工程热力学第 4 版习题解

本题解是沈维道、童钧耕编写高等教育出版社出版的“十一五”国家级规划教材《工程热力学》第 4 版的配套资料。本题解提供的解法是从教学的角度出发的，未必是唯一的或是最好的，题解中出现的错误恳请读者批评指正。

上海交通大学机械与动力工程学院

童钧耕

2007/11/22

第一章 基本概念

1-1 英制系统中采用华氏温标，它规定在标准大气压（101 325 Pa）下纯水的冰点是 32 °F，汽点是 212 °F，试推导华氏温度与摄氏温度的换算关系。

解：
$$\frac{\{t\}_{°F}-32}{212-32}=\frac{\{t\}_{°C}-0}{100-0}$$
$$\{t\}_{°F}=\frac{180}{100}\{t\}_{°C}+32=\frac{9}{5}\{t\}_{°C}+32$$

1-2 英制系统中朗肯温度与华氏温度的关系为 $\{T\}_{°R}=\{t\}_{°F}+459.67$。已知热力学绝对温标及朗肯温标在纯水冰点的读数分别是 273.15K 和 491.67°R；汽点的读数分别是 373.15K 和 671.67°R。

（1）导出朗肯温度和开尔文温度的关系式；

（2）开尔文温标上绝对零度在朗肯温标上是多少度？

解：（1）若任意温度 T 在朗肯温标上读数为 $T(°R)$ 在热力学绝对温标上读数为 T（K），

则
$$\frac{671.67-491.67}{373.15-273.15}=\frac{T(°R)-491.67}{T(K)-273.15}$$

解得
$$\{T\}_{°R}=1.8\{T\}_{K}$$

（2）据上述关系 $\{T\}_{K}=0$ 时，$\{T\}_{°R}=0$

1-3 设一新温标，用符号 °N 表示温度单位（它的绝对温标是用 °Q 表示温度单位）。规定纯水的冰点和汽点 $100°\mathrm{N}$ 和 $1000°\mathrm{N}$ 。试求：

（1）该新温标与摄氏温标的关系；

（2）若该温标的绝对零度与热力学温标零度相同，则该温标读数为 $0°\mathrm{N}$ 时，其绝对温标读数是多少 °Q？

解：（1）
$$\frac{\{t\}_{°\mathrm{N}}-100}{1000-100}=\frac{\{t\}_{°\mathrm{C}}-0}{100-0}$$

$$\{t\}_{°\mathrm{N}}=9\{t\}_{°\mathrm{C}}+100$$

（2）
$$\{T\}_{°\mathrm{Q}}=\{t\}_{°\mathrm{N}}+C=9\{t\}_{°\mathrm{C}}+100+C=9[\{T\}_{\mathrm{K}}-273.15]+100+C$$

据题意，当 $\{T\}_{\mathrm{K}}=0$ 时，$\{T\}_{°\mathrm{Q}}=0$，解得上式中 $C=2358.35$，代回原式得

$$\{T\}_{°\mathrm{Q}}=\{t\}_{°\mathrm{N}}+2358.35$$

$\{T\}_{°\mathrm{N}}=0$ 时，$T=2358.385°\mathrm{Q}$ 。

1-4 直径为 1m 的球形刚性容器，抽气后真空度为 752.5mmHg，若当地大气为 $0.101\mathrm{MPa}$，求：

（1）容器内绝对压力为多少 Pa；

（2）容器表面受力多少 N?

解：（1）
$$p=p_{\mathrm{b}}-p_{\mathrm{v}}=0.101\times10^{6}\,\mathrm{Pa}-752.5\mathrm{mmHg}\times133.3\mathrm{Pa/mmHg}=691.75\mathrm{Pa}$$

（2）
$$A_0=4\pi d^2=4\times3.1416\times1\mathrm{m}^2=12.57\mathrm{m}^2$$

$$\begin{aligned}F&=A_0\Delta p=A_0(p_{\mathrm{b}}-p)\\&=12.57\ \mathrm{m}^2\times(0.101\times10^{6}\,\mathrm{Pa}-691.75\mathrm{Pa})=1.261\times10^{6}\,\mathrm{N}\end{aligned}$$

1-5 用 U 型压力计测量容器中气体的压力，在水银柱上加一段水，则得水柱高 1020mm，水银柱高 900mm，如图 1-1 所示，若当地大气压为 755mmHg，求容器中气体的压力（MPa）。

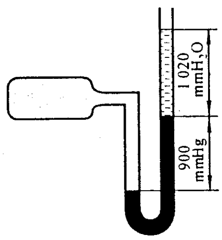


图 1-1

解：

$$\begin{aligned}p&=p_{\mathrm{e}}+p_{\mathrm{b}}\\&=(1020\times9.81)\mathrm{Pa}+(900\times133.3)\mathrm{Pa}+(755\times133.3)\mathrm{Pa}\\&=2.306\times10^{5}\,\mathrm{Pa}=0.231\mathrm{MPa}\end{aligned}$$

1-6 容器中的真空度为 $p_{\mathrm{v}}=600\mathrm{mmHg}$，气压计上水银柱高度为 $p_{\mathrm{b}}=755\mathrm{mm}$，求容器中

的绝对压力（以 MPa 表示）。如果容器中的绝对压力不变，而气压计上水银柱高度为 $p_b' = 770\text{mm}$，求此时真空表上的读数（以 mmHg 表示）是多少？

解：容器中气体压力低于当地大气压力，故绝对压力

$$p = p_\text{b} - p_\text{v} = (755 - 600)\text{mmHg} = 155\text{mmHg} = 0.0207\text{MPa}$$

若容器中绝对压力不变，而大气压力变为 $p_\text{b}' = 770\text{mmHg}$。则此时真空表上的读数为

$$p_\text{v}' = p_\text{b}' - p = (770 - 155)\text{mmHg} = 615\text{mmHg}$$

1-7 用斜管压力计测量锅炉烟道烟气的真空度（如图 1-24）管子的倾斜角 $\alpha = 30°$，压力计中使用密度 $\rho = 0.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 的煤油，斜管中液柱长度 $l = 200\text{mm}$。当地大气压力 $p_\text{v} = 745\text{mmHg}$。求烟气的真空度（以 mmH_2O 表示）及绝对压力（以 Pa 表示）。

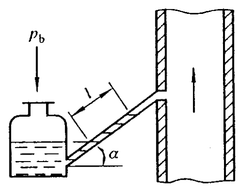


图 1-2

解：倾斜式压力计上读数即烟气的真空度

$$\begin{aligned} p_\text{v} &= l \sin\alpha \rho g \\ &= 200 \times 10^{-3}\text{m} \times 0.5 \times 0.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3 \times 9.81\text{m/s}^2 = 80 \times 9.81\text{Pa} \end{aligned}$$

因 $1\text{Pa} = \dfrac{1}{9.81}\text{mmH}_2\text{O}$、$1\text{mmHg} = 13.595\text{mmH}_2\text{O}$，故

$$p_\text{v} = 80\text{mmH}_2\text{O}$$

烟气绝对压力

$$\begin{aligned} p &= p_\text{b} - p_\text{v} = (745 \times 13.595)\text{mmH}_2\text{O} - 80\text{mmH}_2\text{O} \\ &= 10048.3\text{mmH}_2\text{O} = 0.9857 \times 10^5 \text{Pa} \end{aligned}$$

1-8 压力锅因其内部压力和温度比普通锅高而缩短了蒸煮食物的时间。压力锅的盖子密封良好，蒸汽只能从盖子中间的缝隙逸出，在缝隙的上方有一个可移动的小柱塞，所以只有锅内蒸汽的压力超过了柱塞的压力后蒸汽才能逸出（图 1-3）。蒸汽周期性逸出使锅内压力近似可认为恒定，也防止了锅内压力过高产生的危险。若蒸汽逸出时压力锅内压力应达到 201kPa，压力锅盖缝隙的横截面积为 4mm^2，当地大气压力平均为 101kPa，试求小柱塞的质量。

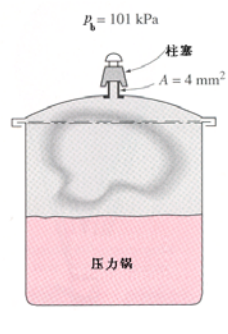


图 1-3

解：蒸汽逸出时锅内表压力即为应由柱塞产生的压力，所以

$$p_e = p - p_b = 201\text{kPa} - 101\text{kPa} = 100\text{kPa}$$

柱塞质量

$$m = \frac{p_e A}{g} = \frac{100\times10^3\text{Pa}\times4\times10^{-6}\text{m}^2}{9.81\text{m/s}^2} = 0.0408\text{kg} = 40.8\text{g}$$

1-9 容器被分隔成 AB 两室，如图 1-4 所示，已知当场大气压 $p_b = 0.1013\text{MPa}$，气压表 2 读为 $p_{e2} = 0.04\text{MPa}$，气压表 1 的读数 $p_{e1} = 0.294\text{MPa}$，求气压表 3 的读数（用 MPa 表示）。

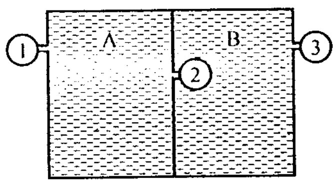


图 1-4

解：

$$p_A = p_b + p_{e1} = 0.1013\text{MPa} + 0.294\text{MPa} = 0.3953\text{MPa}$$

$$p_A = p_B + p_{e2}$$
$$p_B = p_A - p_{e2} = 0.39153\text{MPa} - 0.04\text{MPa} = 0.3553\text{MPa}$$

$$p_{e3} = p_B - p_b = 0.3553\text{MPa} - 0.1013\text{MPa} = 0.254\text{MPa}$$

1-10 起重机以每秒 2m 的恒速提升总质量为 450kg 的水泥块，试求所需功率。

解：功率等于力与速度的乘积，因恒速提升，加速度为零，所以仅为重力。

$$P = Fc = mgc = 450\text{kg}\times9.80665\text{m/s}^2\times2\text{m/s} = 8826\text{W} = 8.83\text{kW}$$

1-11 电阻加热器的电阻 15Ω，现有 10A 的电流流经电阻丝，求功率。

解： $P = Ei = Ri^2 = 15\Omega\times(10\text{A})^2 = 1500\text{W} = 1.5\text{kW}$

1-12 气缸中密封有空气，初态为 $p_1 = 0.2\text{MPa}$，$V_1 = 0.4\text{m}^3$，缓慢胀到 $V_2 = 0.8\text{m}^3$。

（1）过程中 pV 保持不变；

（2）过程中气体先循 $\{p\}_{\text{MPa}} = 0.4 - 0.5\{V\}_{\text{m}^3}$ 膨胀到 $V_a = 0.6\text{m}^3$，再维持压力不变，膨胀到 $V_2 = 0.8\text{m}^3$。分别求出两过程中气体作出的膨胀功。

解：（1）

$$W = \int_1^2 p\text{d}V = \int_1^2 \frac{pV}{V}\text{d}V = p_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1}$$
$$= 0.2\times10^6\text{Pa}\times0.4\text{m}^3\times\ln\frac{0.8\text{m}^3}{0.4\text{m}^3} = 5.54\times10^4\text{J}$$

（2）
$$w=\int_1^2 p\mathrm{d}V=\int_1^a p\mathrm{d}V+\int_a^2 p\mathrm{d}V$$
$$=\int_1^a(0.4-0.5V)\times10^6\mathrm{d}V+(0.4-0.5\times0.6)\times10^6\int_a^2\mathrm{d}V$$
$$=[0.4(V_a-V_1)-\frac{0.5}{2}(V_a{}^2-V_1^2)+0.1\times(V_2-V_a)]\times10^6$$
$$=[0.4\times(0.6-0.4)+\frac{0.5}{2}(0.6^2-0.4^2)+0.1\times(0.8-0.6)]\times10^6=0.15\times10^5\,\mathrm{J}$$

1-13 某种理想气体在其状态变化过程中服从 $pv^n=$常数的规律，其中 n 是定值，p 是压力；v 是比体积。试据 $w=\int_1^2 p\mathrm{d}v$ 导出气体在该过程中做功为 $w=\dfrac{p_1v_1}{n-1}\left[1-\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$

解：
$$w=\int_1^2 p\mathrm{d}v=\int_1^2\frac{pv^n}{v^n}\mathrm{d}v=p_1v_1{}^n\int_1^2\frac{\mathrm{d}v}{v^n}=\frac{p_1v_1{}^n}{-n+1}(v_2{}^{-n+1}-v_1{}^{-n+1})$$
$$=\frac{p_1v_1^nv_1^{-n+1}-p_2v_2^nv_2^{-n+1}}{n-1}=\frac{p_1v_1-p_2v_2}{n-1}=\frac{p_1v_1\left(1-\dfrac{p_2v_2}{p_1v_1}\right)}{n-1}=\frac{p_1v_1}{n-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$$

证毕。

1-14 测得某汽油机气缸内燃气的压力与容积对应值如下表所示，求燃气在该膨胀过程中所作的功。

p / MPa	1.655	1.069	0.724	0.500	0.396	0.317	0.245	0.193	0.103
V / cm^3	114.71	163.87	245.81	327.74	409.68	491.61	573.55	655.48	704.64

解：
$$W=\int_1^2 p\mathrm{d}V\cong\Sigma\overline{p}\Delta V$$
$$=\frac{(1.655+1.069)\mathrm{MPa}}{2}\times(63.87-114.71)\mathrm{m}^3+\frac{(1.069+0.724)\mathrm{MPa}}{2}\times$$
$$(245.81-163.87)\mathrm{m}^3+\frac{(0.724+0.500)\mathrm{MPa}}{2}\times(327.74-245.81)\mathrm{m}^3+$$
$$\frac{(0.500+0.396)\mathrm{MPa}}{2}\times(409.68-327.74)\mathrm{m}^3+\frac{(0.396+0.317)\mathrm{MPa}}{2}\times$$
$$(491.61-409.68)\mathrm{m}^3+\frac{(0.317+0.245)\mathrm{MPa}}{2}\times(573.55-491.61)\mathrm{m}^3+$$
$$\frac{(0.245+0.193)\mathrm{MPa}}{2}\times(655.48-573.55)\mathrm{m}^3+\frac{(0.193+0.103)\mathrm{MPa}}{2}$$
$$\times(704.64-655.48)\mathrm{m}^3=304.7\mathrm{J}$$

1-15 有一绝对真空的钢瓶，当阀门的打开时，在大气压 $p_0 = 1.013\times10^5\,\text{Pa}$ 的作用下有体积为 0.1m^3 的空气被输入钢瓶，求大气对输入钢瓶的空气所作功为多少？

解： $W = p_0 V = 1.013\times10^5\,\text{Pa}\times0.1\text{m}^3 = 1.013\times10^4\,\text{J} = 10.13\text{kJ}$

1–16 某种气体在气缸中进行一缓慢膨胀过程。其体积由 0.1m^3 增加到 0.25m^3。过程中气体压力循 $\{p\}_{\text{MPa}} = 0.24 - 0.4\{V\}_{\text{m}^3}$ 变化。若过程中气缸与活塞的摩擦保持为 1200N；当地大气压力为 0.1MPa；气缸截面积为 0.1m^2，试求：

（1）气体所作的膨胀功 W；

（2）系统输出的有用功 W_{u}；

（3）若活塞与气缸无摩擦，系统输出的有用功 $W_{\text{u,re}}$。

解：活塞移动距离

$$L = \frac{V_2 - V_1}{A} = \frac{0.25\text{m}^3 - 0.1\text{m}^3}{0.1\text{m}^2} = 1.5\text{m}$$

（1）气体膨胀作功

$$\begin{aligned} W &= \int_1^2 p\text{d}V = \int_1^2 (0.24 - 0.4V)\text{d}V = 0.24(V_2 - V_1) - 0.2(V_2^2 - V_1^2) \\ &= 0.24\times(0.25-0.1)\text{m} - 0.2\times(0.25^2 - 0.1^2)\text{m}^2 = 0.0255\times10^6\,\text{J} \end{aligned}$$

气体膨胀排拆大气功

$$W' = p_0(V_2 - V_1) = 0.1\text{MPa}\times(0.25\text{m} - 0.1\text{m}) = 0.015\times10^6\,\text{J}$$

摩擦耗功

$$W'' = FL = 1200\text{N}\times1.5\text{m} = 1800\text{J}$$

（2）有用功

$$W_{\text{u}} = W - W' - W'' = 0.0255\times10^6\,\text{J} - 0.015\times10^6\,\text{J} - 1800\text{J} = 8700\text{J}$$

（3）有用功

$$W_{\text{u,re}} = W - W' = 0.0255\times10^6\,\text{J} - 0.015\times10^6\,\text{J} = 10500\text{J}$$

1–17 某蒸汽动力厂加入锅炉的每 1MW 能量要从冷凝器排出 0.58MW 能量，同时水泵消耗 0.02MW 功，求汽轮机输出功率和电厂的热效率。

解： $P_{\text{T}} = (\Phi_1 - \Phi_2) + P_{\text{C}} = (1\text{MW} - 0.58\text{MW}) - 0.02\text{MW} = 0.44\text{MW}$

$$\eta_t = 1 - \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = 1 - \frac{0.58\text{MW}}{1\text{MW}} = 0.42$$

1–18 汽车发动机的热效率为 35%，车内空调器的工作性能系数为 3，求每从车内排除 1kJ 热量消耗燃油能量。

解：汽车发动机输出循环净功

$$W = Q_1\eta_t$$

空调器耗功

$$W = \frac{Q_c}{\varepsilon}$$

所以

$$Q_1 = \frac{W}{\eta_t} = \frac{Q_c}{\eta_t\varepsilon} = \frac{1\text{kJ}}{0.35\times 3} = 0.952\text{kJ}$$

1–19 据统计资料，某地各发电厂平均发 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 的电耗标煤 372g，若标煤的热值是 29308kJ/kg，试求电厂平均热效率 η_t 是多少？

解：

$$\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{Q_1} = \frac{3600\text{kJ}}{0.372\text{kg}\times 29308\text{kJ/kg}} = 33.0\%$$

1–20 某空调器输入功率 1.5kW 需向环境介质输出热量 5.1kW，求空调器的制冷系数。

解：制冷速率

$$\Phi_2 = \Phi_1 - P_C = 5.1\text{kW} - 1.5\text{kW} = 3.6\text{kW}$$

制冷系数

$$\varepsilon = \frac{\Phi_2}{P_C} = \frac{3.6\text{kW}}{1.5\text{kW}} = 2.4$$

1–21 某房间冬季通过墙壁和窗子向外散热 70 000 kJ/h，房内有 2 只 40W 电灯照明，其他家电耗电约 100W，为维持房内温度不变，房主购买供暖系数为 5 的热泵，求热泵最小功率。

解：热泵供暖速率为

$$\Phi_1 = \frac{70000\text{kJ/h}}{3600\text{s/h}} - (2\times 40\text{J/s} + 100\text{J/s})\times 10^{-3} = 19.26\text{kW}$$

因 $\varepsilon' = \dfrac{\Phi_1}{P}$，故

$$P = \frac{\Phi_1}{\varepsilon'} = \frac{19.26\text{kW}}{5} = 3.85\text{kW}$$

1–22 一所房子利用供暖系数为 2.1 热泵供暖维持 20℃，据估算室外大气温度每低于房内

温度 1℃，房子向外散热为 0.8kW，若室外温度为−10℃，求驱动热泵所需的功率。

解：热泵供暖系数 $\varepsilon' = \dfrac{\Phi_1}{P}$，为维持房子内温度需使散热与热泵供热平衡，所以

$$\Phi_1 = 0.8\text{kW}\cdot{}^\circ\text{C}^{-1}\times(20+10)^\circ\text{C} = 24\text{kW}$$

$$P = \frac{\Phi_1}{\varepsilon'} = \frac{24\text{kW}}{2.1} = 11.43\text{kW}$$

1–23 若某种气体的状态方程为 $pv = R_\mathrm{g}T$，现取质量 1kg 的该种气体分别作两次循环，如图 1−5 中循环 1–2–3–1 和循环 4–5–6–4 所示，设过程 1–2 和过程 4–5 中温度不变都等于 T_a，过程 2–3 和 5–6 中压力不变，过程 3–1 和 4–6 中体积不变。又设状态 3 和状态 6 温度相等，都等于 T_b。试证明两个循环中 1kg 气体对外界所作的循环净功相同。

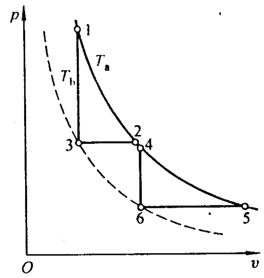


图 1−5

证明：循环 1–2–3–1 和循环 4–5–6–4 中过程 1−2 和 4−5 都是等温过程，$T = T_\mathrm{a}$，据理想气体状态方程，$pv = R_\mathrm{g}T$，可知

$$p = \frac{R_\mathrm{g}T}{v} = \frac{R_\mathrm{g}T_\mathrm{a}}{v}$$

$$w_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p\mathrm{d}v = \int_{v_1}^{v_2} \frac{R_\mathrm{g}T_\mathrm{a}}{v}\mathrm{d}v = R_\mathrm{g}T_\mathrm{a}\ln\frac{v_2}{v_1}$$

$$w_{4-5} = \int_{v_4}^{v_5} p\mathrm{d}v = \int_{v_4}^{v_5} \frac{R_\mathrm{g}T_\mathrm{a}}{v}\mathrm{d}v = R_\mathrm{g}T_\mathrm{a}\ln\frac{v_3}{v_4}$$

根据已知条件：$v_1 = v_3$，$v_4 = v_6$，$p_3 = p_2$，$p_6 = p_5$，$T_2 = T_5 = T_a$，$T_3 = T_6 = T_b$，得

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{v_3} = \frac{R_\mathrm{g}T_2}{p_2}\frac{p_3}{R_\mathrm{g}T_3} = \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_\mathrm{a}}{T_\mathrm{b}};\quad \frac{v_5}{v_4} = \frac{v_5}{v_6} = \frac{R_\mathrm{g}T_5}{p_5}\frac{p_6}{R_\mathrm{g}T_6} = \frac{T_5}{T_6} = \frac{T_\mathrm{a}}{T_\mathrm{b}}$$

故 $$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_5}{v_4}$$

即 $$w_{1-2} = w_{4-5}$$

过程 2−3 和 5−6 都是等压过程，故

$$w_{2-3} = p_2(v_3 - v_2) = p_3v_3 - p_2v_2 = R_\mathrm{g}(T_b - T_a)$$

$$w_{5-6} = p_5(v_6 - v_5) = p_6v_6 - p_5v_5 = R_\mathrm{g}(T_b - T_a)$$

$$w_{2-3}=w_{5-6}$$

过程 3−1 和 6−4 中 v 不变，故功为零。综上两循环的净功相等，即

$$W_{\mathrm{net},1-2-3-1}=W_{1-2}+W_{2-3}+W_{3-1}=W_{4-5}+W_{5-6}+W_{6-4}=W_{\mathrm{net},4-5-6-4}$$

证毕。

第二章 热力学第一定律

2−1 一辆汽车 1 小时消耗汽油 34.1 升，已知汽油发热量为 44 000 kJ/kg，汽油密度 $0.75\mathrm{g/cm^3}$。测得该车通过车轮出的功率为 64kW，试求汽车通过排气，水箱散热等各种途径所放出的热量。

解：汽油总发热量

$$Q=34.1\times10^{-3}\mathrm{m^3}\times750\mathrm{kg/m^3}\times44000\mathrm{kJ/kg}=1125300\mathrm{kJ}$$

汽车散发热量

$$Q_{\mathrm{out}}=Q-W\times3600=(1125300-64\times3600)\mathrm{kJ/h}=894900\mathrm{kJ/h}$$

2−2 质量为 1 275 kg 的汽车在以 60 000 m /h 速度行驶时被踩刹车止动，速度降至 20 000 m/h，假定刹车过程中 0.5kg 的刹车带和 4kg 钢刹车鼓均匀加热，但与外界没有传热，已知刹车带和钢刹车鼓的比热容分别是 1.1kJ/(kg·K)和 0.46kJ/(kg·K)，求刹车带和刹车鼓的温升。

解：汽车速度降低，动能转化为刹车带和刹车鼓的热力学能，没有传热和对外作功，故

$$\frac{m_{\mathrm{car}}(c_2^2-c_1^2)}{2}+(U_2-U_1)=\Delta E=0$$

$$c_1=\frac{60000\mathrm{m}}{3600\mathrm{s}}=16.67\mathrm{m/s}，\quad c_2=\frac{20000\mathrm{m}}{3600\mathrm{s}}=5.56\mathrm{m/s}$$

$$U_2-U_1=(m_{\mathrm{s}}c_{V,\mathrm{s}}+m_{\mathrm{b}}c_{V,\mathrm{b}})(t_2-t_1)$$

$$\begin{aligned}(t_2-t_1)&=-\frac{m_{\mathrm{car}}(c_2^2-c_1^2)}{2(m_{\mathrm{s}}c_{V,\mathrm{s}}+m_{\mathrm{b}}c_{V,\mathrm{b}})}\\&=-\frac{1275\mathrm{kg}\times[(16.67\mathrm{m/s})^2-(5.56\mathrm{m/s})^2]}{2\times[0.5\mathrm{kg}\times1.1\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}+4\mathrm{kg}\times0.46\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}]}=65.9^{\circ}\mathrm{C}\end{aligned}$$

2−3 1kg 氧气置于图 2−1 所示气缸内，缸壁能充分导热，且活塞与缸壁无磨擦。初始时氧气压力为 0.5MPa，温度为 27℃，若气缸长度 $2l$，活塞质量为 10kg。试计算拔除钉后，活塞可能达到最大速度。

解：可逆过程对外界作功最大，故按可逆定温膨胀计算：

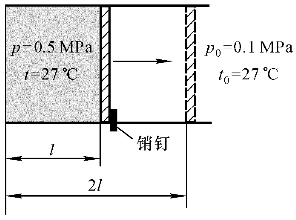


图 2-1

$$w = R_g T \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$= 0.26\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(273.15+27)\text{K}\times\ln\frac{A\times 2l}{A\times l} = 54.09\text{kJ/kg}$$

$$W = W_0 + \frac{m'}{2}\Delta c^2 = p_0(V_2 - V_1) + \frac{m'}{2}c_2^{\ 2} \qquad \text{（a）}$$

$$V_1 = \frac{m_1 R_g T_1}{p_1} = \frac{1\text{kg}\times 260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 300.15\text{K}}{0.5\times 10^6\text{Pa}} = 0.1561\text{m}^3$$

$$V_2 = 2V_1 = 0.3122\text{m}^3$$

代入式（a）

$$c_2 = \sqrt{\frac{2\times(54.09\text{J/kg}\times 1\text{kg}\times 10^3 - 0.1\times 10^6\text{Pa}\times 0.1561\text{m}^3)}{10\text{kg}}} = 87.7\text{m/s}$$

2−4 气体某一过程中吸收了 50J 的热量，同时，热力学能增加 84J，问此过程是膨胀过程还是压缩过程？对外作功是多少 J？

解：取气体为系统，据闭口系能量方程式

$$W = Q - \Delta U = 50\text{J} - 84\text{J} = -34\text{J}$$

所以过程是压缩过程，外界对气体作功 34J。

2−5 在冬季，工厂车间每一小时经过墙壁和玻璃等处损失热量 $3\times 10^6\text{kJ}$，车间中各种机床的总功率是 375kW，且最终全部变成热能，另外，室内经常点着 50 盏 100W 的电灯，若使该车间温度保持不变，问每小时需另外加入多少热量？

解：要使车间保持温度不变，必须使车间内每小时产生的热量等散失的热量，即

$$Q = Q_m + Q_E + Q_B + Q_l = 0$$

$$Q_m = 375\text{kJ/s}\times 3600\text{s} = 1.35\times 10^6\text{kJ}$$

$$Q_E = 50\times 0.1\text{kJ/s}\times 3600\text{s} = 18000\text{kJ}$$

$$Q_l = -3\times 10^6\text{kJ}$$

$$Q_B = -Q_l - Q_m - Q_E = 3\times 10^6\text{kJ} - 1.35\times 10^6\text{kJ} - 18000\text{kJ} = 1632000\text{kJ}$$

2−6 夏日，为避免阳光直射，密闭门窗，用电扇取凉，若假定房间内初温为 28℃，压力为 0.1MPa，电扇的功率为 0.06kW，太阳直射传入的热量为 0.1kW，若室内有三人，每人每

小时向环境散发的热量为 418.7kJ，通过墙壁向外散热1800kJ/h，试求面积为15m^2，高度为 3.0m 的室内空气每小时温度的升高值，已知空气的热力学能与温度关系为 $\Delta u = 0.72\{\Delta T\}_{\text{K}}\ \text{kJ/kg}$。

解：室内空气总质量

$$m = \frac{pV}{R_\text{g}T} = \frac{0.1\times10^6\,\text{Pa}\times15\text{m}^2\times3.0\text{m}}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(28+273.15)\text{K}} = 52.06\text{kg}$$

取室内空气为系统，$Q = \Delta U + W$，因$W = 0$，所以$\Delta U = Q$

$$\Delta T = \frac{Q}{0.72m}$$
$$= \frac{(0.1+0.06)\text{kJ/s}\times3600s + 418.7\text{kJ}\times3 - 1800\text{kJ}}{0.72\times52.06\text{kg}} = 0.86\text{K}$$

2−7 有一飞机的弹射装置，如图 2−2，在气缸内装有压缩空气，初始体积为0.28m^3，终了体积为0.99m^3，飞机的发射速度为61m/s，活塞、连杆和飞机的总质量为 2722kg。设发射过程进行很快，压缩空气和外界间无传热现象，若不计摩擦力，求发射过程中压缩空气的热力学能变化。

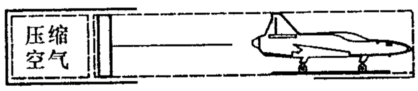


图 2−2

解：取压缩空气为系统，$Q = \Delta U + W$，其中，$Q = 0$

$$W = p_0(V_2 - V_1) + \frac{m}{2}c_2^{\,2}$$

$$\Delta U = -p_0(V_2 - V_1) - \frac{m}{2}c_2^{\,2}$$
$$= -0.1\times10^6\,\text{Pa}\times(0.99-0.28)\text{m}^3 - \frac{2722\text{kg}}{2}\times(61\text{m/s})^2 = -5135\times10^3\,\text{J}$$

2−8 如图 2−3 所示，气缸内空气的体积为0.008m^3，温度为 17℃。初始时空气压力为 0.1013MPa，环境大气压力 $p_\text{b} = 0.1\text{MPa}$，弹簧呈自由状态。现向空气加热，使其压力升高，并推动活塞上升而压缩弹簧。已知活塞面积为0.08m^2，弹簧刚度为$k = 40\ 000\ \text{N/m}$，空气热力学能变化关系式为 $\Delta\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.718\Delta\{T\}_{\text{K}}$。试求，使气缸内空气压力达到 0.15MPa 所需的热量。

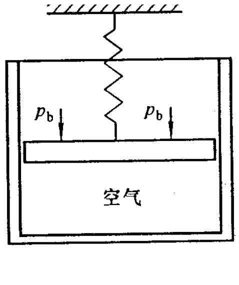


图 2-3

解：先求活塞质量，初始时弹簧呈自由状态

$$m_{\mathrm{p}}\mathrm{g} + p_{\mathrm{b}}A = p_1 A$$

$$m_{\mathrm{p}} = \frac{(p_1 - p_{\mathrm{b}})A}{\mathrm{g}} = \frac{(0.1013 - 0.1)\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 0.08\mathrm{m}^2}{9.80665\mathrm{m/s}^2} = 10.61\mathrm{kg}$$

空气质量

$$m_{\mathrm{a}} = \frac{p_1 V_1}{R_{\mathrm{g}} T_1} = \frac{0.1013\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 0.008\mathrm{m}^3}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 290.15\mathrm{K}} = 9.73\times 10^{-3}\,\mathrm{kg}$$

$$h = \frac{V_1}{A} = \frac{0.008\mathrm{m}^3}{0.08\mathrm{m}^2} = 0.1\mathrm{m}$$

终态

$$(p_2 - p_{\mathrm{b}})A - m_{\mathrm{p}}\mathrm{g} = kx_2\,,\quad x_2 = \frac{(p_2 - p_{\mathrm{b}})A - m_{\mathrm{p}}\mathrm{g}}{k}$$

$$x_2 = \frac{(0.15 - 0.1)\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 0.08\mathrm{m}^2 - 10.61\mathrm{kg}\times 9.81\mathrm{m/s}^2}{40000\mathrm{N/m}} = 0.0974\mathrm{m}$$

$$V_2 = A(h + x_2) = 0.08\mathrm{m}^2\times(0.1 + 0.0974)\mathrm{m} = 0.0158\mathrm{m}^3$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{m_{\mathrm{a}} R_{\mathrm{g}}} = \frac{0.15\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 0.0158\mathrm{m}^3}{9.73\times 10^{-3}\,\mathrm{kg}\times 287\mathrm{J/(kg\cdot K)}} = 848.26\mathrm{K}$$

$$\begin{aligned}\Delta U &= m_{\mathrm{a}} c_V (T_2 - T_1)\\ &= 9.73\times 10^{-3}\,\mathrm{kg}\times 0.718\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(848.26 - 290.15)\mathrm{K} = 3.90\mathrm{kJ}\end{aligned}$$

$$W = \int_1^2 p\mathrm{d}V = \int_{A_2}^2 \left[p_{\mathrm{b}} + \frac{(m_{\mathrm{p}}\mathrm{g} + Kx)}{A}\right]\mathrm{d}(Ax)$$

$$\begin{aligned}&= \int_1^2 (p_{\mathrm{b}}A + m_{\mathrm{p}}\mathrm{g} + kx)\mathrm{d}x = (p_{\mathrm{b}}A + m_{\mathrm{p}}\mathrm{g})(x_2 - x_1) + \frac{k}{2}({x_2}^2 - {x_1}^2)\\ &= (0.1\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 0.08\mathrm{m}^2 + 10.61\mathrm{kg}\times 9.81\mathrm{m/s}^2)\times 0.0974\mathrm{m} +\\ &\quad \frac{40000\mathrm{N/m}}{2}\times(0.0974\mathrm{m})^2 = 979\mathrm{J} = 0.98\mathrm{kJ}\end{aligned}$$

$$Q = \Delta U + W = 3.90\mathrm{kJ} + 0.98\mathrm{kJ} = 4.88\mathrm{kJ}$$

2-9 有一橡皮球，当其内部气体的压力和大气压相同，为$0.1\mathrm{MPa}$时呈自由状态，体积为$0.3\mathrm{m}^3$。气球受火焰照射而受热，其体积膨胀一倍，压力上升为$0.15\mathrm{MPa}$，设气球内的压力与体积成正比。试求：（1）该过程中气体作的功；（2）用于克服橡皮气球弹力所作的功，若初

始时气体温度为 17℃，求球内气体吸热量。已知该气体的气体常数 $R_g = 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，其热力学能 $\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.72\{T\}_{\text{K}}$ 。

解：据题意

$$\Delta p = (p - p_0) = kV + b \tag{a}$$

$V_1 = 0.3\text{m}^3$ 时 $\Delta p = 0$；$V_2 = 0.6\text{m}^3$ 时，$\Delta p = 0.05\text{MPa}$ 。代入式（a），解得 $b = -0.05$ ，$k = 0.166$ 。所以

$$\Delta p = 0.1667V - 0.05$$

$$m = \frac{p_1V_1}{R_gT_1} = \frac{0.1\times10^6\,\text{Pa}\times0.3\text{m}^3}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times290.15\text{K}} = 0.360\text{kg}$$

（1）过程中气体作的功

$$W = \int_1^2 p\text{d}V = \int_{V_1}^{V_2}(\Delta p + p_0)\text{d}V$$
$$= \int_{v_1}^{v_2}(0.1667V - 0.05 + 0.1)\times10^6\,\text{d}V = 37500\text{J} = 37.5\text{kJ}$$

（2）克服橡皮气球弹力所作的功

$$W_0 = p_0(V_2 - V_1) = 0.1\times10^6\,\text{Pa}\times(0.6-0.3)\text{m}^3 = 30000\text{J} = 30\text{kJ}$$

$$W_e = W - W_0 = 37.5\text{kJ} - 30\text{kJ} = 7.5\text{kJ}$$

（3）气体吸热量

$$T_2 = \frac{p_2V_2}{mR_g} = \frac{0.15\times10^6\,\text{Pa}\times0.6\text{m}^3}{0.360\text{kg}\times287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 871.08\text{K}$$

$$Q = \Delta U + W = m(u_2 - u_1) + W$$
$$= 0.360\text{kg}\times0.72\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(871.08-290.15)\text{K} + 37.5\text{kJ} = 188.1\text{kJ}$$

2−10 空气在某压气机中被压缩，压缩前空气的参数是：$p_1 = 0.1\text{MPa}$ ，$v_1 = 0.845\,\text{m}^3/\text{kg}$ 。压缩后的参数是 $p_2 = 0.1\text{MPa}$ ，$v_2 = 0175\,\text{m}^3/\text{kg}$ 。设在压缩过程中 1kg 空气的热力学能增加 139.0kJ 同时向外放出热量 50kJ。压气机每分钟产生压缩空气 10kg。求：

（1）压缩过程中对 1kg 气体所作的体积变化功；

（2）生产 1kg 的压缩空气所需的功（技术功）；

（3）带动此压气机要用多大功率的电动机？

解：（1）已知 $q=-50\text{kJ/kg}$，$\Delta u=139.0\text{kJ/kg}$ 由闭口系能量方程 $q=\Delta u+w$ 得

$$w=q-\Delta u=-50\text{kJ}-139.0\text{kJ}=-189.5\text{kJ/kg}$$

即压缩过程中压气机对 1kg 气体作功 189.0kJ

（2）压气机是开口热力系，压气机耗功 $w_{\text{C}}=-w_{\text{t}}$。由稳定流动开口系能量方程 $q=\Delta h+w_{\text{t}}$，得

$$\begin{aligned}w_{\text{t}}&=q-\Delta h=q-\Delta u-\Delta(pv)=q-\Delta u-(p_2v_2-p_1v_1)\\&=-50\text{kJ/kg}-139.0\text{kJ/kg}-(0.8\times10^3\text{kPa}\times0.175\text{m}^3/\text{kg}-\\&\quad 0.1\times10^3\text{kPa}\times0.845\text{m}^3/\text{kg})=-244.5\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

即每生产 1 公斤压缩空气所需技术功为 244.5kJ。

（3）压气机每分钟生产压缩空气 10kg，故带动压气机的电机功率为

$$N=q_m w_{\text{t}}=\frac{1}{6}\text{kg/s}\times244.5\text{kJ/kg}=40.8\text{kW}$$

2-11 某建筑物的排气扇每秒能把 2.5kg/s 压力为 98kPa，温度为 20℃的空气通过直径为 0.4m 的排气孔排出，经过排气扇后气体压力升高 50mmH$_2$O，但温度近似不变，试求排气扇的功率和排气速度。

解：
$$p_2=p_1+\Delta p=98\ 000\ \text{Pa}+50\times9.81\ \text{Pa}=98\ 490.5\ \text{Pa}$$

$$v_1=\frac{R_{\text{g}}T_1}{p_1}=\frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times293.15\text{K}}{98\ 000\ \text{Pa}}=0.858\ 5\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_2=\frac{R_{\text{g}}T_2}{p_2}=\frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times293.15\text{K}}{98\ 490.5\ \text{Pa}}=0.854\ 2\ \text{m}^3/\text{kg}$$

排气扇后的压力和温度计算空气质量流量

$$q_m=\frac{p_2q_V}{R_{\text{g}}T}=\frac{p_1\dfrac{\pi D^2c_{\text{f2}}}{4}}{R_{\text{g}}T}$$

所以

$$c_{\text{f2}}=\frac{4q_mR_{\text{g}}T}{\pi p_2D^2}=\frac{4\times2.5\text{kg/s}\times287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times293.15\text{K}}{\pi\times98\ 490.5\ \text{Pa}\times(0.4\text{m})^2}=17.0\text{m/s}$$

由能量方程

$$q_Q+q_m\left(h_1+\frac{c_{\text{f1}}^2}{2}+\text{g}z_1\right)-q_m\left(h_2+\frac{c_{\text{f2}}^2}{2}+\text{g}z_2\right)+P=0$$

$$P = \left(\frac{c_{f2}^2}{2} + p_2v_2 - p_1v_1\right)q_m$$

$$= \left(\frac{(17.0\text{m/s})^2}{2\times1000} + 98.491\text{kPa}\times0.854\ 2\text{m}^3/\text{kg} - 98\text{kPa}\times0.858\ 5\text{m}^3/\text{kg}\right)\times$$

$$2.5\text{kg/s} = 0.365\ \text{kW}$$

2−12 进入蒸汽发生器中内径为30mm 管子的压力水参数为10MPa、30℃，从管子输出时参数为 9MPa、400℃，若入口体积流量为 3L/s，求加热率。已知，初态时 $h = 134.8\text{kJ/kg}$ 、v=$0.0010\text{m}^3/\text{kg}$；终态时 $h = 3117.5\text{kJ/kg}$ 、 $v = 0.0299\text{m}^3/\text{kg}$ 。

解：管截面积

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi\times(0.03\text{m})^2}{4} = 7.069\times10^{-4}\,\text{m}^2$$

$$c_{f1} = \frac{q_{V1}}{A} = \frac{0.003\text{m}^3/\text{s}}{7.069\times10^{-4}\text{m}^2} = 4.244\text{m/s}$$

$$q_m = \frac{q_V}{v_1} = \frac{0.003\text{m}^3/\text{s}}{0.001\text{m}^3/\text{kg}} = 3\text{kg/s}$$

$$c_{f2} = \frac{q_{V2}}{A} = \frac{q_{V_1}\dfrac{v_2}{v_1}}{A} = c_{f1}\frac{v_2}{v_1} = 4.244\text{m/s}\times\frac{0.0299\text{m}^3/\text{s}}{0.0010\text{m}^2} = 126.9\text{m/s}$$

$$\Phi = q_m[h_2 - h_1 + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2)]$$

$$= 3\text{kg/s}\times[(3117.5-134.8)\text{kJ/kg}+\frac{(126.9\text{m})^2-(4.244\text{m})^2}{2\times1000}] = 8972.2\text{kW}$$

2−13 某蒸汽动力厂中锅炉以40t/h 的蒸汽供入蒸汽轮机。进口处压力表上读数是9MPa，蒸汽的焓是3441kJ/kg 。蒸汽轮机出口处真空表上的读数是0.0974MPa ，出口蒸汽的焓是2248kJ/kg，汽轮机对环境散热为6.81×10^5kJ/h 。求：

（1）进、出口处蒸汽的绝对压力，（当场大气压是 101325Pa）；

（2）不计进、出口动能差和位能差时汽轮机的功率；

（3）进口处蒸汽为 70m/s，出口处速度为 140m/s 时对汽轮机的功率有多大的影响；

（4）蒸汽进出、口高度并差是 1.6m 时，对汽轮机的功率又有多大影响？

解：（1） $p_1 = p_{e,1} + p_b = 9\text{MPa} + 0.101325\text{MPa} = 9.1\text{MPa}$

$$p_2 = p_b - p_{v,2} = 0.101325\text{MPa} - 0.0974\text{MPa} = 0.3925\times10^{-2}\text{MPa}$$

（2）据稳流能量方程，$Q = \Delta H + W_t$

$$P = \Phi - \Delta\dot{H} = \Phi - q_m\Delta h$$
$$= \frac{-6.81\times10^5}{3600}\text{kJ/s} - 40\times\frac{1000}{3600}\text{kg/s}\times(3441-2248)\text{kJ/kg} = 13066.7\text{kW}$$

（3）若计及进出口动能差，则

$$\Phi = q_m(h_2 - h_1) + P_i' + \frac{q_m}{2}(c_{f2}{}^2 - c_{f1}{}^2)$$

$$P_i' = (\Phi - q_m\Delta h) - \frac{q_m}{2}(c_{f2}{}^2 - c_{f1}{}^2)$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} - \frac{40\times10^3}{2\times3600}\times[(140\text{m/s})^2 - (70\text{m/s})^2]\times10^{-3}$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} - 81.7\text{kJ/s} = 12985\text{kW}$$

即汽轮机功率将减少 81.7kW

（4）若计及位能差，则

$$P_i'' = (\Phi - q_m\Delta h) - q_m g\Delta z$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} - \frac{40000\text{kg/h}}{3600\text{s}}\times9.81\text{m/s}^2\times(-1.4)\text{m}$$
$$= 13066.7\text{kJ/s} + 0.174\text{kJ/s} = 13066.9\text{kW}$$

已汽轮机功率将增加 0.174kW。

2 −14 500 kPa 饱和液氨进入锅炉加热成干饱和氨蒸气，然后进入压力同为 500 kPa 的过热器加热到 275 K，若氨的质量流量为 0.005 kg/s，求：锅炉和过热器中的换热率。已知：氨进入和离开锅炉时的焓分别为 $h_1 = h' = -396.2\text{kJ/kg}$、$h_2 = h'' = -223.2\text{kJ/kg}$，氨离开过热器时的焓为 $h = -25.1\text{kJ/kg}$。

解：由题意，氨进入和离开锅炉及离开过热器时的焓分别为

$$h_1 = h' = -396.2\text{kJ/kg}，\quad h_2 = h'' = -223.2\text{kJ/kg}，\quad h = -25.1\text{kJ/kg}$$

锅炉中的换热率

$$\Phi_b = q_m(h_2 - h_1)$$
$$= 0.005\text{kg/s}\times[-223.2\text{kJ/kg} - (-396.2\text{kJ/kg})] = 0.865\text{kW}$$

换热器中的换热率

$$\begin{aligned}\Phi_{\mathrm{e}} &= q_m(h_3 - h_2)\\ &= 0.005\mathrm{kg/s}\times[-25.1\mathrm{kJ/kg}-(-223.2\mathrm{kJ/kg})] = 0.991\mathrm{kW}\end{aligned}$$

2−15 向大厦供水的主管线在地下 5m 进入时，管内压力 600kPa。经水泵加压，在距地面 150m 高处的大厦顶层水压仍有 200kPa，假定水温为 10℃，流量为 10kg/s，忽略水热力学能差和动能差，假设水的比体积为 $0.001\mathrm{m^3/kg}$，求水泵消耗的功率。

解：整个水管系统从−5m 到 150m。据稳定流动能量方程有

$$q+\left(h_1+\frac{c_{\mathrm{f}1}^2}{2}+gz_1\right)-\left(h_2+\frac{c_{\mathrm{f}2}^2}{2}+gz_2\right)-w_{\mathrm{s}}=0$$

据题意，$q=0$、$t_1=t_2$、$u_1=u_2$，所以

$$\begin{aligned}w_{\mathrm{s}} &= -[(p_2v_2-p_1v_1)+g\Delta z]\\ &= -(200\mathrm{kPa}\times0.001\mathrm{m^3/kg}-600\mathrm{kPa}\times0.001\mathrm{m^3/kg})-\\ &\quad 9.81\mathrm{m/s^2}\times(150\mathrm{m}+5\mathrm{m})\times10^{-3} = -1.12\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$P=q_mw_{\mathrm{s}}=-10\mathrm{kg/s}\times1.12\mathrm{kJ/kg}=-11.2\mathrm{kW}$$

2−16 用一台水泵将井水从 6m 深的井里泵到比地面高 30m 的水塔中，水流量为 $25\mathrm{m^3/h}$，水泵耗功是 12kW。冬天井水温度为 3.5℃，为防止冬天结冰，要求进入水塔的水温不低于 4℃。整个系统及管道均包有一定厚度的保温材料，问是否有必要在管道中设置加热器？如有必要的话需加入多少热量?设管道中水进、出口动能差可忽略不计；水的比热容取定值 $c_p=4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$ 且水的焓差 $\Delta h\cong c_p\Delta t$，水的密度取 $1000\mathrm{kg/m^3}$。

解 $$Q=\Delta H+\frac{m}{2}({c_{\mathrm{f}2}}^2-{c_{\mathrm{f}1}}^2)+mg(z_2-z_1)+W_{\mathrm{s}}$$

忽略管道中水进出口的动能差

$$q_Q=q_m[\Delta h+g(e_2-e_1)]+P_s=q_m[c_p(t_2-t_1)+g(z_2-z_1)]+P_{\mathrm{s}}$$

$$\begin{aligned}&=\frac{25\mathrm{m^3/h}\times1000\mathrm{kg/m^3}}{3600}\times[4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(4-3.5)^{\circ}\mathrm{C}+\\ &\quad 9.81\mathrm{m/s^2}\times(30+6)\mathrm{m}\times10^{-3}]-12\mathrm{kJ/s}=4.99\mathrm{kJ/s}=1.8\times10^4\mathrm{kJ/h}\end{aligned}$$

所以有必要加入加热器，加热量最小为 $1.8\times10^4\mathrm{kJ/h}$。

2−17 一种工具利用从喷嘴射出的高速水流进行切割，若供水压力 200kPa、温度 20℃，喷嘴内径为 0.002 m，射出水流温度 20℃，流速 1 000 m/s，假定喷嘴两侧水的热力学能变化可

略去不计，求水泵功率。已知，在 200kPa、20℃时水的比体积$v = 0.001002\text{m}^3/\text{kg}$

解 $$q_m = \frac{q_V}{v} = \frac{c_\text{f} A}{v} = \frac{1000\text{m/s} \times \pi \times (0.002\text{m})^2}{4 \times 0.001002\text{m}^2/\text{kg}} = 3.135\text{kg/s}$$

能量方程

$$q + \left(h_1 + \frac{c_{\text{f}1}^2}{2} + gz_1 \right) - \left(h_2 + \frac{c_{\text{f}2}^2}{2} + gz_2 \right) - w_\text{s} = 0$$

据题意，$q = 0$、$t_1 = t_2$、$u_1 = u_2$、$z_2 = z_1$，所以

$$w_\text{s} = -\left[\frac{c_{\text{f}2}^2}{2} + (p_2 v_2 - p_1 v_1) \right] = -\left[\frac{c_{\text{f}2}^2}{2} + (p_2 - p_1) v_1 \right]$$

$$= -\left[\frac{(1000\text{m/s})^2}{2 \times 1000} + (100 - 200)\text{kPa} \times 0.001002\text{m}^3/\text{kg} \right] = -500.0\text{kJ/kg}$$

$$P = q_m w_s = -3.135\text{kg/s} \times 500.0\text{kJ/kg} = -1567.2\text{kW}$$

2−18 一刚性绝热容器，容积为$V = 0.028\text{m}^3$，原先装有压力为0.1MPa、温度为 21℃的空气。现将与此容器连接的输气管道阀门打开，向容器充气。设输气管道内气体的状态参数$p = 0.7\text{MPa}$，$t = 21°\text{C}$保持不变。当容器中压力达到 0.2MPa 时，阀门关闭。求容器内气体到平衡时的温度。设空气可视为理想气体，其热力学能与温度的关系为$\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.72\{T\}_\text{K}$；焓与温度的关系为$\{h\}_{\text{kJ/kg}} = 1.005\{T\}_\text{K}$。

解：取刚性容器为控制体，则

$$\delta Q = \text{d}E_\text{CV} + (h_{\text{f}2} + \frac{1}{2}c_{\text{f}2}{}^2 + gz_2)\delta m_2 - (h_1 + \frac{1}{2}c_{\text{f}1}{}^2 + gz_1)\delta m_1 + \delta W_\text{i}$$

据题意，$\delta Q = 0$，$\delta W_\text{i} = 0$，$\delta m_2 = 0$，$\dfrac{c_{\text{f}1}{}^2}{2}$和$g(z_2 - z_1)$可忽略不计，所以

$$\text{d}E_\text{CV} = h_1 \delta m_1 = h_\text{in} \text{d}m_\text{in}$$

积分，$\Delta E_\text{CV} = h_\text{in} m_\text{in}$。因$\Delta E_\text{CV} = \Delta U$，$m_\text{in} = m_2 - m_1$，所以

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = (m_2 - m_1) h_\text{in}$$

$$T_2 = \frac{h_\text{in}(m_2 - m_1) + m_1 u_1}{m_2 c_V} = \frac{c_p T_\text{in}(m_2 - m_1) + m_1 c_V T_1}{m_2 c_V} \qquad \text{(a)}$$

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} = \frac{0.2\times10^6\,\mathrm{Pa}\times0.028\mathrm{m}^3}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times294.15\mathrm{K}} = 0.0332\mathrm{kg}$$

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_g T_2} = \frac{0.2\times10^6\times0.028}{287\times T_2} = \frac{19.5}{T_2} \tag{b}$$

联立求解式（a）、（b）得

$$m_2 = 0.0571\mathrm{kg}，\ T_2 = 342.69\mathrm{K}$$

2−19 医用氧气袋中空时是扁平状态，内部容积为零。接在压力为 14MPa，温度为 17℃的钢质氧气瓶上充气。充气后氧气袋隆起，体积为$0.008\mathrm{m}^3$，压力为$0.15\mathrm{MPa}$。由于充气过程很快，氧气袋与大气换热可以忽略不计，同时因充入氧气袋内气体质量与钢瓶气体内质量相比甚少，故可以认为钢瓶内氧气参数不变。设氧气可作为理想气体，其热力学能和焓可表示为$\{u\}_{\mathrm{kJ/kg}} = 0.657\{T\}_{\mathrm{K}}$，$\{h\}_{\mathrm{kJ/kg}} = 0.917\{T\}_{\mathrm{K}}$，理想气体服从$pV = mR_gT$。求充入氧气袋内氧气的质量？氧气$R_g = 260\mathrm{J/(kg\cdot K)}$。

解：据能量方程

$$\delta Q = \mathrm{d}E_{\mathrm{CV}} + (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)\delta m_{\mathrm{out}} - (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)\delta m_{\mathrm{in}} + \delta W_i$$

据题意，$\delta Q = 0$，$\delta m_{\mathrm{out}} = 0$，$\mathrm{d}E_{\mathrm{CV}} = \mathrm{d}U$，忽略$\frac{c_{f,\mathrm{in}}^2}{2}$和$gz_{\mathrm{in}}$，则

$$\mathrm{d}U - h_{\mathrm{in}}\delta m_{\mathrm{in}} + \delta W_i = 0$$

因$\delta W_i = p_0 \mathrm{d}V$，且氧气袋内氧气质量即充入氧气的质量，所以积分后

$$m_2 u_2 - h_{\mathrm{in}} m_2 + p_0 (V_2 - V_1) = 0$$

$$m_2 (u_2 - h_{\mathrm{in}}) + p_0 V_2 = 0 \tag{a}$$

又

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_g T_2} \tag{b}$$

将$p_2 = 0.15\mathrm{MPa}$，$V_2 = 0.008\mathrm{m}^3$，$\{u_2\}_{\mathrm{kJ/kg}} = 0.657\{T_2\}_{\mathrm{K}}$，$\{h_{\mathrm{in}}\}_{\mathrm{kJ/kg}} = 0.917\{T_{\mathrm{in}}\}_{\mathrm{K}}$，代入式（a）、（b），解得

$$T_2 = 313.20\mathrm{K}，\ m_2 = 0.0147\mathrm{kg}$$

2−20 两个体重都是 80kg 的男子每天吃同样的食物，完成相同的工作，但 A 每天上下班步行 60 min，而 B 则每天驾驶汽车 20 min 上下班，另 40 min 用于看电视，试确定 100 工作日后这两人的体重差。

解：每个工作日男子 A 比 B 多消耗能量

$$Q=\frac{80\text{kg}}{68\text{kg}}\times\left(1\text{h}\times1810\text{kJ/h}-\frac{20}{60}\text{h}\times755\text{kJ/h}-\frac{40}{60}\text{h}\times300\text{kJ/h}\right)=1598.0\text{kJ}$$

100 工作日后两人的体重差

$$\Delta m=100\times\frac{1598.0\text{kJ}}{39.8\text{MPa}}=4.04\text{kg}$$

2−21 一间教室通过门窗散发热量 25 000 kJ/h，教室内有 30 名师生，15 套电子计算机，若每人散发的热量是 100 W，每台计算机功率 120 W，为了保持室内温度，是否有必要打开取暖器？

解 取室内空气为系统，可以认为空气温度是温度的函数因 $W=0$，为保持温度不变

$$Q=Q_1-Q_2=\left(30\times100\text{W}+15\times120\text{W}\right)\times10^{-3}-\frac{25\ 000\text{kJ/h}}{3600\text{s/h}}=-2.14\text{kW}$$

所以需打开取暖器补充热量。

2−22 一位 55kg 的女士经不住美味的诱惑多吃了 0.25 L 冰激凌，为了消耗这些额外的冰激凌的能量她决定以 7.2 km/h 的速度步行 5.5 km 回家，试确定她能否达到预期目的？

解 如果步行消耗的热量与 0.25L 冰激凌提供的热量相当，她即能达到预期目的。0.25L 冰激凌提供的热量

$$Q=250\text{ml}\times4.60\text{kJ}/\text{ml}=1150\text{kJ}$$

55kg 的女士步行 5.5km 消耗的热量

$$Q'=\frac{55\text{kg}}{68\text{kg}}\times\frac{5.5\text{km}}{7.2\text{km}}\times1810\text{kJ}=1118.3\text{kJ}$$

$Q>Q'$，但相差微小，所以她基本上可以达到预期目的。

第三章 气体和蒸气的性质

3−1 已知氮气的摩尔质量 $M=28.1\times10^{-3}$ kg/mol，求：

（1）N_2 的气体常数 R_g；

（2）标准状态下 N_2 的比体积 v_0 和密度 ρ_0；

（3）标准状态 $1m^3$ N_2 的质量 m_0；

（4） $p=0.1MPa$ 、$t=500^\circ C$ 时 N_2 的比体积 v 和密度 ρ；

（5）上述状态下的摩尔体积 V_m。

解：（1）通用气体常数 $R=8.314\ 5\ \ J/(mol\cdot K)$，查附表 $M_{N_2}=28.01\times10^{-3}\ \ kg/mol$。

$$R_{g,N_2}=\frac{R}{M_{N_2}}=\frac{8.314\ 5\ \ J/(mol\cdot K)}{28.01\times10^{-3}\ \ kg/mol}=0.297\ \ kJ/(kg\cdot K)$$

（2）1mol 氮气标准状态时体积为 $V_{m,N_2}=M_{N_2}v_{N_2}=22.4\times10^{-3}\ \ m^3/mol$，故标准状态下

$$v_{N_2}=\frac{V_{m,N_2}}{M}=\frac{22.4\times10^{-3}\ \ m^3/mol}{28.01\times10^{-3}\ \ kg/mol}=0.8\ \ m^3/kg$$

$$\rho_{N_2}=\frac{1}{v_{N_2}}=\frac{1}{0.8\ \ m^3/kg}=1.25\ \ kg/m^3$$

（3）标准状态下 $1m^3$ 气体的质量即为密度 ρ，即 $m_0=1.25\ \ kg$。

（4）由理想气体状态方程式 $pv=R_gT$

$$v=\frac{R_gT}{p}=\frac{297\ \ J/(kg\cdot K)\times(500+273)\ \ K}{0.1\times10^6\ \ Pa}=2.296\ \ m^3/kg$$

$$\rho=\frac{1}{v}=\frac{1}{2.296\ \ m^3/kg}=0.435\ 6\ \ kg/m^3$$

（5） $$V_{m,N_2}=M_{N_2}v_{N_2}=28.01\times10^{-3}\ \ kg/mol\times2.296\ \ m^3/kg=64.29\times10^{-3}\ \ m^3/mol$$

3-2 压力表测得储气罐中丙烷 C_3H_8 的压力为 4.4MPa，丙烷的温度为 120℃，问这时比体积多大？若要储气罐存 1 000kg 这种状态的丙烷，问储气罐的体积需多大？

解：由附表查得 $M_{C_3H_8}=44.09\times10^{-3}\ \ kg/mol$

$$R_{g,C_3H_8}=\frac{R}{M_{C_3H_8}}=\frac{8.314\ 5\ \ J/(mol\cdot K)}{44.09\times10^{-3}\ \ kg/mol}=189\ \ J/(kg\cdot K)$$

由理想气体状态方程式 $pv=R_gT$

$$v=\frac{R_gT}{p}=\frac{189\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(120+273)\ \mathrm{K}}{4.4\times10^6\ \mathrm{Pa}}=0.016\ 88\ \mathrm{m^3/kg}$$

$$V=mv=1\ 000\ \mathrm{kg}\times0.016\ 88\mathrm{m^3/kg}=16.88\ \mathrm{m^3}$$

或由理想气体状态方程 $pV=mR_gT$

$$V=\frac{mR_gT}{p}=\frac{1\ 000\ \mathrm{kg}\times189\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(120+273)\ \mathrm{K}}{4.4\times10^6\ \mathrm{Pa}}=16.88\ \mathrm{m^3}$$

3−3 供热系统矩形风管的边长为 100mm×175mm，40℃、102kPa 的空气在管内流动，其体积流量是 0.018 5m^3/s，求空气流速和质量流量。

解：风管面积 $A=100\ \mathrm{mm}\times175\ \mathrm{mm}=175\ 00\ \mathrm{mm^2}=0.017\ 5\mathrm{m^2}$

空气流速

$$c_f=\frac{q_V}{A}=\frac{0.018\ 5\ \mathrm{m^3/s}}{0.0175\mathrm{m^2}}=1.06\ \mathrm{m/s}$$

空气质量流量

$$q_m=\frac{pq_V}{R_gT}=\frac{102\times10^3\mathrm{Pa}\times0.017\ 5\mathrm{m^3/s}}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(273+35)\mathrm{K}}=0.020\ \mathrm{kg/s}$$

3−4 一些大中型柴油机采用压缩空气启动，若启动柴油机用的空气瓶体积 $V=0.3\ \mathrm{m^3}$，内装有 $p_1=8\mathrm{MPa}$，$T_1=303\mathrm{K}$ 的压缩空气，启动后瓶中空气压力降低为 $p_2=0.46\mathrm{MPa}$，$T_2=303\mathrm{K}$，求用去空气的质量。

解：根据物质的量为 n 的理想气体状态方程，使用前后瓶中空气的状态方程分别为：

$$p_1V=n_1RT_1,\quad p_2V=n_2RT_2$$

用掉空气的量

$$n_1-n_2=\frac{V\left(p_1-p_2\right)}{RT_1}=\frac{0.3\mathrm{m^3}\times(8\times10^6\mathrm{Pa}-4.6\times10^6\mathrm{Pa})}{8.314\ 5\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times303\mathrm{K}}=405\mathrm{mol}$$

由附表查得空气的相对分子质量 M_r=28.97，即摩尔质量 $M=28.97\times10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}$，故用掉空气的质量

$$m_1-m_2=M(n_1-n_2)=28.97\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}\times405\mathrm{mol}=11.73\mathrm{kg}$$

3−5 空气压缩机每分钟从大气中吸入温度 $t_{\mathrm{b}}=17\ ^{\circ}\mathrm{C}$，压力等于当地大气压力 $p_{\mathrm{b}}=750\ \mathrm{mmHg}$ 的空气 $0.2\mathrm{m}^3$，充入体积为 $V=1\mathrm{m}^3$ 的储气罐中。储气罐中原有空气的温度 $t_1=17\ ^{\circ}\mathrm{C}$，表压力 $p_{\mathrm{e1}}=0.05\ \mathrm{MPa}$，参见图 3−1。问经过多长时间储气罐内气体压力才能提高到 $p_2=0.7\ \mathrm{MPa}$，温度 $t_2=50\ ^{\circ}\mathrm{C}$？

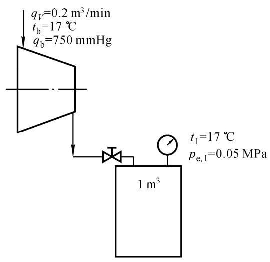


图 3−1 习题 3-5 附图

解：利用气体的状态方程式 $pV=mR_{\mathrm{g}}T$，充气前储气罐里空气质量

$$m_1=\frac{p_1v}{R_{\mathrm{g}}T_1}=\frac{\left(0.5+\dfrac{750}{750.062}\right)\times10^5\times1}{R_{\mathrm{g}}(17+273)}=\frac{517.21}{R_{\mathrm{g}}}$$

充气后储气罐里空气质量

$$m_2=\frac{p_2v}{R_{\mathrm{g}}T_2}=\frac{7\times10^5\times1}{R_{\mathrm{g}}(50+273)}=\frac{2167.18}{R_{\mathrm{g}}}$$

已知压气机吸入空气体积流率 $q_{V_{\mathrm{in}}}=0.2\mathrm{m}^3/\mathrm{min}$，故质量流量

$$q_{m_{\mathrm{in}}}=\frac{p_{\mathrm{in}}q_{V_{\mathrm{in}}}}{R_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{in}}}=\frac{p_{\mathrm{b}}q_{V_{\mathrm{in}}}}{R_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{in}}}=\frac{\dfrac{750}{750.062}\times10^5\times0.2}{R_{\mathrm{g}}(17+273)}=\frac{68.96}{R_{\mathrm{g}}}$$

若充气时间为 τ 分钟，由质量守恒 $q_{m_{\mathrm{in}}}\tau=m_2-m_1$，得

$$\tau=\frac{m_2-m_1}{q_{m_{\mathrm{in}}}}=\frac{2167.18/R_{\mathrm{g}}-517.21/R_{\mathrm{g}}}{68.96/R_{\mathrm{g}}}=23.93\ \ \mathrm{min}$$

3−6 锅炉燃烧需要的空气量折合标准状态为 $5000\mathrm{m}^3/\mathrm{h}$，鼓风机实际送入的是温度为 $250^{\circ}\mathrm{C}$、表压力为 150mmHg 的热空气。已知当地大气压力为 $p_{\mathrm{b}}=765\ \mathrm{mmHg}$。设煤燃烧后产生的烟气量与空气量近似相同，烟气通过烟囱排入上空，已知烟囱出口处烟气压力为 $p_2=0.1\ \mathrm{MPa}$，温度 $T_2=480\ \mathrm{K}$，要求烟气流速为 $c_{\mathrm{f}}=3\mathrm{m/s}$（图 3−2）。求：

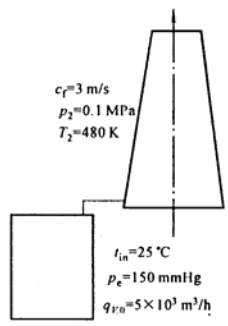


图 3−2 习题 3−6 附图

（1）热空气实际状态的体积流量 $q_{V,\mathrm{in}}$；

（2）烟囱出口内直径的设计尺寸。

解：（1）标准状态下 $p_0 = 0.101325\text{MPa}$，$T_0 = 273\text{K}$，$V_\text{m} = 22.4\times10^{-3}\text{m}^3/\text{mol}$。

送入锅炉的空气的量

$$q_n = \frac{q_{V_0}}{q_{V_{\text{m},0}}} = \frac{5\ 000\ \text{m}^3/\text{h}}{22.4\times10^{-3}\ \text{m}^3/\text{mol}} = 223.21\ \text{kmol/h} = 0.062\ \text{kmol/s}$$

实际送风的体积流率

$$q_{V\text{in}} = \frac{q_n RT}{p}$$

$$= \frac{223.21\ \text{kmol/h}\times 8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(250+273)\ \text{K}}{\left(\dfrac{150+765}{750.062}\right)\times10^5\,\text{Pa}} = 7962.7\text{m}^3/\text{h}$$

或
$$\frac{p_0 q_{V_0}}{RT_0} = \frac{p q_V}{RT}$$

$$q_{V\text{in}} = \frac{p_0 q_{V_0} T}{pT_0} = \frac{101325\text{Pa}\times 5\ 000\text{m}^3/\text{h}\times 523\text{K}}{\left(\dfrac{150+765}{750.062}\right)\times10^5\,\text{Pa}\times 273\text{K}} = 7\ 962.7\text{m}^3/\text{h}$$

（2）烟囱出口处烟气的体积流量

$$q_{V\text{out}} = \frac{q_n RT_2}{p_2} = \frac{0.062\text{mol/s}\times 8.314\ 5\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 480\text{K}}{0.1\times10^6\ \text{Pa}} = 2.474\ 5\text{m}^3/\text{s}$$

设烟囱出口截面直径为 D

$$q_{V\text{out}} = c_\text{f}\frac{\pi \text{D}^2}{4}$$

$$\text{D} = \sqrt{\frac{4q_{V\text{out}}}{\pi c_\text{f}}} = \sqrt{\frac{4\times 2.474\ 5\ \text{m}^3/s}{\pi\times 3\ \text{m/s}}} = 1.025\ \text{m}$$

3−7 烟囱底部烟气的温度为250°C，顶部烟气的温度为100°C，若不考虑顶、底部两截面间压力微小的差异，欲使烟气以同样的速度流经此两截面，求顶、底部两截面面积之比。

解：设顶、底部两截面面积分别为 A_1 和 A_2，顶、底部两截面上质量流量相同，即

$$q_{m_1} = q_{m_2},\quad \frac{A_2 c_{\text{f}2}}{v_2} = \frac{A_1 c_{\text{f}1}}{v_1}$$

由状态方程式可以得出

$$\frac{q_{V_2}}{q_{V_1}} = \frac{p_1 q_{m_2} T_2}{p_2 q_{m_1} T_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{373\text{K}}{523\text{K}} = 0.7132$$

因流速相同，$c_{\text{f}2} = c_{\text{f}1}$

$$\frac{A_2}{A_1}=\frac{v_2}{v_1}=\frac{q_{V_2}}{q_{m_2}}\frac{q_{m_1}}{q_{V_1}}=\frac{q_{V_2}}{q_{V_1}}=1:1.4$$

3−8 截面积 $A=100\ \text{cm}^2$ 的气缸内充有空气，活塞距底面高度 $h=10\ \text{cm}$，活塞及负载的总质量是 195kg（见图 3−3）。已知当地大气压力 $p_0=771\ \text{mmHg}$，环境温度为 $t_0=27\ °\text{C}$，气缸内空气外界处于热力平衡状态，现将其负载取去 100 kg，活塞将上升，最后与环境重新达到热力平衡。设空气可以通过气缸壁充分与外界换热，达到热力平衡时，空气的温度等于环境大气的温度。求活塞上升的距离，空气对外作出的功以及与环境的换热量。

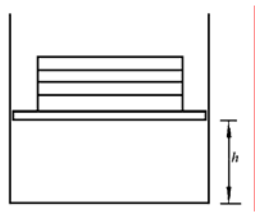


图 3−3 习题 3−8 附图

解：据题意，活塞上负载未取走前气缸内气体的初始状态为

$$\begin{aligned}p_1&=p_b+\frac{m_1g}{A}\\&=\frac{771}{750.062}\times10^{-1}\text{MPa}+\frac{195\text{kg}\times9.80665\text{m/s}^2}{100\times10^{-4}\text{m}^3}=0.294\text{MPa}\end{aligned}$$

$$T_1=(27+273)\text{K}=300\text{K}$$

$$V_1=100\text{cm}^2\times10\text{cm}=10^3\text{cm}^3=10^{-3}\text{m}^3$$

取走负载 100 kg 后，因活塞与气缸壁间无摩擦，又能充分与、外界交换热量，最后重新建立热力平衡时，气缸内压力与温度等于外界的压力与温度，故

$$\begin{aligned}p_2&=p_b+\frac{m_2g}{A}\\&=\frac{771}{750.062}\times10^{-1}\text{MPa}+\frac{(195-100)\text{kg}\times9.80665\text{m/s}^2}{100\times10^{-4}\text{m}^2}=0.196\text{MPa}\end{aligned}$$

$$T_2=27+273=300\text{K}$$

由 $\dfrac{p_1V_1}{T_1}=\dfrac{p_2V_2}{T_2}$ 得

$$V_2=\frac{p_1}{p_2}V_1=\frac{0.294\text{MPa}}{0.196\text{MPa}}\times10^{-3}\text{m}^3=1.5\times10^{-3}\text{m}^3$$

上升距离

$$\Delta H=\frac{\Delta V}{A}=\frac{V_2-V_1}{A}=\frac{(1.5-1)\times10^{-3}\text{m}^3}{100\times10^{-4}\text{m}^2}=0.05\text{m}=5\text{cm}$$

气缸内气体由状态 1 到状态 2，其间经过的是非准平衡过程，所以不能用 $w=\int_1^2 p\text{d}v$ 求解

过程功，但气缸内气体所做的功等于克服外力的功，故

$$W = p_2 A\Delta H = 0.196\times10^6\,\mathrm{Pa}\times0.05\,\mathrm{m}\times100\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2 = 98\,\mathrm{J}$$

理想气体$T_2 = T_1$时即$U_2 = U_1$，所以

$$Q = \Delta U + W = W = 98\,\mathrm{J}$$

3−9 空气初态时$T_1 = 480\mathrm{K}$，$p_1 = 0.2\mathrm{MPa}$，经某一状态变化过程被加热到$T_2 = 1\,100\mathrm{K}$，这时$p_2 = 0.5\mathrm{MPa}$。求 1kg 空气的u_1、u_2、Δu、h_1、h_2、Δh。（1）按平均质量热容表；（2）按空气的热力性质表；（3）若上述过程为定压过程，即$T_1 = 480\ \mathrm{K}$，$T_2 = 1100\mathrm{K}$，$p_1 = p_2 = 0.2\mathrm{MPa}$，问这时的$u_1$、$u_2$、$\Delta u$、$h_1$、$h_2$、$\Delta h$有何改变？（4）对计算结果进行简单的讨论：为什么由气体性质表得出的u，h与平均质量热容表得出的u，h不同？两种方法得出的Δu，Δh是否相同？为什么？

解：（1）　$t_1 = T_1 - 273 = 480 - 273 = 207^\circ\mathrm{C}$，$t_2 = T_2 - 273 = 1100 - 273 = 827^\circ\mathrm{C}$

由附表查得空气的气体常数$R_\mathrm{g} = 0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$及

$$c_p\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{207^\circ\mathrm{C}} = 1.012\ 5\mathrm{kJ/(kg\cdot K)},\quad c_p\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{827^\circ\mathrm{C}} = 1.073\ 7\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$c_V\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{207^\circ\mathrm{C}} = c_p\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{207^\circ\mathrm{C}} - R_\mathrm{g}$$
$$= 1.012\ 5\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} - 0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} = 0.725\ 5\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$c_V\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{827^\circ\mathrm{C}} = c_p\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{827^\circ\mathrm{C}} - R_\mathrm{g}$$
$$= 1.073\ 7\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} - 0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} = 0.786\ 7\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$u_1 = c_V\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{207^\circ\mathrm{C}} t_1 = 0.725\ 5\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times207^\circ\mathrm{C} = 150.2\mathrm{kJ/kg}$$
$$u_2 = c_V\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{827^\circ\mathrm{C}} t_2 = 0.786\ 7\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times827^\circ\mathrm{C} = 650.6\mathrm{kJ/kg}$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 650.6\mathrm{kJ/kg} - 150.2\mathrm{kJ/kg} = 500.4\mathrm{kJ/kg}$$

$$h_1 = c_p\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{207^\circ\mathrm{C}} t_1 = 1.0125\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times207^\circ\mathrm{C} = 209.6\mathrm{kJ/kg}$$
$$h_2 = c_p\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{827^\circ\mathrm{C}} t_2 = 1.0737\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times827^\circ\mathrm{C} = 887.9\mathrm{kJ/kg}$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = 887.9\mathrm{kJ/kg} - 209.6\mathrm{kJ/kg} = 678.3\mathrm{kJ/kg}$$

（2）利用空气的热力性质表

根据$T_1 = 480\mathrm{K}$，$T_2 = 1100\mathrm{K}$查得$h_1 = 484.49\mathrm{kJ/kg}$，$h_2 = 1162.95\mathrm{kJ/kg}$，由定义

$$u_1 = h_1 - R_g T_1 = 484.49\text{kJ/kg} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 480\text{K} = 346.73\text{kJ/kg}$$
$$u_2 = h_2 - R_g T_2 = 1162.95\text{kJ/kg} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 1100\text{K} = 847.25\text{kJ/kg}$$
$$\Delta u = u_2 - u_1 = 847.25\text{kJ/kg} - 346.73\text{kJ/kg} = 50052\text{kJ/kg}$$
$$\Delta h = h_2 - h_1 = 1162.95\text{kJ/kg} - 484.49\text{kJ/kg} = 678.46\text{kJ/kg}$$

（3）因为理想气体的u、h只是温度的函数，而与压力的大小无关，所以不论过程是否定压，只要是$T_1 = 480\text{K}$，$T_2 = 1100\text{K}$不变，则u_1、u_2、h_1、h_2的数值与上相同，当然Δu、Δh也不会改变；

（4）用气体性质表得出的u、h是以 0 K 为计算起点，而用比热表求得的u、h是以0°C为计算起点，故u、h值不同，但两种方法得出的Δu、Δh是相同的。

3−10 体积$V = 0.5\text{m}^3$的密闭容器中装有27°C 、 0.6MPa 的氧气，加热后温度升高到327 °C，（1）按定值比热容；（2）按平均热容表；（3）按理想气体状态的比热容式；（4）按平均比热容直线关系式；（5）按气体热力性质表，求加热量Q_V。

解:（1）由低压时气体的比热容表查得$T_1 = 27 + 273 = 300\text{K}$和$T_2 = 327 + 273 = 600\text{K}$时，$c_{V1} = 0.658\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$时，$c_{V2} = 0.742\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

$$c_V\Big|_{300\text{K}}^{600\text{K}} = \frac{0.658\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + 0.742\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{2} = 0.7005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

附表中查出

$$M_{O_2} = 32.0\times10^{-3}\text{kg/mol},\quad R_g = \frac{R}{M_{O_2}} = \frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}} = 260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

由理想气体的状态方程式 $p_1V_1 = mR_gT_1$

$$m = \frac{p_1V}{R_gT} = \frac{0.6\times10^6\text{Pa}\times0.5\text{m}^3}{260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(27+273)\text{K}} = 3.846\text{kg}$$

$$\begin{aligned} Q_V &= mc_V\Big|_{300\text{K}}^{600\text{K}}(T_2 - T_1) \\ &= 3.846\text{kg}\times0.7005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(600-300)\text{K} = 808.27\text{kJ} \end{aligned}$$

（2）
$$n = \frac{p_1V}{RT_1} = \frac{0.6\times10^6\text{Pa}\times0.5\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(27+273)\text{K}} = 120.3\text{mol}$$

由附表查出 $t_1 = 27°\text{C}$ 和 $t_2 = 327°\text{C}$ 时，$C_{p,\text{m}}\Big|_{0°\text{C}}^{27°\text{C}} = 29.345\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$，$C_{p,\text{m}}\Big|_{0°\text{C}}^{327°\text{C}} = 30.529\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$。因此

$$C_{V,\mathrm{m}}\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{27^\circ\mathrm{C}} = C_{p,\mathrm{m}}\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{27^\circ\mathrm{C}} - R$$
$$= 29.345\ \mathrm{J/(mol\cdot K)} - 8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)} = 21.031\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$C_{V,\mathrm{m}}\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{327^\circ\mathrm{C}} = C_{p,\mathrm{m}}\Big|_{0^\circ\mathrm{C}}^{327^\circ\mathrm{C}} - R$$
$$= 30.529\ \mathrm{J/(mol\cdot K)} - 8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)} = 22.215\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$Q_V = n(C_{V,\mathrm{m}}\Big|_0^{t_2} t_2 - C_{V,\mathrm{m}}\Big|_0^{t_1} t_1)$$
$$= 120.3\mathrm{mol} \times [22.215\mathrm{J/(mol\cdot K)} \times 327^\circ\mathrm{C} - 21.031\mathrm{J/(mol\cdot K)} \times 27^\circ\mathrm{C}]$$
$$= 805.59\mathrm{kJ}$$

（3）由光盘附表中查出氧气的真实摩尔定压热容为

$$\frac{C_{p,\mathrm{m}}}{R} = 3.626 - 1.878\times10^{-3}T + 7.055\times10^{-6}T^2 - 6.764\times10^{-9}T^3 + 2.156\times10^{-12}T^4$$

$$C_{V,\mathrm{m}} = C_{p,\mathrm{m}} - R\ ,\quad \frac{C_{V,\mathrm{m}}}{R} = \frac{C_{p,\mathrm{m}}}{R} - 1,\quad Q_V = n\int C_{V,\mathrm{m}}\mathrm{d}T = nR\int \frac{C_{V,\mathrm{m}}}{R}\mathrm{d}T$$

$$Q_V = 120.3\mathrm{mol}\times 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\int_{300\mathrm{K}}^{600\mathrm{K}}[(3.626-1) - 1.878\times10^{-3}T + 7.055\times10^{-6}T^2 - 6.764\times10^{-9}T^4 + 2.156\times10^{-12}T^6]\mathrm{d}T$$
$$= 120.3\mathrm{mol}\times 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\{2.626\times(600-300)\mathrm{K} - \frac{1.878\times10^{-3}}{2}\times[(600\mathrm{K})^2 - (300\mathrm{K})^2] + \frac{7.055\times10^{-6}}{3}\times[(600\mathrm{K})^3 - (300\mathrm{K})^3] - \frac{6.764\times10^{-9}}{4}\times[(600\mathrm{K})^4 - (300\mathrm{K})^4] + \frac{2.156\times10^{-12}}{5}\times[(600\mathrm{K})^5 - (300\mathrm{K})^5]\}$$
$$= 805.95\mathrm{kJ}$$

（4）由附表中查得氧气$\left\{c_V\Big|_{t_1}^{t_2}\right\}_{\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}} = 0.6594 + 0.000106\{t\}_{^\circ\mathrm{C}}$，所以

$$c_V\Big|_{t_1}^{t_2} = 0.6594 + 0.000106\times(27+327)\mathrm{K} = 0.6971\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$Q_V = mc_V\Big|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1)$$
$$= 3.846\mathrm{kg}\times 0.6971\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(327-27)\mathrm{K} = 804.31\mathrm{kJ}$$

（5）由附表中查得，氧气

$T_1 = 300\mathrm{K}$ 时，$H_{\mathrm{m},1} = 8\ 737.3\mathrm{J/mol}$；$T_2 = 600\mathrm{K}$ 时，$H_{\mathrm{m},2} = 1\ 7926.1\mathrm{J/mol}$

$$U_{\mathrm{m},1} = H_{\mathrm{m},1} - RT_1$$
$$= 8737.3\mathrm{J/mol} - 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times 300\mathrm{K} = 6242.95\mathrm{J/mol}$$

$$U_{\mathrm{m},2} = H_{\mathrm{m},2} - RT_2$$
$$= 17926.1\mathrm{J/mol} - 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times 600\mathrm{K} = 12937.4\mathrm{J/mol}$$

$$Q_V = n(U_{m,2} - U_{m,1}) \\ = 120.3\text{mol} \times (12937.4\text{J/mol} - 6242.95\text{J/mol}) = 805.34\text{kJ}$$

3−11 某种理想气体初态时 $p_1 = 520\text{kPa}$，$V_1 = 0.141\,9\text{m}^3$ 经过放热膨胀过程，终态 $p_2 = 170\text{kPa}$，$V_2 = 0.274\,4\text{m}^3$，过程焓值变化 $\Delta H = -67.95\text{kJ}$，已知该气体的质量定压热容 $c_p = 5.20\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，且为定值。求：

（1）热力学能变化量；

（2）比定容热容和气体常数 R_g。

解：（1）由焓的定义式 $H = U + pV$ 可得出

$$\Delta U = \Delta H - \Delta(pV) = \Delta H - (p_2V_2 - p_1V_1) \\ = -67.95\text{kJ} - (170\text{kPa} \times 0.2744\text{m}^3 - 520\text{kPa} \times 0.1419\text{m}^3) = -40.81\text{kJ}$$

（2）定值热容时 $\Delta U = mc_V\Delta T$，$\Delta H = mc_p\Delta T$，所以

$$c_V = \frac{c_p}{\frac{\Delta H}{\Delta U}} = \frac{5.20\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{\frac{-67.95\text{kJ}}{-40.81\text{kJ}}} = 3.123\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$R_g = c_p - c_V = 5.20\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 3.123\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 2.077\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

3−12 2 kg 理想气体，定容下吸热量 $Q_V = 367.6\text{kJ}$ 同时输入搅拌功 468.3kJ（图 3−4）。该过程中气体的平均比热容为 $c_p = 1124\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_V = 934\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，已知初态温度为 $t_1 = 280°\text{C}$，求：

（1）终态温度 t_2 和热力学能的变化量 ΔU；

（2）焓、熵的变化量 ΔH、ΔS。

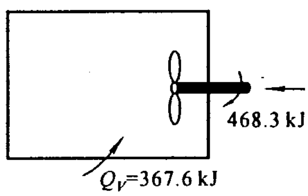


图 3−4 习题 3−13 附图

解：（1）终态温度和热力学能的变化量

由闭口系统能量守恒式 $Q = \Delta U + W$ 及 $\Delta U = mc_V(t_2 - t_1)$

$$\Delta U = Q_V - W = 367.6\text{kJ} - (-468.3\text{kJ}) = 835.9\text{kJ}$$

$$t_2 = t_1 + \frac{\Delta U}{mc_V} = 280^\circ\text{C} + \frac{835.9\text{kJ}}{2\text{kg} \times 0.934\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 727.48^\circ\text{C}$$

（2）焓和熵的变化量

$$\Delta H = \Delta U + mR_{\mathrm{g}}\Delta T = \Delta U + m(c_p - c_V)\Delta T$$
$$= 835.9\mathrm{kJ} + 2\mathrm{kg}\times(1.124-0.934)\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(727.48-280)^{\circ}\mathrm{C}$$
$$= 1005.94\mathrm{kJ}$$

$$\Delta S = mc_V \ln\frac{T_2}{T_1}$$
$$= 2\mathrm{kg}\times 0.934\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{(727.48+273)\mathrm{K}}{(280+372)\mathrm{K}} = 1.1075\mathrm{kJ/K}$$

3−13 5g 氩气初始状态 $p_1 = 0.6\mathrm{MPa}$，$T_1 = 600\mathrm{K}$，经历一个热力学能不变的过程膨胀到体积 $V_2 = 3V_1$，氩气可作为理想气体，且热容可看作为定值，求终温 T_2、终压 p_2 及总熵变 ΔS。

解： 氩气可看为理想气体，其热力学能只是温度的单一函数，故等热力学能过程也即等温过程，$T_2 = T_1 = 600\mathrm{K}$。根据理想气体的状态方程有 $m_1 = m_2 = \dfrac{p_2V_2}{R_{\mathrm{g}}T_2} = \dfrac{p_1V_1}{R_{\mathrm{g}}T_1}$，故

$$p_2 = p_1\frac{V_1}{V_2} = 0.6\times10^6\,\mathrm{Pa}\times\frac{1}{3} = 0.2\times10^6\,\mathrm{Pa}$$

由附表查出 Ar 的 $R_{\mathrm{g}} = 0.208\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

$$\Delta S = m\left(c_p\ln\frac{T_2}{T_1} - R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1}\right) = -m\left(R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1}\right)$$
$$= -0.005\mathrm{kg}\times0.208\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\ln\frac{0.2\mathrm{MPa}}{0.6\mathrm{MPa}} = 1.14\times10^{-3}\,\mathrm{kJ/K}$$

3−14 1kmol 氮气由 $p_1 = 1\mathrm{MPa}$，$T_1 = 400\mathrm{K}$ 变化到 $p_2 = 0.4\mathrm{MPa}$，$T_2 = 900\mathrm{K}$，试求摩尔熵变量 ΔS_{m}。（1）比热容可近似为定值；（2）藉助气体热力表计算。

解：（1）氮为双原子气体，比热容近似取定值时

$$C_{p,\mathrm{m}} = \frac{7}{2}R = \frac{7\times8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}}{2} = 29.10\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$\Delta S_{\mathrm{m}} = C_{p,\mathrm{m}}\ln\frac{T_2}{T_1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}$$
$$= 29.10\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\ln\frac{900\ \mathrm{K}}{400\ \mathrm{K}} - 8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\ln\frac{0.4\ \mathrm{MPa}}{1\ \mathrm{MPa}}$$
$$= 31.22\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$\Delta S = n\Delta S_{\mathrm{m}} = 1\ 000\ \mathrm{mol}\times31.22\ \mathrm{J/(mol\cdot K)} = 31.22\ \mathrm{kJ/K}$$

（2）热容为变值时，由附表查得

$T_1 = 400\ \text{K}$ 时 $S^0_{\text{m},1} = 200.179\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}$；$T_2 = 900\ \text{K}$ 时 $S^0_{\text{m},2} = 224.756\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

$$\begin{aligned}\Delta S_\text{m} &= S^0_{\text{m},2} - S^0_{\text{m},1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}\\ &= 224.756\text{J/(mol}\cdot\text{K)} - 200.179\text{J/(mol}\cdot\text{K)} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times\\ &\quad \ln\frac{0.4\text{MPa}}{1\text{MPa}} = 32.20\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

$$\Delta S = n\Delta S_\text{m} = 1\ 000\ \text{mol}\times 32.20\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)} = 32.20\ \text{kJ/K}$$

3-15 初始状态 $p_1 = 0.1\ \text{MPa}$，$t_1 = 27\ ^\circ\text{C}$ 的 CO_2，$V_2 = 0.8\ \text{m}^3$，经历某种状态变化过程，其熵变 $\Delta S = 0.242\ \text{kJ/K}$（精确值），终压 $p_2 = 0.1\ \text{MPa}$，求终态温度 t_2。

解：
$$n = \frac{p_1V_1}{RT_1} = \frac{0.1\times10^6\ \text{Pa}\times0.8\ \text{m}^3}{8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(27+273)\ \text{K}} = 32.07\ \text{mol}$$

由附表查得 CO_2，$T_1 = 300\ \text{K}$ 时，$S^0_{\text{m},1} = 214.025\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}$。

$$\Delta S = n\left(S^0_{\text{m},2} - S^0_{\text{m},1} - R\ln\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\begin{aligned}S^0_{\text{m},2} &= \frac{\Delta S}{n} + S^0_{\text{m},1} + R\ln\frac{p_2}{p_1}\\ &= \frac{242\text{J/K}}{32.0\text{mol}} + 214.025\text{J/(mol}\cdot\text{K)} + 8.314\ 5\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.5\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\\ &= 234.953\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

由同表查得 T_2

$$T_2 = 500\text{K} + \frac{234.953\text{J/(mol}\cdot\text{K)} - 234.901\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{243.284\text{J/(mol}\cdot\text{K)} - 234.901\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}\times100\text{K} = 500.62\text{K}$$

$$t_2 = 227.47^\circ\text{C}$$

3-16 绝热刚性容器中间有隔板将容器一分为二，左侧有温度为 300K、压力为 2.8MPa 的高压空气 0.05kmol，右侧为真空。若抽出隔板，求容器中空气的熵变。

解：抽出隔板，自由膨胀，因 $Q = 0$，$W = 0$，故 $\Delta U = 0$，即 $nC_{V,\text{m}}(T_2 - T_1) = 0$。所以，

$T_2 = T_1 = 300\ \text{K}$

$$V_\text{A} = \frac{nRT_{\text{A}1}}{p_{\text{A}1}} = \frac{50\ \text{mol}\times8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times300\ \text{K}}{2.8\times10^6\ \text{Pa}} = 0.044\ 5\text{m}^3$$

$V_{\mathrm{B}}=V_{\mathrm{A}}=0.044\ 5\ \mathrm{m}^3$， $V=V_{\mathrm{B}}+V_{\mathrm{A}}=0.089\ \mathrm{m}^3$

$$\Delta S=n\left(C_{V,\mathrm{m}}\ln\frac{T_2}{T_1}+R\ln\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$=50\ \mathrm{mol}\times 8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\ln\frac{0.089\ \mathrm{m}^3}{0.044\ 5\ \mathrm{m}^3}=288.2\ \mathrm{J/K}$$

3-17 CO_2 按定压过程流经冷却器， $p_1=p_2=0.105\ \mathrm{MPa}$，温度由 600 K 冷却到 366 K，试分别使用（1）真实热容经验式、（2）比热容算术平均值，计算 1kg CO_2 的热力学能变化量、焓变化量及熵变化量。

解：（1）使用真实热容经验式，由光盘版附表 5 查得 CO_2 的摩尔定压热容为

$$\frac{C_{p,\mathrm{m}}}{R}=2.401+8.735\times10^{-3}\{T\}_{\mathrm{K}}-6.607\times10^{-6}\{T\}_{\mathrm{K}}^2+2.002\times10^{-9}\{T\}_{\mathrm{K}}^3$$

$$\Delta h=\frac{R}{M}\int_{T_1}^{T_2}\frac{C_{p,\mathrm{m}}}{R}\mathrm{d}T$$

$$=\frac{8.314\ 5\times10^{-3}\ \mathrm{kJ/(mol\cdot K)}}{44.01\times10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}}\times\{2.401\times(366\ \mathrm{K}-600\ \mathrm{K})+$$

$$\frac{8.735\times10^{-3}}{2}\times[(366\ \mathrm{K})^2-(600\ \mathrm{K})^2]-\frac{6.607\times10^{-6}}{3}\times$$

$$[(366\ \mathrm{K})^3-(600\ \mathrm{K})^3]+\frac{2.002\times10^{-9}}{4}\times(366\ \mathrm{K})^4-(600\ \mathrm{K})^4]\}$$

$$=-233.74\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$\Delta u=\Delta h-R_{\mathrm{g}}\Delta T$$

$$=-233.74\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}-0.188\ 9\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(366-600)\mathrm{K}$$

$$=-189.54\mathrm{kJ/kg}$$

$$\Delta s=\frac{R}{M}\int_{T_1}^{T_2}\frac{c_{p,\mathrm{m}}}{RT}\mathrm{d}T-R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1}=\frac{R}{M}\int_{T_1}^{T_2}\frac{c_{p,\mathrm{m}}}{R}\frac{\mathrm{d}T}{T}$$

$$=\frac{8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}}{44.01\times10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}}\times\{2.401\times\ln\frac{366\mathrm{K}}{600\mathrm{K}}+8.735\times10^{-3}\times$$

$$(366\ \mathrm{K}-600\mathrm{K})-\frac{6.607\times10^{-6}}{2}\times[(366\ \mathrm{K})^2-(600\ \mathrm{K})^2]+$$

$$\frac{2.002\times10^{-9}}{3}\times[(366\ \mathrm{K})^3-(600\ \mathrm{K})^3]\}=-0.490\ 3\ \mathrm{kJ/kg}$$

（2）使用比热容算术平均值，由光盘版附表 4 查得

$c_{p1}=1.075\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$， $c_{V1}=0.886\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

$$c_{p2}=0.909\ 08\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}，\ c_{V2}=0.720\ 18\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

T_1 到 T_2 之间的比热容算术平均值

$$c_{p,\text{av}}=\frac{c_{p1}+c_{p2}}{2}=\frac{1.075\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+0.909\ 08\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{2}=0.992\ 04\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_{V,\text{av}}=\frac{c_{V1}+c_{V2}}{2}=\frac{0.886\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+0.720\ 18\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{2}=0.803\ 09\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta u=c_{V,\text{av}}\left(T_2-T_1\right)=0.803\ 09\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(366-600)\text{K}=-187.92\text{kJ/kg}$$

$$\Delta h=c_{p,\text{av}}\left(T_2-T_1\right)=0.992\ 04\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(366-600)\text{K}=-232.14\text{kJ/kg}$$

$$\Delta s=c_{p,\text{av}}\ln\frac{T_2}{T_1}-R_\text{g}\ln\frac{p_2}{p_1}=992.04\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{366\text{K}}{600\text{K}}=-490.4\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

讨论：对照例题 3-4 得：

（1）利用气体热力性质表直接查取 h(或 H_m)的方法是一种既精确又简便的方法，各种方法的计算结果，以及与此相比得出的相对误差见下表。利用平均比热容表也是一种精确的计算方法。真实摩尔经验式和比热容算术平均值这两种方法的误差也都能满足工程计算的要求。若按定值比热容计算，$C_{p,\text{m}}=\frac{9R}{2}$，可得 $\Delta u=-154.73\ \text{kJ/kg}$，$\Delta h=-198.94\ \text{kJ/kg}$，$\Delta s=-0.420\ 2\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，误差分别为 18.1%、14.5%、15.2%，显然误差过大。

方法	Δu /(kJ/kg)	误差 / %	Δh /(kJ/kg)	误差 / %	Δs /(kJ/kg·K)	误差 / %
1	−188.88	0.19	−233.10	0.16	−0.492 4	0.63
2	−188.52		−232.72		−0.495 5	
3	−189.54	0.56	−233.74	0.46	−0.490 3	1.06
4	−187.92	0.32	−232.14	0.24	−0.490 4	1.03

（2）理想气体的熵不是温度的单值函数，比熵变为 $\Delta s_{1-2}=\int_{T_1}^{T_2}c_p\frac{\text{d}T}{T}-R_\text{g}\ln\frac{p_2}{p_1}$，摩尔熵变 $\Delta S_\text{m}=S_{\text{m}2}^0-S_{\text{m}1}^0-R\ln\frac{p_2}{p_1}$。本题为定压过程，与压力相关量 $R\ln\frac{p_2}{p_1}$ 为零，熵变量也只与温

度项$\int_{T_1}^{T_2} c_p \dfrac{\mathrm{d}T}{T}$有关。

3−18 氮气流入绝热收缩喷管时压力 $p_1 = 300\text{kPa}$，温度 $T_1 = 400\text{K}$，速度 $c_{\text{f1}} = 30\text{m/s}$，流出喷管时压力 $p_2 = 100\text{kPa}$，温度 $T_2 = 330\text{K}$。若位能可忽略不计，求出口截面上气体流速。氮气比热容可取定值，$c_p = 1042\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。

解：取喷管为控制体积，列能量方程

$$h_1 + \frac{c_{\text{f1}}^2}{2} + gz_1 = h_2 + \frac{c_{\text{f2}}^2}{2} + gz_2$$

忽略位能差

$$c_{\text{f2}} = \sqrt{2(h_1 - h_2) + c_{\text{f1}}^2} = \sqrt{2c_p(T_1 - T_2) + c_{\text{f1}}^2}$$
$$= \sqrt{2 \times 1\ 042\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (400\ \text{K} - 330\ \text{K}) + (30\ \text{m/s})^2} = 383.1\ \text{m/s}$$

3−19 刚性绝热容器用隔板分成 A、B 两室，A 室的容积 0.5 m^3，其中空气压力 250 kPa、温度 300 K。B 室容积 1 m^3，其中空气压力 150 kPa、温度 1 000 K。抽去隔板，A、B 两室的空气混合，最终达到均匀一致，求平衡后的空气的温度和压力过程熵变。空气比热容取定值 $c_p = 100\ 5\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。

解：初态时 A 室和 B 室空气质量

$$m_{\text{A}} = \frac{p_{\text{A}} V_{\text{A}}}{R_{\text{g}} T_{\text{A}}} = \frac{250 \times 10^3\ \text{Pa} \times 0.5\ \text{m}^3}{287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 300\ \text{K}} = 1.452\ \text{kg}$$

$$m_{\text{B}} = \frac{p_{\text{B}} V_{\text{B}}}{R_{\text{g}} T_{\text{B}}} = \frac{150 \times 10^3\ \text{Pa} \times 1\ \text{m}^3}{287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 1\ 000\ \text{K}} = 0.523\ \text{kg}$$

$$m = m_{\text{A}} + m_{\text{B}} = 1.452\ \text{kg} + 0.523\ \text{kg} = 1.975\ \text{kg}$$

取容器内全部气体位系统，列能量方程，有 $Q = \Delta U + W$ 因 $Q = 0$、$W = 0$，故 $\Delta U = 0$，所以

$$mc_V T_2 - (m_{\text{A}} c_V T_{\text{A}} + m_{\text{B}} c_V T_{\text{B}}) = 0$$

$$T_2 = \frac{m_{\text{A}} c_V T_{\text{A}} + m_{\text{B}} c_V T_{\text{B}}}{mc_V} = \frac{m_{\text{A}} T_{\text{A}} + m_{\text{B}} T_{\text{B}}}{m}$$
$$= \frac{1.452\ \text{kg} \times 300\ \text{K} + 0.523\ \text{kg} \times 1\ 000\ \text{K}}{1.975\ \text{kg}} = 485.4\ \text{K}$$

$$p_2 = \frac{mR_{\text{g}} T_2}{V_{\text{A}} + V_{\text{B}}} = \frac{1.975\ \text{kg} \times 287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 485.4\ \text{K}}{0.5\ \text{m}^3 + 1\ \text{m}^3} = 183.4\ \text{kPa}$$

$$\Delta S = m_{\rm A}\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_A} - R_{\rm g}\ln\frac{p_2}{p_A}\right) + m_{\rm B}\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_{\rm B}} - R_{\rm g}\ln\frac{p_2}{p_{\rm B}}\right)$$
$$= c_p\left(m_{\rm A}\ln\frac{T_2}{T_A} + m_{\rm B}\ln\frac{T_2}{T_{\rm B}}\right) - R_{\rm g}\left(m_{\rm A}\ln\frac{p_2}{p_{\rm A}} + m_{\rm B}\ln\frac{p_2}{p_{\rm B}}\right)$$
$$= 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\left(1.452\text{kg}\times\ln\frac{485.4\text{K}}{300\text{K}} + 0.523\text{kg}\times\ln\frac{485.4\text{K}}{1\ 000\text{K}}\right)$$
$$-287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\left(1.452\text{kg}\times\ln\frac{183.4\text{Pa}}{250\text{Pa}} + 0.523\text{kg}\times\ln\frac{183.4\text{Pa}}{150\text{Pa}}\right)$$
$$= 223\text{J/K}$$

3−20 气缸活塞系统内有 3 kg 压力为 1 MPa、温度为 27 ℃的 O_2。缸内气体被加热到 327 ℃，此时压力为 1 500 kPa。由于活塞外弹簧的作用，缸内压力与体积变化成线性关系。若 O_2 的比热容可取定值，$c_V = 0.658\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$R_{\rm g} = 0.260\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。求过程中的换热量。

解：据题意 $p_1 = kV_1$，$p_2 = kV_2$。

$$V_1 = \frac{mR_{\rm g}T_1}{p_1} = \frac{3\ \text{kg}\times 0.260\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(27+273)\ \text{K}}{1\ 000\ \text{kPa}} = 0.234\text{m}^3$$

$$V_2 = \frac{mR_{\rm g}T_2}{p_2} = \frac{3\ \text{kg}\times 0.260\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(327+273)\ \text{K}}{1\ 500\ \text{kPa}} = 0.312\ \text{m}^3$$

$$W = \int_1^2 p\text{d}V = \int_1^2 kV\text{d}V = \frac{k(V_2^2 - V_1^2)}{2} = \frac{p_2 + p_1}{2}(V_2 - V_1)$$
$$= \frac{1\ 000\ \text{kPa} + 1\ 500\ \text{kPa}}{2}\times(0.312\ \text{m}^3 - 0.234\ \text{m}^3) = 97.5\ \text{kJ}$$

$$Q = \Delta U + W = mc_V(T_2 - T_1) + W$$
$$= 3\ \text{kg}\times 0.658\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(600\ \text{K} - 300\ \text{K}) + 97.5\text{kJ} = 689.7\ \text{kJ}$$

3−21 利用蒸汽图表，填充下列空白并用计算机软件计算校核

	p / MPa	t/℃	h / kJ/kg	s / kJ/(kg·K)	x	过热度℃
1	3	500	*3457*	*7.226*		*266*
2	0.5	*392*	3244	*7.764*		*239*
3	*3*	360	3140	*6.780*		*126*
4	0.02	*61*	*2375*	*7.210*	0.90	

解：见表中斜体字。

3−22 湿饱和蒸汽，$x = 0.95$、$p = 1\ \text{MPa}$，应用水蒸表求 t_s、h、u、v、s，再用 $h-s$ 图求上述参数并用计算机软件计算校核。

解：利用饱和水和饱和水蒸气表，$p=1.0\text{MPa}$ 时 $t_s=179.916^\circ\text{C}$

$$v'=0.0\ 011\ 272\text{m}^3/\text{kg}、v''=0.19\ 438\text{m}^3/\text{kg};$$

$$h=762.84\text{kJ/kg}、h''=2\ 777.67\text{kJ/kg};$$

$$s'=2.138\ 8\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}、s''=6.585\ 9\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\begin{aligned}h&=h'+x(h''-h')\\&=762.84\text{kJ/kg}+0.95\times(2777.67-762.84)\text{kJ/kg}=2676.9\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v&=v'+x(v''-v')\\&=0.0011272\text{m}^3/\text{kg}+0.95\times(0.19438-0.0011272)\text{m}^3/\text{kg}\\&=0.18472\text{m}^3/\text{kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s&=s'+x(s''-s')\\&=2.1388\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+0.95\times(6.5859-2.1388)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\\&=6.3635\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

$$u=h-p_sv=2676.9\text{kJ/kg}-1\times10^3\text{kPa}\times0.18472\text{m}^3=2492.2\text{kJ/kg}$$

据 $h-s$ 图查得：$t_s=180°\text{C}$、$h=2678.0\text{kJ/kg}$、$v=0.186\text{m}^3/\text{kg}$、$s=0.636\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

$$u=h-p_sv=2678.0\text{kJ/kg}-1\times10^3\text{kPa}\times0.186\text{m}^3=2492\text{kJ/kg}。$$

3−23 根据水蒸气表求 $p=3\text{MPa}$、$t=400^\circ\text{C}$ 的过热蒸汽的 h、u、v、s 和过热度，再用 $h-s$ 图求上述参数。

解：据水蒸气表，$p=3\text{MPa}$、$t=400^\circ\text{C}$ 时 $t_s=233.893^\circ\text{C}$

$$h=3\ 230.1\text{kJ/kg}、s=6.919\ 9\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}、v=0.099\ 352\text{m}^3/\text{kg}$$

$$D=t-t_s=400^\circ\text{C}-233.893^\circ\text{C}\doteq166.1°\text{C}。$$

利用 $h-s$ 图 $t_s=234°\text{C}$、$h=3233\text{kJ/kg}$、$v=0.1\text{m}^3/\text{kg}$、$s=6.92\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$D=t-t_3=400^\circ\text{C}-234^\circ\text{C}=166^\circ\text{C}。$$

3−24 已知水蒸气的压力为 $p=0.5\text{MPa}$，比体积 $v=0.35\text{m}^3/\text{kg}$，问这是不是过热蒸汽？如果不是，那是饱和蒸汽还是湿蒸汽？用水蒸气表求出其它参数。

解：据水蒸气表 $p=0.5\text{MPa}$ 时，$v'=0.001\ 092\ 5\text{m}^3/\text{kg}$、$v''=0.374\ 86\text{m}^3/\text{kg}$。因 $v'<v<v''$，所以该水蒸气不是过热蒸汽而是饱和湿蒸汽。

据同一表 $t_s = 151.867^\circ\mathrm{C}$ 、$h' = 640.35\mathrm{kJ/kg}$ 、$h'' = 2748.59\mathrm{kJ/kg}$ 、$s' = 1.8610\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$ 、$s'' = 6.8214\mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$ 。

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0.35\mathrm{m^3/kg} - 0.0010925\mathrm{m^3/kg}}{0.37486\mathrm{m^3/kg} - 0.0010925\mathrm{m^3/kg}} = 0.9335$$

$$\begin{aligned} h &= h' + x(h'' - h') \\ &= 640.35\mathrm{kJ/kg} + 0.9335 \times (2748.59 - 640.35)\mathrm{kJ/kg} = 2608.4\mathrm{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s &= s' + x(s'' - s') \\ &= 1.8610\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} + 0.9335 \times (6.8214 - 1.8610)\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \\ &= 6.4915\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u &= h - pv \\ &= 2608.4\mathrm{kJ/kg} - 0.5 \times 10^6\,\mathrm{Pa} \times 0.35 \times 10^{-3}\,\mathrm{m^3/kg} = 2433.4\mathrm{kJ/kg} \end{aligned}$$

3−25 我国南方某核电厂蒸汽发生器内产生的新蒸汽压力 6.53 MPa，干度为 0.9956，蒸汽的流量为 608.47 kg/s，若蒸汽发生器主蒸汽管内流速不大于 20 m/s，求：新蒸汽的焓及蒸汽发生器主蒸汽管内径。

解：蒸汽发生器输出蒸汽压力 6.53MPa 时：$h'' = 2\ 777.8\ \mathrm{kJ/kg}$，$v'' = 0.029\ 6\ \mathrm{m^3/kg}$；$h' = 1\ 242.0\ \mathrm{kJ/kg}$，$v' = 0.000\ 13\ \mathrm{m^3/kg}$

$$\begin{aligned} h &= h' + x(h'' - h') \\ &= 1\ 242.0\ \mathrm{kJ/kg} + 0.995\ 6 \times (2\ 777.8 - 1\ 242.0)\ \mathrm{kJ/kg} = 2\ 771.0\ \mathrm{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v &= v' + x(v'' - v') \\ &= 0.001\ 3\mathrm{m^3/kg} + 0.9956 \times (0.029\ 6 - 0.001\ 3)\mathrm{m^3/kg} = 0.029\ 48\mathrm{m^3/kg} \end{aligned}$$

$$q_m = \frac{Ac_\mathrm{f}}{v} = \frac{\pi d_\mathrm{i}^2 c_\mathrm{f}}{4v}$$

$$d_\mathrm{i} = \sqrt{\frac{4vq_m}{\pi c_\mathrm{f}}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.029\ 48\ \mathrm{m^3/kg} \times 608.47\ \mathrm{kg/s}}{\pi \times 20\ \mathrm{m/s}}} = 1.07\ \mathrm{m}$$

3−26 容器内有氟利昂 134a 过热蒸气 1 kg，参数为 300 kPa、100℃，定压冷却成为干度为 0.75 的气液两相混合物，求过程中氟利昂 134a 的热力学能变化量。

解：取容器中 R134a 为闭口系，据题意，查 R134a 热力性质表，300 kPa、100 ℃时 $h_1 = 490.13\ \mathrm{kJ/kg}$、$v_1 = 0.098\ 75\mathrm{m^3/kg}$

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 490.13\ \text{kJ/kg} - 300\text{kPa} \times 0.098\ 75\ \text{m}^3/\text{kg} = 460.55\ \text{kJ/kg}$$

$p_2 = p_1 = 300\text{kPa}$，查 R134a 饱和性质表 $v' = 0.000\ 77492\text{m}^3/\text{kg}$、$v'' = 0.066\ 694\text{m}^3/\text{kg}$、$h'' = 398.36\ \text{kJ/kg}$、$h' = 200.85\ \text{kJ/kg}$。

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ &= 200.85\ \text{kJ/kg} + 0.75 \times (398.36\ \text{kJ/kg} - 200.85\ \text{kJ/kg}) = 348.98\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_2 &= v' + x_2(v'' - v') \\ &= 0.000\ 774\ 92\ \text{m}^3/\text{kg} + 0.75 \times (0.066\ 694 - 0.774\ 92)\ \text{m}^3/\text{kg} \\ &= 0.050\ 214\ \text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 348.98\text{kJ/kg} - 300\text{kPa} \times 0.050\ 214\text{m}^3/\text{kg} = 333.92\text{kJ/kg}$$

$$\Delta U = m\Delta u = 1\ \text{kg} \times (333.92 - 348.98)\ \text{kJ/kg} = -15.06\ \text{kJ}$$

3−27 干度为 0.6、温度为 0 ℃的氨在容积为 200 L 的刚性容器内被加热到压力 $p_2 = 1\ \text{MPa}$，求加热量。

解：取容器内 NH_3 为系统，0 ℃时 $p = 429.6\text{kPa}$、$h = 957.3\text{kJ/kg}$、$v = 0.1741\text{m}^3/\text{kg}$。

$$m = \frac{V}{v} = \frac{0.2\text{m}^3}{0.1741\text{m}^3/\text{kg}} = 1.149\text{kg}$$

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 957.3\text{kJ/kg} - 429.6\text{kPa} \times 0.1741\text{m}^3/\text{kg} = 882.5\text{kJ/kg}$$

因容器是刚性的，所以在过程中氨的比体积不变，p_2＝1MPa 时，$v'' = 0.1285\text{m}^3/\text{kg} < v_2$，所以终态为过热蒸气。查 NH_3 热力性质表，$h = 1684.4\text{kJ/kg}$

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 1684.4\text{kJ/kg} - 1000\text{kPa} \times 0.1741\text{m}^3/\text{kg} = 1510.3\text{kJ/kg}$$

$$Q = \Delta U + W = m(u_2 - u_1) = 1.149\text{kg} \times (1510.3 - 882.5)\text{kJ/kg} = 721.3\text{kJ}$$

3−28 某压水堆核电厂蒸汽发生器（图 3−5）产生的新蒸汽是压力 6.53MPa，干度为 0.9956 的湿饱和蒸汽，进入蒸汽发生器的水压力为 7.08MPa，温度为 221.3℃。反应堆冷却剂（一回路压力水）进入反应堆时的平均温度为 290 ℃，吸热离开反应堆进入蒸汽发生器时的温度为 330 ℃，反应堆内平均压力为 15.5MPa，冷却剂流量为 17550 t/h。蒸汽发生器向环境大气散热量可忽略，不计工质的动能差和为能差，求蒸汽发生器的蒸汽产量。

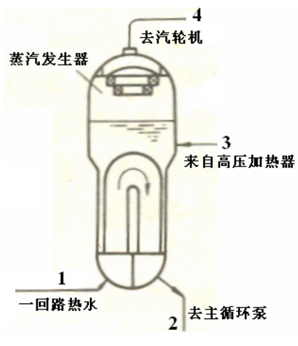


图 3−5 蒸汽发生器示意图

解：冷却剂的流量

$$q_{m1}=\frac{17\ 550\ \text{t/h}}{3\ 600}=4\ 875\ \text{kg/s}$$

据题意，查表：$h_1=1\ 515.0\ \text{kJ/kg}$，$h_2=1287.8\text{kJ/kg}$； $h_3=950.7\text{kJ/kg}$； $p=6.53\text{MPa}$ 时：

$h'=1\ 242.0\ \text{kJ/kg}$，$h''=2\ 777.8\ \text{kJ/kg}$，新蒸汽干度 $x=0.9956$，所以

$$\begin{aligned}h_4&=h'+x(h''-h')\\&=1242.0\text{kJ/kg}+0.9956\times(2777.8-1242.0)\text{kJ/kg}=2771.0\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

取蒸汽发生器为控制体积，忽略向环境大气散热量，不计工质的动能差和为能差，能量方程 $q_{m1}(h_1-h_2)=q_{m3}(h_4-h_3)$ 解得蒸汽流量

$$\begin{aligned}q_{m3}&=\frac{q_{m1}(h_1-h_2)}{(h_4-h_3)}\\&=\frac{4\ 875\ \text{kg/s}\times(1\ 515.0\ \text{kJ/kg}-1\ 287.8\ \text{kJ/kg})}{2\ 771.0\ \text{kJ/kg}-950.7\ \text{kJ/kg}}=608.47\ \text{kg/s}\end{aligned}$$

3-29 垂直放置的气缸活塞系统的活塞质量为 90kg，气缸的横截面积为 0.006m^2。内有 10℃的干度为 0.9 的 R407c（一种在空调中应用的制冷工质）蒸气 10L。外界大气压 100kPa，活塞用销钉卡住。拔去销钉，活塞移动，最终活塞静止，且 R407c 温度达到 10℃。求终态工质压力、体积及所作的功。已知：10℃时 R407c 饱和参数为 $v'=0.0008\text{m}^3/\text{kg}$、$v''=0.0381\text{m}^3/\text{kg}$；终态时比体积 $v=0.1059\text{m}^3/\text{kg}$。

解：状态 1

$$\begin{aligned}v_1&=v'+x(v''+v')\\&=0.0008\text{m}^3/\text{kg}+0.9\times(0.0381\text{m}^3/\text{kg}-0.0008\text{m}^3/\text{kg})=0.03437\text{m}^3/\text{kg}\end{aligned}$$

$$m=\frac{V_1}{v_1}=\frac{0.01\text{m}^3}{0.03437\text{m}^3/\text{kg}}=0.291\text{kg}$$

状态 2 $$p_2=p_0+\frac{mg}{A}=100\text{kPa}+\frac{90\text{kg}\times9.80665\text{m/s}^2}{0.006\text{m}^2}\times10^{-3}=247.1\text{kPa}$$

由 T_2 和 p_2 查 R407c 表，得 $v=0.1059\text{m}^3/\text{kg}$

$$V_2=mv_2=0.291\text{kg}\times0.1059\text{m}^3/\text{kg}=0.0308\text{m}^3=30.8\text{L}$$

$$W=p_{\text{out}}(V_2-V_1)=p_2(V_2-V_1)=247.1\text{kPa}\times(0.0308\text{m}^3-0.01\text{m}^3)=5.14\text{kJ}$$

第四章 气体和蒸汽的热力过程

4-1 有 2.3kg 的 CO，初态 $T_1 = 477\ \text{K}$，$p_1 = 0.32\ \text{MPa}$，经可逆定容加热，终温 $T_2 = 600\ \text{K}$，设 CO 为理想气体，求 ΔU、ΔH、ΔS，求过程功及过程热量。

（1）比热容为定值；

（2）比热容为变值，按气体性质表计算。

解 （1）定值比热容

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{600\text{K}}{477\text{K}} \times 0.32\text{MPa} = 0.4025\text{MPa}$$

由附表 $M = 28.01 \times 10^{-3}\text{kg/mol}$，$R_g = \frac{R}{M} = \frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01 \times 10^{-3}\text{kg/mol}} = 296.8\text{J(kg}\cdot\text{K)}$。

$$c_V = \frac{5}{2} R_g = \frac{5}{2} \times 296.8\text{J/(kg}\cdot\text{K)} = 742.1\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_p = \frac{7}{2} R_g = \frac{7}{2} \times 296.8\text{J/(kg}\cdot\text{K)} = 1038.94\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta U = mc_V(T_2 - T_1) = 2.3\text{kg} \times 742.1\text{J/(kg}\cdot\text{K)}(600 - 477)\text{K} = 209.94\text{kJ}$$

$$\Delta H = mc_p(T_2 - T_1) = 2.3\text{kg} \times 1038.94\text{J/(kg}\cdot\text{K)}(600 - 477)\text{K} = 293.92\text{kJ}$$

$$\Delta S = mc_V \ln\frac{T_2}{T_1} = 2.3\text{kg} \times 742.1 \ln\frac{600\text{K}}{477\text{K}} = 0.3916\text{kJ/K}$$

$$W = 0,\quad Q = \Delta U = 209.94\text{J}$$

（2）变比热容

由附表查得 $T_1 = 477\text{K}$ 时 $H_{\text{m},1} = 13921.704\text{J/mol}$，$S^0_{\text{m},1} = 211.312\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

$T_2 = 600\text{K}$ 时 $H_{\text{m},2} = 17612.7\text{J/mol}$，$S^0_{\text{m},2} = 218.217\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$

$$\begin{aligned} U_{\text{m},1} &= H_{\text{m},1} - RT_1 \\ &= 13921.704\text{J/mol} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times 477\text{K} = 9955.69\text{J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{m},2} &= H_{\text{m},2} - RT_2 \\ &= 17612.7\text{J/mol} - 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times 600\text{K} = 12624.0\text{J/mol} \end{aligned}$$

$$\Delta U = \frac{m}{M}\Delta U_\text{m} = \frac{2.3\text{kg} \times (12624.0 - 9955.69)\text{J/mol}}{28.01 \times 10^{-3}\text{kg/mol}} = 219.10 \times 10^3\text{J}$$

$$\Delta H=\frac{m}{M}\Delta H_{\mathrm{m}}=\frac{2.3\mathrm{kg}\times(17612.7-13921.704)\mathrm{J/mol}}{28.01\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}}=303.08\times10^{3}\mathrm{J}$$

$$\Delta S=n\left(S_{\mathrm{m},2}^{0}-S_{\mathrm{m},1}^{0}-R\ln\frac{p_2}{p_1}\right)=\frac{m}{M}\left(S_{\mathrm{m},2}^{0}-S_{\mathrm{m},1}^{0}-R\ln\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$=\frac{2.3\mathrm{kg}\times\left([218.317-211.312]\mathrm{J/(mol\cdot K)}-8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\ln\frac{600\mathrm{K}}{477\mathrm{K}}\right)}{28.01\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}}$$

$$=0.4186\times10^{3}\mathrm{J/K}$$

$W=0$，$Q=\Delta U=219.10\mathrm{kJ}$

4-2 甲烷 CH_4 的初始状态 $p_1=0.47\mathrm{MPa}$、$T_1=393\mathrm{K}$，经可逆定压冷却对外放出热量 $4110.76\mathrm{J/mol}$，试确定其终温及 $1\mathrm{mol}CH_4$ 的热力学能变化量 ΔU_{m}、焓变化量 ΔH_{m}。设甲烷的比热容近似为定值，$c_p=2.3298\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。

解：由附表查得甲烷的摩尔质量 $M=16.04\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}$，所以

$$C_{p,\mathrm{m}}=Mc_p=16.04\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}\times2.3298\mathrm{J/(kg\cdot K)}=37.37\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$T_2=T_1+\frac{Q_{\mathrm{m}}}{C_{p,\mathrm{m}}}=393\mathrm{K}+\frac{-4110.76\mathrm{J/mol}}{37.37\mathrm{J/(mol\cdot K)}}=283\mathrm{K}$$

$$C_{V,\mathrm{m}}=C_{p,\mathrm{m}}-R=37.37\mathrm{J/(mol\cdot K)}-8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}=29.056\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$\Delta U_{\mathrm{m}}=C_{V,\mathrm{m}}(T_2-T_1)=29.056\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times(283-393)\mathrm{K}=-3196.11\mathrm{J/mol}$$

$$\Delta H_{\mathrm{m}}=C_{p,\mathrm{m}}(T_2-T_1)=Q_{\mathrm{m}}=-4110.76\mathrm{J/mol}$$

4-3 试由 $w=\int_1^2 p\mathrm{d}v$，$w_{\mathrm{t}}=-\int_1^2 v\mathrm{d}p$ 导出理想气体进行可逆绝热过程时过程功和技术功的计算式。

解：可逆过程的过程功 $w=\int_1^2 p\mathrm{d}v$，由绝热过程方式 $p_1v_1^{\kappa}=pv^{\kappa}$，得 $p=\dfrac{p_1v_1^{\kappa}}{v^{\kappa}}$。所以

$$w=p_1v_1^{\kappa}\int_{v_1}^{v_2}\frac{\mathrm{d}v}{v^{\kappa}}=\frac{1}{\kappa-1}(p_1v_1-p_2v_2)=R_{\mathrm{g}}\frac{1}{\kappa-1}(T_1-T_2)$$

考虑到

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}，\ \frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$w=\frac{R_{g}T_{1}}{\kappa-1}[1-\left(\frac{p_{2}}{p_{1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}]=\frac{R_{g}T_{1}}{\kappa-1}\left[1-\left(\frac{v_{2}}{v_{1}}\right)^{\kappa-1}\right]$$

可逆过程的技术功 $w_{t}=-\int_{p_{1}}^{p_{2}}v\mathrm{d}p=\int_{v_{1}}^{v_{2}}p\mathrm{d}v+(p_{1}v_{1}-p_{2}v_{2})$，将 $\int_{v_{1}}^{v_{2}}p\mathrm{d}v$ 关系式代入，经整理可得

$$w_{t}=\frac{\kappa}{\kappa-1}(p_{1}v_{1}-p_{2}v_{2})=\frac{\kappa}{\kappa-1}R_{g}(T_{1}-T_{2})=\frac{\kappa}{\kappa-1}R_{g}T_{1}\left[1-\left(\frac{p_{2}}{p_{1}}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}\right]$$

$$=\kappa w$$

4-4 氧气由 $t_{1}=40\ ^{\circ}\mathrm{C}$，$p_{1}=0.1\ \mathrm{MPa}$ 被压缩到 $p_{2}=0.4\ \mathrm{MPa}$，试计算压缩 1kg 氧气消耗的技术功。（1）按定温压缩计算；（2）按绝热压缩计算，设为定值比热容；（3）将它们表示 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上，试比较两种情况技术功大小。

解：由附表查得氧气 $\mathrm{M}=32.0\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}$。$T_{1}=t_{1}+273=(40+273)\mathrm{K}=313\mathrm{K}$

$$R_{g}=\frac{R}{M}=\frac{8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}}{32.0\times10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}}=0.260\ \ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$$

（1）
$$w_{t,T}=R_{g}T_{1}\ln\frac{p_{1}}{p_{2}}=0.260\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times313\mathrm{K}\ln\frac{0.1\mathrm{MPa}}{4\mathrm{MPa}}=-112.82\mathrm{J/kg}$$

（2）
$$T_{2}=\left(\frac{p_{2}}{p_{1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}T_{1}=\left(\frac{0.4\mathrm{MPa}}{0.1\mathrm{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}\times313\mathrm{K}=465.12\mathrm{K}$$

$$w_{t,s}=c_{p}(T_{1}-T_{2})=\frac{7}{2}\frac{R}{M}(T_{1}-T_{2})$$
$$=\frac{7}{2}\times\frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{32.0\times10^{-3}\mathrm{kg/mol}}(313-465.12)\mathrm{K}=-138.34\mathrm{kJ/kg}$$

（3）在 $p-v$ 图上定温压缩和绝热压缩技术功分别以面积 $12_{T}mn1$ 和 $12_{s}mn1$ 表示（图 4-1），$w_{t,T}<w_{t,s}$，在 $T-s$ 图上，定温过程 $w_{t,T}=q_{T}$，用面积 $12Tmn1$ 表示，绝热过程 $w_{t,s}=h_{1}-h_{2}=h_{2T}-h_{2s}$，用面积 $12_{s}2_{T}mn1$ 表示，显见 $w_{t,T}<w_{t,s}$。

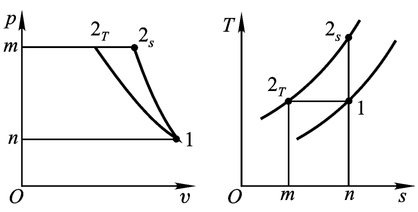


图 4-1 习题 4-4 附图

4-5 同上题，若比热容为变值，试按气体热力性质表计算绝热压缩 1 kg 氧气消耗的技术

功。

解：由附表查得氧气的 H_{m}、S_{m}^{0}

T / K	H_{m} / J/mol	S_{m}^{0} / J/(mol·K)
300	8737.3	205.329
400	11708.9	213.872
500	14767.3	220.693

用插值的方法求出 $T_1 = 313\mathrm{K}$ 时 $H_{\mathrm{m},1} = 9\,123.608\ \mathrm{J/mol}$、$S_{\mathrm{m},1}^{0} = 206.44\ \mathrm{J/(mol \cdot K)}$。定熵过程有

$$\Delta S = S_{\mathrm{m},2}^{0} - S_{\mathrm{m},1}^{0} - R\ln\frac{p_2}{p_1} = 0$$

$$\begin{aligned} S_{\mathrm{m},2}^{0} &= S_{\mathrm{m},1}^{0} + R\ln\frac{p_2}{p_1} \\ &= 206.44\mathrm{J/(mol \cdot K)} + 8.3145\mathrm{J/(mol \cdot K)} \times \ln\frac{0.4\mathrm{MPa}}{0.1\mathrm{MPa}} \\ &= 217.97\mathrm{J/(mol \cdot K)} \end{aligned}$$

因为 $S_{\mathrm{m,400K}}^{0} < S_{\mathrm{m},2}^{0} < S_{\mathrm{m,500K}}^{0}$，故 $400\mathrm{K} < T_2 < 500\mathrm{K}$

$$T_2 = 400\mathrm{K} + \frac{(217.97 - 213.872)\mathrm{J/(mol \cdot K)}}{(220.693 - 213.872)\mathrm{J/(mol \cdot K)}} \times 100\mathrm{K} = 460.08\mathrm{K}$$

$$\begin{aligned} H_{\mathrm{m},2} &= 11708.9\mathrm{J/mol} + (14767.3 - 11708.9)\mathrm{J/(mol \cdot K)} \times \frac{60.08\mathrm{K}}{100\mathrm{K}} \\ &= 13546.39\mathrm{J/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{\mathrm{t,s}} &= \frac{H_{\mathrm{m},1} - H_{\mathrm{m},2}}{M} \\ &= \frac{(9123.608 - 13546.39)\mathrm{J/(mol \cdot K)}}{32.0 \times 10^{-3}\mathrm{kg/mol}} = -138.21 \times 10^{3}\mathrm{J/kg} \end{aligned}$$

4-6 3 kg 空气从 $p_1 = 1\ \mathrm{MPa}$、$T_1 = 900\ \mathrm{K}$，可逆绝热膨胀到 $p_2 = 0.1\ \mathrm{MPa}$。设比热容为定值，绝热指数 $\kappa = 1.4$，求：

（1）终态参数 T_2 和 v_2；

（2）过程功和技术功；

（3）ΔU 和 ΔH。

解：（1） $T_2=\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}T_1=\left(\dfrac{0.1\text{MPa}}{1\text{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}}\times 900\text{K}=466.15\text{K}$

$$v_2=\frac{R_gT_2}{p_2}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 466.15\text{K}}{28.97\times 10^{-3}\text{kg/mol}\times 10^5\text{Pa}}=1.3379\text{m}^3/\text{kg}$$

（2） $c_V=\dfrac{5}{2}\dfrac{R}{M}=\dfrac{5}{2}\times\dfrac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.97\times 10^{-3}\text{kg/mol}}=718\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$

$$c_p=c_V+R_g=718\text{J/(kg}\cdot\text{K)}+\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.97\times 10^{-3}\text{kg/mol}}=1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$W=mc_V(T_1-T_2)=3\text{kg}\times 718\text{J/(kg}\cdot\text{K)}(900-466.15)\text{K}=933.21\text{kJ}$$

$$W_t=\kappa W=1.4\times 933.21\text{kJ}=1306.50\text{kJ}$$

（3） $\Delta U=-W=-933.21\text{kJ}$； $\Delta H=-W_t=-1306.50\text{kJ}$

4-7 同上题，比热容为变值，按空气热力性质表重新进行计算。

解：（1）查附表，$T_1=900\text{K}$ 时，$h_1=934.91\text{kJ/kg}$、$p_{r1}=76.576$

$$p_{r2}=\frac{p_2}{p_1}p_{r1}=\frac{0.1\text{MPa}}{1\text{MPa}}\times 76.576=7.6576$$

查得 $T_2=484.68\text{K}$

$$h_2=484.49\text{kJ/kg}+(494.76-484.49)\text{kJ/kg}\times 0.468=489.30\text{kJ/kg}$$

$$v_2=\frac{R_{g,a}T_2}{p_2}=\frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 484.68\text{K}}{0.1\times 10^6\text{Pa}}=1.391\text{m}^3/\text{kg}$$

（2） $W=m(u_1-u_2)=m(h_1-h_2)-mR_g(T_1-T_2)$

$$=3.0\text{kg}\times[934.91\text{kJ/kg}-489.30\text{kJ/kg}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(900-489.30)\text{K}]=983.22\text{kJ}$$

$$W_t=m(h_1-h_2)=3\text{kg}\times(934.91-489.30)\text{kJ/kg}=1336.82\text{kJ}$$

（3） $\Delta U=-W=-983.22\ \text{kJ}$，$\Delta H=-W_t=-1\,336.83\ \text{kJ}$

4-8 1kg 空气初态为 $p_1=0.5\ \text{MPa}$，$T_1=1\,000\ \text{K}$，按定熵过程：（1）变化到 $T_2=500\ \text{K}$，试确定 p_2；（2）变化到 $p_2=0.1\ \text{MPa}$ 确定 T_2。空气的 c_p 可由空气真实热容确

定

$$\frac{C_{p,\mathrm{m}}}{R}=3.653-1.337\times10^{-3}\{T\}_{\mathrm{K}}+3.294\times10^{-6}\{T\}_{\mathrm{K}}^{2}-1.913\times10^{-9}\{T\}_{\mathrm{K}}^{3}+0.276\ 3\times10^{-12}\{T\}_{\mathrm{K}}^{4}$$

将计算结果与利用气体性质表求出的值进行比较。

解：（1） $\Delta S=\int C_{p,\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}T}{T}-R\ln\frac{p_2}{p_1}=0$， $R\int_{1000\mathrm{K}}^{500\mathrm{K}}\frac{C_{p,\mathrm{m}}}{R}\frac{\mathrm{d}T}{T}=R\ln\frac{p_2}{p_1}$，所以

$$\int_{1000\mathrm{K}}^{500\mathrm{K}}[3.653\frac{1}{T}-1.337\times10^{-3}+3.294\times10^{-6}T-1.913\times10^{-9}T^2+0.2763\times10^{-12}T^3]\mathrm{d}T=\ln\frac{p_2}{0.5}$$

$$p_2=0.5\times\exp[3.653\ln\frac{500}{1000}-1.337\times10^{-3}\times(500-1000)+\frac{3.294\times10^{-6}}{2}\times(500^2-1000^2)-\frac{1.913\times10^{-9}}{3}\times(500^3-1000^3)+\frac{0.2763\times10^{-12}}{4}\times(500^4-1000^4)]=0.037\mathrm{MPa}$$

（2）同理有 $\int_{1000\mathrm{K}}^{T_2\mathrm{K}}C_{p,\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}T}{T}-R\ln\frac{p_2}{p_1}=0$

$$3.653\times\ln\frac{T_2}{1000}-1.337\times10^{-3}\times(T_2-1000)+\frac{3.294\times10^{-6}}{2}\times(T_2{}^2-1000^2)-\frac{1.913\times10^{-9}}{3}\times(T_2^3-1000^3)+\frac{0.2763\times10^{-12}}{4}\times(T2^4-1000^4)=\ln\frac{0.1}{0.5}$$

用迭代法得出 $T_2=657.4\ \mathrm{K}$，这时左侧=1.60908，右侧=1.60944。

利用气体性质表

（1）已知 $p_1=0.5\mathrm{MPa}$，$T_1=1000\mathrm{K}$，$T_2=500\mathrm{K}$。由附表，根据 T_1、T_2，查得 $p_{\mathrm{r}1}=115.97$，$p_{\mathrm{r}2}=8.5558$，所以

$$p_2=\frac{p_{\mathrm{r}2}}{p_{\mathrm{r}1}}p_1=\frac{8.5558}{115.97}\times0.5\mathrm{MPa}=0.03689\mathrm{MPa}$$

（2）已知 $p_1=0.5\mathrm{MPa}$，$T_1=1000\mathrm{K}$，$p_2=0.1\mathrm{MPa}$

$$p_{r2}=\frac{p_2}{p_1}p_{r1}=\frac{0.1\text{MPa}}{0.5\text{MPa}}\times 115.97=23.194$$

根据 p_{r2}，在附表中查得

$$T_2=650\text{K}+\frac{23.194-22.234}{23.528-22.234}\times 10\text{K}=657.419\text{K}$$

计算结果表明：用真实比热容式积分所得的结果与气体性质表得出的结果是一致的，后一方法方便得多。

4-9 某气缸中空气初始参数 $p_1=8\ \text{MPa}$，$t_1=1\ 300\ ^\circ\text{C}$，进行了一个可逆多变过程后，终态 $p_2=0.4\ \text{MPa}$，$t_2=400\ ^\circ\text{C}$，空气的气体常数 $R_g=0.287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，试按下列两种方法计算空气该过程是放热还是吸热？（1）按定值热容，$c_V=0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；（2）比热容是温度的线性函数 $\{c_V\}_{\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}=0.708\ 8+0.000\ 186\{t\}_{^\circ\text{C}}$。

解：由 p_1、T_1；p_2、T_2 确定多变指数

$$\frac{n-1}{n}=\frac{\ln\frac{T_2}{T_1}}{\ln\frac{p_2}{p_1}}=\frac{\ln\frac{673\ \text{K}}{1\ 573\ \text{K}}}{\ln\frac{0.4\ \text{MPa}}{8\ \text{MPa}}}=0.283\ 401，\quad n=1.3955$$

（1）
$$\Delta u=c_V(T_2-T_1)=0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(400-1300)\text{K}=-646.2\text{kJ/kg}$$

$$w=\frac{1}{n-1}R_g(T_1-T_2)$$
$$=\frac{1}{1.3955-1}\times 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1300-400)\text{K}=653.1\text{kJ/kg}$$

$$q=\Delta u+w=-646.2\text{kJ/kg}+653.1\text{kJ/kg}=6.9\text{kJ/kg}$$

$q>0$，所以是吸热过程。

（2）
$$\Delta u=\int_1^2 c_V\text{d}t=\int_{1300^\circ\text{C}}^{400^\circ\text{C}}(0.7088+0.000186t)\text{d}t$$
$$=0.7088\times(400-1300)+\frac{0.000186}{2}\times(400^2-1300^2)=-780.21\text{kJ/kg}$$

$$w=\frac{1}{n-1}R_g(T_1-T_2)$$
$$=\frac{1}{1.3955-1}\times 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1300-400)^\circ\text{C}=653.1\text{kJ/kg}$$

$$q = \Delta u + w = -780.21\text{kJ/kg} + 653.1\text{kJ/kg} = -127.1\text{kJ/kg}$$

$q < 0$，是放热过程。可见温度变化范围很大时按定值比热容计算误差太大。

4-10 一体积为 $0.15\ \text{m}^3$ 的气罐，内装有 $p_1 = 0.55\ \text{MPa}$，$t_1 = 38\ \text{°C}$ 的氧气，对氧气加热，其温度、压力都将升高，罐上装有压力控制阀，当压力超过 $0.7\ \text{MPa}$ 时阀门自动打开，放走部分氧气，使罐中维持最大压力 $0.7\ \text{MPa}$。问当罐中氧气温度为 285℃时，共加入多少热量？设氧气的比热容为定值，$c_V = 0.667\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p = 0.917\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

解：由附表查得氧气

$$M = 32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}，\ R_\text{g} = \frac{R}{M} = \frac{8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\ \text{kg/mol}} = 260\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$m_1 = \frac{p_1V}{R_\text{g}T_1} = \frac{0.55\times10^6\,\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(38+273)\text{K}} = 1.02\text{kg}$$

$$m_3 = \frac{p_3V}{R_\text{g}T_3} = \frac{0.7\times10^6\,\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(285+273)\text{K}} = 0.72\text{kg}$$

根据题意，1-2 是封密容器定容加热过程，$Q_V = m_1c_V(T_2 - T_1)$

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1}T_1 = \frac{0.7\text{MPa}}{0.55\text{MPa}}\times311\text{K} = 395.8\text{K}$$

$$Q_V = 1.02\times0.657\times(395.8-311) = 56.83\text{kJ}$$

2-3 是边加热，边放气的吸热放气过程，过程中维持容器中氧气压力不变，恒为 $0.7\ \text{MPa}$。罐中气体由 $m_2(=m_1)$ 减少到 m_3，温度由 T_2 升高到 T_3，任何一中间状态都满足 $p_3V = mR_\text{g}T$。

$$Q_p = \int_{T_2}^{T_3} mc_p\text{d}T = c_p\int\frac{p_3V}{R_\text{g}T}\text{d}T = \frac{c_p p_3 V}{R_\text{g}}\ln\frac{T_3}{T_2}$$

$$= \frac{917\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times0.7\times10^6\,\text{Pa}\times0.15\text{m}^3}{260\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}\ln\frac{558\text{K}}{395.8\text{K}} = 127.19\text{kJ}$$

$$Q = Q_V + Q_p = 56.83\text{kJ} + 127.19\text{kJ} = 184.02\text{kJ}$$

4-11 某理想气体在 $T-s$ 图上的四种过程如图 4-2 所示，试在 $p-v$ 图上画出相应的四个过程，并对每个过程说明 n 的范围，是吸热还是放热，是膨胀还是压缩过程？

解：过程 $\text{A}-1$，$-\infty < n_1 < 0$，压缩、放热；过程 $\text{A}-2$，$1 < n_2 < \kappa$，压缩、放热；

过程 A−3，$0<n_3<1$，膨胀、吸热；过程 A−4，$1<n_4<\kappa$，膨胀、吸热。

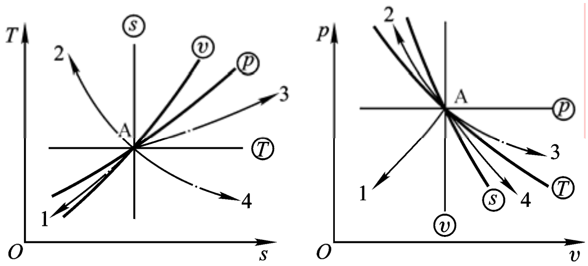


图 4-2 习题 4−11 附图

4−12 试将满足以下要求的多变过程表示在 $p-v$ 和 $T-s$ 图上（先标出四个基本热力过程）：（1）工质膨胀、吸热且降温；（2）工质压缩、放热且升温；（3）工质压缩，吸热，且升温；（4）工质压缩、降温且降压；（5）工质放热、降温且升压；（6）工质膨胀，且升压。

解：

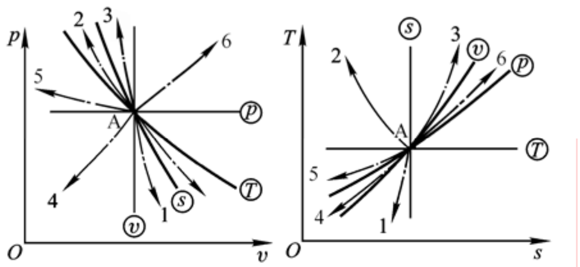


图 4−3 习题 4−12 附图

4−13 有 1kg 空气，初始状态为 $p_1=0.5\ \text{MPa}$，$t_1=500\ °\text{C}$，(1)绝热膨胀到 $p_2=0.1\ \text{MPa}$；(2)定温膨胀到 $p_2=0.1\ \text{MPa}$；(3)多变膨胀到 $p_2=0.1\ \text{MPa}$，多变指数 $n=1.2$。试将各过程画在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上，并计算 Δs_{1-2}。设过程可逆，且比热容 $c_V=718\ \text{J/(kg·K)}$。

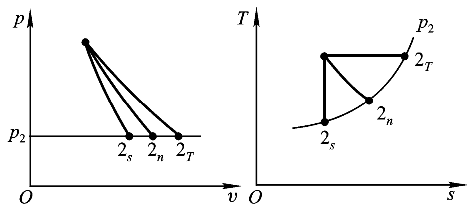


图 4−4 习题 4−13 附图

解：（1）绝热膨胀过程 $1-2_s$，$\delta q=0$，$\text{d}s=0$，所以 $\Delta s_{1-2_s}=0$。

（2）定温膨胀过程 $1-2_T$

$$\Delta s=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}-R_g\ln\frac{p_2}{p_1}=-R_g\ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$=-0.287\text{kJ/(kg·K)}\times\ln\frac{0.1\text{MPa}}{0.5\text{MPa}}=0.462\text{kJ/(kg·K)}$$

（3）多变膨胀过程 $1-2_n$

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = (500+273)\text{K}\times\left(\frac{0.1\text{MPa}}{0.5\text{MPa}}\right)^{\frac{0.2}{1.2}} = 591.13\text{K}$$

$$\begin{aligned}\Delta s &= c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}\\ &= (718+287)\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{591.13\text{K}}{773\text{K}} - 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.1\text{MPa}}{0.5\text{MPa}}\\ &= 192.3\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

4-14 试证明理想气体在 $T-s$ 图（图 4-5）上的任意两条定压线（或定容线）之间的水平距离相等，即求证：$\overline{14}=\overline{23}$。

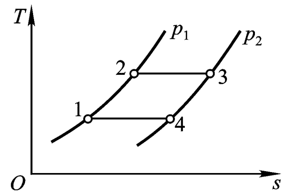


图 4-5 习题 4-14 附图

解：

$$\overline{14} = s_4 - s_1 = c_p \ln\frac{T_4}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$\overline{23} = s_3 - s_2 = c_p \ln\frac{T_3}{T_2} - R_g \ln\frac{p_3}{p_2}$$

因 $T_4 = T_1$，$c_p \ln\frac{T_4}{T_1} = 0$，所以 $\overline{14} = R_g \ln\frac{p_1}{p_4}$，同理 $T_3 = T_2$，$c_p \ln\frac{T_3}{T_2} = 0$，$\overline{23} = R_g \ln\frac{p_2}{p_3}$，而 $p_1 = p_2$，$p_3 = p_4$，所以

$$\overline{14} = \overline{23}$$

证毕。

4-15 1 mol 理想气体，从状态 1 经定压过程达状态 2，再经定容过程达状态 3，另一途径为经 1-3 直接到达 3（图-6）。已知 $p_1 = 0.1\ \text{MPa}$，$T_1 = 300\text{K}$，$v_2 = 3v_1$，$p_3 = 2p_2$，试证明：

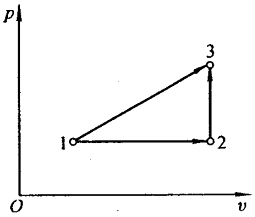


图 4-6 习题 4-15 附图

（1）$Q_{1-2} + Q_{2-3} \neq Q_{1-3}$；

（2）$\Delta S_{1-2} + \Delta S_{2-3} = \Delta S_{1-3}$。

证明：（1）由热力学第一定律

$$Q_{1-2} = U_2 - U_1 + W_{1-2} \qquad \text{(a)}$$

$$Q_{2-3} = U_3 - U_2 + W_{2-3} \qquad \text{(b)}$$

2-3 为定容过程，$W_{2-3} = 0$。

式（a）加式（b）得

$$Q_{1-2}+Q_{2-3}=U_3-U_1+W_{1-2} \tag{c}$$

而
$$Q_{1-3}=U_3-U_1+W_{1-3} \tag{d}$$

在 $p-v$ 图上，过程线下面积代表过程功，显见 $W_{1-3}>W_{1-2}$

或
$$W_{1-3}=\frac{1}{2}(p_1+p_3)(v_3-v_1)=\frac{p_1+2p_1}{2}(3v_1-v_1)=3p_1v_1$$

$$W_{1-2}=p_1(v_2-v_1)=p_1(3v_1-v_1)=2p_1v_1$$

所以
$$W_{1-3}>W_{1-2}$$

$$Q_{1-2}+Q_{2-3}\neq Q_{1-3}$$

证毕。

（2）1−2 为定压过程，$\Delta S_{1-2}=C_{p,\mathrm{m}}\ln\dfrac{T_2}{T_1}$，而 $\dfrac{T_2}{T_1}=\dfrac{v_2}{v_1}=3$，即

$$\Delta S_{1-2}=C_{p,\mathrm{m}}\ln 3\ \ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

2−3 为定容过程 $\Delta S_{1-2}=C_{V,\mathrm{m}}\ln\dfrac{T_3}{T_2}$，而 $\dfrac{T_3}{T_2}=\dfrac{p_3}{p_2}=2$，即

$$\Delta S_{2-3}=C_{V,\mathrm{m}}\ln 2\ \ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$\Delta S_{1-2}+\Delta S_{2-3}=C_{p,\mathrm{m}}\ln 3\ \ \mathrm{J/(mol\cdot K)}+c_{V,\mathrm{m}}\ln 2\ \ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

过程 1−3 熵变，$\Delta S_{1-3}=C_{V,\mathrm{m}}\ln\dfrac{p_3}{p_1}+C_{p,\mathrm{m}}\ln\dfrac{v_3}{v_1}$，而 $\dfrac{p_3}{p_1}=2$，$\dfrac{v_3}{v_1}=3$，故

$$\Delta S_{1-3}=(C_{V,\mathrm{m}}\ln 2+C_{p,\mathrm{m}}\ln 3)\ \ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

所以
$$\Delta S_{1-2}+\Delta S_{2-3}=\Delta S_{1-3}$$

证毕。

4−16 试导出理想气体定值比热容时多变过程熵差的计算式为

$$s_2-s_1=\frac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1} \tag{a}$$

或
$$s_2-s_1=\frac{(n-\kappa)R_{\mathrm{g}}}{(n-1)(\kappa-1)}\ln\frac{T_2}{T_1}\qquad (n\neq 1) \tag{b}$$

并根据式（a）对图 4-7 中三种压缩过程进行分析，它们的 n 是大于、等于 κ，还是小于 κ？它们各是吸热、绝热、还放热过程？

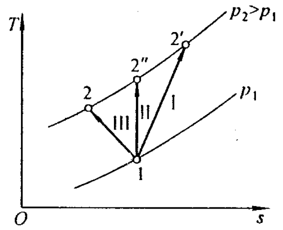


图 4-7 习题 4-16 附图

解 $$\Delta s_{1-2}=\int_1^2\frac{\delta q}{T}=\int_1^2\frac{c\mathrm{d}T}{T}$$

因 $c_n=\dfrac{n-\kappa}{n-1}c_V\,(n\neq 1)$，所以

$$\Delta s_{1-2}=\int_1^2\frac{n-\kappa}{n-1}c_V\frac{\mathrm{d}T}{T}=\frac{n-\kappa}{n-1}c_V\ln\frac{T_2}{T_1}$$

将 $c_V=\dfrac{1}{\kappa-1}R_{\mathrm{g}}$ 代入，得

$$\Delta s_{1-2}=\frac{n-\kappa}{(n-1)(\kappa-1)}R_{\mathrm{g}}\ln\frac{T_2}{T_1}\qquad(n\neq 1)$$

因 $\dfrac{T_2}{T_1}=\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$

$$\Delta s_{1-2}=\frac{n-\kappa}{(n-1)(\kappa-1)}R_{\mathrm{g}}\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}=\frac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1}$$

由图可见，过程 I 是熵增过程 $\Delta s>0$，过程线与 s 轴所包围的面积代表热量，是吸热过程，这时

$$\frac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1}>0$$

因 $p_2>p_1$，$\ln\dfrac{p_2}{p_1}>0$，$R_{\mathrm{g}}>0$，$(\kappa-1)>0$，所以 $\dfrac{n-\kappa}{n}>0$，即，$n>\kappa$ 或 $n<0$ 而 $\kappa>1$。因此，当 $n>\kappa$（这是时 n 必大于 0）或 $n<0$（这时 n 必小于 κ）时上式都成立。

过程 II 与 s 轴垂直，是定熵过程，故为可逆绝热过程

$$\frac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1}=0$$

由于 $p_2\neq p_1$，所以 $n=\kappa$。

过程III是熵减过程 $\Delta s<0$

$$\frac{n-\kappa}{n(\kappa-1)}R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_2}{p_1}<0$$

因 $p_2>p_1$，$\ln\dfrac{p_2}{p_1}>0$，$R_{\mathrm{g}}>0$，$(\kappa-1)>0$，所以 $\dfrac{n-\kappa}{n}<0$。两种可能：$n>\kappa$，$n<0$，由于

κ恒大于 1，这两条件不可能同时满足，这种情况不成立；唯有$n<\kappa$，$n>0$，即过程III的多变指数应满足$0<n<\kappa$。

4-17 气缸活塞系统的缸壁和活塞均为刚性绝热材料制成，A 侧为N_2，B 侧为O_2（图 4-8），两侧温度、压力、体积均相同：$T_{A1}=T_{B1}=300\ \text{K}$，$p_{A1}=p_{B1}=0.1\ \text{MPa}$，$V_{A1}=V_{B1}=0.5\ \text{m}^3$。活塞可在气缸中无磨擦地自由移动。A 侧的电加热器通电后缓缓和对N_2加热，直到$p_{A2}=0.22\ \text{MPa}$，设O_2和N_2均为理想气体，试按定值比热容计算：（1）T_{B2}和V_{B2}；（2）V_{A2}和T_{A2}；（3）Q和W_A（A 侧N_2对 B 侧O_2作出的过程功）；（4）ΔS_{O_2}和ΔS_{N_2}；（5）在$p-v$图及$T-s$图上定性地表示 A、B 两侧气体所进行的过程；（6）A 侧进行的是否是多变过程，为什么？

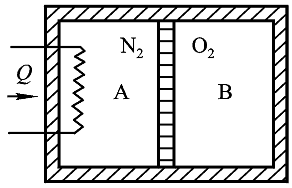


图 4-8 题 4-17 附图

解：（1）已知：$V_{A1}=V_{B1}=0.5\text{m}^3$，$p_{A1}=p_{A2}=0.1\text{MPa}$，$T_{A1}=T_{B1}=300\text{K}$，$p_{A2}=0.22\text{MPa}$，活塞是自由的，故$p_{B2}=p_{A2}=0.22\text{MPa}$。

由附表可得$M_{N_2}=28.0\times10^{-3}\text{kg/mol}$，$M_{O_2}=32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}$

$$R_{gN_2}=\frac{R}{M_{N2}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=296.84\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$R_{gO_2}=\frac{R}{M_{O_2}}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}=259.83\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_{V,N_2}=\frac{5}{2}\frac{R}{M_{N_2}}=\frac{5}{2}\times\frac{8.1345\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\text{kg/mol}}=742.1\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$c_{V,O_2}=\frac{5}{2}\frac{R}{M_{O_2}}=\frac{5}{2}\times\frac{8.1345\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{32.0\times10^{-3}\text{kg/mol}}=649.6\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$m_A=\frac{p_{A1}V_{A1}}{R_{g,N_2}T_{A1}}=\frac{0.1\times10^6\text{Pa}\times0.5\text{m}^3}{296.84\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=0.5615\text{kg}$$

$$m_B=\frac{p_{B1}V_{B1}}{R_{g,O_2}T_{B_2}}=\frac{0.1\times10^6\text{Pa}\times0.5\text{m}^3}{259.83\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=0.6414\text{kg}$$

B 内进行可逆绝热过程

$$T_{B,2}=\left(\frac{p_{B,2}}{p_{B,1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\left(\frac{0.22\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}\times 300\text{K}=375.8\text{K}$$

$$V_{B,2}=\frac{m_B R_{g,O_2}T_{B,2}}{p_{B_2}}=\frac{0.6414\text{kg}\times 259.83\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 375.8\text{K}}{0.22\times 10^6\text{Pa}}=0.2847\text{m}^3$$

（2） $$V_{A,2}=1-V_{B,2}=1\text{m}^3-0.2847\text{m}^3=0.7153\text{m}^3$$

$$T_{A2}=\frac{p_{A,2}V_{A,2}}{R_{g,N_2}m_A}=\frac{0.22\times 10^6\text{Pa}\times 0.7153\text{m}^3}{296.84\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 0.5615\text{m}^3}=944.15\text{K}$$

（3）取 A+B 为热力系

$$Q=\Delta U_A+\Delta U_B=m_A c_{V,N_2}(T_{A2}-T_{A1})+m_B c_{V,O_2}(T_{B2}-T_{B1})$$
$$=0.5615\text{kg}\times 742.1\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(944.15-300)\text{K}+0.6414\text{kg}\times$$
$$649.4\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(375.8-300)\text{K}=299.99\text{kJ}$$

取 B 为热力系

$$W_B=-\Delta U_B=-m_B c_{V,O_2}(T_{B,2}-T_{B,1})$$
$$=-0.6414\text{kg}\times 0.6496\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(375.8-300)\text{K}=-31.58\text{kJ}$$

$$W_A=-W_B=31.58\text{kJ}$$

（4）由题意

$$\Delta S_{O_2}=m_B\left(c_{p,O_2}\ln\frac{T_{B2}}{T_{B1}}-R_{g,O_2}\ln\frac{p_{B2}}{p_{B1}}\right)=0$$

$$c_{p,N_2}=c_{V,N_2}+R_{g,N_2}$$
$$=0.7421\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+0.29684\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=1.03894\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\Delta S_{N_2}=\left[c_{p,N_2}\ln\frac{T_{A2}}{T_{A1}}-R_{g,N2}\ln\frac{p_{A2}}{p_{A1}}\right]m_A$$
$$=\left[1.0389\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{944.5\text{K}}{300\text{K}}-0.2968\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.22\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right]\times$$
$$0.5615\text{kg}=0.5374\text{kJ/K}$$

(5)、(6)略

4-18 空气装在如图 4-9 所示的绝热刚性气缸活塞装置内，气缸中间有一块带有小孔的导热隔板，两活塞联动，故活塞移动时装置内总体积不变。设活塞移动时外界机器以对系统作功 40 kJ，活塞与隔板静止后，系统恢复平衡。已知初始状态，$p_1=2.0\ \text{MPa}$，$T_1=400\ \text{K}$，空气总质量 $m=2\ \text{kg}$。设比热容为定值，$c_V=0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。求：

（1）终态空气的温度 T_2 和压力 p_2；

（2）系统的熵变 ΔS_{1-2}，是定熵过程吗？

（3）在 $T-s$ 图上示意画出该过程。

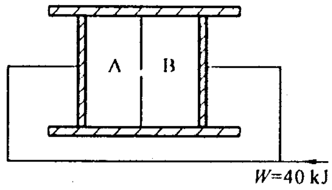


图 4-9 题 4-18 附图

解：（1）

$$V_{A1}=V_{B1}=\frac{m_A R_g T_1}{p_1}=\frac{1\text{kg}\times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 400\text{K}}{2\times 10^6\,\text{Pa}}=0.0574\text{m}^3$$

取 A+B 为热力系

$$W=-(\Delta U_A+\Delta U_B)=(U_{A,1}+U_{B,1})-2U_2=2c_V(T_1-T_2)$$

$$T_2=T_1+\frac{W}{mc_V}=400\text{K}+\frac{-40\text{kJ}}{2\text{kg}\times 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}=427.9\text{K}$$

$$p_2=\frac{mR_gT_2}{2V_A}=\frac{2\text{kg}\times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 427.9\text{K}}{2\times 0.0574\text{m}^3}=2.139\times 10^6\,\text{Pa}=2.139\text{MPa}$$

（2）过程中系统体积不变

$$\Delta S=m\left(c_V\ln\frac{T_2}{T_1}+R_g\ln\frac{V_2}{V_1}\right)=mc_V\ln\frac{T_2}{T_1}$$
$$=2\text{kg}\times 718\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{427.9\text{K}}{400\text{K}}=0.0968\text{kJ/K}>0$$

所以不是定熵过程。

（3）略

4-19 一孤立系统由带有隔板的气缸组成，隔板将气缸两部分，一侧装有理想气体氦，气体常数 $R_g=2\ 077\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，比热容 $c_V=3\ 116\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，另一侧完全真空，内装有一弹簧，弹性系数 $k=900\ \text{N/m}$，弹簧的自由长度为 0.3 m，弹性力 $F=kx$，x 表示伸长或压缩的长度，初始位置如图 4-19 所示。初态为 $t_1=40\ °\text{C}$，$V_1=10^{-4}\ \text{m}^3$，$p_1=0.14\ \text{MPa}$，弹簧长度为 0.25 m。开始时隔板由销子固定，现拔去销子，则气体和弹簧达到新的力平衡。假定不计隔板质量，且隔板是绝热的，面积 $A=0.001\ \text{m}^2$，且不计移动磨擦阻力。求：力平衡时气体的压力和温度，状态变化前后气体的熵变，是否是定熵过程？试在 $T-s$ 图上示意画出该过程。

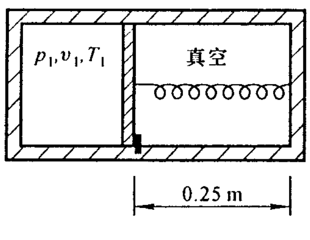


图 4-10 题 4-19 附图

解：已知 $p_1=0.14\text{MPa}$，$T_1=313\text{K}$，$V_1=10^{-4}\text{m}^3$，$k=900\text{N/m}$，自由长度 0.3m，气体的参数 $R_g=2.077\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$M=4.003\times10^{-3}\text{kg/mol}$，$c_V=3.116\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

据题意，$x_1=0.3\text{m-}0.25\text{m=}0.05\text{m}$

$$m=\frac{p_1V_1}{R_gT_1}=\frac{0.14\times10^6\text{Pa}\times10^{-4}\text{m}^3}{2077\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times313\text{K}}=0.2154\times10^{-4}\text{kg}$$

初态弹簧压力

$$p_0=\frac{F_1}{A}=\frac{kx_1}{A}=\frac{900\text{N/m}\times0.05\text{m}}{0.001\text{m}^2}=4.5\times10^4\text{Pa}=0.045\text{MPa}<p_1$$

设过程中间状态氦气体积为 V，则

$$p=\frac{F}{A}=\frac{kx}{A}=\frac{k}{A}\left[\frac{V-V_1}{A}+x_1\right]$$

代入数据得

$$\{p\}_{\text{Pa}}=9\times10^8\{V\}_{\text{m}^3}-4.5\times10^4 \tag{a}$$

取氦气侧为热力系，是绝热系，能量方程 $\delta W=-\mathrm{d}U$，故

$$p\mathrm{d}V=-mc_V\mathrm{d}T$$

将式（a）及相关数据代入，得

$$(9\times10^8V-4.5\times10^4)\mathrm{d}V=-0.2154\times10^{-4}\times3.116\mathrm{d}T$$

积分

$$\int_{10^{-4}\text{m}^3}^{V_2}(9\times10^8V-4.5\times10^4)\mathrm{d}V=-\int_{313\text{K}}^{T_2}0.0671\mathrm{d}T$$

得

$$T_2=313-67.064\times10^8V_2^{\ 2}+67.064\times10^4V_2 \tag{b}$$

将式(a)、(b)代入状态方程 $\dfrac{p_2V_2}{R_gT_2}=m$，得

$$\frac{(9\times10^8V_2-4.5\times10^4)V_2}{2077(313-67.064\times10^8V_2^{\ 2}+67.064\times10^4V_2)}=0.2154\times10^{-4}$$

经整理得

$$12\times10^8V_2^{\ 2}-7.5\times10^4V_2-14=0$$

$$V_2=1.4369\times10^{-4}\text{m}^3$$

代入式（a）和式（b），解得

$$p_2 = 9\times10^8 \times 1.4369\times10^{-4} - 4.5\times10^4 = 8.4323\times10^4\,\text{Pa} = 0.0843\text{MPa}$$

$$T_2 = 313 - 67.064\times10^8 \times (1.4369\times10^{-4})^2 \times 67.064\times10^4 \times 1.4369\times10^{-4}$$
$$= 270.89\text{K}$$

$$\Delta S_{1-2} = \left[c_V \ln\frac{T_2}{T_1} + R_g \ln\frac{V_2}{V_1}\right]m$$
$$= \left[3116\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{270.9\text{K}}{313\text{K}} + 2077\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{1.4369\times10^{-4}\,\text{m}^3}{10^{-4}\,\text{m}^3}\right]\times$$
$$0.2154\times10^{-4}\,\text{kg} = 0.0652\times10^{-4}\,\text{kJ/K} > 0$$

是非定熵绝热过程。

4−20 一竖直气缸截面积 $A = 6\ 450\ \text{mm}^2$，内置一重 100N 活塞，通过管道、阀门与气源相通。如图 4−11，起初活塞在气缸底部，打开阀门空气缓缓流入，当活塞上移至 $L = 0.6\ \text{m}$ 时阀门关闭，这时气缸内空气温度为 30 ℃，已知输气管中空气参数保持一定，$p_L = 0.15\ \text{MPa}$，$t_L = 90\ °\text{C}$。活塞与缸壁间无磨擦损失，大气压力 $p_0 = 0.101\ 3\ \text{MPa}$，已知 $c_V = 718\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p = 1005\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。求：

（1）活塞上升过程中气缸内气体压力 p；

（2）对外作出的功 W；

（3）过程中气体对外作出的有用功 W_u；

（4）吸热量 Q。

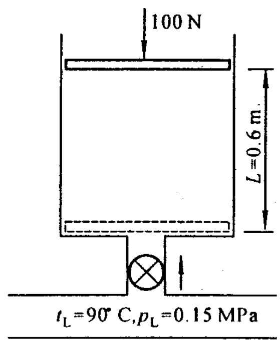


图 4−11 题 4−20 附图

解：（1）气缸内气体压力

$$p = p_0 + \frac{F}{A} = 0.1013\times10^6\,\text{Pa} + \frac{100\text{N}}{6450\times10^{-6}\,\text{m}^2} = 0.1168\text{MPa}$$

（2）空气对外作功

$$W = \int_1^2 p\text{d}V = p\Delta V = 0.1168\times10^6\,\text{Pa}\times(6450\times10^{-6}\,\text{m}^2\times0.6\text{m}) = 452\text{J}$$

（3）输出的有用功

$$W_u = FL = 100\text{N}\times0.6\text{m} = 60\text{J}$$

（4）由非稳定流动能量方程

$$\delta Q = \mathrm{d}U + h_{\mathrm{in}}\delta m_{\mathrm{in}} + \delta W_{\mathrm{i}}$$

因 $\delta m_{\mathrm{in}} = \mathrm{d}m$，$m_2 = m_{\mathrm{in}}$，所以

$$Q = m_2 c_V T_2 - c_p T_{\mathrm{in}} m_{\mathrm{in}} + W_{\mathrm{i}} = m_2 c_V T_2 - m_2 c_p T_{\mathrm{in}} + W_{\mathrm{i}}$$

因 $T_2 = 303\mathrm{K}$，$T_{\mathrm{in}} = 363\mathrm{K}$，$R_{\mathrm{g}} = 287\mathrm{J/(kg\cdot K)}$，$c_v = 718\mathrm{J/(kg\cdot K)}$，$c_p = 1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}$ 故

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_{\mathrm{g}} T_2} = \frac{0.1168\times10^6\,\mathrm{Pa}\times6450\times10^{-6}\,\mathrm{m}^2\times0.6\mathrm{m}}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times303\mathrm{K}} \doteq 0.0052\mathrm{kg}$$

$$Q = 0.0052\mathrm{kg}\times[718\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times303\mathrm{K} - 1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times363\mathrm{K}] + 452\mathrm{J}$$
$$= -313\mathrm{J}$$

4−21 容器 A 中装有 0.2 kg 压力为 0.07 MPa、温度为 77 ℃ 的一氧化碳 CO。容器 B 中装有 0.8 kg 压力、温度为 0.12 MPa、温度为 27 ℃ 的 CO（图 4−12）。A 和 B 的壁面均为透热壁面，之间用管道和阀门相通，打开阀门，CO 气体由 B 流向 A，若压力平衡时温度同为 $t_2 = 42$ ℃，CO 为理想气体，过程中平均比热容 $c_V = 745\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$。试求：平衡时终压 p_2 和过程吸热量 Q。

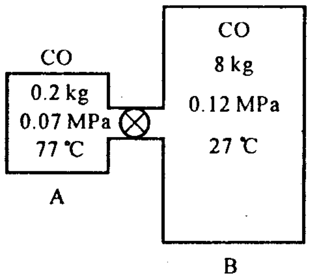


图 4−12 题 4−21 附图

解：由附表查得 $M_{\mathrm{CO}} = 28.01\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}$

$$R_{\mathrm{g}} = \frac{R}{M} = \frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{28.01\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}} = 297\mathrm{J/(kg\cdot K)}$$

$$V_{\mathrm{A}} = \frac{m_{\mathrm{A1}} R_{\mathrm{g}} T_{\mathrm{A1}}}{p_{\mathrm{A1}}} = \frac{0.2\mathrm{kg}\times297\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times350\mathrm{K}}{0.07\times10^6\,\mathrm{Pa}} = 0.297\mathrm{m}^3$$

$$V_{\mathrm{B}} = \frac{m_{\mathrm{B1}} R_{\mathrm{g}} T_{\mathrm{B1}}}{p_{\mathrm{B1}}} = \frac{0.8\mathrm{kg}\times297\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times300\mathrm{K}}{0.12\times10^6\,\mathrm{Pa}} = 0.594\mathrm{m}^3$$

取 A+B 为热力系，总质量不变

$$m = m_{\mathrm{A1}} + m_{\mathrm{B1}} = 0.2\mathrm{kg} + 0.8\mathrm{kg} = 1\mathrm{kg}$$

总容积

$$V = V_{\mathrm{A}} + V_{\mathrm{B}} = 0.297\mathrm{m}^3 + 0.594\mathrm{m}^3 = 0.891\mathrm{m}^3$$

CO 为理想气体，初终态都是平衡态，终态压力

$$p_2 = \frac{mR_g T_2}{V} = \frac{1\text{kg} \times 297\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 315\text{K}}{0.891\text{m}^3} = 0.105\text{MPa}$$

据闭口系能量方程 $Q = \Delta U + W$，不作外功 $W = 0$，故

$$Q = \Delta U = U_2 - U_1 = (m_1 + m_2)c_V T_2 - (m_{A1}c_V T_{A1} + m_{B1}c_V T_{B1})$$
$$= (1\text{kg} \times 315\text{K} - 0.2\text{kg} \times 350\text{K} + 0.8\text{kg} \times 300\text{K}) \times 745\text{J/(kg}\cdot\text{K)} = 3725\text{J}$$

4−22 有一刚性绝热容器被绝热隔板一分为二，$V_A = V_B = 28\times10^{-3}\ \text{m}^3$，A 中装有 0.7 MPa，65 °C 的氧气，B 为真空，见图 4−13。打开安装在隔板上的阀门，氧气自 A 流向 B，两侧压力相同时关闭阀门。氧气的 $c_p = 0.920\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，试求：

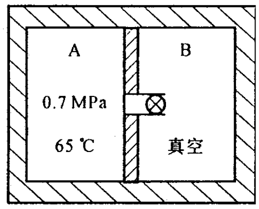


图 4−13 题 4−22 附图

（1）终压 p_2 和两侧终温 T_{A2} 和 T_{B2}；

（2）过程前后氧气的熵变 ΔS_{1-2}，

解：（1）氧气气体常数 $R_g = \dfrac{R}{M} = \dfrac{8.3145\text{kJ/(mol}\cdot\text{K)}}{32\times10^{-3}\text{kg/mol}} = 259.8\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$

初始时 A 侧 O_2 的质量

$$m_{A1} = \frac{p_{A1}V_A}{R_g T_{A1}} = \frac{0.7\times10^6\text{Pa}\times28\times10^{-3}\text{m}^3}{259.8\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(65+273)\text{K}} = 0.2232\text{kg}$$

终态时两侧 O_2 质量为

$$m_{A2} + m_{B2} = \frac{p_{A2}V_A}{R_g T_{A2}} + \frac{p_{B2}V_B}{R_g T_{B2}} = m_{A1} = 0.2232\text{kg}$$

考虑到终态压力 $p_{A2} = p_{B2}$，所以

$$p_{A2}\left(\frac{1}{T_{A2}} + \frac{1}{T_{B2}}\right) = 2.07\times10^3 \tag{a}$$

A 侧为绝热放气，其中气体参数变化规律与等比熵过程相同

$$p_{A2} = \left(\frac{T_{A2}}{T_{A1}}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} p_{A1} = \frac{T_{A2}{}^{3.5}}{338^{3.5}}\times0.7\times10^6 = 0.9860\times10^{-3}T_{A2}{}^{3.5} \tag{b}$$

取 A 和 B 为热力系，是不作外功的绝热闭口系 $\Delta U = 0$，即 $m_2u_2 - m_1u_1 = 0$，故

$$m_{A2}c_V T_{A2} + m_{B2}c_V T_{B2} = m_{A1}c_V T_{A1}$$

$$m_{A2}T_{A2} + (0.2232 - m_{A2})T_{B2} = 0.2232 \times 338$$

整理得

$$4.48m_{A2}(T_{A2} - T_{B2}) + T_{B2} = 338 \tag{c}$$

$$m_{A2} = \frac{p_{A2}V_A}{R_g T_{A2}} = \frac{28\times10^{-3}p_{A2}}{259.8T_{A2}}$$

将式(b)代入得

$$m_{A2} = \frac{0.9860\times10^{-3}T_{A2}{}^{3.5}\times28\times10^{-3}}{259.8T_{A2}} = 0.10627\times10^{-6}T_{A2}{}^{2.5} \tag{d}$$

采用迭代方法联立求解式（a）、（b）、（c）、（d）即可求得 p_{A2}、T_{A2}、T_{B2}、m_{A2}。

设 $T_{A2} = 277.3\text{K}$，则由式（b）得

$$p_{A2} = 0.35\text{MPa}；$$

由式（d）得

$$m_{A2} = 0.13608\text{kg}$$

$$m_{B2} = m - m_{A2} = 0.2232\text{kg} - 0.13608\text{kg} = 0.08712\text{kg}$$

由式（a）得 $T_{B2} = 432.72\text{K}$

代入式（c），左侧=337.97，故 T_{A2} 选择合适。

（2）因 $p_{A2} = p_{B2}$，故据理想气体的熵变计算式有

$$\begin{aligned}
\Delta S_{1-2} &= m_{A2}\left(c_p \ln\frac{T_{A2}}{T_{A1}} - R_g \ln\frac{p_{A2}}{p_{A1}}\right) + m_{B2}\left(c_p \ln\frac{T_{B2}}{T_{A1}} - R_g \ln\frac{p_{B2}}{p_{A1}}\right) \\
&= \left(m_{A2}\ln\frac{T_{A2}}{T_{A1}} + m_{B2}\ln\frac{T_{B2}}{T_{A1}}\right)c_p - (m_{A2}+m_{B2})R_g \ln\frac{p_{A2}}{p_{A1}} \\
&= \left(0.13608\text{kg}\times\ln\frac{277.3\text{K}}{338\text{K}} + 0.08712\text{kg}\times\ln\frac{432.72\text{K}}{338\text{K}}\right)\times \\
&\qquad 920\text{J/(kg}\cdot\text{K)} - 0.2232\text{kg}\times259.8\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.35\times10^6\text{Pa}}{0.7\times10^6\text{Pa}} \\
&= 35.2\text{J/K}
\end{aligned}$$

4−23 大容器内水蒸气 $p_B = 1.5\ \text{MPa}$，$t_B = 320\ °\text{C}$，比焓 $h_B = 3\,080.9\ \text{kJ/kg}$，通过阀门与汽轮机连接，汽轮机排汽流入 $V = 0.6\ \text{m}^3$ 的小容器，如图 4−14 所示。初始时小容器内真空。打开阀门向小容器充入蒸汽，直到 $p_2 = 1.5\ \text{MPa}$，$t_2 = 400\ °\text{C}$ 后关闭阀门，这时 $v_2 = 0.229\ \text{m}^3/\text{kg}$、$u_2 = 2\,911.5\text{kJ/kg}$，充气过程为绝热的，汽轮机中也按绝热膨胀，且不计动能差，位能差的影响。设大容器内蒸汽参数保持不变，终态时汽轮机和连接管道内蒸汽质量可不计。求：

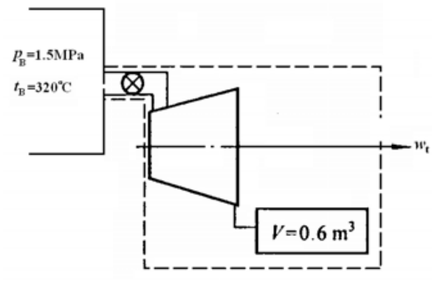


图 4−14 题 4−23 附图

（1）汽轮机作出的功 W_t；

（2）移走汽轮机，蒸汽直接充入小容器，当小容器内蒸汽压力为1.5 MPa 时终温是否仍为 400℃？

解：（1）取图中虚线为控制体积，是绝热系，$q_{CV} = 0$，该控制体积只有一股水蒸气流入，流出 $\delta m_{out} = 0$，所以能量守恒式 $\delta Q = \mathrm{d}U + h_{out}\delta m_{out} - h_{in}\delta m_{in} + \delta W_i$ 可简化为

$$\delta W_i = \mathrm{d}U - h_{in}\mathrm{d}m$$

积分得

$$W_i = (m_2u_2 - m_1u_1) - h_{in}(m_2 - m_1)$$

又因小容器内初态为真空，$m_1 = 0$，故有

$$W_i = m_2(h_B - u_2) = \frac{V}{v_2}(h_B - u_2)$$

$$= \frac{0.6\text{m}^3}{0.229\text{m}^3/\text{kg}}(3080.9\text{kJ/kg} - 2911.5\text{kJ/kg}) = 443.84\text{kJ}$$

（2）移走汽轮机，蒸汽直接流入小容器，控制体积不作功，这时能量方程可简化得出

$$u_2 = h_B = 3080.9\text{kJ/kg}$$

显然，这时小容器内蒸汽状态与前不同，查得终温约为504°C。

4−24 空气瓶内装有 $p_1 = 3.0\ \text{MPa}$，$T_1 = 296\ \text{K}$ 的高压空气，可驱动一台小型气轮机，用作发动机的起动装置，如图 4−15 所示。要求该气轮机能平均产生 5kW 的输出功率，并持续

半分钟而瓶内空气压力不得低于 0.3MPa 。设气轮机中进行的是可逆绝热膨胀过程，气轮机出口排气压力保持一定 $p_b = 0.1\ \text{MPa}$ 。空气瓶是绝热的，不计算管路和阀门的摩阻损失。问空气瓶的体积 V 至少要多大？

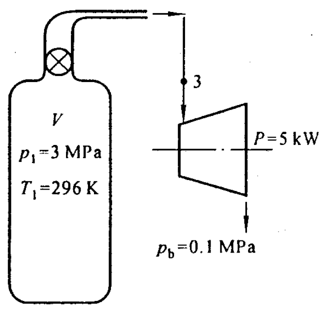


图 4-15 题 4-24 附图

解：初态气瓶内空气质量

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = \frac{3.0\times10^6 V}{287\times(23+273)} = 35.314V$$

打开阀门绝热放气，瓶中剩余气体的参数按等比熵过程变化，由 p_1、T_1 变化到 p_2、T_2

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 = \left(\frac{0.3\text{MPa}}{3.0\text{MPa}}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} \times 296\text{K} = 153.31\text{K}$$

终态气瓶内空气质量

$$m_2 = \frac{p_2 V}{R_g T_2} = \frac{0.3\times10^6 V}{287\times153.31} = 6.818V$$

流出的空气

$$-\Delta m = m_1 - m_2 = 35.314V - 6.818V = 28.496V$$

放气过程气瓶内气体任何中间状态都满足 $T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1$，若不计磨擦损失，气轮机入口参数与气瓶内放气参数 p_2、T_2 时刻相同。任一时刻气轮机内 $T_4 = T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$，气轮机入口参数为 p_2、T_2，气轮机出口参数为 $p_4(=0.1\text{MPa})$ 和 T_4

$$T_4 = T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_2\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1\left(\frac{p_4}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 112.01\text{K}$$

即，整个放气过程气轮机出口压力、温度保持为 0.1MPa 、112.01K 。

取气瓶和气轮机一起为热力系，是非稳定流动开口系，能量方程

$$\delta Q = \text{d}U + h_{\text{out}}\delta m_{\text{out}} - h_{\text{in}}\delta m_{\text{in}} + \delta W_{\text{i}}$$

因绝热 $\delta Q = 0$ ，无空气流入， $\delta m_{\text{in}} = 0$，$\delta m_{\text{out}} = -\text{d}m$ 。对上式从 0~30 秒积分，则

$$0 = m_2 c_V T_2 - m_1 c_V T_1 - c_p T_4 \Delta m + W_{\text{i}}$$

即
$$m_2T_2 - m_1T_1 - \kappa T_4\Delta m + \frac{W_i}{c_V} = 0$$

据题意，$W_i = 5\text{kJ/s} \times 30\text{s} = 150\text{kJ}$，空气的 $c_V = 0.718\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$，故

$$-35.314 \times 296V + 6.818 \times 153.31V - 1.4 \times 28.496 \times 112.01V + \frac{150}{0.718} = 0$$

$$V = 0.04237\text{m}^3 \approx 0.043\text{m}^3$$

4−25 绝热刚性容器内有一绝热的不计重量的自由活塞，初态活塞在容器底部，A 中装有 $p_{A1} = 0.1\ \text{MPa}$，$T_{A1} = 290\ \text{K}$ 的 N_2，体积 $V_{A1} = 0.12\ \text{m}^3$，见图 4−16。打开阀门，$N_2$ 缓缓充入，活塞上升到压力平衡的位置，此时 $p_{A2} = p_{B2} = p_L$，然后关闭阀门。输气管中 N_2 参数保持一定，为 $p_L = 0.32\ \text{MPa}$，$T_L = 330\ \text{K}$。求：终温 T_{A2}、T_{B2}；A 的体积 V_{A2}；及充入的氮气量 m_{B2}。

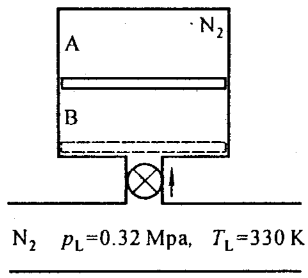


图 4−16 题 4−25 附图

解：取 A 为热力系，是闭口热力系，其中进行可逆绝热压缩

$$T_{A2} = \left(\frac{p_{A2}}{p_{A1}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_{A1} = \left(\frac{0.32\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \times 290\text{K} = 404.3\text{K}$$

$$\frac{V_{A2}}{V_{A1}} = \left(\frac{p_{A1}}{p_{A2}}\right)^{\frac{1}{\kappa}}，\quad V_{A2} = \left(\frac{0.1\text{MPa}}{0.32\text{MPa}}\right)^{\frac{1}{1.4}} \times 0.12\text{m}^3 = 0.0523\text{m}^3$$

取 B 为控制体积，是变质量系系统，其能量方程

$$\delta Q = \text{d}U - h_{in}\delta m_{in} + \delta W_B$$

据题意，$\delta Q = 0$、$\delta m_{in} = \text{d}m_B$，故

$$0 = U_{B,2} - U_{B,1} - h_L(m_{B2} - m_{B1}) + W_B$$

$$m_{B,2}c_V T_{B,2} - h_2 m_{B,2} + W_B = 0 \tag{a}$$

$$V_{B,2} = V - V_{A,2} - \left[1 - \left(\frac{p_{A1}}{p_L}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right]V \tag{b}$$

$$m_{\mathrm{B,2}}=\frac{p_{\mathrm{B,2}}V_{\mathrm{B,2}}}{R_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{B,2}}}=\frac{p_{\mathrm{L}}V_{\mathrm{B,2}}}{R_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{B,2}}} \tag{c}$$

$$W_{\mathrm{B}}=-W_{\mathrm{A}}=-\frac{p_{\mathrm{A,1}}V_{\mathrm{A,1}}}{\kappa-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_{\mathrm{A,1}}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \tag{d}$$

将式（b）、（c）、（d）代入式（a），经整理后得

$$T_{\mathrm{B,2}}=\frac{\kappa T_{\mathrm{L}}\left[1-\left(\dfrac{p_{\mathrm{A1}}}{p_{\mathrm{L}}}\right)^{\frac{1}{\kappa}}\right]}{1-\dfrac{p_{\mathrm{A1}}}{p_{\mathrm{L}}}}=\frac{1.4\times330\mathrm{K}\times\left[1-\left(\dfrac{0.1\mathrm{MPa}}{0.32\mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1}{1.4}}\right]}{1-\dfrac{0.1\mathrm{MPa}}{0.32\mathrm{MPa}}}=379.22\mathrm{K}$$

$$m_{\mathrm{B,2}}=\frac{p_2V_{\mathrm{B,2}}}{R_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{B,2}}}=\frac{0.32\times10^6\,\mathrm{Pa}\times0.0677\mathrm{m}^3}{297\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times379.22\mathrm{K}}=0.1924\mathrm{kg}$$

4−26 $V=8\ \mathrm{m}^3$ 的刚性容器中装有 0.64 MPa、48 ℃ 的 N_2，容器上方的阀门设计成使 N_2 以固定的质量流量排出，$q_m=0.032\ \mathrm{kg/s}$，见图 4−17。已知热流量 $q_Q=5.6\ \mathrm{kW}$，且保持恒定。N_2 按理想气体处理，比热容取定值，$c_V=0.743\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，$c_p=1.040\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。试求：

（1）10 min 后容器内 N_2 的温度 T_2 和压力 p_2；

（2）容器内空气温度达 120℃所需的时间（min）。

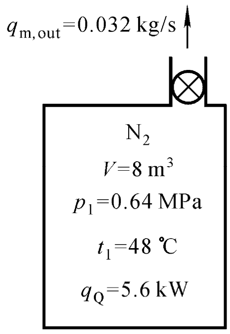


图 4−17 题 4−26 附图

解：（1）该题为定质流量，定热流率的放气问题。由附表查得

$$M=28.01\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol},\quad R_{\mathrm{g}}=\frac{R}{M}=\frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{28.01\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}}=297\mathrm{J/(kg\cdot K)}$$

$$m_1=\frac{p_1V}{R_{\mathrm{g}}T_1}=\frac{0.64\times10^6\,\mathrm{Pa}\times8\mathrm{m}^3}{297\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times321\mathrm{K}}=53.70\mathrm{kg}$$

若以 τ 表示时间，则留在容器内 N_2 的质量：

$$m=m_1-q_m\tau=53.70-0.032\tau \tag{a}$$

取容器为控制休积，考虑到 $\delta W_{\mathrm{i}}=0$、$\delta m_{\mathrm{in}}=0$，能量方程为

$$\delta Q=\mathrm{d}U_{\mathrm{CV}}+h_{\mathrm{out}}\delta m_{\mathrm{out}}$$

因 $h_{out} = h$，$\delta m_{out} = -\mathrm{d}m$

所以 $\delta Q = m\mathrm{d}u + u\mathrm{d}m - h\mathrm{d}m = m\mathrm{d}u - pv\mathrm{d}m = mc_V \mathrm{d}T + R_g T\delta m_{out}$

$$q_Q = mc_V \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\tau} + R_g T q_m \tag{b}$$

$$5.6 = (53.70 - 0.032\tau)0.743\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}\tau} + 0.297\times 0.032T$$

分离变量

$$\frac{\mathrm{d}\tau}{39.8991 - 0.023776\tau} = \frac{\mathrm{d}T}{5.6 - 0.009504T} \tag{c}$$

积分后解得 $T_2 = 364.48\mathrm{K}$。

$$m_2 = m_1 - q_m\tau = 53.70\mathrm{kg} - 0.032\mathrm{kg/s}\times 600\mathrm{s} = 34.5\mathrm{kg}$$

$$p_2 = \frac{m_2 R_g T_2}{V}$$
$$= \frac{34.5\mathrm{kg}\times 297\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times 364.48\mathrm{K}}{8\mathrm{m}^3} = 466830.54\mathrm{Pa} = 0.467\mathrm{MPa}$$

（2）（c）式积分

$$\int_0^\tau \frac{\mathrm{d}\tau}{39.8991 - 0.023776\tau} = \int_{321\mathrm{K}}^{393\mathrm{K}} \frac{\mathrm{d}T}{5.6 - 0.009504T}$$
$$\frac{1}{0.023776}\ln\frac{39.8991 - 0.023776\tau}{39.8991} = \frac{1}{0.009504}\ln\frac{5.6 - 0.009504\times 393}{5.6 - 0.009504\times 321}$$

解得 $\tau = 910.35\mathrm{s} = 15.17\,\mathrm{min}$。

4−27 某锅炉每小时生产 10 000 kg 的蒸汽，蒸汽的表压力为 $p_e = 1.9$ MPa，温度 $t_1 = 350$ °C。设锅炉给水的温度为 $t_2 = 40$ °C，锅炉的效率 $\eta_B = 0.78$。煤的发热量（热值）为 $Q_p = 2.97\times 10^4$ kJ/kg。求每小时锅炉的煤耗量是多少？汽锅内水的加热和汽化、以及蒸汽的过热都在定压下进行。锅炉效率 η_B 的定义为：

$$\eta_B = \frac{\text{水和蒸汽所吸的热量}}{\text{燃料燃烧时所在发出的热量}}$$

（未被水和蒸汽所吸收的热量是锅炉的热损失，其中主要是烟囱出口处排烟所带走的热量。）

解： $p_1 = p_b + p_e = 0.1\ \mathrm{MPa} + 1.9\ \mathrm{MPa} = 2.0\ \mathrm{MPa}$

由 $p_1 = 2.0$ MPa、$t_1 = 350$ °C，$t_2 = 40$ °C 查未饱和水和过热蒸汽表，得

$$h_1 = 3136.2\mathrm{kJ/kg}、h_2 = 169.27\mathrm{kJ/kg}$$

每生产 1kg 蒸汽需要吸入热量

$$q = h_1 - h_2 = 3136.2\text{kJ/kg} - 169.27\text{kJ/kg} = 2966.93\text{kJ/kg}$$

$$q_Q = q_m q = 10\ 000\ \text{kg/h} \times 2\ 966.93\ \text{kJ/kg} = 2.967 \times 10^7\ \text{kJ/h}$$

设每小时锅炉耗煤 m kg，则$\eta_\text{t} = \dfrac{q_Q}{mQ_p}$

$$m = \frac{q_Q}{\eta_\text{B} Q_p} = \frac{2.967 \times 10^7\ \text{kJ/h}}{2.97 \times 10^4\ \text{kJ/h} \times 0.78} = 1\ 281\ \text{kg/h}$$

4−28　1 kg 蒸汽，$p_1 = 3\ \text{MPa}$、$t_1 = 450\ ^\circ\text{C}$，绝热膨胀至 $p_2 = 0.004\ \text{MPa}$，试用 $h-s$ 图求终点状态参数 t_2、v_2、h_2、s_2 并求膨胀功和技术功 w_t。

解：由 $h-s$ 图查得：$h_1 = 3345\text{kJ/kg}$、$v_1 = 0.108\text{m}^3/\text{kg}$、$s_1 = 7.082\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；$h_2 = 2132\text{kJ/kg}$、$v_2 = 28\text{m}^3/\text{kg}$、$s_2 = s_1 = 7.082\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$t_2 = 29.4^\circ\text{C}$。

膨胀功

$$\begin{aligned} w &= u_1 - u_2 = (h_1 - p_1 v_1) - (h_2 - p_2 v_2) = (h_1 - h_2) - (p_1 v_1 - p_2 v_2) \\ &= (3345 - 2132)\text{kJ/kg} - (3 \times 10^3\text{kPa} \times 0.108\text{m}^3/\text{kg} - 0.004 \times 10^3\text{kPa} \times \\ &\quad 28\text{m}^3/\text{kg}) = 1001\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

技术功

$$w_\text{t} = h_1 - h_2 = 3345\text{kJ/kg} - 2132\text{kJ/kg} = 1214\text{kJ/kg}$$

4−29　1 kg 蒸汽，由初态 $p_1 = 2\ \text{MPa}$，$x_1 = 0.95$，定温膨胀到 $p_2 = 1\ \text{MPa}$，求终态参数 t_2、v_2、h_2、s_2 及过程中对蒸汽所加入的热量 q_T 和过程中蒸汽对外界所作的膨胀功 w。

解：由 $h-s$ 图得 $h_1 = 2706\text{kJ/kg}$、$t_1 = 212.5^\circ\text{C}$、$v_1 = 0.095\text{m}^3/\text{kg}$、$s_1 = 6.144\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；$h_2 = 2861\text{kJ/kg}$、$t_2 = t_1 = 212.5^\circ\text{C}$、$v_2 = 0.215\text{m}^3/\text{kg}$、$s_2 = 6.760\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 2706\text{kJ/kg} - 2 \times 10^3\text{Pa} \times 0.095\text{m}^3/\text{kg} = 2516\text{kJ/kg}$$

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 2861\text{kJ/kg} - 1 \times 10^3\text{Pa} \times 0.215\text{m}^3/\text{kg} = 2646\text{kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} q_T &= T(s_2 - s_1) \\ &= (212.5 + 273.15)\text{K} \times (6.760 - 6.144)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 299.2\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$w = q_T - \Delta u = 299.2\text{kJ/kg} - (2646 - 2516)\text{kJ/kg} = 169.2\text{kJ/kg}$$

4−30 一台功率为 20 000 kW 的汽轮机，其耗汽率为 $d = 1.32 \times 10^{-6}$ kg/J 。从汽轮机排出的乏气参数为 $p_2 = 0.004$ MPa、$x_2 = 0.9$ 。乏汽进入冷凝器后，在其中凝结为冷凝水。冷凝器中的压力设为 0.004 MPa ，即等于乏汽压力。冷凝水的温度等于乏汽压力下的饱和温度，乏汽在凝结时放出热量。这些热量为冷却水所吸，因此冷却水离开冷凝器时的温度高于进入时的温度。设冷却水进入冷凝器时的温度为 10℃，离开时温度为 18℃，求冷却水每小时的流量（ t/h ）。冷却水在管内流动，乏汽在管壁外凝结。如图 4−18 所示。管子通常用黄铜管，大型冷凝器中装有数千根黄铜管。

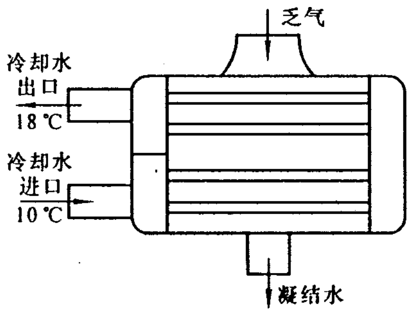


图 4−18 题 4−30 附图

解：耗汽量

$$D = P \times 3600 \times d = 2 \times 10^7 \text{kJ/s} \times 3600\text{s} \times 1.32 \times 10^{-6} \text{kg/J} = 9.52 \times 10^4 \text{kg/h}$$

乏汽状态为 $p_2 = 0.004\text{MPa}$、$x_2 = 0.9$ ，查表得 0.004MPa 时汽化潜热 $\gamma = 2432.2\text{kJ/kg}$ ，故 1kg 乏汽凝结为饱和水时放出热量

$$q = \gamma x = 2432.2\text{kJ/kg} \times 0.9 = 2188.98\text{kJ/kg}$$

冷却水流量为 q_m ，取冷凝器为体系，能量方程为 $Dq + q_m c_w (t_{in} - t_{out}) = 0$ ，故

$$\begin{aligned} q_m &= \frac{Dq}{c_w (t_{out} - t_{in})} \\ &= \frac{9.52 \times 10^4 \text{kg/h} \times 2188.98\text{kJ/kg}}{4.187\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times (18 - 10)^\circ\text{C}} = 6221.4 \times 10^3 \text{kg/h} = 6221.4\text{t/h} \end{aligned}$$

4−31 给水在温度 $t_1 = 60\ ^\circ\text{C}$ 和压力 $p_1 = 3.5\text{MPa}$ 下进入蒸汽锅炉的省煤器中，在锅炉中加热而成 $t_2 = 350\ ^\circ\text{C}$ 的过热蒸汽。试把过程表示在 $T - s$ 图上，并求出加热过程中水的平均吸热温度。

解：$T - s$ 图如图 4−19。由未饱和水与过热蒸汽表查得：

		h / kJ/kg	s /[kJ/(kg·K)]
$p = 3.5\text{MPa}$	$t = 60^\circ\text{C}$	254.08	0.8294
	$t = 350^\circ\text{C}$	3102.95	6.6610

水的加热过程可看作定压过程，所以

$$q_p = h_2 - h_1 = 3102.95\text{kJ/kg} - 254.08\text{kJ/kg} = 2848.9\text{kJ/kg}$$

$$\Delta s_{12} = s_2 - s_1 = 6.6610\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.8294\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 5.8316\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\overline{T} = \frac{q_p}{\Delta s_{12}} = \frac{2848.9\text{kJ/kg}}{5.8316\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 488.53\text{K} = 215.4^\circ\text{C}$$

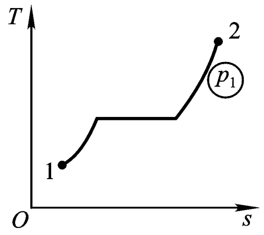


图 4-19 题 4-31 附图

4-32 图 4-20 所示的刚性容器容积为 $3\ \text{m}^3$，内贮压力 3.5MPa 的饱和水和饱和蒸汽，其中汽和水的质量之比为 $1:9$。将饱和水通过阀门排出容器，使容器内蒸汽和水的总质量减为原来的一半。若要保持容器内温度不变，试求需从外界传入多少热量。

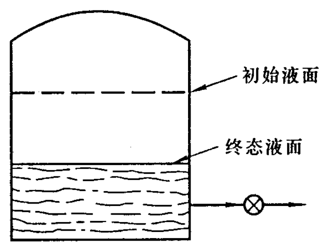


图 4-20 题 4-32 附图

解：由饱和水和饱和水蒸气表查得：

$p = 3.5\text{MPa}$、$t_s = 242.59°\text{C}$，$v' = 0.0012348\text{m}^3/\text{kg}$、$v = 0.057054\text{m}^3/\text{kg}$、$h' = 1049.6\text{kJ/kg}$；$h'' = 2802.51\text{kJ/kg}$、$s' = 2.7250\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$s'' = 6.1238\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

因 $V = 3\text{m}^3$，汽水质量为 1 ∶ 9，即干度 $x_1 = 0.1$，所以

$$v_1 = v' + x_1(v'' - v') = 0.0012348\text{m}^3/\text{kg} + 0.1\times(0.057054 - 0.0012348)\text{m}^3/\text{kg} = 0.0068167\text{m}^3/\text{kg}$$

$$h_1 = h' + x_1(h'' - h') = 1049.6\text{kJ/kg} + 0.1\times(2802.51 - 1049.6)\text{kJ/kg} = 1224.89\text{kJ/kg}$$

$$s_1 = s + x_1(s'' - s') = 2.7250\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + 0.1\times(6.1238 - 2.7250)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 3.06488\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

初始状态质量

$$m_1 = \frac{V}{v_1} = \frac{3\text{m}^3}{0.0068167\text{m}^3/\text{kg}} = 440.10\text{kg}$$

其中饱和水质量

$$m_1 = 0.9 \times 440.10\text{kg} = 396.09\text{kg}$$

饱和蒸汽质量

$$m_v = 0.1 \times 440.10\text{kg} = 44.01\text{kg}$$

据题意，自阀门排出饱和水

$$m_{out} = \frac{m_1}{2} = \frac{440.10\text{kg}}{2} = 220.05\text{kg}$$

容器内终态质量

$$m_2 = \frac{m_1}{2} = 220.05\text{kg}$$

由于排出过程中容器内温度不变，所以蒸汽压力也不变，维持 3.5MPa ，这时

$$v_2 = \frac{V}{m_2} = \frac{3\text{m}^3}{220.05\text{kg}} = 0.0136333\text{m}^3/\text{kg}$$

$$x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = \frac{0.0136333\text{m}^3/\text{kg} - 0.0012348\text{m}^3/\text{kg}}{0.057054\text{m}^3/\text{kg} - 0.0012348\text{m}^3/\text{kg}} = 0.2221$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ &= 1049.6\text{kJ/kg} + 0.2221 \times (2802.51 - 1049.6)\text{kJ/kg} = 1438.95\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

取容器为系统，因不作功，若不计动能差与位能差，并考虑到 $p_1 = p_2$， $V_1 = V_2$，则能量方程为

$$Q - H_{out} = U_2 - U_1$$

$$\begin{aligned} Q &= m_2u_2 - m_1u_1 + m_{out}h_{out} = m_2(h_2 - p_2v_2) - m_1(h_1 - p_1v_1) + m_{out}h' \\ &= H_2 - H_1 + p_1m_1v_1 - p_2m_2v_2 + m_{out}h' = H_2 - H_1 + p_1V_1 - p_1V_2 + m_{out}h' \\ &= m_2h_2 - m_1h_1 + m_{out}h' \\ &= 220.05\text{kg} \times 1438.95\text{kJ/kg} - 440.10\text{kg} \times 1224.89\text{kJ/kg} + 220.05\text{kg} \times \\ &\quad 1049.6\text{kJ/kg} = 8531.3\text{kJ} \end{aligned}$$

4-33 绝热良好的圆筒内装置自由活动无磨擦的活塞，活塞下有压力为 0.8MPa ，干度为 0.9 的蒸汽 0.5kg，活塞上方有空气保持压力，吹空气入活塞上方空间，下压活塞使蒸汽压力上升并使蒸汽干度变为 1。求：

（1）终态（ $x = 1$ ）的蒸汽压力；

（2）压缩中对蒸汽作功量。

解：查表， $p = 0.8\text{MPa}$ 时 $t_s = 170.44^\circ\text{C}$ 其它饱和参数为

$v'/(\mathrm{m^3/kg})$	$v''/(\mathrm{m^3/kg})$	$h'/(\mathrm{kJ/kg})$	$h''/(\mathrm{kJ/kg})$	$s'/[\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}]$	$s''/[\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}]$
0.0011148	0.24037	721.20	2768.86	2.0464	6.6625

$$\begin{aligned}v_1&=v'+x_1(v''-v')\\&=0.0011148\mathrm{m^3/kg}+0.9\times(0.24037-0.0011148)\mathrm{m^3/kg}\\&=0.2164\mathrm{m^3/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h_1&=h'+x_1(h''-h')\\&=721.20\mathrm{kJ/kg}+0.9\times(2768.86-721.20)\mathrm{kJ/kg}=2564.09\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s_1&=s'+x_1(s''-s')\\&=2.0464\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}+0.9\times(6.6625-2.0464)\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\\&=6.20089\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\end{aligned}$$

（1）据题意活塞下压，过程可认为是等熵过程，即 $s_2=s_1=6.20089\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，查饱和水蒸气表，经插值得 $p_2=2.88\,\mathrm{MPa}$

（2）$p_2=2.88\mathrm{MPa}$、$v''=0.069449\mathrm{m^3/kg}$、$h''=1805.5\mathrm{kJ/kg}$

$$\begin{aligned}w&=u_1-u_2=h_1-p_1v_1-(h_2-p_2v_2)=h_1-h_2-(p_1v_1-p_2v_2)\\&=2564.09\mathrm{kJ/kg}-1805.5\mathrm{kJ/kg}-(0.8\times10^3\mathrm{kPa}\times0.2164\mathrm{m^3/kg}-\\&\qquad 2.88\times10^3\mathrm{kPa}\times0.069449\mathrm{m^3/kg})=785.48\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$W=mw=0.5\mathrm{kg}\times785.48\mathrm{kJ/kg}=392.7\mathrm{kJ}$$

4−34 压力维持 200kPa 恒定的汽缸内有 0.25kg 饱和水蒸气。加热使水温度升高到 200℃，试求初、终态水蒸气的热力学能和过程的加热量。

解：取缸内水蒸气为闭口系。

状态 1：由 $p_1=200\mathrm{kPa}$、$x=1$，查饱和水和饱和水蒸气表

$$t_s=120.2^\circ\mathrm{C}、h''=2706.5\mathrm{kJ/kg}、v''=0.8865\mathrm{m^3/kg}$$

$$\begin{aligned}u''&=h''-p_sv''\\&=2706.5\mathrm{kJ/kg}-200\mathrm{kPa}\times0.8865\mathrm{m^3/kg}=2529.2\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

状态 2：$t_2=320.2^\circ\mathrm{C}$，$p_2=200\mathrm{kPa}$，查过热水蒸气热力性质表

$$h_2=3112.4\mathrm{kJ/kg}、v_2=1.3634\mathrm{m^3/kg}$$

$$\begin{aligned}u_2&=h_2-p_2v_2\\&=3112.4\mathrm{kJ/kg}-200\mathrm{kPa}\times1.3634\mathrm{m^3/kg}=2839.7\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$Q = m(\Delta u + w) = m[(u_2 - u_1) + p(v_2 - v_1)] = m(h_2 - h_1)$$
$$= 0.25\text{kg} \times (3112.4\text{kJ/kg} - 2706.5\text{kJ/kg}) = 101.5\text{kJ}$$

4−35 反应堆容积 1 m^3，其中充满 20 MPa、360 ℃的水。反应堆置于密封、绝热的良好包壳内，初始时包壳抽空。发生反应堆烧毁事故时，水充满包壳，为了使终态包壳内压力不超过 200 kPa，确定包壳的最小体积。

解：取水为闭口系，过程示意图见图 4−21 由于初始时包壳抽空，包壳体积可以认为不变，所以事故中热量和功均为零。

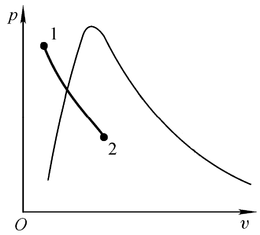


图 4−21 题 4−35 附图

$$Q = \Delta U + W\text{，}\quad \Delta U = 0\text{，}\quad u_1 = u_2$$

初态：由 20MPa、360℃查表，得

$$h_1 = 1739.7\text{kJ/kg}\text{，}\quad v_1 = 0.001823\text{m}^3/\text{kg}$$

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1$$
$$= 1739.7\text{kJ/kg} - 20000\text{kPa} \times 0.001823\text{m}^3/\text{kg} = 1703.7\text{kJ/kg}$$

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{1\text{m}^3}{0.001823\text{m}^3/\text{kg}} = 548.5\text{kg}$$

终态：由 200kPa，查表得

$$v'' = 0.8865\text{m}^3/\text{kg}\text{、}\quad v' = 0.0011\text{m}^3/\text{kg}\text{，}$$

$$h'' = 2706.5\text{kJ/kg}\text{、}\quad h' = 504.7\text{kJ/kg}$$

$$u' = h' - p_s v' = 504.7\text{kJ/kg} - 200\text{kPa} \times 0.0011\text{m}^3/\text{kg} = 504.5\text{kJ/kg}$$

$$u'' = h'' - p_s v'' = 2706.5\text{kJ/kg} - 200\text{kPa} \times 0.8865\text{m}^3/\text{kg} = 2529.2\text{kJ/kg}$$

$u' < u_2 < u''$，所以终态为湿蒸汽状态

$$x_2 = \frac{u_2 - u'}{u'' - u'} = \frac{1703.7\text{kJ/kg} - 504.5\text{kJ/kg}}{2529.2\text{kJ/kg} - 504.5\text{kJ/kg}} = 0.592$$

$$v_2 = v' + x_2(v'' - v')$$
$$= 0.0011\text{m}^3/\text{kg} + 0.592 \times (0.8865\text{m}^3/\text{kg} - 0.0011\text{m}^3/\text{kg}) = 0.5253\text{m}^3/\text{kg}$$

$$V_2 = m v_2 = 548.5\text{kg} \times 0.5253\text{m}^3/\text{kg} = 288.2\text{m}^3$$

4−36 容积为 100L 的刚性透热容器内含 30℃的 R134a 饱和蒸气，容器 A 和气缸 B 用阀门管道相通（图 4−22），B 中通过活塞传递的压力恒定为 200kPa。打开阀门，R134a 缓慢流入

B，直至容器 A 内压力也为 200kPa，过程中容器 A 和 B 内工质温度保持 30℃不变，求过程的热量。

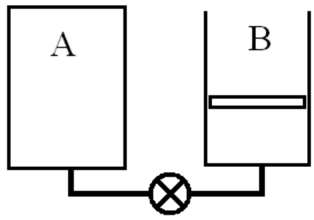


图 4-22 题 4-36 附图

解：取全部 R134a 为闭口系。终态时容器 A 和气缸 B 内 R134a 的状态相同。

初态：$t_1 = 30^\circ\text{C}$、$x_1 = 1$，查 R134a 热力性质表

$p_1 = 770.6\text{kPa}$、$h_1 = 414.8\text{kJ/kg}$、$v_1 = 0.0266\text{m}^3\text{/kg}$

终态：$t_2 = 30^\circ\text{C}$、$p_2 = 200\text{kPa}$，查表得 $h_2 = 427.0\text{kJ/kg}$、$v_2 = 0.01187\text{m}^3\text{/kg}$。

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0.1\text{m}^3}{0.0266\text{m}^3/\text{kg}} = 3.759\text{kg}$$

$$\begin{aligned}u_1 &= h_1 - p_1 v_1\\ &= 414.8\text{kJ/kg} - 770.6\text{kPa} \times 0.0266\text{m}^3\text{/kg} = 394.3\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}u_2 &= h_2 - p_2 v_2\\ &= 427.0\text{kJ/kg} - 200\text{kPa} \times 0.1187\text{m}^3\text{/kg} = 403.3\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$V_2 = m v_2 = 3.759\text{kg} \times 0.1187\text{m}^3\text{/kg} = 0.4462\text{m}^3$$

因容器 A 是刚性的，所以 R134a 在气缸 B 内的体积为

$$\Delta V_\text{B} = V_2 - V_\text{A} = 0.4462\text{m}^3 - 0.1\text{m}^3 = 0.3462\text{m}^3$$

$$\begin{aligned}Q &= \Delta U + W = m(u_2 - u_1) + p_2 \Delta V_\text{B}\\ &= 3.759\text{kg} \times (403.3\text{kJ/kg} - 394.3\text{kJ/kg}) + 200\text{kPa} \times 0.3462\text{m}^3\\ &= 103.1\text{kJ}\end{aligned}$$

4-37 某大型蒸汽膨胀发动机有两股流体流入，一股是参数为 $p_1 = 2\text{ MPa}$、$t_1 = 500\ ^\circ\text{C}$ 的蒸汽，质量流量 $q_{m1} = 2.0\text{ kg/s}$；另一股是 $p_2 = 120\text{ kPa}$、$t_2 = 30\ ^\circ\text{C}$ 的冷却水，质量流量为 $q_{m2} = 0.5\text{ kg/s}$。两股流体汇合成一股流出设备时 $p_3 = 150\text{ kPa}$、干度 $x_3 = 0.8$，流出管的直径是 0.15m，如图 4-23。若过程中的热损失是 300kW，试求工质通过管道排出时的速度和发动机输出功率。

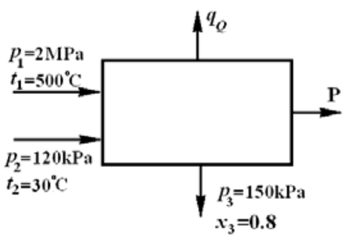


图 4-23 习题 4-37 附图

解：取稳态运行的发动机为控制体积，查饱和水和饱和水蒸气表

$h_1 = 3467.6\text{kJ/kg}$、$h_2 = 125.77\text{kJ/kg}$；$h_3'' = 2693.3\text{kJ/kg}$、

$h_3' = 467.1\text{kJ/kg}$；$v_3' = 0.0011\text{m}^3/\text{kg}$、$v_3'' = 1.1604\text{m}^3/\text{kg}$。

$$\begin{aligned} v_3 &= v_3' + x_3(v_3'' - v_3') \\ &= 0.0011\text{m}^3/\text{kg} + 0.8\times(1.1604 - 0.0011)\text{m}^3/\text{kg} = 0.09277\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_3 &= h_3' + x_3(h_3'' - h_3') \\ &= 467.1\text{kJ/kg} + 0.8\times(2693.3\text{kJ/kg} - 467.1\text{kJ/kg}) = 2248.3\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$q_{m3} = q_{m1} + q_{m2} = 2\text{kg/s} + 0.5\text{kg/s} = 2.5\text{kg/s}$$

$$c = \frac{q_{m3}v_3}{A} = \frac{2.5\text{kg/s}\times 0.09277\text{m}^3/\text{kg}}{\frac{\pi}{4}\times(0.15\text{m})^2} = 131.2\text{m/s}$$

据稳态稳流能量方程

$$\begin{aligned} P &= q_{m1}h_1 + q_{m2}h_2 - q_{m3}\left(h_3 + \frac{c^2}{2}\right) - \Phi_l \\ &= 2\text{kg/s}\times 3467.6\text{kJ/kg} + 0.5\text{kg/s}\times 125.77\text{kJ/kg} - \\ &\quad 2.5\text{kg/s}\times\left[2248.3\text{kJ/kg} + \frac{(131.2\text{m/s})^2}{2}\right] - 300\text{kJ/s} = 1056\text{kW} \end{aligned}$$

4-38 气缸活塞系统的缸内含有 5kgR134a 过热蒸气，参数为 20℃、0.5MPa。在温度维持常数的条件下冷却到干度为 0.5 的终态。过程中系统放热 500kJ，求过程初终态的体积和过程功。

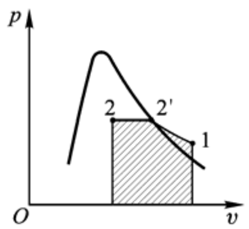


图 4-24 习题 4-38 附图

解：工质在缸内的过程如图 4-24 所示。

初态：由 20℃、2MPa 查表，得

$$h = 411.6\text{kJ/kg}、v = 0.0421\text{m}^3/\text{kg}$$

$$u_1 = h_1 - p_1v_1 = 411.6\text{kJ/kg} - 500\text{kPa}\times 0.0421\text{m}^3/\text{kg} = 390.6\text{kJ/kg}$$

$$V_1 = mv_1 = 5\text{kg}\times 0.0421\text{m}^3/\text{kg} = 0.211\text{m}^3$$

终态：由 20 ℃ 查表，得 $p_s = 527.1\text{kPa}$、$h' = 227.4\text{kJ/kg}$、$h'' = 409.8\text{kJ/kg}$、$v' = 0.0008\text{m}^3/\text{kg}$、$v'' = 0.036\text{m}^3/\text{kg}$

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ &= 227.4\text{kJ/kg} + 0.5\times(409.8\text{kJ/kg} - 227.4\text{kJ/kg}) = 318.6\text{kJ/lg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_2 &= v' + x_2(v'' - v') \\ &= 0.0008\text{m}^3/\text{kg} + 0.5\times(0.036 - 0.0008)\text{m}^3/\text{kg} = 0.0184\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$V_2 = mv_2 = 5\text{kg} \times 0.0184\text{m}^3/\text{kg} = 0.092\text{m}^3$$

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 318.6\text{kJ/kg} - 572.1\text{kPa} \times 0.0184\text{m}^3/\text{kg} = 308.1\text{kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} W &= Q - \Delta U = Q - m(u_2 - u_1) \\ &= -500\text{kJ} - 5\text{kg} \times (308.1\text{kJ/kg} - 390.6\text{kJ/kg}) = -87.5\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

4-39 体积均为 1 m^3 的两个刚性容器 A 和 B 用管道阀门相连，初始时容器 A 内干度为 0.15，温度为 20 ℃的氟利昂 R134a，容器 B 为真空。打开阀门，氟利昂 R134a 蒸气缓缓流入容器 B，直至容器 A 和 B 内压力相等，过程进行足够缓慢，使过程中温度保持 20℃不变，求过程中的换热量。

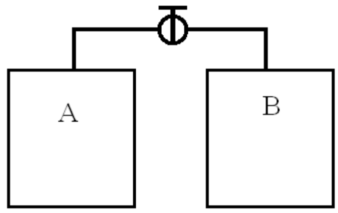


图 4-25 习题 4-39 附图

解：取全部氟利昂 R134a 为控制质量。

初态：由 20℃查表，$p_s = 572.1\text{kPa}$、

$$v' = 0.0008\text{m}^3/\text{kg}、v'' = 0.0360\text{m}^3/\text{kg}；\ h' = 227.4\text{kJ/kg}、h'' = 409.8\text{kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} v_1 &= v' + x_1(v'' - v') \\ &= 0.0008\text{m}^3/\text{kg} + 0.15 \times (0.0360\text{m}^3/\text{kg} - 0.0008\text{m}^3/\text{kg}) = 0.00608\text{m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$m = \frac{V_A}{v_1} = \frac{1\text{m}^3}{0.00608\text{m}^3/\text{kg}} = 164.5\text{kg}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= h' + x_1(h'' - h') \\ &= 227.4\text{kJ/kg} + 0.15 \times (409.8\text{kJ/kg} - 227.4\text{kJ/kg}) = 254.8\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$u_1 = h_1 - p_s v_1 = 254.8\text{kJ/kg} - 572.1\text{kPa} \times 0.00608\text{m}^3/\text{kg} = 251.3\text{kJ/kg}$$

终态：

$$v_2 = \frac{V_A + V_B}{m} = \frac{1\text{m}^3 + 1\text{m}^3}{164.5\text{kg}} = 0.0122\text{m}^3/\text{kg}$$

$v' < v_2 < v''$，所以终态仍是湿蒸气状态。

$$x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = \frac{0.0122\text{m}^3/\text{kg} - 0.0008\text{m}^3/\text{kg}}{0.0360\text{m}^3/\text{kg} - 0.0008\text{m}^3/\text{kg}} = 0.323$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ &= 227.4\text{kJ/kg} + 0.323 \times (409.8 - 227.4)\text{kJ/kg} = 286.3\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$u_2 = h_2 - p_s v_2 = 286.3\text{kJ/kg} - 572.1\text{kPa} \times 0.0122\text{m}^3/\text{kg} = 279.3\text{kJ/kg}$$

$$Q = \Delta U + W = m(u_2 - u_1)$$
$$= 164.5\text{kg} \times (279.3\text{kJ/kg} - 251.3\text{kJ/kg}) = 4603.7\text{kJ}$$

第五章 热力学第二定律

5-1 利用逆向卡诺机作为热泵向房间供热，设室外温度为-5°C，室内温度为保持20°C。

要求每小时向室内供热$2.5 \times 10^4\text{kJ}$，试问：

（1）每小时从室外吸多少热量？

（2）此循环的供暖系数多大？

（3）热泵由电机驱动，设电机效率为 95%，求电机功率多大？

（4）如果直接用电炉取暖，问每小时耗电几度（$\text{kW} \cdot \text{h}$）？

解：$T_1 = (20 + 273)\text{K} = 293\text{K}$、$T_2 = (-5 + 273)\text{K} = 268\text{K}$、$q_{Q_1} = 2.5 \times 10^4\text{kJ/h}$

（1）逆向卡诺循环

$$\frac{q_{Q_1}}{T_1} = \frac{q_{Q_2}}{T_2}$$

$$q_{Q_2} = \frac{T_2}{T_1} q_{Q_1} = \frac{268\text{K}}{293\text{K}} \times 2.5 \times 10^4\text{kJ/h} = 2.287 \times 10^4\text{kJ/h}$$

（2）循环的供暖系数

$$\varepsilon' = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{293\text{K}}{293\text{K} - 268\text{K}} = 11.72$$

（3）每小时耗电能

$$q_\text{w} = q_{Q_1} - q_{Q_2} = (2.5 - 2.287) \times 10^4\text{kJ/h} = 0.213 \times 10^4\text{kJ/h}$$

电机效率为 95%，因而电机功率为

$$P = \frac{0.213 \times 10^4\text{kJ/h}}{3600\text{s/h} \times 0.95} = 0.623\text{kW}$$

（4）若直接用电炉取暖，则$2.5 \times 10^4\text{kJ/h}$的热能全部由电能供给

$$P = 2.5 \times 10^4\text{kJ/h} = \frac{2.5 \times 10^4}{3600}\text{kJ/s} = 6.94\text{kW}$$

即每小时耗电 6.94 度。

5-2　一种固体蓄热器利用太阳能加热岩石块蓄热，岩石块的温度可达 400K 。现有体积为 $2\ \text{m}^3$ 的岩石床，其中的岩石密度为 $\rho = 2\ 750\ \text{kg/m}^3$ ，比热容 $c = 0.89\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，求岩石块降温到环境温度 290K 时其释放的热量转换成功的最大值。

解：岩石块从 290K 被加热到 400K 蓄积的热量

$$Q = mc(T_2 - T_1) = \rho Vc(T_2 - T_1)$$
$$= 2750\text{kg/m}^3 \times 2\text{m}^3 \times 0.89\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (400 - 290)\text{K} = 538450\text{kJ}$$

岩石块的平均温度

$$T_\text{m} = \frac{Q}{\Delta S} = \frac{mc(T_2 - T_1)}{mc\ln\dfrac{T_2}{T_1}} = \frac{400\text{K} - 290\text{K}}{\ln\dfrac{400\text{K}}{290\text{K}}} = 342.1\text{K}$$

在 T_m 和 T_0 之间运行的热机最高热效率

$$\eta_{\text{t,max}} = 1 - \frac{T_0}{T_\text{m}} = 1 - \frac{290\text{K}}{342.1\text{K}} = 0.152$$

所以，可以得到的最大功

$$W_{\max} = \eta_{\text{t,max}} Q_1 = 0.152 \times 538450\text{kJ} = 81946.0\text{kJ}$$

5-3 设有一由两个定温过程和两个定压过程组成的热力循环，如图 5-1 所示。工质加热前的状态为 $p_1 = 0.1\ \text{MPa}$ ，$T_1 = 300\ \text{K}$ ，定压加热到 $T_2 = 1\ 000\ \text{K}$ ，再在定温下每千克工质吸热 $400\ \text{kJ}$ 。试分别计算不采用回热和采用极限回热循环的热效率，并比较它们的大小。设工质比热容为定值，$c_p = 1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

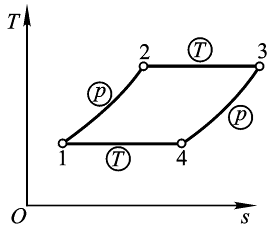


图 5-1 题 5-3 附图

解：（1）不回热

$$q_1 = q_{1-2} + q_{2-3} = c_p(T_2 - T_1) + q_{2-3}$$
$$= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(1000 - 300)\text{K} + 400\text{kJ/kg} = 1102.8\,\text{kJ/kg}$$

$$T_3 = T_2 = 1000\text{K},\quad T_4 = T_1 = 300\text{K}$$

$$q_{4-1} = \frac{T_1}{T_2} q_{2-3} = \frac{300\text{K}}{1000\text{K}} \times 400\text{kJ/kg} = 120\,\text{kJ/kg}$$

$$q_2 = q_{3-4} + q_{4-1} = c_p(T_3 - T_4) + q_{4-1}$$
$$= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}(1000 - 300)\text{K} + 120\text{kJ/kg} = 822.8\text{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1-\frac{q_2}{q_1} = 1-\frac{822.8\text{kJ/kg}}{1102.8\text{kJ/kg}} = 0.254$$

（2）采用极限回热时，过程 1-2 所需热量由过程 3-4 供给，所以

$$q_1 = q_{2-3} = 400\,\text{kJ/kg}$$

$$q_2 = q_{4-1} = \frac{T_1}{T_2}q_{2-3} = \frac{300\text{K}}{1000\text{K}}\times 400\text{kJ/kg} = 120\,\text{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1-\frac{q_2}{q_1} = 1-\frac{120\text{kJ/kg}}{400\text{kJ/kg}} = 0.70 \text{ 或 } \eta_t = \eta_c = 1-\frac{T_2}{T_1} = 1-\frac{300\text{K}}{1000\text{K}} = 0.70$$

5-4 试证明：同一种工质在参数坐标图上（例如 $p-v$ 图上）的两条绝热线不可能相交（提示：若相交的活，将违反热力学第二定律）。

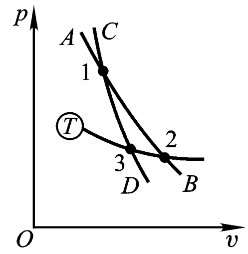


图 5-2 题 5-4 $p-v$ 图

证：假设 AB 和 CD 两条可逆绝热线可能相交，其交点为 1，设另一条等温线分别与二条绝热线交于 2 和 3，如图 5-2。令工质依 1-2-3-1 进行热力循环，此循环由 1-2，2-3 和 3-1 三个过程组成，除 2-3 过程中工质自单一热源吸热外，其余二过程均绝热，这样就可使循环发动机有从单一的热源吸热，全部转化为机械能而不引起任何其他变化，显然是与热力学第二定律相矛盾的，从而证明两条可逆绝热线不可能相交。

5-5 设有 1kmol 某种理想气体进行图 5-3 所示循环 $1-2-3-1$。且已知：$T_1 = 1\,500$ K、$T_2 = 300$ K、$p_2 = 0.1$ MPa。设比热容为定值，取绝热指数 $\kappa = 1.4$。

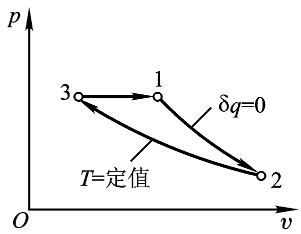


图 5-3 题 5-5 附图

（1）求初态压力；

（2）在 $T-s$ 图上画出该循环；

（3）求循环热效率；

（4）该循环的放热很理想，T_1 也较高，但热效率不很高，问原因何在？（提示：算出平均温度）

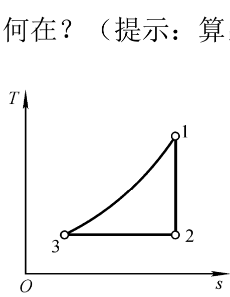


图 5-4 题 5-5 $T-s$ 图

解：（1）过程 1-2 为可逆的绝热过程，初终状态参数间关系有

$$p_1 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} p_2 = \left(\frac{1500\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} \times 0.1\text{MPa} = 27.951\text{MPa}$$

（2）循环 1-2-3-1 的 $T-s$ 图如图 5-4

（3）吸热量

$$Q_1 = Q_{3-1} = C_{p,\mathrm{m}}(T_1 - T_3)$$

放热量

$$Q_2 = Q_{2-3} = RT_3 \ln\frac{p_3}{p_2}$$

$$T_3 = T_2 = 300\mathrm{K}，p_3 = p_1 = 27.951\mathrm{MPa}，C_{p,\mathrm{m}} = \frac{\kappa}{\kappa-1}R$$

$$\eta_t = 1-\frac{Q_2}{Q_1} = 1-\frac{RT_3\ln\frac{p_3}{p_2}}{C_{p,\mathrm{m}}(T_1-T_3)} = 1-\frac{T_3\ln\frac{p_3}{p_2}}{\frac{\kappa}{\kappa-1}(T_1-T_3)}$$

$$= 1-\frac{300\mathrm{K}\times\ln\frac{27.951\mathrm{MPa}}{0.1\mathrm{MPa}}}{\frac{1.4}{0.4}\times(1500\mathrm{K}-300\mathrm{K})} = 0.598$$

（4）如果是以 $T_1 = 1500\mathrm{K}$ 为热源，$T_2 = 300\mathrm{K}$ 为冷源的卡诺循环，其热效率可达 80%（$\eta_c = 1-\frac{T_2}{T_1} = 1-\frac{300\mathrm{K}}{1500\mathrm{K}} = 0.8$），这里吸热过程按定压，平均吸热温度

$$\overline{T}_1 = \overline{T}_3 = \frac{Q_1}{\Delta S_{3-1}} = \frac{Q_1}{C_{p,\mathrm{m}}\ln\frac{T_1}{T_2}} = \frac{C_{p,\mathrm{m}}(T_1-T_3)}{C_{p,\mathrm{m}}\ln\frac{T_1}{T_3}} = \frac{1500\mathrm{K}-300\mathrm{K}}{\ln\frac{1500\mathrm{K}}{300\mathrm{K}}} = 745.6\mathrm{K}$$

可见，$\overline{T}_1$ 比 T_1 低得多，故该循环热效不高。

5-6 如图 5-5 所示，在恒温热源 T_1 和 T_0 之间工作的热机作出的循环净功 W_{net} 正好带动工作于 T_{H} 和 T_0 之间的热泵，热泵的供热量 Q_{H} 用于谷物烘干。已知 $T_1 = 1\ 000\ \mathrm{K}$、$T_{\mathrm{H}} = 360\ \mathrm{K}$、$T_0 = 290\ \mathrm{K}$、$Q_1 = 100\ \mathrm{kJ}$。

（1）若热机效率 $\eta_t = 40\%$，热泵供暖系数 $\varepsilon' = 3.5$，求 Q_{H}；

（2）设 E 和 P 都以可逆机代替，求此时的 Q_{H}；

（3）计算结果 $Q_{\mathrm{H}} > Q_1$，表示冷源中有部分热量传入温度为 T_{H} 的热源，此复合系统并未消耗机械功，将热量由 T_0 传给了 T_{H}，是否违背了第二定律？为什么？

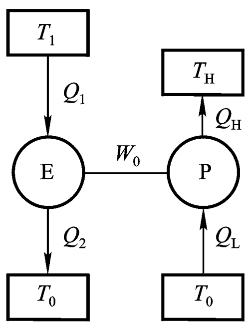


图 5-5 题 5-6 附图

解：热机 E 输出功

$$W_{net}=\eta_{t,E}Q_1=0.4\times100\text{kJ}=40\text{kJ}$$

热泵向热源 T_H 输送热量

$$Q_H=\varepsilon'W_{net}=3.5\times40\text{kJ}=140\text{kJ}$$

（2）若 E、P 都是可逆机，则

$$\eta_{E,rev}=1-\frac{T_0}{T_1}=1-\frac{290\text{K}}{1000\text{K}}=0.71$$

$$W_{net,rev}=\eta_{E,rev}Q_1=0.71\times100\text{kJ}=71\text{kJ}$$

$$\varepsilon'_{P,rev}=\frac{T_H}{T_H-T_0}=\frac{360\text{K}}{360\text{K}-290\text{K}}=5.14$$

$$Q_{H,rev}=\varepsilon'_{P,rev}W_{net,rev}=5.14\times71\text{kJ}=364.94\text{kJ}$$

（3）上述两种情况 Q_H 均大于 Q，但这并不违背热力学第二定律，以（1）为例，包括温度为 T_1、T_H、T_0 的诸热源和冷源，以及热机 E，热泵 P 在内的一个大热力系统并不消耗外功，但是 $Q_2=Q_1-W_{net}=100\text{kJ}-40\text{kJ}=60\text{kJ}$，$Q_L=Q_H-W_{net}=140\text{kJ}-40\text{kJ}=100\text{kJ}$，就是说虽然经过每一循环，冷源 T_0 吸入热量 60kJ，放出热量 100kJ，净传出热量 40kJ 给 T_H 的热源，但是必须注意到同时有 100kJ 热量自高温热源 T_1 传给温度（T_H）较低的热源，所以 40kJ 热量自低温传给高温热源（$T_0\to T_H$）是花了代价的，这个代价就是 100kJ 热量自高温传给了低温热源（$T_1\to T_H$），所以不违力学第二定律。

5-7 某热机工作于 $T_1=2\ 000\ \text{K}$、$T_2=300\ \text{K}$ 的两个恒温热源之间，试问下列几种情况能否实现？是否是可逆循环？（1）$Q_1=1\ \text{kJ}$，$W_{net}=0.9\ \text{kJ}$；（2）$Q_1=2\ \text{kJ}$，$Q_2=0.3\ \text{kJ}$；（3）$Q_2=0.5\ \text{kJ}$，$W_{net}=1.5\ \text{kJ}$。

解：方法一

在 T_1、T_2 间工作的可逆循环热效率最高，等于卡诺循环热效率，而

$$\eta_c=1-\frac{T_2}{T_1}=1-\frac{300\text{K}}{2000\text{K}}=0.85$$

（1） $Q_2=Q_1-W_{net}=1\text{kJ}-0.9\text{kJ}=0.1\text{kJ}$

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{0.1\text{kJ}}{1\text{kJ}} = 0.9 > \eta_c$$ 不可能实现

（2） $$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{0.3\text{kJ}}{2\text{kJ}} = 0.85 = \eta_c$$ 是可逆循环

（3） $$Q_1 = Q_2 + W_{net} = 0.5\text{kJ} + 1.5\text{kJ} = 2.0\text{kJ}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{0.5\text{kJ}}{2.0\text{kJ}} = 0.75 < \eta_c$$ 是不可逆循环

方法二

（1） $$\oint \frac{\delta Q}{T_r} = \frac{Q_1}{T_r} + \frac{Q_2}{T_2} = \frac{1\text{kJ}}{2000\text{K}} + \frac{-0.1\text{kJ}}{300\text{K}} = 0.000167\text{kJ/K} > 0$$ 不可能实现

（2） $$\oint \frac{\delta Q}{T_r} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = \frac{2\text{kJ}}{2000\text{K}} + \frac{-0.3\text{kJ}}{300\text{K}} = 0$$ 是可逆循环

（3） $$\oint \frac{\delta Q}{T_r} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = \frac{2\text{kJ}}{2000\text{K}} + \frac{-0.5\text{kJ}}{300\text{K}} = -0.00067\text{kJ/K} < 0$$ 是不可逆循环

5-8 有人设计了一台热机，工质分别从温度为$T_1 = 800$ K、$T_2 = 500$ K 的两个高温热源吸热$Q_1 = 1\ 500$ kJ 和$Q_2 = 500$ kJ，以$T_0 = 300$ K 的环境为冷源，放热Q_3，问：

（1）要求热机作出循环净功$W_{net} = 1\ 000$ kJ，该循环能否实现？

（2）最大循环净功$W_{net,max}$为多少？

解：（1）已知循环吸热$Q_1 = 1\ 500$ kJ，$Q_2 = 500$ kJ，$W_{net} = 1\ 000$ kJ，故循环放热

$$Q_3 = -\left[(Q_1 + Q_2) - W_{net}\right] = -\left[(1500 + 500)\text{kJ} - 1000\text{kJ}\right] = -1000\text{kJ}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T_r} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = \frac{1500\text{kJ}}{800\text{K}} + \frac{500\text{kJ}}{500\text{K}} - \frac{1000\text{kJ}}{300\text{K}} = -0.4583\text{kJ/K} < 0$$

所以可以实现

（2）最大循环净功只有在可逆循环时才能获得，即

$$\oint \frac{\delta Q}{T_r} = 0,\quad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = 0$$

$$Q_3 = T_3\left(\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}\right) = -300\text{K} \times \left(\frac{1500\text{kJ}}{300\text{K}} + \frac{500\text{kJ}}{500\text{K}}\right) = -862.5\text{kJ}$$

$$W_{\text{net},\max} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1500\text{kJ} + 500\text{kJ} - 862.5\text{kJ} = 1137.5\text{kJ}$$

5-9 试判别下列几种情况的熵变是：（a）正；（b）负；（c）可正可负：

（1）闭口系中理想气体经历一可逆过程，系统与外界交换功量 $20\ \text{kJ}$，热量 $20\ \text{kJ}$；

（2）闭口系经历一不可逆过程，系统与外界交换功量 $20\ \text{kJ}$，热量 $-20\ \text{kJ}$；

（3）工质稳定流经开口系，经历一可逆过程，开口系作功 $20\ \text{kJ}$，换热 $-5\ \text{kJ}$，工质流进出口的熵变；

（4）工质稳定流经开口系，按不可逆绝热变化，系统对外作功 $10\ \text{kJ}$，系统的熵变。

解：（1）闭口系能量守恒 $Q = \Delta U + W$，故 $\Delta U = Q - W = 20\text{kJ} - 20\text{kJ} = 0$，理想气体 $\Delta u = f(T)$，即 $\Delta T = 0$，所以过程为定温可逆过程。闭口系的熵方程 $\Delta S = S_\text{f} + S_\text{g}$，可逆过程熵产为零，故

$$\Delta S = S_\text{f} = \int \frac{\delta Q}{T} = \frac{Q}{T} = \frac{Q}{T_\text{r}} > 0$$

即熵变为正。

（2）不可逆过程 $\Delta S > \int \dfrac{\delta Q}{T_\text{r}}$，由于热量为负，熵流为负，但熵产为正，故熵变可正，可负，可为零。

（3）稳定流动系熵方程为 $S_2 - S_1 = S_\text{f} + S_\text{g}$，可逆过程时熵产为零，进口、出口熵差 $\Delta S = S_\text{f} + \int \dfrac{\delta Q}{T_\text{r}}$，热量为负，故熵差为负。

（4）稳定流动绝热系，进行不可逆过程，虽进、出口熵差 $\Delta S > 0$，但系统（控制体积）的熵变为零。

5-10 燃气经过燃气轮机，由 $0.8\ \text{MPa}$、$420\ ^\circ\text{C}$ 绝热膨胀到 $0.1\ \text{MPa}$，$130\ ^\circ\text{C}$。设燃气比热容 $c_p = 1.01\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_V = 0.732\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，问：

（1）该过程能否实现？过程是否可逆？

（2）若能实现，计算 1kg 燃气作出的技术功 w_t，设燃气进、出口动能差、位能差忽略不计。

解：（1）燃气的气体常数

$$R_g = c_p - c_V = 1.01\text{kJ(kg}\cdot\text{K)} - 0.732\text{kJ(kg}\cdot\text{K)} = 0.278\text{kJ(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\begin{aligned}\Delta s &= c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1} \\ &= 1.01\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{(130+273)\text{K}}{(420+273)\text{K}} - 0.278\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{0.1\text{MPa}}{0.8\text{MPa}} \\ &= 0.03057\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

因$\Delta s > 0$，该绝热过程是不可逆绝热过程。

（2）稳定流动系统能量方程，在不计动能差，位能差，且$q = 0$时，可简化为

$$\begin{aligned}w_t &= w_i = h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2) \\ &= 1.01\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(693-403)\text{K} = 292.9\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

5-11 0.25kg CO 在闭口系中由初态 $p_1 = 0.25$ MPa 、$t_1 = 120$ °C 膨胀到终态$t_2 = 25$°C，$p_2 = 0.125$ MPa 、作出膨胀功 $W = 8.0$ kJ ，已知环境温度 $t_0 = 25$ °C ，CO 的 $R_g = 0.297$ kJ/(kg·K)，$c_V = 0.747$ kJ/(kg·K)，试计算过程热量，并判断该过程是否可逆。

解：$T_1 = (120+273)\text{K} = 393\text{K}$ 、$T_2 = (25+273)\text{K} = 298\text{K}$ 。由闭口系能量方程

$$Q = \Delta U + W = mc_V(T_2 - T_1) + W$$

$$\begin{aligned}Q &= 0.25\text{kg}\times 0.747\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(298-393)\text{K} + 8\text{kJ} \\ &= -17.74\text{kJ} + 8.0\text{kJ} = -9.74\text{kJ}\end{aligned}$$

（负值表示放热）

$$\begin{aligned}\Delta S &= \left(c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}\right)m \\ &= \left[0.747\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{298\text{K}}{393\text{K}} - 0.297\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.125\text{MPa}}{0.25\text{MPa}}\right]\times \\ &\quad 0.25\text{kg} = -0.00021\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

环境吸热及熵变

$$Q_{surr} = -Q = 9.74\text{kJ}，\ \Delta S_{surr} = \frac{Q_{surr}}{T_0} = \frac{9.74\text{kJ}}{298\text{K}} = 0.03268\text{kJ/K}$$

系统和环境组成的孤立系熵变

$$\Delta S_{iso} = \Delta S + \Delta S_{surr} = -0.00021\text{kJ/K} + 0.03268\text{kJ/K} = 0.03247\text{kJ/K} > 0$$

由于孤立系熵变大于零，该过程为不可逆膨胀过程。

5-12 某太阳能供暖的房屋用$5\times8\times0.3$ m 的大块混凝土板作为蓄热材料，该混凝土的密

度为 $2\ 300\ \mathrm{kg/m^3}$，比热容 $0.65\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。若在 $18\ ^\circ\mathrm{C}$ 的房子内的混凝土板在晚上从 $23\ ^\circ\mathrm{C}$ 冷却到 $18\ ^\circ\mathrm{C}$，求此过程的熵产。

解：混凝土板的质量

$$m = \rho V = 2300\mathrm{kg/m^3} \times 5\mathrm{m} \times 8\mathrm{m} \times 0.3\mathrm{m} = 27600\mathrm{kg}$$

混凝土板的释热量

$$Q = mc\Delta T = 27600\mathrm{kg} \times 0.65\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times (23^\circ\mathrm{C} - 18^\circ\mathrm{C}) = 89700\mathrm{kJ}$$

混凝土的熵变

$$\Delta S_1 = m\int_1^2 \frac{\delta q}{T} = m\int_1^2 \frac{c\mathrm{d}T}{T} = mc\ln\frac{T_2}{T_1}$$
$$= 27600\mathrm{kg} \times 0.65\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times \ln\frac{(273+18)\mathrm{K}}{(273+23)\mathrm{K}} = -305.63\mathrm{kJ/K}$$

环境介质的熵变

$$\Delta S_2 = \frac{Q}{T_0} = \frac{89700\mathrm{kJ}}{(273+18)\mathrm{K}} = 308.25\mathrm{kJ/K}$$

$$S_\mathrm{g} = \Delta S_\mathrm{iso} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -305.63\mathrm{kJ/K} + 308.25\mathrm{kJ/K} = 2.62\mathrm{kJ/K}$$

5-13 将一根 $m = 0.36\ \mathrm{kg}$ 的金属棒投入 $m_\mathrm{w} = 9\ \mathrm{kg}$ 的水中，初始时金属棒的温度 $T_{\mathrm{m},1} = 1\ 060\ \mathrm{K}$，水的温度 $T_\mathrm{w} = 295\ \mathrm{K}$。金属棒和水的比热容分别为 $c_\mathrm{m} = 420\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$ 和 $c_\mathrm{w} = 4187\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}$，求：终温 T_f 和金属棒、水以及它们组成的孤立系熵变。设容器为绝热。

解：取容器内水和金属棒为热力系，由闭口系能量方程 $\Delta U = Q - W$，因绝热，不作外功，故 $Q = 0$，$W = 0$，故 $\Delta U = 0$，即 $\Delta U_\mathrm{w} + \Delta U_\mathrm{m} = 0$

$$m_\mathrm{w} c_\mathrm{w}(T_\mathrm{f} - T_\mathrm{w}) + m_\mathrm{m} c_\mathrm{m}(T_\mathrm{f} - T_\mathrm{m}) = 0$$

$$T_\mathrm{f} = \frac{m_\mathrm{w} c_\mathrm{w} T_\mathrm{w} + m_\mathrm{m} c_\mathrm{m} T_\mathrm{m}}{m_\mathrm{w} c_\mathrm{w} + m_m c_m}$$
$$= \frac{9\mathrm{kg} \times 4187\mathrm{J/(kg\cdot K)} \times 295\mathrm{K} + 0.36\mathrm{kg} \times 420\mathrm{J/(kg\cdot K)} \times 1060\mathrm{K}}{9\mathrm{kg} \times 4187\mathrm{J/(kg\cdot K)} + 0.36\mathrm{kg} \times 420\mathrm{J/(kg\cdot K)}}$$
$$= 298.1\mathrm{K}$$

由金属棒和水组成的孤立系的熵变为金属棒熵变和水熵变之和

$$\Delta S_\mathrm{iso} = \Delta S_\mathrm{m} + \Delta S_\mathrm{w}$$

$$\Delta S_{\mathrm{m}}=m_{\mathrm{m}}c_{\mathrm{m}}\ln\frac{T_{\mathrm{f}}}{T_{\mathrm{w}}}=0.36\mathrm{kg}\times0.42\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{298.1\mathrm{K}}{1060\mathrm{K}}=-0.1918\mathrm{kJ/K}$$

$$\Delta S_{\mathrm{w}}=m_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{w}}\ln\frac{T_{\mathrm{f}}}{T_{\mathrm{w}}}=9.0\mathrm{kg}\times4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{298.1\mathrm{K}}{295\mathrm{K}}=0.3939\mathrm{kJ/K}$$

$$\Delta S_{\mathrm{iso}}=-0.1918\mathrm{kJ/K}+0.3939\mathrm{kJ/K}=0.2021\mathrm{kJ/K}$$

5-14 刚性密闭容器中有 1kg 压力 $p_1=0.101\ 3$ MPa 的空气，可以通过叶轮搅拌，或由 $t_{\mathrm{r}}=283\ ^{\circ}\mathrm{C}$ 的热源加热及搅拌联合作用，使空气温度由 $t_1=7\ ^{\circ}\mathrm{C}$ 上升到 $t_2=317\ ^{\circ}\mathrm{C}$。求：

（1）联合作用下系统的熵产 s_{g}；

（2）系统的最小熵产 $s_{\mathrm{g,min}}$；

（3）系统的最大熵产 $s_{\mathrm{g,max}}$。

解：$T_1=(7+273)\mathrm{K}=280\mathrm{K}$，$T_2=(317+273)\mathrm{K}=590\mathrm{K}$，$T_{\mathrm{r}}=(283+273)\mathrm{K}=556\mathrm{K}$。

容器中空气进行的是定容过程

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{T_2}{T_1}=\frac{590\mathrm{K}}{280\mathrm{K}}=2.107$$

（1）由 T_1、T_2 查气体的热力性质表，得

$$h_1=282.22\mathrm{kJ/kg},\quad s_1^0=6.6380\mathrm{kJ/(kg\cdot K)},$$

$$h_2=598.52\mathrm{kJ/kg},\quad s_2^0=7.3964\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}。$$

过程中气体的热力学能差

$$\begin{aligned}\Delta u&=\Delta h-\Delta(pv)=\Delta h-R_{\mathrm{g}}\Delta T\\&=598.52\mathrm{kJ/kg}-282.22\mathrm{kJ/kg}-0.287\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(590-280)\mathrm{K}\\&=227.33\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

据闭口系量方程 $q=\Delta u+w$

$$\{q\}_{\mathrm{kJ/kg}}=227.33+\{w\}_{\mathrm{kJ/kg}}$$

由闭口系熵方程

$$s_{\mathrm{g}}=s_2-s_1-s_{\mathrm{f}} \qquad \text{(a)}$$

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln\frac{p_2}{p_1}$$
$$= (7.3964 - 6.6380)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln 2.107$$
$$= 0.5445\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\{s_f\}_{\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = \frac{q}{T_r} = \frac{227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}}{556}$$

将上述结果代入式(a)，得

$$\{s_g\}_{\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 0.5445 - \frac{227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}}{556}$$

由于式中 w 为负值，故系统熵产与搅拌功的大小有关，搅拌功越大，则 s_g 越大。

（2）据题意，$T_2 = 590\text{K}$、$T_r = 556\text{K}$，$T_2 > T_r$ 所以靠热源加热至多可加热到 $T_a = T_r = 556\text{K}$，$T_a \to T_2$ 这一段温升只是由于叶轮搅拌而产生。故将过程分成两个阶段：由 T_1 到 T_2 靠热源加热，由 T_a 到 T_2 靠搅拌。

由附表查得 $h_a = 563.0\text{kJ/kg}$ ，$s_a^0 = 7.3343\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$\Delta h_{1-a} = h_a - h_1 = 563.0\text{kJ/kg} - 282.22\text{kJ/kg} = 280.78\text{kJ/kg}$$

$$\Delta u_{1-a} = \Delta h_{1-a} - R_g \Delta T_{1-a}$$
$$= 280.78\text{kJ/kg} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (556 - 280)\text{K} = 201.57\text{kJ/kg}$$

因此

$$q_{1-a} = \Delta u_{1-a} = 201.57\text{kJ/kg}$$

$$w_{\min} = -\Delta u_{a-2} = -(\Delta u_{1-2} - \Delta u_{1-a}) = (227.33 - 201.57)\text{kJ/kg} = -25.76\text{kJ/kg}$$

$$s_{g,\min} = s_2 - s_1 - s_f$$
$$= 0.5445\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - \frac{277.33\text{kJ/kg} - 25.76\text{kJ/kg}}{556\text{K}} = 0.18196\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

这种情况是尽可能多利用加热，而搅拌功最小的情况，所以是系统的最小的熵产。

(3)最大熵产发生在不靠加热，全部由于搅拌而升温，这时 $q = 0$，$S_f = 0$

$$s_{g,\max} = s_2 - s_1 = 0.5445\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

这时搅拌功最大，$w_{\max} = -\Delta u_{1-2} = -227.33\text{kJ/kg}$。

5−15 要求将绝热容器内管道中流动的空气由$t_1 = 17\ ^\circ\mathrm{C}$在定压（$p_1 = p_2 = 0.1\ \mathrm{MPa}$）下加热到$t_2 = 57\ ^\circ\mathrm{C}$。有两种方案。方案 A：叶轮搅拌容器内的粘性液体，通过粘性液体加热空气；方案 B 容器中通入$p_3 = 0.1\ \mathrm{MPa}$的饱和水蒸气，加热空气后冷却为饱和水，见图 5−6。设两系统均为稳态工作，且不计动能、位能影响。试分别计算两种方案流过 1 kg 空气时系统的熵产并从热力学角度分析哪一种方案更合理。已知水蒸气进、出口的焓值及熵值分别为$s_3 = 7.358\ 9\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$、$s_4 = 1.302\ 8\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$和$h_3 = 2\ 673.14\ \mathrm{kJ/kg}$、$h_4 = 417.52\ \mathrm{kJ/kg}$。

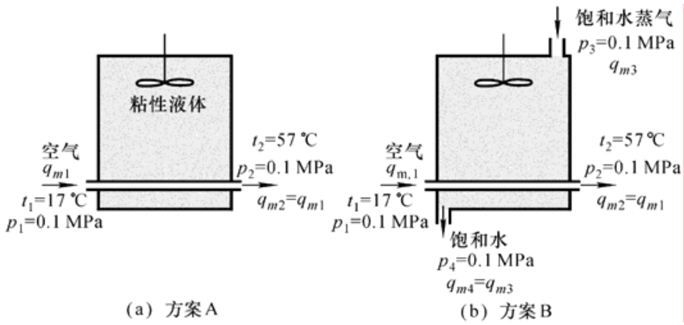


图 5−6 题 5−15 附图

解：取控制体积如图阴影所示，低压下空气作为理想气体。

$$T_1 = (17 + 273)\mathrm{K} = 290\mathrm{K}，T_2 = (57 + 273)\ \mathrm{K} = 330\mathrm{K}$$

方案 A：稳定流动系空气的熵方程为$s_2 - s_1 = s_\mathrm{f} + s_\mathrm{g}$，该控制体积为绝热：$s_\mathrm{f} = 0$，

$$s_\mathrm{g} = s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R_\mathrm{g}\ln\frac{p_2}{p_1} = s_2^0 - s_1^0$$

根据T_1、T_2由附表中查得$s_1^0 = 6.6732\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，$s_2^0 = 6.8029\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

$$\begin{aligned} s_\mathrm{g} &= s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 \\ &= 6.8029\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} - 6.6732\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} = 0.1297\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \end{aligned}$$

方案 B：空气和水蒸汽均为稳定流动，根据稳定流动热力系的熵方程

$$q_{m1}(s_2 - s_1) + q_{m3}(s_4 - s_3) = \dot{S}_\mathrm{f} + \dot{S}_\mathrm{g}$$

由于绝热

$$s_\mathrm{g} = \frac{\dot{S}_\mathrm{g}}{q_{m1}} = (s_2 - s_1) + \frac{q_{m3}}{q_{m1}}(s_4 - s_3) \qquad \text{(a)}$$

式中，$\dfrac{q_{m3}}{q_{m1}}$可由稳定流动能量方程确定，不计动能、位能差时可推得$\dfrac{q_{m3}}{q_{m1}}=\dfrac{h_2-h_1}{h_3-h_4}$。

由附表，根据T_1、T_2查得$h_1=292.25\text{kJ/kg}$，$h_2=332.42\text{kJ/kg}$

$$\frac{q_{m3}}{q_{m1}}=\frac{332.42\text{kJ/kg}-292.25\text{kJ/kg}}{2675.14\text{kJ/kg}-417.52\text{kJ/kg}}=0.0178$$

将数据代入式（a），得

$$\begin{aligned}s_\text{g}&=(6.8029-6.6732)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+0.0178\times(1.3028-7.3589)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\\&=0.022\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

计算结果表明，系统 2 的熵产远小于系统 1 的，从热力学角度分析方案 B 更合理。

5-16 某小型运动气手枪射击前枪管内空气压力 250kPa、温度 27℃，容积 1cm^3，被扳机锁住的子弹像活塞，封住压缩空气。扣动扳机，子弹被释放。若子弹离开枪管时枪管内空气压力为 100kPa、温度为 235K，求此时空气的体积、过程中空气作的功及单位质量空气的熵产。

解：由于过程中质量不变，所以，

$$\frac{p_1V_1}{R_\text{g}T_1}=\frac{p_2V_2}{R_\text{g}T_2}$$

$$V_2=V_1\frac{p_1}{p_2}\frac{T_2}{T_1}=1\text{cm}^3\times\frac{250\text{kPa}}{100\text{kPa}}\times\frac{235\text{K}}{(273+27)\text{K}}=1.96\text{cm}^3$$

因过程绝热，有

$$\begin{aligned}W&=U_1-U_2=\frac{mR_\text{g}}{\kappa-1}(T_1-T_2)=\frac{1}{\kappa-1}(p_1V_1-p_2V_2)\\&=\frac{1}{1.4-1}\times(250\text{kPa}\times1\times10^{-6}\text{m}^3-100\text{kPa}\times1.96\times10^{-6}\text{m}^3)=0.135\text{J}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta s_{1-2}&=s_\text{g}=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}-R_\text{g}\ln\frac{T_2}{T_1}\\&=1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{235\text{K}}{230.9\text{K}}-287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{100\text{kPa}}{250\text{kPa}}\\&=17.7\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

5-17 $m=1\times10^6\ \text{kg}$，温度$t=45\ ^\circ\text{C}$的水向环境放热，温度降低到环境温度$t_0=10\ ^\circ\text{C}$，试确定其热量 $E_{\text{x},Q}$和热量 $A_{\text{n},Q}$。已知水的比热容$c_\text{w}=4.187\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

解：方法一：$T_1=t_1+273=(45+273)\text{K}=318\text{K}$，$T_0=(10+273)\text{K}=283\text{K}$。

温度为 318K 的水放热，温度降低到 283K 过程的平均温度为

$$\overline{T}=\frac{Q}{\Delta s}=\frac{c_{\mathrm{w}}(T_1-T_0)}{c_{\mathrm{w}}\ln\dfrac{T_1}{T_0}}=\frac{(318-283)\mathrm{K}}{\ln\dfrac{318\mathrm{K}}{283\mathrm{K}}}=300.16\mathrm{K}$$

热量

$$E_{\mathrm{x},Q}=\left(1-\frac{T_0}{\overline{T}}\right)Q=mc_{\mathrm{w}}(T_1-T_0)\left(1-\frac{T_0}{\overline{T}}\right)$$
$$=10^6\,\mathrm{kg}\times4187\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(318-283)\mathrm{K}\left(1-\frac{283\mathrm{K}}{300.16\mathrm{K}}\right)=8.38\times10^9\,\mathrm{J}$$

热量

$$A_{\mathrm{n},Q}=Q-E_{\mathrm{x},Q}=\frac{T_0}{\overline{T}}Q$$
$$=\frac{283\mathrm{K}}{300.16\mathrm{K}}\times4187\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times10^6\,\mathrm{kg}\times(318-283)\mathrm{K}=138.16\times10^9\,\mathrm{J}$$

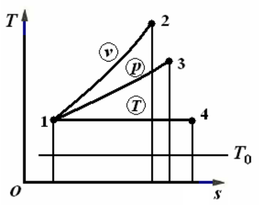
方法二：热量

$$A_{n,Q}=mT_0\Delta s=mT_0c_{\mathrm{w}}\ln\frac{T_0}{\overline{T}}$$
$$=10^6\,\mathrm{kg}\times283\mathrm{K}\times4187\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{318\mathrm{K}}{283\mathrm{K}}=138.17\times10^9\,\mathrm{J}$$

热量

$$E_{\mathrm{x},Q}=Q-A_{n,Q}=mc_{\mathrm{w}}(T_1-T_0)-A_{n,Q}$$
$$=10^6\,\mathrm{kg}\times4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(318-283)\mathrm{K}-138.17\mathrm{kJ/kg}\times10^6\,\mathrm{kg}$$
$$=8.38\times10^6\,\mathrm{kJ}$$

5-18 根据熵增与热量　的关系来讨论对气体：（1）定容加热、（2）定压加热、（3）定温加热，哪一种加热方式较为有利？比较的基础分两种情况：（A）从相同的初温出发；（B）达到相同的终温（提示：比较时取同样的热量 Q_1）



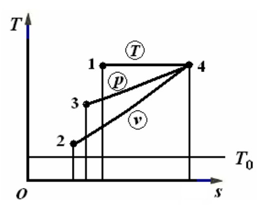


图 5-7 题 5-20 附图

解：（A）从相同初温出发

见图 5-7，1-2 示定容加热，1-3 示定压加热，1-4 示定温加热，取加热量 Q_1 相同，即三条过程线下面积相等，此时 $\Delta s_{1-2}<\Delta s_{1-3}<\Delta s_{1-4}$，而熵增与热量成正比，故定容过程中 Δs_{1-2} 最小，最有利；定压次之；定温最不利。

(B)到达相同的终温

图中 1−4 示定温加热，2−4 示定压加热，3−4 示定容加热，取加热量 Q_1 相同，三条线下面积相等，此时，$\Delta s_{3-4} > \Delta s_{2-4} > \Delta s_{1-4}$，可见，定容最不利，定压次之，定温最有利。

5−19 设工质在 1 000 K 的恒温热源和 300 K 的恒温冷源间按循环 $a-b-c-d-a$ 工作（见图 5−8），工质从热源吸热和向冷源放热都存在 50 K 的温差。（1）计算循环的热效率；（2）设体系的最低温度即环境温度，$T_0 = 300$ K，求热源每供给 1 000 kJ 热量时，两处不可逆传热引起的 损失 I_1 和 I_2，及总 损失。

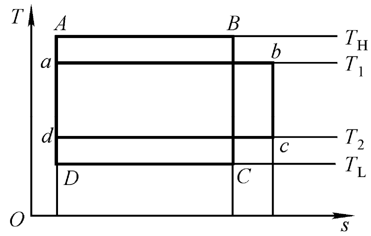


图 5−8 题 5−21 附图

解：（1）循环 $a-b-c-d-a$ 可看作是在中间热源 T_1'、T_2' 之间工作的内可逆循环，因此

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{(300+50)\ \mathrm{K}}{(1000-50)\mathrm{K}} = 0.632$$

（2）已知 $Q_1 = 1000\mathrm{kJ}$

$$Q_2 = \frac{T_2}{T_1} Q_1 = \frac{350\mathrm{K}}{950\mathrm{K}} \times 1000\mathrm{kJ} = 368\mathrm{kJ}$$

高温热源（$T_H = 1000\mathrm{K}$）放出热量 1000kJ，与工质二者组成的孤立系，其熵增

$$\Delta S_{iso} = \Delta S_H + \Delta S_{ab} = \frac{-Q_1}{T} + \frac{Q_1}{T_1'} = \frac{-1000\mathrm{kJ}}{1000\mathrm{K}} + \frac{1000\mathrm{kJ}}{950\mathrm{K}} = 0.0526\mathrm{kJ/K}$$

由于不等温传热引起的 损失

$$I_1 = T_0 \Delta S_{iso,1} = 300\mathrm{K} \times 0.0526\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} = 15.78\mathrm{kJ}$$

350K 的工质放热 368KJ，被 300K 的冷源吸收，二者组成孤立系，其熵增

$$\Delta S_{iso,2} = \Delta S_{cd} + \Delta S_L = \frac{-Q_2}{T_{2'}} + \frac{Q_2}{T_2} = \frac{-368\mathrm{kJ}}{350\mathrm{K}} + \frac{368\mathrm{kJ}}{300\mathrm{K}} = 0.1752\mathrm{kJ/K}$$

不等温传热引起的 损失

$$I_2 = T_0 \Delta S_{iso,2} = 300\mathrm{K} \times 0.1752\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} = 52.56\mathrm{kJ}$$

总的 损失

$$I = I_1 + I_2 = 15.78\mathrm{kJ} + 52.56\mathrm{kJ} = 68.34\mathrm{kJ}$$

5−20 将 100 kg 温度为 20 °C 的水与 200 kg 温度为 80 °C 的水在绝热容器中混合，求混

合前后水的熵变及 损失。设水的比热容为定值，$c_w = 4.187\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，环境温度 $t_0 = 20\ ^\circ\text{C}$。

解：闭口系，$W = 0$，$Q = 0$，故 $\Delta U = 0$，设混合后水温为 t，则

$$m_1 c_w (t - t_1) = m_2 c_w (t_2 - t)$$

$$t = \frac{m_2 t_2 + m_1 t_1}{m_2 + m_1} = \frac{100\text{kg} \times 20^\circ\text{C} + 200\text{kg} \times 80^\circ\text{C}}{100\text{kg} + 200\text{kg}} = 60^\circ\text{C}$$

即 $T_1 = (20 + 273)\text{K} = 293\text{K}$，$T_2 = (80 + 273)\text{K} = 353\text{K}$，$T = (60 + 273)\text{K} = 333\text{K}$。

$$\begin{aligned}\Delta S_{1-2} &= \Delta S_1 + \Delta S_2 = m_1 c_w \ln\frac{T}{T_1} + m_2 c_w \ln\frac{T}{T_2} = c_w\left(m_1 \ln\frac{T}{T_1} + m_2 \ln\frac{T}{T_2}\right) \\ &= 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \left[100\text{kg} \times \ln\frac{333\text{K}}{293\text{K}} + 200\text{K} \times \ln\frac{333\text{K}}{353\text{K}}\right] \\ &= 4.7392\text{kJ/K}\end{aligned}$$

绝热过程熵流 $S_f = 0$，熵变等于熵产 $\Delta S_{1-2} = S_g$， 损失

$$I = T_0 S_g == (20 + 273)\text{K} \times 4.3792\text{kJ/K} = 1388.6\text{kJ}$$

5-21 100 kg 温度为 0 °C 的冰，在大气环境中融化为 0 °C 的水，已知冰的溶解热为 335 kJ/kg，设环境温度 $T_0 = 293\ \text{K}$，求冰化为水的熵变，过程中的熵流、熵产及 损失。

解：100kg 冰融解需热量 $Q = 100\text{kg} \times 335\text{kJ/kg} = 3.35 \times 10^4\text{kJ}$。设想在冰与环境间有一中间热源，中间热源与冰接触侧的温度 $T = T_{ice} = 273\text{K}$，它们之间是无温差传热，取冰为热力系，进行的是内可逆过程，因而冰的熵变

$$\Delta S_{1-2} = \frac{Q}{T} = \frac{Q}{T_{ice}} = \frac{3.35 \times 10^4\text{kJ/kg}}{273\text{K}} = 122.71\text{kJ/K}$$

闭口系的熵方程 $\Delta S = S_f + S_g$。这里，热源温度即为环境温度，所以熵流

$$S_f = \frac{Q}{T_r} = \frac{Q}{T_0} = \frac{3.35 \times 10^4\text{kJ}}{293\text{K}} = 114.33\text{kJ/K}$$

熵产

$$S_g = \Delta S - S_f = 122.71\text{kJ/K} - 114.33\text{kJ/K} = 8.38\text{kJ/K}$$

损失

$$I = T_0 S_g = 293\text{K} \times 9.38\text{kJ/K} = 2455.34\text{kJ}$$

5-22 100 kg 温度为 0 °C 的冰，在 20 °C 的环境中融化为水后升温至 20 °C。已知冰的溶解热为 335 kJ/kg，水的比热容为 $c_w = 4.187\ \text{kJ/(kg·K)}$，求：

（1）冰融化为水，并升温到 20 °C 的熵变量；

（2）包括相关环境在内的孤立系统的熵变；

（3） 损失，并将其示于 $T-s$ 图上。

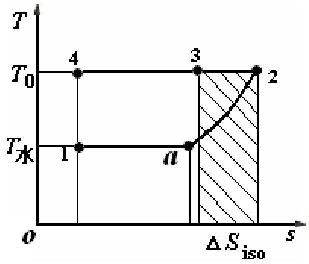


图 5-9 习题 5-24 T-s 图

解：冰融化、升温过程如图 5-9 中曲线 $1-a-2$ 所示

（1）100 kg 0 °C 的冰融化需热量

$$Q_1 = 100\text{kg} \times 335\text{kJ/kg} = 3.35\times10^4\,\text{kJ}$$

100 kg 0 °C 的水加热到 20 °C，需要热量

$$Q_2 = 100\text{kg}\times 4.187\text{kJ/(kg·K)}\times(20-0)^\circ\text{C} = 8.374\times10^3\,\text{kJ}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 3.35\times10^4\,\text{kJ} + 8.374\times10^3\,\text{kJ} = 4.1874\times10^4\,\text{kJ}$$

水的熵变

$$\Delta S_{1-2} = \frac{Q_1}{T_{\text{ice}}} + mc_w \ln\frac{T_0}{T_{\text{ice}}}$$
$$= \frac{3.35\times10^4\,\text{kJ}}{273\text{K}} + 100\text{kg}\times4.187\text{kJ/(kg·K)}\times\ln\frac{293\text{K}}{273\text{K}} = 152.313\text{kJ/K}$$

（2）环境的熵变

$$\Delta S_{3-4} = \frac{-Q}{T_0} = \frac{-4.1874\times10^4\,\text{kJ}}{293\text{K}} = -142.915\text{kJ/K}$$

由冰和水与环境组成的孤立系熵变

$$\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_{1-2} + \Delta S_{3-4} = 152.313\text{kJ/K} - 142.915\text{kJ/K} = 9.398\text{kJ/K}$$

（3）$I = T_0\Delta S_{\text{iso}} = 293\text{K}\times9.398\text{kJ/K} = 2753.71\text{kJ}$。

I 在 $T-s$ 图（图 5-9）中以阴影面积表示。

5-23 两物体 A 和 B 质量及比热容相同，即 $m_1 = m_2 = m,\ c_{p1} = c_{p2} = c_p$，温度各为 T_1 和 T_2，且 $T_1 > T_2$，设环境温度为 T_0。按一系列微元卡诺循环工作的可逆机，以 A 为热源，以 B 为冷源，循环运行后，A 物体温度逐渐降低，B 物体温度逐渐升高，直至两物体温度相等，为 T_f 为

止，试证明：

（1）$T_f=\sqrt{T_1T_2}$，以及最大循环净功 $W_{max}=mc_p(T_1+T_2-2T_f)$；

（2）若 A 和 B 直接传热，热平衡时温度为 T_m，求 T_m 及不等温传热引起的 损失。

解：（1）根据题意，A、B 均为变温热源，要求确定在 A、B 间工作的最大循环净功，因此，一定是可逆循环。设过程中，A、B 温度分别为 T_{1x}、T_{2x} 时的微元卡诺循环自 A 热源吸热 $\delta Q_{1,x}$，向 B 冷源放热 $\delta Q_{2,x}$，循环净功为 δW_{net}，因过程全部可逆

热源 A 的熵变 $$dS_1=\frac{\delta Q_{1,x}}{T_{1,x}}=\frac{mc_p dT_{1,x}}{T_{1,x}}$$

冷源 B 的熵变 $$dS_2=\frac{\delta Q_{2,x}}{T_{2,x}}=\frac{mc_p dT_{2,x}}{T_{2,x}}$$

经过一系列微元卡诺循环，热源 A 温度由 T_1 变化到 T_f，冷源 B 的温度由 T_2 变化到 T_f，这时

A 的总熵变 $$\Delta S_1=\int_{T_1}^{T_f} mc_p\frac{dT_{1,x}}{T_{1,x}}=mc_p\ln\frac{T_f}{T_1}$$

B 的总熵变 $$\Delta S_2=\int_{T_2}^{T_f} mc_p\frac{dT_{2,x}}{T_{2,x}}=mc_p\ln\frac{T_f}{T_2}$$

而工质经过的是循环 $$\oint dS=0$$

由热源、冷源、工质组成孤立系，孤立系中进行的可逆循环，故 $\Delta S_{iso}=0$，即

$$\Delta S_1+\oint dS+\Delta S_2=0$$

所以 $$mc_p\ln\frac{T_f}{T_1}+mc_p\ln\frac{T_f}{T_2}=0$$

即 $$\ln\frac{T_f}{T_1}\cdot\frac{T_f}{T_2}=0$$

$$T_f=\sqrt{T_1T_2}$$

微元循环的循环净功

$$\delta w_{max}=|\delta Q_{1,x}|-|\delta Q_{2,x}|=|mc_p dT_{1,x}|-|mc_p dT_{2,x}|$$

全部微元循环

$$W_{\max} = \int_{T_f}^{T_1} mc_p \mathrm{d}T_{1,x} - \int_{T_2}^{T_f} mc_p \mathrm{d}T_{2,x}$$
$$= mc_p(T_1 - T_f) - mc_p(T_f - T_2) = mc_p(T_1 + T_2 - 2T_f)$$

(2)两物体 A 和 B 直接触，则热物体放出的热量等于冷物体吸入的热$|\delta Q_{1,x}| = |\delta Q_{2,x}|$，因此

$-mc_p \mathrm{d}T_{1,x} = mc_p \mathrm{d}T_{2,x}$ 即 $-mc_p \int_{T_1}^{T_m} \mathrm{d}T_{1,x} = mc_p \int_{T_2}^{T_m} \mathrm{d}T_{2,x}$，故 $-(T_m - T_1) = (T_m - T_2)$，得

$$T_m = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$$

损失的计算有二种方法。方法一

A 物体的熵变 $\quad \Delta S_A = \int_{T_1}^{T_m} mc_p \frac{\mathrm{d}T_{1,x}}{T_{1,x}} = mc_p \ln\frac{T_m}{T_1}$

B 物体的熵变 $\quad \Delta S_B = \int_{T_2}^{T_m} mc_p \frac{\mathrm{d}T_{2,x}}{T_{2,x}} = mc_p \ln\frac{T_m}{T_2}$

由 A 和 B 组成的孤立系熵变

$$\Delta S_{iso} = \Delta S_A + \Delta S_B = mc_p \ln\frac{T_m}{T_1} + mc_p \ln\frac{T_m}{T_2} = mc_p \ln\frac{T_m^2}{T_1 T_2}$$

又因$T_1 T_2 = T_f^{\,2}$。所以

$$\Delta S_{iso} = 2mc_p \ln\frac{T_m}{T_f}$$

损失

$$I = T_0 \Delta S_{iso} = 2mc_p T_0 \ln\frac{T_m}{T_f}$$

方法二

A 物体放出热量 $\quad Q_A = mc_p(T_1 - T_m)$

其中热量

$$A_{n,Q_A} = T_0(-\Delta S_A) = T_0 mc_p \ln\frac{T_1}{T_m}$$

热量

$$E_{x,Q_A} = Q_A - A_{n,Q_A}$$
$$= mc_p(T_1 - T_m) - mc_p T_0 \ln\frac{T_1}{T_m} = mc_p\left(T_1 - T_m - T_0 \ln\frac{T_1}{T_m}\right)$$

A 物体放出热量由 B 物体吸收 $\quad Q_B = mc_p(T_m - T_2)$

其中热量

$$A_{n,Q_\mathrm{B}} = T_0 \Delta S_\mathrm{B} = T_0 m c_p \ln \frac{T_\mathrm{m}}{T_2}$$

热量

$$E_{\mathrm{x},Q_\mathrm{B}} = Q_\mathrm{B} - A_{\mathrm{n},Q_\mathrm{B}}$$
$$= mc_p (T_\mathrm{m} - T_2) - mc_p T_0 \ln \frac{T_\mathrm{m}}{T_2} = mc_p \left(T_\mathrm{m} - T_2 - T_0 \ln \frac{T_\mathrm{m}}{T_2} \right)$$

损失

$$I = E_{\mathrm{x},Q_\mathrm{A}} - E_{\mathrm{x},Q_\mathrm{B}} = A_{\mathrm{n},Q_\mathrm{B}} - A_{\mathrm{n},Q_\mathrm{A}} = 2T_0 m c_p \ln \frac{T_\mathrm{m}}{T_\mathrm{f}}$$

5-24 稳定工作的齿轮箱，由高速轴输入功率 $300\ \mathrm{kW}$，由于磨擦损耗和其它不可逆损失，从低速驱动轴输出功率 $292\ \mathrm{kW}$，齿轮箱的外表面被环境空气冷却，冷却量 $q_Q = -hA(T_\mathrm{b} - T_0)$。式中表面传热系数 $h = 0.17\ \mathrm{kW/(m^2 \cdot K)}$，齿轮箱外表面积 $A = 1.2\ \mathrm{m}^2$。T_b 为外壁面平均温度。已知环境温度 $T_0 = 293\ \mathrm{K}$。试求：

（1）齿轮系统的熵产和 损失；

（2）齿轮箱及相关环境组成的孤立系熵增（kW/K）和 损失（kW）。

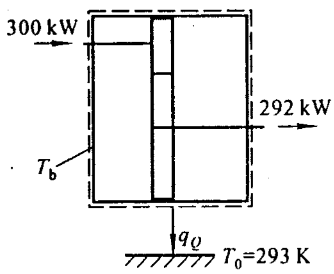


图 5-10 习题 5-26 示意图

解 根据题意，齿轮箱在稳定情况下工作。齿轮箱内部存在磨擦不可逆因素；齿轮箱壁面温度和环境间存在有限温差传热引起的不可逆损失。假设齿轮箱外表面温度均匀。

（1）取齿轮系统为热力系，由闭口系能量方程 $\mathrm{d}U = \delta Q - \delta W$ 得单位时间表达式

$$\frac{\Delta U}{\tau} = q_Q - \Delta P$$

由于稳定，$\dfrac{\Delta U}{\tau} = 0$

$$q_Q = \Delta P = 292\mathrm{kW} - 300\mathrm{kW} = -8\mathrm{kW}$$ （负号表示放热）

因 $q_Q = -hA(T_\mathrm{b} - T_0)$，故

$$T_\mathrm{b} = \frac{-q_Q}{hA} + T_0 = \frac{-(-8\mathrm{kW})}{0.17\mathrm{kW/(m^2 \cdot K)} \times 1.2\mathrm{m}^2} + 293\mathrm{K} = 332.2\mathrm{K}$$

单位时间闭口系的熵方程

$$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau} = \dot{S}_\mathrm{f} + \dot{S}_\mathrm{g}$$

由于稳定，$\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau}=0$，齿轮箱系统向齿轮箱壁面放热，故$T_{\mathrm{r}}=T_{\mathrm{b}}$，所以

$$\dot{S}_{\mathrm{g1}}=-\dot{S}_{\mathrm{f1}}=-\frac{q_Q}{T_{\mathrm{b}}}=\frac{-(-8\mathrm{kW})}{332.2\mathrm{K}}=0.0241\mathrm{kW/K}$$

损失

$$\dot{I}_1=T_0\dot{S}_{\mathrm{g1}}=293\mathrm{K}\times0.024\mathrm{kW/K}=7.056\mathrm{kW}$$

（2）包括齿轮箱和相关环境在内的系统是孤立系，$\Delta S_{\mathrm{iso}}=S_{\mathrm{g}}$。对齿轮箱写出熵方程，同样由于稳定$\dfrac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau}=\dot{S}_{\mathrm{f}}+\dot{S}_{\mathrm{g}}=0$

$$\dot{S}_{\mathrm{g}}=-\dot{S}_{\mathrm{f}}=-\frac{q_Q}{T_0}=\frac{-(-8\mathrm{kW})}{293\mathrm{K}}=0.0273\mathrm{kW/K}$$

损失

$$\dot{I}=T_0\dot{S}_{\mathrm{g}}=293\mathrm{K}\times0.0273\mathrm{kW/K}=8\mathrm{kW}$$

$\dot{S}_{\mathrm{g}}$和$\dot{I}$分别为总熵产和总 损失。由于齿轮箱外壳与环境间不等温传起的熵产$\dot{S}_{\mathrm{g2}}$和 损失$\dot{I}_2$为

$$S_{\mathrm{g,2}}=S_{\mathrm{g}}-S_{\mathrm{g,1}}=0.0273\mathrm{kW/K}-0.0241\mathrm{kW/K}=0.0032\mathrm{kW/K}$$

$$\dot{I}_2=\dot{I}-\dot{I}_1=8\mathrm{kW}-7.056\mathrm{kW}=0.944\mathrm{kW}$$

5-25 有一热交换器用干饱和蒸汽加热空气，已知蒸汽压力为$0.1\ \mathrm{MPa}$，空气出入口温度分别为$66\ ^{\circ}\mathrm{C}$ ℃和$21\ ^{\circ}\mathrm{C}$，环境温度为$t_0=21^{\circ}\mathrm{C}$。若热交换器与外界完全绝热，求稳流状态下 1kg 蒸汽凝结时，（1）空气的质流量；（2）整个系统不可逆作功能力损失。

解：查饱和水和饱和蒸汽表得 $p=0.1\mathrm{MPa}$ 时 $t_{\mathrm{s}}=99.634\ ^{\circ}\mathrm{C}$，$\gamma=2257.6\mathrm{kJ/kg}$、$s'=1.3028\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$、$s''=7.3589\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。

（1）由能量守恒得$m_{\mathrm{a}}(h_{\mathrm{a2}}-h_{\mathrm{a1}})=m_{\mathrm{v}}\gamma$，所以

$$m_{\mathrm{a}}=\frac{\gamma}{h_{\mathrm{a2}}-h_{\mathrm{a1}}}=\frac{\gamma}{c_p(t_{\mathrm{a2}}-t_{\mathrm{a1}})}=\frac{2257.6\mathrm{kJ/kg}}{1.005\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(66-21)^{\circ}\mathrm{C}}=49.92\mathrm{kg}$$

（2）取换热器为控制容积，列熵方程

$$\Delta S_{\mathrm{CV}}=(s_{\mathrm{v,1}}-s_{\mathrm{v,2}})+m_{\mathrm{a}}(s_{\mathrm{a,1}}-s_{\mathrm{a,2}})+S_{\mathrm{f}}+S_{\mathrm{g}}=0$$

据题意$Q=0$，故$S_{\rm f}=0$，于是

$$S_{\rm g}=(s_{\rm v,2}-s_{\rm v,1})+m_{\rm a}(s_{\rm a,2}-s_{\rm a,1})$$
$$=(s'-s'')+m_{\rm a}\left[c_p\ln\frac{T_{\rm a,2}}{T_{\rm a,1}}-R_{\rm g}\ln\frac{p_{\rm a,2}}{p_{\rm a,1}}\right]\approx(s'-s'')+m_{\rm a}c_p\ln\frac{T_{\rm a,2}}{T_{\rm a,1}}$$
$$=(1.3028-7.3589)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+49.92\text{kg}\times$$
$$1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{(66+273.15)\text{K}}{(21+273.15)\text{K}}=1.0857\text{kJ/K}$$

$$I=T_0S_{\rm g}=293.15\text{K}\times1.0857\text{kJ/K}=318.3\text{kJ}$$

5-26 垂直放置的气缸活塞系统内含有 100 kg 水，初温为$27\ ^\circ\text{C}$，外界通过螺旋桨向系统输入功$W_{\rm s}=1\ 000\ \text{kJ}$，同时温度为$373\ \text{K}$的热源向系统内水传热$100\ \text{kJ}$，如图 5-11 所示。若加热过程中水维持定压，且水的比热容取定值，$c_{\rm w}=4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，环境参数为$T_0=300\text{K}$、$p_0=0.1\text{MPa}$。求：

（1）过程中水的熵变及热源熵变；

（2）过程中作功能力损失。

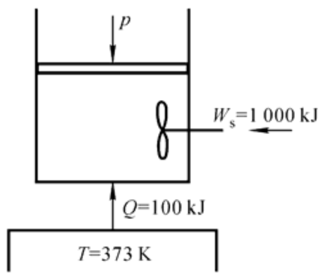


图 5-11 习题 5-28 附图

解：由于温升较小，忽略其体积变化，则

$$\Delta t_{\rm w}=\frac{W_{\rm s}+Q}{c_{\rm w}m_{\rm w}}$$

$$t_2=t_1+\frac{W_{\rm s}+Q}{c_{\rm w}m_{\rm w}}=27\ ^\circ\text{C}+\frac{1\ 000\ \text{kJ}+100\ \text{kJ}}{4.187\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times100\ \text{kg}}=29.63\ ^\circ\text{C}$$

（1）熵变

$$\Delta S_{\rm w}=\int_1^2\frac{\delta Q}{T}=\int_1^2\frac{m_{\rm w}c_{\rm w}\text{d}T}{T}=m_{\rm w}c_{\rm w}\ln\frac{T_{\rm w,2}}{T_{\rm w,1}}$$
$$=100\text{kg}\times4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{(273.15+29.63)\text{K}}{(273.15+27)\text{K}}=3.652\ 8\text{kJ/K}$$

$$\Delta S_{\rm r}=\int_1^2\frac{\delta Q}{T_{\rm r}}=\frac{Q}{T_{\rm r}}=-\frac{100\ \text{kJ}}{373\ \text{K}}=-0.268\ 1\ \text{kJ/K}$$

（2）作功能力损失

取水和热源为系统，为闭口绝热系，列熵方程

$$\Delta S=S_{\rm f}+S_{\rm g}=S_{\rm g}，\quad s_{\rm f}=0$$

$$S_{\mathrm{g}}=\Delta S_{\mathrm{w}}+\Delta S_{\mathrm{r}}=3.6528\mathrm{kJ/kg}-0.2681\mathrm{kJ/kg}=3.3847\mathrm{kJ/kg}$$

$$I=T_0S_{\mathrm{g}}=(273.15+27)\mathrm{K}\times3.3847\mathrm{kJ/K}=1015.9\mathrm{kJ}$$

5-27 在一台蒸汽锅炉中，烟气定压放热，温度从$1\ 500\ ^{\circ}\mathrm{C}$降低到$250\ ^{\circ}\mathrm{C}$。所放出的热量用以生产水蒸气。压力为$9.0\ \mathrm{MPa}$、温度为$30\ ^{\circ}\mathrm{C}$的锅炉给水被加热、汽化、过热成$p_1=9.0\ \mathrm{MPa}$、$t_1=450\ ^{\circ}\mathrm{C}$的过热蒸汽。将烟气近似为空气，取比热容为定值、且$c_p=1.079\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。试求：

（1）产生 1 kg 过热蒸汽的烟气（kg）；

（2）生产 1 kg 过热蒸汽时，烟气熵的减小以及过热蒸汽熵的增大；

（3）将烟气和水蒸气作为孤立系时生产 1 kg 过热蒸汽孤立系熵的增大为多少；

（4）环境温度为$15\ ^{\circ}\mathrm{C}$时作功能力的损失。

解：由未饱和水和过热蒸汽表查得：$p=9.0\mathrm{MPa}$、$T_s=303.385\mathrm{K}$。给水：$p_1=9.0\mathrm{MPa}$、$t_1=30^{\circ}\mathrm{C}$，$h_1=133.86\mathrm{kJ/kg}$、$s_1=0.4338\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$；过热蒸汽：$p_2=9.0\mathrm{MPa}$、$t_1=450^{\circ}\mathrm{C}$，$h_2=3256.0\mathrm{kJ/kg}$、$s_1=6.4835\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$。烟气进出口温度为$t_{\mathrm{g},1}=(1500+273)\mathrm{K}=1773\mathrm{K}$、$t_{\mathrm{g},2}=(250+273)\mathrm{K}=523\mathrm{K}$。

（1）烟气量

由热平衡方程$m_{\mathrm{g}}c_p(t_{\mathrm{g},1}-t_{\mathrm{g},2})=m(h_2-h_1)$，得

$$m_{\mathrm{g}}=\frac{m(h_2-h_1)}{c_p(t_{\mathrm{g},1}-t_{\mathrm{g},2})}=\frac{1\mathrm{kg}\times(3256.0\mathrm{kJ/kg}-133.86\mathrm{kJ/kg})}{1.079\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(1500-250)^{\circ}\mathrm{C}}=2.315\mathrm{kg}$$

（2）烟气熵变

$$\Delta S_{\mathrm{g}}=m_{\mathrm{g}}c_p\ln\frac{T_{\mathrm{g},2}}{T_{\mathrm{g},1}}$$

$$=2.315\mathrm{kg}\times1.079\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{523.15\mathrm{K}}{1773.15\mathrm{K}}=-3.0488\mathrm{kJ/K}$$

水的熵变

$$\Delta S_{\mathrm{H_2O}}=m(s_2-s_1)=1\mathrm{kg}\times(6.4835-0.4338)\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}=6.0497\mathrm{kJ/K}$$

（3）孤立系统熵变

$$\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_{\text{g}} + \Delta S_{\text{H}_2\text{O}} = -3.0488\text{kJ/K} + 6.0497\text{kJ/K} = 3.0009\text{kJ/K}$$

（4）作功能力损失

$$I = T_0 \Delta S_{\text{iso}} = (273.15 + 20)\text{K} \times 3.0009\text{kJ/K} = 879.7\text{kJ}$$

5−28 上题中加热、汽化和过热过程若在电热锅炉内完成，试求生产 1kg 过热蒸汽的（1）耗电量；（2）整个系统作功能力损失；（3）蒸汽获得的可用能。

解：（1）耗电量即 H_2O 获得的能量

$$Q_{\text{E}} = m(h_2 - h_1) = 1\text{kg} \times (3256.0 - 133.86)\text{kJ/kg} = 3122.14\text{kJ}$$

（2）据熵方程 $\Delta S = S_{\text{f}} + S_{\text{g}}$，绝热熵流为零，所以熵产

$$S_{\text{g}} = \Delta S = \Delta S_{\text{H}_2\text{O}} = 6.0497\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$I = T_0 S_{\text{g}} = 293.15\text{K} \times 6.0497\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} = 1773.5\text{kJ/kg}$$

（3）获得的可用能是其　值增量

$$\begin{aligned}\Delta e_{\text{x},H} &= (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) \\ &= 3122.14\text{kJ/kg} - 293.15\text{K} \times 6.0497\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} = 1348.67\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

5−29　分别求例 4-10 两种情况的作功能力损失。

解：例 4−10 已求得气缸内 80%的水蒸发需输入能量1 761.4 kJ

（1）取缸内水为系统，是闭口热力系。闭口系熵方程 $\Delta S = S_{\text{f}} + S_{\text{g}}$，由于绝热，所以熵流为零，即 $S_{\text{f}} = 0$，于是

$$S_{\text{g}} = \Delta S = m(s'' - s') = 0.8\text{kg} \times (7.1272 - 1.5303)\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} = 4.4775\text{kJ/K}$$

$$I = T_0 S_{\text{g}} = 293.15\ \text{K} \times 4.477\ 5\ \text{kJ/K} = 1\ 311.9\ \text{kJ}$$

（2）移去绝热层，直接加热。据熵方程，并考虑到系统熵变与（1）相同，所以

$$S_{\text{g}} = \Delta S - S_{\text{f}} = \Delta S - \frac{Q}{T_{\text{r}}} = 4.477\ 5\ \text{kJ/K} - \frac{1\ 761.4\ \text{kJ}}{450\ \text{K}} = 0.563\ 3\ \text{kJ/K}$$

$$I = T_0 S_{\text{g}} = 293.15\ \text{K} \times 0.563\ 3\ \text{kJ/K} = 165.0\ \text{kJ}$$

5−30　体积 $V = 0.1\ \text{m}^3$ 的刚性真空容器，打开阀门，$p_0 = 10^5\ \text{Pa}$、$T_0 = 303\ \text{K}$ 的环境空气充入，充气终了 $p_2 = 10^5\ \text{Pa}$。已知空气的 $R_{\text{g}} = 0.287\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$，$c_p = 1.004\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$，

$\kappa = 1.4$。分别按绝热充气和等温充气两种情况，求：

（1）终温 T_2 和充气量 m_i；（2）充气过程的熵产 S_g；

（3）充气　损失 I。

解：取容器内空间为控制体积，根据控制体积能量方程的一般表达式

$$\delta Q = \mathrm{d}U_{CV} + h_e \delta m_e - h_i \delta m_i + \delta W_i$$

已知是刚性容器不作外功，$\delta W_i = 0$，无空气流出，$\delta m_e = 0$，空气充入量等于控制体积内空气增量，$\delta m_i = \mathrm{d}m$，且 $h_i = h_0 = c_p T_0$，故能量方程简化为 $\delta Q = \mathrm{d}U_{CV} - h_0 \mathrm{d}m$。

（一）按绝热充气

（1）终温和充气量

$$\mathrm{d}U_{CV} - h_0 \mathrm{d}m = 0$$

积分得 $u_2 m_2 - u_1 m_1 - h_0(m_2 - m_1) = 0$。因初态真空，$m_1 = 0$，$m_2 = m_i$，因而 $u_2 = h_0$，$c_V T_2 = c_p T_0$，所以

$$T_2 = \kappa T_0 = 1.4 \times 303\text{K} = 424.2\text{K}$$。

$$m_i = m_2 = \frac{p_2 V}{R_g T_2} = \frac{10^5 \times 0.1\text{Pa}}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 424.2\text{K}} = 0.8214\text{kg}$$

（2）充气过程的熵产

控制体积熵方程

$$\mathrm{d}S_{CV} = \frac{\delta Q}{T_r} + s_i \delta m_i - s_e \delta m_e + \delta S_g$$

据题意可简化化为

$$\mathrm{d}S_{CV} = s_0 \mathrm{d}m + \delta S_g$$

积分

$$S_2 - S_1 = s_0(m_2 - m_1) + S_g$$

$$S_g = m_2(s_2 - s_0) = m_2 c_p \ln\frac{T_2}{T_0}$$

$$= 0.8214\text{kg} \times 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{424.2\text{K}}{303\text{K}} = 0.2775\text{kJ/K}$$

（3）充气　损失

$$I = T_0 S_{\mathrm{g}} = 303\mathrm{K} \times 0.2775\mathrm{kJ/K} = 84.08\mathrm{kJ}$$

（二）按等温充气

（1）终温和充气量

$$T_2 = T_0 = 303\mathrm{K}$$

$$m_{\mathrm{i}} = m_2 = \frac{p_2 V}{R_{\mathrm{g}} T_2} = \frac{10^5\,\mathrm{Pa} \times 0.1\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}}{287\mathrm{J/(kg \cdot K)} \times 303\mathrm{K}} = 1.1499\mathrm{kg}$$

（2）充气过程的熵产

熵方程简化为

$$\mathrm{d}S_{\mathrm{CV}} = \frac{\delta Q}{T_{\mathrm{r}}} + s_0 \mathrm{d}m + \delta S_{\mathrm{g}}$$

积分得 $$S_2 - S_1 = \frac{Q}{T_0} + s_0(m_2 - m_1) + S_{\mathrm{g}}\text{。}$$

式中：$S_2 = m_2 s_2 = m_2 s_0$、$S_1 = 0$、$m_1 = 0$。故

$$S_{\mathrm{g}} = -\frac{Q}{T_0}$$

由能量方程的简化式，$\delta Q = \mathrm{d}U_{\mathrm{CV}} - h_0 \mathrm{d}m$，积分得，$Q = U_2 - U_1 - h_0(m_2 - m_1)$。因 $m_1 = 0$、$U_1 = 0$，$u_2 = u_0$、$h_0 - u_0 = p_0 v_0$，代入后有

$$Q = m_2 u_0 - m_2 h_0 = (u_0 - h_0) m_2 = -p_0 v_0 m_2 = -p_0 V$$

$$S_{\mathrm{g}} = \frac{p_0 V}{T_0} = \frac{10^5\,\mathrm{Pa} \times 10^{-3} \times 0.1\mathrm{m}^3}{303\mathrm{K}} = 0.0330\mathrm{kJ/K}$$

（3）充气 损失

$$I = T_0 S_{\mathrm{g}} = 303\mathrm{K} \times 0.0330\mathrm{kJ/K} = 10\mathrm{kJ}$$

5-31 一刚性密封容器体积为V，其中装有状态为p，T_0的空气，这时环境大气状态为p_0，T_0。不计系统的动能和位能，试证明其热力学能 为：$E_{\mathrm{x},U} = p_0 V\left(1 - \frac{p}{p_0} + \frac{p}{p_0}\ln\frac{p}{p_0}\right)$。

证明：工质的热力学能 的定义式

$$E_{\mathrm{x},U} = U - U_0 - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0)$$

空气可作为理想气体，若取定值比热容，则$U-U_0=mc_V(T-T_0)$。因$T=T_0$，所以

$$U-U_0=0$$

$$S-S_0=m\left[c_p\ln\frac{T}{T_0}-R_g\ln\frac{p}{p_0}\right]=-mR_g\ln\frac{p}{p_0}$$

故

$$E_{x,U}=mT_0R_g\ln\frac{p}{p_0}+p_0V-p_0V_0=pV\ln\frac{p}{p_0}+p_0V-p_0V_0$$

$$=p_0V\left(1-\frac{V_0}{V}+\frac{p}{p_0}\ln\frac{p}{p_0}\right)$$

由于$T=T_0$，所以$\frac{V_0}{V}=\frac{p}{p_0}$。代入上式得

$$E_{x,U}=p_0V\left(1-\frac{p}{p_0}+\frac{p}{p_0}\ln\frac{p}{p_0}\right)$$

证毕。

5-32 活塞—气缸系统的容积$V=2.45\times10^{-3}\ \mathrm{m^3}$，内有 $p_1=0.7\ \mathrm{MPa}$、$t_1=867\ ^\circ\mathrm{C}$的燃气，已知环境温度、压力分别为$t_0=27\ ^\circ\mathrm{C}$、$p_0=0.101\,3\ \mathrm{MPa}$，燃气的$R_g=296\mathrm{J/(kg\cdot K)}$，$c_p=1040\mathrm{J/(kg\cdot K)}$，求：

（1）燃气的热力学能 ；

（2）除环境外无其它热源的情况下，燃气膨胀到$p_2=0.3\ \mathrm{MPa}$、$t_2=637\ ^\circ\mathrm{C}$时的最大有用功$W_{u,\max}$。

解：（1） $c_V=c_p-R_g=1.04\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}-0.296\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}=0.744\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

$$m=\frac{p_1V_1}{R_gT_1}=\frac{0.7\times10^6\,\mathrm{Pa}\times2.45\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}}{296\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(867+273)\mathrm{K}}=0.00508\mathrm{kg}$$

$$V_0=\frac{mR_gT_0}{p_0}=\frac{p_1T_0}{p_0T_1}V_1$$

$$=\frac{0.7\mathrm{MPa}\times300\mathrm{K}}{0.1013\mathrm{MPa}\times1140\mathrm{K}}\times2.45\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}=4.455\times10^{-3}\,\mathrm{m^3}$$

$$
\begin{aligned}
E_{x,\mathrm{U}_1} &= U_1 - U_0 - T_0(S_1 - S_0) + p_0(V_1 - V_0) \\
&= mc_V(T_1 - T_0) - mT_0\left(c_p \ln\frac{T_1}{T_0} - R_\mathrm{g}\ln\frac{p_1}{p_0}\right) + p_0(V_1 - V_0) \\
&= 0.00508\mathrm{kg}\times 744\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(1140-300)\mathrm{K} - 0.00508\mathrm{kg}\times 300\mathrm{K}\times \\
&\left[1040\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{1140\mathrm{K}}{300\mathrm{K}} - 296\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{0.7\mathrm{MPa}}{0.1013\mathrm{MPa}}\right] + \\
&101300\mathrm{Pa}(2.45-4.455)\times 10^{-3}\mathrm{m}^3 = 1727.7\mathrm{J}
\end{aligned}
$$

（2） $$W_{\mathrm{u,max}} = E_{x,\mathrm{U}1} - E_{x,\mathrm{U}2} = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) + p_0(V_1 - V_2)$$

$$V_2 = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1}V_1 = \frac{0.7\mathrm{MPa}\times(637+273)\mathrm{K}}{0.3\mathrm{MPa}\times 1140\mathrm{K}}\times 45\times 10^{-3}\mathrm{m}^3 = 4.5633\times 10^{-3}\mathrm{m}^3$$

$$
\begin{aligned}
W_{1-2} &= mc_V(T_1 - T_2) - mT_0\left(c_p\ln\frac{T_1}{T_2} - R_\mathrm{g}\ln\frac{p_1}{p_2}\right) + p_0(V_1 - V_2) \\
&= 0.00508\mathrm{kg}\times 774\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(1140-910)\mathrm{K} - 0.00508\mathrm{kg}\times 300\mathrm{K}\times \\
&\left[(1040\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{1140\mathrm{K}}{910\mathrm{K}} - 296\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times\ln\frac{0.7\mathrm{MPa}}{0.3\mathrm{MPa}}\right] + \\
&101300\mathrm{kPa}\times(2.45-4.5633)\times 10^{-3}\mathrm{m}^3 = 680.3\mathrm{J}
\end{aligned}
$$

5-33 试证明理想气体状态下比热容为定值的稳定流动气体流的无量纲焓 的表达式为：$\dfrac{e_{x,\mathrm{H}}}{c_p T_0} = \dfrac{T}{T_0} - 1 - \ln\dfrac{T}{T_0} + \ln\left(\dfrac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$，式中 c_p 为气体的比定压热容，T_0 和 p_0 分别为环境的温度和压力，p 为气体的压力，T 为温度。

证明：稳定物质流的焓 $e_{x,\mathrm{H}} = h - h_0 - T_0(s - s_0)$。对于理想气体，定值热容

$$h - h_0 = c_p(T - T_0)，\quad s - s_0 = c_p\ln\frac{T}{T_0} - R_\mathrm{g}\ln\frac{p}{p_0}，\quad c_p = \frac{\kappa}{\kappa-1}R_\mathrm{g}$$

一起代入焓 式，得

$$
\begin{aligned}
e_{x.H} &= c_p(T - T_0) - T_0\left(c_p\ln\frac{T}{T_0} - \frac{\kappa-1}{\kappa}c_p\ln\frac{p}{p_0}\right) \\
&= c_p T_0\left[\frac{T}{T_0} - 1 - \ln\frac{T}{T_0} + \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]
\end{aligned}
$$

$$\frac{e_{x.H}}{c_p T_0} = \frac{T}{T_0} - 1 - \ln\frac{T}{T_0} + \ln\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

证毕。

5-34 空气稳定流经绝热气轮机，由 $p_1 = 0.4\ \text{MPa}$、$T_1 = 450\ \text{K}$、$c_{f1} = 30\ \text{m/s}$、膨胀到 $p_2 = 0.1\ \text{MPa}$、$T_2 = 330\ \text{K}$、$c_{f2} = 130\ \text{m/s}$，这时环境参数 $p_0 = 0.1\ \text{MPa}$、$T_0 = 293\ \text{K}$，设空气的 $R_g = 0.287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p = 1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，不计位能变化。求：

（1）工质稳定流经气轮机时进、出口处的比焓 e_{x,H_1}、e_{x,H_2}，以及比物流 e_{x1}、e_{x2}；

（2）1kg 空气从状态变 1 化到状态 2 的最大有用功 $w_{u,\max}$；

（3）实际有用功。

解：（1）进口处工质的比焓

$$
\begin{aligned}
e_{x,H_1} &= c_p(T_1 - T_0) - T_0\left(c_p \ln\frac{T_1}{T_0} - R_g \ln\frac{p_1}{p_0}\right) \\
&= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (450-293)\text{K} - 293\text{K} \times \\
&\quad \left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{450\text{K}}{293\text{K}} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{0.4\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right] \\
&= 157.63\text{kJ/kg} - 9.15\text{kJ/kg} = 148.48\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

出口处工质的比焓

$$
\begin{aligned}
e_{x,H_2} &= c_p(T_2 - T_0) - T_0\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_0} - R_g \ln\frac{p_2}{p_0}\right) \\
&= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (330-293)\text{K} - 293\text{K} \times \\
&\quad \left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{330\text{K}}{293\text{K}} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{0.1\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right] \\
&= 37.148\text{kJ/kg} - 34.983\text{kJ/kg} = 2.165\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

进口处工质的比物流

$$
\begin{aligned}
e_{x1} &= e_{x,H_1} + \frac{1}{2}c_{f1}^{2} \\
&= 148.48\text{kJ/kg} + \frac{1}{2}(30\text{m/s})^2 \times 10^{-3} = 148.48\text{kJ/kg} + 0.45\text{kJ/kg} \\
&= 148.93\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

出口处工质的比物流

$$
\begin{aligned}
e_{x2} &= e_{x,H_2} + \frac{1}{2}c_{f2}^{2} \\
&= 2.165\text{kJ/kg} + \frac{1}{2}(130\text{m/s})^2 \times 10^{-3} = 2.165\text{kJ/kg} + 8.45\text{kJ/kg} \\
&= 10.62\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

（2）除环境外无其他热源时的最大有用功

$$
w_{1-2,\max} = -\Delta e_x = e_{x1} - e_{x2} = 148.93\text{kJ/kg} - 10.62\text{kJ/kg} = 138.31\text{kJ/kg}
$$

（3）稳定流动热力系能量方程　　　$q = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^2 + w_{\mathrm{i}}$

过程绝热 $q = 0$，所以

$$
\begin{aligned}
w_{\mathrm{i}} &= h_1 - h_2 + \frac{1}{2}(c_{\mathrm{f1}}^2 - c_{\mathrm{f2}}^2) = c_p(T_1 - T_2) + \frac{1}{2}(c_{\mathrm{f1}}^2 - c_{\mathrm{f2}}^2) \\
&= 1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times (450 - 330)\mathrm{K} + \frac{1}{2}[(30\mathrm{m/s})^2 - (130\mathrm{m/s})^2 \times 10^{-3}] \\
&= 112.48\mathrm{kJ}
\end{aligned}
$$

稳流过程的实际有用功 w_{u} 和内部功 w_{i} 相同，$w_{\mathrm{u}} = w_{\mathrm{i}} = 112.48\ \mathrm{kJ/kg}$。

5-35　刚性绝热器内装有 $0.5\ \mathrm{kg}$，$t_1 = 20\ ^\circ\mathrm{C}$、$p_1 = 200\ \mathrm{kPa}$ 的空气，由于叶轮搅拌使空气压力升高到 $p_2 = 220\ \mathrm{kPa}$，空气的比定容热容 $c_V = 0.717\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$，设环境参数为 $p_0 = 98\ \mathrm{kPa}$、$t_0 = 20\ ^\circ\mathrm{C}$。求：

（1）实际过程的过程功（即消耗的搅拌功）；

（2）状态 1 变化到状态 2 的最大可用功 $W_{\mathrm{u.max}}$；

（3）过程　损失。

解　（1）根据闭口系能量方程，对绝热容器有

$$
W = U_1 - U_2 = mc_V(T_1 - T_2)
$$

因 $V_2 = V_1$，故

$$
T_2 = \frac{p_2}{p_1}T_1 = \left(\frac{220\mathrm{kPa}}{200\mathrm{kPa}}\right) \times 293\mathrm{K} = 322.3\mathrm{K}
$$

$$
W = 0.5\mathrm{kg} \times 0.717\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times (293 - 322.3)\mathrm{K} = -10.504\mathrm{kJ}
$$

（2）

$$
\begin{aligned}
W_{\mathrm{u.max}} &= E_{\mathrm{x},U_1} - E_{\mathrm{x},U_2} = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) + p_0(V_1 - V_2) \\
&= U_1 - U_2 - T_0 m\left[c_V \ln\frac{T_1}{T_2} + R_{\mathrm{g}} \ln\frac{V_1}{V_2}\right] + p_0(V_1 - V_2)
\end{aligned}
$$

因 $V_2 = V_1$，故

$$
\begin{aligned}
W_{\mathrm{u.max}} &= U_1 - U_2 - mT_0 c_V \ln\frac{T_1}{T_2} \\
&= -10.504\mathrm{kJ} - 0.5\mathrm{kg} \times 0.717\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times 293\mathrm{K} \ln\frac{293\mathrm{K}}{322.3\mathrm{K}} \\
&= -10.504\mathrm{kJ} + 10.011\mathrm{kJ} = -0.493\mathrm{kJ}
\end{aligned}
$$

（3）　　$$I = T_0 \Delta S_{\text{iso}} = T_0(\Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_0)$$

由于是绝热系，$\Delta S_0 = 0$，$\Delta S_{\text{sys}} = \Delta S_{1-2}$，所以

$$I = T_0 \Delta S_{\text{iso}} = T_0 m c_V \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$= 293\text{K} \times 0.5\text{kg} \times 0.717\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln \frac{322.3\text{K}}{293\text{K}} = 10.011\text{kJ}$$

或：根据闭口系　平衡方程，除环境外无其他的热源时有

$$I = W_{1-2.\max} - W_{\text{u}} = -0.493\text{kJ} - (-10.504\text{kJ}) = 10.011\text{kJ}$$

5−36　表面式换热器中用热水加热空气。空气进、出口参数为 $p_1 = 0.13\ \text{MPa}$、$t_1 = 20\ °\text{C}$，$p_2 = 0.12\ \text{MPa}$、$t_2 = 60\ °\text{C}$，空气流量 $q_m = 1\ \text{kg/s}$，热水进口温度 $t_{\text{w1}} = 80\ °\text{C}$，流量 $q_{m,\text{w}} = 0.8\ \text{kg/s}$，压力几乎不变。水和空气的动能差、位能差也可不计。见图 5−12，已知环境温度 $t_0 = 10°\text{C}$、压力 $p_0 = 0.1\text{MPa}$，空气和水的比热容为 $c_p = 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_{\text{w}} = 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，空气的气体常数 $R_{\text{g}} = 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，换热器的散热损失可忽略不计，用　平衡方程确定　损失。

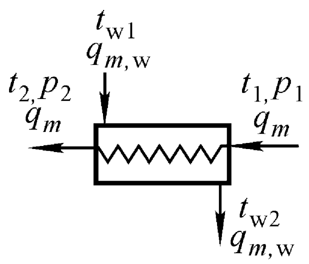


图 5−12 题 5-36 附图

解：由第一定律热水放出热量等于空气吸入热量，故

$$q_m c_p (t_2 - t_1) = q_{m,\text{w}} c_{\text{w}} (t_{\text{w1}} - t_{\text{w2}})$$

$$t_{\text{w2}} = t_{\text{w1}} - \frac{q_m c_p}{q_{m,\text{w}} c_{\text{w}}}(t_2 - t_1) = 80^\circ\text{C} - \frac{1\text{kg} \times 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{0.8\text{kg} \times 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}(60-20)^\circ\text{C} = 68^\circ\text{C}$$

$T_1 = (20+273)\text{K} = 293\text{K}$，$T_2 = (60+273)\text{K} = 333\text{K}$，$T_{\text{w1}} = (80+273)\text{K} = 353\text{K}$，

$T_{\text{w2}} = (68+273)\text{K} = 341\text{K}$，$T_0 = (10+273)\text{K} = 283\text{K}$

空气进、出口的比焓

$$e_{\text{x},H1} = h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0) = c_p(T_1 - T_0) - T_0\left(c_p \ln\frac{T_1}{T_0} - R_{\text{g}} \ln\frac{p_1}{p_0}\right)$$

$$= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (293-283)\text{K} - 283\text{K} \times$$

$$\left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{293\text{K}}{283\text{K}} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{0.13\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right]$$

$$= 21.48\text{kJ/kg}$$

$$
\begin{aligned}
e_{x,H2} &= h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0) = c_p(T_2 - T_0) - T_0\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_0} - R_g \ln\frac{p_2}{p_0}\right) \\
&= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(333-283)\text{K} - 283\text{K}\times \\
&\left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{333\text{K}}{283\text{K}} - 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.12\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right] \\
&= 18.78\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

水进、出口比焓

$$
\begin{aligned}
e_{x,H,w1} &= h_{w1} - h_0 - T_0(s_{w1} - s_0) = c_w\left[(T_{w1} - T_0) - T_0 \ln\frac{T_{w1}}{T_0}\right] \\
&= 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\left[(353-283)\text{K} - 283\text{K}\times\ln\frac{353\text{K}}{283\text{K}}\right] \\
&= 31.20\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
e_{x,H,w2} &= h_{w2} - h_0 - T_0(s_{w2} - s_0) = c_w\left[(T_{w2} - T_0) - T_0 \ln\frac{T_{w2}}{T_0}\right] \\
&= 4.187\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\left[(341-283)\text{K} - 283\text{K}\times\ln\frac{341\text{K}}{283\text{K}}\right] \\
&= 21.93\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

据稳定流动系的　平衡方程，该换热器无散热损失，不作功，所以 $E_{x,Q} = 0$、$W_i = 0$

$$
\begin{aligned}
I &= q_m(e_{x,H_1} - e_{x,H_2}) + q_{mw}(e_{x,H_w1} - e_{x,H_w2}) \\
&= 1\text{kg/s}\times(21.48-18.78)\text{kJ/kg} + 0.8\text{kg/s}\times(31.20-21.93)\text{kJ/kg} \\
&= 10.12\text{kW}
\end{aligned}
$$

5-36 空气稳定地流经气轮机，由 $p_1 = 0.75$ MPa、$t_1 = 750\ ^\circ\text{C}$，绝热膨胀到 $p_2 = 0.1$ MPa、$t_2 = 320\ ^\circ\text{C}$，不计动能，位能变化。若环境参数 $p_0 = 0.1$ MPa、$T_0 = 298$ K，已知空气 $R_g = 0.287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_p = 1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。针对流入 1kg 空气，计算：

（1）实际过程输出的内部功 w_i，过程是否可逆？

（2）1 到 2 的最大有用功 $w_{u,\max}$；

（3）　损失 I；

（4）若不可逆，试计算经可逆绝热过程膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$ 时的理论内部功 $w_{i,\text{rev}}$，并讨论 I 与（$w_{i,\text{rev}} - w_i$）为何不相同？

解：（1）实际内部功 w_i

考虑到不计动、位能差，过程绝热，稳定流动能量方程可简化为

$$w_{\mathrm{i}} = h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2) = 1.004\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (750 - 320)\mathrm{K} = 431.72\mathrm{kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\Delta s_{1-2} &= c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_{\mathrm{g}} \ln\frac{p_2}{p_1} \\ &= 1.004\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln\frac{593\ \mathrm{K}}{1\ 023\ \mathrm{K}} - 0.287\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln\frac{0.1\ \mathrm{MPa}}{0.75\ \mathrm{MPa}} \\ &= 0.031\mathrm{kJ/kg} > 0\end{aligned}$$

故为不可逆过程

（2）最大有用功

$$\begin{aligned}w_{\mathrm{u,max}} &= e_{\mathrm{x},H_1} - e_{\mathrm{x},H_2} \\ &= h_1 - h_2 - T_0(s_1 - s_2) = c_p(T_1 - T_2) - T_0\left[c_p \ln\frac{T_1}{T_2} - R_{\mathrm{g}} \ln\frac{p_1}{p_2}\right] \\ &= 1.004\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (1023 - 593)\mathrm{K} - 298\mathrm{K} \times \\ &\left[1.004\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln\frac{1023\mathrm{K}}{593\mathrm{K}} - 0.287\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln\frac{0.75\mathrm{MPa}}{0.1\mathrm{MPa}}\right] \\ &= 431.72\mathrm{kJ/kg} + 9.177\mathrm{kJ/kg} = 440.897\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

（3）　损失

$$w_{\mathrm{u}} = w_{\mathrm{i}} = 431.72\mathrm{kJ/kg}$$

$$I = w_{\mathrm{u,max}} - w_{\mathrm{i}} = 440.897\mathrm{kJ/kg} - 431.72\mathrm{kJ/kg} = 9.177\mathrm{kJ/kg}$$

（4）可逆绝热膨胀时终温

$$T_{2\mathrm{s}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 = \left(\frac{0.1\mathrm{MPa}}{0.75\mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} \times 1023\mathrm{K} = 575.25\mathrm{K}$$

可逆绝热膨胀理论内部功

$$\begin{aligned}w_{\mathrm{i,s}} &= h_1 - h_{2\mathrm{s}} = c_p(T_1 - T_{2\mathrm{s}}) \\ &= 1.004\mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (1023 - 575.25)\mathrm{K} = 449.54\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

不可逆过程少作功

$$w_{\mathrm{i},s} - w_{\mathrm{i}} = 449.54\mathrm{kJ/kg} - 431.72\mathrm{kJ/kg} = 17.82/\mathrm{kg}$$

显然 $w_{\mathrm{i},s} - w_{\mathrm{i}} \neq I$，　损失小于不可逆绝绝热膨胀少作的功，原因是两者终态不同，实际终态 2 工质的焓　比 2_s 的大。

$$e_{\mathrm{x},H_2} = h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0) = c_p(T_2 - T_0) - T_0\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_0} - R_{\mathrm{g}} \ln\frac{p_2}{p_0}\right)$$

$$
\begin{aligned}
&=1.004\times\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(593-298)\text{K}-298\text{K}\times\\
&\left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{593\text{K}}{298\text{K}}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.75\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right]\\
&=262.63\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

$$
e_{x,H_{2s}}=h_{2s}-h_0-T_0(s_{2s}-s_0)=c_p(T_{2s}-T_0)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_{2s}}{T_0}-R_g\ln\frac{p_{2s}}{p_0}\right)
$$

$$
\begin{aligned}
&=1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(575.25-298)\text{K}-298\text{K}\times\\
&\left[1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{575.25\text{K}}{298\text{K}}-0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{0.75\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right]\\
&=253.90\text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

$w_{i,s}-w_i=I+e_{x,H_1}-e_{x,H_{2s}}$。

5-40 容器 A 的体积为3m^3，内装$0.08\ \text{MPa}$、$27\ ^\circ\text{C}$的空气，容器 B 中空气的质量和温度与 A 中相同，但压力为$0.64\ \text{MPa}$，用空气缩压机将容器 A 中空气全部抽空送到容器 B，见附图。设抽气过程 A 和 B 的温度保持不变。已知环境温度为$27\ ^\circ\text{C}$，压力为$0.1\ \text{MPa}$，求：

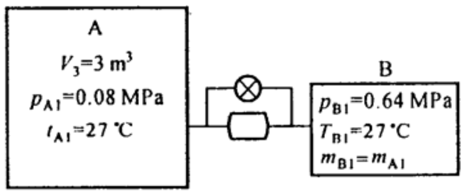


图 5-13 习题 5-40 附图

（1）空气压缩机消耗的最小有用功；

（2）容器 A 抽空后，打开旁通阀门，使两容器内空气压力平衡，空气温度仍保持$27\ ^\circ\text{C}$，求该不可逆过程造成的 损失。

解：（1）初态 A、B 容器中质量相同

$$
m_{B1}=m_{A1}=\frac{p_{A1}V_A}{R_gT_{A1}}=\frac{0.08\times10^6\text{Pa}\times3\text{m}^3}{287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=2.7875\text{kg}
$$

据
$$
\frac{p_{A1}V_A}{R_gT_{A1}}=\frac{p_{B1}V_B}{R_gT_{B1}}
$$

$$
V_B=\frac{p_{A1}}{p_{B1}}V_A=\frac{0.08\text{MPa}}{0.64\text{MPa}}\times3\text{m}^3=0.375\text{m}^3
$$

取容器 A 和容器 B 以及压缩机共同组成热力系，是闭口热力系，除环境外无其它热源，若过程可逆，则压缩消耗最小有用功，这时，$E_{x,Q}=0$，$I=0$，闭口系 平衡方程可写为

$$W_{1-2,\min}=E_{x,U_2}-E_{x,U_1}=U_2-U_1-T_0(S_2-S_1)+p_0(V_2-V_1)$$
$$=(m_{A1}+m_{B1})c_VT_{B2}-(m_{A1}c_VT_{A1}+m_{B1}c_VT_{B1})+p_0(V_2-V_1)-$$
$$T_0\left[m_{A1}\left(c_p\ln\frac{T_{B2}}{T_{A1}}-R_g\ln\frac{p_{B2}}{p_{A1}}\right)+m_{B1}\left(c_p\ln\frac{T_{B2}}{T_{B1}}-R_g\ln\frac{p_{B2}}{p_{B1}}\right)\right]$$

因$T_{A1}=T_{B1}=T_{B2}$，终态 A 中真空，$V_2=V_B$，$V_1=V_A+V_B$，所以

$$p_{B2}=\frac{(m_{A1}+m_{B1})}{V_B}R_gT_{B2}$$
$$=\frac{2\times2.7875\text{kg}}{0.375\text{m}^3}\times287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}=1.28\times10^6\,\text{Pa}$$

$$W_{1-2,\min}=T_0m_{A1}R_g\ln\frac{p_{B2}^2}{p_{A1}p_{B1}}-p_0V_A$$
$$=300\text{K}\times2.7875\text{kg}\times0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\ln\frac{(1.28\text{MPa})^2}{0.08\text{MPa}\times0.64\text{MPa}}-$$
$$100\text{kPa}\times3\text{m}^3=831.79\text{kJ}-300\text{kJ}=531.79\text{kJ}$$

（2）打开旁通阀，关闭压缩机后，取 A、B 和旁通阀为热力系。因$T_{A3}=T_{A1}$，压力为

$$p_3=\frac{2m_{A1}R_gT_{A3}}{V_A+V_B}=\frac{2\times2.7875\text{kg}\times287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}{3.375\text{m}^3}=0.142\times10^6\,\text{Pa}$$

对过程 2-3 写出　平衡方程，这时

$$I=E_{x,Q}+E_{x,U_2}-E_{x,U_3}-E_{x,w}$$

除环境外无热源换热，故$E_{x,Q}=0$；不作功，$E_{x,W}=0$，所以

$$I=E_{x,U_2}-E_{x,U_3}=U_2-U_3-T_0(S_2-S_3)+p_0(V_2-V_3)$$

考虑到$T_{A3}=T_{B3}=T_{B2}$，$U_2-U_3=0$。且$V_2=V_B$，$V_3=V_A+V_B$，$p_{A3}=p_{B3}$，故

$$m_{A3}=\frac{p_{A3}V_A}{R_gT_{A3}}=\frac{0.1422\times10^6\,\text{Pa}\times3\text{m}^3}{287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times300\text{K}}=4.954\text{kg}$$

$$m_{B3}=2m_{A1}-m_{A3}=2\times2.7875\text{kg}-4.954\text{kg}=0.621\text{kg}$$

$$I=-T_0\left[m_{B3}\left(c_p\ln\frac{T_{B3}}{T_{B2}}-R_g\ln\frac{p_{B2}}{p_{B3}}\right)+m_{A3}\left(c_p\ln\frac{T_{B3}}{T_{A3}}-R_g\ln\frac{p_{B2}}{p_{A3}}\right)\right]-p_0V_A$$
$$=\left(m_{B3}\ln\frac{p_{B2}}{p_{B3}}+m_{A3}\ln\frac{p_{B2}}{p_{A3}}\right)T_0R_g-p_0V_A$$

$$=\left[0.62\text{kg}\times\ln\frac{1.28\text{MPa}}{0.1422\text{MPa}}+4.954\text{kg}\times\ln\frac{1.28\text{MPa}}{0.1422\text{MPa}}\right]\times300\text{K}\times$$

$$287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}-0.1\times10^3\text{kPa}\times3\text{m}^3=1054.76\text{kJ}-300\text{kJ}=754.76\text{kJ}$$

第六章 实际气体的性质和热力学一般关系

6-1 试推导范德瓦尔气体在定温膨胀时所作功的计算式。

解：范德瓦尔气体状态方程可写成 $p=\dfrac{RT}{V_\text{m}-b}-\dfrac{a}{V_\text{m}{}^2}$，所以

$$W=\int_1^2 p\text{d}V=\int_{V_{\text{m},1}}^{V_{\text{m},2}}\left(\frac{RT}{V_\text{m}-b}-\frac{a}{V_\text{m}{}^2}\right)\text{d}V$$

在等温过程中，$T=$ 常数，积分上式得：

$$W=RT\ln\frac{V_{\text{m},1}-b}{V_{\text{m},2}-b}+a\left(\frac{1}{V_{\text{m},2}}-\frac{1}{V_{\text{m},1}}\right)$$

6-2 NH_3 气体的压力 $p=10.13$ MPa，温度 $T=633$ K。试根据通用压缩因子图求其密度，并和由理想气体状态方程计算的密度加以比较。

解：由附录表查得 NH_3 临界参数为 $T_\text{cr}=406$ K 、 $p_\text{cr}=11.28$ MPa

$$p_\text{r}=\frac{10.13}{11.28}=0.898\text{，}\quad T_\text{r}=\frac{633}{406}=1.560$$

查通用压缩因子图得：Z=0.94。

$$v=\frac{ZR_\text{g}T}{p}=\frac{0.94\times\dfrac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{17.04\times10^{-3}\text{kg/mol}}\times633\text{K}}{10.13\times10^6\text{Pa}}=0.02866\text{m}^3\text{/kg}$$

$$\rho=\frac{1}{v}=34.9\text{kg/m}^3$$

若按理想气体计算

$$v_\text{i}=\frac{R_\text{g}T}{p}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times633\text{K}}{17.04\times10^{-3}\text{kg/mol}\times10.13\times10^6\text{Pa}}=0.0305\text{m}^3\text{/kg}$$

$$\rho_\text{i}=\frac{1}{v_\text{i}}=32.8\text{kg/m}^3$$

$$\frac{\rho}{\rho_\text{i}}=\frac{34.9\text{kg/m}^3}{32.8\text{kg/m}^3}=1.064$$

6-3 一容积为 3m^3 的容器中储有状态为 $p=4\text{MPa}$，$t=-113°\text{C}$ 的氧气，试求容器内氧

气的质量，（1）用理想气体状态方程；（2）用压缩因子图。

解：（1）按理想气体状态方程

$$m=\frac{pV}{R_{\rm g}T}=\frac{4\times10^{6}\,{\rm Pa}\times3{\rm m}^{3}}{\dfrac{8.3145{\rm J/(mol\cdot K)}}{32\times10^{-3}{\rm kg/mol}}\times(273.15-113){\rm K}}=288.4{\rm kg}$$

（2）查附录表得氧气$T_{\rm cr}=154\ {\rm K}$，$p_{\rm cr}=2.49\ {\rm MPa}$

$$p_{\rm r}=\frac{4\ {\rm MPa}}{2.49\ {\rm MPa}}=1.606\text{，}\quad T_{\rm r}=\frac{(273.15-113)\ {\rm K}}{154\ {\rm K}}=1.040$$

查通用压缩因子图得：Z=0.32。

$$v=\frac{ZR_{\rm g}T}{p}=\frac{0.32\times8.3145{\rm J/(mol\cdot K)}\times160.15{\rm K}}{32\times10^{-3}{\rm kg/mol}\times4\times10^{6}\,{\rm Pa}}=3.33{\rm m}^{3}/{\rm kg}$$

$$m=\frac{V}{v}=\frac{3{\rm m}^{3}}{3.33\times10^{-3}{\rm m}^{3}/{\rm kg}}=900{\rm kg}$$

6-4　容积为 0.425m^3 的容器内充满氮气，压力为 16.21 MPa，温度为 189 K，计算容器中氮气的质量。利用（1）理想气体状态方程；（2）范德瓦尔方程；（3）通用压缩因子图；（4）R-K 方程。

解：（1）利用理想气体状态方程

$$m=\frac{pV}{R_{\rm g}T}=\frac{16.21\times10^{6}\,{\rm Pa}\times0.425{\rm m}^{3}}{\dfrac{8.3145{\rm J/(mol\cdot K)}}{28.01\times10^{-3}{\rm kg/mol}}\times189{\rm K}}=122.80{\rm kg}$$

（2）利用范德瓦尔方程

查表 6-1，氮气的范德瓦尔常数 $a=0.1361{\rm m}^{6}\cdot{\rm Pa}\cdot{\rm mol}^{-2}$ ，$b=3.85\times10^{-5}\ {\rm m}^{3}/{\rm mol}$，将 a，b 值代入范德瓦尔方程

$$\left(p+\frac{a}{{V_m}^2}\right)(V_m-b)=RT$$

得
$$\left(16.21\times10^{6}+\frac{0.1361}{{V_{\rm m}}^{2}}\right)(V_{\rm m}-3.85\times10^{-5})=8.3145\times189$$

展开可解得
$$V_{\rm m}=0.081\times10^{-3}{\rm m}^{3}/{\rm mol}$$

$$m=\frac{V}{V_{\rm m}}M=\frac{0.425{\rm m}^{3}}{0.081{\rm m}^{3}/{\rm mol}}\times28.01\times10^{-3}{\rm kg/mol}=147.0{\rm kg}$$

（3）利用通用压缩因子图。氮气的临界参数为$T_{\rm cr}=126.2\ \rm K$、$p_{\rm cr}=3.39\ \rm MPa$

$$T_{\rm r}=\frac{189\rm K}{126.2\rm K}=1.50,\qquad p_{\rm r}=\frac{16.21\rm MPa}{3.39\rm MPa}=4.78$$

查通用压缩因子图 $Z=0.84$。

$$V_{\rm m}=\frac{ZRT}{p}=\frac{0.84\times8.3145\rm J/(mol\cdot K)\times189K}{16.21\times10^{6}\,\rm Pa}=8.14\times10^{-5}\,\rm m^3/mol$$

$$m=\frac{V}{V_{\rm m}}M=\frac{0.425\rm m^3}{8.14\times10^{-5}\,\rm m^3/mol}\times28.01\times10^{-3}\,\rm kg/mol=146.2kg$$

（4）利用 R−K 方程

用临界参数求取 R−K 方程中常数 a 和 b

$$a=\frac{0.427480R^2T_{\rm cr}^{\ 2.5}}{p_{\rm cr}}=\frac{0.427480\times[8.3145\rm J/(mol\cdot K)]^2\times(126.2K)^{2.5}}{3.39\times10^{6}\,\rm Pa}$$
$$=0.13864\rm Pa\cdot m^6\cdot K^{1/2}\cdot mol^{-2}$$

$$b=\frac{0.08664RT_{\rm cr}}{p_{\rm cr}}=\frac{0.08664\times8.3145\rm J/(mol\cdot K)\times126.2K}{3.39\times10^{6}\,\rm Pa}$$
$$=0.0268\times10^{-3}\,\rm m^3/mol$$

将 a，b 值代入 R−K 方程：

$$p=\frac{RT}{V_{\rm m}-b}-\frac{a}{T^{0.5}V_{\rm m}(V_{\rm m}+b)}$$
$$=\frac{8.3145\times189}{V_{\rm m}-0.0268\times10^{-3}}-\frac{0.13864}{189^{0.5}V_{\rm m}(V_{\rm m}+0.0268\times10^{-3})}$$

迭代后解得$V_{\rm m}=0.080238\ \rm m^3/mol$

$$m=\frac{V}{V_{\rm m}}M=148.84\ \rm kg$$

本例中，因范氏方程常数采用实验数据拟合值，故计算 O_2 质量误差较小。

6−5 试用下述方法求压力为 5 MPa，温度为 450 ℃的水蒸气的比体积。（1）理想气体状态方程；（2）压缩因子图。已知此状态时水蒸气的比体积是 0.063 291 $\rm m^3/kg$，以此比较上述计算结果的误差。

解：（1）利用理想气体状态方程

$$v_{\rm i}=\frac{R_{\rm g}T}{p}=\frac{8.3145\rm J/(mol\cdot K)\times(273.15+450)K}{18.02\times10^{-3}\,\rm kg/mol\times5\times10^{6}\,\rm Pa}=0.066733\rm m^3/kg$$

$$\frac{|v-v_i|}{v}\times100\%=\frac{|0.063291\text{m}^3/\text{kg}-0.066733\text{m}^3/\text{kg}|}{0.063291\text{m}^3/\text{kg}}\times100\%=5.44\%$$

（2）利用通用压缩因子图

查附表，水的临界参数为 $p_{cr}=22.09\ \text{MPa}$，$T_{cr}=647.3\text{K}$

$$p_r=\frac{p}{p_{cr}}=\frac{5\ \text{MPa}}{22.09\ \text{MPa}}=0.226,\qquad T_r=\frac{T}{T_{cr}}=\frac{723.15\ \text{K}}{647.3\ \text{K}}=1.11$$

查通用压缩因子图 $Z=0.95$

$$v'=\frac{ZR_gT}{p}=\frac{0.95\times8.3145\text{kJ}/(\text{mol}\cdot\text{K})\times723.15\text{K}}{18.02\times10^{-3}\text{kg/mol}\times5\times10^6\text{Pa}}=0.063340\text{m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{|v-v'|}{v}\times100\%=\frac{|0.063291\text{m}^3/\text{kg}-0.063340\text{m}^3/\text{kg}|}{0.063291\text{m}^3/\text{kg}}\times100\%=0.11\%$$

6-6* 在一容积为$3.0\times10^{-2}\ \text{m}^3$的球形钢罐中储有 0.5 kg 甲烷（$CH_4$），若甲烷由 25 ℃上升到 33 ℃，用 R-K 方程求其压力变化。

解：摩尔体积

$$V_m=\frac{V}{n}=\frac{VM}{m}=\frac{3\times10^{-2}\text{m}^3\times16.043\times10^{-3}\text{kg/mol}}{0.5\text{kg}}=9.63\times10^{-4}\text{m}^3/\text{mol}$$

用临界参数求取 R-K 方程中常数 a 和 b：查表 6-1，CH_4 的临界参数为：$T_{cr}=190.7\ \text{K}$，$p_{cr}=4.64\text{MPa}$。

$$a=\frac{0.427480R^2T_{cr}^{\ 2.5}}{p_{cr}}=\frac{0.427480\times[8.3145\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]^2\times(190.7\text{K})^{2.5}}{4.64\times10^6\text{Pa}}$$
$$=3.1985\text{Pa}\cdot\text{m}^6\cdot\text{K}^{1/2}\cdot\text{mol}^{-2}$$

$$b=\frac{0.08664RT_{cr}}{p_{cr}}$$
$$=\frac{0.08664\times8.3145\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})\times190.7\text{K}}{4.64\times10^6\text{Pa}}=0.0296\times10^{-3}\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$$

将 a，b 值代入 R-K 方程：

$$p_1=\frac{RT_1}{V_m-b}-\frac{a}{T_1^{0.5}V_m(V_m+b)}=\frac{8.3145\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})\times298\text{K}}{(0.963\text{m}^3-0.0296\text{m}^3/\text{mol})\times10^{-3}}-$$
$$\frac{3.1985\text{Pa}\cdot\text{m}^6\cdot\text{K}^{1/2}\cdot\text{mol}^{-2}}{(298\text{K})^{0.5}\times0.963\text{m}^3\times(0.963\text{m}^3+0.0296\text{m}^3/\text{mol})\times10^{-6}}$$
$$=2.463\times10^6\text{Pa}$$

$$p_2=\frac{RT_2}{V_m-b}-\frac{a}{T_2^{0.5}V_m(V_m+b)}=\frac{8.3145\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 306\text{K}}{(0.963\text{m}^3-0.0296\text{m}^3\text{/mol})\times 10^{-3}}-$$
$$\frac{3.1985\text{Pa}\cdot\text{m}^6\cdot\text{K}^{1/2}\cdot\text{mol}^{-2}}{(306\text{K})^{0.5}\times 0.963\text{m}^3\times(0.963\text{m}^3+0.0296\text{m}^3\text{/mol})\times 10^{-6}}$$
$$=2.534\times 10^6\,\text{Pa}$$

所以 $\Delta p=2.534\text{ MPa}-2.463\text{ MPa}=0.071\text{ MPa}$ 。

6-7* 迭特里希状态方程为 $p=\dfrac{nRT}{V-nb}\exp\left(-\dfrac{na}{RTV}\right)$，式中 V 为体积，p 为压力，n 为物质的量，a、b 为物性常数。试说明符合迭特里希状态方程的气体的临界参数分别为 $p_{cr}=\dfrac{a}{4n^2b^2}$，$V_{cr}=2nb$，$T_{cr}=\dfrac{a}{4Rb}$ 并将此状态方程改写成对比态方程。

解：对迭特里希状态方程求导

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T=-\frac{nRT}{(V-nb)^2}e^{-\frac{na}{RTV}}+\frac{nRT}{V-nb}\cdot\frac{na}{RTV^2}e^{-\frac{na}{RTV}}$$

据临界等温线特征，临界点令 $\left(\dfrac{\partial p}{\partial V}\right)_T=0$ 得 $\dfrac{nRT_{cr}}{(V_{cr}-nb)}e^{-\frac{na}{RT_{cr}V_{cr}}}\left[\dfrac{na}{RT_{cr}V_{cr}{}^2}-\dfrac{1}{V_{cr}-nb}\right]=0$，故

$$\frac{na}{RT_{cr}V_{cr}{}^2}-\frac{1}{V_{cr}-nb}=0 \tag{1}$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_T=-\frac{2nRT}{(V-nb)^3}e^{-\frac{na}{RTV}}-\frac{nRT}{(V-nb)^2}\cdot\frac{na}{RTV^2}e^{-\frac{na}{RTV}}-$$
$$e^{-\frac{na}{RTV}}\left[\frac{n^2a(3V^2-2nbV)}{(V^3-nbV^2)^2}+\frac{n^2a}{V^3-nbV^2}\cdot\frac{-na}{RTV^2}\right]$$

据临界等温线特征，在临界点有 $\left(\dfrac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_T=0$，所以

$$\frac{2nRT_{cr}}{(V_{cr}-nb)^3}-\frac{n^2a}{(V_{cr}-nb)^2V_{cr}{}^2}-\left[\frac{n^2a(3V_{cr}-2nb)V_{cr}}{(V_{cr}-nb)^2V_{cr}{}^4}-\frac{n^3a^2}{(V-nb)RT_{cr}V_{cr}{}^4}\right]=0 \tag{2}$$

化简，并将式（1）代入式（2），得

$$V_{cr}=2nb \tag{3}$$

将式（3）代入式（1），得

$$T_{cr}=\frac{a}{4Rb} \tag{4}$$

将式（4）、（3）代入迭特里希状态方程，得

$$p_{\mathrm{cr}}=\frac{a}{4n^2b^2} \tag{5}$$

由迭特里希状态方程

$$p_{\mathrm{r}}p_{\mathrm{cr}}=\frac{nRT_{\mathrm{r}}T_{\mathrm{cr}}}{V_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{cr}}-nb}\exp\left(-\frac{na}{RT_{\mathrm{r}}T_{\mathrm{cr}}V_{\mathrm{cr}}V_{\mathrm{r}}}\right) \tag{6}$$

将式（3）、（4）、（5）代入式（6）

$$p_{\mathrm{r}}\frac{a}{4n^2b^2}=\frac{nRT_{\mathrm{r}}\dfrac{a}{4Rb}}{V_{\mathrm{r}}2nb-nb}\exp\left(-\frac{na}{RT_{\mathrm{r}}\dfrac{a}{4Rb}V_{\mathrm{r}}2nb}\right)=\frac{nRaT_{\mathrm{r}}}{nb(2V_{\mathrm{r}}-1)4b}\exp\left(-\frac{2}{T_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{r}}}\right)$$

$$p_{\mathrm{r}}=\frac{n^2T_{\mathrm{r}}}{2V_{\mathrm{r}}-1}\exp\left(-\frac{2}{T_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{r}}}\right)$$

6-8 29 ℃、15 atm 的某种理想气体从 1 m^3 等温可逆膨胀到 10 m^3，求过程能得到的最大功。

解：气体的摩尔数

$$n=\frac{pV_1}{RT_1}=\frac{15\times 101\ 325\ \mathrm{Pa}\times 1\ \mathrm{m}^3}{8.314\ 5\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}\times(273.15+29)\ \mathrm{K}}=605\ \mathrm{mol}$$

系统在可逆等温过程中，其自由能的减少量等于所得到的最大功。

$F=U-TS$， $\mathrm{d}F=\mathrm{d}U-\mathrm{d}(TS)$

因等温 $\mathrm{d}F=\mathrm{d}U-T\mathrm{d}S$

据第一定律，可逆过程 $\mathrm{d}U=T\mathrm{d}S-p\mathrm{d}V$ ，所以

$$\mathrm{d}F=-p\mathrm{d}V$$

$$W_{\max}=F_1-F_2=\int_1^2 p\mathrm{d}V=nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$=605\mathrm{mol}\times 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times 302.15\mathrm{K}\times\ln\frac{10\mathrm{m}^3}{1\mathrm{m}^3}=3\ 499\ 692\ \mathrm{J}$$

6-9 试证明理想气体的体积膨胀系数 $\alpha_V=\dfrac{1}{T}$。

证：对理想气体的状态方程 $pv=R_{\mathrm{g}}T$ 求导，得 $\left(\dfrac{\partial v}{\partial T}\right)_p=\dfrac{R_{\mathrm{g}}}{p}$，代入体积膨胀系数定义，

$\alpha_V=\dfrac{1}{v}\left(\dfrac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ 。即

$$\alpha_V=\frac{1}{v}\frac{R_{\mathrm{g}}}{p}=\frac{R_{\mathrm{g}}}{R_{\mathrm{g}}T}=\frac{1}{T}$$

证毕。

6-10 试证在 h—s 图上定温线的斜率 $\left(\dfrac{\partial h}{\partial s}\right)_T = T - \dfrac{1}{\alpha_V}$

证：
$$\mathrm{d}h = T\mathrm{d}s + v\mathrm{d}p$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_T = T + v\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_T = T + v\frac{1}{\left(\partial s/\partial p\right)_T}$$

据麦克斯韦关系 $\left(\partial s/\partial p\right)_T = -\left(\partial v/\partial T\right)_p$

所以

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_T = T - v\frac{1}{\left(\partial v/\partial t\right)_p} = T - v\frac{1}{v\alpha_V} = T - \frac{1}{\alpha_V}$$

证毕。

6-11 刚性容器中充满 0.1MPa 的饱和水，温度为 99.634℃。将其加热到 120 ℃，求其压力。已知：在 100 ℃到 120 ℃内，水的平均 $\alpha_V = 80.8\times10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$；0.1MPa，120 ℃时水的 κ_T 值为 $4.93\times10^{-4}\,\mathrm{MPa}^{-1}$，假设其不随压力而变。

解：$v = v(p,T)$，故 $\mathrm{d}v = \left(\dfrac{\partial v}{\partial T}\right)_p \mathrm{d}T + \left(\dfrac{\partial v}{\partial p}\right)_T \mathrm{d}p$

据热系数的定义 $\alpha_V = \dfrac{1}{v}\left(\dfrac{\partial v}{\partial T}\right)_p$、 $\kappa_T = -\dfrac{1}{v}\left(\dfrac{\partial v}{\partial p}\right)_T$

所以
$$\mathrm{d}v = v\alpha_V\mathrm{d}T - v\kappa_T\mathrm{d}p$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{v} = \alpha_V\mathrm{d}T - \kappa_T\mathrm{d}p$$

积分
$$\ln\frac{v_2}{v_1} = \int_1^2 \alpha_V\mathrm{d}T - \int_1^2 \kappa_T\mathrm{d}p = 0$$

因在积分区间内 α_V 和 κ_T 都是常数，所以

$$\alpha_V\left(T_2 - T_1\right) = \kappa_T\left(p_2 - p_1\right)$$

$$p_2 = \frac{\alpha_V\left(T_2 - T_1\right)}{\kappa_T} + p_1 = \frac{80.8\times10^{-5}\,\mathrm{K}^{-1}\times\left(120-99.634\right)\mathrm{K}}{4.93\times10^{-4}\,\mathrm{MPa}^{-1}} + 0.1\mathrm{MPa}$$
$$= 33.4\mathrm{MPa}$$

虽然水的温度仅升高 20℃，但容器内的压力是初态压力的 334 倍，因此进行定容过程相对于定压过程困难得多。

6-12 试证状态方程为 $p(v-b)=R_{\rm g}T$（其中 b 为常数）的气体（1）热力学能 $\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T$；（2）焓 $\mathrm{d}h=c_p\mathrm{d}T+b\mathrm{d}p$；（3）$c_p-c_V$ 为常数；（4）其可逆绝热过程的过程方程为 $p(v-b)^{\kappa}=$ 常数。

证：（1）据热力学能的一般关系式

$$\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T+\left[T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v-p\right]\mathrm{d}v \tag{a}$$

对 $p(v-b)=R_{\rm g}T$ 求导，得 $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v=\frac{R_{\rm g}}{v-b}$

$$T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v-p=\frac{R_{\rm g}T}{v-b}-p=p-p=0$$

即 $$\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T$$

（2） $$\mathrm{d}h=c_p\mathrm{d}T+\left[v-T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right]\mathrm{d}p$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p=\frac{R_{\rm g}}{p}$$

$$v-T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p=v-\frac{R_{\rm g}T}{p}=v-(v-b)=b$$

所以 $$\mathrm{d}h=c_p\mathrm{d}T+b\mathrm{d}p$$

（3）据式（6-38）$c_p-c_V=T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$，故

$$c_p-c_V=T\frac{R_{\rm g}}{p}\frac{R_{\rm g}}{v-b}=R_{\rm g}\frac{R_{\rm g}T}{p(v-b)}=R_{\rm g}$$

（4）对 $p(v-b)=R_{\rm g}T$ 取对数后求导

$$\frac{\mathrm{d}p}{p}+\frac{\mathrm{d}v}{v-b}=\frac{\mathrm{d}T}{T} \tag{b}$$

$$\mathrm{d}s=\frac{\mathrm{d}u}{T}+\frac{p\mathrm{d}v}{T}=c_V\frac{\mathrm{d}T}{T}+\frac{R_{\rm g}}{v-b}\mathrm{d}v$$

因过程可逆绝热，所以 $\mathrm{d}s=0$，即

$$c_V\frac{\mathrm{d}T}{T}=-\frac{R_\mathrm{g}}{v-b}\mathrm{d}v=-\frac{c_p-c_V}{v-b}\mathrm{d}v$$

将式（b）代入

$$c_V\left(\frac{\mathrm{d}p}{p}+\frac{\mathrm{d}v}{v-b}\right)=c_V\frac{\mathrm{d}T}{T}=-\frac{c_p-c_V}{v-b}\mathrm{d}v$$

移项整理得

$$c_V\frac{\mathrm{d}p}{p}=-\frac{c_p}{v-b}\mathrm{d}v\,,\quad \frac{\mathrm{d}p}{p}=-\kappa\frac{\mathrm{d}(v-b)}{v-b}$$

取κ为定值，积分得

$$p(v-b)^\kappa=常数$$

证毕。

6-13 证明下列等式

（1）$\left(\dfrac{\partial s}{\partial T}\right)_v=\dfrac{c_V}{T}$，　　$\left(\dfrac{\partial s}{\partial T}\right)_p=\dfrac{c_p}{T}$

（2）$\dfrac{\partial^2 u}{\partial T\partial v}=T\dfrac{\partial^2 s}{\partial T\partial v}$，　　$\dfrac{\partial^2 u}{\partial T\partial p}=T\dfrac{\partial^2 s}{\partial T\partial p}$

证：（1）取 $s=s(v,T)$，$\mathrm{d}s=\left(\dfrac{\partial s}{\partial T}\right)_v\mathrm{d}T+\left(\dfrac{\partial s}{\partial v}\right)_T\mathrm{d}v$

据第一 ds 方程

$$\mathrm{d}s=\frac{c_V}{T}\mathrm{d}T+\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\mathrm{d}v$$

所以　　$\left(\dfrac{\partial s}{\partial T}\right)_v=\dfrac{c_V}{T}$

另，若 $s=s(p,T)$，$\mathrm{d}s=\left(\dfrac{\partial s}{\partial T}\right)_p\mathrm{d}T+\left(\dfrac{\partial s}{\partial p}\right)_T\mathrm{d}p$

据第二 ds 方程式

$$\mathrm{d}s=\frac{c_p}{T}\mathrm{d}T-\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\mathrm{d}p$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p=\frac{c_p}{T}$$

或由链式关系 $$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v\left(\frac{\partial T}{\partial u}\right)_v\left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v=1\,,\quad \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v=\frac{\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v}{\left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v}=\frac{c_V}{T}$$

由链式关系 $$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p\left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_p\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p=1\,,\quad \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p=\frac{\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p}{\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p}=\frac{c_p}{T}$$

（2）由 $\mathrm{d}u=T\mathrm{d}s-p\mathrm{d}v$，$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v=T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial T\partial v}=\frac{\partial}{\partial v}\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v=\frac{\partial}{\partial v}\left[T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v\right]=T\frac{\partial^2 s}{\partial v\partial T}=T\frac{\partial^2 s}{\partial T\partial v}$$

由 $\mathrm{d}h=T\mathrm{d}s+v\mathrm{d}p$，$\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p=T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial T\partial p}=\frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p=\frac{\partial}{\partial p}\left[T\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p\right]=T\frac{\partial^2 s}{\partial T\partial p}$$

证毕。

6-14 试证范德瓦尔气体

（1）$\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T+\frac{a}{v^2}\mathrm{d}v$；

（2）$c_p-c_V=\dfrac{R_g}{1-\dfrac{2a(v-b)^2}{R_gTv^3}}$；

（3）定温过程焓差为 $(h_2-h_1)_T=p_2v_2-p_1v_1+a\left(\frac{1}{v_1}-\frac{1}{v_2}\right)$；

（4）定温过程熵差为 $(s_2-s_1)_T=R_g\ln\frac{v_2-b}{v_1-b}$

证：（1）据 $\mathrm{d}u$ 第一关系式 $\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T+\left[T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v-p\right]\mathrm{d}v$

由范氏方程 $$p=\frac{R_gT}{v-b}-\frac{a}{v^2}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v=\frac{R_g}{v-b}，\quad T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v-p=\frac{R_gT}{v-b}-\left(\frac{R_gT}{v-b}-\frac{a}{v^2}\right)=\frac{a}{v^2}$$

因此

$$\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T+\frac{a}{v^2}\mathrm{d}v$$

（2）据式（6-38）

$$c_p-c_V=T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$$

从（1）得$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v=\frac{R_g}{v-b}$，因求$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$较困难，故利用循环关系式

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T=-1$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p=-\frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v}{\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T}=-\frac{\frac{R_g}{v-b}}{\frac{-R_gT}{(v-b)^2}+\frac{2a}{v^3}}$$

$$c_p-c_V=T\frac{\frac{R_g}{v-b}}{\frac{R_gT}{(v-b)^2}-\frac{2a}{v^3}}\frac{R_g}{v-b}=\frac{\frac{R_g^2T}{(v-b)^2}}{\frac{R_gT}{(v-b)^2}-\frac{2a}{v^3}}=\frac{R_g}{1-\frac{2a(v-b)^2}{R_gTv^3}}$$

（3）由（1）$\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T+\frac{a}{v^2}\mathrm{d}v$，$\mathrm{d}h=\mathrm{d}(u+pv)$，对等温过程$\mathrm{d}T=0$，所以

$$(h_2-h_1)_T=(u_2-u_1)_T+p_2v_2-p_1v_1=a\left(\frac{1}{v_1}-\frac{1}{v_2}\right)+p_2v_2-p_1v_1$$

（4）$\mathrm{d}s=\frac{c_V}{T}\mathrm{d}T+\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\mathrm{d}v$，所以，范德瓦尔气体经历等温过程

$$\mathrm{d}s=\frac{R_g}{v-b}\mathrm{d}v$$

$$(s_2-s_1)_T=R_g\ln\frac{v_2-b}{v_1-b}$$

***6-15** 利用通用焓图求甲烷（CH_4）由6.5 MPa、70 °C定压冷却到–6 °C时放出的热量。已知甲烷在理想气体状态下的摩尔定压热容为$\left\{C_{p\mathrm{m}}^*\right\}_{\mathrm{J/(mol\cdot K)}}=18.9+0.055\{T\}_{\mathrm{K}}$。

解：查表 6-1，甲烷 $p_{cr}=4.64\ \text{MPa}$、$T_{cr}=190.7\ \text{K}$

$$p_{r1}=\frac{p_1}{p_{cr}}=\frac{6.5\ \text{MPa}}{4.64\ \text{MPa}}=1.40\text{，}\quad p_{r2}=p_{r1}$$

$$T_{r1}=\frac{T_1}{T_{cr}}=\frac{(70+273.15)\ \text{K}}{190.7\ \text{K}}=1.80\text{，}\quad T_{r2}=\frac{(-6+273.15)\ \text{K}}{190.7\ \text{K}}=1.40$$

分别按 $p_{r1}=1.40$、$T_{r1}=1.80$；$p_{r2}=p_{r1}$、$T_{r2}=1.40$ 查通用焓图

$$\frac{(H_m{}^*-H_m)_1}{RT_{cr}}=0.39\text{，}\qquad \frac{(H_m{}^*-H_m)_2}{RT_{cr}}=0.80$$

$$\begin{aligned}H_{m,2}-H_{m1}&=RT_{cr}\left[\frac{(H_m{}^*-H_m)_1}{RT_{cr}}-\frac{(H_m{}^*-H_m)_2}{RT_{cr}}\right]+\int_1^2 C_{p,m}{}^*\mathrm{d}T\\&=8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times190.7\text{K}\times(0.39-0.80)+\\&\int_{343.15\text{K}}^{267.15\text{K}}1.89+0.055T\mathrm{d}T=-2069.2\text{J/mol}\end{aligned}$$

***6-16** 8 MPa、15 0K 的氮节流到 0.5 MPa 后流经一短管，测得温度为 125 K，利用通用图求换热量及过程熵变。

解：查有关资料，氮 $p_{cr}=3.39\text{MPa}$，$T_{cr}=126\text{K}$，所以

$$p_{r1}=\frac{p_1}{p_{cr}}=\frac{8\text{MPa}}{3.39\text{MPa}}=2.36\text{，}\qquad p_{r2}=\frac{p_2}{p_{cr}}=\frac{0.5\text{MPa}}{3.39\text{MPa}}=0.147$$

$$T_{r1}=\frac{T_1}{T_{cr}}=\frac{150\text{K}}{126\text{K}}=1.19\text{，}\qquad T_{r2}=\frac{T_2}{T_{cr}}=\frac{125\text{K}}{126\text{K}}=0.99$$

取节流阀及短管为系统，列能量方程

$$Q+H_{m1}-H_{m2}=0$$

$$Q=H_{m2}-H_{m1}=(H^*_{m1}-H_{m1})+(H^*_{m2}-H^*_{m1})-(H^*_{m2}-H_{m2})$$

其中，$H^*_{m2}-H^*_{m1}=C_{p,m}(T_2-T_1)=29.1\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(125-150)\text{K}=-727.5\text{J/mol}$。

查通用焓图

$$\left(\frac{H^*_m-H_m}{RT_{cr}}\right)_1=2.42$$

$$\begin{aligned}(H^*_m-H_m)_1&=2.42RT_{cr}\\&=2.42\times8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times126\text{K}=2535.3\text{J/mol}\end{aligned}$$

$$\left(\frac{H_{\mathrm{m}}^{*}-H_{\mathrm{m}}}{RT_{\mathrm{cr}}}\right)_{2}=0.20$$

$$(H_{\mathrm{m}}^{*}-H_{\mathrm{m}})_{2}=0.20RT_{\mathrm{cr}}$$
$$=0.20\times 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times 126\mathrm{K}=209.5\mathrm{J/mol}$$

$$Q=2535.3\mathrm{J/mol}-727.5\mathrm{J/mol}-209.5\mathrm{J/mol}=1598.3\mathrm{J/mol}$$

$$S_{\mathrm{m}2}-S_{\mathrm{m}1}=(S_{\mathrm{m}1}^{*}-S_{\mathrm{m}1})+(S_{\mathrm{m}2}^{*}-S_{\mathrm{m}1}^{*})-(S_{\mathrm{m}2}^{*}-S_{\mathrm{m}2})$$

利用对比压力和对比温度，查通用熵图

$$\frac{S_{\mathrm{m}1}^{*}-S_{\mathrm{m}1}}{R}=1.44\text{，}\quad \frac{S_{\mathrm{m}2}^{*}-S_{\mathrm{m}2}}{R}=0.146$$

$$S_{\mathrm{m}1}^{*}-S_{\mathrm{m}1}=1.44\times 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}=11.973\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$S_{\mathrm{m}2}^{*}-S_{\mathrm{m}2}=0.146\times 8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}=1.214\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$S_{\mathrm{m}2}^{*}-S_{\mathrm{m}1}^{*}=C_{p,\mathrm{m}}\ln\frac{T_{2}}{T_{1}}-R\ln\frac{p_{2}}{p_{1}}$$
$$=29.1\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\ln\frac{125}{150}-8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}\times\ln\frac{0.5\mathrm{MPa}}{8\mathrm{MPa}}$$
$$=17.75\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

$$S_{\mathrm{m}2}-S_{\mathrm{m}1}=(11.973+17.735-1.214)\mathrm{J/(mol\cdot K)}=28.494\mathrm{J/(mol\cdot K)}$$

6-17 某理想气体的变化过程中比热容 c_n 为常数，试证其过程方程为 $pv^n=$常数。式中，$n=\dfrac{c_x-c_p}{c_x-c_V}$，$p$ 为压力，c_p 、c_V 为比定压热容和比定容热容，取定值。

证：

$$\delta q=\mathrm{d}u+p\mathrm{d}v\text{，}\quad \delta q=c_x\mathrm{d}T$$

对于理想气体 $\mathrm{d}u=c_V\mathrm{d}T$ ，所以

$$c_x\mathrm{d}T=c_V\mathrm{d}T+p\mathrm{d}v$$

移项得

$$(c_V-c_x)\mathrm{d}T+p\mathrm{d}v=0$$

考虑到

$$\mathrm{d}T=\mathrm{d}\left(\frac{pv}{R_{\mathrm{g}}}\right)=\frac{p\mathrm{d}v}{R_{\mathrm{g}}}+\frac{v\mathrm{d}p}{R_{\mathrm{g}}}$$

故

$$(c_V - c_x)p\mathrm{d}v + (c_V - c_x)v\mathrm{d}p + R_{\mathrm{g}}p\mathrm{d}v = 0$$

$$(c_V - c_x + R_{\mathrm{g}})p\mathrm{d}v + (c_V - c_x)v\mathrm{d}p = 0$$

因 $R_{\mathrm{g}} = c_p - c_V$，所以

$$(c_p - c_x)p\mathrm{d}v + (c_V - c_x)v\mathrm{d}p = 0$$

比热容取常数，积分得

$$pv^{\frac{c_p - c_x}{c_V - c_x}} = \text{常数，即 } pv^n = \text{常数。}$$

证毕。

6-18 某一气体的体积膨胀系数和等温压缩率分别为

$$\alpha_V = \frac{nR}{pV},\quad \kappa_T = \frac{1}{p} + \frac{a}{V}$$

式中，a 为常数，n 为物质的量，R 为通用气体常数。试求此气体的状态方程。

解：取 $V = V(T, p)$，则

$$\begin{aligned}\mathrm{d}V &= \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \mathrm{d}T + \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T \mathrm{d}p \\ &= \alpha_V V\mathrm{d}T - \kappa_T V\mathrm{d}p = \frac{nR}{pV}V\mathrm{d}T - \left(\frac{1}{p} + \frac{a}{V}\right)V\mathrm{d}p\end{aligned} \tag{a}$$

整理得

$$p\mathrm{d}V + V\mathrm{d}p = -ap\mathrm{d}p + nR\mathrm{d}T$$

积分

$$pV = -\frac{a}{2}p^2 + nRT + C$$

当 $p = 0$ 时气体应服从理想气体方程 $pV = nRT$，上式中 $p \to 0$，p^2 为高阶无穷小，可略去不计，所以积分常数 $C = 0$，因此状态方程为

$$pV = -\frac{a}{2}p^2 + nRT$$

6-19 气体的体积膨胀系数和定容压力温度系数分别为 $\alpha_V = \dfrac{R}{pV_{\mathrm{m}}}$，$\alpha = \dfrac{1}{T}$。试求此气体的状态方程。（$R$ 为通用气体常数）

解：据循环关系式 $\left(\dfrac{\partial v}{\partial p}\right)_T \left(\dfrac{\partial p}{\partial T}\right)_v \left(\dfrac{\partial T}{\partial v}\right)_p = -1$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T=-\frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p}{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v}=-\frac{\alpha_V v}{p\alpha}=-\frac{\frac{R}{pV_\mathrm{m}}v}{p\frac{1}{T}}=-\frac{RTv}{p^2V_\mathrm{m}}=-\frac{RT}{p^2M}=-\frac{R_\mathrm{g}T}{p^2}$$

积分

$$v=\frac{R_\mathrm{g}T}{p}+\varphi(T)$$

$p\to 0$ 时气体趋近于理想气体，服从 $v=\frac{R_\mathrm{g}T}{p}$，故 $\varphi(T)=0$，因此状态方程为

$$pv=R_\mathrm{g}T$$

***6-20** 水的三相点温度 $T_\mathrm{s}=273.16\ \mathrm{K}$，压力 $p=611.2\ \mathrm{Pa}$，汽化潜热 $\gamma=2\ 501.3\ \mathrm{kJ/kg}$。按蒸气压力方程计算 $t_2=10^\circ\mathrm{C}$ 时饱和蒸汽压（假定在本题范围内水的汽化潜热近似为常数）。

解：据饱和蒸汽压力方程式

$$\ln p_\mathrm{s}=-\frac{\gamma}{R_\mathrm{g}T_\mathrm{s}}+A$$

在三相点，$\gamma_\mathrm{lg}=2501.3\ \mathrm{kJ/kg}$，故 10℃时饱和蒸汽压

$$p_{\mathrm{s},10^\circ\mathrm{C}}=\exp\left(-\frac{\gamma}{R_\mathrm{g}T_\mathrm{s}}+26.261\right)$$

$$=\exp\left(\frac{2501.3\times10^3\ \mathrm{J/kg}}{\frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{18.02\times10^{-3}\ \mathrm{kg/mol}}\times283.15\mathrm{K}}+26.261\right)=1231\mathrm{Pa}$$

蒸汽表提供的 10℃的 $p_\mathrm{s}=1227.9\mathrm{Pa}$。

***6−21** 在二氧化碳的三相点状态，$T_\mathrm{tp}=216.55\ \mathrm{K}$，$p_\mathrm{tp}=0.518\ \mathrm{MPa}$，固态、液态和气态比体积分别为 $v_s=0.661\times10^{-3}\ \mathrm{m^3/kg}$，$v_l=0.894\times10^{-3}\ \mathrm{m^3/kg}$，$v_g=722\times10^{-3}\ \mathrm{m^3/kg}$，升华潜热 $\gamma_\mathrm{sg}=542.7\ 6\ \mathrm{kJ/kg}$，汽化潜热 $\gamma_\mathrm{lg}=347.85\ \mathrm{kJ/kg}$。计算：

（1）在三相点上升华线，熔解线和气化线的斜率各为多少；

（2）按蒸气压方程计算 $t_2=-80^\circ\mathrm{C}$ 时饱和蒸汽压力（查表数据为 0.060 2 MPa）。

解：（1）$\gamma_\mathrm{sl}=\gamma_\mathrm{sg}-\gamma_\mathrm{lg}=542.76\ \mathrm{kJ/kg}-347.85\ \mathrm{kJ/kg}=194.91\ \mathrm{kJ/kg}$

据克拉贝隆方程 $\left(\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right)_s=\dfrac{\gamma}{T_s(v^\beta-v^\alpha)}$，故汽化线斜率

$$\left.\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right|_{汽化}=\frac{\gamma_{\mathrm{lg}}}{T_s(v''-v')}=\frac{347.85\times10^3\,\mathrm{J/kg}}{216.55\mathrm{K}\times(722-0.849)\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3}=2.23\times10^3\,\mathrm{Pa/K}$$

熔解线斜率

$$\left.\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right|_{熔解}=\frac{\gamma_{\mathrm{sl}}}{T_s(v_1-v_s)}=\frac{194.91\times10^3\,\mathrm{J/kg}}{216.55\mathrm{K}\times(0.849-0.661)\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3}=4.79\times10^6\,\mathrm{Pa/K}$$

升华线斜率

$$\left.\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right|_{升华}=\frac{\gamma_{\mathrm{sg}}}{T_s(v_g-v_s)}=\frac{542.76\times10^3\,\mathrm{J/kg}}{216.55\mathrm{K}\times(722-0.661)\times10^{-3}\,\mathrm{m}^3}=3.47\times10^3\,\mathrm{Pa/K}$$

（2）三相点时 $\ln p_s=-\dfrac{\gamma_{\mathrm{lg}}}{R_g T_s}+A$

$$A=\ln(0.518\times10^6)\mathrm{Pa}+\frac{347.85\times10^3\,\mathrm{J/kg}}{\dfrac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{44.01\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}}\times216.55\mathrm{K}}=21.66$$

–80℃时饱和蒸汽压

$$p_{s,-80^\circ\mathrm{C}}=\exp\left(-\frac{\gamma_{\mathrm{lg}}}{R_g T_s}+A\right)=\exp\left(-\frac{347.85\times10^3\,\mathrm{J/kg}}{\dfrac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{44.01\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}}\times(273.15-80)\mathrm{K}}+21.66\right)=184915\mathrm{Pa}$$

6−22 利用水蒸气下述数据计算 200℃时水的汽化潜热。

$t/^\circ\mathrm{C}$	p_s/kPa	$v''/\mathrm{m^3/kg}$	$v'/\mathrm{m^3/kg}$	$h''/\mathrm{kJ/kg}$	$h'/\mathrm{kJ/kg}$
190	1254.2	0.1565	0.0011	2785.8	807.6
195	1397.6	0.1410	0.0011	2789.4	829.9
200	1551.6	0.1273	0.0012	2792.5	854.0
205	1722.9	0.1152	0.0012	2795.3	875.0
210	1906.2	0.1044	0.0012	2797.7	897.7

解：据克拉贝隆方程

$$\left.\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right|_s=\frac{h''-h'}{T_s(v''-v')}$$

$$h''-h'=T_s(v''-v')\left.\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right|_s\cong T_s(v''-v')\frac{\Delta p}{\Delta T}$$

$$=(273+200)\mathrm{K}\times(0.1273-0.0012)\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}\times\frac{(1722.9-1397.6)\mathrm{kPa}}{(205-195)^\circ\mathrm{C}}=1940.3\mathrm{kJ}$$

同表数据显示 $h''-h'=(2792.5-854.0)\text{kJ/kg}=1938.5\ \text{kJ/kg}$。

6-23 制冷剂 R134a 在 20℃时饱和压力和气化潜热分别是 571.6kPa 和 182.4kJ/kg，利用这些数据估算 R134a 在 0℃时的饱和压力。

解：据克拉贝隆方程

$$\left.\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}T}\right|_{\mathrm{s}}=\frac{h''-h'}{T_{\mathrm{s}}(v''-v')}$$

分离变量 $$\mathrm{d}p=\frac{h''-h'}{T_{\mathrm{s}}(v''-v')}\mathrm{d}T$$

考虑到 $v''>>v'$，且 R134a 蒸气近似服从理想气体规律，所以

$$\mathrm{d}p=\frac{p(h''-h')}{T_{20^\circ\mathrm{C}}R_{\mathrm{g}}T_{0^\circ\mathrm{C}}}\mathrm{d}T$$

$$\frac{\mathrm{d}p}{p}=\frac{h''-h'}{T_{20^\circ\mathrm{C}}R_{\mathrm{g}}T_{0^\circ\mathrm{C}}}\mathrm{d}T$$

积分

$$\ln\frac{p_2}{p_1}=\frac{(h''-h')(T_{20^\circ\mathrm{C}}-T_{0^\circ\mathrm{C}})}{T_{20^\circ\mathrm{C}}R_{\mathrm{g}}T_{0^\circ\mathrm{C}}}$$

由于温度变化范围不大，可假设气化潜热为常数，所以

$$\ln\frac{p_2}{p_1}=\frac{182.4\times10^3\,\text{J/kg}\times102.03\times10^{-3}\text{kg/mol}\times(0-20)^\circ\text{C}}{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times293\text{K}\times273\text{K}}=-0.560$$

$$p_2=p_1e^{-0.56}=571.6e^{-0.56}=326.5\text{kPa}$$

第七章　气体和蒸汽的流动

7-1 空气以 $c_{\mathrm{f}}=180\text{m/s}$ 的流速在风洞中流动，用水银温度计测量空气的温度，温度计上的读数是 70℃，假定气流通在温度计周围得到完全滞止，求空气的实际温度（即所谓热力学温度）。

解：
$$T_0=T_1+\frac{c_{\mathrm{f}}^2}{2c_p}$$

$$T_1=T_0-\frac{c_{\mathrm{f}}^2}{2c_p}=(70+273.15)\text{K}-\frac{(180\text{m/s})^2}{2\times1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times10^3}=327.03\text{K}，\ t_1=53.88^\circ\text{C}$$

7-2 已测得喷管某一截面空气的压力为0.5MPa，温度为800K，流速为600m/s，若空气按理想气体定比热容计，试求滞止温度和滞止压力。

解：
$$T_0=T_1+\frac{c_{f1}^2}{2c_p}=800\text{K}+\frac{(600\text{m/s})^2}{2\times1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=979.1\text{K}$$

$$p_0=p_1\left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}=0.5\text{MPa}\times\left(\frac{979.1\text{K}}{800\text{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}}=1.014\text{MPa}$$

7-3 喷气发动机前端是起扩压器作用的扩压段，其后为压缩段。若空气流以 900km/h 的速度流入扩压段，流入时温度为−5℃，压力为 50kPa。空气流离开扩压段进入压缩段时速度为 80m/s，此时流通截面积为入口截面积的 80%，试确定进入压缩段时气流的压力和温度。

解：扩压段出口的温度

$$T_2=T_1+\frac{c_{f1}^2-c_{f2}^2}{2c_p}=(273.15-5)\text{K}+\frac{\left(\frac{900000}{3600}\text{m/s}\right)^2-(80\text{m/s})^2}{2\times1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=296.06\text{K}$$

由质量守恒，$q_m=\frac{A_1c_{f1}}{v_1}=\frac{A_2c_{f2}}{v_2}=\frac{0.8A_1c_{f2}}{v_2}$，得 $v_2=0.8v_1\frac{c_{f2}}{c_{f1}}$，所以

$$v_2=\frac{R_gT_2}{p_2}=0.8\frac{R_gT_1}{p_1}\frac{c_{f2}}{c_{f1}}$$

$$p_2=\frac{1}{0.8}p_1\frac{T_2}{T_1}\frac{c_{f1}}{c_{f2}}=\frac{50\text{kPa}\times296.06\text{K}\times250\text{m/s}}{0.8\times268.15\text{K}\times80\text{m/s}}=215.7\text{kPa}$$

7-4 进入出口截面积 $A_2=10\text{cm}^2$ 的渐缩喷管的空气初速度很小可忽略不计，初参数为 $p_1=2\times10^6$ Pa 、$t_1=27^\circ\text{C}$ 。求空气经喷管射出时的速度，流量以及出口截面处空气的状态参数 v_2、t_2 。设空气取定值比热容，$c_p=1\,005$ J/(kg·K)、$\kappa=1.4$ ，喷管的背压力 p_b 分别为 1.5MPa 和 1MPa。

解：$p_{cr}=\nu_{cr}p_1=0.528\times2\text{MPa}=1.056\text{MPa}$，当背压 $p_b=1.5\text{MPa}$ 时，$p_2=p_b=1.5\text{MPa}$

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=(27+273.15)\text{K}\times\left(\frac{1.5\text{MPa}}{2\text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}=276.47\text{K}$$

$$t_2=3.32^\circ\text{C}$$

$$v_2=\frac{R_gT_2}{p_2}=\frac{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 276.47\mathrm{K}}{1.5\times 10^6\,\mathrm{Pa}}=0.0529\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$$

$$c_{f2}=\sqrt{2(h_1-h_2)}=\sqrt{2c_p(T_1-T_2)}$$
$$=\sqrt{2\times 1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(300.15-276.47)\mathrm{K}}=218.2\mathrm{m/s}$$

$$q_m=\frac{A_2c_{f2}}{v_2}=\frac{10\times 10^{-4}\,\mathrm{m}^2\times 218.2\mathrm{m/s}}{0.0529\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}}=4.12\mathrm{kg/s}$$

当背压 $p_b=1\mathrm{MPa}$ 时， $p_2=p_{cr}=1.056\mathrm{MPa}$

$$T_2=T_1\nu_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=300.15\mathrm{K}\times 0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}}=250.09\mathrm{K}；\ t_2=-23.06^\circ\mathrm{C}$$

$$v_2=\frac{R_gT_2}{p_2}=\frac{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 250.09\mathrm{K}}{1.05\times 10^6\,\mathrm{Pa}}=0.0680\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$$

$$c_{f2}=\sqrt{2(h_1-h_2)}=\sqrt{2c_p(T_1-T_2)}$$
$$=\sqrt{2\times 1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(300.15-250.09)\mathrm{K}}=317.2\mathrm{m/s}$$

$$q_m=\frac{A_2c_{f2}}{v_2}=\frac{10\times 10^{-4}\,\mathrm{m}^2\times 317.2\mathrm{m/s}}{0.0680\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}}=4.66\mathrm{kg/s}$$

7-5 空气进入渐缩喷管时的初速为200m/s，初压为1MPa，初温为500℃。求喷管达到最大流量时出口截面的流速、压力和温度。

解：
$$T_0=T_1+\frac{c_{f1}^2}{2c_p}=(500+273)\mathrm{K}+\frac{(200\mathrm{m/s})^2}{2\times 1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}}=792.9\mathrm{K}$$

$$p_0=p_1\left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}=1\mathrm{MPa}\times\left[\frac{792.9\mathrm{K}}{(500+273)\mathrm{K}}\right]^{\frac{1.4}{1.4-1}}=1.093\mathrm{MPa}$$

对于初态及 A_2 确定的收缩喷管内的流动，出口截面流速达到音速时，流量最大，所以

$$p_2=p_0\nu_{cr}=0.528\times 1.093\mathrm{MPa}=0.5771\mathrm{MPa}$$

$$T_2=T_0\nu_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=792.9\mathrm{K}\times 0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}}=660.7\mathrm{K}$$

$$c_{f2}=c_2=\sqrt{\kappa R_gT_2}=\sqrt{1.4\times 287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 660.7\mathrm{K}}=515.2\mathrm{m/s}$$

7-6　空气流经渐缩喷管。在喷管某一截面处，压力为0.5MPa，温度为540℃，流速为200m/s，截面积为0.005m^2。试求：

（1）气流的滞止压力及滞止温度；

（2）该截面处的音速及马赫数；(3)若喷管出口处的马赫数等于1，求出口截面积、出口温度、压力及速度。

解：（1）
$$T_0 = T + \frac{c_f^2}{2c_p} = (540+273)\text{K} + \frac{(200\text{m/s})^2}{2\times 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 832.9\text{K}$$

$$p_0 = p\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.5\text{MPa}\times\left(\frac{832.9\text{K}}{813\text{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 0.544\text{MPa}$$

（2）
$$c = \sqrt{\kappa R_g T} = \sqrt{1.4\times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 813\text{K}} = 571.5\text{m/s}$$

$$Ma = \frac{c_f}{c} = \frac{200\text{m/s}}{571.5\text{m/s}} = 0.350$$

$$q_m = \frac{Ac_f}{v} = \frac{Ac_f p}{R_g T} = \frac{0.005\text{m}^2\times 200\text{m/s}\times 0.5\times 10^6\text{Pa}}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 813\text{K}} = 2.143\text{kg/s}$$

（3）
$$Ma_2 = 1$$

$$p_2 = p_{cr} = p_0 \nu_{cr} = 0.544\text{MPa}\times 0.528 = 0.2872\text{MPa}$$

$$T_2 = T_0 \nu_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 832.9\text{K}\times 0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 694.0\text{K}$$

$$c_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T_2} = \sqrt{1.4\times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 694.0\text{K}} = 528.1\text{m/s}$$

$$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = \frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 694.0\text{K}}{0.2872\times 10^6\text{Pa}} = 0.6935\text{m}^3/\text{kg}$$

$$A_2 = \frac{q_m v_{cr}}{c_{f2}} = \frac{2.143\text{kg/s}\times 0.6935\text{m}^3/\text{kg}}{528.1\text{m/s}} = 28.1\times 10^{-4}\text{m}^2$$

7-7　燃气经过燃气轮机中渐缩喷管形的通道绝热膨胀，燃气的初参数为 $p_1 = 0.7\text{MPa}$、$t_1 = 750^\circ\text{C}$，燃气在通道出口截面上的压力 $p_2 = 0.5\text{MPa}$，经过通道的流量 $q_m = 0.6\text{kg/s}$，若通道进口处流速及通道中的磨擦损失均可忽略不计，求燃气外射速度及通道出口截面积。（燃气比热容按变值计算，设燃气的热力性质近似地和空气相同。）

解：查附表 $t_1 = 750°\text{C}$ 时，$p_{r1} = 126.984$，$h_1 = 1074.28\text{kJ/kg}$

$$p_{r2} = p_{r1}\frac{p_2}{p_1} = 126.984\times\frac{0.5\text{MPa}}{0.7\text{MPa}} = 90.703$$

再查附表得 $T_2 = 939.73\text{K}$，$t_2 = 666.58°\text{C}$，$h_2 = 979.56\text{kJ/kg}$

$$c_{f2}=\sqrt{2(h_1-h_2)}$$
$$=\sqrt{2\times(1074.28\text{kJ/kgK}-976.56\text{kJ/kgK})\times10^3}=435.25\text{m/s}$$

$$v_2=\frac{R_gT_2}{p_2}=\frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times939.73\text{K}}{0.5\times10^6\text{Pa}}=0.5394\text{m}^3/\text{kg}$$

$$A_2=\frac{q_mv_2}{c_{f2}}=\frac{0.6\text{kg/s}\times0.5394\text{m}^3/\text{kg}}{435.25\text{m/s}}=7.44\times10^{-4}\text{m}^2$$

7-8　有一玩具火箭装满空气，其参数为：$p=13.8\text{MPa}$、$t=43.3^\circ\text{C}$。空气经缩放喷管排向大气产生推力。已知：喷管喉部截面积为1mm^2，出口上截面压力与喉部压力之比为 1：10，试求稳定情况下火箭的净推力。（$p_0=0.1\text{MPa}$）

解：
$$p_{cr}=\nu_{cr}p_1=0.528\times13.8\text{MPa}=7.2864\text{MPa}$$

$$T_{cr}=T_1\left(\frac{p_{cr}}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=T_1\nu_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=(43.3+273.15)\text{K}\times0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}}=263.67\text{K}$$

$$v_{cr}=\frac{R_gT_{cr}}{p_{cr}}=\frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times263.67\text{K}}{7.2864\times10^6\text{Pa}}=0.0104\text{m}^3/\text{kg}$$

$$c_{cr}=c=\sqrt{\kappa R_gT_{cr}}=\sqrt{1.4\times287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times263.67\text{K}}=325.49\text{m/s}$$

$$q_m=\frac{A_{cr}c_{cr}}{v_{cr}}=\frac{1\times10^{-6}\text{m}^2\times325.49\text{m/s}}{0.0104\text{m}^3/\text{kg}}=0.0313\text{kg/s}$$

$$p_{cr}:p_2=10:1,\quad p_2=0.72864\text{MPa}$$

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=316.45\text{K}\times\left(\frac{0.72864\text{MPa}}{13.8\text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}=136.57\text{K}$$

$$v_2=\frac{R_gT_2}{p_2}=\frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times136.57\text{K}}{0.72864\times10^6\text{Pa}}=0.0538\text{m}^3/\text{kg}$$

$$c_{f2}=\sqrt{2c_p(T_1-T_2)}=\sqrt{2\times1004\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(316.45-136.57)\text{K}}=601.0\text{m/s}$$

$$A_2=\frac{q_mv_2}{c_{f2}}=\frac{313\times10^{-4}\text{kg/s}\times0.0538\text{m}^3/\text{kg}}{601.0\text{m/s}}=2.8\times10^{-6}\text{m}^2$$

$$F=q_mc_{f2}+\Delta pA_2=q_mc_{f2}+(p_2-p_0)A_2$$
$$=0.0313\text{kg/s}\times601\text{m/s}+(0.72864-0.1)\times10^6\text{Pa}\times2.8\times10^{-6}\text{m}^2=20.6\text{N}$$

7-9 内燃机排出的废气压力为0.2MPa，温度为 550℃，流速为110m/s，若将之引入渐缩喷管，试确定当背压为0.1MPa时废气通过喷管出口截面的流速并分析若忽略进口流速时引起的误差。

解：
$$T_0 = T_1 + \frac{c_{f1}^2}{2c_p} = (550 + 273.15)\text{K} + \frac{(110\text{m/s})^2}{2\times 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 829.17\text{K}$$

$$p_0 = p_1\left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.2\text{MPa}\left(\frac{829.17\text{K}}{823.15\text{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 0.205\text{MPa}$$

$$p_{cr} = \nu_{cr} p_0 = 0.528\times 0.205\text{MPa} = 0.108\text{MPa} > p_b，\quad p_2 = p_{cr}$$

$$T_2 = T_{cr} = T_0 \nu_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 829.17\text{K}\times 0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 690.88\text{K}$$

$$c_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T_{cr}} = \sqrt{1.4\times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 690.88\text{K}} = 526.87\text{m/s}$$

若忽略初流速，则

$$p'_{cr} = \nu_{cr} p_1 = 0.528\times 0.2\text{MPa} = 0.105\text{MPa} > p_b，\quad p_2 = p_{cr}$$

$$T'_2 = T'_{cr} = T_1 \nu_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 823.15\text{K}\times 0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 685.86\text{K}$$

$$c'_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T'_{cr}} = \sqrt{1.4\times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 685.86\text{K}} = 524.96\text{m/s}$$

$$\frac{c_{f2} - c'_{f2}}{c_{f2}} = \frac{526.87\text{m/s} - 524.96\text{m/s}}{526.87\text{m/s}} = 0.36\%$$

7-10 滞止压力为 0.65MPa，滞止温度为 350K 的空气可逆绝热流经收缩喷管，在截面积为$2.6\times 10^{-3}\,\text{m}^2$处气流马赫数为 0.6。若喷管背压力为$0.28\text{MPa}$，试求喷管出口截面积。

解：
$$Ma = \frac{c_f}{c} = \frac{\sqrt{c_p(T_0 - T)}}{\sqrt{\kappa R_g T}}$$

$$T = \frac{2c_p T_0}{\kappa R_g Ma^2 + 2c_p}$$
$$= \frac{2\times 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 350\text{K}}{1.4\times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 0.6^2 + 2\times 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 326.50\text{K}$$

$$p = p_0\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.65\text{MPa}\times\left(\frac{326.50\text{K}}{350\text{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 0.510\text{MPa}$$

$$v = \frac{R_g T}{p} = \frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 326.50\text{K}}{0.51\times 10^6\,\text{Pa}} = 0.1839\text{m}^3/\text{kg}$$

$$c_{\mathrm{f}}=\sqrt{2\times1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(350-326.5)\mathrm{K}}=217.34\mathrm{m/s}$$

$$q_m=\frac{Ac_{\mathrm{f}}}{v}=\frac{2.6\times10^{-3}\mathrm{m}^2\times217.34\mathrm{m/s}}{0.1839\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}}=3.07\mathrm{kg/s}$$

$$p_{\mathrm{cr}}=\nu_{\mathrm{cr}}p_0=0.528\times0.65\mathrm{MPa}=0.3432\mathrm{MPa}>p_{\mathrm{b}}$$

故 $p_2=p_{\mathrm{cr}}=0.3432\mathrm{MPa}$，出口截面即为临界截面。

$$T_2=T_{\mathrm{cr}}=T_0\nu_{\mathrm{cr}}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=350\mathrm{K}\times0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}}=291.62\mathrm{K}$$

$$v_2=\frac{R_{\mathrm{g}}T_2}{p_2}=\frac{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times291.62\mathrm{K}}{0.3432\times10^6\mathrm{Pa}}=0.2439\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$$

$$c_{\mathrm{f}2}=\sqrt{2(h_0-h_2)}=\sqrt{2c_p(T_0-T_2)}$$
$$=\sqrt{2\times1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}(350-291.62)\mathrm{K}}=342.55\mathrm{m/s}$$

$$A_2=\frac{q_mv_2}{c_{\mathrm{f}2}}=\frac{3.07\mathrm{kg/s}\times0.2439\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}}{342.55\mathrm{m/s}}=2.19\times10^{-3}\mathrm{m}^2$$

7-11　空气等熵流经缩放喷管，进口截面上压力和温度分别为 $0.58\mathrm{MPa}$、$440\mathrm{K}$，出口截面压力 $p_2=0.14\mathrm{MPa}$。已知喷管进口截面积为 $2.6\times10^{-3}\mathrm{m}^2$，空气质量流量为 $1.5\mathrm{kg/s}$，试求喷管喉部及出口截面积和出口流速。空气取定值比热容，$c_p=1\,005\mathrm{J/(kg\cdot K)}$。

解：

$$v_1=\frac{R_{\mathrm{g}}T_1}{p_1}=\frac{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times440\mathrm{K}}{0.58\times10^6\mathrm{Pa}}=0.2177\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$$

$$c_{\mathrm{f}1}=\frac{q_mv_1}{A_1}=\frac{1.5\mathrm{kg/s}\times0.2177\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}}{2.6\times10^{-3}\mathrm{m}^2}=125.61\mathrm{m/s}$$

$$T_0=T_1+\frac{c_{\mathrm{f}1}^2}{2c_p}=440\mathrm{K}+\frac{125.61(\mathrm{m/s})^2}{2\times1005\mathrm{J/(kg\cdot K)}}=447.85\mathrm{K}$$

$$p_0=p_1\left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}=0.58\mathrm{MPa}\times\left(\frac{447.85\mathrm{K}}{440\mathrm{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}}=0.617\mathrm{MPa}$$

$$p_{\mathrm{cr}}=p_{\text{喉}}=\nu_{\mathrm{cr}}p_0=0.528\times0.617\mathrm{MPa}=0.3258\mathrm{MPa}$$

$$T_{\mathrm{cr}}=T_{\text{喉}}=T_0\nu_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=447.85\mathrm{K}\times0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}}=373.15\mathrm{K}$$

$$v_{\mathrm{cr}}=v_{\text{喉}}=\frac{R_{\mathrm{g}}T_{\mathrm{cr}}}{p_{\mathrm{cr}}}=\frac{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times373.15\mathrm{K}}{0.3258\times10^6\mathrm{Pa}}=0.3287\mathrm{m}^3/\mathrm{kg}$$

$$c_{\rm cr} = c = \sqrt{\kappa R_{\rm g} T_{\rm cr}} \sqrt{1.4 \times 287\,{\rm J/(kg \cdot K)} \times 373.15\,{\rm K}} = 387.21\,{\rm m/s}$$

$$A_{\rm cr} = A_{喉} = \frac{q_m v_{\rm cr}}{c_{\rm cr}} = \frac{1.5\,{\rm kg/s} \times 0.3287\,{\rm m^3/kg}}{387.21\,{\rm m/s}} = 1.27 \times 10^{-3}\,{\rm m^2}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 440\,{\rm K} \times \left(\frac{0.14\,{\rm MPa}}{0.58\,{\rm MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 293.15\,{\rm K}$$

$$v_2 = \frac{R_{\rm g} T_2}{p_2} = \frac{287\,{\rm J/(kg \cdot K)} \times 293.15\,{\rm K}}{0.14 \times 10^6\,{\rm Pa}} = 0.6010\,{\rm m^3/kg}$$

$$c_{\rm f2} = \sqrt{2(h_1 - h_2) + c_{\rm f1}^2} = \sqrt{2c_p(h_0 - h_2)} = \sqrt{2c_p(T_0 - T_2)}$$
$$= \sqrt{2 \times 1005\,{\rm J/(kg \cdot K)}(447.85 - 293.15)\,{\rm K}} = 557.63\,{\rm m/s}$$

$$A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{\rm f2}} = \frac{1.5\,{\rm kg/s} \times 0.6010\,{\rm m^3/kg}}{557.63\,{\rm m/s}} = 1.62 \times 10^{-3}\,{\rm m^2}$$

7-12　流入绝热喷管的过热氨蒸气压力为 800kPa，温度为 20℃，喷管出口截面上压力为 300kPa，流速达 450m/s。若喷管中质量流量为 0.01kg/s，试求喷管出口截面积。

解：喷管进口截面上 NH_3 的参数：由为 800kPa、20℃查氨热力性质表

$$h_1 = 1485.0\,{\rm kJ/kg}，\ v_2 = 0.1614\,{\rm m^3/kg}$$

能量方程，$h_1 + \dfrac{c_{\rm f1}^2}{2} = h_2 + \dfrac{c_{\rm f2}^2}{2}$，因入口流速可忽略不计，所以

$$h_2 = h_1 - \frac{c_{\rm f2}^2}{2} = 1485.0\,{\rm kJ/kg} - \frac{(450\,{\rm m/s})^2 \times 10^{-3}}{2} = 1387.75\,{\rm kJ/kg}$$

喷管出进口截面上 NH_3 的参数：由 300kPa，查表，$h'' = 1451.6\,{\rm kJ/kg}$、$h' = 157.5\,{\rm kJ/kg}$，$v'' = 0.4061\,{\rm m^3/kg}$、$v' = 0.0015\,{\rm m^3/kg}$。$h' < h_2 < h''$，所以出口截面上氨为湿饱和蒸气

$$x_2 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'} = \frac{1387.75\,{\rm kJ/kg} - 157.5\,{\rm kJ/kg}}{1451.6\,{\rm kJ/kg} - 157.5\,{\rm kJ/kg}} = 0.95$$

$$v_2 = v' + x_2(v'' - v')$$
$$= 0.0015\,{\rm m^3/kg} + 0.95 \times (0.4061\,{\rm m^3/kg} - 0.0015\,{\rm m^3/kg}) = 0.3861\,{\rm m^3/kg}$$

$$A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{\rm f2}} = \frac{0.01\,{\rm kg/s} \times 0.3861\,{\rm m^3/kg}}{450\,{\rm m/s}} = 8.58 \times 10^{-6}\,{\rm m^2}$$

7-13　压力$p_1 = 2\text{MPa}$，温度$t_1 = 500℃$的蒸汽，经收缩喷管射入压力为$p_b = 0.1\text{MPa}$的空间中，若喷管出口截面积$A_2 = 200\text{mm}^2$，试确定：

（1）喷管出口截面上蒸汽的温度、比体积、焓；

（2）蒸汽射出速度；

（3）蒸汽的质量流量。

解：
$$p_{cr} = \nu_{cr} p_1 = 0.546 \times 2\text{MPa} = 1.092\text{MPa} > p_b(0.1\text{MPa})$$

气体在喷管内只能膨胀到临界压力，$p_2 = p_{cr} = 1.092\text{MPa}$。查$h-s$图，$h_1 = 3468\ \text{kJ/kg}$、$h_2 = 3275\ \text{kJ/kg}$、$t_2 = 406^{\circ}\text{C}$、$v_2 = 0.245\ \text{m}^3/\text{kg}$。

$$c_{f2} = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \times (3468\text{kJ/kg} - 3275\text{kJ/kg}) \times 10^3} = 621.3\text{m/s}$$

$$q_m = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2} = \frac{200 \times 10^{-6}\text{m}^2 \times 621.3\text{m/s}}{0.245\text{m}^3/\text{kg}} = 0.51\text{kg/s}$$

7-14　压力$p_1 = 2\text{MPa}$，温度$t_1 = 500^{\circ}\text{C}$的蒸汽，经拉伐尔喷管流入压力为$p_b = 0.1\text{MPa}$的大空间中，若喷管出口截面积$A_2 = 200\text{mm}^2$，试求：临界速度、出口速度、喷管质量流量及喉部截面积。

解：取$\nu_{cr} = 0.546$，$p_{cr} = \nu_{cr} p_1 = 0.546 \times 2\text{MPa} = 1.092\text{MPa} > p_b$；故$p_2 = p_b = 0.1\text{MPa}$。查$h-s$图，$h_1 = 3468\text{kJ/kg}$、$h_{cr} = 3275\ \text{kJ/kg}$、$v_{cr} = 0.245\text{m}^3/\text{kg}$；$h_2 = 27.2\ \text{kJ/kg}$，$v_2 = 1.79\ \text{m}^3/\text{kg}$。

$$c_{fcr} = \sqrt{2(h_1 - h_{cr})} = \sqrt{2 \times (3468\text{kJ/kg} - 3275\text{kJ/kg}) \times 10^3} = 621.3\text{m/s}$$

$$c_{f2} = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \times (3468\text{kJ/kg} - 2702\text{kJ/kg}) \times 10^3} = 1237.7\text{m/s}$$

$$q_m = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2} = \frac{200 \times 10^{-6}\text{m}^2 \times 1237.7\text{m/s}}{1.79\text{m}^3/\text{kg}} = 0.1383\text{kg/s}$$

$$A_{cr} = \frac{q_m v_{cr}}{c_{fcr}} = \frac{0.1383\text{kg/s} \times 0.245\text{m}^3}{621.3\text{m/s}} = 0.545 \times 10^{-4}\text{m}^2$$

7-15　压力 $p_1 = 0.3\text{MPa}$，温度 $t_1 = 24^\circ\text{C}$ 的空气，经喷管射入压力为0.157MPa的空间中，应采用何种喷管？若空气质量流量为 $q_m = 4\text{kg/s}$，则喷管最小截面积应为多少？

解：
$$p_{\text{cr}} = p_1 \nu_{\text{cr}} = 0.528 \times 0.3 = 0.157\text{MPa} = p_\text{b}$$

所以应采用收缩喷管。气流出口截面压力为临界压力，出口截面为临界截面。

$$p_2 = p_1 \nu_{\text{cr}} = 0.157\text{MPa}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \nu_{\text{cr}}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 297\text{K} \times 0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 247.5\text{K}$$

$$c_{\text{f}2} = \sqrt{\kappa R_\text{g} T_{\text{cr}}} = \sqrt{\kappa R_\text{g} T_2} = \sqrt{1.4 \times 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 247.5\text{K}} = 315.3\text{m/s}$$

$$v_2 = \frac{R_\text{g} T_2}{p_2} = \frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 247.5\text{K}}{0.157 \times 10^6\,\text{Pa}} = 0.4527\text{m}^3/\text{kg}$$

$$A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{\text{f}2}} = \frac{4\text{kg/s} \times 0.4527\text{m}^3/\text{s}}{315.3\text{m/s}} = 57.43 \times 10^{-4}\,\text{m}^2$$

7-16　初态为 3.5MPa 和 450℃的水蒸气以初速 100m/s 进入喷管，在喷管中绝热膨胀到 2.5MPa，已知流经喷管的质量流量为 10kg/min。（1）忽略磨擦损失，试确定喷管的型式和尺寸；（2）若存在磨擦损失，且已知速度系数 φ=0.94，确定上述喷管实际流量。

解：查 $h-s$ 图，$h_1 = 3339\text{kJ/kg}$、$s_1 = 7.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

$$h_0 = h_1 + \frac{c_{\text{f}1}^2}{2} = 3339\text{kJ/kg} + \frac{(100\text{m/s})^2}{2} \times 10^{-3} = 3344\text{kJ/kg}$$

$$t_0 = 461.5^\circ\text{C}，\quad p_0 = 3.6\text{MPa}$$

（1）$p_{\text{cr}} = \nu_{\text{cr}} p_0 = 0.546 \times 3.6\text{MPa} = 1.966\text{MPa} < p_2$，所以采用收缩喷管。由 $s_2 = s_1$ 及 p_2 查 $h-s$ 图得，$h_2 = 3233\ \text{kJ/kg}$，$v_2 = 0.12\text{m}^3/\text{kg}$

$$c_{\text{f}2} = \sqrt{2(h_0 - h_2)} = \sqrt{2 \times (3344\text{kJ/kg} - 3233\text{kJ/kg}) \times 10^3} = 471.17\text{m/s}$$

$$A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{\text{f2}}} = \frac{10}{60}\text{kg/s} \times \frac{0.12\text{m}^3/\text{kg}}{472.17\text{m/s}} = 0.424 \times 10^{-4}\,\text{m}^2$$

（2）
$$c'_{\text{f2}} = \varphi c_{\text{f2}} = 0.94 \times 471.17\text{m/s} = 442.09\text{m/s}$$

$$h_2 = h - \frac{c_{f2}'^2}{2} = 3344\text{kJ/kg} - \frac{(442.09\text{m/s})^2}{2} \times 10^{-3} = 3245.9\text{kJ/kg}$$

由 p_2 及 h_2. 查 $h-s$ 图，$v_2 = 0.122\text{m}^3/\text{kg}$

$$q_m' = \frac{A_2 c_{f2}'}{v_2} = \frac{0.424\times10^{-4}\text{m}^2 \times 442.90\text{m/s}}{0.122\text{m}^3/\text{kg}} = 0.1539\text{kg/s} = 9.24\text{kg/min}$$

7-17　压力为 0.1MPa，温度 27℃的空气流经扩压管，压力升高到 0.18MPa，试问空气进入扩压管时的初速至少有多大？

解：
$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = (273.15+27)\text{K}\left(\frac{0.18\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 355.03\text{K}$$

$h_1 + \dfrac{c_{f1}^2}{2} = h_2 + \dfrac{c_{f2}^2}{2}$，所以

$$\begin{aligned} c_{f1} &\ge \sqrt{2(h_2-h_1)} = \sqrt{2c_p(T_2-T_1)} \\ &= \sqrt{2\times1004\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(355.03-300.15)\text{K}} = 332.0\text{m/s} \end{aligned}$$

7-18　试证明理想气体的绝热节流微分效应 μ_J 恒等于零。

证：对于理想气体

$$pv = R_g T\text{，}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{v}{T}$$

$$\mu_J = \frac{T\left(\dfrac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} = \frac{T\dfrac{v}{T} - v}{c_p} = 0$$

7-19 1.2MPa、20℃的氦气经节流阀后压力降至 100kPa，为了使节流前后速度相等，求节流阀前后的管径比。

解：氦气可作理想气体，节流前后 $h_1 = h_2$，$T_1 = T_2$，$q_m = \dfrac{A_1 c_{f1}}{v_1} = \dfrac{A_2 c_{f2}}{v_2}$。因节流前后流速相等，所以 $\dfrac{A_2}{A_1} = \dfrac{v_2}{v_1}$

$$\frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} = \sqrt{\frac{R_g T_2/p_2}{R_g T_1/p_1}} = \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} = \sqrt{\frac{1.2\times10^6\text{Pa}}{100\times10^3\text{Pa}}} = 3.464$$

7-20　通过测量节流前后蒸汽的压力及节流后蒸汽的温度可推得节流前蒸汽的干度。现

有压力 $p_1 = 2\text{MPa}$ 的湿蒸汽被引入节流式干度计，蒸汽被节流到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$，测得 $t_2 = 130^\circ\text{C}$，试确定蒸汽最初的干度 x_1。

解：查饱和蒸汽表，$p_2 = 0.1\text{MPa}$ 时，$h' = 908.64\ \text{kJ/kg}$，$h'' = 2798.66\ \text{kJ/kg}$，据 $h-s$ 图，$p_2 = 0.1\text{MPa}$，$t_2 = 130^\circ\text{C}$ 时，$h_2 = 2739\ \text{kJ/kg}$。节流过程 $h_1 = h_2$，从 $h-s$ 图查得，$x_1 = 0.967$。或查表，$h_2 = 2736.3\text{kJ/kg}$

$$x_1 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'} = \frac{2736.3\text{kJ/kg} - 908.64\text{kJ/kg}}{2798.66\text{kJ/kg} - 908.64\text{kJ/kg}} = 0.967$$

7-21　750kPa、25℃的 R134a 经节流阀后压力降至 165kPa，求节流后 R134a 的温度和为了使节流前后速度相等，节流阀前后的管径比。

解：查表，节流前 $v_1 = 0.0008\text{m}^3\text{/kg}$，节流后 $h_2 = h_1 = 234.5\text{kJ/kg}$；$p = 165\text{kPa}$ 时，$h'' = 389.7\text{kJ/kg}$、$h' = 180.3\text{kJ/kg}$，$v' = 0.0007\text{m}^3\text{/kg}$、$v'' = 0.12001\text{m}^3\text{/kg}$。因 $h' < h_2 < h''$，所以出口截面上氨为饱和湿蒸气状态

$$x_2 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'} = \frac{234.5\text{kJ/kg} - 180.3\text{kJ/kg}}{389.7\text{kJ/kg} - 180.3\text{kJ/kg}} = 0.2588$$

$$\begin{aligned} v_2 &= v' + x_2(v'' - v') \\ &= 0.0007\text{m}^3\text{/kg} + 0.2588 \times (0.1200 - 0.0007)\text{m}^3\text{/kg} = 0.03157\text{m}^3\text{/kg} \end{aligned}$$

$$q_m = \frac{A_1 c_{\text{f}1}}{v_1} = \frac{A_2 c_{\text{f}2}}{v_2}$$

因节流前后流速相等，所以

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{v_2}{v_1},\quad \frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} = \sqrt{\frac{0.03157\text{m}^3\text{/kg}}{0.0008\text{m}^3\text{/kg}}} = 6.28$$

7-22　压力 $p_1 = 2\text{MPa}$，温度 $t_1 = 400^\circ\text{C}$ 的蒸汽，经节流阀后，压力降为 $p_{1'} = 1.6\text{MPa}$，再经喷管射入压力为 $p_\text{b} = 1.2\text{MPa}$ 的大容器中，若喷管出口截面积 $A_2 = 200\text{mm}^2$。求：

（1）节流过程熵增；

（2）应采用何种喷管？其出口截面上的流速及喷管质量流量是多少？

解：查 $h-s$ 图，$h_1 = 3250\text{kJ/kg}$，$h_{1'} = h_1 = 3250\text{kJ/kg}$；$s_1 = 7.124\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$s_{1'} = 7.224\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；$v_1 = 0.154\text{m}^3\text{/kg}$，$v_{1'} = 0.19\text{m}^3\text{/kg}$。

$$s_g = s' - s = 7.224\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 7.124\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 0.1\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$p_{cr} = p_1 v_{cr} = 1.6 \times 0.546 = 0.8736\text{MPa} < p_b = 1.2\text{MPa}$$

所以采用收缩喷管，$p_2 = p_b = 1.2\text{MPa}$，查 $h-s$ 图，得 $h_2 = 3164\ \text{kJ/kg}$，$s_2 = 7.224\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$v_2 = 0.238\text{m}^3\text{/kg}$。

$$c_{f2} = \sqrt{2(h_1^{'} - h_2)} = \sqrt{2 \times (3250 - 3164)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 10^3} = 414.7\text{m/s}$$

$$q_m = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2} = \frac{200 \times 10^{-6}\text{m}^2 \times 414.7\text{m/s}}{0.238\text{m}^3/\text{kg}} = 0.35\text{kg/s}$$

$$I = T_0 S_g = T_0 (S_1^{'} - S_1) = 300\text{K} \times (7.224 - 7.124)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 30\text{kJ/kg}$$

7-23 压力为 6.0MPa，温度为 490℃的蒸汽，经节流后压力为 2.5MPa，然后定熵膨胀到 0.04MPa。求：

（1）绝热节流后蒸汽温度及节流过程蒸汽的熵增；

（2）若节流前后膨胀到相同的终压力，求由于节流而造成的技术功减少量和作功能力的损失。（$T_0 = 300\text{K}$）

解：（1）查 $h-s$ 图，$h_1 = 3400\text{kJ/kg}$、$s_1 = 6.844\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$v_1 = 0.06\text{m}^3/\text{kg}$。节流后，$h_2 = h_1 = 3400\text{kJ/kg}$、$t_2 = 471^\circ\text{C}$、$s_2 = 7.239\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$v_2 = 0.135\text{m}^3/\text{kg}$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 7.239\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 6.844\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 0.395\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

（2）节流前膨胀到 0.04MPa，$h_a = 2346\text{kJ/kg}$；节流后膨胀到 0.04MPa，$h_b = 2486\text{kJ}/\text{kg}$。

$$h_1 - h_a = 3400\text{kJ}/\text{kg} - 2346\text{kJ}/\text{kg} = 1054\text{kJ}/\text{kg}$$

$$h_2 - h_b = 3400\text{kJ}/\text{kg} - 2486\text{kJ}/\text{kg} = 914\text{kJ}/\text{kg}$$

$$\Delta w_t = (h_1 - h_a) - (h_2 - h_b) = h_b - h_a = (2468 - 2346)\text{kJ}/\text{kg} = 140\text{kJ}/\text{kg}$$

因绝热变化，$s_f = 0$，$s_g = \Delta s_{12}$

$$I = T_0 s_g = 300\text{K} \times 0.395\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 118.5\text{kJ/kg}$$

7-24　1kg 温度 $T_1 = 330.15\text{K}$ 、压力 $p_1 = 7.1\text{MPa}$ 的空气，经绝热节流压力降至 0.1MPa。

（1）计算节流引起的熵增量；

（2）上述空气不经节流而是在气轮机内作可逆绝热膨胀到 0.1MPa，气轮机能输出多少功？

（3）上述功是否即为空气绝热节流的作功能力损失，为什么？取环境大气 $T_0 = 300.15\text{K}$ ，$p_0 = 0.1\text{MPa}$ 。

解：（1）节流熵增

$$\Delta s_{12} = c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1} = R_g \ln\frac{p_1}{p_2}$$

$$= 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{7.1\text{MPa}}{0.1\text{MPa}} = 1.223\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

（2）可逆绝热膨胀作功

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 330.15\text{K} \times \left(\frac{0.1}{7.1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 97.68\text{K}$$

$$w_t = h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2)$$

$$= 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (350.15 - 97.68)\text{K} = 233.400\text{kJ/kg}$$

（3）　$$I = T_0 s_g = T_0 \Delta s_{12} = 300.15\text{K} \times 1.223\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 367.08\text{kJ/kg}$$

$I \neq w_t$ ，因为气轮机排气温度低于环境大气温度，仍有作功能力。

7-25　用管子输送压力为 1MPa，温度为 300℃的水蒸气，若管中容许的最大流速为 100m/s，水蒸气的质量流量为 12000kg/h 时管子直径最小要多大？

解：由图表 $p = 1\text{MPa}$ ， $t = 300^\circ\text{C}$ 时， $v = 0.25793\text{m}^3/\text{kg}$

$$q_m v \le \frac{\pi}{4} D^2 c_f \text{，} \quad D \ge \sqrt{\frac{4 q_m v}{\pi_1 c_f}} = \sqrt{\frac{4 \times 12000\text{kg/h} \times 0.25793\text{m}^3/\text{kg}}{\pi \times 3600\text{s/h} \times 100\text{m/s}}} = 0.105\text{m}$$

7-26　两输送管送来两种蒸汽进行绝热混合，一管的蒸汽流量为 $q_{m1} = 60\text{kg/s}$ ，状态 $p_1 = 0.5\text{MPa}$ ，$x = 0.95$ ；另一管的蒸汽流量为 $q_{m2} = 20\text{kg/s}$ ，其状态为 $p_2 = 8\text{MPa}$ 、$t_2 = 500^\circ\text{C}$ 。如经混合后蒸汽压力为 0.8MPa，求混合后蒸汽的状态。

解：由表 $p_1 = 0.5\text{MPa}$ 时 $h' = 640.35\text{kJ/kg}$、$h'' = 2748.6\text{kJ/kg}$ ；$p_2 = 8\text{MPa}$ 、$t_2 = 500^\circ\text{C}$ 时 $h_2 = 3397.0\text{kJ/kg}$

$$h_1 = h' + x(h'' - h')$$
$$= 640.35\text{kJ/kg} + 0.95 \times (2748.6 - 640.35)\text{kJ/kg} = 2643.19\text{kJ/kg}$$

混合过程能量方程

$$(q_{m1} + q_{m2})h_3 = q_{m1}h_1 + q_{m2}h_2$$

$$h_3 = \frac{q_{m1}h_1 + q_{m2}h_2}{q_{m1} + q_{m2}}$$
$$= \frac{60\text{kg/s} \times 2643.19\text{kJ/kg} + 20\text{kg/s} \times 3397.0\text{kJ/kg}}{(60+20)\text{kg/s}} = 2831.64\text{kJ/kg}$$

据 $p_3 = 0.8\text{MPa}$、$h_3 = 2831.64\text{kJ/kg}$，查 $h-s$ 图或过热蒸汽表值得

$$t_3 = 196.7^\circ\text{C}，\ v_3 = 0.2586\text{m}^3/\text{kg}$$

7-27* 在绝热稳态过程中 20MPa，–20℃的氮被节流降压到 2MPa，确定节流后氮的温度。

解：查有关资料，氮 $p_{cr} = 3.39\text{MPa}$，$T_{cr} = 126\text{K}$。

$$p_1 = 20\text{MPa}、\ p_2 = 2\text{MPa}、\ T_1 = (-70+273)\text{K} = 203\text{K}$$

$$p_{r1} = \frac{p_1}{p_{cr}} = \frac{20\text{MPa}}{3.39\text{MPa}} = 5.9，\ T_{r1} = \frac{T_1}{T_{cr}} = \frac{203\text{K}}{126\text{K}} = 1.61；$$

$$p_{r2} = \frac{p_2}{p_{cr}} = \frac{2\text{MPa}}{3.39\text{MPa}} = 0.59$$

查通用焓图

$$\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_1 = 1.79$$

$$(H_m^* - H_m)_1 = 1.79RT_{cr} = 1.79 \times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times 126\text{K} = 1875.3\text{J/mol}$$

假设 $T_2 = 140\text{K}$，则

$$T_{r2} = \frac{T_2}{T_{cr}} = \frac{140\text{K}}{126\text{K}} = 1.11$$

$$\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_2 = 0.57$$

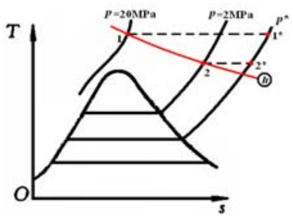


图 9-1 题 7-27 附图

$$(H_m^* - H_m)_2 = 0.57RT_{cr} = 0.57 \times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times 126\text{K} = 597.1\text{J/mol}$$

据绝热节流特征，$H_{m1} = H_{m2}$

$$H_{m2}-H_{m1}=(H_{m1}^*-H_{m1})+(H_{m2}^*-H_{m1}^*)-(H_{m2}^*-H_{m2})$$
$$=(H_{m1}^*-H_{m1})-(H_{m2}^*-H_{m2})+C_{Pm}(T_2-T_1)$$
$$=1875.3\text{J/mol}-597.1\text{J/mol}+29.1\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(140-203)\text{K}$$
$$=-555.1\text{J/mol}$$

采用试差法，得

T_2 / K	T_{r2}	$(H_m^*-H_m)_2/RT_{cr}$	$(H_m^*-H_m)_2$ /(J/mol)	$H_{m2}-H_{m1}$ /(J/mol)
140	1.11	0.57	597.1	−555.1
145	1.15	0.54	565.7	−378.2
150	1.19	0.49	513.3	−180.0
152	1.21	0.48	502.9	−111.7
155	1.23	0.47	492.4	−13.9

$H_{m1}\cong H_{m2}$，所以取 $T_2=155\text{K}$。

7−28 1.5 MPa、150 ℃的水经节流阀绝热节流压力降至 200 kPa，进入节流阀的速度是 5 m/s，节流阀前后的管径相等，求节流后工质的状态和速度。

解：查水蒸气热力性质表：150°C，1.5 MPa 时 $h=632.9\text{kJ/kg}$、$v=0.0011\text{m}^3/\text{kg}$；200kPa 时 $h''=2706.5\text{kJ/kg}$、$h'=504.7\text{kJ/kg}$；$v''=0.8865\text{m}^3/\text{kg}$、$v'=0.0011\text{m}^3/\text{kg}$。

绝热节流，取节流阀为控制体积，节流前后能量方程：

$$h_1+\frac{c_{f1}^2}{2}=h_2+\frac{c_{f2}^2}{2} \tag{a}$$

质量守恒方程

$$q_m=\frac{A_1c_{f1}}{v_1}=\frac{A_2c_{f2}}{v_2} \tag{b}$$

其中：

$$h_2=h'+x_2(h''-h')=504.7\text{kJ/kg}+x_2\times(2706.5-504.7)\text{kJ/kg}$$

$$v_2=v'+x_2(v''-v')=0.0011\text{m}^3/\text{kg}+x_2\times(0.8865-0.0011)\text{m}^3/\text{kg}$$

代入式（a）和式（b）解得：$h_2=614.79\text{kJ/kg}$，$x_2=0.050$。

$$v_2=v'+x_2(v''-v')$$
$$=0.0011\text{m}^3/\text{kg}+0.050\times(0.8865-0.0011)\text{m}^3/\text{kg}=0.0454\text{m}^3/\text{kg}$$

$$c_{f2}=c_{f1}\frac{A_1v_2}{A_2v_1}=c_{f1}\frac{v_2}{v_1}=5\text{m/s}\times\frac{0.0454\text{m}^3/\text{kg}}{0.0011\text{m}^3/\text{kg}}=206.4\text{m/s}$$

通常，节流前后工质相态不改变，同时还可通过改变管径等措施使节流前后工质流速接近

相等，所以由能量方程得出节流前后焓相等，但本题节流前后工质有液态水改变为湿蒸汽，比体积极大地增大，导致节流后流速远大于节流前，必须考虑动能变化，所以与绝热节流“特征” $h_1 = h_2$ 有“矛盾”。

第八章 压气机的热力过程

8-1 某单级活塞式压气机每小时吸入的空气量 $V_1 = 140\text{m}^3/\text{h}$，吸入空气的状态参数是 $p_1 = 0.1\text{MPa}$、$t_1 = 27^\circ\text{C}$，输出空气的压力 $p_2 = 0.6\text{MPa}$。试按下列三种情况计算压气机所需要的理想功率（以 kW 表示）：（1）定温压缩；（2）绝热压缩（设 κ =1.4）；（3）多变压缩（设 n =1.2）。

解：（1）定温压缩

$$W_\text{T} = p_1 V_1 \ln\frac{p_2}{p_1} = 0.1\times10^6\,\text{Pa}\times140\text{m}^3/\text{h}\ln\frac{0.6\text{MPa}}{0.1\text{MPa}} = 250.8\times10^5\,\text{J/h}$$

$$P_\text{T} = \frac{250.8\times10^5\,\text{J/h}}{3600\text{s/h}} = 6966.7\text{J/h} = 6.97\text{KW}$$

（2）绝热压缩，$\kappa = 1.4$

$$W_\text{s} = \frac{\kappa}{\kappa-1}p_1V_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1\right]$$

$$= \frac{1.4}{1.4-1}\times0.1\times10^6\,\text{Pa}\times140\text{m}^3\times[6^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1] = 327.9\times10^5\,\text{J/h}$$

$$P_\text{s} = \frac{327.9\times10^5\,\text{J/h}}{3600\text{s/h}} = 9108.3\text{W} = 9.11\text{kW}$$

（3）多变压缩

$$W_n = \frac{n}{n-1}p_1V_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

$$= \frac{1.2}{1.2-1}\times0.1\times10^6\,\text{Pa}\times140\text{m}^3\times[6^{\frac{1.2-1}{1.2}} - 1] = 292.3\times10^5\,\text{J/h}$$

$$P_n = \frac{292.3\times10^5\,\text{J/h}}{3600\text{s/h}} = 8.12\times10^3\,\text{W} = 8.12\text{kW}$$

8-2 某单级活塞式压气机吸入空气参数为 $p_1 = 0.1\text{MPa}$,、$t_1 = 50°\text{C}$、$V_1 = 0.032\text{m}^3$，经多

变压缩 $p_2=0.32\text{MPa}$、$V_2=0.012\text{m}^3$ 。求：

（1）压缩过程的多变指数；

（2）压缩终了空气温度；

（3）所需压缩功；

（4）压缩过程中传出的热量。

解：（1）多变指数

$$p_1v_1^{\ n}=p_2v_2^n$$

$$n=\frac{\ln\dfrac{p_2}{p_1}}{\ln\dfrac{V_1}{V_2}}=\frac{\ln\dfrac{0.32\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}}{\ln\dfrac{0.032\text{m}^3}{0.012\text{m}^3}}=1.186$$

（2）空气终温

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}=(273.15+50)\text{K}\times\left(\frac{0.32\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}\right)^{\frac{1.186-1}{1.186}}=387.82\text{K}$$

（3）压缩功

$$W_n=\frac{1}{n-1}p_1V_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$

$$=\frac{1}{1.186-1}\times0.1\times10^6\,\text{Pa}\times0.032\text{m}^3\times(3.2^{\frac{1.186-1}{1.186}}-1)=3442.8\text{J}=3.443\text{kJ}$$

（4）过程热量

$$c_n=\frac{n-\kappa}{n-1}c_V=\frac{1.186-1.4}{1.186-1}\times0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=-0.826\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$q=c_n\Delta T=-0.826\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(387.28-323.15)\text{K}=-53.42\text{kJ}$$

$$m=\frac{p_1V_1}{R_gT_1}=\frac{0.1\times10^6\,\text{Pa}\times0.032\text{m}^3}{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times323.15\text{K}}=0.0345\text{kg}$$

$$Q_n=mq=-0.0345\text{kg}\times53.42\text{kJ/kg}=-1.84\text{kJ}$$

8-3 压气机中气体压缩后的温度不宜过高，若取限极值为 150℃。某单缸压气机吸入空气的压力和温度为 $p_1=0.1\text{MPa}$，$t_1=20°\text{C}$，吸气量为 $250\text{m}^3/\text{h}$，若压气机中缸套流过冷却水 465kg/h，温升为 14℃。求：

（1）空气可能达到的最高压力；

（2）压气机必需的功率。

解：空气在可逆多变过程可能达到最高压力，先求多变指数。

$$Q_{\mathrm{w}}=q_{m,\mathrm{w}}c\Delta t=\frac{465\mathrm{kg/h}}{3600\mathrm{s/h}}\times 4.187\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times 14^{\circ}\mathrm{C}=7.5715\mathrm{kW}$$

$$q_{m,\mathrm{a}}=\frac{p_1V_1}{R_{\mathrm{g}}T_1}=\frac{0.1\times 10^6\,\mathrm{Pa}\times 250\mathrm{m^3/h}}{3600\mathrm{s/h}\times 287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 293.15\mathrm{K}}=0.08254\mathrm{kg/s}$$

$$Q_{\mathrm{w}}=-Q_{\mathrm{a}}\text{，}\quad q=\frac{Q_{\mathrm{w}}}{q_{ma}}=\frac{-7.5715\mathrm{kJ/s}}{0.08254\mathrm{kg/s}}=-91.73\mathrm{kJ/kg}$$

$$q=\frac{n-\kappa}{n-1}c_V(T_2-T_1)$$

$$\frac{n-\kappa}{n-1}=\frac{c_V(T_2-T_1)}{q}=\frac{0.728\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(150-20)^{\circ}\mathrm{C}}{-91.73\mathrm{kJ/kg}}=-1.0317$$

$$n=1.20$$

（1） $$T_1p_1^{-\frac{n-1}{n}}=T_2p_2^{-\frac{n-1}{n}}$$

$$p_2=p_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{n}{n-1}}=0.1\mathrm{MPa}\times\left(\frac{(150+273.15)\mathrm{K}}{293.15\mathrm{K}}\right)^{\frac{1.2}{1.2-1}}=0.90\mathrm{MPa}$$

（2） $$q=\Delta h+w_{\mathrm{t}}$$

$$\begin{aligned}w_{\mathrm{C}}&=-w_{\mathrm{t}}=\Delta h-q=c_p(T_2-T_1)-q\\&=1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(150-20)^{\circ}\mathrm{C}+91.73\mathrm{kJ/kg}=222.25\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$P=q_{m,\mathrm{a}}w_{\mathrm{C}}=0.08254\mathrm{kg/s}\times 222.25\mathrm{kJ/kg}=18.3\mathrm{kW}$$

或

$$\begin{aligned}w_{\mathrm{C}}&=\frac{n}{n-1}R_{\mathrm{g}}T_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]\\&=\frac{1.2}{1.2-1}\times 287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 293.15\mathrm{K}\times\left[\left(\frac{0.9}{0.1}\right)^{\frac{1.2-1}{1.2}}-1\right]=2.23\times 10^5\,\mathrm{J/kg}\end{aligned}$$

$$P=q_{m,\mathrm{a}}w_{\mathrm{C}}=0.0825\mathrm{kg/s}\times 2.23\times 10^5\,\mathrm{J/kg}=18.4\mathrm{kW}$$

8-4　三台空气压缩机的余隙容积比均为 6%，进气状态均为 0.1MPa、27°C，出口压力为 0.5MPa，但压缩过程的指数分别为：$n_1=1.4$、$n_2=1.25$、$n_3=1$，试求各压气机的容积效率（假设膨胀过程的指数和压缩过程相同）。

解：据题意，$\dfrac{V_{\mathrm{c}}}{V_{\mathrm{h}}}=0.06$、$\pi=\dfrac{0.5}{0.1}=5$，因 $\eta_{\mathrm{V}}=1-\dfrac{V_{\mathrm{c}}}{V_{\mathrm{h}}}(\pi^{\frac{1}{n}}-1)$，故

$$\eta_{V,1}=1-0006\times(5^{\frac{1}{1.4}}-1)=0.871$$

$$\eta_{V,2}=1-0.06\times(5^{\frac{1}{1.25}}-1)=0.843$$

$$\eta_{V,3}=1-0.06\times(5-1)=0.76$$

8-5　某单级活塞式压气机，其增压比为 7，活塞排量为0.009m^3，余容比为 0.06，转速为 750r/min，压缩过程多变指数为 1.3。已知吸入空气参数为 $p_1=0.1\text{MPa}$、$t_1=20^\circ\text{C}$。求：

（1）容积效率；

（2）生产量（kg/h）；

（3）理论消耗功率（kW）；

（4）压缩过程中放出的热量。

解：由题意$V_\text{h}=0.009\ \text{m}^3$，$\pi=7$，$\sigma=0.06$，$n=1.3$。

（1）

$$\eta_\text{V}=1-\frac{V_\text{c}}{V_\text{h}}(\pi^{\frac{1}{n}}-1)=1-\sigma(\pi^{\frac{1}{n}}-1)=1-0.06\times(7^{\frac{1}{1.3}}-1)=0.792$$

（2）

$$V=\eta_\text{V}V_\text{h}=0.792\times0.009\ \text{m}^3=0.007\ 13\ \text{m}^3$$

$$v_1=\frac{R_\text{g}T_1}{p_1}=\frac{287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times293.15\text{K}}{0.1\times10^6\text{Pa}}=0.084\ 13\ \text{m}^3\text{/kg}$$

$$q_m=\frac{V}{v_1}=\frac{0.007\ 13\ \text{m}^3\times750\times60\ 1\text{/h}}{0.084\ 13\ \text{m}^3\text{/kg}}=3\ 813.56\ \text{kg/h}$$

（3）

$$w_\text{c}=\frac{n}{n-1}p_1v_1(\pi^{\frac{n-1}{n}}-1)$$

$$=\frac{1.3}{1.3-1}\times0.1\times10^6\ \text{Pa}\times0.084\ 13\ \text{m}^3\text{/kg}\times(7^{\frac{1}{1.3}}-1)=1.264\times10^5\ \text{J/kg}$$

$$P=q_mw_\text{c}=\frac{3\ 813.56\ \text{kg/h}}{3\ 600\ \text{s/h}}\times1.264\times10^5\ \text{J/kg}=13.39\times10^3\ \text{J/s}=13.4\ \text{kW}$$

（4）

$$T_2=T_1\pi^{\frac{n-1}{n}}=293.15\ \text{K}\times7^{\frac{1.3-1}{1.3}}=459.32\ \text{K}$$

$$q_n=\frac{n-\kappa}{n-1}c_V\Delta T$$
$$=\frac{1.3-1.4}{1.3-1}\times0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(459.32-293.15)\ \text{K}=-39.77\ \text{kJ/kg}$$

$$q_Q = q_m q_n = \frac{3\ 813.56\ \text{kg/h}}{3\ 600\text{s/h}} \times (-39.77\ \text{kJ/kg}) = 42.13\ \text{kW}$$

8-6 利用单缸活塞式压气机制备 0.8MPa 的压缩空气，已知气缸直径 $D = 300\text{mm}$，活塞行程 $S = 200\text{mm}$ 余隙容积比为 0.05，机轴转速为 400r/min。压气机吸入空气的参数是 $p_1 = 0.1\text{MPa}$、$t_1 = 20°\text{C}$，压缩过程多变指数 n =1.25。若压气机的定温效率为$\eta_{C,T} = 0.77$，试计算压气机生产量（kg/h）及带动该压气机所需的原动机的功率（压气机的外部磨擦损失忽略不计）。

解：据题意　$\sigma = \dfrac{V_c}{V_h} = 0.05$，$\pi = \dfrac{p_2}{p_1} = 8$，$n = 1.25$

$$\eta_V = 1 - \sigma(\pi^{\frac{1}{n}} - 1) = 1 - 0.05 \times (8^{\frac{1}{1.25}} - 1) = 0.786$$

$$q_m = N\frac{p_1 V}{R_g T_1} = N\frac{p_1 \eta_V V_h}{R_g T_1}$$

$$= \frac{400}{60}1/\text{s} \times \frac{0.1\times10^6\ \text{Pa}\times0.786\times\frac{\pi}{4}\times(0.3\ \text{m})^2\times0.2\ \text{m}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times293.15\ \text{K}} = 0.088\ \text{kg/s}$$

可逆定温功压缩功率为：

$$P_{c,T} = -p_1 V_1 \ln\frac{p_2}{p_1}$$

$$= -\frac{400}{60}1/\text{s}\times0.1\times10^6\ \text{Pa}\times0.786\times\frac{\pi}{4}\times(0.3\text{m})^2\times0.2\text{m}\times\ln\frac{8\ \text{MPa}}{1\ \text{MPa}}$$

$$= 15.4\times10^3\ \text{J/s} = 15.4\ \text{kW}$$

$$\eta_{C,T} = \frac{P_{C,T}}{P_C},\quad P_C = \frac{P_{C,T}}{\eta_{C,T}} = \frac{15.4\ \text{kW}}{0.77} = 20.0\ \text{kW}$$

8-7 空气初态为 $p_1 = 0.1\text{MPa}$、$t_1 = 20°\text{C}$，经过三级活塞式压气机后，压力提高到 12.5MPa，假定各级压力比相同，各级压缩过程的多变指数 $n = 1.3$。试求：

（1）生产 1kg 压缩空气理论上应消耗的功；

（2）各级气缸出口的温度；

（3）如果不用中间冷却器，压气机消耗的功及各级气缸出口温度；

（4）若采用单级压缩，压气机消耗的功及气缸出口温度。

解：按耗功最小原则

$$\pi_1 = \pi_2 = \pi_3 = \sqrt[3]{\frac{p_4}{p_1}} = \sqrt[3]{\frac{12.5\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}}} = 5$$

（1）
$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 293.15\ \text{K}}{0.1 \times 10^6\ \text{Pa}} = 0.841\ 3\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned}w_C &= 3w_{C,L} = 3 \times \frac{n}{n-1} p_1 v_1 (\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1)\\ &= 3 \times \frac{1.3}{1.3-1} \times 0.1 \times 10^6\ \text{Pa} \times 0.841\ 3\ \text{m}^3/\text{kg} \times (5^{\frac{1.3-1}{1.3}} - 1)\\ &= 4.919 \times 10^5\ \text{J/kg} = 492.0\ \text{kJ/kg}\end{aligned}$$

（2）
$$T_2 = T_3 = T_4 = T_1 \pi^{\frac{n-1}{n}} = 293.15\ \text{K} \times 5^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 425.0\ \text{K} = 151.85\ ^\circ\text{C}$$

（3）
$$T_2 = T_1 \pi^{\frac{n-1}{n}} = 425.0\ \text{K}$$

$$T_3 = T_2 \pi^{\frac{n-1}{n}} = 425.0\ \text{K} \times 5^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 616.25\ \text{K} = 343.10\ ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = T_3 \pi^{\frac{n-1}{n}} = 616.25\ \text{K} \times 5^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 893.56\ \text{K} = 620.41\ ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}w_C &= \frac{n}{n-1} R_g T_1 (\pi^{\frac{n-1}{n}}) + \frac{n}{n-1} R_g T_2 (\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1) + \frac{n}{n-1} R_g T_3 (\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1)\\ &= \frac{n}{n-1} R_g (\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1)(T_1 + T_2 + T_3)\\ &= \frac{1.3}{1.3-1} \times 287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (5^{\frac{1.3-1}{1.3}} - 1) \times (293.15 + 425.0 + 616.25)\ \text{K}\\ &= 7.464 \times 10^5\ \text{J / kg} = 746.4\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

（4）若单级压缩，则出口温度上述 T_4 相同，为 893.56 K，耗功也（3）相同，为 $746.4\ \text{kJ/kg}$ 。

8-8　一台两级压气机，示功图如图 8-7 所示，若此压气机吸入空气的温度是 $t_1 = 17°\text{C}$ 、$p_1 = 0.1\text{MPa}$，压气机将空气压缩到 $p_3 = 2.5\text{MPa}$。压气机的生产量为 $500\text{m}^3/\text{h}$（标准状态下），两个气缸中的压缩过程均按多变指数 $n = 1.25$ 进行。以压气机所需要的功量最小作为条件，试求：

（1）空气在低压气缸中被压缩后所达到的压力 p_2；

（2）压气机中气体被压缩后的最高温度 t_2 和 t_3；

（3）设压气机转速为 250r/min，每个气缸在每个进气冲程中吸入的空气体积 V_1 和 V_2；

（4）每级压气机中每小时所消耗的功 W_1 和 W_2，以及压气所消耗的总功 W;

（5）空气在中间冷却器及两级气缸中每小时放出的热量。

解：（1）中间压力 p_2

$$p_2 = \sqrt{p_1 p_3} = \sqrt{0.1\ \text{MPa} \times 2.5\ \text{MPa}} = 0.5\ \text{MPa}$$

（2）压气机中空气被压缩后最高温度

$$T_2 = T_3 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 290.15\ \text{K} \times \left(\frac{0.5\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}}\right)^{\frac{1.25-1}{1.25}} = 400.33\ \text{K}$$

$$t_2 = t_3 = 127.18\ ^\circ\text{C}$$

（3）每小时吸气量

$$V_1' = \frac{nRT_1}{p_1}$$

$$= \frac{500\text{m}^3/\text{h}}{22.4\times10^{-3}\ \text{m}^3/\text{mol}} \times \frac{8\ 314.5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times 290.15\ \text{K}}{0.1\times10^6\ \text{Pa}} = 538.49\ \text{m}^3/\text{h}$$

$$q_{ma} = \frac{p_1 V_1'}{R_g T_1} = \frac{0.1\times10^6\ \text{Pa} \times 538.49\ \text{m}^3/\text{h}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 290.15\ \text{K}} = 646.64\text{kg/h}$$

每一冲程吸入空气体积

$$V_1 = \frac{V_1'}{250\times60} = \frac{538.49}{250\times60} = 0.035\ 90\ \text{m}^3$$

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2}V_1 = \frac{1\ \text{MPa}}{5\ \text{MPa}} \times 0.035\ 90\ \text{m}^3 = 0.007\ 18\ \text{m}^3$$

（4）压气机耗功

$$W_1 = W_2 = \frac{n}{n-1}p_1 V_1'\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

$$= \frac{1.25}{1.25-1} \times 0.1\times10^6\ \text{Pa} \times 538.49\ \text{m}^3/\text{h} \times [5^{\frac{1.25-1}{1.25}} - 1] = 1.022\times10^5\ \text{kJ/h}$$

$$W_\text{C} = W_1 + W_2 = 2W_1 = 2\times1.022\times10^5\ \text{kJ/h} = 2.044\times10^5\ \text{kJ/h}$$

$$N = \frac{W_\text{C}}{3\ 600} = \frac{2.044\times10^5\ \text{kJ/h}}{3\ 600} = 56.8\ \text{kW}$$

（5） $$Q = \Delta H + W_\text{t} = H_3 - H_1 - W_\text{C}$$

$$= 646.64\text{kg/h} \times 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (400.33-290.15)\text{K} - 2.044\times10^5\text{kJ/h}$$

$$= -1.33\times10^5\ \text{kJ/h}$$

8-9 某活塞式空气压缩机容积效率为$\eta_{\mathrm{V}}=0.95$，每分钟吸进 $p=1\mathrm{atm}$、$t=21°\mathrm{C}$的空气 $14\mathrm{m}^3$，压缩到$0.52\mathrm{MPa}$输出，设压缩过程可视为等熵压缩，求：

（1）余隙容积比；

（2）所需输出入功率。

解：（1）据题意，$\pi=\dfrac{p_2}{p_1}=\dfrac{0.52\ \mathrm{MPa}}{0.101\ 325\ \mathrm{MPa}}=5.132$， $n=1.4$

$$\eta_{\mathrm{V}}=1-\frac{V_{\mathrm{C}}}{V_{\mathrm{h}}}(\pi^{\frac{1}{n}}-1)$$

$$\frac{V_{\mathrm{C}}}{V_{\mathrm{h}}}=\frac{1-\eta_V}{\pi^{\frac{1}{n}}-1}=\frac{1-0.95}{5.132^{\frac{1}{1.4}}-1}=0.023$$

（2）
$$P_{\mathrm{C}}=\frac{n}{n-1}p_1q_V\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$

$$=\frac{1.4}{1.4-1}\times101\ 325\ \mathrm{Pa}\times\frac{14\mathrm{m}^3/\min}{60\mathrm{s}/\min}\times[5.132^{\frac{1.4-1}{1.4}}-1]$$
$$=49\ 289.7\ \mathrm{J/s}=49.3\ \mathrm{kW}$$

8-10 一台单缸活塞式压气机（见图 8-1），气缸直径$D=200\mathrm{mm}$，活塞行程$S=300\mathrm{mm}$。从大气中吸入空气，空气初态为$p_1=97\mathrm{kPa}$、$t_1=20°\mathrm{C}$，经多变压缩到$p_2=0.55\mathrm{MPa}$，若多变指数为 n=1.3，机轴转速为 500r/min，压气机余隙容积比$\sigma=0.05$，求：

（1）压气机有效吸气容积及容积效率；

（2）压气机的排气温度；

（3）压气机的生产量；

（4）拖动压气机所需的功率。

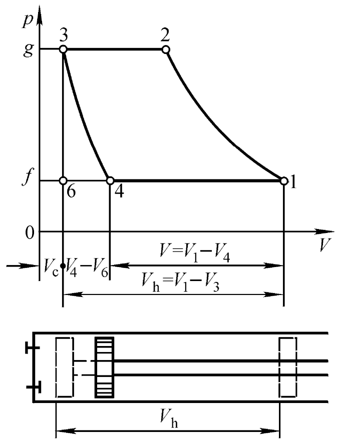


图 8-1 题 8-10 附图

解：据题意，气缸活塞排量

$$V_{\mathrm{h}}=\frac{\pi}{4}D^2S=\frac{\pi}{4}\times0.2^2\times0.3\ \mathrm{m}^3=0.009\ 425\ \mathrm{m}^3$$

（1）有效吸气容积 V 及η_{V}

$$\sigma=\frac{V_{\mathrm{c}}}{V_{\mathrm{h}}}=0.05,\quad V_{\mathrm{c}}=0.05\times0.009\ 425\ \mathrm{m}^3=0.000\ 471\ \mathrm{m}^3,\quad V_{\mathrm{c}}=V_3$$

$$V_4 = V_3\left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1}{n}} = V_3\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$= 0.000\ 471\ \mathrm{m^3/kg}\times\left(\frac{0.55\ \mathrm{MPa}}{97\times10^{-3}\ \mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1}{1.3}} = 0.001\ 79\ \mathrm{m^3}$$

$$V_1 = V_\mathrm{h} + V_\mathrm{c} = 0.009\ 425\ \mathrm{m^3} + 0.000\ 471\ \mathrm{m^3} = 0.009\ 896\ \mathrm{m^3}$$

$$V = V_1 - V_4 = 0.009\ 896\ \mathrm{m^3} - 0.001\ 79\ \mathrm{m^3} = 0.008\ 106\ \mathrm{m^3}$$

$$\eta_\mathrm{V} = 1-\frac{V_\mathrm{c}}{V_\mathrm{h}}(\pi^{\frac{1}{n}}-1) = 1-0.05\times\left[\left(\frac{0.55\ \mathrm{MPa}}{0.097\ \mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1}{1.3}}-1\right] = 0.86$$

或
$$\eta_\mathrm{V} = \frac{V}{V_\mathrm{h}} = \frac{0.008\ 106\ \mathrm{m^3}}{0.009\ 425\ \mathrm{m^3}} = 0.86$$

（2）排气温度

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 293.15\ \mathrm{K}\times\left(\frac{0.55\ \mathrm{MPa}}{0.097\ \mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 437.52\ \mathrm{K}$$

$$t_2 = 164.37\ ^\circ\mathrm{C}$$

（3）生产量

$$q_m = \frac{p_1 q_V}{R_\mathrm{g} T_1}$$

$$= \frac{97\times10^3\ \mathrm{Pa}\times0.008\ 106\ \mathrm{m^3}}{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}\times293.15\ \mathrm{K}}\times\frac{500}{60}1/\mathrm{s} = 0.077\ 88\ \mathrm{kg/s} = 280.4\ \mathrm{kg/h}$$

（4）可逆压缩功率最小

$$P_\mathrm{C} = \frac{n}{n-1}p_1 q_V\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right]$$

$$= \frac{1.3}{1.3-1}\times97\times10^3\ \mathrm{Pa}\times\left(0.008\ 106\times\frac{500}{60}\right)\ \mathrm{m^3/s}\times\left[\left(\frac{0.55}{0.097}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}}-1\right]$$

$$= 1.398\times10^4\ \mathrm{J/s} = 14.0\ \mathrm{kW}$$

8-11 轴流式压气机每分钟吸入 $p_1 = 0.1\mathrm{MPa}$、$t_1 = 20^\circ\mathrm{C}$ 的空气 1200kg，经绝热压缩到 $p_2 = 0.6\mathrm{MPa}$，该压气机的绝热效率为 0.85，求：

（1）出口处气体的温度及压气机所消耗的功率；

（2）过程的熵产率及作功能力的损失（$T_0 = 293.15\text{K}$）。

解：（1）比热容按定值计算时，压气机的绝热效率

$$\eta_{\text{Cs}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

其中：

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 293.15\ \text{K} \times \left(\frac{0.6\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 489.12\ \text{K}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{\text{Cs}}} = 293.15\ \text{K} + \frac{489.12\ \text{K} - 293.15\ \text{K}}{0.85} = 523.70\ \text{K}$$

$$t_2 = 250.6\ ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{c}} &= q_m \times (h_2 - h_1) \\ &= \frac{1200}{60}\text{kg/s} \times 1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (250.6 - 20)\ ^\circ\text{C} = 4\ 630.0\ \text{kW} \end{aligned}$$

（2）据稳流系统熵方程，$(s_2 - s_1) = s_{\text{g}} + s_{\text{f}}$，绝热 $s_{\text{f}} = 0$，故

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{g}} &= \dot{S}_2 - \dot{S}_1 = q_m[c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_{\text{g}} \ln\frac{p_2}{p_1}] = q_m c_p \ln\frac{T_2}{T_{2s}} \\ &= 20\ \text{kg/s} \times 1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{523.70\ \text{K}}{489.12\ \text{K}} = 1.3717\ \text{kJ/(K}\cdot\text{s)} \end{aligned}$$

$$\dot{I} = T_0 \dot{S}_{\text{g}} = 293.15\ \text{K} \times 1.3717\ \text{kJ/(K}\cdot\text{s)} = 402.1\ \text{kJ/s}$$

8-12 某轴流式压气机从大气环境吸入 $p_1 = 0.1\text{MPa}$、$t_1 = 27°\text{C}$ 的空气，其体积流量为 $516.6\text{m}^3/\text{min}$，绝热压缩到 $p_2 = 1\text{MPa}$。由于磨擦作用，使出口气温度达到 350℃。求：

（1）该压气机的绝热效率；

（2）因磨擦引起的熵产；

（3）拖动压气机所需的功率。

解：（1）压气机的绝热效率

$$\eta_{\text{Cs}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = (27 + 273.15)\ \text{K} \times \left(\frac{1\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 579.50\ \text{K}$$

$$\eta_{\mathrm{Cs}}=\frac{(579.50-300.15)\ \mathrm{K}}{(350-27)\ \mathrm{K}}=0.865$$

（2）熵产率

据稳流系统熵方程 $\dot{S}_{\mathrm{f}}+\dot{S}_{\mathrm{g}}=\dot{S}_2-\dot{S}_1$，因 $S_{\mathrm{f}}=0$，所以

$$\dot{S}_{\mathrm{g}}=\dot{S}_2-\dot{S}_1=q_m c_p\ln\frac{T_2}{T_{2\mathrm{s}}}=\frac{q_{V1}p_1}{R_{\mathrm{g}}T_1}c_p\ln\frac{T_2}{T_{2\mathrm{s}}}$$
$$=\frac{516.6}{60}\mathrm{m^3/s}\times\frac{0.1\times10^6\,\mathrm{Pa}}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times300.15\mathrm{K}}\times1.004\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times$$
$$\ln\frac{(350+273.15)\mathrm{K}}{579.50\mathrm{K}}=0.729\ \ \mathrm{kJ/(K\cdot s)}$$

（3）压气机所需的功率

$$P_{\mathrm{C}}=q_m(h_2-h_1)=\frac{q_{V1}p_1}{R_{\mathrm{g}}T_1}c_p(T_2-T_1)$$
$$=\frac{516.6}{60}\mathrm{m^3/s}\times\frac{0.1\times10^6\,\mathrm{Pa}}{287\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times300.15\mathrm{K}}\times1.004\ \ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times$$
$$(350-27)\ {}^\circ\mathrm{C}=3\ 241.3\ \ \mathrm{kW}$$

8-13 某次对轴流压气机的实例数据如下：压气机进口处空气压力 $p_1=0.1\mathrm{MPa}$，温度 $t_1=17°\mathrm{C}$，出口处温度 $t_2=207°\mathrm{C}$，压力 $p_2=0.4\mathrm{MPa}$，气体流量是 $60\mathrm{kg/\min}$；消耗功率 185kW，若压缩过程绝热，分析测试的可靠性。

解：从出口温度分析，若过程可逆，则

$$T_{2\mathrm{s}}=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=(17+273.15)\ \mathrm{K}\times\left(\frac{0.4\ \mathrm{MPa}}{0.1\ \mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}=431.15\ \mathrm{K}$$

$t_{2\mathrm{s}}=158\ °\mathrm{C}$，$t_{2\mathrm{s}}<t_2$ 合理。

从耗功分析

$$P_{\mathrm{c}}=q_m(h_2-h_1)$$
$$=1\mathrm{kg/s}\times1.004\ \ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(207-7)\ \ {}^\circ\mathrm{C}=190.7\ \ \mathrm{kW}>185\ \ \mathrm{kW}$$

考虑到实际存在的少量散热和不可逆性，P_{c} 应略大于 185kW，$\dfrac{(190.76-185)\mathrm{kW}}{185\ \ \mathrm{kW}}=3.1\%$，其误差尚在可允许范围内，所以实测基本合理。

8-14 以 R134a 为工质的制冷循环装置中，蒸发器温度为−15℃，进入压缩机工质的干度近似为 1，压缩后的压力为$1\ 160.5\ \mathrm{kPa}$，若压缩机的绝热效率为 0.95，求压缩机出口处工质的焓值。

解：由 $t_1=-15^\circ\mathrm{C}$，$x=1$，查 R134a 热力性质表得 $h_1=389.6\mathrm{kJ/kg}$、$s_1=1.737\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$

由 $s_{2_s}=s_1$、$p_2=1\,160.5\ \mathrm{kPa}$，查同表得 $h_{2_s}=430.5\mathrm{kJ/kg}$。

$$h_2=h_1+\frac{h_{2_s}-h_1}{\eta_{\mathrm{Cs}}}=389.6\mathrm{kJ/kg}+\frac{430.5\mathrm{kJ/kg}-389.6\mathrm{kJ/kg}}{0.95}=432.7\mathrm{kJ/kg}$$

8-15 以 R134a 为工质的制冷装置循环的制冷工质进入压缩机的状态为 $t_1=-10°\mathrm{C}$、$x_1=0.99$，压缩后压力 $p_2=10\mathrm{MPa}$、温度 $t_2=60°\mathrm{C}$，求：压缩机耗功和压缩机的绝热效率。

解：据题意，$t_1=-10°\mathrm{C}$，$x_1=0.99$、$s_{2_s}=s_1$、$p_2=1\ \mathrm{MPa}$，$t_2=60^\circ\mathrm{C}$。查 R134a 性质表得 $h'=186.7\ \mathrm{kJ/kg}$、$h''=392.7\ \mathrm{kJ/kg}$；$s'=0.950\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$、$s''=1.733\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$；$h_2=441.5\mathrm{kPa}$、$h_{2_s}=423.5\ \mathrm{kJ/kg}$。

$$\begin{aligned}h_1&=h'+x(h''-h')\\&=186.7\ \mathrm{kJ/kg}+0.99\times(392.7-186.7)\ \mathrm{kJ/kg}=390.6\ \mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s_1&=s'+x(s''-s')\\&=0.950\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}+0.99\times(1.733-0.950)\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}=1.725\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\end{aligned}$$

$$\eta_{\mathrm{Cs}}=\frac{h_{2_s}-h_1}{h_2-h_1}=\frac{423.5\ \mathrm{kJ/kg}-390.6\ \mathrm{kJ/kg}}{441.5\ \mathrm{kJ/kg}-390.6\ \mathrm{kJ/kg}}=0.646$$

$$w_{\mathrm{C}}=h_2-h_1=441.5\ \mathrm{kJ/kg}-390.6\ \mathrm{kJ/kg}=50.9\ \mathrm{kJ/kg}$$

8-16 某两级气体压缩机进气参数为 100kPa、300K，每级压力比为 5，绝热效率为 0.82，从中间冷却器排出的气体温度是 330K。若空气的比热容可取定值，计算每级压气机的排气温度和生产 1kg 压缩空气压气机消耗的功。

解：状态 1：$p_1=100\mathrm{kPa}$、$T_1=300\mathrm{K}$；

状态 2：$p_2=\pi p_1=5\times100\mathrm{kPa}=500\mathrm{kPa}$

$$T_{2_s}=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=T_1\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=300\mathrm{K}\times5^{\frac{1.4-1}{1.4}}=475.13\mathrm{K}$$

$$T_2=T_1+\frac{T_{2_s}-T_1}{\eta_{\mathrm{Cs}}}=300\mathrm{K}+\frac{475.13\mathrm{K}-300\mathrm{K}}{0.82}=513.57\mathrm{K}$$

状态 3：$p_2=p_2=500\mathrm{kPa}$、$T_3=330\mathrm{K}$；状态 4：$p_4=\pi p_3=5\times500\mathrm{kPa}=2500\mathrm{kPa}$

$$T_{4_s}=T_3\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=T_3\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=330\text{K}\times5^{\frac{1.4-1}{1.4}}=522.65\text{K}$$

$$T_4=T_3+\frac{T_{4_s}-T_3}{\eta_{\text{Cs}}}=330\text{K}+\frac{522.65\text{K}-330\text{K}}{0.82}=564.94\text{K}$$

生产 1kg 压缩空气压气机耗功：

$$w_{\text{C}}=(h_2-h_1)+(h_4-h_3)=c_p[(T_2-T_1)+(T_4-T_3)]$$
$$=1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times[(513.57-300)\text{K}+(564.94-330)\text{K}]=450.7\text{kJ/kg}$$

本题虽然各级压力比相同，但进入高压级气缸的气体温度比进入低压级气缸温度高，所以各级消耗的功不相等。

8-17 某高校实验室需要压力为 6.0MPa 的压缩空气。有两人分别提出下述两个方案：A 方案采用绝热效率为 0.9 的轴流式压气机；B 方案采用活塞式气机，二级压缩。中间冷却，两缸压缩多变指数均为 1.25。试述上述两个方案的优劣。（设 $p_0=0.1\text{MPa}$、$t_0=27°\text{C}$ ）

解：A 方案：$\pi=\dfrac{p_2}{p_1}=\dfrac{6.0\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}}=60$

$$T_{2s}=T_1\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=(273.15+27)\ \text{K}\times60^{\frac{1.4-1}{1.4}}=966.84\ \text{K}$$

$$T_2=T_1+\frac{T_{2s}-T_1}{\eta_{\text{Cs}}}=300.15\ \text{K}+\frac{966.840\ \text{K}-300.15\ \text{K}}{0.9}=1\ 042.92\ \text{K}$$

$$t_2=767.77\ °\text{C}$$

$$w_{\text{C}}=h_2-h_1\doteq c_p(T_2-T_1)$$
$$=1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(966.84-300.15)\ \text{K}=743.7\ \text{kJ/kg}$$

B 方案：按耗功最小选择中间压力

$$\pi_{\text{L}}=\pi_{\text{H}}=\sqrt{\frac{p_2}{p_1}}=\sqrt{\frac{6\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}}}=7.746$$

$$T_a=T_2=T_1\pi_{\text{L}}^{\frac{n-1}{n}}=300.15\ \text{K}\times7.746^{\frac{1.25-1}{1.25}}=452.02\ \text{K}，\ t_a=t_2=178.87\ °\text{C}$$

$$w_{\text{C}}=w_{\text{C,L}}+w_{\text{C,H}}=2w_{\text{c,L}}=2\times\frac{nR_{\text{g}}T_1}{n-1}\times(\pi^{\frac{n-1}{n}}-1)$$
$$=2\times\frac{1.25\times287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times300.15\ \text{K}}{1.25-1}\times(7.746^{\frac{1.25-1}{1.25}}-1)=435.8\ \text{kJ/kg}$$

比较两方案：$T_{2,A}>>T_{2,B}$；$w_{\text{C,A}}>w_{\text{C,B}}$，所以从人身安全、设备安全的角度看 B 方案优于 A

方案。比外 A 方案实施需多级压气机故较困难，而且实验室未必需要大流量的高压空气，但 A 案可提供稳定气流可能是某些场合需要的。

第九章 气体动力循环

9-1 某活塞式内燃机定容加热理想循环，压缩 $\varepsilon = 10$，气体在压缩中程的起点状态是 $p_1 = 100\ \text{kPa}$、$t_1 = 35\ ^\circ\text{C}$，加热过程中气体吸热 $650\ \text{kJ/kg}$。假定比热容为定值且 $c_p = 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$\kappa = 1.4$，求：

（1）循环中各点的温度和压力；

（2）循环热效率，并与同温度限的卡诺循环热效率作比较；

（3）平均有效压力。

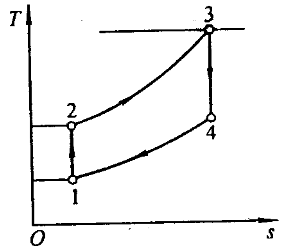


图 9-1 题 9-1 附图

解：（1）各点的温度和压力

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (35 + 273.15)\ \text{K}}{100 \times 10^3\ \text{Pa}} = 0.884\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.884\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}}{10} = 0.088\ 44\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1 \varepsilon^{\kappa} = 0.1\ \text{MPa} \times 10^{1.4} = 2.512\ \text{MPa}$$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} = \frac{2.512 \times 10^6\ \text{Pa} \times 0.088\ 44\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 774.05\ \text{K}$$

$$v_3 = v_2 = 0.088\ 44\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$q_1 = c_V (T_3 - T_2)$$

$$T_3 = T_2 + \frac{q_1}{c_V} = T_2 \frac{q_1}{c_p / \kappa} = 774.05\ \text{K} + \frac{650\ \text{kJ/kg}}{1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}/1.4} = 1\ 679.52\ \text{K}$$

$$p_3 = \frac{R_g T_3}{v_3} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 1\ 679.52\ \text{K}}{0.088\ 44\ \text{m}^3/\text{kg}} = 5.450\ \text{MPa}$$

$$v_4 = v_1$$

$$p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa} = p_3 \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa} = p_3 \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa} = 5.45\ \text{MPa} \times \left(\frac{1}{10}\right)^{1.4} = 0.217\ \text{MPa}$$

$$T_4=\frac{p_4v_4}{R_g}=\frac{0.217\times10^6\ \text{Pa}\times0.884\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=668.60\ \text{K}$$

（2）热效率

$$\eta_t=1-\frac{q_2}{q_1}=1-\frac{T_4-T_1}{T_3-T_2}=1-\frac{668.60\ \text{K}-308.15\ \text{K}}{1\ 679.52\ \text{K}-774.05\ \text{K}}=0.602$$

或
$$\eta_t=1-\frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}=1-\frac{1}{10^{1.4-1}}=0.602$$

同温限的卡诺循环热效率

$$\eta_{t,c}=1-\frac{T_L}{T_H}=1-\frac{308.15\ \text{K}}{1\ 679.52\ \text{K}}=0.817>\eta_t$$

（3）平均有效压力

$$\text{MEP}=\frac{W_{net}}{V_h}=\frac{W_{net}}{v_1-v_2}=\frac{q_1\eta_t}{v_1-v_2}=\frac{650\times10^3\ \text{J/kg}\times0.602}{(0.884\ 4-0.088\ 44)\text{m}^3/\text{kg}}=491.6\text{kPa}$$

9-2 利用空气标准的奥托循环模拟实际火花点火活塞式汽油机的循环。循环的压缩比为 7，循环加热量为$1\ 000\ \text{kJ/kg}$，压缩起始时空气压力为$90\ \text{kPa}$，温度$10\ ^\circ\text{C}$，假定空气的比热容可取定值，求循环的最高温度、最高压力、循环热效率和平均有效压力。

解：状态 1：

$$v_1=\frac{R_gT_1}{p_1}=\frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(273.15+10)\ \text{K}}{90\times1\ 000\ \text{Pa}}=0.902\ 9\ \text{m}^3/\text{kg}$$

状态 2：

$$v_2=\frac{v_1}{\varepsilon}=\frac{0.902\ 9\ \text{m}^3/\text{kg}}{7}=0.129\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_2=T_1\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1}=T_1\varepsilon^{\kappa-1}=(10+273.15)\ \text{K}\times7^{1.4-1}=616.67\ \text{K}$$

$$p_2=\frac{R_gT_2}{v_2}=\frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times616.67\ \text{K}}{0.129\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}}=1\ 372.0\ \text{kPa}$$

状态 3： $v_3=v_2$

$$T_3=T_2+\frac{q_1}{c_V}=616.67\ \text{K}+\frac{1\ 000\ \text{kJ/kg}}{0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}=2\ 009.43\ \text{K}$$

$$p_3 = \frac{R_g T_3}{v_3} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 2\ 009.43\ \text{K}}{0.129\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}} = 4\ 470.6\ \text{kPa}$$

状态 4：　$v_4 = v_1$

$$T_4 = T_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = T_3\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = T_3\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1} = 2\ 009.43\text{K} \times \left(\frac{1}{7}\right)^{1.4-1} = 922.64\text{K}$$

$$p_4 = \frac{R_g T_4}{v_4} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 922.64\ \text{K}}{0.902\ 9\ \text{m}^3/\text{kg}} = 293.3\ \text{kPa}$$

$$q_2 = c_V(T_4 - T_1) = 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (922.64 - 283.15)\text{K} = 459.2\text{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{459.2\ \text{kJ/kg}}{1\ 000\ \text{kJ/kg}} = 54.1\ \%$$

$$w_{net} = \eta_t q_1 = 0.541 \times 1\ 000\ \text{kJ/kg} = 541\ \text{kJ/kg}$$

$$\text{MEP} = \frac{w_{net}}{v_1 - v_2} = \frac{541\ \text{kJ/kg}}{0.902\ 9\ \text{m}^3/\text{kg} - 0.129\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}} = 699.1\ \text{kPa}$$

9-3 某狄塞尔循环的压缩比是19:1，输入每千克空气的热量 $q_1 = 800\ \text{kJ/kg}$。若压缩起始时状态是 $t_1 = 25\ ^\circ\text{C}$、$p_1 = 100\ \text{kPa}$，计算：（1）循环中各点的压力、温度和比体积；（2）预胀比；（3）循环热效率，并与同温限的卡诺循环热效率作比较；（4）平均有效压力。假定气体的比热容为定值，且 $c_p = 1\ 005\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$、$c_V = 718\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。

解：（1）循环中各点的压力、温度和比体积

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (25 + 273.15)\ \text{K}}{100 \times 10^3\ \text{Pa}} = 0.855\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.855\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}}{19} = 0.045\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$p_2 = p_1\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1\varepsilon^{\kappa} = 100\ \text{kPa} \times 19^{1.4} = 6\ 169.6\ \text{kPa}$$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} = \frac{6\ 169.6 \times 10^3\ \text{Pa} \times 0.045\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 967.35\ \text{K}$$

$$T_3 = T_2 + \frac{q_1}{c_p} = 967.35\ \text{K} + \frac{800\ \text{kJ/kg}}{1\ 005\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 1\ 763.37\ \text{K}$$

$$p_3 = p_2，\ v_3 = \frac{R_g T_3}{p_3} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times 1\ 763.37\ \text{K}}{6\ 169.6\times 10^3\ \text{Pa}} = 0.082\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_4 = v_1$$

$$p_4 = p_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa} = p_2\left(\frac{v_3}{v_1}\right)^{\kappa} = 6\ 169.6\text{kPa}\left(\frac{0.082\ 0\text{m}^3/\text{kg}}{0.855\ 7\text{m}^3/\text{kg}}\right)^{1.4} = 231.5\text{kPa}$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R_g} = \frac{231.5\times 10^3\ \text{Pa}\times 0.855\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 690.25\ \text{K}$$

（2）预胀比

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{0.082\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}}{0.045\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}} = 1.82$$

（3）循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\kappa(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{690.25\ \text{K} - 298.15\ \text{K}}{1.4\times(1\ 763.37 - 967.35)\ \text{K}} = 0.648$$

或 $$\eta_t = 1 - \frac{\rho^{\kappa} - 1}{\varepsilon^{\kappa-1}\kappa(\rho - 1)} = 1 - \frac{1.82^{1.4} - 1}{19^{1.4-1}\times 1.4\times(1.82 - 1)} = 0.648$$

卡诺循环效率 $$\eta_{t,c} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{298.15\ \text{K}}{1\ 763.37\ \text{K}} = 0.848$$

（4）平均有效压力

$$\text{MEP} = \frac{w_{net}}{v_4 - v_2} = \frac{\eta_t q_1}{v_4 - v_2} = \frac{0.648\times 800\ \text{kJ/kg}}{(0.855\ 7 - 0.045)\ \text{m}^3/\text{kg}} = 639.4\ \text{kPa}$$

9-4 某内燃机狄塞尔循环的压缩比是17:1，压缩起始时工质状态为 $p_1 = 95\ \text{kPa}$、$t_1 = 10\ ^\circ\text{C}$。若循环最高温度为 $1\ 900\ \text{K}$，假定气体比热容为定值 $c_p = 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$\kappa = 1.4$。试确定：

（1）循环各点温度，压力及比体积；

（2）预胀比；

（3）循环热效率。

解：（1）循环各点的压力、温度和比体积

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(10 + 273.15)\ \text{K}}{95\times 10^3\ \text{Pa}} = 0.855\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.855\ 4\ \mathrm{m^3/kg}}{17} = 0.050\ 3\ \mathrm{m^3/kg}$$

$$p_2 = p_1\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1\varepsilon^{\kappa} = 95\ \mathrm{kPa}\times 17^{1.4} = 5\ 015.94\ \mathrm{kPa}$$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} = \frac{5\ 015.94\times 10^3\ \mathrm{Pa}\times 0.050\ 3\ \mathrm{m^3/kg}}{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}} = 879.10\ \mathrm{K}$$

$T_3 = T_{\max} = 1\ 900\ \mathrm{K}$， $p_3 = p_2 = 5\ 015.94\ \mathrm{kPa}$

$$v_3 = \frac{R_g T_3}{p_3} = \frac{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 1\ 900\ \mathrm{K}}{5\ 015.94\times 10^3\ \mathrm{Pa}} = 0.108\ 7\ \mathrm{m^3/kg}$$

$$v_4 = v_1$$

$$p_4 = p_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa} = p_2\left(\frac{v_3}{v_1}\right)^{\kappa}$$

$$= 5\ 015.94\ \mathrm{kPa}\times\left(\frac{0.108\ 7\ \mathrm{m^3/kg}}{0.855\ 4\ \mathrm{m^3/kg}}\right)^{1.4} = 279.28\ \mathrm{kPa}$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R_g} = \frac{279.28\times 10^3\ \mathrm{Pa}\times 0.855\ 4\ \mathrm{m^3/kg}}{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}} = 832.38\ \mathrm{K}$$

(2) 预胀比

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} = \frac{0.108\ 7\ \mathrm{m^3/kg}}{0.050\ 3\ \mathrm{m^3/kg}} = 2.16$$

(3) 循环热效率

$$q_2 = c_V(T_4 - T_1) = 0.718\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(832.38 - 283.15)\ \mathrm{K} = 394.35\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2) = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(1\ 900 - 879.10)\ \mathrm{K} = 1\ 026.00\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{394.35\ \mathrm{kJ/kg}}{1\ 026.00\ \mathrm{kJ/kg}} = 61.6\ \%$$

或

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^{\kappa} - 1}{\varepsilon^{\kappa}\kappa(\rho - 1)} = 1 - \frac{2.16^{1.4} - 1}{17^{1.4-1}\times 1.4\times(2.16 - 1)} = 61.6\ \%$$

9-5 已知某活塞式内燃机混合加热理想循环 $p_1 = 0.1\ \mathrm{MPa}$ 、 $t_1 = 60\ ^\circ\mathrm{C}$ ，压缩比

$\varepsilon = \dfrac{v_1}{v_2} = 15$，定容升压比 $\lambda = \dfrac{p_3}{p_2} = 1.4$，定压预胀比 $\rho = \dfrac{v_4}{v_3} = 1.45$，试分析计算循环各点温度、压力、比体积及循环热效率。设工质比热容取定值，$c_p = 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_V = 0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

解：
$$R_g = c_p - c_V = 1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (60 + 273.15)\ \text{K}}{0.1 \times 10^6\ \text{Pa}} = 0.955\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}$$

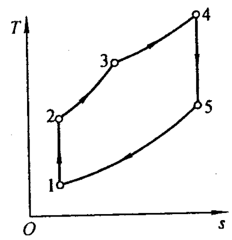


图 9-2 题 9-5 附图

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.955\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}}{15} = 0.063\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1 \varepsilon^{\kappa} = 0.1\ \text{MPa} \times 15^{1.4} = 4.431\ \text{MPa}$$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} = \frac{4.431 \times 10^6\ \text{Pa} \times 0.063\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 983.52\ \text{K}$$

$$v_3 = v_2,\quad p_3 = \lambda p_2 = 1.4 \times 4.431\ \text{MPa} = 6.203\ \text{MPa}$$

$$T_3 = \frac{p_3 v_3}{R_g} = \frac{6.203 \times 10^6\ \text{Pa} \times 0.063\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 1\ 376.8\ \text{K}$$

$$p_4 = p_3,\quad v_4 = v_3 \rho = 0.063\ 7\ \text{m}^3/\text{kg} \times 1.45 = 0.092\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R_g} = \frac{6.203 \times 10^6\ \text{Pa} \times 0.092\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 1\ 996.3\ \text{K}$$

$$v_5 = v_1,\quad p_5 = p_4 \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{\kappa} = 6.203\ \text{MPa} \times \left(\frac{0.092\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}}{0.955\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}}\right)^{1.4} = 0.236\ \text{MPa}$$

$$T_5 = \frac{p_5 v_5}{R_g} = \frac{0.236 \times 10^6\ \text{Pa} \times 0.955\ 7\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 784.39\ \text{K}$$

$$\begin{aligned} q_1 &= c_V (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3) \\ &= 0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (1\ 376.85 - 983.52)\ \text{K} + 1\ 005\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times \\ &\quad (1 \times 996.3 - 1 \times 376.8)\ \text{K} = 905.0\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$q_2 = c_V (T_5 - T_1) = 0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (784.39 - 333.15)\ \text{K} = 324.0\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{324.0\ \text{kJ/kg}}{905.0\ \text{kJ/kg}} = 0.642$$

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda\rho^\kappa - 1}{\varepsilon^{\kappa-1}[(\lambda-1)+\kappa\lambda(\rho-1)]}$$

$$= 1 - \frac{1.4\times1.45^{1.4}-1}{15^{1.4-1}\times[(1.4-1)+1.4\times1.4\times(1.45-1)]} = 0.642$$

9-6 有一定压加热理想循环的压缩比 $\varepsilon = 20$，工质取空气，比热容取定值，$\kappa = 1.4$，循环作功冲程的4%为定压加热过程，压缩冲程的初始状态为 $p_1 = 100\ \text{kPa}$，$t_1 = 20\ ^\circ\text{C}$。求：

（1）循环中每个过程的初始压力和温度；

（2）循环热效率。

解：（1）循环中每个过程的初始压力和温度。由已知条件

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times(20+273.15)\ \text{K}}{100\times10^3\ \text{Pa}} = 0.841\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.841\ \text{m}^3/\text{kg}}{20} = 0.042\ \text{m}^3/\text{kg}$$

过程1-2是定熵过程，有

$$T_2 = T_1\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = 293.15\ \text{K}\times20^{1.4-1} = 971.63\ \text{K}$$

$$p_2 = p_1\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = 100\ \text{kPa}\times20^{1.4} = 6\ 628.9\ \text{kPa}$$

已知定压加热过程占作功冲程的4%，即有

$$\frac{v_3 - v_2}{v_1 - v_2} = 0.04$$

所以

$$v_3 = v_2\left[1+0.04(\varepsilon-1)\right] = v_2\left[1+0.04\times(20-1)\right] = 1.76v_2$$

由于 $\dfrac{v_3}{v_2} = \rho$，所以据上式求得 $\rho = 1.76$。因过程2-3定压，$p_3 = p_2 = 6\ 628.9\ \text{kPa}$，故有

$$T_3 = T_2\left(\frac{v_3}{v_2}\right) = T_2\rho = 971.63\ \text{K}\times1.76 = 1\ 710\ \text{K}$$

过程3-4是定熵过程，有

$$T_4 = T_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = T_3\left(\frac{\dfrac{v_3}{v_2}}{\dfrac{v_4}{v_2}}\right)^{\kappa-1} = T_3\left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1} = 1\ 710\text{K}\times\left(\frac{1.76}{20}\right)^{1.4-1} = 646.8\text{K}$$

$$p_4 = p_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa} = p_3\left(\frac{v_3}{v_1}\right)^{\kappa} = p_3\left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{\kappa} = 6628.9\text{kPa}\times\left(\frac{1.76}{20}\right)^{1.4} = 220.6\text{kPa}$$

（2）循环热效率

$$\eta_{\text{t}} = 1-\frac{q_2}{q_1} = 1-\frac{\rho^{\kappa}-1}{\varepsilon^{\kappa-1}\kappa(\rho-1)} = 1-\frac{1.76^{1.4}-1}{20^{1.4-1}\times1.4\times(1.76-1)} = 0.658$$

或
$$\eta_{\text{t}} = 1-\frac{q_2}{q_1} = 1-\frac{T_4-T_1}{\kappa(T_3-T_2)} = 1-\frac{646.8\ \text{K}-293.15\ \text{K}}{1.4\times(1\ 710\ \text{K}-971.63\ \text{K})} = 0.658$$

9−7 某柴油机定压加热循环气体压缩前的参数为 $290\ \text{K}$、$100\ \text{kPa}$，燃烧完成后气体循环最高温度和压力分别是 $2\ 400\ \text{K}$、$6\ \text{MPa}$，利用空气的热力性质表，求循环的压缩比和循环的热效率。

解：状态 1：$v_1 = \dfrac{R_{\text{g}}T_1}{p_1} = \dfrac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times290\ \text{K}}{100\times1\ 000\ \text{Pa}} = 0.832\ 3\ \text{m}^3/\text{kg}$

查由空气热力性质表得 $h_1 = 292.25\ \text{kJ/kg}$、$p_{\text{r}1} = 1.253\ 1$、$v_{\text{r}1} = 231.43$。

$$\begin{aligned}u_1 &= h_1 - p_1v_1 = h_1 - R_{\text{g}}T_1\\ &= 292.25\ \text{kJ/kg} - 0.287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times290\ \text{K} = 209.02\ \text{kJ/kg}\end{aligned}$$

状态 2：$p_2 = p_3 = 6\ \text{MPa}$，$s_2 = s_1$

$$\frac{p_{\text{r}2}}{p_{\text{r}1}} = \frac{p_2}{p_1},\quad p_{\text{r}2} = p_{\text{r}1}\frac{p_2}{p_1} = 1.253\ 1\times\frac{6\ 000\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}} = 75.186$$

所以
$$T_2 = 890\ \text{K} + \frac{75.186-73.310}{76.576-73.310}\times(900\ \text{K}-890\ \text{K}) = 895.74\ \text{K}$$

$$v_2 = \frac{R_{\text{g}}T_2}{p_2} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}\times895.74\ \text{K}}{6\times10^6\ \text{Pa}} = 0.042\ 85\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\varepsilon = v_1/v_2 = 0.8323\text{m}^3/\text{kg}/0.04285\text{m}^3/\text{kg} = 19.4$$

$$\begin{aligned}h_2 &= 923.72\ \text{kJ/kg} + \frac{75.186-73.310}{76.576-73.310}\times(934.91-923.72)\text{kJ/kg}\\ &= 930.1\ \text{kJ/kg}\end{aligned}$$

状态 3：查空气热力性质表得 $h_3 = 2\ 756.75\ \text{kJ/kg}$，$p_{r3} = 4\ 667.4$，$v_{r3} = 0.514\ 20$。

$$v_3 = v_2 \frac{T_3}{T_2} = 0.042\ 85\ \text{m}^3/\text{kg} \times \frac{2\ 400\ \text{K}}{895.74\ \text{K}} = 0.114\ 8\ \text{m}^3/\text{kg}$$

状态 4：　　$v_4 = v_1$

$$v_{r4} = v_{r3} \frac{v_4}{v_3} = v_{r3} \frac{v_1}{v_3} = 0.514\ 20 \times \frac{0.832\ 3\ \text{m}^3/\text{kg}}{0.114\ 8\ \text{m}^3/\text{kg}} = 3.728\ 0$$

$$T_4 = 1\ 310\ \text{K} + \frac{3.728\ 0 - 3.775\ 0}{3.685\ 8 - 3.775\ 0} \times (1\ 320\ \text{K} - 1\ 310\ \text{K}) = 1\ 315.27\ \text{K}$$

$$p_4 = \frac{R_g T_4}{v_4} = \frac{R_g T_4}{v_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 1\ 315.27\ \text{K}}{0.832\ 3\ \text{m}^3/\text{kg}} = 453.5\ \text{kPa}$$

$$h_4 = 1\ 409.45\ \text{kJ/kg} + \frac{3.728\ 0 - 3.775\ 0}{3.685\ 8 - 3.775\ 0} \times (1\ 421.34 - 1\ 409.45)\text{kJ/kg}$$
$$= 1\ 415.71\ \text{kJ/kg}$$

$$u_4 = h_4 - p_4 v_4 = h_4 - R_g T_4$$
$$= 1\ 415.71\ \text{kJ/kg} - 0.287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 1\ 315.23\ \text{K} = 1\ 038.23\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2 = u_4 - u_1 = 1\ 308.23\ \text{kJ/kg} - 209.02\ \text{kJ/kg} = 829.2\ \text{kJ/kg}$$

$$q_1 = h_3 - h_2 = 2\ 756.75\ \text{kJ/kg} - 930.1\ \text{kJ/kg} = 1\ 826.65\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{829.2\ \text{kJ/kg}}{1\ 826.65\ \text{kJ/kg}} = 54.6\ \%$$

注意：$p_2 v_2^{\kappa} = p_1 v_1^{\kappa}$ 及 $T_2 v_2^{\kappa-1} = T_1 v_1^{\kappa-1}$ 等公式是在比热容取常数下得到的，本题不能利用这些公式求得温度或压力再查表求焓、热力学能。

9-8　内燃机混合加热循环，如图 9-3 所示。已知 $t_1 = 90\ ^\circ\text{C}$、$p_1 = 0.1\ \text{MPa}$；$t_2 = 400\ ^\circ\text{C}$，$t_3 = 590\ ^\circ\text{C}$，$t_5 = 300\ ^\circ\text{C}$。若比热容按变值考虑，试利用气体性质表计算各点状态参数，循环热效率及循环功并与按定值比热容计算作比较。

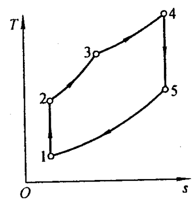


图 9-3 题 9-8 附图

解：据气体热力性质表：$T_1 = 363.15\ \text{K}$，$u_1 = 259.81\ \text{kJ/kg}$、$p_{r1} = 2.181\ 96$；$T_2 = 673.15\ \text{K}$，$u_2 = 491.59\ \text{kJ/kg}$、$h_2 = 684.81\ \text{kJ/kg}$、$p_{r2} = 20.035\ 85$；

$T_3 = 863.15\ \text{K}$，$h_3 = 892.06\ \text{kJ/kg}$、$u_3 = 644.31\ \text{kJ/kg}$、$p_{r3} = 51.637\ 82$；$T_5 = 573.15\ \text{K}$，$u_5 = 414.69\ \text{kJ/kg}$、$p_{r5} = 11.093\ 09$；$s_1^0 = 7.061\ 36\ \text{kJ/(kg·K)}$、$s_2^0 = 7.698\ 12\ \text{kJ/(kg·K)}$；$s_3^0 = 7.968\ 83\ \text{kJ/(kg·K)}$、$s_5^0 = 7.528\ 30\ \text{kJ/(kg·K)}$。

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_{r1}}{p_{r2}},\quad p_2 = p_1\frac{p_{r2}}{p_{r1}} = 0.1\ \text{MPa}\times\frac{20.035\ 85}{2.181\ 96} = 0.918\ \text{MPa}$$

$$\frac{p_3}{T_3} = \frac{p_2}{T_2},\quad p_3 = p_2\frac{T_3}{T_2} = 0.918\ \text{MPa}\times\frac{863.15\ \text{K}}{673.15\ \text{K}} = 1.177\ \text{MPa}$$

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg·K)}\times 363.15\ \text{K}}{0.1\times 10^6\ \text{Pa}} = 1.042\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = \frac{287\ \text{J/(kg·K)}\times 673.15\ \text{K}}{0.918\times 10^6\ \text{Pa}} = 0.210\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$v_3 = v_2,\quad p_4 = p_3,\quad v_5 = v_1$$

$$p_5 = \frac{R_g T_5}{v_5} = \frac{0.287\ \text{kJ/(kg·K)}\times 573.15\ \text{K}}{1.042\ \text{m}^3/\text{kg}} = 157.86\ \text{kPa}$$

$$\Delta s_{1-5} = s_5^0 - s_1^0 - R_g\ln\frac{p_5}{p_1} = 7.528\ 30\ \text{kJ/(kg·K)} - 7.063\ 16\ \text{kJ/(kg·K)} - 0.287\ \text{kJ/(kg·K)}\times\ln\frac{0.157\ 829\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}} = 0.336\ 0\ \text{kJ/(kg·K)}$$

$$\Delta s_{2-4} = s_4^0 - s_2^0 - R_g\ln\frac{p_4}{p_2} = \Delta s_{1-5}$$

$$s_4^0 = \Delta s_{1-5} + s_2^0 + R_g\ln\frac{p_4}{p_2} = 0.336\ 0\ \text{kJ/(kg·K)} + 7.698\ 12\ \text{kJ/(kg·K)} + 0.287\ \text{kJ/(kg·K)}\times\ln\frac{1.177\ \text{MPa}}{0.18\ \text{MPa}} = 8.001\ 055\ \text{kJ/(kg·K)}$$

查表得 $T_4 = 974.7\ \text{K}$，$h_4 = 1\ 017.49\ \text{kJ/kg}$。

$$q_1 = q_{2-3} + q_{3-4} = (u_3 - u_2) + (h_4 - h_3) = (644.31 - 491.59)\ \text{kJ/kg} + (1\ 017.49 - 892.06)\ \text{kJ/kg} = 278.1\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2 = u_5 - u_1 = 414.69\ \text{kJ/kg} - 259.81\ \text{kJ/kg} = 154.9\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{net} = q_1 - q_2 = 278.1\ \text{kJ/kg} - 154.9\ \text{kJ/kg} = 123.2\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{154.9\ \text{kJ/kg}}{278.1\ \text{kJ/kg}} = 44.3\ \%$$

取定值比热容

$$p_4 = \frac{T_3}{T_2} p_2\text{，}\quad p_5 = \frac{T_5}{T_1} p_1$$

代入$T_4 = T_5\left(\dfrac{p_4}{p_5}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$，整理得

$$T_4 = T_5 \frac{T_2}{T_1}\left(\frac{T_3 T_1}{T_2 T_5}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$= 573.15\ \text{K} \times \frac{673.15\ \text{K}}{363.15\ \text{K}} \times \left(\frac{863.15\ \text{K} \times 363.15\ \text{K}}{673.15\ \text{K} \times 573.15\ \text{K}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 1\ 001.2\ \text{K}$$

$$t_4 = 728.05\ {}^\circ\text{C}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_V(T_3 - T_1)}{c_V(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)}$$

$$= 1 - \frac{718\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (1300 - 907)\text{K}}{718\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (590 - 400)\text{K} + 1004\text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (728.05 - 590) \times \text{K}}$$

$$= 45.2\ \%$$

$$\eta_{t,c} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{363.15\ \text{K}}{1\ 001.2\ \text{K}} = 63.7\ \%$$

9-9 若某内可逆奥托循环压缩比为$\varepsilon = 8$，工质自$1\ 000\ {}^\circ\text{C}$高温热源定容吸热，向$20\ {}^\circ\text{C}$的环境介质定容放热。工质在定熵压缩前压力为$110\ \text{kPa}$，温度为$50\ {}^\circ\text{C}$；吸热过程结束后温度为$900\ {}^\circ\text{C}$，假定气体比热容可取定值，且$c_p = 1\ 005\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$、$\kappa = 1.4$，环境大气压$p_0 = 0.1\ \text{MPa}$，求：

（1）循环中各状态点的压力和温度；

（2）循环热效率；

（3）吸、放热过程作能力损失和循环㶲效率。

解：据题意，$p_1 = 110\ \text{kPa}$、$T_1 = (273.15 + 50)\ \text{K} = 323.15\ \text{K}$、$\varepsilon = v_1 / v_2 = 8$、$T_3 = (273.15 + 900)\ \text{K} = 1\ 173.15\ \text{K}$

（1）循环中各状态点的压力和温度

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)} \times 323.15\ \mathrm{K}}{110 \times 10^3\ \mathrm{Pa}} = 0.843\ 1\ \mathrm{m^3/kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.843\ 1\ \mathrm{m^3/kg}}{8} = 0.105\ 4\ \mathrm{m^3/kg}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1 \varepsilon^{\kappa} = 110\ \mathrm{kPa} \times 8^{1.4} = 2\ 021.71\ \mathrm{kPa}$$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} = \frac{2\ 021.71 \times 10^3\ \mathrm{Pa} \times 0.105\ 4\ \mathrm{m^3/kg}}{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}} = 724.47\ \mathrm{K}$$

$$v_3 = v_2,\quad p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2} = 2\ 021.71\ \mathrm{kPa} \times \frac{1\ 173.15\ \mathrm{K}}{742.47\ \mathrm{K}} = 3\ 194.44\ \mathrm{kPa}$$

$$v_4 = v_1,\quad p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa} = 3\ 199.44\mathrm{kPa} \times \left(\frac{0.1054\mathrm{m^3/kg}}{0.843\ 1\mathrm{m^3/kg}}\right)^{1.4} = 173.81\mathrm{kPa}$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R_g} = \frac{173.81 \times 10^3\ \mathrm{Pa} \times 0.843\ 1\ \mathrm{m^3/kg}}{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}} = 510.59\ \mathrm{K}$$

（2）循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 1 - \frac{1}{8^{1.4-1}} = 56.5\ \%$$

或

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{510.59\ \mathrm{K} - 323.15\ \mathrm{K}}{1\ 173.15\ \mathrm{K} - 742.47\ \mathrm{K}} = 56.5\ \%$$

(3)作能力损失和循环㶲效率

吸热过程，$s_f + s_g = \Delta s$，$s_g = \Delta s - s_f$

$$\Delta s_1 = c_V \ln\frac{T_3}{T_2} + R_g \ln\frac{v_3}{v_2} = c_V \ln\frac{T_3}{T_2}$$

$$= 0.718\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times \ln\frac{1\ 173.15\ \mathrm{K}}{742.47\ \mathrm{K}} = 0.328\ 5\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$s_{f1} = \int_2^3 \frac{\delta q}{T_r} = \frac{q_{2-3}}{T_r} = \frac{c_V (T_3 - T_2)}{T_r}$$

$$= \frac{0.718\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \times (1\ 173.15 - 742.47)\ \mathrm{K}}{1\ 273.15\ \mathrm{K}} = 0.242\ 9\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$s_{g1}=\Delta s_1-s_{f1}$$
$$=0.328\ 5\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}-0.242\ 9\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=0.085\ 6\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$i_1=T_0 s_{g1}=293.15\ \text{K}\times 0.085\ 6\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=25.1\ \text{kJ/kg}$$

放热过程，$s_g=\Delta s-s_f$

$$\Delta s_2=c_V\ln\frac{T_1}{T_4}+R_g\ln\frac{v_1}{v_4}=c_V\ln\frac{T_1}{T_4}$$
$$=0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{293.15\ \text{K}}{510.59\ \text{K}}=-0.398\ 4\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$s_{f2}=\int_2^3\frac{\delta q}{T_r}=\frac{q_{4-1}}{T_0}=\frac{c_V(T_1-T_4)}{T_0}$$
$$=\frac{0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(323.15-510.59)\ \text{K}}{293.15\ \text{K}}=-0.459\ 1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$s_{g2}=\Delta s_2-s_{f2}$$
$$=-0.398\ 4\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}+0.459\ 1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=0.060\ 7\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$i_2=T_0 s_{g2}=293.15\ \text{K}\times 0.060\ 7\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=17.8\ \text{kJ/kg}$$

循环后工质复原态，故就工质而言，不存在作功能力损失。

热源放热的可用能：

$$e_{x,Q}=\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)q_{2-3}$$
$$=\left(1-\frac{293.15\ \text{K}}{1\ 273.15\ \text{K}}\right)\times 0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1\ 173.15-742.47)\ \text{K}$$
$$=238.0\ \text{kJ/kg}$$

循环净功

$$w_{net}=q_1-q_2=309.2\ \text{kJ/kg}-134.6\ \text{kJ/kg}=174.6\ \text{kJ/kg}$$

由于排向环境的热量可用能为零，所以

$$\eta_{e_x}=\frac{w_{net}}{e_{x,Q}}=\frac{174.6\ \text{kJ/kg}}{238.0\ \text{kJ/kg}}=0.734$$

9-10 某内可逆狄塞尔循环压缩比$\varepsilon=17$，定压预胀比$\rho=2$，定熵压缩前$t=40\ ^\circ\text{C}$，$p=100\text{kPa}$，定压加热过程中工质从$1\ 800^\circ\text{C}$的热源吸热；定容放热过程中气体向$t_0=25^\circ\text{C}$、

$p_0 = 100\ \text{kPa}$ 的大气放热，若工质为空气，比热容可取定值，$c_p = 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$、$R_g = 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，计算：

（1）定熵压缩过程终点的压力和温度及循环最高温度和最高压力；

（2）循环热效率和㶲效率；

（3）吸、放热过程的作功能力损失；

（4）在给定热源间工作的热机的最高效率。

解：据题意：$\varepsilon = 17$，$T_1 = 313.15\ \text{K}$，$p_1 = 100\ \text{kPa}$，$T_H = 2\ 073.15\ \text{K}$。

（1）定熵压缩过程终点的压力和温度及循环最高温度和最高压力

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 313.15\ \text{K}}{100 \times 10^3\ \text{Pa}} = 0.898\ 7\ \text{m}^3\text{/kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.898\ 7\ \text{m}^3\text{/kg}}{17} = 0.052\ 9\ \text{m}^3\text{/kg}$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} = p_1 \varepsilon^{\kappa} = 100\ \text{kPa} \times 17^{1.4} = 5\ 279.9\ \text{kPa}$$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} = \frac{5\ 279.9 \times 10^3\ \text{Pa} \times 0.052\ 9\ \text{m}^3/\text{kg}}{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}} = 973.20\ \text{K}$$

$$p_{\max} = p_3 = p_2 = 5.280\ \text{MPa}$$

$$\frac{v_3}{v_2} = \rho,\quad v_3 = \rho v_2 = 2 \times 0.052\ 9\ \text{m}^3/\text{kg} = 0.105\ 8\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_3 = T_2 \frac{v_3}{v_2} = T_2 \rho = 973.2\ \text{K} \times 2 = 1\ 946.4\ \text{K} = T_{\max}$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = 1946.4\text{K} \times \left(\frac{0.1058\text{m}^3/\text{kg}}{0.8987\text{m}^3/\text{kg}}\right)^{1.4-1} = 827.14\text{K}$$

（2）循环热效率和㶲效率

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) = 1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (1\ 946.40 - 973.20)\text{K} = 978.07\text{kJ/kg}$$

$$q_2 = c_V (T_4 - T_1) = 0.718\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (827.14 - 313.15)\text{K} = 369.04\text{kJ/kg}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{369.04\ \text{kJ/kg}}{978.07\ \text{kJ/kg}} = 62.3\ \%$$

$$w_{net}=q_1\eta_t=978.07\ \text{kJ/kg}\times 0.623=609.3\ \text{kJ/kg}$$

热源放热量的可用能

$$e_{x,Q}=\left(1-\frac{T_0}{T_H}\right)q_1=\left(1-\frac{298.15\ \text{K}}{2\ 073.15\ \text{K}}\right)\times 978.07\ \text{kJ/kg}=837.4\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_{e_x}=\frac{w_{net}}{e_{x,Q}}=\frac{609.3\ \text{kJ/kg}}{837.4\ \text{kJ/kg}}=72.8\ \%$$

或

$$\Delta s_{iso}=\Delta s_{热机}+\Delta s_{热源}+\Delta s_{冷源}=\frac{q_1}{T_H}+\frac{q_2}{T_0}$$

$$=-\frac{978.07\ \text{kJ/kg}}{2\ 073.15\ \text{K}}+\frac{369.04\ \text{kJ/kg}}{298.15\ \text{K}}=0.766\ 0\ \text{kJ/kg}$$

$$i=T_0\Delta s_{iso}=298.15\ \text{K}\times 0.766\ 0\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=228.4\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_{e_x}=\frac{e_{x,Q}-i}{e_{x,Q}}=1-\frac{i}{e_{x,Q}}=1-\frac{228.4\ \text{kJ/kg}}{837.4\ \text{kJ/kg}}=72.7\ \%$$

（3）吸热过程和放热过程的作功能力损失

$$\overline{T}_{2-3}=\frac{q_1}{s_3-s_2}=\frac{q_1}{c_p\ln\dfrac{T_3}{T_2}}=\frac{978.07\ \text{kJ/kg}}{1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\dfrac{1\ 946.40\ \text{K}}{973.20\ \text{K}}}=1404.2\text{K}$$

$$e'_{x,Q}=\left(1-\frac{T_0}{\overline{T}_{2-3}}\right)q_1=\left(1-\frac{298.15\ \text{K}}{1404.2\ \text{K}}\right)\times 978.07\ \text{kJ/kg}=770.4\ \text{kJ/kg}$$

$$i_1=e_{x,Q}-e'_{x,Q}=837.4\ \text{kJ/kg}-770.4\ \text{kJ/kg}=67.0\ \text{kJ/kg}$$

或

$$i_1=T_0\Delta s_{iso,1}=T_0(\Delta s_H+\Delta s_{2-3})=T_0\left(\frac{q_1}{T_H}+c_p\ln\frac{T_3}{T_2}\right)$$

$$=298.15\ \text{K}\times\left(\frac{-978.07\ \text{kJ/kg}}{2\ 073.15\ \text{K}}+1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{1\ 946.40\ \text{K}}{973.20\ \text{K}}\right)=67.0\ \text{kJ/kg}$$

$$i_2=T_0\Delta s_{iso,2}=T_0(\Delta s_L+\Delta s_{4-1})=T_0\left(\frac{q_2}{T_0}+c_V\ln\frac{T_1}{T_4}\right)$$

$$=298.15\ \text{K}\times\left(\frac{369.04\ \text{kJ/kg}}{298.15\ \text{K}}+0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{313.15\ \text{K}}{827.14\ \text{K}}\right)=161.1\ \text{kJ/kg}$$

校核：

$$w_{\rm net}+i_1+i_2=609.3\ \text{kJ/kg}+67\ \text{kJ/kg}+161.1\ \text{kJ/kg}=837.4\ \text{kJ/kg}=e_{\text{x},Q}$$

（4）在给定热源间工作的热机的最高效率

$$\eta_{\rm t}=1-\frac{T_0}{T_{\rm H}}=1-\frac{298.15\ \text{K}}{2073.15\ \text{K}}=85.6\ \%$$

请考虑下述分析是否正确，为什么？

热源放热的热量灢与工质在加热过程中热力学能灢增加量的差即为过程灢损失，故

$$\begin{aligned}\Delta e_{\text{x},U}&=e_{\text{x},U3}-e_{\text{x},U2}=u_3-u_2-T_0(s_3-s_2)+p_0(v_3-v_2)\\&=c_V(T_3-T_2)-T_0\left(c_p\ln\frac{T_3}{T_2}+R_{\rm g}\ln\frac{p_3}{p_2}\right)+p_0(v_3-v_2)\\&=0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1\,946.40-973.20)\ \text{K}-298.15\ \text{K}\times\\&\quad 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times\ln\frac{1\,946.40\ \text{K}}{973.20\ \text{K}}+100\ \text{kPa}\times\\&\quad(0.105\,8-0.052\,9)\ \text{m}^3/\text{kg}=496.4\ \text{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$i_1=e_{\text{x},Q1}-\Delta e_{\text{x},U}=837.4\ \text{kJ/kg}-496.4\ \text{kJ/kg}=341.0\ \text{kJ/kg}$$

错！因气体在定压吸热过程中膨胀，对外作功，所以加热过程灢损失为

$$\begin{aligned}i_1&=e_{\text{x},Q1}-\Delta e_{\text{x},U}-e_{\text{x,W}}=e_{\text{x},Q1}-\Delta e_{\text{x},U}-(p_3-p_0)(v_3-v_2)\\&=837.4\ \text{kJ/kg}-499.8\ \text{kJ/kg}-(5\,280-100)\ \text{kPa}\times(0.105\,8-0.052\,9)\ \text{m}^3/\text{kg}=67.0\ \text{kJ/kg}\end{aligned}$$

9-11 内燃机中最早出现的是煤气机，煤气机最初发明时无燃烧前的压缩。设这种煤气机的示功图如图 9-4 所示。图中：$6-1$ 为进气线，这时活塞向右移动，进气阀开启，空气与煤气的混合物进入气缸。活塞到达位置 1 时，进气阀关闭，火花塞点火。$1-2$ 为接近定容的燃烧过程，$2-3$ 为膨胀线，$3-4$ 为排气阀开启后，部分废气排出，气缸中压力降低。$4-5-6$ 为排气线，这时活塞向左移动，排净废气。

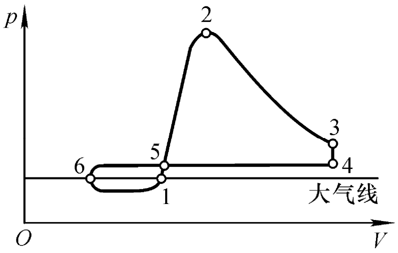
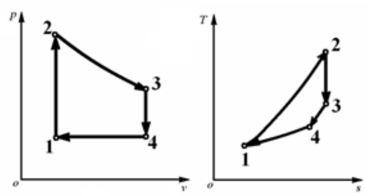


图 9-4 早期煤气机示功图

（1）试画出这一内燃机循环的理想循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图；

（2）分析这一循环热效率不高的原因；

（3）设 $p_1=0.1\ \text{MPa}$、$t_1=50\ °\text{C}$、$t_2=1\,200\ °\text{C}$、$v_4/v_2=2$，求此循环热效率。



解：（1）循环的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图如图 9-5。

图 9-5 题 9-11 附图

（2）从 $T-s$ 图看出，吸热线 $1-2$ 和放热线 $3-4$，$4-1$ 之间的垂直距离很短，即平均温差不大，原因是加热前未经绝热压缩，致使加热起始温度很低，平均吸热温度也就不高。与平均放热温度之间相差不大，效率不高。

（3）由题意，$T_1 =（50+273.15）\text{K}=323.15\ \text{K}$、$T_2 =（1\ 200+273.15）\text{K}=1\ 473.15\ \text{K}$、$v_1 = v_2$、$v_3 = v_4$、$s_2 = s_3$、$p_1 = p_4$。

$$T_3 = T_2\left(\frac{v_2}{v_3}\right)^{\kappa-1} = T_2\left(\frac{v_2}{v_4}\right)^{\kappa-1} = 1\ 473.15\ \text{K}\times\left(\frac{1}{2}\right)^{0.4} = 1\ 116.3\ \text{K}$$

$$T_4 = T_1\frac{v_4}{v_1} = T_1\frac{v_4}{v_2} = 323.15\ \text{K}\times 2 = 646.3\ \text{K}$$

$$\begin{aligned} q_1 &= c_V(T_2 - T_1) \\ &= 0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1\ 473.15-323.15)\ \text{K} = 825.7\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_2 &= q_{3-4} + q_{4-1} = c_V(T_3 - T_4) + c_p(T_4 - T_1) \\ &= 0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1\ 116.3-646.3)\ \text{K} + \\ &\quad 1.004\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(646.3-323.15)\ \text{K} = 662.0\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_t = 1-\frac{q_2}{q_1} = 1-\frac{662.0\ \text{kJ/kg}}{825.7\ \text{kJ/kg}} = 19.8\ \%$$

9-12 如图 9-6 所示，在定容加热理想循环中，如果绝热膨胀不在点 4 停止，而使其继续进行一直进行到点 5，使 $p_5 = p_1$。试在 $T-s$ 图上表示循环 $1-2-3-5-1$、并根据 $T-s$ 图上这两个循环的图形比较它们的热效率哪一个较高。

设 1、2、3 各点上的参数与题 9-1 所点给出的相同，求循环 $1-2-3-5-1$ 的热效率。

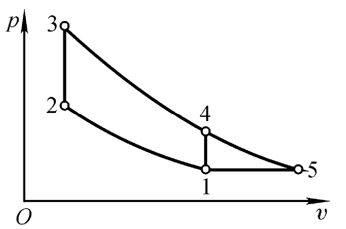


图 9-6 题 9-12 $p-v$ 图

解：该循环的 $T-s$ 图如图 9-7。

根据 $T-s$ 图可见，循环 $1-2-3-5-1$ 和 $1-2-3-4-1$ 吸收同样多的热量（吸热线 2-3 相同），而前者循环功较大，故 $\eta_{t123451} > \eta_{t12341}$。

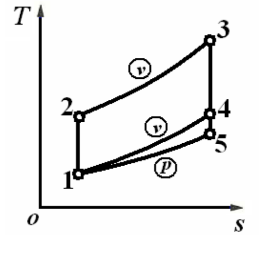


图 9-7 题 9-12 $T-s$ 图

按题意：1、2、3 各点参数与题 9-1 相同：$p_1 = 100\ \text{kPa}$、$T_1 = 308\ \text{K}$、$v_1 = 0.8844\ \text{m}^3/\text{kg}$；$p_2 = 2\ 512\ \text{kPa}$、$T_2 = 774.05\text{K}$、$v_2 = v_3 = 0.08844\text{m}^3/\text{kg}$；

$p_3 = 5\ 450\ \text{kPa}$、$T_3 = 1\ 679.52\ \text{K}$。

点 5 参数： $p_5 = p_1$

$$v_5 = v_3\left(\frac{p_3}{p_5}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = v_3\left(\frac{p_3}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

$$= 0.08844\ \text{m}^3/\text{kg} \times \left(\frac{5\ 450\text{kPa}}{100\ \text{kPa}}\right)^{\frac{1}{1.4}} = 1.538\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_5 = \frac{v_5}{v_1}T_1 = \frac{1.538\ \text{m}^3/\text{kg}}{0.8844\ \text{m}^3/\text{kg}} \times 308\ \text{K} = 535.6\ \text{K}$$

循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_5 - T_1)}{c_V(T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (535.6 - 308)\ \text{K}}{0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (1679.52 - 774.05)\ \text{K}} = 64.8\ \%$$

9-13 若使活塞式内燃机按卡诺循环进行，并设其温度界限和例 9-1 中混合加热循环相同，试求循环各特性点的状态参数和循环热效率。把循环表示在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上。分别从热力学理论角度和工程实用角度比较两个循环。

解：例 9-2 中混合加热理想循环的温度界限为 $T_1 = 333.15\ \text{K}$、$T_4 = 1\ 987.4\ \text{K}$。为便于比较，卡诺循环与混合加热循环的 $T-s$ 图画在一起（$p-v$ 图略）。

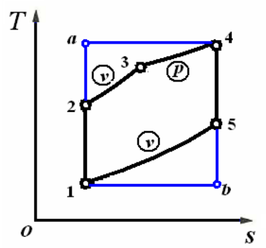


图 9-8 题 9-13 $T-s$ 图

已知：$p_1 = 0.17\ \text{MPa}$，$v_1 = 0.562\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}$，$T_1 = 333.15\text{K}$；$p_4 = 10.3\text{MPa}$，$v_4 = 0.055\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}$，$T_4 = 1\ 987.4\ \text{K}$；$v_5 = v_1 = 0.562\ 4\ \text{m}^3/\text{kg}$

a 点参数：

$$p_a = p_1\left(\frac{T_a}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = p_1\left(\frac{T_4}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.17\ \text{MPa} \times \left(\frac{1\ 987.4\ \text{K}}{333.15\ \text{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 88.15\text{MPa}$$

$$T_a = T_4 = 1\ 987.4\ \text{K}$$

$$v_a = \frac{R_g T_a}{p_a} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times 1\ 987.4\ \text{K}}{88.15 \times 10^6\,\text{Pa}} = 0.006\ 47\ \text{m}^3/\text{kg}$$

b 点参数：

$$T_b = T_1 = 333.15\ \mathrm{K}$$

$$p_b = p_4\left(\frac{T_b}{T_4}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 10.3\ \mathrm{MPa}\times\left(\frac{333.15\ \mathrm{K}}{1\ 987.4\ \mathrm{K}}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 0.019\ 9\ \mathrm{MPa}$$

$$v_b = \frac{R_\mathrm{g}T_b}{p_b} = \frac{287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 333.15\ \mathrm{K}}{0.019\ 9\times 10^6\ \mathrm{Pa}} = 4.81\ \mathrm{m^3/kg}$$

循环热效率

$$\eta_{\mathrm{t,c}} = 1-\frac{T_b}{T_a} = 1-\frac{333.15\ \mathrm{K}}{1\ 987.4\ \mathrm{K}} = 83.2\ \%$$

讨论比较：从热力学理论角度看，混合加热理想循环 123451 的热效率 $\eta_\mathrm{t} = 63.9\ \%$，$\eta_{\mathrm{t}1a4b1} > \eta_{\mathrm{t}123451}$。卡诺循环的热效率高，从 $T-s$ 图也能得出的同样结论。但从工程角度来看，不适宜采用卡诺循环 $1-a-4-b-1$，有如下几点原因：

1．$p_a = 88.15\ \mathrm{MPa}$，压力太高，通常气缸强度难以承受；

2．$p_b = 0.019\ 9\ \mathrm{MPa}$，压力太低，即真空度太高，要保证空气不渗入将很困难；

3．$v_b = 4.81\ \mathrm{m^3/kg}$，比混合加热循环时 v_5 大得多，$\dfrac{v_b}{v_a} = \dfrac{4.81\ \mathrm{m^3/kg}}{0.006\ 47\ \mathrm{m^3/kg}} = 743$ 倍，气缸长度过长，刚度不能满足要求。

4．循环净功

$$w_{\mathrm{net}} = \eta_{\mathrm{t,c}}q_1 = \eta_{\mathrm{t,c}}R_\mathrm{g}T_a\ln\frac{v_4}{v_a} = 0.832\times 287\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 1\ 987.4\ \mathrm{K}\times$$
$$\ln\frac{0.055\ 4\ \mathrm{m^3/kg}}{0.006\ 47\ \mathrm{m^3/kg}} = 1\ 019.1\mathrm{kJ/kg}$$

仅是混合循环功 $580\,\mathrm{kJ/kg}$ 的 1.75 倍，而气缸容积却是它的 8.55 倍（$v_b/v_5 = 8.55$），因而机件笨重，机械损失大，实际可得的有效功比理想卡诺循环功会小得多。

综上所述，从工程实用观点考察，内燃机不宜采用卡诺循环。

9-14 试分析斯特林循环并计算循环热效率及循环放热量 q_2。已知：循环吸热温度 $t_\mathrm{H} = 527\ ^\circ\mathrm{C}$。放热温度 $t_\mathrm{L} = 27\ ^\circ\mathrm{C}$（见图 9-9）。从外界热源吸热量 $q_1 = 200\ \mathrm{kJ/kg}$。设工质为理想气体，比热容为定值。

解：斯特林循环是概括性卡诺循环，循环热效率为

$$\eta_t = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{(273+27)\ \text{K}}{(273+527)\ \text{K}} = 62.5\ \%$$

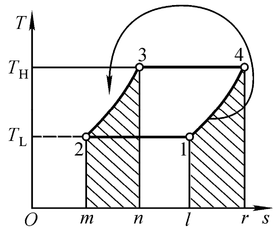


图 9-9 题 9-14 $T-s$ 图

$$q_2 = (1-\eta_t)q_1$$
$$= (1-0.625)\times 200\ \text{kJ/kg} = 75\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{net} = q_1 - q_2$$
$$= 200\ \text{kJ/kg} - 75\ \text{kJ/kg} = 125\ \text{kJ/kg}$$

又
$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{75\ \text{kJ/kg}}{200\ \text{kJ/kg}} = 0.625$$

9-15 某定压加热燃气轮机装置理想循环，参数如下：$p_1 = 101\ 150$ Pa、$T_1 = 300$ K、$T_3 = 923$ K，$\pi = \dfrac{p_2}{p_1} = 6$。循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图如图 9-10 所示。假定工质为空气，且设比热为定值，并取 $c_p = 1.03$ kJ/(kg·K)。试求：

（1）q_1、q_2；

（2）循环功 w_{net}；

（3）循环热效率；

（4）平均吸热温度和平均放热温度。

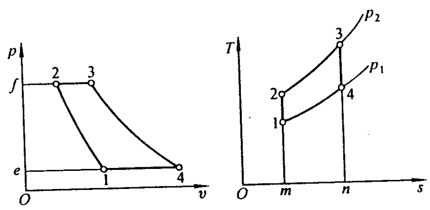


图 9-10 题 9-15 附图

解：（1）循环吸热量和放热量 q_1 和 q_2

过程 1-2 和过程 3-4 是可逆绝热过程

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 300\ \text{K}\times 6^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 500.6\ \text{K}$$

$$T_4 = T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 300\ \text{K}\times\left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 553.2\ \text{K}$$

$$q_1 = q_{2-3} = c_p(T_3 - T_2) = 1.03\ \text{kJ/(kg·K)}\times(923-500.6)\ \text{K} = 432.1\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2 = q_{4-1} = c_p(T_4 - T_1) = 1.03\ \text{kJ/(kg·K)}\times(553.2-300)\ \text{K} = 260.8\ \text{kJ/kg}$$

（2）循环净功

$$w_{net} = q_1 - q_2 = 435.1\ \text{kJ/kg} - 260.8\ \text{kJ/kg} = 174.3\ \text{kJ/kg}$$

（3）热效率

$$\eta_{\mathrm{t}}=\frac{w_{\mathrm{net}}}{q_1}=\frac{174.3\ \mathrm{kJ/kg}}{435.1\ \mathrm{kJ/kg}}=40.1\ \%$$

（4）平均吸收热温度度$\overline{T}_1$，和平均放热温度$\overline{T}_2$

$$\Delta s_{2-3}=c_p\ln\frac{T_3}{T_2}-R_{\mathrm{g}}\ln\frac{p_3}{p_2}=c_p\ln\frac{T_3}{T_2}$$

同理 $$\Delta s_{1-2}=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}$$

$$\overline{T}_1=\overline{T}_{2-3}=\frac{q_1}{\Delta s_{2-3}}=\frac{c_p(T_3-T_2)}{c_p\ln\dfrac{T_3}{T_2}}=\frac{923\ \mathrm{K}-500.6\ \mathrm{K}}{\ln\dfrac{923\ \mathrm{K}}{500.6\ \mathrm{K}}}=690.4\ \mathrm{K}$$

$$\overline{T}_2=\overline{T}_{1-4}=\frac{q_2}{\Delta s_{1-4}}=\frac{c_p(T_4-T_1)}{c_p\ln\dfrac{T_4}{T_1}}=\frac{553.2\ \mathrm{K}-300\ \mathrm{K}}{\ln\dfrac{553.2\ \mathrm{K}}{300\ \mathrm{K}}}=413.8\ \mathrm{K}$$

9-16 同上题，若燃气的比热容是变值，试利用空气热力性质表求出上题各项。

解：（1）循环吸热量和放热量q_1和q_2

查教材附表 8：$T_1=300\ \mathrm{K}$，$h_1=300.473\ \mathrm{kJ/kg}$、$s_1^0=6.869\ 26\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$、$p_{\mathrm{r1}}=1.114\ 58$；$T_3=923\ \mathrm{K}$，$h_3=959.043\ \mathrm{kJ/kg}$、$s_3^0=8.043\ 81\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$、$p_{\mathrm{r3}}=67.095\ 66$。

$$p_{\mathrm{r2}}=p_{\mathrm{r1}}\frac{p_2}{p_1}=1.114\ 58\times6=6.687\ 48$$

$$p_{\mathrm{r4}}=p_{\mathrm{r3}}\frac{p_4}{p_3}=67.095\ 66\times\frac{1}{6}=11.182\ 61$$

据p_{r2}、p_{r4}，由同表查得

$$T_2=498.4\ \mathrm{K},\quad h_2=501.716\ \mathrm{kJ/kg},\quad s_2^0=7.383\ 57\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$T_4=574.4\ \mathrm{K},\quad h_4=580.505\ \mathrm{kJ/kg},\quad s_4^0=7.530\ 59\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$$

$$q_1=h_3-h_2=959.043\ \mathrm{kJ/kg}-501.716\ \mathrm{kJ/kg}=457.3\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$q_2=h_4-h_1=580.505\ \mathrm{kJ/kg}-300.473\ \mathrm{kJ/kg}=280.0\ \mathrm{kJ/kg}$$

（2）循环净功

$$w_{\text{net}} = q_1 - q_2 = 457.3\ \text{kJ/kg} - 280\ \text{kJ/kg} = 177.3\ \text{kJ/kg}$$

（3）热效率

$$\eta_{\text{t}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{177.3\ \text{kJ/kg}}{457.3\ \text{kJ/kg}} = 38.8\ \%$$

（4）平均吸收热温度度$\overline{T}_1$，和平均放热温度$\overline{T}_2$

$$\overline{T}_1 = \frac{q_1}{\Delta s_{2-3}} = \frac{q_1}{s_3^0 - s_2^0} = \frac{457.3\text{kJ/kg}}{8.043\ 81\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 7.383\ 57\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 692.6\text{K}$$

$$\overline{T}_2 = \frac{q_2}{\Delta s_{4-1}} = \frac{q_2}{s_1^0 - s_4^0} = \frac{280.0\text{kJ/kg}}{6.869\ 26\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 7.530\ 59\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 423.4\text{K}$$

9-17 某采用回热的大型陆上燃气轮机装置定压加热理想循环输出净功率为$100\ \text{MW}$，循环的最高温度为$1\ 600\ \text{K}$，最低温度为$300\ \text{K}$，循环最低压力$100\ \text{kPa}$，压气机中的压比$\pi = 14$，若回热度为 0.75，空气比热容可取定值，求：循环空气的流量和循环的热效率。

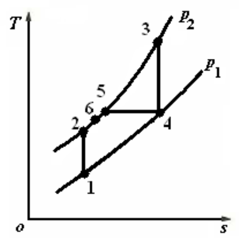


图 9-11 题 9-17 附图

解：由题意，状态 1：$p_1 = 100\ \text{kPa}$、$T_1 = 300\ \text{K}$

状态 2：

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 300\ \text{K}\times 14^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 637.63\ \text{K}$$

状态 3：

$$p_3 = p_2 = \pi p_1 = 14\times 100\ \text{kPa} = 1\ 400\ \text{kPa}\text{ 、 }T_3 = 1600\text{K}$$

状态 4：

$$p_4 = p_1$$

$$T_4 = T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1\ 600\text{K}\times\left(\frac{1}{14}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 752.79\text{K}$$

1kg 工质循环中压气机耗功、燃气轮机输出功及循环输出净功

$$w_{\text{C}} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$
$$= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(637.63\ \text{K} - 300\ \text{K}) = 339.32\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{\mathrm{T}} = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4)$$
$$= 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (1\ 600\ \mathrm{K} - 752.79\ \mathrm{K}) = 851.45\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$w_{\mathrm{net}} = w_{\mathrm{T}} - w_{\mathrm{C}} = 851.45\ \mathrm{kJ/kg} - 339.32\ \mathrm{kJ/kg} = 512.13\ \mathrm{kJ/kg}$$

循环工质流量

$$q_m = \frac{P}{w_{\mathrm{net}}} = \frac{100\ 000\ \mathrm{kW}}{512.13\ \mathrm{kJ/kg}} = 195.3\ \mathrm{kg/s}$$

据回热度定义 $\sigma = \dfrac{h_6 - h_2}{h_5 - h_2} = \dfrac{T_6 - T_2}{T_5 - T_2} = \dfrac{T_6 - T_2}{T_4 - T_2}$，故

$$T_6 = T_2 + \sigma(T_4 - T_2) = 637.73\mathrm{K} + 0.75 \times (752.79\mathrm{K} - 637.73\mathrm{K}) = 724.0\mathrm{K}$$

循环吸热

$$q_1 = c_p(T_3 - T_6)$$
$$= 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (1\ 600\ \mathrm{K} - 724.0\ \mathrm{K}) = 880.4\ \mathrm{kJ/kg}$$

循环效率

$$\eta_{\mathrm{t}} = \frac{w_{\mathrm{T}} - w_{\mathrm{C}}}{q_1} = \frac{851.45\ \mathrm{kJ/kg} - 339.32\ \mathrm{kJ/kg}}{880.4\ \mathrm{kJ/kg}} = 0.582$$

9-18 若例 9-3 燃气轮机装置的布雷顿循环配置一回热器，回热度 $\sigma = 70\%$，空气比热容 $c_p = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，$\kappa = 1.4$，试求：

（1）循环净功及净热量；

（2）循环热效率及㶲效率。

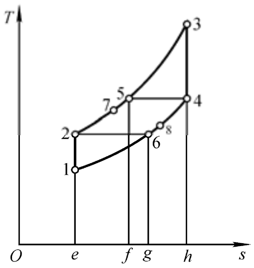


图 9-12 题 9-18 附图

解：据题意 $T_1 = 310\ \mathrm{K}$、$T_2 = 630.5\ \mathrm{K}$、$T_3 = 1\ 566.1\ \mathrm{K}$、$T_4 = 770\ \mathrm{K}$、$T_0 = 310\ \mathrm{K}$。

$$\sigma = \frac{h_7 - h_2}{h_5 - h_2} = \frac{h_7 - h_2}{h_4 - h_2} = \frac{T_7 - T_2}{T_4 - T_2}$$

$$T_7 = T_2 + \sigma(T_4 - T_2) = 630.5\ \mathrm{K} + 0.7 \times (770 - 630.5)\ \mathrm{K} = 728.15\ \mathrm{K}$$

同理：$$T_8 = T_4 - \sigma(T_4 - T_2) = 770\ \mathrm{K} - 0.7 \times (770 - 630.5)\ \mathrm{K} = 672.35\ \mathrm{K}$$

$$q_1 = h_3 - h_7 = c_p(T_3 - T_7)$$
$$= 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (1\ 556.1 - 728.15)\ \mathrm{K} = 842.1\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$q_2 = h_8 - h_1 = c_p(T_8 - T_1)$$
$$= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (672.35 - 310)\ \text{K} = 364.2\ \text{kJ/kg}$$

$$q_{\text{net}} = q_1 - q_2 = 842.1\ \text{kJ/kg} - 364.2\ \text{kJ/kg} = 477.9\ \text{kJ/kg} = w_{\text{net}}$$

$$\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{477.9\ \text{kJ/kg}}{842.1\ \text{kJ/kg}} = 56.75\ \%$$

$$\Delta s_{2-3} = c_p \ln\frac{T_3}{T_2} - R_g \ln\frac{p_3}{p_2}$$
$$= c_p \ln\frac{T_3}{T_2} = 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln\frac{1\ 556.1\ \text{kPa}}{630.5\ \text{kPa}} = 0.907\ 9\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\overline{T}_1 = \frac{q_1}{\Delta s_{2-3}} = \frac{842.1\ \text{kJ/kg}}{0.907\ 9\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 927.48\ \text{K}$$

$$e_{x,Q_1} = \left(1 - \frac{T_0}{\overline{T}_1}\right) q_1 = \left(1 - \frac{310\ \text{K}}{927.48\ \text{K}}\right) \times 842.1\ \text{kJ/kg} = 560.64\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_{e_x} = \frac{w_{\text{net}}}{e_{x,Q_1}} = \frac{477.9\ \text{kJ/kg}}{560.64\ \text{kJ/kg}} = 85.2\ \%$$

9-19 某极限回热的简单定压加热燃气轮机装置理想循环，已知参数：$T_1 = 300\ \text{K}$，$T_3 = 1\ 200\ \text{K}$，$p_1 = 0.1\ \text{MPa}$、$p_2 = 1.0\ \text{MPa}$、$\kappa = 1.37$。求：

（1）循环热效率；

（2）设 T_1、T_3、p_1 各维持不变，问 p_2 增大到何值时就不可能再采用回热？

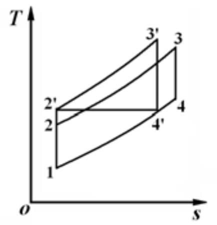


图 9-13 题 9-19 附图

解 （1）热效率

过程 $1-2$ 和过程 $3-4$ 为绝热过程

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 300\ \text{K} \times \left(\frac{1.0\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}}\right)^{\frac{1.37-1}{1.37}} = 558.7\ \text{K}$$

$$T_4 = T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1\ 200\ \text{K} \times \left(\frac{0.1\ \text{MPa}}{1.0\ \text{MPa}}\right)^{\frac{1.37-1}{1.37}} = 644.3\ \text{K}$$

由于极限回热，所以 $q_1 = c_p(T_3 - T_4)$；$q_2 = c_p(T_2 - T_1)$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_4)} = 1 - \frac{(558.7 - 300)\ \text{K}}{(1\ 200 - 644.3)\ \text{K}} = 53.4\ \%$$

（2）当 p_2 增大到 p_2' 时，$T_{4'}=T_{2'}$，这时再采用回热将无效果。即

$$T_1\left(\frac{p_2'}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=T_3\left(\frac{p_1}{p_2'}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

将 T_1、T_3、p_1 代入，解得

$$p_2'=1.30\ \text{MPa}$$

9-20 燃气轮机装置发展初期曾采用定容燃烧，这种燃烧室配制置有进、排气阀门和燃油阀门。当压缩空气与燃料进入燃烧室混合后，全部阀门都关闭，混合气体借电火花点火定容燃烧，燃气的压力、温度瞬间迅速提高。然后，排气阀门打开，燃气流入燃气轮机膨胀作功。这种装置理想循环的 $p-v$ 图如图 9-14 所示。图中 $1-2$ 为绝热压缩，$2-3$ 为定容加热，$3-4$ 为绝热膨胀，$4-1$ 为定压放热。

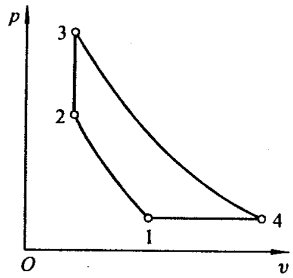


图 9-14 题 9-20 附图

（1）画出理想循环的 $T-s$ 图；

（2）设 $\pi=\dfrac{p_2}{p_1}$，$\theta=\dfrac{T_3}{T_2}$，并假定气体的绝热指数 κ 为定值，求循环热效率 $\eta_t=f(\pi,\theta)$。

解：（1）$T-s$ 图如

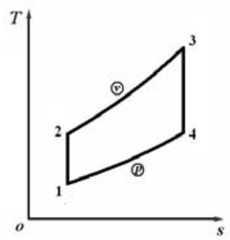


图 9-15 题 9-20 $T-s$ 图

（2）　　$q_1=c_V(T_3-T_2)$，$q_2=c_p(T_2-T_1)$

$$\eta_t=1-\frac{q_2}{q_1}=1-\frac{c_p(T_4-T_1)}{c_V(T_3-T_2)}=1-\frac{\kappa\left(\dfrac{T_4}{T_2}-\dfrac{T_1}{T_2}\right)}{\left(\dfrac{T_3}{T_2}-1\right)}$$

式中：
$$\frac{T_3}{T_2}=\theta,\quad \frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\frac{1}{\left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}=\frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}},$$

$$\frac{T_4}{T_2}=\frac{T_4}{T_3}\frac{T_3}{T_2}=\theta\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\theta\left(\frac{p_1}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\theta\left(\frac{p_1}{p_2}\frac{p_2}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\frac{\theta}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}\left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$=\frac{\theta}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}\theta^{-\frac{\kappa-1}{\kappa}}=\frac{\theta^{\frac{1}{\kappa}}}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$

将这些关系代入η_t式，得

$$\eta_t = 1 - \frac{\kappa(\theta^{\frac{1}{\kappa}} - 1)}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}(\theta - 1)}$$

9-21 一架喷气式飞机以每秒$200\ \text{m}$速度在某高度上飞行，该高度上空气温度为 -33℃、压力为$50\ \text{kPa}$。飞机的涡轮喷气发动机（图 9-16）的进、出口面积分别为$0.6\ \text{m}^2$、$0.4\ \text{m}^2$。压气机的增压为 9，燃气轮机的进口温度是$847\ ^\circ\text{C}$。空气在扩压管中压力提高$30\ \text{kPa}$，在尾喷管内压力降低$200\ \text{kPa}$。假定发动机进行理想循环，燃气轮机产生的功恰好用于带动压气机。若气体比热容$c_p = 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$c_V = 0.718\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，计算：

（1）压气机出口温度；

（2）空气离开发动机时温度及速度；

（3）发动机产生的推力；

（4）循环效率。

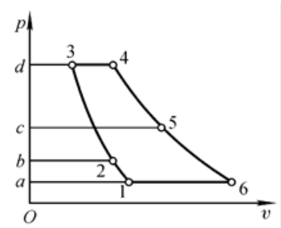


图 9-16 题 9-21 附图

解：据题意进口处$p_1 = 50\ \text{kPa}$，$t_1 = -33\ ^\circ\text{C}$，$c_{f1} = 200\ \text{m/s}$，$A_1 = 0.6\ \text{m}^2$

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (273.15 - 33)\ \text{K}}{50 \times 10^3\ \text{kPa}} = 1.378\ 5\ \text{m}^3/\text{kg}$$

$$q_m = \frac{A_1 c_{f1}}{v_1} = \frac{0.6\ \text{m}^2 \times 200\ \text{m/s}}{1.378\ 5\ \text{m}^3/\text{kg}} = 87.05\ \text{kg/s}$$

经扩压管后压力

$$p_2 = p_1 + \Delta p = 50\ \text{kPa} + 30\ \text{kPa} = 80\ \text{kPa}$$

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 240.15\ \text{K} \times \left(\frac{80\ \text{kPa}}{50\ \text{kPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 274.66\ \text{K}$$

扩压管出口参数即压气机进口参数，$\pi = 9$，压汽机出口参数为

$$p_3 = p_2\pi = 80\ \text{kPa} \times 9 = 720\ \text{kPa}$$

$$T_3 = T_2\left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 274.66\ \text{K} \times 9^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 514.55\ \text{K}$$

压气机耗功

$$w_{\mathrm{C}} = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_{\mathrm{g}} T_2 \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)$$

$$= \frac{1.4}{1.4-1} \times 287\ \mathrm{J/(kg \cdot K)} \times 274.66\ \mathrm{K} \times \left(9^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right) = 2.41 \times 10^5\ \mathrm{J}$$

燃烧室内定压燃烧，所以燃烧室出口参数（即燃气轮机进口参数） $p_4 = p_3 = 720\ \mathrm{kPa}$。另据题意，$T_4 = (847 + 273.15)\ \mathrm{K} = 1\,120.15\ \mathrm{K}$。燃气轮机产生的功恰好用于带动压气机，所以

$$w_{\mathrm{T}} = h_4 - h_5 = c_p (T_4 - T_5) = w_{\mathrm{C}} = c_p (T_3 - T_2)$$

$$T_5 = T_4 - (T_3 - T_2) = 1\,120.15\ \mathrm{K} - (514.55 - 274.66)\ \mathrm{K} = 880.26\ \mathrm{K}$$

$$p_5 = p_4 \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 720\ \mathrm{kPa} \times \left(\frac{880.26}{1\,120.15} \right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 309.7\ \mathrm{kPa}$$

据题意喷管出口截面上压力为 $p_6 = 309.7\ \mathrm{kPa} - 200\ \mathrm{kPa} = 109.7\ \mathrm{kPa}$，所以

$$T_6 = T_5 \left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 880.26\ \mathrm{K} \left(\frac{109.7}{309.7} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 654.4\ \mathrm{K}$$

$$v_6 = \frac{R_{\mathrm{g}} T_6}{p_6} = \frac{287\ \mathrm{J/(kg \cdot K)} \times 654.4\ \mathrm{K}}{50 \times 10^3\ \mathrm{Pa}} = 1.712\ \mathrm{m^3/kg}$$

$$c_{\mathrm{f}6} = \sqrt{2(h_5 - h_6)} = \sqrt{2 \times 1\,005 \mathrm{J/(kg \cdot K)} \times (880.26 - 654.4) \mathrm{K}} = 673.78 \mathrm{m/s}$$

$$F = q_m \Delta c_{\mathrm{f}} = q_m (c_{\mathrm{f}6} - c_{\mathrm{f}1}) = 87.05\ \mathrm{kg/s} \times (673.78 - 200)\ \mathrm{m/s} = 4.12 \times 10^4\ \mathrm{N}$$

$$q_1 = c_p (T_4 - T_3) = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (1\,120.15 - 514.55)\ \mathrm{K} = 608.6\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$q_2 = c_p (T_6 - T_1) = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (654.4 - 240.15)\ \mathrm{K} = 416.32\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$\eta_{\mathrm{t}} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{416.32\ \mathrm{kJ/kg}}{608.6\ \mathrm{kJ/kg}} = 31.6\ \%$$

9-22 某涡轮喷气推进装置（图 9-17），燃气轮机输出功用于驱动压气机。工质的性质与空气近似相同，装置进气压力 $90\ \mathrm{kPa}$，温度 $290\ \mathrm{K}$，压气机的压力比是 14:1，气体进入气轮机时的温度为 $1\,500\ \mathrm{K}$，排出气轮机的气体进入喷管膨胀到 $90\ \mathrm{kPa}$，若空气比热容为 $c_p = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$、$c_V = 0.718\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$，试求进入喷管时

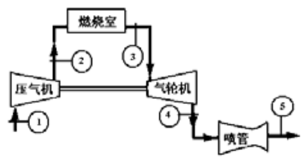


图 9-17 题 9-22 附图

气体的压力及离开喷管时气流的速度。

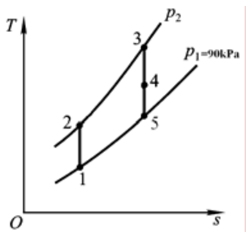


图 9-18 题 9-22 $T-s$ 图

解：据题意，燃气轮机输出功用于驱动压气机。

状态 1：　　$p_1 = 90\ \text{kPa}$ 、$T_1 = 290\ \text{K}$

状态 2：　　$p_2 = \pi p_1 = 14 \times 90\ \text{kPa} = 1\ 260\ \text{kPa}$

所以

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 290\ \text{K} \times \left(\frac{1\ 260\ \text{kPa}}{90\ \text{kPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 616.4\ \text{K}$$

状态 3：　　$p_3 = p_2 = 1\ 260\ \text{kPa}$ 、$T_3 = 1\ 500\ \text{K}$

压气机耗功

$$w_{\text{C}} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) = 1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (616.4 - 290)\text{K} = 328.0\text{kJ/kg}$$

燃气轮机技术功等于压气机耗功 $w_{\text{t}} = w_{\text{C}} = h_3 - h_4$

$$\begin{aligned} h_4 &= h_3 - w_{\text{C}} = c_p T_3 - w_{\text{C}} \\ &= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 1\ 500\ \text{K} - 328.0\ \text{kJ/kg} = 1\ 179.5\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$T_4 = \frac{h_4}{c_p} = \frac{1\ 179.5\ \text{kJ/kg}}{1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 1\ 173.6\ \text{K}$$

$$p_4 = p_3\left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1\ 260\ \text{kPa} \times \left(\frac{1\ 173.6}{1\ 500}\right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 533.8\ \text{kPa}$$

$$T_5 = T_3\left(\frac{p_5}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\left(\frac{p_1}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1\ 500\ \text{K} \times \left(\frac{90\ \text{kPa}}{1\ 260\ \text{kPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 705.7\ \text{K}$$

$$\begin{aligned} c_{\text{f}} &= \sqrt{2(h_4 - h_5)} = \sqrt{2c_p(T_4 - T_5)} \\ &= \sqrt{2 \times 1005\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)} \times (1\ 173.6\ \text{K} - 705.7\ \text{K}) \times 10^3} = 969.8\ \text{m/s} \end{aligned}$$

9-23　某电厂以燃气轮机装置为动力，输向发电机的能量为 20 MW。循环简图如图 9-19，循环最低温度 290K，最高为 1500K；循环最低压力为 $95\ \text{kPa}$，最高压力 $950\ \text{kPa}$，循环中设一回热器，回热度为 75 %。压气机绝热效率 $\eta_{\text{C,s}} = 0.85$，气轮机相对内部效率为 $\eta_{\text{T}} = 0.87$。试求：

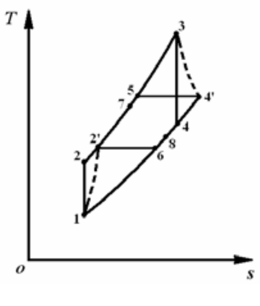


图 9-19 题 9-23 $T-s$ 图

（1）气轮机输出的总功率及压气机消耗的功率；

（2）循环热效率；

（3）假设循环中工质向 1 800 K 的高温热源吸热，向 290K 的低温热源放热，求每一过程的不可逆损失（$T_0 = 290\ \text{K}$）

解：据题意，$T_1 = 290\ \text{K}$、$T_3 = 1\ 500\ \text{K}$、$p_1 = 95\ \text{kPa}$、$p_4 = 950\ \text{kPa}$。

$$\tau = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{1\ 500\ \text{K}}{290\ \text{K}} = 5.172\ 4\text{、}\pi = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{950\ \text{kPa}}{95\ \text{kPa}} = 10$$

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1\left(\frac{p_3}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 290\ \text{K}\times 10^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 559.88\ \text{K}$$

$$T_{2'} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_{\text{C,s}}} = 290\ \text{K} + \frac{(559.88-290)\ \text{K}}{0.85} = 607.51\ \text{K}$$

$$T_4 = T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_3\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1\ 500\ \text{K}\times 0.1^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 776.95\ \text{K}$$

$$T_{4'} = T_3 - \eta_{_\text{T}}(T_3 - T_4) = 1\ 500\ \text{K} - 0.87(1\ 500 - 776.95)\ \text{K} = 870.95\ \text{K}$$

回热度 $\sigma = \dfrac{h_7 - h_{2'}}{h_{4'} - h_{2'}} = \dfrac{T_7 - T_{2'}}{T_{4'} - T_{2'}}$，所以

$$T_7 = T_{2'} + \sigma(T_{4'} - T_{2'}) = 607.15\text{K} + 0.75\times(870.94 - 607.51)\text{K} = 805.09\text{K}$$

同样

$$T_8 = T_{4'} - \sigma(T_{4'} - T_{2'}) = 870.94\text{K} - 0.75\times(870.94 - 607.51)\text{K} = 673.37\text{K}$$

（1）气轮机及压气机的功率

$$q_1 = h_3 - h_7 = c_p(T_3 - T_7)$$
$$= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1\ 500 - 805.09)\ \text{K} = 698.4\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2 = h_8 - h_1 = c_p(T_8 - T_1)$$
$$= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(673.37 - 290)\ \text{K} = 385.3\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = q_{\text{net}} = q_1 - q_2 = 698.4\ \text{kJ/kg} - 385.3\ \text{kJ/kg} = 313.1\ \text{kJ/kg}$$

$$P = q_m w_{\text{net}}\text{，}\quad q_m = \frac{P}{w_{\text{net}}} = \frac{20\times 10^6\ \text{J/s}}{313.1\times 10^3\ \text{J/kg}} = 63.88\ \text{kg/s}$$

$$P_\text{T} = q_m c_p (T_3 - T_{4'})$$
$$= 63.88\ \text{kg/s}\times 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(1\ 500 - 870.94)\ \text{K} = 40.4\times 10^3\ \text{kW}$$

$$P_{\mathrm{C}} = q_m c_p (T_{2'} - T_1)$$
$$= 63.88\ \mathrm{kg/s} \times 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times (607.51 - 290)\ \mathrm{K} = 20.4 \times 10^3\ \mathrm{kW}$$

（2）循环热效率

$$\eta_{\mathrm{t}} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{385.3\ \mathrm{kJ/kg}}{698.4\ \mathrm{kJ/kg}} = 44.8\ \%$$

（3）不可逆损失

$$\Delta s_{1-2'} = \Delta s_{2-2'} = c_p \ln \frac{T_{2'}}{T_2}$$
$$= 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln \frac{607.51\ \mathrm{K}}{559.88\ \mathrm{K}} = 0.082\ 05\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

$$\Delta s_{7-3} = c_p \ln \frac{T_3}{T_7} = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln \frac{1\ 500\ \mathrm{K}}{805.09\ \mathrm{K}} = 0.625\ 38\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

$$\Delta s_{2'-7} = c_p \ln \frac{T_7}{T_{2'}} = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln \frac{805.09\ \mathrm{K}}{607.51\ \mathrm{K}} = 0.282\ 99\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

$$\Delta s_{3-4'} = \Delta s_{4-4'} = c_p \ln \frac{T_{4'}}{T_4}$$
$$= 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln \frac{870.94\ \mathrm{K}}{776.95\ \mathrm{K}} = 0.114\ 77\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

$$\Delta s_{4'-8} = c_p \ln \frac{T_8}{T_{4'}} = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln \frac{673.37\ \mathrm{K}}{870.94\ \mathrm{K}} = -0.258\ 56\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

$$\Delta s_{8-1} = c_p \ln \frac{T_1}{T_8} = 1.005\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times \ln \frac{290\ \mathrm{K}}{673.37\ \mathrm{K}} = -0.846\ 63\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

压缩过程不可逆损失

$$\dot{I}_1 = q_m T_0 s_{\mathrm{g}1} = q_m T_0 \Delta s_{1-2'}$$
$$= 63.88\ \mathrm{kg/s} \times 290\ \mathrm{K} \times 0.082\ 05\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} = 1\ 520.0\ \mathrm{kJ/s}$$

吸热过程不可逆损失

$$\Delta s_{7-3} = s_{\mathrm{f}2} + s_{\mathrm{g}2}$$

$$s_{\mathrm{f}2} = \frac{q_1}{T_{\mathrm{r}}} = \frac{698.4\ \mathrm{kJ/kg}}{1\ 800\ \mathrm{K}} = 0.388\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

$$s_{\mathrm{g}2} = \Delta s_{73} - s_{\mathrm{f}2}$$
$$= 0.625\ 38\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} - 0.388\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} = 0.237\ 38\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$$

$$\dot{I}_2 = q_m T_0 s_{g2} = 63.88\ \text{kg/s} \times 290\ \text{K} \times 0.237\ 38\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 4\ 397.5\ \text{kJ/s}$$

膨胀过程不可逆损失

$$\dot{I}_3 = q_m T_0 s_{g3} = q_m T_0 \Delta s_{3-4'}$$
$$= 63.88\ \text{kg/s} \times 290\ \text{K} \times 0.114\ 77\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 2\ 126.1\ \text{kJ/s}$$

放热过程不可逆损失

$$\dot{I}_4 = q_m T_0 s_{g4} = q_m T_0 (\Delta s_{8-1} - s_{f4}) = 63.88\ \text{kg/s} \times 290\ \text{K} \times \left[-0.846\ 63\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - \frac{-385.3\ \text{kJ/kg}}{290\ \text{K}}\right] = 8\ 929.0\ \text{kJ/s}$$

换热器内不可逆损失

$$\dot{I}_5 = q_m T_0 (\Delta s_{2'-7} + \Delta s_{4'-8})$$
$$= 63.88\ \text{kg/s} \times 290\ \text{K} \times (0.282\ 99 - 0.258\ 56)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 452.6\ \text{kJ/s}$$

$$P_{\text{net}} + \Sigma\dot{I} = 20\ 000\ \text{kJ/s} + 1\ 520.0\ \text{kJ/s} + 4\ 397.5\ \text{kJ/s} + 2\ 126.1\ \text{kJ/s} + 8\ 929.0\ \text{kJ/s} + 452.6\ \text{kJ/s} = 37\ 425.1\ \text{kJ/s}$$

$$E_{x,Q} = q_m q_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)$$
$$= 63.88\ \text{kg/s} \times 698.4\ \text{kJ/s} \times \left(1 - \frac{290\ \text{K}}{1\ 800\ \text{K}}\right) = 37\ 426.0\ \text{kJ/s}$$

计算合理

第十章 蒸汽动力装置循环

10-1 简单蒸汽动力装置循环（即朗肯循环），蒸汽的初压 $p_1 = 3\ \text{MPa}$，终压 $p_2 = 6\ \text{kPa}$，初温如下表所示，试求在各种不同初温时循环的热效率 η_t，耗汽率 d 及蒸汽的终干度 x_2，并将所求得的各值填写入表内，以比较所求得的结果。

t_1 / °C	300	500
η_t	***0.3476***	***0.3716***
d /(kg/J)	***1.009×10⁻⁶***	***8.15×10⁻⁷***
x_2	***0.761***	***0.859***

解：（1） $p_1 = 3\ \text{MPa}$， $t_1 = 300\ ^\circ\text{C}$， $p_2 = 6\text{kPa}$。由 $h-s$ 图查得： $h_1 = 2\ 996\ \text{kJ/kg}$， $h_2 = 2\ 005\ \text{kJ/kg}$， $x_2 = 0.761$， $t_2 = 36\ ^\circ\text{C}$。取 $v_{2'} \approx 0.001\ \text{m}^3$

$$h_{2'} \approx c_{\mathrm{w}} t_{2'} = 4.187\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times 36\ ^{\circ}\mathrm{C} = 150.7\ \mathrm{kJ/kg}$$

水泵功近似为

$$\begin{aligned} w_p &= v_{2'}(p_2 - p_1) \\ &= 0.001\ \mathrm{m^3/kg} \times (3.0 - 0.006) \times 10^3\ \mathrm{kPa} = 2.994\ \mathrm{kJ/kg} \approx 3\ \mathrm{kJ/kg} \end{aligned}$$

热效率

$$\eta_{\mathrm{t}} = \frac{h_1 - h_2 - w_{\mathrm{P}}}{h_1 - h_2 - w_{\mathrm{P}}} = \frac{(2\ 996 - 2\ 005 - 3)\ \mathrm{kJ/kg}}{(2\ 996 - 150.7 - 3)\ \mathrm{kJ/kg}} = 34.76\ \%$$

若略去水泵功，则

$$\eta_{\mathrm{t}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}} = \frac{2\ 996\ \mathrm{kJ/kg} - 2\ 005\ \mathrm{kJ/kg}}{2\ 996\ \mathrm{kJ/kg} - 150.7\ \mathrm{kJ/kg}} = 34.83\ \%$$

$$d = \frac{1}{h_1 - h_2} = \frac{1}{(2\ 996 - 2\ 005) \times 10^3\ \mathrm{J/kg}} = 1.009 \times 10^{-6}\ \mathrm{kg/J}$$

（2） $p_1 = 3\ \mathrm{MPa}$ ， $t_1 = 500\ ^{\circ}\mathrm{C}$ ， $p_2 = 6\ \mathrm{kPa}$ ， 由 $h-s$ 图查得： $h_1 = 3\ 453\ \mathrm{kJ/kg}$ 、 $h_2 = 2\ 226\ \mathrm{kJ/kg}$ 、 $x_2 = 0.859$ 、 $t_2 = 36\ ^{\circ}\mathrm{C}$ 。

$$h_{2'} \approx c_{\mathrm{w}} t_{2'} = 4.187\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)} \times 36^{\circ}\mathrm{C} = 150.7\ \mathrm{kJ/kg}$$

若不计水泵功，则

$$\eta_{\mathrm{t}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}} = \frac{3\ 453\ \mathrm{kJ/kg} - 2\ 226\ \mathrm{kJ/kg}}{3\ 453\ \mathrm{kJ/kg} - 150.7\ \mathrm{kJ/kg}} = 37.16\ \%$$

$$d = \frac{1}{h_1 - h_2} = \frac{1}{(3\ 453 - 2\ 226) \times 10^3\ \mathrm{J/kg}} = 8.15 \times 10^{-7}\ \mathrm{kg/J}$$

10-2 简单蒸汽动力装置循环，蒸汽初温 $t_1 = 500\ ^{\circ}\mathrm{C}$，终压 $p_2 = 0.006\ \mathrm{MPa}$ ，初压 p_1 如下表所示，试求在各种不同的初压下循环的热效率 η_{t} ，耗汽率 d 、及蒸汽终干度 x_2 ，并将所求得的数值真入下表内，以比较所求得的结果。

p_1 / MPa	3.0	15.0
η_{t}	***0.3716***	***0.4287***
d /(kg/J)	***8.15×10^{-7}***	***6.05×10^{-7}***
x_2	***0.859***	***0.746***

解：(1) $p_1 = 3\ \mathrm{MPa}$ ， $t_1 = 500\ ^{\circ}\mathrm{C}$ ， $p_2 = 6\ \mathrm{kPa}$ ，即上题的(2)。

（2）据 $p_1 = 15\ \text{MPa}$、$t_1 = 500\ ^\circ\text{C}$ 由 $h-s$ 图得，$h_1 = 3\ 305\text{kJ/kg}$ 、 $s_1 = 6.345\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。由 $p_2 = 0.006\ \text{MPa}$ 查饱和水蒸气表得，$s' = 0.520\ 8\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $h' = 151.47\text{kJ/kg}$ ；$s'' = 8.328\ 3\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $h'' = 2566.5\text{kJ/kg}$ 。

因 $s_2 = s_1$，故

$$x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = \frac{6.345\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.520\ 8\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{8.328\ 3\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.520\ 8\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 0.746$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ &= 151.47\text{kJ/kg} + 0.766 \times (2564.5 - 151.47)\text{kJ/kg} = 1953.0\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

忽略水泵功

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}} = \frac{(3\ 305 - 1\ 953.0)\ \text{kJ/kg}}{(3\ 305 - 151.47)\ \text{kJ/kg}} = 42.87\ \%$$

$$d = \frac{1}{h_1 - h_2} = \frac{1}{(3\ 305 - 1\ 653.0) \times 10^3\ \text{J/kg}} = 6.05 \times 10^{-7}\ \text{kg/J}$$

10-3 某蒸汽动力装置朗肯循环的最高运行压力是 5MPa，最低压力是 15kPa，若蒸汽轮机的排汽干度不能低于 0.95，输出功率不小于 7.5MW，忽略水泵功，试确定锅炉输出蒸汽必须的温度和质量流量。

解：据 $p_2 = 15\ \text{kPa}$、$x_2 = 0.95$，查水蒸气表得 $h' = 225.9\ \text{kJ/kg}$ 、 $h'' = 2\ 598.2\ \text{kJ/kg}$ ，$s' = 0.755\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $s'' = 8.007\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ &= 225.9\ \text{kJ/kg} + 0.95 \times (2\ 598.2 - 225.9)\text{kJ/kg} = 2\ 479.6\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_2 &= s' + x_2(s'' - s') \\ &= 0.755\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + 0.95 \times (8.007 - 0.755)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 7.644\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \end{aligned}$$

由 $s_1 = s_2$ 、 $p_1 = 5\ \text{MPa}$ ，查水蒸气表得：$h_1 = 4\ 032.1\ \text{kJ/kg}$、$t_1 = 756\ ^\circ\text{C}$ 。忽略水泵功

$$w_{\text{net}} = w_{\text{T}} = h_1 - h_2 = 4\ 032.1\ \text{kJ/kg} - 2\ 479.6\ \text{kJ/kg} = 1\ 552.5\ \text{kJ/kg}$$

$$q_m = \frac{P}{w_{\text{net}}} = \frac{7.5 \times 10^3\ \text{kJ/s}}{1\ 552.5\ \text{kJ/kg}} = 4.831\ \text{kg/s}$$

10-4 利用地热水作为热源，R134a 作为工质的朗肯循环（$T-s$ 图如图 10-1），在 R134a

离开锅炉时状态为 85℃的干饱和蒸气，在气轮机内膨胀后进入冷凝器时的温度是 40℃，计算循环热效率。

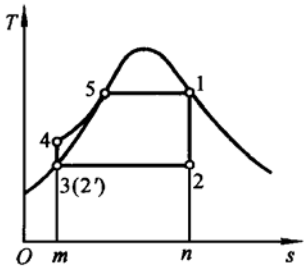


图 10-1 题 10-4 $T-s$ 图

解：85 ℃时查 R134a 性质表得：$h_1 = h'' = 427.6\ \text{kJ/kg}$

$s_1 = s'' = 1.677\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$p_s = 2\ 928.2\ \text{kPa}$。

40℃时查表得 $p_s = 1\ 017.1\ \text{kPa}$、$h'' = 419.4\ \text{kJ/kg}$

$s'' = 1.711\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$h' = 256.4\ \text{kJ/kg}$、$s' = 1.190\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$v' = 0.000\ 9\ \text{m}^3/\text{kg}$。

$$x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = \frac{1.677\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 1.190\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{1.711\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 1.190\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 0.935$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h' + x_2(h'' - h') \\ &= 256.4\text{kJ/kg} + 0.935\times(419.4 - 256.4)\text{kJ/kg} = 408.8\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

汽轮机输出功

$$w_{\text{T}} = h_1 - h_2 = 427.6\ \text{kJ/kg} - 408.8\ \text{kJ/kg} = 18.8\ \text{kJ/kg}$$

泵耗功

$$\begin{aligned} w_{\text{P}} &= h_4 - h_3 \cong v'(p_4 - p_3) \\ &= 0.000\ 9\ \text{m}^3/\text{kg}\times(2\ 928.2 - 1\ 017.1)\text{kPa} = 1.72\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

所以 $$h_4 = h_3 + w_{\text{P}} = 256.4\ \text{kJ/kg} + 1.72\ \text{kJ/kg} = 258.2\ \text{kJ/kg}$$

$$q_1 = h_1 - h_4 = 427.6\ \text{kJ/kg} - 258.2\ \text{kJ/kg} = 169.5\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2 = h_2 - h_3 = h_2 - h' = 408.8\ \text{kJ/kg} - 256.4\ \text{kJ/kg} = 152.4\ \text{kJ/kg}$$

循环热效率

$$\eta_{\text{t}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{w_{\text{T}} - w_{\text{P}}}{q_1} = \frac{18.8\ \text{kJ/kg} - 1.72\ \text{kJ/kg}}{169.5\ \text{kJ/kg}} = 10.0\ \%$$

或 $$\eta_{\text{t}} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{152.4\ \text{kJ/kg}}{169.5\ \text{kJ/kg}} = 10.0\%$$

10-5 某项 R134a 为工质的朗肯循环利用当地海水为热源。已知 R134a 的流量为 1 000 kg/s，当地表层海水的温度 25℃，深层海水的温度为 5℃。若加热和冷却过程中海水和工质的温差为 5℃，试计算循环的功率和热效率。

解：由题意，$t_1 = 25\ ^\circ\text{C} - 5\ ^\circ\text{C} = 20\ ^\circ\text{C}$，$t_2 = 5\ ^\circ\text{C} + 5\ ^\circ\text{C} = 10\ ^\circ\text{C}$。20℃时查 R134a

性质表得：$h_1 = h'' = 409.8\ \text{kJ/kg}$，$s_1 = s'' = 1.718\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$，$p_s = 572.1\ \text{kPa}$；10℃时查表得：$p_s = 414.9\ \text{kPa}$、$h'' = 404.3\ \text{kJ/kg}$，$h' = 213.5\ \text{kJ/kg}$，$s'' = 1.722\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$、$s' = 1.048\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$，$v' = 0.0008\text{m}^3/\text{kg}$。

$$x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = \frac{1.718\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} - 1.048\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}}{1.722\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} - 1.048\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}} = 0.994$$

$$h_2 = h' + x_2(h'' - h') = 213.5\ \text{kJ/kg} + 0.994 \times (404.3 - 213.5)\text{kJ/kg} = 403.2\ \text{kJ/kg}$$

汽轮机输出功 $w_\text{T} = h_1 - h_2 = 409.8\ \text{kJ/kg} - 403.2\ \text{kJ/kg} = 6.6\ \text{kJ/kg}$

泵功 $w_\text{P} = h_4 - h_3 \cong v'(p_4 - p_3) = 0.000\ 8\ \text{m}^3/\text{kg} \times (572.1 - 414.9)\text{kPa} = 0.126\ \text{kJ/kg}$

$$h_4 = h_3 + w_\text{P} = 213.5\ \text{kJ/kg} + 0.126\ \text{kJ/kg} = 213.6\ \text{kJ/kg}$$

$$q_1 = h_1 - h_4 = 409.8\ \text{kJ/kg} - 213.6\ \text{kJ/kg} = 196.2\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2 = h_2 - h_3 = h_2 - h' = 403.2\ \text{kJ/kg} - 213.5\ \text{kJ/kg} = 189.7\ \text{kJ/kg}$$

循环净功 $w_\text{net} = w_\text{T} - w_\text{P} = 6.6\ \text{kJ/kg} - 0.126\ \text{kJ/kg} = 6.474\ \text{kJ/kg}$

循环热效率 $\eta_\text{t} = \dfrac{w_\text{net}}{q_1} = \dfrac{w_\text{T} - w_\text{P}}{q_1} = \dfrac{6.6\ \text{kJ/kg} - 0.126\ \text{kJ/kg}}{196.2\ \text{kJ/kg}} = 3.3\%$

或 $\eta_\text{t} = 1 - \dfrac{q_2}{q_1} = 1 - \dfrac{189.7\ \text{kJ/kg}}{196.2\ \text{kJ/kg}} = 3.3\ \%$

装置功率 $P = q_m w_\text{net} = 1\ 000\ \text{kg/s} \times 6.474\ \text{kJ/kg} = 6\ 474\ \text{kW}$

10−6 某抽汽回热循环采用间壁式回热器，见图 10−2。该循环最高压力 5MPa，锅炉输出蒸汽温度为 650℃，抽汽压力 1MPa，冷凝器工作温度 45℃，送入锅炉的给水温度为 200℃。求：循环抽汽量和水泵 A、B 的耗功。

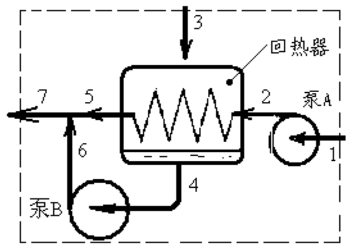


图 10−2 题 10−6 附图

解：题意，由 5MPa 和 650℃，查得新蒸汽的焓和熵为 $h_8 = 3\ 782.6\ \text{kJ/kg}$、$s_8 = 7.388\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$。蒸汽在汽轮机内等熵膨胀，由 s_8 及抽汽压力 1MPa，查得抽汽的焓 $h_3 = 3\ 213.0\ \text{kJ/kg}$。抽汽在回热器内凝结，$h_4 = 762.8\ \text{kJ/kg}$、$v_4 = 0.001\ 1\ \text{m}^3/\text{kg}$、$t_s = 179.9\ {}^\circ\text{C}$。冷凝器内凝结水 $h_1 = 188.4\ \text{kJ/kg}$、

$v_1 = 0.001\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}$， $p_1 = 9.6\ \text{kPa}$。进入锅炉的给水 $h_7 = 853.8\ \text{kJ/kg}$。

$$w_{\text{P1}} = v_1(p_2 - p_1) = 0.001\ 0\ \text{m}^3/\text{kg} \times (5\ 000 - 9.6)\text{kPa} = 4.99\ \text{kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_{\text{P1}} = 188.4\ \text{kJ/kg} + 4.99\ \text{kJ/kg} = 193.4\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{\text{P2}} = v_4(p_7 - p_4) = 0.001\ 1\ \text{m}^3/\text{kg} \times (5\ 000 - 1\ 000)\text{kPa} = 4.4\ \text{kJ/kg}$$

$$h_6 = h_4 + w_{\text{P2}} = 762.8\ \text{kJ/kg} + 4.4\ \text{kJ/kg} = 767.2\ \text{kJ/kg}$$

取图示虚线为控制体积，列能量方程

$$(1-\alpha)h_1 + \alpha h_3 + w_{\text{P1}} + w_{\text{P2}} - h_7 = 0$$

$$\alpha = \frac{h_7 - h_1 - w_{\text{P1}} - w_{\text{P2}}}{h_3 - h_1}$$
$$= \frac{853.8\ \text{kJ/kg} - 188.4\ \text{kJ/kg} - 4.99\ \text{kJ/kg} - 4.4\ \text{kJ/kg}}{3\ 213.0\ \text{kJ/kg} - 188.4\ \text{kJ/kg}} = 0.217$$

10−7 设有两个蒸汽再热动力装置循环，蒸汽的初参数都为 $p_1 = 12.0\ \text{MPa}$，$t_1 = 450\ ^\circ\text{C}$，终压都为 $p_2 = 0.004\ \text{MPa}$，第一个再热循环再热时压力为 $2.4\ \text{MPa}$，另一个再热时的压力为 $0.5\ \text{MPa}$，两个循环再热后蒸汽的温度都为 400℃。试确定这两个再热循环的热效率和终湿度，将所得的热效率、终湿度和朗肯循环作比较，以说明再热时压力的选择对循环热效率和终湿度的影响。注：湿度是指 1 kg 湿蒸汽中所含和水的质量，即（1–x）。

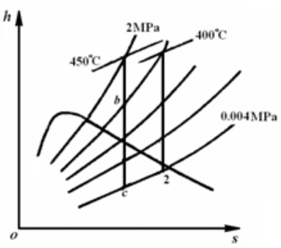


图 10−3 题 10−7 $h-s$ 图

解：（1）由 $p_1 = 12.0\text{MPa}$、$t_1 = 450^\circ\text{C}$ 及再热压力 $p_b = 2.4\text{MPa}$，从 $h-s$ 图查得，$h_1 = 3\ 212\ \text{kJ/kg}$、$s_1 = 6.302\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$h_b = 2\ 819\ \text{kJ/kg}$、$h_a = 3\ 243\ \text{kJ/kg}$、$h_2 = 2\ 116\ \text{kJ/kg}$、$x_2 = 0.820$。由 $p_2 = 0.004\ \text{MPa}$、$s_1 = s_c = s_b = 6.302\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 及 $s_c' = 0.422\ 1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$s_c'' = 8.472\ 5\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，$h_2' = 121.30\ \text{kJ/kg}$、$h_2'' = 2\ 553.5\ \text{kJ/kg}$。

$$x_c = \frac{s_c - s_c'}{s_c'' - s_c'} = \frac{6.302\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.422\ 1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{8.472\ 5\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.422\ 1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 0.730$$

$$\eta_{\text{t}} = \frac{(h_1 - h_b) + (h_a - h_2)}{(h_1 - h_2') + (h_a - h_b)} = \frac{(3\ 212 - 2\ 819)\ \text{kJ/kg} + (3\ 243 - 2\ 116)\ \text{kJ/kg}}{(3\ 212 - 121.30)\ \text{kJ/kg} + (3\ 243 - 2\ 819)\ \text{kJ/kg}} = 43.25\%$$

终湿度　　　$y_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.82 = 0.18$

（2）再热压力 $p_b = 0.5\ \text{MPa}$ 时，h_1、x_c、h_2' 同（1），$h_b = 2\ 530\ \text{kJ/kg}$、$h_a = 3\ 275\ \text{kJ/kg}$、$h_2 = 2\ 350\ \text{kJ/kg}$、$x_2 = 0.916$

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_b) + (h_a - h_2)}{(h_1 - h_2') + (h_a - h_b)} = \frac{(3\ 212 - 2\ 530)\ \text{kJ/kg} + (3\ 275 - 2\ 350)\ \text{kJ/kg}}{(3\ 212 - 121.30)\ \text{kJ/kg} + (3\ 275 - 2\ 530)\ \text{kJ/kg}} = 40.02\%$$

$$y_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.916 = 0.084$$

（3）朗肯循环

$$\begin{aligned} h_c &= h_2' + x_c(h_2'' - h_2') \\ &= 121.30\ \text{kJ/kg} + 0.730 \times (2\ 553.5 - 121.30)\ \text{kJ/kg} = 1\ 896.8\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_c}{h_1 - h_2'} = \frac{3\ 212\ \text{kJ/kg} - 1\ 896.8\ \text{kJ/kg}}{3\ 212\ \text{kJ/kg} - 121.30\ \text{kJ/kg}} = 42.55\%$$

$$y_2 = 1 - x_c = 1 - 0.730 = 0.27$$

列表比较

	η_t	y_2
无再热（朗肯循环）	42.55	0.27
再热压力 2.4 MPa	43.25	0.18
再热压力 0.5 MPa	40.02	0.084

由此可见，再热压力高，可提高循环效率，但提高干度的作用不显著，再热压较低，提高干度作用较大，但可能引起循环热效率下降。

10-8　具有两次抽汽加热给水的蒸汽动力装置回热循环。其装置示意图如教材图 10-16 所示。已知：第一次抽气压力 $p_{0_1} = 0.3\ \text{MPa}$，第二次抽汽压力 $p_{0_2} = 0.12\ \text{MPa}$，蒸汽初温 $t_1 = 450\ ^\circ\text{C}$，初压 $p_1 = 3.0\ \text{MPa}$。冷凝器中压力 $p_2 = 0.005\ \text{MPa}$。试求：

（1）抽汽量 α_1、α_2；

（2）循环热率 η_t；

（3）耗汽率 d；

（4）平均吸热温度；

（5）与朗肯循环的热效率 η_t、耗汽率 d 和平均吸热温度作

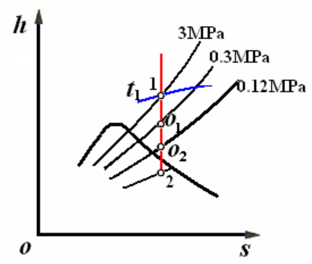


图 10-4 题 10-8 $h-s$ 图

比较、并说明耗汽率为什么反而增大？

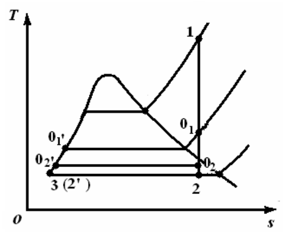


图 10-5 题 10-8 $T-s$ 图

解：由 $p_1 = 3.0\ \text{MPa}$，$t_1 = 450^\circ\text{C}$、$p_{0_1} = 0.3\ \text{MPa}$、$p_{0_2} = 0.12\ \text{MPa}$、$p_2 = 0.005\text{MPa}$，从 $h-s$ 图查得：$h_1 = 3\ 344\ \text{kJ/kg}$、$h_{0_1} = 2\ 765\ \text{kJ/kg}$，$h_{0_2} = 2\ 603\ \text{kJ/kg}$，$h_2 = 2\ 159\ \text{kJ/kg}$；由饱和水和饱和蒸汽表得：$h'_{0_1} = 561.58\text{kJ/kg}$，$h'_{0_2} = 439.37\ \text{kJ/kg}$、$h'_2 = 137.72\ \text{kJ/kg}$、$s'_{0_1} = 1.672\ 1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$s'_2 = 0.476\ 1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。由过热蒸汽表查得 $s_1 = 7.081\ 7\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

（1）抽汽量 α_1、α_2

由热平衡方程 $\alpha_1(h_{0_1} - h'_{0_1}) = (1-\alpha_1)(h'_{0_1} - h'_{0_2})$ 得

$$\alpha_1 = \frac{h'_{0_1} - h'_{0_2}}{h_{01} - h'_{0_2}} = \frac{561.58\ \text{kJ/kg} - 439.37\ \text{kJ/kg}}{2\ 765\ \text{kJ/kg} - 439.37\ \text{kJ/kg}} = 0.052\ 5$$

因 $\alpha_2 = (h_{0_2} - h'_{0_2}) = (1-\alpha_1-\alpha_2)(h_{0_2} - h_2)$

$$\alpha_2 = \frac{(1-\alpha_1)(h'_{0_2} - h'_2)}{h_{0_2} - h'_2} = \frac{(1-0.052\ 5)\times(439.37-137.72)\ \text{kJ/kg}}{(2603-137.72)\ \text{kJ/kg}} = 0.115\ 9$$

（2）循环热效率

$$q_1 = h_1 - h'_{0_1} = 3\ 344\ \text{kJ/kg} - 561.58\ \text{kJ/kg} = 2\ 782.4\ \text{kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} q_2 &= (1-\alpha_1-\alpha_2)(h_2 - h'_2) \\ &= (1-0.052\ 5-0.115\ 9)\times(2\ 159-137.72)\ \text{kJ/kg} = 1\ 680.9\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1\ 680.9\ \text{kJ/kg}}{2\ 782.4\ \text{kJ/kg}} = 39.6\%$$

或

$$\begin{aligned} w_{\text{net}} &= (h_1 - h_{0_1}) + (1-\alpha_1)(h_{0_1} - h_{0_2}) + (1-\alpha_1-\alpha_2)(h_{0_2} - h_2) \\ &= (3\ 344 - 2\ 765)\ \text{kJ/kg} + (1-0.052\ 5)\times(2\ 765-2\ 603)\ \text{kJ/kg} + \\ &\quad (1-0.052\ 5-0.115\ 9)\times(2\ 603-2\ 159)\ \text{kJ/kg} = 1\ 101.7\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{1\ 101.7\ \text{kJ/kg}}{2\ 782.4\ \text{kJ/kg}} = 39.6\%$$

（3）耗汽率

$$d=\frac{1}{w_{\text{net}}}=\frac{1}{1\,101.7\ \text{kJ/kg}}=9.08\times10^{-7}\ \text{kg/J}$$

（4）平均吸热温度

$$\Delta s=s_1-s'_{0_1}$$
$$=7.081\,7\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}-1.672\,1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=5.409\,6\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\overline{T}_1=\frac{q_1}{\Delta s}=\frac{2\ 782.4\ \text{kJ}}{5.409\,6\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}=514.3\ \text{K}$$

（5）朗肯循环热效率

$$\eta'_{\text{t}}=\frac{h_1-h_2}{h_1-h_{2'}}=\frac{3\ 344\ \text{kJ/kg}-2\ 159\ \text{kJ/kg}}{3\ 344\ \text{kJ/kg}-137.72\ \text{kJ/kg}}=37.0\ \%$$

耗汽率

$$d'=\frac{1}{h_1-h_2}=\frac{1}{(3\ 344-2\ 159)\times10^{3}\ \text{J/kg}}=8.44\times10^{-7}\ \text{J/kg}$$

平均吸热温度

$$\overline{T}'_1=\frac{q_1}{\Delta s}=\frac{h_1-h'_2}{s_1-s'_2}=\frac{3\ 344\ \text{kJ/kg}-137.72\ \text{kJ/kg}}{7.081\,7\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}-0.476\,1\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}=485.4\ \text{K}$$

比较发现，采用抽汽回热后，热效率较简单朗肯循环有所提高，而耗汽率有所增大，这是因为抽汽使 1kg 新蒸汽作出的功减小，故使 d 增大，但由于回热，吸热量减少，平均吸热温度升高，放热温度不变，故 η_{t} 提高。

10−9 某蒸汽循环进入汽轮机的蒸汽温度 400℃、压力 3MPa，绝热膨胀到 0.8MPa 后，抽出部分蒸汽进入回热器，其余蒸汽在再热器中加热到 400℃后进入低压汽轮机继续膨胀到 10kPa 排向冷凝器，忽略水泵功，求循环热效率。

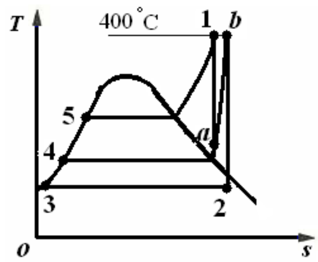


图 10-6 题 10-9 $T-s$ 图

解：状态 1：由 3MPa 和 400℃查水蒸气表，$h_1=3\ 230.7\ \text{kJ/kg}$，$s_1=6.921\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；状态 a：据 $s_a=s_1$、$p_a=0.8\ \text{MPa}$ 查水蒸气表，$h_a=2\ 890.1\ \text{kJ/kg}$；状态 b：由 0.8MPa 和 400℃查水蒸气表，$h_4=h'=721.1\ \text{kJ/kg}$、$h_b=3\ 267.0\ \text{kJ/kg}$、$s_b=7.571\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；状态 2：由 10kPa，查饱和水蒸气表，$h''=2\ 583.7\ \text{kJ/kg}$、$h'$=191.7 kJ/kg，$s''=8.149\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$s'$=0.649 kJ/(kg·K)；据 $s_b=s_2$，

$s' < s_2 < s''$，所以状态 2 为饱和湿蒸汽状态

$$x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = \frac{7.571\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.649\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{8.149\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.649\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 0.923$$

$$h_2 = h' + x_2(h'' - h') = 191.7\ \text{kJ/kg} + 0.923 \times (2\ 583.7 - 191.7)\text{kJ/kg} = 2\ 399.5\ \text{kJ/kg}$$

状态 3

$$h_3 = 191.7\ \text{kJ/kg}，\ v_3 = 0.001\ 0\ \text{m}^3/\text{kg}$$

抽汽量

$$\alpha = \frac{h_4 - h_3}{h_a - h_3} = \frac{721.1\ \text{kJ/kg} - 191.7\ \text{kJ/kg}}{2\ 890.1\ \text{kJ/kg} - 191.7\ \text{kJ/kg}} = 0.196\ 2$$

汽轮机输出功：

$$\begin{aligned} w_\text{T} &= h_1 - h_a + (1-\alpha)(h_b - h_2) \\ &= (3\ 230.7\ \text{kJ/kg} - 2\ 890.1\ \text{kJ/kg}) + (1 - 0.196\ 2) \times \\ &\quad (3\ 267.0\ \text{kJ/kg} - 2\ 399.5\ \text{kJ/kg}) = 1\ 037.9\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

从锅炉吸热量

$$\begin{aligned} q_1 &= h_1 - h_4 + (1-\alpha)(h_b - h_a) \\ &= (3\ 230.7\ \text{kJ/kg} - 721.1\ \text{kJ/kg}) + (1 - 0.196\ 2) \times \\ &\quad (3\ 267.0\ \text{kJ/kg} - 2\ 890.1\ \text{kJ/kg}) = 2\ 812.6\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

冷凝器中放热量：

$$q_2 = (1-\alpha)(h_2 - h_3) = (1 - 0.196\ 2) \times (2\ 399.5\ \text{kJ/kg} - 191.7\ \text{kJ/kg}) = 1\ 774.6\ \text{kJ/kg}$$

循环热效率

$$\eta_\text{t} = \frac{w_\text{net}}{q_1} = \frac{w_\text{t}}{q_1} = \frac{1\ 037.9\ \text{kJ/kg}}{2\ 812.6\ \text{kJ/kg}} = 0.369\ \text{或}\ \eta_\text{t} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1\ 774.6\ \text{kJ/kg}}{2\ 812.6\ \text{kJ/kg}} = 0.369$$

10-10 某发电厂采用的蒸汽动力装置，蒸汽以 $p_1 = 9.0\ \text{MPa}$，$t_1 = 480\ ^\circ\text{C}$ 的初态进入汽轮机。汽轮机的 $\eta_\text{T} = 0.88$。冷凝器的压力与冷却水的温度有关。设夏天冷凝器温度保持 35℃。假定按朗肯循环工作。求汽轮机理想耗汽率 d_0 与实际耗汽率 d_i。若冬天冷却水水温降低。使冷凝器的温度保持 15℃，试比较冬、夏两季因冷凝器温度不同所导致的以下各项的差别：

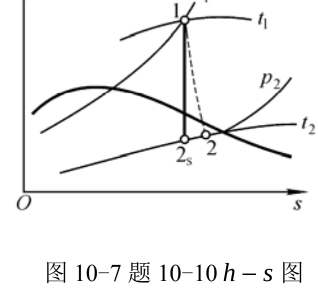


图 10-7 题 10-10 $h-s$ 图

（1）汽轮机作功；

（2）加热量；

（3）热效率（略去水泵功）。

解：由 $p_1 = 9.0\ \text{MPa}$、$t_1 = 480\ ^\circ\text{C}$，查得 $s_1 = 6.589\ 4\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$h_1 = 3\ 336\ \text{kJ/kg}$。

（1）夏天，$t_2 = 35^\circ\text{C}$，由水蒸气表查得：$p_2 = 0.005\ 626\ 3\ \text{MPa}$、$h_2' = 146.59\ \text{kJ/kg}$ 由 $h-s$ 图查得，$h_{2_s} = 2\ 016\ \text{kJ/kg}$。

汽轮机的理论技术功

$$w_\text{T} = h_1 - h_{2_s} = 3\ 336\ \text{kJ/kg} - 2\ 016\ \text{kJ/kg} = 1\ 320\ \text{kJ/kg}$$

汽轮机的实际技术功

$$w_\text{T}' = \eta_\text{T} w_\text{T} = 0.88 \times 1\ 320\ \text{kJ/kg} = 1\ 161.6\ \text{kJ/kg}$$

若不计水泵功时，循环的内部功

$$w_\text{i} = w_\text{T}' = 1\ 161.1\ \text{kJ/kg}$$

吸热量

$$q_1 = h_1 - h_2' = 3\ 336\ \text{kJ/kg} - 146.59\ \text{kJ/kg} = 3\ 189.4\ \text{kJ/kg}$$

装置内部热效率

$$\eta_\text{i} = \frac{w_\text{i}}{q_1} = \frac{1\ 161.1\ \text{kJ/kg}}{3\ 189.4\ \text{kJ/kg}} = 34.4\ \%$$

理想耗汽率

$$d_0 = \frac{1}{h_1 - h_{2_s}} = \frac{1}{1\ 310 \times 10^3\ \text{J/kg}} = 7.63 \times 10^{-7}\ \ \text{J}\big/\text{kg}$$

实际耗汽率

$$d_\text{i} = \frac{1}{w_\text{i}} = \frac{1}{1\ 161.1 \times 10^3\ \text{J/kg}} = 8.61 \times 10^{-7}\ \ \text{J}\big/\text{kg}$$

（2）冬天 $t_2 = 15^\circ\text{C}$ 查得 $p_2 = 0.001\ 705\ 3\text{MPa}$、$h_2'' = 2\ 528.07\text{kJ/kg}$、$h_2' = 62.95\text{kJ/kg}$、$s_2' = 0.224\ 3\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$s_2'' = 8.779\ 4\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。因 $s_2 = s_1 = 6.589\ 4\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$，所以

$$x_2 = \frac{s_2 - s_2'}{s_2'' - s_2'} = \frac{6.589\ 4\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.224\ 3\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}}{8.779\ 4\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - 0.224\ 3\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}} = 0.744$$

$$h_{2_s} = x_2 h_2'' + (1 - x_2) h_2'$$
$$= 0.744 \times 2\ 528.07\ \text{kJ/kg} + (1 - 0.744) \times 62.95\ \text{kJ/kg} = 1\ 897.0\ \text{kJ/kg}$$

$$w_t = h_1 - h_{2_s} = 3\ 344\ \text{kJ/kg} - 1\ 897.0\ \text{kJ/kg} = 1\ 447.0\ \text{kJ/kg}$$

$$w'_T = \eta_T w_T = 0.88 \times 1\ 447.0\ \text{kJ/kg} = 1\ 273.36\ \text{kJ/kg}$$

$$q_1 = h_1 - h_2' = 3\ 344\ \text{kJ/kg} - 62.95\ \text{kJ/kg} = 3\ 281.05\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_i = \frac{w_i}{q_1} = \frac{1\ 273.36\ \text{kJ/kg}}{3\ 281.05\ \text{kJ/kg}} = 38.8\ \%$$

$$d_0 = \frac{1}{w_t} = \frac{1}{1\ 447.0 \times 10^3\ \text{J/kg}} = 6.91 \times 10^{-7}\ \text{J/kg}$$

$$d_i = \frac{1}{w_i} = \frac{1}{1\ 273.36 \times 10^3\ \text{J/kg}} = 7.85 \times 10^{-7}\ \text{kg/J}$$

列表比较

	w_t/(kJ/kg)	q_1/(kJ/kg)	η_t
夏天	1161.1	3189.4	0.364
冬天	1273.36	3281.05	0.388

10−11 某压水堆二回路循环采用一次抽汽加热给水，循环抽象简化为图 10−8 所示，若新蒸汽的 $p = 6.69\ \text{MPa}$ 、 $t = 282.2\ ^\circ\text{C}$ ， 抽气压力 $p_{0_1} = 0.782\ \text{MPa}$，凝汽器维持 0.009 MPa，忽略水泵功，试求：

（1）抽汽量 α；

（2）循环热率；

（3）耗汽率 d 。

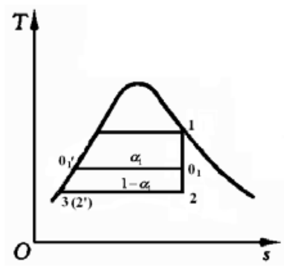


图 10−8 题 10−11 $T-s$ 图

（4）与朗肯循环的热效率 η_t 、耗汽率 d 作比较，并说明耗汽率为什么反而增大？

解：由 $p = 6.69\ \text{MPa}$ 、$t = 282.2\ ^\circ\text{C}$ 查水蒸气表得，新蒸汽的焓 $h_1 = 2\ 772.5\text{kJ/kg}$ ，熵 $s_1 = 5.830\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ；假定膨胀过程为等熵过程，由 $s_{0_1} = s_1 = 5.830\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 及抽汽压力 $p_{0_1} = 0.782\text{MPa}$ ，查得 $h_{0_1} = 2\ 395.9\text{kJ/kg}$ 、$h'_{0_1} = 717.0\text{kJ/kg}$ ；据 $s_2 = s_1$ ，及 $p_2 = 0.007\text{MPa}$ ，查得 $h_2 = 1\ 808.7\ \text{kJ/kg}$ ， $x_2 = 0.68$ ；另据 $p_2 = 0.007\ \text{MPa}$ ，查得 $h_3 = 163.4\ \text{kJ/kg} = h_2'$ 。

（1）抽汽量 α

由热平衡方程式 $\alpha(h_{0_1}-h'_{0_1})=(1-\alpha)(h'_{0_1}-h'_2)$ 得

$$\alpha=\frac{h'_{0_1}-h'_2}{h_{0_1}-h'_2}=\frac{717.0\ \text{kJ/kg}-163.4\ \text{kJ/kg}}{2\ 395.9\ \text{kJ/kg}-163.4\ \text{kJ/kg}}=0.248$$

（2）循环热效率

$$q_1=h_1-h'_{0_1}=2\ 772.5\ \text{kJ/kg}-717.0\ \text{kJ/kg}=2\ 055.5\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2=(1-\alpha)(h_2-h'_2)=(1-0.248)(1\ 808.7-163.4)\ \text{kJ/kg}=1\ 237.3\ \text{kJ/kg}$$

$$\eta_t=1-\frac{q_2}{q_1}=1-\frac{1\ 237.3\ \text{kJ/kg}}{2\ 055.5\ \text{kJ/kg}}=39.8\ \%$$

或

$$\begin{aligned}w_{\text{net}}&=(h_1-h_{0_1})+(1-\alpha)(h_{0_1}-h_2)\\&=2\ 772.5\text{kJ/kg}-2\ 395.9\text{kJ/kg}+(1-0.248)(2\ 395.5-1\ 808.7)\text{kJ/kg}\\&=817.9\text{kJ/kg}\end{aligned}$$

$$\eta_t=\frac{w_{\text{net}}}{q_1}=\frac{817.9\ \text{kJ/kg}}{2\ 055.5\ \text{kJ/kg}}=39.8\ \%$$

（3）耗汽率

$$d=\frac{1}{w_{\text{net}}}=\frac{1}{817.9\ \text{kJ/kg}}=1.22\times10^{-6}\ \text{kg/J}$$

（4）朗肯循环

热效率

$$\eta'_t=\frac{h_1-h_2}{h_1-h_{2'}}=\frac{2\ 772.5\ \text{kJ/kg}-1\ 808.7\ \text{kJ/kg}}{2\ 772.5\ \text{kJ/kg}-163.4\ \text{kJ/kg}}=36.9\ \%$$

耗汽率

$$d'=\frac{1}{h_1-h_2}=\frac{1}{(2\ 772.5-1\ 808.7)\times10^3\ \text{J/kg}}=1.04\times10^{-6}\ \text{J/kg}$$

采用抽汽回热后，热效率较朗肯循环有所提高，而耗汽率有所增大，这是因为抽汽使 1kg 新蒸汽作出的功减小，故 d 增大，但由于回热，吸热量减少，平均吸热温度升高，而放热温度不变，故 η_t 提高。

10-12 某朗肯循环，蒸汽初压 $p_1=6\ \text{MPa}$，初温 $t_1=600\ ^\circ\text{C}$，冷凝器内维持压力

10 kPa，蒸汽质流量是 80 kg/s，假定锅炉内传热过程是在 1 400 K 的热源和水之间进行；冷凝器内冷却水平均温度为 25℃。试求：

（1）水泵功；

（2）锅炉烟气对水的加热率；

（3）汽轮机作功；

（4）冷凝器内乏汽的放热率；

（5）循环热效率；

（6）各过程及循环不可逆作功能力损失。已知 $T_0 = 290.15\ \text{K}$。

解：查 $h-s$ 图及水蒸气表：$h_1 = 3\ 657\ \text{kJ/kg}$、$s_1 = 7.161\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；$h_2 = 2\ 276\ \text{kJ/kg}$、$s_2 = s_1 = 7.161\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$h_2' = 191.76\text{kJ/kg}$、$s_2' = 0.649\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；$v_2' = 0.001\ 010\ 3\text{m}^3/\text{kg}$、$s_4 = s_2' = 0.649\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

（1）水泵功

$$\begin{aligned} w_\text{P} &= h_4 - h_2' \approx v_2'(p_4 - p_2) \\ &= 0.001\ 010\ 3\ \text{m}^3/\text{kg} \times (6\times10^6 - 10\times10^3)\ \text{Pa} = 6.05\times10^3\ \text{J} \end{aligned}$$

$$P_\text{P} = q_m w_\text{P} = 80\ \text{kg/s} \times 6.05\ \text{kJ/kg} = 484.1\ \text{kW}$$

（2）加热率

$$\begin{aligned} q_1 &= h_1 - h_4 = h_1 - (h_2' + w_\text{P}) \\ &= 3\ 657\ \text{kJ/kg} - (191.76\ \text{kJ/kg} + 6.05\ \text{kJ/kg}) = 3\ 459.19\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$q_{Q_1} = q_m q_1 = 80\ \text{kg/s} \times 3\ 459.19\ \text{kJ/kg} = 2.767\times10^5\ \text{kW}$$

（3）汽轮机作功

$$w_\text{T} = h_1 - h_2 = 3\ 657\ \text{kJ/kg} - 2\ 276\ \text{kJ/kg} = 1\ 381\ \text{kJ/kg}$$

$$P_\text{T} = q_m w_\text{T} = 80\ \text{kg/s} \times 1\ 381\ \text{kJ/kg} = 1.105\times10^5\ \text{kW}$$

（4）循环热效率

$$q_2 = h_2 - h_2' = 2\ 276\ \text{kJ/kg} - 191.76\ \text{kJ/kg} = 2\ 084.24\ \text{kJ/kg}$$

$$q_{Q_2} = q_m q_2 = 80\ \text{kg/s} \times 2\ 084.24\ \text{kJ/kg} = 1.667\times10^5\ \text{kW}$$

（5）循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{2\ 084.24\ \text{kJ/kg}}{3\ 459.19\ \text{kJ/kg}} = 39.75\ \%$$

或

$$\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{w_{\text{T}} - w_{\text{P}}}{q_1} = \frac{1\ 381\ \text{kJ/kg} - 6.05\ \text{kJ/kg}}{3\ 459.19\ \text{kJ/kg}} = 39.75\ \%$$

（6）各过程不可逆作功能力损失

因膨胀及压缩均按等熵过程计算，故不可逆损失表现在烟气向水放热及乏汽向冷却水放热的过程中。假定锅炉和冷凝器散热可忽略不计，即熵流为零，熵产即流体熵变之和。

锅炉内传热过程损失。烟气熵变

$$\Delta s_{\text{gas}} = \frac{q_1'}{\overline{T}_{\text{gas}}} = -\frac{-3\ 459.19\ \text{kJ/kg}}{1\ 400\ \text{K}} = -2.471\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$s_{\text{g}} = \Delta s_{\text{gas}} + \Delta s_{4-1} = \Delta s_{\text{gas}} + (s_1 - s_4)$$
$$= -2.471\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + (7.161 - 0.649)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 4.041\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\dot{I}_{\text{B}} = q_m T_0 s_{\text{g}} = 80\ \text{kg/s} \times 290.15\ \text{K} \times 4.041\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 9.38 \times 10^4\ \text{kW}$$

冷凝器内传热过程损失。冷却水熵变

$$\Delta s_{\text{w}} = \frac{q_2}{\overline{T}_{\text{w}}} = \frac{2\ 084.24\ \text{kJ/kg}}{(273.15 + 25)\ \text{K}} = 6.990\ 6\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$s_{\text{g}}' = \Delta s_{\text{w}} + \Delta s_{2-2'} = \Delta s_{\text{w}} + (s_{2'} - s_2)$$
$$= 6.990\ 6\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + (0.649 - 7.161)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 0.478\ 6\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\dot{I}_{\text{C}} = q_m T_0 s_{\text{g}}' = 80\ \text{kg/s} \times 290.15\ \text{K} \times 0.478\ 6\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 1.11 \times 10^4\ \text{kW}$$

循环不可逆损失：

$$\dot{I} = \dot{I}_{\text{B}} + \dot{I}_{\text{C}} = (9.38 + 1.11) \times 10^4\ \text{kW} = 10.49 \times 10^4\ \text{kW}$$

10−13 题 10−12 循环改成再热循环，从高压汽轮机排出的蒸汽压力为 0.5MPa，加热到 500℃后再进入低压汽轮机，若所有其它条件均不变，假定循环总加热量也不变（即上题中锅炉内加热量）。试求：

（1）在低压汽轮机末端蒸汽的干度；

（2）锅炉及再热器内单位质量的加热量；

（3）高压汽轮机和低压汽轮机产生的总功率；

（4）循环热效率；

（5）各过程和循环不可逆作功能力损失。

解：由题 10-12：$h_1 = 3\ 657\ \text{kJ/kg}$、$s_1 = 7.161\ \text{kJ/(kg·K)}$；$h_2' = 191.76\text{kJ/kg}$、$s_4 = s_2' = 0.649\text{kJ/(kg·K)}$、$h_4 = 197.81\ \text{kJ/kg}$。

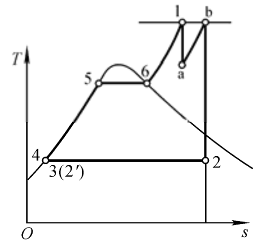


图 10-9 题 10-13 $T-s$ 图

（1）查 $h-s$ 图得 $h_a = 2\ 906\ \text{kJ/kg}$、$h_b = 3\ 485\ \text{kJ/kg}$、$s_b = 8.082\ \text{kJ/(kg·K)}$、$h_2 = 2\ 563\ \text{kJ/kg}$、$x_2 = 0.991$。

（2）加热量

锅炉内 1kg 工质吸热量即上题中 q_1，$q_{\text{B}} = q_1 = 3\ 459.19\ \text{kJ/kg}$，再热器内蒸汽吸热量

$$q_{\text{R}} = h_b - h_a = 3\ 485\ \text{kJ/kg} - 2\ 906\ \text{kJ/kg} = 579\ \text{kJ/kg}$$

$$q_1 = q_{\text{B}} + q_{\text{R}} = 3\ 459.19\ \text{kJ/kg} + 579\ \text{kJ/kg} = 4\ 038.19\ \text{kJ/kg}$$

因总加热量未变，所以蒸汽流量减少

$$q_m' = \frac{q_{Q1}}{q_{1'}} = \frac{2.767\times10^5\ \text{kJ/s}}{4\ 038.19\ \text{kJ/kg}} = 68.53\ \text{kg/s}$$

$$q_{Q_{\text{B}}} = q_m' q_{\text{B}} = 68.53\ \text{kg/s}\times3\ 459.19\ \text{kJ/kg} = 2.371\times10^5\ \text{kW}$$

$$q_{Q_{\text{R}}} = q_m q_{\text{R}} = 68.53\ \text{kg/s}\times579\ \text{kJ/kg} = 0.397\times10^5\ \text{kW}$$

（3）功率

高压汽轮机

$$P_{\text{T,H}} = q_m'(h_1 - h_a) = 68.53\ \text{kg/s}\times(3\ 657 - 2\ 900)\ \text{kJ/kg} = 5.15\times10^4\ \text{kW}$$

低压汽轮机

$$P_{\text{T,L}} = q_m'(h_b - h_2) = 68.53\ \text{kg/s}\times(3\ 485 - 2\ 563)\ \text{kJ/kg} = 6.32\times10^4\ \text{kW}$$

所以

$$P_{\text{T}} = P_{\text{T,H}} + P_{\text{T,L}} = (5.15 + 6.32)\times10^4\ \text{kW} = 1.147\times10^5\ \text{kW}$$

（4）热效率

$$\eta_{\text{t}} = 1 - \frac{q_2}{q_1'} = 1 - \frac{h_2 - h_{2'}}{q_1'} = 1 - \frac{2\ 563\ \text{kJ/kg} - 191.76\ \text{kJ/kg}}{4\ 038.19\ \text{kJ/kg}} = 41.28\ \%$$

（5）锅炉及再热器内不可逆损失

$$s_{\rm g}=\Delta s_{\rm gas}+\Delta s_{4-b}=\frac{q_{Q_1}}{q_m\overline{T}_{\rm g}}+(s_b-s_4)$$
$$=\frac{-2.767\times10^5\,\text{kJ/s}}{68.53\text{kg/s}\times1\ 400\text{K}}+(8.02-0.649)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=4.487\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$I'_{\rm B}=q_mT_0s_{\rm g}$$
$$=68.53\ \text{kg/s}\times290.15\ \text{K}\times4.487\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=8.92\times10^4\ \text{kW}$$

冷凝器内不可逆损失

$$s'_{\rm g}=\Delta s_{\rm C}+\Delta s_{2-2'}=\frac{q_2}{\overline{T}_{\rm C}}+(s_{2'}-s_2)=\frac{h_2-h_{2'}}{\overline{T}_{\rm C}}+(s_{2'}-s_2)$$
$$=\frac{(2\ 563-191.76)\text{kJ/kg}}{(273.15+25)\text{K}}+(0.649-8.082)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=0.5202\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$\dot I'_{\rm C}=q_mT_0s'_{\rm g}$$
$$=68.53\ \text{kg/s}\times290.15\ \text{K}\times0.520\ 2\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}=1.03\times10^4\ \text{kW}$$

$$\dot I'=\dot I'_{\rm B}+\dot I'_{\rm C}=(8.92+1.03)\times10^4\ \text{kW}=9.95\times10^4\ \text{kW}$$

10−14 题 10−12 循环改成一级抽汽回热循环，抽汽压力为 0.5MPa，若其它条件均不变，假定锅炉总加热量不变，试求：

（1）锅炉内水的质量流量；

（2）两台水泵总耗功；

（3）汽轮机作功；

（4）冷凝器内放热量；

（5）循环热效率；

（6）各过程及循环不可逆作功能力损失。

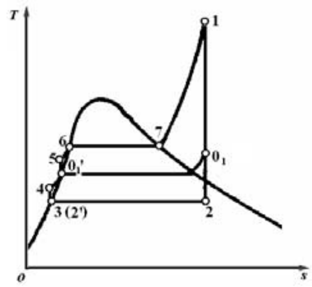


图 10−10 题 10−14 $T-s$ 图

解： 据题 10−12， $h_1=3\ 657\ \text{kJ/kg}$、$s_1=7.161\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$； $h_2=2\ 276\ \text{kJ/kg}$、$h'_2=191.76\text{kJ/kg}$、$s'_2=0.649\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$v'_2=0.001\ 010\ 3\text{m}^3/\text{kg}$、$s_4=s'_2=0.649\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$q_{Q_1}=2.767\times10^5\ \text{kW}$。据 $p_{0_1}=0.5\text{MPa}$ 和 $s_{0_1}=s_1=7.161\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 查得 $h_{0_1}=2\ 906\ \text{kJ/kg}$、$h_{0'_1}=640.35\ \text{kJ/kg}$、$s_{0'_1}=1.861\ 0\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$v_{0'_1}=0.001\ 092\ 5\ \text{m}^3/\text{kg}$。

$$h_4\approx h_{2'}+v_2(p_4-p_2)$$
$$=191.76\ \text{kJ/kg}+0.001\ 010\ 3\ \text{m}^3/\text{kg}\times(0.5\times10^6-10\times10^3)\ \text{Pa}\times10^{-3}$$
$$=192.26\ \text{kJ/kg}$$

对回热器列能量方程，得抽汽量

$$\alpha = \frac{h_{0_1'} - h_4}{h_{0_1} - h_4} = \frac{1\ \text{kg} \times (6\ 430.35\ \text{kJ/kg} - 192.26\ \text{kJ/kg})}{2\ 906\ \text{kJ/kg} - 192.26\ \text{kJ/kg}} = 0.165\ \text{kg}$$

（1）锅炉内水流量

$$\begin{aligned} h_5 &\approx h_{0_1'} + v_{0_1'}(p_5 - p_{0_1}) \\ &= 640.35\ \text{kJ/kg} + 0.001\ 092\ 5\ \text{m}^3/\text{kg} \times (6\times10^6 - 0.5\times10^6)\ \text{Pa}\times10^{-3} \\ &= 646.36\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$q_{Q_1} = q_m(h_1 - h_5)$$

$$q_m = \frac{q_{Q_1}}{h_1 - h_5} = \frac{2.767\times10^5\ \text{kJ/s}}{3\ 657\text{kJ/kg} - 646.36\text{kJ/kg}} = 91.9\text{kg/s}$$

（2）水泵耗功

低压泵

$$\begin{aligned} P_{\text{P,L}} &= q_{mL}(h_4 - h_{2'}) = (1-\alpha)q_m(h_4 - h_{i'}) \\ &= (1-0.165)\times 91.9\ \text{kg/s}\times(192.26 - 191.76)\ \text{kJ/kg} = 38.36\text{kW} \end{aligned}$$

高压泵

$$\begin{aligned} P_{\text{P,H}} &= q_m(h_5 - h_{0_1'}) \\ &= 91.9\ \text{kg/s}\times(646.36\ \text{kJ/kg} - 640.35\ \text{kJ/kg}) = 552.32\text{kW} \end{aligned}$$

$$P_{\text{p}} = P_{\text{p,L}} + P_{\text{p,H}} = 38.36\text{kW} + 552.32\text{kW} = 590.7\text{kW}$$

（3）汽轮机作功

$$\begin{aligned} w_{\text{T}} &= (h_1 - h_{0_1}) + (1-\alpha)(h_{0_1} - h_2) \\ &= (3\ 657 - 2\ 906)\text{kJ/kg} + (1-0.165)(2\ 906 - 2\ 276)\,\text{kJ/kg} \\ &= 1\ 277.1\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$P_{\text{T}} = q_m w_{\text{T}} = 91.9\ \text{kg/s}\times 1\ 277.1\ \text{kJ/kg} = 1.174\times10^5\ \text{kW}$$

（4）冷凝器放热量

$$\begin{aligned} q_{Q_{\text{C}}} &= q_{m_{\text{C}}}(h_2 - h_{2'}) = (1-\alpha)q_m(h_2 - h_{2'}) \\ &= (1-0.165)\times 91.9\ \text{kg/s}\times(2\ 276 - 197.26)\ \text{kJ/kg} = 1.595\times10^5\ \text{kW} \end{aligned}$$

（5）热效率

$$\eta_{\text{t}} = \frac{P_{\text{net}}}{q_{Q_1}} = \frac{P_{\text{T}} - P_{\text{P}}}{q_{Q_1}} = \frac{1.174\times10^5\ \text{kJ/s} - 59.07\ \text{kJ/s}}{2.767\times10^5\ \text{kJ/s}} = 42.2\ \%$$

或
$$\eta_t = 1 - \frac{q_{Q_2}}{q_{Q_1}} = 1 - \frac{1.595 \times 10^5 \ \text{kJ/s}}{2.767 \times 10^5 \ \text{kJ/s}} = 42.4\ \%$$

（6）作功能力损失

锅炉内不等温传热

$$\begin{aligned} s_g &= \Delta s_{gas} + \Delta s_{5-1} \\ &= -2.067\ 5\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + (7.161 - 1.861)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 3.232\ 5\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_B = q_m T_0 s_g = 91.9\ \text{kg/s} \times 290.15\ \text{K} \times 3.232\ 5\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 8.62 \times 10^4\ \text{kW}$$

回热器内每产生 1kg 状态 $0_1'$ 的饱和水的熵产

$$\begin{aligned} s_g' &= S_{0_1'} - [\alpha s_{0_1} + (1-\alpha) s_{2'}] \\ &= 1.861\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} - [0.165 \times 7.161\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + \\ &\quad (1 - 0.165) \times 0.649\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}] = 0.137\ 5\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \end{aligned}$$

所以

$$\dot{I}_R = q_m T_0 s_g' = 91.9\text{kg/s} \times 290.15\text{K} \times 0.137\ 5\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 0.767 \times 10^4\text{kW}$$

冷凝器内传热过程，因条件题 10−12 同，所以 S_g'' 与题 10−12 相同。

$$\dot{I}_C = q_{mC} T_0 s_g'' = 91.9\text{kg/s} \times 290.15\text{K} \times (1 - 0.165) \times 0.478\ 6\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} = 1.066 \times 10^4\text{kW}$$

总作功能力损失

$$\dot{I} = I_B + \dot{I}_R + \dot{I}_C = (8.62\text{kW} + 0.367\text{kW} + 1.066\text{kW}) \times 10^4 = 10.05 \times 10^4\text{kW}$$

或锅炉烟气放热量的热量有

$$E_{x,Q_1} = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) q_{Q_1} = \left(1 - \frac{290.15\text{K}}{1\ 673.15\text{K}}\right) \times 2.767 \times 10^5\text{kW} = 2.287 \times 10^5\text{kW}$$

冷凝器中冷却水吸热量的热量有

$$E_{x,Q_2} = \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) q_{Q_2} = \left(1 - \frac{290.15\text{K}}{298.15\text{K}}\right) \times 1.595 \times 10^5\text{kW} = 0.043 \times 10^5\text{kW}$$

循环输出净功有

$$\dot{E}_x = P_{net} = P_T - P_P = 1.174 \times 10^5\text{kW} - 0.005\ 9 \times 10^5\text{kW} = 1.168 \times 10^5\text{kW}$$

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{E}_{x,Q_1} - \dot{E}_{x,Q_2} - \dot{E}_x \\ &= 2.287 \times 10^5\ \text{kW} - 0.043 \times 10^5\ \text{kW} - 1.168 \times 10^5\ \text{kW} = 1.076 \times 10^5\ \text{kW} \end{aligned}$$

10−15 某热电厂（或称热电站）以背压式汽轮机的乏汽供热，其新汽参数为 $3\ \text{MPa}$ 、$400℃$。背压为 $0.12\ \text{MPa}$ 。乏汽被送入用热系统，作加热蒸汽用。放出热量后凝结为同一压力的饱和水，再经水泵返回锅炉。设用热系统中热量消费为 $1.06\times10^7\ \text{kJ/h}$ ，问理论上此背压式汽轮机的电功率输出为多少（kW）？

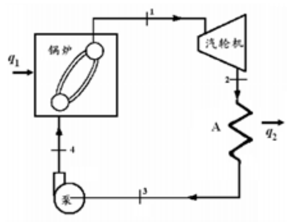


图 10-11 题 10-15 附图

解：已知 $p_1=3.0\ \text{MPa}$ 、$t_1=400\ {}^\circ\text{C}$ 、$p_2=0.12\ \text{MPa}$ 、$q_{Q_2}=1.06\times10^7\ \text{kJ/h}$ 。查 $h-s$ 图得：$h_1=3\ 232\ \text{kJ/kg}$ 、$h_2=2\ 540\ \text{kJ/kg}$ ；查表得：$h_{2'}=439.37\ \text{kJ/kg}$ 。

1kg 蒸汽凝结放出热量

$$q_2=h_2-h_{2'}=2\ 540\ \text{kJ/kg}-439.37\ \text{kJ/kg}=2\ 100.63\ \text{kJ/kg}$$

蒸汽质量流量
$$q_m=\frac{q_{Q_2}}{q_2}=\frac{1.06\times10^7\ \text{kJ/h}}{2\ 100.63\ \text{kJ/kg}}=5\ 046.1\ \text{kg/h}$$

1kg 蒸汽作功
$$w_{\text{net}}=h_1-h_2=3\ 232\ \text{kJ/kg}-2\ 540\ \text{kJ/kg}=692\ \text{kJ/kg}$$

汽轮机总功
$$W_{\text{net}}=q_m w_{\text{net}}=5\ 046.1\ \text{kg/h}\times692\ \text{kJ/kg}=3.492\times10^6\ \text{kJ/h}$$

理论功率

$$P=\frac{W_{\text{net}}}{3600}=\frac{3.492\times10^6\ \text{kJ/h}}{3600}=970\ \text{kW}$$

10−16 某台蒸汽轮机由两台中压锅炉供给新蒸汽，这两台锅炉每小时的蒸汽生产量相同，新蒸汽参数 $p_1=3.0\ \text{MPa}$、$t_1=450\ {}^\circ\text{C}$，设备示意图如图 10−12a 所示。后来因所需要的动力增大，同时为了提高动力设备的热效率，将原设备加以改装。将其中一台中压锅炉拆走，同时在原址安装一台同容量（即每小时蒸汽生产量相同）的高压锅炉。并在汽轮机间增设了一台背压式的高压汽轮机（前置汽轮机）。高压锅炉所生产的蒸汽参数为 $p_0=18.0\ \text{MPa}$、$t_0=550\ {}^\circ\text{C}$ 。高压锅炉的

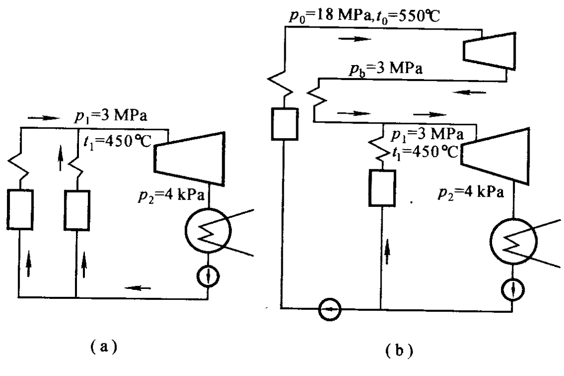


图 10-12 题 10-16 附图

新蒸汽进入高压汽轮机工作。高压汽轮机的排汽背压 $p_{\text{b}}=3.0\text{MPa}$ ，这排汽进入炉内再热。再

热后蒸汽参数与另一台中压锅炉的新蒸汽参数相同，即 $p_1 = 3.0\ \text{MPa}$、$t_1 = 450\ ^\circ\text{C}$，这蒸汽与另一台中压锅炉的新蒸汽会合进入原来的中压汽轮机工作，改装后设备示意图如图 10-12b 所示。求改装前动力装置的理想热效率。以及改装后动力装置理想效率，改装后理想热效率比改装前增大百分之几？

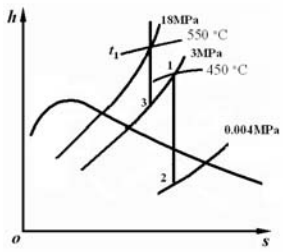


图 10-13 题 10-16 $h-s$ 图

解：改装前：已知两台中压锅炉 $p_1 = 3.0\ \text{MPa}$、$t_1 = 450\ ^\circ\text{C}$，$p_2 = 0.004\ \text{MPa}$。由 $h-s$ 图查得 $h_1 = 3\ 345\ \text{kJ/kg}$，$h_2 = 2\ 131\ \text{kJ/kg}$；由表中查出 $h_{2'} = 121.30\,\text{kJ/kg}$。

$$\eta_\text{t} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}} = \frac{3\ 345\ \text{kJ/kg} - 2\ 131\ \text{kJ/kg}}{3\ 345\ \text{kJ/kg} - 121.30\ \text{kJ/kg}} = 37.7\ \%$$

改装后：改装后一台中压锅炉，参数同上，另一台高压锅炉，生产蒸汽量同中压锅炉，新蒸汽参数 $p_0 = 18.0\ \text{MPa}$、$t_0 = 550\ ^\circ\text{C}$，膨胀到 $3.0\ \text{MPa}$ 后，再热到 450℃，再继续膨胀到 0.004MPa，由 $h-s$ 图上查得：$h_0 = 3\ 418\ \text{kJ/kg}$、$h_3 = 2\ 928\ \text{kJ/kg}$。

若以再热循环和中压锅炉朗肯循环各 1kg 蒸汽考虑，全装置所作的功等于再热循环功加朗肯循环功

$$\begin{aligned} W_\text{net} &= m_1(h_0 - h_3) + (m_1 + m_2)(h_1 - h_2) \\ &= 1\ \text{kg} \times (3\ 418 - 2\ 928)\ \text{kJ/kg} + (1+1)\ \text{kg} \times (3\ 345 - 2\ 131)\ \text{kJ/kg} \\ &= 2\ 918\ \text{kJ} \end{aligned}$$

全装置所吸热量等于再热循环吸热量加朗肯循环吸热量

$$\begin{aligned} q_1 &= (h_0 - h_{2'}) + (h_1 - h_3) + (h_1 - h_{2'}) \\ &= (3\ 418 - 121.30)\text{kJ/kg} + (3\ 345 - 2\ 928)\text{kJ/kg} + (3\ 345 - 121.30)\text{kJ/kg} \\ &= 6\ 937.4\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\eta_\text{t} = \frac{W_\text{net}}{Q_1} = \frac{W_\text{net}}{mq_1} = \frac{2\ 918\ \text{kJ}}{1\ \text{kg} \times 6\ 937.4\ \text{kJ/kg}} = 42.1\ \%$$

理想效率由 37.1%增大到 42.1%，改装后功率增大百分比

$$\varepsilon = \frac{2\ 918\ \text{kJ} - 2\ \text{kg} \times (3\ 345 - 2\ 131)\ \text{kJ/kg}}{2\ \text{kg} \times (3\ 354 - 2\ 131)\ \text{kJ/kg}} = 20.2\ \%。$$

第十一章　制冷循环

11-1　一制冷机在-20℃和 30℃的热源间工作，若其吸热为 10kW，循环制冷系数是同温限间逆向卡诺循环的 75%，试计算：

（1）散热量；

（2）循环净耗功量；

（3）循环制冷量折合多少“冷吨”？

解：在-20℃和 30℃间逆向卡诺循环制冷系数

$$\varepsilon_c = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{(273.15-20)\ \text{K}}{[30-(-20)]\ \text{K}} = 5.06$$

实际循环制冷系数

$$\varepsilon_{act} = 0.75\varepsilon_c = 0.75 \times 5.06 = 3.80$$

（1）散热量

$$\varepsilon_{act} = \frac{q_{Q_c}}{P_{net}} = \frac{q_{Q_c}}{q_Q - q_{Q_c}}$$

$$q_Q = q_{Q_c}\left(1+\frac{1}{\varepsilon_{act}}\right) = 10\ \text{kW} \times \left(1+\frac{1}{3.80}\right) = 12.63\ \text{kW}$$

（2）净功率

$$P_{net} = \frac{q_{Q_c}}{\varepsilon_{act}} = \frac{10\ \text{kW}}{3.80} = 2.63\ \text{kW}$$

（3）折合冷吨

$$\frac{q_{Q_c}}{3.86} = \frac{10\ \text{kW}}{3.86} = 2.59\ \text{冷吨}$$

11-2　一逆向卡诺制冷循环，其性能系数为 4，（1）问高温热源与低温热源温度之比是多少？（2）若输入功率为 1.5 kW。试问制冷量为多少“冷吨”？（3）如果将此系统改作热泵循环，高、低温热源温度及输入功率维持不变。试求循环的性能系数及能提供的热量。

解：（1）　$$\varepsilon_c = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{1}{\dfrac{T_H}{T_L} - 1}$$

$$\frac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{L}}}=1+\frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{c}}}=1+\frac{1}{4}=1.25$$

（2） $\varepsilon_{\mathrm{c}}=\dfrac{q_{Q_{\mathrm{c}}}}{P_{\mathrm{net}}}$， $q_{Q_{\mathrm{c}}}=\varepsilon_{\mathrm{c}}P_{\mathrm{net}}=1.25\times1.5\ \mathrm{kW}=1.875\ \mathrm{kW}$

$$\frac{1.875\ \mathrm{kW}}{3.86}=0.486\text{冷吨}$$

（3） $\varepsilon_{\mathrm{c}}'=\dfrac{T_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}-T_{\mathrm{L}}}=\dfrac{1}{1-\dfrac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}}=\dfrac{1}{1-\dfrac{1}{1.25}}=5$

$$q_Q'=\varepsilon_{\mathrm{c}}'P_{\mathrm{net}}=5\times1.5\ \mathrm{kW}=6\ \mathrm{kW}$$

11−3 压缩空气制冷循环运行温度 $T_{\mathrm{c}}=290\ \mathrm{K}$，$T_0=300\ \mathrm{K}$，如果循环增压此分别为 3 和 6，分别计算它们的循环性能系数和每千克工质的制冷量。假定空气为理想气体，比热容取定值 $c_p=1.005\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}$、$\kappa=1.4$。

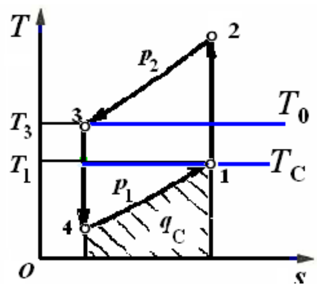


图 11−1 习题 11−3 附图

解： $\varepsilon_a=\dfrac{1}{\pi_1^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}-1}=\dfrac{1}{3^{(1.4-1)/1.4}-1}=2.712$

$$\varepsilon_b=\frac{1}{\pi_2^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}-1}=\frac{1}{6^{(1.4-1)/1.4}-1}=1.496$$

$$T_{4,a}=T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=T_0\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=T_0\left(\frac{1}{\pi_a}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=300\mathrm{K}\times\left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}=219.18\mathrm{K}$$

$$T_{4,b}=T_0\left(\frac{1}{\pi_b}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=300\ \mathrm{K}\ \left(\frac{1}{6}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}=179.81\ \mathrm{K}$$

$$T_{2,a}=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=T_1\pi_a^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}=290\ \mathrm{K}\times3^{\frac{1.4-1}{1.4}}=396.93\ \mathrm{K}$$

$$T_{2,b}=T_1\pi_b^{\frac{k-1}{k}}=290\ \mathrm{K}\times6^{\frac{1.4-1}{1.4}}=483.86\ \mathrm{K}$$

$$q_{\mathrm{c},a}=c_p(T_1-T_{4,a})=1.005\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(290-219.18)\ \mathrm{K}=71.2\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$q_{\mathrm{c},b}=c_p(T_1-T_{4,b})=1.005\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times(290-179.8)\ \mathrm{K}=110.7\ \mathrm{kJ/kg}$$

11−4 若题 11−3 中压气机绝热效率 $\eta_{\mathrm{C,s}}=0.82$，膨胀机相对内效率 $\eta_{\mathrm{T}}=0.85$，分别计算

1 kg 工质的制冷量，循环净功及循环性能系数。

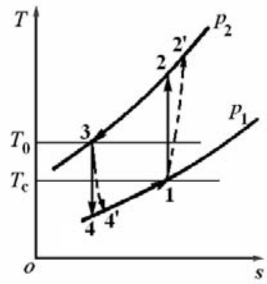


图 11-2 习题 11-4 附图

解：

$$\eta_T=\frac{h_3-h_{4'}}{h_3-h_4}=\frac{T_3-T_{4'}}{T_3-T_4}\text{，}\quad T'_{4,a}=T_3-\eta_T(T_3-T_4)$$

$$T_{4,a}=300\text{K}-0.8\times(300-219.18)\text{K}=235.34\text{K}$$

$$T_{4,b}=300\text{K}-0.8\times(300-179.81)\text{K}=203.85\text{K}$$

$$\eta_{C,s}=\frac{h_2-h_1}{h_{2'}-h_1}=\frac{T_2-T_1}{T_{2'}-T_1}\text{，}\quad T_{2'}=T_1+\frac{(T_2-T_1)}{\eta_{C,s}}$$

$$T_{2',a}=290\ \text{K}+\frac{396.93\ \text{K}-290\ \text{K}}{0.82}=420.40\ \text{K}$$

$$T_{2',b}=290\ \text{K}+\frac{483.86\ \text{K}-290\ \text{K}}{0.82}=526.41\ \text{K}$$

制冷量

$$q_{c,a}=c_p(T_1-T_{4',a})=1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(290-235.34)\ \text{K}=54.93\ \text{kJ/kg}$$

$$q_{c,b}=c_p(T_1-T_{4',b})=1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(290-203.85)\ \text{K}=86.58\ \text{kJ/kg}$$

循环净功

$$w_{net,a}=(h_1-h_{2',a})+(h_3-h_{4',a})=c_p(T_1-T_{2',a}+T_3-T_{4'a})$$
$$=1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(290-420.40+300-235.34)\ \text{K}=-66.1\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{net,b}=c_p(T_1-T_{2,b}+T_3-T_{4'b})$$
$$=1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(290-526.41+300-203.85)\text{K}=-141.0\ \text{kJ/kg}$$

循环性能系数

$$\varepsilon_a=\frac{q_{c,a}}{|w_{net,a}|}=\frac{54.93\ \text{kJ/kg}}{66.1\ \text{kJ/kg}}=0.831$$

$$\varepsilon_b=\frac{q_{c,b}}{|w_{net,b}|}=\frac{86.58\ \text{kJ/kg}}{141.0\ \text{kJ/kg}}=0.614$$

11-5 若例 11-1 中压气机的绝热效率 $\eta_{Cs}=0.90$、膨胀机的相对内效率 $\eta_T=0.92$，其他条件不变，再求无回热时的制冷系数 ε、每千克空气的制冷量 q_c 及压缩过程的作功能力损失。

解：据例 11-1，$\pi=5$、$T_2=401.13\ \text{K}$、$T_4=185.01\ \text{K}$。

$$T_{2'} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)}{\eta_{C,s}} = 253.15\ \text{K} + \frac{401.13\ \text{K} - 253.15\ \text{K}}{0.9} = 417.57\ \text{K}$$

$$T_{4'} = T_3 - \eta_T (T_3 - T_4) = 293.15\text{K} - 0.92 \times (293.15 - 185.01)\text{K} = 193.66\text{K}$$

压缩机耗功为

$$\begin{aligned} w'_C &= h_{2'} - h_1 = c_p (T_{2'} - T_1) \\ &= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (417.57\ \text{K} - 253.15\ \text{K}) = 165.24\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

膨胀机作出的功为

$$\begin{aligned} w'_T &= h_3 - h_{4'} = c_p (T_3 - T_{4'}) \\ &= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (293.15\ \text{K} - 193.66\ \text{K}) = 99.99\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

空气在冷却器中放热量为

$$\begin{aligned} q'_0 &= h_{2'} - h_3 = c_p (T_{2'} - T_3) \\ &= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (417.57\ \text{K} - 293.15\ \text{K}) = 125.04\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

1kg 空气在冷库中的吸热量（即 1kg 空气的制冷量）

$$\begin{aligned} q'_c &= h_1 - h_{4'} = c_p (T_1 - T_{4'}) \\ &= 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (253.15\ \text{K} - 193.66\ \text{K}) = 59.79\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

循环的净功为

$$w'_{net} = w'_C - w'_T = 165.24\ \text{kJ/kg} - 99.99\ \text{kJ/kg} = 65.25\ \text{kJ/kg}$$

循环的净热量为

$$q'_{net} = q'_0 - q'_c = 125.04\ \text{kJ/kg} - 59.79\ \text{kJ/kg} = 65.25\ \text{kJ/kg}$$

故循环的制冷系数为

$$\varepsilon = \frac{q'_c}{w'_{net}} = \frac{59.79\ \text{kJ/kg}}{65.25\ \text{kJ/kg}} = 0.916$$

压缩过程作功能力损失

$$\begin{aligned} I &= T_0 s_g = T_0 (s_{2'} - s_1) = T_0 c_p \ln \frac{T_{2'}}{T_2} \\ &= 293.15\ \text{K} \times 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times \ln \frac{417.57\ \text{K}}{401.13\ \text{K}} = 11.83\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

11-6 某采用理想回热的压缩气体制冷装置，工质为某种理想气体，循环增压比为 $\pi = 5$，冷库温度 $T_c = -40\ ^\circ\text{C}$，环境温度为 300K，若输入功率为 3kW，气体热可取定值，

$c_p = 0.85\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$\kappa = 1.3$。试计算：

（1）循环制冷量；

（2）循环制冷量系数；

（3）若循环制冷系数及制冷量不变，但不用回热措施。此时，循环的增压比应该是多少？

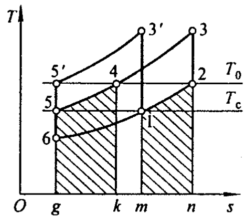


图 11-3 习题 11-6 附图

解：
$$T_3 = T_2\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_0\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 300\ \text{K}\times 5^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 434.93\ \text{K}$$

$$T_5 = T_1 = T_c = (-40+273.15)\ \text{K} = 233.15\ \text{K}$$

$$T_6 = T_5\left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 233.15\ \text{K}\times\left(\frac{1}{5}\right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 160.82\ \text{K}$$

$$T_3' = T_3,\quad T_{3'} = T_1\left(\frac{p_{3'}}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\pi' = \frac{p_{3'}}{p_1} = \left(\frac{T_{3'}}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{434.93\ \text{K}}{233.15\ \text{K}}\right)^{\frac{1.3}{1.3-1}} = 14.9$$

$$\varepsilon_{1234561} = \varepsilon_{13'5'6} = \frac{1}{\pi'^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}-1} = \frac{1}{14.9^{\frac{1.3-1}{1.3}}-1} = 1.156$$

$$q_{c,134561} = c_p(T_1 - T_b)$$
$$= 0.815\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times(233.15-160.82)\ \text{K} = 58.95\ \text{kJ/kg}$$

因 $\varepsilon_{1234561} = \dfrac{q_{Q_c}}{P_{\text{net}}}$，所以

$$q_{Q_c} = \varepsilon_{1234561}P_{\text{net}} = 1.156\times 3\ \text{kW} = 3.47\ \text{kW}$$

11-7 某压缩气体制冷循环中空气进入压气机时 $p_1 = 0.1\ \text{MPa}$，$t_1 = t_c = -23.15\ ^\circ\text{C}$，在压气机内定熵压缩到 $p_2 = 0.4\ \text{MPa}$，然后进入冷却器。离开冷却器时空气温度 $t_3 = t_0 = 26.85^\circ\text{C}$。取空气比热容是温度的函数，试求制冷系数 ε 及每千克空气的制冷量 q_c。

解：据题意，$T_1 = T_c = 250\ \text{K}$、$T_3 = T_0 = 300\ \text{K}$、$\dfrac{p_2}{p_1} = \dfrac{p_3}{p_4} = \dfrac{0.4\ \text{MPa}}{0.1\ \text{MPa}} = 4$。查空气热力性质表，$p_{r1} = 0.745\ 8$、$h_1 = 252.12\ \text{kJ/kg}$；$p_{r3} = 1.410\ 8$、$h_3 = 302.29\text{kJ/kg}$。

$$\frac{p_{r2}}{p_{r1}} = \frac{p_2}{p_1}，\quad p_{r2} = p_{r1}\frac{p_2}{p_1} = 0.7458 \times 4 = 2.9832$$

$$\frac{p_{r4}}{p_{r3}} = \frac{p_4}{p_3}，\quad p_{r4} = p_{r3}\frac{p_4}{p_3} = 1.410\ 8 \times \frac{1}{4} = 0.3527$$

再由 p_{r2}、 p_{r4} 查空气的热力性质表

$$T_2 = 370\ \text{K} + \frac{2.983\ 2 - 2.941\ 9}{3.231\ 2 - 2.941\ 9} \times (380\ \text{K} - 370\ \text{K}) = 371.43\ \text{K}$$

$$h_2 = 372.69\text{kJ/kg} + \frac{371.43\text{K} - 370\text{K}}{380\text{K} - 370\text{K}} \times (382.79 - 372.69)\text{kJ/kg}$$
$$= 374.13\text{kJ/kg}$$

$$T_4 = 200\ \text{K} + \frac{0.352\ 7 - 0.341\ 4}{0.405\ 1 - 0.341\ 4} \times (210\ \text{K} - 200\ \text{K}) = 201.77\ \text{K}$$

$$h_4 = 201.87\ \text{kJ/kg} + \frac{201.77\ \text{K} - 200\ \text{K}}{210\ \text{K} - 200\ \text{K}} \times (211.94\text{kJ/kg} - 201.87\text{kJ/kg})$$
$$= 203.66\ \text{kJ/kg}$$

压缩机耗功为

$$w_C = h_2 - h_1 = 374.13\ \text{kJ/kg} - 252.12\ \text{kJ/kg} = 122.01\ \text{kJ/kg}$$

膨胀机作出的功为

$$w_T = h_3 - h_4 = 302.29\ \text{kJ/kg} - 203.66\ \text{kJ/kg} = 98.63\ \text{kJ/kg}$$

空气在冷却器中放热量为

$$q_0 = h_2 - h_3 = 374.13\ \text{kJ/kg} - 302.29\ \text{kJ/kg} = 71.84\ \text{kJ/kg}$$

1kg 空气在冷库中的吸热量即为每千克空气的制冷量

$$q_c = h_1 - h_4 = 252.12\ \text{kJ/kg} - 203.66\ \text{kJ/kg} = 48.46\ \text{kJ/kg}$$

循环输入的净功为

$$w_{net} = w_C - w_T = 122.01\ \text{kJ/kg} - 98.63\ \text{kJ/kg} = 23.38\ \text{kJ/kg}$$

循环的净热量为

$$q_{net} = q_0 - q_c = 71.84\ \text{kJ/kg} - 48.46\ \text{kJ/kg} = 23.38\ \text{kJ/kg}$$

循环的制冷系数为

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w_{net}} = \frac{48.46\ \text{kJ/kg}}{23.38\ \text{kJ/kg}} = 2.07$$

11-8 氟里昂 134a 是对环境较安全的制冷剂，用来替代对大气臭氧层有较大破坏作用的氟里昂 12。今有以氟里昂 134a 为工质的制冷循环，其冷凝温度为 40℃，蒸发器温度为-20℃，求：

（1）蒸发器和冷凝器的压力；

（2）循环的制冷系数。

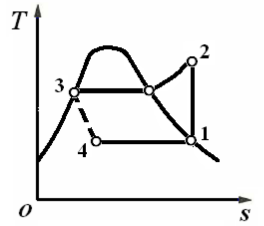


图 11-4 习题 11-8 附图

解：据题意，$t_1 = -20\ ^\circ\text{C}$、$t_3 = 40\ ^\circ\text{C}$，查氟里昂 134a 热力性质表：$p_1 = 133.8\ \text{kPa}$、$p_2 = p_3 = 1\ 016.32\text{kPa}$；$h_1 = 385.89\text{kJ/kg}$、$h_3 = h_4 = 256.44\text{kJ/kg}$、$s_1 = 1.738\ 7\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

由 $s_2 = s_1$、$p_2 = p_3$，查得 $h_2 = 428.2\ \text{kJ/kg}$。

$$q_c = h_1 - h_4 = 385.89\ \text{kJ/kg} - 256.44\ \text{kJ/kg} = 129.5\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{net} = h_2 - h_1 = 428.2\ \text{kJ/kg} - 385.89\ \text{kJ/kg} = 42.3\ \text{kJ/kg}$$

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w_{net}} = \frac{129.5\ \text{kJ/kg}}{42.3\ \text{kJ/kg}} = 3.06$$

11-9 一台汽车空调器使用氟里昂 134a 为制冷工质，向空调器的压缩机输入功率 2kW，把工质自 200kPa 压缩到 1200kPa，车外的空气流过空调器的蒸发器盘管从 33℃的降温到 15℃吹进车厢，假定制冷循环为理想循环，求制冷系统内氟里昂 134a 的流量和吹进车厢时的空气体积流量。车厢内压力为 100kPa。

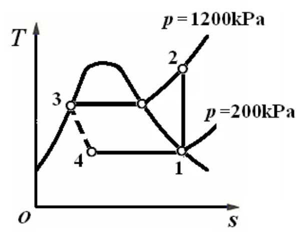


图 11-5 习题 11-9 附图

解：据 $p_1 = 200\ \text{kPa}$、$p_2 = p_3 = 1\ 200\ \text{kPa}$，查氟里昂 134a 热力性质表：$h_1 = 391.93\text{kJ/kg}$、$t_1 = -10.14^\circ\text{C}$、$s_1 = 1.731\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$h_3 = h_4 = 265.93\text{kJ/kg}$。

由 $s_2 = s_1$、$p_2 = 1200\text{kPa}$，查表得 $h_2 = 429.2\ \text{kJ/kg}$。

$$q_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 = 391.93\ \text{kJ/kg} - 265.93\ \text{kJ/kg} = 126.0\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{net} = h_2 - h_1 = 429.2\ \text{kJ/kg} - 391.93\ \text{kJ/kg} = 37.3\ \text{kJ/kg}$$

$$q_m = \frac{P_{\rm C}}{w_{\rm net}} = \frac{2\ \text{kJ/s}}{37.3\ \text{kJ/kg}} = 0.054\ \text{kg/s}$$

$$q_{Q_{\rm c}} = q_m q_{\rm c} = 0.054\ \text{kg/s} \times 126.0\ \text{kJ/kg} = 6.804\ \text{kW}$$

制冷量等于空气放热量，所以

$$q_{m,\rm a} = \frac{q_{Q_{\rm c}}}{c_p \Delta t} = \frac{6.084\ \text{kW}}{1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (33-15)\ {}^\circ\text{C}} = 0.376\ \text{kg/s}$$

$$q_V = \frac{q_{m,\rm a} R_{\rm g} T}{p} = \frac{0.376\text{kg/s} \times 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times (273.15+15)\text{K}}{100\text{kPa}} = 0.211\text{m}^3\text{/s}$$

11−10 某压缩蒸汽制汽冷装置采用氨（NH_3）为制冷制，参看图 11−6，从蒸发器中出来的氨气的状态是 $t_1 = -15\ {}^\circ\text{C}$， $x_1 = 0.95$。进入压气机升温升压后进入冷凝器。在冷凝器中冷凝成饱和氨液，温度为 $t_4 = 25\ {}^\circ\text{C}$。从点 4 经节流阀，降温降压成干度较小的湿蒸气状态，再进入蒸发器气化吸热。求：

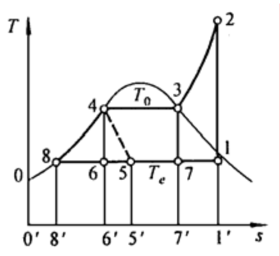


图 11−6 题 11−10 附图

（1）蒸发器管子中氨的压力 p_1 及冷凝器管子中的氨的压力 p_2；

（2）$q_{\rm c}$、 $w_{\rm net}$ 和制冷系数 ε，并在 $T-s$ 图上表示 $q_{\rm c}$；

（3）设该装置的制冷量 $q_{Q_{\rm c}} = 4.2\times10^4\ \text{kJ/h}$，氨的流量 q_m；

（4）该装置的灌效率。

解：（1）查 NH_3 表， $p_1 = 0.236\ \text{MPa}$、 $p_2 = 1.003\ \text{MPa}$。

（2）查 NH_3 表， $h_1' = 111.66\ \text{kJ/kg}$， $h_1'' = 1\ 424.6\ \text{kJ/kg}$， $s_1' = 0.453\ 8\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$， $s_1'' = 5.539\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$

$$\begin{aligned} h_1 &= x h_1 + (1-x) h_1' \\ &= 0.95 \times 1\ 424.6\ \text{kJ/kg} + (1-0.95)\times 111.66\ \text{kJ/kg} = 1\ 358.95\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_1 &= s_1' + x(s_1'' - s_1') \\ &= 0.453\ 8\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + 0.95\times(5.539\ 7 - 0.453\ 8)\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \\ &= 5.285\ 4\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \end{aligned}$$

据 $s_2 = s_1$ 及 $p_2 = 1.003\ \text{MPa}$，查 NH_3 过热蒸汽表，得 $t_2 = 52.4\ {}^\circ\text{C}$，$h_2 = 1\ 542.9\text{kJ/kg}$；查 NH_3

饱和蒸汽表，$t_4 = 25\ ^\circ\mathrm{C}$、$h_4 = 298.25\ \mathrm{kJ/kg}$。

$$q_\mathrm{c} = h_1 - h_5 = h_1 - h_4 = 1\ 358.95\ \mathrm{kJ/kg} - 298.25\ \mathrm{kJ/kg} = 1\ 060.7\ \mathrm{kJ/kg}$$

q_c 可用 $T-s$ 图上面积，155'1'1 表示。

$$w_\mathrm{net} = h_2 - h_1 = 1\ 542.9\ \mathrm{kJ/kg} - 1\ 358.95\ \mathrm{kJ/kg} = 184.0\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$\varepsilon = \frac{q_\mathrm{c}}{w_\mathrm{net}} = \frac{1\ 060.7\ \mathrm{kJ/kg}}{184.0\ \mathrm{kJ/kg}} = 5.77$$

（3）由 $q_{Q_\mathrm{c}} = 4.2\times10^5\ \mathrm{kJ/h}$，$q_m = \dfrac{q_{Q_\mathrm{c}}}{q_\mathrm{c}} = \dfrac{4.2\times10^5\ \mathrm{kJ/h}}{1\ 060.7\ \mathrm{kJ/kg}} = 396.0\ \mathrm{kg/h} = 0.11\ \mathrm{kg/s}$

（4）冷量㶲及㶲效率

$$e_{\mathrm{x},Q} = \left(\frac{T_0}{T_\mathrm{c}} - 1\right) q_\mathrm{c} = \left[\frac{(25+273.15)\mathrm{K}}{(-15+273.15)\mathrm{K}} - 1\right] \times 1\ 060.7\mathrm{kJ/kg} = 164.35\mathrm{kJ/kg}$$

$$\eta_{e_\mathrm{x}} = \frac{e_{\mathrm{x},Q}}{w_\mathrm{net}} = \frac{164.35\ \mathrm{kJ/kg}}{184.0\ \mathrm{kJ/kg}} = 0.893$$

11−11 上题中若氨压缩机的绝热效率 $\eta_{\mathrm{C,s}} = 0.80$，其它参数同上题，求循环的 w'_net、ε 及㶲效率 η_{e_x}。

解：由上题，$w_\mathrm{net} = h_2 - h_1 = 184.0\ \mathrm{kJ/kg}$，据 $\eta_{\mathrm{C,s}} = \dfrac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$，所以

$$h_{2'} = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_{\mathrm{C,s}}} = 1\ 358.95\ \mathrm{kJ/kg} + \frac{184.0\ \mathrm{kJ/kg}}{0.8} = 1\ 588.9\ \mathrm{kJ/kg}$$

$$w'_\mathrm{net} = h_{2'} - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{\eta_{\mathrm{C,s}}} = \frac{w_\mathrm{net}}{\eta_{\mathrm{C,s}}} = \frac{184.0\ \mathrm{kJ/kg}}{0.8} = 230\ \mathrm{kJ/kg}$$

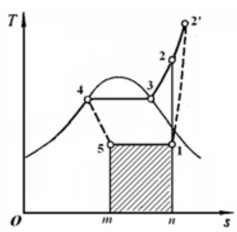


图 11−7 题 11−11 附图

$$\varepsilon = \frac{q_\mathrm{c}}{w_\mathrm{net}} = \frac{1\ 060.7\ \mathrm{kJ/kg}}{230\ \mathrm{kJ/kg}} = 4.61$$

循环制冷量中的冷量㶲

$$e_{\mathrm{x},Q} = \left(\frac{T_0}{T_\mathrm{c}} - 1\right) q_\mathrm{c} = \left[\frac{(25+273.15)\mathrm{K}}{(-15+273.15)\mathrm{K}} - 1\right] \times 1\ 060.7\mathrm{kJ/kg} = 164.35\mathrm{kJ/kg}$$

循环㶲效率

$$\eta_{e_x}=\frac{e_{x,Q}}{w'_{net}}=\frac{164.35\ \text{kJ/kg}}{230\ \text{kJ/kg}}=0.715$$

11−12 若 11−10 题中制冷剂改为氟里昂 134a（HCFC134a），求：

（1）蒸发压力 p_1 和冷凝压力 p_2；

（2）q_c、w_{net} 和 ε；

（3）HCFC134a 的流量；

（4）装置㶲效率 η_{e_x}。

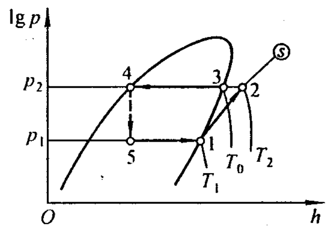


图 11−8 题 11−12 附图

解：（1）据工作温度，查附表得：$p_1=164.36\ \text{kPa}$、$p_2=665.49\ \text{kPa}$

（2）查 HCFC134a 的压焓图（示意图见图 11−8）得，$h_1=380\ \text{kJ/kg}$、$h_2=406\ \text{kJ/kg}$、$s_1=1.69\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$h_4=230\ \text{kJ/kg}$、$s_4=1.12\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$。

$$q_c=h_1-h_5=h_1-h_4=380\ \text{kJ/kg}-230\ \text{kJ/kg}=150\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{net}=h_2-h_1=406\ \text{kJ/kg}-380\ \text{kJ/kg}=26\ \text{kJ/kg}$$

$$\varepsilon=\frac{q_c}{w_{net}}=\frac{150\ \text{kJ/kg}}{26\ \text{kJ/kg}}=5.77$$

(3)
$$q_m=\frac{q_{Q_c}}{q_c}=\frac{4.2\times10^5\ \text{kJ/h}}{150\ \text{kJ/kg}}=2\ 800\ \text{kg/h}=0.778\ \text{kg/s}$$

(4) 冷量㶲

$$e_{x,Q}=\left(\frac{T_0}{T_c}-1\right)q_c=\left[\frac{(25+73.15)\ \text{K}}{(-15+273.15)\ \text{K}}-1\right]\times150\ \text{kJ/kg}=23.24\ \text{kJ/kg}$$

循环㶲效率

$$\eta_{e_x}=\frac{e_{x,Q}}{w_{net}}=\frac{23.24\ \text{kJ/kg}}{26\ \text{kJ/kg}}=0.894$$

11−13 某热泵装置用氨为工质，设蒸发器中氨的温度为−10℃，进入压缩机时氨蒸气的干度为 $x_1=0.95$，冷凝器中饱和氨的温度为 35℃。求：

（1）工质在蒸发器中吸收的热量 q_2，在冷凝器中的散向室内空气的热量 q_1 和循环供暖系

数 ε'；

(2) 设该装置每小时向室内空气供热量 $Q_1 = 8\times10^4\ \text{kJ}$，求用以带动该热泵的最小功率是多少？若改用电炉供热，则电炉功率应是多少？两者比较，可得出什么样的结论？

解：查 NH_3 热力性质表，$t=-10^{\circ}\text{C}$ 时：$h' = 134.41\ \text{kJ/kg}$、$h'' = 1\ 430.8\ \text{kJ/kg}$；$s' = 0.540\ 8\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$s'' = 5.467\ 3\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$；$t = 35^{\circ}\text{C}$ 时：$p_s = 1\ 350.4\text{kPa}$、$h_4 = h' = 346.80\text{kJ/kg}$、$h'' = 1\ 468.6\text{kJ/kg}$。

$$
\begin{aligned}
h_1 &= xh'' + (1-x)h' \\
&= 0.95\times1\ 430.8\ \text{kJ/kg} + (1-0.95)\times134.41\ \text{kJ/kg} = 1\ 366.0\ \text{kJ/kg}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
s_1 &= xs'' + (1-x)s' \\
&= 0.95\times5.467\ 3\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} + (1-0.95)\times0.540\ 8\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \\
&= 5.221\ 9\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}
\end{aligned}
$$

据 $p_2 = p_s$、$s_2 = s_1$ 经线性插值得 $t_2 = 60^{\circ}\text{C}$、$h_2 = 1\ 550.5\ \text{kJ/kg}$。

（1）
$$q_1 = h_2 - h_4 = 1\ 550.5\ \text{kJ/kg} - 346.8\ \text{kJ/kg} = 1\ 203.7\ \text{kJ/kg}$$

$$q_2 = h_1 - h_4 = 1\ 366.0\ \text{kJ/kg} - 346.8\ \text{kJ/kg} = 1\ 019.2\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = h_2 - h_1 = 1\ 550.5\ \text{kJ/kg} - 1\ 366.0\ \text{kJ/kg} = 184.5\ \text{kJ/kg}$$

$$\varepsilon' = \frac{q_1}{w_{\text{net}}} = \frac{1\ 203.7\ \text{kJ/kg}}{184.5\ \text{kJ/kg}} = 6.52$$

（2）
$$q_m = \frac{q_{Q_1}}{q_1} = \frac{8\times10^4\ \text{kJ/h}}{1\ 203.7\ \text{kJ/kg}} = 66.46\ \text{kg/h} = 0.018\ 5\ \text{kg/s}$$

$$P = q_m w_{\text{net}} = 0.018\ 5\ \text{kg/s}\times184.5\ \text{kJ/kg} = 3.41\ \text{kW}$$

若用电炉，则功率

$$P_{\text{E}} = q_{Q_1} = \frac{8\times10^4\ \text{kJ/h}}{3\ 600\ \text{s/h}} = 22.2\ \text{kW}$$

$P_{\text{E}} >> P$，所以热泵供暖是一种节能设施。

11−14 某热泵型空调器用氟里昂 134a 为工质，设蒸发器中氟里昂 134a 温度为−10℃，进压气机时蒸气干度 $x_1 = 0.98$，冷凝器中饱和液温度为 35℃。求热泵耗功和循环供暖系数。

解：查 HCFC134a 压焓图得：$h_1 = 388\ \text{kJ/kg}$、$h_2 = 420\ \text{kJ/kg}$、$h_4 = 250\ \text{kJ/kg}$。

$$w_P = h_2 - h_1 = 420\ \text{kJ/kg} - 388\ \text{kJ/kg} = 32\ \text{kJ/kg}$$

$$q_1 = h_2 - h_4 = 420\ \text{kJ/kg} - 242\ \text{kJ/kg} = 170\ \text{kJ/kg}$$

$$\varepsilon' = \frac{q_1}{w_P} = \frac{170\ \text{kJ/kg}}{32\ \text{kJ/kg}} = 5.31$$

11−15 有一台空调系统，采用蒸汽喷射压缩制冷机，制取 $p_3 = 1\ \text{kPa}$ 的饱和水（$t_s = 6.949\ ^\circ\text{C}$），来降低室温，如图 11−9。在室内吸热升温到 15℃的水被送入蒸发器内，部分汽化，其余变为1 kPa 的饱和水，蒸发器内产生的蒸汽干度为 0.95，被喷射器内流过的蒸汽抽送到冷凝器中，在 30℃下凝结成水，若制冷量为32 000 kJ/h，试求所需冷水流量及蒸发器中被抽走蒸汽的量。

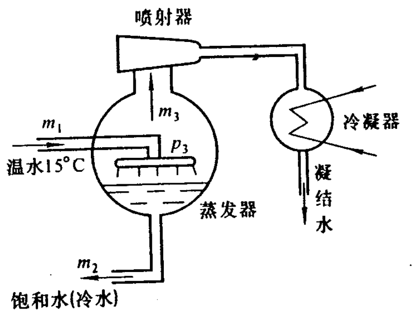


图 11−9 蒸汽喷射压缩制冷示意图

解：取蒸发器为控制器积，则

$$q_{m_1} = q_{m_2} + q_{m_3} \tag{a}$$

$$q_{m_1}h_1 - q_{m_2}h_2 - q_{m_3}h_3 = 0 \tag{b}$$

$$q_{m_1}h_1 - q_{m_2}h_2 = q_{Q_c} \tag{c}$$

查水和水蒸气表得，$h_3' = 29.21\ \text{kJ/kg} = h_2$、$h_3'' = 2\ 513.29\ \text{kJ/kg}$。

$$\begin{aligned} h_3 &= h_3' + x(h_3'' - h_3') \\ &= 29.21\ \text{kJ/kg} + 0.95\times(2\ 513.29 - 29.21)\ \text{kJ/kg} = 2\ 389.1\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h_1 \approx c_w t_1 = 4.187\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times 15\ ^\circ\text{C} = 62.81\ \text{kJ/kg}$$

式（c）代入式（b）

$$q_{m_3} = \frac{q_{Q_c}}{h_3} = \frac{32\ 000\ \text{kJ/h}}{2\ 389.1\ \text{kJ/kg}} = 13.39\ \text{kg/h} = 0.003\ 72\ \text{kg/s} \tag{d}$$

式(a)和式(d)代入式(c)，得

$$(q_{m_1} + q_{m_2})h_1 - q_{m_2}h_2 = q_{Q_c}$$

$$q_{m_2} = \frac{q_{Q_c} - q_{m_1} h_1}{h_1 - h_2} = \frac{32\ 000\ \text{kJ/h} - 13.39\ \text{kg/h} \times 62.81\ \text{kJ/kg}}{62.81\ \text{kJ/kg} - 29.21\ \text{kJ/kg}}$$
$$= 927.35\ \text{kg/h} = 0.258\ \text{kg/s}$$

11-16 某冷库制冷机组利用氨（NH_3）为制冷工质，由一台小型天然气动力的燃气轮机机组为制冷机组提供动力。制冷机组的冷凝温度为 40℃，蒸发温度为-20℃。燃气轮机装置的热效率是 30%。试求：

（1）制冷循环中每千克制冷剂的吸热量、放热量及制冷系数；

（2）整个系统的能量利用率。

解：（1）制冷循环

查 NH_3 热力性质表得 $h_1 = 1\ 437.7\ \text{kJ/kg}$、$s_1 = 5.904\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$、$h_3 = h_4 = 390.6\ \text{kJ/kg}$、$p_3 = 1\ 555.3\ \text{kPa}$。因 $s_2 = s_1$、$p_2 = p_3$，所以，$h_2 = 1\ 756.9\ \text{kJ/kg}$。

$$q_c = h_1 - h_4 = 1\ 437.7\ \text{kJ/kg} - 390.6\ \text{kJ/kg} = 1\ 047.1\ \text{kJ/kg}$$

$$q_0 = h_2 - h_3 = 1\ 756.9\ \text{kJ/kg} - 390.6\ \text{kJ/kg} = 1\ 366.8\ \text{kJ/kg}$$

$$w_{net} = h_2 - h_1 = 1\ 756.9\ \text{kJ/kg} - 1\ 437.7\ \text{kJ/kg} = 319.2\ \text{kJ/kg}$$

$$\varepsilon = \frac{q_c}{w_{net}} = \frac{1\ 047.1\ \text{kJ/kg}}{319.2\ \text{kJ/kg}} = 3.28$$

（2）全系统

燃气轮机装置燃烧室内燃料放出热量

$$Q_1 = \frac{W_{net}}{\eta_t} = \frac{319.2\ \text{kJ}}{0.30} = 1\ 064\ \text{kJ}$$

制冷系统 1kg 制冷剂从冷库吸热量和燃气轮机装置中工质吸热量之比，即系统的能量利用率

$$\zeta = \frac{Q_c}{Q_1} = \frac{1\ 047.1\ \text{kJ}}{1\ 064\ \text{kJ}} = 0.984$$

11-17 在氨-水吸收式制冷装置中，利用压力为 0.3MPa，干度为 0.88 的湿饱和蒸汽的冷凝热，作为蒸汽发生器的外热源，如果保持冷藏库的温度为-10℃，周围环境温度为 30℃，试计算吸收式制冷装置的 COP_{max} 和如果实际的热量利用系数为 $0.4\,\text{COP}_{max}$，而要达到制冷能力为 $2.8\times10^5\ \text{kJ/h}$，需提供湿饱和蒸汽的质量流量 q_m。

解：吸收式制冷装置见图如图 11-10 所示。忽略溶液泵消耗的功，整个吸收式制冷装置热能量平衡为

$$Q_{\mathrm{H}}+Q_{\mathrm{L}}=Q_{\mathrm{L}}'+Q_{\mathrm{L}}'' \qquad \text{(a)}$$

取整个吸收式制冷装置为控制体积，全部过程可逆时装置的经济性指标达最大，此时熵产为零，控制体积的熵变也为零，故

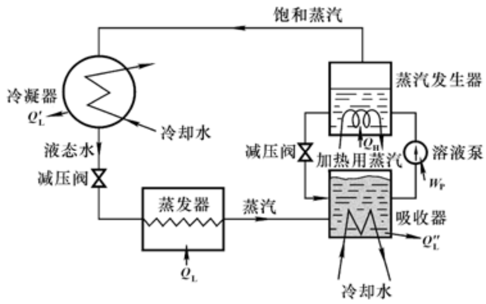


图 11-10 吸收式制冷装置示意图

$$S_{\mathrm{f}}=S_{\mathrm{H}}+S_{\mathrm{L}}+S_0=-\frac{Q_{\mathrm{H}}}{T_{\mathrm{H}}}+\frac{Q_{\mathrm{L}}'+Q_{\mathrm{L}}''}{T_0}-\frac{Q_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{L}}}=0 \qquad \text{(b)}$$

联立求解式（a）和（b），得

$$\mathrm{COP}_{\max}=\frac{T_{\mathrm{H}}-T_0}{T_0-T_{\mathrm{L}}}\left(\frac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}\right)$$

据 $p=0.3\ \mathrm{MPa}$，查水蒸气表得 $t_{\mathrm{s}}\approx 133.5\ {}^{\circ}\mathrm{C}$，汽化潜热 $\gamma=h''-h'=2\ 163.7\ \mathrm{kJ/kg}$ 、$T_{\mathrm{H}}=T_{\mathrm{s}}=133.5\ {}^{\circ}\mathrm{C}=406.7\ \mathrm{K}$ 。

1kg 湿蒸汽的冷凝热为

$$q_x=x\gamma=0.88\times 2\ 163.7\ \mathrm{kJ/kg}=1\ 904.1\ \mathrm{kJ/kg}$$

已知冷藏库及周围环境的温度分别为 $T_{\mathrm{L}}=-10\ {}^{\circ}\mathrm{C}=263\ \mathrm{K}$ 、$T_0=303\ \mathrm{K}$ ，故

$$\mathrm{COP}_{\max}=\frac{T_{\mathrm{H}}-T_0}{T_0-T_{\mathrm{L}}}\left(\frac{T_{\mathrm{L}}}{T_{\mathrm{H}}}\right)=\frac{(406.7-303)\ \mathrm{K}\times 263\ \mathrm{K}}{(303-263)\ \mathrm{K}\times 406.7\ \mathrm{K}}=1.68$$

吸收式制冷装置的实际热量利用系数 COP 为

$$\mathrm{COP}=0.4\mathrm{COP}_{\max}=0.4\times 1.68=0.672$$

所需的供热能力 Q_{H} 可表示为

$$Q_{\mathrm{H}}=\frac{Q_{\mathrm{L}}}{\mathrm{COP}}=\frac{280\ 000\ \mathrm{kJ/h}}{3\ 600\times 0.672}=115.7\ \mathrm{kW}$$

需要提供的湿饱和蒸汽的质量流率为

$$q_m=\frac{Q_{\mathrm{H}}}{q_x}=\frac{115.7\ \mathrm{kJ/s}}{1\ 904.1\ \mathrm{kJ/kg}}=0.061\ \mathrm{kg/s}$$

第十二章 理想气体混合物及湿空气

12−1 混合气体中各组成气体的摩尔分数为：$x_{CO_2}=0.4$，$x_{N_2}=0.2$，$x_{O_2}=0.4$。混合气体的温度$t=50^{\circ}C$，表压力$p_e=0.04MPa$，气压计上水银柱高度为$p_b=750mmHg$。求：

（1）体积$V=4m^3$混合气体的质量；

（2）混合气体在标准状态下的体积V_0。

解 （1）混合气体折合摩尔质量及折合气体常数

$$
\begin{aligned}
M &= x_{CO_2}M_{CO_2}+x_{N_2}M_{N_2}+x_{O_2}M_{O_2}\\
&=(0.4\times 44.01+0.2\times 28.01+0.4\times 32.00)\times 10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}\\
&=36.01\times 10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}
\end{aligned}
$$

$$R_g=\frac{R}{M}=\frac{8.3145\mathrm{J/(mol\cdot K)}}{36.01\times 10^{-3}\mathrm{kg/mol}}=230.9\mathrm{J/(kg\cdot K)}$$

$$p=p_e+p_b=0.04\mathrm{MPa}+750\mathrm{mmHg}\times 133.32\mathrm{Pa/mmHg}=0.14\times 10^6\mathrm{Pa}$$

由混合气体状态方程式

$$m=\frac{pV}{R_gT}=\frac{0.14\times 10^6\mathrm{Pa}\times 4\mathrm{m^3}}{230.9\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times 323\mathrm{K}}=7.51\mathrm{kg}$$

（2）标准状态下的折合体积

$$V_0=mv_0=m\frac{V_{0,\mathrm{m}}}{\mathrm{M}}=7.51\mathrm{kg}\times\frac{22.4\times 10^{-3}\mathrm{m^3/mol}}{36\times 10^{-3}\mathrm{kg/mol}}=4.67\mathrm{m^3}\text{（标准状态）}$$

12−2 50kg 废气和 75kg 的空气混合，废气中各组成气体的质量分数为：$w_{CO_2}=14\%$，$w_{O_2}=6\%$，$w_{H_2O}=5\%$，$w_{N_2}=75\%$。空气中的氧气和氮气的质量分数为：$w_{O_2}=23.2\%$，$w_{N_2}=76.8\%$。混合后气体压力p =0.3MPa，求：（1）混合气体各组分的质量分数；（2）折合气体常数；（3）折合摩尔质量；（4）摩尔分数；（5）各组成气体分压力。

解：（1）混合后气体质量$m=75+50=125\mathrm{kg}$，其中

$$m_{CO_2}=w_{CO_2}m=0.14\times 50\mathrm{kg}=7\mathrm{kg}$$

$$m_{H_2O}=w_{H_2O}\times m=0.05\times 50\mathrm{kg}=2.5\mathrm{kg}$$

$$m_{O_2}=w_{g,O_2}m_g+w_{a,O_2}m_a=0.06\times 50\mathrm{kg}+0.232\times 75\mathrm{kg}=20.4\mathrm{kg}$$

$$m_{N_2}=w_{g,N_2}m_g+w_{a,N_2}m_a=0.75\times 50\text{kg}+0.768\times 75\text{kg}=95.1\text{kg}$$

因此，质量分数

$$w_{CO_2}=\frac{m_{CO_2}}{m}=\frac{7\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.056\text{，}\quad w_{H_2O}=\frac{m_{H_2O}}{m}=\frac{2.5\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.020$$

$$w_{O_2}=\frac{m_{O_2}}{m}=\frac{20.4\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.163\text{，}\quad w_{N_2}=\frac{m_{N_2}}{m}=\frac{95.1\text{kg}}{50\text{kg}+75\text{kg}}=0.761$$

核算 $\sum w_i=0.056+0.163+0.020+0.761=1$

（2）混合气体折合气体常数

$$\begin{aligned}R_g&=\sum_i w_iR_{g,i}=R\sum_i w_i\frac{1}{M_i}\\&=8.314\ 5\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times\left(\frac{0.056}{44.01}+\frac{0.163}{32.0}+\frac{0.020}{18.016}+\frac{0.761}{28.02}\right)\frac{1}{\times 10^{-3}\text{kg/mol}}\\&=288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}\end{aligned}$$

（3）折合摩尔质量

$$M=\frac{R}{R_g}=\frac{8.314\ 5\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=28.87\times 10^{-3}\text{kg/mol}$$

（4）摩尔分数 $x_i=\dfrac{R_{g,i}}{R_g}w_i$

$$\begin{aligned}x_{CO_2}&=\frac{R_{g,CO_2}}{R_g}w_{CO_2}=\frac{R}{M_{CO_2}R_g}w_{CO_2}\\&=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 0.056}{44.01\times 10^{-3}\text{kg/mol}\times 288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=0.037\end{aligned}$$

$$x_{O_2}=\frac{R}{M_{O_2}R_g}w_{O_2}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 0.163}{32.0\times 10^{-3}\text{kg/mol}\times 288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=0.147$$

$$x_{H_2O}=\frac{R}{M_{H_2O}R_g}w_{H_2O}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 0.020}{18.016\times 10^{-3}\text{kg/mol}\times 288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=0.032$$

$$x_{N_2}=\frac{R}{M_{N_2}R_g}w_{N_2}=\frac{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 0.761}{28.01\times 10^{-3}\text{kg/mol}\times 288\text{J/(kg}\cdot\text{K)}}=0.784$$

核算： $\sum x_i=0.037+0.147+0.032+0.784=1$

（5）各组分分压力 $p_i=x_ip$

$$p_{CO_2} = x_{CO_2} p = 0.037 \times 0.3\text{MPa} = 0.0111\text{MPa}$$

$$p_{O_2} = x_{O_2} p = 0.147 \times 0.3\text{MPa} = 0.0441\text{MPa}$$

$$p_{H_2O} = x_{H_2O} p = 0.032 \times 0.3\text{MPa} = 0.0096\text{MPa}$$

$$p_{N_2} = x_{N_2} p = 0.784 \times 0.3\text{MPa} = 0.2352\text{MPa}$$

核算： $\sum p_i = (0.0111 + 0.0441 + 0.0096 + 0.2352)\text{MPa} = 0.3\text{MPa} = p$

12−3 烟气进入锅炉第一段管群时温度为 1200℃，流出时温度为 800℃，烟气的压力几乎不变。求每 1kmol 烟气的放热量 Q_p。可藉助平均摩尔定压热容表计算。已知烟气的体积分数为：$\varphi_{CO_2} = 0.12$，$\varphi_{H_2O} = 0.08$，其余为 N_2。

解：因 $\varphi_i = x_i$ ，所以 $x_{CO_2} = 0.12$， $x_{H_2O} = 0.08$， $x_{N_2} = 0.8$。由附表查得平均摩尔定压热容如下：

t/℃	$C_{p,m}\Big\|_0^{t\,^\circ C}$ /[J/(mol·K)]		
	CO_2	H_2O	N_2
800	47.763	37.392	30.748
1200	50.740	39.285	31.828

混合气体的热容 $C_{p,m} = \sum x_i C_{p,m,i}$

$$C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{800^\circ C} = 0.12 \times 47.763\text{J/(mol·K)} + 0.08 \times 37.392\text{J/(mol·K)} + 0.8 \times 30.748\text{J/(mol·K)} = 33.321\text{J/(mol·K)}$$

$$C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{1200^\circ C} = 0.12 \times 54.740\text{J/(mol·K)} + 0.08 \times 39.285\text{J/(mol·K)} + 0.8 \times 31.828\text{J/(mol·K)} = 34.694\text{J/(mol·K)}$$

$$\begin{aligned} Q_p &= n\left(C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{800^\circ C} t_2 - C_{p,m}\Big|_{0^\circ C}^{1200^\circ C} t_1\right) \\ &= 1000\text{mol} \times [33.321\text{J/(mol·K)} \times 800^\circ\text{C} - 34.694\text{J/(mol·K)} \times 1200^\circ\text{C}] \\ &= -149.76\text{kJ} \end{aligned}$$

12−4 流量为 3mol/s 的 CO_2，2mol/s 的 N_2 和 4.5mol/s 的 O_2 三股气流稳定流入总管道混合，混合前每股气流的温度和压力相同，都是 76.85℃，0.7MPa，混合气流的总压力 $p = 0.7\text{MPa}$，温度仍为 $t = 76.85^\circ\text{C}$。藉助气体热力性质表试计算：

（1）混合气体中各组分的分压力；

（2）混合前后气流焓值变化 $\Delta\dot{H}$ 及混合气流的焓值；

（3）导出温度、压力分别相同的几种不同气体混合后，系统熵变为：$\Delta S = -R\sum n_i \ln x_i$，并计算本题混合前后熵的变化量 $\Delta\dot{S}$；

（4）若三股气流为同种气体，熵变如何？

解：三股来流和混合物的温度、压力相同：p＝0.7MPa，$T = 76.85 + 273.15 = 350\text{K}$。由稳定流动能量方程，$Q = 0$，$W_i = 0$ 不计动能差、位能差时 $\Delta\dot{H} = 0$，$\dot{H} = \sum \dot{H}_i$。混合物的摩尔焓 $H_{\text{m}} = \sum x_i H_{\text{m},i}$。总物质的量

$$q_n = \sum q_{n_i} = 3\text{mol/s} + 2\text{mol/s} + 4.5\text{mol/s} = 9.5\text{mol/s}$$

摩尔分数

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n} = \frac{3\text{mol/s}}{9.5\text{mol/s}} = 0.3158$$

$$x_{\text{N}_2} = \frac{n_{\text{N}_2}}{n} = \frac{2\text{mol/s}}{9.5\text{mol/s}} = 0.2105$$

$$x_{\text{O}_2} = \frac{n_{\text{O}_2}}{n} = \frac{4.5\text{mol/s}}{9.5\text{mol/s}} = 0.4737$$

（1）各组分的分压力 $p_i = x_i p$

$$p_{\text{CO}_2} = x_{\text{CO}_2} p = 0.3158 \times 0.7\text{MPa} = 0.2211\text{MPa}$$

$$p_{\text{N}_2} = x_{\text{N}_2} p = 0.2105 \times 0.7\text{MPa} = 0.1473\text{MPa}$$

$$p_{\text{O}_2} = x_{\text{O}_2} p = 0.4737 \times 0.7\text{MPa} = 0.3156\text{MPa}$$

（2）由 $T = 350\text{K}$ 附表查得 $H_{\text{m,CO}_2} = 11399.75\text{J/mol}$，$H_{\text{m,N}_2} = 10182.15\text{J/mol}$，$H_{\text{m,O}_2} = 10223.1\text{J/mol}$

$$\begin{aligned} H_{\text{m}} &= 0.3158 \times 11399.75\text{J/mol} + 0.2105 \times 10182.15\text{J/mol} + \\ &\quad 0.4737 \times 10223.1\text{J/mol} = 10586.07\text{J/mol} \end{aligned}$$

$$\dot{H} = q_n H_{\text{m}} = 9.5\text{mol/s} \times 10586.07\text{J/mol} = 100567.63\text{J/s}$$

（3）
$$\Delta S = n_{\text{CO}_2}\Delta S_{\text{m,CO}_2} + n_{\text{N}_2}\Delta S_{\text{m,N}_2} + n_{\text{O}_2}\Delta S_{\text{m,O}_2}$$

$$=n_{CO_2}\left(C_{p,m,CO_2}\ln\frac{T_2}{T_{CO_2}}-R\ln\frac{p_{CO_2}}{p_{CO_2,1}}\right)+n_{N_2}\left(C_{p,m,N_2}\ln\frac{T_2}{T_{N_2}}-R\ln\frac{p_{N_2}}{p_{N_2,1}}\right)+$$

$$n_{O_2}\left(C_{p,m,O_2}\ln\frac{T_2}{T_{O_2}}-R\ln\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,1}}\right)$$

据题意

$$p_{CO_2,1}=p_{N_2,1}=p_{O_2,1}=0.7\text{MPa}=p，\ T_{CO_2,1}=T_{N_2,1}=T_{O_2,1}=350\text{K}=T_2$$

$$\Delta S=-Rn_{CO_2}\ln\frac{p_{CO_2}}{p_{CO_2,1}}-Rn_{N_2}\ln\frac{p_{N_2}}{p_{N_2,1}}-Rn_{O_2}\ln\frac{p_{O_2}}{p_{O_2,1}}$$

$$=-R\left(n_{CO_2}\ln\frac{p_{CO_2}}{p}+n_{N_2}\ln\frac{p_{N_2}}{p}+n_{O_2}\ln\frac{p_{O_2}}{p}\right)$$

$$=-R(n_{CO_2}\ln x_{CO_2}+n_{N_2}\ln x_{N_2}+n_{O_2}\ln x_{O_2})=-R\sum n_i\ln x_i$$

本题

$$\Delta\dot{S}=-8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times(3\text{mol/s}\times\ln 0.3158+2\text{mol/s}\times\ln 0.2105+$$
$$4.5\text{mol/s}\times\ln 0.4737)=82.62\text{kJ/(K}\cdot\text{s)}$$

（4）若为几股同种气流，来流各股 p、T 相同，且与混合物的 p、T 也相同，这时 $\Delta S=0$，因每股进出口熵变都为零。

***12−5** $V=0.55\ \text{m}^3$ 的刚性容器中装有 $p_1=0.25\ \text{MPa}$、$T_1=300\ \text{K}$ 的 CO_2，N_2 气在输气管道中流动，参数保持 $p_L=0.85\ \text{MPa}$、$T_L=440\ \text{K}$，如图 12−1 所示，打开阀门充入 N_2，直到容器中混合物压力达 $p_2=0.5\ \text{MPa}$ 时关闭阀门。充气过程绝热，求容器内混合物终温 T_2 和质量 m_2。按定值比热容计算，$c_{V,N_2}=751\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_{p,N_2}=1048\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$；$c_{V,CO_2}=657\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$，$c_{p,CO_2}=846\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。

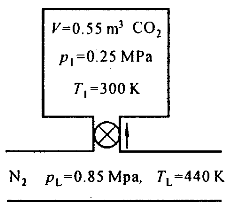


图 12−1 习题 12−5 附图

解：由附表查得，$M_{CO_2}=44.01\times10^{-3}\ \text{kg/mol}$，$M_{N_2}=28.01\times10^{-3}\ \text{kg/mol}$。

$$R_{g,co_2}=\frac{R}{M_{CO_2}}=\frac{8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{44.01\times10^{-3}\ \text{kg/mol}}=189\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}；$$

$$R_{g,N_2}=\frac{R}{M_{N_2}}=\frac{8.314\ 5\ \text{J/(mol}\cdot\text{K)}}{28.01\times10^{-3}\ \text{kg/mol}}=297\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$m_1=\frac{p_1V}{R_{\mathrm{g,CO_2}}T_1}=\frac{0.25\times10^6\ \mathrm{Pa}\times0.55\ \mathrm{m^3}}{189\ \mathrm{J/(kg\cdot K)}\times300\ \mathrm{K}}=2.425\ \mathrm{kg}$$

混合物折合气体常数 $R_\mathrm{g}=\Sigma w_iR_{\mathrm{g}i}$

$$R_\mathrm{g}=\frac{m_1}{m_1+m_\mathrm{in}}R_{\mathrm{g,CO_2}}+\frac{m_\mathrm{in}}{m_1+m_\mathrm{in}}R_{\mathrm{g,N_2}}=\frac{2.425\times0.189+m_\mathrm{in}\times0.297}{m_1+m_\mathrm{in}}$$

$$T_2=\frac{p_2V}{m_2R_\mathrm{g}}=\frac{0.5\times10^3\times0.55}{(m_1+m_\mathrm{in})\dfrac{0.4583+0.297m_\mathrm{in}}{m_1+m_\mathrm{in}}}=\frac{0.275\times10^3}{0.4583+0.297m_\mathrm{in}}\tag{a}$$

$$m_\mathrm{in}=\frac{0.275\times10^3-0.4583T_2}{0.297T_2}\tag{b}$$

取容器内体积为控制体积，其能量守恒式为

$$\delta Q=\mathrm{d}U+h_\mathrm{out}\delta m_\mathrm{out}-h_\mathrm{in}\delta m_\mathrm{in}+\delta W_\mathrm{i}\tag{c}$$

据题意 $\delta Q=0$、$\delta W_\mathrm{i}=0$、$\delta m_\mathrm{out}=0$，故

$$0=U_2-U_1-h_\mathrm{in}\delta m_\mathrm{in}\tag{d}$$

$$U_2=U_{2,\mathrm{CO_2}}+U_{2,\mathrm{N_2}}=m_1c_{V,\mathrm{CO_2}}T_2+m_{in}c_{V,\mathrm{N_2}}T_2$$

$$U_1=m_1c_{V,\mathrm{CO_2}}T_1$$

$$h_\mathrm{in}=c_{p,\mathrm{N_2}}T_\mathrm{L}=1.048\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times440\mathrm{K}=461.12\mathrm{kJ/kg}$$

代入式（d）

$$m_1c_{V,\mathrm{CO_2}}T_2+m_\mathrm{in}c_{V,\mathrm{N_2}}T_2-m_1c_{V,\mathrm{CO_2}}T_1=c_{p,\mathrm{N_2}}T_\mathrm{L}m_\mathrm{in}$$

$$m_1c_{V,\mathrm{CO_2}}(T_2-T_1)=m_\mathrm{in}(c_{p,\mathrm{N_2}}T_\mathrm{L}-c_{V,\mathrm{N_2}}T_2)\tag{e}$$

将 h_in 等数据及式（b）代入式（e），化简，得

$$0.129T_2^2+275.9T_2-126.81\times10^3=0$$

解得 $T_2=388.9\mathrm{K}$ 。代回式（b）

$$m_\mathrm{in}=\frac{0.275\times10^3-0.4583\times388.9}{0.297\times388.9}=0.837\ 79\ \mathrm{kg}$$

$$m_2=m_1+m_\mathrm{in}=2.425\ \mathrm{kg}+0.837\ 79\ \mathrm{kg}=3.262\ 79\ \mathrm{kg}$$

$$R_g = \frac{2.425\ \text{kg} \times 0.189\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}}{3.262\ 79\ \text{kg}} + \frac{0.837\ 79\ \text{kg} \times 0.297\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}}{3.262\ 79\ \text{kg}}$$
$$= 0.216\ 7\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

12-6 同例 12−3，氧气和氮气绝热混合，求混合过程有损失。设环境温度为$T_0 = 298\text{K}$。

解：例 12−3 已得出混合熵变$\Delta S = 0.823\ 9\ \text{kJ/K}$，对绝热过程$S_f = 0$，$\Delta S = S_g$，所以有损失为

$$I = T_0 S_g = 298\ \text{K} \times 0.823\ 9\ \text{kJ/K} = 245.5\ \text{kJ}$$

***12−7** 刚性绝热容器中放置一个只能透过氧气，而不能透过氮气的半渗透膜，见图 12−2 两侧体积各为$V_A = 0.15\text{m}^3$，$V_B = 1\text{m}^3$，渗透开始前左侧氧气压力$p_{A1} = 0.4\text{MPa}$，温度$T_{A1} = 300\text{K}$，右侧为空气$p_{B1} = 0.1\text{MPa}$，$T_{B1} = 300\text{K}$，这里空气中含有的氧气和氮气的摩尔分数各为 0.22 和 0.78。通过半渗透膜氧气最终将均匀占据整个容器，试计算：

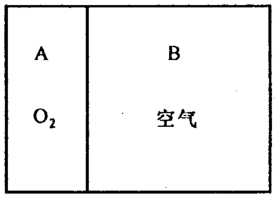


图 12−2 习题 12−7 附图

（1）渗透终了 A 中氧气的量$n_{O_2}^A$；

（2）B 中氧气和氮气混合物的压力以及各组元的摩尔分数x_{O_2}、x_{N_2}；

（3）渗透前后系统熵变ΔS。

解：（1）已知$p_1^A = 0.4\text{MPa} = 400\text{kPa}$，$p_1^B = 0.1\text{MPa} = 100\text{kPa}$。初始状态 A 和 B

$$n_{O_2}^{A_1} = \frac{p_1^A V_A}{RT_A} = \frac{0.4 \times 10^6\,\text{Pa} \times 0.15\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol} \cdot \text{K)} \times 300\text{K}} = 24.05\text{mol}$$

$$n_{air}^{B_1} = \frac{p_1^B V_B}{RT_B} = \frac{0. \times 10^6\,\text{Pa} \times 1\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol} \cdot \text{K)} \times 300\text{K}} = 40.09\text{mol}$$

其中

$$n_{O_2}^{B_1} = x_{O_2} n_{air}^{B_1} = 0.22 \times 40.09\text{mol} = 8.82\text{mol}$$

$$p_{O_2}^{B_1} = x_{O_2} p_1^B = 0.22 \times 100\text{kPa} = 22\text{kPa}$$

$$n_{N_2}^{B_1} = x_{N_2} n_{air}^{B_1} = 0.78 \times 40.09\text{mol} = 31.27\text{mol}$$

$$p_{N_2}^{B1} = x_{N_2} p_1^B = 0.78 \times 100\text{kPa} = 78\text{kPa}$$

A 和 B 两侧氧气的量

$$n_{O_2} = n_{O_2}^{A_1} + n_{O_2}^{B_1} = 24.05\text{mol} + 8.82\text{mol} = 32.87\text{mol}$$

取 A 和 B 为热力系，是封闭系，这时 $Q=0$ 、$W=0$，由能量守恒方程可得 $\Delta U=0$，$U_2=U_1$，又因氧气、氮气和空气均为双原子气体，取定值比热容时它们摩尔热容相同，

$$C_{V,\text{m}} = \frac{5}{2}R = \frac{5}{2}\times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)} = 20.8\text{J/(mol}\cdot\text{K)}$$

$$n_{O_2}^{A_2}C_{V,\text{m}}T + n_{O_2+N_2}^{B_2}C_{V,\text{m}}T = n_{O_2}^{A_1}C_{V,\text{m}}T_A + n_{\text{air}}^{B_1}C_{V,\text{m}}T_B$$

式中：$n_{O_2+N_2}^{B_2} = n_{O_2}^{A} + n_{\text{air}}^{B} - n_{O_2}^{A_2}$，所以

$$T(n_{O_2}^{A_2} + n_{O_2}^{A} + n_{\text{air}}^{B} - n_{O_2}^{A_2}) = (n_{O_2}^{A_1} + n_{\text{air}}^{B})T_B$$

$$T = T_A = T_B = 300\text{K}$$

氧气由 A 渗透到 B，使 A 和 B 中氧气均匀分布，渗透后氧气的压力

$$p_{O_2} = \frac{n_{O_2}RT}{V_A+V_B} = \frac{32.87\times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 300\text{K}}{(0.15+1)\text{m}^3} = 71295.0\text{Pa} = 71.3\text{kPa}$$

A 侧压力即为剩余 O_2 的压力 $p_2^{A_2} = p_{O_2} = 71.3\text{kPa}$，

$$n_{O_2}^{A_2} = \frac{p_2^{A_2}V_A}{RT} = \frac{71.3\times 10^3\text{Pa}\times 0.15\text{m}^3}{8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 300\text{K}} = 4.287\text{mol}$$

B 侧 O_2 的量为

$$n_{O_2}^{B_2} = n_{O_2} - n_{O_2}^{A_2} = 32.87\text{mol} - 4.287\text{mol} = 28.583\text{mol}$$

通过半透膜由 A 进入到 B 的 O_2 的量为

$$\Delta n_{O_2} = n_{O_2}^{A_1} - n_{O_2}^{A_2} = 24.05\text{mol} - 4.287\text{mol} = 19.763\text{mol}$$

（2）终态 B 侧为 28.583molO_2 与 31.27molN_2 组成的混合物 59.853mol，其压力为

$$p_2^{B} = \frac{n_2^{B}RT}{V_B} = \frac{59.853\text{mol}\times 8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)}\times 300\text{K}}{1\text{m}^3} = 149293.4\text{Pa}$$

其中

$$x_{O_2}^{B_2} = \frac{n_{O_2}^{B_2}}{n_2^{B}} = \frac{28.583\text{mol}}{59.853\text{mol}} = 0.4776$$

$$x_{N_2}^{B_2} = \frac{n_{N_2}^{B_2}}{n_2^{B}} = \frac{31.27\text{mol}}{59.853\text{mol}} = 0.5224$$

$$p_{O_2}^{B_2} = x_{O_2}^{B_2} p_2^{B} = 0.4776 \times 149.3\text{kPa} = 71.3\text{kPa}$$

$$p_{N_2}^{B_2} = x_{N_2}^{B_2} p_2^{B} = 0.5224 \times 149.3\text{kPa} = 78.0\text{kPa}$$

（3）系统熵变分四部分考虑：留在 A 中的 O_2，渗透到 B 内的 O_2，B 中原有的 O_2，B 中原有的 N_2 的熵变之和。

$$\Delta S_{1-2} = n_{O_2}^{A_2} \Delta S_{m,O_2}^{A_2} + \Delta n_{O_2}^{A} \Delta S_{m,O_2}^{A\to B} + n_{O_2}^{B_1} \Delta S_{m,O_2}^{B} + n_{N_2}^{B} \Delta S_{m,N_2}^{B}$$
$$= n_{O_2}^{A_2}[S_{m.O_2}(p_2^{A}T) - S_{m,O_2}(p_1^{A}T_A)] + \Delta n_{O_2}^{A}[S_{m,O_2}(p_{O_2}^{B_2}T) - S_{m,O_2}(p_{O_2}^{A_1}T_A)] +$$
$$n_{O_2}^{B_1}[S_{m.O_2}(p_{O_2}^{B_2}T) - S_{m,O_2}(p_{O_2}^{B_1}T_B)] + n_{N_2}^{B}[S_{m,N_2}(p_{N_2}^{B_2}T) - S_{m,N_2}(p_{N_2}^{B_1}T_B)]$$

注意到 $T = T_A = T_B = 300\text{K}$，氧气熵变中温度项为零，由于氮气温度和分压力均不变，故

$$\Delta S_{1-2} = -8.3145\text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times [4.287\text{mol} \times \ln\frac{71.3\text{kPa}}{400\text{kPa}} + 19.763\text{mol} \times$$
$$\ln\frac{71.3\text{kPa}}{400\text{kPa}} + 8.82\text{mol} \times \ln\frac{71.3\text{kPa}}{22\text{kPa}}] = 258.6\text{J/K}$$

12−8 设大气压力 $p_b = 0.1\text{MPa}$，温度 $t = 28^\circ\text{C}$，相对湿度 $\varphi = 0.72$，试用饱和空气状态参数表确定空气的 p_v、t_d、d、h。

解：由 $t = 28$ ℃从附表查得：$p_s = 3.778\text{kPa}$、$p_v = \varphi p_s = 0.72 \times 3.778\text{kPa} = 2.720\text{kPa}$。

再根据 p_v 在同一表上查出 $t_s = 22.47^\circ\text{C}$、$t_d = t_s(p_v) = 22.47^\circ\text{C}$

$$d = 0.622\frac{p_v}{p - p_v} = 0.622 \times \frac{2.72\text{kPa}}{100\text{kPa} - 2.72\text{kPa}} = 0.017\ 4\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$\{h\}_{\text{kJ/kg干空气}} = 1.005\{t\}_{^\circ\text{C}} + \{d\}_{\text{kg水蒸气/kg干空气}}\left(2501 + 1.86\{t\}_{^\circ\text{C}}\right)$$

$$h = 1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 28^\circ\text{C} + 0.017\ 4\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)} \times$$
$$[2501\text{kJ/kg} + 1.86\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 28^\circ\text{C}] = 72.56\text{kJ/kg（干空气）}$$

12−9 设压力 $p_b = 0.1\text{MPa}$，填充下列六种状态的空格。

	t/℃	t_w/℃	φ/%	d/kg(水蒸汽)/kg (干空气)	t_d/℃
1	25	*16.1*	40	*0.0079*	*10*
2	20	15	*60*	*0.0088*	*12*
3	20	*14*	*52.5*	*0.0077*	10
4	30	*26.1*	*73.5*	0.020	*24.7*
5	*20*	20	*100*	*0.0149*	*20*
6	*22*	16.8	60	0.010	*13.96*

12−10 湿空气 $t = 35^\circ\mathrm{C}$，$t_\mathrm{d} = 24^\circ\mathrm{C}$，总压力 $p = 0.10133\mathrm{MPa}$，求：

（1）φ 和 d；

（2）在海拔 1500 米处，大气压力 $p = 0.084\mathrm{MPa}$，求这时 φ 和 d。

解：（1）从附表由 $t_\mathrm{d} = 24^\circ\mathrm{C}$ 得 $p_\mathrm{v} = p_\mathrm{s}(t_\mathrm{d}) = 2.982\ \mathrm{kPa}$，由 $t = 35^\circ\mathrm{C}$，得 $p_\mathrm{s}(35^\circ\mathrm{C}) = 5.622\ \mathrm{kPa}$。

$$\varphi = \frac{p_\mathrm{v}}{p_\mathrm{s}} = \frac{2.982\ \mathrm{kPa}}{5.622\ \mathrm{kPa}} = 0.53$$

$$d = 0.622\frac{p_\mathrm{v}}{p - p_\mathrm{v}} = 0.622 \times \frac{2.982\ \mathrm{kPa}}{100\ \mathrm{kPa} - 2.982\ \mathrm{kPa}} = 0.018\ 86\mathrm{kg/kg}(\text{干空气})$$

（2）同理查得 $p_\mathrm{v} = 2.982\ \mathrm{kPa}$、$p_\mathrm{s} = 5.622\ \mathrm{kPa}$，

$$\varphi = \frac{p_\mathrm{v}}{p_\mathrm{s}} = \frac{2.982\ \mathrm{kPa}}{5.622\ \mathrm{kPa}} = 0.53$$

$$d = 0.622\frac{p_\mathrm{v}}{p - p_\mathrm{v}} = 0.622 \times \frac{2.982\ \mathrm{kPa}}{84\mathrm{k\ Pa} - 2.982\ \mathrm{kPa}} = 0.022\ 9\mathrm{kg/kg}(\text{干空气})$$

可见，大气压力低，只要温度不变，露点温度不变，则 φ 不变，但 d 上升。

12−11 （1）湿空气总压 $p = 0.1\mathrm{MPa}$，水蒸气分压力 p_v 由 1.2kPa 增至 2.4kPa，求含湿量相对变化率 $\Delta d / d_1$。（2）$p = 0.1\mathrm{MPa}$，p_v 由 $13.5\mathrm{kPa}$ 增大到 $27.0\mathrm{kPa}$，求 $\Delta d / d_1$。（3）$p_\mathrm{v} = 1.2\mathrm{kPa}$，但 p 由 $0.1\mathrm{MPa}$ 变为 $0.061\mathrm{MPa}$，求 $\Delta d / d_1$。（4）写出 $p_\mathrm{v} \sim \Delta d / d_1$ 的函数关系式。

解：$d = 0.622\dfrac{p_\mathrm{v}}{p - p_\mathrm{v}}$

（1）
$$d_1 = 0.622 \times \frac{1.2\mathrm{kPa}}{100\mathrm{kPa} - 1.2\mathrm{kPa}} = 0.007\ 555\mathrm{kg}(\text{水蒸气})/\mathrm{kg}(\text{干空气})；$$

$$d_2 = 0.622 \times \frac{2.4\mathrm{kPa}}{100\mathrm{kPa} - 2.4\mathrm{kPa}} = 0.015\ 295\ \mathrm{kg}(\text{水蒸气})/\mathrm{kg}(\text{干空气})$$

$$\frac{\Delta d}{d_1} = \frac{(0.015\ 295 - 0.007\ 555)\mathrm{kg}(\text{水蒸气})/\mathrm{kg}(\text{干空气})}{0.007\ 555\mathrm{kg}(\text{水蒸气})/\mathrm{kg}(\text{干空气})} = 102.5\%$$

（2）
$$d_1 = 0.622 \times \frac{13.5\mathrm{kPa}}{100\mathrm{kPa} - 13.5\mathrm{kPa}} = 0.097\ 08\ \mathrm{kg}(\text{水蒸气})/\mathrm{kg}(\text{干空气})；$$

$$d_2 = 0.622 \times \frac{27\mathrm{kPa}}{100\mathrm{kPa} - 27\mathrm{kPa}} = 0.230\ 05\ \mathrm{kg}(\text{水蒸气})/\mathrm{kg}(\text{干空气})$$

$$\frac{\Delta d}{d_1}=\frac{(0.230\ 05-0.097\ 08)\text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}}{0.097\ 09\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}}=13.7\%$$

（3）
$$d_1=0.622\times\frac{1.2\text{kPa}}{100\text{kPa}-1.2\text{kPa}}=0.007\ 555\ \text{kg (水蒸气)/kg (干空气)；}$$

$$d_2=0.622\times\frac{1.2\text{kPa}}{61\text{kPa}-1.2\text{kPa}}=0.012\ 48\ \text{kg (水蒸气)/kg (干空气)}$$

$$\frac{\Delta d}{d_1}=\frac{(0.01248-0.007555)\text{kg水蒸气/kg干空气}}{0.007555\text{kg水蒸气/kg干空气}}=65.2\%$$

（4） $p=$常数，设 $p_{v2}=Ap_{v1}$

$$d_1=0.622\frac{p_{v1}}{p-p_{v1}}，\ d_2=0.622\frac{Ap_{v1}}{p-Ap_{v1}}$$

$$\frac{\Delta d}{d_1}=\frac{0.622\left[\dfrac{Ap_{v1}}{p-Ap_{v1}}-\dfrac{p_{v1}}{p-p_{v1}}\right]}{0.622\dfrac{p_{v1}}{p-p_{v1}}}=\frac{A-1}{1-A\dfrac{p_v}{p}}$$

12−12 室内空气的 $t_1=20^\circ\text{C}$，$\varphi_1=40\%$，与室外 $t_2=-10^\circ\text{C}$，$\varphi_2=80\%$ 的空气相混合，已知 $q_{m,a1}$=50kg/s、$q_{m,a2}$=20kg/s，求混合后湿空气状态 t_3， φ_3， h_3。

解：由附表，$t_1=20^\circ\text{C}$ 时， $p_{s1}(t_1)=2.337\text{kPa}$； $t_2=-10^\circ\text{C}$ 时， $p_{s2}(t_2)=0.259\text{kPa}$。

$$d_1=0.622\frac{\varphi_1 p_{s1}}{p-\varphi_1 p_{s1}}$$
$$=0.622\times\frac{0.4\times2.337\text{kPa}}{100\text{kPa}-0.4\times2.337\text{kPa}}=0.005\ 869\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$d_2=0.622\frac{\varphi_2 p_{s,2}}{p-\varphi_2 p_{s,2}}$$
$$=0.622\times\frac{0.8\times0.259\text{kPa}}{100\text{kPa}-0.8\times0.259\text{kPa}}=0.001\ 291\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$h_1=1.005t_1+d_1(2501+1.86t_1)$$
$$=1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times20^\circ\text{C}+0.005\ 869\text{kg/kg(干空气)}\times$$
$$[2\ 501\text{kJ/kg}+1.86\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times20^\circ\text{C}]=30.5\text{kJ/kg}$$

$$h_2=1.005t_2+d_2\left(2501+1.86t_2\right)$$
$$=1.005\times(-10)+0.001\ 29\times[2\ 501+1.86\times(-10)]=-6.844\text{kJ/kg}$$

由能量守恒方程 $q_{m,a1}h_1+q_{m,a2}h_2=(q_{m,a1}+q_{m,a1})h_3$

$$h_3=\frac{q_{m,\mathrm{a1}}h_1+q_{m,\mathrm{a2}}h_2}{q_{m,\mathrm{a1}}+q_{m,\mathrm{a1}}}$$
$$=\frac{50\mathrm{kg/s}\times35.0\mathrm{kJ/kg(干空气)}+20\mathrm{kg/s}\times(-6.844)\mathrm{kJ/kg(干空气)}}{50\mathrm{kg/s}+20\mathrm{kg/s}}$$
$$=23.04\mathrm{kJ/kg(干空气)}$$

水蒸气质量守恒 $q_{m,\mathrm{a1}}d_1+q_{m,\mathrm{a2}}d_2=(q_{m,\mathrm{a1}}+q_{m,\mathrm{a1}})d_3$

$$d_3=\frac{q_{m,\mathrm{a1}}d_1+q_{m,\mathrm{a2}}d_2}{q_{,\mathrm{ma1}}+q_{m,\mathrm{a1}}}$$
$$=\frac{50\mathrm{kg/s}\times0.005\ 869\ \mathrm{kg/kg(干空气)}+20\mathrm{kg/s}\times0.001\ 291\ \mathrm{kg/kg(干空气)}}{50\mathrm{kg/s}+20\mathrm{kg/s}}$$
$$=0.004\ 561\ \mathrm{kg/kg(干空气)}$$

因 $h_3=c_{p,\mathrm{a}}t_3+d_3(2501+c_{p,\mathrm{v}}t_3)$

$$t_3=\frac{h_3-2501d_3}{c_{p,\mathrm{a}}+c_{p,\mathrm{v}}}$$
$$=\frac{23.04\mathrm{kJ/kg(干空气)}-2\ 501\ \mathrm{kJ/kg}\times0.004\ 561\ \mathrm{kg/kg(干空气)}}{(1.005+1.86)\mathrm{kJ/(kg\cdot K)}}=11.48^\circ\mathrm{C}$$

$d_3=0.622\dfrac{p_{\mathrm{v},3}}{p-p_{\mathrm{v},3}}$，代入 d_3 数据解得 $p_{\mathrm{v}.3}=0.733\ \mathrm{kPa}$。查出 $p_{\mathrm{s}}(t_3)=1.335\ \mathrm{kPa}$，所以

$$\varphi_3=\frac{p_{\mathrm{v}.3}}{p_{\mathrm{s}}(t_3)}=\frac{0.733\mathrm{kPa}}{1.355\mathrm{kPa}}=54.1\%$$

12−13 湿空气体积流率 $q_V=15\mathrm{m^3/s}$，$t_1=6^\circ\mathrm{C}$，$\varphi=60\%$，总压力 $p=0.1\mathrm{MPa}$，进入加热装置，（1）温度加热到 $t_2=30^\circ\mathrm{C}$，求 φ_2 和加热量 Q；（2）再经绝热增湿装置，使其相对温度提高到 $\varphi_3=40\%$，喷水温度 $t_{\mathrm{w.i}}=22^\circ\mathrm{C}$，求喷水量。（喷水带入的焓值忽略不计，按等焓过程计算）

解：（1）根据 $t_1=6^\circ\mathrm{C}$ 由饱和水和水蒸气表得 $p_{\mathrm{s1}}(t_1)=0.935\ 2\ \mathrm{kPa}$，$h_{\mathrm{v1}}=h''(t_1)=2\ 511.55\ \mathrm{kJ/kg}$

$$d_1=0.622\frac{\varphi_1p_{\mathrm{s1}}}{p-\varphi_1p_{\mathrm{s1}}}$$
$$=0.622\times\frac{0.6\times0.9352\mathrm{kPa}}{100\mathrm{kPa}-0.6\times0.9352\mathrm{kPa}}=0.003\ 51\mathrm{kg（水蒸气）/kg（干空气）}$$

$$h_1 = c_{p,a} t_1 + d_1 h''(t_1)$$
$$= 1.005\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times 6^\circ\text{C} + 0.003\ 51\text{kg/kg(干空气)} \times 2\ 511.55\ \text{kJ/kg}$$
$$= 14.85\ \text{kJ/kg(干空气)}$$

加热过程是等 d 过程，

$$d_2 = d_1 = 0.003\ 51\ \text{kg/kg(干空气)}$$

由 $t_2 = 30^\circ\text{C}$，查表得 $p_{s2}(t_2) = 4.245\ 1\ \text{kPa}$、$h_{v2} = h''(t_2) = 2\ 555.35\ \text{kJ/kg}$。把 d_2 和 p_{s2} 数据代入 $d_2 = 0.622\dfrac{\varphi_2 p_{s2}}{p - \varphi_2 p_{s2}}$，解得 $\varphi_2 = 13.22\%$。

$$h_2 = c_{p,a} t_2 + d_2 h''(t_2)$$
$$= 1.005\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times 30^\circ\text{C} + 0.003\ 51\ \text{kg/kg(干空气)} \times 2\ 555.35\ \text{kJ/kg}$$
$$= 39.12\text{kJ/kg(干空气)}$$

湿空气的折合气体常数

$$R_g = \frac{R_{g,a} + R_{g,v} d}{1 + d}$$
$$= \frac{287\text{J/(kg} \cdot \text{K)} + 461\text{J/(kg} \cdot \text{K)} \times 0.00351\text{kg/kg(干空气)}}{1 + 0.00351\text{kg/kg(干空气)}} = 287.6\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$$

由以流率形式表达到湿空气状态方程可得空气质流量

$$q_m = \frac{p q_V}{R_g T_1} = \frac{1 \times 10^5\ \text{Pa} \times 15\text{m}^3/\text{s}}{287.6\ \text{J/(kg} \cdot \text{K)} \times (273 + 6)\text{K}} = 18.693\ 8\ \text{kg/s}$$

其中，干空气的质量流量

$$q_{ma} = \frac{1}{1 + d} q_m = \frac{1}{1 + 0.003\ 51\text{kg/kg(干空气)}} \times 18.693\ 8\text{kg/s} = 18.628\ 4\text{kg/s}$$

水蒸气质量流量

$$q_{m,v} = q_m - q_{m,a} = 18.693\ 8\ \text{kg/s} - 18.628\ 4\ \text{kg/s} = 0.065\ 36\ \text{kg/s}$$

加热量

$$\Phi = q_{m,a}(h_2 - h_1) = 18.628\ 4\ \text{kg/s} \times (39.12 - 14.85)\text{kJ/kg} = 452.11\ \text{kJ/s}$$

（2）喷水加湿过程为等 h 过程，$h_3 = h_2 = 39.12\ \text{kJ/kg(干空气)}$

$$h_3 = c_{p,a} t_3 + d_3 h''(t_3) \tag{a}$$

$$d_3 = 0.622\frac{\varphi_3 p_s(t_3)}{p-\varphi_3 p_s(t_3)} \tag{b}$$

已知 $\varphi_3 = 40\%$，设定 t_3，查得 $h''(t_3)$、$p_s(t_3)$ 代入式（b），再代入式（a），迭代使（a）式两侧相等，最后得 $t_3 = 22.0^\circ\text{C}$。

校核：由 $t_3 = 22.0^\circ\text{C}$ 查得 $p_{s3}(t_3) = 2.644\ 4\ \text{kPa}$、$h_{v3} = h_{v3} = h''(t_3) = 2\ 540.84\ \text{kJ/kg}$。

$$\begin{aligned} d_3 &= 0.622\frac{\varphi_3 p_{s3}}{p-\varphi_3 p_{s3}} \\ &= 0.622\times\frac{0.4\times 2.644\ 4\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}-0.4\times 2.644\ 4\ \text{kPa}} = 0.006\ 649\ 6\text{kg/kg(干空气)} \end{aligned}$$

将之代入式（a），左侧 $h_3 = 39.12\ \text{kJ/kg(干空气)}$；右侧

$$\begin{aligned} &1.005\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times 22^\circ\text{C} + 0.006\ 649\ 6\text{kg/kg(干空气)}\times 2\ 540.84\ \text{kJ/kg} \\ &= 39.01\ \text{kJ/kg} \end{aligned}$$

两侧近似相等。

喷水量

$$\begin{aligned} q_{m,\text{v}} &= q_{m,\text{a}}(d_3 - d_2) \\ &= 18.628\ 4\text{kg/s}\times(0.006\ 649\ 6 - 0.003\ 510)\text{kg(水蒸气)/kg(干空气)} = 0.058\ 5\ \text{kg/s} \end{aligned}$$

12−14 $p = 0.1\text{MPa}$、$\varphi_1 = 60\%$、$t_1 = 32^\circ\text{C}$ 的湿空气，以 $q_{m,\text{a}} = 1.5\text{kg/s}$ 的质量流量进入到制冷设备的蒸发盘管，被冷却去湿，以 15℃的饱和湿空气离开。求每秒钟的凝水量 $q_{m,\text{w}}$ 及放热量 Φ。

解：由水蒸气表，$t = 32^\circ\text{C}$ 时 $p_s(t_1) = 4.757\ 4\ \text{kPa}$、$h_{v1} = h''(t_1) = 2\ 558.96\ \text{kJ/kg}$。

$$\begin{aligned} d_1 &= 0.622\frac{\varphi_1 p_{s1}}{p-\varphi_1 p_{s1}} \\ &= 0.622\times\frac{0.6\times 4.757\ 4\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}-0.6\times 4.757\ 4\ \text{kPa}} = 0.018\ 28\text{kg/kg(干空气)} \end{aligned}$$

$t_2 = 15^\circ\text{C}$ 时 $p_s(t_2) = 1.705\ 3\ \text{kPa}$、$h_{v2} = h''(t_2) = 2\ 528.07\ \text{kJ/kg}$。

$$\begin{aligned} d_2 &= 0.622\frac{\varphi_2 p_{s2}}{p-\varphi_2 p_{s2}} \\ &= 0.622\times\frac{1\times 1.705\ 3\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}-1\times 1.705\ 53\ \text{kPa}} = 0.010\ 79\ \text{kg/kg(干空气)} \end{aligned}$$

$$q_{m,\mathrm{w}}=q_{m,\mathrm{a}}(d_1-d_2)$$
$$=1.5\ \mathrm{kg/s}\times(0.018\ 28-0.010\ 79)\ \mathrm{kg/kg(干空气)}=0.011\ 2\ \mathrm{kg/s}$$

$$h_1=c_{p,\mathrm{a}}t_1+d_1h''(t_1)$$
$$=1.005\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times32^\circ\mathrm{C}+0.018\ 28\ \mathrm{kg/kg(干空气)}\times2\ 558.96\ \mathrm{kJ/kg}$$
$$=78.94\ \mathrm{kJ/kg(干空气)}$$

$$h_2=c_{p,\mathrm{a}}t_2+d_2h''(t_2)$$
$$=1.005\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\times15^\circ\mathrm{C}+0.010\ 79\ \mathrm{kg/kg(干空气)}\times2\ 528.07\ \mathrm{kJ/kg}$$
$$=42.35\ \mathrm{kJ/kg(干空气)}$$

$$\Phi=q_{m,\mathrm{a}}(h_1-h_2)=1.5\mathrm{kg/s}\times(78.94-42.35)\mathrm{kJ/kg}=54.9\ \mathrm{kJ/s}$$

12−15 湿空气温度为 30℃，压力为 100kPa，测得露点温度为 22℃，计算其相对湿度及含湿量。

解：由水蒸气表，$t=30^\circ\mathrm{C}$， $p_\mathrm{s}=4.2417\mathrm{kPa}$； $t=22^\circ\mathrm{C}$， $p_\mathrm{s}=2.6596\mathrm{kPa}=p_\mathrm{v}$。

$$\varphi=\frac{p_\mathrm{v}}{p_\mathrm{s}}=\frac{2.6596\mathrm{kPa}}{4.2417\mathrm{kPa}}=62.7\%$$

$$d=0.622\frac{p_\mathrm{v}}{p-p_\mathrm{v}}=0.622\times\frac{2.6596\mathrm{kPa}}{100\mathrm{kPa}-2.6596\mathrm{kPa}}=0.017\mathrm{kg/kg(干空气)}$$

12−16 压力为 $p_1=0.1\mathrm{MPa}$，温度为 $t_1=30^\circ\mathrm{C}$，相对湿度 $\varphi_1=0.6$ 的湿空气在活塞式压气机内压缩后，压力升至 $p_2=0.2\mathrm{MPa}$，（1）若压缩过程绝热；（2）若压缩过程等温，分别求压缩后湿空气的相对湿度 φ_2，含湿量 d_2

解：查表，$t=30^\circ\mathrm{C}$， $p_\mathrm{s}=4\ 241\ \mathrm{Pa}$。

$$p_{\mathrm{v}1}=\varphi_1p_{\mathrm{s}1}=0.6\times4\ 241\ \mathrm{Pa}=2\ 544.6\mathrm{Pa}$$

$$d_1=0.622\frac{p_{\mathrm{v}1}}{p_1-p_{\mathrm{v}1}}=0.622\times\frac{2\ 544.6\ \mathrm{Pa}}{(100\ 000-2\ 544.6)\mathrm{Pa}}=0.162\mathrm{kg/kg(干空气)}$$

$$p_{\mathrm{v}1}=x_\mathrm{v}p$$

所以

$$x_{\mathrm{v}1}=\frac{p_{\mathrm{v}1}}{p}=\frac{2\ 554.6\ \mathrm{Pa}}{0.1\times10^6\ \mathrm{Pa}}=0.025\ 5，\quad x_{\mathrm{a}1}=1-0.0255=0.9745$$

（1）压缩过程绝热

湿空气作为理想气体，所以

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = (30+273)\mathrm{K}\times\left(\frac{0.2\mathrm{MPa}}{0.1\mathrm{MPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 369.4\mathrm{K}$$

查水蒸气表：$T = 369.4\ \mathrm{K}$，$p_{\mathrm{s}} = 89.0\ \mathrm{kPa}$。假定压缩过程水蒸气和干空气质量不变，则

$x_{\mathrm{v2}} = x_{\mathrm{v1}}$

$$p_{\mathrm{v2}} = x_{\mathrm{v2}} p_2 = 0.025\ 5\times 0.2\times 10^6\,\mathrm{Pa} = 5\ 100\ \mathrm{Pa}$$

$$\varphi_2 = \frac{p_{\mathrm{v2}}}{p_{\mathrm{s2}}} = \frac{5\ 100\ \mathrm{Pa}}{89\ 000\ \mathrm{Pa}} = 0.057$$

$$d_2 = 0.622\frac{p_{\mathrm{v2}}}{p_2 - p_{\mathrm{v2}}} = 0.622\times\frac{5\ 100\ \mathrm{Pa}}{(200\ 000-5\ 100)\mathrm{Pa}} = 0.016\ 3\mathrm{kg/kg}(\text{干空气})$$

（2）压缩过程等温

仍假定压缩过程水蒸气和干空气质量不变，$x_{\mathrm{v2}} = x_{\mathrm{v1}}$，$p_{\mathrm{s2}} = 4\ 241\ \mathrm{Pa}$。则

$$p_{\mathrm{v2}} = x_{\mathrm{v2}} p_2 = 0.025\ 5\times 0.2\times 10^6\,\mathrm{Pa} = 5\ 100\ \mathrm{Pa} > p_{\mathrm{s2}}$$

假定错误，所以

$$p_{\mathrm{v2}} = p_{\mathrm{s2}} = 4\ 241\ \mathrm{Pa},\quad \varphi_2 = \frac{p_{\mathrm{v2}}}{p_{\mathrm{s2}}} = 1$$

$$d_2 = 0.622\frac{p_{\mathrm{v2}}}{p_2 - p_{\mathrm{v2}}} = 0.622\times\frac{4\ 241\ \mathrm{Pa}}{(200\ 000-4\ 241)\mathrm{Pa}} = 0.0135\mathrm{kg/kg}(\text{干空气})$$

12−17 烘干装置入口处湿空气 $t_1 = 20^{\circ}\mathrm{C}$、$\varphi_1 = 30\%$、$p = 0.1013\mathrm{MPa}$，加热到 $t_2 = 85^{\circ}\mathrm{C}$。试计算从湿物体中的吸收 1kg 水分的所需干空气质量和加热量。

解：$h-d$ 图中，$t_1 = 20^{\circ}\mathrm{C}$、$\varphi_1 = 30\%$ 两条等值线交于点 1（图 12−3），读得：$d_1 = 0.004\ 5\ \mathrm{kg}(\text{水蒸气})/\mathrm{kg}(\text{干空气})$、$h_1 = 31.4\ \mathrm{kJ/kg}(\text{干空气})$。

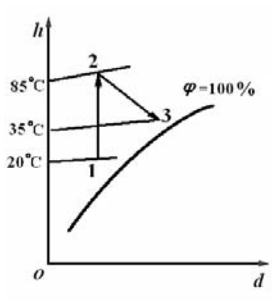


图 12−3 习题 12−17 附图

过程 1−2 为等 d 过程，与 $t_2 = 85^{\circ}\mathrm{C}$ 等温度线交点 2，读出

$h_2 = 96.3\ \mathrm{kJ/kg}(\text{干空气})$

过程 1−3 为等 h 过程，与 $t_3 = 35^\circ\text{C}$ 等温线交于 3，读出 $d_3 = 0.024\ \text{kg/kg(干空气)}$。

1kg 干空气吸收水分

$$\begin{aligned}\Delta d &= d_3 - d_1 \\ &= (0.024 - 0.004\ 5)\text{kg/kg(干空气)} = 0.019\ 5\ \text{kg/kg(干空气)}\end{aligned}$$

每吸收 1kg 水分需要干空气气量

$$m_a = \frac{1\text{kg}}{0.019\ 5\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}} = 51.3\ \text{kg(干空气)}$$

1kg 干空气加热量

$$q = h_2 - h_1 = (96.3 - 31.4)\text{kJ/kg(干空气)} = 64.9\ \text{kJ/kg(干空气)}$$

每吸收 1kg 水分需加热

$$Q = m_a q = 51.3\ \text{kg} \times 64.9\ \text{kJ/kg} = 3\ 329\ \text{kJ}$$

12−18 安装一台冷却塔供应某厂工艺用冷却水，已知热水流率为 190kg/s，温度为 40℃，设计出口处冷水水温为 29℃，流率为 190kg/s，湿空气进口参数，$p_1 = 0.1\text{MPa}$、$t_1 = 24^\circ\text{C}$、$\varphi_1 = 50\%$，流出时为 $t_2 = 31^\circ\text{C}$ 的饱和湿空气，为保持水流量稳定，向底部冷却水中充入补充水，补充水温度为 $t_l = 29^\circ\text{C}$，见图 12−4。若干空气和水蒸气的气体常数及比定压热容为 $c_{p,\text{v}} = 1.86\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$、$c_{p,\text{a}} = 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$、$R_{\text{g,a}} = 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$、$R_{\text{g,v}} = 462\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$。求：

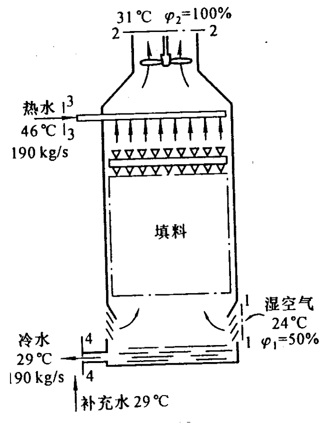


图 12−4 冷却塔示意图

（1）干空气质量流量 $q_{m,\text{a}}$；

（2）补充水质量流量 $q_{m,\text{w}}$。

解：（1）由 $t_1 = 24^\circ\text{C}$，查出 $p_s(t_1) = 2.984\ 6\ \text{kPa}$；$t_2 = 31^\circ\text{C}$，查出 $p_s(t_2) = 4.494\ 9\ \text{kPa}$。

$t_3 = 46^\circ\text{C}$ 时，$h_{\text{w}3} = h'(t_3) = 192.60\ \text{kJ/kg}$ $t_4 = 29^\circ\text{C}$ 时，$h_2 = h_{\text{w}4} = h'(t_4) = 121.50\ \text{kJ/kg}$

$$\begin{aligned}d_1 &= 0.622\frac{\varphi_1 p_s(t_1)}{p - \varphi_1 p_s(t_1)} \\ &= 0.622 \times \frac{0.5 \times 2.984\ 6\text{kPa}}{100\text{kPa} - 0.5 \times 2.984\ 6\text{kPa}} = 0.009\ 423\text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}\end{aligned}$$

$$h_1 = 1.005t_1 + d_1(2501 + 1.86t_1)$$
$$= 1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 24^\circ\text{C} + 0.009\ 423 \times [2\ 501\text{kJ/kg} +$$
$$1.86\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 24^\circ\text{C}] = 48.11\text{kJ/kg(干空气)}$$

$$d_2 = 0.622\frac{\varphi_2 p_s(t_2)}{p - \varphi_2 p_s(t_2)}$$
$$= 0.622 \times \frac{1 \times 4.494\ 9\text{kPa}}{100\text{kPa} - 1 \times 4.494\ 9\text{kPa}} = 0.029\ 27\text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$h_2 = 1.005t_2 + d_2(2501 + 1.86t_2)$$
$$= 1.005\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 31^\circ\text{C} + 0.029\ 27 \times [2\ 501\text{kJ/kg} +$$
$$1.86\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)} \times 31^\circ\text{C}] = 106.05\text{kJ/kg(干空气)}$$

由能量守衡方程 $q_{m,a}h_1 + q_{m3}h_{w3} + q_{m,w}h_w = q_{m,a}h_2 + q_{m4}h_{w4}$

$$q_{m,a} = \frac{q_{m4}h_{w4} - q_{m3}h_{w3} - q_{m,w}h_w}{h_1 - h_2}$$
$$= \frac{190\text{kg/s} \times 121.50\text{kJ/kg} - 190\text{kg/s} \times 192.6\text{kJ/kg} - 0.01985\text{kg/s} \times 121.50\text{kJ/kg}}{48.11\text{kJ/kg} - 106.05\text{kJ/kg}}$$
$$= 233.20\text{kg/s}$$

(2) 补充水量

$$q_{m,w} = q_{m,a}(d_2 - d_1)$$
$$= 233.2\text{kg/s} \times (0.02927 - 0.009423)\text{kg/kg(干空气)} = 4.63\text{kg/s}$$

12−19 实验室需安装空调系统，它由冷却去湿器和加热器组成，如图 12−5 所示，已知入口空气参数为 $p_1 = 0.1\text{MPa}$、$t_1 = 32^\circ\text{C}$、$\varphi_1 = 80\%$，体积流率 $q_V = 800\text{m}^3/\text{min}$，经冷却盘管冷却到饱和湿空气后，继续冷却到 10 ℃，这时有冷凝水所出，凝水量 $q_{m,w} = \Delta q_{m,v} = q_{m,a}(d_1 - d_2)$，然后进入加热器，加热到相对湿度 $\varphi_3 = 40\%$ 离开空调系统。求：

（1）d_1、h_1、d_2、h_2；

（2）在冷却去湿器中放热量 Φ_{1-2} 及加热器中吸热量 Φ_{2-3}；

（3）凝水流率 $q_{m,w}$。

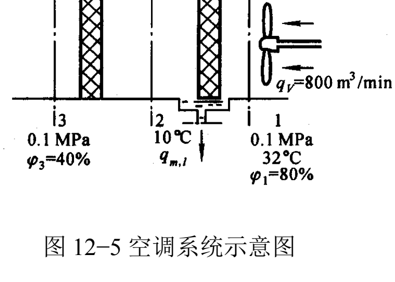


图 12−5 空调系统示意图

解：（1）确定各点参数

查得 $t_1 = 32^\circ\text{C}$，$p_{s1} = 4.753\text{kPa}$；$t_2 = 10^\circ\text{C}$，$p_{s2} = 1.227\text{kPa}$，$h_2 = 29.5\text{kJ/kg(干空气)}$。

$$d_1=0.622\frac{\varphi_1 p_{s1}}{p-\varphi_1 p_{s1}}=0.622\times\frac{0.8\times4.753\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}-0.8\times4.753\ \text{kPa}}$$
$$=0.024\ 59\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$\{h_1\}_{\text{kJ/kg}}=1.005\{t_1\}_{^\circ\text{C}}+d_1\left(2501+1.86\{t_1\}_{^\circ\text{C}}\right)$$
$$=1.005\times32+0.024\ 95\times(2\ 501+1.86\times32)=95.123$$

$$h_1=95.123\ \text{kJ/kg(干空气)}$$

$$d_2=0.622\frac{p_{v2}}{p-p_{v2}}$$
$$=0.622\times\frac{1.227\ \text{kPa}}{100\ \text{kPa}-1.227\ \text{kPa}}=0.007\ 727\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$\{h_2\}_{\text{kJ/kg}}=1.005\{t_2\}_{^\circ\text{C}}+d_2\left(2501+1.86\{t_2\}_{^\circ\text{C}}\right)$$
$$=1.005\times10+0.007\ 727\times(2\ 501+1.86\times10)=29.52$$

$$h_2=29.52\ \text{kJ/kg(干空气)}$$

（2）热量

$$q_{m,\text{a}}=\frac{(p-\varphi_1 p_{s1})q_V}{R_{\text{g,a}}T_1}=\frac{(100\ \text{kPa}-0.8\times4.753\ \text{kPa})\times800\ \text{m}^3/\text{s}}{0.287\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times305\ \text{K}}$$
$$=879.17\ \text{kg/s}$$

$$\Phi_{1-2}=q_{m,\text{a}}(h_1-h_2)+q_{m,\text{a}}(d_1-d_2)h_{\text{w},2}$$

右侧第一项为冷却放热量，第二项为冷凝水带走的热量，

$$h_{\text{w},2}\approx c_{\text{w}}t_2=4.187\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}\times10^\circ\text{C}=41.87\ \text{kJ/kg}$$

$$\Phi_{1-2}=879.17\ \text{kg/min}\times[(95.123-29.53)\text{kJ/kg}+$$
$$(0.02459-0.007727)\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}\times41.87\ \text{kJ/kg}]$$
$$=58\ 288.139\ \text{kJ / min}=971.47\ \text{kJ/s}$$

由 $d_3=d_2=0.007\ 727\ \text{kg/kg(干空气)}$， $d_3=0.622\dfrac{p_{v3}}{p-p_{v,3}}$ 解得 $p_{v,3}=1.227\ \text{kPa}$ 。由 $p_{s,3}=\dfrac{p_{v,3}}{\varphi_3}=\dfrac{1.227\ \text{kPa}}{0.4}=3.067\ 6\ \text{kPa}$，查得 $t_3(p_{s,3})=24.46\ ^\circ\text{C}$ 。

$$\{h_3\}_{\text{kJ/kg}}=1.005\{t_3\}_{^\circ\text{C}}+d_3\left(2501+1.86\{t_3\}_{^\circ\text{C}}\right)$$
$$=1.005\times24.46+0.007\ 727\times(2\ 501+1.86\times24.46)=44.26$$

$$h_3=44.26\ \text{kJ/kg(干空气)}$$

$$\Phi_{2-3}=q_{m,\mathrm{a}}(h_3-h_2)=879.17\ \mathrm{kg/min}\times(44.26-29.53)\ \mathrm{kJ/kg}$$
$$=12\ 950\ \mathrm{kJ/min}=215.8\ \mathrm{kJ/s}$$

（3）凝水流量

$$q_{m,\mathrm{w}}=\Delta q_{m,\mathrm{v}}=q_{m,\mathrm{a}}(d_1-d_2)$$
$$=879.17\ \mathrm{kg/min}\times(0.024\ 59-0.007\ 727)\mathrm{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$
$$=14.83\ \mathrm{kg/min}=0.247\ \mathrm{kg/s}$$

12−20 编写一个程序，用来确定大气压力 p_b 下湿空气的性质。

（1）按输入 t、φ、p_b，输出 d、h、p_v、t_d、v；

（2）按输入 t、t_w、p_b 输出 h、d、p_v、φ、t_d、v。

解：（1）输入 $R_{\mathrm{g,a}}$、$R_{\mathrm{g,v}}$、$t(^\circ\mathrm{C})$、$\varphi(\%)$、$p_\mathrm{b}(\mathrm{kPa})$

$$\{p_\mathrm{s}\}_{\mathrm{kPa}}=\frac{2}{15}\exp\left[18.5916-\frac{3991.11}{\left(\{t\}_{^\circ\mathrm{C}}+233.84\right)}\right]$$

$$d=0.622\frac{\varphi p_\mathrm{s}}{p_\mathrm{b}-\varphi p_\mathrm{s}}\mathrm{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$$

$$\{h\}_{\mathrm{kJ/kg(干空气)}}=1.005\{t\}_{^\circ\mathrm{C}}+d\left(2501+1.86\{t\}_{^\circ\mathrm{C}}\right)$$

$$p_\mathrm{v}=\varphi p_\mathrm{s}$$

$$\{t_\mathrm{d}\}_{^\circ\mathrm{C}}=\frac{3\ 991.11}{18.591\ 6-\ln\frac{15}{2}\{p_\mathrm{v}\}_{\mathrm{kPa}}}-233.84$$

$$R_\mathrm{g}=\frac{1}{1+d}R_{\mathrm{g,a}}+\frac{d}{1+d}R_{\mathrm{g,v}},\quad v=\frac{R_\mathrm{g}(t+273)}{p_\mathrm{b}}(1+d)$$

输出 d、h、p_v、t_d、v

（2）输入 $R_{\mathrm{g,a}}$、$R_{\mathrm{g,v}}$、$t(^\circ\mathrm{C})$、$t_\mathrm{w}(^\circ\mathrm{C})$、$p_\mathrm{b}(\mathrm{kPa})$

$$\{h_0\}_{\mathrm{kJ/kg(干空气)}}=-7.495628+0.7937629\{t_\mathrm{w}\}_{^\circ\mathrm{C}}+16.93575\exp\left(0.053106\{t_\mathrm{w}\}_{^\circ\mathrm{C}}\right)$$

若 $p_\mathrm{b}\neq p_0(p_0=101.3\ \mathrm{kPa})$ 则按下式修改

$$\{h\}_{\mathrm{kJ/kg(干空气)}}=1.005\{t_\mathrm{w}\}_{^\circ\mathrm{C}}\left(1-\frac{101.3}{\{p_\mathrm{b}\}_{\mathrm{kPa}}}\right)+\{h_0\}_{\mathrm{kJ/kg(干空气)}}\left(\frac{101.3}{\{p_\mathrm{b}\}_{\mathrm{kPa}}}\right)$$

$$d_{\rm s}=\frac{h-1.005t}{(2501+1.86t)}$$

再由$1.005t+d(2501+1.86t)+4.1868t_{\rm w}(d_{\rm s}-d)=h(t_{\rm w})$解出$d$。

$$\{p_{\rm v}\}_{\rm kPa}=\frac{\dfrac{\{d\}_{\rm kg/kg(干空气)}}{0.622}\{p_{\rm b}\}_{\rm kPa}}{1+\dfrac{\{d\}_{\rm kg/kg(干空气)}}{0.622}}$$

$$\{p_{\rm s}\}_{\rm kPa}=\frac{2}{15}\exp\left[18.591\ 6-3\ 991.11\Big/\left(\{t\}_{^\circ\rm C}+233.847\right)\right]$$

$$\varphi=\frac{p_{\rm v}}{p_{\rm s}(t)}，\ \{t_{\rm d}\}_{^\circ\rm C}=\frac{3\ 991.11}{18.591\ 6-\ln\dfrac{15}{2}\{p_{\rm v}\}_{\rm kPa}}-233.84$$

$$R_{\rm g}=\frac{R_{\rm g,a}+R_{\rm g,v}d}{1+d}，\ v=\frac{R_{\rm g}T}{p_{\rm b}}(1+d)$$

输出d、h、$p_{\rm v}$、$t_{\rm d}$、v、φ。

12−21 利用上题确定湿空气性质的程序，编写一个计算冷却去湿过程的放热量Φ_{1-2}和加热量Φ_{2-3}的程序，用来计算习题 12−18。

解：解题思路和计算公式：

输入：t_1、t_2、φ_1、$\varphi_2(=1)$、φ_3、$p_{\rm b}$、q_V。

$$\{p_{\rm s}\}_{\rm kPa}=\frac{2}{15}\exp\left[18.591\ 6-3\ 991.11\Big/\left(\{t\}_{^\circ\rm C}+232.84\right)\right]$$

$$d=0.622\frac{\varphi p_{\rm s}}{p_{\rm b}-\varphi p_{\rm s}}$$

代入t_1、φ_1、t_2、φ_2得$p_{\rm s1}$、$p_{\rm s2}$、d_1、d_2。

$$\{h\}_{\rm kJ/kg(干空气)}=1.005\{t\}_{^\circ\rm C}+d\left(2\ 501+1.86\{t\}_{^\circ\rm C}\right)$$

代入t_1、d_1、t_2、d_2，得h_1、h_2。

$$q_{m,\rm a}=\frac{(p_{\rm b}-\varphi_1 p_{\rm s1})q_V}{R_{\rm g,a}T_1}$$

$$\Phi_{1-2}=q_{m,\rm a}[h_1-h_2+(d_1-d_2)c_{\rm w}t_2]$$

$$p_{v3}=\frac{\frac{d_3}{0.622}p_b}{1+\frac{d_3}{0.622}}$$

$$p_{s3}=\frac{p_{v3}}{\varphi_3}$$

$$\{t_3\}_{^\circ C}=\frac{3\ 991.11}{18.591\ 6-\ln\frac{15}{2}\{p_{s3}\}_{kPa}}-233.84$$

$$\{h\}_{kJ/kg(干空气)}=1.005\{t\}_{^\circ C}+d\left(2\ 501+1.86\{t\}_{^\circ C}\right)$$

$$\Phi_{2-3}=q_{m,a}(h_3-h_2)$$

$$q_{m,w}=q_{m,a}(d_1-d_3)$$

输出：Φ_{1-2}、Φ_{2-3}、$q_{m,w}$。

第十三章 化学热力学基础

13–1 已知反应 $C+\frac{1}{2}O_2=CO$ 在 298 K 的定压热效应为–110 603 J/mol，求同温度下的定容热效应。

解：由 $Q_p-Q_V=RT\Delta n$

$$Q_V=Q_p-RT\Delta n$$
$$=-110\ 603J+8.314\ 5J/(mol\cdot K)\times 298K\left(1-\frac{1}{2}\right)mol=111\ 841.9J$$

13–2 已知定温（298K）定压（101 325Pa）下，

$$CO+\frac{1}{2}O_2\xrightarrow{Q}CO_2 \qquad Q=-283\ 190\ \ J/mol$$

$$H_2+\frac{1}{2}O_2\xrightarrow{Q}H_2O_{(g)} \qquad Q=-241\ 997\ \ J/mol$$

试确定下列反应的热效应

$$H_2O_{(g)}+CO\xrightarrow{Q}H_2+CO_2$$

解：根据条件 $CO+\frac{1}{2}O_2\rightarrow CO_2 \qquad Q_1=-283190J/mol$

$$H_2O_{(g)}\rightarrow H_2+\frac{1}{2}O_2 \qquad Q_2=241997J/mol$$

所以 $$H_2O_{(g)} + CO \rightarrow H_2 + CO_2$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = -283\ 190\ \text{J/mol} + 241\ 997\ \text{J/mol} = -41\ 193\ \text{J/mol}$$

13–3 在煤气发生炉的还原反应层中二氧化碳的还原反应为：

$$CO_2 + C = 2CO + Q_4$$

据 $C + O_2 = CO_2 + Q_1 \qquad Q_1 = -393\ 791\ \text{J/mol}$

$$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2 + Q_2 \qquad Q_2 = -283\ 190\ \text{J/mol}$$

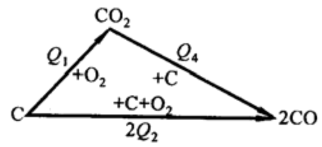


图 13-1 习题 13–3 附图

参见图 13−1 利用赫斯定律，求反应热效应。

解 $$Q_4 = -Q_1 + 2Q_2 = -(-393791\text{J/mol}) + 2\times(-110601\text{J/mol}) = 172589\text{J/mol}$$

13–4 在 298K、1atm 下反应 $CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$ 的定压热效应为 $Q_P = -283\ 190\ \text{J/mol}$，试求在 2 000 K 和 1atm 下，这一反应的定压热效应。

解：对于反应 $CO+\frac{1}{2}O_2=CO_2$ 应用基尔希霍夫定律

$$Q_T = \Delta H^0 + \left[\sum n_k (H_{\text{m},k} - H^0{}_{\text{m},k})\right]_{pr} - \left[\sum n_k (H_{\text{m},k} - H^0{}_{\text{m},k})\right]_{\text{Re}}$$

其中

$$\Delta H^0 = \Delta H^0_{\text{f,CO}_2} - \Delta H^0_{\text{f,CO}} - \frac{1}{2}\Delta H^0_{\text{f,O}_2}$$

据附表，$\Delta H^0_{\text{f,CO}_2} = -393552\text{J/mol}$，$\Delta H^0_{\text{f,CO}} = -110527\text{J/mol}$，故

$$\Delta H^0 = 1\text{mol}\times[-393552\text{J/mol} - (-110527)\text{J/mol}] = -283025\text{J}$$

查气体热力性质表

$$H_{m,\text{CO}_2} - H^0_{\text{m,CO}_2} = 100811.2\text{J/mol} - 9624.0\text{J/mol} = 91447.2\text{J/mol}$$

$$H_{m,\text{CO}} - H^0_{\text{m,CO}} = 65413.9\text{J/mol} - 8671.0\text{J/mol} = 56742.9\text{J/mol}$$

$$H_{m,\text{O}_2} - H^0_{\text{m,O}_2} = 67857.5\text{J/mol} - 8683.0\text{J/mol} = 59174.5\text{J/mol}$$

$$Q_T = -28302\text{J} + 1\text{mol}\times 91447.2\text{J/mol} - 1\text{mol}\times 56742.9\text{J/mol} - \frac{1}{2}\text{mol}\times 5974.5\text{J/mol} = -277908.0\text{J}$$

13–5 利用下述方法计算水蒸气在 3.5MPa，300℃时的焓（相对于 0.1MPa，25℃）。

（1）假定水蒸气为理想气体，其比定压热容为

$$c_{p,0}=1.79+0.107\theta+0.586\theta^2-0.20\theta^3，其中\ \theta=\overline{T}/1000$$

（2）假定水蒸气为理想气体，利用气体热力性质表；

（3）利用通用余焓图。

解：由于工质在状态（p,T）的焓是标准生成焓和从标准状态到指定状态的焓差之和，即 $H_{\mathrm{m}}=\Delta H_{\mathrm{f}}^0+(H_{p,T}-H^0)$，因此上述各种途径的差异仅在于 $(H_{p,T}-H^0)$ 的不同。查标准生成焓表，水的 $\Delta H_{\mathrm{f(g)}}^0=-241\ 826\ \mathrm{J/mol}$。

（1）
$$\overline{T}=\frac{T_1+T_2}{2}=\frac{298.15\mathrm{K}+573.15\mathrm{K}}{2}=435.65\mathrm{K}$$

$$\theta=\frac{\overline{T}}{1000}=\frac{435.65\mathrm{K}}{1000}=0.43565\mathrm{K}$$

$$\begin{aligned}c_{p,0}&=1.79+0.107\times0.43565\mathrm{K}+0.586\times(0.43565\mathrm{K})^2-0.20\times(0.43565\mathrm{K})^3\\&=1.9313\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_{p,T}-H^0&=Mc_{p,0}\Delta T\\&=18.02\times10^{-3}\,\mathrm{kg/mol}\times1\ 931.3\mathrm{J/(kg\cdot K)}\times(573.15-298.15)\mathrm{K}\\&=9\ 571\ \mathrm{J/mol}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_{\mathrm{m}}&=\Delta H_{\mathrm{f}}^0+(H_{p,T}-H^0)=-241\ 826\ \mathrm{J/mol}+9\ 571\ \mathrm{J/mol}\\&=-232\ 255\ \mathrm{J/mol}\end{aligned}$$

（2）查气体热力性质表，$T=298.15\mathrm{K}$，$H_{\mathrm{m}}=9\ 904.0\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$；$T=573.15\mathrm{K}$，$H_{\mathrm{m}}=19\ 445.8\ \mathrm{J/(mol\cdot K)}$。

$$\begin{aligned}H_{\mathrm{m}}&=\Delta H_{\mathrm{f}}^0+(H_{p,T}-H^0)\\&=-241\ 826\mathrm{J/mol}+19\ 445.8\mathrm{J/mol}-9\ 904.0\mathrm{J/mol}=-232\ 284\ \mathrm{J/mol}\end{aligned}$$

（3）据余焓概念，有

$$\begin{aligned}H_{\mathrm{m}}&=\Delta H_{\mathrm{f}}^0+(H_{p,T}-H^0)\\&=\Delta H_{\mathrm{f}}^0+RT_{\mathrm{cr}}\left[\frac{(H_{\mathrm{m}}^*-H_{\mathrm{m}})_1}{RT_{\mathrm{cr}}}-\frac{(H_{\mathrm{m}}^*-H_{\mathrm{m}})_2}{RT_{\mathrm{cr}}}\right]+(H_{\mathrm{m},2}^*-H_{\mathrm{m},1}^*)\end{aligned}$$

因 0.1MPa，25℃即为标准状态，所以 $(H_{\mathrm{m}}^*-H_{\mathrm{m}})_1=0$，$H_{\mathrm{m},2}^*-H_{\mathrm{m},1}^*$ 即上述（2）的 $H_{p,T}-H^0$

$$H_{\mathrm{m},2}^*-H_{\mathrm{m},1}^*=19\ 445.8\mathrm{J/mol}-9\ 904.0\mathrm{J/mol}=9\ 541.8\ \mathrm{J/mol}$$

$$p_r=\frac{p}{p_{\mathrm{cr}}}=\frac{3.5\mathrm{MPa}}{22.1\mathrm{MPa}}=0.158，\ T_r=\frac{T}{T_{\mathrm{cr}}}=\frac{573.15\mathrm{K}}{647.3\mathrm{K}}=0.886$$

利用通用余焓图查得 $(H_{\rm m}^* - H_{\rm m})_2 / RT_{\rm cr} = 0.24$，所以

$$(H_{\rm m}^* - H_{\rm m})_2 = 0.24RT_{\rm cr}$$
$$= 0.24 \times 8.314\ 5\text{J/(mol}\cdot\text{K)} \times 647.3\text{K} = 1\ 291.7\ \text{J/mol}$$

$$H_{\rm m} = \Delta H_{\rm f}^0 + (H_{\rm m,2}^* - H_{\rm m,1}^*) - \frac{(H_{\rm m}^* - H_{\rm m})_2}{RT_{\rm cr}}$$
$$= -241\ 826\text{J/mol} + 9\ 541.8\text{J/mol} - 1\ 291.7\text{J/mol} = -233\ 576\text{J/mol}$$

13–6 甲烷稳态稳流在燃烧室内燃烧，反应式如下

$$\rm CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O(\mathit{l})$$

若反应物和产物均为 0.1MPa、25℃，确定进入燃烧室的甲烷在燃烧过程中的放热量。

解：取燃烧室为控制体积，反应在标准状态下进行

$$Q_p^0 = \Delta H^0 = (\sum_k n_k \Delta H_{{\rm f},k}^0)_{\rm Pr} - (\sum_j n_j \Delta H_{{\rm f},j}^0)_{\rm Re}$$
$$= \Delta H_{\rm f,CO_2}^0 + 2\Delta H_{\rm f,H_2O_{(l)}}^0 - (\Delta H_{\rm f,CH_4}^0 + 2\Delta H_{\rm f,O_2}^0)$$

氧的标准生成焓为零，由附表查得有关物质的标准生成焓为 $\Delta H_{\rm f,CO_2}^0 = -393\ 522\ \text{J/mol}$，$\Delta H_{\rm f,H_2O_{(l)}}^0 = -285\ 830\ \text{J/mol}$，$\Delta H_{\rm f,CH_4}^0 = -74\ 873\ \text{J/mol}$。代入上式，得

$$Q_p^0 = -393\ 522\ \text{J/mol} + 2 \times (-285\ 830\ \text{J/mol}) - (-74\ 873\ \text{J/mol})$$
$$= -890\ 309\ \text{J/mol}(= -55\ 506\ \text{kJ/kg})$$

13–7 1mol 气态乙烯和 3mol 氧的混合物在 25℃下刚性容器内反应，试确定产物冷却到 600K 时系统放热量。

解：乙烯和氧的化学反应式为

$$\rm C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O(g)$$

由于容器刚性，所以 $W = 0$，据热力学第一定律

$$Q = U_{\rm Pr} - U_{\rm Re}$$

$$U_{\rm Pr} = \sum_{\rm Pr} n(H - RT) = \sum_{\rm Pr} n(\Delta H_{\rm f}^0 + \Delta H_{\rm m} - RT)$$
$$= \left[n(\Delta H_{\rm f}^0 + \Delta H_{\rm m} - RT)\right]_{\rm H_2O} + \left[n(\Delta H_{\rm f}^0 + \Delta H_{\rm m} - RT)\right]_{\rm CO_2}$$

$$U_{\rm Re} = \sum_{\rm Re} n(H - RT)$$
$$= \left[n(\Delta H_{\rm f}^0 + \Delta H_{\rm m} - RT)\right]_{\rm C_2H_4} + \left[n(\Delta H_{\rm f}^0 + \Delta H_{\rm m} - RT)\right]_{\rm O_2}$$

查得 $\Delta H^0_{\mathrm{f\,H_2O(g)}} = -241\ 826\ \mathrm{J/mol}$， $\Delta H^0_{\mathrm{f\,CO_2}} = -393\ 522\ \mathrm{J/mol}$， $\Delta H^0_{\mathrm{f\,C_2H_4O}} = +52\ 467\ \mathrm{J/mol}$。

从 298K 到 600K，$\Delta H_{\mathrm{m,CO_2}} = 12\ 907\ \mathrm{J/mol}$，$\Delta H_{\mathrm{m,H_2O}} = 10\ 501\ \mathrm{J/mol}$。

$$U_{\mathrm{Re}} = \left[n(\Delta H^0_{\mathrm{f}} - RT)\right]_{\mathrm{C_2H_4}} + n(-RT)_{\mathrm{O_2}}$$
$$= 1\mathrm{mol} \times 52\ 467\mathrm{J/mol} - 4\mathrm{mol} \times 8.3145\mathrm{J/(mol \cdot K)} \times 298.15\mathrm{K} = 42\ 551\mathrm{J}$$
$$U_{\mathrm{Pr}} = \left[n(\Delta H^0_{\mathrm{f}} + \Delta H_{\mathrm{m}} - RT)\right]_{\mathrm{H_2O}} + \left[n(\Delta H^0_{\mathrm{f}} + \Delta H_{\mathrm{m}} - RT)\right]_{\mathrm{CO_2}}$$
$$= 2\mathrm{mol} \times (-241826 + 10501)\mathrm{J/mol} + 2\mathrm{mol} \times (-393522 + 12907)\mathrm{J/mol} -$$
$$4\mathrm{mol} \times 8.314\ 5\mathrm{J/(mol \cdot K)} \times 600\mathrm{K} = -1\ 243\ 835\mathrm{J}$$

$$Q = U_{\mathrm{Re}} + U_{\mathrm{Pr}} = -42\ 551\mathrm{J} - 1\ 243\ 835\mathrm{J} = 1\ 286\ 386\ \mathrm{J}$$

13−8 计算气态丙烷 500K 时的燃烧焓。燃烧过程中形成的水为气态，298K 到 500K 间丙烷的平均比定压热容为 2.1 kJ/(kg·K)。

解：燃烧方程

$$\mathrm{C_3H_{8(g)}} + 5\mathrm{O_2} \to 3\mathrm{CO_2} + 4\mathrm{H_2O_{(g)}}$$

$$\Delta H_{\mathrm{C}} = n_{\mathrm{CO_2}}\left[\Delta H^0_{\mathrm{f}} + (H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})\right]_{\mathrm{CO_2}} + n_{\mathrm{H_2O}}\left[\Delta H^0_{\mathrm{f}} + (H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})\right]_{\mathrm{H_2O}}$$
$$- n_{C_3H_8}\left[\Delta H^0_{\mathrm{f}} + (H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})\right]_{\mathrm{C_3H_8}} - n_{\mathrm{O_2}}(H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})_{\mathrm{O_2}}$$

查资料，25℃时的生成焓：$\left(\Delta H^0_{\mathrm{f}}\right)_{\mathrm{C_3H_8}} = -103\ 900\ \mathrm{J/mol}$，$\left(\Delta H^0_{\mathrm{f}}\right)_{\mathrm{CO_2}} = -393\ 522\ \mathrm{J/mol}$，$\left(\Delta H^0_{\mathrm{f}}\right)_{\mathrm{H_2O_{(g)}}} = -241\ 826\ \mathrm{J/mol}$；

查气体热力性质表，从 298K 到 500K 的焓差

$$(H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})_{\mathrm{CO_2}} = 8\ 304.9\ \mathrm{J/mol}，(H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})_{\mathrm{H_2O}} = 6\ 926.2\ \mathrm{J/mol}，$$

$$(H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})_{\mathrm{O_2}} = 6\ 084.3\ \mathrm{J/mol}$$

$$(H_{\mathrm{m,500}} - H^0_{\mathrm{m}})_{\mathrm{C_3H_8}} = C_{p,\mathrm{m}}\Delta T = 2\ 100\mathrm{J/(kg \cdot K)} \times 44.09 \times 10^{-3}\mathrm{kg/mol} \times$$
$$(500 - 298.15)\mathrm{K} = 19\ 615.0\ \mathrm{J/mol}$$

$$\Delta H_{\mathrm{C}} = 3\mathrm{mol} \times [(-393\ 522\mathrm{J/mol}) + 8\ 304.9\mathrm{J/mol}] + 4\mathrm{mol} \times$$
$$[(-241\ 826\mathrm{J/mol}) + 6\ 926.2\mathrm{J/mol}] - 1\mathrm{mol} \times [(-103\ 900\mathrm{J/mol}) +$$
$$19\ 615.0\mathrm{J/mol}] - 5\mathrm{mol} \times 6\ 084.3\mathrm{J/mol} = -2\ 041\ 387\mathrm{J/mol}$$

13−9 试确定初温为 400K 的甲烷气体，过量空气系数为 2.5 在 1atm 下定压完全燃烧时的绝热理论燃烧温度。

解：过量空气系数为 250%时，甲烷的燃烧反应方程式

$$\mathrm{CH_4+5O_2+5\times3.76N_2\rightarrow CO_2+2H_2O_{(g)}+3O_2+18.8N_2}$$

据式（13-11）$-\Delta H^0=(H_{ad}-H_b)-(H_1-H_a)$

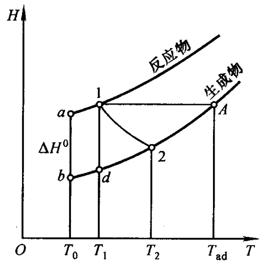


图 13-2 习题 13-9 附图

查附表，得甲烷的燃烧焓 $\Delta H_C^0=-50010\text{kJ/kg}$，故甲烷

$$\Delta H^0=M\Delta H_C^0=16.043\times10^{-3}\text{kg/mol}\times(-50010\text{kJ/kg})=-802310.4\text{J/mol}$$

H_b 为生成物在 298.15K 时的焓，由附表查出

$$H_{\mathrm{m,CO_2}}=964.0\ \text{J/mol}，\ H_{\mathrm{m,H_2O}}=9\ 904.0\text{J}\ /\text{mol}，$$

$$H_{\mathrm{m,O_2}}=8\ 683.0\ \text{J/mol}，\ H_{\mathrm{m,N_2}}=8\ 670.0\ \text{J/mol}$$

$$\begin{aligned}H_b&=\left(\sum n_kH_{\mathrm{m},k}\right)_{pr}=n_{\mathrm{CO_2}}\times H_{\mathrm{m,CO_2}}+n_{\mathrm{H_2O}}\times H_{\mathrm{m,H_2O}}+n_{\mathrm{O_2}}\times H_{\mathrm{m,O_2}}+n_{\mathrm{N_2}}\times H_{\mathrm{m,N_2}}\\&=1\text{mol}\times9\ 364.0\text{J/mol}+2\text{mol}\times9\ 904.0\text{J/mol}+3\text{mol}\times8\ 683.0\text{J/mol}+\\&\quad 18.8\text{mol}\times8\ 670.0\text{J/mol}=218\ 217\text{J}\end{aligned}$$

由同表查出 400K 时

$$H_{\mathrm{m,O_2,400K}}=11\ 708.9\ \text{J/mol}，\ H_{\mathrm{m,N_2,400K}}=11\ 640.4\ \text{J/mol}$$

$$H_{\mathrm{m,CH_4,400K}}=13\ 888.9\ \text{J/mol}，\ H_{\mathrm{m,CH_4,298.15K}}=11\ 640.4\ \text{J/mol}$$

$$\begin{aligned}H_1-H_a&=n_{\mathrm{CH_4}}(H_{\mathrm{m,400K}}-H_{\mathrm{m,298.15K}})_{\mathrm{CH_4}}+n_{\mathrm{O_2}}(H_{\mathrm{m,400K}}-H_{\mathrm{m,298.15K}})_{\mathrm{O_2}}+\\&\quad n_{\mathrm{N_2}}(H_{\mathrm{m,400K}}-H_{\mathrm{m,298.15K}})_{\mathrm{N_2}}\\&=1\text{mol}\times(13\ 888.9-10\ 018.7)\text{J/mol}+5\text{mol}\times(11\ 708.9-\\&\quad 8\ 683.0)\text{J/mol}+18.8\text{mol}\times(11\ 640.4-8\ 670.0)\text{J/mol}\\&=74\ 838.7\text{J}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_{ad}&=(H_1-H_a)+H_b-\Delta H^0\\&=74\ 838.7\text{J/mol}+218\ 217\text{J/mol}+802\ 310.4\text{J/mol}=1\ 095\ 366.1\ \text{J}\\&=n_{\mathrm{CO_2}}H_{\mathrm{m,CO_2},T_{\mathrm{ad}}}+n_{\mathrm{H_2O}}H_{\mathrm{m,H_2O},T_{ad}}+n_{\mathrm{O_2}}H_{\mathrm{m,O_2},T_{\mathrm{ad}}}+n_{\mathrm{N_2}}H_{\mathrm{m,N_2},T_{\mathrm{ad}}}\end{aligned}$$

取 T_{ad}=1410K，得

$$\begin{aligned}H_{\mathrm{ad}}&=1\text{mol}\times65\ 844.4\ \text{J/mol}+2\text{mol}\times53\ 869.4\ \text{J/mol}+\\&\quad 3\text{mol}\times46\ 000.1\text{J/mol}+18.8\text{mol}\times43\ 954.7\text{J/mol}=1\ 137\ 932.4\text{J}\end{aligned}$$

与 1095366.1J 有较大误差。取 T_{ad}=1400K

$$\begin{aligned}H_{\mathrm{ad}}&=1\ \text{mol}\times65\ 263.1\ \text{J/mol}+2\ \text{mol}\times53\ 403.6\ \text{J/mol}+\\&\quad 3\text{mol}\times45\ 635.9\text{J/mol}+18.8\text{mol}\times43\ 607.8\text{J/mol}=1\ 037\ 532.8\text{J}\end{aligned}$$

直至取 T_{ad}=1405K，得 1 087 732.6 J，因

$$\frac{1\ 095\ 366.1\ \text{J}-1\ 087\ 732.6\ \text{J}}{1\ 095\ 366.1\ \text{J}}=0.007$$

误差足够小，故取 $T_{ad}=1\ 405\ \text{K}$。

13–10 用三分氢气和一分氮气组成的混合气生产氨，在 400℃、10atm 下化学平衡时产生 3.85％的氨（体积百分比）。求：

（1）反应 $3H_2+N_2 \rightleftharpoons 2NH_3$ 在 400℃时的平衡常数 K_p；

（2）相同温度下要得到 5％氨时的反应总压力；

（3）在 400℃、压力为 50 atm 下达到化学平衡时求氨的体积比（认为 K_p 不随压力而变）。

解：对反应 $3H_2+N_2 \rightleftharpoons 2NH_3$，每 mol$NH_3$ 中需 $\frac{3}{2}$molH_2 和 $\frac{1}{2}$molN_2。

（1）若设平衡时 NH_3 物质的量为 n，则 H_2 为 $3-\frac{3}{2}n$，N_2 为 $1-\frac{1}{2}n$。反应式应为

$$3H_2+N_2 \rightleftharpoons \left(3-\frac{3}{2}n\right)H_2+\left(1-\frac{1}{2}n\right)N_2+nNH_3$$

平衡时总物质的量

$$N=3-\frac{3}{2}n+1-\frac{1}{2}n+n=4-n$$

据题意，NH_3 的体积比为 3.85%，按理想气体性质即为摩尔分数，所以

$$x_{NH_3}=\frac{n}{4-n}=0.0385\text{，即 } n=0.1483\text{；}N=3.8517$$

$$x_{H_2}=\frac{3-\frac{3}{2}\times0.1483}{3.8517}=0.7211\text{，}\quad x_{N_2}=\frac{1-\frac{1}{2}\times0.1483}{3.8517}=0.2404$$

$$p_{NH_3}=x_{NH_3}p=0.385p\text{；}\ p_{H_2}=x_{H_2}p=0.7211p\text{；}\ p_{N_2}=x_{N_2}p=0.2404p$$

$$K_p=\frac{p_{NH_3}^2}{p_{H_2}^3p_{N_2}}=\frac{(0.0385p)^2}{(0.7211p)^3\times0.2404p}=1.664\times10^{-4}$$

（2）由（1），若 NH_3 的体积比为 5%，则 $\frac{n}{4-n}=0.05$ 可得 $n=0.190$，$N=3.810$。此时

$$x_{H_2}=\frac{3-\frac{3}{2}\times0.19}{3.810}=0.7127\text{，}\quad x_{N_2}=0.2373$$

$$n_{H_2}=3-\frac{3}{2}\times0.190=2.715\text{，}\quad n_{N_2}=1-\frac{1}{2}n=0.905$$

$$K_p=\frac{p_{\mathrm{NH_3}}^2}{p_{\mathrm{H_2}}^3 p_{\mathrm{N_2}}}=\frac{n_{\mathrm{NH_3}}^2}{n_{\mathrm{H_2}}^3 n_{\mathrm{N_2}}^1}\left(\frac{p}{n}\right)^{2-3-1}=\frac{0.19^2}{2.715^3\times 0.905}\left(\frac{p}{3.81}\right)^{-2}$$

$$p=\sqrt{\frac{0.19^2\times 3.81^2}{2.715^3\times 0.905\times 1.644\times 10^{-4}}}=13.27\mathrm{atm}$$

（3）由 $$K_p=\frac{{n_{\mathrm{NH_3}}}^2}{\left(3-\frac{3}{2}n_{\mathrm{NH_3}}\right)^3\left(1-\frac{1}{2}n_{\mathrm{NH_3}}\right)^1}\left(\frac{p}{4-n_{\mathrm{NH_3}}}\right)^{-2}$$

将 $p=50\mathrm{atm}$、$K_p=1.664\times 10^{-4}$ 代入解得：$n_{\mathrm{NH_3}}=0.5228$

$$x_{\mathrm{NH_3}}=\frac{n_{\mathrm{NH_3}}}{4-n_{\mathrm{NH_3}}}=\frac{0.5228}{4-0.5228}=0.1504$$，即体积比。

13–11 1 mol CO 和 4.76mol 的空气反应，在 1atm、300K 下达到化学平衡。试求平衡时各种气体的组成。

解：CO 和 O_2 的反应式为

$$\mathrm{CO}+\frac{1}{2}\mathrm{O_2}\rightleftharpoons \mathrm{CO_2}$$

据题意 1molCO 和 4.76mol 的空气反应，而 4.76mol 的空气由 1molO_2 和 3.76molN_2 构成。

设平衡时 CO_2 的摩尔数为 $n_{\mathrm{CO_2}}=x$，则据 C、O、N 原子平衡可得：

$$n_{\mathrm{CO}}=1-x\ ;\ \ n_{\mathrm{O_2}}=1-\frac{1}{2}x\ ;\ \ n_{\mathrm{N_2}}=3.76$$

实际反应方程为

$$\mathrm{CO+O_2+3.76N_2}\to(1-x)\mathrm{CO}+(1-\frac{1}{2}x)\mathrm{O_2}+x\mathrm{CO_2}+3.76\mathrm{N_2}$$

平衡时总物质的量

$$N=1-x+(1-\frac{1}{2}x)+x+3.76=5.76-\frac{1}{2}x$$

于是 $$p_{\mathrm{CO}}=\frac{1-x}{5.76-0.5x};\ p_{\mathrm{O_2}}=\frac{1-0.5x}{5.76-0.5x};\ p_{\mathrm{CO_2}}=\frac{x}{5.76-0.5x}$$

据 $$K_p=\frac{p_{\mathrm{CO_2}}}{p_{\mathrm{CO}}{p_{\mathrm{O_2}}}^{0.5}}=\frac{x(5.76-0.5x)^{0.5}}{(1-x)(1-0.5x)^{0.5}}$$

查附表 3000K 时，该反应 $K_p=3.06$，代入上式解得 $x=0.495$。故

$$n_{\mathrm{CO_2}}=x=0.495\text{、}n_{\mathrm{CO}}=1-x=0.505\text{、}n_{\mathrm{O_2}}=1-\frac{1}{2}x=0.7525\text{、}n_{\mathrm{N_2}}=3.76,\ \ N=\sum n_i=5.5125$$

$$x_{\mathrm{CO_2}}=\frac{n_{\mathrm{CO_2}}}{N}=\frac{0.495}{5.5125}=8.98\%\text{、}x_{\mathrm{CO}}=\frac{n_{\mathrm{CO}}}{N}=\frac{0.505}{5.5125}=9.16\%\text{、}x_{\mathrm{O_2}}=13.65\%\text{、}x_{\mathrm{N_2}}=68.21\%\text{。}$$

13–12　以碳为“燃料”的电池中，碳完全反应 $C+O_2 \to CO_2$，求此反应在标准状态下的最大有用功，且说明它与 CO_2 的标准生成焓不同的原因。

解：可逆定温定压反应的最大有用功

$$
\begin{aligned}
W_{u,\max} &= -\Delta G = G_{Re} - G_{pr} \\
&= \left[\sum_{Re}\left(n\Delta G_f^0\right) - \sum_{pr}\left(n\Delta G_f^0\right)\right] + \sum_{Re} n\left[(H_m - H_m^0) - (TS_m - 298.15S_m^0)\right] - \\
&\quad \sum_{pr} n\left[(H_m - H_m^0) - (TS_m - 298.15S_m^0)\right]
\end{aligned}
$$

因题目求标准状态下的最大有用功，所以上式右侧后二项为零

$$W_{u,\max} = \Delta G_{f,C}^0 + \Delta G_{f,O_2}^0 - \Delta G_{f,CO_2}^0$$

由附表 $\Delta G_{f,C}^0 = 0$、$\Delta G_{f,O_2}^0 = 0$、$\Delta G_{f,CO_2}^0 = -394\ 398\ \text{J/mol}$，所以

$$W_{u,\max} = 394\ 398\ \text{J/mol}$$

再由附表得 $\Delta H_{f,CO_2}^0 = -393\ 522\ \text{J/mol}$。$G = H + Ts$，$G_{Re} - G_{Pr} = H_{Re} - H_{Pr} - \left[(TS)_{Re} - (TS)_{Pr}\right]$

标准状态下

$$G_{Re} - G_{Pr} = \sum \Delta G_{f,Re}^0 - \sum \Delta G_{f,Pr}^0;\quad H_{Re} - H_{Pr} = \sum \Delta H_{f,Re}^0 - \sum \Delta H_{f,Pr}^0$$

所以最大有用功与标准生成焓两者差

$$\Delta G_{f,CO_2}^0 - \Delta H_{f,CO_2}^0 = -394\ 398\ \text{J/mol} - (-393\ 522\ \text{J/mol}) = 867\ \text{J/mol}$$

即

$$
\begin{aligned}
T_0(S_{Re} - S_{Pr}) &= 298.15\ \text{K} \times [213.795\ \text{J/(mol·K)} - 5.740\ \text{J/(mol·K)} - \\
&\quad 205.14\ \text{J/(mol·K)}] = 867.02\ \text{J/mol}
\end{aligned}
$$

13–13　反应 $2CO+O_2 \rightleftharpoons 2CO_2$ 在 2 800 K、1atm 下达到平衡，$K_p = \dfrac{p_{CO_2}^2}{p_{CO}^2 p_{O_2}} = 44.67$。求：

（1）这时 CO_2 的离解度及各气体的分压力；

（2）相同温度下，下列二反应各自的平衡常数 $CO+\frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons CO_2$；$CO_2 \rightleftharpoons CO+\frac{1}{2}O_2$。

解：（1）由题意 $2CO+O_2 \rightleftharpoons 2CO_2$ 在 2 800 K、1atm 时平衡常数 $K_p = 44.67$。

设 CO_2 的离解度为 x，则平衡时各组分摩尔数为

$$n_{CO_2} = 2(1-x);\quad n_{CO} = 2x;\quad n_{O_2} = x$$

总物质的量

$$N = 2(1-x) + 2x + x = 2 + x$$

$$p_{CO_2} = \frac{2(1-x)}{2+x}p;\ \ p_{CO} = \frac{2x}{2+x}p;\ \ p_{O_2} = \frac{x}{2+x}p$$

据
$$K_p = \frac{p_{CO_2}^2}{p_{CO}^2 p_{O_2}} = \frac{[2(1-x)]^2/(2+x)^2}{(2x)^2 \cdot x^2/(2+x)^3} = 44.67$$

解得 $x = 0.295$。

$$p_{CO_2} = \frac{2(1-x)}{2+x}p = \frac{2\times(1-0.295)}{2+0.295}\times 1\text{atm} = 0.614\text{atm}$$

$$p_{CO} = \frac{2x}{2+x}p = \frac{2\times 0.295}{2+0.295}\times 1\text{atm} = 0.257\text{atm}$$

$$p_{O_2} = \frac{x}{2+x}p = \frac{0.295}{2+0.295}\times 1\text{atm} = 0.129\text{atm}$$

（2）对反应 $CO_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2}O_2$

查附表，2 800 K 时 $K_p = 0.150$（$\log K_p = -0.825$，$K_p = 0.150$）而反应 $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons CO_2$ 是逆反应，故同温度下

$$K'_p = \frac{1}{K_p} = \frac{1}{0.15} = 6.667$$

13–14 相同摩尔数的一氧化碳和水蒸汽在 400K、1atm 下发生水煤气反应，最后达到 1000K。若在 1000K 下达到平衡时反应物中 CO 为 1mol，试计算此反应的反应热。（生成水煤气的反应：$CO+H_2O_{(g)} \rightleftharpoons CO_2+H_2$。）

解：反应 $CO+H_2O_{(g)} \rightleftharpoons CO_2+H_2$ 在 1000K 时 K_p 是 $CO_2+H_2 \rightleftharpoons CO+H_2O_{(g)}$ 的反应 K'_p 的倒数，查附表，后者 $\log K'_p = -0.159$，所以 $K_p = 1/K'_p = 1.442$。

设在 1 000K 平衡时 CO_2 和 H_2 均为 x mol，由于 1mol CO 和 1mol H_2O 参与反应，故 CO 为 1–x mol，H_2O 为 1–x mol，于是

$$K_p = \frac{xx}{(1-x)(1-x)} = 1.442,\quad x = 0.5456$$

故平衡时

$$CO+H_2O \to 0.5456CO_2 + 0.5456H_2 + (1-05456)CO + (1-0.5456)H_2O$$

由附表得 $H^0_{f,CO_2} = -393\ 522$ J/mol，$H^0_{f,CO} = -110\ 527$ J/mol，$H^0_{f,H_2O} = -241\ 826$ J/mol。因此，标准状态下 $CO+H_2O_{(g)} \rightleftharpoons CO_2+H_2$ 完全反应生成 1mol CO_2 时反应热效应

$$Q^0 = \Delta H^0 = \left[\sum n_k H^0_{\mathrm{f},k}\right]_{\mathrm{Pr}} - \left[\sum n_k H^0_{\mathrm{f},k}\right]_{\mathrm{Re}}$$
$$= 1\mathrm{mol}\times(-393\ 522\ \mathrm{J/mol}) + 0 - 1\mathrm{mol}\times(-110\ 527\ \mathrm{J/mol}) -$$
$$1\mathrm{mol}\times(-241\ 826\ \mathrm{J/mol}) = -41\ 169\ \mathrm{J}$$

因未完全反应，故反应热效应为

$$n_{CO_2}Q^0 = 0.545\ 6\times(-41\ 169\mathrm{J}) = -22\ 461.8\ \mathrm{J}$$

由附表，查得摩尔焓（J/mol）数据如表：

	1 000 K	400 K	298.15 K
CO_2	42 763.1 J/mol	13 366.7 J/mol	9 364.0 J/mol
CO	30 359.8 J/mol	11 646.2 J/mol	8 670.1 J/mol
H_2	29 147.3 J/mol	11 424.9 J/mol	8 467.0 J/mol
H_2O	35 904.6 J/mol	13 357.0 J/mol	9 904.0 J/mol

故 $T = 1\ 000$ K 时反应热效应为

$$Q'_T = n_{CO_2}Q^0 + \left[\sum n_k(H_{\mathrm{m,1000K}} - H_{\mathrm{m,298.15K}})\right]_{\mathrm{Pr}} - \left[\sum n_k(H_{\mathrm{m,1000K}} - H_{\mathrm{m,298.15K}})\right]_{\mathrm{Re}}$$
$$= 1\mathrm{mol}\times(-22\ 461.8\ \mathrm{J/mol}) + 0.545\ 6\mathrm{mol}\times(42\ 763.1 - 9\ 364.0)\ \mathrm{J/mol} +$$
$$0.545\ 6\mathrm{mol}\times(29\ 147.3 - 8\ 467.0)\mathrm{J/mol} + 0.454\ 4\mathrm{mol}\times(30\ 359.8 -$$
$$8\ 671.0)\mathrm{J/mol} + 0.454\ 4\mathrm{mol}\times(35\ 904.6 - 9\ 904.0)\mathrm{J/mol} - 1\mathrm{mol}\times$$
$$(11\ 646.2 - 8\ 671.0)\mathrm{J/mol} - 1\mathrm{mol}(13357.0 - 9904.0)\mathrm{J/mol} = 22285.4\mathrm{J}$$

由题意，平衡时 CO 为 1 mol，故参与反应的 CO 为 $n_{CO} = \dfrac{1\mathrm{mol}}{0.4544} = 2.2\mathrm{mol}$，所以

$$Q_T = n_{CO}Q'_T = 2.2\mathrm{mol}\times 22\ 285.4\mathrm{J/mol} = 49\ 027.9\ \mathrm{J}$$

13–15 已知反应 $CO + \dfrac{1}{2}O_2 = CO_2$ 在 3 000K 时平衡常数 $K_p = 3.06$。求 1mol 一氧化碳和 1mol 氧气反应在 3000K 和 5atm 平衡时混和物的组成。

解：1mol CO 和 1mol O_2 反应式

$$1CO + 1O_2 \to xCO + yO_2 + zCO_2$$

据质量守恒　　$z = 1 - x$，$y = \dfrac{1}{2}(1 + x)$

平衡时总物质的量

$$n = x + y + z = x + \frac{1}{2}(1 + x) + 1 - x = \frac{1}{2}(3 + x)$$

$$K_p = \frac{n_{CO_2}}{n_{CO}n_{O_2}}\left(\frac{p}{n}\right)^{1-1-1/2} = \frac{z}{xy^{1/2}}\left(\frac{5}{x+y+z}\right)^{-1/2} = 3.06$$

$$\frac{(1-x)(3+x)^{1/2}}{x(1+x)^{1/2}}=3.06\times 5^{1/2}$$

用试差法求得 $x=0.193$ mol； $y=0.597$ mol； $z=0.807$ mol。

点评：例 13−5 同一反应在 3000K，1atm 平衡时 $x=0.34$，即初始 1mol CO 可形成 0.66mol CO_2，因此压力对这一反应平衡常数的影响显而易见。

13−16 已知反应 $CO+\frac{1}{2}O_2=CO_2$ 在 3 000K 时平衡常数 $K_p=3.06$。求 1mol 一氧化碳和 1mol 空气中氧气反应在 3000K 和 5atm 平衡时混和物的组成。

解：由于空气由 3.76mol N_2 和 1mol O_2 组成，故反应式为

$$1CO+1O_2+3.76N_2\rightarrow xCO+yO_2+zCO_2+3.76N_2$$

据质量守恒　　$z=1-x$， $y=\frac{1}{2}(1+x)$

平衡时总物质的量

$$n=x+y+z+3.76=x+\frac{1}{2}(1+x)+(1-x)+3.76=\frac{1}{2}(10.52+x)$$

$$K_p=\frac{n_{CO_2}}{n_{CO}n_{O_2}}\left(\frac{p}{n}\right)^{1-1-1/2}=\frac{z}{xy^{1/2}}\left(\frac{1}{x+y+z+3.76}\right)^{-1/2}=3.06$$

$$3.06=\frac{(1-x)\times 1^{-1/2}}{x\left[(1+x)/2\right]^{1/2}\left[(10.5+x)/2\right]^{-1/2}}=\frac{(1-x)(10.5+x)^{1/2}}{x(1+x)^{1/2}}$$

用试差法求得 $x=0.47$ mol、 $y=0.74$ mol、 $z=0.53$ mol。

点评：与例 13−5 比较，由于不参与反应的氮气，同一反应在 3000K，1atm 平衡时，即初始 1mol CO 可形成的 CO_2 从 0.66mol 降到 0.53mol，因此在计算反应平衡时组成时必须考虑惰性气体的存在。

13-17 3 000 K 时气相反应 $CO+\frac{1}{2}O_2\rightleftharpoons CO_2$ 的平衡常数 $K_p=3.055$，求反应在 2000 K 时平衡常数值。已知 2 000 K 时反应焓 $\Delta H=-277\ 950$ J/mol，3 000 K 时反应焓 $\Delta H=-272\ 690$ J/mol

解：　$$\ln\frac{K_{p2}}{K_{p1}}=\frac{\Delta H^0}{R}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)\simeq\frac{(\Delta H/R)(T_2-T_1)}{T_1T_2}$$

标准状态下题示反应的反应焓为−283 190 J/mol 与 2 000 K 和 3 000 K 时的反应焓有较大的出入，但在 2 000 K 到 3 000 K 时反应焓的变化相对较小，式中 ΔH 可近似取反应焓的平均值，

故

$$\Delta H = \frac{1}{2}(-277\ 950 - 272\ 690)\text{J/mol} = -275\ 320\text{J/mol}$$

所以

$$\ln\frac{K_{p2}}{K_{p1}} = \frac{275\ 320\text{J/mol}}{8.314\ 5\text{J/(mol}\cdot\text{K)}}\left(\frac{1}{2\ 000\text{K}} - \frac{1}{3\ 000\text{K}}\right) = 5.52$$

$$\frac{K_{p2}}{K_{p1}} = 252\text{，}\quad K_{p2} = 252\times 3.055 = 769.9$$