

第一章 基本概念

Basic Concepts and Definition

1-1 热能和机械能相互转换过程

1-2 热力系统

1-3 工质的热力学状态及其基本状态参数

1-4 平衡状态

1-5 工质的状态变化过程

1-6 功和热量

1-7 热力循环

1-1 热能和机械能相互转换的过程

一、热能动力装置(Thermal power plant)

定义：从燃料燃烧中获得热能并利用热能得到动力的整套设备。

分类

气体动力装置(combustion gas power plant)

内燃机(internal combustion gas engine)

燃气轮机装置(gas turbine power plant)

喷气发动机(jet power plant)

.....

蒸气动力装置 (steam power plant)

共同本质：由媒介物通过吸热—膨胀做功—排热

二、工质(working substance; working medium)

定义：实现热能和机械能相互转化的媒介物质。

对工质的要求：

- 1) 膨胀性
- 2) 流动性
- 3) 热容量
- 4) 稳定性，安全性
- 5) 对环境友善
- 6) 价廉，易大量获取

物质三态中
气态最适宜。

三、热源(heat source; heat reservoir)

定义：工质从中吸取或向之排出热能的物质系统。

- 高温热源—热源 (heat source)
低温热源—冷源 (heat sink)
- 恒温热源(constant heat reservoir)
变温热源



1-2 热力系统（热力系、系统、体系）

外界和边界



一、定义

- 系统(thermodynamic system, system)

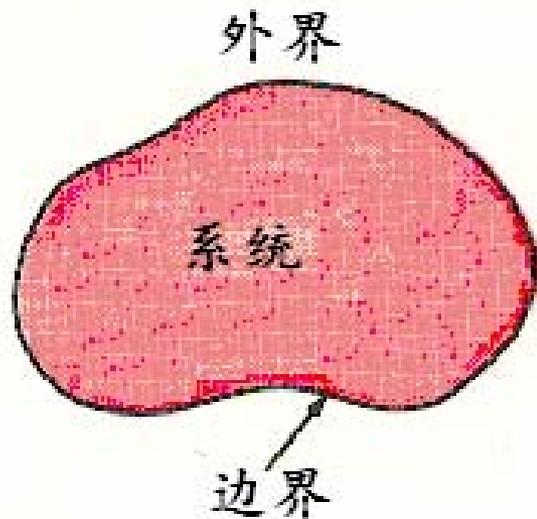
人为分割出来，作为热力学研究对象的有限物质系统。

- 外界(surrounding):

与体系发生质、能交换的物系。

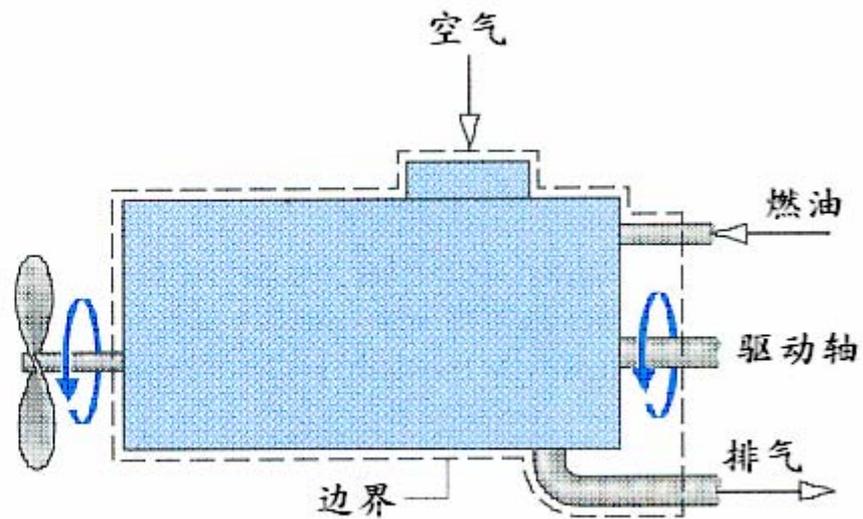
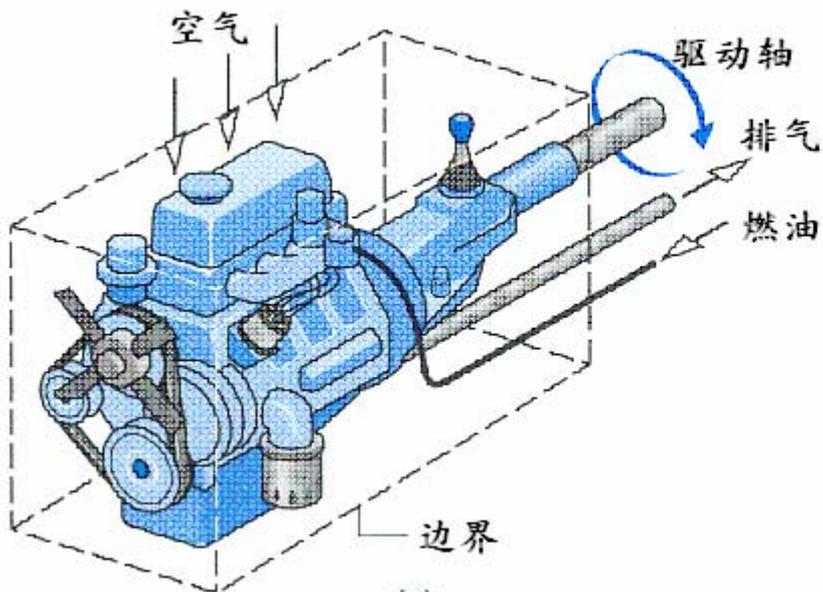
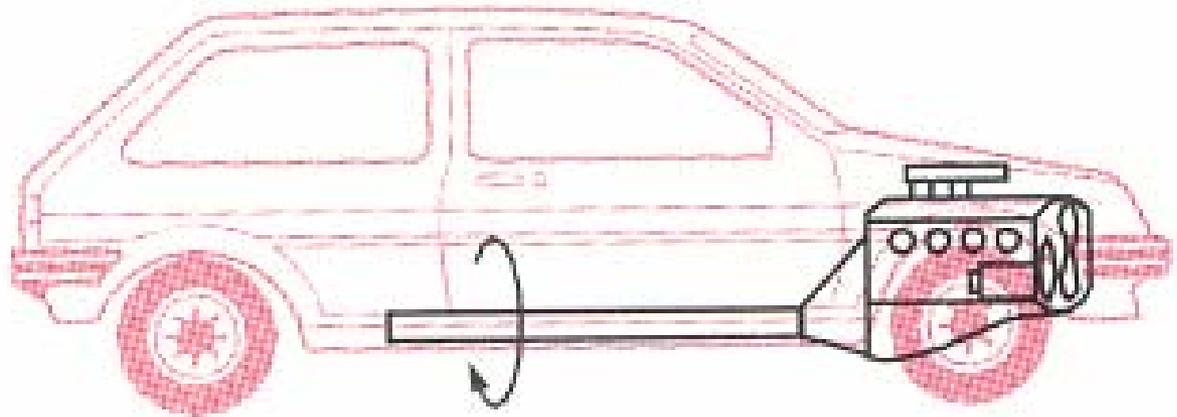
- 边界(boundary):

系统与外界的分界面（线）。

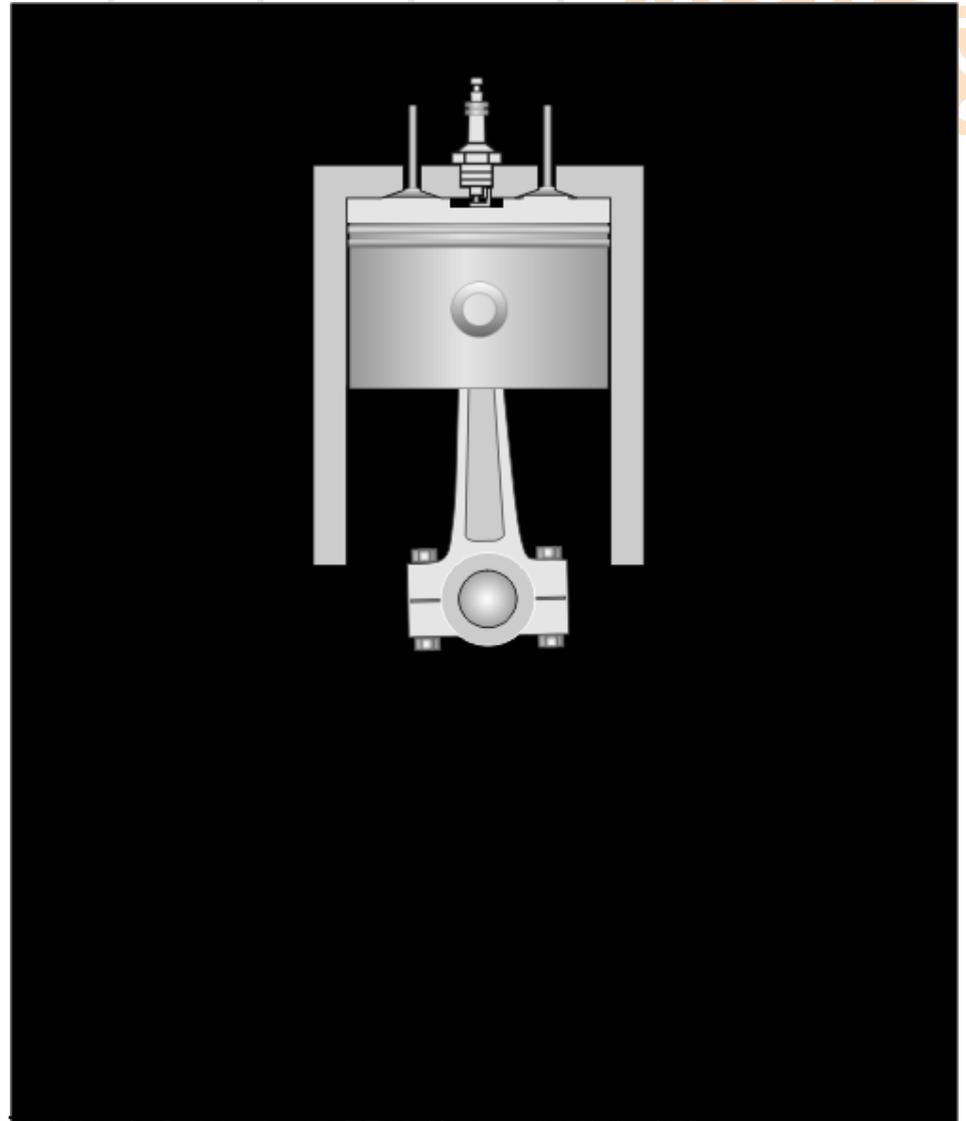
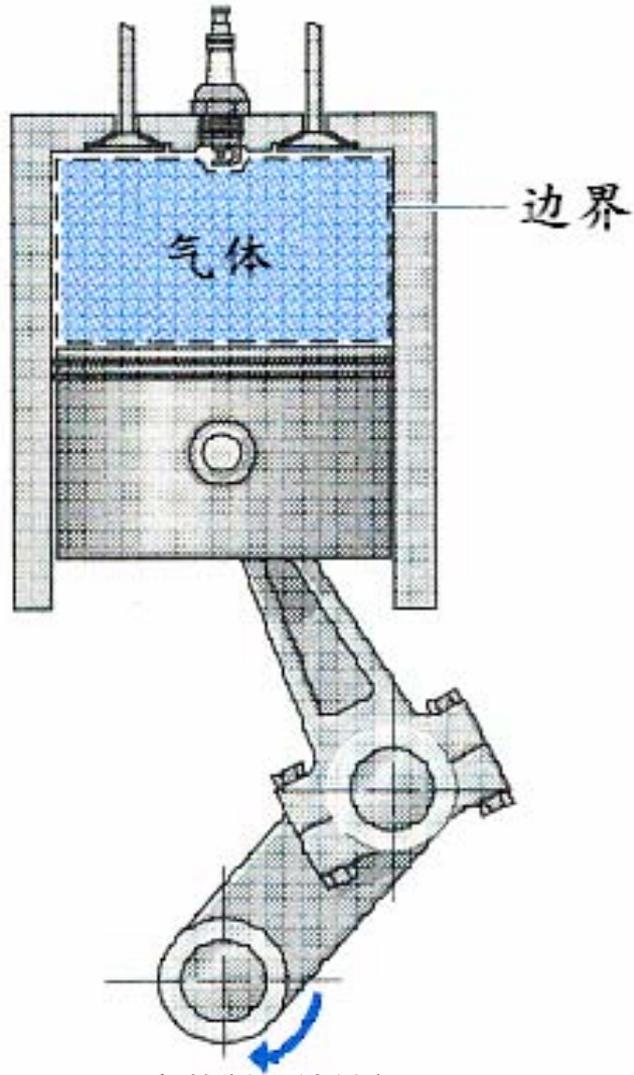




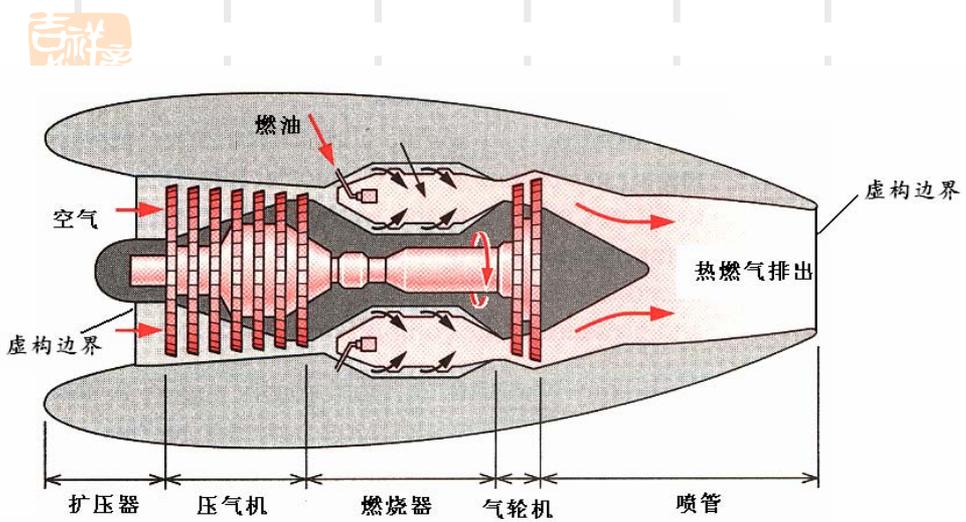
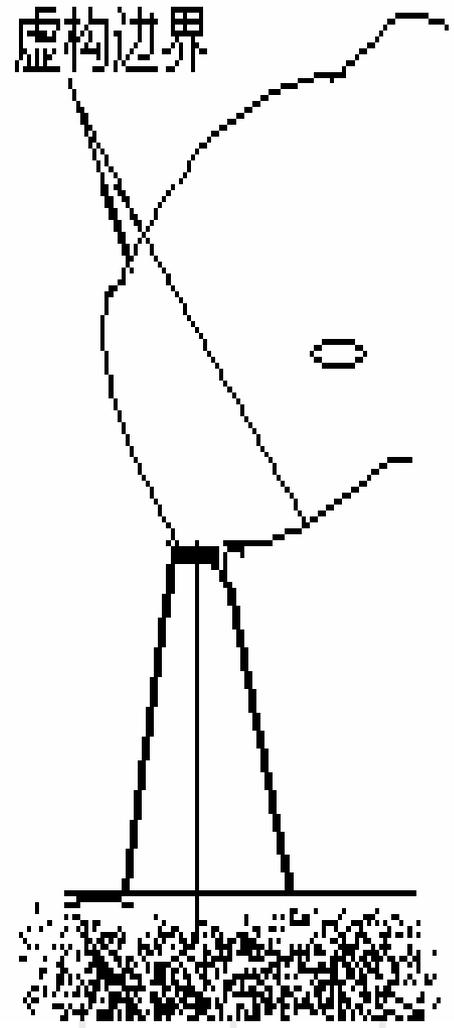
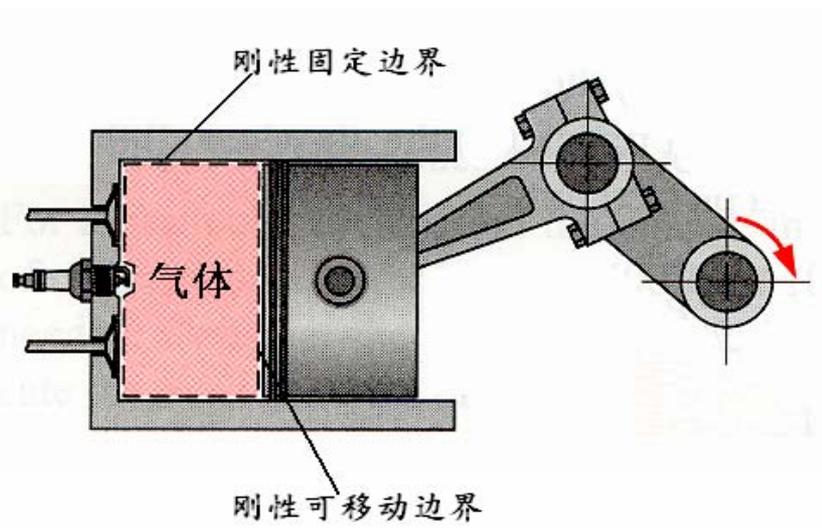
• 汽车发动机



• 汽缸-活塞装置（闭口系例）



• 移动和虚构边界





注意：

- 1) 系统与外界的人为性
- 2) 外界与环境介质
- 3) 边界可以是：
 - a) 刚性的或可变形的或有弹性的
 - b) 固定的或可移动的
 - c) 实际的或虚拟的



三、热力系分类

1. 按组元和相

按组元数

单元系 (one component system; pure substance system)

多元系 (multicomponent system)

按相数

单相系 (homogeneous system)

复相系 (heterogeneous system)

- 注意：
- 1) 不计恒外力场影响；
 - 2) 复相系未必不均匀——湿蒸汽；
单元系未必均匀——气液平衡分离状态。

2. 按系统与外界质量交换

闭口系 (closed system)

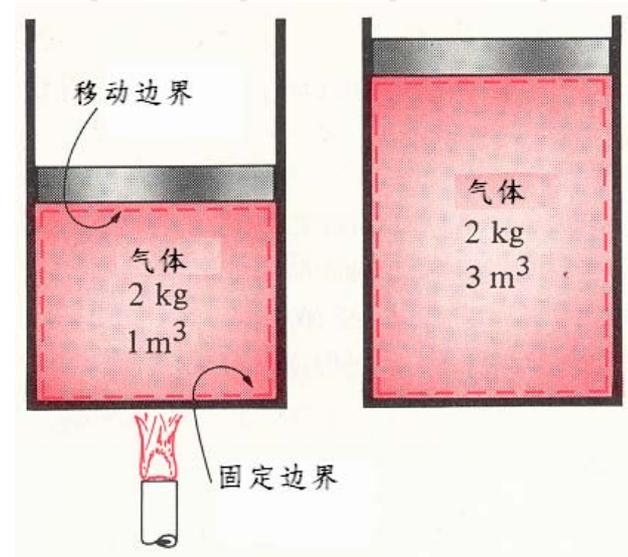
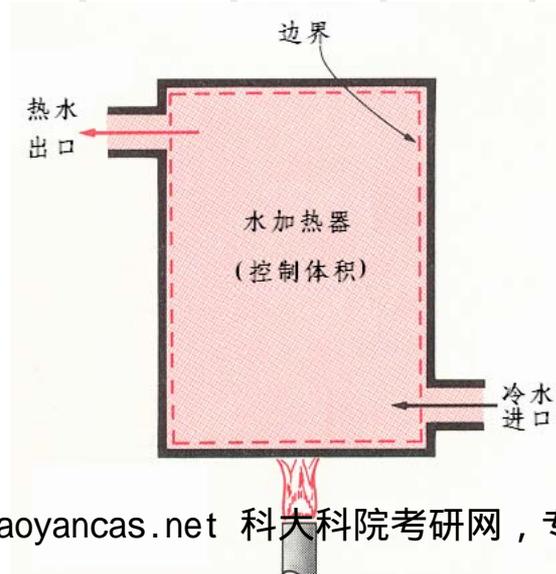
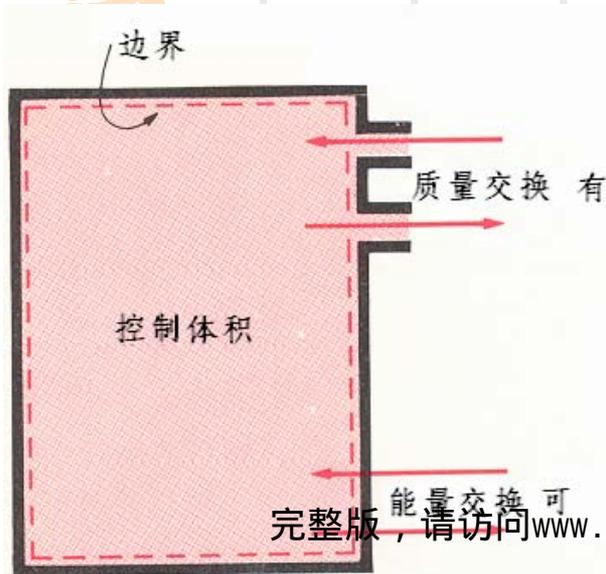
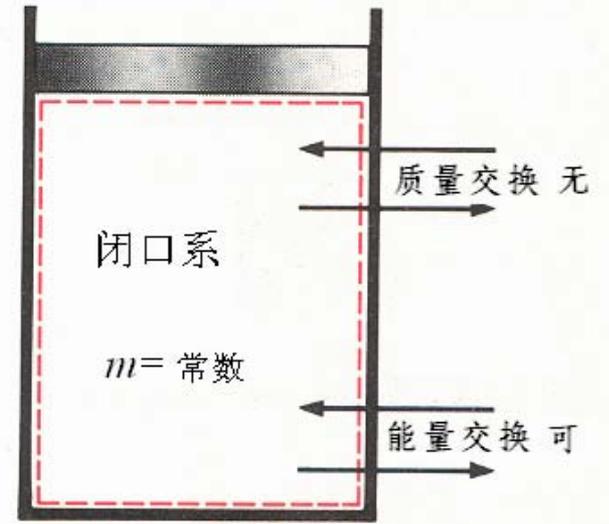
(控制质量CM)

—没有质量越过边界

开口系 (open system)

(控制体积CV)

—通过边界与外界有质量交换



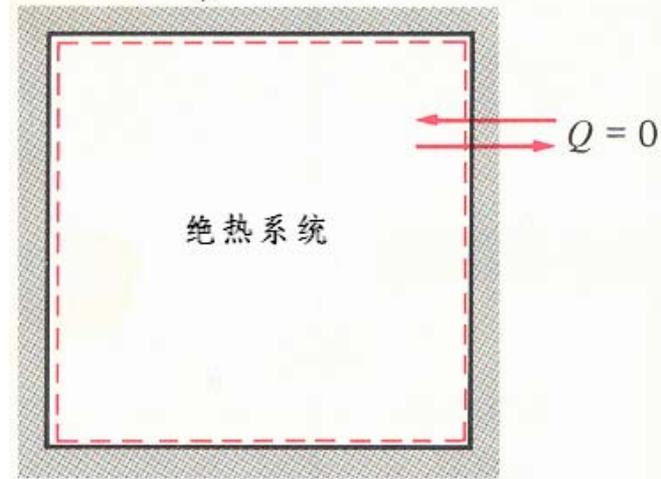
3. 按能量交换

绝热系 (adiabatic system) —

与外界无热量交换；

孤立系 (isolated system) —

与外界无任何形式的质能交换。



4. 简单可压缩系 (simple compressible system)

—由可压缩物质组成，无化学反应、与外界有交换容积变化功的有限物质系统。

注意：

- 1) 闭口系与系统内质量不变的区别；
- 2) 开口系与绝热系的关系；
- 3) 孤立系与绝热系的关系。

四、热力系示例

1. 刚性绝热气缸-活塞系统，B侧设有电热丝

红线内

——闭口绝热系

黄线内不包含电热丝

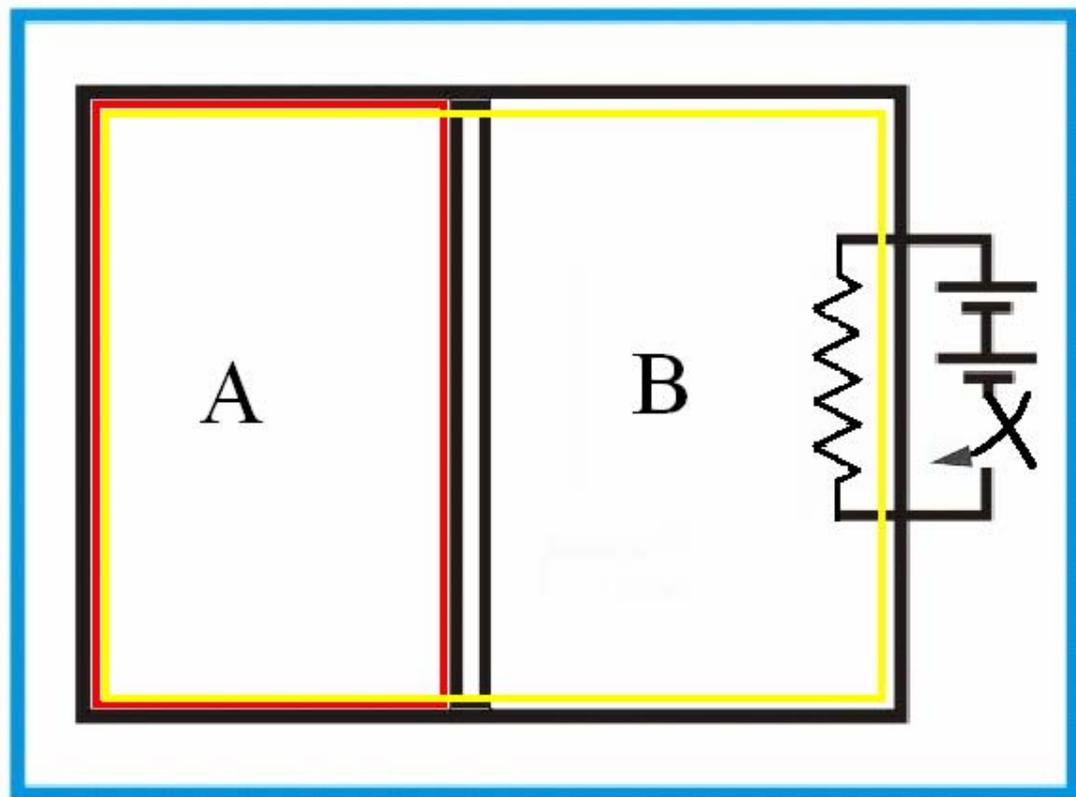
——闭口系

黄线内包含电热丝

——闭口绝热系

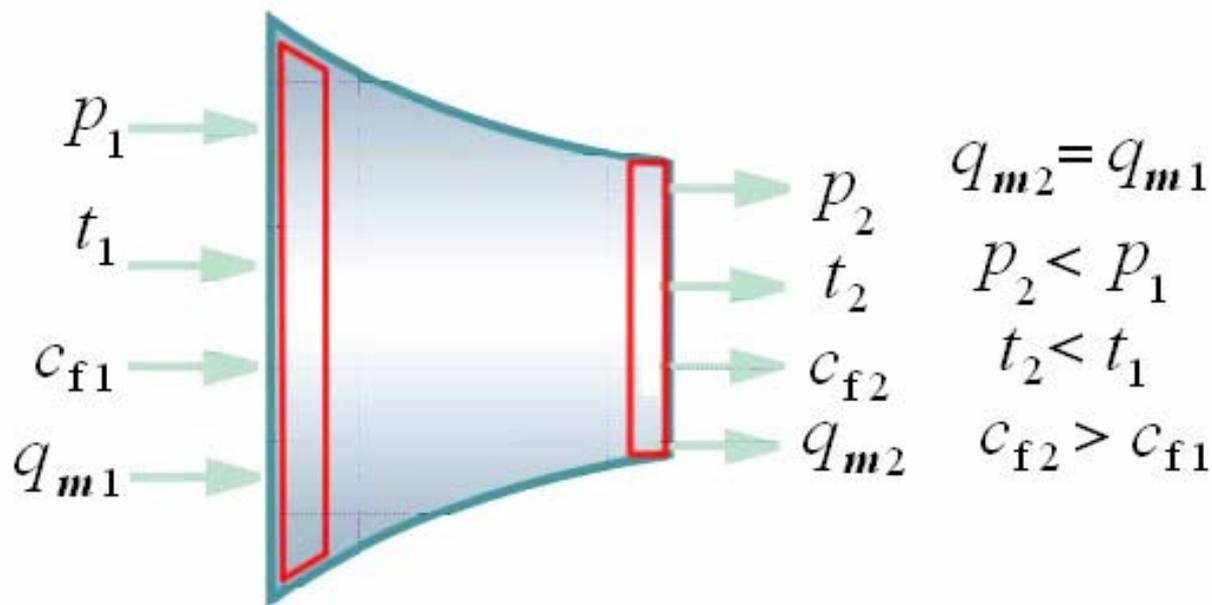
兰线内

——孤立系





2. 刚性绝热喷管



取红线为系统—— 闭口系

取喷管为系统—— 开口系绝热系？

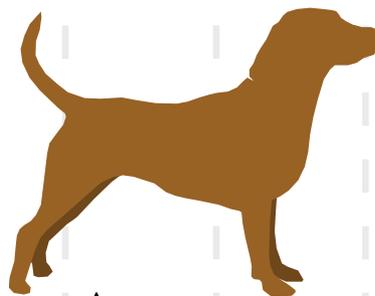




3. A、B两部落“鸡、犬之声相闻，民至老死不相往来”

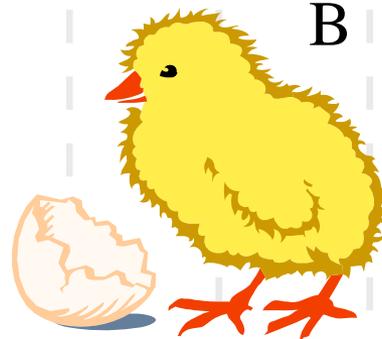
A部落为系统

—闭口系



A

A+B部落为系统—孤立系



B



1-3 工质的热力学状态和基本状态参数

一、热力学状态和状态参数

热力学状态 (state of thermodynamic system)

—系统宏观物理状况的综合

状态参数 (state properties)

—描述物系所处状态宏观物理量

二、状态参数的特性和分类

1. 状态参数是宏观量，是大量粒子的统计平均效应，只有平衡态才有状参，系统有多个状态参数，如

$$p, V, T, U, H, S$$



2. 状态的单值函数。

物理上——与过程无关；

数学上——其微量是全微分。

$$\oint dx = 0 \quad \int_{1b2} dx = \int_{1a2} dx$$

3. 状态参数分类

广延量 (extensive property)

强度量 (intensive property)



又：广延量的比性质具有强度量特性，如比体积



$$v = \frac{V}{m}$$



工程热力学约定用小写字母表示单位质量参数。





三、系统状态相同的充分必要条件

系统两个状态相同的充要条件：

所有状态参数一一对应相等

简单可压缩系两状态相同的充要条件：

两个独立的状态参数对应相等



四、温度和温标 (temperature and temperature scale)

温度的定义:

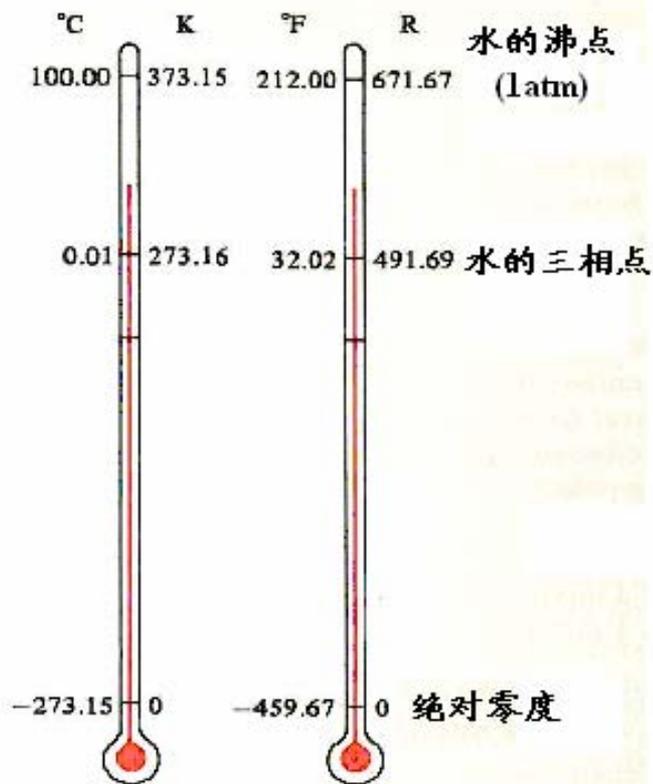
测温的基础—热力学零定律

(zeroth law of thermodynamics)

热力学温标和国际摄氏温标

(thermodynamics scale; Kelvin scale; absolute temperature scale and internal Celsius temperature scale)

$$\{t\}_{\text{C}} = \{T\}_{\text{K}} - 273.15$$





附：

华氏温标和朗肯温标

$$\{T\} \cdot \text{R} = \{t\} \cdot \text{F} + 459.67$$

华氏温标和摄氏温标

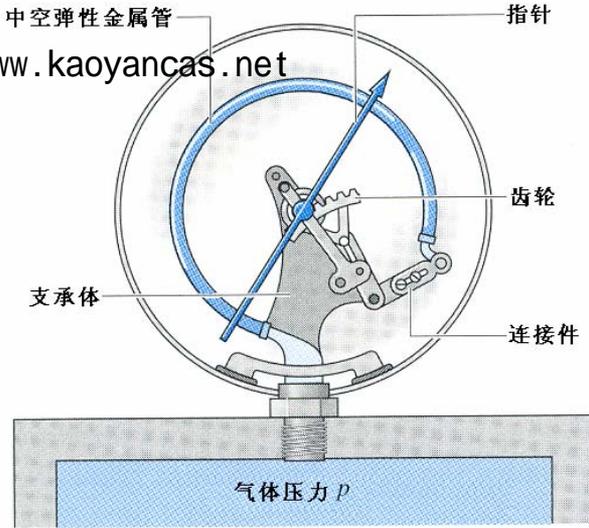
$$\{t\} \cdot \text{C} = 5/9[\{t\} \cdot \text{F} - 32]$$

$$\{t\} \cdot \text{F} = 9/5\{t\} \cdot \text{C} + 32$$



五、压力(pressure)

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：www.kaoyancas.net



绝对压力 p (absolute pressure)

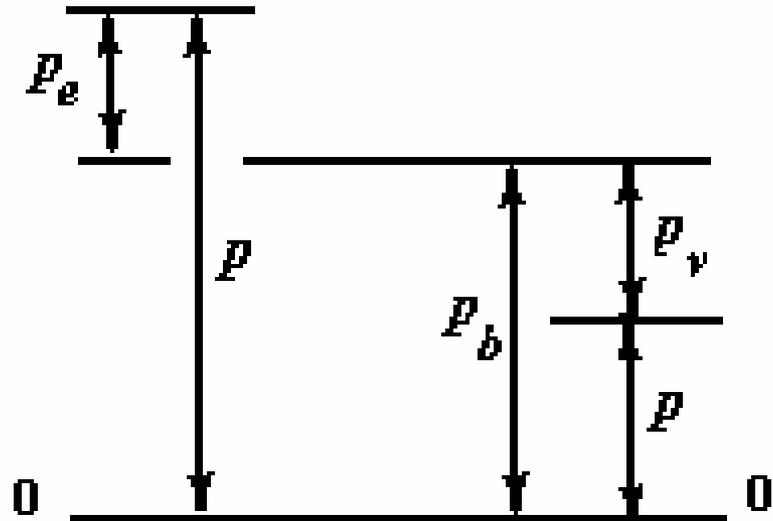
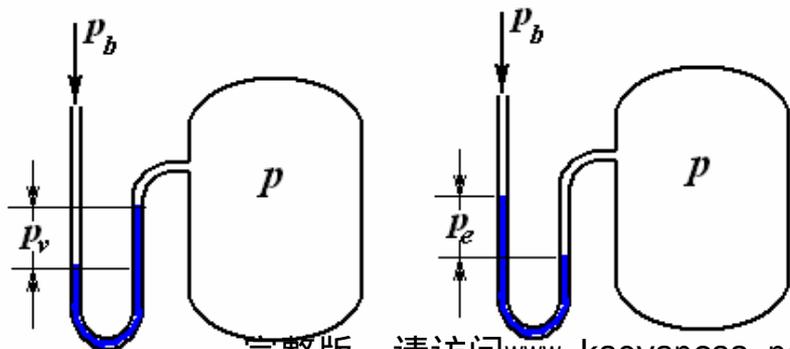
表压力 p_e (p_g) (gauge pressure;
manometer pressure)

真空度 p_v (vacuum; vacuum pressure)

当地大气压 p_b (local atmospheric pressure)

$$p = p_b + p_e \quad (p > p_b)$$

$$p = p_b - p_v \quad (p < p_b)$$



常用压力单位：

$$1\text{Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \Rightarrow 1\text{MPa} = 1 \times 10^6 \text{Pa} \quad 1\text{kPa} = 1 \times 10^3 \text{Pa}$$

$$1\text{bar} = 1 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$1\text{atm} = 101325\text{Pa} = 760\text{mmHg}$$

$$1\text{mmHg} = 133.32\text{Pa}$$

$$1\text{mmH}_2\text{O} = 9.80665\text{Pa}$$

例A4001441

例A4002771

六、比体积和密度

比体积(specific volume)

$$v = \frac{V}{m}$$

单位质量工质的体积 m^3/kg

密度(density)

$$\rho = \frac{m}{V}$$

单位体积工质的质量 kg/m^3

两者关系：

$$v = \frac{1}{\rho}$$

1-4 平衡状态

一、平衡状态 (thermodynamic equilibrium state)

1. 定义：无外界影响系统保持状态参数不随时间而改变的状态

• **热平衡** (thermal equilibrium) :

在无外界作用的条件下，系统内部、系统与外界处处温度相等。

• **力平衡** (mechanical equilibrium) :

在无外界作用的条件下，系统内部、系统与外界处处压力相等。

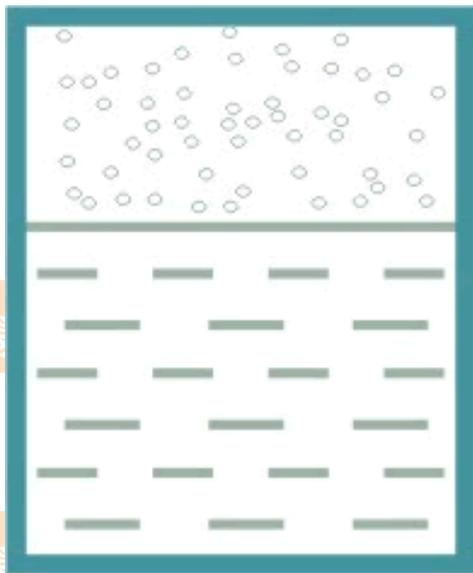
• **热力平衡的充要条件**

—系统同时达到热平衡和力平衡。



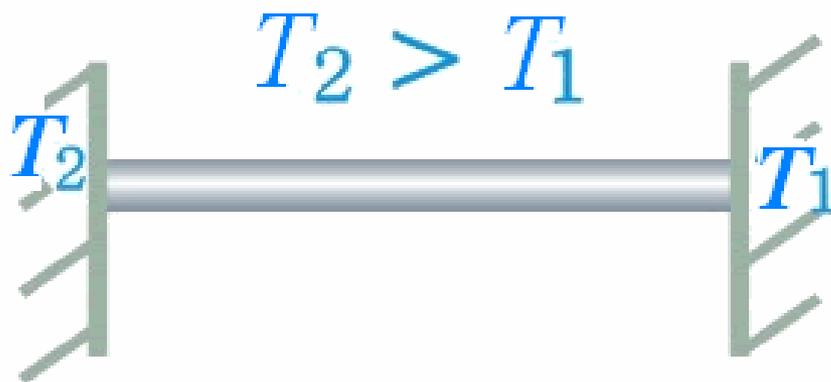
讨论:

1) 系统平衡与均匀



—— 平衡可不均匀

2) 平衡与稳定



—— 稳定未必平衡

三、纯物质的状态方程

(pure substance state equation)



状态方程 $f(p, v, T) = 0$

1. 理想气体状态方程

(ideal-gas equation; Clapeyron's equation)

$$p v = R_g T \quad pV = mR_g T \quad pV = nRT$$

$$p - \text{Pa} \left[\text{N/m}^2 \right] \quad v - \left[\text{m}^3/\text{kg} \right] \quad T - \text{K}$$

摩尔质量

R_g — 气体常数 (gas constant) $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

R — 通用气体常数

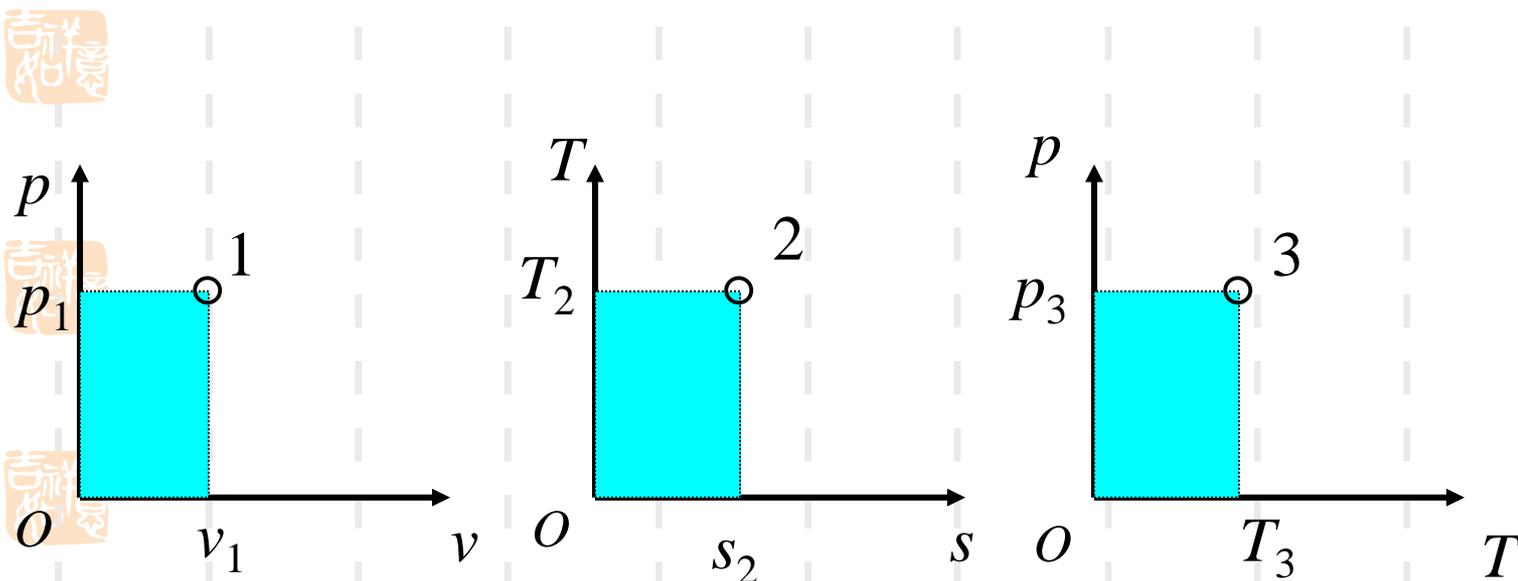
$$R = 8.3145 \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$$R = MR_g$$

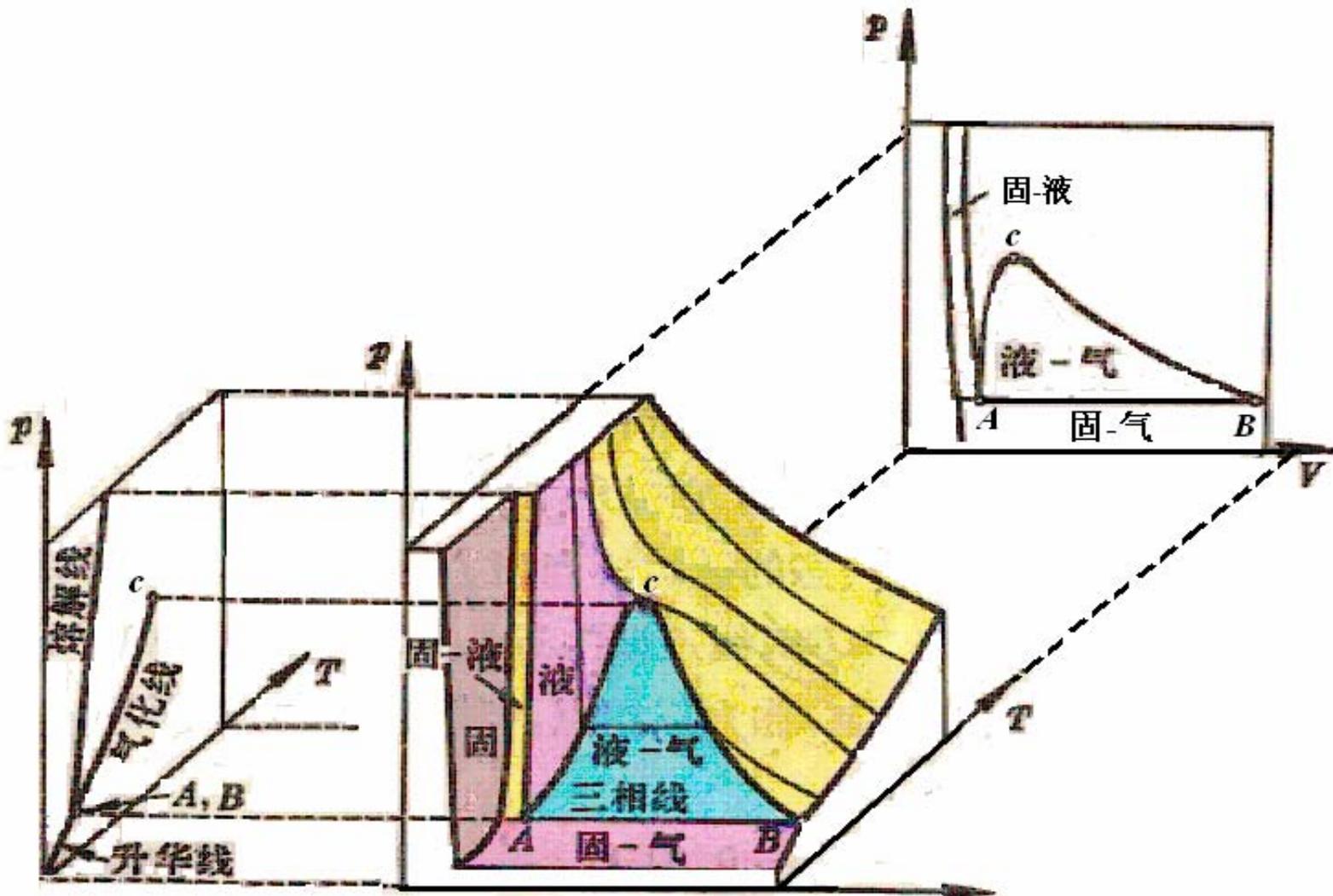
(universal (molar) gas constant)

四、状态参数坐标图（parametric coordinates）

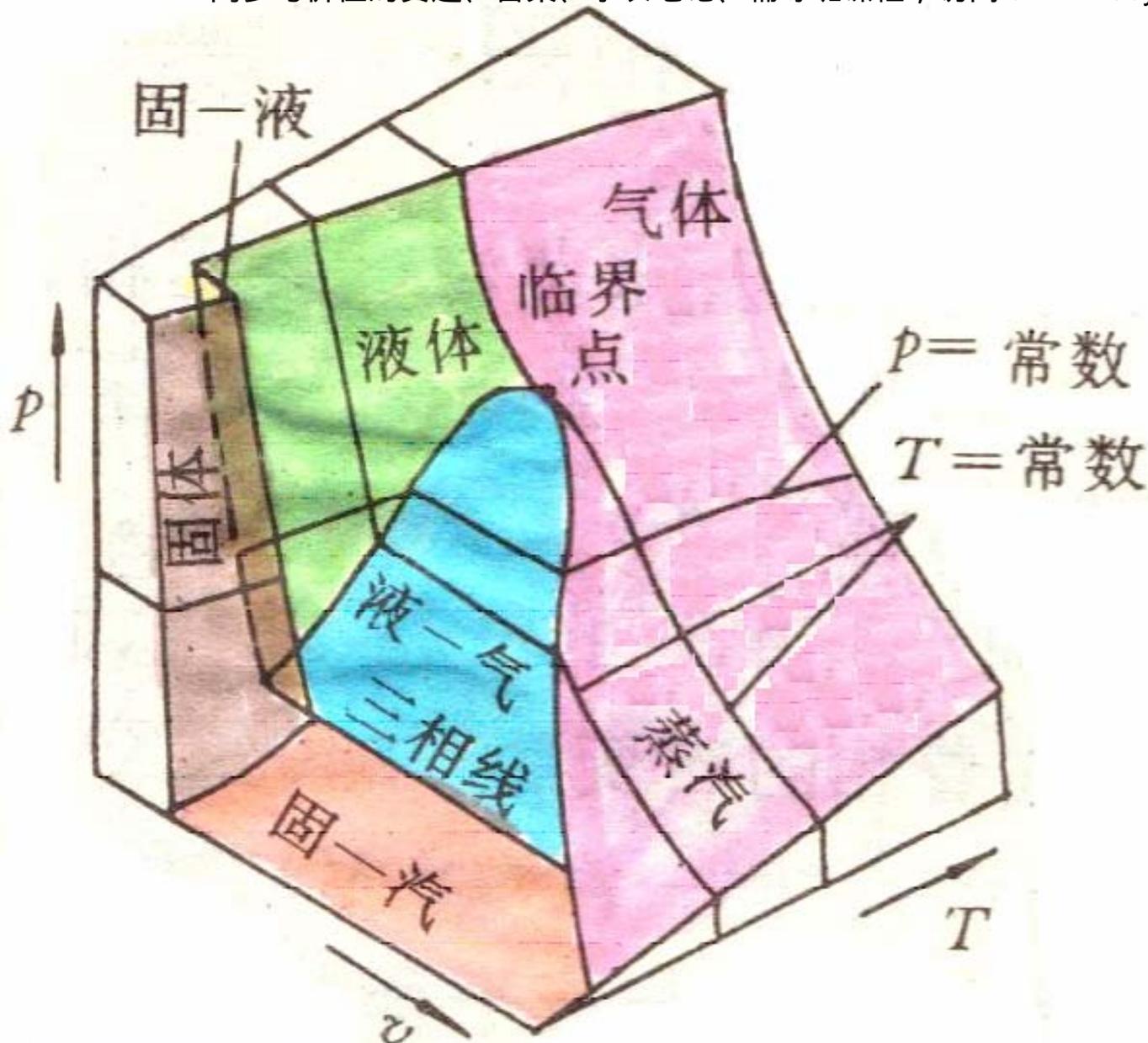
一简单可压缩系只有两个独立参数，所以可用平面坐标上一点确定其状态，反之任一状态可在平面坐标上找到对应点，如：



附：纯物质的 $p-v-T$ 图



水 p - v - T 图



1-5 工质的状态变化过程



一、准静态过程(quasi-static process; quasi-equilibrium process)

定义： 偏离平衡态无穷小，随时
恢复平衡的状态变化过程。

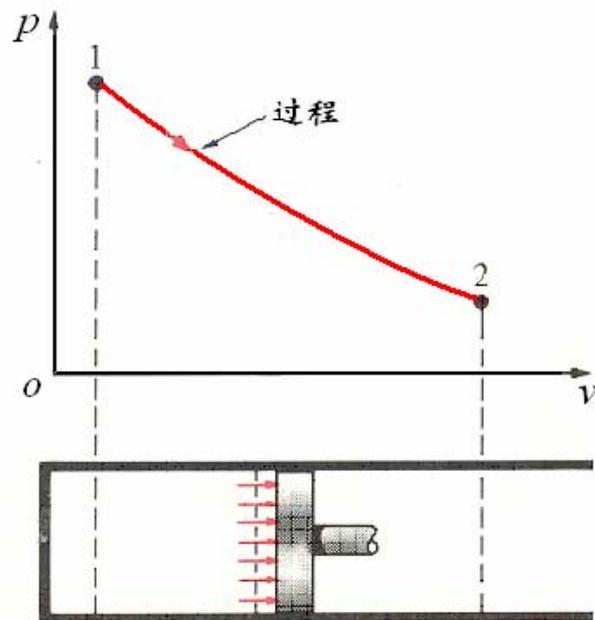
进行条件：

破坏平衡的势—

$\Delta p, \Delta T$ 无穷小

过程进行无限缓慢

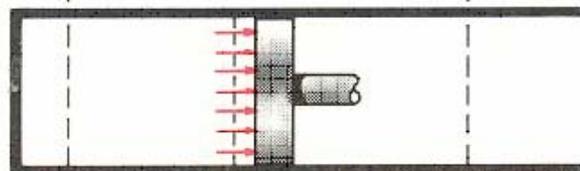
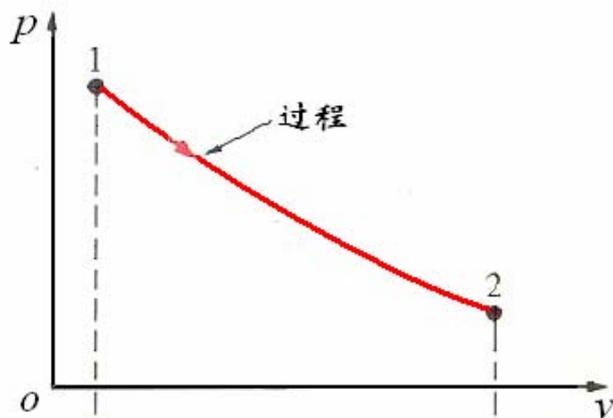
工质有恢复平衡的能力



准静态过程可在状态参数图上用连续实线表示

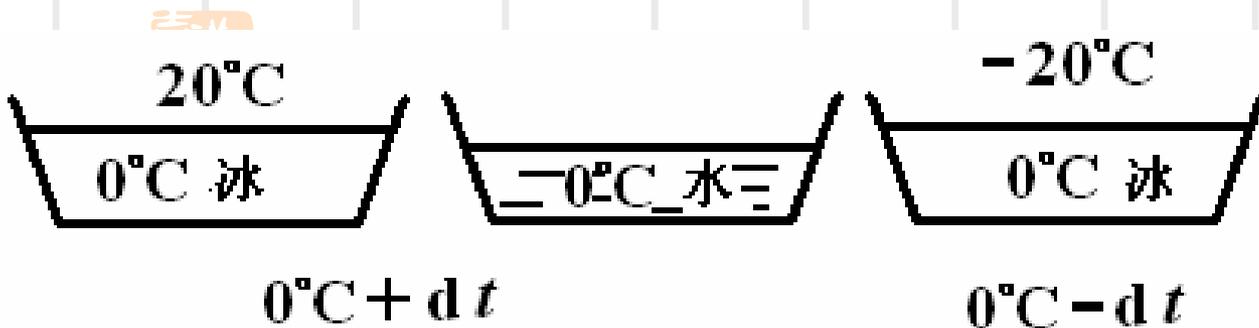
二、可逆过程(reversible process)

定义：系统可经原途径返回原来状态而在外界不留下任何变化的过程。



可逆过程与准静态过程的关系

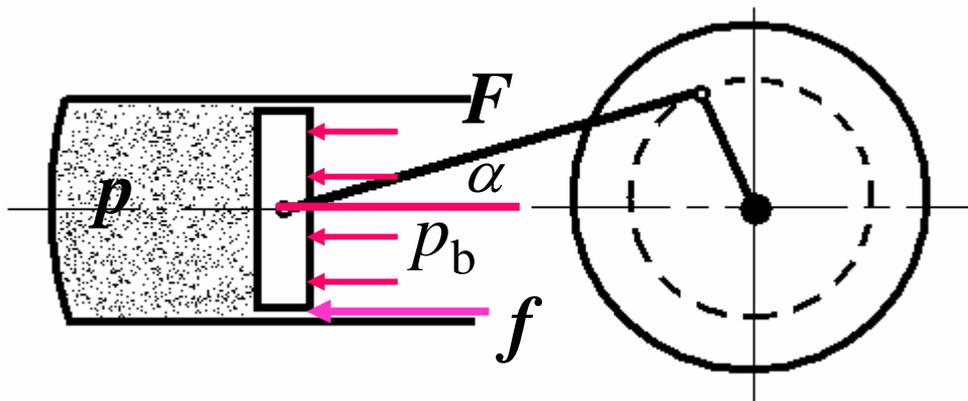
● 单纯传热过程



非准静态
不可逆

准静态
可逆

● 做功过程



$$pA > F \cos \alpha + f + p_b A$$

非准静态过程

(nonequilibrium process)

$$pA = F \cos \alpha + f + p_b A$$

准静态过程，不可逆

$$pA = F \cos \alpha + p_b A \quad (f = 0)$$

准静态过程，可逆



讨论:

1.可逆=准静态+没有耗散效应

2.准静态着眼于系统内部平衡，可逆着眼于系统内部及系统与外界作用的总效果

3.一切实际过程不可逆

4.内部可逆过程的概念

5.可逆过程可用状态参数图上实线表示



1-6 功和热量



一、功(work)的定义和可逆过程的功

1. 功的力学定义

2. 功的热力学定义：**通过边界传递的能量其全部效果可表现为举起重物。**

3. 可逆过程功的计算

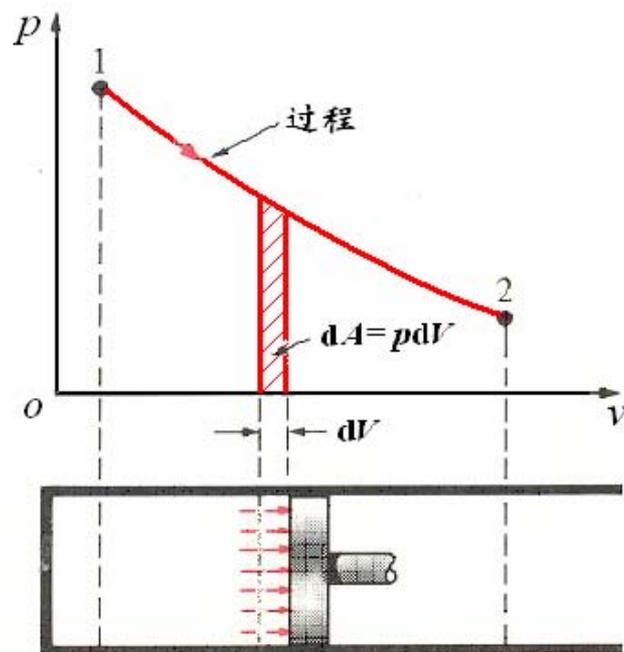
$$W = \int_1^2 \delta W$$

$$= \int_1^2 pAdx = \int_1^2 pdV$$

▲ **功是过程量**

▲ **功可以用 $p-v$ 图上过程线**

与 v 轴包围的面积表示



4. 功的符号约定:

系统对外做功为“+”

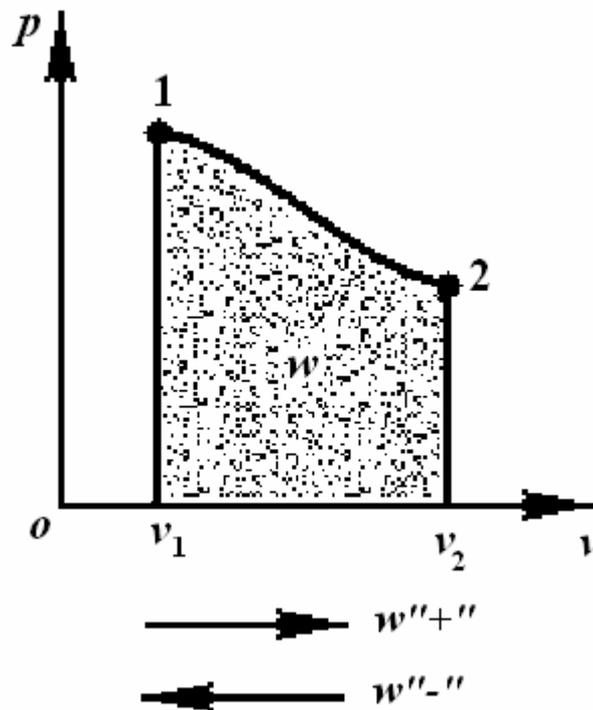
外界对系统做功为“-”

5. 功和功率的单位:

J 或 kJ

J/s \rightarrow W

kJ/s \rightarrow kW



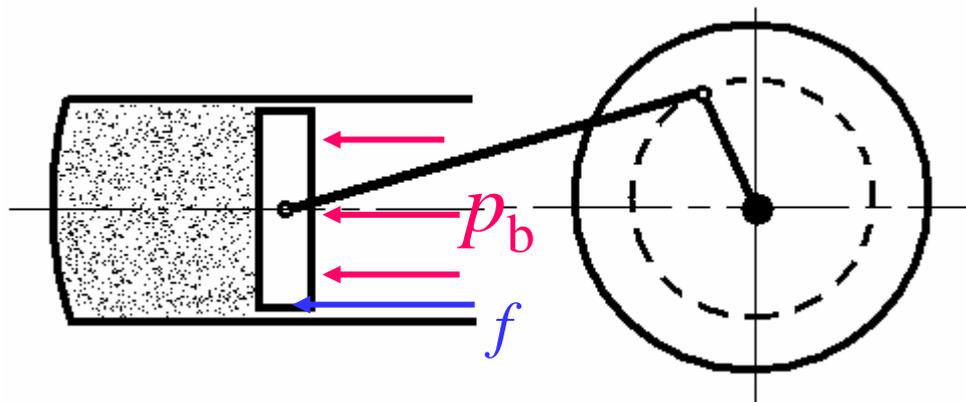
附: $1\text{ kW h} = 3600\text{ kJ}$



6. 讨论

○ 有用功(useful work)概念

$$W_u = W - W_l - W_p$$

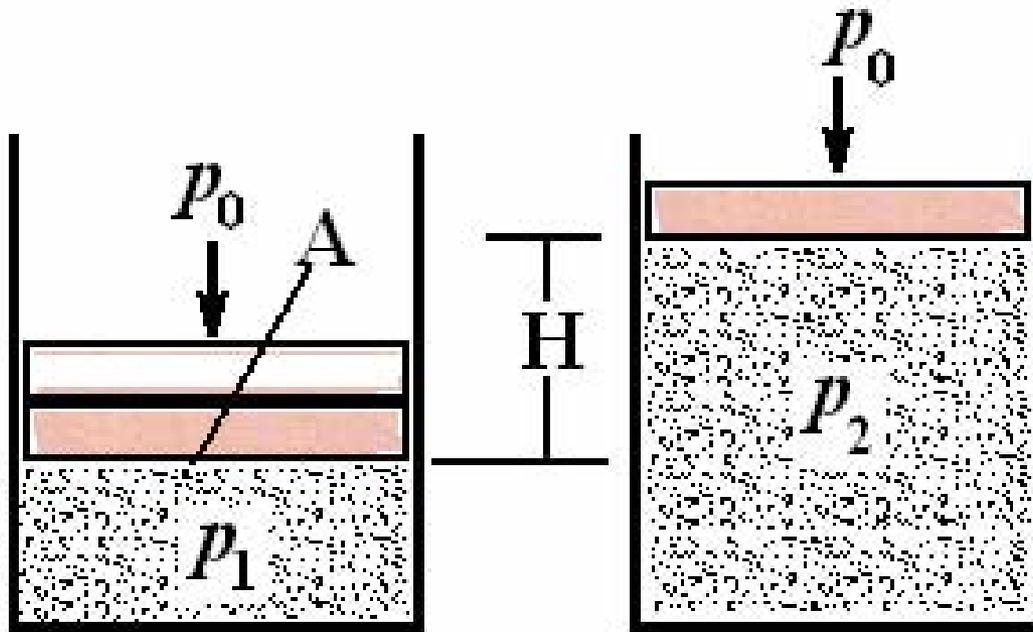


其中： W —膨胀功(compression/expansion work);

W_l —摩擦耗功;

W_p —排斥大气功。

例A7001331



$$W \neq \int_1^2 p \, dV \quad ?$$

$$W = p_0 A H = p_0 \Delta V$$

三、热量 (heat)

1. 定义：仅仅由于温差而通过边界传递的能量。

2. 符号约定：系统吸热“+”；放热“-”

3. 单位：J (kJ)

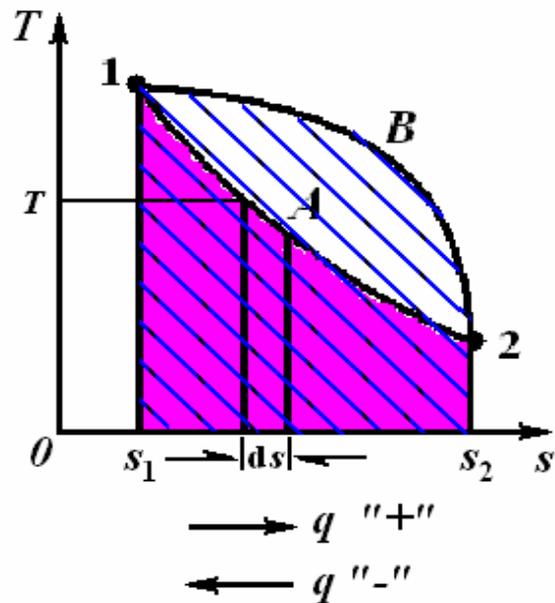
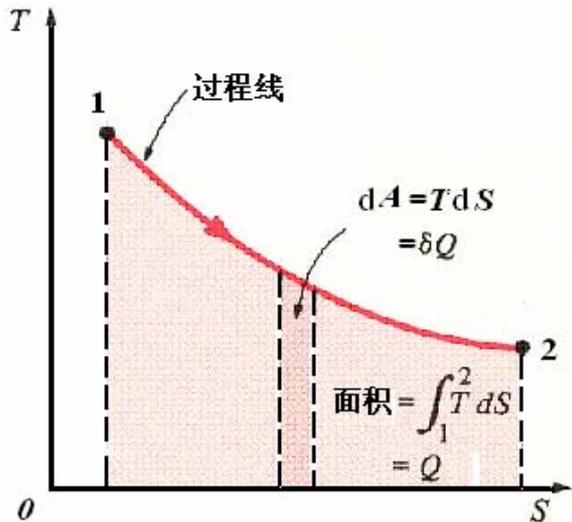
4. 计算式及状态参数图

($T-s$ 图上) 表示

$$Q = \int_1^2 TdS \quad (\text{可逆过程})$$

$$\delta Q = TdS$$

热量是过程量



四、热量与功的异同：高参考价值的真题答案，学长笔记、辅导班课程，访问：www.kaoyancas.net



1. 均为通过边界传递的能量；
2. 均为过程量；
3. 功传递由压力差推动，比体积变化是作功标志；
热量传递由温差推动，比熵变化是传热的标志；
4. 功是物系间通过宏观运动发生相互作用传递的能量；
热是物系间通过紊乱的微粒运动发生相互作用而传递的能量。

功 \longrightarrow 热是无条件的；

热 \longrightarrow 功是有条件、限度的。

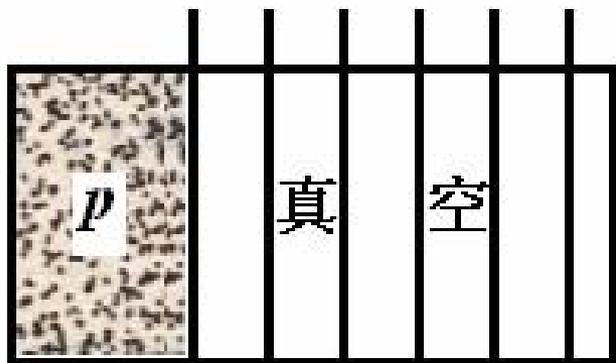




思考题：



容器为刚性绝热，抽去隔板，
重又平衡，过程性质。



逐个抽去隔板，又如何？



1-7 热力循环

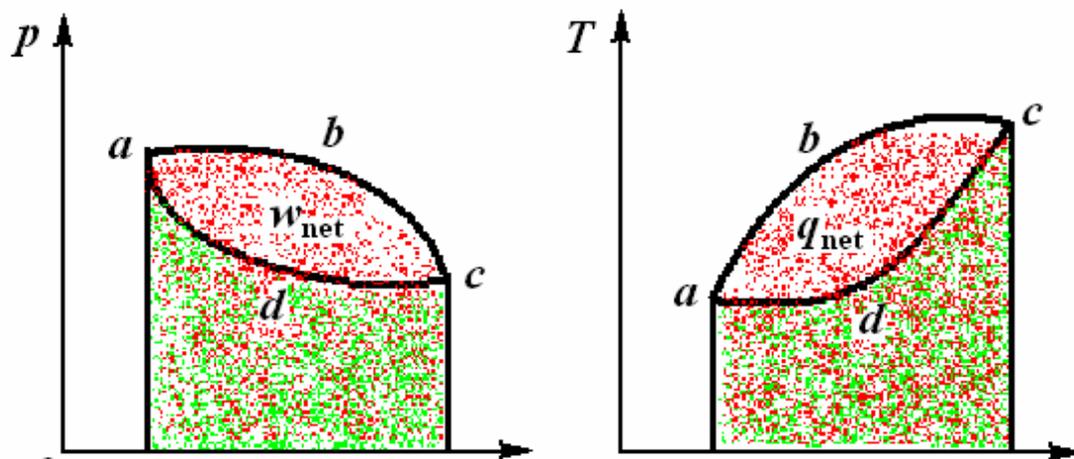


一、定义：

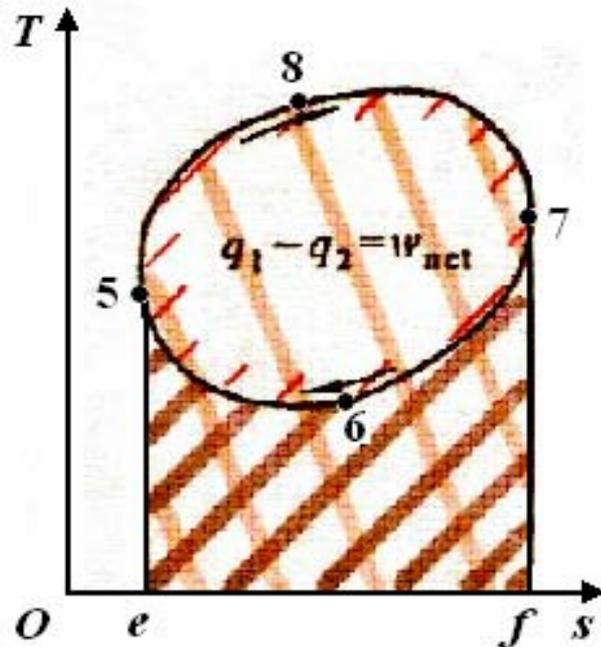
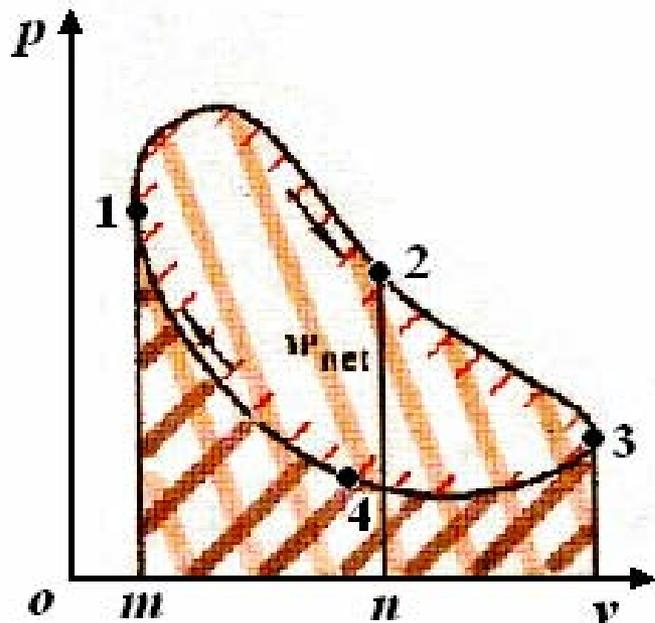
封闭的热力过程

特性：一切状态参数恢复原值，即 $\oint dx = 0$

二、可逆循环与不可逆循环(reversible cycle and irreversible cycle)



三、动力循环（正向循环）（power cycle; direct cycle）



输出净功；

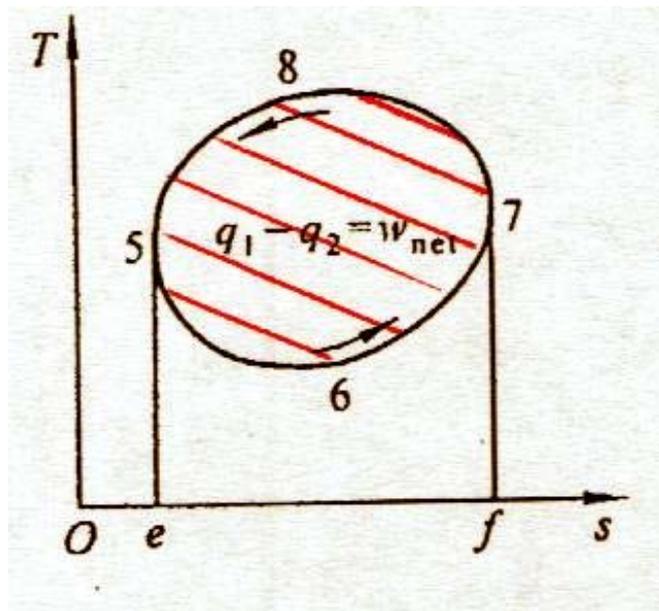
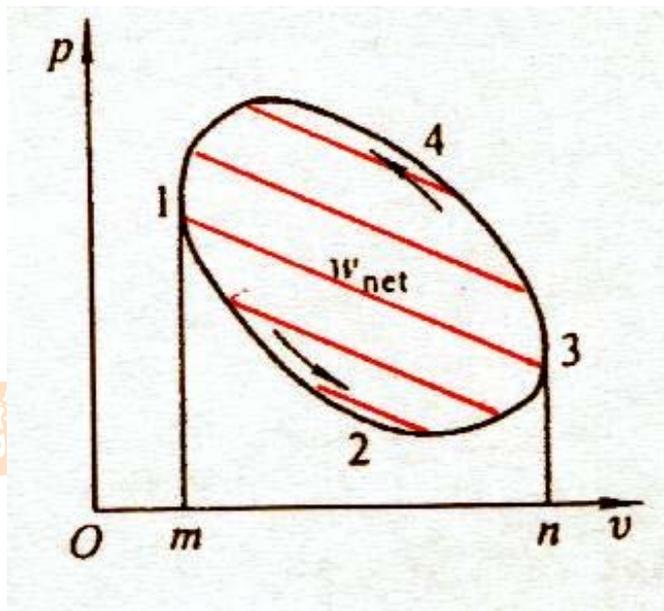
在 $p-v$ 图及 $T-s$ 图上顺时针进行；

膨胀线在压缩线上方；吸热线在放热线上方。

四、逆向循环(reverse cycle)

▲ 制冷循环(refrigeration cycle)

▲ 热泵循环(heat-pump cycle)



一般地讲：输入净功；
在状态参数图逆时针运行；
吸热小于放热。



五、循环经济性指标：

$$\frac{\text{收益}}{\text{代价}}$$

动力循环：

热效率(thermal efficiency)

$$\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{q_1} < 1$$

逆向循环：

制冷系数(coefficient of performance
for the refrigeration cycle)

$$\varepsilon = \frac{q_2}{W_{\text{net}}} \geq \text{or} < 1$$

供暖系数(coefficient of performance
for the heat-pump cycle)

$$\varepsilon' = \frac{q_1}{W_{\text{net}}} > 1$$

第二章 热力学第一定律

First law of thermodynamics

2-1 热力学第一定律的实质

2-2 热力学能（内能）和总能

2-3 热力学第一定律基本表达式

2-4 闭口系基本能量方程式

2-5 开口系能量方程

2-1 热力学第一定律的实质



一、第一定律的实质

能量守恒与转换定律在热现象中的应用。

二、第一定律的表述

热是能的一种，机械能变热能，或热能变机械能的时候，他们之间的比值是一定的。

或：

热可以变为功，功也可以变为热；一定量的热消失时必定产生相应量的功；消耗一定量的功时，必出现与之相应量的热。



2-2 热力学能（内能）和总能

一、热力学能(internal energy)

$$U \begin{cases} U_{ch} \\ U_{nu} \\ U_{th} \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} U_k \begin{cases} \text{平移动能} \\ \text{转动动能} \\ \text{振动动能} \end{cases} f_1(T) \\ U_p - f_2(T, v) \end{array} \right\} U = U(T, v)$$

二、总（储存）能(total stored energy of system)

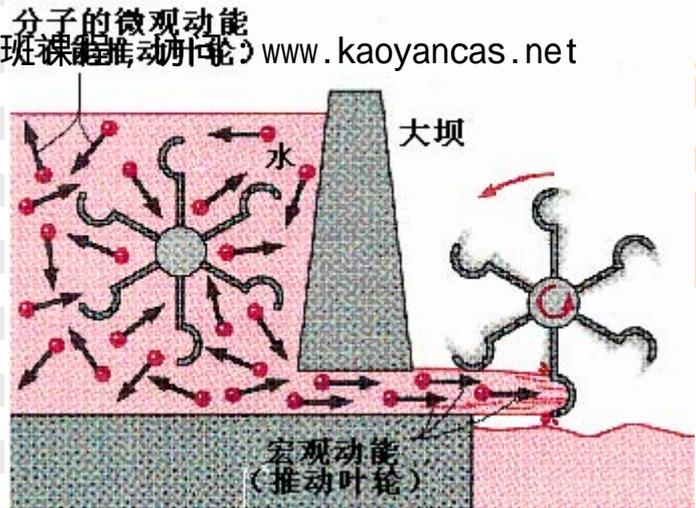
热力学能，内部储存能

$$E = U + E_k + E_p \qquad e = u + e_k + e_p$$

宏观动能 宏观位能

总能

外部储存能



宏观动能与内动能的区别

三、热力学能是状态参数

$$\oint dU = 0$$

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV = c_V dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V - p \right] dV$$

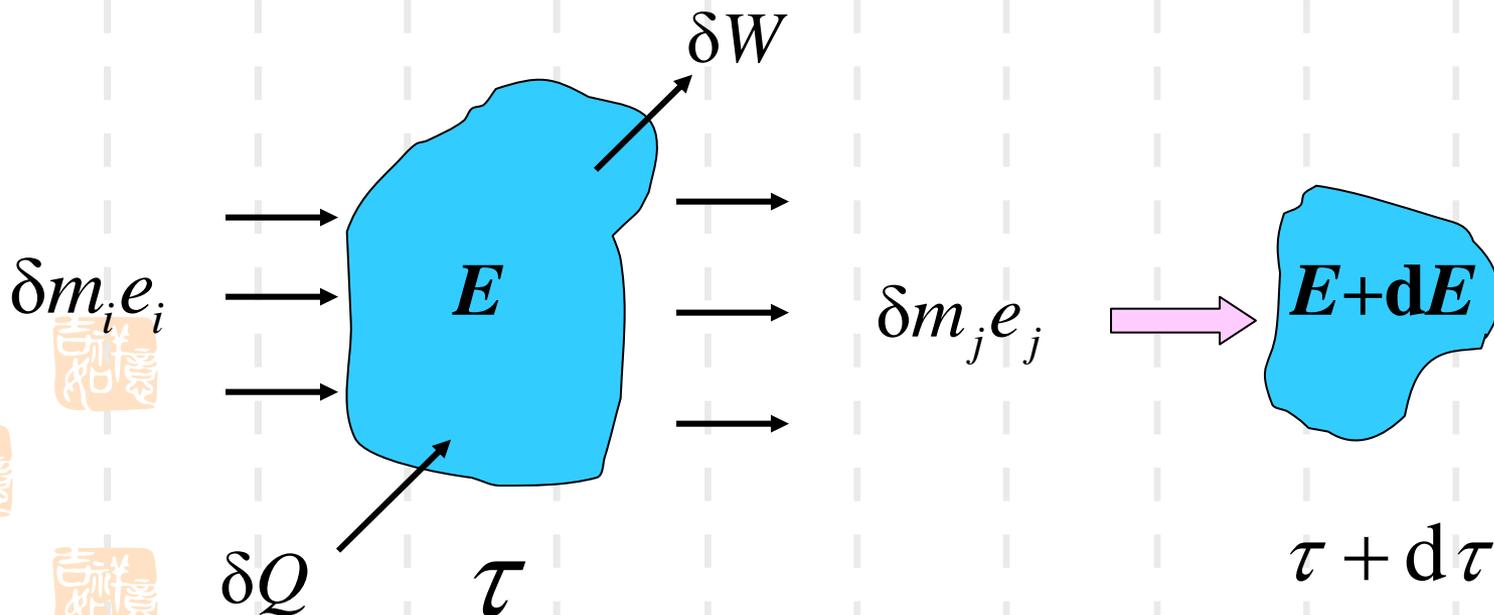
测量 p 、 V 、 T 可求出 ΔU

四、热力学能单位 J kJ

五、工程热力学 ΔU 完整版，请访问 www.kaoyancas.net 科大科院考研网，专注于中科大、中科院考研

2-3 热力学第一定律基本表达式

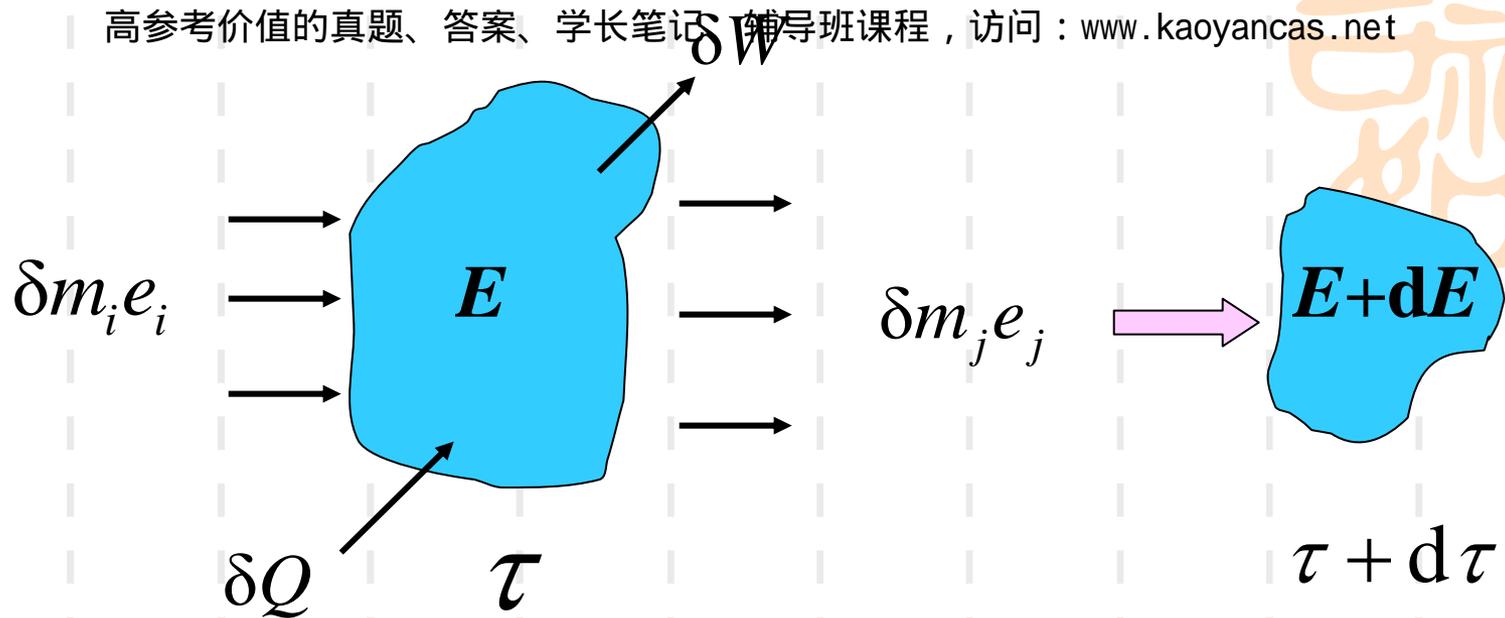
加入系统的能量总和 - 热力学系统输出的能量总和 = 热力学系统总储存能的增量



流入: $\delta Q + \sum \delta m_i e_i$

流出: $\delta W + \sum \delta m_j e_j$

内部贮能的增量: dE



$$\delta Q = dE + \left[\Sigma(e_j \delta m_j) - \Sigma(e_i \delta m_i) \right] + \delta W_{\text{tot}}$$

或

$$Q = \Delta E + \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left[\Sigma(e_j \delta m_j) - \Sigma(e_i \delta m_i) \right] + W_{\text{tot}}$$

$$\Phi = \frac{dE}{d\tau} + \left[\Sigma(e_j q_{mj}) - \Sigma(e_i q_{mi}) \right] + P_{\text{tot}}$$

2-4 闭口系基本能量方程式

$$Q = \Delta E + \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left[\Sigma(e_j \delta m_j) - \Sigma(e_i \delta m_i) \right] + W_{\text{tot}}$$

闭口系， $\delta m_i = 0$ $\delta m_j = 0$

忽略宏观动能 U_k 和位能 U_p ， $\Delta E = \Delta U$

$$Q = \Delta U + W \qquad \delta Q = dU + \delta W$$

$$q = \Delta u + w \qquad \delta q = du + \delta w$$

第一定律第一解析式—— 热 \rightarrow 功的基本表达式

讨论：

$$Q = \Delta U + W \quad \delta Q = dU + \delta W$$

$$q = \Delta u + w \quad \delta q = du + \delta w$$

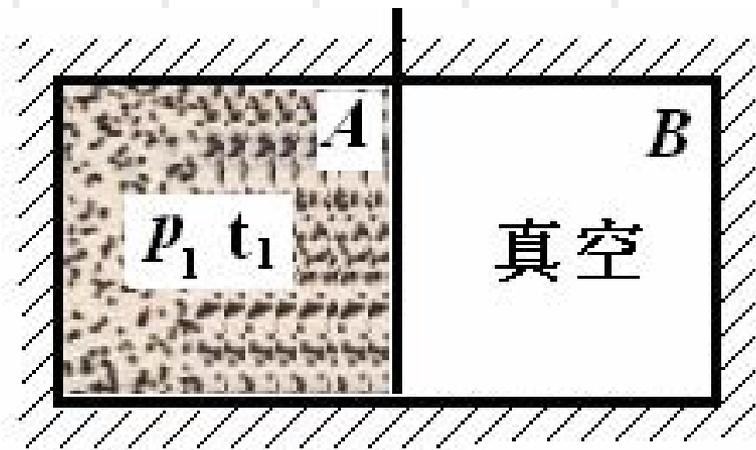
1) 对于可逆过程 $\delta Q = dU + p dV$

2) 对于循环 $\oint \delta Q = \oint dU + \oint \delta W \Rightarrow Q_{\text{net}} = W_{\text{net}}$

3) 对于定量工质吸热与升温关系，还取决于 W 的“+”、“-”、数值大小。

如图，抽去隔板，求 ΔU 解：取气体为热力系

—闭口系？开口系？



$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = 0 \quad W = ? 0$$

$$\Delta U = 0 \quad \text{即 } U_1 = U_2$$

强调：功是通过边界传递的能量。

[例A4302661](#)

[例A4303771](#)



归纳热力学解题思路

- 1) 取好热力系;
- 2) 计算初、终态;
- 3) 两种解题思路

从已知条件逐步推向目标

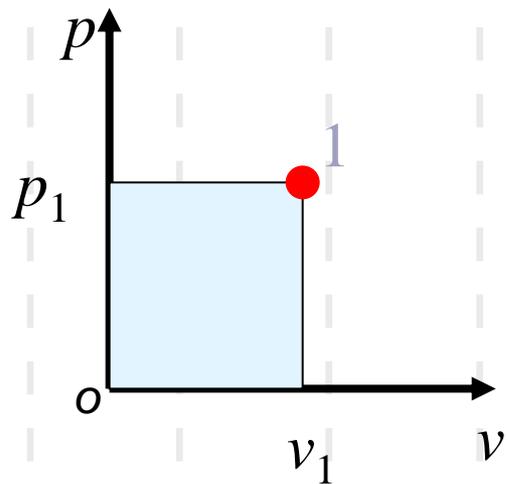
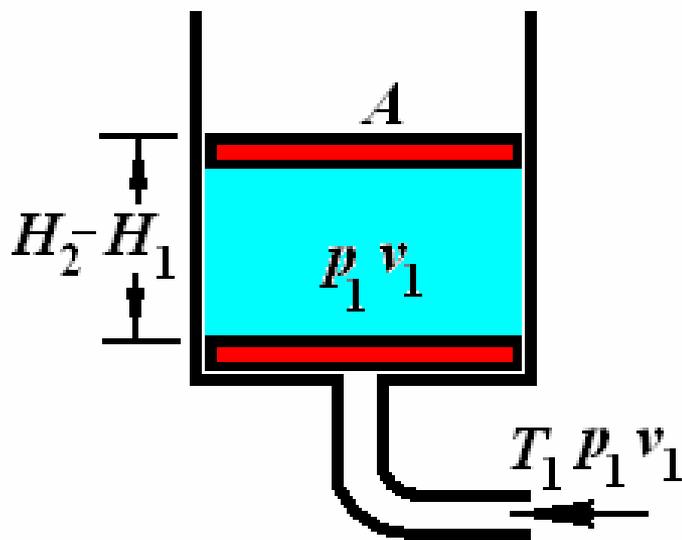
从目标反过来缺什么补什么

- 4) 不可逆过程的功可尝试从外部参数着手。



2-5 开口系能量方程

一、推动功(flow work; flow energy)和 流动功(flow work; flow energy)

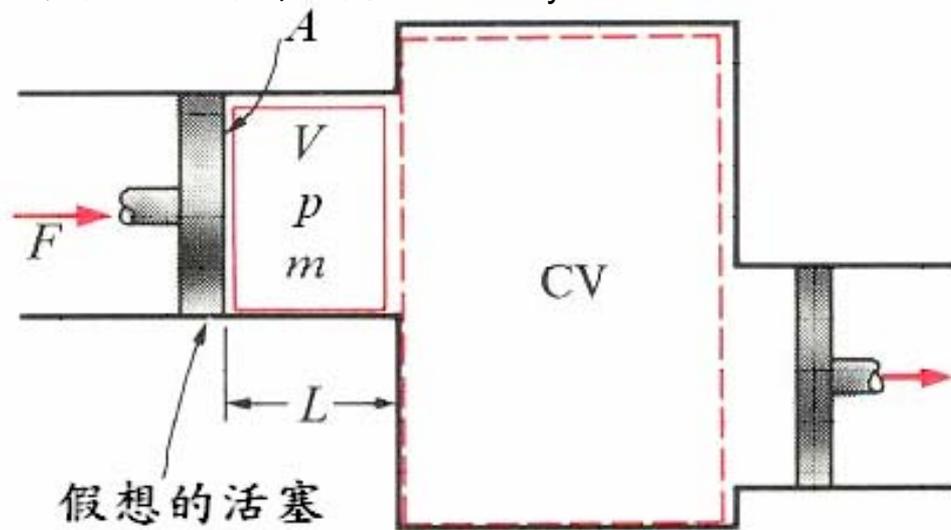


推动功：系统引进或排除工质传递的功量。

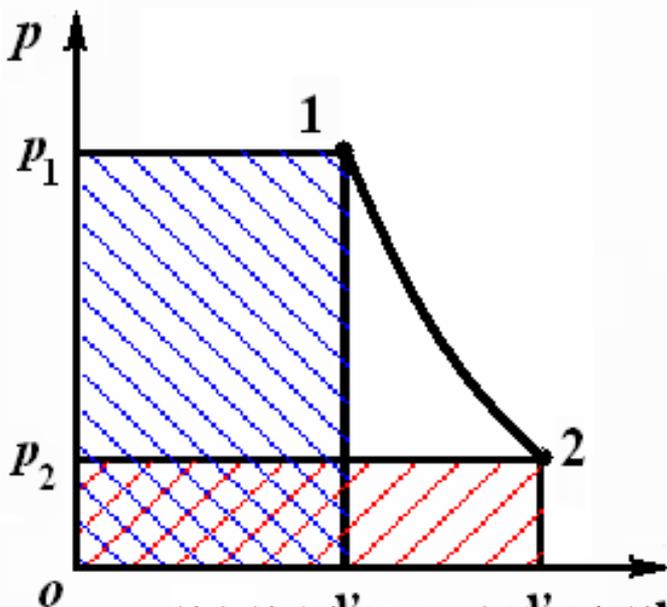
$$pA\Delta H = pv$$

流动功：系统维持流动所花费的代价。

$$p_2 v_2 - p_1 v_1 (= \Delta[pv])$$



推动功在 $p-v$ 图上:





二、焓 (enthalpy)

定义： $H=U+pV$ $h=u+pv$

单位： J (kJ) J/kg (kJ/kg)

焓是状态参数。

物理意义：

引进或排出工质而输入或排出系统的总能量。

$$dH = c_p dT + \left[V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right] dp$$



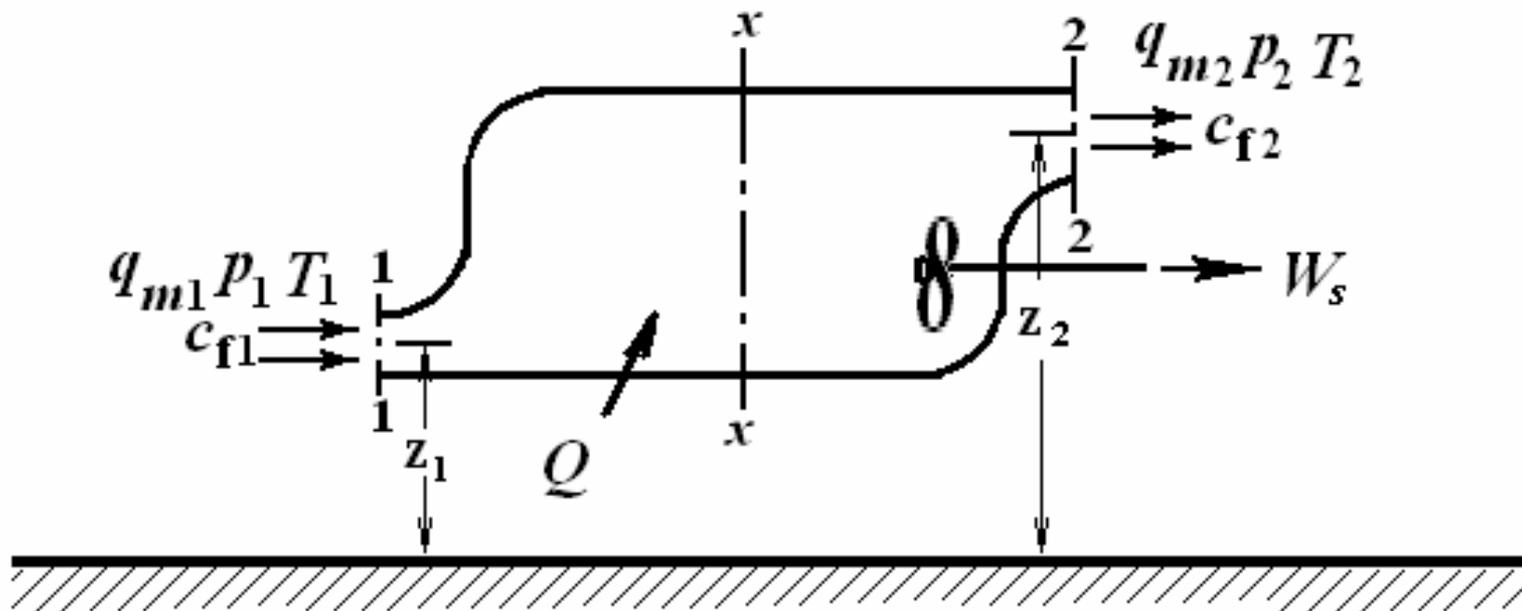
三、稳定流动能量方程(steady-flow energy equation)

稳定流动特征：

1) 各截面上参数不随时间变化。

2) $\Delta E_{CV} = 0$, $\Delta S_{CV} = 0$, $\Delta m_{CV} = 0 \dots$

注意：区分各截面间参数可不同。



流入系统的能量： $q_Q + q_{m1} \left(u_1 + p_1 v_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} + g z_1 \right)$

— 流出系统的能量： $P_s + q_{m2} \left(u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + g z_2 \right)$

= 系统内部储能增量： ΔE_{CV}

考虑到稳流特征： $\Delta E_{CV}=0$ $q_{m1}=q_{m2}=q_m$ ；及 $h=u+pv$

$$q_Q = (H_2 - H_1) + q_m \left(\frac{c_{f2}^2}{2} - \frac{c_{f1}^2}{2} \right) + q_m g (z_2 - z_1) + P_s \quad (A)$$

$$q = h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g (z_2 - z_1) + w_s \quad (B)$$

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：www.kaoyancas.net

$$q_Q = (H_2 - H_1) + q_m \left(\frac{c_{f2}^2}{2} - \frac{c_{f1}^2}{2} \right) + q_m g (z_2 - z_1) + P_s \quad (A)$$

$$q = h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g (z_2 - z_1) + w_s \quad (B)$$

讨论：

1) 改写式 (B) 为式 (C)

$$q - \Delta u = w_s + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + \left\{ \frac{1}{2} (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g (z_2 - z_1) \right\} \quad (C)$$

输出轴功

热能转变成功部分

流动功

机械能增量

$$w_t = w_s + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z$$

由式 (C)

$$q - \Delta u = w_s + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + \frac{1}{2} (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g (z_2 - z_1)$$

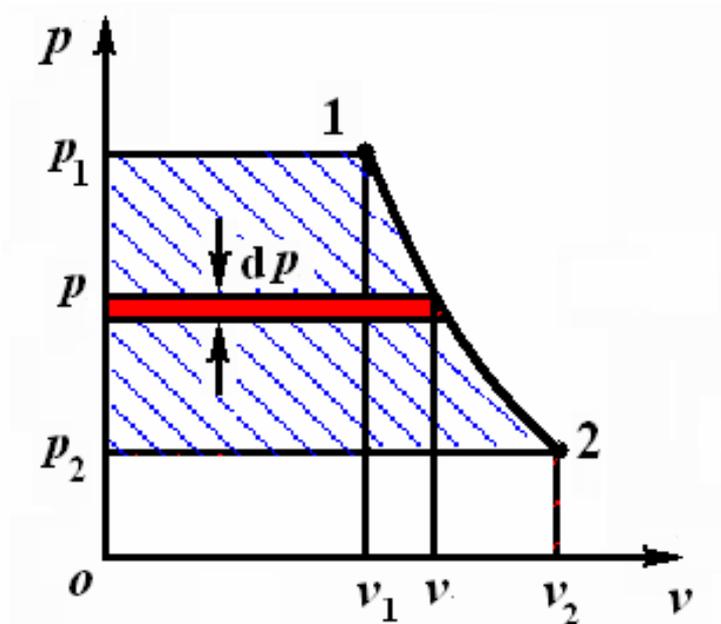
$$q - \Delta u = w_t + p_2 v_2 - p_1 v_1 \quad (D)$$

$$w_t = w - p_2 v_2 + p_1 v_1$$

$$\delta w_t = \delta w - d(pv)$$

可逆过程

$$\delta w_t = pdv - d(pv) = -vdp$$



3) 第一定律第二解析式 参考价值的真解精武 学长笔记、辅导班课程, 访问: www.kaoyancas.net

$$w_t = w_s + \frac{1}{2} \Delta c_f + g \Delta z$$

$$q = h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g (z_2 - z_1) + w_s \quad (B)$$

$$q = \Delta h + w_t \quad \text{可逆} \quad q = \Delta h - \int_1^2 v dp$$

$$\delta q = dh + \delta w_t \quad \delta q = dh - v dp$$

4) 两个解析式的关系

$$\delta q = dh - v dp = d(u + pv) - v dp$$

$$= du + p dv = du + \delta w_{\text{膨}}$$

总之:

1) 通过膨胀, 由热能 \longrightarrow 功, $w = q - \Delta u$

2) 第一定律两解析式可相互导出, 但只有在开系中
能量方程才用焓。

四、稳定流动能量方程式的应用

1. 蒸汽轮机、气轮机 (steam turbine、gas turbine)

流进系统:

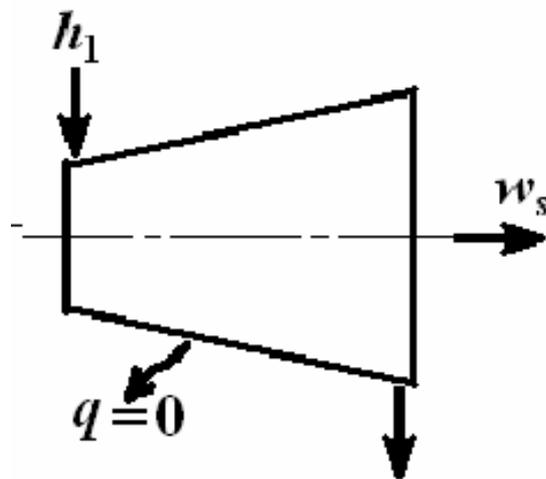
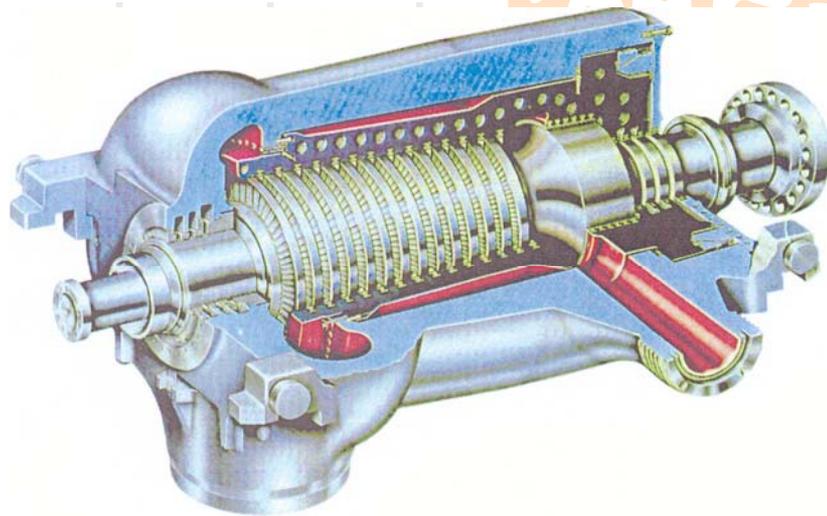
$$u_1 + p_1 v_1 = h_1$$

流出系统:

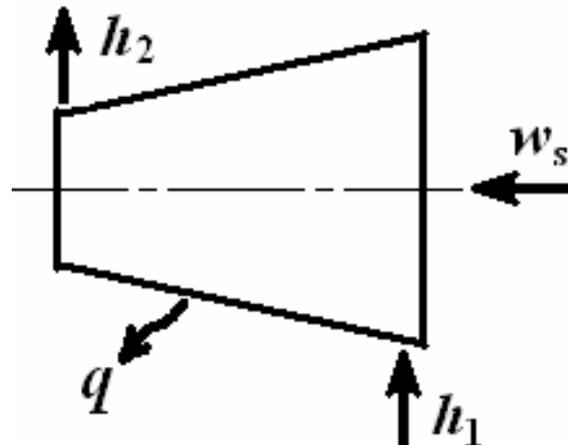
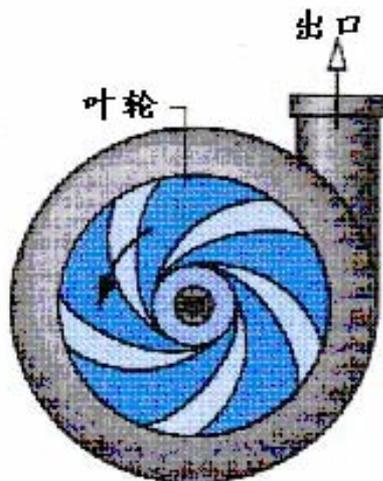
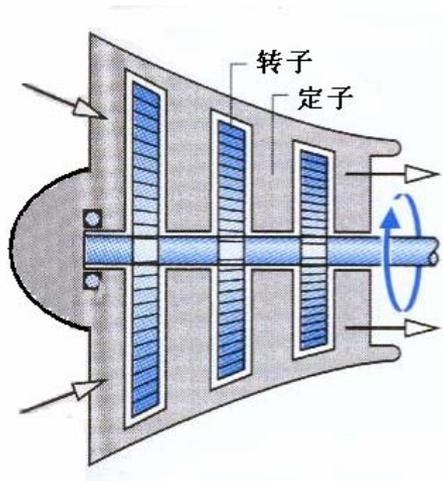
$$u_2 + p_2 v_2 = h_2, w_s$$

内部储能增量: 0

$$h_1 - h_2 = w_s = w_t$$



2. 压气机，水泵类 (compressor, pump)



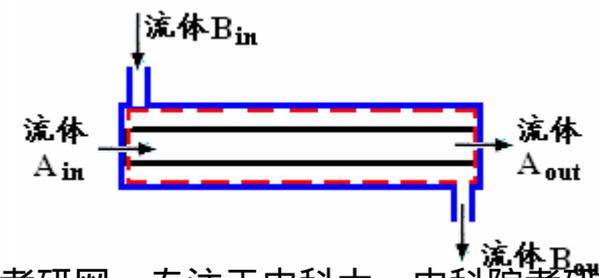
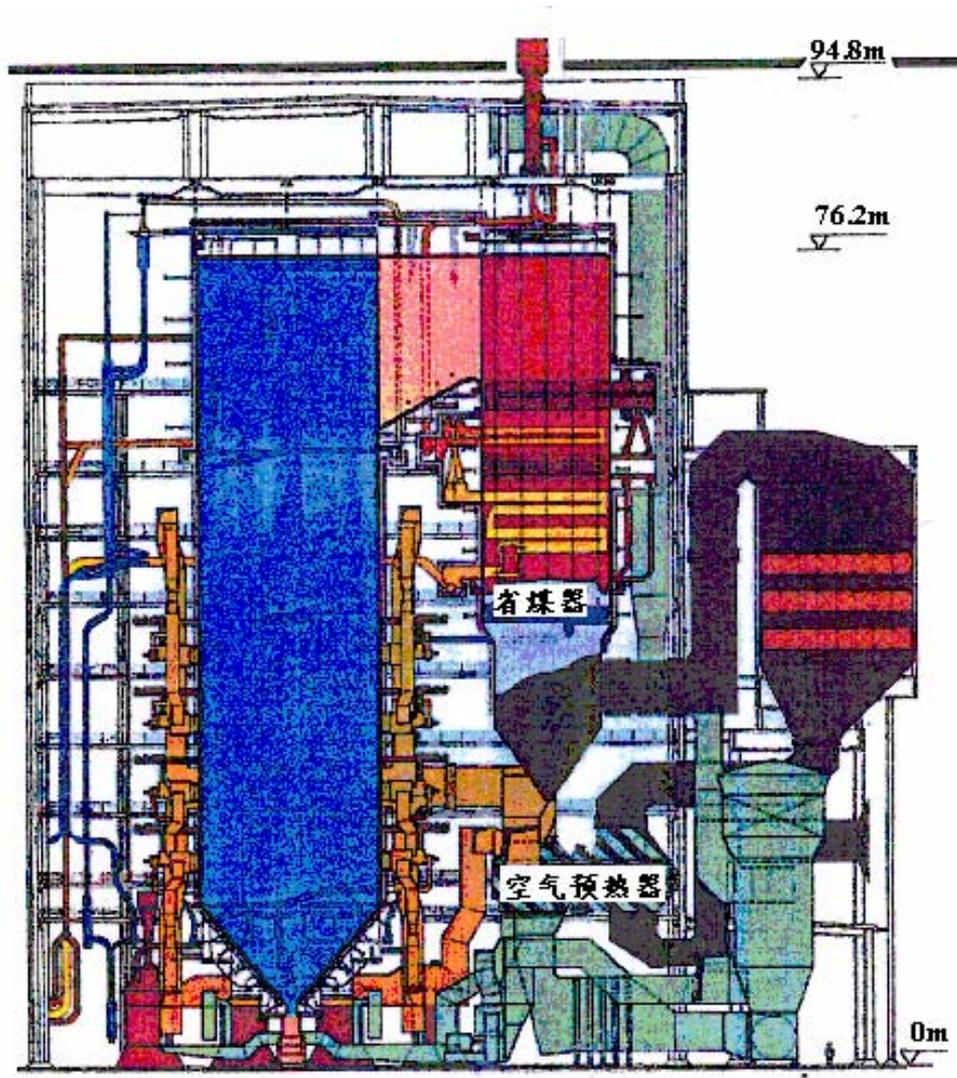
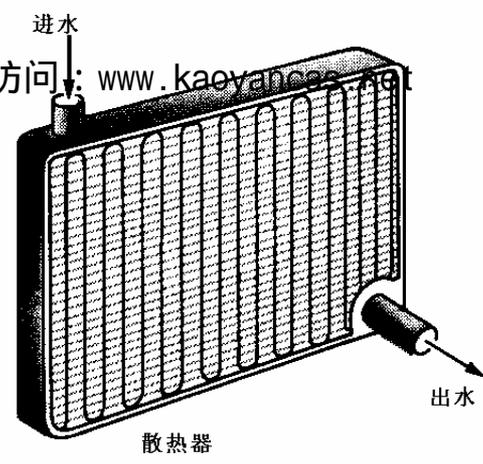
流入 $h_1, \left(\frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 \right), w_s$

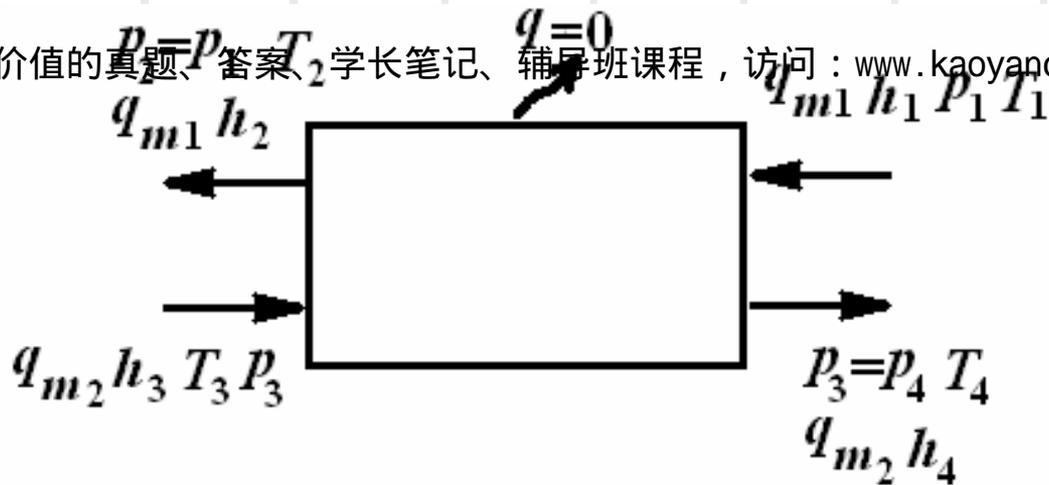
流出 $h_2, \left(\frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 \right), q$

内部贮能增量 0

高参考价值的真题、答案、学长笔记、辅导班课程，访问：www.kaoyancas.net

3. 换热器（锅炉、加热器等） (heat exchanger: boiler, heater etc.)





流入:

$$q_{m_1} \left(h_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1 \right) + q_{m_2} \left(h_3 + \frac{1}{2} c_{f3}^2 + gz_3 \right)$$

流出:

$$q_{m_1} \left(h_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2 \right) + q_{m_2} \left(h_4 + \frac{1}{2} c_{f4}^2 + gz_4 \right)$$

内增: 0

若忽略动能差、位能差

$$h_4 - h_3 = \frac{q_{m_1}}{q_{m_2}} (h_1 - h_2)$$



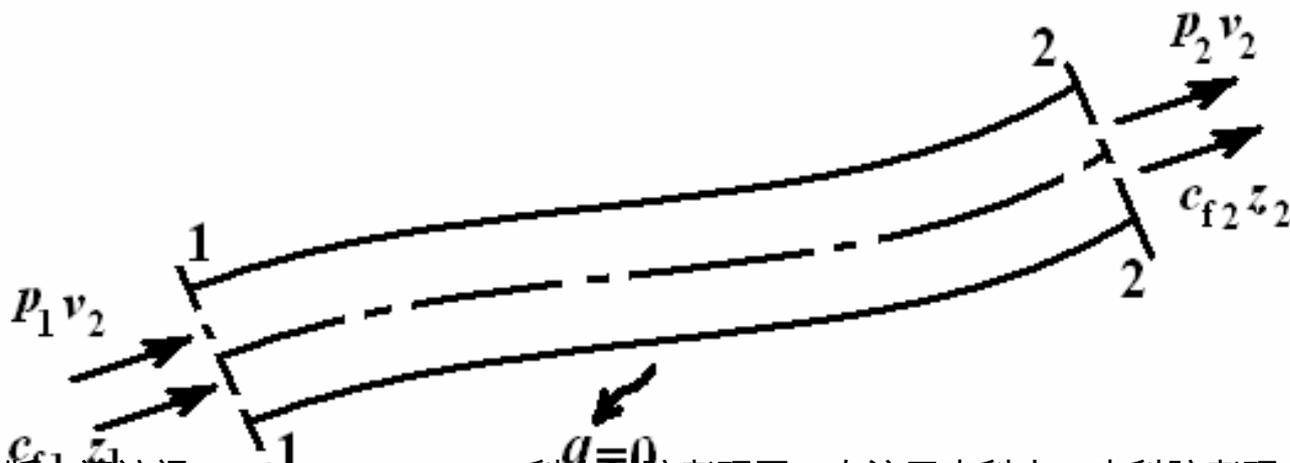
4. 管内流动

流入： $u_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1 + p_1 v_1$

内增：0

流出： $u_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2 + p_2 v_2$

$$\Delta \left(u + \frac{1}{2} c_f^2 + gz + \frac{p}{\rho} \right) = 0$$





[例A4312661](#)

[例A4322661](#)

[例A4332771](#)

[例A4333771](#)



归纳：

- 1) 开口系问题也可用闭口系方法求解。
- 2) 注意闭口系边界面上热、功交换；尤其是边界面变形时需考虑功的交换。
- 3) 例 [A4333771](#) 中若有无摩擦及充分导热的活塞，结果如何？
——解法三即可认为是这种情况，故无影响。
- 4) 若 [A4333771](#) 活塞为绝热材料制造，

若活塞下有弹簧，

若...

...

如何？

