

化工原理学习指导

行者左脸制作

小蚂蚁化学论坛

<http://bbs.my666.com>

第一章 流体流动

1.1 教学基本要求：（14 学时，包括绪论）

概述 流体的作用力和机械能；牛顿粘性定律。

静力学 静止流体受力平衡的研究方法；压强和势能的分布；静力学原理的工程应用。

守恒原理 流动流体的机械能守恒（柏努利方程）；压头；机械能守恒原理的应用。

流体流动的内部结构 层流和湍流的基本特征；定态和稳态的概念；流动边界层的概念；管流剪应力分布和速度分布。

流体流动的机械能损失 沿程阻力损失；因次论指导下的实验研究方法；当量直径；局部阻力损失；当量长度。

管路计算 管路设计型计算的特点、计算方法（参数的选择和优化，常用流速）；阻力损失对流动的影响；简单管路的计算。

流量和流速的测量 毕托管、孔板流量计、转子流量计的原理和计算方法。

1.2 基本概念：

质点 含有大量分子的流体微团，其尺寸远小于设备尺寸，但比起分子自由程却要大得多。

连续性假定 假定流体是由大量质点组成的、彼此间没有间隙、完全充满所占空间的连续介质。

拉格朗日法 选定一个流体质点，对其跟踪观察，描述其运动参数(如位移、速度等)与时间的关系。

欧拉法 在固定空间位置上观察流体质点的运动情况，如空间各点的速度、压强、密度等，即直接描述各有关运动参数在空间各点的分布情况和随时间的变化。

定态流动 流场中各点流体的速度 u 、压强 p 不随时间而变化。

轨线与流线 轨线是同一流体质点在不同时间的位置连线，是拉格朗日法考察的结果。流线是同一瞬间不同质点在速度方向上的连线，是欧拉法考察的结果。

系统与控制体 系统是采用拉格朗日法考察流体的。控制体是采用欧拉法考察流体的。

理想流体与实际流体的区别 理想流体粘度为零，而实际流体粘度不为零。

粘性的物理本质 分子间的引力和分子的热运动。通常液体的粘度随温度增加而减小，因为液体分子间距离较小，以分子间的引力为主。气体的粘度随温度上升而增大，因为气体分子间距离较大，以分子的热运动为主。

总势能 流体的压强能与位能之和。

可压缩流体与不可压缩流体的区别 流体的密度是否与压强有关。有关的称为可压缩流体，无关的称为不可压缩流体。

牛顿流体与非牛顿流体的区别 流体行为是否符合牛顿粘性定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad 1-1$$

符合的为牛顿流体，不符合的为非牛顿流体。

伯努利方程的物理意义 流体流动中的位能、压强能、动能之和保持不变。

平均流速 流体的平均流速是以体积流量相同为原则的。

动能校正因子 实际动能之平均值与平均速度之动能的比值。

均匀分布 同一横截面上流体速度相同。

均匀流段 各流线都是平行的直线并与截面垂直，在定态流动条件下该截面上的流体没有加速度，故沿该截面势能分布应服从静力学原理。

层流与湍流的本质区别 是否存在流体速度 u 、压强 p 的脉动性，即是否存在流体质点的脉动性。

稳定性与定态性 稳定性是指系统对外界扰动的反应。定态性是指有关运动参数随时间的变化情况。

边界层 流动流体受固体壁面阻滞而造成速度梯度的区域。

边界层分离现象 在逆压强梯度下，因外层流体的动量来不及传给边界层，而形成边界层脱体的现象。

因次 因次就是量纲。

雷诺数的物理意义 雷诺数是惯性力与粘性力之比。

因次分析实验研究方法的主要步骤 ①经初步实验列出影响过程的主要因素；②无因次化减少变量数并规划实验；③通过实验数据回归确定参数及变量适用范围，确定函数形式。

摩擦系数 层流区， λ 与 Re 成反比，而与相对粗糙度无关；一般湍流区， λ 随 Re 增加而递减，同时 λ 随相对粗糙度增大而增大；充分湍流区， λ 与 Re 无关， λ 随相对粗糙度增大而增大。

完全湍流粗糙管 当壁面凸出物低于层流内层厚度，体现不出粗糙度过对阻力损失的影响时，称为水力光滑管。 Re 很大， λ 与 Re 无关的区域，称为完全湍流粗糙管。同一根实际管子在不同的 Re 下，既可以是水力光滑管，又可以是完全湍流粗糙管。

局部阻力当量长度 把局部阻力损失看作相当于某个长度的直管，该长度即为局部阻力当量长度。

驻点压强 在驻点处，动能转化成压强(称为动压强)，所以驻点压强是静压强与动压强之和。

毕托管特点 毕托管测量的是流速，通过换算才能获得流量。

孔板流量计的特点 恒截面，变压差。结构简单，使用方便，阻力损失较大。

转子流量计的特点 恒流速，恒压差，变截面。

非牛顿流体的特性 **塑性**：只有当施加的剪应力大于屈服应力之后流体才开始流动。**假塑性与涨塑性**：随剪切率增高，表观粘度下降的为假塑性。随剪切率增高，表观粘度上升的为涨塑性。**触变性**与**震凝性**：随剪应力 τ 作用时间的延续，流体表观粘度变小，当一定的剪应力 τ 所作用的时间足够长后，粘度达到定态的平衡值，这一行为称为触变性。反之，粘度随剪切力作用时间延长而增大的行为则称为震凝性。**粘弹性**：不但有粘性，而且表现出明显的弹性。具体表现如：爬杆效应、挤出胀大、无管虹吸。

1.3 基本内容：

本章主要讨论有关流体流动的基本原理，流体流动的基本规律。流体流动的计算是物料衡算、力平衡、能量衡算的综合应用。

一、流体静力学

1. 流体密度

流体密度是指单位体积 V 内流体的质量 m 。对于气体来说，密度与温度、压力都有关。由物理化学知识可知

$$pV = nRT = \frac{m}{M} RT \quad 1-2$$

其中 R 为通用气体常数，其值为 8314 J/kmolK ； M 为气体平均分子量。由密度定义可得

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT} \quad 1-3$$

当已知一种状态的气体密度，求另一种状态的气体密度时，可用下式进行换算

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{T_1 p_2}{T_2 p_1} \quad 1-4$$

在计算气体的体积流量时，因温度、压力的不同而引起密度、体积变化，也需要进行换算。当已知一种状态的气体流量求另一种状态的气体时，可用下式进行换算。

$$q_{V2} = q_{V1} \frac{T_2 p_1}{T_1 p_2} \quad 1-5$$

例 1 试计算常压下，20℃空气的密度。

解：方法 1：空气的平均分子量为 29，由式 1-3 可得

$$\rho = \frac{29 \times 1.013 \times 10^5}{8314 \times 293} = 1.206 \text{ kg/m}^3$$

方法 2：标准态下(0℃, 1.013×10⁵Pa)空气的密度为 29/22.4，由式 1-4 可得

$$\rho = \frac{M}{22.4} \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{29}{22.4} \times \frac{273}{293} = 1.206 \text{ kg/m}^3$$

液体密度通常可视作不可压缩流体，认为它只与温度有关。液体密度可查教材附录。

2. 压强换算

单位换算：压力可以用流体柱高度来表示，它们的换算可以用下式

$$p = \rho g h \quad 1-6$$

此外，压力的单位除 Pa(=N/m²)外，有 kgf/cm²，atm，等等。要掌握它们之间的换算关系。

基准换算：压力分为绝压、表压、真空度。压力表读数就是表压，即绝对压力比大气压高出多少；真空表读数就是真空度，即绝对压力比大气压低多少。真空度实际上就是负压。

例 2 2MPa(表压)压力等于几公斤压力，相当于几米水柱。

解：绝对压力为

$$p = 2 \times 10^6 + 1.013 \times 10^5 = 2.101 \times 10^6 \text{ Pa (绝压)}$$

1 公斤力等于 9.81 牛顿，所以

$$p = \frac{2.101 \times 10^6}{9.81 \times 10^4} = 21.42 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (绝压)}$$

水的密度为 1000kg/m³，所以

$$p = \frac{2.101 \times 10^6}{9.81 \times 10^3} = 214.2 \text{ mH}_2\text{O (绝压)}$$

1 大气压等于 1.033kgf/cm²或 10.33mH₂O，所以用表压表示为

$$p = 21.42 - 1.033 = 20.38 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (表压)}$$

$$p = 214.2 - 10.33 = 203.8 \text{mH}_2\text{O} \text{ (表压)}$$

3. 基本公式及应用

静力学方程 $\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g$ 1-7

静力学方程应用条件：

- ①同种流体且不可压缩（气体高差不大时仍可用）；
- ②静止（或等速直线运动的流体横截面——均匀流）；
- ③重力场；
- ④单连通。

例 3 如图 1.1 所示，测量 A 处的压力

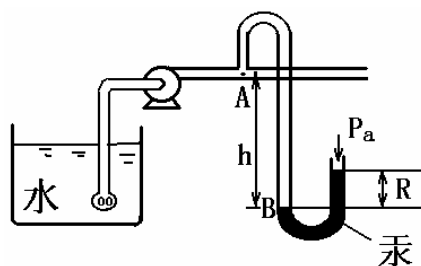


图 1.1 测压示意图

已知：R=180mm, h=500mm

求： p_A =? (绝压)，(表压)

解：由静力学方程应用条件可知，在 U 形管的 B 平面上，符合“等高等压”的条件，即左边压力与右边压力相等。

左边 $p_B = p_A + \rho_{\text{汞}} g R$

右边 $p_B = p_A + \rho_{\text{水}} g h$

两边相等可得 $p_A = p_A + \rho_{\text{汞}} g R - \rho_{\text{水}} g h$
 $= 1.013 \times 10^5 + 13600 \times 9.81 \times 0.18 - 1000 \times 9.81 \times 0.5$
 $= 1.204 \times 10^5 \text{Pa (绝压)}$

或 $p_A = 1.204 \times 10^5 - 1.013 \times 10^5 = 1.91 \times 10^4 \text{Pa (表压)}$

例 4 如图 1.2 所示，设备中压力要保持，液体要排出，须用液封。求液封的高度 h 应为多少。

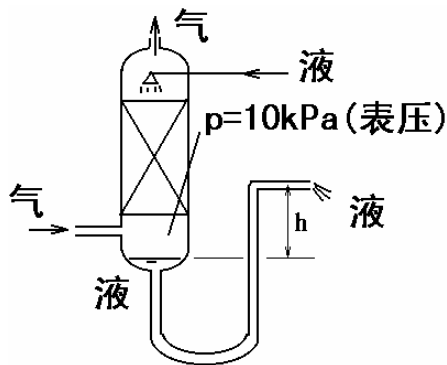


图 1.2 液封

解：根据静力学方程可得

$$p - p_a = \rho gh$$

所以
$$h = \frac{p - p_a}{\rho g} = \frac{10 \times 10^3}{1000 \times 9.81} = 1.02m$$

二、机械能守恒

1. 流量和流速

质量流量等于体积流量乘以密度，即 $q_m = q_v \rho$ 。它是一种瞬时的特性，不是某段时间内累计流过的量。当流体作定态流动时，流量不随时间而变。平均速度是按流量相等为原则计算的，即

$$u = \frac{q_v}{A}$$

对于气体，流速随密度的变化而变化，但是，速度与密度的乘积却不变，所以有时用质量流速来表示比较方便。

$$G = \rho u = \frac{q_m}{A}$$

在满流、定态的条件下，水平直管中的液体流速并不会因流动阻力而沿程减速；垂直直管向下流动中的液体也不会因重力而沿程加速。这是由质量守恒方程所限定的。

2. 柏努利方程及其应用

柏努利方程的导出是在流场中①取微分控制体②作力衡算③结合定态流动过程有迁移加速度的特点，建立微分方程并解析解。具体形式为

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{u_2^2}{2} \quad 1-8$$

上述取控制体进行分析的方法，不仅对于动量传递过程是常用的分析方法，而且对于热量传递、质量传递过程也是常用的。所以，在掌握柏努利方程的同时，要掌握这一分析方法，以便举一反三。

柏努利方程的物理意义是流体流动中的位能、压强能、动能之和保持常数。柏努利方程的几何意义是流体流动中以流体柱高度表示的位头、压头、速度头之和保持不变。

柏努利方程的应用条件是：

- 1) 重力场，定态流动，不可压缩的理想流体沿轨线；
- 2) 无外加机械能或机械能输出。

在实际过程中，如果距离较短、阻力损失较小，可以忽略时，就可以考虑使用柏努利方程解决实际流体的流动问题，如重力射流、压力射流、虹吸等等过程。

例 5 如图所示，用 U 形压差计测量风机的风量。

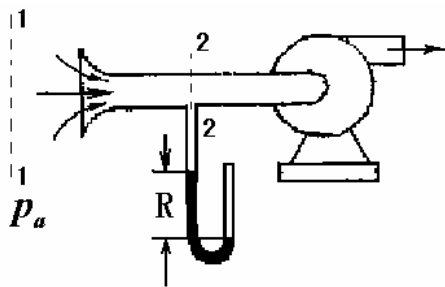


图 1.3 风量的测定

已知指示剂为水， R 为 20mm，风机吸入管直径为 300mm，空气密度为 1.2kg/m^3 ，求风机的风量。

解：先取图 1.3 中所示的 1-1 和 2-2 截面，注意截面选取在垂直于流动方向，且在均匀流段、已知数最多。1-1 截面为大截面，可视作速度为零。由 1-1 至 2-2 排柏努利方程

$$\frac{p_a}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

压差计：

$$p_a = p_2 + \rho_i g R$$

$$\text{由此可得： } u_2 = \sqrt{\frac{2(p_a - p_2)}{\rho}} = \sqrt{2gR \frac{\rho_i}{\rho}} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.02 \times \frac{1000}{1.2}} = 18.1\text{m/s}$$

$$\text{流量 } q_V = A_2 u_2 = 0.785 \times 0.3^2 \times 18.1 = 1.28\text{m}^3/\text{s}$$

三、阻力损失

1. 流体流动类型

流体流动存在两种不同的类型，即层流和湍流。圆直管内流体的层流和湍流在很多方面存在着区别，如速度分布、流动阻力、传热传质速率等方面，但是本质区别在于是否存在流体质点的脉动性。

流体流动类型的判据是雷诺数

$$\text{Re} = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{dG}{\mu} \quad 1-9$$

对于液体，计算 Re 数时采用 $du\rho/\mu$ 比较多，而对于气体，采用 dG/μ 更为方便。

流体流动类型通常可用三区两类型概括。当 $\text{Re} < 2000$ 时，为稳定的层流区；当 $\text{Re} > 4000$ 时，为稳定的湍流区；当 $2000 < \text{Re} < 4000$ 时，为过渡区，有时为层流，有时为湍流。

雷诺数对于后续的学习内容很重要，时常会遇到，它的物理意义可以分析如下：

$$\text{Re} = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{\rho u^2}{\mu \frac{u}{d}}$$

上式分子 ρu^2 与流体的惯性力成正比；分母与式 1-1 比较，可表征为粘性力。因此，雷诺数的物理意义是流体的惯性力与粘性力之比。

2. 边界层

流动流体受固体壁面阻滞而造成速度梯度的区域称为边界层。研究边界层主要是要弄清流体流动阻力的形成机理，实际流体有速度梯度就会形成内摩擦，有内摩擦就会造成阻力损

失。

边界层脱体的条件是①逆压强梯度；②外层流体动量来不及传入边界层。边界层脱体的后果是①产生大量旋涡；②造成较大的能量损失。讨论边界层脱体主要是说明流体流动局部阻力形成的原因。

3. 阻力损失

阻力损失的根本原因是流动流体存在粘性。直管阻力与局部阻力的划分只是根据流动的外部条件来分的。阻力损失的测量是根据机械能衡算式

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g + \frac{u_2^2}{2} + h_f \quad 1-10$$

来确定的。对于水平直管， $u_1=u_2$ ， $z_1=z_2$ ，阻力损失表现为压差损失。通过对圆直管内流体运动的数学描述，获得了计算圆直管内流体层流流动时的阻力损失的公式，即泊谟叶方程

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{32\mu ul}{\rho d^2} \quad 1-11$$

泊谟叶方程的应用条件是①牛顿流体；②层流状态；③圆直管速度分布稳定段。

对于湍流直管阻力，采用阻力损失计算通式

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad 1-12$$

摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 、相对粗糙度 ε/d 有关，可查教材中的莫迪图，即图 1-34。

对照式 1-11 和 1-12 可得，层流时

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad 1-13$$

在阻力损失的学习中，要从数学表达式中弄清阻力损失 h_f 的影响因素，尤其是速度 u 、流量 q_v 、管径 d 等因素的影响。不难推出，层流时

$$h_f \propto \frac{u}{d^2} \propto \frac{q_v}{d^4} \quad 1-14$$

$$\text{充分湍流时} \quad h_f \propto \frac{u^2}{d} \propto \frac{q_v^2}{d^5} \quad 1-15$$

对于非圆形管道，可采用当量直径

$$d_e = \frac{4A}{\Pi} \quad 1-16$$

式中 A 为管道截面积， Π 为浸润周边。但是当量直径 d_e 仅用于

$$h_f = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{u^2}{2} \quad \text{和} \quad Re = \frac{d_e u \rho}{\mu} = \frac{d_e G}{\mu}$$

以及相对粗糙度 ε/d_e 。速度 u 为实际平均速度。绝对不成立 $u = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} d_e^2}$ 。

例 6 有一方形截面的直管管道，方形边长为 100mm，输送流量为 0.1m³/s、密度为 1.2kg/m³、

20°C 的空气，已知管道的粗糙度 $\varepsilon = 0.2\text{mm}$ ，试求每米管长的损失压降为多少？

解：查 20°C 的空气中的粘度为 $1.81 \times 10^{-5}\text{Pas}$ ，管道的当量直径为

$$d_e = \frac{4 \times 0.1 \times 0.1}{4 \times 0.1} = 0.1\text{m}$$

相对粗糙度 $\frac{\varepsilon}{d_e} = \frac{0.2 \times 10^{-3}}{0.1} = 0.002$

速度 $u = \frac{q_v}{A} = \frac{0.1}{0.1 \times 0.1} = 10\text{m/s}$

雷诺数 $Re = \frac{d_e u \rho}{\mu} = \frac{0.1 \times 10 \times 1.2}{1.81 \times 10^{-5}} = 6.63 \times 10^4$

查莫迪图可得摩擦系数 $\lambda = 0.026$ ，每米管长阻力损失压降为

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{\rho u^2}{2} = 0.026 \times \frac{1}{0.1} \times \frac{1.2 \times 10^2}{2} = 15.6\text{Pa}$$

由管件、阀件所引起的局部阻力损失可按

$$h_f = \zeta \frac{u^2}{2} \quad 1-17$$

计算。也可按当量长度 l_e 的方法计算。

$$h_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2} \quad 1-18$$

应当注意的是，两种方法并不一致，都有近似。

4. 阻力损失的单位

阻力损失的单位有三种：损失压降 Pa ；损失能量 J/kg ；损失压头 $\text{m}(=\text{J/N})$ 。损失压降 ΔP 、损失能量 h_f 、损失压头 H_f 三者之间的换算关系为：

$$H_f = \frac{h_f}{g} = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad 1-19$$

四、管路计算

1. 阻力损失压差-管路状况-流量三者关系

如图 1.4 所示管路，当槽 1 的总势能大于槽 2 的总势能时，流体流动方向为槽 1 向槽 2。

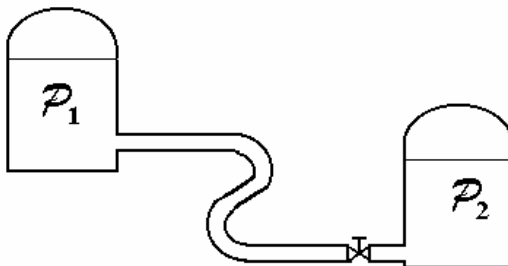


图 1.4 管路计算

对此，可以列出如下计算式

质量守恒式
$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2 u$$

机械能衡算式
$$\frac{P_1}{\rho} = \frac{P_2}{\rho} + \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2}$$

摩擦系数计算式
$$\lambda = \varphi \left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d} \right)$$

从而，可以导出如下的阻力损失压差-管路状况-流量三者关系

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{8}{\pi^2 d^4} q_v^2 \quad 1-20$$

由上式可以得出如下结论：①管路状况一定，流量增加 $q_v \uparrow$ ，阻力损失增加 $h_f \uparrow$ ；② h_f (ΔP) 一定，阀门关小 $\zeta \uparrow$ ，流量减小 $q_v \downarrow$ ；③流量 q_v 一定，阀门关小 $\zeta \uparrow$ ，阻力损失 $h_f \uparrow$ 。

例7 如图 1.5 所示管路，当阀门关小时， $\zeta \uparrow$ ，则变量 h_{fAB} 、 p_A 、 p_B 将发生如何变化，为什么？

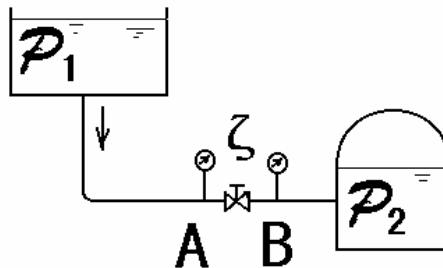


图 1.5 例 7 附图

解：当阀门关小时， ζ 上升，管路流量减小。因管路段 1-A 状况没有变化，流量减小，压差减小，1 处压强不变，A 处压强必然上升。管路段 B-2 状况也没有变化，流量减小，压差减小，2 处压强不变，B 处压强必然下降。

所以 h_{fAB} 上升； p_A 上升； p_B 下降。

由例 7 可以得出一般结论：阀门关小，上游压强上升，下游压强下降，压差增大；阀门开大，上游压强下降，下游压强上升，压差减小。

例 8 如图 1.6 所示管路，原先 1、2、3 阀均为半开。当阀门 1 关小时，变量 q_v 、 q_{v1} 、 q_{v2} 、 q_{v3} ，将发生如何变化，为什么？

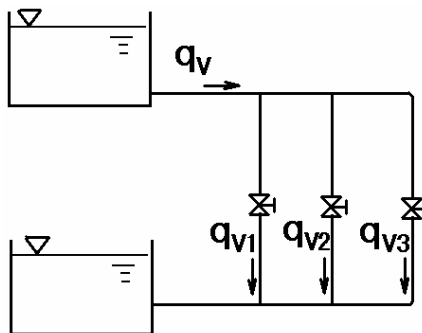


图 1.6 例 8 附图

解：当 1 阀关小时， ζ_1 上升，总流量 q_v 、流量 q_{v1} 均下降。1 阀两端压差上升，而 2 阀、3

阀状况没有变化，所以流量 q_{v2} 、 q_{v3} 上升。

2. 简单管路计算

简单管路计算包括串联管路。它可以由多项沿程阻力与局部阻力组成，但是，没有分支管路。串联管路如图 1.7 所示

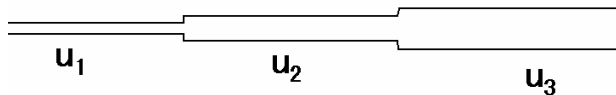


图 1.7 串联管路

串联管路计算的特点是：
$$h_{f总} = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3} \quad 1-21$$

$$q_v = q_{v1} = q_{v2} = q_{v3} \quad 1-22$$

在计算中，注意各段阻力计算的 u 、 l 、 d 、 λ 的不同。

简单管路的阻力损失可用下式计算

$$H_f = \Sigma \frac{8(\Sigma \lambda \frac{l}{d} + \Sigma \zeta)}{\pi^2 d^4 g} q_v^2 \quad 1-23$$

如果是两个容器之间的定态流动，则阻力损失等于两个容器之间的总势能差。

3. 并联管路计算

当并联管路不是太短时，分流和汇合处的阻力损失与管路的阻力损失相比可以忽略不计。如图 1.8 所示为并联管路

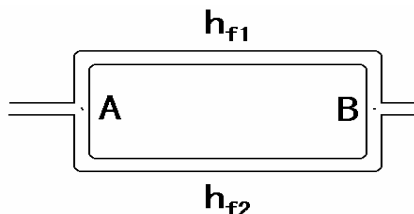


图 1.8 并联管路

并联管路的方程特点：
$$\frac{P_A - P_B}{\rho} = h_{f1} = h_{f2} \quad 1-24$$

$$q_{v总} = q_{v1} + q_{v2} \quad 1-25$$

在计算中，注意 h_f 不要重复计算，只要计算其中的一个就可知道另一个。

例 9 如图 1.9 所示，由一高位槽向搅拌反应器送料，料液性质同 20℃ 的水，流量 1.3l/s，镀锌铁管 $\phi 42 \times 3\text{mm}$ ，管长 10m，90° 弯头 4 个，闸阀(全开)1 个。搅拌反应器内压强 $p=10\text{kPa}$ (表压)。

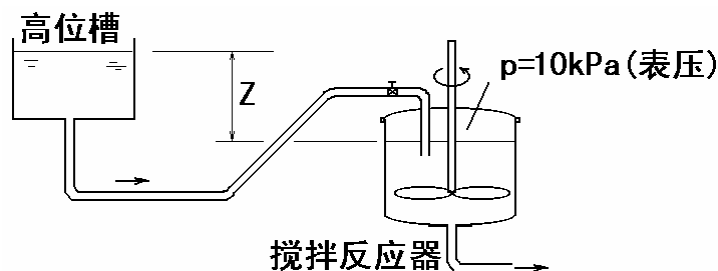


图 1.9 例 9 附图

试求：Z 应为多少 m。

解：计算管内流速 $u = \frac{4q_v}{\pi d^2} = \frac{4 \times 1.3 \times 10^{-3}}{3.14 \times 0.036^2} = 1.28 \text{ m/s}$

计算雷诺数 $Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.036 \times 1.28 \times 1000}{0.001} = 4.61 \times 10^4$

查 90° 标准弯头 $\zeta = 0.75$ ，闸阀全开 $\zeta = 0.17$ ，出口 $\zeta = 1$ ，

取 $\varepsilon = 0.2 \text{ mm}$ ， $\varepsilon/d = 0.0056$ ，查莫迪图得 $\lambda = 0.033$ ，

由高位槽液面至反应器液面作机械能衡算

$$Z = \frac{p}{\rho g} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2g}$$

$$= \frac{10^4}{10^3 \times 9.81} + \left(0.033 \times \frac{10}{0.036} + 4 \times 0.75 + 0.17 + 1 \right) \frac{1.28^2}{2 \times 9.81} = 2.13 \text{ m}$$

例 10 原有一长输油管路，直径 $d_1 = 1 \text{ m}$ ，流量为 q_{V1} ，现为了增加输油量的 50%，在原来的长管旁并联一根直径为 d_2 的长管。已知油在原管道中为层流。求 $d_2 = ?$

解：先作示意图

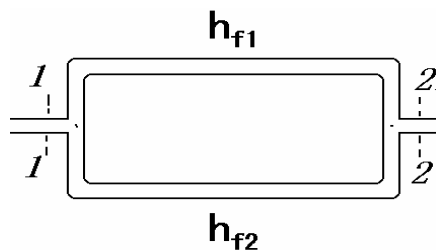


图 1.10 例 10 解附图

由于 $h_{f1} = h_{f2}$

而且 $h_f = \frac{32\mu u l}{\rho d^2}$

根据 $q_{V2} < q_{V1}$ ，则 $d_2 < d_1$ ， $u_1 < u_2$ ，

而雷诺数 $Re = \frac{du\rho}{\mu}$

所以 $Re_2 < Re_1$ ，小管中流动也为层流

由 $\frac{32\mu u_1 l}{\rho d_1^2} = \frac{32\mu u_2 l}{\rho d_2^2}$

可得 $\frac{u_2}{u_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$

$$\frac{q_{V2}}{q_{V1}} = \frac{u_2 d_2^2}{u_1 d_1^2} = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4$$

$$d_2 = d_1 \left(\frac{q_{V2}}{q_{V1}} \right)^{0.25} = 1 \times 0.5^{0.25} = 0.84m$$

4. 阻力控制问题

如图 1.11 所示的分支管路，水经过总管，进入两支管。

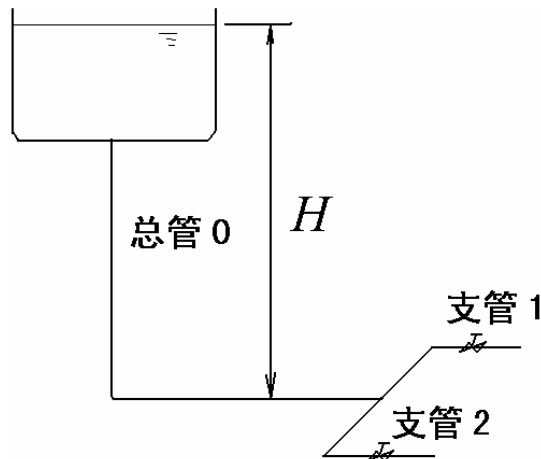


图 1.11 阻力控制问题

根据机械能衡算，从水槽液面至支管 1 出口，可建立如下机械能衡算方程

$$H \cdot g = \left(\lambda \frac{l+l_e}{d} \right)_0 \frac{u_0^2}{2} + (\zeta_1 + 1) \frac{u_1^2}{2} \quad 1-26$$

从分流点分别至支管 1、支管 2 出口排能量衡算方程

$$(\zeta_1 + 1) \frac{u_1^2}{2} = (\zeta_2 + 1) \frac{u_2^2}{2} \quad 1-27$$

从式 1-26 可以看出，阻力损失分两部分，一部分为总管阻力损失，另一部分为支管阻力损失。

总管阻力为主时， u_0 基本确定，增加分支， $q_{V总}$ 几乎不变。这时，由式 1-27 可以看出，支管的阀门调节，只能改变流量在各支管之间的分配，各支管之间相互干扰。

支管阻力为主时，总管阻力可以忽略，增加分支，调节支管阀门， $q_{V分支}$ 互不干扰。

五、流量测定

1. 毕托管

原理上要弄清驻点压强。在驻点处，动能转化成压强(称为动压强)，所以驻点压强是静压强与动压强之和。毕托管通过测定驻点压强与静压强之差，确定的是点速度。

$$u_r = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2gR(\rho_i - \rho)}{\rho}} \quad 1-28$$

对于圆管，通常毕托管测定管中心的最大速度，再根据雷诺数

$$Re_{max} = \frac{du_{max}\rho}{\mu} \quad 1-29$$

查图以获得平均速度，从而获得流量。

2. 孔板流量计

孔板流量计是孔截面不变，随着流量变化，孔板前后的压强差也随之而变，通过测定压

差，可以确定流量。孔板流量计结构简单，使用方便，但是阻力损失较大。孔板流量计可以通过下式计算流量

$$q_V = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad 1-30$$

$$\Delta P = R(\rho_i - \rho)g \quad 1-31$$

计算中，注意 C_0 与 Re_d 、 $m(=A_0/A_1)$ 有关。 Re_d 为管道中流体流动的雷诺数。当 Re_d 大于某一值时， C_0 仅与 $m(=A_0/A_1)$ 有关，而不再与 Re_d 有关；对于确定的孔板 C_0 就为常数。在测定不同种类的流体时，注意 Re_d 的换算、式 1-30 的换算、 C_0 的换算。

3. 转子流量计

转子流量计的流动面积为转子与圆锥形玻管之间的环隙面积，当流量变化时，转子的位置也会上下变动，环隙面积也随之变动。由于转子的重量是一定的，测定流量时，转子上下压差也是恒定的，从而环隙中的流体速度也是恒定的。转子流量计的流量关系式

$$q_V = C_R A_0 \sqrt{\frac{2g(\rho_f - \rho)V_f}{\rho A_f}} \quad 1-32$$

计算中，注意在测定不同种类的流体时进行密度的换算。若流量系数 C_R 为常数，则

$$\frac{q_{VB}}{q_{VA}} = \sqrt{\frac{\rho_A(\rho_f - \rho_B)}{\rho_B(\rho_f - \rho_A)}} \quad 1-33$$

出厂时，玻管上的刻度值是按标准流体(液体转子流量计， $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ；气体转子流量计， $\rho = 1.2 \text{kg/m}^3$)标定的，计量其它密度不同的流体时，注意刻度换算。对于气体计量，式 1-33 还可以进一步简化

$$\frac{q_{VB}}{q_{VA}} = \sqrt{\frac{\rho_A}{\rho_B}} \quad 1-34$$

例 11 用转子流量计计量乙醇流量，已知： $\rho_f = 3000 \text{kg/m}^3$ ， $\rho_{乙醇} = 800 \text{kg/m}^3$ ，测量范围

内 C_R 为常数，现读数为 $5 \text{m}^3/\text{h}$ ，实际流量为多少？

解：出厂标定 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ，则换算关系为

$$\begin{aligned} q_{V实} &= q_{V读} \sqrt{\frac{\rho_{标}(\rho_f - \rho_{实})}{\rho_{实}(\rho_f - \rho_{标})}} \\ &= 5 \times \sqrt{\frac{1000 \times (3000 - 800)}{800 \times (3000 - 1000)}} = 5.86 \text{m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

1.4 教材习题答案：

- P_A (绝) = $1.28 \times 10^5 \text{N/m}^2$
 P_A (表) = $2.66 \times 10^4 \text{N/m}^2$
- $W = 6.15$ 吨
- $F = 1.42 \times 10^4 \text{N}$

- $P = 7.77 \times 10^4 \text{Pa}$
- 4 $H = 0.39\text{m}$
- 5 $\Delta P = 2.41 \times 10^5 \text{N/m}^2$
- 6 $P = 1.028 \times 10^5 \text{Pa}$ (绝); $\Delta h = 0.157\text{m}$
- 7 $P = 18\text{kPa}$ (绝); $H = 8.36\text{m}$
- 8 $H = R$; $P_A > P_B$
- 9 略
- 10 $P = P_a \exp[-Mgh/RT]$
- 11 $u = 11.0\text{m/s}$; $G = 261.9\text{kg/m}^2\text{s}$
 $q_m = 2.27\text{kg/s}$
- 12 $R = 340\text{mm}$, R 不变
- 13 $q_v = 2284\text{m}^3/\text{h}$
- 14 $\tau = 1466\text{s}$
- 15 $H_f = 0.26\text{J/N}$
- 16 细管最上端; 会汽化
- 17 $u_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$
 $u_2 = A_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$
- 18 $F = 4.02 \times 10^3 \text{N}$
- 19 略
- 20 $u_2 = 3.62\text{m/s}$; $R = 0.41\text{m}$
- 21 $F = 151\text{N}$
- 22 $v = 5.5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$
- 23 $\frac{u}{u_{\max}} = 0.817$, $\alpha = 1.06$
- 24 略
- 25 P (真) = 95kPa ; P (真) 变大
- 26 $Z = 12.4\text{m}$
- 27 P (表) = 0.30MPa (表)
- 28 $q_v = 3.39\text{m}^3/\text{h}$; P_1 变小; P_2 变大
- 29 $q_v = 1.81\text{m}^3/\text{h}$
- 30 $H = 43.8\text{m}$; $\rho_{\text{烟}} < \rho_{\text{外}}$; H 增大, P_1 降低, 抽吸量增加
- 31 $\tau = 2104\text{s}$
- 32 $H_e = 38.1\text{J/N}$
- 33 $q_v = 0.052\text{m}^3/\text{s} = 186\text{m}^3/\text{h}$
- 34 $q_{v1} = 9.70\text{m}^3/\text{h}$; $q_{v2} = 4.31\text{m}^3/\text{h}$
 $q_{v3} = 5.39\text{m}^3/\text{h}$; $q'_{v3} = 5.39\text{m}^3/\text{h}$
- 35 $q_{vB}/q_{vC} = 1.31$; $q_{vB}/q_{vC} = 1.05$; 能量损失
- 36 P_1 (绝) = $5.35 \times 10^5 \text{Pa}$
- 37 $u = 13.0\text{m/s}$

38 $q_v = 7.9\text{m}^3/\text{h}$

39 $q_{v\text{CO}_2}(\text{上限}) = 3248\text{l/h}$

40 $\frac{du}{dy} = 500\text{ l/s}; \tau = 3 \times 10^4\text{Pa}$

$F = 3 \times 10^2\text{N}; P = 150\text{w}$

41 $h_e = 60.3\text{J/kg}$

42 $\tau_y = 18.84\text{Pa}; \mu_\infty = 4.55\text{Pa} \cdot \text{s}$

43 $\tau_y = 39.7\text{Pa}$

44 略

1.5 教材思考题解：

1. 假定流体是由大量质点组成的、彼此间没有间隙、完全充满所占空间的连续介质。
质点是含有大量分子的流体微团，其尺寸远小于设备尺寸，但比起分子自由程却要大得多。
2. 前者描述同一质点在不同时刻的状态；后者描述空间任意定点的状态。
3. 分子间的引力和分子的热运动。
通常气体的粘度随温度上升而增大，因为气体分子间距离较大，以分子的热运动为主；温度上升，热运动加剧，粘度上升。液体的粘度随温度增加而减小，因为液体分子间距离较小，以分子间的引力为主，温度上升，分子间的引力下降，粘度下降。
4. 静压强的特性：①静止流体中任意界面上只受到大小相等、方向相反、垂直于作用面的压力；②作用于任意点所有不同方位的静压强在数值上相等；③压强各向传递。
5. 1) 图略，受力箭头垂直于壁面、上小下大。
2) 内部压强 $p = \rho gh = 1000 \times 9.81 \times 0.5 = 4.91\text{kPa}$;
外部压强 $p = F/A = 10/0.008 = 1.25\text{kPa} < \text{内部压强 } 4.91\text{kPa}$ 。
因为容器内壁给了流体向下的力，使内部压强大于外部压强。
6. 容器 A 的液体势能下降，使它与容器 B 的液体势能差减小，从而 R_2 减小。 R_1 不变，因为该 U 形管两边同时降低，势能差不变。
7. 由静力学方程可以导出 $\Delta p = H(\rho_{\text{冷}} - \rho_{\text{热}})g$ ，所以 H 增加，压差增加，拔风量增大。
8. 前者指速度分布大小均匀；后者指速度方向平行、无迁移加速度。
9. 重力场下、不可压缩、理想流体作定态流动，流体微元与其它微元或环境没有能量交换时，同一流线上的流体间能量的关系。
10. $R = R'$ ，因为 U 形管指示的是总势能差，与水平放还是垂直放没有关系。
11. 选 (1) $p_B < p_A$ ；因为管道出口通大气，出口压力等于 p_A ，而 B 处的位置比出口处高，所以，压力较低。
12. 是否存在流体速度 u 、压强 p 的脉动性，即是否存在流体质点的脉动性。
13. 惯性力与粘性力之比。
14. $\Delta P = 32 \mu u L / d^2$ 。不可压缩流体在直圆管中作定态层流流动时的阻力损失计算。
15. 当壁面凸出物低于层流内层厚度，体现不出粗糙度过对阻力损失的影响时，称为水力光滑管。在 Re 很大， λ 与 Re 无关的区域，称为完全湍流粗糙管。
16. 定义为 $4A/\Pi$ 。不能按该式计算流量。
17. 因为质量守恒，直管内不同轴向位子的速度是一样的，不会因为重力而加快，重力只体现在压强的变化上。

18. (1) h_1 下降, h_2 下降, (h_1-h_2) 下降;
(2) h_1 上升, h_2 上升, (h_1-h_2) 下降。
19. q_v 、 q_{v1} 下降, q_{v2} 、 q_{v3} 上升。
20. 不一定, 具体要看管路状况是否变化。

第二章 流体输送机械

2.1 教学要求：（4 学时）

管路特性 管路特性方程。

离心泵 离心泵实际压头、功率、效率的主要影响因素（流量、密度及气缚现象）；离心泵的工作点和流量调节方法；离心泵的安装高度，汽蚀余量；离心泵的选用。

其它泵 往复泵的工作原理、特点和流量调节方法。

气体输送机械 气体输送的特点及风机的全风压概念。

2.2 基本概念：

管路特性方程 管路对能量的需求，管路所需压头随流量的增加而增加。

输送机械的压头或扬程 流体输送机械向单位重量流体所提供的能量(J/N)。

离心泵主要构件 叶轮和蜗壳。

离心泵理论压头的影响因素 离心泵的压头与流量，转速，叶片形状及直径大小有关。

叶片后弯原因 使泵的效率。

气缚现象 因泵内流体密度小而产生的压差小，无法吸上液体的现象。

离心泵特性曲线 离心泵的特性曲线指 $H_e \sim q_v$ ， $\eta \sim q_v$ ， $P_a \sim q_v$ 。

离心泵工作点 管路特性方程和泵的特性方程的交点。

离心泵的调节手段 调节出口阀，改变泵的转速。

汽蚀现象 液体在泵的最低压强处(叶轮入口)汽化形成气泡，又在叶轮中因压强升高而溃灭，造成液体对泵设备的冲击，引起振动和侵蚀的现象。

必需汽蚀余量(NPSH)r 泵入口处液体具有的动能和压强能之和必须超过饱和蒸汽压强能多少。

离心泵的选型(类型、型号) ①根据泵的工作条件，确定泵的类型；②根据管路所需的流量、压头，确定泵的型号。

正位移特性 流量由泵决定，与管路特性无关。

往复泵的调节手段 旁路阀、改变泵的转速、冲程。

离心泵与往复泵的比较(流量、压头) 前者流量均匀，随管路特性而变，后者流量不均匀，不随管路特性而变。前者不易达到高压头，后者可达高压头。前者流量调节用泵出口阀，无自吸作用，启动时关出口阀；后者流量调节用旁路阀，有自吸作用，启动时开足管路阀门。

通风机的全压、动风压 通风机给每立方米气体加入的能量为全压($P_a = J/m^3$)，其中动能部分为动风压。

真空泵的主要性能参数 ①极限真空；②抽气速率。

2.3 基本内容：

流体输送设备是向流体补加机械能的设备，用于将流体从低能位送往高能位处，或向流体补加能量，以克服流体在流动过程中的能量损失。

输送液体的设备称为泵，按工作原理可分为离心泵、往复泵、旋转泵、流体作用泵等。输送气体的设备主要有通风机、鼓风机、压缩机等。形成负压的为真空泵。

一、管路特性

管路特性表示了流体对输送机械的能量要求。如图 2.1 所示的流体输送管路，它的管路

特性

$$H_e = \frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z + \Sigma \frac{8(\lambda \frac{l}{d} + \zeta)}{\pi^2 d^4 g} q_v^2 \quad 2-1$$

式中 $\Delta p = p_2 - p_1$, $\Delta z = z_2 - z_1$ 。

式 2-1 中右边第二项为阻力损失项，可以写成

$$\Sigma H_f = \Sigma \frac{8(\lambda \frac{l}{d} + \zeta)}{\pi^2 d^4 g} q_v^2 = K q_v^2 \quad 2-2$$

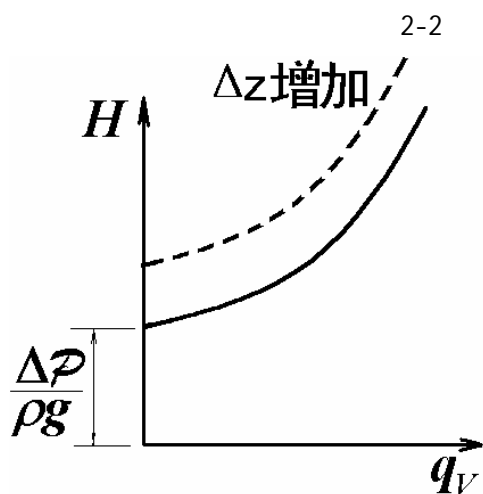


图 2.2 管路特性

度 ρ 增加，管路特性曲线不变。

阻力损失部分中有管径 d 、管长 l 、 l_e 或 ζ 、 λ 或相对粗糙度 ϵ/d ，比如当管路阀门关小时， ζ 增加，式 2-2 中的 K 值随之增加，如图 2.3 所示，管路特性曲线就会变得更陡。

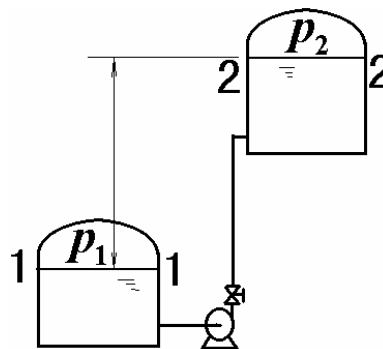


图 2.1 输送管路

当流体流动为高度湍流时， K 与流量无关。管路特性的影响因素可分为两部分，即势能增加部分和阻力损失部分。

势能增加部分中有位差 Δz ，压差 Δp ，密度 ρ 。如图 2.2 所示，当位差 Δz 增加时，管路特性曲线会上移。同样道理，当压差 Δp 增加时，管路特性曲线也会上移。密度的影响分三种情况，当 $\Delta p > 0$ 时，密度 ρ 增加，管路特性曲线下移。当 $\Delta p < 0$ 时，密度 ρ 增加，管路特性曲线上移。当 $\Delta p = 0$ 时，密

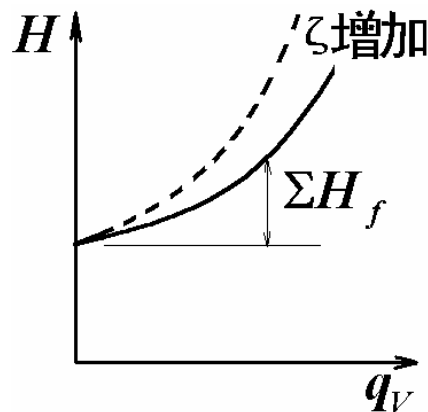


图 2.3 阀门开度的影响

二、离心泵

1. 离心泵的主要部件

叶轮：其作用是将电机的机械能直接传给液体，以增加液体的静压能和动能(主要是静压能)。

蜗壳(泵壳)：其作用不仅是汇集由叶轮甩出的液体，而且能将液体的部分动能转变成静压能。

2. 离心泵的工作原理

叶轮在电机的带动下作高速旋转运动，叶片间的液体也随着转动。在离心力场的作用下，

在叶轮中心形成低压；在叶轮外缘形成高压。叶轮中心吸入低势能、低动能的液体，在叶轮外缘输出高势能、高动能的液体。在蜗壳中，由于流道的逐渐扩大，液体逐渐减速，又将大部分动能转化成压强能。然后，液体以较高的压强排入出口管道。

为了获得较高的泵效率，叶片采用后弯的形式。后弯叶片的叶轮边缘产生的液体动能较小，而静压能较大，动能在转化成压强能的过程中损失较小，从而泵的效率较高。

3. 离心泵的特性

离心泵的主要性能参数有流量 q_v 、压头(扬程) H_e 、轴功率 P_a 、效率 η 。通常，将 $H_e \sim q_v$ ， $P_a \sim q_v$ ， $\eta \sim q_v$ 曲线称为离心泵特性曲线。

流量是泵的送液能力，通常，将泵在最高效率点流量称为额定流量。

压头(扬程)是泵对单位重量流体所加入的能量 $J/N(=m)$ 。 $H_e \sim q_v$ 曲线在额定流量附近是单调下降的。这种特点，使输送管路工作点稳定，也是采用后弯叶片的另一个原因。

轴功率是单位时间泵所需要的机械能。液体流过泵实际得到的功率称为泵的有效功率，即

$$P_e = \rho g q_v H_e \quad 2-3$$

而泵的有效功率与轴功率之比为泵的效率。轴功率曲线 $P_a \sim q_v$ 通常是单调上升的，当流量为零时，轴功率最小，这就是离心泵启动时应关闭出口阀的原因。

泵效率定义为

$$\eta = \frac{P_e}{P_a} \quad 2-4$$

泵的效率曲线 $\eta \sim q_v$ 存在着极大值，即最高效率点。

例 1 泵的特性曲线测定

离心泵的特性曲线测定装置如图 2.4 所示。已知管路

$d_{吸}=38\text{mm}$ ， $d_{出}=25\text{mm}$ ，测得水流量

$q_v=5 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ ， $p_{压}=0.2\text{MPa}$ ， $p_{真}=27\text{kPa}$ 。

求： $H_e=?$

解：由泵进、出口列机械能衡算方程

$$H_e = z_2 - z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$$

$$\text{即 } H_e = \Delta z + \frac{p_{压} + p_{真}}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$$

由 $z_2 \approx z_1$

$$u_1 = \frac{q_v}{0.785d_1^2} = \frac{5 \times 10^{-4}}{0.785 \times 0.025^2} = 0.44 \text{m/s}$$

$$u_2 = \frac{q_v}{0.785d_2^2} = \frac{5 \times 10^{-4}}{0.785 \times 0.038^2} = 1.02 \text{m/s}$$

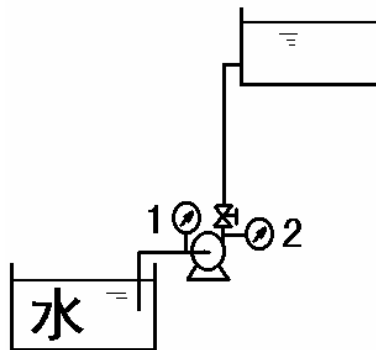


图 2.4 例 1 附图

以及 $\frac{u_1^2}{2g} = 0.01m$, $\frac{u_2^2}{2g} = 0.05m$ 代入上式, 得

$$H_e = \frac{p_{\text{压}} + p_{\text{真}}}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$$

$$H_e = \frac{2 \times 10^5 + 27 \times 10^3}{1000 \times 9.81} + 0.05 - 0.01 = 23.2m$$

通过出口阀调节, 测定不同流量下的压头, 即可获得离心泵的特性曲线。

4. 离心泵特性的影响因素

影响离心泵的特性曲线的主要因素有液体密度, 粘度, 转速, 叶轮形状及直径大小。

1) 液体密度的影响

在推导出的离心泵理论压头方程式中, 理论压头与液体密度无关。离心泵实际压头 $H_e \sim q_v$ 也与液体密度无关。因此, 离心泵有一个“气缚现象”。

“气缚现象”是指离心泵在启动时, 泵内没有充满液体, 泵内存在气体, 由于气体的密度太小, 压头又与密度无关, 所造成的压差 $\Delta p = \rho g H_e$ 太小, 吸不上液体的现象。克服“气缚现象”的方法就是在吸入管路中安装单向阀(底阀), 启动泵前进行灌泵、排气。

液体密度对效率曲线 $\eta \sim q_v$ 没有影响。由于泵的有效功率与液体密度成正比, 所以, 轴功率也与密度成正比, 即 ρ 对 $P_a \sim q_v$ 曲线有明显影响。输送密度比水大的液体必须注意电机功率是否匹配。

2) 粘度的影响

粘度对泵的流量、压头、效率、轴功率均有影响。粘度增大, 流量变小, 压头变小, 效率降低, 轴功率变大。

3) 转速的影响

当泵的流量与转速成正比时

$$\frac{q'_v}{q_v} = \frac{n'}{n} \quad 2-5$$

则有

$$\frac{H'_e}{H_e} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \quad 2-6$$

$$\frac{P'_a}{P_a} = \left(\frac{n'}{n}\right)^3 \quad 2-7$$

式 2-5、6、7 称为比例定律。

4) 叶轮直径的影响

叶轮直径对泵特性的影响与转速相类似, 也有比例定律。

5. 离心泵的工作点和流量调节

离心泵管路的流量是由离心泵特性和管路特性共同决定的。因此，两特性曲线的交点就是离心泵的工作点，如图 2.5 所示。

离心泵流量调节的方法有：

1) 改变出口阀开度。如图 2.5 所示，当出口阀关小时，管路特性曲线变陡，流量变小。

出口阀调节的优点是非常简便、灵活；缺点是调节阀增加了机械能的额外损失。它适合于临时性的流量调节。

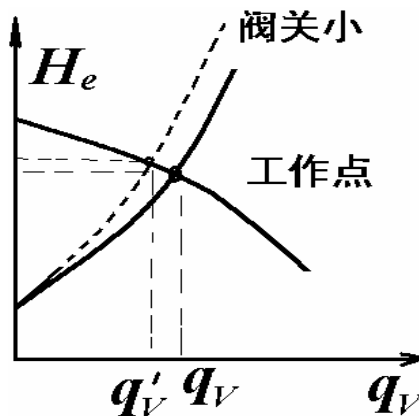


图 2.5 出口阀调节流量

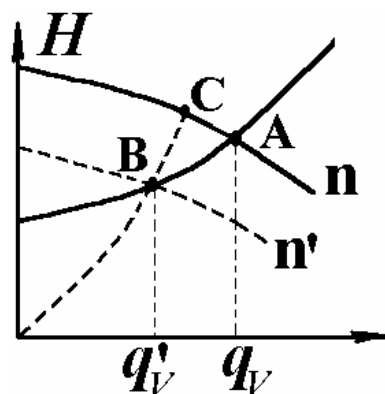


图 2.6 转速调节

2) 改变泵的转速。

根据比例定律，降低转速会使泵的特性曲线下移，如图 2.6 所示。此时，离心泵工作点从 A 点移到 B 点，流量也随之降低。

采用改变泵的转速的方法的优点是节约能量，缺点是不很方便。它适合于季节性的流量调节。

必须指出的是，两个工作点之间并不符合比例定律。符合比例定律的是 B 点和 C 点。由比例定律可知，新老泵特性曲线关系当

$$\frac{q'_V}{q_V} = \frac{n'}{n}$$

成立时，有 $\frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 = \left(\frac{q'_V}{q_V}\right)^2$ ，由此可以导出

$$H' = \frac{H}{q_V^2} q_V'^2 \quad 2-8$$

式 2-8 表明，比例点(等效率点)是通过原点的抛物线上的两点，如图 2.6 中的 C 点和 B 点。

6. 离心泵的组合操作

当单台离心泵不能满足输送任务的要求时，可以采用几台泵的组合操作。组合方式有串联和并联两种。

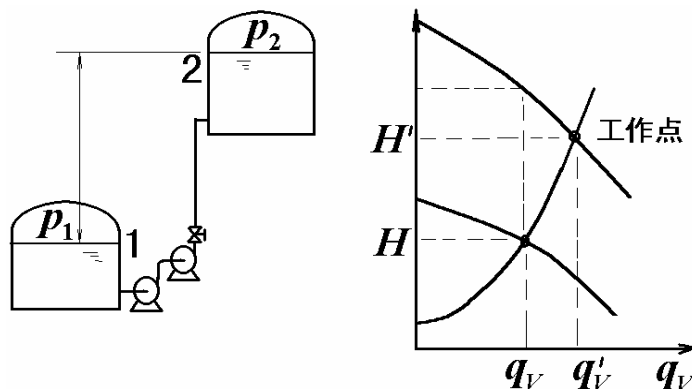


图 2.7 串联组合

1) 串联操作

两台相同型号的离心泵串联操作时，如图 2.7 所示。在同样流量下，两泵压头相加，由此可以组成泵的特性曲线。如果单泵的压头表示为 $H_{\text{单}} = \varphi(q_V)$ ，则两泵串联的压头为

$$H_{\text{串}} = 2\varphi(q_V)。例如：H_{\text{单}} = 20 - 2q_V^2，则两泵串联 H_{\text{串}} = 40 - 4q_V^2。$$

必须注意的是，两泵串联后的工作点的压头并不是单泵工作点压头的两倍，即 $H' \neq 2H$ 。

2) 并联操作

两台相同型号的离心泵并联操作时，如图 2.8 所示。在同样压头下，两泵流量相加，由此可以组成泵的特性曲线。如果单泵的压头表示为 $H_{\text{单}} = \varphi(q_V)$ ，则两泵并联的压头为

$$H_{\text{并}} = \varphi\left(\frac{q_V}{2}\right)。例如：H_{\text{单}} = 20 - 2q_V^2，则两泵并联 H_{\text{并}} = 20 - 2 \times \left(\frac{q_V}{2}\right)^2 = 20 - 0.5q_V^2。$$

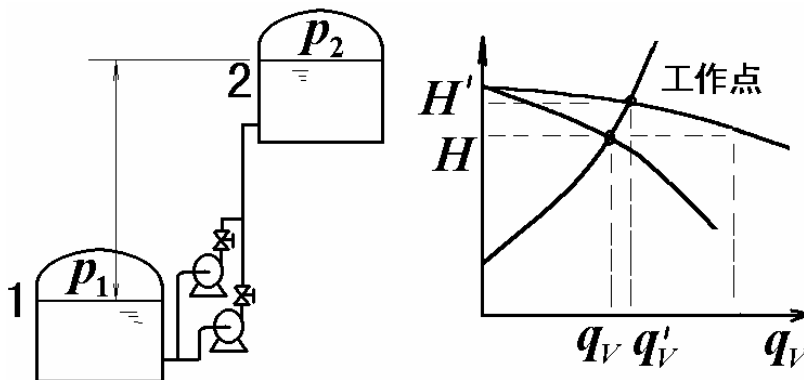


图 2.8 并联组合

必须注意的是，两泵并联后的工作点的流量并不是单泵工作点流量的两倍，即 $q'_V \neq 2q_V$ 。

3) 组合方式的选择

当管路的势能增加部分 $\Delta z + \frac{\Delta p}{\rho g}$ 大于单泵的最大压头 $H_{\text{单max}}$ 时，必须串联组合，才能

获得一定的流量。

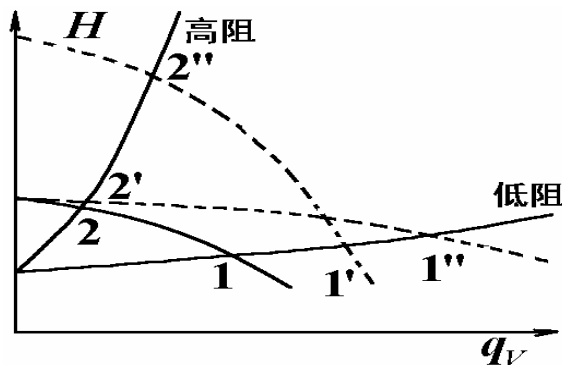


图 2.9 组合方式的选择

对于低阻管路(值较小)，泵的并联组合输送的流量大于串联组合；对于高阻管路(值较大)，泵的串联组合输送的流量大于并联组合。具体如图 2.9 所示。

7. 离心泵的安装高度

离心泵的安装高度 H_g 是指离心泵吸入口与液源液面间的垂直距离。当安装高度 H_g 太大时，离心泵会发生“汽蚀现象”。

汽蚀现象是指：叶轮的入口 处压强最低，当 $p < p_v$ (液体饱和蒸汽压) 时，液体汽化，形成气泡，又在叶轮中因压强升高而溃灭，造成液体对泵设备的冲击，引起振动和腐蚀的现象。

为了避免离心泵发生汽蚀，规定泵的实际汽蚀余量必须大于允许汽蚀余量；通过计算，确定泵的最大允许安装高度。泵的实际安装高度必须低于最大允许安装高度。最大允许安装高度为

$$[H_g] = \frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - \Sigma H_{f0-1} - [(NPSH)_r + 0.5] \quad 2-9$$

泵的允许汽蚀余量(NP H) 是泵的特性之一，由泵样本可以查到(NP H) 数据。

8. 离心泵的选用

1) 离心泵的类型

按被输送的液体性质来分，离心泵有以下几种类型：

水泵：用于输送清水、以及物理、化学性质近似于水的清洁液体；

油泵：用于输送油品；

耐腐蚀泵：用于输送酸、碱等腐蚀性液体；

杂质泵：用于输送悬浮液、浆液等。

2) 离心泵的选用

①根据泵的工作条件，确定泵的类型；

②根据管路所需的流量、压头，确定泵的型号。

例 2 图 2.10 所示输水管路，用离心泵将水池中的水输送到常压高位槽。已知吸入管长 $l_{AB}=15\text{m}$ ，压出管长 $l_C=85\text{m}$ ，管长均包括局部阻力的当量长度，管径均为 $\phi 60 \times 3\text{mm}$ ，摩擦系数 λ 均为 0.023， $\Delta z=15\text{m}$ ，离心泵特性曲线为 $H_e = 32 - 6 \times 10^5 q_v^2$ ，式中 $H_e - m$ ，

$q_v - \text{m}^3 / \text{s}$ 。试求：

(1) 管路流量为多少 m^3/h ；

(2) 泵的吸入口与水池液面垂直距离为 2m，试求真空表读数？

解：1) 管路方程

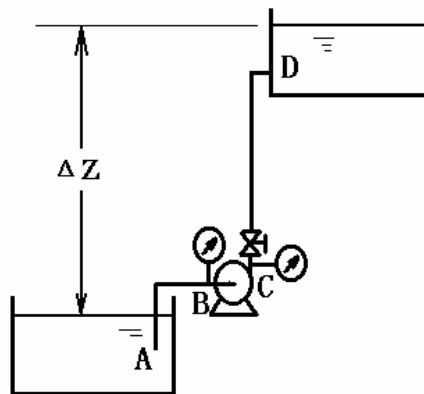


图 2.10 例 2 附图

$$\begin{aligned} H_e &= \Delta z + \frac{8\lambda \Sigma l}{\pi^2 d^5 g} q_v^2 = 15 + \frac{8 \times 0.023 \times (15 + 85)}{\pi^2 \times 0.054^5 \times 9.81} q_v^2 \\ &= 15 + 4.14 \times 10^5 q_v^2 \end{aligned}$$

与泵的特性方程 $H_e = 32 - 6 \times 10^5 q_V^2$ 联立，得

$$q_V = \sqrt{\frac{32 - 15}{(4.14 + 6) \times 10^5}} = 4.09 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s} = 14.74 \text{ m}^3 / \text{h}$$

2) 从水池液面至泵吸入口排机械能衡算式，可得

$$\frac{p_a}{\rho g} = \frac{p_B}{\rho g} + Z_B + \frac{u_B^2}{2g} + \lambda \frac{l_{AB}}{d} \frac{u_B^2}{2g}$$

$$u_B = \frac{q_V}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{4.09 \times 10^{-3}}{0.785 \times 0.054^2} = 1.79 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{真空表读数为 } p_a - p_B &= \rho g Z_B + (1 + \lambda \frac{l_{AB}}{d}) \frac{\rho u_B^2}{2} \\ &= 10^3 \times 9.81 \times 2 + (1 + 0.023 \times \frac{15}{0.054}) \frac{10^3 \times 1.79^2}{2} \\ &= 3.144 \times 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

三、往复泵

往复泵的主要构件为泵缸、活塞、活门。工作原理是直接由活塞提供压强能。往复泵的流量具有正位移特性。所谓正位移特性就是流量由泵决定，与管路特性无关。因此，往复泵的流量调节只能采用旁路阀、或改变转速和活塞行程。往复泵的扬程在电机功率和泵的机械强度范围内，由管路需要所决定。往复泵有一定的自吸作用，故不需要灌泵，但是也存在“汽蚀”问题，安装高度有限制。

与离心泵相比，往复泵适用于压头较高、流量不大的场合；而离心泵适用于压头不高、流量较大的场合。

四、气体输送机械

通常，水在管道中的经济流速为 1~3m/s，低压气体在管道中的经济流速为 8~15m/s。同样质量流量下，由于气体密度几乎是液体密度的千分之一，所以，气体输送的管道比液体输送的管道大 10 倍左右。

气体输送机械按压缩比分为通风机、鼓风机、压缩机，生成负压的称为真空泵。

离心通风机的的工作原理与离心泵完全相同。不同之处有：

- ① 风机叶轮直径大，叶片有前弯的，大多为后弯的；
- ② 风压 $p_T \propto \rho$ ；
- ③ 动能在总机械能中所占比重明显。

因此，风机的全压 p_T 分为动风压 p 和静风压 p_s 。气体经过风机

$$p_T = \rho g H = (p_2 - p_1) + \rho \frac{u_2^2}{2} = p_s + p_k \quad 2-10$$

其中静压强增加部分为静风压，动能增加部分为动风压。风机全压与离心泵的压头有所不同，全压与密度成正比，压头与密度无关。

离心风机的特性曲线是以入口气体状态为基准的，出厂时的标准是：0.1MPa, 20℃ 空气，

$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。在使用中要注意密度换算

$$p'_T = p_T \frac{\rho'}{\rho} \quad 2-11$$

在使用中，要注意罗茨风机、螺杆风机等具有正位移特性。

2.4 教材习题答案：

- 1 $H_e = 15.1 + 4.36 \times 10^5 q_v^2$
 $H_e = 45.4 \text{ J/N}$; $P_e = 4.5 \text{ kW}$
- 2 $P = \rho \omega^2 r^2 / 2 = 5.48 \times 10^6 r^2$; $P / \rho g = u^2 / 2g = 22.4 \text{ J/N}$
- 3 $H_e = 34.6 \text{ J/N}$; $\eta = 64\%$
- 4 略
- 5 $q_v = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$; $P_e = 11.5 \text{ KW}$
- 6 串联
- 7 $q_v = 0.178 \text{ m}^3/\text{min}$; $q_{v'} = 0.222 \text{ m}^3/\text{min}$
- 8 不能正常操作，会汽蚀
- 9 安装不适宜，泵下移或设备上移
- 10 IS80-65-160 或 IS100-65-315
- 11 $\eta_v = 96.6\%$
- 12 此风机不适用
- 13 $P = 33.6 \text{ k}$ $T_2 = 101.0^\circ\text{C}$
- 14 $q_v = 87.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 选 2

2.5 教材思考题解：

1. 流体输送机械向单位重量流体所提供的能量(J/N)。
2. 离心泵的压头与流量，转速，叶片形状及直径大小有关。
3. 后弯叶片的叶轮使流体势能提高大于动能提高，动能在蜗壳中转换成势能时损失小，泵的效率。这是它的优点。
它的缺点是产生同样理论压头所需泵体体积比前弯叶片的大。
4. 因泵内流体密度小而产生的压差小，无法吸上液体的现象。
原因是离心泵产生的压差与密度成正比，密度小，压差小，吸不上液体。
灌泵、排气。
5. 离心泵的特性曲线指 $H_e \sim q_v$, $\eta \sim q_v$, $P_a \sim q_v$ 。影响这些曲线的主要因素有液体密度，粘度，转速，叶轮形状及直径大小。
6. 离心泵的工作点是由管路特性方程和泵的特性方程共同决定的。
调节出口阀，改变泵的转速。
7. 随着江面的上升，管路特性曲线下移，工作点右移，流量变大，泵的压头下降，阻力损失增加；随着江面的上升，管路压力均上升，所以真空表读数减小，压力表读数增加。
8. 从型谱图上看，管路特性曲线应该通过 $H=3\text{m}$ 、 $q_v=0$ 点和 $H=13\text{m}$ 、 $q_v=3\text{m}^3/\text{h}$ 点，显然，管路特性曲线很陡，属于高阻管路，应当采用串联方式。
9. 泵的汽蚀是指液体在泵的最低压强处(叶轮入口)汽化形成气泡，又在叶轮中因压强升高而溃灭，造成液体对泵设备的冲击，引起振动和腐蚀的现象。
规定泵的实际汽蚀余量必须大于允许汽蚀余量；通过计算，确定泵的实际安装高度低于允许安装高度。

10. 流量由泵决定，与管路特性无关。
11. 往复泵同样有汽蚀问题。这是由液体汽化压强所决定的。
12. 这与功率曲线的走向有关，离心泵在零流量时功率负荷最小，所以在启动时关闭出口阀，使电机负荷最小；而旋涡泵在大流量时功率负荷最小，所以在启动时要开启出口阀，使电机负荷最小。
13. 通风机给每立方米气体加入的能量为全压，其中动能部分为动风压。
因单位不同，压头为 m ，全风压为 N/m^2 ，按 $\Delta P = \rho g h$ 可知 h 与 ρ 无关时， ΔP 与 ρ 成正比。
14. 风机在前时，气体密度大，质量流量大，电机功率负荷也大；
风机在后时，气体密度小，质量流量小，电机功率负荷也小。

第三章 液体搅拌

3.1 教学基本要求：（2 学时）

典型的工业搅拌问题；搅拌的目的和方法；搅拌装置，常用搅拌浆的型式，挡板及其它构件；混合效果的度量（均匀性的标准偏差、分隔尺度）；混合机理；搅拌功率；搅拌器经验放大时需要解决的问题。

3.2 基本概念：

搅拌目的 均相液体的混合，多相物体(液液，气液，液固)的分散和接触，强化传热。

搅拌器按工作原理分类 搅拌器按工作原理可分为旋浆式，涡轮式两大类。旋浆式大流量，低压头；涡轮式小流量，高压头。

混合效果 搅拌器的混合效果可以用调匀度、分隔尺度来度量。

宏观混合 总体流动是大尺度的宏观混合；强烈的湍动或强剪切力场是小尺度的宏观混合。

微观混合 只有分子扩散才能达到微观混合。总体流动和强剪切力场虽然本身不是微观混合，但是可以促进微观混合，缩短分子扩散的时间。

搅拌器的两个功能 产生总体流动；同时形成湍动或强剪切力场。

改善搅拌效果的工程措施 改善搅拌效果可采取增加搅拌转速、加挡板、偏心安装搅拌器、装导流筒等措施。

3.3 基本内容：

一、搅拌器

1. 搅拌器分类

搅拌器类型按工作原理可分两大类：

1) 旋浆式：旋浆、螺带式、锚式、框式

2) 涡轮式：涡轮、平直叶浆

2. 混合效果的度量

混合效果可以用调匀度、分隔尺度来度量

1) 调匀度

体积分率 $C_{A0} = \frac{V_A}{V_A + V_B}$ ，局部取样分析测得体积分率 C_A

$$\text{调匀度 } I = \frac{C_A}{C_{A0}}, \quad \text{当 } C_A < C_{A0} \quad \text{3-1}$$

$$I = \frac{1 - C_A}{1 - C_{A0}}, \quad \text{当 } C_A > C_{A0} \quad \text{3-2}$$

$$\text{个取样分析之后，可得平均调匀度 } \bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i \quad \text{3-3}$$

2) 分隔尺度

由于调匀度与取样尺寸大小有关，度量混合效果不够全面，因此，引入分隔尺度的概念。对于多相物系，用气泡直径、液滴直径、颗粒直径及分布来表征分隔尺度。

3. 宏观混合与微观混合

设备尺度的混合、旋涡尺度的混合都是宏观混合；只有分子尺度混合（依赖于分子扩散）才是微观混合。

二、混合机理

1. 搅拌器的两个功能

- 1) 总体流动——将流体输送到搅拌釜内各处。大尺度宏观混合。
 - 2) 强剪切或高度湍动——产生旋涡，小尺度宏观混合。促进微观混合。
- 值得注意的是：流体不是靠浆叶直接打碎的，而是靠高剪切力场撕碎的。

2. 均相液体的混合机理

- 1) 低粘度液体的混合---总体流动 高度湍动
最小液团尺寸为 $10\mu\text{m}$ 量级。
- 2) 高粘度及非牛顿流体的混合---大多处于层流状态，混合机理主要依赖于充分的总体流动。

3. 非均相物系的混合机理

1) 液滴或气泡的分散

界面张力是抗力， σ 大不易分散。液滴(或气泡)在剪切力的作用下，变形、破裂。液滴达到稳定时，液滴破碎与合并达到动态平衡。由于叶片附近剪切强度大，液滴较小；边角处剪切强度小，液滴较大。要克服液滴大小分布不均，可采取的措施：

- ①尽量使釜内湍动程度均匀；
- ②加少量保护胶或表面活性剂，使液滴难以合并。

2) 固体颗粒的分散

对于细颗粒，搅拌要能打散颗粒团聚体；对于粗颗粒，要使全部颗粒离底悬浮，操作转速应大于悬浮临界转速。

三、搅拌器性能

1. 旋浆式搅拌器

旋浆式搅拌器产生的流量 q_v 大，压头 H 小，适合于低粘度液体 ($\mu < 10\text{Pa} \cdot \text{s}$) 的搅拌。

2. 涡轮式搅拌器

涡轮式搅拌器产生的流量 q_v 小，压头 H 大，适合于中等粘度液体 ($\mu < 50\text{Pa} \cdot \text{s}$) 的搅拌。

3. 大叶片低转速搅拌器

有锚式、框式、螺带式搅拌器，适合于高粘度液体、颗粒悬浮液的搅拌，能防止器壁沉积现象。

4. 强化过程的工程措施

采取一定的工程措施，可以抑制不利因素，调动有利因素。不利因素有：打旋、流体走短路、阻力不足。

- 1) 提高转速——提高流量 q_v 、压头 H
- 2) 加挡板——消除打旋，增加阻力
加四块挡板被称为全挡板。
- 3) 偏心安装——破坏循环回路的对称性。
- 4) 装导流筒——避免短路及死区。

四、搅拌功率

1. 混合效果与功率消耗

$$\text{功率消耗 } P = \rho g H q_v$$

3-4

增加功率的目的是改善混合效果，但有一个能量合理有效利用的问题，这与浆形、尺寸选择有关。要提高总体流动，就要提高流量；要加强液团破碎度，就要提高压头。

2. 功率曲线

搅拌功率与影响因素的无因次化结果为

$$\frac{P}{\rho n^3 d^5} = \Psi \left(\frac{d^2 n \rho}{\mu}, \frac{h}{d}, \frac{D}{d}, \dots \right) \quad 3-5$$

几何相似条件下，对应边成同一比例， $\frac{h}{d}, \frac{D}{d}, \dots$ 都相同，此时，

$$\frac{P}{\rho n^3 d^5} = \Psi \left(\frac{d^2 n \rho}{\mu} \right) \quad 3-6$$

式中 $\frac{P}{\rho n^3 d^5} = K$ 为功率准数， $\frac{d^2 n \rho}{\mu} = Re_n$ 为搅拌雷诺数。经实验后，获得功率准数与

搅拌雷诺数 Re_M 的关系曲线，即功率曲线。

$$\text{搅拌功率} \quad P = K \rho n^3 d^5 \quad 3-7$$

3. 搅拌功率的分配

当搅拌功率为一定值时，由式 3-4 和 $q_V \propto nd^3$ 、 $H \propto n^2 d^2$ 、式 3-7 可得

$$\frac{q_V}{H} \propto d^{8/3} \quad \text{和} \quad \frac{q_V}{H} \propto \frac{1}{n^{8/5}} \quad 3-8$$

由式 3-8 可以得出，小直径，高转速，适合于产生强剪切力场；大直径，低转速适合于产生大流量。根据人为要求可调整转速与直径，以改变功率的分配。

五、搅拌器的放大

1. 放大过程（设计）

小试→中试→工业设计，逐级放大。

2. 放大准则

$$1) \text{ 按雷诺数 } Re_M = \frac{\rho n d^2}{\mu} \text{ 不变, 即 } n_1 d_1^2 = n_2 d_2^2;$$

$$2) \text{ 按单位体积能耗 } \frac{P}{V_0} \text{ 不变, } P \propto n^3 d^5, V_0 \propto d^3, \text{ 可得 } n_1^3 d_1^2 = n_2^3 d_2^2;$$

$$3) \text{ 按叶片端部切向速度不变, } n_1 d_1 = n_2 d_2;$$

$$4) \text{ 按 } \frac{q_V}{H} \text{ 不变, 即 } \frac{d_1}{n_1} = \frac{d_2}{n_2}.$$

3.4 教材习题答案:

- 1 略
- 2 $P = 38.7\text{W}$; $P' = 36.8\text{W}$
- 3 $d/d_1 = 4.64$; $n/n_1 = 0.359$; $N/N_1 = 100$

3.5 教材思考题解：

1. 混合(均相)，分散(液液，气液，液固)，强化传热。
2. 因调匀度与取样尺度有关，引入混合尺度反映更全面。
3. ①产生强大的总体流动，②产生强烈的湍动或强剪切力场。
4. 旋桨式适用于宏观调匀，而不适用于固体颗粒悬浮液；涡轮式适用于小尺度均匀，而不适用于固体颗粒悬浮液；大叶片低转速搅拌器适用于高粘度液体或固体颗粒悬浮液，而不适合于低粘度液体混合。
5. ①提高转速。②阻止液体圆周运动，加挡板，破坏对称性。③装导流筒，消除短路、消除死区。
6. 只要几何相似就可以使用同一根功率曲线，因为无因次化之后，使用了这一条件。
7. 混合效果与小试相符。

第四章 流体通过颗粒层的流动

4.1 教学基本要求：（6 学时）

固定床 颗粒和床层的基本特性；影响压降的主要因素；数学模型法。

过滤 过滤方法及常用过滤机的构造；过滤过程数学描述（物料衡算和过滤速率方程），过滤速率、推动力和阻力的概念；恒速过滤；恒压过滤；洗涤时间；过滤机的生产能力。

4.2 基本概念：

非球形颗粒的当量直径 球形颗粒与实际非球形颗粒在某一方面相等，该球形的直径为非球形颗粒的当量直径，如体积当量直径、面积当量直径、比表面积当量直径等。

形状系数 等体积球形的表面积与非球形颗粒的表面积之比。

分布函数 小于某一直径的颗粒占总量的分率。

频率函数 某一粒径范围内的颗粒占总量的分率与粒径范围之比。

颗粒群平均直径的基准 颗粒群的平均直径以比表面积相等为基准。因为颗粒层内流体为爬流流动，流动阻力主要与颗粒表面积的大小有关。

床层比表面 单位床层体积内的颗粒表面积。

床层空隙率 单位床层体积内的空隙体积。

数学模型法的主要步骤 数学模型法的主要步骤有①简化物理模型②建立数学模型③模型检验，实验确定模型参数。

架桥现象 尽管颗粒比网孔小，因相互拥挤而通不过网孔的现象。

过滤常数及影响因素 过滤常数是指 k 、 q_e 。与压差、悬浮液浓度、滤饼比阻、滤液粘度有关； q_e 与过滤介质阻力有关。它们在恒压下才为常数。

过滤机的生产能力 滤液量与总时间(过滤时间和辅助时间)之比。

最优过滤时间 使生产能力达到最大的过滤时间。

加快过滤速率的途径 ①改变滤饼结构；②改变颗粒聚集状态；③动态过滤。

4.3 基本内容：

本章叙述了颗粒床层的压降的影响因素，并应用于对过滤分离操作的描述。讲叙了过滤的物料衡算，过滤速率方程，过滤过程的计算，常用的过滤设备。

一、颗粒与颗粒床层的特性

1. 单颗粒特性

最理想的颗粒是大小均一的球形颗粒，只需一个参数 d_p 即可描述颗粒特性。此时，

$$\text{体积} \quad V = \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad 4-1$$

$$\text{表面积} \quad S = \pi d_p^2 \quad 4-2$$

$$\text{比表面} \quad a = \frac{S}{V} = \frac{6}{d_p} \quad 4-3$$

实际颗粒遇到两个问题：①非球形；②大小不一(分布)。对于非球形问题，可以定当量直径，但是目标不同结果不同。

$$\text{定球形与实际颗粒体积相等，得体积当量直径 } d_e, \text{ 即 } V = \frac{\pi}{6} d_{ev}^3 \quad 4-4$$

定球形与实际颗粒表面积相等，得面积当量直径 d_{es} ，即 $S = \pi d_{es}^2$ ； 4-5

定球形与实际颗粒比表面相等，得比表面当量直径 d_{ea} ，即 $a = \frac{6}{d_{ea}}$ 4-6

三个当量直径中，只有两个是独立的，常用体积当量直径 d_e 和球形度(形状系数) ψ 。球形度定义为

$$\psi = \frac{\text{与非球形颗粒体积相等的球的表面积}}{\text{非球形颗粒的表面积}} \quad 4-7$$

任何颗粒的 $\psi \leq 1$ 。

由此可得 d_e, d_{es}, d_{ea} 三者关系为

$$d_{ea} = \psi d_{ev} = \psi^{1.5} d_{es}$$

显然，有 $d_{ea} \leq d_e \leq d_{es}$ 成立。

例 1 边长为 $L=4\text{mm}$ 的正方体颗粒

求： $d_e, d_{es}, d_{ea}, \psi, a$

解： 体积 $V = L^3 = \frac{\pi}{6} d_{ev}^3$

体积当量直径 $d_{ev} = L \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}} = 4 \times 1.24 = 5\text{mm}$

表面积 $S = 6L^2 = \pi d_{es}^2$

面积当量直径 $d_{es} = L \sqrt{\frac{6}{\pi}} = 4 \times 1.38 = 5.5\text{mm}$

比表面 $a = \frac{S}{V} = \frac{6L^2}{L^3} = \frac{6}{d_{ea}}$

比表面当量直径 $d_{ea} = L = 4\text{mm}$

比表面 $a = \frac{6}{d_{ea}} = \frac{6}{0.004} = 1500\text{m}^2/\text{m}^3$

球形度 $\psi = \frac{d_{ev}^2}{d_{es}^2} = \frac{5^2}{5.5^2} = 0.81$

2. 颗粒群的特性

颗粒大小不一，对其进行筛分分析，筛过量(小于某一直径的颗粒)占总量的质量分率，就是分布函数 $F(d_p)$ 。分布函数的特点： $d_{p\max}$ 处 $F=1$ ， $d_{p\min}$ 处 $F=0$ 。

某一粒径范围内的颗粒占总量的分率与粒径范围之比，就是频率函数，即

$$f_i = \frac{F_{i-1} - F_i}{d_{i-1} - d_i}$$

对分布函数求导，即可获得频率函数

$$f = \frac{dF(d_p)}{d(d_p)} \quad 4-8$$

反之 $F(d_p) = \int_0^{d_p} f d(d_p) \quad 4-9$

频率函数的特点：某粒级范围的颗粒质量分率等于该范围曲线下的面积，曲线下的面积和等于1。

颗粒群的平均直径 d_m 是按照比表面相等的原则确定的，因为在过滤过程中，流动较慢时，阻力以表面剪切力为主，表面积对阻力影响大。

$$a = \frac{\sum S_i}{\sum V_i} = \frac{\sum (\frac{m_i}{\rho_p} a_i)}{m/\rho_p} = \sum x_i a_i$$

由 $a = \frac{6}{\psi d_m}$, $a_i = \frac{6}{\psi d_i}$

可得 $d_m = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}} \quad 4-10$

3. 颗粒床层的压降

1) 床层特性

①空隙率 $\varepsilon = \frac{V_{\text{空}}}{V_{\text{床}}} = \frac{V_{\text{床}} - V_p}{V_{\text{床}}} \quad 4-11$

或 $V_p = (1 - \varepsilon)V_{\text{床}}$

②床层比表面 $a_B = \frac{S}{V_{\text{床}}} = \frac{S(1 - \varepsilon)}{V_p} = a(1 - \varepsilon) \quad 4-12$

2) 流体通过固定床的压降

本章采用数学模型方法解决固定床的压降问题。数学模型方法的主要步骤为：

①原型---抓住特征，合理简化---建立简化的物理模型

②物理模型—数学描述，解析解—建立数学模型

③实验—检验模型，测定模型参数

最终获得 $\frac{\Delta P}{L} = 4.17 \frac{a^2 (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u + 0.29 \frac{a(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho u^2 \quad 4-13$

欧根方程： $\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 (\psi d_{ev})^2} \mu u + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \psi d_{ev}} \rho u^2 \quad 4-14$

式中表观速度 $u = \frac{q_V}{A} \quad 4-15$

欧根方程右边的第一项为粘性项，第二项为惯性项。当 $Re' < 3$ 时，可忽略惯性项；当 $Re' > 100$ 时，可忽略粘性项。床层雷诺数

$$Re' = \frac{d_e u_1 \rho}{4\mu} = \frac{\rho u}{a(1-\varepsilon)\mu} \quad 4-16$$

例 2 要估计 20°C , 1.0MPa (绝)的 CO 通过固定床脱硫器的压降，用 20°C , 101.3kPa (绝)的空气进行实测，测得 $u=0.4\text{m/s}$ 时 $\frac{\Delta P}{L} = 470\text{Pa/m}$ ， $u=0.9\text{m/s}$ 时 $\frac{\Delta P}{L} = 2300\text{Pa/m}$ 。

已知： 20°C , 1.0MPa (绝)的一氧化碳 $\mu = 2.4 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{s}$ ， $\rho = 11.4\text{kg/m}^3$ 。

求：CO 以 $u=0.5\text{m/s}$ 通过时的 $\frac{\Delta P}{L}$ 。

解： 20°C ，常压空气： $\rho = 1.2\text{kg/m}^3$ ， $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{Pa}\cdot\text{s}$

根据欧根方程，取 $\frac{\Delta P}{L} = C_1 \mu u + C_2 \rho u^2$

代入空气数据 $470 = C_1 \times 1.81 \times 10^{-5} \times 0.4 + C_2 \times 1.2 \times 0.4^2$

$$2300 = C_1 \times 1.81 \times 10^{-5} \times 0.9 + C_2 \times 1.2 \times 0.9^2$$

解得 $C_1 = 3.9 \times 10^6$ ， $C_2 = 2301$

$$\begin{aligned} \text{一氧化碳} \quad \frac{\Delta P}{L} &= C_1 \mu u + C_2 \rho u^2 = 3.9 \times 10^6 \times 2.4 \times 10^{-5} \times 0.5 + 2301 \times 11.4 \times 0.5^2 \\ &= 6604 \text{Pa/m} \end{aligned}$$

本例也可用 a, ε 表达，

$$\frac{\Delta P}{L} = 4.17 \frac{a^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u + 0.29 \frac{a(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho u^2$$

先用实验值算出 a, ε ，再用这两个参数来计算实际工艺物料的压降。

二、过滤原理及过程计算

1. 基本原理

悬浮液中的固体颗粒被过滤介质所截留，而清液在压差下通过多孔过滤介质流出，使固液得以分离。

过滤介质缝隙并不需要比颗粒小，因为颗粒之间因为拥挤，会形成“架桥现象”，通不过过滤介质。

如果颗粒粘，不出滤液，可采用助滤剂。助滤剂的使用方式有两种：**1. 预涂**，**2. 混入**悬浮液。助滤剂为刚性颗粒，不易变形。

2. 物料衡算

悬浮液含固量表示方法：质量分数 $w, \text{kg 固体/kg 悬浮液}$ ；体积分数 $\phi, \text{m}^3 \text{ 固体/m}^3 \text{ 悬浮液}$ 。

在物料衡算中要弄清悬浮液三个去向，即滤液 V 、滤饼中的液体 $V_{\text{饼}} \varepsilon$ 、滤饼中的固体 $V_{\text{饼}}(1-\varepsilon)$ 。在换算过程中，选取合适的基准，如 1kg 悬浮液， 1m^3 滤饼。

例 3 有一板框压滤机,框的边长为 450mm,厚度为 25mm,有 20 个框。用来过滤含固体 $w=0.025$ 的水-固悬浮液,滤饼含水 40 (质量分率), $\rho_p = 2100\text{kg}/\text{m}^3$, 试计算当滤饼充满滤框时所得的滤液量。

$$\text{解: } V_{\text{饼}} = 0.45^2 \times 0.025 \times 20 = 0.101\text{m}^3$$

$$\text{取 } 1\text{kg 滤饼 } \varepsilon = \frac{a/\rho}{a/\rho + (1-a)/\rho_p} = \frac{0.4/1000}{0.4/1000 + (1-0.4)/2100} = 0.583$$

$$\text{根据三个去向, 有 } \frac{V_{\text{饼}}(1-\varepsilon)\rho_p}{V_{\text{饼}}(1-\varepsilon)\rho_p + V_{\text{饼}}\varepsilon\rho + V\rho} = w$$

$$\begin{aligned} \text{整理后 } V &= V_{\text{饼}} \left[\left(\frac{1}{w} - 1 \right) (1-\varepsilon) \frac{\rho_p}{\rho} - \varepsilon \right] \\ &= 0.101 \times \left[\left(\frac{1}{0.025} - 1 \right) \times (1-0.583) \times 2.1 - 0.583 \right] = 3.39\text{m}^3 \end{aligned}$$

3. 过滤基本方程

过滤过程特点: ①滤饼中流体流动很慢; ②非定态。经推导, 获得过滤速率基本方程

$$\frac{dq}{d\tau} = \frac{K}{2(q+q_e)} \quad 4-17$$

其中 K, q_e 被称为过滤常数, $K = \frac{2\Delta P}{r\phi\mu} = \frac{2\Delta P^{1-S}}{r_0\phi\mu}$ 。 r 为滤饼比阻, 对于不可压缩滤饼,

$r = \text{常数}$, $S = 0$, $K \propto \Delta P$; 对于可压缩滤饼, $r = r_0\Delta P^S$, S 为压缩指数。 q_e 与介质性质、悬浮液性质有关。过滤基本方程也可表达为

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{KA^2}{2(V+V_e)} \quad 4-18$$

式中 $V=qA$, $V_e=q_eA$ 。

4. 过滤基本方程的应用

$$\text{恒速过滤 } V^2 + VV_e = \frac{KA^2}{2} \tau \quad 4-19$$

恒速过滤时, 注意 V 是随时间变化的。恒速段终了的 $V_{\text{终}}$ 与 $\tau_{\text{终}}$ 对应, 有

$$\frac{q_{\text{终}}}{\tau_{\text{终}}} = \frac{K_{\text{终}}}{2(q_{\text{终}} + q_e)} \quad 4-20$$

$$\text{恒压过滤 } V^2 + 2VV_e = KA^2 \tau \quad 4-21$$

$$\text{生产能力 } Q = \frac{V}{\Sigma\tau} \quad 4-22$$

先恒速后恒压：从 $\tau = \tau_1$, $q = q_1$ 起开始恒压操作

$$(q^2 - q_1^2) + 2q_e(q - q_1) = K(\tau - \tau_1) \quad 4-23$$

或 $(V^2 - V_1^2) + 2V_e(V - V_1) = KA^2(\tau - \tau_1) \quad 4-24$

而恒速段 $\frac{q_1}{\tau_1} = \frac{K_{终}}{2(q_1 + q_e)}$, 其中 $K_{终} = K_{恒压}$ 。

板框压滤机洗涤时间 ($q_e = 0, S = 0$) $\tau_w = \frac{\Delta P}{\Delta P_w} \frac{\mu_w}{\mu} \frac{8V_w}{V} \tau \quad 4-25$

回转真空过滤的计算与恒压操作是一样的，只是将过滤时间 $\tau = \frac{\Phi}{n}$ 代入即可

$$q = \sqrt{K \frac{\Phi}{n} + q_e^2} - q_e \quad 4-26$$

例 4 某过滤机恒速操作在最初的 10 分钟获得 4 升滤液。

①再过滤 20 分钟，可获得多少滤液？

②共滤了 30m 后，用 $V = 0.2V_{总}$ 的洗涤液量洗涤，速率不变，则 $\tau =$

③每次过滤洗涤后，所需装卸时间 τ 为 20m，求：生产能力 $Q = \frac{V}{\Sigma\tau} = ?$

解：①由于速度恒定，所以 $V \propto \tau$

$$\Delta V = \frac{V}{\tau} \Delta\tau = \frac{4}{10} \times 20 = 8 \text{ 升}$$

$$\textcircled{2} \frac{V}{\tau} = \frac{V_w}{\tau_w} = \frac{0.2V}{\tau_w}$$

$$\therefore \tau_w = 0.2\tau = 0.2 \times 30 = 6 \text{ min}$$

$$\textcircled{3} Q = \frac{V}{\tau + \tau_w + \tau_D} = \frac{12}{30 + 6 + 20} = 0.21 \text{ 升/分}$$

例 5 某叶滤机恒压操作，在 10 分钟内获得滤液 4 升，在第二个 10 分钟内获得滤液 2 升。

①再过滤 10 分钟，可获得多少滤液？

②共滤了 30m 后，用 $V = 0.2V_{总}$ 的洗涤液量洗涤， $\Delta P_{洗} = \Delta P_{滤}$, $\mu_{洗液} = \mu_{滤液}$ ，则 $\tau =$

③每次过滤洗涤后，所需装卸时间 τ 为 20m，求：生产能力 $Q = \frac{V}{\Sigma\tau} = ?$

解：①由恒压方程 $V^2 + 2VV_e = KA^2\tau$ ，代入数据求 KA^2, V_e

$$4^2 + 2 \times 4V_e = KA^2 \times 10$$

$$6^2 + 2 \times 6V_e = KA^2 \times 20$$

得 $V_e=1$ 升, $KA^2 = 2.4l^2/\text{min}$ 。∴ $\tau = 30\text{m}$ 时

$$V = \sqrt{KA^2\tau + V_e^2} - V_e = \sqrt{2.4 \times 30 + 1^2} - 1 = 7.54 \text{ 升}$$

$$\Delta V = 1.54 \text{ 升}$$

② 洗涤过程是定态的, 恒压即恒速, 饼厚就是过滤终了时的饼厚(叶滤机)当 $\Delta P_{\text{洗}} = \Delta P_{\text{滤}}$, $\mu_{\text{洗液}} = \mu_{\text{滤液}}$ 时,

$$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w = \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_{\text{终}} = \frac{KA^2}{2(V_{\text{终}} + V_e)} = \frac{2.4}{2 \times (7.54 + 1)} = 0.141 \text{ l/min}$$

$$\tau_w = \frac{V_w}{\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w} = \frac{0.2 \times 7.54}{0.141} = 10.7 \text{ min}$$

$$\textcircled{3} Q = \frac{V}{\tau + \tau_w + \tau_D} = \frac{7.54}{30 + 10.7 + 20} = 0.124 \text{ 升/分}$$

恒压过滤过程为了获得最大生产能力, 有一个最优过滤时间 τ_{pt} 。可以令 $\frac{dQ}{d\tau} = 0$, 得

τ_{opt} 。

三、加快过滤速率的途径

1. 改变滤饼结构

办法: 用助滤剂(刚性, 多孔性, 尺度均匀)。方式: 预敷和掺滤。

2. 改变悬浮液中颗粒聚集状态

目的: 将小颗粒聚成大颗粒, 再过滤。办法: 加聚合电解质、无机电解质。如: 脏水用明矾。

3. 动态过滤

传统的滤饼过滤是终端过滤。动态过滤是用机械的、水力的、电场的方法限制滤饼增长。

4. 4 教材习题答案:

$$1 \quad d_{eV} = \left(\frac{3}{2}d_p^2h\right)^{1/3}, \quad \psi = \frac{(18d_p h)^{1/3}}{2h + d_p}, \quad \Delta P = 222.7 \text{ N/m}^2$$

$$2 \quad \Delta P/L = 1084 \text{ Pa/m}$$

$$3 \quad V = 2.42 \text{ m}^3$$

$$4 \quad = 5.26 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad q_e = 0.05 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$5 \quad A = 15.3 \text{ m}^2 \quad = 2 \text{ 台}$$

6 略

$$7 \quad \Delta V_0 = 1.5 \text{ L}$$

$$8 \quad \Delta V = 13 \text{ L}$$

$$9 \quad q = 58.4 \text{ l/m}^2; \quad \tau_w = 6.4 \text{ min}$$

$$10 \quad \tau = 166 \text{ s} \quad \tau_w = 124 \text{ s}$$

$$11 \quad K = 3.05 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$q_e = 0.0316 \text{ m}^3/\text{m}^2; V = 0.25 \text{ m}^3$$

$$12 \quad n' = 4.5 \text{ rpm}; L'/L = 2/3$$

4.5 教材思考题解：

1. 颗粒群的平均直径以比表面积相等为基准。

因为颗粒层内流体为爬流流动，流动阻力主要与颗粒表面积的大小有关。

2. 数学模型法的主要步骤有①简化物理模型②建立数学模型③模型检验，实验定模型参数。

3. 过滤速率 $u = dq/d\tau = \Delta P / (\phi \mu (q + q_e))$ 中， u 与 ΔP 、 ϕ 、 μ 、 q 、 q_e 均有关。

4. ϕ 、 q_e 为过滤常数。

与压差、悬浮液浓度、滤饼比阻、滤液粘度有关； q_e 与过滤介质阻力有关。

恒压下才为常数。

5. τ_{opt} 对生产能力 ($=V/\Sigma \tau$) 最大而言。在 $V \sim \tau$ 图上体现为斜率，切线处可获最大斜率，即为 τ_{pt} 。

6. 考察方法是跟踪法，所以过滤面积为 A ，而 ϕ 体现在过滤时间里。

不，滤饼厚度 δ 与 $q = \sqrt{K \frac{\phi}{n} + q_e^2} - q_e$ 成正比，例如，转速愈快，生产能力愈大，而

滤饼愈薄。

7. 强化过滤速率的措施有①改变滤饼结构；②改变颗粒聚集状态；③动态过滤。

第五章 颗粒的沉降和流态化

5.1 教学基本要求：(6 学时)

绕流基础 球形颗粒的曳力系数及斯托克斯定律。

自由沉降 沉降速度及其计算；降尘室的流量、沉降面积和粒径的关系；旋风分离器的工作原理及影响性能的主要因素。

流态化 流化床的工业应用和典型结构；流化床的主要特性；流化床的操作范围(起始流化速度和带出速度)。

5.2 基本概念：

曳力(表面曳力、形体曳力) 曳力是流体对固体的作用力，而阻力是固体壁对流体的力，两者为作用力与反作用力的关系。表面曳力由作用在颗粒表面上的剪切力引起，形体曳力由作用在颗粒表面上的压强力扣除浮力的部分引起。

(自由)沉降速度 颗粒自由沉降过程中，曳力、重力、浮力三者达到平衡时的相对运动速度。

离心分离因数 离心力与重力之比。

旋风分离器主要评价指标 分离效率、压降。

总效率 进入分离器后，除去的颗粒所占比例。

粒级效率 某一直径的颗粒的去除效率。

分割直径 粒级效率为 50 的颗粒直径。

流化床的特点 混合均匀、传热传质快；压降恒定、与气速无关。

两种流化现象 散式流化和聚式流化。

聚式流化的两种极端情况 腾涌和沟流。

起始流化速度 随着操作气速逐渐增大，颗粒床层从固定床向流化床转变的空床速度。

带出速度 随着操作气速逐渐增大，流化床内颗粒全被带出的空床速度。

气力输送 利用气体在管内的流动来输送粉粒状固体的方法。

5.3 基本内容：

本章考察流固两相物系中固体颗粒与流体间的相对运动。解决了颗粒沉降速度的计算。同时，叙述了重力沉降器的计算，旋风分离器的原理和特点。研究了流化床的特点和影响因素。

一、颗粒沉降

1. 绕流

绕流可发生在下列系统中：固体颗粒在流体(气、液)中，液滴在液体中，气泡在液体中，液滴在气体中。本章分析典型的系统：固体颗粒在流体(气、液)中的相对运动。

研究相对运动时，以下几种情况都是相同的，①固体颗粒运动，流体静止②固体颗粒静止，流体运动③固体颗粒运动，流体运动。为了简便起见，以研究固体颗粒运动流体静止的情况为代表。

2. 曳力

流体对固体的作用力称为曳力，固体壁对流体的力为阻力，两者关系为作用力与反作用力的。由作用在颗粒表面上的剪切力引起的称为表面曳力，由作用在颗粒表面上的压强力扣除浮力的部分引起称为形体曳力。

颗粒在流体中所受的曳力为