

大学课后习题解答之

化工原理(上)-天津大学化工学院-柴诚敬主编

(普通高等教育“十五”国家级规划教材)

部分重点章节

绪 论

1. 从基本单位换算入手, 将下列物理量的单位换算为SI单位。

(1) 水的黏度 $\mu=0.00856 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$

(2) 密度 $\rho=138.6 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$

(3) 某物质的比热容 $C_p=0.24 \text{ BTU}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$

(4) 传质系数 $K_G=34.2 \text{ kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{atm})$

(5) 表面张力 $\sigma=74 \text{ dyn}/\text{cm}$

(6) 导热系数 $\lambda=1 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$

解: 本题为物理量的单位换算。

(1) 水的黏度 基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ kg}=1000 \text{ g}, 1 \text{ m}=100 \text{ cm}$$

则

$$\mu = \frac{0.00856 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}\cdot\text{s}} \right] \left[\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right] \left[\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right]}{1} = 8.56 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) = 8.56 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

(2) 密度 基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ kgf}=9.81 \text{ N}, 1 \text{ N}=1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$$

则

$$\rho = 138.6 \left[\frac{\text{kgf}\cdot\text{s}^2}{\text{m}^4} \right] \left[\frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \right] \left[\frac{1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2}{1 \text{ N}} \right] = 1350 \text{ kg}/\text{m}^3$$

(3) 从附录二查出有关基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ BTU}=1.055 \text{ kJ}, 1 \text{ lb}=0.4536 \text{ kg}$$

$$1^\circ\text{F} = \frac{5}{9}^\circ\text{C}$$

则

$$c_p = 0.24 \left[\frac{\text{BTU}}{\text{lb}\cdot^\circ\text{F}} \right] \left[\frac{1.055 \text{ kJ}}{1 \text{ BTU}} \right] \left[\frac{1 \text{ lb}}{0.4536 \text{ kg}} \right] \left[\frac{1^\circ\text{F}}{5/9^\circ\text{C}} \right] = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

(4) 传质系数 基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ h}=3600 \text{ s}, 1 \text{ atm}=101.33 \text{ kPa}$$

则

$$K_G = 34.2 \left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{atm}} \right] \left[\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right] \left[\frac{1 \text{ atm}}{101.33 \text{ kPa}} \right] = 9.378 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{kPa})$$

(5) 表面张力 基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ dyn}=1 \times 10^{-5} \text{ N}, 1 \text{ m}=100 \text{ cm}$$

则

$$\rho = 74 \left[\frac{\text{dyn}}{\text{cm}} \right] \left[\frac{1 \times 10^{-5} \text{N}}{1 \text{dyn}} \right] \left[\frac{100 \text{cm}}{1 \text{m}} \right] = 7.4 \times 10^{-2} \text{N/m}$$

(6) 导热系数 基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ kcal} = 4.1868 \times 10^3 \text{ J}, 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

则

$$\lambda = 1 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \left[\frac{4.1868 \times 10^3 \text{ J}}{1 \text{ kcal}} \right] \left[\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right] = 1.163 \text{ J} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}) = 1.163 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

2. 乱堆 25cm 拉西环的填料塔用于精馏操作时，等板高度可用下面经验公式计算，即

$$H_E = 3.9A \left(2.78 \times 10^{-4} G \right)^B \left(2.01D \right)^C \left(0.3048Z \right)^D \frac{\alpha \mu_L}{\rho_L}$$

式中 H_E —等板高度，ft；

G —气相质量速度，lb/(ft²·h)；

D —塔径，ft；

Z_0 —每段（即两层液体分布板之间）填料层高度，ft；

α —相对挥发度，量纲为一；

μ_L —液相黏度，cP；

ρ_L —液相密度，lb/ft³；

A 、 B 、 C 为常数，对 25 mm 的拉西环，其数值分别为 0.57、-0.1 及 1.24。试将

上面经验公式中各物理量的单位均换算为SI 单位。

解：上面经验公式是混合单位制度，液体黏度为物理单位制，而其余诸物理量均为英制。经验公式单位换算的基本要点是：找出式中每个物理量新旧单位之间的换算关系，导出物理量“数字”的表达式，然后代入经验公式并整理，以便使式中各符号都变为所希望的单位。具体换算过程如下：

(1) 从附录查出或计算出经验公式有关物理量新旧单位之间的关系为

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{h} = 1.356 \times 10^{-3} \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (\text{见 1})$$

α 量纲为一，不必换算

$$1 \text{ cp} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 1 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{2.2046 \text{ lb}} \right) \left(\frac{3.2803 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right)^3 = 16.01 \text{ kg/m}^3$$

(2) 将原符号加上“'”以代表新单位的符号，导出原符号的“数字”表达式。下面以 H_E 为例：

$$H_E \text{ ft} = H'_E \text{ m}$$

$$\text{则 } H_E = H'_E \frac{\text{m}}{\text{ft}} = H'_E \frac{\text{m}}{\text{ft}} \times \frac{3.2803 \text{ ft}}{1 \text{ m}} = 3.2803 H'_E$$

$$\text{同理 } G = G' / (1.356 \times 10^{-3}) = 737.5 G'$$

$$D = 3.2803D'$$

$$Z_0 = 3.2803Z'_0$$

$$\mu_L = \mu'_L / (1 \times 10^{-3})$$

$$\rho_L = \rho'_L / 16.01 = 0.06246\rho'_L$$

(3) 将以上关系式代入原经验公式，得

$$3.2803H'_E = 3.9 \times 0.57 (2.78 \times 10^{-4} \times 737.5G')^{0.1} (12.01 \times 3.2803D')^{1.24} \times \\ (0.3048 \times 3.2803Z'_0)^{1/3} \left(\alpha \frac{1000\mu'_L}{0.0624\rho'_L} \right)$$

整理上式并略去符号的上标，便得到换算后的经验公式，即

$$H_E = 1.084 \times 10^{-4} A (0.205G)^{0.1} (39.4D)^{1.24} Z_0^{1/3} \frac{\alpha\mu}{\rho_L}$$

第一章 流体流动

流体重要性质

1. 某气柜的容积为 $6\,000\text{ m}^3$ ，若气柜内的表压力为 5.5 kPa ，温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 。已知各组分气体的体积分数为： H_2 40%、 N_2 20%、 CO 32%、 CO_2 7%、 CH_4 1%，大气压力为 101.3 kPa ，试计算气柜满载时各组分的质量。

解：气柜满载时各气体的总摩尔数

$$n_t = \frac{pV}{RT} = \frac{(101.3 + 5.5) \times 1000.0 \times 6000}{8.314 \times 313} \text{ mol} = 246245.4 \text{ mol}$$

各组分的质量：

$$m_{\text{H}_2} = 40\% n_t \times M_{\text{H}_2} = 40\% \times 246245.4 \times 2 \text{ kg} = 197 \text{ kg}$$

$$m_{\text{N}_2} = 20\% n_t \times M_{\text{N}_2} = 20\% \times 246245.4 \times 28 \text{ kg} = 1378.97 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CO}} = 32\% n_t \times M_{\text{CO}} = 32\% \times 246245.4 \times 28 \text{ kg} = 2206.36 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CO}_2} = 7\% n_t \times M_{\text{CO}_2} = 7\% \times 246245.4 \times 44 \text{ kg} = 758.44 \text{ kg}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 1\% n_t \times M_{\text{CH}_4} = 1\% \times 246245.4 \times 16 \text{ kg} = 39.4 \text{ kg}$$

2. 若将密度为 830 kg/m^3 的油与密度为 710 kg/m^3 的油各 60 kg 混在一起，试求混合油的密度。设混合油为理想溶液。

解： $m_t = m_1 + m_2 = (60 + 60) \text{ kg} = 120 \text{ kg}$

$$V_t = V_1 + V_2 = \frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} = \left(\frac{60}{830} + \frac{60}{710} \right) \text{ m}^3 = 0.157 \text{ m}^3$$

$$\rho_m = \frac{m_t}{V_t} = \frac{120}{0.157} \text{ kg/m}^3 = 764.33 \text{ kg/m}^3$$

流体静力学

3. 已知甲地区的平均大气压力为 85.3 kPa ，乙地区的平均大气压力为 101.33 kPa ，在甲地区的某真空设备上装有一个真空表，其读数为 20 kPa 。若改在乙地区操作，真空表的读数为多少才能维持该设备的绝对压力与甲地区操作时相同？

解：（1）设备内绝对压力

$$\text{绝压} = \text{大气压} - \text{真空度} = (85.3 \times 10^3 - 20 \times 10^3) \text{ Pa} = 65.3 \text{ kPa}$$

（2）真空表读数

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝压} = (101.33 \times 10^3 - 65.3 \times 10^3) \text{ Pa} = 36.03 \text{ kPa}$$

4. 某储油罐中盛有密度为 960 kg/m^3 的重油（如附图所示），油面最高时离罐底 9.5 m ，油面上方与大气相通。在罐侧壁的下部有一直径为 760 mm 的孔，其中心距罐底 1000 mm ，孔盖用 14 mm 的钢制螺钉紧固。若螺钉材料的工作压力为 $39.5 \times 10^6\text{ Pa}$ ，问至少需要几个螺钉（大气压力为 $101.3 \times 10^3\text{ Pa}$ ）？

解：由流体静力学方程，距罐底 1000 mm 处的流体压力为

$$p = p_a + \rho gh = [101.3 \times 10^3 + 960 \times 9.81 \times (9.5 - 1.0)] \text{ Pa} = 1.813 \times 10^5 \text{ Pa (绝压)}$$

作用在孔盖上的总力为

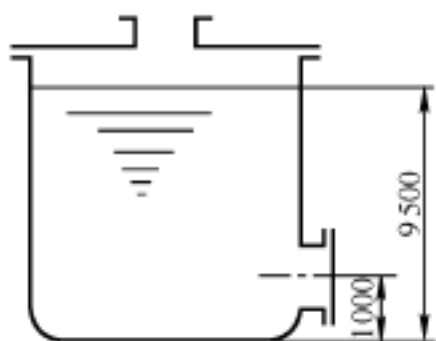
$$F = (p - p_a) A = (1.813 \times 10^5 - 101.3 \times 10^3) \times \frac{\pi}{4} \times 0.76^2 \text{ N} = 3.627 \times 10^4 \text{ N}$$

每个螺钉所受力为

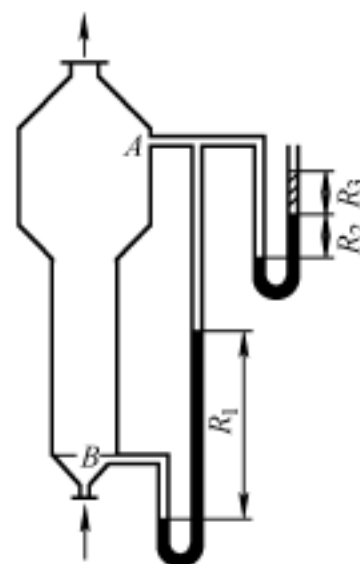
$$F_1 = 3.627 \times 10^4 \text{ N} \div 6 = 6.045 \times 10^3 \text{ N}$$

因此

$$n = F/F_1 = 3.627 \times 10^4 / (6.045 \times 10^3) \text{ N} = 5.99 \approx 6 (\text{个})$$



习题 4 附图



习题 5 附图

1. 如本题附图所示，流化床反应器上装有两个U 管压差计。读数分别为 $R_1=500 \text{ mm}$ ， $R_2=80 \text{ mm}$ ，指示液为水银。为防止水银蒸气向空间扩散，于右侧的U 管与大气连通的玻璃管内灌入一段水，其高度 $R_3=100 \text{ mm}$ 。试求 A、B 两点的表压力。

解 (1) A 点的压力

$$p_A = p_a + \rho_{\text{水}} g R_3 + \rho_{\text{汞}} g R_2 = (1000 \times 9.81 \times 0.1 + 13600 \times 9.81 \times 0.08) \text{ Pa} = 1.165 \times 10^4 \text{ Pa (表)}$$

(2) B 点的压力

$$p_B = p_A + \rho_{\text{汞}} g R_1 = 1.165 \times 10^4 + 13600 \times 9.81 \times 0.5 \text{ Pa} = 7.836 \times 10^4 \text{ Pa (表)}$$

2. 如本题附图所示，水在管道内流动。为测量流体压力，在管道某截面处连接U 管压差计，指示液为水银，读数 $R=100 \text{ mm}$ ， $h=800 \text{ mm}$ 。为防止水银扩散至空气中，在水银面上方充入少量水，其高度可以忽略不计。已知当地大气压力为 101.3 kPa ，试求管路中心处流体的压力。

解：设管路中心处流体的压力为 p

根据流体静力学基本方程式， $p_A = p_{A'}$

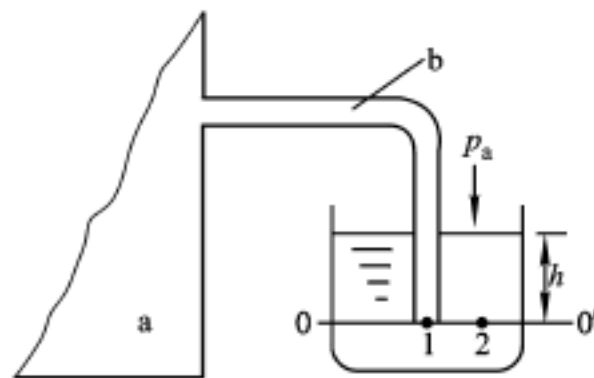
习题 6 附图

$$p + \rho_{\text{水}} gh + \rho_{\text{汞}} g R = p_a$$

$$p = p_a - \rho_{\text{水}} gh - \rho_{\text{汞}} gR$$

$$= (101.3 \times 10^3 - 1000 \times 9.8 \times 0.8 - 13600 \times 9.8 \times 0.1) \text{ Pa} = 80.132 \text{ kPa}$$

1. 某工厂为了控制乙炔发生炉内的压力不超过 13.3 kPa (表压)，在炉外装一安全液封管 (又称水封) 装置，如本题附图所示。液封的作用是，当炉内压力超过规定值时，气体便从液封管排出。试求此炉的安全液封管应插入槽内水面下的深度 h 。



习题 7 附图

解: $\rho_{\text{水}} gh = 13.3$

$$h = 13.3 / (\rho_{\text{水}} g) = 13.3 \times 1000 / (1000 \times 9.8) \text{ m} = 1.36 \text{ m}$$

流体流动概述

2. 密度为 1800 kg/m³ 的某液体经一内径为 60 mm 的管道输送到某处，若其平均流速为 0.8 m/s，求该液体的体积流量 (m³/h)、质量流量 (kg/s) 和质量通量 [kg/(m² · s)]。

解: $V_h = uA = u \frac{\pi d^2}{4} = 0.8 \times \frac{3.14}{4} \times 0.06^2 \times 3600 \text{ m}^3/\text{s} = 8.14 \text{ m}^3/\text{h}$

$$w_s = uA\rho = u \frac{\pi d^2}{4} \rho = 0.8 \times \frac{3.14}{4} \times 0.06^2 \times 1800 \text{ kg/s} = 2.26 \text{ kg/s}$$

$$G = u\rho = 0.8 \times 1800 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)} = 1440 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$$

3. 在实验室中，用内径为 1.5 cm 的玻璃管路输送 20 °C 的 70% 醋酸。已知质量流量为 10 kg/min。试分别用 SI 和厘米克秒单位计算该流动的雷诺数，并指出流动型态。

解: (1) 用 SI 单位计算

查附录 70% 醋酸在 20 °C 时， $\rho = 1069 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 2.50 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$$d = 1.5 \text{ cm} = 0.015 \text{ m}$$

$$u_b = 10 / (60 \times \pi / 4 \times 0.015^2 \times 1069) \text{ m/s} = 0.882 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{du_b \rho}{\mu} = 0.015 \times 0.882 \times 1069 / (2.5 \times 10^{-3}) = 5657$$

故为湍流。

(2) 用物理单位计算

$$\rho = 1069 \text{ g/cm}^3, \mu = 0.025 \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}$$

$$d = 1.5 \text{ cm}, u_b = 88.2 \text{ cm/s}$$

$$Re = \frac{du_b \rho}{\mu} = 1.5 \times 88.2 \times 1.069 / 0.025 = 5657$$

4. 有一装满水的储槽，直径 1.2 m，高 3 m。现由槽底部的小孔向外排水。小孔的直径为 4 cm，测得水流过小孔的平均流速 u_0 与槽内水面高度 z 的关系为：

$$u_0 = 0.62 \sqrt{2zg}$$

试求算 (1) 放出 1 m³ 水所需的时间 (设水的密度为 1000 kg/m³)；(2) 又若槽中装满

煤油，其它条件不变，放出 1m³ 煤油所需时间有何变化（设煤油密度为800 kg/m³）？

解：放出 1m³ 水后液面高度降至 z_1 ，则

$$z_1 = z_0 - \frac{1}{0.785 \times 1.2^2} = (3 - 0.8846) \text{m} = 2.115 \text{m}$$

由质量守恒，得

$$w_2 - w_1 + \frac{dM}{d\theta} = 0, \quad w_1 = 0 \quad (\text{无水补充})$$

$$w_2 = \rho u_2 A_2 = 0.62 \rho A_0 \sqrt{2gz_0} \quad (A_0 \text{ 为小孔截面积})$$

$$M = \rho A Z \quad (A \text{ 为储槽截面积})$$

故有 $0.62 \rho A_0 \sqrt{2gz_0} + \rho A \frac{dz}{d\theta} = 0$

即 $\frac{dz}{\sqrt{2gz_0}} = -0.62 \frac{A_0}{A} d\theta$

上式积分得 $\theta = \frac{2}{0.62 \sqrt{2g}} \left(\frac{A}{A_0} \right) (z_0^{1/2} - z_1^{1/2})$

$$= \frac{2}{0.62 \sqrt{2 \times 9.81}} \left(\frac{1}{0.04} \right)^2 (3^{1/2} - 2.115^{1/2}) \text{ s} = 126.4 \text{ s} = 2.1 \text{ min}$$

5. 如本题附图所示，高位槽内的水位高于地面7 m，水从 $\phi 108 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的管道中流出，管路出口高于地面 1.5 m。已知水流经系统的能量损失可按 $\Sigma h_f = 5.5 u^2$ 计算，其中 u 为水在管内的平均流速（m/s）。设流动为稳态，试计算（1）A-A'截面处水的平均流速；（2）水的流量（m³/h）。

解：（1）A-A'截面处水的平均流速

在高位槽水面与管路出口截面之间列机械能衡算方程，得

$$gz_1 + \frac{1}{2} u_{b1}^2 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{1}{2} u_{b2}^2 + \frac{p_2}{\rho} + \Sigma h_f$$

（1）

式中 $z_1 = 7 \text{ m}$, $u_{b1} \sim 0$, $p_1 = 0$ （表压）
 $z_2 = 1.5 \text{ m}$, $p_2 = 0$ （表压）， $u_{b2} = 5.5 u$

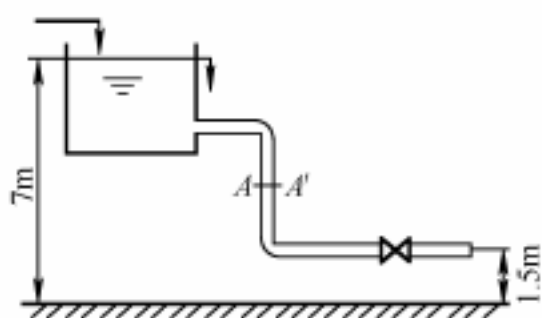
代入式（1）得

$$9.81 \times 7 = 9.81 \times 1.5 + \frac{1}{2} u_{b2}^2 + 5.5 u_{b2}^2$$

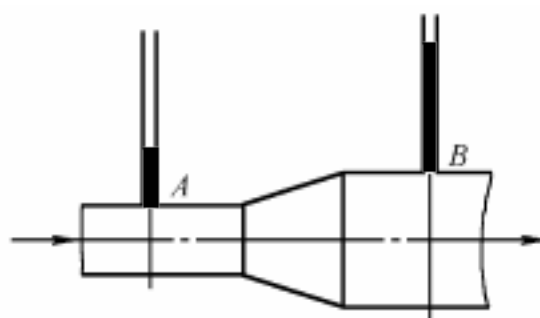
$$u_b = 3.0 \text{ m/s}$$

（2）水的流量（以 m³/h 计）

$$V_s = u_{b2} A = 3.0 \times \frac{3.14}{4} \times (0.018 - 2 \times 0.004)^2 = 0.02355 \text{ m}^3/\text{s} = 84.78 \text{ m}^3/\text{h}$$



习题 11 附图



习题 12 附图

12. 20 °C 的水以 2.5 m/s 的平均流速流经 $\Phi 38 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的水平管，此管以锥形管与另一 $\Phi 53 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的水平管相连。如本题附图所示，在锥形管两侧 A、B 处各插入一垂直玻璃管以观察两截面的压力。若水流经 A、B 两截面间的能量损失为 1.5 J/kg，求两玻璃管的水面差（以 mm 计），并在本题附图中画出两玻璃管中水面的相对位置。

解：在 A、B 两截面之间列机械能衡算方程

$$gz_1 + \frac{1}{2} u_{b1}^2 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{1}{2} u_{b2}^2 + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f$$

式中 $z_1 = z_2 = 0$, $u_{b1} = 3.0 \text{ m/s}$

$$u_{b2} = u_{b1} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) = u_{b1} \left(\frac{d_1^2}{d_2^2} \right) = 2.5 \left(\frac{0.038 - 0.0025 \times 2}{0.053 - 0.003 \times 2} \right)^2 \text{ m/s} = 1.232 \text{ m/s}$$

$$\sum h_f = 1.5 \text{ J/kg}$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{u_{b2}^2 - u_{b1}^2}{2} + \sum h_f = \left(\frac{1.232^2 - 2.5^2}{2} + 1.5 \right) \text{ J/kg} = -0.866 \text{ J/kg}$$

故 $\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = 0.866 / 9.81 \text{ m} = 0.0883 \text{ m} = 88.3 \text{ mm}$

13. 如本题附图所示，用泵 2 将储罐 1 中的有机混合液送至精馏塔 3 的中部进行分离。已知储罐内液面维持恒定，其上方压力为 $1. \times \text{Pa}$ 。流体密度为 800 kg/m^3 。精馏塔进口处的塔内压力为 $1.21 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，进料口高于储罐内的液面 8 m，输送管道直径为 $\Phi 68 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ，进料量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 。料液流经全部管道的能量损失为 70 J/kg ，求泵的有效功率。

解：在截面 A-A' 和截面 B-B' 之间列柏努利方程式，得

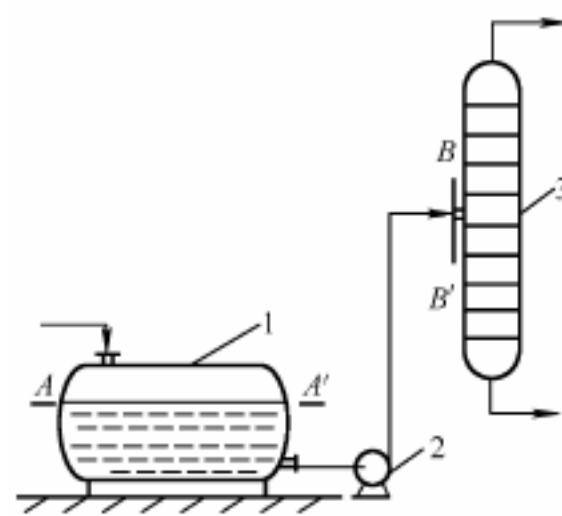
$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + gZ_1 + W_e = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + gZ_2 + \sum h_f$$

$$p_1 = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}; p_2 = 1.21 \times 10^5 \text{ Pa}; Z_2 - Z_1 = 8.0 \text{ m};$$

$$u_1 \approx 0; \sum h_f = 70 \text{ J/kg}$$

$$u_2 = \frac{V}{A} = \frac{V}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{20 / 3600}{\frac{\pi (0.068 - 2 \times 0.004)^2}{4}} \text{ m/s} = 1.966 \text{ m/s}$$

$$W_e = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(Z_2 - Z_1) + \sum h_f$$



习题 13 附图

$$W_e = \left[\frac{(1.21 - 1.0133 \times 10^5)}{800} + \frac{1.9662}{2} + 9.8 \times 8.0 + 70 \right] \text{J/kg}$$

$$= (2.46 + 1.93 + 78.4 + 70) \text{J/kg} = 175 \text{J/kg}$$

14. 本题附图所示的贮槽内径

$$N_s = w_s W = 20 \times 3600 \times 800 \times 173 \text{W} = 768.9 \text{W}$$

$D=2 \text{ m}$ ，槽底与内径 d_0 为 32 mm 的钢管相连，槽内无液体补充，其初始液面高度 h_1 为 2 m （以管子中心线为基准）。液体在管内流动时的全部能量损失可按 $\Sigma h_f = 20 u^2$ 计算，式中的 u 为液体在管内的平均流速（m/s）。试求当槽内液面下降 1 m 时所需的时间。

解：由质量衡算方程，得

$$W_1 = W_2 + \frac{dM}{d\theta} \quad (1)$$

$$W_1 = 0, \quad W_2 = \frac{\pi d^2 u}{4} \rho \quad (2)$$

$$\frac{dM}{d\theta} = \frac{\pi D^2 \rho}{4} \frac{dh}{d\theta} \quad (3)$$

将式 (2)，(3) 代入式 (1) 得

$$\frac{\pi d^2 u}{4} \rho + \frac{\pi D^2 \rho}{4} \frac{dh}{d\theta} = 0$$

$$\text{即} \quad u + \left(\frac{D}{d} \right)^2 \frac{dh}{d\theta} = 0 \quad (4)$$

在贮槽液面与管出口截面之间列机械能衡算方程

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \Sigma h_f$$

$$\text{即} \quad gh = \frac{u_b^2}{2} + \Sigma h_f = \frac{u_b^2}{2} + 20u_b^2 = 20.5u_b^2$$

$$\text{或写成} \quad h = \frac{20.5}{9.8} u_b^2$$

$$u_b = 0.692 \sqrt{h} \quad (5)$$

式 (4) 与式 (5) 联立，得

$$0.692 \sqrt{h} + \left(\frac{2}{0.032} \right)^2 \frac{dh}{d\theta} = 0$$

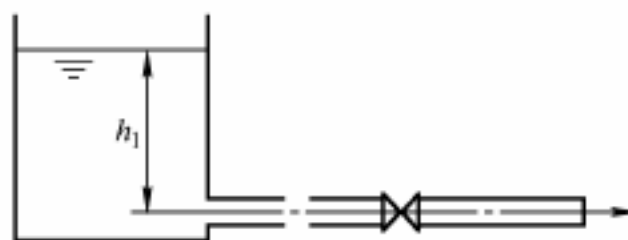
$$\text{即} \quad -5645 \frac{dh}{\sqrt{h}} = d\theta$$

$$\text{i.e.} \quad \theta=0, \quad h=h_1=2 \text{ m}; \quad \theta=\theta, \quad h=1 \text{ m}$$

$$\text{积分得} \quad \theta = -5645 \times 2 \left[-2\sqrt{h} \right]_1^2 = 4676 \text{ s} = 1.3 \text{ h}$$

动量传递现象与管内流动阻力

15. 某不可压缩流体在矩形截面的管道中作一维定态层流流动。设管道宽度为 b ，高度 $2y_0$ ，且 $b \gg y_0$ ，流道长度为 L ，两端压力降为 Δp ，试根据力的衡算导出 (1) 剪应力 τ 随高



习题 14 附图

度 y (自中心至任意一点的距离) 变化的关系式; (2) 通道截面上的速度分布方程; (3) 平均流速与最大流速的关系。

解 (1) 由于 $b \gg y_0$, 可近似认为两板无限宽, 故有

$$\tau = \frac{1}{2bL} (-\Delta p \cdot 2yb) = \frac{-\Delta p}{L} y \quad (1)$$

(2) 将牛顿黏性定律代入 (1) 得

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

$$\mu \frac{du}{dy} = \frac{\Delta p}{L} y$$

上式积分得

$$u = \frac{\Delta p}{2\mu L} y^2 + C \quad (2)$$

边界条件为 $y=0, u=0$, 代入式 (2) 中, 得 $C=0$

$$u = \frac{\Delta p}{2\mu L} (y^2 - y_0^2) \quad (3)$$

(3) 当 $y=y_0, u=u_{\max}$

$$u_{\max} = -\frac{\Delta p}{2\mu L} y_0^2$$

再将式 (3) 写成

$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

根据 u_b 的定义, 得

$$u_b = \frac{1}{A} \iint_A u dA = \frac{1}{A} \iint_A u_{\max} \left[1 - \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 \right] dA = \frac{2}{3} u_{\max}$$

16. 不可压缩流体在水平圆管中作一维定态轴向层流流动, 试证明 (1) 与主体流速 u 相应的速度点出现在离管壁 $0.293r_i$ 处, 其中 r_i 为管内半径; (2) 剪应力沿径向为直线分布, 且在管中心为零。

$$\text{解 (1)} \quad u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] = 2u_b \left[1 - \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

当 $u=u_b$ 时, 由式 (1) 得

$$\left(\frac{r}{r_i} \right)^2 = 1 - \frac{1}{2}$$

$$\text{解得 } r = 0.707r_i$$

$$\text{由管壁面算起的距离为 } y = r_i - r = r_i - 0.707r_i = 0.293r_i \quad (2)$$

由 $\tau = -\mu \frac{du}{dr}$ 对式 (1) 求导得

$$\frac{du}{dr} = -\frac{2u_{\max} r}{r_i^2}$$

故
$$\tau = \frac{2\mu u}{r_2} r = \frac{4\mu u}{r_2} r \quad (3)$$

在管中心处, $r=0$, 故 $\tau=0$ 。

17. 流体在圆管内作定态湍流时的速度分布可用如下的经验式表达

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}$$

试计算管内平均流速与最大流速之比 $u/u_{\max}$ 。

解:
$$u = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u_z 2\pi r dr = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7} u_{\max} 2\pi r dr$$

令

$$1 - \frac{r}{R} = y, \text{ 则 } r = R(1-y) \quad R$$

$$u = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R u_z 2\pi r dr = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^1 y^{1/7} u_{\max} 2\pi R^2 (1-y) dy = 2u_{\max} \int_0^1 (y^{1/7} - y^{8/7}) dy = 0.817u_{\max}$$

18. 某液体以一定的质量流量在水平直圆管内作湍流流动。若管长及液体物性不变, 将管径减至原来的 $1/2$, 问因流动阻力而产生的能量损失为原来的多少倍?

解: 流体在水平光滑直圆管中作湍流流动时

$$\Delta p_f = \rho \sum h_f$$

或
$$\sum h_f = \Delta p_f / \rho = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho u^2}{2}$$

$$\sum h = \lambda \frac{d}{d_2} \frac{u}{u_{b1}}^2$$

$$\sum h_{f1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right) \left(\frac{d_1}{d_2}\right) \left(\frac{u_{b1}}{u_{b2}}\right)^2$$

式中 $\frac{d_1}{d_2} = 2$, $\frac{u_{b1}}{u_{b2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1/4} = 2^{1/4} = 1.19$

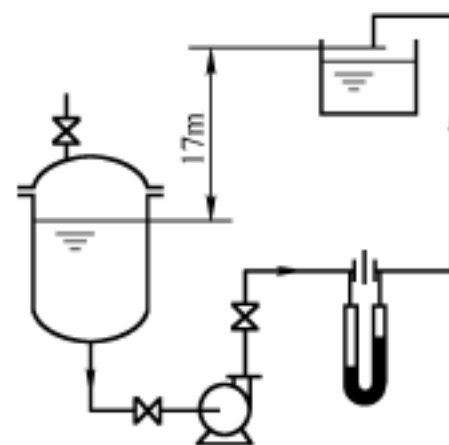
因此
$$\sum h_{f1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right) \left(\frac{d_1}{d_2}\right) \left(\frac{u_{b1}}{u_{b2}}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right) (1.19)^2 = 0.71$$

又由于
$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \left(\frac{Re_1}{Re_2}\right)^{0.25} = \left(\frac{d_1 u_{b1}}{d_2 u_{b2}}\right)^{0.25} = \left(2 \times \frac{1}{1.19}\right)^{0.25} = (0.84)^{0.25} = 0.97$$

故
$$\sum h_{f1} = 32 \times 0.97 = 31.04$$

19. 用泵将 $2 \times 10^4 \text{ kg/h}$ 的溶液自反应器送至高位槽（见本题附图）。反应器液面上方保持 $25.9 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的真空度，高位槽液面上方为大气压。管道为 $\phi 76 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的钢管，总长为 35 m ，管线上有两个全开的闸阀、一个孔板流量计（局部阻力系数为 4）、五个标准弯头。反应器内液面与管路出口的距离为 17 m 。若泵的效率为 0.7 ，求泵的轴功率。（已知溶液的密度为 1073 kg/m^3 ，黏度为 $6.3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。管壁绝对粗糙度可取为 0.3 mm 。）



习题 19 附图

解：在反应器液面 1-1 与管路出口内侧截面 2-2 间列机械能衡算方程，以截面 1-1 为基准水平面，得

$$gz_1 + \frac{u_{b1}^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_{b2}^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1)$$

式中 $z_1=0, z_2=17 \text{ m}, u_{b1} \approx 0$

$$u_{b2} = \frac{w}{\frac{\pi}{4} d^2 \rho} = \frac{2 \times 10^4}{3600 \times 0.785 \times 0.068^2 \times 1073} \text{ m/s} = 1.43 \text{ m/s}$$

$$p_1 = -25.9 \times 10^3 \text{ Pa (表)}, p_2 = 0 \text{ (表)}$$

将以上数据代入式 (1)，并整理得

$$W_e = g(z_2 - z_1) + \frac{u_{b2}^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \sum h_f$$

$$= 9.81 \times 17 + \frac{1.43^2}{2} + \frac{25.9 \times 10^3}{1073} + \sum h_f = 192.0 + \sum h_f$$

其中 $\sum h_f = \left(\lambda + \frac{L + \sum L_e}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u_{b2}^2}{2}$

$$Re = \frac{du_{b2}\rho}{\mu} = \frac{0.068 \times 1.43 \times 1073}{0.63 \times 10^{-3}} = 1.656 \times 10^5$$

$$e/d = 0.0044$$

根据 Re 与 e/d 值，查得 $\lambda = 0.03$ ，并由教材可查得各管件、阀门的当量长度分别为

闸阀（全开）： $0.43 \times 2 \text{ m} = 0.86 \text{ m}$

标准弯头： $2.2 \times 5 \text{ m} = 11 \text{ m}$

故 $\sum h_f = (0.03 \times \frac{35 + 0.86 + 11}{0.068} + 0.5 + 4) \frac{1.43^2}{2} \text{ J/kg} = 25.74 \text{ J/kg}$

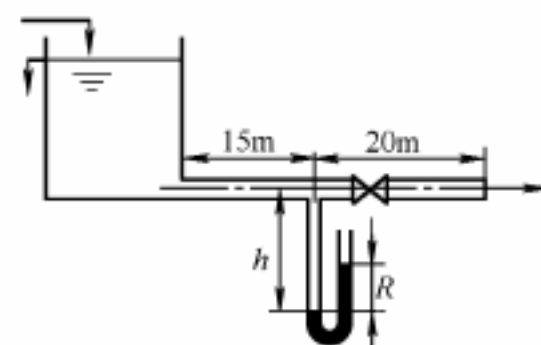
于是 $W_e = (192.0 + 25.74) \text{ J/kg} = 217.7 \text{ J/kg}$

泵的轴功率为

$$N_s = W_e w / \eta = \frac{217.7 \times 2 \times 10^4}{3600 \times 0.7} \text{ W} = 1.73 \text{ kW}$$

流体输送管路的计算

20. 如本题附图所示，贮槽内水位维持不变。槽的底部与内径为 100 mm 的钢质放水管相连，管路上装有一个闸阀，距管路入口端 15 m 处安有以水银为指示液的 U 管压差计，其一臂与管道相连，另一臂通大气。压差计连接管内充满了水，测压点与管路出口端之间的直管长度为 20 m。



习题 20 附图

(1) 当闸阀关闭时，测得 $R=600\text{ mm}$ 、 $h=1500\text{ mm}$ ；当闸阀部分开启时，测得 $R=400\text{ mm}$ 、 $h=1400\text{ mm}$ 。摩擦系数 λ 可取为 0.025，管路入口处的局部阻力系数取为 0.5。问每小时从管中流出多少水 (m^3)？

(2) 当闸阀全开时，U 管压差计测压处的压力为多少 Pa (表压)。(闸阀全开时 $L_e/d \approx 15$ ，摩擦系数仍可取 0.025。)

解 (1) 闸阀部分开启时水的流量

在贮槽水面 1-1 与测压点处截面 2-2 间列机械能衡算方程，并通过截面 2-2 的中心作基准水平面，得

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_{f,1-2} \quad (\text{a})$$

式中 $p_1=0$ (表)

$$p_2 = \rho_{\text{Hg}} gR - \rho_{\text{H}_2\text{O}} gR = (13600 \times 9.81 \times 0.4 - 1000 \times 9.81 \times 1.4) \text{ Pa} = 39630 \text{ Pa (表)}$$

$$u_{b2}=0, z_2=0$$

z_1 可通过闸阀全关时的数据求取。当闸阀全关时，水静止不动，根据流体静力学基本方程知

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} g(z_1 + h) = \rho_{\text{Hg}} gR \quad (\text{b})$$

式中 $h=1.5\text{ m}$, $R=0.6\text{ m}$

将已知数据代入式 (b) 得

$$z_1 = \left(\frac{13600 \times 0.6}{1000} - 1.5 \right) \text{ m} = 6.66 \text{ m}$$

$$\sum h_{f,1-2} = \left(\lambda \frac{L}{d} + \zeta_c \right) \frac{u_b^2}{2} = 2.13 u_b^2 = \left(0.025 \times \frac{15}{0.1} + 0.5 \right) \frac{u_b^2}{2} = 2.13 u_b^2$$

将以上各值代入式 (a)，即

$$9.81 \times 6.66 = \frac{u_b^2}{2} + \frac{39630}{1000} + 2.13 u_b^2$$

解得 $u_b = 3.13 \text{ m/s}$

$$\text{水的流量为 } V_s = \frac{3600}{4} \pi d^2 u_b = 3600 \times 0.785 \times 0.1^2 \times 3.13 \text{ m}^3/\text{s} = 1.43 \text{ m}^3/\text{s}$$

(2) 闸阀全开时测压点处的压力

在截面 1-1 与管路出口内侧截面 3-3 间列机械能衡算方程，并通过管中心线作基准平面，得

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_3 + \frac{u_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho} + \sum h_{f,1-3} \quad (\text{c})$$

式中 $z_1=6.66\text{ m}$, $z_3=0$, $u_{b1}=0$, $p_1=p_3$

$$\sum_{f,1-3} h = \left(\lambda \frac{L + \sum L}{d} + \zeta \right) \frac{u_b^2}{2} = \left[0.025 \left(\frac{35}{0.1} + 15 \right) + 0.5 \right] \frac{u_b^2}{2} = 4.81 u_b^2$$

将以上数据代入式 (c)，即

$$9.81 \times 6.66 = \frac{u_b^2}{2} + 4.81 u_b^2$$

解得 $u_b = 3.13 \text{ m/s}$

再在截面 1-1 与 2-2 间列机械能衡算方程，基平面同前，得

$$g z_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = g z_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum_{f,1-2} h \quad (d)$$

式中 $z_1 = 6.66 \text{ m}$, $z_2 = 0$, $u_1 \approx 0$, $u_2 = 3.51 \text{ m/s}$, $p_1 = 0$ (表压力)

$$\sum_{f,1-2} h = 0.025 \left(\frac{35}{0.1} + 15 \right) \frac{3.51^2}{2} + 0.5 \frac{3.51^2}{2} = 26.2 \text{ J/kg}$$

将以上数值代入上式，则

$$9.81 \times 6.66 = \frac{3.51^2}{2} + \frac{p_2}{1000} + 26.2$$

解得 $p_2 = 3.30 \times 10^4 \text{ Pa}$ (表压)

21. 10°C 的水以 500 l/min 的流量流经一长为 300 m 的水平管，管壁的绝对粗糙度为 0.05 mm 。有 6 m 的压头可供克服流动的摩擦阻力，试求管径的最小尺寸。

解：由于是直径均一的水平圆管，故机械能衡算方程简化为

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \sum_{f,1-2} h_f$$

上式两端同除以加速度 g ，得

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \sum_{f,1-2} \frac{h_f}{g} = 6 \text{ m (题给)}$$

$$\text{即 } \sum_{f,1-2} h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{u_b^2}{2} = 6 \times 9.81 \text{ J/kg} = 58.56 \text{ J/kg}$$

(a)

$$u_b = \frac{V}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{500 \times 10^{-3}}{60 \times \frac{\pi d^2}{4}} = 0.01062 d^{-2}$$

将 u_b 代入式 (a)，并简化得

$$d^5 = 2.874 \times 10^{-4} \lambda$$

(b)

λ 与 Re 及 e/d 有关，采用试差法，设 $\lambda = 0.021$ 代入式 (b)，求出 $d = 0.0904 \text{ m}$ 。

下面验算所设的 λ 值是否正确：

$$e/d = 0.05 \times 10^{-3} / 0.0904 = 0.000553$$

$$u_b = 0.01062 / 0.0904^2 \text{ m/s} = 1.3 \text{ m/s}$$

10°C 水物性由附录查得

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \mu = 130.77 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$Re = \frac{d u_b \rho}{\mu} = \frac{0.0904 \times 1.3 \times 1000}{130.77 \times 10^{-5}} = 8.99 \times 10^4$$

由 el/d 及 Re , 查得 $\lambda=0.021$

故 $d = 0.0904\text{m} = 90.4\text{mm}$

22. 如本题附图所示, 自水塔将水送至车间, 输送管路用 $\phi 114\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的钢管, 管路总长为 190m (包括管件与阀门的当量长度, 但不包括进、出口损失)。水塔内水面维持恒定, 并高于出水口 15m 。设水温为 12°C , 试求管路的输水量 (m^3/h)。

解: 在截面 $1-1'$ 和截面 $2-2'$ 之间列柏努利方程式, 得

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + gZ_2 + \sum h_f$$

习题 22 附图

$$p_1 = 1.0133 \times 10^5 \text{Pa}; \quad p_2 = 1.0133 \times 10^5 \text{Pa}; \quad Z_2 - Z_1 = 15.0\text{m}; \quad u_1 \approx 0$$

$$\frac{u_2^2}{2} = g(Z_1 - Z_2) - \sum h_f = 9.8 \times 15 - \left(\lambda \frac{l + \sum l_e}{d} + 0.5 \right) \frac{u_2^2}{2}$$

$$\frac{u_2^2}{2} \left(\lambda \frac{l + \sum l_e}{d} + 1.5 \right) = 294$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{294}{1792.45\lambda + 1.5}} \quad (1)$$

采用试差法, 假设 $u_2 = 2.57\text{m/s}$

$$\text{则 } Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.106 \times 2.57 \times 999.8}{124.23 \times 10^{-5}} = 2.19 \times 10^5$$

取管壁的绝对粗糙度为 0.2mm ,

$$\text{则管壁的相对粗糙度为 } \frac{e}{d} = \frac{0.2}{106} \approx 0.0019$$

查图1-22, 得

$$\lambda = 0.024$$

代入式 (1) 得,

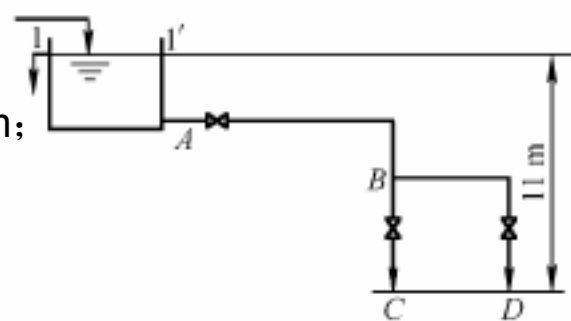
$$u_2 = 2.57\text{m/s}$$

故假设正确, $u_2 = 2.57\text{m/s}$

管路的输水量

$$V = u_2 A = 2.57 \times \frac{3.14}{4} \times (0.114 - 2 \times 0.004)^2 \times 3600\text{m}^3/\text{h} = 81.61\text{m}^3/\text{h}$$

23. 本题附图所示为一输水系统，高位槽的水面维持恒定，水分别从 BC 与 BD 两支管排出，高位槽液面与两支管出口间的距离均为 11 。 AB 管段内径为 38 mm、长为 58 m； BC 支管的内径为 32 mm、长为 12.5 m； BD 支管的内径为 26 mm、长为 14 m，各段管长均包括管件及阀门全开时的当量长度。 AB 与 BC 管段的摩擦系数 λ 均可取为 0.03 。试计算（1）当 BD 支管的阀门关闭时， BC 支管的最大排水量为多少 (m^3/h)；（2）当所有阀门全开时，两支管的排水量各为多少 (m^3/h)？（ BD 支管的管壁绝对粗糙度，可取为 0.15 mm，水的密度为 1000 kg/m^3 ，黏度为 $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。）



习题 23 附图

解（1）当 BD 支管的阀门关闭时， BC 支管的最大排水量

在高位槽水面 1-1' 与 BC 支管出口内侧截面 C-C 间列机械能衡算方程，并以截面 C-C 为基准平面得

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_c + \frac{u_c^2}{2} + \frac{p_c}{\rho} + \sum h_f$$

式中 $z_1=11 \text{ m}$, $z_c=0$, $u_{b1} \approx 0$, $p_1=p_c$

$$\text{故 } \frac{u_{bc}^2}{2} + \sum h_f = 9.81 \times 11 = 107.9 \text{ J/kg} \quad (\text{a})$$

$$\sum h_f = \sum h_{f,AB} + \sum h_{f,BC} \quad (\text{b})$$

$$\begin{aligned} \sum h_{f,AB} &= \left(\lambda \frac{L + \sum L_e}{d} + \zeta_c \right) \frac{u_{b,AB}^2}{2} \\ &= \left(0.03 \times \frac{58}{0.038} + 0.5 \right) \frac{u_{b,AB}^2}{2} = 23.15 u_{b,AB}^2 \end{aligned} \quad (\text{c})$$

$$\sum h_{f,BC} = \left(0.03 \times \frac{12.5}{0.032} \right) \frac{u_{b,BC}^2}{2} = 5.86 u_{b,BC}^2 \quad (\text{d})$$

$$\therefore \frac{u_{b,AB}}{d_{AB}} = \left(\frac{d_{BC}}{d_{AB}} \right)^2 u_{b,BC} \quad \therefore \frac{u_{b,AB}^2}{d_{AB}^4} = \left(\frac{d_{BC}}{d_{AB}} \right)^4 u_{b,BC}^2 = 0.5 u_{b,BC}^2 \quad (\text{e})$$

将式 (e) 代入式 (b) 得

$$\sum h_{f,AB} = 23.15 \times 0.5 u_{b,BC}^2 = 11.58 u_{b,BC}^2 \quad (\text{f})$$

将式 (f)、(d) 代入式 (b) 得

$$\sum h_f = 11.58 u_{b,BC}^2 + 5.86 u_{b,BC}^2 = 17.44 u_{b,BC}^2$$

$u_{bC} = u_{b,BC}$ ，并以 $\sum h_f$ 值代入式 (a)，解得

$$u_{b,BC} = 2.45 \text{ m/s}$$

$$\text{故 } V_{BC} = 3600 \times \frac{\pi}{4} \times 0.032^2 \times 2.45 \text{ m}^3/\text{h} = 7.10 \text{ m}^3/\text{h}$$

（2）当所有阀门全开时，两支管的排水量根据分支管路流动规律，有

$$gz_c + \frac{u_c^2}{2} + \frac{p_c}{\rho} + \sum h_{f,BC} = gz_D + \frac{u_{b,D}^2}{2} + \frac{p_D}{\rho} + \sum h_{f,BD} \quad (\text{a})$$

两支管出口均在同一水平面上，下游截面列于两支管出口外侧，于是上式可简化为

$$\begin{aligned}\sum h_{f,BC} &= \sum h_{f,BD} \\ \sum h_{f,BC} &= \left(\lambda \frac{L + \sum L}{d} + \zeta_{cD} \right) \frac{u_{b,BC}^2}{2} \\ &= \left(0.03 \times \frac{12.5}{0.032} + 1 \right) \frac{u_{b,BC}^2}{2} = 6.36 u_{b,BC}^2 \\ \sum h_{f,BD} &= \left(\lambda \frac{14}{0.026} + 1 \right) \frac{u_{b,BD}^2}{2} = (269.2\lambda + 0.5) u_{b,BD}^2\end{aligned}$$

将 $\sum h_{f,BC}$ 、 $\sum h_{f,BD}$ 值代入式 (a) 中, 得

$$6.36 u_{b,BC}^2 = (269.2\lambda + 0.5) u_{b,BD}^2$$

(b)

分支管路的主管与支管的流量关系为

$$\begin{aligned}V_{AB} &= V_{BC} + V_{BD} \\ d_{AB}^2 u_{b,AB} &= d_{BC}^2 u_{b,BC} + d_{BD}^2 u_{b,BD} \\ 0.038^2 u_{b,AB} &= 0.032^2 u_{b,BC} + 0.026^2 u_{b,BD}\end{aligned}$$

上式经整理后得

$$u_{b,AB} = 0.708 u_{b,BC} + 0.469 u_{b,BD} \quad (c)$$

在截面 1-1, 与 C-C 间列机械能衡算方程, 并以 C-C 为基准水平面, 得

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_c + \frac{u_{b,C}^2}{2} + \frac{p_C}{\rho} + \sum h_f \quad (d)$$

上式中 $z_1=11\text{ m}$, $z_c=0$, $u_{b1}\approx 0$, $u_{b,C}\approx 0$
上式可简化为

$$\sum h_f = \sum h_{f,AB} + \sum h_{f,BC} = 107.9 \text{ J/kg}$$

前已算出 $\sum h_{f,AB} = 23.15 u_{b,AB}^2$ $\sum h_{f,BC} = 6.36 u_{b,BC}^2$

因此 $23.15 u_{b,AB}^2 + 6.36 u_{b,BC}^2 = 107.9$

在式 (b)、(c)、(d) 中, $u_{b,AB}$ 、 $u_{b,BC}$ 、 $u_{b,BD}$ 即 λ 均为未知数, 且 λ 又为 $u_{b,BD}$ 的函数, 可采用试差法求解。设 $u_{b,BD}=1.45\text{ m/s}$, 则

$$Re = \frac{d u_b \rho}{\mu} = \frac{0.026 \times 1.45 \times 1000}{1 \times 10^{-3}} = 37700 \quad e/d = \frac{0.15}{26} = 0.0058$$

查摩擦系数图得 $\lambda=0.034$ 。将 λ 与 $u_{b,BD}$ 代入式 (b) 得

$$6.36 u_{b,BC}^2 = (269.2 \times 0.034 + 0.5) \times 1.45^2$$

解得 $u_{b,BC} = 1.79 \text{ m/s}$

将 $u_{b,BC}$ 、 $u_{b,BD}$ 值代入式 (c), 解得

$$u_{b,AB} = (0.708 \times 1.79 + 0.469 \times 1.45) \text{ m/s} = 1.95 \text{ m/s}$$

以上内容仅为
本文档的试下
载部分，为可
阅读页数的一
半内容。如要
下载或阅读全
文，请访问：
[https://d.boo
k118.com/2162
3410501301020
4](https://d.boo
k118.com/2162
3410501301020
4)