

第一章

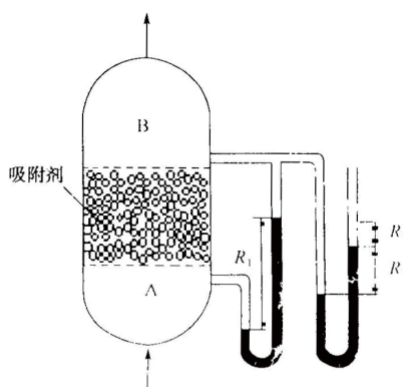
1-1 烟道气的组成约为 N_2 75%, CO_2 15%, O_2 5%, H_2O 5% (体积百分数)。试计算常压下 $400^\circ C$ 时该混合气体的密度。

解: $M_m = \sum M_i y_i = 0.75 \times 28 + 0.15 \times 44 + 0.05 \times 32 + 0.05 \times 18 = 30.1$
 $\rho_m = p M_m / RT = 101.3 \times 10^3 \times 30.1 / (8.314 \times 10^3 \times 673) = 0.545 \text{ kg/m}^3$

1-2 已知成都和拉萨两地的平均大气压强分别为 0.095 MPa 和 0.062 MPa 。现有一果汁浓缩锅需保持锅内绝对压强为 8.0 kPa 。问这一设备若置于成都和拉萨两地, 表上读数分别应为多少?

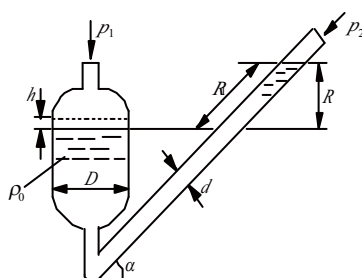
解: 成都 $p_R = 95 - 8 = 87 \text{ kPa}$ (真空度)
 拉萨 $p_R = 62 - 8 = 54 \text{ kPa}$ (真空度)

1-3 用如附图所示的 U 型管压差计测定吸附器内气体在 A 点处的压强以及通过吸附剂层的压强降。在某气速下测得 R_1 为 400 mmHg , R_2 为 90 mmHg , R_3 为 $40 \text{ mmH}_2\text{O}$, 试求上述值。



解: $p_B = R_3 \rho_{H_2O} g + R_2 \rho_{Hg} g = 0.04 \times 1000 \times 9.81 + 0.09 \times 13600 \times 9.81 = 12399.8 \text{ Pa}$ (表)
 $p_A = p_B + R_1 \rho_{Hg} g = 12399.8 + 0.4 \times 13600 \times 9.81 = 65766.2 \text{ Pa}$ (表)
 $\Delta p = p_A - p_B = 65766.2 - 12399.8 = 53366.4 \text{ Pa}$ (表)

1-4 如附图所示, 倾斜微压差计由直径为 D 的贮液器和直径为 d 的倾斜管组成。若被测流体密度为 ρ_0 , 空气密度为 ρ , 试导出用 R_1 表示的压强差计算式。如倾角 α 为 30° 时, 若要忽略贮液器内的液面高度 h 的变化, 而测量误差又不得超过 1% 时, 试确定 D/d 比值至少应为多少?



解: 由静力学方程 $\Delta p = R(\rho_0 - \rho)g = R_1 \sin \alpha (\rho_0 - \rho)g = R_1 (\rho_0 - \rho)g / 2$ (1)

若忽略贮液器内液面高度的变化, 则斜管内液位为: $R' = R - h$

液柱长度: $R_1' = R_1 - h / \sin \alpha = R_1 - 2h$

$$\Delta p' = R'(\rho_0 - \rho)g = R_1'(\rho_0 - \rho)g / 2 = (R_1 / 2 - h)(\rho_0 - \rho)g$$

又 $\pi D^2 h / 4 = \pi d^2 R_1' / 4$ 即 $h = R_1 (d/D)^2 / [1 + 2(d/D)^2]$

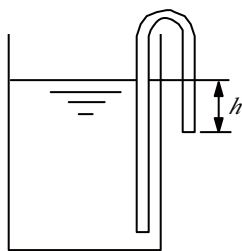
所以 $\Delta p' = R_1 (\rho_0 - \rho)g / [2 + 4(d/D)^2]$ (2)

相对误差为 $(\Delta p - \Delta p') / \Delta p \leq 0.001$

代入式 (1) 和 (2): $(\Delta p - \Delta p') / \Delta p = 1 - 1 / [1 + 2(d/D)^2] \leq 0.001$

解得: $d/D \leq 0.02237$ 即 $D/d \geq 44.7$

1-5 一虹吸管放于牛奶储槽中，其位置如图所示。储槽和虹吸管的直径分别为 D 和 d ，若流动阻力忽略不计，试计算虹吸管的流量。储槽液面高度视为恒定。



解：

$$\begin{aligned} p_1/\rho + u_1^2/2 + gz_1 &= p_2/\rho + u_2^2/2 + gz_2 \\ p_1 &= p_2, \quad u_1=0, \quad z_1=h, \quad z_2=0, \quad u_2=u \\ 2gh &= u^2 \quad u^2 = (2gh)^{1/2} \quad q_v = 0.785 d^2 u = 0.785 d^2 (2gh)^{1/2} \end{aligned}$$

1-6 密度为 920 kg/m^3 的椰子油由总管流入两支管，总管尺寸为 $\phi 57 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ ，两支管尺寸分别为 $\phi 38 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 和 $\phi 25 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。已知椰子油在总管中的流速为 0.8 m/s ，且 $\phi 38 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 与 $\phi 25 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 两支管中流量比为 2.2。试分别求椰子油在两支管中的体积流量、质量流量、流速及质量流速。

解：

$$\begin{aligned} q_v &= 0.785 \times 0.052 \times 0.8 = 1.57 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \\ q_{v1} + q_{v2} &= 1.57 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} & q_{v1}/q_{v2} &= 2.2 \\ q_{v2} &= 1.57 \times 10^{-3} / 3.2 = 4.91 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} & q_{v1} &= 2.2 q_{v2} = 1.079 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \\ q_{m2} &= \rho q_{v2} = 920 \times 4.91 \times 10^{-4} = 0.452 \text{ kg/s} & q_{m1} &= \rho q_{v1} = 920 \times 1.079 \times 10^{-3} = 0.993 \text{ kg/s} \\ u_2 &= q_{v2} / 0.785 d_2^2 = 4.91 \times 10^{-4} / (0.785 \times 0.025^2) = 1.564 \text{ m/s} \\ u_1 &= q_{v1} / 0.785 d_1^2 = 1.079 \times 10^{-3} / (0.785 \times 0.038^2) = 1.262 \text{ m/s} \\ w_2 &= \rho u_2 = 920 \times 1.564 = 1438.6 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)} & w_1 &= \rho u_1 = 920 \times 1.262 = 1161 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)} \end{aligned}$$

1-7 用一长度为 0.35 m 的渐缩管将输水管路由内径 100 mm 缩至 30 mm 。当管内水流量为 $0.52 \text{ m}^3/\text{h}$ ，温度为 10°C 时，问：（1）在该渐缩管段中能否发生流型转变；（2）管内由层流转为过渡流的截面距渐缩管大端距离为多少？

解：

$$\begin{aligned} u_1 &= q_v / 0.785 d_1^2 = 0.52 / (3600 \times 0.785 \times 0.1^2) = 0.0184 \text{ m/s} \\ Re_1 &= d_1 u_1 \rho / \mu = 0.1 \times 0.0184 \times 1000 / 0.0013077 = 1407 < 2000 \\ u_2 &= q_v / 0.785 d_2^2 = 0.52 / (3600 \times 0.785 \times 0.03^2) = 0.2045 \text{ m/s} \\ Re_2 &= d_2 u_2 \rho / \mu = 0.03 \times 0.2045 \times 1000 / 0.0013077 = 4691 > 4000 \quad \text{故可以发生转变} \\ \text{当 } Re &= 2000 \text{ 时, } u d = 2000 \times 0.0013077 / 1000 = 0.0026154 \\ u d^2 &= q_v / 0.785 = 0.52 / (3600 \times 0.785) = 1.84 \times 10^{-4} \\ \text{两式相除} & \quad d = 1.84 \times 10^{-4} / 0.0026154 = 0.07035 \text{ m} \\ \text{由比例关系} & \quad (0.1 - 0.03) : 0.35 = (0.1 - 0.07035) : x \quad x = (0.1 - 0.07035) \times 0.35 / (0.1 - 0.03) = 0.148 \text{ m} \end{aligned}$$

1-8 直径为 1.0 m 的稀奶油高位槽底部有一排出孔，其孔径为 15 mm 。当以 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 的固定流量向高位槽加稀奶油的同时底部排出孔也在向外排出奶油。若小孔的流量系数 C_d 为 0.62 （ C_d 为孔口实际流量与理想流量之比），试求达到出奶油与进奶油流量相等时高位槽的液位及所需的时间。（假设高位槽最初是空的）

解：

设任一时刻槽内液位为 h ，则由柏努利方程得：

理论流速 $u_{th} = (2gh)^{1/2}$ 实际流速： $u = C_d (2gh)^{1/2}$

流量： $q_v = \pi d^2 u / 4 = 0.785 \times 0.015^2 \times 0.62 \times (2 \times 9.81 \times h)^{1/2} = 4.85 \times 10^{-4} h^{1/2}$

代入 $q_v = 2/3600 \text{ m}^3/\text{s}$, $H = [2 / (3600 \times 4.85 \times 10^{-4})]^2 = 1.312 \text{ m}$

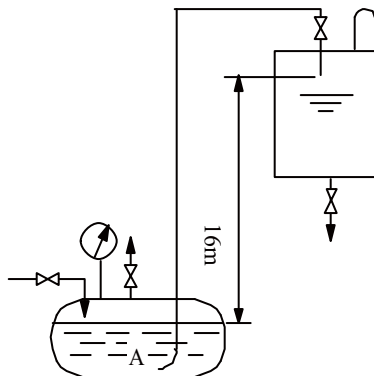
由物料衡算 $q_{v,in} - q_{v,out} = dV/d\theta = 0.785 D^2 dh/d\theta$

$$\frac{2}{3600} - 4.85 \times 10^{-4} \sqrt{h} = 0.785 \times 1^2 \frac{dh}{d\theta}$$

令 $y = h^{1/2}$ ，则 $dh = 2y dy$ ，当 $h = H$ 时， $y = H^{1/2} = 1.145 \text{ m}$

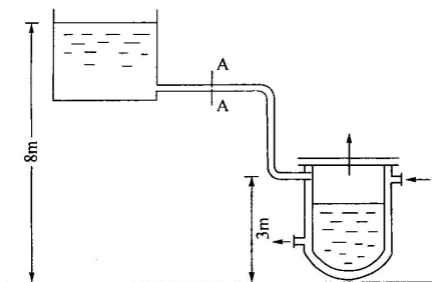
$$\begin{aligned}
 \theta &= \int_0^{1.145} \frac{2 \times 10^4 dy}{7.077 - 6.178y} = 10^4 \int_0^{1.145} \frac{\frac{2}{6.178}(6.178y - 7.077) + 2.291}{7.077 - 6.178y} dy \\
 &= 10^4 \left[\frac{2}{6.178} \int_0^{1.145} -dy + \int_0^{1.145} \frac{2.291 dy}{7.077 - 6.178y} \right] = 10^4 \left[\frac{-2y}{6.178} \Big|_0^{1.145} - \frac{2.291}{6.178} \ln(7.077 - 6.178y) \Big|_0^{1.145} \right] = 2486s
 \end{aligned}$$

1-9 用压缩空气将密度为 1081 kg/m^3 的蔗糖溶液从密闭容器中送至高位槽，如附图所示。要求每批的压送量为 1.2 m^3 ，20 分钟压完，管路能量损失为 25 J/kg ，管内径为 30 mm ，密闭容器与高位槽两液面差为 16 m 。求压缩空气的压强为多少 Pa （表压）？



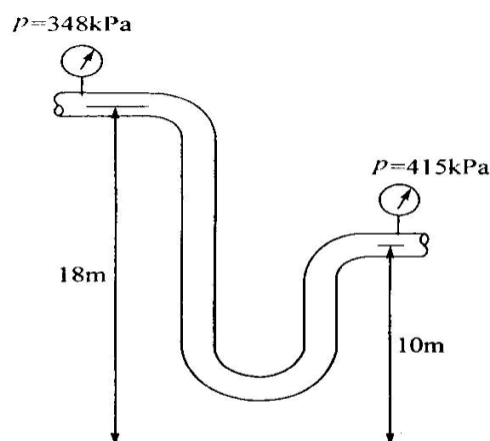
解： $p_1/\rho + u_1^2/2 + gz_1 = p_2/\rho + u_2^2/2 + gz_2 + \Sigma h_f$
 $u_1=0, z_1=0, p_2=0, z_2=16 \text{ m}, \Sigma h_f=25 \text{ J/kg}$
 $u_2=1.2/(20 \times 60 \times 0.785 \times 0.03^2)=1.415 \text{ m/s}$
 $p_1=(1.415^2/2 + 9.81 \times 16 + 25) \times 1081 = 1.987 \times 10^4 \text{ Pa}$

1-10 敞口高位槽中的葡萄酒（密度为 985 kg/m^3 ）经 $\phi 38 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的不锈钢导管流入蒸馏锅，如图所示。高位槽液面距地面 8 m ，导管进蒸馏锅处距地面 3 m ，蒸馏锅内真空度为 8 kPa 。在本题特定条件下，管路摩擦损失可按 $\Sigma h_f = 6.5u^2 \text{ J/kg}$ （不包括导管出口的局中阻力）计算， u 为葡萄酒在管内的流速 m/s 。试计算：（1）导管 A—A 截面处葡萄酒的流速；（2）导管内葡萄酒的流量。



解： $p_1/\rho + u_1^2/2 + gz_1 = p_2/\rho + u_2^2/2 + gz_2 + \Sigma h_f$
 $p_1=0, u_1=0, z_1=8 \text{ m}, p_2=-8 \text{ kPa}, z_2=3 \text{ m}, u_2=u$
 $8 \times 9.81 = -8000/985 + u^2/2 + 3 \times 9.81 + 6.5u^2$
 $u = \sqrt{\frac{5 \times 9.81 + \frac{8000}{985}}{7}} = 2.86 \text{ m/s}$
 $q_v = 0.785 \times 0.033^2 \times 2.86 = 2.443 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

1-11 如附图所示，水从离地面 18 m 处用 $\phi 273 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ，长 35 m （包括局部阻力损失的当量长度）的管道连接到离地面 10 m 处，并测得高低两处压强分别为 345 kPa 和 415 kPa （表压）。试确定：（1）水的流动方向；（2）若管路摩擦系数取 0.026 ，管路中水的流量为多少？



解:

$$u_1 = u_2$$

$$p_1/\rho + gz_1 = 348 \times 10^3 / 1000 + 18 \times 9.81 = 524.58 \text{ J/kg}$$

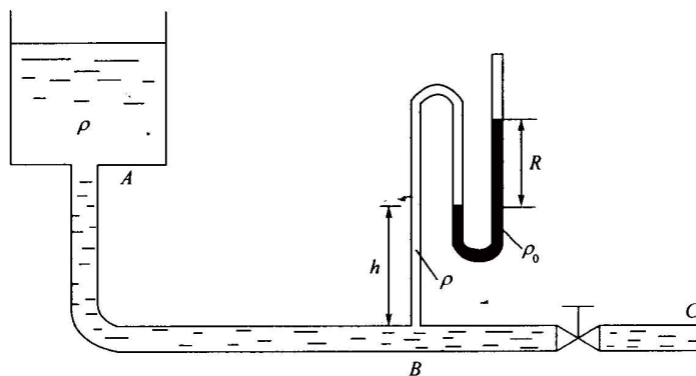
$$p_2/\rho + gz_2 = 415 \times 10^3 / 1000 + 10 \times 9.81 = 513.1 \text{ J/kg}$$

$$u_1^2/2 + 524.58 = u_2^2/2 + 513.1 + 0.026 \times (35/0.263) \times u^2/2$$

$$u = \sqrt{\frac{(524.58 - 513.1) \times 2 \times 0.263}{0.026 \times 35}} = 2.578 \text{ m/s}$$

$$q_v = 0.785 \times 0.263^2 \times 2.578 = 0.14 \text{ m}^3/\text{s}$$

1-12 如图所示, 槽内水位维持不变, 槽底部与内径为 50mm 的钢管联结, 管路中 B 处装有一 U 型管压差计。当阀门关闭时读数 $R=350\text{mmHg}$, $h=1200\text{mm}$ 。(1) 阀门部分开启时, 测得 $R=250\text{mm}$, $h=1250\text{mm}$, 若 AB 段能量损失为 10J/kg , 问管内流量为多少 m^3/h ? (2) 阀门全开时, 若 AB 段与 BC 段的能量损失分别按 $\Sigma h_{fAB}=1.6u^2\text{J/kg}$, $\Sigma h_{fAC}=7u^2\text{J/kg}$ 计算 (不包括管出口阻力), u 为管内流速。问 B 点处 (压差计处) 的压强为多少?



解：

阀门全关时：

$$p_0 = R\rho_{\text{Hg}}g = 0.35 \times 13600 \times 9.81 = 4.67 \times 10^4 \text{ Pa (表)}$$

$$H\rho_{\text{H}_2\text{O}}g = 4.67 \times 10^4 + h\rho_{\text{H}_2\text{O}}g = 4.67 \times 10^4 + 1.2 \times 1000 \times 9.81 \\ = 5.847 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$H = 5.847 \times 10^4 / (1000 \times 9.81) = 5.96 \text{ m}$$

阀门部分开时：

$$p_A/\rho + u_A^2/2 + gz_A = p_B/\rho + u_B^2/2 + gz_B + \Sigma h_{fAB} \\ p_A = 0, u_A = 0, z_A = H = 5.96 \text{ m}, \Sigma h_{fAB} = 10 \text{ J/kg}, \\ z_B = 0, u_B = u$$

$$p_B = 0.25 \times 13600 \times 9.81 + 1.25 \times 1000 \times 9.81 = 4.562 \times 10^4 \text{ Pa (表)} \\ 5.96 \times 9.81 = 4.562 \times 10^4 / 1000 + u^2/2 + 10 \\ u = 2.388 \text{ m/s}$$

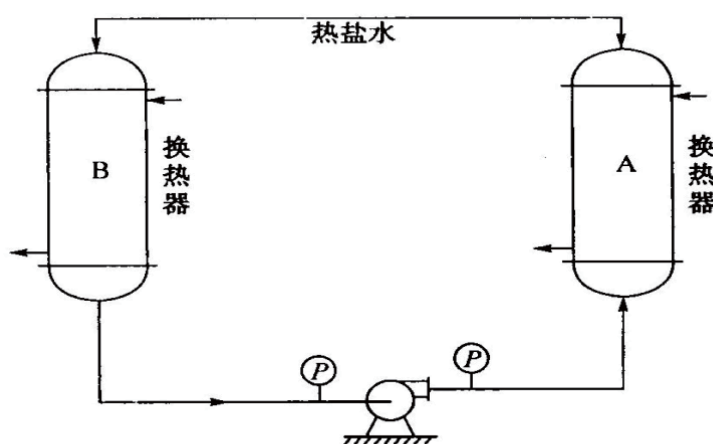
$$q_{\text{vh}} = 0.785 \times 0.05^2 \times 2.388 \times 3600 = 16.87 \text{ m}^3/\text{h}$$

阀门全开时：

$$p_A/\rho + u_A^2/2 + gz_A = p_C/\rho + u_C^2/2 + gz_C + \Sigma h_{fAB} + \Sigma h_{fBC} \\ z_C = 0, p_C = 0, u_C = u \\ 5.96 \times 9.81 = u^2/2 + 1.6u^2 + 7u^2 \\ u = 2.535 \text{ m/s}$$

$$p_B/\rho + u_B^2/2 + gz_B = p_C/\rho + u_C^2/2 + gz_C + \Sigma h_{fBC} \\ z_B = z_C, p_C = 0, u_B = u_C \\ p_B = 1000 \times 7 \times 2.535^2 = 2.249 \times 10^4 \text{ Pa (表)}$$

1-13 如图所示的一冷冻盐水循环系统，盐水循环量为 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，盐水流经换热器 A 的阻力损失为 50J/kg ，流经换热器 B 的阻力损失为 60J/kg ，管路中流动的阻力损失为 30J/kg 。管路系统采用同直径管子，盐水密度为 1100kg/m^3 （忽略泵进、出口的高差），试计算：
 （1）若泵的效率为 68% ，泵的轴功率为多少 kW ？
 （2）若泵出口压强为 0.26MPa （表压），泵入口压力表读数为多少 Pa ？



解：

$$(1) \quad W_e = 50 + 60 + 30 = 140 \text{ J/kg}$$

$$q_m = 30 \times 1100 / 3600 = 9.17 \text{ kg/s}$$

$$P = W_e q_m / \eta = 140 \times 9.17 / 0.68 = 1.89 \times 10^3 \text{ W}$$

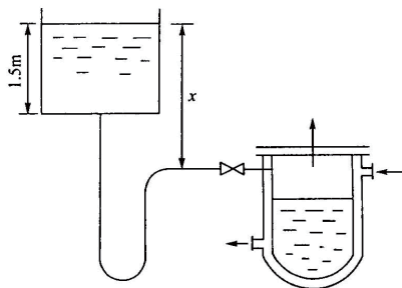
(2) 在泵出入口间列柏努利方程：

$$p_{\text{入}} / \rho + W_e = p_{\text{出}} / \rho$$

$$p_{\text{入}} = 1100 \times (0.26 \times 10^6 / 1100 - 140) = 1.06 \times 10^5 \text{ Pa}$$

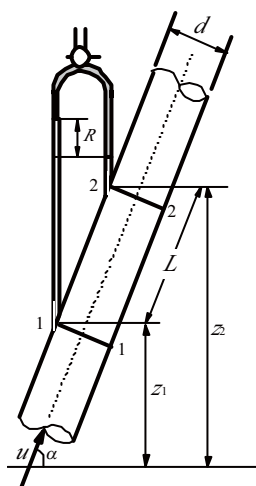
1-14 要求以均匀的速度向果汁蒸发浓缩釜中进料。现装设一高位槽，使料液自动流入釜中（如附图

所示)。高位槽内的液面保持距槽底 1.5m 的高度不变，釜内的操作压强为 0.01MPa（真空度），釜的进料量须维持在每小时为 12m³，则高位槽的液面要高出釜的进料口多少米才能达到要求？已知料液的密度为 1050kg/m³，粘度为 3.5cP，连接管为 $\phi 57\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 的钢管，其长度为 $[(x-1.5)+3]\text{m}$ ，管道上的管件有 180° 回弯管一个，截止阀（按 1/2 开计）一个及 90° 弯头一个。



解： $p_1/\rho + u_1^2/2 + gz_1 = p_2/\rho + u_2^2/2 + gz_2 + \sum h_f$
 $p_1=0, u_1=0, z_1=x, p_2=-10\text{kPa}, z_2=0, u_2=u=12/(3600 \times 0.785 \times 0.05^2)=1.7\text{m/s}$
 $Re = du\rho/\mu = 0.05 \times 1.7 \times 1050 / 0.0035 = 2.55 \times 10^4$
 取 $\varepsilon=0.2\text{ mm}, \varepsilon/d=0.004, \lambda=0.027; \zeta_\lambda=0.5$ ，截止阀 $\zeta=9.5$ ，弯头 $\zeta=0.75$ ，回弯管 $\zeta=1.5$
 $\sum h_f = [0.027 \times (x+1.5)/0.05 + 0.5 + 0.75 + 9.5 + 1.5] \times 1.7^2/2 = 0.78x + 18.872$
 $9.81x = -10000/1050 + 1.7^2/2 + 0.78x + 18.872 \quad x=1.2\text{m}$

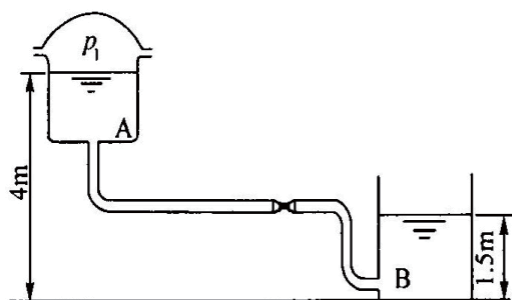
1-15 如附图所示，拟安装一倒 U 型管压差计测量 L 管段的阻力损失。管内流体密度 $\rho=900\text{kg/m}^3$ ，粘度 $\mu=1.5 \times 10^{-3}\text{Pas}$ ；指示剂为空气 $\rho_0=1.2\text{kg/m}^3$ ；管内径 $d=50\text{mm}$ ，管壁绝对粗糙度 $\varepsilon=0.3\text{mm}$ 。试推导：
 (1) 管路条件 (L, d, ε) 和流速 u 一定时，倾角 α 与两测点静压差 Δp 的关系以及 α 与 R 读数的关系；
 (2) 当流速为 2m/s, $L=1\text{m}$ 时， R 读数的预测值。



解： $p_1/\rho + u_1^2/2 + gz_1 = p_2/\rho + u_2^2/2 + gz_2 + \sum h_f$
 $u_1=u_2, z_2=z_1+L\sin\alpha \quad \sum h_f = \lambda(L/d)u^2/2 \quad \Delta p/\rho = gL\sin\alpha + \lambda(L/d)u^2/2$
 对倒 U 形压差计 $p_1 - \rho g L \sin\alpha - p_2 = R(\rho - \rho_0)g = R(\rho - \rho_0)g + \rho g L \sin\alpha$
 当 $u=2\text{m/s}$ 时 $Re = 2 \times 0.05 \times 900 / 0.0015 = 6 \times 10^4 \quad \varepsilon/d = 0.3/50 = 0.006 \quad \lambda = 0.023$
 $\Delta p = 950(gL\sin\alpha + 0.023 \times (1/0.05) \times 2^2/2) = 950gL\sin\alpha + 874$
 由 $950gL\sin\alpha + 874 = R(950 - 1.2) \times 9.81 + 950gL\sin\alpha$
 $R = 874 / [(950 - 1.2) \times 9.81] = 0.094\text{m}$

1-16 水由水箱 A 经一导管路流入敞口贮槽 B 中，各部分的相对位

置如图所示。水箱液面上方压强为 0.02MPa （表压），导管为 $\phi 108\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的钢管，管路中装有一闸阀，转弯处均为 90° 标准弯头。试计算：（1）闸阀全开时水的流量（设直管阻力可忽略不计）；（2）闸阀 $1/2$ 开时水的流量（设直管阻力可忽略不计）；（3）若此系统其它条件不变，仅输水管增长 200m ，此系统阻力为若干？



解：（1） $p_1/\rho + u_1^2/2 + gz_1 = p_2/\rho + u_2^2/2 + gz_2 + \Sigma h_f$

$$p_1 = 2 \times 10^4 \text{Pa}, u_1 = 0, z_1 = 4\text{m}, p_2 = 0, u_2 = 0, z_2 = 1.5\text{m},$$

$$\text{入口 } \zeta = 0.5, \text{出口 } \zeta = 1, \text{闸阀 } \zeta = 0.17, \text{弯头 } \zeta = 0.75,$$

$$\Sigma h_f = (0.5 + 1 + 0.17 + 3 \times 0.75) \times u^2 / 2 = 1.96 u^2$$

$$20000/1000 + 4 \times 9.81 = 1.5 \times 9.81 + 1.96 u^2$$

$$u = 4.766 \text{m/s}$$

$$q_v = 0.785 \times 0.1^2 \times 4.766 = 0.0374 \text{m}^3/\text{s}$$

（2） 闸阀 $\zeta' = 4.5$

$$\Sigma h_f = (0.5 + 1 + 4.5 + 3 \times 0.75) \times u^2 / 2 = 4.125 u^2$$

$$20000/1000 + 4 \times 9.81 = 1.5 \times 9.81 + 4.125 u^2$$

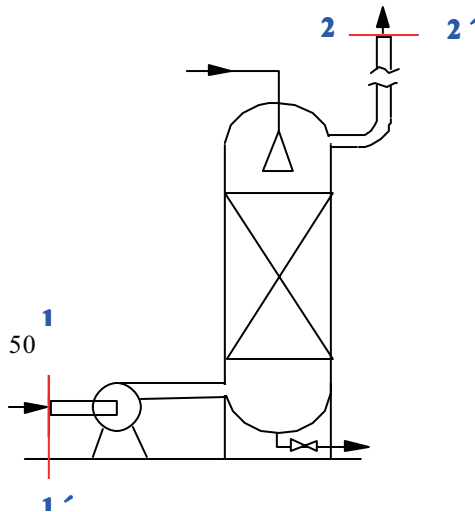
$$u = 3.285 \text{m/s}$$

$$q_v = 0.785 \times 0.1^2 \times 3.285 = 0.0258 \text{m}^3/\text{s}$$

$$(3) \Sigma h_f = (p_1 - p_2) / \rho + (u_1^2 - u_2^2) / 2 + g(z_1 - z_2)$$

$$= 20000 / 1000 + 0 + 9.81 \times 2.5 = 44.53 \text{ J/kg}$$

1-17 如附图所示某含有少量可溶物质的空气，在放空前需经一填料吸收塔进行净化。已知鼓风机入口处空气温度为 50°C ，压强为 $30\text{mmH}_2\text{O}$ （表压），流量为 $2200\text{m}^3/\text{h}$ 。输气管与放空管的内径均为 200mm ，管长与管件、阀门的当量长度之和为 50m （不包括进、出塔及管出口阻力），放空口与鼓风机进口的垂直距离为 20m ，空气通过塔内填料层的压降约为 $200\text{mmH}_2\text{O}$ ，管壁绝对粗糙度 ε 可取为 0.15mm ，大气压为 0.1MPa 。求鼓风机的有效功率。



解：如图界面

$$p_1 / \rho_m + u_1^2 / 2 + g z_1 + W_e = p_2 / \rho_m + u_2^2 / 2 + g z_2 + \Sigma h_f$$

$$p_m = 1 \times 10^5 + 30 \times 9.81 / 2 \approx 1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_m = p_m M / R T = 1 \times 10^5 \times 29 / (8314 \times 323) = 1.081 \text{ kg/m}^3$$

$$p_1 = 294.3 \text{ Pa}, u_1 = 0, z_1 = 0, p_2 = 0, u_2 = 0, z_2 = 20 \text{ m}$$

$$u = 2000 / (3600 \times 0.785 \times 0.2^2) = 17.69 \text{ m/s} \quad \mu = 1.96 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$Re = d u \rho / \mu = 0.2 \times 17.69 \times 1.081 / (1.96 \times 10^{-5}) = 1.95 \times 10^5$$

$$\varepsilon / d = 0.15 / 200 = 7.5 \times 10^{-4} \quad \lambda = 0.02$$

$$\Sigma h_f = (0.02 \times 50 / 0.2 + 0.5 + 1) \times 17.69^2 / 2 + 200 \times 9.81 / 1.081 = 2832 \text{ J/kg}$$

$$294.3 / 1.081 + W_e = 20 \times 9.81 + 2832$$

$$W_e = 2756 \text{ J/kg}$$

$$q_m = 2200 \times 1.081 / 3600 = 0.661 \text{ kg/s}$$

$$P = W_e q_m = 1820 \text{ W}$$

1-18 用 $\phi 60 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 钢管从敞口高位槽中引水至一常压吸收塔内。高位槽液面与水喷头出口高差 **10m**，管路流量最大可达 **15m³/h**。现需将流量增加到 **25m³/h**，试求：（1）管路不变，在管路中增加一台泵，该泵的功率；（2）管路布局不变，换新的管子，管子的直径。**以上计算中摩擦系数可视为不变。**

解：

（1）原来

$$p_1/\rho_m + u_1^2/2 + gz_1 = p_2/\rho_m + u_2^2/2 + gz_2 + \lambda(L/d)u^2/2$$

$$p_1 = p_2, \quad u_1 = 0, \quad z_1 = 10 \text{ m}, \quad u_2 = 0, \quad z_2 = 0,$$

$$u = 15 / (3600 \times 0.785 \times 0.053^2) = 1.89 \text{ m/s}$$

$$10 \times 9.81 = (\lambda L/d) \times 1.89^2 / 2$$

$$\lambda L/d = 54.95$$

后来

$$p_1/\rho_m + u_1^2/2 + gz_1 + W_e = p_2/\rho_m + u_2^2/2 + gz_2 + \lambda(L/d)u'^2/2$$

$$p_1 = p_2, \quad u_1 = 0, \quad z_1 = 10 \text{ m}, \quad u_2 = 0, \quad z_2 = 0,$$

$$u' = 25 / (3600 \times 0.785 \times 0.053^2) = 3.15 \text{ m/s}$$

$$W_e = -10 \times 9.81 + 54.95 \times 3.15^2 / 2 = 174.4 \quad \text{/kg}$$

$$q_m = 25 \times 1000 / 3600 = 6.94 \text{ kg/s}$$

$$P = 6.94 \times 174.4 = 1211 \text{ W}$$

（2）

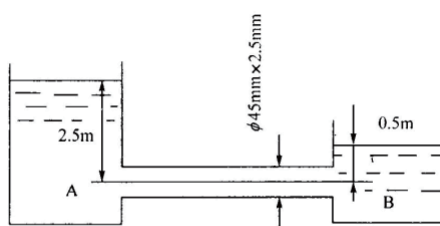
$$p_1/\rho_m + u_1^2/2 + gz_1 = p_2/\rho_m + u_2^2/2 + gz_2 + \lambda(L/d'') u''^2/2$$

$$u'' = 25/(3600 \times 0.785 \times d''^2) = 8.846 \times 10^{-3}/d''^2$$

$$10 \times 9.81 = 54.95 \times (0.053/d'') \times (8.846 \times 10^{-3}/d''^2)^2 \quad /2$$

$$d'' = 0.075 \text{ m}$$

1-19 距某植物油罐 A 液面 2.5 m 深处用一根油管向油箱 B 放油，连接 A、B 的油管为 $\phi 45 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 不锈钢管，长度 20 m，油出口距油箱 B 液面 0.5 m，如附图所示。该植物油的 $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。试求两液面高度稳定不变时，流经管道的流量。



解：

$$p_1/\rho_m + u_1^2/2 + gz_1 + W_e = p_2/\rho_m + u_2^2/2 + gz_2 + \Sigma h_f$$

$$p_1 = p_2, \quad u_1 = 0, \quad z_1 = 2.5 \text{ m}, \quad u_2 = 0, \quad z_2 = 0.5 \text{ m}$$

$$2.5 \times 9.81 = 0.5 \times 9.81 + (\lambda \times 20/0.04 + 1 + 0.5) \times u^2/2$$

设为层流，忽略进出口损失。则： $\lambda = 64/Re$

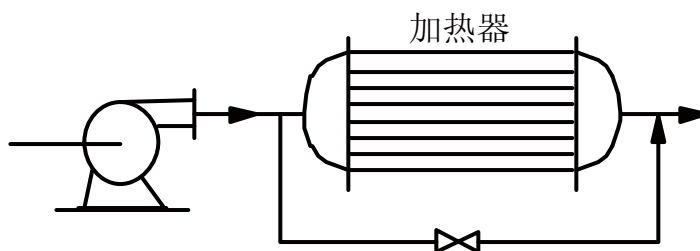
$$19.62 = (64\mu/du\rho) \times (L/d) \times u^2/2 = 32\mu u L/d^2 \rho$$

$$u = 19.62 \times 0.04^2 \times 930 / (32 \times 0.04 \times 20) = 1.14 \text{ m/s}$$

$$Re = du\rho/\mu = 19.62 \times 0.04 \times 930 / 0.04 = 1060 < 2000$$

$$q_v = 0.785 \times 0.04^2 \times 1.14 = 1.43 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

1-20 为调节加热器出口空气的温度，在空气加热器的进出口并联一旁路（附图）。已知鼓风机出口压强为 **0.02MPa**（表），温度为 **25℃**，流量为 **340m³/h**，空气通过换热器的压降为 **0.01MPa**。若旁路管长 **6m**，管路上标准弯头两个，截止阀一个（按 **1/2** 开计），试确定当旁路通过最大气量为总气量的 **15%** 时，所用管子的规格。



解：旁路的流量

$$q_v = 340 \times 0.15 / 3600 = 0.0142 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{弯头 } \zeta = 0.75, \text{ 调节阀 } \zeta = 9.5, \mu = 1.96 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s},$$

$$p_m = 0.02 \times 10^6 + 1 \times 10^5 = 1.2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_m = 1.2 \times 10^5 \times 29 / (8314 \times 323) = 1.296 \text{ kg/s}$$

$$\Delta p = \rho_m (\lambda L / d + \Sigma \zeta) \times (q_v / 0.785 d^2)^2 / 2$$

$$\Sigma h_f = \Delta p / \rho_m = (\lambda L / d + \Sigma \zeta) \times u^2 / 2$$

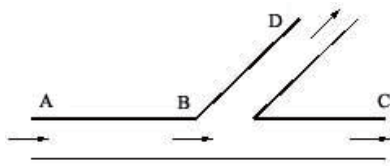
$$0.01 \times 10^6 = 1.296 \times (6\lambda / d + 2 \times 0.75 + 9.5) \times 0.0142^2 / (2 \times 0.785^2 \times d^4) = 1.272 \times 10^{-3} \lambda / d^5 + 2.332 \times 10^{-3} / d^5$$

取 $\varepsilon = 0.2 \text{ mm}$,

试差得： $d = 0.0473 \text{ m}$, $\varepsilon / d = 0.00423$, $\lambda = 0.0322$,

$$u = 8.085 \text{ m/s}, \quad Re = 2.53 \times 10^4$$

1-21 温度为 20℃ 的空气以 2000m³/h 的流量通过 $\phi 194\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的钢管管路 ABC 于 C 处进入一常压设备，如附图所示。现因生产情况变动，C 处的设备要求送风量减少为 1200m³/h。另需在管道上的 B 处接出一支管 BD，要求从此支管按每小时 800m³ 的流量分气，于 D 处进入另一常压设备。设管道 BC 间和 BD 间各管段局部阻力系数之和分别为 7 及 4，试计算 BD 分气支管的直径。



解：

$$p_B/\rho + u_B^2/2 + gz_B = p_C/\rho + u_C^2/2 + gz_C + \sum h_{fBC} = p_D/\rho + u_D^2/2 + gz_D + \sum h_{fBD}$$

$$p_C = p_D, \quad z_C = z_D,$$

$$u_C = 1200 / (3600 \times 0.785 \times 0.182^2) = 12.82 \text{ m/s}$$

$$\sum h_{fBC} = 7 \times 12.82^2 / 2 = 575.2 \text{ J/kg}$$

$$u_D = 800 / (3600 \times 0.785 \times d^2) = 0.2831 / d^2$$

$$\sum h_{fBD} = 4 \times (0.2831 / d^2)^2 / 2 = 0.1603 / d^4$$

$$12.82^2/2 + 575.2 = 657.4 = (0.2831/d^2)^2/2 + 0.1603/d^4 = 0.2004/d^4$$

$$d = 0.132 \text{ m}$$

1-22? 拟用泵将葡萄酒由贮槽通过内径为 50mm 的光滑铜管送至白兰地蒸馏锅。贮槽液面高出地面 3m，管子进蒸馏锅处高出地面 10m。泵出口管路上有一调节阀，管路总长 80m（包括除调节阀以外的所有局部阻力的当量长度）。葡萄酒的密度为 985kg/m³，粘度为 1.5mPa·s。试求：（1）在阀 1/2 开度和全开两种情况下，流动处于阻力平方区时管路特性方程；（2）流量为 15m³/h 时，两种情况下管路所需的压头及功率。

解：（1）阀全开时 $\zeta = 6.4$

$$H_L = \Delta p / \rho g + \Delta u^2 / 2g + \Delta z + (\lambda L / d + \sum \zeta) u^2 / 2g = \Delta p / \rho g + \Delta z + 8(\lambda L / d + \sum \zeta) q_v^2 / \pi^2 d^5 g$$

$$= 0 + (10 - 3) + (80\lambda / 0.05 + 6.4) q_v^2 / (0.785^2 \times 0.05^4 \times 2 \times 9.81) = 7 + 2.1174 \times 10^7 \lambda q_v^2 + 8.47 \times 10^4 q_v^2$$

阀半开 $\zeta = 9.5$

$$H_L = 7 + (80\lambda / 0.05 + 9.5) q_v^2 / (0.785^2 \times 0.05^4 \times 2 \times 9.81) = 7 + 2.1174 \times 10^7 \lambda q_v^2 + 1.257 \times 10^5 q_v^2$$

（2）当 $q_v = 15 / 3600 = 4.167 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时，

阀全开 $u = 4.167 \times 10^{-3} / (0.785 \times 0.05^2) = 2.12 \text{ m/s}$

$$Re = 2.12 \times 0.05 \times 985 / 0.0015 = 6.96 \times 10^4$$

$$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25} = 0.0195$$

$$H_L = 7 + 2.1174 \times 10^7 \times 0.0195 \times (4.167 \times 10^{-3})^2 + 8.47 \times 10^4 \times (4.167 \times 10^{-3})^2 = 15.64 \text{ m}$$

$$P = 15.64 \times 4.167 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 985 = 630 \text{ W}$$

阀半开 $H_L = 7 + 2.1174 \times 10^7 \times 0.0195 \times (4.167 \times 10^{-3})^2 + 1.257 \times 10^5 \times (4.167 \times 10^{-3})^2 = 16.35 \text{ m}$

$$P = 16.35 \times 4.167 \times 10^{-3} \times 9.81 \times 985 = 658 \text{ W}$$

1-23 压强为 0.35MPa（表压），温度为 25℃ 的天然气（以甲烷计）经过长 100m（包括局部阻力的当

量长度) $\phi 25\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的水平钢管后, 要求压强保持 0.05MPa (表压)。如视为等温流动, 天然气的粘度为 0.011cP , 钢管的绝对粗糙度取为 0.15mm , 大气压强为 0.1MPa 。求天然气的质量流量。

解: $\rho_m = 3 \times 10^5 \text{Pa}$ $\rho_m = 3 \times 10^5 \times 16 / (8314 \times 298) = 1.937 \text{ kg/m}^3$
 $p_1 - p_2 = (0.35 - 0.05) \times 10^6 = 3 \times 10^5 \text{Pa}$ $\ln(p_1/p_2) = \ln(0.35/0.05) = 1.946$
 $p_1 - p_2 = \nu^2 [\ln(p_1/p_2) + \lambda L / (2d)] / \rho_m$ $3 \times 10^5 = \nu^2 (1.946 + 100\lambda / 0.038) / 1.937$
 试差得: $\nu = 8.565 \text{ m/s}$ $\nu = 16.6 \text{ m/s}$ $Re = 8.565 \times 0.019 \times 1.937 / 0.000011 = 2.87 \times 10^4$
 $\varepsilon/d = 0.15/19 = 0.00079$ $\lambda = 0.026$ $q_m = 16.6 \times 0.785 \times 0.019^2 = 4.7 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

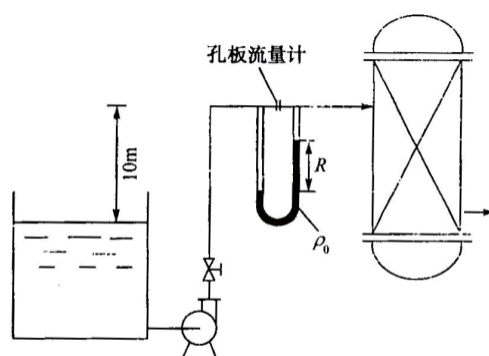
1-24 0°C 的冷空气在直径为 600 mm 的管内流动, 将毕托管插入管的中心位置, 以水为指示液, 读数为 4 mm , 试求冷空气的流量。

解: 管中心流速为最大流速 u_{\max} $u_{\max} = [2gR(\rho_a - \rho)]^{0.5}$
 0°C 水 $\rho_a = 999.9 \text{ kg/m}^3$ 0°C 空气 $\rho = 1.293 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.72 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $u_{\max} = [2 \times 9.81 \times (999.9 - 1.293) \times 0.004 / 1.293]^{0.5} = 7.79 \text{ m/s}$
 $Re_{\max} = du_{\max} \rho / \mu = 0.6 \times 7.79 \times 1.293 / (1.72 \times 10^{-3}) = 351365$ (湍流)
 由 Re_{\max} 与 u/u_{\max} 关联图查得: $u = 0.85 u_{\max} = 0.85 \times 7.79 = 6.62 \text{ m/s}$
 $q_v = \pi d^2 u / 4 = 0.785 \times 0.6^2 \times 6.62 = 1.87 \text{ m}^3/\text{s} = 6732 \text{ m}^3/\text{h}$

1-25 用一转子流量计测定温度为 60°C , 压强为 0.3MPa 的二氧化碳气体的流量。该转子流量计上的刻度是由 20°C 、 0.1MPa 空气标定的, 转子材料为铝材。当转子流量计上读数为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 二氧化碳的实际流量应为多少? 若将转子换为同形状、同大小的不锈钢转子, 在此读数下二氧化碳的流量又为多少? (铝与不锈钢的密度分别为 $\rho_{\text{Al}} = 2670 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{St}} = 7900 \text{ kg/m}^3$)

解: 空气: $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ CO_2 : $\rho = 3 \times 10^5 \times 44 / (8314 \times 333) = 4.768 \text{ kg/m}^3$
 铝转子: $q'_v = 5 \times \sqrt{\frac{1.2 \times (2670 - 4.768)}{4.768 \times (2670 - 1.2)}} = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$
 不锈钢转子: $q'_v = 5 \times \sqrt{\frac{1.2 \times (7900 - 4.768)}{4.768 \times (7900 - 1.2)}} = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$

1-26 用离心泵将敞口贮槽中的大豆油 (密度为 940 kg/m^3 , 粘度为 40cP) 送往一精制设备中, 如附图所示。设备内压强保持 0.01MPa (表压), 贮槽液面与设备入口之间的垂直距离为 10m , 管路为 $\phi 57\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的钢管 ($\varepsilon = 0.2\text{mm}$), 管道总长 60m (包括除孔板流量计在外的所有局部阻力的当量长度)。管路上装有孔径 $d_0 = 16\text{mm}$ 的孔板流量计。今测得连接孔板的指示剂为水银的 U 型管差压计的读数 $R = 250\text{mm}$, 孔板阻力可取所测得压差的 80% 。试求泵消耗的轴功率, 泵的效率取为 65% 。



解： $A_0/A_1=(d_0/d_1)^2=0.107$ 查得： $C_0=0.6$

$$q_v = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_i - \rho)}{\rho}}$$

$$= 0.6 \times 0.785 \times 0.016^2 \times \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 0.25 \times (13600 - 940)}{940}}$$

$$= 9.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$u = 9.8 \times 10^{-4} / (0.785 \times 0.049^2) = 0.52 \text{ m/s}$$

$$Re = 0.52 \times 0.049 \times 940 / 0.04 = 598.7$$

$$\lambda = 64 / Re = 0.107$$

$$\text{孔板压差 } gR(\rho_i - \rho) = 9.81 \times 0.25 \times (13600 - 940) = 31048 \text{ Pa}$$

$$\text{孔板阻力 } 31048 \times 0.8 / 940 = 26.42 \text{ J/kg}$$

$$\Sigma h_f = 0.107 \times (60 / 0.049) \times 0.52^2 / 2 + 26.42 = 44.14 \text{ J/kg}$$

$$W_e = g\Delta z + \Delta p / \rho + \Delta u^2 / 2 + \Sigma h_f = 10 \times 9.81 + 0.01 \times 10^6 / 940 + 0.52^2 / 2 + 44.14 = 153 \text{ J/kg}$$

$$q_m = q_v \times \rho = 9.8 \times 10^{-4} \times 940 = 0.9212 \text{ kg/s}$$

$$P_e = W_e \times q_m$$

$$P = P_e / \eta = 0.9212 \times 153 / 0.65 = 217 \text{ W}$$

若已知 C_0 ,
则

$$u_0 = C_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_i - \rho)}{\rho}}$$

主管流速 $u_1 = u_0 \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^2$

1-27 某油田用 $\phi 300\text{mm} \times 15\text{mm}$ 的钢管,将原油送到炼油厂。管路总长 160km,送油量为 240000kg/h,油管允许承受的最大压强为 6.0MPa(表)。已知原油粘度为 $187 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$,密度 890kg/m^3 ,忽略两地高差和局部阻力损失,试求中途需要多少个泵站?

解: $u = 240000 / (890 \times 3600 \times 0.785 \times 0.27^2) = 1.31\text{m/s}$
 $Re = 1.31 \times 0.27 \times 890 / 0.187 = 1682$ 为层流 $\lambda = 64 / Re = 0.03805$
 $L = d^5 \Delta p / 32 \mu u = 0.27^5 \times 6 \times 10^6 / (32 \times 0.187 \times 1.31) = 5.58 \times 10^4\text{m}$
 $160 \times 10^3 / (5.58 \times 10^4) = 2.86$ 应用 3 个泵站

1-28 在用水测定离心泵的性能中,当排水量为 $12\text{m}^3/\text{h}$ 时,泵的出口压力表读数为 0.38MPa,泵入口真空读数为 200mmHg,轴功率为 2.3kW。压力表和真空表两测压点的垂直距离为 0.4m。吸入管和压出管的内径分别为 68mm 和 41mm。两测点间管路阻力损失可忽略不计。大气压强为 0.1MPa。试计算该泵的效率,并列出该效率下泵的性能。

解: $u_1 = 12 / (3600 \times 0.785 \times 0.068^2) = 0.918\text{m/s}$ $u_2 = 12 / (3600 \times 0.785 \times 0.041^2) = 2.526\text{m/s}$
 $H = [0.38 \times 10^6 / (1000 \times 9.81) + 200 \times 10^5 / (760 \times 1000 \times 9.81)] + 0.4 + (2.526^2 - 0.918^2) / (2 \times 9.81) = 42.1\text{m}$
 $P_L = 42.1 \times 12 \times 1000 \times 9.81 / 3600 = 1376.7\text{W}$
 $\eta = 1376.7 / 2300 = 59.8\%$

1-29 某厂根据生产任务购回一台离心水泵,泵的铭牌上标着: $q_v = 12.5\text{m}^3/\text{h}$ 、 $H = 32\text{mH}_2\text{O}$ 、 $n = 2900\text{r.p.m}$ 、 $NSPH = 2.0\text{mH}_2\text{O}$ 。现流量和扬程均符合要求,且已知吸入管路的全部阻力为 1.5m 水柱,当地大气压为 0.1MPa。试计算:(1) 输送 20°C 的水时,离心泵允许的安装高度;(2) 若将水温提高到 50°C 时,离心泵允许的安装高度又为多少?

解:(1) $p_0 = 1 \times 10^5\text{Pa}$
 $p_v = 2340\text{Pa}$

$$\begin{aligned}
 H_g &= p_0/\rho g - p_v/\rho g - NSPH - \Sigma H_f \\
 &= (1 \times 10^5 - 2340)/(1000 \times 9.81) - 2 - 1.5 \\
 &= 6.46 \text{ m}
 \end{aligned}$$

(2) $p_v' = 12340 \text{ Pa}$

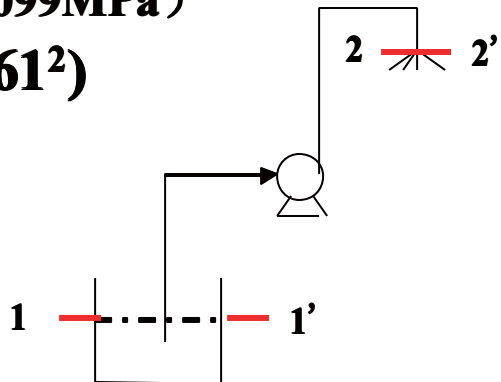
$$\begin{aligned}
 H_g' &= (1 \times 10^5 - 12340)/(1000 \times 9.81) - 2 - 1.5 \\
 &= 5.44 \text{ m}
 \end{aligned}$$

1-30 某食品厂为节约用水,用一离心泵将常压热水池中 60°C 的废热水经 $\phi 68\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 的管子输送至凉水塔顶,并经喷头喷出而入凉水塔,以达冷却目的,水的输送量为 $22\text{m}^3/\text{h}$, 喷头入口处需维持 0.05MPa (表压), 喷头入口的位置较热水池液面高 5m , 吸入管和排出管的阻力损失分别为 $1\text{mH}_2\text{O}$ 和 $4\text{mH}_2\text{O}$ 。试选用一台合适的离心泵, 并确定泵的安装高度。(当地大气压为 0.099MPa)

解: $u = 22/(3600 \times 0.785 \times 0.061^2)$
 $= 2.09 \text{ m/s}$

60°C 水 $\rho = 983.2 \text{ kg/m}^3$

$p_v = 19.923 \text{ kPa}$



$$\begin{aligned}
 H &= 5 + 0.05 \times 10^6 / (983.2 \times 9.81) + 2.09^2 / (2 \times 9.81) + 1 + 4 \\
 &= 15.41 \text{ m}
 \end{aligned}$$

可用 **IS65-50-125** 清水泵, 转速 2900r.p.m. , 流量 $25\text{m}^3/\text{h}$, 扬程 20m , $NSPH = 2.5\text{m}$

$$\begin{aligned}
 H_g &= (0.099 \times 10^6 - 19923) / (983.2 \times 9.81) - 2.5 - 1 = 4.7 \text{ m}
 \end{aligned}$$

1-31 一管路系统的特性曲线方程为 $H_L = 20 + 0.0065q_v^2$ 。现有两台同型号的离心泵, 该泵的特性曲线可用方程 $H = 30 - 0.0025q_v^2$ 表示 (上两式中 H_L 和 H 的单位为 m , q_v 的单位为 m^3/h)。试求: 当管路输送量为 $30\text{m}^3/\text{h}$ 时, 安装一台泵能否满足要求? (2) 若将两泵联合安装在管路中, 该管路可输送的最大流量为多少?

解: (1) $H = 30 - 0.0025 \times 30^2 = 27.75 \text{ m}$

$$H_L = 20 + 0.0065 \times 30^2 = 25.85 \text{ m} < H$$

能符合要求

(2) 两泵并联后的特性曲线为 $H = 30 - 6.25 \times 10^{-4} q_v^2$
 与 $H_L = 20 + 0.0065 q_v^2$ 联立得 $q_v = 37 \text{ m}^3/\text{h}$
 两泵串联后的特性曲线为 $H = 60 - 5.0 \times 10^{-3} q_v^2$
 与 $H_L = 20 + 0.0065 q_v^2$ 联立得 $q_v = 59 \text{ m}^3/\text{h}$

1-32 某双动往复泵，其活塞直径为 180mm，活塞杆直径为 50mm，曲柄半径为 145mm。活塞每分钟往复 55 次。实验测得此泵的排水量为 42m³/h。试求该泵的容积效率 η 。

解：冲程 $s = 0.145 \times 2 = 0.29 \text{ m}$
 $q_{VT} = (2 \times 0.785 \times 0.18^2 - 0.785 \times 0.05^2) \times 0.29 \times 55 \times 60 = 46.8 \text{ m}^3/\text{h}$
 $\eta = 42/46.8 = 89.7\%$

1-33 温度为 15℃ 的空气直接由大气进入风机，并通过内径为 800mm 的管道送至燃烧炉底，要求风量为 20000m³/h（以风机进口状态计），炉底表压为 1100mmH₂O。管长 100m（包括局部阻力当量长度），管壁粗糙度 0.3mm。现库存一离心通风机，其铭牌上的流量为 21800m³/h，全风压为 1290mmH₂O，问此风机是否合用？（大气压为 0.1MPa）。

解：

$$u = 20000 / (3600 \times 0.785 \times 0.8^2) = 11.06 \text{ m/s}$$

$$\rho_m = (1 \times 10^5 + 1100 \times 9.81/2) \times 29 / (8314 \times 288) = 1.276 \text{ kg/m}^3$$

$$Re = 11.06 \times 0.8 \times 1.276 / (1.79 \times 10^{-5}) = 6.31 \times 10^5$$

$$\varepsilon/d = 0.3/800 = 3.75 \times 10^{-4} \quad \lambda = 0.017$$

$$H_T = 1100 \times 9.81 + 0.017 \times (100/0.8) \times 11.06^2 \times 1.276/2 = 1.096 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$H_T' = 1.096 \times 10^4 \times 1.2 / 1.276 = 1.03 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$= 1050.3 \text{ mmH}_2\text{O} < 1290 \text{ mmH}_2\text{O} \quad \text{可以用}$$

1-34 实验中测定一离心通风机的性能，得以下数据：气体出口处压强为 $23 \text{ mmH}_2\text{O}$ ，入口处真空度为 $15 \text{ mmH}_2\text{O}$ ，送风量为 $3900 \text{ m}^3/\text{h}$ 。吸入管路与排出管路的直径相同。通风机的转速为 960 rpm ，其所需要轴功率为 0.81 kW 。试求此通风机的效率。若将此通风机的转速增为 1150 rpm ，问转速增大后，此通风机的送风量和所需的轴功率各为若干？

解：(1) $H_T = (23 + 15) \times 9.81 = 372.8 \text{ Pa}$

平均压强近似为大气压

$$\rho = 1 \times 10^5 \times 29 / (8314 \times 293) = 1.19 \text{ kg/m}^3$$

$$P_L = H_T q_v \rho g$$

$$= 372.8 \times 3900 \times 1.19 / (3600 \times 1.19) = 404 \text{ W}$$

$$\eta = 404 / 810 = 49.9\%$$

(2) $q_v' = q_v n' / n = 3900 \times 1150 / 960 = 4672 \text{ m}^3/\text{h}$

$$P' = P (n' / n)^3 = 0.81 \times (1150 / 960)^3 = 1.39 \times 10^3 \text{ W}$$

1-35 某单级双缸、双动空气压缩机将空气从 0.1 MPa （绝对）压缩到 0.35 MPa （绝对）。活塞直径为 300 mm ，冲程 200 mm ，每分钟往复 480 次。气缸余隙系数为 8% ；排气系数为容积系数的 85% ，压缩过程为绝热过程，绝热指数为 1.4 ，总效率 0.7 。试计算该压缩机的排气量和轴功率？

解：容积系数 $\lambda_v = 1 - \epsilon [(p_2 / p_1)^{1/k} - 1] = 1 - 0.08 \times [(0.35 / 0.1)^{1/1.4} - 1] = 0.884$

排气系数 $\lambda_p = 0.85 \lambda_v = 0.752$

排气量 $q_v = 0.785 \times 0.3^2 \times 0.2 \times 480 \times 60 \times 0.752 \times 2 = 611.8 \text{ m}^3/\text{h}$

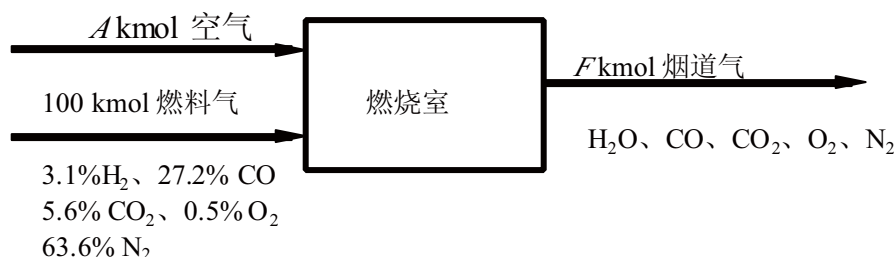
理论功率 $P_T = p_1 V_{\min} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = 0.1 \times 10^6 \times \frac{611.8}{3600} \times \frac{1.4}{0.4} \times \left[\left(\frac{0.35}{0.1} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} - 1 \right] = 25.6 \times 10^3 \text{ W}$

$$P = 25.6 / 0.7 = 36.57 \text{ kW}$$

第二章

2-1 燃料气含有 3.1% (摩尔分数, 下同) H_2 、27.2% CO 、5.6% CO_2 、0.5% O_2 和 63.6% N_2 , 在过量 20% 的空气 (即高于完全燃烧生成 CO_2 和 H_2O 所需的空气量) 中燃烧。CO 只有 98% 完全燃烧。试对 100 kmol 燃料气, 计算尾气中各组分的摩尔数。

解: 首先画出流程图 (附图), 图上标出了尾气中各组分。以 A 代表空气的摩尔数, F 代表尾气的摩尔数。化学反应式如下:

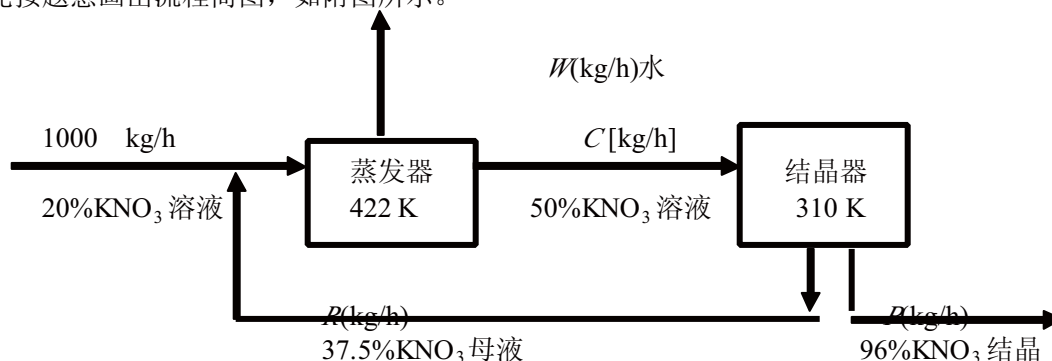


根据反应式, 为使 H_2 完全燃烧需氧: $3.1 \times 0.5 = 1.55 \text{ kmol}$
 为使 CO 完全燃烧需氧: $27.2 \times 0.5 \times 0.98 = 13.33 \text{ kmol}$
 因为过量 20%, 共需氧: $1.2 \times (1.55 + 13.33) = 17.854 \text{ kmol}$
 应加入: $17.854 - 0.5 = 17.354 \text{ kmol}$
 由于空气中含有 79% (摩尔分数) 的 N_2 , 故加入的 N_2 量是: $79 \times 17.354 / 21 = 66.283 \text{ kmol}$
 下面计算尾气中各组分的摩尔数:

所有的 H_2 都变成了 H_2O , 即: 3.1 kmol
 对于 CO 有 2.0% 不反应, 因此有: $0.02 \times 27.2 = 0.544 \text{ kmol}$
 CO_2 : $5.6 + 27.2 \times 0.98 = 32.256 \text{ kmol}$
 N_2 : $63.6 + 66.283 = 129.883 \text{ kmol}$
 O_2 : $17.354 - (1.55 + 13.33) + 0.5 = 2.974 \text{ kmol}$

2-2 在生产 KNO_3 的过程中, 1000 kg/h 的 20% KNO_3 溶液送入蒸发器中, 在 422 K 温度下浓缩成 50% KNO_3 浓溶液, 然后再进入结晶器中冷却到 310 K, 得含量为 96% 的 KNO_3 结晶。结晶器中 37.5% 的 KNO_3 母液送入蒸发器中循环使用。试计算循环的母液量与产品 KNO_3 结晶量。

解: 首先按题意画出流程简图, 如附图所示。



计算可分为两部分, 先以 1000 kg/h 的 20% KNO_3 溶液为基准, 对整个生产过程作物料衡算:

解得: $1000 = W + P$ $1000 \times 0.2 = P \times 0.96$
 $P = 208 \text{ kg/h}$ $W = 792 \text{ kg/h}$
 再对结晶器作物料衡算: $C = R + 208$ $0.5C = 0.375R + 0.96 \times 208$
 解得: $C = 975 \text{ kg/h}$ $R = 767 \text{ kg/h}$

2-3 在一加热器中, 用 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ (绝压) 的饱和蒸汽加热空气。空气流量为 4000 kg/h, 进口温度为 25 $^\circ\text{C}$, 出口温度为 125 $^\circ\text{C}$, 空气平均比热容 c_p 为 1.009 kJ/(kg K), 冷凝液在饱和温度下排出。试求蒸汽消耗量 (不计热损失)。

解：首先按题意画出流程简图，如附图所示。



由空气带入加热器的热量

$$q_{mc}c_{pc}t_1$$

由蒸汽带入加热器的热量

$$DH$$

由空气带出的热量

$$q_{mc}c_{pc}t_2$$

由冷凝水带出的热量

$$Dh$$

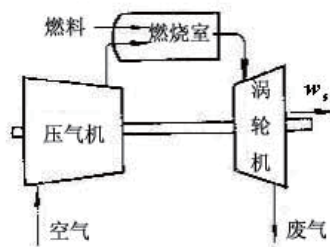
$$q_{mc}c_{pc}t_1 + DH = q_{mc}c_{pc}t_2 + Dh$$

$$D(H-h) = q_{mc}c_p(t_2 - t_1)$$

由附录饱和水蒸气表查得： $5 \times 10^5 \text{Pa}$ 饱和水蒸气的焓为 2753kJ/kg ， 151.7°C 水的焓为 639.6kJ/kg 。

$$D = 4000 \times 1.009(398 - 298) / (2753 - 639.6) = 191 \text{kg/h}$$

2-4 图示为一台燃气轮机装置，其空气消耗量 $q_{ma} = 100 \text{kg/s}$ 。压气机入口空气的焓 $h_1 = 290 \text{kJ/kg}$ ，出口压缩空气的焓 $h_2 = 580 \text{kJ/kg}$ ；在燃烧室中压缩空气和燃料混合燃烧，燃烧生成的高温燃气的焓 $h_3 = 1250 \text{kJ/kg}$ ；高温燃气送入涡轮机中膨胀做功，作功后排出废气的焓 $h_4 = 780 \text{kJ/kg}$ 。试求：（1）压气机消耗的功率；（2）燃料的发热量 $Q_f = 43960 \text{kJ/kg}$ 时的燃料消耗量；（3）涡轮机输出的功率；（4）燃气轮机装置的总功率。



解：（1）按稳定流动能量方程式，在压气机中压缩 1kg 空气所消耗的功为：

$$w_{sc} = -(h_1 - h_2) = -(290 - 580) = 290 \text{kJ/kg}$$

$$\text{压气机消耗的功率为： } P_{sc} = w_{sc}q_{ma} = 290 \times 100 = 29000 \text{kW}$$

（2）加热 1kg 空气所需的加热量为： $Q_1 = h_3 - h_2 = 1250 - 580 = 670 \text{kJ/kg}$

$$\text{燃料的消耗量为： } q_{mf} = Q_1 q_{ma} / Q_f = 670 \times 100 / 43960 = 1.5 \text{kg/s}$$

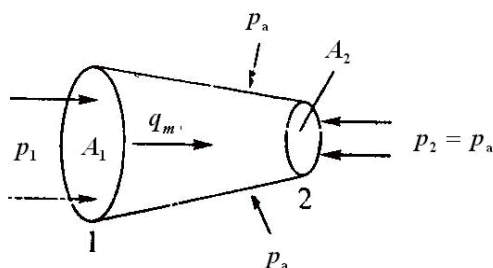
（3）在涡轮机中 1kg 燃气所作的功为： $w_{sT} = h_3 - h_4 = 1250 - 780 = 470 \text{kJ/kg}$

$$\text{故涡轮机的功率为： } P_{sT} = w_{sT}q_{ma} = 470 \times 100 = 47000 \text{kW}$$

（4）燃气轮机装置的总功率等于涡轮机发出的功率及压气机消耗功率之差，即：

$$P_s = P_{sT} - P_{sc} = 47000 - 29000 = 18000 \text{kW}$$

2-5 水以 9.5kg/s 的质量流量稳定地通过一个上游端内径为 0.0762m 、下游端内径为 0.0254m 的水平汇合喷嘴（参见附图）。试计算水在大气压中喷出时喷嘴上的合力。



解：此题为稳态流动。当选择控制面时，必须包括喷嘴的外壁面，这样喷嘴所受的合力才能计入总动量衡算中，使问题可以直接求解。因摩擦阻力可以忽略， x 轴为水平方向，忽略截面上速度的变化，于是有：

$$q_m \Delta u_b = F_{xR} + F_{xp}$$

为求出式 (1) 中的 F_{xp} ，利用柏努利方程式可得：

$$\Delta u_b^2/2 + \Delta p/\rho = 0$$

$$u_{b1} = q_m/\rho A_1 = 9.5/(1000 \times 0.785 \times 0.762^2) = 2.09 \text{ m/s}$$

$$u_{b2} = q_m/\rho A_2 = 9.5/(1000 \times 0.785 \times 0.0254^2) = 18.8 \text{ m/s}$$

$$q_m \Delta u_b = 9.5 \times (18.8 - 2.09) = 159 \text{ N}$$

故

$$\Delta p = -\rho(u_{b2}^2 - u_{b1}^2)/2 = -1000 \times (18.8^2 - 2.09^2)/2 = -174500 \text{ Pa}$$

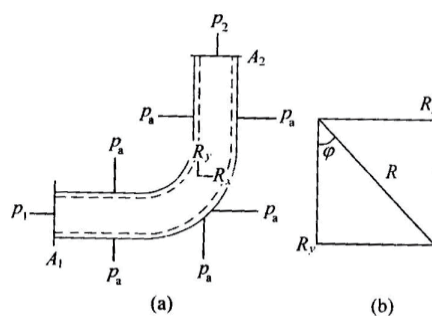
力 F_{xp} 是截面 A_1 、 A_2 和侧面的压力在 x 方向上分量的代数和。截面 A_1 的总压力在 x 方向上的分量为 $p_1 A_1$ ，方向向右；截面 A_2 的总压力在 x 方向上的分量为 $p_2 A_2 = p_a A_2$ ，方向向左；外壁面的总压力在 x 方向上的分量为 $p_a(A_1 - A_2)$ ，方向向左。因此：

$$F_{xp} = p_1 A_1 - p_2 A_2 - p_a(A_1 - A_2) = -A_1 \Delta p = 0.785 \times 0.762^2 \times 174500 = 795 \text{ N}$$

$$F_{xR} = q_m \Delta u_b - F_{xp} = 159 - 795 = -636 \text{ N}$$

由此得喷嘴所受的合力为负值，作用在 x 轴的反方向上，与流动方向相反。

2-6 水稳定流过如图所示的暴露在大气中的等径直角弯管，管内径为 0.05m，水的主体流速为 20m/s，进口压强为 $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ （表压）。由于管道很短，摩擦阻力及重力的影响均可忽略。试计算此管所受合力的大小和方向。



解：弯管（包括固体壁面）所受的合力，可分为两步求算：第一步先根据图中侧面为虚线的范围求算流体所受的合力，第二步再根据图中实线范围求算弯管所受的合力。

(1) 管中流体所受的力 选择截面 1、2 及虚线所限定的范围为控制体。由于选择了管内的流体为控制体，故壁外的大气无需考虑。设截面 A_1 和 A_2 所受的压强分别为 p_1 和 p_2 （绝压），管壁对流体的压力为 F'_x 和 F'_y （设力的作用方向均与坐标轴同向）。由于 $dp_x/d\theta = 0$ （稳态），故：

$$A_1 p_1 + F'_x = \Delta(q_m u_x) = 0 - (q_m u_x)_1 = -(q_m u_x)$$

$$\text{或：} \quad F'_x = -q_m u_x - A_1 p_1$$

$$\text{又由于 } dp_y/d\theta = 0 \text{（稳态），故：} -A_2 p_2 + F'_y = \Delta(q_m u_y) = (q_m u_y)_2 - 0 = q_m u_y$$

$$\text{因 } A_2 = A_1 \text{（等径）及 } p_2 = p_1 \text{（无摩擦力），故：} F'_y = q_m u_y + A_1 p_1$$

(2) 弯管所受的力 选择实线所限定的范围为控制体。此时弯管受两种力的作用，一是流体作用在管壁上的力，即 $-F'_x$ 和 $-F'_y$ ；另一是大气压力。控制面上只有 A_1 和 A_2 受来自对面大气压力的影响，其余部分因大气压的作用完全对称而相互抵消。设弯管所受的力为 F_x 和 F_y ，其方向均与坐标

轴同向，于是：

$$F_x' = F_x' - A_1 p_0 = q_m u_x + A_1 p_1 - A_1 p_0 = q_m u_x + A_1 (p_1 - p_0) \quad (3)$$

$$F_y' = F_y' + A_1 p_0 = -q_m u_y - A_1 p_1 + A_1 p_0 = -q_m u_y - A_1 (p_1 - p_0) \quad (4)$$

上二式中 $p_1 - p_0$ 表示表压。由题设数据得： $p_1 = p_0 = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$

$$u_x = u_y = u_b = 20 \text{ m/s} \quad A_1 = 0.785 \times 0.05^2 = 1.9635 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{故：} \quad q_m = \rho A u_b = 1000 \times 1.9635 \times 10^{-3} \times 20 = 39.25 \text{ kg/s}$$

$$F_x = 39.25 \times 20 + 1.9625 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^5 = 1079 \text{ N}$$

$$F_y = -39.25 \times 20 - 1.9635 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^5 = -1079 \text{ N}$$

$$|F| = (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} = (1079^2 + 1079^2)^{1/2} = 1526 \text{ N}$$

$$\theta' = \pi/4$$

弯管受力方向如附图 (b) 所示。

2-7 不可压缩流体绕一圆柱体作二维流动，流场可用下式表示：

$$u_r = \left(\frac{C}{r^2} - D \right) \cos \vartheta', u_{\vartheta'} = \left(\frac{C}{r^2} + D \right) \sin \vartheta'$$

其中 C 、 D 为常数，说明此时是否满足连续性方程。

$$\text{解：} \quad \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho r \left(\frac{C}{r^2} - D \right) \cos \vartheta' \right] = \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \rho C \cos \vartheta' - \rho r D \cos \vartheta' \right] = -\frac{1}{r^2} \rho C \cos \vartheta' - \rho D \cos \vartheta'$$

$$\frac{\partial}{\partial \vartheta'}(\rho u_{\vartheta'}) = \frac{\partial}{\partial \vartheta'} \left[\rho \left(\frac{C}{r^2} + D \right) \sin \vartheta' \right] = \frac{\partial}{\partial \vartheta'} \left[\frac{1}{r^2} \rho C \sin \vartheta' + \rho D \sin \vartheta' \right] = \frac{1}{r^2} \rho C \cos \vartheta' + \rho D \cos \vartheta'$$

又因为此流体为不可压缩流体， ρ 为常数，故 $\frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} = 0$

$$\text{所以} \quad \frac{\partial \rho}{\partial \vartheta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \vartheta'}(\rho u_{\vartheta'}) = 0 \quad \text{满足连续性方程}$$

2-8 已知不可压缩流体流动的速度场为： $\mathbf{u} = 5x^2yz\mathbf{i} + 3xy^2z\mathbf{j} - 8xyz^2\mathbf{k}$ ，流体的粘度 $\mu = 10.7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。求 (2, 4, -6) 点处的法向应力和切向应力。

解：法向应力

$$\tau_{xx} = -p + 2\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) - \frac{2\mu}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 2\mu \left[\frac{\partial(5x^2yz)}{\partial x} \right] - \frac{2\mu}{3} \left[\frac{\partial(5x^2yz)}{\partial x} + \frac{\partial(3xy^2z)}{\partial y} + \frac{\partial(-8xz^2y)}{\partial z} \right]$$

$$= 2\mu(10xyz) - 2\mu(10xyz + 6xyz - 16xyz)/3 = 2 \times 10.7 \times 10^{-3} \times 10 \times 2 \times 4 \times (-6) = -10.27 \text{ Pa}$$

$$\text{同理} \quad \tau_{yy} = 2\mu(6xyz) = -6.16 \text{ Pa} \quad \tau_{zz} = 2\mu(-16xyz) = 16.44 \text{ Pa}$$

$$\text{切向应力} \quad \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) = \mu(5x^2z + 3y^2z) = 10.7 \times 10^{-3} \times [5 \times 4 \times (-6) + 3 \times 16 \times (-6)] = -4.37 \text{ Pa}$$

$$\text{同理} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) = \mu(3xy^2 - 8xz^2) = -5.14 \text{ Pa}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = \mu(5x^2y - 8yz^2) = -4.62 \text{ Pa}$$

2-9 判断以下流动是否是不可压缩流动：

$$(1) \quad u_x = 2\theta + 2x + 2y \quad u_y = \theta - y - z \quad u_z = \theta + x - z$$

$$(2) \quad u_x = (y^2 - x^2)/\rho \quad u_y = 2xy/\rho \quad u_z = -2\theta z/\rho \quad \rho = \theta^2$$

$$(3) \quad u_x = \theta + 3x \quad u_y = 2\theta - 2y \quad u_z = 4y + z - 3$$

证明：若为不可压缩流动，则需满足： $\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$

$$(1) \quad \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial(2\theta + 2x + 2y)}{\partial x} + \frac{\partial(\theta - y - z)}{\partial y} + \frac{\partial(\theta + x - z)}{\partial z} = 3 - 2 - 1 = 0 \quad \text{满足条件}$$

所以为不可压缩流体流动

$$(2) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{-2x}{9^2} + \frac{2x}{9^2} - \frac{2}{9} \neq 0 \quad \text{不满足条件, 所以此流动不是不可压缩流动}$$

$$(3) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 3 - 2 + 1 = 0 \quad \text{不满足条件, 所以此流动不是不可压缩流动}$$

2-10 试采用一般化连续性方程描述下述各种运动情况, 并结合具体条件将连续性方程简化, 指出简化过程的依据。(1) 在矩形截面管道内, 可压缩流体作稳态、一维流动; (2) 在平板壁面上不可压缩流体作稳态二维流动; (3) 在平板壁面上可压缩流体作二维稳态流动; (4) 不可压缩流体在圆管中作轴对称的轴向稳态流动; (5) 不可压缩流体作圆心对称的径向稳态流动。

解: (1) 采用直角坐标系下的连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial g} + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0$$

因为此流动为可压缩流体的稳态一维流动, 故: $\frac{\partial \rho}{\partial g} = 0$, $u_y = 0$, $u_z = 0$ 。

$$\text{即可化简为: } u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0$$

(2) 采用直角坐标系下的连续性方程, 因为此流动为不可压缩流体的稳态二维流动, 故:

$$\frac{\partial \rho}{\partial g} + u_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + u_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + u_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0, \quad u_z = 0。$$

$$\text{即可化简为: } \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0$$

(3) 采用直角坐标系下的连续性方程, 因为此流动为可压缩流体的稳态二维流动, 故:

$$\frac{\partial \rho}{\partial g} = 0, \quad u_z = 0。 \quad \text{即可化简为: } \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} = 0$$

(4) 采用柱坐标系下的连续性方程, 因为是不可压缩流体, 故写为:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{g'}}{\partial g'} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

又因为此流动作轴对称的轴向稳态流动, 故与 θ' 无关且 $u_r = 0$ 。 即可化简为:

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

(5) 采用柱坐标系下的连续性方程, 因为此流动作圆心对称的径向稳态流动, 故与 θ' 无关且 $u_r = 0$ 。

$$\text{即可化简为: } \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} = 0$$

2-11 有下列 3 种流场的速度矢量表达式, 试判断哪种流场指不可压缩流体的流动:

$$(1) u(x, y, \theta) = (x^2 + 2\theta)\mathbf{i} + (2xy - \theta)\mathbf{j}$$

$$(2) u(x, y, z) = -2x\mathbf{i} + (x+z)\mathbf{j} + (2x+2y)\mathbf{k}$$

$$(3) u(x, y, z) = 2xy\mathbf{i} + 2yz\mathbf{j} + 2xz\mathbf{k}$$

解: 根据连续性方程, 若为不可压缩流体的流动, 须满足: $\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$

$$(1) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial (x^2 + 2\theta)}{\partial x} + \frac{\partial [-(2xy - \theta)]}{\partial y} + 0 = 2x - 2x = 0$$

满足条件, 故此为不可压缩流体的流动

$$(2) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial (-2x)}{\partial x} + \frac{\partial (x+z)}{\partial y} + \frac{\partial (2x+2y)}{\partial z} = -2 + 0 + 0 \neq 0$$

不满足条件, 故此流动不是不可压缩流体的流动

$$(3) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial (2xy)}{\partial x} + \frac{\partial (2yz)}{\partial y} + \frac{\partial (2xz)}{\partial z} = 2y + 2z + 2x \neq 0$$

不满足条件, 故此流动不是不可压缩流体的流动

2-12 判断以下不可压缩性流体流动是否能满足连续性方程:

- (1) $u_x = [\frac{1}{x^2 + y^2} - \frac{2x^2}{(x^2 + y^2)^2}]u_0 r_0^2$ $u_y = \frac{-2xy}{(x^2 + y^2)^2}u_0 r_0^2$
- (2) $u_x = \frac{-2xyz}{(x^2 + y^2)^2}u_0 r_0$ $u_y = \frac{(x^2 - y^2)z}{(x^2 + y^2)^2}u_0 r_0$ $u_z = \frac{y}{x^2 + y^2}u_0 r_0$
- (3) $u(x, y) = x^3 \sin y + 3x^3 \cos y$
- (4) $u_x = \ln x$ $u_y = xy(1 - \ln x)$
- (5) $u_x = \ln(xy) + \sin(y\theta)$ $u_y = \cos(x\theta) - y/x$ (θ 为时间)
 u_0, r_0 为定性速度与定性长度, 均为常数。

解: (1) $\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial [\frac{1}{x^2 + y^2} - \frac{2x^2}{(x^2 + y^2)^2}]u_0 r_0^2}{\partial x} = \frac{2x^3 - 6xy^2}{(x^2 + y^2)^3}u_0 r_0^2$

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial [\frac{-2xy}{(x^2 + y^2)^2}]u_0 r_0^2}{\partial y} = \frac{-2x^3 + 6xy^2}{(x^2 + y^2)^3}u_0 r_0^2$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad \text{满足连续性方程}$$

(2) $\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial [\frac{-2xyz}{(x^2 + y^2)^2}]u_0 r_0}{\partial x} = \frac{6x^2 yz - 2y^3 z}{(x^2 + y^2)^3}u_0 r_0$

$$\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial [\frac{(x^2 - y^2)z}{(x^2 + y^2)^2}]u_0 r_0}{\partial y} = \frac{-6x^2 yz + 2y^3 z}{(x^2 + y^2)^3}u_0 r_0$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial (\frac{y}{x^2 + y^2})u_0 r_0}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad \text{满足连续性方程}$$

(3) $\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial (x^3 \sin y)}{\partial x} = 3x^2 \sin y$ $\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial (3x^3 \cos y)}{\partial y} = -3x^3 \sin y$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \neq 0 \quad \text{不满足连续性方程}$$

(4) $\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial (\ln x)}{\partial x} = \frac{1}{x}$ $\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial [xy(1 - \ln x)]}{\partial y} = x(1 - \ln x)$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \neq 0 \quad \text{不满足连续性方程}$$

(5) $\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial [(\ln xy) + \sin(y\theta)]}{\partial x} = \frac{1}{x}$ $\frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{\partial [\cos(x\theta) - \frac{y}{x}]}{\partial y} = -\frac{1}{x}$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad \text{满足连续性方程}$$

2-13 证明柱坐标系中, 连续性方程的表达式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho u_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} = 0$$

证明: 在图 1 的柱坐标系 (r, θ, z) 中任意取一微元柱体。根据质量守恒定律, 作此微元柱体的质量衡算, 沿 r, θ, z 各方向输入微元柱体的质量流率分别为:

$$\rho u_r r d\theta' dz \quad (1a)$$

$$\rho u_\theta r dr dz \quad (1b)$$

$$\rho u_z r d\theta' dr \quad (1c)$$

输出的质量流率分别为：

$$\left[\rho u_r + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} dr \right] (r + dr) d\theta' dz \quad (2a)$$

$$\left[\rho u_{\theta'} + \frac{\partial(\rho u_{\theta'})}{\partial \theta'} d\theta' \right] dr dz \quad (2b)$$

$$\left[\rho u_z + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} dz \right] r d\theta' dr \quad (2c)$$

略去高阶无穷小，输出与输入的质量流率之差为：

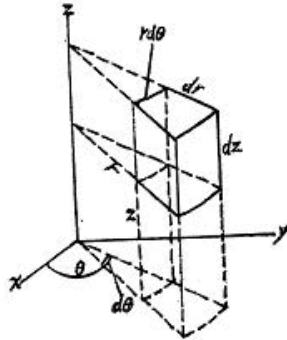
$$\left[\rho u_r + r \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_{\theta'})}{\partial \theta'} + r \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \right] dr d\theta' dz \quad (3)$$

$$\text{在微元柱体中累积的质量速率为：} \quad r \frac{\partial \rho}{\partial \theta} dr d\theta' dz \quad (4)$$

最后可得柱坐标系中的连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \frac{\rho u_r}{r} + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u_{\theta'})}{\partial \theta'} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0$$

$$\text{或：} \quad \frac{\partial \rho}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta'} (\rho u_{\theta'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) = 0$$



2-14 某一流场的速度矢量可以下式表述： $u(x, y) = 5x\mathbf{i} - \theta yz\mathbf{j}$ ，试写出该流场随体加速度矢量 $Du/D\theta$ 的表达式。

$$\text{解：} \quad \frac{Du}{D\theta} = \frac{Du_x}{D\theta} + \frac{Du_y}{D\theta} + \frac{Du_z}{D\theta} = \frac{D(5x)}{D\theta} + \frac{D(-\theta yz)}{D\theta} = 0 - yz = -yz$$

2-15 某流场可由下述速度矢量式表达： $u(x, y, z, \theta) = xyz\mathbf{i} + y\mathbf{j} - 3z\theta\mathbf{k}$ ，试求点 (2, 1, 2, 1) 的加速度矢量。

$$\text{解：} \quad u(x, y, z, \theta) = xyz\mathbf{i} + y\mathbf{j} - 3z\theta\mathbf{k}$$

$$\frac{Du}{D\theta} = \frac{Du_x}{D\theta} + \frac{Du_y}{D\theta} + \frac{Du_z}{D\theta} = -3z\mathbf{k} = -3 \times 2\mathbf{k} = -6\mathbf{k}$$

2-16 试参照以应力分量形式表示的 x 方向的运动方程，推导下述方程：

$$\rho \frac{Du_y}{D\theta} = \rho Y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{Du_z}{D\theta} = \rho Z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

证明：（1）根据 外力=质量力+表面力 有

$$dF_y = dF_{My} + dF_{sy} \quad (1)$$

$$dF_{My} = Y \rho dx dy dz \quad (2)$$

$$\begin{aligned} dF_{sy} &= [(\tau_{yy} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} dy) dx dz - \tau_{yy} dx dz] + [(\tau_{xy} + \frac{\tau_{xy}}{\partial x} dx) dy dz - \tau_{xy} dy dz] \\ &\quad + [(\tau_{zy} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz) dx dy - \tau_{zy} dx dy] = (\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}) dx dy dz \end{aligned} \quad (3)$$

将（2）、（3）代入（1）整理，得：

$$\rho dx dy dz \frac{Du_y}{Dg} = \rho Y dx dy dz + (\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}) dx dy dz$$

即：

$$\rho \frac{Du_y}{Dg} = \rho Y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}$$

（2）同理 $dF_z = dF_{Mz} + dF_{sz} \quad (4)$

$$dF_{Mz} = Z \rho dx dy dz \quad (5)$$

$$\begin{aligned} dF_{sz} &= [(\tau_{zz} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} dz) dx dy - \tau_{zz} dx dy] + [(\tau_{xz} + \frac{\tau_{xz}}{\partial x} dx) dy dz - \tau_{xz} dy dz] \\ &\quad + [(\tau_{yz} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dy) dx dz - \tau_{yz} dx dz] = (\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}) dx dy dz \end{aligned} \quad (6)$$

将（5）、（6）代入（4）整理，得：

$$\rho dx dy dz \frac{Du_z}{Dg} = \rho Z dx dy dz + (\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}) dx dy dz$$

即：

$$\rho \frac{Du_z}{Dg} = \rho Z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

2-17 试证明温度在柱坐标系和球坐标系中的随体导数可分别用如下两式表示：

$$\begin{aligned} \frac{Dt}{Dg} &= \frac{\partial t}{\partial g} + u_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{u_{g'}}{r} \frac{\partial t}{\partial g'} + u_z \frac{\partial t}{\partial z} \\ \frac{Dt}{Dg} &= \frac{\partial t}{\partial g} + u_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{u_{g'}}{r} \frac{\partial t}{\partial g'} + \frac{u_{\phi}}{r \sin g'} \frac{\partial t}{\partial \phi} \end{aligned}$$

证明：（1） $\frac{Dt}{Dg} = \frac{\partial t}{\partial g} + \frac{\partial t}{\partial r} \frac{dr}{dg} + \frac{\partial t}{\partial g'} \frac{dg'}{dg} + \frac{\partial t}{\partial z} \frac{dz}{dg}$

$$\because \frac{dr}{dg} = u_r, \quad \frac{r dg'}{dg} = u_{g'}, \quad \frac{dz}{dg} = u_z$$

$$\frac{Dt}{Dg} = \frac{\partial t}{\partial g} + u_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{u_{g'}}{r} \frac{\partial t}{\partial g'} + u_z \frac{\partial t}{\partial z}$$

此为温度 t 在柱坐标系中的随体导数

$$\begin{aligned}
 (2) \quad \frac{Dt}{Dg} &= \frac{\partial t}{\partial g} + \frac{\partial t}{\partial r} \frac{dr}{dg} + \frac{\partial t}{\partial g'} \frac{dg'}{dg} + \frac{\partial t}{\partial z} \frac{dz}{dg} \\
 \because \frac{dr}{dg} &= u_r, \quad \frac{r dg'}{dg} = u_{g'}, \quad \frac{r \sin g' d\phi}{dg} = u_{\phi} \\
 \frac{Dt}{Dg} &= \frac{\partial t}{\partial g} + u_{g'} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{u_{g'}}{r} \frac{\partial t}{\partial g'} + \frac{u_{\phi}}{r \sin g'} \frac{\partial t}{\partial \phi}
 \end{aligned}$$

此为温度 t 在球坐标系中的随体导数

2-18 一具有均匀内热源 $q' \text{ W/m}^3$, 端部绝热的圆柱体, 其表面温度保持不变为 $t_w \text{ K}$ 。圆柱的半径是 $r=R$ 。仅在半径方向有热流。假定圆柱的导热系数是常数, 推导稳态时温度分布方程。

解: 采用圆柱坐标方程, 同时在右边加上发热项 $q'/\rho c_p$ 得

$$\frac{\partial t}{\partial g} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial g^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q'}{\rho c_p}$$

对于稳态导热, $\partial t / \partial \theta = 0$ 。同时, 对于仅在径向的导热, $\partial^2 t / \partial z^2 = 0$ 和 $\partial^2 t / \partial \theta^2 = 0$ 。这样微分方程式

的形式变为:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = -\frac{q'}{\lambda}$$

可写成:

$$r \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} = -\frac{q' r}{\lambda} \quad \text{或:} \quad \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) = -\frac{q' r}{\lambda}$$

对方程 (4) 积分一次:

$$r \frac{dt}{dr} = -\frac{q' r^2}{2\lambda} + K_1$$

式中 K_1 是常数, 再次积分:

$$t = -\frac{q' r^3}{6\lambda} + K_1 \ln r + K_2$$

式中 K_2 是常数。边界条件: 当 $r=0$ 时, $dt/dr=0$ (由于对称); 当 $r=R$ 时, $t=t_w$ 。最终得到:

$$t = \frac{q'(R^2 - r^2)}{4\lambda} + t_w$$

第三章

3-1 试求粒度为 $50\mu\text{m}$ 的某谷物的粉粒在 20°C 和 100°C 的常压空气中的沉降速度。并分析其计算结果。已知该谷物的密度 $\rho_p=1480\text{kg/m}^3$ 。

解：(1) $\mu=1.81\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ $\rho=1.205\text{kg/m}^3$
 $u_t=(50\times 10^{-6})^2\times(1480-1.205)\times 9.81/(18\times 1.81\times 10^{-5})=0.111\text{m/s}$
 $Re_t=0.111\times 50\times 10^{-6}\times 1.205/(1.81\times 10^{-5})=0.37<1$
 (2) $\mu=2.19\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ $\rho=0.946\text{kg/m}^3$
 $u_t=(50\times 10^{-6})^2\times(1480-0.946)\times 9.81/(18\times 2.19\times 10^{-5})=0.092\text{m/s}$
 $Re_t=0.092\times 50\times 10^{-6}\times 0.946/(2.19\times 10^{-5})=0.199<1$

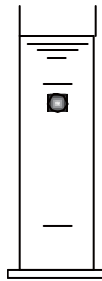
3-2 密度为 1850kg/m^3 的微粒，在 20°C 的水中按斯托克斯定律沉降，问直径相差一倍的微粒，其沉降速度相差多少？

解： $u_t'/u_t=(d'/d)^2$ $u_t'=4u_t$

3-3 已测得密度为 1100kg/m^3 的某球形豆制品颗粒在 15°C 水中的沉降速度为 2.8mm/s ，求此豆制品颗粒的直径。

解： $d=\sqrt{\frac{18\mu u_t}{(\rho_p-\rho)g}}=\sqrt{\frac{18\times 0.00115\times 0.0028}{(1100-1000)\times 9.81}}=2.43\times 10^{-4}\text{m}$
 $Re_t=2.43\times 10^{-4}\times 0.0028\times 1000/0.00115=0.59<1$

3-4 用落球粘度计测定 20°C 时密度为 1400kg/m^3 的糖蜜的粘度。该粘度计由一光滑钢球和玻璃筒组成，如附图所示。试验测得密度为 7900kg/m^3 ，直径为 0.2mm 的钢球在盛有此糖蜜的玻璃筒中的沉降速度为 10.2mm/s ，问此糖蜜的粘度为多少？



解： $\mu=d^2(\rho_p-\rho)g/18u_t=(2\times 10^{-4})^2\times(7900-1400)\times 9.81/(18\times 10.2\times 10^{-3})=0.0139\text{Pa}\cdot\text{s}$
 $Re_t=2\times 10^{-4}\times 10.2\times 10^{-3}\times 1400/0.0139=0.2055<1$

3-5 一矩形降尘室，长 10m ，宽 5m ，其中有 20 块隔板，隔板间的距离为 0.1m ，用以分离含尘气体中的微粒，微粒的密度是 2500kg/m^3 ，微粒中最小粒径为 $10\mu\text{m}$ ，气体的粘度为 0.0218cP ，密度为 1.1kg/m^3 。试求：(1) 最小微粒的沉降速度；(2) 若需将最小微粒沉降下来，气体的最大流速不能超过多少 m/s ？(3) 此降尘室能够处理的气体量为多少 m^3/h ？

解：(1) $u_{t\min}=(10\times 10^{-6})^2\times(2500-1.1)\times 9.81/(18\times 0.0218\times 10^{-3})=6.247\times 10^{-3}\text{m/s}$
 $Re_t=6.247\times 10^{-3}\times 10\times 10^{-6}\times 1.1/(0.0218\times 10^{-3})=0.00315<1$
 (2) $t_t=0.1/u_{t\min}=16\text{s}$ $u=10/16=0.6247\text{m/s}$
 (3) $q_{\text{th}}=u_{t\min}BLn=6.247\times 10^{-3}\times 10\times 5\times 21\times 3600=23614\text{m}^3/\text{h}$

3-6 拟用长 4m 、宽 2m 的降尘室净化 $3000\text{m}^3/\text{h}$ 的常压空气，气温为 25°C ，空气中含有密度 2000kg/m^3 的尘粒，欲要求净化后的空气中所含尘粒小于 $10\mu\text{m}$ ，试确定降尘室内需设多少块隔板？

解： $u_t=(10\times 10^{-6})^2\times(2000-1.185)\times 9.81/(18\times 1.835\times 10^{-5})=5.94\times 10^{-3}\text{m/s}$
 $q_{\text{v1}}=5.94\times 10^{-3}\times 4\times 2\times 3600=128\text{m}^3/\text{h}$
 $3000/128=23.4$ 即应有 24 层，需 23 层隔板。

3-7 有一旋风分离器分离气流中的颗粒，在正常操作时，其进口风速为 20m/s ，由于突然事故，使处理气体量减少 40% ，问此旋风分离器能够分离出的最小颗粒将有何变化？

解: $q_v' = 0.6q_v$ $u_T' = u_T q_v' / q_v = 0.6u_T = 0.6 \times 20 = 12 \text{ m/s}$
 $d_c' = \sqrt{\frac{9\mu B}{\pi N \rho_s u_T}}$ $d_c' / d_c = (u_T / u_T')^{1/2} = (1/0.6)^{1/2} = 1.29$

3-8 使用 ($B=D/4$ 、 $A=D/2$) 标准型旋风分离器收集流化床锻烧器出口的碳酸钾粉尘, 粉尘密度为 2290 kg/m^3 , 旋风分离器的直径 $D=650 \text{ mm}$ 。在旋风分离器入口处, 空气的温度为 200°C , 流量为 $3800 \text{ m}^3/\text{h}$ (200°C) 时, 求此设备能分离粉尘的临界直径 d_c (取 $N=5$)。

解: $u_T = 3800 \times 8 / (3600 \times 0.65^2) = 20 \text{ m/s}$
 $d_c' = \sqrt{\frac{9\mu B}{\pi N \rho_s u_T}} = \sqrt{\frac{9 \times 2.6 \times 10^{-5} \times 0.65}{4 \times 3.14 \times 5 \times 2290 \times 20}} = 7.27 \times 10^{-6} \text{ m}$

3-9 在 100°C 的热空气中含砂粒之粒度分布 (质量分率) 为:

粒径范围, μm	10 以下	10~20	20~30	30~40	40 以上
质量分率, %	10	10	20	20	40

已知砂粒的密度为 2200 kg/m^3 , 若此含尘气流在一降尘室中分离, 其分离效率为 60%; 在另一旋风分离器中分离, 其分离效率可达 90%, 现将流量降低 50%, 问新的情况下两种分离器的分离效率各为若干? 设砂粒的沉降均符合斯托克斯定律。

解: 对降尘室, 原临界粒径为 $30 \mu\text{m}$ 。
 $q_v = u_c B L$ $q_v' = q_v / 2$ $u_c' = u_c / 2$
 $d_c' / d_c = (u_c' / u_c)^{1/2}$ $d_c' = d_c / 2^{1/2} = 2.12 \times 10^{-5} \text{ m}$ 分离效率增为 80%
 对旋风分离器, 原临界粒径为 $10 \mu\text{m}$ 。
 $d_c' / d_c = (u_c' / u_c)^{1/2}$ $d_c' = d_c \times 2^{1/2} = 14.1 \times 10^{-5} \text{ m}$ 分离效率 < 90%

3-10 某圆柱形吸附剂的尺寸为直径 4 mm , 高 8 mm 。试分别求该吸附剂的等体积直径、等表面积当量直径、等比表面积当量直径以及球形度。

解: $V_p = 0.785 \times 0.004^2 \times 0.008 = 1.005 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ $d_e = (6V_p / \pi)^{1/3} = 5.77 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $A_p = 0.785 \times 0.004^2 \times 2 + 3.14 \times 0.004 \times 0.008 = 1.256 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 $d_A = (A_p / \pi)^{1/2} = 6.32 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $d_a = 6V_p / A_p = 6 \times 1.005 \times 10^{-7} / (1.256 \times 10^{-4}) = 4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$
 $\alpha = 6 / d_e = 1040 \text{ m}^2/\text{m}^3$ $\alpha_p = 1.256 \times 10^{-3} / (1.005 \times 10^{-7}) = 1250 \text{ m}^2/\text{m}^3$
 $j_A = 1040 / 1250 = 0.83$

3-11 某喷雾干燥制品的筛分数据如下表所示。颗粒试样总量为 0.5 kg , 设颗粒为球形, 试求该混合颗粒的分布函数曲线, 频率函数曲线以及以等比表面积计的平均粒径。

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
筛孔尺寸/mm	0.4	0.315	0.25	0.18	0.154	0.125	0.09	0.071	0.056	<0.045
筛留量/kg	0.001	0.004	0.010	0.071	0.135	0.143	0.116	0.018	0.002	0.000

解: 附表

序	(I) 筛分数据				(II) 计算值				
号	筛孔尺寸 mm	筛留量 kg	$d_{p,i-1} - d_{p,i}$	d_{pm}/mm	$w_i/\%$	F_i	f_i/mm	w_i/d_{pmi}	
1	0.4	0.01			0.2	1.000			
2	0.315	0.004	0.085	0.3575	0.8	0.998	0.0224	0.00286	
3	0.25	0.01	0.065	0.2825	2	0.99	0.0708	0.00565	
4	0.18	0.071	0.07	0.215	14.2	0.97	0.6605	0.0305	
5	0.154	0.135	0.026	0.167	27	0.828	1.6168	0.04509	
6	0.125	0.143	0.029	0.1395	28.6	0.558	2.0502	0.0400	
7	0.09	0.116	0.035	0.1075	23.2	0.272	2.1581	0.02494	
8	0.071	0.018	0.019	0.0805	3.6	0.04	0.4472	0.00290	
9	0.056	0.002	0.015	0.0635	0.4	0.004	0.0630	0.000254	
10	0.000	0	0.056	0.028	0	0	0	0	
以等比表面积计的平均粒径:				$d_{pm} = 0.141 \text{ mm}$			$S = 7.089$	$S = 0.1521$	

3-12 一固定床吸附器，床层由比表面积 $a=1250\text{m}^2/\text{m}^3$ 的圆柱形吸附剂组成，床层的高度为 1.5m，空隙率为 0.42。当温度为 150°C 及压强为 0.02MPa （表压）时，在每平方米吸附层的截面上每小时通过 1800m^3 （标准状况）的混合气体，试计算通过吸附层的流体压降。已知 150°C 及 0.12MPa （绝压）时该混合气体的密度为 $0.8\text{kg}/\text{m}^3$ ，粘度为 $2.5\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

解：

$$u = \frac{1800}{3600} \times \frac{273+150}{273} \times \frac{101.3}{121.3} = 0.647\text{m/s}$$

$$\Delta p = L \left[4.17 \frac{a^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} u \mu + 0.29 \frac{a(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho u^2 \right]$$

$$= 1.5 \times \left[4.17 \times \frac{1250^2 \times (1-0.42)^2}{0.42^3} \times 2.5 \times 10^{-5} \times 0.647 + 0.29 \times \frac{1250 \times (1-0.42)}{0.42^3} \times 0.8 \times 0.647^2 \right]$$

$$= 2143\text{Pa}$$

3-13 用活性炭固定床脱除某溶液的色度，溶液温度为 20°C ，密度为 $830\text{kg}/\text{m}^3$ ，粘度为 $1.3\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。使用的活性炭平均粒径为 0.85mm ，床层直径为 0.3m ，填充高度为 0.6m ，空隙率为 0.43。当活性炭层上方在大气压下保持 1.0m 液层高度，而床层下方集液容器内抽真空减压至 40kPa （真空度）时，问该溶液的处理量有多大？

解： 床层上方压强 9810Pa （表），床层下方压强 -40000Pa （表）

$$\Delta p = 9810 + 40000 = 49810\text{Pa} \quad a = 6/d = 7959\text{m}^2/\text{m}^3$$

$$\frac{49810}{0.6} = 4.17 \times \frac{7959^2 \times (1-0.43)^2}{0.43^3} \times 1.3 \times 10^{-3} u + 0.29 \times \frac{7959 \times (1-0.43)}{0.43^3} \times 830 u^2$$

$$83016.7 = 1.104 \times 10^6 u + 1.218 \times 10^7 u^2$$

$$u^2 + 0.0906 u - 0.006816 = 0 \quad u = 0.0489\text{m/s}$$

$$q_v = 0.785 \times 0.3^2 \times 0.0489 = 3.455 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$$

3-14 恒压下过滤某含渣的果汁，由实验已测得过滤中截留的浆渣滤饼的压缩指数为 0.55。现已知在 0.2MPa 的压差下，过滤 1h 后可得 3m^3 的清果汁。问在其它条件相同下，若过滤 1h 后要得到 5m^3 的清果汁需采用多大的过滤压差？设介质阻力忽略不计。

解：

$$V^2 = 2kA^2 \Delta p^{1-s} t \quad V'^2 = 2kA^2 \Delta p'^{1-s} t$$

$$(V'/V)^2 = (\Delta p'/\Delta p)^{1-s} = (5/3)^2 \quad (\Delta p'/\Delta p) = (5/3)^{2/(1-0.55)} = 9.68$$

$$\Delta p' = 9.68 \Delta p = 9.68 \times 0.2 = 1.94\text{MPa}$$

3-15 某厂用压滤机恒压过滤某种胶状悬浮液， 1m^2 过滤面积过滤 15 分钟后得滤液 1.2m^3 ，继续过滤至 1 小时，共得滤液 4m^3 ，此时滤框已充满，即停止过滤。试依据上述测试数据确定其恒压过滤方程。如果过滤前在滤布面上涂一层助滤剂（其厚度可略而不计），则滤布阻力可降至原来的 1/3，问涂上助滤剂后滤框充满所需时间为多少？

解：

$$1.22 + 2 \times 1.2 \times q_e = 15K \quad 42 + 2 \times 4 \times q_e = 60K$$

$$K = 1.12\text{m}^2/\text{min} \quad q_e = 6.4\text{m}^3/\text{m}^2$$

过滤方程为 $q^2 + 12.8q = 1.12t$

铺助滤剂后 $q_e' = q_e/3 = 6.4/3\text{m}^3/\text{m}^2$

$$42 + 2 \times 4 \times 6.4/3 = 1.12t \quad t = 29.5\text{min}$$

3-16 今有一实验装置，以 0.3MPa 的恒压过滤某水悬浮液，测得过滤常数 $K=5\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ， $q_e=0.01\text{m}^3/\text{m}^2$ 。又测得滤饼体积与滤液体积之比 $v=0.08\text{m}^3/\text{m}^3$ 。现拟在生产中采用 BMY50—810/25 型板框压滤机来过滤同样的料液，过滤压强和所用滤布也与实验时相同（此板框压滤机的 B 代表板框式，M 代表明流，Y 代表采用液压力压紧装置，这一型号的滤机滤框空间的长与宽均为 810mm ，框的厚度为 25mm ，共 20 个框）。试计算：（1）过滤至框内全部充满滤渣时所需过滤时间；（2）过滤后以相当滤液量 1/10 的清水进行洗涤，求洗涤时间；（3）洗涤后卸渣、重装等操作共需 15min ，求压滤机的生产能力，以每小时平均可得多少 m^3 滤饼计。

解：（1） $A = 0.812 \times 2 \times 20 = 26.24\text{m}^2$ $V_{\text{饼}} = 0.812 \times 0.025 \times 20 = 0.328\text{m}^3$

$$V = 0.328/0.08 = 4.1\text{m}^3 \quad q = V/A = 4.1/26.24 = 0.156\text{m}^3/\text{m}^2$$

$$q^2 + 2 \times 0.01 \times q = 5 \times 10^{-5} t \quad t = (0.156^2 + 0.02 \times 0.156)/(5 \times 10^{-5}) = 549\text{s}$$

（2） $t_w = 0.1 V \times 8(V + V_e)/KA^2 = 0.1 \times 8 \times q \times (q + q_e)/K = 0.1 \times 8 \times 0.156 \times (0.156 + 0.01)/(5 \times 10^{-5}) = 414\text{s}$

$$(3) Q_{\text{饼}} = 0.328 \times 3600 / (549 + 414 + 900) = 0.634 \text{ m}^3/\text{h}$$

3-17 有一浓度为 9.3% 的水悬浮液，固相的密度为 2200 kg/m^3 ，于一小型过滤机中测得此悬浮液的滤饼常数 $k = 1.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{atm})$ ，滤饼的空隙率为 40%。现用一台 GP5-1.75 型回转真空过滤机进行生产（此过滤机的转鼓直径为 1.75m，长度为 0.98m，过滤面积为 5 m^2 ，浸入角度为 120° ），生产时采用的转速为每分钟 0.5 转，真空度为 600mmHg，试求此过滤机的生产能力（以滤液量计）和滤饼厚度。假设滤饼不可压缩，过滤介质的阻力可忽略不计。

解： $K = 2k\Delta p = 2 \times 1.1 \times 10^{-4} \times 600/760 = 1.737 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Q = 465 A \sqrt{K n \psi} = 465 \times 5 \times \sqrt{1.737 \times 10^{-4} \times 0.5 \times 1/3} = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V = Q/60n = 12.5/(60 \times 0.5) = 0.417 \text{ m}^3$$

$$\nu \times (1 - 0.4) \times 2200 / [1000 + \nu \times 0.4 \times 1000 + \nu \times (1 - 0.4) \times 2200] = 0.093$$

$$\nu = 0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad V = \nu V_{\text{饼}} = 0.08 \times 0.417 = 0.0333 \text{ m}^3$$

$$\delta = V_{\text{饼}}/S = 0.0333/5 = 0.0067 \text{ m}$$

3-18 某回转真空过滤机转速为每分钟 1.5 转，今将转速提高至每分钟 2.5 转，若其它情况不变，问此过滤机的生产能力有何变化？设介质阻力可忽略不计。

解： $Q'/Q = (n'/n)^{1/2} = (2.5/1.5)^{1/2} = 1.29$

3-19 一台 BMS30-635/25 型板框压滤机（过滤面积为 30 m^2 ）在 0.25MPa（表压）下恒压过滤，经 30 分钟充满滤框，共得滤液 2.4 m^3 ，过滤后每次拆装清洗时间需 15 分钟。现若改用一台 GP20-2.6 型回转真空过滤机来代替上述压滤机，转筒的直径为 2.6m，长为 2.6m，过滤面积有 25% 被浸没，操作真空度为 600mmHg，问真空过滤机的转速应为多少才能达到同样的生产能力？设滤渣为不可压缩，过滤介质的阻力可忽略不计。

解：板框压滤机 $Q = 2.4 \times 60 / (30 + 15) = 3.2 \text{ m}^3/\text{h}$

回转真空过滤机 $K'/K = 600 \times 101.3 / (760 \times 250) = 0.32$

$$K = 2.42 / (302 \times 30 \times 60) = 3.556 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K' = 0.32K = 1.1374 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$A' = 2.6 \times 3.14 \times 2.6 = 21.2 \text{ m}^2$$

$$3.2 = 465 \times 21.2 \times \sqrt{1.1374 \times 10^{-6} \times 0.25 \times n'}$$

$$n' = 0.37 \text{ rpm}$$

3-20 工厂用一台加压叶滤机过滤某种悬浮液，先以恒速过滤 15 分钟得到滤液 2.5 m^3 ，达到泵的最大压头，然后再继续进行恒压过滤 1 小时，问：（1）总共可得滤液多少 m^3 ？（2）如果叶滤机的去渣，重装等需 15 分钟。此滤机的生产能力为多少 m^3/h ？（3）如果要此过滤机的生产能力为最大，则每一循环应为多少时间？生产能力又是多少 m^3/h ？设介质阻力忽略不计。

解：（1）恒速 $V_R^2 = KA^2 t_R / 2$

即 $2.5^2 = KA^2 \times 0.25 / 2 \quad KA^2 = 2.5^2 \times 2 / 0.25 = 50$

先恒速再恒压 $V^2 - V_R^2 = KA^2 (t - t_R)$

$$V^2 - 2.5^2 = 50 \times (1.25 - 0.25) \quad V = 7.5^3$$

（2） $Q = 7.5 / (1.25 + 0.25) = 5 \text{ m}^3/\text{h}$

（3） $Q = \frac{V}{V + V_D} = \frac{\sqrt{KA^2 (t - t_R) + V_R^2}}{t + t_D}$

$$\text{令 } \frac{dQ}{dt} = \frac{(t + t_D) \times \frac{1}{2} \times \frac{KA^2}{\sqrt{KA^2 (t - t_R) + V_R^2}} - \sqrt{KA^2 (t - t_R) + V_R^2}}{(t + t_D)^2} = 0$$

即 $(t + t_D) \times \frac{1}{2} \times \frac{KA^2}{\sqrt{KA^2 (t - t_R) + V_R^2}} = \sqrt{KA^2 (t - t_R) + V_R^2}$

$$(t + t_D) KA^2 / 2 = KA^2 (t - t_R) + V_R^2$$

代入 $t_D = 0.25 \text{ h}$, $KA^2 = 50$, $t_R = 0.25 \text{ h}$, $V_R = 2.5 \text{ m}^3$, 得 $t = 0.52 \text{ h}$

此时 $V = [50 \times (0.52 - 0.25) + 2.5^2]^{1/2} = 4.444 \text{ m}^3$

$$Q_{\text{max}} = 4.444 / (0.52 + 0.25) = 5.77 \text{ m}^3/\text{h}$$

3-21 加压叶滤机过滤面积为 4.5m^2 ，在 0.2MPa （表压）下用某种料浆进行恒压过滤实验，测得：

过滤时间 t/min	5	10	15	20	25	30
滤液量 V/l	490	795	1035	1235	1425	1575

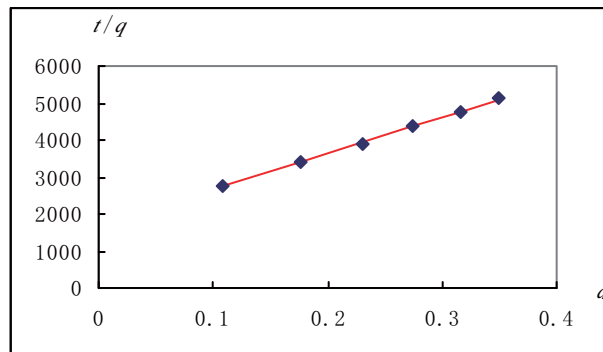
试求过滤常数 K 、 q_e 。

解：用线性回归法得： $K=1.02\times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ $q_e=0.0852\text{m}^3/\text{m}^2$

t/s	V/m^3	Q/m	t/q
300	0.490	0.1089	2755.10
600	0.795	0.1767	3396.23
900	1.035	0.2300	3913.04
1200	1.235	0.2744	4372.47
1500	1.425	0.3167	4736.84
1800	1.575	0.3500	5142.86

斜率 9809.32

截距 1671.27



3-22 有一转鼓真空过滤机，每分钟回转 2 周，每小时可得滤液 4m^3 。若滤布阻力忽略不计，问每小时要获得 5m^3 滤液，转鼓每分钟应回转几周？此时转鼓表面滤饼的厚度为原来的几倍？假定所用的真空度不变。

解：过滤介质可以忽略时，每小时所得的滤液体积： $q_v=465A(Kn\psi)^{1/2}$

$$q_v'/q_v=465A(Kn'\psi)^{1/2}/[465A(Kn\psi)^{1/2}]=n'/n)^{1/2}$$

$$\therefore n'=n(q_v'/q_v)^2=2\times(5/4)^2=3.125$$

即每小时要获得 5m^3 滤液，转鼓每分钟应转 3.125 周。

转鼓旋转一周表面生成的滤饼的厚度： $\delta=v(Vn)/A=vV/nA$

$$\therefore \delta'/\delta=(V'/n')/(V/n)=V'n/Vn'=5\times 2/(3.125\times 4)=0.8$$

即转鼓表面滤饼的厚度为原来的 0.8 倍。

3-23 用板框压滤机过滤某糖汁。滤框边长为 810mm 。已测得操作条件下过滤常数 $K=6.2\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ， $q_e=0.01\text{m}^3/\text{m}^2$ ，每得 1m^3 滤液的滤饼体积为 0.1m^3 ，滤饼洗涤及卸饼、重装等共费时 25min 。要求过滤机的生产能力为 $15\text{m}^3/\text{h}$ （按滤液计）。试计算：（1）至少需几个框；（2）框的厚度。

解：（1）由恒压过滤方程式：

$$t=(V^2+2VV_e)/KA^2 \quad \text{及} \quad V_e=Aq_e$$

$$q_v=V/(t+t_0)=V/[(V^2+2VV_e)/KA^2+t_0]=KA^2V/(V^2+2VV_e+KA^2t_0)$$

$$\text{令 } dq_v/dV=0, \text{ 得: } V^2=KA^2t_0=6.2\times 10^{-5}\times 25\times 60A^2=0.093A^2$$

$$\therefore V=(0.093)^{1/2}A=0.3050A$$

$$q_v=6.2\times 10^{-5}\times A^2\times 0.305A/(0.093A^2+2\times 0.305A\times 0.01A+0.093A^2)=1.891\times 10^{-5}A/0.1921$$

$$\text{而 } q_v=15\text{ m}^3/\text{h}=4.167\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$$

$$\therefore A=4.167\times 10^{-3}\times 0.1921/1.891\times 10^{-5}=42.33\text{m}^2$$

$$\text{所需滤框数: } n=A/2b^2=42.33/(2\times 0.81^2)=32.26 \quad \text{取 } 33$$

$$\text{实际过滤面积: } A=33\times 2\times 0.81^2=43.30\text{m}^2$$

（2）一个操作周期中得到的滤液体积为：

$$V=(KA^2\tau_D)^{1/2}=0.305A=0.305\times 43.3=13.21\text{m}^3$$

$$\therefore \text{框的厚度为: } L=V/nb^2=13.21\times 0.1/(33\times 0.81^2)=0.061\text{m}$$

3-24 用板框压滤机恒压过滤某悬浮液。悬浮液中固相质量分率为 0.1。固相密度 $\rho_s=2000\text{kg/m}^3$ ，液相为密度 $\rho=1100\text{kg/m}^3$ 的水溶液，每 1m^3 滤饼中含 600kg 溶液，其余全为固相。已知操作条件下过滤常数 $K=9.8\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ， $q_c=0.02\text{m}^3/\text{m}^2$ ，板框尺寸为 $810\text{mm}\times 810\text{mm}\times 25\text{mm}$ ，共 26 个框。求：（1）滤框全部充满所需的时间及所得的滤液体积；（2）过滤完毕后用 0.5m^3 清水洗涤，洗涤时表压与过滤时相同，洗水粘度为滤液粘度的 75%，求洗涤时间。

解：（1）以 1m^3 滤饼为基准求 v ，设其质量为 x ：

$$(x-600)/2000+600/1100=1 \quad \text{解得 } x=1509.1\text{kg}$$

$$\text{对应的滤浆量} \quad 909.1/0.1=9090.9\text{kg}$$

$$\text{对应的滤液量} \quad 9090.9-1509.1=7581.8\text{kg}$$

$$\text{对应的滤液体积} \quad 7581.8/1100=6.89\text{m}^3$$

$$\text{滤框全部充满时的体积} \quad 0.81^2\times 0.025\times 26=0.4265\text{m}^3$$

$$V=0.4265\times 6.89=2.94\text{m}^3 \quad \text{而} \quad A=0.81^2\times 2\times 26=34.12\text{m}^2$$

$$q=V/A=2.94/34.12=0.0862\text{m}^3/\text{m}^2$$

由恒压过滤方程式 $q^2+2qq_c=K\tau$ ，知：

$$(0.0862)^2+2\times 0.0862\times 0.02=9.8\times 10^{-5}\tau \quad \text{解得: } \tau=111\text{s}$$

$$(2) (dV/d\tau)_w=KA^2/[8(V+V_c)]=KA/[8(q+q_c)]=9.8\times 10^{-5}\times 34.12^2/[8\times (0.0862+0.02)]=3.936\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$$

$$t_w=V_w/(dV/d\tau)_w=0.5/3.936\times 10^{-3}=127\text{s}$$

$$\text{校正后的洗涤时间为: } t_w'=t_w\mu_w/\mu=127\times 0.75=95.25\text{ s}$$

第四章

4-1 在某一间歇式混合器内将淀粉与干菜粉混合以生产汤粉混合物。干菜粉和淀粉的原料比例为 4:6，混合 5min 后取样分析，以质量分数表示淀粉含量，测得混合物组成的均方差为 0.0823。均方差的初值可用两组分的质量比表示。试问若要求混合物达到规定的均方差值 0.02，混合操作还需继续进行多少时间？（初始均方差等于两组分浓度的乘积）

$$\text{解: } c_m=6/(6+4)=0.6 \quad \sigma_\infty^2=0 \quad \text{开始的5min内}$$

$$\sigma_0^2=0.6\times (1-0.6)=0.24 \quad \sigma^2=0.823 \quad \tau=5\text{min}=300\text{ s}$$

$$\text{则: } 0.0823-0=(0.24-0)\exp(-300k) \quad \text{解得: } k=3.57\times 10^{-3}1/\text{s}$$

$$\text{即: } \sigma^2=0.24\exp(-3.57\times 10^{-3}\tau)$$

$$\text{再代入: } \sigma^2=0.02 \quad \tau=696.5\text{s}=11.6\text{min} \quad \text{即再混合6.6min.}$$

4-2 用平桨式叶轮搅拌液体，搅拌已达湍流。原用的桨叶直径为容器直径的 $1/3$ ，今拟以容器直径的 $1/4$ 的桨叶直径代替。要求功率数相等，问转速应如何改变？

$$\text{解: 由 } P/P=[(d/D)']/(d/D)]^{-1.2}=(3/4)^{-1.2}=1.41 \quad P/d^5n^3\rho=P/d'^5n'^3\rho \quad \text{且 } P=1.41P$$

$$1.41/d'^5n'^3=1/d^5n^3 \quad n'/n=[1.41(d/d')^5]^{1/3}=(5.942)^{1/3}=1.81$$

4-3 用一具有 6 个平直叶片的涡轮搅拌器在标准搅拌系统内搅拌果浆。果浆密度 1100kg/m^3 ，粘度 $20\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。搅拌槽直径 1.65m ，有挡板。若马达的功率消耗为 1.6kW ，求其转速。

$$\text{解: 设搅拌为湍流} \quad N_p=P/\rho n^3 d^5=6.1 \quad d=D/3=0.55\text{m}$$

$$n=(P/6.1\rho d^5)^{1/3}=[1600/(6.1\times 1100\times 0.55^5)]^{1/3}=1.68\text{ s}^{-1}$$

$$Re=\rho d^2 n/\mu=1100\times 0.55^2\times 1.68/0.02=27951 \quad \text{假设成立}$$

4-4 为制取某种难溶的矿物盐稀溶液，使矿物盐在容器内与 30°C 水混合，采用平桨式搅拌器，搅拌叶轮直径 500mm ，所消耗的功率为 0.0385kW ，试估算叶轮转速（稀溶液物性可用水的物性代替）。

$$\text{解: 设搅拌已达湍流, 从图查得: } N_p=P/d^5n^3\rho=1$$

$$30^\circ\text{C 水} \quad \rho=995.7\text{ kg/m}^3 \quad \mu=0.8007\text{mPa}\cdot\text{s}$$

$$\text{故 } n=(P/2d^5\rho)^{1/3}=[38.5/(1\times 0.5^5\times 995.7)]^{1/3}=1.07\text{s}^{-1}$$

$$Re=nd^2\rho/\mu=1.07\times 0.5^2\times 995.7/0.8007\times 10^{-3}=3.34\times 10^5 \quad \text{假设成立}$$

4-5 实践证明,糖蜜和维生素浓缩液在直径0.6m,深0.75m的容器内,采用直径0.3m,转速450r/min的三叶旋浆式搅拌器搅拌,可以得到很好的混合。今欲设计规模更大的设备,容器直径1.8m,欲达到小设备同样的混合效果。试问容器深度、搅拌浆直径和转速应各取何值为宜?电动机功率有多大改变?混合物粘度为6.6 Pa·s、密度1520 kg/m³。设放大基准为 Re 相等且放大时应保持几何相似。

解: 小试: $Re = n d^2 \rho / \mu = 450 \times 0.3^2 \times 1520 / (60 \times 6.6) = 155.5$ 属过渡流但 Φ 与 Fr 无关
欲保持几何相似, 则 $d = d' D / D = 0.3 \times 1.8 / 0.6 = 0.9\text{m}$ $H = H' D' / D = 0.75 \times 1.8 / 0.6 = 2.25\text{m}$
由 $n' d'^2 \rho / \mu = n d^2 \rho / \mu$ $n' = n (d/d')^2 = 450 \times (0.3/0.9)^2 = 50\text{r/min}$
由于 $Re < 300$, 故 $\phi = f(Re)$ $N_p' = N_p$ 小试: $N_p = P / d^3 n^2 \rho = 0.8$
 $P = 0.8 \times 0.3^5 \times (450/60)^3 \times 1520 = 1247\text{W}$ $\therefore P = P (n'/n)^3 (d/d')^5 = P \times (1/9)^3 \times 3^5 = P/3 = 415.7\text{W}$
因为是非标准搅拌系统, 故对几何形状进行校正:
 $f_1 = [(d/D)_2 / (d/D)_1]^{0.9} = [(0.9/1.8) / (1/3)]^{0.9} = (3/2)^{-0.9} = 0.694$
 $f_2 = [(H/D)_2 / (H/D)_1]^{0.6} = [(2.25/1.8) / 1]^{0.6} = 1.14$
 $P' = f_1 f_2 P = 0.694 \times 1.14 \times 415.7 = 328.9\text{W}$

4-6 在一有挡板的搅拌槽内,用带园盘平直叶片的涡轮搅拌器搅拌粘度为10mPa·s, 密度950kg/m³的溶液。装置有关尺寸比例为: $d/D=1/3$, $W/d=1/5$, $H/d=3$, $h/d=1$, 搅拌槽直径0.9m, 叶轮转速480r/min。现有一电机能提供1.5kW的有效功率, 问此电机是否能驱动上述搅拌器, 再核算该电机能驱动上述搅拌器的最高转速有多大?

解: 题中为标准搅拌系统 $Re = n d^2 \rho / \mu = 480 \times 0.3^2 \times 950 / (60 \times 10 \times 10^{-3}) = 68400 > 10^4$ 湍流
查图7-7 $\phi = 6.1$ $P = 6.1 \rho n^3 d^5 = 6.1 \times 950 \times (480/60)^3 \times 0.3^5 = 7210\text{W}$
 \therefore 不能驱动 若仍取 $\phi = 6.1$ 由 $6.1 \rho n^3 d^5 = 1500$, 得 $n = 4.741/\text{s}$
 $Re = 4.74 \times 0.3^2 \times 950 / (10 \times 10^{-3}) = 40530 > 10^4$ \therefore 最高转速为 $4.74 \text{ 1/s} \Rightarrow 284\text{r/min}$

4-7 具6个平直叶片的涡轮搅拌器装于直径 $D=1.5\text{m}$ 的搅拌槽中央, 叶轮直径 $d=0.5\text{m}$, 距槽底 $h=0.5\text{m}$, 转速 $n=90\text{r/min}$, 槽为平底, 无挡板, 被搅拌液体 $\mu=200\text{mPa}\cdot\text{s}$, $\rho=1060\text{kg/m}^3$, 槽内液体深度1.5m, 试计算搅拌功率, 若在槽内装置4块宽0.15m的挡板, 其他条件不变, 再求此时所需功率。

解: $d/D=1/3$, $h/d=1$, \therefore 为标准系统, 但无挡板
 $Re = n d^2 \rho / \mu = 90 \times 0.5^2 \times 1060 / (60 \times 200 \times 10^{-3}) = 1987.5 < 10000$ 查图, 曲线5, $\phi = 2$
 $Fr = n^2 d / g = (90/60)^2 \times 0.5 / 9.81 = 0.1147$ $a_2 = (1 - \lg 1987.5) / 40 = -0.05746$
 $N_p = \phi Fr^{a_2} = 2 \times 0.1147^{-0.05746} = 2.265$ $P = 2.265 \rho n^3 d^5 = 2.265 \times 1060 \times (90/60)^3 \times 0.5^5 = 253.2\text{W}$
装挡板后查曲线6 $\phi = 4.9$ $P = 4.9 \times 1060 \times (90/60)^3 \times 0.5^5 = 547.8\text{W}$

4-8 一搅拌槽装有螺旋桨式叶轮。转速500r/min, 功率消耗17kW, 物料为 $\rho=1200\text{kg/m}^3$, $\mu=1.6\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的甘油, 系统为标准系统, 有挡板。求槽直径。

解: 设为湍流, 则 $Eu = P / \rho n^3 d^5 = 0.32$ $n = 500/60 = 50/6$
 $d = \{17000 / [0.32 \times 1200 \times (50/6)^3]\}^{1/5} = 0.598\text{m}$ $Re = 1200 \times 0.598^2 \times 50 / (6 \times 1.6) = 2235 < 100000$
由图7-7曲线2, $\phi = N_p = 0.4$ $d = \{17000 / [0.4 \times 1200 \times (50/6)^3]\}^{1/5} = 0.572\text{m}$
 $Re = 1200 \times 0.572^2 \times 50 / (6 \times 1.6) = 2044$ 再查图7-7曲线2, $\phi = Eu = 0.4$ 符合
故 $D = 3d = 3 \times 0.572 = 1.72\text{m}$

4-9 大豆的密度为1200kg/m³, 直径为5mm, 堆积成高度为0.3m的固定床层, 空隙率为0.4, 若20℃的空气流过床层时, 空床流速为0.5m/s, 试求压降。又问空床流速达何值时, 流化方才开始? 此时压降为何值?

解: 20℃空气: $\rho = 1.205\text{kg/m}^3$, $\mu = 1.81 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$
 $u_{mf} = 0.00923 d_p^{1.82} (\rho_s - \rho)^{0.94} / \mu^{0.88} \rho^{0.06}$
 $= 0.00923 \times 0.005^{1.82} (1200 - 1.205)^{0.94} / [(1.81 \times 10^{-3})^{0.88} \times 1.205^{0.06}] = 6.914\text{m/s}$
 $Re_p = 0.005 \times 6.914 \times 1.205 / (1.81 \times 10^{-3}) = 2300$ 查图: $F_G = 0.2$, $\therefore u_{mf} = 1.383\text{m/s}$
当 $u = 0.5\text{m/s}$ 时, 尚未流化, 为固定床
 $\Delta p = 36 k'' \mu (1 - \varepsilon)^2 Lu / d_p^2 \varepsilon^3 = 36 \times 5 \times 1.81 \times 10^{-3} (1 - 0.4)^2 \times 0.3 \times 0.5 / (0.005^2 \times 0.4^3) = 110\text{Pa}$
当达到流化时: $\Delta p = h_0 (1 - \varepsilon) (\rho_s - \rho) g = 0.3 \times (1 - 0.4) (1200 - 1.205) \times 9.81 = 2117\text{Pa}$

4-10 一砂滤器在粗砂砾层上铺有厚 750mm 的砂粒层, 以过滤工业用水。砂砾的密度为 2550kg/m^3 , 粒径为 0.75mm , 床层松密度为 1400kg/m^3 。今于过滤完毕后用 14°C 的水以 0.02m/s 的空床流速进行砂粒层的返洗。问砂粒层在返洗时是否处于流化状态?

解: $1-\varepsilon=1400/2550 \quad \varepsilon=0.451 \quad 14^\circ\text{C}$ 水, $\mu=1.185\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s} \quad \rho=1000\text{kg/m}^3$
 $u_{mf}=0.00923\times 0.00075^{1.82}(2550-1000)^{0.94}/[(1.185\times 10^{-3})^{0.88}\times 1000^{0.06}]=0.0047\text{m/s}$
 $Re_p=0.00075\times 0.0047\times 1000/(1.185\times 10^{-3})=2.97$ 不必校正
 $\because u>u_{mf}$ 故处于流化态

4-11 鲜豌豆近似为球形, 其直径为 6mm , 密度为 1080kg/m^3 。拟于 -20°C 冷气流中进行流化冷冻。豆床在流化时的高度为 0.3m , 空隙率为 0.4 。冷冻进行时, 空气速度等于临界速度的 1.6 倍。试估算:

(1) 流化床的临界流化速度和操作速度; (2) 通过床层的压降。

解: (1) -20°C 空气, $\mu=1.62\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s} \quad \rho=1.395\text{kg/m}^3$
 $u_{mf}=0.00923\times 0.006^{1.82}(1080-1.395)^{0.94}/[(1.62\times 10^{-3})^{0.88}\times 1.395^{0.06}]=9.534\text{m/s}$
 $Re_p=9.534\times 0.006\times 1.395/(1.62\times 10^{-3})=4926$ 取 $F_G=0.1, u_{mf}=0.953\text{m/s}$
 或 $u_{mf}'=[0.006\times (1080-1.395)\times 9.81/(24.5\times 1.395)]^{0.5}=1.363\text{m/s}$
 操作速度 $u=1.6\times 1.363=2.18\text{m/s}$

(2) $\Delta p=f_0(1-\varepsilon)(\rho_s-\rho)g=0.3\times (1-0.4)(1080-1.395)\times 9.81=1905\text{Pa}$

4-12 小麦粒度为 5mm , 密度为 1260kg/m^3 。面粉的粒度为 0.1mm , 密度为 1400kg/m^3 。当同样以 20°C 空气来流化时, 试分别求其流化速度的上、下限值, 并作此散料和粉料流化操作的比较 (比较 u_t/u_{mf})。

解: 20°C 空气, $\mu=1.81\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s} \quad \rho=1.205\text{kg/m}^3$

(1) 小麦

$u_{mf}'=0.00923\times 0.005^{1.82}(1260-1.205)^{0.94}/[(1.81\times 10^{-3})^{0.88}\times 1.205^{0.06}]=7.4\text{m/s}$
 $Re_p=0.005\times 7.4\times 1.205/(1.81\times 10^{-3})=2464 \quad F_G=0.2, \quad u_{mf}=7.4\times 0.2=1.48\text{m/s}$
 或 $u_{mf}=[0.005\times (1260-1.205)\times 9.81/(24.5\times 1.205)]^{0.5}=1.45\text{m/s}$
 $Re_{pt}=0.005\times 12.46\times 1.205/(1.81\times 10^{-3})=4148>1000$
 $u_t=1.74[0.005(1260-1.205)\times 9.81/1.205]^{0.5}=12.46\text{m/s}$
 $u_t/u_{mf}=8.6$

(2) 面粉

$u_{mf}'=0.00923\times 0.0001^{1.82}(1400-1.205)^{0.94}/[(1.81\times 10^{-3})^{0.88}\times 1.205^{0.06}]=6.465\times 10^{-3}$
 $Re_p=6.465\times 10^{-3}\times 0.0001\times 1.205/(1.81\times 10^{-3})=0.043<1$
 $u_t=0.0001^{1/2}(1400-1.205)\times 9.81/(18\times 1.81\times 10^{-3})=0.42\text{m/s}$
 $Re_{pt}=0.0001\times 0.42\times 1.205/(1.81\times 10^{-3})=2.8>1$
 $u_t/u_{mf}=0.42/(6.465\times 10^{-3})=65$

4-13 试设计一低真空吸入式气力输送原料小麦的管路, 并计算其压降损失。已知管路的垂直和水平两段长度各为 10m , 中间有一 90° 弯头, 要求小麦的输送量为 5000kg/h 。

解: 取 $u_a=20\text{m/s}, \quad R_s=6$ 则 $q_v=G_s/R_s\rho_a=5000/(3600\times 6\times 1.2)=0.193\text{m}^3/\text{s}$

$d=(4q_v/\pi u_a)^{0.5}=(4\times 0.193/20\pi)^{0.5}=0.11\text{m}$

$\lambda_a=K(0.0125+0.0011/d)=1.3(0.0125+0.0011/0.11)=0.02925$

水平管 $\alpha_1=(30/u_a)^{0.5}+0.2R_s=(30/20)^{0.5}+0.2\times 6=2.425$

垂直管 $\alpha_2=250/(u_a^{3/2})+0.15R_s=250/20^{3/2}+0.15\times 6=3.695$ 取 $R/d=6, \quad \xi_{ab}=0.5$

$\Delta p=[(\alpha_1+\alpha_2)\lambda_a L/d+\xi_{ab}R_s]\rho_a u_a^2/2=[(2.425+3.695)\times 0.02925\times 10/0.11+0.5\times 6]\times 1.2\times 20^2/2=4626\text{Pa}$

4-14 某牛奶均质机在进行牛奶均质时, 将牛奶脂肪球的平均滴径从 $3.5\mu\text{m}$ 减至 $1\mu\text{m}$, 生产能力为 $2.22\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ 。试计算均质所需要的压降和功率。已知均质机的 $k_1=500, m=2$, 牛奶表面张力为 10^{-2}N/m 。

解: $W_p=k_1 X^m=500(3.5/1)^2=6125$ 又 $W_p=\Delta p_H d_0 r_s/\sigma$

$\therefore \Delta p_H=\sigma W_p/d_0 r_s=10^{-2}\times 6125/3.5\times 10^{-6}=17.5\times 10^6\text{Pa}$

$P=\Delta p_H\times q_v=17.5\times 10^6\times 2.22\times 10^{-5}=388.5\text{W}$

第五章

5-1 对于水分含量不低于 40%的食品，且温度在 0~100℃范围内时，其热扩散率可以用同温下水分和其他干物质的热扩散率的加权平均法来计算。根据经验，干物质的热扩散率约为 $88.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ 。根据此法，试计算牛肉的热扩散率。已知牛肉含蛋白质 10%，磷脂 6%，糖 2%及少量多种无机盐，其余为水分。

解：由附录查得 20℃时水的 $\lambda = 59.89 \times 10^{-2} \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ， $c_p = 4.183 \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， $\rho = 998.2 \text{kg}/\text{m}^3$
 \therefore 水的热扩散率： $a_{\text{水}} = \lambda / c_p \rho = 59.89 \times 10^{-2} / (4.183 \times 10^3 \times 998.2) = 1.434 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$
 牛肉的热扩散率为： $a = \sum w_i a_i / \sum w_i$
 $= [(0.10 + 0.06 + 0.02) \times 88.5 \times 10^{-9} + 0.82 \times 1.434 \times 10^{-7}] / [0.10 + 0.06 + 0.02 + 0.82]$
 $= 1.335 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$

5-2 燃烧炉的平面壁是由一层耐火砖与一层普通砖所砌成，两层的厚度均为 100mm，操作稳定后测得耐火砖内壁表面温度为 700℃，普通砖外壁表面温度为 130℃，已知耐火砖的导热系数 λ_1 为 0.93W/(m·K)，普通砖的导热系数 λ_2 为 0.58W/(m·K)，问耐火砖与普通砖的接触面的温度是多少？

解： $q = (t_1 - t_3) / (b_1 / \lambda_1 + b_2 / \lambda_2) = (700 - 130) / (0.1 / 0.93 + 0.1 / 0.58) = 2036 \text{W}/\text{m}^2$
 $q = \lambda_1 (t_1 - t_2) / b_1$ $2036 = 0.93 \times (700 - t_2) / 0.1$ $t_2 = 481^\circ\text{C}$

5-3 在第 1 题中，如果在普通砖的外表面再敷上一层厚度为 40mm 的 85%的氧化镁，以减少外壁面的散热损失。氧化镁层的导热系数 λ 为 0.081W/(m·K)，操作稳定后测得耐火砖内壁表面温度为 740℃，氧化镁的外表面温度为 90℃，问每小时每平方米壁面的热损失减少了多少？

解： $q' = (t_1 - t_4) / (b_1 / \lambda_1 + b_2 / \lambda_2 + b_3 / \lambda_3) = (740 - 90) / (0.1 / 0.93 + 0.1 / 0.58 + 0.04 / 0.081) = 840 \text{W}/\text{m}^2$
 $q - q' / q = (2036 - 840) / 2036 = 0.5874$ 即减少了 58.74%

5-4 某蒸汽管外径为 51mm，壁厚 1.5mm，管材热导率 λ_1 为 46W/(m·K)，管外包有厚度为 30mm 的绝热材料，绝热材料的热导率 λ_2 为 0.1246W/(m·K)，管子内表面温度为 175℃，绝热层外表面温度为 45℃，求每小时每米管长的散热损失。

解： $r_1 = 0.024 \text{m}$ $r_2 = 0.0255 \text{m}$ $r_3 = 0.055 \text{m}$
 $\frac{Q}{l} = \frac{2\pi(t_1 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2}} = \frac{2 \times 3.14 \times (175 - 45)}{\frac{1}{46} \ln \frac{0.0255}{0.024} + \frac{1}{0.1246} \ln \frac{0.0555}{0.0255}} = 130.8 \text{W}/\text{m} = 470.9 \text{kJ}/(\text{h}\cdot\text{m})$

5-5 某蒸汽管道外包有两层热导率不同而厚度相同的保温层。设外层的平均直径（按对数平均值计）为内层的 2 倍，其热导率也为内层的 2 倍。若将两保温层对调，其它条件不变，问每米管长的热损失将改变多少？

解：设外层平均直径为 d_{m2} ，内层平均直径为 d_{m1} ，则： $d_{m2} = 2d_{m1}$ 且 $\lambda_2 = 2\lambda_1$

由导热速率方程知：

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda_1 S_{m1}} + \frac{\delta}{\lambda_2 S_{m2}}} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda_1 \pi d_{m1} l} + \frac{\delta}{2\lambda_1 2\pi d_{m1} l}} = \frac{4\lambda_1 \pi d_{m1} \Delta t}{5\delta}$$

两层材料互换位置后：

$$Q' = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{2\lambda_1 \pi d_{m1} l} + \frac{\delta}{\lambda_1 2\pi d_{m1} l}} = \frac{\lambda_1 \pi d_{m1} \Delta t}{\delta}$$

$\therefore Q/Q' = 5/4 = 1.25$

互换位置后，单位管长热损失量增加，说明在本题情况下，热导率小的材料放在内层较适宜。

5-6 某蒸汽管道的外径为 219mm，外表面温度为 120℃。管道外包一层厚 100mm 的保温层，保温层表面温度为 30℃。保温材料的热导率可用： $\lambda = 0.52 + 0.0008t$ 表示。试求：（1）单位长度管长的热损失；（2）若按平均温度计算热导率，求保温层内的温度分布。

解：（1） $Q = -2\pi r \lambda dt/dr$ $r_1 = 0.1095 \text{m}$ ， $t_1 = 120^\circ\text{C}$ ， $r_2 = 0.2095 \text{m}$ ， $t_2 = 30^\circ\text{C}$ 。

分离变量积分得： $\frac{Q}{l} \int_{0.1095}^{0.2095} \frac{dr}{r} = -2\pi \int_{120}^{30} (0.52 + 0.0008t) dt$

$$(Q/l) \times (\ln 0.2095 - \ln 0.1095) = 2 \times 3.14 \times [(0.52 \times 120 + 0.0004 \times 120^2) - (0.52 \times 30 + 0.0004 \times 30^2)]$$

$$Q/l = 505.3 \text{ W/m}$$

$$(2) \quad t_m = (120 + 30)/2 = 75^\circ\text{C} \quad \lambda_m = 0.52 + 0.0008 \times 75 = 0.58 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\ln(r_2/r_1) = \ln(0.2095/0.1095) = 0.6488$$

$$Q/l = 2\pi(t_1 - t_2)\lambda_m / \ln(r_2/r_1) = 2 \times 3.14 \times (120 - 30) \times 0.58 / 0.6488 = 505.3 \text{ W/m}$$

$$2 \times 3.14 \times (120 - 30) \times 0.58 / \ln(r_2/r_1) = 505.3 \text{ W/m}$$

$$f = -138.7 \ln r - 186.8$$

5-7 水以 1.5 m/s 的流速在长为 3 m，直径为 $\phi 27\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的管内从 20°C 被加热到 40°C 。试求水与管壁之间的对流传热系数。如果将水的流速提高到 2.2 m/s，并近似假设水的热力性质不变，水与管壁之间的对流传热系数大约又是多少？

解：(1) $t_m = 30^\circ\text{C}$ $\lambda = 0.6171 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\rho = 995.7 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 4.174 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, $\mu = 0.8012 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

$$Re = d u \rho / \mu = 0.022 \times 1.5 \times 995.7 / 0.0008012 = 41011 > 10^4 \quad Pr = c_p \mu / \lambda = 4.174 \times 0.8012 / 0.6171 = 5.42$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.023 \times 41011^{0.8} \times 5.42^{0.4} = 221.6$$

$$\alpha = Nu \times \lambda / d = 221.6 \times 0.6171 / 0.022 = 6217 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

(2) $\alpha' = (2.2/1.5)^{0.8} \alpha = 8446 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

5-8 在套管换热器中将水从 25°C 加热至 80°C ，水在内管中流动，水与管壁间的对流传热系数为 $2000 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。若改为加热相同流量的大豆油，试求对流传热系数。设两种情况下流体均呈湍流流动，两流体在定性温度下的物性：

流体	ρ / kgm^{-3}	$\mu / \text{mPa}\cdot\text{s}$	$c_p / \text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\lambda / \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
水	1000	0.54	4.17	0.65
豆油	892	7.2	2.01	0.15

解： $\alpha_{\text{油}} = 0.027(\lambda_1/d)(d u \rho_1/\mu_1)^{0.8}(c_{p1}\mu_1/\lambda_1)^{0.33}(\mu_1/\mu_w)^{0.14}$

$$\alpha_{\text{水}} = 0.023(\lambda_2/d)(d u \rho_2/\mu_2)^{0.8}(c_{p2}\mu_2/\lambda_2)^{0.4}$$

$\therefore d, u$ 不变，两种情况下 α 之比为：

$$\alpha_{\text{油}}/\alpha_{\text{水}} = (0.027/0.023)(\lambda_1/\lambda_2)(\rho_1\mu_2/\mu_1\rho_2)^{0.8}(c_{p1}\mu_1/\lambda_1)^{0.33}(\mu_1/\mu_w)^{0.14}(c_{p2}\mu_2/\lambda_2)^{-0.4}$$

$$= 1.174 \times (15/65) \times [892 \times 0.54 / (1000 \times 7.2)]^{0.8} \times (2.01 \times 7.2 / 0.15)^{0.33} \times 1.05 \times (4.17 \times 0.54)^{-0.4}$$

$$= 1.174 \times 0.231 \times 0.1149 \times 4.517 \times 1.05 \times 0.608 = 0.08986$$

$$\alpha_{\text{油}}/\alpha_{\text{水}} = (0.027/0.023)(\lambda_1^{0.67}/\lambda_2^{0.6})(\rho_1/\rho_2)^{0.8}(\mu_2^{0.4}/\mu_1^{0.4}) \times 1.05 \times (c_{p1}^{0.33}/c_{p2}^{0.4})$$

$$= 1.2326 \times (0.15^{0.67}/0.65^{0.6})(0.892)^{0.8}(2010^{0.33}/4170^{0.4})/(0.0072^{0.33}/0.00054^{0.4})$$

$$= 1.2326 \times 0.3633 \times 0.9126 \times 0.4385 / 1.995 = 0.0898$$

$\therefore \alpha_{\text{油}} = 2000 \times 0.08986 = 179.7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

5-9 冷却水以错流方式流过管子外侧，以冷却管内的牛奶。水流速度为 0.5 m/s，管子外径为 20 mm。如果水的平均温度为 15°C ，管外壁温度为 80°C ，试求管壁对冷却水的对流传热系数。

解：由水的平均温度即定性温度 15°C ，查得： $\rho = 999.45 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.5867 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\mu = 0.0011564 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $Pr = 8.265$ ，及 $Pr_w = 2.22$

$$\therefore Re_o = d_o u \rho / \mu = 0.02 \times 0.5 \times 999.45 / 0.0011564 = 8643 > 1000$$

$$\therefore Nu = 0.25 Re^{0.6} Pr^{0.38} (Pr/Pr_w)^{0.25}$$

管壁对冷却水的表面传热系数为：

$$\alpha = 0.25 Re^{0.6} Pr^{0.38} (Pr/Pr_w)^{0.25} \times \lambda / d_o = 0.25 \times 8643^{0.6} \times 8.265^{0.38} \times (8.265/2.22)^{0.25} \times 0.5867 / 0.02$$

$$= 0.25 \times 230.1 \times 2.231 \times 1.389 \times 0.587 / 0.02 = 5232 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

$$\alpha = 0.41 Re^{0.6} Pr^{0.33} (Pr/Pr_w)^{0.25} \times \lambda / d_o = 0.41 \times 8643^{0.6} \times 8.265^{0.33} \times (8.265/2.22)^{0.25} \times 0.5867 / 0.02$$

$$= 0.41 \times 230.1 \times 2.008 \times 1.389 \times 0.587 / 0.02 = 7723 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

5-10 将粗碎的番茄通过管子从温度 20°C 加热至 75°C 。管子内径为 60 mm，表面温度保持 105°C 。番茄流量为 1300 kg/h 。已知物性数据是： $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$; $c_p = 3.98 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$; $\mu = 2.15 \text{ cP}$ (47.5°C 时)， 1.2 cP (105°C 时)； $\lambda = 0.61 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。试求对流传热系数。

解： $u = q_{\text{m}}/\rho A = 1300/(1050 \times 0.785 \times 0.06^2 \times 3600) = 0.1216 \text{ m/s}$

$$Re = d u \rho / \mu = 0.06 \times 0.1216 \times 1050 / 0.00215 = 3563 \quad \text{属过渡流}$$

$$Pr = c_p \mu / \lambda = 3.98 \times 2.15 / 0.61 = 14.03$$

$$\alpha = 0.027 Re^{0.8} Pr^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \times \lambda / d = 0.027 \times 3563^{0.8} \times 14.03^{1/3} \times (2.15/1.2)^{0.14} \times 0.61 / 0.06 = 498.42 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

校正系数为: $\phi = 1 - 6 \times 10^5 / Re^{0.8} = 1 - 6 \times 10^5 / 3563^{0.8} = 0.7574$

$$\therefore \alpha' = 498.42 \times 0.7574 = 377.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

5-11 脱脂牛奶流过 $\phi 32\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 的不锈钢管, 被管外水蒸汽加热。某处管壁温度为 70°C , 蒸汽冷凝温度为 110°C , 管子系水平放置。求换热器第一根管子的该处的对流传热系数。

解: 110°C 下饱和水蒸汽的冷凝潜热 $r = 2232 \text{ kJ/kg}$, 由定性温度 $t_m = (t_s + t_w)/2 = (110 + 70)/2 = 90^\circ\text{C}$, 查得水的物性数据: $\rho = 965.3 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.6804 \text{ W/(mK)}$, $\mu = 0.0003165 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

管子水平放置时, 表面传热系数为:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.725(\lambda^3 \rho^2 g r / r^{2/3} d_o \mu \Delta t)^{1/4} \\ &= 0.725[0.6804^3 \times 965.3^2 \times 9.81 \times 2.232 \times 10^3 / (1 \times 0.032 \times 0.0003165 \times 40)]^{1/4} = 8136 \text{ W/(m}^2\text{K)} \end{aligned}$$

5-12 热水在水平管中流过, 管子长 3m , 外径 50mm , 外壁温度 50°C , 管子周围空气温度 10°C , 试求管外自然对流引起的热损失。

解: $t_m = (t_b + t_w)/2 = (10 + 50)/2 = 30^\circ\text{C}$, 查得 30°C 空气的物性数据:

$$\begin{aligned} \rho &= 1.165 \text{ kg/m}^3, \lambda = 0.0267 \text{ W/(mK)}, \mu = 1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}, \\ Pr &= 0.701, l = d_o = 0.05 \text{ m}, \nu = \mu/\rho = 1.86 \times 10^{-5} / 1.165 = 1.597 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \\ \alpha_v &= 1/t_{mk} = 1/(30 + 273) = 0.0033 \text{ 1/K} \\ Gr &= \alpha_v g \Delta t l^3 / \nu^2 = 0.0033 \times 9.81 \times (50 - 10) \times 0.05^3 / (1.597 \times 10^{-5})^2 = 6.347 \times 10^5 \\ PrGr &= 6.347 \times 10^5 \times 0.701 = 4.449 \times 10^5 \\ \alpha &= C(PrGr)^n \lambda / l = 0.4 \times (4.449 \times 10^5)^{1/4} \times 0.0267 / 0.05 = 5.5165 \text{ W/(m}^2\text{K)} \\ Q &= \alpha S \Delta t = 5.5165 \times 0.05 \pi \times 3 \times (50 - 10) = 103.9 \text{ W} \end{aligned}$$

5-13 试计算某蒸煮锅的垂直侧壁对周围的热损失。锅子直径为 0.9m , 高为 1.2m 。其外部有绝缘层, 外表面温度为 49°C , 空气温度为 15°C 。

解: $t_m = (t_b + t_w)/2 = (15 + 49)/2 = 32^\circ\text{C}$, 查得 32°C 空气的物性数据: $\rho = 1.1596 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.02688 \text{ W/(mK)}$, $\mu = 1.87 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $Pr = 0.7008$, $l = 1.2 \text{ m}$, $\nu = \mu/\rho = 1.87 \times 10^{-5} / 1.1596 = 1.613 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$$\begin{aligned} \alpha_v &= 1/t_{mk} = 1/(32 + 273) = 0.003279 \text{ 1/K} \\ Gr &= \alpha_v g \Delta t l^3 / \nu^2 = 0.003279 \times 9.81 \times (49 - 15) \times 1.2^3 / (1.613 \times 10^{-5})^2 = 7.264 \times 10^9 \\ PrGr &= 7.264 \times 10^9 \times 0.7008 = 5.091 \times 10^9 \\ \alpha &= C(PrGr)^n \lambda / l = 0.129 \times (5.091 \times 10^9)^{0.33} \times 0.02688 / 1.2 = 4.614 \text{ W/(m}^2\text{K)} \\ Q &= \alpha S \Delta t = 4.614 \times 0.9 \pi \times 1.2 \times (49 - 15) = 532 \text{ W} \end{aligned}$$

5-14 用常压饱和水蒸汽在直立的列管换热器内加热糖汁, 蒸汽在管外冷凝。管直径为 $\phi 25\text{mm} \times 2.5\text{mm}$, 长 2m , 列管外表面平均温度可取为 94°C , 蒸汽流量为 720 kg/h , 试按冷凝要求估算列管的根数。设换热器的热损失可忽略。

解: 由附录查得常压饱和蒸汽冷凝温度为 100°C , 汽化潜热 $r = 2258 \text{ kJ/kg}$; 定性温度 $= (t_w + t_s)/2 = (94 + 100)/2 = 97^\circ\text{C}$; 97°C 下水的物性: $\rho = 960.5 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.682 \text{ W/(mK)}$, $\mu = 0.2936 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

先按滞流计算 α , 即:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.13(g \rho^2 \lambda^3 r / \mu \Delta t)^{1/4} \\ &= 1.13\{9.81 \times 960.5^2 \times 0.682^3 \times 2258 \times 1000 / [2 \times 0.2936 \times 10^{-3} \times (100 - 94)]\}^{1/4} = 7401 \text{ W/(m}^2\text{K)} \end{aligned}$$

而 $Q = r q_m = \alpha S_o \Delta t$

$$\text{即 } 2258 \times 1000 \times 720 / 3600 = 7401 \times \pi \times 0.025 \times 2 \times n \times (100 - 94) \quad \therefore n = 65 \text{ 根}$$

核算流型: $M = 720 / (3600 \times 65 \pi \times 0.025) = 0.03918 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

$$Re = 4M/\mu = 4 \times 0.03918 / 0.2936 \times 10^{-3} = 533.8 < 1800 \text{ 为滞流, 故假设正确。}$$

5-15 试求外径为 70mm , 长度为 3m 的钢管在表面温度为 227°C 时的辐射热损失。假定: (1) 该钢管处于很大的砖屋内, 砖壁面的温度为 27°C ; (2) 该钢管处于断面为 $0.3 \times 0.3\text{m}$ 的砖槽内, 若砖壁面的温度为 57°C 。

解: 钢的黑度取为 0.95 , 砖的黑度取为 0.55

(1) 属于很大的物体 2 包住物体 1 的情况, $c_{1-2} = \varepsilon_1 c_0 = 0.95 \times 5.67 = 5.387 \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$

$$S_1 = 0.07 \times 3.14 \times 3 = 0.6594 \text{ m}^2, \varphi = 1$$

$$Q = c_{1-2} \times \varphi \times S_1 \times [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] = 5.387 \times 0.6594 \times [(500/100)^4 - (300/100)^4] = 1932.4 \text{ W}$$

(2) 属于物体 2 恰好包住物体 1 的情况, $S_1=0.6594\text{m}^2$, $\varphi=1$

$$c_{1-2}=c_0/(1/\varepsilon_1+1/\varepsilon_2-1)=5.67/(1/0.55+1/0.95-1)=3.031\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$$

$$Q=c_{1-2}\times\varphi\times S_1\times[(T_1/100)^4-(T_2/100)^4]=3.031\times0.6594\times[(500/100)^4-(330/100)^4]=1012.1\text{ W}$$

5-16 两平行的大平板, 放在空气中, 相距 5 mm。一平板的黑度为 0.15, 温度为 350K; 另一平板的黑度为 0.05, 温度为 300 K。若将第一块板加涂层, 使其黑度变为 0.025, 试计算由此引起的辐射传热热流密度改变的百分率。

解: 辐射传热的热通量为:

$$q=C_{1-2}\varphi[(T_1/100)^4-(T_2/100)^4]=C_0[(T_1/100)^4-(T_2/100)^4]/(1/\varepsilon_1+1/\varepsilon_2-1)$$

$$=0.15\times0.05\times5.67\times(3.5^4-3^4)/(0.15+0.05-0.15\times0.05)=15.26\text{ W}/\text{m}^2$$

当一板黑度变为 0.025 时, 辐射热通量变为:

$$q'=0.025\times0.05\times5.67\times(3.5^4-3^4)/(0.025+0.05-0.025\times0.05)=6.637\text{ W}/\text{m}^2$$

$$\text{辐射传热量减少百分数为: } (15.26-6.63)/15.26\times100\%=56.5\%$$

5-17 试估算烤炉内向一块面包辐射传递的净热量。已知炉温为 175℃, 面包的黑度为 0.85, 表面积为 645cm², 表面温度为 100℃。估算时可认为一块面包的表面积与炉壁面积相比, 相对很小。

解: 烤炉内向一块面包辐射传递的净热量为:

$$Q_{1-2}=C_{1-2}\varphi S[(T_2/100)^4-(T_1/100)^4]$$

本题属于很大的物体 2 (炉壁) 包住物体 1 (面包) 的情况, 故: $S=S_1=645\text{cm}^2$

$$C_{1-2}=C_0\varepsilon_1=5.67\times0.85=4.8195\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4) \quad \varphi=1$$

$$Q_{1-2}=4.8195\times1\times645\times10^{-4}\{[(175+273)/100]^4-[(100+273)/100]^4\}=65.05\text{ W}$$

5-18 在果汁预热器中, 参加换热的热水进口温度为 98℃, 出口温度为 75℃。果汁的进口温度为 5℃, 出口温度为 65℃。求两种流体顺流和逆流时的平均温度差, 并将两者作比较。

解: (1) 逆流时 $\Delta t_1=t_{h1}-t_{c2}=98-65=33^\circ\text{C}$ $\Delta t_2=t_{h2}-t_{c1}=75-5=70^\circ\text{C}$

$$\therefore \Delta t_m=(\Delta t_1-\Delta t_2)/[\ln(\Delta t_1/\Delta t_2)]=(33-70)/[\ln(33/70)]=49.20^\circ\text{C}$$

(2) 顺流时 $\Delta t_1=t_{h1}-t_{c1}=98-5=93^\circ\text{C}$ $\Delta t_2=t_{h2}-t_{c2}=75-65=10^\circ\text{C}$

$$\therefore \Delta t_m=(93-10)/[\ln(\Delta t_1/\Delta t_2)]=37.22^\circ\text{C}$$

5-19 香蕉浆在管外单程管内双程的列管换热器中用热水加热, 热水在管外。香蕉浆的流量为 500kg/h, 比热容为 3.66kJ/kgK, 从进口初温 16℃加热至 75℃。热水的流量为 1000kg/h, 进口温度为 95℃。换热器的平均传热系数 $K=60\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。求换热器传热面积。

解: $\Phi=q_{mc}c_{pc}(t_{c2}-t_{c1})=500/3600\times3.66\times1000\times(75-16)=2.999\times10^4\text{ W}$

忽略热损, 则: $Q=q_{mh}c_{ph}(t_{h1}-t_{h2})$

$$\therefore t_{h2}=t_{h1}-Q/q_{mh}c_{ph}=95-2.999\times10^4/(1000\times4.187\times1000/3600)=69.21^\circ\text{C}$$

$$\text{这样 } R=(t_{h1}-t_{h2})/(t_{c2}-t_{c1})=(95-69.21)/(75-16)=0.4371$$

$$P=(t_{c2}-t_{c1})/(t_{h1}-t_{c1})=(75-16)/(95-16)=0.7468$$

从图中查得 $\varepsilon_{\Delta t}=0.72$

$$\Delta t_m'=[(t_{h1}-t_{c2})-(t_{h2}-t_{c1})]/\ln[(t_{h1}-t_{c2})/(t_{h2}-t_{c1})]=[(95-75)-(69.21-16)]/\ln[(95-75)/(69.21-16)]=33.94^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m=\varepsilon_{\Delta t}\Delta t_m'=0.72\times33.94=24.44^\circ\text{C}$$

$$S=Q/K\Delta t_m=2.999\times10^4/(60\times24.44)=20.45\text{ m}^2$$

5-20 某列管式换热器用 100℃的饱和蒸汽对液体进行加热, 将液体从 25℃加热到 60℃, 问换热器的平均传热温差是多少?

解: $\Delta t_1=100-25=75^\circ\text{C}$ $\Delta t_2=100-60=40^\circ\text{C}$

$$\Delta t_m=(75-40)/\ln(75/40)=55.68^\circ\text{C}$$

5-21 某列管式换热器的传热面积为 60m² (近似认为换热管的内外表面积相等), 用 80℃的饱和水蒸汽每小时将 60 吨的糖汁从 25℃升温到 50℃, 若糖汁的比热容 c_p 为 4.0kJ/(kg·K), 问: 换热器的总传热系数是多少? 若运行了一段时间之后, 管程壁面上产生了污垢, 使总传热系数下降为 500W/(m²·K), 问这时污垢的热阻 b/λ 的数值是多少?

解: (1) $Q=q_{mc}c_{pc}(t_{c2}-t_{c1})=60000\times4\times10^3\times(50-25)/3600=1.667\times10^6\text{ W}$

$$\Delta t_m = (50-25)/\ln[(80-25)/(80-50)] = 41.24^\circ\text{C}$$

$$K = Q/S\Delta t_m = 1.667 \times 10^6 / (60 \times 41.24) = 673.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$(2) b/\lambda = 1/K - 1/K' = 1/500 - 1/673.5 = 5.152 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

5-22 一两壳程的列管式换热器使用汽凝水对冷水加热，入口汽凝水的温度为 95°C ，出口汽凝水的温度为 50°C ，冷水在入口处的温度为 25°C ，在出口处的温度为 50°C ，求该换热器的平均传热温差。

解： $\Delta t_m = [(95-50)-(50-25)]/\ln[(95-50)/(50-25)] = 34.02^\circ\text{C}$

$$R = (t_{h1} - t_{h2}) / (t_{c2} - t_{c1}) = (95-50)/(50-25) = 1.8 \quad P = (t_{c2} - t_{c1}) / (t_{h1} - t_{c1}) = (50-25)/(95-25) = 0.357$$

$$\text{从图中查得 } \varepsilon_{\Delta} = 0.96 \quad \Delta t_m = \varepsilon_{\Delta} \Delta t_m' = 0.96 \times 34.02 = 32.66^\circ\text{C}$$

5-23 牛奶在 $\phi 32\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 的不锈钢管中流过，外面用蒸汽加热。不锈钢的热导率为 $17.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，管内牛奶的对流传热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，管外蒸汽的表面传热系数为 $8000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。试求总热阻和传热系数 K 。如管内有 0.5mm 的有机污垢层，其导热系数为 $1.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，求热阻增加的百分数。

解：以管外壁为基准，总阻力：

$$1/K_o = d_o/\alpha_i d_i + \delta d_o/\lambda d_m + 1/\alpha_o = 32/(500 \times 25) + 0.0035 \times 32/(17.5 \times 28.5) + 1/8000 = 0.00291 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$\text{总传热系数} \quad K_o = 343.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

若管内有 0.5mm 的有机垢层，则热阻为： $1/K'_o = 1/K_o + 0.0005 \times 32/(1.5 \times 25) = 0.003336 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

热阻增加的百分数为： $(0.003336 - 0.00291)/0.00291 = 14.64\%$

或 $0.0005 \times 32/(1.5 \times 25) = 0.0004267 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

$$0.0004267/0.00291 = 14.66\%$$

5-24 一列管换热器由 40 根 $\phi 25\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的管子组成。用饱和蒸汽加热糖汁，溶液在管内流动，已知蒸汽冷凝的对流传热系数为 $10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，管内糖汁的对流传热系数为 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，忽略管壁及污垢热阻，求基于外表面的传热系数。若采取措施使：(1) 冷凝对流传热系数增加 20%；(2) 管内糖汁对流传热系数增加 20%。求两种情况下总传热系数分别增加多少？

解： $1/K_o = d_o/\alpha_i d_i + 1/\alpha_o = 25/(2000 \times 20) + 1/10000 = 7.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

$$\therefore K_o = 1379 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

- (1) 当冷凝表面传热系数增加 20%，即 $\alpha_o' = 12000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，
 $K_o' = (d_o/\alpha_i d_i + 1/\alpha_o')^{-1} = [25/(2000 \times 20) + 1/12000]^{-1} = 1412 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 $(K_o' - K_o)/K_o = [(1412 - 1379)/1379] \times 100\% = 2.39\%$
- (2) 管内糖汁表面传热系数增加 20%，即 $\alpha_i' = 2400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，
 $K_o'' = (1/\alpha_i' d_i + d_o/\alpha_o)^{-1} = [25/(2400 \times 20) + 1/10000]^{-1} = 1611 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$
 $(K_o'' - K_o)/K_o = [(1611 - 1379)/1379] \times 100\% = 16.82\%$
- 由计算可知，增加阻力较大侧的 α ，能有效地提高 K_o 。

5-25 一单程列管换热器由 25 根 $\phi 19\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，长 4 m 的管子组成。温度为 120°C 的饱和蒸汽在壳侧冷凝（冷凝液为饱和液体），以加热管内的植物油，将油从 20°C 加热至 85°C ，若换热器的传热负荷为 125kW ，蒸汽冷凝对流传热系数为 $10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，油侧垢层热阻为 $0.0005 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ，管壁热阻和蒸汽侧垢层热阻可忽略，试求管内油侧对流传热系数。若将油的流速加倍，此时换热器的总传热系数为原来的 1.75 倍，油的物性不变，试求油的出口温度。

解：(1) $\Delta t_1 = 120 - 20 = 100^\circ\text{C}$

$$\Delta t_2 = 120 - 85 = 35^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = (\Delta t_1 - \Delta t_2)/\ln(\Delta t_1/\Delta t_2) = (100 - 35)/\ln(100/35) = 61.92^\circ\text{C}$$

$$S_i = 25\pi \times 0.015 \times 4 = 4.71 \text{ m}^2$$

$$K_i = Q/S_i \Delta t_m = 125000/(4.71 \times 61.92) = 428.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$1/K_i = 1/\alpha_i + d_i/\alpha_o d_o + R_{si} = 1/\alpha_i + 15/(10000 \times 19) + 0.0005 = 1/428.6$$

$$\text{解得} \quad \alpha_i = 570 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$(2) K_i' = 1.75 K_i = 1.75 \times 428.6 = 750 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}), \quad q_{mc}' = 2 q_{mc}$$

$$Q' = q_{mc}' c_{pc} (t_{c2}' - t_{c1}) = 2 q_{mc} c_{pc} (t_{c2}' - 20)$$

$$Q' = q_{mc} c_{pc} (t_{c2} - t_{c1}) = q_{mc} c_{pc} (85 - 20) = 125000 \text{ W}$$

$$q_{mc} c_{pc} = 125000/(85 - 20) = 125000/65$$

$$Q' = 2 \times 125000 \times (t_{c2}' - 20)/65 = 250000 \times (t_{c2}' - 20)/65 \quad <a>$$

$$Q' = K_i' S_i \Delta t_m'$$

$$\Delta t_m' = [(120 - 20) - (120 - t_{c2}')] / \ln[(120 - 20)/(120 - t_{c2}')] = 125000 \times (t_{c2}' - 20)/65$$

$$Q = 750 \times 4.71 \times (t_{c2}' - 20) / \ln[100 / (120 - t_{c2}')] \quad $$

联立<a>和: $\ln[100 / (120 - t_{c2}')] = 750 \times 4.71 \times 65 / 250000 = 0.91845$

$$100 / (120 - t_{c2}') = 2.5 \quad t_{c2}' = 80.1^\circ\text{C}$$

[注: 本题宜用内表面作基准]

(1) $\Delta t_m = (\Delta t_1 - \Delta t_2) / \ln(\Delta t_1 / \Delta t_2) = (100 - 35) / \ln(100 / 35) = 61.92^\circ\text{C}$

$$S_o = 25\pi \times 0.019 \times 4 = 5.97\text{m}^2$$

$$K_o = Q / S_o \Delta t_m = 125000 / (5.97 \times 61.92) = 338.4\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$1/K_o = d_o / \alpha_i d_i + 1/\alpha_o + R_{si} d_o / d_i = 19/15\alpha_i + 1/10000 + 0.0005 \times 19/15 = 1/338.4$$

解得 $\alpha_i = 570\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

(2) $K_o' = 1.75 K_i = 1.75 \times 338.4 = 592.2\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

$$Q' = 2 \times 125000 \times (t_{c2}' - 20) / 65 = 250000 \times (t_{c2}' - 20) / 65 \quad <a>$$

$$Q' = K_o' S_o \Delta t_m'$$

$$\Delta t_m' = [(120 - 20) - (120 - t_{c2}')] / \ln[(120 - 20) / (120 - t_{c2}')] \quad $$

$$Q' = 592.2 \times 5.97 \times (t_{c2}' - 20) / \ln[100 / (120 - t_{c2}')] \quad $$

联立<a>和: $\ln[100 / (120 - t_{c2}')] = 592.2 \times 5.97 \times 65 / 250000 = 0.9192$

$$100 / (120 - t_{c2}') = 2.5 \quad t_{c2}' = 80.1^\circ\text{C}$$

5-26 在一逆流套管换热器中冷、热流体进行热交换。两流体进、出口温度分别为 $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 85^\circ\text{C}$, $T_1 = 100^\circ\text{C}$, $T_2 = 70^\circ\text{C}$ 。若将冷流体流量加倍, 设总传热系数不变, 忽略热损失, 试求两流体的出口温度和传热量的变化。

解: $Q = q_{mh} c_{ph} (t_{h1} - t_{h2}) = q_{mc} c_{pc} (t_{c2} - t_{c1}) \quad <a>$

$$q_{mh} c_{ph} (t_{h1} - t_{h2}) = KS \frac{(t_{h1} - t_{c2}) - (t_{h2} - t_{c1})}{\ln \frac{(t_{h1} - t_{c2})}{(t_{h2} - t_{c1})}} = KS \frac{(t_{h1} - t_{h2}) - (t_{c2} - t_{c1})}{\ln \frac{(t_{h1} - t_{c2})}{(t_{h2} - t_{c1})}} \quad $$

将<a>代入:

$$\ln \frac{(t_{h1} - t_{c2})}{(t_{h2} - t_{c1})} = \frac{KS}{q_{mh} c_{ph}} (1 - \frac{t_{c2} - t_{c1}}{t_{h1} - t_{h2}}) = \frac{KS}{q_{mh} c_{ph}} (1 - \frac{85 - 20}{100 - 70}) \quad <c>$$

新工况下: $q_{mc}' = 2q_{mc}$

同样 $\ln \frac{t_{h1} - t_{c2}'}{t_{h2}' - t_{c1}} = \frac{KS}{q_{mh} c_{ph}} (1 - \frac{q_{mh} c_{ph}}{2q_{mc} c_{pc}}) \quad <d>$

$$q_{mh} c_{ph} / q_{mc}' c_{pc} = q_{mh} c_{ph} / 2q_{mc} c_{pc} = (85 - 20) / [2 \times (100 - 70)] = 1.083$$

由<d> / <c>: $\frac{\ln \frac{100 - t_{c2}'}{t_{h2}' - 20}}{\ln \frac{100 - 85}{70 - 20}} = \frac{1 - 1.083}{1 - 2.167}$

$$\ln \frac{100 - t_{c2}'}{t_{h2}' - 20} = 0.473 \quad (100 - t_{c2}') / (t_{h2}' - 20) = 0.9179$$

即 $t_{c2}' = 118.4 - 0.9179 t_{h2}' \quad <e>$

$$Q' = q_{mh} c_{ph} (t_{h1} - t_{h2}') = q_{mc} c_{pc} (t_{c2}' - t_{c1}) = 2q_{mc} c_{pc} (t_{c2}' - t_{c1})$$

$$\therefore t_{c2}' = t_{c1} + q_{mh} c_{ph} (t_{h1} - t_{h2}') / 2q_{mc} c_{pc} = 20 + 1.083(100 - t_{h2}') = 128.3 - 1.083 t_{h2}' \quad <f>$$

<e>代入<f>得: $t_{c2}' = 63.1^\circ\text{C}$, $t_{h2}' = 60.2^\circ\text{C}$

两种情况下传热量之比: $Q' / Q = q_{mh} c_{ph} (t_{h1} - t_{h2}') / [q_{mh} c_{ph} (t_{h1} - t_{h2})] = (100 - 60.0) / (100 - 70) = 1.33$

5-27 试求通过面包炉砖墙的热损失 q (W/m^2), 并求出内外墙面温度。已知: 墙砖厚 250mm, 热导率 $0.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 炉内烟气温度 250°C , 对流传热系数 $23\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, 炉外空气温度 30°C , 表面传热系数 $9.3\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。

解: $1/K = 1/\alpha_i + \delta/\lambda + 1/\alpha_o = 1/23 + 0.25/0.7 + 1/9.3 \quad \therefore K = 1.968\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

通过面包炉砖墙的热损失为: $q = K \Delta t_m = K(t_i - t_o) = 1.968(250 - 30) = 432.96\text{W}/\text{m}^2$

而 $q = \alpha_i(t_h - t_{hw}) = \alpha_o(t_{cw} - t)$

\therefore 内墙面温度 $t_{hw} = t_h - q/\alpha_i = 250 - 432.96/23 = 231.2^\circ\text{C}$

外墙面温度 $t_{cw} = t + q/\alpha_o = 30 + 432.96/9.3 = 76.55^\circ\text{C}$

5-28 用饱和水蒸汽将空气从 20℃ 加热至 90℃。饱和蒸汽压强为 200kPa，现空气流量增加 20%，但要求进出口温度不变，问蒸汽压强应提高至何值方能完成任务？设管壁和污垢热阻均可忽略。

解：\$K \approx \alpha\$，\$\alpha \propto u^{0.8}\$。提高流量后的情况用上标“'”表示，则：\$\alpha' = \alpha \times 1.2^{0.8} = 1.157\alpha\$

由附录查得 \$p=200\$ kPa 时饱和温度为 120.2℃。现空气流量增加 20%，若仍在原换热器中进行操作，则必须提高加热蒸汽温度(即压强)才能完成任务。

$$Q = q_{mc} c_{pc} \Delta t \quad Q' = q_{mc}' c_{pc} \Delta t = 1.2 q_{mc} c_{pc} \Delta t = 1.2 Q$$

$$\Delta t_m = [(t_h - t_{c1}) - (t_h - t_{c2})] / \ln[(t_h - t_{c1}) / (t_h - t_{c2})] = [(120.2 - 20) - (120.2 - 90)] / \ln[(120.2 - 20) / (120.2 - 90)] = 58.37^\circ\text{C}$$

$$\therefore Q = K S \Delta t_m = 58.37 \alpha S$$

$$\text{流量增大后: } Q' = 1.2 Q = K' S \Delta t_m' = 1.157 \times \alpha S \Delta t_m'$$

$$\text{则 } 1.2 \times 58.37 \alpha S = 1.157 \times \alpha S \Delta t_m'$$

$$\text{即 } \Delta t_m' = 1.2 \times 58.37 / 1.157 = 60.54^\circ\text{C}$$

$$\text{或 } \Delta t_m' = [(t_h' - t_{c1}) - (t_h' - t_{c2})] / \ln[(t_h' - t_{c1}) / (t_h' - t_{c2})] = [(t_h' - 20) - (t_h' - 90)] / \ln[(t_h' - 20) / (t_h' - 90)] = 60.54^\circ\text{C}$$

$$\text{解得 } t_h' = 122.1^\circ\text{C}$$

由附录查出，将饱和蒸汽压强提高至约为 213 kPa 即可完成任务。

5-29 水在列管式换热器的管内被加热，设 \$Re \gg 10^4\$。若忽略物性变化，试估算下列情况下对流传热系数 \$\alpha\$ 的变化：(1) 管径不变，流量加倍；(2) 管径减为原来的一半，流量不变；(3) 管径、流量均不变，管程数加倍。

解：因为 \$Re \gg 10^4\$，则 \$\alpha = 0.023 (du\rho/\mu)^{0.8} (c_p\mu/\lambda)^{0.4} \lambda / d \propto u^{0.8} / d^{0.2}\$

(1) 管径不变，流量加倍：\$u' = 2u\$

$$\alpha' / \alpha = (u' / u)^{0.8} = 2^{0.8} = 1.741$$

(2) 管径减为原来的一半，流量不变：\$d' = d/2\$，\$u' = 4u\$

$$\alpha' / \alpha = 4^{0.8} / 0.5^{0.2} = 2^{1.8} = 3.48$$

(3) 管径、流量均不变，管程数加倍：

$$u' = 2u \quad \alpha' / \alpha = (u' / u)^{0.8} = 2^{0.8} = 1.741$$

5-30 某种蔬菜叶子，厚度为 \$0.8 \times 10^{-3}\$ m，其初温为 20℃，将其泡在 90℃ 的热水中。假定浸泡一开始，叶子表面温度即为此温度。试求经 1 秒钟后，菜叶的中心面和离表面 80 \$\mu\$m 处达到什么温度。已知菜叶的热扩散率为 \$15 \times 10^{-8}\$ m\$^2\$/s。

解：此题可看成是无限大平板的不稳定传热。根据题意，“浸泡一开始叶子表面温度即为水温”，即 \$\lambda_s \ll \alpha\$。

(1) 菜叶中心处 \$y=0\$ \$m=0\$

$$Fo = \alpha \tau / R^2 = 15 \times 10^{-8} \times 1 / (0.8 \times 10^{-3} / 2)^2 = 0.9375 \quad Lo = X / R = 0$$

按以上数值查图，过余温度准数为 \$\Theta = 0.13\$

$$\text{而 } \Theta = (t - t_f) / (t_f - t_0) \quad \therefore t = t_f - \Theta(t_f - t_0) = 90 - 0.13 \times (90 - 20) = 80.9^\circ\text{C}$$

(2) 离表面 80 \$\mu\$m 处：\$m \neq 0\$

$$Fo = \alpha \tau / R^2 = 15 \times 10^{-8} \times 1 / (0.8 \times 10^{-3} / 2)^2 = 0.9375$$

$$Lo = R - X / R = 1 - 80 \times 10^{-6} / (0.4 \times 10^{-3}) = 0.8$$

按以上数值查图，过余温度准数为：\$\Theta = 0.035\$

$$\therefore t = t_f - \Theta(t_f - t_0) = 90 - 0.035 \times (90 - 20) = 87.55^\circ\text{C}$$

5-31 直径 10cm，高 6.5cm 的罐头，内装固体食品。其比热容为 3.75kJ/(kg·K)，密度 1040kg/m\$^3\$，导热系数 1.5W/(m·K)，初温为 70℃。放入 120℃ 杀菌锅内加热，蒸汽对罐头的表面传热系数为 8000W/(m\$^2\$·K)。试分别预测 30、60、90 分钟后，罐头的中心温度。

解：(1) 计算无限长圆柱体的 \$\Theta\$：

$$m = \lambda / \alpha R = 1.5 / (8000 \times 0.05) = 0.00375 \approx 0$$

$$Fo = \alpha \tau / R^2 = \lambda \tau / \rho c_p R^2 = 1.5 \times 60 \tau / (1040 \times 3.75 \times 1000 \times 0.05^2) = 0.009231 \tau$$

其中罐头壳壁热阻可以忽略不计，几何相似准数 \$Lo = X / R = 0\$

按以上数值查图可得无限长圆柱体的过余温度准数 \$\Theta\$ 为：

$$30 \text{ 分钟: } Fo = 0.2769 \quad \Theta = 0.35$$

$$60 \text{ 分钟: } Fo = 0.5532 \quad \Theta = 0.09$$

$$90 \text{ 分钟: } Fo = 0.8308 \quad \Theta = 0.0125$$

(2) 计算无限大平板:

δ 取罐头高度的一半, 即 $\delta=6.5/2=3.25\text{cm}$

$$Fo=\alpha\tau/\delta^2=\lambda\tau/\rho c_p\delta^2=1.5\times 60\tau/(1040\times 3.75\times 1000\times 0.0325^2)=0.02185\tau$$

同样 $B\neq 0$, $Lo=X/R=0$ 查图可得无限大平板的过余温度准数 Θ 为:

$$30\text{ 分钟: } Fo=0.6554 \quad \Theta=0.4$$

$$60\text{ 分钟: } Fo=1.311 \quad \Theta=0.065$$

$$90\text{ 分钟: } Fo=1.966 \quad \Theta=0.012$$

(3) 按有限圆柱体计算罐头:

$$\Theta_{\text{有限圆柱体}}=\Theta_{\text{无限圆柱体}}\times\Theta_{\text{无限平板}} \quad t=t_f-\Theta(t_f-t)$$

$$30\text{ 分钟: } \Theta=0.35\times 0.4=0.14 \quad t=120-0.14(120-70)=113^\circ\text{C}$$

$$60\text{ 分钟: } \Theta=0.09\times 0.065=0.00585 \quad t=120-0.00585(120-70)=119.7^\circ\text{C}$$

$$90\text{ 分钟: } \Theta=0.0125\times 0.012=0.00015 \quad t=120-0.00015(120-70)=120.0^\circ\text{C}$$

5-32 直径 6mm 的豌豆, 其初温为 10°C 。在常压下, 快速投入蒸汽中, 假定表面温度瞬时即达蒸汽温度。问中心温度达到 90°C 时需要多少时间? 豌豆的热扩散率约等于水, 平均值为 $0.16\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

解: 此题可看成是圆球的不稳定传热, $m=0$

$$Fo=\alpha\tau/R^2=0.16\times 10^{-6}\tau/0.003^2=0.01778\tau \quad Lo=X/R=0$$

$$\Theta=(t_f-t)/(t_f-t_0)=(100-90)/(100-10)=0.1111$$

按以上数值查图得: $Fo=0.25$

$$\therefore \text{中心温度达到 } 90^\circ\text{C} \text{ 需时间为: } \tau=0.25/0.01778=14.06\text{s}$$

5-33 某间歇式加热釜内被液体质量为 1500kg , 定压比热容 c_p 为 $3.6\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 加热釜内的传热面积为 2m^2 , 液体的初温为 20°C , 要求加热到终温为 80°C 。用于加热的饱和蒸汽温度为 110°C , 釜内设有搅拌器。若换热器的总传热系数 K 为 $1300\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (视为常数), 求所需加热的时间。

解: 由热量衡算: $K\mathcal{A}(t_s-t_c)d\tau=mc_pdt_c$

$$\int_{t_{c1}}^{t_{c2}} \frac{dt_c}{t_s-t_c} = \int_0^\tau \frac{SK}{mc_p} d\tau \quad \text{积分得} \quad \ln(t_s-t_{c1})-\ln(t_s-t_{c2})=KS\tau/mc_p$$

$$\tau=mc_p[\ln(t_s-t_{c1})-\ln(t_s-t_{c2})]/KS=1500\times 3.6\times 10^3\times (\ln 90-\ln 30)/(1300\times 2)=2281\text{s}$$

5-34 带有搅拌器的牛奶加热槽内有 20°C 的牛奶 200kg , 槽内有传热面积 0.5m^2 的蛇管。今以 120°C 的蒸汽通入蛇管进行加热, 试求牛奶的升温规律 (即温度随时间的变化关系)。假定传热系数为 $460\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

解: 由热量衡算: $K\mathcal{A}(t_s-t_c)d\tau=mc_pdt_c$

$$\int_{t_{c0}}^{t_c} \frac{dt_c}{t_s-t_c} = \int_0^\tau \frac{SK}{mc_p} d\tau \quad \text{积分得} \quad \ln(t_s-t_{c0})-\ln(t_s-t_c)=KS\tau/mc_p$$

由附录查得牛奶的比热容为: $c_p=4\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$$\therefore \ln(120-t)=\ln(120-20)-460\times 0.5\tau/(200\times 4000)$$

$$\text{牛奶的升温规律} \quad t=120-100\exp(-0.0002875\tau)$$

第六章

6-1 试估算固形物含量为 30% 的番茄酱在常压和 720mmHg 真空度下蒸发时的沸点升高, 番茄酱的沸点升高数据可参考糖溶液, 忽略静压引起的沸点升高, 大气压强取 760mmHg 。

解: 绝压 $=760-720=40\text{mmHg}=5333\text{Pa}$

在 5.3kPa 下水沸点为 $33.4^\circ\text{C}\rightarrow 306.6\text{K}$, 潜热 2416.1kJ/kg

$$\text{查糖液性质} \quad \Delta'_0=0.6^\circ\text{C} \quad \therefore \Delta'=0.0162\times 0.6\times 306.6^2/2416.1=0.4^\circ\text{C}$$

6-2 上题中若加热管长度为 4m , 则沸点升高又为多少? 计算时番茄酱的密度可近似取为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

解: $p_m=p_0+\rho gh/2=5333+1000\times 9.81\times 4/2=24953\text{Pa}$ 在 25kPa 下, 水沸点为 63.3°C

$$\therefore \Delta''=63.3-33.4=29.9^\circ\text{C} \quad \Delta=\Delta'+\Delta''=30.3^\circ\text{C}$$

6-3 在单效真空蒸发器内，每小时将 1500kg 牛奶从浓度 15% 浓缩到 50%。已知进料的平均比热容为 3.90kJ/(kg·K)，温度 80℃，加热蒸汽表压为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，出料温度 60℃，蒸发器传热系数为 1160W/(m²·K)，热损失可取为 5%。试求：(1) 水分蒸发量和成品量；(2) 加热蒸汽消耗量；(3) 蒸发器传热面积。

解：(1) $W = F(1 - w_0/w_1) = 1500(1 - 15/50) = 1050 \text{ kg/h}$

产品量为： $F - W = 1500 - 1050 = 450 \text{ kg/h}$

(2) $D = 1.05 \times [F c_{p0}(t_1 - t_0) + W r'] / r = 1.05 \times [1500 \times 3.9 \times (60 - 80) + 1050 \times 2355.1] / 2204.6 = 1122 \text{ kg/h}$

此处 r' 按 60℃ 查， r 按 200kPa 绝压查，且知 $T = 120.2^\circ \text{C}$

(3) $S = Q / K \Delta t = D r / K \Delta t = 1122 \times 2204.6 \times 10^3 / [3600 \times 1160 \times (120.2 - 60)] = 9.84 \text{ m}^2$

6-4 在某次试验研究中，桃浆以 65kg/h 的流量进入连续真空蒸发器内进行浓缩，进料温度为 16℃，固溶物含量为 10.9%，产品排出温度为 40℃，固溶物含量为 40%，二次蒸汽在间壁式冷凝器中冷凝，离开冷凝器的汽凝水温度为 38℃。试求：(1) 产品和凝结水的流量；(2) 采用 121℃ 蒸汽供热时的蒸汽消耗量（热损失不计）；(3) 若冷却水进冷凝水时温度为 21℃，离开时为 29.5℃，求其流量。桃浆进料比热容可取为 3.9kJ/(kg·K)，冷却水比热容可取为 4.187kJ/(kg·K)。

解：(1) $W = F(1 - w_0/w_1) = 65(1 - 10.9/40) = 47.3 \text{ kg/h} \rightarrow$ 汽凝水量

产品量 $= F - W = 17.7 \text{ kg/h}$

(2) $r = 2202.5 \text{ kJ/kg}$, $r' = 2401.1 \text{ kJ/kg}$

$D = [F c_{pm}(t_1 - t_n) + W r'] / r = [65 \times 3.9(40 - 16) + 47.3 \times 2401.1] / 2202.5 = 54.3 \text{ kg/h}$

(3) $q_{mw} = [W r' + W c_{pw}(t_1' - t_1)] / [c_{pw}(t_4' - t_3')] = [47.3 \times (2401.1 + 4.187 \times 2)] / [4.187 \times (29.5 - 21)] = 3202 \text{ kg/h}$

6-5 用某真空蒸发器浓缩含大量蛋白质的食品溶液，当加热管子表面洁净时，传热系数为 1400W/(m²·K)，当操作一段时间后，形成了厚 0.5mm 的垢层，问蒸发器的生产能力将发生什么变化？污垢的导热系数可取为 0.2W/(m·K)。

解： $1/K' = 1/K + \delta_r/r = 1/1400 + 0.5 \times 10^{-3} / 0.2 = 3.21 \times 10^{-3}$

$K' = 311 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ $Q'/Q = K'/K = 22\%$ ，即生产能力降为原来的 22%

6-6 对某糖类真空蒸发器的传热系数进行实际测定，蒸发器内料液浓度为 50%，密度 1220kg/m³，加热蒸汽的压强为 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，分离室内真空度 600mmHg，大气压强可取为 760mmHg，蒸发器内液层深度为 2.8m，沸点进料，经 3 小时试验后得蒸发的水分量为 $2.7 \times 10^4 \text{ kg}$ 。已知蒸发器传热面积为 100m²，假定热损失为总传热量的 2%，试求传热系数。

解： $W = 2.7 \times 10^4 / 3 = 9000 \text{ kg/h} = 2.5 \text{ kg/s}$

分离室内压强 $760 - 600 = 160 \text{ mmHg} \rightarrow 21331 \text{ Pa} \rightarrow 61^\circ \text{C}$, $r' = 2352.1 \text{ kJ/kg}$

加热蒸汽 200 kPa $\rightarrow T = 120.2^\circ \text{C}$, $r = 2204.6 \text{ kJ/kg}$

$D = W r' \times 1.02 / r = 2.5 \times 2352.1 \times 1.02 / 2204.6 = 2.72 \text{ kg/s}$

$Q = D r = 5997 \text{ kW}$ 50% 糖液, $\Delta_0' = 1.8^\circ \text{C}$,

$\Delta' = 0.0162(61 + 273)^2 \times 1.8 / 2352.1 = 1.38^\circ \text{C}$

$p_m = 21331 + 1220 \times 9.81 \times 2.8 / 2 = 38088 \text{ Pa} \rightarrow 73.39^\circ \text{C}$ $t = 1.38 + 73.39 = 74.8^\circ \text{C}$

$K = Q / (S \Delta t) = 5997 \times 10^3 / [100(120.2 - 74.8)] = 1321 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

6-7 在双效顺流蒸发器中浓缩脱脂牛奶。进奶固体含量为 10%，温度为 55℃，第一效中沸点为 77℃，第二效中沸点为 68.5℃，末效排出浓奶的固体含量为 30%，假设固形物的比热容为 2 kJ/(kg·K)，试近似估算离开第一效牛奶的固体含量。（提示：以 100kg 进料为基准，作第二效的热量衡算）。沸点升高可忽略。

解：以 100kg 进料为基准，可写出：

$W_1 = F(1 - w_0/w_1) = 100(1 - w_0/w_1)$

$W_2 = (F - W_1)(1 - w_1/w_2) = (100 - W_1)(1 - w_1/30)$

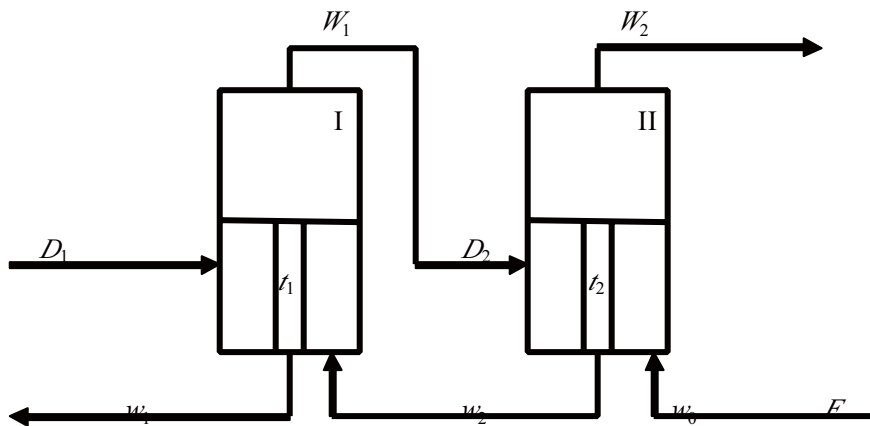
$c_{p1} = c_{ps} w_1 + (1 - w_1) c_{pw} = 2 w_1 + 4.187(1 - w_1)$ $D_2 = W_1$

$D_2 = [(F - W_1) c_{p1}(t_2 - t_1) + W_2 r_2'] / r' = [(100 - W_1) c_{p1}(68.5 - 77) + W_2 \times 2334.9] / 2314.8$

用试差法解得 $w_1 = 14.94\%$, $W_1 = D_2 = 33.0$, $W_2 = 33.6$, $c_{p1} = 3.86 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$

6-8 如上题，所有条件均相同，唯采用逆流操作，且第一效加热蒸汽温度 100°C 。求由末效流入第一效料液中的固体含量。

解：



物料平衡：一效 $Fw_0 = (F - W_2)w_1$

二效 $(F - W_2)w_1 = (F - W_1 - W_2)w_2$

比热容： $c_{p0} = c_{ps}w_0 + (1 - w_0)c_{pw} = 2 \times 0.1 + 0.9 \times 4.187 = 3.97 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$c_{p2} = 2 \times 0.3 + 0.7 \times 4.187 = 3.53 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$c_{p1} = 2w_1 + 4.187(1 - w_1)$

热量衡算： $D_1 = [(q_F - W_1 - W_2)c_{p2}t_1 + W_1r_1' - (F - W_2)c_{p1}t_2]/r_1$

$D_2 = W_1 = [(q_{mF} - q_{mw2})c_{p1}t_2 + W_2r_2' - Fc_{p0}t_0]/r_1'$

由此得方程组： $W_2 = 100(1 - 0.1/w_1)$

$W_1 = (100 - W_2)(1 - w_1/0.3)$

$c_{p1} = 2w_1 + 4.187(1 - w_1)$

$D_1 = [(100 - W_1 - W_2) \times 3.53 \times 77 + 2314.8W_1 - 68.5c_{p1}(100 - W_2)]/2258.4$

$D_2 = W_1 = [(100 - W_2) \times c_{p1} \times 68.5 + 2334.9W_2 - 100 \times 3.97 \times 55]/2314.8$

试差解得： $w_1 = 15.18\%$ ， $c_{p1} = 3.855 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $W_1 = 32.5 \text{ kg}$ ， $W_2 = 34.1 \text{ kg}$ ， $D_1 = 29.44 \text{ kg}$

6-9 用双效顺流蒸发某热敏食品，加热蒸汽温度为 110°C ，冷凝器的冷凝温度为 40°C ，一切温差损失均忽略不计，且规定料液最高允许温度为 65°C ，假定两效的传热系数相等，试估算两效传热面积之比（可设等蒸发量分布及 1 kg 蒸汽蒸发 1 kg 水）。

解： 由等蒸发量可得： $W_1 = W_2$

$\because 1 \text{ kg}$ 汽蒸 1 kg 水， $\therefore D_1 = D_2$ $Q_1 \approx Q_2$

而 $Q_1 = K_1 S_1 (T_1 - t_1)$ $Q_2 = K_2 S_2 (t_1 - t_2)$

二式相除， $K_1 = K_2$

$\therefore S_1/S_2 = (t_1 - t_2)/(T_1 - t_1) = (65 - 40)/(110 - 65) = 0.556$

或 $S_2/S_1 = 1.8$

6-10 同上题，若用等面积原则设计两效设备，试问是否合理？又如果第二效采取改善循环的措施，提高了传热系数，使它为第一效传热系数的2倍，问等面积设计原则是否合理？

解： 上题若用等面积分析，则必有： $K_1 S_1 (T_1 - t_1)/[K_2 S_2 (t_1 - t_2)] = (T_1 - t_1)/(t_1 - t_2) = \phi$

即： $(110 - t_1)/(t_1 - 40) = 1$ $t_1 = 75^{\circ}\text{C}$ ，不合理（因 t_1 不高于 65°C ）

而当 $K_2 = 2K_1$ 时，有 $(110 - t_1)/[2(t_1 - 40)] = 1$ $t_1 = 63.3^{\circ}\text{C}$ ，可以。

6-11 在双效顺流蒸发器内蒸发 1 t/h ，浓度为 10% 的某溶液，溶液浓度在第一效内为 15% ，在第二效内为 30% 。第一效内沸点为 108°C ，第二效内沸点为 75°C ，第二效二次蒸汽的绝对压强为 30 kPa ，设 15% 溶液的比热容为 $3.559 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，问料液由第一效进入第二效时自蒸发的水分量是多少？此水分量占总水分蒸发量的百分之几？

解： $W = F(1 - w_0/w_2) = 1000(1 - 10/30) = 2000/3 \text{ kg/h}$

$W_1 = F(1 - w_0/w_1) = 1000(1 - 10/15) = 1000/3 \text{ kg/h}$

由第一效进入第二效的料液量为： $F - W_1 = 1000 - 1000/3 = 2000/3 \text{ kg/h}$

第二效二次蒸汽潜热， $r_2' = 2333.7 \text{ kJ/kg}$

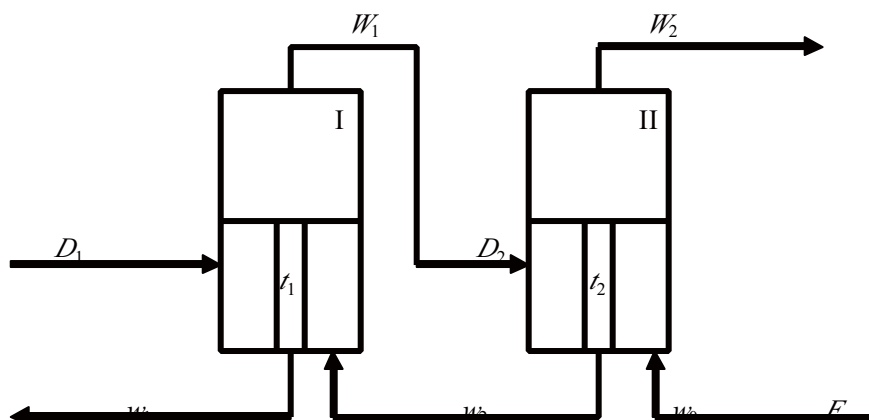
$$\therefore W' = (2000/3) \times 3.559 \times (108-75)/2333.7 = 33.55 \text{ kg/h}$$

$$W/W' = 33.55/(2000/3) = 0.05 = 5\%$$

6-12 试设计计算一双效逆流蒸发器以浓缩番茄汁，要求浓度从4.20%浓缩到28%，原料被预热至最高温60℃后进料。原料处理量为每天100吨（每天按20小时计），所用的加热蒸汽压强为120kPa（绝对），冷凝器的真空度选用700mmHg，第一效用强制循环，传热系数为1800W/(m²·K)，第二效用自然循环，传热系数为900W/(m²·K)，试计算蒸发量、加热蒸汽消耗量和传热面积。（忽略温差损失，比热容中可忽略固体比热容）

解： $W = F(1-w_0/w_1) = (100 \times 10^3/20)(1-4.25/28) = 4241 \text{ kg/h}$

由题意 $t_1 = 60^\circ\text{C} = t_{h1}'$ $t_2 = t_{h2}' = 41.3^\circ\text{C}$
 其中，由 $p_2 = 60 \times 133.2 = 8000 \text{ Pa}$ $\rightarrow t_2 = 41.3^\circ\text{C}$, $r_2' = 2398.2 \text{ kJ/kg}$
 由 $p_1 = 120 \text{ kPa}$, $t_{h1} = 104.5^\circ\text{C}$, $r_1 = 2246.8 \text{ kJ/kg}$
 $t_1 = 60^\circ\text{C}$, $r_1' = r_2 = 2355.1 \text{ kJ/kg}$ $c_{p0} = 4.187(1-0.0425) = 4.01 \text{ kJ/(kg·K)}$



$$c_{p1} = 4.187(1-0.28) = 3.015 \text{ kJ/kg·K} \quad c_{p2} = 4.187(1-w_2) \quad (\text{a})$$

作热衡算， $D_1 r_1 = (F - W) c_{p1} t_1 + W_1 r_1' - (F - W_2) c_{p2} t_2$
 $2246.8 D_1 = (5000 - 4241) \times 3.015 \times 60 + 2355.1 W_1 - (5000 - W_2) \times 41.3 \times 4.187(1 - w_2)$ (b)

$$F c_{p0} t_n + W_1 r_1' = (F - W_1) c_{p2} t_2 + W_2 r_2'$$

$$5000 \times 4.01 \times 60 + 21246.8 W_1 = (5000 - W_1) \times 41.3 \times (1 - w_2) + 2398.2 W_2 \quad (\text{c})$$

$$W_2 = F(1 - w_0/w_2) = 5000(1 - 0.0425/w_2) \quad (\text{d})$$

用试差法解得： $W_1 = 1953 \text{ kg/h}$, $W_2 = 2288 \text{ kg/h}$, $D_1 = 2283 \text{ kg/h}$, $w_2 = 0.0784$

故 $S_1 = 2283 \times 2246.8 \times 10^3 / [3600 \times 1800 \times (104.5 - 60)] = 17.8 \text{ m}^2$

$$S_2 = 1953 \times 2355.1 \times 10^3 / 3600 \times 900 \times (60 - 41.3) = 76 \text{ m}^2$$

6-13 某厂拟采用三效蒸发将浓度为6%的番茄汁浓缩到30%，处理的稀量番茄汁为每小时10吨，第一效的二次蒸汽抽用量为每小时1吨，第二效的二次蒸汽抽用量为每小时0.8吨，第三效的二次蒸汽全部进入冷凝器。设每kg蒸汽可蒸发1kg水。问：（1）蒸发系统每小时总蒸发水量是多少？

（2）消耗的蒸汽量是多少？（2）若第一、二效的二次蒸汽抽用量均每小时增加0.2吨，所消耗的蒸汽量增加多少？

解：（1） $W = F(1 - w_0/w_3) = 10000 \times (1 - 6/30) = 8000 \text{ kg/h}$

$$(2) \quad D_1 = W_1 \quad D_2 = W_2 = W_1 - E_1 \quad D_3 = W_3 = D_2 - E_2 = W_1 - E_1 - E_2$$

$$W_1 + W_2 + W_3 = W = 3 W_1 - 2 E_1 - E_2$$

$$W_1 = D_1 = (W + 2 E_1 + E_2) / 3 = (8000 + 2 \times 1000 + 800) / 3 = 3600 \text{ kg/h}$$

$$(3) \quad D_1' = (8000 + 2 \times 1200 + 1000) / 3 = 3800 \text{ kg/h}$$

6-14 某糖厂采用四效蒸发将干固体浓度为16%的清糖汁浓缩，1200m²，700m²，700m²。第一效蒸发器的加热蒸汽温度为132℃，第一效蒸发器的二次蒸汽温度为120℃。第一效的沸点升高为3℃。各效蒸发器二次蒸汽被抽用的数量为 $E_1 = 14400 \text{ kg/h}$, $E_2 = 19500 \text{ kg/h}$, $E_3 = 4000 \text{ kg/h}$ 。设每kg蒸汽可蒸发1kg水。问：（1）蒸发系统的耗汽量是多少？（2）各效的蒸发水量是多少？（3）第一效的总传热系数是多少？

解：(1) $W=F(1-w_0/w_4)=120000\times(1-16/60)=88000\text{kg/h}$
 $D_1=(W+3E_1+2E_2+E_3)/4=(88000+3\times14400+2\times19500+4000)/4=43550\text{kg/h}$
(2) $W_1=D_1=43550\text{kg/h}$ $W_2=W_1-E_1=29150\text{kg/h}$
 $W_3=W_2-E_2=9650\text{kg/h}$ $W_4=W_3-E_3=5650\text{kg/h}$
(3) $T_1=132^\circ\text{C}$ $t_1=123^\circ\text{C}$
 $r_1=2171.9\text{kJ/kg}$ $\Delta t_1=132-123=9^\circ\text{C}$
 $K_1=Q_1/S_1\Delta t_1=43550\times2171.9\times10^3/(3600\times1000\times9)=2919\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

6-15 乳糖溶液经浓缩至浓度为80 kg/100kgH₂O后进入结晶罐，结晶罐内可装1000kg浓缩液，料液经冷却后温度从57.2℃降至10℃，一个结晶乳糖分子带有一个结晶水，相对分子质量为360.3，溶液的平均比热容为3.48kJ/(kg·K)，溶解热为10.5kJ/mol，假定热损失为12500kJ。试计算：(1) 结晶度（无水的及水合的）；(2) 冷却过程除去的热量。（10℃下乳糖的溶解度为15kg/100kgH₂O）

解：(1) $m_F=1000\text{kg}$, $w_F=80/180=0.444$, $m_w=0$,
 $w_G=1$, $w_H=15/115=0.13$
 $m_G=m_F(w_F-w_M)/(w_G-w_M)=1000\times(0.444-0.13)/(1-0.13)=361\text{kg}$
水合物 $w_G'=342/360.3=0.949$
 $m_G'=m_F(w_F-w_M)/(w_G'-w_M)=1000(0.444-0.13)/(0.949-0.13)=383.4\text{kg}$
(2) $m_F=1000\text{ kg}$, $m_G=3.48\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 $t_1=57.2^\circ\text{C}$, $t_2=10^\circ\text{C}$, $m_G'=383.4\text{ kg}$
 $r_c'=10.5\times10^3/360.3=29\text{ kJ/kg}$ $Q_c=12500\text{kJ}$
 $m_F c_{pF} t_1 + r_c = (m_F - m_F') c_{pF} t_2 + Q_c$
 $Q = m_F c_p (t_1 - t_2) + m_G' r_G + m_G' c_{pF} t_2 - Q_c$
 $=1000\times3.48\times(57.2-10)+383.4\times29+383.4\times3.48\times10-12500=1.762\times10^5\text{kJ}$

6-16 如上题，若结晶过程是在连续结晶槽内进行，每小时处理700kg的浓缩乳糖液，设结晶器的传热系数为420W/(m²·K)，操作系逆流，冷却水进口温度为2℃，出口温度为5℃，试求冷却面积。

解： $Q=1.762\times10^5\times700\times10^3/(1000\times3600)=34261\text{W}$
 $\Delta t_1=57.2-5=52.2^\circ\text{C}$ $\Delta t_2=10-2=8^\circ\text{C}$
 $\Delta t_m=52.2-8/\ln(52.2/8)=23.57^\circ\text{C}$
 $S'=Q/KS\Delta t_m=34261/420\times23.57=3.5\text{m}$

第七章

7-1 乙醇水溶液中含乙醇的质量分数为 30%，计算以摩尔分数表示的浓度。又空气中氮的体积分数为 79%，氧为 21%，计算以质量分数表示的氧气浓度以及空气的平均相对分子质量。

解： $x = (30/46)/(30/46+70/18) = 0.1436$ $\mu = 21 \times 32 / (21 \times 32 + 79 \times 28) = 0.233$
 $M_{\text{空}} = 0.21 \times 32 + 0.79 \times 28 = 28.84$

7-2 有一 O_2 (A) 和 CO_2 (B) 的混合物，温度为 293K，压强为 $1.519 \times 10^5 \text{Pa}$ 。已知 $x_A = 0.4$ ， $u_A = 0.08 \text{m/s}$ ， $u_B = 0.02 \text{m/s}$ 。试计算：(1) 混合物的平均摩尔质量；(2) 混合物、组分 A 和组分 B 的质量浓度 ρ ， ρ_A ， ρ_B ；(3) c ， c_A ， c_B ；(4) w_A ， w_B ；(5) $u_A - u$ ， $u_B - u$ ；(6) $u_A - u_m$ ， $u_B - u_m$ ；(7) N_A ， N_B ， N ；(8) n_A ， n_B ， n ；(9) j_B ， J_B 。

解：(1) $M = 0.4 \times 32 + 0.6 \times 44 = 39.2 \text{kg/kmol}$
(2) 取 100kmol 混合物，其中含 A40kmol，含 B60kmol。
 $V = 100 \times 10^3 \times 8.314 \times 293 / (1.519 \times 10^5) = 1604 \text{m}^3$
 $\rho_A = 40 \times 32 / 1604 = 0.798 \text{kg/m}^3$ $\rho_B = 60 \times 44 / 1604 = 1.646 \text{kg/m}^3$
 $\rho = \rho_A + \rho_B = 0.798 + 1.646 = 2.444 \text{kg/m}^3$
(3) $c_A = \rho_A / M_A = 0.798 / 32 = 0.0249 \text{kmol/m}^3$ $c_B = \rho_B / M_B = 1.646 / 44 = 0.0374 \text{kmol/m}^3$
 $c = c_A + c_B = 0.0249 + 0.0374 = 0.0623 \text{kmol/m}^3$
(4) $w_A = 0.4 \times 32 / (0.4 \times 32 + 0.6 \times 44) = 0.3265$ $w_B = 1 - w_A = 0.6735$
(5) $u = (\rho_A u_A + \rho_B u_B) / \rho = (0.798 \times 0.08 + 1.646 \times 0.02) / 2.444 = 0.0396 \text{m/s}$
 $u_A - u = 0.08 - 0.0396 = 0.0404 \text{m/s}$ $u_B - u = 0.02 - 0.0404 = -0.0204 \text{m/s}$
(6) $u_m = (c_A u_A + c_B u_B) / c = (0.0249 \times 0.08 + 0.0374 \times 0.02) / 0.0623 = 0.0439 \text{m/s}$
 $u_A - u_m = 0.08 - 0.0439 = 0.0361 \text{m/s}$ $u_B - u_m = 0.02 - 0.0439 = -0.0239 \text{m/s}$
(7) $N_A = c_A u_A = 0.0249 \times 0.08 = 1.992 \times 10^{-3} \text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 $N_B = c_B u_B = 0.0374 \times 0.02 = 7.48 \times 10^{-4} \text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 $N = N_A + N_B = 1.992 \times 10^{-3} + 7.48 \times 10^{-4} = 2.74 \times 10^{-3} \text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s)}$
(8) $n_A = \rho_A u_A = 0.798 \times 0.08 = 0.06384 \text{kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 $n_B = \rho_B u_B = 1.646 \times 0.02 = 0.03292 \text{kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 $n = n_A + n_B = 0.06384 + 0.03292 = 0.09676 \text{kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$
(9) $j_B = \rho_B (u_B - u) = 1.646 \times (-0.0204) = -0.0336 \text{kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 $J_B = c_B (u_B - u_m) = 0.0374 \times (-0.0239) = -8.94 \times 10^{-4} \text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s)}$

7-3 一浅盘内有 4mm 厚的水，在 30℃ 气温下逐渐蒸发至大气中。设扩散通过一层厚 5mm 的静止空气膜层进行。在膜层外水蒸汽的分压可视为零。扩散系数为 $2.73 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ，大气压强为 101.3kPa，求蒸干水层所需时间。

解： $p_{A1} = 4.247 \text{kPa}$ $p_{A2} = 0$
 $N_A = D p_T (p_{A1} - p_{A2}) / RT z p_{Bm} = (D p_T / RT z) \ln(p_{B2} / p_{B1})$
 $= [2.73 \times 10^{-5} \times 101.3 / (8.314 \times 303 \times 0.005)] \ln[101.3 / (101.3 - 4.247)] = 9.404 \times 10^{-6} \text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 $d\delta/d\tau = N_A M_A / \rho_L = 9.404 \times 10^{-6} \times 18 / 995.7 = 1.700 \times 10^{-7} \text{m/s}$
 $\tau = \delta / (d\delta/d\tau) = 0.004 / (1.698 \times 10^{-7}) = 2.353 \times 10^4 \text{s} = 6.536 \text{h}$

7-4 一盘内有 30℃ 的水，通过一层静止空气膜层逐渐蒸发至大气中。空气中的水蒸气分压为 30℃ 水的饱和蒸气压的 60%，水蒸气在空气中的扩散系数为 $2.73 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ，大气压强为 100kPa。如果盘中的水每小时减少 1.4mm，求：(1) 气相传质系数 k_G ；(2) 气膜的有效厚度。

解：(1) $p_{A1} = 4.247 \text{kPa}$ $p_{A2} = 4.247 \times 0.6 = 2.548 \text{kPa}$
 $p_{B1} = 100 - 4.247 = 95.753 \text{kPa}$ $p_{B2} = 100 - 2.548 = 97.452 \text{kPa}$
 $p_{Bm} = (97.452 - 95.753) / \ln(97.452 / 95.753) = 96.6 \text{kPa}$
 $N_A = \rho_L (d\delta/d\tau) / M_A = 995.7 \times (0.0014 / 3600) / 18 = 2.151 \times 10^{-5} \text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s)}$
 $k_G = N_A / (p_{A1} - p_{A2}) = 2.151 \times 10^{-5} / (4.247 - 2.548) = 3.655 \times 10^{-5} \text{kmol/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa)}$
(2) $z = D p_T (p_{A1} - p_{A2}) / RT N_A p_{Bm} = 2.73 \times 10^{-5} \times 100 \times (4.247 - 2.548) / (8.314 \times 303 \times 2.151 \times 10^{-5} \times 96.6)$
 $= 8.861 \times 10^{-4} \text{m}$

7-5 一充分润湿的球形颗粒在空气中被干燥，颗粒半径 r_s 保持不变，气化的水通过一厚度为 d 的空气层进行分子扩散。因空气中蒸气的浓度很低，可忽略漂流因子的影响。空气主体中水蒸气的浓度

为 c_{A1} (分压为 p_{A1})，颗粒表面水蒸气的浓度为 c_{A2} (分压为 p_{A2})，水蒸气在空气中的扩散系数为 D 。若将此干燥过程看作稳定过程，求其传质速率。

解：球面上的一维扩散

$$G_A = 4\pi r^2 D \frac{dc_A}{dr} \quad \text{即} \quad G_A dr/r^2 = -4\pi D dc_A$$

$$\text{令 } R=r_s+\delta, \text{ 则} \quad G_A \int_{r_s}^R \frac{dr}{r^2} = -4\pi D \int_{c_{A1}}^{c_{A2}} dc_A \quad G_A(1/R-1/r_s) = -4\pi D(c_{A2}-c_{A1})$$

$$G_A = 4\pi R r_s D (c_{A1} - c_{A2}) / \delta$$

7-6 上题中若空气层的厚度不确定，但其值必大于某最小值。(1) 求传质速率的最小值；(2) 若将传质速率写成 $G_A = k_c F_s (c_{A1} - c_{A2})$ ，其中 F_s 为球的外表面积，求此时的传质系数 k_c ；(3) 求此时的 Sh 值。

解：(1) 上题已得 $G_A(1/R-1/r_s) = -4\pi D(c_{A2}-c_{A1})$

当 R 趋于无穷时， G_A 最小。故

$$G_{Amin} = 4\pi D r_s (c_{A1} - c_{A2})$$

(2) 与 $G_A = 4\pi r_s^2 k_c (c_{A1} - c_{A2})$ 对照得

$$k_c = D/r_s$$

(3) $Sh = k_c d_s / D = 2k_c r_s / D = 2$

7-7 萘在 293K 下的蒸气压为 0.155mmHg，萘的相对分子质量为 128，密度为 1152kg/m³。今有一直径为 10mm 的球形萘粒，在 293K 的常压空气中挥发。由于挥发速率很慢，可以假设萘是通过静止空气层扩散，即在无穷远处萘的浓度为零。(1) 求萘的扩散通量表达式；(2) 若在 6 天内小球的直径减小了 1/10，求萘在空气中的扩散系数。

解：(1) 在球外空气中任意取半径为 r 的球面，其扩散量为： $-4\pi r^2 D \frac{dc}{dr}$

小球表面的挥发量为： $4\pi R^2 N_A$

因挥发速度很慢，可作拟稳态处理，即： $4\pi R^2 N_A = -4\pi r^2 D \frac{dc}{dr}$

$$\text{积分：} \quad N_A R^2 \int_R^\infty \frac{dr}{r^2} = -D \int_{c_0}^0 dc \quad \text{得：} \quad N_A = D c_0 / R$$

(2) 设某时刻小球半径为 r ，则此时萘的挥发速率为： $D c_0 / r$

$$\text{在微元时间内对萘作物料衡算得：} \quad \frac{D c_0 (4\pi r^2) M}{r} d\tau = -4\pi r^2 dr$$

$$\text{积分得：} \quad D = \frac{\rho}{\pi c_0 M} \times \frac{R_1^2 - R_2^2}{2}$$

$$\text{表面浓度：} \quad c_0 = \frac{1}{22.4} \times \frac{273}{293} \times \frac{0.155 \times 133.3}{1.013 \times 10^5} = 8.484 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3$$

$$D = \frac{\rho}{\pi c_0 M} \times \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} = \frac{1152}{6 \times 24 \times 3600 \times 8.484 \times 10^{-6} \times 128} \times \frac{0.005^2 - 0.0045^2}{2} = 4.86 \text{ m}^2/\text{s}$$

7-8 30℃ 的空气以 10m/s 的速度从壁温为 120℃、管径为 30mm 的管道内流过后温度升到 70℃。试用雷诺类比估算其单位长度的压降。

解：定性温度为 50℃，查得空气性质为： $\rho = 1.093 \text{ kg/m}^3$ ， $c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $\lambda = 0.02824 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ， $\mu = 1.96 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ， $Pr = 0.697$ 。

$$q = \rho u c_p (t_{c2} - t_{c1}) = 1.093 \times 10 \times 1.005 \times 10^3 \times (70 - 30) = 4.394 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

$$\text{又} \quad q = \alpha (t_w - t_m) \quad \alpha = q / (t_w - t_m) = 4.394 \times 10^5 / (120 - 50) = 6277 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$Nu = \alpha d / \lambda = 6277 \times 0.03 / 0.0289 = 6516 \quad Re = \rho u d / \mu = 0.03 \times 10 \times 1.093 / (1.96 \times 10^{-5}) = 16729$$

$$St = Nu / (Re Pr) = 6516 / (16729 \times 0.697) = 0.559 = f / 2 \quad f = 0.559 \times 2 = 1.118$$

$$\Delta p / l = \rho \times (f / 4) \times u^2 / 2d = 1.093 \times 4 \times 1.118 \times 10^2 / (2 \times 0.03) = 8143 \text{ Pa/m}$$

7-9 应用几种类比式分别计算空气、水及油三种流体在光滑圆管内流动且 $Re = 10^5$ 时 Nu 的值，并与用常用关联式的计算结果比较。流体温度为 38℃，管壁温度为 66℃，常压，物性数据如下表，其中未指明温度者系在 38℃ 下的值。

流体	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$c_p / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$	$\mu_{38} / \text{mPa} \cdot \text{s}$	$\mu_{66} / \text{mPa} \cdot \text{s}$
空气	0.027	1.05	1.14	0.018	0.0195
水	0.63	4.19	993	0.681	0.429
油	0.13	1.95	900	2.5	1.65

解：由 Plausius 公式， $f=0.0791Re^{0.25}=0.079\times(10^5)^{0.25}=4.442\times 10^{-3}$

(1) 空气 $Pr=c_{pm}/\lambda=1.05\times 0.018/0.027=0.7$

由雷诺类比， $St=f/2=2.221\times 10^{-3}$ $Nu=StRePr=2.221\times 10^{-3}\times 10^5\times 0.7=155.5$

由普朗德-泰勒类比， $St=\frac{f/2}{1+5\sqrt{f/2}(Pr-1)}=\frac{2.221\times 10^{-3}}{1+5\sqrt{2.221\times 10^{-3}\times(0.7-1)}}=2.253\times 10^{-3}$
 $Nu=2.253\times 10^{-3}\times 10^5\times 0.7=157.7$

由卡门类比， $St=\frac{f/2}{1+5\sqrt{f/2}[(Pr-1)+\ln[(1+5Pr)/6]]}=\frac{2.221\times 10^{-3}}{1+5\sqrt{2.221\times 10^{-3}[(0.7-1)+\ln\frac{1+5\times 0.7}{6}]}=2.578\times 10^{-3}$

$Nu=2.578\times 10^{-3}\times 10^5\times 0.7=180.5$

由柯尔本类比， $St=(f/2)\times Pr^{2/3}=2.221\times 10^{-3}\times 0.7^{2/3}=2.817\times 10^{-3}$

$Nu=2.817\times 10^{-3}\times 10^5\times 0.7=197.2$

由传热公式， $Nu=0.023\times Re^{0.8}\times Pr^{0.4}=0.023\times (10^5)^{0.8}\times 0.7^{0.4}=199.4$

(2) 水 $Pr=c_{pm}/\lambda=4.19\times 0.681/0.63=4.529$

由雷诺类比， $St=f/2=2.221\times 10^{-3}$ $Nu=StRePr=2.221\times 10^{-3}\times 10^5\times 4.529=1005.9$

由普朗德-泰勒类比， $St=\frac{f/2}{1+5\sqrt{f/2}(Pr-1)}=\frac{2.221\times 10^{-3}}{1+5\sqrt{2.221\times 10^{-3}\times(4.529-1)}}=1.213\times 10^{-3}$
 $Nu=1.213\times 10^{-3}\times 10^5\times 4.529=549.2$

由卡门类比， $St=\frac{f/2}{1+5\sqrt{f/2}[(Pr-1)+\ln[(1+5Pr)/6]]}=\frac{2.221\times 10^{-3}}{1+5\sqrt{2.221\times 10^{-3}[(4.529-1)+\ln\frac{1+5\times 4.529}{6}]}=1.031\times 10^{-3}$

$Nu=1.031\times 10^{-3}\times 10^5\times 4.529=466.8$

由柯尔本类比， $St=(f/2)\times Pr^{2/3}=2.221\times 10^{-3}\times 4.529^{2/3}=8.114\times 10^{-4}$

$Nu=8.114\times 10^{-4}\times 10^5\times 4.529=367.5$

由传热公式， $Nu=0.023\times Re^{0.8}\times Pr^{0.4}=0.023\times (10^5)^{0.8}\times 4.529^{0.4}=420.9$

(3) 油 $Pr=c_{pm}/\lambda=1.95\times 2.5/0.13=37.5$

由雷诺类比， $St=f/2=2.221\times 10^{-3}$ $Nu=StRePr=2.221\times 10^{-3}\times 10^5\times 37.5=8329$

由普朗德-泰勒类比， $St=\frac{f/2}{1+5\sqrt{f/2}(Pr-1)}=\frac{2.221\times 10^{-3}}{1+5\sqrt{2.221\times 10^{-3}\times(37.5-1)}}=2.205\times 10^{-4}$
 $Nu=2.205\times 10^{-4}\times 10^5\times 37.5=826.9$

由卡门类比， $St=\frac{f/2}{1+5\sqrt{f/2}[(Pr-1)+\ln[(1+5Pr)/6]]}=\frac{2.221\times 10^{-3}}{1+5\sqrt{2.221\times 10^{-3}[(37.5-1)+\ln\frac{1+5\times 37.5}{6}]}=2.133\times 10^{-4}$

$Nu=2.133\times 10^{-4}\times 10^5\times 37.5=799.8$

由柯尔本类比， $St=(f/2)\times Pr^{2/3}=2.221\times 10^{-3}\times 37.5^{2/3}=1.982\times 10^{-4}$

$Nu=1.982\times 10^{-4}\times 10^5\times 37.5=743.4$

由传热公式，

$Nu=0.027\times Re^{0.8}\times Pr^{1/3}\times (\mu/\mu_w)^{0.14}=0.027\times (10^5)^{0.8}\times 37.5^{0.33}\times (2.5/1.65)^{0.14}=946.4$

第八章

8-1 在 25℃ 下，CO₂ 在水中吸收平衡的亨利系数为 1.6×10³atm，如果水面上 CO₂ 的分压为 2atm，计算在这种状态下，CO₂ 在水中的溶解度（质量%）。

解： $p=1.6\times 10^3x$ $x=p/1.6\times 10^3=2/(1.6\times 10^3)=0.00125$
 $w=0.00125\times 44/[0.00125\times 44+(1-0.00125)\times 18]=0.00305=0.305\%$

8-2 含 NH₃3%（体积分数）的混合气体，在填料中为水所吸收。试求氨溶液的最大浓度。塔内绝对压强为 2atm。在操作条件下，气液平衡关系为： $p^*=2000x$

式中 p —气相中氨的分压，mmHg x —液相中氨的摩尔分数

解： $p=p^*=2\times 760\times 0.03=45.6$ mmHg $x^*=45.6/2000=0.0228$

或： $E=2000\times 1.013\times 10^5/760=2.666\times 10^5$ Pa

$$\begin{aligned}
 P &= 2 \times 1.013 \times 10^5 = 2.026 \times 10^5 \text{ Pa} \\
 p &= yP = 0.03 \times 2.026 \times 10^5 = 6078 \text{ Pa} \\
 x^* &= p/E = 6078 / (2.666 \times 10^5) = 0.0228
 \end{aligned}$$

8-3 已知某吸收系统的气液平衡关系符合亨利定律 $y^* = mx$, $k_y = 1.39 \times 10^{-3} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $k_x = 1.11 \times 10^{-2} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。当 $m=1$ 与 $m=1000$ 时, 分别求气相传质阻力在总阻力中所占的比例。

解: (1) $m=1$ $1/K_Y = 1/k_y + m/k_x = 1/(1.39 \times 10^{-3}) + 1/(1.11 \times 10^{-2}) = 809.5$
 $(1/k_y)/(1/K_Y) = (1/1.39 \times 10^{-3})/809.5 = 88.87\%$
 (2) $m=1000$ $1/K_Y = 1/k_y + 1000/k_x = 1/(1.39 \times 10^{-3}) + 1000/(1.11 \times 10^{-2}) = 90810$
 $(1/k_y)/(1/K_Y) = (1/1.39 \times 10^{-3})/90810 = 0.792\%$

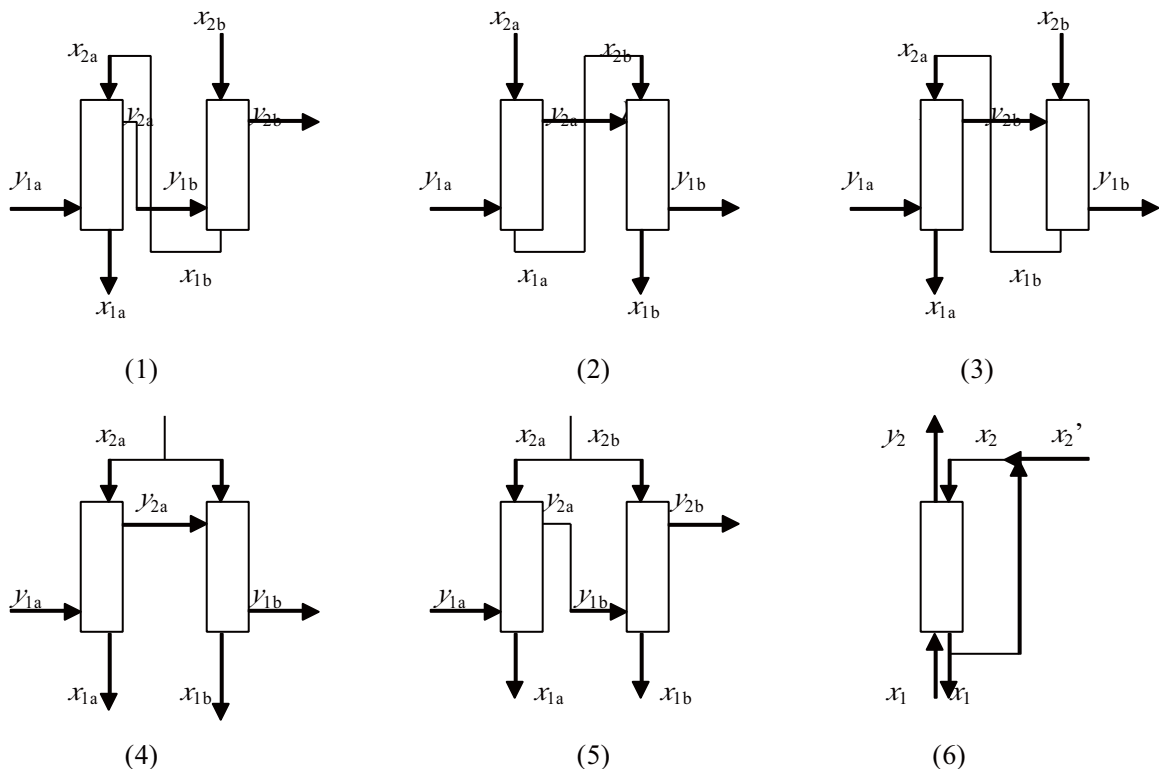
8-4 在吸收塔内用水吸收混于空气中的甲醇, 操作温度为 27°C , 压强 101.3 kPa 。稳定操作状况下塔内某截面上的气相甲醇分压为 5 kPa , 液相中甲醇浓度为 $2.11 \text{ kmol}/\text{m}^3$ 。试算出该截面上的吸收速率。已知溶解度系数 $H = 1.955 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{kPa})$, 总吸收系数 $K_G = 1.122 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$ 。

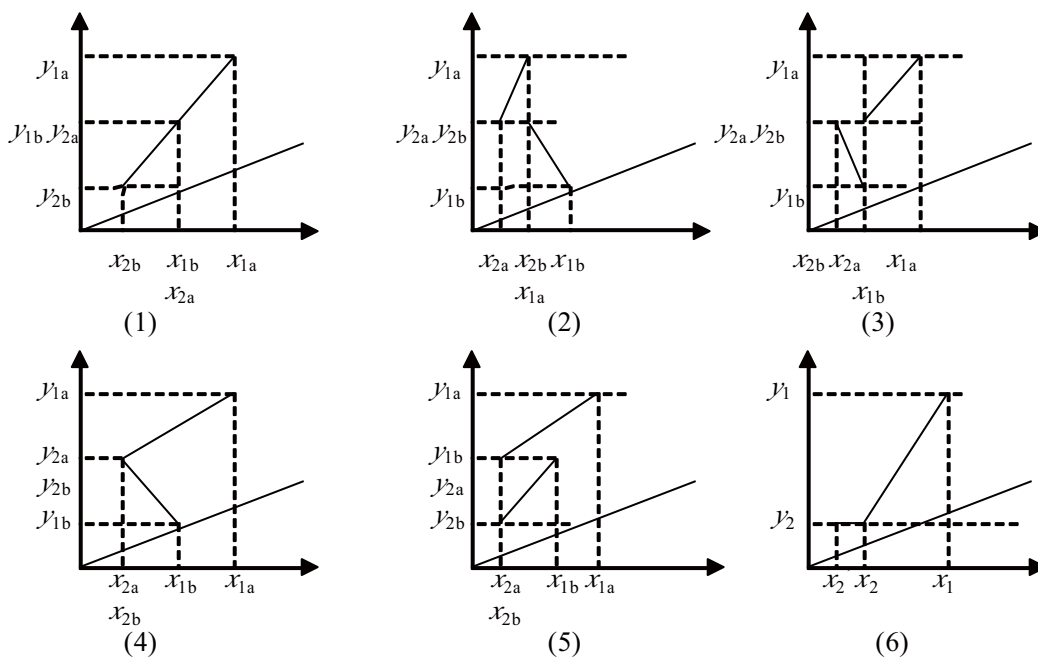
解: $p^* = c/H = 2.11/1.955 = 1.079 \text{ kPa}$
 $N_A = K_G(p - p^*) = 1.122 \times 10^{-5} \times (5 - 1.079) = 4.399 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

8-5 在某吸收塔中用清水处理含 SO_2 的混合气体。进塔气体中含 SO_2 18% (质量分数), 其余为惰性气体。混合气的分子质量取为 28。吸收剂用量比最小用量大 65%, 要求每小时从混合气中吸收 2000 kg 的 SO_2 。在操作条件下, 气液平衡关系为 $y^* = 26.7x$ 。试计算每小时吸收剂用量为若干 m^3 。

解: $y_1 = (18/64)/(100/28) = 0.07875$ $x_1^* = y_1/m = 0.0855/26.7 = 0.00295$
 $x_2 = 0$ $V(y_1 - y_2) = 2000/64 = 31.25 \text{ kmol}/\text{h}$
 $L_{\min} = V(y_1 - y_2)/(x_1^* - x_2) = 31.25/(0.00295 - 0) = 10593.2 \text{ kmol H}_2\text{O}/\text{h}$
 $L = (1 + 0.65)L_{\min} = 1.65 \times 10593.2 = 17479 \text{ kmol H}_2\text{O}/\text{h}$
 或: $L = 17479 \times 18/1000 = 314.6 \text{ m}^3/\text{h}$

8-6 试画出下列吸收流程的操作线。





8-7 用纯水除去气体混合物中有害物质。若进口气体含 6% 的有害物质，要求吸收率为 90%，惰性气体和纯水的流率分别为 $32\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 $24\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，且液体流量是最小流量的 1.5 倍。如果该系统此时服从亨利定律并测得气相传质单元高度 $H_{OG}=0.471\text{m}$ 。该塔在常压下操作。试求出塔的液相浓度和塔高。

解： $y_1=0.06/(1-0.06)=0.06383$ $y_2=y_1(1-\phi)=0.06383(1-0.9)=0.006383$
 $x_2=0$ $X_1=V(y_1-y_2)/L=32\times(0.06383-0.006383)/24=7.66\times 10^{-2}$
 $m=V/1.5x_1=0.06383/(1.5\times 7.66\times 10^{-2})=0.556$ $mV/L=0.556\times 32/24=0.741$
 $N_{OG}=(1-mV/L)^{-1}\ln[(1-mV/L)(y_1-mx_2)/(y_2-mx_2)+mV/L]$
 $= (1-0.741)^{-1}\ln[(1-0.741)(0.06383-0)/(0.006383-0)+0.741]=4.644$
 $Z=H_{OG}\times N_{OG}=0.471\times 4.644=2.19\text{m}$

8-8 一逆流操作的吸收塔，填料层高度为 3m。操作压强为 101.3kPa，温度为 20°C ，用清水吸收空气—A 混合气体中的 A 组分。混合气体流量为 $20\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，其中含 A 6% (体积%)，要求吸收率为 98%，清水流量为 $40\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。操作条件下的平衡关系为 $y^*=0.8x$ 。试估算在塔径、吸收率及其它操作条件均不变时，操作压强增加一倍，此时所需的填料层高度将如何变化？

解： $y_1=0.06$ $y_2=y_1(1-\phi)=0.06\times(1-0.98)=0.0012$
 $x_2=0$ $S=mV/L=0.8\times 20/40=0.4$
 $N_{OG}=(1-S)^{-1}\ln[(1-S)(y_1-mx_2)/(y_2-mx_2)+S]=(1-0.4)^{-1}\ln[(1-0.4)\times(0.06-0)/(0.0012-0)+0.4]=5.69$
 $H_{OG}=Z/N_{OG}=3/5.69=0.527\text{m}$
 $P=2P$ $m'/m=P/P$ $m'=mP/P=0.8/2=0.4$
 $S'=0.4\times 20/40=0.2$
 $N_{OG}'=(1-S')^{-1}\ln[(1-S')(y_1-m'x_2)/(y_2-m'x_2)+S']=(1-0.2)^{-1}\ln[0.06\times(1-0.2)/0.0012+0.2]=4.62$
 $H_{OG}=V/K_YaA=V/K_GaPA$
 $H_{OG}'=H_{OG}P/P=0.527/2=0.2605\text{m}$
 $Z=H_{OG}'\times N_{OG}'=4.62\times 0.2605=1.2$ $Z-Z'=3-1.2=1.8\text{m}$

8-9 今有连续式逆流操作的填料吸收塔，用清水吸收原料气中的甲醇。已知处理气量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，原料气中含甲醇 $100\text{g}/\text{m}^3$ ，吸收后水中含甲醇量等于与进料气体相平衡时浓度的 67%。设在标准状况下操作，吸收的平衡式取为 $y^*=1.15x$ ，甲醇的回收率为 98%， $K_y=0.5\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，塔内填料的有效表面积为 $190\text{m}^2/\text{m}^3$ ，塔内气体的空塔流速为 $0.5\text{m}/\text{s}$ 。试求：(1) 水的用量；(2) 塔径；(3) 填料层高度。

解：(1) $V=1000/22.4=44.64\text{kmol}/\text{h}$
 $y_1=(0.1\times 1000/32)/44.64=0.07$
 $y_2=y_1(1-\phi)=0.07\times(1-0.98)=0.0014$ $x_2=0$

$$\begin{aligned}
x_1 &= (y_1/m) \times 67\% = 0.07 \times 0.67 / 1.15 = 0.0408 \\
L &= V(y_1 - y_2) / (x_1 - x_2) = 44.64 \times (0.07 - 0.0014) / 0.0408 = 75 \text{ kmol/h} \\
(2) \quad D &= (4V_s/\pi u)^{1/2} = [4 \times 1000 / (3600 \times 0.5\pi)]^{1/2} = 0.841 \text{ m} \\
(3) \quad A &= (\pi/4)D^2 = \pi/4 \times 0.841^2 = 0.556 \text{ m}^2 \\
S &= mV/L = 1.15 \times 44.64 / 75 = 0.684 \\
H_{OG} &= V/K_y a A = 44.64 / (0.5 \times 190 \times 0.556) = 0.845 \text{ m} \\
N_{OG} &= (1-S)^{-1} \ln[(1-S)(Y_1 - Y_2^*) / (Y_2 - Y_2^*) + S] = (1-0.684)^{-1} \ln[(1-0.684) \times 0.07 / 0.0014 + 0.684] = 8.87 \\
\text{或: } y_1^* &= mx_1 = 1.15 \times 0.0408 = 0.0469 & y_2^* &= mx_2 = 0 \\
\Delta y_1 &= y_1 - y_1^* = 0.07 - 0.0469 = 0.0231 & \Delta y_2 &= 0.0014 \\
\Delta y_m &= (\Delta y_1 - \Delta y_2) / \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2) = (0.0231 - 0.0014) / \ln(0.0231 / 0.0014) = 0.00774 \\
N_{OG} &= (Y_1 - Y_2) / \Delta Y_m = (0.07 - 0.0014) / 0.00774 = 8.86 \\
Z &= H_{OG} \times N_{OG} = 0.845 \times 8.86 = 7.5 \text{ m}
\end{aligned}$$

8-10 用逆流操作的填料塔除去混合气体中的有害组分。惰性气体流量为 $0.00703 \text{ kmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ，进气浓度 0.05 （摩尔分数，下同），要求出口气体浓度 0.0005 。平衡关系为 $y^* = 0.9x$ 。已知 $k_y a \propto V^{0.7}$ ， $k_y a$ 与 V 无关。 $K_x a = 0.85 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s})$ ， $K_y a = 0.044 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s})$ 。求 $k_y a$ 和 H_{OG} 。若惰性气体流量增大 50% ，问 $k_y a$ 和 H_{OG} 变为多少？

$$\begin{aligned}
\text{解: } 1/K_y a &= 1/k_y a + m/k_x a & \text{即: } 1/0.044 &= 1/k_y a + 0.9/0.85 \\
k_y a &= 0.04615 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s}) & H_{OG} &= V/K_y a A = 0.00703 / 0.044 = 0.16 \text{ m} \\
k_y' a &= k_y a (V'/V)^{0.7} = 0.04615 \times 1.5^{0.7} = 0.06130 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s}) \\
1/K_y' a &= 1/k_y' a + m/k_x a = 1/0.0613 + 0.9/0.85 = 17.373 & K_y' a &= 0.05756 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s}) \\
H_{OG}' &= V'/K_y' a A = 1.5V/K_y' a A = 1.5 \times 0.00703 / 0.05756 = 0.183 \text{ m}
\end{aligned}$$

8-11 上题中若平衡关系改为 $y = 10x$ ，则结果又为如何？

$$\begin{aligned}
\text{解: } m &= 10, \text{ 则 } 1/0.044 = 1/k_y a + 10/0.85 & k_y a &= 0.0912 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s}) \\
k_y' a &= k_y a (V'/V)^{0.7} = 0.0912 \times 1.5^{0.7} = 0.121 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s}) \\
K_y a &= 1/(1/k_y' a + m/k_x a) = 1/(1/0.121 + 10/0.85) = 0.14995 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s}) \\
H_{OG}' &= V'/K_y' a A = 1.5 \times 0.00703 / 0.0499 = 0.211 \text{ m}
\end{aligned}$$

8-12 一个正在操作的逆流吸收塔， $y_1 = 0.05$ ， $x_2 = 0.001$ ， $m = 2$ ，当 $V/L = 0.25$ 时 $y_2 = 0.005$ 。若维持 y_1 、 x_2 和 V/L 不变， L 降低 20% ，设系统属气膜控制， $k_y a \propto V^{0.7}$ ，问 y_2 和 x_1 有何变化？

$$\begin{aligned}
\text{解: } x_1 &= V(y_1 - y_2) / L + x_2 = 0.25(0.05 - 0.005) + 0.001 = 0.01225 \\
S &= mV/L = 2 \times 0.25 = 0.5 \\
N_{OG} &= (1-S)^{-1} \ln[(1-S)(y_1 - mx_2) / (y_2 - mx_2) + S] \\
&= (1-0.5)^{-1} \ln[(1-0.5) \times (0.05 - 2 \times 0.001) / (0.005 - 2 \times 0.001) + 0.5] = 4.28 \\
L' &= 0.8L & V'/L' &= V/L & V' &= 0.8V & S' &= S \\
\text{系统属气膜控制, 则: } & k_y a \approx K_y a \\
H_{OG}' / H_{OG} &= K_y a / K_y' a = (V'/V)(V/V')^{0.7} = (V'/V)^{0.3} = 0.8^{0.3} \\
N_{OG}' &= N_{OG} \times (H_{OG} / H_{OG}') = 4.28 / 0.8^{0.3} = 4.576 \\
\text{即: } N_{OG}' &= (1-S')^{-1} \ln[(1-S')(y_1 - mx_2) / (y_2' - mx_2) + S'] \\
&= (1-0.5)^{-1} \ln[(1-0.5) \times (0.05 - 2 \times 0.001) / (y_2' - 2 \times 0.001) + 0.5] = 4.576 \\
\text{解得 } y_2' &= 0.004565 \\
x_1' &= V'(y_1 - y_2') / L' + x_2 = 0.25 \times (0.05 - 0.004565) + 0.001 = 0.01236 \\
\text{即 } L \text{ 降低 } 20\% \text{ 后, } V/L \text{ 不变时, } y_2 \text{ 降低、} x_1 \text{ 略有增加。}
\end{aligned}$$

8-13 用纯水吸收空气中的氨，气体流量为 $0.02 \text{ kmol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ， $y_1 = 0.05$ ，要求回收率不小于 95% ，出口溶液浓度 x_1 不小于 0.05 ，已知平衡关系为 $y^* = 0.95x$ 。试计算：（1）逆流操作， $K_y a = 0.02 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \text{ s})$ 时，所需的填料层高度应为多少？（2）用部分吸收剂循环，新鲜吸收剂与维持量之比 $L/L_R = 20$ ，气体流速和 $K_y a$ 不变，问所需的填料层高度变为多少？

$$\begin{aligned}
\text{解: (1) } y_1 &= (1-\phi)y_2 = 0.05 \times (1-0.95) = 0.0025 \\
L/V &= (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2) = (0.005 - 0.0025) / (0.05 - 0) = 0.95 \\
L/V &= m = 0.95, \text{ 传质平均推动力为 } \Delta y_m = \Delta y_2 = 0.0025 \\
Z &= V(y_1 - y_2) / K_y a A \Delta y_m = 0.02 \times (0.05 - 0.0025) / (0.02 \times 0.0025) = 19 \text{ m} \\
(2) \quad x_2' &= L_R x_1 / (L + L_R) = 0.05 \times 1 / (20 + 1) = 0.002381
\end{aligned}$$

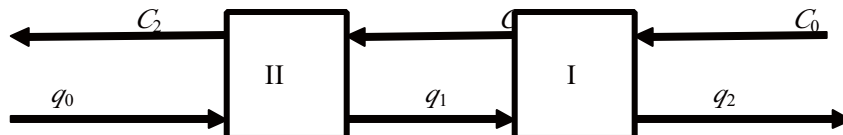
$$\begin{aligned}\Delta y_1 &= y_1 - m x_1 = 0.05 - 0.95 \times 0.05 = 0.0025 \\ \Delta y_2 &= y_2 - m x_2 = 0.0025 - 0.95 \times 0.0023815 = 0.000238 \\ \Delta y_m &= (\Delta y_1 - \Delta y_2) / \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2) = 0.0009618 \\ Z &= V(y_1 - y_2) / K_y a \Delta y_m = 0.02 \times (0.05 - 0.0025) / (0.02 \times 0.0009618) = 49.4 \text{ m}\end{aligned}$$

8-14 某填料吸收塔，用清水吸收混合气体中有害组分。塔的填料层高度为 10m，平衡关系为 $y^* = 1.5x$ ，正常情况下测得 $y_1 = 0.02$ ， $y_2 = 0.004$ ， $x_1 = 0.008$ ，求传质单元高度。今欲使 y_2 减少到 0.002，液气比不变，计划将填料层高度增加，应增加多少？又若将加高部分改为另一个塔，另用等量的清水吸收，问排放浓度变为多少？

解：(1) $\Delta y_1 = y_1 - m x_1 = 0.02 - 1.5 \times 0.008 = 0.008$ $\Delta y_2 = y_2 - m x_2 = 0.004 - 1.5 \times 0 = 0.004$
 $\Delta y_m = (\Delta y_1 - \Delta y_2) / \ln(\Delta y_1 / \Delta y_2) = (0.008 - 0.004) / \ln(0.008 / 0.004) = 0.00577$
 $N_{OG} = (y_1 - y_2) / \Delta y_m = (0.02 - 0.004) / 0.00577 = 2.773$
 $H_{OG} = Z / N_{OG} = 10 / 2.773 = 3.607 \text{ m}$
(2) $L/V = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2) = (0.02 - 0.004) / (0.008 - 0) = 2$
 $x_1' = V(y_1 - y_2') / L = (0.02 - 0.002) / 2 = 0.009$ $\Delta y_1' = 0.02 - 1.5 \times 0.009 = 0.0065$
 $\Delta y_2' = 0.002$
 $\Delta y_m' = (0.0065 - 0.002) / \ln(0.0065 / 0.002) = 0.003818$
 $N_{OG}' = (0.02 - 0.002) / 0.003818 = 4.715$ $H_{OG}' = H_{OG}$
 $Z' = 3.607 \times 4.715 = 17 \text{ m}$ $\Delta Z = Z' - Z = 17 - 10 = 7 \text{ m}$
(3) $Z' = \Delta Z = 7 \text{ m}$ $N_{OG}'' = Z' / H_{OG} = 7 / 3.607 = 1.941$
 $y_1'' = y_2 = 0.004$ $S = mV/L = 1.5/2 = 0.75$
 $N_{OG}'' = (1 - S)^{-1} \ln[(1 - S)(y_1'' - m x_2) / (y_2'' - m x_2) + S] = (1 - 0.75)^{-1} \ln[(1 - 0.75) \times 0.004 / y_2'' + 0.75] = 1.941$
 $y_2'' = 0.001143 < y_2'$ 因此改为另一个塔时，其排放浓度符合要求。

8-15 如例8-3-1的糖液吸附脱色数据，若采用两级逆流吸附法，试求活性炭的用量。

解：



物料平衡： $q_1 - q_0 = V(C_1 - C_2) / G$ (a)

$q_2 - q_1 = V(C_n - C_1) / G$ (b)

平衡关系： $q_1 = m C_2^{1/n}$ (c)

$q_2 = m C_1^{1/n}$ (d)

由例8-5知 $1/n = 1.3$ 又 $q_0 = 0$

将(c), (d)代入(a), (b): $m C_2^{1/n} = V(C_1 - C_2) / G$ (e)

$m C_1^{1/n} - m C_2^{1/n} = V(C_n - C_1) / G$ (f)

(f)/(e): $(C_1^{1/n} - C_2^{1/n}) / C_2^{1/n} = (C_n - C_1) / (C_1 - C_2)$

$\because C \propto \text{色值}$ 故 $(C_1^{1.3} - 0.22^{1.3}) / 0.22^{1.3} = (4.42 - C_1) / (C_1 - 0.22)$

用试差法解得 $C_1 = 0.9$

对第II级 $\eta_2 = 1 - C_2 / C_1 = 1 - 0.22 / 0.9 = 0.76$ 即 $C_2 / C_1 = 0.24$

由例8-5附图得 $\eta \delta = 150$ $\delta = 0.26 / 150 = 5.07 \times 10^{-3} \text{ kg/kg}$

8-16 在9个500ml三角形烧瓶中各加入250ml含农药的溶液，再往其中8个瓶中加入不同量的粉末活性炭，第9个瓶为空的，盖好瓶口后在25℃下摇动足够时间以达吸附平衡，然后分离出上清液，8个其中农药浓度，结果如下：

活性炭加入量/mg	1005	835	640	411	391	298	290	253	0
农药浓度/(g/L)	58.2	87.3	116.4	300	407	786	902	2940	5150

试求出弗里因德里希公式中的参数。

解： q -- kg吸附质/kg吸附剂

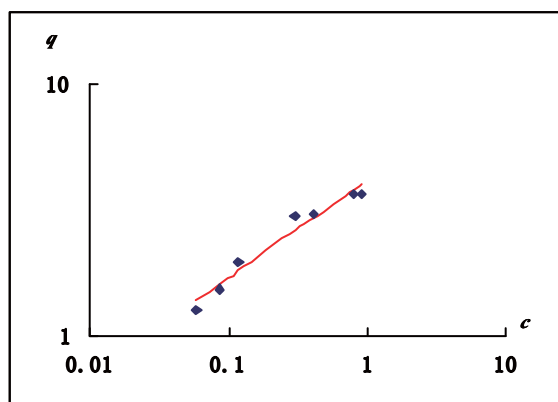
C -- kg吸附质/m³

$q = (C_p \times 0.00025 - C \times 0.00025) / \text{活性炭kg}$

$C = (\text{g/L}) / 1000 \rightarrow \text{kg/m}^3$

C_0 即空白

q	0	2.1834	3.6621	3.6611	3.0326	2.9501	1.9663	1.5158	1.2667
C	5.15	2.94	0.902	0.786	0.407	0.3	0.1164	0.0873	0.0582



去掉第一点，线性回归后得： $1/n=0.39$, $n=2.565$ $\ln m=1.4238$ $m=4.153$

8-17 在80℃用活性炭处理含原糖48%（质量分数）的溶液，使其脱色，由实验测得平衡数据如下：

活性炭用量/(kg活性炭/kg糖)	0	0.005	0.01	0.015	0.02	0.03
脱色百分率/%	0	47	70	83	90	95

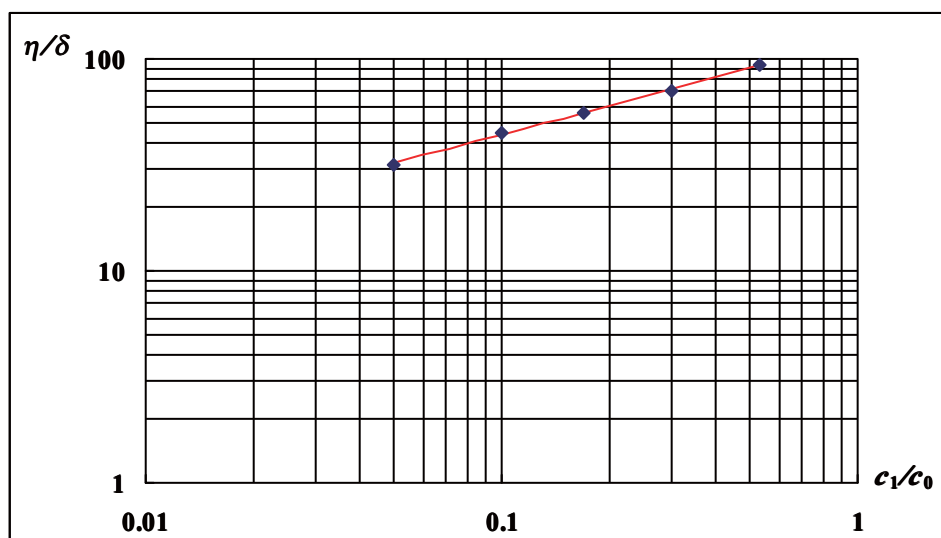
原糖液的色素浓度可定为20，要求脱色后残留色素定为原始含量的2.5%。试计算：（1）弗里因德里希公式中的参数；（2）若用单级操作，则若处理1000kg溶液需用多少kg活性炭；（3）若用两级错流操作，则每处理1000kg溶液需用活性炭的最小量是多少；（4）若用两级逆流操作，则每处理1000kg溶液需用多少kg活性炭。

解：（1） $\delta=G/VC_s$ 代入： $(C_1/C_0)^{1/n}=C_0^{1-1/n}(C_0-C_1)/mC_s\delta C_0=kn/$

用题给数据计算过程如下表：

	0	0.005	0.01	0.015	0.02	0.03
$\eta=1-C_1/C_0$	0	0.47	0.70	0.83	0.90	0.95
C_1/C_0	1	0.53	0.30	0.17	0.10	0.05
η/δ	0	94	70	55.3	45	31.7

在双对数坐标上绘图，回归后得 $1/n=0.45$ ，即 $n=2.22$



（2）单级 $C_1/C_0=0.025$ $\eta/\delta=23.48$

$\delta=\eta/23.48=0.975/23.48=0.0415$ kg/kg

（3）二级错流 $(C_1/C_0/C_0C_2)^{1/n}-C_0/C_1n=1-1/n$

令 $C_1/C_0=Y$ $C_0/C_2=0.025$

$(0.025Y)^{0.45}-0.45/Y=0.55$

用试差得： $Y=0.215$

查附图, 第一级 $C_1/C_0=0.215$
 $\eta_1/\delta_1=60$ $\delta_1=0.785/60=0.013$
 第二级 $C_2/C_1=0.025/0.215=0.116$
 $\eta_2/\delta_2=40$ $\delta_2=0.884/40=0.0221$ $\delta=\delta_1+\delta_2=0.035\text{kg/kg}$

(4) $q_1=V(C_1-C_2)/G$ $q_2-q_1=V(C_0-C_1)/G$
 $q_1=mC_2^{1/n}$ $q_2=mC_1^{1/n}$
 $\therefore mC_2^{1/n}=V(C_1-C_2)/G$ $mC_1^{1/n}-mC_2^{1/n}=V(C_0-C_1)/G$
 二式相除 $(C_1^{0.45}-C_2^{0.45})/C_2^{0.45}=(C_0-C_1)/(C_1-C_2)$
 即 $[(C_1/C_0)^{0.45}-0.025^{0.45}]/0.025^{0.45}=(1-C_1/C_0)/(C_1/C_0-0.025)$
 解得: $C_1/C_0=0.33$ $C_2/C_1=0.025/0.33=0.058$
 查附图 $\eta_2/\delta=37$ $\delta=0.942/37=0.0255\text{kg/kg}$

8-18 有平均直径为0.7mm的强酸H⁺离子树脂的固定床, 床高1m, 床径0.028m。在室温下, 浓度为5mol/m³的NaCl溶液通过此固定床, 溶液流速为0.01m/s。试计算: (1) 交换区高度; (2) 固定床高度相当于几个交换区高度; (3) 固定床能操作多长时间。已知系统的平衡系数 $K_{AB}=1.58$, 传质系数可按 $K_L a_v=8.6u_L^{0.5}\text{s}^{-1}$ 计算, 式中 u 的单位为m/s, 树脂的交换容量 $q_0=2.5\times 10^3\text{mol/m}^3$, 空隙率0.33。

解: (1) $C^*=C_0C/[K_{AB}C_0-(K_{AB}-1)C]=5C/(15.8-0.58C)$

$$N_{OL}=\int_{0.25}^{4.75} (C-C^*)^{-1}dC=\int_{0.25}^{4.75} [(7.9-0.58C)/(2.9C-0.58C^2)]dC$$

$$=\int_{0.25}^{4.75} 2.72C^{-1}dC+\int_{0.25}^{4.75} (2.9-0.58C)^{-1}dC=8.02$$

$$K_L a_v=8.6\times 0.01^{0.5}=0.86\text{s}^{-1}$$
 $H_{OL}=u_L/K_L a_v=0.01/0.86=0.0116\text{m}$

$$Z=H_{OL}N_{OL}=0.0116\times 8.02=0.093\text{m}$$

(2) $N=1/0.093=10.75$ 个

(3) $u_G=u_L C_0/(m q_0+\varepsilon_0 C_0)=0.01\times 5/(2.5\times 10^3+0.33\times 5)=2\times 10^{-5}\text{m/s}$
 $\tau=H/u_G=1/(2\times 10^{-5})=50033\text{ s}\rightarrow 13.9\text{h}$

8-19 用逆流连续接触的球形树脂床回收废液中的铜离子, 树脂从床顶加入, 从床底排出, 稀溶液从床底通入, 从床顶排出, 料液含铜离子20mol/m³, 流量38m³/h, 已知溶液的空床流速为22m³/(m²h), 树脂进口浓度为0.3mol/kg, 质量流量为2kg/h, 总传质系数 $K_L a=2\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{h})$, 总传质单元数 $N_{OL}=5.72$, 要求从废液中回收99%的Cu²⁺离子。试求: (1) 树脂出口浓度; (2) 树脂床层的质量, 树脂松密度为700kg/m³。

解: (1) 每小时应去除的Cu²⁺量为: $38\times 20\times 0.99=752.4\text{mol/h}$
 $(q_2-0.3)\times 2=752.4$ $q_2=376.5\text{mol/kg}$

(2) $K_L a=\rho K_{LS}=700\times 0.2=140\text{L/h}$ $H_{OL}=Q/K_L a=22/140=0.157\text{m}$
 $Z=H_{OL}N_{OL}=0.157\times 5.72=0.9\text{m}$ $S=V/Q=38/22=1.73\text{m}^2$
 $W=ZS\rho=1.73\times 0.9\times 700=1088\text{kg}$

8-20 用732#阴离子树脂处理原水, 如例8-7, 再用701#弱碱性阴离子交换柱除去水中阴离子, 原水中阴离子总浓度为5.8mol/m³, 从阴离子柱出来的水pH为3, 当采用与阳离子交换柱同样尺寸的两面交换柱和树脂层高度时。试求: (1) 一台交换柱的阴离子树脂用量; (2) 采用纯水正洗的水量; (3) 有效工作交换容量; (4) 每台交换柱的工作时间。设树脂含水率50%, $d_p=0.00076\text{m}$ 。

解: 查表, 701#弱碱性阴离子交换树脂, 松密度650~750kg/m³, 取700kg/m³, 全交换容量9mol/kg

(1) $H=\rho_a V=\rho_a S H=700\times 0.32^2\times 1.5\times 4=84.4\text{kg}$

(2) 查表, 701#树脂正洗水量为12.5m³/m³
 $\therefore W_1=12.5\times 0.32^2\times 1.5\times 4=1.51\text{m}^3$

(3) $q_T'=9\times 700\times 0.5=3150\text{mol/m}^3$
 $\beta=0.7+0.001T_0-0.1\text{pH}+0.1\lg C_{A0}-0.15d_p$
 $=0.7+0.001\times 17-0.1\times 3+0.1\lg 5.8-0.15\times 0.00076=0.493$
 $q_0'=\beta q_T'=0.493\times 3150=1554\text{mol/m}^3=q_0'$ (弱碱性阴离子交换树脂)

(4) $t_1=Vq_0'/QC_0=(0.32^2\times 1.5\times \pi/4)/[3/(3600\times 2)\times 5.8]=7.75\times 10^4\text{ s}=21.54\text{h}$