

第二章 流体流动与输送

1,2、(略)

3、在附图所示的气柜内盛有密度为 $0.80\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的气体，气柜与开口 U 形管压差计相连，指示液水银面的读数 R 为 0.4m ，开口支管水银面上灌有一段高度 R' 为 0.01m 清水。左侧水银面与测压口中心线垂直距离 $h=0.76\text{m}$ 试求测压口中心截面处的绝对压强。(当地大气压强为 $1.0133\times 10^5\text{Pa}$)

解：设大气压强为 p_a ，测压口中心截面上绝对压强为 p_A ，取水的密度 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=1000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，水银密度 $\rho_{\text{Hg}}=13600\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，以图中的 m 及 n 面为参考面计算：

$$p_m=p_A+h\cdot\rho_{\text{气}}\cdot g \quad (1)$$

$$p_n=p_a+R'\cdot\rho_{\text{H}_2\text{O}}\cdot g+R\cdot\rho_{\text{Hg}}\cdot g \quad (2)$$

因 $p_m=p_n$ 联立 (1)、(2) 式并整理得：

$$p_A=p_a+R'\cdot\rho_{\text{H}_2\text{O}}\cdot g+R\cdot\rho_{\text{Hg}}\cdot g-h\cdot\rho_{\text{气}}\cdot g \quad (3)$$

$$=1.0133\times 10^5+0.01\times 1000\times 9.81+0.4\times 13600\times 9.81-0.76\times 0.8\times 9.81$$

$$=154788.5\text{Pa}\approx 1.55\times 10^5\text{Pa}$$

由于 $\rho_{\text{气}}<\rho_{\text{Hg}}$ 及 $\rho_{\text{气}}<\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ ，且 R' 值很小，故在工程计算中往往略去式 (3) 中 $R'\rho_{\text{H}_2\text{O}}g$ 及 $h\rho_{\text{气}}g$ 两项，即将式 (3) 简化为：

$$p_A=p_a+R\rho_{\text{Hg}}g=1.0133\times 10^5\text{Pa}+0.4\times 13600\times 9.81\text{Pa}$$

$$=154788.5\text{Pa}\approx 1.55\times 10^5\text{Pa}$$

4、用 U 形管压力计测容器内的压力 (如附图)。在图 (1) 的情况下，器内的绝压、表压各是多少毫米汞柱？图 (2) 的情况下，器内的绝压和真空度各是多少毫米汞柱？

(1 大气压=760 毫米汞柱)

解：(1) $p_{\text{表压}}=200\text{mmHg}$

$$p_{\text{绝压}}=760\text{mmHg}+200\text{mmHg}=960\text{mmHg}$$

(2) $p_{\text{真空度}}=200\text{mmHg}$

$$p_{\text{绝压}}=760\text{mmHg}-200\text{mmHg}=560\text{mmHg}$$

5、用高位槽向反应器加料，料液密度为 $900\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，加料管尺寸为 $\phi 108\text{mm}\times 4\text{mm}$ ，高位槽液面恒定，反应器内压强为 $4\times 10^4\text{Pa}$ (表压)。要求加料量为 $40\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ，若料液在管内流动的能量损失为 $20.0\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，试求高位槽液面应比加料管出口高多少？

解：取高位槽液面为 1-1' 截面，加料管出口为 2-2' 截面，并以 2-2' 截面为基准面，列柏努利方程

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + He' = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f$$

由题意： $z_1=h, z_2=0$

加料管内径： $d=0.108\text{m}-2\times 0.004\text{m}=0.1\text{m}$

高位槽液面恒定，故 $u_1=0$

$$u_2 = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{40}{3600 \times 0.785 \times 0.1^2} \text{m}\cdot\text{s}^{-1} = 1.42\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

压强统一用表压计算， $p_1=0, p_2=4.0\times 10^4\text{Pa}$

$\rho=900\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}, He=0, \sum h_f=20.0\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$

将各项数值代入柏努利方程中

$$9.81h/\text{m} = \frac{1.42^2}{2} + \frac{4.0\times 10^4}{900} + 20.0$$

解得： $h=6.67\text{m}$

即：高位槽液面应比加料管出口高 6.67m

6、水平通风管道某处的直径自 0.50m 渐缩至 0.25m ，为了粗略估计管道内空气的流量，在锥形管两端各引出一个测压口与 U 形管压左计相连，用水作指示液测得读数 R 为 0.05m ，若空气流过锥形管的阻力可忽略不计，求空气的体积流量。（空气的平均密度为 $1.21\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）

解：通风管内空气温度不变，压强变化很小，只有 0.05 米水柱，可按不可压缩流体处理。

以管道中心线作基准水平面，在截面 1-1' 与 2-2' 之间列柏努利方程，此时 $z_1=z_2$ ，因两截面间无外功加入，故 $H_e=0$ ，能量损失忽略不计，则 $\Sigma h_f=0$ 。

$$\text{所以方程简化为: } \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

p_1-p_2 可由 U 形管压差计读数求取：

$$p_1-p_2=\rho_0gR=1000\times9.81\times0.05\text{Pa}=490.5\text{ Pa}$$

$$\text{所以: } u_2^2 - u_1^2 = \frac{2(p_1-p_2)}{\rho} = \frac{2\times490.5}{1.21}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2} = 810.74\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2} \quad (1)$$

$$u_2 = u_1\left(\frac{0.5}{0.25}\right)^2 = 4u_1 \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 得： $(4u_1)^2 - u_1^2 = 810.74\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$

$$u_1=7.35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

空气的体积流量为：

$$q_v = \frac{\pi}{4}d_1^2u_1 = \frac{\pi}{4}\times0.5^2\times7.35\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1} = 1.44\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

7、水喷射泵的进水管内径为 20mm ，水的流量为 $0.6\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ，进水压强为 0.3Mpa （绝对压强），喷嘴的内径 d_2 为 3mm ，当时大气压为 $1.013\times10^5\text{Pa}$ ，问喷嘴处理论上可产生多大的真空度？

说明：入水口和喷嘴间的位差及水流经喷嘴的阻力损失可以忽略不计。

解：取喷射泵进水口为 1-1' 截面，喷嘴处为 2-2' 截面，因位差忽略， $z_1=z_2$ ，又 $\Sigma h_f=0$

$$\text{则柏努利方程为: } \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

$$u_1 = \frac{q_V}{A_1} = \frac{0.6}{3600 \times \frac{\pi}{4} \times 0.02^2}\text{m}\cdot\text{s}^{-1} = 0.53\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$u_2 = \frac{q_V}{A_2} = \frac{0.6}{3600 \times \frac{\pi}{4} \times 0.003^2}\text{m}\cdot\text{s}^{-1} = 23.59\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$p_1=3\times10^5\text{Pa}$$

因水的密度 $\rho=1000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，得：

$$\begin{aligned}
 p_2 &= p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} - \frac{\rho u_2^2}{2} \\
 &= 300000\text{Pa} + \frac{1000 \times 0.53^2}{2}\text{Pa} - \frac{1000 \times 23.59^2}{2}\text{Pa} \\
 &= 21896.4\text{Pa}
 \end{aligned}$$

喷嘴处真空度为: $p_{\text{真空度}} = 101300\text{Pa} - 21896.4\text{Pa} = 7.9 \times 10^4\text{Pa}$

这是理论上的计算值, 实际真空度比理论值低, 因为有流体阻力存在。

8、某流体在内径为 0.05m 的管内流动, 流速为 $0.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 已知流体的密度为 $1800\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 粘度为 $2.54 \times 10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}$, 试计算流体流过 200 米长直管的能量损失 h_f 及压强降 Δp 。

$$\text{解: } \text{Re} = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.05 \times 0.4 \times 1800}{2.54 \times 10^{-2}} = 1417$$

因 $\text{Re} < 2 \times 10^3$, 故为滞流

$$\text{所以: } \lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{1417} = 0.045$$

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{u^2}{2} = 0.045 \times \frac{200}{0.05} \times \frac{0.4^2}{2} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} = 14.4 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

其压强降为: $\Delta p_1 = \rho h_f = 1800 \times 14.4 \text{Pa} = 25920\text{Pa}$

9、判断流速为 $1.00\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水在内径为 2 英寸管 (0.05m) 中的流动形态。已知: $\rho = 1000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\mu = 1.00 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

$$\text{解: } \text{Re} = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.05 \times 1000}{1 \times 10^{-3}} = 5 \times 10^4$$

因 $\text{Re} > 4000$, 所以为稳定湍流。

10、某物料在直径为 $\phi 45\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的钢管内流动, 若物料的质量流量为 $6000\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$, 试判断物料在管中的流动形态。(已知物料的密度为 $900\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $3.60 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)

$$\text{解: } u = \frac{q_m / \rho}{\frac{\pi}{4} d^2 \times 3600} = \frac{6000 / 900}{0.785 \times (0.04)^2 \times 3600} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.47 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Re} = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.04 \times 1.47 \times 900}{3.60 \times 10^{-3}} = 1.47 \times 10^4 > 4000$$

所以为湍流

11、在内径为 80mm 的钢管中, 安装孔径为 20mm 的孔板, 用来测量管中水的流量。接在孔板两侧测压孔的水银压强计的读数 $R = 80$ 厘米汞柱, 求水在钢管中的流速和流量。(孔流系数 C_0 取 0.61)

解: 水银的密度 $\rho_0 = 13600\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

水的密度 $\rho = 1000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

$$\begin{aligned} \text{水流经孔板的流速为: } u_0 &= c_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}} \\ &= 0.61 \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 0.8(13600 - 1000)}{1000}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 8.58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

求水的平均流速:

$$u_1 = u_0 \cdot \frac{A_0}{A_1} = 8.58 \times \frac{\frac{\pi}{4} \times 0.02^2}{\frac{\pi}{4} \times 0.08^2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 0.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{因此水的体积流量: } q_V &= u_0 A_0 = 8.58 \times \frac{\pi}{4} \times 0.02^2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 0.0027 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 9.7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

12、某车间用压缩空气送密度为 $1840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的浓硫酸，每批压送量为 0.8 m^3 ，要求 20 分钟内压送完毕，用内径 $\phi 32 \text{ mm}$ 的钢管压送，管子出口与酸槽液面间的垂直距离为 20 m ，输送过程中能量损失为 $10 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，试求开始压送时压缩空气的表压强 (Pa)，(管路中没有外加功，管中出口与大气相通)。

解：以酸槽液面 1-1' 作为基准面，在 1-1' 和 2-2' 两截面间列出柏努利方程

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

$$\text{得: } p_1 = (z_2 - z_1)\rho \cdot g + \frac{(u_2^2 - u_1^2)}{2} \cdot \rho + p_2 + \rho g \sum H_f$$

已知: $z_1=0$ $u_1 \approx 0$ $p_2=0$ (表压) $z_2=20 \text{ m}$ $d_{\text{内}}=0.032 \text{ m}$

$$q_V = \frac{0.8}{20 \times 60} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 6.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_2 = \frac{q_V}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{6.7 \times 10^{-4}}{0.785 \times 0.032^2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 0.833 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_1 = (20 - 0) \times 1840 \times 9.81 \text{ Pa} + \frac{0.833^2}{2} \times 1840 \text{ Pa} + 1840 \times 10 \text{ Pa} = 3.8 \times 10^5 \text{ Pa}$$

13、某车间的开口贮槽内盛有密度为 $1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的溶液，今用泵 3 将溶液从贮槽 1-1' 输送至常压吸收塔的顶部，经喷头 2 喷到塔 1 内以吸收某种气体，如图所示。已知输送管路与喷头 2 连接处的表压强为 $2 \times 10^4 \text{ Pa}$ ，连接处高于贮槽液面 16 m ，用 $\phi 57 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 的钢管输送，送液量为 $18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，已测得溶液流经管路的能量损失为 $160 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (不包括流经喷头的能量损失)，泵的效率为 0.65 ，求泵的轴功率。(贮槽液面维持恒定)

解：贮槽液面维持恒定，故本题属于定态流动

取 1-1' 面 (贮槽的液面) 为基准面，在 1-1' 与 2-2' 面 (管道与喷头连接处) 间列柏努利方程，即：

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

其中: $z_1=0$ $u_1 \approx 0$ $p_1=0$ (表压) $z_2=16\text{m}$

$$u_2 = \frac{18}{3600 \times \frac{\pi}{4} (0.052)^2} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 2.36 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$p_2=2 \times 10^4 \text{Pa (表压)} \quad \sum h_f = 160 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{所以: } He &= 9.81 \times 16 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} + \frac{2 \times 10^4}{1200} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} + \frac{2.36^2}{2} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} + 160 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \\ &= 336.4 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned}$$

$$q_m = \frac{18 \times 1200}{3600} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} = 6 \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{P_e}{\eta} = \frac{He \cdot q_m}{\eta} = \frac{336.4 \times 6}{0.65} \text{W} = 3105.23 \text{W} \\ &= 3.11 \text{kW} \end{aligned}$$

14、某化工厂用泵将粘度为 $\mu=8.3 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$, 密度为 $1250 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的物料以 $12 \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的流量从敞口的地面贮槽送到敞口高位槽中 (贮槽和高位槽液面恒定), 如图所示。输送管道为 $\phi 59 \text{mm} \times 3 \text{mm}$ 的钢管 (光滑管), 管长共计 20.0m , 管路系统有 10 个 90° 标准弯头, 全开闸阀 2 个, 摇板式止逆阀 1 个, 试求泵所需要的扬程 (水柱高度表示)。(已知: $z_1=2.0 \text{m}, z_2=14.0 \text{m}$)

解: 已知 $\mu=8.3 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$, $\rho=1250 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $l=20.0 \text{m}$, $z_1=2.0 \text{m}$, $z_2=14.0 \text{m}$

$$d_{\text{内}} = (59 - 2 \times 3) \text{mm} = 53 \text{mm} = 0.053 \text{m}$$

取贮槽液面为截面 1-1', 高位槽液面为截面 2-2', 取经泵体中心且与地面平行的截面为水平基准面, 在 1-1', 和 2-2' 截面之间列柏努利方程。

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + He = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f$$

$$\text{因: } u_1 = 0 \quad u_2 = 0 \quad p_1 = p_2 = 1 \text{ 大气压}$$

$$\text{所以: } He = (z_2 - z_1) + \sum H_f$$

$$\text{又 } q_V = 12.0 \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = \frac{1}{300} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

所以流体在管中的流速为:

$$u = \frac{q_V}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{\frac{1}{300}}{0.785 \times (0.053)^2} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.51 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Re} = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.053 \times 1.51 \times 1250}{8.3 \times 10^{-4}} = 1.2 \times 10^5$$

因 $Re > 4000$ 所以流体在管道中呈湍流流动

所以: $f = 0.23Re^{-0.2} = 0.023 \times (1.2 \times 10^5)^{-0.2} = 0.00222$

查表 2-3 并计算得: $le_1 = 10 \times 35 \times 0.053 \text{ m} = 18.55 \text{ m}$

$$le_2 = 2 \times 9 \times 0.053 \text{ m} = 0.954 \text{ m}$$

$$le_3 = 1 \times 100 \times 0.053 \text{ m} = 5.3 \text{ m}$$

$$\Sigma H_f = 8f \cdot \frac{l + \Sigma le}{d} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

$$= 8 \times 0.00222 \times \frac{20 + 18.55 + 0.954 + 5.3}{0.053} \times \frac{1.51^2}{2 \times 9.81} \text{ m} = 1.745 \text{ m}$$

所以: $He_{液} = (z_2 - z_1) + \Sigma H_f = (14.0 - 2.0 + 1.745) \text{ m液} = 13.745 \text{ m液柱}$

$$He_{水} = He_{液} \times \frac{1250}{1000} = 13.745 \times 1.25 \text{ mH}_2\text{O} = 17.18 \text{ mH}_2\text{O}$$

15、在一个长 60m, 内径 100mm 的光滑管管路上, 安装有 4 个标准 90° 弯头, 2 个全开式标准阀, 一个水表。设水的体积流量为 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 试比较管路上没有管件和有管件时单位重量流体因阻力所造成的压降。(已知水的密度是 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 粘度是 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

解: 已知 $d = 100 \text{ mm} = 0.1 \text{ m}$ $q_v = 30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ $l = 60 \text{ m}$

$$\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \mu = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

(1) 先求出 u 、 Re 及 f

$$u = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{30}{\frac{\pi}{4} \times 0.1^2 \times 3600} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.1 \times 1.06 \times 1000}{1 \times 10^{-3}} = 1.06 \times 10^5$$

$$f = 0.023Re^{-0.2} = 0.0023$$

(2) 比较单位重量流体因阻力而损失的压头

$$\text{管路上没有管件时: } H_{f_1} = 8f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

$$= 8 \times 0.0023 \times \frac{60}{0.1} \times \frac{1.06^2}{2 \times 9.81} \text{ m}$$

$$= 0.63 \text{ m}$$

管路上有管件时, 从表 2-3 查得各管件的当量长度分别为:

$$4 \text{ 个标准 } 90^\circ \text{ 弯头: } l_{e1} = 4 \times 35 \times 0.1 \text{ m} = 14.0 \text{ m}$$

$$2 \text{ 个全开式标准阀: } l_{e2} = 2 \times 300 \times 0.1 \text{ m} = 60.0 \text{ m}$$

$$\text{一个水表: } l_{e3} = 1 \times 350 \times 0.1 \text{ m} = 35.0 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 H_{f_2} &= 8f \cdot \frac{l + \sum le}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \\
 &= 8 \times 0.0023 \times \frac{60 + 14.0 + 60.0 + 35.0}{0.1} \times \frac{1.06^2}{2 \times 9.81} \text{ m} \\
 &= 1.78 \text{ m}
 \end{aligned}$$

(3) 比较因阻力而造成的压降

管路上没有管件时: $\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = H_{f_1} = 0.63 \text{ m}$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 0.63 \times 1000 \times 9.81 \text{ Pa} = 6.81 \times 10^3 \text{ Pa}$$

管路上有管件时: $\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = H_{f_2} = 1.78 \text{ m}$

$$\Delta p' = p_1 - p_2 = 1.78 \times 1000 \times 9.81 \text{ Pa} = 1.75 \times 10^4 \text{ Pa}$$

由上述的计算可以看出, 管路中因阻力所造成的压降 (或压头损失) 中, 局部阻力的压头损失占很大的比率。在此比例中, 局部阻力的压头损失占全部阻力所造成的压头损失的百分数为 $\frac{1.78 - 0.63}{1.78} = 64.4\%$

16、用离心泵将湖水通过等径管道送到一蓄水池中, 湖面与地面在同一水平面上 (如图所示), 若将通过此管路的流量加倍, 问泵的功率增加多少倍?

已知流量未增加时的 $Re = 1 \times 10^5$, Re 与 λ 的关系为:

Re	5×10^4	1×10^5	2×10^5	3×10^5
λ	0.023	0.022	0.020	0.019

解: 取湖面为 1-1' 截面, 蓄水池水面为 2-2' 截面, 以湖面为基准面, 列柏努利方程:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + He = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f$$

已知: $z_1 = z_2 = 0$ $u_1 = u_2 = 0$ $p_1 = p_2 = 0$ (表压)

所以: $He = \sum H_f$

设流量变化前后的参数分别为: $u, Re, \sum H_f, u', Re', \sum H_f'$

因为: $u = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} d^2}$, $Re = \frac{du\rho}{\mu}$

所以: $u' = 2u$ $Re' = 2Re$

$$\square \quad \sum H_f = \lambda \frac{l+le}{d} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

$$\therefore \frac{He'}{He} = \frac{\sum H_f'}{\sum H_f} = \frac{\lambda' u'^2}{\lambda u^2} = \frac{0.020 \times 4}{0.022} = 3.64$$

$$\therefore \frac{P_e'}{P_e} = \frac{q_v' He'}{q_v He} = 2 \times 3.64 = 7.28$$

即泵的功率增加到原来的 7.28 倍

17、某车间现有一台离心泵，泵的铭牌上标明其流量 $q_v=30\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ，扬程 $He'=23.0$ 米水柱，允许吸上真空度 $H_s=0.68\text{m}$ ，泵的流量和扬程均符合要求，若已知整个吸入管路的阻力损失为 1.2 米水柱，当时当地大气压为 736 毫米汞柱，试计算：输送 80°C 水时泵的安装高度为多少？若整个吸入管路的阻力损失为 2.0 米水柱时，泵又该怎样安装？

解：已知 $p_a=736$ 毫米汞柱=10 米水柱

由附录二查得 80°C 时水的饱和蒸汽压 $p_t=47.4\text{kPa}$

该温度下水的密度为 $971.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

故安装高度 H_g 应为：

$$H_g = (6.8\text{m} - \frac{p_t}{\rho g}) - 1.2\text{m} = (6.8 - \frac{47.4 \times 10^3}{971.8 \times 9.81})\text{m} - 1.2\text{m} = 0.63\text{m}$$

$$H_g' = (6.8 - \frac{47.4 \times 10^3}{971.8 \times 9.81})\text{m} - 2\text{m} = -0.17\text{m}$$

计算出的 H_g' 为负值，这说明管路阻力损失变大时，泵应安装在贮槽液面以下 0.17 米处。

第三章 传热过程

1、平壁炉的炉壁由三种材料组成，其厚度和导热系数列于本题附表。

习题 1 附表

序号	材 料	厚度 δ/mm	导热系数 $\lambda/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
1(内层)	耐火砖	200	1.07
2	绝热砖	100	0.14
3	钢	6	45

若耐火砖层内表面的温度 t_1 为 1150°C ，钢板外表面温度 t_4 为 30°C ，又测得通过炉壁的热损失为 $300\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。试计算传导传热的面积热流量。若计算结果与实测的热损失不符，试分析原因并计算附加热阻。

$$\text{解：} \quad q = \frac{\Delta t}{R} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{1150 - 30}{\frac{0.2}{1.07} + \frac{0.1}{0.14} + \frac{0.006}{45}} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

$$= \frac{1120}{0.901} \text{W}\cdot\text{m}^{-2} = 1243 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$$

计算的面积热流量大于实测值，说明壁面间接触不良，有空气层存在，产生了附加热阻，其值 R 为：

$$\begin{aligned}
 R &= R_{\text{实测}} - R_{\text{计算}} = \frac{1150 - 30}{300} \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} - \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) \\
 &= (3.733 - 0.901) \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1} \\
 &= 2.832 \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned}$$

2、 $\phi 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的不锈钢管，导热系数 $\lambda_1=16\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，其外包扎厚 30mm 的石棉，导热系数 $\lambda_2=0.2\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，石棉层外再包 30mm 厚的保温灰，导热系数 $\lambda_3=0.07\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。若不锈钢管内壁温度为 260 $^\circ\text{C}$ ，保温层最外层的壁温为 35 $^\circ\text{C}$ ，问每米管长的热损失为多少？

解：不锈钢管的内半径为 $r_1=20\text{mm}$ ，外半径 $r_2=25\text{mm}$ ， $\therefore r_2/r_1 < 2$ ，故可按算术平均求平均面积：

$$A_{m_1} = 2\pi r_{m_1} L = 2\pi \frac{0.025 + 0.02}{2} \text{m} \times L$$

石棉层内半径 $r_2=25\text{mm}$ ，外半径 $r_3=55\text{mm}$

$\because r_3/r_2 > 2$ ，需按对数平均求传热面积

$$r_{m_2} = \frac{0.055 - 0.025}{\ln \frac{0.055}{0.025}} \text{m} = 0.038 \text{m}$$

$$A_{m_2} = 2\pi r_{m_2} L = 2\pi \times 0.038 \text{m} \times L$$

保温灰层内半径 $r_3=0.055\text{m}$ ，外半径 $r_4=0.085\text{m}$

$$r_{m_3} = \frac{0.085 - 0.055}{\ln \frac{0.085}{0.055}} \text{m} = 0.069 \text{m}$$

$$A_{m_3} = 2\pi r_{m_3} L = 2\pi \times 0.069 \text{m} \times L$$

$$\square \quad q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A_{m_1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A_{m_2}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 A_{m_3}}}$$

故每米管长的热损失为

$$\begin{aligned}
 q/L &= \frac{260 - 35}{\frac{0.005}{16 \times 2\pi \frac{0.025 + 0.02}{2}} + \frac{0.03}{0.2 \times 2\pi \times 0.038} + \frac{0.03}{0.07 \times 2\pi \times 0.069}} \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \\
 &= \frac{225}{1.6194} \text{W} \cdot \text{m}^{-1} = 138.9 \text{W} \cdot \text{m}^{-1}
 \end{aligned}$$

3、某蒸汽管外包扎有二层厚度相等的绝热材料，外层的平均直径为内层平均直径的两倍，而外层的导热系数为内层的 1/2，若将此两种绝热材料互换位置，各层厚度与原来的一样，设蒸汽管外壁温度及外层绝热层的外侧面温度与原来情况分别对应相等，各绝热材料的导热系数值不因互换位置而异，问哪种情况的散热小？

解：多层圆筒壁的导热计算式为：

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A_{m_1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A_{m_2}}}$$

设下标 1 代表内层，下标 2 代表外层

$$\text{依题意: } \delta_1 = \delta_2 = \delta, \quad \lambda_2 = \frac{1}{2}\lambda_1, \quad d_{m2} = 2d_{m1}$$

$$\text{故 } A_{m2} = 2A_{m1} (A_m = \pi d_m \cdot L)$$

$$\text{互换前 } q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A_{m1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A_{m2}}} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda_1 A_{m1}} + \frac{\delta}{\frac{1}{2}\lambda_1 \cdot 2A_{m1}}} = \frac{\Delta t}{2 \frac{\delta}{\lambda_1 A_{m1}}}$$

$$\text{互换后 } q' = \frac{\Delta t}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A_{m1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A_{m2}}} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\frac{1}{2}\lambda_1 \cdot A_{m1}} + \frac{\delta}{2\lambda_1 A_{m1}}} = \frac{\Delta t}{\frac{5}{2} \frac{\delta}{\lambda_1 A_{m1}}}$$

$$\therefore \frac{q'}{q} = \frac{\frac{\Delta t}{\frac{5}{2} \frac{\delta}{\lambda_1 A_{m1}}}}{\frac{\Delta t}{2 \frac{\delta}{\lambda_1 A_{m1}}}} = \frac{4}{5} = 0.8$$

计算表明外层材料换内层后散热小，即将导热系数小的材料放在内层为宜。

4、常压下空气在内径为 25.4mm 的管中流动，温度由 220°C 降到 180°C，若空气流速为 15m·s⁻¹，试求空气与管内壁之间的对流传热膜系数。

解：在定性温度 $t_m = \frac{180 + 220}{2} \text{°C} = 200 \text{°C}$ 和常压下，空气的物性：

$$C_p = 1.026 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \lambda = 0.0393 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\mu = 26 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{s} \quad \rho = 0.746 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} = \frac{1.026 \times 10^3 \times 26 \times 10^{-6}}{0.0393} = 0.679$$

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{0.0254 \times 15 \times 0.764}{26 \times 10^{-6}} = 10930 \quad \text{为湍流}$$

$$\begin{aligned} \therefore \alpha &= 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.3} = 0.023 \times \frac{0.0393}{0.0254} \times 10930^{0.8} \times 0.679^{0.3} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \\ &= 53.8 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

5、有一列管式换热器、蒸汽在管外冷凝，加热管内的冷水，水的进出口温度分别为 20°C 和 40°C，水的流速为 1m·s⁻¹，列管为 φ25mm×2.5mm 的钢管，求水在管内的对流传热膜系数，若水的流速减至 0.3m·s⁻¹ 时，水在管内的对流传热膜系数将是多少？

解：(1) 水的定性温度为 $t_m = \frac{20 + 40}{2} \text{°C} = 30 \text{°C}$ ，此时水的物性常数：

$$\rho = 995.7 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad C_p = 4.174 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda = 0.618 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \mu = 0.801 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{0.02 \times 1 \times 995.7}{0.801 \times 10^{-3}} = 24860 \quad \text{为湍流}$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda} = \frac{4.174 \times 10^{-3} \times 0.801 \times 10^{-3}}{0.618} = 5.41$$

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.023 \times \frac{0.618}{0.02} \times 24860^{0.8} \times 5.41^{0.4} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

$$= 4585.3 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

(2)水的流速降到 $0.3 m \cdot s^{-1}$ 后:

$$Re' = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{0.02 \times 0.03 \times 995.7}{0.801 \times 10^{-3}} = 7458 \quad \text{系过渡流}$$

$$Pr' = Pr = 5.41$$

$$\text{校正系数: } f = 1 - \frac{6 \times 10^5}{Re^{1.8}} = 1 - \frac{6 \times 10^5}{7458^{1.8}} = 0.938$$

$$\therefore \alpha' = \alpha \cdot f = 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.4} f$$

$$= 0.023 \times \frac{0.618}{0.02} \times 7458^{0.8} \times 5.41^{0.4} \times 0.938 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

$$= 1640 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

6、温度为 $90^\circ C$ 的甲苯以 $1500 kg \cdot h^{-1}$ 的流量通过蛇管时被冷却至 $30^\circ C$ ，蛇管的直径为 $\phi 57 mm \times 3.5 mm$ ，弯曲半径为 $0.6 m$ ，试求甲苯对蛇管的对流传热膜系数。

解：定性温度 $t_m = \frac{1}{2}(90 + 30)^\circ C = 60^\circ C$ ，其物性为

$$\lambda = 0.127 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \quad \mu = 0.39 \times 10^{-3} \text{ Pas}$$

$$C_p = 1.85 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$$

单位面积上流过的甲苯流量 G 为:

$$G = \frac{1500}{3600 \times \frac{\pi}{4} \times 0.05^2} kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} = 212 kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$$

$$Re = \frac{dG}{\mu} = \frac{0.05 \times 212}{0.39 \times 10^{-3}} = 2.72 \times 10^4 \quad \text{为湍流}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} = \frac{1.85 \times 10^3 \times 0.39 \times 10^{-3}}{0.127} = 5.68$$

$$\begin{aligned} \text{先按直管计算 } \alpha &= 0.023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.3} \\ &= 0.023 \times \frac{0.127}{0.05} \times (2.72 \times 10^4)^{0.8} \times 5.68^{0.3} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \\ &= 347 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

对弯管进行校正得:

$$\alpha' = \alpha \left(1 + 1.77 \frac{d}{R}\right) = 347 \left(1 + 1.77 \frac{0.05}{0.6}\right) \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} = 398 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

7、常压下温度为 120℃ 的甲烷，以 10m·s⁻¹ 的平均速度在列管换热器的管间沿轴向流动，离开换热器时，甲烷的温度为 30℃，换热器外壳内径为 190mm，管束由 37 根 φ19mm×2mm 的钢管组成，试求甲烷对管壁的对流传热膜系数。

解：定性温度 $t_m = \frac{120 + 30}{2} \text{C} = 75 \text{C}$ ，此时的甲烷的物性为：

$$\mu = 0.0115 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s} \quad \lambda = 0.0407 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$C_p = 2.5 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\rho = \frac{PM}{RT} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 16}{8.314 \times 10^3 \times 348} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} = 0.56 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

此为物料在非圆形管间流动，其当量直径为

$$de = 4 \frac{\left(\frac{\pi}{4} D^2 - n \frac{\pi}{4} d^2\right)}{\pi D + n \pi} = \frac{(D^2 - nd^2)}{D + nd} = \frac{0.19^2 - 37 \times 0.019^2}{0.19 + 37 \times 0.019} \text{m} = 0.0254 \text{m}$$

$$\text{Re} = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{0.254 \times 10 \times 0.56}{0.0115 \times 10^{-3}} = 12369$$

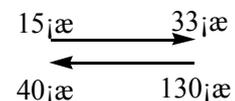
$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{\lambda} = \frac{2.5 \times 10^3 \times 0.0115 \times 10^{-3}}{0.0407} = 0.706$$

$$\begin{aligned} \text{故 } \alpha &= 0.023 \frac{\lambda}{de} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \\ &= 0.023 \times \frac{0.0407}{0.0254} (12369)^{0.8} \times 0.706^{0.4} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \\ &= 62.4 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

8、在一双壳程，四管程的列管换热器中，用水冷却某热流体，冷水在管内流动，进口温度为 15℃，出口温度为 33℃，热流体的进口温度为 130℃，出口温度为 40℃，试求两流体间的平均温度差。

解：此题为求折流时的平均温度差，先按逆流计算

$$\Delta t'_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{(130 - 33) - (40 - 15)}{\ln \frac{130 - 33}{40 - 15}} \text{C} = 53.1 \text{C}$$



$$\text{因 } R = \frac{130-40}{33-15} = 5.0 \quad p = \frac{33-15}{130-15} = 0.16$$

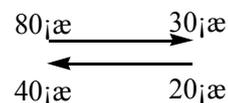
查图得温度校正系数 $\varphi_A = 0.97$

$$\text{所以 } \Delta t_m = \varphi_A \cdot \Delta t'_m = 0.97 \times 53.1^\circ \text{C} = 51.5^\circ \text{C}$$

9、某单程列管式换热器，由直径 $\Phi 25\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 的钢管束组成，苯在列管内流动，流量为 $1.25\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ，由 80°C 冷却到 30°C ，冷却水在管间和苯逆向流动，水的进、出口温度分别为 20°C 和 40°C ，测得水侧和苯侧的对流传热膜系数分别为 1.70 和 $0.85\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ，污垢热阻分别为 0.21 和 $0.176\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{kW}^{-1}$ ，若换热器的热损失可忽略，试求换热器的传热面积。（苯的平均比定压热容为 $1.9\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，钢的导热系数为 $45\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）。

$$\text{解： } q = q_{m,h} C_{p,h} (T_1 - T_2) = 1.25 \times 1.9 \times (80 - 30)\text{kW} = 118.75\text{kW}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{(80-40) - (30-20)}{\ln \frac{80-40}{30-20}}^\circ \text{C} = 21.6^\circ \text{C}$$



$$K_o = \frac{1}{\frac{d_o}{\alpha_i d_i} + R_i + \frac{\delta d_o}{\lambda d_m} + R_o + \frac{1}{\alpha_o}}$$

$$= \frac{1}{\frac{0.025}{0.85 \times 0.02} + 0.176 + \frac{0.0025 \times 0.025}{0.045 \times 0.0225} + 0.21 + \frac{1}{1.7}} \text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$$

$$= 0.4\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{k}^{-1}$$

$$\therefore A_o = \frac{\varphi}{K_o \cdot \Delta t_m} = \frac{118.75}{0.4 \times 21.6} \text{m}^2 = 13.74\text{m}^2$$

10、热空气在冷却管外流动， $\alpha_o=90\text{W}\cdot\text{M}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ，冷却水在管内流动， $\alpha_i=1000\text{W}\cdot\text{M}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ，管外径 d 为 16mm ，管壁厚 $\delta=1.5\text{mm}$ ，管材导热系数 $\lambda=40\text{W}\cdot\text{M}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ，试求：

- (1) 传热系数 K （不计污垢热阻的热损失）
- (2) 管外给热系数 α_o 增加一倍，传热系数有何变化？
- (3) 管内给热系数 α_i 增加一倍，传热系数有何变化？

$$\text{解： (1) } K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_o}} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0.0015}{40} + \frac{1}{90}} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} = 83.1\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$(2) \alpha'_o = 2\alpha_o = 2 \times 90\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} = 180\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{则 } K' = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{1}{180}} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} = 152.5\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$(3) \alpha'_i = 2\alpha_i = 2 \times 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} = 2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{则 } K'' = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{90}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} = 86.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

讨论:

第一种情况, 传热系数 K 的增加率为:

$$\frac{K' - K}{K} = \frac{152.5 - 83.1}{83.1} \times 100\% = 83.5\%$$

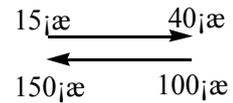
第二种情况, 传热系数 K 的增加率为:

$$\frac{K'' - K}{K} = \frac{86.1 - 83.1}{83.1} \times 100\% = 3.6\%$$

可见, 提高 K 值应从提高 α 小的一侧着手, 才会奏效。

11、在并流换热器中, 用水冷却油。水的进、出口温度分别为 15°C 和 40°C , 油的进、出口温度分别为 150°C 和 100°C 。现要求油的出口温度降至 80°C , 假设油和水的流量、进口温度及物性均不变, 若原换热器的管长为 1m , 试求此换热器的管长增至多少米才能满足要求。(设换热器的热损失可忽略不计。)

$$\text{解: } \Delta t_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

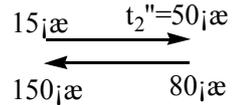


$$= \frac{(150 - 15) - (100 - 40)}{\ln \frac{150 - 15}{100 - 40}} \text{ C} = 92.5^\circ\text{C}$$

$$\text{由热量衡算得: } \frac{q_{m,h} C_{p,h}}{q_{m,c} C_{p,c}} = \frac{t'_2 - t'_1}{t_1 - t_2} = \frac{40 - 15}{150 - 100} = 0.5$$

当油的出口降至 80°C 时, 由热量衡算:

$$q = q_{m,h} C_{p,h} (150 - 80)^\circ\text{C} = q_{m,c} C_{p,c} (t''_2 - 15^\circ\text{C})$$



解得 $t''_2 = 50^\circ\text{C}$

$$\Delta t'_m = \frac{(150 - 15) - (80 - 50)}{\ln \frac{150 - 15}{80 - 50}} \text{ C} = 70^\circ\text{C}$$

$$\text{原来的传热速率方程: } q_{m,h} C_{p,h} (150 - 100)^\circ\text{C} = KA \Delta t_m = K \cdot n \pi d L \cdot 92.5^\circ\text{C}$$

$$\text{后来的传热速率方程: } q_{m,h} C_{p,h} (150 - 80)^\circ\text{C} = KA' \Delta t'_m = K \cdot n \pi d L' \cdot 70^\circ\text{C}$$

$$\text{解得 } L' = \frac{70}{50} \frac{92.5}{70} \text{ m} = 1.85 \text{ m}$$

12、 90°C 的丁醇在逆流换热器中被冷却到 50°C , 换热器传热面积为 6m^2 , 总传热系数为 $230\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 若丁醇的流量为 $1930\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 冷却水的进口温度为 18°C , 试求:

(1) 冷却水的出口温度;

(2) 冷却水的消耗量。

解：(1) 丁醇的定性温度为 $t_m = \frac{90+50}{2} \text{ }^\circ\text{C} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ，此时丁醇的比热为 $C_p = 2.98 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$$q = q_{m,h} C_{p,h} (t_1 - t_2) = \frac{1930}{3600} \times 2.98 \times 10^3 \times (90 - 50) \text{ W} = 6.39 \times 10^4 \text{ W}$$

$$\Delta t_m = \frac{q}{KA} = \frac{6.39 \times 10^4}{230 \times 6} \text{ }^\circ\text{C} = 46.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

若用算术平均温度计算

$$\Delta t_m = \frac{(t_1 - t'_2) + (t_2 - t'_1)}{2} = \frac{(90 \text{ }^\circ\text{C} - t'_2) + (50 - 18) \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 61 \text{ }^\circ\text{C} - \frac{t'_2}{2} = 46.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

解得 $t'_2 = 29.4 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{验算: } \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \frac{90 - 29.4}{50 - 18} = 1.89 < 2$$

所以用算术平均温度差计算是允许的。

(2) 若忽略热损失，则

$$q_{m,c} C_{p,c} (t'_2 - t'_1) = q_{m,h} C_{p,h} (t_1 - t_2)$$

$$\therefore q_{m,c} = \frac{q_{m,h} C_{p,h} (t_1 - t_2)}{C_{p,c} (t'_2 - t'_1)} = \frac{1930 \times 2.98 \times (90 - 50)}{4.187 \times (29.4 - 18)} \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 4820 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

13、一定流量的空气在换热器的管内呈湍流流动，从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ，压强为 180 kPa 的饱和蒸汽在管外冷凝。现因生产需要，空气流量增加 20% ，而其进、出口温度不变。试问，应采取何种措施，才能完成任务。（作定量计算、假设管壁和污垢热阻可忽略）。

解：依题意 $K = \alpha_i$

$$\alpha_i = 0.023 \text{ Re}^{0.8} \text{ Pr}^{0.4}, \quad \alpha_i \propto u^{0.8}$$

故增加流量后 $\alpha'_i = (1.2)^{0.8} \alpha_i = 1.16 \alpha_i$

由附录查得 $p=180 \text{ kPa}$ 时水蒸气的饱和温度为 $116.6 \text{ }^\circ\text{C}$

现空气流量增加 20% ，则需提高加热蒸汽温度（即压强），否则需更换一传热面积更大的换热器。

$$\text{因 } q = q_{m,c} C_{p,c} \Delta t$$

$$\text{故 } q' = 1.2 q_{m,c} C_{p,c} \Delta t = 1.2 q$$

$$\text{而 } q = KA \Delta t_m$$

$$\text{原流量时 } \Delta t_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} = \frac{(116.6 - 20) - (116.6 - 80)}{\ln \frac{96.6}{36.6}} \text{ } ^\circ\text{C} = 61.8^\circ\text{C}$$

$$\text{即 } q = \alpha_i A \times 61.8^\circ\text{C}$$

$$\text{流量增大后: } q' = 1.2q = K' A \Delta t'_m = (1.16\alpha_i) \cdot A \cdot \Delta t'_m$$

$$\text{即 } 1.2\alpha_i A \times 61.8^\circ\text{C} = 1.16\alpha_i A \cdot \Delta t'_m$$

$$\text{故 } \Delta t'_m = \frac{1.2 \times 61.8}{1.16} \text{ } ^\circ\text{C} = 63.9^\circ\text{C}$$

$$\text{即 } \frac{(T' - 20^\circ\text{C}) - (T' - 80^\circ\text{C})}{\ln \frac{T' - 20^\circ\text{C}}{T' - 80^\circ\text{C}}} = 63.9^\circ\text{C}$$

$$\text{化简得: } \ln \frac{T' - 20}{T' - 80} = \frac{60}{63.9} = 0.946$$

$$\text{解得 } T' = 118.5^\circ\text{C}$$

从附录查得，将饱和蒸汽压强提高到约 200kPa 即可。

14、某单壳程、单管程列管换热器，壳程为水蒸气冷凝， $t=140^\circ\text{C}$ ，管程走空气， $t_1=20^\circ\text{C}$ ，现将此换热器由单管程换为双管程，两管程的管数相等，且为原总管数的一半，若空气流量不变，均为湍流流动，且假定 $\alpha_{in} \approx K$ ，求改为双管程后空气的出口温度。（略去管壁及污垢的热阻，空气的物性不变。）

$$\text{解: 热量衡算式: } q = q_{m,2} C_{p,2} (t_2 - t_1)$$

$$\text{传热速率式: } q = KA\Delta t_m = \alpha_2 A \frac{(t - t_1) - (t - t_2)}{\ln \frac{t - t_1}{t - t_2}}$$

$$\text{由上二式得: } q_{m,2} C_{p,2} = \alpha_2 A \frac{1}{\ln \frac{t - t_1}{t - t_2}}$$

$$\text{改双管程前: } q_{m,2} C_{p,2} = \alpha_2 A \frac{1}{\ln \frac{140 - 20}{140 - 90}} \quad (\text{a})$$

$$\text{改双管程后: } q_{m,2} C_{p,2} = \alpha_2' A \frac{1}{\ln \frac{140 - 20}{140 - t_2}} \quad (\text{b})$$

将式 a、b 联立解得：

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_2} = \frac{\ln \frac{120}{140-t_2}}{\ln \frac{120}{50}} \quad (c)$$

因 $\alpha_2 \propto u^{0.8}$

$$\frac{\alpha'_2}{\alpha_2} = \left(\frac{u'}{u}\right)^{0.8} = 2^{0.8} \quad \therefore \quad 2^{0.8} = \frac{\ln \frac{120}{140-t'_2}}{\ln \frac{120}{50}} \quad \text{解得 } t'_2 = 113.9^\circ\text{C}$$

因 $u \uparrow, \alpha \uparrow$

故使空气出口温度上升，但应注意， Δp 亦会增加（ Δp 会增至原来的几倍呢？）

第四章 传质过程

1. 压强为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 、温度为 25°C 的系统中， N_2 和 O_2 的混合气发生定常态扩散过程。已知相距 $5.00 \times 10^{-3} \text{m}$ 的两截面上，氧气的分压分别为 $1.25 \times 10^4 \text{Pa}$ 、 $7.5 \times 10^3 \text{Pa}$ ； 0°C 时氧气在氮气中的扩散系数为 $1.818 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。求等物质的量反向扩散时：

- (1) 氧气的扩散通量；
- (2) 氮气的扩散通量；
- (3) 与分压为 $1.25 \times 10^4 \text{Pa}$ 的截面相距 $2.5 \times 10^{-3} \text{m}$ 处氧气的分压。

解：(1) 首先将 273K 时的扩散系数换算为 298K 时的值：

$$\begin{aligned} D &= D_0 \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.75} \\ &= 1.815 \times 10^{-5} \times \frac{1.013 \times 10^5}{1.013 \times 10^5} \times \left(\frac{273+25}{273}\right)^{1.75} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 2.119 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

等物质的量反向扩散时氧的扩散通量为：

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{D}{RTl} (p_{A,1} - p_{A,2}) \\ &= \frac{2.119 \times 10^{-5}}{8.314 \times 298 \times 5.00 \times 10^{-3}} \times (1.25 \times 10^4 - 7.5 \times 10^3) \text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 8.553 \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

(2) 由于该扩散过程为等物质的量反向扩散过程，所以 $-N_A = N_B$ ，即氮气的扩散通量也为 $8.553 \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3) 因为系统中的扩散为定常态，所以为定值，则：

$$N_A = \frac{D}{RTl'}(p_{A,1} - p_{A,2}')$$

$$\text{则 } p_{A,2}' = p_{A,1} - \frac{N_A RTl'}{D}$$

$$= 1.25 \times 10^4 - \frac{8.55 \times 10^{-3} \times 8.314 \times 298 \times 2.5 \times 10^{-3}}{2.119 \times 10^{-5}} \text{ Pa} = 1.00 \times 10^4 \text{ Pa}$$

2. 在定常态下, NH_3 和 H_2 的混合气发生扩散过程。系统总压为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度为 298 K ，扩散系数为 $7.83 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。已知相距 0.02 m 的两截面上, NH_3 的分压分别为 $1.52 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和 $4.8 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。试求:

(1) NH_3 和 H_2 作等物质的量反向扩散时的传质通量;

(2) H_2 为停滞组分时, NH_3 的传质通量。并比较等物质的量反向扩散与单向扩散的传质通量大小。

解: (1) 当 NH_3 和 H_2 作等物质的量反向扩散时:

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{D}{RTl}(p_{A,1} - p_{A,2}) \\ &= \frac{7.83 \times 10^{-5}}{8.314 \times 298 \times 0.02} \times (1.52 \times 10^4 - 4.80 \times 10^3) \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 1.643 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

(2) 当 H_2 为停滞组分时, NH_3 的扩散为单相扩散,

$$p_{B,1} = p - p_{A,1} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} - 1.52 \times 10^4 \text{ Pa} = 8.61 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_{B,2} = p - p_{A,2} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} - 4.80 \times 10^3 \text{ Pa} = 9.65 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_{B,m} = \frac{p_{B,2} - p_{B,1}}{\ln \frac{p_{B,2}}{p_{B,1}}} = \frac{1.013 \times 10^5 - 8.61 \times 10^4}{\ln \frac{1.013 \times 10^5}{8.61 \times 10^4}} \text{ Pa} = 9.12 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\begin{aligned} \therefore N_A &= \frac{D}{RTl} \cdot \frac{p}{p_{B,m}} (p_{A,1} - p_{A,2}) \\ &= \frac{7.83 \times 10^{-5}}{8.314 \times 298 \times 0.02} \times \frac{1.013 \times 10^5}{9.12 \times 10^4} \times (1.52 \times 10^4 - 4.80 \times 10^3) \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 1.825 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

计算结果表明, 单向扩散时的传质通量比等物质的量反向扩散时的传质通量大, 前者是后者的 $p/p_{B,m}$ 倍 ($p/p_{B,m} > 1$)。

3. 在一装水的浅槽中, 水的高度为 $5 \times 10^{-3} \text{ m}$ 维持槽中水温 30°C , 因分子扩散使水逐渐向大气蒸发。假设扩散开始时通过一厚度为 $5 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、温度为 30°C 的静止空气层, 该空气层以外水蒸气分压可视为零。扩散系数为 $3.073 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 大气压 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。求浅槽内的水完全蒸发所需的时间。

解：本题属于单向扩散过程，但水面上方的静止层厚度发生了变化。

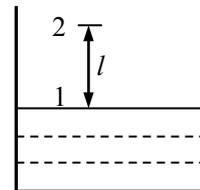
查 30°C 时水的饱和蒸汽压为 $4.25 \times 10^3 \text{Pa}$, $\rho = 995.7 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

如图, $p_{B,1} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} - 4.25 \times 10^3 \text{Pa} = 9.71 \times 10^4 \text{Pa}$

$$p_{B,2} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} - 0 = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$p_{B,m} = \frac{p_{B,2} - p_{B,1}}{\ln \frac{p_{B,2}}{p_{B,1}}}$$

$$= \frac{1.013 \times 10^5 - 9.71 \times 10^4}{\ln \frac{1.013 \times 10^5}{9.71 \times 10^4}} \text{Pa} = 9.919 \times 10^4 \text{Pa}$$



$$\therefore N_A = \frac{D}{RTl} \cdot \frac{p}{p_{B,m}} (p_{A,1} - p_{A,2})$$

$$= \frac{3.073 \times 10^{-5}}{8.314 \times (273 + 30) \times l} \times \frac{1.013 \times 10^5}{9.919 \times 10^4} \times (4.25 \times 10^3 - 0) \text{mol} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$= \frac{5.29 \times 10^{-5}}{l} \text{mol} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

根据扩散量等于蒸发量，得：

$$N_A \cdot A \cdot dt = \frac{\rho_A}{M_A} \cdot A \cdot dl$$

$$\int_0^t dt = \frac{\rho_A}{N_A M_A} \int_{0.005}^{0.01} dl$$

积分得：

$$t = \frac{995.7 \times 10^3}{5.29 \times 10^{-5} \times 18} \times \frac{1}{2} (0.01^2 - 0.005^2) \text{s} = 3.92 \times 10^4 \text{s}$$

4. 含 NH_3 10% (体积分数, 下同) 的氨-空气混合气在填料吸收塔中连续用水吸收, 出塔时氨的浓度降为 0.1%。操作温度为 293K, 压强为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 。已知在塔内某一点上, 氨在气相中的浓度为 5%, 与该点溶液呈平衡的氨的分压为 660Pa, 传质通量为 $1.00 \text{mol} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。若氨在空气中的扩散系数为 $2.4 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 且假定传质阻力集中在气液界面气体一侧的层流膜层中。试求该层流膜层的厚度。

解：用水连续吸收氨气属于单向扩散过程，设层流膜层厚度为 l_G ，在相距 l_G 处气相中的氨和惰性组分的分压分别为：

$$p_{A,1} = 0.05 \times 1.013 \times 10^5 \text{Pa} = 5065 \text{Pa}$$

$$p_{A,2} = 660 \text{Pa}$$

$$p_{B,1} = p - p_{A,1} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} - 5065 \text{Pa} = 9.624 \times 10^4 \text{Pa}$$

$$p_{B,2} = p - p_{A,2} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} - 660 \text{ Pa} = 1.006 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{B,m} = \frac{p_{B,1} - p_{B,2}}{\ln \frac{p_{B,1}}{p_{B,2}}} = \frac{9.624 \times 10^4 - 1.006 \times 10^5}{\ln \frac{9.624 \times 10^4}{1.006 \times 10^5}} \text{ Pa} = 9.84 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$N_A = \frac{D}{RTl} \cdot \frac{p}{p_{B,m}} (p_{A,1} - p_{A,2})$$

$$1.0 = \frac{2.4 \times 10^{-5}}{8.314 \times 293 \times l / \text{m}} \times \frac{1.013 \times 10^5}{9.84 \times 10^4} \times (5065 - 660)$$

$$\therefore l_G = 4.47 \times 10^{-5} \text{ m}$$

第五章 吸收

1、在总压为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度为 303 K 的条件下，氮在空气中的分压为 $2.126 \times 10^4 \text{ Pa}$ ，求：

(1) y_A 和 Y_A ；

(2) 与气相平衡的水溶液浓度，分别用 x_A 和 X_A 表示（设体系服从亨利定律）

$$\text{解：(1) } y_A = \frac{2.126 \times 10^4}{1.00 \times 10^5} = 0.2126 = 21.26\%$$

$$Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A} = \frac{0.2126}{1 - 0.2126} = 0.27$$

(2) 查得 30°C 时 N_2 的亨利系数为 $9.36 \times 10^9 \text{ Pa}$

$$\square \quad p_A^* = E x_A$$

$$\therefore x_A^* = \frac{p_A}{E} = \frac{9.126 \times 10^4}{9.36 \times 10^9} = 2.27 \times 10^{-6}$$

$$X_A = \frac{x_A}{1 - x_A} = \frac{2.301 \times 10^{-6}}{1 - 2.27 \times 10^{-6}} = 2.27 \times 10^{-6}$$

2、当总压为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度为 293 K 时，氧在水中的溶解度可用下式表示：

$p_A^* = 4.01 \times 10^9 x_A$ ，式中： p_A^* 为氧的平衡分压， Pa ； x_A 为氧在溶液中的摩尔分数。试求在此状态下，

空气与水充分接触后，每立方米水中溶有多少克氧？

解：空气中含氧 21%（体积百分数），氧的分压为：

$$p_A = 0.21 \times 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 2.127 \times 10^4 \text{ Pa}$$

水的密度近似取 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

溶解度系数:

$$H = \frac{\rho}{EM} = \frac{1000 \times 10^3}{4.06 \times 10^9 \times 18} \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1} = 1.368 \times 10^{-5} \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$$

根据亨利定律:

$$p_A^* = \frac{c_A}{H}$$

$$c_A = p_A^* \cdot H = 2.127 \times 10^4 \times 1.385 \times 10^{-5} \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} = 0.295 \text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

每立方米水中溶有氧:

$$0.295 \times 32 \text{g} = 9.44 \text{g}$$

3、已知在 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 下, 100g 水中溶有 H_2S $7.821 \times 10^{-3} \text{g}$, 溶液上方 H_2S 的平衡分压 2026kPa。求:

- (1) 溶解度系数 $H(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1})$;
- (2) 以气相分压与液相摩尔分数之间关系表示的相平衡方程;
- (3) 相平衡常数;
- (4) 总压提高一倍时的 E 、 H 、 m 值。

解: (1) 液相中 H_2S 的量为: $\frac{7.821 \times 10^{-3}}{34} \text{mol} = 2.30 \times 10^{-4} \text{mol}$

$$c_A = \frac{2.30 \times 10^{-4}}{7.821 \times 10^{-3} + 100} \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} = 2.30 \times 10^{-4} \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} = 2.30 \text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$$

溶解度系数: $H = \frac{c_A}{P_A^*} = \frac{2.30}{2026} \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1} = 1.135 \times 10^{-3} \text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{Pa}^{-1}$

(2) 亨利系数

$$E = \frac{\rho}{HM} = \frac{1000}{1.135 \times 10^{-3} \times 18 \times 10^{-3}} \text{Pa} = 4.895 \times 10^7 \text{Pa}$$

相平衡关系为: $p_A^* = 4.895 \times 10^7 x_A$

(3) 相平衡常数

$$m = \frac{E}{P} = \frac{4.895 \times 10^7}{1.013 \times 10^5} = 483$$

(4) 当总压不太高时, 总压增大一倍, E 、 H 不变, 但 m 将变化。

$$m = \frac{E}{P} = \frac{E}{2P} = \frac{1}{2} m = 242$$

4、303K 下, SO_2 分压为 3039Pa 的混合气分别与下列溶液接触: a) 含 SO_2 $25.60 \text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/438064131013007005>