

## 第四章 传热

【例 4-1】 某平壁厚度  $b=0.37\text{m}$ ，内表面温度  $t_1=1650^\circ\text{C}$ ，外表面温度  $t_2=300^\circ\text{C}$ ，平壁材料导热系数  $\lambda=0.815+0.00076t$ ， $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。若将导热系数分别按常量（取平均导热系数）和变量计算，试求平壁的温度分布关系式和导热热通量。

解：

(1) 导热系数按常量计算

$$\text{平壁的平均温度 } t_m = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{1650 + 300}{2} = 975^\circ\text{C}$$

平壁材料的平均导热系数

$$\lambda_m = 0.815 + 0.00076 \times 975 = 1.556 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$$

导热热通量为：

$$q = \frac{\lambda}{b}(t_1 - t_2) = \frac{1.556}{0.37}(1650 - 300) = 5677 \text{ W}/\text{m}^2$$

设壁厚  $x$  处的温度为  $t$ ，则由式 4-6 可得

$$q = \frac{\lambda}{x}(t_1 - t)$$

$$\text{故 } t = t_1 - \frac{qx}{\lambda} = 1650 - \frac{5677}{1.556}x = 1650 - 3649x$$

上式即为平壁的温度分布关系式，表示平壁距离  $x$  和等温表面的温度呈直线关系。

(2) 导热系数按变量计算，由式 4-5 得

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = -(\lambda_0 + a't) \frac{dt}{dx} = -(0.815 + 0.00076t) \frac{dt}{dx}$$

$$\text{或 } -qdx = (0.815 + 0.00076t) dt$$

$$\text{积分 } -q \int_0^b dx = \int_{t_1}^{t_2} (0.815 + 0.00076t) dt$$

$$\text{得 } -qb = 0.815(t_2 - t_1) + \frac{0.00076}{2}(t_2^2 - t_1^2)$$

(a)

$$q = \frac{0.815}{0.37}(1650 - 300) + \frac{0.00076}{2 \times 0.37}(1650^2 - 300^2) = 5677 \text{ W}/\text{m}^2$$

当  $b=x$  时， $t_2=t$ ，代入式 (a)，可得

$$-5677x = 0.815(t - 1650) + \frac{0.00076}{2}(t^2 - 1650^2)$$

整理上式得

$$t^2 + \frac{2 \times 0.815}{0.00076}t + \frac{2}{0.00076} \left[ 5677x - \left( 0.815 \times 1650 + \frac{0.00076}{2} \times 1650^2 \right) \right] = 0$$

解得  $t = -1072 + \sqrt{7.41 \times 10^6 - 1.49 \times 10^7 x}$

上式即为当  $\lambda$  随  $t$  呈线性变化时单层平壁的温度分布关系式，此时温度分布为曲线。

计算结果表明，将导热系数按常量或变量计算时，所得的导热通量是相同的，而温度分布则不同，前者为直线，后者为曲线。

**【例 4-2】** 某平壁燃烧炉是由一层耐火砖与一层普通砖砌成，两层的厚度均为 100mm，其导热系数分别为  $0.9\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  及  $0.7\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。待操作稳定后，测得炉膛的内表面温度为  $700^\circ\text{C}$ ，外表面温度为  $130^\circ\text{C}$ 。为了减少燃烧炉的热损失，在普通砖外表面增加一层厚度为 40mm、导热系数为  $0.06\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  的保温材料。操作稳定后，又测得炉内表面温度为  $740^\circ\text{C}$ ，外表面温度为  $90^\circ\text{C}$ 。设两层砖的导热系数不变，试计算加保温层后炉壁的热损失比原来的减少百分之几？

解：加保温层前单位面积炉壁的热损失为  $\left(\frac{Q}{S}\right)_1$

此时为双层平壁的热传导，其导热速率方程为：

$$\left(\frac{Q}{S}\right)_1 = \frac{t_1 - t_3}{\frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2}} = \frac{700 - 130}{\frac{0.1}{0.9} + \frac{0.1}{0.7}} = 2244 \text{ W/m}^2$$

加保温层后单位面积炉壁的热损失为  $\left(\frac{Q}{S}\right)_2$

此时为三层平壁的热传导，其导热速率方程为：

$$\left(\frac{Q}{S}\right)_2 = \frac{t_1 - t_4}{\frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{b_3}{\lambda_3}} = \frac{740 - 90}{\frac{0.1}{0.9} + \frac{0.1}{0.7} + \frac{0.04}{0.06}} = 706 \text{ W/m}^2$$

故加保温层后热损失比原来减少的百分数为：

$$\frac{\left(\frac{Q}{S}\right)_1 - \left(\frac{Q}{S}\right)_2}{\left(\frac{Q}{S}\right)_1} \times 100\% = \frac{2244 - 706}{2244} \times 100\% = 68.5\%$$

**【例 4-3】** 在外径为 140mm 的蒸气管道外包扎保温材料，以减少热损失。蒸气管外壁温度为 390℃，保温层外表面温度不大于 40℃。保温材料的  $\lambda$  与  $t$  的关系为  $\lambda=0.1+0.0002t$  ( $t$  的单位为 ℃， $\lambda$  的单位为 W/(m·℃))。若要求每米管长的热损失  $Q/L$  不大于 450W/m，试求保温层的厚度以及保温层中温度分布。

解：此题为圆筒壁热传导问题，已知： $r_2=0.07\text{m}$      $t_2=390^\circ\text{C}$      $t_3=40^\circ\text{C}$   
先求保温层在平均温度下的导热系数，即

$$\lambda = 0.1 + 0.0002 \left( \frac{390 + 40}{2} \right) = 0.143 \text{ W/(m} \cdot \text{℃)}$$

(1) 保温层温度 将式 (4-15) 改写为

$$\ln \frac{r_3}{r_2} = \frac{2\pi\lambda(t_2 - t_3)}{Q/L}$$

$$\ln r_3 = \frac{2\pi \times 0.143(390 - 40)}{450} + \ln 0.07$$

得  $r_3=0.141\text{m}$

故保温层厚度为

$$b=r_3-r_2=0.141-0.07=0.071\text{m}=71\text{mm}$$

(2) 保温层中温度分布 设保温层半径  $r$  处的温度为  $t$ ，代入式 (4-15) 可得

$$\frac{2\pi \times 0.143(390 - t)}{\ln \frac{r}{0.07}} = 450$$

解上式并整理得  $t = -501 \ln r - 942$

计算结果表明，即使导热系数为常数，圆筒壁内的温度分布也不是直线而是曲线。

**【例 4-4】** 有一列管式换热器，由 38 根  $\phi 25\text{mm} \times 2.5\text{mm}$  的无缝钢管组成。苯在管内流动，由 20℃ 被加热至 80℃，苯的流量为 8.32kg/s。外壳中通入水蒸气进行加热。试求管壁对苯的传热系数。当苯的流量提高一倍，传热系数有何变化。

解：苯在平均温度  $t_m = \frac{1}{2}(20 + 80) = 50^\circ\text{C}$  下的物性可由附录查得：

密度  $\rho = 860\text{kg/m}^3$ ；比热容  $c_p = 1.80\text{kJ/(kg} \cdot \text{℃)}$ ；粘度  $\mu = 0.45\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；导热系数  $\lambda = 0.14\text{W/(m} \cdot \text{℃)}$ 。

加热管内苯的流速为

$$u = \frac{q_v}{\frac{\pi}{4} d_i^2 n} = \frac{\frac{8.32}{860}}{0.785 \times 0.02^2 \times 38} = 0.81 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{d_i u \rho}{\mu} = \frac{0.02 \times 0.81 \times 860}{0.45 \times 10^{-3}} = 30960$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{(1.8 \times 10^3) \times 0.45 \times 10^{-3}}{0.14} = 5.79$$

以上计算表明本题的流动情况符合式 4-32 的实验条件，故

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.023 \frac{\lambda}{d_i} Re^{0.8} Pr^{0.4} = 0.023 \times \frac{0.14}{0.02} \times (30960)^{0.8} \times (5.79)^{0.4} \\ &= 1272 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{°C)} \end{aligned}$$

若忽略定性温度的变化，当苯的流量增加一倍时，给热系数为  $\alpha'$

$$\alpha' = \alpha \left( \frac{u'}{u} \right)^{0.8} = 1272 \times 2^{0.8} = 2215 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{°C)}$$

**【例 4-5】** 在预热器内将压强为 101.3kPa 的空气从 10°C 加热到 50°C。预热器由一束长度为 1.5m，直径为  $\Phi 86 \times 1.5\text{mm}$  的错列直立钢管所组成。空气在管外垂直流过，沿流动方向共有 15 行，每行有管子 20 列，行间与列间管子的中心距为 110mm。空气通过管间最狭处的流速为 8m/s。管内有饱和蒸气冷凝。试求管壁对空气的平均对流传热系数。

解：

$$\text{空气的定性温度} = \frac{1}{2} (10 + 50) = 30 \text{ °C}$$

查得空气在 30°C 时的物性如下：

$$\mu = 1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho = 1.165 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 2.67 \times 10^{-2} \text{ W/ (m} \cdot \text{°C)}$$

$$c_p = 1 \text{ kJ/ (kg} \cdot \text{°C)}$$

所以  $Re = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{0.086 \times 8 \times 1.165}{1.86 \times 10^{-5}} = 43100$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{1 \times 10^3 \times 1.86 \times 10^{-5}}{2.67 \times 10^{-2}} = 0.7$$

空气流过 10 排错列管束的平均对流传热系数为：

$$\begin{aligned} \alpha' &= 0.33 \frac{\lambda}{d_0} Re^{0.6} Pr^{0.33} = 0.33 \frac{0.0267}{0.086} (43100)^{0.6} (0.7)^{0.33} \\ &= 55 \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{°C)} \end{aligned}$$

空气流过 15 排管束时，由表 (4-3) 查得系数为 1.02，则

$$\alpha = 1.02 \alpha' = 1.02 \times 55 = 56 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{°C)}$$

【例 4-6】 热空气在冷却管管外流过， $\alpha_2 = 90 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{°C)}$ ，冷却水在管内流过，

$\alpha_1 = 1000 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{°C)}$ 。冷却管外径  $d_o = 16 \text{ mm}$ ，壁厚  $b = 1.5 \text{ mm}$ ，管壁的  $\lambda = 40 \text{ W / (m} \cdot \text{°C)}$ 。试求：

- ①总传热系数  $K_o$ ；
- ②管外对流传热系数  $\alpha_2$  增加一倍，总传热系数有何变化？
- ③管内对流传热系数  $\alpha_1$  增加一倍，总传热系数有何变化？

解：

①由式 4-70 可知

$$\begin{aligned} K_o &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_o}{d_i} + \frac{b}{\lambda d_m} + \frac{1}{\alpha_2}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{1000} \frac{16}{13} + \frac{0.0015}{40} \frac{16}{14.5} + \frac{1}{90}} \\ &= \frac{1}{0.00123 + 0.00004 + 0.01111} = 80.8 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{°C)} \end{aligned}$$

可见管壁热阻很小，通常可以忽略不计。

$$\textcircled{2} K_o = \frac{1}{0.00123 + \frac{1}{2 \times 90}} = 147.4 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{°C)}$$

传热系数增加了 82.4%。

$$\textcircled{3} K_o = \frac{1}{\frac{1}{2 \times 1000} \frac{16}{13} + 0.01111} = 85.3 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{°C)}$$

传热系数只增加了 6%，说明要提高  $K$  值，应提高较小的  $\alpha_2$  值。

及

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

(4-91a)

【例 4-7】 有一碳钢制造的套管换热器，内管直径为  $\phi 89 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ ，流量为  $2000 \text{ kg/h}$  的苯在内管中从  $80 \text{ °C}$  冷却到  $50 \text{ °C}$ 。冷却水在环隙从  $15 \text{ °C}$  升到  $35 \text{ °C}$ 。苯

的对流传热系数  $\alpha_h=230\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，水的对流传热系数  $\alpha_c=290\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。忽略污垢热阻。试求：①冷却水消耗量；②并流和逆流操作时所需传热面积；③如果逆流操作时所采用的传热面积与并流时的相同，计算冷却水出口温度与消耗量，假设总传热系数随温度的变化忽略不计。

解 ①苯的平均温度  $T = \frac{80+50}{2} = 65^\circ\text{C}$ ，比热容  $c_{ph}=1.86 \times 10^3\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

苯的流量  $W_h=2000\text{kg/h}$ ，水的平均温度  $t = \frac{15+35}{2} = 25^\circ\text{C}$ ，比热容  $c_{pc}=4.178 \times 10^3\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。热量衡算式为

$$Q = W_h c_{ph} (T_1 - T_2) = W_c c_{pc} (t_2 - t_1) \quad (\text{忽略热损失})$$

损失)

$$\text{热负荷 } Q = \frac{2000}{3600} \times 1.86 \times 10^3 \times (80 - 50) = 3.1 \times 10^4 \text{ W}$$

$$\text{冷却水消耗量 } W_c = \frac{Q}{c_{pc}(t_2 - t_1)} = \frac{3.1 \times 10^4 \times 3600}{4.178 \times 10^3 \times (35 - 15)} = 1335 \text{ kg/h}$$

②以内表面积  $S_i$  为基准的总传热系数为  $K_i$ ，碳钢的导热系数  $\lambda=45\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_i} &= \frac{1}{\alpha_h} + \frac{bd_i}{\lambda d_m} + \frac{d_i}{\alpha_c d_o} = \frac{1}{230} + \frac{0.0035 \times 0.082}{45 \times 0.0855} + \frac{0.082}{290 \times 0.089} \\ &= 4.35 \times 10^{-3} + 7.46 \times 10^{-5} + 3.18 \times 10^{-3} \\ &= 7.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{aligned}$$

$K_i=133\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，本题管壁热阻与其它传热阻力相比很小，可忽略不计。

$$\begin{array}{ccc} \text{并流操作} & 80 \begin{array}{c} \longrightarrow \\ \longrightarrow \end{array} 50 & \Delta t_{m\text{并}} = \frac{65-15}{\ln \frac{65}{15}} = 34.2^\circ\text{C} \\ & \frac{15}{65} \quad \frac{35}{15} & \end{array}$$

$$\text{传热面积 } S_{\text{并}} = \frac{Q}{K_i \Delta t_{m\text{并}}} = \frac{3.1 \times 10^4}{133 \times 34.2} = 6.81 \text{ m}^2$$

$$\begin{array}{ccc} \text{逆流操作} & 80 \quad 50 & \Delta t_{m\text{逆}} = \frac{45+35}{2} = 40^\circ\text{C} \\ & \frac{35}{45} \begin{array}{c} \longrightarrow \\ \longleftarrow \end{array} \frac{15}{35} & \end{array}$$

$$\text{传热面积 } S_{\text{逆}} = \frac{Q}{K_i \Delta t_{m\text{逆}}} = \frac{3.1 \times 10^4}{133 \times 40} = 5.83 \text{ m}^2$$

$$\text{因 } \Delta t_{m\text{并}} < \Delta t_{m\text{逆}}, \text{ 故 } S_{\text{并}} > S_{\text{逆}}。 \quad \frac{S_{\text{并}}}{S_{\text{逆}}} = \frac{\Delta t_{m\text{逆}}}{\Delta t_{m\text{并}}} = 1.17$$

$$\textcircled{3} \text{逆流操作 } S_f=6.81\text{m}^2, \Delta t_m = \frac{Q}{K_f S_f} = \frac{3.1 \times 10^4}{133 \times 6.81} = 34.2 \text{ }^\circ\text{C}$$

设冷却水出口温度为  $t_2$ , 则

$$\begin{array}{ccc} 80 & 50 & \Delta t_m = \frac{\Delta t' + 35}{2} = 34.2, \quad \Delta t' = 33.4 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \frac{t_2}{\Delta t'} \longleftarrow \frac{15}{\longrightarrow 35} & & t_2 = 80 - 33.4 = 46.6 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

水的平均温度  $t = (15 + 46.6) / 2 = 30.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $c'_{pc} = 4.174 \times 10^3 \text{ J} (\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$

$$\text{冷却水消耗量 } W_c = \frac{Q}{c'_{pc}(t_2 - t_1)} = \frac{3.1 \times 10^4 \times 3600}{4.174 \times 10^3 \times (46.6 - 15)} = 846 \text{ kg/h}$$

$$\text{逆流操作比并流操作可节省冷却水: } \frac{1335 - 846}{1335} \times 100 = 36.6\%$$

若使逆流与并流操作时的传热面积相同, 则逆流时冷却水出口温度由原来的  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  变为  $46.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在热负荷相同条件下, 冷却水消耗量减少了  $36.6\%$ 。

**【例 4-8】** 有一台运转中的单程逆流列管式换热器, 热空气在管程由  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  降至  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其对流传热系数  $\alpha_1 = 50 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。壳程的冷却水从  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  升至  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其对流传热系数  $\alpha_2 = 2000 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 管壁热阻及污垢热阻皆可不计。当冷却水量增加一倍时, 试求①水和空气的出口温度  $t_2$  和  $T_2$ , 忽略流体物性参数随温度的变化; ②传热速率  $Q$  比原来增加了多少?

解: ①水量增加前  $T_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$\alpha_1 = 50 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}), \quad \alpha_2 = 2000 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}),$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{1}{2000}} = 48.8 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\Delta t_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}} = \frac{(120 - 90) - (80 - 15)}{\ln \frac{120 - 90}{80 - 15}} = 45.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = W_h c_{ph} (T_1 - T_2) = W_c c_{pc} (t_2 - t_1) = K S \Delta t_m$$

$$40 W_h c_{ph} = 75 W_c c_{pc} = 48.8 \times 45.3 S$$

(a)

$$\text{水量增加后 } \alpha'_2 = 2^{0.8} \alpha_2 \quad K' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{2^{0.8} \alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{50} + \frac{1}{2^{0.8} \times 2000}} = 49.3 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\Delta t_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}} = \frac{(120 - t_2) - (T_2 - 15)}{\ln \frac{120 - t_2}{T_2 - 15}}$$

$$Q = W_h c_{ph} (T_1 - T_2) = 2W_c c_{pc} (t_2 - t_1) = K S \Delta t_m$$

$$W_h c_{ph} (120 - T_2) = 2W_c c_{pc} (t_2 - 15) = 49.3 S \cdot \frac{120 - t_2 - T_2 - 15}{\ln \frac{120 - t_2}{T_2 - 15}}$$

(b)

$$\frac{40}{120 - T_2} = \frac{75}{2(t_2 - 15)} \quad \text{或} \quad t_2 - 15 = \frac{75}{80}(120 - T_2)$$

(c)

$$\frac{40}{120 - T_2} = \frac{48.8 \times 45.3}{49.3 \times \frac{120 - T_2 - (t_2 - 15)}{\ln \frac{120 - t_2}{T_2 - 15}}}$$

(d)

$$\text{式 (c) 代入式 (d), 得 } \ln \frac{120 - t_2}{T_2 - 15} = 0.0558 \quad \ln \frac{120 - t_2}{T_2 - 15} = 1.057$$

(e)

由式 (c) 与 (e) 得  $t_2 = 61.9^\circ\text{C}$   $T_2 = 69.9^\circ\text{C}$

$$\textcircled{2} \frac{Q}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{120 - 69.9}{120 - 80} = 1.25 \text{ 即传热速率增加了 } 25\%.$$

**【例 4-9】** 在一传热面积为  $15.8\text{m}^2$  的逆流套管换热器中, 用油加热冷水。油的流量为  $2.85\text{kg/s}$ , 进口温度为  $110^\circ\text{C}$ ; 水的流量为  $0.667\text{kg/s}$ , 进口温度为  $35^\circ\text{C}$ 。油和水的平均比热容分别为  $1.9\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$  及  $4.18\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。换热器的总传热系数为  $320\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  试求水的出口温度及传热量。

解: 本题用  $\varepsilon - NTU$  法计算。

$$W_h c_{ph} = 2.85 \times 1900 = 5415\text{W}/^\circ\text{C}$$

$$W_c c_{pc} = 0.667 \times 4180 = 2788\text{W}/^\circ\text{C}$$

故水 (冷流体) 为最小热容量流体。

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{2788}{5415} = 0.515$$

$$(NTU)_{\min} = \frac{KS}{C_{\min}} = \frac{320 \times 15.8}{2788} = 1.8$$

查图 4-27 得  $\varepsilon = 0.73$ 。



因冷流体为最小热容量流率流体，故由传热效率定义式得

$$\varepsilon = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = 0.73$$

解得水的出口温度为  $t_2 = 0.73(110 - 35) + 35 = 89.8^\circ\text{C}$

换热器的传热量为

$$Q = W_c c_{pc} (t_2 - t_1) = 0.667 \times 4180 (89.8 - 35) = 152.8 \text{ kW}$$

## 习 题

1. 红砖平壁墙，厚度为 500mm，一侧温度为  $200^\circ\text{C}$ ，另一侧为  $30^\circ\text{C}$ 。设红砖的平均导热系数取  $0.57 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，试求：

- (1) 单位时间、单位面积导过的热量；
- (2) 距离高温侧 350mm 处的温度。

2. 用平板法测定材料的导热系数。平板状材料的一侧用加热器加热，另一侧用冷却水通过夹层将热量移走。所加热量由加至电热器的电压和电流算出，平板两侧的表面温度用热电偶测得（见附表）。已知材料的导热面积为  $0.02 \text{ m}^2$ ，其厚度为  $0.01 \text{ m}$ ，测得的数据如下，试求：

- (1) 材料的平均导热系数  $\bar{\lambda}$ ；
- (2) 设该材料的导热系数为  $\lambda = \lambda_0(1 - d't)$ ，试求  $\lambda_0$  和  $d'$ 。

电热器		材料表面温度/ $^\circ\text{C}$	
电压/V	电流/A	高温侧	低温侧
140	2.8	300	100
114	2.28	200	50

3. 某燃烧炉的平壁由下列三种砖依次砌成；

耐火砖：导热系数  $\lambda_1 = 1.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

厚度  $b_1 = 0.23 \text{ m}$ ；

绝热砖：导热系数  $\lambda_2 = 0.151 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

每块厚度  $b_2 = 0.23 \text{ m}$ ；

普通砖：导热系数  $\lambda_3=0.93 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

每块厚度  $b_3=0.24\text{m}$ ;

若已知耐火砖内侧温度为  $1000^\circ\text{C}$ ，耐火砖与绝热砖接触处温度为  $940^\circ\text{C}$ ，而绝热砖与普通砖接触处的温度不得超过  $138^\circ\text{C}$ ，试问：

(1) 绝热层需几块绝热砖？

(2) 此时普通砖外侧温度为多少？

4.  $\phi 60 \times 3$  铝合金管（导热系数按钢管选取），外包一层厚  $30\text{mm}$  石棉后，又包一层  $30\text{mm}$  软木。石棉和软木的导热系数分别为  $0.16\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  和  $0.04\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。又已知管内壁温度为  $-110^\circ\text{C}$ ，软木外侧温度为  $10^\circ\text{C}$ ，求每米管长所损失的冷量。若将两保温材料互换，互换后假设石棉外侧的温度仍为  $10^\circ\text{C}$  不变，则此时每米管长上损失的冷量为多少？

5. 空心球内半径为  $r_1$ 、温度为  $t_i$ ，外半径为  $r_0$ 、温度为  $t_0$ ，且  $t_i > t_0$ ，球壁的导热系数为  $\lambda$ 。试推导空心球壁的导热关系式。

6. 在长为  $3\text{m}$ ，内径为  $53\text{mm}$  的管内加热苯溶液。苯的质量流速为  $172\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。苯在定性温度下的物性数据如下：

$$\mu = 49 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{S}; \quad \lambda = 0.14 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}; \quad c_p = 1.8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})。$$

试求苯对管壁的对流传热系数。

7. 有一套管换热器，内管为  $\phi 25 \times 1\text{mm}$ ，外管为  $\phi 38 \times 1.5\text{mm}$ 。冷水在环隙内流过，用以冷却内管中的高温气体，水的流速为  $0.3\text{m}/\text{s}$ ，水的入口温度为  $20^\circ\text{C}$ ，出口温度为  $40^\circ\text{C}$ 。试求环隙内水的对流传热系数。

8. 某无相变的流体，通过内径为  $50\text{mm}$  的圆形直管时的对流传热系数为  $120\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，流体的  $Re=2 \times 10^4$ 。假如改用周长与圆管相等，高与宽之比等于  $1:2$  的矩形管，而流体的流速增加  $0.5$  倍，试问对流传热系数有何变化？

9. 某厂用冷水冷却柴油。冷却器为  $\phi 14 \times 8$  钢管组成的排管，水平浸于一很大的冷水槽中，冷水由槽下部进入，上部溢出，通过槽的流速很小。设冷水的平均温度为  $42.5^\circ\text{C}$ ，钢管外壁温度为  $56^\circ\text{C}$ ，试求冷水的对流传热系数。

10. 室内有二根表面温度相同的蒸气管，由于自然对流两管都向周围空气散发热量。已知大管的直径为小管直径的  $10$  倍，小管的  $(Gr \cdot Pr) = 10^8$ 。试问两水平管单位时间、单位面积的热损失的比值为多少？

11. 饱和温度为  $100^{\circ}\text{C}$  的水蒸气在长  $3\text{m}$ 、外径为  $0.03\text{m}$  的单根黄铜管表面上冷凝。铜管竖直放置，管外壁的温度维持  $96^{\circ}\text{C}$ ，试求每小时冷凝的蒸气量。

又若将管子水平放，冷凝的蒸气量又为多少？

12. 求直径  $d=70\text{mm}$ 、长  $L=3\text{m}$  的钢管（其表面温度  $t_1=227^{\circ}\text{C}$ ）的辐射热损失。假定此管被置于：（a）很大的红砖里，砖壁温度  $t_2=27^{\circ}\text{C}$ ；（b）截面为  $0.3 \times 0.3\text{m}^2$  的砖槽里， $t_2=27^{\circ}\text{C}$ ，两端面的辐射损失可以忽略不计。

13. 用  $175^{\circ}\text{C}$  的油将  $300\text{kg/h}$  的水由  $25^{\circ}\text{C}$  加热至  $90^{\circ}\text{C}$ ，已知油的比热容为  $2.61\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，其流量为  $360\text{kg/h}$ ，今有以下两个换热器，传热面积为  $0.8\text{m}^2$ 。

换热器 1： $K_1=625\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，单壳程双管程。

换热器 2： $K_2=500\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，单壳程单管程。

为满足所需的传热量应选用那一个换热器。

14. 在一套管换热器中，用冷却水将  $1.25\text{kg/s}$  的苯由  $350\text{K}$  冷却至  $300\text{K}$ ，冷却水在  $\phi 25 \times 2.5$  的管内中流动，其进出口温度分别为  $290\text{K}$  和  $320\text{K}$ 。已知水和苯的对流传热系数分别为  $0.85\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$  和  $1.7\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，又两侧污垢热阻忽略不计，试求所需的管长和冷却水消耗量。

15. 在一列管换热器中，用初温为  $30^{\circ}\text{C}$  的原油将重油由  $180^{\circ}\text{C}$  冷却到  $120^{\circ}\text{C}$ ，已知重油和原油的流量分别为  $1 \times 10^4$  ( $\text{kg/h}$ ) 和  $1.4 \times 10^4$  ( $\text{kg/h}$ )。比热容分别为  $0.52$  ( $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ) 和  $0.46$  ( $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ )，传热系数  $K=100$  ( $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ) 试分别计算并流和逆流时换热器所需的传热面积。

16. 在并流换热器中，用水冷却油。水的进出口温度分别为  $15^{\circ}\text{C}$  和  $40^{\circ}\text{C}$ ，油的进出口温度分别为  $150^{\circ}\text{C}$  和  $100^{\circ}\text{C}$ 。现因生产任务要求油的出口温度降至  $80^{\circ}\text{C}$ ，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  $1\text{m}$ ，试求将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。

17. 一传热面积为  $15\text{m}^2$  的列管换热器，壳程用  $110^{\circ}\text{C}$  饱和水蒸汽将管程某溶液由  $20^{\circ}\text{C}$  加热至  $80^{\circ}\text{C}$ ，溶液的处理量为  $2.5 \times 10^4\text{kg/h}$ ，比热容为  $4\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，试求此操作条件下的总传热系数。又该换热器使用一年后，由于污垢热阻增加，溶液出口温度降至  $72^{\circ}\text{C}$ ，若要出口温度仍为  $80^{\circ}\text{C}$ ，加热蒸汽温度至少要多高？

18. 用  $20.26\text{kPa}$ （表压）的饱和水蒸汽将  $20^{\circ}\text{C}$  的水预热至  $80^{\circ}\text{C}$ ，水在列管换热器管程以  $0.6\text{m/s}$  的流速流过，管子的尺寸为  $\phi 25 \times 2.5$ 。水蒸气冷凝的对流

传热系数为  $10^4 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，水侧污垢热阻为  $6 \times 10^{-4} (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$ ，蒸汽侧污垢热阻和管壁热阻可忽略不计，试求：

(1) 此换热器的总传热系数；

(2) 设备操作一年后，由于水垢积累，换热能力下降，出口温度只能升至  $70^\circ\text{C}$ ，试求此时的总传热系数及水侧的污垢热阻。

19. 今欲于下列换热器中，将某种溶液从  $20^\circ\text{C}$  加热到  $50^\circ\text{C}$ 。加热剂进口温度为  $100^\circ\text{C}$ ，出口温度为  $60^\circ\text{C}$ 。试求各种情况下的平均温度差。

(1) 单壳程，双管程

(2) 双壳程，四管程

20. 有一单壳程双管程列管换热器，管外用  $120^\circ\text{C}$  饱和蒸气加热，干空气以  $12\text{m/s}$  的流速在管内流过，管径为  $\phi 38 \times 2.5\text{mm}$ ，总管数为 200 根，已知总传热系数为  $150 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ，空气进口温度为  $26^\circ\text{C}$ ，要求空气出口温度为  $86^\circ\text{C}$ ，试求：

(1) 该换热器的管长应多少？

(2) 若气体处理量、进口温度、管长均保持不变，而将管径增大为  $\phi 54 \times 2\text{mm}$ ，总管数减少 20%，此时的出口温度为多少？（不计出口温度变化对物性的影响，忽略热损失）。