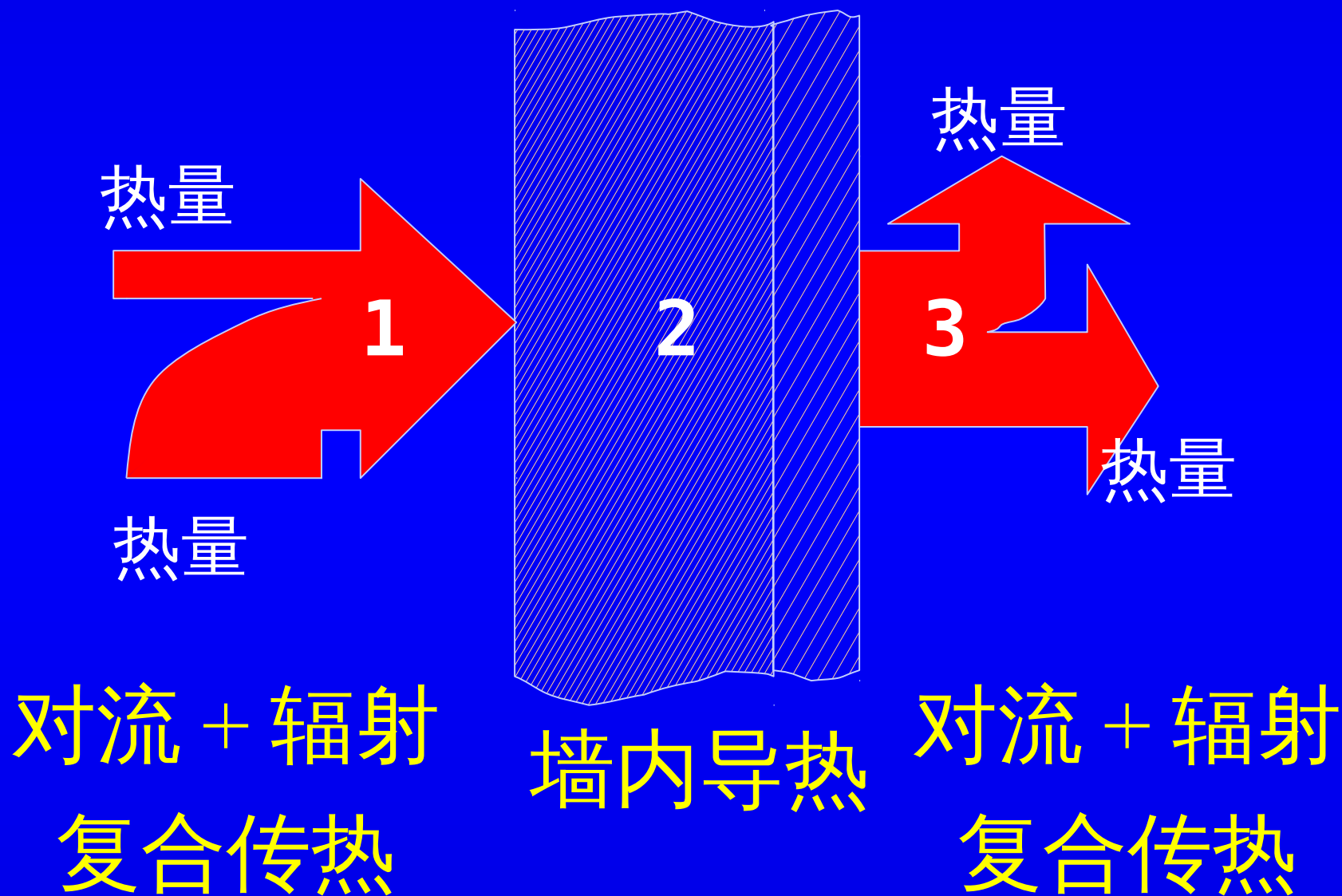


第七章 传热分析

7.1 复合传热

实际生活存在大量复合传热的情況



(表面) 复合传热

在实际换热过程中,有时既有对流传热,又有辐射传热,两者共同作用,其影响都不可忽略,称为复合传热,其表面传热热流量是两部分之和:

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r = (h_c + h_r)A(t_w - t_f) = hA(t_w - t_f) \quad (7-1)$$

其中 h 为复合表面传热系数, $h = h_c + h_r$ 。 h_c 为对流表面传热系数,单位是 $W/(m^2 \cdot K)$,可以由自然对流引起,也可以是强迫对流引起的; h_r 为辐射按表面对流传热折算的辐射表面传热系数,单位是 $W/(m^2 \cdot K)$ 。这是将净辐射换热量按对流进行折算得到的,如两个黑表面之间的辐射换热,

$$\Phi_{net} = A\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (7-2a)$$

则

$$\Phi_{net} = h_r A (T_1 - T_2)$$

有

$$h_r = \frac{\Phi_{net}}{\Delta T} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$$

辐射换热 (7-2b)
修正: 折算 (7-2c)

例题 7-1: 一长、宽各为 10mm 的等温集成电路芯片安装在一块底板上,芯片顶面高出底板的高度为 1mm,温度为 20℃ 的空气在风扇作用下冷却芯片。芯片最高允许温度为 85℃,芯片与冷却气流间的平均表面对流传热系数为 175W/(m² · K),其折算的辐射换热表面传热系数为 7.8W/(m² · K)。试确定芯片的最大允许功率是多少?

解: $\Phi = (h_c + h_r)A\Delta t = (175 + 7.8) \times [0.01 \times 0.01 + 4 \times 0.01 \times 0.001] \times (85 - 20) = 1.66W$

7.2 传热过程

传热过程分析

我们先来分析一下这个房间的一堵外墙,将其视为大平壁,如图 7.5 所示。温度为 t_{f1} 、表面传热系数为 h_1 (复合表面传热系数,可以包含对流和辐射 $h = h_c + h_f$) 的热流体(室外空气)通过壁厚为 δ 、导热系数为 λ 的大平壁(墙壁),将热量传给温度为 t_{f2} 的冷流体(室内空气),冷流体与壁面的表面传热系数为 h_2 (复合表面传热系数),平壁两侧的壁温分别为 t_{w1} 、 t_{w2} ,这时有下式成立:

$$\Phi = h_1 A (t_{f1} - t_{w1}) = \frac{\lambda A}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) = h_2 A (t_{w2} - t_{f2}) \quad (7-3)$$

左面
中间
右面

将上式整理,消去 t_{w1} 、 t_{w2} ,得

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (7-4a)$$

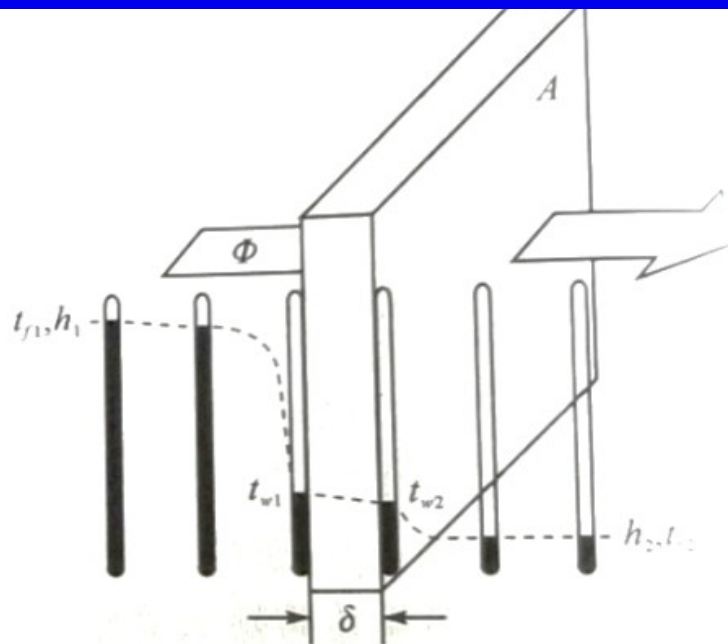


图 7.5 通过平壁的传热过程

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

传热系数

传热过程是复合传热—导热—复合传热的串联过程。可以用传热系数 k 来表征传热过程的强烈程度,单位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。 k 值越大,表示传热过程越强烈。即令

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (7-5a)$$

$$k = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right)^{-1} \quad (7-5b)$$

因此有

$$\Phi = kA(t_{f1} - t_{f2}) \quad (7-6a)$$

$$q = k(t_{f1} - t_{f2}) \quad (7-6b)$$

表 7-1 所示为不同传热过程中传热系数的数值范围。从表中可以看出,不同介质之间的传热过程具有不同的传热系数范围,通常有相变的传热过程强于无相变的,液体—液体之间的传热过程优于气体—气体传热……,这些有助于我们定性地了解各种传热过程传热的强弱。

表 7-1 传热系数的大致数值范围

传热过程的形式	$k[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
气体——气体传热(常压)	10~30
气体——高压水蒸气或水传热	10~100
油——水传热	100~600
有机物蒸气凝结——水传热	500~1000
水——水传热	1000~2500
水蒸气凝结——水传热	2000~6000

7.3 热阻过程的提出

热阻概念的提出

热流密度：

$$q = \frac{\text{温度差 } \Delta t}{\text{热阻 } R_t}$$

$$I = \frac{\Delta U}{R}$$

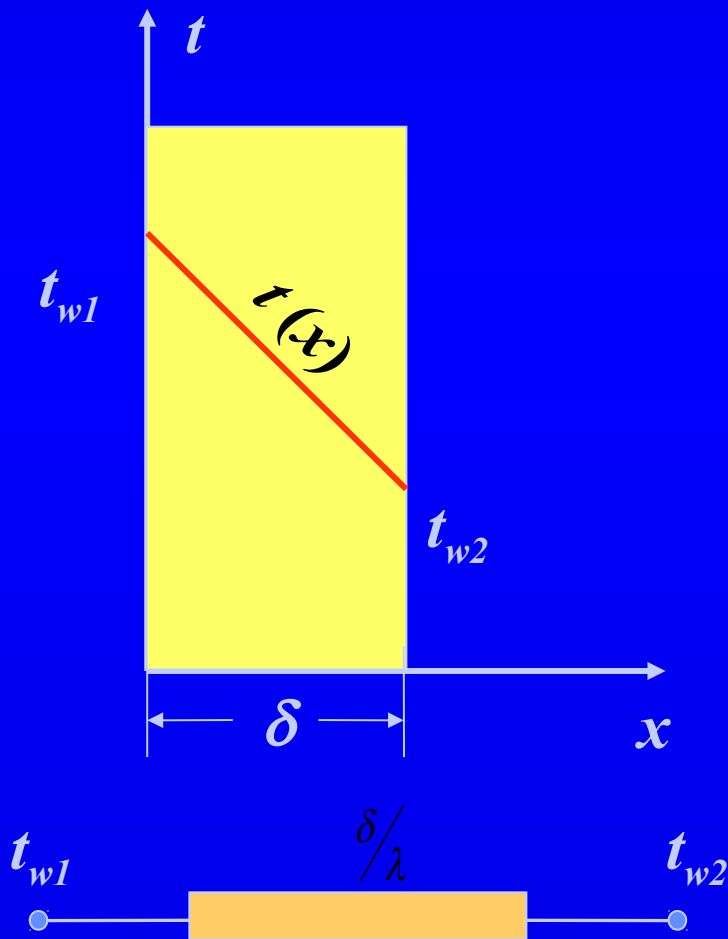
热流 ↔
电流
温度差 ↔
位差
热阻 ↔
电阻

电

平壁导热：

$$q = \frac{\Phi}{A} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t = \frac{\Delta t}{\lambda / \delta} = \frac{\Delta t}{R_{cond}}$$

(a) 单层平壁的热阻图

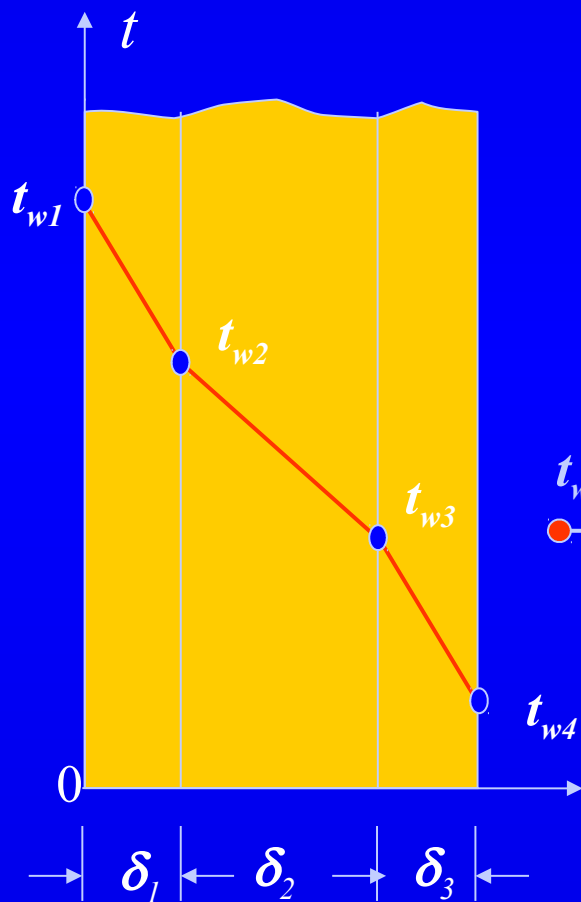


$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}}$$

$$R_{\text{cond}} = \delta / \lambda \quad \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

单位面积平壁的导热热阻。

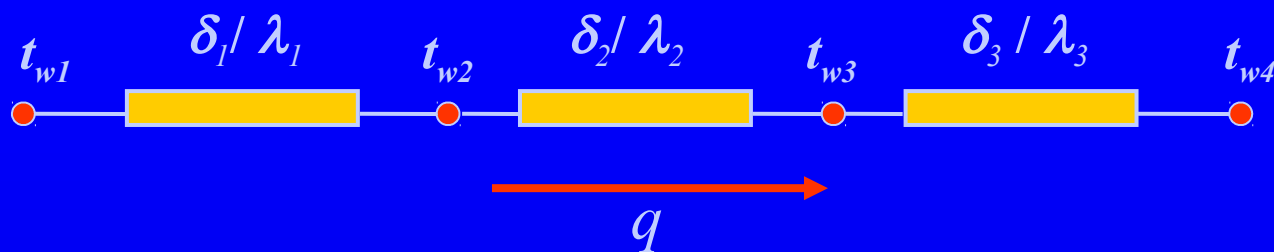
(b) 多层平壁的热阻图



多层平壁的导热

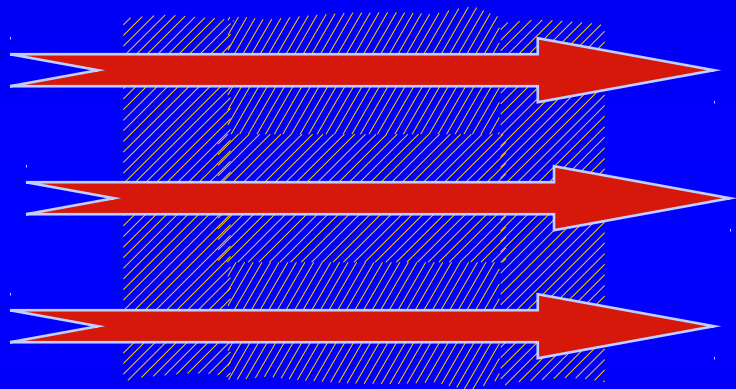
$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta_1 / \lambda_1} = \frac{1}{R_1} (t_{w1} - t_{w2})$$

$$q = \frac{t_{w2} - t_{w3}}{\delta_2 / \lambda_2} = \frac{1}{R_2} (t_{w2} - t_{w3})$$



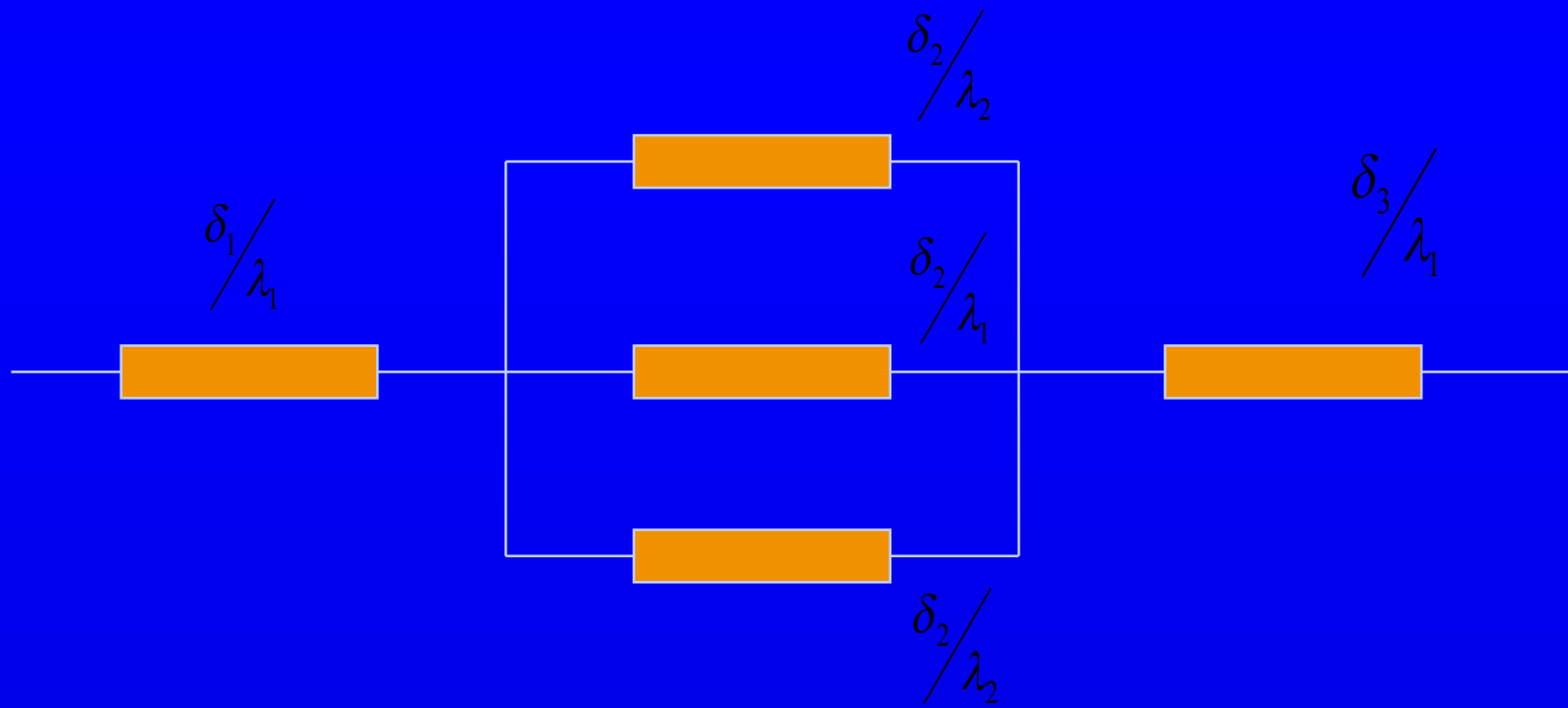
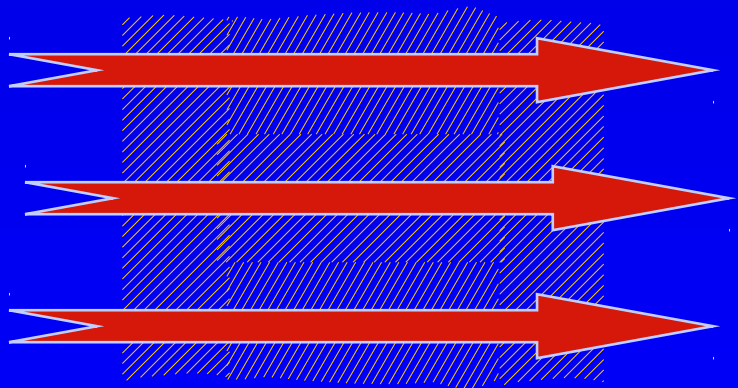
$$q = \frac{t_{w1} - t_{w4}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(t_{w1} - t_{w4})}{\sum_{i=1}^3 R_i}$$

(c) 复合平壁的计算

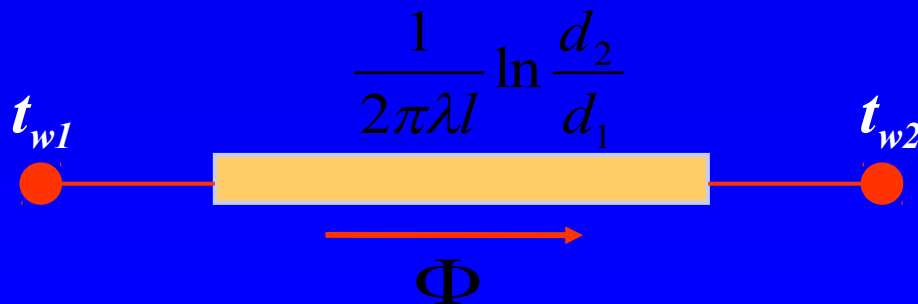


复合平壁如何计算？

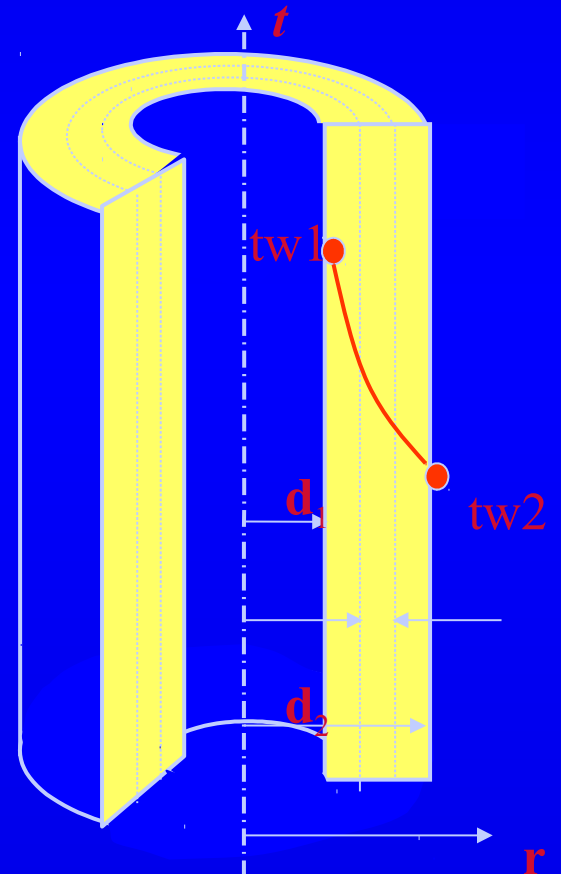




(d) 通过圆筒壁的导热



$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_{cond}}$$



单层圆筒的导热

(d) 通过圆筒壁的导热

$$\Phi = \frac{t_1 - t_{i+1}}{\frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi\lambda_i l}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi\lambda_i l}}$$
$$q_l = \frac{t_i - t_{i+1}}{\frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi\lambda_i}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi\lambda_i}}$$

多层圆筒壁的导热热阻：

$$R_t = \sum_i \frac{\ln(r_{i+1}/r_i)}{2\pi\lambda_i l} \quad (\text{K/W})$$

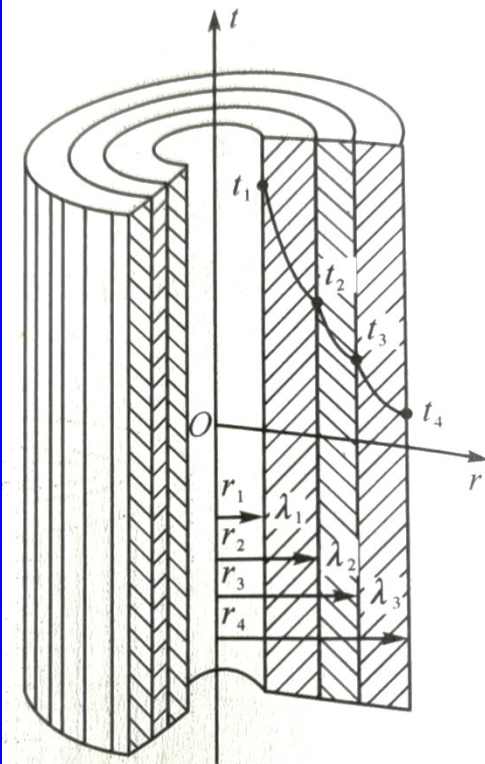


图 7.9 通过多层圆筒壁的导热

几种典型形状的导热系数

例题 7-2: 有一加热炉, 炉墙总面积为 55 m^2 , 炉墙厚度为 280 mm , 炉壁材料的平均导热系数为 $1.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 炉墙的内、外壁温分别为 520°C 和 50°C 。试计算

(1) 通过炉墙的热损失。如果燃煤的发热量为 $2.09 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$, 设煤的价格为 500 元/吨 , 则每年(按 365 天 算)由于热损失而耗费的燃料费用为多少?

(2) 若节能改造中更换炉墙保温材料, 使炉壁的平均导热系数由 $1.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 降为 $0.74 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 其他条件不变, 则每年由于热损失而耗费的燃料费降低多少?

解: (1) 这是一个通过大平壁的一维导热问题。

$$\Phi = \lambda A \frac{(t_1 - t_2)}{\delta} = 1.04 \times 55 \times \frac{520 - 50}{0.28} = 96.01 \text{ kW}$$

每年的燃料费(由于热损失):

$$96.01 \times 3600 \times 24 \times 365 \times 500 / (2.09 \times 10^4 \times 1000) = 72434.7 (\text{元})$$

$$(2) \frac{\Phi_{\text{前}} - \Phi_{\text{后}}}{\Phi_{\text{前}}} = \frac{\lambda_{\text{前}} A \Delta t / \delta - \lambda_{\text{后}} A \Delta t / \delta}{\lambda_{\text{前}} A \Delta t / \delta} = \frac{\lambda_{\text{前}} - \lambda_{\text{后}}}{\lambda_{\text{前}}} = \frac{1.04 - 0.74}{1.04} = 28.85\%$$



图 7.9 通过多层圆筒壁的导热

例题 7-3: 外径为 25mm 的热水管道采用铜塑复合管, 内层铜材的导热系数 $\lambda = 109 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 厚 0.3mm, 塑料的导热系数 $\lambda = 0.045 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 厚 1.5mm。测得热水管内壁温度为 95°C , 外壁温度为 50°C , 问每米长管道的散热损失是多少? 为节能要在外面加上导热系数 $\lambda = 0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的保温材料, 如果保温层外表面温度不超过 27°C , 并且每米长管道的散热损失不超过 $50 \text{ W}/\text{m}$, 问保温层应加多厚?

解: 这是一个通过多层圆筒壁的一维稳态导热问题, 每米长管道的热流量:

$$q_l = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}}$$

$$= \frac{95 - 50}{\frac{1}{2\pi \times 109} \ln \frac{25 - 2 \times 1.5}{25 - 2 \times (0.3 + 1.5)} + \frac{1}{2\pi \times 0.045} \ln \frac{25}{25 - 2 \times 1.5}} = 99.47 \text{ W/m}$$

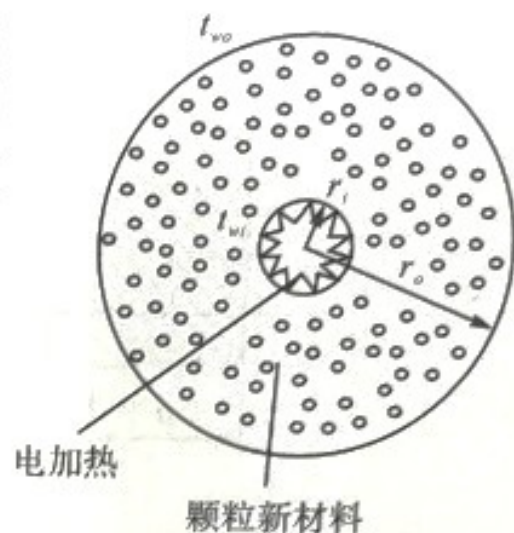
$$\ln \frac{d_4}{d_3} = 2\pi\lambda \left(\frac{t_{w1} - t_{w2}}{q_l} - \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} - \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \right)$$

$$= 2\pi \times 0.04 \times \left(\frac{95 - 27}{50} - \frac{1}{2\pi \times 109} \ln \frac{22}{21.4} + \frac{1}{2\pi \times 0.045} \ln \frac{25}{22} \right) = 0.228$$

$$\therefore \frac{d_4}{d_3} = 1.256, \quad d_2 = 1.256d_1 = 1.256 \times 25 = 31.4 \text{ mm}$$

$$\text{保温层厚度 } \delta = (d_4 - d_3)/2 = 3.2 \text{ mm}$$

例题 7-4:有一种颗粒新材料的导热系数未知,用圆球导热仪来测定。如图所示,它由两个同心空心球壳均为很薄的紫铜皮制成,其热阻可以忽略不计。内外层球壳之间均匀地填塞入这种颗粒材料,内层球壳中装有电热丝,通电后产生的热量通过内层球壁、被测材料和外层球壁散发出去。内、外层球壳的直径分别为 80mm 和 160mm。在稳态导热下测得内、外层球壁的表面平均温度分别为 87.4℃ 和 47.4℃,通过电加热丝的电流为 83.6A、电压为 26V,求该新材料的导热系数。



例题 7-5

解:这是一个通过单层球壁的一维稳态导热问题。

$$\Phi = \frac{4\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}},$$

由于 $\Phi = IU$, 所以

$$\lambda = \frac{IU\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{4\pi(t_1 - t_2)} = \frac{83.6 \times 26 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{0.04} - \frac{1}{0.08}\right)}{4\pi(87.4 - 47.7)} = 0.05449 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

对流换热热阻

牛顿冷却公式:

$$q = \frac{\Delta t}{R_{conv}} = \frac{\Delta t}{1/h}$$

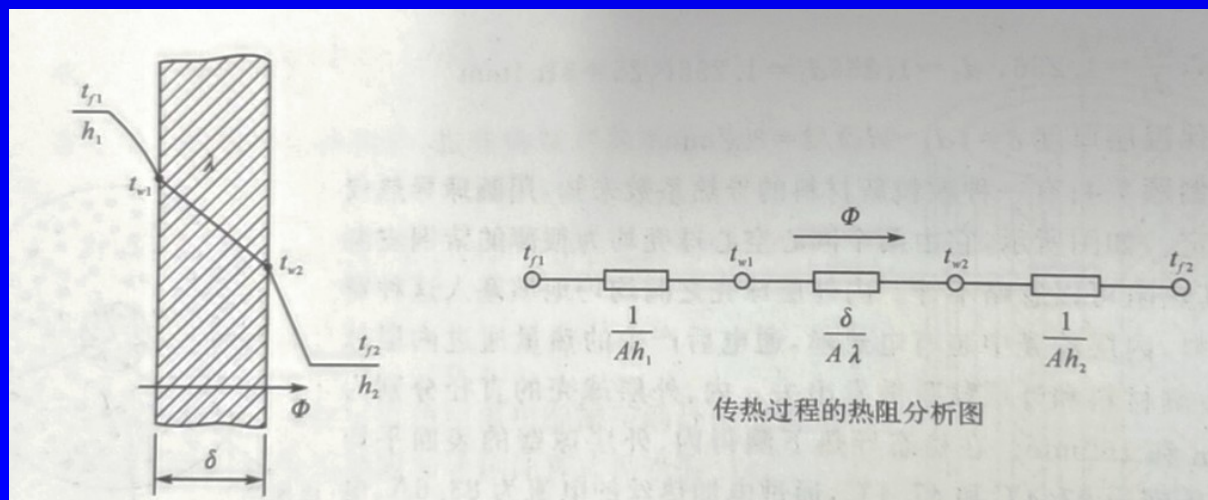


图 7.11 所示为对流边界条件下的通过平壁的传热过程及其热阻分析图,从图中可见上述传热过程可看作热阻的一个串联环节,

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\sum r_i} = k(t_{f1} - t_{f2}) \quad (7-21a)$$

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\sum R_i} = kA(t_{f1} - t_{f2}) \quad (7-21b)$$

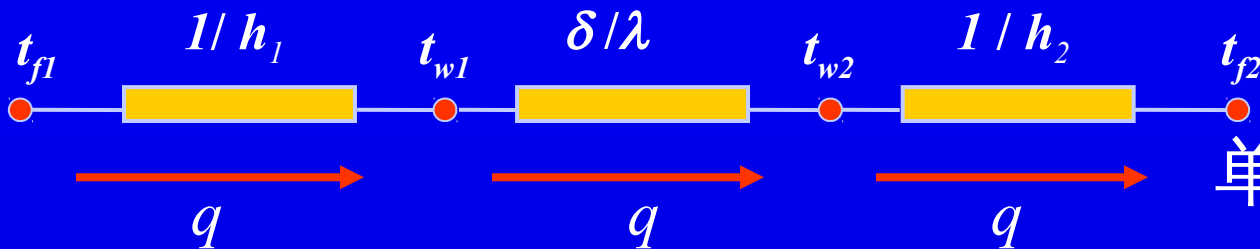
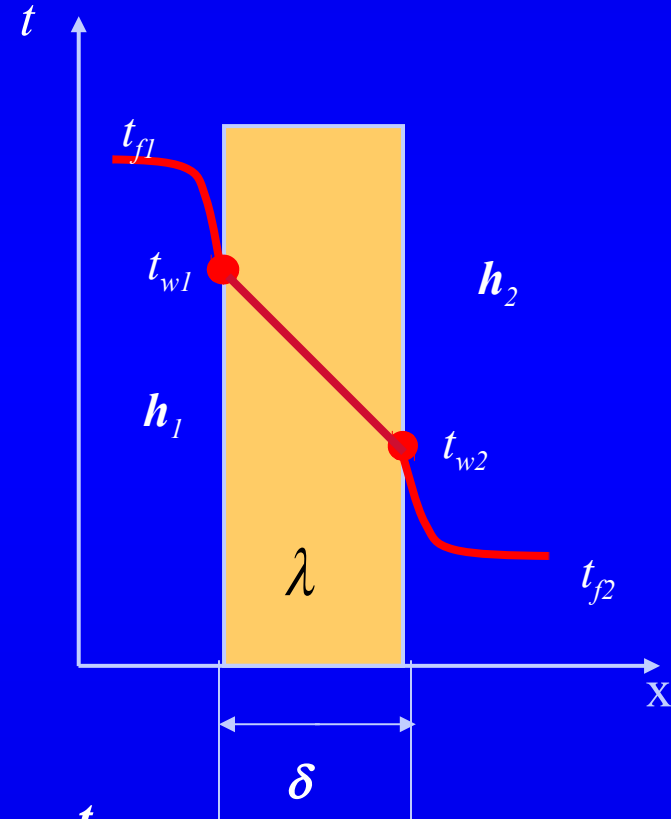
传热系数的倒数是传热过程中各个串联环节的热阻之和:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} = \sum r_i \quad (7-22a)$$

传热系数:

单层平壁传热

$$q = \frac{\Delta t}{\sum R_i} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{1/h_1 + \delta/\lambda + 1/h_2}$$
$$= \frac{t_{f1} - t_{w1}}{1/h_1} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta/\lambda} = \frac{t_{w2} - t_{f2}}{1/h_2}$$



单层平壁的传热

多层平壁传热

对流边界条件下通过多层平壁、圆筒壁或球壳的传热过程：

$$\Phi = \frac{t_{fi} - t_{fo}}{\frac{1}{A_i h_i} + \sum_{i=1}^n R_{twi} + \frac{1}{A_o h_o}} = \frac{t_{fi} - t_{fo}}{\sum R_t} = kA(t_{fi} - t_{fo}) \quad (7-23a)$$

$$\frac{1}{kA} = \sum R_t = \frac{1}{A_i h_i} + \sum_{i=1}^n R_{twi} + \frac{1}{A_o h_o} \quad (7-23b)$$

平壁： $R_{twi} = \frac{\delta_i}{A_i \lambda_i}$ ；圆筒壁： $R_{twi} = \frac{\ln(d_{i+1}/d_i)}{2\pi \lambda_i l}$ ；球壁： $R_{twi} = \frac{1}{2\pi \lambda_i} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right)$ 。

在一个稳态的热传递过程中，每个串联环节上的温度降落同该环节上的热阻成正比，即传递一定的热量，热阻越小，温差越小；反之，热阻越大，温差越大。

$$q = \frac{\Delta t}{\sum r_{ti}} = \frac{\Delta t_1}{r_{t1}} = \frac{\Delta t_2}{r_{t2}} = \frac{\Delta t_3}{r_{t3}} = \dots \quad (7-24a)$$

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\sum R_{ti}} = \frac{\Delta t_1}{R_{t1}} = \frac{\Delta t_2}{R_{t2}} = \frac{\Delta t_3}{R_{t3}} = \dots \quad (7-24b)$$

对流换热例题

例题 7-5:一玻璃窗,尺寸为 $60\text{cm} \times 30\text{cm}$, 厚为 4mm 。冬天,室内及室外温度分别为 20°C 及 -20°C , 内表面的自然对流换热表面传热系数为 $10\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 外表面强制对流换热表面传热系数为 $50\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。玻璃的导热系数 $\lambda = 0.78\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。试确定通过玻璃的热损失。

$$\text{解: } \Phi = \frac{A\Delta t}{\sum R} = \frac{A\Delta t}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_0}} = \frac{0.6 \times 0.3 \times [20 - (-20)]}{\frac{1}{10} + \frac{4 \times 10^{-3}}{0.78} + \frac{1}{50}} = 57.5\text{ W}$$

例题 7-6:有一台气体冷却器,气侧表面传热系数 $h_1 = 95\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 壁面厚 $\delta = 2.5\text{mm}$, $\lambda = 46.5\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 水侧表面传热系数 $h_2 = 5800\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。设传热壁可以看做

平壁,试计算各个环节单位面积的热阻及从气到水的总的传热系数。你能否指出,为了强化这一传热过程,应该首先从哪个环节入手?

解:首先计算各个传热环节的热阻:

$$R_1 = \frac{1}{h_1} = \frac{1}{95} = 1053 \times 10^{-5} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

$$R_2 = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2.5 \times 10^{-3}}{46.5} = 5.376 \times 10^{-5} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

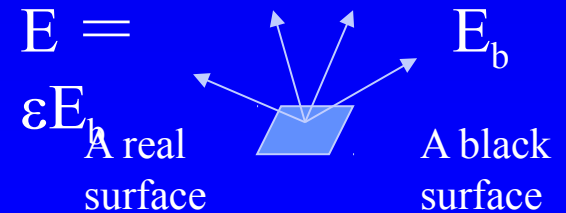
$$R_3 = \frac{1}{h_2} = \frac{1}{5800} = 17.24 \times 10^{-5} (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

$$k = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = 93\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

由计算结果可知,气侧热阻 R_1 是主要热阻,要强化这一传热过程首先应从强化气侧换热着手。

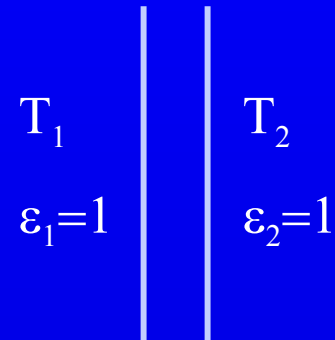
辐射换热热阻

辐射换热: $q = E = \varepsilon E_b$???



例：两个无限大的黑度为 1 的平行平面，温度分别为 T_1 和 T_2 ， $T_1 > T_2$ ，1、2 表面间单位面积辐射换热量：

$$q = E_{b1} - E_{b2} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$



热水瓶胆内的传热

辐射表面热阻:

$$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} - 1$$

辐射空间热阻:

$$\frac{1}{X_{12}} = 1$$

T_1

$\varepsilon_1=0.8$

T_2

$\varepsilon_2=0.8$

表面 1 的辐射落到表面 2 上的百分比

$$q = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 + 1 + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

例题

例题 7-7:一根直径 $d=0.5\text{mm}$ 的白炽灯丝,长度 $l=500\text{mm}$,发射率 $\epsilon_1=0.9$,周围环境温度 $t_2=20^\circ\text{C}$ 。如果对导线通电加热,消耗功率为 0.5kW 。如果这部分热量仅仅依靠辐射换热从导线表面散逸出去,则导线的表面温度是多少?

解:这是一个两个辐射换热面之间的辐射换热的问题,其中导线表面为表面 1,环境可看作黑度为 1 或表面积为无穷大的表面 2,可得,

$$\begin{aligned}\Phi_{1,2} &= \epsilon_1 A_1 (E_{b1} - E_{b2}) = \epsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \epsilon_1 \pi d l \sigma (T_1^4 - T_2^4) \\ T_1 &= \sqrt[4]{\frac{\Phi_{1,2}}{\epsilon \pi d l \sigma} + T_2^4} = \sqrt[4]{\frac{0.5 \times 1000}{0.9 \times \pi \times 0.5 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 5.67 \times 10^{-8}} + (20 + 273)^4} \\ &= 1879.89\text{K} = 1606.9^\circ\text{C}\end{aligned}$$

例题 7-8:将一个涂黑了的、半径为 0.02m 的实心铜球放在真空容器内,容器器壁温度为 100°C ,试问铜球的温度从 103°C 降为 102°C 所需的时间是多少? 已知铜的 $c_p=381\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\rho=8930\text{kg}/\text{m}^3$,不考虑气体传热。

解:将涂黑的铜球近似为一黑体,

$$m c_p \frac{dT}{dt} = 4\pi r^2 \sigma (T^4 - T_w^4) = 4\pi r^2 \sigma (T^2 + T_w^2)(T + T_w)(T - T_w) \approx 16\sigma T_w^3 (T - T_w)$$

由于 $m=4\pi r^3 \rho/3$,代入上式并分离变量积分 $\int_0^t dt = \frac{r \rho c_p}{12\sigma T_w^3} \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{T - T_w}$

$$t = \frac{r \rho c_p}{12\sigma T_w^3} \ln \frac{T_1 - T_w}{T_2 - T_w} = 780\text{s}$$

例题

例题 7-9:在室温为 25°C 的空调房间内,已知人体与空气间的自然对流表面传热系数为 $2.6\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,人体表面及衣服表面的平均温度取为 30°C ,表面黑度为 0.8 ,人体可以简化为直径 25cm 、高度 1.75m 的圆柱体,人体与地面之间的导热可以忽略,计算下列两种情况下人体与环境之间的换热量:

(1)夏天,室内墙面温度为 26°C ;

(2)冬天,室内墙面温度为 10°C 。

解:人体与环境之间的换热包括对流和辐射,人体换热面积:

$$A = \pi dL + \pi d^2/4 = 3.14 \times 0.25 \times 1.75 + 3.14 \times 0.25^2/4 = 1.42\text{m}^2$$

(1)夏天,室内墙面温度为 26°C :

$$\Phi_{\text{夏}} = hA(t_{w1} - t_f) + \epsilon A\sigma(T_{w1}^4 - T_{w2}^4)$$

$$= 2.6 \times 1.42 \times (30 - 25) + 0.8 \times 1.42 \times 4.56 \times 10^{-8} \times (303^4 - 299^4)$$

$$= 46.57\text{W}$$

(2)冬天,室内墙面温度为 10°C :

$$\Phi_{\text{冬}} = hA(t_{w1} - t_f) + \epsilon A\sigma(T_{w1}^4 - T_{w2}^4)$$

$$= 2.6 \times 1.42 \times (30 - 25) + 0.8 \times 1.42 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (303^4 - 283^4)$$

$$= 148.23\text{W}$$

同室温下,夏天人体散热与冬天相比 $\Phi_{\text{夏}}/\Phi_{\text{冬}} = 31.42\%$ 。

人为什么要穿衣服？

若人赤身裸体，考虑对流和辐射散热，其热量散失估算：

近似模型：人体表面温度 **33°C**，体表面积 **A=1.42m²**，处于一个很大的空腔（环境）内，温度 **20°C**，皮肤对红外线的吸收率 **0.95**，则人体散失热量：

$$\begin{aligned}\Phi &= hA(t_{w1} - t_f) + \varepsilon A\sigma(T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \\ &= 2.6 \times 1.42 \times (33 - 20) + 0.95 \times 1.42 \times 5.67 \times 10^8 \times (306^4 - 293^4) \\ &= 154.9W\end{aligned}$$

人从食物中每天摄取的热量平均 **2500kcal**
 $\text{kcal} \div (24 \times 3600\text{s}) = 120.95\text{W} \approx 121\text{W}$

人的基础代谢率（不运动仅维持生命所需热功率）为 **81W**

所以服装相当于多层防辐射屏。

讨论及作业

分析热水瓶为什么能够保温，而普通的玻璃瓶不能很好地保温；

复合结构的壁面问题的分析与计算方法；

你对航空航天中会遇到的温度与湿度问题的想法及如何控制与分析的设想。

习题： 7---3, 9, 12, 19