第一章：

1-3 一大平板，高 2.5 m，宽 2 m，厚 0.03m，导热系数为 45 W/(m·K)，两侧表面温度分别为 t1 = 100 ℃， t2 = 80 ℃，试求该板的热阻、热流量、热流密度。

解: $R=\dfrac{\delta}{A\lambda}=\dfrac{0.03}{2.5\times 2\times 45}=1.3\times 10^{-4}K/W$

$$\Phi=\lambda A\frac{\Delta t}{\delta}=45\times 2.5\times 2\times\frac{100-80}{0.03}=150KW$$

$$q=\frac{\Phi}{A}=\frac{150\times 10^{3}}{2.5\times 2}=30KW/m^{2}$$

1-6 一单层玻璃窗，高 1.2m，宽 1.5 m，玻璃厚 0.3 mm，玻璃导热系数为 λ = 1.05 W/(m·K)，室内外的空气温度分别为 20 ℃和 5 ℃，室内外空气与玻璃窗之间对流换热的表面传热系数分别为 h1 = 5.5 W/(m2·K) 和 h2 = 20 W/(m2·K)，试求玻璃窗的散热损失及玻璃的导热热阻、两侧的对流换热热阻。

解： $q=\dfrac{t_{f1}-t_{f2}}{\dfrac{1}{h_1}+\dfrac{\delta}{\lambda}+\dfrac{1}{h_2}}=\dfrac{20-5}{\dfrac{1}{5.5}+\dfrac{0.003}{0.5}+\dfrac{1}{20}}=63W/m^{2}$

$$Q=A\times q=113.5W$$

$$R=\frac{\delta}{A\lambda}=\frac{0.003}{1.2\times 1.5\times 0.5}=3.3\times 10^{-3}K/W$$

$$\frac{1}{Ah_1}=\frac{1}{1.2\times 1.5\times 5.5}=0.101K/W$$

$$\frac{1}{Ah_2}=\frac{1}{1.2\times 1.5\times 20}=27.8\times 10^{-3}K/W$$

1-16 附图所示的空腔由两个平行黑体表面组成，孔腔内抽成真空，且空腔的厚度远小于其高度与宽度。其余已知条件如图。表面 2 是厚 δ =0.1 m 的平板的一侧面，其另一侧表面 3 被高温流体加热，平板的平均导热系数 λ = 17.5 W/(m·K)，试问在稳态工况下表面 3 的 tw3 温度为多少？

解：若处于稳定工况，则

$$\Phi=\varepsilon A\sigma(T_{w1}^{4}-T_{w2}^{4})=\frac{A\lambda}{\delta}(t_{w2}-t_{w3})$$

$$\therefore\ t_{w3}=t_{w2}-\frac{\varepsilon\delta\sigma(T_{w1}^{4}-T_{w2}^{4})}{\lambda}$$

$$=127-\frac{1.0\times 0.1\times 5.67\times 10^{-8}\times(300^{4}-400^{4})}{17.5}$$

$$=132.67^{\circ}C$$

1-18 解： $q=\dfrac{t_1-t_2}{\dfrac{\delta}{\lambda}+\dfrac{1}{h}}=\dfrac{100-10}{\dfrac{0.4}{1.6}+\dfrac{1}{10}}=257.1W/m^2$

1-19 一厚度为 0.4 m，导热系数为 1.6 W/m·K 的平面墙壁，其一侧维持 100℃的温度，另一侧和温度为 10℃的流体进行对流换热，表面传热系数为 10 W/(m2·K)，求通过墙壁的热流密度。

解：

$$\boldsymbol{q=\dfrac{t_1-t_2}{\dfrac{\delta}{\lambda}+\dfrac{1}{h}}=\dfrac{100-10}{\dfrac{0.4}{1.6}+\dfrac{1}{10}}=257.1W/m^2}$$

第二章：

2－1 按题意 $\dfrac{\Delta t}{r_{墙}+r_{保}}\le q$

则 $r_{保} \geq \dfrac{\Delta t}{q} - r_{墙} = \dfrac{1300-30}{1830} - \dfrac{0.02}{1.3} = 0.6786$

则 $\delta_{保} \geq \lambda_{保} \cdot r_{保} = 0.11 \times 0.6786 = 0.07465 = 74.65mm$

2-2 在如图所示的平板导热系数测定装置中，试件厚度δ远小于直径 d。由于安装制造不好，试件与冷、热表面之间存在着一厚度为Δ=0.1mm 的空气隙。设热表面温度 t1=180℃，冷表面温度 t2=30℃，空气隙的导热系数可分别按 t1、t2 查取。试计算空气隙的存在给导热系数的测定带来的误差。通过空气隙的辐射换热可以忽略不计。(Φ=58.2w d=120mm)

解：不考虑空气隙时侧得的导热系数记为λ0，则

$$\frac{\delta}{\lambda_0} = \frac{A\Delta t}{\phi} = \frac{\frac{\pi d^2}{4} \times 150}{58.2} = 0.02915$$

已知空气隙的平均厚度Δ1、Δ2 均为 0.1mm，并设导热系数分别为λ1、λ2，则试件实际的导热系数应满足：

$$\frac{\delta}{\lambda} + \frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_1}{\lambda_2} = \frac{A\Delta t}{\phi}$$

$$\frac{\delta}{\lambda_0} - \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_1}{\lambda_2}$$

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} = \frac{\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_1}{\lambda_2}}{\frac{\delta}{\lambda_0}} = \frac{\frac{0.0001}{0.00378} + \frac{0.0001}{0.00267}}{0.02915} = \frac{0.02646 + 0.03745}{0.02915} = 21.92\%$$

2-4 一烘箱的炉门由两种保温材料 A 和 B 做成，且δA=2δB(见附图)。已知λA=0.1 w/m•K，λB=0.06 w/m•K。烘箱内空气温度 tf1=400℃，内壁面的总表面传热系数 h1=50 w/m2•K。为安全起见，希望烘箱炉门的外表面温度不得高于 50℃。设可把炉门导热作为一维导热问题处理，试决定所需保温材料的厚度。环境温度 tf2=25℃，外表面总表面传热系数 h2=9.5 w/m2•K。

解：根据稳态热平衡应有：

$$\frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_A}{\lambda_A} + \frac{\delta_B}{\lambda_B} + \frac{1}{h_2}} = \frac{t_w - t_{f2}}{\frac{1}{h_2}}$$

由此解得：$\delta_B = 0.0396m, \delta_A = 0.0793m$

2-10 一内径为 80mm，厚度为 5.5mm，导热系数为 45 W/m•K 的蒸汽管道，内壁温度为 250℃，外壁覆盖有两层保温层，内保温层厚度 45mm，导热系数为 0.25W/m•K，外保温层厚 20mm，导热系数为 0.12 W/m•K。若最外侧的壁面温

度为 30℃，求单位管长的散热损失。

解：

$$r_1 = 40mm$$
$$r_2 = 40 + \delta_1 = 45.5mm$$
$$r_3 = 40 + \delta_1 + \delta_2 = 90.5mm$$
$$r_4 = 40 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 110.5mm$$

$$\boldsymbol{q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_4)}{\frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{\lambda_1} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{\lambda_2} + \frac{\ln(\frac{r_4}{r_3})}{\lambda_3}}}$$
$$\boldsymbol{= \frac{2 \times 3.14 \times (250 - 30)}{\frac{\ln(\frac{45.5}{40})}{45} + \frac{\ln(\frac{90.5}{45.5})}{0.25} + \frac{\ln(\frac{110.5}{90.5})}{0.12}}}$$
$$\boldsymbol{= 312.77W / m}$$

2-13 一直径为 30mm、壁温为 100℃的管子向温度为 20℃的环境散热，热损失率为 100W/m。为把热损失减小到 50W/m，有两种材料可以同时被利用。材料 A 的导热系数为 0.5 w/m•K，可利用度为 3.14×10-3m3/m；材料 B 的导热系数为 0.1 w/m•K，可利用度为 4.0×10-3m3/m。试分析如何敷设这两种材料才能达到上要求。假设敷设这两种材料后，外表面与环境间的表面传热系数与原来一样。

解：对表面的换热系数 h 应满足下列热平衡式：$h(100-20)\times 3.14\times 0.03 = 100$

由此得 h=13.27 w/m2•K

每米长管道上绝热层每层的体积为

$$V = \frac{\pi}{4}({d_{i+1}}^2 - {d_i}^2)$$

当 B 在内，A 在外时，B 与 A 材料的外径为 d2、d3 可分别由上式得出。

$$d_2 = \sqrt{V/0.785 + d_1^2} = \sqrt{4\times 10^{-3}/0.785 + 0.03^2} = 0.0774$$

$$d_3 = \sqrt{V/0.785 + d_2^2} = \sqrt{3.14\times 10^{-3}/0.785 + 0.0774^2} = 0.1$$

此时每米长度上的散热量为：

$$\frac{Q}{l} = \frac{100-20}{\frac{\ln(77.4/30)}{6.28\times 0.1} + \frac{\ln(100/77.4)}{6.28\times 0.5} + \frac{1}{13.27\times 3.14\times 0.1}} = 43.7$$

当 A 在内，B 在外时，A 与 B 材料的外径为 d2、d3 可分别由上式得出。

$$d_2 = \sqrt{V/_{0.785} + d_1^2} = \sqrt{3.14\times10^{-3}/_{0.785} + 0.03^2} = 0.07$$

$$d_3 = \sqrt{V/_{0.785} + d_2^2} = \sqrt{4\times10^{-3}/_{0.785} + 0.07^2} = 0.1$$

此时每米长度上的散热量为:

$$\frac{Q}{l} = \frac{100-20}{\frac{\ln(70/30)}{6.28\times0.5} + \frac{\ln(100/70)}{6.28\times0.1} + \frac{1}{13.27\times3.14\times0.1}} = 74.2W/m$$

绝热性能好的材料 B 在内才能实现要求。

2-17 180A 的电流通过直径为 3mm 的不锈钢导线[λ =19W/（m·℃）]。导线浸在温度为 100℃的液体中，表面传热系数为 3000W/（m2·℃），导线的电阻率为 70 μ Ω·cm，长度为 1m，试求导线的表面温度及中心温度？

解:

$$I^2R = \Phi = h\pi dL(t_w - t_\infty)$$

$$R = \rho\frac{L}{A} = \frac{7\times10^{-7}\times1}{\pi(0.0015)^2} = 9.908\times10^{-2}\,\Omega$$

故热平衡为

$$(180)^2\times9.908\times10^{-2} = 3000\times\pi\times(3\times10^{-3})(t_w - 100)$$

由此解得 $t_w = 213.5$ ℃

导线中心的温度为

$$t_i = \frac{\dot{\Phi}r^2}{4\lambda} + t_w = \frac{\frac{I^2R}{\pi\times(0.0015)^2}\times0.0015^2}{4\times19} + 213.5$$

$= 226.94$ ℃

第三章：

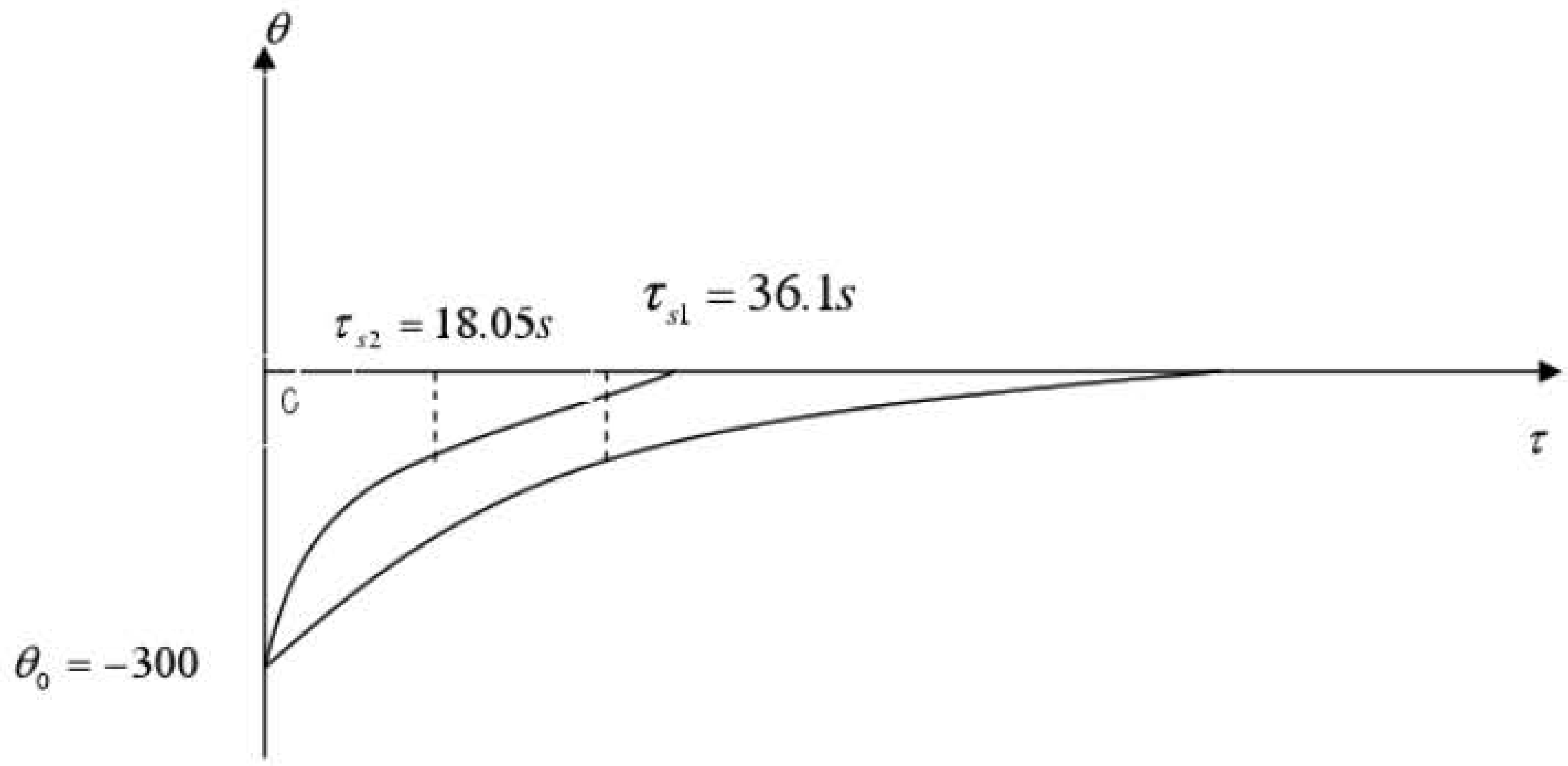
3-1 一热电偶的 $\rho cV/A$ 之值为 2.094 kJ/(m2·K)，初始温度为 20℃，后将其置于 320℃的气流中。试计算在气流与热电偶之间的表面传热系数为 58 W/(m2·K)及 116 W/(m2·K)的两种情形下，热电偶的时间常数，并画出两种情形下热电偶读数的过余温度随时间的变化曲线。

解：（1）时间常数 $\tau_s = \dfrac{\rho cV}{hA}$，已知 $\dfrac{\rho cV}{A} = 2.094$

当 $h = 58W/(m^2 \cdot K)$ 时，$\tau_{s1} = 2.094 \times 10^3 / 58 = 36.1s$

当 $h = 116W/(m^2 \cdot K)$ 时，$\tau_{s2} = 2.094 \times 10^3 / 116 = 18.05s$

（2）过余温度 $\theta = \theta_0 \cdot e^{-\tau/\tau_s} = -300e^{-\tau/\tau_s}$



3-3 一厚 10 mm 的大平壁(满足集总参数分析法求解的条件)，初温为 300℃，密度为 7800 kg/m3，比热容为 0.47 kJ/(kg·℃)，导热系数为 45 W/(m·K)，一侧有恒定热流 q = 100 W/m2 流入，另一侧与 20℃的空气对流换热，换热系数为 70 W/(m2·K)。试求 3min 后平壁的温度。

解：

根据能量守恒原理，有 $\rho cV \dfrac{dt}{d\tau} = qA - hA(t - t_\infty)$

对单位面积而言，其体积为 $V = A \cdot S = 1 \times 10mm = 0.01m^3$

代入其它参数，可得

$$7800 \times 0.47 \times 10^3 \times 0.01 \frac{dt}{d\tau} = 100 - 70(t - 20)$$

$$\Rightarrow 36660 \frac{dt}{d\tau} = -70(t - 150/7)$$

$$\Rightarrow \frac{dt}{d\tau} = -\frac{7}{3666}(t-150/7)$$

分离变量积分 $\int_{300}^{t} \frac{d(t-150/7)}{t-150/7} = \int_{0}^{\tau} -\frac{7}{3666} d\tau$

$$\Rightarrow \ln(t-150/7)|_{300}^{t} = -\frac{7}{3666}\tau$$

令 $\tau = 180 \Rightarrow t = 218.975$

3-7 一根体温计的水银泡长 10 mm，直径 4 mm，护士将它放入病人口中之前，水银泡维持 18℃；放入病人口中时，水银泡表面的换热系数为 85 W/(m2·K)。如果要求测温误差不超过 0.2℃，试求体温计放入口中后，至少需要多长时间，才能将它从体温为 39．4℃的病人口中取出。已别水银泡的物性参数为 $\rho = 13520$ kg/m3，$c = 139.4$ J/(kg·℃)，$\lambda = 8.14$ W/(m·K)。

解：首先判断能否用集总参数法求解

$$\frac{V}{A} = \frac{\pi R^2 l}{2\pi Rl + \pi R^2} = \frac{Rl}{2(l+0.5R)} = \frac{0.002\times 0.01}{2\times(0.01+0.001)} = 0.91\times 10^{-3} m$$

$$Biv = \frac{h(V/A)}{\lambda} = \frac{85\times 0.91\times 10^{-3}}{8.14} = 9.5\times 10^{-3} < 0.05$$

故可用集总参数法。

根据题意，

$$\frac{t-t_\infty}{t_o - t_\infty} = \exp(-BivFov) = \exp(-9.5\times 10^{-3} Fo) \le \frac{-0.2}{18-39.4} = 0.0093$$

$$\Rightarrow Fo > 492.4, 即 \frac{\lambda\tau}{\rho c(V/A)^2} > 492.4$$

$$\Rightarrow \tau > 94.4s$$

3-12 一块厚 10 mm 的大铝板，初始温度为 400℃，突然将其浸入 90℃的流体中，表面传热系数为 1400 W/(m2·K)。试求使铝板中心温度降低到 180℃所需要的时间。

解：$\lambda_{铝} = 236W/(m\cdot K)$

$$Biv = \frac{h\frac{\delta}{2}}{\lambda} = 0.02966 < 0.1$$

满足集总参数法条件。

$$\frac{\theta}{\theta_o} = \exp(-BivFov)$$

$$\Rightarrow \frac{180-90}{400-90} = \exp(-0.02966Fo)$$

$$\Rightarrow Fo = 41.7 \Rightarrow \tau = 10.8s$$

第四章：

4－2 解：由外掠平板流动的动量微分方程

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \qquad (1)$$

由于$u\sim u_\infty, x\sim x, y\sim\delta$，而由连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (2)$$

可知$v\sim\frac{u_\infty}{x}\delta$，因此动量微分方程（1）式中各项的数量级如下：

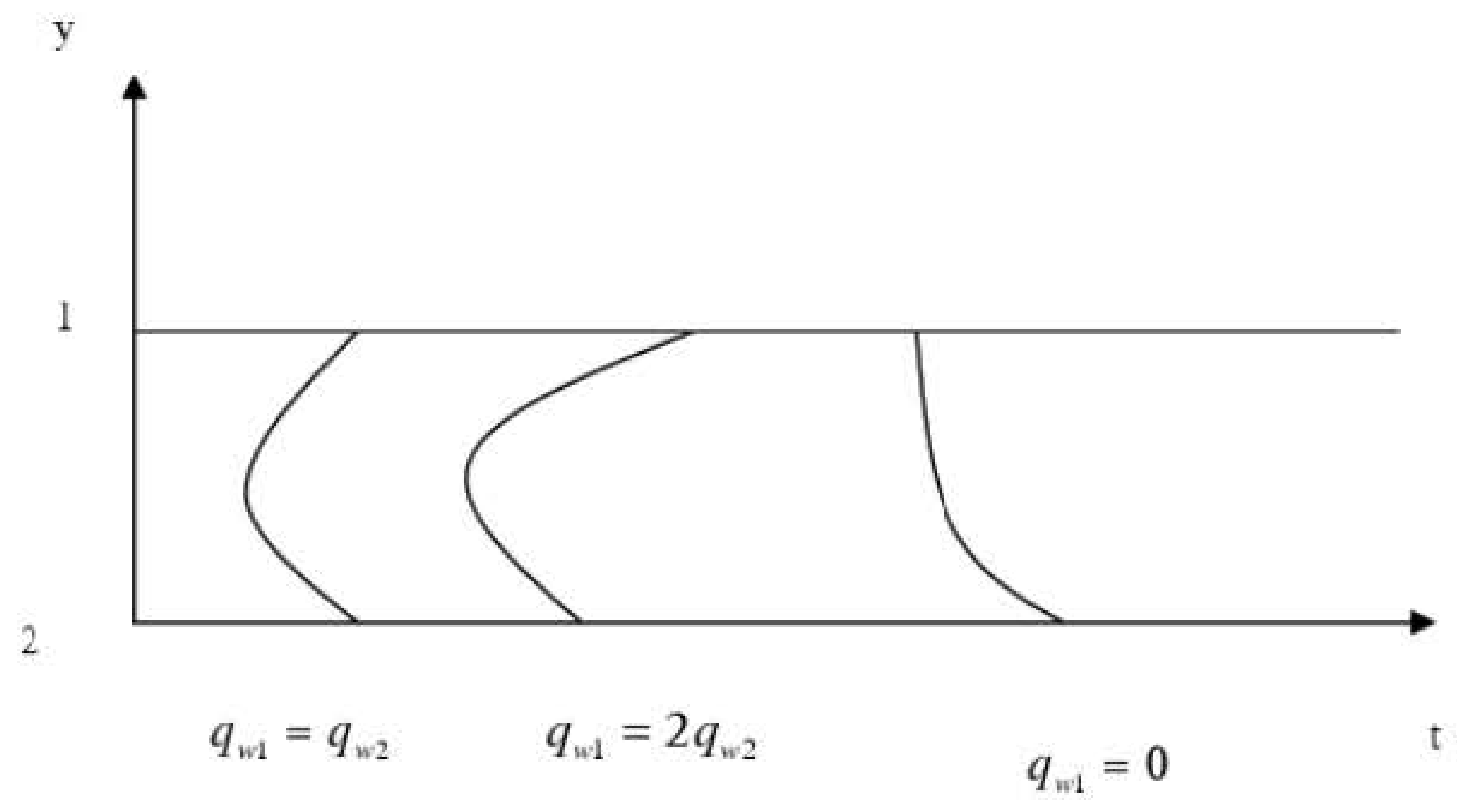
$$u_\infty\frac{u_\infty}{x},\frac{u_\infty}{x}\delta\frac{u_\infty}{\delta},\nu\frac{u_\infty}{\delta^2}$$

在边界层内，粘性力项与惯性力项具有相同的数量级，也就是：

$$\frac{u_\infty^2}{x}\sim\nu\frac{u_\infty}{\delta^2}$$

即$\frac{\delta^2}{x^2}\sim\frac{\nu}{u_\infty x}$，所以$\frac{\delta}{x}\sim\frac{1}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$

4-3，解：三种情况下的温度分布曲线如下所示：



4-14 解：（1）$\lg Nu = \lg C + n\lg \mathrm{Re} + 1/3\lg \mathrm{Pr}$

lgRe	3.699	4.301	4.613	4.954
lgPr	0.342	0.591	-0.155	-0.155
lgNu	1.613	2.097	2.068	2.305

求出了三个 n 值，然后取平均值。

n1=0.666,n2=0.705,n3=0.695

平均值 n=0.689

求出四个 C 值，然后取平均值。

C1=0.089,C2=0.086,C3=0.087,C4=0.088

平均值 C=0.088

（2）不行，两现象不相似，故不能使用相同的准则关系式。

4-15 解：根据题意，$Nu = C\,\mathrm{Re}^u\ \mathrm{Pr}^m$，即 $\dfrac{hl}{\lambda} = C(\dfrac{ul}{v})^m\ \mathrm{Pr}^n$

考虑到 C，m,n 为常数，物性也为常数，因此 $hl \propto (ul)^m$

可以根据试验结果确定 m 的值，

$\dfrac{h_1 l_1}{h_2 l_2} = \dfrac{(u_1 l_1)^m}{(u_2 l_2)^m}$ 代入数据，得出 m=0.782

当 $l = 1m, u = 15m/s$ 时，$h = h_1 l_1 (\dfrac{u}{u_1}\dfrac{l}{l_1})^m / l = 34.3W/(m^2 \cdot K)$

当 $l = 1m, u = 20m/s$ 时，$h = h_1 l_1 (\dfrac{u}{u_1}\dfrac{l}{l_1})^m / l = 42.95W/(m^2 \cdot K)$

第五章：

5-4 一常物性的流体同时流过温度与之不同的两根直管 1 与 2，且 d1=2d2，流动与换热均已处于紊流充分发展区域。试确定在下列两种情形下两管内平均表面传热系数的相对大小：

（1）流体以同样流速流过两管；

（2）流体以同样的质量流量流过两管。

解：（1）当以同样流速流过两管时，$u_1 = u_2$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} = 0.23\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{n}$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{Nu_1 l_2}{Nu_2 l_1} = \left(\frac{\mathrm{Re}_1}{\mathrm{Re}_2}\right)^{0.8}\frac{d_1}{d_2} \Rightarrow \frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0.8}\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2}\times 2^{0.8} = 0.871$$

（2）当以同样质量流量流过两管时，$Q_1 = Q_2$

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{Q_1/A_1}{Q_2/A_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{1}{4}$$

$$\Rightarrow \frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{u_1 d_1}{u_2 d_2}\right)^{0.8}\frac{d_2}{d_1} = \left(\frac{1}{4}\times 2\right)^{0.8}\times\frac{1}{2} = \frac{1}{2}^{0.5}\times\frac{1}{2} = 0.287$$

5-9 水以 1.2m/s 的平均流速流过内径为 20mm 的长直管。(1)管子壁温为 75℃，水从 20℃加热到 70℃;(2)管子壁温为 15℃，水从 70℃冷却到 20℃。试计算两种情形下的表面传热系数，并讨论造成差别的原因。

解：（1）定性温度 $t_f = \dfrac{t_f^{'} + t_f^{''}}{2} = 45$ ℃

查 45℃水的物性参数有：

$$\rho = 990.2kg/m^3, Cp = 4.174kJ/(kg\cdot K), \lambda = 0.642W/(m\cdot K), v = 0.608\times 10^{-6}m^2/s$$
$$\mathrm{Pr} = 3.93, \mu = 601.4\times 10^{-6}kg/m\cdot s$$

$t_w = 15$ ℃时：$\mathrm{Re} = \dfrac{\rho u d}{\mu} = \dfrac{ud}{v} = \dfrac{1.2\times 20\times 10^{-3}}{0.608\times 10^{-6}} = 3.95\times 10^4$ 为紊流流动

则 $Nu = 0.023\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{n} = \dfrac{hd}{\lambda}$ 因为是被加热，所以 n 取 0.4

$$\frac{h\times 20\times 10^{-3}}{0.642} = 0.023\times(3.95\times 10^4)^{0.8}\times 3.93^{0.4} \Rightarrow h = 6071.1W/m^2\cdot K$$

（2） 定性温度 $t_f = \dfrac{t_f^{'} + t_f^{''}}{2} = 45$ ℃，物性参数与（1）相同，因为是被冷却，所以 n 取 0.3

$$Nu = 0.023\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.3} = \frac{hd}{\lambda}$$

$$\frac{h\times 20\times 10^{-3}}{0.642} = 0.023\times(3.95\times 10^{4})^{0.8}\times 3.93^{0.3} \Rightarrow h = 5294.5W/m^2\cdot K$$

h 不同是因为：一个是被加热，一个是被冷却，速度分布受温度分布影响，Nu 不同。

5-11 现代贮存热能的一种装置的示意图如图所示。一根内径为 25mm 的园管被置于一正方形截面的石蜡体中心，热水流过管内使石蜡溶解，从而把热水的显热化为石蜡的潜热而储存起来。热水的入口温度为 60℃，流量为 0.15kg/s。石蜡的物性参数为：熔点为 27.4℃，熔化潜热 L=244kJ/kg，固体石蜡的密度 ρs=770kg/m3。假设圆管表面温度在加热过程中一直处于石蜡的熔点，试计算该单元中的石蜡全部熔化热水需流过多长时间？（b=0.25m，l=3m）

解：设暂取入口水温度为定性温度

$t = 60$ ℃时，物性参数为：

$$\rho = 983.1kg/m^3, Cp = 4.179kJ/kg\cdot K, \lambda = 65.9\times 10^{-2}W/m\cdot K, v = 0.478\times 10^{6}m^2/s$$

$\mathrm{Pr} = 2.99$

$$\mathrm{Re} = \frac{ud}{v} = \frac{0.15\times 4}{\pi d v\rho} = 16256.8$$

所以为紊流。

$$Nu = 0.023\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.3} = \frac{hd}{\lambda} \Rightarrow h = 1.97\times 10^3 W/m^2\cdot K$$

由热平衡关系式 $h\pi dl(t_w - t_f) = \frac{1}{4}\pi d^2\rho u_m Cp(t_f'' - t_f') \Rightarrow t_f'' = 42.4$ ℃

$$t_f = \frac{t_f' + t_f''}{2} = 51.2℃$$

查物性参数：$Cp = 4.175kJ/kg\cdot K, v = 0.547\times 10^{-6}m^2/s, \rho = 987.5kg/m^3, \mathrm{Pr} = 3.474$

$\lambda = 0.6493W/m\cdot K$

$\mathrm{Re} = 14142.9$ 为紊流

$$\Rightarrow h = 1815.15W/m^2\cdot K \qquad t_f'' = 43.4℃ \qquad t_f = \frac{t_f' + t_f''}{2} = 51.7℃$$

则 $h\pi dl(t_f - t_w)t = \rho_s l(b^2 - \frac{1}{4}\pi d^2)L_s \Rightarrow t = 3363s$

5-15 温度为 0℃的冷空气以 6m/s 的流速平行的吹过一太阳能集热器的表面。该表面呈方形，尺寸为 1m×1m，其中一个边与来流方向垂直，如果表面平均温度为 20℃，试计算由于对流所散失的热量。

解：定性温度 $t_m = \frac{0+20}{2} = 10$ ℃

查 10℃空气的物性参数：

$$\rho = 1.247kg/m^3, Cp = 1.005kJ/kg\cdot K, \Pr = 0.705, \lambda = 2.51\times10^{-2}W/m\cdot K$$
$$\mu = 17.6\times10^{-6}kg/m\cdot s, v = 14.16\times10^{-6}m^2/s$$
$$\mathrm{Re} = \frac{\rho ul}{\mu} = 4.2\times10^5 < 5\times10^5$$

为层流流动。

则 $\overline{Nu_x} = 0.664\,\mathrm{Re}^{0.5}\Pr^{1/3} = \frac{hl}{\lambda} \Rightarrow h = 9.67W/m^2\cdot K$

则由对流而散失热量 $Q = hA\Delta t = 9.67\times1\times20 = 193W$

5-25 一未包绝热材料的蒸汽管道用来输送 150℃的水蒸气。管道外径为 500mm，置于室外。冬天室外温度为-10℃。如果空气以 5m/s 流速横向吹过该管道，试确定其单位长度上的对流散热量。

解：$t_w = 150$ ℃查得 $t = -10$ ℃空气的物性参数：

$$\rho = 1.342kg/m^3, Cp = 1.009kJ/kg\cdot K, \lambda = 2.36\times10^{-2}W/m\cdot K, \mu = 16.7\times10^{-6}kg/m\cdot s$$
$$v = 12.43\times10^{-6}m^2/s, \Pr = 0.712$$

$$\Rightarrow \mathrm{Re} = \frac{\rho ud}{\mu} = 2.01\times10^5 > 2\times10^5$$

所以用简化公式 $Nu = 0.02\,\mathrm{Re}^{0.8} = \frac{hd}{\lambda} \Rightarrow h = 16.5W/m^2\cdot K$

单位长度对流散热量 $Q = h\pi dl\Delta t = 16.5\times3.14\times0.5\times160 = 4144.8W$

5-28 在锅炉的空气预热器中，空气横向掠过一组叉排管束，*s1*=80mm，*s2*=50mm，管子外径 *d*=40mm。空气在最小截面处的流速为 6m/s，流体温度 *tf*=133℃，流动方向上的排数大于 10，管壁平均温度为 165℃。试确定空气与管束间的平均表面传热系数。

解：$t_f = 133$ ℃查空气 133℃物性参数：

$$\rho = 0.8694kg/m^3, Cp = 1.0116kJ/kg\cdot K, \lambda = 3.4375\times10^{-2}W/m\cdot K, \mu = 23.385\times10^{-6}kg/m\cdot s$$
$$v = 26.6275\times10^{-6}m^2/s, \Pr = 0.685$$

$$\Rightarrow \mathrm{Re} = \frac{\rho ud}{\mu} = 8.923\times10^3$$

又因为 $\frac{S_1}{S_2} = 1.6 < 2$，所以用简化式 $Nu = 0.31\,\mathrm{Re}^{0.6}(\frac{S_1}{S_2})^{0.2} = \frac{hd}{\lambda} \Rightarrow h = 68.65W/m^2\cdot K$

5-33 假设把人体简化成为直径为 275 mm、高 1.75m 的等温竖直圆柱，其表面温度比人体体内的正常温度低 2℃，试计算该模型位于静止空气中时的自然对流散热量，并与人体每天的平均摄入热量(5440kJ)相比较。圆柱两端面的散热可不予考虑，人体正常体温按 37℃计算，环境温度为 25℃。

解：定性温度$t_m = \dfrac{35+25}{2} = 30$℃

查 30℃空气物性参数如下：

$\lambda = 2.67\times10^{-2} W/m^2\cdot K, v = 16.0\times10^{-6} m^2/s, \Pr = 0.701$

则$Gr = \dfrac{g\beta(t_w - t_\infty)L^3}{v^2} = \dfrac{9.8\times\dfrac{1}{273+30}\times(35-25)\times1.75^3}{(16\times10^{-6})^2} = 6.771\times10^9$

$(Gr\Pr)_m = 6.771\times10^9\times0.701 = 4.75\times10^9 > 10^9$ 为紊流

则 $Nu = 0.1(Gr\cdot\Pr)^{1/3} = \dfrac{hl}{\lambda} \Rightarrow h = 2.564W/m^2\cdot K$

则自然对流散热量$Q = h\pi dl\Delta t = 2.564\times3.14\times275\times10^{-3}\times1.75\times10 = 38.77W$

一天二十四小时总散热量$Q_{总} = 38.77\times24\times3600 = 3349.4kJ$

$3349.4kJ < 5440kJ$

5-36 一块有内部电加热的正方形薄平板，边长为 30cm，被竖直地置于静止的空气中。空气温度为 35℃。为防止平板内部电热丝过热，其表面温度不允许超过 150℃。试确定所允许的电热器的最大功率。平板表面传热系数取为 8.52W/(m2·K)。

解：定性温度$t_m = \dfrac{35+150}{2} = 92.5$℃

查空气物性参数得：$v = 22.4\times10^{-6} m^2/s, \lambda = 3.15\times10^{-2} W/m\cdot K, \Pr = 0.69$

$(Gr\Pr)_m = \dfrac{g\beta\Delta t l^3}{v^2}\Pr_m = \dfrac{9.8\times\dfrac{1}{273+92.5}\times115\times0.3^3}{(22.4\times10^{-6})^2} = 1.14\times10^8 < 10^9$ 为层流

取 $Nu = 0.59(Gr\Pr)_m^{1/4} = \dfrac{h_2 l}{\lambda} \Rightarrow h_2 = 6.4W/(m^2\cdot K)$

由题意知$h_1 = 8.52W/m^2\cdot K$

$\therefore P = \Phi = h\Delta t A = 14.92\times115\times0.09 = 309W$

第六章：

6-3 把太阳表面近似的看成是 T=5800K 的黑体，试确定太阳发出的辐射能中可见光所占的百分数。

解：可见光波长范围 $0.38 \sim 0.76\mu m$

$$\lambda_1 T = 0.38 \times 5800 = 2204\mu m \cdot K$$

$$\lambda_2 T = 0.76 \times 5800 = 4408\mu m \cdot K$$

$$F_{b(0-\lambda 1)} = 10.19\% \qquad F_{b(0-\lambda 2)} = 55.04\%$$

$$F_{b(\lambda 1-\lambda 2)} = 44.85\%$$

6-10 用特定的仪器侧得，一黑体炉发出的波长为 0.7 μm 的辐射能（在半球范围内）为 10^8w/m^3，试问该黑体炉工作在多高的温度下？在该工况下辐射黑体炉的加热功率为多大？辐射小孔的面积为 4×10-4m^2。

解：由普朗特定律得：

$$10^8 = \frac{3.742 \times 10^{-16} \times (0.7 \times 10^{-6})^{-5}}{e^{1.4388 \times 10^{-2} / 0.7 \times 10^{-6} T} - 1}$$

所以 $T = 1213.4K$

该温度下，黑体辐射力 $E_b = 5.67 \times 10^{-8} \times 1213.4^4 = 122913W/m^2$

辐射炉的加热功率为：$4 \times 10^{-4} \times 122913 = 49.2W$

由普朗特定律得：

$$108 = \frac{3.742 \times 10^{-16} \times (0.7 \times 10^{-6})^{-5}}{e^{1.4388 \times 10^{-2} / 0.7 \times 10^{-6} T} - 1}$$

所以 $T = 670.4K$

该温度下，黑体辐射力 $E_b = 5.67 \times 10^{-8} \times 670.4^4 = 11453W/m^2$

辐射炉的加热功率为：$4 \times 10^{-4} \times 11453 = 4.58W$

6-12 一选择性吸收表面的光谱吸收比随 λ 变化的特性如图所示，试计算当太阳投入辐射为 G=800W/m2 时，该表面单位面积上所吸收的太阳能量与太阳辐射的总吸收比。

解：

$$q_1 = \int_0^{1.4} 0.9 E_{b\lambda}(5800) d\lambda \qquad q_2 = \int_{1.4}^{\infty} 0.2 E_{b\lambda}(5800) d\lambda$$

$$q_1 / E_b(5800) = \int_0^{1.4} 0.9 \frac{E_{b\lambda}(5800)}{E_b(5800)} d\lambda$$

$$\lambda_1 T = 1.4 \times 5800 = 8120\mu m \cdot K$$

$F_{b(0-\lambda 1)} = 86.08\%$ $\quad F_{b(\lambda 1-\infty)} = 1 - 86.08 = 13.92\%$

$q_1 / E_b = 0.9 \times 0.861 = 0.775$ $\quad q_2 / E_b = 0.2 \times 0.139 = 0.028$

$Q = 800 \times (0.775 + 0.028) = 642.4W$ 总吸收率：$642.4 / 800 = 80.3\%$

6-13 暖房的升温作用可以从玻璃的光谱的穿透比变化特性得到解释。有一块厚为 3mm 的玻璃，经测定，其对波长为 0.3-2.5μm 的辐射能的穿透比为 0.9，而对其它波长的辐射能可以认为完全不穿透。试据此计算温度为 5800K 的黑体辐射及温度为 300K 的黑体投射到该玻璃上时各自的总穿透比。

解：按定义，穿透比

$$\tau = \frac{\int_{0_1}^{\infty} \tau_\lambda E_{b\lambda}(\lambda, T_b) d\lambda}{\sigma_0 T^4} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 0.9 E_{b\lambda}(\lambda, T_b) d\lambda}{\sigma_0 T^4} = 0.9[F_{b(0-\lambda_2)} - F_{b(0-\lambda_1)}]$$

$T = 5800K$，$\lambda_2 T_2 = 2.5 \times 5800 = 14500 \mu m \cdot K$，$F_{b(0-\lambda 2)} = 96.57\%$

$\lambda_1 T_1 = 0.3 \times 5800 = 1740 \mu m \cdot K$，$F_{b(0-\lambda 1)} = 3.296\%$

所以 $\tau = 0.9 \times (0.9657 - 0.03296) = 83.95\%$

$T = 300K$，$\lambda_2 T_2 = 2.5 \times 300 = 750 \mu m \cdot K$，$F_{b(0-\lambda 2)} = 0.0242\%$

$\lambda_1 T_1 = 0.3 \times 300 = 90 \mu m \cdot K$，$F_{b(0-\lambda 1)} = 0.0029\%$

所以 $\tau = 0.9 \times (0.0242 - 0.0029) = 0.0192\%$

$T = 3000K$，$\lambda_2 T_2 = 2.5 \times 3000 = 7500 \mu m \cdot K$，$F_{b(0-\lambda 2)} = 83.46\%$

$\lambda_1 T_1 = 0.3 \times 3000 = 900 \mu m \cdot K$，$F_{b(0-\lambda 1)} = 0.02907\%$

所以 $\tau = 0.9 \times (83.46 - 0.02907) = 75.088\%$

6-14 一直径为 20mm 的热流计探头，用以测定一微小表面积 A1 的辐射热流，该表面的温度 T1=1000K。环境温度很低，因而对探头的影响可以忽略不计。因某些原因，探头只能安置在与 A1 表面法线成 45° 处，距离 l=0.5m（见附图）。探头侧得的热量是 1.815×10-3w。表面 A1 是漫射的，而探头表面的吸收比可近似的取为 1。试确定 A1 的发射率。A1 的表面积为 4×10-4m2。

解：

$$dQ_p = L_p dA_1 \cos\varphi d\Omega$$

$$d\Omega = \frac{A\cos\varphi}{r^2} = \frac{3.1416 \times 0.01^2 \times 1/\sqrt{2}}{2l^2} = 4.443 \times 10^{-4} sr$$

$$L_p = \varepsilon E_b / \pi$$

$$E_b = 5.67 \times 10^4 W / m^2$$

$$\varepsilon = \frac{\pi dQ_p}{E_b (dA_1 \cos\varphi) d\Omega} = \frac{3.1416 \times 1.815 \times 10^{-3}}{5.67 \times 10^4 \times 4 \times 10^{-4} \times 4.443 \times 10^{-4} / \sqrt{2}} = 0.8$$

第七章：

7-1 试求从沟槽表面发出的辐射能中落到沟槽外面部分所占的百分数，设在垂直于纸面方向沟槽为无限长。

解：对三种情况，在开口处作一假想表面，设表面积为 A_1，而其余沟槽表面为 A_2。

则 $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$，因 $X_{1,2} = 1$，所以 $X_{2,1} = A_1 / A_2$，于是有：

（a） $$X_{2,1} = \frac{W}{2(W/2)/\sin\varphi} = \sin\varphi$$

（b） $$X_{2,1} = \frac{W}{2H + W}$$

（c） $$X_{2,1} = \frac{W}{2H + W/\sin\varphi}$$

7-3 两块平行放置的平板，温度分别保持 t1=527℃和 t2=527℃,板的发射率ε1=ε2=0.8，板间距离远小于板的宽度和高度。试求板 1 的本身辐射；板 1 和板 2 之间的辐射换热量；板 1 的有效辐射；板 1 的反射辐射；对板 1 的投入辐射及板 2 的有效辐射。

解：第一种：两板温度都为 527℃。

（1）板 1 的本身辐射 $E_1 = \varepsilon E_{b1} = 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (527 + 273)^4 = 18579 W/m^2$

（2）两板之间的辐射换热量

$$q_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} = 0 W/m^2$$

（3）板 1 的有效辐射 $J_1 = E_{b1} - (1/\varepsilon_1 - 1) q_{1,2} = E_{b1} = 2.32 \times 10^4 W/m^2$

（4）板 1 的反射辐射 $\Phi_{\rho 1} = J_1 - E_1 = 0.46 \times 10^4 W/m^2$

（5）对板 1 的投入辐射及板 2 的有效辐射

$$G_1 = J_2 = E_{b2} - (1/\varepsilon_2 - 1) q_{1,2} = E_{b2} = 2.32 \times 10^4 W/m^2$$

第二种：一板温度为 527℃，一板为 27℃

（1）板 1 的本身辐射 $E_1 = \varepsilon E_{b1} = 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} = 18579 W/m^2$

（2）两板之间的辐射换热量

$$q_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} = 15176.7 W/m^2$$

（3）板 1 的有效辐射 $J_1 = E_{b1} - (1/\varepsilon_1 - 1) q_{1,2} = 19430 W/m^2$

（4）板 1 的反射辐射 $\Phi_{\rho 1} = J_1 - E_1$ $\qquad \Phi_{\rho 1} = 19430 - 18579 = 851 W/m^2$

（5）对板 1 的投入辐射及板 2 的有效辐射

$$G_1 = J_2 = E_{b2} - (1/\varepsilon_2 - 1)q_{1,2} = 4250W/m^2$$

7-11 一同心长套管，内、外管的直径分别为 d1=50mm、d2=0.3m，温度 t1=277℃，t2=27℃，发射率为 ε 1=0.6、 ε 2=0.28。如果用直径 d3=150mm，发射率 ε 3=0.2 的薄壁铝管作为辐射屏插入内、外管之间，试求：①内、外管间的辐射换热量；②作为辐射屏的铝管的温度。

解：（1）屏的套管间的辐射换热量

$$Q = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,3}} + \frac{2(1-\varepsilon_3)}{\varepsilon_3 A_3} + \frac{1}{A_3 X_{3,2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} = 145.8W/m$$

（2）辐射屏的温度为T_2，由热平衡方程

$$Q = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} = 145.8W/m$$

得到$T = 453.8K$

7-13 假定有两个同心的平行圆盘相距 0.9144m，其中圆盘 1 半径为 0.3048m，温度为 93.33℃，圆盘 2 半径为 0.4572m，温度为 204.44℃。试求下列情况下的辐射换热量：

①两圆盘均为黑体，周围不存在其它辐射；

②两圆盘均为黑体，周围是一平截头的圆锥面作为重辐射表面；

③两圆盘均为黑体，有一个温度为-17.78℃的平截头的圆锥黑表面包住它们。

解：半径不等的：

（1）查图得 $X_{1,2} = 0.18$，故 $X_{2,1} = 0.08$

所以两黑体间的辐射换热量 $Q_{1,2} = A_2 X_{2,1}\sigma(T_2^4 - T_1^4) = 101.2W$

（2） $X_{1,2} = 0.18, X_{1,3} = 0.82, X_{2,3} = 1 - X_{2,1} = 0.92$

$$R_1 = \frac{1}{A_1 X_{1,2}} = 19.03 \qquad R_2 = \frac{1}{A_1 X_{1,3}} = 4.18 \qquad R_3 = \frac{1}{A_2 X_{2,3}} = 1.66$$

此时的总热阻：

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_3}} = 4.47$$

两圆盘间的辐射换热量： $Q_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R} = 431.4W$

（3）

$$Q_{1,2} = \frac{E_{b2} - E_{b1}}{R_1} = 101.2W$$

$$Q_{1,3} = \frac{E_{b1} - E_{b3}}{R_2} = 186.9W$$

$$Q_{2,3} = \frac{E_{b2} - E_{b3}}{R_3} = 1631.2W$$

半径相同的：

（1）查图得 $X_{1,2}=0.16=X_{2,1}$

所以两黑体间的辐射换热量 $Q_{1,2}=A_2X_{2,1}\sigma(T_2^4-T_1^4)=202.4W$

（2）$X_{1,2}=0.16, X_{1,3}=0.84, X_{2,3}=1-X_{2,1}=0.84$

$$R_1=\frac{1}{A_1X_{1,2}}=9.52 \qquad R_2=\frac{1}{A_1X_{1,3}}=1.81 \qquad R_3=\frac{1}{A_2X_{2,3}}=1.81$$

此时的总热阻：

$$R_3=\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2+R_3}}=2.62$$

两圆盘间的辐射换热量：$Q_{1,2}=\dfrac{E_{b1}-E_{b2}}{R}=736W$

（3）

$$Q_{1,2}=\frac{E_{b2}-E_{b1}}{R_1}=202.6$$

$$Q_{1,3}=\frac{E_{b1}-E_{b3}}{R_2}=431.2W$$

$$Q_{2,3}=\frac{E_{b2}-E_{b3}}{R_3}=1496W$$

7-14 在上题中若两圆盘分别为发射率 ε 1= ε 2=0.7 的灰体，试计算周围没有其它辐射时两圆盘间的辐射换热量。

解：半径不等的：

$$\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1A_1}=1.4683 \qquad \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2A_2}=0.6526 \qquad \frac{1}{A_1X_{1,2}}=19.03$$

$$Q'=\frac{E_{b2}-E_{b1}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1A_1}+\frac{1}{A_1X_{1,2}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2A_2}}=91.06W$$

半径相同的：$\dfrac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1A_1}=0.6530 \qquad \dfrac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2A_2}=0.6530 \qquad \dfrac{1}{A_1X_{1,2}}=9.52$

$$Q'=\frac{E_{b2}-E_{b1}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1A_1}+\frac{1}{A_1X_{1,2}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2A_2}}=178.09W$$

7-15 在 14 题中，若两灰盘被重辐射表面围住（平截头的圆锥面），试计算两灰圆盘的辐射换热。

解：半径不等的：

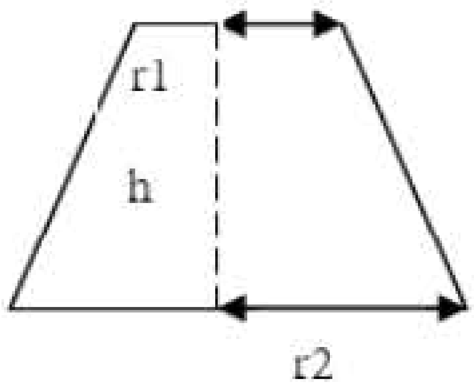
$$Q'=\frac{E_{b2}-E_{b1}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1A_1}+\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2+R_3}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2A_2}}=292.3W$$

半径相同的：

$$Q'=\frac{E_{b2}-E_{b1}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}+\frac{1}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2+R_3}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}=491.18W$$

7-16 在 15 题中，若两灰圆盘的平截头圆锥面亦为灰表面，其发射率为ε 3=0.4，温度为 T3=422.22K，试计算两圆盘之间的辐射换热量。

解：半径不等的：



算出侧面积 $A_3=2.22m^2$ $\frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}=0.68$

$$\frac{E_{b1}-J_1}{1.4683}+\frac{J_2-J_1}{19.03}+\frac{J_3-J_1}{4.18}=0$$

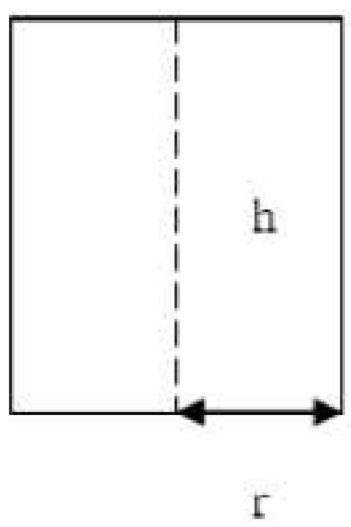
$$\frac{E_{b2}-J_2}{0.6526}+\frac{J_3-J_2}{1.66}+\frac{J_1-J_2}{19.03}=0$$

$$\frac{E_{b3}-J_3}{0.68}+\frac{J_2-J_3}{1.66}+\frac{J_1-J_3}{4.18}=0$$

$$\Rightarrow J_1=714.851W/m^2\ ,J_2=2063.98W/m^2\ ,J_3=1146.04W/m^2$$

$$\Rightarrow Q_{12}=\frac{J_2-J_1}{19.03}=70.8947W$$

半径相同的：



算出侧面积 $A_3=2\pi rh=2.62m^2$

$$\frac{E_{b1}-J_1}{0.6530}+\frac{J_2-J_1}{9.52}+\frac{J_3-J_1}{1.81}=0$$

$$\frac{E_{b2}-J_2}{0.6530}+\frac{J_3-J_2}{1.81}+\frac{J_1-J_2}{9.52}=0$$

$$\frac{E_{b3}-J_3}{0.57}+\frac{J_2-J_3}{1.81}+\frac{J_1-J_3}{1.81}=0$$

$$\Rightarrow J_1=714.38W/m^2, J_2=2061.17W/m^2, J_3=1105.59W/m^2$$

$$\Rightarrow Q_{12}=\frac{J_2-J_1}{9.52}=141.47W$$

7-18 有一面积为 3m×3m 的方形房间，地板的温度为 25℃，天花板的温度为 13℃，四面墙壁都是绝热的。房间高 2.5m，所有表面的发射率为 0.8，求地板和天花板的净辐射换热量及墙壁的温度。

解：地板为表面 1，天花板为表面 2，绝热面为表面 3

$$R_1=\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 F_1}=\frac{0.2}{0.8\times9}=\frac{1}{36}\qquad R_4=\frac{1}{F_1\cdot X_{1,3}}=\frac{1}{9\times0.75}$$

$$R_2=\frac{1}{F_1\cdot X_{1\cdot2}}=\frac{1}{9\times0.25}=\frac{1}{36}$$

$$R_5=\frac{1}{F_2\cdot X_{2,3}}=\frac{1}{9\times0.75}$$

$$R_3=\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 F_2}=\frac{0.2}{0.8\times9}=\frac{1}{36}$$

$$E_{b1}=\sigma T_1^4=5.67\times10^{-8}\times298^4=447.145W/m^2$$

$$E_{b2}=\sigma T_2^4=5.67\times10^{-8}\times286^4=379.356W/m^2$$

$$Q_{1,2}=\frac{E_{b1}-E_{b2}}{R_1+R_3+\cfrac{1}{\cfrac{1}{R_2}+\cfrac{1}{R_4+R_5}}}=859.2W$$

由于墙壁为绝热表面，故 $Q_1=Q_{1,2}=-Q_2$，从 $Q_1==\frac{E_{b1}-J_1}{R_1}=\frac{J_2-E_{b2}}{R_3}$

可以得出：J_1=$423.278W/m^2$，J_2=$403.223W/m^2$

又因为 $\frac{J_1-J_3}{R_4}=\frac{J_3-J_2}{R_5}$

可以得出：$J_3=\sigma_0 T_3^4$

$$T_3=292.185°C$$