一、 术语解释（共 10 分，每小题 2 分）

1、传热过程

冷热流体通过固体壁面交换热量的过程称为传热过程

2、对流传热（换热）

宏观运动的流体与固体表面间的热交换称为对流传热

3、非稳态导热的正规状况阶段

无因次过余温度的对数与傅里叶数成负的线性关系

4、管内对流传热的充分发展段

局部对流传热系数（或无因次过余温度）沿主流方向不再变化的管段

5、温度梯度

等温面法线方向单位距离的温度升高率

二、 填空（共 10 分，每小题 2 分）

1、牛顿冷却公式$\Phi = hA(t_w - t_f)$中，t_f 是指（ 流体平均温度 ）；

2、可以用傅里叶定律计算局部对流传热，其依据是（ 壁面处法线方向没有对流 ）；

3、提高膜状凝结传热强度的关键是（ 减小液膜厚度 ）；

4、自然对流传热的自模化，是指对流传热系数与（ 特征尺寸 ）无关；

5、在过热度一定的条件下，增加表面的粗糙度可以（ 提高 ）沸腾传热强度。

三、 分析与计算（共 20 分，每小题 5 分）

1、导出常物性条件下，有均匀内热源$\dot{\Phi}(\mathrm{W/m^3})$的物体在非均匀网格划分时（$\Delta x \neq \Delta y$），第三类边界条件下，二维非稳态导热边界节点的显式离散化代数方程，并分析稳定性条件。

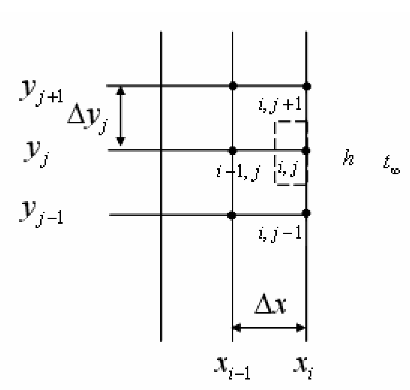
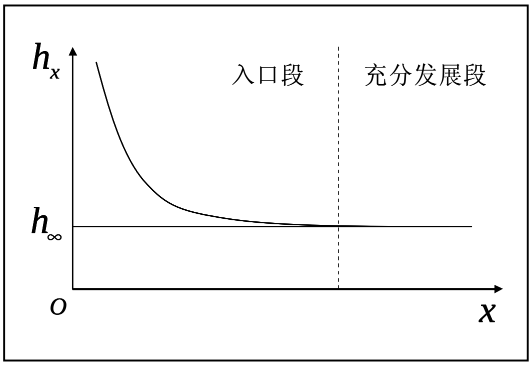


图 1 网格和节点示意图

$$
\begin{aligned}
r\,c\,\frac{t_i^{(k+1)} - t_i^{(k)}}{\Delta t}\frac{\Delta x}{2}\Delta y = {} & l\,\frac{t_{i-1,j}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{\Delta x}\Delta y + h(t_\infty - t_{i,j}^{(k)})\Delta y \\
& + l\,\frac{t_{i,j-1}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{\Delta y}\frac{\Delta x}{2} + l\,\frac{t_{i,j+1}^{(k)} - t_{i,j}^{(k)}}{\Delta y}\frac{\Delta x}{2} \\
& + \dot{\Phi}\frac{\Delta x}{2}\Delta y
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
t_i^{(k+1)} = {} & \left(1 - \frac{2\,l\,\Delta t}{r\,c\,\Delta x^2} - \frac{2\,h\,\Delta t}{r\,c\,\Delta x} - \frac{2\,l\,\Delta t}{r\,c\,\Delta y^2}\right)t_i^{(k)} \\
& + \frac{2\,l\,\Delta t}{r\,c\,\Delta x^2}t_{i-1,j}^{(k)} + \frac{2\,h\,\Delta t}{r\,c\,\Delta x}t_\infty + \frac{l\,\Delta t}{r\,c\,\Delta y^2}t_{i,j-1}^{(k)} + \frac{l\,\Delta t}{r\,c\,\Delta y^2}t_{i,j+1}^{(k)} + \frac{\dot{\Phi}}{r\,c}
\end{aligned}
$$

2、根据圆管内层流受迫对流传热时局部对流传热系数的变化规律，推测等壁温矩形截面通道内层流受迫对流传热时，局部对流传热系数的变化规律。



3、温度为t_∞、来流速度为u_∞的流体与一个长度为L、温度为t_w的等温平壁进行对流传热。若已知热边界层内流体的温度分布为$\dfrac{t-t_w}{t_\infty - t_w} = \dfrac{2y}{d_t(x)} - \left(\dfrac{y}{d_t(x)}\right)^2$，热边界层厚度$d_t(x) = 5.0\sqrt{xn/u_\infty}$，流体的热导率为$l$，$y, x$分别是垂直于壁面的坐标和沿壁面流动方向的坐标。试导出局部努塞尔数Nu_x的表达式。

$$
h_x = \frac{-l\left.\dfrac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=0}}{t_w - t_\infty} = \frac{-l}{t_\infty - t_w}\frac{2}{d_t(x)}(t_\infty - t_w) = \frac{2l}{d_t(x)} = d_t(x) = \frac{2l}{5.0\sqrt{xn/u_\infty}}
$$

$$
Nu_x = \frac{h_x x}{l} = \frac{2x}{5.0\sqrt{xn/u_\infty}} = 0.4\sqrt{u_\infty x/n} = 0.4\,\mathrm{Re}_x^{1/2}
$$

4、初始温度t_0、直径为D、长度为H的圆柱侧面绝热，当时间$t > 0$时开始，左端面保持恒温t_w，右端面与温度为t_f的流体对流传热，对流传热系数为h。

① 写出描述圆柱温度变化的微分方程和定解条件；

② 分析达到稳态时，圆柱右端面的温度。

一维非稳态导热的微分方程和定解条件为：

$$r c\frac{\partial t}{\partial t} = l\,\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

$$t = 0 \quad t = t_0$$

$$x = 0 \quad t = t_w \quad x = H \quad -l\,\frac{\partial t}{\partial x} = h(t - t_f)$$

根据能量平衡关系，

$$l\,\frac{t_w - t_R}{H} = h(t_R - t_f)$$

$$t_R = \frac{t_w + \frac{hH}{l} t_f}{1 + \frac{hH}{l}}$$

四、计算（共 60 分，每小题 15 分）

1、在一条外径D为 133㎜ 的金属管道内输送温度 t_1为 110℃的饱和水蒸汽，为了减少热损失，在管道上包覆了两种不同的保温材料。已知第一种材料的热导率$l_1 = 0.04\mathrm{W/(mgK)}$，第二种材料的热导率为$l_2 = 0.08\mathrm{W/(mgK)}$，两种材料的厚度$d_1 = d_2 = 30\mathrm{mm}$，保温层外表面与空气的表面传热系数为$h = 10\mathrm{W/\left(m^2 \cdot K\right)}$，管道周围空气的温度$t_f$为 10℃。 ① 如果从热损失最小化的角度考虑，试论证哪种材料应该包在内层？②试估算单位管长的最小散热损失q_L。

$$q_l = \frac{t_1 - t_f}{\frac{1}{2p\,l_1}\ln\frac{d + 2d}{d} + \frac{1}{2p\,l_2}\ln\frac{d + 4d}{d + 2d} + \frac{1}{p\,(d + 4d)h}}$$

$$= \frac{110 - 10}{\frac{1}{2p \times 0.04}\ln\frac{0.133 + 2\times 0.03}{0.133} + \frac{1}{2p \times 0.08}\ln\frac{0.133 + 4\times 0.03}{0.133 + 2\times 0.03} + \frac{1}{p \times (0.133 + 4\times 0.03)\times 10}}$$

$$= \frac{100}{1.481 + 0.539 + 1.258} = 30.5\mathrm{W/m}$$

内外层互换后

$$q_l' = \frac{110-10}{\frac{1}{2p\times 0.08}\ln\frac{0.133+2\times 0.03}{0.133}+\frac{1}{2p\times 0.04}\ln\frac{0.133+4\times 0.03}{0.133+2\times 0.03}+\frac{1}{p\times(0.133+4\times 0.03)\times 10}}$$

$$=\frac{100}{0.741+1.077+1.258}=32.5\text{W/m}$$

2、一个边长为b（尺寸很小），导热系数 l 很大的正立方体，初始温度为t_0，将其突然放入温度恒为t_∞的流体中。若该立方体的一个侧面是绝热的，其它侧面与流体的对流传热系数为h（很小），试回答下列问题：

① 写出立方体的温度随时间变化规律的微分方程和定解条件；

② 写出温度变化的时间常数和达到时间常数时立方体的温度。

根据已知条件，可用集总参数法求解，

$$r cV\frac{\partial t}{\partial t}=hA(t-t_\infty)$$

$$t=0 \quad t=t_0$$

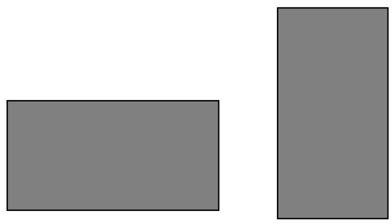
$$t-t_\infty=(t_0-t_\infty)\exp(-\frac{hA}{r cV}t)$$

$$t_c=\frac{r cV}{hA},\quad t=t_c \quad t_c=t_\infty+(t_0-t_\infty)\mathrm{e}^{-1}$$

3、平均温度恒定为 56℃的电加热器，高为0.3m、宽为 0.6m，温度为 24℃的空气以 1.7m/s的速度平行于壁面掠过。

①试计算空气与加热器的对流传热量；

②如果将高度和宽度方向互换，分析传热量会增大还是减小？



①0.3×0.6m　　②0.6×0.3m

图 2 电加热器的放置方式

特征温度 $t_m=\frac{t_w+t_\infty}{2}=\frac{56+24}{2}=40$ ℃

t ℃	ρ kg/m^3	**c$_p$** **kJ/(kg・K)**	λ ×10^2 W/(m·K)	a×10^6 m^2/s	ν ×10^6 m^2/s	**Pr**
40	**1.128**	**1.005**	**2.76**	**24.3**	**16.96**	**0.699**

$$\mathrm{Re}_m=\frac{u_\infty L}{n}=\frac{1.7\times0.3}{16.96\times10^{-6}}=30.07\times10^3$$

$$\begin{aligned}Nu_m&=0.664\,\mathrm{Re}_m^{1/2}\,\mathrm{Pr}_m^{1/3}\\&=0.664\times(30.07\times10^3)^{1/2}\times(0.699)^{1/3}\\&=102.2\end{aligned}$$

$$h=Nu_m\frac{l}{L}=102.2\times\frac{0.0276}{0.3}=9.4(\mathrm{W/m^2gK})$$

$$\Phi=hA(t_w-t_\infty)=9.4\times0.3\times0.6\times(56-24)=54.16\mathrm{W}$$

高宽互换后

$$\mathrm{Re}_m=\frac{u_\infty L}{n}=\frac{1.7\times0.6}{16.96\times10^{-6}}=60.14\times10^3$$

$$Nu_m=0.664\times(60.14\times10^3)^{1/2}\times(0.699)^{1/3}=144.5$$

$$h=Nu_m\frac{l}{L}=144.5\times\frac{0.0276}{0.6}=6.65(\mathrm{W/m^2gK})$$

$$\Phi=hA(t_w-t_\infty)=6.65\times0.3\times0.6\times(56-24)=38.29\mathrm{W}$$

或根据牛顿冷却公式和选定的经验关联式可知

$$\frac{\Phi'}{\Phi}=\frac{h'}{h}=\left(\frac{L'}{L}\right)^{-1/2}=0.707$$

$$\Phi'=0.707\Phi=38.29\mathrm{W}$$

4、 某工程要用一根内径为 25㎜ 的加热管将管内流量为 0.8kg/s 的水从 30℃加热到 50℃。若管壁温度为 65℃。①试求对流传热系数和所需要的管长 L。②若将管径减小一半，其它条件不变，分析所需管长 L' 会比原来增加多少倍。

特征温度 $t_f=\frac{t_{f1}+t_{f2}}{2}=\frac{30+50}{2}=40$ ℃

t ℃	ρ kg/㎥	**c_p** **kJ/(kg・K)**	λ ×10^2 W/(m·K)	a×10^6 m^2/s	ν ×10^6 m^2/s	**Pr**
40	992.2	4.174	63.5	15.3	0.659	4.31

$$u_f=\frac{q_m}{r_f\frac{p}{4}d^2}=\frac{0.8}{992.2\times\frac{p}{4}\times0.025^2}=1.643\mathrm{m/s}$$

$$\mathrm{Re}_f=\frac{u_f d}{n}=\frac{1.643\times0.025}{0.659\times10^{-6}}=6.231\times10^4>10^4$$

$$
\begin{aligned}
Nu_f &= 0.023\,\mathrm{Re}_f^{\,0.8}\,\mathrm{Pr}_f^{\,0.3} \\
&= 0.023\times(6.231\times10^4)^{0.8}\times(4.31)^{0.3} \\
&= 244.2
\end{aligned}
$$

$$h = Nu_f\,\frac{l_f}{d} = 244.2\times\frac{0.635}{0.025} = 6202(\mathrm{W/m^2\cdot K})$$

$$\Phi = q_m c_p (t_{f2}-t_{f1}) = 0.8\times4174\times(50-30) = 66784\mathrm{W}$$

$$L = \frac{\Phi}{h\pi d(t_w - t_f)} = \frac{66784}{6202\times\pi\times0.025\times(65-40)} = 5.48\mathrm{m}$$

或

$$\Delta t = \frac{(t_w - t_{f2})-(t_w - t_{f1})}{\ln\dfrac{t_w - t_{f2}}{t_w - t_{f1}}} = \frac{(65-50)-(65-30)}{\ln\dfrac{65-50}{65-30}} = 23.6\ ℃$$

$$L = \frac{\Phi}{h\pi d\Delta t} = \frac{66784}{6202\times\pi\times0.025\times23.6} = 5.81\mathrm{m}$$

管径改变后

$$\frac{u_f'}{u_f} = \left(\frac{d'}{d}\right)^{-2},\ \frac{\mathrm{Re}_f'}{\mathrm{Re}_f} = \frac{u_f'}{u_f}\frac{d'}{d} = \left(\frac{d'}{d}\right)^{-1},\ \frac{Nu_f'}{Nu_f} = \left(\frac{\mathrm{Re}_f'}{\mathrm{Re}_f}\right)^{0.8} = \left(\frac{d'}{d}\right)^{-0.8}$$

$$\frac{h'}{h} = \frac{Nu_f'}{Nu_f}\left(\frac{d'}{d}\right)^{-1} = \left(\frac{d'}{d}\right)^{-1.8},\ \frac{L'}{L} = \left(\frac{h'd'}{hd}\right)^{-1} = \left(\frac{d'}{d}\right)^{0.8}$$

$$L' = L\left(\frac{d'}{d}\right)^{0.8} = 5.48\times\left(\frac{1}{2}\right)^{0.8} = 9.54\mathrm{m}$$