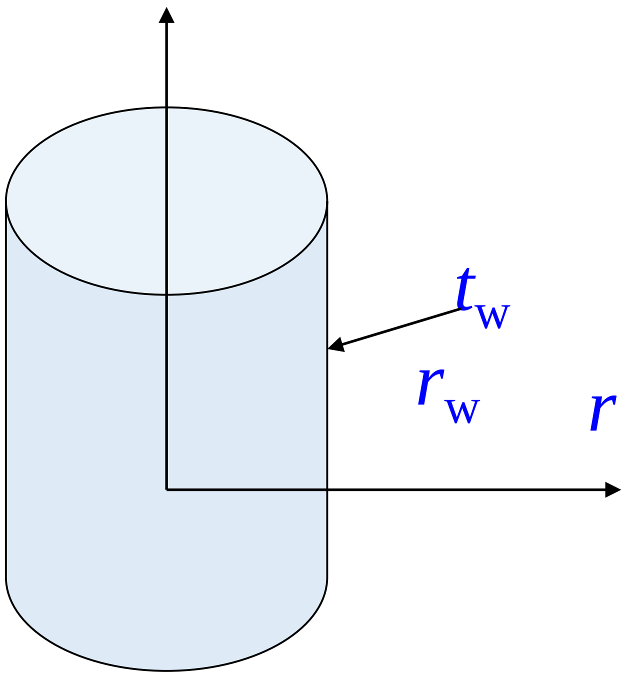
2. 通过含内热源实心圆柱体的导热

$$\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda r\frac{\partial t}{\partial r})+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \phi}(\lambda\frac{\partial t}{\partial \phi})+\frac{\partial}{\partial z}(\lambda\frac{\partial t}{\partial z})+\dot{\Phi}$$

λ为常数，外侧为第一类边界



数学描述：

$$\begin{cases}\dfrac{1}{r}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r\dfrac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}\right)+\dfrac{\dot{\Phi}}{\lambda}=0;\\ r=r_w, t=t_w\\ r=0, \dfrac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}=0\end{cases}$$

积分上面的微分方程两次有

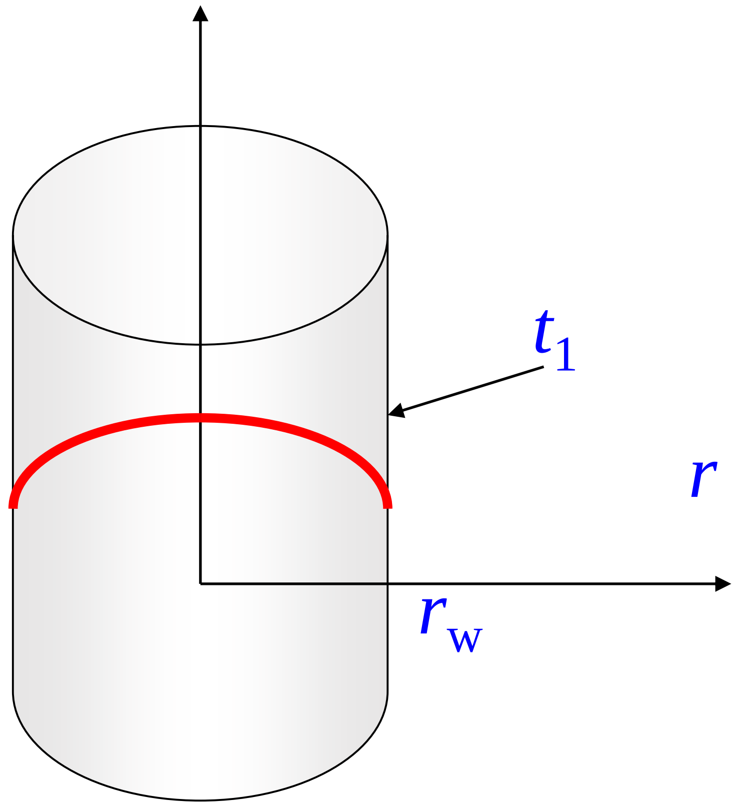
$$\boxed{t=\frac{\dot{\Phi}}{4\lambda}r^2+c_1\ell n r+c_2}$$

利用边界条件得出圆柱体内的温度分布

$$t = t_w + \frac{\dot{\Phi}}{4\lambda}\left(r_w^2 - r^2\right)$$

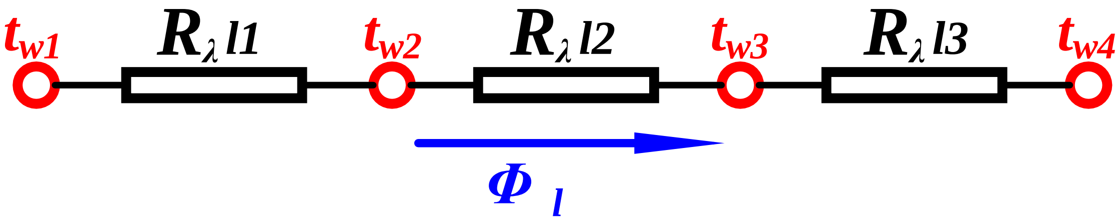
由傅里叶定律可得出壁面处的热流量：

$$\Phi = \pi r_w^2 l \dot{\Phi}$$



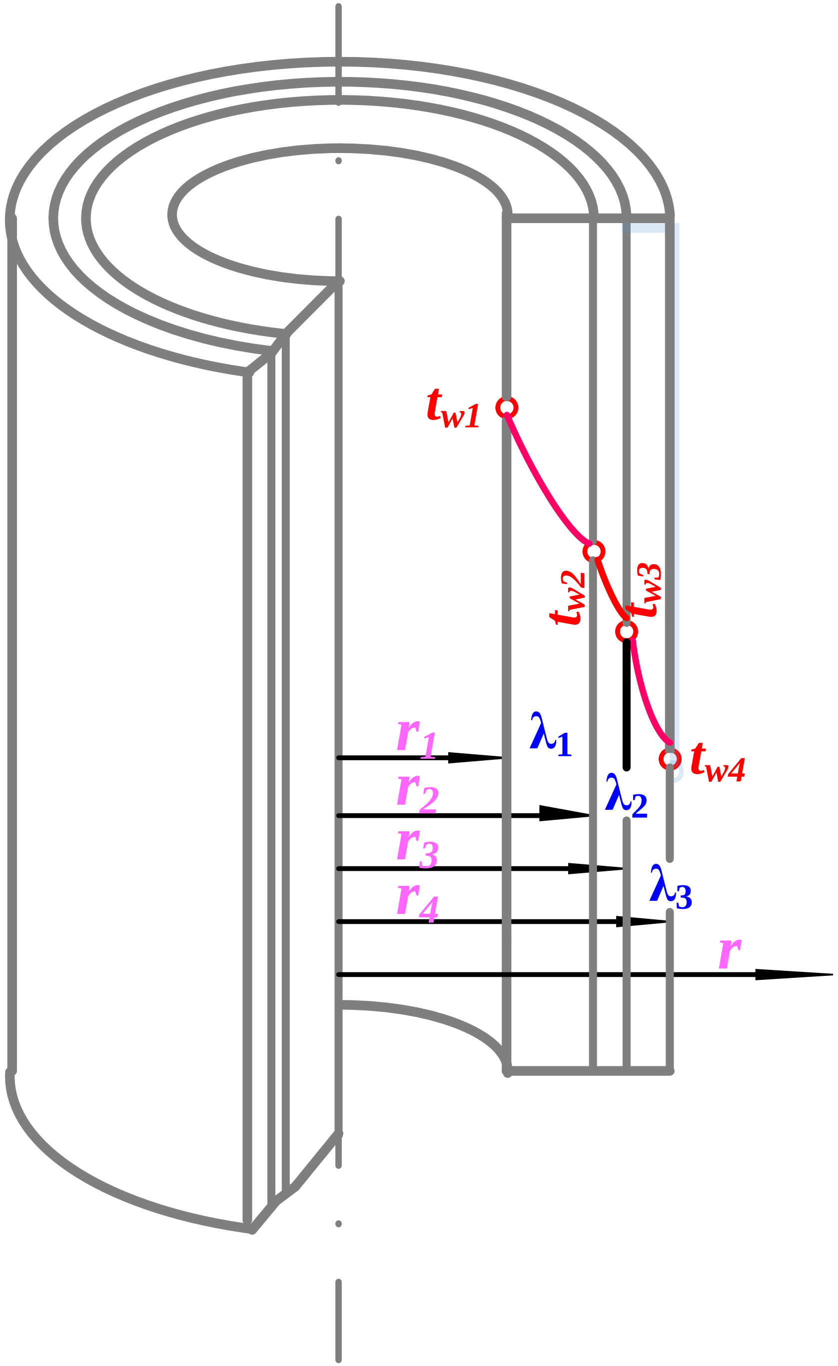
3. 通过多层圆筒壁的导热

热阻的概念



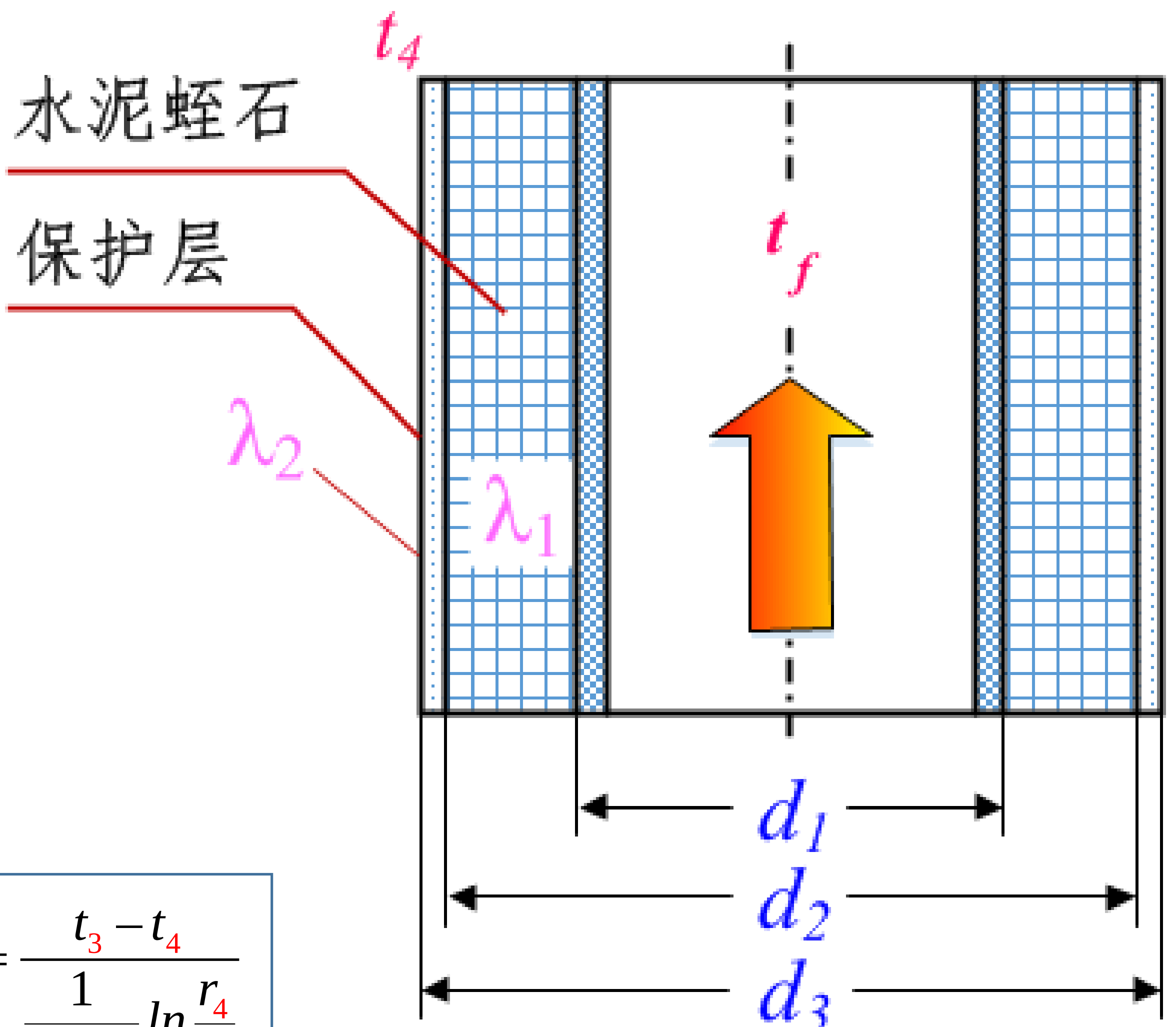
$$\Phi = \frac{t_1 - t_2}{\dfrac{1}{2\pi\lambda_1 l}\ln\dfrac{r_2}{r_1}} = \frac{t_2 - t_3}{\dfrac{1}{2\pi\lambda_2 l}\ln\dfrac{r_3}{r_2}} = \frac{t_3 - t_4}{\dfrac{1}{2\pi\lambda_3 l}\ln\dfrac{r_4}{r_3}}$$

$$= \frac{t_1 - t_4}{R_1 + R_2 + R_3}$$



练习

已知
$$\begin{cases} t_f = 540℃，\quad t_4 = 48℃ \\ d_1 = 273mm \\ d_2 = (273+2\delta)\ mm \\ d_3 = (273+2\delta+30)\ mm \\ \lambda_1 = 0.105W/(m\cdot K) \\ \lambda_2 = 0.192W/(m\cdot K) \\ q_1 = 442W/m \end{cases}$$

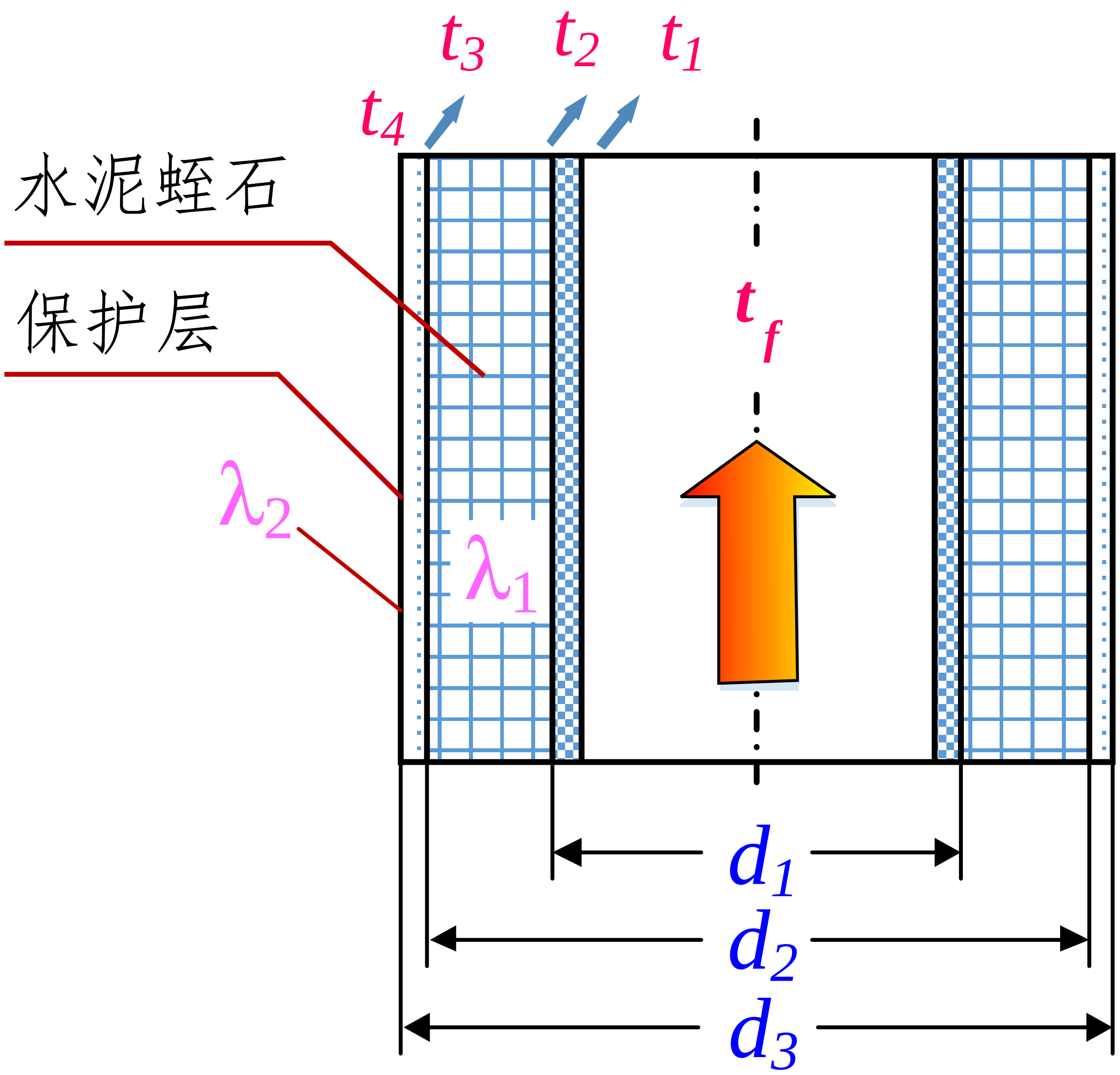


求： δ

$$\Phi = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda_1 l}\ln\frac{r_2}{r_1}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{1}{2\pi\lambda_2 l}\ln\frac{r_3}{r_2}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{1}{2\pi\lambda_3 l}\ln\frac{r_4}{r_3}}$$

分析：

$$t_2 \approx t_f$$



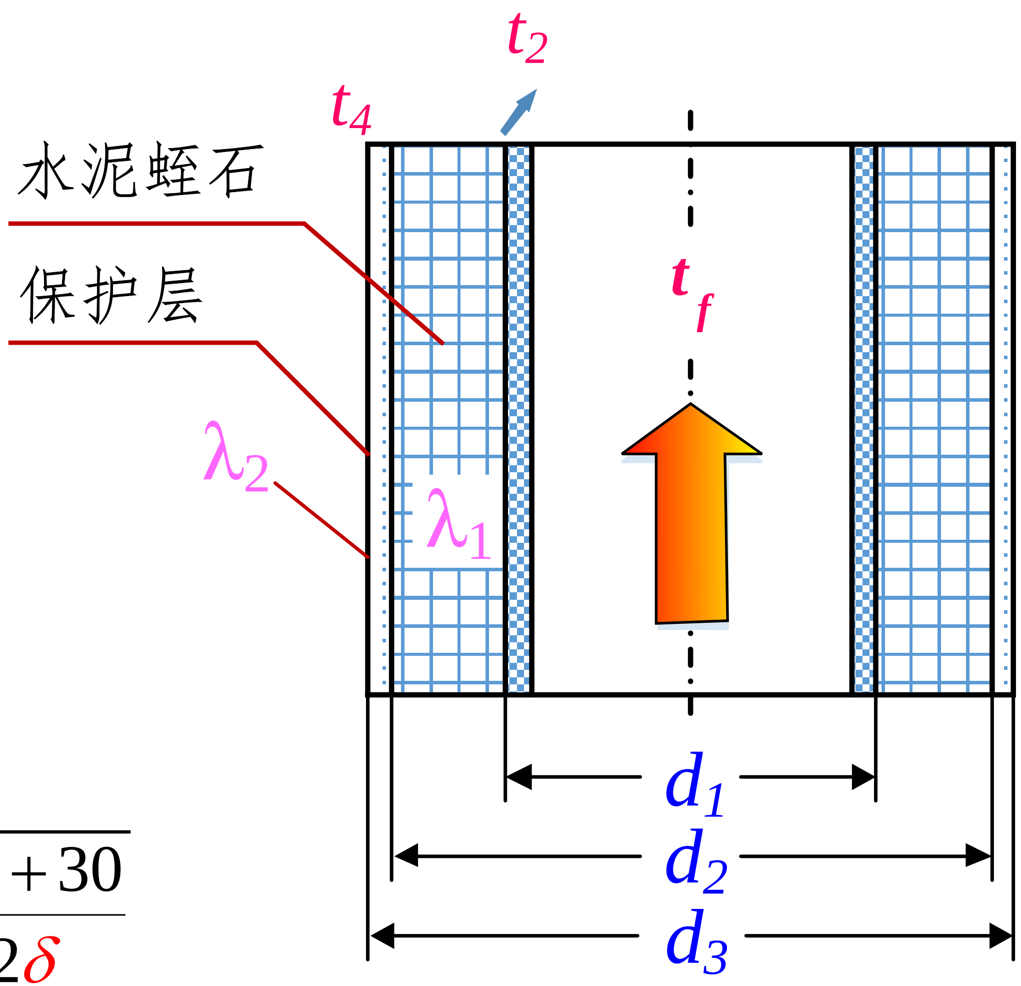
解：单位长度的散热量

$$t_2 \approx t_f$$

$$\Phi_l = \frac{\Phi}{L} = \frac{t_2 - t_4}{\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_3}{d_2}}$$

$$= \frac{t_2 - t_4}{\frac{1}{2\pi\lambda_1}\ln\frac{d_1 + 2\delta}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2}\ln\frac{d_1 + 2\delta + 30}{d_1 + 2\delta}}$$

$$= \frac{540 - 48}{\frac{1}{2\pi \times 0.105} \times \ln\frac{273 + 2\delta}{273} + \frac{1}{2\pi \times 0.192} \times \ln\frac{273 + 2\delta + 30}{273 + 2\delta}}$$



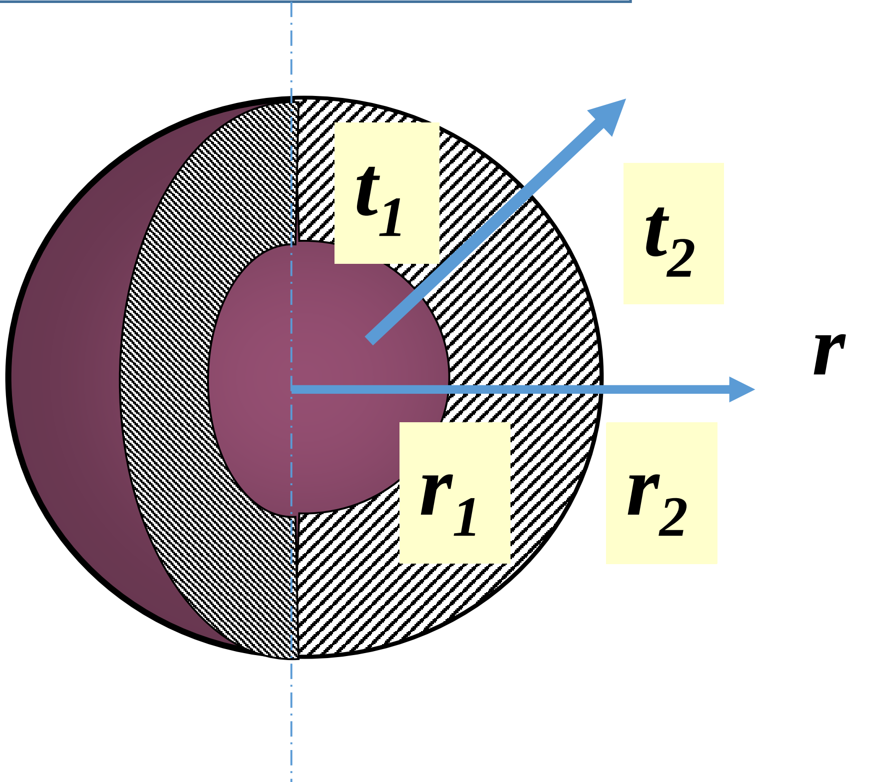
三、通过球壳的导热

导热系数为常数，无内热源

$$\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(\lambda r^2\frac{\partial t}{\partial r})+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\lambda\sin\theta\frac{\partial t}{\partial\theta})+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial}{\partial\phi}(\lambda\frac{\partial t}{\partial\phi})+\dot{\Phi}$$

数学描述：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(r^2\dfrac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}r}\right)=0\\ r=r_1,t=t_1\\ r=r_2,t=t_2\end{cases}$$

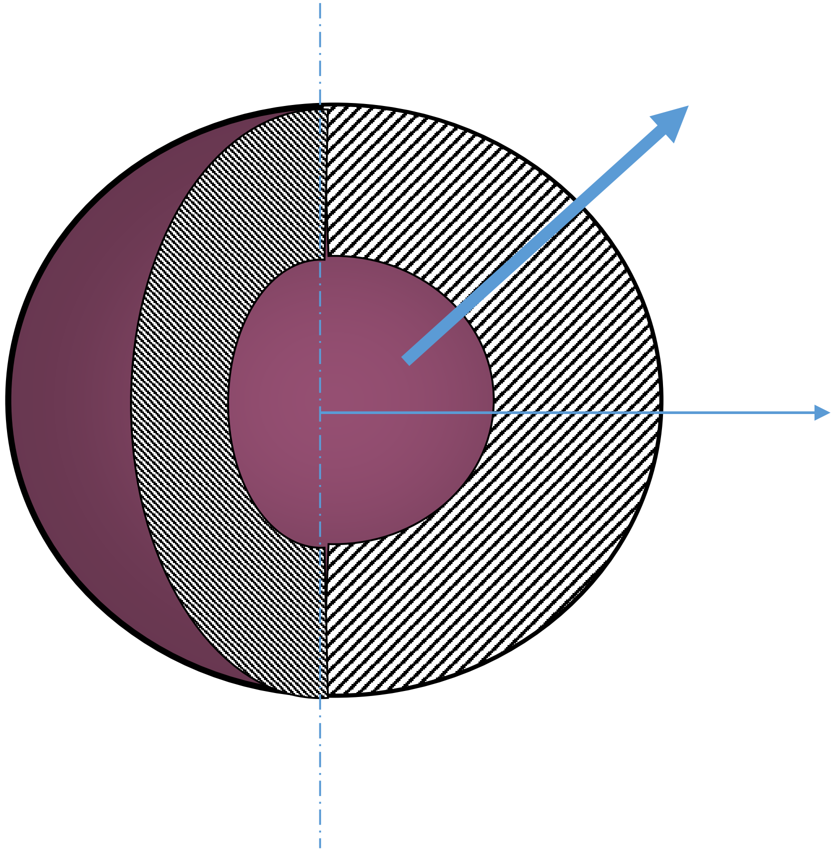


温度分布：

$$t = t_{w2} + \frac{t_{w1} - t_{w2}}{1/r_1 - 1/r_2}\left(1/r - 1/r_2\right)$$

热流量：

$$\Phi = \frac{4\pi\lambda\left(t_{w1} - t_{w2}\right)}{1/r_1 - 1/r_2}$$



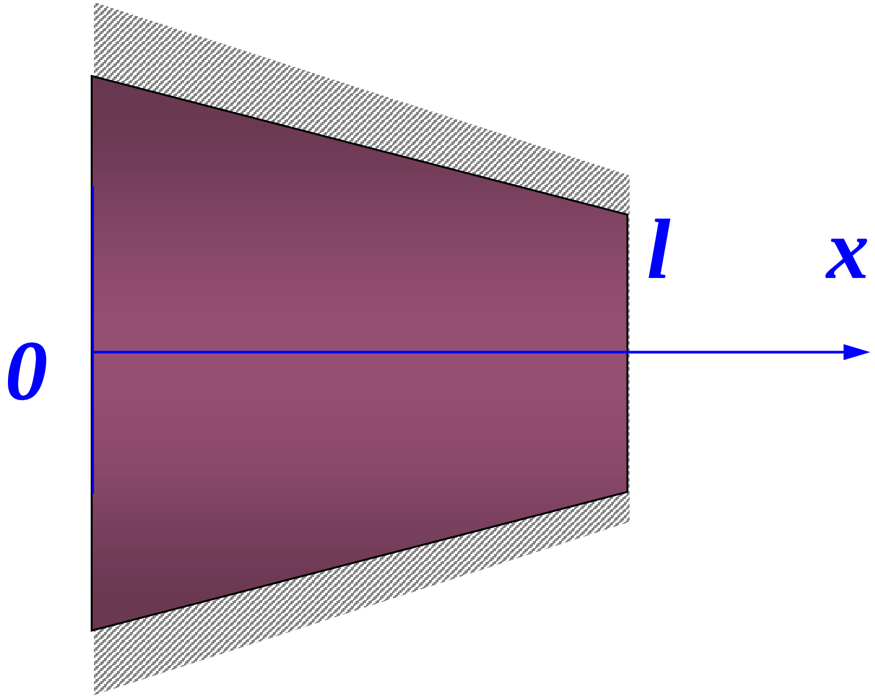
四、其它变截面的导热

变截面形状的一维稳态、且无内热源的导热问题

$$\Phi = qA = -A(x)\lambda\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x}$$

$$\Phi\int_0^l \frac{1}{A(x)}\mathrm{d}x = \int_{t_1}^{t_2}\lambda \mathrm{d}t$$

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2}\lambda \mathrm{d}t \Big/ \int_0^l \frac{1}{A(x)}\mathrm{d}x$$



一维，稳态，无内热源，导热系数为常数，变截面

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2} \lambda \mathrm{d}t \Big/ \int_0^l \frac{1}{A(x)} \mathrm{d}x$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{\boxed{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A(x)}}} \Rightarrow \boldsymbol{\Phi} = \lambda S (t_1 - t_2)$$

形状因子

$$\Phi = \lambda S(t_1 - t_2)$$

	热流密度	传热面积	导热量
平板	$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2)$	A	$\Phi = \lambda \frac{A}{\delta}(t_1 - t_2)$
圆筒壁	$q = \frac{\lambda}{r}\frac{(t_1 - t_2)}{\ln(r_2/r_1)}$	$A = 2\pi rl$	$\Phi = \lambda \frac{2\pi l}{\ln(r_2/r_1)}(t_1 - t_2)$
球壳	$q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{r^2(1/r_1 - 1/r_2)}$	$A = 4\pi r^2$	$\Phi = \lambda \frac{4\pi}{1/r_1 - 1/r_2}(t_1 - t_2)$

计算导热量的形状因子法

$$\Phi = \lambda S\left(t_1 - t_2\right)$$

- 讨论与说明

（1）形状因子S是纯几何参数，与温度、导热系数等物性参数无关

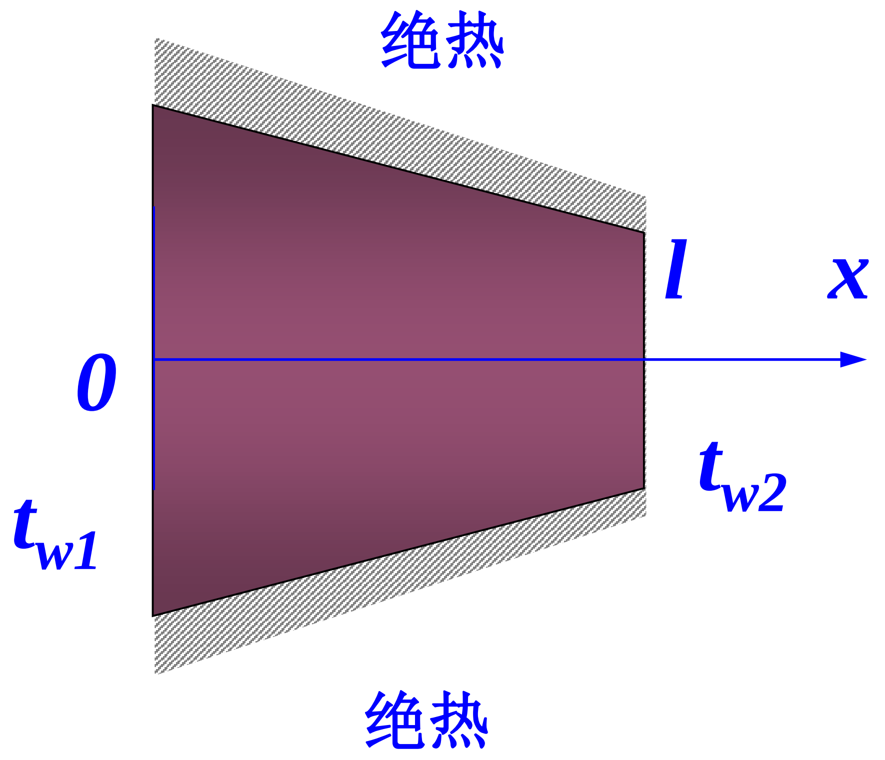
（2）仅适用于两个等温面之间的导热热流量计算

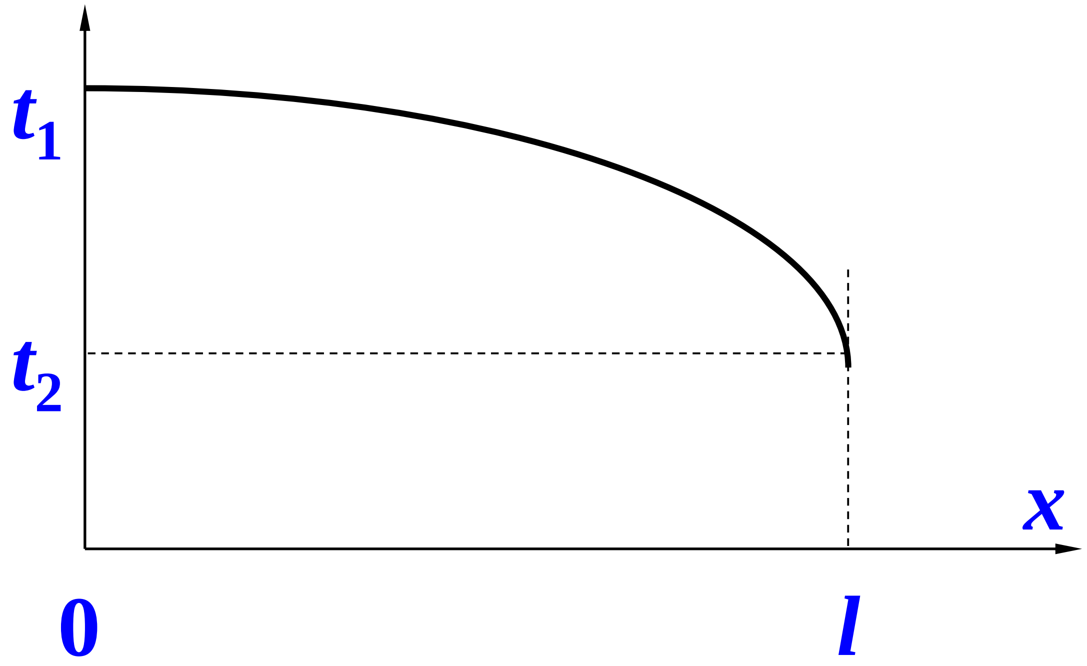
（3）对于二维、三维问题的两个等温面之间也可运用计算

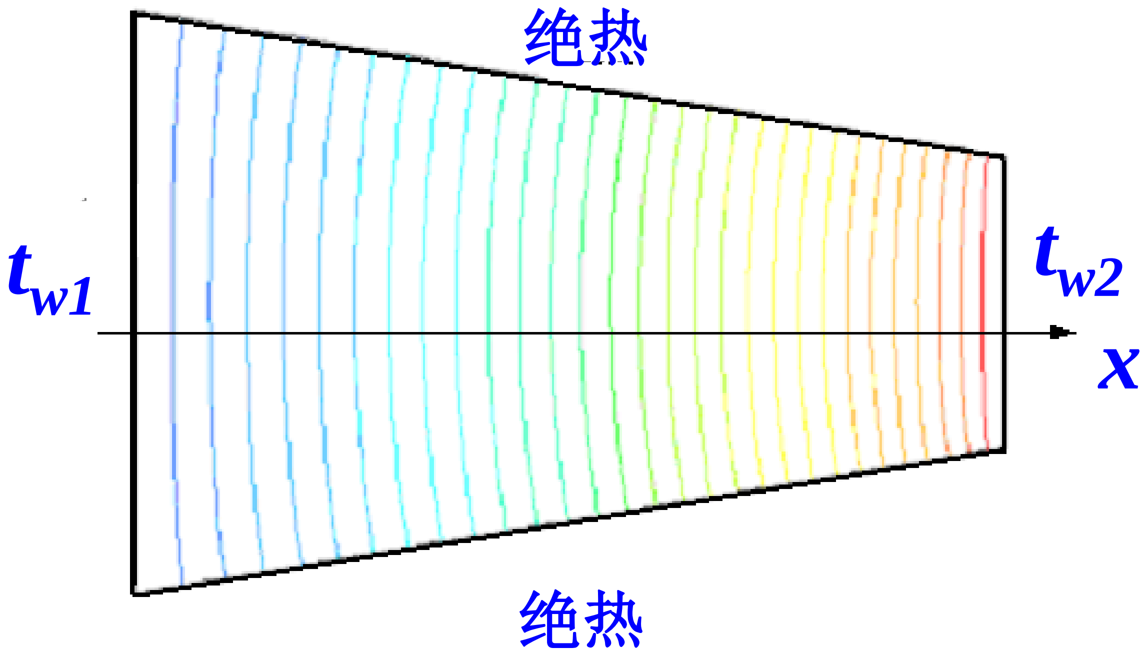
作用：主要应用于工程中复杂结构的导热问题。

例：一维稳态，导热系数为常数

画出等温线及各截面平均温度分布



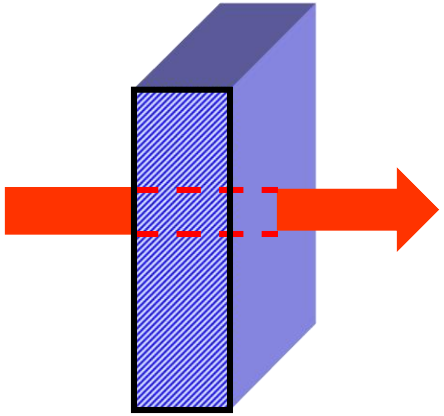
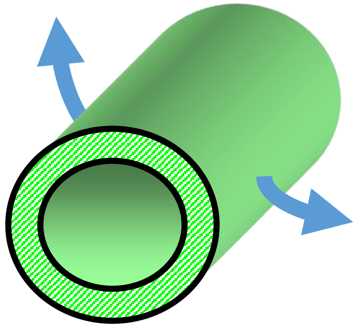
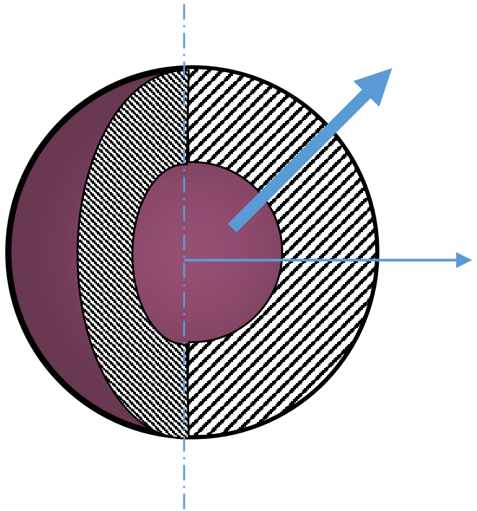




2-3 小结

稳态导热 $\partial t / \partial \tau = 0$ 温度不随时间而变化。

- 通过平壁的导热，直角坐标系中的一维问题。☆
- 通过圆筒壁的导热，圆柱坐标系中的一维问题。☆
- 通过球壳的导热，球坐标系中的一维问题。
- 其他变截面的一维导热问题。

主要内容

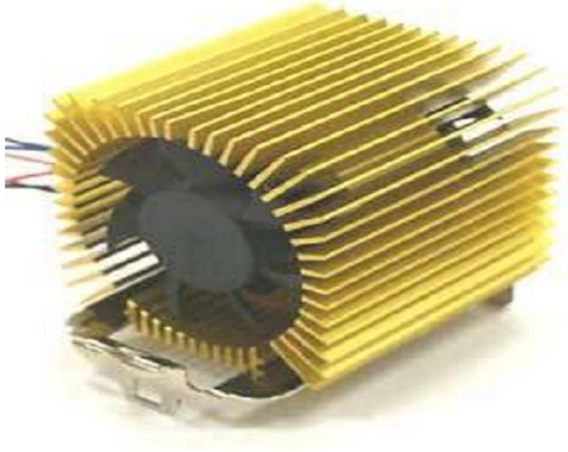
2-1 导热基本定律

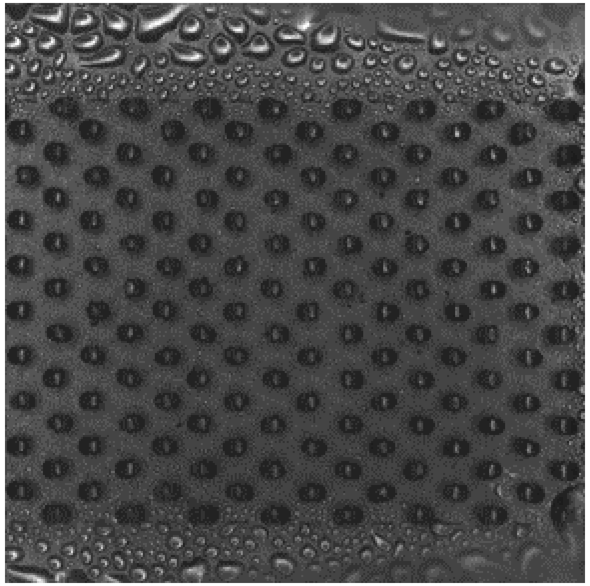
2-2 导热问题的数学描写

2-3 典型一维稳态导热问题的分析解

2-4 通过肋片的导热

2-4 通过肋片的导热





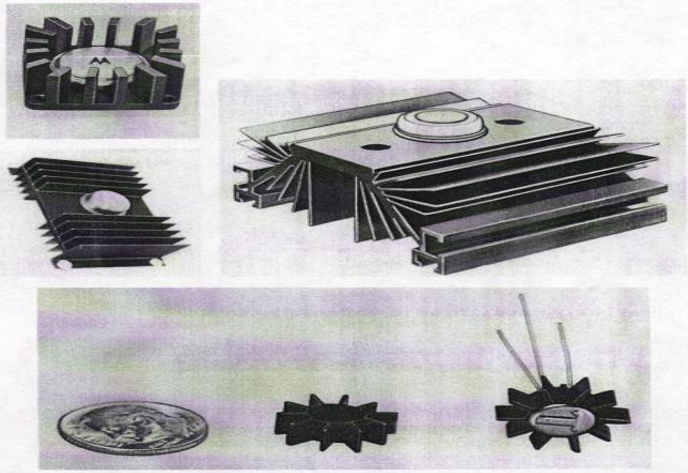
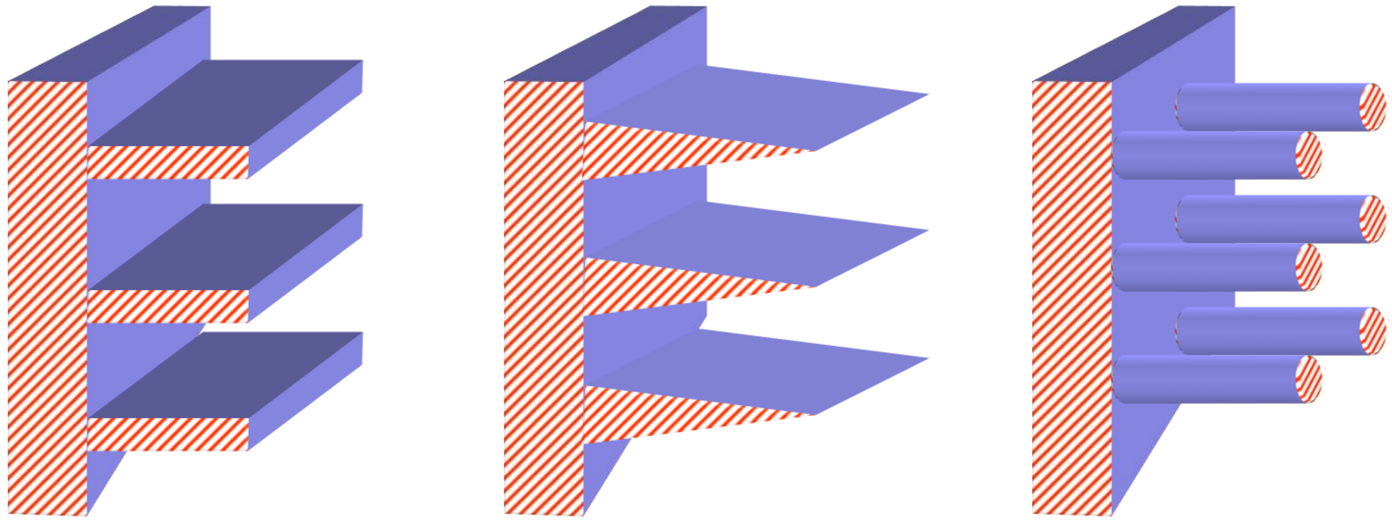


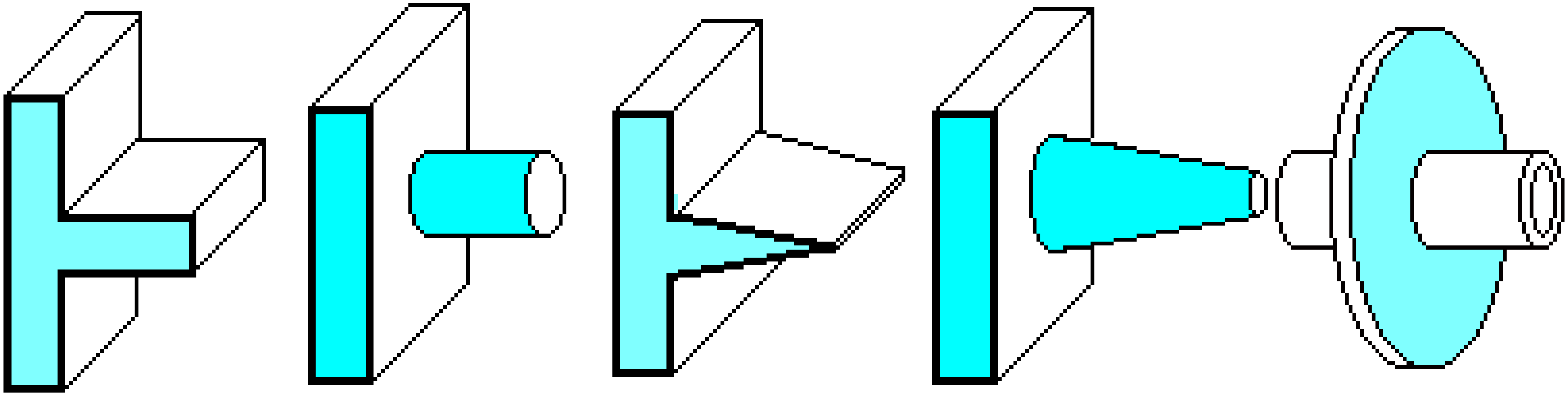
FIG. 2-14
Some fin arrangements used in electronic cooling applications. (Courtesy Wakefield Engineering Inc., Wakefield, Mass.)

肋片是指那些从基础表面上伸展出来的固体表面。

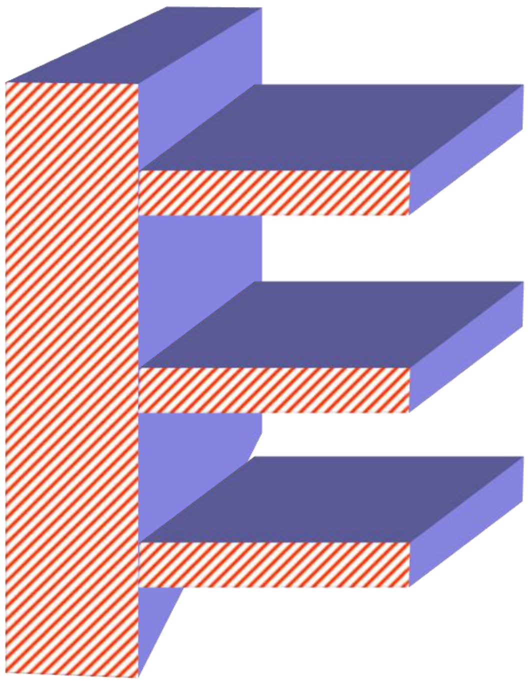
主要作用是通过提高面积来提高传热量。

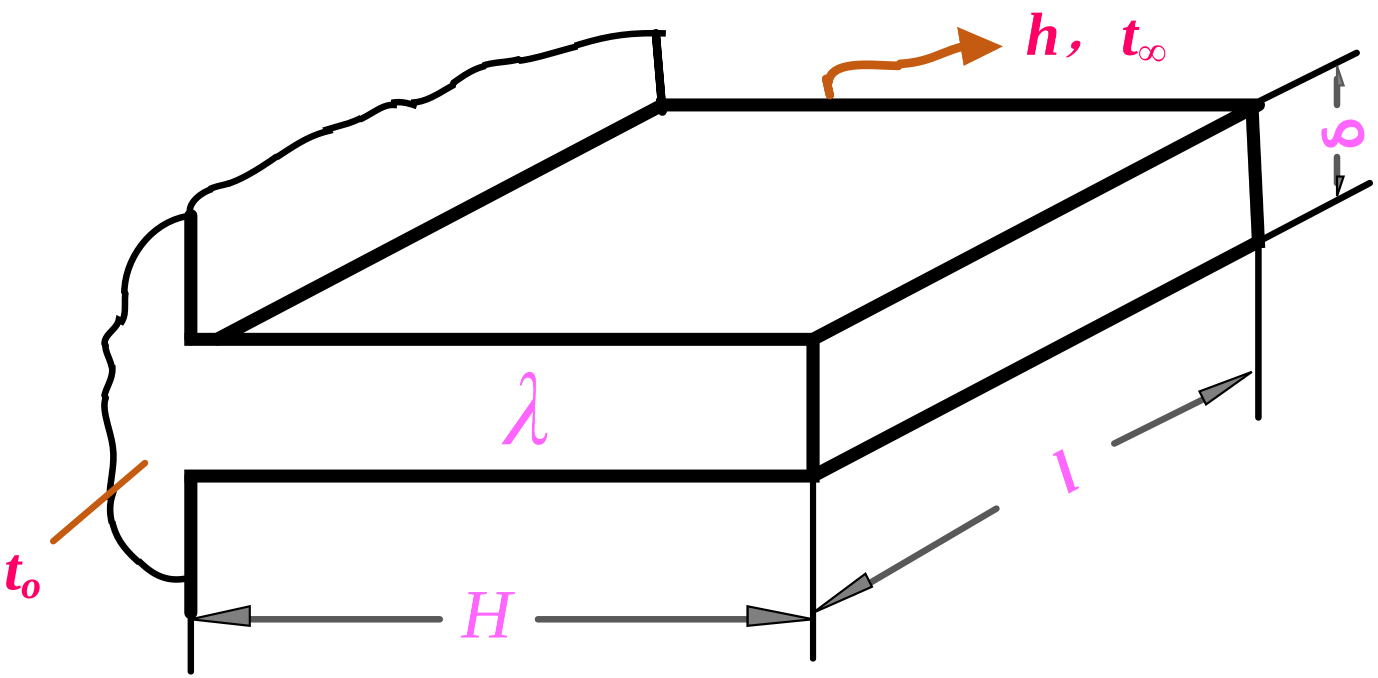


一、肋片的分类



（a）矩形（b）圆柱形（c）三角形（d）圆锥形（e）圆环形

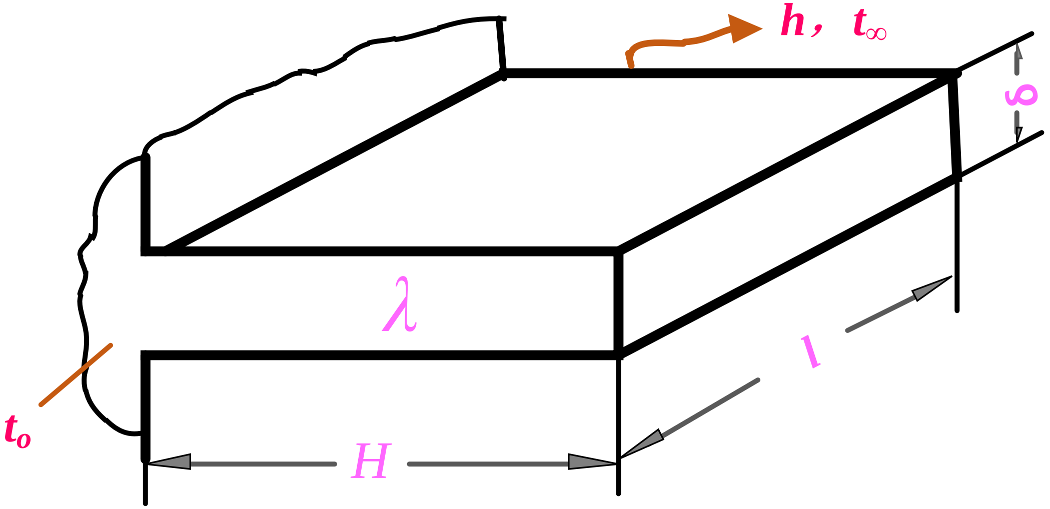




> **问题：**

（1）肋片中沿着肋片高度方向温度是否等于肋根部温度？

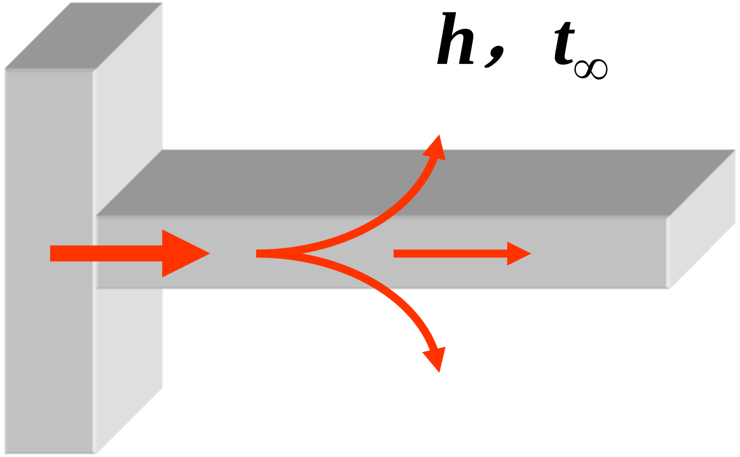
（2）肋片中沿着肋片高度方向热流量是否相等？

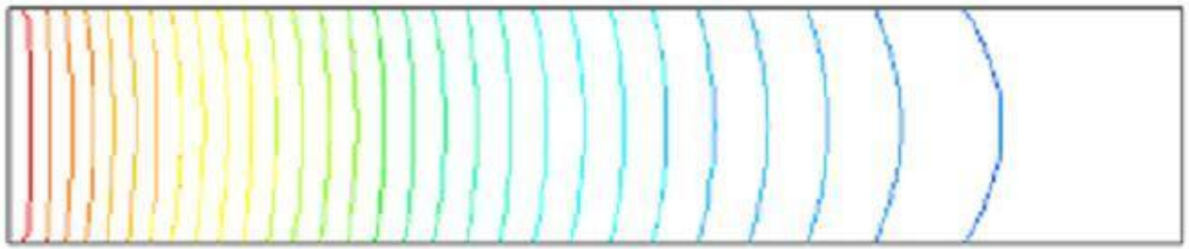


➤ 肋片导热的特点：

（1）肋片伸展的方向上有表面的对流传热及辐射传热。

（2）沿导热热流传递方向的热流量是变化的。

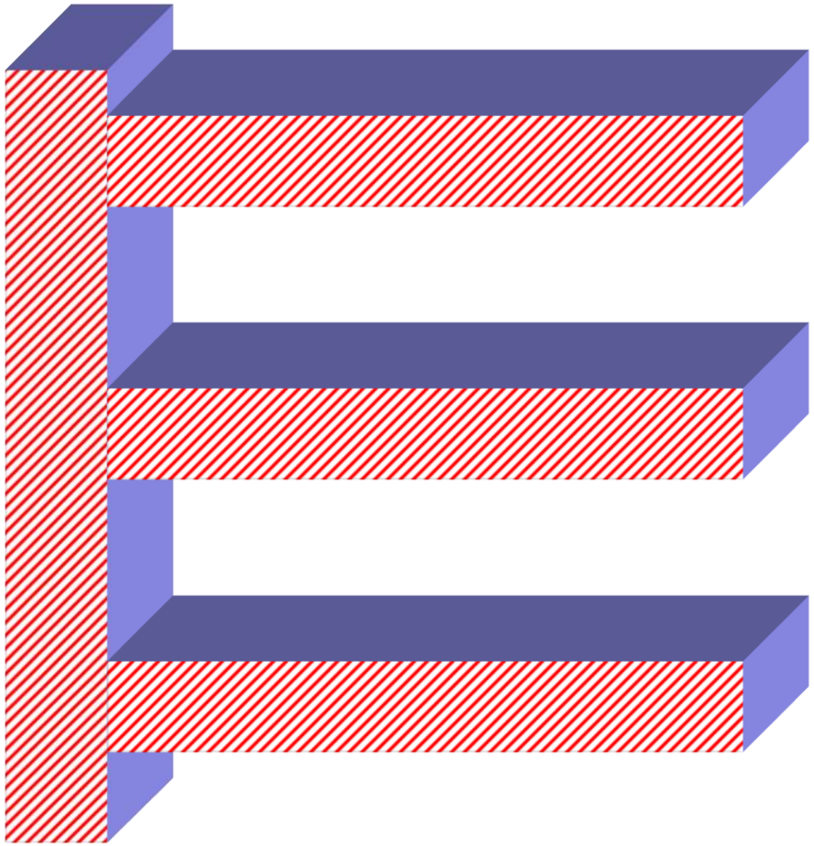




二、主要问题

（1）通过肋片散热的热流量；

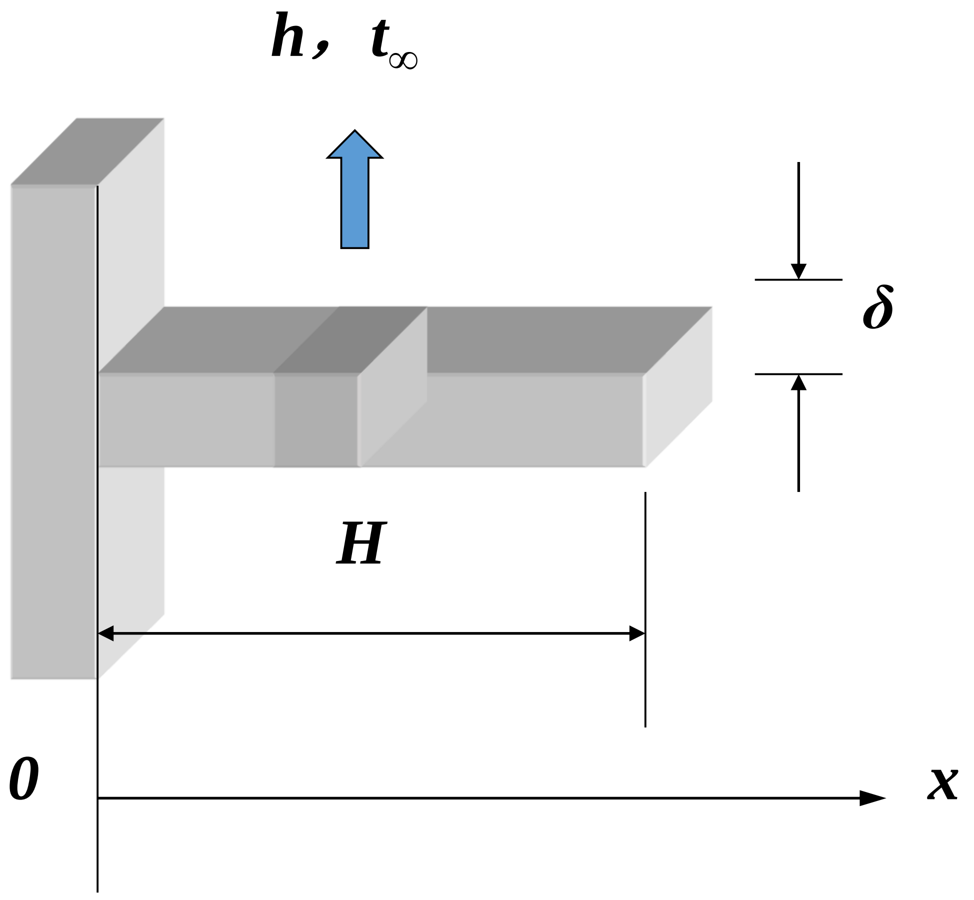
（2）肋片上的温度分布。



三、通过等截面直肋导热的分析和计算

- λ、h、A_c均为常数
- 肋片温度在垂直于纸面方向不发生变化
- $1/h >> \delta/\lambda$

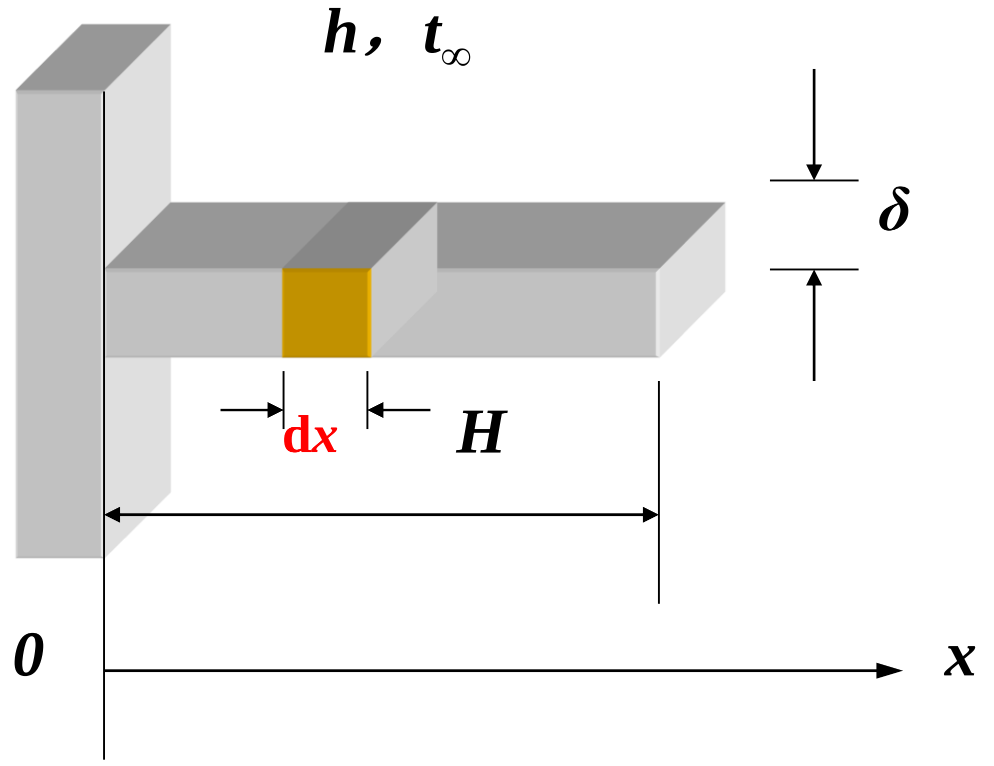
一维稳态导热问题



导热微分方程

$$\boxed{\cancel{\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}) + \cancel{\frac{\partial}{\partial y}(\lambda\frac{\partial t}{\partial y})} + \cancel{\frac{\partial}{\partial z}(\lambda\frac{\partial t}{\partial z})} + \dot{\Phi}_v}$$

$$\lambda\frac{\mathrm{d}^2 t}{\mathrm{d}x^2} + \dot{\Phi} = 0$$

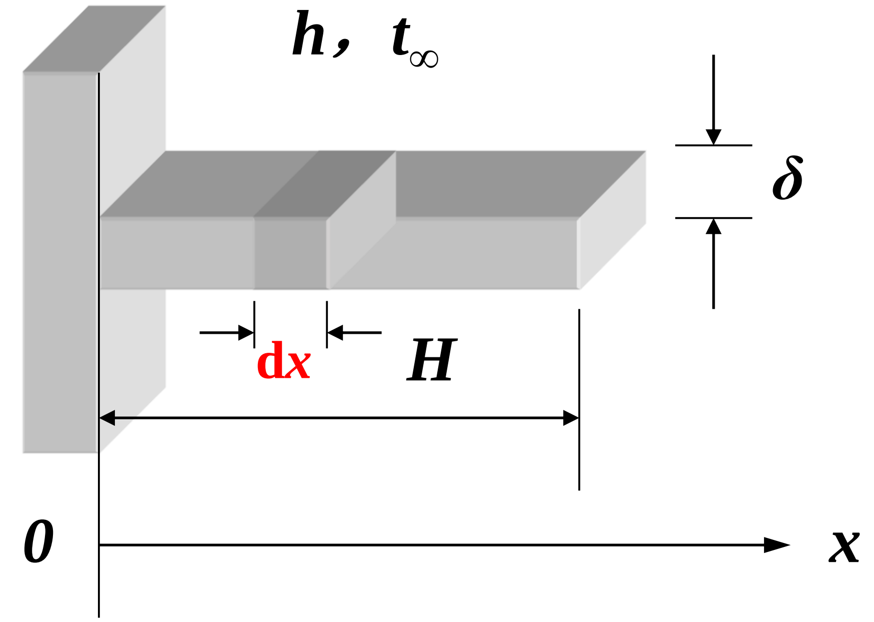


内热源强度的确定：

设横截面积为A_c，界面的周长为P。对dx的微元段进行分析。

$$\dot{\Phi} = -\frac{hP\mathrm{d}x(t-t_\infty)}{A_c\,\mathrm{d}x} = -\frac{hP(t-t_\infty)}{A_c}$$

$$\begin{cases} \lambda \dfrac{\mathrm{d}^2 t}{\mathrm{d}x^2} + \dot{\Phi} = 0 \\ \dot{\Phi} = -\dfrac{hP\mathrm{d}x(t-t_\infty)}{A_c \mathrm{d}x} = -\dfrac{hP(t-t_\infty)}{A_c} \end{cases}$$



$$\frac{\mathrm{d}^2 t}{\mathrm{d}x^2} - \frac{hP(t-t_\infty)}{\lambda A_c} = 0$$

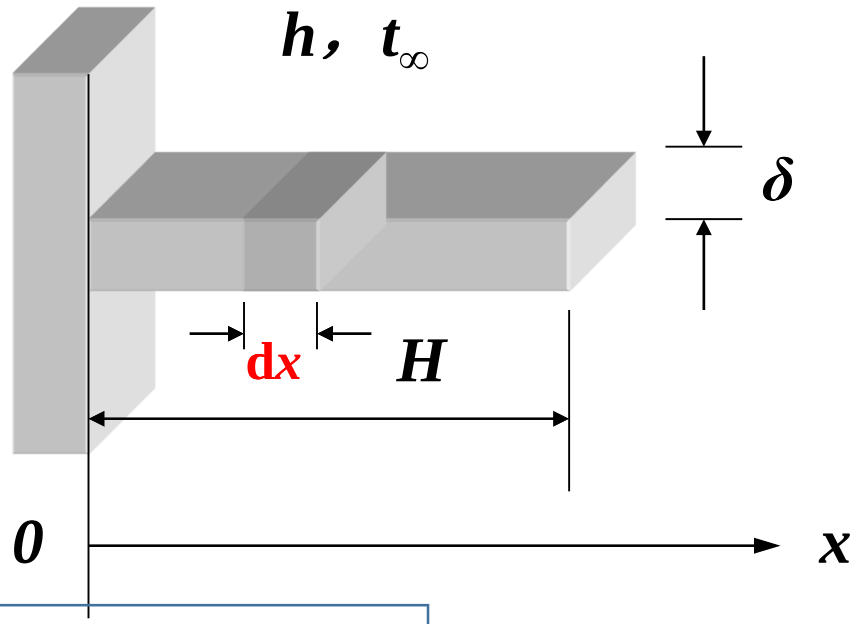
令 $\theta = t - t_\infty$ $m^2 = \dfrac{hP}{A_c \lambda}$ $\Rightarrow$ $\dfrac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}x^2} - m^2\theta = 0$

关于温度的二阶齐次常微分方程

通解为 $\boxed{\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}}$

通解为

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$$



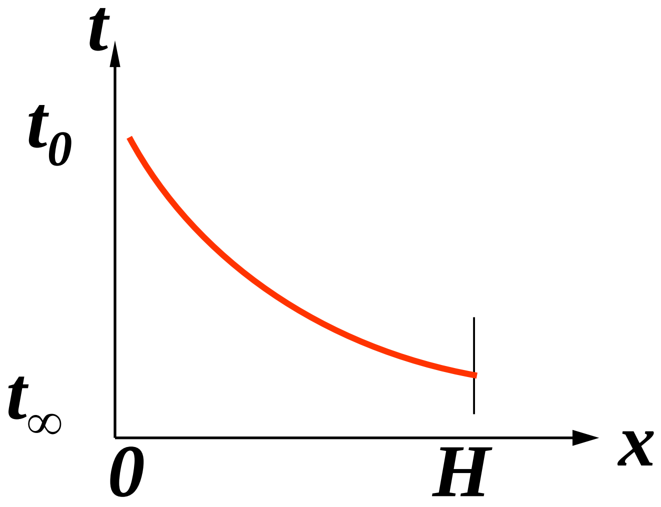
边界条件 $x = 0, t = t_0, \theta = \theta_0$

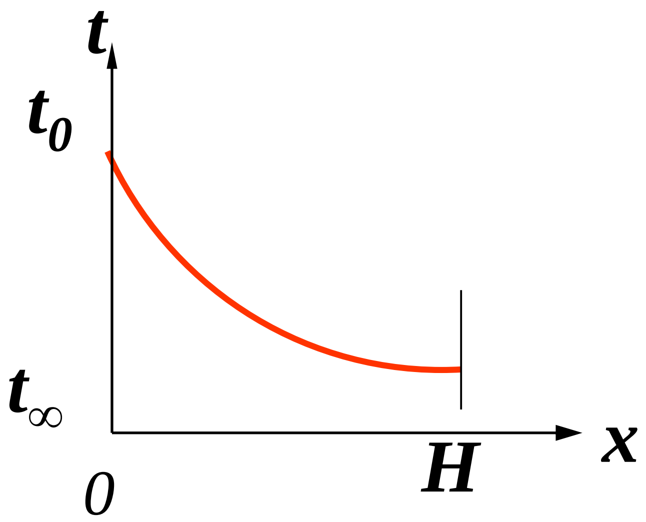
在 x=H 的边界处，有三种情况

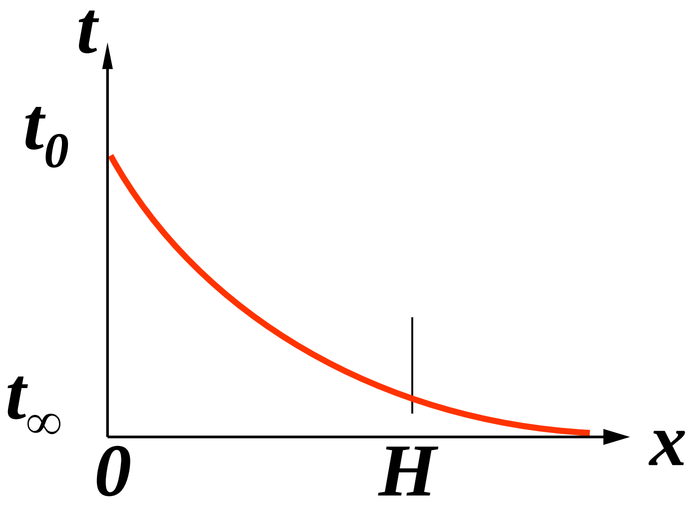
$$-\lambda \left.\frac{dt}{dx}\right|_{x=H} = h\left(t|_{x=H} - t_\infty\right)$$

$$\left.\frac{dt}{dx}\right|_{x=H} = 0$$

$$t|_{x\to\infty} = t_\infty$$

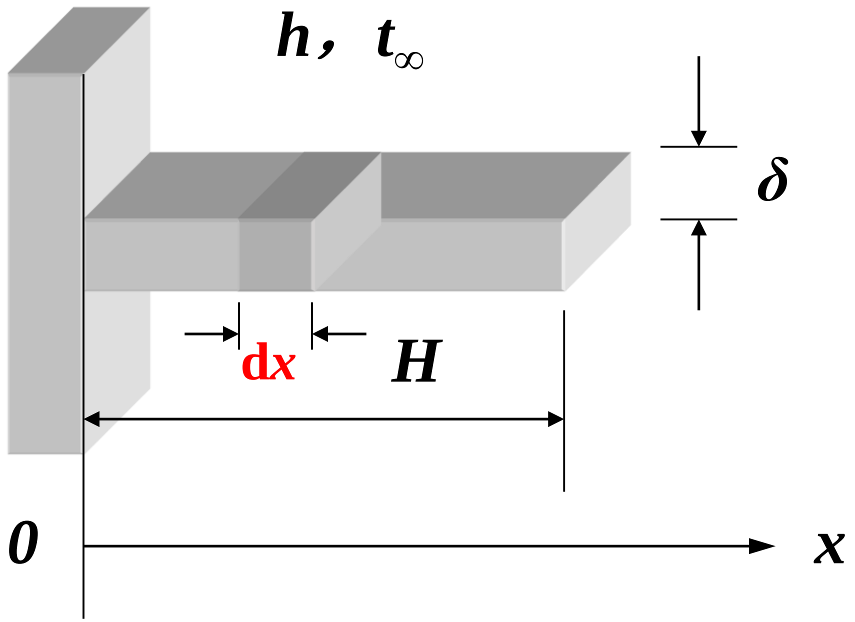






采用第二种情况，顶端绝热

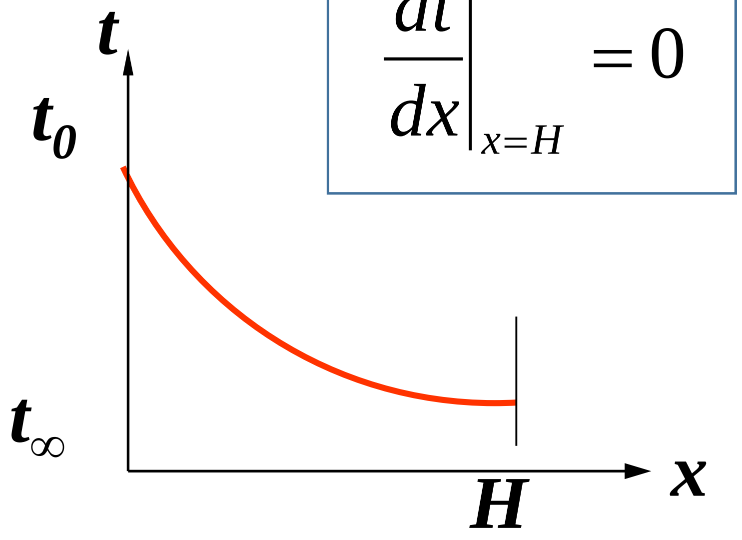
$$x = H, \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x} = 0, \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}x} = 0$$



求解肋片中的温度分布

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_\infty}{t_0 - t_\infty} = \frac{\cosh[m(H - x)]}{\cosh(mH)}$$

$$\left.\frac{dt}{dx}\right|_{x=H} = 0$$



$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

双曲余弦函数

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

双曲正弦函数

求解热流量

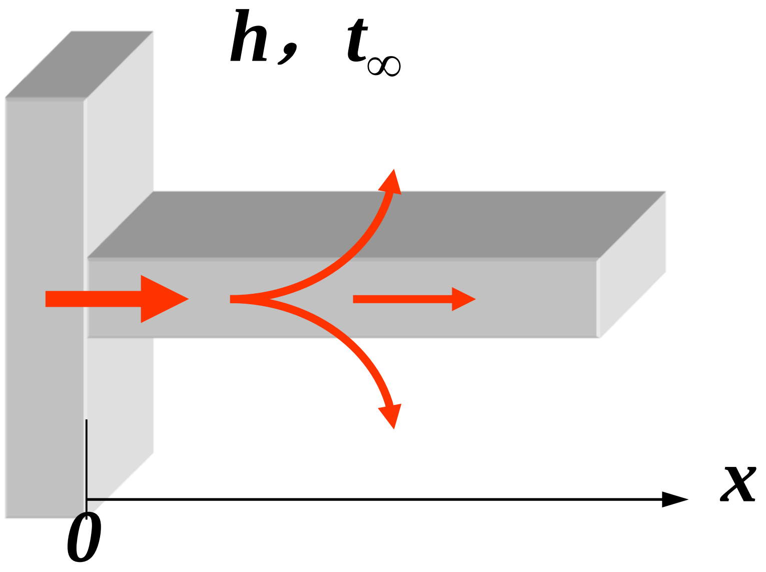
$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_\infty}{t_0 - t_\infty} = \frac{\cosh[m(H - x)]}{\cosh(mH)}$$

由肋片散失的全部热流量都必须通过肋的根部

应用傅立叶定律

$$\Phi = -\lambda A \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x}\bigg|_{x=0} = \sqrt{\lambda A_c hP}\,\theta_0 th(\mathrm{mH})$$

双曲正切函数



此时，肋片顶端的温度

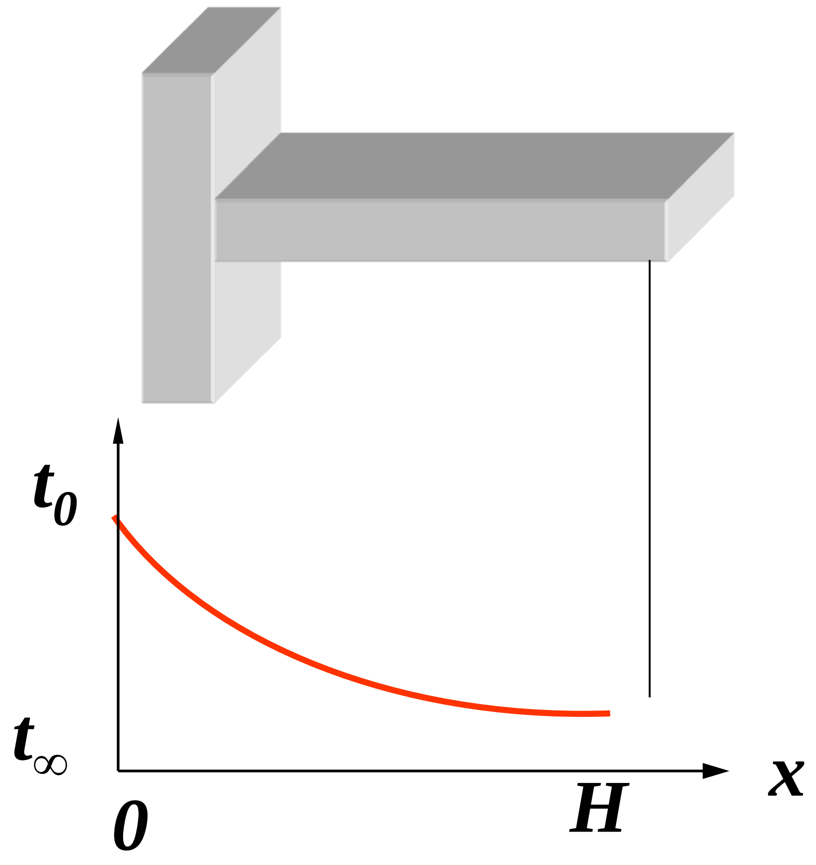
$$\theta_H = \frac{\theta_0}{\cosh(mH)}$$

四、肋片效率

$$\eta_f = \frac{\text{肋片的实际散热量}}{\text{肋片全部处于根部温度下的散热量}}$$

$$= \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

$$= \frac{hA_f(t_m - t_\infty)}{hA_f(t_0 - t_\infty)} = \frac{t_m - t_\infty}{t_0 - t_\infty}$$



肋片效率
$$\eta_f = \frac{hA_f(t_m - t_\infty)}{hA_f(t_0 - t_\infty)} = \frac{t_m - t_\infty}{t_0 - t_\infty}$$

● **问题1　如何增大肋效率**

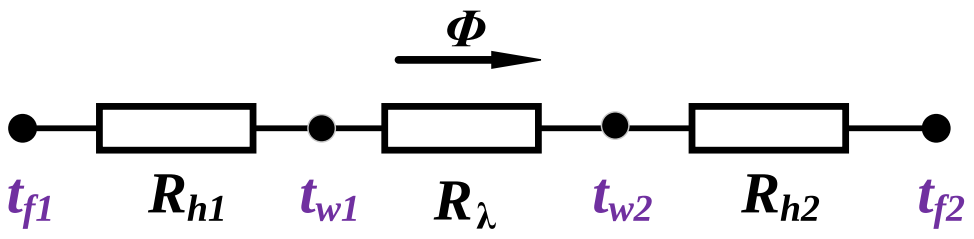
从上式可以看出，应该提高t_m，使肋内部温度均匀。

① 选择热导率大的材料作肋

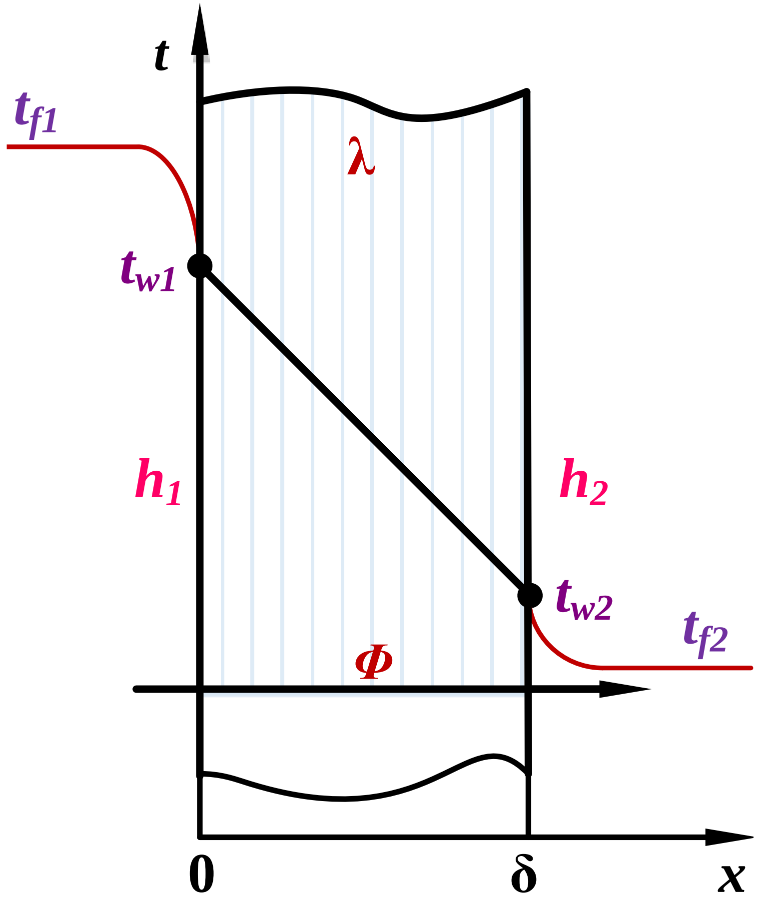
② 肋的厚度要小（薄）

- 问题2：

总传热过程中，肋片安装在哪一侧更有利于加强换热?

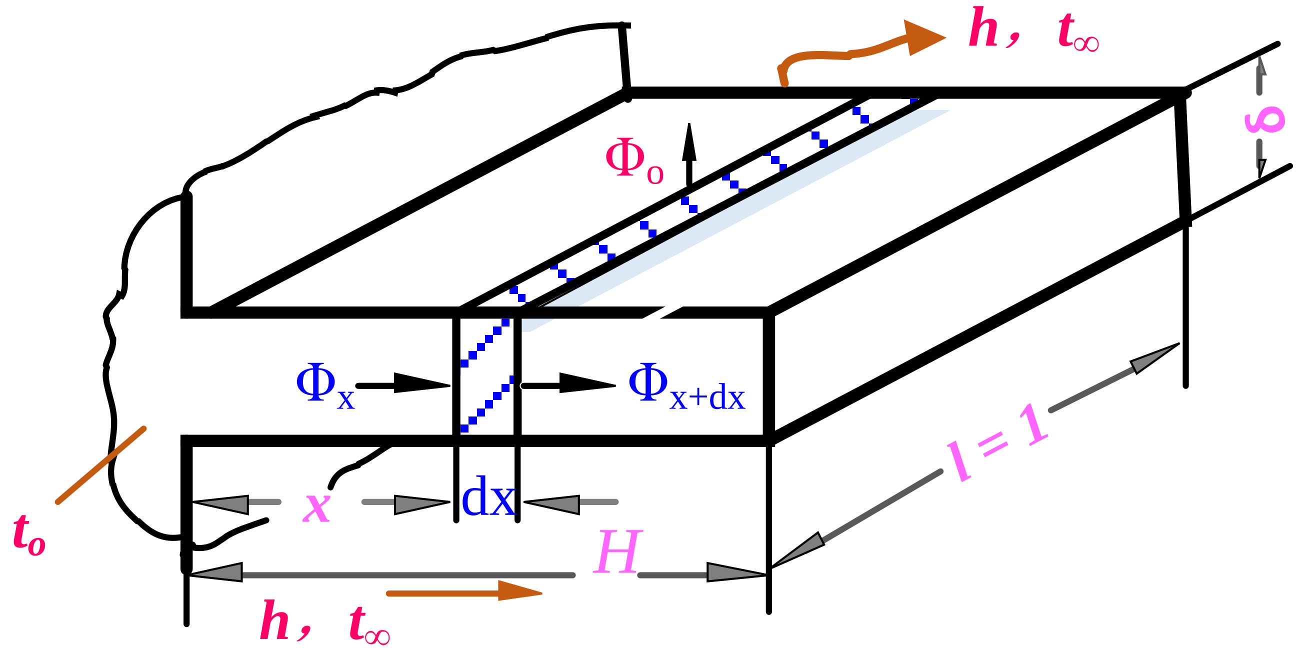


$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\dfrac{1}{h_1 A} + \dfrac{\delta}{\lambda A} + \dfrac{1}{h_2 A}} \quad [\mathrm{W}]$$



减小总热阻，应减小对总热阻影响最大的分热阻。
即肋应加在表面传热系数较小一侧的壁面上。

✱ 问题：加装肋片是否总是加强换热？

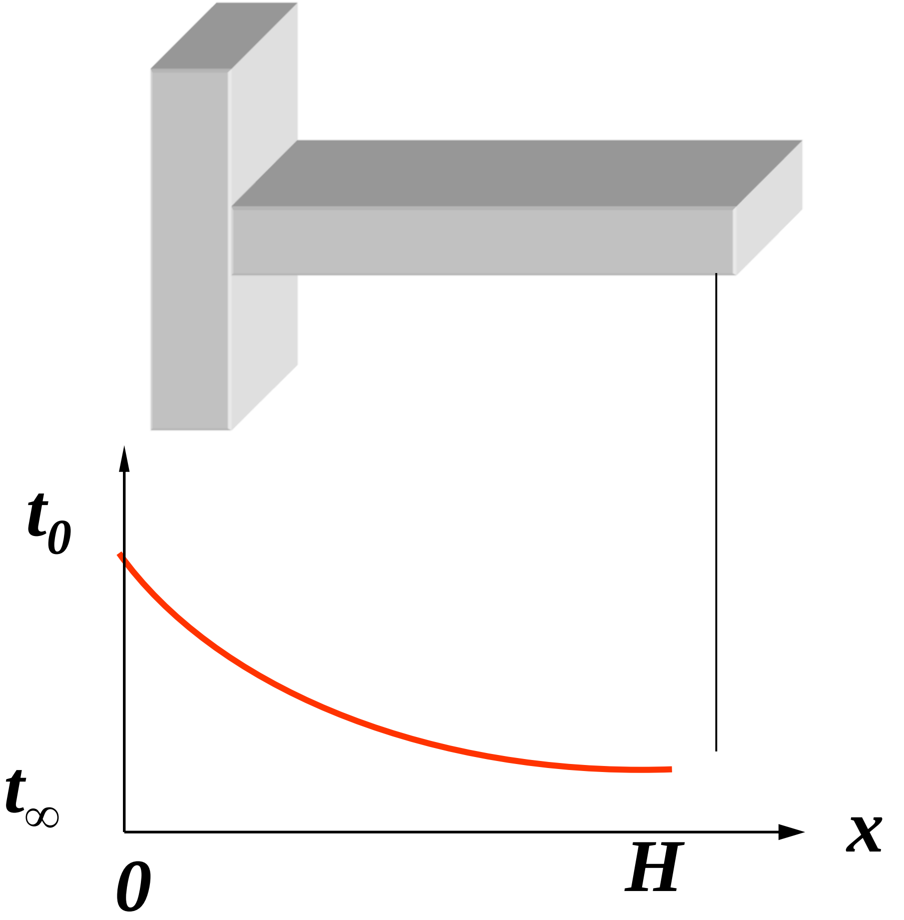


Bi<0.1,
即内部导热热阻<表面传热热阻

对于等截面直肋

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx}\bigg|_{x=0} = \sqrt{\lambda A_c h P}\,\theta_0 th(mH)$$

$$\eta_f = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{\lambda A \theta_0 m th(mH)}{hPH(t_0 - t_f)} = \frac{th(mH)}{mH}$$



在实际计算中，肋片的端部边界条件应该是**第三类边界条件**，把端面的面积折算成**当量长度**来处理，取

$$H_c = H + \frac{A}{P}$$

➢影响肋片效率的因素有哪些?

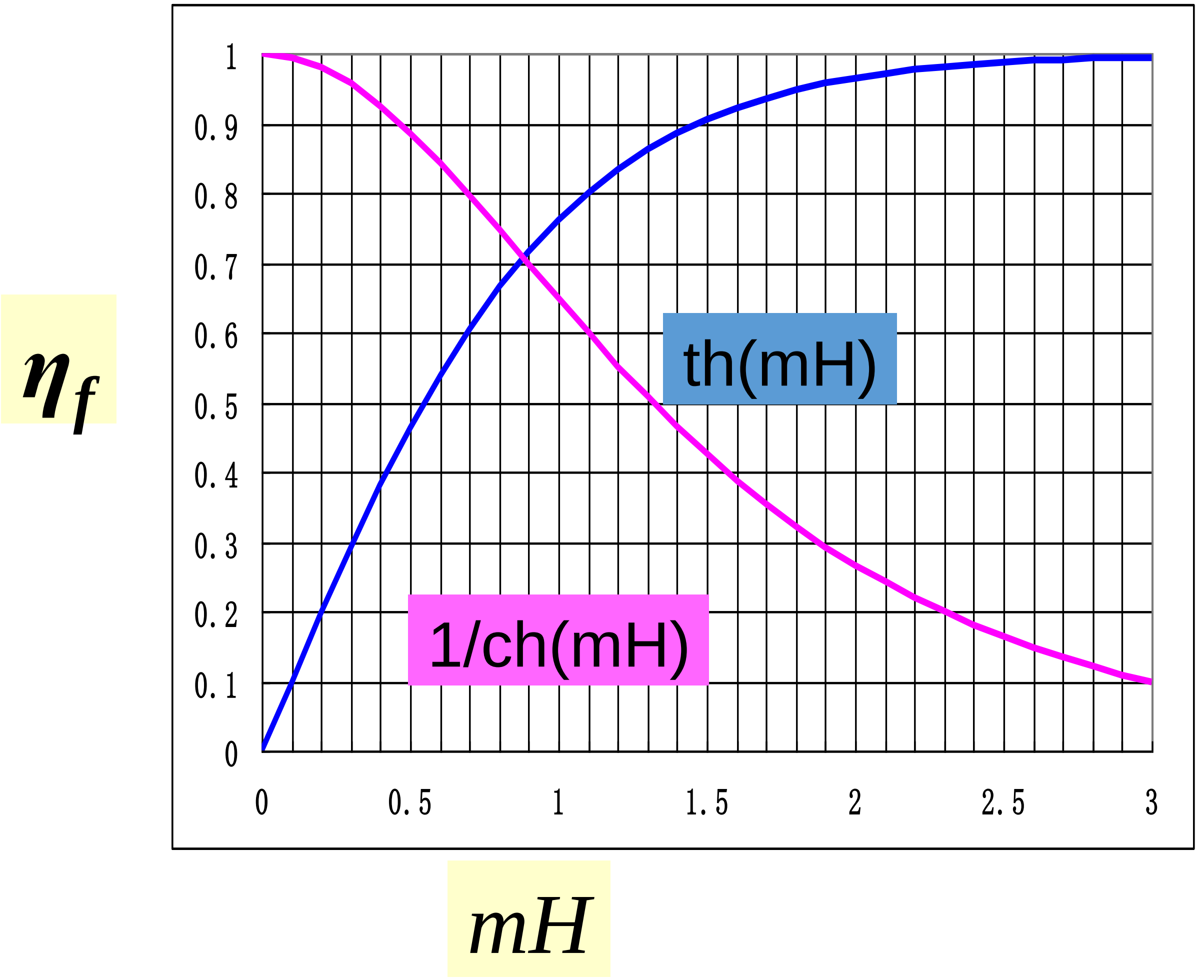
$$\eta_f = \frac{th(mH)}{mH}$$

$$mH = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A_c}}H = \sqrt{\frac{h2l}{\lambda l\delta}}H = \sqrt{\frac{2h}{\lambda A_L}}H^{3/2}$$

$$\theta_H = \theta_0 \frac{1}{ch(mH)}$$

◆**H不变**，**m较小有利，肋片应选择λ大的材料；**

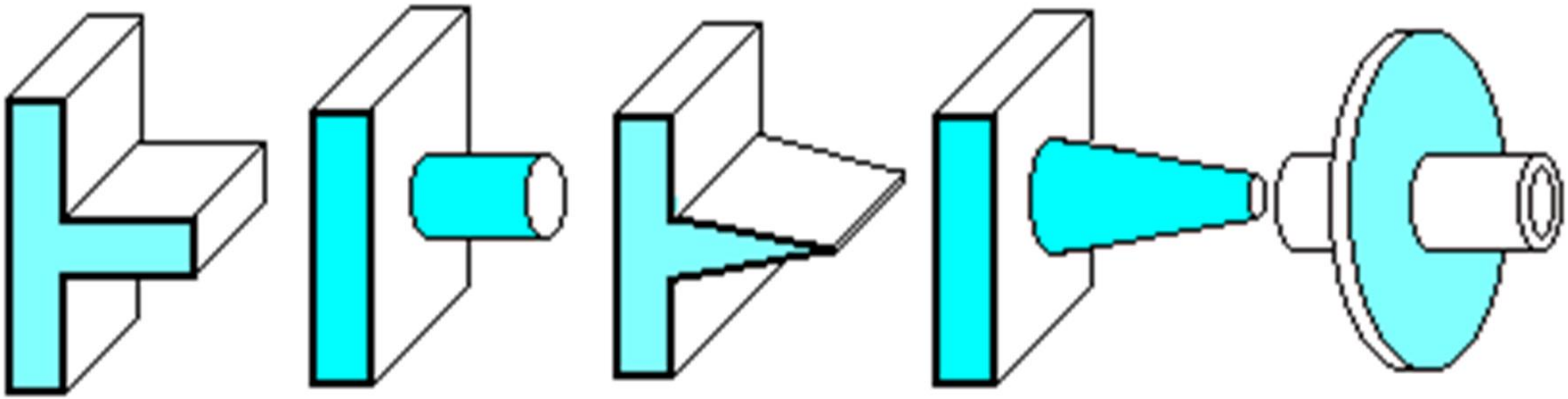
◆当λ、**h一定**，**m随（P/A_c）降低而减小，与几何形状和尺寸有关**



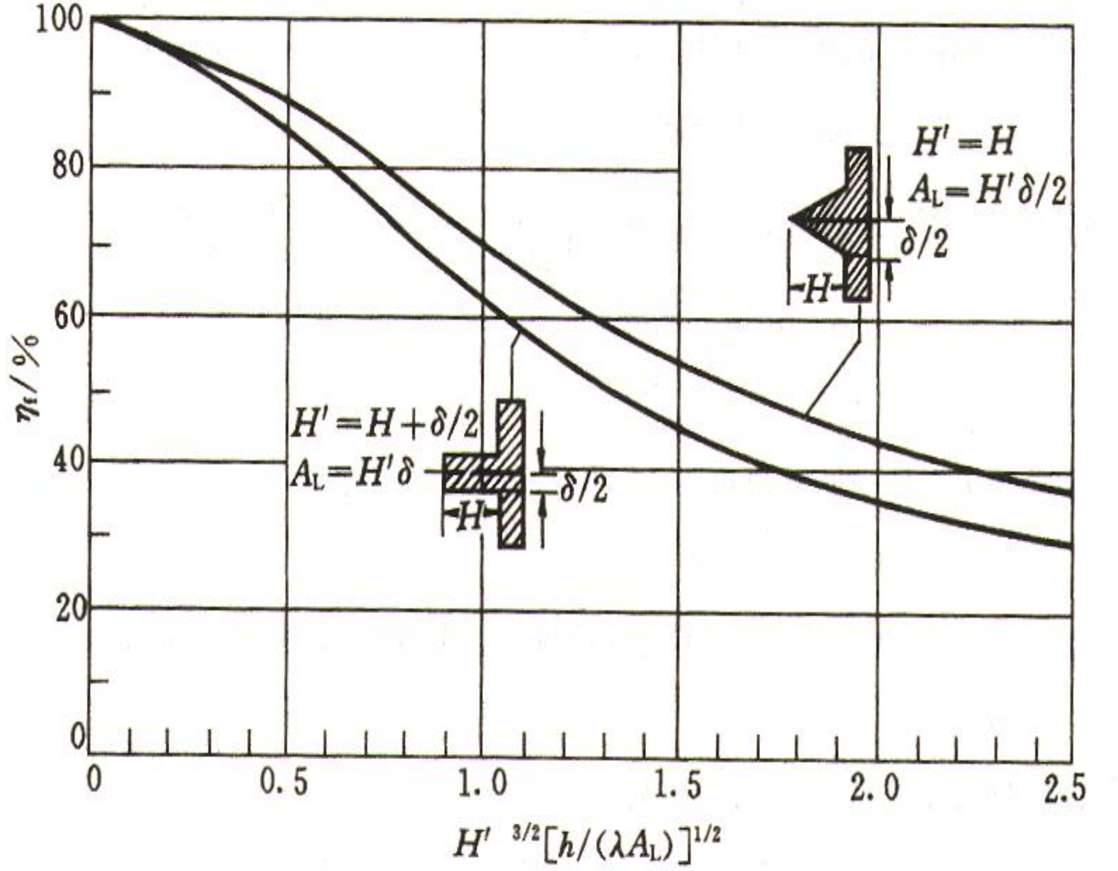
肋片的选择

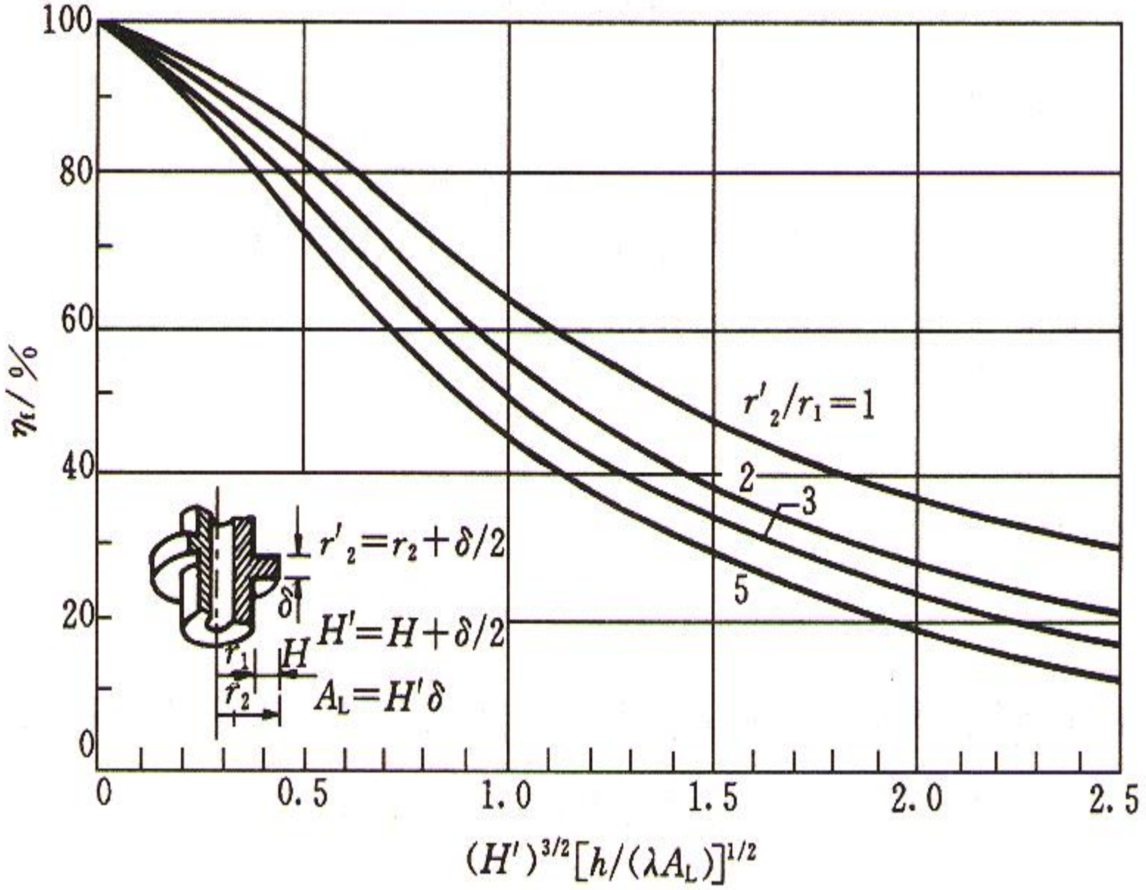
➢ 其它形状肋片

为了减轻肋片重量、节省材料，并保持散热量基本不变，需要采用**变截面肋片**，环肋及三角形截面直肋是其中的两种。



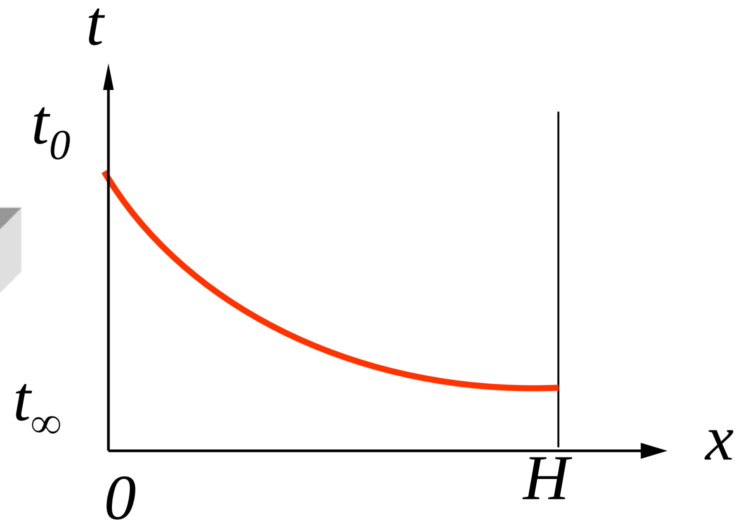
肋片散热量的工程计算方法：





- 由图线或计算公式得到 η_f
- 计算出理想情况下的散热量 $\Phi_0=hA(t_0-t_\infty)$
- 由式$\Phi=\eta_f\,\Phi_0$ 计算出实际散热量Φ

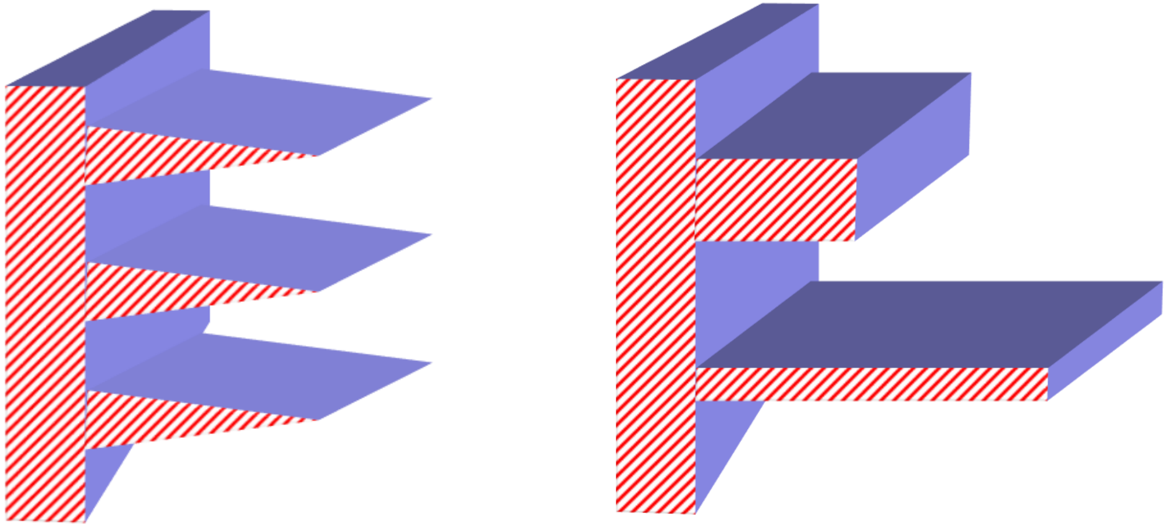
五、肋片的优化



1、最优的肋片型式

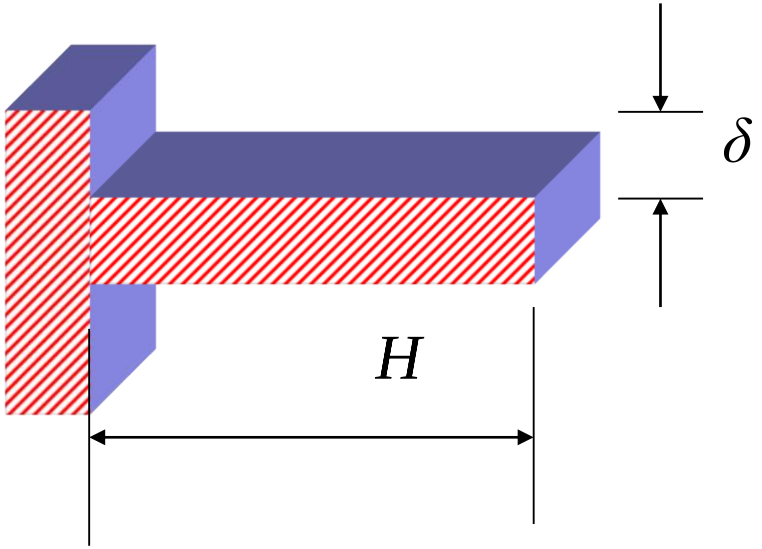
2、 最小重量的矩形肋

（尺寸的优化）



对于矩形肋片，其单位长度的重量与肋片的截面面积 $A^{'}$ 成正比。

$$A^{'} = H\delta$$



矩形肋片总散热量的计算公式为：

$$\Phi = \sqrt{\lambda A_c h P}\theta_0 th(mh)$$

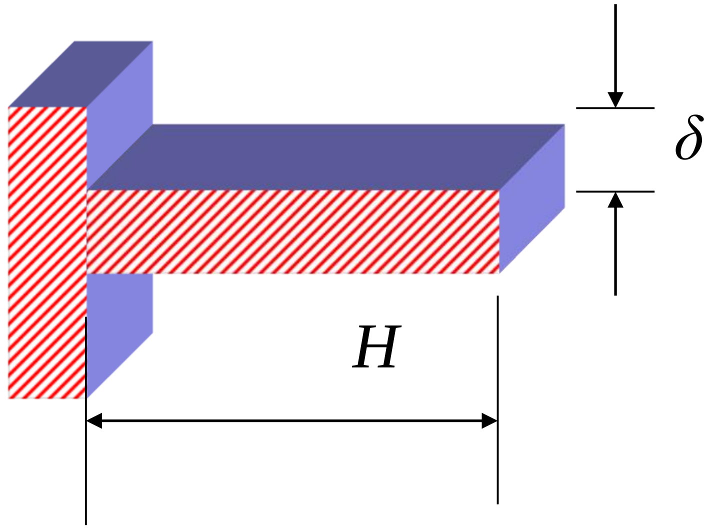
当 $\left.\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}\delta}\right|_{H\delta=\text{常量}} = 0$ 可得肋片的最佳厚度和高度，此时肋端的过余温度为

$$\theta_H = 0.457\theta_0$$

思考

肋片高度增加引起两种效果：肋效率下降及散热表面积增加。因而有人认为，随着肋片高度的增加会出现一个临界高度，超过这个高度后肋片导热热流量反而会下降。请分析这一观点的正确性。

错误。因为当肋片高度达到一定值时，通过该截面处的热流密度为零。通过肋片的热流已达到最大值，不会因为高度的增加而发生变化。

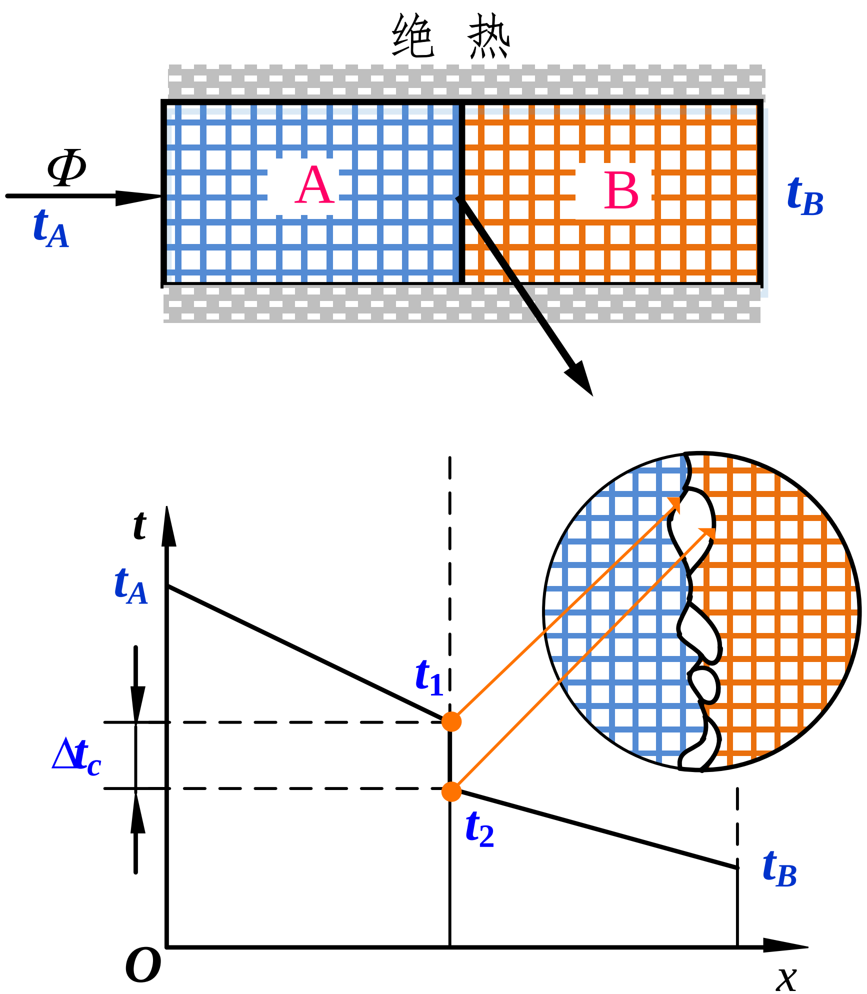


思考

对于一根圆管，保温厚度是否越大越好？

临界绝缘直径

接触热阻

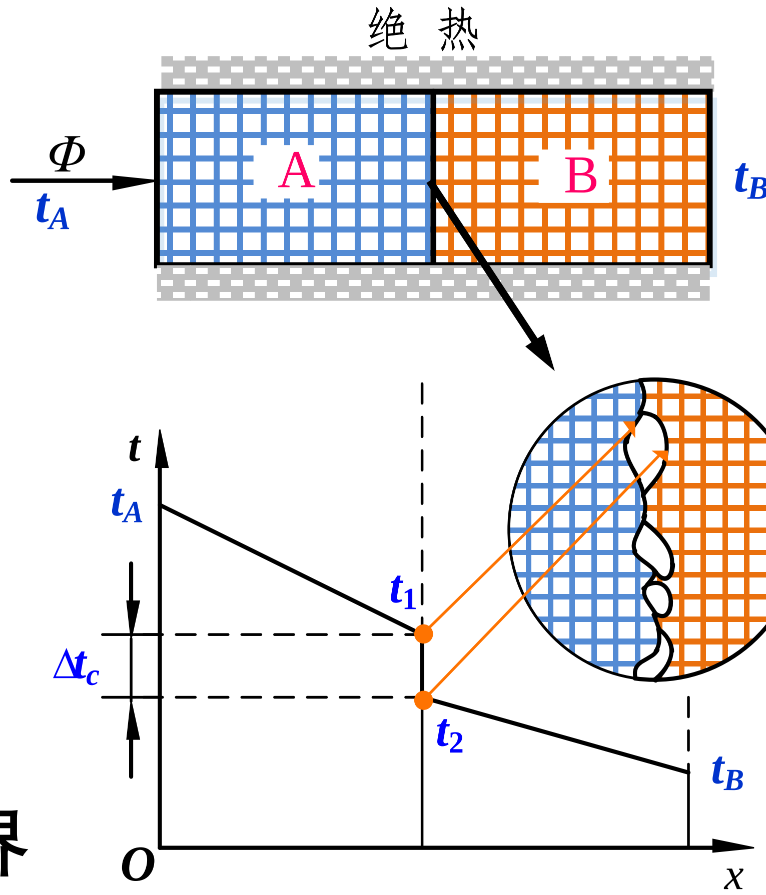


接触热阻(Thermal contact resistance)：
接触界面由于存在空隙，导致热量传递时出现附加的热阻。

当界面上的空隙中充满导热系数远小于固体的气体时，接触热阻的影响更突出

$$q=\frac{t_A-t_B}{\dfrac{\delta_A}{\lambda_A}+r_c+\dfrac{\delta_B}{\lambda_B}}$$

$$t_A-t_B=q\left(\frac{\delta_A}{\lambda_A}+r_c+\frac{\delta_B}{\lambda_B}\right)$$



(1) 当热流量不变时，接触热阻 r_c 较大时，必然在界面上产生较大温差

(2) 当温差不变时，热流量必然随着接触热阻 r_c 的增大而下降

(3) 即使接触热阻 r_c 不是很大，若热流量很大，界面上的温差是不容忽视的

例：

$$q = 6\times10^5 \quad W/m^2$$

$$r_c = 2.64\times10^{-4} \quad m^2K/W$$

$$\Delta t_c = q\cdot r_c = 158.4 \quad ℃$$

接触热阻的影响因素：

(1) 固体表面的粗糙度　　(2) 接触表面的硬度匹配

(3) 接触面上的挤压压力　(4) 空隙中的介质的性质

在实验研究与工程应用中，消除接触热阻很重要

导热姆（导热油、硅油）、银、先进的电子封装材料（AIN），导热系数达400W/(mK)以上

表 2-3 几种接触面的面接触热阻[21]

表面情况	表面不平整尺度/μm	温度 t/℃	压力 p/Pa	面接触热阻 r_c/(m^2·K/W)
416 号不锈钢,磨削,空气	2.54	90～200	$(3.0\sim25.3)\times10^5$	2.64×10^{-4}
304 号不锈钢,磨削,空气	1.14	20	$(40.5\sim70.9)\times10^5$	5.28×10^{-4}
416 号不锈钢,磨削,空气,加 0.025 mm 黄铜垫片	2.54	30－200	7.1×10^5	3.52×10^{-4}
铝,磨削,空气	2.54	150	$(12.2-25.3)\times10^5$	0.88×10^{-4}
铝,磨削,空气	0.25	150	$(12.2\sim25.3)\times10^5$	0.18×10^{-4}
铝,磨削,空气,加 0.025 mm 黄铜垫片	2.54	150	$(12.2\sim20.3)\times10^5$	1.23×10^{-4}
铜,磨削,空气	1.27	20	$(12.2\sim20.3)\times10^5$	0.07×10^{-4}
铜,铣削,空气	3.81	20	$(10.1\sim50.7)\times10^5$	0.18×10^{-4}
铜,铣削,真空	0.25	30	$(7.1-70.9)\times10^5$	0.88×10^{-4}

注:416 号不锈钢相当于我国的 1Cr13;304 号不锈钢相当于我国的 0Cr18Ni9。

表 2-4 在 10^5 Pa 的接触面压力下间隙介质对铝－铝结合面(表面不平整尺度为 10 μm)面接触热阻的影响[19]

间　隙　介　质	面接触热阻 $r_c/(m^2 \cdot K/W)$
空　气	2.75×10^{-4}
氦	1.05×10^{-4}
氢	0.720×10^{-4}
硅　油	0.525×10^{-4}
甘　油	0.265×10^{-4}

例 δ = 6 mm，H = 50mm，l = 800 mm，t_0 = 95 ℃，λ = 120 W/(m·K)。t_∞ = 20 ℃，h = 12 W/(m² ·K)。

试计算肋片的散热量（不计肋端的散热）。

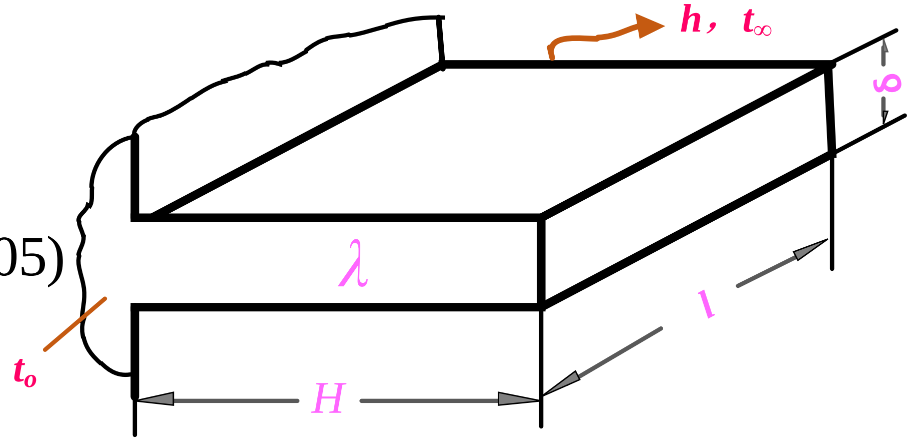
解 散热量

$$m=\sqrt{\frac{hP}{\lambda A}}=\sqrt{\frac{12\times(0.8+0.006)\times 2}{120\times 0.8\times 0.006}}=5.795m^{-1}$$

$$\Phi=\lambda A\theta_0 mth(mH)$$

$$=120\times 0.8\times 0.006\times(95-20)\times 5.795\times th(5.795\times 0.05)$$

$$=70.57W$$



考虑端部的散热 $H_c=H+\frac{A}{P}=0.05+\frac{0.8\times 0.006}{(0.8+0.006)\times 2}=0.0530m$

$$\Phi=\lambda A\theta_0 mth(mH_c)$$

$$=120\times 0.8\times 0.006\times(95-20)\times 5.795\times th(5.795\times 0.053)$$

$$=74.56W$$

不考虑端部散热时的误差

$$\left|\frac{74.56-70.57}{74.56}\right|\times 100\%=5.35\%$$

肋效率

$$\eta_f=\frac{\lambda A\theta_0 mth(mH)}{hPH_c\theta_0}=\frac{74.56}{12\times 1.612\times 0.053\times (95-20)}=0.970$$

与无肋时相比

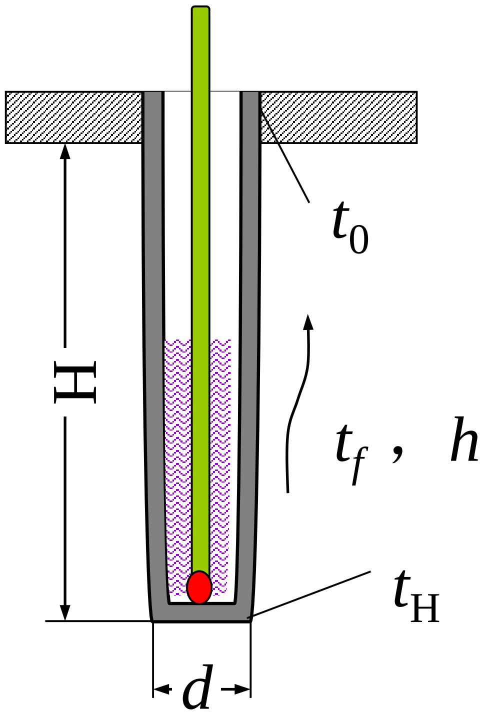
$$\Phi^{'}=\lambda A\theta_0=4.32W$$

$$\frac{\Phi}{\Phi^{'}}=\frac{74.57}{4.32}=17.26$$

加装了肋后，散热量增加为无肋时的17倍之多。

练习

例 一支插入装有油的套管中的水银温度计，测量贮气筒中空气温度。已知温度计的读数t_h=100℃，温度计套管与贮气筒连接处的温度为t_0=50 ℃，套管长度H=140mm，壁厚δ = 1mm，套管的导热系数λ = 58.2W/(m²· ℃)，套管与贮气筒中空气的换热系数h = 29.1 W/(m²· ℃)，此测量误差是多少？



练习

（1）温度计套管可看作从贮气筒筒体上伸出的扩展换热面，

∴采用肋片的分析方法。

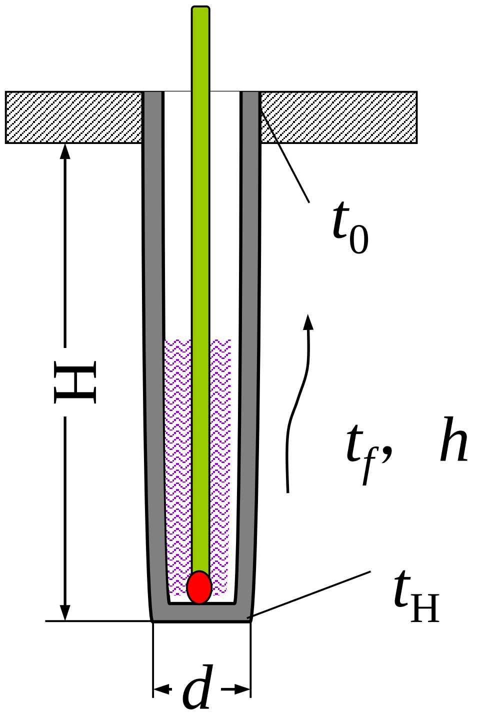
（2）温度计直接接触套管底部，

∴温度计的读数即为套管底部温度 t_H

（3）近似认为套管底部散热可忽略不计。

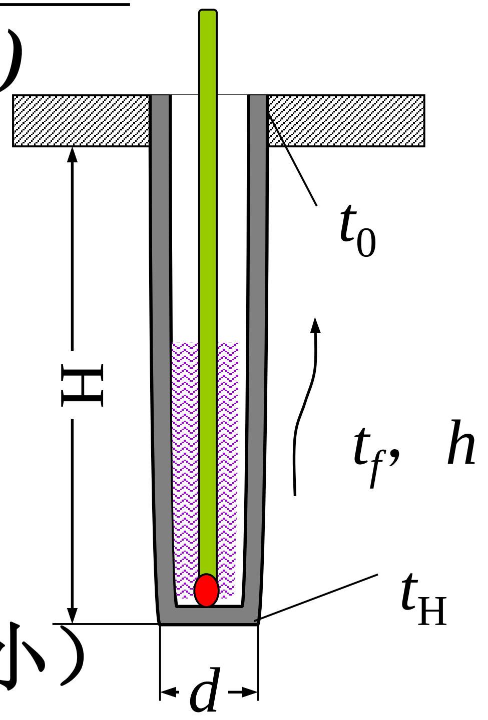
（4）套管壁的温度分布：

$$\theta = \theta_0 \frac{ch[m(x-H)]}{ch(mH)}$$



练习

$$\theta=\theta_0\frac{ch[m(x-H)]}{ch(mH)} \qquad \frac{t-t_f}{t_0-t_f}=\frac{ch[m(x-H)]}{ch(mh)}$$



在 $x=H$处， $ch[m(H-H)]=1$

则： $$\theta_H=\frac{t_H-t_f}{t_0-t_f}=\frac{1}{ch(mH)}$$

- 其中 $m=\sqrt{hP/\lambda A_c}$

周长$P=\pi d$, 套管截面积$A_c=\pi d\delta$（δ较小）

整理后： $$mH=\sqrt{\frac{hP}{\lambda A_c}}H=\sqrt{\frac{h\pi d}{\lambda\pi d\delta}}H=\sqrt{\frac{h}{\lambda\delta}}H$$

$$=\sqrt{\frac{29.1}{58.2\times0.001}}\times0.14=3.13$$

练习

$$\theta_H = \frac{t_H - t_f}{t_0 - t_f} = \frac{1}{ch(mH)} \qquad t_f = \frac{t_H ch(mH) - t_0}{ch(mH) - 1}$$

$$mH = \sqrt{\frac{h}{\lambda\delta}}H = \sqrt{\frac{29.1}{58.2 \times 0.001}} \times 0.14 = 3.13$$

- 查双曲线函数 *ch(3.13)=11.5*

$$\theta_H = \frac{\theta_0}{ch(mH)} \qquad 100 - t_f = \frac{50 - t_f}{ch(3.13)} = \frac{50 - t_f}{11.5}$$

$$t_f = (100 \times 11.5 - 50)/(11.5 - 1) = 104.7$$

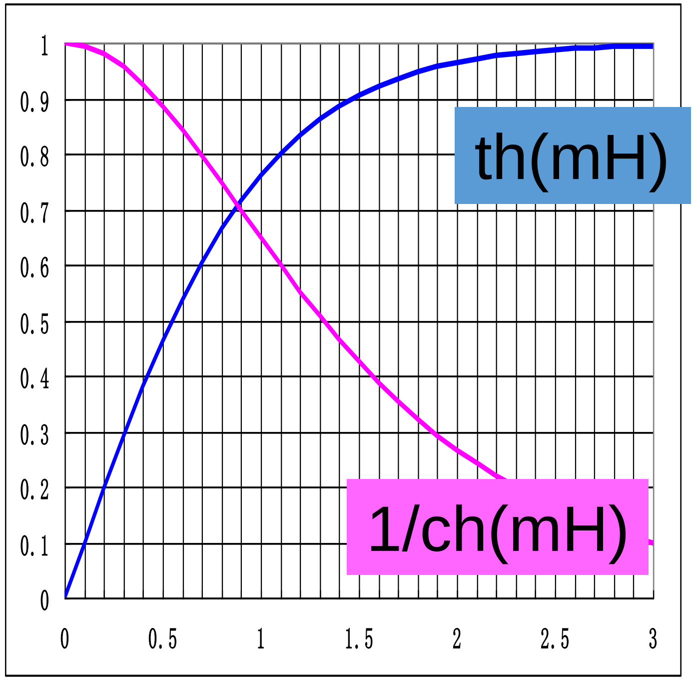
测量误差： $\theta = t_f - t_H = 4.7$°C

练习

减小该误差的措施：

$$m = \sqrt{hP / \lambda A_c}$$

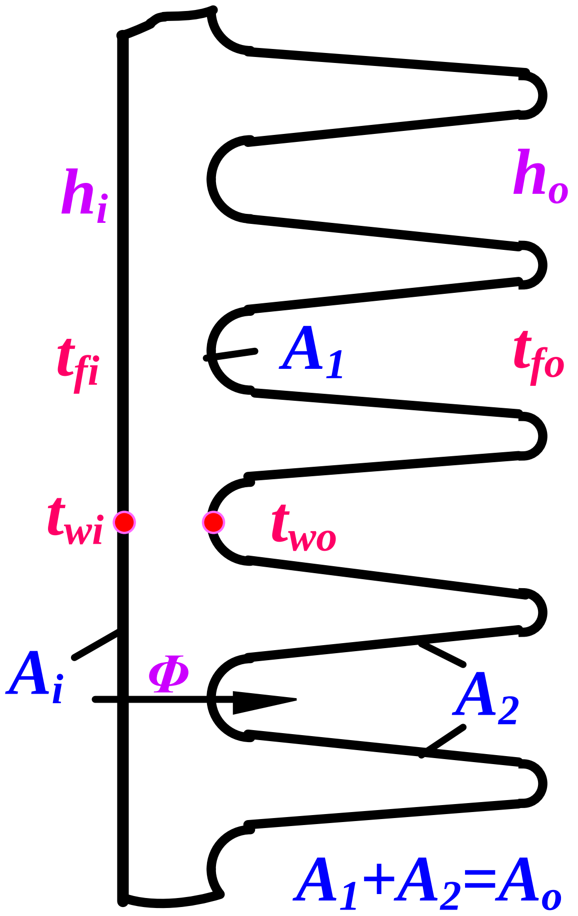
$$t_H - t_f = \frac{t_0 - t_f}{ch(mH)} = \frac{t_0 - t_f}{ch\left(\sqrt{\frac{h}{\lambda\delta}}H\right)}$$



分析：1/ch(*mH*)随mH增加而减少，∴尽量增加mH

- 增加套管的长度，减少壁厚
- 选用导热系数小的套管
- 强化套管与流体间的换热
- 减小 θ_0，减少沿套管长度方向上的温降

练习



$$\Phi = h\,(t_{w2} - t_{f2})A_2^{'} + h\eta_f A_2^{''}(t_{w2} - t_{f2})$$

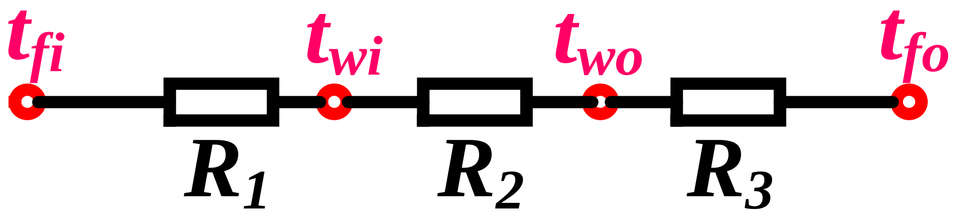
$$\Phi = h\,(t_{w2} - t_{f2})(A_2^{'} + \eta_f A_2^{''})$$

$$= h\,(t_{w2} - t_{f2})\eta_0 A_2$$

其中：

$$\eta_0 = \frac{A_2^{'} + \eta_f A_2^{''}}{A_2}$$ 称为肋面总效率

$$A_2 = A_2^{'} + A_2^{''}$$



主要内容

2-1 导热基本定律

2-2 导热问题的数学描写

2-3 典型一维稳态导热问题的分析解

2-4 通过肋片的导热

作业

2-1，2-2， 2-4，2-5，2-7，
2-12，2-22

谢谢大家！