

传热基本方式之热传导

热传导源于物体内部分子微观运动，如
固体内部相邻分子在碰撞时传递振动能；
流体中既有分子间的振动能，还有分子的不规则运动；
金属内部自由电子的转移。

热传导基本概念

温度场：某一时刻物体内部各点温度分布的总和。

$$t = f(x, y, z, \tau)$$

定态温度场：如果温度场内各点温度不随时间而变化

$$t = f(x, y, z)$$

等温面：定态温度场中，相同温度点组成的面。

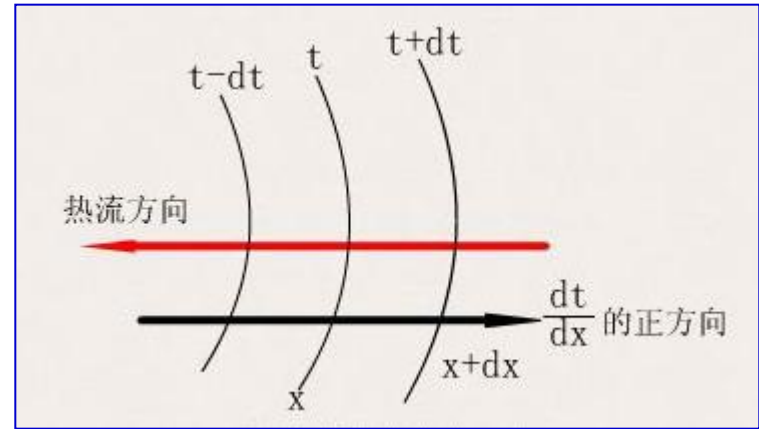
温度梯度：两等温面的温度差与其之间的法向距离之比，在 Δn 趋于零时的极限

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n}$$

傅立叶定律和导热系数

傅立叶 (Fourier) 定律
描述热传导的宏观规律

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$$



热流密度正比于传热面的法向温度梯度，负号表示热流方向与温度梯度方向相反。

λ (W/m°C) : 导热系数，其值越大，导热性越好；
越小，保温性越好。

物体的导热系数 λ (W/m $^{\circ}$ C)

导热率是表征物质导热能力的物理量，为物质的物理性质之一。与材料的组成、结构、温度、压强以及聚集状态等诸多因素有关。一般通过实验测定。

- ① 金属>液体>气体；液态金属>一般液体；纯金属>合金
纯液体>溶液；金属>建筑材料>绝缘材料；
- ② 随温度的上升，液体的下降，但水、甘油例外；
随温度的上升，气体的上升；
- ③ 固体的随温度呈线性关系， $\lambda = \lambda_0(1+at)$ ， a 为温度系数 $1/^{\circ}$ C。对多数金属 a 是负值，而对非金属为正值。
- ④ 只有压强很高或很低时，才考虑压强的影响。
- ⑤ 气体的导热系数比液体更小，约为液体的1/10。

物质种类	金属	建筑材料	液体	绝热材料	气体
W/(m \cdot $^{\circ}$ C)	20~400	0.2~2.0	0.1~0.7	0.02~0.2	0.01~0.6

通过单层平壁的定态热传导

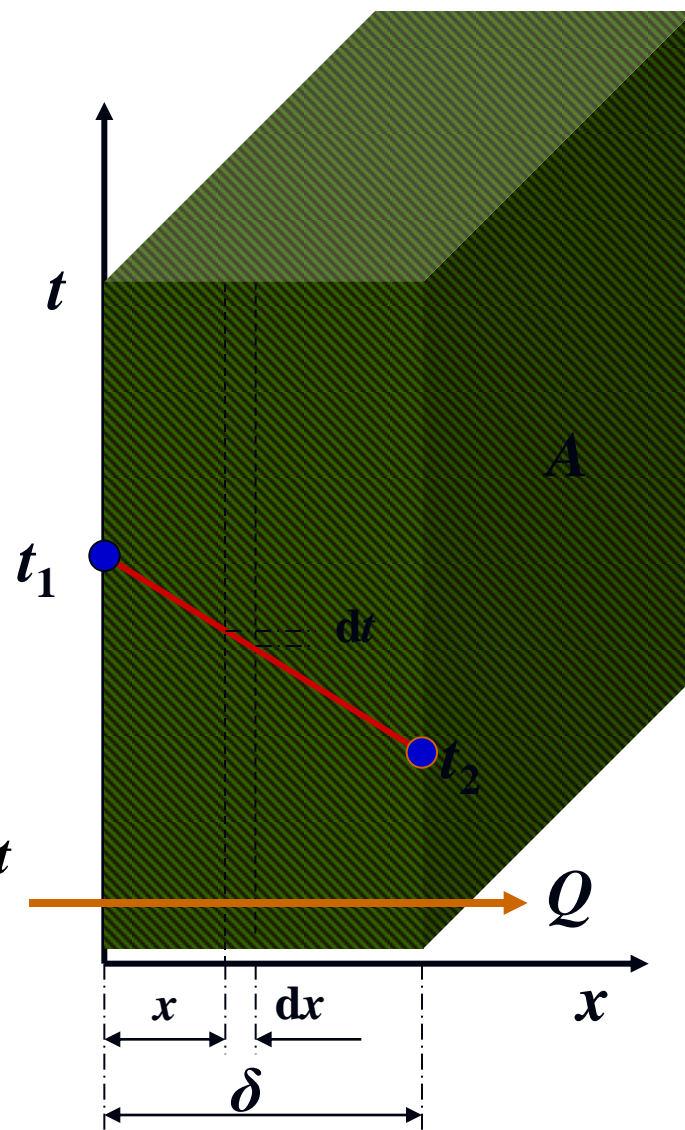
厚度为 δ ，高和宽为无限大的平壁，
两侧表面温度保持均匀，分别是 t_1
 t_2 ，且不随时间而变化，则壁内
传热为一维定态热传导。即：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

对定态导热， $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ ，薄层内无热量
累积，故而：

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = \text{const}, \quad \text{当} \lambda = \text{const}, \frac{dt}{dx} = \text{const}$$

即平壁内温度变化呈线性分布。



热流量

利用边界条件, $x=x_1, t=t_1; x=x_2, t=t_2$ 得:

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta}, \quad \Delta t = t_1 - t_2, \quad \lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$$

即:

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\text{推动力}}{\text{热阻}}$$

λ
的
取
值

$$\lambda_m = \frac{\lambda(t_1) + \lambda(t_2)}{2}$$

$$\lambda_m = \lambda\left(\frac{t_1 + t_2}{2}\right)$$

多层平壁的定态导热过程

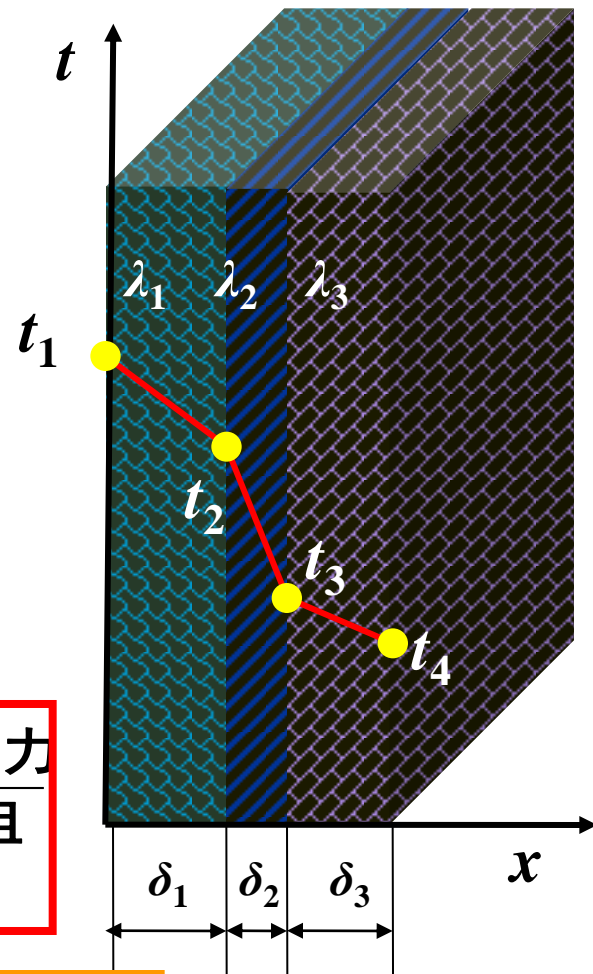
推动力和阻力的加和性

通过多层壁的定态热传导，总热阻等于各层热阻之和，总推动力等于各层推动力之和。

对多层平壁，若各层间的接触无间隙，并且导热系数为常数，则

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A}} = \frac{t_2 - t_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2 A}} = \frac{t_3 - t_4}{\frac{\delta_3}{\lambda_3 A}} = \frac{\sum \Delta t}{\sum \frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

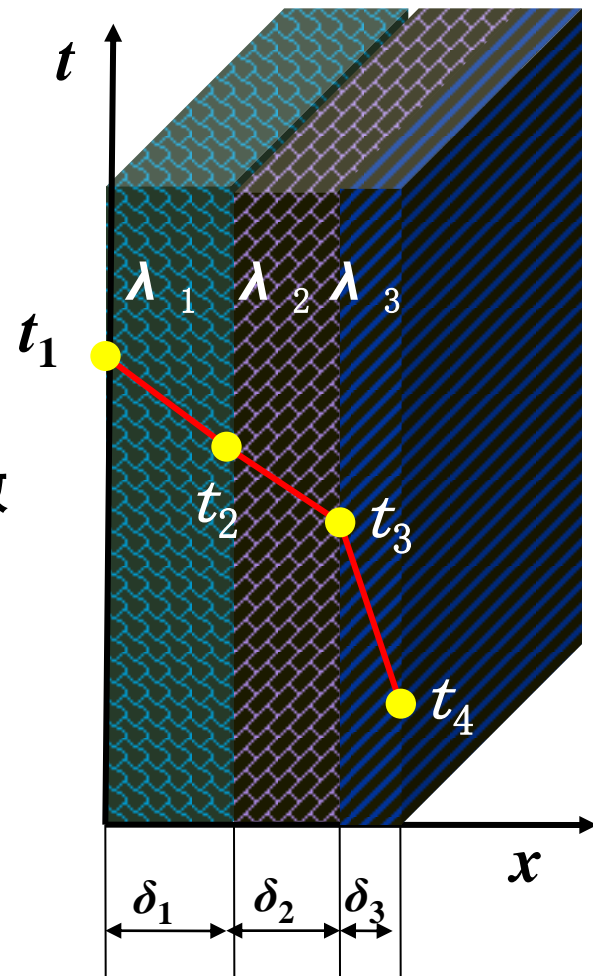
$$(t_1 - t_2) : (t_2 - t_3) : (t_3 - t_4) = \frac{\delta_1}{\lambda_1 A} : \frac{\delta_2}{\lambda_2 A} : \frac{\delta_3}{\lambda_3 A} = R_1 : R_2 : R_3$$



哪层热阻大，哪层温差就大；反之亦然。

【例4-1】某平壁燃烧炉由 $\delta_1=100$ mm的耐火砖和 $\delta_2=80$ mm的普通砖砌成，其 $\lambda_1=1.0$ W/(m·°C)及 $\lambda_2=0.8$ W/(m·°C)。操作稳定后，测得炉壁内表面温度 $t_1=700$ °C，外表面温度 $t_3=100$ °C。为减小燃烧炉的热损失，在普通砖的外增加一层 $\delta_3=30$ mm， $\lambda_3=0.03$ W/(m·°C)的保温材料。待操作稳定后，又测得炉壁内表面温度 $t'_1=900$ °C，外表面温度 $t'_4=60$ °C。设原有 λ_1 和 λ_2 不变，试求

- (1) 加保温层后炉壁的热损失比原来减少的百分数
- (2) 加保温层后各层接触面的温度



$$\frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{\frac{t_1 - t_3}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2} - \frac{t'_1 - t'_4}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3}}{\frac{t_1 - t_3}{\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2}} = \frac{3000 - 700}{3000} = 76.7\%$$

$$\Delta t_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} q_2 = \frac{0.1}{1} \times 700 = 70^\circ\text{C} \quad t'_2 = t'_1 - \Delta t_1 = 900 - 70 = 830^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} q_2 = \frac{0.08}{0.8} \times 700 = 70^\circ\text{C} \quad t'_3 = t'_2 - \Delta t_2 = 830 - 70 = 760^\circ\text{C}$$

$\Delta t_3 = t'_3 - t'_4 = 760 - 60 = 700^\circ\text{C}$ **保温砖层热阻最大，分配于该层的温差也最大**

通过圆筒壁的定态导热过程

$$q = -\lambda \frac{dt}{dr}$$

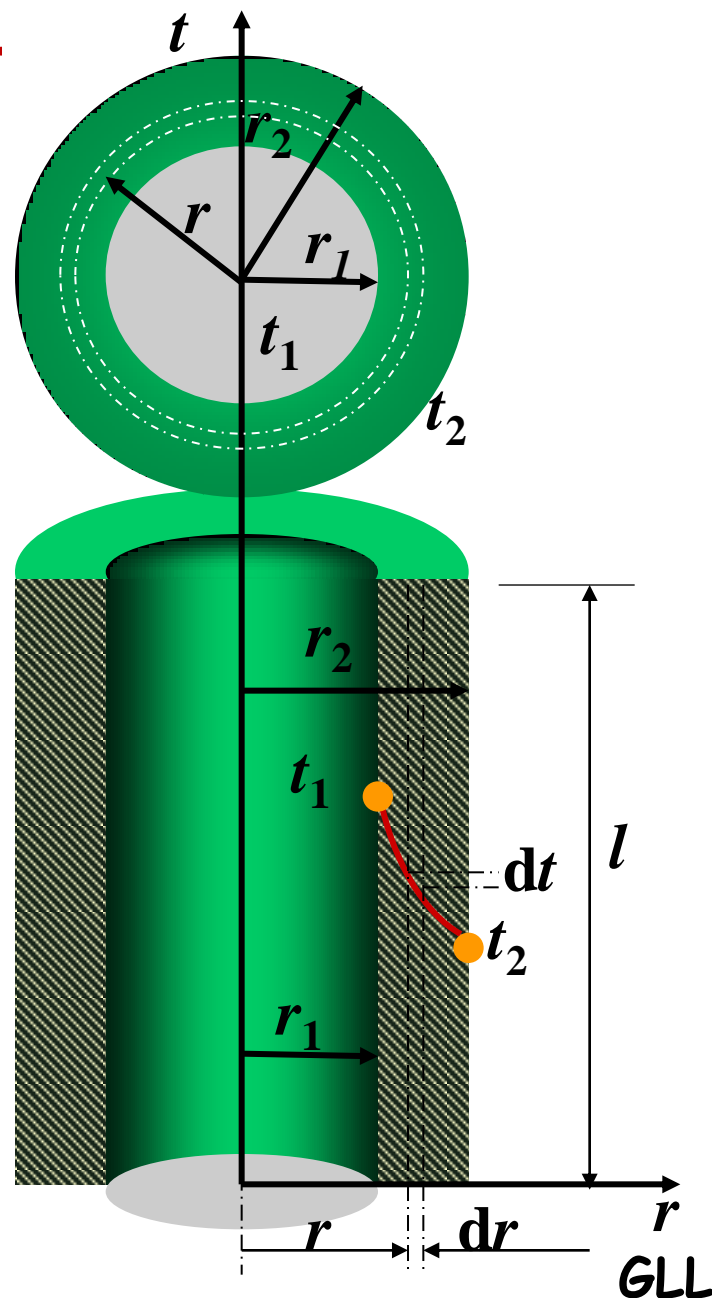
对于圆筒壁的定态热传导，因为圆筒壁的面积随半径增大而增大，对于一定传热速率 Q ，热流密度 q 随半径增大而减小，若导热系数不随温度而变（或取均值），则

$$q = \frac{Q}{2\pi r l}$$

$$dt = -\frac{Q}{2\pi\lambda} \frac{dr}{r}$$

即为圆筒壁内温度分布。
积分形式：

$$t = -\frac{Q}{2\pi\lambda} \ln r + C \quad C \text{为积分常数}$$



圆筒壁内的热流量

由边界条件, $r=r_1, t=t_1; r=r_2, t=t_2$ 得:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad \text{or} \quad Q = \frac{2\pi\lambda l(t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

写成傅立叶定律的形式:

$$Q = \lambda A_m \frac{(t_1 - t_2)}{\delta} = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda A_m}} = \frac{\Delta t}{R}$$
$$A_m = \frac{A_2 - A_1}{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)} = \pi d_m l, \quad R = \frac{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi\lambda}$$

※对于 $d_2/d_1 < 2$ 的圆筒壁, $A_m = (A_1 + A_2)/2$, 误差小于4%。

对数平均面积

$$d_m = \frac{d_2 - d_1}{\ln\frac{d_2}{d_1}}$$

多层壁的定态导热过程

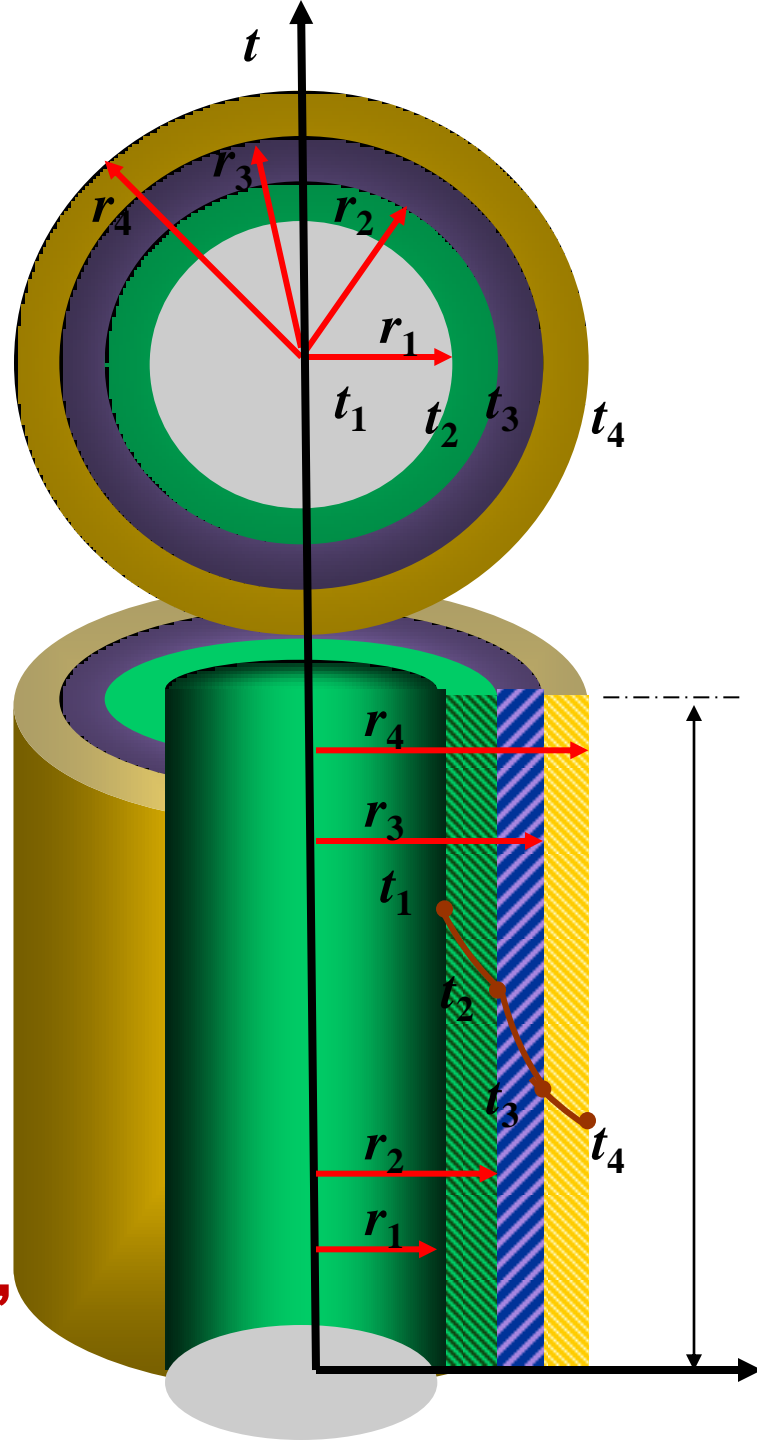
只要各层壁面光滑，壁与壁之间接触紧密，可将多层平壁定态热传导得到的推动力和阻力加和性的结论可以直接推广到此，即

$$Q = \frac{\sum \Delta t}{\sum \frac{\delta}{\lambda A_m}} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总热阻}}$$

仍存在相同的温差及热阻关系式

$$(t_1 - t_2) : (t_2 - t_3) : (t_3 - t_4) = \frac{\delta_1}{\lambda_1 A_{m1}} : \frac{\delta_2}{\lambda_2 A_{m2}} : \frac{\delta_3}{\lambda_3 A_{m3}} = R_1 : R_2 : R_3$$

哪层热阻大，哪层温差就大；反之，哪层温差大，哪层热阻一定大。



【例4-2】导热系数的简易测定法

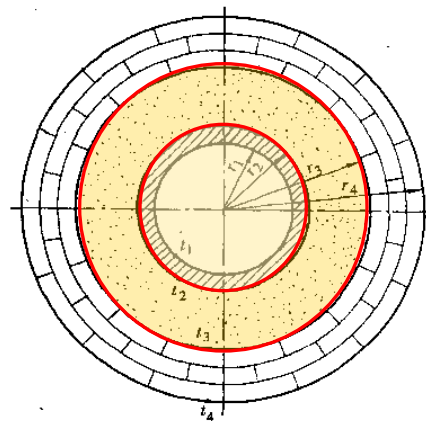
欲测定某绝缘材料的导热系数，将此材料装入如图所示的同心套管间隙内，在内管用电进行加热。已知管长为1米，内管为 $\Phi 25 \times 2.5\text{mm}$ 钢管，外管为 $\Phi 50 \times 3\text{mm}$ 的钢管。当电热功率为1.2kW时，测得内管的内壁温度为 950°C ，外管的外壁温度为 100°C ，钢管的导热系数为 $45\text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。试求该绝缘材料的导热系数（忽略热损失）。

$$r_1=10\text{mm}, r_2=12.5\text{mm}, r_3=22\text{mm}, r_4=25\text{mm}, t_1=950^\circ\text{C}, t_4=100^\circ\text{C},$$

$$\lambda_1 = \lambda_3 = 45\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

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

$$\lambda_2 = 0.127\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$



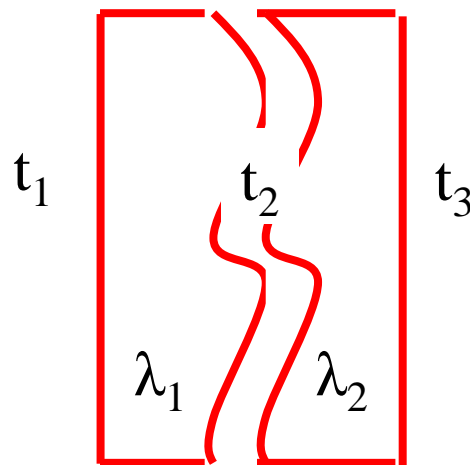
接触热阻

粗糙的界面会增加导热热阻，以 $1/a_c A$ 表示， a_c 为接触系数， $W/m^2\text{°C}$ 。接触系数与接触界面的粗糙度、接触面的压紧力、空隙中的气压有关。

界面处的导热方式多样化：

- ①接触部位的固体与固体的导热；
- ②通过缝隙中气体的导热；
- ③高温时，需考虑热辐射。

因接触热阻的存在，交界面两侧的温度不再相等，此时



$$Q = \frac{t_1 - t_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 A} + \frac{1}{\alpha_c A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 A}}$$