

§. 辐射传热的计算

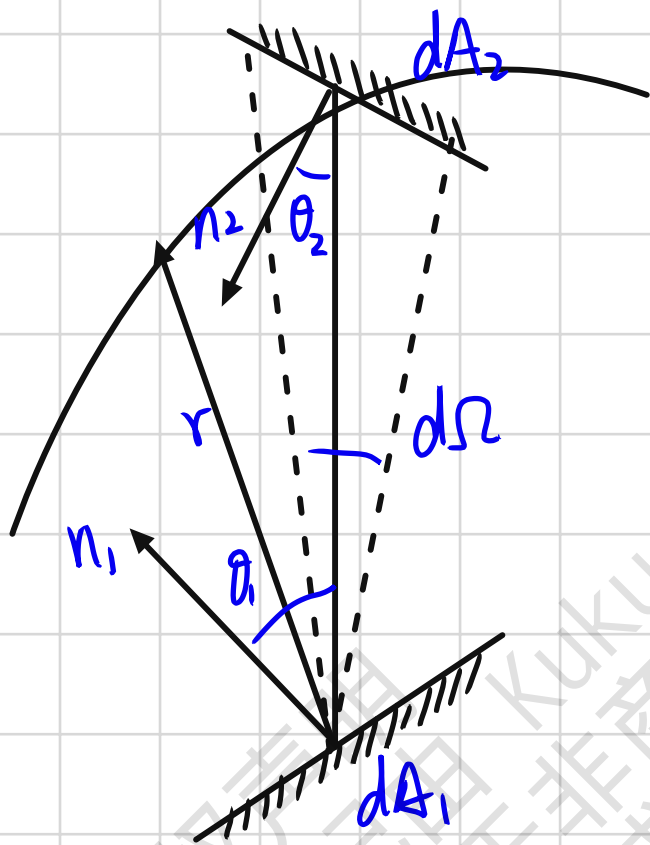
9.1 辐射传热的角系数

def. $X_{1,2}$ - 表面1对表面2的角系数: 离开表面1的辐射能落到表面2上的份额

两个假定 $\left\{ \begin{array}{l} \text{物体表面为漫射表面} \\ \text{离开所研究表面的辐射热流密度是均匀的.} \end{array} \right.$

优点 $\left\{ \begin{array}{l} \text{角系数完全是一个几何因子.} \\ \text{物体的表面温度及发射率的改变不影响离开表面的辐射能的绝对大小} \end{array} \right.$

① 相对性



$$X_{d1,d2} = \frac{I_{b1} \cos \theta_1 dA_1 d\Omega}{E_{b1} dA_1}$$

$$= \frac{dA_2 \cos \theta_2 \cos \theta_1}{\pi r^2}$$

$$X_{d2,d1} = \frac{dA_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2}$$

$$dA_1 X_{d1,d2} = dA_2 X_{d2,d1}$$

有限大小表面 $\Phi_{1,2} = A_1 \bar{E}_{b1} X_{1,2} - A_2 \bar{E}_{b2} X_{2,1}$ 当 $\Phi_{1,2} = 0$ 时, $T_1 = T_2$,

$$\text{且 } A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$$

② 完整性

$$\sum_{j=1}^n X_{1,j} = 1, \quad X_{1,1} = 0, \quad X_{n,n} = 0$$

③ 可加性

$$X_{1,2} = \sum_{i=1}^n X_{1,2i}$$

$$A_2 \bar{E}_{b2} X_{2,1} = A_2 A \bar{E}_{b2} X_{2A,1} + A_2 B \bar{E}_{b2} X_{2B,1}$$

$$X_{2,1} = \frac{A_2 A}{A_2} X_{2A,1} + \frac{A_2 B}{A_2} X_{2B,1}$$

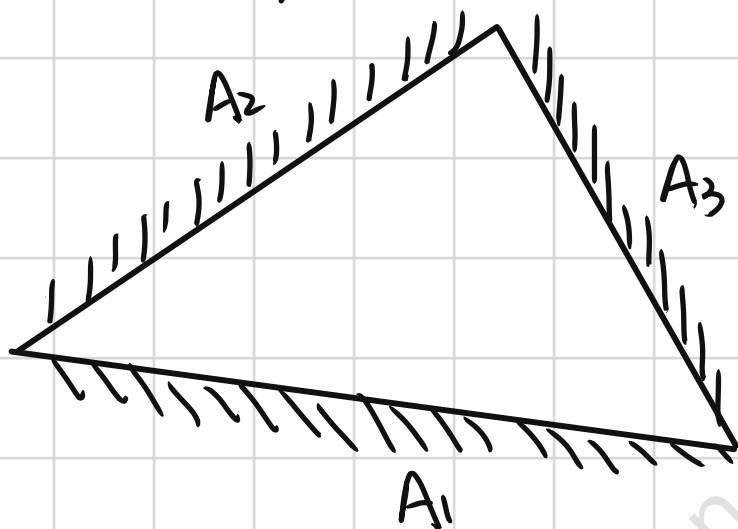
子区域不能重叠

角系数的计算.

① 直接积分法

$$X_{1,2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} X_{d1,d2} dA_1$$

② 代数分析法



对称性
完整性
可加性

$$X_{1,2} + X_{1,3} = 1$$

$$X_{2,1} + X_{2,3} = 1$$

$$X_{3,1} + X_{3,2} = 1$$

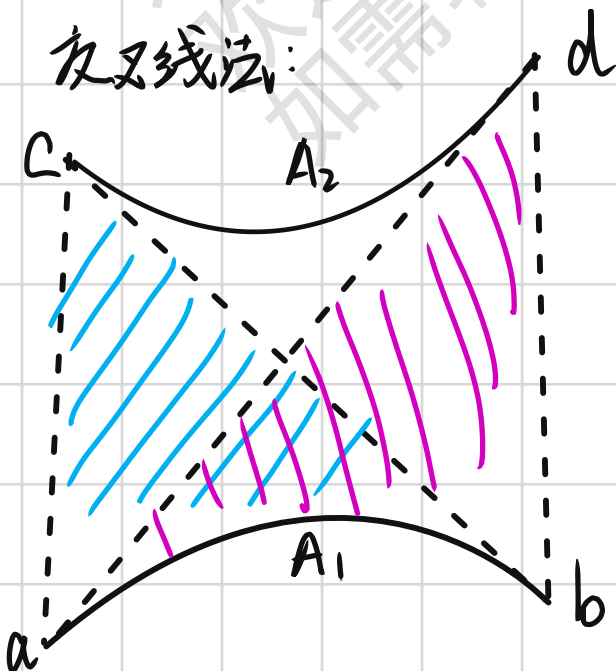
$$A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$$

$$A_1 X_{1,3} = A_3 X_{3,1}$$

$$A_2 X_{2,3} = A_3 X_{3,2}$$

$$X_{1,2} = \frac{A_1 + A_2 - A_3}{2A_1}, \quad X_{1,2} = \frac{l_1 + l_2 - l_3}{2l_1}$$

交叉线法:



两个三表面封闭系统

$$X_{ab,cd} = 1 - X_{ab,ac} - X_{ab,bd}$$

$$X_{ab,ac} = \frac{ab + ac - bc}{2ab}$$

$$X_{ab,bd} = \frac{ab + bd - ad}{2ab}$$

$$X_{ab,cd} = \frac{(bc + ad) - (ac + bd)}{2ab}$$

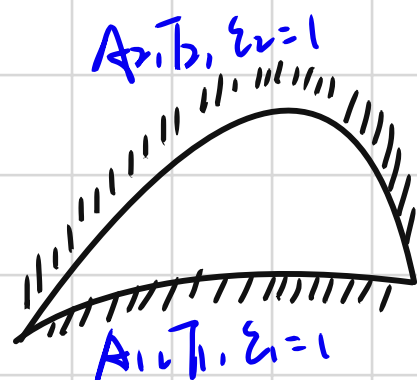
9.2 两表面封闭系统的辐射传热

透热介质 { 指不参与辐射的介质
空气

封闭腔模型 { 某表面向空间各方向发射出去的辐射能
空间各个方向投射到该表面上的辐射能

确保以上两点 { 计算对象必须是一个包含所研究表面在内的一个封闭腔/系统
封闭腔表面可以是全部真实, 也可以是部分假想

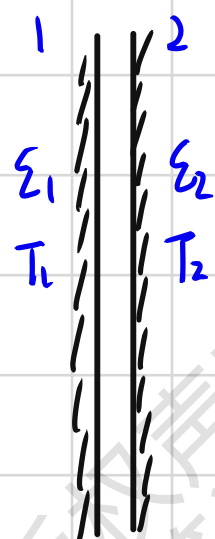
两黑体表面组成的封闭腔:



假定 outgoing "+"

$$\begin{aligned}\Phi_{1,2} &= A_1 E_{b1} X_{1,2} - A_2 E_{b2} X_{2,1} \\ &= A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) \\ &= A_2 X_{2,1} (E_{b1} - E_{b2})\end{aligned}$$

两漫灰表面组成的封闭腔:



投入辐射 G { 单位时间从外界投射到单位表面积上的辐射能
单位 W/m^2

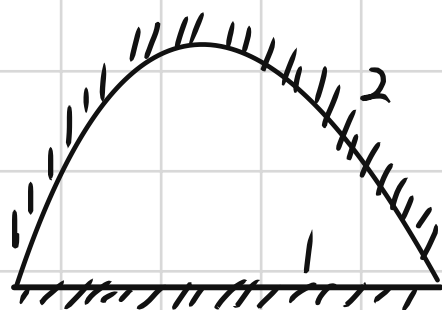
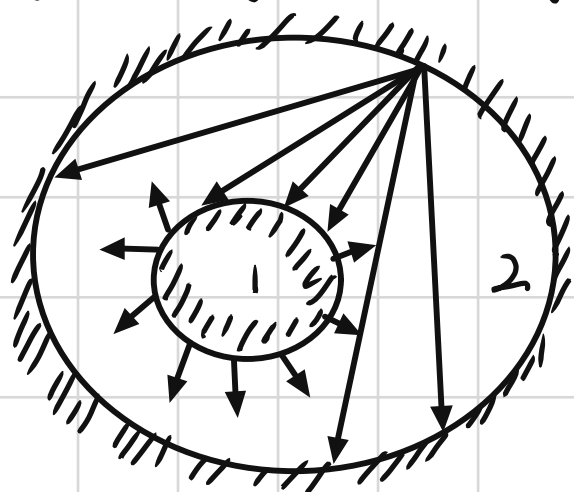
有效辐射 J { 单位时间内离开表面的单位表面积上的总辐射能
单位: W/m^2

$$\Phi_{1,2} = A_1 J_1 X_{1,2} - A_2 J_2 X_{2,1}$$

$$J = E + \rho G = \epsilon E_b + \rho G \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{外: } q_1 = J_1 - G_1 \\ \text{内: } q_1 = \epsilon_1 E_{b1} - \alpha_1 G_1 \end{array} \right.$$

$$J_1 = E_{b1} - (\frac{1}{\epsilon_1} - 1) q_1 \quad \text{假定 outgoing "+"}$$

两漫灰表面组成的封闭腔:



$$\begin{aligned} \Phi_{1,2} &= A_1 J_1 X_{1,2} - A_2 J_2 X_{2,1} \\ J &= E_b - \left(\frac{1}{\epsilon} - 1\right) q \end{aligned} \Rightarrow \begin{cases} \Phi_{1,2} = A_1 q_1 \\ \Phi_{2,1} = A_2 q_2 \\ \Phi_{1,2} = -\Phi_{2,1} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{1,2} &= \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \\ &= \frac{A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2})}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) X_{1,2} + 1 + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) X_{2,1}} \\ &= \frac{1}{\underbrace{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) X_{1,2} + 1 + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right) X_{2,1}}}_{\text{系统黑度/系统发射率 } \epsilon_s}} A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) \end{aligned}$$

$$= \epsilon_s A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2})$$

$$\epsilon_s = \begin{cases} \text{① 表面1为凸面或平面 (全反射, } X_{1,2}=1) \\ \epsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)} \\ \text{② 表面积 } A_1 \text{ 与 } A_2 \text{ 相当且无限靠近 } \left(\frac{A_1}{A_2} \rightarrow 1\right) \\ \epsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \\ \text{③ 表面积 } A_2 \text{ 比表面积 } A_1 \text{ 大得多, 且1为非凹表面 } \left(\frac{A_1}{A_2} \rightarrow 0, X_{1,2}=1\right) \\ \epsilon_s = \frac{1}{\epsilon_1} = \epsilon_1 \end{cases}$$

9.3 多表面系统的辐射传热

两表面封闭系统的辐射网络

$$\Phi_{1,2} = A_1 J_1 X_{1,2} - A_2 J_2 X_{2,1}$$

$$= \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

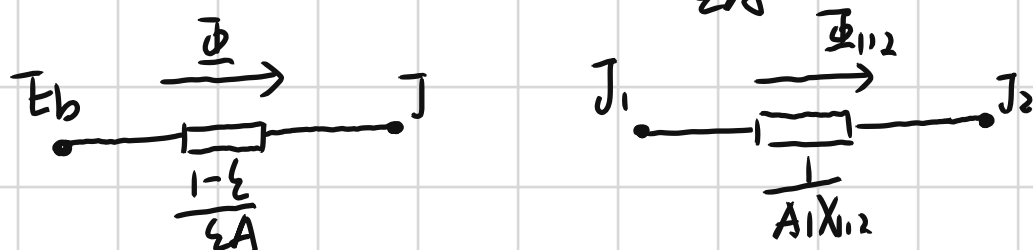
炉膛水冷壁管角系数的确定

$$X = 1 + \frac{d}{s} \arccos\left(\frac{d}{s}\right) - \left[1 - \left(\frac{d}{s}\right)^2\right]^{1/2}$$

(第九章例9-10)

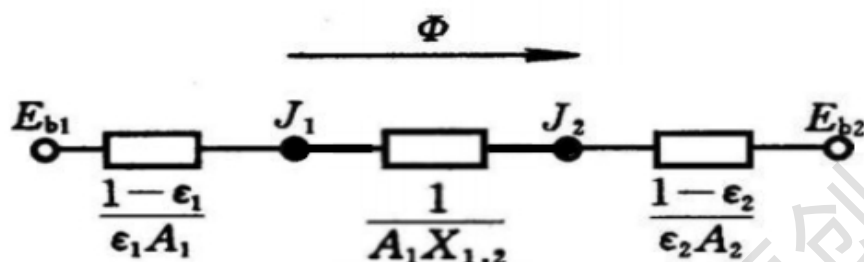
$$\Phi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (J_1 - J_2) = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}}$$

$$J = E_b - (1 - \epsilon) q \quad \left\{ \begin{array}{l} q = \frac{E_b - J}{\frac{1 - \epsilon}{\epsilon}} \\ \Phi = \frac{E_b - J}{\frac{1 - \epsilon}{\epsilon A}} \end{array} \right.$$



表面辐射热阻 $R = \frac{1 - \epsilon}{\epsilon A}$ 空间辐射热阻 $R = \frac{1}{A_1 X_{1,2}}$

两漫灰表面封闭系统辐射网络图。

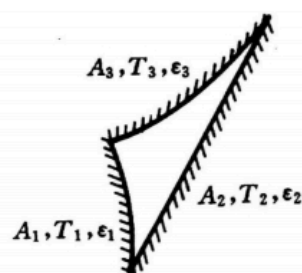
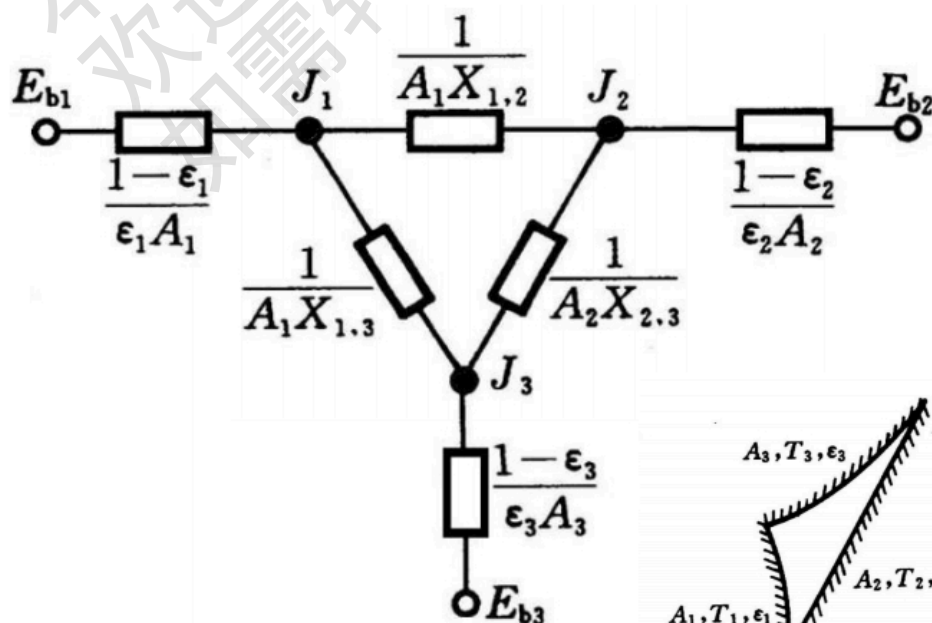


$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

两表面封闭系统的辐射网络

表面净辐射传热量: $\bar{q} = \frac{E_b - J}{\frac{1 - \epsilon}{\epsilon A}}$

两表面之间的辐射传热量: $\Phi_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}}$



建立等效网络图。

节点电流方程

$$\textcircled{1} \text{ 节点 } J_1: \frac{E_{b1}-J_1}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} + \frac{J_2-J_1}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} + \frac{J_3-J_1}{\frac{1}{A_1 X_{1,3}}} = 0$$

$$\textcircled{2} \text{ 节点 } J_2: \frac{E_{b2}-J_2}{\frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} + \frac{J_1-J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} + \frac{J_3-J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,3}}} = 0$$

$$\textcircled{3} \text{ 节点 } J_3: \frac{E_{b3}-J_3}{\frac{1-\epsilon_3}{\epsilon_3 A_3}} + \frac{J_1-J_3}{\frac{1}{A_1 X_{1,3}}} + \frac{J_2-J_3}{\frac{1}{A_2 X_{2,3}}} = 0$$

特殊情况

- ① 有一个表面为黑体, 黑体表面辐射热阻为0
- ② 有一个表面是辐射绝热的, $J = E_b$

几点说明:

- ① 表面数目的确定应以热边界条件为依据, 而不是根据几何形状而定
- ② 封闭系统中某一表面可能是虚构的, 环境常常可以认作一个虚构表面且常常认为是黑体
- ③ 重辐射面虽然其自身净辐射热流量为0, 但它对整个系统中其他表面的辐射传热有很大影响

9.4 气体辐射

不同种类的气体的辐射和吸收能力不同:

- ① 单原子气体 (Ar, He), 空气, 结构对称的双原子气体 (O_2, N_2) 没有辐射和吸收能力
- ② 多原子气体和结构不对称的双原子气体有相当的辐射本领

气体辐射对波长有强烈的选择性:

每一种气体只有在一定的波长范围内才有辐射和吸收能力

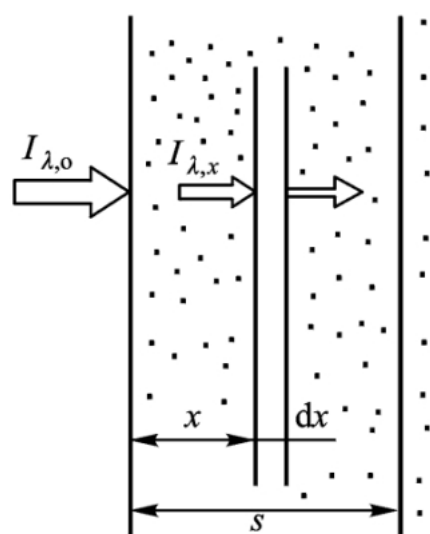
气体的辐射和吸收是在整个容积中进行的

研究气体辐射

- 发射率
- 吸收比

必须说明气体容积的形状和大小

气体辐射定律



Beer 定律

$$\frac{dI_{\lambda,x}}{I_{\lambda,x}} \propto dx$$

沿途被吸收而衰减
定向辐射强度
研究厚度为 dx 的气体薄层

$$\frac{dI_{\lambda,x}}{I_{\lambda,x}} = -k_{\lambda} dx$$

k_{λ} 为光谱减弱系数
与气体种类、密度有关
与参与辐射的波长有关

$$\int_{I_{\lambda,0}}^{I_{\lambda,s}} \frac{dI_{\lambda,x}}{I_{\lambda,x}} = - \int_0^s k_{\lambda} dx$$

$$\Rightarrow I_{\lambda,s} = I_{\lambda,0} e^{-k_{\lambda}s}$$

s 是辐射通过的路程长度, 常称之为射线程长
定向辐射强度在吸收性气体中传播时常呈指数规律衰减

气体辐射的光谱穿透比:

$$I_{\lambda,s} = I_{\lambda,0} e^{-k_{\lambda}s}$$

$$\frac{I_{\lambda,s}}{I_{\lambda,0}} = e^{-k_{\lambda}s}$$

$$\tau(\lambda,s) = e^{-k_{\lambda}s}$$

气体辐射的光谱吸收比和光谱发射率

$$\tau(\lambda,s) = e^{-k_{\lambda}s}$$

$$\alpha(\lambda,s) = 1 - \tau(\lambda,s) = 1 - e^{-k_{\lambda}s}$$

$$\epsilon(\lambda,s) = \alpha(\lambda,s) = 1 - e^{-k_{\lambda}s}$$

$$\epsilon(\lambda,s) = \alpha(\lambda,s) \xrightarrow{s \rightarrow \infty} 1$$

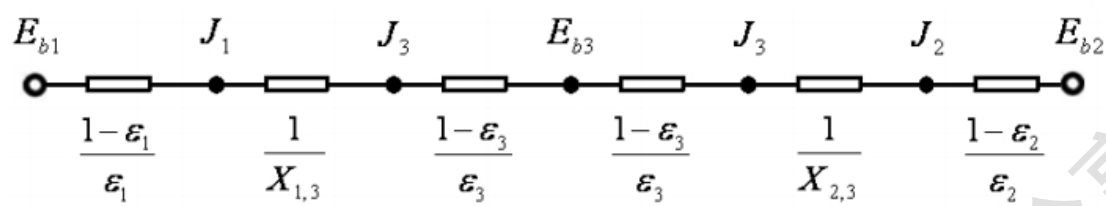
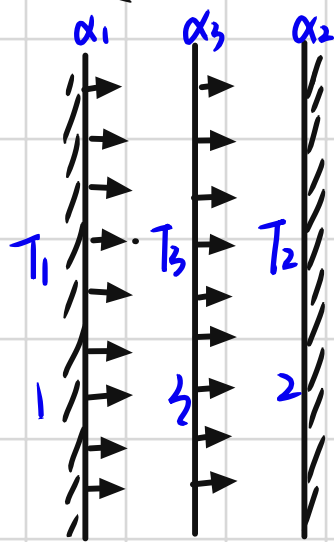
平均射线程长: $S = 3.6 \frac{V}{A}$

9.5 辐射传热的强化与削弱.

措施和方法:

- ① 改变换热表面的发射率或吸收比
- ② 改变换热表面间的角系数
- ③ 利用遮热板

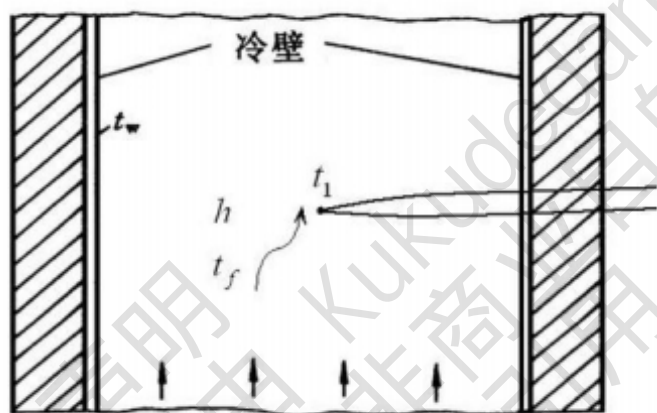
遮热板的工作原理:



$$q'_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} + \frac{2}{\epsilon_3} - 2}, \quad \text{假定 } \epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$$

$$\text{则 } q'_{1,2} = \frac{1}{n+1} q'_{1,2}, \quad \text{插入 } n \text{ 块时, } q'_{1,2} = \frac{1}{n+1} q'_{1,2}$$

遮热罩抽气式热电偶



$$hA_1(t_g - t_1) = \frac{E_{b1} - E_{bw}}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1X_{1,w}} + \frac{1-\epsilon_w}{A_w\epsilon_w}}$$

$$h(t_g - t_1) = \epsilon_1(E_{b1} - E_{bw})$$

$$t_1 = t_g - \frac{\epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_w^4)}{h}$$

$$t_g = t_1 + \frac{\epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_w^4)}{h}$$

$$t_g - t_1 = \frac{\epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_w^4)}{h}, \quad T_w \uparrow \text{ or } h \uparrow$$