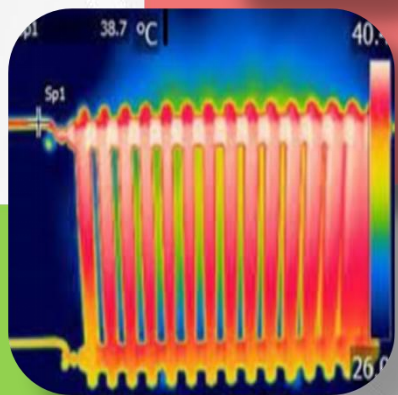




传热学

辐射传热IV

授课老师：苗雨



目录

CONTENTS



華東理工大學

01

课前回顾及
导引

02

两表面封闭
和多表面系
统辐射传热

03

辐射传热的
强化与削弱

01

课前回顾及导引

课前回顾及导引

1 判断题：两表面之间的辐射换热量与两个表面之间的相对位置有很大关系 对

2 角系数的三个性质？ 相对性、完整性、可加性

3 有限大小表面角系数相对性的表达式？ $X_{d1,d2}A_1 = X_{d2,d1}A_2$

4 角系数完整性的表达式？
$$X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + \dots + X_{1,n} = \sum_{i=1}^n X_{1,i} = 1$$

5 非凹表面的角系数等于多少？ 0

6 以下哪个角系数可加性的表达式是正确的？

A $X_{1,2} = X_{1A,2} + X_{1B,2}$

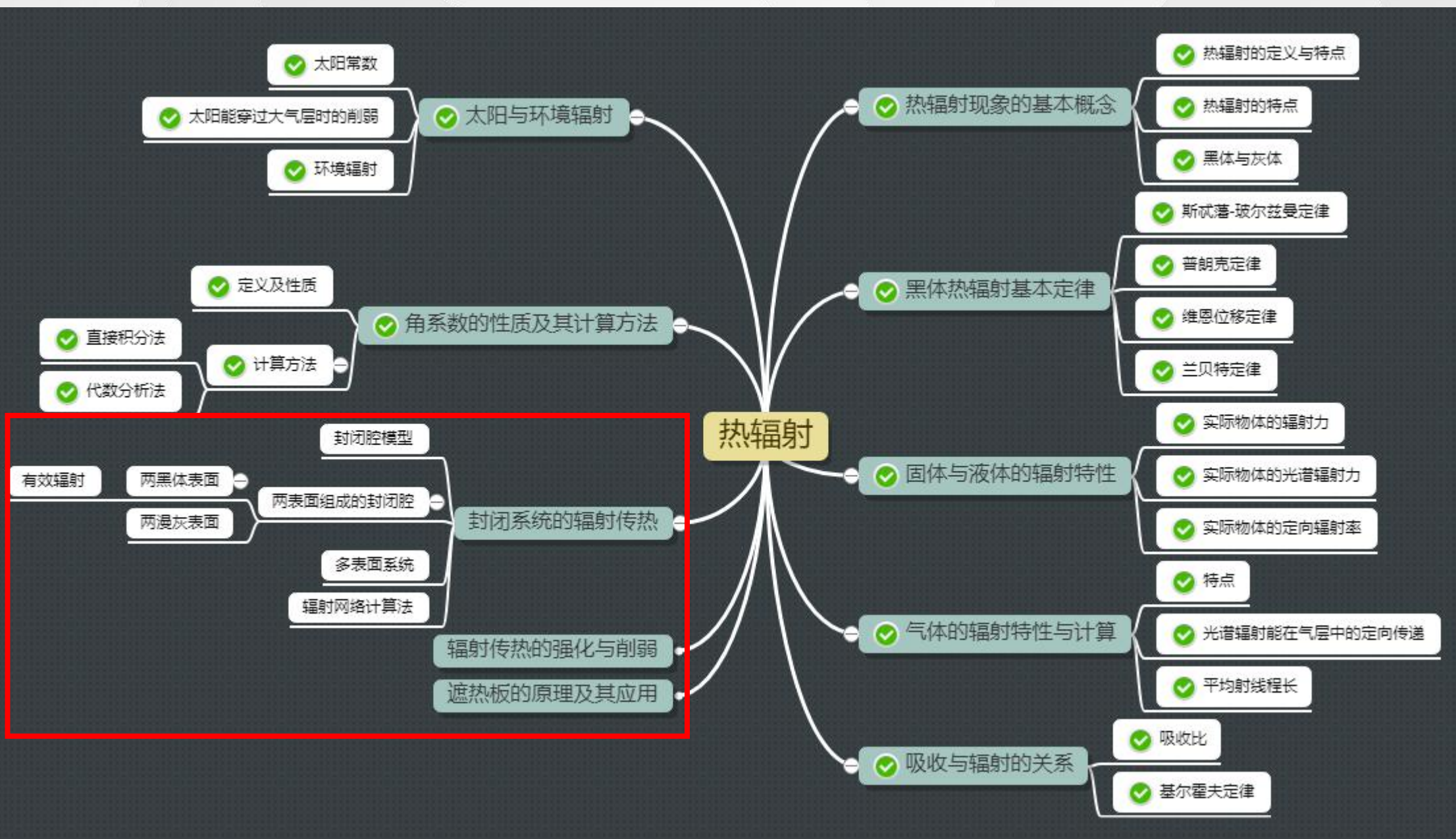
B $X_{1,2} = X_{1,2A} + X_{1,2B}$

B

7 角系数的两种计算方法？ 直接积分法、代数分析法

8 对于在一个方向上长度无限延伸的多个表面组成的系统，可以使用什么方法计算角系数？ 交叉线法

课前回顾及导引



02

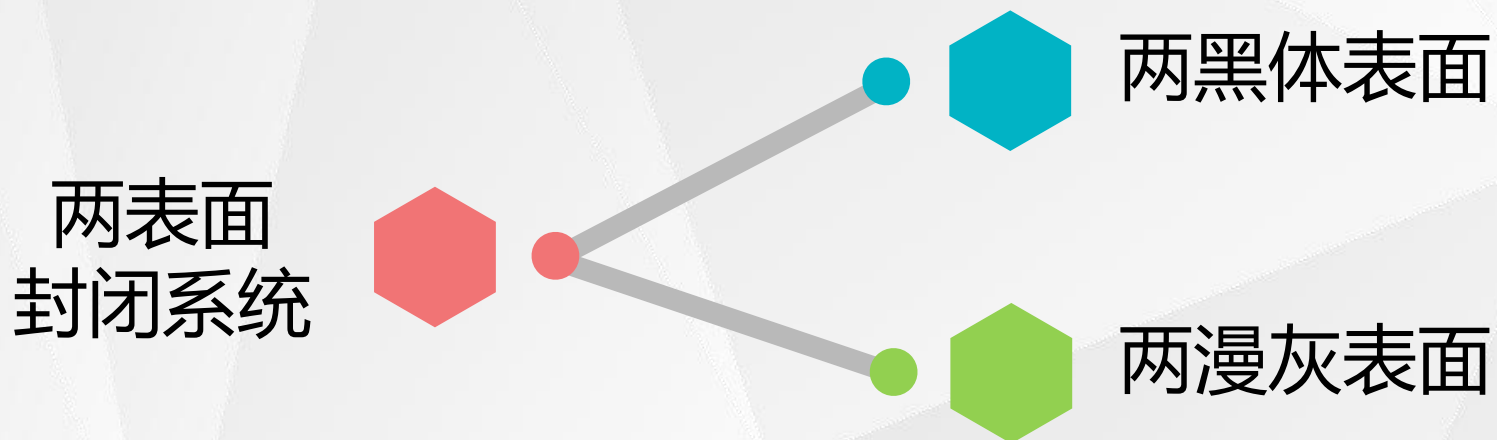
两表面封闭和多表面系统的辐射传热

- 两表面封闭系统的辐射传热
- 多表面系统的辐射传热



两表面封闭系统的辐射传热

当要计算一个表面通过热辐射与外界的净换热量时，计算对象必须是包含研究表面在内的一个**封闭腔**，这个封闭腔可以是真实的，也可以部分是虚构的



表面1发出的热辐射
到达表面2的部分

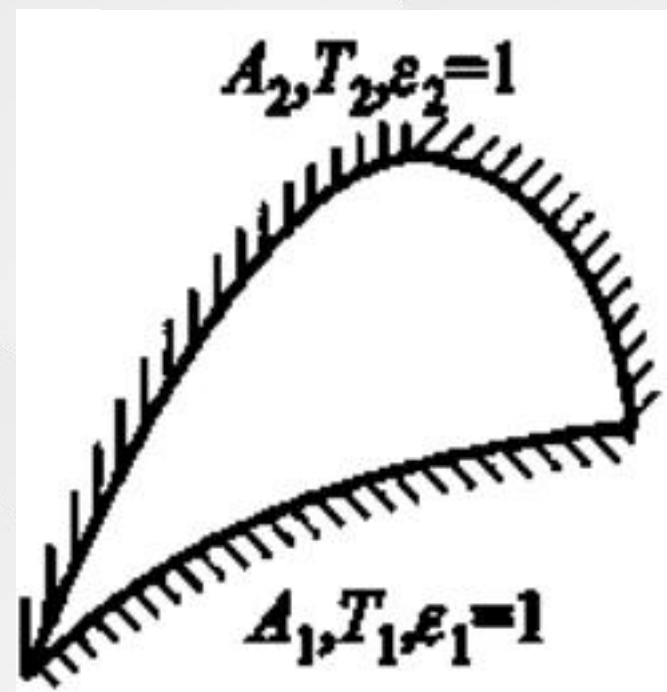
表面2发出的热辐射
到达表面1的部分

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

角系数的相对性

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

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





两表面封闭系统的辐射传热



两漫灰表面

情况复杂得多：

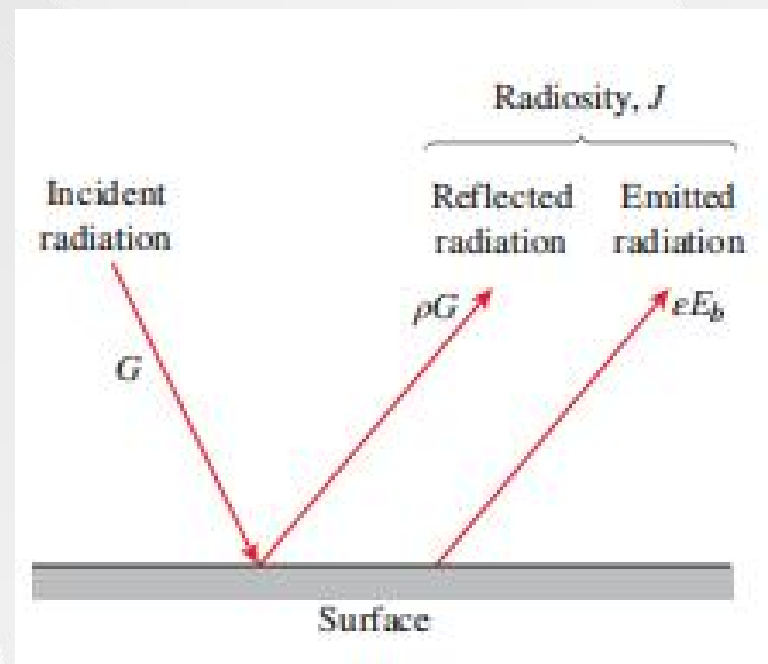
- 灰体表面的吸收比小于1，投入到灰体表面上的辐射能要经过多次反射
- 由一个灰体表面向外发射出去的辐射能除了其自身的辐射（自身辐射）外还包括被反射的辐射能在内

投入辐射G：单位时间内投入到单位表面积上的总辐射能 (W/m^2)

被表面1吸收
被表面1反射

有效辐射J：单位时间内离开单位表面积的总辐射能 (W/m^2)

自身辐射
表面1反射





两表面封闭系统的辐射传热



两漫灰表面

从表面1外部（红色部分）计算的能量收支

$$q = J_1 - G_1$$

从表面1内部（绿色部分）计算的能量收支

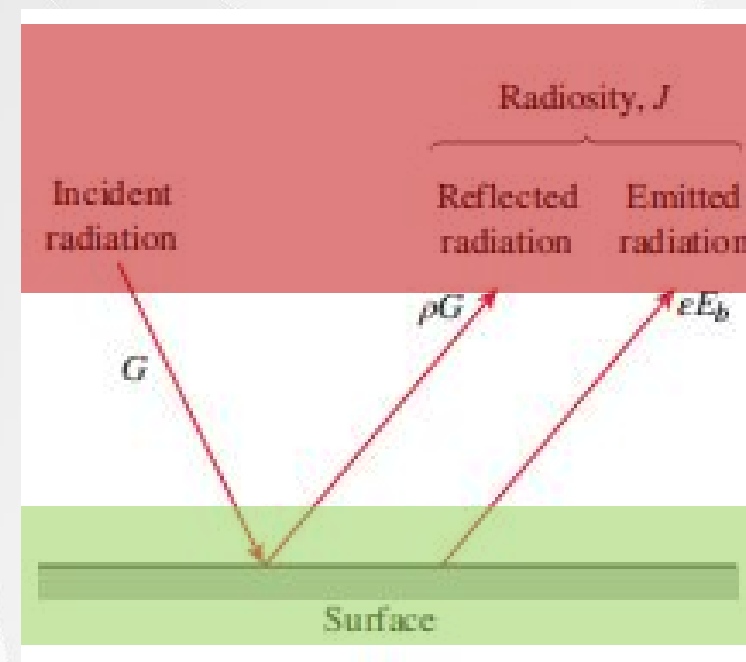
$$q = \varepsilon_1 E_{b1} - \alpha_1 G_1$$

$$J_1 = \frac{\varepsilon_1 E_{b1}}{\alpha_1} - \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} q$$

漫灰表面 $\alpha_1 = \varepsilon_1$

$$J_1 = \frac{\varepsilon_1 E_{b1}}{\varepsilon_1} - \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} q$$

$$J_1 = E_{b1} - \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) q$$





两表面封闭系统的辐射传热



两漫灰表面

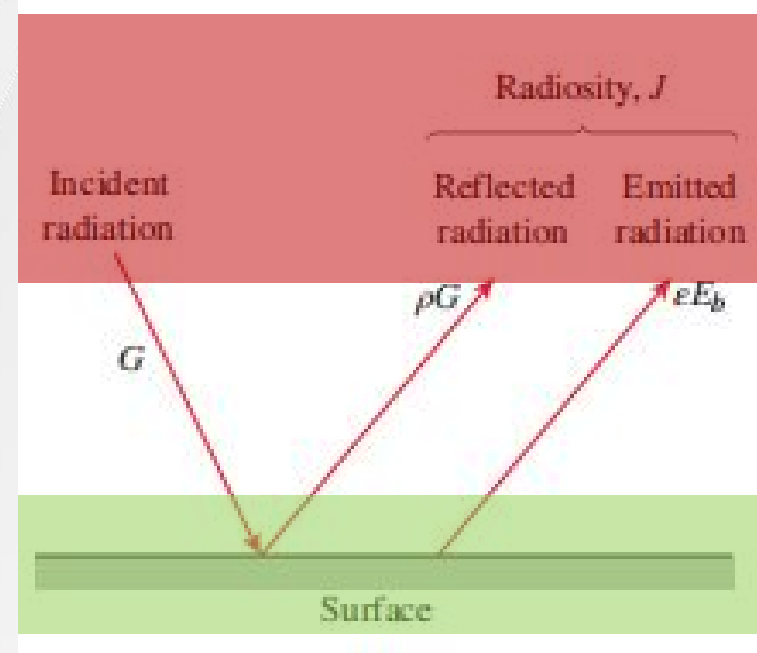
$$J_1 = E_{b1} - \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) q$$

热流密度

$$q = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}}$$

热流量

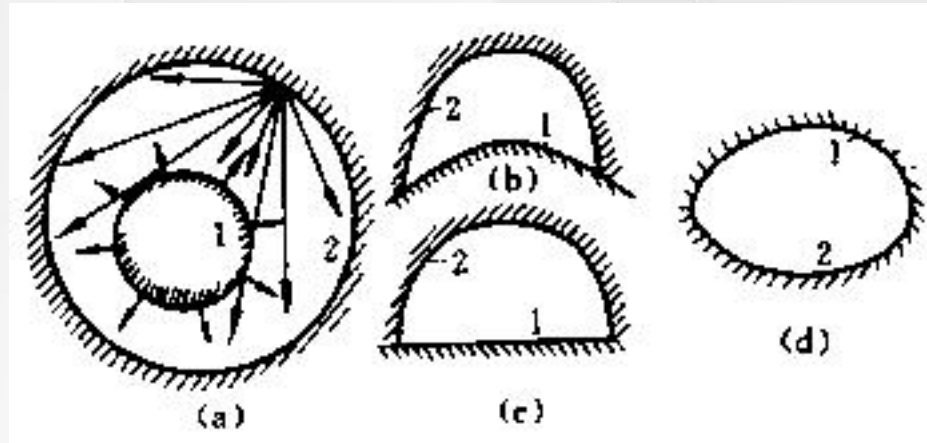
$$\Phi = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A\varepsilon_1}}$$



两表面封闭系统的辐射传热

两漫灰表面组成的**封闭腔**的辐射传热

只需考虑有效辐射



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

$$J = E_b - \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) q \left\{ \begin{array}{l} J_1 A_1 = A_1 E_{b1} - \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \Phi_{1,2} \\ J_2 A_2 = A_2 E_{b2} - \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \Phi_{2,1} \\ \Phi_{1,2} = -\Phi_{2,1} \end{array} \right.$$

角系数的相对性

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

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \\ = \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2} \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \end{array} \right\}$$



两表面封闭系统的辐射传热



两漫灰表面组成的**封闭腔**的辐射传热

$$\begin{aligned}\Phi_{1,2} &= \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2} \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \\&= \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} X_{1,2} + \frac{X_{1,2}}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2} X_{1,2} \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \\&= \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} X_{1,2} + 1 + X_{2,1} \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} = \varepsilon_s A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}\end{aligned}$$

系统发射率（系统黑度）：
考虑由于灰体系统发射率
之值小于1引起的多次吸
收与反射对换热量影响的
因子



两表面封闭系统的辐射传热

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}X_{1,2} + \frac{X_{1,2}}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}X_{1,2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}X_{1,2} + 1 + X_{2,1}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

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

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$



$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{1} + \frac{A_1}{A_2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

$$= \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

$$= \varepsilon_s A_1 (E_{b1} - E_{b2})$$

$$= \varepsilon_s A_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

01

• 表面1为平面
或凸表面



两表面封闭系统的辐射传热

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}X_{1,2} + \frac{X_{1,2}}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}X_{1,2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}X_{1,2} + 1 + X_{2,1}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

$$X_{1,2} = 1, \frac{A_1}{A_2} \rightarrow 1 \quad \Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$



$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{1} + 1\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

$$= \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

$$= \frac{A_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

02

- 表面积 A_1 和 A_2 相差很小, 非凹平面



两表面封闭系统的辐射传热

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}X_{1,2} + \frac{X_{1,2}}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}X_{1,2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})X_{1,2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}X_{1,2} + 1 + X_{2,1}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

$$X_{1,2} = 1, \frac{A_1}{A_2} \rightarrow 0 \quad \Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$



$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{1} + 0\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

- 表面积A2比A1大得多，非凹平面

$$= \varepsilon_1 A_1 (E_{b1} - E_{b2}) = \varepsilon_1 A_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$



多表面系统的辐射传热

辐射传热的网络法：把辐射热阻比拟成等效的电阻并通过等效的网络图求解辐射传热的方法

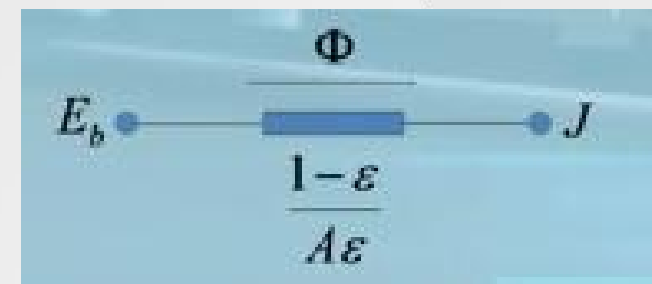
热流密度 $q = \frac{E_b - J}{\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}}$

表面热势差
热流量 $\Phi = \frac{E_b - J}{\frac{1 - \varepsilon}{A\varepsilon}}$
表面辐射热阻

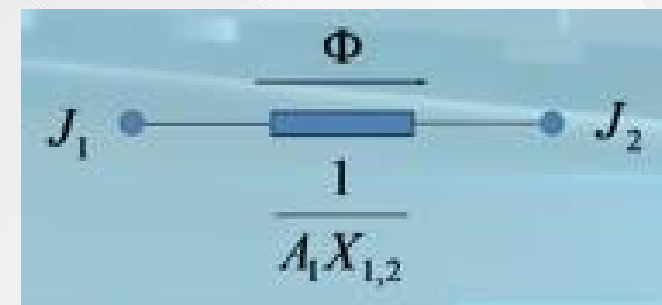
$$\Phi_{1,2} = A_1 J_1 X_{1,2} - A_2 J_2 X_{2,1} = A_1 X_{1,2} (J_1 - J_2)$$



空间热势差
空间辐射热阻 $\Phi_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}}$



每一个表面都有一个表面辐射热阻

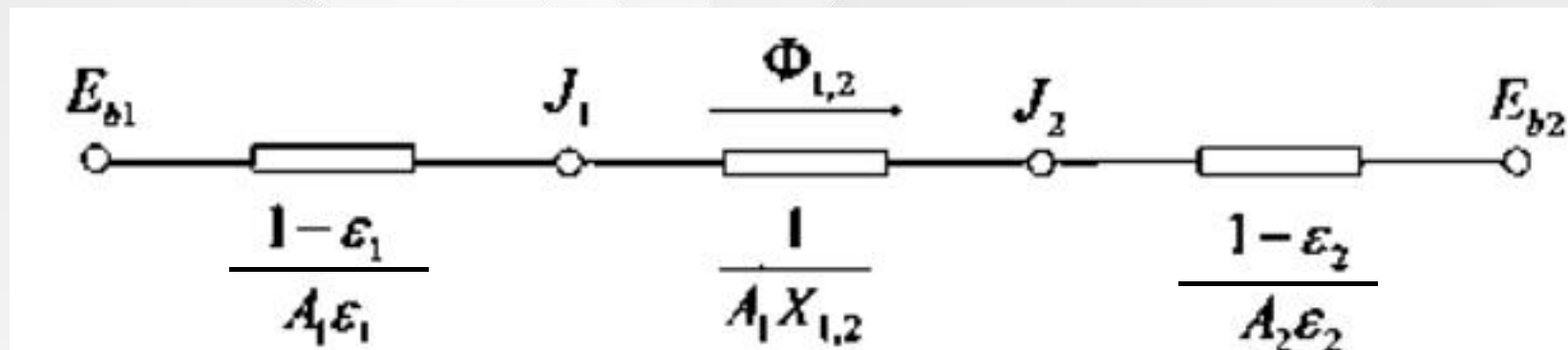
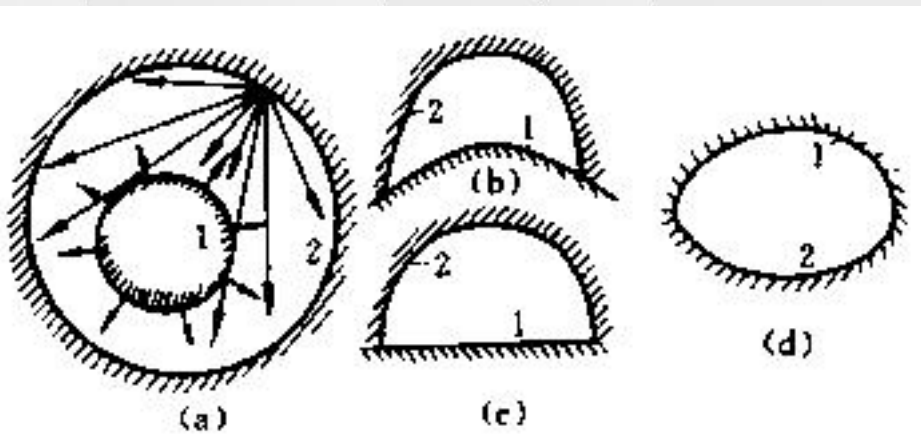


每一对表面都有一个空间辐射热阻



多表面系统的辐射传热

对于两表面的换热系统



$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

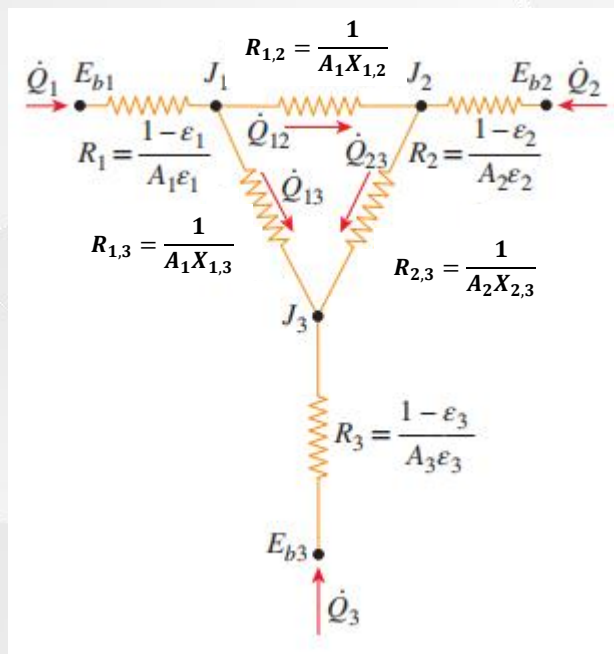
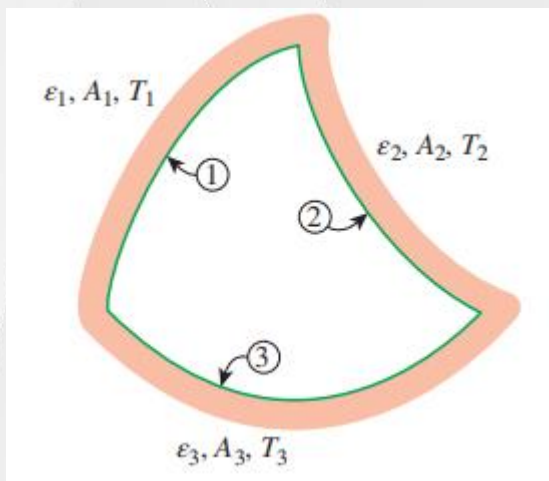
每一个表面都有一个
表面辐射热阻

每一对表面都有一个
空间辐射热阻



多表面系统的辐射传热

对于三表面的换热系统



所有方向流向同一节点的热流之和为零

$$J_1: \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} + \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{A_1 X_{1,3}}} = 0$$

$$J_2: \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} + \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} + \frac{J_3 - J_2}{\frac{1}{A_2 X_{2,3}}} = 0$$

$$J_3: \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}} + \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{A_1 X_{1,3}}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{A_2 X_{2,3}}} = 0$$

每个表面的净辐射传热量 $\Phi_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}} \quad (i = 1, 2, 3 \dots)$



多表面系统的辐射传热

三表面换热系统的两种特殊情形

$$J_3: \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}} + \frac{J_1 - J_3}{A_1 X_{1,3}} + \frac{J_2 - J_3}{A_2 X_{2,3}} = 0$$

- 表面3为黑体

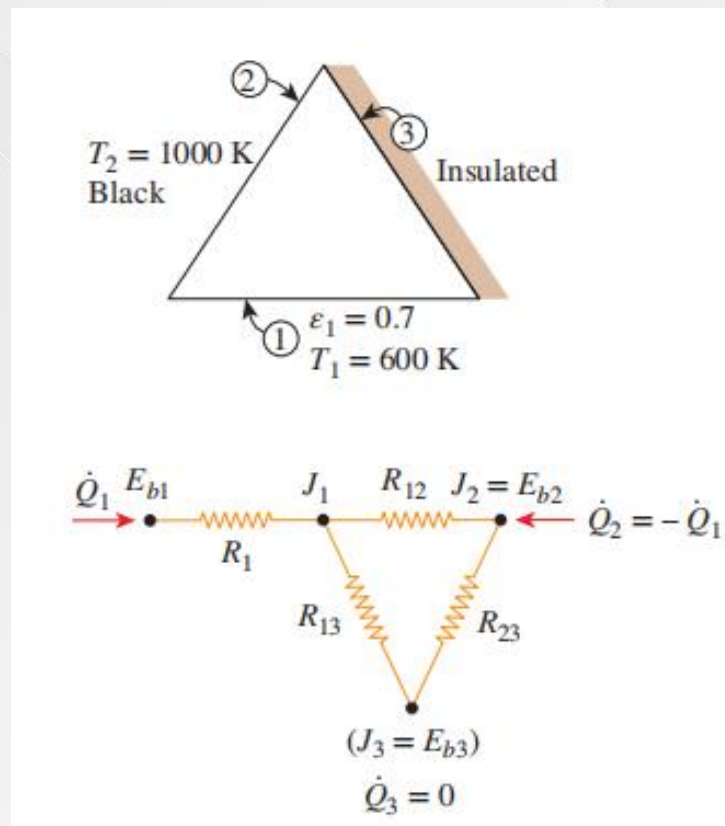
表面3的表面热阻 $\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3} = 0 \Rightarrow J_3 = E_{b3}$

- 表面3绝热 $q = 0$

$$q = \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3}} \Rightarrow J_3 = E_{b3} - \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} q$$

与黑体不同的是，绝热面的温度是未知的。

绝热面仍然吸收和发射辐射，只是发出的和吸收的辐射数值上相等
这种表面温度未知而净辐射换热量为零的表面称为**重辐射面**





多表面系统的辐射传热

辐射传热的网络法的应用步骤



画等效电路图



计算空间热阻和表面热阻



各节点的有效辐射热流方程组



求解方程组，以获得各个节点的有效辐射

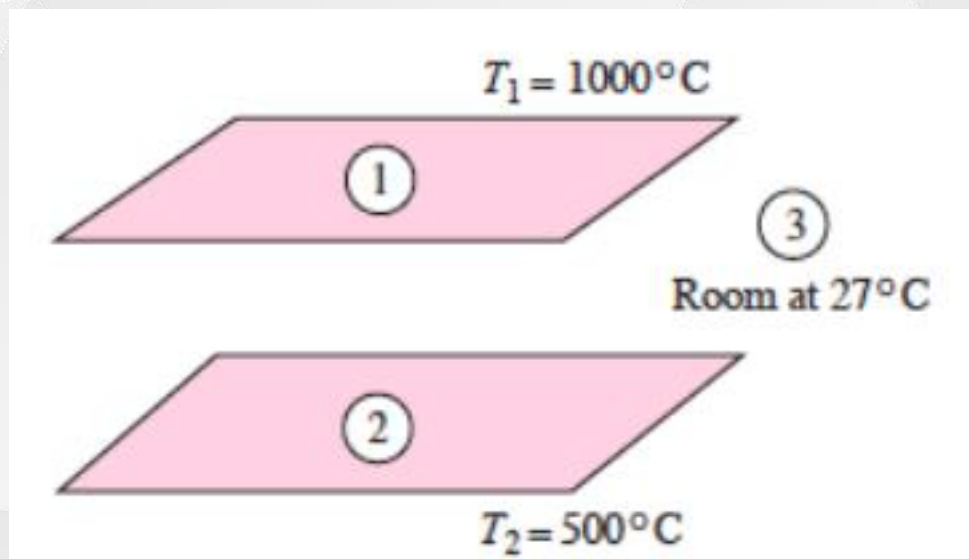


利用公式 $\Phi_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}}$ 计算每个表面的净辐射热流量



两表面封闭和多表面系统的辐射传热

例题1：两平行平板 ($0.5\text{m} \times 1.0\text{m}$)相距距离为 0.5m 。下图中，平板1和平板2的温度分别维持在 1000°C 和 500°C 。两平板的发射率分别为0.2和0.5。两平板置于一个大房间中，室温 27°C 。只考虑相对平面的换热。求两个平面相互之间的换热量和与房间的换热量。已知两平板间的角系数为0.285。

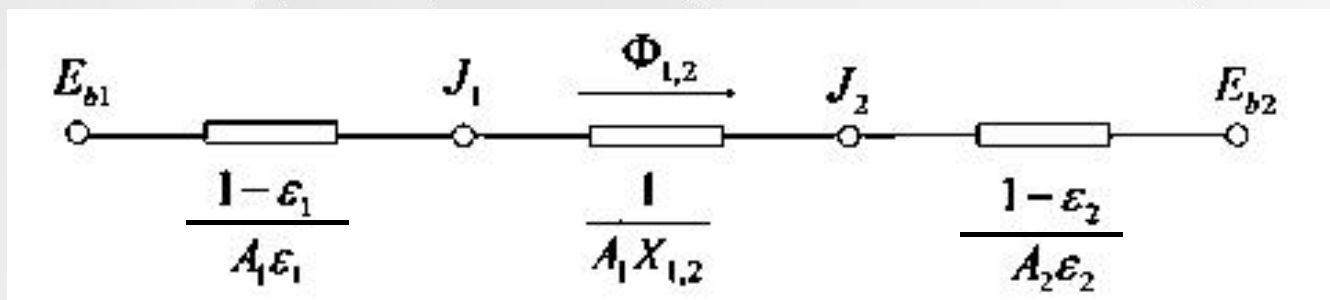


03

辐射传热的强化与削弱

- 表面热阻和空间热阻的控制
- 遮热板的原理

表面热阻和空间热阻的控制



强化或削弱
辐射传热

控制表面热阻

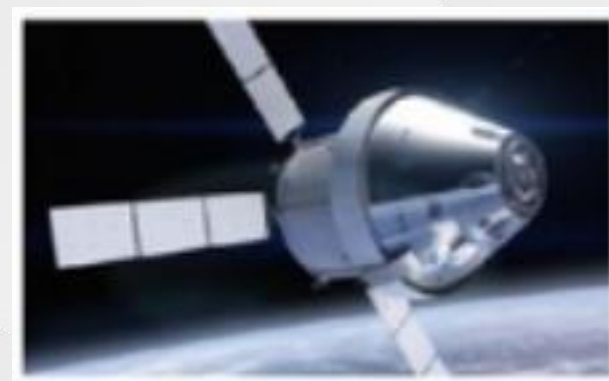
$$r_{\text{表面}} = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon A}$$

改变传热表面发射率或吸收比

控制空间热阻

$$r_{\text{空间}} = \frac{1}{AX_{i,j}}$$

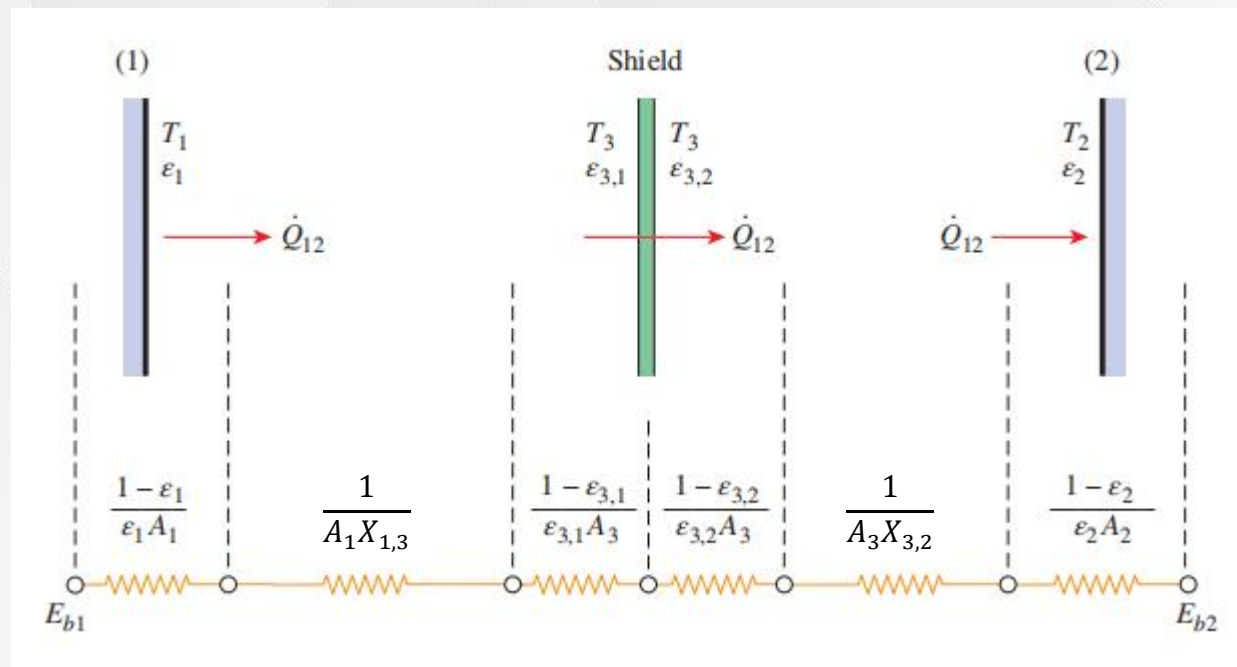
改变传热表面间角系数





遮热板的原理

遮热板是指插入两个辐射传热表面之间用以削弱辐射传热的薄板



$$\Phi_{1,2,N \text{ shield}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{3,2}} - 1\right) + \dots + \left(\frac{1}{\varepsilon_{N,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{N,2}} - 1\right)}$$

$$\Phi_{1,2,\text{no shield}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

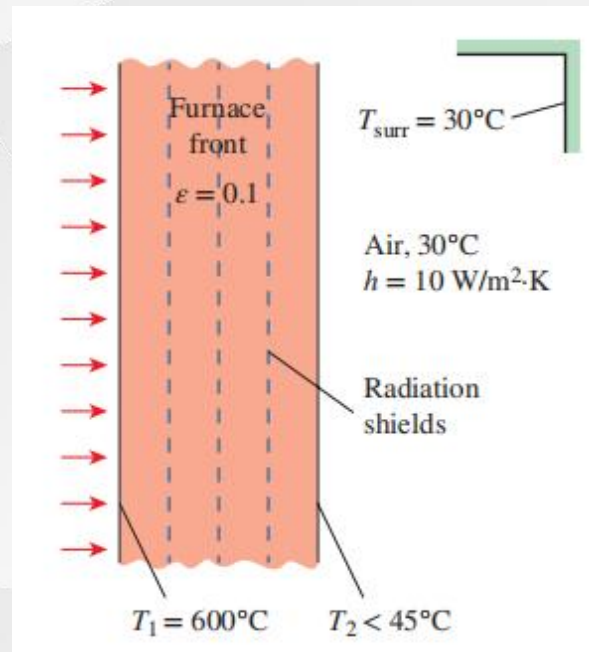
$$\Phi_{1,2,\text{one shield}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon_1}{A_1\varepsilon_1} + \frac{1}{A_1X_{1,3}} + \frac{1-\varepsilon_{3,1}}{A_3\varepsilon_{3,1}} + \frac{1-\varepsilon_{3,2}}{A_3\varepsilon_{3,2}} + \frac{1}{A_1X_{3,2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{A_2\varepsilon_2}}$$

$$X_{1,3} = X_{3,2} = 1 \quad A_1 = A_2 = A_3 = A$$

$$\Phi_{1,2,\text{one shield}} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1}{\varepsilon_{3,2}} - 1\right)}$$

遮热板的原理

例题2：如图所示，现有一个电加热炉，周围空气温度为 30°C ，平均对流传热系数为 $10\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。对流和辐射热传递发生在熔炉外表面和周围环境之间。炉的前表面由两块平行的板组成，其中内板的温度为 600°C 。为了确保安全并防止对炉周围工作人员的热烧伤，炉的外表面应保持在 45°C 以下。根据以上信息，确定应平行放置在内板和外表面之间的辐射防护罩的数量。假设所有表面都具有相同的发射率 0.1 。





预习小测验答案

1.(多选题, 1分)

以下关于两表面封闭系统的辐射传热问题的描述, 正确的是?

- A. 两表面封闭系统的封闭腔必须是真实的, 不可以有虚构部分
- B. 当要计算一个表面通过热辐射与外界的净换热量时, 计算对象必须是包含研究表面在内的一个封闭腔
- C. 两表面可以是两黑体表面, 也可以是两漫灰表面
- D. 由一个灰体表面向外发射出去的辐射能除了其自身的辐射外还包括被反射的辐射在内

答案: BCD

2.(多选题, 1分)

以下关于多表面系统的辐射传热的描述正确的是?

- A. 求解多表面系统的辐射传热问题可以使用辐射传热的网络法
- B. 对于多表面的换热系统, 所有方向流向同一节点的热流之和为1
- C. 辐射传热的网络法是把辐射热阻比拟成等效的电阻并通过等效的网络图求解辐射传热的方法
- D. 对于多表面的换热系统, 每一个表面都有一个表面辐射热阻, 每一对表面都有一个空间辐射热阻

答案: ACD

3.(多选题, 1分)

以下哪些方法可以强化辐射传热?

- A. 增大传热表面发射率或吸收比
- B. 增大辐射表面积
- C. 提高温度
- D. 增大传热表面间角系数

答案: ABD