

第三节 辐射换热

2.2.1 对流换热基本概念

1. 对流传热与对流换热

对流传热：在流体内部依靠流体的宏观位移将热量从高温处传向低温处

对流换热：流体与固体之间接触时彼此之间的换热过程。

2. 对流换热与对流传热的区别

传热的方式不同：对流换热包括流体位移时的对流传热，也包括传导

第三节 辐射换热

第二章 传热原理

2.3.1 辐射传热的基本概念

1. 热辐射特点

(1) **定义**：由热运动产生的，以电磁波形式传递的能量；

(2) **特点**：

- a 任何物体，只要温度高于0 K，就会不停地向周围空间发出热辐射；
- b 可以在真空中传播；
- c 伴随能量形式的转变；
- d 具有强烈的方向性；
- e 辐射能与温度和波长均有关；
- f 发射辐射取决于温度的4次方。

第三节 辐射换热

2. 电磁波谱

电磁辐射包含了多种形式，而我们所感兴趣的，即工业上有实际意义的热辐射区域一般为 $0.1 \sim 100 \mu m$ 。

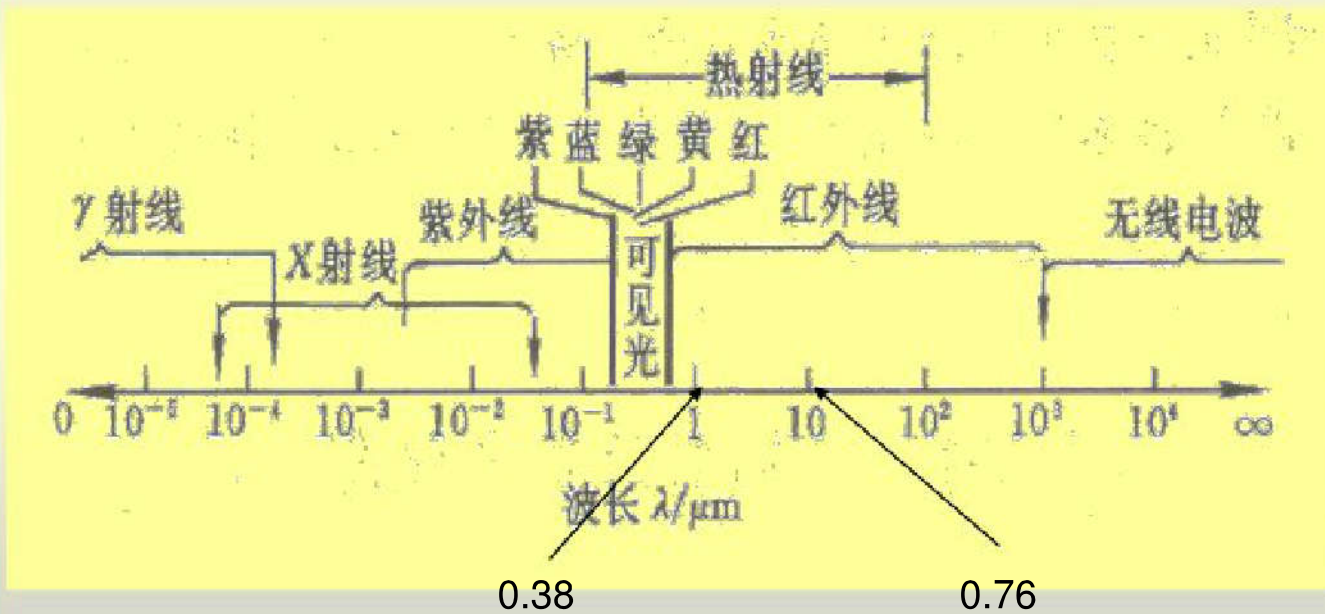
电磁波的传播速度：

$$c = f\lambda$$

式中： f —频率， s^{-1} ； λ —波长， μm

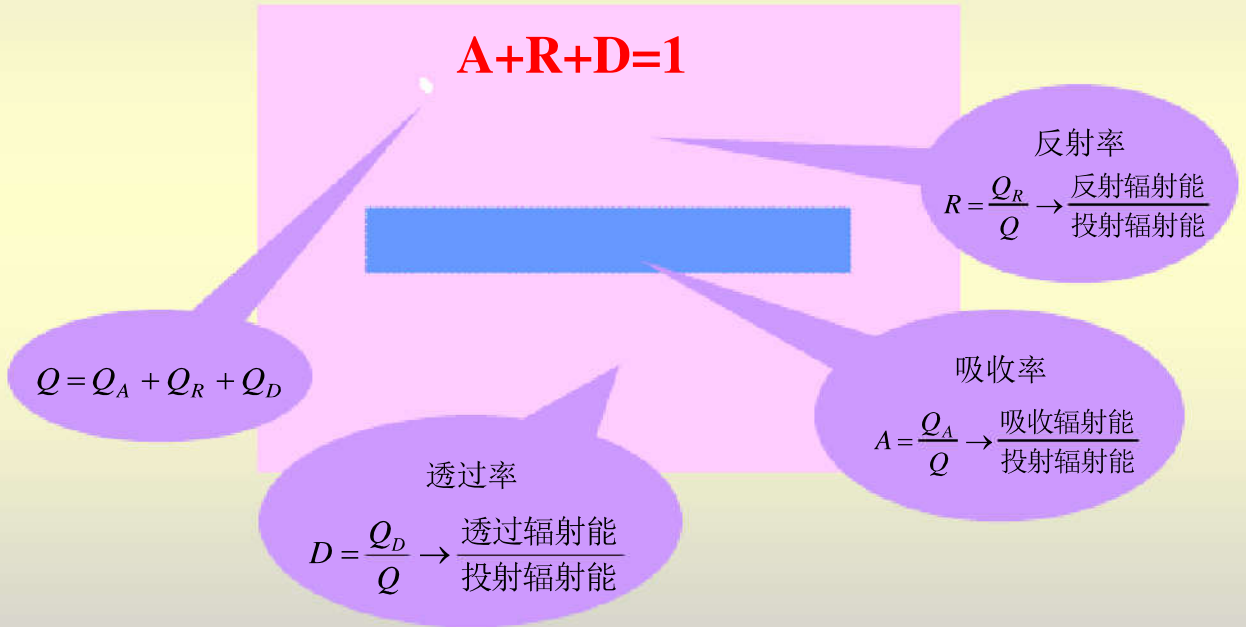
第三节 辐射换热

电磁辐射波谱



第三节 辐射换热

3. 吸收、反射和透过



第三节 辐射换热

第二章 传热原理

几种特殊情况



对于大多数工程材料: $A+R=1$

对于不含颗粒的气体: $A+D=1$

第三节 辐射换热

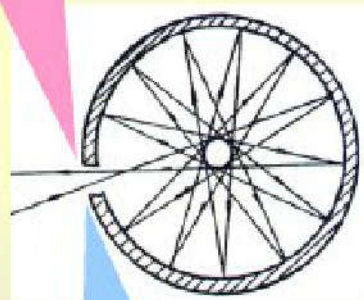
第二章 传热原理

4. 黑体辐射模型

1). 黑体概念

黑体：是指能吸收投入到其面上的所有热辐射能的物体，是一种科学假想的物体，现实生活中是不存在的。但却可以人工制造出近似的人工黑体。

在空心体的壁面上所开的小孔具有黑体的性质



小孔尺寸愈小愈接近黑体

第三节 辐射换热

2.3.2 热辐射的基本定律

2.3.2.1 Planck辐射定律 (第一个定律)

(1) 辐射能力和辐射强度

辐射能力

物体每单位表面积，在单位时间内向半球空间辐射出去的波长从 $0\sim\infty$ 范围内的总能量

符号：“E”
单位： W/m^2

单色辐射力

物体每单位表面积，在单位时间内向半球空间辐射出去的波长从 $\lambda\sim d\lambda$ 范围内的辐射能力为 dE ， dE 与波长间隔的比值

符号：“ E_λ ”

第三节 辐射换热

第二章 传热原理

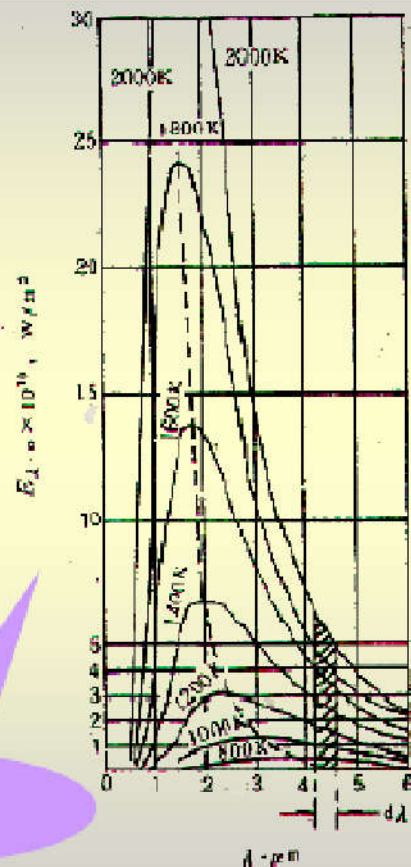
黑体:

$$E_{\lambda,0} = \frac{dE_0}{d\lambda} \quad \rightarrow \quad E = \int_0^{\infty} E_{\lambda,0} d\lambda$$

(2) 普朗克辐射定律

$$E_{\lambda,0} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

$\lambda \sim E_{\lambda}$ 曲线



第三节 辐射换热

第二章 传热原理

对 $\lambda \sim E_\lambda$ 曲线的讨论:

(1) 某一波长的单色辐射能力随温度升高而增大;

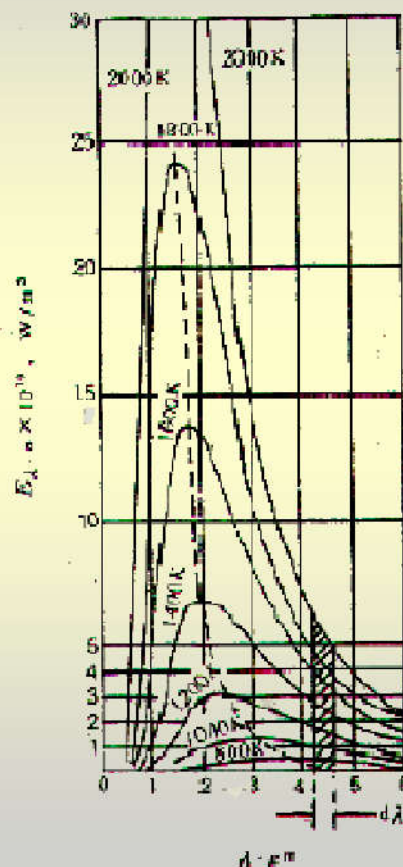
(2) 在某一温度下, 其辐射辐射能力随波长而变化:

$$\lambda=0, E_{\lambda, 0}=0; \lambda \uparrow, E_{\lambda, 0} \uparrow;$$

$$\text{达到最高值后, } \lambda \uparrow, E_{\lambda, 0} \downarrow.$$

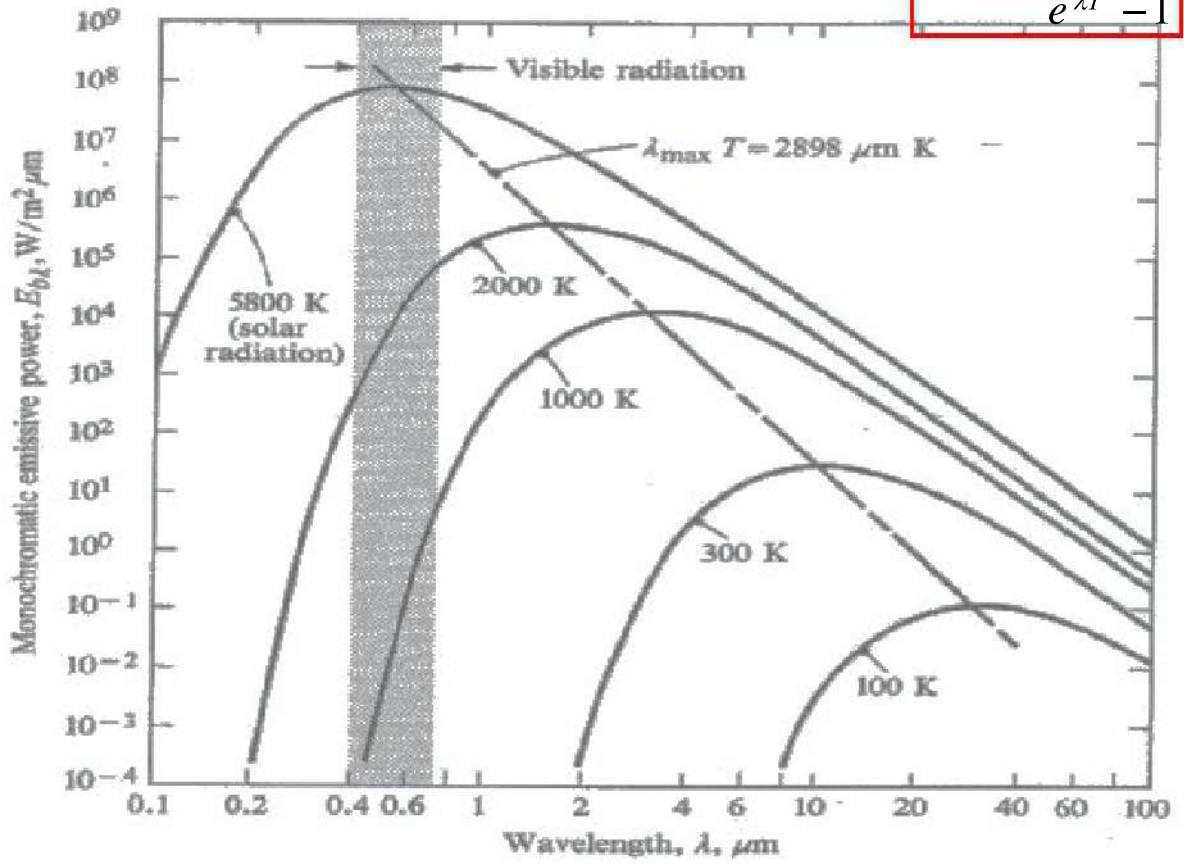
(3) 温度愈高, 最大辐射强度的波长愈短

(4) 温度在2000K以下, 辐射波长大部分在 $0.76 \sim 10 \mu\text{m}$ 的范围内, 可见光比例相当小, 可以忽略。但随温度升高, 可见光比例在不断增加。



第三节 辐射换热

$$E_{\lambda,0} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$



第三节 辐射换热

2.3.2.4 灰体的特性

(1) 黑度与灰体

单色黑度

$$\frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda,0}} = \varepsilon_{\lambda}$$

理想灰体（简称灰体）

$$\frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_1,0}} = \frac{E_{\lambda_2}}{E_{\lambda_2,0}} = \frac{E_{\lambda_3}}{E_{\lambda_3,0}} = \dots = \varepsilon_{\lambda}$$

第三节 辐射换热

黑度 $\frac{E}{E_0} = \varepsilon$ 物体辐射能力与同温度下黑体辐射能力的比值

灰体 $\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda,0}} = \frac{E}{E_0} = \varepsilon$

灰体辐射能力 $E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \left(\frac{T}{100}\right)^4$

第三节 辐射换热

2.3.2.5 Lambert 定律(黑体辐射的第三个基本定律)

(1) 方向辐射力

表面 dF_1 在单位时间内，单位面积与表面法线方向呈 φ 角的P方向上，单位立体角内发射的能量。

$$E_{\varphi,0} = \frac{dQ_{\varphi 0}}{d\omega dF} \quad [W/m^2 \cdot sr]$$

(2) 辐射强度

表面 dF_1 在单位时间内，与辐射方向相垂直的单位面积上，单位立体角内发射的能量。

$$I_{\varphi,0} = \frac{dQ_{\varphi 0}}{d\omega dF \cos \varphi} \quad [W/m^2 \cdot sr]$$

第三节 辐射换热

对于黑体，在半球面空间内各个方向上的辐射强度为定值

$$E_{n0} = I_{\varphi 0} = I_0$$

$$E_{\varphi 0} = E_{n0} \cos \varphi$$

微元黑表面在半球空间内的总辐射力 E_0

$$E_0 = \int_0^{2\pi} E_{\varphi,0} d\omega = \int_0^{2\pi} E_{n0} \cos \varphi d\omega$$

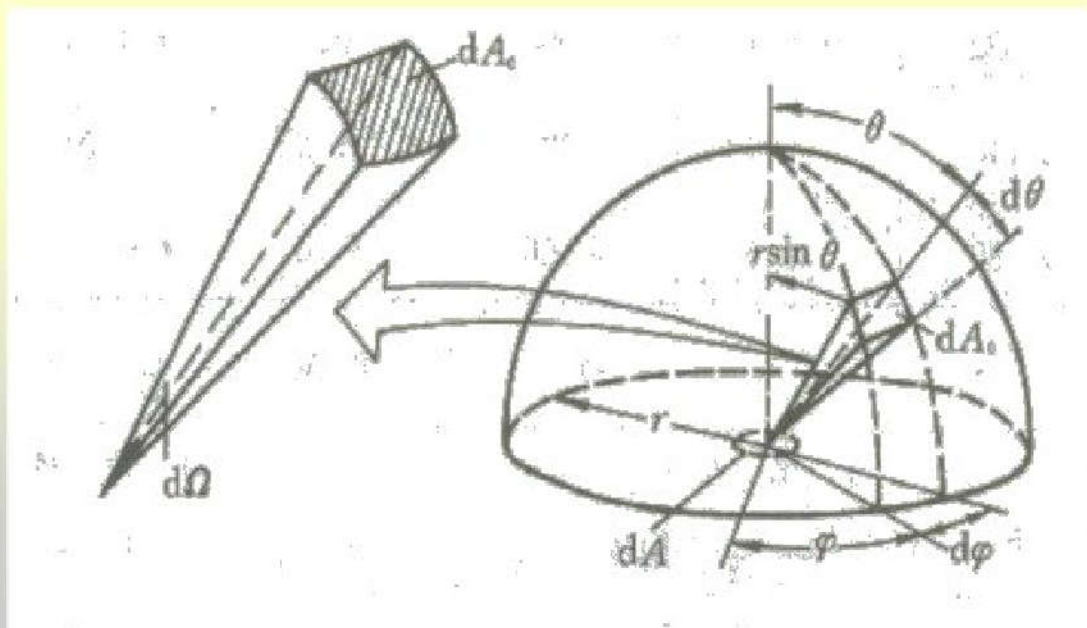
第三节 辐射换热

(3) 立体角

$$E_0 = \int_0^{2\pi} E_{\varphi,0} d\omega = \int_0^{2\pi} E_{n0} \cos \varphi d\omega$$

定义：球面面积除以球半径的平方称为立体角，
单位：sr(球面度)

$$d\omega = \frac{dF_2}{r^2} = \sin \varphi d\varphi d\psi$$



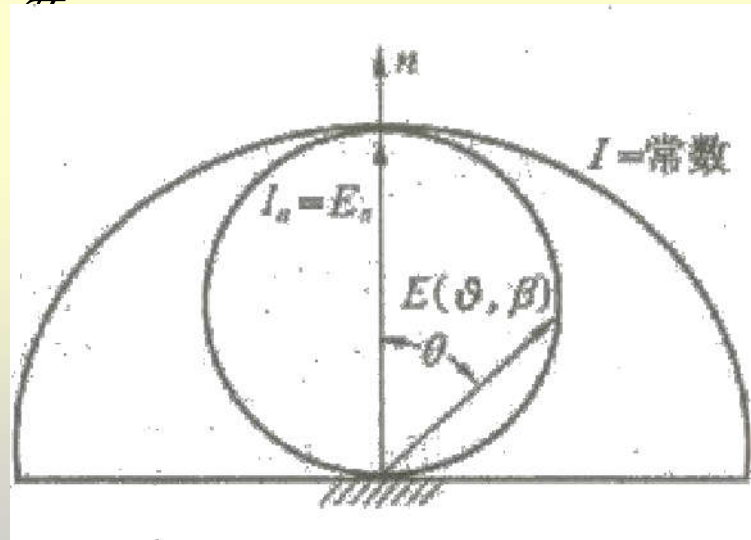
第三节 辐射换热

积分，得到：

$$E_0 = E_{n0} \pi$$

$$E_{n0} = \frac{E_0}{\pi} = I_0$$

$$E_{\varphi 0} = E_{n0} \cos \varphi$$



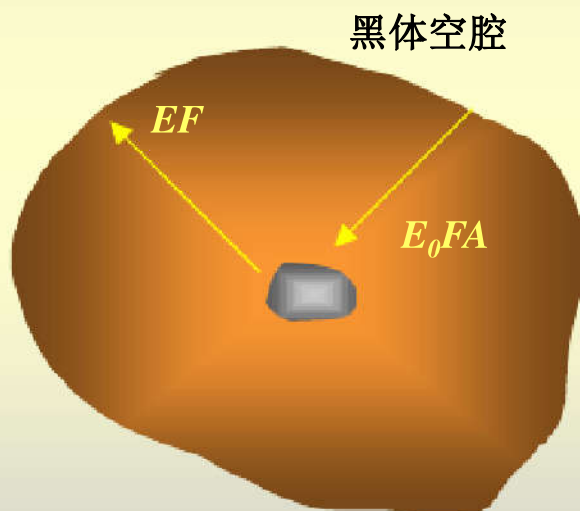
第三节 辐射换热

第二章 传热原理

2.3.2.6 Kirchhoff (基尔霍夫) 定律

当外界的辐射投入到物体表面上时，该物体对投入辐射吸收的情况又是如何呢？

$$\frac{E}{A} = E_0$$



$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \frac{E_4}{A_4} = \dots E_0 = f(T)$$

第三节 辐射换热

基尔霍夫定律另一表达式：

$$\begin{cases} A_1 = \frac{E_1}{E_0} = \varepsilon_1 \\ A_2 = \frac{E_2}{E_0} = \varepsilon_2 \\ \dots\dots\dots \\ A_i = \frac{E_i}{E_0} = \varepsilon_i \end{cases}$$

任何物体的吸收率等于同温度下的黑度

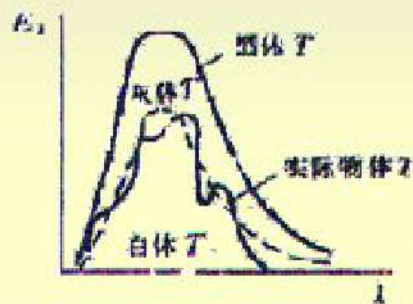
即：

$A = \varepsilon$ \longrightarrow 基尔霍夫恒等式

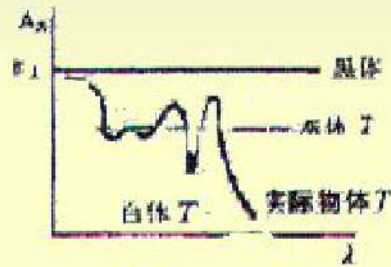
第三节 辐射换热

●单色吸收率

物体对某种波长辐射能的吸收率称为单色吸收率，用 A_λ 表示



(a)



(b)

黑体的 A_λ 不随波长变化而变化，且等于1；

灰体 A_λ 的也不随波长变化而变化，且小于1；

实际物体的 A_λ 随波长变化而变化，但在波长 λ 大于的热射线范围， A_λ 随波长变化很小，可看作为常数

第三节 辐射换热

对于两个温度不同的物体：

1) ε 只与本身特性有关，而 A 既与本身特性有关，又与投入物体的特性有关，

2) 只有当 $E_{\lambda, T_2} = E_{\lambda_0, T_2}$ ，和 $A_{\lambda, T_2} = \varepsilon_{\lambda, T_2}$

$$A = \frac{\int_0^{\infty} A_{\lambda, T_1} E_{\lambda, T_2} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda, T_2} d\lambda}$$

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda, T_1} E_{\lambda_0, T_1} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda_0, T_1} d\lambda}$$

第三节 辐射换热

2.3.3 固体间的辐射传热

2.3.3.1 角系数

辐射换热的热阻 $\left\{ \begin{array}{l} \text{空间热阻} \\ \text{表面热阻} \end{array} \right.$

从微元面 dF_1 投向 dF_2 ，每单位立体角单位时间、单位面积的辐射能量为：

$$E_{\varphi 0} = E_{n0} \cos \varphi_1 = \frac{E_{10}}{\pi} \cos \varphi_1$$

$$E_{\varphi,0} = \frac{dQ_{1,2}}{d\omega_1 dF_1}$$

第三节 辐射换热

从微元面 dF_1 投射到 dF_2 的辐射能量为：

$$dQ_{1,2} = E_{\varphi,0} dF_1 d\omega_1 = \frac{E_{1,0}}{\pi} dF_1 d\omega_1 \cos \varphi_1$$

同理，从微元面 dF_2 投射到 dF_1 的辐射能量为：

$$dQ_{2,1} = \frac{E_{2,0}}{\pi} dF_2 d\omega_2 \cos \varphi_2$$

两微元面 dF_1 、 dF_2 的净辐射换热量为：

$$dQ_{net1,2} = dQ_{1,2} - dQ_{2,1} =$$
$$\left(E_{1,0} - E_{2,0} \right) \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 dF_1 dF_2}{\pi r^2}$$

第三节 辐射换热

两黑体1、2之间的净辐射换热量为：

$$Q_{net1,2} = (E_{1,0} - E_{2,0}) \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 dF_1 dF_2}{\pi r^2}$$

因为

$$Q_{1,2} = E_{1,0} \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 dF_1 dF_2}{\pi r^2}$$

$$Q_{1,0} = E_{1,0} F_1$$

$$\frac{Q_{1,2}}{Q_{1,0}} = \frac{1}{F_1} \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 dF_1 dF_2}{\pi r^2}$$

第三节 辐射换热

$Q_{1,2}/Q_{1,0}$ 表示黑体1向半球空间辐射的能量投射到黑体2表面上的百分数，称为**角系数**，用 $\varphi_{1,2}$ 表示

$$\varphi_{1,2} = \frac{1}{F_1} \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 dF_1 dF_2}{\pi r^2}$$

角系数

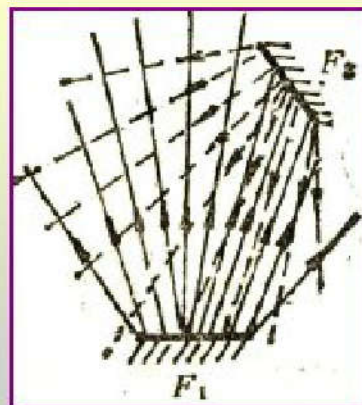
表示一个物体的辐射热量落到另一个物体上的分数

F_1 对 F_2 的角系数

$$\varphi_{12} = \frac{\text{从 } F_1 \text{ 投射到 } F_2 \text{ 的热量}}{\text{从 } F_1 \text{ 辐射出去的总热量}}$$

F_2 对 F_1 的角系数

$$\varphi_{21} = \frac{\text{从 } F_2 \text{ 投射到 } F_1 \text{ 上的热量}}{\text{从 } F_2 \text{ 辐射出去的总热量}}$$



第三节 辐射换热

$$\varphi_{1,2}F_1 = \varphi_{2,1}F_2$$

净辐射换热量可改写为

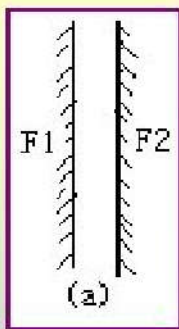
$$Q_{net1,2} = (E_{1,0} - E_{2,0})\varphi_{1,2}F_1$$

第三节 辐射换热

2.3.3.2 角系数的性质

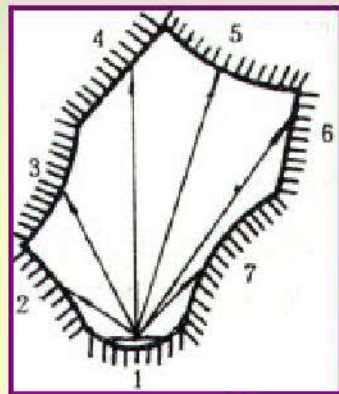
相对性

$$F_1 \varphi_{12} = F_2 \varphi_{21}$$



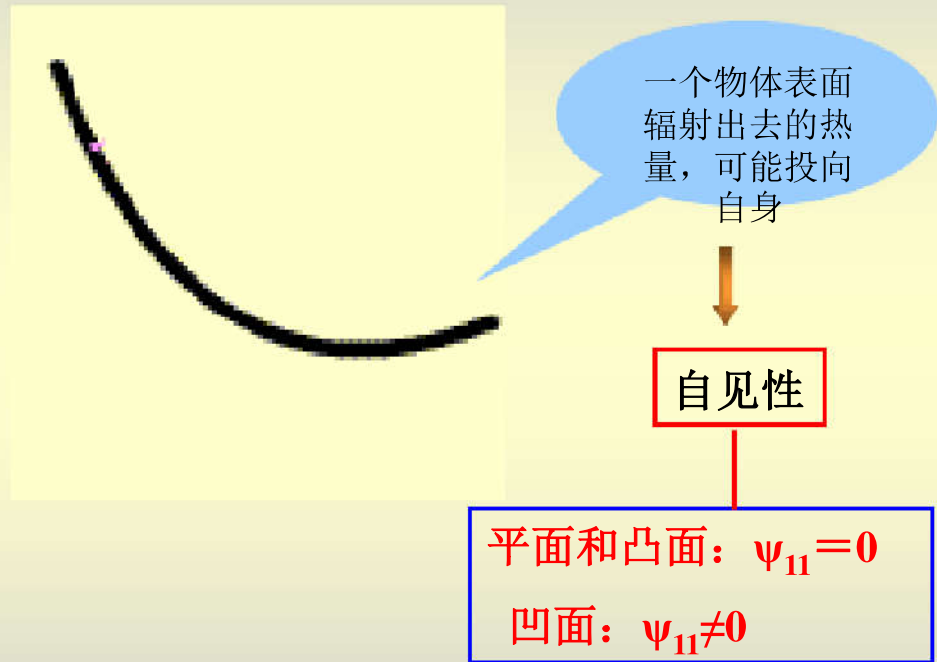
完整性

$$Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + \dots + Q_{1n} = Q_1$$
$$\frac{Q_{11}}{Q_1} + \frac{Q_{12}}{Q_1} + \frac{Q_{13}}{Q_1} + \dots + \frac{Q_{1n}}{Q_1} = 1$$
$$\varphi_{11} + \varphi_{12} + \varphi_{13} + \dots + \varphi_{1n} = 1$$



第三节 辐射换热

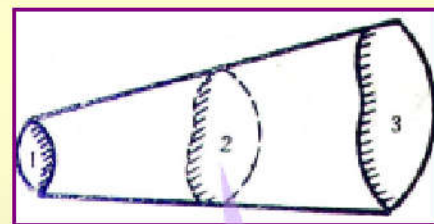
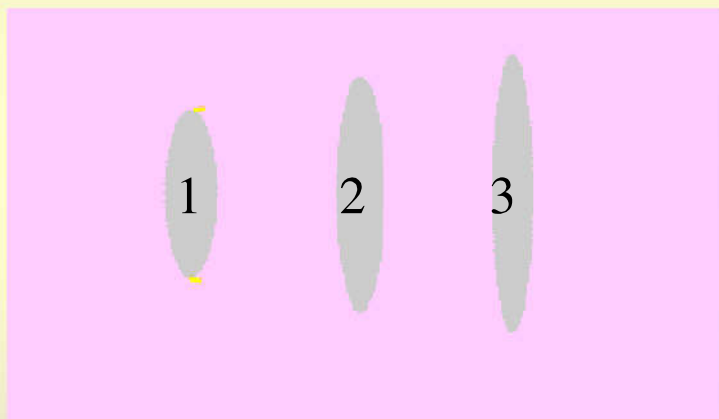
第二章 传热原理



第三节 辐射换热

$$\varphi_{12} = \varphi_{13}$$

兼顾性



透热体

$$\varphi_{12} F_1 = \varphi_{32} F_3 + \varphi_{42} F_4$$

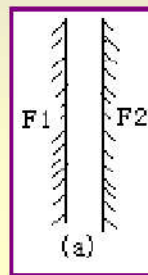
分解性

第三节 辐射换热

常见的几种角系数值

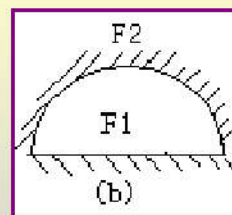
A、两个无限大的平行平面 (如图a)

$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$$



B、一个平面1和一个曲面2组成的封闭体系 (如图 b)

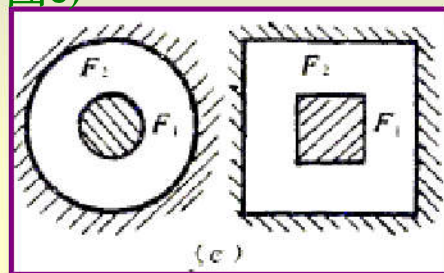
$$\varphi_{12} = 1 \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$$



第三节 辐射换热

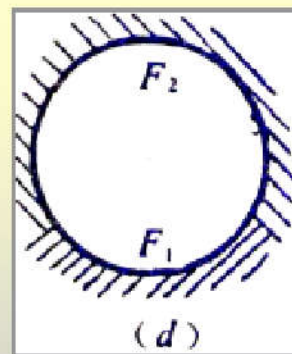
C、一个物体1被另一个物体2包围 (如图c)

$$\varphi_{12} = 1 \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_2}$$



D、两个曲面组成的封闭体系 (如图d)

$$\varphi_{12} = \frac{F_2}{F_1 + F_2} \quad \varphi_{21} = \frac{F_1}{F_1 + F_2}$$



第三节 辐射换热

2.3.3.3 灰体间的辐射传热

灰体的有效辐射

$$J = \varepsilon E_0 + RG = \varepsilon E_0 + (1 - A)G$$

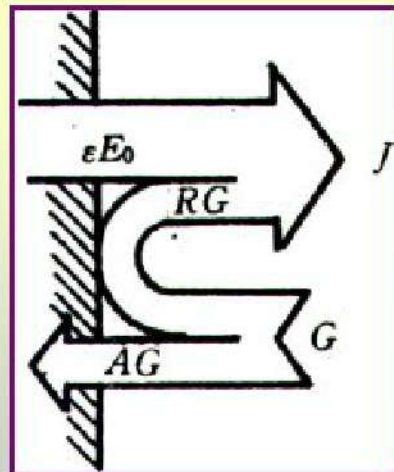
离开表面的净辐射换热量

$$\frac{Q}{F} = J - G = \varepsilon E_0 + (1 - A)G - G = \varepsilon E_0 - AG$$

当 $A = \varepsilon$ 时

$$Q = \frac{\varepsilon F}{1 - \varepsilon} (E_0 - J) = \frac{E_0 - J}{\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon F}}$$

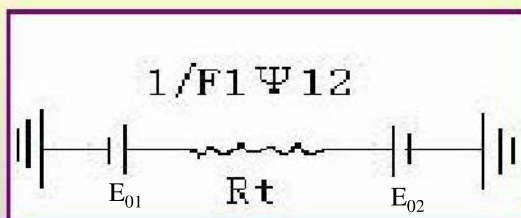
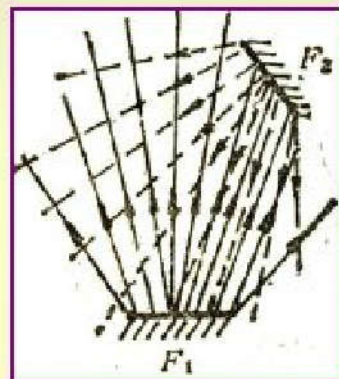
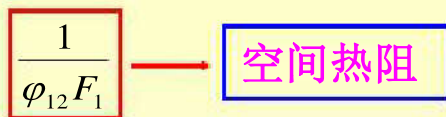
$\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon F}$ —— 灰体辐射换热的表面热阻



第三节 辐射换热

●两个黑体间的辐射传热

$$Q_{12} = \frac{E_{10} - E_{20}}{\frac{1}{\phi_{12} F_1}}$$



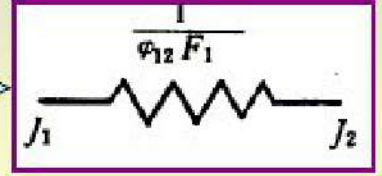
黑体辐射传热的电热网络图

第三节 辐射换热

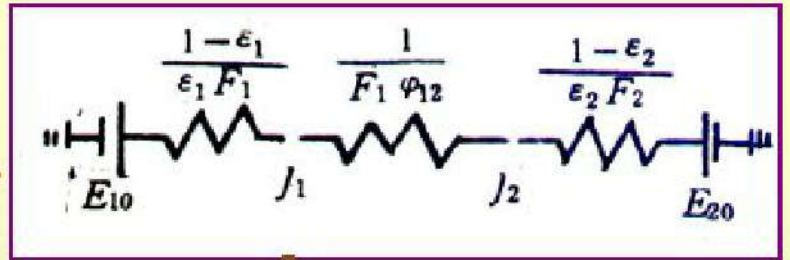
两灰体表面间的净辐射换热：

$$Q_{net,12} = \frac{(J_1 - J_2)}{\frac{1}{F_1 \phi_{12}}}$$

电网络单元



两个灰体表面间的辐射传热的电网络图



$$Q_{net,12} = \frac{E_{10} - E_{20}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 F_1} + \frac{1}{F_1 \phi_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 F_2}} = \frac{(E_{10} - E_{20}) F_1}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) + \frac{1}{\phi_{12}} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}$$

第三节 辐射换热

两灰体表面间辐射换热计算式：

$$Q_{net,12} = \varepsilon_{12} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} F_1$$

系统的导来黑度：

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{1 + \varphi_{12} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

它是考虑由于灰体系统多次吸收与反射对换热量影响的因子。

影响其辐射传热的三个基本因素：

两灰体的温度差、角系数和系统的导来黑度。

第三节 辐射换热

几种特殊情况：

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{1 + \varphi_{12} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

①两个物体均为无限大的平行平面

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

$$q_{net,12} = \frac{Q_{net,12}}{F} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right]$$

如果两平行平面中： $\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2$ （或 $\varepsilon_2 \gg \varepsilon_1$ ）
则： $\varepsilon_{12} = \varepsilon_2$ （或 $\varepsilon_{12} = \varepsilon_1$ ）

第三节 辐射换热

②当两个物体中有一个为凸面（或平面）时：

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

$$Q_{net,12} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1$$

如果两物体中， $F_2 \gg F_1$ ，则： $\varepsilon_{12} \approx \varepsilon_1$ 。

第三节 辐射换热

【例】计算在厂房内的蒸气管道外表面每米长的辐射热损失。已知管外保温层的黑度 $\varepsilon_1=0.9$ ，外径 $d=583\text{mm}$ ，外壁面温度 $t_1=50^\circ\text{C}$ ，室温 $t_2=20^\circ\text{C}$

【解】属一个物体被另一个物体包围时的辐射换热

因为管道表面积 F_1 相对于厂房面积 F_2 来说是很小

$$\frac{F_1}{F_2} \approx 0 \quad \varepsilon_{12} \approx \varepsilon_1 \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_1$$

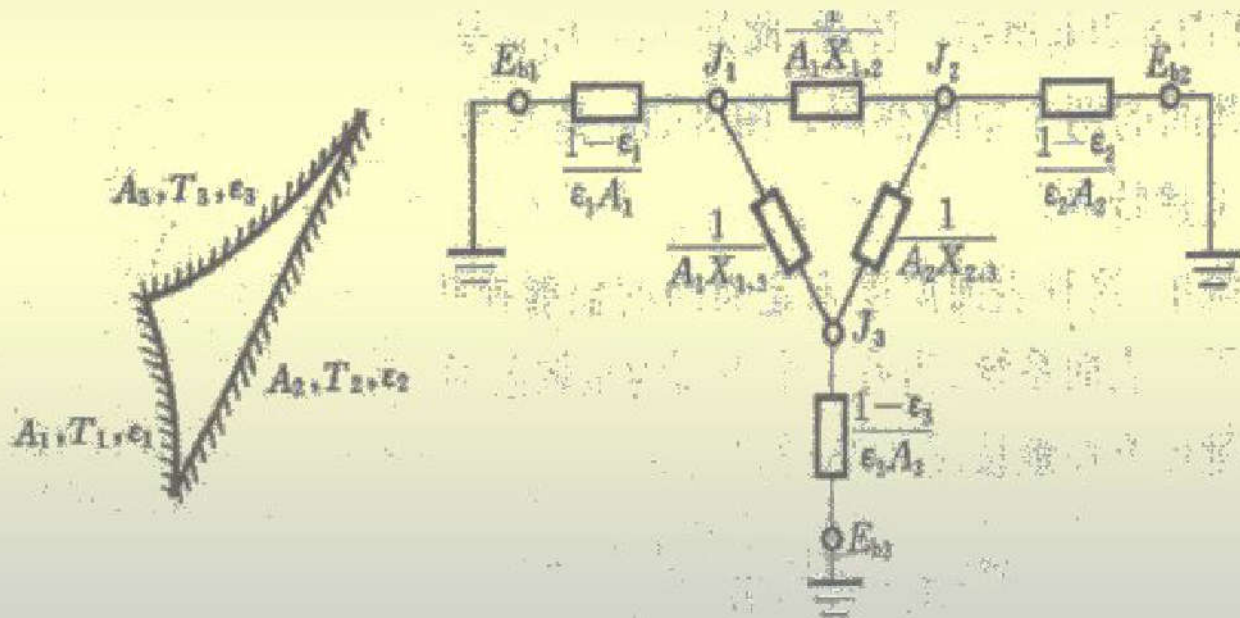
$$Q_{net,12} = \varepsilon_{12} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \varepsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1$$

$$q_l = \varepsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \pi d$$

$$= 0.9 \times 5.67 \left[\left(\frac{273+50}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+20}{100} \right)^4 \right] \times 3.14 \times 0.583 = 334 (\text{W} / \text{m})$$

第三节 辐射换热

下面再来看一下三个表面的情况，与两个表面相似，首先需要画出等效网络，见图所示，然后，列出各节点的电流方程。



第三节 辐射换热

节点 J_1, J_2 和 J_3 的热流方程如下:

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

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

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

求解上面的方程组，再计算净换热量。

第三节 辐射换热

总结上面过程，可以得到应用网络法的基本步骤如下：

- A 画等效电路图；
- B 列出各节点的热流(电流)方程组；
- C 求解方程组，以获得各个节点的等效辐射；
- D 利用公式 $Q_i = \frac{E_{0i} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{F_i \varepsilon_i}}$ 计算每个表面的净辐射热流量。

第三节 辐射换热

2.3.3.4 遮热板和遮热罩

$$Q_{net,12} = \varepsilon_{12} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} F_1$$

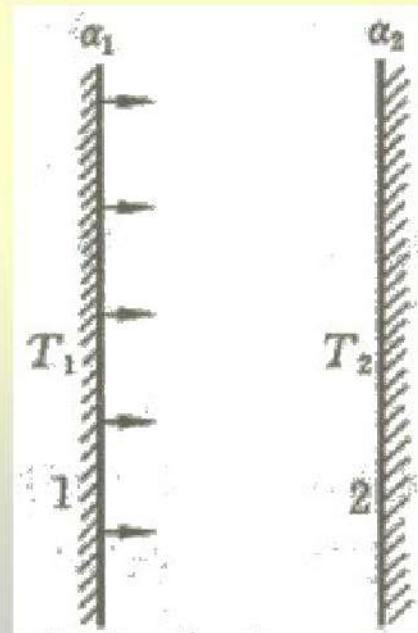
$$Q_{net,1,2} = \frac{E_{10} - E_{20}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{F_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{F_1 \varphi_{1,2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{F_2 \varepsilon_2}}$$

为简单起见，假设

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon, \quad F_1 = F_2, \quad \varphi_{1,2} = \varphi_{2,1} = 1$$

，则上式变为

$$Q_{1,2} = \frac{E_{10} - E_{20}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \varepsilon_s (E_{10} - E_{20})$$



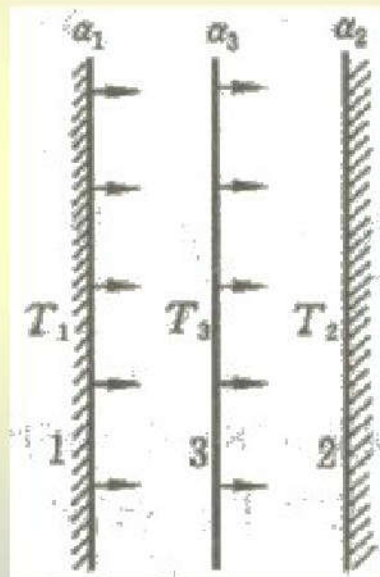
第三节 辐射换热

现在在两面之间插入一块发射率仍为 ε 的遮热板，这样就组成了两个换热系统，

稳态时有：

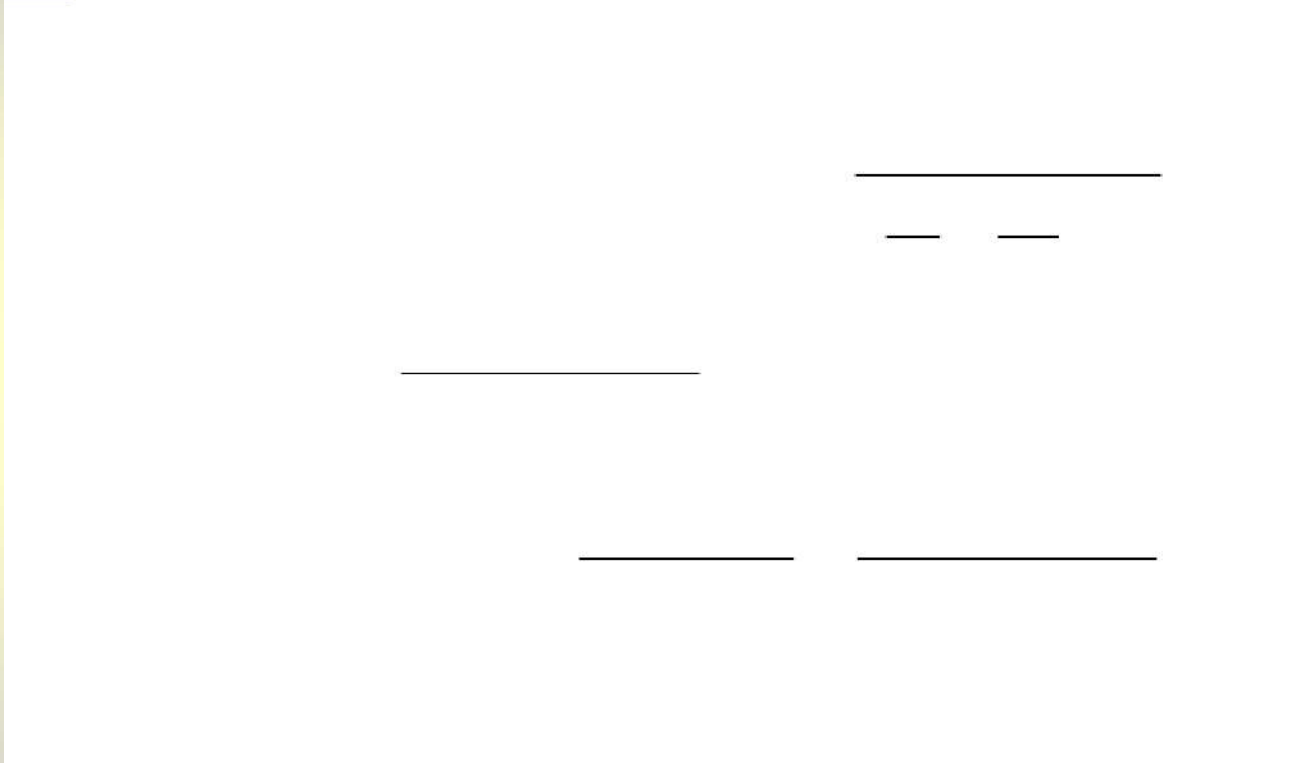
$$\begin{cases} q_{1,3} = \varepsilon_s (E_{10} - E_{30}) \\ q_{3,2} = \varepsilon_s (E_{30} - E_{20}) \Rightarrow q_{1,2} = \frac{1}{2} \varepsilon_s (E_{10} - E_{20}) \\ q_{1,2} = q_{1,3} = q_{3,2} \end{cases}$$

可见，与没有遮热板时相比，辐射换热量减小了一半。



第三节 辐射换热

例2: 两平行无限大平壁, 发射率 $\varepsilon_1=0.5$; $\varepsilon_2=0.8$; 中间遮热板的发射



其中

\dot{Q}_{tot}

$\varepsilon_1 A_1$

$\varphi_{1,3} A_1$

$\varepsilon_{3,1} A_1$

$\varepsilon_{3,2} A_3$

$\varphi_{3,2} A_3$

$\varepsilon_2 A_2$

第三节 辐射换热

由于是无限大平壁，消去 $A_1=A_2=A_3=F$

于是，有
$$R_{tot} = \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varphi_{1,3}} + \frac{1-\varepsilon_{3,1}}{\varepsilon_{3,1}} + \frac{1-\varepsilon_{3,2}}{\varepsilon_{3,2}} + \frac{1}{\varphi_{3,2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}$$

又
$$\frac{1}{\varphi_{1,3}} = \frac{1}{\varphi_{3,2}} = 1$$

故得
$$R_{tot} = \frac{1-0.5}{0.5} + 2 + \frac{1-0.05}{0.05} \times 2 + \frac{1-0.8}{0.8} = 41.25$$

于是
$$q'_{net1,2} = \frac{C_0(T_1^4 - T_2^4)}{41.25} \quad q_{net1,2} = \frac{C_0(T_1^4 - T_2^4)}{2.25}$$

辐射换热减少：
$$\frac{q - q'}{q} = \frac{\frac{1}{2.25} - \frac{1}{41.25}}{\frac{1}{2.25}} = 94.5\%$$

第三节 辐射换热

2.3.5 气体辐射

2.3.5.1 气体辐射的特点

1、气体的辐射和吸收是在整个容积中进行的

固液的辐射和吸收在表面，气体在整个空间。

就吸收而言，投射到气体层界面上的辐射能要在辐射行程中被吸收减弱；就辐射而言，气体层界面上的辐射能为达到界面上的整个容积气体的辐射。

在论及气体的发射率和吸收比时，除其他条件外，还必须说明气体所处容积的形状。

第三节 辐射换热

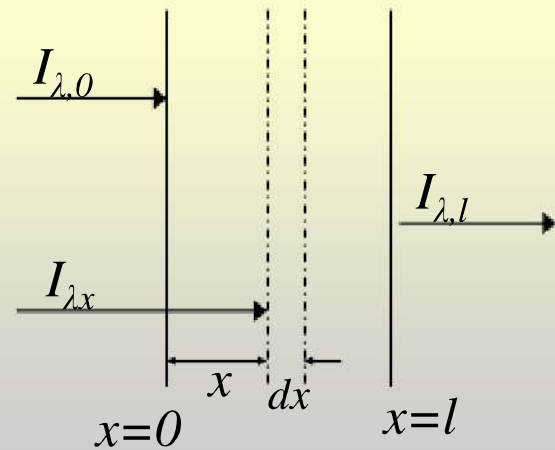
2、气体辐射对波长具有选择性

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

固体表面的辐射和吸收光谱具有连续性，但气体的辐射和吸收具有明显选择性；只能辐射和吸收某一定波长范围内的能量。利用这一性质可制成谱带分析仪，分析物质的成份；

$$D_{\lambda l} + A_{\lambda l} = 1$$

$$A_{\lambda l} = 1 - e^{-k_{\lambda} l} = \varepsilon_{\lambda l}$$



第三节 辐射换热

2.3.5.2 气体的黑度和吸收率

1. 气体的黑度

$$\varepsilon_g = \frac{E_g}{E_0} \longrightarrow E_g = \varepsilon_g E_0$$

$$E_{H_2O} = 4.07 (P_{H_2O}^{0.8} \cdot l_g^{0.6}) \left(\frac{T_g}{100}\right)^3$$

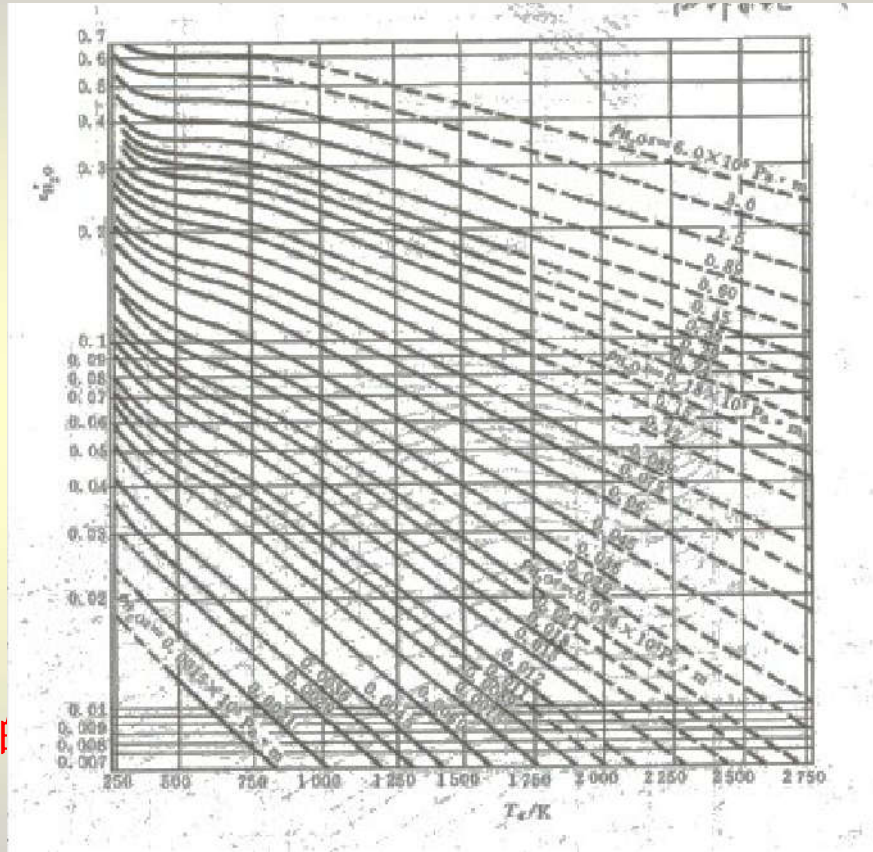
$$E_{CO_2} = 4.07 (P_{CO_2} l_g)^{1/3} \cdot \left(\frac{T_g}{100}\right)^{3.5}$$

第三节 辐射换热

第二章 传热原理

即:

烟气



画出二氧化碳和水蒸气的黑使用时直接

ϵ_{H_2O}

第三节 辐射换热

(2) 气体的吸收率

$$A_{CO_2} = \varepsilon'_{CO_2} \left(\frac{T_g}{T_w} \right)^{0.65}$$

$$A_{H_2O} = \varepsilon_{H_2O} \left(\frac{T_g}{T_w} \right)^{0.45}$$

条件黑度:

$$\varepsilon'_{CO_2} = f\left[T_w, \left(P_{CO_2} \cdot l_g \frac{T_w}{T_g}\right)\right]$$

$$\varepsilon_{H_2O} = f\left[T_w, \left(P_{H_2O} \cdot l_g \frac{T_w}{T_g}\right)\right]$$

据CO₂的黑度图查得

据H₂O的黑度图查得

烟气的吸收率: $A_g = A_{CO_2} + A_{H_2O} \cdot \beta_{H_2O} - \Delta A$

$$\Delta A = A_{CO_2} \cdot \beta_{H_2O} A_{H_2O}$$

近似计算可不修正

第三节 辐射换热

2.3.5.3 气体与外壳间的辐射换热

设温度为 T_w 的黑体外壳，内部充满温度为 T_g 的吸收性气体，气体的黑度和吸收率为 ε_g 和 A_g ，此时气体与黑外壳之间的净辐射换热量：

$$Q_{net,gw} = (\varepsilon_g E_{0g} - A_g E_{0w})F = C_0 \left[\varepsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - A_g \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] F$$

外壳为黑体时，

$$\left(\frac{Q}{F} \right)_g = J_g - G = \varepsilon_g E_{0g} - A_g G$$

气体的有效辐射

$$J_g = \frac{\varepsilon_g E_{0g}}{A_g} - \left(\frac{1}{A_g} - 1 \right) \left(\frac{Q}{F} \right)_g$$

第三节 辐射换热

外壳的有效辐射

$$J_w = \frac{\varepsilon_w E_{0w}}{A_w} - \left(\frac{1}{A_w} - 1 \right) \left(\frac{Q}{F} \right)_w$$

气体失去的热量等于外壳得到的热量

$$\left(\frac{Q}{F} \right)_{net,gw} = - \left(\frac{Q}{F} \right)_w = \left(\frac{Q}{F} \right)_g$$

$$= J_g - J_w$$

$$= \frac{C_0 \left[\frac{\varepsilon_g}{A_g} \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \frac{\varepsilon_w}{A_w} \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{A_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1}$$

第三节 辐射换热

对于外壳 $A_w = \varepsilon_w$,

$$\left(\frac{Q}{F}\right)_{net,gw} = \varepsilon_{gw} C_0 \left[\frac{\varepsilon_g}{A_g} \left(\frac{T_g}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_w}{100}\right)^4 \right]$$

$$\varepsilon_{gw} = \frac{1}{\frac{1}{A_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1}$$

$$q_{net,gw} = \alpha_R (t_g - t_w)$$

$$\alpha_R = \frac{\varepsilon_{gw} C_0 \left[\left(\frac{T_g}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_w}{100}\right)^4 \right]}{t_g - t_w}$$

第三节 辐射换热

2.3.6 火焰辐射

2.3.6.1 火焰特征

(1) 净化的气体燃料完全燃烧时，烟气的主要成分是 CO_2 、 H_2O 和 N_2 ，固体微粒很小，可用上述气体辐射公式计算其黑度和吸收率。

(2) 有灰分的燃料燃烧或无灰分的燃料不完全燃烧时，不仅有气体辐射，同时还存在固体微粒的辐射，并且微粒起决定性作用。

(3) 影响火焰中微粒的数量的因素

燃料种类、燃烧方法、窑炉形状及大小、供应空气的数量及方式