



4.5 热辐射

4.5.1 基本概念

4.5.2 物体的辐射能力

4.5.3 两固体间的相互辐射

4.5.4 高温设备及管道的热损失





4.5.1 基本概念

1. 辐射：物体通过电磁波来传递能量的过程。
2. 热辐射：物体由于热的原因以电磁波的形式向外发射能量的过程。

特点：

- 能量传递的同时还伴随着能量形式的转换；
- 不需要任何介质。

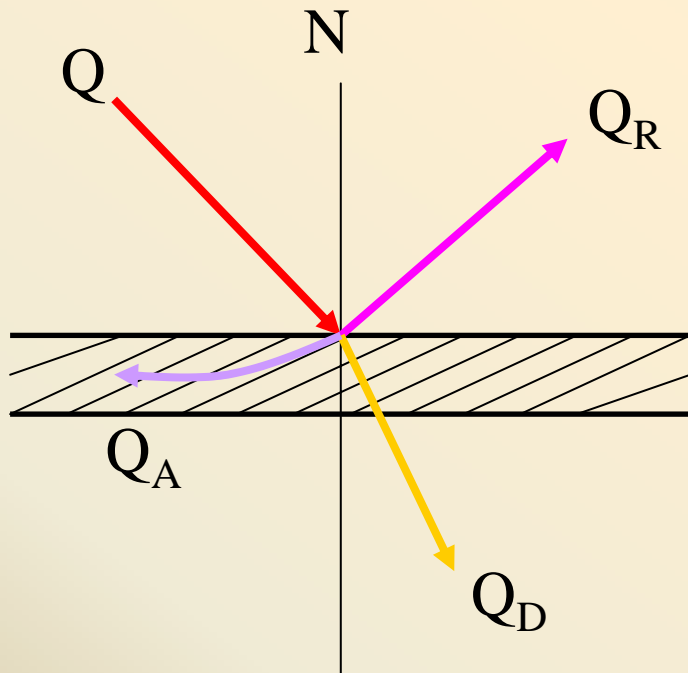




3. 热辐射对物体的作用

总能量 Q ；被物体吸收 Q_A ；被反射 Q_R ；穿过物体 Q_D

能量守恒定律：



式中

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D$$

$$\frac{Q_A}{Q} = A \text{ —— 吸收率；}$$

$$\frac{Q_R}{Q} = R \text{ —— 反射率；}$$

$$\frac{Q_D}{Q} = D \text{ —— 穿透率。}$$

$$A + R + D = 1$$





$A, R, D = f(\text{物体性质、温度、表面、辐射波长})$

固体、液体: $D=0$ $R+A=1$

气体: $R=0$ $A+D=1$

黑体: $A=1$

白体（镜体）: $R=1$

透热体: $D=1$

灰体: 指能以相同的吸收率吸收所有波长的辐射能的物体。





4.5.2 物体的辐射能力

物体在一定温度下，单位表面积，单位时间内所发射的**全部辐射能**（波长从**0到 ∞** ）， W/m^2 。

物体的单色辐射能力：物体在一定温度下，发射**某种波长**的能力；以 E_λ 表示，单位 W/m^3 。

辐射能与单色辐射能的关系：
$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad \text{——普朗克定律}$$





$$\text{其中 } c_1 = 3.743 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$c_2 = 1.4387 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

一、黑体

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} d\lambda = \sigma_0 T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

———— 斯蒂芬-波尔茨曼定律

式中 σ_0 —— 黑体辐射常数， $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

四次方定律表明，热辐射对温度特别敏感。





二、实际物体

物体的黑度：
$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} \quad \varepsilon < 1$$

物体的黑度 ε ：物体的种类、表面温度、表面状况、波长。是物体辐射能力接近黑体辐射能力的程度。

三、灰体

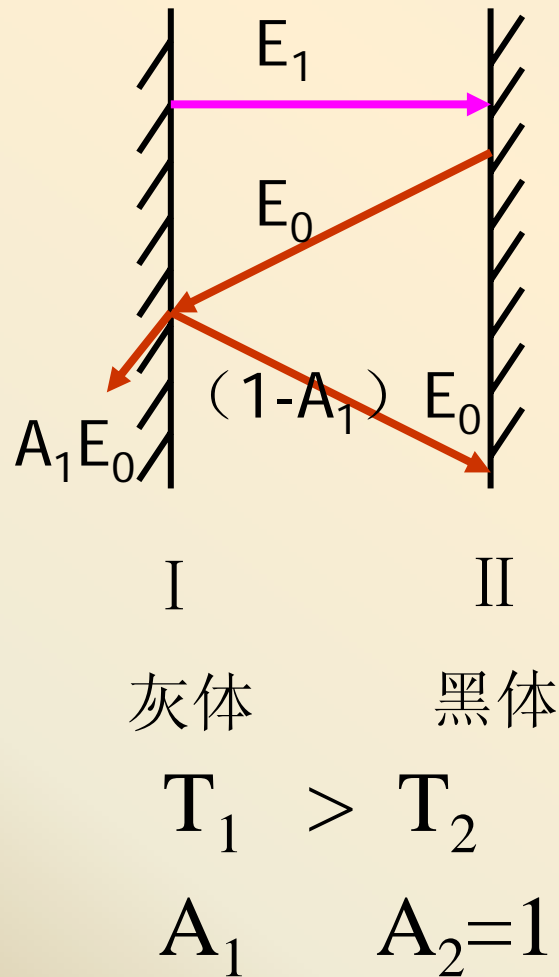
$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

式中 C ——灰体的辐射系数， $C=5.669\varepsilon\text{W}/(\text{m}^2.\text{K}^4)$





四、克希霍夫定律



对灰体: $Q = E_1 - A_1 E_0$

热交换达到平衡时 $T_1=T_2, Q=0$

$$E_1 = A_1 E_0 \quad \frac{E_1}{A_1} = E_0$$

任意物体: $\frac{E}{A} = E_0$

—— 克希霍夫定律





结论:

(1) 任何物体的发射能力与吸收率的比值均相同, 且等于同温度下绝对黑体的发射能力。物体的发射能力越强, 其吸收率越大。

(2) $A = \varepsilon$

即同温度下, 物体的吸收率与黑度在数值上相等。

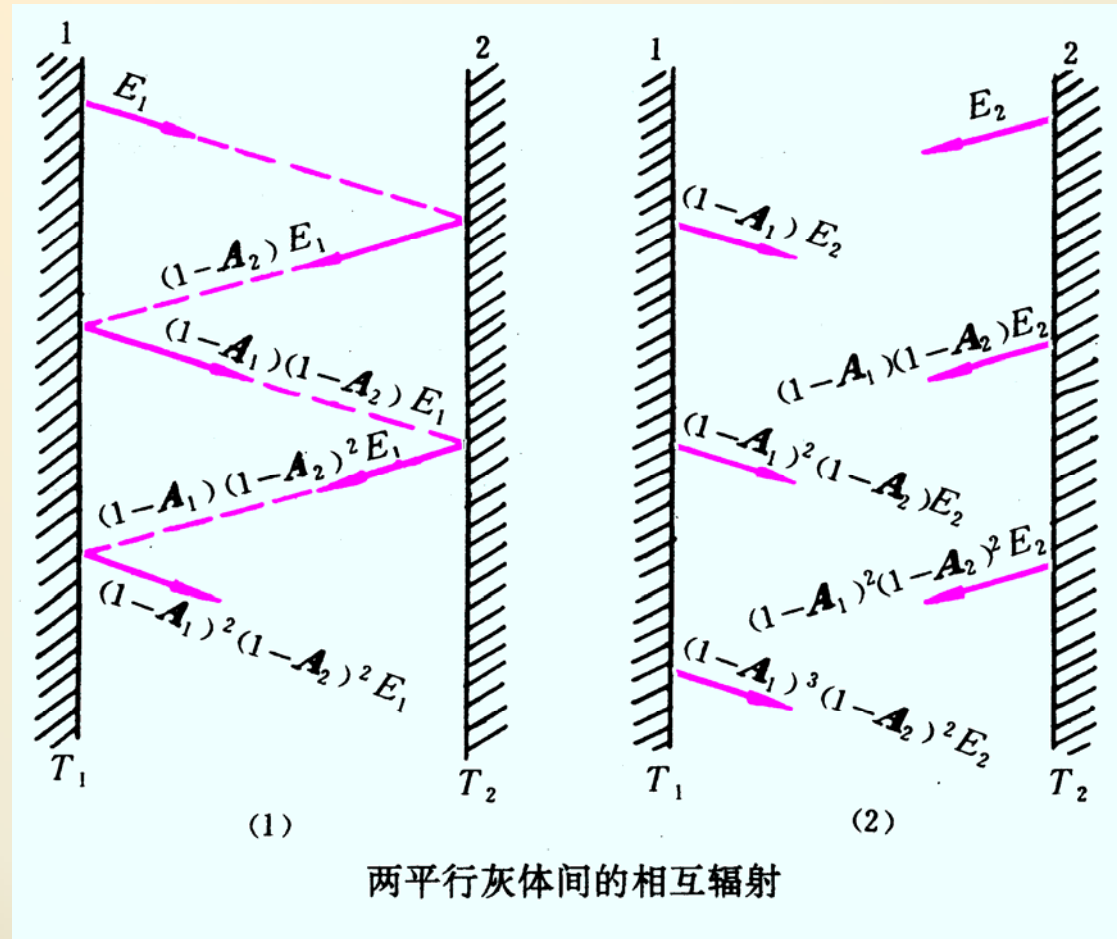
(3) $A < 1$, $E < E_0$, 即在任何温度下, 各种物体中以绝对黑体的发射能力为最大。





4.5.3 两固体间的相互辐射

一、两无限大平行灰体壁面间的相互辐射





设 $T_1 > T_2$

E_1 、 E_2 ——1、2面在温度 T_1 、 T_2 下的发射能力；

E_1' 、 E_2' ——1、2面发射的总能量。

$$E_1' = E_1 + (1 - A_1)E_2'$$

$$E_2' = E_2 + (1 - A_2)E_1'$$

两平面间单位面积的辐射热量： $q_{1-2} = E_1' - E_2'$

$$q_{1-2} = \frac{A_2 E_1 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}$$





$$\text{将} \begin{cases} E_1 = \varepsilon_1 C_0 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \\ E_2 = \varepsilon_2 C_0 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \\ A_1 = \varepsilon_1 \\ A_2 = \varepsilon_2 \end{cases}$$

代入：

$$q_{1-2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$

$$\text{令：} C_{1-2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}}$$

——总发射系数





$$Q_{1-2} = C_{1-2} A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

两平面的面积有限时:

$$Q_{1-2} = \varphi_{12} C_{1-2} A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

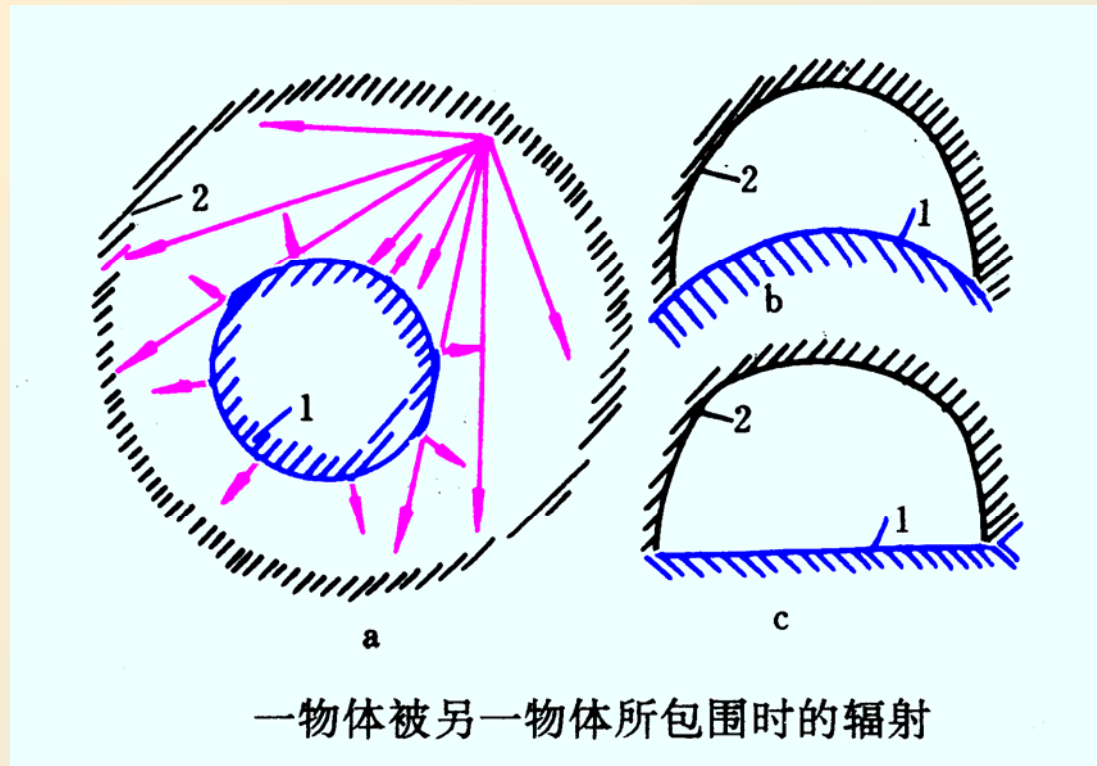
式中 A ——平面的传热面积;

φ_{1-2} ——角系数(物体1发射辐射能被2拦截分率)。





二、一物体被另一物体包围时的辐射



$$\varphi = 1 \quad C_{1-2} = \frac{C_o}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_o} \right)}$$





讨论：1) 很大的物体2包住物体1：

$$A=A_1 \quad C_{1-2} = \varepsilon_1 C_0$$

2) 物体2恰好包住物体1：

$$A=A_1 \quad C_{1-2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

3) 情况1和2间的情况：

$$A=A_1 \quad C_{1-2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$





三、影响辐射传热的因素

1. 温度的影响

$Q \propto \Delta T^4$ ，低温时可忽略，高温时可能成为主要方式

2. 几何位置的影响

3. 表面黑度的影响

$Q \propto \varepsilon$ ，可通过改变黑度的大小强化或减小辐射传热。

4. 辐射表面间介质的影响

减小辐射散热，在两换热面加遮热板（黑度较小的热屏）。





4.5.4 高温设备及管道的热损失

对流散热: $Q_C = \alpha_C A_W (t_W - t)$

热:

辐射散

热:

$$Q_R = C_{1-2} \varphi A_W \left[\left(\frac{T_W}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right]$$

$$\text{令 } \varphi=1 \quad Q_R = C_{1-2} A_W \left[\left(\frac{T_W}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \frac{t_W - t}{t_W - t} = \alpha_R A_W (t_W - t)$$

总热损失:

$$Q = Q_C + Q_R = (\alpha_C + \alpha_R) A_W (t_W - t) = \alpha_T A_W (t_W - t)$$

式中 α_T ——对流-辐射联合传热系数, $W/(m^2.K)$ 。





(1) 空气自然对流, 当 $t_W < 150^\circ\text{C}$ 时

平壁保温层外 $\alpha_T = 9.8 + 0.07(t_W - t)$

管道及圆筒壁保温层外 $\alpha_T = 9.4 + 0.052(t_W - t)$

(2) 空气沿粗糙壁面强制对流

空气速度 $u \leq 5\text{m/s}$ 时 $\alpha_T = 6.2 + 4.2u$

空气速度 $u > 5\text{m/s}$ 时 $\alpha_T = 7.8u^{0.78}$

