

热辐射

热辐射的基本概念

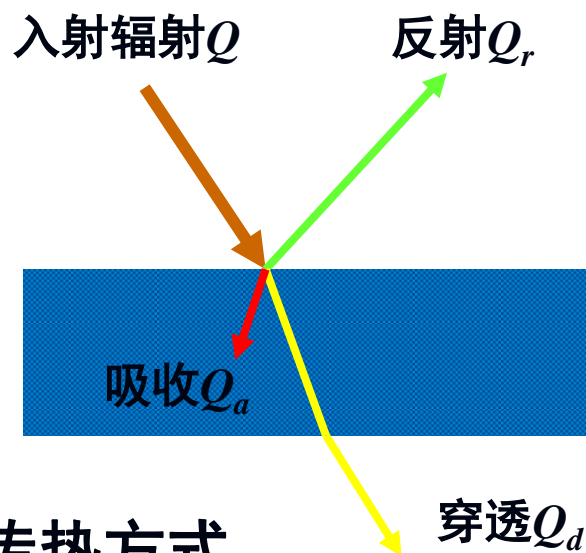
当物体向外界辐射的能量与其从外界吸收的辐射能不等时，该物体就与外界产生热量的传递

热辐射可以在真空中传播
不需要任何物质作媒介

工程上，热辐射是高温物体的主要传热方式

固体和液体的热辐射只发生在物体的表面层，因此只有能够互相照见的物体间才能进行辐射传热；本节讨论固体表面间的热辐射。

辐射能的吸收、反射和透过

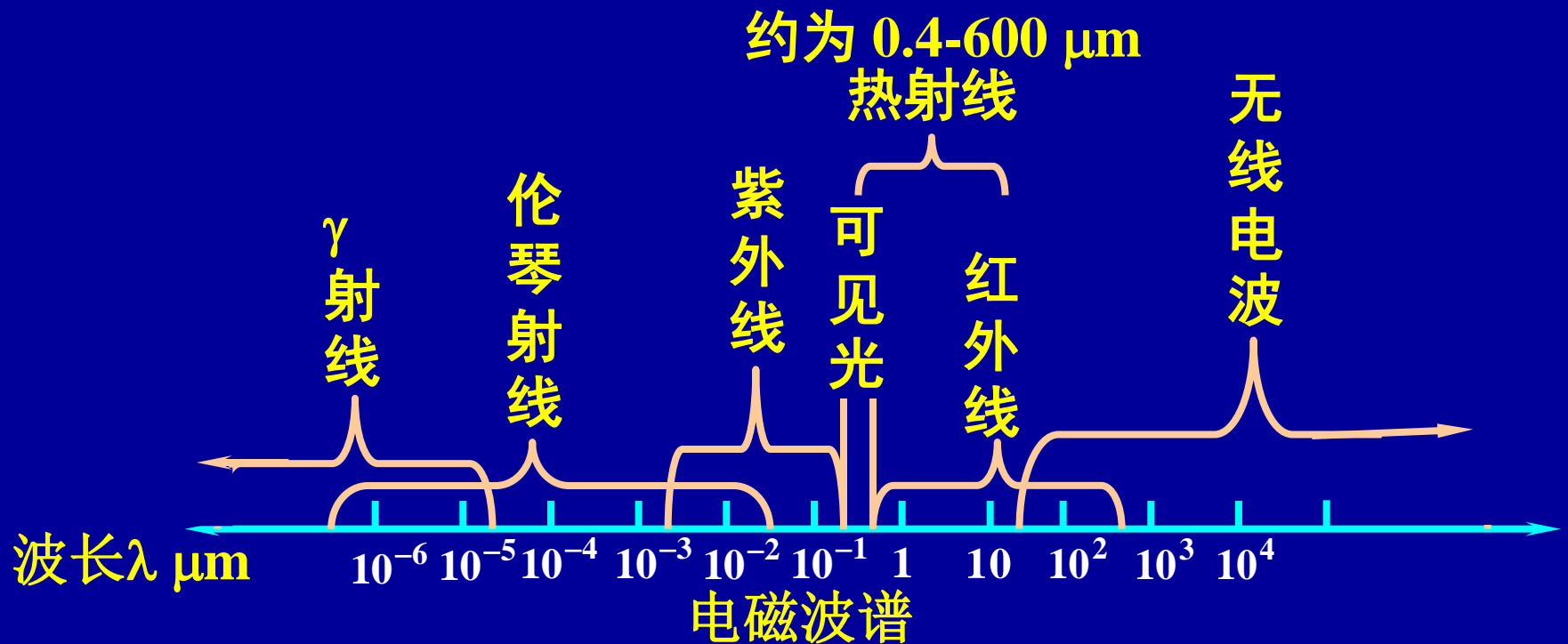


热射线：可转变为热能的射线

理论上是波长为 $0\sim\infty$ 的各种电磁波。

但具有实际意义的波长范围是 $0.38\sim 1000\mu\text{m}$ 。

并且大部分能量集中于红外线区段的 $0.76\sim 20\mu\text{m}$ 范围内。



黑体、镜体、透热体：三种理想物体

$$Q = Q_a + Q_r + Q_d$$

$$1 = \frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_r}{Q} + \frac{Q_d}{Q}$$

$$1 = a + r + d$$

a :吸收率

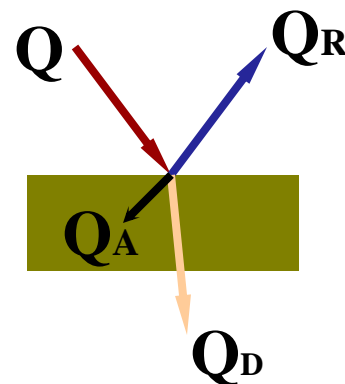
r :反射率

d :透过率

固体和液体： $d=0$ 则 $r+a=1$

气体： $r=0$ 则 $a+d=1$

黑体： $a=1$ 、镜体： $r=1$ 、透热体： $d=1$



固体辐射

黑体的辐射能力 E_b

—斯蒂芬-波尔兹曼定律

黑体是理想化的物体；不存在绝对的黑体。其概念的引入是理论研究的需要。

辐射能力是指单位时间单位黑体表面向外界辐射的全部波长的总能量。

理论研究表明:黑体的辐射能力服从**斯蒂芬-波尔兹曼定律**

$$E_b = \sigma_0 T^4$$

式中 $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ 是黑体的辐射常数， $T(\text{K})$ 黑体表面的绝对温度。

斯蒂芬-波尔兹曼定律（四次方定律）

$$E_b = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad C_0 = 5.67 \text{W/m}^2\text{K}^4$$

表明辐射传热对温度非常敏感：低温时可忽略不计，但高温时，往往成为主要的传热方式。

例4-14:试计算一黑体表面温度分别为25℃及700℃时的辐射能力,并比较之。

$$25^\circ\text{C时} \quad E_{b1} = C_0 \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 = 5.67 \times \left(\frac{273+25}{100} \right)^4 = 447 \text{W/m}^2$$

$$E_{b2} / E_{b1} = 50820 / 447 = 113.7$$

$$700^\circ\text{C时} \quad E_{b2} = C_0 \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 = 5.67 \times \left(\frac{273+700}{100} \right)^4 = 50820 \text{W/m}^2$$

可见，同一黑体温度变化700/25=28倍时，辐射能力增加113.7倍。低温时，辐射传热常可忽略；高温时，则可能是主要的传热方式。

实际物体的辐射能力 E

实际物体的辐射能力恒小于同温度下黑体的辐射能力。

黑度：在同温度下，实际物体的辐射能力与黑体的辐射能力之比，即

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \leq 1 \quad \therefore E = \varepsilon E_b = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

※黑度不是颜色的概念，它表明物体的辐射能力接近于黑体的程度。物体的黑度只与辐射物体本身情况有关，如物体种类、表面温度、表面状况（如粗糙度、表面氧化程度等），是物体的一种性质。

表4-4给出一些常见材料的黑度值。

黑体的吸收率为1，而实际物体的吸收率由以下因素决定

$$a = f(\text{物体种类, 表面温度, 表面状况, 投入辐射的波长})$$

灰体的辐射能力：克希荷夫定律

灰体：对各种波长辐射能力均能同等吸收的理想物体。

其概念的引入可大大简化辐射传热的计算。

克希荷夫定律：同温度下，同一灰体的吸收率与其黑度在数值上必相等，即 $\varepsilon=a$ 。但意义不同：

ε 表示灰体发射的辐射能占同温度下黑体发射的分数；

a 表示外界投入的辐射能可被物体吸收的分数。

推论：

- ◆任何物体的辐射能力与其吸收率的比值，恒等于同温度下黑体的辐射能力，并只和温度有关，与物体的性质无关。
- ◆善于吸收辐射能的物体，也善于发射辐射能。
- ◆在一定温度条件下，黑体具有最大的辐射能力和吸收率。
- ◆克希荷夫定律的另一种表达式： $E/a=E_b$ 。

定常态热辐射过程，灰体的宏观传热结果 对封闭系统

$$Q_{12} = A_1 \varphi_{12} \varepsilon_s C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$
$$\varepsilon_s = \frac{1}{1 + \varphi_{12} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + \varphi_{21} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

ε_s 是系统黑度，在实际计算中可进行简化，见下表。

系统黑度的确定

灰体相对位置 计算面积 角系数

系统黑度

1 极大的两平行面 A_1 或 A_2 $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$$

2 有限的两相等的平行面 同上

$$\varepsilon_s = \varepsilon_1 \times \varepsilon_2$$

3 很大的物体2包住物体1 A_1 $\varphi_{12} = 1$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_1$$

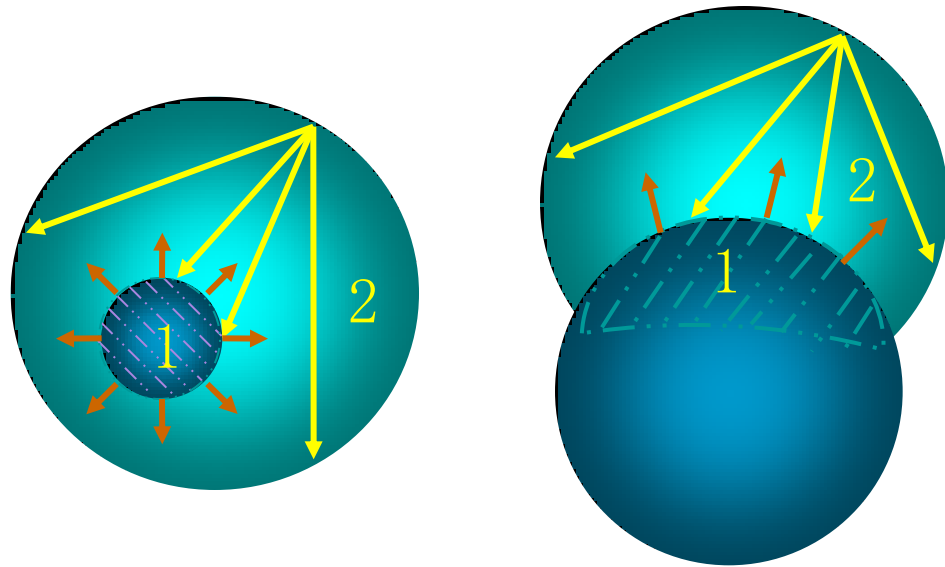
4 物体2恰好包住物体1: $A_1 \approx A_2$ A_1 $\varphi_{12} = 1$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$$

5 介于3、4之间 A_1 $\varphi_{12} = 1$

$$\varepsilon_s = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right)^{-1}$$

内包及内包物体具有凸表面系统



大房间内高温管道的辐射散热，气体管道内热电偶测温的辐射误差计算都属于此种情况。

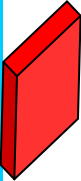
辐射传热的应用

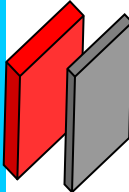
例4-15**遮热板**的作用。某车间内有高2.5m，宽1.8m的铸铁门，温度为427℃，室内温度为27℃。为了减少热损失，在炉门前40mm处放置一块尺寸和炉门相同而黑度为0.15的铝板，试求放置铝板前后因辐射而损失的热量。

炉门与室内壁间的辐射传热属于表中3的情况。

炉门与遮热板间的辐射传热属于表中1的情况；

遮热板与室内壁间的辐射传热亦属于表中3的情况。


$$Q_{12} = \varepsilon_1 A_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$


$$Q_{13} = \frac{A_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1}$$
$$Q_{32} = \varepsilon_3 A_3 C_0 \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

设置铝板（遮热板）是减少辐射散热损失的有效方法

影响辐射传热的主要因素

$$Q_{12} = A_1 \varphi_{12} \varepsilon_s C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

- **温度** 辐射热流量并不正比于温差，而是正比于温度四次方之差。在低温传热时，可忽略辐射的作用，而在高温时，则要考虑热辐射。
- **几何位置** 角系数决定了一个表面对另一个表面的投射角
- **表面黑度** 通过改变表面黑度的方法可以强化或减弱辐射传热。表面黑度大有利于散热，如为增加电气设备的散热能力，在其表面涂上黑度很大的油漆；表面黑度小可减少辐射散热，如镀黑度很小的银，铝。
- **辐射表面之间的介质** 当两表面之间的介质不是透热体时，需考虑介质的发射和吸收辐射能的能力。
- **减少辐射传热的一种有效办法** 采用遮热板。

例：用热电偶温度计测量管道中的气体温度。温度计读数为 650°C 。已知管壁温度为 440°C ，热电偶表面的黑度为 $\varepsilon_1=0.3$ ，气体与热电偶间的对流传热系数为 $50\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ 。试求：

- ①管道中气体的真实温度及热电偶的测温误差。
- ②若要减少测温误差，应采用那些措施？
- ③如采用单层遮热罩抽气式热电偶，热电偶的指示温度为多少？假设由于抽气的原因气体对热电偶的对流传热系数增至 $90\text{ W}/(\text{m}^2\text{ K})$ ，遮热罩表面的黑度为 $\varepsilon_2=0.3$ 。

①与管壁面相比，热电偶面积很小， $A_1/A_2\approx 0$ 。于是，在定态条件下

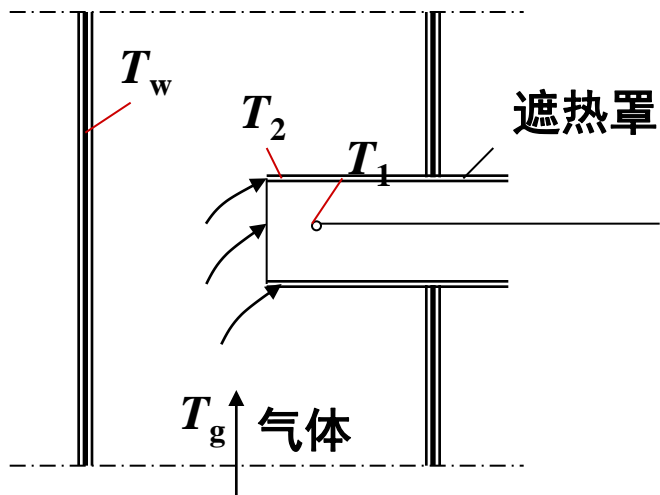
$$\frac{Q}{A} = \varepsilon_1 \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] = 0.3 \times 5.67 \times \left[\left(\frac{923}{100} \right)^4 - \left(\frac{713}{100} \right)^4 \right]$$

$$\frac{Q}{A} = \alpha_1 (T_g - T_1) = 50(T_g - 923) \quad \text{辐射与对流} Q \text{相等}$$

$$T_g = 923 + \frac{0.3 \times 5.67}{50} \times \left[\left(\frac{923}{100} \right)^4 - \left(\frac{713}{100} \right)^4 \right] = 1082\text{K}$$

测温的绝对误差为 159K ，相对误差为 14.7% 。测量误差太大，需改进！

②由计算过程可见，提高 α ，提高 t_w ，降低 ε ，均可减少误差。



③ 设遮热罩表面温度 T_2 ，气体以对流方式传给遮热罩内外表面的传热速率

$$\frac{Q_1}{A} = 2\alpha_2(T_g - T_2) = 2 \times 90(1082 - T_2)$$

遮热罩对管壁的散热速率

定态过程

$$\frac{Q_2}{A} = \varepsilon_2 \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] = 0.3 \times 5.67 \times \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{713}{100} \right)^4 \right] \longrightarrow T_2 = 1009K$$

气体对热电偶的对流传热速率 $\frac{Q_3}{A} = \alpha_2(T_g - T_1) = 90(1082 - T_1) \longrightarrow T_1 = 1045K$

热电偶对遮热罩的辐射散热速率 $\frac{Q_4}{A} = \varepsilon_2 \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0.3 \times 5.67 \times \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{1009}{100} \right)^4 \right]$

测温的绝对误差为37K，相对误差为3.4%。测量精度大为提高!