第五节　热辐射

一、基本概念

一个物体只要它具有一定的温度，就有一定的辐射能力。以电磁波的形式向外界辐射能量，同时，又不断吸收来自外界其它物体的辐射能。当它辐射出和吸收的辐射能不相等时，与外界要产生热传递，这种传热的方式称**热辐射**。

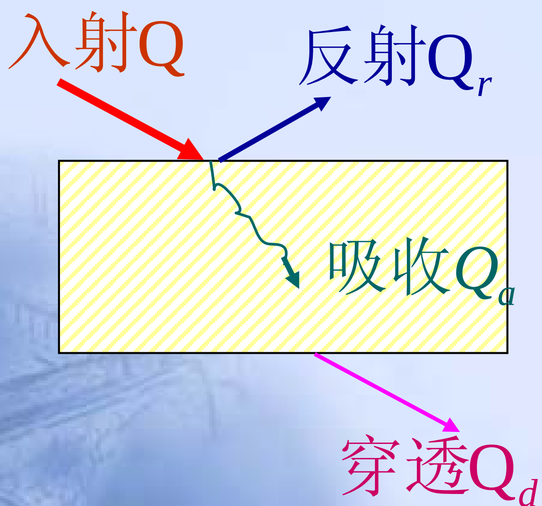
热辐射可以在真空中传播，不需要任何介质，这是热辐射与对流传导的主要不同点。

固体和液体的热辐射与气体的不同。固体和液体辐射只发生在物体的表面层内，而气体辐射则深入气体的内部，因此一般不讲气体辐射。

二、固体辐射

1.黑体的辐射能力和吸收能力——————斯蒂芬-波尔兹曼定律

光辐射所有的性质，热辐射都有。



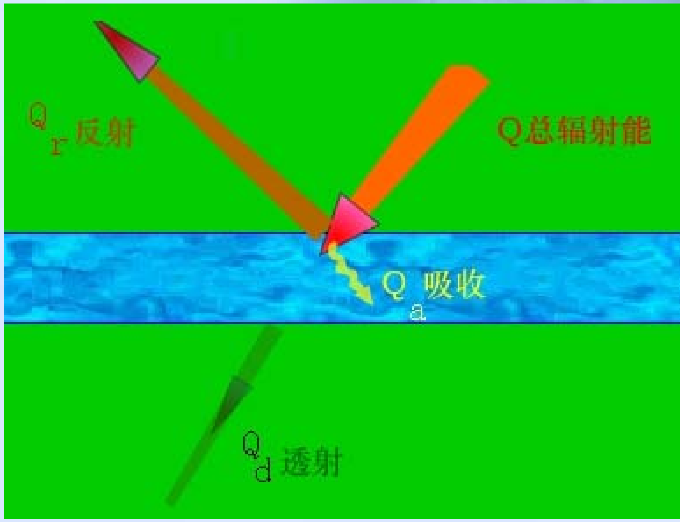
如图，投射在某一物体上的总辐射能为Q，其中Q_a被吸收，一部分Q_r被物体反射，其余部分Q_d穿透物体。那么：

$$Q=Q_a+Q_r+Q_d$$

或

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

记 $\begin{cases} \dfrac{Q_a}{Q} = a \rightarrow \text{物体对投入辐射的吸收率，} \\ \dfrac{Q_r}{Q} = r \rightarrow \text{反射率，} \\ \dfrac{Q_d}{Q} = d \rightarrow \text{穿透率。} \end{cases}$



$\begin{cases} a = 1\text{—黑体（吸收率=1的物体称为黑体），} \\ r = 1\text{—白体（镜体）（反射率 = 1的物体称为白体），} \\ d = 1\text{—透热体（双原子气体）（穿透率 = 1的物体称为透热体）。} \end{cases}$

对固体和液体不允许热辐射通过，d=0，

气体几乎没有反射率，r=0，

刚说过吸收率a等于1的物体称黑体，黑体是一种理想化的物体，绝对的黑体是不存在的。

黑体的辐射能力 E_b ：即单位时间单位黑体表面向外界辐射的全部波长的总能量（W/m²），服从下列**斯蒂芬-波尔兹曼定律**：

$$E_b = \sigma_0 T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

E_b、T — 分别为黑体的辐射力（ W/m^2）及表面的绝对温度， K。

σ_o（或c_0）— 黑体的辐射系数，其值 为5.67×10^{-8}(或$5.67 W/m^2 \cdot K^4$)

显然，热辐射与对流或导热遵循完全不同的规则。**四次方定律表明辐射传热对温度异常敏感**：低温时热辐射往往可以忽略，而高温时，热辐射则成为主要的传热方式。

2、实际物体的辐射能力和吸收能力

同一温度下，实际物体（$a<1$）的辐射能力E恒小于黑体的辐射能力 E_b。把实际物体的E与同温度下黑体的 E_b 之比称为该物体的黑度，以 ε 表示：

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}$$

显然，实际物体的黑度表征了其辐射能力的大小，或接近黑体的程度，且 $\varepsilon<1$，黑体不单纯是颜色的概念，也可将实际物体的辐射能力表示为：

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

实验表明，物体的黑度只与辐射物体本身的情况（物体的种类、表面温度、表面状况）有关，是物体一种性质，而与外界无关。P266页表6-4列出了一些常见材料的黑度值。由表6-4可以看出，金属表面的粗糙程度对ε影响很大，非金属材料的ε值都很高，一般在0.85~0.95之间，在缺乏资料时，可近似取作0.90。

实际物体对投入的辐射能的吸收率不仅取决于物体本身的情况（物体种类、表面温度、表面状况等），而且还与辐射物体的情况（即所辐射的波长）有关。因此，实际物体的吸收率a比其黑度ε更为复杂。（见P266图6-25）

物体的吸收率愈大，其辐射能力也愈大。

3、灰体的辐射能力和吸收能力——克希荷夫定律

实际物体的吸收率与投入辐射能的波长有关，也就是说与外界情况有关。对不同波长的辐射能有选择的吸收，即对不同的吸收具有选择性。如果物体对不同波长辐射能的吸收程度相同，那么，物体对投入辐射的吸收率与外界情况无关。

实验证明，对于波长在0.76~20μm范围内的辐射能，（它也是工业上应用最多的热辐射），大多数材料的吸收率随波长变化不大。

根据这一实际情况，把实际物体当成是对不同波长辐射能的吸收率相同的理想物体，把这种理想物体称为灰体。灰体它是一个理想化的概念。

◆灰体有如下特点：

1.灰体的吸收率 a 不随辐射线的波长而变；

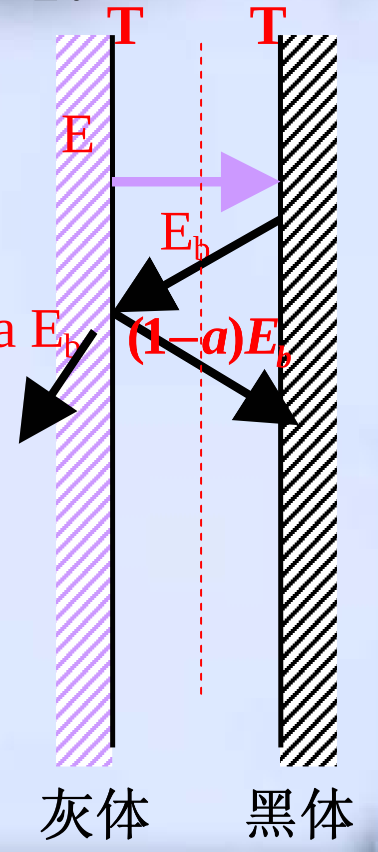
2.它是不透热体（即不允许热辐射透过）。a+r=1。

灰体的辐射能力可用黑度来表征，其吸收能利用a来表征，灰体的a是灰体自身的特点。

克希荷夫从理论上证明：同一灰体的吸收率a与在这个温度下它的黑度在数值上相等：

$$a = \varepsilon$$

此式称为克希荷夫定律。



这样，只要知道实际物体（可近似看作为灰体者）的黑度（可通过实验测定），其值也就是它对任何投入辐射的吸收率。从该定律可知：辐射能力越大，吸收能力也越大。

根据黑度的定义：

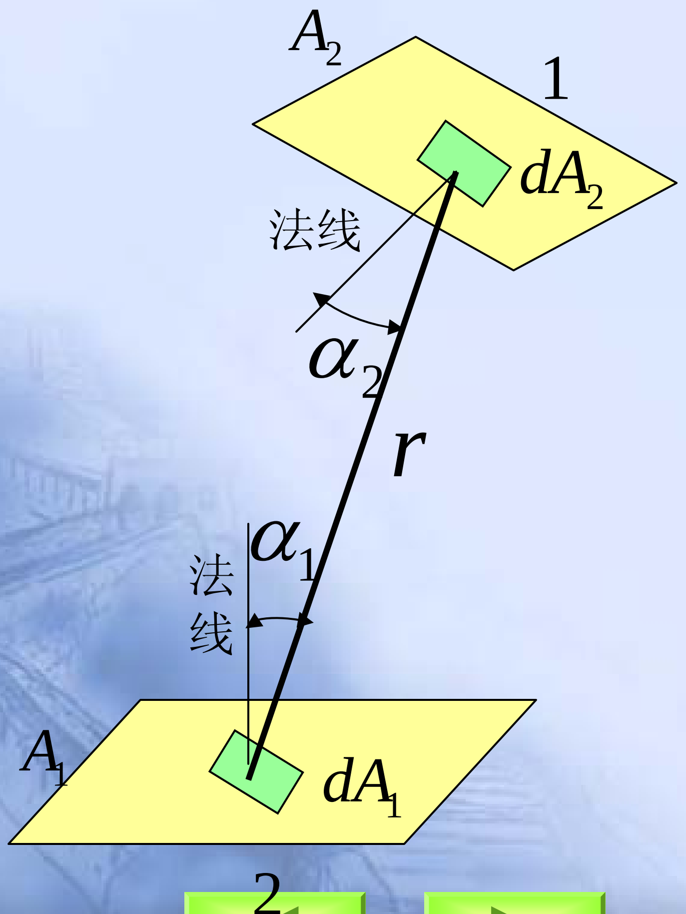
$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = a$$

$$\frac{E}{a} = E_b$$

表明灰体在一定温度下的辐射能力和吸收率之比恒等于同温度下黑体的辐射能力。

4、黑体间的辐射传热和角系数

下面讨论两理想黑体间的辐射传热。



如左图，黑体1向外辐射的能量只有一部分$Q_{1\to2}$投射到黑体 2 并被全部吸收。同样，黑体 2 向外辐射的能量也只有一部分 $Q_{2\to1}$ 投射到黑体1上并被吸收。于是，两黑体间的热流量为：

$$Q_{12}=Q_{1\to2}-Q_{2\to1}$$

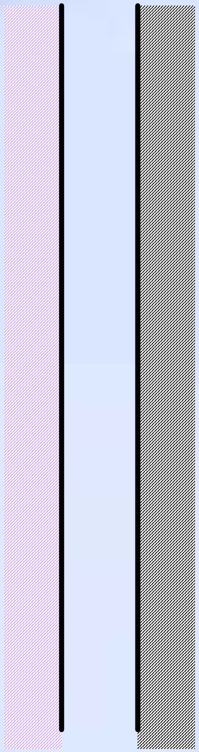
可见，计算Q_{12} 的关键是φ_{12}（或φ_{21} ）的求取。当黑体表面A_1、A_2及其相应位置已知时，φ_{12} 和φ_{21} 可分别用兰贝特公式计算，工程尚为方便起见，把 φ 的计算结果绘成曲线，见P268 图6-27 和图6-28。

对于相距很近的平行黑体平板，两平板的面积相等且足够大，则：

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

则：

$$q = \frac{Q_{12}}{A} = E_{b1} - E_{b2} = C_0\left(\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right)$$



5、灰体间的辐射传热

灰体间的辐射传热过程比黑体复杂的多。设有任意的两个灰体1和2，其面积分别为A_1、A_2，表面温度T_1、T_2不变，灰体1在单位时间内辐射的总能量一部分投射到灰体1上，其余部分散失于外界，投射到灰体2的能量一部分被吸收，又有部分被反射，被反射的又有一部分投射到灰体1。这一能量同样被灰体1部分吸收，而其余部分又再次被反射。如此过程，无穷反复多次，所以灰体间辐射是经过若干次的。

两灰体间的热量交换：

$$Q_{12}=\frac{A_1\varphi_{12}(E_{b1}-E_{b2})}{1+\varphi_{12}\left(\frac{1}{\varepsilon_1}-1\right)+\varphi_{21}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)} \quad (6-98)$$

或：$$Q_{12}=A_1\varphi_{12}\varepsilon_s c_0\left(\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right) \quad (6-99)$$

式中： $$\varepsilon_s = \frac{1}{1+\varphi_{12}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_1}-1\right)+\varphi_{21}\left(\dfrac{1}{\varepsilon_2}-1\right)}$$

ε_s称为系统黑度，它由两物体的角系数及黑度组成。

式（6-99）为封闭系统内两灰体之间辐射传热的一般表达式，在下列情况下可进一步简化：

（1）、对于两块相距很近而面积足够大的平行板，

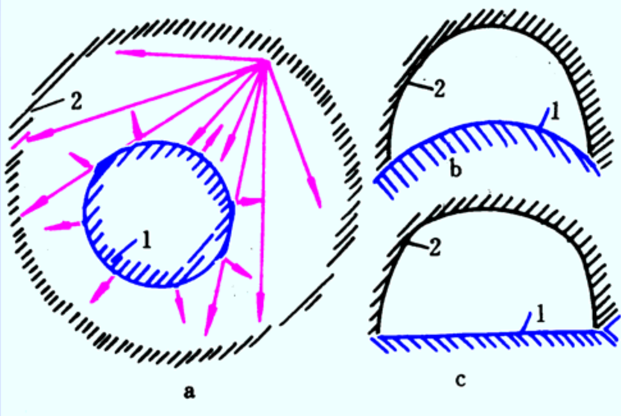
$$\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$$

则：
$$Q_{12} = \frac{A_1 c_0\left(\left(\dfrac{T_1}{100}\right)^4-\left(\dfrac{T_2}{100}\right)^4\right)}{\dfrac{1}{\varepsilon_1}+\dfrac{1}{\varepsilon_2}-1}$$

（2）、对于图6-30 a、b所示的内包系统

$$\varphi_{12} = 1;\ \varphi_{21} = \varphi_{12}\frac{A_1}{A_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

$$Q_{12} = \frac{A_1 c_0\left(\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$



一物体被另一物体所包围时的辐射

当表面$A_2 >> A_1$时，$\frac{A_1}{A_2} \approx 0$，则：

$$Q_{12} = \varepsilon_1 A_1 c_0\left(\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right)$$

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这种情况。

6、影响辐射传热的主要因素

（1）、温度的影响：　$Q_{12} \propto \left(T_1^4 - T_2^4\right)$，

（2）、几何位置的影响：　φ_{12}角系数有关，

（3）、表面黑度的影响：　ε

（4）、辐射表面之间介质的影响。

7、辐射给热系数

气体辐射。（不讲）

也将辐射热流量用统一的牛顿冷却定律表示，辐射给热系数定义为：

$$\alpha_R = \frac{Q_R}{A(T_1 - T_2)}$$

将式（6-99）代入上式，可得：

$$\alpha_R = \varepsilon_s \varphi_{12} c_0 \times 10^{-8} \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$$

$$= \varepsilon_s \varphi_{12} c_0 \left(T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_2^2 T_1 + T_2^3 \right) \times 10^{-8}$$

ε_s、$\varphi_{12} \Rightarrow \alpha_R$（辐射给热系数）

当对流给热的温差也是$T_1 - T_2$时，则总热流密度为：

$$q_t = q_c + q_R = \left(\alpha_c + \alpha_R \right)\left(T_1 - T_2 \right) = \alpha_t \left(T_1 - T_2 \right)$$

本节完