

《传 热 学》电子课件

上海电力学院
能源与环境工程学院
工程热物理学科

第8章 热辐射基本定律和辐射特性

§ 8.1 热辐射现象的基本概念

§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

§ 8.3 固体和液体的辐射特性

§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系



§ 8.1 热辐射现象的基本概念

一、热辐射与辐射换热

1. 热辐射

- ◆ 由于热的原因而产生的电磁波辐射。
- ◆ 热辐射的电磁波是物体内部微观粒子热运动状态改变的激发出来的。

2. 热辐射的特点

- ◆ 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；
- ◆ 可以在真空中传播；
- ◆ 伴随能量形式的转变；
- ◆ 具有强烈的方向性；
- ◆ 辐射能与温度和波长均有关；
- ◆ 发射辐射取决于温度的4次方。



§ 8.1 热辐射现象的基本概念

一、热辐射与辐射换热

3. 辐射换热

物体在向外界辐射热辐射能的同时，也在不停地吸收周围物体投射到它表面的热辐射。

(1) 辐射换热

◆ 物体间以热辐射的方式进行热量的交换；

◆ 物体间相互辐射与吸收的综合效果；

◆ $\Phi_{\text{某物体与外界的辐射换热量}} = \Phi_{\text{该物体的辐射热量}} - \Phi_{\text{该物体的吸收热量}}$

◆ $\Phi_{\text{物体1与物体2的辐射换热量}} = \Phi_{\text{物体1给物体2的辐射热量}} - \Phi_{\text{物体2给物体1的辐射热量}}$

(2) 辐射换热的特点

◆ 物体无需直接接触，中介无需介质；

◆ 辐射换热是一个动态的过程；时刻都在进行；

◆ 物体温度相等时，辐射换热仍在进行，只是辐射换热量为零。



§ 8.1 热辐射现象的基本概念

二、热辐射频谱的分布范围

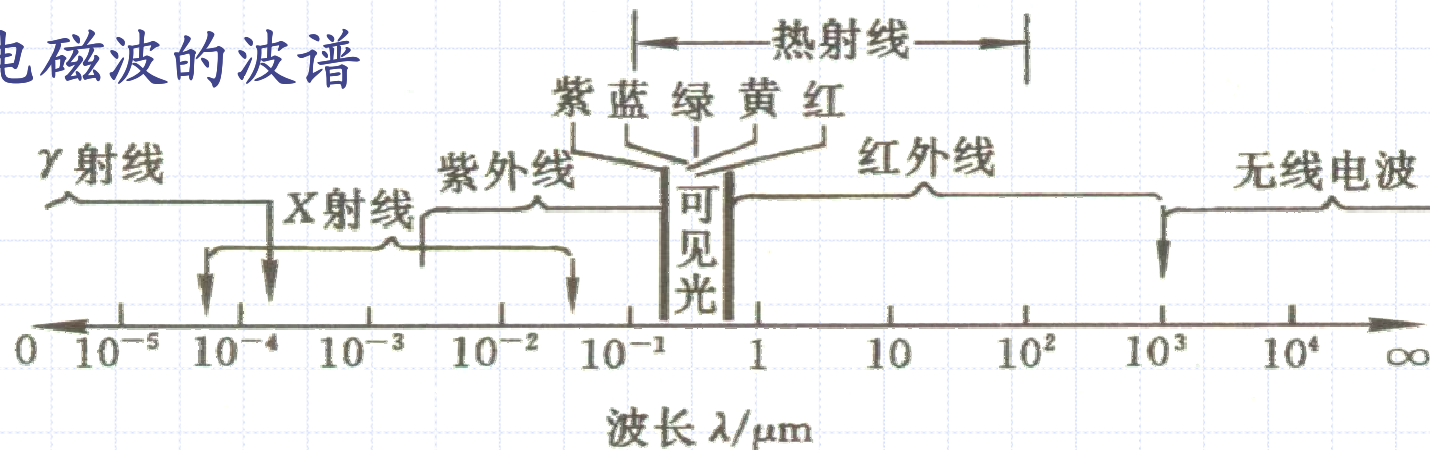
1. 电磁波的标识

频率 波长

$$C = f\lambda$$

- ◆ 电磁波的频率与波长一一对应；
- ◆ 热辐射的电磁波通常用波长加以标识。

2. 电磁波的波谱



§ 8.1 热辐射现象的基本概念

二、热辐射的分布范围

3. 热辐射的分布范围

- ◆ 理论上讲，波长从 0 到 ∞ 的范围内均分布有热辐射；
- ◆ 但物体辐射出的热辐射能的波长分布与物体的温度有关；
- ◆ 工业上有实际意义的热辐射区域一般为 $0.1 \sim 100 \mu m$ 。



§ 8.1 热辐射现象的基本概念

三、热辐射的投射特性

1. 三种投射特性

投入辐射：单位时间内投射到单位面积物体表面上的全波长范围内的辐射能。 W/m^2

反射 吸收 穿透

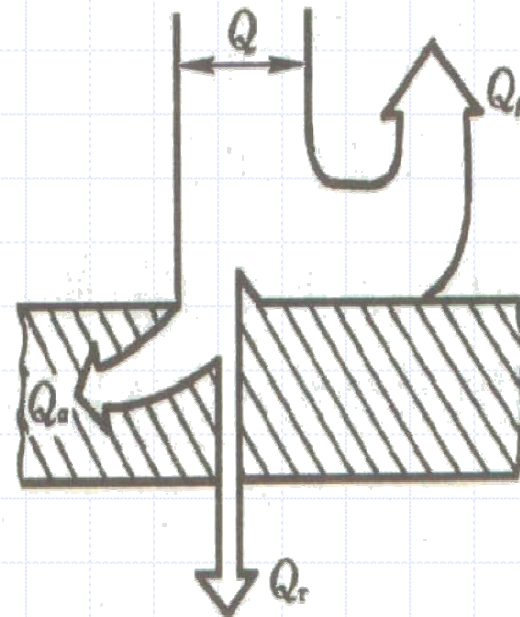
$$Q = Q_{\rho} + Q_{\alpha} + Q_{\tau}$$

反射比： $\rho = \frac{Q_{\rho}}{Q}$

吸收比： $\alpha = \frac{Q_{\alpha}}{Q}$

穿透比： $\tau = \frac{Q_{\tau}}{Q}$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$



§ 8.1 热辐射现象的基本概念

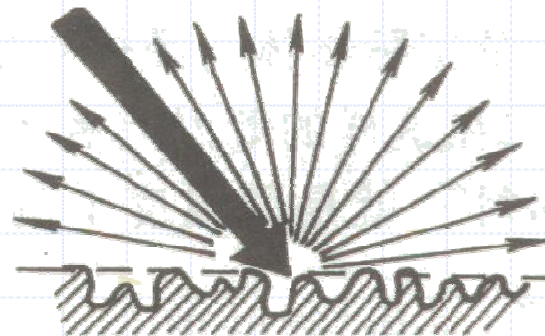
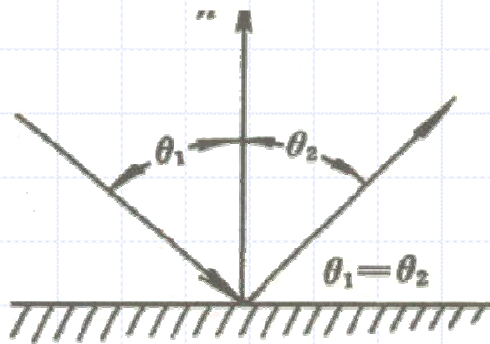
三、热辐射的投射特性

2. 固体、液体的投射特性

热辐射能进入固体、液体后在极短的距离内就被吸收完了。

$$\tau = 0 \quad \alpha + \rho = 1$$

- ◆ 热辐射的投射情况与固体、液体的表面状况有关
- ◆ 一般工程材料的表面都形成漫反射



§ 8.1 热辐射现象的基本概念

三、热辐射的投射特性

3. 气体的投射特性

$$\rho = 0 \quad \alpha + \tau = 1$$

◆ 辐射和吸收在整个气体容积中进行，与气体的表面状况无关

4. 黑体、镜体和白体（透明体）

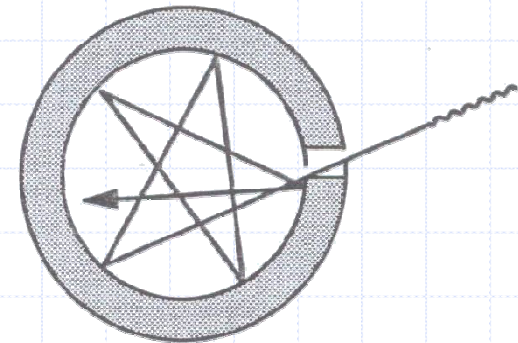
黑体： $\alpha = 1$ 的物体

黑体概念提出的意义：在研究黑体辐射的基础上，通过对黑体辐射的修正，得到实际物体的辐射。

镜体： $\rho = 1$ 的物体。

白体（透明体）： $\tau = 1$ 的物体。

黑体模型



§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

黑体辐射的基本定律从(1)热辐射能随波长的分布、(2)热辐射总能量的大小、(3)热辐射能在空间的分布三个方面讨论黑体的辐射。

一、热辐射能的表示方法

1. 辐射力

单位时间内，物体单位表面积向半球空间发射的所有波长的能量总和。

黑体的辐射力： E_b 实际物体的辐射力： E

2. 光谱辐射力

单位时间内，物体单位表面积向半球空间发射的包含某一波长 λ 单位波长范围内的能量。

黑体的光谱辐射力： $E_{b,\lambda}$ 实际物体的光谱辐射力： E_λ

3. 二者的关系

$$E_b = \int_0^\infty E_{b,\lambda} d\lambda \qquad E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$



§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

二、普朗特定律

- ◆ 揭示黑体辐射按波长的分布规律
- ◆ 给出了黑体光谱辐射力 $E_{b,\lambda}$ 随波长和温度的依变关系

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}$$

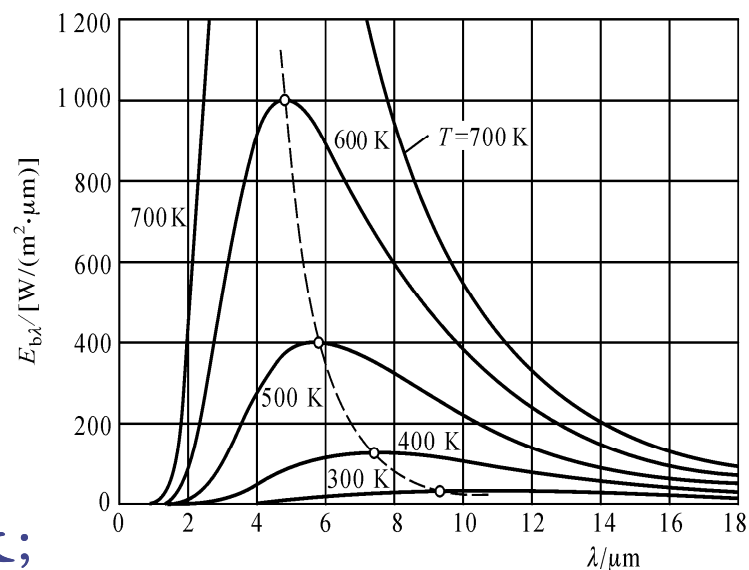
◆ 维恩位移定律

$$\lambda_m T = 2.8976 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

例： $T = 5800\text{K}$ $\lambda_m = 0.5\mu\text{m}$

特点：

- (1) 温度愈高，同一波长下的光谱辐射力愈大；
- (2) 在一定的温度下，黑体的光谱辐射力在某一波长下具有最大值；
- (3) 随着温度的升高， $E_{b\lambda}$ 取得最大值的波长 λ_m 愈来愈小。



§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

三、斯忒藩 - 玻耳兹曼定律

◆ 给出了黑体的辐射力 E_b 的大小

1. 黑体辐射力 E_b

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda = \sigma T^4$$

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

式中, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$$C_0 = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

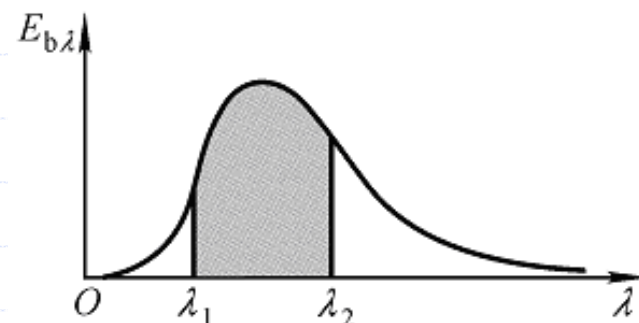


§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

三、斯忒藩 - 玻耳兹曼定律

2. 黑体的波段辐射力 $\Delta E_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$

黑体在波长 λ_1 和 λ_2 区段内所发射的辐射力



$$\Delta E_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda$$
$$F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = \frac{\Delta E_{b(\lambda_1-\lambda_2)}}{E_b} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} - \frac{\int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} = F_{b(0-\lambda_2)} - F_{b(0-\lambda_1)} = f(\lambda_2 T) - f(\lambda_1 T)$$

◆ 黑体辐射函数

$F_{b(0-\lambda)}$ 波长从 0 至 λ 的黑体辐射占黑体辐射力 E_b 的百分数

$$F_{b(0-\lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{C_1 (\lambda T)^{-5}}{e^{C_2/(\lambda T)} - 1} d(\lambda T) = f(\lambda T)$$

$f(\lambda T)$ 称为黑体辐射函数 (详见表 7-1)。



§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

四、兰贝特定律

- ◆ 揭示了黑体辐射在空间的分布规律
- ◆ 黑体辐射在空间分布的比较基础：
(1)相同立体角；(2)相同可见辐射面

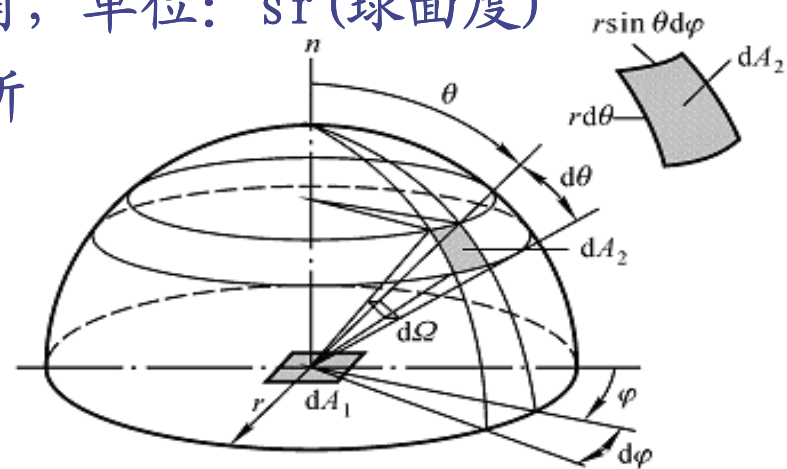
1. 立体角

球面面积除以球半径的平方称为立体角，单位：sr (球面度)

(θ, φ) 处上的微元面积 dA_c 对球心所张的微元立体角

$$d\Omega = \frac{dA_c}{r^2} = \frac{rd\theta \cdot r \sin\theta d\varphi}{r^2}$$
$$= \sin\theta d\theta d\varphi$$

半球面积所张的立体角： $\Omega = \frac{2\pi r^2}{r^2} = 2\pi$



§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

四、兰贝特定律

2. 定向辐射强度 L

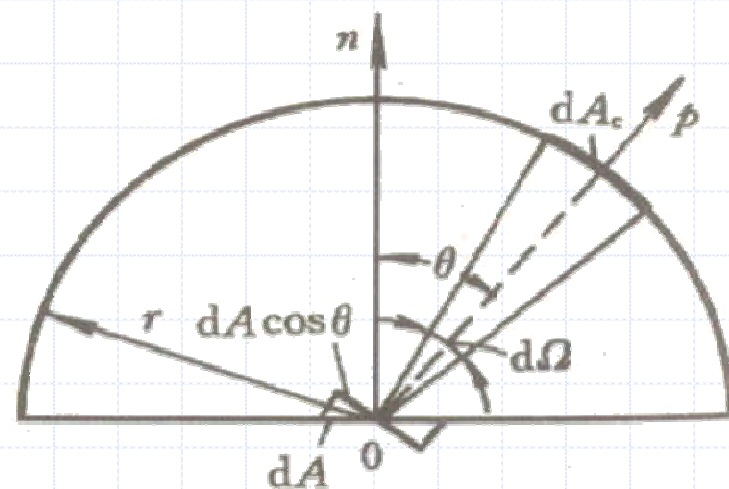
单位时间内，从单位可见辐射面辐射出去的落在单位立体角内的所有波长的辐射能量，称为定向辐射强度 (L)，单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$ 。

与辐射面法向成 θ 角方向上的定向辐射强度，记为 $L(\theta)$

$$L(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{dA \cos \theta d\Omega}$$

$$L(\theta) = L(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{dA \cos \theta d\Omega}$$

定向辐射强度与角 φ 无关



§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

四、兰贝特定律

3. 兰贝特定律

(1) 兰贝特定律 (余弦定律)

黑体的辐射强度与方向无关，半球空间各方向上的辐射强度都相等。

$$L_b(\theta) = L_b = \text{Const}$$

单位时间内单位辐射面积发出去的辐射能，落在空间不同方向单位立体角内的能量数值不等，正比于该方向与辐射面法向夹角的余弦。

$$L_b(\theta) = \frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{dA \cos \theta d\Omega} \Rightarrow L_b(\theta) \cos \theta = \frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{dA d\Omega}$$

满足兰贝特定律的物体表面为漫射表面。

黑体是漫射表面。



§ 8.2 黑体热辐射的基本定律

四、兰贝特定律

3. 兰贝特定律

(2) 定向辐射强度 L 与辐射力 E 的关系

余弦定律:
$$\frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{dA d\Omega} = L_b \cos \theta$$

半球空间方向积分:
$$E_b = \int_{\Omega=2\pi} \frac{d\Phi(\theta, \varphi)}{dA d\Omega} d\Omega = \int_{\Omega=2\pi} L_b \cos \theta d\Omega$$

$$E_b = \int_{\Omega=2\pi} L_b \cos \theta d\Omega = \int_{\Omega=2\pi} L_b \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi$$

$$= L_b \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi L_b$$



§ 8.3 固体和液体的辐射特性

- ◆ 实际物体的辐射不同于黑体
- ◆ 将实际物体的辐射特性与黑体比较，引出发射率（黑度）的概念，

一、光谱发射率，发射率

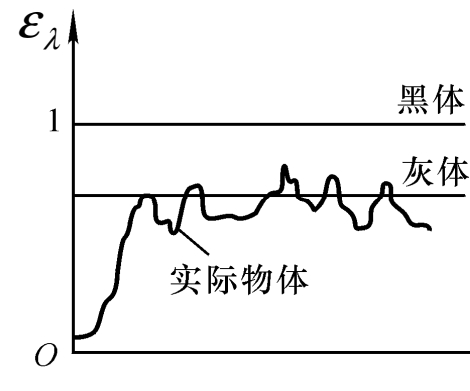
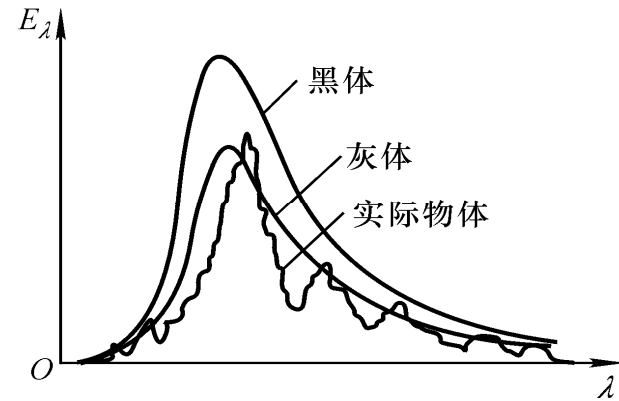
- ◆ 实际物体的光谱辐射力随波长的变化规律不同于黑体

光谱发射率：
$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$$

发射率：
$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4}$$

- ◆ 实际物体的辐射力不严格遵循四次方定律，所存在的偏差包含在由实验确定的发射率数值之中

实际物体的辐射力：
$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4$$



§ 8.3 固体和液体的辐射特性

二、定向发射率

◆ 实际物体的辐射在空间方向的分布不符合兰贝特定律

$$\text{定向发射率: } \varepsilon_{\theta} = \frac{L(\theta)}{L_b(\theta)} = \frac{L(\theta)}{L_b} = f(\theta)$$

实际物体的定向发射率是方向角 θ 的函数。

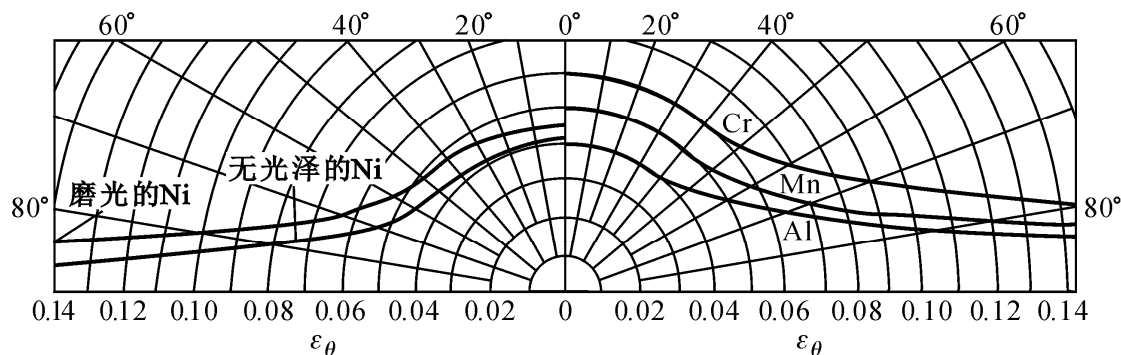
$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} L \sin\theta \cos\theta d\theta}{\pi L_b} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\theta} \sin\theta \cos\theta d\theta}{\pi}$$

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\pi} \varepsilon_{\theta} d\theta}{\pi}$$

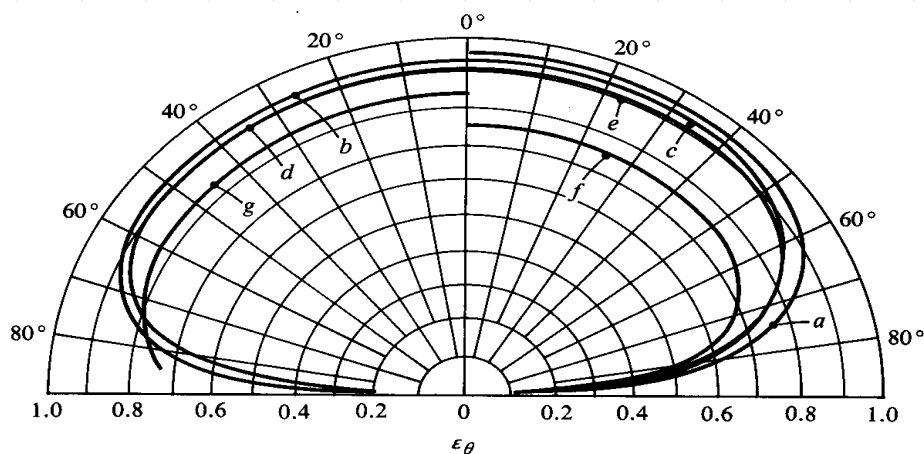


§ 8.3 固体和液体的辐射特性

二、定向发射率



几种金属材料的定向发射率



几种非金属材料定向发射率

◆ 尽管实际物体的定向发射率随 θ 角变化，但，物体在半球空间的平均发射率 ε 确基本不变，约等于法向发射率 ε_n 。

$$\text{金属} \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} = 1.0 \sim 1.2$$

$$\text{非金属} \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} = 0.95 \sim 1.0$$

◆ 近似地认为大多数工程材料服从兰贝特定律，为漫射表面。

◆ 实际物体发射率数值大小取决于材料的种类、温度和表面状况，通常由实验测定。



§ 8.3 固体和液体的辐射特性

本节中，几点需要注意的问题：

1. 将不确定因素归于修正系数，这是由于热辐射非常复杂，很难理论确定，实际上是一种权宜之计；
2. 服从兰贝特定律的表面成为漫射表面。虽然实际物体的定向发射率并不完全符合兰贝特定律，但仍然近似地认为大多数工程材料服从兰贝特定律；
3. 对于一般材料，可把法向发射率 ε_n 近似作为半球平均发射率 ε 。材料的发射率由实验测定。



§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

一、几个概念

1. 投入辐射

单位时间内投射到单位表面上所有波长能量的总和，记为 G 。

2. 吸收比 光谱吸收比

吸收比：物体对投入辐射所吸收的百分数 $\alpha = \frac{G_\alpha}{G}$

光谱吸收比：物体对某一特定波长的辐射能所吸收的百分数

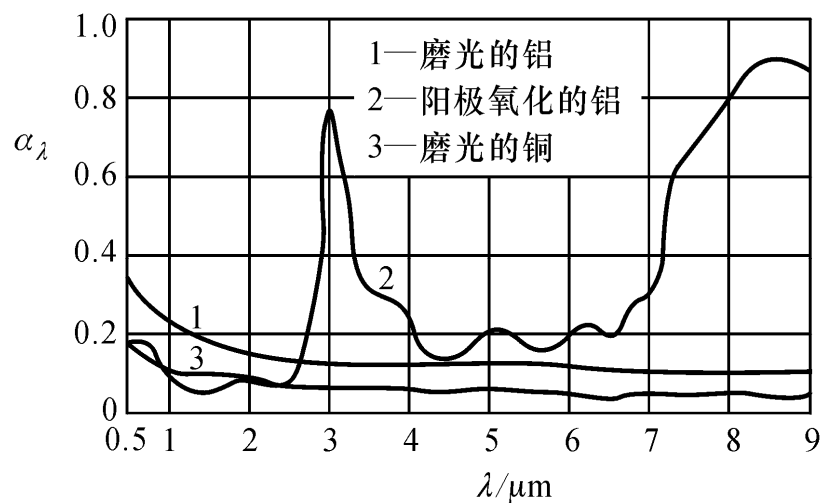
$$\alpha_\lambda = \frac{G_{\alpha\lambda}}{G_\lambda} = \frac{\text{吸收的某一特定波长的能量}}{\text{投入的某一特定波长的能量}}$$



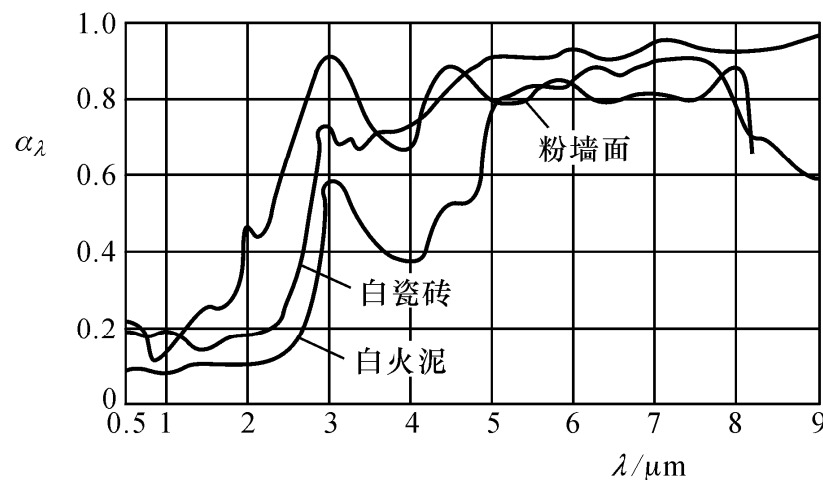
§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

一、几个概念

2. 吸收比 光谱吸收比



几种金属材料的光谱吸收比



几种非金属材料的光谱吸收比

◆ 实际物体的光谱吸收是波长的函数。

§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

一、几个概念

3. 选择性吸收

物体的光谱吸收比随波长而异的特性称为物体的吸收具有选择性。

- ◆ 由于物体的选择性吸收的特性，实际物体的吸收比不确定。
- ◆ 实际物体的吸收比不仅取决于物体本身材料的种类、温度及表面性质，还和投入辐射的波长分布有关。

$$\alpha_1 = \frac{\text{吸收的总能量}}{\text{投入的总能量}} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T_1) \varepsilon(\lambda, T_2) E_{b\lambda}(T_2) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T_2) E_{b\lambda}(T_2) d\lambda}$$
$$= f(T_1, T_2, \text{表面1的性质}, \text{表面2的性质})$$



§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

一、几个概念

3. 选择性吸收

◆ 选择性吸收特性的应用

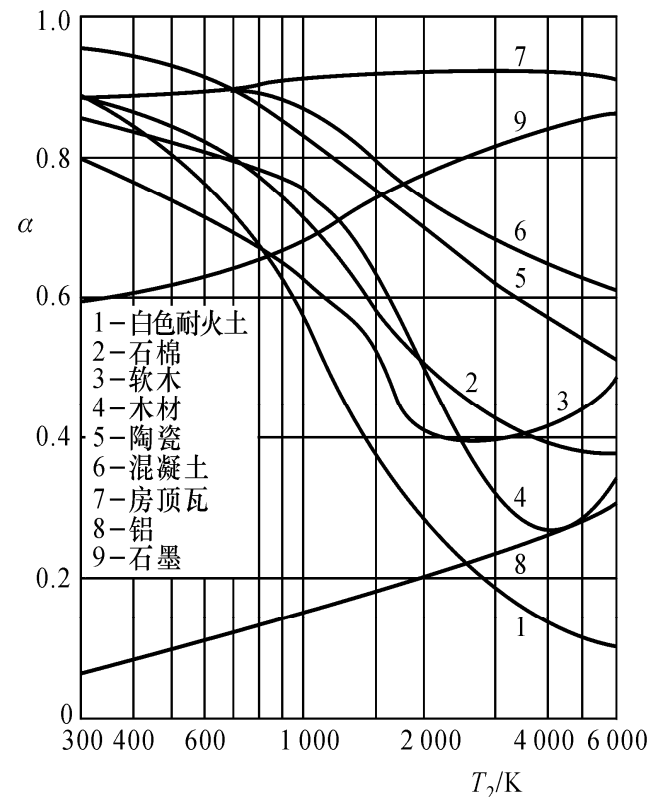
暖房的设计

◆ 选择性吸收特性给辐射计算带来的困难

物体的吸收比要根据吸收一方和发出投入辐射一方两方的性质和温度来确定。

$$\alpha_1 = \frac{\text{吸收的总能量}}{\text{投入的总能量}} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T_1) \varepsilon(\lambda, T_2) E_{b\lambda}(T_2) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T_2) E_{b\lambda}(T_2) d\lambda}$$

= $f(T_1, T_2, \text{表面1的性质, 表面2的性质})$



一些材料对黑体辐射的吸收比随黑体温度的变化。



§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

一、几个概念

4. 灰体

◆ 光谱吸收比与波长无关的物体称为灰体。

$$\alpha_{\lambda} = \text{Const} = \alpha$$

灰体的吸收比只与灰体的性质和温度来确定，而与发出投入辐射一方无关。

◆ 灰体概念引入的意义

确定物体的吸收比时不必考虑投入辐射能量随波长的分布情况，简化辐射换热的计算



§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

二、基尔霍夫定律

◆ 揭示了实际物体的辐射与吸收的内在联系

1. 基尔霍夫定律

实际物体对黑体辐射的吸收比

物体2: 实际物体 物体1: 黑体

物体1的吸收: αE_b 物体2的吸收: E

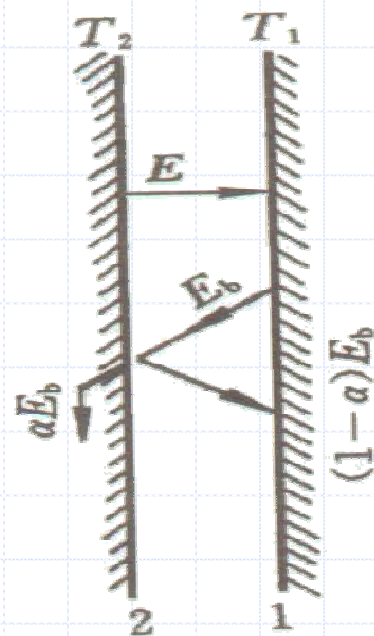
物体1的辐射: E 物体2的辐射: αE_b

两者的辐射换热量: $q = E - \alpha E_b$

两者温度相等时, 辐射换热量为零。

$$0 = E - \alpha E_b \Rightarrow \alpha = E / E_b = \varepsilon$$

结论: 在热力学平衡状态下, 物体对来自黑体辐射的吸收比等与物体的发射率



§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

二、基尔霍夫定律

2. 基尔霍夫定律的推广 $\alpha = \varepsilon$

上式成立的条件:

(2) 物体的温度与黑体的温度相等。

(1) 投射辐射源必须是同温度下的黑体

问题: 如何才能去掉两个条件, 让上式简单的结论恒成立?

解答: 当实际物体为灰体时, 上式简单的结论成立!

原因: (1) 首先, 让处于热平衡的灰体与黑体进行辐射换热, 此时, 灰体的吸收比等于灰体的发射率, 即 $\alpha = \varepsilon$ 。

(2) 由于灰体的吸收比只与自身状况有关, 而与外界无关, 即灰体不管与何种物体进行辐射换热, 吸收比不变, 故 $\alpha = \varepsilon$ 。



§ 8.4 实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

二、基尔霍夫定律

3. 不同层次上的基尔霍夫定律

层 次	数学表达式	成立条件
光谱, 定向	$\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi, T) = \alpha(\lambda, \theta, \varphi, T)$	无条件, θ 为天顶角
光谱, 半球	$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$	漫射表面
全波段, 半球	$\varepsilon(T) = \alpha(T)$	与黑体处于热平衡或对漫灰表面

注意:

- (1) 漫射表面: 符合兰贝特定律的物体表面;
- (2) 灰体: 指光谱吸收比与波长无关的物体,
- (3) 漫灰表面: 发射和吸收辐射与黑体在形式上完全一样, 只是减小了一个相同的比例。



作业

◆ 黑体辐射基本定律(387页):8-5、8-9

