第十一章
辐射换热

Radiation Heat Transfer

第11章作业（1）

11-3

11-6

11-8

11-1 热辐射的基本概念

主要从宏观角度介绍热辐射的基本概念、基本定律。

一、热辐射的基本特点

热辐射是由于物体内部微观粒子的热运动而使物体向外发射辐射能的现象，具有以下特点：

（1）所有温度大于0 K的物体都具有发射热辐射的能力，温度愈高，发射热辐射的能力愈强。

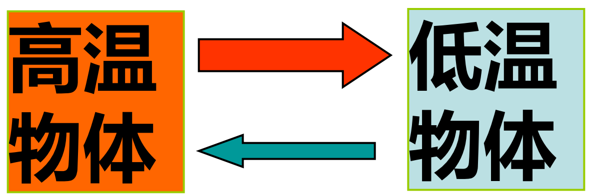
发射热辐射：内能 $\longrightarrow$ 辐射能

（2）**所有实际物体都具有吸收热辐射的能力，**

吸收热辐射：　辐射能 → **内能**

（3）**热辐射不依靠中间媒介，可以在真空中传播；**

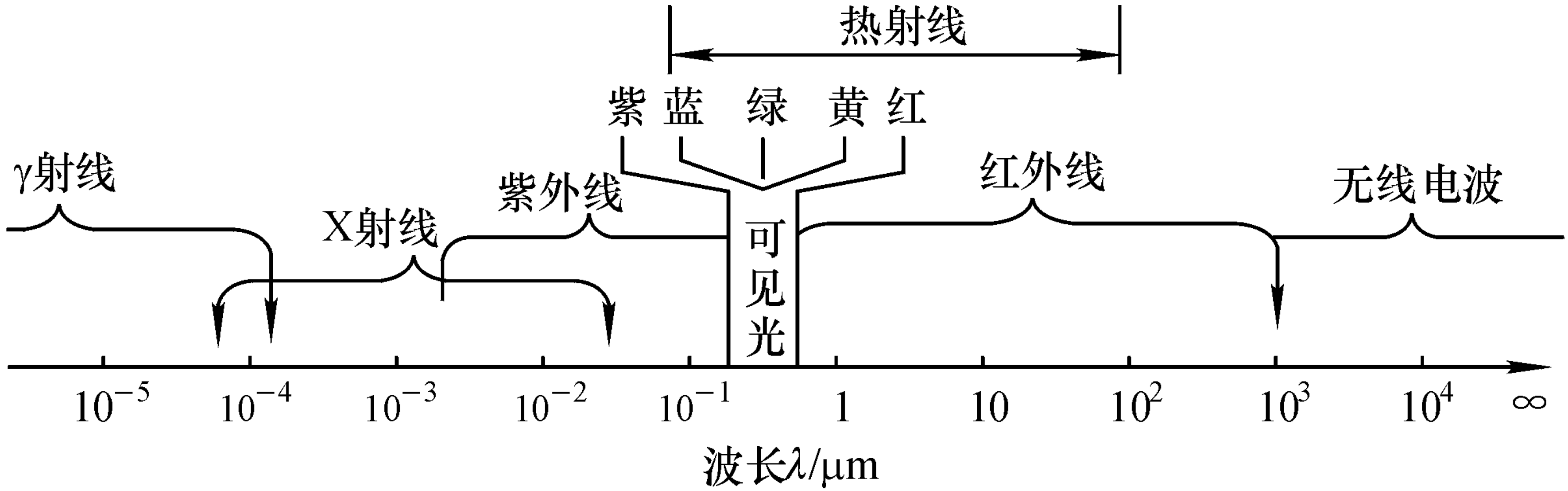
（4）**物体间以热辐射的方式进行的热量传递是双向的；**



热辐射是热量传递基本方式之一

（5）**红外辐射范围内，绝大多数固体和液体的发射和吸收只发生在表面以下很浅的距离内（金属表面：约**1μm；**非金属表面：1mm以内），仅取决于材料表面的性质、特征和温度，与其内部状况无关。**

二、电磁波的波谱



γ射线、 X射线、 X射线、

可见光： $0.38 < \lambda < 0.76\ \mu m$

红外线： $0.76 < \lambda < 10^3\ \mu m$

微 波： $10^3 < \lambda < 10^6\ \mu m$

无线电波： $\lambda > 10^3\ \mu m$

理论上热辐射的波长范围从零到无穷大，但在日常生活和工业上常见的温度范围内，热辐射的波长主要在0.1μm至100μm之间,包括部分紫外线、可见光和部分红外线三个波段。

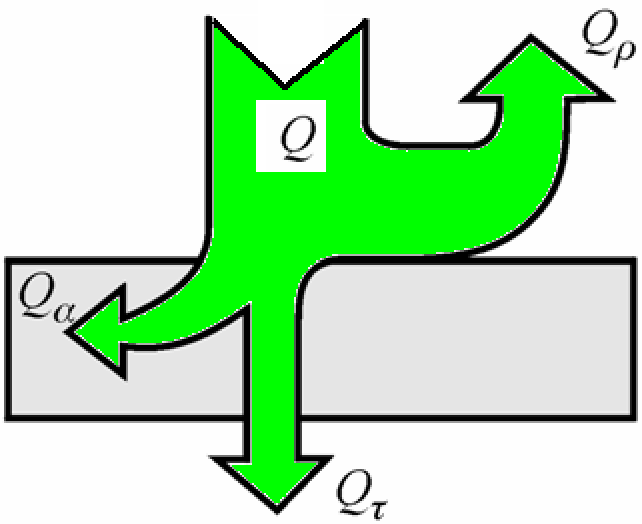
- **辐射换热：**以热辐射的方式进行的热量交换。
- **辐射换热的主要影响因素：**

（1）物体本身的温度、表面辐射特性；

（2）物体的大小、几何形状及相对位置。

三、吸收、反射与透射

投入辐射能：单位时间内投射到物体表面上的全波长范围内的辐射能。Q, W



吸收辐射能： Q_α, W

反射辐射能： Q_ρ, W

透射辐射能： Q_τ, W

吸收比： $\alpha = \dfrac{Q_\alpha}{Q}$

反射比： $\rho = \dfrac{Q_\rho}{Q}$

透射比： $\tau = \dfrac{Q_\tau}{Q}$

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

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

如果投入辐射是某一波长λ的辐射能Q_λ，则

$$\alpha_\lambda = \frac{Q_{\lambda\alpha}}{Q_\lambda} \qquad \rho_\lambda = \frac{Q_{\lambda\rho}}{Q_\lambda} \qquad \tau_\lambda = \frac{Q_{\lambda\tau}}{Q_\lambda}$$

光谱吸收比　　光谱反射比　　光谱透射比

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

α，ρ，τ**与**α_λ，ρ_λ，τ_λ**的关系：**

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda} \qquad \rho = \frac{\int_0^\infty \rho_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda} \qquad \tau = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}$$

注意:

(1) $\alpha_\lambda, \rho_\lambda, \tau_\lambda$ 属于物体的辐射特性，取决于物体的种类、温度和表面状况，是波长的函数。

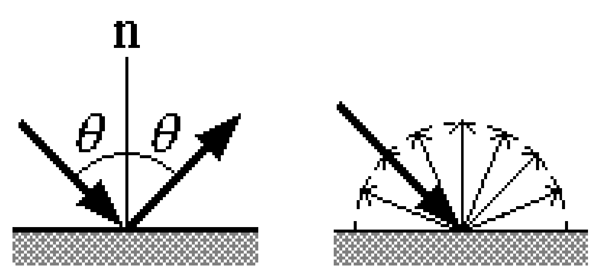
α, ρ, τ 不仅取决于物体的性质，还与投射辐射能的波长分布有关。 $\alpha = \int_0^\infty \alpha_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda \Big/ \int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda$

(2) 固体和液体对辐射能的吸收和反射基本上属于表面效应。

(3) 对于一般固体和液体， $\tau = 0,\ \alpha + \rho = 1$ 。

镜反射与漫反射

产生何种反射取决于物体表面的粗糙程度和投射辐射的波长 。



(a)镜反射 (b)漫反射

四、灰体与黑体

灰体：光谱辐射特性不随波长而变化的假想物体，即α_λ，ρ_λ，τ_λ分别等于常数。

$$\alpha=\frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda} \qquad \rho=\frac{\int_0^\infty \rho_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda} \qquad \tau=\frac{\int_0^\infty \tau_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}$$

$$\Rightarrow \quad \alpha=\alpha_\lambda \qquad \rho=\rho_\lambda \qquad \tau=\tau_\lambda$$

绝对黑体：吸收比$\alpha = 1$的物体，简称黑体。黑体和灰体一样，是一种理想物体。

镜体：$\rho=1$ （漫反射时称为白体）

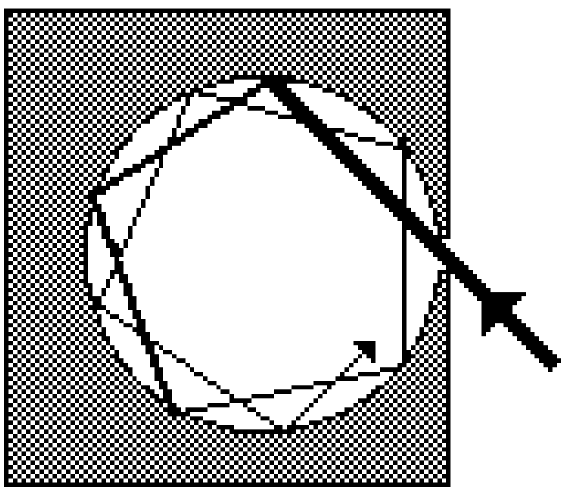
绝对透明体：$\tau=1$

注意黑体、白体与黑色、白色物体的区别。

对热辐射而言，黑体、白体一般与物体的颜色无关。**例：**白雪对红外线的吸收比高达0.94；白布和黑布对可见光的吸收比差别很大，但对红外线的吸收比基本相同

玻璃只透过可见光，对 $\lambda > 3\mu m$ 的红外线不透明

人工黑体



当 $A_{孔}/A_{内壁}<0.6\%$

$\alpha_{内壁}=0.6$

$\alpha_{孔}=0.996$

增大 $\alpha_{孔}$ 的途径：

(1) $A_{孔}/A_{内壁}$ ↓

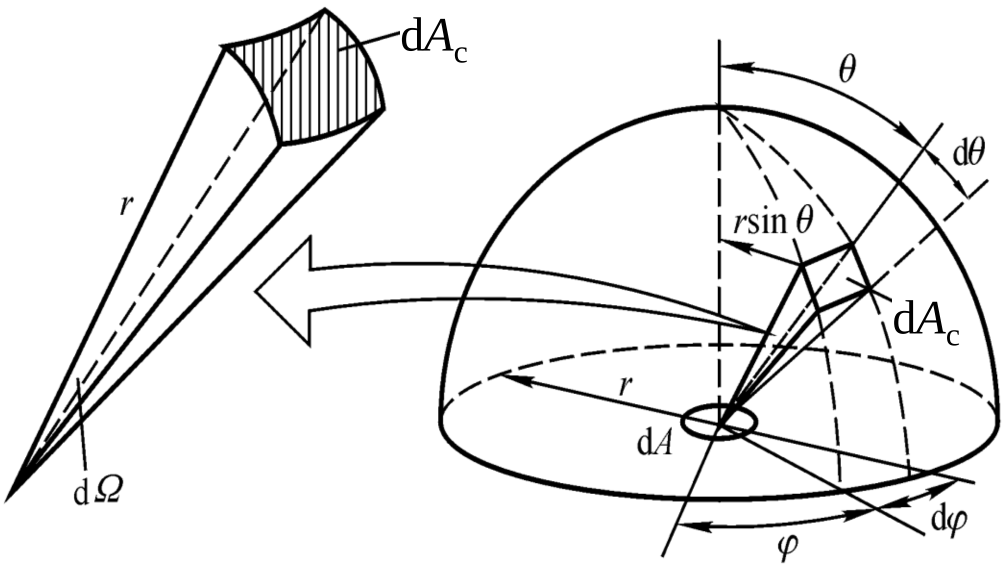
(2) $\alpha_{内壁}$ ↑

五、辐射力与辐射强度

立体角： **半径为r的球面上面积A_c与球心所对应的空间角度，**

$$\Omega = \frac{A_c}{r^2}$$

单位为Sr（<u>球面度</u>）

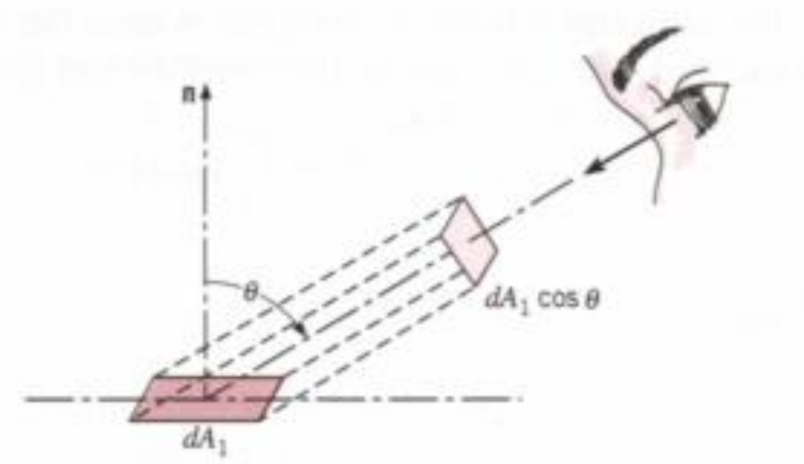


（θ，φ）方向上的微元面积 dA_c对球心所张的微元立体角

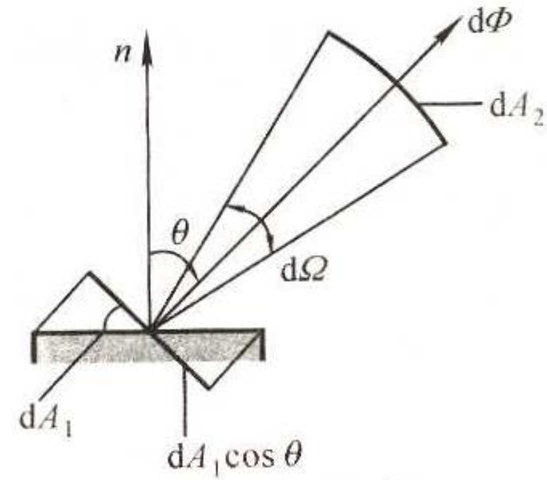
$$\mathrm{d}\Omega = \frac{\mathrm{d}A_c}{r^2} = \frac{r\mathrm{d}\theta \cdot r\sin\theta \mathrm{d}\varphi}{r^2} = \sin\theta \mathrm{d}\theta \mathrm{d}\varphi$$

1.辐射强度

单位时间内从单位投影面积（可见面积）所发出的包含在单位立体角内的全波段辐射能。



$$L(\theta,\varphi)=\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A_1\cos\theta\mathrm{d}\Omega}$$



$L(\theta,\varphi)$称为dA_1在（θ，φ）方向的辐射强度，或称为**定向辐射强度**，单位是W/(m^2·Sr)。

辐射强度的大小不仅取决于物体种类、表面性质、温度，还与方向有关。对于<u>各向同性的物体表面</u>，辐射强度与φ无关。

$$L(\theta,\varphi)=L(\theta)$$

光谱辐射强度：在 $\lambda \to \lambda + \mathrm{d}\lambda$ 波长范围内单位波长的辐射强度称为光谱辐射强度，单位为W/(m^2·μm·Sr)或W/(m^3·Sr) 。

辐射强度与光谱辐射强度之间的关系

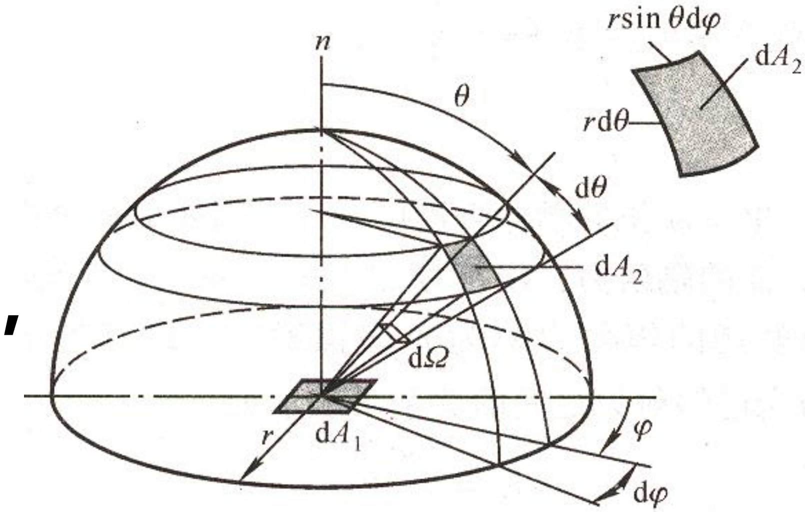
$$L(\theta) = \int_0^{\infty} L_\lambda(\theta) \mathrm{d}\lambda$$

$$L_\lambda(\theta) = \frac{\mathrm{d}\Phi_\lambda(\theta)}{(\mathrm{d}A_1 \cos\theta)\mathrm{d}\Omega} \quad \left[W/(m^2 \cdot \mu m \cdot Sr)\right]$$

$$L_\lambda(\theta) = \frac{\mathrm{d}L(\theta)}{\mathrm{d}\lambda}$$

2.辐射力

辐射力：单位时间内，单位面积表面向半球空间发射的全部波长的辐射能。用E表示，单位为W/m²。



光谱辐射力

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} = \frac{E_{(\lambda \to \lambda + d\lambda)}}{d\lambda}$$

单位为W/m²·μm或W/m³ 。

辐射力与光谱辐射力之间的关系

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$

定向辐射力： 单位时间、单位面积表面向某方向发射的单位立体角内的辐射能。用 E_θ 表示，单位为 $\mathrm{W/(m^2 \cdot sr)}$。

$$E_\theta = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A_1 \mathrm{d}\Omega}$$

定向辐射力与辐射力之间的关系： $E = \int_{\Omega=2\pi} E_\theta \mathrm{d}\Omega$

辐射强度与定向辐射力之间的关系：

$$E_\theta = L(\theta)\cos\theta \qquad L(\theta) = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}A_1 \cos\theta \mathrm{d}\Omega}$$

辐射强度与辐射力之间的关系：

$$E = \int_{\Omega=2\pi} L(\theta)\cos\theta \mathrm{d}\Omega$$

$$E_n = L_n$$

11-2 黑体辐射基本定律
The Basic Laws of Blackbody Radiation

- 普朗克定律(The Plank Distribution)
- 维恩位移定律(Wien’s Displacement Law)
- 斯忒藩—玻耳兹曼定律
（The Stefan-Boltzmann Law）
- 兰贝特定律(The Lambert’s Law)

一、普朗克定律

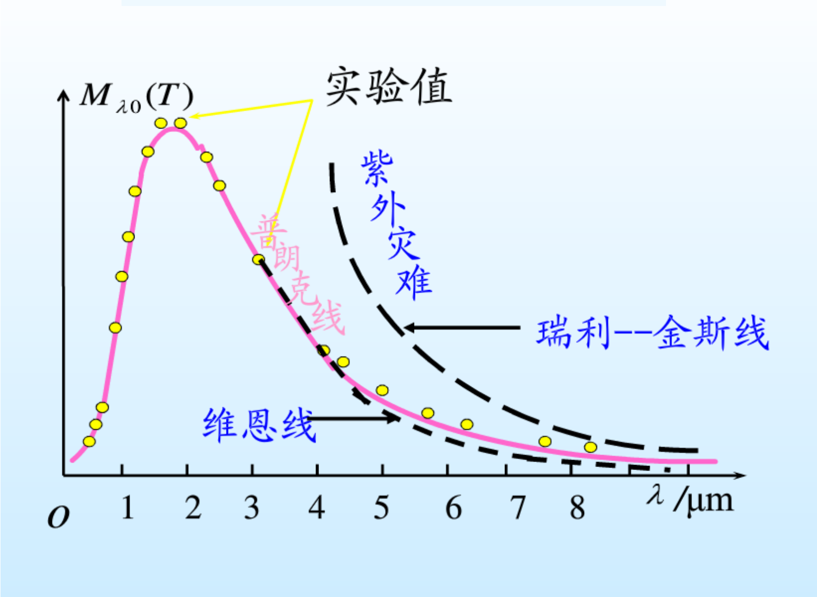
维恩(1893年)从热力学出发加上一些特殊的假设，Wien公式：短波处与实验符合好

$$M_{\lambda 0}(T)=C_1\lambda^{-5}e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$$

瑞利(1900年)和金斯(1905年)根据经典统计理论，Rayleigh-Jeans公式：长波处与实验符合好，但是短波处辐射力无穷大

$$M_{\lambda 0}(T)=C_3\lambda^{-4}T$$

黑体的光谱辐射力

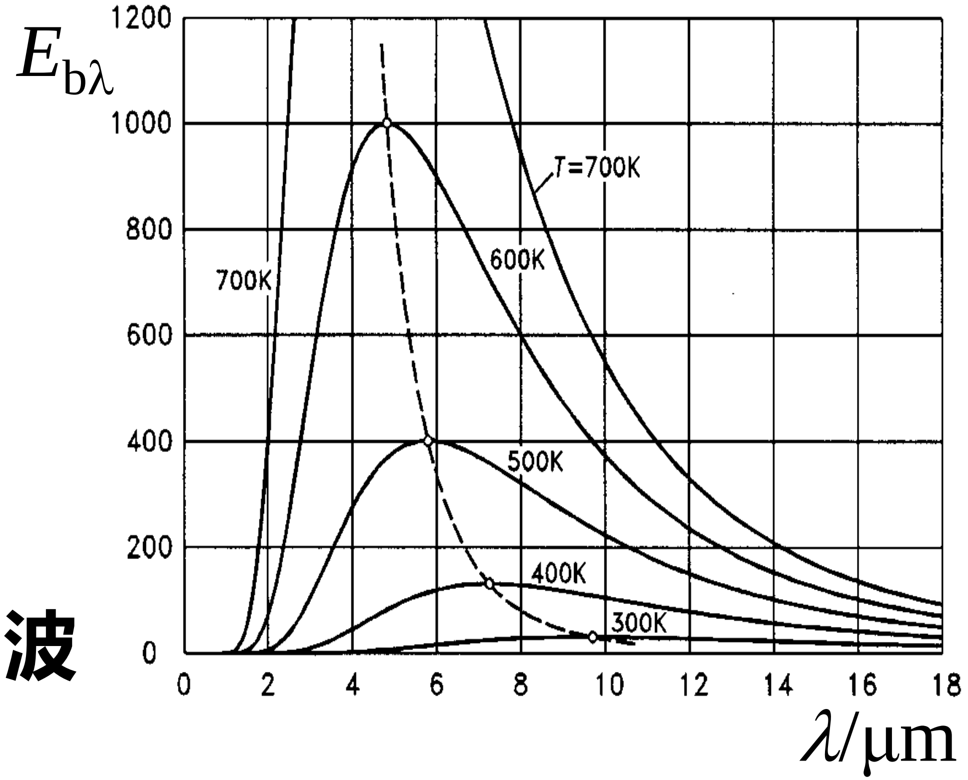


一、普朗克定律(1900-1901年)

经验公式
↓
量子理论

$$E_{b\lambda}=\frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/(\lambda T)}-1}$$

$C_1 = 3.742\times10^{-16}\ \ \mathrm{W\cdot m^2}$
$C_2 = 1.4388\times10^{-2}\ \ \mathrm{m\cdot K}$



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_{max}愈来愈小，即在λ坐标中的位置向短波方向移动。

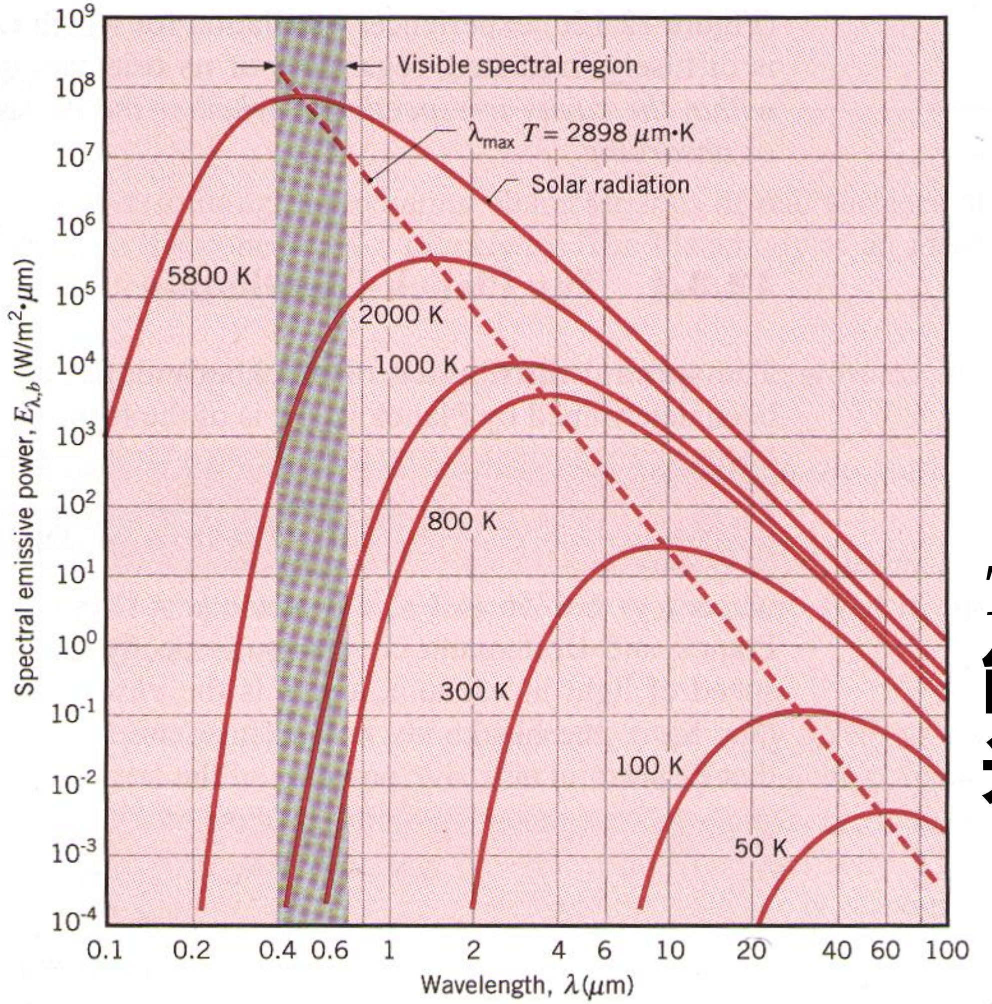


FIGURE 12.13 Spectral blackbody emissive power.

***T*>800K时，辐射能中明显具有可见光射线**

***T*<800K时，主要是红外线，眼睛感觉不到、暗黑；随着温度的升高，铁快颜色变为暗红色、鲜红色、橘黄色、亮白色**

二、维恩（Wien）位移定律1893年

λ_{max}与热力学温度T之间的关系：

普朗克公式求极值

$$\lambda_{max} T = 2.8976\times10^{-3} \approx 2.9\times10^{-3}\ \ \mathrm{m\cdot K}$$

据此可以确定任一温度下黑体的λ_{max}。

$$\lambda_{max} = 0.5\ \mu m \qquad T \approx 5761\mathrm{K}$$

太阳近似为表面温度约为5800 K的黑体

位于可见光的范围内，可见光的波长范围虽窄（0.38 ~ 0.76 μm），占太阳辐射能的份额却很大(约为44.6%）。

三、Stefen-Boltzmann定律
1879年和1884年

确定了黑体辐射力与热力学温度之间的关系

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(T / 100 \right)^4$$

σ = 5.67×10^-8^ W/(m^2·K^4)，黑体辐射常数。C_0= 5.67 W/(m2·K4)，称为黑体辐射系数。

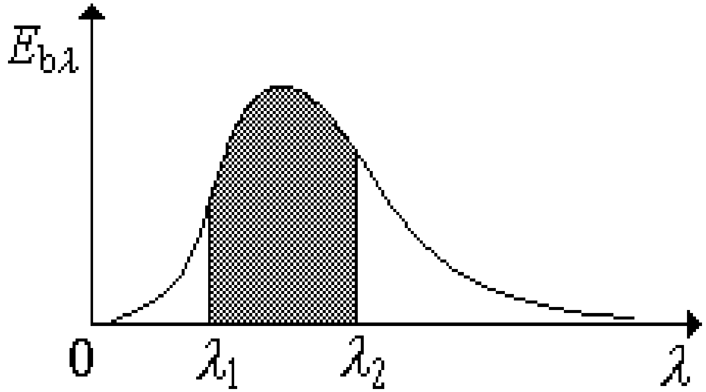
该定律又称温度四次方定律，可以由下式导出

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} \mathrm{d}\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/(\lambda \mathrm{T})} - 1} \mathrm{d}\lambda$$

波段辐射力 $E_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$

$$E_{b(\lambda_1-\lambda_2)}=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda$$

$$=\int_{0}^{\lambda_2}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda-\int_{0}^{\lambda_1}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda$$



波段辐射力 $E_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$ 占黑体辐射力E_b的百分数：

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

根据普朗克定律表达式，

$$F_{b(0-\lambda)}=\frac{\int_0^{\lambda}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda}{\sigma T^4}=\frac{\int_0^{\lambda_1}\frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/(\lambda \mathrm{T})}-1}\mathrm{d}\lambda}{\sigma T^4}$$

$$=\int_0^{\lambda T}\frac{C_1\left(\lambda T\right)^{-5}}{\sigma\left(e^{C_2/(\lambda \mathrm{T})}-1\right)}\mathrm{d}\left(\lambda T\right)=f\left(\lambda T\right)$$

$f(\lambda T)$称为黑体辐射函数，表示温度为T 的黑体所发射的辐射能中在波段（$0\sim\lambda$）内的辐射能所占的百分数。

利用黑体辐射函数数值表（表11－1）可以很容易地用下式计算黑体在某一温度下发射的任意波段的辐射能量。

$$E_{b(\lambda_1-\lambda_2)}=\left[F_{b(0-\lambda_2)}-F_{b(0-\lambda_1)}\right]E_b$$

黑体辐射函数 表 8-1

λT (μm·K)	$F_{0-\lambda T}$	λT (μm·K)	$F_{0-\lambda T}$	λT (μm·K)	$F_{0-\lambda T}$	λT (μm·K)	$F_{0-\lambda T}$
200	0	3200	0.3181	6200	0.7542	11000	0.9320
400	0	3400	0.3618	6400	0.7693	11500	0.9390
600	0	3600	0.4036	6600	0.7833	12000	0.9452
800	0	3800	0.4434	6800	0.7962	13000	0.9552
1000	0.0003	4000	0.4809	7000	0.8032	14000	0.9630
1200	0.0021	4200	0.5161	7200	0.8193	15000	0.9690
1400	0.0078	4400	0.5488	7400	0.8296	16000	0.9739
1600	0.0197	4600	0.5793	7600	0.8392	18000	0.9809
1800	0.0394	4800	0.6076	7800	0.8481	20000	0.9857
2000	0.0667	5000	0.6338	8000	0.8563	40000	0.9981
2200	0.1009	5200	0.6580	8500	0.8747	50000	0.9991
2400	0.1403	5400	0.6804	9000	0.8901	75000	0.9998
2600	0.1831	5600	0.7011	9500	0.9032	100000	1.0000
2800	0.2279	5800	0.7202	10000	0.9143		
3000	0.2733	6000	0.7379	10500	0.9238		

四、兰贝特定律

兰贝特定律说明黑体辐射在半球空间各方向上的分布规律。

兰贝特定律的内容: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。

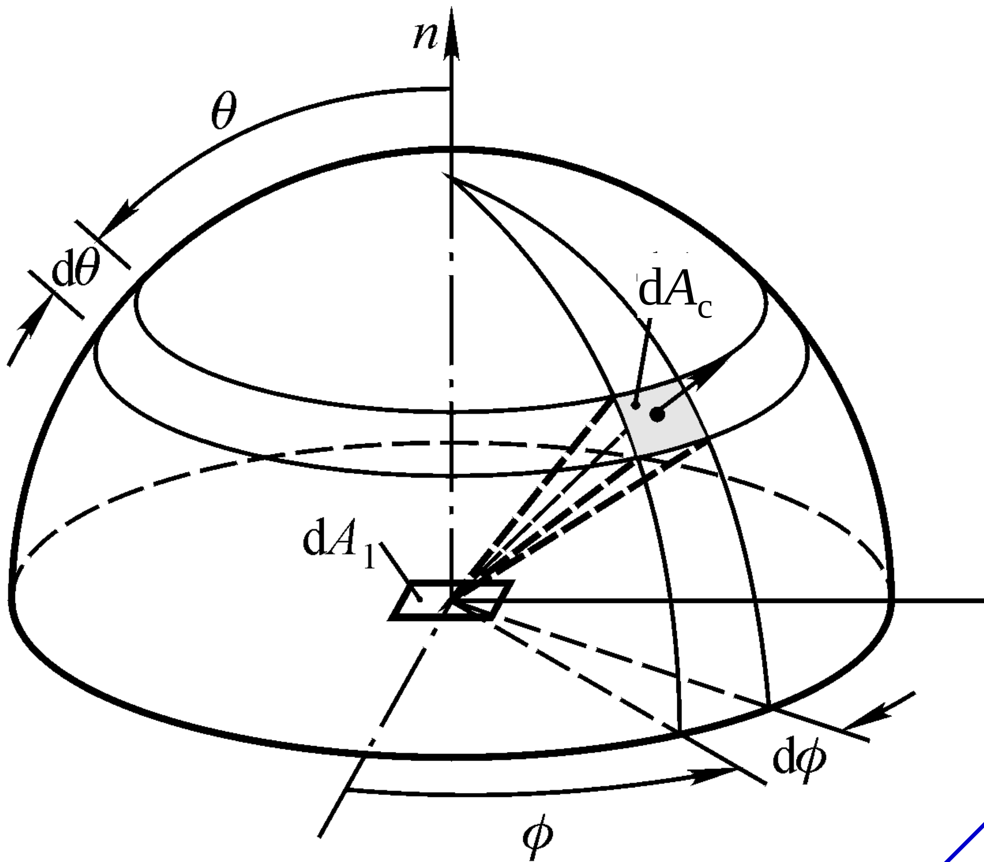
$$L(\theta) = L = \text{const}$$

空间各个方向上辐射强度都相等的物体称为**漫发射体**。

根据定向辐射力与辐射强度的关系

$$E_\theta = L(\theta)\cos\theta = L\cos\theta = E_n\cos\theta$$

E_n为表面法线方向的定向辐射力。兰贝特定律也称为余弦定律。



漫发射体的辐射力是辐射强度的π倍。

$$\Omega = sin\,\theta \mathrm{d}\theta \mathrm{d}\varphi$$

根据辐射力与辐射强度的关系可求得

$$E = \int_{\Omega=2\pi} L(\theta) cos\,\theta \mathrm{d}\Omega \;\; = \int_{\Omega=2\pi} L(\theta) cos\,\theta\, sin\,\theta \mathrm{d}\theta \mathrm{d}\varphi$$

$$= L\int_0^{2\pi} \mathrm{d}\varphi \int_0^{\pi/2} cos\,\theta\, sin\,\theta \mathrm{d}\theta = \pi L$$

11-3 实际固体和液体的辐射特性

一、实际物体的发射特性

■ **发射率：** $\varepsilon = \dfrac{E}{E_b}$ 物体辐射力与同温黑体的辐射力之比

发射率反映物体发射辐射能的能力与黑体的差别。

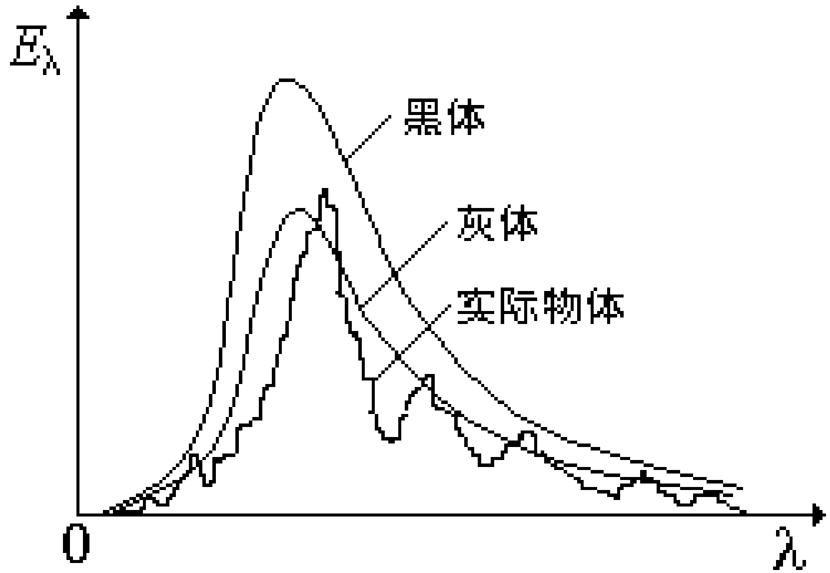
光谱发射率（光谱黑度）： $\varepsilon_\lambda = \dfrac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$

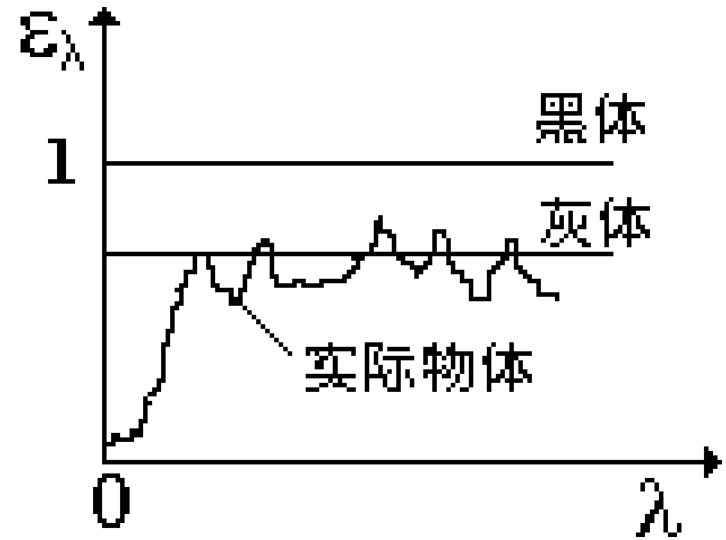
发射率与光谱发射率之间的关系为

$$\varepsilon = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda / E_b$$

对于灰体， $\varepsilon_\lambda =$ **常数，** $\varepsilon = \dfrac{\varepsilon_\lambda \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} = \varepsilon_\lambda$

实际物体的光谱辐射力随波长的变化规律不同于黑体和灰体，光谱发射率是波长的函数。

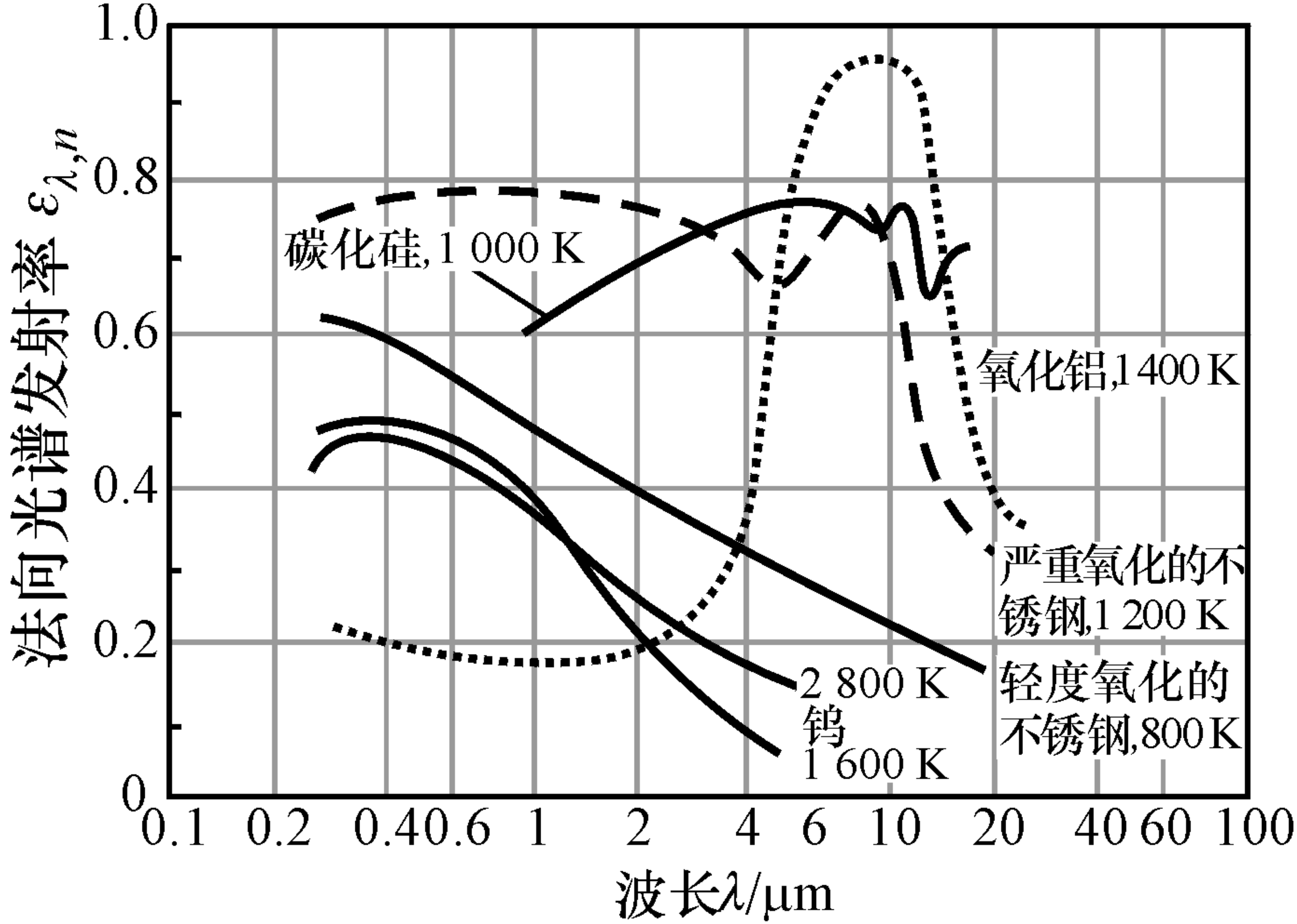




实际物体的辐射力并不严格遵循四次方定律，在工程计算中，实际物体的辐射力可以由下式计算

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4$$

所存在的偏差由实验确定的发射率数值加以考虑。



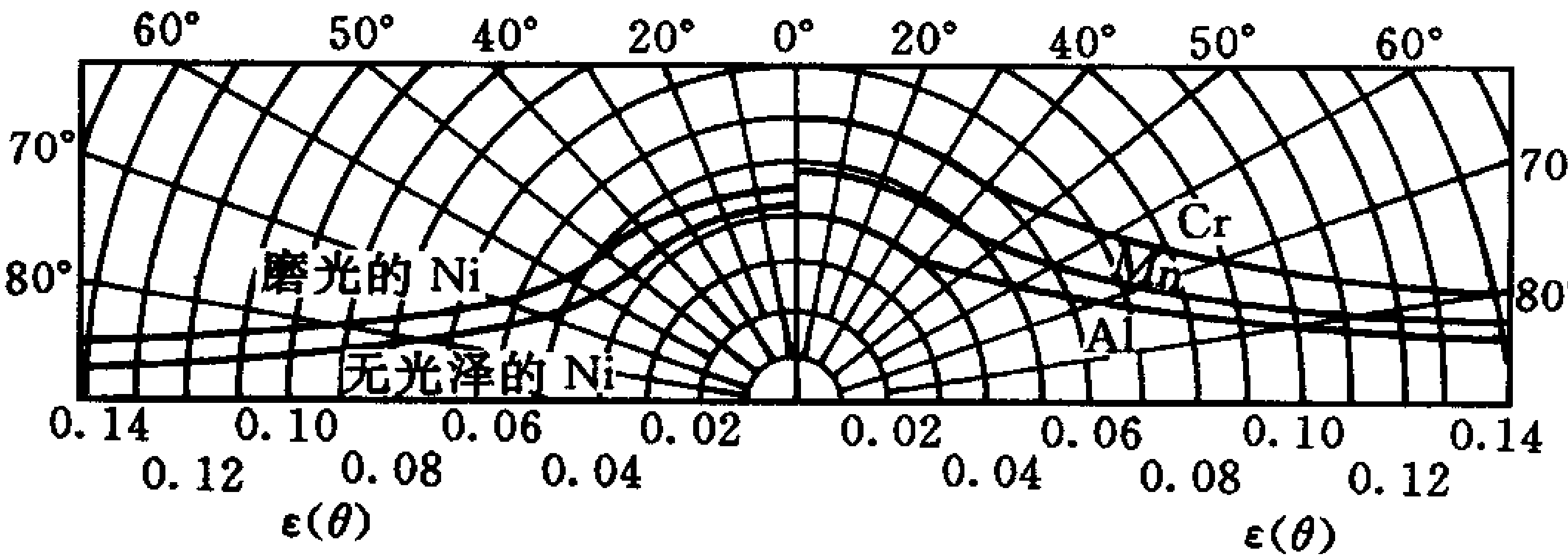
部分物体的光谱发射率随波长的变化

实际物体辐射在半球空间各方向上的分布规律，以**定向发射率**表示。

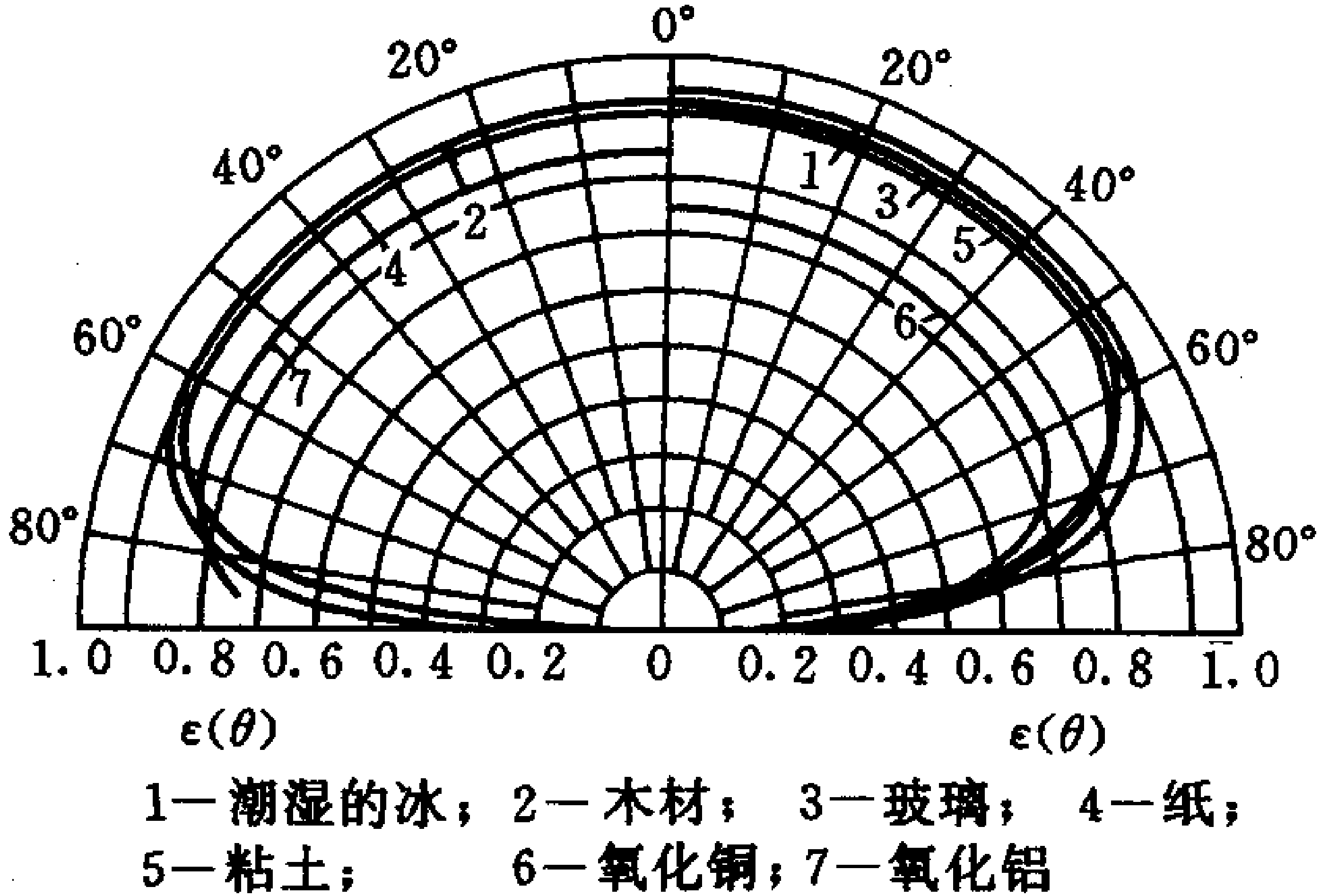
定向发射率（定向黑度）：

$$\varepsilon_\theta = \frac{E_\theta}{E_{b\theta}} = \frac{L(\theta)}{L_b}$$

实际物体不是漫发射体，一般不严格遵守兰贝特定律，定向发射率是方向角 θ 的函数。



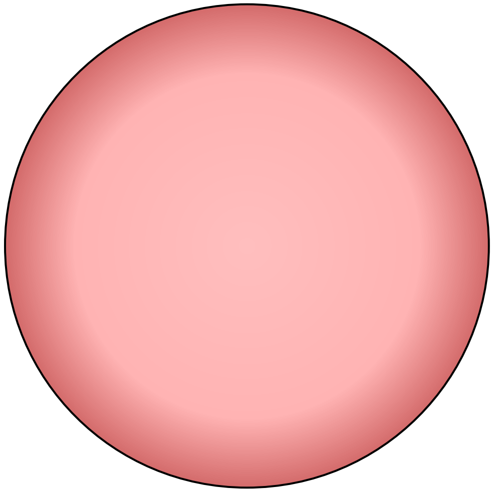
几种金属导体在不同方向上的定向发射率 $\varepsilon(\theta)$ ($t = 150$ ℃)



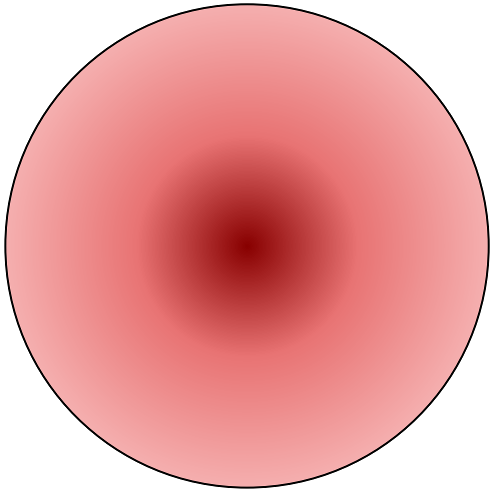
几种非导电体材料在不同方向上的定向发射率 $\varepsilon(\theta)$

$(t=0\sim93.3℃)$

例11-1　两炽热状态下的球体呈现如下图像，一个为金属球另一个是非金属的。请判断哪个是金属球?



A

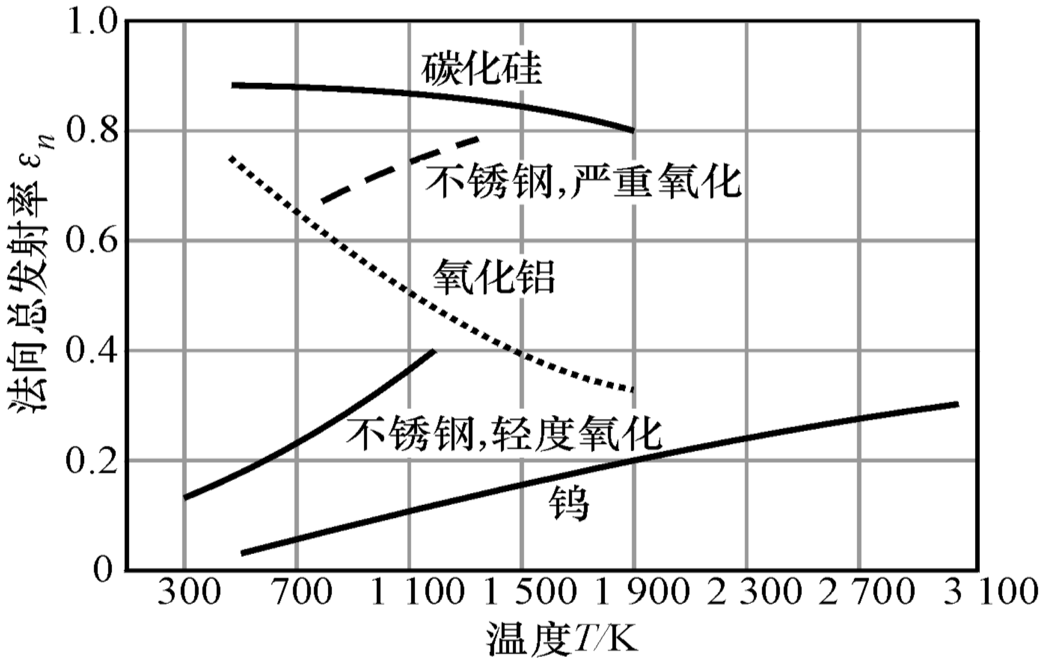


B

金属 $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}=1.0\sim1.2$ **非金属** $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}=0.93\sim1.0$

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。

对绝大多数实际工程材料，可以近似认为半球总发射率等于法向发射率，即 $\varepsilon \cong \varepsilon_n$



法向总发射率随温度的变化

■实际物体发射率的特点：

（1）金属表面发射率偏小，且随波长的增大而减小,一般随温度升高而增大；

（2）非金属表面发射率较高，且随着波长的增大而增大，一般还随温度升高而减小；

（3）法向发射率随温度的变化规律与光谱法向发射率随波长的变化规律有关，因为温度越高，短波辐射的比例越大。

（4）材料的表面状况（粗糙度、氧化程度等）是影响发射率大小的重要因素。

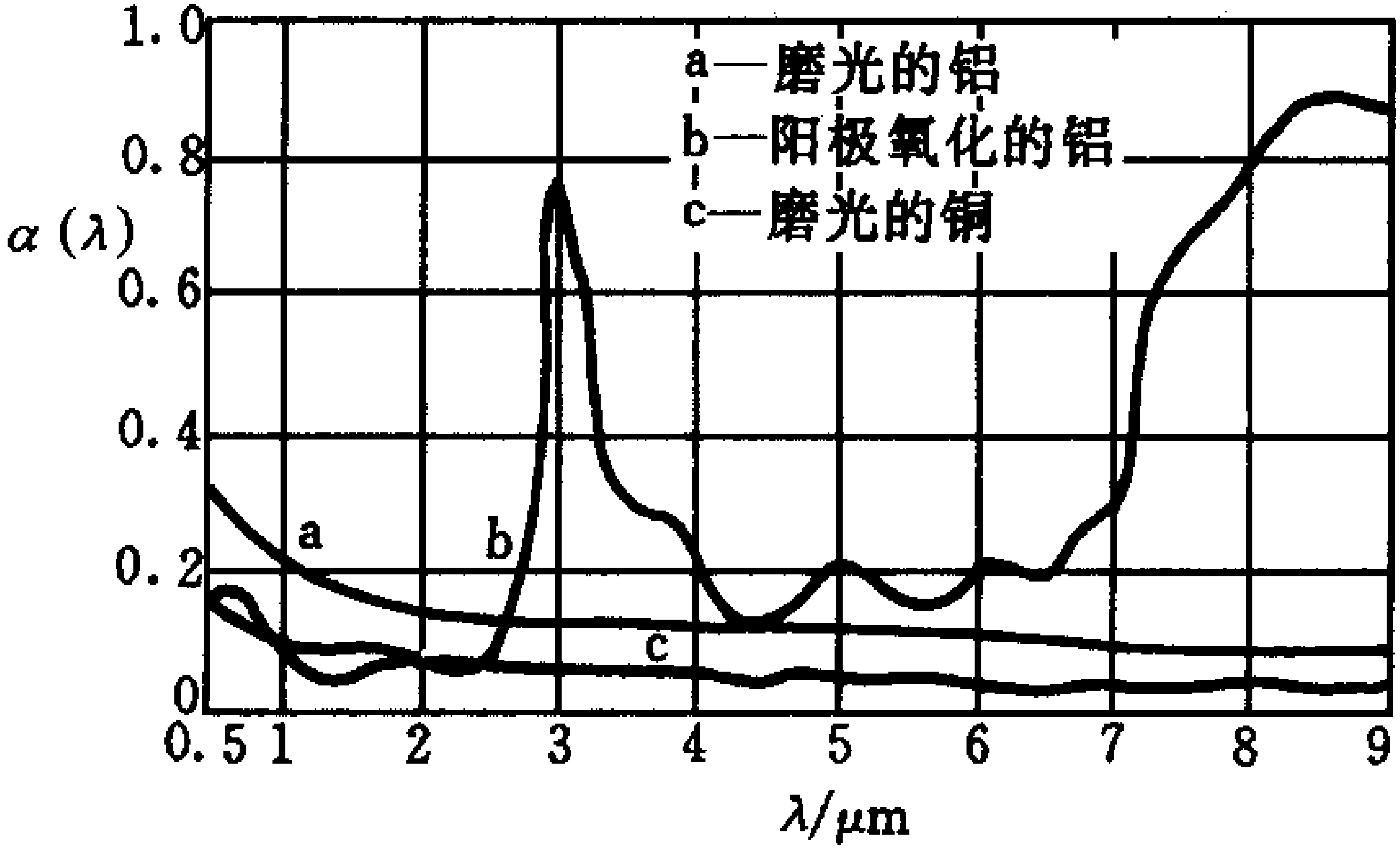
二、实际物体的吸收特性

实际物体的光谱吸收比也与黑体、灰体不同，是波长的函数。　根据**总吸收比**的定义，

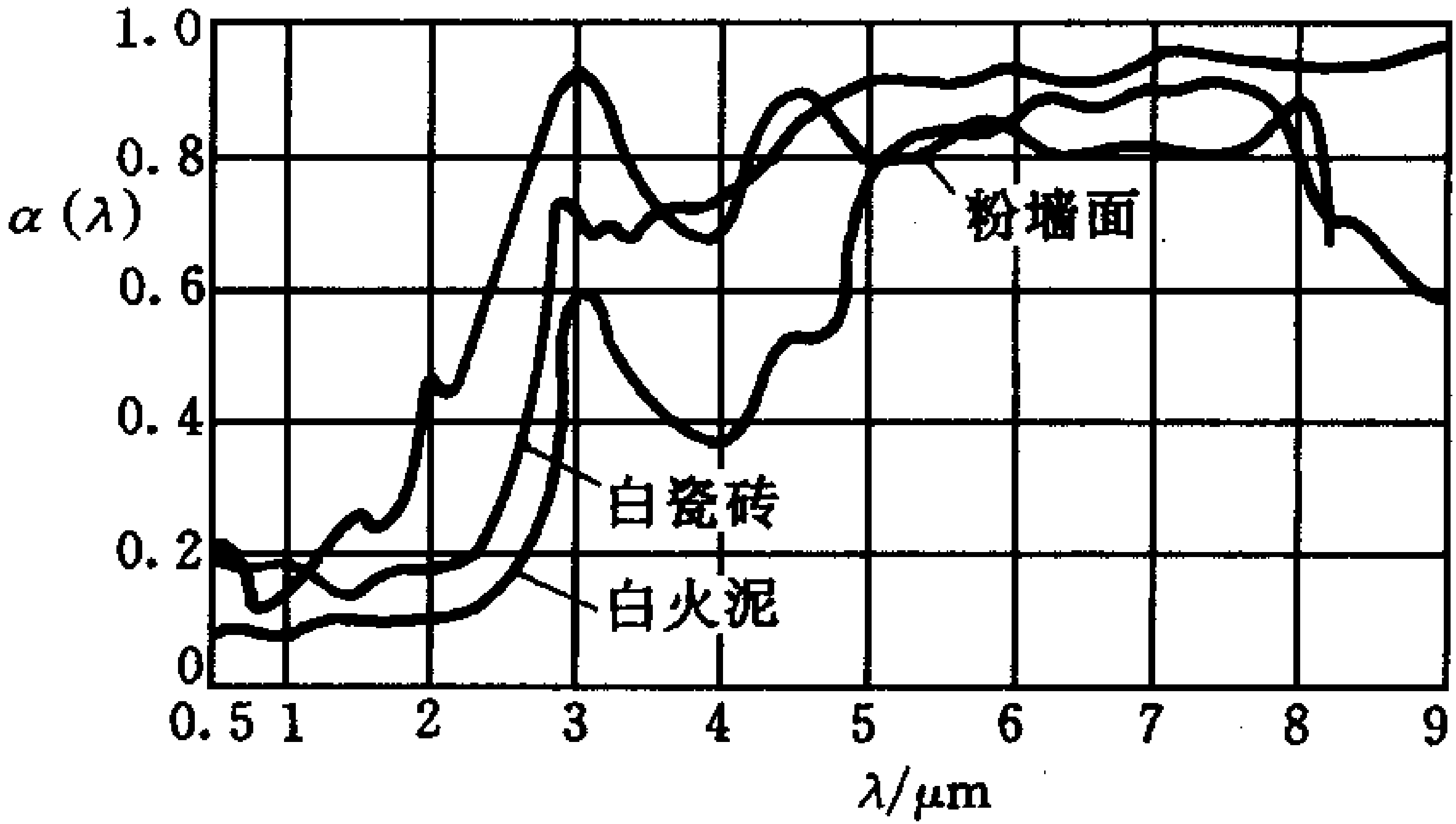
$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda} = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda (\lambda, T) \cdot \varepsilon'_\lambda (\lambda, T') \cdot E_{b\lambda} (\lambda, T') \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty \varepsilon'_\lambda (\lambda, T') \cdot E_{b\lambda} (\lambda, T') \mathrm{d}\lambda}$$

辐射特性随波长变化的性质称为辐射特性对波长的**选择性**。

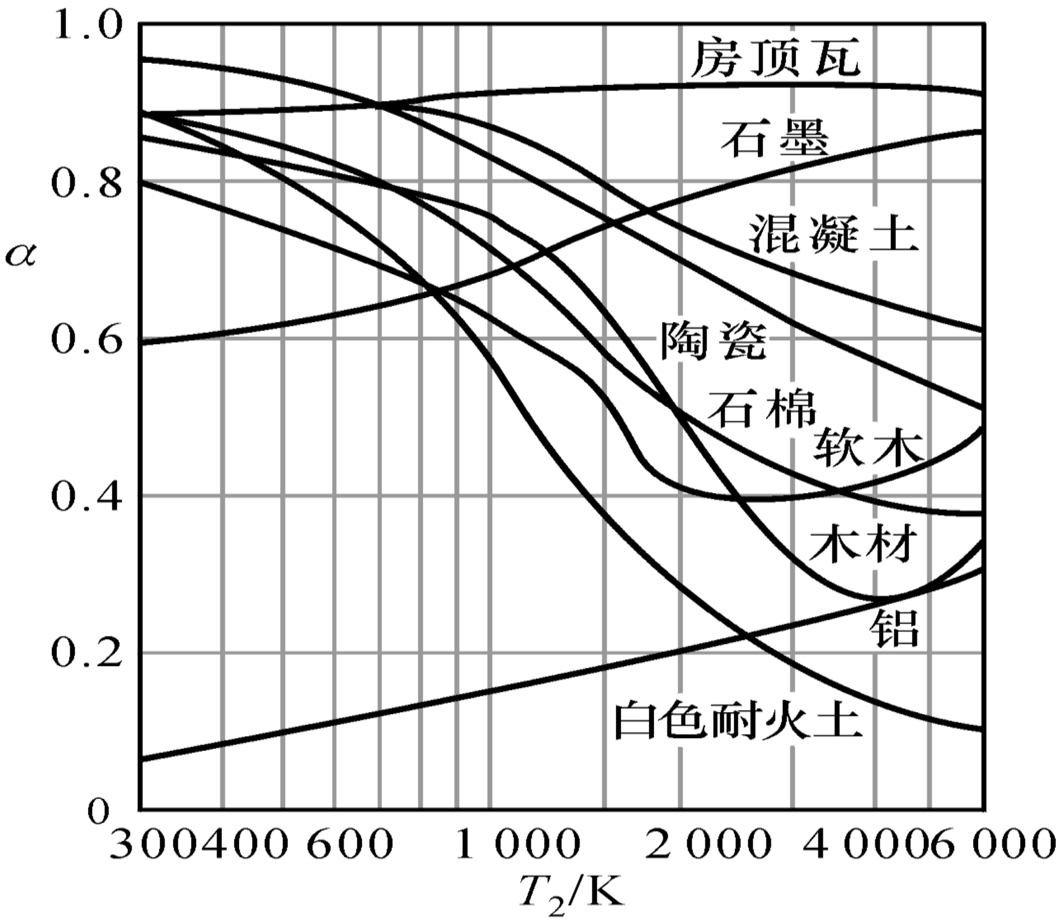
温室、太阳能热电材料



金属导电体的光谱吸收比同波长的关系



非导电体材料的光谱吸收比同波长的关系



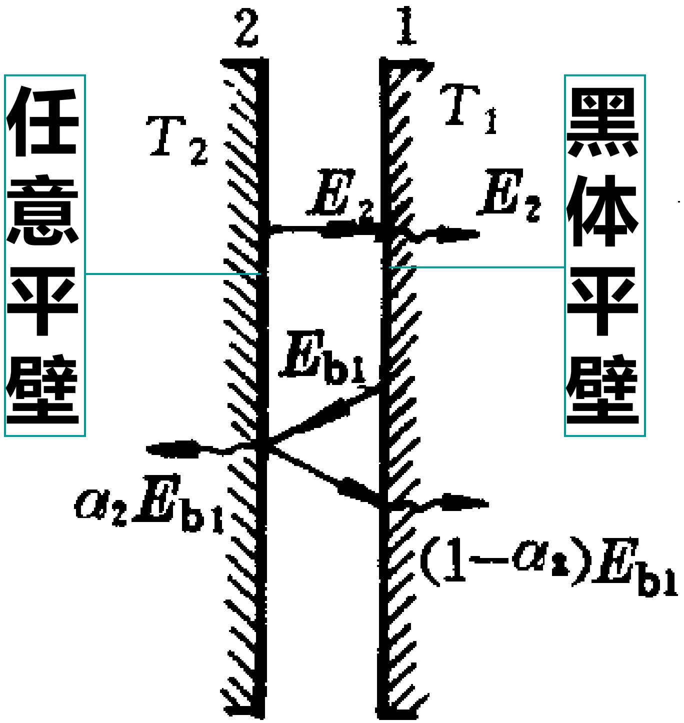
一些材料对黑体辐射的总吸收比随黑体辐射源温度的变化

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，因此和投入辐射能的发射体温度有关。

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty Q_\lambda \mathrm{d}\lambda}$$

三、基尔霍夫（G.R.Kirchhoff）定律

基尔霍夫定律揭示了物体吸收辐射能的能力与发射辐射能的能力之间的关系。



平壁1,2间辐射换热的净热流密度为

$$q_{21} = E_2 - \alpha E_{b1}$$

当平壁1,2即处于热平衡状态时，$q_{21}=0$，可得

$$\frac{E_2}{\alpha_2} = E_{b1}$$

既然平壁2为任意壁面，可写成

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} = \dots = \frac{E_i}{\alpha_i} = E_{b1}$$

基尔霍夫定律表达式之一

$$\frac{E_1}{\alpha_1}=\frac{E_2}{\alpha_2}=\ldots=\frac{E_i}{\alpha_i}=E_{b1} \quad \Rightarrow \quad \frac{E}{\alpha}=E_b$$

上式表明任意物体的辐射力与其吸收比的比值都等于相同温度下的黑体辐射力。可以得出两个结论：

（1）相同温度下，辐射力大的物体其吸收比也大，即发射辐射能的能力强的物体其吸收辐射能的能力也强；

（2）因为实际物体的吸收比小于1，所以在相同温度下的所有物体中，黑体的辐射力最大。

基尔霍夫定律揭示了物体吸收辐射能的能力与发射辐射能的能力之间的关系。

$$\frac{E}{\alpha}=E_b \Rightarrow \alpha=\frac{E}{E_b}$$ **对比发射率定义式：**

$$\varepsilon=\frac{E}{E_b} \Rightarrow \alpha(T)=\varepsilon(T)$$

表明热平衡时任意物体对同温度黑体投入辐射的吸收比等于同温下该物体的发射率。基尔霍夫定律表达式之二。

基尔霍夫定律的不同表达式，一般形式：

$$\alpha_\lambda(\theta,\varphi,T)=\varepsilon_\lambda(\theta,\varphi,T)$$

漫射（漫发射/反射，辐射特性与方向无关）表面：

$$\alpha_\lambda(T)=\varepsilon_\lambda(T)$$

漫灰表面： $\alpha(T)=\varepsilon(T)$

漫灰表面，辐射特性与波长无关，

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda} \mathrm{d}\lambda} = \varepsilon_\lambda \qquad \alpha = \alpha_\lambda$$

$$\Rightarrow \quad \alpha(T) = \varepsilon(T)$$

- **工程上，大部分辐射能都处于红外波长范围内，绝大多数工程材料都可近似为漫发射、灰体，不会引起较大误差。**

- **在太阳能利用中就不能简单地将物体当作灰体，因为近44.6%的太阳辐射位于可见光的波长范围内，而物体自身热辐射位于红外波长范围内，实际物体光谱吸收比对投入辐射的波长具有选择性，所以一般物体对太阳辐射的吸收比与自身辐射的发射率有较大的差别。**