传 热 学

主讲：王晓墨
能源与动力工程学院
华中科技大学

第六章 热辐射基础

§ 6-1 热辐射的基本概念

§ 6-2 黑体辐射和吸收的基本性质

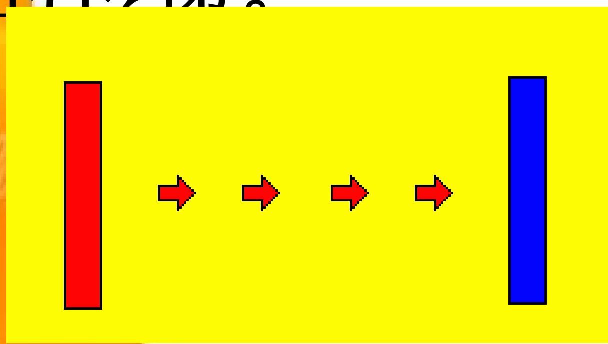
§ 6-3 实际物体的辐射和吸收

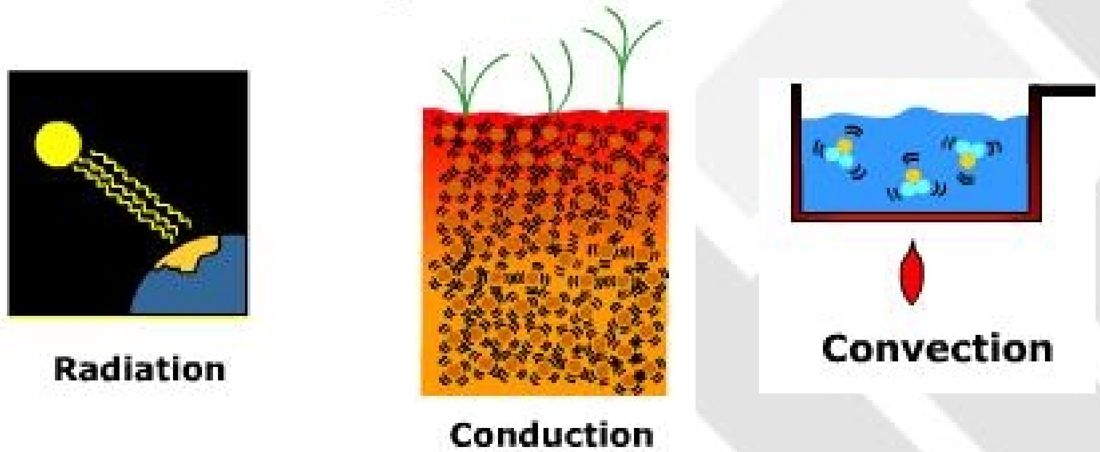
§ 6-1 热辐射的基本概念

热辐射在机理上与导热、对流有根本的不同。

导热与对流是由于物质微观粒子的热运量和物体的宏观运动所造成的能量转移。

热辐射是由于物质的电磁运动所引起的能量的传递。

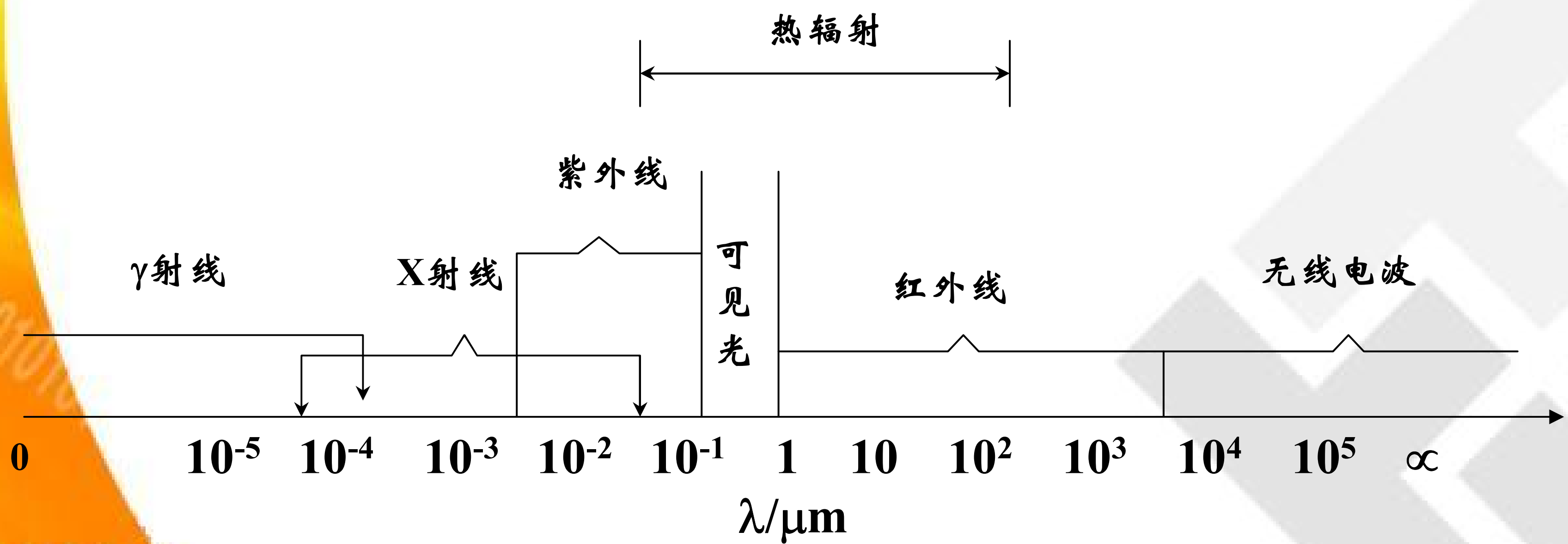




辐射是电磁波传递能量的现象。

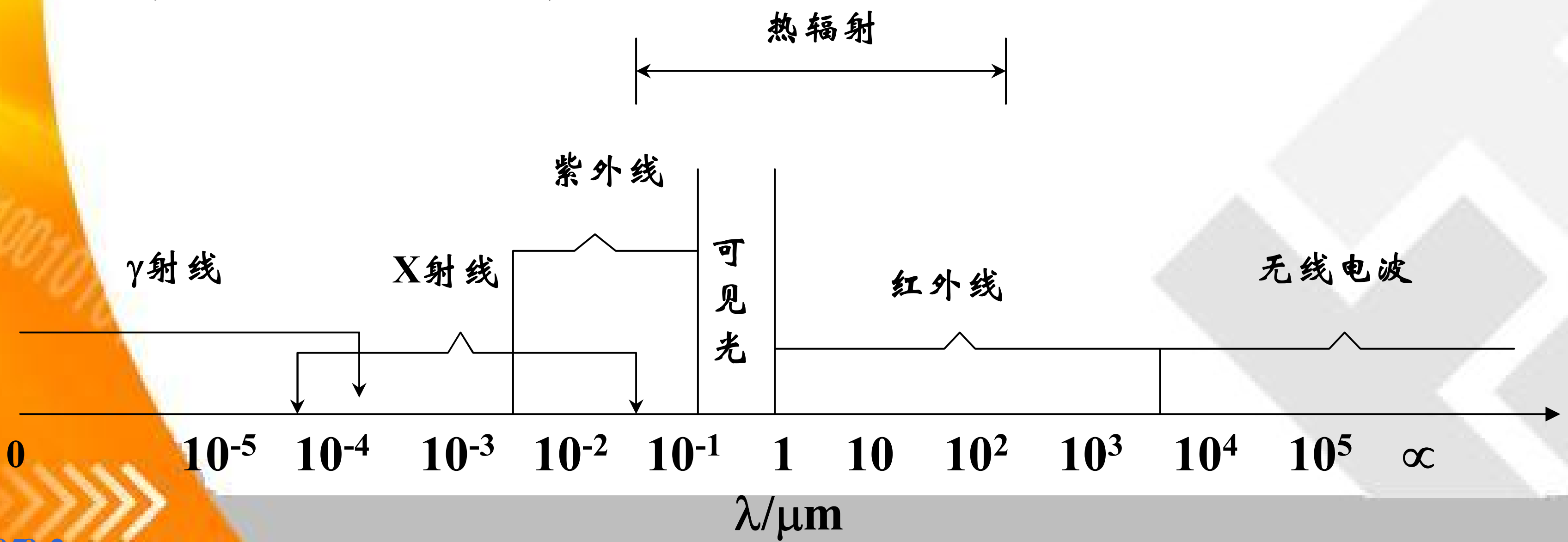
电磁辐射的波长范围很广，从长达数百米的无线电波到小于10-14米的宇宙射线。

由于热的原因而产生的电磁辐射称为**热辐射**。



在工业上所遇到的温度范围内（2000K以下），最感兴趣的是波长约从**0.38μm**到**0.76μm**的可见光和波长从可见光谱的红端之外延伸到**1000μm**的红外线。

有时以波长**25μm**为界，又将红外线区分为近红外区和远红外区。



只要物体的温度高于0K，物体总是不断地把热能变化辐射能，向外发出热辐射。

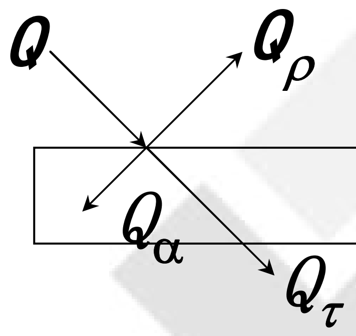
同时，物体也不断地吸收周围物体投射到它上面的热辐射，并把吸收的辐射能重新转变成热能。

辐射换热就是指物体之间相互辐射和吸收的总效果。

一个物体如果与另一个物体相互能够看得见，那么它们之间就会发生辐射热交换。

当热辐射的能量投射到物体表面上时，会发生吸收、反射和穿透现象。若外界投射到物体表面上的总能量为**Q**，一部分**Q**$_\alpha$被物体吸收，一部分**Q**$_\rho$被物体反射，一部分**Q**$_\tau$穿透物体。按能量守恒定律有：

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



或 $$\frac{Q_\alpha}{Q} + \frac{Q_\rho}{Q} + \frac{Q_\tau}{Q} = 1$$

各部分百分数Q_α/Q 、 Q_ρ/Q 、Q_τ/Q 分别称为该物体对投入辐射的吸收比、反射比和透射比，记为α、ρ和τ。于是

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

实际上，当辐射能进入固体或液体表面后，在一个极短的距离内就吸收完了。故对于固体和液体有

$$\alpha+\rho=1$$

因而对固体和液体，吸收能力大的物体其反射本领就小。

由于热射线不能穿过固体和液体，于是可以把它们的吸收和反射视为一个表面过程，它们自身辐射也应在表面完成。因此，固体和液体上的热辐射是表面辐射。

辐射能投射到气体上时，情况与投射到固体或液体上不同。气体对辐射能几乎没有反射能力，可认为反射比，$\rho = 0$，故有 $\alpha + \tau = 1$

气体对热射线的吸收和穿透是在空间中进行的，其自身的辐射也是在空间中完成的。因此，气体的热辐射是容积辐射。

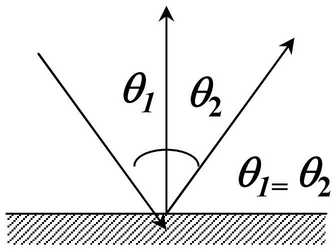
由于不同物体的吸收比、反射比和透射比因具体条件不同差别很大，给热辐射的计算带来很大困难。为了使问题简化，我们定义了一些理想物体。

对于透射比 $\tau=1$的物体称为透明体。

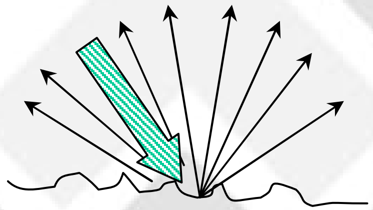
反射比 $\rho=1$物体称为白体（具有漫反射的表面）或镜体（具有镜反射的表面）。

物体表面是漫反射还是镜反射，这要取决于物体表面相对于辐射波长的表面粗糙程度。

当表面的不平整尺寸小于投入辐射的波长时，形成镜面反射，此时入射角等于反射角。高度磨光的金属板会形成镜面反射。

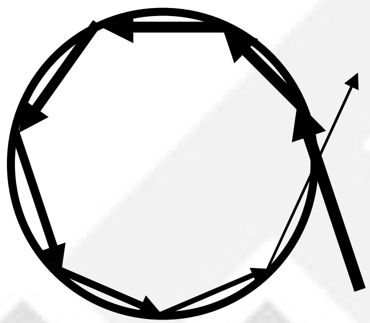


当表面的不平整尺寸大于投入辐射的波长时形成漫反射。这时从某一方向投射到物体表面上的辐射向空间各方向反射出去。

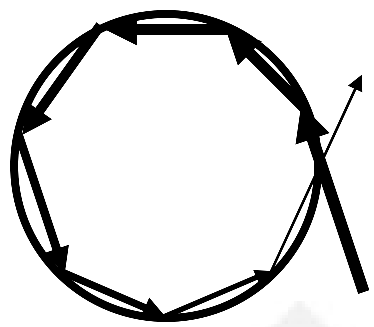


吸收比α=1的物体，称为**绝对黑体**，简称**黑体**；
尽管自然界并不存在黑体，用人工的方法可以制造出十分接近于黑体的模型。

选用吸收比小于1的材料制造一个空腔，并在空腔壁面上开一个小孔，再设法使空腔壁面保持均匀的温度。这时空腔上的小孔就具有黑体辐射的特性。



若小孔占内壁面积小于0.6%，当内壁吸收比为0.6时，小孔的吸收比可大于0.996。



黑体将所有投射在它上面的一切波长和所有方向上的辐射能全部吸收，在所有物体之中，它吸收热辐射的能力最强。

§6-2黑体辐射和吸收的基本性质

1 辐射力

① 总辐射力

辐射力也称全色辐射力，其定义为单位时间单位辐射面积向半球空间辐射出去的一切波长的辐射能量。

$$E = dQ/dA$$

E为辐射力，其单位为**W/m²**；**dQ**为微元面积**dA**向半球空间辐射出去的总辐射能。

② 单色辐射力

单色辐射力被定义为单位时间单位辐射面积向半球空间辐射出去的某一波长范围 的辐射能量，用来描述辐射能量随波长的分布特征。

$$E_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dA} = \frac{d^2Q}{d\lambda dA}$$

E_λ 为物体表面的单色辐射力；dQ_λ 为微元面积dA向半球空间辐射出去的某一波长的辐射能；λ 为热射线的波长，单位为μm。

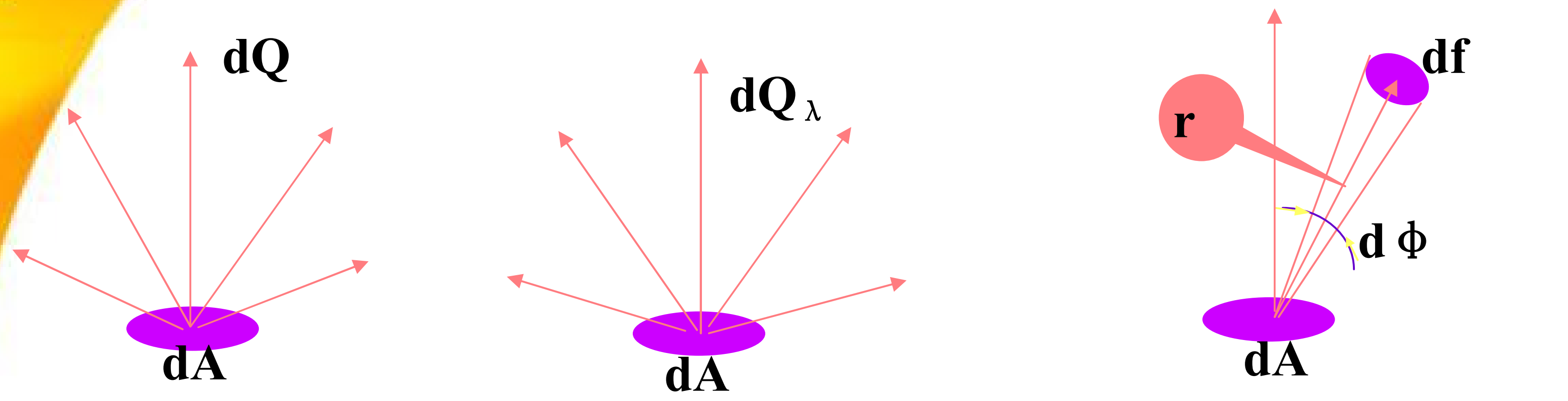
辐射力和单色辐射力之间的关系 ： $E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$

③ 方向辐射力

方向辐射力是定义来描述物体表面辐射能量在半球空间中的分布特征，其定义为单位时间单位辐射面积向半球空间中某一个方向上单位立体角内辐射的所有波长的辐射能量。

$$E_{\varphi} = \frac{d^2Q}{d\varpi dA}$$

dω 为微元立体角



（a）微元表面总辐射　（b）微元表面单色辐射　（c）微元表面方向辐射

立体角是用来衡量空间中的面相对于某一点所张开的空间角度的大小，如图c所示，其定义为：

$$d\varpi = df / r^2$$

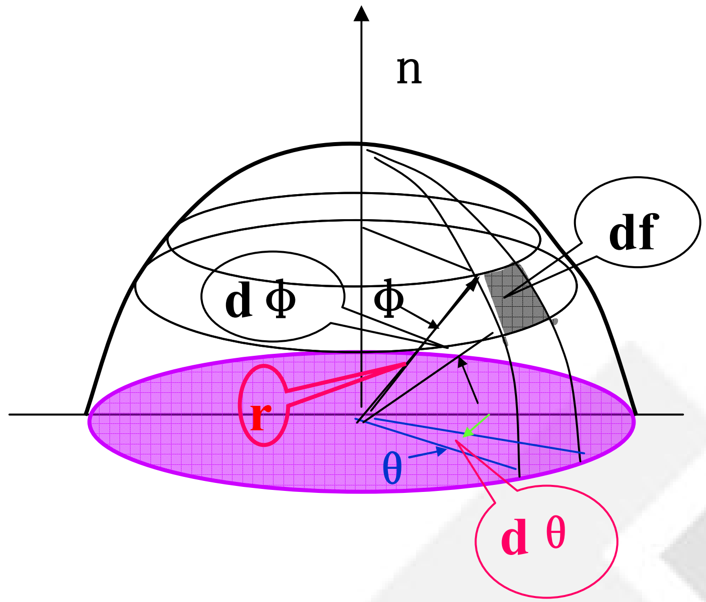
df为空间中的微元面积，r为该面积与发射点之间的距离。

在球坐标系中，如图所示，按几何关系有

$$df = rd\varphi \sin\varphi rd\theta$$

$$d\varpi = df / r^2 = \sin\varphi d\varphi d\theta$$

$$E_\varphi = \frac{d^2Q}{\sin\varphi d\varphi d\theta dA}$$



球坐标系中的立体角

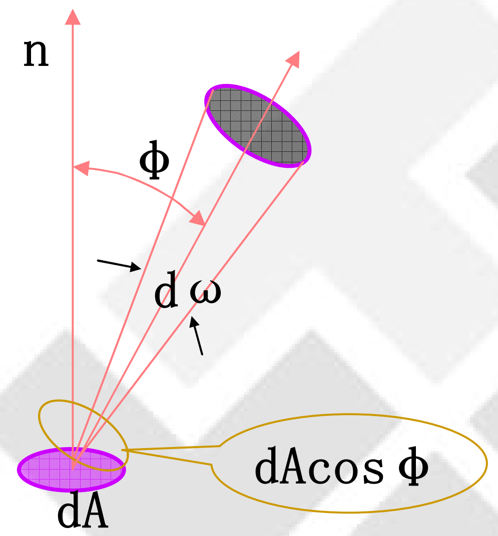
其单位为W/(m²Sr)，Sr为球面度,是立体角的单位。

由于半球面积为2πr^2, 故半球面对球心所张开的立体角 ω=2π[Sr]。

④辐射强度

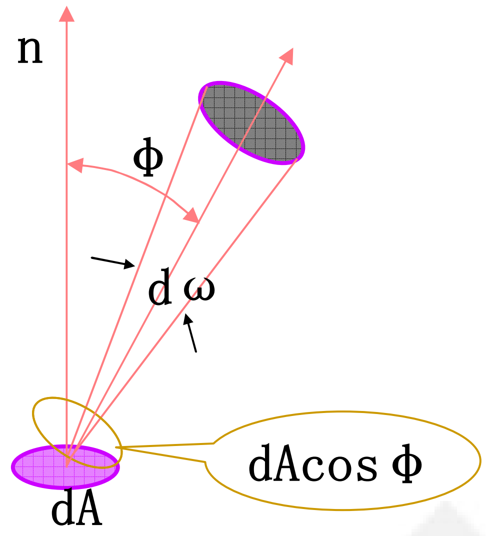
由于处于不同的空间位置所能看见的辐射面积是变化的，也就是随着ψ角的增大，辐射面积在该方向上的可见面积（投影面积）就越小。

定义辐射强度，用以表示单位时间在某一辐射方向上的单位可见辐射面积向该方向单位立体角内辐射的所有波长的辐射能。



辐射强度的定义图

$$I_\varphi = \frac{d^2Q}{\cos\varphi dA d\varpi}$$



辐射强度的定义图

单位为W/(m²Sr)，式中 $\cos\varphi dA$ 为给定方向上的可见辐射面积，也就是垂直于该方向的流通面积。

辐射强度与方向辐射力的关系 ：

$$E_\varphi = I_\varphi \cos\varphi$$

与辐射力之间的关系 ：

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

2 黑体辐射的基本定律

① 普朗克定律

普朗克定律表示的是黑体的辐射能按波长的分布规律，给出了黑体的单色辐射力与热力学温度T、波长λ之间的函数关系，由量子理论得到的数学表达式为：

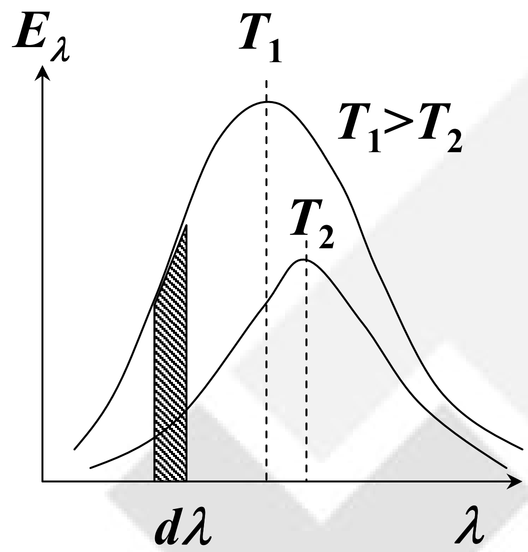
$$E_{b\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[e^{c_2/(\lambda T)} - 1 \right]}$$

c_1为第一辐射常数，$c_1=3.742\times10^{-16}\,\mathrm{W\cdot m^2}$；

c_2为第二辐射常数，$c_2=1.4388\times10^{-2}\,\mathrm{m\cdot K}$

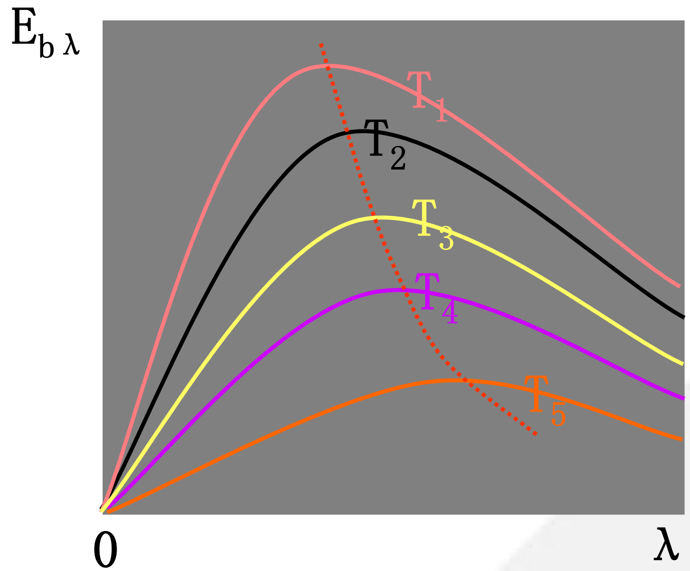
图中给出了在温度为参变量下的单色辐射力随波长变化的一组曲线。单色辐射力随着波长的增加而增加，达到某一最大值后又随着波长的增加而慢慢减小。

在同一波长下黑体温度越高，对应的单色辐射力越大。



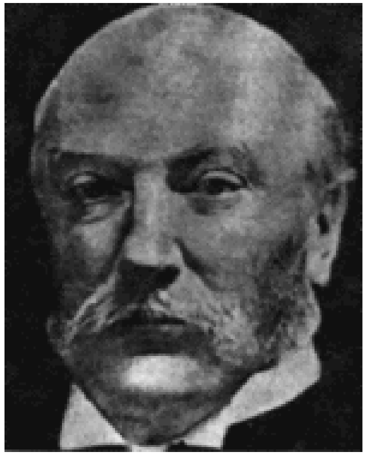
② 维恩定律

意味着随着温度的升高黑体辐射能的分布在向波长短的方向集中，也就是高温辐射中短波热射线含量大而长波热射线含量相对少。



黑体单色辐射力随波长和温度变化

$E_{b\lambda}$最大处的波长λ_m也随温度不同而变化。令



$$\frac{\partial E_{b\lambda}}{\partial \lambda} = 0$$

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

可见λ_m与T成反比，T越高，　则λ_m越小，这一规律为维恩（**Wien**）位移定律，历史上先发现的是维恩位移定律。

例6-1：试分别计算温度为**2000K**和**5800K**的黑体的最大光谱辐射力所对应的波长λ_m。

解：按 $\lambda_m T = 2.9\times10^{-3}\,\mathrm{m\cdot K}$ 计算：

当时，T=2000K $\lambda_m = \dfrac{2.9\times10^{-3}\,\mathrm{m\cdot K}}{2000\mathrm{K}} = 1.45\times10^{-6}\,\mathrm{m}$

当时，T=5800K $\lambda_m = \dfrac{2.9\times10^{-3}\,\mathrm{m\cdot K}}{5800\mathrm{K}} = 0.5\times10^{-6}\,\mathrm{m}$

可见工业上一般高温辐射（**2000K**内），黑体最大光谱辐射力的波长位于红外线区段，而太阳辐射（**5800K**）对应的最大光谱辐射的波长则位于可见光区段。

③ 斯忒芬－波尔兹曼定律

在黑体辐射的研究中，斯忒芬（**Stefan**）于**1879**年由实验确定黑体的辐射力与热力学温度之间的关系，其后由波尔兹曼（**Boltzmann**）于**1884**年从热力学关系式导出。

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda = \sigma_0 T^4$$

E_b为黑体的辐射力（W/m^2）；T为黑体的绝对温度（K）；σ_0为斯忒芬－波尔兹曼常数，其值为$5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2K^4)]$。

例6-2：一黑体置于室温为27℃的厂房中，试求在热平衡条件下黑体表面的辐射力。如果将黑体加热到327℃，它的辐射力又是多少？

解：在热平衡条件下，黑体温度与室温相同，辐射力为：

$$E_{b1}=c_0\left(\frac{T_1}{100}\right)^4=5.67\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{K}^4}\times\left(\frac{27+273}{100}\right)^4\mathrm{K}^4$$

$$=459\mathrm{W/m}^2$$

327℃黑体的辐射力为

$$E_{b2}=c_0\left(\frac{T_2}{100}\right)^4=5.67\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{K}^4}\times\left(\frac{327+273}{100}\right)^4\mathrm{K}^4$$

$$=7350\mathrm{W/m}^2$$

④兰贝特定律（Lambert）

黑体辐射的辐射强度与方向无关，即

$$I_\varphi = const.$$

因为 $I_\varphi = \dfrac{d^2Q}{\cos\varphi dA d\varpi}$

故对于服从兰贝特定律的辐射有：$\dfrac{dQ^2(\theta)}{dAd\omega} = I_\varphi \cos\theta$

即单位辐射面积发出的辐射能，落到空间不同方向单位立体角的能量的数值不相等，其值正比于该方向与辐射面法线方向夹角的余弦。所以兰贝特定律又称余弦定律。

$$E = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_\varphi \cos\varphi \sin\varphi d\theta d\varphi \qquad E_b = \pi I_\varphi = \pi I_b$$

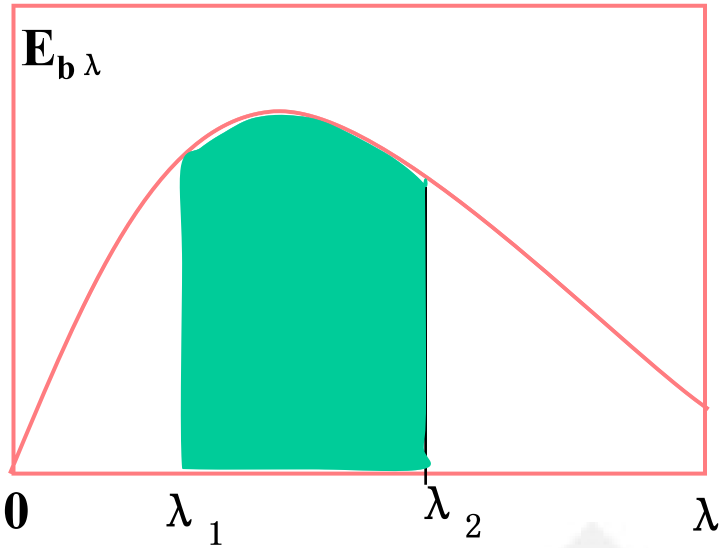
因此，对遵守兰贝特定律的辐射，辐射力在数值上等于辐射强度的π倍。

⑤波段辐射与辐射函数

在工程上和其它许多实际问题中往往需要计算一定波长范围内黑体辐射的能量，也就是波段辐射力。

黑体在波长至区段所发射出的辐射能为：

$$\Delta E_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda$$



一定波长范围黑体的辐射力

亦可写为：

$$\Delta E_b = \int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda$$

写出无量纲的形式，且称之为波段辐射

$$F_b(\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{\Delta E_b}{E_b} = \frac{1}{\sigma_0 T^4}\left[\int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda\right] = F_b(0-\lambda_2) - F_b(0-\lambda_1)$$

$$F_b(\lambda_1-\lambda_2)=\frac{\Delta E_b}{E_b}=F_b(0-\lambda_2)-F_b(0-\lambda_1)$$

式中，$E_b=\int_0^\infty E_{b\lambda}d\lambda=\sigma_0 T^4$ 是同温度下黑体辐射力；

$F_b(0-\lambda)$ 则表示波长从0到 λ 的波段辐射函数。

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

***f*(λ*T*)**称为黑体辐射函数，见表**6-1**。

3 黑体的吸收特性

吸收比是表示物体吸收入射辐射的能力。

吸收比可划分为以下四种：

对来自一切方向和所与波长的入射辐射的吸收比，称之为总吸收比(简称吸收比);

对来自一切方向的某一波长的入射辐射的吸收比，称之为单色吸收比

对来自某一方向的所有波长的入射辐射的吸收比，称之为方向吸收比；

对来自某一方向某一波长的入射辐射的吸收比，称之为单色方向吸收比。

黑体是理想的吸收体，它对一切波长和所有方向入射辐射的吸收比均等于1。于是对黑体有：

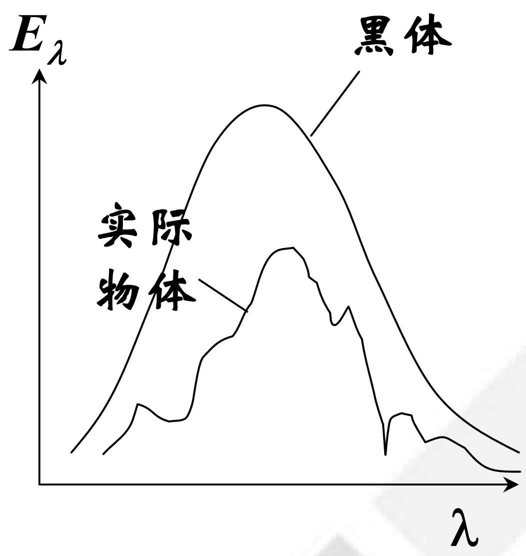
$$\alpha_b = \alpha_{b\lambda} = \alpha_{b\varphi} = \alpha_{b\lambda,\varphi} = 1$$

§6-3实际物体的辐射和吸收

1 实际物体的辐射——黑度（发射率）

实际物体表面的热辐射性能均弱于黑体表面。

实际物体的光谱辐射力往往随波长作不规则的变化。



图为同温度下黑体辐射和实际物体辐射的单色辐射力随温度变化的曲线。

① 总发射率

实际表面的辐射力与同温度下黑体辐射力的比值，称为黑度（发射率）。

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

黑度仅仅与物体表面自身的辐射特性相关，也就是与物体的种类和它的表面特征相关以及和物体的温度相关，而与物体外部的情况无关。

② 单色发射率

实际表面的单色辐射力与同温度下黑体表面的单色辐射力之比

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$$

发射率与单色发射率之间的关系为

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{\mathrm{b}\lambda} d\lambda}{E_{\mathrm{b}}}$$

③方向发射率

物体表面在某方向上的方向辐射力与同温度黑体辐射在该方向上的方向辐射力之比，亦可表示为物体在某方向上的辐射强度与同温度黑体辐射在该方向上的辐射强度之比

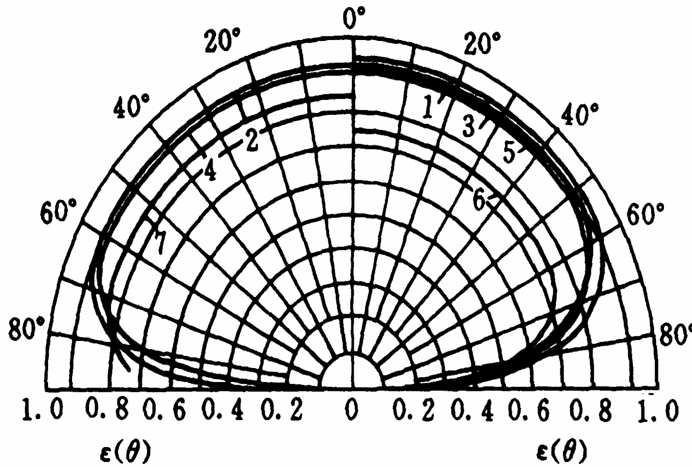
$$\varepsilon_\varphi = \frac{E_\varphi}{E_{b\varphi}} = \frac{I_\varphi \cos\varphi}{I_b \cos\varphi} = \frac{I_\varphi}{I_b}$$

如果实际物体的方向辐射力遵守兰贝特定律，该物体表面称为漫射表面。黑体表面就是漫射表面。

如果实际物体是漫射表面，则其方向辐射率应等于常数，而与角度无关。

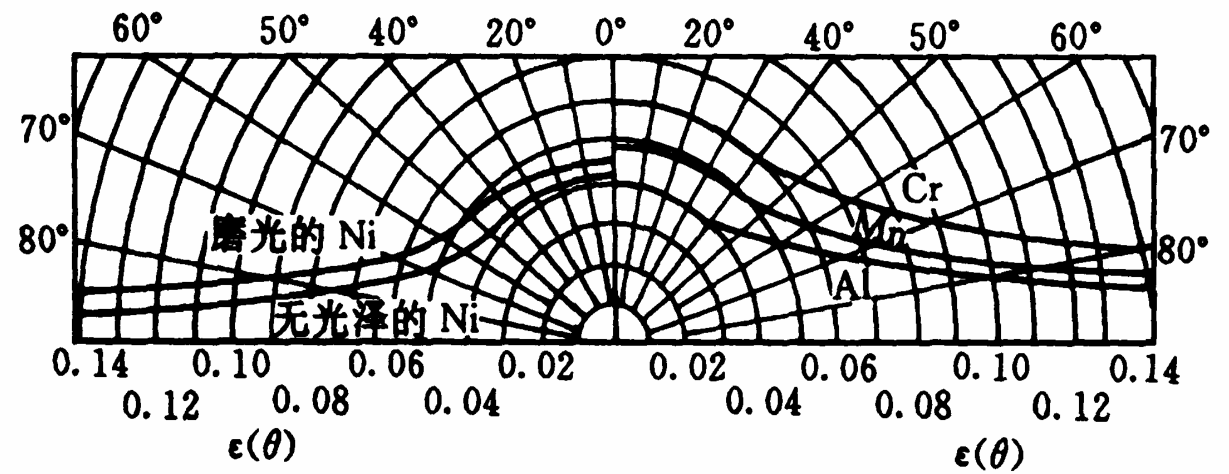
事实上实际物体不是漫发射体，即辐射强度在空间各个方向的分布不遵循兰贝特定律，是方向角的函数。

对于非金属表面在很大范围内方向黑度为一个常数值，表现出等强辐射的特征，而在60°之后方向黑度急剧减小



1—潮湿的冰；2—木材；3—玻璃；4—纸；
5—粘土；6—氧化铜；7—氧化铝

对于金属表面在一个小的φ角范围内亦有等强辐射的特征，方向黑度可视为不变，然后随着φ角增大而急剧增大，直到φ接近90°才有减小。



④单色方向发射率

$$\varepsilon_{\lambda,\varphi} = \frac{E_{\lambda,\varphi}}{E_{b\lambda,\varphi}}$$

实际物体的辐射力

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{1}{\sigma T^4}\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda \qquad E = \varepsilon E_b$$

实际结果发现，实际物体的辐射力并不严格地同热力学温度的四次方成正比，但工程计算中仍认为一切实际物体的辐射力都与热力学温度的四次方成正比，而把由此引起的修正包括到用实验方法确定的发射率中。

例6-3：试计算温度处于1400℃的碳化硅涂料表面的辐射力。

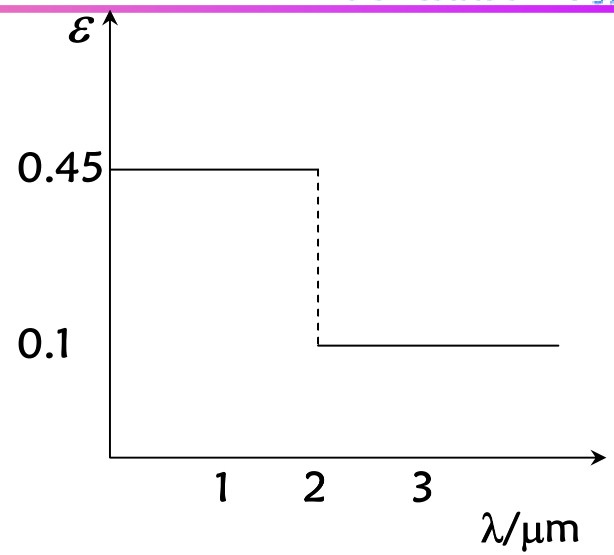
解：由表查得对1010~1400℃，碳化硅 ε_n =0.82~0.92，故可取对应1400℃的ε_n为0.92，即$\varepsilon=\varepsilon_n$ =0.92，辐射力为：

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

$$= 0.92 \times 5.67 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}^4} \times \left(\frac{1400+273}{100}\right)^4 \mathrm{K}^4$$

$$= 409 \times 10^3 \,\mathrm{W/m^2}$$

例6-4：实验测得2500K钨丝的法向单色发射率如图所示，计算其辐射力及发光效率。



解：

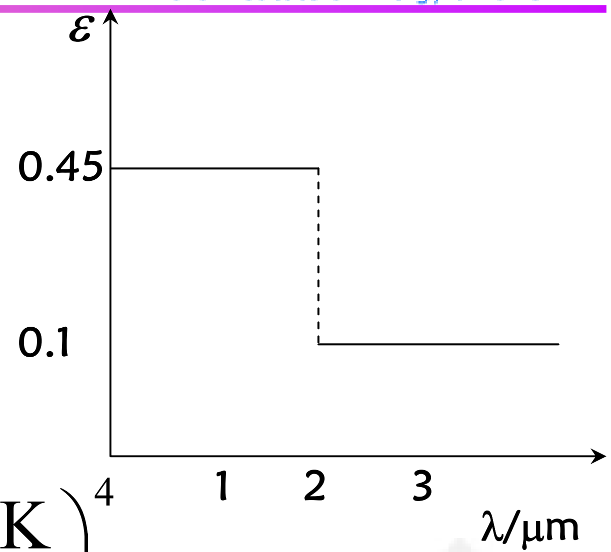
$$\varepsilon = \frac{1}{E_b}\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda) E_{b\lambda} d\lambda$$

$$= \frac{1}{E_b}\left[\int_0^{2} \varepsilon_{\lambda 1} E_{b\lambda} d\lambda + \int_2^{\infty} \varepsilon_{\lambda 2} E_{b\lambda} d\lambda\right]$$

$$= \varepsilon_{\lambda 1} F_{b(0-2)} + \varepsilon_{\lambda 2}\left[1 - F_{b(0-2)}\right]$$

$$\lambda_1 T = 2\times 10^{-6}\,\mathrm{m}\times 2500\mathrm{K} = 5000\,\mu m\cdot \mathrm{K}$$

由表查得:



$$F_{b(0-2)} = 0.6341$$

$$\varepsilon = 0.45 \times 0.6341 + 0.1 \times (1 - 0.6341)$$

$$= 0.322$$

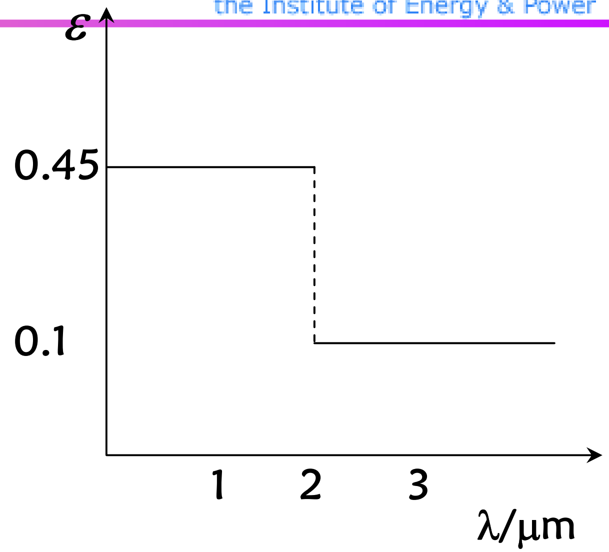
$$E = \varepsilon E_b = 0.322 \times 5.67 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{k}^4} \times \left(\frac{2500\mathrm{K}}{100} \right)^4$$

$$= 7.13 \times 10^5 \, \mathrm{W/m}^2$$

再计算可光范围的辐射能，取可见光波长为 **0.38~0.76 μm**

$$\lambda_1 T_0 = 0.38 \mu m\mathrm{m} \times 2500\mathrm{K} = 950 \mu m \cdot \mathrm{K}$$

$$\lambda_2 T_0 = 0.76 \mu m\mathrm{m} \times 2500\mathrm{K} = 1900 \mu m \cdot \mathrm{K}$$



由表查得：

$$F_{b(0-0.38)}=0.0003,F_{b(0-0.76)}=0.0523$$

于是可见光范围的辐射能为：

$$\Delta E=(0.0523-0.0003)\times0.45\times5.67\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{K}^4}\times\left(\frac{2500\mathrm{K}}{100}\right)^4$$

$$=5.18\times10^4\,\mathrm{W/m^2}$$

发光效率为：

$$\eta=\frac{\Delta E}{E}=\frac{5.18\times10^4\,\mathrm{W/m^2}}{7.13\times10^5\,\mathrm{W/m^2}}=7.27\%$$

可见发光效率很低。

2 实际物体的吸收——灰体

实际物体表面对热辐射的吸收是针对投入辐射而言的。

实际物体对入射辐射吸收的百分数称之为该物体的吸收比。

物体表面的吸收特性就不仅仅与物体的物质结构、表面特征以及温度状况有关，而且还与投入辐射的辐射能随波长和温度的变化密切相关。

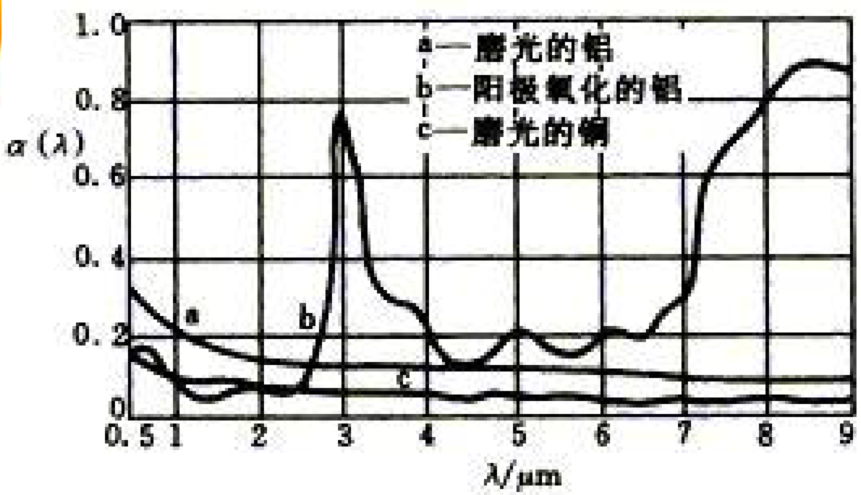
辐射源温度对吸收比的影响是因为实际物体的单色吸收比不等于常数的缘故。

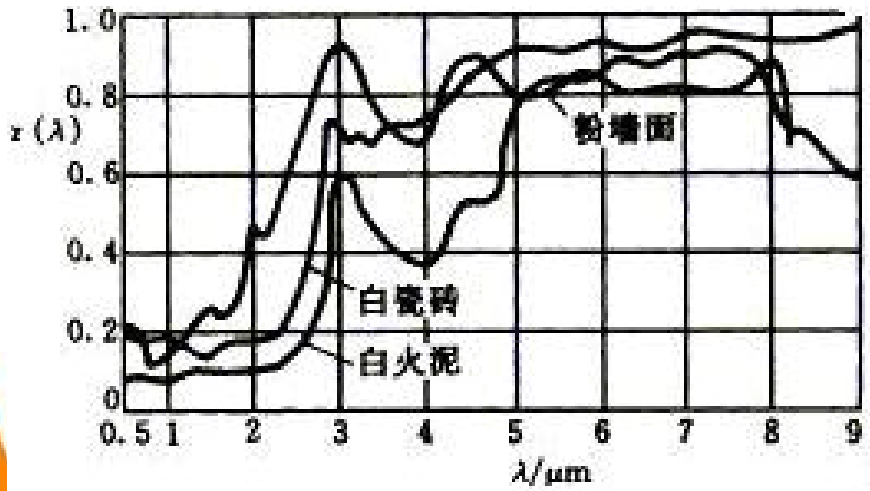
假定投入辐射来自黑体表面2，那么吸收表面1对其的吸收比可以定义为：

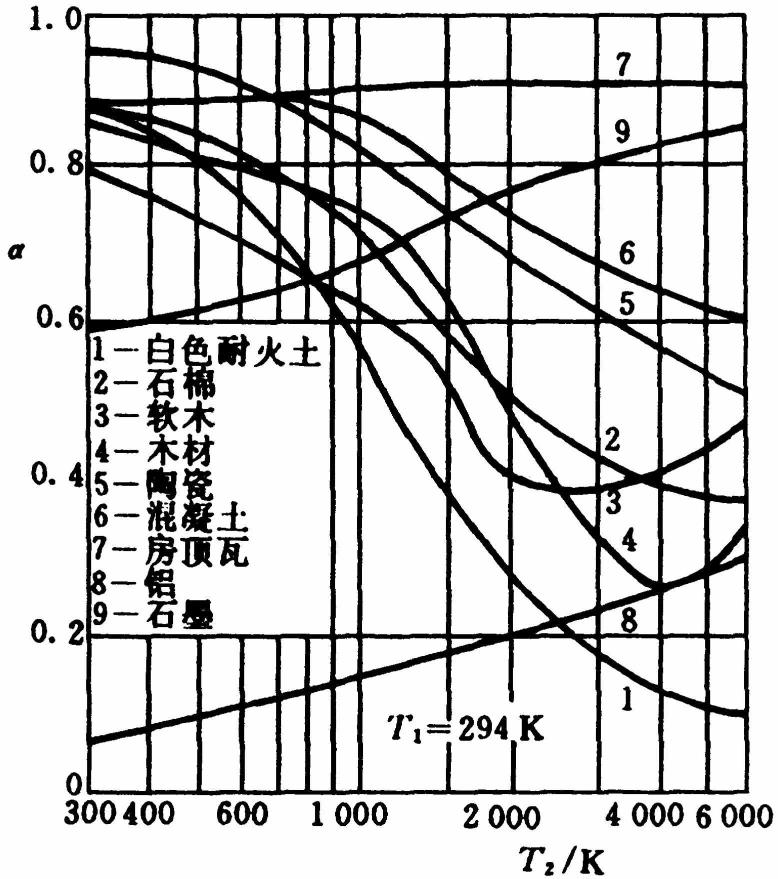
$$\alpha_1 = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(T_1)E_{b\lambda}(T_2)d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda}(T_2)d\lambda} = \int_0^\infty \alpha_\lambda(T_1)E_{b\lambda}(T_2)d\lambda \Big/ (\sigma_0 T_2^4)$$

$\alpha_\lambda(\lambda, T_1)$ 为物体表面对黑体辐射的单色吸收比

下面给出了实验得出的一些材料对黑体辐射的单色吸收比随黑体温度的变化关系。


a—磨光的铝
b—阳极氧化的铝
c—磨光的铜
α(λ)
λ/μm
0.5 1 2 3 4 5 6 7 8 9
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
a
b
c


r(λ)
λ/μm
0.5 1 2 3 4 5 6 7 8 9
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
粉墙面
白瓷砖
白火泥


α
1—白色耐火土
2—石棉
3—软木
4—木材
5—陶瓷
6—混凝土
7—房顶瓦
8—铝
9—石墨
T_1=294 K
T_2/K
300 400 600 1 000 2 000 4 000 6 000
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0

如果投入辐射不是来自黑体，则必须研究物体表面单色吸收率随投入辐射波长变化的规律。

如果物体表面的单色吸收比为常数 $\alpha_\lambda = const.$ 那么它的吸收比也就为常数 。

$$\alpha_1 = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(T_1)E_{b\lambda}(T_2)d\lambda}{\int_0^\infty E_{b\lambda}(T_2)d\lambda} = \int_0^\infty \alpha_\lambda(T_1)E_{b\lambda}(T_2)d\lambda \Big/ (\sigma_0 T_2^4)$$

<u>把灰体定义为单色吸收比为常数的物体</u>。

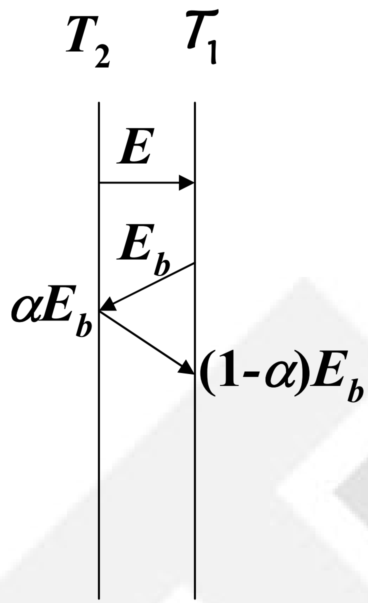
灰体也是一种理想的辐射表面，实际表面在一定条件下可以认为其具有灰体的特性。

灰体是从物体表面对投入辐射的吸收特性上去定义的，如果再在其发射特性上给予等强辐射的假设，即认为是漫射表面，也就是漫射灰表面，简称漫灰表面。

漫射灰表面的方向发射率和方向吸收比与方向无关，单色发射率和单色吸收比与波长无关，所以它对于来自任何方向和任何波长的入射辐射的吸收比均为常数，同时其发射的辐射也等于对任何方向和任何波长的黑体辐射的一个固定份额。

3 实际物体辐射与吸收之间的关系

实际物体的辐射和吸收之间有联系，这就是基尔霍夫定律。



假定两块平行平板距离很近，从一块板发出的辐射能全部落到另一块板上。若板1为黑体表面，板2为任意物体的表面。

两者的辐射力、吸收比和表面温度分别为E_b、 $\alpha_b(=1)$、T_1、E、 α和T_2。

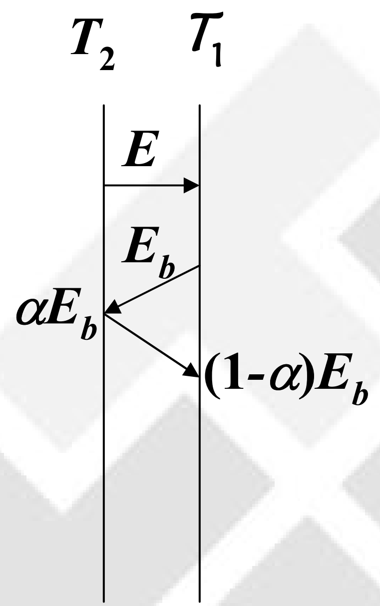
板2发出的辐射能E全部被板1吸收，而板1发出的辐射能E_b只被板2吸收αE_b，对板2能量收支为：

$$q = E - \alpha E_b$$

当体系处于热平衡时$T_1=T_2$，$q=0$，
所以有

$$q = E - \alpha E_b$$

$$\frac{E}{\alpha} = E_b \quad \text{或} \quad \alpha = \frac{E}{E_b} = \varepsilon$$



$$\frac{E}{\alpha} = E_b \quad 或 \quad \alpha = \frac{E}{E_b} = \varepsilon$$

基尔霍夫定律的两种数学表达式。

在热平衡条件下，任何物体的辐射力和它对来自黑体辐射的吸收比的比值恒等于同温度下黑体的辐射力。

热平衡时任意物体对黑体投入辐射的吸收比等于同温度下该物体的发射率。

基尔霍夫定律是在物体与黑体投入辐射处于热平衡条件下得出的。

对于灰体，由于其单色吸收比不随波长变化，所以灰体的吸收比等于其发射率与投射源的温度无关，那么不论物体与外界是否处于热平衡状态，也不论投入辐射是否来自黑体，都存在 $\alpha = \varepsilon$

灰体是无条件满足基尔霍夫定律的。

说明

（1）基尔霍夫定律有几种不同层次上的表达式，归纳为下表

层　　次	数学表达式	成立条件
单色，定向	$\varepsilon(\lambda,\varphi,\theta,T)=\alpha(\lambda,\varphi,\theta,T)$	无条件，θ为纬度角
单色，半球	$\varepsilon(\lambda,T)=\alpha(\lambda,T)$	漫射表面
全波段，半球	$\varepsilon(T)=\alpha(T)$	与黑体热平衡或漫射表面

（2）对工程计算而言，只要在所研究的波长范围内单色吸收率基本上与波长无关，则灰体假设成立。在工程常见的温度范围（≤2000K）内，许多工程材料都具有这一特点。

（3）由基尔霍夫定律，物体的辐射力越大，其吸收能力也就越大，换句话说，善于辐射的物体必善于吸收，反之亦然。所以，同温度下黑体的辐射力最大。

（4）当研究物体表面对太阳能的吸收时，一般不能把物体作为灰体，即不能把物体在常温下的发射率作为对太阳能的吸收比。

例6-5：一火床炉墙内表面温度为500K，其光谱发射率可近似地表示为：$\lambda \le 1.5\mu m$时, $\varepsilon(\lambda) = 0.1$; $\lambda = 1.5 \sim 10\mu m$时, $\varepsilon(\lambda) = 0.5$; $\lambda > 10\mu m$时, $\varepsilon(\lambda) = 0.8$。（非灰体）；炉墙内壁接受来自燃烧着的煤层的辐射，煤层温度为2000K。设煤层的辐射可作为黑体辐射，炉墙为漫射表面，试计算炉墙发射率及其对煤层辐射的吸收比。

解：（1）

$$\varepsilon(T_1)=\frac{\varepsilon_{\lambda,1}}{E_b}\int_0^{\lambda_1}E_{b\lambda}d\lambda+\frac{\varepsilon_{\lambda,2}}{E_b}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{b\lambda}d\lambda+\frac{\varepsilon_{\lambda,3}}{E_b}\int_{\lambda_2}^{\infty}E_{b\lambda}d\lambda$$

$$\lambda_1T_1=1.5\mu m\times500\mathrm{K}=750\mu m\cdot\mathrm{K}$$

查表得 $F_{b(0-\lambda_1)}=0.000$ $\lambda_2T_1=10\mu m\times500\mathrm{K}=5000\mu m\cdot\mathrm{K}$

查表得 $F_{b(0-\lambda_2)}=0.634$

故 $\varepsilon(T_1)=0.1\times0.000+0.5\times0.634+0.8\times(1-0.634)=0.61$

（2）按吸收比定义：

$$\alpha = \int_0^\infty \alpha_\lambda(\lambda, T_1) E_{b\lambda}(T_2) d\lambda \Big/ \int_0^\infty E_{b\lambda}(T_2) d\lambda$$

因为炉墙是漫射的，$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$　　故有：

$$\alpha = \varepsilon(\lambda_1) F_{b(0-\lambda_1)} + \varepsilon(\lambda_2) F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} + \varepsilon(\lambda_3) F_{b(\lambda_3-\infty)}$$

其中的辐射函数是2000K下的值：

$$\lambda_1 T_2 = 1.5\mu m \times 2000\text{K} = 3000\mu m \cdot \text{K}$$

查图得：　$F_{(0-\lambda_1)} = 0.274$

$$\lambda_2 T_2 = 10\mu m \times 2000\text{K} = 20000\mu m \cdot \text{K}$$

查图得：$F_{(0-\lambda_2)} = 0.986$

所以：

$$\alpha = 0.1\times 0.274 + 0.5\times(0.986-0.274) + 0.8\times(1-0.986)$$
$$= 0.395$$

这里$\varepsilon(T_1)$ = **0.61**，而$\alpha(T_1, T_2)$=**0.395**，$\alpha \neq \varepsilon$。这是由于在所研究的波长范围内，$\alpha(\lambda)$不是常数所致。

第六章作业

习题：3、10、12、13、14