第11章 辐射换热

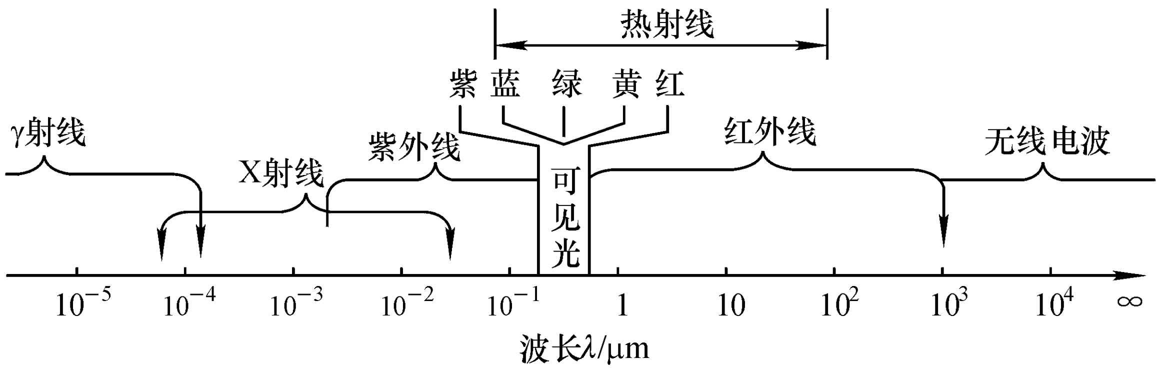
- 发射率 吸收率 反射率 透射率
- 光谱辐射力 辐射力

11.1 热辐射的基本概念

11.1.1 热辐射波谱

- 热辐射是完全自发的，任何0 K以上的物体都不停地向外辐射，同时也吸收外来的辐射能量。
- 即使在温度相同情况下这种过程也照常进行，叫做 辐射平衡。
- 物体间的辐射热交换不需要任何中间媒介。辐射热交换过程从发射到吸收伴随着能量形式的两次变换，即发射时从热力学能（习惯称作内能）转变成电磁波能量，吸收过程反过来。
- 热辐射的本质是电磁波

- 热辐射的本质是电磁波
- 传热学最感兴趣的是0.1～100 μm的波段波长范围，称为<u>热辐射波段</u>。
- 0.38～0.76 μm是可见光
- 0.76 μm 以上是红外能量



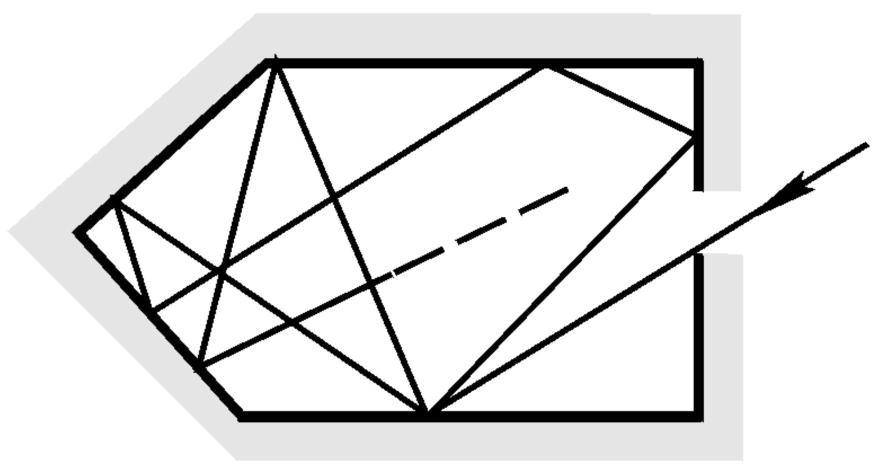
➢ 白炽灯钨丝发光时温度约为2800K，可见光波段内辐射能量占总能量仅8.8%，其余能量不起照明作用，因此用热辐射来照明是相当浪费的。

➢ 1000K温度下金属在黑暗空间呈现暗红色，是因为有少量接近于红外线波长的辐射能量发出。

➢ 400K以下物体即使在黑暗空间也看不到可见光，但利用红外线成像仪可迅速探测出其位置

11.1.2 黑体辐射

- 能够吸收全部投射辐射，无论其具有何种波长及来自何方向的物体被称作 黑体
- 黑体被用作衡量实际物体发射辐射和吸收辐射能力的一种基准
- 人工黑体空腔



11.1.3 辐射力

- 半球向光谱辐射力，表示单位时间内物体单位表面积在波长λ处的单位波长范围内向半球空间所发射的辐射能量，符号是E_λ，单位为W/m^3。

$$E_\lambda = \mathrm{d}\Phi_\lambda / \left(\mathrm{d}A\,\mathrm{d}\lambda\right)$$

- 半球向总辐射力，简称 辐射力，是辐射计算中用得最多的辐射参数之一。它表示单位时间内物体单位表面积在全波长范围内（$0<\lambda<\infty$）向整个半球空间所发射的辐射能量，符号是E，单位是 W/m^2 。

- 辐射力和光谱辐射力间的关系：

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda$$

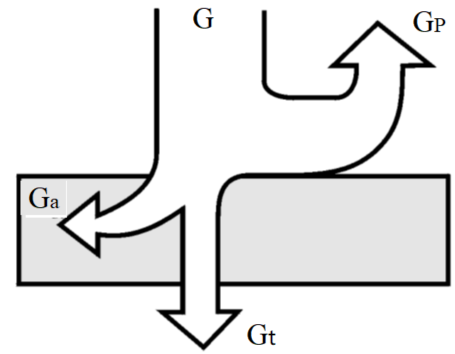
- 黑体的辐射力用E_b表示

11.1.4 吸收比、反射比和透射比

- 投射辐射：吸收辐射G_α、透射辐射G_τ 和反射辐射G_ρ

$$G = G_\alpha + G_\rho + G_\tau$$

$$1 = \frac{G_\alpha}{G} + \frac{G_\rho}{G} + \frac{G_\tau}{G} = \alpha + \rho + \tau$$



$\alpha = \dfrac{G_\alpha}{G}$ 物体的吸收率（吸收比）；$\rho = \dfrac{G_\rho}{G}$ 物体的反射率（反射比）；

$\tau = \dfrac{G_\tau}{G}$ 物体的透射率（穿透比）

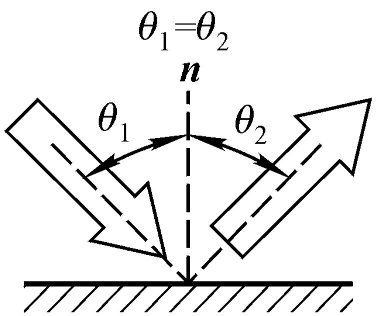
黑体：物体能吸收全部的外来射线，α =1时

白体：物体能反射全部外来射线，ρ =1时(包括镜反射和漫反射)

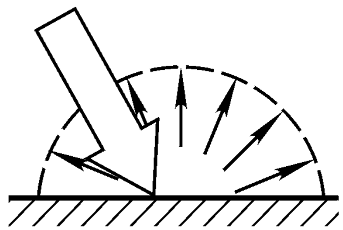
透明体：物体能被外来射线所全部透射，τ =1

黑体≠黑色物体；白体≠白色物体；透明体≠透明的物体

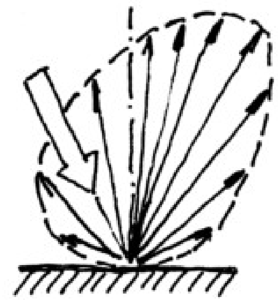
11.1.4　吸收比、反射比和透射比



镜反射



漫反射



实际反射

镜反射:物体表面的不平整尺寸小于投射辐射的波长,反射角等于入射角

漫反射：物体表面的不平整尺寸大于投射辐射的波长,来自任意方向、任意波长的辐射以均匀辐射强度反射到所有方向

实际反射：叠加

11.2 黑体辐射的基本定律

11.2.1 普朗克定律

普朗克定律描述黑体半球向光谱辐射力随温度和波长的变化规律。

$$E_{b\lambda}(\lambda,T)=\frac{C_1}{\lambda^5\left[\exp(C_2/\lambda T)-1\right]}$$

(1) 黑体的光谱辐射力连续分布，随温度升高剧增。

(2) 任意给定温度下，黑体的光谱辐射力存在一个极大值。其位置随温度升高向短波方向移动。

(3) 对一定温度的黑体，曲线下的面积代表黑体的半球总辐射力E_b。

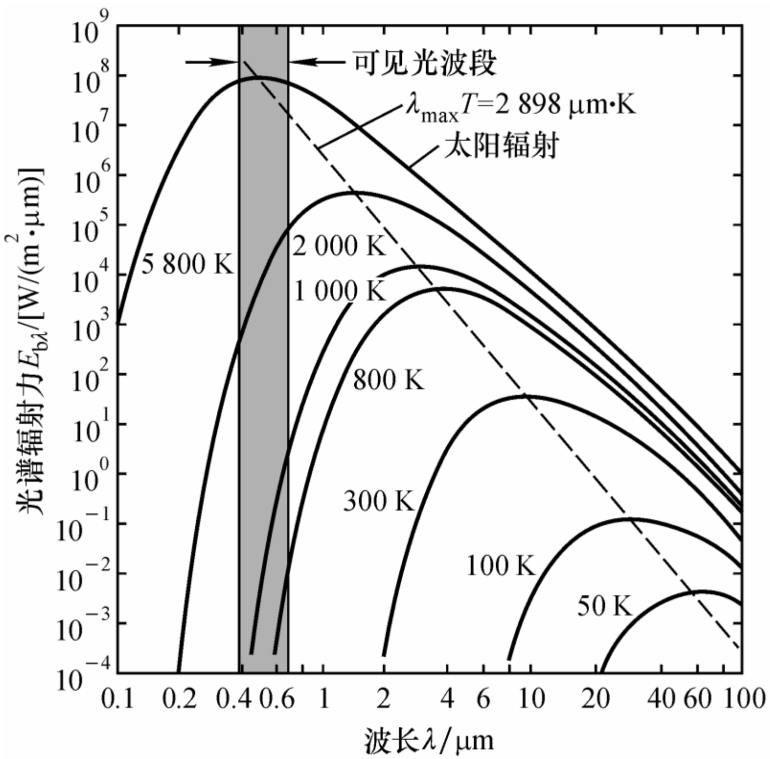
(4) 温度达到3000 K的水平时，可见光才在总能量中占据显著比例。在一般的工业高温情况下，只有红外辐射能量。

11.2.2 维恩（W. Wien）位移定律

- 维恩位移定律：不同温度下的峰值点连接起来的那条线的轨迹

$$\lambda_{\max} T = 2897.8 \mu m \cdot K$$

- $\lambda_{\max}$ 指某温度 T 下黑体光谱辐射力的最大值所对应的波长 。



11.2.3 斯蒂芬-波尔兹曼定律

1879年斯蒂芬通过实验得出，1884年玻尔兹曼用热力学理论推出

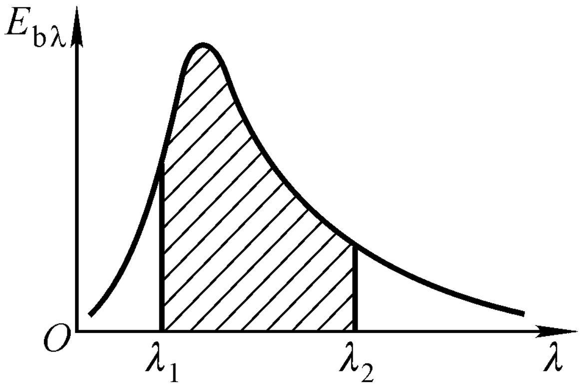
$$E_{\mathrm{b}}(T)=\int_0^{\infty}\frac{C_1}{\lambda^5[\exp(C_2/\lambda T)-1]}\mathrm{d}\lambda=\sigma T^4$$

黑体辐射力仅和温度有关

Josef Stefan（1835—1893）

Ludwig Boltzmann（1844—1906）

波段辐射力



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

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

$$F_{b(\lambda_1-\lambda_2)}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda}{\int_0^{\infty}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda}=\frac{\int_0^{\lambda_2}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda-\int_0^{\lambda_1}E_{b\lambda}\mathrm{d}\lambda}{\sigma T^4}=F_{b(0-\lambda_2)}-F_{b(0-\lambda_1)}$$

- **相应的份额 $F_{b(0-\lambda)}$ 见黑体辐射函数表。**

波段辐射力

工程上计算某一波段范围内黑体的辐射能及其在辐射力中所占的百分数。

某一波段范围内黑体的辐射力

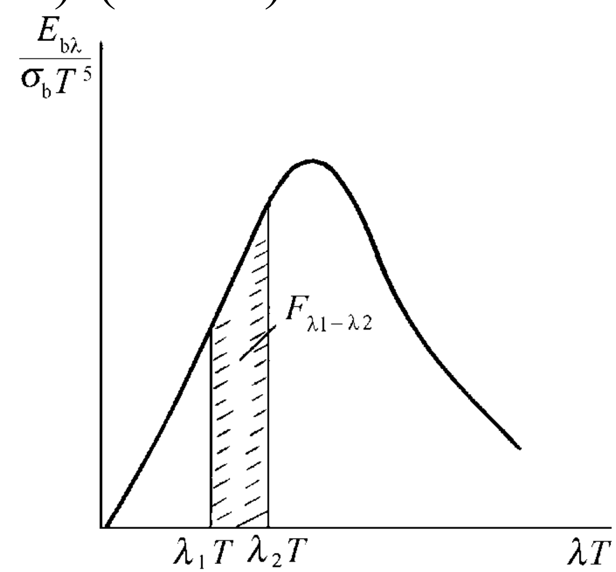
$$E_{\mathrm{b}(\lambda_1-\lambda_2)}=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}E_{\mathrm{b}\lambda}\mathrm{d}\lambda=\int_0^{\lambda_2}E_{\mathrm{b}\lambda}\mathrm{d}\lambda-\int_0^{\lambda_1}E_{\mathrm{b}\lambda}\mathrm{d}\lambda=E_{\mathrm{b}(0-\lambda_2)}-E_{\mathrm{b}(0-\lambda_1)}$$

黑体的波段辐射力

$$F_{\mathrm{b}(0-\lambda T)}=\frac{E_{\mathrm{b}(0-\lambda)}}{E_{\mathrm{b}}}=\frac{\int_0^{\lambda}E_{\mathrm{b}\lambda}\mathrm{d}\lambda}{\sigma_{\mathrm{b}}T^4}=\int_0^{\lambda T}\frac{c_1}{\sigma_{\mathrm{b}}(\lambda T)^5(e^{\frac{c_2}{\lambda T}}-1)}\mathrm{d}(\lambda T)$$

$$=\int_0^{\lambda T}\frac{E_{\mathrm{b}\lambda}}{\sigma_{\mathrm{b}}T^5}\mathrm{d}(\lambda T)=f(\lambda T)$$

$$F_{\mathrm{b}(\lambda_1T—\lambda_2T)}=F_{\mathrm{b}(0-\lambda_1T)}-F_{\mathrm{b}(0-\lambda_2T)}$$



黑体辐射函数

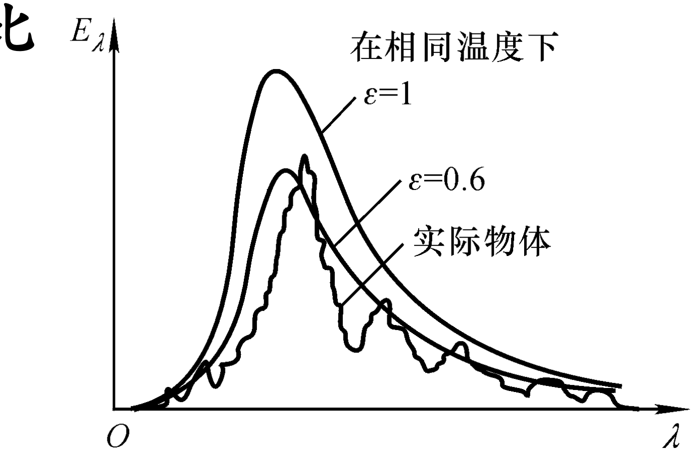
$$F_{\mathrm{b}(0-\lambda T)}=f(\lambda T)$$

11.3 基尔霍夫定律

11.3.1 发射率

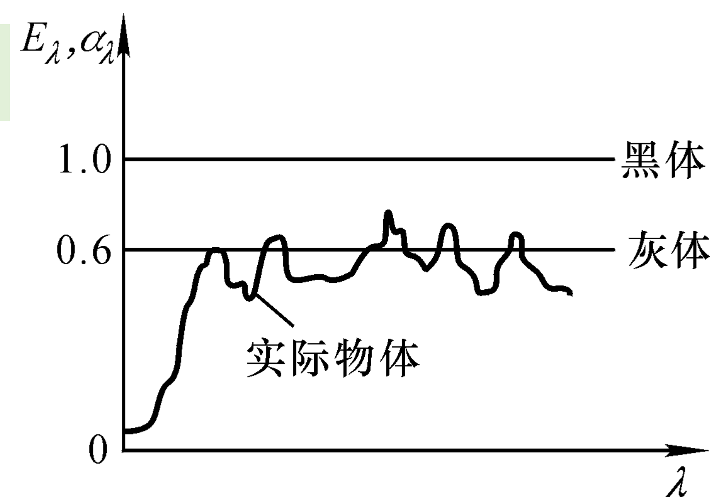
- 半球总发射率，简称发射率：实际物体表面的半球向总辐射力与相同温度下黑体总辐射力之比

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_\lambda(\lambda,T)\, E_{b\lambda}(\lambda,T)\, d\lambda}{E_b(T)}$$



$$\boldsymbol{E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4}$$

灰体：光谱发射率不随波长变化的物体

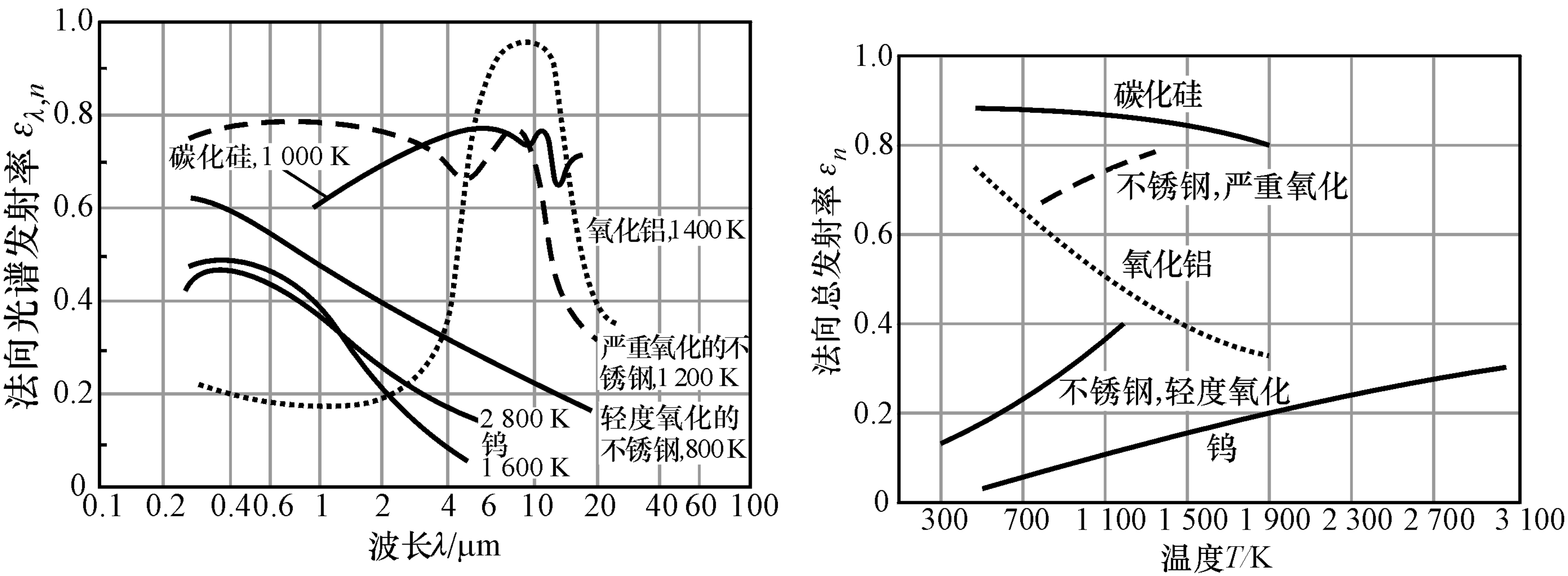


- 实际物体的光谱辐射力低于同温度的黑体，且相对于波长的变化不那么规律。
- 实际物体的辐射力并非严格与热力学温度的四次方成正比。但工程计算中仍按四次方计算，并把由此引起的偏差归到发射率当中。

发射率	$\varepsilon = \dfrac{E}{E_{\mathrm{b}}}$
光谱发射率	$\varepsilon_{\lambda} = \dfrac{E_{\lambda}}{E_{\mathrm{b}\lambda}}$
定向发射率	$\varepsilon_{\theta} = \dfrac{E_{\theta}}{E_{\mathrm{b}\theta}}$
光谱定向发射率	$\varepsilon_{\lambda,\theta} = \dfrac{E_{\lambda,\theta}}{E_{\mathrm{b}\lambda,\theta}}$

已知发射率，则该物体的辐射力为：

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



法向光谱发射率 $\varepsilon_{\lambda,n}$
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0.1
0.2
0.4
0.6
1
2
4
6
10
20
40
60
100
波长λ/μm
碳化硅,1 000 K
氧化铝,1400 K
严重氧化的不锈钢,1 200 K
2 800 K
钨
1 600 K
轻度氧化的不锈钢,800 K
法向总发射率 ε_n
300
700
1 100
1 500
1 900
2 300
2 700
3 100
温度T/K
碳化硅
不锈钢,严重氧化
氧化铝
不锈钢,轻度氧化
钨

11.3.2 吸收比

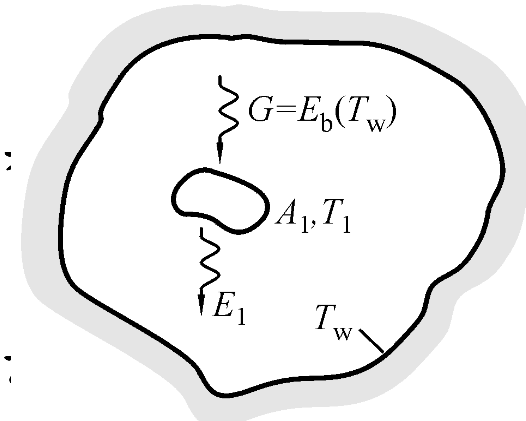
- 实际物体的吸收比既与表面本身的物理特征有关，也和投射辐射的光谱分布有关，即与投射辐射源的温度、它的光谱发射率随波长的变化规律有关 。

$$\alpha=\frac{\text{投射辐射被表面吸收的部分}}{\text{全部投射辐射}}=\frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G_\lambda \mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda \mathrm{d}\lambda}$$

11.3.3 基尔霍夫定律

- 基尔霍夫定律 阐明了两个最重要的辐射热物性，吸收比和发射率之间的关系。
- 无论内表面性质如何，腔内任何地点的辐

  可以视为黑体辐射。



- 内包物体很小，不足以对腔内辐射场造成

  故投射到小表面上的辐射即为腔壁面温度下的黑体辐射，

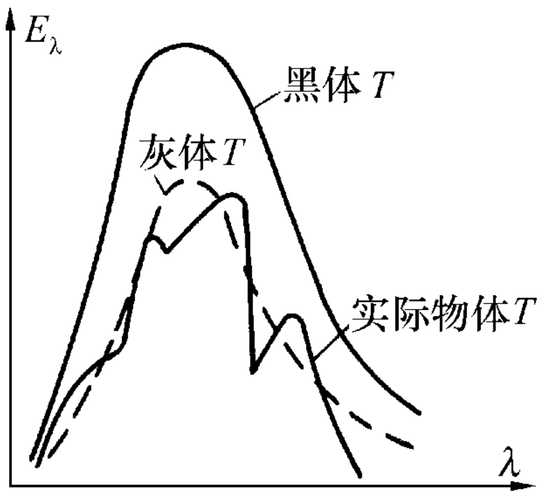
$G = \sigma T_w^4$

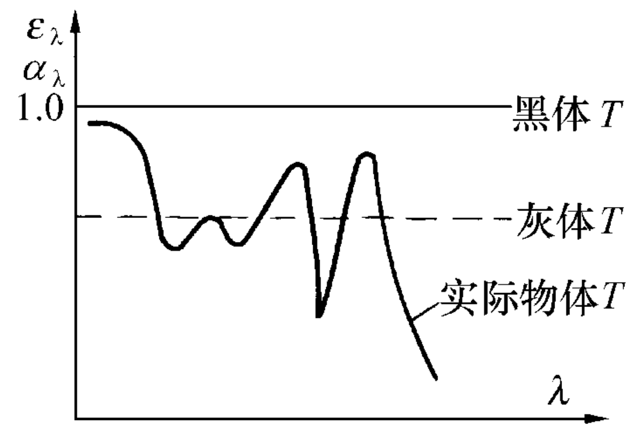
- 小表面吸收的辐射等于 $G_\alpha = \alpha G = \alpha\sigma T_w^4$
- 该表面所发射的辐射等于 $E = \varepsilon\sigma T_1^4$
- 在辐射平衡条件下，即 $T_w = T_1$ 时，物体的净辐射输出为零

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

受射面与辐射源的温度不相同，需要增加一项条件，即应该是漫-灰表面。

- 表面的辐射特性与方向无关，称之为漫射表面 $\varepsilon_\lambda(T)=\alpha_\lambda(T)$
- 表面的辐射特性与波长无关则称为灰表面 $\varepsilon_\theta(T)=\alpha_\theta(T)$
- 同时满足以上两方面要求的就是漫灰表面 $\varepsilon(T)=\alpha(T)$



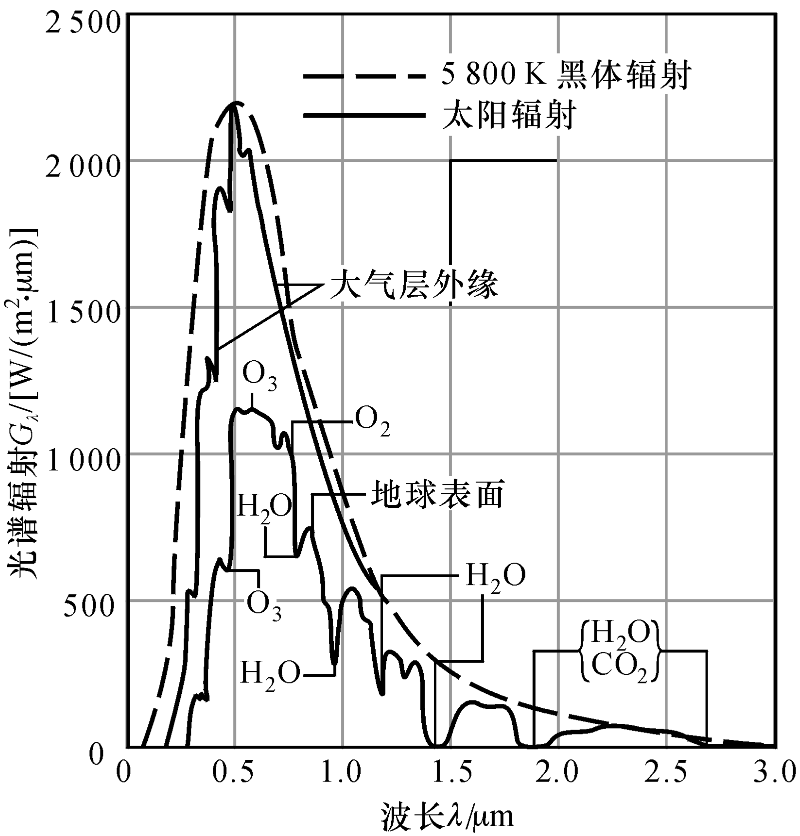


✓ 在工程辐射传热计算中，只要参与辐射各物体的温差不过分悬殊，把物体表面当作漫射灰表面，就可以应用 $\varepsilon=\alpha$。

✓ 对太阳辐射来讲，一般认为物体表面为非灰体。

✓ 如果所研究的物体受到来自很高温度的辐射，而自身却在低温下发射辐射，这时对该物体不能随便引用上述基尔霍夫定律的结论。

11.4 太阳辐射与环境辐射



- 太阳直径1.39×10^9 m
- 表面温度5762 K
- 总辐射功率达到3.8×10^{26} W
- 到达地球范围的辐射能量仅占总量的22亿分之一。

- **地球大气层外的辐射能量密度仅1367±6 W/m²**

- **太阳辐射包括直射和散射：**

  直射：直接来自太阳圆盘的辐射分量，
  散射：金国大气和云层折射、散射以后改变了方向的太阳辐射，又称天空辐射

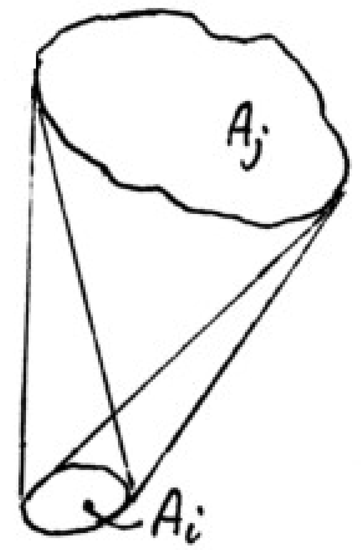
- **温室效应：地球的大气层对辐射具有双重作用，它一方面削弱了太阳的投射辐射（主要能量位于0.3～3 μm），同时它几乎完全阻挡了地球向太空发射的长波红外辐射（波长主要在10 μm以外）。对不同波段辐射能量表现出来的这种“选择性”透过是形成温室效应的基本原因。**

- **对太阳辐射构成不均匀吸收的大气成分主要是水蒸气和二氧化碳，而臭氧（O_3）几乎能完全吸收0.3 μm以下的有害紫外线辐射，从而保护地球表面的人和动物免受过量的紫外线照射。**

- <u>光谱选择性吸收表面</u>**：对太阳辐射的吸收比很高，但自身的发射率相对很低。**
  - ✓由于太阳辐射能主要集中在0.3~3μm的波长范围内，而实际物体对短波光谱吸收率和对长波的光谱吸收率有时会有很大差别
  - ✓在太阳能的利用中，作为太阳能吸收器表面材料，要求它对0.3~3μm波长范围的光谱吸收率尽可能接近1，而对λ>3μm波长范围的光谱吸收率尽可能接近零
  - ✓该表面能从太阳辐射中吸收较多的能量，而自身的辐射热损失又极小

11.5 角系数

11.5.1 角系数的定义

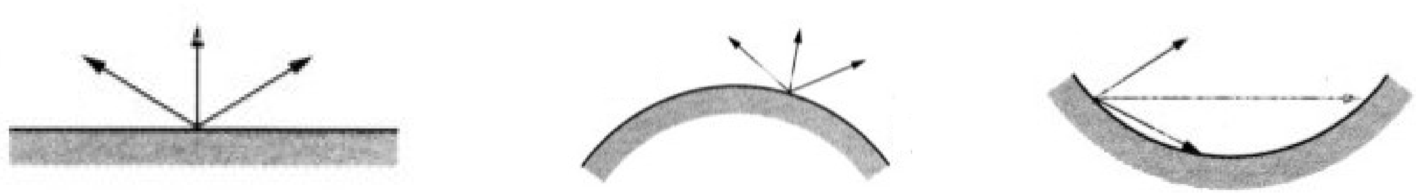


- 角系数 $X_{i,j}$ 表示离开表面i的所有辐射能量中到达表面 j，或者说被表面 j 拦截的百分数。
- 离开表面的所有辐射能量包括它的自身发射和对外来投射辐射的反射。
- 到达和拦截不能理解为被表面 j 吸收，而是指辐射能量到达表面 j 所在的空间位置。

角系数的概念建立在漫灰表面和表面温度均匀、有效辐射均匀的基础上 。

可以从直视的角度来理解角系数概念：

对平表面或凸表面i，角系数$X_{i,I}$均等于零但对凹表面，因为它能“自己看见自己的另一部分”，所以$X_{i,i}$不等于零。



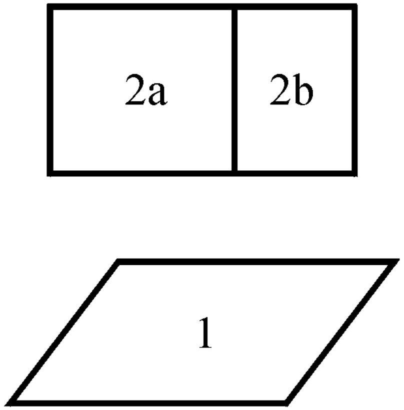
11.5.2 角系数的性质

- 1．互换性，也称为相对性 $A_i X_{i,j} = A_j X_{j,i}$
- 2．完整性 $$\sum_{j=1}^{N} X_{i,j} = X_{i,1} + X_{i,2} + \cdots + X_{i,i} + \cdots + X_{i,N} = 1$$
- 如果研究对象未构成封闭形状，可以用一个假想面把开口封起来，包括该假想面在内的空腔是封闭的，适用完整性规律。

- 3. 分解性，也称为 可加性

$$A_1 X_{1,2} = A_1 X_{1,2a} + A_1 X_{1,2b}$$

$$A_2 X_{2,1} = A_{2a} X_{2a,1} + A_{2b} X_{2b,1}$$



- 4. 对称性

一个房间的地面或者天花板对相向的两面墙的角系数一定相等

11.5.3 角系数的计算

根据完整性：

$$X_{1,2}A_1 + X_{1,3}A_1 = A_1 \qquad X_{2,1}A_2 + X_{2,3}A_2 = A_2 \qquad X_{3,1}A_3 + X_{3,2}A_3 = A_3$$

互换性： $X_{1,2}A_1 = X_{2,1}A_2 \qquad X_{1,3}A_1 = X_{3,1}A_3 \qquad X_{2,3}A_2 = X_{3,2}A_3$

以上联立解，得到：

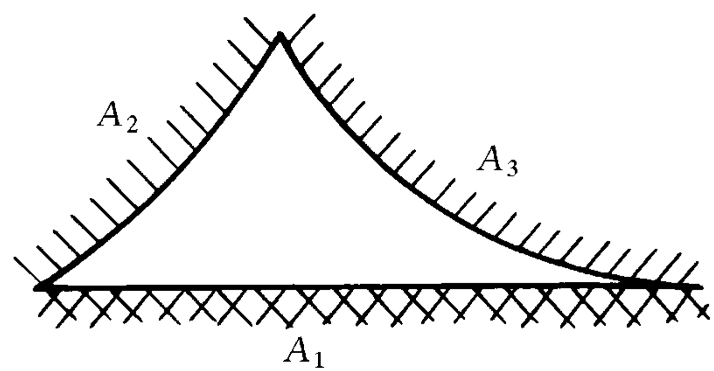
$$X_{2,3}A_2 = \frac{1}{2}(A_2 + A_3 - A_1) \qquad X_{1,3}A_1 = \frac{1}{2}(A_1 + A_3 - A_2)$$

$$X_{1,2}A_1 = \frac{1}{2}(A_1 + A_2 - A_3)$$

最后得到：

$$X_{1,2} = \frac{A_1 + A_2 - A_3}{2A_1} \qquad X_{1,3} = \frac{A_1 + A_3 - A_2}{2A_1}$$

$$X_{2,3} = \frac{A_2 + A_3 - A_1}{2A_2}$$



三个非凹表面组成的空腔

11.5.3 角系数的计算

直接积分法

数值计算法

代数-图线法，图11-17，图11-18，图11-19

太阳对地球的角系数

把地球看做半径r=6436km的圆球，距离太阳R=150.6×10^{6}km，太阳向周围辐射的能量中投射到地球大气层外缘的百分数，即角系数为

$$X_{s,e}=\frac{\pi r^2}{4\pi R^2}=\frac{\pi\times 6436^2}{4\pi(150.6\times 10^6)^2}=4.567\times 10^{-10}$$

太阳向周围辐射的能量

- 把太阳当作黑体看待，认为其直径为1.397×10^6km，表面积为6.131×10^{18}m^2，则太阳向周围辐射的能量

$$E_s = \sigma_b A_s T^4 = 5.67\times10^{-8}\times6.131\times10^{18}\times5762^4 = 3.832\times10^{26}\ \mathrm{W}$$

- 到达地球大气层外缘的能量为：

$$\Phi_s = X_{s,e}E_s = 4.567\times10^{-10}\times3.832\times10^{26} = 1.750\times10^{17}\ \mathrm{W}$$

- 折算到垂直于射线方向每单位表面积的辐射能为

$$q = \frac{1.750\times10^{17}}{\pi\times(6436\times10^3)^2} = 1345\mathrm{W}$$

- 经过多年对太阳辐射的实测资料表明，当地球位于和太阳的平均距离上，在大气层外缘并与太阳射线相垂直的单位表面所接受到的太阳辐射能为1353 W/m^2，称为太阳常数，用符号s_c表示
- 此值与地理位置或一天中的时间无关

11.6 黑表面之间的辐射换热计算

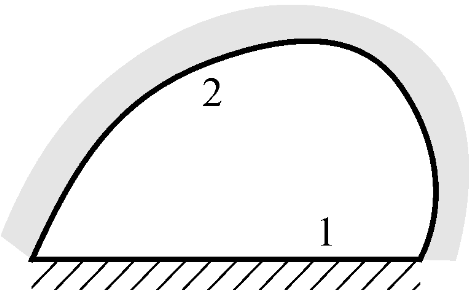
- 黑体不反射任何辐射，黑表面之间的辐射换热计算相对简单

  假设：

  (1) 表面之间的空间为真空或者只存在不参与辐射的透热介质

  (2) 所考虑的表面处于封闭腔中

- 两个黑表面构成封闭腔



$$\Phi_{1\to 2} = E_{b1} A_1 X_{1,2}$$

$$\Phi_{2\to 1} = E_{b2} A_2 X_{2,1}$$

净辐射 $$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{1/A_1 X_{1,2}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{1/A_2 X_{2,1}}$$

- 空间热阻单元