

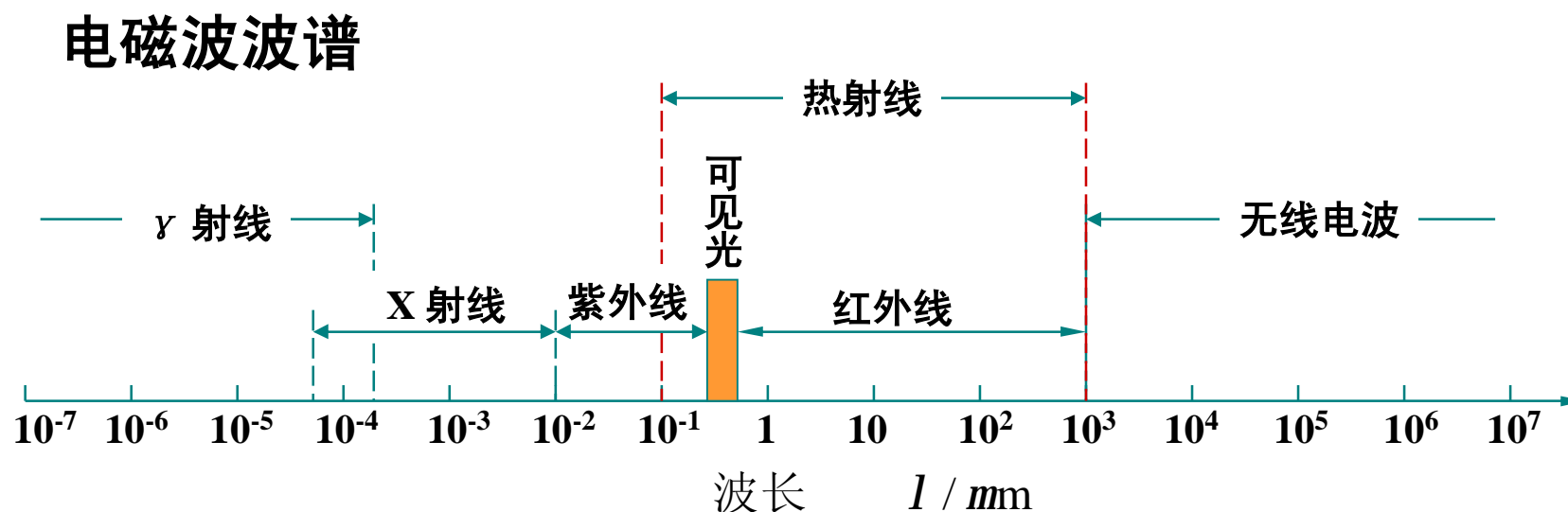
# 第八章 辐射传热

——以电磁波传递和交换热量

# 8.1 辐射传热的基本概念

- a. **辐射** 是物体通过电磁波传递能量的现象。
- b. **热辐射** 由于物体内部微观粒子的热运动状态改变，而将部分内能转换成电磁波的能量发射出去的过程。
- c. **辐射能** 辐射过程中传递的能量称为辐射能。
- d. **热射线** 热辐射产生的电磁波叫热射线，波长主要位于  $0.10 : 1000\text{mm}$  的范围内。
- e. **热辐射的特点** ①不依赖于物体接触就能进行热量传递；  
② $T>0$ 的物体都会不断地发射热射线。

# (1). 热辐射的波长范围



可见光: 波长在  $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ;

紫外线: 波长小于  $0.38 \mu\text{m}$ ;

红外线: 波长大于  $0.76 \mu\text{m}$ 。

热射线 ( $0.10 : 1000\text{mm}$ )

## (2). 吸收比、反射比和透射比

由能量守恒原理可知

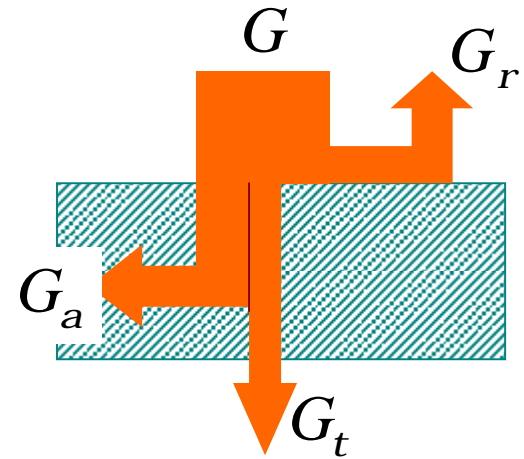
$$G = G_a + G_r + G_t$$

各分量与总量的比值为

$$1 = \frac{G_a}{G} + \frac{G_r}{G} + \frac{G_t}{G}$$

称:  $a = \frac{G_a}{G}$  为吸收比;  $r = \frac{G_r}{G}$  为反射比;

$t = \frac{G_t}{G}$  为透射比。有  $a + r + t = 1$



热射线进入固体或液体后, 在一个极短的距离内就被完全吸收。所以, 可以认为热射线不能穿透固体和液体, 即  $t = 0$ 。于是, 对于固体和液体有  $a + r = 1$

### (3). 黑体、白体和透明体

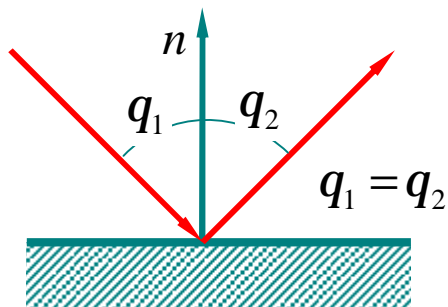
黑 体 能全部吸收外来射线的物体，即  $\alpha = 1$  的物体。

白 体 能全部反射外来射线的物体，即  $\rho = 1$ ，称为白体。

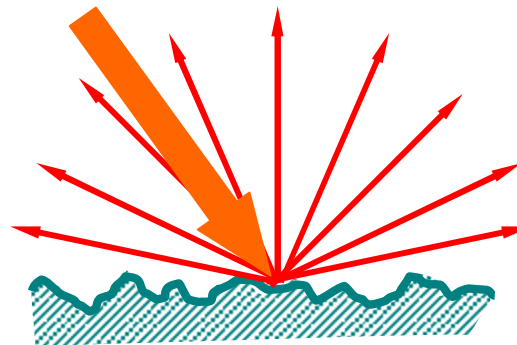
透明体 能被外来射线全部透射的物体，即  $\tau = 1$  的物体。

## (4). 镜反射和漫反射

热射线投射到物体表面后的反射现象和可见光一样，表面不平整尺寸小于投射辐射的波长时，形成镜面反射，反射角等于入射角。当表面不平整尺寸大于投射辐射波长时，形成漫反射，此时，反射能均匀分布在各个方向。



镜反射



漫反射

## (5). 漫发射、漫反射和漫射表面

### ①漫发射表面

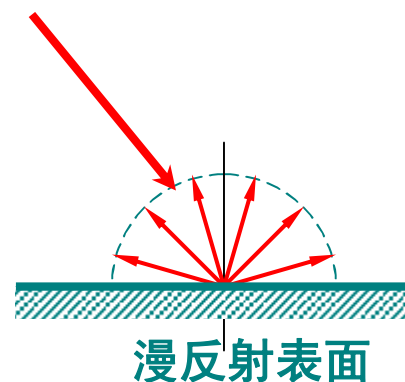
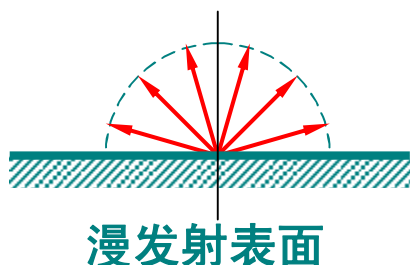
能向半球空间各方向发出均匀辐射强度的物体表面。

### ②漫反射表面

能向半球空间各方向均匀地反射来自各方向的投射辐射。

### ③漫射表面

表面既是漫发射表面，又是漫反射表面，这样的表面称为漫射表面。



## (6). 光谱吸收比、光谱反射比和光谱透射比

如果投射能量是某一波长下的光谱辐射，

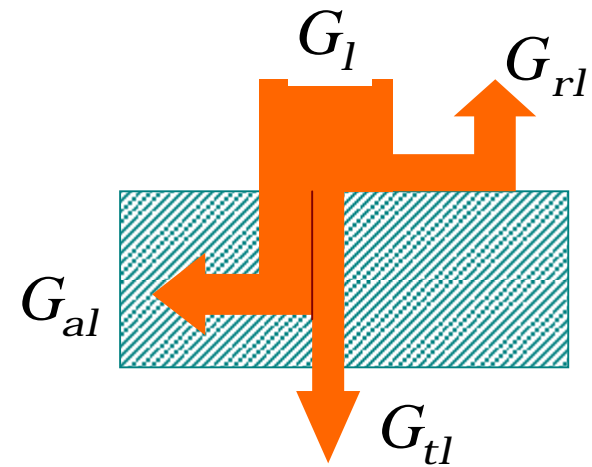
上述关系也同样适用，即  $a_l + r_l + t_l = 1$

式中  $a_l$ 、 $r_l$ 、 $t_l$  分别称为光谱吸收比、光谱反射比和光谱透射比。

$$G_l = G_{al} + G_{rl} + G_{tl}$$

$$\frac{G_{al}}{G_l} + \frac{G_{rl}}{G_l} + \frac{G_{tl}}{G_l} = 1$$

$$a_l + r_l + t_l = 1$$





## (7). 对物体吸收特性的基本认识

煤烟的  $\alpha \approx 0.96$ ，高度磨光的纯金  $\rho \approx 0.98$ 。

雪对可见光是良好的反射体，对肉眼来说是白色的，但对红外线却几乎能全部吸收。

白布和黑布对可见光的吸收率不同，但对红外线的吸收率却基本相同。

普通玻璃对波长小于  $2\ \mu\text{m}$  射线的吸收率很小，从而可以把照射到它上面的大部分太阳能透射过去。但玻璃对  $2\ \mu\text{m}$  以上的红外线几乎是不透明的。

## 8.2 黑体辐射的基本定律

### 1) 辐射力（全辐射力）

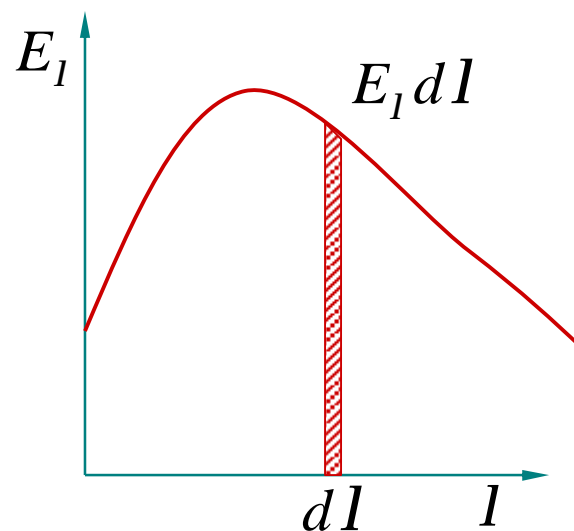
单位时间内物体表面单位辐射面积向半球空间所有方向发射出去的全波长的辐射能的总能量。称为全辐射力（简称辐射力），用  $E$  表示，单位  $\text{W}/\text{m}^2$ 。黑体辐射力用  $E_b$  表示。

### 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出的波长从  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  范围内的单位波长的能量  $E_l$ 。

$$E_l = \frac{dE}{dl} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$$

$$E = \int_0^{\infty} E_l dl$$



黑体光谱辐射力用  $E_{bl}$  表示。

# (1). 普朗克定律

普朗克定律

$$E_{bl} = \frac{C_1 l^{-5}}{e^{C_2/lT} - 1}$$

式中,  $E_{bl}$  —黑体的光谱辐射力,  $W/(m^2 mm)$ ;

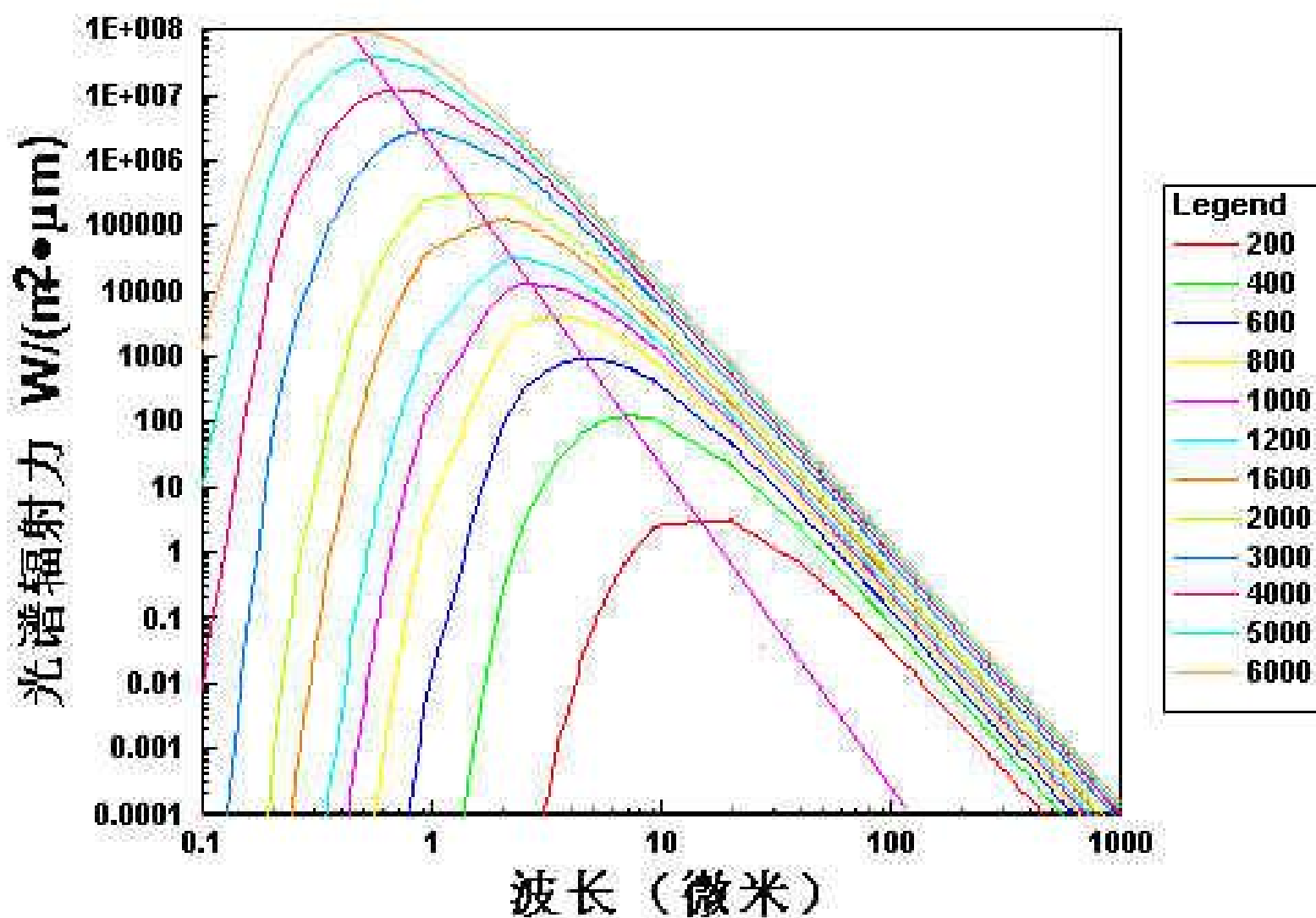
$l$  —波长,  $mm$ 。

$T$  —黑体的热力学温度,  $K$ ;

$C_1$  —普朗克第一常数, 值为  $3.743 \times 10^8 W \cdot mm^4 / m^2$ ;

$C_2$  —普朗克第二常数,  $1.439 \times 10^4 mmK$ 。

# 黑体光谱辐射力与波长及温度的关系



## (2). 维恩位移定律

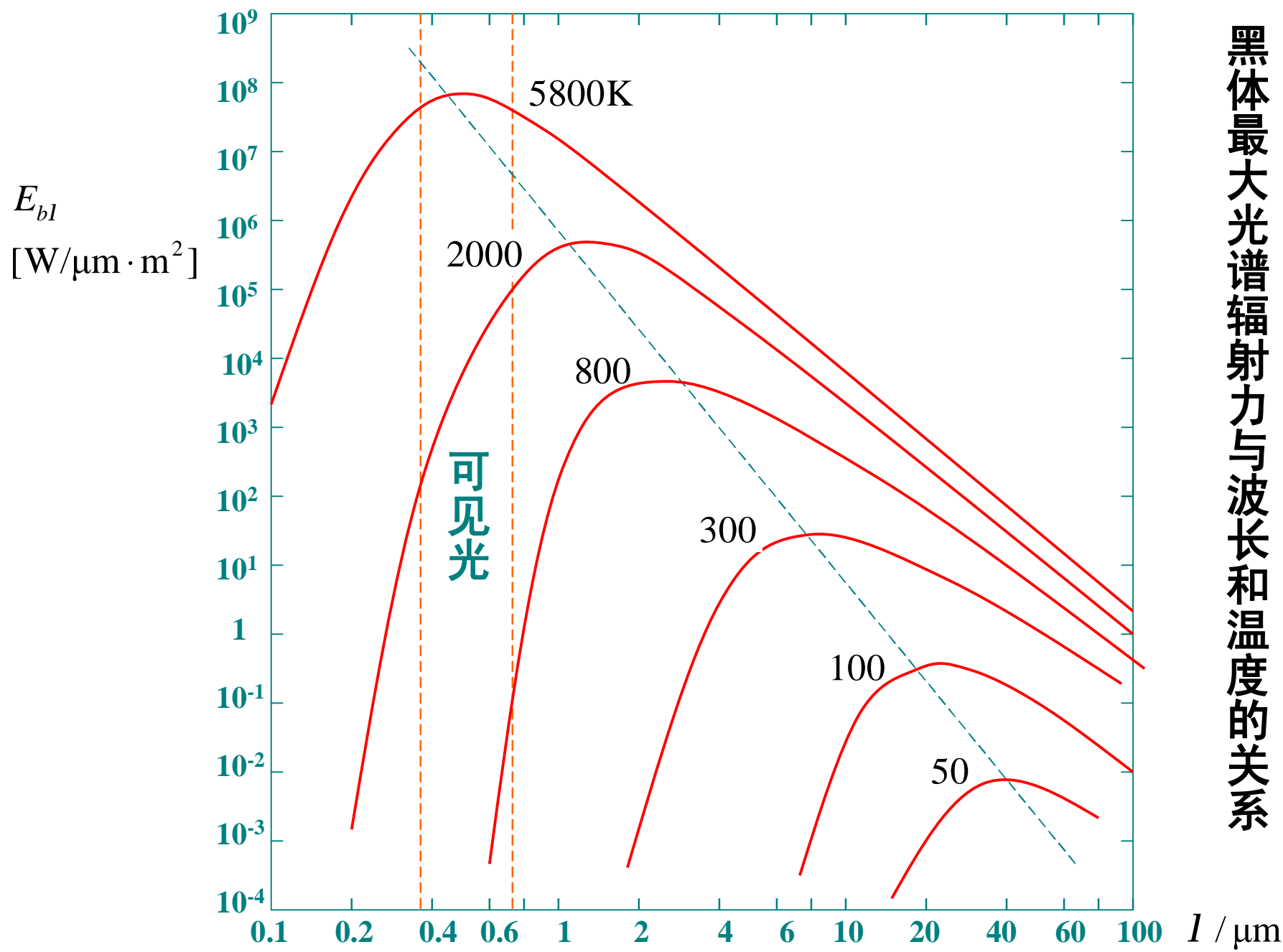
由上图可知，光谱辐射力随着波长的增加，先增大，然后又减小。光谱辐射力最大处的波长也随温度的不同而变化，且随着温度的升高峰值向左移动，移向较短的波长，利用最大值原理  $\frac{dE_{bl}}{d\lambda} = 0$ ，可得在  $E_{bl \max}$  时对应的波长  $\lambda_{b \max}$ 。

维恩得到  $\lambda_{b \max} T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

$$T=2000\text{K} \quad \text{时} \quad \lambda_{b \max} = \frac{2.898}{2000} = 1.45 \mu\text{m}$$

$$T=5800\text{K} \quad \text{时} \quad \lambda_{b \max} = \frac{2.898}{5800} = 0.50 \mu\text{m}$$

黑体最大光谱辐射力与波长和温度的关系



### (3). 斯蒂芬—玻尔茨曼定律

依辐射力和光谱辐射力的关系有

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

积分后得

$$E_b = S_b T^4 = C_b \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{W/m}^2$$

式中,  $S_b$  —黑体辐射常数,  $S_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

$C_b$  —黑体辐射常数,  $C_b = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

## (4). 黑体辐射函数

若要计算波长  $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$  波段内的黑体辐射力  $E_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$ , 可知

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

这一波段的能量通常用同温度下黑体辐射力的百分数间接表示, 记作  $F_b(\lambda_1 - \lambda_2)$ 。于是有

$$F_b(\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda} = \frac{\left( \int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda \right)}{E_b}$$

即 
$$F_b(\lambda_1 - \lambda_2) = F_b(0 - \lambda_2) - F_b(0 - \lambda_1)$$

式中,  $F_b(0 - \lambda_1)$ 、 $F_b(0 - \lambda_2)$  分别为波长从0到  $\lambda_2$  和从 0 到  $\lambda_1$  的黑体辐射占相同温度下黑体辐射力的百分数。



# 黑体辐射函数的计算

能量的份额可以表示成单一的变量  $lT$  的函数

$$F_b(0-l) = \frac{\int_0^l E_{bl} dl}{E_b} = \int_0^{lT} \frac{E_{bl}}{c_0 T^5} d(lT) = f(lT)$$

$f(lT)$  —称为黑体辐射函数。见P196页表8-2

$$E_{b(l_1-l_2)} = F_b(l_1-l_2)E_b$$

在  $l_1 \rightarrow l_2$  的波长范围内黑体的波段辐射函数为

$$F_b(l_1-l_2) = \frac{\int_0^{l_2} E_{bl} dl - \int_0^{l_1} E_{bl} dl}{E_b} = F_b(0:l_2) - F_b(0:l_1)$$

**例题** 已知太阳能集热器的透光玻璃在波长从 $0.35\sim 2.7\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的透射率为85%，在此范围外是不透的。试计算太阳辐射对该玻璃的透射率。把太阳辐射作为黑体，它的表面温度为5762 K。

**解**  $\lambda_1 T = 0.35\mu\text{m}\times 5762\text{K}; \quad \lambda_2 T = 2.7\mu\text{m}\times 5762\text{K}$

**利用黑体辐射函数表计算结果**

| 项目 | $\lambda_1 T\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}$ | $F_b(0-\lambda_1)$ | $\lambda_2 T\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{K}$ | $F_b(0-\lambda_2)$ |
|----|---|--------------------|---|--------------------|
| 结果 | 2017  | 6.96%              | 15557   | 97.17%             |

因此投射到玻璃上的太阳能在波长  $0.35\sim 2.7\text{ }\mu\text{m}$  范围内的能量， 占总能量的百分数为： $97.17-6.96=90.21\%$

太阳辐射透过该玻璃的百分数为： $90.21\%\times 0.85=76.68\%$

投射到玻璃上的太阳能在波长  $0.35\sim 2.7\text{ }\mu\text{m}$  范围内的  
能量， 占总能量的百分数为： $97.17-6.96=90.21\%$

太阳辐射透过该玻璃的百分数为： $90.21\%\times 0.85=76.68\%$

讨论： 由于集热器的表面温度较低， 一般不超过 $373\text{ K}$ ，  
它的长波辐射对玻璃是不透过的。 因此， 该透光  
玻璃的这种对短波透射和对长波阻挡的性质， 减  
少了集热表面透过玻璃向外的辐射热损失。

**例题8-2 试计算表面温度分别为293K、1000 K、2000 K、5800 K 的黑体辐射出来的能量中，紫外线，可见光和波段为0.76 ~3.0、3 ~20、20 ~1000、0.76 ~20  $\mu\text{m}$ 的红  
外线辐射能在黑体总辐射能中所占的份额。**

**解 按题意令**  $\lambda_i = 0.1\mu\text{m}$ 、 $0.38\mu\text{m}$ 、 $0.76\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $1000\mu\text{m}$ ，  
**而 温 度**  $T_j = 293\text{K}$ 、 $1000\text{K}$ 、 $2000\text{K}$ 、 $3000\text{K}$ 、 $5800\text{K}$ 。

**分别将**  $\lambda_i$  **乘以**  $T_j$  **查表8-2得黑体辐射函数，再由式**

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

**求得黑体辐射函数。将计算结果汇总成下表：**

| T/K   | $F_{b(0-0.1)}\%$    | $F_{b(0-0.38)}\%$    | $F_{b(0-0.76)}\%$ | $F_{b(0-3)}\%$  | $F_{b(0-20)}\%$    | $F_{b(0-1000)}\%$  |
|-------|---------------------|----------------------|-------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 293K  | ~0                  | ~0                   | ~0                | ~0              | 72.5               | ~100               |
| 1000K | ~0                  | ~0                   | ~0                | 27.4            | 98.6               | ~100               |
| 2000K | ~0                  | ~0                   | 1.3               | 73.8            | 99.8               | ~100               |
| 3000K | ~0                  | 0.1                  | 11.7              | 89.1            | 99.9               | ~100               |
| 5800K | ~0                  | 10.1                 | 54.9              | 97.9            | ~100               | ~100               |
| T/K   | 紫外线                 | 可见光                  | 红 外 线             |                 |                    |                    |
|       | $F_{b(0.1-0.38)}\%$ | $F_{b(0.38-0.76)}\%$ | $F_{b(0.76-3)}\%$ | $F_{b(3-20)}\%$ | $F_{b(20-1000)}\%$ | $F_{b(0.76-20)}\%$ |
| 293K  | ~0                  | ~0                   | ~0                | 72.5            | 27.5               | 72.5               |
| 1000K | ~0                  | ~0                   | 27.4              | 71.2            | 1.4                | 98.6               |
| 2000K | ~0                  | 1.3                  | 72.5              | 26.0            | 0.2                | 98.5               |
| 3000K | 0.1                 | 11.6                 | 77.4              | 10.8            | 0.1                | 88.2               |
| 5800K | 10.1                | 44.8                 | 43.0              | 2.1             | ~0                 | 45.1               |

## 讨论

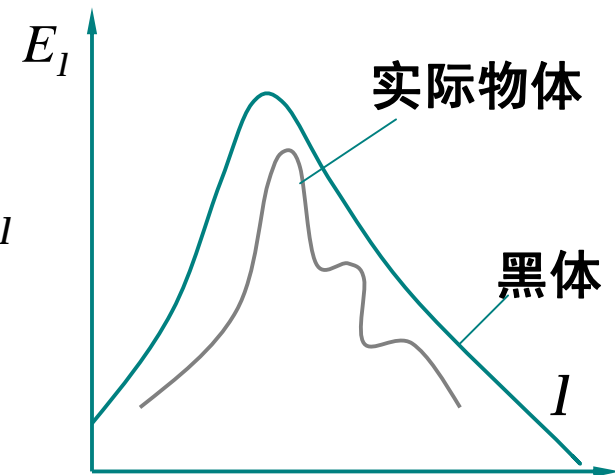
- (1) 在工程上遇到的温度范围内，热射线主要集中在  $0.76 \sim 20 \mu\text{m}$  (即红外线) 范围内。
- (2) 太阳表面温度可认为5800K的黑体，其热辐射为可见光占44.8%，红外线占45.1%、紫外线占10.1%，因此对于太阳辐射必须考虑紫外线部分。
- (3) 常温（20℃）下物体辐射时几乎全部是远红外线。

## 8.3 实际物体的辐射和吸收

实际物体的光谱发射率  $e_l = \frac{E_l}{E_{bl}}$

光谱辐射力随波长变化;  $E_l = e_l E_{bl}$

实际物体的发射率  $e = \frac{E}{E_b}$



$$e = \frac{E}{E_b} \quad e = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty E_l dl}{\int_0^\infty E_{bl} dl} = \frac{\int_0^\infty E_l dl}{s_b T^4} = \frac{\int_0^\infty e_l E_{bl} dl}{s_b T^4}$$

$$\text{实际物体的辐射力 } E = e E_b = e s_b T^4 = e c_b \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (2)$$

例

表面温度为200℃时发射率  $\varepsilon$  { 抛光铸铁 0.21  
抛光铝 0.04  
抛光金 0.02

磨光的铝的发射率  $\varepsilon$  { 200℃时 0.04  
600℃时 0.06

40℃黄铜的发射率  $\varepsilon$  { 磨光 0.04  
无光泽 0.06

40℃抛光紫铜的发射率  $\varepsilon$  { 抛 光 0.04  
严重氧化 0.76



**实验表明：物体的发射率  $\varepsilon$  与其表明法向发射率的比值为**  
**粗糙的物体为0.98 ；**  
**表面光滑的非金属物体为0.95；**  
**高度磨光的金属物体为1.2。**

**因此，工程上除高度磨光的金属表面外，一般情况下不考虑发射率随方向的变化。大多数工程材料都可近似地认为是漫射体。大多数资料只提供法向发射率，其可近似地认为是半球空间的平均发射率。**

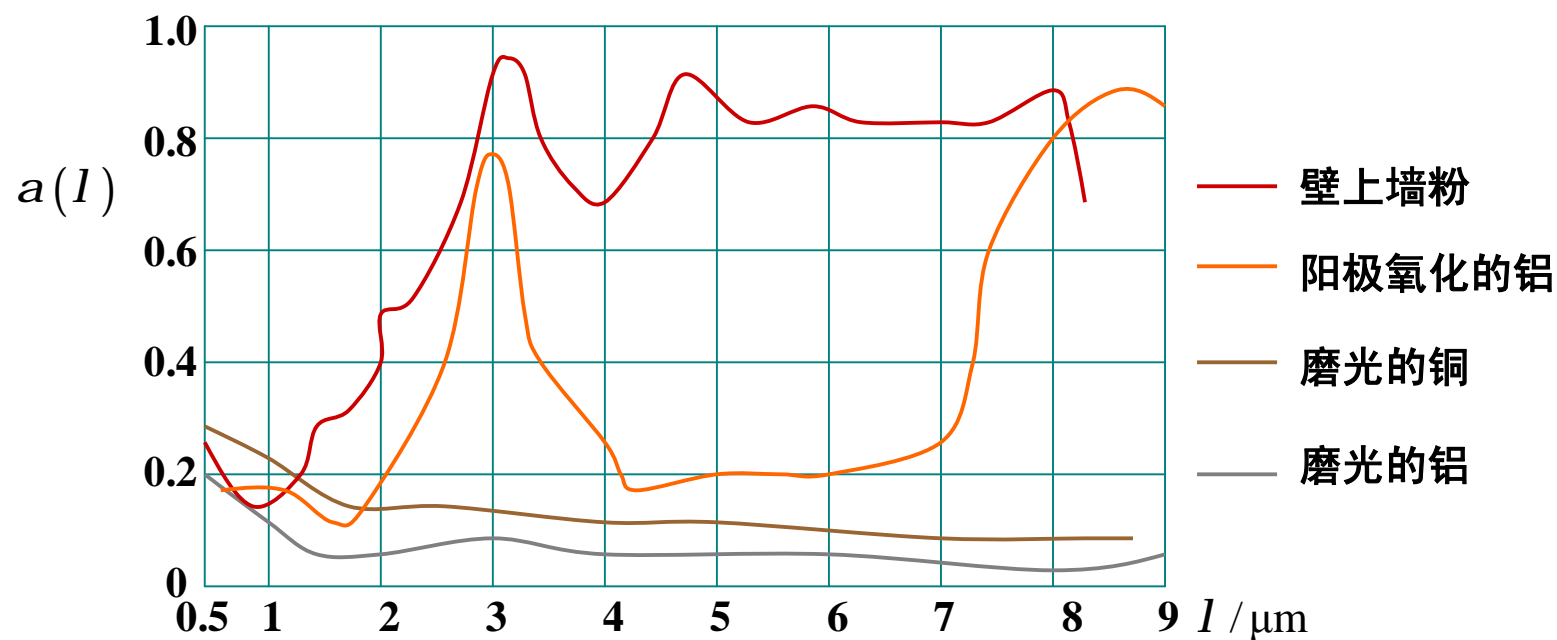
**可见，物体表面的发射率取决于物体的种类、表面温度和表面状况。仅与物体本身性质有关，与环境无关。**  
**物体表面发射率  $\varepsilon$  是一个物性参数。**

# (1) 实际物体的吸收特性

实际物体的光谱吸收比  $a_l = a(\lambda) = \frac{G_{l,a}}{G_l}$

式中：  $G_l$  — 波长为  $\lambda$  的投射辐射，  $\text{W/m}^2$ ；

$G_{l,a}$  — 所吸收的波长为  $\lambda$  的投射辐射，  $\text{W/m}^2$ 。



## (2) 实际物体的吸收比与光谱吸收比

物体表面对投射辐射的吸收比  $\alpha$  为物体表面对投射辐射在全波长范围内吸收的份额。设吸收辐射的物体为1, 投射辐射的物体（辐射源）为2, 则

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T_1) G_{\lambda}(T_2) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda}(T_2) d\lambda}$$

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T_1) G_{\lambda}(T_2) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda}(T_2) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T_1) G_{\lambda}(T_2) d\lambda}{E_b(T_2)}$$

可见  $\alpha = f(\lambda, T_1, T_2)$

这也表明实际物体的吸收比不是物性参数\*。

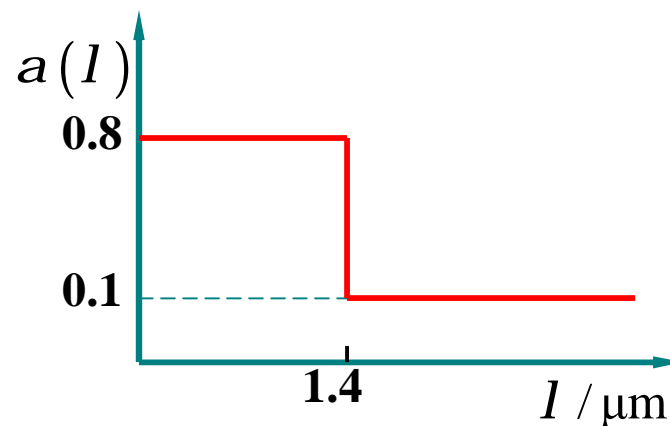
**例题3** 已知太阳可视为5800K的黑体。 某选择性表面的光谱吸收比随波长  $\lambda$  变化的特性如图所示。当太阳投入辐射  $G_s=800\text{W/m}^2$  时， 试计算该表面对太阳辐射的吸收比及单位面积上所吸收的太阳能量。

**解** 计算总吸收比

$$a = \frac{\int_0^{\infty} a(\lambda) G_{\lambda}(T_s) d\lambda}{E_b}$$

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

$$a = \frac{\int_0^{1.4} a(\lambda) E_{b\lambda}(T_s) d\lambda + \int_{1.4}^{\infty} a(\lambda) E_{b\lambda}(T_s) d\lambda}{E_b}$$



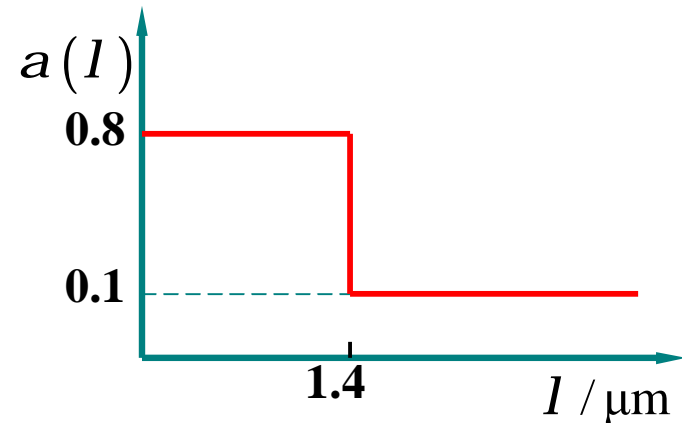
$$a = \frac{\int_0^{1.4} a(l_1) E_{bl}(T_2) dl + \int_{1.4}^{\infty} a(l_1) E_{bl}(T_2) dl}{E_b}$$

$$a = 0.8 \frac{\int_0^{1.4} E_{bl}(T_2) dl}{E_b} + 0.1 \frac{\int_{1.4}^{\infty} E_{bl}(T_2) dl}{E_b}$$

$$a = 0.8 F_b(0-1.4) + 0.1 F_b(1.4-\infty)$$

$$= 0.8 \times 0.8608 + 0.1 \times (1 - 0.8608)$$

$$= 0.7026$$



单位面积上所吸收的太阳能

$$q = a G_s = 0.7026 \times 800 = 562 \text{ W/m}^2$$

### (3) 基尔霍夫定律

单位时间内黑体发出的辐射能为  $AE_b$

投射到另一板面后被其吸收了  $aAE_b$

单位时间内实际物体发出的辐射能为  $AE$

离开黑体表面的能量 =  $AE_b$

投射到黑体表面的能量 =  $AE + (1-a)AE_b$

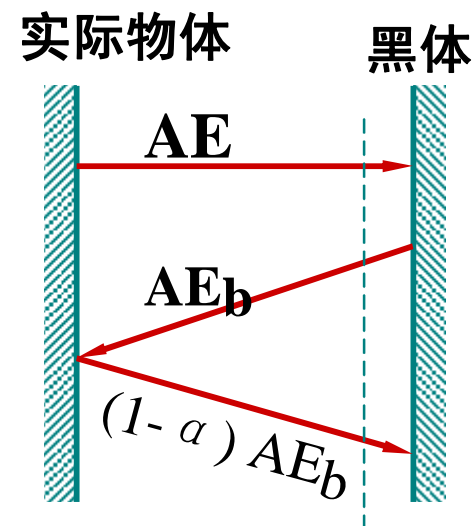
离开黑体表面的净能量 = 两板间的辐射换热量 =  $\Phi$

$$\Phi = AE_b - AE - (1-a)AE_b = aAE_b - AE$$

当  $T = T_b$  时，即此辐射系统处于热平衡时，有  $\Phi = 0$

$$aAE_b - AE = 0$$

$$a = \frac{E}{E_b} \quad a_1 = \frac{E_1}{E_{b1}} \quad \text{或} \quad E = aE_b \quad E_1 = a_1E_{b1}$$



#### (4)非热平衡条件下的光谱特性

$$a_l = \frac{E_l}{E_{bl}}$$

$$E_l = a_l E_{bl}$$

$$a_l = e_l ???$$

$$a(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad \text{或} \quad \frac{E(T)}{a(T)} = E_b(T)$$

上式称为基尔霍夫定律，该定律表明在热平衡辐射的条件下，任何物体的辐射力与它对来自黑体的辐射的吸收率的比值恒等于同温度下黑体的辐射力。结论如下：

- 1 ) 辐射力大的物体，对同温下黑体辐射能的吸收比也大，即善于辐射的物体也必善于吸收同温度下黑体的辐射能。
- 2 ) 因实际物体的  $\alpha < 1$ ，则实际物体的辐射力  $E$  小于同温度下黑体的辐射力  $E_b$ ，即同一温度下黑体的辐射力最大。
- 3 ) 由发射率的定义  $e = \frac{E}{E_b}$  可得  $e(T) = a(T)$

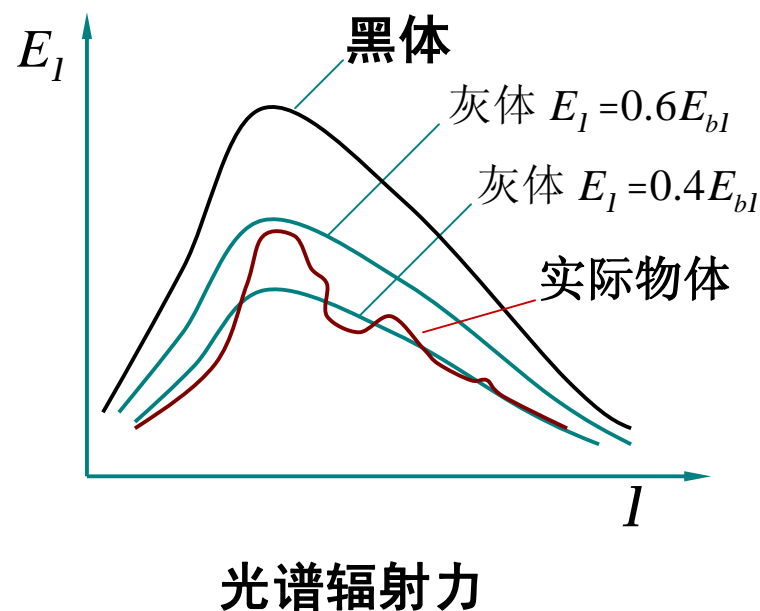
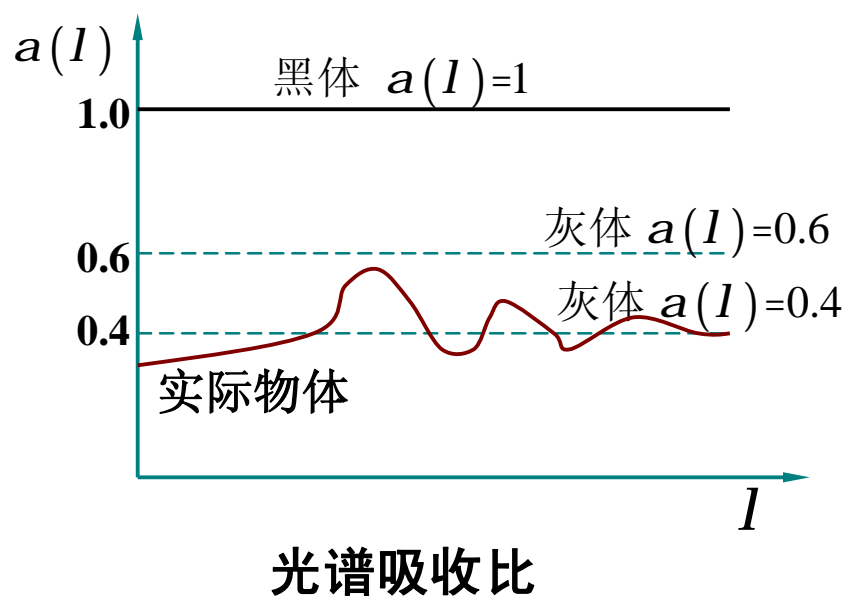
表明当黑体处于热平衡时，任何物体对于黑体辐射的吸收比等于同温度下该物体的发射率。

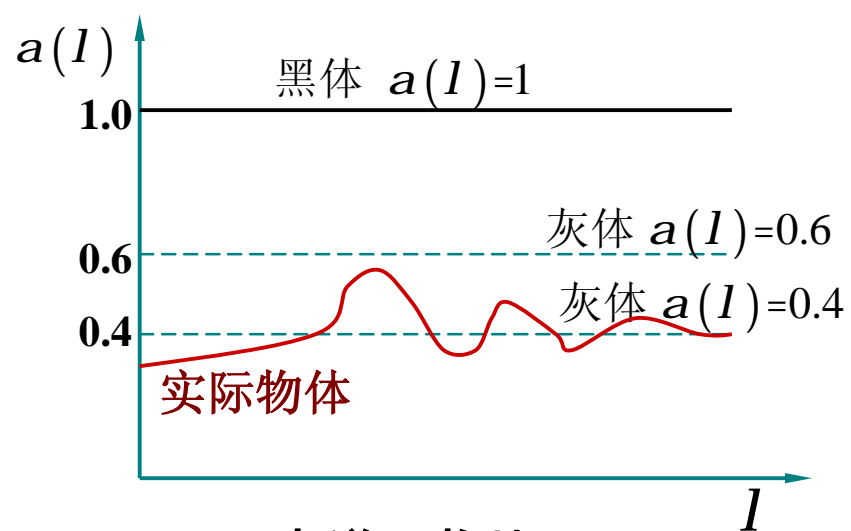


## (5) 灰体

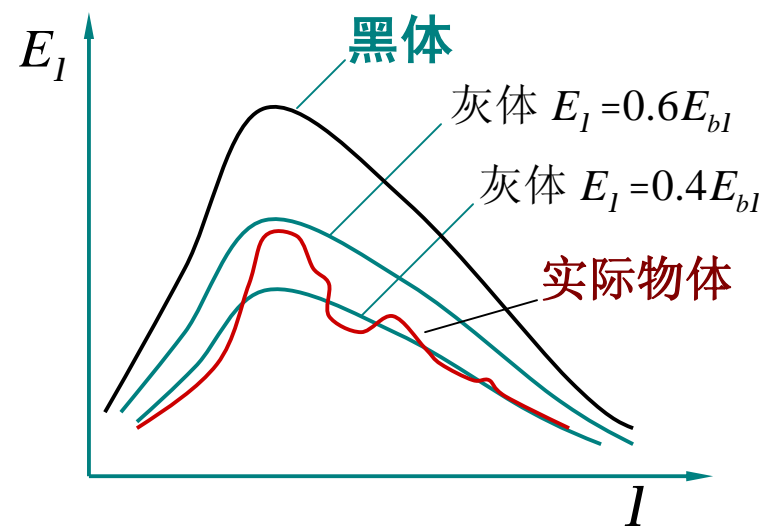
如果某一物体的光谱吸收比  $a(\lambda)$  虽小于1,但它是一个不随投射辐射的波长而变化的常数, 则它的吸收比也是一个常数, 即  $a = a(\lambda) = \text{常数}$ 。

光谱吸收比与波长无关的物体称为灰体。





光谱吸收比



光谱辐射力

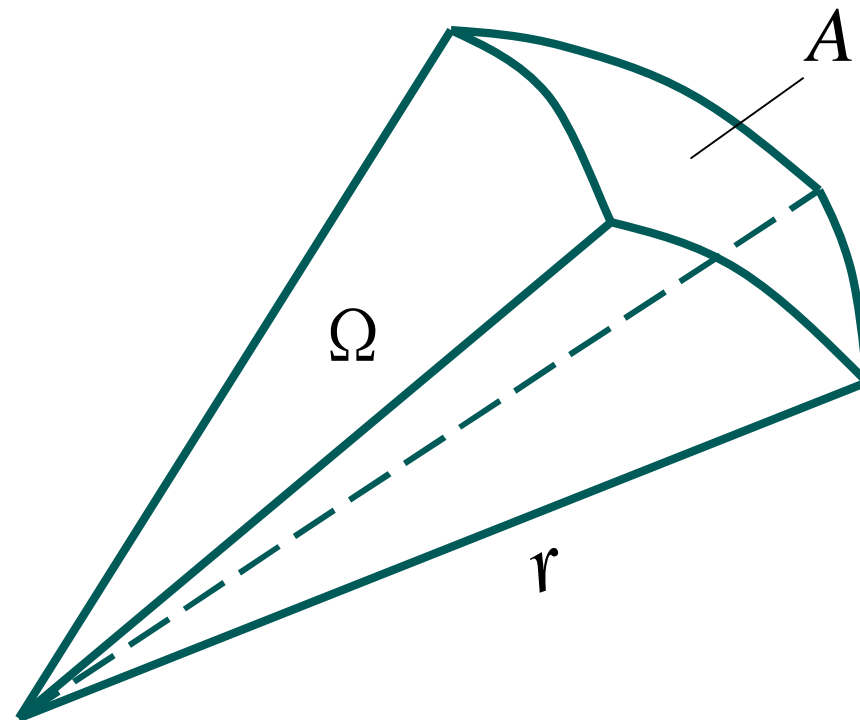
因 
$$e(\lambda) = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$$

对于灰体有 
$$e(\lambda) = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}} = e = \text{常数}$$

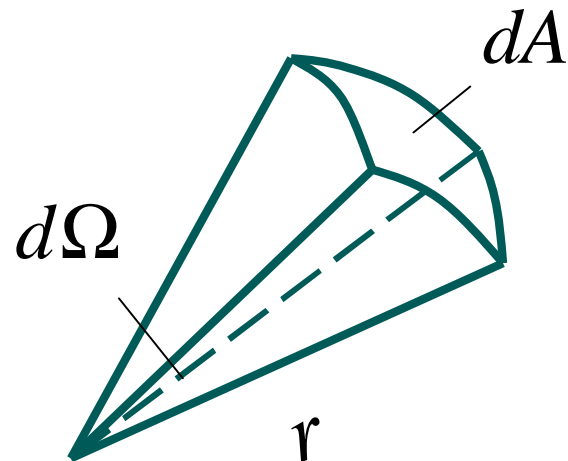
## 8.4 辐射的方向特性和角系数

### 1. 立体角的概念

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



$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}$$



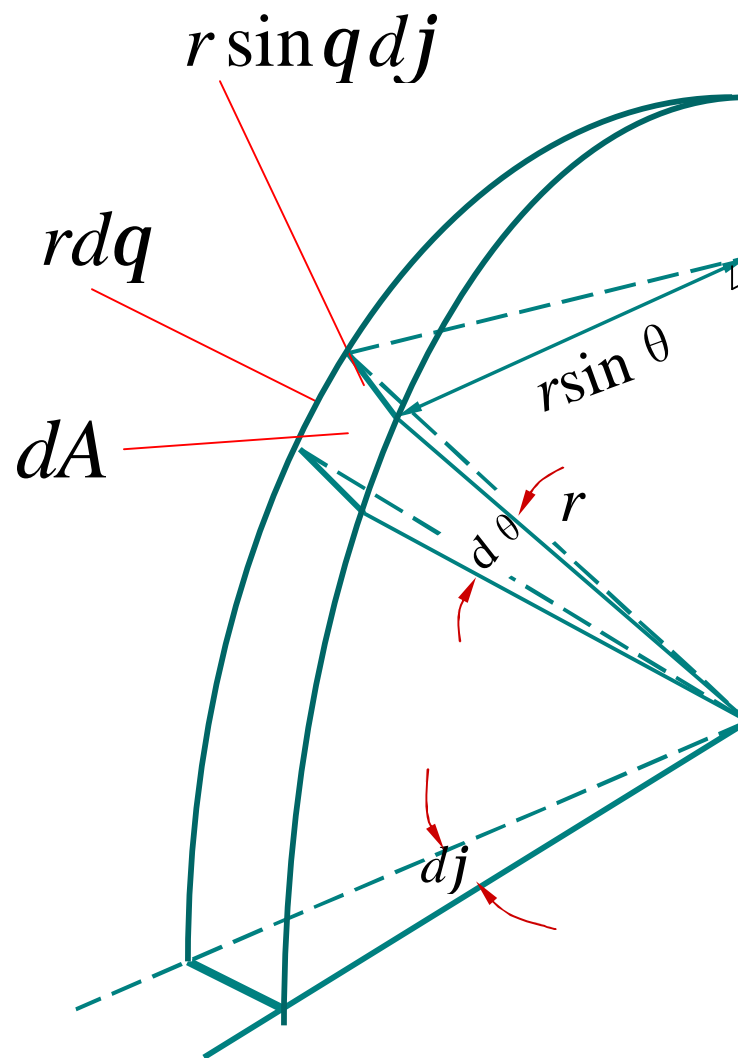
## (1). 立体角的计算

### 微元立体角

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}$$

$$dA = rdq \times r \sin q \times dj$$

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin q dq dj$$

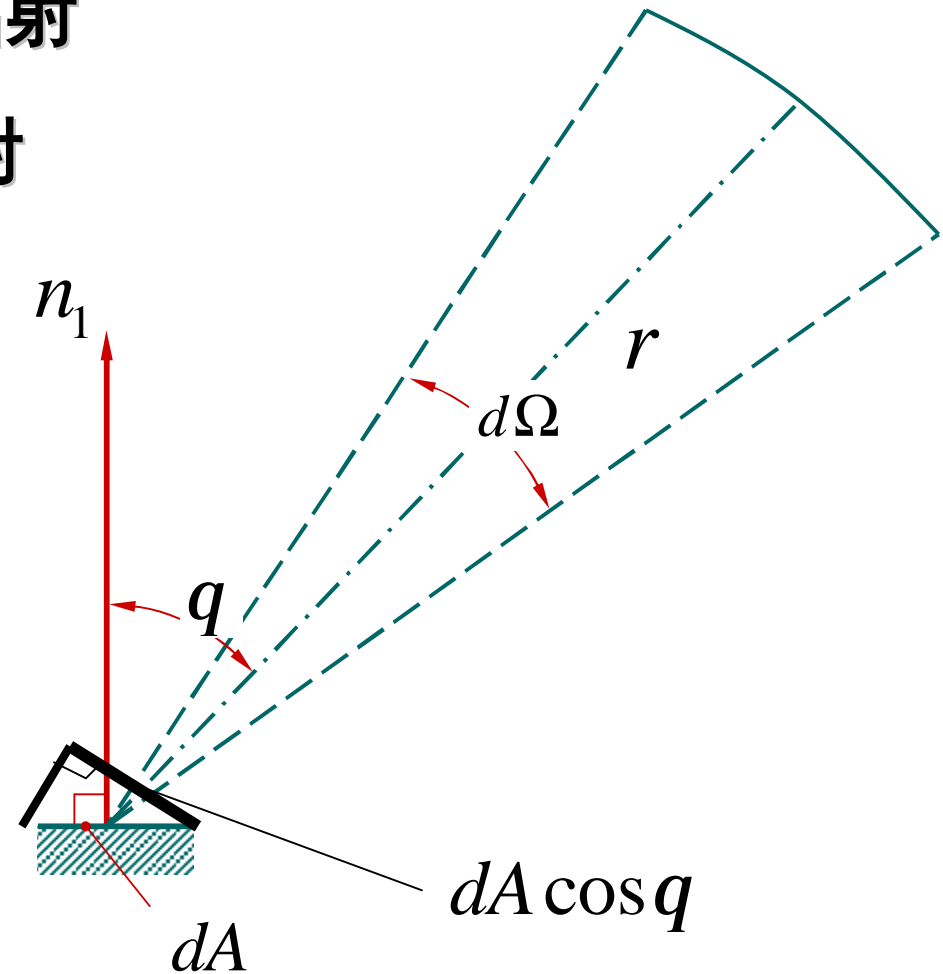


## (2). 定向辐射强度

单位时间、单位可见辐射  
面积、单位立体角内的辐射  
能量称为定向辐射强度。

$$L(q) = \frac{d^2\Phi(q)}{dA \cos q d\Omega} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$$

式中： $dA \cos q$  —  $dA$   
在  $q$  方向上的可见面积；  
 $d\Omega$  — 微元立体角。



### (3). 兰贝特定律

**黑体辐射的定向辐射强度与方向无关，即半球空间的各个方向上的定向辐射强度相等**

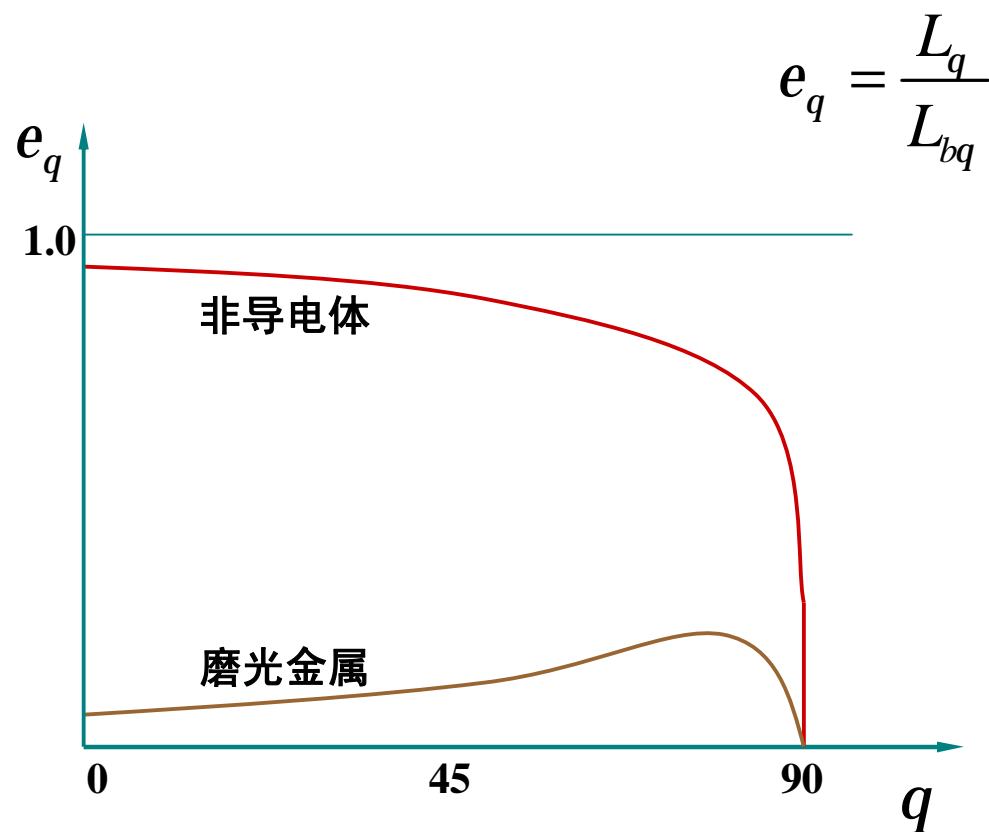
$$d^2\Phi(q) = L \cos q dA d\Omega$$

$$E_b = \int_{\text{半球空间}} L \cos q d\Omega$$

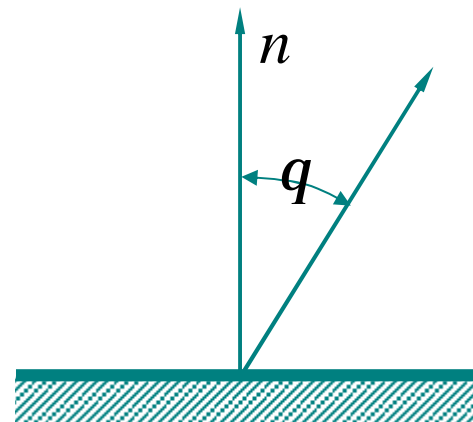
$$E_b = \int_0^{\frac{p}{2}} L \cos q \sin q dq \int_0^{2p} dj = Lp$$

$$L_{bq} = \frac{E_b}{p}$$

## (4). 定向发射率



定向发射率  $e_q$  与  $q$  的关系



工程中，常用的处理方法是  $e_q = e_n$ ,  $e = e_n$

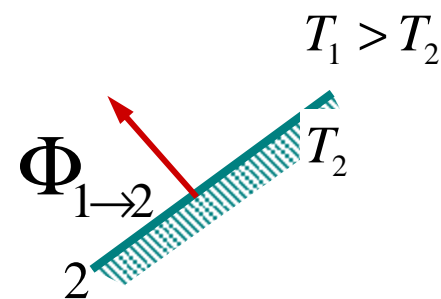
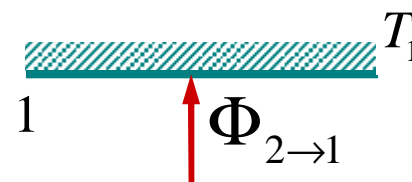
## (5). 角系数

### 角系数的基本概念

任意放置的两物体表面，把表面1发出的辐射能  $\Phi_1$  中落到表面2上的能量  $\Phi_{1 \rightarrow 2}$  所占的百分数称为表面1对

表面2的角系数，记作  $X_{1,2} = \frac{\Phi_{1 \rightarrow 2}}{\Phi_1}$

同样有，表面2对表面1的角系数  $X_{2,1} = \frac{\Phi_{2 \rightarrow 1}}{\Phi_2}$





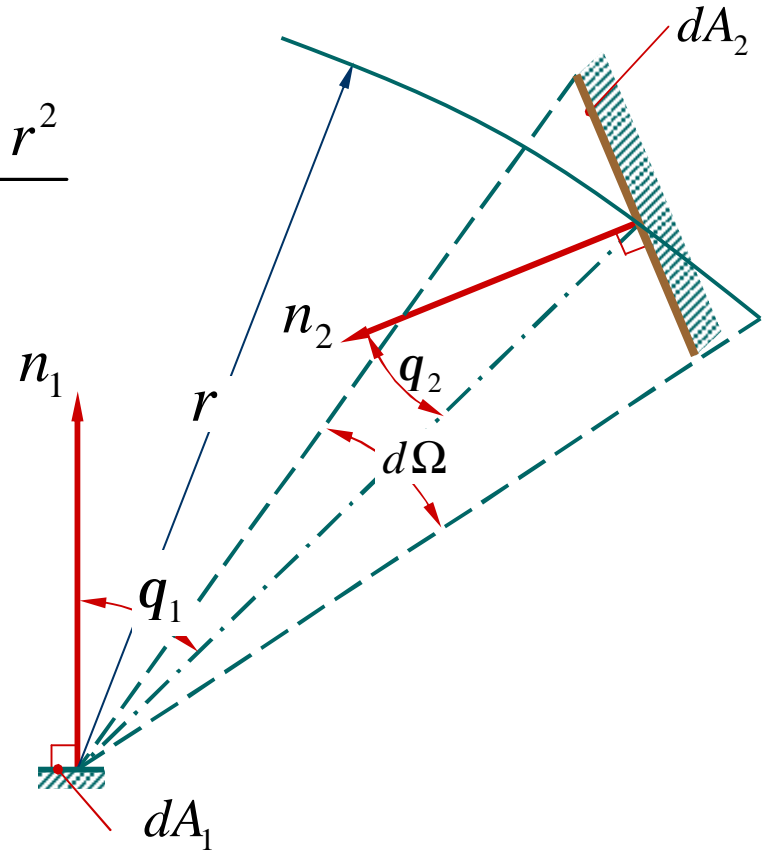
## (6). 角系数的计算原理

$$d\Phi_{1-2} = L_{b1} dA_1 \cos q_1 d\Omega_1 = L_{b1} dA_1 \cos q_1 \cos q_2 dA_2 / r^2$$

$$X_{dA1,dA2} = \frac{d\Phi_{1-2}}{E_{b1} dA_1} = \frac{L_{b1} dA_1 \cos q_1 \cos q_2 dA_2 / r^2}{E_{b1} dA_1}$$

$$X_{dA1,dA2} = \frac{\cos q_1 \cos q_2 dA_2}{p r^2}$$

$$X_{dA2,dA1} = \frac{\cos q_1 \cos q_2 dA_1}{p r^2}$$



## 角系数的计算（续）

$$X_{dA_1, A_2} = \frac{\int_{A_2} d\Phi_{1-2}}{E_{b1} dA_1} = \int_{A_2} \frac{\cos q_1 \cos q_2}{p r^2} dA_2$$

$$X_{A_1, A_2} = \frac{\int_{A_1} \int_{A_2} d\Phi_{1-2}}{E_{b1} A_1} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos q_1 \cos q_2}{p r^2} dA_1 dA_2$$

$$X_{A_2, A_1} = \frac{\int_{A_1} \int_{A_2} d\Phi_{1-2}}{E_{b2} A_2} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos q_1 \cos q_2}{p r^2} dA_1 dA_2$$

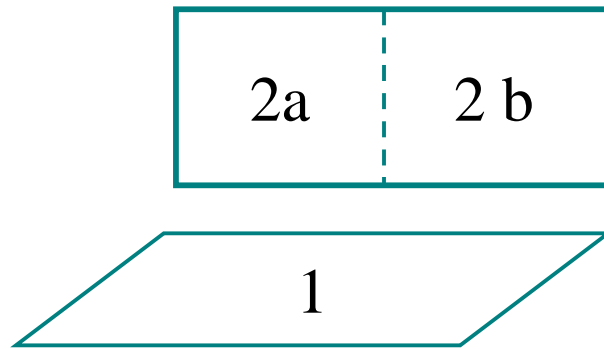
## (7). 角系数的性质

$$X_{dA1,dA2}dA_1 = X_{dA2,dA1}dA_2$$

$$X_{A1,A2}A_1 = X_{A2,A1}A_2$$

$$X_{1,2} = X_{1,2a} + X_{1,2b} + \cdots + X_{1,2n}$$

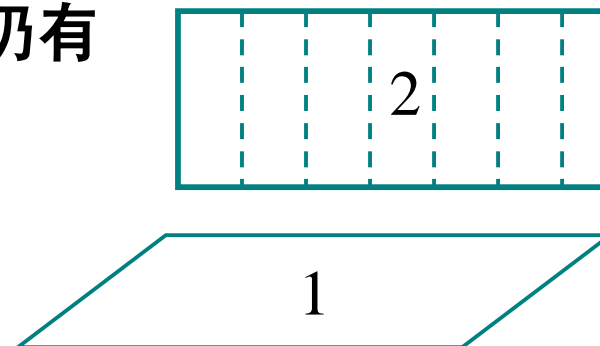
$$\sum_{i=1}^n X_{j,i} = 1$$



## 角系数的计算小结

若把表面2分解成若干小块，则仍有

$$X_{1,2} = \sum_{i=1}^n X_{1,2i}$$



1. 角系数的相对性  $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1} = A_e$

2. 角系数的完整性  $1 = \sum_{i=1}^n X_{1,i}$

3. 角系数的可加性（分解性）  $X_{1,2} = \sum_{i=1}^n X_{1,2i}$

**思考题 8-18 下列各式中哪些是正确的？**

$$(1) X_{1+2,3} = X_{1,3} + X_{2,3}$$

**由角系数的相对性和角系数可加性**

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

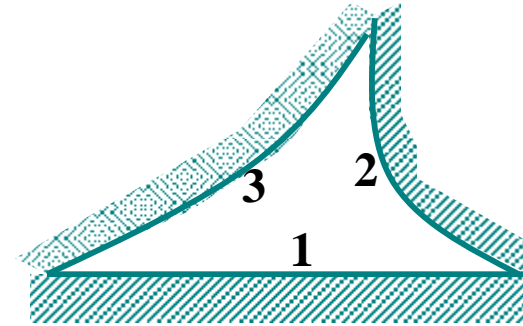
**可知(1)式是错误的。**

$$(2) X_{3,1+2} = X_{3,1} + X_{3,2}$$

**由角系数的分解性  $X_{1,2} = \sum_{i=1}^n X_{1,2i}$  可知(2)式是正确的。**

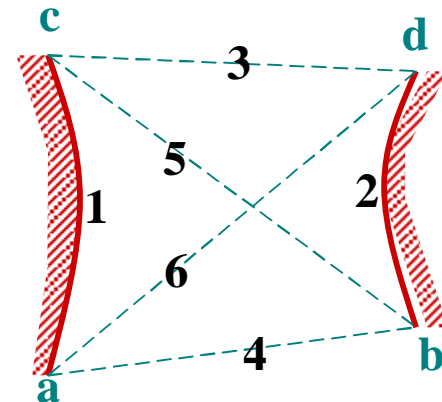
# 角系数的代数法

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

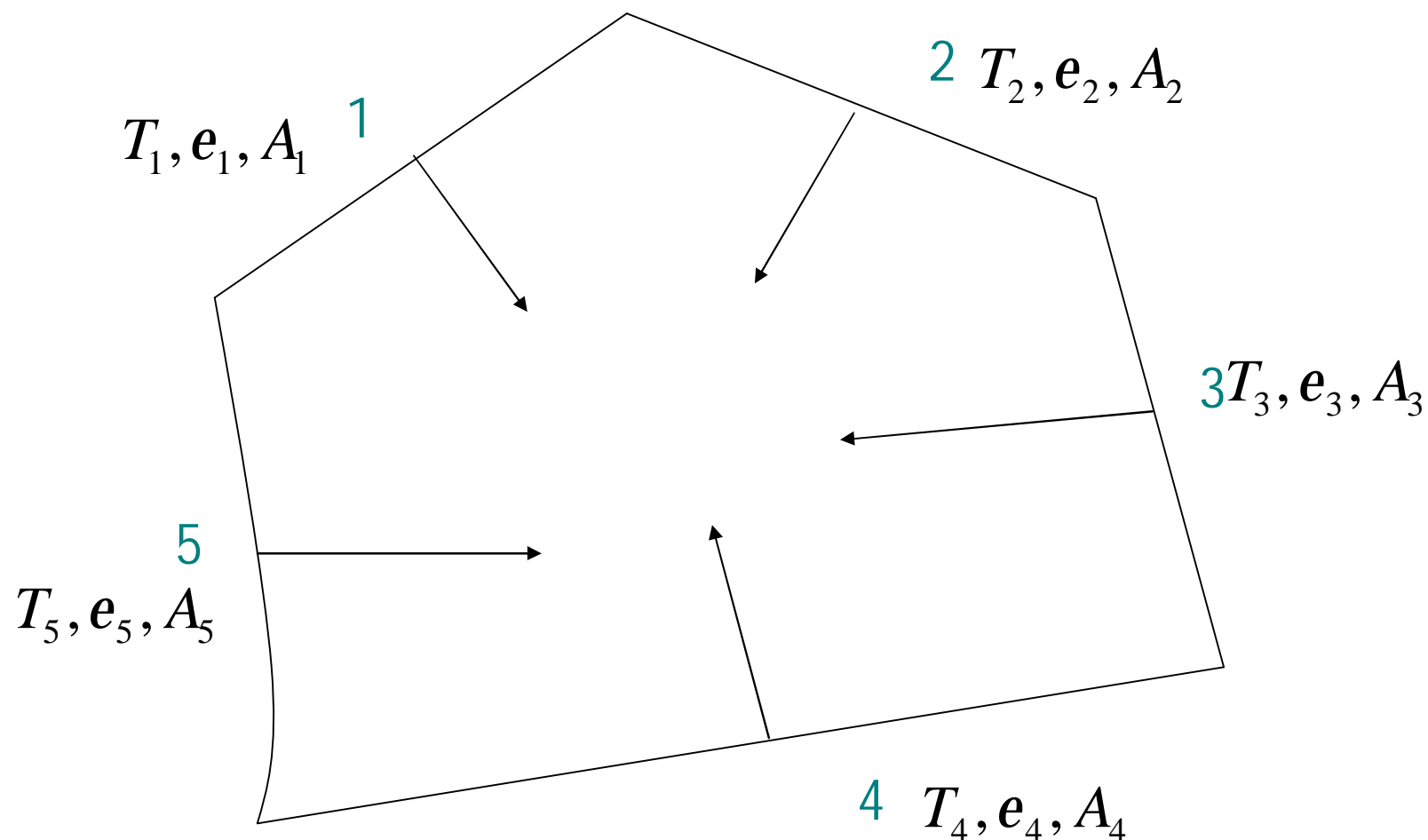


$$X_{1,2} = \frac{(bc + ad) - (ab + cd)}{2ac}$$

$$= \frac{\text{交叉线之和} - \text{非交叉线之和}}{2 \times \text{表面1的断面长度}}$$



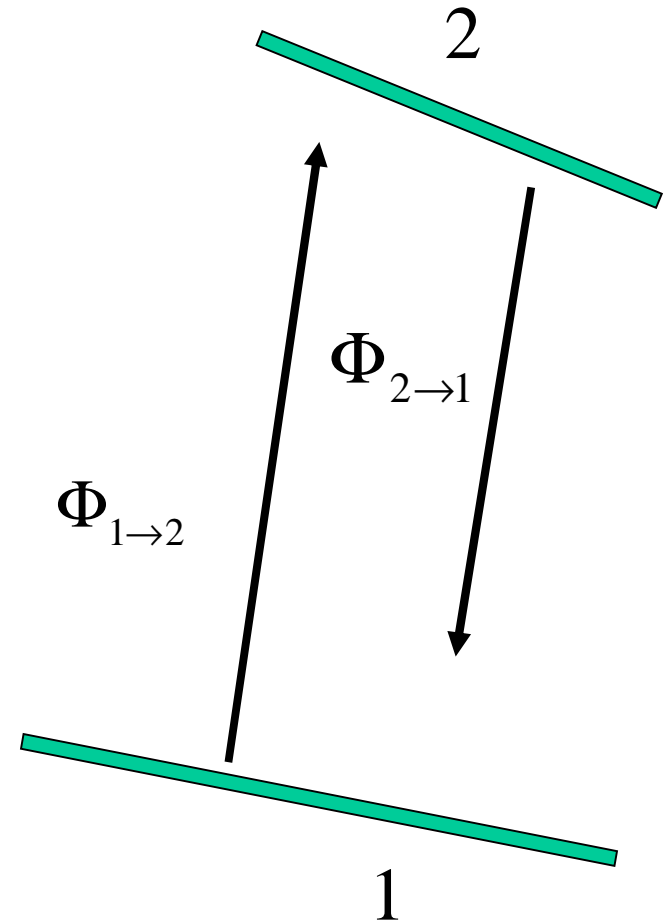
## 8.5 封闭系统中灰（黑）体表面间的辐射传热



# (1)表面间的辐射热交换

对于某个表面 1，如果要知道它和任何一个表面 2 之间交换的能量，那么一定要知道离开 1 表面且到达 2 表面的能量，同时也要知道离开 2 表面且到达 1 表面的能量，两者交换的能量为：

$$\Phi_{1,2} = \Phi_{1 \rightarrow 2} - \Phi_{2 \rightarrow 1}$$

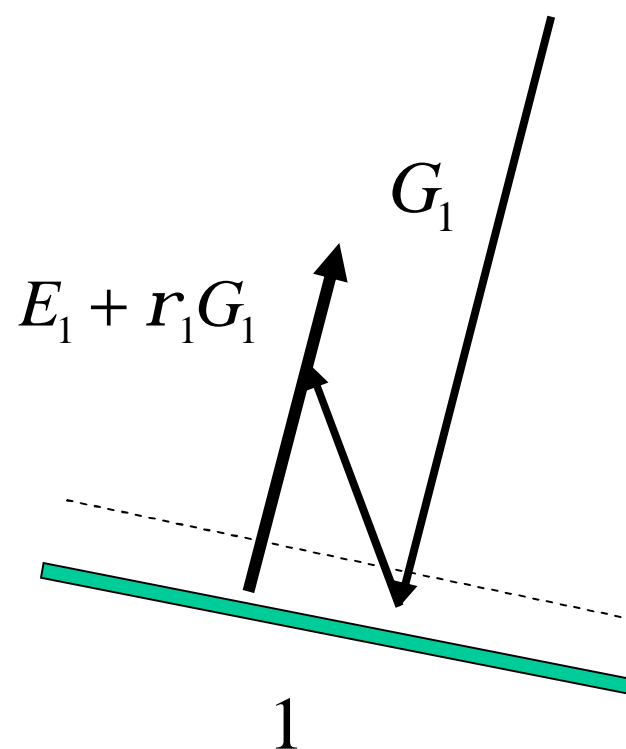




## (2)表面的净热损失

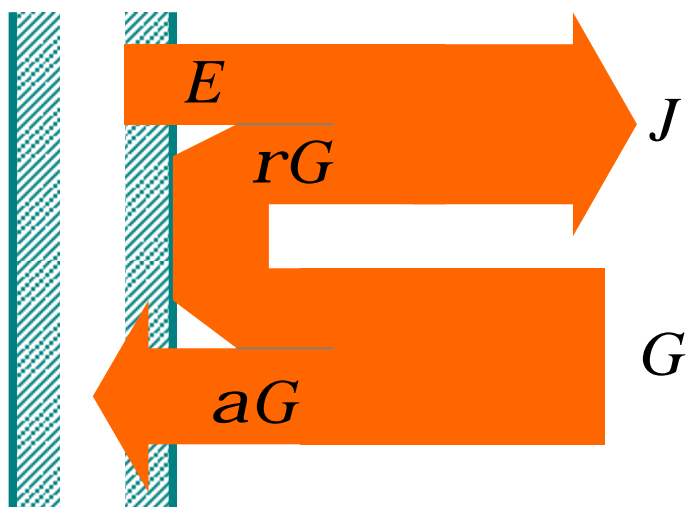
对于某个表面 1，如果要知道它的净得热或净失热，那么只要知道离开 1 表面的能量和到达 1 表面的能量，表面 1 的净失热为：

$$q_1 = E_1 + r_1 G_1 - G_1$$



### (3)有效辐射的概念

离开物体表面的能量为发射辐射与对投射辐射的反射之和，称之为有效辐射，记为 $J$ (单位为 $\text{W}/\text{m}^2$ )。



# (4)封闭体系中表面投射辐射的计算

$$\Phi_i = A_i J_i - A_i G_i$$

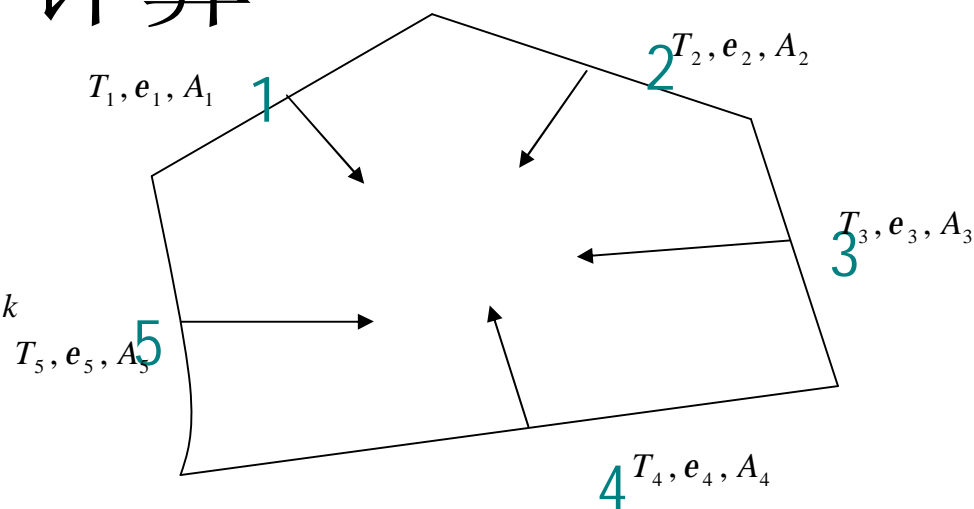
$$q_i = J_i - G_i$$

$$A_i G_i = \sum_{k=1}^n J_k A_k X_{k,i} = \sum_{k=1}^n J_k A_i X_{i,k}$$

$$G_i = \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

$$J_i = E_i + r_i G_i = e_i E_{bi} + (1 - e_i) \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

$$J_i = E_i + r_i G_i = e_i \sigma T_i^4 + (1 - e_i) \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$



## (5)有效辐射的计算原理

$$A_i G_i = \sum_{k=1}^n J_k A_k X_{k,i} = \sum_{k=1}^n J_k A_i X_{i,k}$$

$$G_i = \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

表面温度已知时

$$J_i = E_i + r_i G_i = e_i E_{bi} + (1 - e_i) \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

$$J_i = E_i + r_i G_i = e_i \sigma T_i^4 + (1 - e_i) \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

表面热流已知时

$$\Phi_i = A_i J_i - A_i G_i$$

$$q_i = J_i - G_i = J_i - \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

## (6) 灰体表面的能量平衡

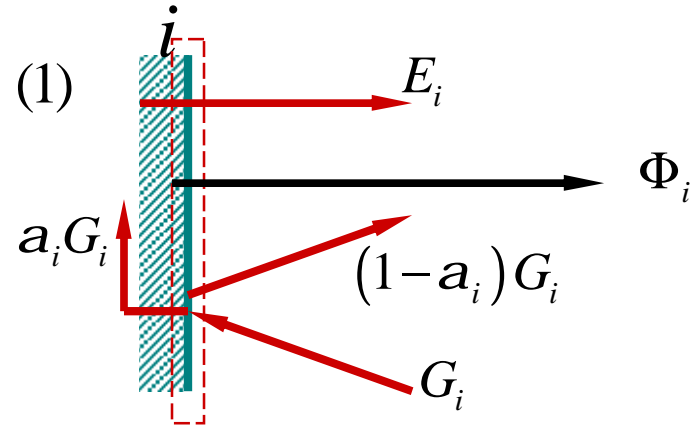
有效辐射  $J_i = E_i + r_i G_i = E_i + (1 - a_i) G_i$  (1)

从i 表面的右侧看辐射出去的净热流量

$$\Phi_i = A_i J_i - A_i G_i \quad (2)$$

从i 表面内部看离开的净热流量为

$$\Phi_i = A_i E_i - A_i a_i G_i \quad (3)$$



消去投射辐射  $G_i$

$$\Phi_i = A_i E_i - A_i a_i \frac{J_i - E_i}{1 - a_i} = \frac{A_i E_i (1 - a_i) - A_i a_i (J_i - E_i)}{1 - a_i} = \frac{A_i E_i}{1 - a_i} - \frac{A_i a_i J_i}{1 - a_i}$$

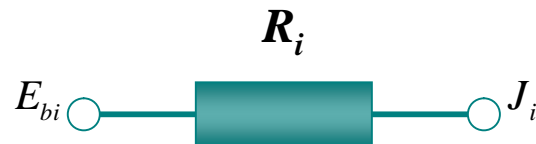
$$J_i = \frac{E_i}{a_i} - \left( \frac{1 - a_i}{a_i} \right) \frac{\Phi_i}{A_i}$$

## (7)表面热阻

对于灰体  $e_i = a_i$ ,  $E_i = e_i E_{bi}$  , 则有

整理成  $\Phi_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - e_i}{A_i e_i}}$

$R_i = \frac{1 - e_i}{A_i e_i}$  称为表面辐射热阻。



## (8)两灰体表面间交换的热量

考虑任意放置的两灰体表面

离开表面1的能量为有效辐射  $A_1 J_1$

其中落到表面2上的能量为  $A_1 X_{1,2} J_1$

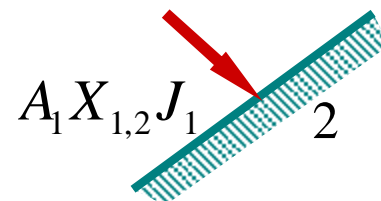
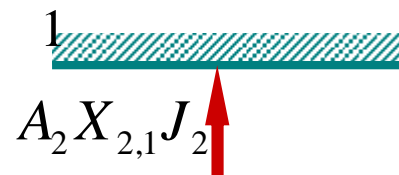
离开表面2的能量为有效辐射  $A_2 J_2$

其中落到表面1上的能量为  $A_2 X_{2,1} J_2$

两表面间的辐射换热量为  $\Phi_{1,2} = A_1 X_{1,2} J_1 - A_2 X_{2,1} J_2$

由角系数的相对性  $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$  ， 得到

$$\Phi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (J_1 - J_2)$$



## (9)空间热阻

两表面间的辐射换热量为  $\Phi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (J_1 - J_2)$

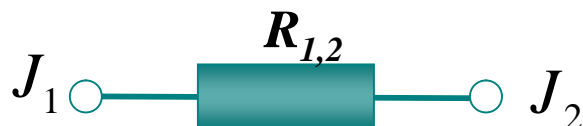
由角系数的相对性  $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$

可得  $\Phi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (J_1 - J_2) = A_2 X_{2,1} (J_1 - J_2)$

整理成 
$$\Phi_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_2 X_{2,1}}}$$

式中,  $\frac{1}{A_1 X_{1,2}} = \frac{1}{A_2 X_{2,1}} = R_{1,2} = R_{2,1}$

称为空间热阻。





## (10)两灰表面构成的封闭体系中的辐射换热

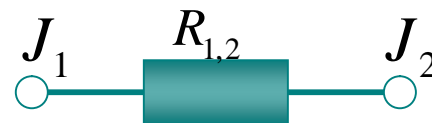
表面1失去的能量  $\Phi_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - e_1}{A_1 e_1}} = \frac{E_{b1} - J_1}{R_1}$



表面2获得的能量  $\Phi_2 = \frac{J_2 - E_{b2}}{\frac{1 - e_2}{A_2 e_2}} = \frac{J_2 - E_{b2}}{R_2}$



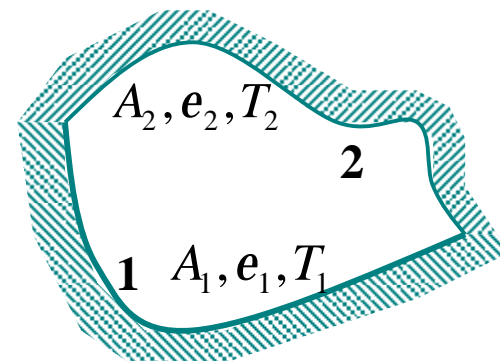
两表面间辐射换热量  $\Phi_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} = \frac{J_1 - J_2}{R_{1,2}}$



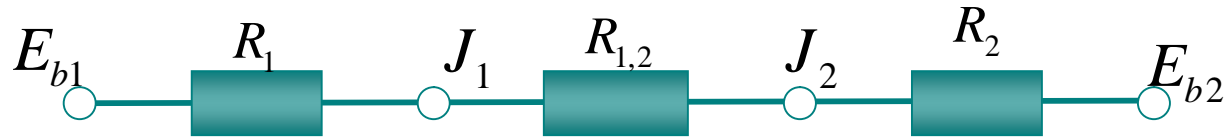
因为  $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_{1,2}$

有

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - e_1}{A_1 e_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - e_2}{A_2 e_2}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_{1,2} + R_2}$$



# (11)采用热阻的计算方法

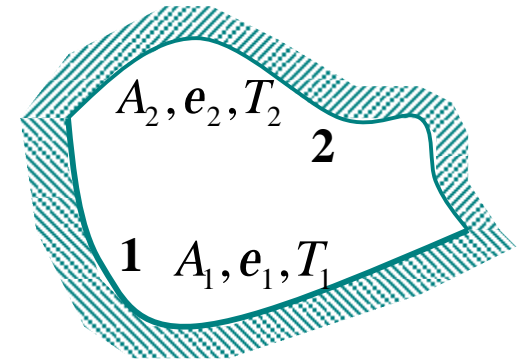


表面1, 2的表面热阻

$$R_1 = \frac{1 - e_1}{A_1 e_1} \quad R_2 = \frac{1 - e_2}{A_2 e_2}$$

1、2表面间的空间热阻

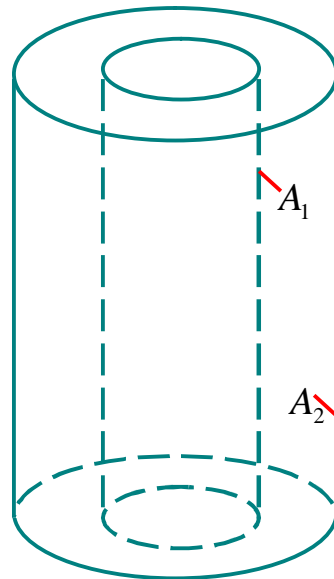
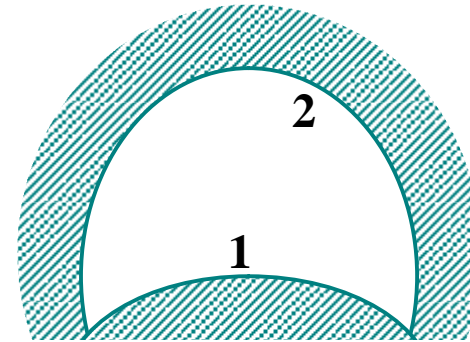
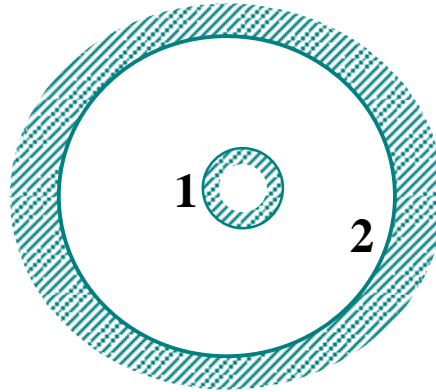
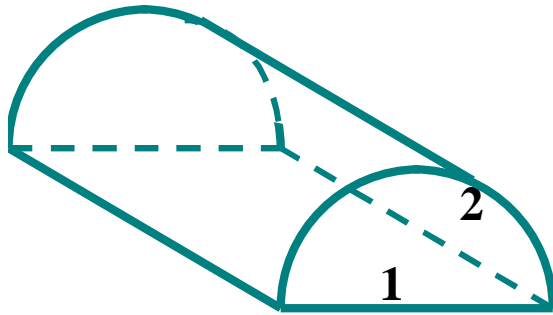
$$R_{1,2} = \frac{1}{A_1 X_{1,2}}$$



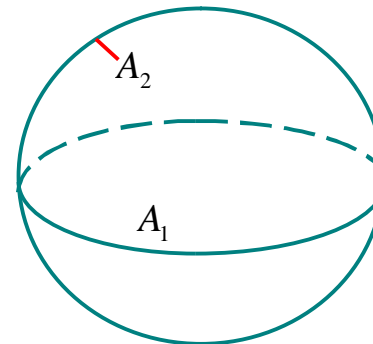
$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - e_1}{A_1 e_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - e_2}{A_2 e_2}}$$

# (12)方法的应用

表面 1 为平面或凸表面的情况



同心长圆筒壁

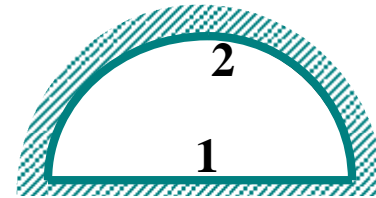


半球内表面与底面

## (12)方法的应用

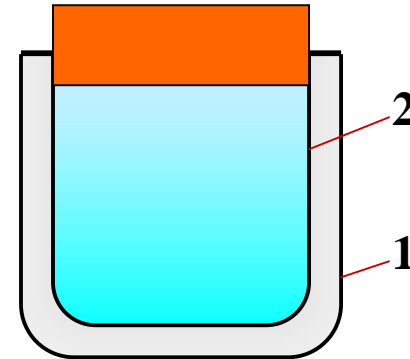
(1) 表面 1 为平面或凸表面。此时为  $X_{1,2} = 1$

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{e_2} - 1 \right)}$$



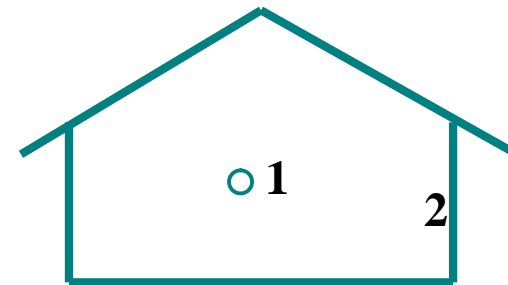
(2) 表面积  $A_1$  和  $A_2$  相差很小,  $A_1 / A_2 \rightarrow 1$

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1}$$



(3) 表面积  $A_2$  比  $A_1$  大得多,  $A_1 / A_2 \rightarrow 0$

$$\Phi_{1,2} = e_1 A_1 (E_{b1} - E_{b2})$$



**例题** 一长0.5m、宽0.4m、高0.3m的小炉窑，窑顶和四周壁温度为300℃，发射率为0.8；窑底温度为150℃，发射率为0.6。试计算窑顶和四周壁面对窑底面的辐射传热量。

**解** 设侧面与顶面之和为1面，底面为2面。由给定条件得

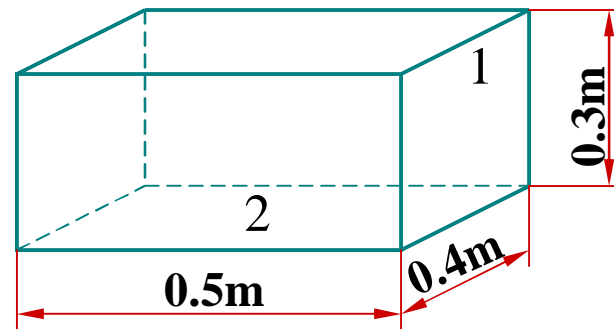
$$A_1 = 0.4 \times 0.5 + 0.4 \times 0.3 \times 2 + 0.5 \times 0.3 \times 2 = 0.74\text{m}^2$$

$$A_2 = 0.4 \times 0.5 = 0.2\text{m}^2$$

$$e_1 = 0.8, \quad e_2 = 0.6$$

由题意， $X_{2,1} = 1$ ，则

$$X_{1,2} = X_{2,1} A_2 / A_1 = 1 \times 0.2 / 0.74 = 0.27$$



于是，窑顶和四周壁面对底面的辐射换热量为

$$\begin{aligned}\Phi_{1,2} &= \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-e_1}{e_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1-e_2}{e_2 A_2}} = \frac{C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A_1}{\frac{1-e_1}{e_1} + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{1-e_2}{e_2} \frac{A_1}{A_2}} \\&= \frac{5.67 \times \left[ \left( \frac{300+273}{100} \right)^4 - \left( \frac{150+273}{100} \right)^4 \right] \times 0.74}{\frac{1-0.8}{0.8} + \frac{1}{0.27} + \frac{1-0.6}{0.6} \times \frac{0.74}{0.2}} \\&= 495.3\text{W}\end{aligned}$$

试考虑炉顶壁面的有效辐射是多少？

P216例题8-10

蒸汽管道的总散热量是多少？

**例题** 在一块温度为 $500^{\circ}\text{C}$ 的厚金属板上钻一个直径为  $20\text{mm}$ 的不穿透小孔，孔深 $=40\text{mm}$ ，锥顶角为 $90^{\circ}$ ，如图示。设孔的表面是黑度为 $0.6$ 的漫射体，其周围环境的温度为 $27^{\circ}\text{C}$ ，试确定从孔向外辐射的能量。

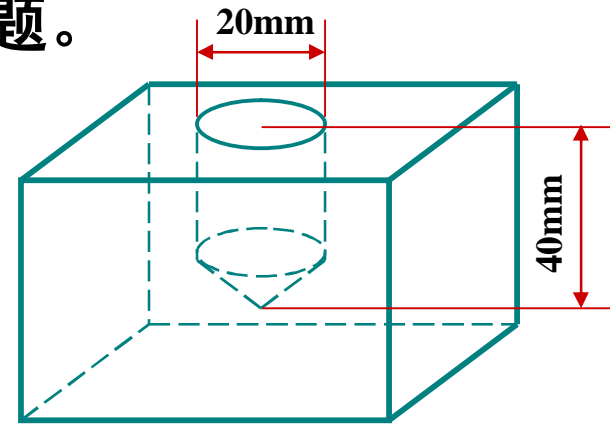
**解** 该题可视为孔内壁面（圆柱内壁面、圆锥内壁面）与顶面圆孔间的两个物体间的辐射换热问题。

令顶面为 $A_1$ 、锥孔内壁面为 $A_2$

$$A_1 = \pi r^2 = \pi \times (10 \times 10^{-3})^2 = 3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi r l + \frac{\pi}{2} R^2 = 2\pi r l + \frac{1}{2} \times \frac{2r}{\sqrt{2}} (r\sqrt{2})^2$$

$$= 2\pi r l + \frac{2}{\sqrt{2}} r^3 = 0.01929 \text{ m}^2 \quad e_1 = 1, \quad e_2 = 0.6,$$



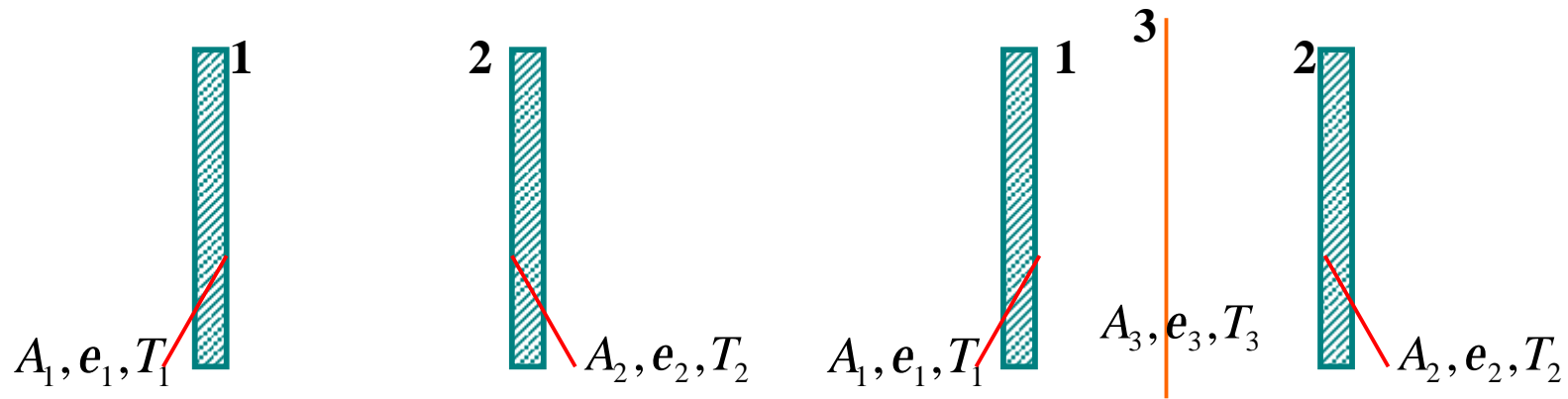
$$\begin{aligned}
\Phi_{1,2} &= \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - e_1}{e_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - e_2}{e_2 A_2}} = \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{1 + \left( \frac{1}{e_2} - 1 \right) \frac{A_1}{A_2}} \\
&= \frac{5.67 \times \left[ \left( \frac{27 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{500 + 273}{100} \right)^4 \right] \times 0.000314}{1 + \left( \frac{1}{0.6} - 1 \right) \times \frac{0.000314}{0.01929}} \\
&= -9.1 \text{ W}
\end{aligned}$$



## (13) 遮热屏

两个物体进行辐射传热时，在它们之间插入一块薄板设平板和金属薄板都是灰体，且

$$X_{1,2} = X_{2,1} = 1, \quad A_1 = A_2 = A_3$$

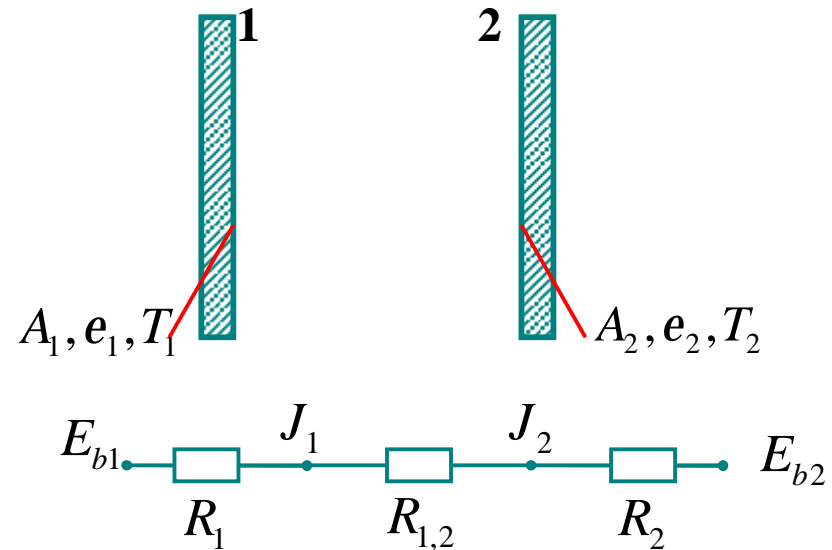


## (14)无遮热屏时的辐射换热

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-e_1}{e_1 A_1} + \frac{1}{AX_{1,2}} + \frac{1-e_2}{e_2 A_2}}$$

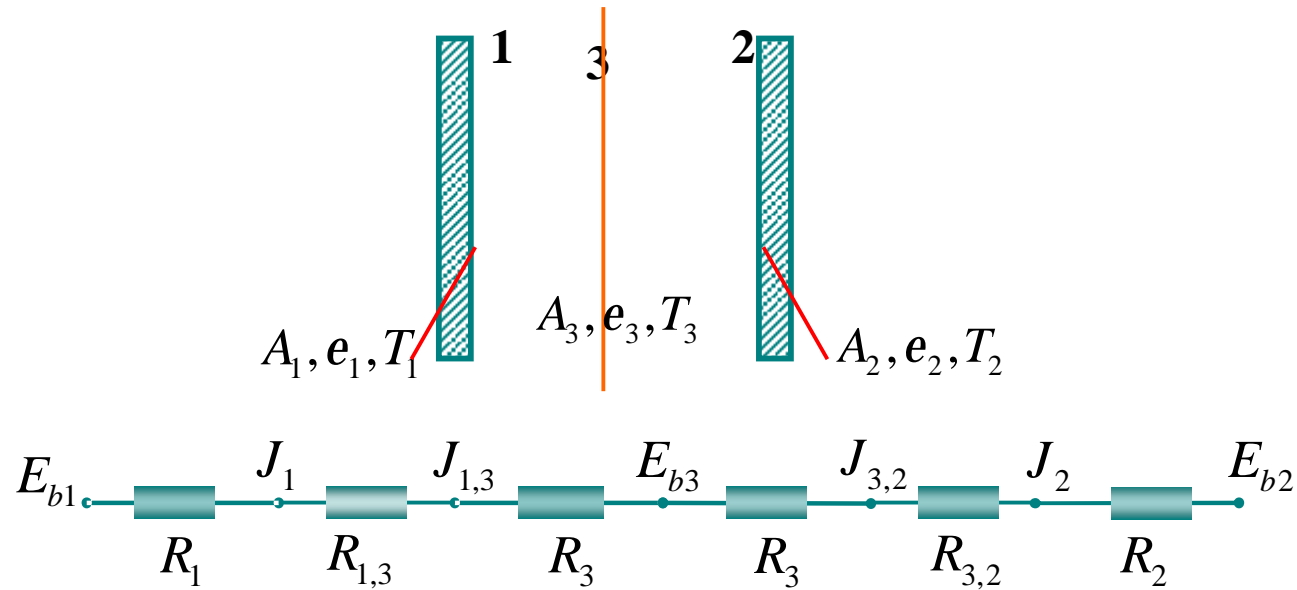
$$= \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1-e_1}{e_1} + 1 + \frac{1-e_2}{e_2}}$$

$$= \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1}$$



若  $e_1 = e_2 = e$ , 有 
$$\Phi_{1,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{2}{e} - 1}$$

## (15)有遮热屏的情况



1, 3表面间的辐射传热量  $\Phi_{1,3} = \frac{E_{b1} - E_{b3}}{R_1 + R_{1,3} + R_3}$

3, 2表面间的辐射传热量  $\Phi_{3,2} = \frac{E_{b3} - E_{b2}}{R_3 + R_{3,2} + R_2}$

1, 2表面间的辐射传热量  $\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_{1,3} + R_3 + R_3 + R_{3,2} + R_2}$

在稳态条件下,  $\Phi_{1,3} = \Phi_{3,2} = \Phi_{1,3,2}$

$$\Phi_{1,3,2} = \Phi_{1,3} = \Phi_{3,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + R_{1,3} + R_3 + R_3 + R_{3,2} + R_2}$$

$$\Phi_{1,3,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-e_1}{e_1 A_1} + \frac{1}{AX_{1,3}} + \frac{1-e_3}{e_3 A_3} + \frac{1-e_3}{e_3 A_3} + \frac{1}{AX_{3,2}} + \frac{1-e_2}{e_2 A_2}}$$

$$\Phi_{1,3,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1 + \frac{1}{e_3} + \frac{1}{e_3} - 1}$$

若  $e_1 = e_2 = e_3 = e$ , 有  $\Phi_{1,3,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{2\left(\frac{2}{e} - 1\right)}$

(1  
6) 遮热屏的影响

未加遮热板时两板间的辐射换热量

$$\Phi_{1,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{2}{e} - 1}$$

加遮热板后两板间的辐射换热量

$$\Phi_{1,3,2} = \frac{A(E_{b1} - E_{b2})}{2\left(\frac{2}{e} - 1\right)}$$

$$\Phi_{1,2} = 2\Phi_{1,3,2}$$

与未加辐射遮热板时的辐射换热相比，其辐射换热量减少了一半。

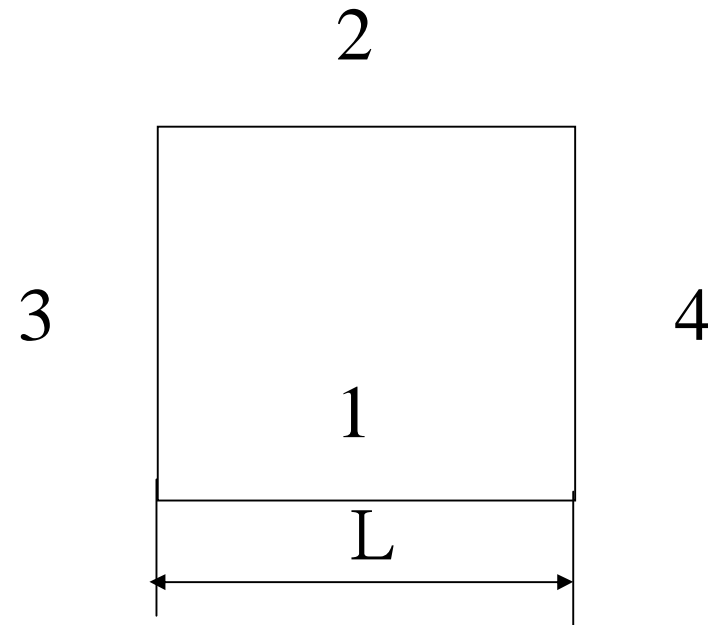
见P218页 例题 8-11、 例题 8-12、

P219页 例题 8-13

(1  
7) 两种情况的对比

## (18)计算例题一

- 一很长的正方形截面通道，底面 1 由电加热器加热，加热功率为  $1000\text{W/m}^2$ ，顶面 2 是绝热的，左侧 3 的温度为  $500\text{K}$ ，右侧 4 的温度为  $700\text{K}$ 。各面的发射率分别为 0.5，0.8，0.6 和 0.4，求表面 1, 2 的温度和 3, 4 的热流量。



解： 对于热流已知的表面

$$J_i = q_i + \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

对于本题目

$$J_1 = q_1 + J_2 X_{1,2} + J_3 X_{1,3} + J_4 X_{1,4}$$

$$J_2 = q_2 + J_1 X_{2,1} + J_3 X_{2,3} + J_4 X_{2,4}$$

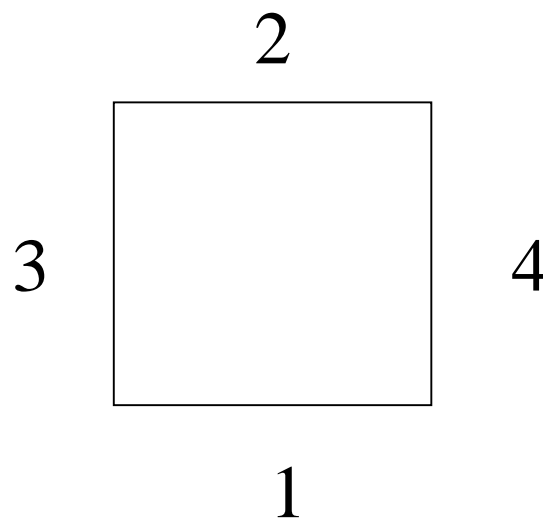
对于温度已知的表面

$$J_i = e_i \sigma T_i^4 + (1 - e_i) \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

对于本题目

$$J_3 = e_3 \sigma T_3^4 + (1 - e_3)(J_1 X_{3,1} + J_2 X_{3,2} + J_4 X_{3,4})$$

$$J_4 = e_4 \sigma T_4^4 + (1 - e_4)(J_1 X_{4,1} + J_2 X_{4,2} + J_3 X_{4,3})$$



## 根据代数法求角系数

由于是正方形的截面，角系数计算可分成两种

1、相对的面，如

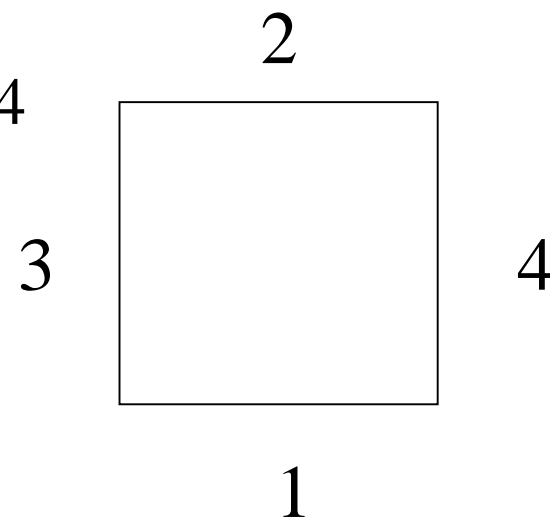
$$X_{1,2} = \frac{(\sqrt{2}L + \sqrt{2}L) - (L + L)}{2L} = \sqrt{2} - 1 = 0.414$$

2、相邻的面，如

$$X_{1,3} = \frac{L + L - \sqrt{2}L}{2L} = 1 - \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.293$$

$$X_{1,2} = X_{2,1} = X_{3,4} = X_{4,3} = 0.414$$

$$X_{1,3} = X_{3,1} = X_{1,4} = X_{4,1} = X_{2,3} = X_{3,2} = X_{2,4} = X_{4,2} = 0.293$$





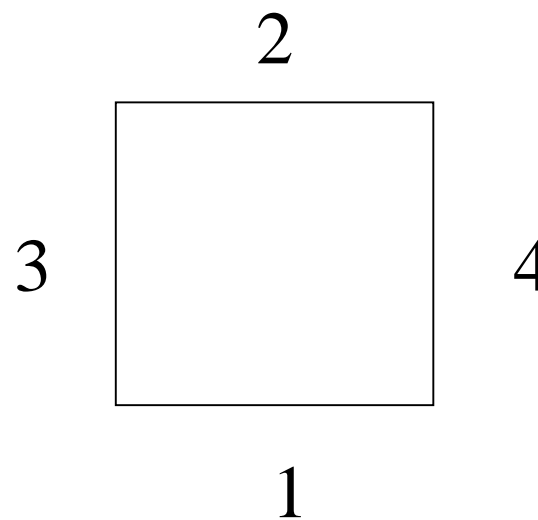
将有效辐射的方程联立，  
写成迭代的形式

$$J_1 = q_1 + J_2 X_{1,2} + J_3 X_{1,3} + J_4 X_{1,4}$$

$$J_2 = q_2 + J_1 X_{2,1} + J_3 X_{2,3} + J_4 X_{2,4}$$

$$J_3 = e_3 \sigma T_3^4 + (1 - e_3)(J_1 X_{3,1} + J_2 X_{3,2} + J_4 X_{3,4})$$

$$J_4 = e_4 \sigma T_4^4 + (1 - e_4)(J_1 X_{4,1} + J_2 X_{4,2} + J_3 X_{4,3})$$



通过迭代求解可以得到

$$J_1 = 9107 \text{ W / m}^2 \quad J_2 = 8400 \text{ W / m}^2$$

$$J_3 = 5829 \text{ W / m}^2 \quad J_4 = 9971 \text{ W / m}^2$$

根据有效辐射，其它物理量都可以计算出来。因此，有效辐射的计算是辐射传热计算的关键。

$$J_1 = e_1 s T_1^4 + (1 - e_1)(J_1 - q_1)$$

$$J_2 = e_2 s T_2^4 + (1 - e_2)(J_2 - q_2)$$

$$T_1 = \sqrt[4]{\left( J_1 + \frac{(1 - e_1)}{e_1} q_1 \right) / s} = \sqrt[4]{\left( 9107 + \frac{(1 - 0.5)}{0.5} \times 1000 \right) / 5.67 \times 10^{-8}} = 647 \text{K}$$

$$T_2 = \sqrt[4]{\left( J_2 + \frac{(1 - e_2)}{e_2} q_2 \right) / s} = \sqrt[4]{\left( 8400 + \frac{(1 - 0.8)}{0.8} \times 0 \right) / 5.67 \times 10^{-8}} = 620 \text{K}$$

$$q_3 = \frac{E_{b3} - J_3}{e_3} = \frac{s T_3^4 - J_3}{e_3} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 500^4 - 5829}{0.6} = -3428 \text{W} / \text{m}^2$$

$$q_4 = \frac{E_{b4} - J_4}{e_4} = \frac{s T_4^4 - J_4}{e_4} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 700^4 - 9971}{0.4} = 2428 \text{W} / \text{m}^2$$

## (19)计算例题二

- 一很长的正三角形截面通道，底面 1 由电加热器加热，加热功率为 $1000\text{W}$ ，左侧 2 是绝热的，右侧 3 的温度为 $500\text{K}$ 。各面的发射率分别为 0.5，0.8，和 0.6，求表面 1, 2 的温度和 3 的热流量。

解： 对于热流已知的表面

$$J_i = q_i + \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

对于本题目

$$J_1 = q_1 + J_2 X_{1,2} + J_3 X_{1,3}$$

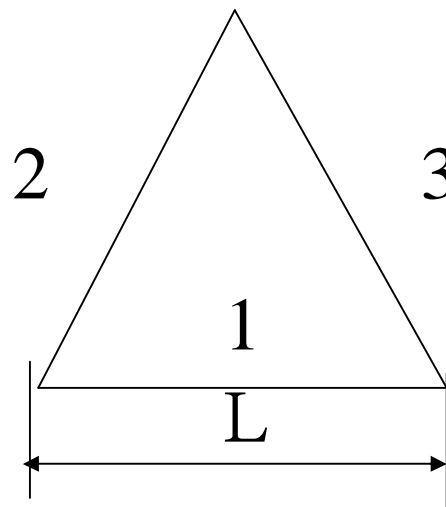
$$J_2 = q_2 + J_1 X_{2,1} + J_3 X_{2,3}$$

对于温度已知的表面

$$J_i = e_i \sigma T_i^4 + (1 - e_i) \sum_{k=1}^n J_k X_{i,k}$$

对于本题目

$$J_3 = e_3 \sigma T_3^4 + (1 - e_3)(J_1 X_{3,1} + J_2 X_{3,2})$$



由于是正三角形的截面，用代数法角系数计算比较简单

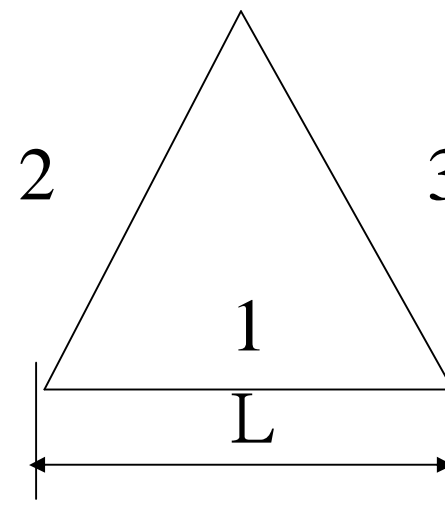
$$X_{i,j} = \frac{L + L - L}{2L} = 0.5$$

将有效辐射的方程联立，  
写成迭代的形式

$$J_1 = q_1 + J_2 X_{1,2} + J_3 X_{1,3}$$

$$J_2 = q_2 + J_1 X_{2,1} + J_3 X_{2,3}$$

$$J_3 = e_3 \sigma T_3^4 + (1 - e_3)(J_1 X_{3,1} + J_2 X_{3,2})$$



通过迭代求解可以得到

$$J_1 = 5543 \text{ W / m}^2 \quad J_2 = 4877 \text{ W / m}^2 \quad J_3 = 4210 \text{ W / m}^2$$

根据有效辐射，其它物理量都可以计算出来。因此，有效辐射的计算是辐射传热计算的关键。

$$J_1 = e_1 s T_1^4 + (1 - e_1)(J_1 - q_1)$$

$$J_2 = e_2 s T_2^4 + (1 - e_2)(J_2 - q_2)$$

$$T_1 = \sqrt[4]{\left( J_1 + \frac{(1 - e_1)}{e_1} q_1 \right) / s} = \sqrt[4]{\left( 5543 + \frac{(1 - 0.5)}{0.5} \times 1000 \right) / 5.67 \times 10^{-8}} = 583 \text{K}$$

$$T_2 = \sqrt[4]{\left( J_2 + \frac{(1 - e_2)}{e_2} q_2 \right) / s} = \sqrt[4]{\left( 4877 + \frac{(1 - 0.8)}{0.8} \times 0 \right) / 5.67 \times 10^{-8}} = 541 \text{K}$$

$$q_3 = \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{(1 - e_3)}{e_3}} = \frac{s T_3^4 - J_3}{\frac{(1 - e_3)}{e_3}} = \frac{5.67 \times 10^{-8} \times 500^4 - 5829}{\frac{(1 - 0.6)}{0.6}} = -1000 \text{W} / \text{m}^2$$

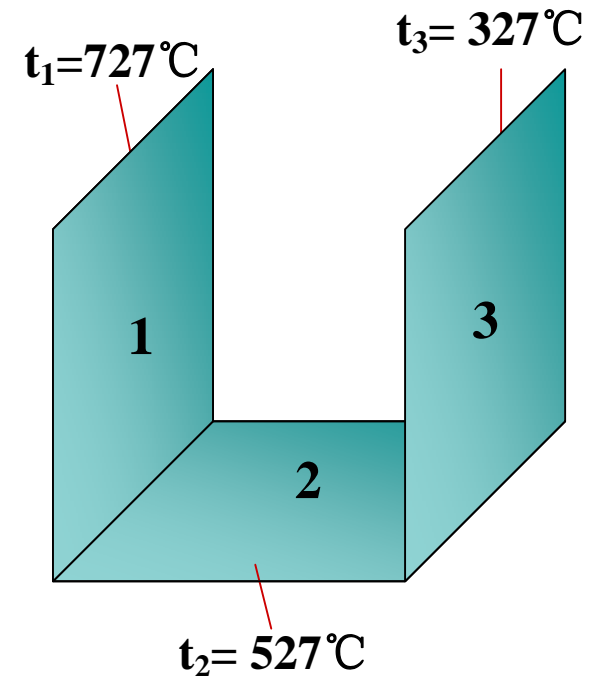
#### 四、多个灰体表面构成封闭系统时的辐射传热 步骤:

1. 分析这些灰体表面是否构成封闭系统。若不是，则作假想面构成封闭系统。
2. 分析系统中哪些表面间有辐射传热。
3. 画出辐射网络图。
4. 由辐射网络图，参照电学上的基尔霍夫定律（稳态时流入节点的热流量之和等于零），写出各节点的方程。
5. 求各表面的辐射力 $E_{bi}$ 和角系数 $X_{i,j}$ 。
6. 将 $E_{bi}$ 和 $X_{i,j}$ 代入节点方程。
7. 计算各表面的有效辐射力 $J_i$ 。

8. 利用  $\Phi_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - e_i}{e_i A_i}}$  或  $\Phi_i = \sum_{j=1}^N \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i X_{i,j}}}$  求得各热流量。

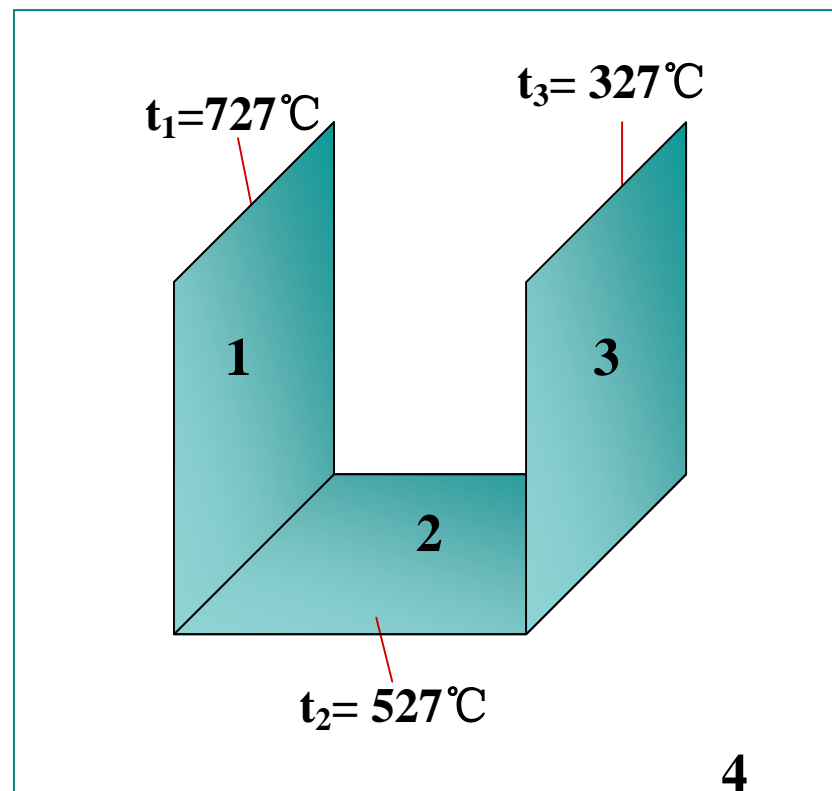
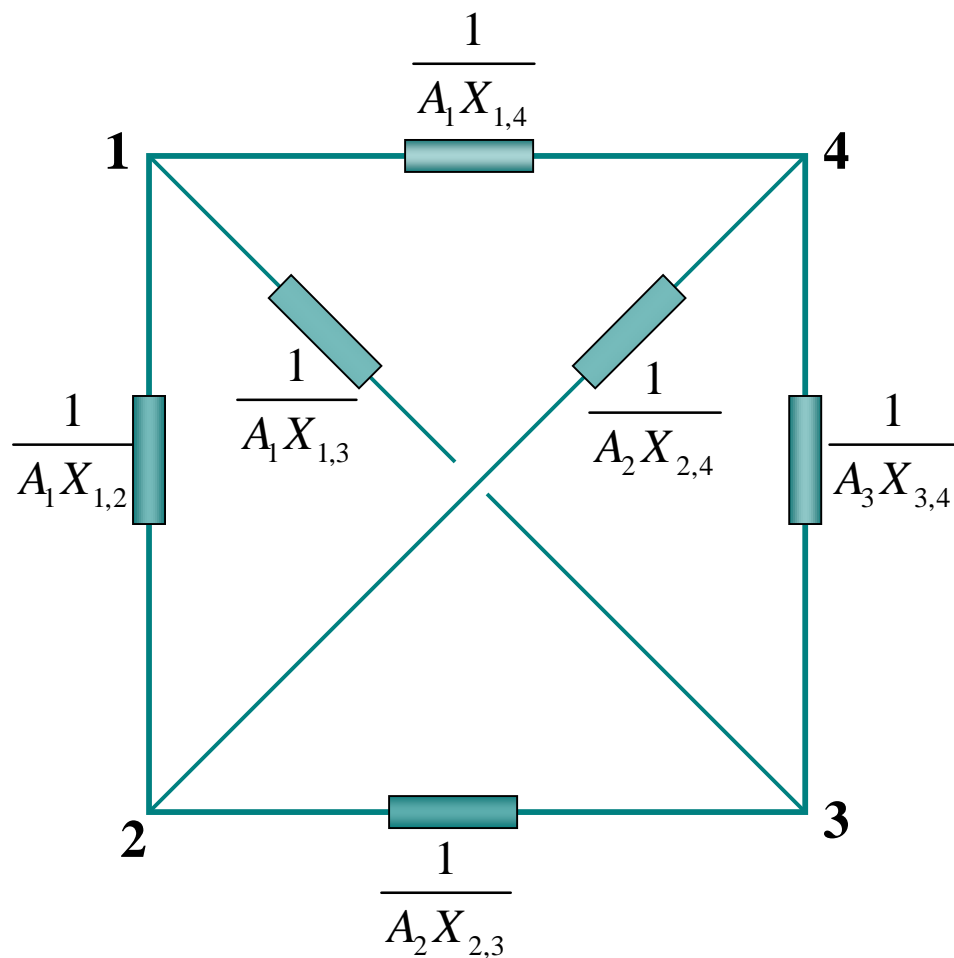
P221 例题8-14  $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的黑体方板1、2、3组成到 II 形。已知方板1、2、3的温度分别为 $727^\circ\text{C}$ 、 $527^\circ\text{C}$ 和 $327^\circ\text{C}$ ，并被放在  $27^\circ\text{C}$ 的房间内，背部均绝热。求方板1与2、3间的辐射传热量及方板1的总传热量。

分析：此3个面并未构成封闭系统，故作假象面4，使它与3个面构成一封闭系统。三块方板辐射给假想面的能量全部透过假想面4进入大房间且几乎不返回，假象面可视为温度为 $27^\circ\text{C}$ 的黑体。对于黑体有  $e = 1, E_{bi} = J_i$ 。





画出其辐射网络图。



解 由表面1和表面2  $\frac{c}{a} = \frac{b}{a} = \frac{2}{2} = 1$  查图8-19的  $X_{1,2} = 0.2$

$$X_{1,2} = 0.2$$

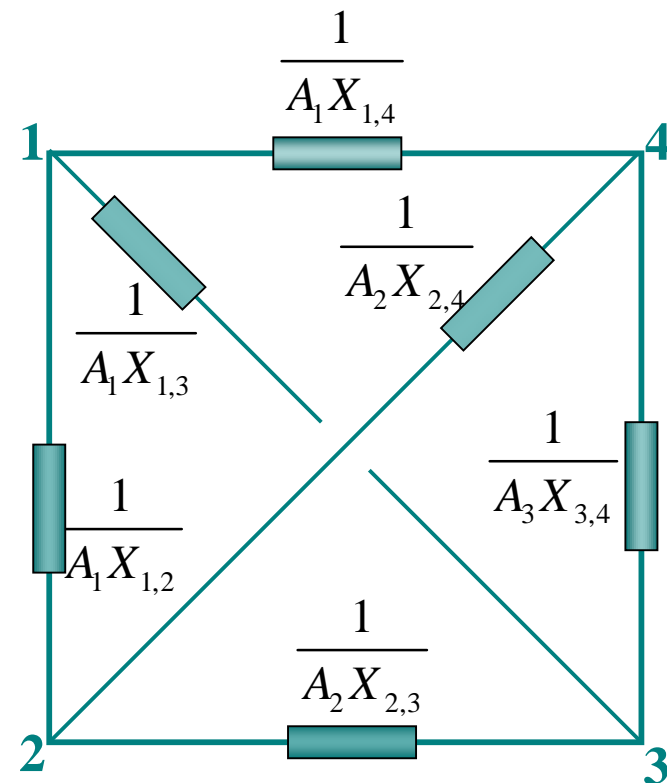
表面1和表面2间的辐射热流量为

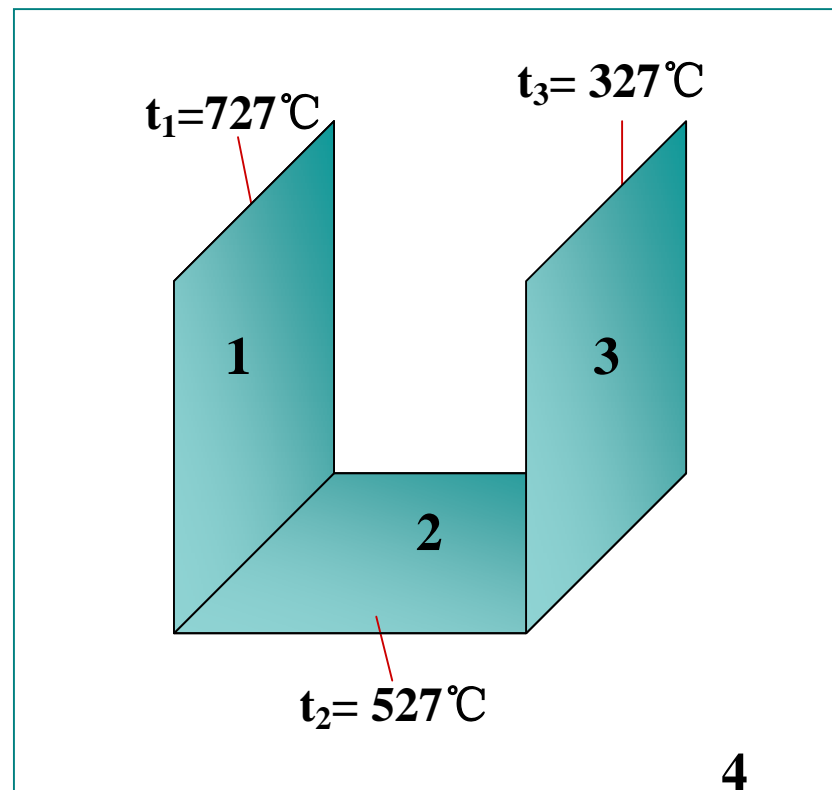
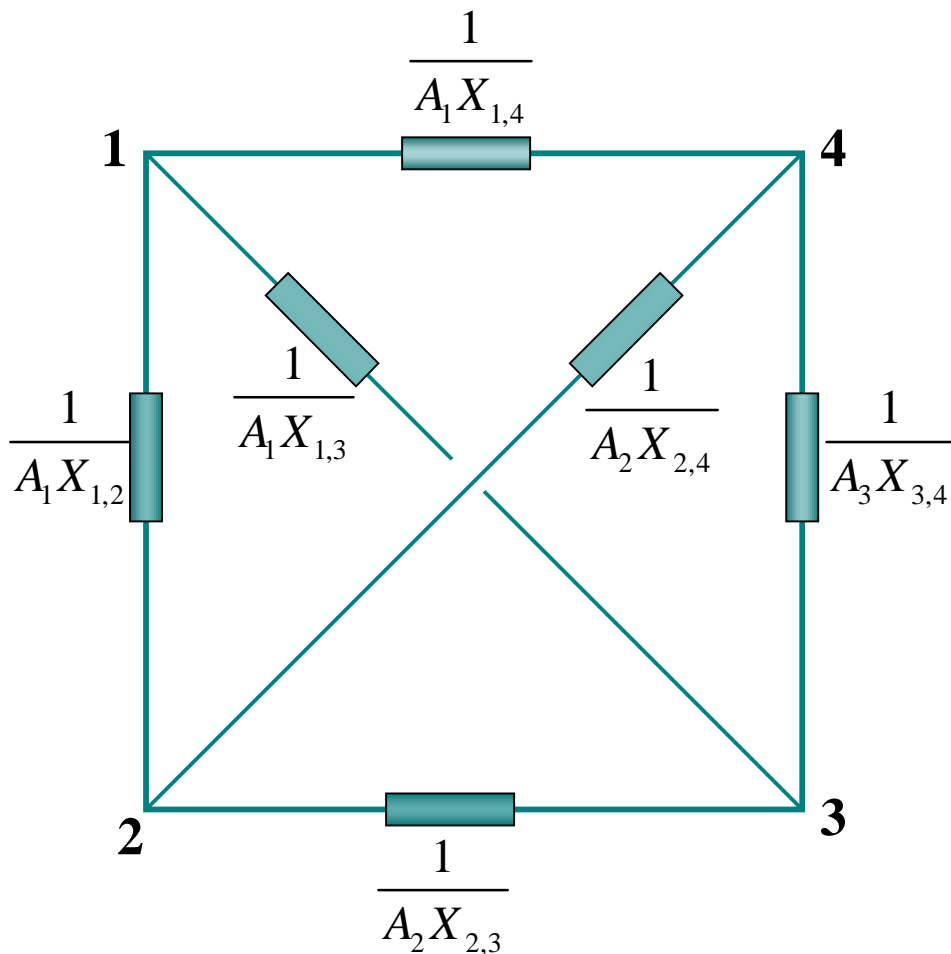
$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} = A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2})$$

$$= A_1 X_{1,2} c_b \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

$$= 2 \times 2 \times 0.2 \times 5.67 \times \left[ \left( \frac{727 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{527 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 2.678 \times 10^4 \text{ W}$$





由表面1和表面3  $\frac{c}{a} = \frac{b}{a} = \frac{2}{2} = 1$  查图8-18的  $X_{1,2} = 0.2$

由表面1和3  $\frac{c}{a} = \frac{b}{a} = \frac{2}{2} = 1$

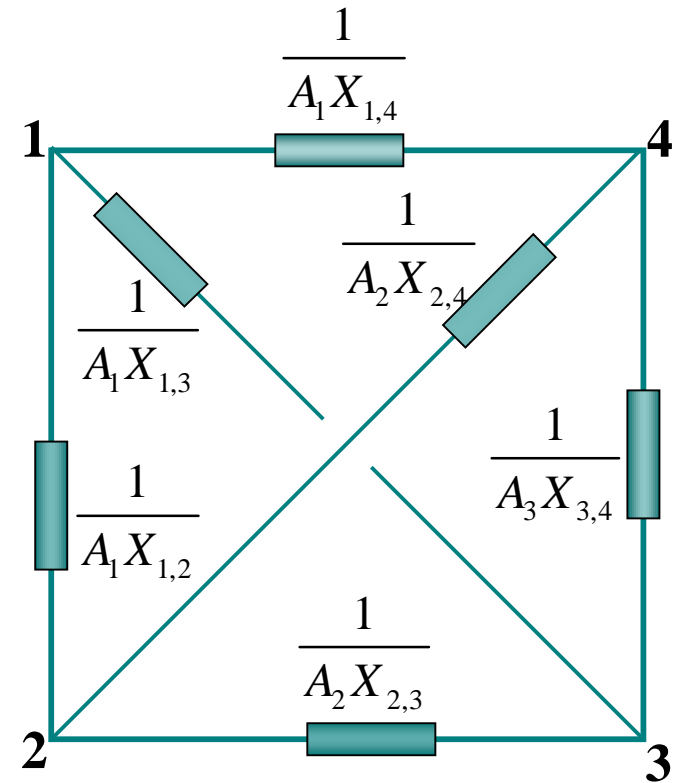
查图8-18的  $X_{1,2} = 0.2$

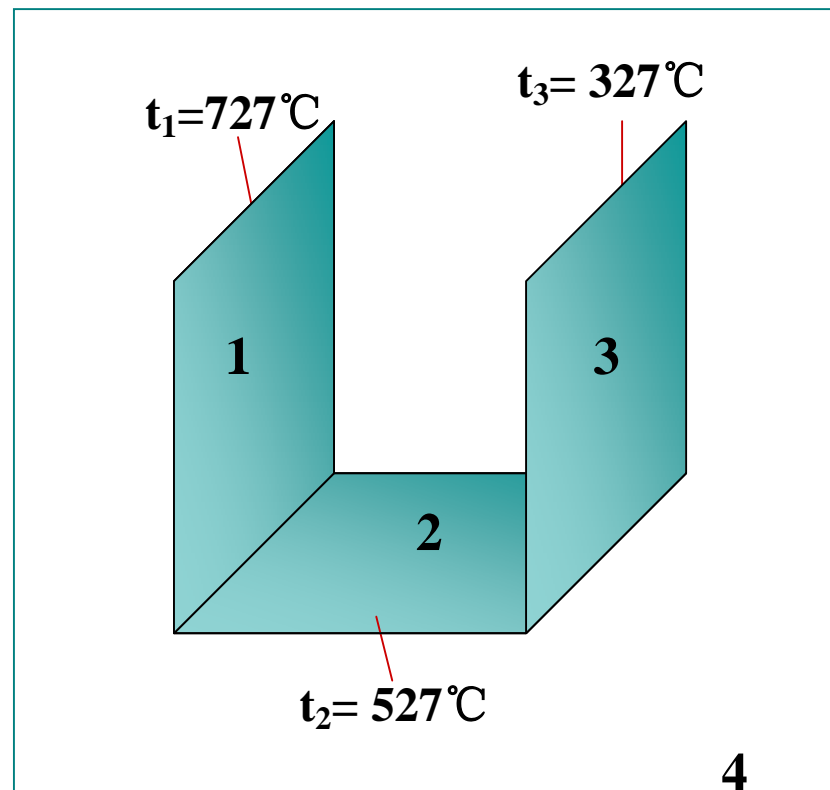
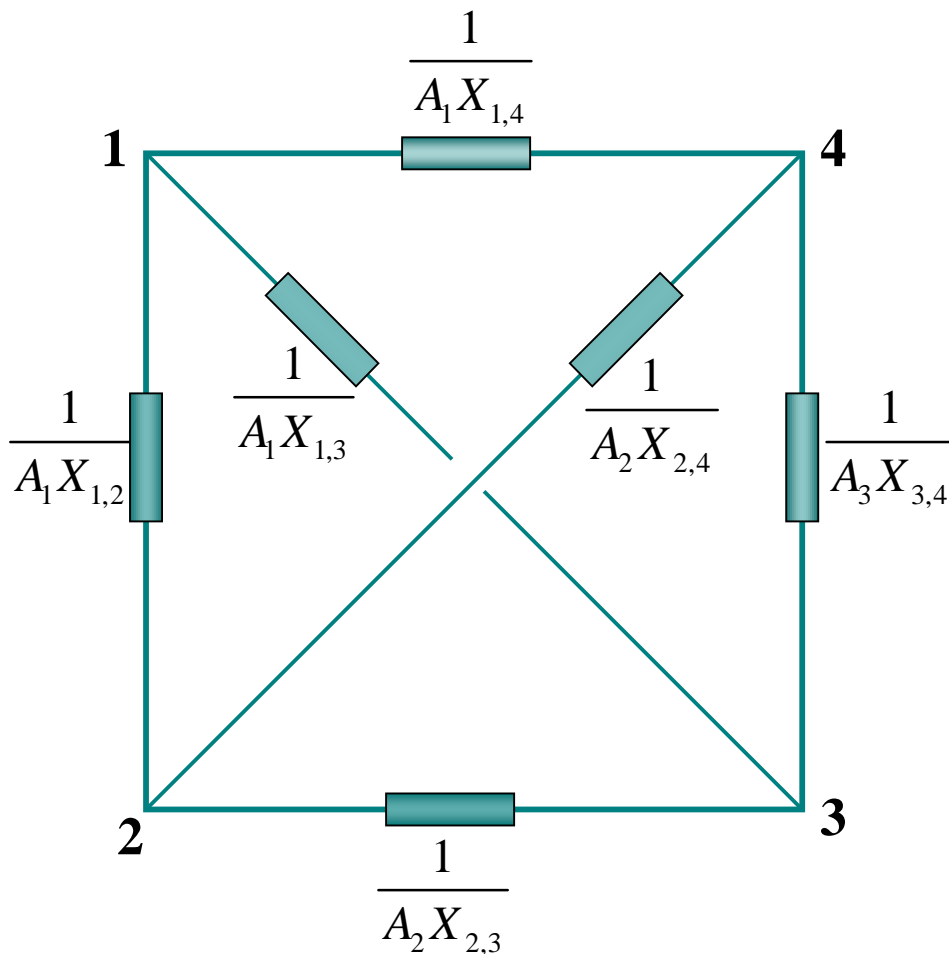
表面1和表面3间的辐射热流量为

$$\Phi_{1,3} = A_1 X_{1,2} c_b \left( \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

$$= 2 \times 2 \times 0.2 \times 5.67 \times \left[ \left( \frac{727 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{327 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 3.948 \times 10^4 \text{ W}$$





板面1对假想面4的角系数

由角系数的完整性  $X_{1,4} = 1 - X_{1,2} - X_{1,3} = 1 - 0.2 - 0.2 = 0.6$

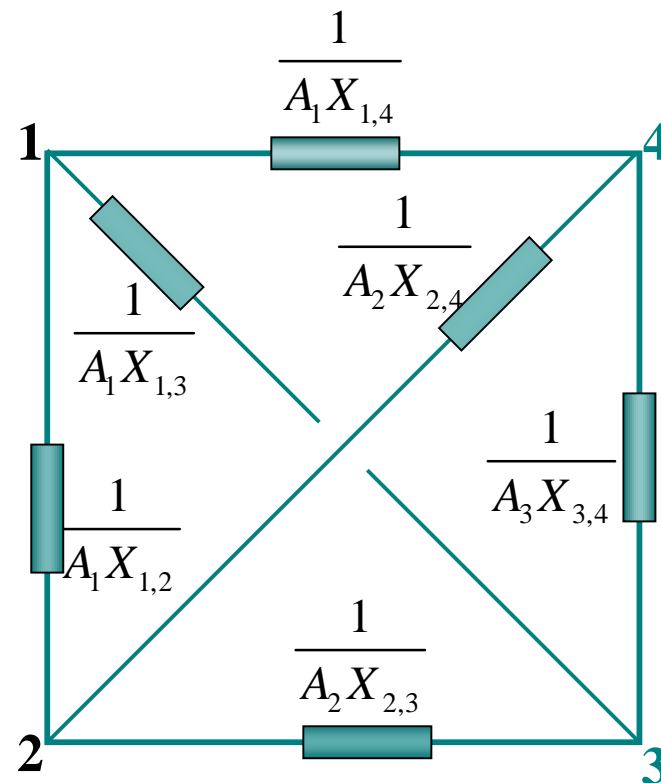
角系数  $X_{1,4} = 0.6$

表面1和假想面4间的辐射热流量为

$$\begin{aligned}\Phi_{1,4} &= A_1 X_{1,4} c_b \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \\ &= 2 \times 2 \times 0.2 \times 5.67 \times \\ &\quad \times \left[ \left( \frac{727 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{27 + 273}{100} \right)^4 \right] \\ &= 1.350 \times 10^5 \text{ W}\end{aligned}$$

板1总辐射传热热流量为  $\Phi_1 = \Phi_{1,2} + \Phi_{1,3} + \Phi_{1,4}$

$$\Phi_1 = 2.678 \times 10^4 + 3.948 \times 10^4 + 13.50 \times 10^4 = 20.1 \times 10^4 \text{ W}$$



### P223 例题8-15

已知  $e_1 = 0.3$ ,  $e_2 = 0.6$

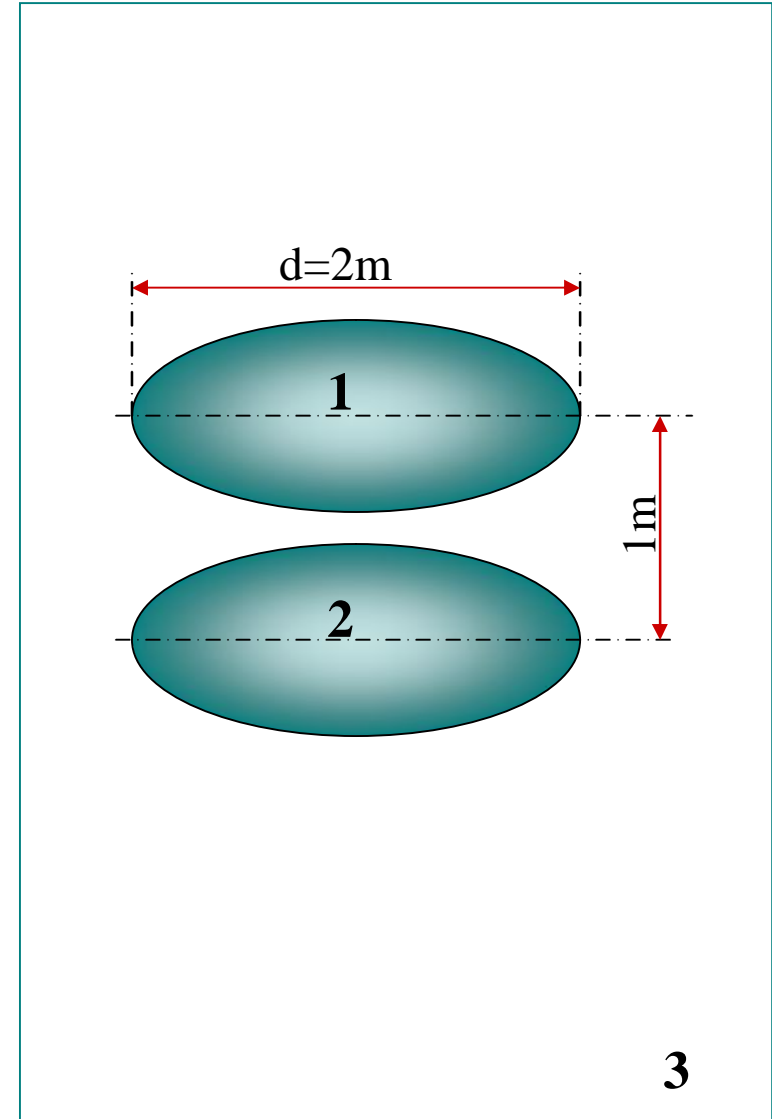
$$t_1 = 500^\circ\text{C}, t_2 = 200^\circ\text{C} \quad t_3 = 20^\circ\text{C}$$

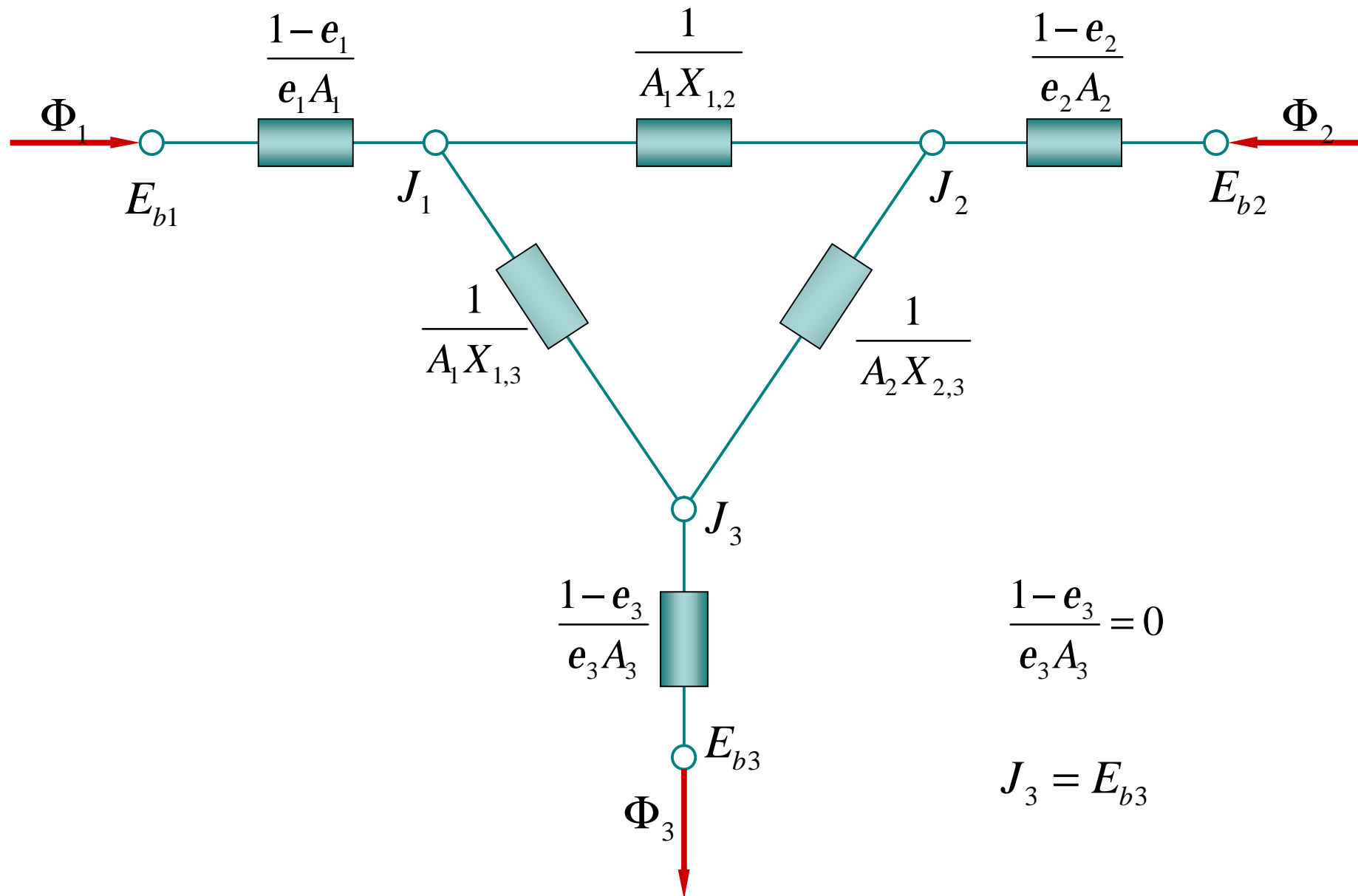
分析：用假想面3与两平行圆板组成封闭系统。二平行圆板辐射到房间的辐射能很少返回，所以可认为3面为黑体。

对照图8-20,得

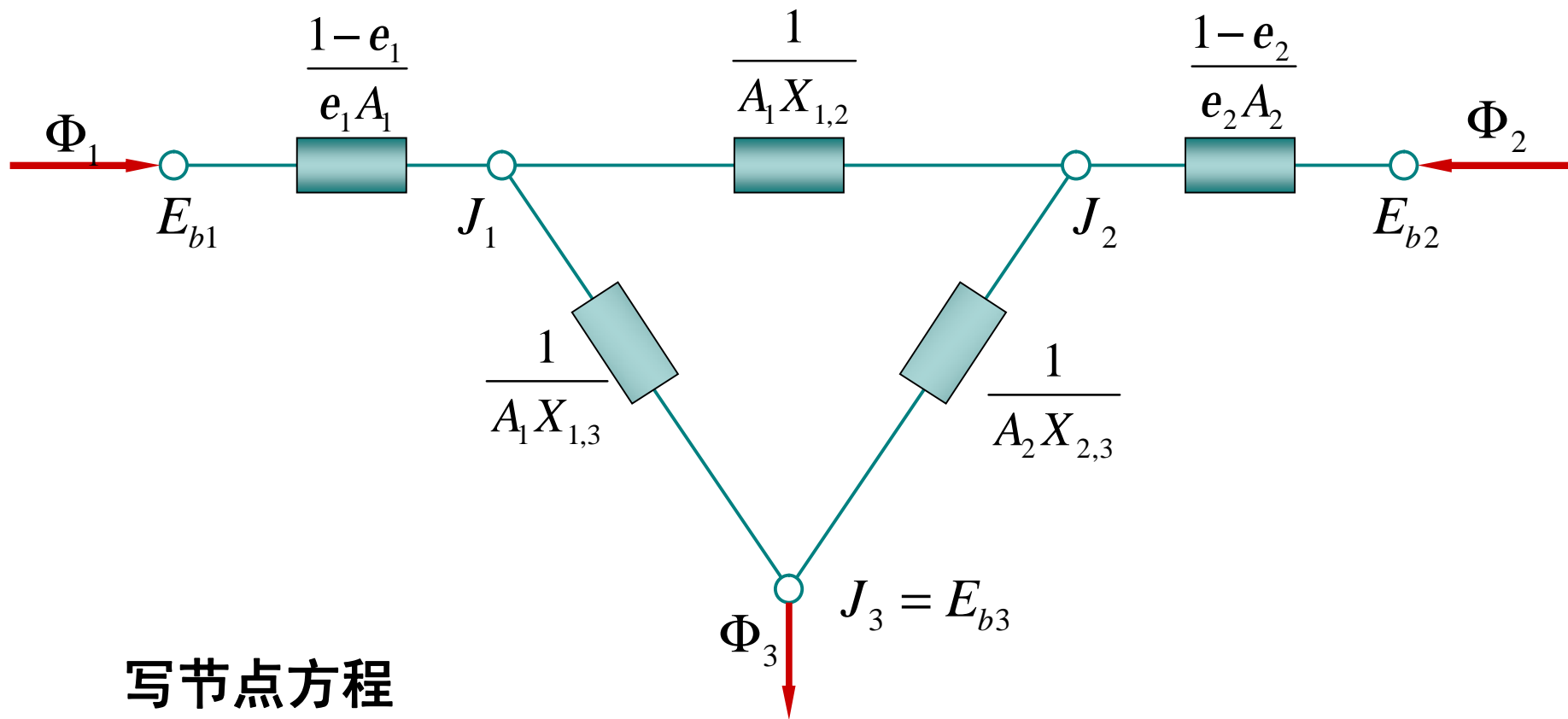
$$\frac{r_1}{a} = \frac{r_2}{a} = \frac{1}{1} = 1 \quad \text{查图得}$$

$$X_{1,2} = X_{2,1} = 0.38, \quad X_{2,3} = X_{1,2} = 1 - X_{1,2} = 1 - 0.38 = 0.62$$





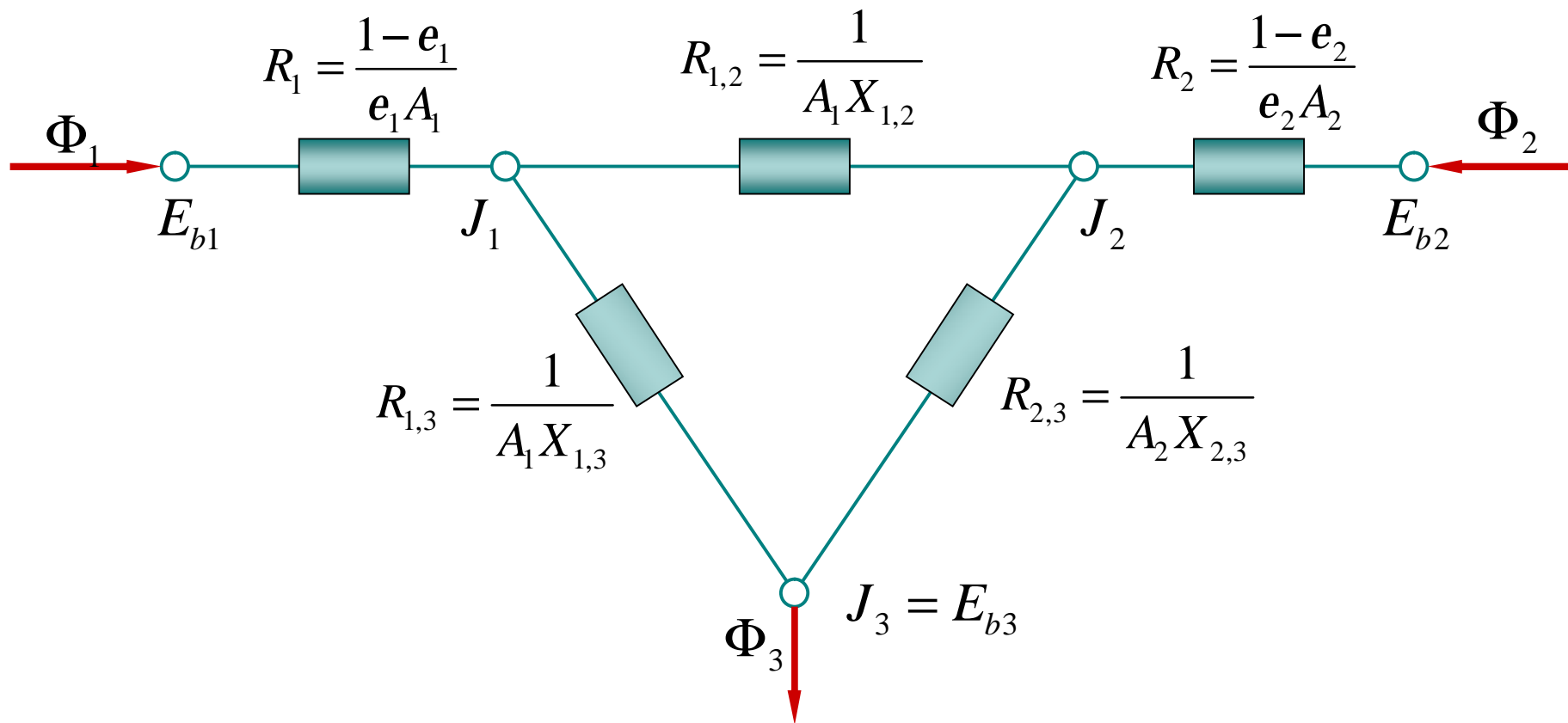




写节点方程

$$\frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1-e_1}{e_1 A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} + \frac{J_3 - J_1}{\frac{1}{A_1 X_{1,3}}} = 0, \quad \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1-e_2}{e_2 A_2}} + \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} + \frac{J_3 - J_2}{\frac{1}{A_2 X_{2,3}}} = 0$$

计算黑体辐射力  $E_{b1}, E_{b2}, E_{b3}$ ，从节点方程中解出  $J_1, J_2$



板1失去的辐射能

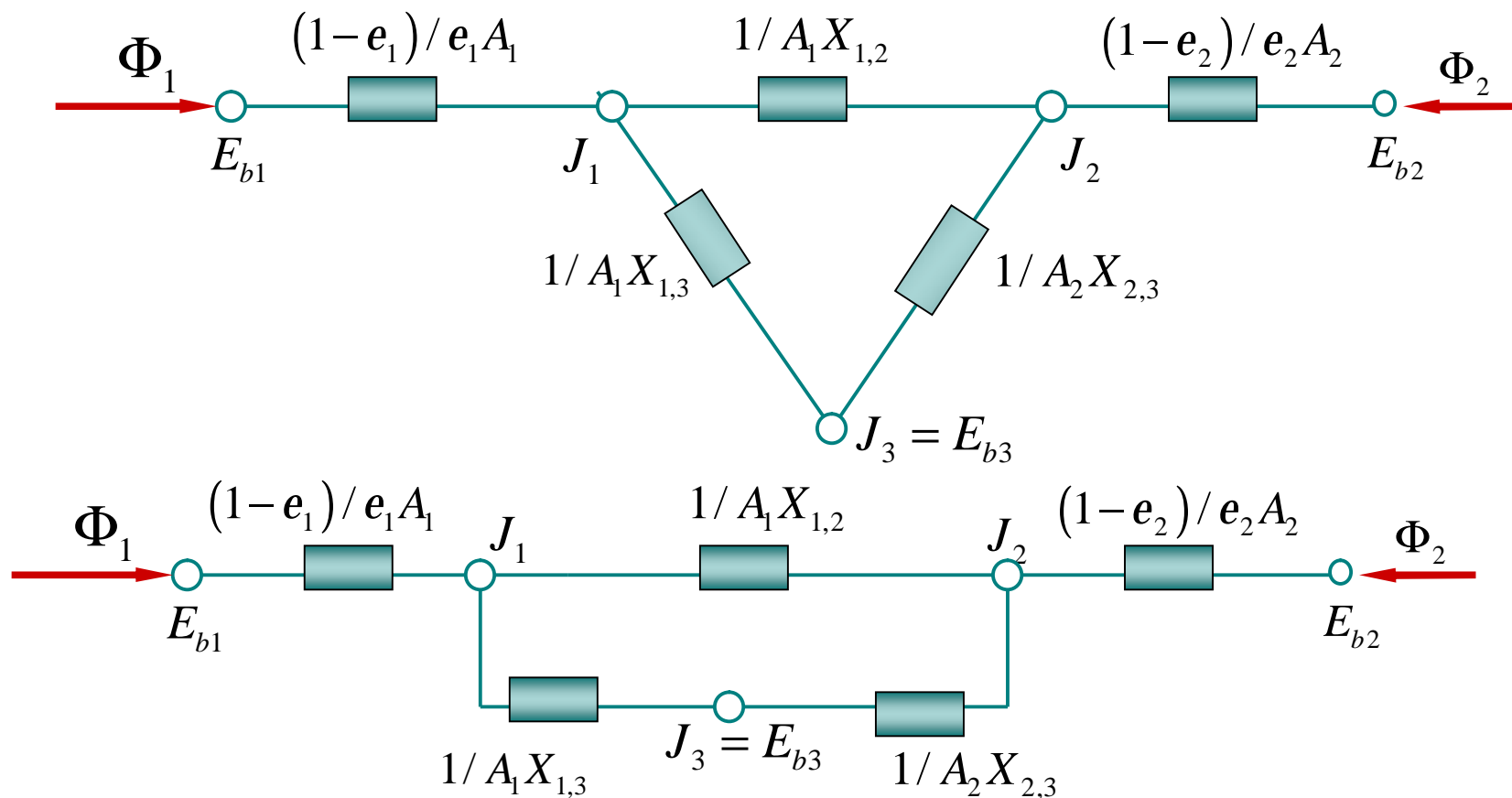
$$\Phi_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1-e_1}{e_1 A_1}}$$

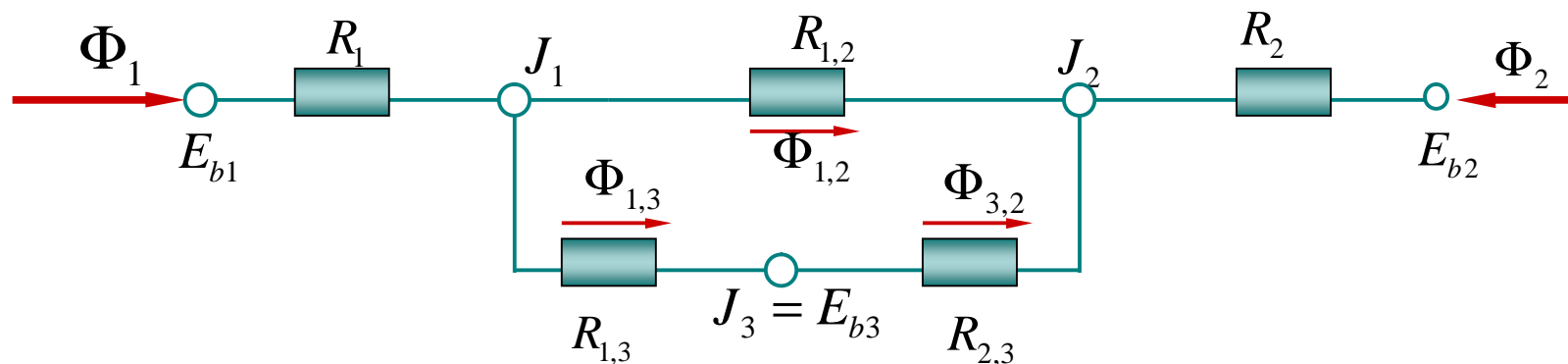
板2失去的辐射能

$$\Phi_2 = \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1-e_2}{e_2 A_2}}$$

若表面3为绝热面，即净辐射换热量为零。

即  $\Phi_3 = \frac{E_{b3} - J_3}{\frac{1 - e_3}{A_3 e_3}} = 0$  有  $E_{b3} = J_3$





辐射传热系统中，这种表面温度未定而净辐射传热量为零的表面称为重辐射面。因  $\Phi_{1,3} = \Phi_{3,2} = \Phi_{1,3,2}^\circ$

相当于表面1、3的空间热阻与表面3、2的空间热阻串联后，再与表面1、2的空间热阻并联。

离开表面1的辐射能  $\Phi_1 = \Phi_{1,2} + \Phi_{132} = -\Phi_2$

$$\Phi_1 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_1 + \frac{R_{1,2} (R_{1,3} + R_{2,3})}{R_{1,2} + R_{1,3} + R_{2,3}} + R_2}$$

# (20)气体辐射及其与包壁间的辐射 传热

1. 常见的参与辐射的气体
2. 气体辐射的特点
3. 贝尔定律
4. 气体的发射率和吸收比
5. 气体与包壁之间的辐射传热

# 参与辐射的气体及其特点

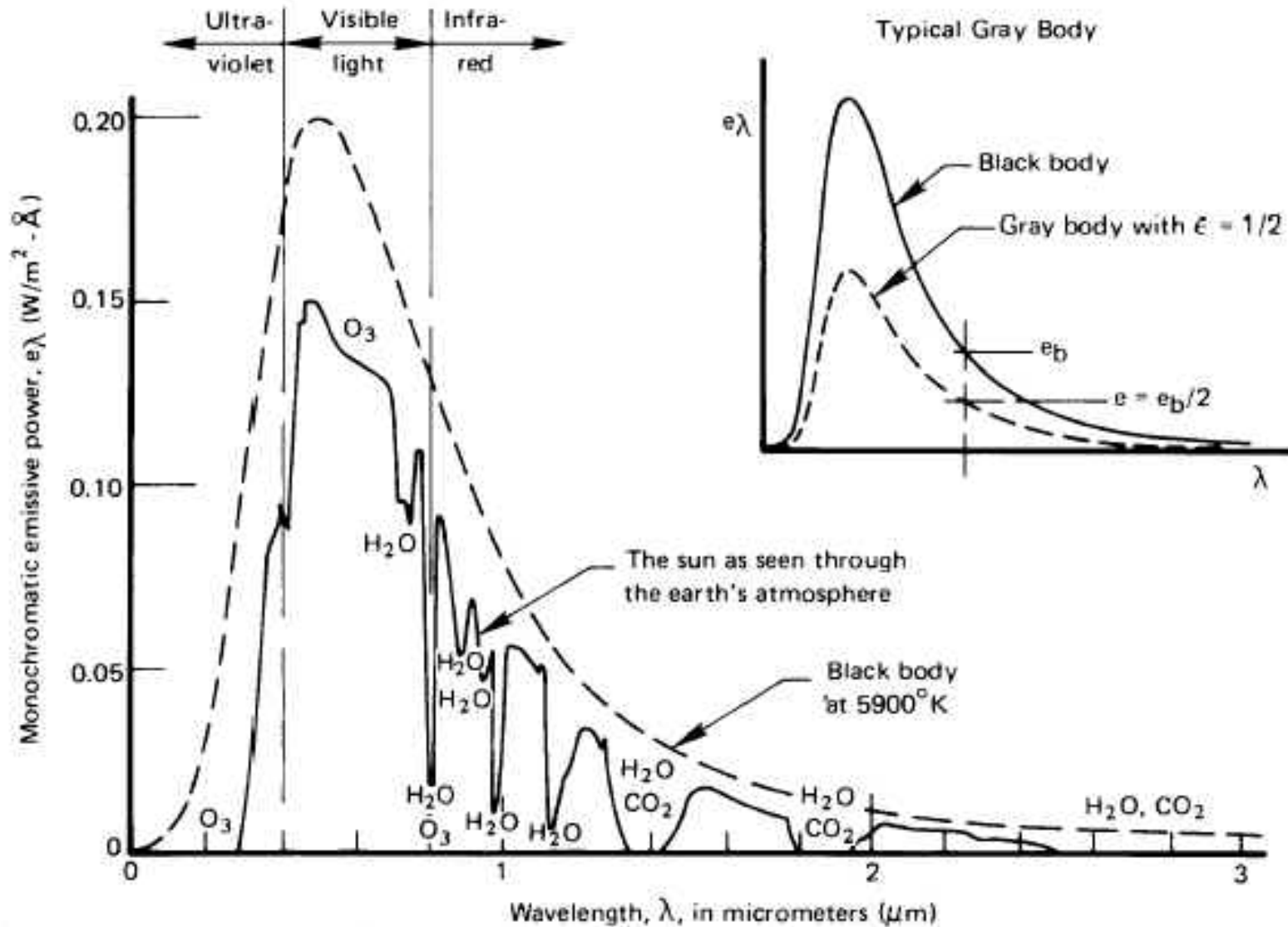
1. CO,NO
2. NO<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>O,CO<sub>2</sub>,SO<sub>2</sub>
3. SO<sub>3</sub>,CH<sub>4</sub>

1. 非对称的双原子气体
2. 极性三原子气体
3. 某些多原子气体

# 水蒸汽和二氧化碳的发射和吸收

| 光带   | 二氧化碳        |      | 水蒸气        |      |
|------|-------------|------|------------|------|
|      | 波长范围        | 带宽   | 波长范围       | 带宽   |
| 第一光带 | 2.64~2.84   | 0.20 | 2.24~3.37  | 1.13 |
| 第二光带 | 4.01~4.80   | 0.79 | 4.80~8.50  | 3.70 |
| 第三光带 | 12.50~16.50 | 4.00 | 12.50~25.0 | 13.0 |

# 温室效应 (Green House Effect)



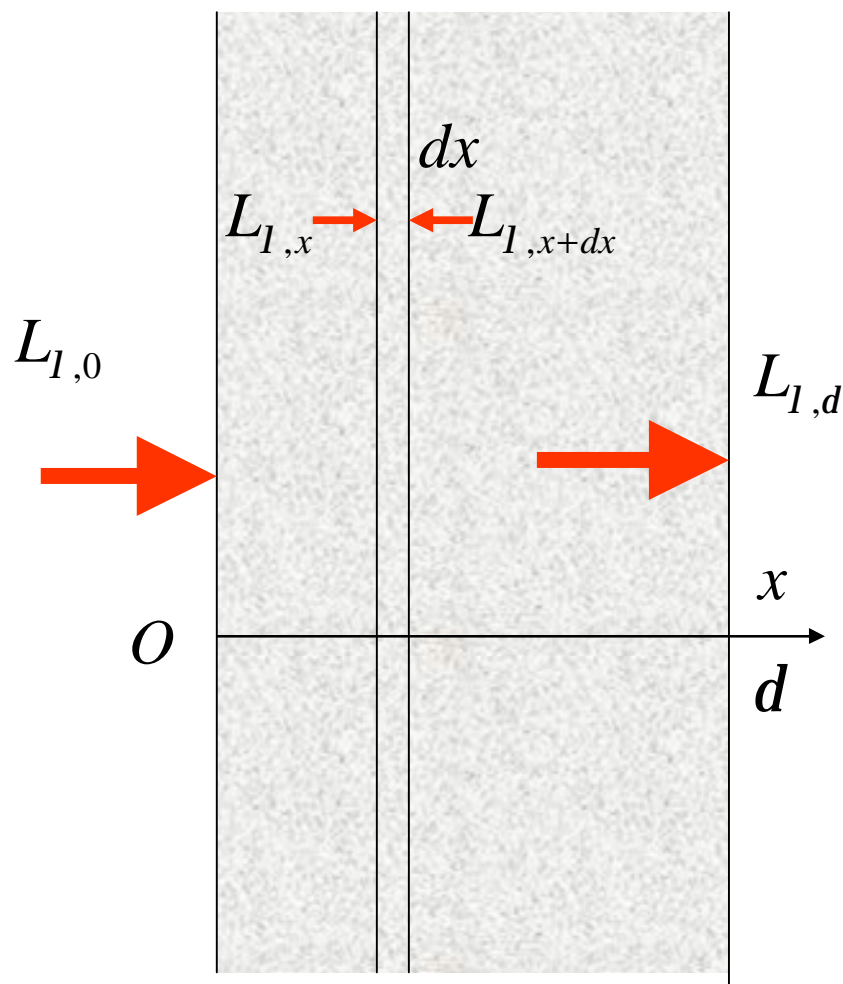


# 气体辐射和吸收的特点

1. 对波长有明显的选择性
2. 吸收和发射光谱是间断的
3. 不同的气体的发射及吸收光谱不同
4. 吸收和辐射光谱与温度没有明显的关系

# 气体的辐射和吸收过程

$$\frac{dL_l}{dx} = -k_l L_l \quad (\text{贝尔定律}) \quad k_l \text{—光谱减弱系数 } m^{-1}$$



$$L_l = L_{l,0} \exp(-k_l x)$$

$$t_{l,x} = \frac{L_l}{L_{l,0}} = \exp(-k_l x)$$

$$t_{l,d} = \frac{L_{l,d}}{L_{l,0}} = \exp(-k_l d)$$

气体对射线的吸收比

$$a_{l,d} = 1 - t_{l,d} = 1 - \exp(-k_l d)$$

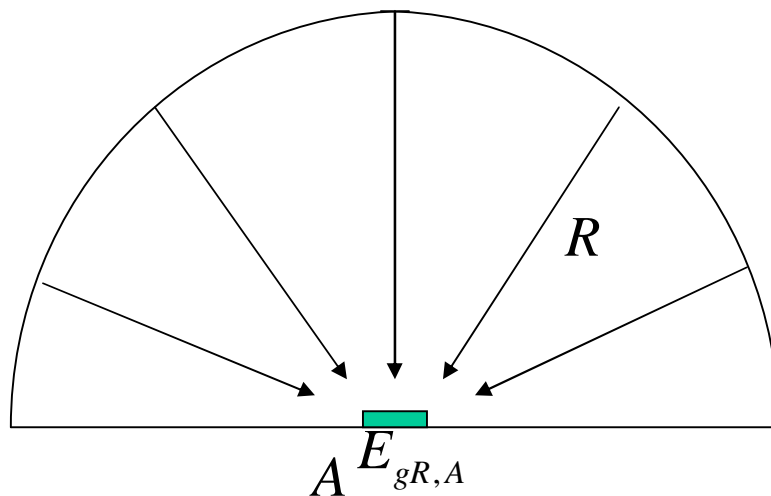
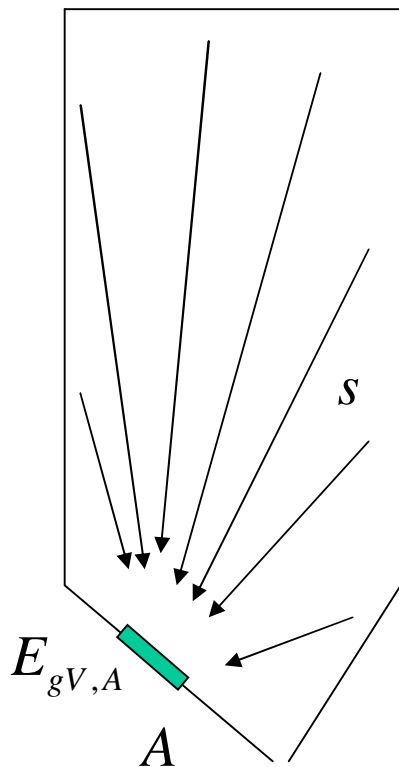
气体的光谱发射率（基尔霍夫定律）

$$e_{l,d} = a_{l,d} = 1 - \exp(-k_l d)$$

# 气体辐射和吸收的特点

1. 对波长有明显的选择性
2. 吸收和发射光谱是间断的
3. 不同的气体的发射及吸收光谱不同
4. 吸收和辐射光谱与温度没有明显的关系
5. 气体的发射和吸收在空间完成

# 平均射线行程



$$e_{l,d} = a_{l,d} = 1 - \exp(-k_l d)$$

$$E_{gV,A} = E_{gR,A}$$

$$S = R$$

# 典型容积形状的平均射线行程

| 容积形状        | 特征尺寸 | 接受辐射的位置   | 平均射线行程  |
|-------------|------|-----------|---------|
| 球           | 直径   | 包壁及其上任何部位 | $0.65d$ |
| 立方体         | 边长   | 整个包壁或任一壁面 | $0.60d$ |
| 高度等于直径的圆柱体  | 直径   | 底面圆心      | $0.71d$ |
|             |      | 整个包壁      | $0.60d$ |
| 高度等于直径2倍的圆柱 | 直径   | 上下底面      | $0.60d$ |
|             |      | 侧面        | $0.76d$ |
|             |      | 整个包壁      | $0.73d$ |
| 无限长圆柱       | 直径   | 整个包壁      | $0.9 d$ |
| 无限大平板间      | 距离   | 任一壁面      | $1.8H$  |
| 半球          | 半径   | 底面圆心      | ? ? ?   |

# 气体的发射率

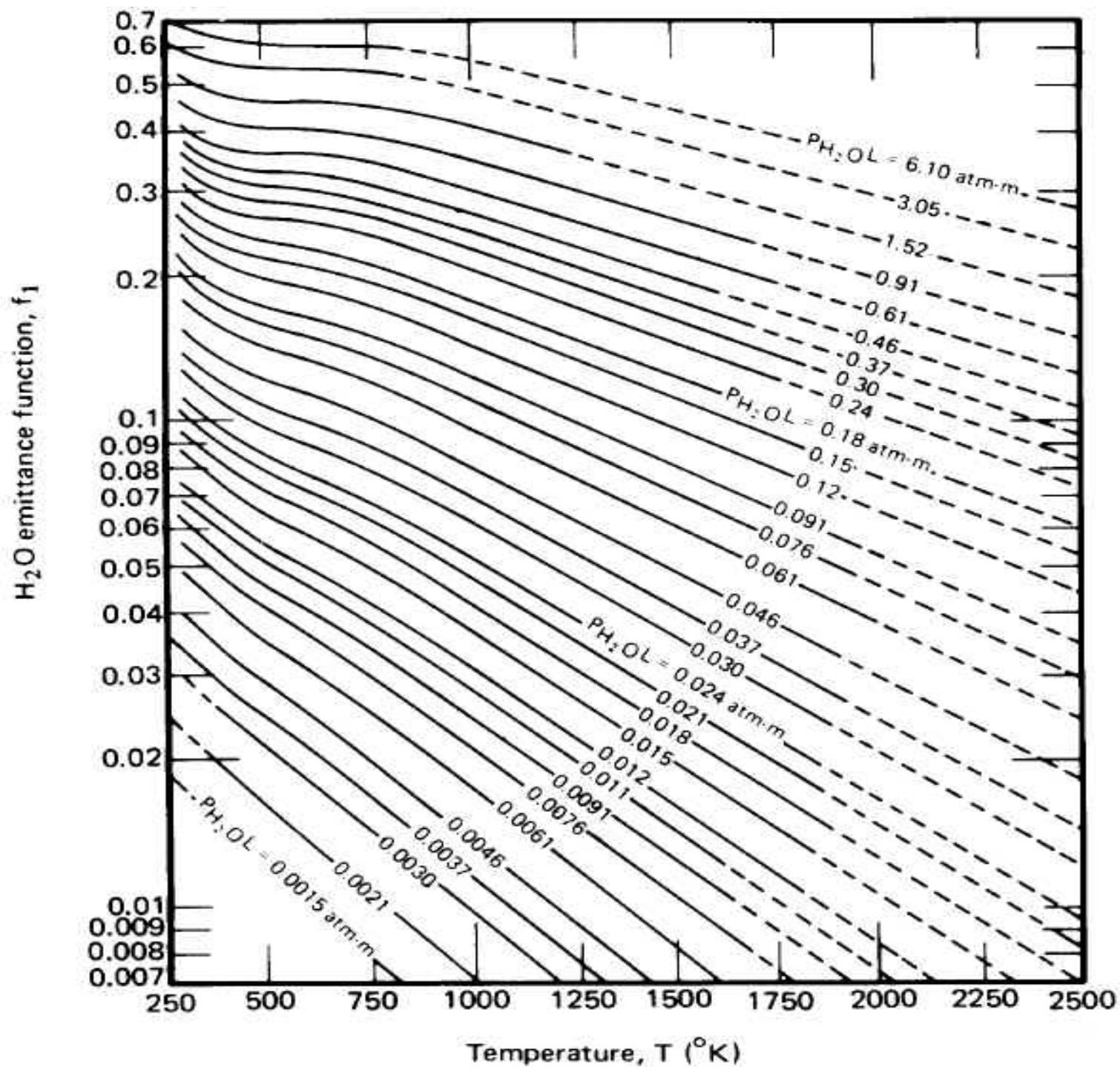
$$e_g = \frac{E_g}{E_b} = \frac{\int_0^\infty E_l dl}{E_b} = \frac{\int_0^\infty e_{l,s} E_{bl} dl}{ST_g^4}$$

$$e_g = f(P_g, T_g, s)$$

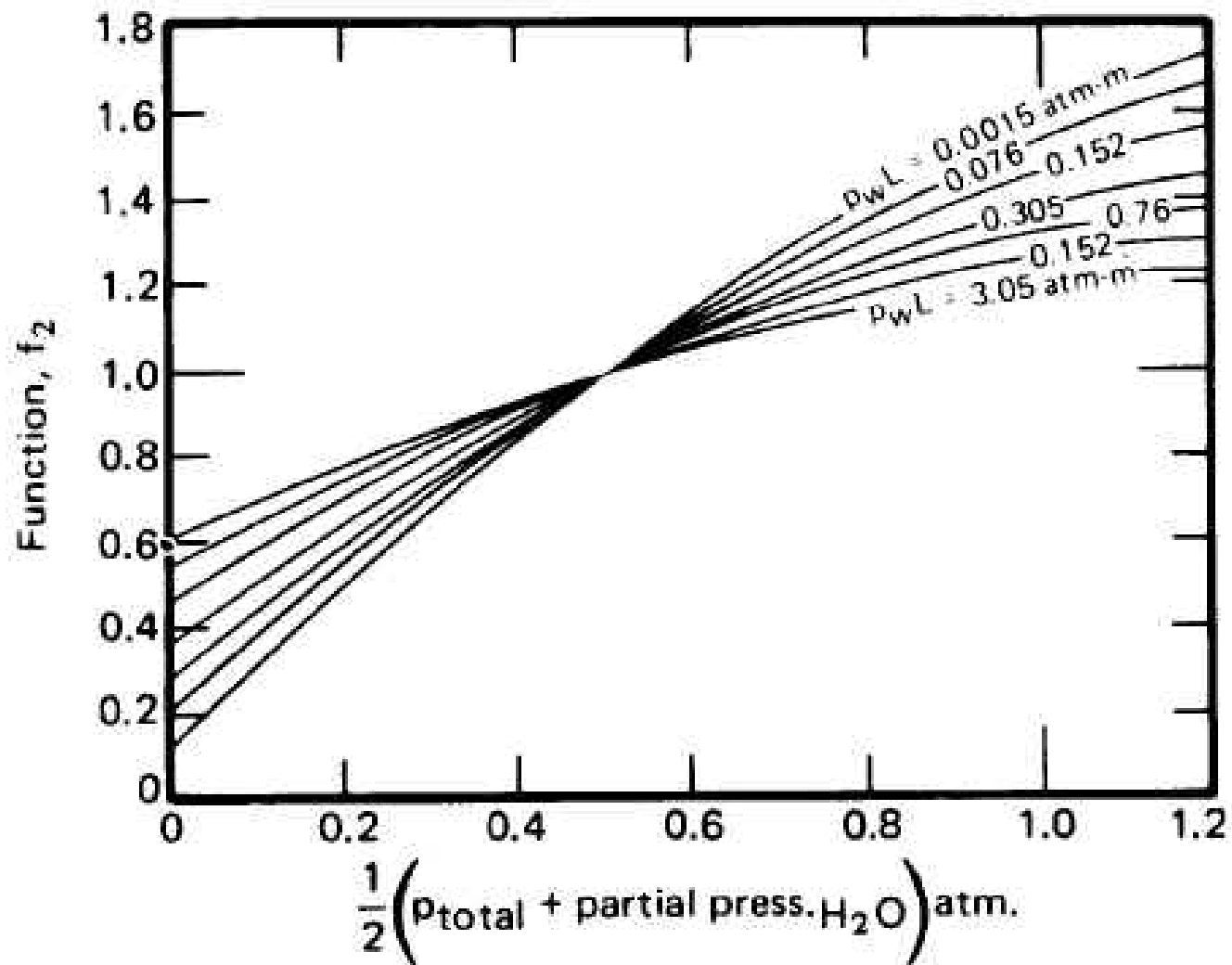
$$e_{H_2O} = C_{H_2O} e_{H_2O}^* \quad e_{CO_2} = C_{CO_2} e_{CO_2}^*$$

$$e_g = C_{H_2O} e_{H_2O}^* + C_{CO_2} e_{CO_2}^* - \Delta e (\text{图8-43})$$

# 水蒸汽的发射率

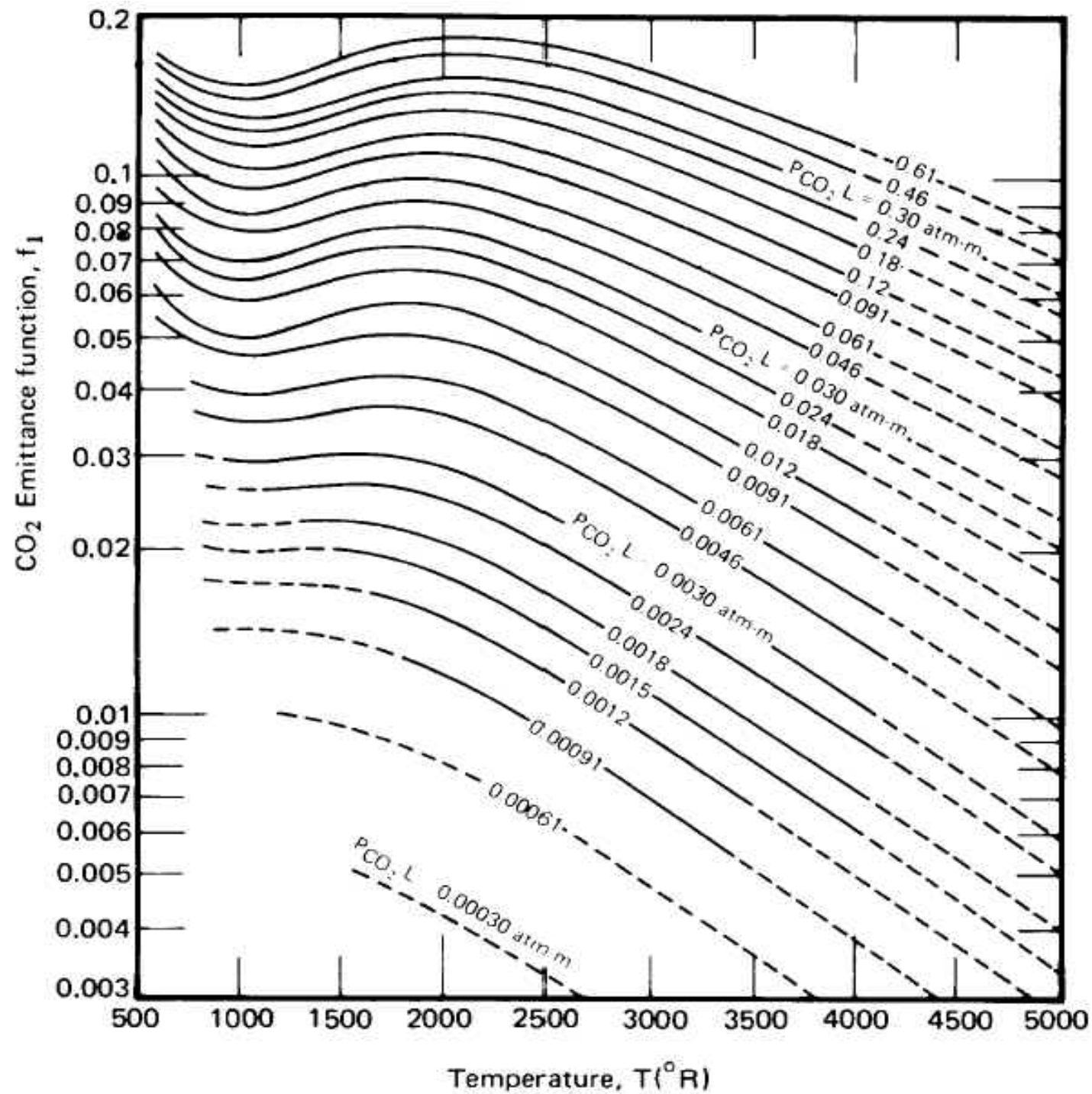


# 水蒸汽发射率的修正系数

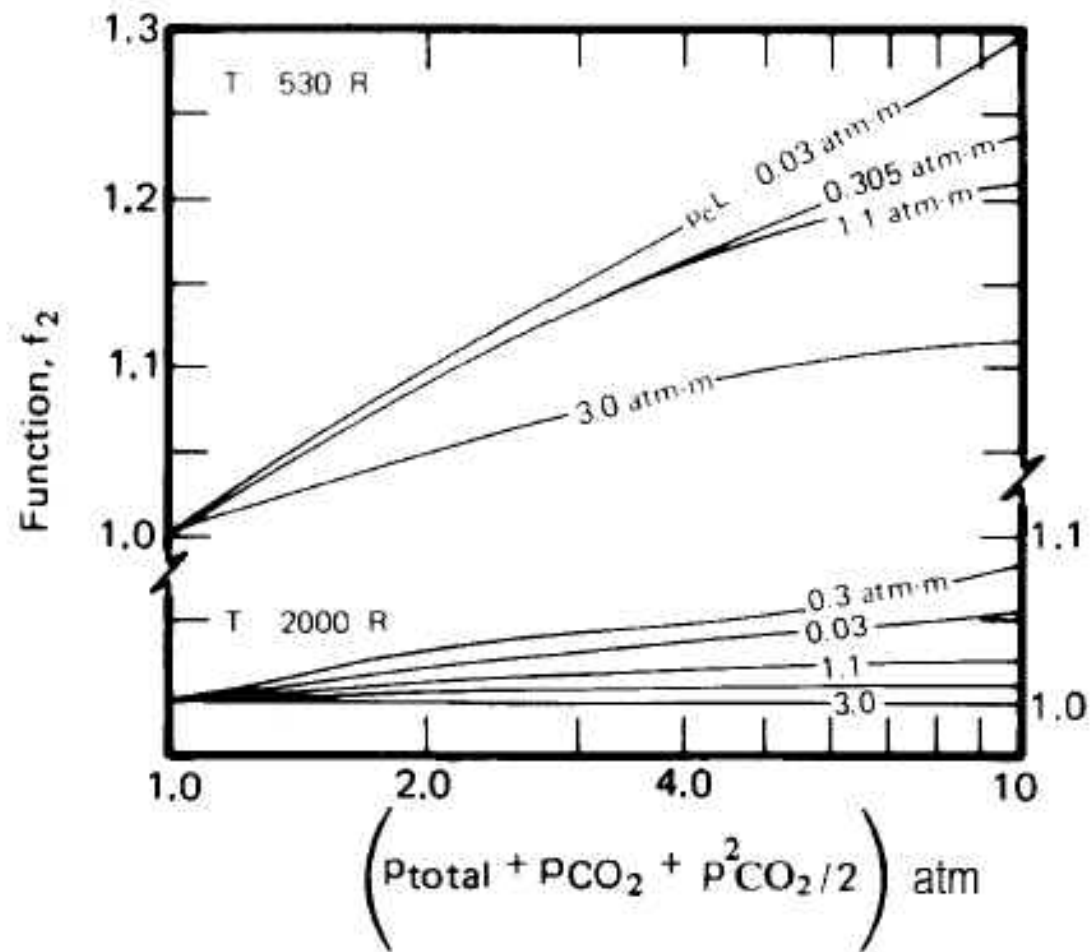




# 二氧化碳的发射率



## 二氧化碳发射率的修正系数



# 气体的吸收比

$$a_g = e_g \text{ ???}$$

# 气体的吸收比

$$a_g = C_{H_2O} a_{H_2O}^* + C_{CO_2} a_{CO_2}^* - \Delta a$$

$$a_{H_2O}^* = \left[ e_{H_2O}^* \right]_{T_w, p_{H_2O}^s} \left( \frac{T_g}{T_w} \right)^{0.45}$$

$$a_{CO_2}^* = \left[ e_{CO_2}^* \right]_{T_w, p_{CO_2}^s} \left( \frac{T_g}{T_w} \right)^{0.45}$$

$$\Delta a = [\Delta e]_{T_w}$$

# 气体与包壁间的辐射传热

气体的包壁，如锅炉的炉膛，一般是可以按照灰体来处理的，它的发射率一般大于0.8。

由于包壁包围着气体，所以气体对包壁的角度系数等于1，包壁对气体的角度系数也等于1。

由于包壁的反射，气体辐射会有一部分被包壁反射回来。

如果暂时忽略反射的情况，并且只考虑气体的一次吸收，气体与包壁之间的辐射传热量为

$$\Phi = a_w e_g E_{bg} A - a_g e_w E_{bw} A = e_w A [e_g E_{bg} - a_g E_{bw}]$$

## 气体与包壁传热的计算

$$\Phi = \frac{1 + e_w}{2} A \left[ e_g E_{bg} - a_g E_{bw} \right]$$

# 表面传热系数

在对流和辐射同时存在时，需要同时考虑两种方式传热的共同结果。

$$\begin{aligned} q &= q_c + q_r = h_c(t_w - t_f) + h_r(t_w - t_f) \\ &= (h_c + h_r)(t_w - t_f) = h(t_w - t_f) \end{aligned}$$

$$h_r = \frac{\Phi_r}{(t_w - t_f)A}$$

# 辐射传热的重要性

- 辐射传热总是存在的；
- 即使在常温条件下，在很多实际问题中，辐射传热的影响仍然是不可忽略的；
- 在很多保温工程应用中，都会采取适当的削弱辐射传热的措施；
- 辐射传热在实际应用中往往具有特殊的效果，例如局部供暖。
- 对于很多实际问题，辐射传热是唯一的途径。