

第三节 热辐射

热射线的传播过程称为热辐射。当投射在物体上的总能量 Q ，其中一部分 Q_A 被吸收， Q_R 被反射，另一部分 Q_D 被透射。如图2.21。

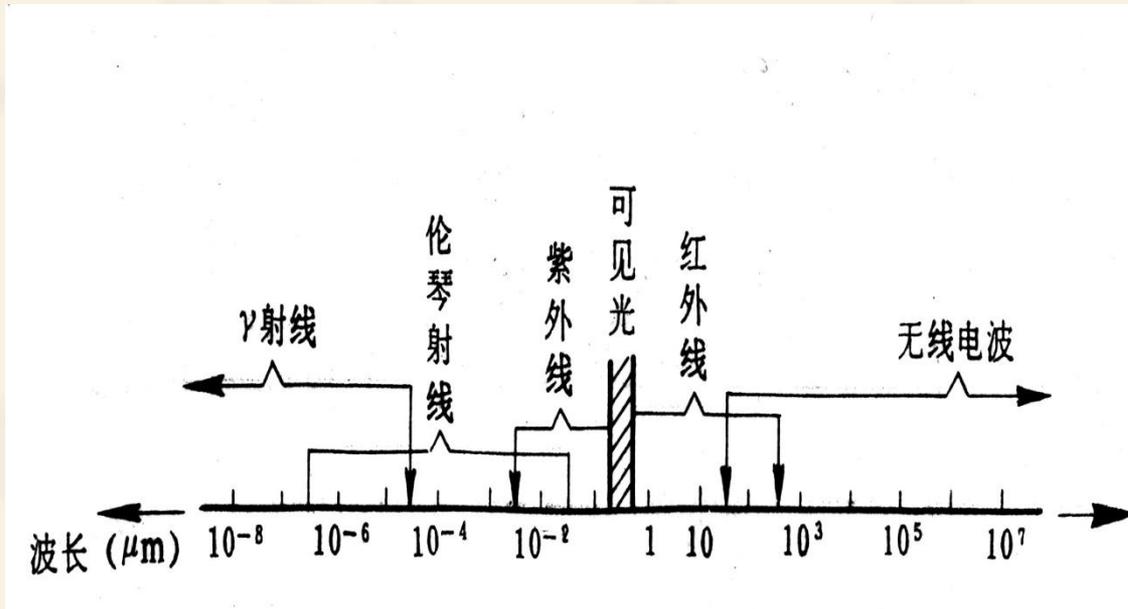


图2.20 电磁波谱

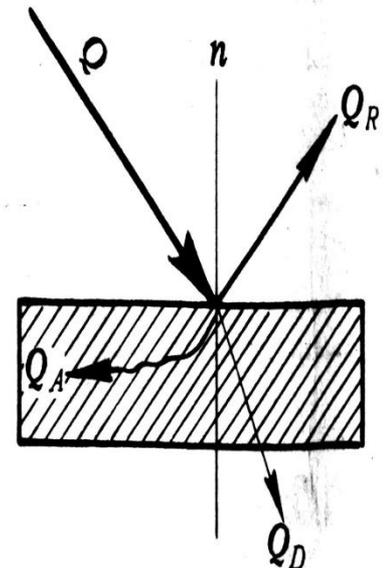


图2.21 热射线被吸收、反射和透过示意图

可见光通常指波长范围为:0.39– 0.780 μm 的电磁波

根据图2.21:

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q;$$

$$Q_A/Q + Q_R/Q + Q_D/Q = 1$$

A (吸收率 = Q_A/Q) + R (反射率 = Q_R/Q) + D (透过率 = Q_D/Q) = 1;

$A = 1$, 全部吸收, 称为黑体;

$R = 1$, 完全反射, 称为白体;

$D = 1$, 透热体。

黑体对于研究热辐射具有很重要的意义，它可以用人工的方法制造出来。如图2.22，射线进入空腔后，经过多次反射和吸收，可以认为全部吸收。

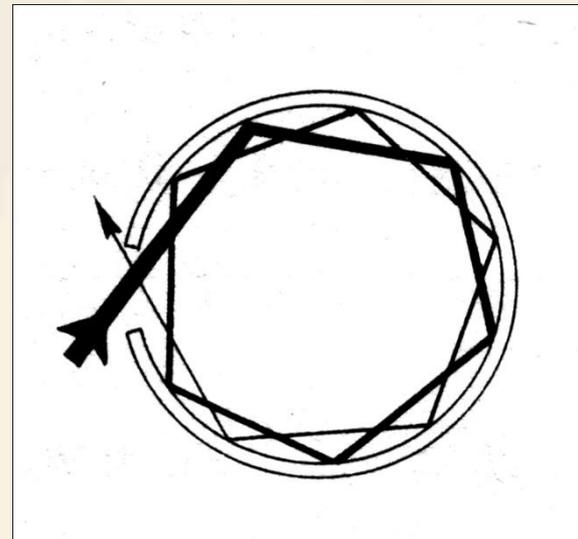


图2.22 热工黑体模型

一、热辐射基本定律

辐射力：单位时间、单位面积的物体向半球空间辐射的波长 λ 从 $0\sim\infty$ 范围内的总能量。用 E 表示，单位为 W/m^2 。

单色辐射力：物体辐射的能量按波长分布规律是不均匀，在 λ 到 $\lambda\pm d\lambda$ 这一波段范围内，辐射能量为 dE ，

$$E_{\lambda} = dE / d\lambda = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \Delta E / \Delta\lambda$$

$\Delta E / \Delta\lambda$ 表示单位波长范围内的辐射力，其极限称为**单色辐射力**。以 E_{λ} ，单位： $W/m^2 \mu m$ 。

1. 普朗克定律

单色辐射力表达式:

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} / (e^{C_2/\lambda T} - 1)$$

λ : 波长, m;

T : 热力学温度, K;

C_1 : 第一常数, $= 3.743 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$;

C_2 : 第二常数, $= 1.44 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

当 $\lambda=0$, $E_{0\lambda}=0$, 波长增加时 $E_{0\lambda}$ 随之增大, 当波长增大到一定值时, $E_{0\lambda}$ 达到最大值, 之后随波长增加又逐渐减小, 故存在一个极值 $E_{0\lambda}$ 。

对应单色辐射力最大值的波长 λ_{\max} 与温度 T 之

间由维恩定律确定: $\lambda_{\max} T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m K}$;

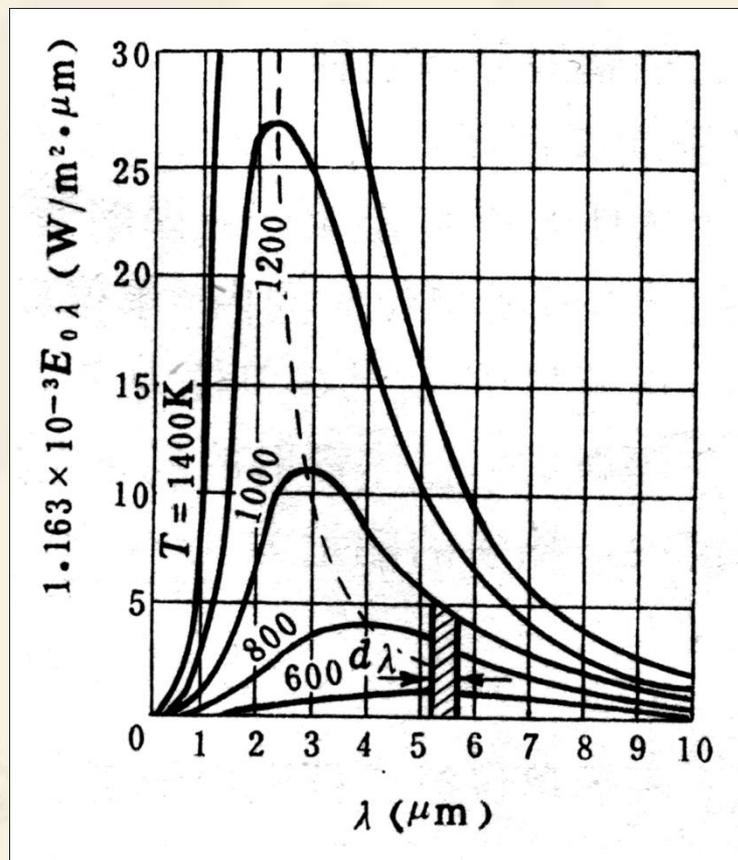


图2.23 普朗克定律所揭示的关系

灰体的辐射:

实际物体单色辐射力随波长和温度所发生的变化, 可以根据该物体辐射光谱的实验测定。如果实验测得的辐射光谱是连续的, 而且曲线 $E_{\lambda}=f(\lambda)$ 又和同温度下黑体相当的曲线相似, 则称该物体为理想灰体。如图2.24, 理想灰体与黑体在同一温度下单色辐射力关系:

$$E_{\lambda 1} / E_{0 \lambda 1} = E_{\lambda 2} / E_{0 \lambda 2} = \dots \dots E_{\lambda n} / E_{0 \lambda n} = \varepsilon_{\lambda} = \text{常数}$$

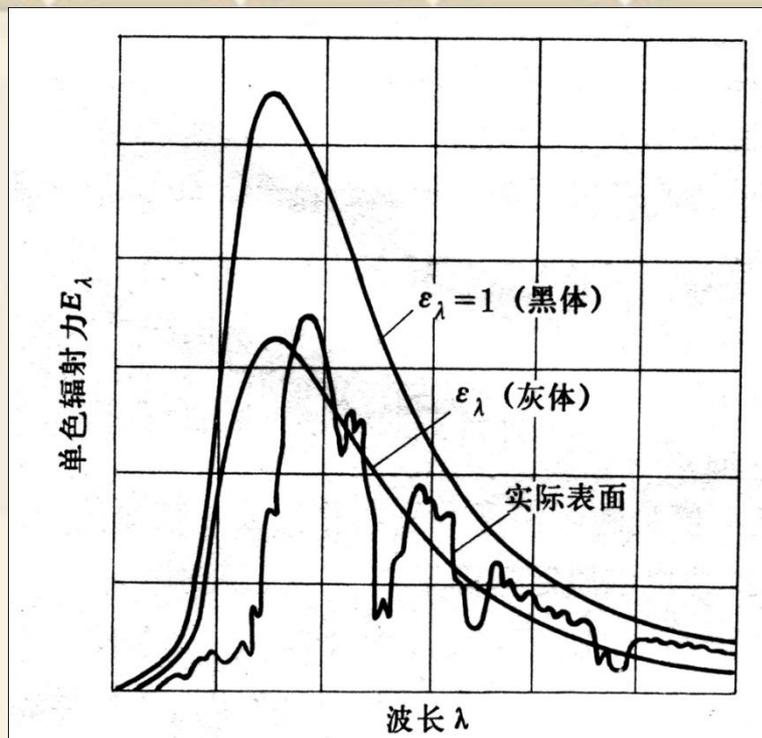


图2.24 在同一温度下, 黑体、灰体和实际表面单色辐射力的比较

2. 斯梯芬-波尔兹曼定律

确定黑体辐射力 E_0 随温度变化的关系。

首先， $d\lambda$ 波长间隔的辐射力： $dE_0 = E_{0\lambda} d\lambda$

将 $E_{0\lambda}$ 在波长从0到 ∞ 的范围内对 λ 进行积分，就可以得出**黑体的辐射力**：

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{0\lambda} d\lambda$$

将普朗克定律 $E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} / (e^{C_2/\lambda T} - 1)$,

代入上式并积分： $E_0 = \sigma_0 T^4 \text{ W/m}^2$

σ_0 ：黑体的辐射常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$

或者， $E_0 = C_0 (T/100)^4 \text{ W/m}^2$

C_0 ：黑体辐射系数，其值为 $5.67 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$

对于理想灰体，辐射力E经过计算可得出：

$$E = \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} E_{0\lambda} d\lambda = \varepsilon_{\lambda} E_0 = \varepsilon C_0 (T/100)^4 = C (T/100)^4$$

C：灰体辐射系数，其值在0~5.67之间，W/（m² K⁴）；

灰体的黑度ε可以表示为： $\varepsilon = E/E_0$

ε即为理想灰体辐射力和同温度下黑体辐射力的比值。

3. 基尔霍夫定律

任意物体辐射力E与吸收率A之间的关系

设有两个相互平行的表面，物体表面得到的能量为 $A_1 E_0$ ，失去的能量为 E_1 ，则有

$$E_1/A_1 = E_2/A_2 = \dots E_n/A_n = E_0$$

基尔霍夫定律为：任何物体的辐射能力与吸收率之间的比值都相等，恒等于同温度下黑体的辐射力，并且只和温度有关。

将 $E = \varepsilon E_0$ 代入上式，得到

$$\varepsilon_1/A_1 = \varepsilon_2/A_2 = \dots \varepsilon_n/A_n = 1;$$

即 $\varepsilon = A$ ，称为基尔霍夫恒等式，它可表述为：在热平衡条件下，任何物体对黑体辐射的吸收率等于同温度下该物体的黑度。

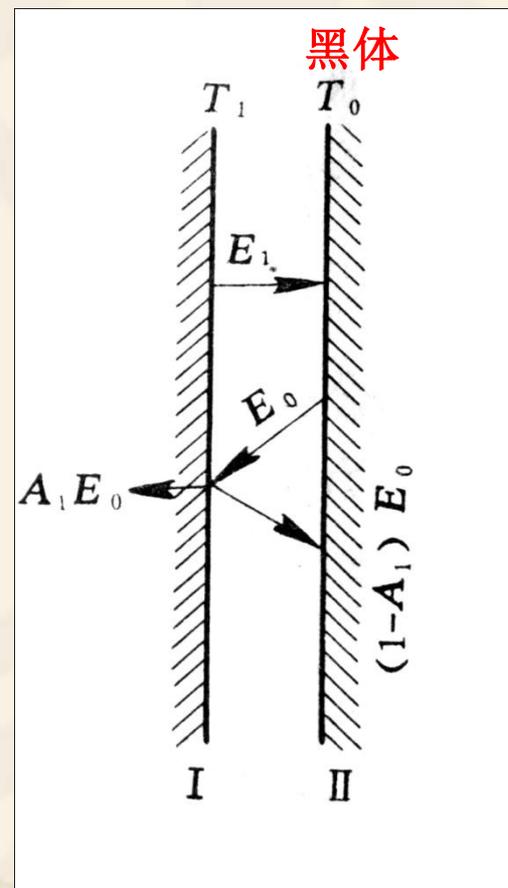


图2.25 基尔霍夫定律的推演

对于灰体，其**单色黑度** ϵ_λ 不随波长发生变化，且等于全**辐射的黑度** ϵ 。

由图2.26可知，灰体的**单色吸收率** A_λ 与波长无关，灰体的吸收率没有选择性，只取决于表面状态和温度。

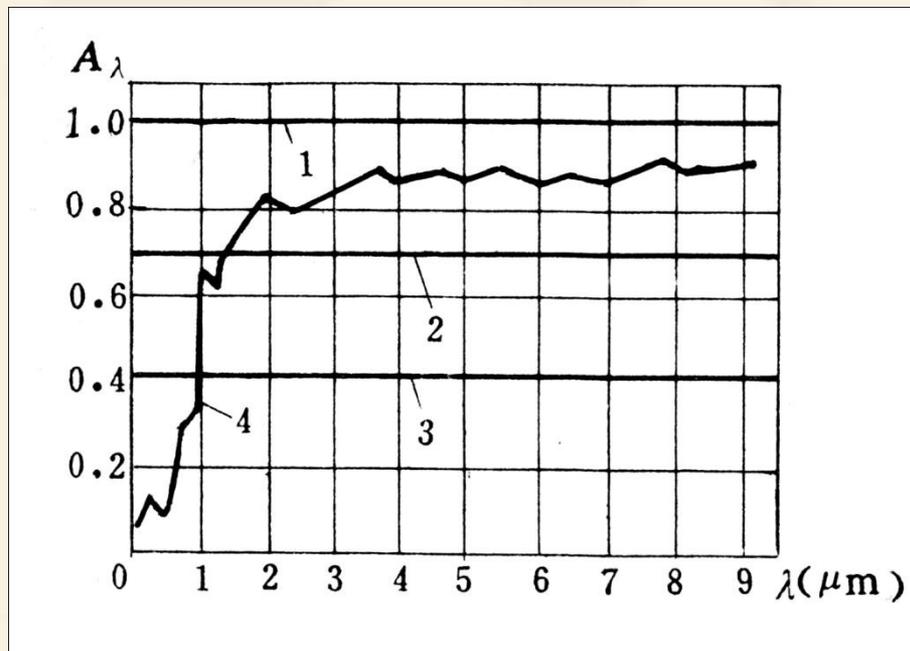


图2.26 黑体、灰体和实际物体的 A_λ 与 λ 关系
1.黑体；2. $A=0.7$ 灰体；3. $A=0.4$ 灰体；4.实际物体

4. 兰贝特定律

黑体沿各方向的辐射变化服从兰贝特定律。

微元表面 dF_1 沿各个方向所辐射的能量是不同的，随**该方向**和**微元表面法线**间所构成的夹角 Φ 而变化，如图2.27。在法线方向($\Phi=0$)上，**辐射能量最大**，到 $\Phi=\pi/2$ ，**减少到零**，它们之间的关系可表示为：

$$E_{\Phi} = E_n \cdot \cos\Phi, \text{ W}/(\text{sr}\cdot\text{m}^2)$$

此式即为兰贝特定律，也称为辐射的余弦定律。

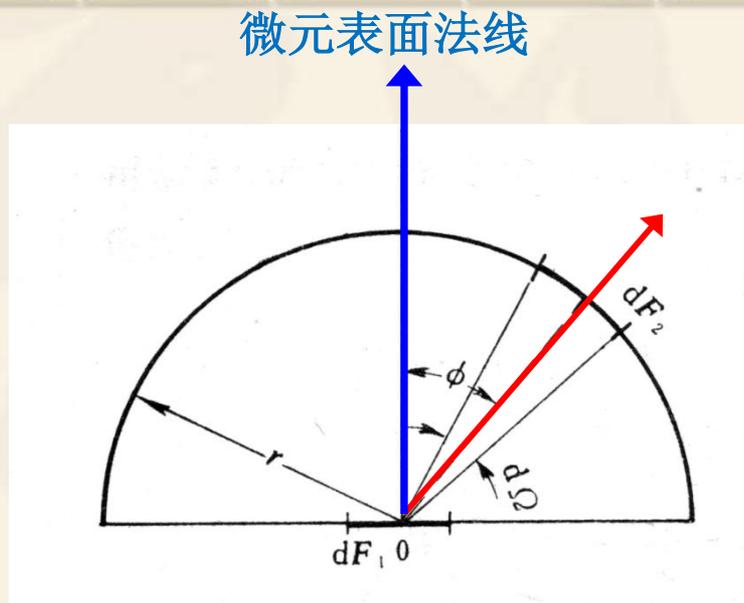


图2.27 兰贝特定律的推演

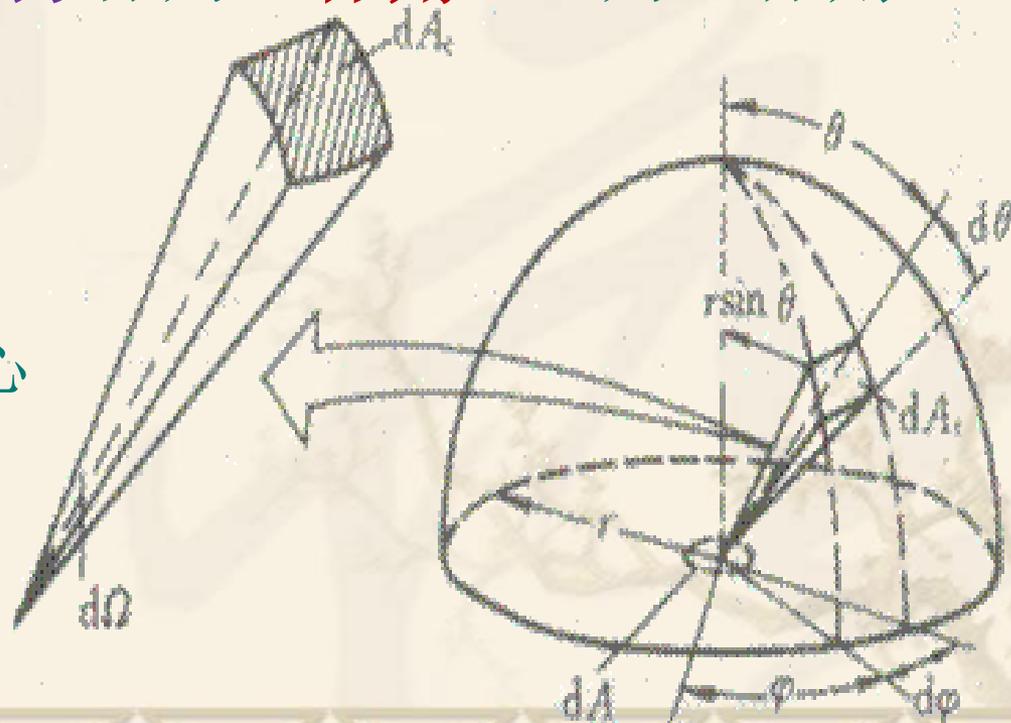
4. 兰贝特定律

黑体沿各方向的辐射变化服从兰贝特定律。

立体角

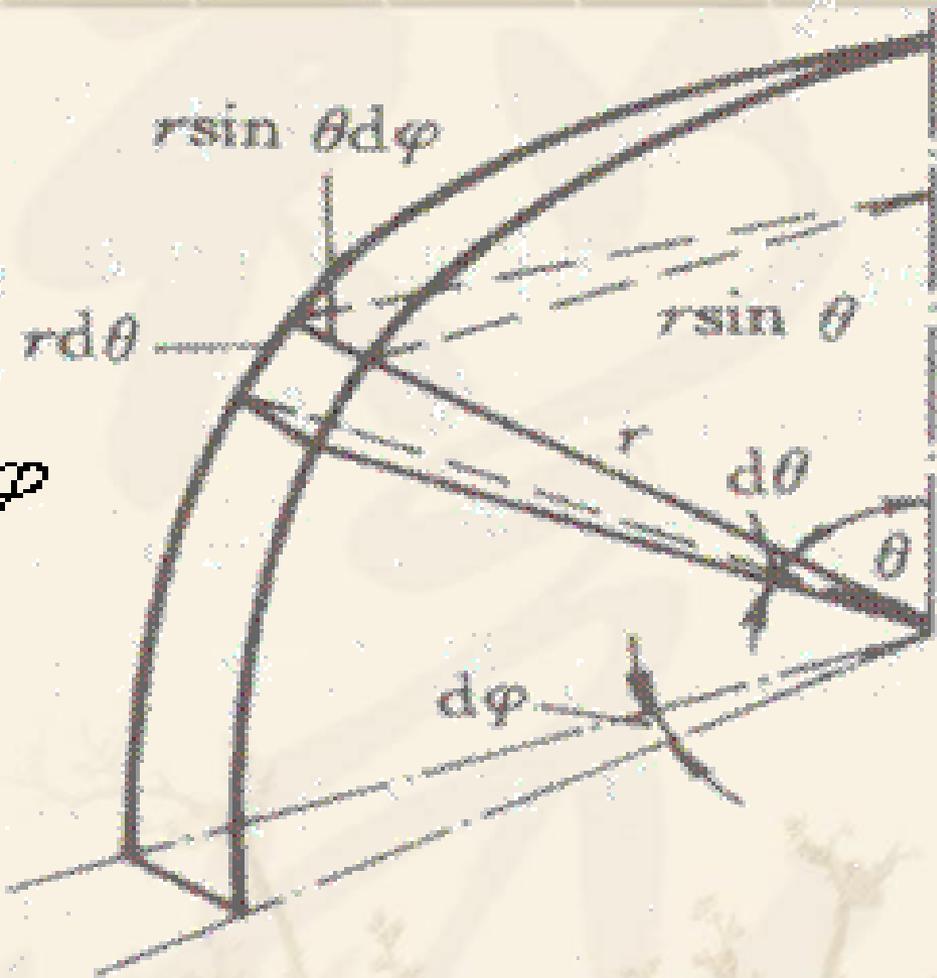
定义：立体角为一空间角，即被立体角所切割的球面面积除以球半径的平方称为立体角，sr为立体角的单位，称为球面度。

对半球空间，半球面对球心的立体角为 $2\pi(\text{sr})$



$$dA_c = r d\theta \cdot r \sin \theta d\varphi$$

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



$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \int \mathbf{E}_\theta d\Omega = \int \mathbf{E}_n \cos \theta d\Omega = \mathbf{E}_n \int_{\Phi=0}^{\Phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\Phi d\theta \\ &= \mathbf{E}_n [1/2 \cdot \sin^2 \theta]_{\theta=0}^{\pi/2} \cdot 2\pi = \pi \cdot \mathbf{E}_n \end{aligned}$$

对于微单元表面在所有方向的总辐射力**E**，应按立体角以整个半球面($\Omega=2\pi$)范围内加以积分得：

$$E = \int_0^{2\pi} E_{\theta} d\Omega = \int_0^{2\pi} E_n \cos\theta d\Omega$$

将立体角 $d\Omega = dF_2/r^2 = \sin\theta d\theta d\Phi$ 带入上式，得：

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{2\pi} E_{\theta} d\Omega = \int_0^{2\pi} E_n \cos\theta d\Omega = E_n \int_{\Phi=0}^{\Phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi/2} \sin\theta \cos\theta d\Phi d\theta \\ &= E_n [1/2 \sin^2\theta]_0^{\pi/2} \cdot 2\pi = \pi E_n \end{aligned}$$

故：

$$E_n = E/\pi = 1/\pi \cdot \varepsilon C_0 (T/100)^4 \quad \text{W/ (sr m}^2\text{)}$$

E_n 指微元表面沿 θ 方向每单位表面积在单位时间内、单位立体角所辐射的能量。

二、物体之间的辐射换热计算

物体间的辐射换热量，与物体形状，位置极有关系。

物体间的辐射换热量的计算：

1. 平行平面间的辐射换热

首先研究最简单情况下的辐射换热。设有两个无限大平面（黑体）， $T_1 > T_2$ ，两面的辐射能力为 E_{01} 和 E_{02} ，辐射换热的最终结果是I面净给II面热流密度。

$$q_{12} = E_{01} - E_{02} = C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad \text{W/m}^2$$

如果两个平面都是灰体，
情况则较为复杂。

灰体I的**有效辐射** J_1 为灰体
每单位表面的**本身辐射**和
反射辐射之和：

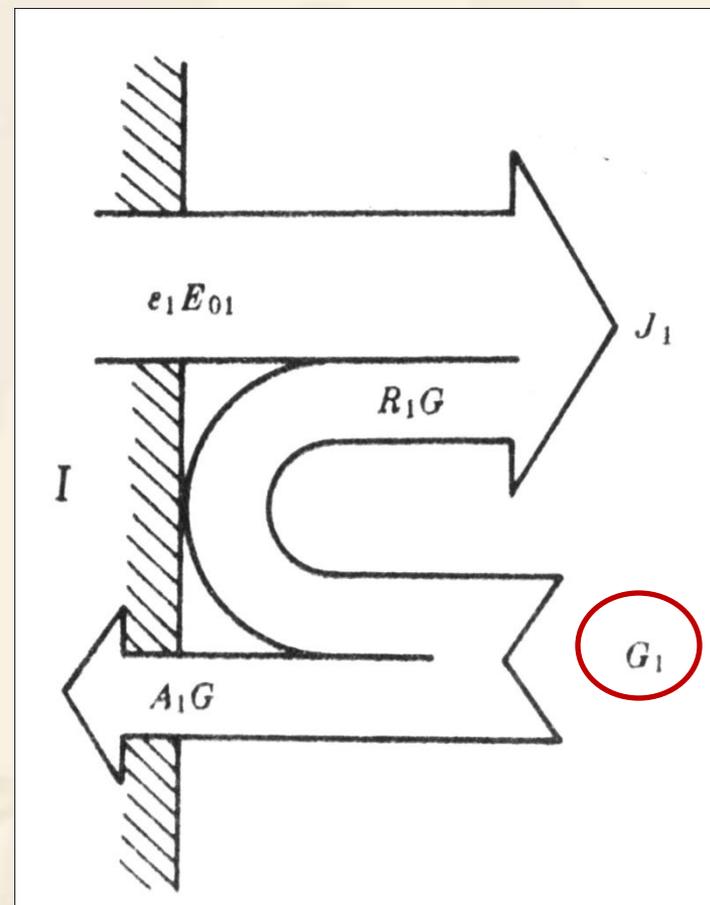


图2.28 有效辐射示意图

$$J_1 = \epsilon_1 E_{01} + R_1 G = \epsilon_1 E_{01} + (1 - A_1) G$$

平面I和II彼此平行放置，平面的尺寸比它们的距离要大的多，以致于一个表面所辐射的能量全部落在了另一个平面上。

I面的有效辐射包括：

本身辐射 $E_1(1+R_1R_2+R_1^2R_2^2+\dots)$ 及

全部反射辐射 $E_2R_1(1+R_1R_2+R_1^2R_2^2+\dots)$

总和

I面有效辐射应该为两个无穷级数的能量之和，可表示为：

$$J_1 = E_1 / (1 - R_1R_2) + E_2R_1 / (1 - R_1R_2)$$

$$= (E_1 + R_1E_2) / (1 - R_1R_2)$$

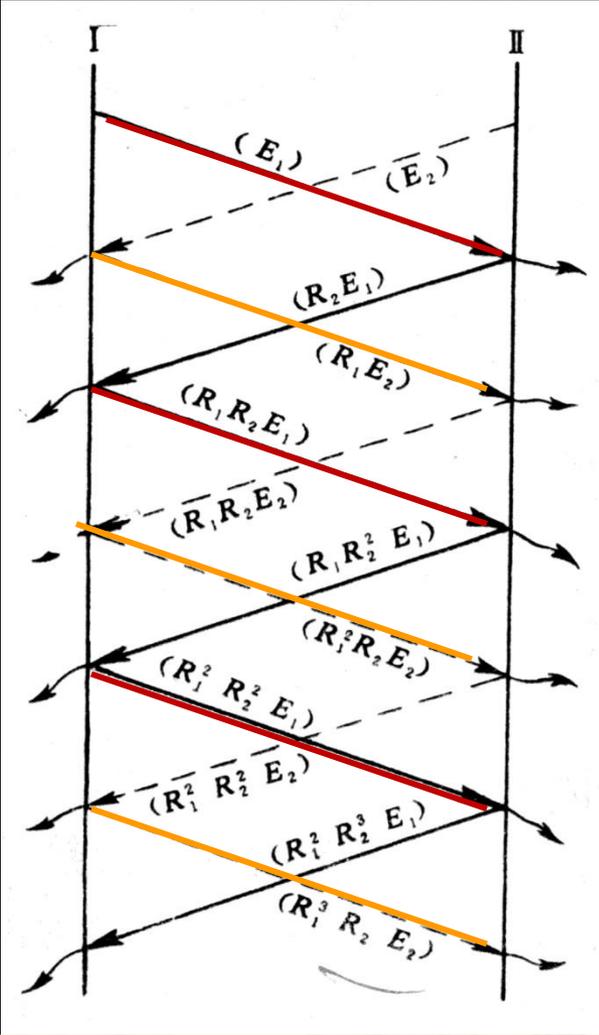


图2.29 两个互相平行的灰体表面间辐射换热

同理，II面的有效辐射为：

$$J_2 = (E_2 + R_2 E_1) / (1 - R_1 R_2)$$

对于固体： $A+R=1$ ，以及对黑体辐射的吸收率 $A=\varepsilon$ ，
则：

$$\begin{aligned} q_{12} &= J_1 - J_2 = (E_{01} - E_{02}) / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) \\ &= C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) \\ &= \varepsilon_s C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \end{aligned}$$

式中 $\varepsilon_s = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}$ ，为辐射换热系统的系统黑度；

T_1 、 T_2 ：I、II两平面的温度，K。

2. 一灰体包围另一灰体表面之间的辐射热交换

如图2.30，灰体1的外表面与包壳2的内表面的温度、黑度以及面积分别为 T_1 、 T_2 ， ε_1 、 ε_2 ， F_1 、 F_2 。两表面间的辐射换热流量为 Φ_{12} ，则

$$\Phi_{12} = J_1 F_1 \varphi_{12} - J_2 F_2 \varphi_{21} \quad \text{W}$$

φ_{12} 、 φ_{21} 角系数

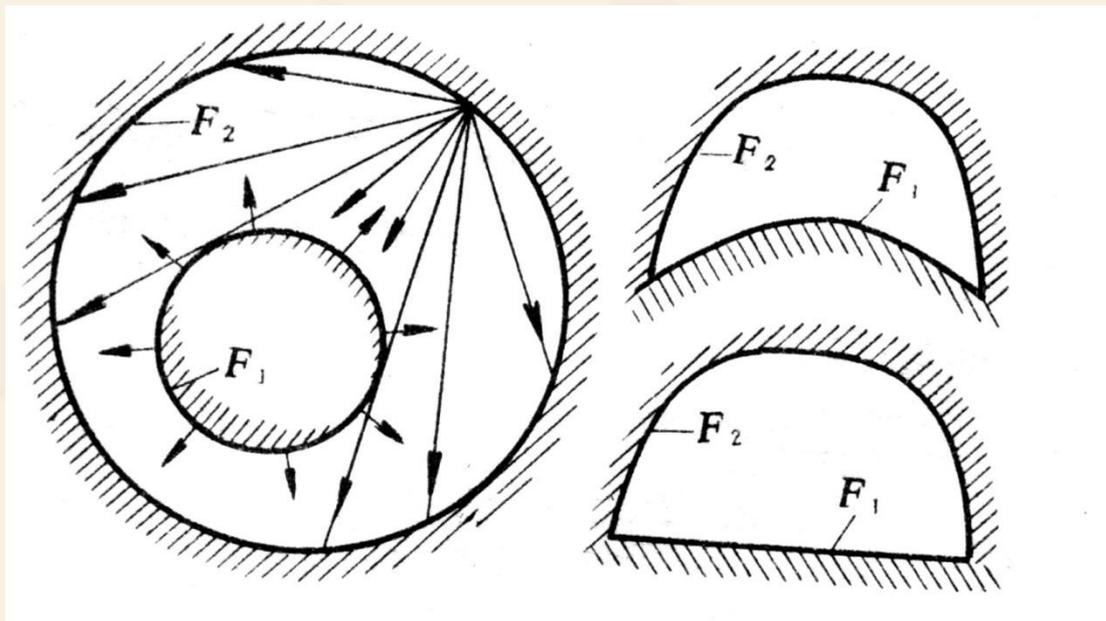


图2.30 一灰体被另一灰体包围时的辐射热交换

表面1为凸面（或平面）且完全被表面2所包围，因此有效辐射 J_1 可以完全到达表面2，角系数 $\varphi_{12} = 1$ ；表面2的有效辐射 J_2 只有部分投射到表面1上，其余部分又投射到本身表面上， $F_2\varphi_{21} = F_1\varphi_{12}$ 。

根据其得 $\varphi_{21} = (F_1/F_2) \cdot \varphi_{12} = F_1/F_2$

$$\begin{aligned}\Phi_{12} &= J_1 F_1 \varphi_{12} - J_2 F_2 \varphi_{21} \\ &= [E_{01} - (1/\varepsilon_1 - 1)q_{12}]F_1 - \varphi_{21}[E_{02} - (1/\varepsilon_2 - 1)q_{21}]F_2 \\ &= [E_{01}F_1 - (1/\varepsilon_1 - 1)\Phi_{12}] - \varphi_{21}[E_{02}F_2 - (1/\varepsilon_2 - 1)\Phi_{21}]\end{aligned}$$

因为研究的是封闭体系，因此1面上的热收入等于2面上的热支出 $\Phi_{12} = -\Phi_{21}$ ，故：

$$\begin{aligned}\Phi_{12} &= (E_{01} - E_{02}) F_1 \cdot [1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1)\varphi_{21}]^{-1} \\ &= \varepsilon_s C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F_1 \quad \text{W}\end{aligned}$$

式中， $\varepsilon_s = [1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1)\varphi_{21}]^{-1}$ 表示该换热场的系统黑度。

例10 钢管长度3m，直径为70mm，管壁温度T₁为500K，将其放置于截面为0.3×0.3 m²的砖槽内，槽内壁温度T₂为300K，求该钢管的辐射热损失。

解：设钢管壁面为1面，砖壁面为2面。

根据公式，钢管与砖壁之间的辐射换热量为

$$\Phi_{12} = \varepsilon_s C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F_1$$

由于砖槽包围钢管

$$\varphi_{12} = 1,$$

$$\varphi_{21} = F_1/F_2 = (0.07 \times \pi \times 3) / (0.3 \times 3 \times 4),$$

$$\varepsilon_s = 1/[1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1) \cdot (F_1/F_2)]$$

查附录6得黑度 $\varepsilon_1 = 0.8$ ，砖壁黑度 $\varepsilon_2 = 0.93$ ，

得 $\varepsilon_s = 0.79$ ，得到 $\Phi_{12} = 1608 \text{ W}$

3、有遮热板存在时的辐射热交换

假设有两个平行平面，中间有一遮热板，如下示意图。并假定它们具有相同的黑度，计算其热流密度。



解：没遮热板，热流密度为：

$$q_{12} = \varepsilon_s C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]$$

第一个表面传到遮热板的热流密度：

$$q_{1c} = \varepsilon_s' C_0 [(T_1/100)^4 - (T_c/100)^4]$$

遮热板传到第二个表面的热流密度：

$$q_{c2} = \varepsilon_s'' C_0 [(T_c/100)^4 - (T_2/100)^4]$$

如果 $\varepsilon_s = \varepsilon_s' = \varepsilon_s''$ ，则 $q_{1c} = q_{c2} = 0.5q_{12}$

若有 n 块遮热板， $q_n = q/(n+1)$

4、通过小孔口的辐射热损失

小孔的散热损失:

$$\Phi_{12} = C_0[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \beta F;$$

T_1, T_2 : 炉膛内外温度, K; F : 为小孔截面积, m^2 ;

β : 门孔系数。

若小孔用金属板盖住, 辐射换热损失:

$$\Phi = \epsilon_m C_0[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F \beta / (1 + \beta),$$

ϵ_m 为金属板的黑度。

三、气体辐射

1. 气体辐射的特点

不同的气体所具有的辐射和吸收辐射的能力大小不同，在窑炉中燃料燃烧产生的**多原子气体**，如二氧化碳（ CO_2 ）、水（ H_2O ）等具有相当大的辐射和吸收辐射能的能力。气体辐射具有如下特点：

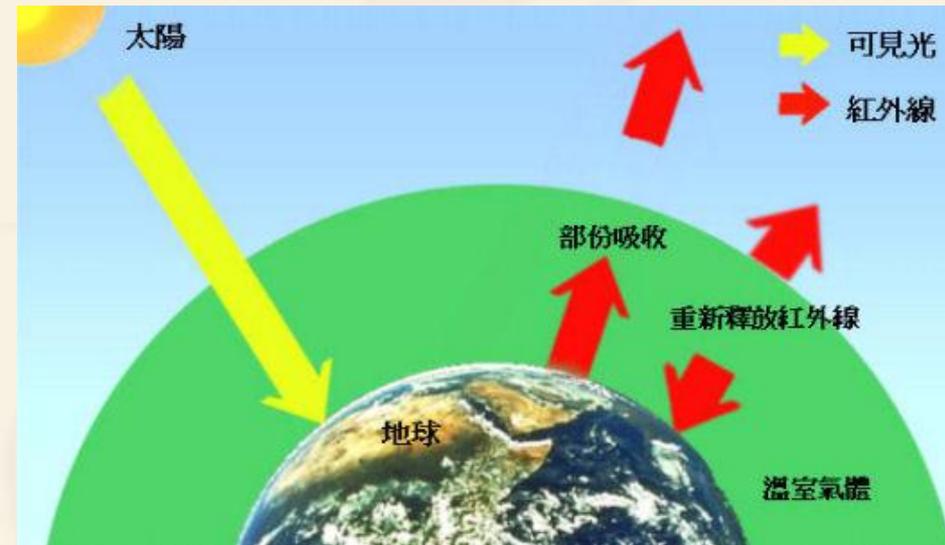
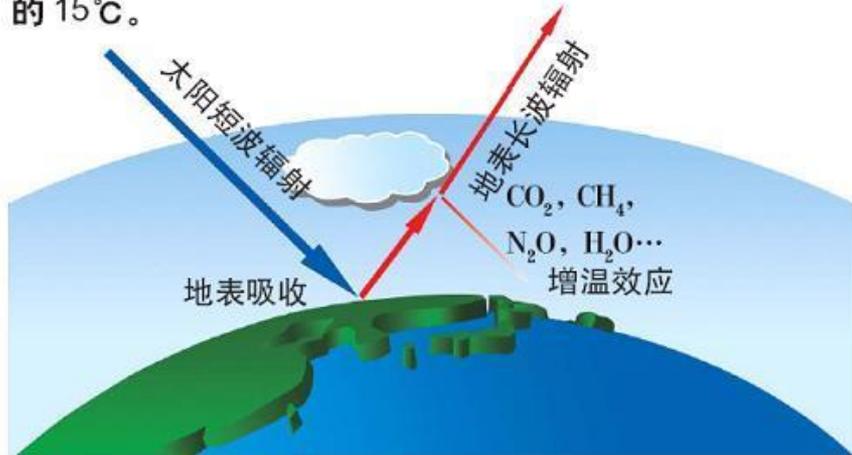
- (1) 气体辐射只能辐射和吸收某一波长间隔 $\Delta\lambda$ 中的辐射能,即**气体的辐射和吸收具有选择性**。
- (2) 气体的辐射和吸收在整个容器中进行。当热射线穿过气体层，沿途被气体分子吸收而减弱，**辐射减弱程度取决于沿途所遇到的分子数**。气体的单色吸收率 A_λ 是气体温度 T 、气体层厚度 s 与气体分压 p 的**乘积**的函数，即 $A_\lambda=f(T、ps)$ 。

温室效应(英文: Greenhouse effect)

大气能使太阳短波辐射到达地面，但地表向外放出的长波热辐射线却被大气吸收，这样就使地表与低层大气温度增高，因其作用类似于栽培农作物的温室，故名温室效应。

温室气体能吸收地表长波辐射，使大气变暖，与“温室”作用相似。

若无“温室效应”，地球表面平均温度是 -18°C ，而非现在的 15°C 。



2. 气体辐射力E

二氧化碳和水蒸气的辐射力E分别为

$$E_{\text{CO}_2} = 4.07(p s)^{1/3}(T/100)^{3.5} \quad \text{W/m}^2$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 4.07(p^{0.8} s^{0.6})(T/100)^3 \quad \text{W/m}^2$$

但实际计算仍以四次方定律为基础，但必须对气体黑度 ϵ_g 加以校正。为了计算气体黑度，必须知道气体温度、气体分压（ p_{CO_2} , $p_{\text{H}_2\text{O}}$ ）和射线行程s。

$$s = 0.9 (4V)/F, \quad V: \text{容器体积, m}^3; \quad F: \text{表面积, m}^2.$$

若已知各气体的p、s、T可查出其黑度。

混合气体的黑度 $\epsilon_g = \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \epsilon_{\text{CO}_2} - \Delta\epsilon$ ，一般 $\Delta\epsilon$ 不超过2~4%，工程计算可忽略。

3. 气体与固体壁面间的辐射热交换

气体被固体壁面所包围，气体和固体壁面温度分别为 T_g 和 T_w ，假定固体壁面为黑体，热流密度

$$q_{g-w} = E_g - A_g E_w = \varepsilon_g C_0 (T_g/100)^4 - A_g C_0 (T_w/100)^4$$

式中 ε_g (气体黑度) $=\varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O}$;

$$A_g(\text{气体吸收率}) = A_{CO_2} + A_{H_2O};$$

此时二氧化碳和水蒸气的吸收率 A_{CO_2} 、 A_{H_2O} 可按如下公式近似计算 $A_{CO_2} = \varepsilon_{CO_2}' (T_g/T_w)^{0.65}$;

$$A_{H_2O} = \varepsilon_{H_2O}' (T_g/T_w)^{0.45}$$

ε_{CO_2}' 和 ε_{H_2O}' 的数值，应按壁面温度 T_w 和 $p s(T_w/T_g)$ 作为参数由手册查出。

当包围气体壁面是黑度为 $\varepsilon_w (= 0.8 \sim 1.0)$ 的灰体时，

$\varepsilon_w' \cong 0.5(1 + \varepsilon_w)$ ，最后热流密度公式为：

$$q_{g-w} = \varepsilon_w' C_0 [\varepsilon_g (T_g/100)^4 - A_g (T_w/100)^4] \quad \text{W/m}^2$$

例11 烟气中含8%的二氧化碳和10%的水蒸气，流过一圆形管道 $d=0.6\text{m}$ ，烟气温度在进口处 $t_g'=1000^\circ\text{C}$ ，在出口处 $t_g''=800^\circ\text{C}$ ，管道内表面温度在进口处 $t_w'=625^\circ\text{C}$ ，出口处 $t_w''=575^\circ\text{C}$ ，管道表面黑度 $\varepsilon_w=0.8$ 。求气体辐射给每平方米管道内表面的热流密度为多少？（混合气体压力为 105Pa ）。

解：根据气体和包围它的固体壁面之间的辐射热交换的计算公式

$$q_{g-w} = \varepsilon_w' C_0 [\varepsilon_g (T_g/100)^4 - A_g (T_w/100)^4] \quad \text{W/m}^2$$

依次计算有关数值， $\varepsilon_w' = (1 + \varepsilon_w) / 2 = (0.8 + 1) / 2 = 0.9$

气体的平均温度 $t_g = (1000 + 800) / 2 = 900^\circ\text{C}$

查出有效平均射线长度：

$$s = 0.9d = 0.9 \times 0.6 = 0.54\text{m};$$

$$P_{\text{CO}_2} = 0.08\text{bar}, P_{\text{CO}_2}s = 0.08 \times 0.54 = 0.043 (\times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{m})$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.10\text{bar}, P_{\text{H}_2\text{O}}s = 0.10 \times 0.54 = 0.054 (\times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{m})$$

查得 $\epsilon_{\text{CO}_2} = 0.08$, $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.07$, $C_{\text{H}_2\text{O}} = 1.08$

气体的黑度 $\epsilon_g = \epsilon_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}}\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.08 + 1.08 \times 0.07 = 0.156$

气体吸收率的计算:

根据公式 $A_{\text{CO}_2} = \epsilon_{\text{CO}_2}' (T_g/T_w)^{0.65}$

$A_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}' (T_g/T_w)^{0.45}$

壁面平均温度 $t_w = (625+575)/2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$

$P_{\text{CO}_2}s(T_w/T_g) = 0.08 \times 0.54 \times (873/1173) = 0.032$

$P_{\text{H}_2\text{O}}s(T_w/T_g) = 0.1 \times 0.54 \times (873/1173) = 0.04$

根据 t_w 及 $ps(T_w/T_g)$ 查得: $\epsilon_{\text{CO}_2}' = 0.080$, $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}' = 0.085$,

$C_{\text{H}_2\text{O}} \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}' = 1.08 \times 0.085 = 0.092$

$A_{\text{CO}_2} = 0.08 \times (1173/873)^{0.65} = 0.097$;

$A_{\text{H}_2\text{O}} = 0.092 \times (1173/873)^{0.45} = 0.105$

$A_g = A_{\text{CO}_2} + A_{\text{H}_2\text{O}} = 0.097 + 0.105 = 0.202$

故: $q_{g-w} = \epsilon_w' C_0 [\epsilon_g (T_g/100)^4 - A_g (T_w/100)^4]$

$= 0.9 \times 5.67 \times [0.156 \times (1173/100)^4 - 0.202 \times (873/100)^4] = 9084 \text{ W/m}^2$