



第八章：热辐射

7.1.1 热辐射基本概念

1. 热辐射的本质

热辐射是物体由于热的原因向外发射电磁波的过程。任何物体的温度只要高于“绝对零度”，便会不停地向外发射电磁波。在电磁波谱上，热射线所涵盖的波长范围大约为 0.1~100 μm。
辐射是电磁波传播能量的现象
把热能转变成辐射能

2. 热辐射和辐射换热的特点

(1) 热辐射的特点。

① 热辐射无需借助任何介质，可在真空中进行，事实上，热辐射在真空中传播时效果更佳。因此，热辐射可以穿过真空区和低温区，且其传播速度很快。

② 只要物体的温度高于“绝对零度”，物体便具有不停地向外辐射能量的本领，所以物体间的辐射换热实际上是一种热动平衡。

(2) 辐射换热与导热、对流换热的不同点。

① 与导热和对流换热不同，辐射换热无需任何介质，所以不仅要研究相距很近的物体之间的辐射换热，有时还需要研究相距很远的物体（如太阳和地球）之间的辐射换热。

② 在辐射换热过程中，不仅存在着能量的转移，还存在能量形式的转换，即发射时由热能先转化为辐射能，而被吸收时再由辐射能转化为热能。

③ 黑体的辐射能力与其热力学温度的四次方（即 T^4 ）成正比，因此，辐射换热在高温时显得更重要。

④ 物体的发射和吸收特性不仅与自身温度及表面状况有关，而且还随发射的波长和方向而异，因此，辐射换热远比导热和对流换热复杂。

电磁波都以光速 C 在空间中传播 $C = \lambda f$ 在其中 $C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 介电常数 $\epsilon = C_0 / n < C_0$
 $\lambda = 100 \mu\text{m}$ 折射率 $(n > 1)$

电磁辐射包含了多种形式，而我们所感兴趣的，即工业上有实际意义的热辐射区域一般为 $0.8~100 \mu\text{m}$ ，且大部分能量位于红外线区段的 $0.76~20 \mu\text{m}$ 范围内，而在可见光区段，即波长为 $0.38~0.76 \mu\text{m}$ 的区段，热辐射能量的比重不大。

$$Q = Q_a + Q_p + Q_t$$

(二) 物体表面对电磁波的作用

当热辐射投射到物体表面上时，一般会发生三种现象，即吸收、反射和透射。外界单位时间内投射到物体表面上的全波长范围内的辐射能称为投入辐射能 Q ，吸收辐射能为 Q_a ，反射辐射能为 Q_p ，透射辐射能为 Q_t 。按能量守恒定律有 $Q_a + Q_p + Q_t = Q$ 。吸收比为 $a = \frac{Q_a}{Q}$ ，反射比为 $p = \frac{Q_p}{Q}$ ，透射比为 $\tau = \frac{Q_t}{Q}$ ，则有 $a + p + \tau = 1$ 。

全吸收 对于大多数的固体和液体 $a = 1$ ；对于不含颗粒的气体 $a = 0$ ， $a + \tau = 1$ ；对于黑体， $a = 1$ ；对于镜体或白体， $p = 1$ ；对于透明体， $\tau = 1$ 。

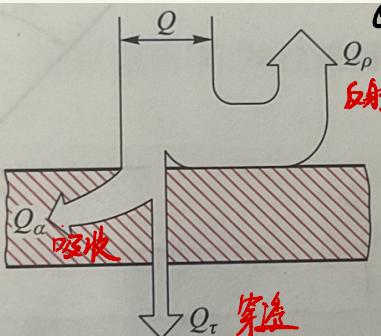


图 8-2 物体对热辐射的吸收、反射和透射

同理，如果投入辐射是某一波长 λ 的辐射能 Q_λ ，则有光谱吸收比 $a_\lambda = \frac{Q_a}{Q_\lambda}$ ，光谱反射比 $p_\lambda = \frac{Q_p}{Q_\lambda}$ ，光谱透射比 $\tau_\lambda = \frac{Q_t}{Q_\lambda}$ 。
固液的吸收/反射都在表面进行，对气体的辐射、吸收在整个空间中进行

(三) 黑体模型

黑体是指能吸收投入到其面上的所有热辐射能的物体，是一种科学假想的物体，现实生活
中是不存在的。但却可以人工制造出近似的人工黑体。而灰体是指光谱辐射特性不随波长而
变化的假想物体，即 $a_\lambda, p_\lambda, \tau_\lambda$ 分别等于常数，即 $a = a_\lambda, p = p_\lambda, \tau = \tau_\lambda$ 。

7.1.2 黑体辐射基本定律

1. 黑体的定义

我们把吸收比 $\alpha = 1$ 的物体称为黑体。具有黑体性质的表面能全部吸收来自半球空间所有方向及全部波长 ($\lambda = 0 \sim \infty \mu\text{m}$) 范围内的能量。研究黑体的辐射性质必须从方向及波长两个方面入手。

2. 斯忒藩-玻耳兹曼定律

此定律是针对黑体发射的能量对半球空间所有方向及全部波长范围而言的。它描述的是黑体辐射力随温度的变化规律。

辐射力 E 。

辐射力是指单位时间、单位面积的辐射表面向半球空间所有方向所发射的全部波长的总能量，其单位为 W/m^2 。

(2) 斯忒藩-玻耳兹曼定律。(四次方律) $E_b = \sigma T^4$

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{T_{\text{abs}}}\right)^4 \quad (7-1)$$



式中 E_b 表示黑体的辐射力， T 表示物体的热力学温度， σ 为黑体辐射常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\cdot\text{K}^4)$ 。

$$C_0 \text{ 黑体辐射系数 } 5.67 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

3. 普朗克定律

此定律描述的是黑体辐射能量沿波长分布的规律，即 E_{ba} 随 λ 变化的规律。

(1) 光谱辐射力 E_{ba} 。

细到到来一波

$$dE \rightarrow dA \rightarrow \theta \rightarrow d\lambda \quad E$$

光谱辐射力是指单位时间内物体的单位表面积向半球空间所有方向所发射的在波长 λ 附近的单位波长的能量，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

(2) 普朗克定律给出了黑体光谱辐射力 E_{ba} 与波长和温度的依变关系。

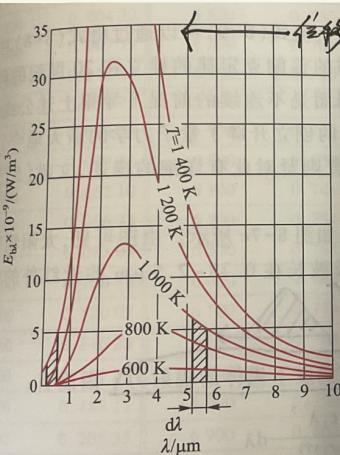
$$\text{即 } E_{\text{ba}} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2 / (\lambda T)} - 1} \quad E_b = \int E_{\text{ba}} \cdot d\lambda \quad (7-2)$$

$$\text{其中 } c_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

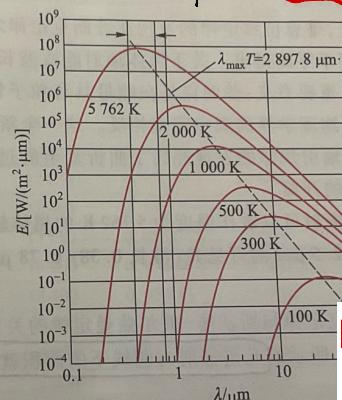
$$c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

黑体光谱辐射力随波长入射增加↑ 峰值↑ 后↓ 峰值随温度升高而左移(短波长)

$$\boxed{\text{维恩位移定律}} \quad \lambda_{\text{max}} \cdot T = 2.8976 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



(a) 算术坐标



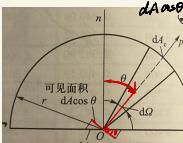
(b) 对数坐标

兰贝特定律：黑体辐射按空间方向的分布

$$\frac{dI(\theta)}{dA \cos \theta} = I \cos \theta \quad dA \text{ 为黑体辐射向球心方向的微元立体角 } d\Omega \text{ 中辐射出的强度与 } d\Omega \text{ 的乘积}$$

$$\frac{dI(\theta)}{dA \cos \theta d\Omega} = I \quad (\text{方向辐射强度，与半径 } r \text{ 无关})$$

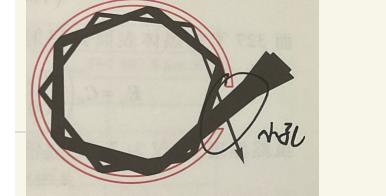
$dA \cos \theta$ 为黑体方向的 dA 面积 (只取面積)



(2) 辐射强度：单位时间內对单位投影面积(可见面积)所发出的包含在单位立体角内全波段辐射能。辐射强度说明物体表面在空间某个方向上发射辐射的能力。辐射强度的定义式如下：

$$I = L(\theta, \varphi) = \frac{dI}{dA \cos \theta}$$

L(θ, φ) 表示 dA 在 (θ, φ) 方向的辐射强度，或称为定向辐射强度，单位是 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr})$ 。辐射强度的大小不仅取决于物体种类、表面性质，还与方向有关。对于各向同性的物体表面，辐射强度与角 φ 无关， $L(\theta, \varphi) = I(\theta)$ 。



选用吸收比以大的制作生腔，并开一个孔，使腔恒温并均匀

孔越小，吸收比越高

孔越小，吸收比越高

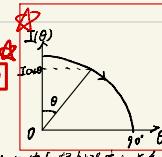
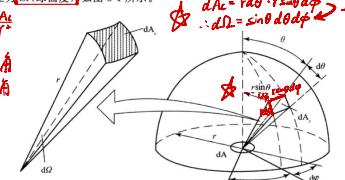
光谱辐射力曲线下的面积 → 黑体的辐射力

$$E_{\text{ba}(\lambda)} = \int_{\lambda}^{\infty} E_{\text{ba}} \cdot d\lambda \quad F_{\text{ba}(\lambda)} = \frac{E_{\text{ba}(\lambda)}}{E_b} = \frac{\int_{\lambda}^{\infty} E_{\text{ba}} \cdot d\lambda}{\int_{\lambda}^{\infty} E_b \cdot d\lambda}$$

→ 以 λ 为变量的函数 = $f(\lambda)$

$$E_{\text{ba}(\lambda)} = E_{\text{ba}(\lambda)} - E_{\text{ba}(\lambda)} = F_{\text{ba}(\lambda)} \cdot E_b = [F_{\text{ba}(\lambda)} - F_{\text{ba}(\lambda)}] E_b$$

立体角



$I(\theta) = L(\theta, \varphi)$ 辐射力与定向辐射强度的关系

三、固体和液体的辐射特性

(一) 实际物体的辐射力

实际物体的辐射力 E 总是小于同温度下黑体的辐射力 E_b , 两者的比值称为实际物体的发射率(黑度), 记为 ϵ :

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad E = \epsilon E_b$$

实际物体的辐射力可以表示为:

$$E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T^4 = \epsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

实际物体的光谱辐射力小于同温下的黑体同一波长下的光谱辐射力, 两者之比为实际物体的光谱发射率:

发射率 ϵ → 光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$

$$\epsilon(\lambda) = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$$

物理性

ϵ 仅取决于物体自身, 无关环境

发射率与光谱发射率之间的关系为

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

$$\epsilon E_b = \int_0^\infty \epsilon(\lambda) E_{b\lambda} d\lambda = E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda$$

对于灰体 $\epsilon = \epsilon(\lambda)$

$$\epsilon(\lambda) = \text{常数}, \epsilon = \frac{\epsilon(\lambda) \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} = \epsilon(\lambda)$$

$\star \epsilon(\lambda)$

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

(二) 实际物体的定向辐射强度

实际物体的定向辐射强度在不同方向上有所变化。为了说明实际物体辐射的方向特性, 即在半球空间各方向上的分布规律, 引进定向发射率(定向黑度)的概念:

$$\epsilon(\theta) = \frac{E(\theta)}{E_b(\theta)} = \frac{L(\theta)}{L_b}$$

$$\frac{I(\theta)}{I_b}$$

漫射体

$\epsilon(\theta) = \text{const} < 1$
满足统计特 $I(\theta)$ 不变

式中, $L(\theta)$ ——与辐射面法向成 θ 角的方向上的定向辐射强度,

I_b ——同温度下黑体的定向辐射强度。 $I_b = \text{const}$

黑体的定向发射率恒为 1; 定向辐射强度随 θ 的分布满足兰贝特定律的物体, 其定向发射率为小于 1 的常数, 这样的物体称为漫射体。实际物体不是漫射体, 一般不严格遵守兰贝特定律, 定向发射率是方向角 θ 的函数。对绝大多数实际工程材料来说, 可以近似地认为半球总发射率等于法向发射率, 即 $\epsilon \approx \epsilon_n$ 。大部分工程材料定向发射率可近似取为常数, 可以将它们当做漫射体看待。

物体表面的发射率取决于物质种类、表面温度和表面状况。这说明发射率只与发射辐射的物体本身有关, 而不涉及外界条件。

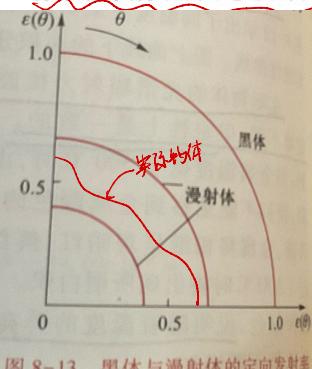


图 8-13 黑体与漫射体的定向发射率

对气体, $\begin{cases} \text{单原子气体和分子结构对称的双原子气体: } \text{空气, H}_2, \text{O}_2, \text{N}_2 \text{ 等, 无辐射能力} \\ \text{三原子分子, 多原子, 不对称双原子气体 (CO) 有辐射能力} \end{cases}$

透明体
 $\alpha = \rho = 0$
 $T = 1$

四、实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

(一) 实际物体的吸收比

$$\alpha = \alpha(\lambda)$$

对黑体, $\alpha = \epsilon = 1$

对实际物体, $\epsilon < 1, \alpha < 1$

实际物体的光谱吸收比也与黑体、灰体不同, 是波长的函数。辐射特性随波长变化的性质称为辐射特性对波长的选择性。

实际物体的吸收比不仅取决于物体本身材料的种类、温度及表面性质, 还和投入辐射的波长分布有关, 因此和投入辐射能的发射体温度有关。单位时间内从外界投入物体的单位面积上的辐射能

光谱吸收比与波长无关的物体称为灰体。此时, 不管投入辐射的分布如何, 吸收比 α 都是同一个常数。工业上的辐射传热计算一般都按灰体来处理, 只要在所研究的波长范围内光谱吸收比基本上与波长无关, 则灰体的假定即可成立。对与漫射表面, 光谱吸收比与光谱发射率是相等的, 因此对于漫射的灰体, 在一定温度下, 光谱发射比也与波长无关, 是一个常数。

物体的光谱吸收比随波长变化 → 选择性

玻璃 对太阳光吸收率大 对红外辐射吸收率小 → 温室效应

实际物体吸收比要根据两方面性质

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda) T_1 \cdot \epsilon(\lambda, T_1) E_m(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \epsilon(\lambda, T_2) E_m(\lambda) d\lambda} = f(T_1, T_2, 表面性质, 波长范围)$$

$$\alpha = \alpha(\lambda) = \text{const}$$

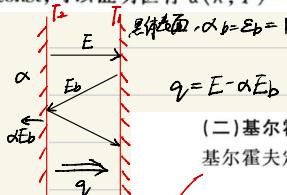
3. 灰体

(1) 灰体定义: 光谱吸收比与波长无关的物体称为灰体, 即 $\alpha(\lambda)$ 为常数。

(2) 只要在所研究的波长范围内 $\alpha(\lambda)$ 基本上保持常数, 即可当作灰体处理。工业上经常遇到的热辐射, 温度在 $300 \sim 2000$ K 之间, 此时绝大部分能量位于波长为 $0.76 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间的红外区域, 而在此范围内, 将大多数工程材料当作灰体处理所带来的误差可以忽略。读者可结合教材 7-22 题来理解这一思想。

4. 实际物体发射与吸收之间的关系——基尔霍夫定律

当一实际物体在同温度下的黑体处于热平衡时, 可以证明 $\epsilon(T) = \alpha(T)$ 。而对漫射的灰体, 即该表面在方向上的辐射强度符合兰贝特定律, 光谱吸收比在波长方面满足 $\alpha(\lambda) = \text{const}$, 可以证明恒有 $\alpha(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T)$ 。



(二) 基尔霍夫 (G. R. Kirchhoff) 定律

基尔霍夫定律揭示了物体吸收辐射能的能力与发射辐射能的能力之间的关系:

$$\alpha = \frac{E}{E_b} = \epsilon$$

上式表明任意物体的辐射力与相同温度下的黑体辐射力的比值都等于其吸收比。或者说在热平衡时, 任意物体对同温度黑体投入辐射的吸收比等于同温下该物体的发射率。可以得出两个结论:

(1) 对于同样温度下的物体, 辐射力越大的物体其吸收比也越大, 即发射辐射能的能力越强的物体其吸收辐射能的能力也越强。

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

对于漫射、灰体表面, 辐射特性与波长无关, $\alpha(T) = \epsilon(T)$

表述 ① 在热平衡下, 任何物体的自身辐射和对来自黑体辐射的吸收比的比值, 既等于同温黑体的辐射力 ($E/\alpha - E_b$)

② 与黑体处于辐射热平衡时, 任意物体对黑体投入辐射的吸收比 = 同温度下物的发射率 ($\alpha = \epsilon = E - q$)

漫射灰体: 对于灰体, 吸收比与无关波长 $\alpha(T) = \text{const}$, 发射率是物理参数无关环境

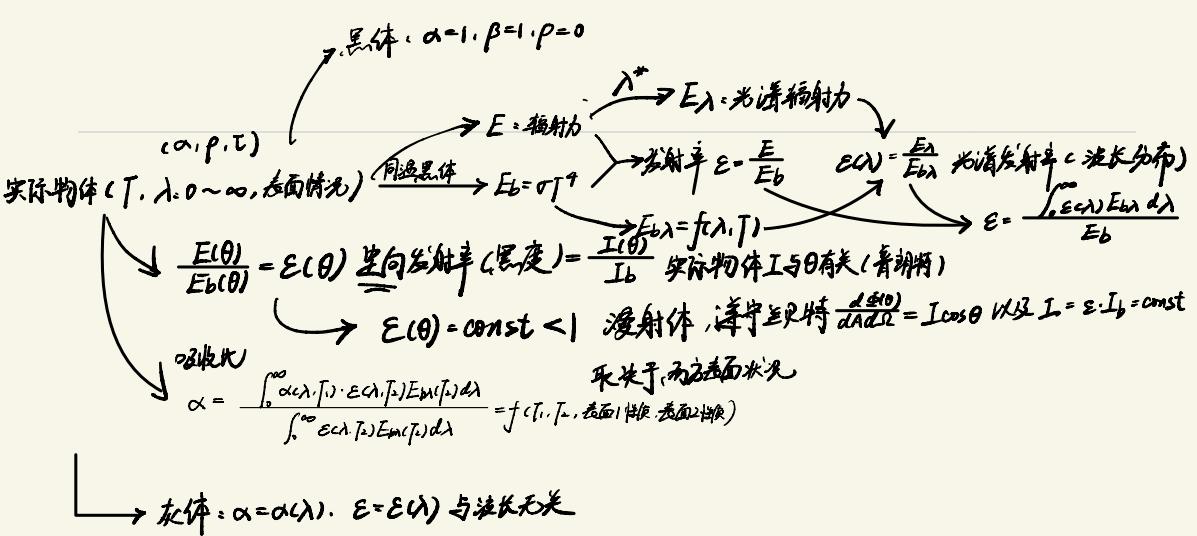
在某一温度 T 下, 灰体与黑体处于热平衡, 则 $\alpha(T) = \epsilon(T)$, 若保持自身温度不变, 则对漫射面一定有 $\alpha = \epsilon = E$

假设辐射率为具有辐射特性的物体

大多数物体可作灰体处理, 辐射力正比大, 吸收力也正比大 (善于辐射必善于吸收)

表 8-6 Kirchhoff 定律的三个层次表达式

层次	数学表达式	成立条件
光谱, 向定	$\epsilon(\lambda, \phi, \theta, T) = \alpha(\lambda, \phi, \theta, T)$	无条件, 光谱、定向发射比与吸收比是物体的固有特性
光谱, 半球	$\epsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$	漫射表面, 其发射比与吸收比与方向无关
全波段, 半球	$\epsilon(T) = \alpha(T)$	黑体辐射处于热平衡的任何物体, 或漫、灰表面



【8-1】（华中科技大学 2006 年考研试题）有人说：“常温下呈红色的物体表示该物体在常温下红色光的光谱发射率较其他单色光（黄、绿、蓝等）的光谱发射率高”。你认为这种说法正确吗？为什么？
答：不正确，原因是该物体对红色光的光谱反射率比其他光的反射率高。

【8-2】（华中科技大学 2006 年考研试题）何谓漫—灰表面？将实际表面视为漫—灰表面有何实际意义？
解：漫—灰表面是漫反射的灰体表面，其光谱吸收比 $\alpha(\lambda)$ 以及定向发射率 $\epsilon(\theta)$ 都等于常数，将实际表面视为漫—灰表面，就把工程复杂的辐射换热转化为简单的问题，可以大量简化工程计算但因此引起的误差在工程允许的范围内。

【8-3】（华中科技大学 2006 年考研试题）试对金属工件在炉内加热时表面的颜色随温度升高而变化的情形作出解释。
解：金属工件在炉内加热时，其热辐射光谱具有选择性，不同温度时选择辐射的光谱不同，因而呈现不同的颜色。
$$\frac{dA_{\text{abs}}}{d\lambda} = \sigma T^4$$

【8-4】（华中科技大学 2005 年考研试题）什么“定向辐射强度”满足兰贝特定律的辐射表面是什么样的表面？试列举两种这样的表面。
解：定向辐射强度定义为：单位时间在某方向上单位面积辐射面积（实际辐射面在该方向的投影面积）向该方向上单位立体角内辐射出来的一切波长范围内的能量，满足兰贝特定律的辐射表面是漫反射和漫发射的表面，简称漫射表面。如，相对于光线的粗糙表面、黑体表面和红外线辐射范围的不光滑的实际物体表面都可以近似认为是漫射表面。

【8-5】（华中科技大学 2005 年考研试题）按照基尔霍夫定律的要求，物体表面的黑度等于其吸收率应该在什么条件下成立？灰体是否需要这些条件？为什么？
解：按照基尔霍夫定律的要求，物体表面的黑度应等于其对同温度的黑体辐射的吸收率，条件就是，发射体为黑体，且温度与吸收体的温度相同。由于灰体是单色吸收率为常数的物体，那么它对来自不同温度的几何物体都有相同的吸收率，因而是无条件具备黑度等于其吸收率。
$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

【8-6】（华中科技大学 2005 年考研试题）指出热射线主要由哪两种射线组成？为什么钢锭在炉中加热时，随着温度升高，钢锭的颜色依次会发生黑、红、橙、白的变化。
解：热射线上主要由可见光和红外线组成。随着温度升高，钢锭辐射能中重要部分的能量向波长较小的方向移动，所以钢锭的颜色依次会发生黑、红、橙、白的变化。

【8-7】（华中科技大学 2005 年考研试题）在深秋晴朗无风的夜晚，草地会结霜，可气象台的天气预报却说清晨最低温度为 2℃，试解释这种现象（假设草地与地面之间绝热）。
解：草地对地面可近似为绝热。所以草地接受空气对流换热量等于它对太空的辐射。由于 $\alpha(T_{\text{long}} - T_{\text{air}}) = \sigma(T_{\text{air}}^4 - T_{\text{long}}^4)$ ，所以 T_{air} 小于 T_{long} ，大于 T_{long} 。晴天，草地直接向天空辐射，辐射热量增加， T_{air} 与 T_{long} 差值增大，结霜。无风， α 减小， T_{air} 与 T_{long} 差值增大，结霜。

【8-8】（华中科技大学 2004 年考研试题）什么“灰体”在工程辐射换热计算中引入灰体概念有何意义？
解：灰体是指单色吸收率为常数的物体。灰体无条件满足基尔霍夫定律，即其黑度等于其吸收率，可以简化计算。

【8-9】（西安交通大学 2004 年考研试题）常温下呈绿色的树叶，其对绿光的光谱发射率较其他颜色的可见光（如红光、黄光）的光谱发射率大还是小？为什么？
答：树叶呈现绿色是由于物体对可见光中的绿光反射较多的缘故，并不是由于树叶的温度而发射的，与树叶对绿光的光谱发射率无关。

【8-10】（西安交通大学 2004 年考研试题）何谓灰体？这种物体表面在现实中并不存在，那为什么可以用于实际物体表面间的辐射换热计算？
答：灰体是物体的光谱吸收比 $\alpha(\lambda) = \sigma = \text{常数}$ 的物体。灰体是对实际物体的吸收比进行抽象简化后的理想模型，只要在所研究的辐射能覆盖的波长范围内， $\alpha(\lambda)$ 为常数即可，而不必要求对所有波长都严格成立。工业上通常遇到的热辐射，其主要波长区段位于红外线范围，把大多数工程材料当作灰体处理引起的误差是允许的，这种处理给辐射传热的计算带来了很大的方便。

【8-11】（上海交通大学 2000 年考研试题）简述玻璃温室保温的原理。（限 50~70 字）
解：玻璃对太阳辐射具有强烈的 选择性，它对可见光为主的太阳光透射率大，但对室内物体红外范围内的热辐射透射率低，所以产生温室效应。

【8-31】（重庆大学 2007 年考研试题）深秋及初冬季节的清晨常常会看到层面结霜，试从传热的因素分析：
(1)为什么有霜出现的早上必然是晴天
(2)室外气温是否一定要低于 0℃?
(3)结霜层面与不结霜层面谁的保温效果更好，为什么？
解：
①因为有霜出现的早上必然是晴天，
②室外气温不一定低于 0℃，因为结霜的主要原因是由于屋面与太空中进行辐射传热，由于太空中温度较低，使屋面上的水（汽）失去大量的热，温度降低，低于冰点，形成霜。所以有霜出现的早上必然是晴天。
③结霜层面的保温效果好。这是因为如果保温效果不好，那么屋面温度受室内温度的影响较大，这样很难达到较低温度形成结霜的条件。

【8-32】（中国科学院 2009 年考研试题）给出辐射强度的定义并给出表达式。
解：辐射强度 I 定义为在波长 λ ，单位可见面积发射出去的落到空间任意方向的单位立体角中的能量。其表达式为：

$$I = \frac{dQ}{dA \cos \theta d\Omega d\lambda}$$

【8-33】（中国科学院 2008 年考研试题）说明“漫射灰表面”的物理含义。

解：“漫射灰表面”的物理意义指，物体在各个方向上的辐射一致，并且光谱吸收比与波长无关。

【8-11】（上海交通大学 2000 年考研试题）简述玻璃温室保温的原理。（限 50~70 字）
解：玻璃对太阳辐射具有强烈的 选择性，它对可见光为主的太阳光透射率大，但对室内物体红外范围内的热辐射透射率低，所以产生温室效应。

【8-15】（东南大学 2000 年考研试题）解释以下现象：大气中的 CO₂ 含量增加，导致地球温度升高。

解：这时因为 CO₂ 对光波的吸收具有选择性，它对红外波段的辐射具有一定的吸收率。这样，以可见光为主的太阳光可以到达地球的表面，而地球上一般温度下的物体所辐射的红外范围内的热辐射则被这些气体吸收，无法散发到宇宙空间，致使地球表面的温度逐渐升高。

【8-16】（浙江大学 2006 年考研试题）维恩位移定律是指 $\lambda_m T = 2.8 \times 10^{-3} m \cdot K$ 。
答案：对应于最大光谱辐射的波长 λ_m 与温度 T 之间存在如下关系： $\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3} m \cdot K$ ，此式表达了波长 λ_m 与温度 T 成反比的规律。

【8-17】（浙江大学 2005 年考研试题）灰体是指具有 X 性质的物体。

答案：光谱吸收比与波长无关。

【8-18】（浙江大学 2004 年考研试题）普朗克定律揭示了 黑体 的单色辐射力按 波长 变化的分布规律。

答案：黑体 波长

【8-19】（浙江大学 2001 年考研试题） 的物体叫灰体。

答案：光谱吸收比与波长无关。

【8-20】（浙江大学 2000 年考研试题）黑体的温度越高，其最大辐射力波长越短，描述这一性质的物理定律叫 定律。

答案：维恩位移

【8-21】（浙江大学 2006 年考研试题）为什么冬天早晨阴天不易结霜，而晴天容易结霜？

解：因为如果是阴天，那么地面发出去的热量有一部分会被空中的云层反射回来，这在一定程度上降低了地面热量的减少，使地面的温度不会太低。因此冬天早晨阴天不易结霜，而晴天容易结霜。

【8-22】（浙江大学 2004 年考研试题）玻璃可以透过可见光，为什么在工业热辐射范围内不可接灰体处理？

解：在工业温度范围内，即 2000K 以下，有实际意义的热辐射波段大部分位于红外区段的 0.76~20μm，对于玻璃来说，在可见光区穿透性较高，而在工业热辐射范围内，光谱吸收比基本上与波长无关，对工程计算而言，玻璃在工业热辐射范围内可接灰体处理。

【8-23】（浙江大学 2001 年考研试题）微元黑体的辐射能按空间方向是怎样分布的？为什么？

解：微元黑体的辐射能在空间的不同方向上分布是不均匀的，按空间纬度角 θ 的余弦规律变化，在垂直于该表面的方向最大，而平行于表面的方向为零。这是因为面积正比于 $\cos \theta$ 。

【8-24】（浙江大学 2000 年考研试题）试解释蔬菜塑料大棚的温度效应的传热学原理。

解：蔬菜塑料大棚的温度明显高于外界温度，是因塑料对太阳辐射具有选择性吸收的缘故。由这一特性，就决定了大部分太阳辐射能穿过塑料大棚进入由吸热面的墙内，而吸热面发出的在室温下的长波辐射被塑料阻隔在腔内，从而产生温室效应。

【8-25】（上海九校联考 2002 年考研试题）有人说：“常温下呈红色的物体表示该物体在常温下红色光的光谱发射率较其他单色光（黄、绿、蓝等）的光谱发射率高”。你认为这种说法正确吗？为什么？

解：错误。因为常温下，物体呈红色是因为在常温下，物体只反射了红光，而几乎全部吸收了其他可见光。也就是说，该物体在常温下，红色光比其他单色光的吸收比低。根据基尔霍夫定律可知，在热平衡时，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。因而，事实上该物体在常温下红色光的光谱发射率较其他单色光的光谱发射率低。

【8-26】（湖南大学 2006 年考研试题）判断题：热辐射基尔霍夫定律只在热平衡条件下才成立。

答案：对。热辐射的基尔霍夫定律可以简述为：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。

【8-27】（南京航空航天大学 2000 年考研试题）写出辐射力的定义和量纲。对于扩散辐射表面，辐射力和辐射强度之间有何关联？

解：辐射力是辐射单位时间内单位表面积向其上的半球空间的所有方向辐射出去的全部波长的辐射能，其单位为 W/m^2 或 W/MT^{-3} 。

对于扩散辐射表面 $E = \pi I$ ，其值上辐射力是辐射强度的 π 倍。

第九章 角系数

一、辐射传热的角系数(几何因子)与表面温度和E不度

两个表面之间的辐射传热量与两个表面之间的相对位置有很大关系。把表面1发出的辐射能中落到表面2上的百分数称为表面1对表面2的角系数,记为 $X_{1,2}$ 。在研究角系数时,假定:

①所研究的表面是漫射的;②在所研究表面的不同地点上向外发射的辐射热流密度是均匀的。

**漫射表面
热流均**

(一) 角系数的性质

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

两微元表面角系数的相对性表达式:

$$\star dA_1 X_{1,2,di} = dA_2 X_{2,1,di}$$

$$X_{1,1,di} \leftrightarrow X_{2,1,di} \text{ 不独立}$$

有限大小表面间角系数的相对性的表达式:

$$\star A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$$

$$\star \star E_{1,2} = A_1 E_b X_{1,2} - A_2 E_b X_{2,1} = -E_{2,1}$$

**辐射: 离开为“正” 进入为“负”
 $E_b = \sigma T^4$**

2. 角系数的完整性

对于由几个表面组成的封闭系统,据能量守恒原理,从任何一个表面发射出的辐射能必全部落到封闭系统的各表面上。因此,任何一个表面对封闭腔各表面的角系数之间存在下列关系:

$$\star X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + \dots + X_{1,n} = \sum_{i=1}^n X_{1,i} = 1$$

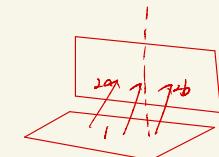


3. 角系数的可加性

从表面1上发出而落到表面2上的总能量,等于落到表面2上各部分的辐射能之和,于是有 $X_{1,2} = X_{1,2a} + X_{1,2b}$;如把表面2进一步分成若干小块,则有:

$$X_{1,2} = \sum_{i=1}^n X_{1,2i} \quad \text{接收表面}$$

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



利用角系数可加性时,只有对角系数符号中第二个角码是可加的,对角系数符号中的第一个角码则不存在类似的关系。

从表面2上发出而落到表面1上的总辐射能,等于从表面2的各部分发出而落到表面1上的辐射能之和,于是有 $X_{2,1} = X_{2,a,1} \frac{A_{2a}}{A_2} + X_{2,b,1} \frac{A_{2b}}{A_2}$

2. 代数分析法

利用角系数的相对性、完整性及可加性,通过求解代数方程而获得角系数的方法称为代数分析法。

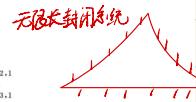
(1) 三面非凹表面组成的封闭系统

如图9-1所示,根据角系数的相对性和完整性得:

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

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

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



通过求解这个封闭的方程组,可得所有角系数:

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

由于垂直纸面方向的长度相同,则有:

$$\star X_{1,2} = \frac{l_1 + l_2 - l_3}{2l_1}, X_{1,3} = \frac{l_1 + l_3 - l_2}{2l_1}, X_{2,3} = \frac{l_2 + l_3 - l_1}{2l_2}$$

(一) 两黑体表面组成的封闭腔间的辐射传热计算

2-1 黑体表面1和2之间的辐射传热量为: $\star \star \text{辐射表面无无限长的二维系统}$

(2) 任意两个非凹表面间的角系数。(非凹)交叉线法

如图9-2所示,并假定在垂直于纸面的方向上表面的长度是无限延伸的,只有封闭系统才能应用角系数的完整性,为此作辅助线ac和bd,与ab,cd一起构成封闭腔。

$$X_{ab,cd} = \frac{(bc+ad)-(ac+bd)}{2ab} = \frac{\text{交叉线之和}-\text{不交叉线之和}}{2 \times \text{表面 } A_1 \text{ 的断面长度}}$$

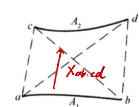
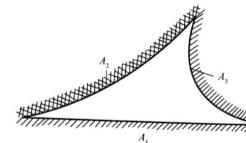


图 9-1

图 9-2

2-2 增加辐射传热的反射热关系

分别从表面1的外部和内部来观察,其能量收支差额应等于有效辐射 J 与投入辐射 G_1 之差,也等于辐射能量与吸收的能量之差,即:

$$J = J_1 - G_1 = E_1 - a_1 G_1 - \epsilon_1 E_b - a_1 G_1$$

得到 J 与表面净辐射传热量之间的关系: $J = \frac{E_1 - 1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} q = E_b - \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1\right) q$,式中的各个量均

是对同一平面而言的,且 ϵ_1 向外界的净辐射热率为正值。

3. 两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热

单位面积的辐射传热量 $\Phi = J - G_1$

$$\text{而 } \Phi = \frac{E_1 - J}{A_1} = \alpha_1 G_1 = \epsilon_1 (E_b - J)$$

上两式联立可得:

$$\Phi = \frac{E_1 - J}{A_1} = \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} \Phi_0$$

式中 $\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1}$ ——表面辐射热阻。

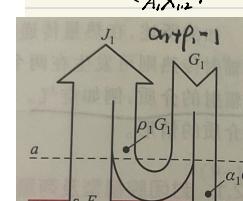


图 9-14 一个表面的辐射能量收支

热网路如图9-4所示。

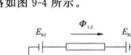


图 9-3

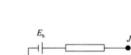


图 9-4

若两个漫灰表面1,2构成封闭空腔, $T_1 > T_2$,则表面1净损失表面2净获得的热量分别为

$$\Phi_1 = \frac{E_1 - J_1}{A_1 t_1} \quad \text{和} \quad \Phi_2 = \frac{J_1 - E_2}{A_2 t_2}$$

表面1,2之间净辐射传热量为:

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

根据能量守恒

故可得:

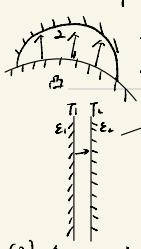
$$\Phi_{1,2} = \Phi_1 - \Phi_2 = \frac{E_1 - E_2}{A_1 t_1} - \frac{E_1 - E_2}{A_2 t_2} = \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1 t_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2 t_2}$$

如图9-5所示,为曲表面封闭空腔的辐射网路:



图 9-5

(1) 表面1为平面和凸表面



$X_{1,2} = 1$

$X_{1,1} = 0$

$\Phi_{1,2}$

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_b - E_o}{\frac{1}{E_1}A_1 + \frac{1}{E_2}A_2 + \frac{1}{E_o}E_o} = \frac{A_1(E_b - E_o)}{\left(\frac{1}{E_1} - 1\right) + \frac{1}{E_2} + A_2\left(\frac{1}{E_o} - 1\right)} = \frac{A_1(E_b - E_o)}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\left(\frac{1}{E_o} - 1\right)}$$

系统温度

$$E_s = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\left(\frac{1}{E_o} - 1\right)}$$

$$\Phi_{1,1} = E_s A_1 (E_b - E_o)$$

(2) $A_2 \gg A_1$, 即 $\frac{A_1}{A_2} \rightarrow 0$, 如大空间中的小物体

$$\Phi_{1,2} = E_s A_1 (E_b - E_o) \quad \text{即} \quad E_s = E_1$$

三、多表面系统的辐射传热

多个漫灰表面封闭空腔, 空腔内任意一个表面 i 净损失的辐射热流量等于该表面与所有表面交换的辐射热流量的代数和。应用网络法求解多表面封闭系统辐射传热。把辐射热阻比拟成等效的电阻从而通过等效的网络图来求解辐射传热的方法称为辐射传热的网络法。步骤如下:

(1) 画出等效的网络图。

(2) 列出节点的电流方程。

(3) 求解上述代数方程得出节点电势。

(4) 按公式 $\Phi_i = \frac{E_{bi} - J_i}{\frac{1 - \epsilon_i}{A_i \epsilon_i}}$ 确定每一个表面的净辐射传热量。

$$\frac{1 - \epsilon}{EA} = 0 \quad J_3 = E_b$$

在三表面封闭系统中, 有两个重要的特例可使计算工作大为简化。分别是一个表面为黑体和一个表面绝热的情况。

④ 净辐射传热量 $\Phi = 0$

主辐射面: 温度栏

四、辐射传热的强化与削弱

强化辐射传热的主要途径有两种: ①增加发射率; ②增加角系数。

削弱辐射传热的主要途径有三种: ①降低发射率; ②降低角系数; ③加入遮热板。

所谓遮热板, 是指插入两个辐射换热表面之间以削弱辐射传热的薄板, 其实插入遮热板相当于降低了表面发射率。

① 控制表面热阻 $(\frac{1 - \epsilon}{EA})$ / 表面 A

首先减少串联环节的最高热阻项

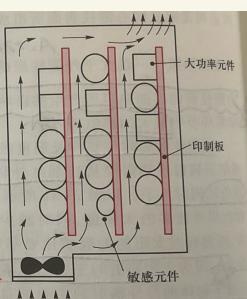
过高而用浅色油漆作为涂层。这些都是用减少对入射辐射的吸收比的方法来削弱传热的例子。

2. 控制表面的空间热阻 $(\frac{1}{A_i X_{ij}})$

空间热阻的定义 $(\frac{1}{A_i X_{ij}})$ 中面积 A 一般取决于工艺条件, 所以改变空间热阻需要调整物体的辐射角系数。

例如要增加一个发热表面的散热量, 则增加该表面与温度较低的表面间的辐射角系数。作为综合应用的实例, 如图 9-41 所示的送风式电子器件机箱中元件布置的一个一般原则, 对温度特别敏感的元件应放置于冷风入口处; 此时从对流传热的角度, 该处流体温度最低, 换热温差大; 从辐射的角度该处元件对冷表面的角系数远大于将元件置于印刷板中间位置时的数值, 因此也增加了辐射传热。

为了削弱两个表面间的辐射传热, 采用遮热板是一种非常有效的方法。它能够使两种辐射热阻同时得到大幅度的增加。



遮热板 (设均为灰体)

$$\text{最大热阻 } E_s = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}$$

$$q_{1,3} = \frac{E_b - E_o}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1}$$

$$q_{2,3} = \frac{E_b - E_o}{\frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_3} - 1}$$

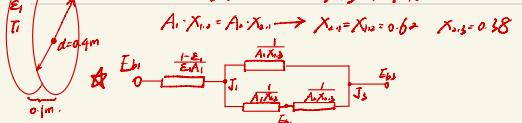
$$q_{1,2} = \frac{1}{2} E_s (E_b - E_o) \quad \text{传热量减半}$$

利用发射率低的作用, 遮热板

图 9-41 电子机箱布置示意图

【9-1】(华中科技大学2006年考研试题)两个直径为0.4m的平行圆盘相距0.1m,两盘置于墙壁温度 $T_3=300\text{K}$ 大房间内,一个圆盘表面温度 $T_1=500\text{K}$,发射率 $\epsilon_1=0.6$,另一圆盘 $T_2=400\text{K}$,发射率 $\epsilon_2=0.4$ 。若两圆盘的背面均不参与换热,求绝热盘表面的温度。已知两圆盘之间的角系数 $X_{1,2}=0.62$ (要求画出网络图)。

解:大房间为表面3,可视为黑表面;表面1为 $T_1=500\text{K}, \epsilon_1=0.6$ 的圆盘;表面2为绝热圆盘。

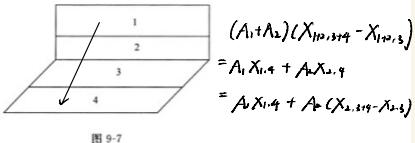


$$1,3 \text{ 间的净热量 } \Phi_{1,3} = \frac{E_1 - E_3}{R_{1,3} + R_{3,2} + R_{2,1}} = 169.092(\text{W})$$

$$\times \frac{E_2 - E_3}{R_{2,3} + R_{3,1} + R_{1,2}} = \frac{R_{1,3}}{R_{1,3} + R_{3,2} + R_{2,1}} \Phi_{1,3}, \text{ 所以 } E_3 = E_1 + \frac{R_{1,3}}{R_{1,3} + R_{3,2} + R_{2,1}} \Phi_{1,3}.$$

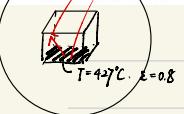
$$\text{绝热盘表面的温度为: } E_2 = \sigma T_2^4 \rightarrow T_2 = [E_2/\sigma]^{\frac{1}{4}}$$

【9-2】(华中科技大学2005年考研试题)求出图9-7中表面1对表面4的角系数 $X_{1,4}$ 的表达式(已知各表面面积 A_1, A_2, A_3, A_4 ,以及 $X_{1+2+3+4}, X_{1+2+3}, X_{2+3+4}, X_{2,3+4}$)。



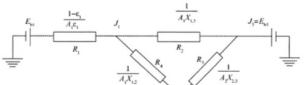
$$\text{解: } X_{1,4} = \frac{[A_{1+2}(X_{1+2+3+4} - X_{1+2+3}) - A_2(X_{2+3+4} - X_{2,3})]}{A_1}.$$

【9-3】(华中科技大学2005年考研试题)有一内腔为 $0.2\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ 的正方炉子,被置于室温为 27°C 的大房间中。炉底电加热,底面温度为 $427^\circ\text{C}, \epsilon=0.8$ 。炉子顶部开口,内腔四周及炉子底面 A 均假设绝热材料。已知炉子底部对炉子顶部环境的角系数为0.2,试确定在不计对流换热的情况下,为保持炉子恒定的地而面温度所需供给的电功率(要求画出网络图)。



$$\begin{aligned} \text{解: 1 为地面, 2 为环境} \\ X_{1,2} = 0, X_{1,A} = 0, X_{1,1} = 0.8 \\ R_1 = 6.25, E_{1,0} = 13614, R_2 = 125, E_{2,0} = 459.3 \\ R_3 = R_4 = 31.25, R' = 41.67 \\ \phi = (13614 - 459.3)/(6.25 + 41.67) = 274.5(\text{W}) \end{aligned}$$

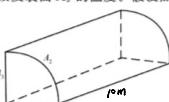
如图9-8所示。



【9-4】(华中科技大学2004年考研试题)什么叫角系数?对于非黑体之间的辐射,角系数成为纯几何量的条件是什么?

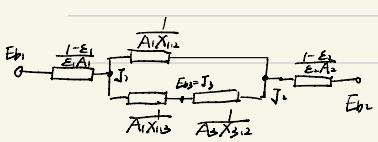
解:通常把1表面辐射出去的辐射能投到2表面上去的份额定义为表面1对表面2的角系数,记为 $X_{1,2}$ 。将从能量传递角度定义的角系数视为一个纯几何量,只能在等温辐射表面(也就是漫射表面)之间的辐射能量传递中才能成立。(漫射辐射,绝对辐射的)

【9-5】(华中科技大学2004年考研试题)一个箱体,其形状为圆柱的四分之一,箱内抽成真空,如图9-9所示。圆柱内表面半径为0.5m,箱体长10m;平面表面 A_1 的温度为50℃,黑度为0.8;圆柱内表面 A_2 温度为30℃,黑度为0.6;另一平面表面 A_3 为绝热表面。假定两端的辐射传热可忽略不计。试画出箱体内辐射系统网络图,并计算表面 A_1 与表面 A_3 之间的辐射传热量以及表面 A_3 的温度。假设黑体辐射常数为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。



$$\begin{aligned} X_{1,2} &= X_{1,3} = \frac{A_1 + A_2 - A_3}{A_1} = 0.71 \\ X_{2,3} &= X_{2,1} = \frac{A_2}{A_1} = 0.71 \\ X_{1,3} &= 1 - X_{1,2} = 0.293 \end{aligned}$$

$$A_1 X_{1,3} = A_3 X_{3,2} \rightarrow$$



【9-6】(西安交通大学2005年考研试题)
重辐射表面是指什么样的表面?从物理本质上讲,能否认为它就是反射率 $\rho=1$ 的表面?为什么?

答:重辐射表面是辐射换热系统中下面温度 φ 未定且净辐射热量为零的表面。不能认为重辐射表面是 $\rho=1$ 的表面。因为反射比 ρ 是指外界投入到物体表面上的总能量 Φ 中被物体反射的部分 Φ_r 与 Φ 的比值。 $\rho=1$ 意味着外界投入到物体表面的总能量全部被反射出来,此时物体表面的净辐射传热量未必为零,不满足重辐射表面的定义。

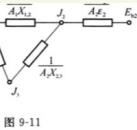


图9-11

还有辐射发射

【9-7】(西安交通大学2003年考研试题)为增强遮热罩的隔热效果,对遮热罩材料的反射率和导热系数分别有何要求,要求高还是低?

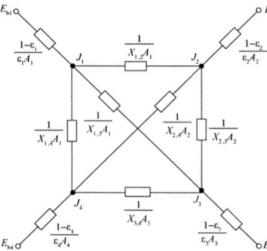
答:对于反射率的要求:当反射率 ρ 越大,对于一定物体而言,由 $\alpha+\rho=1$,可知吸收比 α 越小。利用维耳霍夫定律可知,此时对应的遮热罩的发射率也越小,从而使表面热阻增加,总的传热系数减小,隔热效果增加。

对于导热系数的要求:当遮热罩的导热系数越小时,它所对应的导热热阻 $\frac{\delta}{k}$ 增加,从而使总的热阻增加,传热系数降低,隔热效果增强。

【9-8】(上海交通大学2001年考研试题)简述气体辐射的特性。(限80字)
解:气体辐射对波长有选择性,气体的辐射和吸收是在整个容积中进行的。

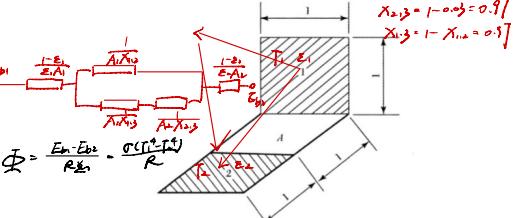
【9-10】(上海交通大学2002年考研试题)试画出四个灰体表面间的辐射传热网络图并写出其四个节点的辐射传热计算方程组(不需展开)。

解:四个灰体表面间的辐射传热网络图如图9-13所示。



【9-11】(上海交通大学2001年考研试题)已知两个互相垂直的正方形表面的温度分别为 $T_1=1000\text{K}, T_2=500\text{K}$,如图9-14所示,其黑度分别为 $\epsilon_1=0.6, \epsilon_2=0.8$,该两表面位于一绝热的房间内,试计算表面1与表面2之间的角系数 $X_{1,2}$ 及此两表面间的净换热量 Φ 。 $X_{1,A}=0.2, X_{1,A+2}=0.23$

$$X_{1,2} = 0.23 - 0.2 = 0.03 \rightarrow X_{2,1} = X_{1,2} = 0.03$$



【9-12】(上海交通大学2000年考研试题)有一封闭矩形空腔,宽4m,高3m,假定它在垂直纸面上方向上无限长 ∞ 。已知上表面1的温度 $t_1=25^\circ\text{C}$,下表面2的温度 $t_2=13^\circ\text{C}$,其余两个侧面(用3表示)均无辐射,借用辐射网络图,计算上、下表面的净辐射传热量 q_1 和 q_2 (W/m^2)以及侧面3的温度 t_3 。假定所有表面的黑度均为 $\epsilon=0.8$ 。

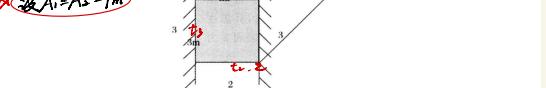
解:本题的简化模型图如图9-16所示。

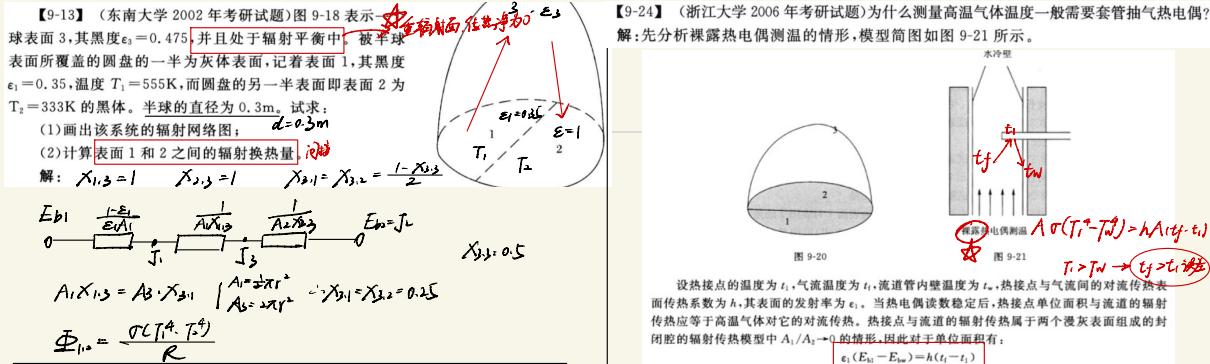
$$X_{1,2} = \frac{s + s - s}{2\pi r} = 0.5 \quad (\text{对称辐射})$$

$$X_{1,3} = 1 - 0.5 = 0.5$$

$$X_{2,3} = 0.5 \quad (\text{对称辐射})$$

$$q_2 = -q_1$$





【9-14】(东南大学 2002 年考研试题)室外横放的一根煤气管道, 直径 $d = 150mm$; 表面黑度和温度分别为 $\epsilon = 0.8$, $t_s = 60^\circ\text{C}$, 周围环境和空气的温度 $t_1 = 20^\circ\text{C}$, 空气处于自由运动状态。试计算管长的散热量。准则关联式: $Nu = 0.48(GPr)^{0.25}$

$$\begin{aligned} \text{辐射热} &= \frac{R}{R} \cdot \frac{\epsilon_s}{A_{1,2}} + \frac{1}{A_{1,2}} \\ \text{准则} &= \frac{t_s - t_1}{R} = \frac{\eta d(t_w - t_f)}{k_e - k_a} = \frac{\eta d c(t_w - t_f)}{k_e} \\ \text{解法} &: \epsilon_s = \eta d c(t_w - t_f), h = \frac{k_e}{d}, \text{壁温} t_m = \frac{t_w + t_f}{2} = 40^\circ\text{C} \rightarrow P_r \cdot P_y \\ &GPr = \frac{Pr \cdot \rho \cdot g \cdot (t_w - t_f)}{v^3} \rightarrow Nu \end{aligned}$$

【9-15】(东南大学 2000 年考研试题)用一棵露的热电偶测烟道内的烟气温度, 其指示值为 280°C 。已知烟道壁面温度 $t_w = 250^\circ\text{C}$, 热电偶的表面黑度 0.9, 与烟气的对流换热系数为 $100W/(m^2 \cdot K)$, 求烟气的实际温度。若烟气的实际温度为 317°C , 热电偶的指标值为多少?

$$A \cdot \epsilon \sigma (T_f^4 - T_s^4) = h(A(t_f - t_w)) \rightarrow t_f = 289.5^\circ\text{C}$$

【9-16】(浙江大学 2006 年考研试题)气体辐射的特点是 **选择性、单向性**。
答案: 气体辐射对波长有选择性 气体的辐射和吸收是在整个容积中进行的。

【9-17】(浙江大学 2006 年考研试题)角系数的性质有 **相对性/完整性/可加性**。
答案: 相对性、完整性、可加性。

【9-18】(浙江大学 2006 年考研试题)漫辐射是指 **辐射**。
答案: 各朝向辐射同性, 即满足兰贝特定律的辐射。

【9-19】(浙江大学 2005 年考研试题)角系数的定义是 **吸收**。

答案: 表面 1 发出的辐射能中落到表面 2 的百分数称为表面 1 对表面 2 的角系数, 记为 $X_{1,2}$ 。
【9-20】(浙江大学 2005 年考研试题)气体辐射的贝尔(Bell)定律是 $I_{1,2} = I_{2,1} e^{-\kappa x}$ 。
答案: $I_{1,2} = I_{2,1} e^{-\kappa x}$, 其中, $I_{2,1}$ 为投射到气体界面 $x=0$ 处的光谱辐射强度, $I_{1,2}$ 为通过一段距离 x 后的辐射强度, κ_x 为光谱减弱系数。

【9-21】(浙江大学 2004 年考研试题)角系数相对性公式表示可以写成 $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$, 对于一个非封闭系统, 角系数完整性的公式为 $\sum X_{1,2,i} = 1$ 。
答案: $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$, $\sum_{i=1}^n X_{1,2,i} = 1$ 。

【9-22】(浙江大学 2001 年考研试题)黑体辐射的角系数具有三个性质, 它们是:

(1) **相对性**, 数学表达式为 $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$

(2) **完整性**, 数学表达式为 $\sum X_{1,2,i} = 1$

(3) **可加性**, 数学表达式为 $X_{1,2} = \sum_i X_{1,2,i}$

答案:
 (1) 相对性 $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$ 。
 (2) 完整性 $\sum_{i=1}^n X_{1,2,i} = 1$ 。
 (3) 可加性 $X_{1,2} = \sum_{i=1}^n X_{1,2,i}$ 。

【9-23】(浙江大学 2000 年考研试题)半球内壁对底部半圆的角系数为 0.25 。
答案: $\frac{1}{4}$
 $X_{\text{底} \rightarrow \text{壁}} = 0.25$

【9-25】(浙江大学 2006 年考研试题)一根长套管, 外管 1 内径为 $400mm$, 辐射率为 0.8 , 温度为 227°C , 内管 2 外径为 $200mm$, 辐射率为 0.5 , 温度为 427°C , 画出该系统的辐射热网络图并计算出 **单位管长内管表面的净辐射热损失**。
 提示: 外管和内管的辐射传热量, 又在内外管同心同轴外径上外径为 $300mm$, 厚 1mm 的钢管, 内外面的辐射率为 0.7, 忽略钢管的导热热阻, **此时单位管长内管表面的净辐射热损失**。
 $X_{1,2} = 1$

答案:

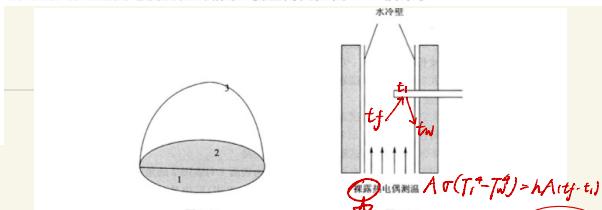
$$\Phi_{1,2} = \frac{\epsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4)}{R} = \frac{\epsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4)}{d_2 - d_1}$$

$$\Phi_{2,3} = \Phi_{1,2} = 1.83 \text{ W}$$

$$\Phi_{1,3} = \Phi_{2,3} = 1.83 \text{ W}$$

$$E_{1,3} = E_{2,3} = \Phi_{1,3} / R$$

【9-24】(浙江大学 2006 年考研试题)为什么测量高温气体温度一般需要套管抽气热电偶?
解: 先分析裸露热电偶测温的情形, 模型简图如图 9-21 所示。



设热接点的温度为 t_1 , 气流温度为 t_f , 流管道内壁壁温为 t_w , 热接点与气流间的对流传热表面传热系数为 h , 其表面的发射率为 ϵ_1 。当热电偶读数稳定后, 热接点单位面积与流道的辐射传热应等于高温气体对它的对流传热。热接点与流道的辐射传热属于两个漫反射表面组成的封闭腔的辐射传热模型中 $A_1/A_2 \rightarrow 0$ 的情形, 因此对于单位面积有:

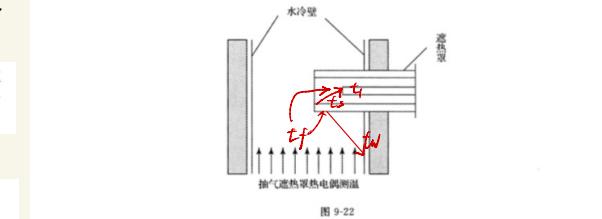
$$\epsilon_1 (E_{\infty} - E_{\text{壁}}) = h(t_f - t_1)$$

运用玻耳兹曼定律, 整理后可得气流温度为:

$$t_f = t_1 + \frac{\epsilon_1 C_p}{h} \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]$$

由此可见, 热电偶所显示的温度与实际气流温度之间存在的误差是由辐射引起的。不妨取 $t_1 = 792^\circ\text{C}$, $t_w = 600^\circ\text{C}$, $h = 58.2 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$, $\epsilon_1 = 0.3$ 进行计算, 代入后可得 $t_f = 998.2^\circ\text{C}$ 。

热电偶显示的温度与实际的流体温度绝对误差达 202.6°C , 相对误差达 20%。
 再分析抽气罩热电偶测温的情形, 模型简图如图 9-22 所示。



略去热电偶连线的导热不计, 而且假定气流与热电偶及气流与遮罩间的对流传热的表面传热系数相同, 遮罩的表面发射率为 $\epsilon_{\text{罩}}$, 热电偶与遮罩内壁 (其温度记为 t_c) 有辐射传热, 且仍然可以采用两个漫反射表面组成的封闭腔的辐射传热满足 $A_1/A_2 \rightarrow 0$ 的情形。那么以热电偶的单位面积考虑 this 辐射传热量为:

$$q_{1,ac} = \epsilon_{\text{罩}} C_p \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]$$

注: 下标 ac 表示热电偶。
 根据对流传热基本计算式可知热电偶与气流间的对流传热为:

$$q_{cv,ac} = h(t_f - t_1)$$

遮罩同样有辐射与对流传热, 需要注意的是, 其外表面同时存在与高温气流的对流传热。那么以遮罩的单位面积考虑, 可得传热量为:

$$q_{cv,ac} = \epsilon_{\text{罩}} C_p \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right], q_{cv,ac} = h(t_1 - t_c)$$

注: 下表 rs 表示遮罩罩。
 当整个测试系统进入稳定后, 有如下等式成立: $q_{1,ac} = q_{cv,ac} \cdot q_{cv,ac} = 2q_{cv,ac}$ 。
 如果仍然 $t_w = \epsilon_1 = 0.3$, $t_w = 600^\circ\text{C}$, 但是对流传热表面传热系数增加为 $118 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$, 重新计算可得: $t_f = 951.2^\circ\text{C}$ 。

由此可见, 在前面的假定条件下, 改进后的测温相对误差为 4.88%, 这与裸露热电偶测温相比提高了不少。

综合分析, 可知, 为了尽可能地减少测温误差, 测量高温气体温度一般需要套管抽气热电偶。

【9-26】(浙江大学 2005 年考研试题)有一长套管, 外管壁厚。外管 1 内径为 $400mm$, 辐射率为 0.8 , 温度为 290°C ; 内管 2 外径为 $200mm$, 辐射率为 0.5 , 温度为 450°C 。
 画出该系统的辐射热网络图, 并计算出单位管长内管表面的净辐射热损失。设外管外部空气和环境温度皆为 100°C , 为自然对流和辐射传热, 试求外管外部表面和空间间的复合传热系数。
 解: $\Phi_{1,2} = \frac{\epsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4)}{R}$

$$\Phi_{1,2} = \frac{\epsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4)}{R} = \frac{\epsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4)}{d_2 - d_1} \rightarrow h = 12.13$$

【9-27】(浙江大学 2004 年考研试题)一种低速介质流过一根直径 $d = 20mm$ 的长管道, 其外表面积可以视为漫反射表面, 而厚度为 $\epsilon_1 = 0.02, T_1 = 715^\circ\text{K}$ 。其有一直径为 $d_1 = 50mm$ 的同心套管, 内表面面积为漫反射表面, 温度为 $\epsilon_2 = 0.05, T_2 = 350^\circ\text{K}$ 。两管之间抽空。试问:
 (1) 这种情况下单位长从环境传给低温介质的热量是多少?
 (2) 若在外管壁上再抽一根直径为 $d_3 = 35mm$, 两端温度均为 $\epsilon_3 = \epsilon_2 = 0.02$ 的薄壁管, 则单位长度从环境传给低温介质的热量是多少?

(3) 通过上述两种情况的传热结果对比。
 (4) 若将套管内管的外壁与空气的热交换系数 $h = 50 \text{ W}/(m^2 \cdot K)$, 试求内外管壁的温度差多少?

【9-28】(浙江大学2001年考研试题)采用温度计套管测量气体温度时,辐射和导热会引起测温误差,请提出提高测温精度的措施。
 \downarrow \downarrow

解:首先分析利用温度计套管测量气体温度时的传热过程。以温度计作为分析对象,主要有,温度计套管与气体容器壁之间的辐射传热、温度计与流体之间的对流传热、温度计与套管之间的热传导。由此可见,辐射与导热是主要的测温误差来源,因而提高测温精度的措施应该从减少辐射传热、热传导着手,具体措施如下:

(1)选择导热系数较小的绝热材料作为气体容器材料,以提高气体容器壁温,从而减少辐射传热量;
 \downarrow \downarrow

(2)减小套管表面黑度,以减少辐射传热量;

(3)选择导热系数较小的套管材料,减小套管壁厚,以减少套管与温度计之间的导热量;

(4)减少温度计探头与套管之间的接触热阻。

【9-29】(浙江大学2000年考研试题)在两板平行放置的相距很近的大平板1与2中插入一块很薄且两个表面黑度不等的第三块平板。已知 $t_1 = 300^\circ\text{C}$, $t_2 = 100^\circ\text{C}$, $\epsilon_1 = 0.5$, $\epsilon_2 = 0.8$,当板3的A面朝向表面1时,板3的温度为 170°C ,当板3的B面朝向表面1时,稳态时板3的温度为 260°C 。试确定表面A、B各自的黑度(精确到2位有效数字)。

当板3的A面朝向表面1时:

$$q = \frac{E_{\text{b}1} - E'_{\text{b}3}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1} = \frac{E_{\text{b}2} - E'_{\text{b}3}}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1} \quad ①$$

当板3的B面朝向表面1时:

$$q' = \frac{E_{\text{b}1} - E'_{\text{b}3}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1} = \frac{E'_{\text{b}3} - E_{\text{b}2}}{\frac{1}{\epsilon_3} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad ②$$