

第八章：热辐射

7.1.1 热辐射基本概念

1. 热辐射的本质

辐射是电磁波传递能量的现象

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 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

把热能转化为辐射能

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

$$c = \lambda f$$

在真空中 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

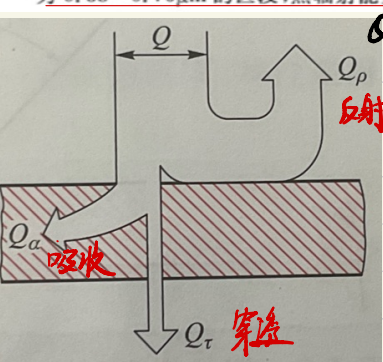
介质中 $c = c_0/n < c_0$

↑ 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 $0.8 \sim 100 \mu\text{m}$ ，且大部分能量位于红外线区段的 $0.76 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内，而在可见光区段，即波长为 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 的区段，热辐射能量的比重不大。

$0.8 \sim 100 \mu\text{m}$

$0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 热辐射比重小



$$Q = Q_a + Q_p + Q_r$$

图 8-2 物体对热辐射的吸收、反射和透射

(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、反射和穿透。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_r 。按能量守恒定律有 $Q_a + Q_p + Q_r = Q$ 。吸收比为 $\alpha = \frac{Q_a}{Q}$ ，反射比为 $\rho = \frac{Q_p}{Q}$ ，透射比为 $\tau = \frac{Q_r}{Q}$ ，则有 $\alpha + \rho + \tau = 1$ 。
对于大多数的固体和液体 $\tau = 0, \alpha + \rho = 1$ ；对于不含颗粒的气体 $\rho = 0, \alpha + \tau = 1$ ；对于黑体， $\alpha = 1$ ；对于镜面或白体 $\rho = 1$ ；对于透明体 $\tau = 1$ 。

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 $\alpha_\lambda = \frac{Q_{a\lambda}}{Q_\lambda}$ ，光谱反射比 $\rho_\lambda = \frac{Q_{p\lambda}}{Q_\lambda}$ ，光谱透射比 $\tau_\lambda = \frac{Q_{r\lambda}}{Q_\lambda}$ 。

固体的吸收/反射都在表面进行，对气体的辐射，吸收在整个容积中进行

(三) 黑体模型

$$\alpha = 1, \rho = 0, \tau = 0$$

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 $\alpha_\lambda, \rho_\lambda, \tau_\lambda$ 分别等于常数，即 $\alpha = \alpha_\lambda, \rho = \rho_\lambda, \tau = \tau_\lambda$ 。

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_b

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 (四次方定律) $E_b \sim T^4$

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (7-1)$$

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， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

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

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 $E_{b\lambda}$ 随 λ 变化的规律。

(1) 光谱辐射力 $E_{b\lambda}$

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 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ 。

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

$$E_{b\lambda} = \frac{E_b(\lambda, T) d\lambda}{d\lambda} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$$

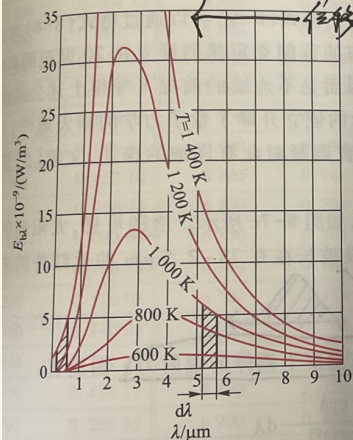
即 $E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda$ (7-2)

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

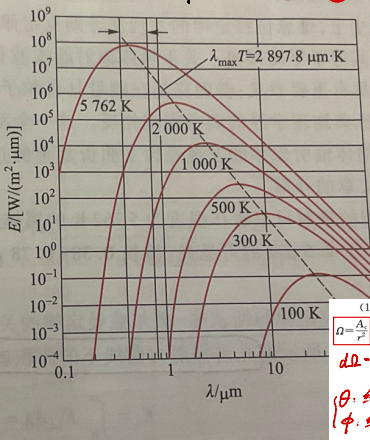
$c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$

黑体光谱辐射力随波长 λ 增加先上升后下降，峰值随温度升高而左移(短波长)

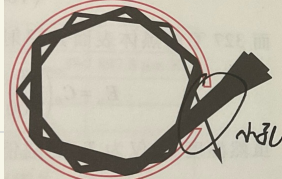
维恩位移定律 $\lambda_m T = 2.8976 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$



(a) 算术坐标



(b) 对数坐标



选用吸收比 α 大的材料作空腔，并开一个小孔，使壁面恒温并均匀。

小孔具有黑体特性

孔越小，吸收比 α 越高

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

细化到某一波长

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 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ 。

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

$$E_{b\lambda} = \frac{E_b(\lambda, T) d\lambda}{d\lambda} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$$

即 $E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda$ (7-2)

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 λ 增加先上升后下降，峰值随温度升高而左移(短波长)

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

光谱辐射力曲线下的面积 \rightarrow 黑体的辐射力

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

在 E_b 中作微分(分布) $F_{\lambda, \lambda} = \frac{E_{b\lambda} d\lambda}{E_b} = \int_0^\infty \frac{E_{b\lambda} d\lambda}{E_b}$

$$F_{\lambda, \lambda} = f(\lambda, T)$$

$$E_{b\lambda}(\lambda) = E_b(\lambda) - E_{b\lambda}(\lambda) = F_{\lambda, \lambda} E_b = [F_{\lambda, \lambda} - F_{\lambda, \lambda}] E_b$$

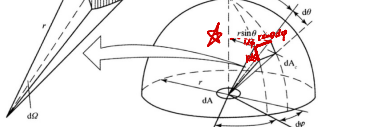
$$= [F_{\lambda, \lambda} - F_{\lambda, \lambda}] E_b$$



立体角 Ω

(1) 立体角，半径为 r 的球面上面积 A ，与球心所对应的空间角度称为立体角，计算公式 $\Omega = \frac{A}{r^2}$ 单位为 Sr (球面度) 如图 8-1 所示。

$$dA = r d\theta \cdot r \sin\theta d\phi \rightarrow d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$$



兰伯特定律，黑体辐射按空间方向的分布

$\frac{dE(\theta)}{dA d\Omega} = I \cos\theta$ dA 的黑体微元面积向空间方位角 θ 方向的微元立体角 $d\Omega$ 中辐射的能量为 $dE(\theta)$

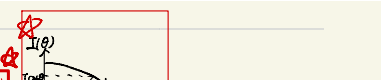
$\frac{dE(\theta)}{dA d\Omega} = I$ (空间辐射强度，为常数，与方位角无关)

$dA \cos\theta$ 为从 θ 方向看的 dA 面积(可见面积)

(2) 辐射强度，单位时间内单位投影面积(可见面积)所发出的包含在单位立体角内空间的辐射能，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：

$$L(\theta, \phi) = \frac{dE}{dA \cos\theta d\Omega dt}$$

$L(\theta, \phi)$ 称为 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(即 L)，还与方向有关。对于各向同性的物体表面，辐射强度与 θ 无关， $L(\theta, \phi) = L(\theta)$ 。



$$E_b = \pi I_b$$

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 $\epsilon \rightarrow$ 光谱 $\epsilon(\lambda)$

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

物性 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

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

对于灰体 $\epsilon = \epsilon(\lambda)$

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

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：

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

定义

漫射体 $\epsilon(\theta) = \text{const} < 1$ 满足兰伯特 $I(\theta)$ 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，

L_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 的分布满足兰伯特定律的物体，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，一般不严格遵守兰伯特定律，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。

实际物体 $I(\theta) = \epsilon(\theta) I_b$ 函数

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。

透明体 $\epsilon = 1$

对气体：
 单原子气体和分子结构对称的双原子气体：空气、 H_2 、 O_2 、 N_2 等，无辐射能力
 三原子分子、多原子、不对称双原子气体(CO)有辐射能力

$\alpha = \beta = 0$ 无辐射、吸收能力

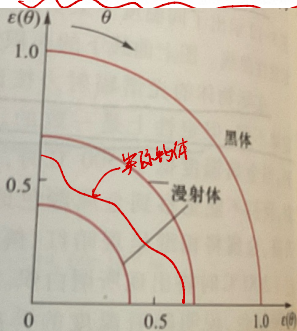


图 8-13 黑体与漫射体的定向发射率

四、实际物体对辐射能的吸收与辐射的关系

对黑体, $\alpha = \varepsilon = 1$
 对实际物体, $\varepsilon < 1, \alpha < 1$

(一) 实际物体的吸收比 $\alpha = \alpha(\lambda)$

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。
单方向向外界投入辐射的总能量

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。
 $\alpha = \text{const}$
 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,是个常数。

物体的光谱吸收比随波长变化 \rightarrow 选择性
 (玻璃) 对可见光透明但对红外线辐射吸收 \rightarrow 温室效应

实际物体吸收比要根据表面性质

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha(\lambda, T_1) \cdot \varepsilon(\lambda, T_2) E_m(\lambda, T_2) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T_1) E_m(\lambda, T_1) d\lambda} = f(T_1, T_2, \text{表面1性质, 表面2性质})$$

3. 灰体

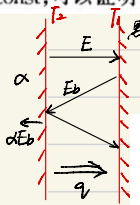
$$\alpha = \alpha(\lambda) = \text{const}$$

(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 ~ 2000 K 之间,此时绝大部分能量位于波长为 0.76 ~ 20 μm 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 $\varepsilon(T) = \alpha(T)$ 。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 $\alpha(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)$ 。



物体表面 $\alpha = \varepsilon_b = 1$
 $q = E - \alpha E_b$ 当 $T_1 = T_2$ 热平衡 $\frac{E}{\alpha} = E_b \rightarrow \alpha = \frac{E}{E_b} = \varepsilon$ 发射

(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:

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

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

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数值,恒等于同温黑体的辐射力 $(\frac{E}{\alpha} = E_b)$
 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 = 同温度下该物体的发射率 $(\alpha = \varepsilon = \frac{E}{E_b})$

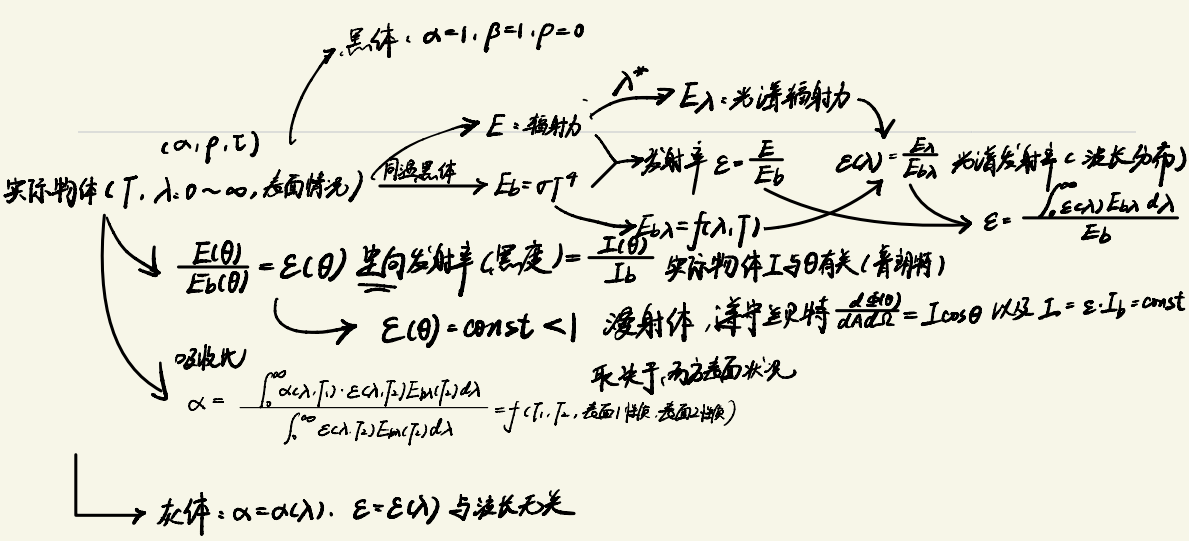
漫射灰体: 对于灰体,吸收比 α 无关波长 $\alpha(\lambda) = \text{const}$, 发射率 ε 是物性参数无关环境
 在某一温度下,灰体与黑体处于热平衡,则 $\alpha(T) = \varepsilon(T)$, 若保持自身温度不变,则对漫射表面一定有 $\alpha = \varepsilon$

假设辐射表面是具有漫射特性的灰体

大多数物体可作灰体处理,辐射力 E 输入,吸收能力 αE_b (发射辐射 ε 等于吸收)

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,定向	$\varepsilon(\lambda, \phi, \theta, T) = \alpha(\lambda, \phi, \theta, T)$	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	$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$	漫射表面,其发射比与吸收比与方向无关
全波段,半球	$\varepsilon(T) = \alpha(T)$	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?

解: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)何谓漫一灰表面?将实际表面视为漫一灰表面有何实际意义?

解:漫一灰表面**漫射的灰表面**,其光谱吸收比 $\alpha(\lambda)$ 以及定向发射率 $\epsilon(\theta)$ 都等于常数。将实际表面视为漫一灰表面,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,但因此引起了一定的误差,就在允许的范围内。

【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。

【8-4】(华中科技大学 2005 年考研试题)什么是定向辐射强度?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可见辐射面积(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、兰贝特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,因而是无条件具有黑度等于其吸收率。

【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?为什么铜锭在炉中加热时,随着温度升高,铜锭的颜色依次会发生黑、红、橙、白的变化?

解:热射线主要由**可见光和红外线组成**。随着温度升高,铜锭辐射能中重要部分的能量向波长较小的方向移动,所以铜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,草地会结冰,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热量等于它对天空的辐射。由于 $\alpha(T_{\text{air}} - T_{\text{min}}) = \epsilon(T_{\text{min}} - T_{\text{air}})$,所以 T_{min} 小于 T_{air} ,大于 T_{max} 。晴天,草地直接向天空热辐射,辐射热量增加, T_{min} 与 T_{air} 差值增大,结冰。无风, α 减小, T_{min} 与 T_{air} 差值增大,结冰。

【8-8】(华中科技大学 2004 年考研试题)什么是灰体?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对其他颜色的可见光(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 $\alpha(\lambda) = \epsilon$ 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,并不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看到屋面结冰,试从传热的观点分析:

(1)为什么有霜出现的早上必然是晴天? **晴天 天云**

(2)室外气温是否一定要低于 0℃? **不一定 地面温度 < 0℃**

(3)结霜屋面与不结霜屋面谁的保温效果更好,为什么? **结霜 热阻**

解:(1)屋面结冰的一个重要原因,是因为在晴天无云条件下,屋面能与天空进行辐射换热。由于天空温度较低,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。

(2)室外气温不一定**高于** 0℃,因为结霜的主要原因是由于屋面与天空之间的辐射传热,而辐射传热是通过电磁波来传递能量的,并不是借助于物质传递能量。

(3)结霜屋面的保温效果更好。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 ,单位可见面积辐射出去落到空间任意方向的单位立体角中的能量。其表达式为:

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

【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能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大量被这些气体吸收,无法发到宇宙空间,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 $\lambda_m T = 2.897 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。答案:对应于最大光谱辐射力的波长 λ_m 与温度 T 之间存在如下关系: $\lambda_m T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$,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冰,而晴天容易结冰?

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冰,而晴天容易结冰。

【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可按灰体处理?

解:在工业温度范围内,即 2000K 以下,有实际意义的热辐射能量大部分位于红外区段的 0.76~20μm。对于玻璃来说,在可见光区穿透率比较高,而在**工业热辐射范围**,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按灰体处理。

【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,按空间倾角 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。这是因为可见面积正比于 $\cos \theta$ 。

【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,是因为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,而吸热面发出的常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率低。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: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:辐射力是指**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 $[\text{MT}^{-3}]$ 。

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

一、辐射传热的角系数 (几何因子) 与表面温度和ε无关

两个表面之间的辐射传热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。

(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:

$$dA_1 X_{d1,d2} = dA_2 X_{d2,d1} \quad X_{d1,d1} \leftrightarrow X_{d2,d1} \text{ 不独立}$$

有限大小表面间角系数的相对性的表达式:

$$A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1} \quad \Phi_{12} = A_1 E_{b1} X_{1,2} = A_2 E_{b2} X_{2,1} = -\Phi_{21} \quad E_b = \sigma T^4$$

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:

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

其中,若表面1为非凹表面时, $X_{1,1}=0$;若表面1为凹表面, $X_{1,1} \neq 0$

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:

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

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

2.代数分法

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法。

(1)三个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:

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

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:

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

(一)两两表面组成的封闭腔的辐射传热计算

①(凹体表面)1和2之间的辐射传热量为: 故有方向无长的二维系统

$$\Phi_{12} = A_1 X_{1,2} E_{b1} - A_1 X_{2,1} E_{b2} = A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) = A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\left(\frac{1}{A_1 X_{1,2}}\right)}$$

$\frac{1}{A_1 X_{1,2}} = \frac{1}{A_2 X_{2,1}}$ 是空间辐射热阻

热阻网络如图9-4所示。



图9-3

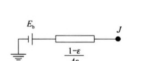


图9-4

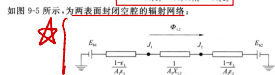
若两个漫灰表面1,2构成封闭空腔, $T_1 > T_2$,则表面1净损失表面2净获得的热量分别为

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} \quad \Phi_2 = \frac{J_2 - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \\ \text{表面1,2之间净辐射传热量为:} \\ \Phi_{12} &= A_1 X_{1,2} (E_{b1} - A_1 X_{1,1} J_1 - A_1 X_{1,2} (J_1 - J_2)) = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} \end{aligned}$$

根据能量守恒

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_{12} \quad \Phi_{12} = \frac{1}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

故可得:



如图9-5所示,为两表面封闭腔的辐射网络。

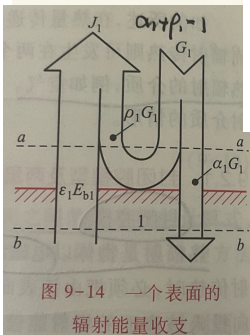


图9-14 一个表面的辐射能量收支

(二)两表面之间的辐射传热
有效辐射 $\epsilon = \epsilon_0, \alpha = 1, \rho = \alpha = \epsilon$
单位时间内离开单位面积表面的总辐射能称为有效辐射,用符号J表示,单位是W/m²。
单位时间内落到单位面积上的总辐射能,记为G。有效辐射J不仅包括表面的自身辐射E,而且还包括投入辐射G中被表面反射的部分\rho G。有效辐射J有下面的表达式:

2.有效辐射与辐射传热的关系
分别对表面1的外部 and 内部来观察,其能量收支差值应等于有效辐射J与投入辐射G之差,也等于辐射能量与吸收的能量之差,即:

$$q = J_1 - G_1 = E_1 - \alpha_1 G_1 = \epsilon_1 E_{b1} - \alpha_1 G_1$$

得到J与表面净辐射传热量的关系: $J = \frac{E - \alpha G}{1 - \epsilon} = E - \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon}\right) q$,式中的各个量均是对同一表面而言的,而且以向外算的净热量为正。

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为 $\Phi = J - G$

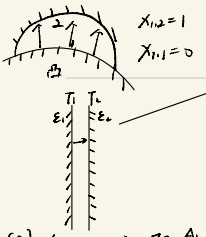
$$\frac{\Phi}{A} = \epsilon E_1 - \alpha_1 G = \epsilon (E_1 - J)$$

而 上述两式联立可得:

$$\Phi = \frac{E_1 - J}{\frac{1-\epsilon}{\epsilon A}}$$

式中 $\frac{1-\epsilon}{\epsilon A}$ 为表面辐射热阻。

(1) 表面1为平面 表面2为凸表面



$$\Phi_{12} = \frac{E_1 - E_{b1}}{\frac{1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 x_{12}} + \frac{1}{\epsilon_2 A_2}} = \frac{A_1 (E_1 - E_{b1})}{(\frac{1}{\epsilon_1 - 1}) + x_{12} + \frac{1}{\epsilon_2 (\frac{A_2}{A_1} - 1)}} = \frac{A_1 (E_1 - E_{b1})}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2 (\frac{A_2}{A_1} - 1)}}$$

系统总度

$$E_s = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2 (\frac{A_2}{A_1} - 1)}}$$

$$\Phi_{12} = E_s A_1 (E_1 - E_{b1})$$

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

$$\Phi_{12} = \epsilon_1 A_1 (E_1 - E_{b1}) \quad \text{即 } E_s = \epsilon_1$$

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。

$$\frac{1 - \epsilon}{\epsilon A} = 0 \quad J_3 = E_{b3}$$

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。

★ 净辐射传热 $q = 0$ 全辐射面: 温度恒定

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 $(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon A})$ < 发射率 ϵ 首先减小串联环节的**最大热阻项**

过高而用浅色油漆作为涂层。这些都是用减少发射率的方法来削弱传热的例子。

2. 控制表面的空间热阻

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射体的辐射角系数。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所示的通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素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;从辐射的角度该处电子元件对冷表面的角系数远大于将元件置于印制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。

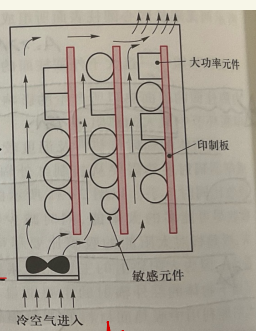
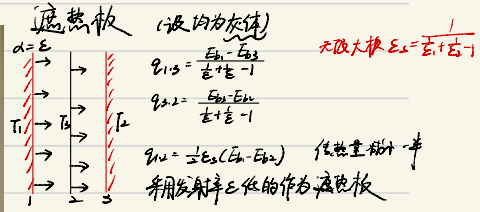
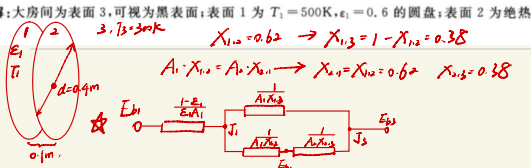


图9-41 电子机箱布置示意图



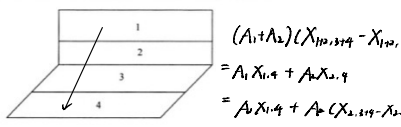
并用发射率低的作为**遮热板**

【9-1】(华中科技大学 2006 年考研试题)两个直径为 0.4m 的平行同轴圆盘相距 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 $\epsilon_1=0.6$, 另一圆盘绝热。若两圆盘的背面均不参与换热, 求绝热表面温度的温度。已知两同轴圆盘之间的角系数 $X_{1,2}=0.62$ (要求画出网络图)。



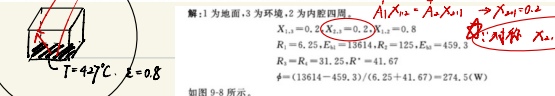
1,3 间的热流 $\Phi_{1,3} = \frac{E_{b1} - E_{b3}}{\frac{R_{1,3}}{A_1 X_{1,3}} + \frac{R_{3,1}}{A_3 X_{3,1}} + \frac{R_{1,3}}{A_3} + \frac{R_{3,1}}{A_1}}$
 $\Phi_{1,3} = \frac{E_{b1} - E_{b3}}{\frac{R_{1,3}}{A_1 X_{1,3}} + \frac{R_{3,1}}{A_3 X_{3,1}} + \frac{R_{1,3}}{A_3} + \frac{R_{3,1}}{A_1}}$
 绝热表面温度为: $E_{b2} = \Phi_{1,2} \rightarrow \Phi_{1,2} = [E_{b1}/\epsilon_1]^{1/4}$

【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 $X_{1,2}, X_{2,3}, X_{3,4}, X_{2,4}, X_{3,2}$)。



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

【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°C , $\epsilon=0.8$ 。炉子顶部开口, 内腔四周及炉子底面均敷设绝热材料。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前提下, 为保持炉子恒定的地面温度所需供给的电功率(要求画出网络图)。

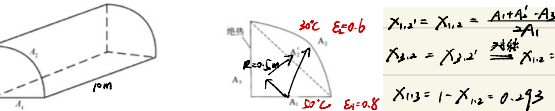


解: 1 为地面, 3 为环境, 2 为内腔四周。
 $X_{1,2} = 0.2, X_{2,1} = 0.8$
 $R_1 = 6.25, E_{b1} = 13614, R_2 = 125, E_{b2} = 459.3$
 $R_3 = R_4 = 31.25, R_4 = 41.67$
 $\Phi = (13614 - 459.3) / (6.25 + 41.67) = 274.54\text{W}$

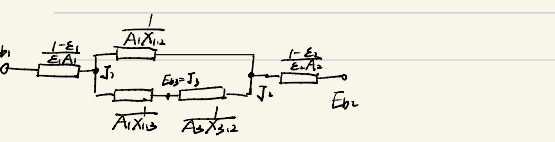
【9-4】(华中科技大学 2004 年考研试题)什么是角系数? 对于非黑体之间的辐射, 角系数成为纯几何量的条件是什么?

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, 只能在等强辐射表面(也就是漫射表面)之间的辐射能量传递中才能成立。

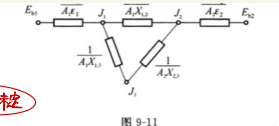
【9-5】(华中科技大学 2004 年考研试题)一个箱体, 其形状为圆柱的四分之一, 箱内抽成真空(如图 9-9 所示)。圆柱内表面半径为 0.5m, 箱体长 10m; 平表面 A_1 的温度为 50°C , 黑度为 0.8; 圆柱内表面 A_2 温度为 30°C , 黑度为 0.6; 另一平表面 A_3 为绝热表面。假定两端的辐射传热可忽略不计。试画出箱体内部辐射系统网络图, 并计算表面 A_1 与表面 A_2 之间的辐射传热热量以及表面 A_3 的温度。假设黑体辐射常数为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$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



$A_2 X_{2,1} = A_1 X_{1,2} \rightarrow X_{1,2} = \frac{A_2 X_{2,1}}{A_1} = \frac{0.5 \times 10 \times 0.6}{10 \times 0.8} = 0.375$
 $X_{1,3} = 1 - X_{1,2} = 0.625$



【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表面温度未定而净辐射换热量为零的表面。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为零, 不满足重辐射表面的定义。

【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?

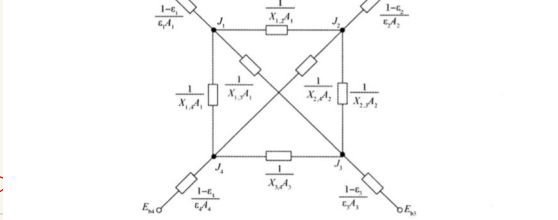
答: 对于反射率的要求, 当反射率 ρ 越大, 对于一物体而言, 由 $\alpha + \rho = 1$, 可知吸收比 α 越小。利用基尔霍夫定律可知, 此时对应的遮热罩的发射率也越小, 从而使表面热阻增加, 总的传热系数减小, 隔热效果增加。

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 $\frac{\delta}{\lambda A}$ 增加, 从而使总的热阻增加, 传热系数降低, 隔热效果增强。

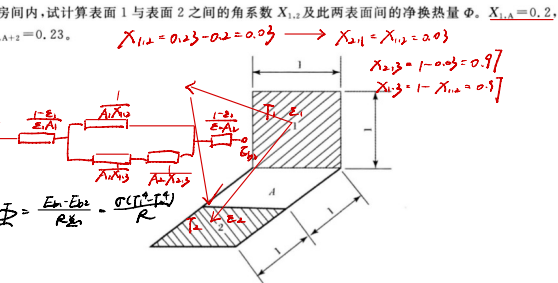
【9-9】(上海交通大学 2001 年考研试题)简述气体辐射的特性。(限 80 字)

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。

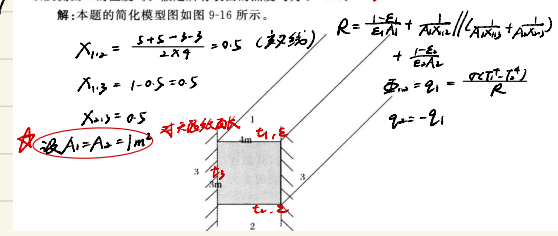
【9-10】(上海交通大学 2002 年考研试题)试画出四个灰体表面间的辐射传热网络图并写出其四个节点的辐射传热计算方程组(不需展开)。



【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 。 $X_{1,1}=0.2$, $X_{1,1+2}=0.23$ 。



【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, 假定它在垂直纸面方向上无限长。已知上表面的温度 $t_1=25^\circ\text{C}$, 下表面的温度 $t_2=13^\circ\text{C}$, 其余两个侧面(用 3 表示)均为绝热。度借用辐射网络图, 计算上、下表面的净辐射传热热量 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。
 $X_{1,2} = \frac{5 \times 5 - 2 \times 3}{2 \times 9} = 0.5$
 $X_{1,3} = 1 - 0.5 = 0.5$
 $X_{2,3} = 0.5$
 $\Phi = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_{1,2}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R}$

[9-13] (东南大学 2002 年考研试题) 图 9-18 表示一被半球表面 3, 其黑度 $\epsilon_3 = 0.475$, 并且处于辐射平衡中。被半球表面所覆盖的圆盘的面积为 A_1 , 其黑度 $\epsilon_1 = 0.35$, 温度 $T_1 = 555\text{K}$, 而圆盘的另一半表面即表面 2 为 $T_2 = 333\text{K}$ 的黑体。半球的直径为 0.3m 。试求:

(1) 画出该系统的辐射网络图; $d = 0.3\text{m}$

(2) 计算表面 1 和 2 之间的辐射换热量; i_{12}

解: $X_{1,3} = 1$ $X_{2,3} = 1$ $X_{2,1} = X_{1,2} = \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2}$

$E_{b1} \frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} \frac{1}{A_1} \frac{1}{A_3} \frac{1}{A_2} E_{b2} = J_1 = J_2 = J_3 = J$

$A_1 X_{1,3} = A_3 X_{3,1} \quad A_2 X_{2,3} = A_3 X_{3,2} \quad \therefore X_{2,1} = X_{1,2} = 0.25$

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

[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 $d = 150\text{mm}$, 表面黑度和温度分别为 $\epsilon = 0.8, t_w = 60^\circ\text{C}$, 周围环境和空气的温度 $t_f = 20^\circ\text{C}$, 空气处于自由运动状态。试计算每米长的散热损失。准则关联式: $Nu = 0.48(GrPr)^{0.25}$

解: $R = \frac{d}{4} = 37.5\text{mm}$

$\Phi = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{d}{4}}$

$\Phi = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{d}{4}}$

$\Phi = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{d}{4}}$

[9-15] (东南大学 2000 年考研试题) 用一裸露的热电偶测烟道内的烟气温度, 其指示值为 280°C 。已知烟道壁面温度为 250°C , 热电偶的表面黑度 0.9 , 与烟气的对流换热系数为 $100\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 求烟气的实际温度。若烟气的实际温度为 317°C , 热电偶的指示值应为多少?

解: $A \cdot \epsilon \sigma (T_w^4 - T_f^4) = h A (t_f - t_w) \rightarrow t_f = 285.5^\circ\text{C}$

[9-16] (浙江大学 2006 年考研试题) 气体辐射的特点是 对波长选择性 非局部性

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 各向同性

答案: 各朝向辐射同性, 即满足兰伯特定律的辐射

[9-19] (浙江大学 2005 年考研试题) 角系数的定义是 面积比

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 $I_{\lambda,0} = I_{\lambda,0} e^{-\lambda x}$

答案: $I_{\lambda,0} = I_{\lambda,0} e^{-\lambda x}$, 其中, $I_{\lambda,0}$ 为投射到气体界面 $x=0$ 处的光谱辐射强度, $I_{\lambda,x}$ 为通过一厚度 x 后的辐射强度 $I_{\lambda,x}$ 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 $\sum_{i=1}^N X_{i,i} = 1$

答案: $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$ $\sum_{i=1}^N X_{i,i} = 1$

[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 $\sum_{i=1}^N X_{i,i} = 1$

(3) 可加性, 数学表达式为 $X_{1,2} = \frac{A_2}{A_1} X_{2,1}$

答案:

(1) 相对性 $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$

(2) 完整性 $\sum_{i=1}^N X_{i,i} = 1$

(3) 可加性 $X_{1,2} = \frac{A_2}{A_1} X_{2,1}$

[9-23] (浙江大学 2000 年考研试题) 半球面对底部圆盘的角系数为 0.25

答案: $\frac{1}{4}$ $X_{3,1} = X_{3,2} = 1$

[9-25] (浙江大学 2006 年考研试题) 一根套管, 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 。画出该系统的辐射换热网络图并计算出 单位管长内管表面的净辐射热损失。为减少内外管间的辐射传热, 又在内外管间同心套上外径为 300mm , 厚 1mm 的钢管, 内外管的辐射率为 0.7 , 忽略钢管的导热热阻, 再求此时单位管长内管表面的净辐射热损失。

(1) $E_{b1} \frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} \frac{1}{A_1} \frac{1}{A_2} \frac{1}{A_3} E_{b2} = J_1 = J_2 = J_3 = J$

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

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

[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都要套管抽气热电偶? 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 , 流道管内壁温度为 t_w , 热接点与气流间的对流换热表面传热系数为 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灰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:

运用波耳兹曼定律, 整理后可得气流温度为:

$t_1 = t_f + \frac{\epsilon_1 C_0}{\epsilon_1} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$

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

$t_w = 998.2^\circ\text{C}$

热电偶显示的温度与实际的流体温度绝对误差达 206.2°C , 相对误差达 20% 。再分析抽气套管热电偶测温的情形, 模型简图如图 9-22 所示。

略去热电偶线路的导热不计, 而且假定气流与热电偶及气流与绝热罩间的对流传热的表面传热系数相同, 绝热罩的表面发射率为 ϵ_w 。热电偶与绝热罩内壁 (其温度记为 t_1) 有辐射传热, 并且仍然可以采用两个漫灰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这份辐射传热量为:

$q_{\text{rad}} = \epsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right]$

注: 下标 t_c 表示热电偶。

根据对流传热基本计算式, 可拟热电偶与气流间的对流传热为:

$q_{\text{conv}} = h(t_f - t_1)$

绝热罩同样有辐射与对流传热, 值得注意的是, 其内外表面同时存在与高温气流的对流传热。那么以绝热罩的单位面积考虑, 可得传热量为:

$q_{\text{conv}} = \epsilon_w C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \cdot q_{\text{conv}} = h(t_f - t_1)$

注: 下表 r_s 表示绝热罩。

当整个测试系统进入稳态后, 有如下等式成立: $q_{\text{rad}} = q_{\text{conv}} = q_{\text{conv}} = 2q_{\text{conv}}$

如果仍然取 $\epsilon_1 = \epsilon_w = 0.3, t_f = 600^\circ\text{C}$, 但是对流传热表面传热系数增加为 $118\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。通过计算可得: $t_1 = 951.2^\circ\text{C}$

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目此提高了不少。

综上所述, 可知, 为了尽可能地减少测温误差, 测量高温气体温度一般都要套管抽气热电偶。

[9-26] (浙江大学 2005 年考研试题) 有一 长管节, 忽略管壁厚。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 。画出该系统的辐射传热网络图, 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 外管外部表面和空气间的复合传热系数。

解: $\Phi_{1,2} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R}$

$\Phi = h A (t_1 - t_f) = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R} \rightarrow h = 12.13$

[9-27] (浙江大学 2004 年考研试题) 一种低沸点介质流过一根直径 $d_1 = 20\text{mm}$ 的长管道, 其外表面可视为漫灰表面, 黑度为 $\epsilon_1 = 0.02, T_1 = 20^\circ\text{C}$ 。其外有一直径为 $d_2 = 50\text{mm}$ 的同心套管, 内表面也为漫灰表面, 黑度为 $\epsilon_2 = 0.05$, 温度 $T_2 = 300\text{K}$ 。两管之间抽真空。

(1) 此种情形下 单位管长 从环境传给低沸点介质的热量是多少?

(2) 若在内外管之间再插一根直径为 $d_3 = 35\text{mm}$, 两面黑度相同均为 $\epsilon_3 = \epsilon_1 = 0.02$ 的薄壁管, 则单位长度从环境传给低沸点介质的热量是多少?

解: $\Phi_{1,2} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R}$

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

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

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。

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;

(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)在两块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:

$$q = \frac{E_{N1} - E_{1A}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_A} - 1} = \frac{E_{1B} - E_{N2}}{\frac{1}{\epsilon_B} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (1)$$

当板 3 的 B 面朝向表面 1 时:

$$q' = \frac{E_{N1} - E'_{1B}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_B} - 1} = \frac{E'_{1A} - E_{N2}}{\frac{1}{\epsilon_A} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2)$$