高等学校试用教材

炉内传热

哈尔滨工业大学秦裕琨 主编

炉 内 传 热
哈尔滨工业大学秦裕琨 主编
*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)
机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售
*
开本 787×1092 1/16·印张12·字数290千字
1981年7月北京第一版·1981年7月北京第一次印刷
印数 0,001—2,700 ·定价1.25元
*
统一书号：15033·5076

前 言

本书是根据1978年4月高等学校一机部对口专业座谈会的精神以及同年召开的一机部锅炉专业教材会议所制定的教材编写大纲编写的。

锅炉的炉膛是一个燃烧设备，同时又是一个换热器，在锅炉中燃料燃烧发出的热量有一半左右是在炉膛内传给工质的，在进行锅炉设计时必须进行炉膛传热计算。炉内传热的实质是辐射换热。本书首先着重阐述辐射换热的有关基本原理，讨论了各种介质的辐射特性，以及被透明介质或吸收性介质隔开的壁面之间的辐射换热过程，为分析炉内传热打下理论基础。在此基础上，讨论了炉膛传热计算的主要问题，介绍了几种典型计算方法，并着重分析我国常用计算方法的特点、适用范围和存在问题。随着大型火力发电机组的发展，锅炉炉膛尺寸不断加大，对传热计算的要求也不断提高，本书接着介绍了近年来迅速发展的不等温介质传热计算方法。最后，考虑到国内、外沸腾燃烧技术的迅速发展，书中对沸腾层传热过程也作了扼要介绍。

本课程是在学习“传热学”课程后进行的，为了保持本书的完整性，在第一章以及部分其它章节内，对某些有关基础知识进行了必要的复习。在进行炉膛传热计算以前必须进行燃烧计算，这些知识以及炉膛结构设计的知识在有关专业课中讲授，本书中不作介绍。

实际上，各种工业炉内的传热过程机理和锅炉是一致的，本课程的一些基本原理也可以用来分析工业炉内的传热问题。

本书可作为高等学校锅炉、热能工程等专业的教材，也可供从事上述专业的工程技术人员参考。

本书由秦裕琨同志主编，第一、二章由余其铮同志编写，由上海机械学院张昌煜同志担任主审。张昌煜同志对本书提出了很多宝贵意见，特此表示感谢。由于编写者水平有限，书中错误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

目　　录

第一章　热辐射的基本性质及定律

§1-1　热辐射的本质及基本定义

一、热辐射的本质

由于物体中粒子的激动，物体会向外发射辐射能。关于辐射能的传递，现在存在两种解释：量子力学和经典的电磁波理论。从量子力学的观点来看，辐射能的传递可以看作是光子的能量传递过程，是不连续的。光子的能量与其频率 ν 成正比。从电磁波理论的观点来看，辐射能的传递可以看作是电磁波的能量传递过程，是连续的。两者可以通过光子能量的频率 ν 与电磁波波长 λ 联系起来。除了物体辐射能按光谱分布的性质和气体的辐射性质外，电磁波理论和量子力学一样，能很好地解释物体的辐射基本性质。所以对于大部分工程中出现的热辐射现象，通常仍用电磁波理论来解释。

热辐射是指物体的热能转变为辐射能的现象。发射的电磁波叫热射线。它被其它物体吸收后，重新变为热能。热射线的光谱可分为两部分：可见光(在真空中波长为 0.35～0.76 微米）及红外线(在真空中波长为 0.76～1000 微米)。红外线有时还分为近红外线（波长为 0.76～25 微米）及远红外线两部分。

二、辐射能量的表示方法

物体向外辐射的能量是按空间分布的，又是按波长（或频率）分布的。为了充分描述辐射能量的这些性质，引入各种不同的能量表示方法。

在辐射换热中，空间的性质常用方向角和立体角表示。如有一半球，半径为 r，其基圆中心有一微元面积 dF，观察此微元面积发射出的一微元束能量的几何性质，如图 1-1。微元束能量的方向用方向角 β 与 θ 表示。β 角是基圆的法线与该方向的夹角。θ 角是在基圆上的投影和座标轴的夹角。

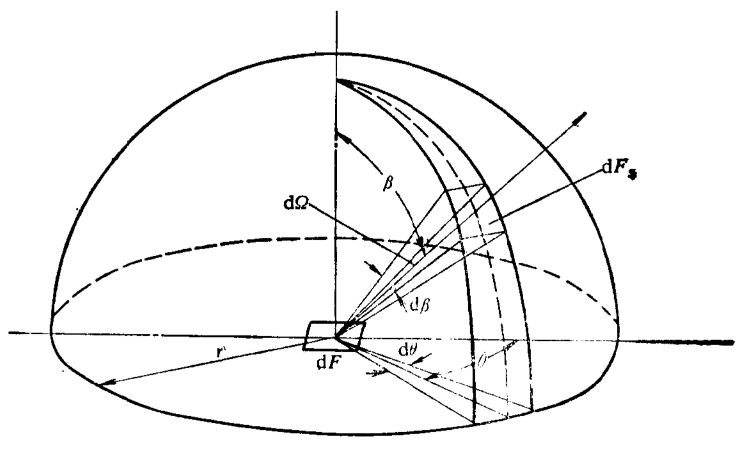

图1-1　微元束能量的几何性质

该束能量所占的空间角用立体角 $d\Omega$ 表示，其单位为球面度（立体弧度）

$$d\Omega = dF_s/r^2$$

式中 dF_s 为球面微元面积。半个空间的立体角等于 2π。

下面引入几个定义：

方向辐射力 物体在单位时间、单位面积、β、θ方向上单位立体角内发射出的从 λ = 0～∞的一切波长的总能量，符号为 $E_{\beta,\theta}$。由于物体的方向辐射力常与θ角无关，所以通常可表示为 E_β，单位为瓦/米²·球面度。如用 dQ 表示微元束的热流量，见图 1-2，则

$$E_\beta = \frac{dQ}{d\Omega dF}$$

辐射强度 物体在单位时间，与辐射方向垂直的单位面积上，单位立体角内发射出的一切波长的能量，符号为 I_β，单位为瓦/米²·球面度。由图 1-3，按定义可知

$$I_\beta = \frac{dQ}{d\Omega dF'}$$

而

$$dF' = \cos\beta dF$$

所以

$$E_\beta = I_\beta \cos\beta \qquad (1-1)$$

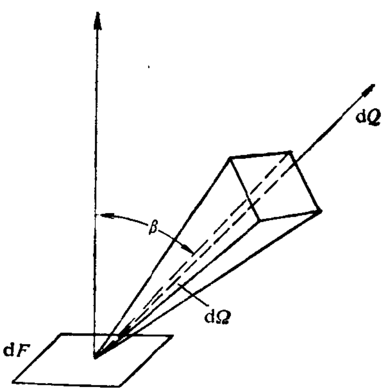

图1-2 方向辐射力

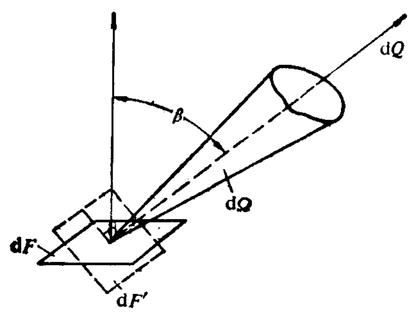

图1-3 辐射强度

辐射力 物体在单位时间、单位面积、向半个空间发射的一切波长的总能量。符号为 E，单位为瓦/米²。由定义可知，

$$E = \int_{2\pi} E_\beta d\Omega = \int_{2\pi} I_\beta \cos\beta d\Omega \qquad (1-2)$$

为了描述辐射能量按波长分布的性质，引入单色辐射力 E_λ、单色方向辐射力 $E_{\lambda\beta}$ 及单色辐射强度 $I_{\lambda\beta}$ 的概念。单色辐射力是单位时间、单位面积、向半个空间发射的波长为 λ 到 λ + dλ 区间的能量。单位为瓦/米²·微米。显然，辐射力与单色辐射力的关系为

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \qquad (1-3)$$

同理

$$\left.\begin{aligned} E_\beta &= \int_0^\infty E_{\lambda\beta} d\lambda \\ I_\beta &= \int_0^\infty I_{\lambda\beta} d\lambda \end{aligned}\right\} \qquad (1-4)$$

单色辐射力、单色辐射强度、单色方向辐射力之间也有式（1-1）与式（1-2）的关系。这样，可得

$$E=\int_0^{\infty}\int_{2\pi} I_{\lambda\beta}\cos\beta d\Omega d\lambda \tag{1-5}$$

三、物体热辐射性能的表示方法

（一）吸收率、反射率和穿透率

物体的吸收率、反射率和穿透率表示物体对从半个空间投射到它身上的一切波长的能量的吸收、反射和穿透的本领。吸收率 α 是物体吸收的能量占投射能量的份额。反射率 ρ 是物体反射的能量占投射能量的份额。穿透率 τ 是穿透物体的能量占投射能量的份额。它们之间有下列关系

$$\alpha+\rho+\tau=1 \tag{1-6}$$

对于大多数固体，$\tau=0$，则

$$\alpha+\rho=1 \tag{1-7}$$

吸收率、反射率和穿透率不仅与物体本身的性质有关，还和投射辐射的性质（辐射源的性质）有关。

（二）黑体、镜体、白体和透明体

对所有波长和各个方向的投射辐射的吸收率都等于 1 的物体称为绝对黑体，简称黑体。同样，穿透率为 1 的物体称为透明体，反射率为 1，且反射为镜面反射（符合几何光学的反射）的物体称为镜体，如反射为扩散反射（乱反射）则称为白体。这几种物体都是理想物体，但在工程计算中，在误差允许范围内，常将某些物体简化成这几种物体。例如，吸收率接近于 1 的物体就可简化成黑体，单、双原子气体可简化为透明体等。

（三）黑度

黑体的吸收本领最大，同样其辐射本领也最大，并且它的辐射能量按波长分布的规律、按方向分布的规律、与温度的关系都有严格的定律作了充分的描述。所以通常把黑体当作衡量物体辐射性质的标准。实际物体的辐射、吸收、反射性质都可以通过和黑体比较而得到。

描述物体辐射本领的物理量是黑度，或称辐射率。黑度 ε 是物体的辐射力 E 和同温度黑体辐射力 E_o 之比，表示物体的辐射本领接近黑体辐射的程度。

$$\varepsilon=E/E_o \tag{1-8}$$

§ 1-2 热辐射的基本定律

一、普朗克定律

普朗克定律描述了黑体辐射能量按波长分布的规律。此定律说明真空中黑体的单色辐射力与波长、温度的关系。其关系式为

$$E_{o\lambda}=\frac{2\pi C_1}{\lambda^5\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1\right]} \tag{1-9}$$

式中，波长 λ 的单位为米，温度 T 的单位为K。常数 $C_1=5.9544\times10^{-17}$瓦·米^2，$C_2=1.4388\times10^{-2}$米·K。

式（1-9）可以改写成下列形式

$$\frac{E_{o\lambda}}{T^5}=\frac{2\pi C_1}{(\lambda T)^5\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1\right]} \tag{1-10}$$

式（1-10）表明 $E_{o\lambda}/T^5$ 是 λT 的单值函数，见图1-4，曲线下面所包括的面积为 E_o/T^5，

$$\frac{E_o}{T^5}=\int_0^\infty \frac{E_{o\lambda}}{T^5}d\lambda$$

曲线极大值的横座标为

$$\lambda T = 0.28978 \quad 厘米·K \tag{1-11}$$

此式称为维恩位移定律，说明温度越高，对应最大单色辐射力的波长越短。

当 $C_2/\lambda T \ll 1$ 时，普朗克公式可简化为瑞利-金斯公式

$$E_{o\lambda}=\frac{C_2}{2\pi C_1}\ \frac{T}{\lambda^4} \tag{1-12}$$

当 $\lambda T \geqslant 100\,C_2$ 时，此公式与普朗克公式相差小于10%。

当 $C_2/\lambda T \gg 1$ 时，普朗克公式可简化为维恩公式

$$E_{o\lambda}=\frac{2\pi C_1}{\lambda^5}\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \tag{1-13}$$

当 $\lambda T \ll 0.2\,C_2$ 时，此式与普朗克公式相差不到1%。

如果黑体在介质中辐射，普朗克定律为

$$E_{o\lambda_m}=\frac{2\pi C_1}{n^2\lambda_m^5\left[\exp\left(\frac{C_2}{n\lambda_m T}\right)-1\right]} \tag{1-14}$$

式中 n 为介质的折射指数，$n=c_o/c$，c_o 为真空中的光速，c 为在该介质中的光速。λ_m 为介质中的波长，$\lambda_m=\lambda/n$。

在一般的工程气体中，折射指数 n 趋近于1。故式（1-14）可简化为式（1-9）。

二、斯蒂芬-包尔茨曼定律（四次方定律）

此定律说明黑体辐射力与温度的关系。黑体在真空中的辐射力为

$$E_o=\int_0^\infty E_{o\lambda}d\lambda$$

$$=\sigma T^4=C_o\left(\frac{T}{100}\right)^4 \tag{1-15}$$

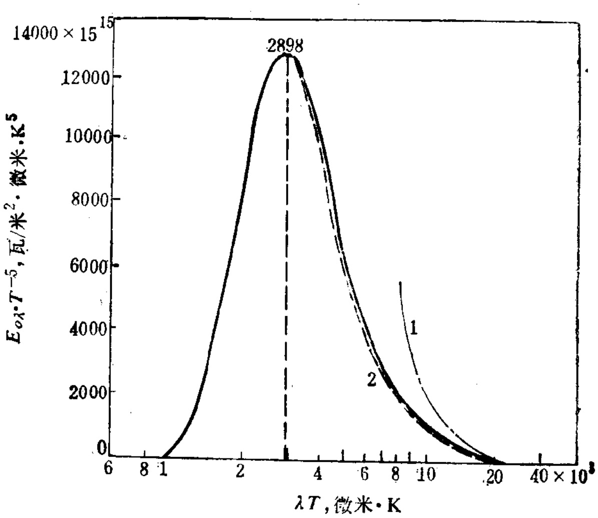

图1-4　普朗克定律

1—瑞利-金斯公式　2—维恩公式

式中，黑体辐射力 E_o 的单位为瓦/米²，黑体温度 T 的单位为K，则黑体的辐射常数 $\sigma=5.6693\times10^{-8}$瓦/米²·K⁴，黑体的辐射系数 $C_o=5.6693$ 瓦/米²·K⁴。如黑体辐射力 E_o 的单位为大卡/米²，则 $\sigma=4.9\times10^{-8}$大卡/时·米²·K⁴，$C_o=4.9$大卡/时·米²·K⁴。

在非真空中，$E_o=n^2\sigma T^4$，n 为介质的折射系数。

三、兰贝特定律（辐射余弦定律）

此定律说明黑体的方向辐射力沿空间分布的规律。对于黑体，空间中各个方向的辐射强度都相等，即

$$I_{o\beta_1}=I_{o\beta_2}=I_{o\beta_3}=\cdots\cdots=I_o$$

所以由式（1-1）可得

$$E_{o\beta}=I_o\cos\beta \tag{1-16}$$

此式即兰贝特定律。对于黑体，单色方向辐射力也符合此定律。

将式（1-16）对半个空间积分，可得

$$E_o=I_o\int_{2\pi}\cos\beta d\Omega=\pi I_o \tag{1-17}$$

凡是符合兰贝特定律的表面（不一定是黑体）称为扩散表面。所以，对于扩散表面，兰贝特定律的一般表示式为

$$\left.\begin{aligned}E_\beta&=I\cos\beta\\E&=I\pi\end{aligned}\right\} \tag{1-18}$$

四、克希荷夫定律

它描述物体的辐射本领和吸收本领的关系。表述如下：在平衡辐射时，任何物体的辐射力E与其同温度吸收率α之比，和该物体的性质无关，恒等于同温度黑体的辐射力E_o。平衡辐射是指系统内无热交换，即各处温度相同。此定律也适用于单色辐射力、方向辐射力、单色辐射强度等。其表示式为

$$E/\alpha=E_o \tag{1-19}$$

将黑度的定义式（1-8）代入上式，可得

$$\varepsilon=\alpha \tag{1-20}$$

即在平衡辐射时，物体的黑度恒等于同温度下该物体的吸收率。物体的吸收本领越大，其辐射本领也越大。

§1-3 固体表面的吸收率和黑度

物体的辐射与吸收是按方向与波长分布的，为了描述这些特点，黑度和吸收率也可分为方向黑度、方向吸收率和单色黑度、单色吸收率。

一、单色方向黑度

单色方向黑度$\varepsilon_{\lambda\beta}$是指物体在$\beta$方向上的单色辐射强度与同温度黑体同波长的单色辐射强度之比，即

$$\varepsilon_{\lambda\beta}=I_{\lambda\beta}/I_{o\lambda} \tag{1-21}$$

单色黑度ε_λ是指物体的单色辐射力与同温度黑体同波长的单色辐射力之比，即

$$\varepsilon_\lambda=\frac{E_\lambda}{E_{o\lambda}}=\frac{\int_{2\pi}I_{\lambda\beta}\cos\beta d\Omega}{\pi I_{o\lambda}}=\frac{\int_{2\pi}\varepsilon_{\lambda\beta}I_{o\lambda}\cos\beta d\Omega}{\pi I_{o\lambda}}=\frac{1}{\pi}\int_{2\pi}\varepsilon_{\lambda\beta}\cos\beta d\Omega \tag{1-22}$$

方向黑度ε_β是指物体在β方向的辐射强度与同温度黑体的辐射强度之比，即

$$\varepsilon_{\beta}=\frac{I_{\beta}}{I_{o}}=\frac{\int_{0}^{\infty}I_{\lambda\beta}\mathrm{d}\lambda}{I_{o}}=\frac{\int_{0}^{\infty}\varepsilon_{\lambda\beta}I_{o\lambda}\mathrm{d}\lambda}{I_{o}} \tag{1-23}$$

黑度与单色方向黑度的关系可由下式给出

$$\varepsilon=\frac{E}{E_{o}}=\frac{1}{E_{o}}\int_{0}^{\infty}I_{o\lambda}\mathrm{d}\lambda\int_{2\pi}\varepsilon_{\lambda\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega \tag{1-24}$$

黑度与方向黑度的关系如下：

$$\varepsilon=\frac{1}{\pi}\int_{2\pi}\varepsilon_{\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega \tag{1-25}$$

二、单色方向吸收率

单色方向吸收率 $\alpha_{\lambda\beta}$ 是指物体在 β 方向上吸收的单色辐射强度 $I_{x\lambda\beta}$ 占同样方向、同样波长的投射辐射强度 $I_{t\lambda\beta}$ 的份额，即

$$\alpha_{\lambda\beta}=I_{x\lambda\beta}/I_{t\lambda\beta} \tag{1-26}$$

单色吸收率 α_{λ} 是指物体吸收的单色辐射力 $E_{x\lambda}$ 占同样波长的投射单色辐射力 $E_{t\lambda}$ 的份额，即

$$\alpha_{\lambda}=\frac{E_{x\lambda}}{E_{t\lambda}}=\frac{\int_{2\pi}\alpha_{\lambda\beta}I_{x\lambda\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega}{\int_{2\pi}I_{t\lambda\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega} \tag{1-27}$$

方向吸收率 α_{β} 是指物体在 β 方向吸收的辐射强度 $I_{x\beta}$ 占同方向投射辐射强度 $I_{t\beta}$ 的份额，即

$$\alpha_{\beta}=\frac{I_{x\beta}}{I_{t\beta}}=\frac{\int_{0}^{\infty}\alpha_{\lambda\beta}I_{x\lambda\beta}\mathrm{d}\lambda}{\int_{0}^{\infty}I_{t\lambda\beta}\mathrm{d}\lambda} \tag{1-28}$$

吸收率 α 与 α_{λ}、α_{β}、$\alpha_{\lambda\beta}$ 有下列关系

$$\alpha=\frac{E_{x}}{E_{t}}=\frac{\int_{0}^{\infty}\int_{2\pi}\alpha_{\lambda\beta}I_{x\lambda\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}\lambda}{\int_{0}^{\infty}\int_{2\pi}I_{t\lambda\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}\lambda}=\frac{\int_{0}^{\infty}\alpha_{\lambda}E_{x\lambda}\mathrm{d}\lambda}{\int_{0}^{\infty}E_{t\lambda}\mathrm{d}\lambda}$$

$$=\frac{\int_{2\pi}\alpha_{\beta}I_{x\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega}{\int_{2\pi}I_{t\beta}\cos\beta\mathrm{d}\Omega} \tag{1-29}$$

从式（1-29）可以看出，吸收率除了和物体本身的性质、状态有关外，还和投射辐射的性质有关。同一状态的物体，对不同性质的投射辐射，其吸收率是不同的。例如，磨光的铜，对红外线辐射（一般温度的黑体辐射），其吸收率大约为 0.09 左右；而对太阳辐射（可见光辐射）其吸收率为 0.47 左右。更显著的是霜，对于同温度黑体辐射（红外线辐射），其吸收率约为 0.98，接近黑体；可是对于太阳辐射，其吸收率只有 0.1 左右。

吸收率的这种性质对确定其数值带来很大的麻烦。所以，有必要对投射辐射的性质作一

个统一的规定。目前有两种方法：

第一种方法，是将投射辐射定为单色辐射，测出各种波长的单色法向方向吸收率$\alpha_{\lambda\beta=0}$，这样，只要知道$\alpha_{\lambda\beta}=f(\alpha_{\lambda\beta=0},\ \beta)$的关系，及投射辐射的光谱和方向分布，就可以通过式(1-29)精确地计算出物体的吸收率来。这种方法虽然精确，但由于对不少材料的$\alpha_{\lambda\beta}$还研究不够，又很复杂，现尚不便于工程应用。

第二种方法，是规定辐射源为一定温度的黑体。从工程应用出发，一般取两种黑体，一个是太阳（它是约6000K的黑体），另一个是红外线黑体。所以在工程手册上，物体的吸收率有两类，一类是对太阳的吸收率，一类是一般工业中用的吸收率。

显然，在工业设备中，投射到物体表面的热辐射并不是黑体辐射，即使投射辐射源是黑体，它的温度也往往不等于求该物体吸收率时用的黑体温度。这就会引起误差。但在一般情况下此误差很小，远小于计算方法本身的误差。

§1-4 扩散灰体和扩散反射

一、真实固体表面与黑体的差别

在工程实际中遇到的固体表面与黑体有差别，这些差别主要有三个方面：

1. 真实固体表面的辐射沿空间各个方向的分布是不均匀的，其辐射强度I_β是方向角β的函数。而对于黑体，其辐射强度在各个方向是均匀分布的，符合兰贝特定律，见图1-5。

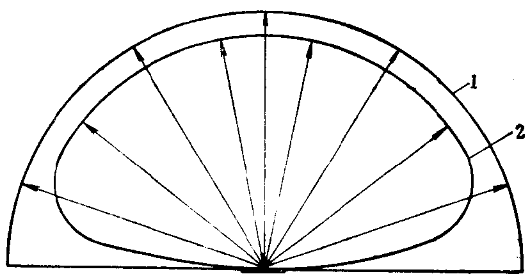

图1-5 辐射强度的分布

1—黑体 2—某实际物体

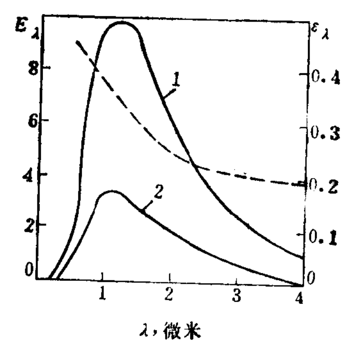

图1-6 $T=2450$K时钨的单色黑度

1—黑体的单色辐射力 2—钨的单色辐射力

——E_λ ------ε_λ

2. 黑体的辐射光谱符合普朗克定律，其单色黑度和单色吸收率恒等于1。实际固体表面的辐射光谱能量不仅比同温度黑体小，并且辐射和吸收都具有选择性，其单色黑度、单色吸收率随波长而变化，即$\varepsilon_\lambda=f(\lambda)$，$\alpha_\lambda=f(\lambda)$。图1-6表示的是钨的单色黑度随波长的变化。

3. 黑体的反射率恒等于零，而实际固体表面的反射率不仅不等于零，并且与方向、波长有关。

辐射换热计算的基础是§1-2给出的黑体三定律和克希荷夫定律。所以物体的性质离开黑体越远，其计算就越复杂。从简化计算的角度上看，在允许的误差范围内，尽可能忽略一些次要影响的因素，尽可能地使它"接近"黑体。这样，就提出了几个简化了的理想条件——

灰体、扩散辐射和扩散反射。

本书介绍的几种分析方法，大部分是基于这些简化条件得到的。为了充分了解这些方法的适用范围，也为了给进一步探讨更精确的计算方法打下基础，本节较详细地介绍这些条件。

二、扩散辐射

扩散辐射是指符合兰贝特定律的辐射，即物体的辐射强度在空间各个方向上是均匀分布的。根据克希荷夫定律，扩散辐射的物体必定是扩散吸收，即物体在各个方向的吸收本领是相同的。

对于金属，一般在 $\beta=0\sim50^\circ$ 范围内可认为是扩散辐射，对于非金属，一般在 $\beta=0\sim(60^\circ\sim70^\circ)$ 范围内可认为是扩散辐射。由于以上原因，以及炉内传热计算的精度一般并不要求很高，在本书以后的计算中一般都假定固体表面为扩散辐射。

三、灰体

原先，灰体这个名词是作为一个理想物体的命名，现在趋向于作为某种理想物体的一个性质，所以更确切地说，应称为“灰的”。但为了顺从习惯，以后仍用灰体这个名词。

灰体是针对实际物体辐射光谱按波长分布的复杂性而提出的一个简化条件，它是指物体的辐射与吸收没有选择性的一种性质，即单色黑度、单色吸收率与波长无关，辐射光谱与黑体的相似，任何波长的单色辐射力都比黑体的小同样比例，见图 1-7，$\varepsilon_\lambda=a/b=a'/b'=\varepsilon$。从辐射光谱的角度上看，灰体只是比黑体“灰”一些。

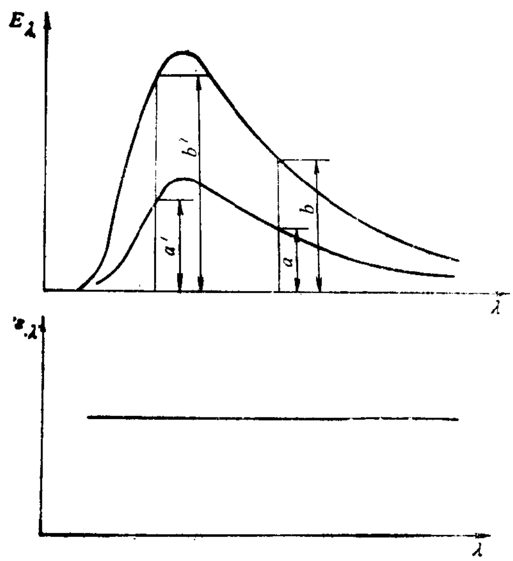

图1-7 灰体的定义

灰体的吸收率等于其黑度，与投射辐射源（黑体）的温度无关。证明如下：

由克希荷夫定律可知

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

黑度 ε 后括号中的 T 表示物体的温度，吸收率 α 后括号中前一个 T 表示物体的温度，后一个 T 表示黑体投射辐射源的温度。用文字表示是：T 温度时物体的黑度等于 T 温度时的吸收率，此吸收率是对 T 温度的投射辐射源而言的。

如投射辐射源的温度改为 T_1，其吸收率为 $\alpha(T,\ T_1)$，由前可知，一般情况下，

$$\alpha(T,\ T)\neq\alpha(T,\ T_1)$$

所以

$$\varepsilon(T)\neq\alpha(T,\ T_1)$$

对于灰体，其吸收没有选择性，不管投射辐射的光谱分布如何变化，其吸收率保持不变，所以

$$\alpha(T,\ T)=\alpha(T,\ T_1)=\alpha(T,\ T_2)=\cdots$$

因此，对于灰体，

$$\varepsilon(T)=\alpha(T,\ T)=\alpha(T,\ T_1)=\alpha(T,\ T_2)=\cdots=\alpha(T)$$

对于单色方向吸收率，由于已经规定了投射辐射的性质，所以不必要标出投射辐射源的温度，可以直接写作 $\alpha_{\lambda\beta}(T)$，故

$$\varepsilon_{\lambda\beta}(T)=\alpha_{\lambda\beta}(T)$$

对于固体壁面，灰体可分为方向灰体和扩散灰体。

方向灰体是指只在 β 方向上的辐射与吸收没有选择性，即

$$\varepsilon_{\lambda_1\beta}(T)=\varepsilon_{\lambda_2\beta}(T)=\varepsilon_{\lambda_3\beta}(T)=\cdots=\varepsilon_{\beta}(T)$$

$$\alpha_{\lambda_1\beta}(T)=\alpha_{\lambda_2\beta}(T)=\alpha_{\lambda_3\beta}(T)=\cdots=\alpha_{\beta}(T)$$

由此可得

$$\varepsilon_{\beta}(T)=\alpha_{\beta}(T)$$

扩散灰体是指在空间所有方向上，辐射与吸收都没有选择性，即

$$\varepsilon_{\lambda\beta}(T)=\varepsilon_{\beta}(T)=\varepsilon(T)$$

$$\alpha_{\lambda\beta}(T)=\alpha_{\beta}(T)=\alpha(T)$$

即

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

对于大多数工程材料（金属与非金属材料），短波段选择性较显著，在长波段不显著。而炉膛内的温度不高于 3000 K，主要是红外线辐射，所以对于炉内辐射，一般工程材料可以近似地认为是灰体。

四、扩散反射

扩散反射是指反射辐射在其空间方向内的分布遵守兰贝特定律。即无论投射辐射是从那个方向来，反射辐射强度与反射角无关。

对于实际固体表面，反射辐射强度的分布与投射辐射的入射角、投射辐射的波长、表面的粗糙度等有关。一般，在反射角方向的反射辐射强度比较大，见图 1-8。从热射线反射的角度看，物体表面的粗糙度与投射辐射的波长是相对应的。如波长比表面凹凸的尺寸大，则此表面可认为对相应波长是光滑的，反之就是粗糙的。光滑表面的反射辐射比较接近镜面反射，粗糙表面的反射辐射比较接近扩散反射。

炉内的固体表面常沾了很多污垢，很粗糙，并且投射到固体表面的辐射强度在各个方向上相差不太悬殊，所以一般可假定表面为扩散反射。

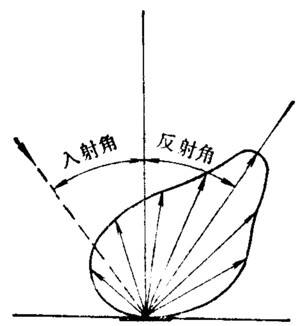

图1-8 反射辐射与入射角关系的示意图

第二章　被透明介质隔开的固体表面间的辐射换热

被透明介质隔开的固体表面间的辐射换热除了和它们的表面温度有关外，还和两个因素有关：一个是固体表面的辐射性能——黑度和吸收率，一个是参与换热的固体表面的几何特征——表面大小、相互位置及形状。对于某些几何形状简单的灰体系统，这三个因素可以分别考虑。对于形状、相互位置比较复杂的辐射换热系统，这三个因素往往相互影响，彼此交错在一起，计算就很复杂，在工程计算中往往要作一些简化。

对于最简单的情况，两块温度均匀的无限大平行平板间的辐射换热，几何特征的影响最简单，这在一般的传热学教科书中已有阐述。本章主要围绕炉膛中出现的某些几何形状，着重讨论比较复杂的或多表面的封闭系统的辐射换热计算，为讨论炉内辐射换热计算打下基础。

§2-1　辐射热量的形式及辐射换热计算

一、辐射热量的形式

由第一章可知，物体在单位时间内，由单位面积上辐射出的能量称为辐射力。如果是单位时间内发射出的热量，一般传热学中称为热流量，单位是瓦。无论是热流量、辐射力都没有涉及到这个热量的起因，只表示了热量的数值大小。根据辐射热量的起因不同，可以将它分成以下几种：

1. 本身辐射　由于温度的原因，物体自身发射的辐射热量称为本身辐射。对于黑体，可用斯蒂芬-包尔茨曼定律计算它。本书中以下标“b”表示之，例如Q_b表示本身热流量，E_b表示本身辐射力。

2. 投射辐射　外界投射到该物体的总热量称为对该物体的投射辐射，以下标“t”表示之。

3. 吸收辐射　对于吸收率不等于零的物体，投射辐射总有一部分或全部分被物体所吸收，这部分热量叫做该物体的吸收辐射，以下标“x”表示之，它等于

$$Q_x = \alpha Q_t \tag{2-1}$$

人感觉到的辐射热量是被人吸收的吸收辐射，测量辐射热的仪器接收到辐射热量也是此热量。只有当仪器的吸收率等于1，或者经过修正，才能测出投射到测热器上的投射辐射。

4. 反射辐射　对于不透明物体（穿透率等于零），投射辐射减去吸收辐射后剩余的热量就是反射辐射，以下标“f”表示之，即

$$Q_f = Q_t - Q_x \tag{2-2}$$

5. 有效辐射　物体的反射辐射与本身辐射之和称为该物体的有效辐射，以下标“y”表示之，即

$$Q_y = Q_b + Q_f \tag{2-3}$$

它是该物体向外辐射的总热量。能被人或辐射测热器感觉到的物体的辐射热量都是该物体的有效辐射。

以上几种热量之间的关系可以用图 2-1 表示。

6．辐射换热量　一个物体如和周围的物体温度不同，就存在辐射换热。物体的辐射换热量等于该物体净得或净失的辐射热量，有的书上也称它为净辐射或结果辐射。如果此物体得到热量，则此物体的辐射换热量为正，反之为负，一般用热流密度 q 或热流量 Q 表示。炉膛中受热面获得的热流密度 q 常常称为受热面的热负荷。

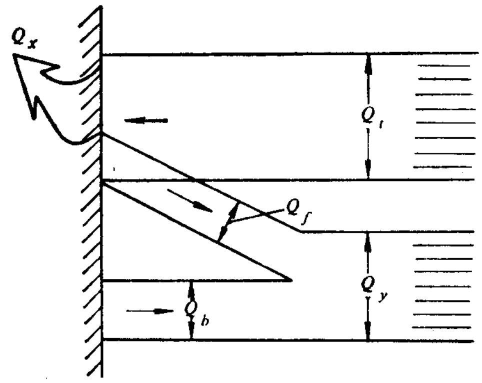

图2-1　各种热量的相互关系

二、有效辐射的讨论

在辐射换热计算中，有效辐射是一个很有用的概念。这里对它作进一步的讨论。对于不透明的物体，有效辐射可以用以下两种方法表示。

一方面直接根据有效辐射的定义，由式（2-3）可得

$$E_y = E_b + E_f$$

而

$$E_b = \varepsilon E_o;\quad E_f = (1-\alpha)E_t$$

所以

$$E_y = \varepsilon E_o + (1-\alpha)E_t \tag{2-4}$$

对于灰体，$\varepsilon = \alpha$，则

$$E_y = \varepsilon E_o + (1-\varepsilon)E_t \tag{2-5}$$

另一方面，有效辐射也可通过辐射换热量来表示，从该物体与外界物体的热平衡来看，可得

$$q = E_t - E_y$$

$$E_y = E_t - q$$

从该物体内部的热平衡来看，可得

$$q = E_x - E_b$$

$$E_x = E_b + q$$

另外，

$$E_t = \frac{1}{\alpha}E_x;\quad E_b = \varepsilon E_o$$

将以上几式合并，整理后可得

$$E_y = \frac{\varepsilon}{\alpha}E_o + \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right)q \tag{2-6}$$

如物体为灰体，则

$$E_y = E_o + \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)q \tag{2-7}$$

式（2-6）、（2-7）将物体的有效辐射与其辐射物性、温度、换热量联系起来，利用这个公式进行计算可带来很大方便。

从式（2-7）可以看出，如一个物体与周围物体无辐射热交换时，即 $q = 0$，其有效辐射恒等于黑体辐射，即 $E_y = E_o$。对于非灰体也是如此，因为在这种情况下，该物体的温度与周围物体的温度相等，投射辐射源的温度等于该物体的温度，处于平衡辐射。由克希荷夫定律可知，此时 $\varepsilon = \alpha$。并且，这时物体的有效辐射为扩散辐射，即使物体表面为镜面反射时

也是如此。所以各个方向上的有效辐射都等于黑体辐射。在实际生产中常可以看到这一现象，例如在加热炉中加热一块一半磨光一半粗糙的钢块，在没有加热时，由于磨光与粗糙处反射率不同，可以明显看出粗糙部分要比磨光部分黑一些。可是当钢块被加热到与炉温相等时，即平衡辐射时，磨光与粗糙部分就分不出来了。因为不管那部分的吸收率是大是小，其有效辐射都接近黑体辐射。吸收率小的部分，其本身辐射小，可是其反射辐射大。吸收率大的部分，其本身辐射大，但是反射辐射小。从这里可以得出一个结论，由任何材料组成的一个封闭体，只要各处是等温的，则其任何表面的有效辐射都等于此温度下的黑体辐射。没有水冷壁的锅炉炉膛、工件被加热到与炉温相同时的加热炉都可视为黑体。

三、被透明介质隔开的固体表面间的辐射换热计算方法

计算辐射换热的基础是能量守恒或热平衡原理。可以用不同方法建立辐射换热热平衡方程式，其计算方法也就不同。一般有三种方法。为了阐述方便起见，此处仅以两个无限大平行平面的辐射换热为例说明之。对于这个系统，可以认为只有两个物体参与换热，平面 1 发射出的热量都投射到平面 2 上，平面 2 发射的热量都投射到平面 1 上。设平面 1 的温度高于平面 2，两平面的辐射换热量等于平面 1 失去的热量，或平面 2 得到的热量。

（一）从物体表面与外界的热平衡来计算

从平面 1 表面与外界的热平衡来看，辐射换热热流密度 q 等于平面 1 的有效辐射力 E_{y1} 减去其投射辐射力 E_{t_1}，即

$$q_2=-q_1=E_{y_1}-E_{t_1}$$

由于 $E_{t_1}=E_{y_2}$，可得

$$q_2=E_{y_1}-E_{y_2} \tag{2-8}$$

由式（2-3），

$$\left.\begin{aligned}E_{y_1}&=E_{b_1}+(1-\alpha_1)E_{y_2}\\E_{y_2}&=E_{b_2}+(1-\alpha_2)E_{y_1}\end{aligned}\right\} \tag{2-9}$$

式（2-9）整理后可写成

$$\left.\begin{aligned}E_{y_1}&=\frac{E_{b_1}+(1-\alpha_1)E_{b_2}}{1-(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\\E_{y_2}&=\frac{E_{b_2}+(1-\alpha_2)E_{b_1}}{1-(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)}\end{aligned}\right\} \tag{2-10}$$

将式（2-10）代入式（2-8），考虑到 $E_{b_1}=\varepsilon_1\sigma T_1^4$，$E_{b_2}=\varepsilon_2\sigma T_2^4$，如果两个平面都是灰体，$\varepsilon_1=\alpha_1$，$\varepsilon_2=\alpha_2$，则可得

$$q_2=\frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1}+\dfrac{1}{\alpha_2}-1}\sigma(T_1^4-T_2^4) \tag{2-11}$$

（二）辐射差额法

由式（2-7）

$$\left.\begin{aligned}E_{y_1}&=E_{o_1}+\left(\frac{1}{\alpha_1}-1\right)q_1\\E_{y_2}&=E_{o_2}+\left(\frac{1}{\alpha_2}-1\right)q_2\end{aligned}\right\}$$

将以上二式代入式（2-8）

$$q_2 = E_{y_1} - E_{y_2} = \left[E_{o_1} + \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1\right)q_1\right] - \left[E_{o_2} + \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1\right)q_2\right]$$

考虑到 $q_2 = -q_1$，且 $E_{o_1} = \sigma T_1^4$，$E_{o_2} = \sigma T_2^4$，整理后得

$$q_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - 1}\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

（三）逐个计算多次反射与多次吸收

平面 1 和 2 的本身辐射分别是

$$E_{b_1} = \varepsilon_1 \sigma T_1^4$$
$$E_{b_2} = \varepsilon_2 \sigma T_2^4$$

如果两个平面是非黑体，平面 1 的本身辐射投射到平面 2 以后，一部分被平面 2 所吸收，另一部分反射回平面 1，而这部分反射回去的热量中，又有一部分被平面 1 所反射，返回平面 2，平面 2 又将从中吸收一部分，如此反复反射无穷多次，如图 2-2。这样，平面 2 从平面 1 的本身辐射 E_{b_1} 中吸收的热量是

$$E_{b_1}\alpha_2 + E_{b_1}(1-\alpha_2)(1-\alpha_1)\alpha_2 + E_{b_1}(1-\alpha_2)^2(1-\alpha_1)^2\alpha_2 + \cdots$$

平面 2 的本身辐射投射到平面 1 上以后，也将有一部分反射回来，并被平面 2 所吸收，而且和上述情况一样，也将多次反射，多次吸收。因此平面 2 从其本身辐射 E_{b_2} 中也将吸收一部分热量，等于

$$E_{b_2}(1-\alpha_1)\alpha_2 + E_{b_2}(1-\alpha_1)^2(1-\alpha_2)\alpha_2 + E_{b_2}(1-\alpha_1)^3(1-\alpha_2)^2\alpha_2 + \cdots$$

平面 2 失去的热量是 E_{b_2}，因此平面 2 获得的辐射换热量是

$$q_2 = E_{b_1}\alpha_2(1 + p + p^2 + \cdots) + E_{b_2}(1-\alpha_1)\alpha_2(1 + p + p^2 + \cdots) - E_{b_2}$$

式中 $p = (1-\alpha_1)(1-\alpha_2)$

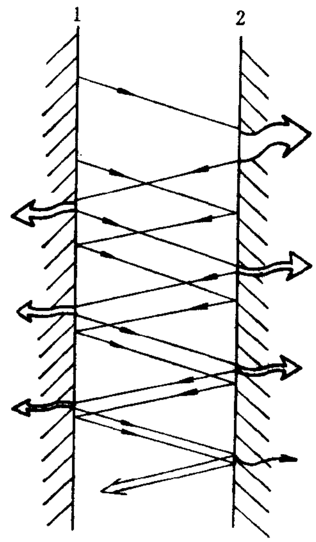

图2-2 多次反射与多次吸收

因为，如果 $p < 1$，$1 + p + p^2 + \cdots = \frac{1}{1-p}$，所以

$$q_2 = \frac{E_{b_1}\alpha_2 - E_{b_2}(1-\alpha_1)\alpha_2}{1-(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)} - E_{b_2}$$

如果两个平面都是灰体，则 $\varepsilon_1 = \alpha_1$、$\varepsilon_2 = \alpha_2$，上式可简化成

$$q_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - 1}\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

由上述讨论可知，以上三种计算方法虽然不同，却可得到同样的结果。

（四）近似解法

由于灰体不能将投射给它的热量全部吸收，在参与辐射换热的物体之间出现多次反射和吸收，使计算复杂化。但是，当两个物体的吸收率（黑度）都相当大时，可以只考虑一次吸