

高等学校教材

炉内传热

(第2版)

哈尔滨工业大学 秦裕琨 主编

机械工业出版社

360805

高等学校教材

炉内传热

(第 2 版)

哈尔滨工业大学 秦裕琨 主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是根据机械电子工业部高等学校热能工程(锅炉)专业教学指导委员会制订的教材编写大纲编写的。

本书着重分析锅炉炉膛传热。首先阐述了辐射换热的基本原理、各种介质的辐射特性以及被透明或吸收性介质隔开的壁面之间的辐射换热过程。在此基础上,讨论了炉内传热的主要问题,介绍了几种典型计算方法,并着重分析了我国常用计算方法的特点、适用范围和存在的问题,对近年迅速发展不等温介质传热计算方法也作了相当详细的讨论。考虑到国内外沸腾燃烧技术的迅速发展,故对沸腾层传热过程也做了扼要介绍。本书介绍的基本原理和方法也可用来分析各种工业炉的炉内传热问题。

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

炉 内 传 热

(第 2 版)

哈尔滨工业大学 秦裕琨 主编

*

责任编辑:郝育生 钱飒飒 版式设计:王 颖

封面设计:郭景云 责任校对:孙志筠

责任印制:王国光

*

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)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $13^{1/4}$ ·字数 321 千字

1981年8月成都第1版

1992年10月北京第2版·1992年10月北京第5次印刷

印数15 051—16 650·定价:3.85元

*

ISBN 7-111-03084-2/TK·121(课)

Q53
(2)

第 2 版 前 言

本书第 1 版是根据 1978 年 4 月原高等学校第一机械工业部对口专业座谈会的精神以及同年召开的原第一机械工业部锅炉专业教材会议制定的教材编写大纲编写的。根据机械电子工业部热能工程(锅炉)专业教学指导委员会制订的“七五”教材规划的要求,于 1990 年对第 1 版进行了修订。

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约有 $1/2$ 是在炉膛内传给工质的,因此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、适用范围和存在的问题。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,本书更介绍了近年来迅速发展的不等温介质传热计算方法。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,在第一章以及其它部分章节内,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等知识将在有关专业课中讲授,本书不作介绍。

实际上,各种工业炉内的传热过程机理和炉膛内的传热是一致的,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。

在修订时,将吸收性介质辐射一章中增加了散射的内容,炉膛传热计算一章中增加了近年来发表的研究成果。由于炉膛传热过程的数值模拟发展迅速,在不等温介质的辐射传热计算一章中作了较多补充。此外,书中的符号和单位表示方法均按国家有关标准作了相应修改。

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

本书第 1 版的第一、二章是由余其铮编写,其它各章是由秦裕琨编写,并由秦裕琨主编,由上海机械学院张昌煜主审。此次修订的第 2 版中,第一、二、三章由余其铮修订,其它各章由吴少华修订。吴少华还对第六章作了较多补充,本书仍由秦裕琨主编。修订稿由上海机械学院李美玲主审。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。

作 者

1991 年 6 月

基本符号表

A ——面积, m^2	τ ——穿透率, 折算时间
α ——炉膛黑度(系统黑度); 导温系数, m^2/s	Φ ——辐射能流量, W
c ——比热容, $J/(kg \cdot K)$	ϕ ——角系数
d ——直径, m	Ψ ——辐射有效系数
E ——辐射力, W/m^2	ψ ——热有效系数
g ——重力加速度, $g = 9.81 m/s^2$	Ω ——立体角, sr
I ——辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$	下标
K ——减弱系数, $1/m$; 传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$	b ——本身, 壁面, 水冷壁
p ——压力, Pa	c ——碳黑
Q ——热量, J	d ——对流
q ——热流密度, W/m^2	dl ——当量
r ——半径, m	f ——反射, 辐射
s ——距离, m	ft ——沸腾
T ——热力学温度, K	g ——介质, 固体
t ——摄氏温度, $^{\circ}C$; 时间, s	h ——火焰, 灰
V ——体积, m^3	j ——绝热, 计算
w ——速度, m/s	l ——炉膛
x ——有效角系数	lj ——临界
α ——吸收率; 放热系数, $W/(m^2 \cdot K)$	o ——黑体
δ ——光学厚度	q ——炉墙, 气体
ϵ ——黑度	i ——投射, 焦炭
θ ——烟气温度, $^{\circ}C$	x ——吸收
λ ——波长, μm ; 导热系数, $W/(m \cdot K)$	γ ——有效
μ ——介质中的粒子浓度, kg/kg , kg/m^3	μ ——单方向
ν ——运动粘度系数, m^2/s	λ ——单色
(光)频率, Hz	上标
ρ ——反射率; 密度, kg/m^3	o ——理论值
σ ——辐射常数(斯忒藩——玻耳兹曼常数), $\sigma = 5.6693 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$	' ——初始值, 入口值
	" ——终了值, 出口值

目 录

基本符号表

第一章 热辐射的基本性质

及定律..... 1

§1-1 热辐射的本质及基本定义..... 1

§1-2 热辐射的基本定律..... 3

§1-3 固体表面的吸收率和黑度..... 5

§1-4 灰体、漫辐射和漫反射..... 7

第二章 被透明介质隔开的固体表面间的辐射换热..... 10

§2-1 辐射热量的形式及辐射换热计算..... 10

§2-2 角系数..... 14

§2-3 本章计算方法的条件..... 30

§2-4 两个面组成的封闭系统的辐射换热计算..... 31

§2-5 多个面组成的封闭系统的辐射换热计算..... 33

§2-6 孔隙中的辐射换热..... 36

§2-7 热面、水冷壁与炉墙之间的辐射换热..... 40

第三章 吸收、散射性介质的辐射..... 49

§3-1 吸收、散射性介质的辐射特性..... 49

§3-2 辐射传递方程式..... 53

§3-3 有效辐射层厚度..... 58

§3-4 气体的吸收率与黑度..... 69

§3-5 含灰气体的黑度..... 78

§3-6 发光火焰的黑度..... 82

§3-7 煤粉火焰的黑度..... 85

§3-8 火焰黑度的测量..... 87

第四章 等温吸收性介质与固体壁面之间的辐射换热..... 91

§4-1 介质与受热面之间的换热..... 91

§4-2 介质、炉墙与受热面之间的换热..... 92

§4-3 灰体壁面与选择性气体介质的辐射换热..... 94

§4-4 古尔维奇方法的炉膛黑度..... 97

§4-5 等温灰体介质与多个等温面之间的换热..... 100

第五章 炉膛传热计算..... 105

§5-1 炉膛传热计算方法的分类..... 105

§5-2 火焰温度..... 107

§5-3 受热面积灰对炉内换热的影响..... 113

§5-4 炉膛传热计算公式..... 117

§5-5 液态排渣炉的传热计算..... 133

§5-6 炉膛内的对流传热..... 136

§5-7 辐射热流量的测量..... 138

第六章 不等温介质的辐射传热计算..... 142

§6-1 不等温介质辐射传热的特点..... 142

§6-2 分段计算法..... 144

§6-3 分区计算法..... 147

§6-4 热流法..... 162

§6-5 蒙特卡洛计算法..... 165

§6-6 炉膛传热计算的数学模型..... 175

第七章 沸腾层传热..... 181

§7-1 沸腾层的基本概念..... 181

§7-2 沸腾层传热的机理..... 181

§7-3 影响沸腾层传热的因素..... 183

§7-4 沸腾层传热的计算..... 190

附录 常用单位换算表..... 203

主要参考文献..... 205

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 $0.35\sim 0.76\mu\text{m}$ ）及红外线（在真空中波长为 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ ）。红外线有时还分为近红外线（波长为 $0.76\sim 25\mu\text{m}$ ）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。如有一半圆，半径为 r ，其基圆中心有一微元面积 dA ，观察此微元面积发射出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 角是微元面的法线与该方向的夹角。 θ 角是坐标轴与该方向在基圆上的投影的夹角。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），符号为 sr

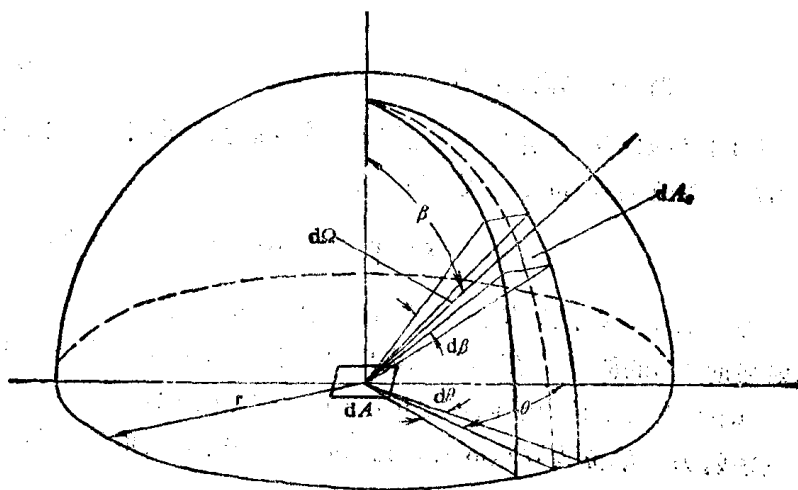


图1-1 微元束能量的几何性质

其单位为球面度（立体弧度），符号为 sr

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

式中 dA_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：

(1) 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 $\lambda = 0 \sim \infty$ 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 $W/(m^2 \cdot sr)$ 。如用 $d\Phi$ 表示微元束的辐射能流量, 见图1-2, 则

$$E_{\beta} = \frac{d\Phi}{d\Omega dA}$$

(2) 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 $W/(m^2 \cdot sr)$ 。由图1-3, 按定义可知

$$I_{\beta} = \frac{d\Phi}{d\Omega dA'}$$

$$dA' = \cos \beta dA$$

而
所以

$$E_{\beta} = I_{\beta} \cos \beta \quad (1-1)$$

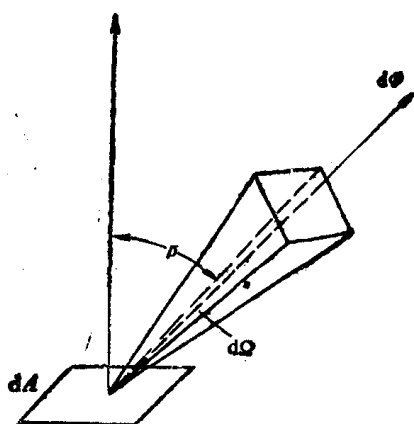


图1-2 方向辐射力

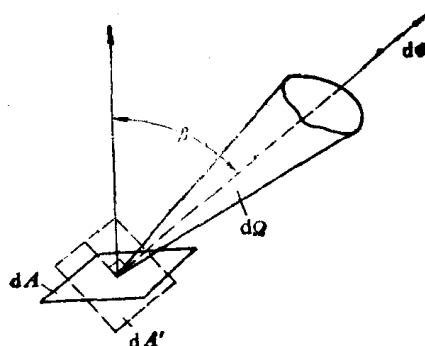


图1-3 辐射强度

(3) 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 W/m^2 。由定义可知,

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

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。在辐射光谱中某一波长 λ 附近, 取一单位波长间隔 (此间隔含此波长), 则此单元波长间隔内, 单位时间, 单位面积, 向半个空间发射的能量就称为此波长的单色辐射力, 单位为 $W/(m^2 \cdot \mu m)$ 。显然, 辐射力与单色辐射力的关系为

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (1-3)$$

同理

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

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

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

三、物体热辐射性能表示方法

(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

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1-6)$$

对于大多数固体, $\tau = 0$, 则

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1-7)$$

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。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, 如反射为漫反射(扩散反射)时则称为白体。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, 发射率。黑度 ε 是物体的辐射力 E 和同温度黑体辐射力 E_0 之比, 表示物体的辐射本领接近黑体辐射的程度。

$$\varepsilon = E/E_0 \quad (1-8)$$

§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

$$E_{0\lambda} = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (1-9)$$

式中, 波长 λ 的单位为m, 温度 T 的单位为K。常数 $C_1 = 5.9544 \times 10^{-17} \text{W} \cdot \text{m}^2$, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

式(1-9)可以改写成下列形式

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

式(1-10)表明 E_{λ}/T^5 是 λT 的单值函数, 见图1-4, 曲线下方面积为 E_0/T^5 ,

$$\frac{E_0}{T^5} = \int_0^{\infty} \frac{E_{\lambda}}{T^5} d\lambda$$

曲线极大值的横坐标为

$$\lambda T = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (1-11)$$

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

$$E_{\lambda} = \frac{C_2}{2\pi C_1} \frac{T}{\lambda^4} \quad (1-12)$$

当 $\lambda T \geq 100 C_2$ 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

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

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

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

式中 n 为介质的折射率, $n = c_0/c$, c_0 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, 折射率 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

$$E_0 = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-15)$$

式中, 黑体辐射力 E_0 的单位为 W/m^2 , 黑体温度 T 的单位为 K , 则黑体的辐射常数 $\sigma = 5.6693 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 黑体的辐射系数 $C_0 = 5.6693 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

在非真空中, $E_0 = n^2 \sigma T^4$, n 为介质的折射率。

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

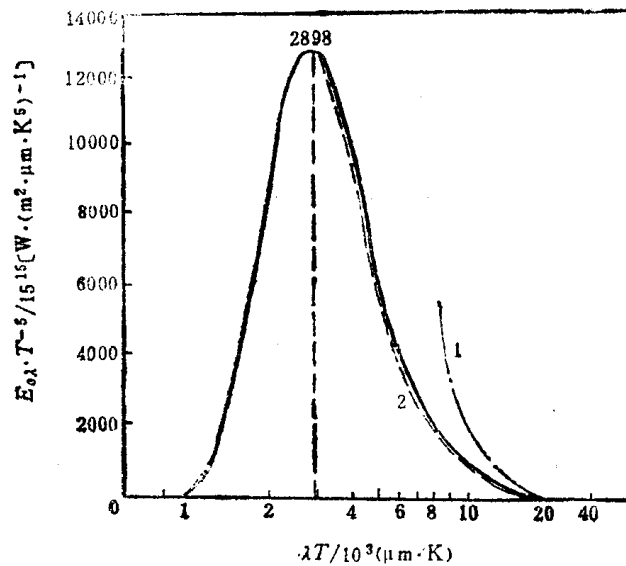


图1-4 普朗克定律
1—瑞利-金斯公式 2—维恩公式

$$I_{\lambda,1} = I_{\lambda,2} = I_{\lambda,3} = \dots = I_{\lambda}$$

所以由式 (1-1) 可得

$$E_{\lambda,\beta} = I_{\lambda} \cos \beta \quad (1-16)$$

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

$$E_{\lambda} = I_{\lambda} \int_{2\pi} \cos \beta d\Omega = \pi I_{\lambda} \quad (1-17)$$

凡是符合兰贝特定律的表面（不一定是黑体）称为漫射表面或漫表面。所以，对于漫射表面，兰贝特定律的一般表示式为

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

四、基尔霍夫定律

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_0 。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

$$E / \alpha = E_0 \quad (1-19)$$

将黑度的定义式 (1-8) 代入上式，可得

$$\varepsilon = \alpha \quad (1-20)$$

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 β 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

$$\varepsilon_{\lambda,\beta} = I_{\lambda,\beta} / I_{\lambda,0,\beta} \quad (1-21)$$

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

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda,0}} = \frac{\int_{2\pi} I_{\lambda,\beta} \cos \beta d\Omega}{\pi I_{\lambda,0}} = \frac{\int_{2\pi} \varepsilon_{\lambda,\beta} I_{\lambda,0} \cos \beta d\Omega}{\pi I_{\lambda,0}} = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \varepsilon_{\lambda,\beta} \cos \beta d\Omega \quad (1-22)$$

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

$$\varepsilon_{\beta} = \frac{I_{\beta}}{I_{\beta,0}} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda,\beta} d\lambda}{I_{\beta,0}} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda,\beta} I_{\lambda,0} d\lambda}{I_{\beta,0}} \quad (1-23)$$

黑度与单色方向黑度的关系可由下式给出

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{1}{E_0} \int_0^\infty I_{0,\lambda} d\lambda \int_{2\pi} \varepsilon_{\lambda,\beta} \cos \beta d\Omega \quad (1-24)$$

黑度与方向黑度的关系如下:

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \varepsilon_{\beta} \cos \beta d\Omega \quad (1-25)$$

二、单色方向吸收率

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

$$a_{\lambda,\beta} = I_{\lambda,\beta} / I_{i,\lambda,\beta} \quad (1-26)$$

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

$$a_\lambda = \frac{E_{\lambda}}{E_{i,\lambda}} = \frac{\int_{2\pi} a_{\lambda,\beta} I_{\lambda,\beta} \cos \beta d\Omega}{\int_{2\pi} I_{i,\lambda,\beta} \cos \beta d\Omega} \quad (1-27)$$

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

$$a_\beta = \frac{I_{\beta}}{I_{i,\beta}} = \frac{\int_0^\infty a_{\lambda,\beta} I_{\lambda,\beta} d\lambda}{\int_0^\infty I_{i,\lambda,\beta} d\lambda} \quad (1-28)$$

吸收率 a 与 a_λ 、 a_β 、 $a_{\lambda,\beta}$ 有下列关系

$$\begin{aligned} a &= \frac{E_s}{E_i} = \frac{\int_0^\infty \int_{2\pi} a_{\lambda,\beta} I_{\lambda,\beta} \cos \beta d\Omega d\lambda}{\int_0^\infty \int_{2\pi} I_{i,\lambda,\beta} \cos \beta d\Omega d\lambda} = \frac{\int_0^\infty a_\lambda E_{\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty E_{i,\lambda} d\lambda} \\ &= \frac{\int_{2\pi} a_\beta I_{\beta} \cos \beta d\Omega}{\int_{2\pi} I_{i,\beta} \cos \beta d\Omega} \end{aligned} \quad (1-29)$$

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。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 6000 K 的黑体), 另一个是人工黑体。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 灰体、漫辐射和漫反射

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_λ 是方向角 β 的函数。而黑体，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。

(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 $\epsilon_\lambda = f(\lambda)$, $\alpha_\lambda = f(\lambda)$ 。图1-6表示的是钨的单色黑度随波长的变化。

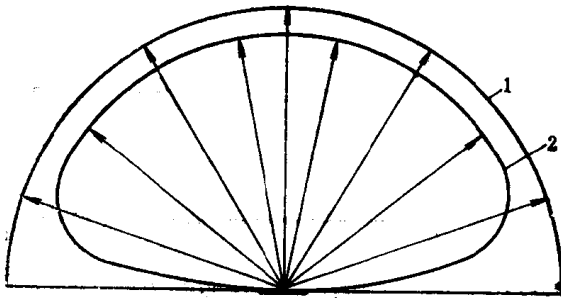


图1-5 辐射强度分布
1—黑体 2—实际物体

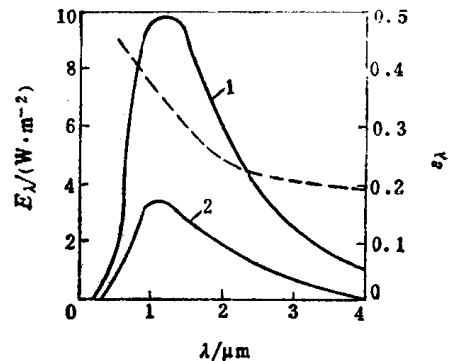


图1-6 $T=2450\text{K}$ 时钨的单色黑度
1—黑体的单色辐射力 2—钨的单色辐射力
—— E_λ ---- ϵ_λ

(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基尔霍夫定律。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、漫辐射和漫反射。

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、漫辐射

漫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。根据基尔霍夫定律，漫辐射的物体必定是漫吸收，即物体在各个方向的吸收本领是相同的。

对于金属，一般在 $\beta = 0 \sim 50^\circ$ 范围内可认为是漫辐射，对于非金属，一般在 $\beta = 0 \sim 70^\circ$ 范围内可认为是漫辐射。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漫辐射。

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。

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:

由基尔霍夫定律可知

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

黑度 ε 后面括号中的 T 表示物体的温度,吸收率 a 后面括号中前一个 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 $a(T, T_1)$, 由前可知, 一般情况下,

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

所以

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

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

$$a(T, T) = a(T, T_1) = a(T, T_2) = \dots$$

因此, 对于灰体,

$$\varepsilon(T) = a(T, T) = a(T, T_1) = a(T, T_2) = \dots = a(T)$$

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3000K, 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、漫反射

漫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

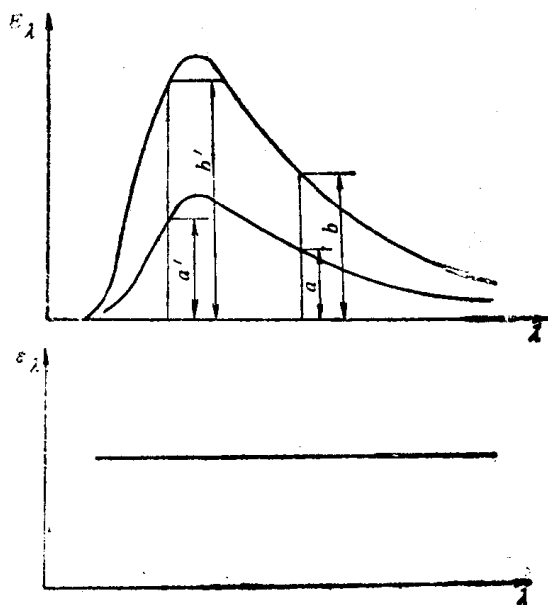


图1-7 灰体的定义

射，粗糙表面的反射辐射比较接近漫反射。

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漫反射。

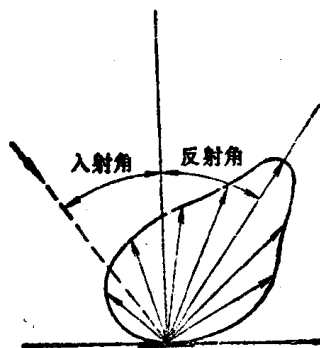


图1-8 反射辐射分布与入射角关系示意图

漫辐射的物体不一定是漫反射。在本书以后的计算中，一般都假定：固定表面为漫辐射，漫反射，无选择性，简称为漫灰体。

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

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 表示本身辐射热量，单位为 WE_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

$$Q_x = \alpha Q_t \quad (2-1)$$

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“ r ”表示之，即

$$Q_r = Q_t - Q_x \quad (2-2)$$

(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

$$Q_y = Q_b + Q_r \quad (2-3)$$

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。

以上几种辐射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 或辐射能流量 Φ 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。

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

$$E_r = E_o + E_r$$

而 $E_o = \varepsilon E_o$, $E_r = (1 - \alpha) E_r$

所以 $E_r = \varepsilon E_o + (1 - \alpha) E_r$ (2-4)

对于灰体， $\varepsilon = \alpha$ ，则

$$E_r = \varepsilon E_o + (1 - \varepsilon) E_r \quad (2-5)$$

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

$$q = E_r - E_o, \quad E_r = E_o - q$$

从该物体内部的热平衡来看，可得

$$q = E_r - E_o, \quad E_r = E_o + q$$

另外，

$$E_r = \frac{1}{\alpha} E_o, \quad E_o = \varepsilon E_o$$

将以上几式合并，整理后可得

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

如物体为灰体，则

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

式 (2-6)、式 (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 $E_r = E_o$ 。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。由基尔霍夫定律可知，此时 $\varepsilon = \alpha$ 。并且，这时物体的有效辐射为漫辐射，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

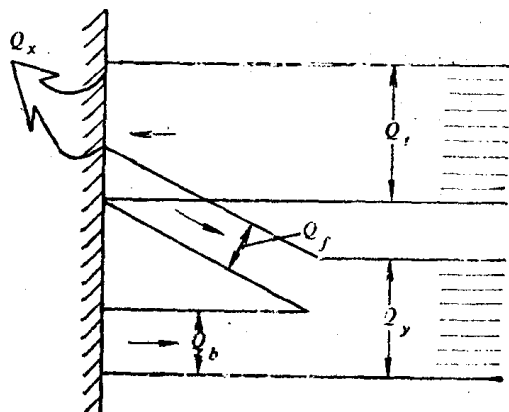


图2-1 各种辐射热量的相互关系