



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学能源动力系列教材

炉内传热原理与计算

Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnace

张衍国 李清海 冯俊凯 编著

Zhang Yanguo Li Qinghai Feng Junkai

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学能源动力系列教材

炉内传热原理与计算

Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnace

张衍国 李清海 冯俊凯 编著
Zhang Yanguo Li Qinghai Feng Junkai

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书简明而系统地阐述了炉内传热的基本原理、计算方法。全书共分7章,包括辐射换热的基本理论与计算,层燃炉、室燃炉和循环床锅炉的炉膛传热计算方法,锅炉热力计算方法,以及积灰、结渣对炉膛传热的影响等内容。本书作为衔接基础课“传热学”和“锅炉课程设计”之间的教材,对从基础理论到工程实际的处理方法给予了充分的重视。结合实际的工程案例,提供了完整的炉膛传热和热力计算的实例,并结合最新的研究进展系统介绍了气固两相流的传热和循环流化床锅炉的传热计算。本书采用国际单位制,并附录了常用的中英文专业词汇,供查阅英文资料时使用。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,可作为高等学校热能工程专业的高年级本科生教材或教学参考书,也可供相关专业工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

炉内传热原理与计算/张衍国,李清海,冯俊凯编著. —北京:清华大学出版社,2008.3
(清华大学能源动力系列教材)

ISBN 978-7-302-16967-3

I. 炉… II. ①张… ②李… ③冯… III. ①锅炉—传热学—高等学校—教材 ②锅炉—传热计算—高等学校—教材 IV. TK224.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 013179 号

责任编辑:曾洁 洪英

责任校对:赵丽敏

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015

客户服务:010-62776969

印刷者:北京四季青印刷厂

装订者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:14.75 字 数:300 千字

版 次:2008 年 3 月第 1 版 印 次:2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:26.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023427-01

序

P R E F A C E

能源、交通、材料是推动社会工业化、电气化和信息化的基本要素。电力供应和交通运输是社会基础建设的两个先行官。能源动力主要源自化石燃料作为工业粮食在炉内燃烧释放的化学反应热。炉内传热又以辐射换热为主,通过辐射换热和对流换热将热量传递给受热面,然后通过导热传入受热物体内部,炉内传热还包括炉壁导热和烟气灰渣的排放而将热量传向环境,成为未能有效利用的热损失。炉内过程是燃烧和传热与流动的耦合,炉内传热受许多工程因素的制约。设计电站锅炉、燃气轮机和喷气发动机的燃烧室以及各种工业与民用炉窑都必须考虑生态环境和技术经济的要求,应当实现节能、减排、降低制造成本、节约资源消耗的运行费用。

本书是多年来在清华大学热能工程系讲授专门化课程“炉内传热”的基础上编写的教材。先修课为专业基础课“传理学”,后继课有“锅炉设计(校核)”等专业课,是一门典型的由基础理论到工程应用的衔接课程,帮助读者了解如何由表及里、通过适当简化近似的工程学方法,掌握主次地进行创新设计。全书共7章,前三章具体讲解炉内辐射,特别是第1章深入分析了热辐射的本质及其基本规律。第4章扼要介绍不同于常见的层燃炉和悬燃炉的流化床传热。第5章汇总介绍炉内传热的计算,第6章介绍受热面积灰和结渣对传热的影响。第7章介绍了炉内传热的测量、包括新型热流计的实有知识。

全书成稿后,我有幸得窥全豹,深感有其特色,概念清晰,深入浅出,文字简洁,表达流畅,有助于理解实际的炉内传热过程。特为之列举如上,算是简单的推荐,供读者参考。



2007年10月于清华园

前言

FOREWORD

能源、交通、通讯和原材料是驱动一个国家的经济前进的四只轮子,缺一不可。

“炉”普遍存在于工业生产、人民生活的各个方面,燃料中不仅有煤,还有油、气及其他可燃物。中国是煤炭大国,火力发电约占总发电量的70%,如加上工业锅炉、民用锅炉及生活用炉,由化石燃料所提供的能源,所占比例更高。除了煤化工过程外,用煤取得热能的设备都离不开炉,如电站锅炉、工业锅炉、炉窑、民用锅炉等,都存在炉内过程,即炉内的燃烧(化学反应)、传热、流动等过程。炉内过程有着广泛的工程应用背景,炉内传热是炉内过程的主要部分之一,是本书的主要内容。

工程热物理的传热学在动力工程中的主要应用之一就是炉内传热,涵盖了热传导、对流换热和辐射换热的所有形式。炉内传热研究炉内过程中的传热行为,主要是炉膛内的传热行为。一般而言,炉膛是燃烧反应的容器,是炉内温度最高的区域,通常的燃烧反应发生的温度比自然环境温度($-40\sim+40^{\circ}\text{C}$)高得多,其热量交换的主要方式是辐射,因此,本书的主要内容是介绍炉内辐射换热行为及其规律。对流和导热作为另外两种基本传热方式,在炉内换热过程中同时存在,如水冷壁管中的导热和烟气侧的对流换热,但这两种传热方式的基本规律已在基础传热学中有较详细的介绍,因此作为锅炉尾部低温区内的对流换热计算方法在本书中只作了基本介绍,并且为了内容的完整,介绍了锅炉的热力计算方法。限于篇幅和课时,没有介绍炉内传热的数值方法和特种锅炉、工业炉窑的炉内传热等内容。

炉内传热作为一门专业基础课,既是“传热学”等基础课程的继续深化,又为“锅炉设计(校核)”等专业课程提供了解决炉内问题必要的基础。因此,它不仅有一定的理论性,还有明显的工程特点,是一门典型的从理论

到实际的课程,帮助学生了解如何通过简化、近似等工程方法从物理理论走向工程应用。通过对本书的学习,希望读者能在两个方面有所收获:一是在方法上掌握工程近似、简化处理的基本思路、方法,了解工程知识的理论背景,以利于掌握新的知识,开拓新的领域;二是在内容上着重对基本概念的理解和对基本原理的应用。

本书由张衍国、李清海和冯俊凯共同编写,由张衍国统编,是多年来在清华大学讲授“炉内传热”课程的基础上编写的。编写的基本原则是概念清晰、系统完整,力求简明扼要,并不强求对基本内容的推导过程进行全面、详细的介绍。

冯俊凯先生把多年积累的关于炉内传热的讲义、内部资料和工程资料全部拿来供编写时参考,在此特别予以感谢!书成之际,我的老师王补宣先生欣然为之作序,令我深感荣幸!

在本书的编写过程中,北京锅炉厂任钢炼总工程师为本书提供了410t/h锅炉的实际算例和部分工程资料;北京交通大学博士生孙进完成了附录的热力计算;同事吕俊复教授提供了部分循环床锅炉的计算方法资料,并修改、审阅了相关的章节;同事谢毅完成了大量的文稿修改工作,在此一并致以深深的谢意!同时感谢关心、支持本书写作的所有同仁!

本书获普通高等教育“十一五”国家级规划教材计划的资助,得到了清华大学热能工程系和热能工程研究所的领导和同事的支持与帮助,以及清华大学出版社编辑曾洁、洪英的大力支持,在此深表谢意!

本书第1章角系数计算公式和附录B引用了文献[18]和文献[20]的部分内容,第4章引用了文献[16]的部分内容和图表,第6章引用了文献[15]的部分内容和图表,在此对上述文献作者表示感谢,并对所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

张衍国

2007年10月于清华园

主要符号表

a 常数; 吸收系数; 黑度; 飞灰份额, %;
宽度, m

[A] 燃料中灰的质量分数, [%]

A 面积, m^2

b 深度, m

B 磁感应强度; 燃料消耗量, kg/s

c 常数; 修正系数; 光速, m/s; 比热容,
J/(kg · K)

c_p 比定压热容, J/(kg · K)

C 修正系数

[C] 燃料中碳元素质量分数, [%]

d 直径, m, mm

D 直径, m; 锅炉蒸发量, kg/s, t/h

E 能量, J; 辐射力, W/m^2 ; 电场强度,
V/m

e 能级; 误差, %

g 能级简并度; 过热器冷段或者热段的烟
气质量份额

G 单位质量燃料燃烧产生的烟气量, kg/kg

h Planck 常数; 换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;
高度, m

H 磁场强度, A/m; 辐射换热面积, m^2 ;

[H] 燃料中氢元素质量分数, [%]

i 虚数单位

i 工质(水、蒸汽)焓值(质量焓), kJ/kg

I 辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$; 空气、烟气焓值
(质量焓), kJ/kg

k 减弱系数的系数, $(m \cdot Pa)^{-1}$;
Boltzmann 常数

K 辐射减弱系数, m^{-1} ; 传热系数,
 $W/(m^2 \cdot K)$

l 无量纲长度

L 长度, m

m 质量, kg

[M] 燃料中水的质量分数, [%]

n 折射率

[N] 燃料中氮元素质量分数, [%]

[O] 燃料中氧元素质量分数, [%]

p 压力(强), Pa, MPa

Pr 普朗特数

q 热流密度, W/m^2 ; 容积或者截面热负荷,
 W/m^3 , W/m^2 ; 锅炉热量百分比, %

Q 热流量, W; 燃料热值, kJ/kg

r 矢径, m; 电阻率, $\Omega \cdot m$; 气体份额

R 半径, m

R_{90}, R_{30} 孔径分别为 $90\mu m, 30\mu m$ 的筛子通
过后剩余的质量分数, %

s 射线行程, 有效辐射层厚度, m; Poynting
矢量, W/m^2 ; 节距, mm

[S] 燃料中硫元素质量分数, [%]

t 时间, s; 温度, $^{\circ}C$

T 热力学温度, K

u 积分方程的未知函数; 流速, m/s

v 空隙率

V 容积, m^3 ; 空气量或者烟气量, m^3/kg

w 速度, m/s

x, y, z 坐标

x 有效角系数

Z 管排数

α 吸收率; 吸收度; Lagrange 因子; 过量空
气系数; 放热系数

β Lagrange 因子; 空气预热器过量空气系数

γ 介电常数, F/m

Δ 差值符号

- δ 光学厚度;壁厚,mm
 ε 发射率;黑度
 φ 角系数;保热系数
 η 无量纲坐标;效率,%
 θ 极角,入射角,rad;温度, $^{\circ}\text{C}$;倾角, $(^{\circ})$
 Θ 无量纲温度
 λ 波长, μm ;导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})$
 μ 磁导率, H/m , $\text{V}\cdot\text{s}/(\text{A}\cdot\text{m})$;无因次浓度(质量分数), kg/kg
 ν 频率,Hz;运动黏度, m^2/s
 ξ 无量纲坐标利用系数;利用系数
 ζ 灰污系数
 Π 系数
 ρ 密度, kg/m^3 ;反射率;电荷密度;积灰系数, $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$
 ρw 蒸汽质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 σ Stefan-Boltzmann 常数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
 τ 穿透率;系数
 ϕ 方位角,rad
 χ 折射角,rad
 ψ 热有效性系数
 ω 圆频率, s^{-1}
 Ω 立体角,sr
 $(-)$ 平均
 上标
 ' 入口
 " 出口
 0 理论
 下标
 A 表面;截面
 a 吸收;空气;绝热
 air 空气
 aph 空气预热器
 ar 收到基
 ave 平均
 b 黑体;底部;锅炉;床
 bd 锅炉排污
 c 炭黑;折算;对流;冷段
 cal 计算
 ca 冷空气
 co 焦炭
 d 漫射;分散相
 daf 干燥无灰基
 db 密相床
 ds 减温水
 DT 变形温度
 dw 向下
 e 发射;环境;出口;当量
 eco 省煤器
 ex 排烟
 F 炉膛;截面
 f 前
 fa 飞灰;折焰角
 fb 稀相区
 fe 炉膛出口
 fl 火焰
 FT 流动温度
 fw 锅炉给水,炉壁
 G 灰体
 g 烟气
 H 截面
 h 热段
 ha 热空气
 H_2O 水
 i 入射;入口;内径
 I 投射
 ic 结壳
 i, j, k 表面编号
 in 进入
 is 内壁,内侧
 l 漏风
 lf 发光火焰
 m 最大;介质;平均;改正
 max 最大

mh	门孔	ss	过热蒸汽
min	最小	ST	软化温度
ms	制粉系统	sys	系统
n	法向; 三原子气体	t	透过; 管子; 水冷壁
N ₂	氮气	uc	固体不完全燃烧
o	出射; 外径; 出口	ug	气体不完全燃烧
os	外壁, 外侧	up	向上
p	投影; 第一级; 屏式; 颗粒	ut	锅炉有效吸热
ph	灰渣物理热	V	容积
r	辐射; 后	w	壁面; 墙
R	有效辐射	wch	冷灰斗
rad	炉体散热	wm	工质
rb	卫燃带	x, y, z	在 x, y, z 方向上的分量
rc	转向室	r, β, θ	球坐标轴
rh	再热器	λ	单色(波长)
RO ₂	CO ₂ 和 SO ₂	ν	单色(频率)
roof	炉顶	ϕ	方位角
s	散射; 本身(辐射); 距离; 第二级; 侧面; 表面; 系统; 饱和	α	吸收
sh	过热器	τ	穿透
		ρ	反射

目 录

CONTENTS

第 1 章 热辐射的理论基础和基本性质	1
1.1 热辐射的理论渊源——黑体辐射定律	2
1.2 辐射能量及物体辐射性能的表示	4
1.3 热辐射的基本定律	9
1.4 固体表面热辐射性质	14
1.5 辐射热量的形式	16
1.6 角系数	19
1.7 辐射换热工程计算的简化条件	32
第 2 章 介质的辐射与吸收	34
2.1 介质辐射与吸收的机理	34
2.2 吸收散射性介质的辐射特性	37
2.3 介质的辐射传递与能量守恒	41
2.4 介质的有效辐射层厚度、吸收率与黑度	45
2.5 烟气与火焰的黑度	54
第 3 章 等温介质与壁面的换热	58
3.1 隔有透明介质的壁面间的辐射换热	58
3.2 等温介质与壁面间的辐射换热	68
3.3 有对流的烟气与受热面的辐射换热	74
第 4 章 流化床传热	78
4.1 流化床的基本概念	78
4.2 两相流对流传热	87
4.3 两相流辐射传热	94
4.4 循环流化床传热计算	96
第 5 章 炉内传热计算	100
5.1 炉膛传热过程	100
5.2 室燃炉炉膛传热计算	106
5.3 层燃炉炉膛传热计算	110
5.4 流化床锅炉炉膛传热计算	116

5.5 尾部受热面传热计算	123
5.6 锅炉热力计算	126
第6章 受热面积灰和结渣对传热的影响	132
6.1 受热面积灰、结渣的过程和特点	132
6.2 受热面积灰、结渣对炉膛传热的影响	137
6.3 受热面积灰、结渣对对流受热面传热的影响	141
第7章 炉内传热测量	147
7.1 火焰黑度的测量	147
7.2 辐射热流量的测量	150
7.3 两种新型热流计	153
附录A 热辐射常用物理常数	156
附录B 常用的角系数计算公式	157
附录C 炉内传热常用中英文词汇索引	166
附录D 锅炉常用中英文词汇	170
附录E 113.89kg/s(410t/h)高参数燃煤锅炉热力计算例题	177
E1 设计任务	177
E2 燃料特性	177
E3 锅炉的基本结构	178
E4 辅助计算	181
E5 燃烧室设计及传热计算	184
E6 过热器的设计及传热计算	190
E7 热量分配	207
E8 省煤器结构设计及热力计算	208
E9 空气预热器结构设计及热力计算	214
E10 热力计算主要参数汇总	221
参考文献	222

一切物质,由于分子或原子受到与内能有关的激发(如受热、光照、化学反应以及电子等微粒撞击等),都能连续地发射电磁能,这种现象称为辐射。经典物理认为辐射是电磁波,而近代物理则认为辐射是光子即光子的传输。严格地说,辐射具有波粒二象性,既有光子(微粒)的性质又有电磁场(波)的性质,因此在本书中认为这两种提法是等同的,也就是说提到辐射,既指光子,也指电磁波。

在平衡状态下,物质的内能与温度有关,温度越高,内能越大,物质发出的辐射能的范围可以覆盖整个电磁波谱。图 1.1 给出了电磁波谱和相应的产生机制。

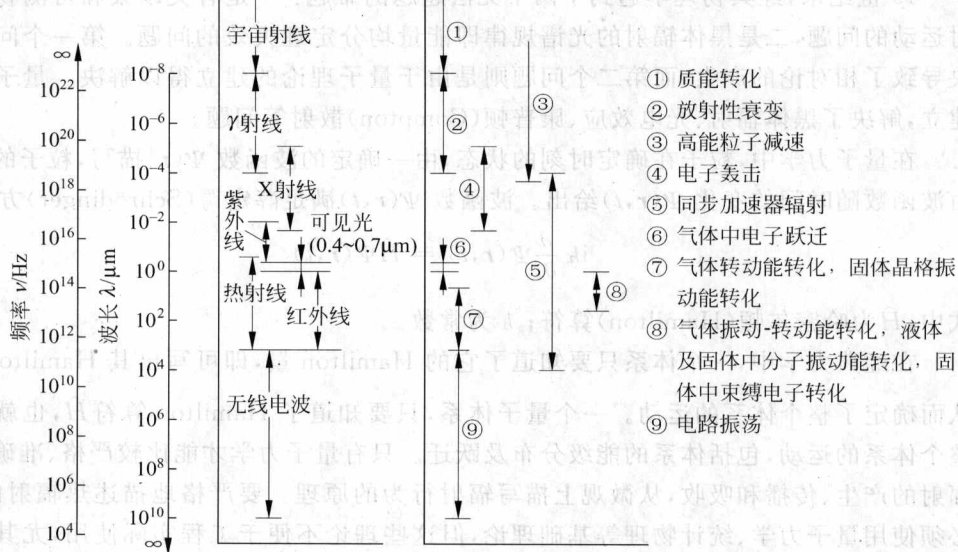
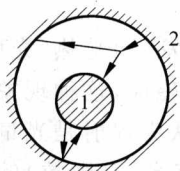


图 1.1 电磁波谱示意图

在工程上,通常把组成物质的大量分子作杂乱而不规则运动所具有的能量称为该物质的热能,而把物质的热能转变为辐射能的现象称为热辐射,热辐射所发射的为射线。一般地,热辐射包括红外线和可见光,也包括近紫外线的一部分,其波长范围大致为 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$,其中 $0.7 \sim$

$100\mu\text{m}$ 属于红外线, $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 属于可见光, $0.1\sim 0.4\mu\text{m}$ 属于近紫外线。

从传热学角度看,热辐射是物体之间热量交换的一种方式。通过射线的发射与吸收进行能量交换的换热方式称为辐射换热。



如图 1.2 所示,是两个同心的球壳 1 和 2,球壳之间为真空,如果起始状态两者温度不相等($t_1 < t_2$),然后经球壳 2 加热(不采用导热或对流其他方式),那么球壳 1 的温度也会升高,这时 1 与 2 之间没有导热或对流换热,球壳 1 的温升就是由于辐射所致。

本章介绍热辐射理论的最重要的基础,扼要说明物体热辐射的基本性能表示方法,着重介绍热辐射的基本定律和辐射换热计算的辐射换热原则性方法。这些是求解辐射换热问题和进行工程计算的基础。

1.1 热辐射的理论渊源——黑体辐射定律

19 世纪末,经典物理学遇到了两个无法超越的难题:一是有关以太和可测物体的相对运动的问题,二是黑体辐射的光谱规律即能量均分定理失效的问题。第一个问题的解决导致了相对论的产生,而第二个问题则是由于量子理论的建立得以解决。量子理论的建立,解决了黑体辐射、光电效应、康普顿(Compton)散射等问题。

在量子力学中,粒子在确定时刻的状态,由一确定的波函数 $\Psi(\mathbf{r})$ 描写,粒子的运动则由波函数随时间的变化 $\Psi(\mathbf{r}, t)$ 给出。波函数 $\Psi(\mathbf{r}, t)$ 满足薛定谔(Schrödinger)方程

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t) \quad (1.1)$$

式中, $\hat{H}$ 为哈密顿(Hamilton)算符; $\hbar$ 为常数。

在经典力学中,一个体系只要知道了它的 Hamilton 量,即可写出其 Hamilton 方程,从而确定了整个体系的运动。一个量子体系,只要知道了 Hamilton 算符 $\hat{H}$,也就确定了整个体系的运动,包括体系的能级分布及跃迁。只有量子力学才能比较严格、准确地描述辐射的产生、传播和吸收,从微观上描写辐射行为的原理。要严格地描述热辐射的行为,必须使用量子力学、统计物理等基础理论,但这些理论不便于工程实际使用,尤其是描述复杂体系运动的方程难以精确求解,更增添了用基础理论描述热辐射宏观行为的困难。因此,在工程时间允许的范围内进行合理的简化、近似,以便于工程应用,就成为必要的事情了。这个任务由工程专业学科来完成。

这一节重点介绍作为整个热辐射理论基础的黑体辐射定律,即普朗克(Planck)定律。在基础传热学课程中,我们知道黑体就是指可以全部吸收投射于其表面的各种波长的辐射能的物体。Planck 定律描述黑体辐射的行为,这个定律的推导需要使用量子力学和统计物理的一些基本概念与方法,下面予以简单介绍,以便于读者了解热辐射的理论基础和

渊源。

根据量子力学,频率为 ν 的光子的能量为

$$e = h\nu \quad (1.2)$$

式中, $h = 6.6262 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 是 Planck 常数。

在统计物理中,通常把一个由大量微粒子组成的系统的几率最大的分布称为该系统的最可几分布。最可几分布常被用来表示某些孤立系统的平衡态分布。光子不服从泡利(Pauli)不相容原理,因而是玻色(Bose)子,而中子、电子、质子等服从 Pauli 不相容原理的粒子则称为费米(Fermi)子。

经典的粒子在能量连续、简并等条件下,满足经典的麦克斯韦-玻耳兹曼(Maxwell-Boltzmann)分布。Bose 子遵守玻色-爱因斯坦(Bose-Einstein)分布(即 B-E 分布),而 Fermi 子则遵从费米-狄拉克(Fermi-Dirac)分布(即 F-D 分布)。

根据统计物理的基本原理,可以导出 B-E 分布的统计公式为

$$N_i = \frac{g_i}{\exp(\alpha + \beta e_i) - 1} \quad (1.3)$$

式中, N_i 为处于能级 $e_i = h\nu_i$ 的粒子数; g_i 为能级 e_i 的简并度; α, β 为拉格朗日(Lagrange)因子。对于光子而言, $\alpha = 0$, 即光子遵从的统计公式为

$$N_i = \frac{g_i}{\exp(\beta e_i) - 1} \quad (1.4)$$

考察体积为 V 的空腔,其表面温度为 T ,对 V 中的光子而言,有

$$\beta = \frac{1}{kT} \quad (1.5)$$

式中, k 是 Boltzmann 常数,为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。 V 中的光子在能级为 e_i 时简并度为

$$g_i = \frac{8\pi V v_i^2}{c^3} dv_i \quad (1.6)$$

把式(1.5)、式(1.6)代入式(1.4),可得到空腔 V 中频率在 $\nu_i \sim \nu_i + d\nu_i$ 之间的光子数为

$$dN_i = \frac{8\pi V v_i^2}{c^3} \frac{dv_i}{e^{\frac{e_i}{kT}} - 1} \quad (1.7)$$

把光子能量 $e_i = h\nu_i$ 代入式(1.7),有

$$dN_i = \frac{8\pi V v_i^2}{c^3} \frac{dv_i}{e^{\frac{h\nu_i}{kT}} - 1} \quad (1.8)$$

那么与总数为 dN_i 对应的光子的能量为

$$\begin{aligned} de_i &= h\nu_i dN_i \\ &= \frac{8\pi h V v_i^3}{c^3} \frac{dv_i}{e^{\frac{h\nu_i}{kT}} - 1} \end{aligned} \quad (1.9)$$

单位体积的光子能量即 $\nu_i \sim \nu_i + d\nu_i$ 的辐射能量密度为

$$u_i dv_i = \frac{de_i}{V} = \frac{8\pi h \nu_i^3}{c^3} \frac{d\nu_i}{e^{\frac{h\nu_i}{kT}} - 1} \quad (1.10)$$

这就是辐射能密度形式的 Planck 定律。对于某一频率 ν_i 而言,可以去掉下标 i 。式(1.10)还可以用波长 λ 来表示,由 $\nu = c/\lambda$ 可得到 $d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$,那么在波长区间 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 的辐射能量密度为

$$u_\lambda d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1.11)$$

即有

$$u_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1.12)$$

从上面简单的推导可以看到,Planck 定律完全是在量子力学和统计物理的基本规律下导出的一个必然结果。这个定律表明,一定的波长区间 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 的辐射能密度除了与该特定波长 λ 有关外,只与空腔的壁温 T 有关,即 $u_\lambda = f(\lambda, T)$ 。从这个定律出发,还可以计算一定温度 T 下的不同波长 λ 的辐射能密度,从而得到辐射能密度的光谱分布。在以后的章节中可以看到,这个定律是整个辐射理论的基础,加深对这个定律的理解有助于更好地掌握辐射的本质和规律。

为了简便起见,在本书以后各章节中除特别说明外,辐射均指热辐射。

1.2 辐射能量及物体辐射性能的表达

黑体是理想的辐射吸收体和发射体。与热力学中理想气体的概念类似,黑体也是一个理想化的概念,是人们为了与实际辐射物体进行比较的标准。相应地,1.1 节推导的 Planck 定律,也是理想化的辐射能的光谱分布,该分布只与温度和波长有关,那么实际物体的辐射能分布和辐射的性能与黑体有什么差别呢?

1.2.1 辐射能量的表示

首先看看辐射能量是如何被表示的。辐射以光子的形式存在,具有波粒二象性,在此用电磁波的理论来描述。光子即电磁波,遵从麦克斯韦(Maxwell)方程组。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (1.13)$$

方程组中, $\mathbf{E}$ 是空间某一处(坐标为 $\mathbf{X}$)、某一时刻(t)的电场强度,严格地说应为 $\mathbf{E}(\mathbf{X}, t)$, 此处简化表示, 其余各量皆然; $\mathbf{H}$ 是磁场强度; $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 是辅助量, ϵ 是介电常数; $\mathbf{B}$ 是磁感应强度; $\mathbf{J}$ 是电流密度; ρ 是电荷密度。

电磁波的能量密度用坡印亭(Poynting)矢量 $\mathbf{S}$ 表示:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.14)$$

在线性介质中 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, μ 为常数。那么从方程组(1.13)可得到 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 满足的波动方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

在单一频率(即单色)时, 方程(1.15)的形式解为

$$\begin{cases} \mathbf{E}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{X}) e^{-i\omega t} \\ \mathbf{B}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{B}(\mathbf{X}) e^{-i\omega t} \end{cases} \quad (1.16)$$

式中, ω 为电磁场的角频率; i 为虚数, $\sqrt{-1} = i$ 。方程(1.15)在非单色时, 可通过傅里叶(Fourier)分析得到类似式(1.16)的形式解。

从式(1.14)、式(1.16)可得到

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(\mathbf{X}, \omega) \quad (1.17)$$

可见辐射能量是空间($\mathbf{X}$)和频率(ω)的函数, 也就是说辐射能量是按空间分布和频率分布的。辐射能量的这种性质是这个辐射换热计算与分析的出发点, 贯穿于整个热辐射学科。

为了描述辐射能量按空间分布的特点, 需要引入若干物理量。在此之前先看看空间立体角的几何定义。如图 1.3 所示, 有一个半径为 r 的半球, 半球表面上有一微元面积 dA_s , 该微元面积对于球心 O 的立体角定义为

$$d\Omega = \frac{dA_s}{r^2} \quad (1.18)$$

立体角的单位是球面度(sr), 用符号 Ω 表示。显然, 整个半球对球心的立体角为 2π , 而整个球面对球心的立体角则为 4π 。当然, 描述空间的性质还要用方向角来表示, 方向角在中学立体几何中已有介绍, 不再赘述。

有了方向角和立体角的概念, 就可以建立辐射力和辐射强度的概念了。

(1) 辐射强度: 空间某一表面在单位时间, 与辐射方向垂直的单位面积上, 单位立体角内发射的波长从 $0 \sim \infty$ 的能量, 用符号 I 表示, 单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 见图 1.4。

图 1.4 中, dA 为空间某一表面微元面积; $\mathbf{n}$ 为 dA 法线; $\mathbf{s}$ 为辐射方向; dA_r 为垂直于辐射方向 $\mathbf{s}$ 的 dA 投影面积; β 为 $\mathbf{s}$ 与 $\mathbf{n}$ 的夹角即辐射方向的方向角。因此有 $dA_r = \cos\beta dA$, $d\Omega$ 为 $\mathbf{s}$ 方向的任一微元对应的立体角, 那么根据定义, 令 $\mathbf{s}$ 方向辐射能量为 dQ , 有

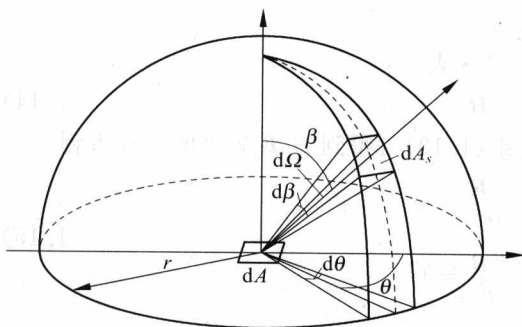


图 1.3 空间立体角的几何定义

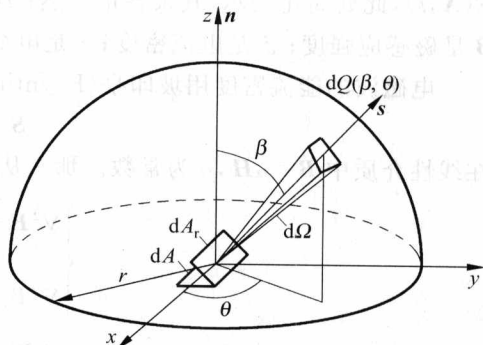


图 1.4 辐射强度和辐射力定义示意图

$$I_{\beta} = \frac{dQ}{dA_r d\Omega} = \frac{dQ}{\cos\beta dA d\Omega} \quad (1.19)$$

式中, I_{β} 的下标 β 指 β 方向。

(2) 辐射力: 空间表面在单位时间、单位面积上, 向在 β, θ 方向上单位立体角发射 $0 \sim \infty$ 波长的能量, 称为 β, θ 方向的方向辐射力, 用符号 $E_{\beta, \theta}$ 表示, 单位 $W/(m^2 \cdot sr)$ 。由于表面的方向辐射力常与 θ 角无关, 故一般不特别指出 θ 角时, 用 E_{β} 表示方向辐射力。如图 1.4 所示, 图中符号含义同上所述, 则有

$$E_{\beta} = \frac{dQ}{dA d\Omega} \quad (1.20)$$

比较(1.19)和(1.20)两式, 可知辐射强度 I_{β} 与方向辐射力 E_{β} 之间有如下关系

$$E_{\beta} = I_{\beta} \cos\beta \quad (1.21)$$

特别地, 当考虑空间表面在单位时间、单位面积向半球空间辐射 $0 \sim \infty$ 波长的总能量时, 常用半球辐射力(常简称辐射力) E 表示, 单位 W/m^2 , 那么 E 与 E_{β} 的关系是

$$E = \int_0^{2\pi} E_{\beta} d\Omega \quad (1.22)$$

1.2.2 物理辐射性能的表达

上面介绍了辐射能按空间分布和频率分布的特点。在工程实际中, 主要关心的是物体之间(如锅炉炉腔内的热烟气与水冷壁之间, 加热炉的炉墙与工件之间)的辐射换热, 因此还需要研究包括固体、液体和气体在内的物体的热辐射性能。

物体对外来的辐射能有吸收、反射和穿透的作用。这里引入吸收率、反射率和穿透率来定量描述这些作用。如图 1.5(a)所示, 物体收到外来的投射辐射, 其能量 Q_i , 物体吸收