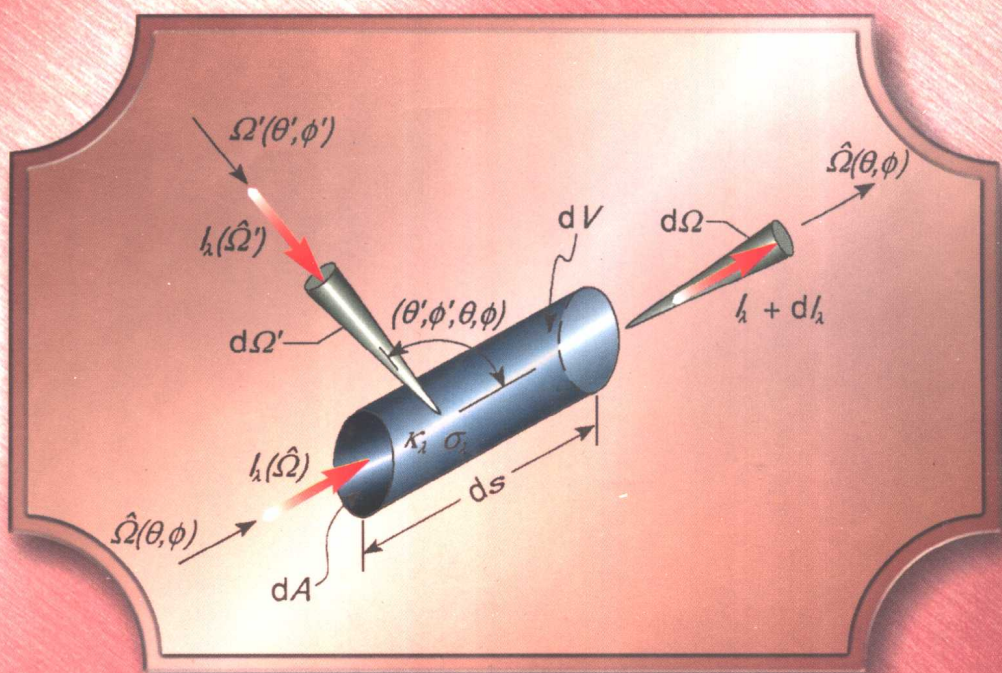


辐射换热原理

余其铮 编著



哈尔滨工业大学出版社

辐射换热原理

余其铮 编著

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨

内 容 简 介

本书是为适应研究生培养需要所编写的专著,在深度和广度上都远远超出国内现有的传热学教科书中有关辐射换热的内容。

全书十三章,重点介绍辐射换热的基本原理,并对辐射换热的数值计算方法、辐射与对流和导热的复合换热作了适当的介绍。本书可供从事能源、动力、机械、航空、冶金、化工等领域的工程技术人员参考,还可作为大学有关专业师生的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

辐射换热原理 / 余其铮编著. - 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2000.9
ISBN 7-5603-1570-4

I. 辐… II. 余… III. 辐射热交换 - 理论
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 42350 号

出版发行	哈尔滨工业大学出版社
社 址	哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真	0451 - 6414749
印 刷	哈尔滨工业大学印刷厂
开 本	787 × 1092 1/16 印张 13.5 字数 310 千字
版 次	2000 年 9 月第 1 版 2000 年 9 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5603-1570-4/TK · 30
印 数	1 ~ 3 000
定 价	20.00 元

前 言

本书为工科研究生辐射换热课或高等传热学课热辐射部分的教材, 30 ~ 40 学时, 除课堂讲授内容外, 增加了一些自学及供选择的内容。本书也可供教师、工程技术人员和研究人员进修自学和工作中参阅。

辐射换热的内容应包含辐射换热原理、实验和数值计算三部分, 本书主要介绍原理, 数值计算部分除表面辐射换热外, 只作了一个概要的介绍。热辐射数值计算的内容较多, 并且还不是很容易的, 应有专门著作阐述。

本书物理概念写得比较多一些, 重要的公式推导写得细一些, 前者是为了课堂的讲授, 后者是为了课后的自学。本书还简要地介绍了辐射换热的进展及应用, 目的是想让读者有一个比较全面的了解, 增加一些学习的兴趣, 但近期辐射换热发展也很快, 估计本书出版后, 又会有很多新的进展。

限于作者水平, 书中定有疏漏和不妥之处, 恳请批评指正。来信请寄哈尔滨工业大学能源学院热工教研室余其铮收, 邮编 150001。

本书编写过程中, 得到哈尔滨工业大学辐射换热课题组教师和同学的支持与帮助, 在此表示衷心感谢。

余其铮

2000 年 3 月

主要符号表

英文字母		$\delta_{k,i}$	克罗内克符号
A	面积, m^2	ϵ	发射率
c	比热容, $(J/kg \cdot K)$; 光速, m/s	ϑ	天顶角
c_0	真空中的光速, m/s	Θ	无因次温度
C_0	黑体辐射系数, $W/(m^2 \cdot K^4)$	κ	折射指数
C_a	吸收截面, m^2	λ	波长, $\mu m, m$
C_e	衰减截面, m^2		导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$
C_s	散射截面, m^2	μ	质量浓度, kg/m^3
D	粒子直径, m	ν	频率, Hz
E	辐射力, W/m^2	ρ	反射率
$E_n(x)$	n 阶指数积分函数		密度, kg/m^3
f_v	粒子的体积百分比	σ	黑体辐射常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
F	截面积, m^2 比表面积, m^2/kg		波数, μm^{-1}
$F_{\lambda_1-\lambda_2}$	λ_1 到 λ_2 的波段辐射份额	τ	透射率
G	投射辐射力, W/m^2		光学厚度
h	对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	φ	角系数
I	辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr)$		散射角
J	有效辐射力, W/m^2	Φ	相函数
k	玻尔兹曼常数, J/K		流体黏性耗散函数
k_a	吸收系数, m^{-1}	χ	尺度参数
k_e	衰减系数, m^{-1}	ω	反照率
k_s	散射系数, m^{-1}	ψ	流函数
L	几何光学长度, m 平均射线行程, m	Ω	立体角, sr
m	复折射率	下标	
n	折射率	a	吸收
N	粒子数密度, $1/m^3$		表观
P	压力, Pa	b	黑体
q	热流密度, W/m^2	c	导热
Q	热流量, W	g	介质, 气体
Q_a	吸收因子	m	平均, 最大
Q_e	衰减因子	r	辐射
Q_s	散射因子	t	总的
r	距离, m	w	壁面
t	时间, s	λ	光谱(波长)
T	温度, K	ν	光谱(频率)
u	流速, m/s	σ	光谱(波数)
V	体积, m^3	$\perp$	法向
X	气体辐射中的行程长度, m		
希腊字母			
α	吸收率		
β	圆周角		

目 录

第一章 热辐射的特点与研究方法	1
1.1 热辐射的本质与研究方法	1
1.2 发展简史	2
1.3 内容介绍	4
参考文献	4
思考题	5
第二章 黑体辐射	6
2.1 热辐射能量的表示方法	6
2.2 绝对黑体	9
2.3 黑体辐射的光谱性质 普朗克定律	10
2.4 维恩位移定律	12
2.5 斯蒂芬-玻尔兹曼定律	13
2.6 兰贝特定律	14
参考文献	15
习题	16
第三章 非黑体的热辐射	17
3.1 物体热辐射性能表示方法的	17
3.2 基尔霍夫定律 灰体	21
3.3 局域平衡假设	23
3.4 尺度条件及微尺度辐射的概念	24
3.5 工程中辐射热量的表示	25
参考文献	26
习题	27
第四章 非透明固体表面的热辐射性质	28
4.1 概述	28
4.2 发射率、吸收率与光谱发射率、光谱吸收率的关系	29
4.3 方向性	30
4.4 选择性	31
4.5 表面状态的影响	32
4.6 温度的影响	34
4.7 表面的反射特性	35
4.8 固体表面热辐射特性的电磁理论简介	35
参考文献	38
习题	39
第五章 角系数	41

5.1 引言	41
5.2 角系数的定义及解析式	41
5.3 角系数的代数性质	43
5.4 代数分析法	45
5.5 求角系数的积分法	49
5.6 求角系数的微分法	51
5.7 其他方法	51
参考文献	52
习题	52
第六章 表面间的辐射换热计算	54
6.1 引言	54
6.2 净热量法	56
6.3 杰勃哈特法	62
6.4 网络法	63
6.5 射线踪迹法	66
6.6 应用时计算方法的近似性	68
6.7 辐射积分方程解法的简介	69
6.8 非漫、灰表面辐射换热计算的特点	72
参考文献	73
习题	75
第七章 工程中一些表面辐射换热计算特点	76
7.1 工业炉辐射换热计算特点	76
7.2 空腔辐射特性	82
7.3 通道的辐射传递	84
7.4 热辐射肋片	88
7.5 天空辐射能的利用	90
7.6 红外辐射加热技术	95
7.7 用对流与辐射能量转化来增强换热的技术	96
参考文献	98
习题	100
第八章 介质热辐射的基本概念与方程	101
8.1 介质热辐射的特点	101
8.2 介质辐射特性与布格尔定律	102
8.3 介质能量的发射	107
8.4 辐射传递方程	108
8.5 辐射能量方程	111
8.6 辐射边界条件	113
参考文献	115
习题	115
第九章 介质热辐射的计算	116

9.1 一维灰介质的精确解	116
9.2 解辐射传递方程的近似方法	124
9.3 辐射换热数值计算概说	130
参考文献	132
习题	133
第十章 工业炉中介质辐射的工程计算特点	135
10.1 腔内介质与腔壁的辐射换热	135
10.2 工程计算中炉膛辐射换热的基本公式	137
10.3 几何平均吸收率及穿透率	138
10.4 射线平均行程长度	140
参考文献	143
第十一章 气体辐射	144
11.1 气体辐射的微观理论简介	144
11.2 光谱法	148
11.3 工程中二氧化碳、水蒸气辐射特性的计算	154
参考文献	158
习题	160
第十二章 粒子热辐射	161
12.1 粒子热辐射的特点与类别	161
12.2 单个大粒子的辐射特性——几何光学与衍射理论	163
12.3 微粒的辐射特性与米氏电磁理论	167
12.4 粒子群的辐射特性	172
12.5 工程中应用的某些粒子群理论	174
参考文献	177
习题	179
第十三章 复合换热	180
13.1 辐射-导热复合换热	180
13.2 辐射-对流复合换热	187
参考文献	198
习题	201
附录一 黑体相对波段辐射力	202
附录二 角系数	202
附录三 指数积分函数	205

第一章 热辐射的特点与研究方法

1.1 热辐射的本质与研究方法

热辐射是辐射现象的一种。人类对辐射本质的认识经历了很长过程。初期,它和人类对可见光的认识紧密地结合在一起。17 世纪末,就有牛顿(I. Newton, 英国人, 1642 ~ 1727)的微粒说及惠更斯(C. Huygens, 荷兰人, 1629 ~ 1695)的波动说。微粒说认为:光是一种完全弹性的球形微粒流,粒子不连续,直线传播。波动说认为:光是在弹性媒介中传递的一种连续的弹性机械波。18 世纪微粒说占统治地位。19 世纪发现光的干涉、衍射和偏振等现象,这些现象是波动的特征,从而波动说占了上风。1865 年麦克斯韦(J. C. Maxwell, 英国人, 1831 ~ 1879)提出了电磁理论,指出可见光是电磁辐射的一种形式,更明确了光是一种波动,于是产生了辐射的波动说定义——物体以电磁波向外传递能量的过程称为辐射。可见,此定义在 19 世纪已奠定了基础。但是,有一些光、热辐射现象不能用波动说解释,如:光电效应,黑体辐射的光谱性质等。1900 年普朗克(M. Planck, 英国人, 1858 ~ 1947)提出量子假设,认为存在能量的最小单元,物体发射或吸收的能量是不连续的,只能是这最小单位的整倍数,重新提出了能量发射与吸收的粒子性。这一假设圆满地解释了黑体辐射能量随波长的分布规律。1905 年爱因斯坦(A. Einstein, 德国人, 1879 ~ 1955)提出量子理论,认为光是一束以光速运动的能量子流,这种能量子称为光子,其能量正比于它的频率。这就产生了辐射粒子说的新定义——辐射是物体向外发射光子的能量传递过程。后来爱因斯坦进一步指出,光子具有波粒两相性——即有粒子性,又有波动性。从光子能量的频率与电磁波的波长两者的关系就可看出粒子性与波动性的关联。

由辐射的两种定义,可以引出热辐射的两种定义:一、由热运动产生的,以电磁波形式传递的能量,也可以指这种能量的传递过程。二、由热的原因,物体以光子的形式传递的能量,也可以指这种能量的传递过程。

由热运动产生的电磁波称为热射线,其波长在 $0.3 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 范围内,可分为可见光及红外线两部分。真空中,可见光的波长为 $0.38 \sim 0.76\ \mu\text{m}$,红外线的波长为 $0.76 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 。红外线又可分为近红外、中红外和远红外三个区域,但也有仅分为近红外、远红外二个区的。以上所说的区,并没有规定严格统一的分界线,不同分类,有不同数值。紫外线与可见光的分界波长在 $0.3 \sim 0.4\ \mu\text{m}$ 内变化;可见光与红外线的分界波长在 $0.7 \sim 0.78\ \mu\text{m}$ 间变化;红外线与无线电波的分界波长在 $100 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 间变化。至

于红外区内的近、中、远红外线的分界就更不统一了。此处仅介绍国际照明委员会的分类, $0.76 \sim 1.4 \mu\text{m}$ 为近红外, $1.4 \sim 3 \mu\text{m}$ 为中红外, $3 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 为远红外。

只要温度高于绝对零度, 物体就会不断地把热能转变为辐射能, 向外发出热射线; 同时, 该物体也不断地吸收周围物体投射来的热射线, 并把吸收的辐射能转变成热能。辐射换热(辐射传热)就是指这些能量转换引起的热量交换。

对辐射的认识虽然经过这么多年的研究, 但目前还不能用一种统一的理论来描述所有的热辐射现象, 其有关理论还在继续发展。目前, 在解释热辐射现象及工程应用中, 有时用电磁理论, 有时用量子理论, 所以上述两个辐射定义目前都有实用意义。

与热辐射的两个定义类似, 辐射换热基本上有两类研究方法:

一、以量子力学为基础的微观方法。一般应用于描述物体的发射、吸收特性。例如: 热辐射的基本定律——普朗克定律的推导, 物体发射及吸收光谱的解释, 气体发射率及吸收率的计算等。

二、基于能量守恒原理的输运理论, 这是宏观方法, 多用于辐射能量的传递。绝大多数的辐射换热计算方法都是这种方法。它包括电磁理论和几何光学, 几何光学是电磁理论的一种特殊情况。但也有将它用于描述物体辐射特性的, 如: 描述微粒辐射特性的米氏电磁理论, 用电磁理论求固体表面的辐射特性等。

辐射换热与导热、对流换热有本质的不同。首先, 在辐射换热过程中必定伴随着能量形式的转变。物体发射热辐射是物体的热能转变为辐射能, 而物体吸收热辐射则是辐射能转变为热能。导热与对流换热中就没有这种能量形式的转变。第二, 导热与对流的热量传递一定要通过物体的直接接触才能进行, 而物体间的辐射换热不是这样, 物体间可以是真空的。这些特点使得辐射换热系统的温度场不一定像导热、对流换热那样, 热源处温度最高, 然后逐渐下降, 冷源处温度最低, 辐射换热时有可能中间温度最低, 以太阳与地球的辐射换热为例说明之: 太阳的温度很高, 地球的温度较低, 而它们之间的大部分空间温度比两者都低。另外, 有时温度场还可以是不连续的, 纯辐射换热系统中, 物体边界上会出现温度的跳跃。第三, 辐射能有强烈的方向性, 一个空间点上各个方向都可能存在辐射换热量, 并且数量不同。并且, 辐射能与波长有关, 它的能量是按波长分布的。从上述几点来看, 辐射换热与导热、对流换热有着根本的不同。对流换热实质上是导热加上流体的热对流运动, 在能量传递的本质上与导热是相同的。所以从物理本质上看, 热交换的基本种类应当分为两类: 一类是辐射换热; 一类是导热与对流换热。这就决定了这两类热交换在基本概念、基本定律、计算公式、计算方法、实验设备等诸方面有很大的区别。

1.2 发展简史*

辐射换热属技术基础学科, 是传热传质学的一个分支。它是随着工程技术的需要而诞生、成熟与发展的。它诞生的年代可追溯到 1900 年, 至今已有百年历史了。

在十九世纪初, 通过对太阳辐射的观察, 发现了红外线。随后, 出现多种测量热辐射

* 本节大部分观点引自田长霖教授讲授的传热学笔记。

能量的仪器,开始对热辐射进行定量的研究。十九世纪下半叶,西欧的钢铁、化工等重工业有很大的发展。很多高温辐射现象引起实验物理与理论物理界的注意,出现了比较精密的测量热辐射与高温的仪器,为热辐射的实验研究提供了有力的武器。同时,经典物理学中的热力学、光谱学、电磁学有了足够的进展。这些都为热辐射的理论与实验研究作了很好的准备。热辐射的几个基本定律都是在这个时期提出的。如 1860 年基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 德国人, 1824 ~ 1887) 在光谱试验的基础上,用热力学方法,提出了在热平衡条件下,物体的发射光谱与吸收光谱的关系,即基尔霍夫定律。1879 年斯蒂芬(J. Stefan, 澳大利亚人, 1835 ~ 1893) 总结了大量实验结果,提出黑体辐射总能量与其绝对温度四次方成正比的经验公式。1884 年玻耳兹曼(L. E. Boltzmann, 澳大利亚人, 1844 ~ 1906) 用热力学理论与电磁理论证明了此公式,后称此定理为斯蒂芬 - 玻耳兹曼定理。1893 年维恩(W. Wien, 德国人, 1864 ~ 1928) 用实验数据与热力学原理提出辐射能量随温度和波长分布的公式,后称作维恩分布定律。此定律在长波波段与实验数据偏差较大,但从此公式可得出峰值波长与绝对温度的关系,即维恩位移定律。1900 年普朗克将维恩分布定律与长波方向的实验数据综合在一起,得出一个新的辐射能量随温度和波长分布的经验公式。此公式与众多的实验数据符合的很好。为了探求这公式的理论推导,他提出了能量不连续假设,即辐射量子假设,得到了黑体辐射能量与发射波长、黑体温度关系的规律——普朗克定律^[1,2]。到此为止,描写热力学平衡状态下热辐射的基本定律全部出齐。所以可将 1900 年标志为辐射换热的诞生年代。

20 世纪前半叶,由于工业的进步,特别是各种高温工业炉的出现与发展,为了计算其中的热辐射,极大地促进了辐射换热的发展。但这时出现的基本概念、参数与计算方法,主要基于实验与几何光学,与量子理论无关。这说明,虽然辐射换热与量子力学是同时诞生的,辐射换热的诞生就有近代物理的支撑,但这先进的理论还没有成熟,不能立即在工程技术中得到应用。这个时期在辐射换热中得到广泛应用的许多概念、方法与一些理论都出现了。概念方面如:灰体、发射率(黑度)、角系数、有效辐射、吸收系数、平均射线行程长度等。计算方法方面如:角系数的代数分析法、积分法、图解法,计算辐射换热量的净热量法、射线踪迹法、区域法等。理论方面如:估计固体表面辐射特性的电磁理论,结合某些工程需要的专门问题,如:炉内换热,热辐射在通道中的传递,空腔热辐射,肋片热辐射等。这时期还开发了多种实验设备、仪器,并进行了大量实验,如:求固体表面和气体的发射率、吸收率、表面反射率等实验,积累了大量热辐射物性数据;某些工业设备的辐射换热实验,得出不少满足工程需要的经验公式、经验系数、计算图表和计算方法等。这时期是辐射换热的成长期,结合工程需要,利用经典物理学的基本理论,辐射换热从物理学中走出来成为传热学的一部分。

20 世纪 60 年代是辐射换热的成熟期。这时出现的航天技术要求更精确的辐射换热计算。同时,动力、化工、仪表、机械加工等工业也对辐射换热提出更高的要求。成熟的标志是出现求气体发射率的光谱法。发送航天器上天的大型火箭尾部会喷出大量的高温气体,正确的预计它的辐射特性对火箭的设计有重要的作用。由于实验设备的限制,气体的高温辐射特性只能从低温的实验数据向高温外推。过去的解决方法是凭科学家的经验,有一定的主观性,显然误差很大。这时美国的阿波罗航天计划吸引了很多传热学专家进

行气体辐射的研究,采用了基于量子力学原理的光谱学,从理论上指导了这一外推,科学地解决了这一问题。这表明近代的辐射基础理论开始直接应用于辐射换热,这标志着它成熟了。它的成熟,还表现在60年代开始出现了论述辐射换热的专著,它不仅作为传热学的一部分,并成为传热学中的一个独立分支。

60年代至今,辐射换热有很大的发展,表现在以下几方面:一是应用面更宽广。除动力、机械制造、建筑等传统工业外,还进入了航空航天、军事、信息、生物工程等工业与技术部门,如红外信息传输,生物组织内的辐射传递及空间环境等。过去不少人以为,辐射换热只有在高温时才需要考虑,事实上有时在常温和低温时也不能忽视。例如:无导热与对流的太空环境中只有辐射;常温环境下物体向平静空气散热,由于自由对流很小,辐射换热往往不能忽略不计。辐射换热的研究已扩散到所有温度领域。二是研究内容扩大、深入。如:粒子热辐射中的多次独立散射,浓相粒子群的非独立散射,各向异性散射,热辐射与湍流的相互作用,半透明体复合换热,辐射反问题,非平衡态气体热辐射,微尺度辐射,多种可容纳多种物理过程、多维的辐射换热数值计算方法等。三是与其他学科的交叉越来越多。较突出的是光学,其他还有电磁学、大气科学、燃烧学、信息科学等。从发表辐射换热文章的杂志中就可看出,例如一本重要的有关辐射换热的国际杂志,名字就叫定量光谱学与辐射换热(*Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*)。美国有些光学杂志每年发表有关热辐射文章的篇数,与传热学杂志发表的篇数相当,有些年度甚至还要多。

1.3 内容介绍

辐射换热的内容可分为三大部分:辐射换热原理,实验与数值计算。本书主要介绍第一部分,附带介绍部分表面辐射的数值计算。

本书分为三部分:第一部分为热辐射的基本定律与概念,它包含第一、二、三章,集中介绍了辐射换热工程应用中的物理基础与基本定义。第二部分为非透明体的表面热辐射,它包含第四到第七章,介绍了固体表面的辐射特性、换热的一般计算方法和一些工程中应用的特点;本部分还对电磁理论应用于固体表面热辐射特性作了简介。第三部分为介质热辐射与复合换热,它包含第八到第十三章,介绍了气体和粒子群的辐射特点、性质及其辐射换热的一般计算方法与工程应用特点;介绍了用光谱理论求气体辐射物性;用米氏电磁理论求微粒辐射物性;用几何光学求大粒子辐射物性。并分别介绍了辐射与导热、对流的复合换热。

到目前为止,公开出版的有关辐射换热的书已有不少,有深也有浅,为了读者查找方便起见,在本章的末尾列出一些参考书目^[3-18]。

参 考 文 献

- 1 郭奕玲,沈慧君. 物理学史. 北京:清华大学出版社,1996.208-214,236-238
- 2 魏凤文,申先甲. 20世纪物理学史. 南昌:江西教育出版社,1996.74-90
- 3 孙鸿宾,殷晓静,杨晶. 辐射换热. 北京:冶金工业出版社,1996

- 4 余其铮. 辐射换热基础. 北京:高等教育出版社, 1990
- 5 R 西格尔, J R 豪威尔. 热辐射传热. 第二版. 曹玉章, 黄素逸, 陆大有, 陶文铨, 朱芙英, 胡槐林译. 北京:科学出版社, 1990
- 6 王兴安, 梅飞鸣. 辐射换热. 北京:高等教育出版社, 1989
- 7 卞伯绘. 辐射换热的分析与计算. 北京:清华大学出版社, 1988
- 8 陆大有. 工程辐射换热. 北京:国防工业出版社, 1988
- 9 E M 斯帕罗, R D 塞斯. 辐射传热. 顾传保, 张学学译. 北京:高等教育出版社, 1982
- 10 Modest M F. Radiative heat transfer. New York: McGraw - Hill, 1993
- 11 Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer. 3rd ed. New York: Hemisphere, 1992
- 12 Brewster M Q. Thermal radiative transfer and properties. New York: John Wiley & Son, 1991
- 13 Edwards D K. Radiation heat transfer notes. New York: Hemisphere, 1981
- 14 Ozisik M N. Radiative transfer and interaction with conduction and convection. New York: John Wiley and Sons, 1973
- 15 Love T J. Radiative heat transfer. Columbus: Charles E Merrill Pub Com, 1968
- 16 Wiebelt J A. Engineering radiation heat transfer. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1966
- 17 Chandrasekhar S. Radiative transfer. New York: Dover Publications, 1960
- 18 Рубцов Н А. Теплообмен излучением в сплошных средах. Новосибирск: Наука, 1984
- 19 Адрианов В Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. Москва: Энергия, 1972
- 20 Бгох А Г. Основы теплообмена излучением. Москва: Госэнергоиздат, 1962

思 考 题

1. 试找最近几年内某一年全年的传热学杂志或光学杂志, 看看有关辐射换热的文章有多少篇? 有哪些内容? 有哪些特点? (题示: 可请教师推荐一杂志名。)
2. 试分析你所熟悉的专业内, 有哪些辐射换热的问题与现象?
3. 从辐射换热的发展史中, 你有何体会?
4. 去附近的图书馆或资料室, 看看有哪些有关辐射换热的书、杂志与资料。

第二章 黑体辐射

本章介绍理想物体——黑体,在理想条件——热力学平衡状态下的辐射基本规律,即普朗克定律,并推导了由此定律派生的一些定律。普朗克定律的推导不是本书的内容,它属于物理学的范畴。本书主要阐述此定律在工程中的应用及某些条件下的简化。

2.1 热辐射能量的表示方法

辐射能的分布是多元的,随波长、方向、偏振以及位置、时间都有自己的分布。描述辐射能的这些性质,需要用不同的参量来表示。目前在辐射换热中偏振性质的应用还不多,因为工程中除激光外,绝大多数热源是非偏振的,所以有关这方面内容本书除在第四章4.8节中略提一点外,其他就不介绍了。要了解的话,可见参考书[1]。本节主要介绍辐射换热中,固体表面常用的辐射能量的表示方法。

本书中空间几何性质的描写,主要采用常用的直角坐标系表示法。辐射换热中,空间方向的性质常用方向角和立体角表示,有时也用向量表示。设有一半圆,半径为 r ,在基圆中心有一微元面 dA 。微元面发射一微元束能量,微元束的中心轴表示此束的发射方向,其空间几何性质及直角坐标系的选取见图2-1所示。图中,微元束能量的方向用方向角 ϑ 和 β 表示。 ϑ 角是 dA 面的法线与微元束中心轴的夹角,称为天顶角,也称纬度、纬度角或极距角。 β 角是中心轴在基圆上的投影线与 x 坐标轴的夹角,称为圆周角,也称经度或经度角。该束能量所占空间的特性用微元立体角 $d\Omega$ 表示。立体角的大小,用球面上被立体角切割的球形面积 dA_s ,除以球半径的平方来表示,见图2-2,单位为球面度 sr ,即

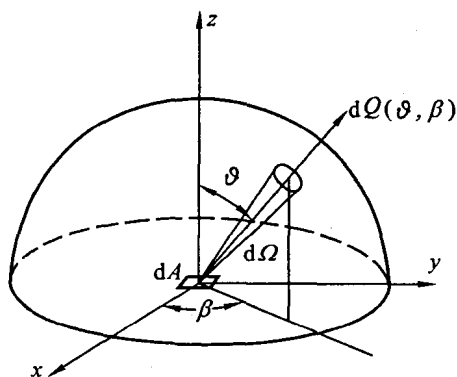


图2-1 微元束辐射的空间几何性质

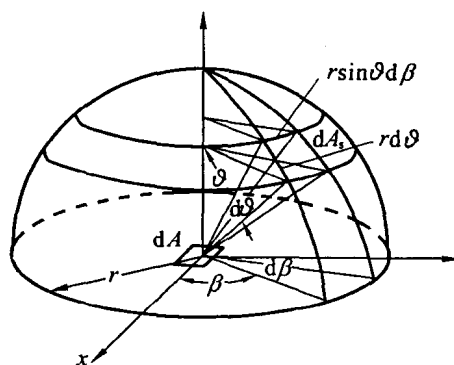


图2-2 立体角

$$d\Omega = \frac{dA_r}{r^2} = \frac{r \sin\vartheta d\beta \cdot r d\beta}{r^2} = \sin\vartheta d\vartheta d\beta \quad (2-1)$$

半个空间的立体角为 $2\pi r^2/r^2 = 2\pi$ 。图 2-2 的方向角表示与图 2-1 的略有不同,两者仅差一无穷小量,完全可以忽略不计。

下面引入几个有关辐射热量术语的定义。根据能量性质及方向的不同,可分为以下几种:

2.1.1 描述热量

(1) 辐射热流量 单位时间内的辐射热量。用符号 Q 表示,单位为 W 或 kW。

(2) 辐射热流密度 单位面积上的辐射热流量。用符号 q 表示。单位为 W/m^2 。

2.1.2 描述物体向半个空间的辐射能量

(1) 半球总辐射力 单位时间内,物体单位面积,向半球空间发射的一切波长的总能量,简称辐射力。用符号 E 表示,单位为 W/m^2 。

(2) 半球光谱辐射力 在某一波长附近取一单位波长间隔(包含此波长),则单位时间内,物体单位面积,在此单位波长间隔,向半球空间发射的能量称为此波长的半球光谱辐射力,简称光谱辐射力或单色辐射力。用符号 E_λ 表示,单位为 W/m^3 或 $W/(m^2 \cdot \mu m)$ 。也可定义为:微元波长范围内的辐射力除以该波长范围。即

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad (2-2)$$

显然,辐射力与光谱辐射力的关系为

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \quad (2-3)$$

2.1.3 描述物体向某个方向的辐射能量

(1) 定向辐射力 单位时间内物体单位面积,向方向 (ϑ, β) 上、单位立体角内发射出 $\lambda = 0 \sim \infty$ 的一切波长的总能量,也称方向辐射力。用符号 $E(\vartheta, \beta)$ 表示,单位为 $W/(m^2 \cdot sr)$ 。如用 $dW(\vartheta, \beta)$ 表示在 dA 面积 (ϑ, β) 方向上的辐射能流量,则

$$E(\vartheta, \beta) = \frac{dW(\vartheta, \beta)}{d\Omega dA} \quad (2-4)$$

显然

$$E = \int_{2\pi} E(\vartheta, \beta) d\Omega \quad (2-5)$$

(2) 光谱定向辐射力 微元波长范围内的定向辐射力除以该波长范围。也可称为单色定向辐射力或方向辐射力,用符号 $E_\lambda(\vartheta, \beta)$ 表示,单位为 $W/(m^3 \cdot sr)$ 或 $W/(m^3 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。即

$$E_\lambda(\vartheta, \beta) = \frac{dE(\vartheta, \beta)}{d\lambda} \quad (2-6)$$

显然

$$E(\vartheta, \beta) = \int_0^\infty E_\lambda(\vartheta, \beta) d\lambda \quad (2-7)$$

2.1.4 描述物体向某个方向法向面积上的辐射能量

(1) 辐射强度 单位时间内, 物体在垂直发射方向的单位面积上, 在单位立体角内, 发射的一切波长的能量。用符号 $I(\vartheta, \beta)$ 表示, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr)$, 又称为定向辐射强度, 见图 2-3, 按定义可知

$$I(\vartheta, \beta) = \frac{dQ(\vartheta, \beta)}{d\Omega dA'} = \frac{dQ(\vartheta, \beta)}{d\Omega dA \cos\vartheta} = \frac{E(\vartheta, \beta)}{\cos\vartheta} \quad (2-8)$$

式中 dA' 为 (ϑ, β) 方向上的法向面积, $dA' = dA \cos\vartheta$

(2) 光谱辐射强度 微元波长范围内的定向辐射力除以该波长范围。也可称为单色辐射强度, 用符号 $I_\lambda(\vartheta, \beta)$ 表示。单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。即

$$I_\lambda(\vartheta, \beta) = \frac{dI_\lambda(\vartheta, \beta)}{d\lambda} \quad (2-9)$$

显然

$$I(\vartheta, \beta) = \int_0^\infty I_\lambda(\vartheta, \beta) d\lambda \quad (2-10)$$

辐射力与以上诸量有下列关系:

$$\begin{aligned} E &= \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \int_{\lambda=0}^\infty \int_{\Omega=2\pi} E_\lambda(\vartheta, \beta) d\Omega d\lambda = \int_{\lambda=0}^\infty \int_{\vartheta=0}^{\pi/2} \int_{\beta=0}^{2\pi} E_\lambda(\vartheta, \beta) \sin\vartheta d\vartheta d\beta d\lambda \\ &= \int_{\lambda=0}^\infty \int_{\vartheta=0}^{\pi/2} \int_{\beta=0}^{2\pi} I_\lambda(\vartheta, \beta) \cos\vartheta \sin\vartheta d\vartheta d\beta d\lambda \end{aligned} \quad (2-11)$$

有些情况下, 辐射光谱用频率 ν 表示。本书把用频率表示的光谱辐射力仍称为光谱辐射力, 但用符号 E_ν 表示, 有的书称为单频辐射力。频率的单位为赫兹 Hz, 故 E_ν 的单位为 $W/(m^2 \cdot Hz)$ 。真空中, 频率与波长有下列关系:

$$\lambda = c_0/\nu \quad (2-12)$$

式中, c_0 为真空中的光速。此时辐射力可写为

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \int_\infty^0 E_\nu d\nu = - \int_0^\infty E_\nu d\nu \quad (2-13)$$

由此式可得 E_λ 与 E_ν 的关系为

$$E_\lambda d\lambda = - E_\nu d\nu \quad (2-14)$$

因为单位波长间隔不等于单位频率间隔, 所以 E_λ 与 E_ν 在数值上不等。

光谱也可用波数表示。波数 σ 为波长的倒数, 即 $\sigma = 1/\lambda$, 并有下列关系:

$$E = - \int_0^\infty E_\sigma d\sigma \quad (2-15)$$

$$E_\lambda d\lambda = - E_\nu d\nu = - E_\sigma d\sigma \quad (2-16)$$

式中, E_σ 为以波数表示的光谱辐射力。

由于辐射换热与光学、光谱学、电磁学在历史上是各自独立发展的, 所以虽然是同样

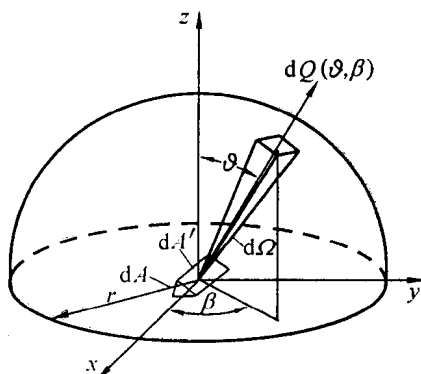


图 2-3 辐射强度

的辐射能量,却往往在不同的学科领域中用不同的名称^[2,3,4,5]。在辐射物性参数的术语中也有这种情况。20 世纪后辐射换热逐渐与光学、光谱学、电磁学有更多的交叉,有一些术语双方逐渐通用或统一起来,但至今仍没有完全达到一致。另外,在我国不少名称是从外文翻译来的,译名不一致,所以热辐射的术语比较混乱,目前我国正在逐渐的统一中^[6]。为便于查阅,表 2-1 列举了传热学、电磁学及光学中一些描述辐射能量的有关术语。

表 2-1 辐射能量的有关术语

No	名 称	符 号	定 义 式	单 位	光、电磁学中名称	其他名称
1	辐射热流量	Q	$\frac{\text{辐射热量}}{\text{时间}}$	W	辐(射能)通量	辐射功率
2	辐射热流密度	q	$\frac{\text{辐射热量}}{\text{时间} \cdot \text{面积}}$	$\frac{W}{m^2}$	辐射换热热流密度	
3	(半球总)辐射力	E	$\frac{\text{半空间辐射能量}}{\text{时间} \cdot \text{面积}}$	$\frac{W}{m^2}$	辐(射)出(射)度	辐射通量密度
4	(半球)光谱辐射力	E_λ	$\frac{\text{微元波段的辐射力}}{\text{微元波段}}$	$\frac{W}{m^3}$	光谱辐出度	单色辐射力
5	定向辐射力	$E(\vartheta, \beta)$	$\frac{\text{某方向的辐射能量}}{\text{时间} \cdot \text{面积} \cdot \text{立体角}}$	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$		方向辐射力
6	光谱定向辐射力,单色定向辐射力	$E_\lambda(\vartheta, \beta)$	$\frac{\text{某方向微元波段的辐射能量}}{\text{时间} \cdot \text{面积} \cdot \text{立体角} \cdot \text{微元波段}}$	$\frac{W}{m^3 \cdot sr}$		光谱定向辐射力
7	辐射强度	I	$\frac{\text{某方向的辐射能量}}{\text{时间} \cdot \text{法向面积} \cdot \text{立体角}}$	$\frac{W}{m^2 \cdot sr}$	辐(射)亮度,辐射度	
8	光谱辐射强度,单色辐射强度	I_λ	$\frac{\text{微元波段的辐射强度}}{\text{微元波段}}$	$\frac{W}{m^3 \cdot sr}$	光谱辐亮度	单色辐射强度
9	投射辐射力	J	$\frac{\text{投射辐射能量}}{\text{时间} \cdot \text{面积}}$	$\frac{W}{m^2}$	辐(射)照度	
10			$\frac{\text{某方向的辐射能量}}{\text{时间} \cdot \text{立体角}}$	$\frac{W}{sr}$	辐(射)强度	

2.2 绝对黑体

绝对黑体(简称黑体)是能全部吸收投射辐射能的物体。它略去了真实物体本身及周围环境对物体热辐射规律起次要作用、但又非常复杂的影响,所以它是个理想物体。黑体的性质代表了物体热辐射规律的共性,在热辐射中常把它作为一种基准或实际物体热辐射性质的极限,因此不仅热辐射理论离不开它,工程技术也常用到它。

黑体有下列性质:

(1) 在相同温度条件下,黑体的发射本领最大。

(2) 投射到黑体上的能量被全部吸收,它的吸收本领最大。这个性质与性质(1)本质上相同,只要性质(1)成立,这一性质也必定成立。稳态时,如物体的吸收本领很大,发射本领很小,则就会不断积累能量而破坏其稳态,所以吸收本领最大的物体发射本领也最大。