

290

高等学校教学参考书

辐射传热

上海机械学院 王兴安

同济大学 梅飞鸣

编

高等教育出版社



高等学校教学参考书

辐 射 传 热

上海机械学院 王兴安 编
同济大学 梅飞鸣



高等教育出版社

102600

2763/2714

内 容 提 要

本书系统地阐述了辐射换热的基本原理、计算方法和实验技术。全书共九章,包括热辐射的理论基础、固体表面的热辐射性质及其辐射换热、气体辐射及其工程计算方法、太阳能利用中的辐射换热以及热辐射的实验研究。本书物理概念清楚,着重于工程应用的分析方法和科学研究实验方法的介绍,并以实例予以深入浅出的说明。书中提供了大量较新的研究报导和有关资料线索。每章末有习题和参考文献,书末附有热辐射性质数据图表。全书采用我国法定计量单位。

本书是1986年6月在镇江召开的高等工科大学传热学课程教学指导小组“辐射传热”评委会确定的教学参考书,可作为高等学校热工类各专业、机械类动力机械专业等有关专业的研究生、高年级大学生选修课及师资提高班的辐射传热的教学用书,也可供有关科技人员参考。

高等学校教学参考书

辐射传热

上海机械学院 王兴安 编
同济大学 梅飞鸣

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京市顺义县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 10.5 字数 250 000

1939 年11月第1版 1989 年11月第1次印刷

印数 0001—910

ISBN 7-04-001149-2/TH·35

定价 2.80元

前 言

随着现代科学技术的突飞猛进，作为基础技术学科的传热学近 30 年来有了长足的进步。辐射换热作为传热学的重要组成部分，由于和空间技术、红外技术、能源工程、低温工程等的紧密结合，因此也有极其迅速的发展。现代科学技术对辐射换热计算及实验的精确度和细致化方面都提出了更高的要求，要求辐射换热计算及实验考虑辐射特性随波长、方向、温度以及表面状况等的变化。因此，探求新的精确计算方法，测定必要、精确而详尽的辐射特性，是当代辐射传热学的重要内容。

本书旨在阐述当代辐射传热学，力图以有限的篇幅提供一些较新的研究成果，以满足高等学校辐射传热教学的需要，并为科学工作者和工程技术人员提供一本较系统的参考书。本书注意了物理概念的阐述和理论的系统性，并通过适当举例予以深入浅出的说明；先讲述固体的热辐射性质和辐射换热计算，再讲述参与辐射介质（气体）的辐射性质和辐射换热计算；加强了工程应用的分析方法和实验研究方法的有关内容；注意前后呼应，相互补充。全书可讲授 30~40 学时，其中有 * 号的章节可作为选学内容。

本书是在上海机械学院和同济大学所用的研究生辐射传热讲义的基础上改编而成的，其中第一~五、八、九章及附录由上海机械学院王兴安副教授编写；第六、七章由同济大学梅飞鸣教授编写。1986 年 6 月，高等学校热工课程教学指导委员会传热学课程指导小组扩大会议对本书进行了评审，主审人张洪济副教授及与会同志认真审阅了初稿，提出了许多宝贵的意见。编者根据评审会议的意见和教学中的试用情况又进行了修改和补充。在编写过程中，上海机械学院蔡祖恢教授、同济大学蒋汉文教授提出了很多

宝贵的意见，谨在此表示衷心的感谢。

编写这样一本比较系统而深入的教科书，限于编者水平与经验，缺点和谬误之处在所难免，恳请读者批评指正，以使本书不断地得到修改和充实。

王兴安 梅飞鸣

1987年5月于上海

主要符号表

A	面积, m^2	R	半径, m
a	矩阵元素; 常数; 吸收系数, m^{-1}	r	矢径, m ; 电阻率, $\Omega \cdot m$
B	有效辐射能流密度, W/m^2	s	射线行程, m ; 坡印廷向量, W/m^2
c	常数; 修正系数; 光速, m/s	t	时间, s ; 温度, $^{\circ}C$
c_p	定压比热容, $J/(kg \cdot K)$	T	绝对温度, K
D, d	直径, m	u	积分方程的未知函数; 流速, m/s
E	镜角系数; 能量, J ; 本身辐射, W/m^2 ; 电场强度, V/m	V	容积, m^3
e	发射力, W/m^2	W	高斯求积系数
F	角系数; 黑体辐射函数	x, y, z	坐标
G	太阳辐照度, W/m^2	* * * *	
H	入射辐射能流密度, W/m^2 ; 磁场强度, A/m	α	吸收率; 吸收度
h	换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$	γ	介电常数, F/m
I	辐射强度, $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; 辅助变分函数	δ	光学厚度
i	虚数单位	ϵ	发射率; 发射度
K	积分方程的核, 辐射减弱系数, m^{-1} ; 相对介电常数	η	无量纲坐标
k	导热系数, $W/(m \cdot K)$	θ	极角, 入射角, rad
L	长度, m	Θ	无量纲温度
L_0	平均射线长度, m	κ	衰减系数
l	无量纲长度	λ	波长, μm
m	质量, kg	μ	磁导率, $H/m, V \cdot s/(A \cdot m)$
n	折射率	ν	频率, Hz
p	压力(强), Pa	ξ	无量纲坐标
Q	热流量, W	ρ	密度, kg/m^3 ; 反射率
q	热流密度, W/m^2	σ	散射系数, m^{-1} ; 斯蒂芬-玻耳兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
		τ	透过率; 透过度
		ϕ	方位角, rad

χ 折射角, rad
 ω 圆频率, s^{-1} ; 立体角, sr

角标

A 表面
a 吸收
b 黑体
d 漫射
e 发射; 环境
g 气体
i 入射; 入口; 内径
i, j, k 表面编号
m 最大
n 法向
o 出射; 外径; 出口

P 投影
r 反射
s 镜表面
t 透过
w 壁面
x, y, z 在 *x, y, z* 方向上的分量
* * * *
 λ 单色(波长)
 ν 单色(频率)
 ϕ 方位角
* * * *
// 平行分量
 \perp 垂直分量
' 定向量
 \diamond 双向量

目 录

主要符号表	1
引言	1
第一章 热辐射的物理基础	4
§ 1-1 热辐射的基本概念	4
§ 1-2 辐射场	6
§ 1-3 黑体及黑体辐射特性	11
§ 1-4 小结	25
参考文献	26
习题	26
第二章 固体的热辐射性质	28
§ 2-1 发射率	28
§ 2-2 吸收率	32
§ 2-3 反射率	38
§ 2-4 发射率、吸收率及反射率之间的关系	45
*§ 2-5 经典电磁波理论	48
§ 2-6 用经典电磁波理论计算热辐射性质	59
§ 2-7 实际物体的热辐射性质	69
§ 2-8 小结	77
参考文献	78
习题	79
第三章 漫表面之间的辐射换热	81
§ 3-1 角系数	81
§ 3-2 角系数的计算方法	84
§ 3-3 有限表面间的辐射换热计算	100
§ 3-4 微元表面间的辐射换热计算	110
§ 3-5 积分方程的求解方法	115
§ 3-6 漫-非灰表面间的辐射换热	124

§ 3-7 小结	127
参考文献	128
习题	130
第四章 非漫表面间的辐射换热	134
§ 4-1 镜反射表面和交换系数	134
§ 4-2 由镜反射表面及漫反射表面组成的包壳中的辐射换热	141
*§ 4-3 具有镜反射分量及漫反射分量的表面间的辐射换热	145
*§ 4-4 非漫非灰表面间的辐射换热	151
§ 4-5 小结	154
参考文献	155
习题	155
第五章 复合换热	157
§ 5-1 导热与辐射的复合换热	157
§ 5-2 对流与辐射的复合换热	160
§ 5-3 导热、对流与辐射的复合换热	164
§ 5-4 小结	165
参考文献	166
习题	166
第六章 气体辐射	168
§ 6-1 气体辐射的机理与特点	168
§ 6-2 一些基本概念与关系式	173
§ 6-3 非散射气体的辐射传递方程	180
*§ 6-4 散射气体的辐射传递方程	190
§ 6-5 小结	195
参考文献	196
习题	196
第七章 气体辐射的工程计算方法	198
§ 7-1 包壳中等温气体辐射换热的净热量法	198
§ 7-2 平均射线长度	205
§ 7-3 气体与包壳间的辐射换热	210
§ 7-4 全辐射换热量计算	215

*§7-5 包壳中有不等温气体时的辐射换热计算 区域法	220
§7-6 火焰辐射	224
§7-7 小结	228
参考文献	229
习题	230
第八章 太阳能利用中的辐射换热	231
§8-1 太阳辐射在大气中的衰减	231
§8-2 吸收材料与透过材料	236
§8-3 平衡温度	240
§8-4 小结	249
参考文献	249
习题	250
第九章 辐射换热的实验研究	252
§9-1 辐射源	252
§9-2 红外光学材料、窗口、棱镜、反射镜	254
§9-3 辐射探测器	257
§9-4 固体表面热辐射性质的测量	262
§9-5 气体及火焰辐射性质的测量	271
§9-6 角系数的测量	273
*§9-7 红外热像技术	275
§9-8 小结	278
参考文献	279
习题	283
附录	285
附录 A 换算系数及常数	285
附录 B 黑体辐射函数	286
附录 C 材料表面的热辐射性质	295
附录 D 角系数	300
附录 E 指数积分函数	311
附录 F 地球大气层外太阳光谱辐照度的标准值	314
参考文献	314
索引	316

引 言

热辐射是物体因本身的温度而向外以电磁波的形式发射能量的现象。只要物体的温度高于绝对零度，任何物体都随时向周围空间发射电磁波。热辐射是热量传递的三种基本方式之一。通常，把波长为 $0.1\sim 1000\mu\text{m}$ 的电磁波称为热射线。热射线运载的能量习惯上称为辐射热。通过热辐射，物体的一部分内能转化为辐射能。在辐射能传播的过程中，辐射能的一部分被沿途介质所吸收，并转化为介质的内能。自然界中的物体都不停地向周围空间发射辐射能，同时又不断地吸收其它物体发射的辐射能。这种以热辐射的方式进行的物体间的热量传递，称为辐射换热。在本书中，把物体间以热辐射与对流、导热的复合方式进行的热量传递称为辐射传热。

热辐射是自然界的普遍现象。太阳向地球表面的辐射，炉膛中的火焰向炉壁和物料的辐射，电灯泡中的灯丝在高温下向周围环境的辐射，都是典型的热辐射。

在现代科学技术的许多传热过程中，辐射换热起着重要的甚至是主导的作用，需要进行详尽、精确的辐射换热计算。例如，燃气轮机燃烧室炉壁的保护、工业炉窑传热的增强、低温容器的隔热、太阳能的热利用、人造卫星及空间飞行体的温度控制，等等，都需要计算、控制传热速率，或计算、控制温度分布。此外，诸如红外探测、遥感技术等需要对各种物体的辐射性能进行详尽、精确的测定。这些都是辐射传热学需要研究的内容。

热辐射现象与依靠微观粒子碰撞或弹性波作用的导热，以及依靠宏观物质运动的对流换热有本质的不同。热辐射所发射的辐

射能取决于物体的温度，所以也被直觉地称为温度辐射。温度越高，辐射越强。此外，热辐射不依赖物质的媒介作用，是不接触的传热方式，因此是真空中唯一能够传递热量的方式。

热辐射的这些特点，使得辐射换热的分析和研究十分复杂与困难。表 0-1 给出了热辐射与导热、对流在某些方面的比较。

表 0-1 热辐射与导热、对流的比较

导热或对流	辐 射
需要介质	不需要介质
$Q \propto T^{1.5}$	$Q \propto T^4$
导热微分方程 $\nabla^2 T = 0$	辐射积分方程 $dq = \int_V q_V dV + \int_S q_S dS$
热物性较简单	热物性复杂

在导热与对流换热中，能量的传递依靠介质的接触，某一微元体的传热量取决于介质的物性以及此微元体邻近介质的温度梯度，例如导热热流密度 $\vec{q} = -k \text{grad} T$ 。稳态、常物性、无内热源介质中的导热微分方程为

$$\text{div}(k \text{grad} T) = 0$$

一般说，这种微分方程比较容易求解。此外，与导热及对流相联系的热物性，如比热容、导热系数等一般也比较简单。

在辐射换热中，物体所发射的辐射能正比于其绝对温度的四次方，描写辐射换热的数学方程是非线性的。由于辐射换热是非接触传热，某一微元表面的传热量和与它相距相当距离的物体或介质有关。例如，对于图 0-1 所示的一个充满辐射气体的封闭空间来说，在计算投射到微元表面 dA 上的辐射能时，应该考虑全部表面和整个封闭空间内气体辐射能的贡献。若微元表面 dS 对 dA 辐射的能量为 $q_S dS$ ，微元体积 dV 中的气体对 dA 辐射的能量为

$q_V dV$, 则投射到 dA 上的总能量为

$$dq = \int_S q_s dS + \int_V q_V dV$$

这是一个积分方程, 而且通常是非线性的, 因此比较难解。物体的热辐射性质也比较复杂。例如固体表面的热辐射性质取决于诸如温度, 表面粗糙度, 辐射能的波长、发射或投射的方向等很多因素, 以致很难精确地描述和测定。此外, 材料热辐射性质的数据现在还相当缺乏。上述辐射换热的特点及其复杂性应该引起我们足够的注意。

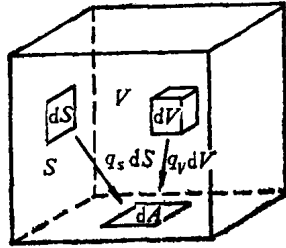


图 0-1 充满辐射气体的封闭空间中的辐射换热

参 考 文 献

- [1] 王补宣著,《工程传热传质学》,上册,科学出版社,1982。
- [2] R. Siegel and J. R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.

第一章 热辐射的物理基础

本章讨论热辐射的基本概念、辐射场的描述方法以及黑体的辐射性质。

§ 1-1 热辐射的基本概念

辐射是物质所固有的属性。原子内部电子的振动或激发将交替地产生变化的电场和磁场而发射电磁波(或释放光子),就形成了辐射。

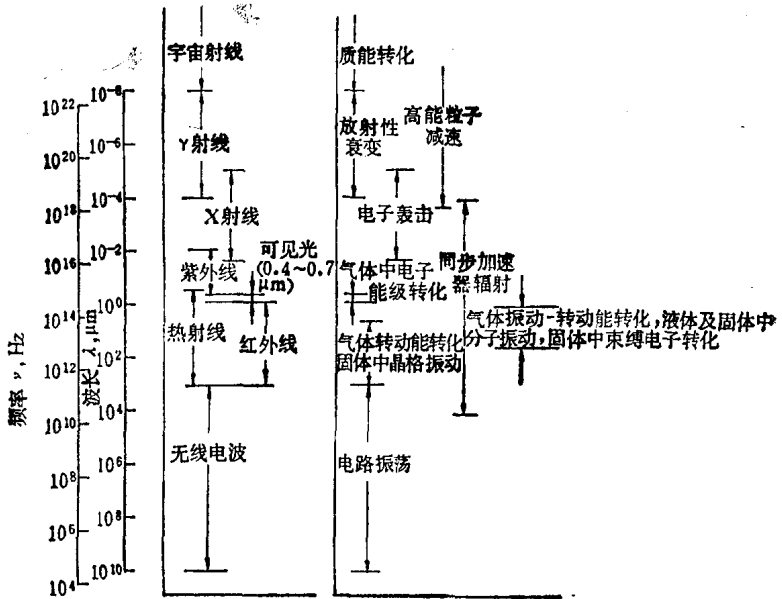
热辐射是辐射现象中的一种。在热辐射过程中,原子受激的基本原因是由于物质粒子的热运动。热射线是热效应最强烈的那部分辐射。热辐射的一些现象和规律可以用经典电磁波理论(波动学说)来说明,而有些现象和规律只能用量子(光子)理论(光子学说)来说明。本书为了说明问题的方便,将分别采用波动学说或光子学说。热辐射的波粒二象性的讨论已超出本书的范围,有兴趣的读者可以参阅有关的教科书^[4]。

根据电磁波学说,热辐射是电磁波。电磁波的波速 c 、波长 λ 、频率 ν 满足下列关系:

$$c = \lambda\nu \quad (1-1-1)$$

电磁波在均匀介质中以光速直线传播。真空中的光速 $c_0 = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。自然界任何介质中的光速都小于真空中的光速。介质中的光速 $c = c_0/n$, n 为介质的折射率(参阅 § 2-5)。电磁波的性质由波长 λ 或频率 ν 确定。通常,波长比频率容易测准,所以常用波长来表征单色波。当电磁波从一种介质进入另一种介质时频率不变,而波速及波长会变化。

将电磁波按波长排列就形成了电磁波谱，见图 1-1-1。不同波长的电磁波的产生机制不同，投射到物体上产生的效应也不同。



(a) 电磁波的种类 (b) 电磁波的产生机制

图 1-1-1 电磁波谱

由图 1-1-1 可见，热射线是波长为 $0.1 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的电磁波。热射线产生的机制主要是气体能级的转化(见第六章)、液体及固体的分子振动以及固体晶格振动等，这些都和物体的热运动有关。波长比热射线更短的电磁波依次是紫外线、X射线、 γ 射线、宇宙射线。它们产生的机制是电子轰击、核裂变及质能转化。波长比热射线更长的电磁波是无线电波，其产生的机制主要是电路中的受激振荡。在热射线中，波长小于 $0.4 \mu\text{m}$ 的属于紫外线，波长在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 范围的是可见光，而波长在 $0.7 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间的称为红外辐射或红外线。红外辐射可分成近红外 ($0.7 \sim 25 \mu\text{m}$) 和远红外 ($25 \sim 1000 \mu\text{m}$) 两个波段。红外辐射投射到物体上会产

生明显的热效应，是热射线的主要组成部分。在工程上所常遇到的温度范围内，例如 1400K 以下，物体热辐射能量的 90% 以上在红外波段。

根据量子学说，辐射是光子的发射。不同频率的单色光的光子不同。光子的能量 $E = h\nu$ ， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数。在均匀介质中，光子以光速 c 作直线运动。光子的能量也可以表示为 $E = h\nu = mc^2$ 。光子的质量为 $m = h\nu/c^2$ ；光子的动量为 $P = mc = h\nu/c$ 。光子的行为犹如气体的分子，光子气与壁面碰撞会对壁面产生作用力。

§ 1-2 辐 射 场

热辐射在空间的分布或传播形成了辐射场。辐射场可以看作是光子气存在的反映。在以下讨论辐射场时，我们将假定系统的几何尺寸远大于电磁波的波长。

1-2-1 辐射强度

辐射场可以用辐射强度来描述。辐射场中，位置 \vec{r} 处在 \vec{s} 方向上波长为 λ 的单色辐射强度 I_λ 定义为：在单位时间、 \vec{s} 方向的单位立体角内，垂直于 \vec{s} 的单位面积上所通过的波长 λ 附近单位波长范围内的辐射能（参看图 1-2-1），即

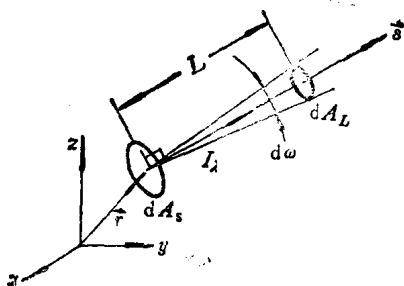


图 1-2-1 辐射强度的定义

$$I_{\lambda} = \frac{dE_{\lambda}}{dA_s d\omega d\lambda d\tau} \quad \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}) \quad (1-2-1)$$

式中: dA_s 是与 \vec{s} 垂直的假想微元面积; $d\omega = dA_L/L^2$ 是 \vec{s} 方向上的微元立体角, 单位为 sr。

辐射强度是矢量, 为了简化书写本书不用矢量的记号。一般说, 单色辐射强度 I_{λ} 是位置 \vec{r} 、方向 \vec{s} 、波长 λ 及时间 τ 的函数, 即 $I_{\lambda} = I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{s}, \lambda, \tau)$ 。单色辐射强度 I_{λ} 是描述辐射场的一个最基本的物理量。

将单色辐射强度 I_{λ} 对整个波长范围积分, 就得到全辐射强度 I :

$$I(\vec{r}, \vec{s}, \tau) = \int_0^{\infty} I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{s}, \tau, \lambda) d\lambda = \frac{dE}{dA_s d\omega d\tau} \quad \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr} \quad (1-2-2)$$

一般说, 全辐射强度 I 是位置 \vec{r} 、方向 \vec{s} 、时间 τ 的函数。如果辐射强度不随位置而变化, 即 $I \equiv f(\vec{r})$, 则称此辐射场是均匀的; 如果辐射强度与方向无关, 即 $I \equiv f(\vec{s})$, 则称此辐射场是各向同性的; 如果辐射强度不随时间而变化, 即 $I \equiv f(\tau)$, 则称此辐射场是稳定的。除特殊说明外, 本书只讨论稳定辐射场。

在完全透明的介质中, 或在不参与辐射传热的介质中, 辐射强度沿着射线方向保持不变。介质中, 沿着射线方向辐射强度的变化是由于介质对辐射能的吸收、散射和介质本身发射所引起的, 将在第六章中讨论。

辐射强度相当于光学中的亮度。全辐射强度把亮度概念扩展到了全波长范围。

根据辐射强度, 可以计算辐射场中任意表面的辐射能流密度、任意位置的辐射能密度以及作用于表面的辐射压强。

1-2-2 辐射能流密度

考虑辐射场中某一微元面积 dA 。单位时间内从 \vec{s} 方向的 $d\omega$