

热 辐 射 传 热

[美] R. 西格尔 J. R. 豪厄尔 著

曹玉璋 黄素逸 陆大有 译
陶文铨 朱美英 胡槐林
刘才铨 校

Hk44/11



C0457085

科 学 出 版 社

1990

内 容 简 介

本书系统而全面地论述了热辐射传热的原理和分析方法,是迄今为止较为详尽地论述热辐射传热理论的专著。全书共二十章,前五章是辐射换热的基本原理,包括电磁波理论和固体材料的辐射性质;第六章至十二章是表面之间的辐射能交换和封闭腔中无衰减性介质时的辐射能交换,最后八章是在衰减性介质中的辐射能交换问题,即所谓的气体辐射问题。书中各章均有例题;书末附录列有转换系数、辐射常数、黑体函数、各种几何条件下的角系数和辐射性质等。本书介绍的太阳能利用方面的内容,是近年来辐射换热发展中较活跃的领域。

本书可供热能动力、航空航天、化工、冶金、建筑、电子等部门的科技人员参考,也可作为高等学校有关专业的教科书或教学参考书。

Robert Siegel and John R. Howell
THERMAL RADIATION HEAT TRANSFER
Second Edition
Hemisphere and McGraw-Hill
1981

热 辐 射 传 热

[美] R. 西格尔 J. R. 豪威尔 著

曹玉璋 黄家逸 陆大有 译
陶文铨 朱美英 胡锦林

谢才俊 校

责任编辑 陈文芳 顾锦梗 李雪芹

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1990年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16
1990年7月第一次印刷 印张:42 1/2
印数:001—580 字数:990 000

ISBN 7-03-001574-6/TB·403

定 价: 47.00 元

前 言

在《热辐射传热》一书的第二版中，作者力图保持第一版作为辐射教科书和参考书的特色，这些特色包括详尽地阐述辐射传递的原理、注意说明基本辐射定律的假设以及提供大量解释性的材料，以使大学生和实习工程师们都能用来作为自学教材和参考书。

在第一版问世后的几年中，太阳能利用方面有了很大的进展。基于这一原因，增加了有关窗户和多层窗户(用于太阳能收集器)、涂层表面和薄膜的传递性能的一章，扩充了玻璃特性方面的材料。

为了完善结构，通过与其它章节内容合并的办法删去了两章，扩充了有关煤烟辐射的材料并和气体在炉内和燃烧室内的辐射数据结合起来。将散射与有关吸收的论述归并一起，以使衰减介质中的辐射特性得到更一致的阐述。

还做了许多其它的补充，使所提供的可资利用的角系数表包括最新的内容。在波段辐射关系方面引入了大量新的成果，从而使这部分内容得以扩充。在微分近似法及一些新的家庭作业题和例题方面作了修改。增加了国际单位制的应用部分，但它并不是唯一的，因为在美国的工程传热计算中通常也采用英制单位。

R. 西格尔

J. R. 豪厄尔

第一版前言

几年以前人们就认识到,在航天研究和设计中,热辐射的重要性更为明显。之所以如此重要有以下几方面的原因:由于发动机效率提高而产生的高温;高速飞行时由于摩擦热引起的温升;以及在地球大气层外各种装置的运转,在那里对流作用消失了,辐射就成了向外界传递热量的唯一方式。正因为这样,在美国国家航空和航天管理局的刘易斯(Lewis)研究中心,开设了相当于一年级研究生水平的热辐射课程,作为内部进修计划的一部分。

该课程分成三个主要部分:第一部分涉及不透明材料的辐射特性,其中包括黑体的讨论,电磁理论和测得的性质;第二部分讨论封闭腔内有对流和壁导热以及没有对流和壁导热这两种情况下的辐射换热;第三部分论述透明介质(主要是气体)中的辐射。

当设立该课程时还没有一本能符合上述要求的专门的辐射教科书。为此我们着手编写了一套讲义,本书正是这套讲义发展的结果。过去几年中,在有关文献中已见到了几本辐射教科书,因此对这方面参考书的需要部分地得到了满足。

本书的容量比指定为一个学期课程的标准教科书所提供的内容要广泛得多,对所讨论的许多部分都做了很详细的叙述,因此它们可以作为辐射理论方面某些更细致问题的参考。详细的叙述使得某些章节偏长,但是在这里作者的意图不是试图节省篇幅而是详尽。为便于参考起见,我们将这些章节再细分,以利于查找专门部分之所在。

本书分为二十章。前五章论及辐射传递的基本原理、黑体、电磁理论和固体材料的性质。第六至十二章讨论表面之间和封闭腔内为非衰减介质时的能量交换。后八章论述衰减介质中的辐射传递。

对一年级研究生水平一个学期结束的课程来说,最基本的内容已在目录上用星号标明。讲授本课程的经验表明,如果按照教师所希望的那样有所侧重,对某些细节不必细讲的话,这些内容是足够的。作者力图以通俗的文体,并甘冒文字冗长的风险来较为详细地进行阐述。按照教学法,教材的编写通常是由特殊到一般(因为通常也更复杂)。由于这些原因,本书还可供只有热辐射初步知识的工程师们自学之用。

为了便于读者熟悉分析关系式的应用,每一章都有数字计算例题。我们希望这些例题将有助于在理论和实际应用之间起桥梁作用。在每一章的最后都附有家庭作业。

最后要说明的是,本书两位作者是尽可能严格地各自承担一半的工作量。撰写某节内容之前先用投掷硬币的方法来确定第一作者。因此无论谁作为第一作者都不要得到本著作的主要荣誉,这不过是一种时新的抓阄方法而已。

作者感谢国家航空和航天管理局众多同事的帮助,他们审核了材料,提供了有价值的详细说明。特别要感谢 Curt. H. Liebert,他仔细地审阅了全部手稿。

R. 西格尔

J. R. 豪厄尔

目 录

前言	vii
第一版前言	viii
第一章 绪论	1
1-1* 热辐射的重要性	1
1-2* 符号	2
1-3* 辐射问题的复杂性	3
1-4* 辐射的波动模型和量子模型	4
1-5* 电磁波谱	4
第二章 黑体辐射	6
2-1* 符号	6
2-2* 黑体定义	7
2-3* 黑体的特性	8
2-4* 黑体的发射特性	10
2-5* 黑体的实验制取	24
2-6* 黑体性质提要	25
2-7 历史的发展	25
习题	28
第三章 非黑表面辐射性质的定义	30
3-1* 引言	30
3-2* 符号	35
3-3* 发射率	35
3-4* 吸收率	41
3-5* 反射率	48
3-6* 反射率、吸收率和发射率之间的关系	54
3-7* 结论	57
习题	58
第四章 用经典的电磁波理论计算热辐射性质	60
4-1* 引言	60
4-2* 符号	60
4-3 电磁波理论的基本方程	62
4-4 介质内辐射波的传播	63
4-5 反射定律和折射定律	68
4-6* 应用电磁波理论的关系式计算热辐射性质	75
4-7 热辐射性质理论的推广	88
习题	88
第五章 实际材料的辐射性质	91
5-1* 引言	91

5-2*	符号	91
5-3*	金属的辐射性质	92
5-4*	不透明非金属材料的辐射性质	102
5-5*	特殊的不透明表面和选择性透射	108
5-6	结论	119
	习题	119
第六章	辐射交换引论	122
6-1*	封闭腔理论	122
6-2*	复合方式的能量传递	124
6-3*	符号	124
6-4	结论	124
第七章	黑体等温表面间的辐射能交换	126
7-1*	引言	126
7-2*	符号	126
7-3*	两个微元表面之间的辐射交换	127
7-4*	辐射几何角系数和两表面间的能量交换	130
7-5*	计算角系数的方法	140
7-6*	已知角系数的文献汇集	160
7-7*	黑体封闭腔内的辐射交换	160
7-8	关于角系数的历史记述	163
7-9	结论	164
	习题	164
第八章	由漫射-灰表面组成的封闭腔内的辐射交换	172
8-1*	引言	172
8-2*	符号	173
8-3*	有限大小面积之间的辐射	175
8-4*	无限小面积之间的辐射	183
8-5	结论	202
	习题	202
第九章	含有镜反射面的封闭腔中的辐射	207
9-1	引言	207
9-2	符号	207
9-3	两个镜反射表面之间的辐射	208
9-4	含有镜反射和漫反射表面封闭腔中的净辐射交换	225
9-5	结论	235
	习题	237
第十章	非漫射非灰表面之间的热辐射交换	240
10-1*	引言	240
10-2*	符号	240
10-3*	对于具有光谱相关性质的漫射表面的封闭腔理论	242
10-4*	能带近似法	246
10-5	有方向性的灰表面	249
10-6	具有方向及波长相关特性的表面	254

10-7	结论	258
	习题	258
第十一章	求解辐射交换问题的蒙特卡罗方法	261
11-1	引言	261
11-2	符号	262
11-3	方法的详细描述	263
11-4	热辐射交换方面的应用	269
	习题	281
第十二章	存在其它能量交换方式时的辐射	282
12-1*	引言	282
12-2*	符号	283
12-3*	辐射和传导组合的问题	285
12-4*	辐射和对流	292
12-5*	与传导和对流相组合的辐射	295
12-6*	对于多模式能量交换的计算机程序	298
12-7*	结论	298
	习题	298
第十三章	在吸收、发射和散射介质中的辐射原理	302
13-1*	引言	302
13-2*	符号	303
13-3	吸收、发射和散射的物理机理	305
13-4*	辐射强度的一些基本性质	308
13-5*	由于吸收和散射引起的能量衰减	310
13-6*	能量的发射	318
13-7*	射入的散射	319
13-8*	工程气体性质所使用的定义	321
13-9*	局部热力学平衡概念	327
	习题	328
第十四章	对于吸收、发射和散射介质的能量传递方程	330
14-1*	引言	330
14-2*	符号	330
14-3*	传递方程	332
14-4*	在介质中的能量守恒	336
14-5*	平面层的传递方程和辐射流	340
14-6	具有各向同性散射的灰体介质	346
14-7	辐射平衡中的灰体介质	348
14-8	利用光子模型建立的能关系式	354
	习题	356
第十五章	辐射传递方程的近似解	358
15-1*	引言	358
15-2*	符号	358
15-3*	忽略传递方程中某些项的近似解	360
15-4*	平行平板之间辐射传递的光学薄极限	364

15-5*	辐射传递中的扩散近似法	366
15-6	使用平均吸收系数的近似法	381
15-7	利用指数函数核的近似解	383
15-8	利用完全的传递方程近似解	385
习题		395
第十六章	气体物性和粒子散射的微观基础导论	397
16-1	引言	397
16-2	符号	397
16-3	量子理论基础	400
16-4	诱导发射和普朗克分布	404
16-5	传递方程	407
16-6*	气体的吸收特性	408
16-7	不同类型粒子的散射	426
习题		437
第十七章	封闭腔内气体辐射的工程计算	439
17-1*	引言	439
17-2*	符号	439
17-3*	封闭腔内充满等温气体的净辐射法——光谱关系式	441
17-4*	光谱几何平均透射因子和吸收因子的计算	447
17-5*	全部气体向所有边界或部分边界辐射时的射线平均行程长度	451
17-6*	利用射线平均行程长度求解黑封闭腔内整个气体和封闭腔边界之间的全辐射交换	456
17-7	利用光谱方程的积分求解封闭腔内的全辐射交换	462
17-8	非等温气体的辐射	472
17-9	火焰、发光火焰和颗粒辐射	483
习题		496
第十八章	辐射与传导和(或)对流的复合能量交换	499
18-1*	引言	499
18-2*	符号	499
18-3*	辐射与传导的复合传热	501
18-4	对流、传导和辐射的复合能量交换	513
18-5	瞬态辐射问题	520
习题		523
第十九章	窗口、镀层和半透明固体的辐射性质	526
19-1	引言	526
19-2	符号	527
19-3	窗口的透射、吸收和反射	529
19-4	具有不完全透明窗口的封闭腔分析	536
19-5	镀层或薄膜对表面的影响	537
19-6	非一的折射率对介质中辐射特性的影响	542
习题		548
第二十章	对于吸收、辐射和散射介质的蒙特卡罗法	552
20-1	引言	552
20-2	符号	552

20-3	方法的讨论	554
20-4	通过灰气体的辐射	558
20-5	关于辐射性质变化的研究	560
20-6	辐射与其它传热共存时的模型	562
20-7	瞬态辐射问题	562
20-8	兼有散射现象的情况	562
20-9	结论	563
	习题	563
附录 A	转换系数、辐射常数和黑体函数	564
附录 B	漫射角系数的原始资料	574
附录 C	选取的角系数一览表	602
附录 D	辐射性质	610
附录 E	Gebhart 的封闭腔分析法	615
附录 F	指数积分关系式	617
附录 G	图表索引	620
附录 H	词汇表	622
	参考文献	628
	索引	656

第一章 绪 论

一切物质由于与材料内能有关的分子和原子激发的结果都连续地发出电磁辐射。在平衡状态下,这种内能与物质的温度成比例。所发出的辐射能的范围可以从无线电波(其波长可达数百米)直到波长小于 10^{-14}m 的宇宙射线。本书中只研究与热和光有关的辐射,这种辐射称之为**热辐射**,它处于波长范围的中段(明确的定义见第 1-5 节)。

虽然辐射能总是围绕着我们,可是我们对它并不是很了解,因为我们的身体只能直接地察觉到它的一部分。其它部分就需要用仪器来检测。我们的眼睛是敏感的光线探测器,它能够形成物体的象,但是对于热辐射(红外线)就相对地不敏感了。我们的皮肤是热辐射的一个直接的探测器,但并不是一个好的探测器。如果热辐射不大的话,皮肤就感觉不出我们周围暖、凉表面的信息。这时我们就需要用间接的方法,譬如在照相机内装上对红外线敏感的胶卷,来获得热辐射的图象。

在详细地讨论热辐射的性质之前,我们将充分地研究为什么热辐射在现代技术中有如此的重要性。

1-1 热辐射的重要性

热辐射在某些应用方面显得重要的原因之一是由于发出的辐射取决于温度。对于导热和对流而言,两个位置之间的能量传递近似地取决于该两位置的温差的一次方¹⁾。可是两物体之间依靠热辐射所传递的能量却取决于该两物体各自的绝对温度的四次方或五次方之差。

由于辐射与对流及导热的能量交换机理之间的这一基本区别,在高绝对温度的层次上辐射的重要性就变得非常突出。因此辐射对炉内和燃烧室内以及核爆炸的放射能量的传热都有很大的影响。辐射定律决定了太阳内部的温度分布以及来自太阳或来自太阳模拟器中模拟太阳源的辐射情况。太阳的辐射特性对太阳能利用的技术发展是十分重要的。为了获得高的热效率,空间应用的某些装置被设计在高温的水平下运行。因此,在诸如火箭喷管、空间应用的核动力站或者气态堆芯的核火箭这一类装置中计算热效应时通常必须考虑辐射。

辐射传递的第二个显著特点是,在发生辐射交换的两位置之间并不需要介质。辐射能完全通过真空传递。这正是辐射与对流和导热大不相同的地方,在那里必须有一种物理介质以对流流动的方式来携带能量并且用热传导的方式来传递能量。如果没有介质,辐射就成了唯一有效的传热方式。穿过杜瓦瓶或保温瓶的抽空了的壁的热泄漏,以及真空管灯丝的热耗散就是一些常见的例子。辐射的一个新近应用是用于从空间运行的动力站中排出废热。

1) 对于自然对流,或者当考虑变物性影响的时候,温差的次方可能大于 1,但在对流和导热中通常都不会趋近于 2。

在某些情况下,即使温度水平不高并且存在着其它传热方式,辐射仍然是重要的。下面的例子是引自 1964 年春天出版的一家克利夫兰市的报纸。一个种花人“注意到了”一个重复出现的现象。自从在花坪上采用塑料罩后,他对这个现象观察了两个季节。当正式的温度读数大大高于冰点时,集结在塑料上的水形成了 1/4 英寸厚的冰(在夜晚)。“我希望对此有一个答案,我猜想不到冰点温度你是不可能得到冰的”。这个种花者的疏忽之处就在于只考虑了对空气的对流而忽略了水覆盖面和室外很冷的冷源之间在夜晚存在着辐射损失。

一个类似的实例是人在有冷表面的房间里就觉得不舒服。例如冷的窗户面,由于身体直接向窗户面辐射而没有得到来自它们的补偿能量,于是产生了寒意。用幕布或窗帘把窗户遮上大大地减轻身体的不舒适感。

在将太阳辐射作为地球上的一种能源而加以实际利用中,热辐射得到重要的应用。太阳能穿过太空真空和地球大气层传到地面上的太阳能收集器上。收集器起到将太阳辐射转化为内能的作用。如果所达到的能量不是用透镜或曲面镜高度聚集的话,则收集器通常是在近于环境温度或者至多在比环境温度高出摄氏一二百度下运行。可得到的太阳能、传至工作流体的可用能与各种各样的对流的、导热的和辐射的热损失之间的平衡是很容易受各种因素的影响的,这就使高效率的收集器的设计成为十分突出的课题。

最后,我们要注意到,我们将要研究的热辐射是在这样的波长范围内,它们给人类以光、热、光合作用和所有与之有关的其它效益。这正是要研究热辐射的有力理由。我们的生存依靠射到地球上的太阳辐射能。了解这种辐射和大气层以及地球表面的相互作用就能在太阳辐射的利用中提供额外的效益。

1-2 符 号

c	电磁辐射在除真空以外的介质中的传播速度
c_0	电磁辐射在真空中的传播速度
k	导热系数
n	折射率, $n = c_0/c$
q_c	由导热引起的单位时间内单位面积上的能量
q_r	单位时间内到达单位面积的面积元上的辐射能
q_s	单位时间内从单位面积的面积元上发射出并到达单位面积上的辐射能
q_v	单位时间内从单位体积的体积元上发射出并到达单位面积上的辐射能
S	表面积
T	温度
V	体积
x, y, z	直角坐标系的坐标
ζ	任意方向
λ	真空中的波长
ν	频率

1-3 辐射问题的复杂性

首先, 让我们讨论由于辐射交换的基本特性所产生的某些数学上的复杂性。在导热和对流换热中能量的传递是借助于物理介质。从固体或液体某一无限小的体积元内传入和传出的能量取决于温度梯度和紧邻微元体处的物理特性。例如对某一物体, 其温度分布为 $T(x, y, z)$, 有恒定的导热系数 k , 则对比较简单的导热情况(无对流), 局部地应用傅里叶导热定律可导出导热方程

$$q_{\zeta \text{ 方向}} = -k \frac{\partial T}{\partial \zeta} \quad (1-1)$$

对如图 1-1(a) 所示的固体内的一微元立方体, 考虑到进出所有面的净热流, 利用图中给出的各项, 即可得到物体内存热的拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1-2)$$

该能量平衡方程中的各项只取决于物体内当地的温度导数。

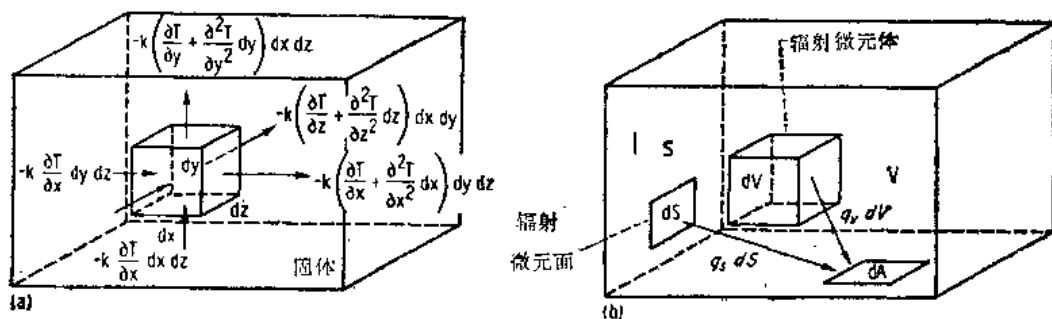


图 1-1 导热和辐射热平衡中各项型式的比较

(a) 固体体积元中的各导热项; (b) 充满辐射物质的封闭腔内的各辐射项

对于对流过程也能进行类似的虽然是更复杂的分析, 还可证明, 热平衡只取决于所考察位置的紧邻处的情况。

在辐射中, 能量在各个分开的微元体之间传递, 在各微元体间并不需要有介质。我们来考察一个面积为 S 、体积为 V 的受热的封闭腔, 其内充满着辐射物质(如热气体或玻璃), 如图 1-1(b) 所示。如果 $q_s dS$ 为从封闭腔上面积为 dS 的元表面到达 dA 上的辐射能流密度(单位时间内和单位面积上的能量), $q_r dV$ 为从体积为 dV 的气体的微元体到达 dA 上的能流密度, 则到达每单位面积的 dA 上的总辐射能为

$$q_r = \int_S q_s dS + \int_V q_r dV \quad (1-3)$$

上述各项就使热平衡有着积分方程的形式, 这对工程师来说通常就不象微分方程那样熟悉了。当辐射与导热和(或)对流结合在一起的时候, 同时存在含有温度的不同幂的微分和积分项将导致一组非线性的积分-微分方程。求解它们通常是很困难的。

除了数学上的困难以外, 辐射问题还有它固有的第二种复杂性, 即精确地确定方程中

出现的物性值。因为固体的物性与许多变量有关,如表面的粗糙度、磨光的程度、材料的纯度、涂层(如表面上的油漆)的厚度(对于薄的涂层,基体材料仍有影响)、温度、辐射的波长、辐射离开表面时的角度等,就使得精确确定物性值更加困难。遗憾的是,已有报道的许多测量结果都没有对有关的表面情况给予明确的规定。

1-4 辐射的波动模型和量子模型

可以用两种观点来考虑辐射能传播理论:经典的电磁波理论和量子力学。在大多数情况下,由辐射与物质的相互作用的经典观点得出的方程和量子力学的结果非常接近,因此除少数情况外,都可以用电磁波传播能量的经典概念来考察热辐射现象。但是这些例外包括辐射传递研究中常见的某些最重要的作用,如从一物体发射能量的光谱分布,气体的辐射特性等。这些作用只能在量子效应的基础上加以解释和推导,在量子效应中假设能量是被不连续的粒子(光子)所携带。电磁能量的“真实”本性(也就是说,是波还是量子)尽管还不知道,但它对工程师来说通常也不重要。本书中通常都是应用波动理论,因为它在工程计算中最实用,并且一般导出的方程形式也与量子理论相同。对于那些必须引用量子理论的现象也会偶而涉及。

1-5 电磁波谱

在波动理论的体系中,电磁辐射遵循说明横波的诸定律。所谓横波就是振动方向垂直于传播方向的波动。电磁辐射在真空中的传播速度是和光一样的。光,归根到底只不过是电磁辐射在一个小的频谱区域内的特例。电磁辐射在真空中的传播速度为 $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在介质中的速度 c 小于 c_0 , 通常是根据折射率 $n = c_0/c$ 来给定。这里 n 大于 1¹⁾; 对于玻璃, n 约为 1.5; 而对于气体, n 接近 1。

电磁辐射的形式能够根据它在真空中的波长 λ (或频率 ν , 这里, $c_0 = \lambda\nu$) 来分类。通常的波长测量单位有微米 (μm)²⁾, $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$, 或 $1\mu\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$, 还有埃 ($\text{\AA}$), $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ 。因此 $10^4\text{\AA} = 1\mu\text{m}$ 。辐射光谱图已示于图 1-2 上。在附录 A 的表 A-2 和表 A-3 中已给出了辐射传递中基本单位的一组换算系数。

在这里最感兴趣的区域包括紫外线边缘的长波部分、可见光(其波长为 $0.4-0.7\mu\text{m}$) 和红外线(其波长从可见光谱的红端之外延伸到 $\lambda = 1000\mu\text{m}$ 左右)。红外线区有时又被分成近红外区(其波长从可见光区到 $\lambda = 25\mu\text{m}$ 左右)和远红外区(由红外光谱的长波部分构成)。

在图 1-2 上最靠右边的一栏标明了产生电磁辐射的各式各样的机理。某些说明反映了量子力学的观点。这种观点认为处于激发状态的电子或分子会产生从一个能级向另一

1) 对于象金属一类的衰减介质,折射率是一个复数, n 只是实数部分。在某些情况下,例如在反常色散的范围内, n 能小于 1。初看起来,可能会造成这样的印象,即传播速度能大于 c_0 。事实却并非如此,在这种情况下,在介质中传播的波形式上会复杂化。 c 则是波的相速度,当它超过 c_0 时就没有物理意义了。对于更进一步的讨论可参阅 Max Born 和 Emil Wolf 合著的“光学原理”(Principles of Optics) 第 1.3 节, 修订第二版, The Macmillan Company, New York, 1964, 以及本书第 4-5.2 节。

2) 专用名词“micron (μ)”也被用来代表 10^{-6} , 我国已规定用“micrometer (μm)”。

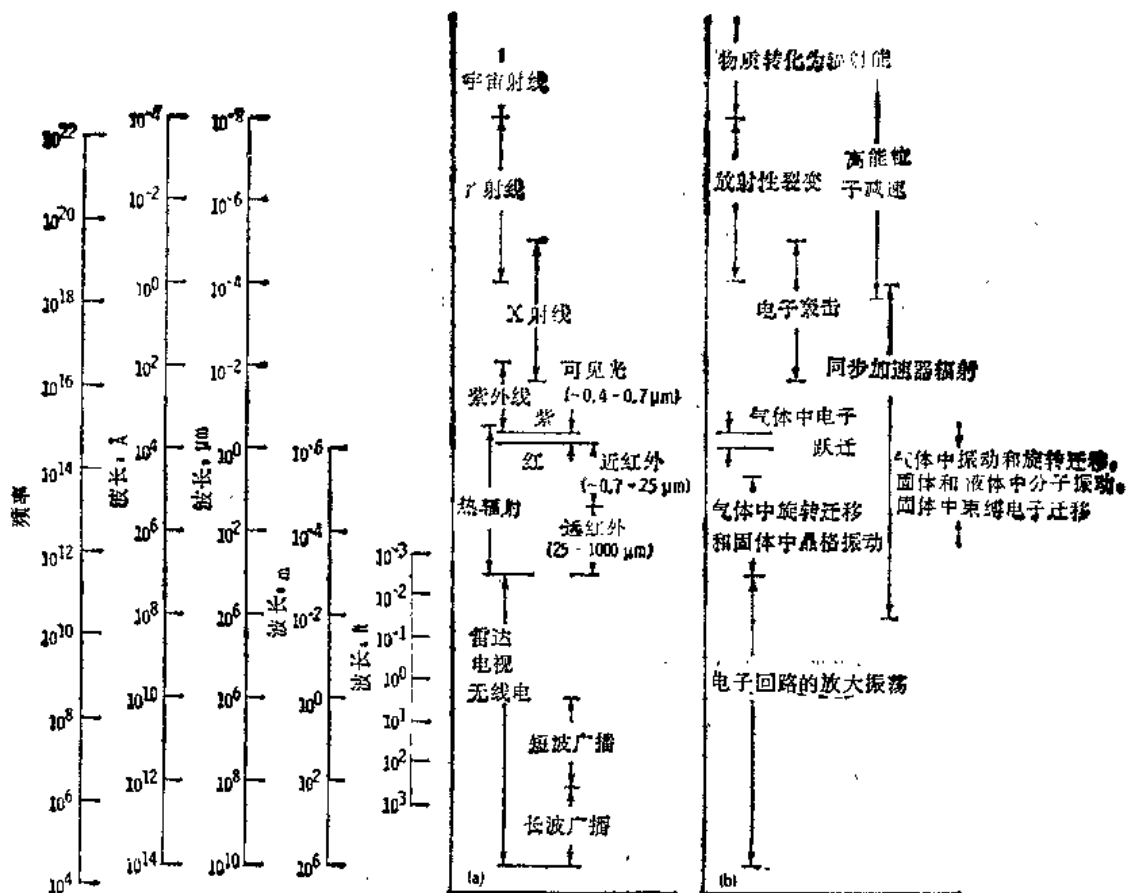


图 1-2 电磁辐射的波谱
(a) 辐射形式；(b) 产生的机理

个较低能级的跃迁过程。这些跃迁就导致释放辐射能。跃迁可以自发地产生也可能由于辐射场的存在而被引发。

在本章中我们讨论了热辐射的重要性，辐射问题所特有的困难，以及在电磁波谱内热辐射所占有的波长范围。在下一章中，将讨论理想的辐射体，即所谓黑体的辐射特性。用这种理想化的特性作为比较的标准，对工程师感兴趣的各種情况下的辐射能的特性将在随后的各章中讨论。

(黄素逸 译)

第二章 黑体辐射

在讨论黑体理想化的概念之前,让我们考察入射的辐射能和物质之间的相互作用的几个方面。我们所涉及的概念是,物体表面的相互作用不仅取决于表面性质,也取决于表面下面的基本材料。

当辐射入射到一均匀物体上时,一部分辐射被反射,其余部分就透射入物体。此外,当辐射通过介质传播时,它可能被吸收。如果实质上吸收辐射所需要的材料的厚度比物体的几何厚度大,那么大部分的辐射将完全地透射过物体并且其本性不会改变。另一方面,如果材料是一个强有力的内部吸收体,则辐射不会从物体反射出来,它将在邻近表面的一个很薄的层内转化为内能。必须区分材料允许辐射通过它的表面的能力和辐射通过表面进入物体后内部吸收辐射的能力。例如,一块高度磨光的金属,通常将入射辐射除一小部分外全都反射了,但是进入物体的辐射将被强烈地吸收并且在材料内的一个很短的距离内被转化成内能。因此该金属具有很强的内部吸收能力,虽然对于入射射线而言,因为大部分入射射线被反射了,它只是一个很差的吸收体。非金属可能显示出相反的倾向。非金属可以允许入射射线的大部分通过它进入物质内部,但是内部吸收辐射能并将它转化为内能所需要的厚度却比金属大。玻璃窗容易让辐射通过它的表面,但是它对可见辐射又是一个差的吸收体,因此它对可见辐射是透明的。当所有进入物体的辐射都被内部吸收,那么我们就称该物体为**不透明体**。

对于入射能来说一个好的吸收体,其材料必须有低的表面反射率及足够高的、防止辐射通过的内部吸收性。如果金属以很细微粒的形式沉积在表面上,其结果是表面的反射率低。这一效应同金属具有高的内部吸收性联系在一起,就使这种形式的表面成为一个良好的吸收体。这就是使金属“变黑”的基本原理,如铂黑或金黑^[1]。一个黑体必须是表面反射为零并且内部完全吸收。

2.1 符 号

A	表面积
C_1, C_2	普朗克光谱能量分布中的常数(见附录 A 的表 A-4)
C_3	Wien 位移定律中的常数(见附录 A 中的表 A-4)
c	电磁辐射在除真空以外的介质中的传播速度
c_0	电磁辐射在真空中的传播速度
E	单位时间辐射的能量
e	辐射力(辐射出射度)
F_{0-1}	在 0—1 波段内黑体辐射或辐射力占总辐射的份额
h	普朗克 (Planck) 常数
i	辐射强度

k	玻耳兹曼 (Boltzmann) 常数
n	折射率
Q	单位时间内的能量
R	半径
T	绝对温度
ζ	量 $C_2/\lambda T$
η	波数
θ	与表面法线所成的极角或锥角
κ	电磁辐射的衰减系数
λ	真空中的波长
λ_m	除真空以外的介质中的波长
ν	频率
φ	圆周角
σ	Stefan-Boltzmann 常数[式(2-22)]
ω	立体角
上标	
'	方向量
下标	
b	黑体
max	对应的能量最大值
n	法线方向
p	投射的
s	球
η	相关波数
λ	相关波长
$\lambda_1 - \lambda_2$	波段 $\lambda_1 - \lambda_2$
λT	λT 值
ν	相关频率

2-2 黑 体 定 义

黑体定义为这样一种理想物体,它允许**所有**的人射辐射进入其内(不反射能量)并吸收**全部**入射的辐射能(不透过能量)。这一点对于所有的波长和所有的人射角的辐射来说都是正确的。因此**黑体是人射辐射理想的吸收体**。所有其它有关黑体特性的定性说法都可以从这一定义引伸出来。

黑体概念是研究辐射能传递的基础。作为一个理想的吸收体,它可以被用来作为与实际吸收体进行比较的标准。正如我们将看到的那样,黑体也发射最大的辐射能,因此也用来作为比较物体发射辐射的理想标准。理想的黑体辐射特性已经通过量子理论充分地确定下来并且被实验所证实。

只有少数的表面如炭黑、金刚砂、铂黑、金黑,在吸收辐射能的能力上接近于黑体。黑体就是由这样的观察而得名的: 对入射的可见光来说,一个好的吸收体肉眼看来确实好像是黑的。但是除了可见光区域外,对热辐射的波长范围而言,眼睛并不是吸收能力的一个好的显示器。例如涂上了白油漆的表面在室温下发出的红外辐射就是很好的吸收体,虽然对于足以表现可见光特征的较短波长的区域来说,它是一个差的吸收体。

2-3 黑体的特性

黑体除了是辐射的理想吸收体外还有其它重要的特性,现在我们加以讨论。

2-3.1 理想的辐射体

假设有一温度均匀的黑体置于任意形状的理想绝缘封闭腔的真空中,封闭腔的壁也是由温度均匀的黑体组成,但其初始温度不同于所包围的黑体(图 2-1)。经过一段时间以后,黑体和封闭腔将达到相同的均匀平衡温度。在该平衡状态下,黑体辐射和吸收的能量必定精确地相等。为了证明这一点,如果得到的和离去的辐射量不等,而系统有相同的温度,请设想一下这将会发生什么样的情况。这时,所包围的黑体的温度将不是增加就是降低。这样就在两个具有同样温度的物体间造成了净的热量传递,这是违背热力学第二定律的。由此得出的结论是: 因为根据定义黑体吸收来自封闭腔的每一波长和各个方向的最大可能的辐射,所以它发射的辐射总量也必定最大。这一点是很清楚的,即考虑任何一个比理想吸收体差的物体,其辐射的能量必定比黑体少,以便保持平衡。一个物体即使当它与周围环境处于热平衡时还必须继续发射辐射能的这一事实,称之为 **Prevost 定律**。



图 2-1 为推导黑体特性的封闭腔的几何图

射,所以它发射的辐射总量也必定最大。这一点是很清楚的,即考虑任何一个比理想吸收体差的物体,其辐射的能量必定比黑体少,以便保持平衡。一个物体即使当它与周围环境处于热平衡时还必须继续发射辐射能的这一事实,称之为 **Prevost 定律**。

2-3.2 在黑封闭腔内辐射的各向同性

现在我们来考察如图 2-1 所示的具有黑壁和任意形状的等温封闭腔,将黑体移动到另一个位置,并转动它朝向另一方向。因为整个封闭腔保持着等温,所以黑体必须依然处在同样的温度下。因此黑体就得发射与以前相同量的辐射。在平衡时,黑体从封闭腔壁上也一定得到相同的辐射量。这样,被黑体得到的总的辐射与黑体在整个封闭腔内的方向或位置无关;因而通过封闭腔内任一点传播的辐射与位置和方向无关。这就是说,封