

146)

热辐射性质 及其测量

葛绍岩 那鸿悦 编著

科学出版社

热辐射性质及其测量

葛绍岩 那鸿悦 编著

科学出版社

1989

内 容 简 介

本书是在搜集国内外 300 多种文献及整理编著者多年积累的数据的基础上撰写而成的。书中给出各种物质的热辐射性质数据,这些物质包括金属元素及合金、非金属元素及化合物、建筑材料、非金属物质、太阳能利用中的光谱选择性涂层等。热辐射性质数据有:各种物质在不同温度和不同波长光谱下的全发射率、单色光谱发射率、法向发射率、吸收率、太阳吸收率、反射率、透过率和吸收系数。这些数据都已编制成图表。对一些常用的典型重要材料还绘出热辐射性质曲线。同时,书中还全面系统地阐述了热发射率、反射率和吸收率的测试原理和各种测试方法,以及各种实验测试装置与各类检测设备。

本书是材料科学、空间科学、工程热物理、热能工程、太阳能利用、建筑工程等领域的科技人员进行热设计和计算时极其实用的工具书,也是高校相应专业师生的重要参考书。

热辐射性质及其测量

葛绍岩 那鸿悦 编著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京市东黄城根北街 16 号

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

*

1989 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1989 年 6 月第一次印刷 印张:32 1/4

印数: 平 1—620 插页:精 2

精 1—350 字数:750,000

ISBN 7-03-000853-7/TB·29 (平)

ISBN 7-03-000854-5/TB·30 (精)

定价: 平 装 32.60 元
布脊精装 34.30 元

序 言

本书是在《金属及其它物质的热辐射性质表》一书的基础上修订而成的。那本书自1958年出版至今,其中的热辐射性质数据一直被国内广大的科技工作者所引用。清华大学王补宣教授、上海交通大学杨世铭教授等所著传热学方面的教科书,均将该书列为热辐射性质的主要参考手册。美国明尼苏达大学教授 Sparrow 和 Cess 于1982年合著的《热辐射》一书,称那本性质表(1960年版)是最完整和最实用的热辐射性质手册。美国 NASA 的 Siegel 和 Howell 于1981年合著的热辐射方面教科书,也推荐了那本热辐射性质表。早在六十年代初期,苏联科学院动力研究所也曾引用过那本热辐射性质表。

由于我国工业和科学技术的不断发展,出现了许多新材料和新的涂层,因此编著者感到有义务再增订一些新型材料和涂层的热辐射性质的数据,以满足科技工作者的需要。

本书的主要目的是搜集和分析各种物质热辐射性质的数据。这些物质包括金属元素、各种合金、非金属元素、各种化合物、非金属材料 and 合成的各种涂层等。热辐射性质系指发射率、吸收率、反射率和透过率等。这些数据对工业和科学技术的传热学计算是很重要的。本书从世界各国和国内各种文献以及编著者多年收集的国产金属、非金属材料、建筑材料和太阳能利用中的光谱选择性涂层等资料出发,对几百种金属元素及它们的合金和其他固体的热辐射性质进行了归纳和比较。书中热辐射性质数据是按照每种元素和固体的种类分别整理和分析的。把对工业和科学技术的热设计有实用价值的可靠数据整理出来并绘制成图,以供读者进行热设计时参考、使用。热辐射性质数据散见于世界各国文献,缺乏有系统的整理和分析;虽然有些传热学书籍中也附上了这类数据,但内容很少,且仅限于全发射率,而缺乏光谱发射率数据和温度对辐射性能的影响的资料。

这次修订时,我们在第一章中增加了太阳辐射一节,在第二章中增加了太阳常数一节,而第四、五章则是新编著的。原来那本书有辐射性质表186幅,这次新增487幅,现总计673幅。另外,修订版中增加了热辐射性质曲线图105幅,曲线也相应地增加了395条。原来那本书曾于1960年由原作者 G. G. Gubareff 在美国用英文修订再版了一次,我们这次修订时也将其新增订的部分图表收集进来,这就使得本书内容更为丰富。

全书共分十一章。第一章叙述了物体辐射和太阳辐射热传播的基本原则,讨论了金属和非金属的热辐射性质的一般规律,还列举了光谱辐射的性质和计算全辐射性质的方法等。

第二章对热辐射方程和基本定律以及热辐射计算公式都作了概述。热辐射公式中的许多常数由于研究人员所采用的试验方法和理论方法各不相同,因此数值也有明显的差别。这些常数包括斯蒂芬-玻耳兹曼常数、普朗克常数、维恩位移定律常数和太阳常数等。本章分别列举了各国科学家研究的结果,同时也列举了1982年中华人民共和国国家标准 GB3102·6-82 的可靠实用的常数数值,以供读者在热设计和计算中使用。

第三章是各种热辐射性质的定义以及它们之间的关系。为了促进国际上量值的统一和国内的标准化,本章还列举了国家标准 GB3102·6-82 “光及有关电磁辐射的量 and 单

位”中的基本辐射度量和光度量。

第四、五章分别介绍了发射率、反射率和太阳吸收率的测量方法和测试装置。其中除了对一般的常规方法予以阐述外，还介绍了我国近年来测量这些参数的新方法以及装置的一些科研新成果。

第六章列出了 40 多种金属元素及其合金的热辐射性质表。

第七至九章先后列出非金属元素和化合物、建筑材料、非金属物质的热辐射性质表。

第十章列举了太阳能利用中的光谱选择性吸收涂层的热辐射性质的发射率，太阳光谱反射率和吸收率等。

第十一章给出了 140 幅热辐射性质的曲线图(包括 620 多条金属、非金属和其他重要工程材料和涂层的热辐射性质曲线)。这些曲线不仅表明热辐射性能随着温度和波长变化的趋势，而且可在同一图中直接比较各种物质热辐射性质数值的高低，以作为热辐射设计和计算者选择材料的准则与参考。

书中的符号采用一般热工学和传热学书籍中的通用符号，但也有若干符号的定义与通常书籍稍有不同，这是为了用有限的符号代表复杂的热辐射公式(见常用符号表)。

热辐射性质数据是从国外 300 多种和国内几十种的文献报告以及编著者多年所做数据中整理出来的。

这次修订过程中，中国空间技术研究院北京东方科学仪器厂工程师赵国兰和张敏宜参加了材料和涂层试样的收集、测试、数据整理、描图和抄写等工作，付出了大量的劳动。侯伟昌工程师参加了部分样品的收集和测试工作。杨丽同志参加了部分物质名词翻译和数据整理等工作。编著者在这里向他们一并表示最深切的谢意。

由于编著者水平所限，加上时间的短促和资料的分散，书中缺点、错误在所难免，恳请广大读者与同行专家批评指正。

葛绍岩

中国科学院工程热物理研究所

那鸿悦

中国空间技术研究院北京东方科学仪器厂

1987 年 8 月

常用符号表

- A_R 有效辐射面积 (m^2)
 C 以重量百分比计算的某一元素的浓度
 c 光速 (cm/s)
 c_1 普朗克定律中的第一常数 ($\text{erg} \cdot \text{cm}^2/\text{s}$)
 c_2 普朗克定律中的第二常数 ($\text{cm} \cdot \text{K}$)
 D 表面密度 (g/cm^2)
 h 普朗克量子常数 ($\text{erg} \cdot \text{s}$)
 J 任一物体的辐射强度, 它表示每单位面积 A 每单位立体角 ω 在方向角为 θ 时, 每单位时间内所辐射出的辐射能
 K 吸收系数 (μ^{-1} 或 $\text{\AA}^{-1}$)
 k 玻耳兹曼常数 (erg/K)
 N 面积辐射强度, 它表示每单位投影面积每单位立体角在方向角为 θ 时, 每单位时间内黑体辐射出的辐射能
 T_{MRT} 热辐射的平均温度 ($^{\circ}\text{R}$ 或 K)
 W 辐射强度, 它表示每单位面积在单位时间内辐射出的辐射能 ($\text{kcal/h} \cdot \text{m}^2$)

 ω 维恩位移定律中的常数 ($\text{cm} \cdot \text{K}$); 立体角 (rad)
 α 吸收率
 α_λ 单色吸收率或光谱吸收率
 α_s 太阳能吸收率
 ϵ 全发射率
 ϵ_H 半球发射率
 ϵ_n 法向发射率
 ϵ_θ 定向发射率
 ϵ_λ 单色发射率或光谱发射率
 ρ 反射率
 ρ_λ 单色反射率或光谱反射率
 ρ_s 太阳能反射率
 τ 穿透率或透过率

目 录

常用符号表	vii
第一章 热辐射概述	1
1.1 引言	1
1.2 热辐射	2
1.3 工业上的热辐射	3
1.4 太阳辐射	3
1.5 绝对黑体和基尔霍夫定律	6
1.6 辐射温度与颜色温度	7
1.7 金属的热辐射性质	8
1.8 非金属的热辐射性质	9
1.9 由单色辐射性质计算全辐射性质的方法	9
1.10 几个计算凡例	10
第二章 热辐射方程	15
2.1 黑体的光谱辐射——普朗克定律	15
2.2 维恩位移定律	15
2.3 全辐射的斯蒂芬-玻耳兹曼定律	16
2.4 吸收系数和 Bouguer-Lambert 公式	16
2.5 理想辐射体的制造	17
2.6 热辐射方程中的常数	18
2.7 太阳常数	21
第三章 热辐射性质的定义以及它们之间的关系	35
第四章 发射率的测量方法和装置	41
4.1 测量方法概述	41
4.2 稳态卡计法半球发射率的测定	42
1. 补偿电加热稳态卡计法	44
2. 间接电加热稳态卡计法	45
3. 直接通电加热稳态卡计法	46
4. 用太阳模拟器加热稳态卡计法	48
4.3 非稳态卡计法半球发射率的测量	49
4.4 辐射计法法向发射率的测量	53
4.5 光谱发射率的测量	60
4.6 发射率的检测	63
1. 倒喇叭型发射率检验装置	63
2. 调制型发射率检测装置	64
3. 便携式发射率检测仪	64
第五章 反射率和太阳吸收率的测量方法和装置	68
5.1 测量方法概述	68
5.2 积分球工作原理	68

5.3	反射率测量的替代法和比较法积分球	71
5.4	反射率测量的绝对法积分球	73
5.5	镜反射与镜反射率的测量	75
5.6	太阳吸收率的检测仪器	80
1.	积分球仪	80
2.	小型 α , 检验仪	81
3.	椭球仪	82
5.7	太阳光谱反射率和太阳吸收率的计算	83
5.8	光谱反射率标准板	86
第六章	金属元素及合金的热辐射性质	96
6.1	铝的热辐射性质	96
6.2	铈的热辐射性质	104
6.3	钡的热辐射性质	105
6.4	铍的热辐射性质	106
6.5	铋和铋合金的热辐射性质	107
6.6	镉的热辐射性质	109
6.7	铯的热辐射性质	110
✓ 6.8	铬的热辐射性质	111
6.9	钴的热辐射性质	117
6.10	铜和铜合金的热辐射性质	120
6.11	铊的热辐射性质	129
6.12	钼的热辐射性质	130
6.13	镓的热辐射性质	130
6.14	锗的热辐射性质	131
6.15	金的热辐射性质	132
6.16	铪的热辐射性质	142
6.17	铟的热辐射性质	143
6.18	铀的热辐射性质	145
6.19	铁和铁合金的热辐射性质	146
6.20	铅的热辐射性质	162
6.21	镭的热辐射性质	164
6.22	镁的热辐射性质	164
6.23	锰的热辐射性质	170
6.24	水银的热辐射性质	171
6.25	钨的热辐射性质	173
✓ 6.26	镍和镍合金的热辐射性质	181
6.27	铌的热辐射性质	189
6.28	钨的热辐射性质	191
6.29	钇的热辐射性质	191
✓ 6.30	铂的热辐射性质	195
6.31	钾和钾-钠合金的热辐射性质	202
6.32	铯的热辐射性质	203
6.33	铷的热辐射性质	204

6.34	铷的热辐射性质	207
6.35	铈的热辐射性质	207
6.36	银的热辐射性质	207
6.37	钼的热辐射性质	218
6.38	铀的热辐射性质	221
6.39	钍的热辐射性质	222
6.40	锡和锡合金的热辐射性质	223
6.41	钛的热辐射性质	227
6.42	钨的热辐射性质	234
6.43	铀的热辐射性质	244
6.44	钒的热辐射性质	245
6.45	钇的热辐射性质	246
6.46	锌的热辐射性质	247
6.47	锆的热辐射性质	251
6.48	元素的热辐射性质综合表	252
6.49	合金的热辐射性质	253
6.50	一些国产金属元素和合金的热辐射性质	276
第七章	非金属元素和化合物的热辐射性质	280
7.1	砷的热辐射性质	280
7.2	碳的热辐射性质	280
7.3	石墨的热辐射性质	284
7.4	碘的热辐射性质	287
7.5	硒的热辐射性质	287
7.6	硅的热辐射性质	288
7.7	硫的热辐射性质	290
7.8	碲的热辐射性质	291
7.9	碳化物和硫化物的热辐射性质	292
第八章	建筑材料的热辐射性质	294
8.1	各种建筑材料的热辐射性质	294
8.2	油漆、涂料和颜料的热辐射性质	314
8.3	灯光反射器表面的反射率	337
8.4	玻璃的热辐射性质	340
8.5	各种物质的热辐射性质	355
第九章	非金属物质的热辐射性质	364
9.1	塑料的热辐射性质	364
9.2	橡胶的热辐射性质	372
9.3	衣料及其它纺织品的热辐射性质	376
9.4	纸的热辐射性质	385
9.5	绝缘材料的热辐射性质	404
9.6	晶体及其它材料的热辐射性质	408
9.7	雪、水和冰的热辐射性质	411
第十章	光谱选择性吸收涂层的热辐射性质	413

10.1	化学与电化学型选择性涂层	414
10.2	涂料型选择性吸收涂层	424
10.3	真空沉积选择性涂层	430
10.4	喷涂热解涂层及其它涂层	437
10.5	镍-铝合金的太阳吸收率及其平衡温度	439
10.6	各种物质的太阳吸收率	440
第十一章 工程上常用物质的辐射性质曲线		452
参考文献		499

第一章 热辐射概述

1.1 引言

任何物质在绝对零度以上都能发出电磁辐射,而热辐射系指物质发射波长 $0.1-100\mu$ 的辐射热射线在空间传递能量的现象。

物质的热辐射能的多少,不仅取决于物质的种类及其表面的温度,还取决于物质的表面状态。由于物质种类繁多,而且每一种物质表面状态又影响其热辐射性能,因此很多文献中的数据都不完整。所以,同一物质的热辐射,由于它的表面状态、温度和辐射光谱波长的不同而有很大的差别。高温物体的热辐射能既和温度的四次方成正比,又和物体表面的发射率成正比。即使在同一温度下,同种物体的发射率也不一样。例如,在常温下磨光的铝片,其发射率是 0.05,而经过 600°C 加热氧化后的铝片,在常温下其发射率却增加到 0.11。

当物体温度很高,且物质与周围环境的温差甚大的情况下,辐射能可以达到很大的数量,甚至常常超过对流放热量。在锅炉和炼钢炉内的传热过程中,就有这种现象。如欲计算高温炉内的热辐射数量,必先测定炉壁、燃料表面和铁矿面在很高的工作温度时的发射率。此外,有些物体即使在很低的温度下,其辐射热量也是很显著的。例如,室内用的火炉外表面,它把多半的热量以辐射换热的方式传给四周,而只将小部分热量直接以对流换热的方式输送给屋内的空气。因为火炉外表面通常是用金属材料做的,而经过涂上一层黑漆或是金属加热氧化之后,其发射率也就显著地提高了。

物体在高速飞行时,其表面和空气摩擦生热,大大地提高了表面的平衡温度和瞬时间的不平衡温度。飞行速度愈高,表面摩擦产生热量的现象愈严重。例如,探空火箭和人造地球卫星以极高速度返回大气层时,如果不采取适当的减速和防热的措施,那么火箭和人造卫星就会因摩擦产生巨大的热量而烧毁。在接近金属熔点温度时的散热,主要是靠热辐射,而热辐射的数量则和物体表面的发射率成正比。当飞机在云层外界的高空飞行时,其表面受到比在地面时更强烈的日光辐射热,这就严重地影响到飞机内部温度的平衡。在地球大气层外高空轨道飞行并暴露于空间环境的卫星蒙皮,其简单的热平衡方程为

$$A_p s_o \alpha_s = \sigma \epsilon_H A T^4$$

或

$$T = \left[\frac{s_o}{\sigma} \cdot \frac{A_p}{A} \cdot \frac{\alpha_s}{\epsilon_H} \right]^{\frac{1}{4}}$$

式中, A , A_p 分别为卫星外表面和投影面积,当卫星形状一定时, A_p/A 是一个常数; s_o , σ 分别是太阳常数和斯蒂芬-玻耳兹曼常数; T 为卫星的蒙皮表面温度。所以,卫星蒙皮的表面温度是取决于太阳吸收率 α_s 和半球发射率 ϵ_H 的比值 α_s/ϵ_H 。

在太阳能利用方面,研究和设计各种热水器时,为了提高热水器的热效率,吸热面需要获得一种对太阳辐射能量有较高的吸收本领,而对长波的红外辐射又有比较低的辐射能力,这种表面或者涂层就是光谱选择性涂层。光谱选择性表面具有对太阳辐射能吸收高,辐射低的明显特性,这时提高热水器的效率是大有益处的。总之,热辐射传热对近代高速航空和航天工程的发展是极其重要的。热辐射性质对高速飞行体表面散热提供了设计数据和依据。

金属的加工和热处理都是在高温下进行的。此类工艺过程中的温度控制至关重要,而影响温度升降的主要因素则是金属表面的发射率及其辐射热量。锅炉的燃烧和炼钢炉的熔炼都是一些高温热辐射过程的实例。

世界各国已经获得了很多太阳能利用的成果。近年来,太阳能热水器、太阳灶、太阳能电池、太阳能发电站和太阳能冷却机等,正在我国遍地开花。本书列举了很多物质表面热辐射性质数据。这些数据对研究和设计者有很大的参考价值。

1.2 热 辐 射

热辐射与热传导过程不同,传播辐射热的气体介质本身仅吸收极少量的热。象光波一样,热辐射也是一种电磁波振动,不过其波长与光波和无线电波不同。很明显,热辐射也遵循光线辐射的所有规律。热辐射是沿直线进行的,它遵守反射定律和折射定律,并有偏光性。同时,辐射热的强度也与距离的平方成反比。

辐射能的载体是电磁波。辐射能以电磁波的形式传送,而电磁波的波长范围很宽,从 γ 射线、 x 射线、紫外线、可见光、红外线直到无线电波。具有热辐射性质的电磁波,包括人们肉眼可以觉察到的从0.4到 0.8μ 波长的可见光和肉眼觉察不到的从0.8到 100μ 波长范围的红外线。人们称这些射线为热射线,它们的传播过程称之为热辐射。

热辐射仅是电磁波多种辐射形式中的一种,不论辐射形式如何,它们皆以光速进行传播,其值等于辐射波长同频率的乘积,即

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

式中, c ——光速, λ ——波长, ν ——频率。

热辐射的传播是以不连续的量子形式进行的,每个量子的能量为

$$E = h\nu \quad (1-2)$$

式中, h 是普朗克常数,其值为 $6.624 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s}$ 。

关于辐射的本质和现象的解释,最早认为光沿直线传播是微粒流的作用,这种微粒是从光源发出的。这种微粒说只能解释一般光辐射现象,但不能解释所有光辐射现象,象绕射现象等。后来麦克斯韦根据电磁场结构理论提出了电磁波动说,认为辐射是电磁波输送的。在20世纪初,以普朗克、爱因斯坦和玻尔为代表的光量子论,它指出电磁能是量子化的。量子论是描述光同物质的相互作用或光的吸收和发射,而麦克斯韦的电磁理论则描绘和处理光的传播现象。两者组成的理论称为量子电动力学,这个理论也能解释有关电磁辐射现象。所以,人们也认为辐射具有双重性。

热辐射的过程显然可分为三个阶段:第一,热物体的表面或接近表面层的热能变成了电磁波状的振动;第二,这种电磁波状的振动透过了中间的空气传播;最后,在接受辐射

热的物体的表面,电磁波又转变成热能,被该物体所吸收。

1.3 工业上的热辐射

燃烧着的煤块和高温物体都发出大量的辐射热,这种物体称之为热辐射体。热辐射体所发出热量的一部分由其他设备(如锅炉内的水管组)所吸收,另一部分热能则反射回来。前一部分被吸收了的热能也有一部分重新辐射出来,其数量取决于吸收体本身的温度和它的辐射性质。在辐射换热的计算中,辐射体和吸收体的发射率、反射率和吸收率都需要预先确定。

辐射传热在工业上是很重要的。大型锅炉内有一部分锅炉管直接面对着燃烧段,这一部分可以叫做辐射段。在辐射段内,热的传递除一部分靠对流外,主要是靠直接热辐射。燃烧火焰所辐射出的热量,其主要成分是燃烧气体的红外光谱辐射。天花板辐射和墙壁辐射取暖的方法,是近代建筑业所采取的一种新型冬季取暖法,这类低温辐射传热的过程是波长较长的远红外光谱辐射。天花板和墙壁大面积热辐射取暖不仅是靠低温辐射,同时也靠空气的自然对流。自然对流取暖法比用火炉燃烧取暖要均匀舒适多了。

太阳辐射热在房屋取暖、烘干水果和农作物、暖水、太阳能发电、果品冷藏和其他工业及民用方面都有着很大的发展。太阳热辐射对工作安全也有重要的影响。爆炸性和挥发性的液体在贮藏器受到过强的日光照射,会有爆炸和燃烧的危险。固体燃料在强烈的日光下也可能引起自燃的现象。有些化学成品在太阳辐射下会起光学变化和化学变化,而使整个成品变质或受到破坏。高山地区和高空飞行物体则受到较强烈的短波紫外光照射。因此,对强烈日光采取适当的防护措施是完全必要的。在地球大气层外轨道飞行的卫星必然受到最短的紫外线照射。这种紫外线对人体、太阳能电池、温控涂层表面和各种材料的影响是很大的。它可以把人的皮肤晒焦,导致皮肤癌;可以使太阳能电池的材料变色,降低透明度,从而削弱射入太阳能电池的光能量;还可以使卫星的温控表面涂层光学性能改变。一般表现为表面逐渐变暗,使表面的太阳吸收率 α ,显著增加,从而影响卫星的温度控制。在这类热辐射设计和计算选择适当的防护材料时,必须具备各种物质的太阳能吸收率,反射率和发射率的数值。

1.4 太阳辐射

太阳是一个由氢为主要成分组成的炽热气态球体,其内部温度高达 $8-40 \times 10^6 \text{K}$,而表层温度大约在 6000K 。太阳辐射能量,是由太阳内部不断地进行热核聚变反应而产生的。这种能量极其强大,而且每时每刻都在向宇宙空间辐射。地球的能量主要来源于太阳。地球接收太阳辐射热的总功率,近似等于以地球半径为半径的大圆面积上接收太阳光线垂直照射的能量,可表示为

$$Q = s_0 \pi R^2 = 1.743 \times 10^{17} \text{W} \quad (1-3)$$

式中, s_0 ——太阳常数, 1367W/m^2 ; R ——地球半径, $6371 \times 10^3 \text{m}$ 。

到达地球大气高层的 $1.743 \times 10^{17} \text{W}$ 巨额能量,仅是太阳总辐射能量的二十亿分之一。其中约30%被地球大气层反射到宇宙空间,约23%被大气层吸收,约40%到达地球

表面。

太阳这种巨额能量，是以电磁辐射的方式输送，辐射波长从短于 $10^{-4}\text{\AA}$ 的 γ 射线到波长大于 10^4m 的无线电波的各种波长电磁波。眼睛所能看到的可见光只不过是其中很窄的一小部分。太阳电磁辐射中的紫外线、可见光和红外线称为光学辐射。光学辐射是太阳辐射能的主要部分。比紫外线波长还短的称为核子辐射，而比红外线波长还长的则叫做无线电波。光学辐射在太阳电磁波辐射光谱中的位置，如图 1-1 所示。

波长									
$10^{-4}\text{\AA}$	$10^{-2}\text{\AA}$	$1\text{\AA}$	$10^2\text{\AA}$	1μ	$10^2\mu$	cm	1m	10^2m	10^4m
核子辐射			光学辐射			无线电波			
γ 射线, x射线			紫 外 线	可 见 光	红 外 线	微 波	无 线 电 短 波	无线电长波	

图 1-1 太阳电磁波辐射示意图

虽然，太阳电磁波辐射波长从 $10^{-4}\text{\AA}$ 到 10^4m ，但是，太阳辐射能量主要则集中在 0.230μ 到 4.00μ 的波长范围内，它占太阳总辐射能量的 98% 以上。描述太阳辐射的总辐射能量大小和光谱辐射能量分布的物理量，分别是太阳常数与大气外太阳光谱辐射照度 E_λ 。

太阳常数是指日地平均距离时，在地球大气上界垂直于太阳辐射光线的表面上，单位面积单位时间内所接受到的太阳辐射能量，并以 $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 或 w/m^2 来计量，用 s_0 表示。而大气上界太阳辐射光谱能量分布，称之为大气外太阳分光辐照，以 $E_\lambda(\lambda)$ 表示，即是在单位波长间隔、单位时间、单位面积内太阳辐射的能量，用 $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min} \cdot \mu)$ 或 $\text{w}/(\text{cm}^2 \cdot \mu)$ 来计量。

到目前为止，太阳常数和分光辐照测量，由于不同的作者在不同的年代，使用不同的仪器，选取不同的测量高度以及采用不同的推算方法，因此他们的测量结果有很大的差异。美国的 Johnston^[230] 澄清和校正了 Smithsonian 的资料和数据，于 1954 年提出了 $2.00\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 的太阳常数和 $0.22 \sim 7.00\mu$ 波长范围的太阳辐射光谱能量分布。该数据被公认为第一个标准，长期被人们所采用。到了六十年代中期，随着宇航事业的发展，要求更精确地测量太阳常数和太阳辐射光谱能量分布。1971 年美国国家航空和宇航局 (NASA) 提出 $1.94\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 的太阳常数和 $0.120 \sim 1000\mu$ 的光谱能量分布。从 50 年代到 80 年代的数十年里，无论是地面的还是高空的测量，其结果的分散度都很大。最新的太阳常数定为 $1.96\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ (或 $1367 \pm 7\text{w}/\text{m}^2$)，它是世界气象组织和观察方法委员会于 1981 年建议采用的。

太阳辐射能量是随波长而变化的，所以太阳辐射有光谱能量分布的概念，即分光辐照。描述黑体辐射强度与波长和温度关系的是普朗克定律，数学表示式为

$$W_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1-4)$$

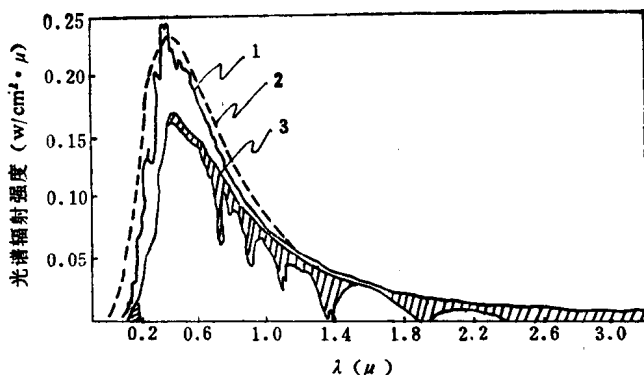


图 1-2 太阳辐射光谱曲线与地球大气吸收影响

1——大气层外的太阳辐射曲线 ($m=0$); 2——6000K 黑体辐射能量分布曲线; 3——海平面上的太阳辐射曲线

图 1-2 给出了 6000K 黑体与太阳辐射能量分布曲线, 两者分布曲线很相似, 光谱辐射强度的峰值波长都是 0.48μ , 太阳辐射表面温度是 5795K。根据维恩位移定律, 计算太阳辐射光谱辐射强度峰值下所对应的波长是 0.50μ 。从而表明, 太阳并不是一个理想黑体, 所以太阳辐射有别于黑体辐射。

太阳辐射穿过地球大气时, 一方面既受到大气分子的散射, 又受到大气中含有的粗粒 (尘埃) 和水滴散射; 另一方面受到大气中的水蒸汽、臭氧、氧和二氧化碳的吸收。散射和吸收作用使得透过地球大气到达地面的太阳辐射光谱与地球大气外的太阳辐射光谱不大相同。如图 1-2 所示, 已明显地衰减了。波长在 0.30μ 以下的短波辐射几乎全部被地球大气中的臭氧所吸收。在 $0.30\sim 1.00\mu$ 波长范围, 地球大气是透明的, 太阳辐射可以到达地面, 称之为可见窗。比 1.00μ 波长还长的范围, 有二氧化碳、水蒸汽、臭氧等其它分子吸收带。有一些窄波段太阳辐射可以透过地球大气层, 被称为红外窗。波长在 $2.4\sim 300\mu$ 的太阳辐射可全部被地球大气所吸收。

因为地球大气对太阳辐射有作用, 所以太阳辐射强度与通过地球大气的路径有关, 亦即与观察高度、太阳方位角、气候条件等有关。为了叙述太阳辐射经过大气的路程, 引入大气质量的概念。设在海平面上空垂直方向辐射路线为 l_n , 太阳辐射的任意入射路线为 l_m , l_n 与 l_m 之间夹角 δ 称为天顶角, 如图 1-3 所示。那么, 大气路程 l_m 与 l_n 之比, 叫做大气质量 m 。

$$m = l_m / l_n \approx \sec \delta \quad (1-5)$$

当太阳辐射通过天顶垂直入射时, 大气质量 $m = 1$; 地球大气层外, 大气质量 $m = 0$ 。

大气内的太阳辐射不仅能量有显著减弱, 而且光谱能量分布也有很大变化, 这种变化直接与消光系数 $\sigma(\lambda)$ 和大气质量 m 有关。单色辐射 Bouguer 指数消光定律, 就反映这个变化的定量关系, 即

$$I_m(\lambda) = I_o(\lambda) e^{-m\sigma(\lambda)}$$

式中, $I_m(\lambda)$ ——大气内太阳辐射光谱强度; $I_o(\lambda)$ ——大气外太阳辐射光谱强度; $\sigma(\lambda)$ ——地球大气引起的太阳辐射衰减的消光系数。

当大气质量为 m 时的理想 (干洁) 大气, 太阳辐射可用下列公式表达^[227]:

$$S_{L,m} = \int_0^{\infty} S_{o,\lambda} \cdot P_{\lambda,o_3}^{\tau} \cdot P_{\lambda,F}^{\tau} d\lambda - \phi(m) \quad (1-6)$$

式中, $S_{o,\lambda}$ ——波长为 λ 时的大气上界太阳辐射强度; P_{λ,o_3}^{τ} ——臭气的光谱透明度; $P_{\lambda,F}^{\tau}$ ——分子散射的光谱透明度; $\phi(m)$ ——其他气体选择性吸收的修正值, 它随 m 而变。计算结果见表 5-8, 可以看出太阳辐射强度随着大气质量 m 的增加而减小。

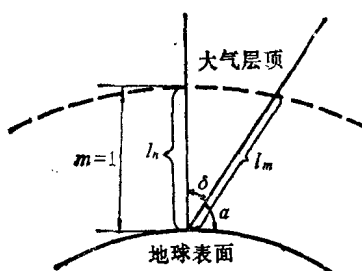


图 1-3 大气质量示意图

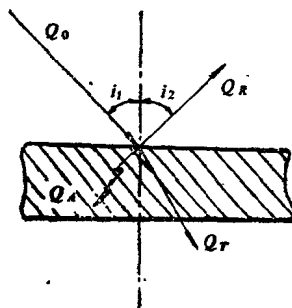


图 1-4 投射到物体上能量分布

1.5 绝对黑体和基尔霍夫定律

当一物体受到辐射总能量 Q_0 辐射时, 其一部分 Q_A 被物体吸收, 一部分 Q_R 被反射回来, 另外一部分 Q_T 辐射热则穿透物体, 如图 1-4 所示。

因此

$$Q_A + Q_R + Q_T = Q_0 \quad (1-7)$$

将上式左右两端各除以 Q_0 就得到

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_T}{Q_0} = 1 \quad (1-8)$$

式(1-8)中三项比值分别代表物体的吸收率 α 、反射率 ρ 和穿透率 τ 。由此可见

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1-9)$$

固体和液体对于热射线来说, 实际上都可以看作是不透明体, 即 $\tau = 0$; 在这种情况下

$$\alpha + \rho = 1 \quad (1-10)$$

绝对黑体能将外界辐射到表面上的热量全部吸收掉, 即 $\alpha = 1$ 和 $\rho = 0$ 。实际上, 自然界并没有这种绝对黑体。最接近绝对黑体的物质, 如灯黑水玻璃混合体和无光泽的黑漆等, 其吸收率介于 0.96 与 0.98 之间。接近绝对黑体的物质, 其颜色并不一定是黑的。例如, 白色的霜和雪, 它们的吸收率竟高达 0.985, 是所有物质中最接近绝对黑体的; 在 -9.6°C 温度下, 透明的冰的吸收率为 0.965, 几乎与黑漆相同。显然, 这种数值仅限于低温的长波辐射。

物体每单位表面积在单位时间内所放射的能量, 叫做该物体的辐射强度, 通常用符号 W 表示。任何物体的辐射强度 W_s 和在同一温度下绝对黑体的辐射强度 W_b 的比值, 称为该物体的发射率。发射率通常用符号 ε 表示, 即

$$\varepsilon = \frac{W_s}{W_b} \quad (1-11)$$

基尔霍夫定律说明了物体辐射强度与吸收率之间的联系。任何物体在一定波长下的辐射强度和同一波长下的吸收率的比值都相同,并恒等于同一温度下绝对黑体的辐射强度。该比值只是波长和温度的函数。这种辐射称为光谱辐射或单色辐射。实验证明,一般工程材料的辐射光谱是连续的,而且其辐射强度和同一温度下绝对黑体的辐射强度曲线相似,这种物质称为灰体。灰体的发射率只与温度的变化有关。任何灰体在同一温度上所测得的发射率应与吸收率相等,即

$$\varepsilon = \alpha \quad (1-12)$$

根据热物性的热力学定义,发射率是物体本身的热物性之一,其数值变化仅与物体的种类、性质和表面状态有关。而物体的吸收率则不同,它的数值既与物体的性质和表面状态有关,也因外界射入的辐射能的波长与强度而异,所以严格讲来,吸收率不是物体的热物性。

单位时间自绝对黑体微面积 dA 所发出的辐射强度可由下列积分求得:

$$\begin{aligned} \phi_b &= \int W_b dA = \pi \int N_b dA \\ &= \pi I_{b_n} \end{aligned} \quad (1-13)$$

其中, ϕ_b ——绝对黑体的总辐射强度; W_b ——绝对黑体单位面积辐射强度; N_b ——绝对黑体单位面积在法线方向上的辐射强度; I_{b_n} ——绝对黑体在法线方向上的总辐射强度。因此,绝对黑体在整个半球面的总辐射强度要比在其法线方向上的总辐射强度大 π 倍。

1.6 辐射温度与颜色温度

在研究辐射热的工作中,科学家们采用着不同的辐射温度尺度。常用的温度尺度标准有颜色温度、亮度温度和辐射温度等三类。因为这些温度尺度的不精确和不统一,增加了对文献中辐射热研究结果数据进行比较的困难。颜色温度的定义是:当欲测验的物体在可见光谱段内的辐射强度分布与绝对黑体在同一光谱段内之辐射强度分布相同时,绝对黑体的温度就代表欲测物体的温度,这种测温方法是测量某一物体在可见光谱段内所辐射出来的热能的方法,适于测量象白热化金属等高温热源的灰色物体。绝对黑体在某一固定温度时的光谱辐射能强度分布可参考图 2-1。在实际测定颜色温度时,除用肉眼做粗略的观察外,通常可用比较法利用滤光镜和光电池测两个不同光谱(例如红色和绿色的)的相对辐射强度。在不同的温度下,绝对黑体的两种光谱强度也有不同的比率。这种测温仪器已由 Russell 等人^[220]设计成功。但这种测温技术的精确性,可靠性和重复性都很差。例如,不同的试验室测出的标准钨丝灯的颜色温度数值,最大差别可达 35K。又如碳极弧光的颜色温度有人测出是 3855K,而有人测出则只有 3780K。

辐射温度尺度是用辐射高温计所测出之温度值。辐射高温计测温的正确度不但受辐射感应体本身吸收率的影响,并且也受仪器与温源间空气成分的影响。空气中若含有水蒸汽和二氧化碳,则对光谱的吸收率增大,并减低了仪器所接受的辐射热量。另一个利用辐射高温计测量的困难是被测物体在高温下的表面发射率无法精确测定,因而增加了辐射高温计刻度的困难,也严重影响了仪器的精度。目前常用的光学辐射高温计避免测量物体的全发射率。因光学辐射高温计的透镜总不免吸收一部分光谱辐射热,仪器内部的