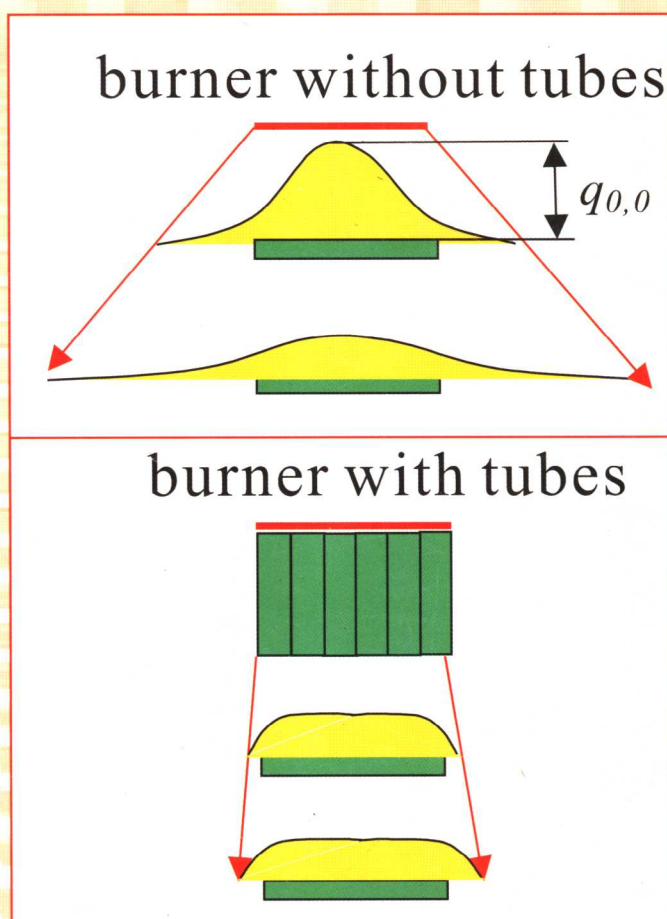


计 / 算 / 辐 / 射 / 传 / 热 / 教 / 学 / 参 / 考 / 书 /

燃气辐射器辐射 方向性与均匀性研究

路义萍 韩家德 编著



哈尔滨地图出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气辐射器辐射方向性与均匀性研究 / 路义萍, 韩家德编著. —哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2005. 12

ISBN 7-80717-199-5

I. 燃... II. ①路... ②韩... III. ①燃气发生器-研究②热管辐射器-研究 IV. ①TK172.4②TK474.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 142593 号

哈尔滨地图出版社出版、发行

(地址: 哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮编: 150086)

哈尔滨理工大学印刷厂印刷

开本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 8.125 字数: 170 千字

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1~1 000 定价: 20.00 元

前 言

辐射方向性是决定辐射均匀性的重要因素。实际运行的各种电或燃气的辐射器,均匀加热面上的能量利用率很低。因此,辐射定向性、均匀性研究有助于提高能量利用率,节约能源,符合节能为本、能源利用可持续发展战略。

对红外辐射加热系统及设备的设计与研究,应注意光谱匹配、方向性与均匀性和节能问题。但由于辐射计算的复杂性,设计过程中往往缺乏温度场、辐射强度场、被加热物体表面投射辐射密度计算等。由于辐射方向性隐含于辐射强度中,辐射方向性研究不是很多。物体表面投射辐射能分布均匀性直接影响其温度分布的均匀性以及加热质地均匀与否,所以,针对具体被加热物体、具体加热过程,必须把辐射器与被加热物体作为一整体,研究红外加热辐射强度与被加热物质特性的关系,对红外辐射加热源的辐射方向性与均匀性进行分析与计算,最终达到优化设计的目的。本书就是在这样的背景下研究并编写的。

本书属于计算辐射传热学研究内容的一部分。辐射换热计算方法很多,如蒙特卡罗法、区域法、热通量法、射线踪迹法、有限体积法等,此外,还有离散坐标法、离散传递法等。考虑到初学者易于掌握蒙特卡罗法,加之蒙特卡罗法便于处理复杂表面特性、复杂几何形状等,本书计算方法仅涉及到蒙特卡罗法。本书共分 8 章,前三章分别介绍辐射换热的基本原理、角系数及辐射传递系数,即热辐射理论基础及计算,作为本书的后续内容的简单铺垫;第 4~8 章主要采用基于辐射传递系数的蒙特卡罗法研究等温圆管辐射方向性;提供辐射、对流非线性边界条件下圆管壁与管内空气一维稳态换热传热模型与有限差分求解方法,非等温圆管空腔辐射方向性研究;板式燃气定向红外辐射加热器由辐射器前方加反射管束组成,燃气定向辐射器辐射均匀性影响因素研究;燃气定向辐射器技术经济分析。

本书第 1~3 章,第 6 章及附录由韩家德编写;第 4, 5, 7, 8 章由路义萍编写。全书由路义萍统稿。在本书内容的研究过程中,得到过哈尔滨工业大学李炳熙教授、谈和平教授的精心指导,余其铮教授、刘林华教授、阮立明教授、夏新林教授的大力支持和热心帮助,还得到了日本北海道大学工藤一彦教授的

热心指导及为作者寄送了相关的文献资料。在此向帮助我的各位老师致以衷心的感谢。此外，还得到了哈尔滨工业大学博士研究生易宏亮、硕士研究生王永鏢的大力帮助，在此一并表示致谢。

由于作者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，真诚地期待国内从事辐射换热研究的前辈、同行及其他读者的批评指正。作者的 E-mail 地址为 Luyp2010@yahoo.com.cn。

路 义 萍

2005 年 12 月

目 录

第1章 热辐射基本原理.....	1
1.1 引言.....	1
1.1.1 热辐射定义及研究方法.....	1
1.1.2 辐射换热特点.....	2
1.2 热辐射基本概念.....	3
1.2.1 基本物理量.....	3
1.2.2 理想物体.....	5
1.3 黑体辐射.....	7
1.3.1 普朗克(Planck)定律.....	7
1.3.2 维恩(Wien)位移定律.....	8
1.3.3 斯忒藩—玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律.....	8
1.3.4 波段辐射力.....	9
1.3.5 兰贝特(Lambert)定律.....	10
1.4 非黑体表面的辐射特性.....	10
1.4.1 吸收比、反射比及穿透比.....	10
1.4.2 发射率.....	11
1.4.3 基尔霍夫(Kirchoff)定律.....	12
1.5 本章小结.....	13
1.6 参考文献.....	14
第2章 角系数.....	15
2.1 引言.....	15
2.2 角系数定义.....	15
2.3 角系数的性质.....	19
2.4 角系数的计算方法.....	21
2.5 本章小结.....	24
2.6 参考文献.....	25
第3章 辐射传递系数.....	26

3.1 引言	26
3.2 蒙特卡罗法计算辐射传递系数的基本原理	27
3.3 辐射传递系数的性质	30
3.4 本章小结	31
3.5 参考文献	32
第4章 燃气定向辐射定向机理研究概说	33
4.1 研究目的及意义	33
4.2 文献综述	35
4.2.1 燃气辐射器研究现状	35
4.2.2 红外辐射方向性研究概况	38
4.2.3 红外辐射均匀性应用与发展概况	42
4.3 研究内容及方法	45
4.4 参考文献	47
第5章 漫射等温圆柱空腔的方向辐射特性	54
5.1 引言	54
5.2 蒙特卡罗法研究过程描述	54
5.2.1 发射点及发射方向确定	54
5.2.2 接收点的坐标确定	56
5.2.3 辐射传递系数计算	57
5.3 管口逸出能束方向性确定	58
5.3.1 描述方向辐射特性的模型比较	58
5.3.2 管口辐射能随天顶角变化集中程度表示方法	59
5.4 计算结果与分析	60
5.4.1 漫射等温圆管口逸出辐射能方向特性分析	60
5.4.2 漫射等温圆柱空腔口逸出辐射能方向特性分析	63
5.5 计算程序验证	67
5.6 本章小结	68
5.7 参考文献	69
第6章 非等温圆柱空腔的方向辐射特性	70
6.1 引言	70
6.2 非等温圆柱空腔温度场求解	71
6.2.1 物理数学模型	71

6.2.2 数值求解.....	75
6.2.3 模拟结果和分析.....	75
6.3 漫射非等温圆柱空腔口逸出辐射能的方向性模型.....	77
6.4 影响因素分析.....	78
6.4.1 管长与半径比影响.....	78
6.4.2 管内壁发射率影响.....	79
6.4.3 辐射器表面温度影响.....	80
6.4.4 管内空气流速影响.....	81
6.5 镜漫射非等温空腔口逸出辐射能的方向性.....	82
6.5.1 管内壁镜反射时当地坐标系下反射方向确定.....	82
6.5.2 镜漫反射非等温腔口逸出辐射能定向集中性描述.....	83
6.6 计算结果与讨论.....	84
6.6.1 管长与半径比的影响.....	85
6.6.2 管内壁镜漫反射分布与发射率数值影响.....	86
6.7 本章小结.....	88
6.8 参考文献.....	88
第7章 定向反射管束结构与辐照均匀性分析.....	90
7.1 引言.....	90
7.2 物理数学模型.....	91
7.2.1 计算对象.....	92
7.2.2 辐射传递系数确定.....	92
7.2.3 辐照度计算与均匀性表示.....	93
7.3 被加热物体表面辐照均匀性影响因素分析.....	94
7.3.1 单根定向反射管对物体表面辐射加热分析.....	94
7.3.2 管束整体对被加热物体表面辐射加热分析.....	94
7.3.3 被加热物体表面单元数选取对辐照均匀性影响.....	95
7.3.4 加热距离对辐照均匀性的影响.....	96
7.3.5 管束布置方式对辐照均匀性的影响.....	98
7.3.6 管间距对辐照均匀性的影响.....	100
7.3.7 管长与半径比变化对辐照均匀性的影响.....	101
7.4 与板式辐射器直接加热时辐射均匀性比较.....	102
7.5 本章小结.....	107
7.6 参考文献.....	107
第8章 多孔陶瓷板燃气定向辐射器技术经济分析.....	108

8.1 引言	108
8.2 热工计算	108
8.2.1 热量计温度、实际燃烧温度	110
8.2.2 板面上方烟气温度 t_y	111
8.2.3 煤气耗量、板面热强度	111
8.2.4 定向辐射器混合烟气温度	112
8.3 能量平衡分析	114
8.3.1 多孔陶瓷燃气辐射器能量平衡分析	114
8.3.2 反射管能量平衡分析	115
8.4 直接加热与定向加热技术经济参数分析	115
8.4.1 多孔陶瓷燃气辐射器直接加热技术经济参数	115
8.4.2 多孔陶瓷燃气定向辐射器间接加热技术经济参数	116
8.4.3 相同尺寸板式辐射器直接与定向加热燃料耗量比较	116
8.4.4 均匀加热面积相同 β 变化对燃料耗量影响	118
8.5 本章小结	120
8.6 参考文献	120
附录	121

第1章 热辐射基本原理

1.1 引言

1.1.1 热辐射定义及研究方法

什么是热辐射？热辐射是辐射现象的一种，具有电磁波和粒子的双重特性^[1]。

什么是电磁波？在多种电磁波的形式中，较熟悉的有无线电波、可见光、X射线。在三种形式中，无线电波的波长最长，可见光波长居中，X射线波长最短。由于只有可见光能够使物体的温度发生变化，即发生热辐射，因而，人们对热辐射和电磁波中可见光的认识是紧密结合在一起的^[2~4]。

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。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，于是产生了辐射的波动说定义，即物体以电磁波形式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。但由于一些光、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位，物体发射和吸收的能量是不连续的，只能是最小单元的整数倍，重新提出了能量发射和吸收的粒子性。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。于是产生了辐射粒子说的新定义，即辐射使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，既有粒子性，又有波动性。

由辐射的两种定义，可以引出热辐射的两种定义：

(1) 由热运动产生的以电磁波的形式传递能量的过程。

(2) 由于热的原因，物体以光子的形式传递能量的过程。

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。

当各种电磁波在真空中传播时，均具有相同的速度，即 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，当在介质中传

播时均低于此值。热辐射的传播速度规律与上相同,因此,采用热辐射方式加热或干燥物体,加热速度比其他加热方式要快得多。电磁波以波长或频率来识别,波长与频率之间存在如下关系

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

式中 λ 为波长,单位为米 (m),常用单位为微米 (μm), ν 为频率,单位为 1/秒 ($1/\text{s}$)。

由热运动产生的电磁波称为热射线。在工业温度范围内,有实际意义的热射线波长在 $0.38 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间,包括可见光及红外线两部分。红外线又可分为近红外、中红外和远红外三个区域。大部分能量位于红外线区段 $0.76 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间,而在可见光区段,即波长为 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 的区段,热辐射的能量比重不大。在热辐射计算中,如果把太阳辐射包括在内,太阳是表面温度约为 5800 K 的热源,此时,热射线的波长范围放宽到 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$,太阳辐射的主要能量集中在 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 的波长范围,其中可见光区段占有很大比重。

热辐射的电磁波是物体内部微观粒子的热运动状态改变时激发出来的。只要温度高于 0 K (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,该物体也在不断地吸收周围物体投射来的热射线,并把吸收的辐射能重新转变成热能。辐射换热就是指物体之间发射和吸收辐射能引起的热量交换。

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:

(1) 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、物体发射和吸收光谱的解释、气体发射率及吸收率的计算等。

(2) 基于能量守恒原理的输运理论。该方法为宏观方法,多用于辐射能量的传递。绝大多数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,几何理论是电磁理论的一种特殊情况。辐射换热与导热、对流换热有本质的不同。

1.1.2 辐射换热特点

在热量传递的三种方式中,辐射换热与导热、对流换热有本质的不同。特点如下^[5]。

(1) 不需介质传递: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则不是这样,不需介质传递,可在真空中传递。

(2) 瞬时性:热辐射是以光速传递的电磁波,辐射加热或冷却是瞬时完成的物理过程。

(3) 强烈的方向性:当辐射能在传递过程中遇到非黑体时,会改变传递方向。该特点常常被用来控制辐射传递的方向,并产生特殊的辐射强度分布。辐射方向性研究是辐射加

热器设计、太阳能集热器设计中的基本问题^[6,7]。

(4) 光谱特性：辐射能与波长有关，它的能量是按波长分布的。

(5) 空间性：在物体内部，微观粒子相互吸收相邻层微观粒子的热运动状态改变时激发出来的能量，不存在辐射，辐射换热只是在空间进行的。

(6) 与传输介质的吸收辐射特性有关：当辐射能通过吸收性较强的传输介质时，因沿途被传输介质吸收而削弱^[8]。

(7) 必定伴随着能量形式的转换：物体发射热辐射时物体的热能转变为辐射能，而物体吸收热辐射时则是辐射能转变为热能。

(8) 动态平衡特性：当加热系统内的物体的温度相同时，物体的发射和吸收过程仍在不停地进行，只是发射和吸收的能量数值相等，净辐射换热量为零。

(9) 容易满足洁净加热的要求：基于以上特点，自 20 世纪 30 年代以来，开发了用于工业加热/干燥领域的红外辐射加热器，发展了红外辐射加热技术^[9~11]。

1.2 热辐射基本概念

1.2.1 基本物理量

热辐射能是由于物体具有温度而发射出的能量。辐射能的分布随时间、波长及方向等发生变化。需采用不同的参量来描述辐射能的上述特性。本书主要介绍固体壁面间辐射加热过程中涉及到的常用物理量^[12,13]。

(1) 辐射力：单位时间内，物体单位表面积向半球空间发射出的一切波长的总能量，称为半球总辐射力 E ，简称辐射力。单位为瓦/米² (W/m^2)。辐射力表征物体发射辐射能本领的大小，与物体的表面特性及温度有关。辐射力是最常用的概念。

(2) 辐射热流量：单位时间内的辐射能量，称为辐射热流量 Q 。单位为瓦 (W) 或为千瓦 (KW)。

(3) 辐射热流密度：单位面积上的辐射热流量，称为辐射热流密度 q 。单位为瓦/米² (W/m^2)。

(4) 投入辐射：单位时间内投射到表面的单位面积上的总辐射能，称为投入辐射 G ，又称为投射辐射力、辐照度、辐射照度等。单位为瓦/米² (W/m^2)。投入辐射表征投入表面辐射能的大小。

(5) 有效辐射：单位时间内，离开所研究物体单位面积的辐射能，称为有效辐射

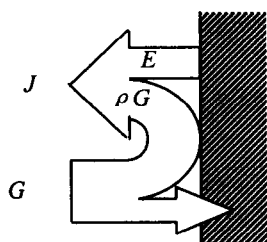


图 1-1 有效辐射定义

J 。单位为瓦/米² (W/m^2)。有效辐射不仅包括表面的本身辐射 E ，而且还包括投入辐射 G 被表面反射的部分 ρG ，此处 ρ 为壁面的反射率，见图 1-1。

(6) 光谱辐射力：单位时间内，物体单位表面积向半球空间发射的某波长 λ 的辐射能则称为半球光谱辐射力，简称光谱辐射力或单色辐射率 E_λ ，单位为瓦/米³ (W/m^3)

或瓦/(米²·微米) ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$)。在任意温度下，不同

波长的 E_λ 数值总是不同。光谱辐射力也可定义为：微元波长范围内的辐射力除以该波长范围。即：

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad (1-2)$$

显然，辐射力与光谱辐射力的关系为

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda \quad (1-3)$$

由于辐射能具有方向分布特性，当研究物体向某一方向发射的辐射能，即空间辐射特性时，常用立体角概念，因为不同方法向上的辐射能力分布规律，只有在相同的立体角内进行比较才有意义。

(7) 立体角：设有一半球，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，如图 1-2 所示。图中，微元束能量的方向用方向角 θ 和 φ 表示。 θ 角是微元面 dA

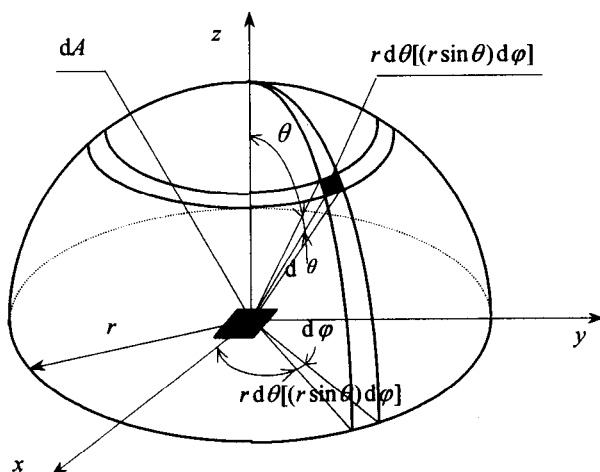


图 1-2 立体角

面的法线与微元能束中心轴的夹角,称为天顶角,也称为纬度、纬度角等。 φ 是能束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。微元立体角表示能束所占据的空间,用符号 $d\Omega$ 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,单位为球面度(sr),即

$$d\Omega = \frac{dA_s}{r^2} = \frac{r \sin \theta d\varphi \cdot r d\theta}{r^2} = \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1-4)$$

显然,半球空间的立体角为 $2\pi r^2 / r^2 = 2\pi$ 。

(8) 定向辐射力: 单位时间内,物体单位表面积,向 (θ, φ) 方向单位立体角内发射出的一切波长的总能量,称为定向辐射力,也称为方向辐射力。用符号 $E_{\theta, \varphi}$ 表示,单位为瓦/(米²·球面度)(W/(m²·sr))。如用 $dQ_{\theta, \varphi}$ 表示在微元面积 dA 的 (θ, φ) 方向上的辐射热流量,则

$$E_{\theta, \varphi} = \frac{dQ_{\theta, \varphi}}{d\Omega \cdot dA} \quad (1-5)$$

显然,辐射力与定向辐射力的关系为

$$E = \int_{2\pi} E_{\theta, \varphi} d\Omega \quad (1-6)$$

(9) 定向辐射强度: 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所有波长的辐射能量,称为定向辐射强度,简称为辐射强度。采用符号 $L_{\theta, \varphi}$ 表示,单位为W/(m²·sr),如图1-3所示。

$$L_{\theta, \varphi} = \frac{dQ_{\theta, \varphi}}{d\Omega \cdot dA'} = \frac{dQ_{\theta, \varphi}}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos \theta} = \frac{E_{\theta, \varphi}}{\cos \theta} \quad (1-7)$$

式中 dA' 为 (θ, φ) 方向上的法向面积,即 (θ, φ) 方向上看得见的辐射面积, $dA' = dA \cdot \cos \theta$ 。

在分析不同方向辐射能量强弱时,定向辐射强度概念在相同的可见辐射面积上进行合理比较,所以较常用。

1.2.2 理想物体

辐射换热理论中,除了黑体、漫辐射体之外,理想物体还有:漫反射体、白体、镜体、透明体、灰体(灰体概念在以后介绍)。依次介绍这些定义如下。

(1) 黑体: 在辐射换热理论中,引入绝对黑体(简称黑体)的概念是非常重要的。

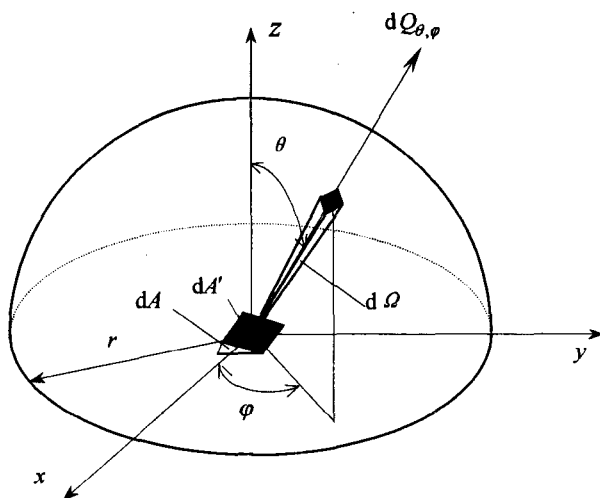


图 1-3 定向辐射强度

像理想气体一样，黑体也是理想物体。在热辐射中，常把它作为一个标准或实际物体热辐射的极限，用来比较其它物体的辐射、吸收特性偏离黑体的程度。

相同温度下，黑体的发射本领最大。黑体能吸收所有投射到它表面上的辐射能，其吸收本领最大。

可见，吸收本领大，发射本领小；或反之，吸收本领小，发射本领大，都将无法达到稳态，所以吸收本领最大的物体，其发射本领也最大。

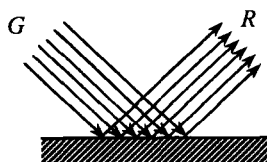
黑体的发射、吸收性质与方向无关，各个方向的辐射强度相同。

(2) 漫辐射体：在热辐射中，物体发射的辐射强度与方向无关的性质叫做漫发射。具有漫发射性质的物体称为漫辐射体。黑体是漫辐射体。所谓漫射表示定向发射与定向吸收都与方向无关，辐射强度沿各方向都均匀分布而和黑体的情况一样。

(3) 漫反射体：物体反射的辐射强度与方向无关的性质称为漫反射，见图 1-4。



(a) 漫反射



(b) 镜反射

图 1-4 漫反射与镜反射

具有漫反射性质的表面称为漫反射表面或漫反射体。

一般说来,反射辐射的方向分布与表面粗糙度的大小、入射辐射的波长有关。当平均粗糙度与波长相比很小时,这种表面可以近似当作镜面;否则,可以看作漫射表面。例如,经过极化处理的铝表面可认为是镜反射,而木材的表面则是漫反射。

(4) 白体: 投射到表面上的能量全部被漫反射的物体。

(5) 镜体: 投射到表面上的能量全部被反射,并且镜面反射时入射射线与反射射线在同一平面、入射角等于反射角的物体叫做镜体。

(6) 透明体: 能透过全部辐射能的物体叫做透明体。可见,透明体对辐射能既不吸收,也不反射,当然,也不发射辐射。

在所有的理想物体中,黑体在热辐射分析中最重要。因为研究辐射换热的思路是首先研究黑体辐射的基本规律,在此基础上,把其它物体的辐射与黑体辐射相比较,从中找出与黑体辐射的偏离程度,然后确定出修正系数。

1.3 黑体辐射

黑体辐射的基本定律包括以下四个基本定律:普朗克定律、维恩位移定律、斯忒藩—玻耳兹曼定律及兰贝特定律。

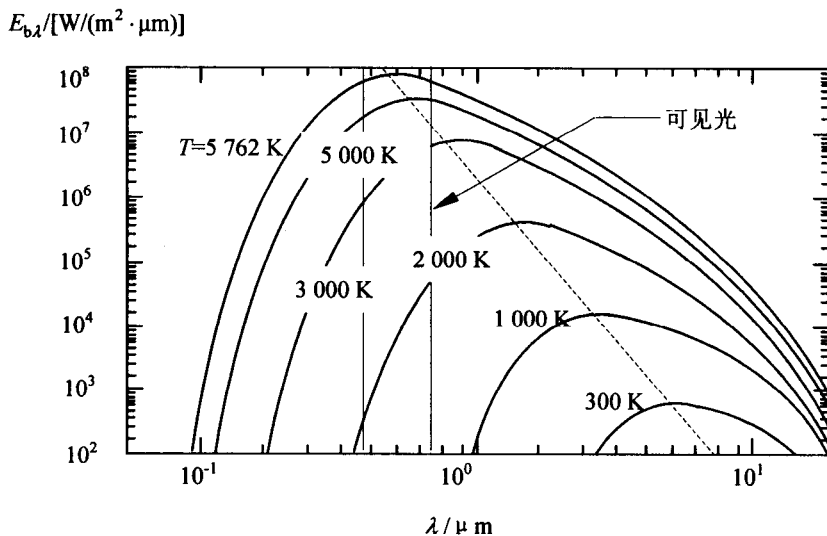
1.3.1 普朗克(Planck)定律

1900年,普朗克采用量子理论推出了黑体光谱辐射力随波长的分布规律,或者说普朗克定律给出了黑体光谱辐射力与波长和温度的变化规律。其数学表达式如下

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1} \quad (1-8)$$

式中 $E_{b\lambda}$ 为黑体光谱辐射力,单位为瓦/米³ (W/m³); λ 为波长,单位为米 (m); T 为黑体的热力学温度,单位为开 (K); 第一辐射常数 $C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; 第二辐射常数 $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

图 1-5 给出了不同温度下黑体的光谱辐射力随波长的分布。由图可知:所有波长下的光谱辐射力都随温度升高而增大。


 图 1-5 普朗克定律 $E_{b\lambda} = f(\lambda, T)$

1.3.2 维恩(Wien)位移定律

由黑体的单色辐射力随波长变化曲线可以发现：在任意给定温度下，黑体的光谱辐射力均存在极大值。随着温度的提高，曲线的极大值向左移动，即向较短的波长方向移动。维恩位移定律给出的是最大光谱辐射力对应的波长 λ_m 与黑体的绝对温度 T 之间的关系：

$$\lambda_m T = 2897.6 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (1-9)$$

该式可通过将普朗克定律对波长求导并令其等于零得到。通过计算可以得出：太阳表面温度（约 5800 K）的黑体辐射的最大光谱辐射力的波长为 $0.50 \mu\text{m}$ ，位于可见光区段，而在一般的工业较高温度范围内（2000 K），黑体最大光谱辐射力的波长为 $1.45 \mu\text{m}$ ，位于红外线区段。

利用维恩位移定律可以解释钢材加热时的颜色变化。当温度低于 600°C 时，钢材发射的基本上都是红外线，没有可见光辐射，基本没有颜色的变化。当温度超过 600°C 时，随温度升高，钢材将相继呈现暗红、红、黄色，当温度超过 1300°C 时开始发白，说明随着温度的升高，热辐射中可见光的比例逐渐增大。

1.3.3 斯忒藩—玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律

光谱辐射力曲线下的面积代表的就是黑体辐射力 E_b 。根据式(1-3)，黑体的辐射力可以表示为

$$E_b = \int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda \quad (1-10)$$

将普朗克定律的表达式(1-8)代入上式得

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1} d\lambda \quad (1-11)$$

对上式积分可得斯忒藩—玻耳兹曼定律，俗称四次方定律

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-12)$$

该式说明黑体的辐射力与其绝对温度的四次方成正比。式中 σ 为黑体辐射常数，其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ， C_0 为黑体辐射系数，其值为 $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

1.3.4 波段辐射力

对于许多工程实际问题，往往需要确定某一指定波长区段内的辐射能量。

按照式(1-11)，黑体在波长 λ_1 至 λ_2 区段所发射出的辐射能为

$$E_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda \quad (1-13)$$

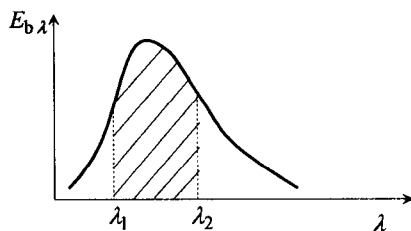


图 1-6 黑体的波段辐射力

如图 1-6 所示，该部分能量可用波长 λ_1 至 λ_2 区段间相应温度曲线下的面积表示。通常把这种波段区间的辐射能表示成同温度下黑体辐射力的百分数，用符号 $F_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$ 表示

$$F_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda_2} E_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} = F_{b(0-\lambda_2)} - F_{b(0-\lambda_1)} \quad (1-14)$$

能量份额 $F_{b(0-\lambda)}$ 可以表示为单一变量 λT 的函数，即

$$F_{b(0-\lambda)} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{b\lambda}}{\sigma T^5} d(\lambda T) = f(\lambda T) \quad (1-15)$$

$f(\lambda T)$ 称为黑体辐射函数。黑体辐射函数 $f(\lambda T)$ 可由附录 1 查取，然后计算出波段辐射力