



弥散介质的 光学特性及辐射传热

Optical Properties and Radiative Heat
Transfer of Dispersed Particles

郑楚光 柳朝晖 著

华中理工大学出版社

弥散介质的光学特性 及辐射传热

郑楚光 柳朝晖 著

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

弥散介质的光学特性及辐射传热/郑楚光, 柳朝晖 著
武汉:华中理工大学出版社, 1996.10

ISBN 7-5609-1470-5

I. 弥…

II. ①郑… ②柳…

III. 传热学-辐射传热

IV. TK124

弥散介质的光学特性及辐射传热

楚光 柳朝晖 著

责任编辑: 易秋明

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编: 430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社照排室排版

华中理工大学出版社西阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.25 字数: 152 000

1996年10月第1版 1996年10月第1次印刷

印数: 1-1 000

ISBN 7-5609-1470-5/TK·36

定价: 9.00 元

(本书若有印装质量问题, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书是讨论煤粉炉内弥散介质的辐射特性及其辐射传递行为的专著。

全书共分六章,结合煤粉炉内各种颗粒的辐射特性的研究,阐述了颗粒光散射、吸收的电磁理论方法,以及有吸收、发射和各向异性散射的弥散粒子云的辐射传输的基本理论,综合介绍了国内外在研究煤粉炉内各种颗粒的光学、辐射特性中所使用的测量、计算方法,以及有关研究结果,书中还给出了作者们在非均匀颗粒和炭燃尽过程中辐射特性变迁等方面的最新研究结果。

本书着重于基本的物理概念、理论模型和工程应用,不拘泥于繁琐的数学推导,特别适合于动力工程中从事炉内介质的辐射特性、炉内辐射传热、煤粉及污染物颗粒的在线监测等方面研究的科研和工程技术人员,可作为炉内传热教学的补充材料,也可供大气、医学、材料和军事领域的有关研究者参考。

前 言

电站锅炉向高容量、高参数方向发展,对锅炉设计提出了更高的要求。众所周知,在煤粉锅炉内,煤粉火焰和水冷壁间的换热量有 95% 以上是通过辐射换热获得的,即便在流化床锅炉内,辐射传热量也占总换热量的 (25~50)%。为设计高效率低污染、能长期安全运行的锅炉炉膛,必须对炉内的辐射传热有准确的理解。

辐射传热与传输空间内介质的辐射特性有密切的关系。在燃用固体燃料的燃烧室内,对辐射传热有重要影响的是各种颗粒,对于煤粉炉而言,即飞灰、焦炭、未燃尽炭和烟黑。我国锅炉设计中长期沿用的是前苏联的辐射传热计算方法,由该法设计的大型的、燃用高灰分煤的锅炉,实际运行中其炉膛出口烟温普遍高出设计值近 100℃,从而引发了受热面结渣、水冷壁、屏式壁超温爆管和锅炉运行效率偏低等一系列问题,产生该问题的主要症结即在于:没有很好的考虑颗粒的辐射特性和辐射传热计算模型过于简单,从而导致的炉内辐射传热计算不准确。

自 60 年代以来,国际上已广泛地将电磁理论的方法应用到颗粒辐射特性研究上,并获得了较丰硕的成果,虽然目前对各种颗粒的辐射特性的测量结果仍存在较大的分歧,炉内辐射传热计算中必须详细地考虑颗粒的辐射特性已经成为国际上炉内辐射传热研究者们的共识。我国在该领域的研究起步于 80 年代,哈尔滨工业大学和华中理工大学分别先后在机械工业部和国家自然科学基金委员会资助下开展了相应的研究,并已取得了一些有特色的研究成果。

鉴于目前国内外尚没有专门讨论燃烧微粒的辐射特性及其辐射传递过程的较系统的著作,为推动我国工程热物理学界和锅炉设计、制造厂家在本领域的研究和应用,我们将有关的基本理论和

研究成果加以整理撰写成本书。本书中的部分内容是我们在国家自然科学基金“弥散介质的辐射特性和燃烧过程中的辐射传热”和国家攀登计划“煤和石油的高效率、低污染燃烧过程的基础研究”资助下完成的,其中非均匀颗粒的辐射特性部分则是我们的最新研究成果。

本书共分六章:第一章对炉内辐射传热及炉内介质辐射特性的研究进行了概要的回顾;第二章概括地给出了本书涉及到的基本热辐射量和热辐射定义;第三章至第六章是本书的核心,其中第三章系统地给出了单颗粒及粒子云辐射特性的本质、基本参量及其电磁理论的解析结果,第四章则对颗粒的光学常数的有关理论和测量方法进行了专门的介绍。第五章是第三章的具体应用,回顾了国内外对煤粉炉内几种重要微粒的辐射特性的研究结果,并对多孔炭粒和未燃尽炭粒的辐射特性进行了较系统的分析;第六章概要地介绍了弥散粒子云的辐射传输方程及其计算方法,给出了对含灰平板辐射传热的计算分析,并对炉内辐射传热计算的现况进行了介绍。

本书由郑楚光拟定大纲,并负责全书的定稿,由柳朝晖负责撰写各章,刘迎晖帮助完成了部分资料的翻译。

黄素逸教授在百忙之中对本书进行了认真的审定,并提出了很多有益的改进意见,在此,表示深切的感谢。

本书编写过程中得到了史学峰副教授、周英彪副教授、周向阳博士、刘贵苏博士、吴宏伟博士和徐辉硕士等众多朋友的热情关注,在此也向他们一并表示感谢。

本书的出版得到了华中理工大学的资助。

本书在选材和编排上受作者的认识所限,疏漏和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作者

1996 年秋

序 言

在即将进入 21 世纪的今天,能源和环境仍然是困扰着全球经济发展的两大主要问题。我国是以煤为主要一次能源的发展中国家,以燃煤为主的燃烧装置的效率直接关系到能源的有效利用和环境保护,因此正确地认识和描述燃烧装置中的物理化学过程,准确地预报炉内流动、传热、燃烧、结渣、污染物生成情况,进而设计和制造出高效率、低污染的燃烧设备是我国热能科学工作者所面临的共同任务。

辐射传热是各种燃烧设备中的主要传热方式,特别对大型煤粉炉而言,炉膛中的辐射传热量占总传热量的 95% 以上。与其它传热方式相比,辐射传热有其特殊性,它是参与辐射换热过程的各种媒体表面之间的一个包括辐射能发射、散射、透射、反射和吸收的复杂换热过程。在燃烧空间内,除了高温烟气中的三原子气体能参与辐射换热外,弥散在该空间的悬浮粒子,如烟黑、炭粒和飞灰等也将通过对辐射能的吸收、发射和散射来参与换热过程;而这些弥散的颗粒介质的辐射特性与燃烧空间的温度分布有关,且其弥散特性,如颗粒的类型、结构和尺寸分布等,与炉内的湍流、化学反应、脱挥发分、焦炭氧化等物理化学过程紧密耦合,这些情况就使炉内辐射传热的描述和计算变得十分复杂。

近几十年来国内外的许多研究工作者对炉内辐射传热过程进行了大量的理论和实验研究,取得了许多丰硕成果,使人们对炉内辐射传热过程的认识大大地加深了一步。然而,遗憾的是目前国内外尚缺少一本专门讨论燃烧中弥散介质辐射特性及辐射传递过程的著作。华中理工大学煤燃烧国家重点实验室多年来从事炉内辐射传热的基础研究,颇具心得;近几年又在国家自然科学基金委员会和国家攀登计划的支持下,对弥散介质的辐射特性及炉内辐射

传热的数值模拟进行了系统的研究,取得了一批具有创造性的成果,在此基础上,作者写成本书。我相信,本书的出版将大大促进有关炉内辐射传热和数值模拟的研究,同时也为我国锅炉设计和制造厂家应用最新研究成果创造了条件。

本书除系统地介绍了有关炉内辐射传热及炉内介质辐射特性的基本理论和研究成果外,还全面地描述了作者在此领域的最新研究成果,包括成功地将电磁理论的研究方法引入到颗粒辐射特性的成果;在光学常数的计算方法上提出了富有创新意义的迭代算法;对实际煤粉燃烧过程中的各种颗粒,特别是未燃尽炭粒的辐射特性进行广泛的研究等。本书涵盖了理论分析、实验研究、模型计算和实际应用四个环节,对从事工程热物理研究的科学工作者和从事燃烧设备设计、制造的工程技术人员都是一本值得推荐的好书。

黄素逸

于华中理工大学

1996年9月

目 录

第一章 引论	(1)
1.1 炉内过程与辐射传热	(1)
1.2 辐射传热模型与介质辐射特性	(3)
1.3 炉内颗粒辐射特性概述	(6)
第一章参考文献	(8)
第二章 热辐射的基本性质及定律	(10)
2.1 热辐射的本质及基本定义	(10)
2.1.1 热辐射的本质	(10)
2.1.2 辐射能的基本表示方法	(11)
2.1.3 物体的热辐射特性	(13)
2.2 热辐射的基本定律	(14)
第二章参考文献	(17)
第三章 弥散介质的光散射和吸收	(18)
3.1 介质吸收、发射和散射的物理机理	(18)
3.1.1 概述	(18)
3.1.2 单颗粒散射	(19)
3.1.3 粒子云的散射	(21)
3.2 单颗粒的辐射特性	(21)
3.2.1 单颗粒的辐射特性参数	(22)
3.2.2 Mie 理论及其近似	(24)
3.2.3 Mie 散射算法	(34)
3.2.4 均匀单颗粒的单色辐射特性初析	(37)
3.2.5 包覆球体模型	(39)
3.3 弥散介质的辐射特性	(41)

3.3.1	独立散射和非独立散射	(41)
3.3.2	粒子云的辐射特性——独立、单次散射近似	(43)
3.3.3	颗粒粒径分布及其对平均辐射特性的影响	(45)
3.3.4	粒子云辐射特性的极限情况	(48)
第三章参考文献		(50)
第四章 光学常数的基本理论及实验测量		(54)
4.1	光学常数的基本理论	(54)
4.1.1	光学常数的色散理论	(54)
4.1.2	等效光学常数	(67)
4.2	光学常数的实验测量	(68)
4.2.1	光学常数的测量方法概述	(68)
4.2.2	测量微粒光学常数的 KBr 样片透射法	(72)
第四章参考文献		(79)
第五章 燃烧微粒的光学和辐射特性		(81)
5.1	燃烧微粒的光学和辐射特性概述	(81)
5.2	炭和飞灰粒子云的辐射特性	(98)
5.2.1	炭和飞灰粒子云的辐射特性	(99)
5.2.2	粒子云辐射特性的简化描述	(107)
5.3	多孔炭粒的辐射特性	(110)
5.4	炭燃尽过程中的结构与辐射特性	(116)
第五章参考文献		(124)
第六章 弥散介质的辐射传输与炉内传热		(130)
6.1	辐射传输方程	(130)
6.1.1	空间内的辐射强度及其性质	(131)
6.1.2	辐射传输方程	(132)
6.1.3	光学厚度	(138)
6.1.4	辐射传输过程分类	(140)

6.2	能量平衡方程	(141)
6.3	炉内辐射传输计算方法概述	(144)
6.4	煤粉燃烧室辐射传热计算	(152)
6.4.1	介质的辐射特性	(152)
6.4.2	飞灰对辐射传输的影响	(158)
6.4.3	煤粉炉内辐射传热计算	(161)
第六章参考文献		(169)

附录

A.	均匀球形颗粒光散射计算的标准子程序(BHMIE)	(175)
B.	包覆球体颗粒光散射计算的标准子程序(BHCOAT)	(179)

第一章 引 论

1.1 炉内过程与辐射传热

煤是当今世界上蕴藏量最丰富、价格最便宜的常规能源之一。我国是世界上最大的煤炭生产的消费国,也是世界上少数几个能源以煤炭为主的国家之一。在我国能源结构中,煤具有举足轻重的地位,约占一次能源的70%以上(1992年为74.0%),且这种以煤为主的能源结构在今后相当长的时期内都不会改变^[1]。以燃煤为主的火力发电机组在我国电力工业中占主导地位;1993年,燃煤电厂的装机容量和年发电量在全国装机总量和全年发电量中所占的比例都在70%以上。虽近年来大力发展核电和以水电为代表的可再生能源发电,但即使这样,到2010年,煤电仍将占我国发电总量的65.5%,基本与现在持平^[2]。

随着国民经济的迅猛发展,对电力的需求量与日俱增。据估计,全国每年因缺电而损失的生产能力在千亿元以上。为适应机组向大容量、高参数发展的需要,并保障电网和机组的运行安全,实践中对锅炉设计水平就提出了更高的要求。

长期以来,我国锅炉炉膛设计的热力计算都是基于一些不很准确的半经验的描述方法,由此设计出来的锅炉在实际运行中常会出现一些不良现象,例如出口烟温过高,引起对流收热面超温就是一个比较普遍存在的问题。出口烟温是影响水平烟道乃至尾部竖井受热面设计的重要参数,若其值过高,将使锅炉运行经济性降低,并很可能引发过热器、再热器超温爆管和受热面结渣,对锅炉运行安全造成严重威胁。造成这种现象的原因有很多,其中很重要

的因素是炉内传热计算不准。另外,传统炉膛设计计算方法是将炉膛作零维处理,即简单地取绝热燃烧温度为炉内介质的特征温度,没有考虑炉内温度、热流场的不均匀性,因而无法预测炉内的传热特性和炉墙的结渣倾向,从而难以保证锅炉设计的可靠性。由此可见,传统的锅炉炉膛设计计算方法,已不能适应我国火电机组大型化设计的要求。

对燃烧装置中的全过程进行科学的描述和总体模拟,一直是燃烧学界所致力方向,其基本目标是准确地预报出炉内的流动、传热、燃烧、污染物生成与结渣倾向,从而指导或取代工业实验,为锅炉炉膛设计提供可靠的依据或直接应用于锅炉设计计算中。国外的锅炉设计方法中,有的已大量应用模拟计算的结果,国内近年来也广泛地将其应用于锅炉的改造和运行优化的实践中。炉内全局模拟计算无疑是改进炉膛设计方法的最优途径之一。

燃煤锅炉内的过程非常复杂,它包含流动、传热、传质和化学反应等过程。影响煤粉燃烧和气化过程中的关键性因素有^[3]:①湍流机理;②气相湍流燃烧;③颗粒弥散;④煤焦非均相燃烧;⑤辐射传热;⑥脱挥发分;⑦灰渣生成和 ⑧污染物生成。炉内过程的数值模拟是通过运用质量守恒、能量平衡、动量平衡和组分平衡的基本规律,分析流体流动、传热传质和燃烧过程,以及对湍流输运、湍流燃烧、化学动力学、辐射传热等子过程的模拟,建立起控制反应流的封闭方程组,加上合理的初始条件和边界条件,进行恰当的数值计算,即可获得符合实际的解。由于炉内各过程均具有强烈的非线性,各过程之间存在着复杂的耦合关系,缺乏对其中任何一个子过程和因素的准确描述都将导致整个炉内模拟结果有较大的误差,因此炉内过程的数值模拟特别是热态有反应流的模拟尚处于定性的阶段。但总体上,随着对各子过程研究的进一步深入开展和计算机性能的提高,炉内总体模拟的可信性正在不断地提高。

传热是炉内过程的一个重要子过程,在锅炉设计过程中,希望能预测出炉膛各截面的热流分布,从而指导受热面的布置,避免因

局部温度或热流密度过高而导致受热面结渣和超温爆管。在粉煤燃烧室内,由于火焰组分的强烈吸收、发射特性,火焰和水冷壁之间的传热量有95%以上的是以辐射的方式来传递的,并且炉膛尺寸愈大,辐射传热在总传热量中所占的比重愈大^[4]。因此,炉内传热的模拟可归结为辐射传热的模拟。另外,在锅炉炉膛内,辐射热在煤粉粒子着火热中所占的比例可从小粒子的10%到大粒子的50%^[5],因而辐射热对煤粉流的温升速率、着火距离有不可忽略的影响。由此可见,辐射传热对粉煤着火、炉内温度分布、污染物生成和灰渣生成等都有着直接或间接的影响。因此,欲准确地预报炉内过程,就必须完善辐射传热的模型和有关参数。

其它子过程反过来对辐射传热又有强烈的影响:辐射传热依赖于介质的辐射特性,而介质的辐射特性是随其温度而改变的,因而炉内的能量平衡对辐射传热有直接影响。我们知道,炉内的能量平衡还受对流、扩散和燃料燃烧的控制,它们对炉内辐射传热有间接的影响。例如,在其它条件不变的情况下,燃料进入炉膛后,燃烧愈迅速,在炉膛内愈快形成高温,辐射换热量愈多,炉膛出口的温度愈低;反之,燃烧过程延迟必将导致炉内换热量降低,炉膛出口温度升高^[6]。由此可见,欲准确地计算炉内的辐射传热,必须采用适当的方式考虑其它过程对辐射传热的影响。

1.2 辐射传热模型与介质辐射特性

与其它传热形式相比较,辐射传热有其特殊性^[7]。燃烧装置中,火焰的热辐射与火焰中介质的温度以及介质的辐射吸收、散射能力有关,而介质的辐射特性又与辐射的波长有关。锅炉炉膛是由不均匀的、具有吸收、反射和发射的固体表面围成,该表面具有复杂的几何结构,并且其内流动着的是多相、不均匀、有吸收、发射、散射的弥散颗粒介质,并且介质本身还因燃烧而产生热,在这样复杂的系统内,必须考虑辐射特性的空间分布。另外,燃烧装置空间

中的辐射传热是容积辐射传热,空间中的任一点和空间中其它任一点间均存在辐射换热,因此,必须对全炉膛空间联立求解辐射传输方程。

辐射换热的以上特性,使辐射换热的求解复杂而困难。理论上,给定介质的辐射特性及温度分布,火焰及燃烧产物对壁面的辐射换热是可以计算的。但通常温度是一个未知量,与温度有关的介质辐射特性也是待定的,因此,辐射换热方程的求解还需与能量方程相耦合。

炉内辐射的计算曾长期局限于零维处理的方法^[4],早期也曾利用射线跟踪法、热网络法来计算密闭空腔内的辐射换热,它们均未考虑介质的辐射特性,这种状况直到本世纪 50 年代才有了根本变化;这时,如 Hottel 和 Cohen^[8],开始将电磁理论方法应用于辐射传热问题,并建立起了严格的辐射传递控制方程。将该法应用于炉内辐射传热的模拟,必须具备两个基本条件,即:

一、辐射传递方程的离散求解方法

比较基本的如:Hottel 区域法、Monte Carlo 法、热通量法和离散坐标法等。它们都有各自的特点,但共同的缺点是求解一维问题精确,求解三维问题时,要么扩展困难,要么扩展后精度和收敛性很差,并且难于处理介质辐射特性的非均匀性、散射的各向异性和光谱特性。近年来,研究者们普遍寻求结合各种基本方法优点的途径,典型的如离散射线法,它兼具有 Monte Carlo 法、区域法和通量法的特点,因而计算时间较省,且占内存较少。但该法对于三维有散射的情况的适用性还有待于验证。

二、炉内介质的红外辐射特性参数

在锅炉炉膛内,需要考虑的对象包括粉煤燃烧的各种气体、颗粒产物和灰污壁面。

在炉内辐射传热中,比较重要的气体产物主要是 CO_2 、 H_2O 和 SO_2 等三原子气体。这些气体对辐射能的散射不明显,主要表现为选择性的吸收,因此必须考虑其辐射性质随波长的变化。对气体的

辐射特性的研究已较成熟,并建立了一些标准的图表和适于工程计算用的光谱模型,如 Hottel 图^[9]、窄带(Narrow Band)模型^[10]、宽带(Wide Band)模型^[11]等。在类似于煤粉炉的燃烧设备中,由于燃烧产物中有固体颗粒存在,气体的辐射特性对总体辐射换热的影响份额相对较小,在颗粒产物的辐射特性尚不明的情况下,单纯地对气体产物的辐射特性采用精确的光谱性质是不必要的,因而目前普遍采用的是较简单的模型,如宽带模型。

对于燃烧颗粒产物的辐射特性,虽然早在 70 年代即在国际上引起广泛的重视,并作了大量的研究,但现有的研究仍只是限于少数几种煤种的煤粉、炭粒、飞灰的辐射性质,炭燃尽过程中颗粒辐射特性的演变就更不明确了,并且各研究者所获得的数据结果存在着很大的分歧,即便是对于烟黑,其结构和辐射特性的研究至今也仍是国际辐射传热学界的研究热点。随锅炉炉膛尺寸的增大,颗粒对辐射的影响更加显著^[12],颗粒的辐射特性是大型电站锅炉炉内辐射计算所迫切需要解决的关键问题。

壁面的辐射特性和导热性是决定辐射传热量的另一类重要参数。研究壁面在沾污过程中发射率和反射率的演变,考察壁面的发射率和反射率与壁面上粘附的颗粒的形态、成分和温度的关系,建立壁面辐射特性的预测模型也是近年来研究者们所关注的热点^[13]。

总而言之,综合各计算方法的优点,寻求精度高、收敛快速、能充分反应介质的复杂辐射特性、可应用于复杂空间结构且能较好地与流动计算相耦合的辐射传热数值计算方法;全面、系统地量测和描述炉内各种辐射媒质的辐射特性,并寻求恰当的辐射特性简化表示方法,仍然是炉内辐射传热研究的重点和难点,也是目前和将来研究者们努力的方向。

1.3 炉内颗粒辐射特性概述

通常将燃烧室内的颗粒产物区分为两大类:含碳的(煤粒、炭粒、未燃尽炭粒和烟黑)和不含碳的(飞灰)*^[14]。含碳的颗粒主要集中于火焰面以内,不含碳颗粒则弥散于近80%的炉膛空间内。

颗粒的辐射特性与气体的辐射特性有显著的差异:首先,气体对光波是选择性吸收和发射的,而颗粒能吸收和发射一切波长的辐射能。Wall等^[12]曾计算比较了高灰分烟煤(25%灰)在20%过量空气中燃烧产物的发射率随光程的变化,发现随设备尺寸的增大,粒子云的发射率较纯气体介质的发射率更快地接近1,因此,在大型燃烧设备中,颗粒的辐射特性对辐射传输的影响大于气体的影响;其次,颗粒尺寸与波长之比大到一定程度,就会出现显著的散射特性,在燃烧室内感兴趣的波长范围为 $(1\sim 16)\mu\text{m}$,而颗粒的粒径在 $(2\sim 300)\mu\text{m}$ 之间,相应的尺寸参数为 $0.9\sim 940$,因而颗粒的散射性相当强烈^[15],而气体的散射性则很微弱,可以忽略不计。由于颗粒同时具有吸收、发射和散射的特性,因此它们对辐射传输的影响便很复杂:一方面,颗粒发射将增强辐射,另一方面,颗粒的散射将使辐射在传输方向上的衰减增大。

对颗粒辐射特性的描述,历史上先后有两类方法^[16]。一种是传统的方法,即由实验获取的粒子云黑度或衰减指数,这种方法虽然数据形式简单,宜于工程实用,但其准确性受到实验范围和条件的限制,缺乏通用性,不易放大外推,且实验耗资、需时都较大。我国现行锅炉计算标准沿用的就是这种方法^[17];另一种方法则是随电磁理论在辐射计算中的应用而产生的,它采用三个参数来描述

* 国外有的研究者,如 Self, S. A., 将未燃尽炭视作飞灰的一种特殊形态,若按此分类,则飞灰也应视作含碳的。在本书中,为和初始的未燃烧的炭粒和燃烧完全的灰粒相区别,我们将未燃尽炭作为一类颗粒处理。