

非均匀高辐射热流环境下 太阳能吸热器光热耦合特性研究

毛前军 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

非均匀高辐射热流环境下 太阳能吸热器光热耦合特性研究

毛前军 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

非均匀高辐射热流环境下太阳能吸热器光热耦合特性研究/毛前军
著. —武汉: 武汉大学出版社, 2016. 9
ISBN 978-7-307-18574-6

I. 非… II. 毛… III. 太阳能利用—石油工程—研究
IV. ①TK519 ②TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 203463 号

责任编辑:任仕元 责任校对:汪欣怡 版式设计:马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)
(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 虎彩印艺股份有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 9.5 字数: 133 千字 插页: 1

版次: 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-18574-6 定价: 22.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

序

能源是支撑人类文明进步的物质基础。目前,我国已经成为世界上最大的能源生产国和最大的能源消耗国,能源消耗总量近年来增长过快使得保障能源供应压力增大,能源问题成为制约我国经济可持续发展、社会和谐稳定的主要因素之一。而太阳能具有取之不竭、用之不尽的特点,并且对环境不产生任何污染,因此具有极大的应用价值。但是,由于太阳能的低密度、多变性和昼夜间歇性等特性,目前太阳能在工业方面产业化、规模化实际应用还很不普遍。作为能源密集型企业的油田既是产能大户也是耗能大户,一方面源源不断地为国家提供能源,另一方面也在不断地消耗大量的能源。能耗问题一直困扰着油田的可持续发展和导致环境生态问题的产生,在油田利用太阳能具有较高的科学价值和巨大的社会效益。因此,实现太阳能的高效光热转换及应用具有特殊的背景和广阔的前景。

本书以严寒高纬度地区碟式太阳能聚光系统高效光热转换及利用为应用背景,结合油田工程实际对太阳能利用发展的技术需求,对碟式太阳能聚光系统太阳辐射强度、腔式吸热器的优化设计、腔式吸热器热流密度场分布规律、太阳能光热转换效率及应用等核心技术的关键基础科学问题开展系统研究。主要研究内容包括以下 4 个方面:

1. 基于气溶胶修正因子的太阳辐射强度的理论计算和实验测试研究。首先,分析大气层中气溶胶的几何特性和辐射特性,提出太阳辐射强度理论计算模型中的气溶胶修正因子的意义和概念,并以地面观测数据的反演计算结果为基础,采用普朗克、罗斯兰德和普朗克-罗斯兰德模型分别计算平均衰减系数;其次,基于

SMARTS 软件计算光谱太阳辐射强度, 并以此选择平均衰减系数的模型; 再次, 根据计算结果给出太阳辐射强度计算中气溶胶修正因子及在实际应用中的选定方法; 最后, 采用修正后的太阳辐射强度 Hottel 模型计算哈尔滨地区典型时段的逐时辐射强度及年周期性变化规律, 并通过实验测试验证理论模型的精度。

2. 太阳能腔式吸热器优化设计研究。基于碟式太阳能聚光系统光路传输过程的特点和蒙特卡洛法的求解思想, 分别给出太阳光线发射、反射、吸收以及逃逸过程中的计算模型, 重点推导出旋转抛物面发射点的概率模型, 提出研究系统 14 个表面的物理模型和数学描述, 并采用 FORTRAN 95 语言完成太阳能腔式吸热器的辐射特性数值模拟程序的设计、编写; 通过分析单碟与多碟太阳能聚光系统的差别和实验测试光谱反射率的变化规律等为数值模拟计算提供准确的参数; 同时基于等高度等面积法和等开口等面积法设计 4 种不同形状的腔式吸热器, 并数值模拟腔式吸热器的热流密度场分布特征; 考虑腔体材料的光学特性, 给出辐射热流随材料光学特性的变化规律; 最后研究 6 种不同高径比条件下腔式吸热器的热流分布规律, 建立吸热器总吸热量与吸热器高度之间的本构方程, 同时以腔式吸热器获取最大有效吸热量为目标函数, 优化提出腔式吸热器最优的高径比。

3. 太阳能腔式吸热器辐射特性数值模拟研究。针对碟式太阳能聚光系统对热流密度分布的重要作用, 数值研究碟式太阳能聚光系统的焦距对光斑特性、焦面热流分布规律以及吸热器内表面热流分布的影响, 通过计算结果提出不同碟式太阳能聚光系统圆柱形腔式吸热器最大热流值出现位置的函数关系; 同时基于气溶胶对太阳辐射强度的强烈影响数值模拟变化范围较大的 5 种太阳辐射强度对腔式吸热器热流密度和无量纲热流的影响; 数值模拟研究 6 种不同系统误差对腔式吸热器辐射热流分布及总吸热量的影响, 并给出不同系统误差条件下腔式吸热器总吸热量的理论计算模型。

4. 碟式太阳能聚光系统光热转换效率数值模拟和实验测试, 并基于研究结果进行太阳能在油田工程中的理论应用研究。系统地提出严寒高纬度地区光热转换效率实验测试方法和手段; 实验测试

腔式吸热器热流密度分布规律，验证数值模拟结果的精度；以蒙特卡洛法计算的辐射热流分布规律作为边界条件(UDF 函数的形式)，采用 Fluent 计算软件数值模拟碟式太阳能聚光系统腔式吸热器出口水温分布规律；完成太阳能光热转换效率基本参数的测试，建立光热转换效率计算模型，给出热效率的变化特征；结合油田工程特点，理论设计太阳能在油田工程利用中的流程图并进行初步验证。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 碟式太阳能聚光系统光热转换效率研究现状	2
1.2.1 太阳辐射强度的研究现状	3
1.2.2 腔式吸热器不同形状的研究现状	5
1.2.3 腔式吸热器热流密度场分布规律研究现状	7
1.2.4 光热转换效率研究现状	11
1.3 太阳能在油田中的利用现状	18
1.4 主要研究内容	21
第 2 章 基于气溶胶修正因子的太阳辐射强度计算	22
2.1 太阳辐射强度计算的理论模型	23
2.2 气溶胶修正因子	24
2.2.1 大气气溶胶辐射特性	25
2.2.2 大气气溶胶辐射特性理论计算模型	26
2.2.3 气溶胶修正因子计算	30
2.2.4 结果分析及模型选取	34
2.2.5 气溶胶修正因子应用选定方法	38
2.3 太阳辐射强度理论计算结果	39
2.4 太阳辐射强度的实验测量及对比分析	41
2.5 本章小结	44
第 3 章 腔式吸热器结构设计及优化研究	45
3.1 蒙特卡洛法	46

3.1.1	系统结构表面的数学描写	47
3.1.2	计算模型	52
3.1.3	计算程序	55
3.1.4	算例分析	55
3.2	碟式太阳能聚光系统物理模型及参数分析	59
3.2.1	物理模型	59
3.2.2	单碟与多碟系统的影响	62
3.2.3	镜面光谱反射率影响	64
3.3	不同形状的腔式吸热器	66
3.3.1	等高度等面积法	67
3.3.2	等开口等面积法	68
3.4	材料特性对吸热器热流密度的影响	70
3.5	腔式吸热器高径比优化	73
3.6	本章小结	79
第4章	腔式吸热器热流密度场研究	80
4.1	碟式聚光系统焦距对太阳光线聚集品质的影响	80
4.2	太阳辐射强度对焦面热流密度场的影响	85
4.3	腔式吸热器表面热流密度分布特性	87
4.3.1	太阳辐射强度对吸热器表面热流密度场的影响	87
4.3.2	系统误差对腔式吸热器表面热流密度的影响	88
4.4	本章小结	95
第5章	太阳能光热转换效率及应用研究	97
5.1	碟式聚光系统实验台介绍	97
5.1.1	碟式聚光系统	98
5.1.2	腔式吸热器	100
5.1.3	热流密度传感器	101
5.2	腔式吸热器表面热流测试实验	101
5.3	光热转换效率数值模拟研究	103
5.3.1	Fluent 软件	103

5.3.2 对流热损失计算	105
5.3.3 数值模拟结果	105
5.4 光热转换效率实验研究	109
5.4.1 吸热器出口水温测试实验及分析	109
5.4.2 热效率计算模型的建立	110
5.4.3 光热转换效率实验结果	111
5.5 太阳能聚光系统在油田中的应用研究	113
5.6 本章小结	114
 第6章 结论	 116
 附录一 典型气溶胶粒子光谱复折射率	 119
 附录二 主要符号表	 122
 参考文献	 128

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

能源、环境以及可持续发展是 21 世纪人类社会生存和发展的关键主题，三者之中环境和能源是保障，可持续发展是中心。然而近些年来，随着经济社会发展、人口增长、人民生活水平提高及城市化、现代化的生活方式对能源的需求不断增大，能源供需矛盾加剧，在一定程度上影响了社会的可持续发展。同时，能源是我国现代社会发展不可或缺的物质基础，能源问题是我国实现全体人民共同富裕过程中的一个重大战略问题。随着常规化石能源储量的逐步减少和对环境污染的加剧，人类为了可持续发展和生存的需要，必然要寻求可再生能源来代替常规能源。以我国石油对外依存度(年进口量与消费量之比)为例，1995 年，我国石油对外依存度为 7.6%；2003 年，我国石油对外依存度为 48.6%^[1]；2012 年，我国进口原油总量为 2.7 亿吨，石油对外依存度升至 57%，超过了 50%的警戒线^[2]。如何保障我国的石油安全，已成为国家、社会关注的重大问题之一。与此同时，随着油田开发的持续和原油储量的日益减少，自产原油产量逐渐减小，而原油综合质量含水率还在上升，开采石油的难度不断变大，开采单位原油所耗费的能耗总量不断增加，并且由于油田生产工艺环节中存在用能不合理，造成了油田系统自身能耗过大，油田节能减排和新能源的利用已经成为目前油田可持续发展过程中的关键问题之一。

大庆油田作为中国最大的石油生产基地，连续 29 年保持 5000 万吨以上的原油稳产水平，为我国的能源工业做出了巨大的贡献，

也是黑龙江省经济的支柱产业。大庆油田既是产能大户,也是耗能大户^[3,4],在为国家源源不断输送能源的同时自身的能耗总量很大。2005年大庆油田生产原油约为4495万吨,能耗总量约为670万吨标煤;2010年大庆油田生产原油约为4000万吨,能耗总量约为665万吨标煤^[5,6]。同时,随着大庆油田开采后期(综合含水不断增加,已达到90%以上)和生产规模的进一步扩大,能耗总量还会维持在较高水平,油田面临着水、电、气等能源紧缺的局面,严重地影响着大庆油田建设百年油田这一历史使命^[7]。因此,能源领域的革命,也就是寻找新能源并成功应用于油田,已成为油田亟待解决的关键科学和技术问题,规模化、产业化利用太阳辐射能是可供其选择的目标之一。

太阳能蕴藏丰富,不会枯竭,并且干净、安全,同时不会威胁人类生存和破坏大气环境。大力发展太阳能等可再生能源,是培育新兴产业、推进能源多元化发展的重要战略策略,也是应对全球气候变化、保护生态环境实现经济社会可持续发展的迫切需要。全国太阳能资源丰富,在绝大部分国土面积上,年日照时数大于2000h,年利用率高。据统计,我国每年地球表面吸收的太阳能从数量上相当于17万亿吨标准煤,是世界第一大能源^[8-10]。我国《可再生能源法》已于2010年4月1日进行了颁布和实施。此外,全球京都议定书的签订,国家一系列环保政策的出台,这些都为发展和利用太阳能提供了政策保障。同时,随着原油价格的不断上涨和原油缺口形势的不断加剧,加大了我国政府对能源战略的调整力度和决心,也加大了对新能源发展的支持程度,这些都为高效产业化利用太阳能提供了机遇和机会。

总之,实现高效、低成本太阳能光热转换技术的创新,并大力发展太阳能产业(特别是工业应用)是时代赋予我们的使命,也是解决能源供需矛盾最行之有效的办法之一。

1.2 碟式太阳能聚光系统光热转换效率研究现状

碟式太阳能聚光系统由碟式镜面反射器和腔式吸热器组成,系

统的光热转换效率是整个太阳能利用效率的核心和难点之处,也是系统性能指标最重要的评价因素及推广利用的关键。目前国内外学者的研究重点主要包括太阳辐射强度的动态规律、腔式吸热器形状优化、腔式吸热器的辐射热流分布特征以及光热转换效率和应用等。太阳辐射强度动态规律的研究手段主要包括数值模拟和实验测试。腔式吸热器形状优化研究手段主要是数值模拟。腔式吸热器热流密度场的研究手段也主要是数值模拟。系统光热转换效率研究手段主要包括两种:一是正平衡研究,即首先测试和计算吸热器带入和带出能量,然后根据带出能量与带入能量的比值计算吸热器的效率;二是反平衡研究,即首先测试和计算吸热器的热损失(包括光学热损失、辐射热损失、对流热损失和导热热损失等),然后再根据能量守恒定律计算吸热器的效率。两者研究方法各有优势,具体实验和数值模拟计算中需要根据实际情况进行选取。太阳能利用主要手段为实验研究和数值模拟。

1.2.1 太阳辐射强度的研究现状

为了实现太阳能的有效利用和推广,准确计算和实验测试太阳辐射强度是一项必不可少的基础工作。考虑太阳辐射强度的周期性、低密度性和间歇性特点,碟式太阳能聚光系统的利用效率和经济性评价及应用受到了一定的限制和影响。因此,为了获取最大光热转换能量和准确优化设计太阳能蓄热系统,对太阳辐射强度的动态规律和特点进行研究非常有必要和意义。

目前关于太阳辐射强度的研究有5种方法:

第1种方法是最简单的方法,即采用日照时数来计算平均太阳辐射强度^[11,12],这也是目前国内各地区采用的一种主要方法。这种方法方便使用,但是对当地气候特征依赖严重,具有一定的局限性。

第2种方法是研究太阳光线的传输机理,详细考虑气体吸收率、瑞利散射和气溶胶的影响。但这种方法的使用也有限制,如采用的云层特性其实是采用平均日照时数来计算获取的,因此计算结果也会有一定的限制^[13]。

第3种方法是分别计算太阳总辐射强度和散射强度,然后通过两者的差值计算太阳辐射强度(直射强度)。此方法的平均误差超过10%,主要是由于散射辐射强度的测量很容易产生误差^[14]。

第4种方法是采用卫星获取数据,精度较高。但这种方法对卫星的要求和工作强度提出了更高的要求,常规应用也具有一定的难度^[15]。

第5种方法采用地面观测获取实验数据,是最准确的方法之一。因为只能测试当地准确的太阳辐射强度,例如海平面表面的太阳辐射强度^[16]、青藏高原地区太阳辐射强度规律^[17]、南京地区^[18]、苏州地区^[19]以及长江中下游地区^[20]等,故需要建立许多地面观测站,不具有推广性。但是此方法可以用来验证理论模型的精度。

为了准确计算太阳能光热转换效率,太阳辐射强度是一个重要的基础参数,国外许多学者对其进行了相关的研究。2009年,Janjai等^[21]介绍了太阳辐射强度对太阳能系统热效率的重要作用和意义,采用卫星数据来测试泰国不同城市、不同季节的逐时太阳辐射强度,并与理论计算值进行了比较,结果显示平方根误差在10%以内。2009年,Yao等^[22]采用HFLD软件计算了中国首座1MW中央吸热器系统定日镜场布置设计和属性,建立了不同太阳辐射强度条件下太阳能镜场设计的数学模型及各部分之间的耦合关系,并基于太阳辐射强度数值模拟了日平均和年平均光电转换量。2011年,David Barlev等^[23]对最近几十年聚焦太阳能系统的研究成果进行了总结,包括聚焦太阳能集热器、抛物线槽式集热器、定日场集热器、线性菲涅尔透镜、抛物线碟式集热器、聚集光伏、聚焦太阳能热电技术、热能储存、能量循环以及应用等。文章指出,由于太阳能光热转化效率受到不同地区太阳辐照强度的近似日周期变化和年周期性变化规律的影响,因此在研究系统热效率的同时,针对太阳辐照强度的研究是重中之重,也是前提之一。2011年,Wu和Chee^[24]介绍了几种计算太阳逐时辐射强度的计算模型,提出了一种耦合ARMA和TDNN的新计算模型,并计算了研究地区2009年2月的月平均太阳逐时辐射强度。2012年,Su等^[25]研究了澳门

地区太阳辐照强度的日变化规律和年变化规律，并建立了理论计算模型，同时基于太阳辐射强度的研究结论给出了太阳能系统的光热转换效率规律。

近年来，国内相关高校和科研机构也有一些关于太阳辐射强度的研究成果。到目前为止，文献显示太阳辐射强度基本计算模型主要有：Hottel 模型、ASHRAE 模型、非晴天计算模型等^[26]。1980 年，中国科技大学的程曙霞和葛新石提出了采用非稳态卡计法原理来测试和计算太阳辐射强度，具有结构简单、价格低廉的优点，并提出需要通过研究玻璃罩对太阳散射辐射和直射辐射不同的透射特性来提高仪器的测试精度^[27]。2012 年，南京理工大学的卢奇和周伟建基于 Hottel 模型数值计算了我国主要大城市太阳逐时辐射强度（晴天条件）的变化特征，并基于研究结果计算了集热器的最佳倾斜角，以获取最大的太阳辐射量^[28]。2003 年，哈尔滨工业大学的吴继臣和徐刚以暖通空调设计负荷计算需求为研究背景，采用 ASHRAE 模型（同布格尔公式）计算了我国主要城市冬季各月典型日水平面上的太阳散射辐射日总量和总辐射强度，得出了哈尔滨地区 2 月份典型日水平面逐时太阳辐射强度数据^[29]。2007 年，安徽建筑工业学院的林媛通过实测大气透过率并采用 ASHRAE 模型推导了任意角度采光面的太阳直射辐射强度和散射辐射强度的计算公式，并且为了获取非晴天太阳辐射强度的计算模型，研究了地区云层变化对太阳辐射强度的影响，最后以安徽省合肥市为实验测试点验证了理论模型的准确性^[30]。

综上所述，目前的文献主要针对太阳辐射强度值进行了相关的理论建模和实验研究。由于太阳辐射强度受纬度、当地太阳时、大气环境等多因素的影响，部分模型的应用具有一定的局限性或者精度不高，尚未形成系统的研究模式和统一的认识，因此需要针对严寒高纬度地区大气环境特征，并考虑太阳光线传输过程的物理机制尤其是气溶胶对太阳辐射强度的作用机制，开展太阳辐射强度准确特征规律的定性和定量研究。

1.2.2 腔式吸热器不同形状的研究现状

腔式吸热器的形状直接影响辐射热流的分布规律和系统总吸热

量,也关系到系统效率和使用寿命等。目前的研究主要是数值模拟和实验测试,通过研究不同形状或者特定的某一形状的腔式吸热器来研究整个系统的对流热损失及相关参数的优化,为高效利用太阳能提供技术支持。

1981年, Clausing^[31,32]首次提出了一个大立方体形腔式吸热器的对流热损失的分析模型,后来基于吸热器开口孔的面积对这个模型进行了修正,并通过实验数据来验证模型的可靠性和精度。1990年, Behnia 等^[33]研究了充满非参与性流体介质的长方形腔式吸热器的混合辐射和自然对流热损失变化规律,研究结果表明吸热器外部的自然对流弱化了内部循环,但辐射却加强了工质的流动性。1993年, Steinfeld 和 Schubnell^[34]提出了对于太阳能腔式吸热器,最优的开口直径是解决最大程度吸收辐射能和最小辐射能损失的关键,并提出了一种新的简单的半经验方法解决最优开口直径的计算措施。文章最后采用蒙特卡洛方法计算了碟式太阳能腔式吸热器的形状对最优参数的影响尺度。1993年 Balaji 和 Venkateshan^[35], 1999年 Ramesh 和 Venkateshan^[36]数值研究了一个长方体的自然对流和表面辐射的混合属性特征,并进行了相关的实验。研究结果表明表面辐射对于系统的自然对流有压制作用,因此减少了系统的效率。2006年,哈尔滨工业大学的孙加滢^[37]数值研究了球形、圆锥形等几种不同形状的腔式吸热器对热流密度分布和温度场分布规律的影响,研究表明不同形状的腔体对热效率没有影响,但对能流密度分布有影响。2008年, Shuai 等^[38]采用蒙特卡洛法并耦合光学属性来预测碟式太阳能聚光系统腔式吸热器的辐射属性。文章研究了太阳形状和表面倾斜误差的影响并介绍了相应的概率计算模型,并基于等量热流概念,根据焦面热流的方向理论提出了一个倒置梨形截顶腔式吸热器。2009年,上海交通大学的翟辉^[39]理论设计和制造了四种腔体吸收器,分别为半圆形、圆弧形、三角形和四方形,并以电加热模拟真实太阳进行了光学效率实验。该研究结果表明:三角形腔体吸收器光学效率99%,当腔体开口宽度一定时,三角形腔体吸收器的光学效率随相对口径的增加而增大;半圆形腔体吸收器由于换热面积最小,具有最好的热效率,三角形其次;当

入口温度在 90℃ 时, 热效率 94%。2010 年, Wu 等^[40] 详细介绍了相关工程中可能涉及的各种各样不同形状的腔式吸热器的特征和属性, 并重点就将来的发展方向和可能研究的问题提出了建议, 同时总结了目前关于太阳能腔式吸热器形状的研究成果。

综上所述, 文献研究成果显示了腔式吸热器的形状直接影响系统效率而且具有重要的研究意义, 目前主要是针对给定太阳辐射强度条件下, 对具体的腔式吸热器形状开展实验和数值模拟研究, 而不同太阳辐射强度、不同碟式聚光系统对光线传输特性多因素影响条件下的腔式吸热器形状研究尚未开展。

1.2.3 腔式吸热器热流密度场分布规律研究现状

太阳能聚光系统焦面热流分布规律和腔式吸热器内表面热流密度场的分布情况是反映太阳能聚光系统的聚集品质的重要特征。因此, 热流密度场分布规律的研究对聚集和吸收技术的创新具有重要的指导意义。当前的主要研究内容分为焦面热流和腔式吸热器内表面热流。焦面热流分布直接体现了聚光系统的光线聚集品质, 对于进入腔式吸热器内的太阳光线方向和数量以及腔式吸热器的开口半径等都具有重要影响。腔式吸热器表面热流的分布规律对于吸热器防止局部过热、延长使用寿命以及系统获得最大辐射热流尤为重要。现有的研究手段主要为数值模拟和实验测试。

1. 碟式聚光系统焦面热流分布规律研究现状

1984 年, 宁夏技术物理所的马惠民等^[41] 针对目前对聚光集热器没有统一的测量标准, 提出采用六项指标来评价聚光器性能, 并通过焦面能量密度分析对这六项指标进行测定。这六项指标分别为: 用标称功率、标称最高温度、平均温度、光机效率、镜面平均贡献及聚光度。研究结果认为本书这种焦面能量分析法能直接测出聚光器焦平面上的能量密度分布而不受任何不确定因素的影响, 是比较理想的测试聚光器主要性能指标方法。

2007 年, 哈尔滨工业大学的帅永等^[42] 结合碟式太阳能聚光系统的光学传输特性, 同时考虑了太阳光线不平行度、系统焦面误差以及跟踪指向误差等多方面误差因素, 基于蒙特卡洛法对多碟抛物

面太阳能聚光系统的焦面热流分布特性进行了数值模拟计算,获得了在相同口径和相同焦距条件下系统的边缘角对焦面热流分布的影响程度,为今后碟式聚光太阳能系统的优化设计和安装维修提供指导意见。

2012年,南京航空航天大学的王磊磊等^[43]基于蒙特卡洛光线跟踪法及光线的镜面反射定律,采用数值模拟的方法分析了指向误差、焦面位置误差等对新型太阳能聚焦器焦面光斑形状及热流分布规律的影响。研究结果显示焦面位置误差绝对值越大,焦面光斑半径越大,焦面热流峰值越小;焦面误差绝对值相同时,焦面光斑形状及热流分布几乎一样;指向误差越大,光斑越偏离焦面中心,并且光斑由圆形逐渐演变成椭圆形,光斑长短径之比越大。

2012年,哈尔滨工业大学的王富强^[44]基于直接热流密度场测量法对碟式太阳能聚光系统焦平面处的热流密度场进行了测量和研究,实验设计了不同的焦点测试位置,并编制了计算程序来实现相关参数的数值模拟,最后将两者结果进行了对比分析,找出了数值模拟的最佳参数组合。同时,研究碟式聚光系统不同反射镜数目及镜面反射率的变化对焦面热流密度场分布的影响。

综上所述,在碟式太阳能聚光系统焦面热流测试及数值模拟过程中,由于热流密度传感器的工作温度高、制造成本高以及太阳辐照强度的不稳定性等因素,影响了焦面热流场的分布规律研究,制约了后续光热转换效率的研究需要。因此,基于蒙特卡洛法从光线传输特性出发,考虑碟式太阳能聚光系统的光线聚集特性,系统地开展焦面热流分布特征规律的研究很有必要。

2. 腔式吸热器表面热流密度场研究现状

太阳能腔式吸热器表面热流分布规律是太阳能高效光热转换的重要参数和指标,也是国内外学者研究的关键热点和难点问题之一。目前主要的研究手段是数值模拟,实验研究相对较少,这主要是因为碟式太阳能聚光系统聚光比较高,稳定性较差,实验台搭建比较困难,成本高,并且实验测试的难度较大。

传统用来设计和模拟太阳能腔式吸热器热流密度分布规律的程序最早起源于20世纪80年代,例如1976年 Vittitoe 和 Biggs 编写