

博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

液态碳氢化合物透射光谱测量 及其热辐射物性反演研究

李 栋 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

液态碳氢化合物透射光谱测量 及其热辐射物性反演研究

李 栋 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐明了透射法实验获取液态碳氢化合物透射光谱及其热辐射物性反演的基础知识,介绍了传热传质理论和电磁理论在液态碳氢化合物辐射特性测量系统及其光学测量工程中的应用,具有一定的深度和广度。全书共6章,包括恒温箱热环境仿真和光学腔的瞬态加热特性研究、反演液态碳氢化合物热辐射物性的方法研究、液态碳氢化合物高温透射特性测量实验系统的研制、基于透射光谱反演光学窗口玻璃光学常数的双厚度法研究、液态碳氢化合物热辐射物性的实验研究。全书还配有大量的反演算例和实验数据,可供读者参考。

本书主要面向动力工程及工程热物理和石油天然气工程等专业中从事液体光谱分析和辐射传热研究的科研工作者,以及相关院所的研究生。本书可作为液态碳氢化合物透射光谱高温测量基础实验和理论学习的工具,也可供基于类似液体透射光谱测量数据反演其热辐射物性的实验和理论研究参考。

图书在版编目(CIP)数据

液态碳氢化合物透射光谱测量及其热辐射物性反演研究/李栋著. —北京:科学出版社,2017.6

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-051583-4

I. ①液… II. ①李… III. ①烃-光谱-测量-研究②烃-热辐射-反演-研究 IV. ①O622.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 016673 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年6月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:305 000

定价:95.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵 傅伯杰 郭坤宇 胡 滨 贾国柱 刘 伟

卢秉恒 毛大立 权良柱 任南琪 万国华 王光谦

吴硕贤 杨宝峰 印遇龙 喻树迅 张文栋 赵 路

赵晓哲 钟登华 周宪梁

《博士后文库》序言

1985年,在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下,我国建立了博士后制度,同时设立了博士后科学基金。30多年来,在党和国家的高度重视下,在社会各方面的关心和支持下,博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中,博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分,专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助,对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说,适逢其时,有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神,是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大,但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤,博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才,“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年,为提高博士后科学基金的资助效益,中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作,通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作,收入《博士后文库》,由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望,借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌,激励博士后研究人员潜心科研,扎实治学,提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年,国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》(国办发〔2015〕87号),将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段,这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信,我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用,促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才,为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

液态碳氢化合物在日常生活、工业生产和科学研究等领域中具有广泛的应用背景,其属于典型具有光谱选择性的半透明液体。液态碳氢化合物的热辐射物性数据在航天、化工、动力和生物等众多领域具有重要的使用价值。例如,液态碳氢化合物的热辐射物性是航空类发动机燃烧室内液态碳氢燃料蒸发、雾化及其燃烧过程的传热计算,新型超燃冲压发动机冷却通道内液态碳氢化合物换热研究的基础热物性参数。获取液态碳氢化合物的热辐射特性是实现液态碳氢化合物类发动机内燃烧状态光学诊断的条件之一,而液态碳氢化合物的热辐射物性数据是计算其热辐射特性的关键参数。令人遗憾的是,国产液态碳氢化合物的热辐射物性数据库尚属空白,我国科研人员在从事相关工作时,只能采用国外类似液态碳氢化合物的热辐射物性数据。

多年来,笔者以获取液态碳氢化合物高温透射光谱和热辐射物性为目标,对液态碳氢化合物透射光谱高温测量的实验技术、光学窗口玻璃和液态碳氢化合物的热辐射物性反演计算模型、典型光学窗口玻璃和液态碳氢化合物的透射光谱特性及其热辐射物性数据进行了大量的实验和仿真研究,并将近年的研究成果和相关数据进行总结。为了便于读者理解,本书附有光热传输仿真算例、液态碳氢化合物热辐射物性反演算例及其透射光谱测量数据,内容充实、新颖、实用。

本书部分成果得到了中国国家自然科学基金青年科学基金项目“太阳能光谱特性作用下内嵌半透明相变材料层玻璃幕墙光热传输特性研究”(编号:51306031)、中国博士后科学基金面上资助项目“油气管道泄漏污染物光谱特征及其地面红外传输机理研究”(编号:2014M560246)、中国国家自然科学基金面上项目“地下输油管道泄漏过程中多相流动及热质耦合传递特性研究”(编号:51274071)等多项科研项目资助。本书在撰写过程中借鉴了众多专家、学者的著作和研究成果,在此笔者一并表示衷心的感谢。

本书得到了2014年度博士后研究人员优秀学术专著出版资助,在此表示感谢。

由于笔者能力有限,难免有不足之处,敬请读者和同行批评指正。

编 后 记

《博士后文库》(以下简称《文库》)是汇集自然科学领域博士后研究人员优秀学术成果的系列丛书。《文库》致力于打造专属于博士后学术创新的旗舰品牌,营造博士后百花齐放的学术氛围,提升博士后优秀成果的学术和社会影响力。

《文库》出版资助工作开展以来,得到了全国博士后管委会办公室、中国博士后科学基金会、中国科学院、科学出版社等有关单位领导的大力支持,众多热心博士后事业的专家学者给予积极的建议,工作人员做了大量艰苦细致的工作。在此,我们一并表示感谢!

《博士后文库》编委会

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 液态碳氢化合物热辐射物性研究背景	1
1.2 液态碳氢化合物的热辐射物性和反演方法	5
1.2.1 热辐射物性	5
1.2.2 液态碳氢化合物热辐射物性反演方法	6
1.3 国内外研究现状	10
1.3.1 液态碳氢化合物热辐射物性研究	10
1.3.2 碳氢化合物高温透射特性测量系统	25
1.3.3 基于透射特性反演热辐射物性的方法	31
1.4 本书的主要内容	33
第 2 章 恒温箱的热环境仿真和光学腔的瞬态加热特性分析	36
2.1 电阻加热式恒温箱的热环境模拟	36
2.1.1 物理模型和数学模型	38
2.1.2 模拟方法和网格校核	41
2.1.3 加热温度的影响	42
2.1.4 加热表面发射率的影响	44
2.1.5 光学窗口玻璃对流换热系数的影响	48
2.1.6 光学窗口玻璃换热温度的影响	50
2.2 氮气加热式恒温箱的热环境仿真	52
2.2.1 物理模型和数学模型	53
2.2.2 模型求解方法和网格验证	55
2.2.3 结果与讨论	56
2.3 光学腔的瞬态加热特性	62
2.3.1 物理模型和数学模型	62
2.3.2 结果与讨论	64
2.4 小结	68

第3章 光学窗口玻璃热辐射物性的测量方法	69
3.1 基于光谱透射比方程简化的双厚度法	69
3.1.1 光学窗口玻璃光谱透射比的正问题模型	69
3.1.2 光学窗口玻璃光学常数的反问题模型	70
3.1.3 透射比方程简化的不利影响分析	71
3.1.4 反问题模型的敏感度分析	74
3.1.5 反问题模型的适用范围	76
3.2 基于透射比方程的双厚度法	86
3.2.1 反问题模型	86
3.2.2 反问题模型的适用范围	87
3.3 一种新的双厚度法	91
3.3.1 双层光学窗口玻璃透射特性的正问题模型	91
3.3.2 反问题模型	92
3.3.3 反问题模型的适用范围	92
3.4 光学窗口玻璃光谱透射比范围的影响	98
3.4.1 光学窗口玻璃高透射比区域	98
3.4.2 光学窗口玻璃低透射比区域	100
3.4.3 光学窗口玻璃弱透射比区域	102
3.5 实验测量值偏差对其反演方法的影响	105
3.5.1 光学窗口玻璃光谱透射比测量偏差的影响	105
3.5.2 光学窗口玻璃厚度测量偏差的影响	109
3.6 小结	112
第4章 液态碳氢化合物热辐射物性的反演方法	114
4.1 填充液态碳氢化合物光学腔光谱透射比计算公式推导	114
4.2 反演液态碳氢化合物光学常数的简化双透射法	116
4.2.1 正问题模型	116
4.2.2 正问题模型简化的影响	117
4.2.3 反问题模型	119
4.2.4 反问题模型的适用范围	120
4.3 反演液态碳氢化合物光学常数的透射比与 KK 结合法	124
4.3.1 反问题模型	124
4.3.2 反演模型的适用范围	127
4.3.3 算例分析	130
4.4 反演液态碳氢化合物光学常数的新双厚度法	131
4.4.1 反问题模型	131

4.4.2 反演方法的适用范围	133
4.4.3 反演模型验证算例分析	143
4.5 小结	146
第5章 液态碳氢化合物高温透射特性测量实验系统	147
5.1 液态碳氢化合物高温透射特性测量实验系统的总体结构	147
5.2 液态碳氢化合物高温透射特性测量实验系统功能与设计	150
5.2.1 液态碳氢化合物供液和预热系统	150
5.2.2 液态碳氢化合物光学腔及光学窗口玻璃	151
5.2.3 液态碳氢化合物加热用光学恒温箱及温度测控系统	154
5.2.4 液态和固态介质透射特性测量系统	157
5.2.5 杂散辐射抑制系统	162
5.3 背景噪声消除方法	164
5.3.1 光电探测器的输出信号分析	164
5.3.2 背景噪声的补偿算法	165
5.4 小结	166
第6章 光学玻璃窗口和液态碳氢化合物热辐射物性反演	167
6.1 石英和蓝宝石光学窗口玻璃的热辐射物性参数	167
6.1.1 石英光学窗口玻璃	167
6.1.2 石英的高温热辐射物性参数	173
6.1.3 蓝宝石光学窗口玻璃	178
6.2 硒化锌光学窗口玻璃的热辐射物性参数	182
6.2.1 硒化锌光学窗口玻璃的常温热辐射物性	182
6.2.2 硒化锌光学窗口玻璃的高温热辐射物性参数	186
6.3 水的光学常数反演及其本书方法验证	191
6.3.1 水的透射光谱	191
6.3.2 水的光学常数	192
6.3.3 水的光学常数测量实验的不确定度	193
6.4 液态碳氢化合物的常温热辐射物性参数	195
6.4.1 RP-3 航空煤油的常温热辐射物性参数	195
6.4.2 普通煤油的常温热辐射物性参数	199
6.4.3 一35# 柴油的常温热辐射物性参数	202
6.4.4 乙醇的常温热辐射物性参数	206
6.5 RP-3 航空煤油的高温热辐射物性参数	209
6.5.1 RP-3 航空煤油的高温透射光谱	209
6.5.2 RP-3 航空煤油的光学常数	210

6.5.3 RP-3 航空煤油的热辐射物性参数	211
6.5.4 RP-3 航空煤油光学常数测量实验的不确定度	212
6.6 小结	213
参考文献	215
编后记	231

第 1 章 绪 论

1.1 液态碳氢化合物热辐射物性研究背景

柴油和汽油等液态碳氢化合物是具有光谱选择性的一类半透明液体,广泛应用于日常生活、工业生产和科学研究等领域。液态碳氢化合物的热辐射物性在航天、化工、动力和生物等众多领域具有重要的应用背景。例如,液态碳氢化合物的热辐射物性是航空类发动机燃烧室内液态碳氢燃料蒸发^[1-5]、雾化^[6-8]及其燃烧^[9-11]过程的传热计算、新型超燃冲压发动机冷却通道内液态碳氢化合物换热研究^[12-14]的基础热物性参数。在研究液态碳氢化合物燃料的各类燃烧热反馈时^[15-17],需要分析火焰对燃料富集区的热辐射情况,而液态碳氢化合物的热辐射物性是模拟该传热过程的基础参数。获取液态碳氢化合物的热辐射特性是实现液态碳氢化合物类发动机内燃烧状态光学诊断的条件之一^[18,19],而液态碳氢化合物的热辐射物性数据是计算其热辐射特性的关键参数。

在航空航天飞行器发动机研制和设计领域,液态碳氢化合物类发动机是目前国家发展的超大型运输飞机、高超音速各类飞行器的核心动力部件,发动机研究人员一直热衷于如何优化液态碳氢化合物发动机的效能,而其中重要的一环是如何对发动机燃烧室进行热控设计。辐射传热是液态碳氢化合物发动机燃烧室内燃料喷入、气化、燃烧过程的重要传热方式,液态碳氢化合物的热辐射物性也是定量研究该燃料动态传热过程的基础热物性参数。令人遗憾的是,因为国产液态碳氢化合物热辐射物性数据库的空白,国内的这类发动机科研人员只好借助国外类似液态碳氢化合物燃料的热辐射物性数据完成辐射传热过程研究,然而我国的液态碳氢化合物燃料成分与国外的差别很大,加之美国、德国和法国等西方国家由于军事保密原因,尚未公开其有关液态碳氢化合物的高温热辐射物性参数,致使我国发动机科研人员进行燃烧室内液态碳氢化合物燃料传热设计时计算精度明显低于西方发达国家。

在军用液态碳氢化合物发动机尾气的目标识别等高新技术领域,各类大型导弹、轰炸机、战斗机和直升机等军用飞行器^[20,21],航空母舰、驱逐舰和护卫舰等军用舰船^[22],以及导弹发射车和坦克等装甲车辆^[23]的发动机在使用过程中,其排气系统经常喷发带有碳氢化合物液滴的尾气,其中排气系统各部分的红外辐射比例如图 1-1 所示。目前,西方国家采用红外激光技术追踪其尾气团,进而锁定军事装备目标。而在大气环境中发动机尾气热气团的热辐射状态,特别是其红外光谱特

征分布是各类预警军事装备进行目标探测和识别的重要依据,也是各类军事装备进行反红外探测设计和研究的关键参数^[24,25]。目前,国内外科研人员主要采用实验测量和仿真计算两种手段来获取液态碳氢化合物发动机排气系统尾气的红外特征分布数据,其中美国、德国和法国等西方国家以模拟为主、实验为辅;由于缺乏国产液态碳氢化合物的热辐射物性数据导致模拟精度过低,我国科研工作者主要通过实验测量来完成数据采集工作,造成成本过大、周期过长和人力投入过多等问题。众所周知,如果清楚地了解发动机排气系统高温尾气中未燃尽碳氢化合物液滴热辐射物性参数,科研工作者就可以通过计算机模拟手段快速得到其热辐射特征分布情况,从而为各类液态碳氢化合物发动机的实验方案优化提供可靠的数据参考。

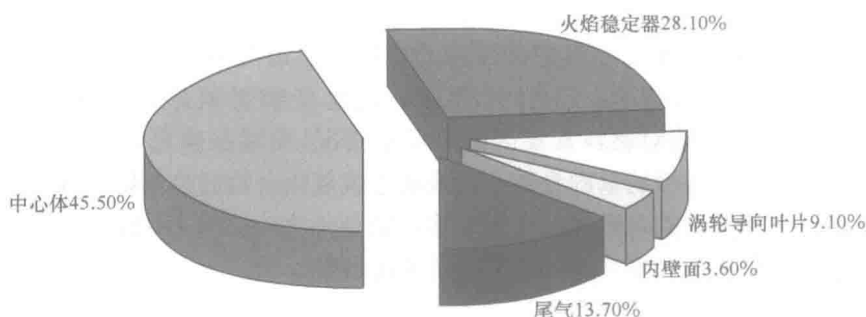


图 1-1 排气系统各部分红外辐射比例^[24]

在液态碳氢化合物的燃烧技术领域,各类液态碳氢化合物在燃烧过程中,其火焰表面通过辐射传热方式会对火焰底部液态碳氢化合物富集区进行大量的热反馈,并且由于火焰中含有未燃尽的碳氢化合物液滴,进一步增加了热反馈强度,增强了火焰底部液态碳氢化合物富集区的加热过程。在计算碳氢化合物液滴和火焰对底部液态碳氢化合物富集区的热反馈时,首先需要明确液态碳氢化合物的热辐射物性数据。令人尴尬的是,在计算液态碳氢化合物的池燃烧表面反射率时,同样由于缺少液态碳氢化合物的热辐射物性数据,我国大量的科研和设计人员只能采用经验值进行计算^[16],甚至在计算液态碳氢化合物的池燃烧热辐射时不考虑火焰中液滴对其传热的影响^[26,27]。

在液态碳氢化合物燃烧的激光诊断技术领域,目前国内外的研究人员均提出了采用激光技术在线探测发动机燃烧室内液态碳氢化合物的燃烧成分和温度的新方法^[28-30]。由于美国、德国和日本等发达国家已建成包含大量液态碳氢化合物热辐射物性的数据库,在开发这类高新技术时已经明显占有主导地位,尤其需要关注的是,日本目前已经着手于激光技术诊断柴油机燃烧状态的验证性工作,图 1-2 所示为日本研究人员的技术验证装置。在应用激光技术测量介质温度时,我国科研

工作者苦于缺乏液态碳氢化合物的热辐射物性数据,仅通过采用国外的同类液态碳氢化合物测量数据完成研究,往往导致激光测试数据误差较大。大量的实验表明,提高激光技术测量介质温度精度的前提条件之一是需要考虑液态碳氢化合物热辐射物性参数与温度和波长的对应关系^[31-33]。

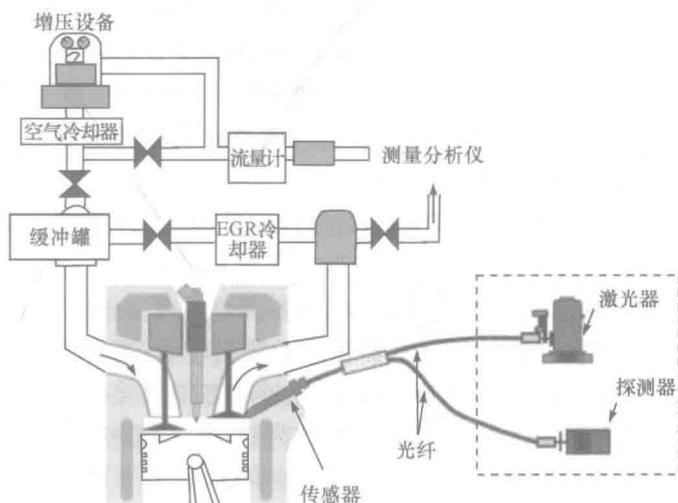


图 1-2 激光诊断柴油机燃烧的技术验证装置^[30]

在高超音速飞行器发动机燃烧室的热防护技术领域,目前有关科研人员提出采用吸热型液态碳氢化合物带走燃烧室壁面热量,从而实现发动机燃烧室的主动热防护,并实现液态碳氢化合物的提前加热^[34-36]。然而,由于高超音速飞行器发动机冷却通道内液态碳氢化合物的温度一般很高,往往超过 600°C ,造成冷却通道内辐射对液态碳氢化合物的传热影响很大。为精确模拟该传热过程,需要已知液态碳氢化合物的热辐射物性数据。但是,由于目前我国液态碳氢化合物热辐射物性数据缺乏,在对高超音速飞行器发动机冷却通道内的液态碳氢化合物传热进行研究时^[37,38],科研人员往往采用国外同类液态碳氢化合物的热辐射物性数据来分析,或直接对传热过程简化处理,不考虑壁面辐射的影响,造成冷却通道内液态碳氢化合物传热计算精度降低,而这种现状对发展应用国产碳氢化合物的高超音速飞行器发动机极其不利。俗话说,“工欲善其事,必先利其器”,为又快又好地发展高性能的高超音速飞行器发动机,实现国产高超音速飞行器的“飞天梦”,建立国产液态碳氢化合物热辐射物性数据库是目前不可缺少的基础性工作。

在液态碳氢化合物污染探测技术领域,基于液态碳氢化合物的光谱辐射特性,国内外许多科研人员和学者展开了中低空大气环境、海洋和湖泊水环境、土壤及其地下水环境的微量碳氢化合物污染物多空间、在线快速探测技术研究^[39-43]。时至今日,为检测飞机尾气中的碳氢化合物污染物,美国等西方发达国家已建立了

HITEMP数据库^[39],并发展了通过分析飞机尾气光谱辐射特性对其污染物监控的手段,而目前由于我国的科研工作者缺乏液态碳氢化合物热辐射物性数据库,相关的技术研究工作进展非常缓慢。

从上述分析可知,液态碳氢化合物的热辐射物性数据在众多高新技术领域具有重要的应用背景,也是进行相关科学研究和设计工作的基础参数。目前,我国尚未建立液态碳氢化合物热辐射物性数据库,导致各相关技术领域的科研工作和技术应用存在“短板”。而与之相对应的是,国外的学者和科研人员为定量研究碳氢化合物的热辐射物性参数,数十年来一直进行碳氢化合物的辐射特性测量手段与热辐射物性参数反演方法等基础性研究工作。美国、德国、加拿大、日本、俄罗斯、英国等发达国家高度重视碳氢化合物辐射特性测量和热辐射物性参数反演研究工作,长期投入大量的人力和财力对其测量实验平台和反演方法进行论证,并完成了大量的实验工作,目前已经获得了较多的研究成果。但是,一直以来西方发达国家对液态碳氢化合物热辐射物性的研究多局限于常温环境,通常认为液态碳氢化合物的热辐射物性受温度的影响很小,所以在分析液态碳氢化合物的高温辐射传热时直接采用常温热辐射物性参数。然而,西方发达国家最新的研究表明,液态碳氢化合物在高温时其热辐射物性参数受温度的影响很大,由于西方发达国家的数据垄断,目前很难发现公开的液态碳氢化合物高温热辐射物性数据。

近年来,美国著名工程院院士 Hanson 等在回顾碳氢化合物辐射特性测量和热辐射物性数据反演工作时指出,今后液态碳氢化合物的辐射特性测量和热辐射物性参数反演研究方向主要包括以下几个方面:①尽管目前碳氢化合物的辐射特性测量和热辐射物性反演方法已取得很大的研究进展,然而仍需要发展更精确和实用的液态碳氢化合物的辐射特性测量手段及热辐射物性参数反演方法;②进一步研究液态碳氢化合物的热辐射物性,并分析其与温度之间的关联关系是今后很长时期的重要工作,重点强调了发展提高液态碳氢化合物辐射特性测量精度的新技术也是目前研究工作的重点之一;③需要分析液态碳氢化合物高温辐射特性测量中光学窗口玻璃的温度不均匀性及其引起的热辐射物性反演误差,进一步强调了目前尚未足够重视在高温条件下液态碳氢化合物自身辐射及其温度分布的非均匀性影响;④发展新的反演算法,进一步完善液态碳氢化合物的热辐射物性反演方法^[44]。由此可见,实验手段是确定液态碳氢化合物辐射特性的关键技术,而发展测量液态碳氢化合物辐射特性的新实验方法,特别是高温辐射特性测量方法具有重要意义。

实际上,液态碳氢化合物高温辐射特性测量及其热辐射物性反演不同于常温液态碳氢化合物和高温气态碳氢化合物。这是由于液态碳氢化合物多为高分子碳氢化合物的混合物,其在高温加热及气化过程中,成分变化复杂,而且在高温时液态碳氢化合物的自身辐射很强,致使高温实验测量中尚存在许多关键技术和科学

问题亟待解决。本书将以上述技术领域应用作为背景,研究高温条件下液态碳氢化合物的辐射特性,重点通过搭建液态碳氢化合物高温辐射特性测量实验平台,进行液态碳氢化合物的高温辐射特性测量和热辐射物性反演研究,获取不同温度下液态碳氢化合物的热辐射物性数据,为早日建成我国液态碳氢化合物热辐射物性数据库提供方法和数据支持。

1.2 液态碳氢化合物的热辐射物性和反演方法

1.2.1 热辐射物性

液态碳氢化合物的热辐射物性参数同其他半透明介质一样,也包括吸收系数和反射率等,而这些热辐射物性参数可由液态碳氢化合物的光学参数(又称为复折射率)计算得出。光学参数主要为吸收指数(又称为衰减系数)和折射指数(又称为折射率)。由于光学和动力工程及工程热物理学科对半透明介质热辐射物性参数和光学参数的表征术语往往不一致,为便于读者阅读,笔者首先对本书中半透明介质的热辐射物性参数和光学参数进行简要介绍。

由经典色散理论可知,半透明介质光学参数的吸收指数和折射率构成了复折射率方程的实部和虚部,其复折射率方程为^[45]

$$m(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \quad (1-1)$$

式中, $m(\lambda)$ 为波长 λ 下半透明介质的复折射率; $k(\lambda)$ 、 $n(\lambda)$ 分别为在波长 λ 时半透明介质的光谱吸收指数和光谱折射率。

通过光谱吸收指数可以计算半透明介质的光谱吸收系数,其计算公式为^[46]

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (1-2)$$

式中, $\alpha(\lambda)$ 为波长 λ 下半透明介质的光谱吸收系数, m^{-1} 。

通过 Fresnel 定律可以计算半透明介质的光谱反射率,其计算公式为^[46]

$$\rho(\lambda) = \frac{[n(\lambda) - 1]^2 + k^2(\lambda)}{[n(\lambda) + 1]^2 + k^2(\lambda)} \quad (1-3)$$

式中, $\rho(\lambda)$ 为波长 λ 下半透明介质的光谱反射率。

半透明介质的光谱吸收率满足^[47]

$$a(\lambda) = 1 - \exp[-\alpha(\lambda)L] \quad (1-4)$$

式中, $a(\lambda)$ 为波长 λ 下半透明介质的光谱吸收率; L 为半透明介质的厚度, m 。

半透明介质的光谱透射率满足^[47]

$$\tau(\lambda) = \exp[-\alpha(\lambda)L] \quad (1-5)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 为波长 λ 下半透明介质的光谱透射率。

根据基尔霍夫定律,半透明介质的光谱发射率满足^[47]

$$\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (1-6)$$

式中, $\epsilon(\lambda)$ 为波长 λ 下介质的光谱发射率。

1.2.2 液态碳氢化合物热辐射物性反演方法

液态碳氢化合物的辐射特性主要包括透射特性、反射特性和吸收特性。透射特性指标为透射比,是指透射能量与入射能量的比值。反射特性指标为反射比,是指反射能量与入射能量的比值。吸收特性指标为吸收比,是指吸收能量与入射能量的比值。反演液态碳氢化合物的热辐射物性参数时,一般常采用的为透射比和反射比。

1. 基于透射特性的反演方法

通过实验获取液态碳氢化合物的透射比,再反演其热辐射物性参数,是目前常用的一种方法,其测试原理如图 1-3 所示。该方法主要由单厚度透射比反演法(下文简称为单厚度法)和双厚度透射比反演法(下文简称为双厚度法)组成。

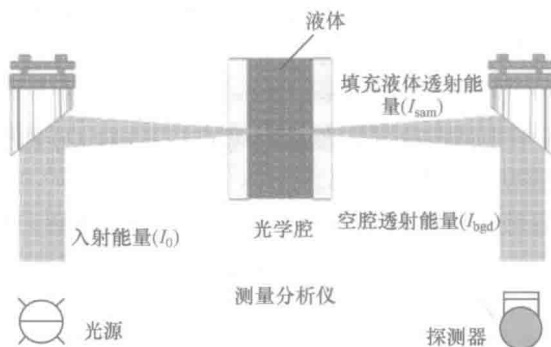


图 1-3 透射法测量原理示意图

1) 单厚度法

单厚度法发展历史悠久,目前仍为广泛应用的一种方法。根据利用其透射比反演方法的差别,单厚度法主要分为直接求解吸收系数法、透射比与色散关系式结合法、透射比与 Kramers-Kronig(KK)关系式结合法等。

(1) 直接求解吸收系数法。直接求解吸收系数法主要是基于透射比与吸收系数之间的关系进行求解的,在 20 世纪 70 年代初期应用较多^[48]。直接求解吸收系数法的测量和反演过程如下所述。