

燃烧实验诊断学

汪亮 编著

RANSHAOSHIYANZHENDUANXUE



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

燃烧实验诊断学

汪 亮 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书较系统地介绍了有代表性的燃烧实验诊断技术,并以光谱法为重点,着重讲述了它们的工作原理、测量方法、实验装置和应用举例,为读者了解与应用这些诊断技术提供了必需的基本知识。

本书共9章,内容涉及激光诱导荧光法、相干反斯托克斯拉曼光谱法、简并四波混合法、原子谐振吸收光谱法、X射线实时荧屏高速动态分析法和超声波法等,还介绍了相位多普勒粒子分析仪、激波管技术以及燃速与燃烧声导纳测量等。

本书可作为工程热物理、热能动力、航空宇航推进理论与工程等专业的本科生与研究生教材或参考书,亦可供相关专业的科研和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃烧实验诊断学/汪亮编著. —北京:国防工业出版社,2005.5

ISBN 7-118-03819-9

I. 燃... II. 汪... III. ①航空发动机燃烧—试验—诊断技术②航天器—燃烧—发动机试验—诊断技术
IV. ①V231.2②V433.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 014181 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 295 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

不断地了解与控制燃烧过程是人类长期追求的目标之一。如今,在多种工程领域,仍有许多与燃烧相关的专门课题有待研究解决。而为了合理设计燃烧系统并实现过程优化与实时监控或进行燃烧器缩比实验等,也需开展燃烧研究。为此,除了理论分析和数值模拟,还要通过实验诊断提供诸如温度、浓度、火焰结构显示等反映燃烧系统工作进程的各种信息。正因为如此,燃烧实验诊断技术的发展与应用一直受到国内外有关研究人员的关注。相应地,高等学校有关专业开设燃烧实验诊断学课程十分必要。

随着在分子水平上对燃烧过程的不断了解以及光电测试等技术的迅速发展,在已有的一些燃烧实验诊断技术尚需进一步发展完善的同时,另一些更新的技术又应运而生。迄今,燃烧实验诊断学已覆盖了不同的学科领域,有相当一些诊断技术仍处于研究开发阶段,需要训练有素的专门人才去掌握。本教材编写的思路是既突出重点,着重介绍燃烧实验诊断领域发展最迅速的各种光谱法;又照顾一般,让读者有较全面的了解。通过阐述基本原理、介绍概况、讨论现状,一方面为本科生、研究生了解与应用燃烧实验诊断技术提供所必需的基本知识;另一方面又为已熟悉某种领域诊断技术的科技人员应用或移植、改进其它燃烧领域行之有效的技术来满足本领域研究的需要打下基础。

从1984年至今,笔者在西北工业大学航天学院为研究生讲授燃烧实验诊断学课程。最初仅有讲稿,后来编有讲义。在此基础上,经过修订和补充,成为本书。内容主要取自国内外有关专著与文献,有些则是笔者在德国当访问学者或在国内研究中的心得,也有些是在筹建笔者所在国防科技重点实验室时进行系统调研及实验室建成后仪器设备运行中收集、积累的。但限于水平,在本书内容取舍、编排和观点阐述等方面的缺点与错误在所难免,恳请同行、专家和读者批评赐教,在此预致谢意。

在本书的编著过程中,承蒙西北工业大学航天学院何洪庆教授的审稿,教务处郭金香、李辉和万小鹏老师的关心,还有笔者夫人虞静芬始终如一的理解、支持与关爱,在此一并表示衷心的感谢。最后笔者还要特别感谢国防工业出版社杜钧编辑为本书出版所付出的辛勤劳动。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 燃烧实验诊断的重要性	1
1.2 实验诊断技术简介	2
1.2.1 分类	2
1.2.2 电磁波	4
1.2.3 激光器	5
1.2.4 燃烧温度与组分浓度测量	5
1.2.5 速度测量	7
1.2.6 粒子测量	7
1.2.7 流场显示技术	8
1.3 本书梗概	9
习题	10
第 2 章 激光多普勒测速仪(LDV)	11
2.1 LDV 概述	11
2.2 基本概念与测量原理	12
2.2.1 粒子光散射	12
2.2.2 激光多普勒效应	15
2.2.3 双光束光路的条纹模型与基本参数	17
2.2.4 光外差检测	19
2.3 光学器件	24
2.3.1 LDV 用激光器	24
2.3.2 光纤及其耦合	28
2.3.3 LDV 的光学通路	29
2.4 散射粒子及其撒播	33
2.5 光学频移	35
2.6 其它类型的 LDV	36
2.6.1 多点测量用 LDV ^[17]	36
2.6.2 激光双焦点测速仪(L2FV) ^[18]	37
2.6.3 采用光致电动势检测器的激光多普勒测速仪	38
习题	39
第 3 章 相位多普勒粒子分析仪(PDPA)	40

3.1	两相流的测量参数	40
3.1.1	概述	40
3.1.2	流量与浓度测量 ^[15]	42
3.2	PDPA 测量粒子尺寸的原理	44
3.2.1	几何光学的应用	45
3.2.2	PDPA 的光路配置	48
3.2.3	PD 法测量原理 ^[22]	49
3.2.4	PD 法标定曲线的计算 ^[15]	50
3.3	PDPA 光路参数的选择与光路调节	51
3.3.1	光路参数选择	51
3.3.2	光路调节	52
3.4	PDPA 的信号处理	52
3.4.1	接收光学	52
3.4.2	信号处理方法	53
3.4.3	实时信号分析仪(RSA) ^[24]	57
3.4.4	参数设置	60
3.5	PDPA 应用中的几个问题	61
3.5.1	测量体内粒子运动轨迹的影响	61
3.5.2	粒子数密度的影响 ^[25]	66
3.5.3	粒子形状的影响	66
3.5.4	数密度与容积流量测量	68
	习题	68
第4章	拉曼光谱法	70
4.1	拉曼散射与分子光谱	70
4.1.1	拉曼散射概述	70
4.1.2	分子光谱	70
4.2	线性(自发)激光拉曼散射(LRS)	73
4.2.1	测量原理	73
4.2.2	实验装置举例	74
4.3	转动拉曼光谱	75
4.4	增强型拉曼散射	77
4.4.1	概述	77
4.4.2	斯托克斯拉曼法测温度与浓度	77
4.4.3	反向拉曼散射法测温度	78
	习题	81
第5章	激光诱导荧光(LIF)法	82
5.1	LIF 法概述	82
5.2	LIF 法原理	84
5.2.1	分子状态间的能量传输	84

5.2.2	速率方程分析 ^[41]	85
5.2.3	浓度测量用方程	86
5.2.4	温度测量用方程	88
5.3	测量方法	89
5.3.1	组分成像	89
5.3.2	温度成像	91
5.3.3	速度成像	93
5.4	光学布置与实验装置	95
5.4.1	光学布置	95
5.4.2	实验装置	95
5.5	应用举例	96
5.5.1	由浓度测量研究热解机理	96
5.5.2	高压燃烧器中 OH 的 PLIF 成像	97
5.5.3	激波风洞喷管流中的温度测量	99
	习题	100
第 6 章	相干反斯托克斯拉曼光谱 (CARS) 和简并四波混合 (DFWM) 法	101
6.1	相干光的概念与特性 ^[46]	101
6.2	光散射与三阶非线性极化率	104
6.3	CARS 法 ^[47]	105
6.3.1	简介	105
6.3.2	温度与组分浓度测量	110
6.3.3	实验装置	113
6.3.4	多色 CARS 技术	115
6.4	DFWM 法 ^[52]	119
6.4.1	基本原理	119
6.4.2	实验方法	122
	习题	125
第 7 章	激波管与光学发射-吸收法	126
7.1	激波管	126
7.1.1	激波管技术的主要特点	126
7.1.2	气体驱动激波管	127
7.1.3	激波管的工程计算方法	130
7.2	光学发射与吸收法	134
7.2.1	测温度	135
7.2.2	测组分浓度	138
7.3	应用举例	141
7.3.1	研究点火性能	141
7.3.2	进行动力学测量	143
	习题	146

第 8 章 固体火箭发动机的燃烧实验诊断法	147
8.1 燃速测量	147
8.1.1 X 射线实时荧屏高速动态分析法	147
8.1.2 超声波法	151
8.2 燃烧表面声导纳的测量	161
8.2.1 不稳定燃烧分类与声学不稳定燃烧的特点	161
8.2.2 基本概念	162
8.2.3 理论分析	165
8.2.4 实验测量与数据处理方法	167
习题	174
第 9 章 其它实验诊断方法	175
9.1 探针法	175
9.1.1 各类探针简介	175
9.1.2 探针测量误差	179
9.2 普通摄影(摄像)法	180
9.3 纹影法	181
9.3.1 普通纹影法	182
9.3.2 激光纹影法	183
9.4 全息摄影法	183
9.5 电子能谱法	187
9.5.1 扫描电子显微镜(SEM)	187
9.5.2 燃烧诊断用的电子能谱 ^[69]	191
习题	191
参考文献	192
附录 英文缩写词汇	197

第 1 章 绪 论

1.1 燃烧实验诊断的重要性

能源是国民经济的基础。而在今后相当长的时间内化石燃料的燃烧仍是获取动力的主要途径来源。因此,不断地了解与控制燃烧过程是人类长期追求的目标之一。近来,除了要求节能和进一步提高燃烧效率外,还提出了一系列新课题,如污染控制、火焰安全、以煤代油、研制合成燃料和超高密度燃料、寻找清洁高效的新型能源(如开采利用天然气水合物)、实现可控的核聚变反应(所谓人造太阳)、用燃烧合成先进材料以及其它许多与各类热力发动机或反作用式发动机燃烧有关的专门课题。例如,为合理设计燃烧系统并实现过程优化与实时监控或燃烧器缩比实验,需进一步了解化学反应、流体力学、传热和其它物理现象间复杂的相互作用。目前计算流体力学虽已取得进展,开发有预估实际燃烧系统流动与传热特性的大型三维软件,但要真正解决工程中遇到的实际问题,尚需进行二次开发。至于要实现计算机辅助燃烧实验,更有许多工作要做。而理论模拟要发展,还需通过实验不断提供新的全方位信息。正因如此,燃烧实验诊断技术的发展与应用一直受到国内外有关研究人员的关注。

燃烧诊断的任务是采集能反映燃烧系统工作进程的各种信息,主要有各燃烧反应区的压强、温度、速度、浓度及其随空间与时间的分布,火焰峰的位置与传播速度,火焰结构与反应流场的显示,粒子尺寸分布,固体燃料燃烧表面与亚表面状况及其化学结构,排放物的温度分布、组分浓度与信号特征等。而实际燃烧过程的多样性与复杂性使燃烧实验诊断十分困难。以最简单的烃燃料和空气的反应动力学为例,至少包含 30 多种组分和 100 多种基元反应,且在不同燃烧条件下特点各异。要分析湍流反应流,除了要了解湍流本身的传输特性以及动力学参数和湍流对火焰结构的影响外,还需测量经常伴随的湍流旋涡流和湍流两相流数据。至于内燃机、喷气发动机和火箭发动机燃烧室内工作过程的实验诊断则更为复杂。

直至 20 世纪 60 年代初,测量气相燃烧系统的主要手段一直是插入式探针。探针法简单、经济、便于使用,但对火焰的扰动以及恶劣的测试环境限制了探针的精度与应用范围。相比之下,光谱法有许多优点,例如,可非接触式测量以减小或避免气动、热或化学扰动,能承受高温和恶劣环境等。激光的发明,在分子水平上对过程的不断了解以及光电测试与数据图象处理技术的发展与应用,为燃烧实验诊断学开创了新局面。各种光谱法实验诊断技术不仅为反应流提供了瞬时流动与热力学性质,并具有必要的时间与空间分辨率。特别是速度、温度与组分浓度的同时测量可直接确定能量和组分浓度守恒方程的相关项。因此,光谱法是本教材介绍的重点。当然,这些新技术同样也有局限性,主要是需

要光学通路,因为观察窗、背景照明、激光诱导效应和激光杂散散射等的干扰有时难以避免。例如为穿过稠密的燃烧区常用强激光。而强激光会使介质受热,诱发受激拉曼散射、光分解和光磁裂效应。为此要精心设计光路结构,采用空间滤波,选用合适的激光波长和光路接收系统等。不言而喻,燃烧实验诊断技术还有待进一步完善与发展。

1.2 实验诊断技术简介

为了对燃烧实验诊断方法有个概括的了解,本节先从分类谈起。又考虑到现代诊断技术同电磁波与激光器密切相关,对这两个问题也一并介绍。最后再简单介绍获取不同燃烧信息的诊断方法。至于与特殊应用有关的如固体火箭推进剂燃速和燃烧表面声导纳的测量方法,则见其它有关章节,本章不提及。

1.2.1 分类

通常,燃烧实验诊断方法可按诊断原理、实验方法、采集信息以及探测手段等的不同来进行分类(表 1.1)。当然,这种分类不是绝对的。例如,激光多普勒测速仪(LDV)和相位多普勒粒子分析仪(PDPA)都是干涉仪,因而它们也可归入干涉量度法。与此相仿,纹影、阴影或全息摄影则可归入摄影法。再如,表 1.1 中前几种诊断方法大多是从测试原理来区分的,而后几种则为了结合实际应用,以测试对象来划分了。但不管怎样,表 1.1 从一个侧面反映了与燃烧实验研究有关的有代表性的诊断方法,其中大部分也是本教材要介绍的主要内容。

表 1.1 燃烧实验诊断法

分 类	方法或仪器设备名称		应用举例
探针法	热电偶温度探针	无屏蔽式	测温度
		吸入式	
	气动式双声速孔温度探针		
	气动式速度探针	两孔皮托管	测速度
		五孔皮托管	
	气体取样探针	金属或石英探针	采集试样
分子束探针			
两相取样探针			
普通摄影 (摄像)法	高速摄影(摄像)		流场与火焰结构显示,粒子尺寸与速度测量等
	电影显微摄影		
	干涉法		测气体密度
	纹影法		测密度梯度
	阴影法		测密度的二阶导数

(续)

分 类	方法或仪器设备名称		应用举例	
干涉量度法	全息摄影	单脉冲激光全息摄影	流场显示, 燃烧波与激波传播, 粒子尺寸与速度测量等	
		双(或多)脉冲激光全息摄影		
		高速实时全息干涉摄影		
		双参考光全息摄影		
		反射光全息摄影		
光谱法	光学发射与吸收	辐射计法	谱线反转法	测气体温度
			辐射吸收法	
			色温法	
		分光辐射计法	绝对强度法	
			相对强度法	
	原子谐振吸收光谱法	测组分浓度		
	光散射	见表 1.2		测组分相对浓度
质谱法		测组分相对浓度		
电子能谱法	俄歇电子能谱		测材料表面的化学成分等	
	X 射线光电子能谱			
粒子尺寸分析法	显微镜	光学显微镜	为粒子阻尼与喷管两相流损失等的数值计算提供数据	
		电子显微镜		扫描式
	马尔文粒子分析仪			
	单粒子计数器			
燃速测量法	稳态燃速	稳压式燃速仪	主要用于固体火箭推进剂	
		密闭弹		
		声发射		
	非稳态燃速	微波法		
		超声波法		
X 射线实时荧屏高速动态分析法				
燃烧导纳测量法	压力耦合响应	T 型燃烧器	主要用于固体火箭发动机不稳定燃烧的实验研究	
		旋转阀		
	速度耦合响应	阻抗管		
	测量发动机响应的调制喉部发动机			

随着现代实验技术与光电仪器设备的迅速发展, 各种新的诊断方法层出不穷。总的特点如下:

(1) 许多种诊断方法已逐步发展为商品仪器并成为常规测试手段了, 但还有不少诊断

法仍停留在单纯作为研究手段的阶段,需要训练有素的专门人才去开发应用。

(2)每种诊断方法都有各自的优点、缺点及其局限性,因此不同诊断方法的相互渗透和联合使用是发展趋势。也就是说,尽可能同时使用两种或两种以上方法对同一探测区域进行测试。

(3)要根据具体的研究对象,充分发挥各种测试方法的特点加以灵活运用。还要强调指出,每一新的应用常会提出它所特有的问题,故往往不是一般的例行测量,而是一项艰巨的研究工作。

1.2.2 电磁波

电磁波谱包括波长从毫米的极小分数(10^{-13} cm)到很多米($>10^4$ cm)之间的多种波。根据产生、分离及探测这些辐射所采用的方法不同,可把整个波谱分成很多不太严格的波段(或谱区,见图 1.1^[8])。随波长递增依次有宇宙射线,原子射线, γ 射线,X射线,紫外线(该区波长 $\lambda \approx 140\text{nm} \sim 360\text{nm}$,相应地从远紫外也称真空紫外过渡到近紫外),可见光(从紫到红, $\lambda \approx 360\text{nm} \sim 780\text{nm}$),红外线(从近红外到远红外, $\lambda \approx 0.78\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$),雷达波,微波(通常 $\lambda < 10\text{cm}$),电视波,无线电波(超短波、短波、中波、长波)。其中,许多波段都可用于组分的温度与浓度测量。当然,不同参考文献,划分各谱区的波长范围会略有差异。

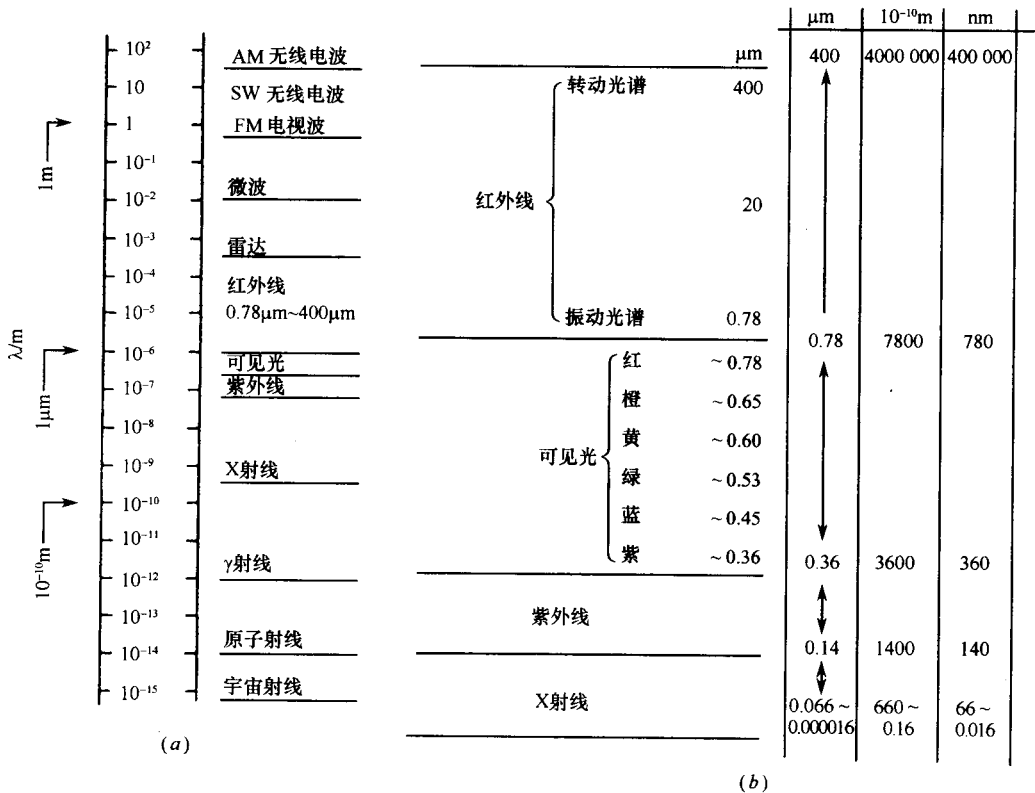


图 1.1 电磁波

1.2.3 激光器

鉴于现代实验诊断技术离不开激光器,这里先从激光器谈起。由于激光具有单色、相干、定向、高能量密度和线性偏振等特性,它在非接触式燃烧实验诊断中得到了广泛的应用。例如氩—氟和氩离子(Ar^+)连续波激光器常用于流场诊断,特别是速度测量。二氧化碳远红外激光器用于燃料或推进剂点火研究。需瞬时高功率的场合,则用可调谐的脉冲激光器,以产生可见与紫外线波段的光辐射,如红宝石激光器。目前最常用的是掺钕钇铝石榴石($\text{Nd}:\text{YAG}$)激光器和有机染料激光器。而激态激光器有较高的能量和重复率。以波长 $\lambda=308\text{nm}$ 的 XeCl 激态激光器为例,因其脉冲重复率的灵活性(从每秒单个脉冲直到几百脉冲)并适于泵浦染料激光器,从发展看可代替 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器(重复率固定为 $10\text{Hz}\sim 20\text{Hz}$)。铜蒸气激光器因其几千 Hz 的特征重复率,在诊断学中可用于光屏照明。此外,小尺寸、低能耗、高可靠和廉价的半导体激光二极管和雪崩光电二极管的发展为微型激光测速仪的开发应用创造了条件。以往因受信号强度和监测仪器灵敏度的限制,激光诊断技术大多限于空间局部点的测量。现在,强激光散射和微光检测技术的结合使这种技术更多地用于二维场测量。

激光器的选择取决于待测特性和燃烧环境的尺寸与类型。正是这些因素决定了激光源的功率、波长以及对激光直径、准直性、稳定性和偏振性的要求。具体选择时,还要考虑测量所需的时间与空间分辨力。对瞬态过程,可选用 Q 开关激光器(几 ns 的闪光持续时间),有时用简单的脉冲固态激光器(脉冲持续时间 ms 级)亦可。而对稳定的燃烧过程,可用连续波(通常为气体)激光器。空间分辨力则与辐射波长有关。一般说,波长越小,分辨力越高。

为比较激光诊断技术的光路结构,所接收的信号强度 I_s 可统一表示为

$$I_s = KI_0 l \Omega (d\sigma/d\Omega) n_i$$

式中 I_0 为照射激光强度; l 为接收光学在立体角 Ω 内所观测的激光长度; n_i 为散射粒子或分子的数密度; $(d\sigma/d\Omega)$ 为微分散射横截面(cm^2/sr , sr 为立体角); K 为标定常数。因此,同样实验条件下散射横截面直接反映了所接收信号的强弱。通常,浓度信息与散射强度有关;温度则取决于谱分布,即强度随频率的变化。

1.2.4 燃烧温度与组分浓度测量

为测量燃烧产物的温度与组分浓度,本教材主要阐述各种光散射法,同时还介绍了激光管与光学发射—吸收法。这里仅对光散射法作一概述。

由分子和粒子(如尘、烟)组成的气体试样处于频率分别为 ν_0 与 ν_r 的振动态与转动态。能量为 $h\nu_0$ (h 为普朗克常数)的激光照射试样时,不考虑光吸收,散射光可按发射频率分类。而各种光散射测量法可用表1.2概括之。表中 ν_0 和 λ 分别为入射光的频率和波长; d 和 ν_s 分别为粒子或分子的直径和散射光频率。

表1.2中,若入射光子和靶分子或粒子之间无能量交换,散射光相对初始入射频率 ν_0 无频移,此过程称为一阶弹性散射过程。它们包括米氏(Mie)散射和瑞利(Rayleigh)散射。

表 1.2 光散射测量法

分 类	名 称	特 点			应 用
		散射介质	散射光频率	微分横截面	
一阶弹性 散射过程	米氏散射	粒子 $d \approx \lambda$	无频移 $\nu_s = \nu_0$	$d\sigma/d\Omega = 10^{-7} \sim 10^{-13}$	LDV 和 PDPA 的基本效应, 测瞬时速度、密度和混合物分数
	瑞利散射	分子 $d \ll \lambda$	无频移 $\nu_s = \nu_0$	10^{-27}	总密度测量, 等压下测量温度
一阶非弹性 散射过程	自发拉曼 散射	分子 $d \ll \lambda$	$\nu_R = \nu_0 \pm \Delta\nu$	$10^{-30} \sim 10^{-31}$	测量 CO_2 、 O_2 、 CO 、 N_2 、 CH_4 、 H_2O 、 H_2 等主要组分质量分数以及温度
	激光诱导 荧光(LIF)	分子 $\lambda > 190\text{nm}$	$\nu_F \leq \nu_0$	$10^{-19} \sim 10^{-24}$	测量 NO 和 OH 之类 10^{-6} 量级的活性组分
二阶非线性 散射过程	相干反斯托克斯 拉曼散射 (CARS)				测量主要组分
	简并四波混合 (DFWM)技术				监测碰撞跃迁所形成的低浓度受激原子及跃迁组分
	受激拉曼散射 (SRS) 反向拉 曼散射 (IRS)				

粒子与分子尺寸(d)和光波长(λ)相当时,即产生米氏散射。这是构成激光测速和粒子尺寸分析的基本效应。在快速化学反应和刘易斯(Lewis)数 $Le(=a/D, \text{即热扩散系数和扩散系数之比})$ 为 1 的假设下,米氏散射还可提供瞬时密度和混合物分数的信息。瑞利散射相应于 $d \ll \lambda$ 的情况,既然无频移,所有气体组分的瑞利散射都落到与入射光同样的光谱区,故常用于总密度测量而不能用来区分单个的气体组分。等压下借助气体定律,用瑞利散射可测量温度,也可辨别散射的多普勒谱线宽度或者和激光测速仪组合使用。简单烃燃料的燃烧实验中,从反应物转化为产物,瑞利横截面的变化一般为 10% 的量级。

另一方面,光子和分子间的一阶非弹性作用则引起频移过程,产生自发拉曼(Raman)散射和激光诱导荧光(LIF)。顺便指出拉曼散射和荧光之间的区别。在荧光中,体系首先吸收一个量子 $h\nu$,然后再发射一个量子 $h\nu_F$ (ν_F 为荧光频率),所以入射必须是吸收光频率。在拉曼散射中,入射光可以为任何频率。这时视入射光量子与分子间发生的能量交换性质而定,分别称为转动、振动或电子拉曼散射。它们基本上是瞬时的,发生于 10^{-12} s (或更短)的时间内。拉曼散射已用于 CO_2 、 O_2 、 CO 、 N_2 、 CH_4 、 H_2O 和 H_2 等主要组分质量分数以及温度的测量,但要用强的激光器,因为火焰中收集的拉曼信号与激光能量的比值仅为 10^{-14} 的量级。LIF 是由于光吸收,两离散能态间发生谐振,原子或分子从低能级跃迁到高能级后所产生的自发光发射,即所谓荧光,其生存时间为 10^{-10} s \sim 10^{-5} s。这时需用输出频率可调的激光器,因其信号强度大,并可测 NO 和 OH 之类 10^{-6} 量级的活性组分,已成为化学动力学和火焰结构研究的重要工具。为避免可能的粒子米氏散射或寄生的激光散射干扰,荧光发射波长可偏离入射光,但仅在所测分子有激光源可达到的吸收波长,也即 $\lambda > 190\text{nm}$ 时才能应用此法。若激光束扩展成光屏后通过测量气体,即可形成

平面激光诱导荧光(PLIF),然后成像到 2D 光电检测器。

上述几种散射技术均为一阶散射过程,一旦信号被辐射到 $4\pi\text{sr}$ 后彼此不相干。反之,三阶非线性散射过程是相干的。相干过程要求视线光学通路,涉及波混合过程和光束间的相互作用,特点是信号强度增强并有优良的信噪比(SNR)。燃烧诊断领域,相干法主要包括相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)和简并四波混合(DFWM)技术。近年来 CARS 法颇受重视,其信号通常较自发拉曼散射强几个数量级,且 0.5%~30% 范围的浓度测量可基于谱特性而非绝对信号强度,故可用于实际燃烧系统。其时,一个固定频率(ν_p)的激光器产生泵浦光束,另一个可调频率(ν_s)的激光器产生斯托克斯光束,两者被聚焦到测量点。调节(ν_s),通过三阶非线性电极化效应即可控制它们同被测气体的相互作用,产生频率为(ν_A)的相干反斯托克斯拉曼光束,并由谱型推知温度,由信号强度确定主要组分浓度。此外,多色 CARS 法可同时测量一种以上的组分。但当消光与折射显著影响信号大小时,CARS 法无法应用。至于简并四波混合法,频率为 ν 的三束光在非线性介质中相互作用,当 ν 和许可的电子跃迁(本质上为待测组分的吸收谱)一致时即产生 DFWM 信号的谐振增强,产生第四束频率也为 ν 的辐射信号。这时使用窄带宽激光器产生无多普勒信号,以提高光谱仪的分辨力。这种方法可用来检测碰撞跃迁所形成的低浓度受激原子,还可检测跃迁组分。一般认为,在较高压力与实际发动机应用中,与 LIF 法相比,DFWM 法是更好的选择方案。

1.2.5 速度测量

要确定流场就要测量流体的速度分布。由此得出的流线可揭示环流与逆流区以及加速与减速区。流谱信息还可帮助设计人员了解侵蚀和粒子沉积的位置,评定结构形状尺寸变化所带来的影响。湍流信息更与速度测量密切相关,因知道了速度就可进一步确定湍流强度、剪应力和湍流动能,还可导出湍流长度和漩涡尺寸。定向测量正被用于鉴别相干结构和周期性现象。为测速度,作为空间点测量,目前主要用激光多普勒测速仪(LDV);作为 2D 平面速度场测量,则常用粒子成像速度场仪(PIV)。后者通过测量照明屏平面上单个粒子图像的位移,可得到燃烧系统二维平面的速度场。前者(LDV)常用双光束差动多普勒系统。两等强度的激光束聚焦相交形成控制体并产生明、暗交替的干涉条纹。凝聚相(固、液相)运动粒子穿过这些条纹时,散射光强度的周期性变化产生多普勒波系,所测频率即与信号波束平面上粒子的瞬时速度分量成正比。为反映流体速度,示踪粒子必须足够小。例如索特(Sauter)平均直径约 $1\mu\text{m}$ 的氧化铝粒子可跟随 5kHz 的湍流脉动。在折射率梯度随空间与时间变化大的场合,例如激光通过尺寸大于 300mm 的火焰时,信号质量会衰减。又在油与煤焰中,因粒子(液滴与烟粒)浓度过高,光学测量常难以进行。迄今,LDV 在集成化、光纤化、智能化和精确化方面已取得很大进展。今后要开发利用半导体材料,例如,若用激光二极管和雪崩光电二极管分别代替目前所用的气体激光器和光电检测器,则 LDV 有望实现小型化。而激光散斑测速仪(LSV)和 PIV 一样,也属全场测速技术。它是利用流体中粒子散射光产生的远场散斑谱的运动来导出粒子速度,因要求高密度的散射率,LSV 在燃烧流中的应用有限。

1.2.6 粒子测量

凝聚相粒子的速度、尺寸、数密度、质量流量及轨迹等信息对预估燃烧效率与喷管效

率以及控制污染等起着十分重要的作用。测量粒子尺寸的非接触光学法可分为以下3类。

(1) 成像法——用摄影或摄像(包括全息摄影)并借助短时间脉冲“冻结”两相流图像,可测量大于 $5\mu\text{m}$ 的粒子尺寸。此外,根据粒子尺寸范围的不同,还可选择不同类型的显微镜来进行测量,如光学显微镜(OM)或扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)。通常认为,OM与TEM的组合,可分析燃烧诊断领域所感兴趣的全部粒子尺寸。

以光学显微镜为例,测得的尺寸数据可靠,并可用作其它测试方法的基准,但测量费时。为保证承物片上的试样能反映待测样品的尺寸分布,测量前常要做好下述准备工作^[9]:

①混合:由重复实验得到的试样,必须彻底混合,使整个试样的尺寸分布均匀。

②细分:先去除粗粒子(例如直径 $d > 43\mu\text{m}$,对不可溶粒子,可用湿筛法),再去掉细粒子($d < 2\mu\text{m}$,即光学显微镜的尺寸范围下限)。必要时,用重力或离心沉积法对剩下的($d \approx 2\mu\text{m} \sim 43\mu\text{m}$)试样进行附加的细分。

③试样的弥散与安放:要求把有代表性的试样放到支承上,并要求有最小的聚集与尺寸分离。对透射电子显微镜来说,试样支承为直径3mm的圆形铜格栅。格栅必须涂以对电子有高度透明度的薄膜(20nm的碳膜)。为安放粒子,小滴悬浮液沉积在膜上,并使其干燥。这时同样要求有足够数量的粒子在碳膜上良好地弥散。

(2) 积分法——例如常见的马尔文(Malvern)粒子分析仪所用的夫琅禾费(Fraunhofer)衍射谱法,考察粒子尺寸分布和散射光强度空间分布间的关系。测量范围约为 $1\mu\text{m} \sim 1800\mu\text{m}$ 。这时激光扩束后照射被测的粒子场并被接收透镜接收。检测屏则位于透镜的焦面处。因而非衍射光聚焦在中心点上,衍射光则在該点周围形成环形谱(粒子运动并不引起衍射谱运动)。不同环的光强度提供了粒子尺寸信息。一般,检测器标定误差和透镜效应等可导致15%的偏差。

(3) 单粒子计数器法——给定时间内分析穿过一定测量容积的单个粒子。这时,尺寸分布与粒子浓度关系很大。具体测量时可找出粒子尺寸与下述某一参数间的依从关系。如①白光源 90° 散射光强度,主要用来测量直径 $10\mu\text{m}$ 以下浓度直到 10^5cm^{-3} 的气悬液粒子;②双色激光的信号强度,测量范围 $0.2\mu\text{m} \sim 200\mu\text{m}$;③空间不同位置散射光强度比,适于 $< 4\mu\text{m}$ 的小尺寸粒子;以及④基座脉冲强度等。这些技术易于实现,并可用来测量非球形粒子的尺寸,例如分析粉煤焰等。

对球形粒子,为求得尺寸信息,可由空间不同点的两个检测器分别测量同一粒子的相位差,此即所谓相位多普勒粒子分析仪(PDPA)。它可同时测量粒子速度与尺寸分布,且对轨迹含糊性和流动浑浊性不很敏感,因此日益受到研究人员的重视。用3个光电检测器可进一步避免含糊性并拓宽尺寸测量范围。PDPA还可延伸来测量浓度与质量流量。

1.2.7 流场显示技术

反应流场的显示技术包括直接摄像(或摄影)以及干涉、纹影、阴影与激光全息等。纹、阴影技术易显示温度与密度一、二阶导数的分布谱。近来用高速激光纹影可分析气缸内不稳定旋涡焰。而彩色纹影提供了必要的梯度响应灵敏度,同时可检测周围气体中流

体的运动。全息摄影主要用于火焰结构显示,记录火焰形成与传播,测定粒子尺寸与速度等。

前述技术基于可见光,实验装置上需开透明的观察窗,致使有的实验无法进行(例如六氟化硫气体在金属锂液中的射流燃烧。这种推进剂在燃烧过程中仅产生凝聚相产物,可用于密闭式锅炉反应器);有的即使能进行,也难免带来边界条件不连续和入射光散焦、转向等干扰。X射线摄像,结合实时荧屏高速动态分析系统则另辟蹊径,例如可在固体火箭发动机的实际工作过程中实时地进行内视研究,了解固体火箭推进剂的侵蚀燃烧特性和燃速畸变,裂缝与脱粘扩展,阻燃层动态撕裂,翼槽火焰传播,燃烧室与喷管流场中粒子运动规律,热防护材料烧蚀,潜人喷管背壁熔渣沉积以及脉冲发动机二次点火等,从而成为实验诊断的重要手段。

为提高复杂三维反应流中光谱的分辨率,拓宽流场显示技术的应用范围,可采用光屏照明技术。为此利用柱面透镜,圆柱形反射镜或旋转镜来扩展光束。光屏典型厚度 $50\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$,常用铜蒸气之类脉冲激光器,并用多通道元件以在所测过程的特征时间内提供足够的信号。信号光被垂直收集,借助透镜与滤光镜的组合,聚焦到二维检测器上(光电二极管,光导摄像管,CCD等),摄像机与脉冲激光器同步。与单点法相比,这种二维测量通过平面成像可提供有时间分辨力的空间相关性、特征长度、旋涡和火焰等额外的信息,在燃烧实验诊断中占有越来越重要的地位。

1.3 本书梗概

本教材着重讲述基于光谱法的燃烧实验诊断学。全书分下述9章:

第1章为绪论,主要阐述燃烧实验诊断的重要性,并描述实验诊断技术的概况。

第2章为激光多普勒测速仪(LDV),重点介绍其工作原理、光路设计、光学器件、光散射粒子、光学频移以及多点式、双焦点和采用光致电动势检测器的测速仪。

第3章为相位多普勒粒子分析仪(PDPA),涉及两相流的测量参数,相位多普勒法测量粒子尺寸的原理与光学布置,PDPA的信号处理,应用中常遇到的问题及相应的对策。

第4章为拉曼光谱法,主要描述分子光谱,线性激光拉曼散射(LRS)和反向拉曼散射(IRS)测量温度及组分浓度的原理与实验装置及其应用举例。

第5章为激光诱导荧光(LIF)法,介绍其工作原理与光学布置,测量组分浓度、温度和速度的方法、实验装置及应用。

第6章为相干反斯托克斯拉曼光谱(CARS)和简并四波混合(DFWM)法,从介绍光相干等预备知识着手,阐述CARS法和DFWM法测量温度与组分浓度的原理、方法和实验装置以及多色CARS技术。

第7章为激波管与光学发射一吸收法,首先介绍气体驱动激波管的原理、结构和工程计算方法,然后阐述光学发射与吸收法的一般原理与方法,最后介绍激波管与原子谐振吸收光谱法(ARAS)在化学动力学研究中的应用。

第8章为固体火箭发动机的燃烧实验诊断法。全章分为两部分:第1部分介绍测量固体推进剂燃速的X射线实时荧屏高速动态分析法和超声波法;第2部分介绍燃烧表面声导纳的测量方法,还阐述了指导实验所需的声学不稳定燃烧的原理。