



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

RANSHAO  
SHIYAN  
ZHENDUANXUE

# 燃烧实验诊断学

( 第2版 )

汪亮 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 燃烧实验诊断学

(第2版)

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,包括一阶弹性与非弹性散射法、三阶非线性散射法以及光学发射与吸收法,着重讲述了每种诊断技术的工作原理、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 12 章,内容涉及分子光谱学、拉曼散射法、激光诱导荧光法、相干反斯托克斯拉曼散射法、简并四波混频法、红外吸收法、原子谐振吸收光谱法、固体推进剂燃速测量用 X 射线法、超声波法和密闭燃烧器法。本书还介绍了激光多普勒测速仪、相位多普勒粒子分析仪、粒子成像测速仪、平面多普勒测速仪、分子示踪测速仪、激波管技术、燃烧声导纳测量以及内燃机汽缸内的流场与燃烧测量等。

本书可作为工程热物理、热能动力、汽车内燃机、航空宇航推进理论与工程等学科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. —2 版. —北京:国防工业出版社, 2011. 7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 07488 - 8

I. ①燃... II. ①汪... III. ①燃烧 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①O643.2 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 138022 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 100048)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 21½ 字数 492 千字

2011 年 7 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 46.00 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

## 再版前言

再版后,本书一方面新增了三章:一是分子光谱学,用作光散射诊断法的背景知识。二是平面流场的二维测速仪,拓宽了单点式测速仪单次测量的空间范围。三是内燃机的燃烧实验诊断法,主要考虑到我国汽车工业的发展方兴未艾,这方面的需求迫切。另一方面,本书对原有各章进行了不同程度的充实与完善,内容涉及三个方面:一是增加了散射横截面、光与粒子的相互作用等基本概念的描述;二是补充了光纤耦合红外吸收法,同时还新增了燃速测量用 X 射线吸收法和密闭燃烧器法;三是充实了拉曼散射法、激光诱导荧光法和简并四波混频法等章节的内容。当然,选用本书作为参考教材的任课老师,可以按照各自专业的具体情况,取舍讲授内容。

不言而喻,笔者深知编写国家级规划教材的责任,主观上也是认真努力,包括双休日在内,全身心地投入了本教材的编著工作。如今脱稿了,在如释重负的同时,笔者也颇感不安。相关文献,浩如烟海。囿于水平,本书难免有错误和疏漏之处,恳请专家与读者批评赐教,在此预致谢意。

最后,笔者谨向教育部、西北工业大学、国防工业出版社表示诚挚的感谢。编写过程中,女儿汪玲、女婿季明为笔者创造了温馨的生活与工作环境,还有笔者夫人虞静芬一如既往、毫无保留的无私付出,在此一并表示衷心的感谢。

# 第 1 版前言

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速度、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、李辉和万小朋老师的关心,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为本书出版所付出的辛勤劳动。

作者

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	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 .....	4
1.2.4 燃烧温度与组分浓度测量 .....	6
1.2.5 速度测量 .....	8
1.2.6 粒子测量 .....	8
1.2.7 流场显示技术 .....	9
1.3 本书梗概 .....	10
习题 .....	11
<b>第2章 激光多普勒测速仪</b> .....	12
2.1 概述 .....	12
2.2 基本概念与测量原理 .....	13
2.2.1 粒子光散射 .....	13
2.2.2 激光多普勒效应 .....	17
2.2.3 双光束光路的条纹模型与基本参数 .....	19
2.2.4 光外差检测 .....	21
2.3 光学器件 .....	27
2.3.1 激光器 .....	27
2.3.2 光纤及其耦合 .....	32
2.3.3 光学通路 .....	33
2.4 散射粒子及其撒播 .....	36
2.5 光学频移 .....	40
2.6 其它类型的激光多普勒测速仪 .....	41
2.6.1 多点测量用测速仪 .....	41
2.6.2 激光双焦点测速仪 .....	42

2.6.3 采用光致电动势检测器的激光多普勒测速仪 .....	43
习题 .....	45
<b>第3章 相位多普勒粒子分析仪 .....</b>	<b>46</b>
3.1 两相流的测量参数 .....	46
3.1.1 概述 .....	46
3.1.2 流量与浓度测量 .....	48
3.2 测量粒子尺寸的原理 .....	51
3.2.1 几何光学的应用 .....	51
3.2.2 光路配置 .....	54
3.2.3 测量原理 .....	55
3.2.4 标定曲线的计算 .....	57
3.3 光路参数的选择与光路调节 .....	57
3.3.1 光路参数选择 .....	57
3.3.2 光路调节 .....	58
3.4 信号处理 .....	58
3.4.1 接收光学 .....	58
3.4.2 信号处理方法 .....	59
3.4.3 实时信号分析仪 .....	63
3.4.4 参数设置 .....	66
3.5 应用中的几个问题 .....	67
3.5.1 观察窗的设计与散射角的选取 .....	67
3.5.2 测量体内粒子运动轨迹的影响 .....	68
3.5.3 粒子数密度的影响 .....	73
3.5.4 粒子形状的影响 .....	73
3.5.5 数密度与体积流量测量 .....	75
习题 .....	76
<b>第4章 平面流场的二维测速技术 .....</b>	<b>77</b>
4.1 粒子成像测速仪 .....	77
4.1.1 概述 .....	77
4.1.2 粒子图像的记录与处理 .....	78
4.1.3 实验装置及其优化设计 .....	85
4.1.4 全息粒子成像测速仪 .....	88
4.2 平面多普勒测速仪 .....	91
4.3 分子示踪测速仪 .....	93
4.3.1 测试原理及其技术实现 .....	93

4.3.2 估计位移向量的空间相关技术 .....	96
习题 .....	100
<b>第5章 分子光谱学</b> .....	<b>101</b>
5.1 分子光谱简介 .....	101
5.1.1 电子—振动—转动光谱 .....	101
5.1.2 谱线加宽效应 .....	104
5.2 双原子分子的电子能级 .....	106
5.2.1 电子能级的描述 .....	106
5.2.2 能级的分布 .....	108
5.3 能级间原子跃迁的选择规则 .....	109
5.3.1 原子跃迁的基本选择规则与允许的转动量子数变化值 .....	109
5.3.2 其它选择规则 .....	111
5.4 羟基的光谱 .....	112
习题 .....	114
<b>第6章 拉曼散射法</b> .....	<b>116</b>
6.1 拉曼散射简介 .....	116
6.1.1 拉曼散射概述 .....	116
6.1.2 拉曼散射的由来 .....	119
6.1.3 双原子分子的拉曼光谱 .....	120
6.2 线性(自发)拉曼散射 .....	123
6.2.1 测量原理 .....	123
6.2.2 实验装置 .....	125
6.3 转动拉曼散射 .....	127
6.4 增强型拉曼散射 .....	128
6.4.1 概述 .....	128
6.4.2 斯托克斯拉曼散射法测温度与浓度 .....	129
6.4.3 反向拉曼散射法测温度 .....	130
习题 .....	133
<b>第7章 激光诱导荧光法</b> .....	<b>134</b>
7.1 概述 .....	134
7.2 原理 .....	137
7.2.1 分子状态间的能量传输 .....	137
7.2.2 速率方程分析 .....	137
7.2.3 浓度测量用方程 .....	139



7.2.4	温度测量用方程	145
7.2.5	激光诱导荧光与线性拉曼散射的比较	146
7.3	测量方法	147
7.3.1	组分成像	147
7.3.2	温度成像	149
7.3.3	速度成像	151
7.4	光学布置与实验装置	153
7.4.1	光学布置	153
7.4.2	实验装置	153
7.5	应用举例	155
7.5.1	由浓度测量研究热解机理	155
7.5.2	高压燃烧器中的应用	156
7.5.3	激波风洞喷管流中的温度测量	160
7.5.4	撞击式喷注器的推进剂喷雾特性	161
	习题	164
<b>第8章</b>	<b>相干反斯托克斯拉曼散射和简并四波混频法</b>	<b>165</b>
8.1	非线性光学散射过程	165
8.2	相干光的概念与特性	167
8.3	三阶非线性极化率	170
8.4	相干反斯托克斯拉曼散射法	171
8.4.1	简介	171
8.4.2	温度与组分浓度测量	176
8.4.3	实验装置	178
8.4.4	多色技术	181
8.5	简并四波混频法	186
8.5.1	基本原理	186
8.5.2	实验方法	190
	习题	196
<b>第9章</b>	<b>激波管与光学发射—吸收法</b>	<b>197</b>
9.1	激波管	197
9.1.1	激波管技术的主要特点	197
9.1.2	气动驱动激波管	198
9.1.3	激波管的工程计算方法	201
9.2	光学反射与吸收法	205
9.2.1	一般的光学发射与吸收法	205

9.2.2	光纤耦合红外吸收法	210
9.3	应用举例	216
9.3.1	化学动力学研究	216
9.3.2	燃烧反应流研究	221
	习题	229
<b>第10章</b>	<b>固体火箭发动机的燃烧实验诊断法</b>	<b>231</b>
10.1	燃速测量	231
10.1.1	X射线法	231
10.1.2	超声波法	240
10.1.3	密闭燃烧器法	250
10.2	燃烧表面声导纳的测量	255
10.2.1	不稳定燃烧分类与声学不稳定燃烧的特点	255
10.2.2	基本概念	256
10.2.3	理论分析	260
10.2.4	实验测量与数据处理方法	261
	习题	268
<b>第11章</b>	<b>内燃机的燃烧实验诊断法</b>	<b>270</b>
11.1	流速测量数据的处理方法	270
11.1.1	流动特征数的计算	270
11.1.2	汽缸内流速的计算	272
11.2	汽缸内的流场测量	277
11.2.1	油气两相流测量	278
11.2.2	湍流测量	283
11.3	汽缸内的燃烧测量	286
11.3.1	内燃机工作过程内视研究的概况	286
11.3.2	燃烧产物一氧化氮和甲醛的浓度测量	288
11.3.3	燃料射流和燃烧火焰的图像显示	294
	习题	296
<b>第12章</b>	<b>其它实验诊断方法</b>	<b>298</b>
12.1	探针法	298
12.1.1	各类探针简介	298
12.1.2	探针法测量误差	302
12.2	普通摄影(摄像)法	303
12.3	纹影法	304

12.3.1 普通纹影法 .....	305
12.3.2 激光纹影法 .....	306
12.4 全息摄影法 .....	306
12.4.1 分类 .....	307
12.4.2 外差式全息干涉法 .....	310
12.5 电子能谱法 .....	314
12.5.1 扫描电子显微镜 .....	314
12.5.2 燃烧诊断用的电子能谱 .....	317
习题 .....	318
<b>参考文献</b> .....	<b>319</b>
<b>附录 英文缩写词汇</b> .....	<b>327</b>

# 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。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。近年来,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像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信息,并具有必要的时间与空间分辨力。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,因而观察窗、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与电磁波与激光器密切相关,对这两个问题也一并介绍。最后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内燃机以及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,单点测量用激光多普勒测速仪(LDV)和相位多普勒粒子分析仪(PDPA)以及平面测量用粒子成像测速仪(PIV)可归入弹性光散射法;同时,LDV 和 PDPA 也是干涉仪,可称为干涉量度法,而 PIV 则可称为成像法。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	
	红外吸收法	近红外	测组分温度与浓度	
中红外				
光散射	见表 1.2			
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
				透射式
	马尔文粒子分析仪			
单粒子计数器				
流速测量法	单点式	激光多普勒测速仪(LDV)	测局部点的 1,2,3 维速度分量	
		相位多普勒粒子分析仪(PDPA)		同上, 还可测粒子尺寸
	成像法	粒子成像测速仪(PIV)	测平面流场的 1,2 维速度分量	
		平面多普勒测速仪(PDV)		
		分子示踪测速仪(MTV)		
全息粒子成像测速仪(HPIV)		测平面流场的 1,2,3 维速度分量		
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	
		密闭弹或密闭燃烧器		
		声发射		
	非稳态燃速	微波法		
		超声波法		
		X 射线法		吸收法
实时荧屏高速动态分析法				

(续)

分类	方法或仪器设备名称		应用举例
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,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。同时,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,在仔细控制和可重复的实验条件下,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。还要强调指出,每一种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。

(3) 实验诊断系统要讲究简约、灵巧——“系统配置虽不能比可能的更简单,但也不能比必要的更复杂”。为此,诊断系统要尽可能融入主流技术,除了虚拟化测试,还要逐步向智能化、自动化方向努力。

### 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(大于  $10^4$  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<sup>[24]</sup>,旧时文献中  $1\text{Å} = 10^{-10}$  m)。随波长递增依次有宇宙射线,原子射线, $\gamma$ 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。

### 1.2.3 激光器

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-氖和氩离子( $\text{Ar}^+$ )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( $\text{Nd:YAG}$ )激光器和有机染料激光器。而准分子(又称激基复合物)激光器(excimer laser)有较高的能量和重复率。以波长  $\lambda = 308\text{nm}$  的XeCl准分子激光器为例,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Nd:YAG激光器(重复率固定为  $10\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$ )。铜

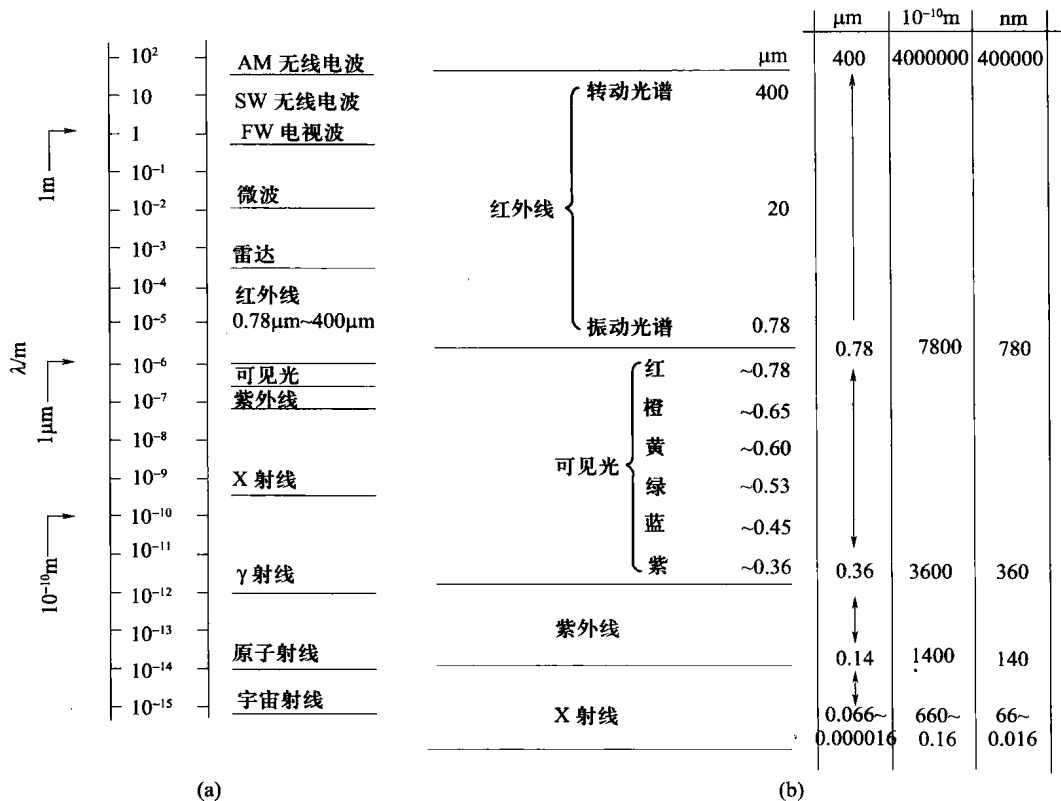


图 1.1 电磁波

蒸气激光器的波长界于黄(578nm)和绿(510nm)光谱之间,平均输出功率可达 1W ~ 30W,因其几千赫兹的特征重复率和短的脉冲宽度(即脉冲持续时间约 30ns),尤其适用于高速显示实验中的光屏照明。还有,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。此外,红外吸收测量中应用的各种二极管激光器也值得关注。

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(几纳秒的闪光持续时间),有时用简单的脉冲固态激光器(脉冲持续时间毫秒级)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。一般而言,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  $\Omega$  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 ( $\text{cm}^2/\text{sr}$ , 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,同时还介绍了激波管与光学发射—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  $\nu_0$  与  $\nu_s$  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  $\nu_0$  和  $\lambda$  分别为入射光的频率和波长; $d$  和  $\nu_s$  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  $\nu_0$  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 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ 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
三阶非线性散射过程	相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)				测量主要组分
	简并四波混频(DFWM)技术 相共轭 PC-DFWM,前向折叠式盒状 FFB-DFWM				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)				测温度,提供基本谱宽和能级间隔之类的基础数据
	光声拉曼散射(PARS),高阶拉曼散射(HORS),余见表 8.1				有待开发应用