

本书得到《国家重点基础研究发展规划》项目(2001CB409600)的资助

热灾害实验诊断方法

RE ZAIHAI SHIYAN ZHENDUAN FANGFA

廖光煊 王喜世 秦 俊 编著



中国科学技术大学出版社

98. 12

466

本书得到《国家重点基础研究发展规划》项目(2001CB409600)的资助

热灾害实验诊断方法

廖光焯 王喜世 秦 俊 编著

中国科学技术大学出版社

2003·合肥

内 容 简 介

本书阐述热灾害现象中主要特征参量的物理含义及其实验测量的意义。在此基础上,着重系统介绍各特征参量的实验诊断理论及相关技术,内容包括:热灾害过程中烟气特性的实验诊断方法、热释放速率以及火蔓延特性的实验诊断技术;热流场的动态显示与速度测量方法;温度、组分浓度的实验测量方法以及辐射热通量的实验测量与标定方法等。

其内容在兼顾传统实验诊断技术的同时,主要介绍基于高新技术而发展起来的新方法和先进技术。本书内容丰富、资料翔实、适用范围广泛,可供从事热安全、环境保护、交通、石油化工和航空航天等领域安全部门的科研工作者和工程技术人员使用,亦可作为安全技术与工程专业硕士生和高年级本科生的教材,以及大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热灾害实验诊断方法/廖光焯,王喜世,秦俊编著. —合肥:中国科学技术大学出版社.
2003. 1

ISBN 7-312-01409-7

I. 热... II. ①廖... ②王... III. 火灾监测 IV. TU998. 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 024277 号

中国科学技术大学出版社出版发行
(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)
中国科学技术大学印刷厂印刷
全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:11.75 字数:300 千
2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷
印数:1—2000 册
ISBN 7-312-01409-1/X·5 定价:20.00 元

前言

热灾害是指与热过程有关的灾害过程与现象。当能量过分集中作用在某一客观物体上,并超过客观物体所能承受的某一阈值时,就会发生热灾害事故甚至重大热灾害事故。同时,热过程中发生的一些突变现象(如燃气泄漏引发的爆炸等)和燃烧过程中释放的有毒有害气体,均可以引发灾害事故。本书将主要介绍热灾害现象(特别是火灾现象)中主要特征参量(如速度、温度、热释放速率、热通量以及组分浓度等)的实验诊断方法,为深化认识热灾害现象的发生、发展机理和规律提供科学的测试和研究手段,最终为有效预防和减少热灾害损失、保护人民的生命和财产安全以及维护社会稳定提供科学保障和技术支持。

重视实验研究向来是科研工作者的共识。“理论指导实践,实践是检验真理的唯一标准”以及“实践、实践、再实践”均体现了科学实验的重要性。在热灾害现象的研究和事故后果分析等领域,实验研究及实验诊断新方法和新技术的应用显得尤为重要。例如,2000年4月和7月分别在美国和英国召开的“国际火灾工程高级论坛(International FORUM Workshop on Fire Engineering)”会上,与会代表一致同意将温度、速度、辐射热通量、热释放速率和组分浓度等参数确定为火灾安全科学研究中必须通过实验测量获取的主要参数。

鉴于此,本书主要介绍以下实验诊断方法和技术:

1. 热流场的动态显示技术,主要介绍粒子示踪技术、纹影法和阴影法等;
2. 温度的实验诊断,主要讲述接触性实验诊断方法和非接触性实验诊断方法,其中前者主要介绍最传统也是应用最广泛的测温方法——热电偶测温,后者在介绍固体表面温度测量和气体温度辐射测量方法的基础上,介绍红外热成像(Infrared Image)等方法;
3. 速度的实验诊断,将首先介绍传统的皮托管测速方法和热线热膜测速等接触式速度测量技术,进而在介绍 LDV(Laser Doppler Velocimetry)、PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)等非接触点测量技术的基础上,着重介绍基于互相关等法的数字粒子图像测速技术(Digital Particle Image Velocimetry, DPIV);
4. 热释放速率的实验诊断,热释放速率被认为是热灾害现象,特别是火灾安全科学研究中非常重要的一个参量,本书主要介绍基于氧消耗原理的热释放速率实验测量方法;
5. 热通量的测定,它是火灾安全科学研究中要求通过实验测量获取的主要参量之一,本书将介绍该参量的主要测量方法和标定方法;
6. 组分浓度的实验测量研究,组分浓度的测量有助于分析热灾害现象发生、发展的机理和过程,又有利于对灾害现象进行事故后果分析,因而在相关研究中也是需要实验测量获取的主要参数。将介绍一些基于激光技术的组分浓度实验诊断方法;
7. 在对粒子场实验诊断方法进行综述的基础上,介绍基于数字粒子成像的粒子场全场诊断方法;
8. 介绍有害气体泄漏及其诊断技术;

9. 烟气特性参数的实验测量,本部分主要介绍烟气光学密度(Optical Depth, OD)的实验测量方法;

10. 火蔓延特性的实验测量,介绍利用热电偶和红外热成像等方法确定火蔓延速率以及对火蔓延过程进行动态显示的方法和技术;

本书所介绍的实验诊断方法在编写时基本上是按其可测量的具体参数划分在相应的章节,各章节内容的安排基本上遵循了“先传统后最新、先点后面”的原则。对于那些属于多参数诊断的方法,一般按其可测量的主要参数分(或部分),其它可测参数的测量原理和方法亦放在该章节中同时介绍。如热线热膜风速仪,它的主要功能是测量速度和速度的脉动等参数,在第2章速度的实验诊断这一章中介绍,同时利用它测量热流场的温度等参数的原理也在第2章作了简单介绍。

本书按统一大纲分章节编写,是编者在多年从事安全工程专业本科生和硕士生专业必修课教学的讲义之上完成的。廖光煊任主编,主要负责拟定大纲,并编写了第二章、第五章;秦俊编写了第九章和第十章;王喜世完成其余章节的编写工作;丛北华和朱伟分别对最后两章作了补充。

由于我们水平有限,书中错误和遗漏之处在所难免,敬请专家、读者批评指正。

编著者
2002年3月

目 录

第一章 热流场的动态显示技术	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 热流场显示的粒子示踪技术	(1)
1.3 热流场显示的光学方法	(3)
1.3.1 火焰发光度与摄影法	(4)
1.3.2 衍射成像法	(5)
参考文献	(13)
第二章 速度的实验诊断方法	(14)
2.1 引 言	(14)
2.2 速度动态测量的探针方法	(15)
2.2.1 皮托静压探针	(15)
2.2.2 差动皮托管	(16)
2.2.3 五孔探针	(16)
2.3 热线风速计	(18)
2.3.1 热线风速计的测量原理及其发展概况	(18)
2.3.2 热线探针的材料和结构	(19)
2.3.3 热线风速计的基本电路	(20)
2.3.4 热线对流动参数的测量	(21)
2.4 激光多普勒测速技术	(25)
2.4.1 引 言	(25)
2.4.2 基本原理	(25)
2.4.3 光学检测的基本模式	(27)
2.4.4 激光多普勒测速中散射(示踪)粒子的跟随性问题	(28)
2.4.5 LDV/APV 系统简介	(29)
2.4.6 燃烧速度场测量的局限性	(32)
2.5 速度场测量技术	(32)
2.5.1 引 言	(32)
2.5.2 全息干涉测速技术	(33)
2.5.3 激光诱导荧光测速技术	(34)
2.5.4 激光散斑测速技术	(36)
2.5.5 粒子图像测速技术	(38)

参考文献	(45)
第三章 粒子场实验诊断方法	(47)
3.1 引 言	(47)
3.2 基本概念和相关描述	(47)
3.2.1 粒子直径和形状的描述	(47)
3.2.2 粒子谱分布函数	(49)
3.3 粒子谱分析方法	(49)
3.3.1 直接照相法	(50)
3.3.2 收集法	(50)
3.3.3 过滤法	(51)
3.3.4 激光衍射法	(51)
3.3.5 全息法	(51)
3.3.6 比率计法	(52)
3.3.7 相位多普勒方法	(52)
3.3.8 基于数字粒子成像的粒子谱分析方法	(52)
参考文献	(57)
第四章 温度测量方法	(59)
4.1 引 言	(59)
4.2 热电偶测温原理和技术	(60)
4.2.1 基本原理	(60)
4.2.2 热电偶的种类	(61)
4.2.3 热电偶的响应方程	(63)
4.2.4 裸露和抽吸式热电偶测温模型	(64)
4.2.5 讨论	(66)
4.3 辐射测温方法	(67)
4.3.1 辐射测量中的基本辐射量及其定义	(67)
4.3.2 辐射测量的物理基础	(69)
4.3.3 辐射测量中的基本定律	(73)
4.3.4 几种辐射测温方法	(75)
4.4 比色测温法	(80)
4.5 红外热成像方法	(81)
4.5.1 引 言	(81)
4.5.2 热像诊断的物理基础	(81)
4.5.3 热像系统描述	(84)
4.5.4 热像仪标定	(85)
4.5.5 红外热成像诊断应用	(86)
参考文献	(91)

第五章 热释放速率测量	(93)
5.1 引言	(93)
5.2 基于氧消耗原理的热释放速率测量	(94)
5.2.1 小尺度热释放速率测量	(94)
5.2.2 中尺度热释放速率测量	(98)
5.2.3 大尺度热释放速率测量	(99)
5.3 应用举例	(99)
参考文献	(101)
第六章 热通量测量及其标定方法	(103)
6.1 引言	(103)
6.2 差温热通量测量技术	(104)
6.2.1 分层传感器	(104)
6.2.2 线绕式传感器	(106)
6.2.3 折射率指数法	(106)
6.2.4 辐射计法	(106)
6.2.5 圆箔传感器	(107)
6.3 量热热通量测量技术	(109)
6.3.1 能量平衡法	(109)
6.3.2 一维瞬态传导分析法	(110)
6.4 主动加热或冷却技术	(113)
6.5 传质类比法	(113)
6.6 热通量传感器的标定	(115)
6.6.1 几种辐射热源	(115)
6.6.2 热通量传感器标定方法	(116)
参考文献	(120)
第七章 组分浓度的实验诊断技术	(121)
7.1 概述	(121)
7.2 激光吸收法	(121)
7.3 发射和吸收光谱法	(122)
7.4 快速扫描红外发射光谱方法	(124)
7.5 其它方法	(128)
参考文献	(129)
第八章 火蔓延特性的实验测量	(131)
8.1 概述	(131)
8.2 基于热电偶测温的火蔓延速率测量	(136)
8.3 火蔓延速率测量的红外热像技术	(140)

8.4 应用锥形量热计获取火蔓延速率	(141)
8.4.1 火蔓延速率的获取方法	(142)
8.4.2 应用举例	(145)
参考文献	(146)
第九章 烟气特性的实验诊断技术	(147)
9.1 引言	(147)
9.2 烟气的产生和特性	(147)
9.2.1 烟气的产生	(147)
9.2.2 烟气的特性	(149)
9.3 烟气密度的实验测量方法	(153)
9.4 烟气微粒的谱分布实验测量方法	(157)
参考文献	(161)
第十章 有害气体及有害气体泄漏诊断技术	(162)
10.1 燃烧产物中的有害物分析	(162)
10.2 有害气体的测量方法	(165)
10.2.1 电化学气体测量方法	(165)
10.2.2 催化燃烧气体测量方法	(166)
10.2.3 金属氧化物传感器方法	(168)
10.2.4 光化电离气体测量方法	(169)
10.2.5 红外谱线分析方法	(170)
10.3 有害气体泄漏的诊断方法	(173)
10.3.1 泄漏检测技术	(173)
10.3.2 有害气体泄漏监测系统	(174)
参考文献	(176)
附 录 几种流动测量方法的比较	(177)

第一章 热流场的动态显示技术

1.1 引言

对热流场的流动过程和结构进行显示和诊断,在热灾害现象的分析和研究中具有十分重要的意义。特别是在传热传质、燃烧学和火灾安全科学研究中,往往需要对流体的热力学状态参数(如温度和密度等)的时空分布进行定性显示和定量测量。早在 19 世纪,Toepler(1868)在对动力学过程的研究中就利用电弧纹影术(flash Schlieren method)对流体进行了显示。近几十年来,人们研究和发展了许多种标量场和矢量场的瞬时显示和测量技术,如层析 X 射线干涉摄影术(tomographic interferometry)、平面激光诱导荧光法(planar laser-induced fluorescence, LIF)、激光散斑测速法(laser speckle velocimetry, LSV)、分子跟踪测速法(molecular tracking velocimetry, MTV)、粒子图像测速法(particle image velocimetry, PIV)、可调谐二极管激光吸收光谱法(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)、相干反斯托克斯喇曼光谱(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, CARS)、傅立叶变换红外光谱仪(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIS)以及多波长辐射光谱仪(Multi-Wavelength Emission Spectroscopy, MWES)等。

然而,许多研究发现上述方法并不都完全适用于热流场,特别是火焰等高温热过程的显示和测量,因为测试对象所具有的高温和大密度梯度等增大了对其进行动态显示的难度和限制了测量的精度。上面提到的大部分方法均是后来发展起来的可用于做定量测量的方法,对定性研究和动态显示来说,最常用的方法有直接摄影法、干涉测量法、纹影法、阴影法以及粒子示踪技术等。这些方法大都先通过一定的设备获取被测试对象的光学图像,然后将图像中每一像素的光强转换为数字信号存储到磁带或磁盘中,以备事后进行分析、反演和重建等处理。事实上,随着科学技术的发展,已有了可直接对被测对象进行数字化成像的设备和系统(如数码相机、数码摄像机等),因而使得上述方法的快捷、有效实施成为可能。下面将对其分别进行简要阐述。

1.2 热流场显示的粒子示踪技术

粒子示踪技术在流动显示,特别是实验流体力学研究中是一项非常传统的定性测量技术。

但随着人们对各种复杂流动现象的深入研究的需要,特别是随着计算机应用技术的引入,使得该技术得到了新的发展,并由定性向定量化测量方向发展,由显示定常流场向显示非定常流场发展。粒子示踪流动显示技术即指通过在透明无色的气流或水流中加入一些可见的粒子,然后根据这些外加粒子随流体微团的流动而使各种流动现象显示出来。该技术已成为人们了解和观察流动现象并建立其相应理论模型的重要手段。

在介绍粒子示踪技术之前,先来明确在该技术中常用的几个基本概念(包括迹线、流线和脉线)。为了描述流场中流体的流动,通常有两种方法。一种是沿用描述刚体运动的方法来描述流场中每个流体微团的运动,这叫做拉格朗日法。该方法着眼于每个特定的流体微团,即对流场中的无穷多个流体微团,通过取某个特定时刻,各个微团所在的坐标 (a, b, c) 来标注它,不同的 (a, b, c) 就代表不同的微团。这样对于一个特定的 (a, b, c) 流体微团,其运动方程可表示为:

$$\begin{cases} x = x(a, b, c, t) \\ y = y(a, b, c, t) \\ z = z(a, b, c, t) \end{cases} \quad (1.1)$$

于是,把由上式所描述的特定流体微团随时间 t 的运动轨迹称为迹线(Path line)。另一种描述流体运动的方法是着眼于流场中某个空间位置点,即以观察在该点 (x, y, z) 处流体微团所具有的流动特性为主。例如某一时刻 t 时流场中某个空间点处流体微团的速度特性可表示为:

$$\begin{aligned} u &= F_1(x, y, z, t) \\ v &= F_2(x, y, z, t) \\ w &= F_3(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

习惯上把这种描述流体运动的方法称为欧拉法。由上式即可确定流场中任一时刻每一点处的速度向量。在观察某一时刻的速度场时,可以顺着速度指向作一曲线,其上任何一点处的切线方向即为该点处的速度方向,这样确定的曲线称为流线(Stream line)。此外,为了能对透明无色的气流或水流的流动现象直接进行观察,往往在流场内的某个固定点 O 处对流经该点的流体微团进行染色或附加上某些可视的标记,从而使得经过某一时刻后,在 O 点处染过色的所有流体微团形成一条看得见的线,通常称其为脉线或染色线(Streak line)。由上述定义不难看出,在某一时刻流场中的脉线实际上是通过 O 点的所有迹线在该时刻其端点的连线。需要指出的是,在定常流中,其迹线、流线和脉线重合为同一条线,而在非定常流中,脉线、迹线和流线是互不相同的。

此外,示踪粒子在流体中的跟随性也是流动显示技术中必须考虑的主要因素之一。因为粒子示踪流场显示技术就是利用示踪粒子在流体中的运动来显示流体的运动形态和流动特征的,因而为了保证所观察到的示踪粒子的运动能真实反映流体的流动特性,必须解决好示踪粒子本身的两个问题,即粒子的大小和粒子的跟随性。为了保证流体的流动性不受外加粒子的影响,所施加的示踪粒子的浓度和尺度都应足够小,同时为了保证施加到流体中的示踪粒子的运动能真实反应流体微团的运动,就要求示踪粒子能很好地跟随流体微团一起运动。关于示踪粒子跟随性的分析已有不少作者作了论述,恕这里不再赘述(可参见文献[2])。

示踪粒子通常按其物态可分为固态示踪粒子、液态示踪粒子和气态示踪粒子。常用的固态示踪粒子有铝粉、有机玻璃粉末和密度接近于水的聚苯乙烯小球、空心玻璃球、尼龙粒子等。液态示踪粒子通常有稀释的牛奶等,其多用于对水流的显示,因为它的比重和粘性系数几乎和水相同,同时牛奶中含有脂肪,在水中不易扩散。此外还有各种染料的溶液,特别是荧光染料在流动显示技术中也得到了广泛的应用。气态示踪粒子用的最多的是通过电解产生的氢气泡等。

然而,对火焰等热流动的显示来说,上述示踪粒子就不一定都适用了。因为此时所选用的示踪粒子必须具有耐高温性和在火焰中具有比较好的跟随性、易于施加等特性。因此,上面述及的有机玻璃粉末、聚苯乙烯小球和氢气泡等就不能用于火焰热流场的显示,必须寻找比较适合的示踪粒子。表 1.1 给出了适宜于火焰等热场显示的示踪粒子及其相应的特性参数,在实际应用中,需要根据不同的测试对象选择与之相适应的粒子。

表 1.1 可用于火焰显示的示踪粒子及其特性参数

粒子类型	熔 点 (K)	沸 点 (K)	比 重(g/cm ³) (298K 时)
Al	933	2325	2.7
NH ₄ Cl	—	800	1.53
TiCl ₄	250	420	1.73
ZnO	2225	—	5.47
Al ₂ O ₃	2275	2500	4.00
MgO	3025	3875	3.65
SiO ₂	2000	2500	2.65
TiO ₂	2400	>3000	3.84
ZrO ₂	3275	>4000	5.73

1.3 热流场显示的光学方法

除了前面述及的显示方法外,还可以根据火焰本身的发光特性以及其对外加光线或光场特性参量的扰动来对火焰热流场作定性显示或定量测量。我们知道,当光线透过折射率不均匀的流场时,会发生两种情况:一是光线偏离原来的方向;二是光线的相位发生变化。同时,热流场的温度、压力、浓度等状态参量与密度之间存在确定的函数关系,而气体的光学折射率恰恰是密度的函数。因此通过测量和分析光线(或光场)被扰动的程度就可以确定流场折射率的变化,进而获取流场的温度、压力和浓度等参量的空间分布。图 1.1 给出了被测流场状态参数与光学测试方法之间的相互关系。

光学显示和测量方法与其它方法相比有许多优点:对被测流场无干扰;可以实现对不宜接近流场的显示与测量;由于光线传播十分迅速,可以实现对被测对象的实时检测和显示等。

1.3.1 火焰发光度与摄影法

众所周知,对火焰来说,其最为显著的特征就是它的发光性,而且其为化学发光(Fristrom,1995)。其大部分可见光主要产生于初级反应带(primary reaction zone),辐射成分包括 C_2 、CH、HCO和 OCH_2 (甲醛)等。此外,CO和O的重新组合在蓝光区形成了比较弱的连续辐射带(Gaydon,1974)。由于水汽与二氧化碳的热发射作用,高温气体在红外波段也有较强的辐射。这些较明显的发光带为研究自由基的最大数量提供了有用信息,因为发光度与自由基浓度成二次方关系,同时,CO的连续辐射带与自由基浓度成线性关系。因此,火焰在可见光范围的辐射为研究火焰内部的反应区域及其相应的自由基浓度提供了很有用的信息。

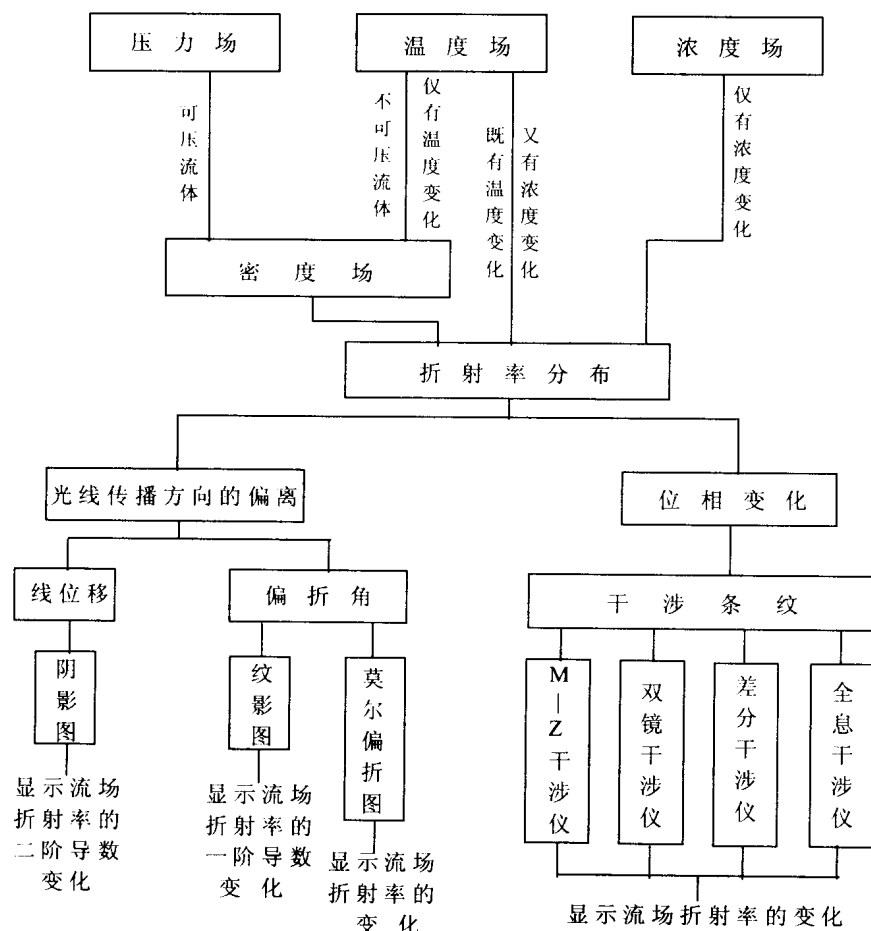


图 1.1 被测流场状态参数与光学测试方法之间的相互关系

然而,由于火焰难以处于某一单一的焦平面,因而使得对火焰的成像与实际存在一定的偏差(如图 1.2 所示)。对火焰直接成像的另一局限性在于由火焰中密度梯度所引起的对发射光线的折射作用(如图 1.3 所示)。这些影响可以通过采用高 f 数透镜(即大口径高放大倍率)进行锐聚焦等加以减小。总之,为了从宏观上定性获取火焰的几何形状,直接摄影法仍是最方便、应用比较普遍的。

为了对火焰形态进行高质量成像,在选用或设计摄影系统时,必须考虑以下几个因素,即:所要求的视场大小、成像分辨率、容许的畸变、目标亮度和曝光时间限制等。随着科学技术的飞速发展,市面上已有各种各样的光学成像镜头和高分辨率、高速采集的光电成像系统出售,因此可以根据具体的测试要求选用不同的成像器件或系统。

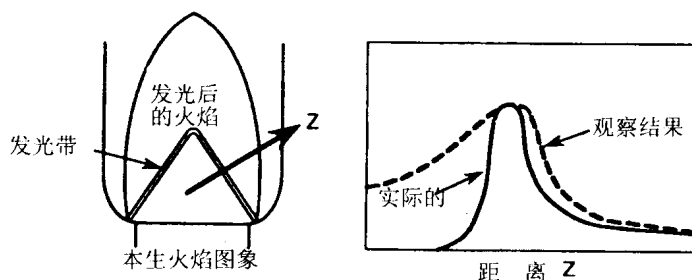


图 1.2 由焦平面外光线导致的图像失真

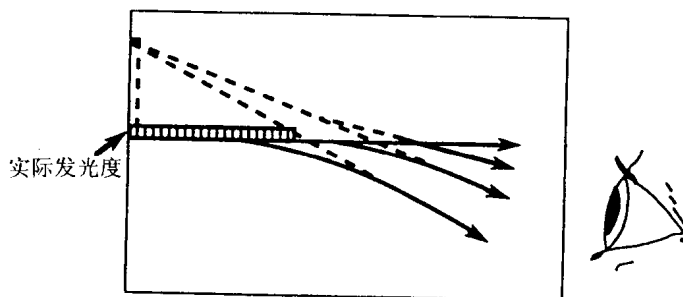


图 1.3 由密度梯度引起的发光度畸变

1.3.2 衍射成像法(Diffraction Imaging)

我们知道,光波在传播过程中通常表现出衍射现象,即光不沿直线传播而向各方向绕射的现象。因此,可以通过火焰前锋(flame front)处陡峭的密度梯度对光线的偏转特性来对火焰进行显示,不过对观察到的透射光的解释说明在物理实验上和几何光学上都是很复杂的。常用的光学流场显示方法主要有三类,即:

- (1) 根据光线的偏折角来确定流场折射率一阶导数的纹影法;
- (2) 根据光线在投射面上的偏移来确定折射率二阶导数的阴影法;
- (3) 根据光线的光程差来确定折射率的干涉法。

在此三种方法中,干涉法被公认是严格定量的诊断技术,因为由干涉图可严格计算流场的折射率分布,进而可通过相应计算获取密度、温度、压力以及速度等参数。

1. 干涉测量法

光波通过流场等介质时,由于介质中的原子、分子等的作用,使得光波中的某些特征参量发生改变。光学或光电测量技术就是通过检测这些特征参量的变化而获取流场等的状态信息(如温度、密度、速度、压力等)的。而干涉测量法则是通过检测光波经介质后位相发生的变化

而获取流场状态参量的。

在讨论两列光波的干涉时,一般都假定两列光波的频率(或波长)相同、偏振方向相同和具有恒定的相位差,这样才会发生干涉现象。然而,这只是发生干涉现象的必要条件。因为要想获得清晰的干涉条纹,还必须满足以下两个充分条件:(1)两列光波在发生干涉叠加时其振幅或光强的差别不能太悬殊,否则其合振幅将与其中某一光波的振幅无多大差别,从而使得光场对比度很差,在实验时难以观察到干涉条纹;(2)两列光波在叠加处光程差也不能相差太大,因为对于任何光源,即使是相干性很好的激光光源,其相干长度(在光学分析中,把原子的平均发光时间间隔称为相干时间,把在相干时间内光波所经过的路程称为相干长度)都是有限的,如果光程差大于相干长度就不能发生干涉现象。因此,在实验中选择或设计干涉仪器或系统时,必须考虑使得上述三个必要条件和两个充分条件得以满足。下面简单介绍几种典型的干涉测量系统的光路图及其测量原理。

1) 马赫—曾德尔(Mach Zehnder)干涉仪

马赫—曾德尔干涉仪(通常称为 M-Z 干涉仪)的基本元件包括两块平面全反射镜和两块平面半反半透分光镜(如图 1.4 所示)。这四块镜子成矩形布局,如果这四块镜子都精确地与入射光束成 45° 角,且光学元件的质量理想,则到达观察屏上的物光与参考光的波面是严格平行的,在物光没有受到测试流场的扰动时,观察屏上将出现一个非常明亮的均匀光场,看不到干涉条纹。若反射镜与入射光夹角并非严格的 45° ,而是倾斜一个微小角度 δ ,则可得平行、等间距的直条纹,且改变 δ 的大小,可得到不同间距的干涉条纹,通常称之为背景条纹(即载波条纹)。若物光受到非均匀流场的扰动,将使物光的光程发生改变,从而将使背景条纹发生扭曲,形成所谓的有限宽条纹干涉场。由相干条件可得该干涉条纹图与介质折射率之间的相互关系为

$$k\lambda = \int_0^L [n(x, y, z) - n_{\text{ref}}] dz \quad (1.3)$$

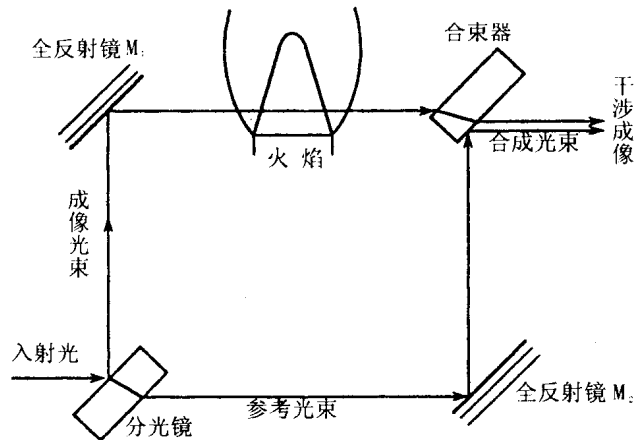


图 1.4 M-Z 干涉仪测量原理图

其中 n_{ref} 为参考光所经过介质的折射率, k 为条纹阶数, L 为测试段的几何长度。由于参考光经过的介质为均匀场,故 n_{ref} 是一常数。如若参考光经过的介质为空气,则 $n_{\text{ref}} = n_0 = 1$ 。若测试对象为二维流场,则沿光束传播方向 Z 方向的折射率为均匀分布,于是上式可简化为

$$k\lambda = L[n(x, y) - n_{\text{ref}}] \quad (1.4)$$

2) 全息干涉法(Holography Interferometry)

全息干涉法即通过记录全息干涉图来显示流场,利用该方法可以对观察对象进行三维重建。特别是利用相位差技术可对火焰进行可视化显示。考虑到干涉需要相干光,因而此类方法中多用激光作光源。不过也有用自然光作光源的,但对定量分析研究来讲,一般都需要相干单色光。

在火焰全息术(Flame Holography)中,应用比较多的有双曝光、时间延迟、实时和时间平均等干涉测量方法(Fristrom,1995)。图 1.5 给出了火焰全息术的光路原理示意图。

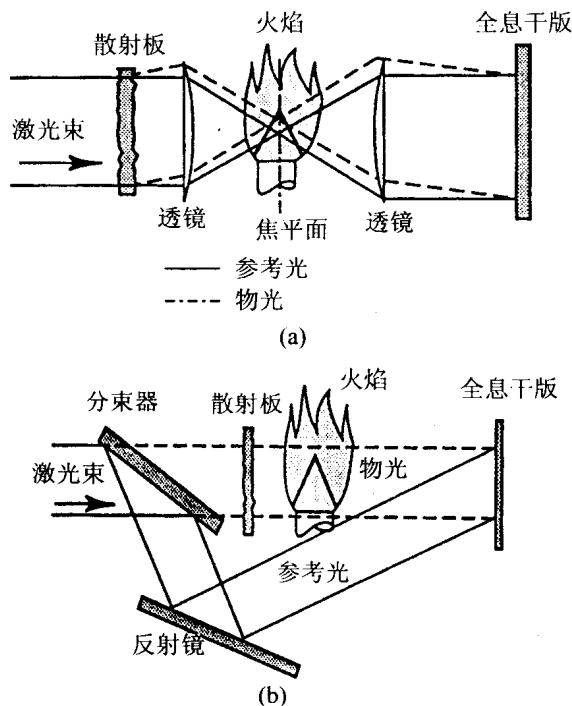


图 1.5 同轴(a)和旁轴(b)火焰全息术原理示意图

双曝光法即指在全息干版和光路都不动的情况下,对测试对象在其特性参数变化前后各曝光一次,这样得到的全息图在参考光的照明下,变化前后的两个物光波同时出现。由于激光的相干性,此两光波要发生干涉形成干涉条纹。利用实时法可以获得动态甚至高速流场全场信息的瞬时变化,但在实验实现上存在一定的难度。

3) 双镜干涉仪

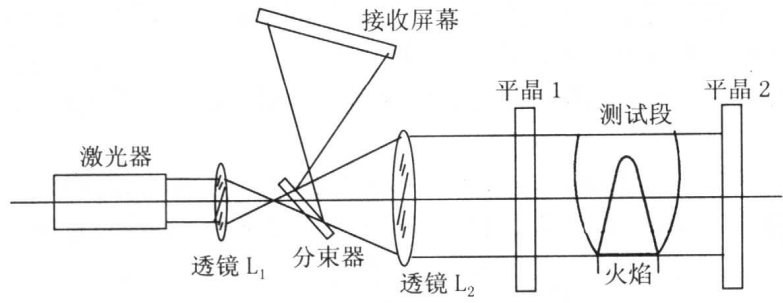
双镜干涉仪是一种不等光程、高精度、高灵敏度的干涉仪。该干涉仪系统的干涉元件是两块平面平晶,在干涉测量中,其中第一块平晶后表面的反射光作参考光,第二块平晶前表面的反射光为物光,两者在干涉屏幕上形成干涉花纹。双镜干涉仪又分为同轴式和离轴式两类,图 1.6 给出了分别由凸透镜和凹透镜组成的同轴式双镜干涉仪光路示意图。

双镜干涉仪系统具有测量灵敏度高、结构简单、调整方便、抗震性能好等特点。

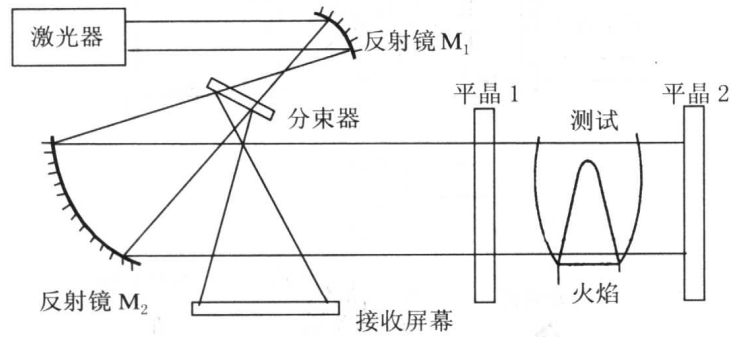
4) 沃拉斯顿(Wollaston)棱镜差分干涉仪

沃拉斯顿棱镜差分干涉仪通常又称作剪切干涉仪,其核心部件是沃拉斯顿棱镜,图 1.7 给出了光路原理示意图。应用该系统可直接显示或定量测量流场的密度或温度梯度值。这种干

涉仪的成本低、抗干扰能力强。



(a) 由凸透镜组成的双镜干涉仪



(b) 由凹透镜组成的双镜干涉仪

图 1.6 同轴式双镜干涉仪光路原理示意图

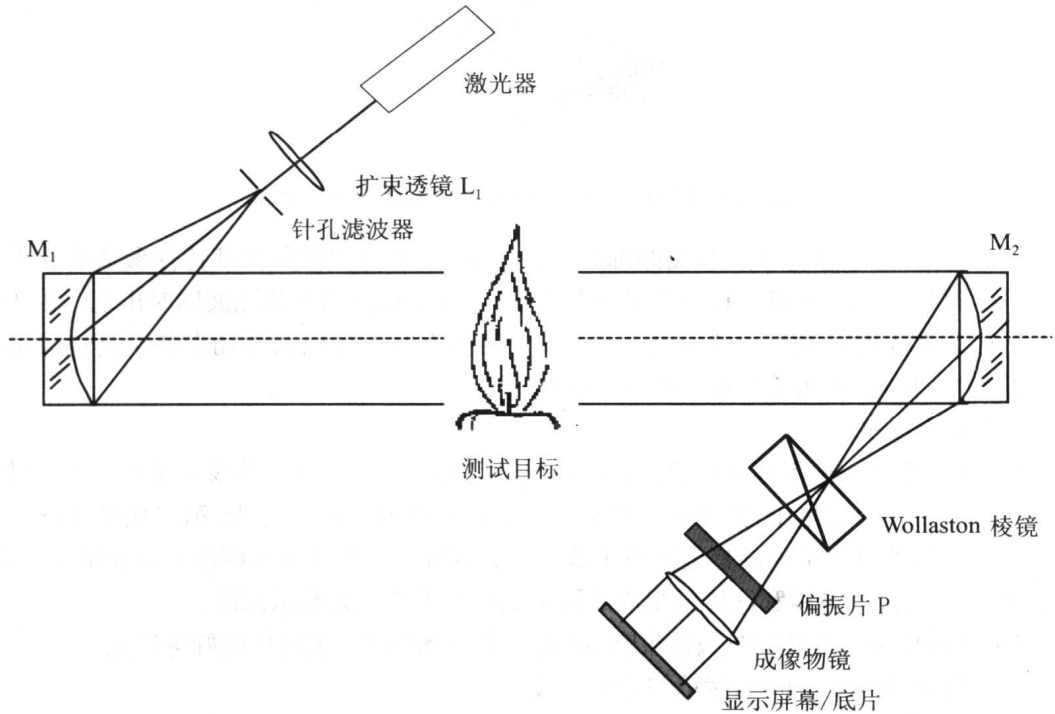


图 1.7 沃拉斯顿棱镜差分干涉仪光路原理示意图