

文章编号: 1001-3806(2019)05-0702-06

喷雾场内液滴粒径光学测试技术进展

赵家丰, 聂万胜, 林伟, 苏凌宇, 仝毅恒*
(航天工程大学 宇航科学与技术系, 北京 100048)

摘要: 雾化场粒径测量对于测试和评价喷雾性能意义重大, 总结分析光学粒径测量技术手段十分重要。介绍了喷雾的基本原理及粒径数学表征; 论述了喷雾场测试中主流及新兴的粒径光学测试方法如光散射、平面结构光照明、相位多普勒分析仪、激光全息技术、双光谱成像等方法的原理及特点, 列举了这些测试方法的典型应用场合。针对喷雾场测试中存在的问题分别进行总结评述并进行对比分析, 对喷雾场粒径测量中如何恰当选取测试方法给出具体的参考建议。

关键词: 激光技术; 喷雾粒径测量; 光学测试方法; 光散射

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.05.022

Research progress of optical measurement of particle size in spray

ZHAO Jiafeng, NIE Wansheng, LIN Wei, SU Lingyu, TONG Yiheng

(Department of Aerospace Science and Technology, Aerospace Engineering University, Beijing 100048, China)

Abstract: The measurement of the size of the atomized field is of great significance for testing and evaluating the spray performance. It is very important to summarize and analyze the technical means of optical particle size measurement. Firstly, the basic principle of spray and mathematical representation of particle size are introduced. The principles and characteristics of the mainstream and emerging optical methods of particle size measurement, such as light scattering, structured laser illumination planar imaging, phase Doppler analyzer, laser holography and dual spectral imaging, are discussed in detail. At the same time, the typical applications of these testing methods are listed. On this basis, the problems existing in the spray field test are summarized and compared respectively, and the specific suggestions on how to select the test method properly are put forward.

Key words: laser technique; spray particle size measurement; optical testing technology; light scattering

引言

雾化技术作为一种将液体或悬浮体分散成细小微粒的实用技术广泛应用于生产生活之中, 雾化效果的测试和评价对于雾化装置的科学设计具有十分重要的作用。光学测量法是目前最主流的喷雾场测试和评价方法, 具备非接触、无扰动、高精度等优点^[1]。

喷雾场粒径测量是两相流研究中带有共性的问题, 粒径大小及其分布是评价雾化器效果及其强化措施的主要参量, 在评价雾化和掺混效果方面具有重要意义。在多相流仿真方面也有重要作用, 可作为喷雾场仿真的验证手段和喷雾燃烧计算的初始条件, 可用以验证射流破碎准则。对于液体燃料发动机来说, 射

流雾化程度的好坏直接影响到发动机的工作性能。燃料在流场中雾化效果好, 雾化后液滴尺寸小且分布均匀, 就有利于液体燃料的蒸发、混合以及高效燃烧。随着激光技术的进步, 以光散射、相位多普勒分析仪、激光全息为代表的粒径测试技术一直在不断完善和发展之中, 平面结构光照明和双光谱成像技术测量粒径也在近些年取得较大突破^[2]。本文中将对相关方法和技术分别进行介绍, 并针对每种方法的特点给出该方法适应场合、优势和不足之处。

1 喷雾的原理及粒径数学表征

1.1 喷雾的原理

从雾化装置如喷嘴喷出的射流或液膜在液体表面张力、粘性力、惯性力、气动力等共同作用下裂碎成大液块, 并进一步裂碎成微小液滴的过程称为雾化过程, 其中液滴粒径尺寸和空间分布表征着蒸发以及混合的好坏。对于发动机来说, 雾化过程对整个稳定燃烧过程起着决定性作用, 因为燃烧(化学反应)过程是在气

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876219)

作者简介: 赵家丰(1992-), 男, 博士研究生, 研究领域为射流喷注雾化。

* 通讯联系人。E-mail: tongyiheng87@126.com

收稿日期: 2018-10-11; 收到修改稿日期: 2018-12-03

体状态下进行的,为加速燃烧过程实现,首先必须将液体推进剂尽快蒸发成气体。而粒径的大小及分布是表征雾化效果好坏的重要因素^[3]。

1.2 粒径数学表征

在液体雾化研究中,索特尔平均直径(Sauter mean diameter, SMD) D_{32} 常用来表征液体雾化效果,即表征液滴群大小的等效直径的概念,是喷雾燃烧领域重要的评价指标。为了比较不同情况下的雾化细度,近似将液滴看成球形,并引入平均直径(或中间直径)的概念。平均直径是用来代替真实液滴的假想液滴的液滴直径。假想液滴流的液滴直径都一样,而且具有真实液滴流的某些特点,如总体积相等、总表面积相等或质量之间有一定的关系。索特尔平均直径表示喷雾场内所有液滴的总体积与总表面积的比值,数学表达式为:

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^2} \quad (1)$$

式中, D_i 为喷雾场粒子等效粒径; N_i 为按照等效粒径所划分跨度数; n_i 为该粒径的粒子数量。

2 典型粒径测量手段及国内外相关研究进展

2.1 光散射

电磁波理论认为光在行进中遇到障碍物,会与之相互作用改变原来的行进方向。一般把这种现象称作光的散射。平行光束进入喷雾场会发生“光的颗粒散射”现象,在实际喷雾场中往往有成千上万个颗粒同时处在照明光束中,这时测到的散射光场是众多颗粒的散射光相干叠加的结果。颗粒直径不同,其散射光在焦平面的位置也不同。小颗粒产生的散射光夹角大,大颗粒产生的散射光夹角小。且散射光强度与颗粒尺寸也有关系,散射光强度的信息可反映喷雾中相同大小的颗粒所占比例。

激光散射法测量喷雾场粒径原理如图 1 所示。光源发出激光经扩束、滤波和准直后以平行光形式进入测量区。傅里叶透镜把相同散射角的光线聚焦到探测平面相同的半径位置上,通过自扫描光电二极管阵列检测粒子散射的激光,每个探测单元接收到的散射光代表一个确定的散射角范围内散射光能的总和。未被颗粒散射的光被聚焦到中心探测器上。假设颗粒是均匀、各向同性的圆球形,探测器根据喷雾前后接收到的光信号的相对变化,可以用电磁波理论推导出散射光场的严格解析解。采用一系列光敏检测器测量未知粒

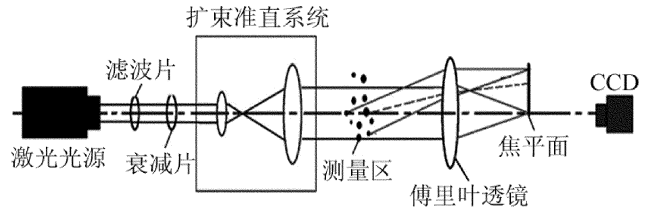


图 1 激光散射法喷雾测量原理图^[4]

径的颗粒在不同角度上的散射光强度,最终由所测量反射光强反演出粒径和数密度,这也称为米氏(Mie)散射理论。

针对现有激光散射对于信号放大和处理要求高,系统内部多采用光电阵列传感器对光路调节要求高的问题。上海理工大学 ZHU 等人采用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)光电探测器接收散射光信息,优化软硬件方法,提高了粒径测量精度^[4]。LIU 利用马尔文粒度仪测量离心式喷嘴的雾化粒径,并进一步研究喷嘴结构参量如喷嘴出口张角、长径比、旋转直径对喷嘴雾化特性的影响^[5]。

采用 Mie 散射测量时,测试所得结果空间分辨率高。随着片激光技术以及 CCD 技术快速发展,基于平面散射光粒径测量方法已成为重要发展趋势,广泛应用于雾化测试及流场诊断研究中,所测粒径信息也由点拓宽至面,同时测量精度得到了大大提高。上述 Malvern 粒度仪即为应用光散射原理进行粒径测量的常用设备,操作简单、数据容易处理。但 Malvern 粒度仪测量空间有限,在密度场过大的喷雾区测试结果偏差较大,光的多次折射、偏转、晕光现象均会影响测试结果。目前该技术在低速流场中应用较多,但在超声速气流研究中使用较少。

激光粒度仪是一种基于静态光散射原理的粒度测试设备。目前还存在一种基于动态光散射原理的粒度仪,同样以激光为照明光源,但称为动态光散射(dynamic light scattering, DLS)粒度仪。静态粒度仪是根据大小不同颗粒产生散射光的分布来计算颗粒大小,而动态粒度仪是在固定散射角上测量散射光随时间的变化规律进而分析颗粒大小;前者适用于 $0.1\mu\text{m}$ 以上粒径的测量,而后者适用于 $1\text{nm} \sim 1\mu\text{m}$ 粒径的测量。

2.2 平面结构光照明法

传统的片状激光照明成像多是基于光的单次散射假设原理的检测技术,但实际喷雾场测试中,液滴尺寸、形状和分布均比较随机,对光的散射特性比较复杂。尤其当喷雾场的浓度较高时,入射光往往需要经过多次散射才会被最终获取,因此很难进行精准测量。

结构光指的是经过编码的光,即一种利用入射光束与被测对象轮廓信息发生调制后再被拍摄,用已知光源信息对拍摄所得图片解调获取被测物体表面信息的技术。结构光技术可以较好地解决3维空间中深度匹配以及被动测量精度不高等问题^[6],抗干扰能力强、速度快、分辨率高,广泛应用于各类光学测量场合中。传统的结构光测量技术多用于3维深度及表面形貌测量,无法实现喷雾场剖面信息精确测量。为解决该问题,2007年,BREUNINGER等人率先发明了平面结构光照明(structured laser illumination planar imaging, SLIPI)技术^[7],成为结构光测量技术又一重要分支。SLIPI结合了结构光测量和层析的思想,利用带有结构光编码信息的片状光源照射喷雾区,使用垂直于照射面的相机进行拍摄,并通过结构光解调算法快速还原出喷雾场剖面的分布形貌信息,基本原理如图2所示。垂直于平面结构光的视角观察,可以发现结构光编码条纹,对相应的结构光编解码算法即可实现对喷雾场相应剖面测量和分析。结构光的编码方式种类多样,选择适合的测试内容的编码形式至关重要。

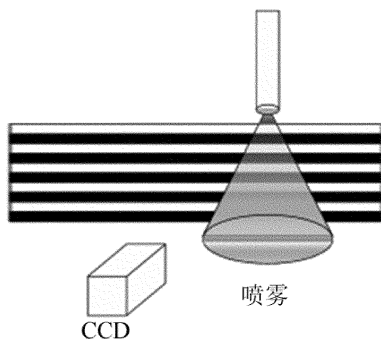


图2 结构光对雾场照明示意图

基于上述优点,SLIPI已经逐渐成为喷雾场测量系统的主要发展方向。瑞典隆德大学的KRISTENSSON等人率先将该技术应用于喷雾检测^[8-9]。利用带编码信息的片状平面结构光照射喷雾场,结构光和喷雾场发生调制。入射结构光编码信息和测量系统有关参量已知,因此可以对所得调制图像解调进而获取喷雾场准确形貌信息,基本原理如图3所示。哈尔滨工程大学DAI在研究片状激光照明成像技术的基础上,提出

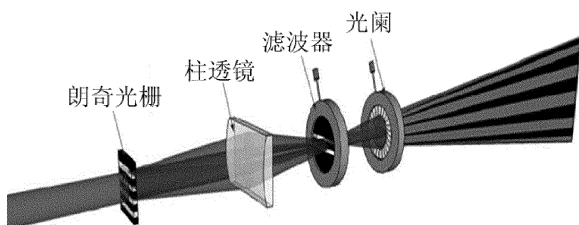


图3 平面结构光照明系统

了一种基于数字微镜器件(digital micro-mirror device, DMD)的平面结构光喷雾场检测系统^[10],能够准确还原被测喷雾场剖面形貌信息,实现高速连续测量,并具有相对简单的标定过程和较好的适应性。

SLIPI抗干扰能力强、精度高和适应性强,在光学喷雾场检测技术中重要性越来越高。SLIPI结合了结构光技术与平面激光成像的共同优势,保留了结构光抗多次散射光线和抗背景光干扰的能力,同时拥有片激光对喷雾场剖面信息精准成像定位的特点,能够更好地改进和增强喷雾粒径测量效果。

2.3 相位多普勒分析仪

相位多普勒分析仪(phase Doppler anemometry, PDA)是一种非接触式实时光学测量方法,建立在光线透过透明球状粒子发出多重散射现象。运动粒子在入射光照射下散射产生频移,分析可求解粒子速度,利用频移相位差可求解粒径,进行综合分析还可获取喷雾流场的其它参量。PDA能够实时准确地测量出透明粒子的速度和直径信息,是一种标准液滴尺寸和速度测量光学诊断系统。

PDA作为一种技术成熟的液滴粒径测量仪器,可测量喷雾场中液滴移动速度及液滴粒径信息,直径测量误差在 $1\mu\text{m}$ 以下,因此很多研究者采用该仪器对静态空气、亚/超声速横向射流喷雾场特性进行测试分析。LIN等人^[11]利用PDA技术,在射流喷口直径 1mm , 1.94Ma 横向来流条件下的液滴粒径和速度分布,这在超声速喷雾场粒径分布测量领域尚属首次。有学者^[12]采用双模态PDA技术对喷雾场内液滴速度、平均直径、数密度等信息进行了测试和采集。国防科技大学WU利用PDA对射流一次破碎喷雾场的液滴粒径分布开展测量研究^[13],分析研究空间单点液滴粒径统计分布规律及喷雾场 D_{32} 随空间变化规律。国防科技大学WANG等人利用PDA技术对煤油两相连续旋转爆震燃烧室喷注器雾化场进行测量^[14],研究典型工况下不同平面位置煤油液滴速度及直径分布。

PDA作为一种成熟的商业产品,在雾化测量领域数据准确性得到广泛认可,测量精度高、技术成熟、使用方便,在喷嘴雾化方面应用较多。但该系统对于测试环境要求高,光路调节繁琐,不适用于不规则的液块以及非球形、不透明的液滴粒径测量。另外PDA系统是单点测量,需要逐个采集每个测量点足够的样本,因此需要试验过程可以持续一定的时间。PDA也不适合测量数密度较大的喷雾场,当浓度高时,多重散射信号以及喷雾场内液滴数密度和粒径变化较大的情况,

均会对接收信号造成较大干扰。

2.4 激光全息技术

激光全息技术可用于测量喷雾场内液滴粒径分布、速度分布,进行 3 维信息定量诊断。激光全息粒径分布测量方法首先需要获取全息图像,所采用的脉冲激光干涉方法分物光波前记录、还原以及处理等过程。记录信息中的干涉条纹灰度和间距分别表示光振幅和相位,获得粒子在不同截面处的图像并进行计算分析,借助粒子景深信息,最终可得粒子形状、直径、密度以及速度分布信息,进而获取粒子分裂、破碎、团聚规律等^[15]。

激光全息技术最开始由 PARRENT 和 THOMPSON 针对大气环境下的液滴,进行雾化相关的测量和研究工作。经过不断完善和改进,目前已可以应用于燃烧室喷雾场测量和诊断^[16]。CHEN 等人利用激光全息技术,对不同来流下总压/马赫数、射流孔径和喷射压力等条件下超声速横向射流雾化现象进行系统研究,得到了液滴平均粒径和数密度分布^[17]。YANG 利用脉冲激光全息技术测量超燃冷/热态煤油喷雾场粒径分布,突破液滴不均匀形状限制,单次测量即可获取较大范围内喷雾场的 3 维图像,从而快速得到喷雾参量信息^[18]。

全息测量作为非接触测量的一种,无扰动、结果准确、失真小。全息显微照相技术对于研究喷雾场规律和液滴形状变化较为有效,尤其适用于液滴形状不规则情况。缺点是同样对系统内光学元件要求高,光路调节复杂、操作困难,后续数据难以处理。

2.5 平面激光诱导荧光/Mie 双光谱成像

粒径 2 维分布的弹性/非弹性散射光测量方法是近年快速发展的新手段,该组合测试方法为雾化场参量测量提供了新的途径。煤油或示踪粒子受到片光激发后可产生弹性散射光如 Mie 散射和非弹性散射光如荧光,从统计学意义液滴的 Mie 弹性散射光与液滴的面积、平面激光诱导荧光(planar laser induced fluorescence, PLIF)非弹性散射光强度与液滴的体积成线性关系,即该组合光学成像方法利用产生的 Mie/荧光散射光强度与雾化场液滴粒径二次方/三次方的比例关系,将雾化场粒径信息利用光强比值进行表达,最终对 Mie/PLIF 散射光信号进行接收处理可得喷雾场粒径 2 维分布信息。假设喷雾场内存在有荧光活性粒子群,被激发后 PLIF 散射光强表示为 I_f , Mie 散射光强表示为 I_M ,则有喷雾索特尔平均粒径 D_{32} :

$$D_{32} = K \frac{I_f}{I_M} = K_1 \frac{\sum_{i=1}^{N_i} D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_i} D_i^2} \quad (2)$$

式中, K 和 K_1 为系数,数值大小与雾化粒子特性和测试系统如片光波长/强度、成像相机焦距及其相距片光位置等均有关,利用目前成熟的测量设备可对其定标。即当系统中的各部件调节完毕、部件间相对位置一致,被测对象与系统的相对位置保持不变的情况下 K 为常量。其余参量与(1)式相同,结合定标所得 I_f/I_M 和 K 曲线,可反演喷雾场 D_{32} 数值。

DESHMUKH 等人采用双光谱成像方法测量流体索特尔平均粒径分布并研究其特性^[19-21]。中国科学技术大学 ZHANG 将 Mie/PLIF 方法应用于超声速流场中煤油粒径测量试验中,对雾化场 SMD 粒径 2 维分布进行测量^[15]。

PLIF/Mie 双光谱成像技术可有效应用于喷雾场粒径信息测量,但测试区域内液滴散射效应会导致入射激光和激发荧光发生沿程衰减最终形成测量误差。

2.6 彩虹散射技术

目前彩虹测试方法主要分为两种^[22]。一种是标准彩虹测量技术,它利用后向散射光与反射光在区域内进行干涉形成明暗条纹测量单个液滴的粒径和折射率。条纹的间距结构信息可反演出喷雾液滴粒径分布等参量,并且折射率随着喷雾液滴密度、温度、组分而变化,因此折射率的微小变化可以较为精准地测试液滴浓度、温度和组分参量,从而实现喷雾场多参量的测量。但需要说明的是标准彩虹测量技术易受高频纹波结构影响且对颗粒球形度异常敏感。另一种为全场彩虹测试技术由标准彩虹技术扩展而来。与标准彩虹相比,通过扩大通光孔径、增大曝光时间,多个颗粒的散射光信息进行叠加,消除了单个颗粒 1 阶彩虹高频纹波信号,形成平滑彩虹信号。记录成数以万计符合一定粒径分布规律喷雾液滴的彩虹,进而可以反演出喷雾液粒的平均折射率、粒径分布、平均温度等雾场信息。

全场彩虹光路系统如图 4 所示。主要由激光发射和信号接收两部分组成。其中激光发射部分一般由连续或脉冲单色激光器、准直系统、反射镜、空间滤波器部件组成,信号接收部分一般是由导光反射镜、光阑、透镜线阵或面阵 CCD 等部件组成。透镜 1 的作用是收集喷雾场液滴散射光信号,各液滴不同角度的散射光汇聚透镜 1 的焦平位置面。为了减少通过第 2 个

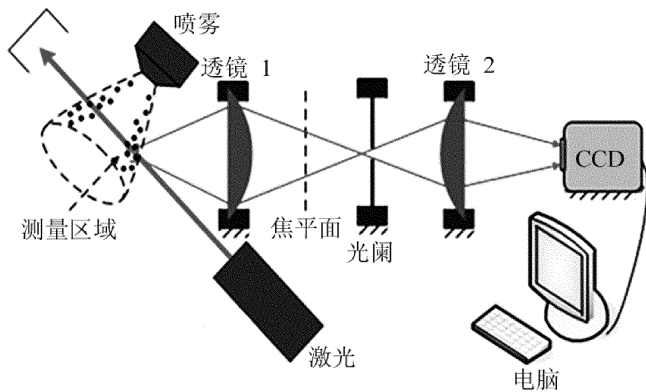


图4 全场彩虹系统示意图

透镜的杂光信号对 CCD 成像造成影响,利用大小和位置可调的光阑选择控制测量区域的进行处理,保证区域内的喷雾粒径具有相近属性从而研究液滴属性演化规律。透镜 1 上记录的各个方向散射光信号最终需要借助透镜 2 来实现成像。

目前国内外学者对彩虹技术在粒径分布方面及其在喷雾场中的应用进行了很好地尝试,取得了一定的研究成果。WU 等人对全场彩虹技术进行大量深入研究,应用其测量粒径分布、液滴折射率等参量,并将全场彩虹技术应用于复杂恶劣的现场环境^[23]。WU 等人应用该技术分别对单喷雾密度、双喷雾组分等参量进行了测量^[24]。浙江大学 WU 和 JIANG 等人采用全场彩虹技术研究粒径分布和喷雾浓度喷雾场的多参量同时测量,通过对颗粒折射率和粒径分布最优化反演得到喷雾场粒径和浓度信息^[25-26]。

应该说绝大部分光学测试手段均无法实现喷雾液滴关键参量多点同时测量。而彩虹测量技术具备喷雾场组分、浓度、温度、粒径多参量非接触实时测量能力,因而被广泛地应用于科学研究和工业过程中液体参量测量。

3 对比分析

综上所述目前喷雾场粒径分布的测量方法有 PDA、SLIPI、光散射、激光全息、PLIF/Mie 双光谱成像、彩虹测量技术等。激光全息技术可用于粒径空间 2 维测量,但是数据量大、处理效率低,且光路积分效应明显。基于光散射原理的激光粒度仪和相位多普勒分析仪等,能够较准确地测量粒径分布比较窄、微小尺寸粒径喷雾,但对含特大颗粒且粒径分布很宽的喷雾,往往难以得到可靠结果甚至不可能进行测量。另外 PDA 费用昂贵、光路复杂且系统配置要求高,对测试环境要求高,难以适用高温强噪音大振动如燃烧室、大型超声速

风洞等真实在线环境。基于光散射的粒径测量仪可对喷雾场进行单点测量,但也存在空间分辨率低的缺点。PLIF/Mie 双光谱成像粒径测量是最近 10 年间快速发展的技术,测量效率高、光路简单和信息量较大,环境恶劣条件下也可进行测量。综合这些测量方法优势及弊端,如表 1 所示。

表 1 典型粒径测试方法对比

测试方法	适应场合及优势	不足
光散射	多应用于静止或低速气流中液体雾化研究、简单	路径积分测量、空间分辨率低
PDA	测量精度高、空间分辨率高,可进行空间 3 维测量,可以同时测量粒径和速度	单点测量效率低、光路调节要求高、价格昂贵
激光全息	两相流场显示,可用于观察一次雾化区域(液滴不规则区域)	存在沿光路积分效应,数据量大处理效率低
PLIF/Mie	空间和时间分辨率高、速度快可用于高密度测量	需要对系数进行标定
SLIPI	抗干扰能力强	无法连续测量、标定繁琐且适应性较差
彩虹测试技术	可实现多参量、多点同时测量	标定复杂

4 结束语

喷雾粒径测量对于喷雾效果诊断具有十分重要的作用。本文中几种喷雾场液滴的测量方法进行综述,重点从原理、应用以及优缺点等方面,对应用场合给出建议分析,希望对喷雾场粒径测量有一定的指导帮助。虽然经过几十年的发展,喷雾场粒径测量技术取得了较大进展,但需要说明的只有深刻认知不同粒径测量手段的基本原理,才能根据具体应用场景选择合适的测试方法,并对测试结果进行科学准确合理的分析。

参 考 文 献

- [1] LIU D P, CHEN P D. Analysis on several detection techniques for atomization effects[J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(8):1-4(in Chinese).
- [2] LIU J, XU X. Research progress of transverse liquid jet atomization in high-speed airflow[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(3):273-283(in Chinese).
- [3] ASHGRIZ N, YARIN A L, YARIN A L, et al. Handbook of atomization and sprays[M]. New York, USA: Springer US, 2011:18-25.
- [4] ZHU Zh B, SU M X, CAI X S. Research on particle size measurement by laser light scattering based on array CCD[J]. Optical Instruments, 2017, 40(3):1-7 (in Chinese).
- [5] LIU J. Experimental and numerical simulation of the breakup process of swirling conical liquid sheet[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012:33-48(in Chinese).
- [6] WU M R, YANG X B, XIONG D X, et al. Principle of structural il-

- lumination fluorescence microscope breaking through diffraction limit and its application in life science[J]. *Advances in Laser and Photoelectronics*, 2015, 52(1):10003(in Chinese).
- [7] BREUNINGER T, GREGER K, STELZER E H. Lateral modulation boosts image quality in single plane illumination fluorescence microscopy[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13):1938-1940.
- [8] MISHRA Y, KRISTENSSON E, ALDÉN M, *et al.* Droplet size and concentration mapping in sprays using slipi based techniques[C]// *Combustion Physics: 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2014. Lund, Sweden:Lund University Publications, 2014;5471234.
- [9] KRISTENSSON E. Structured laser illumination planar imaging SLIPI applications for spray diagnostics[D]. Lund, Sweden:Lund University, 2012;61-65.
- [10] DAI Y X. Research of structured laser illumination planar imaging based on DMD technology application for spray diagnostics[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017;9-24(in Chinese).
- [11] LIN K C, KENNEDY P J, JACKSON T A. Structures of water jets in a mach 1.94 supersonic crossflow[C]//*The 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings 2004*. Reston, Virginia, USA: AIAA, 2004;971.
- [12] XIE J, GAN Z W, DUAN F, *et al.* Characterization of spray atomization and heat transfer of pressure swirl nozzles[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, 68: 94-102.
- [13] WU L Y. Breakup and atomization mechanism of liquid jet in supersonic crossflows[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016;80-95(in Chinese).
- [14] WANG D, ZHOU J, LIN Zh Y. Experimental investigation on operating characteristics of two-phase continuous rotating detonation combustor fueled by kerosene[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(2):471-480(in Chinese).
- [15] ZHANG Zh X. Study on the laser drop sizing of kerosene injected into a supersonic airstream by PLIF/Mie dual spectrum[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014;48-50(in Chinese).
- [16] WANG D Zh, HUANG Zh. Application of laser technology in fuel spray testing[J]. *Laser Technology*, 1995, 19(1):26-34(in Chinese).
- [17] CHEN L, LE J L, SONG W Y, *et al.* Experimental and numerical simulation of jet atomization in supersonic flow[J]. *Experimental Fluid Mechanics*, 2011, 25(2):29-34(in Chinese).
- [18] YANG Sh H. Experimental and numerical simulation of jet atomization in supersonic flow[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010;58-60(in Chinese).
- [19] DESHMUKH D. A method for measurement of planar liquid volume fraction in dense sprays[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 46(4):254-258.
- [20] KANNAIYAN K, VAIDYANATHAN A. Design and characterization of liquid centered swirl-coaxial injector[M]. New York, USA: Springer, 2017;34-42.
- [21] KANNAIYAN K, BANDA M V K, VAIDYANATHAN A. Planar sauter mean diameter measurements in liquid centered swirl coaxial injector using laser induced Fluorescence, Mie scattering and laser diffraction techniques[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 123:257-270.
- [22] JIANG H Y. Improving rainbow scattering measurement technique for the key parameters of droplets and its online applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017;15-33(in Chinese).
- [23] WU Y Ch, PROMVONGSA J, WU X Ch, *et al.* One-dimensional rainbow technique using Fourier domain filtering[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23):30545.
- [24] WU X, WU Y, SAENGKAEW S, *et al.* Concentration and composition measurement of sprays with a global rainbow technique[J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23(12):56-56.
- [25] WU Y Ch, WU X Ch, SAWITREE S, *et al.* Concentration and size measurements of sprays with global rainbow technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 76-83(in Chinese).
- [26] LIU H Y, CAO K L, LI C, *et al.* Experimental study on one dimensional full field rainbow spray measurement method[J]. *Optical Technique*, 2017, 43(3):217-221(in Chinese).