

## 喷雾场测试技术研究进展

杨成虎, 刘 犇  
(上海空间推进研究所, 上海 200233)

**摘 要:** 喷注器的喷雾质量直接影响推进剂在燃烧室中的燃烧效率。为了准确获得其喷雾特性, 以收集法、PDA 及 PIV 为代表的喷雾场测试技术一直在不断发展和完善中, 其中 PIV 技术与数字全息技术相结合发展的 DHPIV 技术具有较好的应用前景。对近年来的喷雾场测试技术进行了综述, 介绍了各种测试技术的原理、特点及其在喷雾场测试中存在的问题。

**关键词:** 喷雾; 测试技术; 综述

**中图分类号:** V432

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 04-0016-08

## Development of diagnostic techniques for spray measurements

Yang Chenghu, Liu Ben  
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The injector spray quality influences the liquid propellants combustion efficiency directly. To get a comprehensive understand of the spray characteristics, many diagnostic techniques for measurements have been put forward and updated. DHPIV is assumed to be a promising technique for spray measurements. This paper reviews different techniques for spray measurements during the recent years, including the principles, characteristics and issues in spray measurements of the techniques.

**Key words:** spray; diagnostic technique; review

### 0 引言

在液体火箭发动机中, 喷注器将燃料和氧化

剂进行雾化和混合, 其雾化细度和混合均匀性直接影响到液体火箭发动机的燃烧性能。通过研究推进剂喷雾在燃烧室空间的液滴分布、速度分布、流强及混合比, 可以了解其在燃烧室内推进

收稿日期: 2010-01-03; 修回日期: 2010-02-26。

作者简介: 杨成虎 (1978—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机设计。

剂能量的释放程度及向燃烧室壁传递的热流。喷雾场测试是准确获取喷注器的喷雾特性的最直接方法, 近二十年来, 国内外研究人员对喷雾场的测试技术进行了大量的研究工作并取得了很多成果。

喷雾场的测试方法有很多, 传统多用接触式测量方法, 如收集法、液蜡冻结法及氧化镁涂层印痕法等进行喷雾场测试, 这些传统的测试方法简单, 操作复杂, 而且由于是接触式测量, 会对喷雾场产生不同程度的影响; 从上世纪 80 年代以来, 随着光学技术和计算机技术的高速发展, 出现了各种非接触式测量技术, 比较有代表性的有 PDA、PIV、PLIF 以及摄影测试技术等。下面简单介绍近年来常用的喷雾场测试技术原理。

### 1 收集法

除收集法之外, 大多数传统的喷雾场机械测试方法已经较少应用了。收集法可以进行喷雾场的流强和混合比测量, 是光学测量技术的有效补充, Puschmann 认为收集法要比 PDA 对喷雾场的测量更可信<sup>[1]</sup>, 实际上在很多情况下, 都采用收集法对新发展的光学测量技术进行检查和标定。因此收集法在喷雾场测量领域一直都有应用, 并被不断发展完善。

吴晋湘等设计了一种两相探针可以进行喷雾场气液两相流强的测量, 这是一种单点测量方法<sup>[2,3]</sup>。为了减少测试时间, 提高测试效率, 将集液管组合布置是一种常用的方法。图 1 和图 2 为典型的集液装置<sup>[1]</sup>。由于径向集液要求喷注器/喷嘴必须位于集液器圆面的中心, 测量的位置不可改变, 因此多数情况下都采用平面布置的周向集液器。

Rupe<sup>[4]</sup> 是较早使用收集法进行液体火箭发动机喷注器研究人员之一。当时的集液器只是在喷雾场 100° 喷雾角范围内布置了四个径向玻璃集液腔, 集液腔的进口端到喷注器出口的距离相等, 为了消除喷注器开启和关闭时对液滴收集的影响, Rupe 还为集液腔加装了可以开启的挡板。Ashgriz<sup>[5]</sup>将 20 个方形界面的铜管排成一排, 铜管

下段连接玻璃试管, 采用分光光度计测量试管内的液体浓度可以得到喷雾的混合比。通过改变集液器的垂直位置可以对喷注器出口的不同距离进行测量。首尔大学的 Yoon 等<sup>[6]</sup>将方形集液格以 15 列 12 行布置成一个平面, 这样可以对整个喷雾场进行快速简单的测量, 不过同时也增大了对喷雾场的干扰。Hoffman<sup>[7]</sup>将 23 个圆形铜管排成一排用以研究汽车发动机喷嘴的脉冲喷雾, 可能是出于减少对喷雾场的干扰的考虑, 其铜管间的间距达到 3.8mm。值得注意的是铜管内径只有 1.7mm, 因此提高了集液器的空间分辨率。McVey<sup>[8]</sup>将各个集液管内的液体引入对应的计量管, 计量管的气体受到压缩, 采用压力传感器测量气体的压力变化就可以计算收集的液体体积和质量, 相应的, 管内液体的排出也达到半自动化水平, 该集液器的测量精度可以达到 1%。

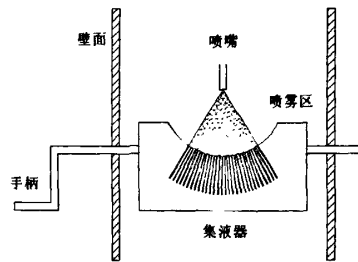


图 1 喷雾场径向集液装置

Fig.1 Radial patternators in spray field

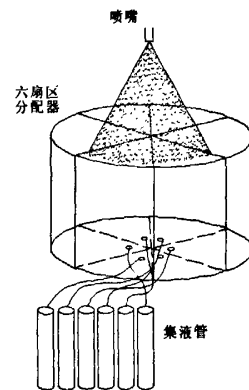


图 2 喷雾场轴向集液装置

Fig.2 Circumferential patternators in spray field

Eric<sup>[1]</sup>采用了如图 3 所示的集液器, 三组集液

管沿周向夹角  $120^\circ$  布置, 每组集液管由 60 个边长 5mm 的方管组成, 方管上面有挡板可以自动开关, 方管下面连接对应的计量管, 计量管的布置如图 4 所示。计量管内的气体压力由压力传感器测量用于计算液体的体积和质量, 每次测量后, 计量管内的液体可以用气体引射的方式导出。系统测量最大误差为  $-1.673\%$ 。

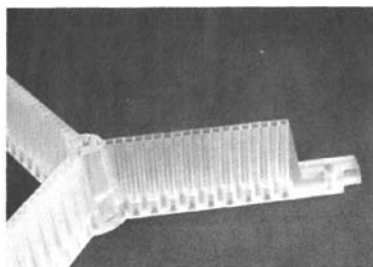


图 3 收集法集液器

Fig.3 Collection tube array

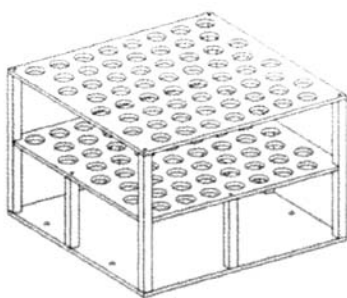


图 4 集液器计量管架

Fig.4 Measurement tube crate

## 2 光学测试技术

和传统粒径测量方法相比, 光学颗粒测量技术具有测量速度快、量程大、精度高、测量过程自动化程度高、接收光信号和颗粒的化学性质无关以及不接触测量对象等诸多优点。

摄影法是最直观的喷雾场光学测试方法, 其原理也较为简单。早期的直接摄影法很难进行单个液滴的观测, 而主要用于喷雾场整体形态的测量, 随着高速相机以及激光全息技术的应用, 实现了喷雾场动态发展观测。高速摄影法、激光全息摄影法逐渐发展起来并与 PIV 技术的结合, 扩

展了其在喷雾场测试中的应用。这里介绍光散射、PDA 及 PLIF 等光学测试技术。

### 2.1 激光散射技术

激光散射法测量粒径的原理如图 5 所示<sup>[9]</sup>, 激光经过扩束和准直之后, 照射在被测颗粒上, 通过自扫描光电二极管阵列检测粒子散射的激光, Mie 散射理论表明, 散射光的衍射部分集中在沿入射方向不大的一个立体角内, 夹角的大小与颗粒的大小有关, 颗粒越大, 产生的散射光的夹角越小, 颗粒越小, 产生的散射光的夹角越大。散射光的强度是粒子直径、光波长、散射角的函数。测量不同角度上的散射光强度, 就可以得到颗粒的粒径分布。

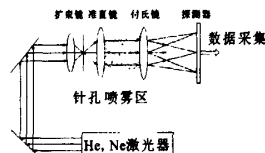


图 5 激光散射法喷雾测量原理图

Fig.5 Schematic diagram of laser scatter method

英国的马尔文激光粒度仪<sup>[10]</sup>是该技术的典型代表。国内也有多家单位基于激光衍射原理自行研制了类似的激光粒度仪<sup>[11]</sup>。一般地, 马尔文激光粒度仪可测出喷雾的索特平均直径和质量中间直径, 但光的重复折射、晕光、光束偏转都会影响测试的精度。

另一种简便的粒度测试技术是透射光脉动法, 由俄国学者 Shifrin 提出<sup>[12]</sup>, 国内上海理工大学和上海交通大学做了比较深入的研究<sup>[13,14]</sup>。其技术原理如图 6 所示, 当平行光束穿越含有颗粒的介质区域时, 由于颗粒的宏观运动, 光束照亮体积内不同时刻的颗粒数也不同, 因此透射光信号是随时间变化的。如果颗粒的宏观运动是定常的, 把光束照亮体积内不同时刻的颗粒数量作为随机事件, 则这一随机过程是平稳的。按各态历经随机过程的特性, 颗粒数随机变量在一定体积内时域上的数字特征可以代表其在整个空间的总集数字特征, 建立颗粒粒径和透射光强之间的关系后, 就能求出颗粒粒径浓度。

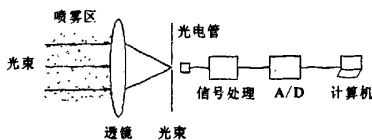


图 6 光脉动法喷雾测量原理图

Fig.6 Schematic diagram of laser transmission fluctuation method

当光束穿越空间内的颗粒数很少时, 透射光强信号含有负脉冲, 当空间内颗粒数量很多时, 透射光强表现为一个被削弱的、相对平稳的信号, 一般认为这种情况已属于光的复散射范围, 数学规律非常复杂, 很难用透射光信号来研究颗粒系统的性质。

散射法和透射法的共同点是测量快速、简便、成本较低, 都是测量光束照亮区域上所有颗粒的平均值, 因此当对空间分辨率有要求时, 应用受到限制。

## 2.2 相位多普勒技术 (PDA)

1842 年, 奥地利科学家 Doppler 首次研究了由于运动产生的波频率变化现象, 后来称为多普勒频移。1964 年, Yeh 和 Cummins 首次观察到水流中粒子的散射光频移, 证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流动速度<sup>[1]</sup>。激光所产生的强单色光用于这类测量的技术形式很多, 都被称为激光多普勒测速技术。上世纪 70 年代, 相位多普勒技术在传统的激光多普勒测速仪 (LDA/LDV) 的基础上发展起来, 并在上世纪 80 年代获得应用。相位多普勒技术的出现实现了液滴的速度和滴径的同时测量。

典型的 PDA 主要由以下几部分组成: 发射光路系统、接收光路系统、信号处理系统、位移系统、计算机及应用软件。技术原理如图 7 所示<sup>[10]</sup>, 从运动的粒子发出的散射光频率与照射在此粒子上光的频率之间所产生的频差, 这一频差正比于流动速度, 对频差进行处理可以得出速度量; 放置多个探测器, 每个探测器接收相同的多普勒频差, 每个探测器之间存在相位差, 该相位差正比于粒子的直径, 对相位进行处理可以得到

粒径信息。

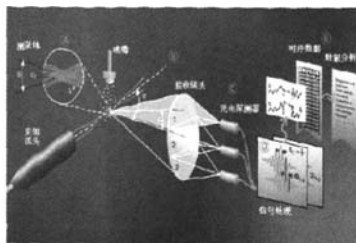


图 7 PDA 系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of PDA system

在 PDA 系统的光学探测器上, 有一条狭缝确定了测量体的长度, 由于光学探测器一般放置在与前向散射方向成  $30^{\circ} \sim 75^{\circ}$  的方向上, 从图 8 可以看到, 当液滴位于测量体的某些位置时, 探测器只能探测到其反射光而不能探测到折射光, 这种现象称作狭缝效应<sup>[16]</sup>; 另一方面, 由于激光光强的高斯分布, 在测量体的某些位置, 液滴的反射光明显强于其折射光光强, 对这些位置上液滴的测量也是不准确的, 如图 9 所示, 这种现象称作高斯光束效应<sup>[16]</sup>。由于 PDA 是假设对折射光进行处理的, 因此系统中的狭缝效应和高斯光束效应可能影响测量的结果。为此发展了一种改进型的 PDA 系统, 该系统由一套标准光学配置和一个平面 PDA 系统组成, 即双模式 PDA。狭缝效应和高斯光束效应对标准 PDA 系统和平面 PDA 系统产生的影响是不同的, 如果两个测量结果的差别超过了给定界限, 就舍弃这次测量, 从而避免了测量错误。

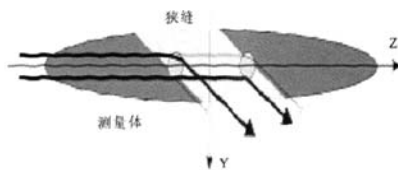


图 8 狭缝效应

Fig.8 The slit effect

PDA 实现了对喷雾场粒径和速度的同时测量, 是喷雾场测试技术的一大进步, 这种单点测量技术在稳态喷雾场已获得广泛应用。在使用中

需要注意由于 PDA 的粒径检测基于球形粒子的 Mie 散射理论, 对非球形粒子测量误差会偏大。

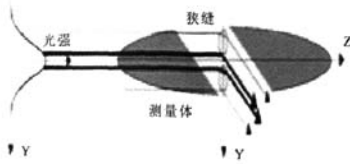


图 9 高斯光束效应

Fig.9 Gaussian beam effect

### 2.3 粒子图像测速技术 (PIV)

上个世纪 80 年代初期, 布鲁塞尔冯·卡门研究所的 Meynart<sup>[17]</sup>最早将 PIV 技术用于水和空气流场的测量。1992 年, Adrian 开始使用 Nd: YAG 激光作为 PIV 光源, 1995 年解决了流动中示踪粒子的产生和分布问题, 使 PIV 的实际应用成为现实<sup>[18]</sup>。近二十年来, 作为一种流动速度全场无干扰瞬时测量方法, 粒子图像测速技术迅速发展, 并逐渐成为流体速度的主要测量方法之一。在喷雾场的测试中, 喷雾液滴可以直接作为示踪粒子, 而同时测量喷雾场中的气相速度时, 仍然需要加示踪粒子。

典型的 PIV 测速系统主要由成像系统、图像记录系统及图像分析系统三部分组成。如图 10 所示, 采用片光照明测试的平面流场, 用图像记录系统连续记录下曝光粒子的位置信息, 然后用图像分析技术得到所测平面各粒子的位移, 由此位移和曝光时间间隔计算出流场各点的速度矢量。

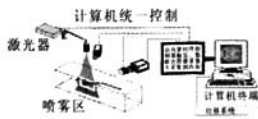


图 10 PIV 系统原理图

Fig.10 Schematic diagram of PIV system

与 PIV 类似的技术有 PTV (Particle Tracking Velocimetry) 和 LSV (Laser Speckle Velocimetry)。当示踪粒子浓度极低时, 跟踪单个粒子的轨迹, 从而得到单点的速度, 称为 PTV; 当示踪粒子浓度高到使粒子图像重叠时, 用统计技术来处理粒

子的散斑图像得到速度信息, 称为 LSV; 当粒子浓度较高, 但粒子图像又没有达到重叠的程度时, 即 PIV 技术。

早期的 PIV 采用干涉条纹方法计算速度, 1983 年, Sutton 和 Adrian<sup>[17]</sup>相继将互相关算法引入 PIV 的图像分析。在二十世纪 90 年代, 许多 PIV 图像速度提取算法相继被提出, 主要可分为适用于低粒子浓度的算法和适用于高粒子浓度的算法。适用于低粒子浓度的算法有二值化互相关法、弹性模型法、速度梯度张量法及四时间步追踪法等, 适用于高粒子浓度的算法有灰度分布相关法和 MQD 法 (Minimum Quadratic Difference)<sup>[19]</sup>。灰度分布互相关法适合于各种流动的测量, 缺点是计算量大, MQD 算法是在灰度分布相关法基础上发展而来的, 显著缩短了计算时间。拓扑图论、神经网络、小波变换、遗传算法及模糊聚类等算法也相继被引入 PIV 图像速度提取中来。到现在, 互相关算法仍然是 PIV 图像速度提取算法的基础<sup>[20-22]</sup>。

PIV 经历了从平面二维速度测量 (2D-2C/2Dt-2C) 到平面三维速度测量 (2D-3C/2Dt-3C), 再到三维空间三维速度测量 (3D-3C/3Dt-3C) 的发展。目前, 通过采用两个相机从不同的视角观察, 从每个相机视点各自测量到垂直于相机光轴的二维速度, 然后对这两个二维速度矢量进行综合分析, 得到三维速度矢量 2D-3C/2Dt-3C 的技术已经得到应用<sup>[23]</sup>。

三维空间三维速度场时间历程技术仍是尚未攻关的难关。技术方案包括高速扫描 PIV, 散焦 PIV, Tomo-PIV 及全息 PIV 等<sup>[24-29]</sup>。高速扫描 PIV 从严格意义上说并不是直接的瞬时空间场信息记录, 而且高速的切面扫描技术上实现也比较困难。散焦 PIV 实质上是一种 PTV, 和多相机 PTV 一样采用粒子跟踪判读技术, 其硬件结构比较简单, 定位比较准确, 但难以用语离子浓度比较高的情况。TSI 公司推出的 V3V 即属于多相机 PTV, 多用于液体速度场的测量, 在气体环境中的喷雾场测量还比较困难。采用分子示踪的全场多普勒测速技术作为切面的三维速度测量, 特别在  $Ma>3$  的流动中有其独到的应用潜力, 但实现

三维空间三维速度场测量还有很多困难。HPIV 是一种较好的方法,图 11 为同轴和离轴 HPIV 的光路布置方案。

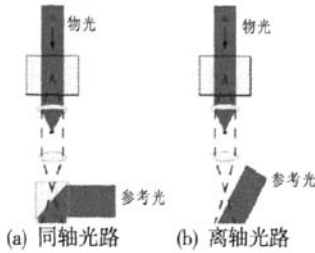


图 11 全息 PIV 光路布置

Fig.11 Light path of holograph PIV

普通的 HPIV 可以取得一个瞬时的三维流动结构和速度场<sup>[30]</sup>,但由于采用传统全息干板和底片,需要进行化学湿处理,难以实际应用。将数字全息与 PIV 结合的数字全息粒子图像测速技术(DHPIV)被认为是最具潜力的 3Dt-3C 流体力学观测技术。DHPIV 技术的应用需要解决被测物体的空间定位精度与空间分辨率、信噪比问题和数字全息图像的快速重建与再现的物理方法等问题。根据物光与参考光光路的布置可以将 DHPIV 技术分为同轴数字全息 PIV 和离轴数字全息 PIV。当物光和参考光同轴照射时,不再需要任何附加的参考光照明光路,因此系统结构简单,便于集成,稳定性较好;另一方面,当前 CCD 像元尺寸及间距的局限性导致对可分辨的空间频率的限制,这种限制要求物光与参考光夹角在几度的范围内,更大的离轴角度将导致物体成像的极限分辨率下降,因此 DHPIV 技术主要采用同轴方法<sup>[31]</sup>。目前国际国内都已展开 DHPIV 技术的应用研究,但还未能实用化<sup>[31-33]</sup>。

PIV 技术可实现非稳态喷雾速度场的准确测量,是对 PDA 测试技术的补充。需要注意的是,除了稠密场对光学测量的影响,喷雾场中的大液滴对激光的散射会影响小液滴在相机芯片上的成像,给速度的判读带来较大的困难。

#### 2.4 平面激光诱导荧光技术 (PLIF)

激光诱导荧光 (Laser induced fluorescence) 技术是一种激光分子流场检测技术,在喷雾场研

究中使用的较多。从上世纪七十年代以来,该技术就得到了较大发展。从技术本身讲,不仅采用了多种多样的激光荧光染料用于流动显示,流态的记录方式,也从照相、录相,线阵光敏元件和 CCD、CMOS 相机摄取流态图像和浓度场定量信息。如今 LIF 技术已成为揭示复杂流动现象和定量测量分析最重要的手段之一<sup>[34]</sup>。

激光诱导荧光流动显示的基本原理如图 12 所示,荧光染料在激光照射下,处于基态的分子或原子吸收激光光子能量跃迁至高能态,然后在很短的时间通过自发辐射跃迁至另一低能态,在跃迁过程中释放荧光,当荧光强度达到峰值时,使用 CCD 捕捉信号,用图像处理软件处理图像,最终获得组分浓度及混合比分布。在喷雾场测试中,利用 PLIF 技术可以方便地获取流强和混合比参数<sup>[35]</sup>。

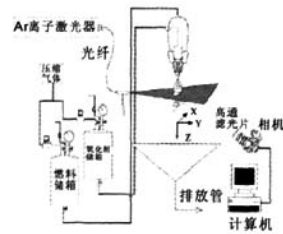


图 12 PLIF 喷雾场测试示意图

Fig.12 Schematic diagram of PLIF system in spray field

根据 Beer 定理,流场中  $(x, y)$  点的荧光光强  $I_f(x, y)$  主要受该点入射激光光强  $I_i$  和荧光物质浓度  $C_i$  的影响:

$$I_f(x, y) = K' I_i(x, y) C_i(x, y) \Delta t(x, y) \quad (1)$$

式中,  $K'$  为常数;  $\Delta t$  为片光照射时荧光分子的停留时间,接近常数。当荧光分子在流体中混合均匀时,荧光分子浓度可以表征该点的质量流量。因此

$$I_f(x, y) = K I_i(x, y) m(x, y) \quad (2)$$

式中,  $K$  为常数;  $m$  为喷雾场中  $(x, y)$  点的质量流量。忽略激光光强的衰减或通过不同方法进行衰减修正,则可以由荧光信号强度计算喷雾场中的流强分布:

$$\dot{m}(x,y) = \frac{I_f(x,y)}{\sum_{x,y} I_f(x,y)} \frac{\dot{m}}{A} \quad (3)$$

式中,  $\dot{m}$  为喷流的质量流量;  $A$  为一个像素的面积。

分别在燃料和氧化剂中添加不同的荧光染料, 就可以测出喷雾场各点的燃料和氧化剂流强, 并得到氧化剂和燃料的混合比。

注意到 LIF 信号强度与粒子直径的三次方成正比, 而 Mie 散射信号强度与粒子直径的平方成正比, 结合 LIF 信号和 Mie 散射信号, 可以获得截面的粒度分布。Laurent 等<sup>[36]</sup>结合 PLIF 和 Mie 散射对工业喷嘴的水喷雾进行了测量, 并采用互相关算法对两种信号图像处理获取了喷雾速度, 在喷雾测量中, PLIF 技术和 PIV 技术也可以联合应用, 同时获取喷雾场的速度场和浓度场<sup>[7]</sup>。目前, PLIF 在内燃机燃油喷雾<sup>[38-39]</sup>和火箭发动机推进剂喷雾<sup>[40-41]</sup>方面获得了广泛应用。

激光诱导荧光技术是测量喷雾场流强和混合比的有效手段, 在使用中需要注意由于喷雾场液滴的散射和吸收, 入射激光和激发的荧光会在沿程发生衰减, 且同一测量平面上的衰减率不相等, 从而导致测量误差。显然, 喷雾场越稠密, 测量误差会越大。

### 3 结论

对当前常用的喷雾场测试技术进行了回顾和总结, 介绍了各类测试技术的原理及其在喷雾场测试中的特点和存在的问题, 小结如下:

(1) 利用激光散射法测量喷雾非常方便快捷, 但无法获取喷雾场的细节信息是这类技术的一大缺陷。

(2) PDA 和平面 PIV 测试技术目前已较为成熟, 是喷雾场的液滴滴径和速度测试的较好选择; 结合高速摄影和全息摄影技术, 当前 PIV 正向三维空间三维速度高速测量方面发展; PLIF 技术实现了喷雾场的流强和混合比的非接触测量, 但要实现定量测量还比较困难。

(3) 尽管各种光学测试技术在喷雾场中获得

了长足应用, 但在稠密喷雾场中, 目前的光学测量技术都存在不同程度的困难, 收集法在喷雾场的流强和混合比测量方面仍有自身的优势, 需要在提高其空间分辨率以及自动化方面做更多工作。

### 参考文献:

- [1] Burroughs E W. Development of a High-Resolution Mechan-ical Spray Patternator for the Characterization of Fuel Sprays[D]. Cincinnati: University of Cincinnati, 2005.
- [2] 吴晋湘, 刘卫东, 庄逢辰. 气液两相同轴喷注器的流强及混合比分布的实验研究[J]. 推进技术, 1993, (3): 29-35.
- [3] 吴晋湘. 一种能同时测量喷嘴下游气液流强的两相探针的研制[J]. 航空学报, 1996, 17(6): 694-701.
- [4] Rupe J H. The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Jets[C]. Jet Propulsion Lab, 1953.
- [5] Ashgriz N, Brocklehurst. Mixing Mechanisms in a Pair of Impinging Jets [J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(3): 736-749.
- [6] Jung K, Koh. Assessment of Planar Liquid-Laser-Induced Fluorescence Measurements for Spray Mass Distributions of Like-Doublet Injectors [J]. Measurement Science and Technology, 2003, (14): 1387-1396.
- [7] Hoffman J A, Martin. A Technique for Obtaining Spatial and Temporal Mass Flux Measurements of a Pulsed Spray: A Description of the Hardware and Methodology[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(11): 4247-4252.
- [8] Mcvey J B, Russell. High-Resolution Patternator for the Characterization of Fuel Sprays [J]. Journal of Propulsion and Power, 1987, (3): 8-10.
- [9] 黄洁彬, 杨冠玲, 韩鹏. 激光粒度仪的系统实现及展望[J]. 中国粉体技术, 2008, (3): 14-19.
- [10] 杨道媛, 马成良, 孙宏魏. 马尔文激光粒度分析仪粒度检测方法及其优化研究[J]. 中国粉体技术, 2002, 8(5): 27-30.
- [11] 周文, 陆勇, 王式民. 激光衍射散射技术在超声波喷嘴雾化特性测量中的应用[J]. 能源研究与利用, 2003, (1): 22-25.
- [12] 吴志锋. 光脉动法颗粒测试技术及其在喷嘴雾化研究中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- [13] 吴伟亮, 陈汉平, 金浩. 新型喷雾光学测量仪的研制[J].

- 热能动力工程, 2003, 18(6): 623-627.
- [14] 黄春燕, 沈嘉祺, 蔡小舒. 透射光脉动法在颗粒测量运用中若干问题探讨[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 96-99.
- [15] 洪昕, 张海翔, 蒋诚志. 激光多普勒测量技术及其运用[J]. 航空计测技术, 1998, 18(3): 3-6.
- [16] A/S D D. BSA Flow Software Installation & User's Guide [M]. Skovlunde: Dantec Dynamics A/S, 2003.
- [17] Markus Raffel C E W, Steve T Wereley. Particle Image Velocimetry [M]. Puducherry: Intergra Software Services Pvt. Ltd, 2007.
- [18] 余文国. 柴油机缸内流畅 PIV 测试技术的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [19] 石惠娟. 循环流化床流动特性 PIV 测试和数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [20] 冯旺聪, 郑十琴. 粒子图像测速(PIV)技术的发展[J]. 仪器仪表用户, 2003, 10(6): 1-3.
- [21] Stanislas M K O, Kahler C J. Main Results of the Third International PIV Challenge [J]. Experiments in Fluids, 2004, 45: 27-61.
- [22] 金上海. PIV 技术的算法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- [23] Wieneke B. Stereo-PIV Using Self-Calibration on Particle Images[J]. Experiments in Fluids, 2005, 39: 267-280.
- [24] G E Elsinga F S, Wienke B. Assessment of Tomo-PIV for Three-Dimensional Flows[C]. 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, 2005.
- [25] G E Elsinga F S, Wienke B. Tomographic Particle Image Velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 2006, 41: 933-947.
- [26] Ralph Lindken J W, Bernhard Wieneke. Stereoscopic Micro Particle Image Velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2006, 41: 161-171.
- [27] Gerrit E, Elsinga B W, Fulvio Scarano. Tomographic 3D-PIV and Applications [J]. Appl. Physics, 2009, 112: 103-125.
- [28] Yan Yang B K. Measurements of the Characteristics of Spray Droplets Using in-Line Digital Particle Holography [J]. Journal of Mechanical Science and Technology. 2009, 23: 1670-1679.
- [29] M Pilar Arroyo K D H. Recent Developments of PIV Towards 3D Measurements [J]. Appl. Physics, 2009, 112: 127-154.
- [30] Grandt I. Particle Image Velocimetry: a Review [J]. Proc Instn Mech Engrs, 1997, 211: 23.
- [31] 魏润杰, 申功忻, 丁汉泉. 数字全息粒子图像测速技术研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(5): 457-461.
- [32] Yeon Jun, Choo B S K. Measurements of Three-Dimensional Velocities of Spray Droplets Using the Holographic Velocimetry System [J]. KSME International Journal, 2003, 17(7): 1095-1103.
- [33] 浦兴国, 浦世亮, 袁镇福. 激光数码全息技术在两相流三维空间速度测量中的应用[J]. 动力工程, 2008, 28(2): 242-245.
- [34] 申功忻, 晋健. LIF 喷雾混合流浓度场定量测量[J]. 力学学报, 1992, 24(4): 488-493.
- [35] Kihoon Jung B L. The Mixing Characteristics of F-O-O-F Injector in Liquid Rockets Using Plif Technique[C]. 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, Indiana, 2002.
- [36] Laurent Zimmer Y I. Simultaneous LIF and Mie Scattering Measurements for Branch-Like Spray Cluster in Industrial Oil Burner [C]. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NV, 2002.
- [37] Reungoat D, Faure R N, Faure J P. 3c PIV and PLIF Measurement in Turbulent Mixing Round Jet Impingement[J]. Journal of Visualization, 2007, 10(1): 99-101.
- [38] Jose V, Pastor J J L, Enrique J Julia. Planar Laser-Induced Fluorescence Fuel Concentration Measurements in Isothermal Diesel Sprays [J]. Optics Express, 2002, 10(7): 309-323.
- [39] 雷卫, 苏万华. 一种新的 HCCI 柴油机燃油喷雾特性的 PLIF 法测试装置[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 405-409.
- [40] 陈威丞. 冲击喷流雾化混合之分析 [D]. 台湾: 成功大学, 2007.
- [41] Jennifer A, Inman P M D, Robert J Nowak. Fluorescence Imaging Study of Impinging Underexpanded Jets[C]. 46th AIAA Aerospace sciences meeting and Exhibit, Reno, NV, 2008.
- [42] 黄真理, 李玉梁, 余常昭. PLIF 技术测量浓度场及其二维数字校正[J]. 力学学报, 1994, 26(5): 616-625.
- [43] 黄真理, 李玉梁, 余常昭. 平面激光诱导荧光技术测量横流中射流浓度场的研究[J]. 水利学报, 1994, (11): 1-7.

(编辑:马杰)