

基于PLIF/Mie图像测量煤油超雾化场数值特性^{*}

徐宝剑¹, 刘维来¹, 徐胜利², 王克逸¹, 付可可¹, 吴成陆¹

(1. 中国科学技术大学 嵌入式系统实验室, 安徽 合肥 230022;

2. 清华大学 航空航天学院, 北京 100084)

摘 要: 为获得航空煤油在超声速气流中喷射雾化后粒径二维分布信息, 设计了基于PLIF/Mie双光谱成像法的测量系统。在PLIF/Mie煤油超雾化粒径测量方法基础上, 实现了SMD计算公式系数的标定和煤油超声速射流破碎和雾化的SMD二维在线测量, 取得射流雾化场SMD径向分布、穿透深度、展向输运宽度等关键参数。结果表明: 射流分两个阶段, 前期突变阶段和稳定阶段, 在初始射流压强为1.0MPa, 来流初始压强为0.5MPa, 喷孔直径1mm, 喷射角度为90°的工况下, 稳定阶段煤油喷雾SMD稳定在10 μ m左右, 射流径向SMD由内向外由小变大, 整体展向宽度范围比穿透深度稍大, 在各截面位置变化趋势一致。

关键词: 煤油雾化; 超声速气流; 索太尔平均直径; 测量方法

中图分类号: V231.23; O358 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 04-0905-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.04.023

Measurement of Numerical Characteristics of Kerosene Atomization Field Based on PLIF/Mie Image Measurement Method

XU Bao-jian¹, LIU Wei-lai¹, XU Sheng-li², WANG Ke-yi¹, FU Ke-ke¹, WU Cheng-lu¹

(1. Embedded System Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China;

2. College of Aeronautics and Astronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to obtain the two-dimensional distribution information of the particle size distribution in the supersonic flow of aviation kerosene, a measurement system based on PLIF/Mie dual spectrum imaging was designed. On the basis of the measurement method of PLIF/Mie kerosene atomization particle size, the calibration of SMD calculation formula coefficients of SMD two-dimensional measurement of kerosene supersonic jet break-up and atomization has been realized, and the key parameters such as radial distribution of SMD, penetration depth and spanwise transport width have been obtained. Results show that the jet can be divided into two stages—the unstable stage and the stable stage. When the initial jet pressure is 1.0MPa, the initial flow pressure is 0.5MPa, the nozzle diameter is 1mm, and the injection angle is 90°, the kerosene spray SMD stabilized at around 10 μ m in the stable stage. The radial SMD of jet is changed from small to large from inside to outside. The overall spanwise transport width range is greater than the penetration depth, but the trend of change in the position of each section is the same.

Key words: Kerosene atomization; Supersonic flow; Sauter mean diameter; Measuring method

^{*} 收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-05-28。

基金项目: 国家自然科学基金 (11272309)。

作者简介: 徐宝剑, 男, 硕士生, 研究领域为超声速煤油雾化。E-mail: bjxu@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘维来, 男, 博士, 讲师, 研究领域为测控技术和雾化场激光测量技术。E-mail: weilai@ustc.edu.cn

1 引言

煤油超声速雾化的粒径测量是超燃冲压发动机性能测试和设计领域的具有挑战性的课题,尽管一直以来都被广泛关注和研究,但精细的在线测量方法对于研究雾化场粒径分布依然迫在眉睫。雾化场粒径测量是两相流研究中带有共性的问题,过去利用光散射原理,并研制了的单点测量的相关仪器,如PDA和Marlvin粒径分析仪、激光粒度仪等。这些仪器对光路调节要求高、同时粒径反演算法精度差且效率低(计算效率和单点测量),很难适应大量工程型试验设备和工业规模雾化测量环境和需求,也不满足科研型设备(激波风洞、爆炸抛撒等)的非定常雾化场测量需求。

目前测量粒径的方法有很多,费立森^[1]利用Mie散射、杨顺华^[2]利用激光全息测量了煤油超燃冷态和热态雾化场粒径分布,两者分别给出了单点和截面粒径分布数据。常用的纹影法是利用光在被测流场中的折射率梯度正比于流场的气流密度的基本原理进行测量的,广泛用于观测气流的边界层、燃烧、激波等。李锋等^[3~6]利用纹影法对不同燃烧室的射流特性进行了研究,对射流雾化掺混特性进行了数理分析。陈亮等^[7~10]同时采用全息诊断和高速纹影,对不同来流总压、来流马赫数、喷孔直径和喷射压力等条件下超声速冷态流场液体射流雾化进行了研究。

王金华等^[11]在高速摄影法的基础上研究了天然气高压喷射射流特性。为了利用液态煤油在燃烧性能方面的优点,改善其缺点,研究液态煤油射流在超声速气流下的破碎和雾化特性以提高燃烧效率显得尤为重要。粒径二维分布的弹性/非弹性散射光测量方法是近年快速发展的新方法。在片光激发下,从统计上说,液滴发出的弹性/非弹性散射光强度分别与液滴的面积和体积成正比,采用组合的物理光学和成像方法,如Mie/PLIF、Mie/Raman成像,可测量雾场粒径二维分布。Deshmukh D等^[12~15]采用PLIF/Mie法测量SMD粒径分布,并对流体特性进行研究。

本项目粒径测量拟采用PIV单点粒径测量与PLIF/Mie相结合的方法进行研究,采用基于脉冲片激光的PLIF/Mie散射光粒径测量方法,在对测量系统进行标定的基础上测量粒径,研究了超声速气体和横向射流的相互影响、喷射参数对雾化质量的影响以及超声速雾化场的二维粒径分布情况,可满足雾化场瞬态性和高效性的需求,为超声速雾化场粒径

二维分布测量提供新途径,以满足煤油超燃雾化场测量的迫切需求。

2 测量原理

激光照射液滴的荧光和散射光的强度比值与液滴直径的关系是激光诱导荧光和Mie散射光(PLIF/Mie)技术的基础,在统计意义上,PLIF/Mie技术的基本前提是每个被照射液滴的散射光强度 I_s 与液滴表面积成正比

$$I_s(D) = a_s D^2 \quad (1)$$

每个被照射液滴的荧光强度 I_f 与液滴体积成正比

$$I_f(D) = a_f D^3 \quad (2)$$

式中 D 为液滴直径, a_m 和 a_f 是常量,与成像相机的灵敏度、光学系统的特性、图像放大率等因素有关,是测量系统的信号传输特性系数。液滴尺寸分布的索特平均直径(SMD)的定义并计算得

$$SMD = \frac{\int_{D=0}^{\infty} D^3 dN(D)}{\int_{D=0}^{\infty} D^2 dN(D)} = \frac{\int_{D=0}^{\infty} a_f I_f(D) dN(D)}{\int_{D=0}^{\infty} a_s I_s(D) dN(D)} = K \frac{\int_{D=0}^{\infty} I_f(D) dN(D)}{\int_{D=0}^{\infty} I_s(D) dN(D)} \quad (3)$$

式中 K 是由PLIF/Mie强度比值转换成所测量液滴的SMD的标定参数,与成像相机相对于片激光的位置、片激光的波长及强度、成像相机的焦距等有关。当测量系统的各个组成部件特性调整好,各个部件之间相对位置保持不变,且测量对象与测量系统的相对位置保持不变的情况下, K 就是常量。标定 K ,首先要得到煤油喷雾的SMD,以及 I_f/I_s 。

Georgios等^[16]利用Mie散射理论并结合实验深入研究了利用式(3)计算0~100 μm 范围的雾场粒径适用条件。得出的结论是,当测量相机光轴与激发激光投射方向成约60°夹角的时候,得到的数据误差较小。因此,本文采用的光路布置,始终满足相机光轴与片激光投射方向成60°角,以获得稳定可靠的SMD粒径测量结果。

3 SMD计算公式的系数标定

3.1 双光谱测量荧光和Mie散射光图像

本文利用双光谱成像系统对静态雾化场煤油喷雾激发光图像进行拍摄。静态雾场煤油喷射压力为1.0MPa,喷头的喷口直径为1.0mm。在煤油喷雾形成3min之后,开始用片激光侧面激发,片激光波长为

284nm,厚度控制在0.5mm左右,并经过煤油喷口正下方的中轴线。同时打开静态雾化腔的出气阀,观察压力表控制腔内压强不变。实验所用的ICCD相机为Andor公司的New iStar camera相机。为了对SMD计算公式系数 K 进行标定,杨辉^[17]设计了双光谱成像光路,如图1,片激光激发煤油产生多种波长的激发光,经过双像器和滤波片之后,分别产生荧光和Mie散射光,然后被ICCD相机接收。滤波片通过Mie散射光的滤波片采用的是Semrock公司生产型号为FF01-285/14滤波片,通过荧光散射光的是该公司生产的LP03-325RE-25滤波片。如图2,左边为荧光图像,右边为Mie散射光图像。考虑了相机感光度的非线性效应,在Mie散射光路增加减光镜,已保证ICCD相机能同时获得荧光图像和Mie散射光图像。

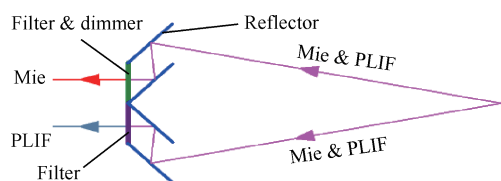


Fig. 1 Double spectral imaging optical system

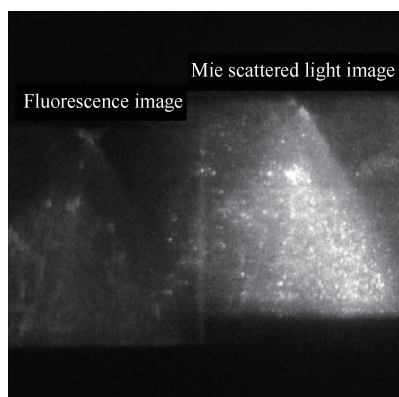


Fig. 2 Static fog captured by the ICCD camera and dual image camera

对利用ICCD相机拍摄到的静态雾场图片进行区域划分,可以计算出荧光光强与Mie散射光光强之比 I_f/I_s 。

为了明确拍摄到的煤油雾化场的实际物理位置,需要对静态雾化场中ICCD相机的放大倍数进行标定。标定采用已知大小的“十字形”标定模板,放在喷口正下方,并利用双光谱成像系统进行拍摄。实验所用的ICCD相机为Andor公司的New iStar camera相机。通过计算所拍摄图像中边长所占的像素数,来确定双光谱成像系统像素所表示的实际物理尺寸。通过计算得到70个像素所表示的距离为

10mm,进而可以计算出锥形喷雾的实际尺寸,见图3。

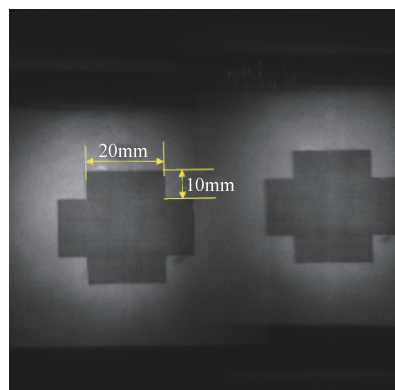


Fig. 3 "Cross" calibration plate image located in the laser position captured by ICCD camera

3.2 静态雾场煤油喷雾不同位置单个煤油颗粒粒径的测量

由式(3)可知,确定了 I_f/I_s 的值,需要知道煤油颗粒的SMD才能求出系数 K ,因此需要对煤油喷雾的颗粒大小进行测量。实验采用PIV系统喷雾粒径测量方法,由Genimi PIV激光器产生片激光穿过煤油喷雾的中轴线,实验镜头采用长焦显微镜,镜头前端缘平行于片激光,距离500mm,拍摄过程中要打开排气口,控制腔内压强不变,见图4。

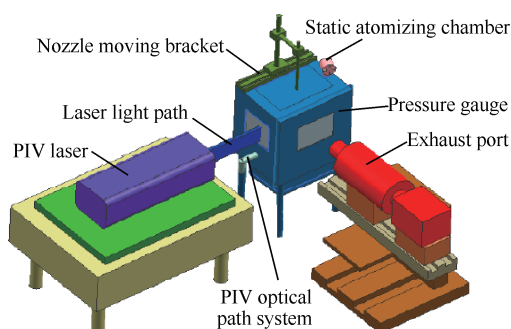


Fig. 4 Optical path of PIV system for static fog field

由于PIV系统测量的视场范围较小,适用于小范围内的粒径测量,因此需要移动长焦显微镜拍摄系统,进行多点拍摄,移动过程中保证镜头距离片激光的距离不变。在图像拍摄的过程中,以喷口位置为坐标原点,射流方向为 Y 方向,垂直于射流方向为 X 方向,以10mm为单位分别对喷雾场 X 方向5个位置, Y 方向7个位置,共35个位置的点进行单点粒径测量,见图5。

图6为实验过程中拍摄的图片,考虑到喷雾过程中的复杂性,需要对煤油颗粒进行筛选。由于煤油喷雾颗粒较小,片激光具有一定厚度,所以会使得前后距离很近的煤油颗粒都能在长焦显微镜的景深范

围内,即出现形状不规则、长条形的亮斑,这有碍于煤油颗粒的计算,取点计算的时候需要进行剔除。对于独立的清晰圆状的亮斑(如图6中1,2,3位置所示)进行保留,用于计算。对保留的光斑进行滤波,并对亮斑所占的像素个数,亮斑直径进行统计。

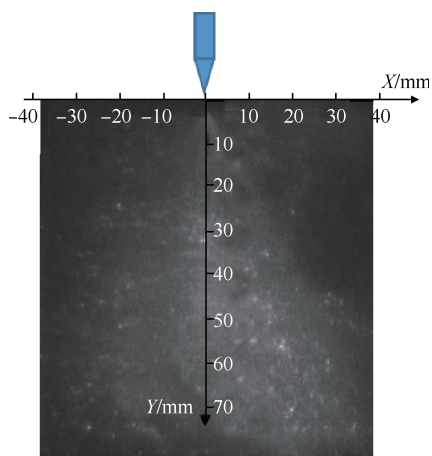


Fig. 5 Static spray kerosene spray location

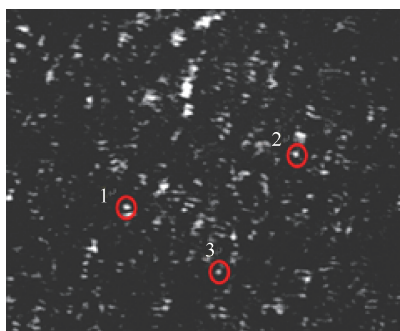


Fig. 6 Photo of kerosene particles at $X=0$, $Y=5\text{mm}$

上述测量只能得到该成像系统下,煤油颗粒所占的像素数,因此实验还要进一步对PIV成像系统的放大倍数进行标定。

将红米 Note 增强版手机屏幕置于片激光位置,即喷口正下方,利用长焦显微镜和PIV测量系统的相机(Hisense PIV/PLIF Camera)进行拍摄,长焦显微镜前端面平行于手机,距手机500mm。拍摄到的手机像素图像如下。已知手机像素的大小为 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$,经计算,一个手机像素在图片里面占像97.5个像素,因此可得,PIV系统相机单个像素所对应的实际物理尺寸为 $0.975\mu\text{m}$,见图7。

利用上述计算所得PIV系统相机单个像素所对应的实际物理尺寸,得到不同煤油喷雾位置煤油颗粒的大小 D 。由于静态雾场粒径分布图像左右一致,用PIV测得的单点煤油粒径 D 与平均粒径 SMD 基本一致,因此在标定系数 K 的时候用煤油颗粒单点粒径

D 代替平均粒径 SMD 。本实验用的是QUESTAR QM100长焦显微镜,其数值孔径大小由 $A = n \sin \alpha$ 决定,其中 n 是被观察物体与透镜之间介质的折射率; α 是透镜孔径角(2α)的一半。经计算其 $A=0.1143$,阿贝分辨率: $Y = \lambda / 2A$, $\lambda = 532\text{nm}$, $Y = 2.327\mu\text{m}$,该结果说明衍射光斑的影响相对于最终实验结果不能忽略,所以对最终测量计算的 SMD 需要减去衍射带来的影响值。

对锥形煤油喷雾划分的35个位置进行 SMD 的计算,最后根据上节求出的 I_t/I_s ,即由式(3)求出对应位置的 K 值。

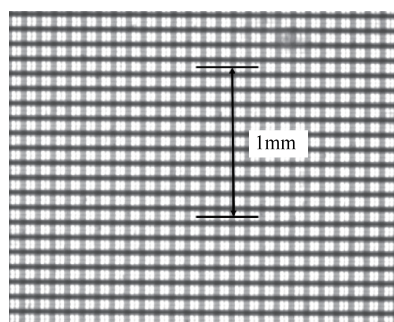


Fig. 7 Image pixels in the telephoto microscope in mobile phone

4 实验结果与分析

如图8所示,利用反射镜、平凹柱面镜和平凸圆面镜将YAG激光器和染料激光器产生的284nm的激光展成片激光,片激光与风洞实验腔成 30° 夹角入射,ICCD相机主光轴片激光光路成 60° ,ICCD相机与激光平面相距500mm。保证风洞实验和静态雾场实验下,激光光强、相机与片激光的相对位置等参数不变,才能使得静态雾场测量的系数 K 值,能被动态雾场实验拍摄的图片所用,进而保证动态雾场 SMD 测量的可靠性。其中激发光波长与厚度与标定过程保持一致,初始射流压强为 1.0MPa ,风洞来流初始压强为 0.5MPa ,喷孔直径1mm,喷射角度为 90° ,如图9所示。

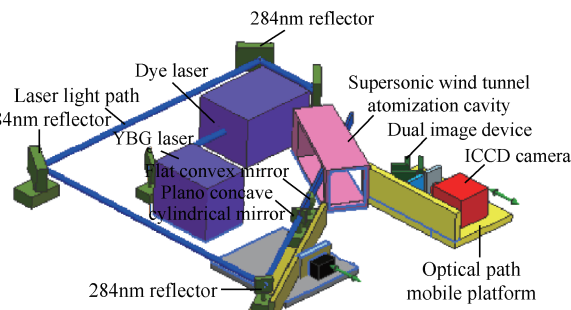


Fig. 8 Double spectral light path in kerosene atomization in supersonic wind tunnel

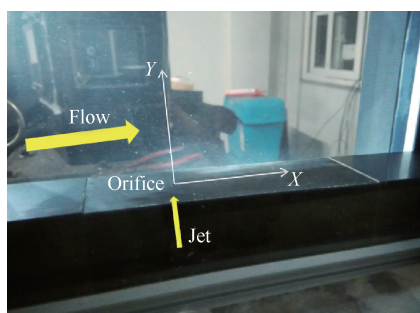


Fig. 9 Spray hole block

为了研究射流雾化过程中 SMD 总体分布和不同位置的 SMD 分布情况,对各个片激光截面位置的 SMD 做测量分析。截面位置分别距离喷孔 5~45mm,间隔为 5mm,见图 10。

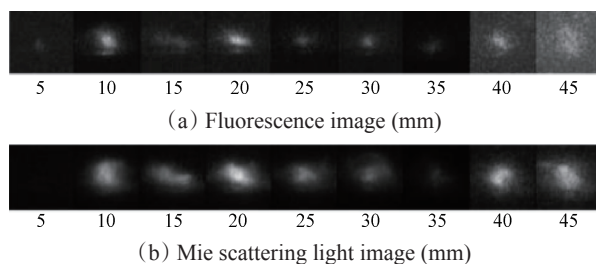


Fig. 10 Spot image at different laser cross section

图 11 为不考虑颗粒蒸发情况下,沿着 X 轴方向,不同片激光截面煤油颗粒总体 SMD 分布图,其中 Y_i 表示的是不同 SMD 的颗粒占总的煤油喷雾颗粒的百

分比, SMD 集中分布在 8~16 μm ,峰值在 13 μm 和 20 μm 。可以看出,在超声速煤油雾化场中,煤油 SMD 为十几微米。

不同位置片激光截面中不同 SMD 值对应的像素数占所属截面雾场范围内总像素数的百分比如图 12 所示,射流在距离喷孔 5mm 处的 SMD 最大,分布在 20 μm 左右,超过 5mm 之后 SMD 开始减小,且 SMD 大小分布比较大。随后逐渐趋于稳定, SMD 大小稳定在 8~16 μm 。可知由于射流破碎开始阶段,煤油颗粒较大,颗粒大小大于 18 μm ,稳定之后,颗粒大小分布比较均匀。

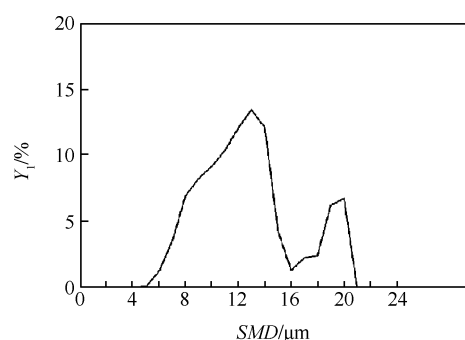
Fig. 11 Overall SMD distribution of kerosene jet spray

图 13 分别对射流在距离喷孔 20mm 处的截面进行 SMD 径向分析,整个光斑为 15mm $\times$ 15mm,为了研究煤油 SMD ,将光斑图像分割成 4 个部分,每个部分

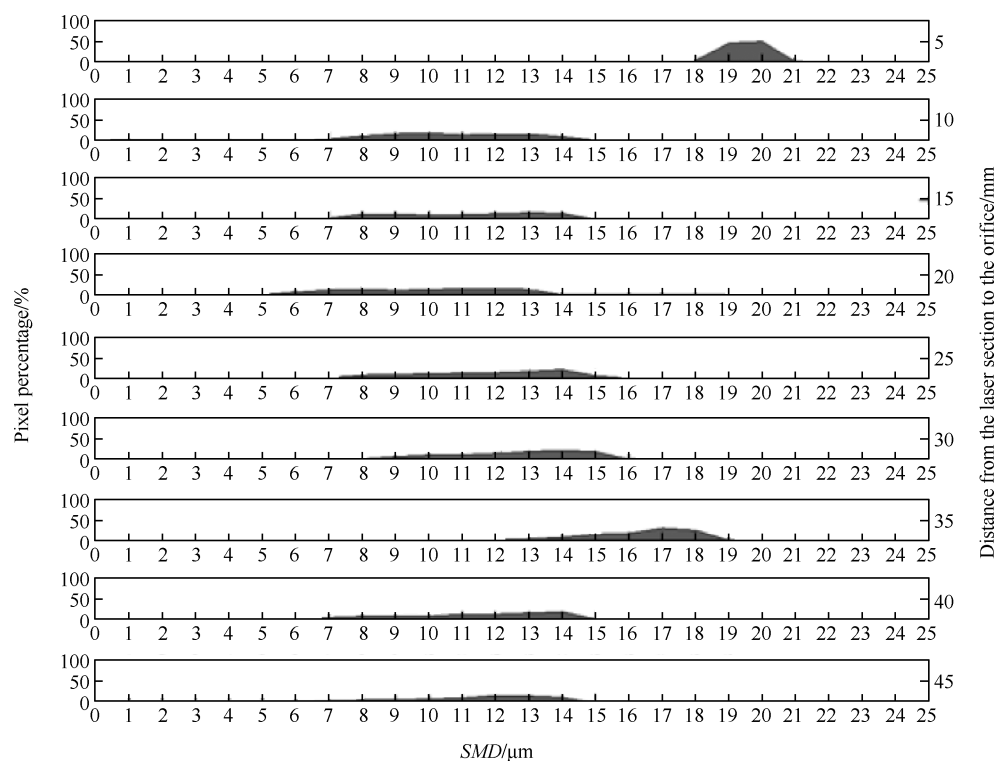


Fig. 12 Percentage of total image of the number of pixels corresponding to different SMD values within the range of fog in different laser cross section

的距离为2mm,第一部分为半径为2mm的圆,第二和第三部分为宽度为2mm的圆环,剩下的部分为第四部分。

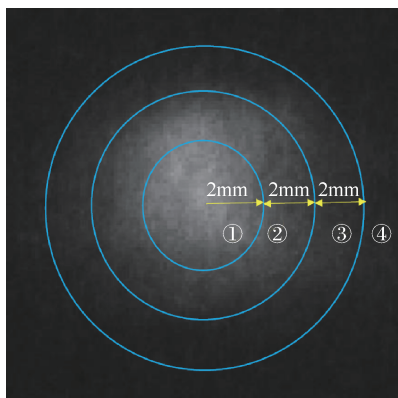


Fig. 13 Radial zoning of section at the distance from the hole 20mm

图14为同一位置截面的四个部分做了SMD统计,其中 Y_2 表示的是不同SMD的颗粒浓度。第一部分的SMD比较小,浓度较大,第四部分的SMD比较大浓度较小,由此可知,SMD在截面上的分布从里到外是从小到大分布的,且内部浓度大,外部浓度小。

如图15是超燃冲压发动机中煤油射流的穿透深度和展向扩展分布,展向扩展区域垂直于射流方向,

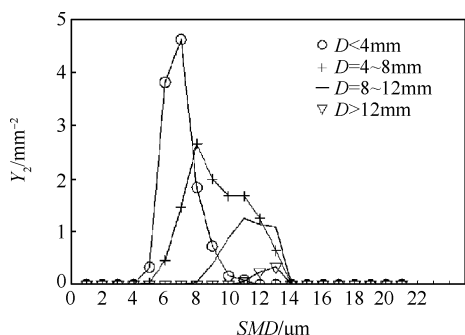


Fig. 14 Radial distribution of SMD in the section of 20mm at the distance of nozzle

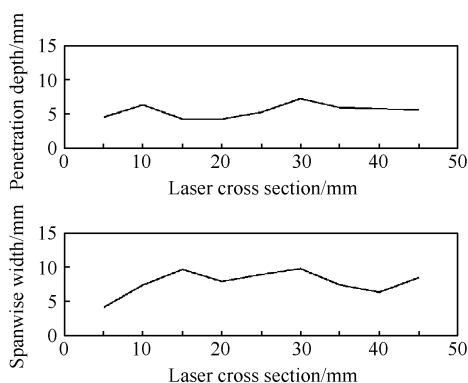


Fig. 15 Penetration depth and spanwise width of kerosene jet

平行于工作台平面。由图可看出,穿透深度在4~8mm,展向宽度在5~10mm,可以看出展向宽度比穿透深度稍大,但变化趋势基本一致。

5 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)在初始射流压强为1.0MPa,来流初始压强为0.5MPa,喷孔直径1mm,喷射角度为90°的工况下,喷口附近的SMD较大,在距离喷口5mm之后,SMD逐渐减小,稳定在十几微米。

(2)射流SMD径向分布由内向外,SMD由小变大。煤油喷射过程中,展向宽度比穿透深度稍大,但变化趋势基本一致。

此种方法验证了在初始射流压强为1.0MPa,来流初始压强为0.5MPa,Plif/Mie煤油超雾化粒径二维分布测量方法,认识了煤油射流的内部特性,具有空间和时间分辨率高、速度快的优点,不再局限于单点测量,并且对雾锥中液滴浓度要求不高,为煤油超燃发动机燃烧室设计和雾化方案布置提供参考依据。

参考文献:

- [1] 费立森. 煤油在超声速冷态气流中喷射雾化现象的初步实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008.
- [2] 杨顺华. 超声速气流中的射流雾化实验和数值模拟[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2010.
- [3] 李 锋, 吕付国, 罗卫东, 等. 超声速气流中液体横向射流的破碎特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2356-2362.
- [4] 刘福水, 常婧雯, 张小玉, 等. 初始压力对氢-空气预混诱导湍流燃烧的影响[J]. 内燃机学报, 2016, (5): 409-414.
- [5] 王长园, 刘福水, 吴文锋, 等. 高压甲烷气体碰壁射流扩散与卷吸特性的试验[J]. 内燃机学报, 2012, 30(5): 423-428.
- [6] 杨 猛. 高速脉冲纹影技术及其在超声速燃烧室流场显示中的应用[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [7] 陈 亮, 乐嘉陵, 宋文艳, 等. 超声速冷态流场液体射流雾化实验研究[J]. 实验流体力学, 2011, 25(2): 29-34.
- [8] 王 冬, 俞 刚. 煤油射流在超声速燃烧室中的实验研究[J]. 实验流体力学, 2005, 19(2): 11-13.
- [9] 费立森, 徐胜利, 黄生洪, 等. 有/无凹槽通道内煤油超燃雾化的测量研究[J]. 推进技术, 2009, 30(1): 18-23. (FEI Li-sen, XU Sheng-li, HUANG Sheng-hong, et al. Measurements on Kerosene Atomization in Supersonic Flow in Duct with and Without Cavity [J].

- Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30 (1): 18–23.)
- [10] 杨波, 洪延姬, 徐庆尧, 等. 异辛烷预混层流火焰传播特性的实验与数值研究[J]. 推进技术, 2015, 36 (11): 1694–1698. (YANG Bo, HONG Yan-ji, XU Qing-yao, et al. Experimental and Numerical Study on Premixed Laminar Flame Propagation Characteristics for Iso-Octane [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(11): 1694–1698.)
- [11] 王金华, 方宇, 黄佐华, 等. 利用高速摄影纹影法研究天然气高压喷射射流特性[J]. 内燃机学报, 2007, 25(6): 24–28.
- [12] 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.
- [13] Kamalakannan K, Aravind V. Design and Characterization of Liquid Centered Swirl-Coaxial Injector[J]. *Fluid Mechanics and Fluid Power-Contemporary Research*, 2016, (1): 23–32.
- [14] Kamalakannan K, Manoj V, Aravind V. 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, 132: 257–270.
- [15] Laurent Zimmer, Yuji Ikeda. Simultaneous Laser-Induced Fluorescence and Mie Scattering for Droplet Cluster Measurements [J]. *AIAA Journal*, 2015, 41 (41): 2170–2178.
- [16] Georgios Charalampous, Yannis Hardalupas. Numerical Evaluation of Droplet Sizing Based on the Ratio of Fluorescent and Scattered Light Intensities (LIF/Mie Technique) [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (9): 1197–1209.
- [17] 杨辉. 双光谱成像测量煤油超雾化粒径分布初步研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

(编辑: 梅 瑛)