

文章编号: 1001-3806(2013)02-0143-04

静电雾化场的数字全息实验研究

徐青¹ 曹娜¹ 曹亮¹ 韩长材¹ 雷岚¹ 王清华²

(1. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘要: 为了获取静电雾化场中雾滴的空间位置、尺寸和速度信息, 利用同轴数字显微全息方法, 设计并搭建了雾化场测量装置。横向测量范围 $\varnothing 12.5\text{mm}$, 空间极限分辨率 90.5LP/mm , 能够实现直径 $8\mu\text{m}$ 雾滴的测量。在该装置上, 进行了单毛细管和多毛细管在稳定锥-射流模式下雾化场的测量, 取得了不同流量下雾滴平均直径和平均速度随流量的变化关系。结果表明, 该装置能够在单次测量中同时给出雾滴空间位置、尺寸和速度信息。该研究对于雾化参数的测量以及静电雾化研究有重要意义。

关键词: 全息; 雾化测量; 数字显微全息; 静电雾化

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.002

Experimental research of electrostatic spray with digital holography

XU Qing¹, CAO Na¹, CAO Liang¹, HAN Chang-cai¹, LEI Lan¹, WANG Qing-hua²

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To obtain data about position, size and velocity of droplets in the electrostatic spray, a device based on in-line digital microscopic holography for spray measurement was devised and established, which has lateral measurement scope of $\varnothing 12.5\text{mm}$, utmost spatial resolution of 90.5LP/mm , and the capacity of measuring the droplet in $8\mu\text{m}$ diameter. Spray measurements under the Taylor-cone mode with single metal capillary and multiple metal capillaries were carried out respectively on the established device, and the relations between average diameter, average velocity of droplets and flow rate were obtained. Results show that position, size and velocity of droplets can be obtained simultaneously during a single-shot measurement by the device, which is of great significance to the measurement on spray and the research of electrostatic spray.

Key words: holography; atomization measurement; digital microscopic holography; electrostatic spray

引言

静电雾化是指导电液体在液体表面张力、粘性力和静电库仑力的联合作用下, 破碎成微小单分散液滴(直径从几微米到几十微米)的过程^[1-2]。与其它雾化技术相比, 静电雾化具有很多优越特性: 能产生单分散性好的雾滴; 雾滴带电不易凝聚; 通过调节电参量可控制雾滴运动轨迹等。所以, 目前已在质谱仪、纳米材料制备、喷墨打印、燃油喷射、药物输送等方面得到了广泛的研究和应用。

雾滴的尺寸和速度参量在静电雾化研究中起着重

要作用。到目前为止, 许多学者对这些参量与静电雾化实验条件(流量、电压等)、液体物性参量(导电率、粘度、密度、表面张力等)之间的关系进行了大量的实验研究。例如, TANG 和 GOMEZ^[3]使用相位多普勒测速分析仪(phase Doppler analyzer, PDA), 给出了庚烷电雾化场中, 雾化轴线上雾滴尺寸和速度的统计分布以及雾滴轴向平均速度分量与径向位置的关系。GANNAN-CALVO 等人^[4]同样使用 PDA, 对锥-射流模式下的静电雾化进行了测量, 给出了液体流量、电流、雾滴尺寸之间的量纲关系, 使人们对电雾化有了进一步地理论认识。由于 PDA 只能进行空间点上的测量, CHEN 等人^[5]在分析了使用粒子图像速度仪(particle image velocimetry, PIV)进行雾滴速度测量的可行性后, 测量了毛细管轴线所在平面内的雾滴速度分布, 并且研究了不同的流量和电压下雾滴轴向速度和径向速度的变化。PDA 或者 PIV 方法虽然能够进行雾滴尺寸和速度的测量, 但是不能同时给出雾滴空间分布、尺

基金项目: 教育部“新世纪人才支持计划”基金资助项目 (NCET-07-0688)

作者简介: 徐青(1981-), 男, 硕士, 现主要从事脉冲激光全息诊断技术的研究。

E-mail: xuqingmai@gmail.com

收稿日期: 2012-07-16; 收到修改稿日期: 2012-08-27

寸和速度等信息,测量维度局限于空间点或2维平面,而且测量结果在时间上或空间上存在一定平均效应。另外,PDA对非球形雾滴测量时,误差较大。

20世纪60年代,PARRENF等人^[6]首先提出了利用激光全息技术进行粒子场测量的方法,它能够在这次测量中提供粒子的尺寸、形状和空间位置等信息,克服了PDA和PIV方法的上述不足,现在已经成为粒子场测量的常用方法^[7-10]。目前,随着计算机和图像传感器件的不断发展以及全息数值再现算法的成熟^[11],数字全息技术在粒子场测量方面的优势逐渐凸显^[12]。

静电雾化场中雾滴尺寸跨度小、浓度稀疏,特别适合采用同轴数字全息记录。但是,由于CCD相机分辨率的限制,需要结合显微成像方式实现对小雾滴的全息记录。本文中对单毛细管和多毛细管在锥-射流模式下的雾化场进行了测量,给出了液体流量与雾滴尺度分布、空间位置和速度的关系,扩充了静电雾化的测量方法,丰富了静电雾化研究的实验数据。

1 实验方法及原理

实验中的数字全息测量装置以及静电雾化装置如图1所示。数字全息测量装置中,使用波长532nm、脉冲宽度180ps、脉冲能量80mJ的双脉冲激光器作为记录光源,双脉冲时间间隔大于100ns可调,能够实现雾滴的速度测量。激光束经过扩束准直镜以及可调光阑形成入射光照明雾化场,雾滴散射光与直透光形成的全息图由像素尺寸 $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$ 、像素数 $4096\text{pixels} \times 4096\text{pixels}$ 的CCD相机记录。由于雾场中雾滴尺寸较小,所以在测量装置中加入成像透镜对雾场放大后再进行全息记录,这样可以满足CCD相机分辨的要求。

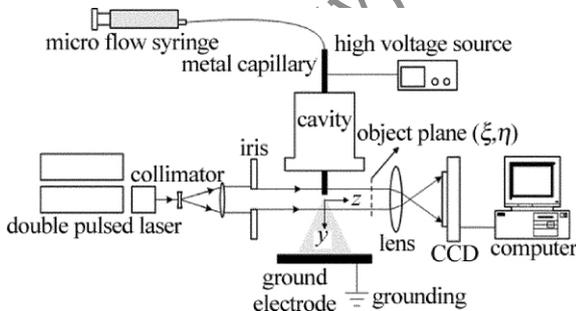


Fig.1 Experiment setup of electrostatic spray and digital microscopic holography

静电雾化装置中,工作液体被微流量控制注射器(LSP02-4B型,兰格)推入金属毛细管中,然后通过此毛细管进入腔体。腔体材料为聚醚醚酮,形状为圆柱体,其内部直径为20mm,深20mm;外部直径为30mm,高30mm。腔体底板钻有微孔,微孔与金属毛细管紧配合。单管道时,金属毛细管外径1.2mm,内径0.9mm;多管道时,金属毛细管外径0.7mm,内径

0.5mm。毛细管喷口距离地电极15mm。液体通过腔体,从底部的毛细管流出,并在高压作用下,建立连续稳定的锥-射流模式的电雾化喷洒,然后使用上述全息测量装置开展雾化参量测量。

作者选取锥射流开始破碎成雾滴的位置作为坐标原点, y 轴沿毛细管轴线指向地电极, z 轴平行于光轴指向CCD灵敏面。CCD灵敏面为全息图记录面,它与物平面 (ξ, η) 共轭。雾化场应位于物平面前方,保证经过透镜成像后的雾化场位于CCD灵敏面同一侧进行全息图记录,从而避免因雾场跨越记录面出现雾滴像混叠。当使用平面光记录和再现时,雾滴全息像的横向放大率 α 与雾滴位置无关^[8],纵向放大率为 α^2 。 α 可以通过将标准分划板(USAF-1951)置于物平面上标定得到。对于大尺寸的全息图,采用参考文献[13]中的基于快速傅里叶变换的角谱再现(fast Fourier transform based on angular spectrum, FFT-AS)算法进行再现计算,得到 z 方向不同位置处的再现像复振幅分布:

$$u_z[k, l] = \text{IFFT}_2 \{ \text{FFT}_2 \{ h[m, n] \cdot E_r^*[m, n] \} \cdot H_{AS}[p, q] \} \quad (1)$$

式中, $H_{AS}[p, q] = \exp \left[ikz \sqrt{1 - (\lambda p \Delta f_x)^2 - (\lambda q \Delta f_y)^2} \right]$ 为角谱衍射公式的传递函数; $E_r^*[m, n]$ 为与参考光共轭的再现光; $h[m, n]$ 为CCD采样后的全息图; k, l 和 m, n 分别为再现像面和全息图面上的离散坐标, p 和 q 为频域上的离散坐标, Δf_x 和 Δf_y 为频域上的采样间隔;FFT₂和IFFT₂分别为正、逆2维快速傅里叶变换。再现像可以表示为 $|u_z[k, l]|^2$ 。获得各个层面再现像后,对再现像上的每一个像素,取其 z 轴方向上雾化场深度范围内所有再现图像中对应像素的强度最大值,得到合成图像^[14]:

$$I[k, l] = \max_{\text{all the } z \text{ planes}} \{ |u_z[k, l]|^2 \} \quad (2)$$

由于雾滴形状规则,使用Canny算子对合成图中的雾滴图像进行边缘提取,然后根据质心强度最大原则确定雾滴所在的焦层面,从在焦的雾滴图像中提取其空间位置和直径,雾滴速度信息则根据配对的在焦雾滴图像之间的位移与双脉冲时间间隔得到。整个雾

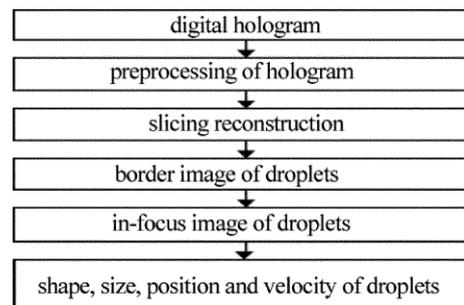


Fig.2 Flowchart of droplet images processing

滴信息处理流程如图 2 所示。

实验中的工作液体为无水乙醇。单毛细管情况下,流量分别控制为 2.0mL/h、2.5mL/h、3.0mL/h 和 3.5mL/h;多毛细管情况下,流量分别控制为 31mL/h、32mL/h、33mL/h 和 34mL/h。双脉冲时间间隔设置为 1.3 μ s,系统横向放大率的标定值为 2.88。

2 实验结果及分析

2.1 单毛细管的测量结果

对 2.0mL/h、2.5mL/h、3.0mL/h 和 3.5mL/h 这 4 种流量下记录到的全息图进行处理,分别得到雾滴的空间分布、尺寸统计及雾滴速度的数据。图 3 为 2.0mL/h 流量时,液柱破碎点下方雾化区域的测量结果。图 3a 中合成再现像局部的放大结果如图 3b 所示,可以清楚分辨出成对的雾滴。图 3c 是图像数据处理后对应于第 1 个激光脉冲时刻的雾滴 3 维空间分布,雾滴尺寸信息使用颜色的深浅表示,具体数据(单位为 μ m)由右边色条给出。液柱的破碎点在左上方的 $x-z$ 平面中央,沿 y 轴方向雾化,由于雾滴间静电排斥力,在距离雾化点约 7mm 处,雾滴扩散范围约为 2.34mm \times 2.42mm。图 3d 是图 3c 中雾滴尺寸的统计结果,大部分雾滴尺寸集中在 10 μ m ~ 14 μ m,平均直径为 12.46 μ m,相对于平均直径的标准偏差为 0.2280,雾滴呈现较好的单分散性。图 3e 是雾滴在 $x-y$ 面内速度矢量,箭头方向表示雾滴运动方向,箭头长度表示速度大小,平均速率为 19.94m/s。

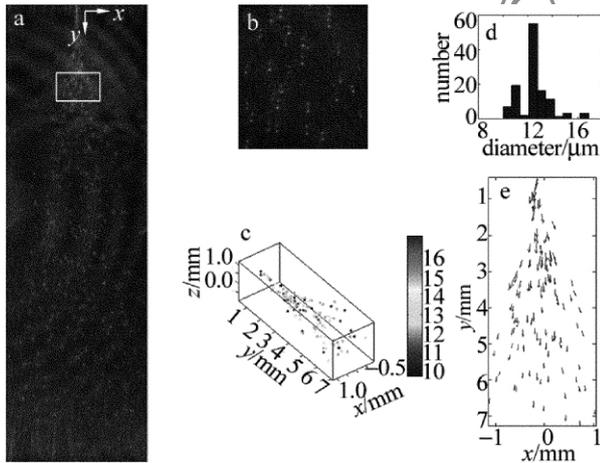


Fig. 3 Measurement results of single-capillary at the flow rate of 2.0mL/h a—synthesis of reconstructed images b—partial enlargement of Fig. 3a c—spatial distribution of droplets d—size distribution of droplets e—droplet velocities in the $x-y$ plane

4 种流量下单毛细管雾化的测量结果如图 4 所示。以 y 轴原点为起始点,在液柱轴线上沿雾化方向相距 1mm 的间隔选取 1mm \times 1mm \times 1mm 的小区域,计算这些区域内雾滴的平均直径,结果如图 4a 所示。同一流量下,轴线上雾滴平均直径基本上一致;不同流

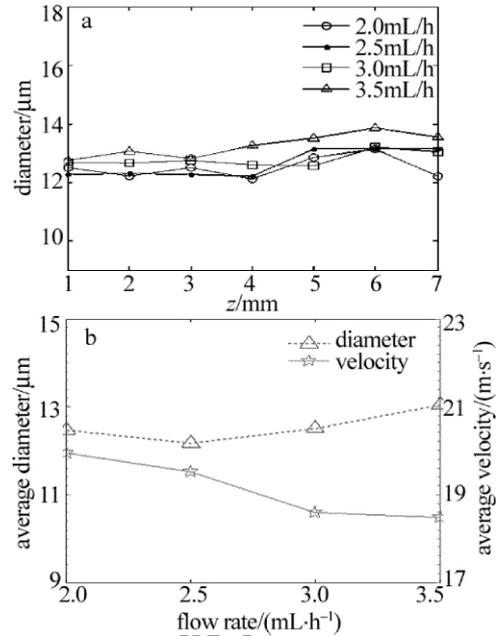


Fig. 4 Measurement results of single-capillary at the four flow rates a—average diameter of droplet along the axis of capillary b—average diameter and average velocity of the $x-y$ plane

量下,雾滴平均直径随流量变大会会有较小增加。4 种流量下,相应的雾滴平均直径以及 $x-y$ 面内雾滴的平均速率分别如图 4b 中的虚线和实线所示,它们随流量的变化趋势相反。

2.2 多毛细管的测量结果

对 31mL/h、32mL/h、33mL/h 和 34mL/h 4 种流量下记录到的全息图进行处理,计算以中间一排毛细管所在平面为中心面、纵向厚度为 0.78mm 范围内雾滴的空间分布、尺寸统计以及雾滴速度的数据。图 5 是 31mL/h 流量下的测量结果。对应于第 1 个激光脉冲时刻的雾滴 3 维空间分布如图 5a 所示,大部分雾滴尺寸集中在 12 μ m ~ 16 μ m 之间(见图 5b),平均直径为 13.98 μ m,相对于平均直径的标准偏差为 0.0788,雾滴尺寸呈现单分散性。雾滴在 $x-y$ 面内速度矢量如图 5c 所示,平均速率为 35.00m/s。

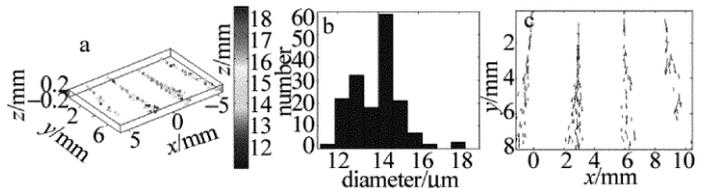


Fig. 5 Results near middle row in multi-capillaries at the flow rate of 31mL/h a—spatial distribution of droplets b—droplet velocities in the $x-y$ plane c—size distribution of droplets

4 种流量下相应的雾滴平均直径和平均速率随流量的变化关系如图 6 所示。与单毛细管相比,多毛细管数量增加,相当于增大了液体的流量,雾滴平均速率和雾滴平均直径均有所增加。另外,平均速率和平均直径随流量的变化趋势与单毛细管情形类似,不因毛

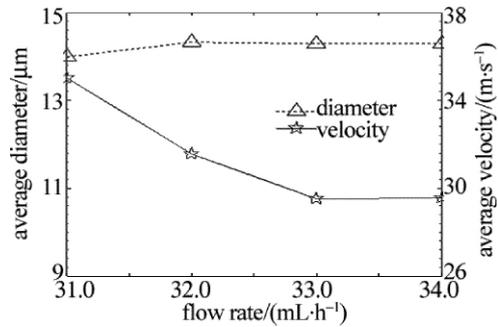


Fig. 6 Average diameters and velocities in the $x-y$ plane of multi-capillaries at four flow rates

细管数量的增加而改变。

3 结论

采用数字同轴显微全息技术和测量系统,实现了静电雾化锥-射流模式下全场雾滴参量的量化测量,给出了某个时刻雾滴的空间分布、尺寸分布以及速度信息。测量系统横向测量范围 $\varnothing 12.5\text{mm}$,空间极限分辨率 90.5LP/mm ,能够实现直径 $8\mu\text{m}$ 雾滴的测量。与收集法、PDA和PIV等测量技术相比,该方法能够在单次测量中提供更加丰富的雾滴数据,这对进一步揭示静电雾化现象和表征雾化微观特性有重要的意义。

参考文献

- [1] CHEN X P, CHENG J S, YIN X Z. Research progress and application of electrohydrodynamic[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(7): 637-646(in Chinese).
- [2] CHEN X P, DONG S T, CHENG J S, et al. Electrostatic atomization and the spray modes in fluid atomization[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(1): 97-103(in Chinese).
- [3] TANG K, GOMEZ A. On the structure of an electrostatic spray of monodisperse droplets[J]. Physics of Fluids, 1994, 6(7): 2317-2332.
- [4] GANAN-CALVO A M, DAVILA J, BARRERO A. Current and droplet size in the electro spraying of liquids scaling laws[J]. Journal of Aerosol Science, 1997, 28(2): 249-275.
- [5] CHEN X P, CHENG J S, YIN X Z. Measurements of drop velocity in electro spray by PIV[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5058: 181-187.
- [6] PARRENT G B, THOMPSON B J. On the fraunhofer(far field) diffraction patterns of opaque and transparent objects with coherent background[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1964, 11(3): 183-193.
- [7] THOMPSON B J. Holography particle sizing techniques[J]. Journal of Physics, 1974, E7(10): 781-787.
- [8] VIKRAM C S. Particle field holography[M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1992: 71-74.
- [9] MURATA S, YASUDA N. Potential of digital holography in particle measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2000, 32(7/8): 567-574.
- [10] ANEZAKI Y, SHIRABE N, KANEHARA K, et al. 3-D spray measurement system for high density fields using laser holography[J]. DENSO Technology Review, 2003, 8(1): 120-129.
- [11] ONURAL L, SCOTT P D. Digital decoding of in-line holograms[J]. Optical Engineering, 1987, 26(11): 1124-1132.
- [12] SCHNARS U, JUPTER W. Digital holography[M]. New York, USA: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 107-111.
- [13] XU Q, CAO N, HEI D W, et al. Reconstruction algorithm of particle fields digital holographic diagnosis[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 967-973(in Chinese).
- [14] LU Q N, ZHAO C, GE B Z, et al. Digital holography experiment on the measurement of particle size and size distribution of diesel spray[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 779-783(in Chinese).