

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.014

锥-射流模式下毛细管静电雾化流场的 PIV 测量*

王贞涛 毛惠敏 罗惕乾

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 采用粒子图像速度场仪测量了毛细管微射流静电雾化流场, 获得了毛细管静电雾化的典型雾化模式和锥-射流模式下雾场中雾滴的速度矢量图与流线图, 分析了雾滴在输运过程中的受力情况和静电电压作用下的速度与流线变化。实验结果表明: 在静电力与极化力、重力、流体拖曳力等共同作用下, 随着荷电电压的增加, 雾场流线分布均匀, 雾滴在轴线上速度逐渐增加。在任一电压下, 随着射流轴向距离的增加, 同一截面上雾滴速度都有所增加, 且速度的均匀性沿轴向有所提高。

关键词: 静电雾化 锥-射流 雾滴速度 粒子图像速度场仪

中图分类号: S499 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0062-05

Investigation on Electrostatic Spray of Capillary in Cone-jet Mode Using PIV

Wang Zhentao Mao Huimin Luo Tiquan

(College of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

A particle image velocimetry (PIV) was used to measure the cone-jet flow in electrostatic spray. The mode of spraying was observed. The droplets' velocity and flow vector graphs were analyzed. Streamlines field under different voltages were obtained. The forces acted on the droplets in their transportation and the change of the velocity and flow field were analyzed. The experiment indicated that, with the increasing of voltage, the flow field was distributed uniformly and the droplets' velocity along the axes increased with electrostatic forces, polarization forces and fluid forces together. With the increasing of axes distance, the droplets' velocity in the same section along the radius increased under the same voltage, and the velocity uniformity in the same section improved.

Key words Electrostatic spray, Cone-jet, Droplets velocity, PIV

引言

高压静电场作用下, 静电力克服液体表面张力使液体破碎成微小液滴的过程, 称为静电雾化现象。静电雾化现象是电流体动力学的一个重要分支, 已经在质谱仪技术、纳米级材料粒子和薄膜制备、微推进技术等领域得到广泛应用^[1-3]。微纳米薄膜广泛应用于机械涂层、光电子器件和集成电子器件等领域。随着微机电系统(MEMS)的发展, 此项技术受到了日益广泛的关注。在纳米材料薄膜的制备中,

静电雾化技术是通过静电场作用得到雾滴速度和粒径均匀的毛细管微射流流场, 进而得到沉积均匀、高致密度、厚度均一的纳米薄膜材料。锥-射流模式下的毛细管雾化流场研究对材料薄膜的制备有着重要的意义。

国内众多学者针对毛细管的静电雾化现象进行了大量研究, 获得了不同荷电参数下的典型雾化模式、雾滴速度分布与粒径大小等, 并对雾化过程中的破碎机理、射流稳定性等进行了理论分析, 为毛细管锥-射流流场的研究提供了理论和实验基础^[4-14]。

收稿日期: 2009-10-10 修回日期: 2009-11-17

* 国家自然科学基金资助项目(50975125)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA100905)、江苏省高校自然科学基金资助项目(09KJB470001)和江苏大学高级人才基金资助项目(09JDC067)

作者简介: 王贞涛, 讲师, 博士, 主要从事荷电两相流动理论及应用研究, E-mail: wickol@ujs.edu.cn

本文采用粒子图像速度场仪对毛细管静电雾化射流进行测量和分析,探讨锥-射流模式下雾滴速度分布。

1 测量系统与实验装置

1.1 测量原理

粒子图像速度场仪 (particle image velocimetry, 简称 PIV) 是利用散播在流场中的示踪粒子的图像进行测速。其基本原理是测量示踪粒子在时间 Δt 内所运动的位移 Δx 、 Δy , 进而获得粒子运动的速度 $v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}, v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$, 如图 1 所示。测量要求粒子的位移足够小, 使 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ 是速度 v_x 的近似, 即在 Δt 时间内粒子的运动轨迹接近直线且速度近似恒定, 这一条件可以由选择 Δt 来达到, 使 Δt 小到与拉格朗日速度场的微尺度可以比较的程度。当 PIV 所选用的示踪粒子对流体跟随性较好时, 粒子的运动即反映出流体的运动。

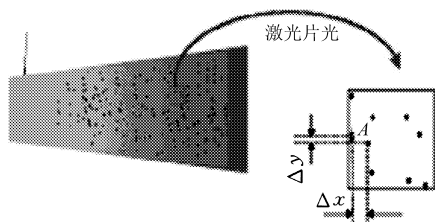


图 1 PIV 测量基本原理

Fig. 1 Principle of PIV system

1.2 实验装置

实验装置主要由容器、调节阀、毛细管喷嘴、高压静电发生器、电极 (高压电极与地电极) 以及雾化测试系统 PIV 组成, 如图 2 所示。实验中以 TiO_2 的乙醇溶液作为雾化液体。雾化喷嘴是垂直放置的金属毛细管圆形喷嘴, 毛细管内径为 1.0 mm。高压发生器产生的高压静电直接连接在喷嘴上, 形成电场使喷嘴射流发生雾化。电场变化通过调节电极电压来实现。实验中毛细管的流量为 0.001 ~ 0.080 mL/s, 电极电压 0 ~ 30 kV, 且为负压。实验在室温条件下进行, 环境温度为 26 °C, 相对湿度为 58%。实验中定义雾场轴线方向为 z 向, 垂直于毛细管方向为 x 向, 坐标原点为毛细管最末端的轴心处。

2 结果与分析

2.1 雾化过程的雾化模式

液体通过毛细管进行静电雾化时, 在不同的流量、荷电电压下, 会出现几种不同的射流及雾化形态, 即雾化模式。在不同的雾化模式下, 雾滴具有不

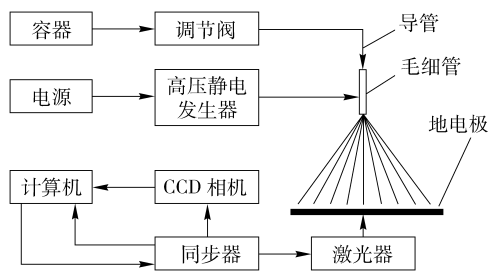


图 2 毛细管静电雾化实验装置

Fig. 2 Device of electrostatic spray for capillary

同的电动力学特性, 雾滴速度的大小、粒径分布及雾滴的运动轨迹等均呈现出不同的特点。

溶液的毛细管静电雾化过程会呈现出几种较为典型的雾化模式: 滴状、脉动、锥-射流和多股射流模式^[10-11], 本文实验过程中也得到了上述几种典型的雾化模式, 其特征描述如图 3 所示^[14]。图 4 为 CCD 相机拍摄的锥-射流模式图像。

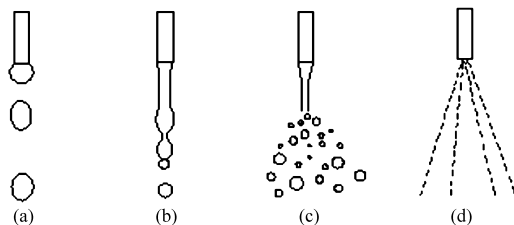


图 3 几种典型的雾化模式

Fig. 3 Typical nodes of spraying

(a) 滴状模式 (b) 脉动模式
(c) 锥-射流模式 (d) 多股射流模式

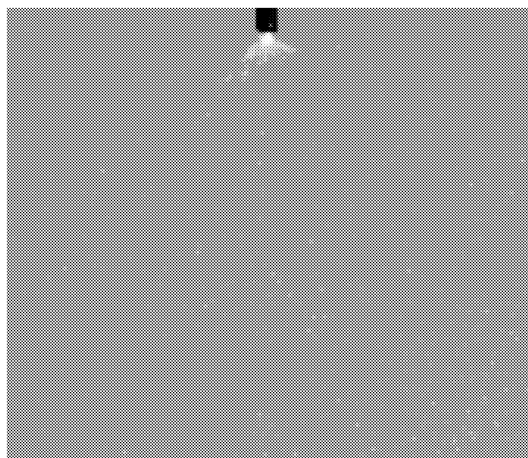


图 4 锥-射流模式雾化流场

Fig. 4 Spray flow in cone-jet mode

实验过程中毛细管与地电极之间的电压, 即荷电电压从零逐渐升高。在荷电电压为零时没有液滴从毛细管末端滴出。随着荷电电压的升高, 静电力克服了液体的表面张力作用, 使毛细管末端有液体渗出, 其液面呈光滑曲面。随着荷电电压的增加, 光滑曲面的曲率半径逐渐增大, 液体在重力和电场力作用下克服了与毛细管之间的表面张力作用, 从而

以液滴下落,出现滴状模式。当荷电电压进一步增加时,液滴滴下的频率不断增加,而且液滴的粒径也在不断减小。电压增至 6.0 kV 时,液滴在电场力的作用下被拉成细长轴状,形成介于不连续和连续之间的单股射流,即为脉动模式。当电压增至约 8.0 kV 以上时,单股射流会逐渐演变为锥-射流。外加高电压在毛细管尖端产生更强大的电场作用,使流经之溶液产生带电现象,其中的负电荷离子将聚集在近毛细管壁的位置,此种内部电荷分布不均的溶液在流出毛细管尖端出口时会呈现圆锥状,即为泰勒圆锥(Taylor cone)。圆锥形成之后,在高压电场作用下,更多负电荷累积在溶液表面,当电荷累积到一定数量时,因相同电荷所造成的斥力便会克服溶液表面张力的束缚,而以表面带电荷的微小液滴方式喷出,形成圆锥射流。射流从锥的顶端产生,在射流的端部由于外界扰动而破碎为小液滴。在电压继续升高时,会出现 2~6 股射流,并且有时数股射

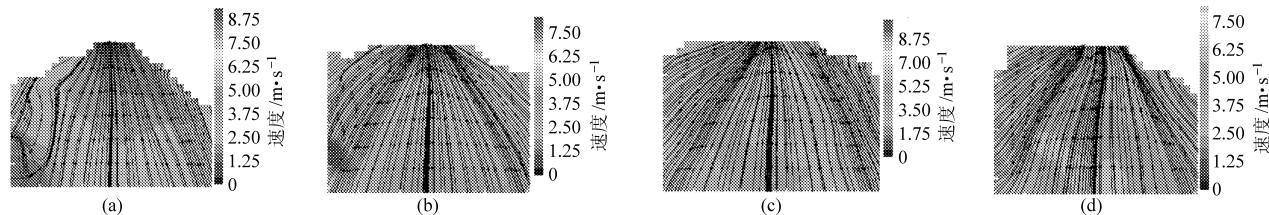


图5 不同荷电电压下毛细管静电雾化矢量与流线

Fig. 5 Vector and streamline in electrostatic spray for capillary

(a) 10 kV (b) 15 kV (c) 20 kV (d) 25 kV

对比不同荷电电压下的流场图可见,随着荷电电压的增大,沿中心轴线荷电后的射流核心区迅速缩短。当电压从 10 kV 增加到 15 kV 时,无论在轴向(z 方向)还是径向(x 方向)的流场视场范围内雾滴速度分布不均匀,速度梯度较大。荷电电压为 10 kV 左右时,锥-射流的扩散角相对较小,质量、能量的运输主要集中在射流核心区,显然不利于均匀流场的形成和纳米材料薄膜的制备。随着荷电电压的增加,锥-射流的扩散角逐渐增大,整个流场显示出趋向均匀分布的形态,无论在轴向还是径向的流场视场范围内雾滴速度分布趋向均匀,速度梯度减小。当荷电电压加至 20 kV 以上时,雾滴速度梯度在轴向和径向都很小,有利于均匀流场的形成和薄膜的制备。

从不同荷电电压作用下的喷雾流线图可以看出,在微射流的边界上,随着荷电电压的增加,荷电后卷吸现象趋于平缓。荷电电压为 10 kV 时,在微射流的边缘可见明显的卷吸和回流区。荷电电压增加到 20 kV 以上时,微射流的密集程度明显变得稀疏,雾滴粒子在基片上的沉积将更加均匀。

流沿轴线旋转或者沿径向振荡及扭曲。这种振荡扭曲射流雾化模式只在极小的工况范围内存在,并且极不稳定,很容易转换为多股射流。

2.2 静电雾化流场分析

在静电雾化过程中,毛细管射流破碎成分散液滴的同时会发生液滴的带电现象,使液滴在输运过程中带有同种电荷而相互排斥,从而获得较大的射流扩散角^[15]。锥-射流模式下雾滴流动形成的图像,在片光源下由 CCD 相机获取,采用 TSI 公司的 Insight 3.3 图像处理软件处理后得到了锥-射流模式下毛细管静电雾化的速度矢量图和流线图,如图 5 所示。从流场图中可知,高压静电场的存在对锥-射流模式下雾化流场产生重要影响,锥-射流模式初始状态是雾滴在射流端部形成一定锥角的伞状雾化区(图 3c),随着电压的升高,射流变短,雾化角增大,在荷电电压允许的范围内雾滴的平均速度逐渐增大,雾滴的运动速度趋向均匀。

2.3 荷电雾滴速度分析

为了分析雾滴在空间的分布情况,分别对轴线上(z 方向)和不同截面上(x 方向)雾滴的速度进行分析。图 6 为射流轴线上雾滴的速度变化。图 7 为不同荷电电压下轴向距离分别为 60、80、100 mm 的截面上的雾滴速度。

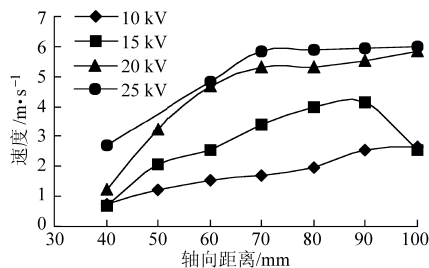


图6 射流轴线上雾滴速度

Fig. 6 Droplets velocity along jet axes

由图 6 可知,随着荷电电压的升高,雾滴沿轴线的速度不断增大。这是由于雾滴在较高的电压下其破碎程度增加,较小的雾滴的荷质比较大,在重力和电场力的作用下运动加速度增大,因此沿轴线方向上速度不断增大。表明电场力在液滴输运的过程中成为影响其动力学特性的主要因素,通过荷电电压

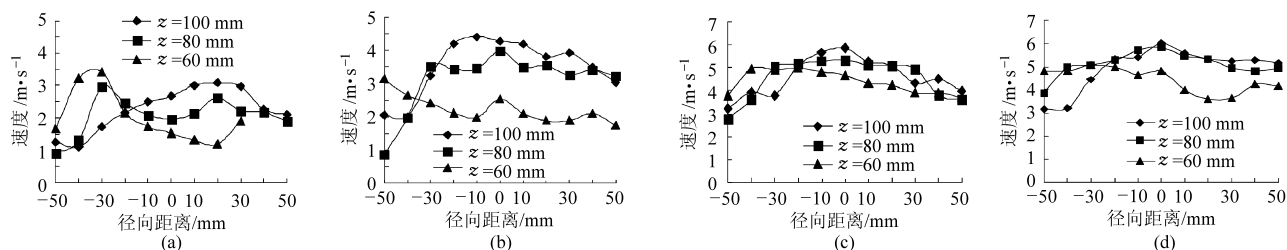


图 7 不同截面上雾滴速度沿径向的分布

Fig. 7 Droplets velocity along the radius in different sections

(a) 10 kV (b) 15 kV (c) 20 kV (d) 25 kV

能够有效控制雾滴的运动状态^[15-16]。当射流距离超过 70 mm 时,雾滴受到电场作用的影响逐渐减弱,雾滴动能出现损耗,雾滴速度逐渐平缓甚至出现速度下降趋势。

由图 7 可知,随着荷电电压的增加,在所有截面上雾滴速度都不断增加,这是由于雾滴在较高的电压下其破碎程度增加,较小的雾滴荷质比较大,在电场力的作用下加速度增大。随着荷电电压的升高,任一截面上的速度分布都逐渐均匀,这是由于在电压较低时,雾滴没有足够的能量发生破碎,粒度不均匀,雾滴获得相等的能量时,速度大小不一致。当电压升高时,在静电力的作用下,雾滴破碎成粒度较为均匀的雾滴,雾滴在电场作用所获得的能量逐渐趋于均匀,因此其速度分布也逐渐均匀。在任一电压下,随着射流距离的增加,雾滴速度都有所增加且速度的均匀性在截面上有所提高。雾滴在毛细管末端

发生破碎,在荷电雾滴运输的过程中雾滴在电场力和流体力作用下雾滴速度趋于均匀,同时雾滴在运输过程中亦可能发生二次破碎现象,使雾滴粒度均匀,雾滴速度趋于一致。

3 结束语

设计了毛细管静电雾化实验装置,进行了毛细管静电雾化的实验研究,观测到了滴状、脉动、锥-射流和多股射流等几种典型的静电雾化模式,并在较大的荷电电压范围内获得了稳定的锥-射流状态。采用 PIV 技术研究了锥-射流模式下毛细管静电雾化流场,获得了不同荷电电压时锥-射流模式下雾化流场的速度矢量图和流线图。随着荷电电压的升高,雾滴沿轴线的速度逐渐增加,截面上速度分布更加均匀;同一电压下随着射流距离的增加,截面上雾滴速度分布更加均匀。

参 考 文 献

- 鲁健,褚家如,秦俊. 溶胶-电雾化系统雾滴速度场 LDV 测量的研究[J]. 微细加工技术, 2004(3): 24 ~ 28.
Lu Jian, Chu Jiaru, Qin Jun. Research on droplets' velocity in electrostatic spray deposition system by LDV [J]. Microfabrication Technology, 2004(3): 24 ~ 28. (in Chinese)
- 吴有金,吴亚雷,许晓慧,等. PZT 溶胶液静电雾化雾场的模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(7): 755 ~ 760.
Wu Youjin, Wu Yalei, Xu Xiaohui, et al. Simulation of the aerosol of electrostatic spray of PZT sol solution [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(7): 755 ~ 760. (in Chinese)
- Yogi O, Kawakami T, Mizuno A. Properties of droplets formation made by cone jet using a novel capillary with an external electrode[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(7 ~ 9): 634 ~ 638.
- Taylor G I. Disintegration of water drops in an electric field[C]//Proceedings of the Royal Society of London, 1964, A280: 383 ~ 397.
- Cloupeau M, Prunet-Foch B. Electrostatic sprayings of liquids in cone-jet mode[J]. Journal of Electrostatics, 1989, 22(2): 561 ~ 571.
- Juan Fernández D L M. The effect of charge emission from electrified liquid cones[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 243: 561 ~ 574.
- Meesters G M H, Vercoulen P H W, Marijnissen J C M, et al. Generation of micro-sized droplets from the Taylor cone[J]. Journal of Aerosol Science, 1992, 23(1): 37 ~ 49.
- Juan Fernández D L M, Loscertales G I. The current emitted by highly conducting Taylor cones[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 260: 155 ~ 184.
- Lastov O, Balachandran W. Novel low voltage EHD spray nozzle for atomization of water in the cone jet mode[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(8): 490 ~ 499.

- 10 陈效鹏,董绍彤,程久生,等. 电雾化装置及雾化模型的研究[J]. 实验力学,2000,15(1):97~103.
Chen Xiaopeng, Dong Shaotong, Cheng Jiusheng, et al. Electrostatic atomization and the spray modes in fluid atomization [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000,15(1):97~103. (in Chinese)
 - 11 张军,闻建龙,王军锋,等. 毛细管环电极下的静电雾化模式的研究[J]. 农业机械学报,2006,37(6):124~127.
Zhang Jun, Wen Jianlong, Wang Junfeng, et al. Investigation on modes of electrostatic spray under capillary-annular electrode configuration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6):124~127. (in Chinese)
 - 12 Chen X P, Cheng J S, Yin X Z, et al. Measurements of drop velocity in electrostatic spray[C]// Optical Technology and Image Processing for Fluids and Solids Diagnostics 2002, Bellingham, Wash: SPIE 2003: 181~187.
 - 13 Tang K, Gomez A. Generation of monodisperse water droplets from electrospray in a corona assisted cone-jet mode[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1996, 175(2):326~332.
 - 14 张军,闻建龙,王军锋,等. 不同雾化模式下静电雾化的雾化特性[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(2):105~108.
Zhang Jun, Wen Jianlong, Wang Junfeng, et al. Droplets characteristics of electrostatic spraying at different modes of spraying [J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition, 2006,27(2):105~108. (in Chinese)
 - 15 鲍重光. 静电技术原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.
 - 16 王军锋,王贞涛,毛惠敏,等. 双流体荷电喷雾结构的 PIV 测量[J]. 农业机械学报,2009,40(9):107~111.
Wang Junfeng,Wang Zhentao,Mao Huimin, et al. Measurement of twin-fluid electrostatic spray structure by using PIV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):107~111. (in Chinese)
-

(上接第 47 页)

- 16 陈敏,宝音陶格涛. 半干旱草原区退化草地改良的试验研究[J]. 草业科学,1997,14(6):27~30.
Chen Min,Baoyin Taogetao. Improvement of regressive grassland in semi-arid steppe region[J]. Pratacultural Science,1997, 14(6):27~30. (in Chinese)
- 17 杨丽娜,宝音陶格涛. 不同改良措施对退化羊草草原的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(2):312~317.
Yang Lina,Baoyin Taogetao. Effect of different improving measures on degenerated steppe of *Leymus Chinensis*[J]. Journal of Desert Research,2008,28(2):312~317. (in Chinese)
- 18 丁元书. 虚实并存耕作技术推广研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
Ding Yuanshu. Study on the extension of spacing tillage technique[D]. Beijing: China Agricultural University,2005. (in Chinese)
- 19 马军华. 虚实并存(间隔)耕作与国外类耕作的比较研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.
Ma Junhua. Research on the compare of zone tillage and overseas similar tillage[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)