



引用格式:王贞涛,夏磊,张永辉,等.多毛细管静电雾化模式实验研究[J].轻工学报,2018,33(1):96-103.

中图分类号:TK018 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.01.012

文章编号:2096-1553(2018)01-0096-08

多毛细管静电雾化模式实验研究

Experimental study on electro-spraying modes from multi-capillary

王贞涛^{1,2},夏磊²,张永辉²,钱怡松¹,顾利定¹,邱乾胜¹
WANG Zhentao^{1,2}, XIA Lei², ZHANG Yonghui², QIAN Yisong¹, GU Liding¹,
QIU Qiansheng¹

1. 洁华控股股份有限公司 博士后科研工作站,浙江 海宁 314419;

2. 江苏大学 能源与动力工程学院,江苏 镇江 212013

1. *Postdoctoral Scientific Research Workstation, Jiehua Holdings Co., Ltd., Haining 314419, China;*

2. *School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*

关键词:

多毛细管;静电雾化模式;无量纲流量 α ;静电 Bond 数 β

Key words:

multi-capillary;
electro-spraying mode;
non-dimensional flow α ;
electric Bond number β

摘要:采用高速数码摄像技术,通过图像对比与分析,获得了无水乙醇的一些多毛细管静电雾化模式,依据无量纲流量 α 和静电 Bond 数 β 对这些模式进行分类,结果表明:与单毛细管静电雾化模式相似,在多毛细管静电雾化模式出现了滴状、纺锤、射流及多股射流等雾化模式,并随着电压与流量的增加依次出现转变;同时由于毛细管、射流之间的库仑力作用,两股射流呈现对称向外倾斜分布。随着静电 Bond 数值的增大,两种多毛细管出现纺锤和脉动射流模式的重复频率增多,且两种模式的摆动幅度随之减小,当静电 Bond 数值增大到某一值时,纺锤模式将会转变为脉动射流模式;当静电 Bond 数值继续增大时,两种多毛细管均产生多股射流模式,且其射流数目随着静电 Bond 数值的增加而有所增多。

收稿日期:2016-11-25;收稿日期:2017-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51106064);江苏大学青年基金扶持计划项目(FCJJ2015001);江苏大学青年骨干教师培养工程项目;江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介:王贞涛(1978—),男,山东省齐河县人,江苏大学副教授,洁华控股股份有限公司在读博士后,主要研究方向为静电雾化理论和应用研究。

Abstract: High speed digital camera was used to record electrohydrodynamics spraying modes of multi-capillary with ethanol. The spraying modes of multi-capillary were obtained by analyzing the pictures, and the effect of operating parameters on electro-spraying modes was discussed. The spraying modes with two configurations were classified by the dimensionless parameter flow (α) and electric Bond number (β). The experimental results indicated that similar to spraying mode of mono-capillary, dripping, spindle, jet and multi-jet modes could be observed in spraying mode of multi-capillary. The modes could transits from one mode to another with varying applied voltage and flow rate. The two jets from double-capillary showed symmetrical skewed distribution due to Coulomb repulsive forces between them. Although there are different configurations for two kinds of capillaries, the spindle and pulsated jet modes could be observed. For these two modes, the frequency of spindle and pulsated jet ejected from the capillary would also increased and the swing range of the spindle and jet would reduce with an increase in electric Bond number. The transition from spindle to pulsated jet mode would be observed at a critical electric Bond number. With electric Bond number further increased, the multi-jet mode would be observed for two configurations. The number of jet increased with an increase in electrical Bond number.

0 引言

液体以一定的流量从毛细管中流出,在不同的电压与流量下,毛细管口处的液滴会破碎成不同形态,最终表现为不同形式的雾化模式.毛细管静电雾化具有雾滴粒径细小、尺度均匀、空间弥散广等优点,因此被广泛应用于材料薄膜制备、纳米级材料粒子制备、喷墨打印、质谱分析和空间推进技术等方面^[1-3].自从1915年J. Zeleny对毛细管静电雾化现象进行开创性研究后,近百年来众多学者对单毛细管静电雾化现象进行了理论、实验与应用等研究,获得了滴状、纺锤状、锥射流、多股射流等多种典型的雾化模式^[4-5].然而对多毛细管静电雾化现象的研究起步较晚,至今仍在探索阶段.2005年,R. Bocanegra等^[6]通过在微孔阵列的平板上进行多喷嘴静电雾化实验,测量了液体流量与电流的关系,以及雾化产生的雾滴粒径分布,得出微孔阵列产生的雾化效果与单个导管所产生的雾化效果相似的结论.2006年,W. Deng等^[7]通过其设计的多管道静电雾化装置对多管道雾化模式进行了研究,得到静电雾化过程中电流与流量的关系,以及雾化产生液滴粒径的分布,并将该装置成功应用于半导体制造工艺和微纳制造

工艺.同年,L. F. Velasquez-Garcia等^[8]通过对空间推进器的电喷雾喷嘴进行平面阵列和线性阵列的研究,得出发动机的电流流量特性与降阶模型一致的结论,为空间推进器的设计改进与发展提供了有力的依据.2007年,B. Q. T. Sia等^[9]对阵列电喷雾发生器的干扰效应进行了分析与实验研究,提出了一种用于预测发射极间距工作电压的静电干扰模型,该模型的结果能够很好地与实验数据相吻合^[9].2008年,H. Oh等^[10]对双喷嘴电喷雾沉积与毛细管萃取基板进行研究,发现液滴的尺寸分布并不会受提取基板电压的影响,但是喷雾进程会受到提取基板电压的影响,较小的颗粒沉积在密集的外部区域,较大的颗粒沉积在核心区域.2010年,刘明明等^[11]利用传统的金属毛细管搭建了多喷嘴静电雾化实验装置,获得了乙醇在单、多管道条件下锥-射流模式的重要关系,即稳定喷洒的起始电压与电流-流量的关系.2011年,陈效鹏等^[12-13]对多毛细管电雾化装置进行了研究,根据单排管道电雾化现象及相应静电场的数值结果,分析了多管道下电场强度分布对雾化稳定性的影响,得到了比较稳定的多管道雾化射流.2012年,王清华等^[14]对无水乙醇分别在单根、线性单排及双排毛细管条件下的雾化

模式进行比较,获得了在稳定的锥-射流模式下喷洒的重要关系,即在稳定的锥-射流喷洒模式下,雾化的起始电压、电流、粒径与流量的关系,并且得出单根、单排管道、双排管道3种情况下起始电压、回滞电压、电流、粒径与流量之间关系的规律.

多毛细管静电雾化过程影响因素很多,内在关系复杂,尽管已有丰富的研究成果,但对多毛细管静电雾化现象,特别是多毛细管静电雾化模式及其影响因素仍需进一步探讨.本文以无水乙醇作为雾化介质,通过改变电压与流量,获得不同毛细管布置下的雾化过程,并通过高速数码显微摄像机记录多毛细管静电雾化模式,探讨流量、电压等运行参数对多毛细管静电雾化模式的影响,对不同雾化模式产生范围进行对比分析,以推进多毛细管静电雾化技术在微尺度燃烧、功能材料薄膜的制备、空间推进技术,以及农业药剂喷洒防治病虫害等工农业生产中的应用.

1 实验装置与参数

本研究所采用的实验装置如图1所示,以无水乙醇作为雾化介质,配置20 mL注射器,储液管为除去活塞芯的5.0 mL注射器,储液管前端装有金属毛细管,无水乙醇由注射泵通过液

体输送管及储液管以一定速度最终被推进到金属毛细管中,注射器的工作流量控制在0.05 ~ 1.00 mL/min之间.实验所用到的高压静电由负高压静电发生器提供,高压静电发生器的电压控制在0.0 ~ 15.0 kV之间,其负极与金属毛细管连接,作为静电雾化的负极.金属毛细管的下方是直径为150 mm的铜制金属圆板,铜板作为零极通过导线与大地相连接,电极连接处使用绝缘胶布粘合,防止漏电,以保证实验电压的准确性,两极板间距为20.0 mm.通过MotionProTMX4puls高速数码相机获得金属毛细管静电雾化的图像,高速数码摄像机的采集率为105 f/s,配合型号为NAVITAR12X的显微变焦镜头进行微距拍摄,LED提供实验光源.捕获的图像在电脑上通过高速数码相机专用软件进行分析,以获得清晰、准确的雾化模式.实验选取型号为24G的两个毛细管喷嘴(内径0.30 mm,外径0.55 mm,长度为13.00 mm),两毛细管轴线之间的距离为2 mm,无水乙醇的参数如表1所示.

2 实验研究

2.1 双毛细管静电雾化模式实验

通过高速数码摄像机记录液滴滴落与射流

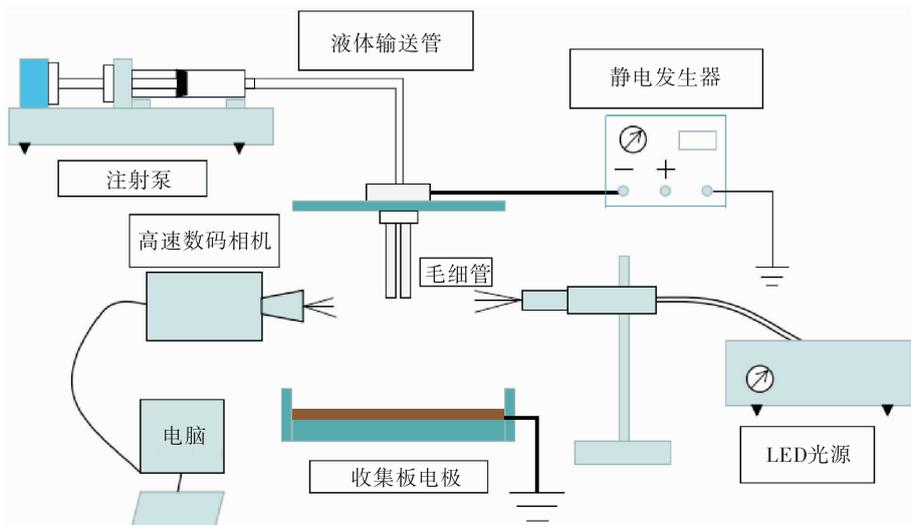


图1 电动流体力学雾化实验装置图

Fig.1 Experiment device for electrohydrodynamics

表1 无水乙醇的物理参数

Table1 The physical parameters of absolute ethyl alcohol

液体	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	表面张力 $\sigma / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	介电常数 ε	电导率 $K / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	黏度 $\nu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$
无水乙醇	791.0	0.022	24	0.50×10^{-4}	1.64×10^{-3}

雾化过程的图像,通过大量图片的对比分析可知,双毛细管呈现出滴状、纺锤状、脉动射流、锥射流和多股射流等雾化模式,但是在所采用的实验参数内没有观察到旋转模式和摆动射流模式. 鉴于影响毛细管静电雾化模式的因素很多,本文采用无量纲流量 α 和静电 Bond 数 β 对无水乙醇存在的雾化模式进行详细划分^[15]. α 和 β 的定义式分别为

$$\alpha = \frac{\rho K Q}{\gamma \varepsilon \varepsilon_0} \quad \beta = \frac{\sqrt{\varepsilon_0} V}{\sqrt{\gamma d}}$$

其中, ρ 为液体密度, K 为电导率, Q 为液体流量, γ 为液体表面张力, ε 为液体的相对介电常数, ε_0 为真空介电常数, V 为电压, d 为毛细管内径.

双毛细管静电雾化模式对应的流量和电压范围如图2所示. 在实验所采用的流量范围内,均能够观察到滴状模式、纺锤模式和锥-射流模式,当无量纲流量 $\alpha \leq 42.3$ 时,可以观察到脉动锥-射流和稳定的多股射流.

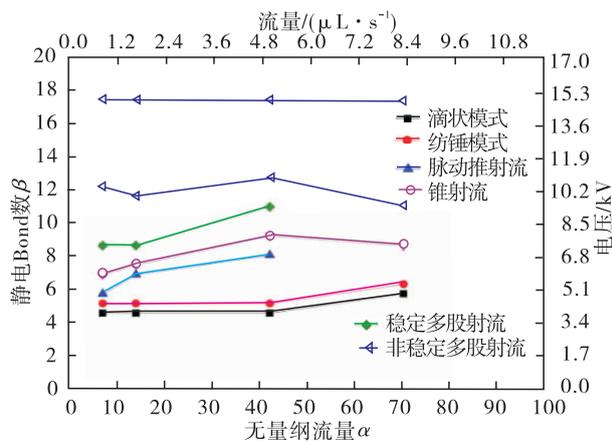
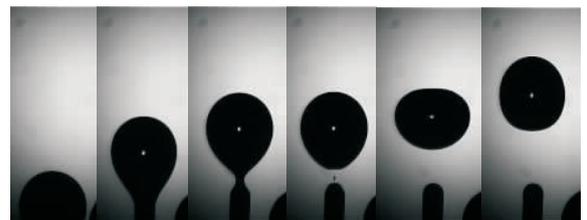


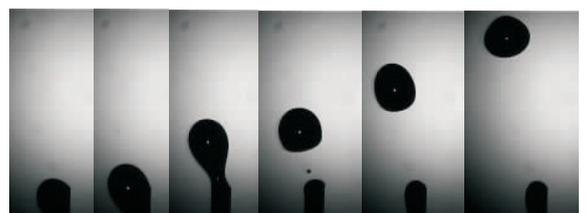
图2 双毛细管雾化模式的电压与流量范围

Fig.2 Voltage and flow range of dual capillary spraying model

2.1.1 滴状模式 在较低电压下,液体从毛细管中逐渐流出,由于集肤效应的作用,液体会贴着毛细管外壁向上运动一定距离. 随着流量的增加,毛细管末端的液体体积逐渐增大,液滴在毛细管末端会形成半球形的弯月面. 由于液体流量较低,大约经过 1 ~ 2 s 后,毛细管末端的液滴脱离毛细管滴落. 双毛细管在发生静电雾化时所形成的空间电场具有对称性,因此雾化所形成的液滴也具有对称性. 选取双毛细管的左侧金属毛细管进行图像处理与分析,可得到滴状模式(见图3a)). 该过程主要是由于液滴受到的重力、静电力和表面张力作用的结果. 在实验过程中,双毛细管产生液滴呈现交替滴落现象. 当缓慢增加电压后,会明显观察到双毛细管产生的大液滴在滴落过程中出现相互排斥的现象,这是由于两个大液滴带有同种电荷,产生了库伦排斥力. 同样选取双毛细管的左侧金属毛细管进行图像处理与分析,可得到倾斜滴状



a) 滴状模式 (0.1 mL/min, 电压 2.0 kV)



b) 倾斜滴状模式 (0.1 mL/min, 电压 3.5 kV)

图3 双毛细管滴状模式形态演化过程

Fig.3 Evolution of dripping mode of double-capillary

模式(见图 3b)). 相比较低电压,此时液滴表面电荷密度较大,两液滴之间的库仑力表现更加明显,随着电压的增加,两毛细管产生的液滴在脱离毛细管口后均会产生一个副液滴.

2.1.2 纺锤模式与脉动射流模式 无水乙醇在双毛细管下的纺锤雾化模式和脉动射流模式与单毛细管雾化模式相似:当静电 Bond 数 β 增大时,纺锤与锥射流脉动产生的频率会增大,形成纺锤模式与脉动射流模式时,两液滴之间夹角会减小;当静电 Bond 数 β 增大到某一值时,纺锤模式会转变为脉动射流模式;当无量纲流量 α 增大时,形成的纺锤模式与脉动射流模式中的两液滴之间夹角会减小. 不同工作流量和电压下的双毛细管纺锤模式与脉动射流模式如图 4 所示. 单毛细管与双毛细管的不同之处在于:双毛细管形成的纺锤与脉动射流之间由于库仑力的作用,液滴在滴落过程中向外倾斜,每个射流均与毛细管轴线形成一定的夹角.

2.1.3 锥射流模式 在双毛细管的静电雾化中观察到了锥射流模式,与单毛细管中锥射流模式的不同主要表现为:在双毛细管中形成的液锥与射流偏离毛细管轴线向外倾斜,两液锥之间形成一定的夹角,呈现为八字状(见图 5). 由图 5 可以看出,随着电压与流量的增加,锥射流模式会逐渐由纺锤模式或脉动射流转变而来. 当流量较低时,射流破碎方式为轴向破裂机制;当流量和电压较高时,射流破碎方式则为扭曲破裂机制,这与单毛细管锥射流模式的破碎规律基本相同.

2.1.4 多股射流模式 无水乙醇在双毛细管下产生的多股射流模式如图 6 所示. 与单毛细管多股射流模式相比较,两者最显著的差异表现为:在多股射流模式下,双毛细管管口相近处无射流产生,由管口相近处到管口相远处射流的数目逐渐增多,在两管口最远处两侧的射流数目最多,当静电 Bond 数 β 较大时,在两毛细

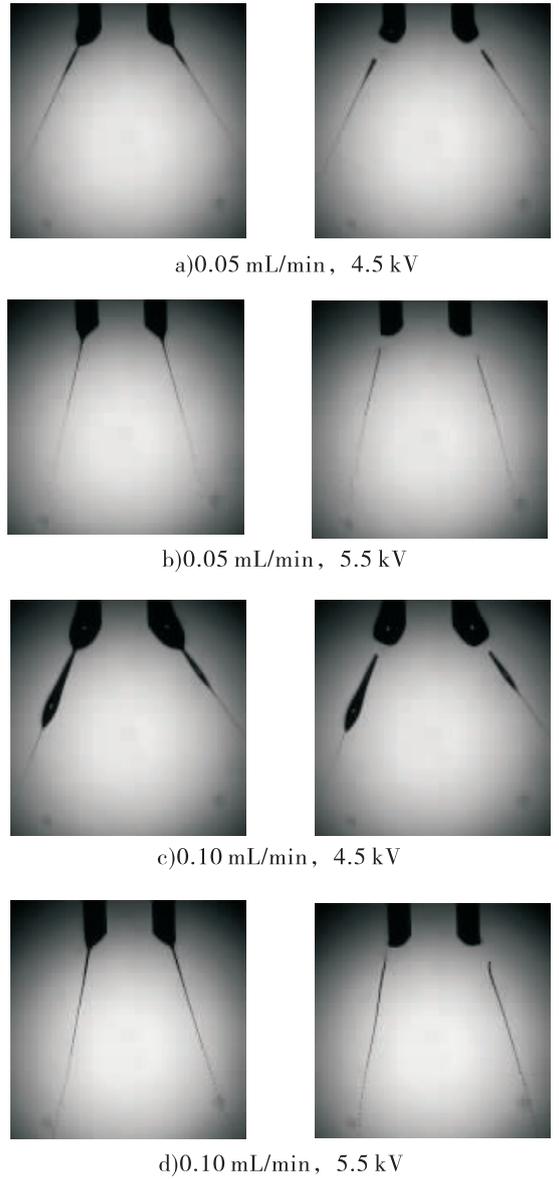


图 4 不同工作流量和电压下的双毛细管纺锤模式与脉动射流模式

Fig. 4 Spindle and pulsated-jet modes of double-capillary at different working flow and voltage

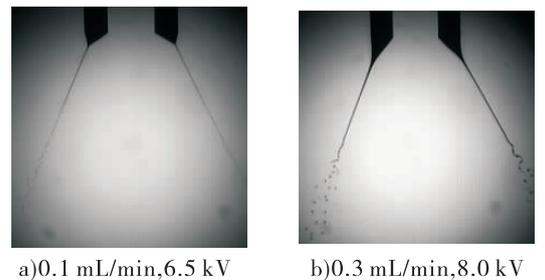


图 5 双毛细管锥射流模式

Fig. 5 Cone-jet mode of double-capillary

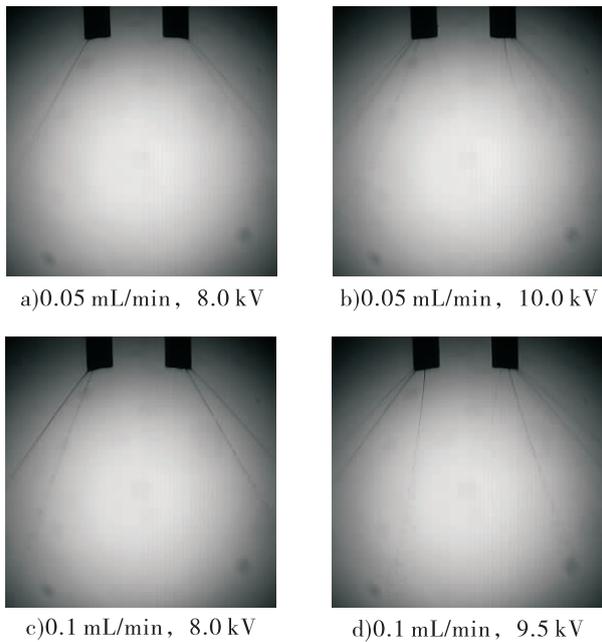


图6 双毛细管多股射流模式

Fig.6 Multi-jet mode of double-capillary

管口距离相近的两侧同样也会产生射流. 由于金属毛细管的加工程度不同及两射流之间的相互作用等因素的影响,在相同电压与流量下,两毛细管最远处两侧产生的射流数目会有所不同. 当静电 Bond 数 β 增大时,在毛细管口处的射流数目会有所增加,此时弯月面的体积会显著减小,呈现为倾斜的平面,毛细管外侧边缘出现微小的突起,射流由此产生;当流量增大时,射流与毛细管轴的夹角会增大.

2.2 三毛细管静电雾化模式实验

为探究毛细管的空间分布对雾化模式的影响,实验选择正三角形分布的金属毛细管. 流量

分别选取为 $3 \mu\text{L/s}$, $6 \mu\text{L/s}$ 和 $15 \mu\text{L/s}$, 电压范围为 $0.0 \sim 15.0 \text{ kV}$, 每 0.5 kV 记录一次. 毛细管为正三角形分布时,每支毛细管雾化模式的起始电压都相同,雾化时产生的形态差异较小,可得到雾化模式为滴状、纺锤、脉动射流、锥射流和多股射流等雾化模式,如图7所示. 由于毛细管形成电场的空间部分,使毛细管喷嘴处在液锥、射流、纺锤等雾化模式下都会沿正三角形的中心线向外倾斜.

2.2.1 滴状模式 在实验的流量范围内,当电压较低时,附着在毛细管外壁面液体会随着时间的推移逐渐增多,由于集肤效应,液体会贴着毛细管外壁向上运动一定距离,随着流量的进一步增加,毛细管口会被无水乙醇包围,弯月面呈现半球状,最终在3个毛细管上分别形成1个大液滴,在重力的作用下,脱离毛细管(见图7a)). 该过程与单毛细管滴状模式相同. 在流量为 $3 \mu\text{L/s}$, 电压小于 3.0 kV 时,3个毛细管产生的液滴呈现直线下降状态;当电压为 3.0 kV 时,3个毛细管产生的液滴在毛细管口处由于库仑力的作用产生排斥力,3个液滴分别向外倾斜,与毛细管轴线呈现一定的夹角,随着附着在毛细管上液滴体积的增大,排斥现象会更加明显. 这是因为在毛细管内及其外壁的液滴带有相同的电荷,因此相邻液滴之间由于库仑力的作用产生排斥现象,液滴体积的增大使得液滴所带电荷量也增多,因此相互排斥力也会增加. 当电压增加到某一值时,3个毛细管

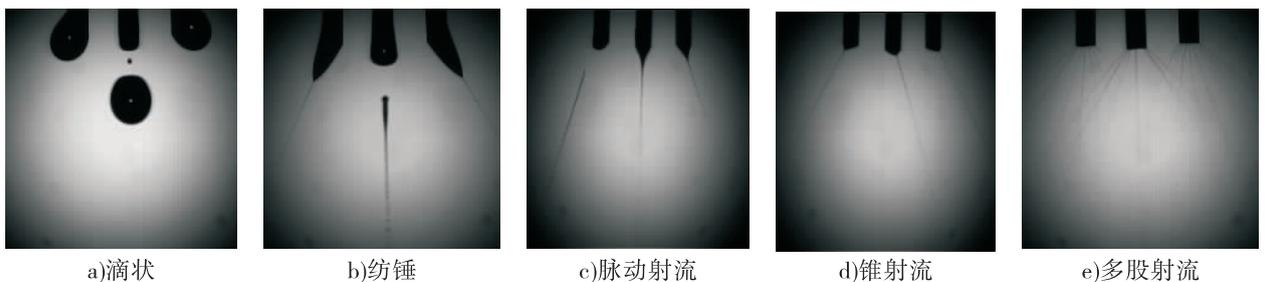


图7 三毛细管雾化模式

Fig.7 The spraying modes of three-capillary

产生的主液滴在脱离毛细管口后均会产生一个副液滴,副液滴的运动轨迹受到毛细管电场及主液滴电场的影响,其运动过程较为复杂,在较低的电压下,小液滴容易被弯月面所吸收,而在较高电压下,小液滴会沿毛细管垂直方向射出。

2.2.2 纺锤与脉动射流模式 随着电压的增加,在三角形分布的毛细管喷嘴末端产生纺锤模式,其形态与单毛细管、双毛细管产生的纺锤模式基本相似.不同之处在于双毛细管的分布是在同一平面内两个纺锤形液滴与轴线呈现一定的夹角,而在三毛细管中液滴沿着等边三角形的中心线向外倾斜,如图7b)一c)所示.当静电 Bond 数 β 增大时,纺锤模式产生的频率也会增大,而形成纺锤模式的3个液滴之间的夹角会减小;当静电 Bond 数 β 增大到某一值时,纺锤模式会转变为脉动射流模式;当无量纲流量 α 增大时,3个液滴之间夹角会减小.相比与双毛细管,正三角形分布时产生的纺锤模式会更加稳定,主要原因是三毛细管产生的空间电场较双毛细管产生的空间电场更加稳定,因此液滴更容易达到平衡.纺锤模式在电压稍微增加后,容易转变为脉动射流模式,并在与脉动射流模式出现共存过程.在脉动射流模式下液滴的状态与单毛细管下得到的脉动射流模式并无显著差异,主要不同之处在于:三毛细管产生的射流都相对于各自的毛细管轴线形成一定的夹角,并且液滴整体绕着三角形轴线定周期地来回摆动.这是因为液滴脱落使得液柱上的电荷量减少,导致空间电场分布不均匀,带电量多的液滴有向场强弱的方向倾斜的趋势,在倾斜过程中,又有液滴从液柱上脱落,该过程周期往复地循环着.随着电压的增加,脉动射流模式将逐渐过渡到锥射流模式。

2.2.3 锥射流与多股射流模式 正三角分布的三毛细管出现的锥射流模式中液锥与射流偏离毛细管轴线向外倾斜,呈现3个八字状,如图

7d)一e)所示.当流量较低时,射流破碎方式为轴向破裂机制;当流量和电压较高时,射流破碎方式则为扭曲破裂机制,这与单毛细管形成锥射流模式的规律基本相同.多股射流模式中每个毛细管在远离其他两个毛细管的管口处形成多股射流,而在毛细管形成的内侧空间及邻近区域没有射流产生.这是由于此时金属毛细管上的电压比较高,液滴带相同电荷所产生的库伦排斥力也比较大,因此射流被排斥在每个毛细管外侧边缘.在多股射流模式下,由于毛细管电场与射流形成电场之间的相互作用,在相同电压与流量下,产生射流的数目会有所不同.当静电 Bond 数 β 增大时,射流数目会有所增加。

3 结论

通过高速数码相机对毛细管静电雾化现象进行观察,获得了多毛细管静电雾化的多种模式,并以此为基础,结合静电 Bond 数 β 和无量纲参数流量 α 对多毛细管静电雾化模式进行了分类和分析,获得了不同雾化模式对应的流量与电压范围,主要结论如下。

1) 双毛细管静电雾化模式存在滴状、纺锤、脉动射流、锥射流和多股射流雾化模式,毛细管的雾化模式与单毛细管的雾化模式基本相似.在双毛细管周围产生的电场以及带电射流或雾滴产生电场的共同作用下,每个毛细管末端的弯月面、液锥、射流及破碎的液滴与毛细管轴线呈现一定的角度,两条射流呈现八字状。

2) 正三角分布的三毛细管静电雾化过程,由于空间的对称性,产生的滴状、纺锤、脉动射流、锥射流及多股射流雾化模式更加稳定.同时任意两毛细管的弯液面、液锥、射流和雾化液滴构成的雾化形态呈现八字状,并且沿着等边三角形的中心线向外倾斜。

3) 在两种多毛细管静电雾化系统中,随着静电 Bond 数值的增大,纺锤和脉动射流模式的

重复频率增多,两种模式的摆动幅度均会减小,且容易从纺锤模式转变为脉动射流模式;当静电 Bond 数值继续增大到某一数值时,两种多毛细管均产生多股射流模式,其射流数目随着静电 Bond 数值的增大而增加。

参考文献:

- [1] 王贞涛,毛惠敏,罗惕乾. 锥-射流模式下毛细管静电雾化流场的 PIV 测量[J]. 农业机械学报,2010,8(41):62.
- [2] JAWOREK A, SOBCZYK A T. Electro spraying route to nanotechnology: an overview[J]. Journal of Electrostatics,2008,66(3-4):197.
- [3] FILLMORE G L, BUEHNER W L, WEST D L. Drop charging and deflection in an electrostatic ink jet Printer[J]. IBM Journal of Research and Development,1977,21(1):37.
- [4] ZELENY J. On the conditions of instability of liquid drops with applications to the electrical discharge from liquid point[J]. Pro Camb Phil Soc,1915,18:71.
- [5] ZELENY J. Instability of electrified liquid surfaces[J]. Phys Rev,1917,10(1):1.
- [6] BOCANEGRA R, GALAN D, MARQUEZ M, et al. Multiple electro spray emitted from an array of holes[J]. Journal of Aerosol Science,2005,36(12):1387.
- [7] DENG W, KLEMIC J F, LI X, et al. Increase of electro spray throughput using multiplexed micro-fabricated sources for the scalable generation of monodisperse droplets[J]. Journal of Aerosol Science,2006,37(6):696.
- [8] VELASQUEZ-GARCIA L F, AKINWANDE A I. A micro-fabricated linear array of electrospray emitters for thruster applications[J]. Microelectromech Syst,2006,15(5):1260.
- [9] SIA B Q T, BYUNA D, LEE S. Experimental and theoretical study of a cone-jet for an electro-spray microthruster considering the interference effect in an array of nozzles[J]. Journal of Aerosol Science,2007,38(9):924.
- [10] OH H, KIM K, KIM S. Characterization of deposition patterns produced by twin-nozzle electro-spray[J]. Journal of Aerosol Science,2008,39(9):801.
- [11] 刘明明,陈效鹏,徐晓建. 多毛细管电雾化喷洒模式及稳定喷洒特征研究[J]. 力学学报,2010,42(3):567.
- [12] 陈效鹏,董绍彤,程久生,等. 电雾化装置及雾化模型研究[J]. 实验力学,2000,15(1):97.
- [13] 陈效鹏,王清华. 多毛细管稳定喷洒电雾化特征研究(一)——实验设备设计及粒径测量方法[J]. 实验力学,2011,26(6):692.
- [14] 王清华,陈效鹏,赵梦华. 多毛细管稳定喷洒电雾化特征研究(二)——电压、电流、粒径与流量的关系[J]. 实验力学,2012,27(1):102.
- [15] FERNANDEZ DE LA MORA, LOSCERTALES I G. The current emitted by highly conducting Taylor cones[J]. Journal of Fluid Mechanics,1994,260:155.