电场作用下乙醇的稳定多股射流现象

霍元平, 张聪, 刘海龙, 左子文, 王军锋*

江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013

* 联系人, E-mail: wangjunfeng@ujs.edu.cn

2019-11-19 收稿, 2020-01-10 修回, 2020-01-10 接受, 2020-01-14 网络版发表

国家自然科学基金(51706089)、江苏省自然科学基金(BK20160517)和中国博士后科学基金(2016M601734)资助

摘要 基于高时空分辨率的高速摄像技术, 通过精确记录无水乙醇静电雾化多股射流模式下射流形成及演变的显微形貌特征, 研究了电邦德数及无量纲流量等参数对稳定雾化区间及稳定股数演变行为的影响及作用规律. 研究表明: 乙醇稳定多股射流存在不同的稳定股数, 其稳定股数 N 波动区间为2~10股, 并先后出现稳定多股射流弯液面模式和边缘模式. 边缘模式下, 随着稳定股数的增加, 稳定多股射流的电邦德数区间和临界最低电邦德数均在不断增大, 且出现稳定多股射流的电压开关现象. 随着无量纲流量的增加, 各稳定股数下的电邦德数极大值整体呈线性增长趋势, 同等流量下电邦德数极大值随稳定股数的增加而不断增大, 且较电邦德数极小值的增加幅度明显. 此外, 边缘模式下随着稳定股数的增加, 射流偏离角整体呈增大趋势, 但各股数下的射流偏离角变化幅度均控制在 $5^\circ \pm 0.3^\circ$.

关键词 静电雾化, 多股射流, 稳定股数, 显微高速摄像

静电雾化是一种在电场力作用下促使荷电液体破碎成具有单分散性好、可控性强、沉积率高的微小液滴/颗粒的雾化传质技术^[1~3]. 喷雾的形成源于液滴的分裂破碎, 借助于静电力形成喷雾称之为电动力液体雾化(electrohydrodynamic atomization, EHDA), 它是少有的能够产生单分散微米级雾滴的雾化方法^[4]. 自Rayleigh^[5]在1882年发现球形荷电液滴的临界分裂破碎条件(即瑞利极限)以来, 静电雾化这一理论被后来的研究者开创并不断发展完善. 迄今为止的一百多年以来, 众多研究者已经进行了很多的实验和理论研究, 以了解这种电动力液体雾化喷雾的形成及演变机制. Zeleny^[6~8]最先对静电雾化这种现象进行比较系统完整的实验研究, 观察玻璃毛细管施加高电压后其端口处流出液体的喷射情况, 并对从端口喷射出液滴的分裂破碎现象进行了分析. 此后, Taylor等人^[9~11]通过一系列实验测量研究结合理论分析提出了静电雾化的基本理论模型, 这为后来进一步的实验及理论拓展研究提供

了重要的理论指导基础. 随后Joffre等人^[12]又拓展研究了电场作用下毛细管端口处液体弯月面的形成并提出理论预测模型. 至此, 有关静电雾化形成机制的理论已初步成型. Cloupeau和Prunet-Foch^[13]又在前人相关工作基础上研究了毛细管静电喷雾对由锥形液体向外延伸的永久射流破裂而形成液滴的作用, 确定了这种锥形射流模式的工作区域, 并讨论了射流直径随体积流量和外加电压的变化关系. Tang和Gomez^[14]则是通过实验研究了低导电性液体通过静电雾化锥形射流模式形成的单分散性喷雾. 近10年来, 随着微精密制造技术, 特别是纳米技术、微生物医药技术的迅猛发展, 静电雾化的研究被逐渐应用到了微喷雾冷却^[15]、微/纳米薄膜或颗粒制备、微胶囊封装^[16]、微型燃烧^[17]及微动力推进^[18]等多项领域, 显示了其巨大的潜在价值. 由于可产生单分散性极好的微小液滴/颗粒, 静电雾化的锥形射流模式在实际应用中被认为是最理想也是首选的雾化模式, 因此也是前人开展静电雾化研究主要涉及的

引用格式: 霍元平, 张聪, 刘海龙, 等. 电场作用下乙醇的稳定多股射流现象. 科学通报, 2020, 65: 1046–1054

Huo Y P, Zhang C, Liu H L, et al. Stable multi-jet behavior of ethanol under an electric field (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1046–1054, doi: 10.1360/TB-2019-0758

雾化模式。但该运行模式也存在明显的缺陷,其雾化产生液滴的大小严格受限于供给流量,即要想获得较小尺度的喷雾液滴,必须限制供给流量极小,而这又无法满足实际应用中雾化流量的要求。多股射流模式或许是改善这一缺陷的有效方法。多股射流模式下形成静电喷雾的供给流量要远远大于锥形射流模式,然而多股射流模式下的射流由于具有较强的不稳定性,难以实现稳定的雾化状态^[19-21],应用价值受限,其稳定多股射流雾化行为是静电雾化模式研究中经常被忽视的一个科学问题,涉及射流稳定雾化区间、稳定射流股数与电邦德数的映射关系等仍存在较多的研究盲点。因此,对于电场作用下光滑毛细管微通道出口处形成多股荷电射流达到稳定运行状态的研究具有十分重要的意义。

本研究基于时空分辨率较高的高速摄像技术,通过精确记录静电雾化多股射流模式下射流形成及演变的显微形貌特征,研究了电邦德数及无量纲流量等参数对稳定雾化区间及稳定股数演变行为的影响及作用规律,对揭示荷电液体多股射流雾化模式演变规律,丰富静电雾化多股射流部分的基础理论及拓展静电雾化技术的多领域实际应用具有重要的指导意义。

1 实验装置与方法

静电雾化多股射流可视化的实验装置如图1所示。

实验中采用的液体介质为无水乙醇,其相关物性参数为:其黏度 μ 为 1.64×10^{-3} Pa s,相对介电常数为24,电导率 K 为 5×10^{-5} S/m,表面张力 σ 为 2.2×10^{-2} N/m。选择RISTRON的RSP02-B型微流量注射泵(线性推力>30 kgf,控制精度 $\leq 0.1\%$)精确控制液体的供给流量,实现液滴的稳定发射频率。负高压直流静电发生器(DW-N503-1ACDF)的高压输出端对毛细管尖端施加 $-10 \sim 0$ kV的电压(控制精度为 ± 0.1 kV),使之成为负极;在毛细管正下方一定距离处水平放置直径为50 mm的紫铜材质圆板,与毛细管轴向保持严格对称并接地成为正极,这样就构成一个典型的针-板形式的非匀强电场。无水乙醇在电场力的作用下逐渐破碎、分裂成微小液滴,在相同的实验配置参数下,通过对施加电压的调控最终形成稳定的多股射流静电喷雾。实验中使用OLM-PUMS的ILP-2型高强度LED点光源对静电喷雾形成区域进行照射,借助PHANTOM V1611高速摄像机配合型号为NAVITAR 12X的显微变焦镜头对静电喷雾多股射流雾化区进行微距拍摄,精确记录多股射流模式下射流演变的显微形貌特征,拍摄频率为16000帧/s,图像分辨率为 1280×800 。为保证实验结果的精度和实验操作的安全性,实验装置中所有关键连接部位均采用聚四氟乙烯进行绝缘处理,并且将所有的实验设备进行接地保护处理。

实验环境温度控制在 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,相对湿度为(40

图1 (网络版彩色)静电雾化多股射流的可视化实验装置示意图

Figure 1 (Color online) Schematic of visualization experimental device for electrostatic atomization of multiple jets

$\pm 0.5\%$ 。实验选取5种不同内/外径的不锈钢毛细管针头,所有毛细管针头为定制工件,长度均为6.5 mm,制作公差为 ± 2 mm。每种型号的毛细管端面与接地圆铜板之间的极间距 H 分别设置为5种不同值,微流量注射泵的供给流量 Q 设置5种不同值,具体实验配置参数如表1所示。因此实验中可通过分析多股射流的雾化特征获取电邦德数及无量纲流量等对稳定雾化区间及稳定股数演变行为的影响及作用规律。

2 实验结果与讨论

2.1 稳定多股射流形成的力学特征

电场作用下荷电液滴的表面电荷密度是不均匀的,电荷会沿着电场力的方向迁移至液滴局部尖端区域。如果电场强度足够大,液滴表面电荷分布将极其不均匀,这导致局部电荷聚集量率先达到瑞利极限^[22] $q_{\text{Ray}} = 8\pi(\epsilon_0\sigma_0r^3)^{1/2}$ 从而发生库仑分裂破碎行为。其中, ϵ_0 为液滴周围空气的介电常数, σ_0 为液滴表面张力, r 为液滴半径, q_{Ray} 代表临界荷电量。静电雾化过程中,随着电场强度的增加,会依次出现滴状模式、脉动模式、纺锤模式、锥射流模式、多股射流模式及其他模式,不同的雾化模式下破碎子液滴具有不同的流体动力学特性,射流的演变特征及雾滴的运动轨迹等均呈现出不同的特点。多股射流模式下的射流结构有其特殊性,随着毛细管出口处电场强度的增加,管口液体表面波的扰动增强,这导致电荷会选择性聚集在液面的几个局部区域,进而达到瑞利极限状态并发射多股射流。

表1 多股射流静电喷雾实验配置参数

Table 1 Experimental configuration parameters of multi-jet electrostatic spray

	毛细管针头内/外径 D_i/D_o (μm)	针-板极间距 H (mm)	供给流量 Q ($\mu\text{L}/\text{min}$)
值1	60/190	5	10
值2	110/230	7	20
值3	210/420	9	30
值4	300/550	11	40
值5	420/720	13	50

静电雾化稳定多股射流的稳定性主要体现在两个方面,一是当多股射流达到稳定状态后,其多股射流形貌在空间位置上保持不变,二是稳定多股射流状态不会随着时间而发生变化。其中每股射流的雾化与稳定不仅与流体重力 G 、管口附着力 $F_a = \pi D_j^2 \sigma_0 / 4$ 、电场力 $F_e = \frac{4qU}{D_o \ln(8H/D_o)}$ 有关,同时还增加了其他射流的库仑斥力合力 $F_c = \sum kq^2 \cos \alpha_i / r_i$,而稳定多股射流的形成恰好取决于这些力在空间上的平衡,如图2所示。其中, D_j 、 q 、 U 、 α_i 、 r_i 分别表示单股射流的直径、单股射流的荷电量、毛细管上的荷电电压、第 i 股对第1股射流静电斥力与 x 方向的夹角以及第 i 股与第1股射流在毛细管端面的距离,同时 $D_j = 2\sqrt{Q/\pi v N}$ 又意味着 F_a 受毛细管流量 Q 、单股射流速度 v 及稳定射流股数 N 的影响,诸多因素共同决定了静电雾化稳定多股射流的动力学演变行为。

图2 (网络版彩色)静电雾化稳定6股射流中的单股射流受力示意图

Figure 2 (Color online) Schematic of force acting on single jet under 6 stable jets in electrostatic atomization

2.2 稳定多股射流的动力学演变行为

图3显示了静电雾化稳定单股到稳定10股射流的射流演变形貌特征。实验中发现,在稳定射流股数较少(5股以下)的情况下,射流从毛细管针头管口端面处形成的不规则弯液面上射出,称为多股射流弯液面射流模式;而当稳定射流股数达到5股及以上时,这种形状不规则的弯液面会消失,所有射流均从毛细管针头管口外端面边缘射出,称为多股射流边缘射流模式。为了更好地界定以上两种不同的多股射流模式,这里引入一个无量纲参数 ω ,将其定义为弯液面最低点处距毛细管针头管口端面处的垂直距离 L_h 与毛细管针头外径 D_0 的比值,即 $\omega=L_h/D_0$ 。经过计算后可知,当 $\omega>0$ 时,形成多股射流弯液面射流模式,当 $\omega=0$ 时,形成多股射流边缘射流模式。由于受表面波的扰动明显,表面电荷聚集区域的不确定性较强,这导致弯液面形式的稳定多股射流的形成条件极为苛刻,即使平衡后也极易受到干扰而失稳,这预示着形成此类稳定模式的工况较少,稳定区间窄。随着射流股数的增加,弯液面逐渐减小,多股射流发射点逐渐向毛细管针头端口外边缘移动,当射流股数增加至5股及以上时,弯液面消失,所有射流均从毛细管针头外端面边缘射出,形成多股射流边缘射

流模式。边缘模式下稳定多股射流的雾化极其稳定,图4给出了稳定8股射流的雾化演变,从图中可以看出随着时间的变化各单股射流的空间位置均保持不变,表现出恒定流动的特点。由于各射流间不再受表面波扰动的影响,表面电荷的聚集区域选择性强,更容易实现力的空间平衡,因此可预示着边缘模式下稳定多股的工况会明显增多。实验中可观察到的极限稳定射流股数为10股,5~10股的稳定多股射流沿毛细管轴向严格对称,各个稳定股数下射流偏离轴向的角度、射流直径、射流速度也呈现不同的特点。

2.3 静电雾化多股射流的稳定股数分布

毛细微通道静电雾化过程中,管口处形成射流的过渡演变行为可以通过电邦德数加以描述^[23]:

$$Bo_E = \frac{8\varepsilon U^2}{\sigma D_0 \ln^2(8H/D_0)}, \quad (1)$$

其中, ε 表示无水乙醇的介电常数, U 表示施加电压, σ 表示无水乙醇的表面张力。电邦德数 Bo_E 与施加电压的平方成正比,且受毛细管几何尺寸、电极间距及液体表面张力的影响,较单一的电压参数能更准确地反映射流模式的雾化演变行为。图5给出不同流量下随电邦德

图3 (网络版彩色)静电雾化稳定单股至稳定10股的射流形态

Figure 3 (Color online) The jet patterns from a stable single cone-jet to stable 10 jets in electrosprays

图4 随时间变化的稳定8股射流的雾化演变形态

Figure 4 Spray evolution morphology of stable 8 jets as a function of time

图5 (网络版彩色)不同流量下稳定射流股数随电邦德数的变化
Figure 5 (Color online) Variation of stable jet number with electric bond number at different flow rates

数变化的稳定股数分布特征。该图准确反映了正交实验中全部的稳定多股射流工况,从图中可以看出,稳定多股射流的稳定股数 N 变化区间为2~10股。当 $2 \leq N < 5$,射流从毛细管管口处形成的变化弯液面上射出,形成多股射流的弯液面射流模式,由于受液面表面波的扰动明显,此模式下出现稳定多股射流的情况极少。当 $5 \leq N \leq 10$,射流均从毛细管管口外端面边缘射出,形成多股射流的边缘射流模式。需要特别说明的是,边缘模式下稳定5~8股的出现频率较高,而其他股数出现频率极低,且在毛细管管口光滑的情况下大于10股的多股射流均无法达到稳定射流状态。此外,边缘模式下产生稳定多股射流的临界最低电邦德数随着稳定股数的增加而不断增大,呈现线性增长趋势。

2.4 边缘模式下稳定多股射流的电压开关现象

由于稳定多股射流中边缘模式下5~8股的出现频率高,相较于其他股数容易产生,在实际应用中也是最适合利用的股数范围。图6给出了该股数范围内稳定射流的电压区间。从图中可以看出,在特定关键参数下,边缘多股射流模式中稳定射流股数将随着荷电电压的增加呈现阶梯式的连续增大,股数之间过渡转变时不存在不稳定多股射流发生的电压区间,相邻股数射流之间的切换在临界电压处如拨动开关一样瞬时完成,这里称之为电压开关现象。这意味着通过结构参数和流量的精准控制,稳定多股射流存在特有的连续稳定电压区间(跨度可达1 kV),这个特殊的电压区间跨度大,在电压调节中容易实现稳定多股射流雾化行为。电

图6 边缘多股射流模式下不同股数稳定射流的电压范围
Figure 6 The voltage range for stable jet with different number in the edge multi-jet mode

压开关现象的发现使得多股射流模式的拓展应用成为可能,未来研究涉及稳定多股荷电射流的多毛细管微通道阵列集成模块构建,大跨度的稳定电压区间有利于整体多股射流雾化的稳定,从而在成倍增长供给流量的情况下形成单分散性更好的亚微米级液滴。

2.5 无量纲流量影响下形成稳定多股射流的极限电邦德数

图7给出稳定多股射流边缘模式下随无量纲流量变化的极限电邦德数。这里采用 $Q_0 = \frac{\varepsilon_0 \sigma}{\rho K}$ 作为参照流量^[24],由此引入无量纲流量:

图7 (网络版彩色)电邦德数随着无量纲流量的变化
Figure 7 (Color online) Changes of the electric bond number with dimensionless flow rates

$$Q_m = \frac{Q}{\varepsilon Q_0} = \frac{\rho K Q}{\varepsilon \varepsilon_0 \sigma}, \quad (2)$$

其中, ε_0 为真空介电常数, ε 为无水乙醇的相对介电常数, σ 表示无水乙醇的表面张力, ρ 为无水乙醇的密度, K 为无水乙醇的电导率, Q 为液体流量。从图中可以看出, 各个稳定股数下电邦德数 Bo_E 与无量纲流量 Q_m 之间存在一定的映射关系。随着无量纲流量的增加, 各个稳定股数下的电邦德数极小值均未发生明显变化, 而随着稳定股数的增加, 电邦德数极小值整体呈升高趋势, 这意味着形成某一稳定股数的多股射流受无量纲流量的影响微弱, 同时也表明形成某一稳定股数射流的电邦德数极小值直接反映了稳定股数的大小。随着无量纲流量的增加, 各个稳定股数下的电邦德数极大值变化明显, 整体呈线性增长趋势, 这说明无量纲流量的增加使得各个稳定股数下的稳定电邦德数区间逐渐增大。此外, 同等流量下电邦德数极大值随稳定股数的增加而不断增大, 且较电邦德数极小值的增加幅度明显, 这

意味着稳定股数的增加可以获得更大的稳定电邦德数区间, 更容易在实际应用中实现稳定多股射流雾化行为。

2.6 边缘模式下稳定多股射流的射流偏离角

稳定多股射流边缘模式下, 定义单股射流与毛细管中心轴线的夹角为射流偏离角 θ , 其数值的变化是射流雾化区域的直接反馈。图8给出了稳定多股射流边缘模式下各个稳定股数随流量变化的射流偏离角, 其数值是借助ImageJ图像后处理软件对所拍摄的高速数码相机图片进行处理后获得的数据, 均为多次测量后取平均值的的结果, 不确定度为 $\pm 1.5\%$ 。从图中可以看出, 随着稳定股数的增加, 射流偏离角整体呈增大趋势, 但增长幅度有限, 各个稳定股数下的射流偏离角主要集中在 45° 附近, 且随着电邦德数的增大射流偏离角向 45° 靠拢的趋势愈加明显, 这表明随着电场强度的增加, 其他射流的库仑斥力合力与电场力对射流偏离的影响占主

图8 (网络版彩色)不同无量纲流量时各个稳定股数下射流偏离角随电邦德数的变化。(a) $N=5$; (b) $N=6$; (c) $N=7$; (d) $N=8$
Figure 8 (Color online) Variation of jet deviation angle with electric bond number for each stable jet number at different dimensionless flow rates. (a) $N=5$; (b) $N=6$; (c) $N=7$; (d) $N=8$

导地位. 此外, 各无量纲流量下的射流偏离角的变化幅度均控制在 $5^\circ \pm 0.3^\circ$, 这在一定程度上明确了单毛细管稳定多股射流的射流雾化区域, 为未来稳定多股射流阵列集成雾化模块的几何尺寸构型选择提供了非常重要的参考价值.

3 结论

本研究以无水乙醇为液体介质, 采用显微高速摄像技术精确记录了静电雾化多股射流形成及演化的显微形态特征, 重点关注了毛细管几何尺寸、电极间距、液体流量、荷电电压等参数对稳定雾化区间和稳定射流数演化的影响. 并通过电邦德数和无量纲流量等对稳定多股荷电射流运行区间及射流偏离角的变化趋势进行衡量. 得出的主要结论如下.

(1) 稳定多股射流的稳定股数 N 变化区间为2~10股, 当 $2 \leq N < 5$, 射流从毛细管管口弯液面射出, 形成稳定多股射流的弯液面射流模式; 当 $5 \leq N \leq 10$, 射流均由

毛细管管口边缘射出, 形成稳定多股射流的边缘射流模式.

(2) 边缘模式下, 稳定多股射流的主要稳定股数区间为5~8股, 此时在特定关键参数下, 稳定射流股数将随着荷电电压的增加呈现阶梯式的连续增大, 实现大跨度电压区间的稳定多股射流雾化行为.

(3) 随着无量纲流量的增加, 各稳定股数下的电邦德数极小值均未发生明显变化, 而随着稳定股数的增加, 电邦德数极小值整体呈升高趋势. 无量纲流量的增加使得各稳定股数下的稳定电邦德数区间逐渐增大, 同等流量下电邦德数极大值随稳定股数的增加而不断增大, 且较电邦德数极小值的增加幅度明显.

(4) 稳定多股射流边缘模式下, 随着稳定股数的增加, 射流偏离角整体呈增大趋势, 但各稳定股数下的射流偏离角变化幅度均控制在 $5^\circ \pm 0.3^\circ$, 这为荷电多股射流阵列集成雾化装置的几何尺寸构型选择提供了非常重要的参考价值.

参考文献

- Agostinho L L F, Yurteri C U, Fuchs E C, et al. Monodisperse water microdroplets generated by electrohydrodynamic atomization in the simple-jet mode. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 244105
- Rosell-Llompart J, Grifoll J, Loscertales I G. Electrosprays in the cone-jet mode: From Taylor cone formation to spray development. *J Aerosol Sci*, 2018: 125: 2–31
- Chen X P, Cheng J S, Yin X Z. Advances and applications of electrohydrodynamics. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 1055–1063 [陈效鹏, 程久生, 尹协振. 电流体动力学研究进展及其应用. 科学通报, 2003, 48: 637–646]
- Gan Y H, Jiang Z W, Li H G. A study on droplet velocity of ethanol during electrospraying process at cone-jet mode (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2017, 49: 1272–1279 [甘云华, 江政伟, 李海鸽. 锥射流模式下乙醇静电喷雾液滴速度特性分析. 力学学报, 2017, 49: 1272–1279]
- Rayleigh L. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity. *Philos Mag*, 1882, 14: 184–186
- Zeleny J. The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces. *Phys Rev*, 1914, 3: 69–91
- Zeleny J. On the conditions of instability of liquid drops with applications to the electrical discharge from liquid point. *Proc Camb Phil Soc*, 1915, 18: 71–83
- Zeleny J. Instability of electrified liquid surfaces. *Phys Rev*, 1917, 10: 1–6
- Taylor G I. Studies in electrohydrodynamics. I. The circulation produced in a drop by electrical field. *Proc R Soc London Ser A*, 1966, 291: 159–166
- Taylor G I. Electrically driven jets. *Proc R Soc London Ser A*, 1969, 313: 453–475
- Taylor G I, McEwan A D. The stability of a horizontal fluid interface in a vertical electric field. *J Fluid Mech*, 1965, 22: 1–5
- Joffe G, Prunet-Foch B, Berthomme S, et al. Deformation of liquid menisci under the action of an electric field. *J Electrostat*, 1982, 13: 151–165
- Cloupeau M, Prunet-Foch B. Electrostatic spraying of liquids in cone-jet mode. *J Electrostat*, 1989, 22: 135–159
- Tang K, Gomez A. Monodisperse electrosprays of low electric conductivity liquids in the cone-jet mode. *J Colloid Interface Sci*, 1996, 184: 500–511
- Deng W, Gomez A. Electrospray cooling for microelectronics. *Int J Heat Mass Transf*, 2011, 54: 2270–2275
- Chen H Y, Zhao Y, Jiang L. Compound-fluidic electrospray: An efficient method for the fabrication of microcapsules with multicompartiment structure (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 3147–3153 [陈洪燕, 赵勇, 江雷. 一种有效的多室结构微胶囊制备方法: 多流体复合电喷技术. 科学通报, 2009, 54: 3147–3153]
- Deng W, Klemic J F, Li X, et al. Liquid fuel microcombustor using microfabricated multiplexed electrospray sources. *Proc Combust Instit*, 2007,

- 31: 2239–2246
- 18 Lenguito G, Gomez A. Pressure-driven operation of microfabricated multiplexed electroSprays of ionic liquid solutions for space propulsion applications. *J Microelectromech Syst*, 2014, 23: 689–698
- 19 Jaworek A, Lackowski M, Krupa A, et al. Electrostatic interaction of free EHD jets. *Exp Fluids*, 2006, 40: 568–576
- 20 Noymer P D, Garel M. Stability and atomization characteristics of electrohydrodynamic jets in the cone-jet and multi-jet modes. *J Aerosol Sci*, 2000, 31: 1165–1172
- 21 Ryan C N, Smith K L, Stark J P W. Characterization of multi-jet electrospray systems. *J Aerosol Sci*, 2012, 51: 35–48
- 22 Huo Y, Wang J, Zuo Z, et al. Visualization of the evolution of charged droplet formation and jet transition in electrostatic atomization. *Phys Fluids*, 2015, 27: 114105
- 23 Coelho R, Debeau J. Properties of the tip-plane configuration. *J Phys D-Appl Phys*, 1971, 4: 1266–1280
- 24 Gañán-Calvo A M. The surface charge in electrospraying: Its nature and its universal scaling laws. *J Aerosol Sci*, 1999, 30: 863–872

Summary for “电场作用下乙醇的稳定多股射流现象”

Stable multi-jet behavior of ethanol under an electric field

Yuanping Huo, Cong Zhang, Hailong Liu, Ziwen Zuo & Junfeng Wang*

*School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China** Corresponding author, E-mail: wangjunfeng@ujs.edu.cn

Electrospray is a mass transfer technology in which charged liquid is broken into fine droplets/particles with ideal monodispersity, easy controllability, and high-deposition. In recent decades, with the rapid development of various micro precision instrument technologies, the research of electrospray has been widely applied to micro/nano-scaled thin film and particle preparation, air purification, micro-combustion, space micro-propulsion, mass spectrometry, and biotechnology. Previous researches mainly focused on the stable cone-jet mode that has the advantages for producing several micron-sized particles or droplets with good stability and monodispersity. However, electrospray in this cone-jet mode has a major disadvantage that restricts the practical application of electrospray. The droplet size in the cone-jet mode increases with an increase of the flow rate, and this means the production of tiny droplets limits the supply flow rate, and this limited flow rate cannot meet the requirements for atomization flow in practical application. Multi-jet is an important operation mode in electrospray, and sub-droplets of comparable size to the sub-droplets produced by cone-jet can be obtained on the basis of multiplication of the single capillary flow. However, multi-jet atomization is very unstable, and it is difficult to attain a stable jet atomization state; therefore, in-depth research on the evolution of its morphology and atomization characteristics is necessary to expand the practical application of electrostatic atomization technology.

Based on high-speed photography technology with a high spatial-temporal resolution, the influence of capillary geometry, electrode spacing, liquid supply flow rate, and applied voltage on the multi-jet formation and evolution in electrospray was studied in detail. The electric bond number and the dimensionless flow rate were introduced to describe their action laws on the evolution behavior of the stable jet number, stable atomization range, and jet deviation angle in the stable multi-jet mode. The research results show that the range of the number of stable jets N of multi-jet is from 2 to 10. When $2 \leq N < 5$, the stable jets have a high probability to eject from the meniscus of the capillary orifice, forming a meniscus jet mode. When $5 \leq N \leq 10$, the jets are ejected from the outer edge of the capillary orifice to form an edge jet mode, and it is particularly important to note that the occurrence frequency of the stable 5–8 strands is higher than other strands. In the edge mode, as the number of stable jets increases, the range of the electric bond number of the stable multi-jets and the critical minimum electric bond number gradually increases, and a voltage switching phenomenon of stabilizing multi-jet is also presented. As the dimensionless flow rate increases, the maximum value of the electric bond number under each number of stable jets shows a linear growth trend. The maximum value of the electric bond number increases with the increase of the stable jet number under the same flow rate, and a significant increase in the minimum value of the electric bond number is observed. Additionally, as the number of stable jets in the edge mode increases, the overall deviation angle of the jet increases, but the range of variation of the deviation angle of each stable jet number is controlled within $5^\circ \pm 0.3^\circ$. Moreover, as the electric bond number increases, the jet deviation angle gets closer to 45° , which indicates that the electric field force dominates the jet deviation as the electric field intensity increases.

electrostatic atomization, multi-jet, number of stable jets, microscopic high-speed cameradoi: [10.1360/TB-2019-0758](https://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2019-0758)