文章编号：1672-9897(2026)02-0081-09 doi：10.11729/syltlx20240007

稳定多股射流集成的静电雾化特性研究

张澄澄，霍元平*，张聪，王贞涛，王军锋
江苏大学 能源与动力工程学院，镇江 212013

摘要：设计了一个具有双层交叉空间屏蔽电极的阵列集成微通道静电雾化装置，采用光学可视化系统和高速喷雾粒度分析仪，精确记录了稳定多股射流集成静电雾化的射流形貌演变特征，探讨了不同集成度和不同供应流量下稳定多股射流静电雾化的电压区间和喷雾液滴粒径分布特性。结果表明：阵列集成静电雾化装置下多股射流稳定雾化的电压区间高于单毛细管装置下的情况，且稳定射流股数受外加电压的影响微弱。相同单毛细管供应流量下，由集成度提高所带来的总供应流量增大对整体喷雾液滴的平均粒径、粒径分布和累积体积分布的影响并不明显，但体积分布峰值会有所减小。相同集成度下，液滴平均粒径随着总供应流量的增大呈非线性增长，且增长速率随着总供应流量的增大而减小，阵列集成微通道静电雾化装置可以在大幅提高供应流量的同时，使喷雾液滴的粒径分布保持在较窄范围内，表现出良好的单分散性。

关键词：静电雾化；稳定多股射流；阵列集成；稳定电压区间；液滴粒径分布
中图分类号：TB126；V231.2^{+}3 **文献标识码：**A

Study on atomization characteristics of array integrated stable multi-jet

ZHANG Chengcheng, HUO Yuanping*, ZHANG Cong, WANG Zhentao, WANG Junfeng
School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

Abstract: By designing an array integrated electrostatic atomization device with double-layer cross space shielding electrodes, using an optical visualization system and a high-speed spray particle size analyzer, the evolution characteristics of the jet morphology of the integrated electrostatic atomization of stable multiple jets were accurately recorded, and the voltage range of the integrated electrostatic atomization of stable multiple jets and the size distribution characteristics of spray droplets under different integration degrees and supply flow rates were discussed. The results show that the voltage range for stable atomization of multiple jets in the array integrated device is higher than that in the single capillary device, and the number of stable jet strands is weakly affected by the applied voltage. Under the same single capillary supply flow rate, the increase of the total supply flow rate due to the improvement of the integration degree has no obvious effect on the average droplet size, droplet size distribution range and cumulative volume distribution of the overall spray, but can cause the peak value of the volume distribution to decrease accordingly. At the same integration level, the average droplet size increases nonlinearly with the increase of the total supply flow, and the growth rate decreases with the increase of the total supply flow. The array integrated microchannel stabilized multi jet atomization system can significantly increase the supply flow while maintaining the particle size distribution of spray droplets in a narrow range, showing good monodispersity.

Keywords: electrostatic atomization; steady multiple jets; array integrated; stable voltage interval; droplet size distribution

收稿日期：2024-01-12；**修回日期**：2024-07-15；**录用日期**：2024-09-02
基金项目：国家自然科学基金项目（51706089，52076105）
* 通信作者 E-mail: huoyuanping@ujs.edu.cn

引用格式：张澄澄, 霍元平, 张聪, 等. 稳定多股射流集成的静电雾化特性研究 [J]. 实验流体力学, 2026, 40(2): 81-89.
ZHANG C C, HUO Y P, ZHANG C, et al. Study on atomization characteristics of array integrated stable multi-jet[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2026, 40(2): 81-89.

0 引 言

电流体动力学(Electrohydrodynamic, EHD)是流体力学及多相流领域的一个重要研究分支。与传统的机械式雾化方法相比,基于电流体动力学多相流动现象发展的静电雾化技术能以超低能耗(mW级)获得大量粒径细小、单分散性好、可控性强、沉积率高的荷电(微)液滴群[1-4]。近年来,现代科学技术不断向节能化、精密化、微型化方向发展,静电雾化技术凭借自身的独特优势而受到越来越多的关注,也被逐渐应用到微/纳米颗粒和薄膜制备、EHD打印、生物质谱分析、生物制药、医学治疗、微喷雾冷却和空间微动力推进等诸多领域[5-13],显示出巨大的应用潜能。

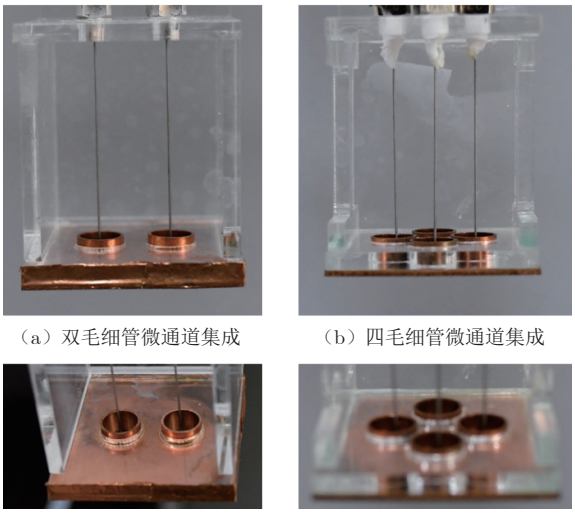
当前绝大多数关于静电雾化的研究都是基于锥射流模式[14-15],但静电雾化在锥射流模式下运行产生的雾滴粒径严格受限于液体供应流量,而稳定多股射流及其阵列集成装置为突破静电雾化的流量瓶颈提供了可能。多股射流模式作为一种独特的静电雾化模式在许多文献中均有提及[16-19]。López-herrera等[20]报道了一种类似于多股射流模式的"边缘发射模式",Cloupeau和Prunet-foch[21]则认为边缘发射模式是多股射流模式的一种特定情况。Jaworek和Krupa[16]分别使用去离子水、乙二醇和乙醇这3种不同物理性质的液体介质在正负极性高压电场下进行静电雾化实验,发现在去离子水实验中无法观察到多股射流模式,而在乙二醇和乙醇实验中可以观察到多股射流模式,且2种液体介质形成多股射流的形式大不相同。他们还提出了一个用于判定不同物理性质液体介质是否可以形成多股射流模式的定性模型。Noymer和Garel[22]使用丙二醇在毛细管–电极板装置中进行静电雾化实验,对锥射流和多股射流2种运行模式下射流的稳定性和雾化特性进行了详细的对比分析,指出在给定的供应流量下,形成多股射流模式所需的外加电压较高,且多股射流雾化产生液滴的粒径分布是多分散的。Ryan等[23]对多股射流静电雾化系统进行了实验研究,发现多股射流模式下电流与流量间的依赖关系与锥射流模式相同,且与射流数量无关。Gu等[24]对受限流场注入式静电雾化(Flow-limited Field-injection Electrostatic Spraying, FFESS)系统的多股射流进行了研究,并提出通过监测*I*–*U*(电流–电压)来预测和控制从单股射流到多股射流静电雾化的形成。霍元平等[10, 25]对无水乙醇静电雾化中形成的稳定多股射流模式进行了研究,获得了各实验参数影响下稳定射流股数、稳定射流雾化区间及射流偏离角度等的变化规律。Wang等[26]采用一个薄圆盘作为供液系统,在1 cm^2范围内成功实现了有数千个泰勒锥的静电雾化,并发现泰勒锥的数目与电压的平方成正相关。Jung等[27]通过毛细管间距为5 mm的双喷嘴静电雾化装置,研究了电压对沉积机理的影响。结果表明:锥射流状态下,所加电压越大,两喷雾射流相邻部分的排斥越强,公共区域形成的空隙越大;且液滴轴向速度越大,沉积面积反而越小。Deng等[28-29]对微喷雾单元集成度不等的阵列集成静电雾化(MES)进行了实验,研究表明:通过加2个强电场以保证喷雾射流不偏斜时,其单个喷雾单元的电流与荷电量的1/2次方成正比,且MES的整体液滴粒径分布与单个微喷雾单元并没有明显区别。MES能成倍增加喷雾流量,但这其中高集成度所要求的激光蚀刻成本较高,其耐久性也受到较大考验。然而一般情况下,多股射流模式中射流具有较强的不稳定性,不易实现稳定的射流雾化状态,使得其实际应用价值受到了极大限制,除了Ueda等[30]将其应用于NPB/Alq3小分子多层结构的制备之外,该模型在实际生产中的应用并不普遍。静电雾化是一个复杂的荷电多相流动现象,其多股射流雾化特性受到诸多因素的影响,上述研究大多仅是对多股射流静电雾化现象进行的宏观描述,内容仍存在一定的局限性,稳定多股射流模式中射流形态和股数演变行为、稳定射流雾化区间、雾化液滴的尺度信息以及阵列集成稳定多股射流的雾化特性等尚不明确。深入研究稳定多股射流及其阵列集成过程中的射流演变行为与雾化特性,是提升静电雾化产率的潜在途径,这对丰富静电雾化理论、拓展其在工业领域的实际应用具有重要的指导意义。

1 实验装置及方法

1.1 阵列集成微通道装置

实验装置实物图如图1所示,选择不锈钢抛光平口毛细管(内径400 μm、外径400 μm,长38 mm)作为微通道单元,通过在有机玻璃(PMMA)板上加工圆通孔,将多个微通道单元按照一定的间距和排列顺序固定在同一平面上,完成阵列集成微通道的制作。为了消除相邻微通道出口之间电压边缘效应的影响,选择紫铜正方形平板作为水平电极、紫铜圆

筒壁作为垂直电极。通过在水平电极板上加工圆通孔，将这些圆筒壁状垂直电极按照一定的间距和顺序排列固定在一起，组成双层交叉空间屏蔽电极。该电极结构为可拆卸式，组装时将圆筒壁状电极的下端面与紫铜正方形平板电极上圆通孔的下端面相齐平，实物模块如图 2 所示。阵列集成微通道和双层交叉空间屏蔽电极通过不同规格的有机玻璃板连接，组装时分别保持各微通道、各圆筒壁状电极与相应的圆孔中心对齐。双层交叉空间屏蔽电极的各组成部分具体尺寸为：紫铜正方形平板边长 35 mm、厚度 1 mm，圆通孔直径 8 mm，孔与孔（圆心）间距 12 mm。紫铜圆筒壁外直径 8 mm，厚度 0.5 mm，高

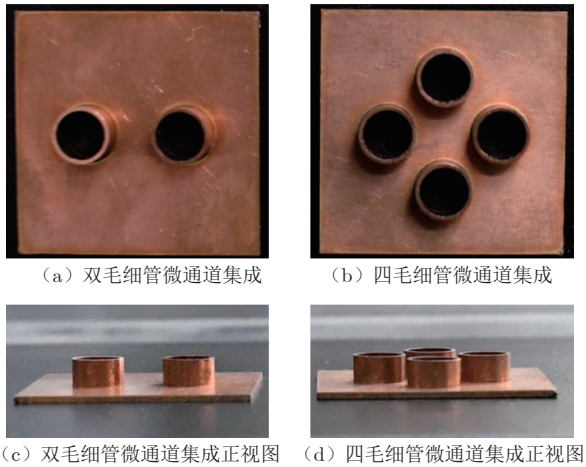


（a）双毛细管微通道集成　（b）四毛细管微通道集成

（c）双毛细管微通道集成喷嘴局部图　（d）四毛细管微通道集成喷嘴局部图

图 1　阵列集成微通道装置的实物图

Fig. 1　The physical image of the array integrated microchannel device



（a）双毛细管微通道集成　（b）四毛细管微通道集成

（c）双毛细管微通道集成正视图　（d）四毛细管微通道集成正视图

图 2　双层交叉空间屏蔽电极的实物图

Fig. 2　The physical image of the double-layer cross space shielding electrode

度 5 mm，毛细管出口与铜板下平面的相对高度为 1 mm。实验中分别制作了双毛细管和四毛细管微通道阵列集成静电雾化装置，而单毛细管微通道雾化装置的设计与前述内容中一致，毛细管型号与阵列集成装置中保持一致。

1.2　多股射流集成静电雾化实验系统

图 3 为双毛细管微通道阵列集成静电雾化装置及可视化测量系统示意图，对于不同集成度的装置，仅需更换雾化喷嘴及相应的供液管道即可。采用毛细管−电极板构型的电极组合形式，同时增加一个自主设计的双层交叉空间屏蔽电极，以削弱相邻微通道间的电压边缘效应。实验中采用无水乙醇（纯度≥99.7%）作为工作液体介质，其物理性质如表 1 所示。使用微流量注射泵（KD Scientific，KDS 100）精确控制通过阵列集成微通道雾化装置的各个喷雾源的液体流量，工作液体通过同程式管道均匀分配到每个毛细管微通道中。实验中，不同集成度雾化装置的总供应流量不同，单毛细管、双毛细管及四毛细管微通道雾化装置的总供应流量分别为 10～50 μL/min、20～200 μL/min 及 40～400 μL/min。为了获得不同的电场强度分布，将阵列集成微通道雾化装置中各毛细管微通道统一与一个负高压直流电源（DW−N503−1ACDF）连接，使之成为负极，并设置不同的电压输出值（控制精度 ± 0.01 kV）；另外将一个紫铜圆形板（直径 8 mm，厚度 1 mm）同轴放置于毛细管微通道下方并接地，作为正极。同时，不同集成度的阵列集成微通道雾化装置中，毛细管出口端面与圆形接地极板之间的距离 h 始终保持为 20 mm。不同电场强度下，阵列集成多股射流的雾化形态各不相同，借助光学可视化测量系统获得不同集成度下多股射流雾化形态的可视化图像。该测量系统主要由搭配 Nikon AF−S 24−70 mm f/2.8G 镜头的 Nikon D5 单反相机和 LED 冷光源组成。为保证实验结果

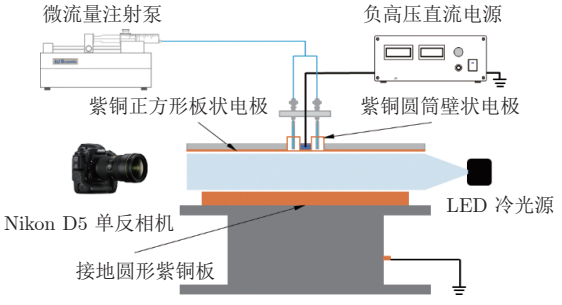


图 3　阵列集成微通道静电雾化装置及可视化系统示意图

Fig. 3　Schematic of array integrated microchannel electrohydrodynamic atomization device and visualization system

的准确性和可重复性，所有实验均在环境温度 25 ℃ ± 0.5 ℃、相对湿度 40% ± 2.5% 的条件下进行。同时，将实验装置中所有关键部位和测量仪器均进行接地保护处理。

表 1 无水乙醇的物理性质（环境温度 25 ℃）

Table 1 Physical properties of absolute ethanol (ambient temperature 25 ℃)

密度ρ/(kg·m^{-3})	黏度μ/(Pa·m^{-1})	电导率K/(S·m^{-1})	表面张力σ/(N·m^{-1})	相对介电常数ε
789.3	1.08×10^{-3}	4.2×10^{-5}	2.21×10^{-2}	24.3

2 实验结果与讨论

2.1 多股射流集成的静电雾化形态

图 4 显示了不同集成度装置下多股射流电流体动力学雾化形态随外加电压 U_a 的变化。由图 4(a)可以看出：给定供应流量(Q_v = 50 μL/min)条件下，无水乙醇在单毛细管微通道雾化装置下形成多股射流模式所需的起始外加电压(4.5 kV 左右)较小；增大外加电压至 5 kV 左右便出现稳定多股射流模式，且稳定射流股数随外加电压的增大而增加；当达到某一临界值(6 kV 左右)后再增大外加电压，稳定多股射流结构失去稳定性，成为紊乱的多股射流。由此可知，在单毛细管微通道雾化装置下，多股射流模式的稳定运行电压区间一般小于 1 kV，其起始电压与最大电压之间的差值(简称稳定运行电压区间)一般小于 1 kV。此外，外加电压增大到 10.2 kV 附近时会出现嘶嘶声，且高压电源上开始显示电流，这表明已发生电晕放电击穿现象。图 4(b)和(c)分别显示了双毛细管和四毛细管阵列集成微通道雾化装置下无水乙醇形成多股射流的雾化形态随外加电压的变化。由图 4 可以看出：阵列集成微通道雾化装置形成多股射流所需的起始外加电压(5 kV 左右)高于单毛细管装置，且形成稳定多股射流雾化的起始外加电压及稳定运行电压区间均高于单毛细管微通道装置。对于双毛细管阵列集成微通道雾化装置，给定供应流量(Q_v = 200 μL/min)条件下，形成稳定多股射流的起始外加电压在 8 kV 左右；而在外加电压增大至约 10 kV 后，继续增大外加电压只会使多股射流状态变得越来越不稳定，甚至出现部分射流停止喷射的情况；当外加电压接近 14 kV 时会出现嘶嘶声和电流。四毛细管阵列集成微通道雾化装置下的情况有所不同：给定供应流量(Q_v = 400 μL/min)条件下，稳定多股射流在外加电压达到 10 kV 左右时才出现，且外加电压可以持续增大到 12 kV 左右，之后再增大外加电压会出现类似的不稳定多股射流情况，但嘶嘶声和电流会在外加电压接近 14.5 kV 时才出现。这表明阵列集成微通道雾化装置可以在成倍提升供应流量的基础上形成稳定多股射流雾化，意味着静电雾化的稳定雾化量也得到大幅提升。值得注意的是，总供应流量随集成度的提高而成倍增大，导致形成稳定多股射流雾化所需的起始电压相应增大，阵列集成多股射流的稳定运行电压区间(2 kV 左右)远大于单毛细管微通道雾化装置，且该区间不会随着集成度的提高而发生明显变化。此外，阵列集成微通道雾化装置下形成的稳定射流股数不随外加电压的增大而变化，这一点与单毛细管微通道雾化装置下的情况不同。其原因可能是圆筒壁状电极的抑制作用削弱了毛细管端口液膜的波动，导致液膜表面高电荷密度的集聚点难以增加。

2.2 多股射流集成的稳定雾化电压区间

液体从单毛细管微通道中流出时，可在较小的外加电压下形成稳定多股射流模式，而对于阵列集成微通道装置，由于总供应流量成倍增大，导致液体从每个毛细管微通道流出后形成的气液界面内外静压差增大，只有继续增大外加电压才能形成稳定多股射流雾化状态。图 5 显示了不同阵列集成微通道雾化装置下形成稳定多股射流所需的起始外加电压及稳定运行电压区间随供应流量的变化，图中 SMJ_{onset} 和 SMJ_{offset} 分别表示稳定多股射流雾化状态形成和消失时所对应的临界外加电压。由图 5 可以看出：不同阵列集成微通道雾化装置下形成稳定多股射流所需的 SMJ_{onset} 和 SMJ_{offset} 都会随着供应流量的增大而增大，但在相同集成度下，稳定雾化电压区间的大小基本不会随着供应流量的增大而发生变化。相对于单毛细管微通道雾化装置，阵列集成微通道雾化装置下形成的稳定多股射流能进一步提升供应流量和稳定运行电压区间(2 kV 左右)，且该电压区间的大小不会随着集成度的提高和供应流量的增大而发生明显的变化。这是由于双层交叉空间屏蔽电极改变了针板之间的电场分布，抑制了射流



图 4　不同集成度装置下多股射流电流体动力学雾化形态演变

Fig. 4　Evolution of morphology of multi-jet electrohydrodynamic atomization in devices with different integration levels

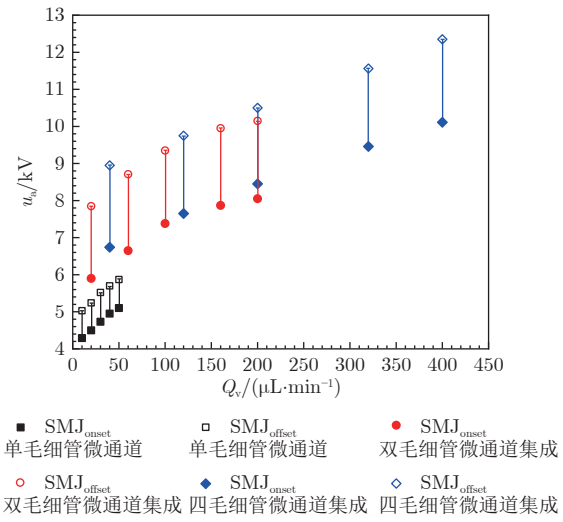


图 5　不同集成度装置下稳定多股射流雾化运行所需的外加电压区间

Fig. 5　The applied voltage range required for stable multi-jet atomization operation in devices with different integration levels

的向上卷吸，射流的稳定性增强，从而能在较高的电压区间范围内稳定运行。这意味着多股射流的阵列集成更易实现整场射流的稳定雾化，也反映了本文构建的阵列集成微通道雾化装置能实现稳定多股射流雾化运行，这为未来更高集成度的电流体动力学雾化装置设计提供了指导。

2.3　稳定多股射流集成雾化的液滴粒径分布

由可视化实验结果可知，多股射流阵列集成可大幅提升电流体动力学的稳定雾化流量，但生成喷雾液滴的尺度信息尚不清楚，而液滴的粒径及其分布是评估喷雾性能和雾化效果的关键指标。因此本节借助 Spraylink 高速喷雾粒度分析仪对不同集成度、供应流量、外加电压等条件下形成的稳定多股射流雾化液滴的粒径及其分布进行测量，并利用 Spraylink v1.0 和 OriginPro 2018 软件对相关数据进行处理分析。实验测量中发现：不同阵列集成微通道雾化装置下，形成稳定多股射流雾化生成液滴的粒径几乎不受外加电压的影响，因此只需分析供应流量对不同集成度下稳定多股射流雾化液滴粒径的影响及作用规律。

2.3.1 供应流量对稳定多股射流集成雾化液滴平均粒径的影响

液相介质分散到气相介质中的液气两相流动体系一般使用索特平均直径(D_{32})来表征喷雾液滴的平均粒径。图 6 显示了不同集成度下形成稳定多股射流雾化液滴的平均粒径随供应流量的变化。由图 6 可以看出:3 种不同微通道雾化装置下形成稳定多股射流雾化生成液滴的平均尺度均随着供应流量的增大而增大,但是变化趋势却存在差异。单毛细管微通道装置下呈线性增长趋势,而双毛细管和四毛细管微阵列集成通道装置下的增长速率却随着供应流量的增大而减小。同时,保持单个毛细管微通道的供应流量不变,四毛细管微通道集成虽然比双毛细管微通道集成的总供应流量提升了一倍,但产生的喷雾液滴平均粒径基本相同。这表明,在本文设计的阵列集成微通道装置下,形成稳定多股射流雾化液滴的平均粒径主要受单个毛细管微通道供应流量的影响,即由集成度提高带来的总供应流量提升不会造成液滴平均粒径发生明显变化。这意味着可以提高集成密度以实现静电雾化流量的大幅提升,同时将喷雾液滴的尺度控制在理想范围内。

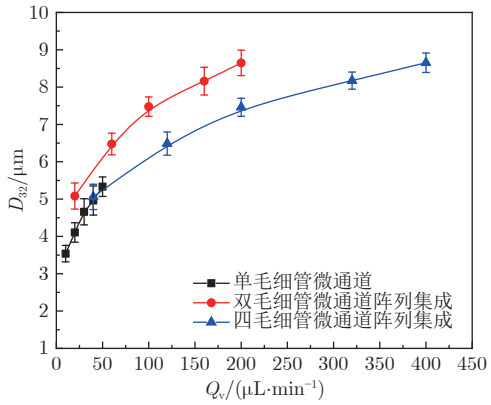


图 6 不同集成度下稳定多股射流雾化液滴的平均粒径随供应流量的变化

Fig. 6 The average size of spray droplets generated by stable multi-jet atomization in devices with different integration levels varies with supply flow rate

2.3.2 供应流量对稳定多股射流集成雾化液滴粒径分布的影响

图 7 为单毛细管微通道装置且不加中间电极的情况下,稳定多股射流雾化液滴粒径分布随供应流量的变化。由图 7 可以看出:当供应流量较小时,稳定多股射流雾化液滴粒径分布范围较窄,体积分布的峰值较大,最大体积分布对应的液滴粒径较小;当供应流量增大时,液滴粒径分布范围随之增大,液滴粒径体积分布曲线的峰值及累计体积分布达到 100% 时,所对应的液滴粒径均向粒径增大的方向移动。但在供应流量较大时,液滴粒径体积分布和累积体积分布受供应流量的影响很小。

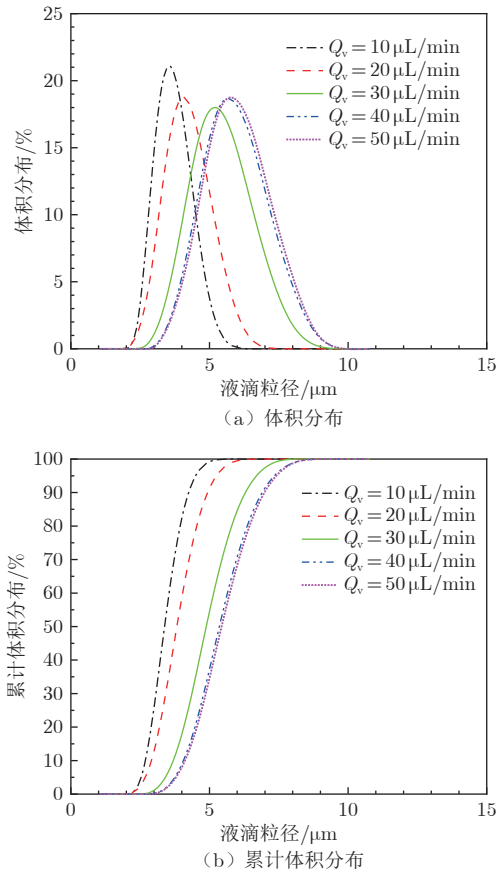
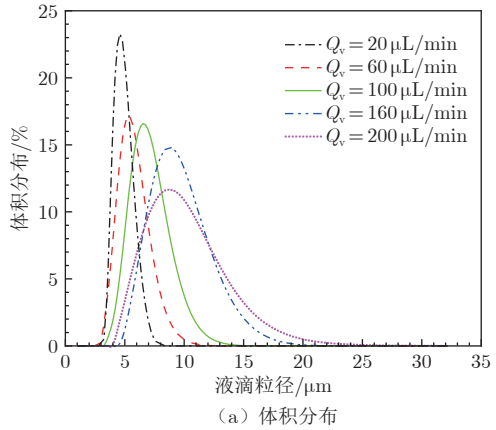


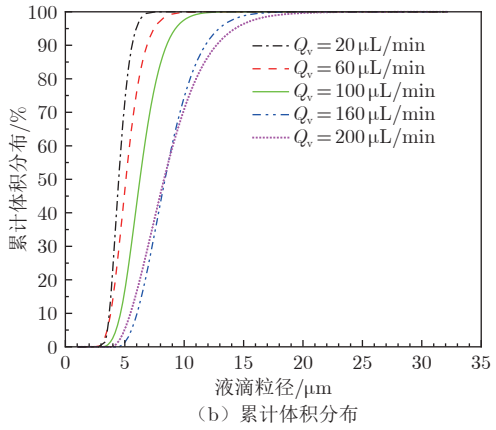
图 7 单毛细管微通道装置中不同供应流量下稳定多股射流雾化液滴粒径分布

Fig. 7 The size distribution of droplets generated by stable multi-jet atomization in the single capillary microchannel device at different supply flow rates

图 8 和 9 分别显示了双毛细管和四毛细管阵列集成微通道装置在增加一个双层交叉空间屏蔽电极的情况下,形成稳定多股射流雾化液滴的粒径分布随供应流量的变化。由图 8 和 9 可以看出:当供应流量较小时,阵列集成稳定多股射流雾化液滴粒径分布范围较窄,体积分布峰值较大,最大体积分布对应的液滴粒径较小;液滴粒径分布范围和体积分布曲线峰值所对应的液滴粒径,均随着供应流量的增大而增大,但体积分布的峰值会随着供应流量的增大而减小,累计体积分布达到 100% 时所对应的液滴粒径会随着供应流量的增大而向液滴粒径增大的方向移动。在供应流量较大的条件下,不同集成度的装置下,稳定多股射流雾化液滴的粒径分布差异性较小。



（a）体积分布

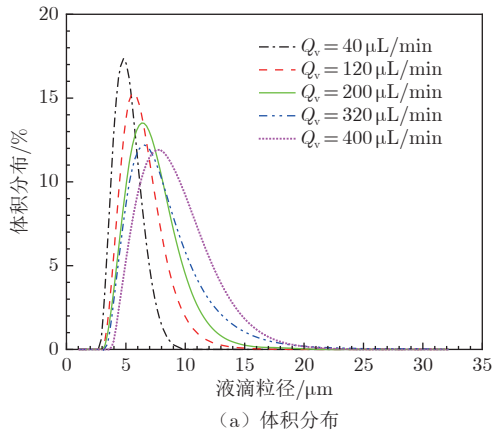


（b）累计体积分布

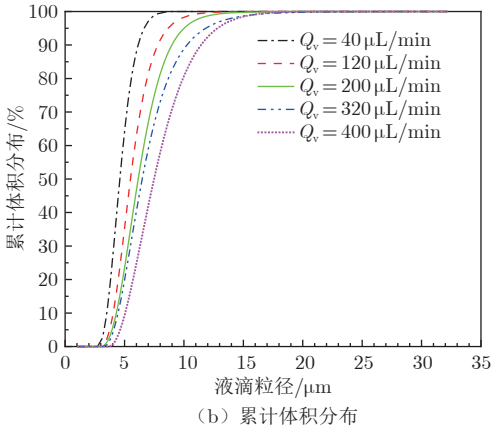
图 8　双毛细管微通道阵列集成装置不同供应流量下稳定多股射流雾化液滴粒径分布

Fig. 8　The size distribution of droplets generated by stable multi-jet atomization in the two capillary microchannel array integrated device at different supply flow rates

为了探索集成度提升对雾化液滴粒径分布的影响，将单个毛细管微通道供应流量固定为 50 μL/min，获得 3 种不同集成度的微通道雾化装置下稳定多股射流雾化液滴的粒径分布，如图 10 所示。由图 10 可以看出：双毛细管和四毛细管阵列集成微通道装置下的总供应流量比单毛细管微通道分别提升 2 倍和 4 倍，而稳定多股射流雾化液滴的粒径分布差异却很



（a）体积分布

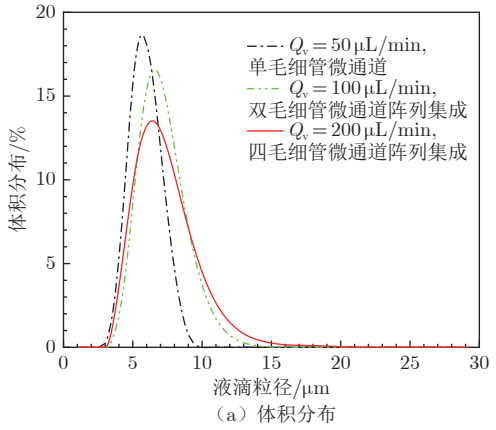


（b）累计体积分布

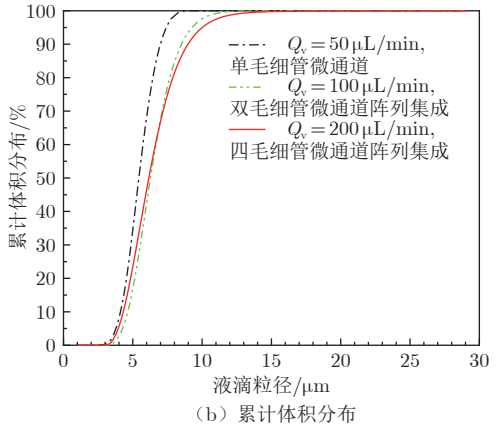
图 9　四毛细管微通道阵列集成装置不同供应流量下稳定多股射流雾化液滴粒径分布

Fig. 9　The size distribution of droplets generated by stable multi-jet atomization in the four capillary microchannel array integrated device at different supply flow rates

小。这表明阵列集成微通道装置可在大幅提升供应流量的同时，保持雾化液滴粒径分布在较窄的范围内。图 10(a)显示，在给定单个毛细管微通道供应流量(Q_v = 50 μL/min)时：单毛细管微通道装置下稳



（a）体积分布



（b）累计体积分布

图 10　不同集成度的微通道装置下稳定多股射流雾化液滴的粒径分布

Fig. 10　The size distribution of droplets generated by stable multi-jet atomization in microchannel devices with different integration levels

定多股射流雾化液滴粒径的体积分布峰值约为19%，最大体积分布所对应的液滴粒径约 6 μm；而双毛细管和四毛细管阵列集成微通道装置下，稳定多股射流雾化液滴粒径体积分布的峰值分别在 17% 和 14% 左右，最大体积分布所对应的液滴粒径均约为 7.5 μm。由此可知，阵列集成微通道装置下稳定多股射流雾化液滴粒径体积分布的峰值随着集成度的提升而略微减小，但最大体积分布对应的液滴粒径却基本不变，液滴粒径分布范围随集成度的提高而略微增大，这些变化是由于总供应流量增大，导致形成稳定多股射流雾化所需的外加电压增大。图 10(b)显示：虽然单毛细管微通道装置下稳定多股射流雾化液滴粒径累计体积分布达到 100% 所对应的液滴粒径要小于在双毛细管和四毛细管微通道阵列集成装置，但集成度的提升对其并无明显影响。这表明阵列集成微通道装置可以成倍增大供应流量，同时保持稳定多股射流雾化液滴的粒径分布几乎不变。

3 结 论

1)相较于单毛细管的稳定多股射流模式，阵列集成微通道静电雾化装置下多股射流雾化的稳定运行电压区间明显更大，且在该区间内射流股数不会随着外加电压的增大而变化，雾化稳定性好。

2)保持单个微通道供应流量不变，阵列集成度提高所导致的总供应流量增大对阵列集成微通道静电雾化液滴平均粒径的影响甚微；但相同集成度下液滴平均粒径会随着总供应流量的增大而呈非线性增长趋势，且增长速率随总供应流量的增大而减小。

3)阵列集成微通道静电雾化装置可以在大幅提高供应流量的同时，保持喷雾液滴粒径分布在较窄的范围，表现出良好的单分散性；且在保持单微通道供应流量不变的情况下，集成度的提高能够在成倍增大供应流量的同时，保持雾化液滴的粒径分布不发生明显变化。

参考文献：

[1] 陈效鹏, 程久生, 尹协振. 电流体动力学研究进展及其应用[J]. 科学通报, 2003, 48(7): 637-646.
doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2003.07.001

[2] ROSELL-LLOMPART J, GRIFOLL J, LOSCERTALES I G. Electrosprays in the cone-jet mode: from Taylor cone formation to spray development[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 125: 2-31.
doi: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.008

[3] MAZUMDER M K, SIMS R A, BIRIS A S, et al. Twenty-first century research needs in electrostatic processes applied to industry and medicine[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(7): 2192-2211.
doi: 10.1016/j.ces.2005.05.002

[4] ASHGRIZ N. Handbook of atomization and sprays: Theory and applications[M]. Berlin: Springer, 2011: 727-754.

[5] JAWOREK A, SOBCZYK A T, KRUPA A. Electrospray application to powder production and surface coating[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 125: 57-92.
doi: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.006

[6] ONSES M S, SUTANTO E, FERREIRA P M, et al. Mechanisms, capabilities, and applications of high-resolution electrohydrodynamic jet printing[J]. Small, 2015, 11(34): 4237-4266.
doi: 10.1002/smll.201500593

[7] 甘云华, 张夏, 罗智斌. 微尺度锥射流雾化模拟分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4000-4007.
GAN Y H, ZHANG X, LUO Z B. Numerical analysis on micro-scale cone-jet spraying[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4000-4007.

[8] BODA S K, LI X R, XIE J W. Electrospraying an enabling technology for pharmaceutical and biomedical applications: a review[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 125: 164-181.
doi: 10.1016/j.jaerosci.2018.04.002

[9] 江旭丽, 甘云华, 江政纬, 等. 乙醇-生物柴油液滴的荷电与破碎特性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4115-4121.
JIANG X L, GAN Y H, JIANG Z W, et al. Analysis on charge and breakup characteristics of ethanol-biodiesel droplets[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4115-4121.

[10] 霍元平, 李尤, 王贞涛, 等. 荷电 PLGA 溶液稳定多股射流模式的破碎行为研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 401-410.
HUO Y P, LI Y, WANG Z T, et al. Study on jet break-up behavior in the stable multi-jet mode of charged PLGA solution[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 401-410.

[11] DENG W W, GOMEZ A. Electrospray cooling for microelectronics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(11-12): 2270-2275.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.038

[12] LENGUITO G, GOMEZ A. Pressure-driven operation of microfabricated multiplexed ElectroSprays of ionic liquid solutions for space propulsion applications[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 23(3): 689-698.
doi: 10.1109/jmems.2013.2283728

[13] 王军锋, 卜佳振, 王晓英, 等. 大载荷无人直升机静电喷雾沉积特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(12): 1239-1244.
WANG J F, BU J Z, WANG X Y, et al. Experimental study on electrostatic spray deposition characteristics of large-load unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(12): 1239-1244.

[14] XIE J W, JIANG J, DAVOODI P, et al. Electrohydrodynamic atomization: a two-decade effort to produce and process micro-/ nanoparticulate materials[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 125: 32-57.
doi: 10.1016/j.ces.2014.08.061

[15] GRACE J M, MARIJNISSEN J C M. A review of liquid atomization by electrical means[J]. Journal of Aerosol

Science, 1994, 25(6): 1005-1019.
doi: 10.1016/0021-8502(94)90198-8

[16] JAWOREK A, KRUPA A. Classification of the modes of ehd spraying[J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30(7): 873-893.
doi: 10.1016/S0021-8502(98)00787-3

[17] JONES A R, THONG K C. The production of charged monodisperse fuel droplets by electrical dispersion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 4(8): 1159-1166.
doi: 10.1088/0022-3727/4/8/316

[18] LÜTTGENS U, DÜLCKS T, RÖLLGEN F W. Field induced disintegration of glycerol solutions under vacuum and atmospheric pressure conditions studied by optical microscopy and mass spectrometry[J]. Surface Science, 1992, 266(1-3): 197-203.
doi: 10.1016/0039-6028(92)91021-3

[19] JAWOREK A, KRUPA A. Forms of the multijet mode of electrohydrodynamic spraying[J]. Journal of Aerosol Science, 1996, 27(7): 979-986.
doi: 10.1016/0021-8502(96)00042-0

[20] LÓPEZ-HERRERA J M, BARRERO A, BOUCARD A, et al. An experimental study of the electrospraying of water in air at atmospheric pressure[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2004, 15(2): 253-259.
doi: 10.1016/j.jasms.2003.10.018

[21] CLOUPEAU M, PRUNET-FOCH B. Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review[J]. Journal of Aerosol Science, 1994, 25(6): 1021-1036.
doi: 10.1016/0021-8502(94)90199-6

[22] NOYMER P D, GAREL M. Stability and atomization characteristics of electrohydrodynamic jets in the cone-jet and multi-jet modes[J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31(10): 1165-1172.
doi: 10.1016/S0021-8502(00)00019-7

[23] RYAN C N, SMITH K L, STARK J P W. Characterization of multi-jet electrospray systems[J]. Journal of Aerosol Science, 2012, 51: 35-48.
doi: 10.1016/j.jaerosci.2012.03.007

[24] GU W, HEIL P E, CHOI H, et al. Generation of stable multi-jets by flow-limited field-injection electrostatic spraying and their control via I–V characteristics[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(49): 492001.
doi: 10.1088/0022-3727/43/49/492001

[25] HUO Y P, ZHANG C, LIU H L, et al. Stable multi-jet behavior of ethanol under an electric field[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(11): 1046-1054.
doi: 10.1360/tb-2019-0758

[26] WANG Z, TIAN Y, ZHANG C, et al. Massively multiplexed electrohydrodynamic tip streaming from a thin disc[J]. Phys Rev Lett, 2021, 126(6): 064502.
doi: 10.1103/physrevlett.126.064502

[27] JUNG J H, OH H, KIM S S. Numerical simulation of the deposition pattern in multiple electrohydrodynamic spraying[J]. Powder Technology, 2010, 198(3): 439-444.
doi: 10.1016/j.powtec.2009.12.006

[28] DENG W W, WAITS C M, MORGAN B, et al. Compact multiplexing of monodisperse electrosprays[J]. Journal of Aerosol Science, 2009, 40(10): 907-918.
doi: 10.1016/j.jaerosci.2009.07.002

[29] DENG W W, KLEMIC J F, LI X H, et al. Increase of electrospray throughput using multiplexed microfabricated sources for the scalable generation of monodisperse droplets[J]. Journal of Aerosol Science, 2006, 37(6): 696-714.
doi: 10.1016/j.jaerosci.2005.05.011

[30] UEDA H, TAKATSUKA Y, NIINUMA Y, et al. Fabrication of NPB/Alq_3 small-molecule multilayer structures with suppressed interface mixing by multi-jet mode electrospray deposition[J]. Physica Status Solidi (b), 2017, 254(2): 1600564.
doi: 10.1002/pssb.201600564



作者简介：

张澄澄（1999—），男，江苏南通人，硕士研究生。研究方向：荷电微射流雾化技术。

E-mail: 1952474555@qq.com

（编辑：宋嘉慧）