

文章编号 1004-924X(2015)04-1062-08

气辅式多射流纳米颗粒高效静电雾化喷射

赵 扬, 姜佳昕, 陈冬阳, 郑高峰*, 孙道恒
(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 研究了一种带辅助气体的新型纳米颗粒多射流高效雾化喷射技术。开发了带有辅助气流的多喷嘴静电雾化喷头, 引导辅助气体均匀分布于各喷嘴四周形成稳定鞘层气流, 从而对带电雾化射流产生拉伸与约束作用, 而形成的鞘层气流降低了表面电荷密度, 克服了带电喷嘴间的电场干扰, 实现了多雾化射流的稳定、持续喷射。研究了静电雾化多射流的喷射、沉积行为, 分析了辅助气体供气压强对射流喷射临界启动电压和纳米颗粒均匀性的影响规律。实验结果显示: 辅助鞘层气流降低了射流喷射临界启动电压和雾化颗粒直径, 提升了雾化纳米颗粒的均匀性。辅助气体供气压强从 0 kPa 增加到 50 kPa 时, 雾化多射流喷射临界启动电压从 4.9 kV 降低至 2.8 kV, 纳米颗粒平均直径从 845.267 nm 下降至 528.06 nm。结果表明: 鞘层气流的引入为纳米颗粒的多射流、快速喷射提供了一种有效的技术手段, 有助于推动静电雾化技术的应用发展。

关键词: 静电雾化; 纳米颗粒; 多射流喷射; 鞘层气流; 约束聚焦

中图分类号: TB383; TP67 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.1062

High efficiency multi-jet electrospaying of nano particles with assisted gas

ZHAO Yang, JIANG Jia-xin, CHEN Dong-yang, ZHENG Gao-feng*, SUN Dao-heng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding author, E-mail: zheng_gf@xmu.edu.cn

Abstract: A novel multi-jet electrospay with assisted gas was explored to eject nano particles in a high efficiency. The electrospay spinneret with multi nozzles was designed to guide the assisted gas to form the uniform sheath gas around each nozzle and to provide the excess stretching and restriction forces on the charged electrospay jets. The obtained sheath gas decreases the surface charge density of charged electrospay jets and the interferences among charged jets and makes stable multi electrospay jets for continuously ejection for a long time. The ejection and deposition behaviors of multi electrospay jets were investigated and the effects of sheath gas on the threshold voltage of multi electrospay jet ejection and the uniformity of nano particles were analyzed. The experiments show that the sheath gas is beneficial to the decrease of threshold voltages of multi electrospay jets and the diameters of electrospay nano particles and to the increase of the uniformity of nano particles. When the supply pressure of assisted gas increases from 0 kPa to 50 kPa, the threshold voltage of multi

收稿日期: 2014-06-20; 修订日期: 2014-08-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51305373); 福建省科技计划重大项目(No. 2012H6022); 福建省自然科学基金资助项目(No. 2013J05083)

electrospray jet ejection decreases from 4.9 kV to 2.8 kV and the average diameter of nano particles decreases from 845.267 nm to 528.06 nm. It concludes that introducing the assisted gas into electrospray spinneret provides a good way to rapidly fabricate the nano particles through multi-jet electrospray. This work would promote the application research of electrospray technology.

Key words: electro spraying; nano particle; multi-jet ejection; sheath gas; focused restriction

1 引言

静电雾化技术利用外静电场拉伸溶液变形产生射流进行微纳液滴的喷射制造,克服了传统内压力喷印技术液滴体积大、材料兼容性差等缺点^[1];其以可控性强、设备简单、雾化微纳颗粒均匀、直径小等优点,在微纳颗粒制造及薄膜成型等方面显示出良好的应用潜力^[2-4]。目前,静电雾化技术已经在锂离子电池隔膜^[5]、微纳发光器件^[6]、有机太阳能电池^[7]、生物医药^[8]、微纳高灵敏传感^[9,10]等领域获得了广泛应用,也吸引了学者们广泛的研究兴趣。实现微纳颗粒的批量化快速喷射、降低颗粒直径和提高颗粒均匀性成为了静电雾化技术应用研究的关键,也成为电液耦合喷印技术发展的重要趋势^[11,12]。

开发新型喷头结构增加雾化射流数量,是提高静电雾化颗粒生产效率的主要技术手段^[13]。Oh^[14]等分析了带电喷嘴及射流之间的相互干扰作用,提出喷嘴间距离过小会抑制射流的稳定正常喷射。因此,克服喷头间的电场干扰、提高射流密度,维持雾化多射流的稳定、持续喷射则是微纳颗粒高效雾化喷射的研究重点。Deng^[15]等人通过引入同轴孔板减弱射流间的干扰作用,提高射流喷射效率和稳定性,提高了静电雾化产量。Duby^[16]等人通过设计槽管实现圆周阵列的多射流喷射,但是该方法需要在槽管引入尖角来产生足够的高压保证射流喷射的稳定性;而随着尖角的磨损,颗粒分布的均匀性不易控制。目前,引入鞘层气流,促进带电射流的快速、稳定喷射已经成为电液耦合喷印技术研究的重要技术手段,其在降低雾化电压、减小喷印结构尺寸等方面都有着明显的促进作用^[17],并在单射流雾化喷射中获得了较好的应用^[18,19]。

本文引入鞘层气流构建了气辅式多喷嘴静电雾化装置,利用鞘层气流的拉伸与屏蔽作用,抑

制带电射流的相互干扰,促进多带电射流的稳定均匀喷射,进一步提高了雾化颗粒喷射效率。

2 多喷嘴静电雾化喷头设计开发

2.1 多喷嘴静电雾化喷头结构

气辅式多喷嘴静电雾化装置如图1所示,主要由上盖、溶液槽、进液口、喷嘴、气罩、进气口及导电板等组成。导电板通过电极与直流高压电源相连,且与喷嘴导电连接,实现喷嘴静电电压供给;辅助气体从进气口引入,经气罩缓冲均匀流向各气孔,并环绕于喷嘴四周形成具有约束功能的鞘层气流。图2所示为气辅式多喷嘴静电喷印装置的三维结构示意图。气罩底部设有如图3所示的19个阵列气孔;气孔呈现三圈等距分布,气孔之间的距离为1 cm。19个独立雾化喷嘴同时穿过导电板和气罩底部的气孔。

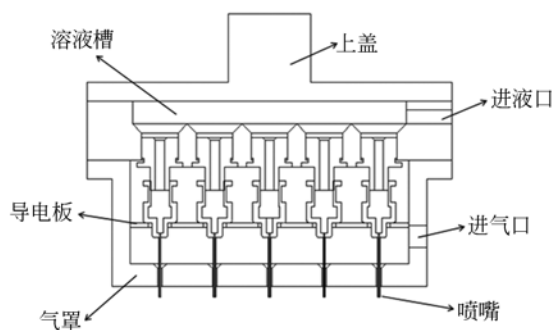


图1 多喷嘴静电雾化装置剖面图

Fig. 1 Cross-section of multi nozzle electrospray spinneret

喷射溶液由进液口进入溶液槽均匀流向各个喷嘴;在高压静电场的作用下,溶液受力拉伸变形产生溶液射流喷射;辅助气体经气罩形成均匀鞘层气流围绕在各喷嘴四周,对带电射流起到拉伸、屏蔽作用,既可促进射流产生额外拉伸力的细化,同时可约束与屏蔽带电射流间的干扰作用,以保

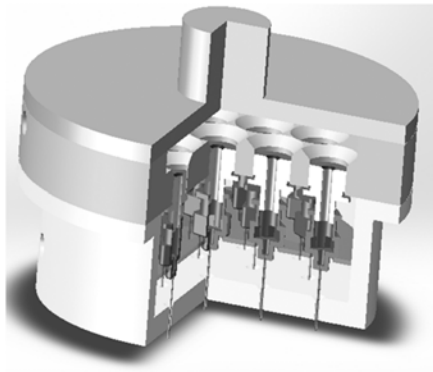


图 2 多喷嘴静电喷雾喷头三维结构

Fig. 2 Three dimensional structure of multi nozzle electrospray spinneret

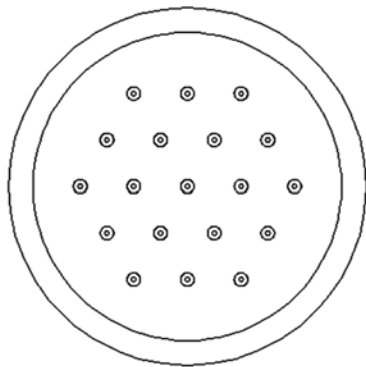


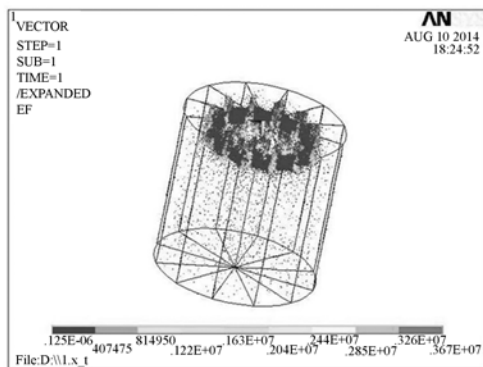
图 3 气罩底面气孔阵列分布图

Fig. 3 Hole array on the bottom of gas hood

证多带电射流的均匀、持续喷射。

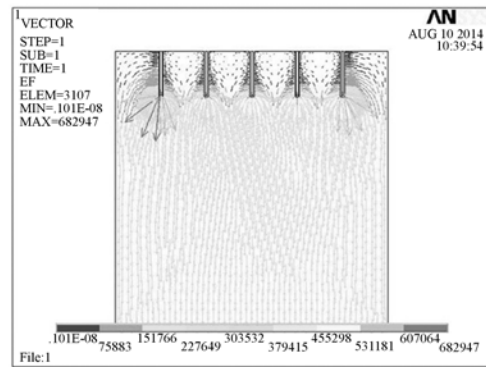
2.2 多喷嘴静电场仿真

首先利用 ANSYS 仿真软件建立多喷嘴静电场仿真模型。施加静电高压后多喷嘴喷头下方空间电场三维仿真结果如图 4(a)所示,空间电场仿



(a) 空间电场三维仿真结果

(a) Three dimensional simulation result of space electric field



(b) 空间电场仿真剖面

(b) Cross-section of space electric field simulation result

真结果施加电压后空间电场仿真结果

Fig. 4 Simulation results of space electric field under multi nozzle spinneret with high voltage

真结果剖面如图 4(b)所示。图 4 中喷嘴施加的静电高压为 10 kV,喷嘴至收集板距离为 6 cm。空间电场仿真结果可知各个带电喷嘴之间存在较强的电场干扰,特别是中心喷嘴的电场强度受外围喷嘴的抑制而被削弱,不利于雾化射流的稳定喷射。另一方面,射流喷射受到抑制无法稳定喷射,其产生的液滴滴落影响了雾化微纳颗粒和薄膜的均匀性。因此克服带电喷嘴间的干扰,维持射流的持续稳定喷射是多喷嘴雾化技术研究的关键。

2.3 辅助气体流场仿真

气罩引导辅助气体均匀流向各个气孔,形成具有约束功能的鞘层气流围绕于各个喷嘴四周,是气辅式多喷嘴静电雾化装置稳定喷射的研究重点。辅助气体流场仿真结果矢量分布如图 5所

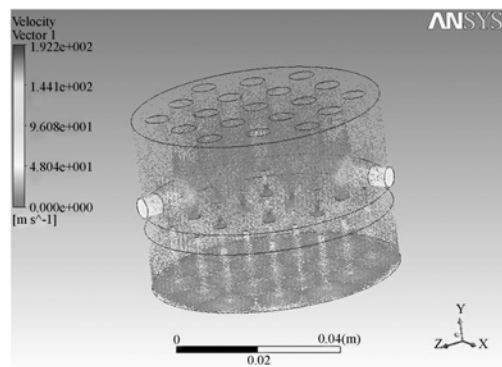
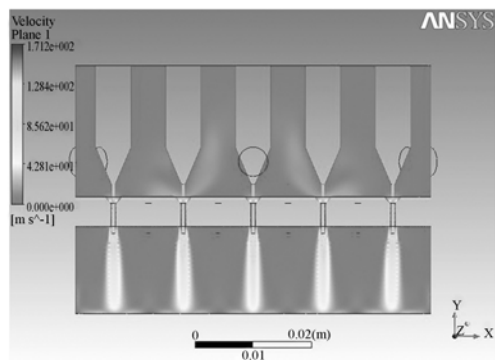


图 5 辅助气体流场仿真结果

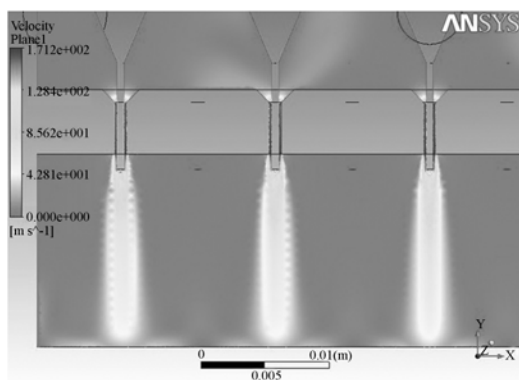
Fig. 5 Flow simulation results of assisted gas

示,辅助气体供气压强为 25 kPa。图 6 所示为带辅助气体多喷嘴流场仿真云图,辅助气体经气罩内腔的缓冲后可以均匀流向位于气罩底面的各个气孔;在气孔约束作用下辅助气体流速增加,并环绕于喷嘴四周形成稳定鞘气层流。由仿真结果可知,内、中、外 3 层气孔出的鞘层气流较为均匀,各气孔出口处的最大气体流速相差小于 5%。仿真结果表明气罩可较好地实现均匀引导辅助气流。



(a) 辅助气体流场仿真云图

(a) Cloud chart of assisted gas flow simulation



(b) 辅助气体流场局部放大图

(b) Local amplification of assisted gas flow simulation

图 6 辅助气体流场仿真结果剖面图

Fig. 6 Cross-section of assisted gas flow simulation gas

3 多射流雾化实验

气体辅助多喷嘴静电雾化实验系统如图 7 所示。雾化喷头上的导电板与直流高压电源正极相连,采用精密注射泵(HARVARD-11plus,美国)进行供液,精密注射泵将溶液注入进液口,溶液经溶液槽输送至各个喷嘴,利用高压直流电源(DW-

SA403-1ACE5,0~50kV,天津东文)产生高压电场,通过电场力拉伸溶液使其变形产生射流,通过锡箔纸板收集静电雾化纳米颗粒,收集板与喷嘴之间的距离为 0~20 cm 可调。采用场发射扫描电子显微镜(LEO1530,德国)检测静电雾化纳米颗粒的形貌和直径。

采用聚氧化乙烯(Poly ethylene Oxide (PEO),长春市大地精细化工公司, Mw = 300 000)溶液作为静电雾化溶液,聚合物溶液质量分数为 2%,溶剂为去离子水与乙醇混合液,二者体积比为 3:1。

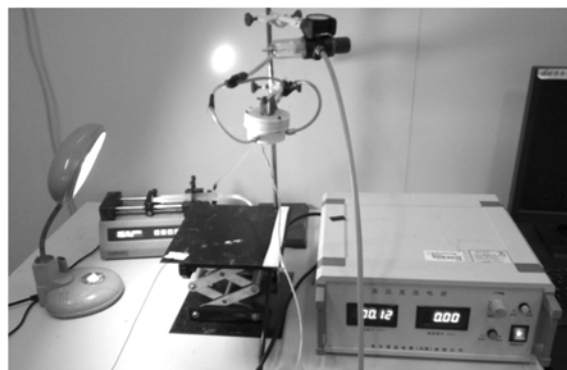


图 7 气辅式多射流静电雾化试验系统

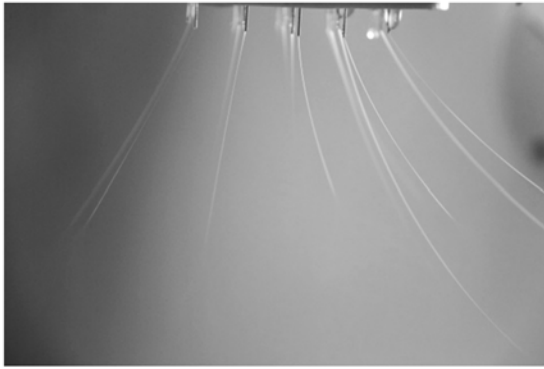
Fig. 7 Multi jet electro spray setup with sheath gas

4 结果与讨论

4.1 多射流静电雾化沉积

采用多喷嘴开展静电雾化实验,以实现多射流的雾化喷射,提高微纳颗粒喷射生产效率,多雾化射流喷射如图 8 所示。未加载辅助气体时,各带电喷嘴间产生较强的干扰与抑制作用,特别是处于中心位置的喷嘴受电场抑制难以保证稳定、持续喷射。处于气罩四周的喷嘴可以较好地产生射流喷射,但受到带电射流之间电荷排斥力的作用,射流易生不稳定并朝外偏斜,如图 8(a)所示。加载辅助气流后,鞘层气流将对带电射流产生约束拉伸作用,抑制带电喷嘴及射流间的干扰,以确保雾化射流的持续稳定喷射。外围喷嘴射流受鞘层气流的约束作用,雾化射流喷射稳定性将得到增强,其偏斜程度也将大为减小,如图 8(b)所示。

多射流静电雾化所获得微纳颗粒薄膜的形貌如图 9 所示。供液速率为 80 $\mu\text{l}/\text{min}$,喷嘴内径为 0.24 mm,喷嘴到收集板距离为 12 cm,施加电压



(a) 未加载辅助气体
(a) Without sheath gas



(b) 加载辅助气体
(b) With sheath gas

图 8 多喷嘴喷头静电雾化射流

Fig. 8 Electro spray jets from multi nozzles spinneret

为 12 kV。在鞘层气约束下,由各个喷嘴射出的微纳颗粒将形成较为独立的沉积区域。

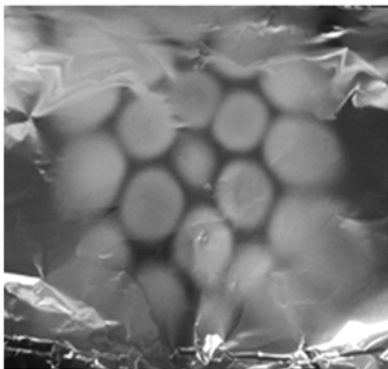


图 9 多喷嘴雾化纳米薄膜

Fig. 9 Electro spray nano thin film from multi nozzle spinneret

随着喷射时间的增加,各独立区域的边缘逐渐融合,喷射 1 h 后可形成厚度达 $4 \mu\text{m}$ 的薄膜。多射流喷射过程,纳米颗粒沉积面积随喷射时间的变化曲线如图 10 所示。鞘层气流的引入,增强了射流在收集板表面沉积时的无序运动,扩大了纳米颗粒的沉积面积。然而,鞘层气流对雾化射流的约束力将随着辅助气体的供气压强的增加而增大,从而减小了射流的运动范围和纳米颗粒沉积面积。因此,供气压强由 25 kPa 上升到 50 kPa 时,纳米颗粒沉积面积反而降低。

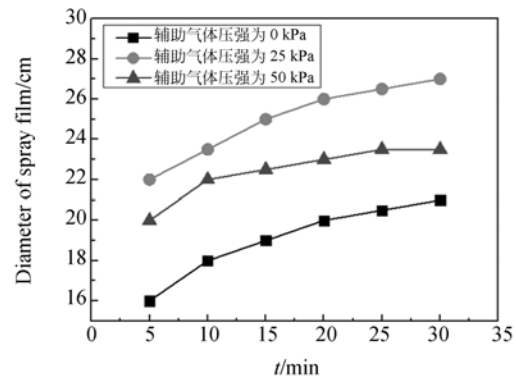


图 10 纳米颗粒沉积面积随时间的变化规律

Fig. 10 Relationship between deposition area of nano particles and ejection time

4.2 静电雾化临界启动电压

辅助气体经气罩缓冲均匀流向各喷嘴形成鞘层气流,将对射流起到拉伸与约束作用,降低了射流喷射所需要的电场力。因此,射流喷射所需要的临界电压随辅助气体供气压强的增加而降低,如图 11 所示。没加载辅助气体时,射流喷射临界启动电压为 4.9 kV。当辅助气体供气压强由

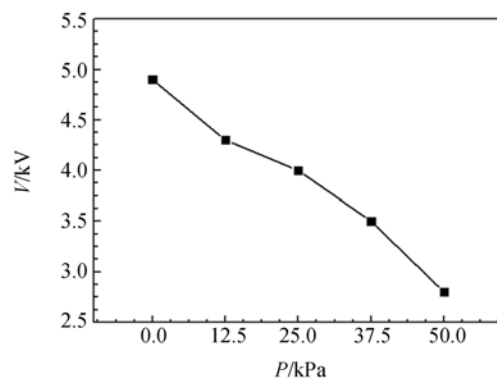


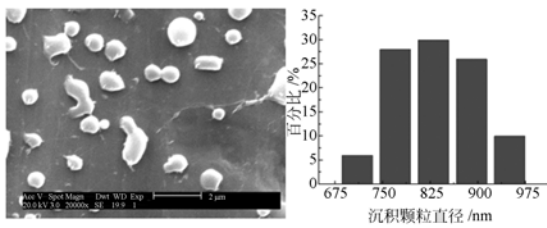
图 11 启动电压与辅助气体供气压强的关系曲线

Fig. 11 Relationship between the threshold voltage and the supply pressure of assisted gas

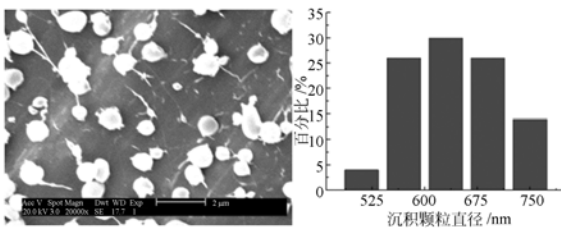
12.5 kPa 增加到 50 kPa 时,射流雾化喷射临界启动电压由 4.3 kV 降低至 2.8 kV。实验用的雾化溶液选用质量浓度为 2% 的聚氧化乙烯(PEO)溶液、供液速度为 80 $\mu\text{l}/\text{min}$ 、喷嘴内径为 0.24 mm、喷嘴到收集板距离为 17 cm。

4.3 静电雾化纳米颗粒直径

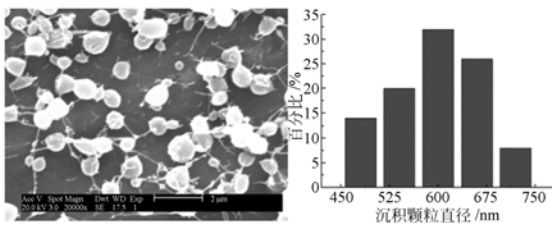
鞘层气流所产生的拉伸约束作用不仅有助于促进射流喷射降低临界启动电压,也将促进射流的拉伸细化和降低雾化结构尺寸。不同辅助气体供气压强作用下所雾化制得的纳米颗粒和纳米颗粒直径分布区间如图 12 所示,PEO 溶液质量浓度为 2%,供液速度为 80 $\mu\text{l}/\text{min}$,施加电压为 16 kV,喷嘴内径为 0.24 mm,喷嘴到收集板距离为 17 cm。其中,图 11(a)、(b)、(c)、(d)、(e)中辅助气体供气压强分别为 0、12.5、25、37.5 和 50 kPa。由实验结果可知,随着辅助气体供气压强的增加,雾化纳米颗粒直径和分布区间也将随之减小,纳米颗粒直径分布与辅助气体供气压强关系如图 13 所示。



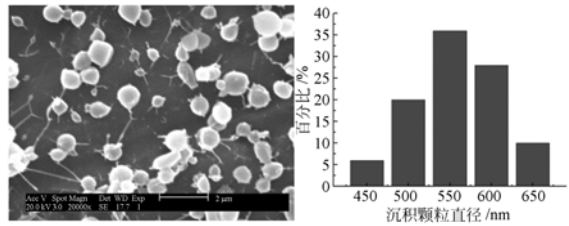
(a) 不加载辅助气体
(a) Without assisted gas



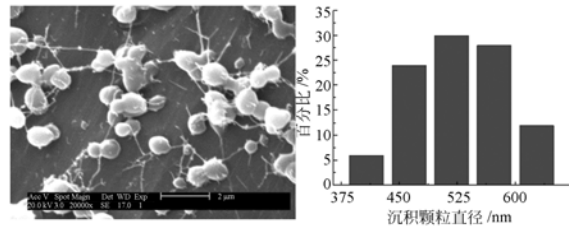
(b) 辅助气体供气压强 12.5 kPa
(b) With assisted gas in supply pressure of 12.5 kPa



(c) 辅助气体供气压强 25 kPa
(c) With assisted gas in supply pressure of 25 kPa



(d) 辅助气体供气压强 37.5 kPa
(d) With assisted gas in supply pressure of 37.5 kPa



(e) 辅助气体供气压强 50 kPa
(e) With assisted gas in supply pressure of 50 kPa

图 12 不同辅助气体气压条件下纳米颗粒的 SEM 图和直径分布图

Fig. 12 SEM images and diameter distribution of electro spray nano particle with different supply pressures of assisted gas

当未加载辅助气体时,静电雾化纳米颗粒直径分布为 600~1 000 nm;加载辅助气体后,变为 400~800 nm。辅助气体供气压强由 0 kPa 增加到 50 kPa 时,雾化纳米颗粒的平均直径从 845.267 nm 减小到 528.06 nm。围绕于喷嘴四周的鞘层气流对雾化射流提供了额外的拉伸力,有利于促进雾化射流尺寸和纳米颗粒直径分布区间的减小。

为了更好地理解鞘层辅助气流对雾化纳米颗粒直径分布规律的影响,进一步分析了不同喷嘴雾化纳米颗粒的直径。根据气罩下方鞘层气流的分布规律,对比分析了内层喷嘴与外层喷嘴喷射颗粒直径随辅助气体供气压强变化规律,如图 14 所示。由电场仿真结果可知,喷头内环电场集中提高了溶液表面电荷密度促进了射流的破裂,雾化颗粒源于锥射流尖的液滴破裂,液滴直径小且均匀性好;而外围喷头受边缘效应影响,溶液供给不稳定^[15],雾化液滴直径大且分布不均匀。没有加载辅助气体时,外环喷嘴喷射颗粒的平均直径为 845.267 nm,内层喷嘴喷射颗粒的平均直径为 770.9 nm,两者差值为 74.367 nm;而辅助气体供

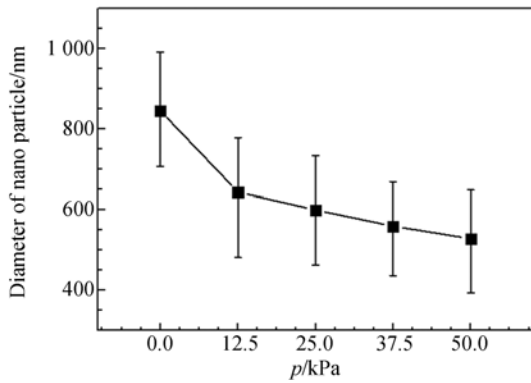


图 13 雾化纳米颗粒直径与辅助气体供气压强的关系曲线

Fig. 13 Relationship between the diameter of electro-spray nano particle and the supply pressure of assisted gas

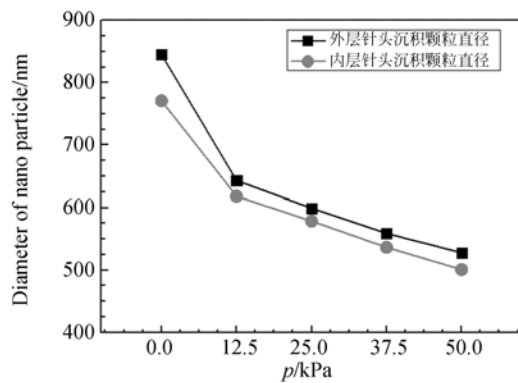


图 14 内环、外环喷嘴雾化纳米颗粒直径与辅助气体供气压强的关系曲线

Fig. 14 Effect of supply pressures of assisted gas on the diameters of electro-spray nano particles gained from center nozzles and border nozzles, respectively

参考文献:

- [1] WONG S Y, CHEN Y C. Droplet-based electro-spray ionization mass spectrometry for qualitative and quantitative analysis [J]. *J. Mass. Spectrom.*, 2014, 49(5): 432-436.
- [2] 张丽, 孙冰, 佐藤大, 等. 静电雾化法制备二氧化硅微粒的研究 [J]. *大连海事大学学报*, 2012, 38(4): 88-90.
- ZHANG L, SUN B, SATO M, *et al.*. Silicon dioxide formation by electrostatic atomization [J]. *J. of Dalian Maritime Univer.*, 2012, 38(4): 88-

气压强为 12.5 kPa 时,外环喷嘴与内环喷嘴喷射颗粒的平均直径差值减小为 35 nm;当辅助气体供气压强从 12.5 kPa 增加到 50 kPa 时,外层喷嘴与内层喷嘴喷射颗粒的平均直径差值从 35 nm 降低到 20 nm。辅助鞘层气流的引入促进了锥射流的稳定喷射和颗粒雾化,减弱了溶液供给不均匀的影响,有助于雾化纳米颗粒均匀性的提升。

5 结 论

本文提出一种气辅式多喷嘴静电雾化装置,实现了促进多溶液射流的快速雾化喷射。辅助气体围绕于喷嘴四周形成稳定鞘层气流,对射流产生拉伸与约束作用,降低了静电雾化的临界启动电压;鞘层气流还起到屏蔽作用,减弱了各处带电射流间的干扰与抑制作用,确保了高密度多射流的长时间稳定喷射并提高了纳米颗粒静电雾化的喷射效率和颗粒的均匀性。

辅助气体供气压强由 0 kPa 升高到 50 kPa 时,多喷嘴雾化射流喷射的临界启动电压由 4.9 kV 下降至 2.8 kV,纳米颗粒的平均直径从 845.267 nm 减小至 528.06 nm,外层与内层喷嘴之间的喷射颗粒直径差从 74.367 nm 减小至 20 nm。

通过辅助鞘层气流的引入,静电雾化纳米颗粒的喷射效率与均匀性都得到了有效的提升,为静电雾化技术的发展应用提供了一种良好的技术手段。

致谢:感谢厦门大学分析测试中心在纳米纤维 SEM 的检测分析方面的帮助,谨以致谢。

90. (in Chinese)

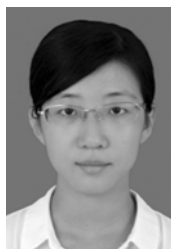
- [3] BENNETT R V, CLEAVES H J, DAVIS J M, *et al.*. Desorption electro-spray ionization imaging mass spectrometry as a tool for investigating model prebiotic reactions on mineral surfaces [J]. *Anal. Chem. Analytical chem.*, 2013, 85(3): 1276-1279.
- [4] 蔡浩原, 崔大付, 李亚亭, 等. 高阻值纳米薄膜材料的热电特性测量 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(7): 1794-1799.
- CAI H Y, CUI D F, LI Y T, *et al.*. Measurement of thermoelectric characteristics of high resistance

- nano films [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1794-1799. (in Chinese)
- [5] REDDY M, SUBBA R G, CHOWDARI B. Metal oxides and oxysalts as anode materials for Li ion batteries [J]. *Chem. Rev.*, 2013, 113(7): 5364-5457.
- [6] JU J, YAMAGATA Y, HIGUCHI T. Thin-film fabrication method for organic light-emitting diodes using electrospray deposition [J]. *Adv. Mater.*, 2009, 21(43): 4343-4347.
- [7] ZHAO X Y, WANG X, LIM S L, *et al.*. Enhancement of the performance of organic solar cells by electrospray deposition with optimal solvent system [J]. *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, 2014, 121: 119-125.
- [8] HAN Y L, WANG S, ZHANG X, *et al.*. Engineering physical microenvironment for stem cell based regenerative medicine [J]. *Drug Discov. Today*, 2014, 19(6): 763-773.
- [9] PAN C, CHEN Y, HSIEH C, *et al.*. Ultrasonic sensing device with ZnO piezoelectric nanorods by selectively electrospraying method [J]. *Sensor Actuat. A-Phys.*, 2014, 216(9): 318-327.
- [10] 郑高峰, 何广奇, 刘海燕, 等. 电纺氧化锌纳米纤维乙醇、丙酮气敏传感器 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1555-1561.
- ZHENG G F, HE G Q, LIU H Y, *et al.*. Electrospun zinc oxide nanofibrous gas sensors for alcohol and acetone [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1555-1561. (in Chinese)
- [11] 刘大利, 郭俊, 方淑慧, 等. 使用目标多特征识别的纳米纤维制造在线监测系统 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 360-368.
- LIU D L, GUO J, FANG SH H, *et al.*. On-line monitor system for nanoscale fiber manufacturing based on multi-featured pattern recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 360-368. (in Chinese)
- [12] 赵恩铭, 雒莘梓, 李乐, 等. 电纺氧化硅凝胶亚微米光波导 [J]. *光学精密工程*, 2012, 10(6): 1282-1287.
- ZHAO E M, LUO S Z, LI L, *et al.*. Electrospun silicon gel submicrometer optical waveguides [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 10(6): 1282-1287. (in Chinese)
- [13] BHATNAGAR P. Multiplexed electrospray deposition for protein microarray with micromachined silicon device [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(1): 014102-014102-014103.
- [14] OH H, KIM K, KIM S. Characterization of deposition patterns produced by twin-nozzle electrospray [J]. *J. Aerosol Sci.* 2008, 39(9): 801-813.
- [15] DENG W, KLEMIC J F, LI X, *et al.*. Increase of electrospray throughput using multiplexed microfabricated sources for the scalable generation of monodisperse droplets [J]. *J. Aerosol Sci.*, 2006, 37(6): 696-714.
- [16] DUBY M H, DENG W, KIM K, *et al.*. Stabilization of monodisperse electrosprays in the multi-jet mode via electric field enhancement [J]. *J. Aerosol Sci.*, 2006, 37(3): 306-322.
- [17] FORBES T P, BREWER T M, GILLEN G. Primary and secondary droplet and charge transmission characteristics of desorption electro-flow focusing ionization [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(21): 214102.
- [18] KANEV I L, BALABAEV N K, GLYAKINA V, *et al.*. Computer simulation of gas-phase neutralization of electrospray-generated protein macroions [J]. *J. Phys. Chem. B.*, 2012, 116(20): 5872-5881.
- [19] ACERO A, REBOLLO M N, MONTANERO J, *et al.*. A new flow focusing technique to produce very thin jets [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, 23(6): 065009.

作者简介:



赵扬(1980-),男,辽宁丹东人,博士,助理教授,2009年于吉林大学获博士学位,主要从事智能精密制造和智能材料应用等领域研究。E-mail: zhaoyang@xmu.edu.cn



姜佳昕(1992-),女,河北秦皇岛人,硕士研究生,2014年于厦门大学获得学士学位,主要从事电纺直写纤维可控沉积方面的研究。E-mail: 1260924735@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)