

文章编号 1004-924X(2016)05-1138-10

鞘气聚焦电纺射流喷射的电学特性

郑高峰¹, 孙玲玲¹, 郑艺玲¹, 李文望², 薛文东^{1*}, 郑建毅¹

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要:开展了鞘气聚焦高效率纺丝射流喷射的研究。搭建了带有微弱电流检测模块的鞘气聚焦电纺喷射实验平台,讨论了鞘气约束作用下纺丝射流的流变与运动行为,结合理论模型分析了鞘气供气压强等工艺参数对纺丝电流的作用规律。实验显示:鞘气聚焦促进了射流的拉伸细化,降低了射流喷射临界启动电压,减小了纳米纤维的直径、提高了电纺纳米纤维的均匀性。当供气压强由0 kPa上升到50 kPa时,射流喷射平均临界启动电压由10.2 kV降低至2.9 kV;施加电压为4 kV时,经4.4 s产生峰值为532 nA的冲击电流,稳定喷射阶段纺丝电流为300~500 nA。鞘气聚焦还减小了射流直径和表面电荷密度,纺丝电流减小至没有鞘气聚焦时纺丝电流的1/7;纺丝电流随着鞘气压强、喷头至收集板距离的增加而降低,随着施加电压和溶液质量百分数的增加而增大。得到的结果表明:鞘气聚焦抑制了射流喷射过程的电荷干扰,减小了纺丝射流直径,提高了静电纺丝的稳定性。该方法为改善静电纺丝技术的控制水平提供了新的途径。

关键词:纺丝电流;微弱电流检测;鞘层气流;约束聚焦;可控喷射

中图分类号:TS104.7;TP69 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1138

Electrical properties of electrospinning under sheath gas focusing

ZHENG Gao-feng¹, SUN Ling-ling¹, ZHENG Yi-ling¹,
LI Wen-wang², XUE Wen-dong^{1*}, ZHENG Jian-yi¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering,

Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

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

Abstract: How to increase the ejection efficiency of an electrospinning jet by inducing sheath gas focusing was investigated, and an electrospinning experimental setup with sheath gas focusing was built up. The ejection and movement behaviors of electrospinning jet under the sheath gas was analyzed. The effect of some of technological parameters such as the pressure of sheath gas on a electrospinning current was studied based on the theoretical model. The experiments indicate that the sheath gas promotes the stretching and thinning of the electrospinning jet, by which the critical voltage of electrospinning and the diameter and distribution area of a nanofiber have been decreased. As the pressure of sheath gas is increased from 0 kPa to 50 kPa, the critical voltage of electrospinning decreases from 10.2 kV to 2.9 kV. When the applied voltage is 4 kV, the front-end of electrospinning

收稿日期:2015-11-03;修订日期:2016-01-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51305373, 51405408);厦门科技计划资助项目(No. 3502Z20143033);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 20720140517);厦门大学基础创新科研基金资助项目

jet takes 4.4 s to reach a collector and produces a peak current of 532 nA. The electrospinning current ranges from 300 nA to 500 nA during the stable ejection process. Moreover, both the diameter and surface charge density of electrospinning jet have been decreased by the sheath gas focusing, and the electrospinning current is only one seventh of that without sheath gas. Under the sheath gas focusing, the electrospinning current decreases with the increasing of gas pressure and the distance between nozzle and collector, but increases with the increasing of applied voltage and the concentration of polymer solution. It concludes that the sheath gas focusing restrains the charge interferences in electrospinning processing, decreases the diameter of electrospinning, improves both the injection stability of electrospinning and uniformity of nanofiber. This work provides a good way to improve the control level of electrospinning technology.

Key words: electrospinning current; micro current measurement; sheath gas; focused restriction; controlled ejection

1 引言

静电纺丝技术利用高压静电场拉伸溶液,诱导其发生形变,从而产生射流,实现纳米纤维的喷射制造,具有设备轻便、操作简单、材料兼容性好、成本低、无污染等优点^[1]。纳米纤维直径小、比表面积大、材料多样化,在生物医药^[2-3]、微机电系统^[4]、工业过滤^[5]、电子器件制造^[6-7]、航天器材^[8]等领域均表现出良好的应用前景,并引起了各界的关注^[9]。目前,提高纳米纤维的均匀性和喷射过程的稳定性已成为静电纺丝研究的关键问题。

引入鞘层气流,利用辅助气体的约束与拉伸作用,促进射流的喷射与细化,是提高静电纺丝生产效率的有效手段。鞘层气流为纺丝射流提供了额外的拉伸力,降低了射流喷射所需的临界电压;同时,鞘层气流还可降低射流与周围介质的相对速度,有效抑制射流运动的干扰因素^[10],为均匀纳米纤维的快速喷印和精确沉积提供了有效的技术手段^[11]。如 Liu^[12]等研究了鞘气约束对聚乙烯醇(PVA)电纺纳米纤维均匀性的提升作用; Ganán-Calvo^[13]等证实了鞘层聚焦气体能减小静电喷雾液滴直径并且提高其均匀性。

利用静电拉伸进行射流喷射是静电纺丝技术的基本原理^[14]。电荷沿射流迁移所形成的纺丝电流,已成为静电纺丝电学特性研究和喷射行为监控的重要手段^[15]。Kadomae^[16]等通过实验证

明了纺丝电流的波动情况与纳米纤维均匀性的关系,即纺丝电流激烈波动时所喷射的纳米纤维均匀性差。Muhammad^[17]等构建了恒电流的静电纺丝闭环控制系统,进一步提升了电纺纳米纤维的均匀性。分析纺丝电流演变规律,已经成为明确静电纺丝喷射电荷迁移行为、提高射流喷射可控性的重要方法^[18-19]。

鞘层气流的引入改变了纺丝射流的受力情况和流变行为,影响了射流喷射的电学特性与电荷迁移行为。研究鞘气约束下纺丝电流的演变规律,有助于加深对射流喷射、流变行为的理解,提升射流稳定喷射的控制水平。

因此,本文搭建了具有微纳电流检测模块的鞘气约束静电纺丝喷射系统,分析了鞘气约束作用下纺丝射流的流变与运动行为,研究了纺丝电流的演变规律和控制规律,为静电纺丝喷射过程的精确控制提供了技术基础。

2 静电纺丝实验系统

带有微纳电流检测模块和鞘气约束的静电纺丝系统如图1所示,包括精密注射泵、供气系统、纺丝喷头、精密电流检测模块、上位机控制软件、数控直流高压电源。自主开发的微纳电流检测模块如图2所示,其中:电流检测的电流灵敏度为1 nA、检测范围为1 nA~3 μ A、采样频率为1 Hz~2 kHz。

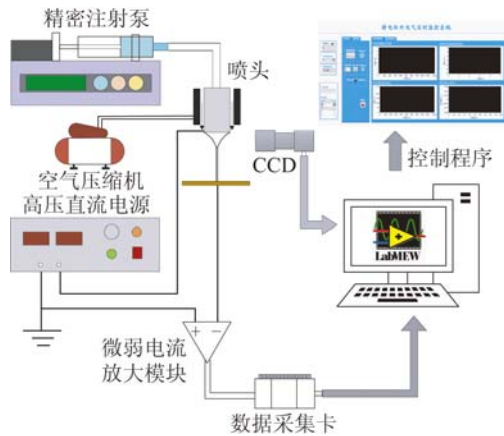


图 1 精密微纳电流检测和纺丝射流喷射控制系统

Fig. 1 Precise micro-nano current detection and jet injection control system

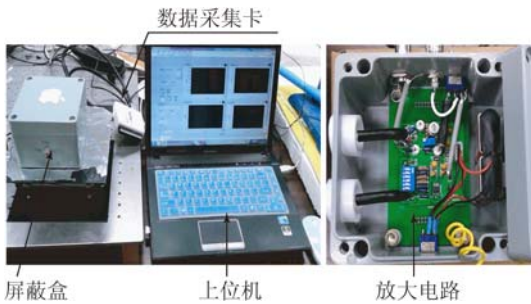


图 2 精密微纳电流检测模块

Fig. 2 Module of precise micro-nano current detection

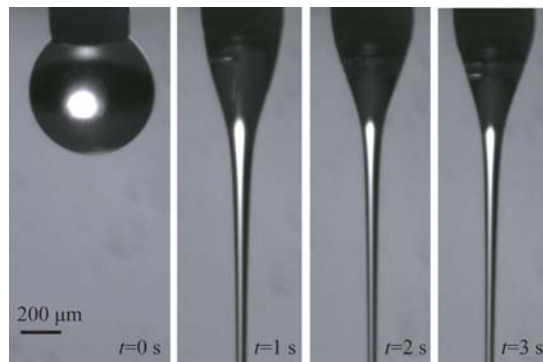
直流高压电源 (DW-SA403-1ACE5, 0~50 kV, 天津东文) 通过 RS232 转 USB 数据线与上位机相连, 其正极与喷头相连, 通过精密注射泵 (HARVARD-11plus, 美国) 控制溶液的供给速度, 由上位机控制给定电压。在高压静电场的作用下, 喷头处液滴受到电场力拉伸发生形变形成泰勒锥进而形成射流, 射流在鞘气的约束下到达收集板, 固化形成纺丝纤维。收集板与微纳检测电路相连, 放大电路将检测到的电流信号进行转换放大, 放大后的信号经由数据采集卡 (National Instruments corporation 16 Inputs, 16-bit, 250kS/s, Multifunction I/O) 采集至上位机, 利用 LabVIEW 程序进行处理。实验过程中通过 CCD (UI-2250-C, uEye, 德国) 对纺丝射流的喷射与流变行为进行记录分析。

实验所用溶液由聚乙烯 (Poly ethylene Oxide, PEO), 长春市大地精细化工公司, $M_w = 300\ 000$) 粉末配制, 溶剂为去离子水与乙醇的混合液 (体积比为 3:1); 纺丝溶液中聚合物的质量

百分数为 8 wt%~10 wt%; 收集板到喷头的距离为 1~10 cm。

3 结果与讨论

静电纺丝过程中, 喷嘴出口处的溶液在表面张力作用下收缩成球状悬挂液滴。施加电压后 ($t=0$ s 开始施加电压), 溶液将受到电场力的拉伸作用而开始产生形变; 电场力增加到足以克服表面张力、黏性阻力等时, 将有射流从喷嘴处射出; 随着施加电压时间的增加, 喷嘴出口处聚集的液滴体积和射流直径也将随之逐减小; $t=2$ s 后, 纺丝射流进入稳定喷射阶段, 泰勒锥与射流的形状保持不变。没有加载鞘气时, 纺丝射流的产生、喷射过程如图 3 所示。

图 3 不加载鞘气约束时, 喷嘴出口处的液滴与纺丝射流 (聚合物溶液的质量百分数、供液流速、喷头至收集板的距离分别是 10 wt%、100 μ L/hr 和 8 cm。)Fig. 3 Liquid droplet at the outlet of nozzle and electrospinning jet without sheath gas (The concentration of polymer solution, flow rate, distance between nozzle and collector is 10 wt%, 100 μ L/hr, 8 cm, respectively.)

鞘气约束增加了对射流的拉伸作用力, 促进了溶液的变形与射流的产生。纺丝溶液输送至喷嘴出口时 ($t=0$ s) 开始施加鞘气, 在鞘气的约束作用下, 纺丝溶液无法在喷嘴出口处聚集产生悬挂液滴; 鞘气拉伸力将诱使溶液在 $t=1$ s 时产生射流, 射流直径将逐步增加 ($t=2$ s)。 $t=3$ s 时开始施加高压电场, 进一步增加了纺丝溶液所受到的拉伸力, 明显增加了溶液泰勒锥的体积和纺丝射流的体积。 $t=4$ s 后, 纺丝射流进入稳定喷射阶段, 射流直径保持稳定。鞘气约束作用下纺丝射流的喷射行为如图 4 所示。

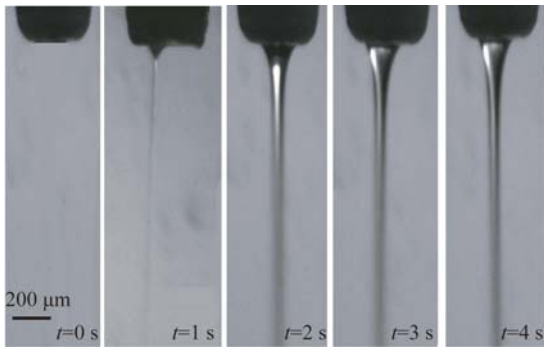


图4 鞘气约束下纺丝射流的喷射行为(聚合物溶液质量百分数、供液流速、喷头至收集板的距离、鞘气压强分别是 10 wt%、100 μL/hr、8 cm 和 25 kPa。)

Fig. 4 Ejection behaviors of electrospinning jet under sheath gas focusing (Concentration of polymer solution, flow rate, distance between nozzle and collector, pressure of sheath gas is 10 wt%, 100 μL/hr, 8 cm, 25 kPa, respectively.)

鞘气在射流表面所产生的气液界面扰动以及强电场排斥力,将诱使纺丝射流产生剧烈小幅度振动,如图4所示。鞘气约束对纺丝溶液的拉伸力,将有助于促进射流的产生,从而降低了静电纺丝射流喷射的临界启动电压。当供气压强由 0 kPa 上升到 50 kPa 时,射流喷射的平均临界启动电压将由 10.2 kV 降低至 2.9 kV。射流喷射临界启动电压与鞘气供气压强的关系曲线如图5所示。

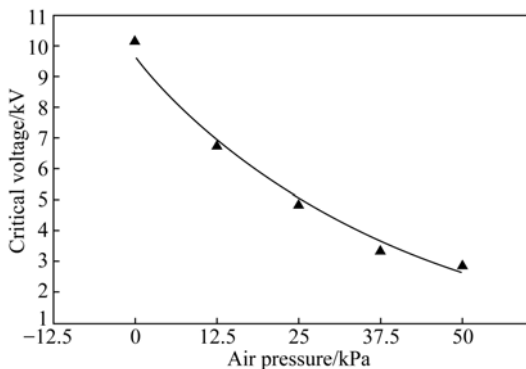


图5 纺丝射流喷射启动电压随鞘气压强的变化规律(聚合物溶液质量百分数、供液流速、喷头至收集板的距离分别是 10 wt%、100 μL/hr 和 8 cm。)

Fig. 5 Relationship between critical voltage of electrospinning jet and pressure of sheath gas (Concentration of polymer solution, flow rate, distance between nozzle and collector is 10 wt%, 100 μL/hr, 8 cm, respectively.)

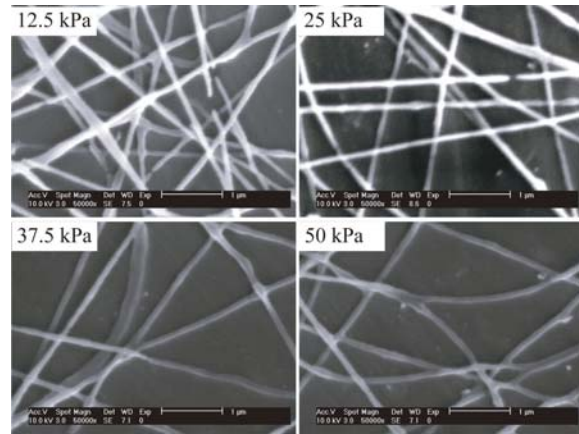


图6 不同气压鞘气聚焦下的静电纺丝纳米纤维(聚合物溶液质量百分数、供液流速、喷头至收集板的距离分别是 10 wt%、100 μL/hr 和 8 cm。)

Fig. 6 Electrospinning nanofiber under sheath gas focusing with different pressures (Concentration of polymer solution, flow rate, distance between nozzle and collector is 10 wt%, 100 μL/hr, 8 cm, respectively.)

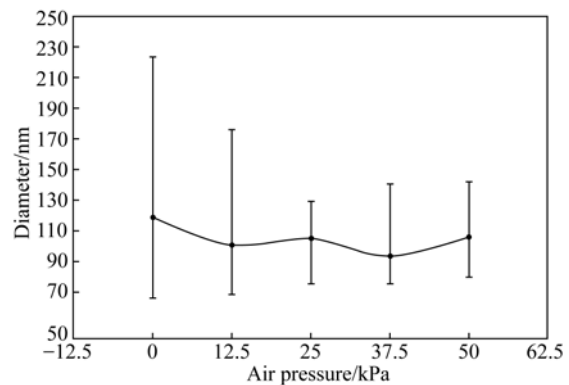


图7 纳米纤维直径随鞘气压强的变化规律(聚合物溶液质量百分数、供液流速、喷头至收集板的距离分别是 10 wt%、100 μL/hr 和 8 cm。)

Fig. 7 Relationship between diameter of electrospun nanofiber and pressure of sheath gas (Concentration of polymer solution, flow rate, distance between nozzle and collector is 10 wt%, 100 μL/hr, 8 cm, respectively.)

辅助鞘气的拉伸作用也将促进射流的拉伸细化,有助于降低电纺纳米纤维的直径、提高纳米纤维的均匀性。不同气压鞘气约束作用下的静电纺丝纳米纤维如图6所示,鞘气压强的提高不仅降低了电纺纳米纤维的直径,也减少了纤维上的珠状结构,提高了纳米纤维的均匀性、缩小了直径分

布区间。当供气压强由 0 kPa 上升到 50 kPa 时, 纳米纤维平均直径将由 125.14 nm 降低至 112.61 nm, 纳米纤维直径分布区间将由 150 nm 降低至 60 nm。电纺纳米纤维直径与鞘气压强的关系规律如图 7 所示。鞘气约束为均匀纳米纤维的快速制造提供了一种良好的技术手段。鞘气与溶液射流之间产生的相互作用, 改变了射流表面电荷的迁移行为; 探索鞘气约束作用下的纺丝电流特性可进一步提高静电纺丝射流喷射行为的调控水平, 促进静电纺丝技术的发展应用。

在鞘层气流的约束作用下, 静电纺丝的过程电流随时间动态变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 施加电压后会在空间产生感应电场, 可检测到一个微小的电流波动如图 8 中 A 点所示; 电场诱导溶液产生射流喷射, 射流前端携带聚集在喷嘴处的自由电荷; 当射流前端到达收集板时, 射流所携带的电荷经收集板向大地传输, 形成一个较高的电流峰值如图 8 中 B 点所示, 此电流峰值可达 532 nA; 射流前端沉积于收集板后, 纺丝过程进入稳定喷射阶段, 电流变化较为平稳, 如图 8 中 C 阶段所示。射流稳定喷射阶段纺丝的电流波动范围为 300~500 nA。

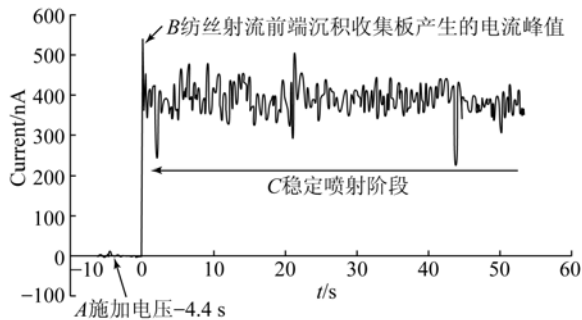


图 8 鞘层气流约束作用下纺丝电流随时间的变化曲线 (聚合物溶液的质量百分数、供液流速、施加电压、鞘层气流供气压强、喷头至收集板距离分别是 10 wt%、100 $\mu\text{L}/\text{hr}$ 、4 kV、12.5 kPa、1 cm。)

Fig. 8 Relationship between electrospinning current and ejection time under the restriction of sheath gas (Concentration of polymer solution, flow rate, voltage, pressure of sheath gas, distance between nozzle and collector is 10 wt%, 100 $\mu\text{L}/\text{hr}$, 4 kV, 12.5 kPa, 1 cm, respectively.)

为了更好地对纺丝电流的演变规律进行深入分析, 定义了稳定喷射阶段平均纺丝电流 I_{ave} [20]:

$$I_{\text{ave}} = \frac{\int_{T_0}^{T_d} I_E(t) dt}{T_d - T_0}, \quad (1)$$

其中: $I_E(t)$ 为稳定喷射阶段实时检测的电流值; T_0 为稳定喷射阶段纺丝电流的检测起始时间; T_d 为稳定喷射阶段纺丝电流的检测终止时间。图 8 中稳定喷射阶段所检测出的平均纺丝电流为 395.90 nA。

下面进一步研究静电纺丝工艺参数对稳定喷射阶段平均纺丝电流的影响规律。

静电纺丝过程中, 射流会在喷头和收集板间形成通路, 构成电流回路。纺丝电流主要由自由电荷迁移电流、欧姆体传导电流、对流传输电流组成, 忽略自由电荷漂移扩散产生的自由电荷迁移电流, 假设射流为圆柱体, 欧姆体传导电流可表示为 [9]:

$$I_0 = \pi r^2 KE, \quad (2)$$

其中: K 为溶液电导率, E 为电场强度, r 为射流的半径, 鞘层气流提供的额外拉伸力会减小射流的直径, 降低欧姆体传导电流。

在射流稳定的情况下, 根据漏电介质模型, 对流传输电流可表示为 [9]:

$$I_c = 2\pi r\sigma u, \quad (3)$$

其中: σ 为射流表面的电荷密度, u 为射流速度。聚焦鞘气的引入, 鞘气与射流之间的表面作用有助于降低表面电荷密度 σ 。总体纺丝电流可表示:

$$I = \pi r^2 KE + 2\pi r\sigma u. \quad (4)$$

实验所采用的喷头至收集板的距离较小, 可假设喷头延长线上的电场为均匀场强分布, 喷头处的电场强度 E 与施加电压 U 、喷头至收集板距离 h 可表示为:

$$E = \frac{U}{r_0 \ln(4h/r_0)}. \quad (5)$$

忽略溶剂挥发对体积的影响, 射流运动速度 u 与半径 r 、供液流速 Q 之间可表示为:

$$u = \frac{Q}{\pi r^2}. \quad (6)$$

根据电液耦合的动力学特性知, 纺丝射流表面的电荷密度 σ 与施加电压 U 成指数关系, 两参数间的关系表达式可写成 [21]:

$$\sigma = kU^z, \quad (7)$$

式中: k 是电荷密度与施加电压的比例关系常数, z 是电荷密度与施加电压的幂函数关系常数。

k, z 两个关系常数大小主要取决于溶液与射流的电荷携带能力与迁移速度。

鞘层气流与射流的界面效应将引导表面电荷在纺丝射流与鞘气之间进行重新分配,从而降低表面电荷密度^[22]。根据界面电学电荷迁移特性可知,单位时间内鞘气携带走的电荷量可表示为:

$$\Delta q = 2\pi r(v-u)\sigma\omega\Delta t, \quad (8)$$

其中: v 为射流表面鞘气流速; ω 为鞘气电荷的携带能力; ω 是一个与气液两相电学特性、环境温、湿度相关的比例常数。鞘气约束下,射流表面电荷密度可表示为:

$$\sigma' = \frac{2\pi ru\sigma\Delta t - 2\pi r(v-u)\sigma\omega\Delta t}{2\pi ru\Delta t}, \quad (9)$$

经化简可得:

$$\sigma' = \frac{u(1+\omega) - v\omega}{u}. \quad (10)$$

根据前期研究的仿真结果可知,鞘气运动速度随供气压强的提高而增加。

鞘气约束增加了射流所受到的拉伸力和射流表面的电荷迁移能力,从而减小了纺丝射流直径和表面电荷密度,降低了射流的欧姆体传导电流和对流传输电流^[20, 23]。图 9 为不同鞘气供气压强下,纺丝电流随施加电压的变化规律。由图 9 可知,鞘气约束作用下纺丝电流的幅值明显小于无鞘气约束时的纺丝电流。鞘气聚焦作用下纺丝电流仅为无鞘气聚焦纺丝电流的 1/7。

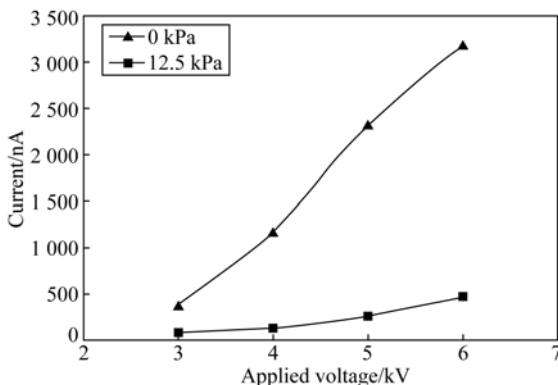


图 9 不同鞘气供气压强,纺丝电流随施加电压的变化规律(聚合物溶液质量百分数、供液流速、喷头至收集板距离分别是 8 wt%、100 $\mu\text{L/hr}$ 和 1 cm。)

Fig. 9 Relationship between electrospinning current and applied voltage under different pressures of sheath gas (Concentration of polymer solution, flow rate, distance between nozzle and collector is 8 wt%, 100 $\mu\text{L/hr}$, 1 cm, respectively.)

施加电压是影响纺丝射流喷射行为和纺丝电流最主要的决定因素。空间电场和射流表面电荷密度都将随着施加电压的提高而增加,因而欧姆体传导电流和对流传输电流都将随之增大,从而提高纺丝电流。由图 9 还可以看到,施加电压由 3 kV 提高到 6 kV,没有鞘气时平均纺丝电流将由 500 nA 增大至 3 500 nA;在鞘气聚焦下平均纺丝电流将由 0 nA 增大至 500 nA。

喷头至收集板距离的增加会降低空间电场强度,对欧姆体传导电流的作用明显。纺丝电流随着喷头至收集板距离的增加而减小,如图 10 所示。

溶液质量百分数的提高会增加溶液的黏滞阻力,阻碍了射流的喷射与细化,从而增加了射流直径、降低了射流的电阻,两方面作用下提高了纺丝电流;另一方面,溶液质量百分数的提高也增加了射流上带电离子的数量和电荷迁移效率。不同溶液质量百分数条件下纺丝电流随施加电压的变化规律如图 11 所示。

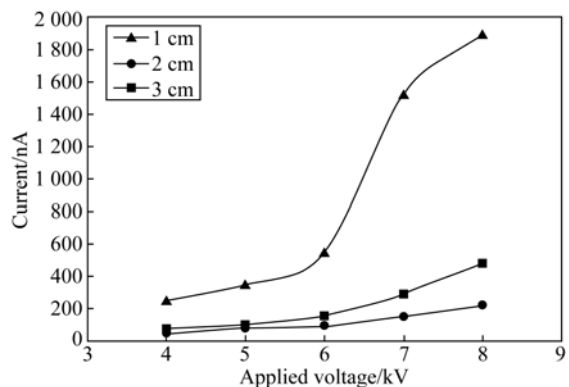


图 10 不同喷头至收集板距离时,鞘气聚焦下纺丝电流随施加电压的变化规律曲线(聚合物溶液质量百分数、供液流速、鞘气供气压强分别是 10 wt%、100 $\mu\text{L/hr}$ 和 12.5 kPa。)

Fig. 10 Relationship between electrospinning current restricted by sheath gas and applied voltage with different distances between nozzle and collector (Concentration of polymer solution, flow rate, pressure of sheath gas is 10 wt%, 100 $\mu\text{L/hr}$, 12.5 kPa, respectively.)

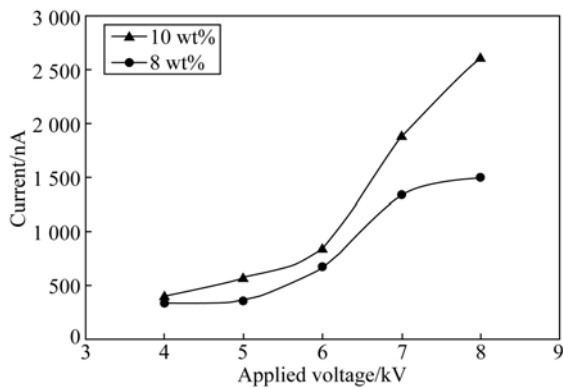


图 11 不同溶液质量百分数时,鞘气聚焦下纺丝电流随施加电压的变化规律曲线(供液流速、鞘气供气压强、喷头至收集板距离分别是 $100 \mu\text{L}/\text{hr}$ 、 12.5 kPa 和 1 cm 。)

Fig. 11 Relationship between electrospinning current restricted by sheath gas and applied voltage with different solution concentrations (Flow rate, pressure of sheath gas, distance between nozzle and collector is $100 \mu\text{L}/\text{hr}$, 12.5 kPa , 1 cm , respectively.)

采用阶梯变化电压研究了鞘气约束作用下的纺丝电流的动态特性。纺丝电流随施加电压增加的响应规律如图 12 所示。由图 12 可知,纺丝电流将随着施加电压的增加而逐级增大。此组实验中先施加电压,再进行溶液供给以避免产生冲击电流,便于进行电流响应特性的对比分析。施加电压分别为 2、3 和 4 kV 时,电流稳定、波动小。电压由 2 kV 增加到 4 kV 时,纺丝电流增幅较小。这是由于电压增大电场拉伸力、减小了射流直径(如图 13 所示),从而降低了欧姆体传导电流;另一方面,空间电场的提高增加了射流电荷密度,增加了对流传输电流,两个效果相互抵消,纺丝总电流增加不明显。在鞘气聚焦下,纺丝电流对电压变化具有较好的响应特性,纺丝电流随电压的增加快速上升,纺丝电流曲线具有较陡的上升沿。

而当施加电压增加到大于 5 kV 后,对流传输电流逐步起主导作用,纺丝电流快速增加;电流的波动也随之增大、稳定性变差;射流表面电荷密度和电荷排斥力增大,易产生射流分叉(如图 13 所示),进一步增大了纺丝电流的波动范围。

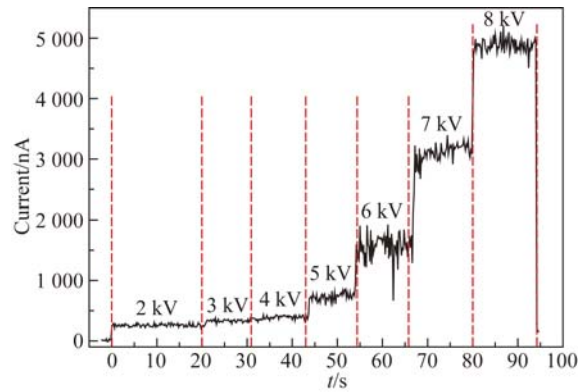


图 12 鞘气聚焦下纺丝电流随阶梯施加电压的动态响应特性(聚合物溶液质量百分数、供液流速、鞘气供气压强、喷头至收集板距离分别是 $8 \text{ wt}\%$ 、 $200 \mu\text{L}/\text{hr}$ 、 12.5 kPa 和 1 cm 。)

Fig. 12 Dynamic response of electrospinning current under step-variable applied voltage (Concentration of polymer solution, flow rate, pressure of sheath gas, distance between nozzle and collector is $8 \text{ wt}\%$, $200 \mu\text{L}/\text{hr}$, 12.5 kPa , 1 cm , respectively.)

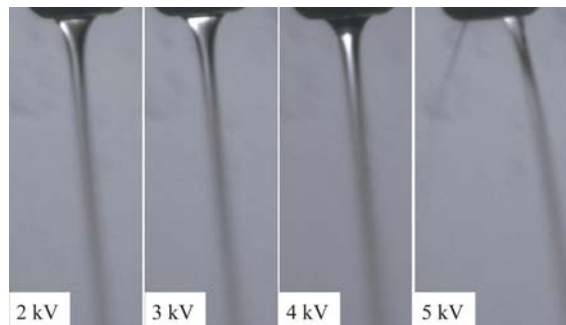


图 13 不同施加电压时,鞘气聚焦作用下的纺丝射流(聚合物溶液质量百分数、供液流速、鞘气供气压强、喷头至收集板的距离分别是 $8 \text{ wt}\%$ 、 $200 \mu\text{L}/\text{hr}$ 、 12.5 kPa 和 1 cm 。)

Fig. 13 Electrospinning jet restricted by sheath gas under different applied voltages (Concentration of polymer solution, flow rate, pressure of sheath gas, distance between nozzle and collector is $8 \text{ wt}\%$, $200 \mu\text{L}/\text{hr}$, 12.5 kPa , 1 cm , respectively.)

纺丝电流随阶梯供气压强的动态响应特性如图 14 所示。由图 14 可知,未加载鞘气时,纺丝电流波动大、稳定性差;而聚集于射流前端的自由电荷,诱使产生了珠状结构,易于产生如图 14 中 7 s

所示纺丝电流的大幅度波动;加载鞘气后纺丝电流明显减小,稳定性也随之提高。随着供气压强从 12.5 kPa 增加到 37.5 kPa 时,纺丝电流逐渐减小,稳定性逐步增强。相比于阶梯电压,纺丝电流对阶梯供气压强的变化响应速度慢,下降沿较为平缓。这是由于静电纺丝喷射系统中电学弛豫时间大于气流、溶液弛豫时间,施加电压是静电纺丝喷射动态行为最重要的决定因素^[23]。

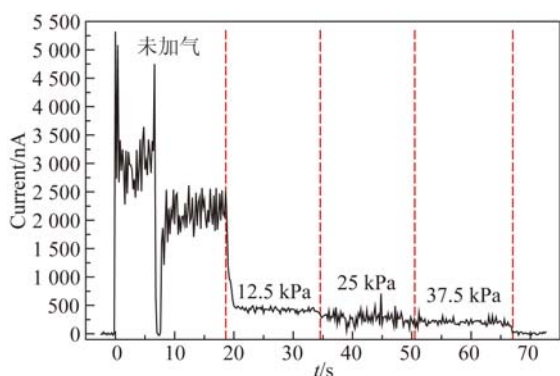


图 14 鞘气聚焦下纺丝电流随阶梯鞘气压强的动态响应特性(聚合物溶液质量百分数、供液流速、施加电压、喷头至收集板距离分别是 8%、200 $\mu\text{L}/\text{hr}$ 、4 kV、1 cm 。)

Fig. 14 Dynamic response of electrospinning current under step-variable pressure of sheath gas (Concentration of polymer solution, flow rate, applied voltage, distance between nozzle and collector is 8%, 200 $\mu\text{L}/\text{hr}$, 4 kV, 1 cm, respectively.)

4 结 论

本文构建了带鞘气聚焦与微纳电流检测的静

参考文献:

- [1] KIM J, OH H, KIM S S. Electrohydrodynamic drop-on-demand patterning in pulsed cone-jet mode at various frequencies [J]. *J. Aerosol Sci.*, 2008, 39(9):819-825.
- [2] XU T, ZHAO W X, ZHU J M, *et al.*. Complex heterogeneous tissue constructs containing multiple cell types prepared by inkjet printing technology [J]. *Biomaterials*, 2013, 34(1):130-139.

电纺丝实验平台,实验分析了鞘气聚焦约束下的射流喷射行为和纺丝电流的演变规律。

鞘气为射流喷射提供了额外的拉伸作用力,促进射流稳定喷射,降低射流喷射的临界启动电压;鞘气压强的提高不仅降低了电纺纳米纤维的直径,也减少纤维上的珠状结构、提高了均匀性,缩小了纳米纤维的直径分布区间。

在鞘气约束作用下,施加电压 4 kV 经过 4.4 s 后所产生的纺丝射流前端将到达收集板,产生峰值为 532 nA 的冲击电流;进入稳定喷射阶段后,纺丝电流较为平稳,波动范围为 300~500 nA,鞘气促进了射流细化、增加了射流电阻,提高电荷迁移速度、降低了电荷密度,最终使纺丝电流减小至没有鞘气聚焦时的 1/7。纺丝电流随着鞘气压强、喷头至收集板距离的增加而降低,而随着施加电压和溶液质量百分数的增加而增大。鞘气聚焦可降低电荷密度和电荷排斥力,有助于提高射流喷射和纺丝电流的稳定性,较好地减小了纺丝电流的波动范围。纺丝电流对于施加电压的改变具有较好的响应速度,而对于鞘气压强改变的响应速度较慢。

鞘层气流的引入实现了射流外场的约束聚焦,对于提高静电纺丝过程的稳定性和电纺纳米纤维的均匀性都有着很好的促进作用,为静电纺丝技术的可控喷射提供了良好的技术途径。

5 致 谢

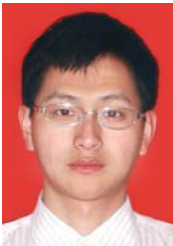
感谢福建省高端装备制造协同创新中心对本文工作的支持。

- [3] 于永泽,刘媛媛,陈伟华,等. 溶剂挥发对静电纺丝纳米纤维支架直径与沉积的影响 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2):420-425.
- YU Y Z, LIU Y Y, CHEN W H, *et al.*. Effect of solvent evaporation on diameter and deposition of nanofibrous scaffold in electrospinning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):420-425. (in Chinese)
- [4] SEKITANI T, TAKAMIYA M, NOGUCHI Y, *et al.*. A large-area wireless power-transmission sheet using printed organic transistors and plastic MEMS

- switches [J]. *Nature Mater.*, 2007, 6:413-417.
- [5] 王晗, 郑高峰, 孙道恒. 电纺不同直径纳米纤维薄膜的空气过滤性能 [J]. *功能材料与器件学报*, 2008, 14(1):153-157.
- WANG H, ZHENG G F, SUN D H. Air filtration performance of nanofibrous membranes electrospun with different nanofiber diameters [J]. *J Fun. Mater. Devices*, 2008, 14(1):153-157. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 李文望, 郑高峰, 王翔, 等. 电纺直写纳米纤维在图案化基底的定位沉积 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10):2231-2238.
- LI W W, ZHENG G F, WANG X, *et al.*. Position deposition of electrospinning direct-writing nanofiber on pattern substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2231-2238. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] PERSANO L, CAMPOSEO A, TEKMECEN C, *et al.*. Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: a review [J]. *Macromol. Mater. Eng.*, 2013, 298(5):504-520.
- [10] 司廷, 田瑞军, 李广滨, 等. 电场作用下流动聚焦的实验研究 [J]. *力学学报*, 2012, 43(6):1030-1036.
- SI T, TIAN R J, LI G B, *et al.*. Experimental study of the flow focusing under an electric field [J]. *Chin. J. Theor. App. Mech. Pol.*, 2012, 43(6):1030-1036. (in Chinese)
- [11] 赵扬, 姜佳昕, 陈冬阳, 等. 气辅式多射流纳米颗粒高效静电雾化喷射 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4):1062-1069.
- ZHAO Y, JIANG J X, CHEN D Y, *et al.*. High efficiency multi-jet eletrospraying of nano particles with assisted gas [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1062-1069. (in Chinese)
- [12] LIU W, YAO Y, LIN Y, *et al.*. Electrospinning assisted by gas jet for preparing ultrafine poly (vinyl alcohol) fibres [J]. *Iran. Polym. J.*, 2009, 18:89-96.
- [13] HARTMAN R P A, BORRA J P, BRUNNER D J, *et al.*. Electrohydrodynamic atomization in the cone-jet mode physical modeling of the liquid cone and jet [J]. *J. Aerosol Sci.*, 1999, 30(7):823-849.
- [14] GAÑÁN-CALVO A M, FERRERA C, MONTANERO J M. Universal size and shape of viscous capillary jets: application to gas-focused microjets [J]. *J. Fluid Mech.*, 2011, 670:427-438.
- [15] 郑高峰, 王凌云, 孙道恒. 基于近场静电纺丝的微/纳米结构直写技术 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(1):20-23.
- ZHENG G F, WANG L Y, SUN D H. Micro/nano-structure direct-write technology based on near-field electrospinning [J]. *Nanotech. Precision Eng.*, 2008, 6(1):20-23. (in Chinese)
- [16] KADOMAE Y, AMAGASA M, SUGIMOTO M, *et al.*. Effect of electric current on beads formation in electrospinning of poly(vinyl alcohol) [J]. *Int. Polym. Proc.*, 2008, 23(4):377-384.
- [17] MUHAMMAD M M, FERRY I, KHAIRURRIJAL, *et al.*. A constant-current electrospinning system for production of high quality nanofibers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, 79(9):093904.
- [18] BHATTACHARJEE P K, SCHNEIDER T M, BRENNER M P, *et al.*. On the measured current in eletrospraying [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107(4):044306.
- [19] VERDOOLD S, AGOSTINHO L, YURTERI C, *et al.*. A generic electro spray classification [J]. *J. Aerosol. Sci.*, 2014, 67:87-103.
- [20] TAUBERT A. Electrospinning of ionogels: current status and future perspectives [J]. *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2015(7):1148-1159.
- [21] 李文望, 郑高峰, 黄辉蓝, 等. 电纺直写单根纳米纤维喷射电流的特性 [J]. *厦门大学学报:自然科学版*, 2011, 50(3):570-573.

- LI W W, ZHENG G F, HUANG H L, *et al.*. Jet current character for electrospinning direct-writing single nanofiber [J]. *J. Xiamen Univ. (Nat. Sci.)*, 2011, 50(3):570-573. (in Chinese)
- [22] THERON S A, ZUSSMAN E, YARIN A L. Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions [J]. *Polymer*, 2004, 45(6):2017-2030.
- [23] MOON J K, SONG M W, PAK H K. Investigation of surface charge density on solid-liquid interfaces by modulating the electrical double layer [J]. *J. Phys. Condens. Mat.*, 2015, 27(19):194102.
- [24] WANG X, ZHENG G F, LUO Z W, *et al.*. Current characteristics of various ejection modes in electrohydrodynamic printing [J]. *AIP Adv.*, 2015, 5(12):127120.

作者简介:



郑高峰(1984—),男,福建泉州人,厦门大学机电工程系副教授,2006年于武汉科技大学获得学士学位;2011年于厦门大学获得工学博士学位,主要从事静电纺丝技术和有机微纳米系统制造领域的研究。E-mail: zheng_gf@xmu.edu.cn



薛文东(1982—),男,福建省南平人,厦门大学机电系助理教授,2009年、2012年于厦门大学分别获得硕士、博士学位,主要从事工业自动化、监测系统开发领域的研究。E-mail: xwd@xmu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)