

文章编号 1004-924X(2026)16-2512-11

电场聚焦电纺射流动力学调控与喷印工艺研究

陈隽毓¹, 刘益芳^{2*}, 郑高峰², 余兆杰², 李书帆¹, 姜佳昕^{3*}

- (1. 厦门理工学院 光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 厦门大学 智能制造学院(萨本栋微米纳米科学技术研究院), 福建 厦门 361102;
3. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要:电纺直写技术能够实现微纳结构一步高效成型,在微纳传感、柔性电子等领域广泛应用。但电纺直写带电射流易受电荷干扰,限制了喷印微纳结构稳定性、均匀性和定位精度的提高,是其在微精系统集成制造的主要挑战。本文引入辅助针尖构建聚焦电场提升了带电射流的抗干扰能力,探究了聚焦电场作用下的沉积喷印行为。实验结果表明,聚焦电场电纺直写有助于纳米纤维的均匀沉积,在收集板运动速度 20 mm/s 条件下可获得无螺旋状的直写微纳结构,引入辅助针尖直写微纳结构的平均直径由 4.84 μm 降低至 2.85 μm ,直径标准差由 2.03 μm 降低至 1.17 μm 。配合精密运动平台可成功喷印得到交叉网格图案,网格平均尺寸与预设尺寸误差仅 0.4%;完成了复杂徽章图案及凤凰花图案制备,沉积形态完整,纤维平滑连续。聚焦电场可显著提升带电射流喷印的可控性,对电纺直写技术的推广应用具有重要意义。

关键词:电纺直写;电场聚焦;辅助针尖;图案化喷印

中图分类号:TQ340.6;TS102.5 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263416.2512 **CSTR:**32169.14.OPE.20263416.2512

Study on jet dynamic regulation and printing process of electric-field-focused electrohydrodynamic direct-writing

CHEN Junyu¹, LIU Yifang^{2*}, ZHENG Gaofeng², YU Zhaojie², LI Shufan¹, JIANG Jiaxin^{3*}

- (1. School of Opto-electronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. School of Intelligent Manufacturing (Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology), Xiamen University, Xiamen 361102, China;
3. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

* Corresponding author, E-mail: yfliu@xmu.edu.cn (Y. F. Liu); jjx@xmut.edu.cn (J. X. Jiang)

Abstract: Electrohydrodynamic Direct-Writing (EDW) technology can efficiently fabricate micro-nano structures in one step and is widely applied in fields such as micro/nano sensing and flexible electronics. However, charged jet of EDW is susceptible to charge interference, which limits the stability, uniformity and positioning accuracy of the printed micro-nano structures. This is a major challenge of EDW in the mi-

收稿日期:2026-05-25;修订日期:2026-07-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52405632);厦门市自然科学基金项目(No. 3502Z202373025);福建省科技计划项目(No. 2025H0003, No. 2024J011214);福建省中青年教育科研项目(No. JAT251145)

cro-precision system integration manufacturing process. In this study, an auxiliary needle tip was introduced for electric field focusing. The anti-interference ability of the charged jet was enhanced. The deposition and printing behavior under the influence of the focused electric field was investigated. Experimental results indicated that electric-field-focused EDW was beneficial to uniform deposition of fibers. Under the condition of a collector velocity of 20 mm/s, non-spiral micro-nano structures could be obtained. The average diameter of the micro-nano structures printed by electric-field-focused EDW was reduced from 4.84 μm to 2.85 μm , and the diameter standard deviation was reduced from 2.03 μm to 1.17 μm . With the help of the precise motion platform, cross-grid patterns were printed successfully. The error between the average size of the grid and the preset size is only 0.4%. A complex emblem pattern and a phoenix flower pattern were fabricated. The deposition morphology was complete, and the fibers were smooth and continuous. Focused electric field could significantly enhance the controllability of printing of charged jet, which was of great significance for the popularization and application of EDW technology.

Key words: electrohydrodynamic direct-writing; electric field focusing; auxiliary needle tip; patterned printing

1 引 言

静电纺丝技术能够直接在目标基底表面完成纳米纤维喷印成型,契合当下微纳结构高效率、快节奏制备的行业发展趋势,有着巨大的应用潜力^[1]。然而在喷印期间,空中的带电射流受到不均匀的电场力和电荷排斥力等影响,会进入不规则的螺旋喷射状态。在电荷排斥力和射流螺旋运动的共同作用下,沉积在收集板上的纤维大多呈现出无序的排列状态,难以实现精确有序沉积和图案化喷印成型目标。因此,开发可靠有效的射流动力学调控方法,抑制喷射的不稳定,实现纳米纤维的有序可控沉积和图案化喷印,是亟待攻克的关键问题。

通过减小喷嘴与收集板之间的距离,近场静电纺丝^[2]能够消除射流的螺旋运动,可实现对纳米纤维沉积位置的精确控制,制备的单根纤维直径可达到纳米级,约为 50~500 nm。电纺直写技术(Electrospinning Direct Writing, EDW)作为近场静电纺丝技术的延伸升级工艺,选用空心针头作为纺丝喷嘴,可实现射流连续稳定喷射,制备直径为 50 nm~10 μm 的有序纳米纤维。电纺直写技术具有成本低、工艺简单且材料兼容性好的优势,已广泛应用于微纳传感^[3-5]、光电显示^[6-7]、生物组织工程^[8-10]、柔性电子^[11-14]及电池电极^[15-17]等领域。陈华坛等人^[18]通过电纺直写制备了 Cu/Ag 复合金属湿度传感器,能够实现湿度检测

的快速精准响应,线性度高达 0.99,吸附、脱附时间小于 3 s,且在高温、高湿环境下仍表现出较低的电阻漂移。杜贤若等人^[19]使用电纺直写技术喷印高度可控的多层纳米纤维堆叠结构,通过调控纤维的双组分体系增强纤维界面耦合稳定性,所制备的光电探测器在紫外光下响应度达 13.3 A/W,光电转换效率显著提升。然而,即便电纺直写技术应用体系日趋成熟,由于电荷排斥力和不均匀空间电场的共同影响,射流仍易发生不稳定鞭动现象,不仅阻碍微纳结构定位沉积精度的突破提升,也阻碍了电纺直写技术在精密微纳系统集成制造领域的进一步应用。

控制和消除射流的不稳定性是推动电纺直写精确图案化沉积,实现工业应用的关键。目前海内外研究人员开发了多种射流稳定控制手段,主流方式包含:电极控制法^[20, 21]和收集器约束控制法^[22-24]。Shin^[25]等人通过调控气-液界面的局部表面电荷,实现了电纺直写射流喷射过程的启停控制。Chen 等人^[26]使用交流电压加速泰勒锥悬滴界面破裂,将射流生成时间缩短至三分之一,微液滴尺寸从 195 μm 缩小至 104 μm ,喷射瞬间产生的脉冲电流从 527.2 nA 下降至 50.14 nA,提升了液滴的均匀性,实现了微滴的可控稳定制备。Sivan 等人^[27]研究了方波、正弦波和三角波三种不同波形的交流电对纳米纤维沉积效率和稳定性的影响,通过改变交流电的电压和频率控制单位长度内珠串结构和纺锤状结构的数

量,实现了纳米纤维形态可控批量制备。叶瑞芳等人^[28]通过同轴激光辅助静电纺丝进行射流检测,在功率 4 mW 激光辅助下,稳定射流平均可视化长度提升了 89.81%,细小射流平均可视化长度提升了 60.74%,提高了射流的可检测性。

一些研究通过辅助电极改变空间电场,引导射流运动,主要的辅助电极形式有平板电极、环形电极和针状电极。Karlsson 等人^[29]在喷嘴侧方加入扇形平板导向电极调控电场方向,引导射流偏移一定角度,控制纤维沉积位置。在喷嘴附近加侧向电极也可影响射流喷射方向,制备波浪和卷曲图案纤维。环形电极可以有效约束空间电场, Lee 等人^[30]通过圆柱形导体约束射流运动,制备了小于 6 mm 的方框结构。环形辅助电极内径固定,调控自由度比较有限,而针状电极在收集板移动的情况下,可更准确地对射流进行定位引导。You 等人^[31]在平面收集板下方增设一个带正电的针尖电极,移动针尖电极可重新分布电场从而控制射流轨迹。Zou 等人^[32]探讨了针尖辅助的电场增强效应,证明针尖辅助作用能够提升喷印分辨率。这些方法均可制备出有序的微纳结构,但空间电场调控理论还有待深入探究,缺乏辅助电极对空间电场的作用分析与射流动力学调控研究。

本文深入研究了电纺直写电场聚焦机理,引入辅助针尖对电纺直写空间电场进行聚焦,实现对射流的诱导沉积,通过仿真分析明确了空间聚焦电场分布特性,通过对电纺射流的动力学调控提高射流喷射的稳定性,为进一步提高射流的稳定性和纤维沉积精度提供了有效的技术手段,实现了纳米纤维的可控沉积和图案化喷印。

2 实 验

2.1 实验材料

实验采用 10wt% 的聚氧化乙烯溶液 (Poly-Ethylene Oxide, PEO, $M_w=300\ 000\text{ g/mol}$), 溶剂为体积比 3:1 的无水乙醇与水混合溶剂。使用磁力搅拌器 (MS7-H550-Pro, 大龙兴创实验仪器 (北京) 股份公司, 中国) 将混合溶液在室温条件下搅拌 24 h, 得到均匀的澄清溶液。

2.2 实验系统

电场聚焦电纺直写系统示意图如图 1 所示。

实验采用内径 0.11 mm 的空心喷嘴, 连接高压电源 (DW-P603-1ACF1, 东文高压电源 (天津) 股份有限公司, 中国) 提供喷印所需电场。使用注射泵 (Harvard Apparatus Pump 11 Elite, Harvard 公司, 美国) 将 PEO 溶液以可控速率输送至喷嘴。两个轴向互相垂直的直线电机相连组成多轴运动平台, 收集板通过支架固定在多轴运动平台上, 通过 PMAC 控制卡 (Parker ACR8020, Parker Hannifin 公司, 美国) 控制 X 轴直线电机 (Parker TR10-2, Parker Hannifin 公司, 美国)、Y 轴直线电机 (Parker TR7-1, Parker Hannifin 公司, 美国) 实现运动轨迹与运动速度可编程化。喷嘴与收集板的距离为 2 mm。喷嘴正下方引入接地的辅助针尖 (不锈钢实心探针, 直径 170 μm) 辅助针尖与收集板接触, 诱导电荷聚集在收集板与辅助针尖接触位置附近, 形成局部电荷密集区, 达到聚焦电场的效果, 提高带电射流的稳定性, 引导带电纤维在收集板上精确定位沉积, 提高喷印精度。

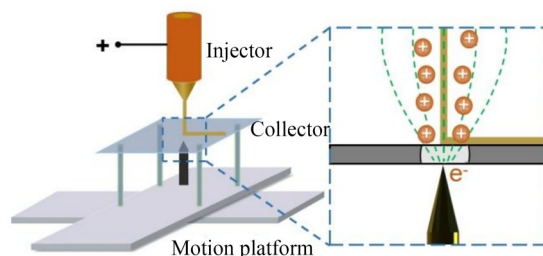


图1 电场聚焦电纺直写系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EDW system with electric field focusing

2.3 电纺直写电场聚焦机理研究

为了探究辅助针尖对电纺直写的电场聚焦效果, 采用 Ansys 仿真软件进行仿真分析。建立仿真模型, 设置喷嘴内径为 0.5 mm, 喷嘴到收集板距离为 1 mm, 收集板厚度为 0.2 mm。仿真类型为 Electric 电场仿真, 设定两种材料, 分别为空气和绝缘玻璃片 (收集板), 相对介电常数 (Relative Permittivity) 分别为 1 和 2.2。边界条件设置喷嘴边界线上加载 1 kV 电压, 辅助针尖接地, 针尖的边界线上加载 0 V 电压。研究有无辅助针尖两种情况下的电纺直写喷嘴周围的电场分布, 仿真结果如图 2 所示。如图 2(a) 所示, 为无辅助针

尖情况下的电纺直写空间电场分布,电场强度在收集板的两侧最高,而喷嘴下方的电场强度较小。如图 2(b)所示,在收集板下方加上辅助针尖后,收集板两侧的电场强度较小,在喷嘴和针尖之间形成了方向向下较强的聚焦电场,且在辅助针尖与收集板接触位置电场强度最大,达到 5 787.7 V/mm,有助于带电射流向辅助针尖处移动,从而实现射流的精确定位沉积。

辅助针尖的类型会影响电纺直写的空间电场分布,对平头针、圆头针、尖头针三种不同的辅助针尖类型进行仿真,仿真结果如图 3 所示。平头针的针头两侧边缘位置电场强度最大,针头中间位置的电场强度较小。圆头针中心与收集板接触位置电场强度最大,而两侧的电场强度逐渐缓慢变小。尖头针顶点电场强度最大,但两侧的电场强度迅速变小,电场聚焦作用显著。

如图 4 所示为不同类型辅助针尖下收集板处的横向电场强度变化曲线,辅助针尖中心位置为收集板横向位置 0 mm 处。平头针的电场强度峰值位置出现在收集板横向位置 0.43 mm 处,即针头两侧边缘位置,达到 1 175.1 V/mm,针头心位置处电场强度较小,为 751.19 V/mm。圆头针电场强度峰值位置在收集板横向位置 0 mm 处,即圆头针中心位置,达到 1 355.3 V/mm,电场强度向两侧逐渐变小。尖头针电场强度峰值位置在收集板横向位置 0 mm 处,即尖头针针尖与收集板接触位置,达到 3 913.1 V/mm,电场强度向两

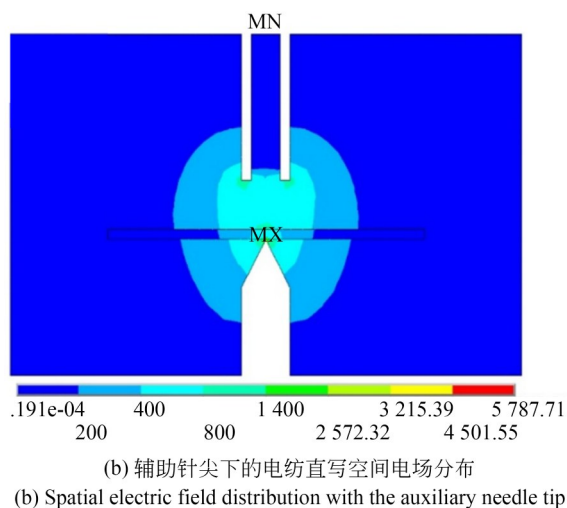
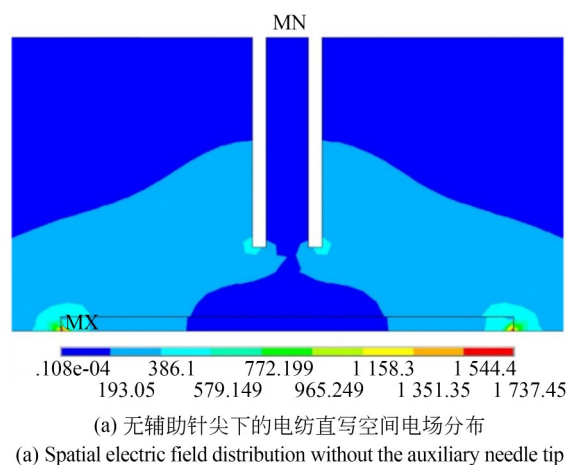


图 2 电纺直写空间电场分布
Fig. 2 Spatial electric field distribution of EDW

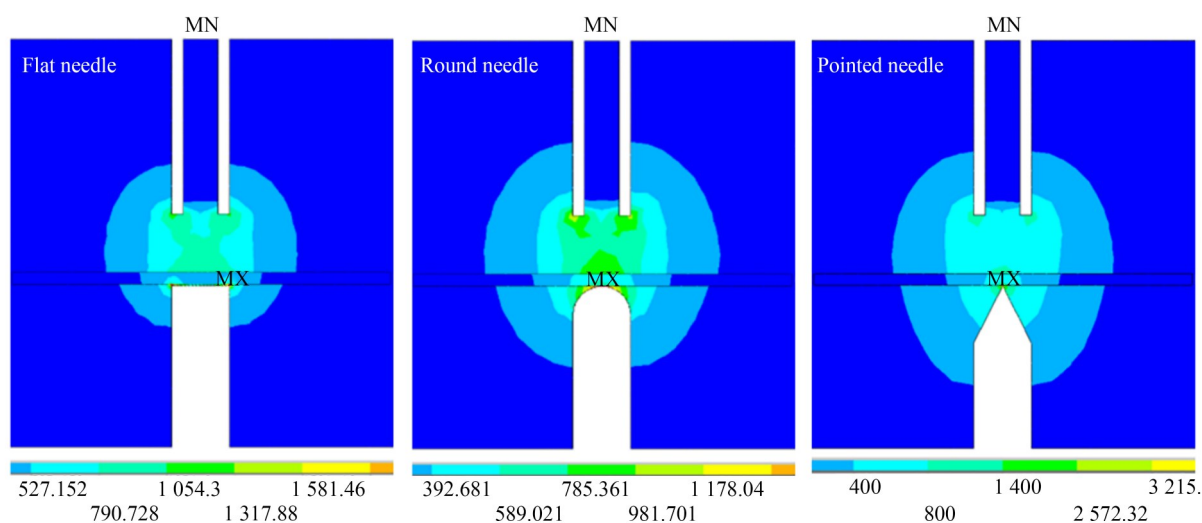


图 3 不同针尖类型的电场聚焦电纺直写空间电场分布

Fig. 3 Spatial electric field distribution in electric-field-focused EDW with different auxiliary needle tip types

侧急速下降,形成良好的电场聚焦作用。综合对比各项参数,实验选取尖头针进行电场聚焦,可以达到更好的效果,能够最大化提升纤维定位沉积精度。

辅助针尖的角度也会影响空间电场的分布

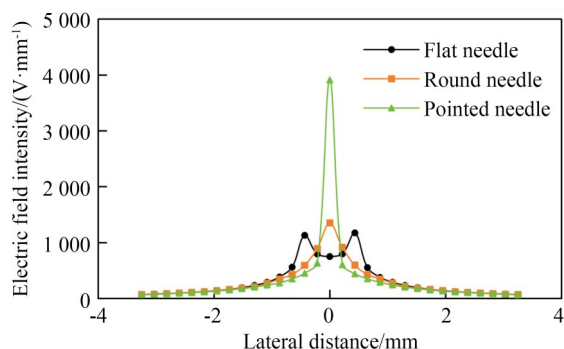


图4 不同针尖类型的聚焦电场横向位置电场强度

Fig. 4 Electric field intensity at the lateral position of the focused electric field at different auxiliary needle tip types

特性,对 $20^\circ \sim 120^\circ$ 的辅助针尖角度进行了电场分布仿真研究,电场分布云图如图 5 所示,当辅助针尖角度增大到 180° 时,即为平头针。由电场分布云图可知,辅助针尖角度从 20° 增大至 120° 的过程中,电场分布云图逐渐接近平头针的分布情况。辅助针尖的角度越小,电纺直写的电场分布越集中,电场聚焦约束效果越优异。

结合量化数据分析针尖角度与电场强度的关联规律,如图 6(a)所示,电场强度峰值随着针尖角度增大持续下降。当辅助针尖角度为 20° 时,电场强度峰值最大,达到 $4\,639.6\text{ V/mm}$;当辅助针尖角度为 120° 时,电场强度峰值减小至 $2\,321.6\text{ V/mm}$ 。对收集板的横向位置电场强度变化趋势进行进一步分析,仿真结果如图 6(b)所示。电场强度最大的位置均为收集板横向位置 0 mm 处,即辅助针尖与收集板接触位置,在横向距离 $-0.05 \sim 0.05\text{ mm}$ 范围内电场强度急剧减小。辅助针尖角度为 20° 时,电场变化的斜率最大,电场聚焦效果最好。随着辅助针尖角度增

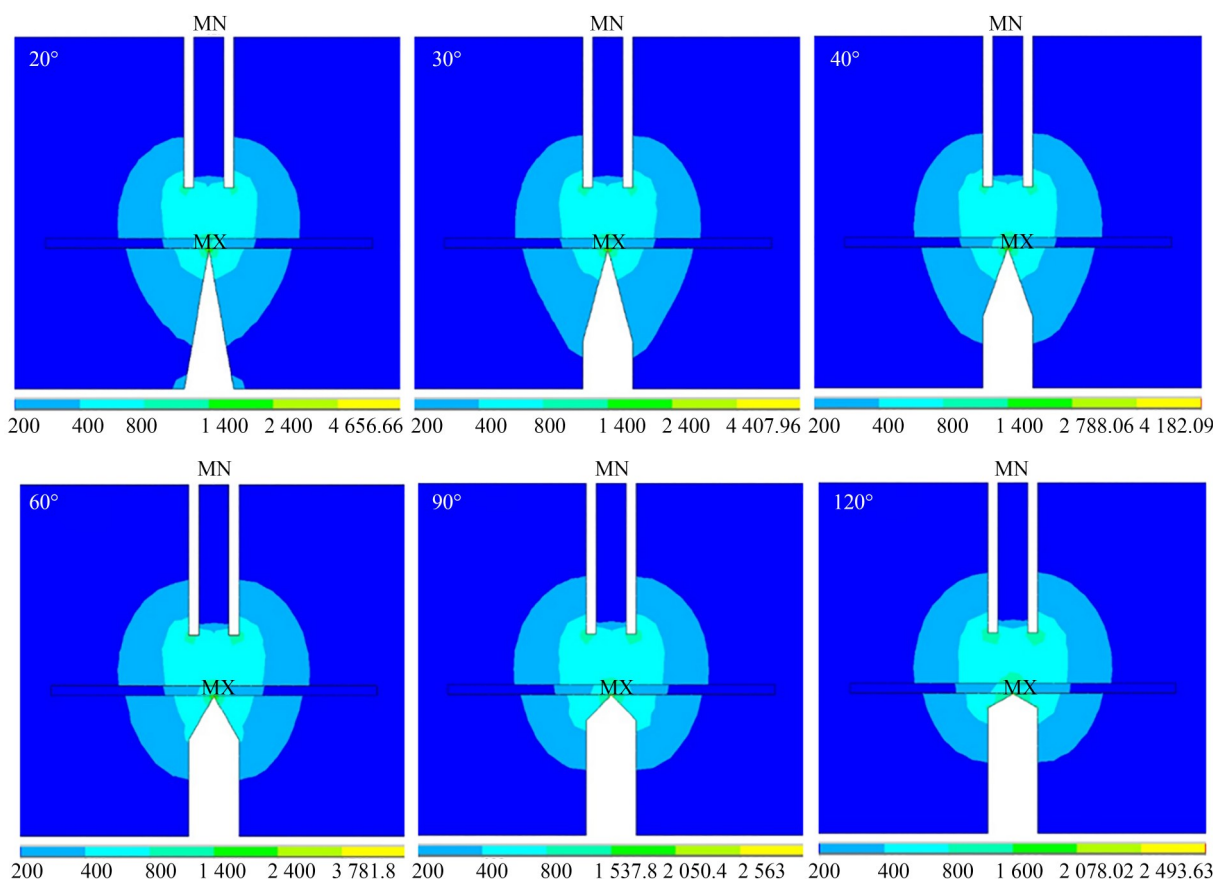
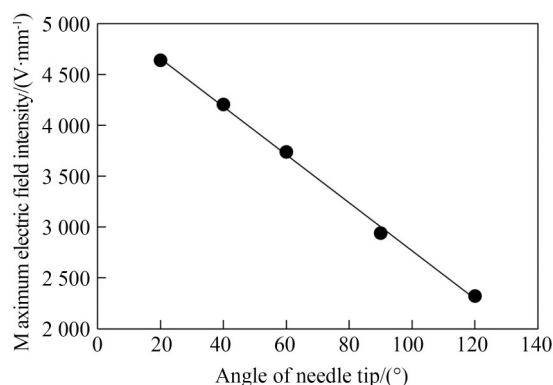
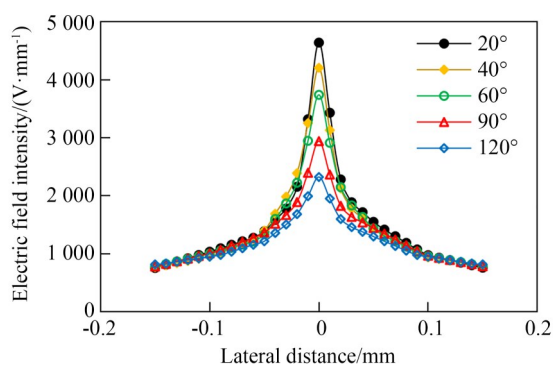


图5 不同针尖角度下的电场聚焦电纺直写空间电场分布

Fig. 5 Spatial electric field distribution in electric-field-focused EDW with different auxiliary needle tip angles



(a) 聚焦电场强度最大值与针尖角度的关系曲线
(a) Maximum electric field intensity at different auxiliary needle tip angles



(b) 不同针尖角度的聚焦电场横向位置电场强度
(b) Electric field intensity at the lateral position of the focused electric field at different auxiliary needle tip angles

图6 不同针尖角度下电场聚焦电纺直写的空间电场强度
Fig. 6 Spatial electric field intensity in electric-field-focused EDW with different auxiliary needle tip angles

大,电场强度最大值减小,且电场变化的斜率逐渐变缓。当辅助针尖角度为 120° 时,电场强度向两侧变化的斜率最小,电场聚焦效果较弱。

带电射流的运动、沉积是一个多物理场耦合作用过程,流体在高压电场作用下,受到静电力、电荷排斥力、黏弹性应力、溶液表面张力等的共同作用,发生振荡、拉伸、细化、断裂等流变过程。在电纺直写过程中,带电射流的受力分析如图7所示,其中, F_E 为电场力, F_g 为重力, F_s 为表面张力, F_v 为射流黏弹性应力, F_c 为电荷间的库仑排斥力。基于Ansys仿真结果分析可得,在电纺直写中引入辅助针尖电极后,在喷嘴和针尖之间会形成方向从喷嘴指向针尖竖直向下、电场强度较强的空间聚焦电场,该聚焦电场能够使电场力

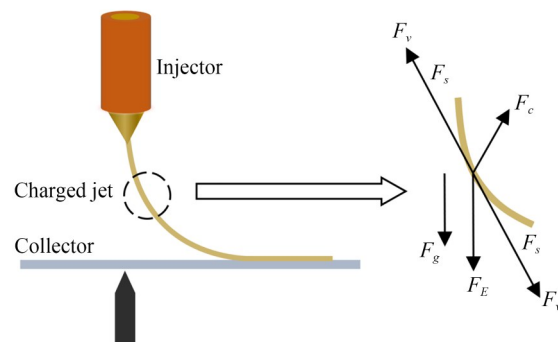


图7 电场聚焦电纺直写带电射流受力分析

Fig. 7 Force analysis of the charged jet in electric-field-focused EDW

F_E 显著增大,向下牵引带电射流,约束带电射流的横向运动,促进带电射流向辅助针尖处移动,加速射流到达收集板的过程,从而实现射流的精确定位沉积,有助于获得有序均匀的纳米纤维。

3 结果与讨论

3.1 电场聚焦电纺直写纤维

电纺直写过程中由于喷嘴与收集板之间的距离较小,前期沉积在收集板表面的纤维会留存大量残余电荷,残留电荷会持续干扰后续喷射的带电射流运动轨迹。实验研究了不同收集板运动速度对纤维沉积形貌的影响规律,纤维沉积形貌如图8所示。当收集板运动速度为 2 mm/s 时,表面残留电荷无法及时释放消散,对带电射流产生电场牵引力,最终沉积的纤维呈螺旋卷曲状。随着收集板速度的不断提升,射流拉伸作用持续增强,沉积的纤维形貌逐渐均匀。在无辅助针尖的情况下,当收集板运动速度达到 20 mm/s 时,纤维形貌基本均匀;而在辅助针尖进行电场聚焦的情况下,纤维形貌的波动在收集板运动速度达到 10 mm/s 时就基本消失,形成较为均匀的直线。这表明聚焦电场有助于加快收集板上的电荷导出,在收集板运动速度较低时就可获得均匀的纤维,有利于微纳结构的稳定沉积。

在施加电压为 1 kV ,供液速度为 $10\text{ }\mu\text{L/h}$ 的实验条件下研究不同收集板运动速度下的纤维尺寸参数,如图9(a)所示,实验次数均为5次,根据5个样品中超过50个数据点计算出纳米纤维的平均直径,图中误差条表示五次独立重复实验

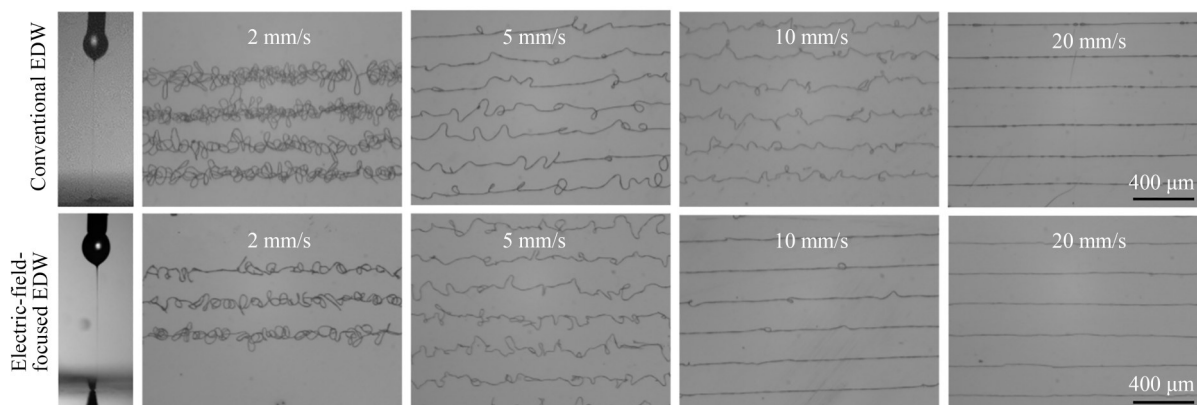


图 8 有无电场聚焦情况下电纺直写在不同收集板运动速度下沉积的纤维

Fig. 8 Fibers deposited by EDW with electric field focusing or not under different collector velocity

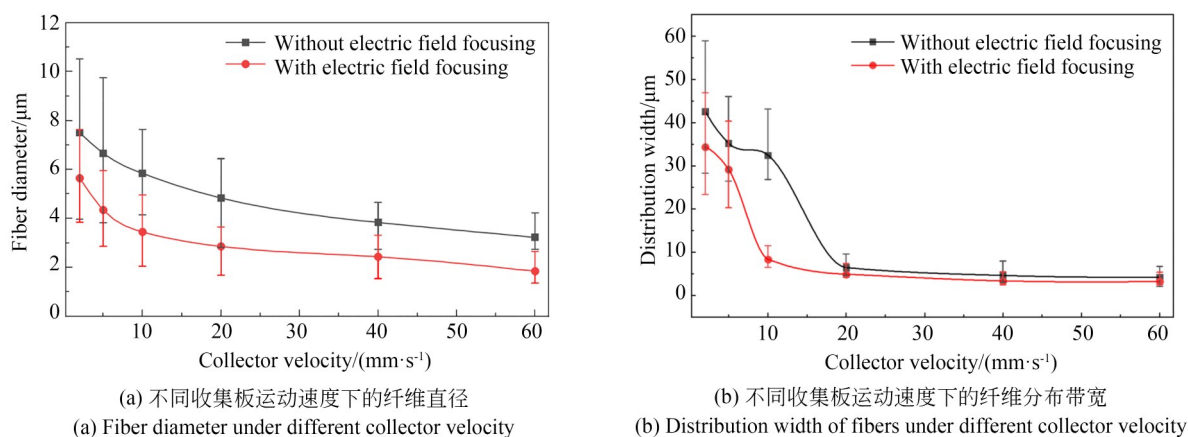


图 9 有无电场聚焦情况下纤维形貌特征与收集板运动速度的关系

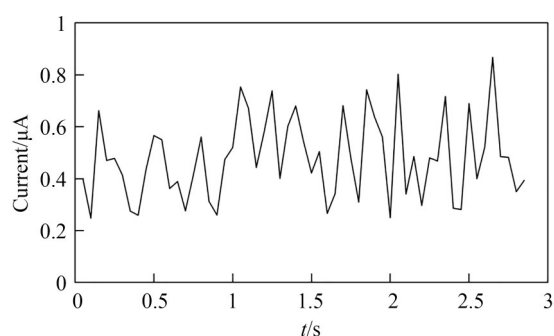
Fig. 9 Relationships between the morphological characteristics of fibers and the collector velocity with electric field focusing or not

的标准差(SD)。纤维平均直径随收集板运动速度升高呈现递减趋势。当收集板运动速度为 20 mm/s 时可获得无螺旋卷曲状的直线纤维,引入辅助针尖直写的纤维平均直径由 4.84 μm 降低至 2.85 μm ,直径标准差由 2.03 μm 降低至 1.17 μm 。在相同的收集板运动速度下,电场聚焦电纺直写的纤维平均直径小于普通电纺直写,且纤维直径的波动较小,成型一致性更佳。

当收集板运动速度较慢时,纤维在收集板上呈螺旋卷曲状,单根纤维沉积的范围为纤维的分布带宽,可直观反映射流横向偏移程度,收集板运动速度的变化能影响纤维分布带宽的大小,聚焦电场的引入能显著降低纤维分布带宽。如图 9 (b)所示,随着收集板运动速度的增加,纤维的分

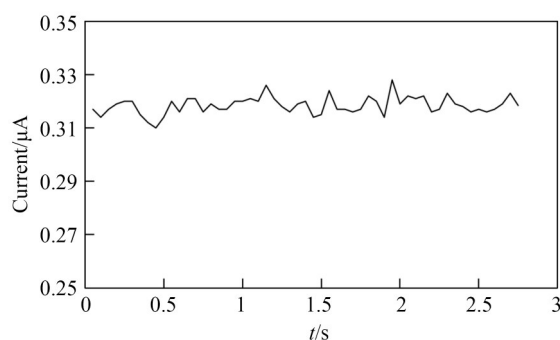
布带宽呈下降趋势。当收集板运动速度小于 10 mm/s 时,纤维受射流鞭动的影响较大,沉积在收集板上的纤维呈螺旋状,纤维带宽较大。收集板运动速度增大后,射流充分拉伸延展,沉积的纤维也被拉伸成直线,带宽显著减小。在收集板运动速度达到 10 mm/s 时,普通电纺直写的纤维平均分布带宽为 23.41 μm ,而电场聚焦电纺直写的纤维平均分布带宽就已经显著减小,为 8.61 μm 。普通电纺直写在收集板运动速度达到 20 mm/s 后,纤维才被拉伸成均匀直线,纤维平均分布带宽显著减小,为 7.71 μm ,而电场聚焦电纺直写的纤维分布带宽为 5.13 μm 。因此,辅助针尖能够在电纺直写过程中进行电场聚焦,有助于实现纤维的精确沉积。

在电纺直写过程中,喷嘴与收集板之间存在空间高压电场,当带电射流到达收集板时,将构成完整回路,产生电纺直写电流。电纺直写电流是纤维的沉积形貌一个重要表征因素,电流波动情况与收集板上纤维沉积的均匀性有关。研究了电场聚焦对电纺直写电流波动的影响,如图 10(a)所示,无电场聚焦情况下的电纺直写电流平均值为 $0.60 \mu\text{A}$,电流波动幅度较大,为平均电流的 $\pm 53\%$ 。如图 10(b)所示,引入辅助针尖进行电场聚焦后,电流平均值为 $0.14 \mu\text{A}$,电流波动显著降低,为平均电流的 $\pm 2.5\%$ 。这表明辅助针尖有效增强了射流稳定性,电纺直写电流波动减小,有助于纤维的形貌稳定和连续沉积。



(a) 普通电纺直写电流变化情况

(a) Current variation in EDW without electric field focusing



(b) 电场聚焦电纺直写电流变化情况

(b) Current variation in EDW with electric field focusing

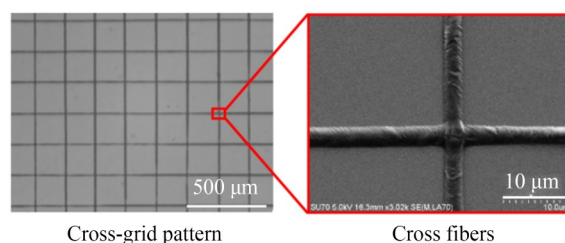
图 10 有无电场聚焦情况下电纺直写电流变化情况

Fig. 10 Current variation in EDW with electric field focusing or not

3.2 电场聚焦电纺直写图案化喷印

聚焦电场有助于抑制带电射流的不稳定运动,可实现微纳结构的精确制备。通过控制软件

灵活调整多轴平台运行轨迹,可控制收集板按照预设路径移动,从而根据预设图案直接在收集板上喷印各类定制化纤维图案。交叉网格结构广泛应用于生物组织支架、高灵敏度传感元件等器件制造领域,具备极高实用价值。借助聚焦电场,可提高电纺直写纳米纤维的沉积精度,从而实现精确的网格图案喷印。如图 11所示,施加电压为 1 kV ,供液速度为 $10 \mu\text{L/h}$,设置平台运动速度为 20 mm/s 进行网格图案喷印,可获得均匀的直线纤维,横向与纵向的纤维相互交叉并组合在一起。进行 5 次网格图案喷印实验,网格图案的预设尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,对 5 个独立样本的网格尺寸进行测量取样,网格的横向、纵向分别取不少于 50 个数据点,统计分析得到 5 次独立重复实验的平均值(Mean)和标准差(SD),网格的横向尺寸为 $200.58 \mu\text{m} \pm 10.42 \mu\text{m}$,纵向平均尺寸为 $200.74 \mu\text{m} \pm 12.26 \mu\text{m}$,网格平均尺寸与预设尺寸误差仅 0.4% 。纤维横竖交叉区域堆叠贴合紧密,交叉位置纤维形态完好无变形破损,结构成型精度表现优异。通过空间电场聚焦,增大了带电射流受到的电场力,带电射流受到的竖直向下的分力显著增大,因此对带电射流起到向下牵引作用,使其向下运动的加速度增大,缩短了带电射流在空中的喷射时间,诱导纤维更快在收集板上准确沉积,减小了纤维的横向位移,提高了纳米纤维沉积的均匀性和稳定性,实现了高精度的网格图案纤维喷印。



Cross-grid pattern

Cross fibers

图 11 电场聚焦电纺直写交叉网格图案

Fig. 11 Cross-grid pattern in EDW with electric field focusing

通过电场聚焦电纺直写成功完成多款造型复杂的纳米纤维图案喷印。如图 12所示,所设计的徽章图案总直径为 16 mm 。为了实现整个徽章图案的直接成型,在图案设计中设置了辅助连接线,并在拐角处增加圆角,避免由于收集板运

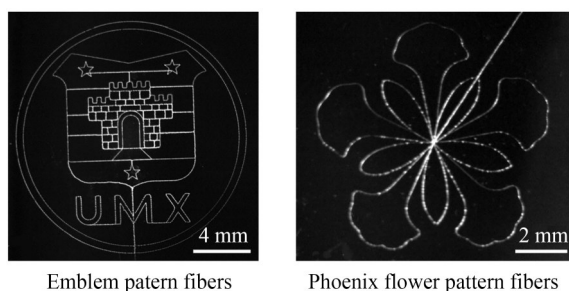


图 12 电场聚焦电纺直写图案化纤维沉积形貌

Fig. 12 Patterned fiber deposition morphology in EDW with electric field focusing

动速度变化过快引发的纤维断裂、图案偏移问题。同时完成了凤凰花艺术图案纤维制备,图案中花瓣、花芯均由平滑弧线构成,喷印过程中收集板运动速度保持恒定,最终获得的纤维图案边界清晰完整,线条连贯顺滑,充分体现电纺直写技术在复杂异形图案加工上的突出优势。

4 结 论

本文在电纺直写过程中引入辅助针尖,通过电场聚焦,对电纺射流进行动力学调控,有效提

升了带电射流的稳定性,进行纳米纤维的诱导沉积,从而实现了精确图案化喷印。构建了电场聚焦电纺直写实验系统,探究了电纺直写电场聚焦作用机理,利用 Ansys 静电场仿真软件,分析了辅助针尖类型、角度对聚焦电场空间电场分布的影响;通过实验验证了不同工艺参数对射流行为的作用规律。通过电场聚焦电纺直写技术,实现了多种图案的精确喷印。本文为提升电纺直写射流稳定性提供了有效方法,有助于推动电纺直写在精密微系统领域的工业化应用。

作者贡献声明:

陈隽毓:实验方法提出,论文构思和撰写,获取资助;

刘益芳:实验数据分析,获取资助,论文审核;

郑高峰:设计研究方法,论文指导,获取资助;

余兆杰:实验设计及数据整理和分析;

李书帆:实验数据分析,获取资助;

姜佳昕:项目管理,论文审核与编辑写作,获取资助。

参考文献:

- [1] LI X H, LI J Z, LI K, *et al.* From fiber to power: recent advances toward electrospun-based nanogenerators [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(13): 2418066.
- [2] SUN D H, CHANG C, LI S, *et al.* Near-field electrospinning [J]. *Nano Letters*, 2006, 6 (4): 839-842.
- [3] PAN T Y, YU Z H, XUE H, *et al.* Paper-based humidity sensor for wearable based on near-field electrohydrodynamic direct writing [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 412: 135826.
- [4] GAO J, YU Z H, XUE H, *et al.* Highly conductive and sensitive alginate hydrogel strain sensors fabricated using near-field electrohydrodynamic direct-writing process [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 282: 136802.
- [5] 王凌云, 马思远, 吴德志. 电纺压电聚偏二氟乙烯有序纳米纤维及其在压力传感器中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2016, 34(10): 2498-2504.
- [6] BAI W H, XUAN T T, ZHAO H Y, *et al.* Microscale perovskite quantum dot light-emitting diodes (micro-PeLEDs) for full-color displays [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10 (12): 2200087.
- [7] MOHTARAM F, PETERSEN M, AHRENST-MORTENSEN M, *et al.* Near-field direct write electrospinning of PET-carbon quantum dot solutions [J]. *Materials*, 2024, 17(24): 6242.
- [8] BAI L, KASIMU A, WANG S, *et al.* Electrohydrodynamic-printed dual-triphase microfibrillar scaffolds reshaping the lipidomic profile for entheses healing in a rat rotator cuff repair model [J]. *Small*, 2025, 21(2): 2406069.
- [9] LI J X, UNIVERSITY X J, *et al.* One-step laser-assisted electrohydrodynamic printing of microelectronic scaffolds for electrophysiological monitoring

- of aligned cardiomyocytes[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(16): 15775-15788.
- [10] ZIELIŃSKI P S, GUDETI P K R, RIKMANSPOEL T, *et al.* 3D printing of bio-instructive materials: Toward directing the cell[J]. *Bioactive Materials*, 2023, 19: 292-327.
- [11] 康国毅, 钟易晟, 姜佳昕, 等. 柔性湿度传感器低温直写制备[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(22): 3279-3288.
- KANG G Y, ZHONG Y S, JIANG J X, *et al.* Low-temperature direct writing fabrication of flexible humidity sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(22): 3279-3288. (in Chinese)
- [12] WAN Y, ZHANG L B, WU T, *et al.* High-performance and frost-resistance MXene co-ionic liquid conductive hydrogel printed by electrohydrodynamic for flexible strain sensor[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 669: 688-698.
- [13] GUO W J, KUMAR DALAPATI G, HU J Y, *et al.* Facile and eco-friendly room-temperature electrical-enhanced technology for conductive circuits electrohydrodynamic-printed directly on textiles with small usage of conductive fillers[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2024, 184: 108268.
- [14] WU Y G, WANG Z B, XU J B, *et al.* Direct writing of liquid metal onto an electrospun graphene oxide composite polymer nanofiber membrane for robust and stretchable electrodes[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(9): 2201935.
- [15] 韩帅, 孙钦军, 吕红燕, 等. 电纺 SnO₂:PVP 复合纳米线/带制备及其在钙钛矿太阳能电池中的应用[J]. *微纳电子技术*, 2023, 60(11): 1736-1745.
- HAN S, SUN Q J, LÜ H Y, *et al.* Preparation of electrospun SnO₂:PVP composite nanowires/nanobelts and their application in perovskite solar cells[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2023, 60(11): 1736-1745. (in Chinese)
- [16] ZUO Y X, YU Y, FENG J Y, *et al.* Electrohydrodynamic printing grid-structured catalytic layers with excellent bending resistance for flexible Al-air batteries[J]. *Small Methods*, 2025, 9(3): 2400875.
- [17] LEE S M, MOON Y K, LIM K, *et al.* One-dimensional In₂O₃ nanofibers patterned onto functionalized catalytic electrodes: a novel approach for selective xylene detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 382: 133494.
- [18] 陈华坛, 余中一, 杜贤若, 等. 复合金属纤维基高响应柔性湿度传感器制备[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(24): 3889-3900.
- CHEN H T, YU Z Y, DU X R, *et al.* Fabrication of composite metal fiber-based high-response flexible humidity sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(24): 3889-3900. (in Chinese)
- [19] 杜贤若, 王俊翔, 陈瑞欣, 等. 电纺直写压电光电子型柔性光电探测器及其传感特性[J]. *光学精密工程*, 2026, 34(1): 72-85.
- DU X R, WANG J X, CHEN R X, *et al.* Electrohydrodynamic direct-writing of piezophototronic flexible photodetectors and sensing characteristics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2026, 34(1): 72-85. (in Chinese)
- [20] LIU Y F, CHEN Y M, YAN H P, *et al.* High-stability electrohydrodynamic inkjet printing based on double closed-loop fuzzy control[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 25794.
- [21] BAI D Q, HUANG J, GONG H X, *et al.* Application of pulse width modulation control in EHD waveform to optimize printing performance[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2025, 11: 117.
- [22] PAN Y Q, ZENG L C. Simulation and validation of droplet generation process for revealing three design constraints in electrohydrodynamic jet printing[J]. *Micromachines*, 2019, 10(2): 94.
- [23] HOSSEINIAN H, JIMENEZ-MORENO M, SHER M, *et al.* An origami-based technique for simple, effective and inexpensive fabrication of highly aligned far-field electrospun fibers[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 7083.
- [24] XIE Y, FANG Q, ZHAO H, *et al.* Effects of six processing parameters on the size of PCL fibers prepared by melt electrospinning writing[J]. *Micromachines*, 2023, 14(7): 1437.
- [25] SHIN D, KIM J, CHANG J. Controlled initiation and termination of jetting in near-field electrospinning through voltage-driven surface charge manipulation[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 90: 226-232.
- [26] CHEN H T, CHEN J Y, JIANG J X, *et al.* Fast on-off controlling of electrohydrodynamic printing based on AC oscillation induced voltage[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 3790.

- [27] SIVAN M, MADHESWARAN D, VALTERA J, *et al.* Alternating current electrospinning: The impacts of various high-voltage signal shapes and frequencies on the spinnability and productivity of polycaprolactone nanofibers [J]. *Materials & Design*, 2022, 213: 110308.
- [28] 叶瑞芳, 施哲钰, 孙正涛, 等. 同轴激光辅助电纺射流检测[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(1): 24-32.
YE R F, SHI Z Y, SUN Z T, *et al.* Electrospinning jet detection by coaxial laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(1): 24-32. (in Chinese)
- [29] KARLSSON A, BERGMAN H, JOHANSSON S. Active real-time electric field control of the e-jet in near-field electrospinning using an auxiliary electrode[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021, 31(3): 035001.
- [30] LEE B, SONG Y, PARK C, *et al.* Focused patterning of electrospun nanofibers using a dielectric guide structure[J]. *Polymers*, 2021, 13(9): 1505.
- [31] YOU X Y, YE C C, GUO P. Electric field manipulation for deposition control in near-field electrospinning [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 30: 431-438.
- [32] ZOU W H, YU H B, ZHOU P L, *et al.* Tip-assisted electrohydrodynamic jet printing for high-resolution microdroplet deposition [J]. *Materials & Design*, 2019, 166: 107609.

作者简介:



陈隽毓(1998—),女,福建泉州人,硕士,助理实验师,2020年、2023年于厦门大学分别获得学士、硕士学位。主要从事微纳系统集成、微纳智能控制等方面的研究。E-mail: chenjunyu@xmut.edu.cn

通讯作者:



姜佳昕(1992—),女,河北秦皇岛人,博士,副教授,2014年、2017年、2022年于厦门大学分别获得学士、硕士、博士学位。主要从事微纳系统集成、功能薄膜及装备开发等方面的研究。E-mail: jjx@xmut.edu.cn

通讯作者:



刘益芳(1976—),女,福建莆田人,博士,副教授,1999年、2002年于东南大学获得学士、硕士学位,2010年于厦门大学获得博士学位。主要从事MEMS传感器、微弱信号检测以及静电纺丝的研究。Email: yfliu@xmu.edu.cn