http://pmse.scu.edu.cn

辅助电极静电纺丝及工艺参数的影响

吴宇珂[1,2], 刘 晨[1], 张 斌[1,3], 汪志成[1]

(1. 东华理工大学 机械与电子工程学院,江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心,江西 南昌 330013; 3. 东华理工大学 核技术应用教育部工程研究中心,江西 南昌 330013)

摘要:为解决传统静电纺丝一般只产生单股射流、纳米纤维直径大的问题,设计了一种辅助电极静电纺丝装置。采用 Comsol 软件对辅助电极平行于喷丝头和垂直于喷丝头 2 种分布方式进行仿真,观察了辅助电极在不同空间位置下的电场分布,研究了泰勒锥的电场强度;基于电压、注射速度以及针头和辅助电极距离的调控,分析了辅助电极在不同空间位置对纳米纤维形貌、射流数量及产量的影响。结果表明,辅助电极在平行位置时收集到了直径分布在 220~277 nm 的纳米纤维,略小于同等条件下辅助电极在垂直位置时制备的纳米纤维直径(249~338 nm);而且随着电压的增加、喷丝头和辅助电极之间距离的减小,2 种分布配置条件下获得的纳米纤维直径均呈减小的趋势。研究为实现可控制备多射流和高质量纳米纤维提供了依据。

关键词:纳米纤维;静电纺丝;电场分布;多射流

中图分类号:TQ340.64 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7555(2025)10-0076-11

纤维是纺织产品最基本的单元,人类早期主要通过动物和植物获取棉、麻、丝、毛等天然纤维。随着科技的进步,化学纤维被制造出来,不仅满足了人们的穿衣需求,还广泛应用于能源[1~3]、复合材料和军事等领域[4~6]。在纺织纤维里,纤维超细化一直是重要课题之一[7]。

纳米纤维是纤维超细化的重要研究方向之一[8~10]。目前,有多种制备纳米纤维的方法,如模板法[11]、熔体纺丝法[12]和自组装法[13]等。这些技术在装置操控性、纺丝成本、产量和纤维形貌可控性等方面都有一定的局限性[14]。静电纺丝技术是一种可以直接制备连续纳米纤维的技术[15, 16],通过控制纺丝液性质、纺丝参数和环境参数可以得到理想的纤维形貌,静电纺纳米纤维在催化[17, 18]、传感器、过滤和生物医药等领域有广阔的应用前景。静电纺丝技术是目前制备连续纳米纤维最简单和最有效的技术,也是近年来纳米纤维制备与应用领域中研究最多、应用最广的技术之一,与熔融纺丝、湿法纺丝等传统的加工方法不同,这一技术的关键是在高压静电场中产生溶液或射流流动。一般情况下,喷丝头顶端形成的带电液滴(泰勒锥)在静电纺丝过程中生成单股射流,射流在飞行过程中受电场作用拉伸细化,同时伴随溶剂挥发,固化成直径从几十纳米到数百纳米不等的纳米纤维。但是,传统单喷头静电纺一般只产生单股射流,纳米纤维的产量约为 0.01 ~ 0.05 g/h,难以批量化,极大地制约了其发展。

为了解决传统静电纺丝工艺中射流单一的问题,国内外学术界和企业界都在不断探索提高纳米

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0193
收稿日期: 2024-11-13
基金项目: 江西省新能源工艺及装备中心开放基金(JXNE2020-07); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200740); 东华理工大学博士基金(DHBK2019169); 核技术应用教育部工程研究中心项目(HJSJYB2021-3)
通讯联系人: 汪志成, 主要从事新能源储能理论及装备研究, E-mail: wangzhicheng@ecit.edu.cn;
张斌, 主要从事新能源及核技术应用研究, E-mail: zhangbin@ecit.edu.cn

纤维产量的新方法,以无针式静电纺丝技术和多喷头静电纺丝技术作为主要代表。周海迎等对闭式线型喷头静电纺丝的可纺性进行了研究,刘雍等提出了气泡静电纺丝技术,他们利用气泡破裂时形成多股射流来提高纺丝产量。由于无针式静电纺采用的是自由液面纺丝,溶剂挥发速度快,导致纤维直径离散大;另一方面,无针式静电纺通常需要 30~120 kV 的电压,传统静电纺只需要 5~20 kV,无针式静电纺的能耗更大,并且纺丝装置复杂。多喷头静电纺丝技术通过增加喷丝头数量形成多射流,从而提高纺丝产量。近年来,国内外陆续出现了一些商业化的多喷头静电纺丝生产设备,比如江西先材纳米纤维科技有限公司的静电纺丝设备、韩国 Cluster 公司的静电喷射成型设备和西班牙 Yflow 公司的模块化多喷头静电纺丝设备等。但是多喷头静电纺射流之间存在库仑斥力,射流在运动过程中不稳定。在两端的射流往外侧倾斜,而且越靠外的射流倾斜的角度越大。当喷丝头增加到一定数量时,其中一些喷丝头无法纺丝或以液滴形式落下,纳米纤维膜出现“溶滴”现象,容易造成纳米纤维膜结构不匀或穿孔等问题。另外,以往研究在静电纺丝过程中使用辅助电极的做法并不少见,Deitzel 等[19]利用圆环或圆筒辅助电极控制射流沉降,获得了纤维分布更集中的纳米纤维毡;Zeng 等[20]在纺丝喷头处引入辅助板,发现电场分布更加均匀,从而获得直径更细且均匀性更好的纳米纤维;Carnell 等[21]利用辅助电极控制射流运动方向制备了高取向纳米纤维;Wu 等[22]则利用辅助电极对纳米纤维毡的宽度进行了控制。可以看出,已有研究关注于辅助电极控制单射流的运动和排列成纱问题,而利用辅助电极调控静电纺多射流形成的方法尚未见报道。

本文提出了一种辅助电极静电纺丝实验装置,用于高效制备纳米纤维。该装置结合了传统针式静电纺丝和无针静电纺丝技术的优势,通过在针式静电纺丝的泰勒锥中引入多股射流(类似于无针式静电纺丝),实现了纤维制备效率的显著提升。该方法不需要高电压也不依赖溶剂条件,并具有良好的普适性。一方面可以克服非针式静电纺丝的自由液面容易导致纺丝液性质发生变化的不足,同时每个喷丝头均能喷射多股射流,也可改善静电干扰造成纤维膜结构不匀等问题,从而提高纳米纤维制备效率,并改善纤维膜结构均匀性。此外,研究还进一步探讨了电压、注射速度以及针头与辅助电极距离(针辅距)等参数对纳米纤维直径、形貌和射流数量的影响。实验发现,这些参数的优化能够有效调控纤维的均匀性和直径分布。综上所述,本文通过创新的装置设计和参数优化,为提高纳米纤维的制备效率和质量提供了新的思路,同时也为静电纺丝技术的工业化应用奠定了基础。

1　实验部分

1.1　主要原料

聚乙烯醇(PVA):相对分子质量 $M_w = 8.4\times10^4 \sim 8.9\times10^4$,中国台湾长春石油化学股份有限公司;蒸馏水:实验室自制。

1.2　纺丝溶液制备

将一定质量的 PVA 聚合物与蒸馏水混合,放入 80 ℃恒温水浴锅中,使用电动搅拌器搅拌 5 h 至完全溶解,配置出质量分数 6% 的 PVA-水溶液,待用。

1.3　辅助电极静电纺丝装置

本文采用自制的辅助电极静电纺丝装置,辅助电极平行于喷丝头和垂直于喷丝头 2 种位置,如 Fig.1 所示。

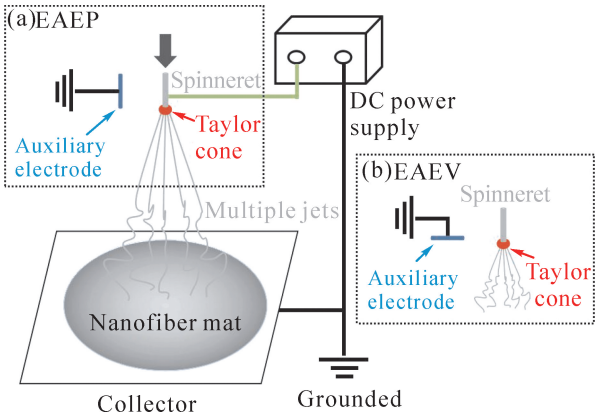


Fig. 1　Schematic of multi-jet electrospinning process using an auxiliary electrode (AE): (a) electrospinning with AE at parallel position (EAEP); (b) electrospinning with AE at vertical position (EAEV)

1.4 形貌表征

采用离子溅射仪(EI045,日本 Hitachi 公司)对制备的纳米纤维膜表面喷金。采用场发射扫描电子显微镜(S4800,日本 Hitachi 公司)表征纳米纤维形貌。纳米纤维直径用 Nano Measure 1.2 软件来统计,至少用 100 根纳米纤维作为统计样本,取纳米纤维直径的平均值。射流图像由富士相机 FinePix HS11(分辨率 3648×2056,每秒 1~4000 帧)拍摄。

2 结果与讨论

2.1 不同空间位置下辅助电极静电纺丝过程及数值模拟

如 Fig.2 所示,辅助电极平行于喷丝头(EAEP)时,PVA-水溶液在电压低于 4.34 kV 时不产生射流,施加电压超过 4.34 kV 后,出现 1 股射流,如 Fig.2(a_1)所示,4.34 kV 是该装置产生射流的临界电压。辅助电极垂直于喷丝头(EAEV)时,产生射流的临界电压为 4.68 kV,如 Fig.3(a_1)所示,其临界电压高于辅助电极平行于喷丝头的临界电压。随着电压增加,辅助电极平行于喷丝头时,在 4.85 kV,5.58 kV 和 6.5 kV 时出现了 2 股、3 股和 5 股射流 (Fig.2(a_2~a_4));辅助电极垂直于喷丝头时,在 5.2 kV,6.12 kV 和 6.84 kV 时出现了 2 股、3 股和 5 股射流 (Fig.3(a_2~a_4))。生产相同数量的射流时,辅助电极平行于喷丝头所需要的电压小于辅助电极垂直于喷丝头的电压。造成这一现象的原因可能是由于辅助电极在平行位置和垂直位置时纺丝区域周围电场分布不同。

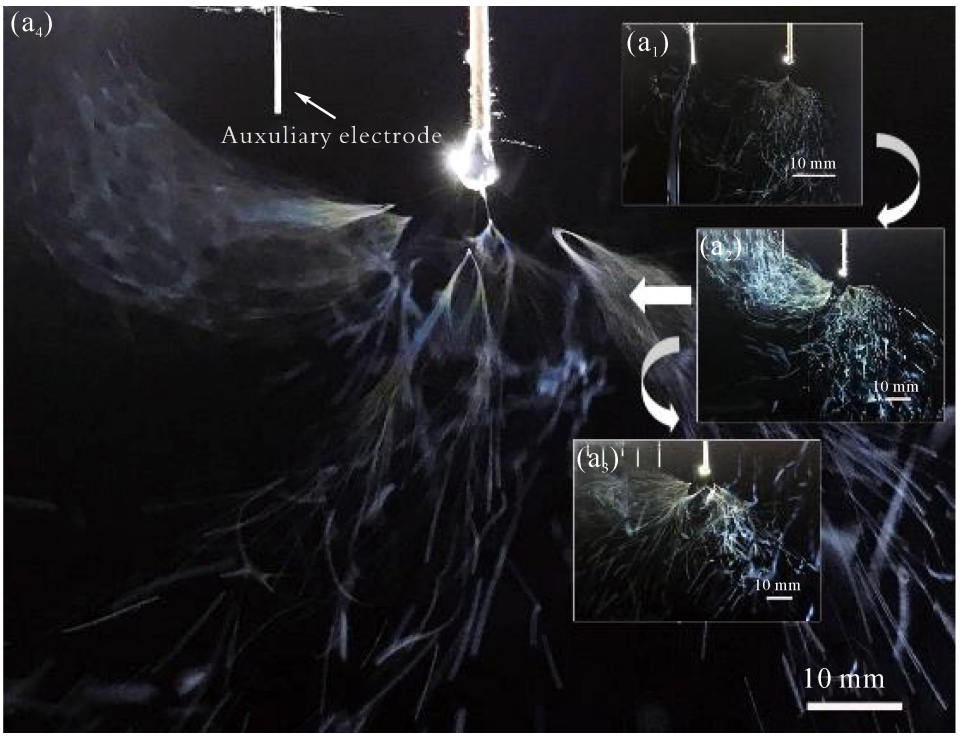


Fig. 2 Images of jets produced by electrospinning with AE at parallel position (EAEP): (a_1) 1 jet at 4.34 kV; (a_2) 2 jets at 4.85 kV; (a_3) 3 jets at 5.58 kV; (a_4) 5 jets at 6.5 kV

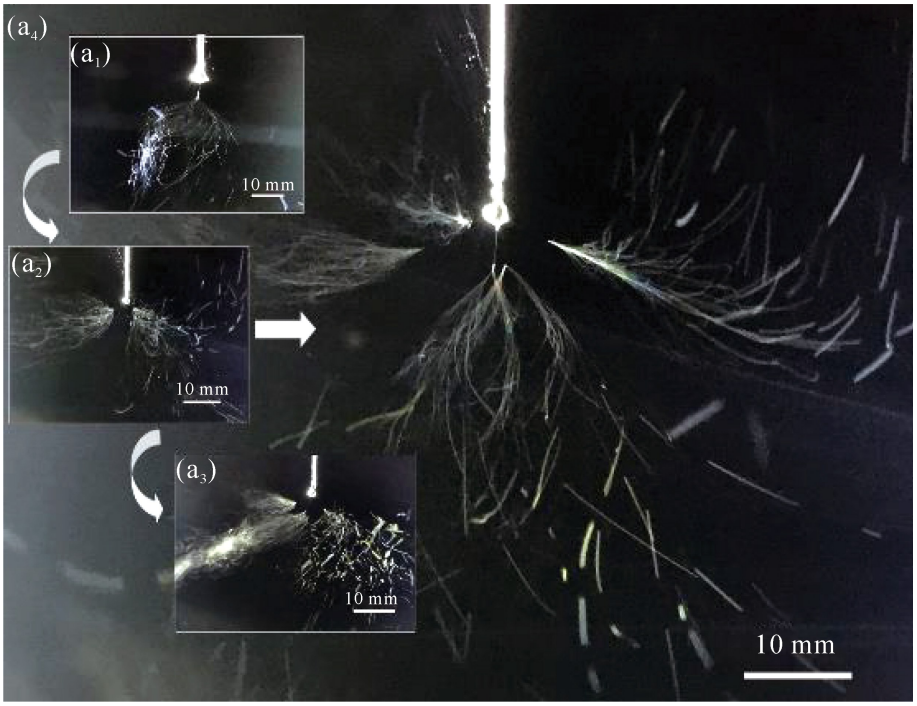


Fig. 3　Images of jets produced by electrospinning with AE at vertical position (EAEV): (a_1) 1 jet at 4.68 kV; (a_2) 2 jets at 5.2 kV; (a_3) 3 jets at 6.12 kV; (a_4) 5 jets at 6.84 kV

为了更好地解释实验现象,使用 Comsol 有限元软件模拟辅助电极平行于喷丝头和垂直于喷丝头时的电场分布情况。模拟参数设置如下:喷丝头长度和直径分别为 2 cm 和 0.08 mm,辅助电极长度和直径分别为 2 cm 和 0.05 mm,针辅距 2 cm,电压 9 kV,纺丝距离 15 cm。Fig.4(a)和 Fig.4(c)为辅助电极在平行位置和垂直位置的电场分布,小箭头表示电场的方向,其长度与该位置电场的强度成正比,如 Fig.4(b)和 Fig.4(d)所示。由此可见,高强度的电场出现在喷丝头附近相对较小的区域内。为了对比辅助电极在 2 个不同位置时的电场强度,将电压控制在 6 kV,7 kV,8 kV 和 9 kV,其他模拟参数不变。分别计算辅助电极平行和垂直于喷丝头时,沿喷丝头到接收板方向(x 轴 0~16 cm)的电场强度和沿辅助电极到喷丝头方向(y 轴 −2~2 cm)的电场强度,如 Fig.5 所示。结果表明,当电压为 9 kV 时,辅助电极在平行位置时,喷丝头附近的电场强度 $E_x = 1.09\times10^6$ V/m。在垂直位置时喷丝头附近的电场强度$E_x = 1.0\times10^6$ V/m。在相同电压下,辅助电极平行于喷丝头时液滴受到的电场强度较大,电场力的作用增强,导致辅助电极在平行位置时产生射流的临界电压低于垂直位置的临界电压。

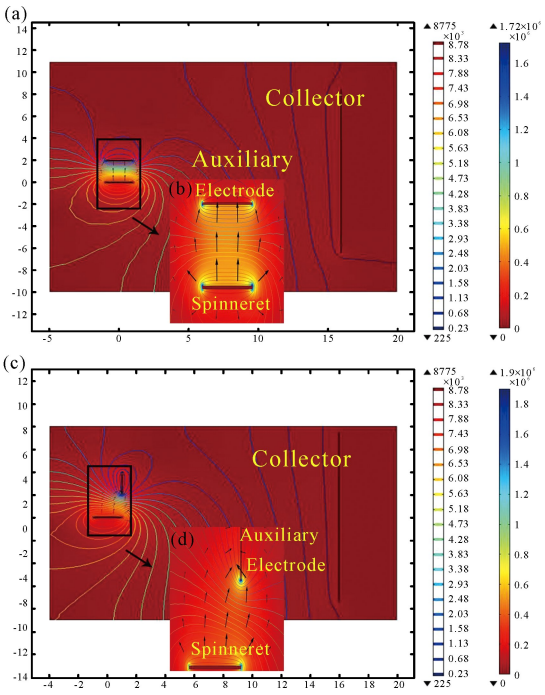


Fig. 4　Simulation of electric field distribution in different auxiliary electrode poisons: (a, b) EAEP; (c, d) EAEV

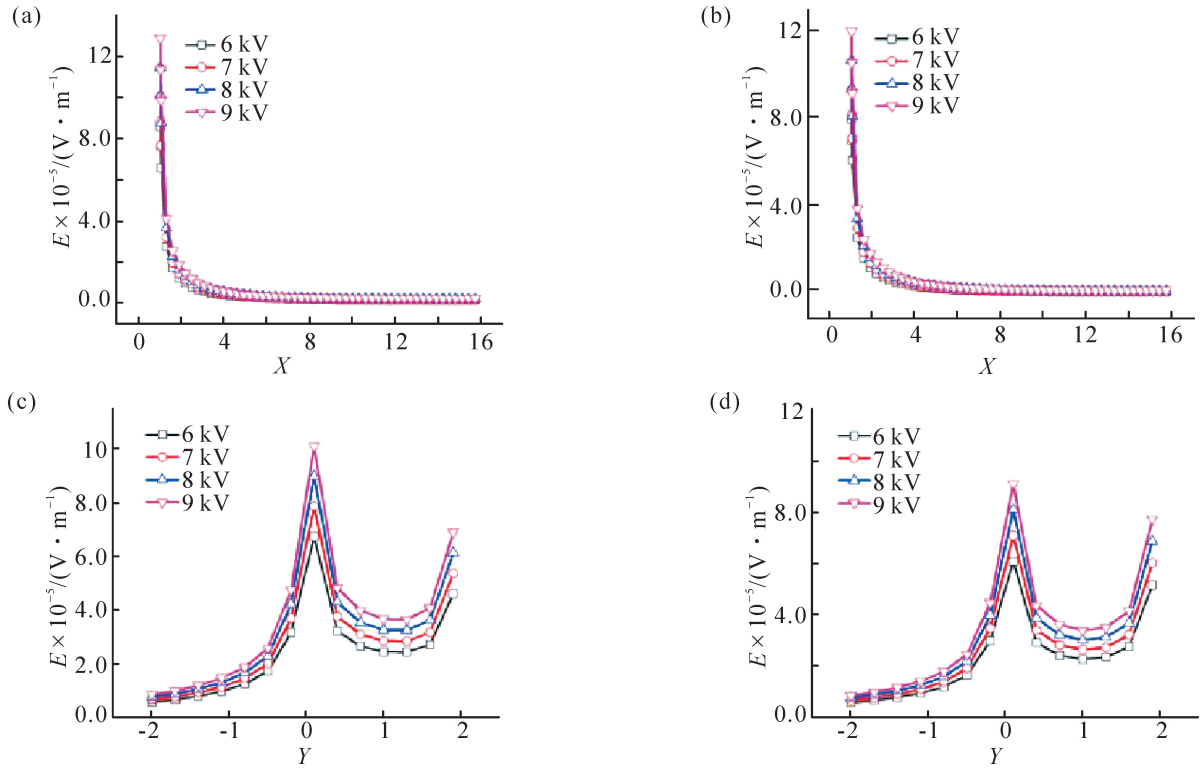


Fig. 5 Graphs of electric field magnitude versus axial distance from the spinneret tip to the collector in *x* direction: (a) EAEP, (b) EAEV; in *y* direction: (c) EAEP, (d) EAEV

2.2 不同电压下辅助电极空间位置对纳米纤维形貌的影响

为了研究辅助电极位置对纤维形貌的影响,将电压设置为 6 kV,7 kV,8 kV 和 9 kV,其他条件设置如下:注射速度 2 mL/h,纺丝距离 15 cm,针辅距 2 cm,进行纺丝实验。实验结果如 Fig.6 所示。辅助电极在平行位置时收集到的纳米纤维平均直径为 220~277 nm,垂直位置时收集到纳米纤维的平均直径为 249~338 nm,辅助电极平行于喷丝头时获得的纳米纤维平均直径小于垂直时纳米纤维平均直径。原因是相同电压下,辅助电极在平行位置时受到电场强度高于垂直位置(Fig.5),较高的电场强度可以产生更强的电场力,导致射流在运动过程中鞭动更加剧烈,纤维直径减小。从纳米纤维的形貌上来看,2 种装置制备的纳米纤维均为随机分布排列的圆形纤维。如 Fig.7(a)所示,随着电压从 6 kV 增加到 9 kV,2 种装置收集到的纤维平均直径均有所减小,纤维平均直径在辅助电极平行于喷丝头时从 277 nm 减小到 220 nm。同时,在辅助电极垂直于喷丝头时产生的纤维平均直径从 338 nm 减小到 249 nm。另外,还研究了 2 种装置在相同电压下产生的平均射流数量,并进行了对比。如 Fig.7(b)所示,当电压分别为 6 kV 和 7 kV 时,辅助电极在平行位置时的平均射流数量是 3.2 股和 8.2 股,大于垂直位置的平均射流数量(2.8 股和 6.4 股),原因是在相同电压下,辅助电极在平行位置时的电场力大于垂直位置时的电场力,液滴形状变化更大,形成更多的曲率极值点,导致射流数量更多。当电压进一步增加到 8 kV 时,辅助电极在平行位置时的电场力过大,射流之间的间距减小,曲率极点减少,导致射流数量减少,此时射流数量是 6 股。对于辅助电极处于垂直位置时的纺丝过程,电压由 6 kV 增大 9 kV 中,射流的平均数量从 2.8 股先增多到 6.2 股,而后减少为 5 股,这说明在这 2 个装置中,射流数量均随电压的增加先增多后减少。另外,2 种装置均出现了平均射流数量极大值,分别为 6.2 股和 5.2 股。

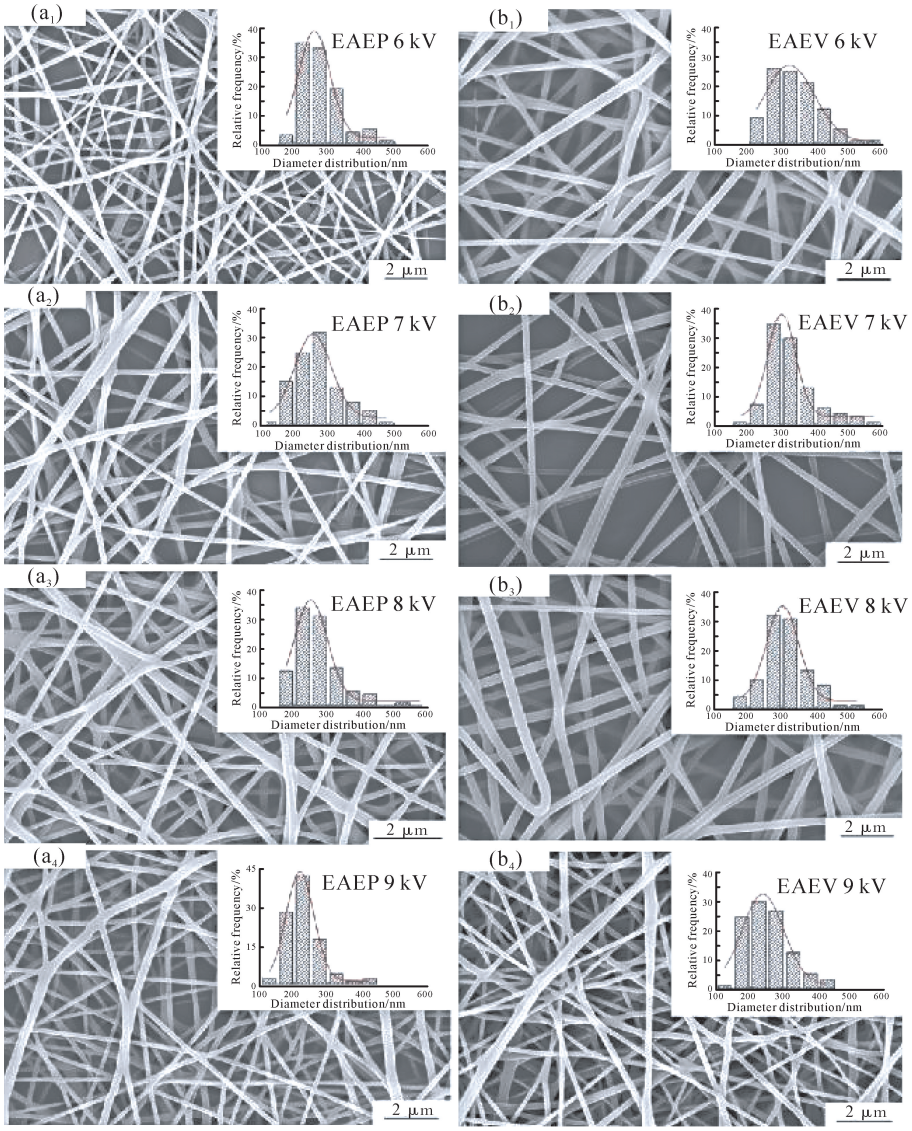


Fig. 6　SEM images of electrospun nanofibers produced by EAEP at (a_1) 6 kV, (a_2) 7 kV, (a_3) 8 kV, (a_4) 9 kV and EAEV at (b_1) 6 kV, (b_2) 7 kV, (b_3) 8 kV, (b_4) 9 kV

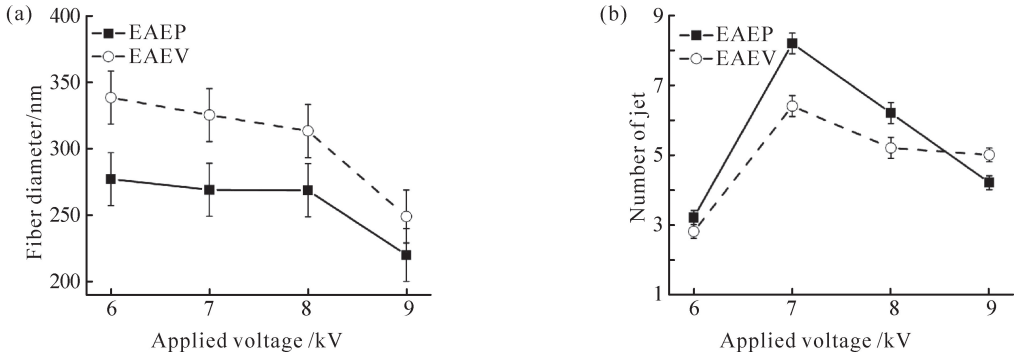


Fig. 7　(a) Average fiber diameter vs. applied voltage; (b) jet number vs. average voltage

2.3　不同注射速度下辅助电极空间位置对纳米纤维形貌的影响

Fig.8 为针辅距在 2 cm,电压为 8 kV,纺丝距离为 15 cm,注射速度为 1 mL/h,1.5 mL/h,2 mL/h 和 2.5 mL/h 时,辅助电极在平行位置和垂直位置时产生的纳米纤维扫描电镜图像。纳米纤维平均直径、

射流数量与注射速度的关系如 Fig.9 所示。结果表明,在 2 种装置中,纳米纤维的平均直径均随着注射速度的增加而减小;辅助电极在平行位置时纳米纤维的平均直径从 290 nm 下降到 260 nm,在辅助电极垂直于喷丝头时,纳米纤维的平均直径从 340 nm 下降到 250 nm。除了注射速度为 2.5 mL/h 外,辅助电极在平行位置时收集到的纳米纤维平均直径均小于辅助电极在垂直位置时产生的纳米纤维平均直径。造成这种现象的主要原因是随着注射速度的增加,较多的液体被挤出,有利于产生多射流,从而形成更细的纤维。不同注射速度下辅助电极位置对射流数量的影响如 Fig.9(b)所示。随着注射速度从 1 mL/h 提高到 2.5 mL/h,平均射流数量在辅助电极平行于喷丝头的装置中从 3 股增加到 8.4 股,垂直于喷丝头的装置从 1.8 股增加到 5.6 股。这说明随着注射速度增大,射流数量越多。对于这种现象产生的原因是注射速度的增大导致喷头末端的液滴形态不稳定。在相同条件下,液滴受更大的电场力作用产生形变,从而液滴表面曲率极点增多,导致射流数量增多。

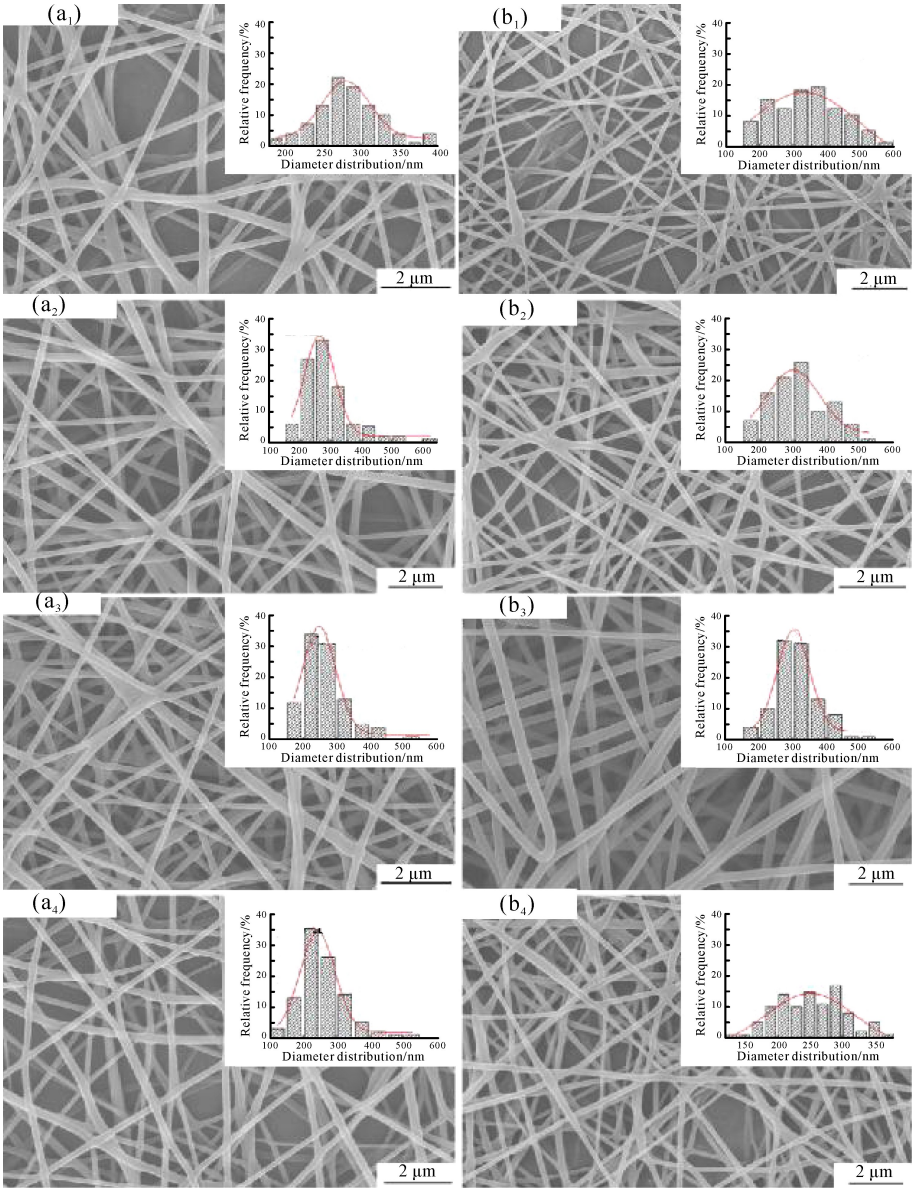


Fig. 8 SEM images of electrospun nanofibers produced by EAEP at (a_1) 1 mL/h, (a_2) 1.5 mL/h, (a_3) 2 mL/h, (a_4)2.5 mL/h and EAEV at (b_1) 1 mL/h, (b_2) 1.5 mL/h, (b_3) 2 mL/h, (b_4)2.5 mL/h

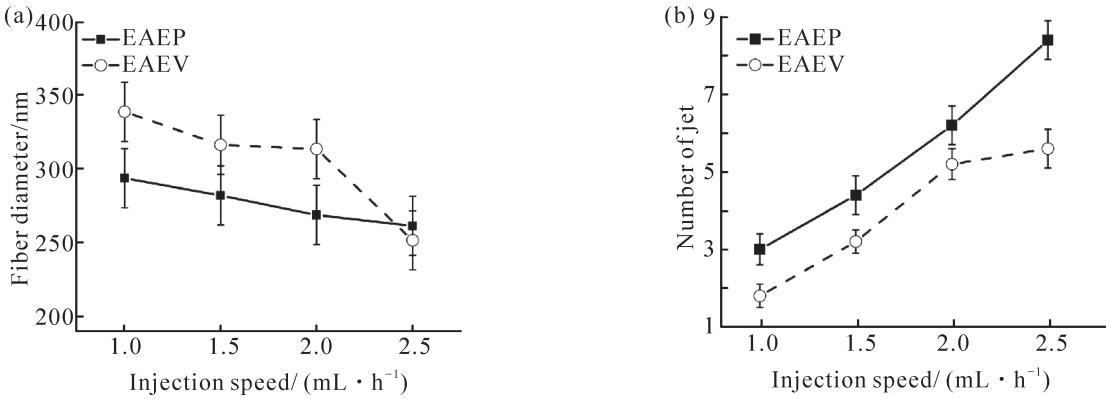


Fig. 9　(a) Average fiber diameter vs. injection speed; (b) jet number vs. injection speed

2.4　不同针辅距下辅助电极空间位置对纳米纤维形貌的影响

为了进一步研究辅助电极位置对纤维形貌和射流数量的影响,将电压设置为 8 kV,注射速度为 2 mL/h,纺丝距离为 15 cm,采用不同针辅距(Electrode to spinneret distance, ESD) 1 cm,2 cm,3 cm 和 4 cm,进行纺丝实验。Fig.10 为采用辅助电极平行于喷丝头和垂直于喷丝头时获得的纳米纤维的扫描电镜图像。当针辅距为 1 cm 时,辅助电极平行于喷丝头时获得的纤维平均直径为 254 nm,辅助电极垂直于喷丝头时收集到的纤维平均直径为 267 nm。针辅距为 2 cm 时,辅助电极平行于喷丝头时获得的纤维平均直径为 268 nm,辅助电极垂直于喷丝头时收集到的纤维平均直径为 313 nm。针辅距为 3 cm 时,辅助电极平行于喷丝头时获得的纤维平均直径为 292 nm,辅助电极垂直于喷丝头时收集到的纤维平均直径为 331 nm。针辅距为 4 cm 时,辅助电极平行于喷丝头时获得的纤维平均直径为 355 nm,辅助电极垂直于喷丝头时收集到的纤维平均直径为 376 nm。结果表明,在针辅距相同时,辅助电极在平行位置时产生的纤维比垂直位置时更细。造成这种现象的主要原因是在针辅距相同且其他条件不变的情况下,辅助电极在平行位置产生射流时受到的电场强度比在垂直位置的电场强度更大,射流受到的电场力作用更强,射流流量增大,射流振动频率增大,从而导致纤维变细.

如 Fig.11(a)所示,随着针辅距的增大,辅助电极平行于喷丝头时产生纳米纤维平均直径由 254 nm 增大为 355 nm;辅助电极垂直于喷丝头时产生的纳米纤维平均直径由 267 nm 增大为 376 nm。2 种装置的纳米纤维平均直径均随着针辅距的增大而增大。其原因是针辅距的增加导致电场强度降低,射流流量减小,射流振动频率减小,从而导致纤维直径增大。Fig.11(b)为辅助电极在平行位置和垂直位置时得到的射流数量对比。结果表明,辅助电极平行于喷丝头的平均射流数量由 3.8 股增加到 6.2 股,辅助电极垂直于喷丝头中平均射流数量由 3.2 股增加到 5.2 股,随着针辅距(4 ~ 2 cm)降低,平均射流数量增加;但当针辅距小于 2 cm 时,射流数随针辅距减少而急剧减小。辅助电极在平行位置和垂直位置时得到的平均射流数量极大值分别为 6.2 股和 5.2 股。

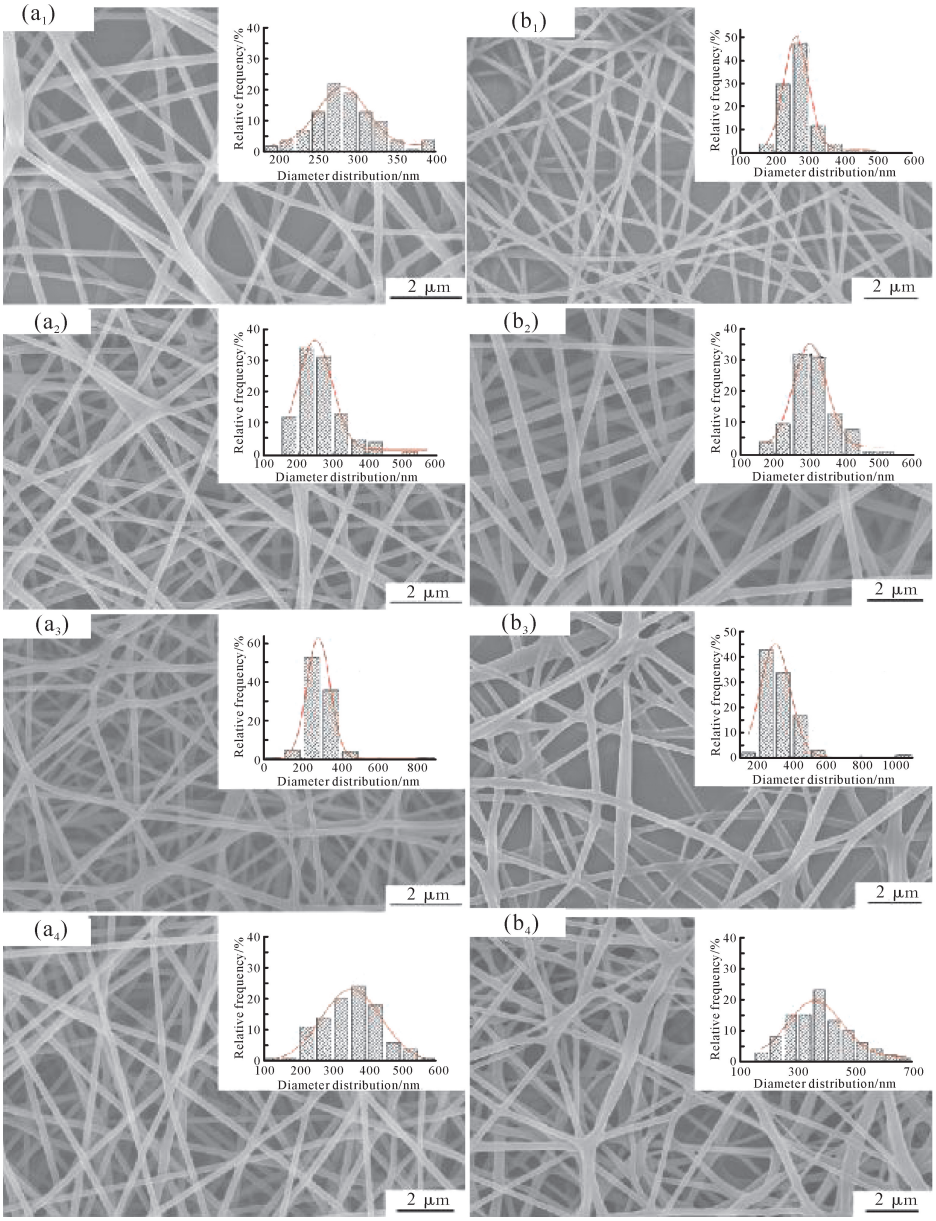


Fig. 10 SEM images of electrospun nanofibers produced by EAEP at (a_1) 1 cm, (a_2) 2 cm, (a_3) 3 cm, (a_4) 4 cm and EAEV at (b_1) 1 cm, (b_2) 2 cm, (b_3) 3 cm, (b_4) 4 cm

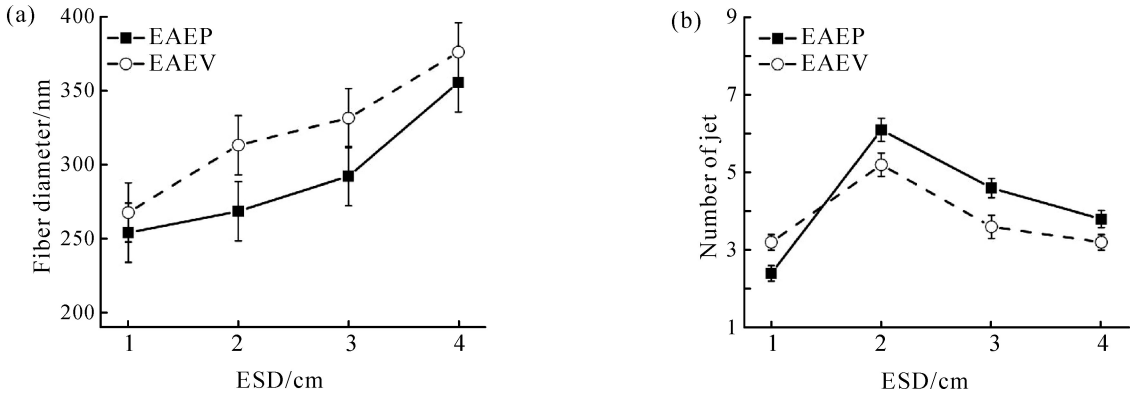


Fig. 11 (a) Average fiber diameter vs. electrode to spinneret distance (ESD); (b) jet number vs. ESD

3　结论

为了研究辅助电极的空间位置对静电纺纤维直径和形貌及射流数量的影响,本文采用辅助电极平行于喷丝头和垂直于喷丝头进行纺丝实验。得到主要结论如下。

(1)辅助电极平行于喷丝头时产生射流的临界电压小于喷丝头垂直于喷丝头时的临界电压;电压为 9 kV 时,当辅助电极处于平行位置,喷丝头处电场强度为 1.29×10^6 V/m,当辅助电极处于平行位置时,喷丝头处电场强度为 1.2×10^6 V/m,由此可知,相同电压下辅助电极在平行位置时纺丝区域的电场强度更大。

(2)辅助电极处于平行位置时制备的纳米纤维的直径分布范围为 220 ~ 277 nm,辅助电极处于垂直位置时制备的纳米纤维直径分布范围为 249 ~ 338 nm,辅助电极平行于喷丝头时得到了直径更细的纳米纤维;在 2 种装置中,纳米纤维的平均直径均随着电压(6 ~ 9 kV)和注射速度(1 ~ 2.5 mL/h)的增加而减小,随着针辅距(1 ~ 4 cm)增大而增大;射流数量随电压和针辅距增大先增大后减小,随注射速度的增大而增多。本文为阐明辅助电极静电纺丝的机理提供了一个新的视角,为减小纳米纤维直径和产生多股射流提供了实验依据。

参考文献:

[1] 殷福珊. 挑战纤维素的利用[J]. 日用化学品科学, 2009, 32(1): 24-26.
Yin F S. Challenging the utilization of cellulose[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2009, 32(1): 24-26.

[2] Ma W, Zhang Y, Pan S, *et al*. Smart fibers for energy conversion and storage[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50: 7009-7061.

[3] Chen S, Qiu L, Cheng H M. Carbon-based fibers for advanced electrochemical energy storage devices[J]. Chemical Reviews, 2020, 120: 2811-2878.

[4] Raju A, Shanmugaraja M. Recent researches in fiber reinforced composite materials: a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 9291-9296.

[5] Erden S, Ho K. Fiber reinforced composites[J]. Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites, 2017: 51-79.

[6] 郑艳超. 超高分子量聚乙烯纤维的性能与应用[J]. 辽宁丝绸, 2016(4): 12-14.
Zheng Y C. Properties and applications of ultra-high molecular weight polyethylene fibers[J]. Liaoning Silk, 2016(4): 12-14.

[7] 于天. 原纤化超细纤维复合空气过滤材料的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024.
Yu T. Preparation and performance of fibrillated micro-fiber composite air-filtration materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.

[8] Jayaraman K, Kotaki M, Zhang Y, *et al*. Recent advances in polymer nanofibers[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2004, 4: 52-65.

[9] Hammel E, Tang X, Trampert M, *et al*. Carbon nanofibers for composite applications[J]. Carbon, 2004, 42(6): 1153-1158.

[10] Chamanehpour E, Thouti S, Rubahn H G, *et al*. Smart nanofibers: synthesis, properties, and scopes in future advanced technologies[J]. Advanced Materials Technologies, 2024, 9: 2301392.

[11] 王永鹏, 刘梦竹, 路大勇. 用静电纺丝法制备可交联高性能聚合物纳米纤维[J]. 纺织学报, 2018, 39(1): 6-10.
Wang Y P, Liu M Z, Lu D Y. Cross-linkable high-performance polymer nanofibers prepared by electrospinning[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(1): 6-10.

[12] 邓荣坚, 刘勇, 丁玉梅, 等. 熔体静电纺丝法制备微纳米纤维的探索[J]. 材料科学与工艺, 2010, 18(3): 425-428.
Deng R J, Liu Y, Ding Y M, *et al*. Exploration of micro-/nano-fiber fabrication by melt electrospinning[J]. Materials Science and Technology, 2010, 18(3): 425-428.

[13] Phong J K, Cooper C B, Michalek L, *et al*. Sequence-dependent self-assembly of supramolecular nanofibers in periodic dynamic block copolymers[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12: 11456.

[14] Shen C, Yang Z, Wu D, *et al*. The preparation, resources, applications, and future trends of nanofibers in active food packaging: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64: 9656-9671.

[15] 王雅欣, 黄继伟, 凌新龙. 静电纺丝技术的发展现状及应用[J]. 纺织科学与工程学报, 2024, 41(2): 88-99.
Wang Y X, Huang J W, Ling X L. Current status and applications of electrospinning technology[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2024, 41(2): 88-99.

[16] Ji D, Lin Y, Guo X, *et al*. Electrospinning of nanofibers[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2024, 4: 1.

[17] 杨海贞, 曾庆龙, 马闯, 等. 静电纺丝纳米纤维在光催化领域

的应用研究[J]. 印染, 2024, 50(4): 83-87.
Yang H Z, Zeng Q L, Ma C, *et al*. Application of electrospun nanofibers in photocatalysis [J]. China Dyeing and Finishing, 2024, 50(4): 83-87.

[18] Liu J X, Yao H Z, Chai X D, *et al*. Review of electrospinning technology of photocatalysis, electrocatalysis and magnetic response [J]. Journal of Materials Science, 2024, 59: 10623-10649.

[19] Kim G H, Cho Y S, Kim W D. Stability analysis for multi-jets electrospinning process modified with a cylindrical electrode[J]. European Polymer Journal, 2006, 42: 2031-2038

[20] Xie S, Zeng Y. Effects of electric field on multineedle electrospinning: experiment and simulation study[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51: 5336-5345.

[21] Carnell L S, Siochi E J, Wincheski R A, *et al*. Electric field effects on fiber alignment using an auxiliary electrode during electrospinning[J]. Scripta Mater, 2009, 60: 359-361.

[22] Wu Y, Carnell L A, Clark R L. Control ofelectrospun mat width through the use of parallel auxiliary electrodes[J]. Polymer, 2007, 48: 5653-5661

Auxiliary Electrode Multi-Jet Electrospinning and the Influence of Process Parameters

Yuke Wu[1,2], Chen Liu[1], Bin Zhang[1,3], Zhicheng Wang[1]

(*1. School of Mechanical and Electronic Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Jiangxi Province Engineering Research Center of New Energy Technology and Equipment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Ministry of Education's Center for Nuclear Technology Application Engineering Research, East China University of Technology, Nanchang 330013, China*)

ABSTRACT: To address the issues of traditional electrospinning, which generally produces only a single jet and has larger nanofiber diameters, an auxiliary electrode electrospinning device was designed. COMSOL software was used to simulate two configurations of auxiliary electrodes, parallel and perpendicular to the spinneret, to observe the electric field distribution in different spatial positions of auxiliary electrodes and to study the electric field intensity at the Taylor cone. Based on the control of voltage, injection speed, and needle-to-auxiliary distance, the influence of spatial position of auxiliary electrodes on morphology of nanofibers, the number of jets, and productivity was analyzed. The results show that when auxiliary electrode is positioned parallel, nanofibers with a diameter range of 220~277 nm are collected, slightly smaller than the nanofibers prepared under the same conditions when auxiliary electrode is in the vertical position (249~338 nm). Moreover, with the increase of voltage and decrease of distance between the spinneret and auxiliary electrode, the diameter of nanofibers obtained under both distribution configurations exhibits a decreasing trend. This study provides a basis for the controllable preparation of multiple jets and high-quality nanofibers.

Keywords: nanofiber; electrospinning; electric field distribution; multi-jets