

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.014

静电纺丝-静电雾化复合喷印稳定性的影响因素

赵宇明¹, 庄明凤¹, 王翔², 施昊辰², 姜佳昕², 卓丽云³

[1.集美工业职业学院,福建厦门 361022; 2.厦门理工学院机械与汽车工程学院,福建厦门 361024;

3.柔性制造装备集成福建省高校重点实验室(厦门工学院),福建厦门 361021]

摘要:为实现高效稳定的静电纺丝-静电雾化复合喷印工艺,解决多工艺耦合喷头的电场与流场协同控制难题,进行了静电纺丝-静电雾化双喷头的复合喷印装置设计及喷印稳定性的影响因素分析。首先通过双喷头参数对电场影响的理论分析,揭示了复合喷印过程中电场变化与雾化扰动的相互作用机制;随后进行了双喷头电场仿真,重点研究双喷头夹角参数(15°, 30°, 45°, 60°, 75°)和针尖间距参数(6, 8, 10, 12 cm)对电场强度极差和标准差的影响;最后以聚乳酸溶液为纺丝液、聚苯胺溶液为雾化原料,采用自制的复合喷印装置制备了纳米复合纤维膜,通过实际实验对仿真结果进行验证。结果表明,当针尖间距不变时,随着双喷头夹角的增加,电场强度标准差总体减小,电场强度分布更加均匀,纳米颗粒在纳米纤维上的附着情况也较好,可以获得成膜性较好的复合纤维膜;当双喷头夹角不变时,随着针尖间距增加,电场强度极差和标准差总体上增大,电场强度分布均匀性变差,纳米颗粒在纳米纤维上的分布较差,甚至在复合纤维膜中出现部分颗粒粘连现象。上述研究建立的双喷头参数调控方法突破了传统单喷头调控的局限性,为多工艺复合喷印装置的开发提供了理论依据。

关键词: 静电纺丝; 静电雾化; 双喷头参数; 电场强度; 复合喷印

中图分类号: TQ340.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0103-06

Influence factors on stability of electrospinning-electrospray composite printing

ZHAO Yuming¹, ZHUANG Mingfeng¹, WANG Xiang², SHI Haochen², JIANG Jiaxin², ZHUO Liyun³

[1. Jimei Polytechnic Vocational College, Xiamen 361022, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 3. The Higher Educational Key Laboratory for Flexible Manufacturing Equipment Integration of Fujian Province (Xiamen Institute of Technology), Xiamen 361021, China]

Abstract : In order to realize the efficient and stable electrospinning-electrospray composite printing process, and solve the problem of cooperative control of electric field and flow field of multi process coupled nozzles, the composite printing device with electrospinning-electrospray dual nozzles was designed and the influence factors on the stability of the printing were analyzed. Firstly, by analyzing the influence of dual nozzle parameters on the electric field theoretically, the interaction mechanism between electric field changes and spray disturbances in the composite printing process was revealed. Then the electric field simulation of the dual nozzles was carried out, the focus was on studying the effects of dual nozzle intersection angle parameters (15°, 30°, 45°, 60°, 75°) and needle tip spacing parameters (6, 8, 10, 12 cm) on the range and standard deviation of the electric field intensity. Finally, using polylactic acid solution as spinning solution and polyaniline solution as spray material, the nano composite fibrous membranes were prepared by using self-made composite printing device, and the simulation results were verified by actual experiments. The results show that when the needle tip spacing remains constant, as the intersection angle increases, the standard deviation of the electric field intensity decreases generally, and the distribution of electric field intensity becomes more uniform. The adhesion of nanoparticles on nanofibers is also good, and the composite fibrous membranes with good film-forming properties can be obtained. When the

基金项目: 国家自然科学基金项目(52405632), 厦门市科技计划项目(2024CXY0420), 厦门市自然科学基金项目(3502Z20227329), 厦门工学院科研项目(pk1fmeiz20240010)

通信作者: 卓丽云, 教授, 工学硕士, 研究方向为静电纺丝、工程图学及计算机辅助设计

收稿日期: 2025-04-02

引用格式: 赵宇明, 庄明凤, 王翔, 等. 静电纺丝-静电雾化复合喷印稳定性的影响因素[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6): 103-108.

ZHAO Yuming, ZHUANG Mingfeng, WANG Xiang, et al. Influence factors on stability of electrospinning-electrospray composite printing [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6): 103-108.

intersection angle remains constant, with the increase of the needle tip spacing, the range and standard deviation of the electric field intensity increase generally, and the uniformity of the electric field intensity distribution becomes poor. The distribution of nanoparticles on the nanofibers is poor, and even some particles adhesion occurs in the composite fibrous membranes. The control methods of the dual nozzle parameters established in this study overcome the limitations of traditional single nozzle control, providing the theoretical basis for the development of multi process composite printing equipment.

Keywords : electrospinning ; electrospray ; dual-nozzle parameter ; electric field intensity ; composite printing

微纳技术的突破与创新正成为推动现代静电纺丝领域发展的核心驱动力之一^[1-3]。作为跨学科研究的前沿领域,该技术在新型功能材料^[4-6]、生物医疗技术^[7-9]、光电信息器件^[10]等方面展现出巨大的应用潜力。近年来,作为微纳技术代表之一的静电纺丝与静电雾化技术的协同应用在功能材料领域取得了显著进展。研究表明,将这两种技术有机结合,可制备出具有独特结构和功能的复合薄膜材料^[11-13]。在抗菌抗病毒材料研究方面,Park等^[14]采用静电纺丝结合静电雾化工艺,制备了以聚丙烯腈(PAN)纳米纤维为基体,银纳米线为功能层的复合纤维网络,该材料不仅具有优异的微生物捕获性能,还表现出显著的抗菌活性。在水处理膜材料方面,Jia等^[15]通过静电纺丝-静电雾化工艺开发了层状聚偏氟乙烯-共六氟丙烯和聚苯乙烯膜材料,因该材料具有独特的结构稳定性和优异的抗湿性能,在膜蒸馏水处理领域展现出良好的应用潜力。在生物医用材料方向,Tang等^[16]通过整合静电纺丝与静电雾化工艺,成功构建了兼具生物相容性、导电性和取向性纤维结构的神经组织工程支架,为神经修复提供了新的技术途径。在能源材料研究方面,Hafner等^[17]通过同步静电纺丝与静电雾化技术,实现了固态电解质层在电极表面的直接构筑,为全固态锂离子电池的性能提升提供了新的解决方案。在智能传感材料领域,Fang等^[18]开发了二维材料/热塑性聚氨酯(MXene/TPU)复合应变传感器,得益于静电纺丝与静电雾化技术的协同作用,该传感器表现出优异的结构稳定性和宽域应变响应特性。Lee等^[19]将静电喷雾与静电纺丝技术相结合,成功制备了具有活性氧响应特性的纳米纤维-颗粒复合材料,为智能药物递送系统的开发提供了新的材料基础。

综上所述,虽然许多学者对静电纺丝和静电雾化两种技术的结合进行了一定的研究,并且制备了多个应用领域的新型功能材料,但是在制备工艺上基本上采用先纺丝后雾化的异步操作,这会增加制备复合膜材料的时间成本。笔者构建了静电纺丝

和静电雾化两种技术同步协同作用的纤维膜复合喷印装置,有助于减少材料成膜时间,而且同步成膜更有利于纳米纤维膜均匀地分布导电颗粒,从而有利于提高复合膜的导电性能和力学性能,是未来多功能纤维膜复合喷印设备发展方向之一。静电纺丝和静电雾化两种技术的同步协同作用必然会对电场强度的均匀性产生相互抑制作用。虽然国内外学者对单一静电雾化或静电纺丝技术的电场分布已有较多研究,但对两者结合的喷印装置的研究仍较为有限。因此笔者聚焦于静电雾化和静电纺丝结合的双喷头装置,通过理论分析、有限元仿真与实验验证相结合的方法,探讨了纺丝喷头和雾化喷头两者之间的夹角和喷头针尖之间的距离对于电场强度分布特性的调控机制,优化了双喷头的空间配置参数,为静电纺丝与静电雾化技术的同步协同应用提供了理论依据和技术支持。

1 静电纺丝与静电雾化双喷头参数对电场影响的理论分析

静电纺丝借助于高压电场的作用,将聚合物溶液或熔体形成射流,并在电场拉伸和溶剂挥发过程中使射流固化从而形成纳米级纤维。静电雾化是在喷头与接收装置之间建立高压静电场,带电液滴在电场力作用下发生不稳定爆裂,形成微米级或纳米级的带电液滴。这些微小的液滴在溶剂挥发后固化成为微/纳米颗粒,最终落在接收器上,与静电纺丝制备的纳米级纤维复合形成纳米复合纤维膜。因此电场的均匀性对于纳米复合纤维膜的成型起着决定性的作用。

笔者设计的复合喷印装置中,纺丝喷头和雾化喷头均沿Z轴方向排列,并可在Z轴方向上进行垂直升降运动,如图1所示,两喷头排列整体呈现V形空间构型。两个喷头均施加高压正电,故其电场力会相互排斥,从而导致电场分布不均匀,进而影响静电纺丝过程中纤维的沉积行为,最终造成复合膜均匀性下降。为了分析双喷头参数对电场均匀性的影响,假设纺丝喷头与收集板垂直,雾化喷头与

收集板成一定角度 θ , 纺丝喷头针尖与雾化喷头针尖的距离即针尖间距为 d , 纺丝喷头与雾化喷头之间的夹角为 ϕ 。

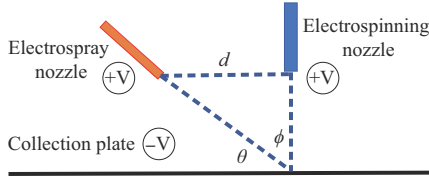


图1 静电纺丝与静电雾化双喷头电场分析图

Fig. 1 Electric field analysis diagram of electrospinning-electrospray dual nozzle

纺丝喷头P1和雾化喷头P2的电场强度分别按式(1)和式(2)计算。

$$E_1 = \frac{V_1}{r_1} \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{V_2}{r_2} \quad (2)$$

式中: E_1 为纺丝喷头的电场强度; V_1 为纺丝喷头的电压; r_1 为纺丝喷头针尖到收集板的垂直距离; E_2 为雾化喷头的电场强度; V_2 为雾化喷头的电压; r_2 为雾化喷头针尖到收集板的垂直距离,满足 $r_2=r_1$ 。

为了分析两喷头针尖的夹角和间距对电场均匀性的影响,需要进一步推导出电场强度分布的表达式。设纺丝喷头P1位于坐标原点(0,0),雾化喷头P2位于($d,0$),则收集板上任意一点(x,y)的电场强度由纺丝喷头和雾化喷头的电场叠加而成。

纺丝喷头P1在点(x,y)处的电场强度见式(3)。

$$E_1(x, y) = \frac{V_1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (3)$$

雾化喷头P2在点(x,y)处的电场强度见式(4)。

$$E_2(x, y) = \frac{V_2}{\sqrt{(x-d)^2 + y^2}} \quad (4)$$

总电场强度见式(5)。

$$E_{\text{total}} = E_1(x, y) + E_2(x, y) \cos \phi \quad (5)$$

当夹角 ϕ 增加时, $\cos \phi$ 减小,导致雾化喷头电场在纺丝喷头方向的分量减小,这使得双喷头电场的叠加效应减弱,电场分布更加依赖于纺丝喷头的电场,从而提高了电场分布均匀性。

2 静电纺丝与静电雾化双喷头电场仿真

在复合喷印结构设计中,纺丝喷头与雾化喷头都要施加高压正电,纺丝喷头与雾化喷头位置的电场力会因为互相排斥而导致电场不均匀,这也是静电纺丝成膜不均匀的直接原因,最终影响到复合膜

的均匀性,因此开展双喷头参数的电场仿真对提升纤维膜的质量至关重要。

采用COMSOL有限元分析软件进行静电纺丝与静电雾化双喷头空间电场的仿真分析,探索了纺丝喷头与雾化喷头针尖间距与夹角对空间电场力分布均匀性的影响,为多维度微纳功能结构薄膜的设计提供理论依据,并由此最终确定纺丝喷头与雾化喷头针尖间距与夹角的最优区间。根据方案设计构建如图2所示的纺丝喷头与雾化喷头3D空间电场仿真模型,主要由纺丝喷头、雾化喷头、空间区域和收集板组成。仿真主要参数设置见表1。

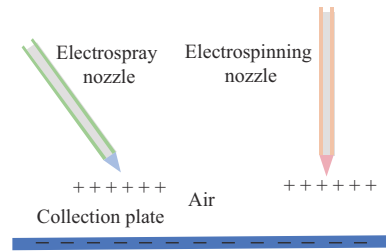


图2 3D空间电场仿真模型

Fig. 2 3D spatial electric field simulation model

表1 静电纺丝与静电雾化模型仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of electrospinning-electrospray models

Parameters	Set values
Unit Type	2D
Spinning medium	Air with a relative dielectric constant of 1
Grid	Triangular mesh
Needle length/mm	13
Needle diameter/mm	0.51
Electrospinning needle tip voltage/kV	6
Electrospray needle tip voltage/kV	6
Collect board voltage/kV	0

电场强度是影响液滴雾化和纤维成型的关键因素,纺丝和雾化过程中产生的带电纤维和液滴可能相互吸引或排斥,这取决于它们的电荷性质。这种电荷效应最终将影响纤维的沉积模式和液滴的分布。因此电场强度的均匀性对于实现均匀的纺丝和雾化效果至关重要。为了揭示静电纺丝喷头和静电雾化喷头夹角与针尖间距之间的协同调控机制,对静电纺丝喷头和静电雾化喷头之间的4组针尖间距(6, 8, 10, 12 cm)和5组夹角(15°, 30°, 45°, 60°, 75°)进行了有限元仿真分析。不同夹角下双喷头水平方向不同针尖间距的电场强度极差和电场强度标准差的仿真结果如图3和图4所示。

由图3和图4可以发现,在15°小夹角下,电场强度标准差随针尖间距增加呈现非单调变化特征,

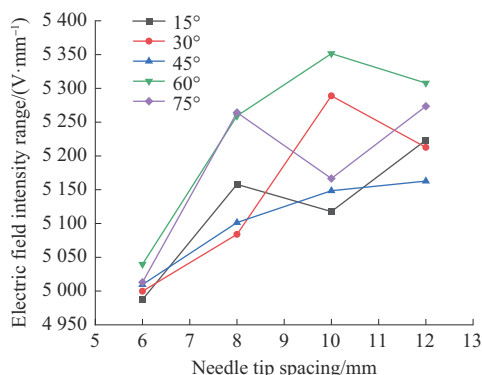


图3 不同夹角下双喷头不同针尖间距的电场强度极差

Fig. 3 Electric field intensity range at different needle tip spacings of dual nozzle under different intersection angles

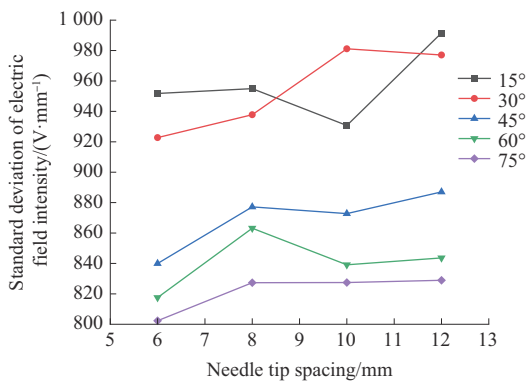


图4 不同夹角下双喷头不同针尖间距的电场强度标准差

Fig. 4 Standard deviation of electric field intensity at different needle tip spacings of dual nozzle under different intersection angles

当间距增至 10 cm 时达到最小值 930.71 V/mm, 较 6 cm 间距达到的 951.76 V/mm 降低 2.21%, 而随着间距增加, 电场强度极差分别为 4 987.39, 5 157.90, 5 117.75, 5 223.45 V/mm, 在间距为 10 cm 时, 极差有一定的降低, 且标准差为最小值, 表明此时可形成最优电场稳定区域。但是当夹角提升至 30° 时, 电场强度极差在 10 cm 间距处达到峰值 5 288.98 V/mm, 较 15° 下 10 cm 间距的最小值提升了 3.3%, 且标准差同步上升 5.4%, 这表明电场强度虽然有所增加, 但分布不均匀性也提高。而在 45° 中等夹角下, 系统展现出独特的空间电荷交互特性, 电场强度标准差在 6 cm 间距时为 839.98 V/mm, 较 15° 下相同间距的值降低 17.7%, 随着间距的增加, 电场强度标准差呈相对稳定增加趋势, 间距为 12 cm 时电场强度标准差为 887.04 V/mm。4 种间距下的电场强度极差分别为 5 009.62, 5 101.4, 5 148.55, 5 162.77 V/mm, 最高增幅仅为 153.15 V/mm, 表明间距对电场强度的影响相对较小。深入研究高夹角体系发现, 在夹角 60° 下, 电场强度标准差随着间距的增加先

增加后降低最后趋于稳定状态, 但在 12 cm 间距下的标准差仍高于 6 cm 间距下的值。电场强度标准差在间距为 8 cm 时达到峰值 863.16 V/mm, 较 6 cm 间距下的 817.55 V/mm 提升了 5.6%, 在间距 10 cm 至 12 cm 之间则稳定在 827.46 V/mm 和 828.94 V/mm 之间。随着间距增加, 电场强度极差分别为 5 039.6, 5 259.16, 5 351.45, 5 307.86 V/mm, 虽然, 在 12 cm 间距下, 极差有所降低, 但整体呈增加的趋势。在 75° 极限夹角条件下, 系统的电场强度标准差表现出参数饱和效应, 虽然当间距在 8 cm 至 12 cm 之间时, 电场强度标准差波动幅度约为 0.19% (827.36~828.94 V/mm), 但是标准差整体也呈增大趋势, 而电场强度极差随间距的增大形成 N 型波动曲线。

根据图 3 和图 4 可以得到纺丝喷头针尖和雾化喷头针尖之间的夹角和针尖间距对电场强度的总体影响: 随着针尖间距的增加, 4 种夹角下的电场强度标准差和极差总体上呈增大趋势; 当针尖间距不变时, 随着两针尖之间夹角的增加, 电场强度标准差总体呈减小趋势, 电场强度分布更加均匀, 但是电场强度极差在不同间距下随夹角增加的变化趋势均不同, 呈现无规律变化。

3 静电纺丝与静电雾化复合喷印实验

3.1 实验材料

聚乳酸(PLA)粉末: 58 μm , 美国 Nature Works 公司;

N,N-二甲基甲酰胺(DMF): 分析纯, 西陇科学股份有限公司;

二氯甲烷(DCM): 分析纯, 上海德诺化工有限公司;

聚苯胺(PANI): 分子量为 726.888, 导电态, 广东元丰化学试剂有限公司;

氯仿: 优级纯, 北京百灵威科技有限公司;

樟脑磺酸: 5872-08-2, 淄博钰锦商贸有限公司。

3.2 主要仪器及设备

场发射扫描电子显微镜(FESEM): SUPRA55 SAPHIRE, 德国蔡司光学仪器公司;

电动搅拌机: JJ-1A, 常州市金坛晨阳电子仪器厂;

高精度电子天平: LQC5001, 昆山优科维特电子科技有限公司;

静电纺丝-静电雾化复合喷印装置: 自制。

构建的静电纺丝-静电雾化复合喷印装置如图5所示(图5只列出最重要的部件),其结构主要包含三轴运动系统模块、成型环境模块、供液模块、材料输送模块和操作界面控制系统5大部分。

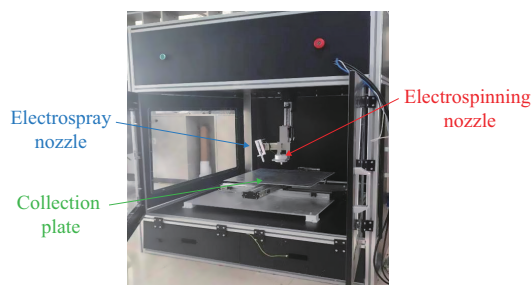


图5 静电纺丝-静电雾化复合喷印装置

Fig. 5 Electrospinning-electrospray composite printing device

3.3 试样制备

采用混合溶剂DMF和DCM(体积比7:3)作为纺丝溶剂,利用高精度电子天平称取2.4 g的溶质PLA粉末,先将两者混合,利用电动搅拌机充分搅拌24 h,配制出质量分数为8%的PLA溶液,然后将

8% PLA溶液进行密封处理,并放在常温状态下静置4 h除泡。接着继续利用高精度电子天平称取0.2 g的PANI粉末和0.2 g的掺杂剂樟脑磺酸颗粒,溶剂选用氯仿,先超声振动1 h,再利用电动搅拌机搅拌8 h,得到墨绿色溶液,随后对该溶液进行过滤处理,配制出质量分数为1%的PANI溶液。

静电纺丝-静电雾化复合喷印的工艺参数设置如下:纺丝电压为6 kV,雾化电压为6 kV,收集板接负极,纺丝溶液的供液速度为15 $\mu\text{L}/\text{min}$,雾化电压的供液速度为1 mL/h,纺丝喷头与雾化喷头到收集板的距离均为10 cm。

3.4 结果与讨论

通过调整纺丝喷头与雾化喷头之间不同的夹角(15° , 30° , 45° , 60° , 75°)以及针尖间距(6, 8, 10, 12 cm)进行静电纺丝与静电雾化同步实验。获得各组纳米复合纤维膜的FESEM照片如图6所示。从图6可以发现,当纺丝喷头与雾化喷头的夹角不变时,随着两喷头针尖间距的增加,纳米颗粒在纳米

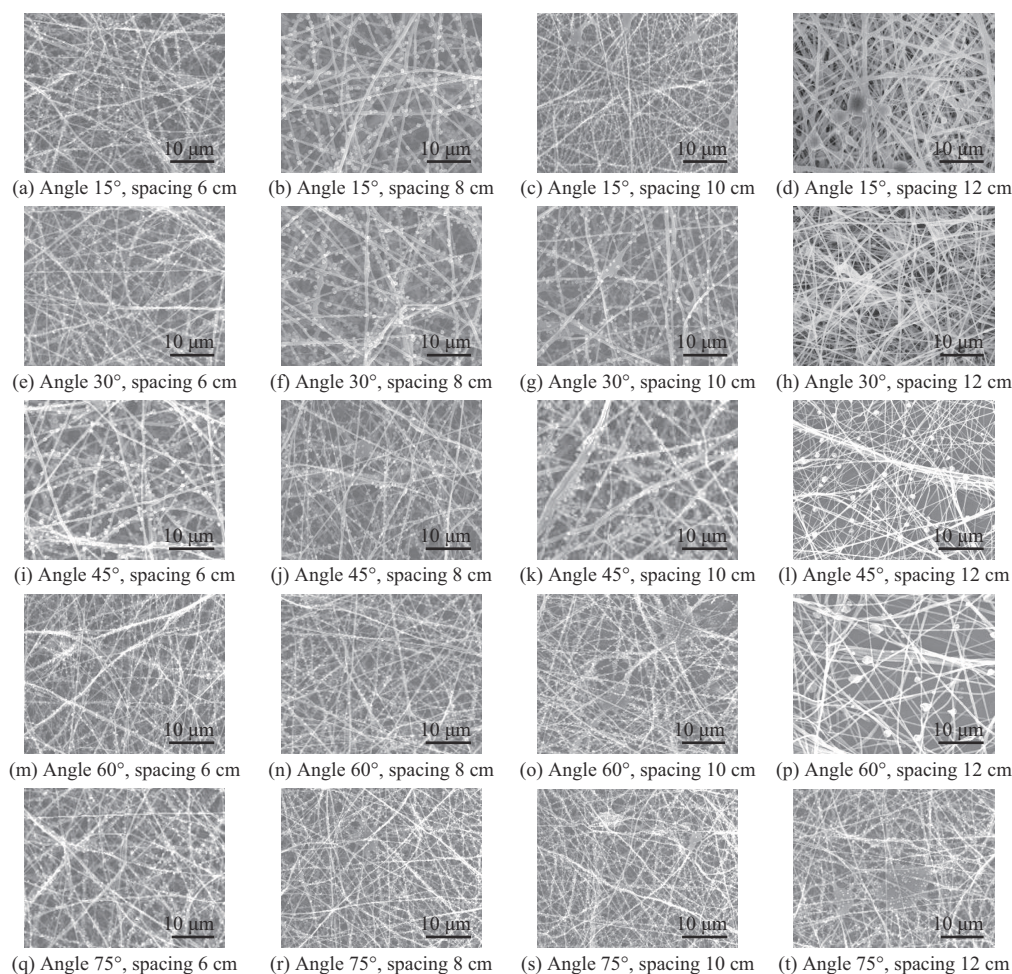


图6 5组夹角和4组针尖间距下复合纤维膜的FESEM照片

Fig. 6 FESEM photos of composite fibrous membranes with five sets of intersection angles and four sets of needle tip spacing

纤维上的分布较差,甚至出现部分颗粒粘连现象,这是因为针尖间距增大,电场强度的极差和标准差总体上均增大,导致了电场强度分布更不均匀。当纺丝喷头与雾化喷头的针尖间距不变时,随着两喷头夹角的增加,纳米颗粒在纳米纤维上的分布变得均匀,这是因为夹角增大,两个喷头的电场强度标准差减小,因此电场强度分布更加均匀,更有利于纳米复合纤维膜的稳定成型。

4 结论

(1)构建了静电纺丝-静电雾化复合喷印装置,通过调整纺丝喷头和雾化喷头两者之间的夹角和针尖间距,能够稳定地实现纺丝与雾化喷头的同步协同操作,并获得成型较好的纳米复合纤维膜。

(2)在纺丝喷头和雾化喷头针尖的5组夹角(15° , 30° , 45° , 60° , 75°)分别固定的情况下,总体上电场强度的标准差和极差都随着针尖间距的增大而增加,这表明虽然电场强度有所增大,但电场强度的分布均匀性较差,从而导致纳米复合纤维膜的成型效果相对较差,甚至出现了部分颗粒粘连现象。

(3)在纺丝喷头和雾化喷头的4组针尖间距(6, 8, 10, 12 cm)分别固定的情况下,电场的标准差随着夹角的增大总体上减小,这表明虽然电场强度有所减小,但电场强度的分布均匀性更好,有利于提高纳米复合纤维膜成型的稳定性,从而获得性能较好的复合纤维膜。

参考文献

- [1] XUE J J, WU T, DAI Y Q, et al. Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications[J]. Chemical Reviews, 2019, 119(8):5 298–5 415.
- [2] HUANG Z M, ZHANG Y Z, KOTAKI M, et al. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63(15):2 223–2 253.
- [3] 卓丽云,朱自明,郑高峰.多射流静电纺丝稳定性的影响分析[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10):59–64.
ZHUO Liyun, ZHU Ziming, ZHENG Gaofeng. Analysis on stability of multi-jet electrostatic spinning[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10):59–64.
- [4] BHARDWAJ N, KUNDU S C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(3): 325–347.
- [5] GREINER A, WENDORFF J H. Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2007, 46(30):5 670–5 703.
- [6] 安瑛,李骥原,张毅,等.离心静电纺丝制备异麦芽酮糖醇纤维膜[J]. 塑料, 2023, 52(5):162–166.
AN Ying, LI Aoyuan, ZHANG Yi, et al. Preparation of isomalt fiber membrane by centrifugal electrospinning[J]. Plastics, 2023, 52(5):162–166.
- [7] RENEKER D H, CHUN I. Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning[J]. Nanotechnology, 1996, 7(3). DOI: 10.1088/0957-4484/7/3/009.
- [8] 滕建祥,朱骥生,袁代柱,等.双喷头静电纺丝法制备载软骨脱细胞基质的复合纳米纤维支架[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(34): 5 448–5 454.
TENG Jianxiang, ZHU Jisheng, YUAN Daizhu, et al. Preparation of cartilage decellularized extracellular matrix-loaded composite nanofiber scaffolds based on two-nozzle electrospinning[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2023, 27(34): 5 448–5 454.
- [9] 施丽君,周涓,朱君,等.静电雾化技术在生物医药材料中的应用[J]. 材料导报, 2013, 27(13):138–144.
SHI Lijun, ZHOU Juan, ZHU Jun, et al. Applications of electro-spraying in biomedicine and biomaterials[J]. Materials Reports, 2013, 27(13):138–144.
- [10] NADAF A, GUPTA A, HASAN N, et al. Recent update on electrospinning and electrospun nanofibers: Current trends and their applications[J]. RSC Advances, 2022, 12(37):23 808–23 828.
- [11] 卓丽云,朱自明,郑高峰.静电纺丝多射流稳定喷射的温度调控规律研究[J]. 上海纺织科技, 2020, 48(10):1–5.
ZHUO Liyun, ZHU Ziming, ZHENG Gaofeng. Study on the law on temperature regulation of multi-Jet stable injection in electrospinning[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2020, 48(10): 1–5.
- [12] 李文望,李晓旭,王翔,等.多射流图案化静电纺丝系统开发及试验研究[J]. 机械设计, 2023, 40(10):50–56.
LI Wenwang, LI Xiaoxu, WANG Xiang, et al. Development and experimental study of multi-jet patterned electrospinning system [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(10):50–56.
- [13] 姜佳昕,王翔,郑高峰,等.基于近场静电雾化工艺制备ZnO薄膜及其紫外光电探测性能[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2023, 62(4):533–538.
JIANG Jiaxin, WANG Xiang, ZHENG Gaofeng, et al. Preparation of ZnO thin film by near-field electro-spray and its ultraviolet photoelectric detection performance[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2023, 62(4):533–538.
- [14] PARK K, KANG S M, PARK J W, et al. Fabrication of silver nanowire coated fibrous air filter medium via a two-step process of electrospinning and electro-spray for anti-bioaerosol treatment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 411. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125043.