http://pmse.scu.edu.cn

沉浸式无针静电纺丝工艺参数对聚乙烯醇纳米纤维形貌的影响

何文军[1], 周海迎[1], 梁力文[1], 柳和生[2], 徐英帅[1]
(1. 东华理工大学 机械与电子工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学 机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为突破静电纺丝技术在实际应用中面临的产量低、工作电压高及针头易堵塞等瓶颈,文中通过优化纺丝工艺参数精准调控聚乙烯醇(PVA)纳米纤维的平均直径(MFD)及直径均匀性(以相对标准偏差(RSD)表征),进而为该技术宏量制备高性能 PVA 纳米纤维提供关键的形貌调控依据与制备稳定性支撑。采用 COMSOL 软件模拟绝缘与导电辊筒的电场分布特征,重点分析了金属丝表面泰勒锥成型位置的电场强度规律;基于正交试验设计,系统探究了聚合物溶液浓度、纺丝距离、工作电压及电极直径对 PVA 纳米纤维形貌的影响,利用响应面法构建了多元回归模型,定量评估了各因素间的交互作用机制。结果表明,实验制备的 PVA 纳米纤维平均直径为 209.02~320.37 nm,相对标准偏差为 15.21%~22.41%;聚合物溶液浓度与纺丝距离对 MFD 的影响具有统计学显著性($p<0.05$),工作电压与电极直径对 MFD 的影响相对不显著($p>0.05$);PVA 纳米纤维直径与溶液浓度、工作电压呈正相关关系,与纺丝距离及电极直径呈负相关关系。

关键词:聚乙烯醇;纳米纤维;静电纺丝;线型喷头
中图分类号:TQ340.64 **文献识别码**:A **文章编号**:1000-7555(2026)06-0078-10

在高分子材料领域,纳米纤维制备技术凭借其独特的结构与性能优势,成为前沿研究热点,广泛应用于液体纯化[1]、食品加工[2]、建筑材料[3]、声学设备[4]、电子皮肤[5]、组织工程[6]及环境过滤[7]等诸多领域。其中,静电纺丝技术以其简单高效、适用性广的特点,备受国内外研究者青睐[8]。

从单针式静电纺丝技术起步,多针式与无针式静电纺丝技术相继发展。多针式静电纺丝通过增加针头数量提高泰勒锥数量,一定程度上提升了纳米纤维膜产量,然而针头堵塞问题始终制约其进一步发展。随着工业化进程加快,纳米纤维膜市场需求持续攀升,如何实现纳米纤维的宏量制备成为行业关键挑战,这促使研究重点逐渐向无针静电纺丝技术转移。目前,无针静电纺丝技术已衍生出旋转式、气泡式、多孔管式、磁场辅助式等多种形式,并与 3D 打印静电纺丝[9]、微流体静电纺丝[10]等新兴技术结合。无针静电纺丝技术效率较针式静电纺丝提升了 3~250 倍[11],在多个领域展现出巨大应用潜力。Li 等[12]研发的无针卡门涡旋溶液吹纺(KV-SBS)系统,在保障纳米纤维质量均一性的同时,实现了每小时每喷头 5.90 g 的高产率;Neibolts 等[13]利用旋转电极静电纺丝设备,成功制备出含石墨烯纳米片的高热性能纳米纤维;Ali 等[14]设计的链轮圆盘喷头,以较低工作电压显示出良好的工业应用前景;Lu 等[15]提出的圆锥体形态静电纺丝喷头,借助重力引导聚合物溶液形成多泰勒锥结构,使纳米纤维制备产量较传统方法提升约 1000 倍;Lou 等[16]采用自制无针静电纺丝装置制备了 PVA/水溶性壳聚糖纳米纤维膜,获得了(216.58±58.15) nm(相对标准偏差约 27%)的精细纤维直径、97%的过滤效率及 41~44 Pa 的低压降,品质因数达 0.0825 Pa^{-1},性能显著优于商用口罩(72.5%过滤效率),为环保型高效空气过滤

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0083
收稿日期: 2025-06-17
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52465050)
通讯联系人: 周海迎, 主要从事高分子材料先进成型方法研究, E-mail: hyzhou@ecut.edu.cn

材料提供了可行的技术方案。

尽管无针静电纺丝技术在产量提升方面已取得突破,但现有技术仍存在三大核心问题:一是电场分布均匀性差(如旋转式、圆盘式),导致纤维直径波动大、制备稳定性不足;二是工作电压调控缺乏理论支撑,多数装置依赖经验参数设定,易因电压过高导致射流紊乱或过低导致纺丝中断;三是供液方式不合理(如滴落式、浸泡式),易引发针头堵塞残留风险或溶液挥发过快问题,制约宏量制备的连续性。针对上述问题,本文在 3 个方面开展了创新性工作:一是设计并构建了沉浸式无针线型静电纺丝装置,通过辊筒传动机构带动铜制电极丝实现“沉浸式”浸液,既从结构上彻底规避了针头堵塞问题,又可减少高压静电场对 PVA 溶液体系的干扰[17];二是采用 COMSOL 软件建立了电场仿真模型,定量分析了金属丝表面泰勒锥成型位置的场强分布规律,突破了传统依赖实验试错优化电压的局限,仿真结果显示,绝缘辊筒可使该位置平均场强提升 52.92%;三是结合正交试验设计与响应面法,系统探究了 PVA 溶液浓度、纺丝距离、工作电压及电极直径对纳米纤维平均直径(MFD)及直径均匀性(以相对标准偏差(RSD)表征)的影响,构建了多元回归模型(拟合优度 $R^2=0.9502$)以实现纤维形貌的精准调控。通过上述研究,阐明了工艺参数到纤维形貌的定量关联机制,得出核心结论,绝缘辊筒相较于导电辊筒更利于优化电场空间分布并降低系统工作电压,PVA 溶液浓度与纺丝距离是调控 MFD 的关键影响因素,经优化的工艺参数可制备出 MFD 低至 209.02 nm 且 RSD 为 18.18%的均匀 PVA 纳米纤维,该研究不仅为 PVA 纳米纤维的高效制备提供了具有工程应用价值的技术路径,更为无针静电纺丝装置的电场优化设计与工艺参数调控提供了重要理论支撑。

1　实验部分

1.1　原料与设备

聚乙烯醇:1788 型,醇解度 87.0%~89.0%(摩尔分数),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;去离子水:W119424-25L 型,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

场发射扫描电子显微镜(SEM):NovaNano SEM450 型,美国 FEI 有限公司;高压电源:DW-P104-5ACB2 型,最高输出电压为 100 kV,东文高压电源(天津)股份有限公司。

1.2　纺丝溶液制备

分别称取定量的聚乙烯醇(PVA)白色粉末加入去离子水中,配置质量分数分别为 8%,10% 和 12% 的聚合物溶液。将溶液转移至广口瓶并密封,置于 90 ℃水浴锅中,用磁力搅拌器搅拌 9 h 以确保 PVA 充分溶解,得到澄清透明的无色溶液。溶液中存在对纳米纤维形貌质量产生影响的少量气泡,在使用前需静置 2 h 确保气泡完全消除。处理后的溶液贴上标签备用。

1.3　线型静电纺丝装置

使用实验室自制的沉浸式无针线型喷头静电纺丝装置,如 Fig.1 所示。装置由传动部分,电源部分,喷头部分及收集部分组成。传动部分包括电机、调速器和传送带等,通过调速器来调节喷头部分中辊筒的转速。电源部分包括 1 个最大输出电压为 100 kV 的直流电源,可为喷头部分中的辊筒施加合适的工作电压。收集部分包括收集板和伸缩台面,纺丝距离可以由伸缩台面进行调节,调节范围为 10~30 cm。喷头部分主要由储液槽、辊筒和电极丝等构成,本文电极采用铜丝,其均匀的分布在辊筒上,储液槽中的溶液由精密注射泵来控制。喷头结构如 Fig.2 所示。

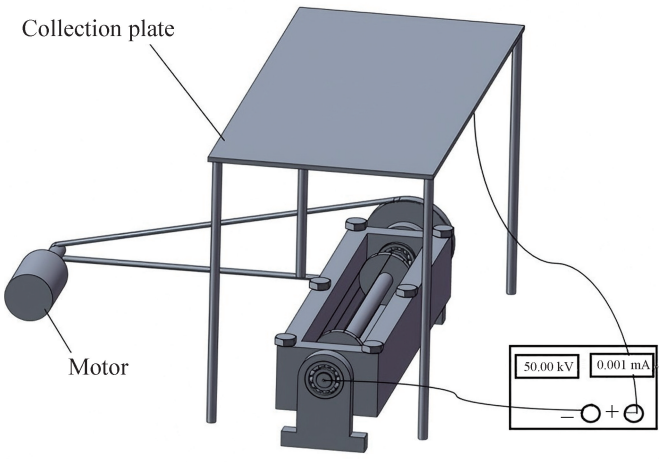


Fig. 1　Diagram of electrospinning device model

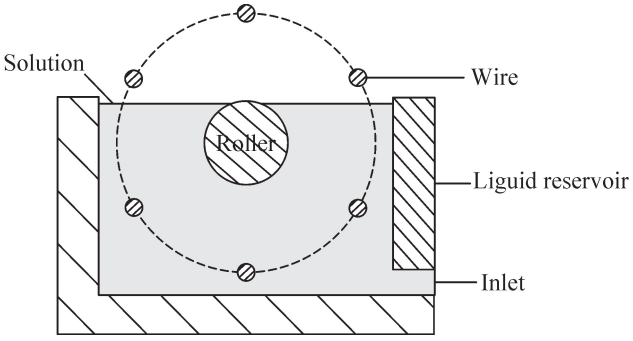


Fig. 2 Diagram of sprinkler structure

1.4 纳米纤维的制备

实验中,辊筒与高压电源的负极相连,收集版与正极相连。将转速设定为 3 r/min,调节收集板的距离并将铝箔锡纸覆盖在铝板上,打开电源调节至实验所需电压。电机带动辊筒转动,将辊筒上的电极丝浸入液面,浸没式的设计使辊筒能在液面下更好地裹挟液体,出液面后形成液滴,在静电场力和表面张力的相互作用下形成泰勒锥。当电压达到突破瑞丽不稳定性的阀值时,泰勒锥产生射流飞向收集板。射流保持一定时间的直线飞行,在溶剂挥发和电场干扰的影响下开始分裂,最终固化鞭打在收集板上,形成纳米纤维。Fig.3 为沉浸式线型静电纺丝过程。



Fig. 3 Electrospinning process

1.5 测试与表征

将 PVA 纳米纤维膜于 60 ℃干燥箱内干燥 1 h,随后在室温静置。剪取小块样品,使用导电胶将其黏附在铝板上。将铝板放入离子溅射仪中,对样品进行喷碳处理。利用扫描电子显微镜观察聚乙烯醇纳米纤维膜的表面形貌,SEM 的加速电压设定为 3 kV。通过 Image J 软件对 SEM 图像进行分析,评估纳米纤维的形貌质量。在每张图像中,随机选取一定数量的纳米纤维测量直径,计算其平均值。

1.6 电场仿真

为了研究辊筒材质和金属丝对电场强度分布的影响,应用 COMSOL 软件分析对比了绝缘辊筒与导电辊筒在高压静电场下的工作电场分布。Fig.4(a)为电场仿真模型,主要参数有辊筒总长度 320 mm,工作电压 50 kV,纺丝距离为 140 mm,其中浸润溶液的辊筒长度为 190 mm,直径都为 10 mm。静电场模拟中设定的参数与实验室现有静电纺丝装置一致。为对比不同材质辊筒在相同工作电压下的电场分布规律,在辊筒上安装了 6 根铜制的电极丝,选取同侧的 4 根相同位置的电极丝,测量其泰勒锥成型位置沿电极丝长度方向 10 ~ 180 mm 处的电场强度。Fig.4(b)为电极丝分布及编号和泰勒锥成型位置。

1.7 响应面方法及实验设计

本文考察了 4 个影响静电纺 PVA 纳米纤维直径的主要参数,分别为工作电压、溶液浓度、方式距离和电极丝直径。为了研究各个参数对实验的影响,采用基于三水平四因素正交试验的响应面方法。实验设计参数范围包括溶液浓度(8%,10% 和 12%)、工作电压(42 kV,44 kV 和 46 kV)、纺丝距离(10 cm,15 cm 和 20 cm)和电极丝直径(0.2 mm,0.3 mm

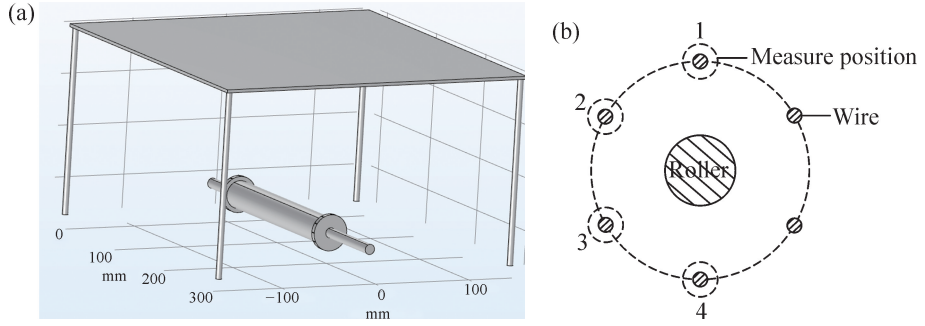


Fig. 4 (a) Diagram of electrospinning device model; (b) electrode wire distribution and Taylor cone forming position

和 0.4 mm)的正交设计表 $L_9(3^4)$。正交设计表如 Tab.1 所示。所有实验均在常温(25±1)℃、相对湿度(RH)42%±3%进行。

Tab. 1　Orthogonal design table

Levels	Concentration /%	Distance /cm	Voltage /kV	Diameter /mm
1	8	10	42	0.2
2	10	14	44	0.3
3	12	18	46	0.4

一次回归正交设计是一种高效的实验数据分析方法,利用正交设计表来安排多因素试验并分析结果。这种方法能够在较少的试验次数下,系统地考察多个因素及其交互作用对响应变量的影响,从而在一定的试验范围内获得较佳的试验结果。建立一次多项式模型去拟合响应值(纳米纤维平均直径)和这 4 个主要参数(溶液浓度、纺丝距离、工作电压和电极直径)的数学关系,如式(1)所示

$$Y=\beta_0+\beta_1A+\beta_2B+\beta_3C+\beta_4D \quad (1)$$

式中:Y——响应值,mm;A——溶液浓度,%;B——工作电压值,kV;C——纺丝距离,cm;D——电极直径,mm;β_0,β_1,β_2,β_3 和 β_4——未知系数,由实验数据拟合确定。

2　结果与讨论

2.1　电场模拟结果分析

Fig.5(a)和(b)分别示意导电和绝缘辊筒在 COMSOL 模拟下的电场强度分布。Fig.5(b)显示,绝缘辊筒周围场强多在 0.1×10^6 V/m,导电辊筒周围场强在 0.5×10^6 V/m 左右(Fig.5(a)),绝缘辊筒周围平均场强比导电辊筒低 0.4×10^6 V/m。不过,Fig.5(a)中最高场强 1.48×10^7 V/m 低于 Fig.5(b)中的 2.36×10^7 V/m,且绝缘辊筒在泰勒锥成型处场强高

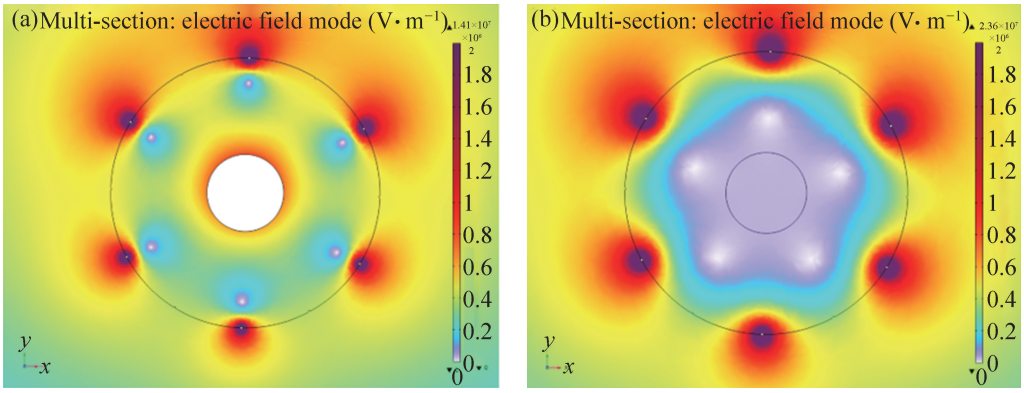


Fig. 5　(a) Electric field distribution diagram of conductive roller; (b) electric field distribution diagram of insulating roller

于导电辊筒。

Fig.6 为导电辊筒和绝缘辊筒在泰勒锥成型位置上的平均电场强度分布对比图,相同位置的绝缘辊筒电极丝上泰勒锥成型位置的平均电场强度明显高于导电辊筒,且随着成型位置和收集板的距离扩大,平均电场强度均逐渐减小。绝缘辊筒在泰勒锥成型位置上的最大平均电场强度为 1.298×10^7 V/m,导电辊筒在泰勒锥成型位置上的最大平均电场强度为 8.492×10^6 V/m,绝缘辊筒相比于导电辊筒电场强度提高了 52.92%。研究模拟表明,使用绝缘辊筒能更好地降低系统的工作电压,减少电场强度对聚合

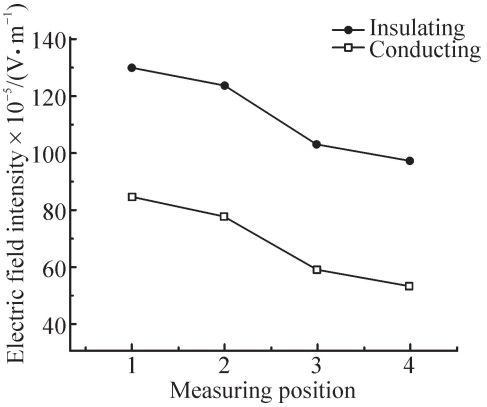


Fig. 6　Comparison of average electric field intensity between insulated roller and conductive roller

物溶液浓度的影响。

2.2 纳米纤维形貌分析

使用场发射扫描电子显微镜对实验结果进行观察,采用 Image J 图像分析软件对 SEM 照片上的 PVA 纳米纤维直径进行测量。随机测量 100 根 PVA 纳米纤维的直径,计算平均值及直径分布的相对标准偏差。SEM 照片及纤维直径分布如 Fig.7 和 Fig.8 所示,计算得到 PVA 纳米线纤维的平均直径为 209.02 ~ 320.37 nm,相对标准偏差为 15.21% ~ 22.41%。正交试验结果如 Tab.2 所示。

如 Tab.2 所示,在 PVA 溶液浓度 12%、纺丝距离 10 cm、工作电压 44 kV、电极丝直径 0.3 mm 的条件下,制备的 PVA 纳米纤维平均直径最大,相关数据与形貌特征分别见 Fig.7(g)和 Fig.8(g)。在 PVA 溶液浓度 8%、纺丝距离 18 cm、工作电压 44 kV、电极丝直径 0.4 mm 的条件下,纳米纤维平均直径最小,对应的直径分布及 SEM 图像见 Fig.7(c)和 Fig.8(c)。对比分析发现,Fig.7(c)和 Fig.8(c)所示的纳米纤维不仅直径更小,且分布密集,均匀性较差。究其原因,较低的溶液浓度导致黏度降低,单位体积内聚合物分子链含量减少,分子间作用力减弱,使得纺丝过程中射流更易拉伸与分裂。同时,较大的电极丝直径在穿过液面时会裹挟更多溶液,形成更大的泰勒锥,在高压电场作用下易引发多射流现象。此外,较长的纺丝距离有利于溶剂挥发,进一步减小了纳米纤维的直径。这些因素协同作用,使该条件下收集的纳米纤维最为细小。

进一步对纳米纤维直径分布的离散程度进行分析,以相对标准偏差作为衡量指标。Tab.2 数据显示,在溶液浓度 8%、纺丝距离 10 cm、工作电压 42 kV、电极丝直径 0.2 mm 的条件下,纳米纤维的 RSD 值达到最大,其 SEM 图像及纤维直径分布见 Fig.7(a)和 Fig.8(a)。相反,在溶液浓度 12%、纺丝距离 10 cm、工作电压 44 kV、电极丝直径 0.3 mm 的条件下,纳米纤维的 RSD 值最小,对应的 SEM 图像及纤维直径分布见 Fig.7(g)和 Fig.8(g)。对比表明,Fig.7(a)和 Fig.8(a)中的纳米纤维分布均匀性较差,且存在黏结现象。其根源在于低黏度溶液使得分子间作用力不足,射流在静电场中的拉伸与分裂过程不稳定。同时,较小的电极丝直径导致泰勒锥尺寸减小,分布密度增加,激发的射流在飞向收集板的过程中易发生碰撞与黏结,从而引发纳米纤维直径不均匀。综上所述,该条件下的纳米纤维分布不均匀性显著。

2.3 响应结果分析

对使用 IMAGE J 软件分析出的纤维直径数据进行整理,采用 DESIGN-EXPERT 软件对正交试验数据继续方差分析,结果如 Tab.3 所示。使用一般线性模型 Linear 对溶液浓度(A)、纺丝距离(B)、工作电压(C)、电极直径(D)进行拟合,并建立多元一次回归模型,如式(2)所示

$$Y=262.83+41.15A-14.39B+5.53C-2.44D \quad (2)$$

Tab. 2 Orthogonal experiment number and corresponding results

Number	Factor				MFD/nm	RSD/%
	A/%	B/cm	C/kV	D/mm		
(a)	1	1	1	1	231.72	22.41
(b)	1	2	3	2	220.25	20.99
(c)	1	3	2	3	209.02	18.18
(d)	2	1	3	3	294.70	16.78
(e)	2	2	2	1	282.36	15.65
(f)	2	3	1	2	255.55	16.57
(g)	3	1	2	2	320.37	15.21
(h)	3	2	1	3	291.60	18.37
(i)	3	3	3	1	295.90	17.13

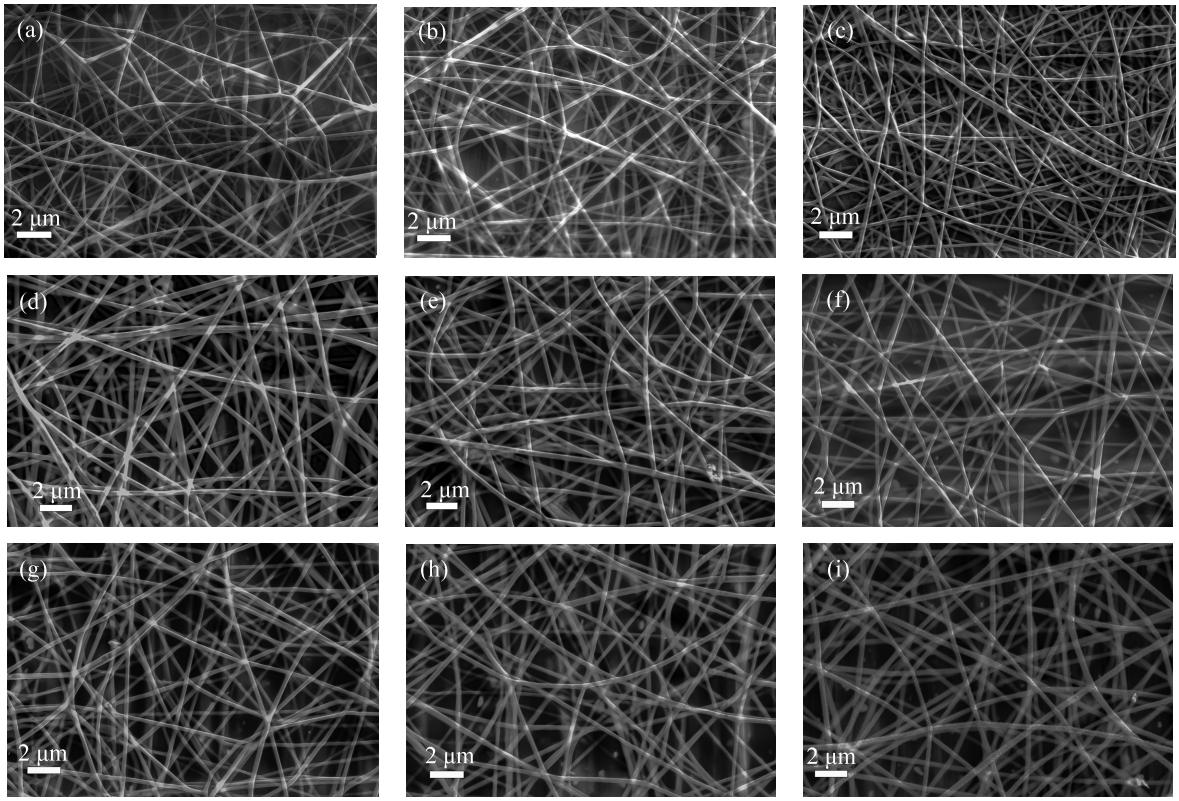


Fig. 7　SEM images of PVA nanofiber diameter

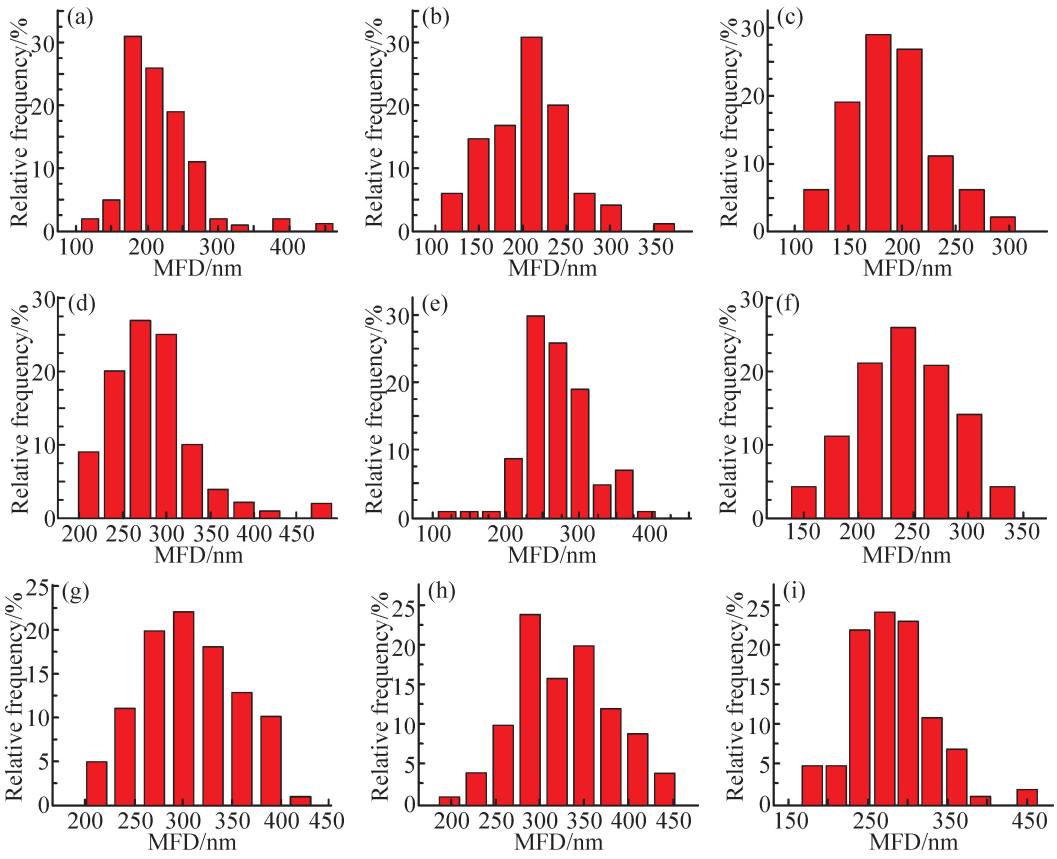


Fig. 8　Diameter distribution of nanofibers

Tab. 3 Variance analysis results of PVA nanofiber process parameters

Source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	*F* value	*P* value	Condition
Model	11606.42	4	2901.60	19.08	0.0072	Remarkable
A	10158.30	1	10158.29	66.80	0.0012	Remarkable
B	1241.86	1	1241.86	8.17	0.0460	Remarkable
C	170.45	1	170.45	1.12	0.3494	Non significant
D	35.82	1	35.82	0.2355	0.6528	Non significant
Residual	608.29	4	152.07			
Cor total	12214.71	8				
R^2	0.9502	4				

分析 Tab.3 可知,模型的 p 值<0.05,说明该模型显著,可用于纳米纤维直径的预测;溶液浓度(A)、纺丝距离(B)的 p 值<0.05,说明影响显著,其中溶液浓度(A)p 值最小,说明其对 PVA 纳米纤维直径的影响最大。而工作电压(C)、电极直径(D)的 p 值均>0.05,说明他们对 PVA 纳米纤维直径的影响并不显著。R^2=0.9502,大于 0.9,说明拟合的方程非常接近实际值,提出的多元一次回归模型得到的计算结果与实验数据关联性较高。

Fig.9 是模型预测 PVA 纳米纤维平均直径与实际纳米纤维平均直径的关系图。从图中可以看出,PVA 纳米纤维实际值与模型预测值相差较小,表明模型拟合效果好。

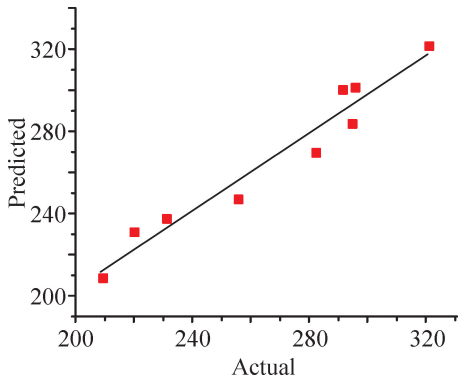


Fig. 9 Predicted average diameter of electrospun PVA nanofibers and actual average diameter

为深入验证模型的准确性与可靠性,本文借助 Design-Expert 软件优化模块,针对目标纤维直径 209.02 nm 的参数优化展开实验。优化参数范围为,溶液浓度 8%~12%,纺丝距离 10~18 cm,工作电压 40~46 kV,电极直径 0.3 mm。选取 4 种优化方案进行实验,对比实际制备的聚乙烯醇(PVA)纳米纤维平均直径与模型预测值。Tab.4 列出了优化实验的参数设置及验证结果。实验结果显示,4 种条件下制备的 PVA 纳米纤维平均直径分别为 207.28 nm,220.09 nm,214.84 nm 和 210.04 nm;模型预测值依次为 211.30 nm,208.63 nm,212.83 nm 和 222.54 nm。尽管预测值与实际值存在一定差异,但误差均控制在 10% 以内,具体为 1.94%,5.21%,0.93% 和 5.95%。对比实验数据表明,拟合的多元一次线性回归方程在预测 PVA 纳米纤维平均直径方面具有较高的准确性和可靠性,为实验参数的优化提供了有力的理论支持。该数学模型为 PVA 纳米纤维直径的精准预测与工艺优化提供了有效的量化工具。

利用 Design-Expert 软件绘制响应曲面图,在选定的显著因素与非显著因素的值固定在中心不变的情况下,分析显著因素与非显著因素交互作用下 PVA 纳米纤维直径的变化。等高线图是对应响应曲面图的投影,响应曲面图中的平面越陡,表示工艺参数对纳米纤维直径的影响越显著。如 Fig.10 所示。

Fig.10(a)是显著因素中溶液浓度与非显著因素中工作电压交互作用对纳米纤维直径的影响。如图所示,在工作电压一定时,溶液浓度增加,纳米纤维直径增加,变化显著;在溶液浓度一定时,工作电压升高,纳米纤维直径增加,但变化不显著。分析纳米纤维直径增加的原因在于,工作电压升高,泰勒锥的电荷增加,电场力增大,导致射流的体积与射流的速

Tab. 4　Optimization experiment parameter settings and verification results

Number	Factor				Actual/nm	Predicted/nm	Error/%
	A/%	B/cm	C/kV	D/mm			
1	8	18	44	0.3	207.28	211.30	1.94
2	8	18	43	0.3	220.09	208.63	5.21
3	8	17	43	0.3	214.84	212.83	0.93
4	10	18	43	0.3	210.04	222.54	5.95

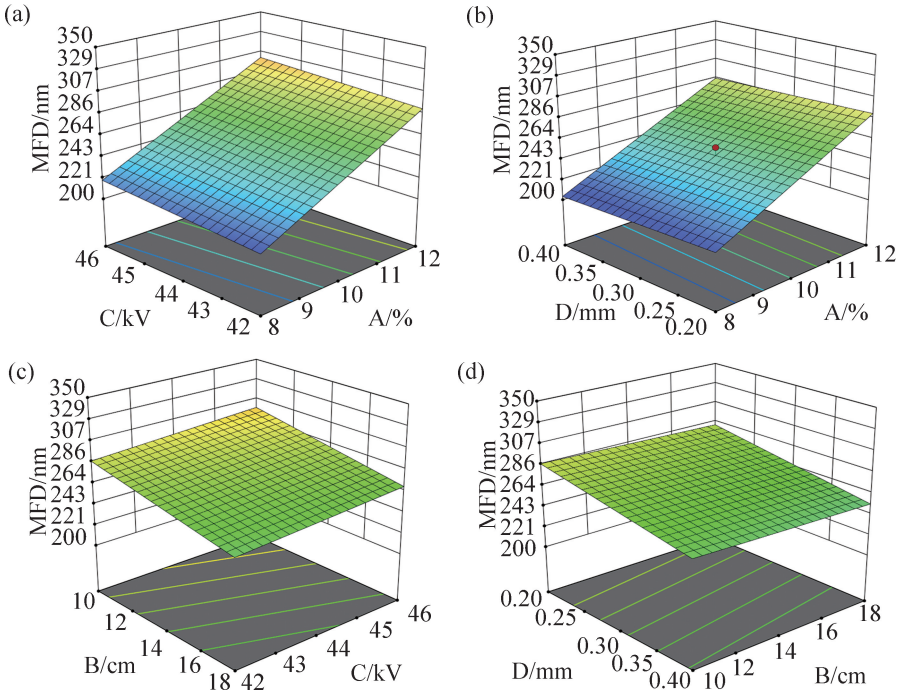


Fig. 10　3D response surface under the interaction of significant factors and non-significant factors: (a) interaction between solution concentration and working voltage; (b) interaction between solution concentration and electrode diameter; (c) interaction between spinning distance and working voltage; (d) interaction between spinning distance and electrode diameter

度增大,射流到达收集板的时间减少,在电场中受到的拉伸时间变短,射流速度加快导致溶剂挥发不完全,携带更多溶剂的射流以更大的体积鞭打在收集板上,而更高的溶液浓度会放大这种现象,形成直径更大的纳米纤维。所以,当工作电压升高、电场力增大、泰勒锥电荷增加、射流速度加快及溶剂挥发不完全等因素影响下,PVA 纳米纤维直径增大。Fig.10(b)是显著因素中溶液浓度与非显著因素中电极直径交互作用对纳米纤维直径的影响。如图所示,在电极直径一定时,溶液浓度增加,纳米纤维直径增加,变化显著;在溶液浓度一定时,电极直径减小,纳米纤维直径增加,但变化不显著。分析纳米纤维直径增加的原因在于,当电极丝减小时,在电极丝上形成的泰勒锥密度更大,泰勒锥之间的距离更近,导致射流在到达收集板的过程中容易发生纠缠,使收集到的纳米纤维直径增大,而溶液浓度增加,溶液中的大分子数量提高,溶液的黏性力增强,进一步使纳米纤维直径增大。所以,聚合物溶液浓度增加、电极丝直径减小时,泰勒锥密度增大导致的射流纠缠等因素使 PVA 纳米纤维直径增大。Fig.10(c)是显著因素中纺丝距离与非显著因素中工作电压交互作用对纳米纤维直径的影响。如图所示,在工作电压一定

时,纺丝距离增加,纳米纤维直径减小,变化显著;在纺丝距离一定时,工作电压增大,纳米纤维直径增加,但变化不显著。分析纳米纤维直径减小的原因在于,纺丝距离增加,电场中的电场力减弱,射流的飞行速度减小,飞行距离增大,溶剂挥发充分,射流能在飞行过程中更好地拉伸,同时,工作电压增大使射流体积增大,速度减小,溶剂挥发速率减慢,导致溶剂残留,纤维直径增大。所以,在纺丝距离增加、工作电压增大、电场力减弱、溶剂挥发充分等多重因素影响下,PVA 纳米纤维直径减小。Fig.10(d)是显著因素中纺丝距离与非显著因素中电极直径交互作用对纳米纤维直径的影响。如图所示,在电极直径一定时,纺丝距离增加,纳米纤维直径减小,变化显著;在纺丝距离一定时,电极直径增大,纳米纤维直径减小,但变化不显著。分析纳米纤维直径减小的原因在于,电极丝直径增大,导致泰勒锥直径增大,同时纺丝距离增大,电场力减弱,电极丝携带的更大体积的泰勒锥激发出的更粗的射流在其影响下,拉伸、分裂成更细小的射流,减少鞭打在收集板上的射流残余的溶剂,导致纤维直径减小。所以,在纺丝距离增加、电场力减弱、溶剂挥发及电极直径增大等多重因素影响下,PVA 纳米纤维直径减小。

3 结论

本文针对闭式线型静电纺丝装置开展优化设计,引入绝缘辊筒结构后,泰勒锥成型区域电场强度得到显著提升,装置工作电压大幅降低,同时有效减少了高压电场对 PVA 溶液的干扰。工艺参数调控实验表明,纳米纤维平均直径随聚合物溶液浓度增加呈明显增长趋势,随纺丝距离延长呈递减特征,其中溶液浓度与纺丝距离为影响纤维直径的主导因素。该优化装置通过对电场分布的精准调控,在低电压工况下实现了 PVA 纳米纤维的稳定、连续制备,有效规避了高压静电场对聚合物溶液流的负面影响,在纤维形貌可控性、工艺运行稳定性及能效水平方面均具有显著技术优势,为高性能 PVA 纳米纤维膜的规模化生产提供了可行的技术路径与设备方案。

参考文献:

[1] Cao Q, Zhang X, Xun H, *et al*. An intelligent nanofiber membrane with dual-asymmetric wettability enabling spontaneous directional water and oil transportation in opposite direction[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 362: 131873.

[2] Amjadi S, Almasi H, Gholizadeh S, *et al*. Designing an active green packaging material based on black chickpea protein isolate electrospun nanofibers containing citral nanoliposomes[J]. LWT, 2024, 213: 117042.

[3] Han M, Ren S, Ge C, *et al*. Polyamide 6-Al_2O_3 nanoparticle composite nanofiber membranes with high solar reflectivity and human radiation transmittance for passive human body cooling[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2025, 279: 113270.

[4] Jihwan L, Seong H K. Effects of SWCNT/PVDF composite web behavior on acoustic piezoelectric property[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 330: 1-6.

[5] Zhang J, Guo K, Guo J, *et al*. Unidirectional moisture-wicking PAN/BTO-PVDF/ZnO all fibrous bilayer breathable electronic skin for health sensing[J]. Polymer, 2025, 316: 127815.

[6] Ramamoorthy T, Soloman M A, Annamalai D, *et al*. Optimization and characterization of electrospun bilayered PVA/collagen nanofibers loaded with quercetin for tissue engineering applications[J]. Journal of Bioactive and Compatible Polymers, 2025, 40: 31-44.

[7] Yang C, Xie D, Li S, *et al*. Electrospun fine-diameter polyimide nanofiber membranes via metal wire-based needle-free technique for high-efficiency PM0.3 filtration at high-temperature[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 357: 130115.

[8] 房炫㬎, 贾露华, 李向红, 等. 静电纺纳米纤维发展概述[J]. 针织工业, 2024(9): 23-27.
Fang X A, Jia L H, Li X H, *et al*. Development overview of electrospun nanofibers[J]. Knitting Industries, 2024(9): 23-27.

[9] Wang Z, Liu S, Han M, *et al*. 3D Printing-electrospinning hybrid nanofibrous scaffold as LEGO-like bricks for modular assembling skeletal muscle-on-a-chip functional platform[J]. Advanced Fiber Materials, 2024, 6: 1521-1540.

[10] Cheng J, Jun Y, Qin J, *et al*. Electrospinning versus microfluidic spinning of functional fibers for biomedical applications[J]. Biomaterials, 2017, 114: 121-143.

[11] Raja V, Mahalakshmi L, Leena M M, *et al*. Needleless electrospinning: concepts and applications in the food industry[J]. Food Engineering Reviews, 2023, 16: 252-269.

[12] Li Z W, Cui Z W, Zhao L H, *et al*. High-throughput production of kilogram-scale nanofibers by Kármán vortex solution blow spinning[J]. Science Advances, 2022, 8: eabn3690.

[13] Neibolts N, Platnieks O, Gaidukovs S, *et al*. Needle-free

electrospinning of nanofibrillated cellulose and graphene nanoplatelets based sustainable poly (butylene succinate) nanofibers[J]. Materials Today Chemistry, 2020, 17: 1-6.

[14] Ali U, Niu H, Aslam S, *et al*. Needleless electrospinning using sprocket wheel disk spinneret[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52: 1-11.

[15] Lu B, Wang Y, Liu Y, *et al*. Superhigh-throughput needleless electrospinning using a rotary cone as spinneret[J]. Small, 2010, 6: 1612-1616.

[16] Lou C W, Lin M C, Huang C H, *et al*. Preparation of needleless electrospinning polyvinyl alcohol/water-soluble chitosan nanofibrous membranes: antibacterial property and filter efficiency[J]. Polymers, 2022, 14: 1054.

[17] 冯旭霞. 高压电场下高分子溶液基本性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
Feng X X. Study on the fundamental properties of polymer solutions under high voltage electric fields[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

Effects of Process Parameters on Immersive Needle-Free Electrospun Polyvinyl Alcohol Nanofibers

Wenjun He[1], Haiying Zhou[1], Liwen Liang[1], Hesheng Liu[2], Yingshuai Xu[1]

(*1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Donghua University of Science and Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Electromechanical and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China*)

ABSTRACT: To overcome the core bottlenecks faced by electrospinning technology in practical applications, such as low production, high operating voltage, and needle clogging, this study precisely controlled the average diameter (MFD) and diameter uniformity (expressed by relative standard deviation, RSD) of polyvinyl alcohol (PVA) nanofibers by optimizing the spinning process parameters. This provides key guidance for morphology regulation and process stability for the large-scale preparation of high-performance PVA nanofibers through this technology. The COMSOL software was employed to simulate the electric field distribution characteristics of insulating and conductive rollers, focusing on analyzing the electric field intensity at the formation positions of Taylor cones on the metal wire surface. Based on an orthogonal experimental design, the effects of polymer solution concentration, spinning distance, operating voltage, and electrode diameter on the morphology of PVA nanofibers were systematically investigated. A multivariate regression model was constructed through response surface methodology to quantitatively assess the interaction mechanisms among these factors. The results show that the experimentally prepared PVA nanofibers have an average diameter range of 209.02~320.37 nm with a relative standard deviation of 15.21%~22.41%. The polymer solution concentration and spinning distance have statistically significant effects on MFD ($p<0.05$), while the effects of operating voltage and electrode diameter on MFD are relatively insignificant ($p > 0.05$). The diameter of PVA nanofibers is positively correlated with solution concentration and working voltage, and negatively correlated with spinning distance and electrode diameter.

Keywords: polyvinyl alcohol; nanofiber; electrospinning; linear nozzle