

线型自由液面静电纺纳米纤维

周海迎¹, 王翌辉¹, 柳和生², 邢升¹, 黄俊杰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:以铜丝作为喷头电极,设计并搭建了一套线型自由液面静电纺丝实验装置。采用L9(34)正交实验方案,研究了聚合物溶液浓度、工作电压、纺丝距离、喷头转速4个主要工艺参数对聚偏氟乙烯(PVDF)纳米纤维形貌及其分布的影响,建立了工艺参数与纳米纤维平均直径间的多元二次回归方程并进行了单因素影响分析。正交实验中获得纳米纤维平均直径(MFD)为192~443 nm、相对标准偏差(RSD)为32.5%~53.8%。研究结果表明,在一定条件下,PVDF纳米纤维的平均直径随着聚合物溶液浓度和工作电压的增加而增加、随着纺丝距离和喷头转速的增加而减小。通过方差和极差分析法可知,聚合物溶液浓度对纳米纤维的平均直径影响最大,随后是纺丝距离和喷头转速的影响,而工作电压对纳米纤维平均直径的影响程度较低。

关键词:纳米纤维;静电纺丝;自由液面;聚偏氟乙烯;工艺参数

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-7555(2022)08-000

静电纺丝是制备纳米纤维最为可靠的一种方法^[1,2],但是传统针头式静电纺丝装置生产效率极低,严重影响了纳米纤维的普遍应用研究。如何实现纳米纤维的规模化低成本制备是当前一个亟待解决的问题^[3]。近年来提出了很多新型的静电纺丝装置,其都有一个共同的特点,即在自由液体表面激发聚合物溶液多射流,从而提高纳米纤维的生产效率,这些方法通常被称为自由液面静电纺丝^[4-6]或无针静电纺丝。Nurwaha等^[7]采用螺旋线圈法分别研究了线圈尺寸等工艺参数对纳米纤维直径和纤维产量的交互影响;Rutledge等^[8,9]研究了线型自由液面静电纺丝的射流触发电压和生产效率;李储林等^[10]采用正交试验设计方法研究了聚氧化乙烯(PEO)水溶液的无针头直线型静电纺丝中5种因素对成纤直径的影响;宋明玉等^[11]采用线型螺旋金属丝进行肽核酸(PNA)纳米纤维多射流纺丝,探究了工艺参数对纤维细度及纤维膜形貌的影响;李婷婷等^[12]采用铜丝作为电极研究了聚乙烯醇(PVA)的可纺性能;Li等^[13,14]采用线型静电纺丝技术宏量制备纳米纤维,制备的石墨烯/碳纳米管/聚乙烯醇/海藻酸钠纳

米纤维纤维直径可达200nm;许文婷等^[15]研究线型静电纺丝中溶液配比、收集距离和纺丝电压对纤维形貌的影响;Aulova等^[16]研究了聚酰胺(PA6)纤维的无针电纺中溶液浓度和电纺电压对纤维直径的影响,得知平均纤维直径随着聚合物浓度和静电纺丝电压的增加而增加。上述研究结果表明,与传统的针式电纺丝相比,自由液面静电纺丝装置具备结构简单、喷头不易堵塞、生产效率高、使用和维护方便等优势,但也存在工艺参数增多且难以控制等问题。

本文设计并搭建了线型自由液面静电纺丝实验装置,成功制备了聚偏氟乙烯(PVDF)纳米纤维,考察了聚合物溶液浓度、工作电压、纺丝距离、喷头速度这4个主要工艺参数对纳米纤维形貌及其分布的影响,并分析了单个工艺参数对纳米纤维平均直径的影响,得出的实验结果可以为该线型自由液面静电纺丝装置的深入研究提供思路 and 参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

聚偏二氟乙烯:P875314型, M_w -400000,上海麦

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0182

收稿日期:2021-12-27

基金项目:江西省新能源工艺及装备工程技术研究中心开放基金(JXNE2020-5);国家自然科学基金资助项目(21664002);

东华理工大学博士基金(DHBK2020009);江西省聚合物微纳制造与器件重点实验室开放基金(PMND202002)

通讯联系人:柳和生,主要从事先进聚合物成型理论及装备研究,E-mail: hslu@vip.163.com;

王翌辉,主要从事静电纺丝新方法研究,E-mail: 13137906281@163.com

克林生化科技有限公司; N,N -二甲基甲酰胺(DMF): 纯度 99.0%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

热磁力搅拌器: ZNCL-BS, 上海越众仪器设备有限公司; 电子天平秤: BSM220.4, 上海卓精电子科技有限公司; 电热鼓风干燥箱: DHG-9420A, 上海一恒科学仪器有限公司; 场发射扫描电子显微镜(SEM): NovaNanoSEM450, 美国FEI有限公司; 高压电源: 最高输出电压为 100 kV, 东文高压电源天津股份有限公司。

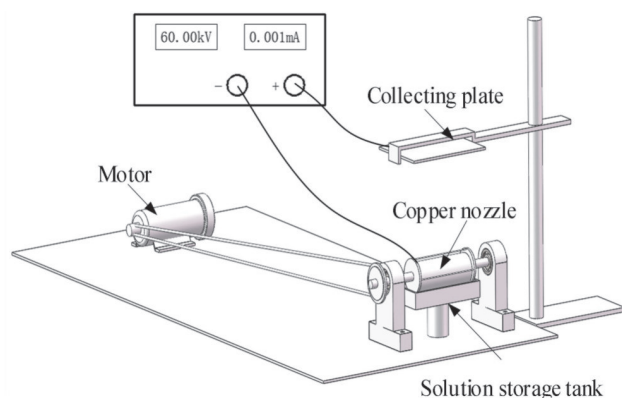


Fig.1 Linear free-liquid surface electrospinning device

1.2 制备

称取一定量的PVDF粉末加入DMF溶液中, 按一定配比置于广口瓶中, 配置聚合物溶液的质量分数分别为 12%, 14% 和 16%。用封口胶带密封完好后, 放入水浴锅中加热搅拌 8 h, 将搅拌器的水温设置为 60 °C, 加热搅拌时长为 5 h, 至溶液澄清透明呈亮黄色, 在室温放置待用, 溶液浓度以质量分数表示。用自制线型自由液面静电纺丝装置进行纳米纤维的制备。

1.3 测试与表征

将纳米纤维膜置于真空烘箱烘干, 经离子溅射仪对其进行喷金处理, 采用扫描电子显微镜观察纳米纤维形貌。

1.4 自制静电纺丝装置

Fig.1 为自制线型自由液面静电纺丝装置示意图, 主要包括铜丝喷头、装有聚合物溶液的储存槽、收集板、皮带传动装置、电机等。实验过程中, 3 根长

度为 16 cm、呈 120° 分布的铜丝安装在金属轴上, 金属轴连接上带轮, 带轮通过皮带与直流电机相连, 可用调速器控制电动机转速, 以实现变速控制。

实验过程中, 为了降低高压电场对驱动电机的电磁干扰, 高压电源正极连接到收集板, 负极连接到铜线和金属轴。设定转速, 电机带动纺丝喷头转动, 铜线电极不断地通过储液器中的聚合物溶液。当铜线刚刚穿过气液界面进入空气中时, 黏性聚合物溶液被挟带出储液器, 并在铜线上形成一层带电荷的聚合物溶液薄膜。在溶液表面张力和电场力的耦合作用下, 由于瑞利-泰勒不稳定性, 覆盖在铜线上的液膜分裂成单个的带电聚合物溶液滴。电磁场作用使得液滴上的电荷重新进行分布, 异性电荷分布在靠近连接正极的收集板的一端, 受电场拉力作用, 液滴逐渐被拉伸成泰勒锥形状, 在足够高的电场下, 每个液滴发出 1 个带电射流。由于电场诱导的拉应力和电荷斥力, 射流向收集板运动时会进一步被拉伸变细, 同时溶剂挥发, 从而在收集板上产生PVDF纳米纤维。Fig.2 为线型自由液面静电纺丝射流喷射过程。

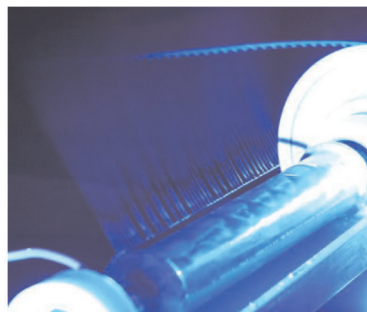


Fig.2 Electrospinning process

1.5 实验设计

本研究基于正交实验设计方法, 考察了聚合物溶液质量分数、工作电压、纺丝距离、旋转速度 4 个主要工艺参数对纳米纤维直径及其分布的影响。为了更加全面地研究各参数的影响趋势, 且不至于实验次数过多而难以进行, 每个实验参数取 3 个水平, 即选取四因素三水平正交设计表 $L_9(3^4)$ 进行实验。参数取值范围如 Tab.1 所示, 聚合物溶液质量分数(12%, 14% 和 16%), 工作电压(65 kV, 70 kV 和

Tab.1 Factor levels

Level	Factor			
	A Mass fraction/%	B Voltage/kV	C Distance/cm	D Rotate speed/ (r·min ⁻¹)
1	12	65	15	4
2	14	70	20	6
3	16	75	25	8

Tab.2 Orthogonal experimental results

Trial	A	B	C	D	Min/nm	Max/nm	MFD/nm	RSD/%
1	1	1	1	1	149	891	419.28	33.58%
2	1	2	2	2	97	521	266.42	32.50%
3	1	3	3	3	61	491	192.28	40.14%
4	2	1	2	3	139	985	373.04	49.78%
5	2	2	3	1	110	743	301.61	47.20%
6	2	3	1	2	95	572	196.50	41.64%
7	3	1	3	2	248	950	442.70	33.57%
8	3	2	1	3	139	1068	336.55	53.75%
9	3	3	2	1	160	1028	431.58	41.09%

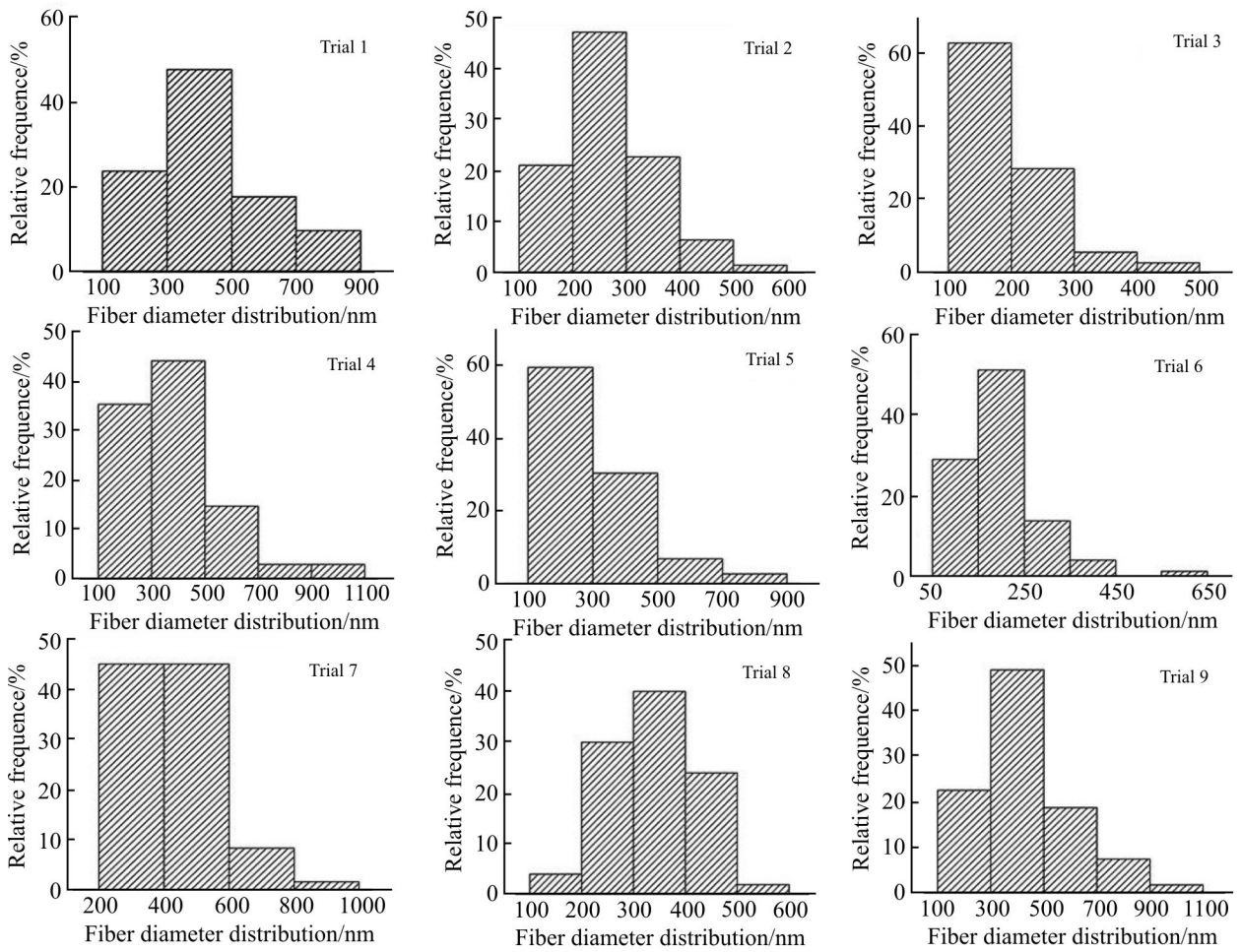


Fig.3 Diameter distribution of PVDF nanofibers

75 kV), 纺丝距离(15 cm, 20 cm 和 25 cm)和喷头转速(4 r/min, 6 r/min, 8 r/min)。每个实验过程进行 3 min, 所有实验均在常温(25 ± 1) °C, 相对湿度(RH) $42\% \pm 3\%$ 下进行。

2 结果与讨论

2.1 正交实验结果

采用 SEM 表征了 PVDF 纳米纤维的表面形貌, 用图像处理软件 ImageJ 测量纳米纤维直径, 每张 SEM 照片上测量 100 个不同部位的纳米纤维直径, 并统计其直径的平均值(MFD)和相对标准差(RSD), 正交实验结果见 Tab.2。

2.2 PVDF 纳米纤维直径及其分布

通过 ImageJ 测量出的数据分别按顺序绘制成

的纤维直径分布如 Fig.3 所示。正交实验设计中 PVDF 纳米纤维 *MFD* 范围为 192~443 nm。

在质量分数为 16%、工作电压为 65 kV、纺丝距离为 25 cm、转速为 6 r/min 的实验条件下, *MFD* 值最大, Fig.4(a) 为该条件下纳米纤维 SEM 图像; 在质量分数为 12%、工作电压为 75 kV、纺丝距离为 25cm、转速为 8r/min 的实验条件下, *MFD* 值最小, Fig.4(b) 为该条件下纳米纤维 SEM 图像。对比 Fig.4 (a) 和 Fig.4(b) 发现, Fig.4(a) 中纳米纤维直径较粗, 但是分布比较均匀, 而 Fig.4(b) 中虽然纳米纤维直径平均值较小, 但最大直径和最小直径分散很宽, 且分布极不均匀。分析其原因在于 Fig.4(b) 中溶液浓度较小, 高分子内部分子链间的纠缠力较小, 而电压比较高, 在溶液射流从喷头飞向收集板的过程中, 射流产生了裂变, 因此收集到非常细的纳米纤维。

据统计结果表明, 正交实验设计中 PVDF 纳米纤维的 *RSD* 范围是 32.5%~53.75%。在质量分数为 16%、工作电压为 70 kV、纺丝距离为 15 cm、转速为 8 r/min 的实验条件下, *RSD* 值最大, Fig.4(c) 为该条件下静电纺丝 PVDF 纳米纤维的 SEM 图像; 在质量分数为 12%、工作电压为 70 kV、纺丝距离为 20 cm、转速为 6 r/min 的实验条件下, *RSD* 值最小, Fig.4(d) 为该条件下静电纺丝 PVDF 纳米纤维的 SEM 图像。对比 Fig.4(c) 和 Fig.4(d) 发现, Fig.4(c) 中的纳米纤维直径明显更大, 且最大直径和最小直径分散很宽,

分布不均匀。其原因在于 Fig.4(c) 中溶液浓度较大, 高分子内部分子链间的纠缠力较大, 铜丝经过储液器时挟带的聚合物溶液量较大, 形成的液珠和泰勒锥体积较大, 同时纺丝距离较短, 溶液射流从喷头飞向收集板的过程时间变短, 射流拉伸不充分, 因此产生较大直径的纳米纤维; 而且纺丝距离较短, 电场强度大, 电场力大的情况下容易促使射流产生裂开现象, 导致纳米纤维分布不均匀。

实验数据结果表明, PVDF 纳米纤维直径及其分布不是由各工艺参数单独决定的, 而是由各工艺参数组合决定的。

2.3 正交试验结果分析

利用 Design-Expert 软件对正交实验数据进行方差分析和极差分析得到结果如 Tab.3 和 Tab.4。建立 PVDF 纳米纤维的 *MFD* (*Y*) 和聚合物溶液浓度 (*A*)、工作电压 (*B*)、纺丝距离 (*C*)、喷头转速 (*D*) 的回归方程模型

$$Y = 8111.1426 + 150.5067A - 66.8677B - 552.9875C - 628.7064D - 4.3274AB + 9.9776AC + 9.5662AD + 5.2127BC + 4.1991BD + 10.3621CD$$

由 Tab.3 可知, 模型 $P < 0.01$ 说明聚合物溶液浓度和纺丝距离对纳米纤维 *MFD* 的影响较大, $p = 0.0003$, 说明此模型的差异较为显著, 方程较为合理。对于 *MFD* 来说, 4 个影响因素, 即聚合物溶液浓度 (*A*)、工作电压 (*B*)、纺丝距离 (*C*) 和喷头转速

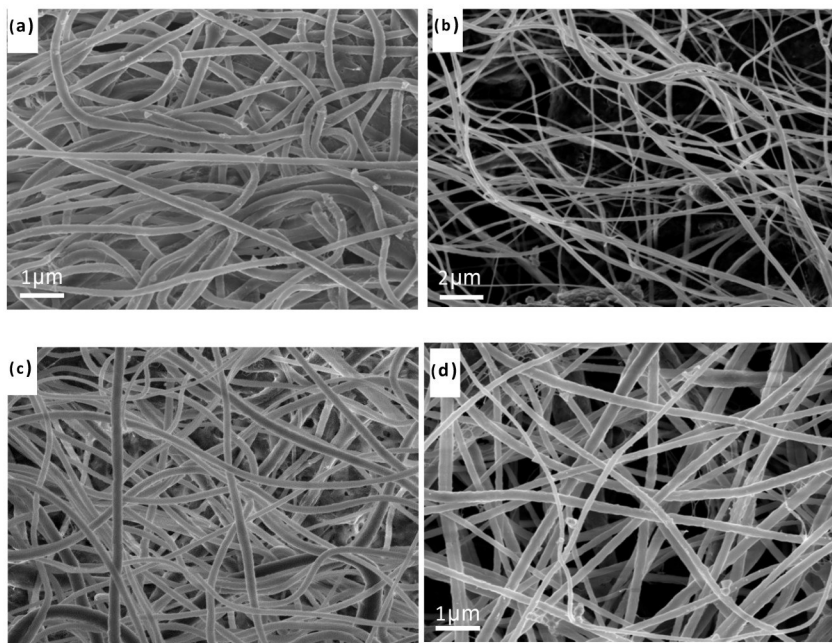


Fig.4 SEM images of nanofibers

(a): *MFD* biggest; (b): *MFD* minimum; (c): *RSD* biggest; (d): *RSD* minimum

Tab.3 ANOVA results of nanofiber process parameters

Soruce of variation	Quadratic sum	Degree of freedom	Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>	Significance
Model	38253.56	10	38253.56	10.03	0.0003	*
<i>A</i>	19292.35	1	19292.35	50.57	<0.0001	*
<i>B</i>	289.52	1	289.52	0.076	0.7880	
<i>C</i>	16259.81	1	16259.81	4.26	0.0633	
<i>D</i>	841.12	1	841.12	0.22	0.6478	
overall error	42453.23	15				

note“*” indicates $P < 0.01$

Tab.4 Range analysis results

Performance index	Index	<i>A</i> /%	<i>B</i> /kV	<i>C</i> /cm	<i>D</i> /(r·min ⁻¹)
Average diameter of nanofibers/nm	<i>K</i> 1	877.98	1235.02	1152.47	1152.47
	<i>K</i> 2	871.15	904.58	1071.04	905.62
	<i>K</i> 3	1210.83	820.36	936.59	901.87
	<i>k</i> 1	219.49	308.76	288.12	288.12
	<i>k</i> 2	217.79	226.15	267.76	226.41
	<i>k</i> 3	302.71	205.09	234.15	225.47
	<i>R</i>	414.66	134.45	399.68	250.6
Primary and secondary factors		<i>A</i> > <i>C</i> > <i>D</i> > <i>B</i>			
Prioritization scheme		<i>A</i> 2 <i>B</i> 3 <i>C</i> 3 <i>D</i> 3			

(*D*)的极差值(*R*)分别为414.66, 134.45, 399.68和250.6, *R*数值越大证明该因素对*MFD*的影响也越明显。4个影响因素中, 聚合物溶液浓度对纳米纤维的*MFD*影响最大, 随后是纺丝距离和旋转速度的影响, 而工作电压对纳米纤维*MFD*的影响程度较低。综上, 4个因素对*MFD*影响的主次顺序为聚合物溶液浓度(*A*)>纺丝距离(*C*)>喷头转速(*D*)>工作电压(*B*)。PVDF纳米纤维*MFD*的最优参数组合为*A*2*B*3*C*3*D*3, 即聚合物溶液质量分数为14%、工作电压为75 kV、纺丝距离为25 cm、喷头转速为8 r/min。

利用该回归模型, 将所得数据处理后利用Origin软件进行拟合处理, 得到4个工艺参数对纳米纤维直径的影响如图5所示。

Fig.5(a)为在工作电压70 kV、纺丝距离20 cm、喷头转速6 r/min的情况下, 聚合物溶液浓度对纳米纤维*MFD*的影响。从图可以观察到, 聚合物溶液质量分数从12%上升至16%时, *MFD*从157.705 nm升高至574.421 nm, 呈现出一个快速增高的趋势, 增幅为265%。分析其原因: 首先, 聚合物溶液浓度增

大, 黏度增大, 铜丝从储液器划过时带出更多的溶液, 在铜丝上形成的液珠体积会增大, 在电磁力作用下形成的泰勒锥也会比较大, 从而导致纳米纤维直径增大; 其次, 随着聚合物溶液浓度的增加, 溶液中聚合物分子链纠缠力增大, 工作电压达到临界值, 产生射流的直径会增大, 同时射流在拉伸过程中表现的黏弹性力增大, 会限制对射流的拉伸, 从而形成较粗的纳米纤维。

Fig.5(b)说明了在聚合物溶液质量分数14%、纺丝距离20 cm、喷头转速6 r/min的情况下, 工作电压对纳米纤维*MFD*的影响。从图中可以看出, 随着工作电压从65 kV增加到75 kV时, *MFD*从356.799 nm增加到了376.551 nm, 整体呈上升的趋势, 增幅为5.6%。工作电压对纳米纤维直径的影响主要体现在2个方面: 首先, 在适当的溶度、纺丝距离和喷头转速下, 随着工作电压的增加, 液滴受到的电场力增加, 使得更多的射流包括直径更大的射流从铜丝上的液珠表面射出, 从而导致纳米纤维直径增大; 其次, 电压的增加导致了电场力的增加, 使得射流

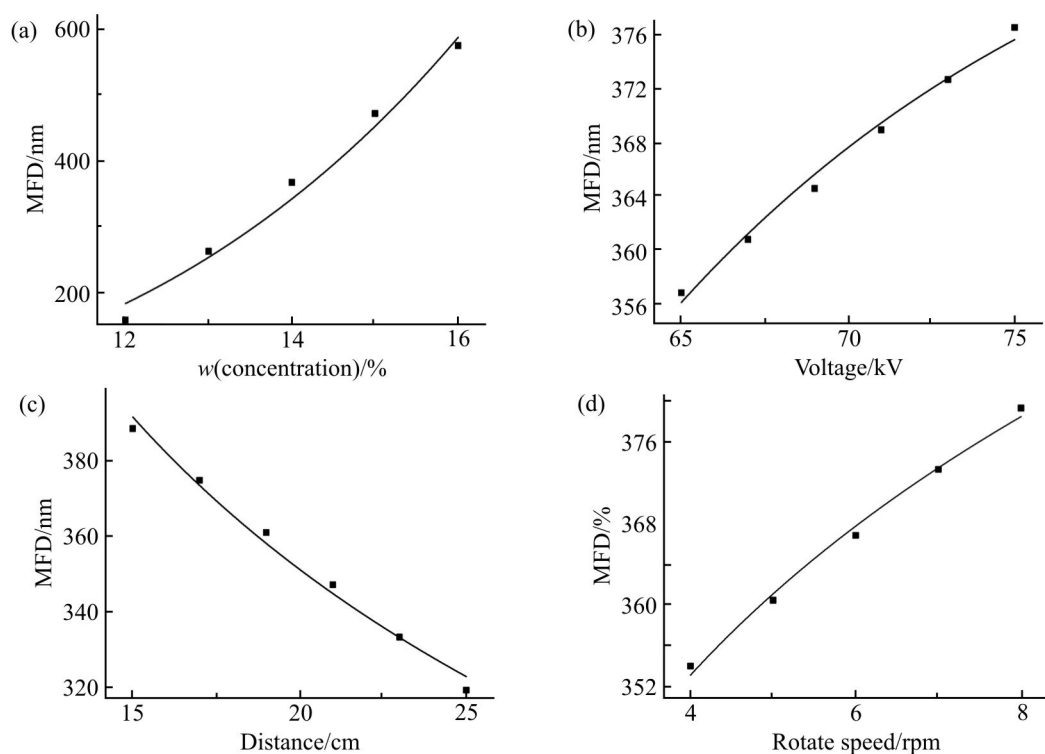


Fig.5 Influence of process parameters on *MFD* of free liquid surface electrospinning

的加速度增加,到达收集板的时间缩短,射流被拉伸的时间缩短,从而导致形成较粗的纳米纤维。

Fig.5(c)显示了在聚合物溶液质量分数 14%、工作电压 70 kV、喷头转速 6 r/min 的情况下,纺丝距离对纳米纤维 *MFD* 的影响。从图中可以看出,随着纺丝距离从 15 cm 增加到 25 cm 时, *MFD* 从 388.416 nm 下降至 319.152 nm,呈现出下降的趋势,总体的降幅为 17.8%。其主要原因是在适当的溶度、电压和转速下,在较低纺丝距离的情况时,虽然电场力较大,但是距离短,射流从铜丝到收集板中被拉伸的时间也比较短,会导致射流拉伸不充分,从而形成较大直径的纳米纤维;其次,随着纺丝距离的增加,电场力一定程度上有所降低,但是射流后期的摆动运动变长,射流被逐渐拉升变细,从而使纳米纤维直径变细。

Fig.5(d)为聚合物质量分数 14%、工作电压 70 kV、纺丝距离 20 cm 的情况下,喷头转速对纳米纤维 *MFD* 的影响。随着转速从 4 r/min 到 8 r/min,纳米纤维的 *MFD* 从 353.981 nm 上升至 379.259 nm,总体增幅为 7.1%。分析其原因:在适当的溶度、电压和纺丝距离下,在较慢的转速时,液珠和泰勒锥处于一个相对稳定的电场环境下,射流受到更长时间

的电场力作用,使射流拉伸足够充分,导致形成较细的纳米纤维;其次,纳米纤维射流随着转速的提高,离心力作用使射流在喷头和收集板之间的飞行速度变快,还未经过充分地拉伸细化就已经固化沉积在接收板,因此形成较粗的纳米纤维。

3 结论

采用铜丝作为喷头电极设计并制作了线型自由液面静电纺丝装置,利用该装置成功制备出 PVDF 纳米纤维。本实验考察了 4 个主要工艺参数对纳米纤维形貌的影响,结果表明在一定条件下,纳米纤维 *MFD* 随着聚合物溶液浓度、工作电压和喷头转速的增加而增加,随着纺丝距离的增加而减小。在本实验装置中,获得 PVDF 纳米纤维 *MFD* 的最优参数组合为聚合物溶液质量分数 14%、工作电压是 75 kV、纺丝距离是 25 cm、喷头转速是 8 r/min。还分析了自由液面静电纺丝 4 个工艺参数与 PVDF 纳米纤维直径及其分布之间存在的非线性关系。然而,迄今为止大多数开发的装置仅适用于特定的聚合物溶剂体系,自由液面静电纺丝纳米纤维形貌与电纺参数之间的确切关系尚未得到明确的认识。因此,还需要进一步研究聚合物类型和聚合

物溶液性质对自由液面静电纺丝工艺和纳米纤维质量的影响。

参考文献:

- [1] 刘宇健, 谭晶, 陈明军, 等. 静电纺纳米纤维纱线研究进展[J]. 纺织学报, 2020, 41(2): 165-171.
Liu Y J, Tan J, Chen M J, *et al.* Research progress of electrospun nanofiber yarns[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(2): 165-171.
- [2] 谭耀红, 刘呈坤, 毛雪. 静电纺制备定向纳米纤维集合体的研究现状[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 183-190.
Tan Y H, Liu C K, Mao X. Research status of electrospun aligned nanofiber array[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11): 183-190.
- [3] 靳世鑫, 辛斌杰, 郑元生. 静电纺丝法宏量制备纳米纤维的研究进展[J]. 纺织学报, 2018, 39(3): 175-180.
Jin S X, Xin B J, Zheng Y S. Overview on mass production of electrospun nanofibers[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(3): 175-180.
- [4] Lu X F, Li M X, Wang H Y, *et al.* Advanced electrospun nanomaterials for highly efficient electrocatalysis[J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2019, 6:3012-3040.
- [5] Xue J, Wu T, Dai Y, *et al.* Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications[J]. Chemical Reviews, 2019, 119: 5298-5415.
- [6] Reneker D H, Yarin A L. Electrospinning jets and polymer nanofibers[J]. Polymer, 2008, 49: 2387-2425.
- [7] Nurwaha D, Wang X. Free surface electrospinning: investigation of the combined effects of process parameters on the morphology of electrospun fibers[J]. Fibers and Polymers, 2015, 16: 850-866.
- [8] Forward K M, Rutledge G C. Free surface electrospinning from a wire electrode[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 183: 492-503.
- [9] Indrani B, Molaro M C, Braatz R D, *et al.* Free surface electrospinning of aqueous polymer solutions from a wire electrode[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 289:203-211.
- [10] 李储林, 吴湘济, 王新厚. 无针头直线型静电纺丝工艺参数研究[J]. 产业用纺织品, 2013(11):9-14.
Li C L, Wu X J, Wang X H. Study on process parameters of needleless thread electrospinning[J]. Technical Textiles, 2013(11):9-14.
- [11] 宋明玉, 何慢, 邵兴贤, 等. 线型螺旋静电纺丝法制备 PAN 纳米纤维[J]. 化工新型材料, 2017, 45(3):93-95.
Song M Y, He M, Shao X X, *et al.* Fabrication of PAN nanofibers with spiral coil spinneret[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(3):93-95.
- [12] 李婷婷, 闫梦雪, 吴宗翰, 等. 动态线性电极静电纺 PVA 纳米纤维的可纺性[J]. 材料导报, 2018, 32(24):4363-4369.
Li T T, Yan M X, Wu Z H, *et al.* The spinnability study of the dynamic linear electrode electrospun PVA Nanofibers[J]. Materials Reports, 2018, 32(24):4363-4369.
- [13] Li T T, Yan M, Xu W, *et al.* Mass- production and characterizations of polyvinyl alcohol/sodium alginate/graphene porous nanofiber membranes using needleless dynamic linear electrospinning[J]. Polymers, 2018, 10:1166-1180.
- [14] Li T T, Zhong Y, Yan M, *et al.* Synergistic effect and characterization of graphene/ carbon nanotubes/polyvinyl alcohol/sodium alginate nanofibrous membranes formed using continuous needleless dynamic linear electrospinning[J]. Nanomaterials, 2019, 9:714-726.
- [15] 许文婷, 李婷婷, 王静, 等. 动态线纺聚乙烯醇/海藻酸钠纳米纤维膜的制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(2):145-151.
Xu W T, Li T T, Wang J, *et al.* Preparation of dynamic linear spinning polyvinyl alcohol/alginate nanofiber membranes[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(2):145-151.
- [16] Aulova A, Bek M, Kossovich L, *et al.* Needleless electrospinning of PA6 fibers: the effect of solution concentration and electrospinning voltage on fiber diameter[J]. Journal of Mechanical Engineering. 2020,66:421-430.

Linear Free Surface Electrospinning Nanofibers

Haiying Zhou¹, Yihui Wang¹, Hesheng Liu², Sheng Xing¹, Junjie Huang¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China ;

2. School of Mechanical & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: In this study, copper wire was used as nozzle electrode to design and build a set of linear free liquid surface electrospinning experimental device. An L9(34) orthogonal experiment was designed to study the effects of four major process parameters, namely, polymer solution concentration, input voltage, spinning distance and nozzle rotation speed on the morphology and distribution of PVDF nanofibers. The multiple quadratic regression equation between the process parameters and average diameter of nanofibers was established, and the influence of single factor was analyzed. The average diameter of the nanofibers obtained in the experiments is 192~443 nm, and the relative standard deviation is 32.5%~53.75%. The results show that under certain conditions, the average diameter of PVDF nanofibers increases with the increase of polymer concentration and voltage, and decreases with the increase of spinning distance and nozzle rotation speed. According to variance and range analysis, the concentration of polymer solution has the greatest influence on the average diameter of nanofibers, followed by the spinning distance and nozzle rotation speed, while the input voltage has a relatively low influence on the *MFD* of nanofibers.

Keywords: nanofiber; electrospinning; free liquid surface; polyvinylidene fluoride; process parameters