http://pmse.scu.edu.cn

闭式线型喷头静电纺丝及工艺参数影响

周海迎[1]，范颖鑫[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：为解决产量低、针头堵塞和溶剂挥发的问题，设计了一种闭式线型喷头静电纺丝装置。采用Comsol软件分别模拟了开式、闭式辊筒的电场分布，并研究了各金属丝的电场强度。采用正交实验研究了聚合物溶液浓度、工作电压、纺丝距离和旋转速度4个工艺参数对聚偏二氟乙烯(PVDF)纳米纤维形貌的影响。应用响应面法建立了工艺参数与纳米纤维直径的多元回归模型，评价了4个工艺参数对纳米纤维直径的影响。正交实验获得的纳米纤维平均直径(MFD)为93.85~206.42 nm，相对标准偏差(RSD)为29.28%~45.13%。研究结果表明，PVDF纳米纤维MFD受聚合物溶液浓度和纺丝距离影响显著，受工作电压和旋转速度的影响不显著；PVDF纳米纤维MFD随聚合物溶液浓度、工作电压、旋转速度的增大而增大，随纺丝距离的增大而减小。

关键词：纳米纤维；静电纺丝；电场仿真；响应面法
中图分类号：TQ340.6 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2024)08-0068-10

纳米纤维可用于生物医学[1]、组织工程[2]、重金属吸收[3]、功能性纺织品[4]、纳米电子[5]、纳米复合材料[6]，以及太阳能电池[7]等多个领域。静电纺丝是一种简单高效的纳米纤维制备技术[8,9]，根据喷头形式不同，静电纺丝可分为针式静电纺丝和无针静电纺丝，针式静电纺丝由于生产效率低，已逐渐向不同形式的无针静电纺丝发展。目前，新型无针静电纺丝装置主要有辊筒式、多孔管式、磁场扰动式、气泡式、金属线型式、圆盘式等。作为一种新型无针静电纺丝装置，线型静电纺丝能极大提高了纳米纤维的生产效率，引起了国内外研究者的关注。Rutledge等[10]采用线型静电纺丝实验装置制备纳米纤维，研究发现纳米纤维产量与金属丝液体捕获量、转速和工作电压有关。在2016年，Rutledge等[11]再次对改进的线型静电纺丝进行研究，结果表明浸润过程中液体捕获量与金属丝直径、转速、溶液黏性、表面张力等有直接关系，转速是串珠完全转化成射流的关键参数，并提出优化装置需要考虑电势、转速、金属丝直径、长度、数量和直线间距离等因素的影响。Lin等[12]发现2-SS扭曲成形的导线电极可以得到较好形貌的纳米纤维，与辊筒式静电纺丝相比，直线型静电纺丝制备的纳米纤维形态更加均匀。Pan等[13]采用不锈钢丝电极静电纺聚乙烯醇(PVA)/柠檬酸锌混合纳米纤维，纤维直径达到100 nm以下。Yan等[14]采用一种自制线型静电纺丝尝试大规模制造石墨烯(Gr)/碳纳米管(CNT)/PVA/海藻酸钠(SA)纳米纤维膜。李婷婷等[15,16]对自制动态线型电极静电纺丝的可纺性进行了研究。上述研究结果表明，开式线型静电纺丝能显著提高纳米纤维的生产效率和改善形貌质量，具有很好的应用前景。由于开式静电纺丝溶液大面积暴露于环境，溶剂易挥发，不利于溶液稳定和长时间连续生产，很难作为商用设备用于规模化制备纳米纤维。其次，相比于传统针式静电纺丝，线型静电纺丝虽然能显著提高生产效率，但其工艺

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0152
收稿日期：2023-09-12
基金项目：东华理工大学博士基金(DHBK2020009)；国家自然科学基金资助项目(21664002)；教育部产学合作协同育人项目(202101362011)
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: hsliu@vip.163.com；
范颖鑫，主要从事静电纺丝新方法研究，E-mail: 2028413548@qq.com

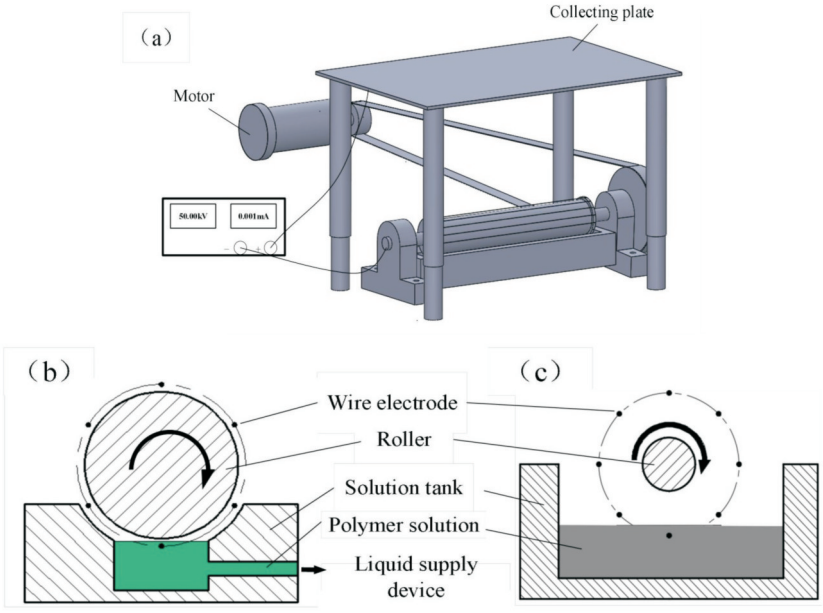


Fig. 1 (a) Closed linear electrostatic spinning device; (b) structural diagram of open spinneret; (c) structural diagram of closed spinneret

参数增多且难以控制,进而影响纳米纤维质量。

本文提出了一种闭式(溶液不与环境接触)线型喷头静电纺丝实验装置来制备纳米纤维,采用Comsol软件分别模拟了开式(溶液直接与环境接触)、闭式辊筒的电场分布,并分析了各金属丝的电场强度。随后,进一步研究了聚合物溶液浓度、工作电压、纺丝距离和旋转速度这4个主要工艺参数对聚偏二氟乙烯(PVDF)纳米纤维形貌的影响,建立了工艺参数与PVDF纳米纤维纳米纤维平均直径(MFD)的数学模型,并基于该模型分析了各参数对PVDF纳米纤维MFD的影响趋势。

1　实验部分

1.1　原料与设备

聚偏二氟乙烯:P302009-100g型,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;N,N-二甲基甲酰胺(DMF):纯度>99.5 %,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;去离子水:W119424-25L型。

数显恒温磁力搅拌器:型号85-2B,山东欧莱博仪器有限公司;超声波清洗机:CJ-020 深圳超洁科技实业有限公司;场发射扫描电子显微镜(SEM):NovaNanoSEM450,美国FEI有限公司;高压电源:型号DW-P104-5ACB2,最高输出电压为100 kV,东文高压电源(天津)股份有限公司;电子天平:MTB 2000,深圳市美孚电子有限责任公司;电热恒温干燥箱:101-00B,绍兴市尚诚仪器制造有限责任公司。

1.2　纺丝溶液制备

称取一定量的PVDF颗粒加入DMF和丙酮(体积比4:1)的混合溶液中,分别配置质量分数为12%,14%和16%的聚合物溶液,并置于广口瓶中。用密封胶带密封后,放入烧杯中水浴加热,用磁力搅拌器加热搅拌6 h,水温设置为60 ℃,得到澄清透明呈亮黄色溶液,溶液会有少量气泡,气泡对于纳米纤维形貌质量存在一定影响,待溶液无气泡后贴上标签备用。

1.3　闭式线型喷头静电纺丝装置

Fig.1(a)为自制的闭式线型喷头静电纺丝装置示意图,该装置主要由收集装置、传动装置、喷丝装置构成。其中,收集装置包括收集板和伸缩杆,收集板的高度可以通过伸缩杆调节,调节范围在10~30 cm之间。传动装置包括电机、传送带、带轮等,电机通过调速器实现对辊筒的转速调节。喷丝装置由辊筒、铜丝、储液器、支架等构成,铜丝均匀分布在辊筒上。喷头结构如Fig.1(b)所示,相比于开式静电纺丝线型喷头(Fig.1(c)),闭式辊筒直径更大,使其覆盖在储液器上,为适应辊筒形状,储液器设计成圆形凹槽,尽可能保证辊筒与储液槽贴合,从而大幅较少溶液挥发,稳定静电纺丝过程中聚合物溶液浓度,同时

辊筒起辅助电极作用，使铜丝部位电势分布更集中，从而降低聚合物溶液产生射流的临界工作电压。储液器的液面高度由精密注射泵控制，保证工作时金属丝浸润在溶液中，而辊筒不与溶液接触。

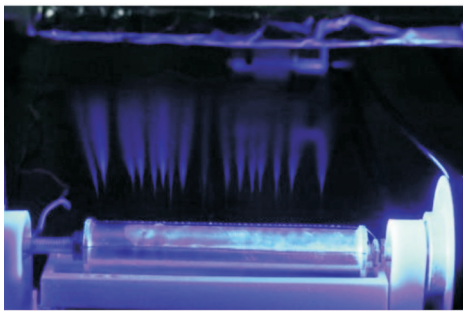


Fig. 2 Electrospinning process

1.4 纳米纤维的制备

实验过程中收集板与电源的正极连接，辊筒与电源负极相连。设定好电机转速和收集板高度，把铝箔贴在收集板上，打开电源，调节适当的工作电压，辊筒带动铜丝通过储液器时，聚合物溶液挟带在铜丝上，在电场力和表面张力的耦合作用下形成泰勒锥；当加载电压超过电压阈值时，泰勒锥末端产生射流飞向收集板。射流保持直线一定距离，然后开始鞭打和分裂，期间溶剂挥发，射流的直径持续下降，最终固化形成纳米纤维。Fig.2为闭式线型喷头静电纺丝射流喷射过程。

1.5 测试与表征

将PVDF纳米纤维膜置于60 ℃干燥箱内2 h，室温静置后，剪下小块样品用导电胶粘在铝板上，将铝板放入离子溅射仪对其进行喷金处理，在扫描电镜中观察纳米纤维膜的表面形貌，扫描电镜加速电压设置为3 kV。应用Image J软件分析SEM照片中纳米纤维的形貌质量，每张照片随机测量一定数量纳米纤维的直径，并取其平均值。

1.6 电场仿真

为了研究金属辊筒对电场分布产生的影响，采用Comsol软件分别模拟了开式和闭式辊筒静电纺丝工作中的电场分布。Fig.3(a)和Fig.3(b)分别为开式和闭式的电场仿真模型，主要参数包括辊筒长度180 mm、工作电压50 kV、纺丝距离170 mm；2个模型不同之处在于开式辊筒直径为12 mm、闭式辊筒

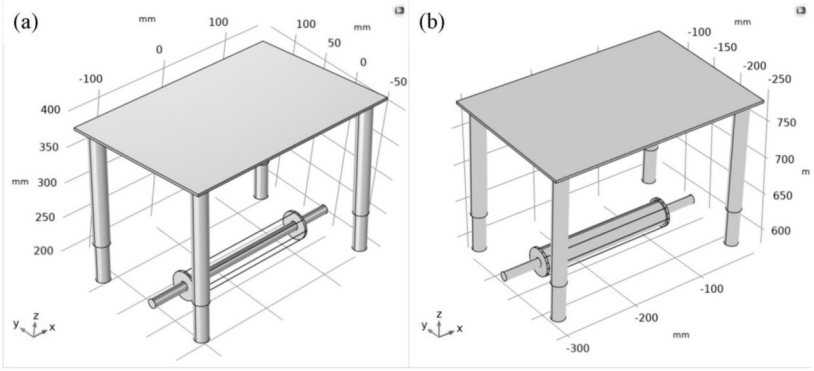


Fig. 3 Electric field simulation model
(a): open simulation model; (b): closed simulation model

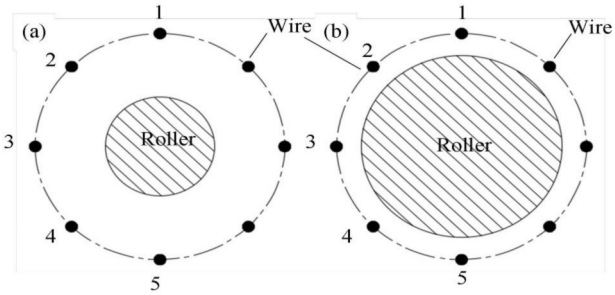


Fig. 4 Nozzles and wire distributions
(a): open nozzle; (b): closed nozzle

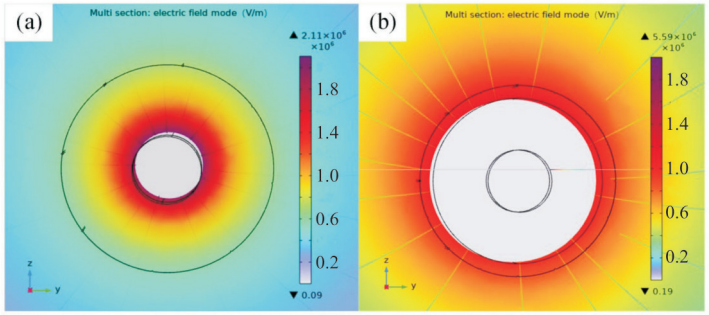


Fig. 5 (a) Open and (b) closed nozzle Comsol electric field simulation result

Tab. 1 Factor levels

Levels	*A* Concentration/%	*B* Voltage/kV	*C* Distance/cm	*D* Rotate speed/(r·min^{-1})
1	12	50	13	6
2	14	55	15	8
3	16	60	17	10

直径为32 mm。电场模拟中设定的参数与实验室现有静电纺丝装置保持一致。为了对比分析开式与闭式喷头中金属丝电场分布规律,每个喷头中安装8根金属丝,选取5根相同位置金属丝,分别测量其长度方向20~160 mm处的电场强度,金属丝分布及其编号如Fig.4所示。

1.7 响应面方法及实验设计

本文考察影响PVDF纳米纤维直径的4个主要参数,即聚合物溶液浓度、工作电压、纺丝距离和旋转速度。采用基于正交实验的响应面法进行实验设计。为了全面研究各参数的影响趋势,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。实验设计如Tab.1所示,参数范围包括聚合物溶液浓度(12%,14%和16%)、工作电压(50 kV,55 kV和60 kV)、纺丝距离(13 cm,15 cm和17cm)和旋转速度(6 r/min,8 r/min和10 r/min)。每个实验进行3 min,所有实验均在常温(25±1) ℃,相对湿度(RH)42%±3%下进行。

响应值(纳米纤维平均直径)与这4个因子(*A*,*B*,*C*和*D*)之间的数学关系用一次多项式模型近似拟合:

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

式中:*Y*——响应值;*A*——聚合物溶液浓度值;*B*——工作电压值;*C*——纺丝距离值;*D*——旋转速度值;β_0,β_1,β_2,β_3和β_4——未知系数,由实验数据拟合确定。

一次回归正交设计是一种高效率的分析方法,利用正交表来安排多因素试验并分析结果。这种方法以较少的试验次数安排较多的因素,从而在一定的试验范围内获得较佳的试验结果。对于较多影响因素的静电纺纳米纤维制备过程,正交设计可以有效筛选出对目标响应影响较大的关键因素。

为了研究模型的统计学意义,采用概率值(*P*值)评价各因素的显著性。当$P<0.05$时,该因素对响应值影响显著。当$P>0.05$时,该因素对响应值影响不显著。相关系数(R^2)是研究模型统计意义的另一个重要因素,$R^2>0.7$时,表明2个变量之间的关联性较高,可以将其作为模型的特征变量。

2 结果与讨论

2.1 电场模拟结果分析

Fig.5(a)和Fig.5 (b)分别为Comsol软件模拟环境下开式、闭式辊筒纺丝过程中的电场分布。从Fig.5(a)中可以看出,开式辊筒金属丝上的电场强度集中在0.6×10^6 V/m附近,而Fig.5(b)中闭式辊筒金属丝上的电场强度集中在1×10^6 V/m附近,闭式辊筒金属丝上的电场强度明显高于开式。

Fig.6为开式、闭式辊筒5根金属丝的平均电场

强度分布对比图，表明相同编号的闭式辊筒金属丝部位平均电场强度都明显高于开式，并且随着金属丝与收集板距离的增大，平均电场强度都逐渐减小。闭式辊筒最大平均电场强为995.22 kV/m，开式辊筒最大平均电场强度为679.41 kV/m，相比开式辊筒电场强度提高了46.48%。研究结果表明，辊筒起到辅助电极的作用，增大辊筒直径，有助于金属丝部位的电场分布更高，从而降低系统工作电压。

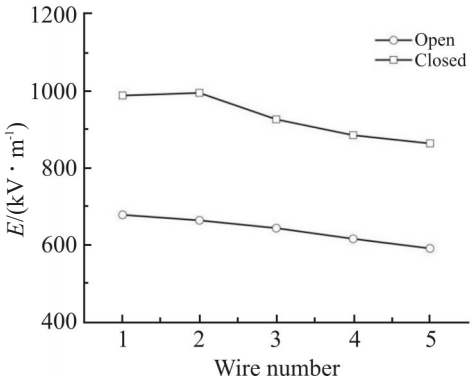


Fig. 6 Comparison of electric field intensity between open and closed nozzle

2.2 纳米纤维形貌分析

应用扫描电镜对各组实验结果进行观测，使用Image J软件测量SEM照片中PVDF纳米纤维的直径。随机选择120根纳米纤维测量其直径，并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所示，得到的PVDF纳米纤维平均直径为93.85~206.42 nm，相对标准偏差为29.28%~45.13%。正交实验结果如Tab.2所示。

如Fig.7和Tab.2所示，在聚合物溶液浓度为12%、工作电压为60 kV、纺丝距离为17 cm、旋转速度为10 r/min的实验条件下，MFD值最小，Fig.7（Trial3）为该条件下PVDF纳米纤维SEM图像及纤维直径分布图；在聚合物溶液浓度为16%、工作电压为5 5kV、纺丝距离为13 cm、旋转速度为10 r/min的实验条件下，MFD值最大，Fig.7（Trial8）为该条件下PVDF纳米纤维SEM图像及纤维直径分布图。对比这2张图像发现，Fig.7（Trial3）中的纳米纤维直径明显更小，但分布不均匀。分析其原因在于：Trial3中

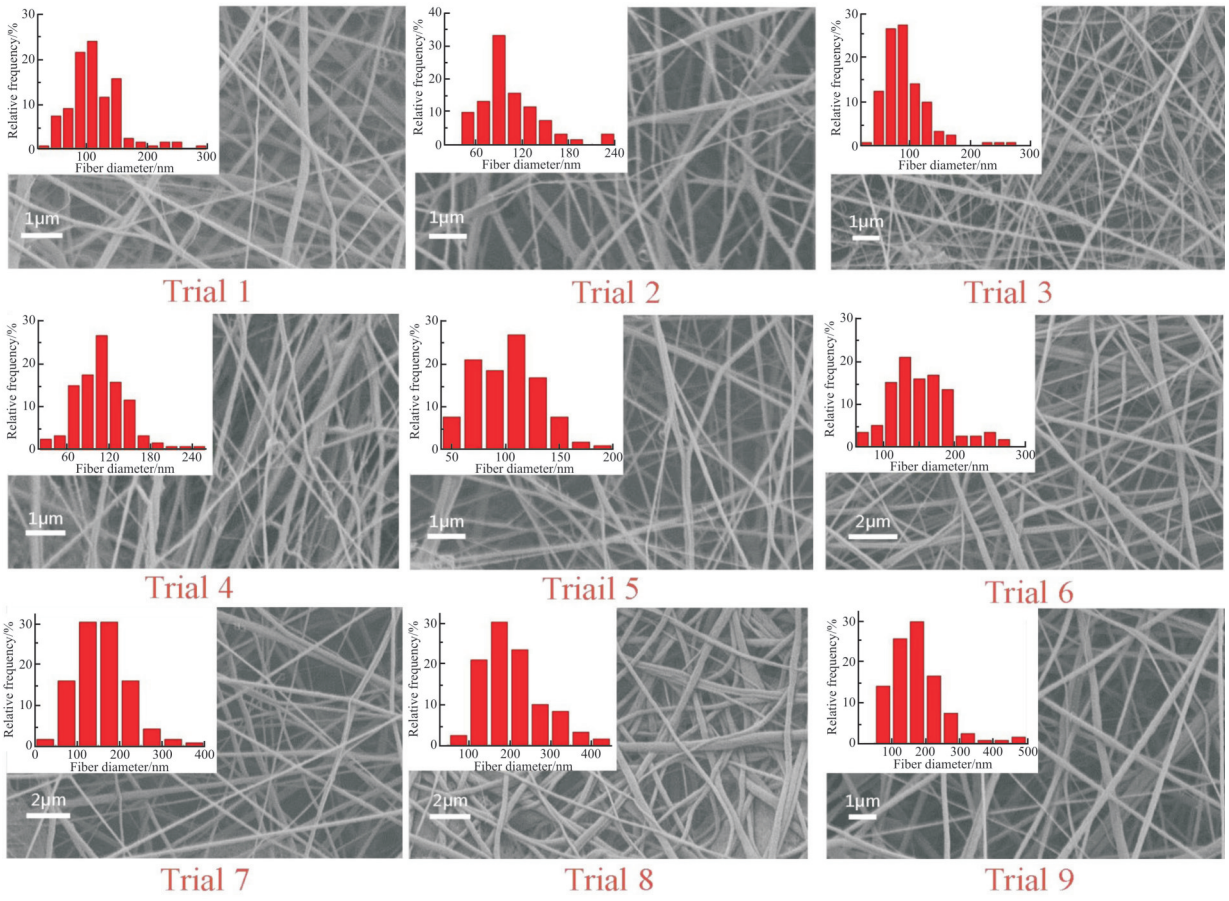


Fig. 7 SEM images of nanofibers and diameter distribution

Tab. 2 Orthogonal experimental results

Trial	Factor				MFD/nm	RSD/%
	A/%	*B*/kV	*C*/cm	*D*/(r·min^{-1})		
1	1	1	1	1	114.82	38.05
2	1	2	2	2	104.35	38.10
3	1	3	3	3	93.85	39.81
4	2	1	2	3	110.60	33.81
5	2	2	3	1	101.23	29.28
6	2	3	1	2	151.60	31.84
7	3	1	3	2	158.64	39.41
8	3	2	1	3	206.42	35.43
9	3	3	2	1	173.88	45.13

Tab. 3 Analysis of variance results of nanofiber process parameters

Soruce of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	*F*-value	*P*-value	Status
Model	11151.98	4	2787.99	10.42	0.0217	significant
A	8506.64	1	8506.64	31.78	0.0049	significant
B	207.33	1	207.33	0.77	0.4285	not significant
C	2364.93	1	2364.93	8.84	0.0410	significant
D	73.08	1	73.08	0.27	0.6289	not significant
Residual	1070.63	4	267.66			
Cor total	12222.61	8				
R^2	0.9124					

的聚合物溶液浓度较小,射流的黏弹阻力较小,更容易拉伸、分裂;而且电压比较高,较高电压会增大液滴所带的库仑力,加速射流拉伸,同时高电压使射流进行二次喷丝,从而进一步降低纳米纤维直径;较大的收集距离使射流得到充分拉伸,溶剂能顺利挥发。因此,该条件下收集的纳米纤维最细。

如Fig.7和Tab.2所示,在聚合物溶液浓度为14%、工作电压为55 kV、纺丝距离为17 cm、旋转速度为6 r/min的实验条件下,RSD值最小,Fig.7(Trial5)为该条件下PVDF纳米纤维SEM图像及纤维直径分布图;在聚合物溶液浓度为16%、工作电压为60 kV、纺丝距离为15 cm、旋转速度为6 r/min的实验条件下,RSD值最大,Fig.7(Trial9)为该条件下PVDF纳米纤维SEM图像。对比这2张图像发现,Fig.7(Trial9)中的纳米纤维直径明显更大,且直径跨度大,分布极不均匀。原因在于Trial9中电压较高,且聚合物溶液浓度较大,射流黏弹阻力较大,铜丝挟带的液滴更大,产生较粗的纳米纤维,而有部分射流由于高电压形成二次分裂。因此,该条件下纳米纤维分布不均匀。

2.3 响应结果分析

利用Design-Expert软件对正交实验数据进行方差分析得到结果如Tab.3,拟合得到PVDF纳米纤维MFD(*Y*)和聚合物溶液浓度(*A*)、工作电压(*B*)、纺丝距离(*C*)、旋转速度(*D*)的多元一次回归方程模型,

$$Y=-58.2517+18.8267A+1.1757B-9.9267C+1.745D \quad (2)$$

由Tab.3可知,模型的$P<0.05$说明该模型显著,

*A*项和*C*项*P*值都小于0.05，*A*项的*P*值最小；因此，聚合物溶液浓度对PVDF纳米纤维的MFD影响最大，纺丝距离对PVDF纳米纤维MFD影响显著。而*B*和*D*项的*P*值大于0.05，说明它们对纳米纤维MFD影响不显著。R^2=0.9182，大于0.7，表明所提出的一次回归模型得到的计算结果与实验数据关联性较高。根据模型可知，4个因素对PVDF纳米纤维MFD影响大小顺序为，聚合物溶液浓度(*A*)>纺丝距离(*C*)>工作电压(*B*)>旋转速度(*D*)。

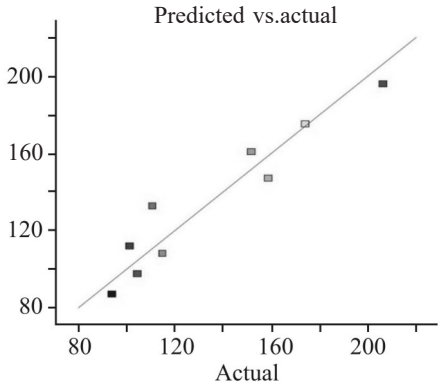


Fig. 8 Predicted average diameters versus actual average diameters of electrospun PVDF nanofibers

Fig.8是PVDF纳米纤维的预测平均直径与实际平均直径的对应关系图。从图中可以看出，PVDF纳米纤维平均直径预测值与实验数据基本一致，表明该回归模型较好，可用于实验数据预测。

为了进一步验证该模型的可靠性，任意选择4种不同实验条件下制备PVDF纳米纤维，对比分析MFD的实验测量值与模型预测值。Tab.4为实验参数设置及验证结果。从Tab.4中可以看出，4种实验条件下制备出的PVDF纳米纤维的实际MFD分别为124.54 nm，131.85 nm，133.83 nm和112.81 nm，而通过多元回归方程模型计算得出的预测MFD分别对应为132.69 nm，126.29 nm，132.73 mn和117.39 nm，预测值与试验值存在一定差距，但偏差分别为6.54%，4.22%，0.82%和4.06%，均不超过10%。通过实验对比结果，说明拟合的多元线性回归方程具备较好的重复性，该数学模型可用于闭式线型喷头静电纺丝纳米纤维MFD预测。

Fig.9(a)和Fig.9(b)是聚合物溶液浓度和纺丝距离交互作用下与PVDF纳米纤维平均直径的等高线

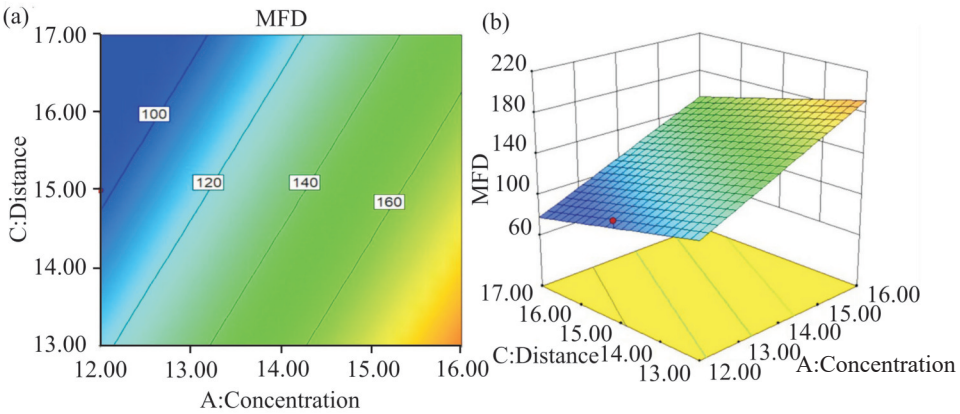


Fig. 9 (a) Contour line plot and (b) 3D response surface plot of average diameter of PVDF nanofibers under the interaction of polymer solution concentration and spinning distance

Tab. 4 Comparison of experimental and predicted results

Experiment number	Factor				Experimental value/nm	Estimate/nm	Error/%
	A/%	*B*/kV	*C*/cm	*D*/(r·min^{-1})			
1	14	53	15	8	124.54	132.69	6.54
2	14	56	16	8	131.85	126.29	4.22
3	14	56	15	6	133.83	132.73	0.82
4	13	56	15	8	112.81	117.39	4.06

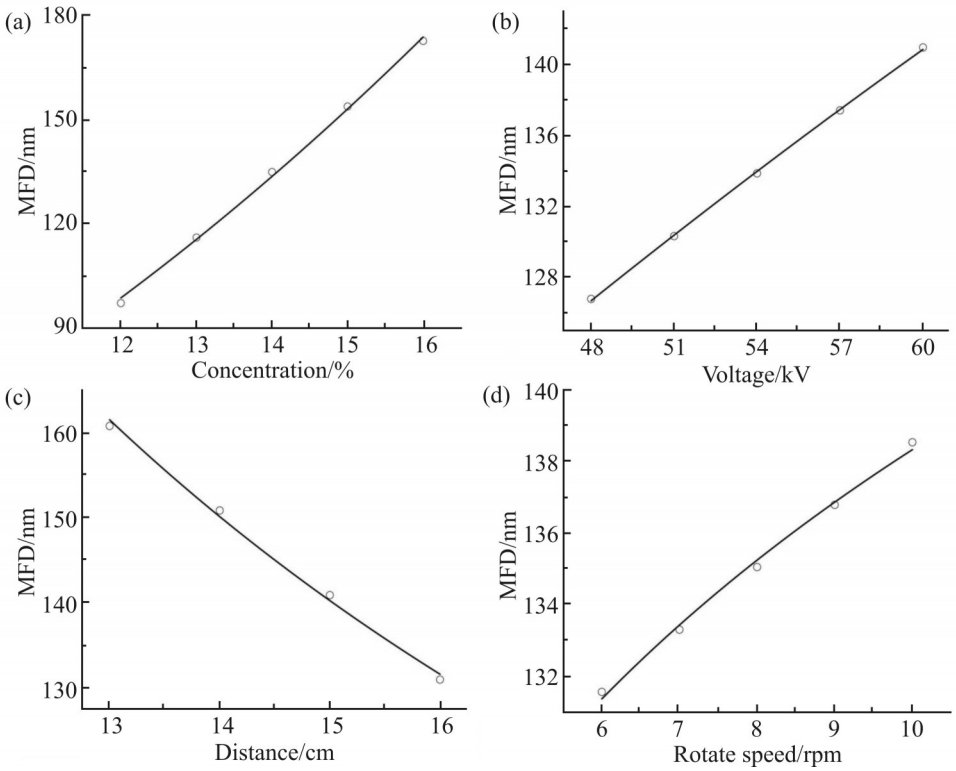


Fig. 10 Effect of single factor on diameter of PVDF nanofibers

图和3D响应面图。从图中可以看出,PVDF纳米纤维平均直径随聚合物溶液浓度增大而增大,随纺丝距离增大而减小。

通过该回归模型预测单因素对PVDF纳米纤维直径的影响,利用Origin软件将预测数据进行拟合处理,得到4个工艺参数对纳米纤维直径的影响,如Fig.10所示。

Fig.10(a)是在工作电压55 kV、纺丝距离15 cm、旋转速度8 r/min的条件下,聚合物溶液浓度对PVDF纳米纤维MFD的影响。从图中可以看出,聚合物溶液浓度由12%增大到16%,PVDF纳米纤维MFD由97.39 nm增大到172.7 nm,增幅为77.3%,增长速度较快。主要原因在于,随着聚合物溶液浓度增加,聚合物分子链缠结程度较大,链间摩擦增强,带电液滴黏滞阻力增大,导致射流受到的电场力不足以克服黏滞阻力从而无法继续拉伸、鞭动;同时,随着聚合物溶液浓度增大,黏度增大,金属丝上挟带的液珠体积增大,形成的泰勒锥直径更大,纳米纤维直径随之增大。所以随着聚合物溶液浓度的增加,PVDF纳米纤维MFD逐渐增大。

Fig.10(b)是在聚合物溶液浓度为14%、纺丝距离15 cm、旋转速度8 r/min的条件下,工作电压对PVDF纳米纤维MFD的影响。从图中可以看出,工作电压由48 kV增大到60 kV,PVDF纳米纤维MFD由126.82 nm增大到140.92 nm,增幅为11.1%,增长速度较慢。主要原因在于,随着工作电压增大,泰勒锥电荷增加,电场力增大,射流量和喷射速度显著增大,射流被拉伸的时间变短,溶剂挥发不完全,纳米纤维直径变大,均匀性也会降低。所以随着工作电压的增大,PVDF纳米纤维MFD逐渐增大。

Fig.10(c)是在聚合物溶液浓度为14%、工作电压55 kV、旋转速度8 r/min的条件下,纺丝距离对PVDF纳米纤维MFD的影响。从图中可以看出,纺丝距离由13 cm增大到17 cm,PVDF纳米纤维MFD由160.77 nm减小到131 nm,降幅为18.5%,减小速度较快。主要原因在于,工作电压恒定的情况下,纺丝距离越大,电场强度越小,电场力越小,形成的纳米纤维直径更小;同时,收集距离越大,射流拉伸的时间也越长,射流无法充分拉伸、鞭动,溶剂挥发不完全,得到的纳米纤维直径较大。所以,随着纺丝距离的增大,PVDF纳米纤维MFD逐渐减小。

Fig.10(d)是在聚合物溶液浓度为14%、工作电压

55 kV、纺丝距离15 cm的条件下，旋转速度对PVDF纳米纤维MFD的影响。从图中可以看出，旋转速度由6 r/min增大到10 r/min，PVDF纳米纤维MFD由131.55 nm增大到138.53 nm，增幅为5.3%，增长速度较慢。主要原因在于，随着旋转速度的增大，辊筒旋转产生的离心力增大，射流的速度随之增大，射流到达收集板的时间也更短，射流拉伸、鞭动时间更短，溶剂挥发不完全，从而形成的纳米纤维直径较大。所以随着旋转速度的增大，PVDF纳米纤维MFD逐渐增大。

3 结论

本文提出了一种闭式线型喷头静电纺丝装置，应用Comsol软件分别对开式、闭式辊筒纺丝过程的电场进行模拟，研究了金属辊筒对电场分布的影响。结果表明，随着与收集板的距离增大，金属丝部位的平均电场强度逐渐减小；辊筒有辅助电极的作用，使相同位置上闭式辊筒金属丝的电场分布更高，这一特点有助于降低系统工作电压要求。采用正交实验研究了聚合物溶液浓度、工作电压、纺丝距离和旋转速度4个工艺参数对纳米纤维形貌的影响，采用响应面法建立工艺参数与纳米纤维平均直径的多元回归模型，以评价这4个工艺参数对纳米纤维直径的影响。结果表明，聚合物溶液浓度和纺丝距离对纳米纤维的平均直径有显著影响，纳米纤维平均直径随着聚合物溶液浓度的增大而增大，随着纺丝距离的增大而减小。闭式线型喷头静电纺丝装置能一定程度上减小溶剂挥发，降低系统工作电压要求，在高效率宏量制备高品质纳米纤维方面具备很好的应用前景。

参考文献：

[1] Chen S, John J V, McCarthy A, *et al.* New forms of electrospun nanofiber materials for biomedical applications[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2020, 8: 3733-3746.

[2] Zhang X, Li L, Ouyang J, *et al.* Electroactive electrospun nanofibers for tissue engineering[J]. Nano Today, 2021, 39: 101196.

[3] Foong C Y, Wirzal M D H, Bustam M A. A review on nanofibers membrane with amino-based ionic liquid for heavy metal removal [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 297: 111793.

[4] Qiu Q, Chen S, Li Y, *et al.* Functional nanofibers embedded into textiles for durable antibacterial properties[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123241.

[5] Giubileo F, Faella E, Pelella A, *et al.* SnO_2 nanofibers network for cold cathode applications in vacuum nanoelectronics[J]. Advanced Electronic Materials, 2022, 8: 2200237.

[6] Yu W, Li X, He J, *et al*. Graphene oxide- silver nanocomposites embedded nanofiber core- spun yarns for durable antibacterial textiles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 584: 164-173.

[7] Haghighat Bayan M A, Afshar Taromi F, Lanzi M, *et al.* Enhanced efficiency in hollow core electrospun nanofiber- based organic solar cells[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 21144.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Forward K M, Rutledge G C. Free surface electrospinning from a wire electrode[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 183: 492-503.

[11] Bhattacharyya I, 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.

[12] Hsieh C T, Lou C W, Pan Y J, *et al.* Fabrication of poly(vinyl alcohol) nanofibers by wire electrode- incorporated electrospinning[J]. Fibers & Polymers, 2016, 7:1217-1226.

[13] Pan Y J, Lin J H, Chiang K C. Biomedical applications of antibacterial nanofiber mats made of electrospinning with wire electrodes[J]. Applied Sciences, 2016, 6: 1-12.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

Impact of Electrospinning and Process Parameters on Closed Linear Spinneret

Haiying Zhou[1], Yingxin Fan[1], Hesheng Liu[2], Sheng Xing[1], Junjie Huang[1]

(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: A electrospinning device with closed linear spinneret was designed to solve the problems of low yield, needle blockage, and solvent evaporation. The electric field distribution of open and closed rollers was simulated by Comsol software, and the electric field strength of each metal wire was studied. The effects of four process parameters, including polymer solution concentration, working voltage, spinning distance, and rotation speed, on the morphology of PVDF nanofibers were studied through orthogonal experiment. A multiple regression model between process parameters and nanofiber diameter was established by response surface methodology, and the impact of four process parameters on nanofiber diameter was evaluated. The average diameter (MFD) of nanofibers obtained from orthogonal experiments is 93.85~206.42 nm, with a relative standard deviation (RSD) of 29.28% ~45.13%. The research results indicate that PVDF nanofiber MFD is significantly affected by polymer solution concentration and spinning distance, but not significantly affected by working voltage and rotation speed; the MFD of PVDF nanofibers increases with the increase of polymer solution concentration, working voltage, and rotation speed, and decreases with the increase of spinning distance.

Keywords: nanofibers; electrospinning; electric field simulation; response surface method