http://pmse.scu.edu.cn

尖端辅助电极对静电纺丝多射流形成的影响机制

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: 为了探索尖端辅助电极静电纺丝技术及多射流产生的原理,首先利用 Comsol 软件分析了辅助电极对静电纺丝区域电场分布的影响。结果表明,辅助电极的引入显著增强了喷丝头附近的电场强度,使得静电纺丝能够在较低电压下产生多股射流,从而在降低能耗的同时提高纺丝效率。此外,电场等势线随着辅助电极与喷丝头距离的减小而增多,导致垂直于等势线的电场力方向变化,进而引发液滴形变。然后采用高速摄影技术记录了液滴及多射流的运动过程,深入探究了液滴形变与多射流产生之间的关系,并通过图片二值化处理和 Mathematica 软件拟合液滴表面曲线,建立了描述带电液滴表面形变与多射流生成关系的回归数学模型。理论分析与实验结果均证实,当液滴表面某点的曲率最大值与平均值之比超过 4.52 时,将诱发射流的产生。研究为优化静电纺丝工艺提供了理论观点和实验依据。

关键词: 多射流;Mathematica 软件;静电纺丝;回归数学模型

中图分类号: TQ340.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2025)10-0098-13

静电纺丝技术是一种利用高压静电场作用于聚合物溶液或熔体[1~3],通过喷丝头形成细丝并沉积在接收装置上,形成非织造布的技术。这种技术能够制备直径在纳米级别的超细纤维而备受关注[4,5],广泛应用于生物医学[6~8]、过滤材料[9,10]、功能性服装[11,12]、电子设备[13,14]等多个领域,其独特的优势和广泛的应用使其成为材料科学领域的一个重要研究方向。

但是,传统静电纺丝只产生单一射流,纳米纤维的产量低,难以批量化生产。这是因为传统静电纺丝过程中针头内部由于针头壁面的作用,液体的速度为中间快两边慢,在壁面附近液体的流速为 0[15]。当液体流出针头后,液滴受到了电场强度的作用,其形状由圆形像圆锥形转变,并形成泰勒锥。液体中的电荷重新分布,正电荷分布在液滴表面,液滴表面光滑,泰勒锥曲率最大。当电压超过某个临界值时,射流从泰勒锥顶端喷射而出,如 Fig.1 所示。

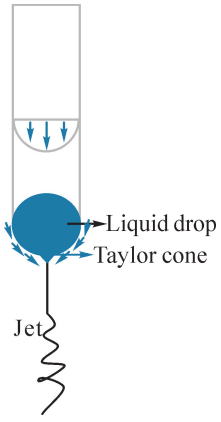


Fig. 1 Schematic of "Taylor cone" in traditional single needle electrospinning

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0194
收稿日期: 2024-11-15
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

一般来说,曲率半径(r)可用来描述曲线上某处曲线弯曲变化的程度(Fig.2),圆形上各个地方的弯曲程度是一样的,故曲率半径就是该圆的半径;直线不弯曲,和直线相切的圆的半径可以任意大,故直线的曲率半径为无穷大。曲率(k)是曲率半径的倒数,曲率越大,曲线的弯曲程度越大。对于同一个导体来说,曲率越大的位置,电荷密度越大[16, 17]。Cloupeau等[18]发现射流的出现与液滴表面电荷量密切相关。导体上电场强度与其电荷密度呈正相关关系,它们之间的关系可以近似表示为式(1)

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1}$$

式中:E——导体某处电场强度;σ——导体该处的电荷密度;ε——真空介电常数。即曲率越大的位置电场强度越大。在传统静电纺丝中,由于泰勒锥曲率最大,受到的电场强度最大,因此单股射流从泰勒锥顶端喷射而出。

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不断探索提高纳米纤维产量的新方法,以多针头静电纺丝技术和无针头静电纺丝技作为主要代表。多针头静电纺过程中,不同针头间的电场存在强烈的相互干扰作用,这会导致射流出现不稳定的鞭动运动,影响纳米纤维沉积的均匀性和质量;而且针头易堵塞,不仅影响纺丝效率,也增加了清洗和维护的难度。无针头静电纺需要复杂的设备结构,溶剂挥发速度快,导致纤维直径离散大,影响产品的一致性和应用效果。这些缺点限制了它们在工业生产中的广泛应用。

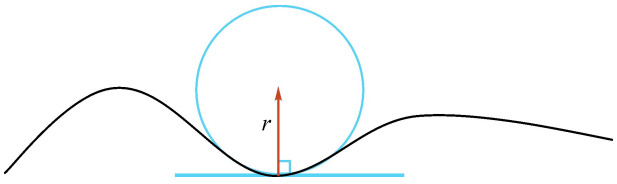


Fig. 2　Schematic of curvature radius

本文在喷丝头附近引入接地的尖端辅助电极进行静电纺丝实验。结合多针头静电纺和无针头静电纺各自的优势,使针式静电纺泰勒锥中发射多股射流(类似于无针式静电纺),达到提高纳米纤维制备效率的目的。首先通过理论分析对静电纺射流数量的变化趋势进行预测,利用 Mathematica 数学软件拟合液滴表面曲线,建立带电液滴表面形变与多射流生成关系的数学模型;然后通过高速摄影机拍摄纺丝过程中液滴和射流的形态,并对静电纺丝区域的电场分布进行数值模拟;最后采用不同性质的溶液进行实验,研究了溶液黏度、表面张力和电导率对射流数量和纳米纤维的影响,为可控制备多射流和纳米纤维提供了理论和实验基础。

1　实验部分

1.1　主要原料

聚乙烯醇(PVA):相对分子质量 $M_w=8.4\times10^4\sim8.9\times10^4$,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

将一定质量的聚乙烯醇聚合物与蒸馏水混合,置于广口瓶中,用密封胶带密封后,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　测试与表征

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　尖端辅助电极静电纺丝原理

传统静电纺装置示意图如 Fig.3(a)所示。其纺丝过程为,在喷丝头末端施加电压,使溶液表面带电并产生形变,在喷头末端形成泰勒锥,施加在喷头上的电压超过某个临界值时,液滴表面受到的电荷斥力克服表面张力,射流在高压静电场中受到电场力的拉伸,缠结的分子链沿射流轴向取向化,能够平衡电场力的拉伸,保持射流的连续性,随着溶剂挥发,在接收极板上固化形成纳米纤维。

Fig.3(b)为尖端辅助电极静电纺装置示意图。将尖端辅助电极引入纺丝区域,放置在平行于喷丝头的位置,能够在单个喷丝头上产生多股射流。其

纺丝过程分为 2 个部分。

第一部分为辅助电极和喷丝头之间区域。喷丝头与辅助电极之间的距离(针辅距)(h_1)趋近于 0 时,喷丝头附近电场强度趋于无穷,电介质带电量趋于无穷,导致电介质被击穿,无法纺丝。针辅距趋近于纺丝距离 h_0 时,辅助电极到喷丝头之间的区域类似于另一个传统静电纺区域,辅助电极成为另一个接收极板,射流会飘向辅助电极和接收板。针辅距趋近于无穷大时,辅助电极对纺丝区域的影响忽略不计。因此,辅助电极的空间位置对产生多射流和制备纳米纤维有重要影响。

第二部分为喷丝头到接收极板之间的区域,由于辅助电极接地,产生的电势为 0,接收极板的电势也为零,纺丝区域产生复杂的等势线。射流产生以后,开始加速向接收极板运动,此时,任何微小的扰动都会引起运动射流振动的不稳定。

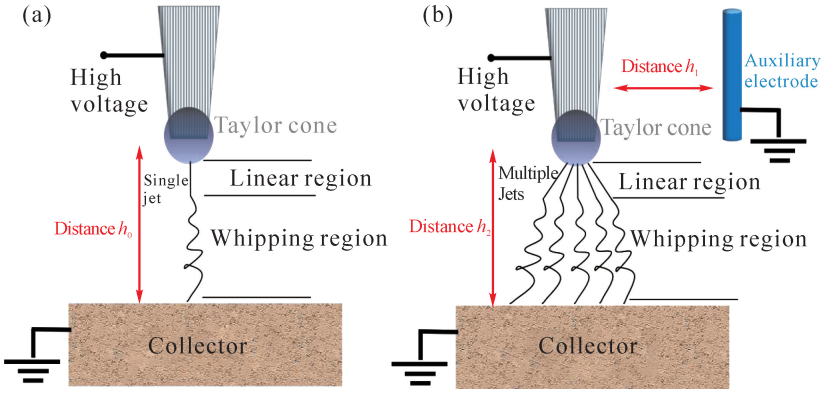


Fig. 3 (a) Traditional electrospinning apparatus consisting of a syringe pump, needle spinneret, DC high voltage power supply, and grounded plate collector; (b) multiple jets electrospinning schematic, adding a grounded auxiliary electrode (AE) parallel to the spinneret

如 Fig.3(a)所示,传统静电纺的纺丝距离为 h_0,电场强度 E_0 和电压 V_0 的关系可近似表示为式(2)

$$E_0=\frac{V_0}{h_0} \tag{2}$$

如 Fig.3(b)所示,辅助电极和喷丝头之间的距离为 h_1,电场强度 E_1 和电压 V_1 的关系可近似表示为式(3)

$$E_1=\frac{V_1}{h_1} \tag{3}$$

静电纺丝过程中,当施加电压超过临界电压时,电荷斥力克服表面张力,射流从泰勒锥表面产生。当 2 种纺丝装置受到的电场强度相等时式(4)成立

$$\frac{V_0}{h_0}=\frac{V_1}{h_1} \tag{4}$$

由于辅助电极和喷丝头之间的距离(h_1)远小于纺丝距离(h_0),导致辅助电极静电纺产生射流的临界电压 V_1 小于 V_0,使得在较低电压下纺丝成为可能。

2.2 尖端辅助电极静电纺电场分布数值模拟

COMSOL Multiphysics 5.0 是一款专业的高级数值仿真软件,主要应用于磁场、似稳场和静电场等领域内的计算与分析,其中,AC/DC 模块分支中包含低频电磁场的物理场接口,可以解决静磁场、似稳场和静电场等领域内的电磁问题。因此,本文选用此软件来模拟分析纺丝区域内的电场分布。

在 COMSOL Multiphysics 5.0 软件中,可以设置一维、二维和三维这 3 个维度,本节进行静电场分析研究时,物理模型涉及到喷丝头、辅助电极和接收极板,选择二维建模便能满足数值模拟过程。根据实验过程中的实际实验参数设定模型树里的几何类型或特征,包括环境范围、接收极板尺寸、喷丝头直径和长度、辅助电极直径和长度、纺丝距离和针辅距等,如 Tab.1 所示。模型的建立基于以下 3 个假设条件:(1) 介质的电导率和介电常数是恒定的;(2) 溶液和静电纺过程中射流所带电荷对电场的影响忽略不计;(3) 注射器和支撑件对电场的影响忽略不计。

为了研究辅助电极对纺丝区域电场分布的影响,建立了传统单喷头静电纺丝装置和辅助电极静电纺丝装置的二维模型,如 Fig.4 所示。

Tab. 1　Basic parameter of two-dimensional electrospinning model

Environmental range Length×width /(cm×cm)	Size of receiving plate Length×width /(cm×cm)	Diameter of spinneret /mm	Spinning length/cm	Auxiliary electrode diameter/ mm	Auxiliary electrode length/ cm	Spinning distance/cm	Distance between spinneret and auxiliary electrode/cm
30×30	15×0.1	0.08	2	0.05	2	15	2

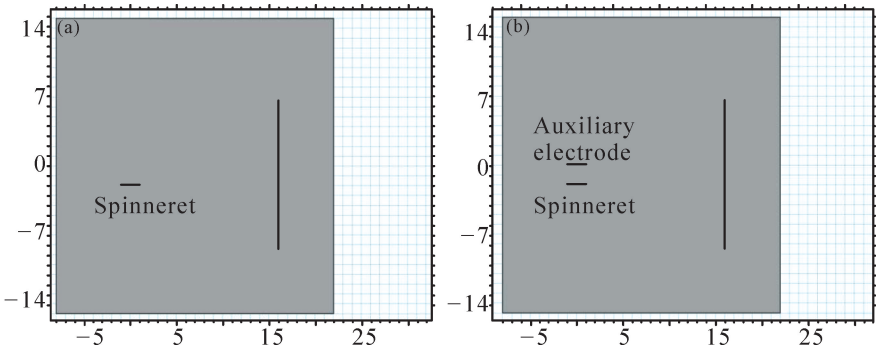


Fig. 4　Schematic of two-dimensional model:(a) traditional electrospinning apparatus; (b) electrospinning with auxiliary electrode

建立静电纺二维几何模型以后,为模型里的喷丝头、辅助电极和接收极板选择相对应的材料和属性。本文所使用的喷丝头、辅助电极和接收极板均是不锈钢结构,导电性优良。环境区域设置为空气,不同材料属性如 Tab.2 所示。设置好材料属性后,添加物理场。根据实际纺丝电压大小,数值模拟中喷丝头连接的电压设置为 9 kV,辅助电极和接收极板均接地。

对建立好的模型进行网格划分,选择自由剖分三角形网格。然后设置网格的尺寸,即设置网格剖分的精细化程度,网格剖分的越精细,结果计算越准确。本文选用的是标准尺寸网格划分,网格划分后的结果如 Fig.5 所示。

Tab. 2　Electrospinning two-dimensional model materials and properties

Model	Materials	Conductivity/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	Dielectric constant
Spinneret, auxiliary electrode, Receiving plate	stainless steel	4.032×10^{6}	10
Environment zones	air	1.0×10^{-5}	1

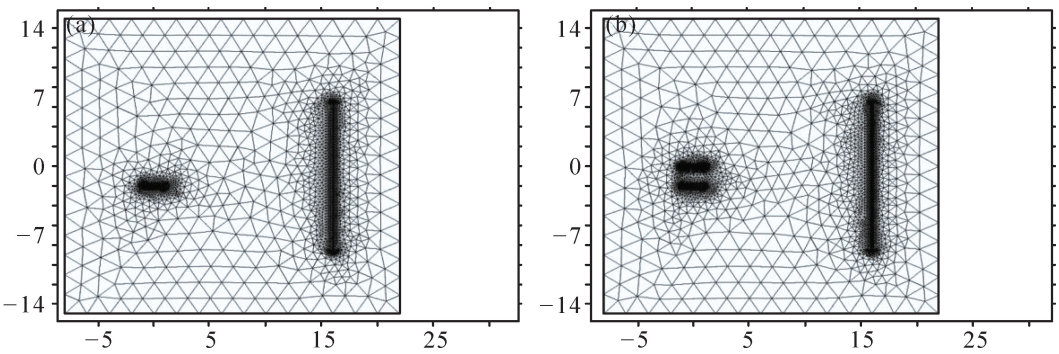


Fig. 5　Mesh generation of electrospinning two-dimensional model: (a) traditional electrospinning apparatus; (b) electrospinning with auxiliary electrode

2.3 静电纺丝区域电场分布

对模型求解之后，生成静电纺丝区域的电场分布图，如 Fig.6 可见。图中颜色越蓝代表电势越高，传统单喷头静电纺丝和辅助电极静电纺装置中喷丝头附近的电势均为最高。此外，传统静电纺丝区域等势线分布均匀，电势下降梯度缓慢(Fig.6(a))，而由于辅助电极的引入，电势下降梯度迅速，喷丝头与辅助电极之间的等势线分布密集且复杂，导致垂直于等势线的电场力方向发生变化，如 Fig.6(b)所示。电场力的方向垂直于等势线是由于电荷在等势线上移动，电荷的势能不变，如果电场线不与等势线垂直，电荷的移动受到电场力沿电荷运动方向的作用，其势能必然变化，与等势线上势能处处相等矛盾。

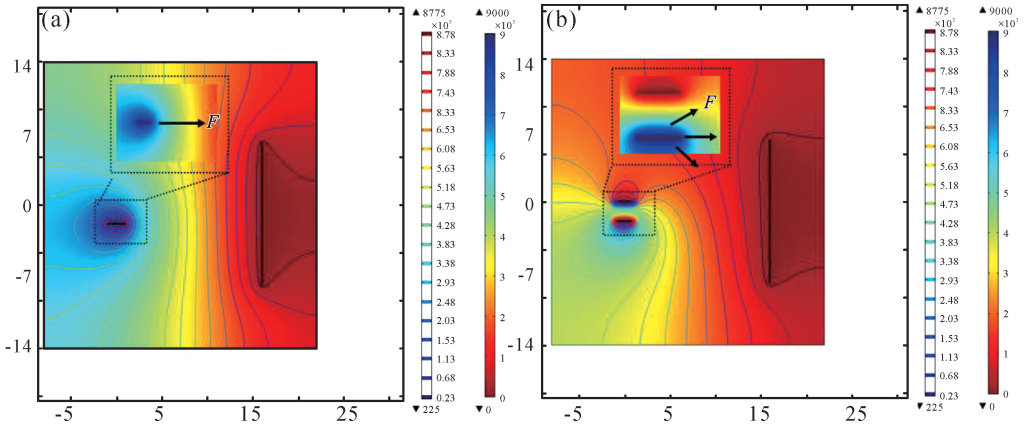


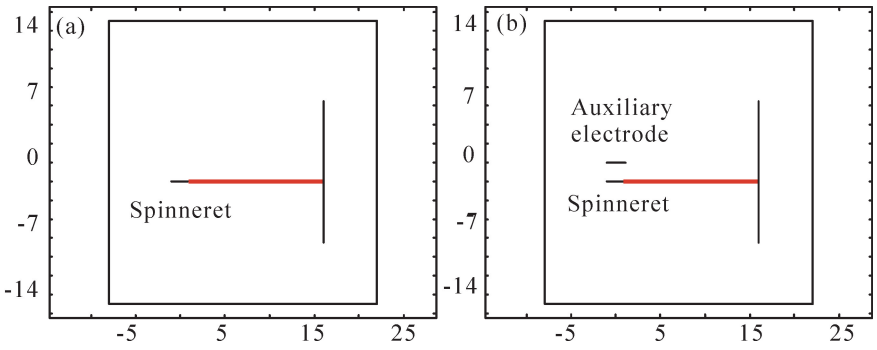
Fig. 6 Diagram of electric field distribution: (a) traditional electrospinning; (b) electrospinning with auxiliary electrode

为了研究辅助电极对纺丝区域电场的影响，以泰勒锥顶端作为起点，沿喷丝头到接收极板方向(y 轴方向)作一条长 15 cm 的截线，如 Fig.7(a)所示。同时沿辅助电极到喷丝头方向(x 轴方向)作一条长 4 cm 的截线，如 Fig.7(b)所示。计算 2 条截线上的电场强度大小。结果如 Fig.8 所示，电场强度在越靠近喷丝头针尖的位置越大，传统静电纺中喷丝头处电场强度最大值为 5.5×10^5 V/m；辅助电极静电纺中喷丝头处最大的电场强度为 1.09×10^6 V/m，由此可知，辅助电极增大了纺丝区域的电场强度，导致液滴受到更大的电场力作用。

根据牛顿第二运动定律，加速度和质量一定时，物体加速度大小跟作用力成正比，跟物体的质量成反比。加速度的方向跟作用力的方向相同。牛顿第二运动定律可表示为 $F \propto ma$。根据电场强度公式(5)

$$E=\frac{F}{q} \tag{5}$$

式中：E——电场强度；F——电场力；q——电荷量。在电荷量不变的情况下，增大电场强度能够得到更大的电场力。即电场强度越大，液滴受到的电场力越大，导致射流初始速度越大。



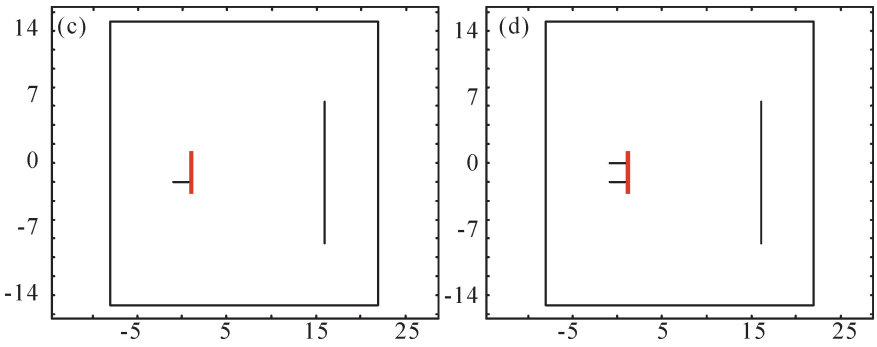


Fig. 7　Position and direction of transversal in electrospinning two-dimensional model: (a) traditional electrospinning from spinneret to collector; (b) auxiliary electrode electrospinning from spinneret to collector; (c) traditional electrospinning from spinneret to auxiliary electrode; (d) auxiliary electrode electrospinning from spinneret to auxiliary electrode

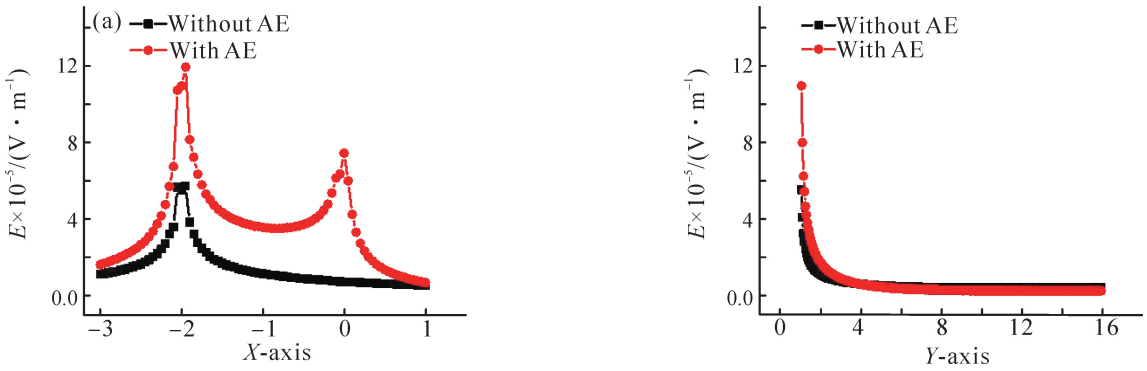


Fig. 8　Electric field of electrospinning region: (a) *X*-Axis; (b) *Y*-Axis

2.4　尖端辅助电极静电纺多射流数学模型的建立

由数值模拟结果可知,辅助电极显著增大了纺丝区域的电场强度。通过 Photron Mini A200 高速摄影机(分辨率 1024×1024, 每秒 6400 帧)拍摄喷丝头末端液滴的形状,如 Fig.9(a)所示。对液滴形状变化和射流形成的关系建立回归数学模型。首先用 VC++对液滴图像进行二值化处理,得到较清晰的边界图,如 Fig.9(b)所示。然后通过 Mathematica 软件拟合出液滴边界曲线的函数方程如式(6)所示

$$f=5.50359*10\hat{}17.01496*10\hat{}12\cos[0.003095x]+3.4699*10\hat{}11\cos[0.00619x] \quad (6)$$

建立液滴的表面曲线,如 Fig.9(c)所示。并根据式(7)计算液滴表面的曲率(k)

$$k=\mathrm{Abs}[6.71965*10\hat{}7\cos[0.003095x]-1.32953*10\hat{}7\cos[0.00619x] \quad (7)$$

为了求曲率最大值,先计算曲率的稳定点坐标,然后计算出对应的曲率值。通过 Mathematica 软件计算横坐标从 150 到 450 的曲率,如 Fig.9(d)所示。喷丝头的直径是 0.08 mm,喷丝头的直径作为参考物,横坐标从 150~450 对应在空间上的直线距离是 0.082 mm。如 Tab.3 所示,在空间直线上直线距离为 0.082 mm 范围内,出现了 7 个曲率极大值(K_{max}),分别为 0.0069 rad/mm, 0.0162 rad/mm, 0.00461 rad/mm, 0.0281 rad/mm, 0.0012 rad/mm, 0.0072 rad/mm 和 0.0028 rad/mm。射流出现在横坐标为 323 的位置,该处曲率为 0.0281 rad/mm,是范围内的最大值。为了得到产生射流的临界条件,计算液滴表面的曲率平均值(K_{mean}),如 Tab.3 所示,曲率平均值为 0.0059 rad/mm。曲率最大值是曲率平均值的 4.76 倍,即在直线距离为 0.082 mm 的区域内,当曲率最大值与平均值的比值大于 4.76 时产生射流。

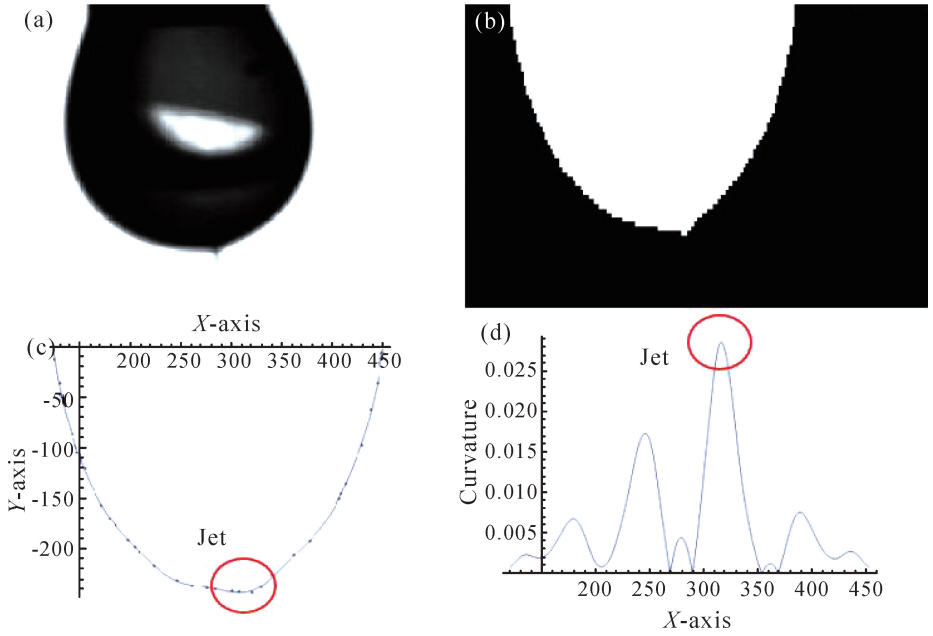


Fig. 9 Droplet in single jet electrospinning: (a) high-speed camera image; (b) binarization image; (c) droplet surface curve; (d) curvature

Tab. 3 Comparison of extreme value and average value of curvature by single jet droplet

Abscissa	K_{max}/(rad · mm^{-1})	K_{mean}/(rad · mm^{-1})	K_{max}/ K_{mean}
181	0.0069		
246	0.0162		
288	0.0046		
323	0.0281	0.0059	4.76
367	0.0012		
395	0.0072		
438	0.0028		

如 Fig.10 和 Tab.4 所示,通过高速摄影机拍摄产生 2 股射流时液滴的形状,然后用 VC++对液滴图像进行二值化处理,最后通过 Mathematica 软件拟合出液滴边界曲率,结果如下。

(1)横坐标从 90~200 对应在空间上的直线距离是 0.03 mm。它们的曲率极大值(K_{max1})和曲率平均值(K_{mean1})如 Tab.4 所示。K_{max1} = 0.0482 rad/mm 时产生射流,此时 K_{mean1} = 0.0066 rad/mm,K_{max1}/K_{mean1} = 7.32。即在直线距离为 0.03 mm 的区域内,横坐标为 99 的位置,$K_{max1}/K_{mean1} \geqslant 7.32$ 时产生射流。

(2)横坐标从 250~360 对应在空间上的直线距离是 0.03 mm。K_{max2} = 0.0854 rad/mm 时产生射流,此时 K_{mean2} = 0.0151 rad/mm,K_{max2}/K_{mean2} = 5.66。即在直线距离为 0.03 mm 的区域内,横坐标为 327 的位置,$K_{max2}/K_{mean2} \geqslant 5.66$ 时产生射流。

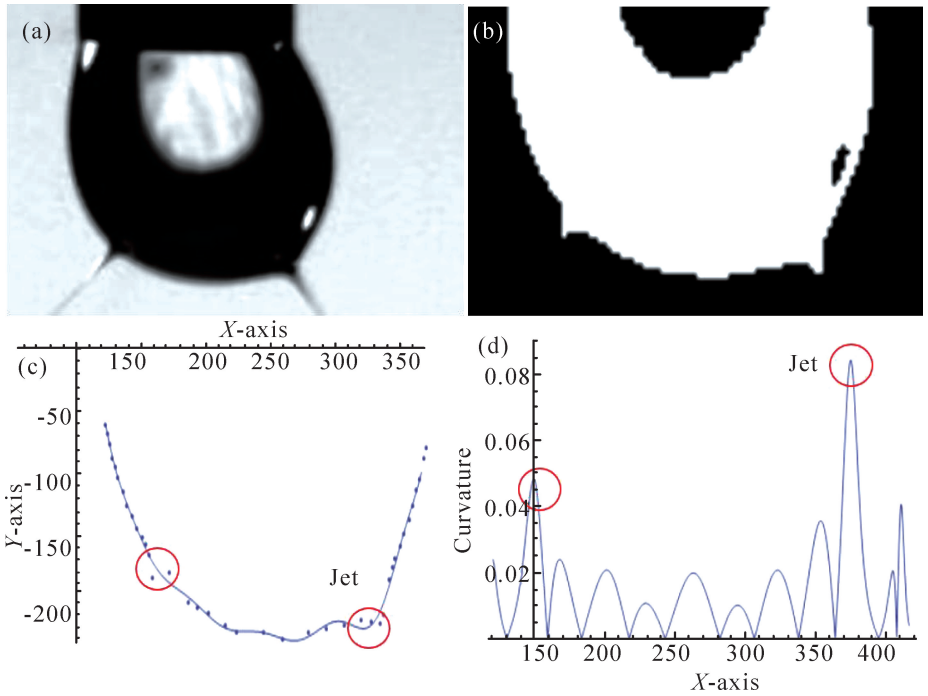


Fig. 10　Droplet in two jets electrospinning: (a) high-speed camera image; (b) binarization image; (c) droplet surface curve; (d) curvature

Tab. 4　Comparison of extreme value and average value of curvature by droplet of two jets

Abscissa	K_{max1}/(rad · mm^{-1})	K_{mean1}/(rad · mm^{-1})	K_{max1}/ K_{mean1}
99	0.0482		
118	0.0217	0.0066	7.32
152	0.02		
179	0.008		
Abscissa	K_{max2}/(rad · mm^{-1})	K_{mean2}/(rad · mm^{-1})	K_{max2}/ K_{mean2}
275	0.0201		
306	0.0352	0.0151	5.66
327	0.0854		
352	0.0192		

如 Fig.11 和 Tab.5 所示,在 3 股射流的液滴曲线上运用同样的方法计算产生 3 股射流的液滴表面曲线及曲率变化,结果如下。

(1)横坐标从 110~230 对应在空间上的直线距离是 0.0328 mm。它们的曲率极大值(K_{max1})和曲率平均值(K_{mean1})如 Tab.5 所示。K_{max1} = 0.061 rad/mm 时产生射流,此时 K_{mean1} = 0.0113 rad/mm, K_{max1}/K_{mean1} = 5.38。即在直线距离为 0.0328 mm 的区域内,横坐标为 146 的位置,$K_{max1}/K_{mean1} \geqslant 5.38$ 时出现射流。

(2)横坐标从 230~350 对应在空间上的直线距离是 0.0328 mm。K_{max2} = 0.0561 rad/mm 时产生射流,此时 K_{mean2} = 0.0088 rad/mm, K_{max2}/K_{mean2} = 6.34。即在直线距离为 0.0328 mm 的区域内,横坐标为 308

的位置，$K_{max2}/K_{mean2} \geqslant 6.34$ 时出现射流。

(3)横坐标从 350～400 对应在空间上的直线距离是 0.0137 mm。K_{max3} = 0.0502 rad/mm 时产生射流，此时 K_{mean3} = 0.0111 rad/mm，K_{max3}/K_{mean3} = 4.52。即在直线距离为 0.0137 mm 的区域内，横坐标为 327 的位置，$K_{max3}/K_{mean3} \geqslant 4.52$ 时出现射流。

综上可知，由于辅助电极提高了纺丝区域的电场强度，形成了复杂且密集的等势线，喷头末端的液滴受到不同方向电场力的作用，液滴形状发生变化，导致液滴表面曲率发生变化。本文通过建立带电液滴表面形变与多射流生成关系的回归数学模型，得到静电纺辅助电极静电纺产生射流的临界条件为：在某一范围内液滴表面上曲率 $K_{max}/K_{mean} \geqslant 4.52$ 时将出现射流。

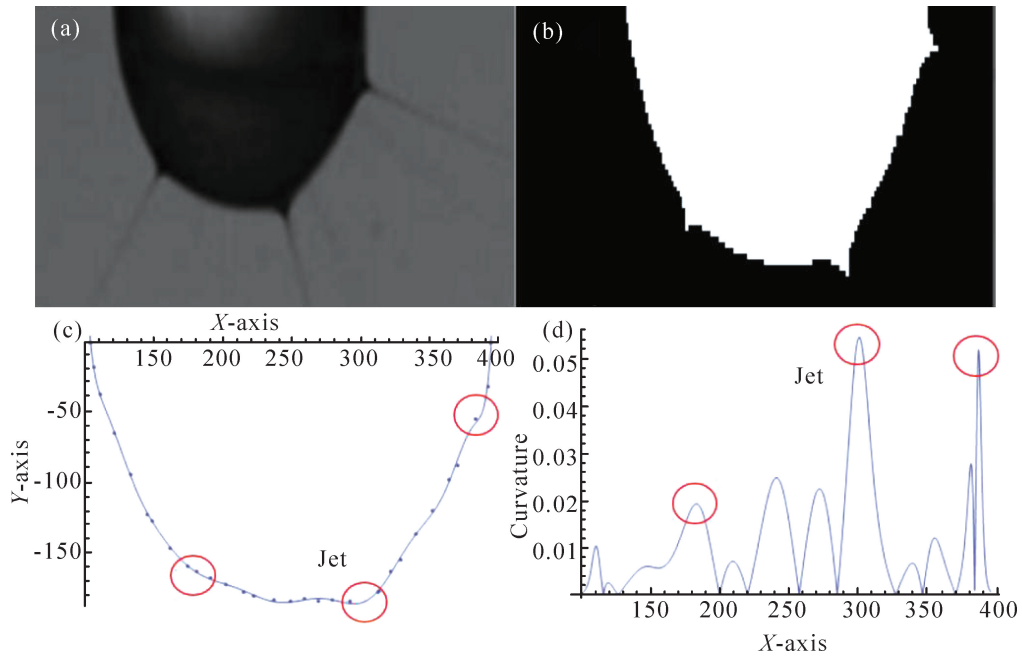


Fig. 11 Droplet in three jets electrospinning: (a) high-speed camera image; (b) binarization image; (c) droplet surface curve; (d) curvature

Tab. 5 Comparison of extreme value and average value of curvature by three jets droplet

Abscissa	K_{max1}/(rad · mm^{-1})	K_{mean1}/(rad · mm^{-1})	K_{max1}/K_{mean1}
112	0.012		
118	0.0032	0.0113	5.38
146	0.061		
185	0.021		
Abscissa	K_{max2}/(rad · mm^{-1})	K_{mean2}/(rad · mm^{-1})	K_{max2}/K_{mean2}
207	0.0067		
242	0.0262	0.0088	6.34
274	0.0223		
308	0.0561		

Abscissa	K_{max3}/(rad · mm^{-1})	K_{mean3}/(rad · mm^{-1})	K_{max3}/ K_{mean3}
337	0.0064		
356	0.0121	0.0111	4.52
380	0.0277		
391	0.0502		

为了验证辅助电极静电纺丝产生射流临界条件的适用性,本文使用高速摄像机拍摄不同数量的泰勒锥和射流图片,如 Fig.12 所示。并通过 Mathematica 软件拟合出边界曲线的函数方程,建立关于液滴的表面曲线。计算产生射流时的曲率最大值和平均值。结果表明,产生 1 股射流时 K_{max}/K_{mean} = 4.97;产生 2 股射流时 K_{max1}/K_{mean1} = 6.53, K_{max2}/K_{mean2} = 8.21;产生 3 股射流时 K_{max}/K_{mean} = 10.23;产生 5 股射流时 K_{max1}/K_{mean1} = 4.99, K_{max2}/K_{mean2} = 5.68;产生 6 股射流时 K_{max1}/K_{mean1} = 4.96, K_{max2}/K_{mean2} = 9.27, K_{max3}/K_{mean3} = 5.61。它们均符合当液滴表面曲率 K_{max}/K_{mean} ≥ 4.52 时产生射流的规律。另外,如 Fig.12(c~e)可见,液滴上产生的射流数量分别是 3 股、5 股和 6 股,但曲率极最大值点未与射流数量一致,造成这种现象的原因为液滴是三维立体的形态,实验过程中高速摄影机只能拍摄到液滴朝向高速摄影机正面的形状。当泰勒锥和射流出现在液滴背面时,由于无法拍摄到液滴背面的形状,导致无法拍摄到在液滴背面上形成的泰勒锥和射流运动过程。因此,无法计算每股射流出现时的曲率极值。

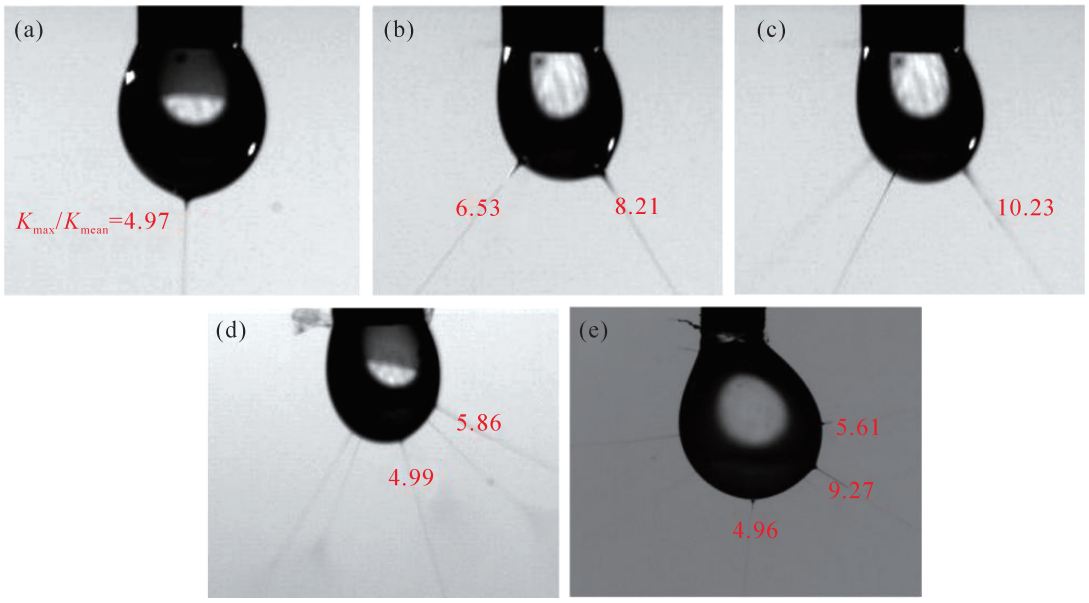


Fig. 12　Image of droplet and jets produced by auxiliary electrode electrospinning and K_{max}, K_{mean}: (a) 1 jet; (b) 2 jets; (c) 3 jets; (d) 5 jets; (e) 6 jets

2.5　尖端辅助电极纺丝实验

为了验证尖端辅助电极静电纺丝原理及可行性,本文采用 6% 的聚乙烯醇(PVA)-水溶液进行实验验证。实验条件为注射速度 2 mL/h,纺丝距离 15 cm,针辅距 2 cm,进行纺丝实验。当电压为 6.92 kV 时,传统静电纺产生单股射流,即其临界电压为 6.92 kV,辅助电极静电纺产生射流的临界电压为 4.34 kV。实验现象符合理论推导结果。随着电压增大到 28 kV,传统单喷头静电纺仍然只能产生 1 股射流,如 Fig.13(a)所示。然而在辅助电极静电纺丝过程

中,电压为 6.3 kV 时出现了 4 股射流,如 Fig.13(b)所示。

Fig.13(c)和 Fig.13(e)为传统单喷头静电纺和辅助电极静电纺纳米纤维的扫描电镜图像,结果可见,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.13(d)和(f)所示,传统单喷头静电纺纳米纤维直径分布在 180 ~ 510 nm,平均直径为 350 nm,辅助电极静电纺纳米纤维的直径分布在 120 ~ 430 nm,其平均直径为 220 nm,添加辅助电极以后的纳米纤维直径小于传统静电纺纳米纤维。另外,收集了 2 种装置纺丝 1 h 的纳米纤维毡,如 Fig.13(g)和 Fig.13(h)所示。传统静电纺纳米纤维沉积分布趋近于圆形,而辅助电极静电纺纳米纤维沉积均匀铺满在铝箔纸上。由此可知辅助电极静电纺纤维沉积分布比传统单喷头静电纺纤维沉积分布区域更大、更均匀。

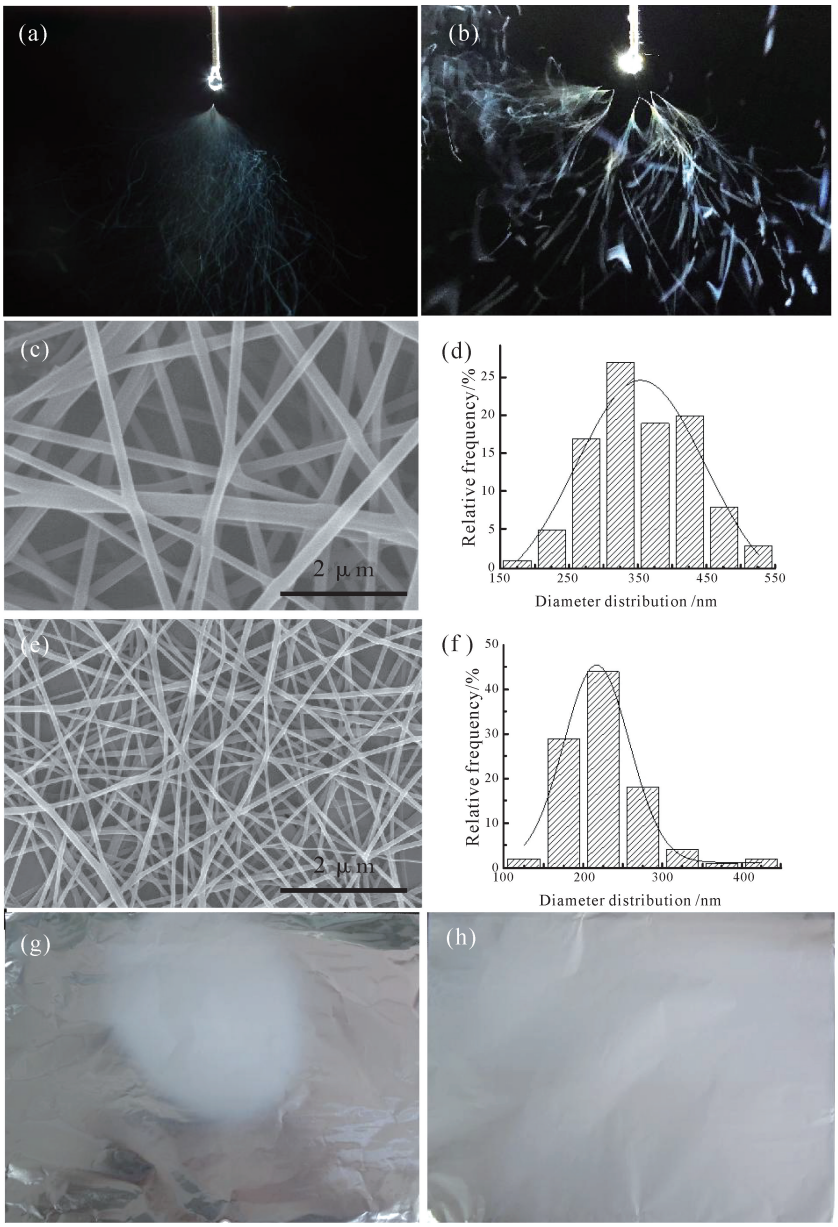


Fig. 13 Traditional electrospinning: (a) image of jet motion; (c) SEM image of nanofibers; (d) fiber diameter distribution; (g) distribution of nanofibers in collector. Auxiliary electrode electrospinning: (b) image of jet motion; (e) SEM image of nanofibers; (f) fiber diameter distribution; (h) distribution of nanofibers in collector

本文还研究了 2 种装置在不同电压的纺丝产量,如 Fig.14 所示。结果表明,电压为 6 kV,7 kV,8 kV 和 9 kV 时,传统单喷头静电纺纳米纤维产量为 0.028 g/h,0.038 g/h,0.042 g/h 和 0.05 g/h,辅助电极静电纺纳米纤维的产量为 0.18 g/h,0.32 g/h,0.27 g/h 和 0.25 g/h。在相同纺丝条件下,辅助电极把静电纺纳米纤维产量提高了 6~10 倍。

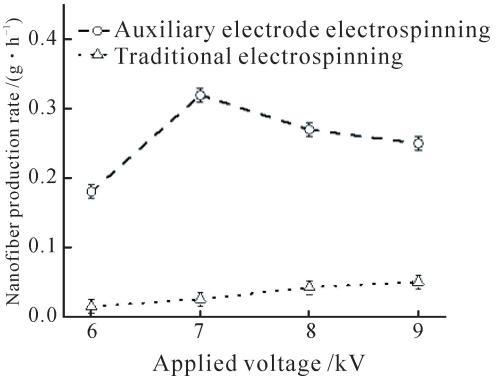


Fig. 14　Applied voltage vs. nanofiber production rate in auxiliary electrode electrospinning and traditional electrospinning

3　结论

本文研究了尖端辅助电极静电纺丝产生多射流的机理,通过使用数值模拟软件模拟了辅助电极对纺丝区域电场分布的影响。结果表明,越靠近喷丝头电场强度越大,辅助电极显著增强了纺丝区域的电场强度。尖端辅助电极静电纺有望在较低电压下进行纺丝实验;辅助电极的空间位置对于静电纺丝过程有重要影响;辅助电极的引入使得纺丝区域产生复杂的等势线。辅助电极静电纺丝技术产生的纤维直径小于传统静电纺丝纤维,纤维的产量提升了 6~10 倍。同时,本文为开发新型多场耦合纺丝系统提供了理论框架,对生物医用、过滤等领域纳米纤维材料的可控制备具有重要指导意义,为推动纳米纤维工业化制备技术提供了新思路。

参考文献:

[1] 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.

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

[3] Park J S. Electrospinning and its applications[J]. Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, 2010, 1: 043002.

[4] Lim C T. Nanofiber technology: current status and emerging developments[J]. Progress in Polymer Science, 2017, 70: 1-7.

[5] 丁彬, 俞建勇. 静电纺丝与纳米纤维[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2011.

[6] Shariatzadeh F J, Currie S, Logsetty S, *et al*. Enhancing wound healing and minimizing scarring: a comprehensive review of nanofiber technology in wound dressings[J]. Progress in Materials Science, 2025, 147: 101350.

[7] Bhowmick D, Shipu I U. Advances in nanofiber technology for biomedical application: a review[J]. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2024, 22: 1908-1919.

[8] 杨海贞, 魏肃桀, 马闯, 等. 静电纺丝丝素蛋白基纳米纤维在医学领域的应用[J]. 印染, 2023, 49(12): 76-81.
Yang H Z, Wei S J, Ma C, *et al*. Application of electrospun silk fibroin-based nanofibers in medicine[J]. China Dyeing and Finishing, 2023, 49(12): 76-81.

[9] Liu H, Zhu Y, Zhang C, *et al*. Electrospun nanofiber as building blocks for high-performance air filter: a review[J]. Nano Today, 2024, 55: 102161.

[10] 胡蝶飞, 王琰, 姚菊明, 等. 纳米纤维复合结构空气过滤材料性能研究[J]. 纺织学报, 2023, 44(5): 77-83.
Hu D F, Wang Y, Yao J M, *et al*. Performance of nanofiber composite air filtration materials[J]. Journal of Textile Research, 2023, 44(5): 77-83.

[11] Faccini M, Vaquero C, Amantia D J. Development of protective clothing against nanoparticle based on electrospun nanofibers[J]. Journal of Nanomaterials, 2012, 2012: 892894.

[12] Sheng J, Zhao J, Yu X, *et al*. Electrospun nanofibers for waterproof and breathable clothing[M]//Electrospinning: nanofabrication and applications. William Andrew Publishing, 2019: 543-570.

[13] 文春鹏, 马勇, 陈品德, 等. 静电纺纳米纤维纱线的制备方法及在智能可穿戴领域的应用进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(5): 40-44.
Wen C P, Ma Y, Chen P D, *et al*. Preparation methods of electrospun nanofiber yarns and their progress in smart wearable applications[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(5): 40-44.

[14] Wang M, Ma C, Uzabakiriho P C, *et al*. Stencil printing of liquid metal upon electrospun nanofibers enables high-performance flexible electronics[J]. ACS Nano, 2021, 15: 19364-19376.

[15] 刘志. 可控多射流针盘纺及其在油水分离中的应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.

Liu Z. Controllable multi-jet needle-disc electrospinning and its application in oil-water separation[D]. Suzhou: Soochow University, 2017.

[16] 刘敏敏, 俎凤霞, 吴涛, 等. 带电球面和带电球体电场强度和电势分布求解探讨 [J]. 物理通报, 2016, 35(6): 8-10.
Liu M M, Zu F X, Wu T, *et al*. Discussion on the calculation of electric field intensity and potential distribution of charged spherical surface and sphere[J]. Physics Bulletin, 2016, 35(6): 8-10.

[17] 吕金钟, 丁红胜, 邱红梅. 带电导体球表面处的电场强度 [J]. 物理与工程, 2005, 15(1): 27-29.
Lü J Z, Ding H S, Qiu H M. Electric field intensity at the surface of a charged conductor sphere[J]. Physics and Engineering, 2005, 15(1): 27-29.

[18] Cloupeau M, Prunet F B. Electrostatic spraying of liquids: main functioning modes [J]. Journal of Electrostatics, 1990, 25: 165-184.

Model Establishment of Tip-Assisted Electrospinning and Multi-Jet Formation

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 explore the principle of cutting-edge auxiliary electrode electrospinning technology and the generation of multiple jets, the influence of auxiliary electrodes on electric field distribution in electrospinning region was firstly analyzed using COMSOL software. The results indicate that the introduction of auxiliary electrodes significantly enhances the electric field intensity near the spinneret, enabling the generation of multiple jets in electrospinning at lower voltages, thereby reducing energy consumption and improving spinning efficiency. Moreover, the equipotential lines increase as the distance between auxiliary electrode and the spinneret decreases, leading to changes in the direction of the electric field force perpendicular to the equipotential lines, which in turn causes the deformation of droplet. High-speed photography was then employed to record the motion process of droplet and multiple jets, deeply exploring the relationship between droplet deformation and the generation of multiple jets. By binarizing the images and fitting the droplet surface curves by Mathematica software, a regression mathematical model describing the relationship between the deformation of charged droplet surface and the generation of multiple jets was established. Theoretical analysis and experimental results both confirm that when the ratio of the maximum curvature at a point on the droplet surface to the average curvature exceeds 4.52, the generation of jets will be induced. This paper provides theoretical insights and experimental evidence for optimizing electrospinning processes.

Keywords: multi-jet; Mathematica software; electrostatic spinning; regression mathematical model