

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.10.011

多射流静电纺丝稳定性的影响分析

卓丽云¹, 朱自明², 郑高峰³

(1. 厦门工学院机械与制造工程学院, 福建厦门 361021; 2. 广东工业大学机电工程学院, 广州 510006; 3. 厦门大学仪器与电气系, 福建厦门 361102)

摘要: 为了使静电纺丝过程高效稳定, 明确多射流喷头电场分布规律与控制策略, 开展结构优化、减少电场抑制, 提出了一种新的静电纺丝多射流喷头——错列喷头。从理论分析了多射流存在边缘现象的原因, 开展单列、双列、错列喷头的电场仿真分析。结果表明, 无论何种结构, 随着喷头中的针头间距由 15 mm 增加到 30 mm, 边缘效应减弱而电场强度增加, 但针头间距的增加必然导致射流密度降低; 和单列喷头相比, 双列喷头有增加射流密度的优势, 是批量生产的最普遍方法, 但其电场强度均低于单列喷头且边缘效应有所加强; 错列喷头因针头间距的互补而在提高射流密度方面有一定的优势, 电场强度和边缘效应均优于针头间距 15 mm 双列喷头而劣于针头间距 30 mm 喷头。总之, 错列喷头在保证一定的射流密度条件下, 可获得相对较高的电场强度。这为多射流静电纺丝过程的稳定和持续提供了技术保障, 为后续多针头喷头规模化生产的设备制造提供了研究基础。

关键词: 静电纺丝; 边缘效应; 错列喷头; 电场强度

中图分类号: TQ340.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)10-0059-06

Analysis on Stability of Multi-Jet Electrostatic Spinning

Zhuo Liyun¹, Zhu Ziming², Zheng Gaofeng³

(1. College of Mechanical and Manufacturing Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;

2. Mechanical engineering college, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. Department of Instruments and Electricity, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract : In order to obtain efficient and stable process of electrostatic spinning, clarify electric field distribution law and control strategy of multiple jet nozzle, carry out structure optimization and reduce electric field suppression, a new electrostatic spinning multiple jet nozzle – staggered jet nozzle was proposed. The reason of edge phenomenon existed in multiple jets was analyzed theoretically, and the electric field simulation analysis of single-row, double-row and staggered jet nozzle was carried out. The results show that edge effect decreases and electric field intensity increases with the increase of spacing of needles in nozzle from 15 mm to 30 mm in any structure, but the increase of spacing of needles must lead to the decrease of jet density. Compared with single-row jet nozzle, double-row jet nozzle has the advantage of increasing jet density, which is the most common method for mass production. However, its electric field intensity is lower than single-row jet nozzle and the edge effect is enhanced. Due to the complementary jet density of the spacing of needles, the staggered jet nozzle has certain advantages, the electric field intensity and edge effect are better than those of the double-row jet nozzle with spacing of needles of 15 mm but worse than those of the double-row jet nozzle with 30 mm. In short, for the the staggered jet nozzle, a relatively high electric field intensity can be obtained under the condition of ensuring a certain jet density. This provides a technical guarantee for the stable and continuous process of multi-jet electrostatic spinning, and provides a research basis for the subsequent equipment manufacturing of multi-jet nozzle large-scale production.

Keywords : electrostatic spinning ; edge effect ; staggered jet nozzle ; electric field intensity

随着纳米技术的迅猛发展, 聚合物纳米纤维在过滤、生物医学、传感器和材料等不同领域有巨大的

应用潜力。因此, 静电纺丝作为制取纳米纤维最简单而有效的方法也成为了研究的热点^[1-7]。

基金项目: 福建省高等学校学科带头人培养计划项目, 福建省中青年骨干教师教育科研项目 (JAT190941), 厦门工学院科研项目 (KYT2019002)

通信作者: 卓丽云, 讲师, 工学硕士, 主要研究方向为工程图学及计算机辅助设计、最优算法、静电纺丝 E-mail : 181465553@qq.com

收稿日期: 2020-06-04

引用格式: 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.

多射流静电纺丝无疑是提高纺丝产量和促进工业化生产的最普遍方法之一。目前多针头静电纺丝喷头主要有直列式和空间排列式^[8-10]。S. A. Theron 等^[11]研究了 1×9 针头和 1×7 针头的线性排列和 3×3 的 9 针头空间排列; W. Tomaszewski 等^[12]研究了 26 针头的线型排列、椭圆排列和 10 针头圆形排列。Zhu Ziming^[13]等通过对线性、三角形、梯形三种多针头排列形式进行仿真实验,提出梯形排列有助于改善静电纺丝制备的纤维膜质量。余薇等^[14]提出一种基于库仑定律的呈线性凸弧形排布多针头的静电纺丝法。王巍和陈云军等^[15-16]针对无针式静电纺丝进行了相应的研究。陈威亚和吴元强等^[17-19]对多针头静电纺丝电场强度的均匀性进行了模拟,主要通过不等针长、间距、针头数量、针头直径、针头排列形式、电压及增加辅助电极等工艺参数进行仿真对比。刘延波等^[20]采用金属套管对多针头静电纺丝过程中场强分布进行了影响分析。

研究表明多针头喷头并不是单针头喷头的简单叠加,而是在库仑力的作用下会导致边缘效应的出现^[21]。笔者建立在许多学者研究的基础上,对多射流静电纺丝的电场边缘效应现象进行理论分析,提出了错位排列的双列线性多针头喷头;为进一步明确多射流静电纺丝控制策略,开展线性单列、双列、错位排列等结构喷头的电场仿真分析,明确多射流喷头结构参数对空间电场的作用规律,进行喷头结构优化设计,为多射流静电纺丝过程的稳定和持续提供技术保障,为后续多针头喷头规模化生产的设备制造提供研究基础。

1 多射流静电纺丝电场边缘现象的理论分析

多针头喷头是解决静电纺丝大批量生产的有效方法,但是多针头并不是简单的单针头的叠加。因为多针头施加电压后,针头之间会出现同种电荷所受的库仑力不同从而导致边缘效应的产生。分别在单针、双针和三针喷头施加相同电压时,会出现如图 1 所示的三种不同的电荷分布现象。图 1 中单针喷头末端的电荷分布比较均匀;双针喷头末端的电荷由于相互之间的排斥力而使得电荷分布不均匀,使得两针头之间相近部分电荷分布较少而外围一侧电荷分布较多;三针喷头因中间针头同时受到两边针头的电荷排斥力而发生相互抵消,从而形成比较均匀的电荷分布,但两边的针头受到同一方向的排斥力而无法相互抵消,从而形成电荷往边缘聚集的现象^[13]。

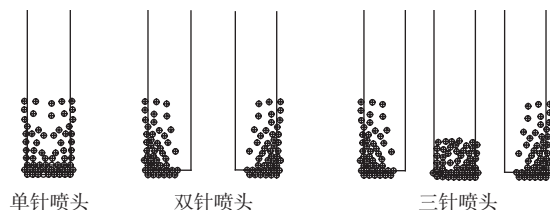


图 1 三种喷头施加电压下的电荷分布情况

喷头中针头附近电场与针头电荷分布情况有关,电荷密度越大,电场越强。线性阵列喷头中相邻针头之间的电荷分布现象如图 1 中三针喷头所示,其电场力矢量图可表示为图 2。

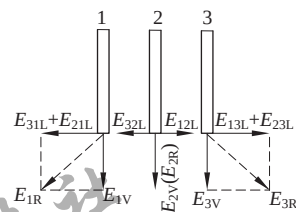


图 2 多针头线性阵列电场力矢量图

图 2 中,1 号和 3 号表示边缘针头,2 号表示中间针头。当喷头施加一定电压时,1,2,3 号针头分别受到针头自身指向收集板的电场力 E_{1V} , E_{2V} , E_{3V} , 同时针头之间分别受到其它针头对自己的水平电场力:1 号针头受到 2 号和 3 号针头对其的水平电场力分别为 E_{21L} 和 E_{31L} ; 2 号针头受到 1 号和 3 号针头对其的水平电场力分别为 E_{12L} 和 E_{32L} ; 3 号针头受到 1 号和 2 号针头对其的水平电场力分别为 E_{13L} 和 E_{23L} 。因此,1,2,3 号针头所受的电场力合力 E_{1R} , E_{2R} 和 E_{3R} 分别表示为式 (1)~式 (3)。2 号中间针头受到两侧的水平电场力方向相反会相互抵消,而 1,3 号边缘针头受到的来自同一侧的水平电场力不会发生相互抵消,所以就会出现如式 (4) 所示的现象,两侧 1,3 号的针头电场力会大于中间 1 号的针头,距离相等的 1 号针头和 3 号针头的电场力大小相等。由此可见,多射流静电纺丝电场边缘现象是不可避免的。考虑到边缘效应的特性,笔者把电场强度比值(即电场强度最高值与最低值之比)作为边缘效应的强弱表征指标。

$$E_{1R} = E_{1V} + E_{31L} + E_{21L} \quad (1)$$

$$E_{2R} = E_{2V} + E_{32L} + E_{12L} \quad (2)$$

$$E_{3R} = E_{3V} + E_{13L} + E_{23L} \quad (3)$$

$$|E_{1R}| = |E_{3R}| > |E_{2R}| \quad (4)$$

2 多射流喷头的静电纺丝电场仿真

因为带电射流的喷射和沉积稳定性主要取决于多针头喷头不同针头位置的电场分布情况,所以

保证纳米纤维膜均匀性的前提是降低边缘效应,提高多射流喷头空间电场的均匀性。因此,明确多射流喷头电场分布规律与控制策略,开展结构优化、减少电场抑制、确保稳定持续喷射已经成为多射流静电纺丝技术研究的重点。

2.1 构建空间电场三维仿真模型

采用 ANSYS 有限元分析软件进行静电纺丝喷头空间电场的仿真分析,根据方案设计构建如图 3 所示的静电纺丝三维空间电场仿真模型,主要由多射流喷头 1、空间区域 2 和收集板 3 组成。多射流喷头 1 的排列方式主要有如图 4 所示的三种:图 4a 所示为单列线性喷头,简称为单列喷头(其中 L_1 分别为 15 mm 和 30 mm);图 4b 所示为双列线性喷头,简称为双列喷头(其中 L_1 分别为 15 mm 和 30 mm, L_2 为 15 mm);图 4c 所示为错列线性喷头,简称为错列喷头(其中 L_1 为 30 mm, L_2 为 15 mm, L_3 为 7.5 mm)。仿真主要参数设置见表 1。

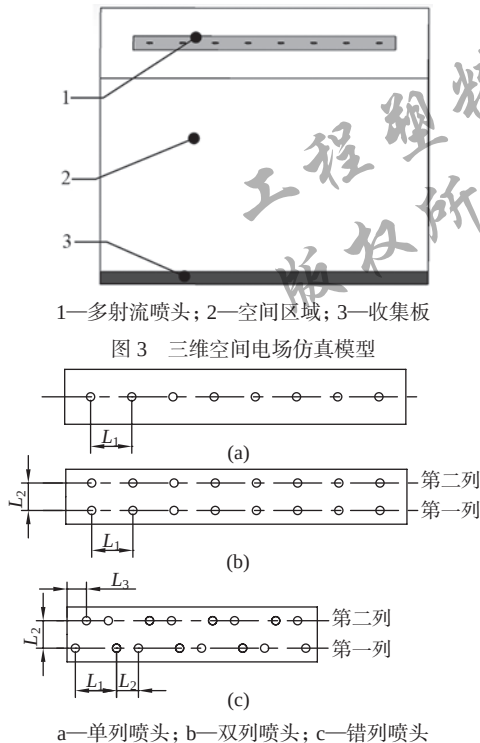


图 3 三维空间电场仿真模型

图 4 喷头的三种排列方式

表 1 静电纺丝模型仿真参数设置情况

参 数	设置值
单元类型	Solid 122
材料属性	相对介质为 1 的空气
接收距离/mm	186
针长/mm	34
针直径/mm	0.56
针尖电压/kV	10
收集板电压/kV	0

2.2 电场仿真分析

由于纳米纤维直径的大小及均匀性主要取决于多射流的稳定性,而其稳定性主要由不同位置的针头电场强度所决定。因此,分别对三种不同的喷头进行仿真建模分析,取各个针尖处的电场强度进行分析。

(1) 单列喷头电场仿真。

单列喷头(针头间距为 15 mm 和 30 mm)针尖处的电场强度对比如图 5 所示(图 5 中的针头距离指各针头相对喷头中心点的距离,下同)。由图 5 可以看出,针头间距 15 mm 单列喷头针尖处电场强度平均值的最大值、最小值和平均值分别为 1689.7, 1352.5 V/mm 和 1473.2 V/mm;针头间距 30 mm 单列喷头针尖处电场强度平均值的最大值、最小值和平均值分别为 2072.7, 1753.5 V/mm 和 1869.9 V/mm。间距 30 mm 单列喷头的电场强度全部大于间距 15 mm 单列喷头的电场强度;随着间距的增大,电场强度也跟着增大且更趋于平缓,电场强度比值由 1.249 降为 1.182。这是由于针头间距增大,针头之间的电荷排斥力减少,处于中间位置的针头处电场强度受到的削弱程度较小,空间电场的抵制作用较弱,这样有利于提高射流喷射的稳定性,但针头间距的增大使得射流密度也降低了。

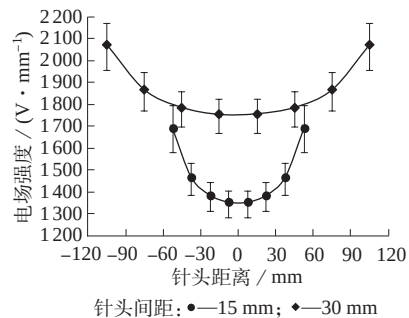


图 5 针头间距为 15 mm 和 30 mm 的单列喷头电场强度分布

(2) 双列喷头电场仿真。

考虑到高射流密度有助于纤维的形成,在单列喷头的基础上采用了双列喷头,其针头排列形式如图 4b 所示,针头间距主要有 15 mm 和 30 mm 两种,其对应的各针尖电场强度对比如图 6 所示。由图 6 可知,双列喷头中间距相同的两列针头的电场强度基本重合,且其曲线趋势均和单列喷头基本一致,表明双列喷头的电纺是可实施的。间距 15 mm 双列喷头针尖处电场强度平均值的最大值、最小值和平均值分别为 1278.7, 929.2 V/mm 和 1008.4 V/mm;间距 30 mm 双列喷头针尖处电场强度平均值的最大

大值、最小值和平均值分别为 1543.9, 1245.9 V/mm 和 1351.1 V/mm。间距 30 mm 的电场强度明显优于间距 15 mm 电场强度。随着间距的增大, 电场强度也随之增大且更趋于平缓, 电场强度比值由 1.376 降为 1.239。同图 5 相比可发现针头间距相同的情况下, 双列喷头的电场强度小于单列喷头的电场强度, 而且双列喷头的边缘效应较单列喷头有所增强, 但是相对于单列喷头, 双列喷头更有助于提高射流密度且是实现静电纺丝批量生产必不可少的方法。

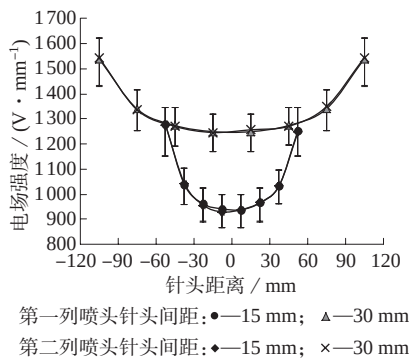


图6 间距为 15 mm 和 30 mm 的双列喷头电场强度分布

(3) 错列喷头电场仿真。

为了同时获得较高的电场强度和射流密度, 在双列喷头的基础上提出了针头间距同时包括 15 mm 和 30 mm 的错列喷头, 其喷头模块的结构形式如图 4c 所示, 其各针尖处电场强度分布如图 7 所示。

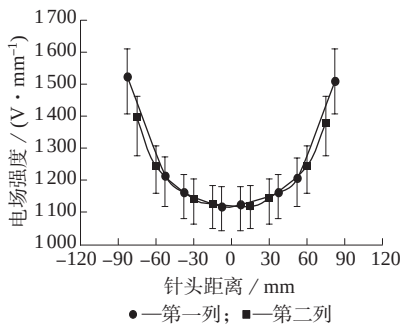


图7 间距同时包括 15 mm 和 30 mm 的错列喷头电场强度分布

由图 7 可以看出, 错列喷头各个针尖处电场强度平均值的最大值、最小值和平均值分别为 1522.2, 1049.0 V/mm 和 1238.6 V/mm, 电场强度比值为 1.361。中间区域的两列针头的电场强度和趋势基本保持相同; 两侧针头的电场强度数据差别比较大且第一列的数值增幅较大。这是因为第一列两侧的针头只受到单边针头电荷排斥力, 电场强度的削弱程度比较小, 使得没有受电荷排斥力

的一侧电场强度增加明显; 第二列两侧的针头和第一列相比多了第一列两侧针头的电荷排斥力, 其和另外一侧的电荷会产生一定的削弱作用, 所以比第一列两侧针头的电场强度小。

(4) 综合分析对比。

考虑多列多射流有助于大批量生产, 取两种不同间距的双列喷头以及错列喷头进行综合分析对比, 分别把三种不同结构喷头中的针头进行如图 8 所示编号, 分别取三种喷头每号针头针尖处电场强度的平均值数据, 制成图 9 的电场强度对比图。由图 9 可知, 三种喷头都存在着不同程度的边缘效应。结合双列喷头和错列喷头中的电场强度比值可知, 错列喷头的边缘效应略弱于间距 15 mm 的双列喷头而强于间距 30 mm 的双列喷头。错列喷头的电场强度和中间位置针头的电场强度曲线平缓度均明显优于间距 15 mm 的双列喷头, 而差于间距 30 mm 的双列喷头。由图 4 可知三种喷头的针头间距关系为: 间距 15 mm 双列喷头 < 错列喷头 < 间距 30 mm 双列喷头。因为针头间距决定着射流密度, 所以错列喷头的射流密度优于间距 30 mm 的双列喷头, 而略劣于间距 15 mm 的双列喷头。因为静电纺丝多射流喷射的稳定性主要取决于电场强度大小和射流密度, 最理想的状态是电场强度好且射流密度高, 而错列喷头可以在保证射流密度的前提下, 获得相对较高的电场强度。由此可见, 错列喷头有助于静电纺丝多射流的稳定生产。

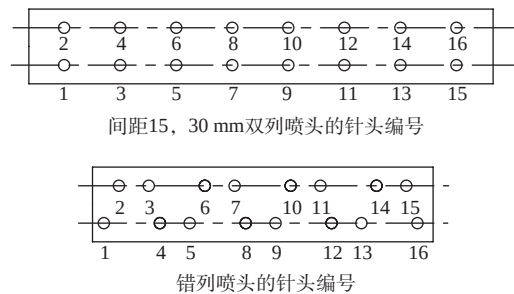


图8 三种喷头的针头编号示意图

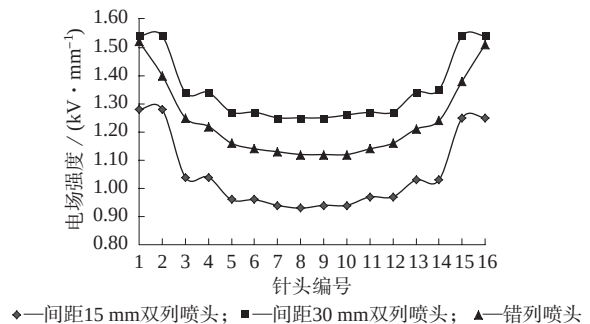


图9 三种喷头的电场强度对比图

3 结论

(1) 边缘效应在线性多针头的喷头静电纺丝过程中必然存在且随着针头距离的加大有所减缓;针头间距同时包括 15 mm 和 30 mm 错列喷头的边缘效应略弱于间距 15 mm 双列喷头而强于间距 30 mm 双列喷头。

(2) 双列喷头的电场强度平均值低于单列喷头的电场强度平均值,而边缘效应相对于单列喷头有所加强。

(3) 无论单列还是双列喷头,增加针头之间的间距都有助于电场强度的增大和减缓边缘效应,但是这是以降低射流的密度为代价的。

(4) 间距错列可以在保证射流密度的前提下,减少电荷之间的干扰效应从而获得较好的电场强度平均值,但其电场强度比值也比较大即具有相对较强的边缘效应。

参考文献

- [1] Chronakis I S. Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2-3):283-293.
- [2] Fang J, Niu H T, Lin T, et al. Applications of electrospun nanofibers[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(15):2265-2286.
- [3] 梁洪. 面向空气净化的规模化纳米纤维静电纺丝机设计[D]. 西安:西安工程大学, 2019.
Liang Hong. Design of large-scale electrospinning machine for air purification[D]. Xi'an:Xi'an Polytechnic University, 2019.
- [4] 张艳萍, 张莉彦, 李轶, 等. 针片辊式溶液微分电纺批量制备 PVA 纤维研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(10):207-209, 216.
Zhang Yanping, Zhang Liyan, Li Yi, et al. Research on efficient preparation of PVA fiber by needle roller solution differential electrospinning[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(10):207-209, 216.
- [5] 吴强. 2D/3D 打印电纺纤维及用于应变传感的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
Wu Qiang. 2D/3D printing of electrospun fibers and utilization for strain sensing[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 韦春华. 基于分形原理的电纺技术研究及在滤材上的应用[D]. 天津:天津工业大学, 2018.
Wei Chunhua. Research on electrospinning technology based on fractal principle and its application in filter material[D]. Tianjin:Tiangong University, 2018.
- [7] 陈程, 陈昀, 曹建华, 等. 静电纺纳米纤维/串珠纤维在低阻力过滤材料中的应用[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(10):18-22.
Chen Cheng, Chen Yun, Cao Jianhua, et al. Application of nanofibers/beaded fibers in low resistance filter materials[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(10):18-22.
- [8] 姜佳昕. 多射流电纺成膜及其电渗析性能研究[D]. 厦门:厦门大学, 2017.
Jiang Jiaxin. Fabrication of nanofibrous membrane via multi-jet electrospinning and its electrodialysis performance[D]. Xiamen:Xiamen University, 2017.
- [9] Khil M S, Cha D I, Kim H Y, et al. Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B Applied Biomaterials, 2010, 67B(2):675-679.
- [10] 张妮华, 孙润军, 陈美玉. 多头喷射静电纺技术的研究进展[J]. 产业用纺织, 2010(9):1-8.
Zhang Weihua, Sun Runjun, Chen Meiyu. Research progress of multi-jet electrospinning technique[J]. Technical Textiles, 2010(9):1-8.
- [11] Therons S A, Yarin A L, Zussman E, et al. Multiple jets in electrospinning: Experiment and modeling[J]. Polymer, 2005, 46(9):2889-2899.
- [12] Tomaszewski W, Szadkowski M. Investigation of electrospinning with the use of multi-jet electrospinning head[J]. Fibers and Textiles in Eastern Europe, 2005, 13(4):22-26.
- [13] Zhu Ziming, Xu Guojie, Chen Rouxi, et al. Uniform electric field enabled multi-needles electrospinning head based on trapezoid arrangement[J]. Aip Advances, 2018, 8(8).doi:10.1063/1.5026908.
- [14] 余薇. 多针头静电纺丝技术控制机理的研究[D]. 天津:天津工业大学, 2018.
Yu Wei. Study on control mechanism of multi-needle electrospinning technique[D]. Tianjin:Tiangong University, 2018.
- [15] 王巍, 强威, 代红超. 无针式静电纺丝喷头几何形状对电场分布规律的影响机理[J]. 高等学校化学学报, 2017, 38(6):982-989.
Wang Wei, Qiang Wei, Dai Hongchao. Impact mechanism of needleless electrospinning spinneret geometry on electric field distribution regularities[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2017, 38(6):982-989.
- [16] 陈云军, 代红超, 王巍, 等. 一种基于导体尖端效应的无针式静电纺丝方法[J]. 高等学校化学学报, 2017, 38(6):975-981.
Chen Yunjun, Dai Hongchao, Wang Wei, et al. Needleless electrospinning method based on tip effect of conductor[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2017, 38(6):975-981.
- [17] 陈威亚, 刘延波, 张泽茹, 等. 多针头静电纺场强改善的有限元分析[J]. 纺织学报, 2014, 35(4):21-31.
Chen Weiya, Liu Yanbo, Zhang Zeru, et al. Finite element analysis of improvement of field intensity in multi-needle electrospinning[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(4):21-31.
- [18] 陈威亚, 刘延波, 王洋知, 等. 多针头静电纺丝过程中电场强度与分布的有限元分析[J]. 纺织学报, 2014, 35(6):1-6.
Chen Weiya, Liu Yanbo, Wang Yangzhi, et al. Finite element analysis on electric field intensity and distribution during multi-

- needle electrospinning process[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(6):1-6.
- [19] 吴元强,许宁,陆振乾,等.多针头静电纺丝电场强度分布模拟研究[J].合成纤维工业,2019,42(5):41-45.
- Wu Yuanqiang, Xu Ning, Lu Zhenqian, et al. Simulation of electric field intensity distribution in multi-nozzle electrospinning[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2019, 42(5):41-45.
- [20] 刘延波,韦春华,刘健,等.金属套管对多针头静电纺丝过程中场强分布的影响[J].天津工业大学学报,2019,38(3):35-40.
- Liu Yanbo, Wei Chunhua, Liu Jian, et al. Effect of metal casing on distribution of field strength in multi-needle electrospinning process[J]. Journal of Tiangong University, 2019, 38(3):35-40.
- [21] Liu Yanbo, Guo Lingling. Homogeneous field intensity control during multi-needle electrospinning via finite element analysis and simulation[J]. Journal of nanoscience and nanotechnology, 2013, 13(2):843-847.

投稿须知

1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过20个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。联系人信息(包括姓名,学历或职称,主要研究方向)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以200~300字为宜,英文摘要可略详。关键词要求3~8个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,横纵坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将*.opg, *.dwg, *.eps等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少16篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过3人时可全部著录,超过3人时,只著录前3位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

3 投稿方式

请作者登陆杂志社网站 <http://www.epa1973.net>, 点击“作者投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般一个月左右可以查询稿件审理意见,超过3个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

4 注意事项

为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已编入国内外著名数据库。稿件一经录用,将同时被数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。