

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.02.010

喷头形状对离心静电纺丝电场影响的模拟分析

杨钧博,高宁萧,刘勇

(北京化工大学机电工程学院,北京 100029)

摘要:为研制更理想的纺丝喷头以提高离心静电纺丝效率及纺丝纤维质量,针对旋转盘式离心静电纺丝设备,使用有限元分析软件 ANSYS 模拟了不同形状纺丝喷头在相同加载条件下的电场分布。对现有 O 型喷头模拟了喷头高度、外端面直径以及喷头相对于底板高度的改变等对电场的影响,并对设计的新型 E 型喷头,模拟了喷头高度以及外端面弯曲程度对电场的影响。结果显示,当喷头高度值越小、外端面直径越小、距离底板越近、外端面弯曲程度越小时,喷头附近电场分布效果越理想。

关键词: 静电纺丝; 喷头形状; 电场分布; 模拟

中图分类号: O6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)02-0047-06

Simulation Analysis of Effect of Nozzle Shape on Centrifugal Electrospinning Electric Field

Yang Junbo, Gao Ningxiao, Liu Yong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : In order to develop a more suitable spinning nozzle for improving the overall electrospinning efficiency and spinning fiber quality, the spinning nozzles of different shape for rotating disc centrifugal electrospinning machine were studied. The finite element analysis software ANSYS was applied to simulate the distribution of electric field with same load. The simulation of the existing O type nozzle and selected new E type nozzle included the effects of the nozzle height, the diameter of outer surface, the changes in height from the nozzle to device floor and the bend degree of outer surface on the electric field. The simulation results show that when the nozzle height is small, the diameter of the outer face is small, the nozzle is close to the device floor, the bend degree of outer surface is small, the distribution of electric field of the nozzle is more ideal.

Keywords : electrospinning ; spinning nozzle ; electric field distribution ; simulation

静电纺丝是当今用热塑性塑料制取纳米纤维最直接最有效的措施之一^[1-3],也是可以直接、持续制取热塑性聚合物纳米纤维的方法,具有工艺简单、操作便利等优点。静电纺丝生产的纳米纤维密度低、比表面积大、孔隙率大、轴向强度高,有望被广泛运用在医疗^[4]、环境保护^[5-6]、服装^[7]、能源^[8]等领域。

离心静电纺丝综合了离心纺丝与静电纺丝的优点,在操作流程中,会产生离心力和静电力这两种作用力。两种作用力同时应用在聚合物液体射流上。一旦它们的合成力大于射流的表面张力和粘滞阻力,液体射流就能够得到延展^[9]。由于附加的电压比喷头法小,因此可以纺导电度高的纺丝溶液^[10]。

离心静电纺丝过程中液体射流更加稳定,从而纤维的取向度和结晶性得到提升^[11-12]。与一般的纺丝模式相比,离心静电纺丝不需要太高的电压和转速,在低电压和低转速的条件下即可获得大量的有序超细纤维^[13],所以操作过程的安全性大大增加^[14]。在离心纺丝中,纺丝喷头的形状、位置与塑料纳米纤维生产效率及纤维质量紧密相关。喷头的形状、位置不同,其表面的电场强度、电势线走向就会不一样,从而造成离心静电纺丝所得纤维的质量不同。

通过 ANSYS 电场分析软件 ELECTRIC 能够计算出喷头或接收装置附近的静态电场和动态电场分布、电场矢量强度、电场分布及电势分布云等参数。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21374008)

通讯作者: 刘勇,副研究员,博导,主要从事机械、材料、能源应用研究 E-mail: yongsd@iccas.ac.cn

收稿日期: 2017-11-15

引用格式: 杨钧博,高宁萧,刘勇. 喷头形状对离心静电纺丝电场影响的模拟分析 [J]. 工程塑料应用,2018,46(2):47-52.

Yang Junbo, Gao Ningxiao, Liu Yong. Simulation analysis of effect of nozzle shape on centrifugal electrospinning electric field[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):47-52.

其核心方法是使用有限元法分析静态或动态的物体或物理系统^[15]。目前,计算机模拟分析在静电纺丝领域已有了许多应用。段宏伟等^[16]使用 ANSYS 模拟了简化的针板式纺丝结构,观察模拟结果发现电场强度最大值出现在喷头处,且电场强度随着与负极板的距离愈短,下降的速度愈快。庄昌明等^[17]运用 MAXWELL 软件模拟出各种形式的电极的电场排布对纤维产生的影响。Z. G. Kim 等^[18]使用 COMSOL1 Ver.4.3 对具有不同喷头配置的多喷头静电纺丝系统进行电场模拟,分析了电场模拟的前视图和侧视图,并且模拟了喷头到基板的距离变化,发现电场强度在喷头尖端处存在极端现象,并且随着喷头尖端到收集器的距离增加,电场强度逐渐减弱。

由此可见,模拟分析对于静电纺丝技术的发展有着重要意义,对纺丝设备进行模拟分析可以确定其是否适合于生产,对静电纺丝过程的模拟可以优化生产过程、解决实际生产中的问题。但上述研究都是针对各自的纺丝体系做出的,尚未发现有离心静电纺丝系统的模拟,为了获得喷头形状对该系统电场分布的影响,从而提高纺丝效率和纤维质量,笔者针对旋转盘式离心静电纺丝设备的锥台式纺丝喷头,改变其在电场中的位置、几何尺寸等,对其周围的电场分布情况用有限元软件 ANSYS 进行了模拟分析,以期获得较优形状的纺丝喷头。

1 模拟部分

1.1 喷头介绍

针对不同纺丝喷头形状对电场分布的影响进行模拟时选择了六种不同形状的喷头,如图1所示。其中O型喷头左端面直径6 mm,右端面直径10 mm,高6 mm,实际喷头如图2所示。A型喷头圆柱和圆台部分的高均为3 mm,圆柱底面直径为6 mm,圆台左右端面直径分别为6 mm和10 mm。B型喷头圆台和圆柱部分的高均为3 mm,圆台左右端面直径分别为6 mm和8 mm,圆柱底面直径为8 mm。C型喷头保持纺丝喷头上下底面为平面,喷头截面的两腰改为曲线。D型喷头将纺丝喷头直径较大的右端面改为内凹面。E型喷头将纺丝喷头直径较大的右端面改为外凸面。

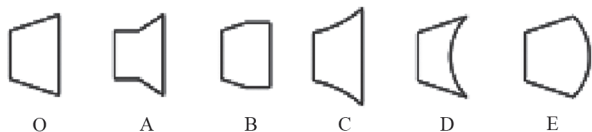


图1 六种喷头的形状示意图



图2 O型喷头真实图片

1.2 模拟过程

实际的离心静电纺丝装置比较复杂,大部分部件与纺丝电场无关,因此需要对实际装置进行精简,只留下对纺丝电场影响较大的金属部件,即喷头、甩盘架、连接轴、底板以及接收圈五部分。由于主要研究喷头改变对电场的影响,故接收圈选取固定位置且固定厚度。按照上述喷头尺寸分别建立模型,固定不变的是接收圈厚度3 mm、甩盘直径120 mm、连接轴直径30 mm,喷头外端面中心点距底板距离初始为20 mm。

设定空气相对介电常数为1,连接轴、纺丝喷头、甩盘和接收圈介电常数为2^[19],底板设定为绝缘板,其相对介电常数为20。根据实验室离心熔体静电纺丝实际操作条件进行加载电压,在接收圈两侧加载300 00 V的正电压。为了保证纺丝喷头靠近接收圈的端面零电势,故将喷头靠近接收圈的外端面加载0 V电压。根据以上参数进行纺丝电场的模拟。当喷头处电场强度值越大时,纺丝物料在喷头处所受的电场力越大,由此物料所受的拉伸力越大,在喷头与接收圈间拉伸出的纤维更充分,产生的纤维直径越细,所获得的纤维性能越好。因此笔者希望通过模拟,获得喷头底边处(形成泰勒锥处,即尖端位置)电场强度最大的喷头形式。

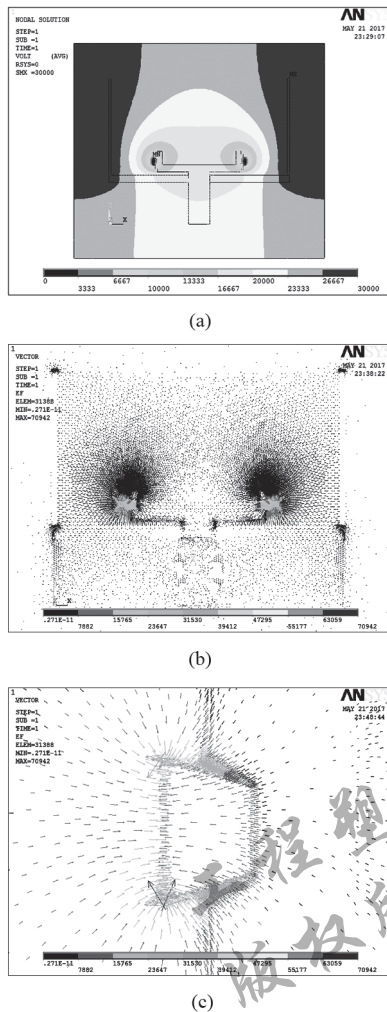
2 结果与讨论

2.1 纺丝喷头形状对电场的影响

首先对O型喷头进行模拟,得到图3结果。

由图3可以看出,离心静电纺丝设备整体电场呈轴对称分布;纺丝喷头处电场方向与其端面垂直;喷头表面电场矢量方向指向喷头内部,但由于纺丝物料带负电,物料出喷头后沿接收圈方向受电场力拉伸符合实际工况;根据喷头处放大的电场矢量分布(图3c)可以看出,喷头电场分布产生尖端效应现象(尖端效应是指在同一带电体上,尖端部位与平滑部位相比面电荷密度更大,由此尖端处电场强度更强),喷头尖端处电场强度最大。

仅将喷头更换为其余五种形状,其余条件保持



a—电势等值线;b—电场强度矢量分布;c—喷头处电场强度矢量分布

图3 O型喷头的模拟结果

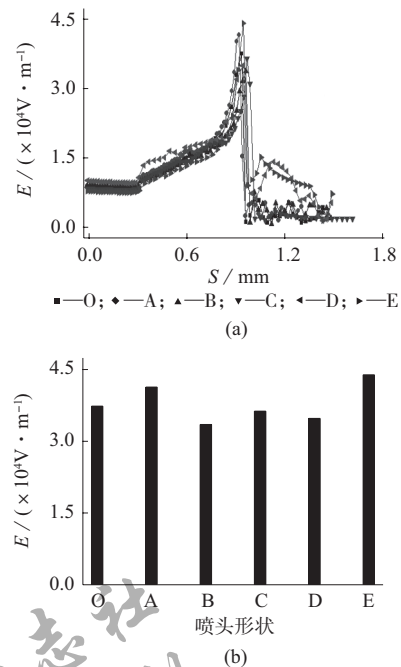
不变。由于纺丝喷头为轴对称形状,故研究喷头电场强度分布可以只取喷头的上半部分。按照喷头的上半部分外轮廓选取节点定义路径,从喷头内侧端面的中心处开始,在喷头外侧端面的中心处终止,取路径上各点的电场强度值作图,如图4a所示。将不同形状喷头模拟所得电场强度数据的最大值进行比较,如图4b所示。图中 E 为电场强度, S 为路径上某点到起始点的距离。

通过观察图4模拟结果,可以得出如下结论:

①喷头电场强度从内端面至尖端处逐渐上升,在尖端处电场强度达到最大,在尖端处至外端面中心处(靠近接收圈侧)电场强度急剧下降;②六种纺丝喷头尖端处电场强度最大值 $E>A>O>C>D>B$,由此看出E型纺丝喷头电场集中效果最好。

2.2 对现有圆锥台喷头的优化模拟

基于现有O型纺丝喷头的模型,通过分别改变



a—电场强度变化曲线;b—电场强度最大值

图4 六种喷头的电场强度变化曲线和电场强度最大值

其高度、外端面直径以及喷头相对于底板高度,按照实际条件加载模拟。对比模拟结果,得出纺丝喷头大小、位置对电场影响的规律。

(1) 喷头高度对电场影响的模拟分析。

除纺丝喷头高度外其余尺寸均保持不变,只将纺丝喷头的高度逐渐增加,即将纺丝喷头的高度 H 由6 mm改为7,8,10,12 mm,进行静电场的模拟。

由于喷头相对于整体静电纺丝装置尺寸较小,且改变量不是很大,故模拟结果区别不是特别明显,选取高度分别为6 mm和12 mm喷头的局部电场强度矢量分布图进行对比,并将五组喷头电场强度数据绘制成曲线,见图5。

由图5a可以看出, $H=12$ mm的喷头表面处的电场强度矢量分布密度较之 $H=6$ mm的更大,但同时喷头内部电场强度矢量密度也增大。但喷头内部电场强度对纺丝无影响,所以只考察喷头表面的电场强度。由图5b可以得出:①无论高度如何改变,喷头表面电场强度最大处始终位于喷头边缘尖端处;②纺丝喷头边缘尖端处电场强度最大值随纺丝喷头高度的增加而减小;③喷头整体电场强度分布也是随着高度增加而减小。

由此可知,为实现纺丝喷头电场强度高度集中,取得理想的纺丝效果,纺丝喷头高度应尽可能小。

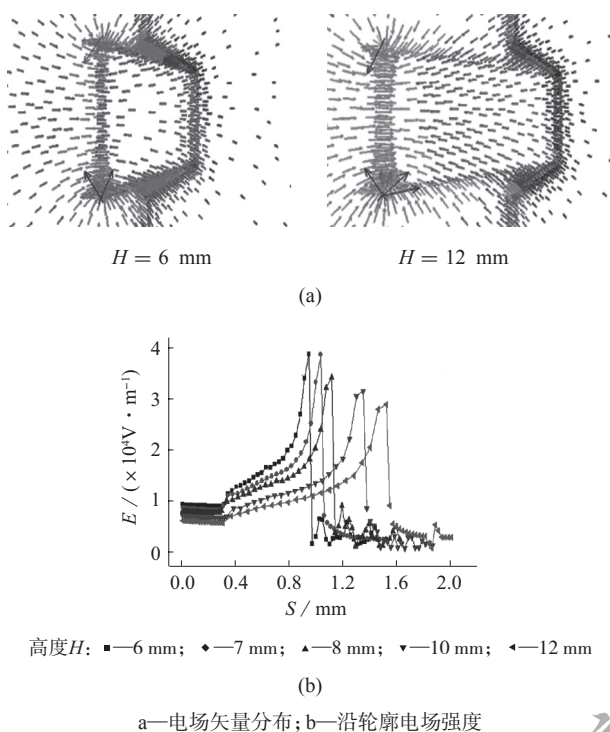


图5 O型喷头不同高度时电场矢量分布和沿轮廓电场强度

(2) 喷头外端面直径对电场影响的模拟分析。

保持其余尺寸均不变,只将纺丝喷头的外端面(靠近接收圈侧)直径 D 逐渐增加,分别设定 D 为8,9,11,12 mm进行模拟实验,结果见图6。

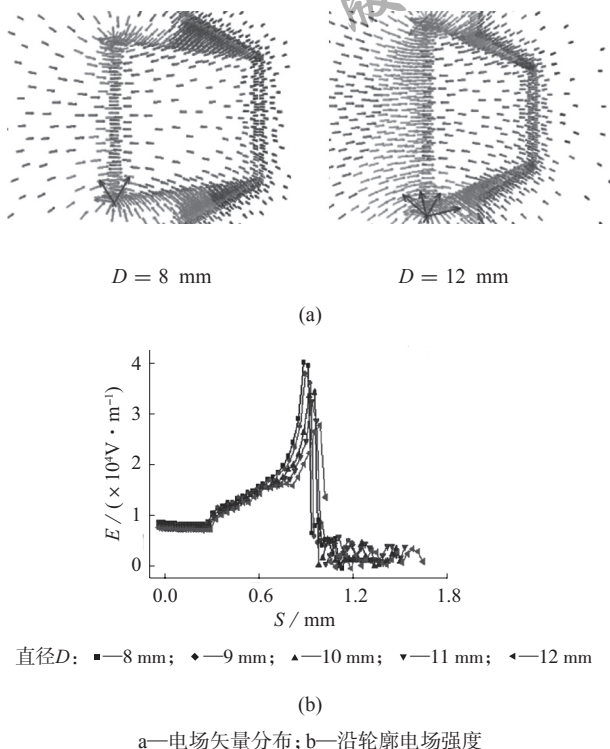


图6 O型喷头不同外端面直径时电场矢量分布和沿轮廓电场强度

由图6a可以看出,当外端面直径增大时,虽然整体密度变大,但喷头整体的电场强度是在减小。 $D=8$ mm的喷头尖端箭头处电场强度值可达到80 000 V/m而 $D=12$ mm的喷头尖端箭头处电场强度值最大仅可达到40 000 V/m,因此 $D=8$ mm的喷头相比之下更为理想。

由图6b可以看出,纺丝喷头外端面直径越小,喷头尖端处电场强度最大值越大,整体电场强度也越大,相应的喷头电场集中效果更好。因此纺丝喷头外端面直径要设计得小一些。

(3) 喷头相对底板高度对电场影响的模拟分析。

采用提升甩盘高度的方法来改变喷头位置,但是由于甩盘由连接轴支撑,甩盘需要进行旋转,且靠底板上的电磁线圈加热,故甩盘不能高出底板太多。因此对于纺丝喷头相对于底板高度对电场影响的模拟,只进行额外的两组,即喷头外端面中心点距底板距离分别取为25 mm和30 mm。将三组模拟数据绘制成曲线如图7所示。

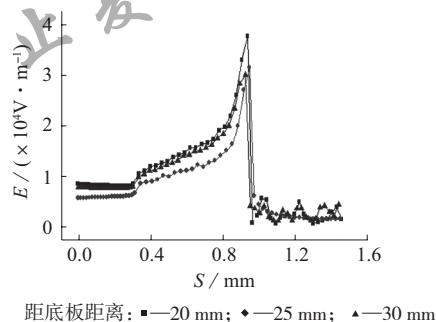


图7 O型喷头距底板不同距离时的沿轮廓电场强度

由图7可以看出,纺丝喷头距离底板越近,整体电场强度值越大,纺丝喷头尖端处电场强度最大值也越大,故设计纺丝喷头时应将喷头尽可能靠近底板。

因此设计改进现有形状喷头时,为实现纺丝喷头处电场强度高度集中,获得理想纺丝效果,应使喷头设计的尽可能小巧。同时在布置喷头时,应使其尽可能靠近底板位置。

2.3 对新型喷头的优化模拟

前面模拟已确定在新设计的各形状喷头中,E型喷头的电场分布效果最为理想。现探讨其高度、外端面弯曲程度对电场分布的影响,以进一步使E型喷头效果更为理想。

(1) 喷头高度对电场影响的模拟分析。

设定其余尺寸均不变,将E型纺丝喷头的圆台部分高度 H 逐渐增加,分别取圆台部分高 H 为4,5,

6,7,8 mm 进行模拟,得到相应的静电场模拟结果,见图 8。

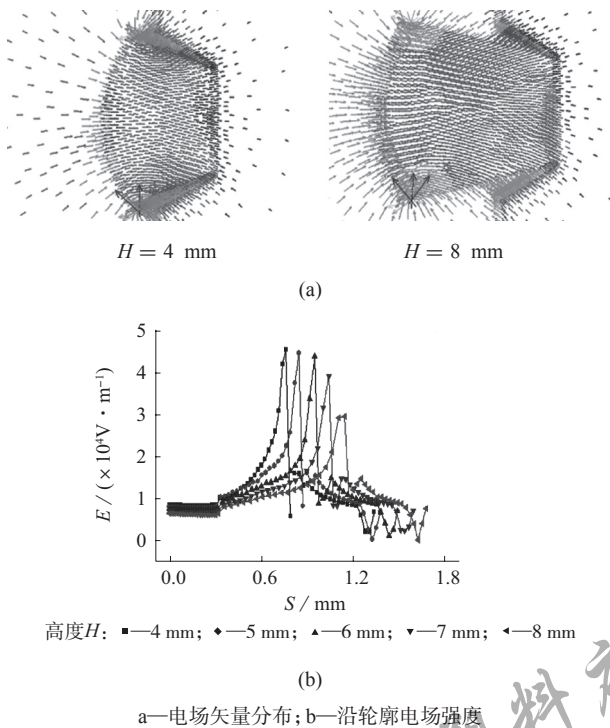


图 8 E 型喷头不同高度时的电场矢量分布和沿轮廓电场强度

由图 8a 可以看出, $H=4$ mm 的喷头边缘尖端箭头处电场强度值可达到 $80\,000$ V/m 以上,而 $H=8$ mm 的喷头尖端箭头处电场强度值最大仅可达到 $60\,000$ V/m 左右,因此 $H=4$ mm 的喷头相比之下更为理想。

由图 8b 可以得出,纺丝喷头圆台部分高度值越小,喷头尖端处电场强度最大值越大,纺丝喷头电场集中效果越好,喷头越理想。

(2) 喷头外端面弯曲程度对电场影响的模拟分析。

E 型纺丝喷头外端面弯曲程度通过改变图 9 所示 a 值来调节, a 值分别取 1,2,3,4,5 mm。

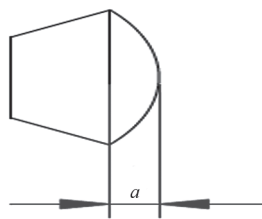


图 9 E 型喷头外端面弯曲程度改变示意图

设定其余尺寸不变,将 E 型纺丝喷头的 a 值逐渐改变,进行静电场的加载模拟,结果见图 10。

由图 10a 可知, $a=1$ mm 时,喷头尖端箭头处电

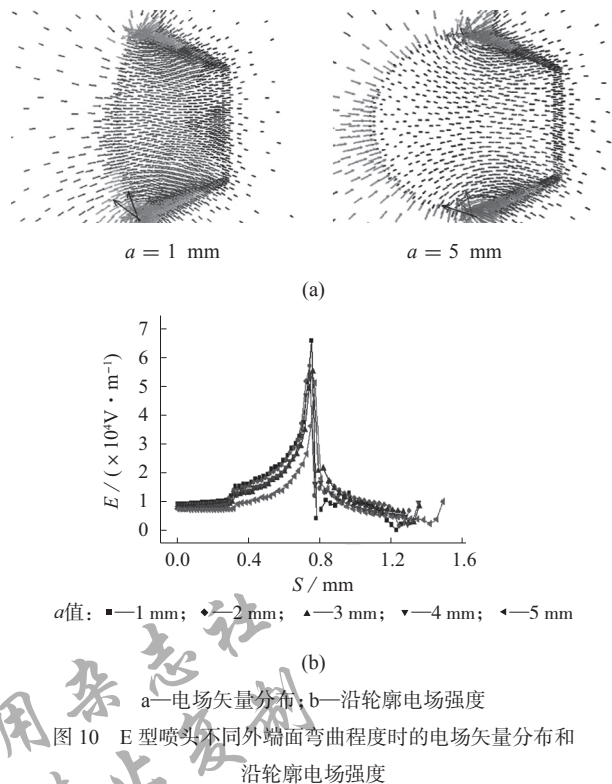


图 10 E 型喷头不同外端面弯曲程度时的电场矢量分布和沿轮廓电场强度

场强度值可达到 $90\,000$ V/m 以上,而 $a=5$ mm 的喷头尖端箭头处电场强度值最大仅可达到 $70\,000$ V/m 左右,因此 $a=1$ mm 的喷头整体电场强度更大。

由图 10b 可以看到,在 E 型喷头弯曲程度增大时,喷头尖端处电场强度最大值随之减小。即当纺丝喷头弯曲程度较小时,纺丝喷头尖端处电场强度最大值较大,喷头更理想。

因此,在设计新型 E 型喷头时,应减小其高度、外端面弯曲程度 (a 值) 以达到更优的纺丝状态。

3 结论

(1) 喷头装置周围的静电场成轴对称分布,并且在喷头处电场方向是与喷头各个截面相互垂直的,在喷头的尖端位置的电场强度最大。六种形状的静电纺丝喷头中,外端面为向外凸出的 E 型纺丝喷头在喷头尖端处电场强度最大。

(2) O 型纺丝喷头的高度越大,其纺丝区域电场越不均匀,喷头尖端处电场强度最大值越小,即纺丝喷头越不理想;喷头外端面直径越小,喷头尖端处电场强度最大值越大,相应的电场更集中;喷头距离底板越近,整体电场强度值越大,纺丝喷头尖端处电场强度最大值也越大。因此,在设计纺丝喷头时应尽可能减小其外端面直径和喷头高度,安装时应将喷头尽可能挨近底板。

(3) 针对 E 型喷头的模拟结果显示,喷头圆台部分高度值越小,工作区域电势等值线分布越均匀,喷头尖端处电场强度最大值越大,纺丝喷头电场集中效果越好,喷头越理想;当外端面弯曲程度较小时,纺丝喷头尖端处电场强度最大值较大,喷头更理想。

参考文献

- [1] Agarwal S, Wendorff J H, Greiner A. Use of electrospinning technique for biomedical applications[J]. *Polymer*, 2008, 49(26):5 603–5 621.
- [2] Sill T J, von Recum H A. Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering. [J]. *Biomaterials*, 2008, 29(13):1 989–2 006.
- [3] Liang D, Hsiao B S, Chu B. Functional electrospun nanofibrous scaffolds for biomedical applications. [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2011, 59(14):1 392–1 412.
- [4] Muthuvignesh V, Reddy V J, Ramakrishna S, et al. Electrospinning applications from diagnosis to treatment of diabetes[J]. *Rsc Advances*, 2016, 6(87):83 638–83 655.
- [5] 单文盼, 黄满红, 李晓纯, 等. CNFM 的制备及其协同电动技术修复土壤重金属的研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9):2 722–2 729.
- Shan Wenpan, Huang Manhong, Li Xiaochun, et al. Fabrication of CNFM and its application in soil remediation of heavy metals coupled with electrokinetic technology[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(9):2 722–2 729.
- [6] 曹鼎, 付志峰, 李从举. 静电纺丝技术在过滤中的应用进展 [J]. *化工新型材料*, 2011, 39(8):15–18.
- Cao Ding, Fu Zhifeng, Li Congju. Overview of the electrospinning technology for filtration[J]. *New Chemical Materials*, 2011, 39(8):15–18.
- [7] 川部雅章, 刘辅庭. 静电纺丝非织造布的特征和应用 [J]. *产业用纺织品*, 2010, 28(5):38–42.
- Tawahe Masaki, Liu Futing. Characteristics and application of electrospun nonwovens[J]. *Technical Textiles*, 2010, 28(5):38–42.
- [8] 袁媛, 张军营, 樊国祥, 等. 静电纺丝法制备 $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ 纳米纤维及光催化脱汞的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(32):9, 66–71.
- Yuan Yuan, Zhang Junying, Fan Guoxiang, et al. Electrospun $\text{TiO}_2\text{-WO}_3$ nanofibers for photocatalytic removal of mercury[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(32):9, 66–71.
- [9] Kancheva M, Toncheva A, Manolova N, et al. Advanced centrifugal electrospinning setup[J]. *Materials Letters*, 2014, 136:150–152.
- [10] 宋天丹, 李秀红, 陈志远, 等. 离心纺丝的发展现状及前景 [J]. *纺织导报*, 2014(1):61–63.
- Song Tiandan, Li Xiuhong, Chen Zhiyuan, et al. Development status-quo and prospect of centrifugal spinning technology[J]. *China Textile Leader*, 2014(1):61–63.
- [11] Liao C C, Wang C C, Chen C Y. Stretching-induced crystallinity and orientation of polylactic acid nanofibers with improved mechanical properties using an electrically charged rotating viscoelastic jet[J]. *Polymer*, 2011, 52(19):4 303–4 318.
- [12] Khamforoush M, Asgari T, Hatami T, et al. The influences of collector diameter, spinneret rotational speed, voltage, and polymer concentration on the degree of nanofibers alignment generated by electrocentrifugal spinning method: Modeling and optimization by response surface methodology[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2014, 31(9):1 695–1 706.
- [13] 李秀红, 宋天丹, 陈志远, 等. 聚乳酸的离心熔体静电纺丝 [C]. 北京: 第 29 届中国化学会学术年会, 2014.
- Li Xiuhong, Song Tiandan, Chen Zhiyuan, et al. Centrifugal melt electrospinning of PLA[C]. Beijing: The 29th Annual Academic Conference of the Chinese Chemical Society, 2014.
- [14] Liu S L, Dong Y Z, Zhang Z H, et al. Assembly of oriented ultrafine polymer fibers by centrifugal electrospinning[J / OL]. *Journal of Nanomaterials*, 2013[2017-11-01]. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/713275>.
- [15] 谢江波, 刘亚青, 张鹏飞. 有限元方法概述 [J]. *设计与研究*, 2007(5):29–30.
- Xie Jiangbo, Liu Yaqing, Zhang Pengfei. Outline of finite element method[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2007(5):29–30.
- [16] 段宏伟, 毕淑娟, 王延福, 等. 高压静电纺丝机工作电场 FEM 分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报: 自然科学版*, 2009, 25(4):461–463.
- Duan Hongwei, Bi Shujuan, Wang Yanfu, et al. FEM analysis on working electrostatic field of high-voltage electrospinning machine[J]. *Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition*, 2009, 25(4):461–463.
- [17] 庄昌明, 曾泳春. 电场均匀性对单孔静电纺丝的影响 [J]. *纺织器材*, 2014, 41(2):1–7.
- Zhuang Changming, Zeng Yongchun. The uniformity of electric field on the single holed static spinning[J]. *Textile Accessories*, 2014, 41(2):1–7.
- [18] Kim I G, Lee J H, Unnithan A R, et al. A comprehensive electric field analysis of cylinder-type multi-nozzle electrospinning system for mass production of nanofibers[J]. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, 2015, 31:251–256.
- [19] 段宏伟. 高压静电纺丝机设计及静电场优化研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- Duan Hongwei. Design of high-voltage electrospinning machine and optimizing of electrostatic field[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008.