

# 离心静电纺丝旋转接收装置电场分布模拟

李凯丽 薛 莲 刘 勇\*

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 利用有限元分析软件对离心静电纺丝接收装置的电场分布进行了模拟分析, 以寻找最优电场。模拟了金属接收圈和网状金属接收圈在不同位置和宽度下电场强度分布和电势的变化情况, 利用电势等值线分布图和电场强度矢量图分析总结电场强度的变化规律。模拟结果表明: 在电压固定的情况下, 电场强度与接收板到喷头的距离成反比, 与接收板的宽度成反比, 与网状接收圈的网格密度成反比。本文结果对离心静电纺丝过程中纳米纤维直径及形貌的控制和装置的优化具有参考意义。

**关键词:** 电场强度; 离心静电纺丝; 接收装置; 电势

**中图分类号:** TQ340.1+49 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.03.011

## 引 言

目前纳米纤维应用于很多领域<sup>[1-3]</sup>, 如何批量化获得直径与收集形态均可控的纳米纤维是实现其工业化应用<sup>[4]</sup>的关键。静电纺丝技术制造成本低廉, 工艺简单, 制备出的纤维性能良好, 被公认为是最具有批量制造纳米纤维材料潜力的重要方法之一。但其制备的纤维有序度差, 并且生产效率低, 从而限制了纳米纤维批量化、规模化生产。离心纺丝技术是一种制备纤维的传统方法, 其优点是纺丝效率高, 可制备有序纤维, 缺点是纤维的直径较大, 并且不能保证纤维整体机械性能的统一。离心静电纺丝综合了离心纺丝与静电纺丝两种方法的优势, 能够高效制备形貌可控的纳米纤维, 是纳米纤维制备技术的发展方向<sup>[5-9]</sup>。接收装置对获得综合性良好的取向纤维有重要意义, 学者们在电场模拟方面的研究取得了一定成果。Deitzel等<sup>[10]</sup>通过宏观控制电场的分布和强度来减弱静电纺丝射流的不稳定现象, 使纤维的形态结构也得到了一定的改善; 王衍书<sup>[11]</sup>对单、双喷头静电纺丝的电场进行了模拟分析, 得到电场强度与到喷头顶端距离之间的关系;

Yang等<sup>[12]</sup>发现均匀分布的电场有利于纺出直径较小的纤维; Zhou等<sup>[13]</sup>通过仿真研究发现平面喷头静电纺丝装置比单针头的电场分布更均匀; Yang等<sup>[14]</sup>设计出一种新形状的接收装置, 改善了电场对纤维接收的影响; Park等<sup>[15]</sup>采用电场模拟方式得出, 随着电场强度的增加纤维直径变小, 并且在不改变电纺工艺其他参数的情况下, 可以通过选择喷嘴结构来控制电纺纤维的纤维直径。但是以上文献侧重研究静电纺丝固定喷头的接收装置<sup>[16-17]</sup>, 关于旋转接收装置相关参数对电场分布的影响尚未见报道。本文通过模拟金属接收圈和网状金属接收圈在不同位置 and 不同宽度下的电场强度分布和电场中电势的变化情况, 来优化接收装置的位置和构造, 获得最佳电场。

## 1 有限元计算

### 1.1 有限元法的基本理论

有限元法是以变分原理和近似插值离散为基础的一种数值计算方法<sup>[11]</sup>, 一般取电位 $\varphi$ 为直接求解对象。

因静电场中介质均匀, 各节点电位 $\varphi$ 由泊松方程计算

$$-\varepsilon \nabla^2 \varphi = \rho \quad (1)$$

再结合公式(2)、(3)计算电场强度和电场强度绝对值

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi = -\frac{d\varphi}{dr} \mathbf{e}_r - \frac{d\varphi}{dz} \mathbf{e}_z \quad (2)$$

收稿日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(21374008)

第一作者: 女, 1993年生, 硕士生

\*通信联系人

E-mail: yongsd@iccas.ac.cn

$$|E| = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2} \tag{3}$$

其中,  $\epsilon$  为介电常数,  $\rho$  为自由电荷体密度,  $E$  为电场强度,  $e_r$ 、 $e_z$  分别为  $r$ 、 $z$  方向的单位单元。

1.2 模型及条件设置

根据实验装置建立三维模型如图 1(a) 所示。因实际纺丝装置较复杂, 不能建立与实际情况完全一致的电场, 所以喷头与接收板间形成的电场分布是本次模拟中主要考虑的因素。将对静电场影响不大的控温装置、高压电源及支撑平台等装置省略, 只留下对工作电场影响较大的高效喷头、甩盘以及接收板部分。由于在有限元分析软件 ANSYS 中构建的平行电场是轴对称的简化模型, 本文取离心静电纺丝装置的截面建立二维模型如图 1(b) 所示, 采用 PLANE121 单元进行网格划分如图 1(c) 所示。

参考常用材料的介电常数<sup>[18]</sup>, 设定空气介电常数为 1, 喷头、甩盘和接收装置的介电常数为 2, 塑料接收板介电常数为 3, 绝缘板介电常数为 30。在喷头和不同类型的接收装置之间施加相应的电压载荷, 完成求解。

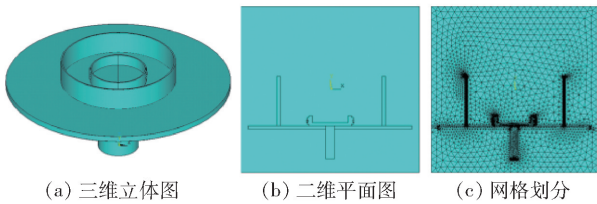


图 1 离心静电纺丝装置及网格划分示意图

Fig. 1 Views of the centrifugal electrospinning device and meshing

2 模拟结果分析

2.1 金属接收圈对电场分布的影响

静电纺丝过程中, 在喷头<sup>[19-21]</sup>和接收装置之间会产生高压静电场。如果能在喷头和金属接收圈之间产生比较稳定的电场, 再综合利用各类影响因素使纤维路径趋于稳定, 将有助于获得综合性良好的取向纤维阵列及较细纤维。本文通过 ANSYS 有限元软件模拟出喷头与金属接收板间电场的分布情况来优化位置并获得优化电场。

2.1.1 金属接收圈位置

模型中甩盘直径 120 mm, 接收圈直径 260 mm, 接收板宽度 150 mm, 厚度 1 mm。在喷头处施加电压载荷 0 V, 金属接收圈施加电压载荷 18 000 V。设置

收板到喷头中心的间距分别为 30 mm、50 mm、70 mm、90 mm 和 110 mm。

求解结束后, 通过 ANSYS 后处理器分析得到喷头与金属接收圈之间的电势等值线和电场强度矢量分布<sup>[15]</sup>分别如图 2(a)、(b) 所示。

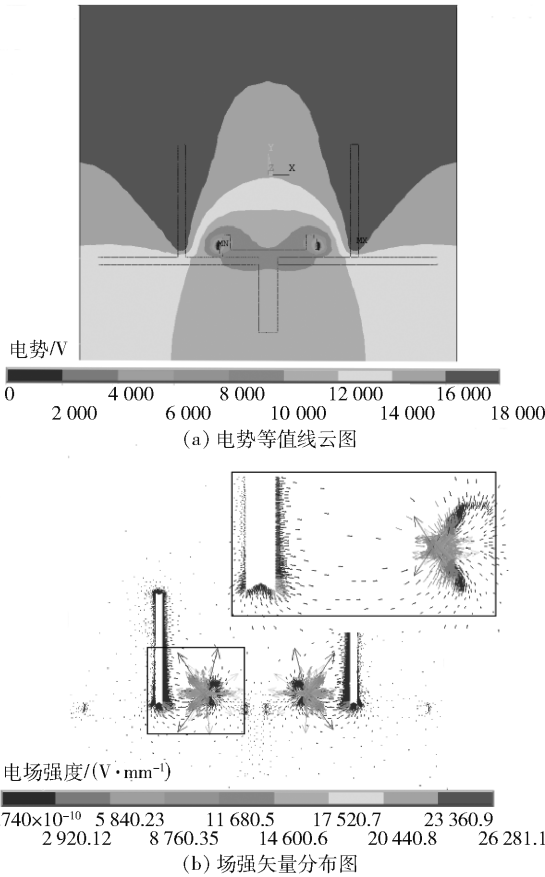


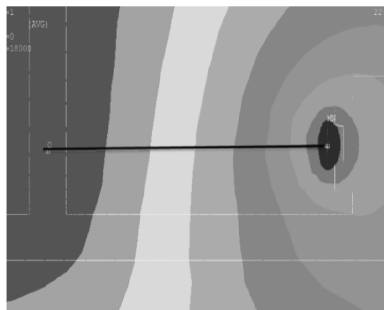
图 2 金属接收板的电势等值线和场强矢量分布图

Fig. 2 Plots of potential contours and field strength vector distribution around the metal receiving plate

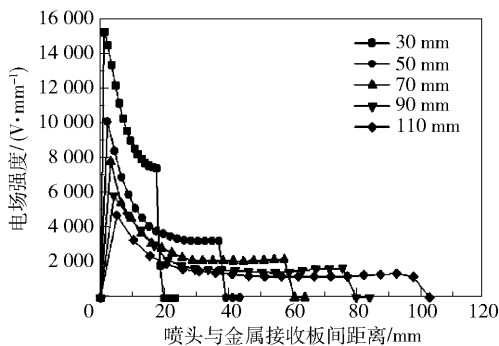
从图 2 可以看出, 离心静电纺丝有限元电场分析模型中电场强度和电势均呈横向对称分布; 图 2(b) 中的箭头出现在两端喷头处, 说明喷头处的金属在电场中产生了尖端效应。通过图 2(b) 右上角放大图可以看出, 电场的方向与喷头截面的方向在喷头处相互垂直, 原因是电荷集中在尖端处, 导致喷头的棱边处电场强度增加。

以左侧接收板为例, 对从喷头到接收板不同间距下的电场强度进行模拟。为了获得 5 组不同间距的电场强度变化情况, 取喷头中心到左侧金属接收板上两节点(图 3(a))来观察水平路径上的电场强度, 得出电场强度变化曲线如图 3(b)。可以看出电场强度的变化趋势为剧烈增大—急剧

减小—平缓降低—缓慢上升—剧烈减小。原因是在靠近金属接收板和喷头棱边处尖端效应的存在使电场强度有一个剧烈上升和下降的过程;随着喷头到金属接收板间距离的不断增大,电场强度逐渐减弱;电场强度大小与该间距成反比,且电场均匀性在中间部分变好,在两端变差。同样可观察得出,电场强度峰值与间距成反比,即间距越大,电场强度峰值越小。



(a) 喷头中心到左侧金属接收板上两节点



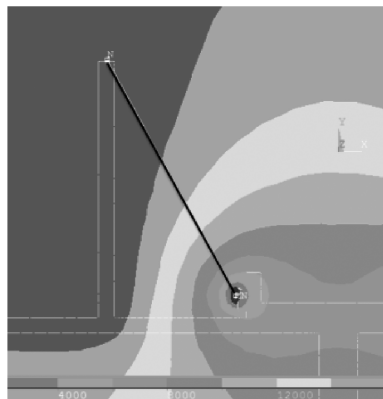
(b) 不同间距下电场强度的变化

图3 喷头中心到左侧金属接收板不同间距及其电场强度变化

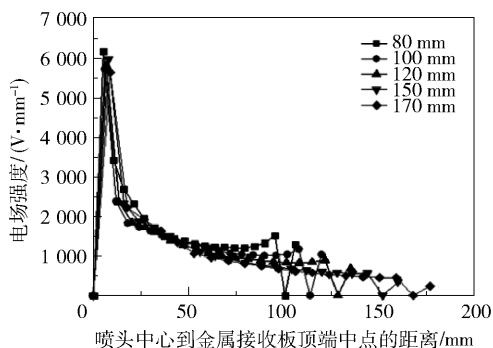
Fig. 3 Plots of the path from the nozzle center to the left side of the metal receiving plate, and the electric field strength on the horizontal path at different distances

### 2.1.2 金属接收圈宽度

使金属接收圈与喷头之间的距离、电压、介电常数、模型参数保持不变,只改变金属接收板宽度分别为 80 mm、100 mm、120 mm、150 mm 和 170 mm。取喷头中心到左侧金属接收板顶端中点两节点(图 4(a))来研究电场强度变化,得出 5 组不同高度下的电场强度变化如图 4(b)。从图 4(b)中可以看出,不同高度下电场强度变化趋势与不同间距下的变化趋势基本相同,即随着金属接收板宽度的不断增加,电场强度及其峰值逐渐减弱,中间部分的电势随着两平行金属接收板宽度的增大趋于均匀。



(a) 喷头中心到左侧金属接收板顶端中点两节点



(b) 不同高度下电场强度变化图

图4 喷头中心到左侧金属接收板不同高度及其电场强度变化

Fig. 4 Plots of the path from the nozzle center to the left side of the metal receiving plate at the midpoint and the change of the electric field on the path for different heights

## 2.2 网状接收圈对电场分布的影响

以网状接收圈作为离心静电纺丝装置的接收极,探索网状接收圈与喷头相对位置的变化对电场分布的影响。

### 2.2.1 网状接收圈位置

设置固定参数为:甩盘直径 120 mm,接收圈直径 260 mm,接收圈宽度 150 mm,铜丝直径 1 mm。改变接收圈中心到喷头中心间距分别为 30 mm、50 mm、70 mm、90 mm、110 mm。在喷头处施加载荷电压 0 V,在网状接收圈上加电压 18 000 V。模拟结束后,由 ANSYS 后处理器得到间距为 30 mm 时的电势等值线图 and 电场强度矢量分布图分别如图 5(a)、(b)所示。以喷头中心到网状接收圈中心的间距为 30 mm 时为例,可在图 5(b)中的局部放大图(右上角)中观察到喷头和接收圈处尖端效应较明显,因为尖端处电荷集中,电场强度较大,这种情况有利于泰勒锥的形成及溶液或熔体被拉伸成丝。

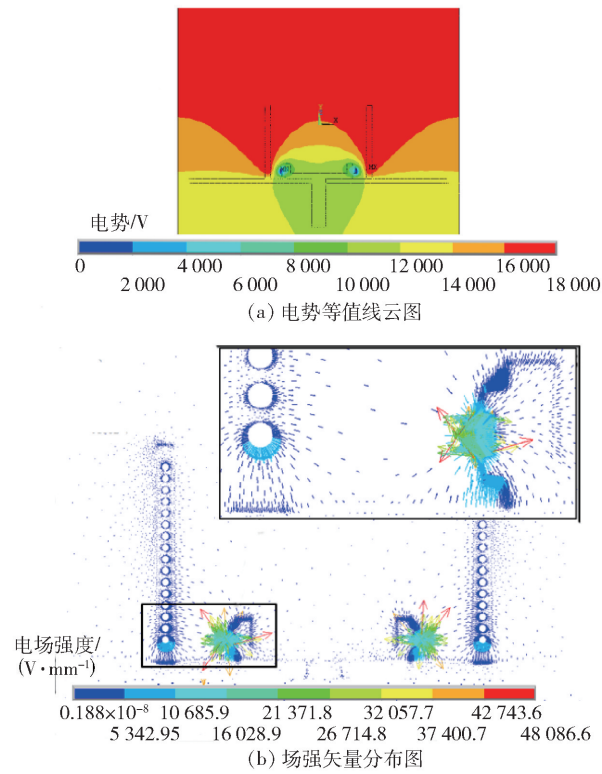


图 5 网状接收圈的电势等值线和场强矢量分布  
Fig. 5 Plots of potential contour and field strength vector distribution around the mesh receiving plate

为研究网状接收圈 5 组不同间距的电场强度变化,取喷头中心到左侧网状接收圈中心两节点来研究其路径上电场强度变化,得到 5 组路径上电场强度变化如图 6 所示。可以看出,电场强度一开始剧烈增大,在一个转折点后急剧减小,随之缓慢上升,在另一个转折点后又剧烈下降。随着网状接收圈与喷头间距的不断增大,曲线走势趋于平稳,电场均匀

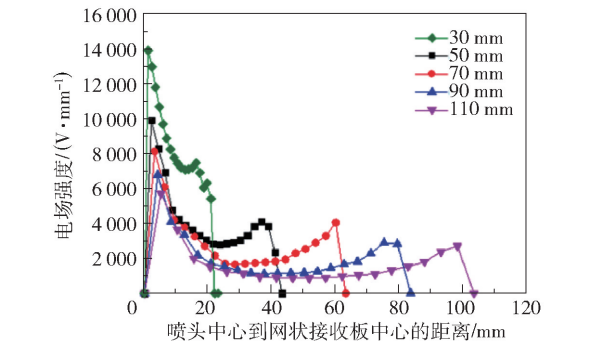


图 6 喷头中心到网状接收板中心不同间距下的电场强度变化曲线图  
Fig. 6 The change of the electric field intensity for different distances between the center of the nozzle and the center of the reticular receiver plate

性也随之变好。总体上电场强度随间距增大呈现出减弱现象,电场强度峰值也随之减小。

2.2.2 网状接收圈中心与喷头中心等高

将网状接收圈中心与喷头中心等高(下文简称中心等高),设定喷头与接收圈间距为 30 mm。为了更直观地显示等高时的电场强度分布变化,以左侧接收圈为例,将中心等高时与网状接收圈底部和旋转喷头等高(下文简称底部等高)时的电场强度分布进行对比,结果如图 7。

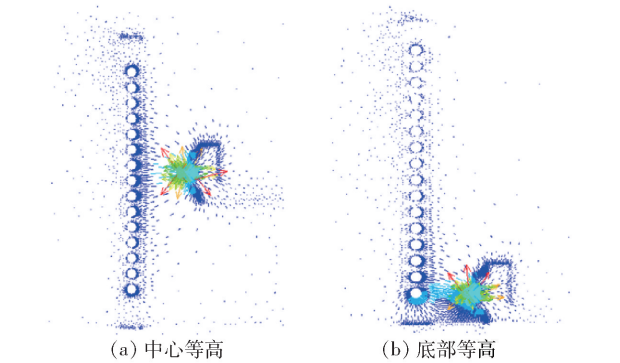


图 7 电场强度矢量分布图  
Fig. 7 Plots of the electric field distribution

从图 7(a)中可得出:电场线的排布总体呈三角形,在喷头处电场线向外发散,喷头周围电荷较集中,网状接收圈中间电场较两端强,电场值也比两端大。比较两种情况可知,底部等高时的电场比中心等高时的电荷更集中,电场强度更大,更有利于溶液被拉丝成形;但电场线不规则,电场均匀性不如中心等高时好,纺丝过程射流较乱。

2.2.3 网状接收圈密度

为了探究不同接收圈密度对电场分布的影响,取网状接收圈的横截面进行数值模拟。设置其固定参数值与 2.2.1 节相同,喷头中心到网状接收圈底端固定间距为 50 mm,网状接收圈密度分别为 1、1.5、2.5(图 8),施加载荷电压为喷头处 0 V,网状接

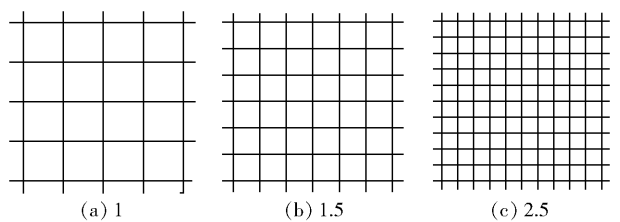


图 8 网状接收圈密度示意图  
Fig. 8 Diagrams showing mesh receivers with different densities



收圈上 18 000 V。由后处理器观察电势等值线分布情况如图 9(a), 3 种不同密度下的电场强度如图 9(b)、(c)、(d)。

对比图 9(b)、(c)、(d) 可知, 喷头周边电场比

接收圈上端更集中; 在相同条件下, 同一网状接收圈上半部分电场弱于下半部分; 网状接收圈的密度越小, 喷头尖端处的电场强度越大, 电场越集中, 对纺丝纤维的形成越有利。

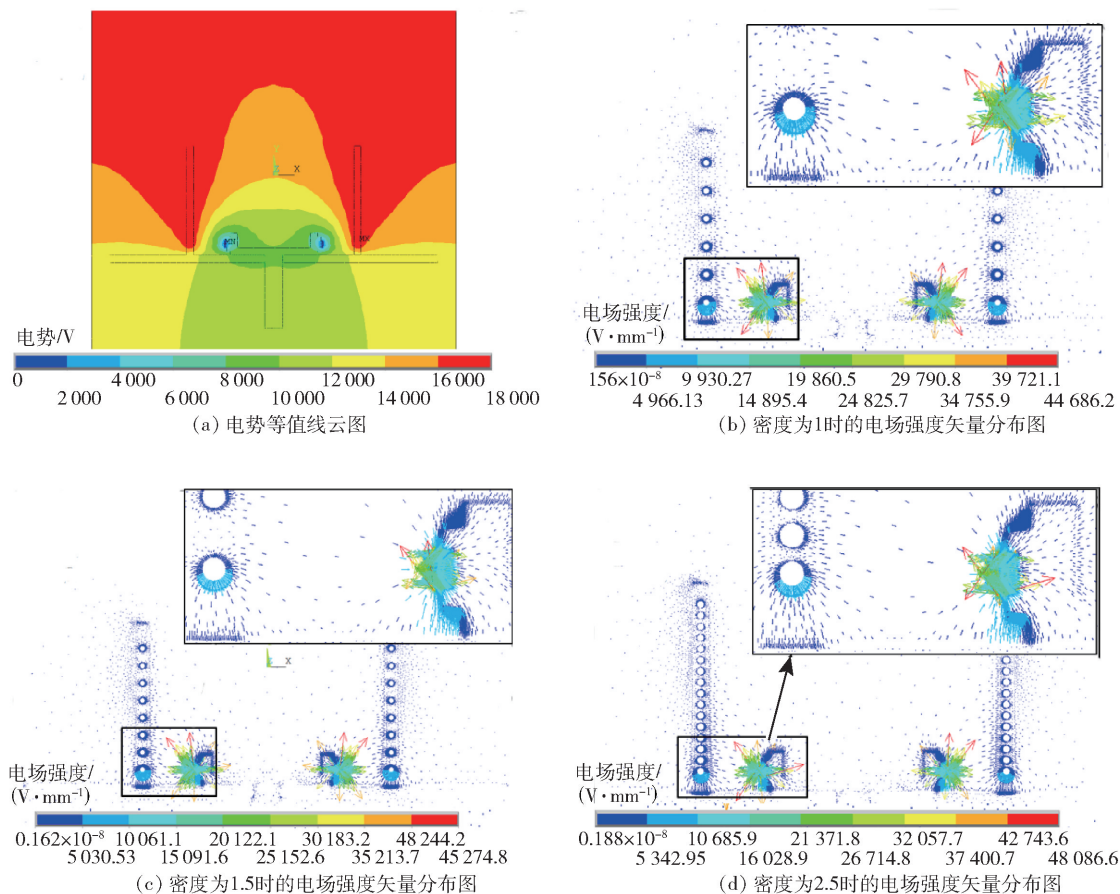


图 9 不同密度的网状接收圈场强矢量变化图

Fig. 9 Plots of potential contours and field strength vectors for mesh receivers with different densities

### 3 结论

(1) 在喷头处, 由于尖端效应导致在喷头的棱边处电场强度最大。在电压固定的情况下, 电场强度与接收板到喷头间距成反比, 间距越小, 电场越集中, 从而使纺丝纤维喷射到接收板上的速度加快, 纺丝过程时间减少, 纺丝效率提高; 但间距过小会使纺丝纤维没有足够的时间来拉伸变细。

(2) 电场均匀性与间距和电压的大小成正比, 间距越大或电压越高, 场强变化曲线越平稳, 电场线更加规则, 电势也随之愈加均匀, 纺丝纤维的均匀性也更好。

(3) 相同间距下, 电场强度及其强度峰值的大小与接收板宽度成反比, 且随着宽度的增大中间部

分的电势越来越均匀, 电场线越来越规则, 电场均匀性也越好。

(4) 在相同条件下, 同一网状接收圈上半部分电场比下半部分电场弱; 网状接收圈的密度越小, 电场强度越大, 电场越集中, 对纺丝纤维的形成更有利。

### 参考文献:

- [1] 王德诚. 静电纺丝的技术进展[J]. 合成纤维工业, 2009, 32(2): 42-44.  
WANG D C. Technological development of electrospinning progress [J]. China Synthetic Fiber Industry, 2009, 32(2): 42-44. (in Chinese)
- [2] 邓宗良. 通用圆盘式静电纺丝数值模拟及实验拟合[D]. 上海: 东华大学, 2017.

- DENG Z L. Numerical simulation and experimental verification on the disc type electrostatic spinning [D]. Shanghai: Donghua University, 2017. (in Chinese)
- [3] 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 T D, LI X H, CHEN Z Y, et al. Development status-quo and prospect of centrifugal spinning technology [J]. China Textile Leader, 2014 (1): 61-63. (in Chinese)
- [4] 张艳萍, 张莉彦, 马小路, 等. 无针静电纺丝技术工业化进展[J]. 塑料, 2017(2): 1-4.
- ZHANG Y P, ZHANG L Y, MA X L, et al. Recent development of industrialized needleless electrospinning technology [J]. Plastics, 2017 (2): 1-4. (in Chinese)
- [5] 高鹤森. 静电纺丝制备纳米纤维及其装置的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(增刊2): 102-106.
- GAO H S. Research development in electrospinning technique for manufacturing nanofibers and progress on their apparatus[J]. Materials Review, 2017, 26(s2): 102-106. (in Chinese)
- [6] 赵治锋, 杨之洵, 李峰, 等. 载药系统中的静电纺丝材料及其应用[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(2): 303-308.
- ZHAO Z F, YANG Z X, LI F, et al. Electrostatic eletro-spun materials applied in drug delivery system[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2017, 21(2): 303-308. (in Chinese)
- [7] 陈康, 焦晓宁, 柯鹏. 静电纺丝制备取向纤维的技术进展及应用现状[J]. 合成纤维工业, 2015, 38(6): 62-66.
- CHEN K, JIAO X N, KE P. Technological development and application status of oriented fiber by electrospinning [J]. China Synthetic Fiber Industry, 2015, 38(6): 62-66. (in Chinese)
- [8] 卓坚锐, 严玉蓉, 李诗丞. 静电纺丝接收装置和辅助电极的研究进展[J]. 合成纤维工业, 2009, 32(5): 40-43.
- ZHUO J R, YAN Y R, LI S C. Research progress in collector and auxiliary electrode for electrospinning progress [J]. China Synthesized Fiber Industry, 2009, 32(5): 40-43. (in Chinese)
- [9] 马小路, 张莉彦, 李好义, 等. 熔体微分静电纺丝取向纳米线的制备[J]. 纺织学报, 2017, 38(1): 8-12.
- MA X L, ZHANG L Y, LI H Y, et al. Preparation of oriented nanowires by melt differential electrospinning [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(1): 8-12. (in Chinese)
- [10] DEITZEL J M, KLEINMEYER J, HARRIS D, et al. The effect of processing variables on the morphology of electro-spun nanofibers and textiles[J]. Polymer, 2001, 42(1): 261-272.
- [11] 王衍书. 静电纺丝电场模拟下的新型喷丝头的设计研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- WANG Y S. Design and research on a new spinneret based on simulation of electric field in electrospinning [D]. Shanghai: Donghua University, 2012. (in Chinese)
- [12] YANG D Y, WANG Y, ZHANG D Z, et al. Control of the morphology of micro/nanostructures of polycarbonate via electrospinning[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(17): 2911-2917.
- [13] ZHOU F, GONG R, PORAT I. Needle and needleless electrospinning for nanofibers [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 115(5): 2591-2598.
- [14] YANG C R, JIA Z D, LIU J N, et al. Guiding effect of surface electric field of collector on deposited electrospinning fibers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2009, 16(3): 785-792.
- [15] PARK C H, PANT H R, KIM C S. Novel robot-assisted angled multi-nozzle electrospinning set-up: computer simulation with experimental observation of electric field and fiber morphology [J]. Textile Research Journal, 2014, 84(10): 1044-1058.
- [16] 庄昌明, 孟晓华, 曾泳春, 等. 静电纺丝接收装置的大小对电场分布和纤维接收的影响[J]. 纺织学报, 2014, 35(6): 7-13.
- ZHUANG C M, MENG X H, ZENG Y C, et al. Influence of size of collector on electric field distribution and fiber receiving of electrospinning [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(6): 7-13. (in Chinese)
- [17] 黄华云. 电场分布对静电纺聚氧化乙烯纤维取向度和结晶度的影响[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- HUANG H Y. Effect of electric field distribution on molecular orientation and crystallinity electrospinning polyethylene oxide fiber [D]. Shanghai: Donghua University, 2016. (in Chinese)
- [18] YOUNG K F, FREDERIKSE H P R. Compilation of the static dielectric constant of inorganic solids[J]. Journal of Physical & Chemical Reference Data, 1973, 2(2): 313-410.
- [19] LEE B S, JEON S Y, PARK H, et al. New electrospinning nozzle to reduce jet instability and its application to

- manufacture of multi-layered nanofibers [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6758.
- [20] RUTLEDGE G C, FRIDRIKHA S V. Formation of fibers by electrospinning [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2007, 59(14): 1384–1391.
- [21] 庄昌明. 静电纺丝接收装置对电场均匀性、纤维形态及接收的影响[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- ZHUANG C M. The influence of collecting targets on electric field uniformity, fiber morphology and receiving of electrospinning [D]. Shanghai: Donghua University, 2014. (in Chinese)

## Simulation of electric field distribution in a centrifugal electro-spinning rotating receiver

LI KaiLi XUE Lian LIU Yong\*

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

**Abstract:** Finite element analysis software has been used to simulate the electric field distribution of a centrifugal electrospinning receiver in order to find the optimal electric field. The simulations mainly focused on changes in the electric field strength and potential of the metal receiver and mesh receiver in different locations and having different widths. The resulting plots of electric field intensity were compared. The effects of varying the electric field intensity have been summarized. In the case of a fixed voltage, the value of the electric field strength is inversely proportional to the distance between the receiving plate and the nozzle, inversely proportional to the height of the receiving plate or the copper wire, and inversely proportional to the density of the mesh receiving ring. The results of this study should play an important role in both enhancing controlling nanofiber diameter and morphology, and device optimization in the process of centrifugal electrospinning.

**Key words:** electric field intensity; centrifugal electrospinning; receiving device; electric potential

(责任编辑:汪 琴)