

近场直写静电纺丝电场仿真与路径规划分析

林灿然¹, 王晗¹, 曾俊^{1,2}, 朱自明^{1,2}, 阳范文³, 张嘉荣¹, 许伟亮¹, 蓝银涛³

(1.广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2.佛山轻工精密测控技术有限公司, 佛山 528225;

3.广州医科大学 生物医学工程系, 广州 511436)

摘要: **目的** 由于在静电纺丝过程中射流的鞭动现象会严重影响纺丝的质量, 无法实现图案的精准化沉积和高分辨率的喷墨打印, 需要探究减小射流鞭动现象的方法。**方法** 首先采用 COMSOL Multiphysics 多物理耦合场有限元仿真软件, 对纺丝过程中有无添加辅助电极情况下的电场场强大小和分布进行模拟分析, 随后通过实验进行对比验证, 并根据结果设计一套适用于近场直写微纳喷印的纤维薄膜打印数控系统, 实现纳米纤维的重复沉积, 进行纤维薄膜的打印。**结果** 实验采用质量分数为 8% 的聚氧化乙烯 (PEO) 溶液作为纺丝溶液, 注射器及喷丝针头容量为 2.5 mL, 针头外径为 0.6 mm, 长度为 12 mm, 注射泵流量设置为 0.5 $\mu\text{L}/\text{min}$, 2 台高压电源设置的电压均为 1.01 kV。实验结果表明, 未添加辅助电极时, 纤维容易出现卷曲, 而添加辅助电极后, 纤维细直不卷曲。**结论** 利用平行辅助电极将工作电场集中在所需范围内, 使电场尽可能实现垂直地从喷丝针头到接收基板, 能有效减小纺丝射流的鞭动现象给稳定沉积带来的不良影响, 可实现聚合物溶液高分辨率的喷墨印刷, 能够实现图案的精准化沉积。

关键词: 静电纺丝; 近场直写; 电场分析; COMSOL Multiphysics 仿真; 纤维薄膜打印数控系统

中图分类号: TS853⁺.5; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0146-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.022

Simulation and Path Planning Analysis of Near Field Direct Write Electrospinning

LIN Can-ran¹, WANG Han¹, ZENG Jun^{1,2}, ZHU Zi-ming^{1,2}, YANG Fan-wen³,
ZHANG Jia-rong¹, XU Wei-liang¹, LAN Yin-tao³

(1. Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Foshan Lepton Precision Measurement and Control Technology Co., Ltd., Foshan 528225, China;

3. Biomedical Engineering Department, Guangzhou Medical University, Guangzhou 511436, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the methods of reducing jet whipping regarding the problem that the precision deposition of image and inkjet printing of high resolution cannot be realized as the jet whipping in the process of electrospinning will seriously affect the quality of spinning. Firstly, COMSOL Multiphysics coupling field finite element simulation software was used to simulate and analyze the electric field intensity and distribution with and without addition of auxiliary electrode in the process of spinning. Then, comparison and verification were conducted through experiment and a set of fiber film print numerical control system suitable for near field direct write micro-nano jet printing was designed according to the results to achieve the repeated deposition of nanofibers and to print fiber film. The experiment used polyethylene oxide (PEO) solution (mass fraction: 8%) as the spinning solution. The capacity of syringes and jet needles was 2.5 mL. The outer diameter of the needle was 0.6 mm and its length was 12 mm. The injection pump flow was set to 0.5 $\mu\text{L}/\text{min}$. The voltage of both high voltage power supplies was set to 1.01 kV. The experimental results showed that the fiber was prone to curl when not added with auxiliary electrodes; however, the fiber was fine and straight after

收稿日期: 2018-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51305084); “广东特支计划”科技青年拔尖人才项目 (2014TQ01X212); 佛山市科技计划 (2015IT100152); 广州市高校创新创业教育项目 (201709P05)

作者简介: 林灿然 (1996—), 男, 广东工业大学硕士生, 主攻电流体动力喷印、微纳加工与制造。

通信作者: 王晗 (1980—), 男, 博士, 广东工业大学教授、硕导, 主要研究方向为电流体动力喷印、微纳加工等。

added with auxiliary electrodes. Parallel auxiliary electrode is applied to make the working electric field concentrated in the required range, to enable the electric field to be vertically from jet needles to receiving plate as much as possible, thus effectively reduce the adverse effects of spinning jet whipping on stable deposits. In such case, the high resolution inkjet printing for polymer solution and precision deposition of image can be achieved.

KEY WORDS: electrospinning; near field direct write; electric field analysis; COMSOL Multiphysics simulation; fiber film printing CNC system

静电纺丝 (Electrospinning) 技术, 简称电纺法^[1], 是一种在静电场力作用下, 由聚合物溶液喷射产生纤维并沉积在基板上从而实现喷墨打印的方法。静电纺丝制得的超细纤维具有较高的孔隙率和较大的比表面积^[2], 以及其优良的电学、力学、光学等性能^[3], 因此被广泛地应用于组织工程支架^[4]、生物传感器^[5]、太阳能薄膜电池^[6]、电子器件^[7]、有机发光二极管^[8-9]、可穿戴设备^[10]、柔性电子显示器^[11]等诸多领域。静电纺丝过程中, 通过对喷嘴处施加高压静电, 从而在喷嘴和接地基板之间形成一个巨大的电场, 同时会产生一个很大的电场力, 当电场力大到突破临界值时, 会克服溶液本身的表面张力, 从喷嘴处产生射流, 随着溶剂的挥发, 形成纤维沉积在收集板上, 最终得到纳米纤维制品^[12]。

聚合物溶液喷墨打印的分辨率可通过近场直写静电纺丝技术得以提高, 通过减小喷嘴与基板之间的垂直距离, 利用刚产生射流时较为稳定的阶段进行图案的喷墨打印^[13], 可实现图案的精准化沉积。

为了分析纺丝过程中有无添加辅助电极下的电场场强大小与分布情况, 采用 COMSOL Multiphysics 软件对 2 种条件下的电场进行分析计算, 并在仿真结果的指导下进行实验探究。

1 有限元仿真模拟与分析

1.1 建立简化模型

实际的静电纺丝实验中, 纤维在静电场中的运动非常复杂, 因此建立有限元模型时, 无法做到与真实情况完全一致, 因此应该对电纺装置的结构和组成尽可能地进行简化, 建立一个简单但主要构成接近的模型, 以便进行电场分析。简化的静电纺丝示意图 1。

通过仿真分析, 可以得到静电纺丝过程中电场的分布情况, 其中喷丝针头和接地基板之间的电场分布是最主要的探究因素, 因此, 建模时可以不考虑非关键部件如注射泵、运动平台等。整个静电纺丝实验的模型最终可简化为 3 部分: 金属喷丝针头; 接地接收基板; 屏蔽网 (内充满空气)。由于建立的模型关于中心对称, 所以喷丝针头和接地的接收基板之间的静电场也同样关于中心对称。

2.2 参数设定

在进行有限元仿真分析前, 为了得到模拟的静电

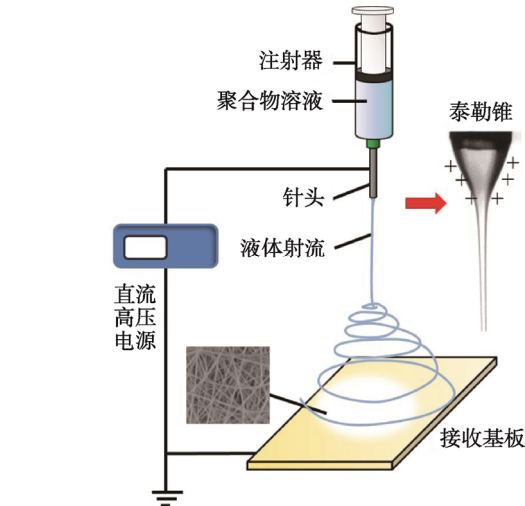


图 1 静电纺丝示意
Fig.1 Schematic diagram of electrospinning

纺丝模型, 需要设定不同的参数。首先需要确定喷丝针头、接收基板和屏蔽网的具体尺寸。将其具体的参数记录, 见表 1。然后对静电纺丝实验的简化装置进行材料及介电常数设定。介电常数分为相对介电常数和绝对介电常数, 是介质的相对介电常数与真空中的绝对介电常数的乘积。

表 1 静电纺丝模型基本参数
Tab.1 Basic parameters of electrospinning model mm

喷丝针头	接收极板	屏蔽网	接收距离
直径: 1	长度: 200	长度: 800	400
长度: 20	厚度: 2	宽度: 400	

模型的建立还需要设定喷丝针头、接收基板以及屏蔽网内空气的相对介电常数, 具体关系为:

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E$$
 (1)

式中: D 为电通量密度; ϵ_r 为介质的相对介电常数; ϵ_0 为真空中的绝对介电常数; E 为电场强度。

国际单位制中真空绝对介电常数一般取 1, 介质的相对介电常数是一个无量纲值。模型经过简化后, 只剩喷丝针头、接收基板和屏蔽网内的空气。设置针头的介电常数为 2, 接收基板的介电常数为 2, 空气的介电常数为 1。其中喷丝针头和接收基板均设置为钢材料, 而屏蔽网内则充满空气介质^[14]。文中研究的静电纺丝工作电场情况较为简单, 仅需在喷丝针头加以 1000 V 的正电压, 接收基板和屏蔽网均接地。

3 静电纺丝电场 COMSOL 模拟仿真结果分析

3.1 电势分布分析

经简化后的静电纺丝装置通过 Delaunay 三角剖分法进行网格划分, 并通过 FGMRES 迭代求解器计算后, 可得到电势表面分布与等值线见图 2。

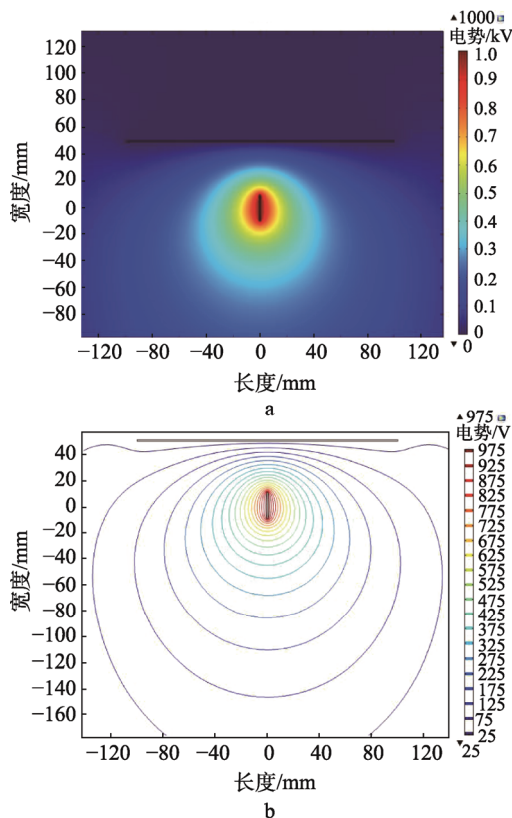


图 2 静电纺丝电势表面分布与等值线

Fig.2 Surface distribution and contour of electrospinning potential

图 2 中可以清晰看出, 电势关于喷丝针头呈中心分布对称; 喷丝针头附近的颜色为深红色, 电势大小约在 0.9 ~ 1 kV 之间, 与给喷丝针头施加的 +1 kV 电压相符; 接收基板附近的颜色为深蓝色, 电势大小趋近于 0, 因为对接收基板进行接地处理; 喷丝针头周围的等势线分布较为密集, 电势值也是较高的, 随着距离喷丝针头越远, 电势越来越小, 且等势线分布也越稀疏, 其中电势较高的区域为红色, 较低的区域为蓝色。

于是可得到电势具体分布情况: 在喷丝针头处电势达到最大, 而在接收基板处最小, 接近于 0; 以喷丝针头为中心, 随着距离不断增加, 电势逐渐减小, 直至为 0, 符合实际情况。

3.2 电场强度矢量分布分析

文中研究的电纺装置的电场强度矢量分布见图 3, 图 3 中可以看出, 电场强度矢量与电势分布一样,

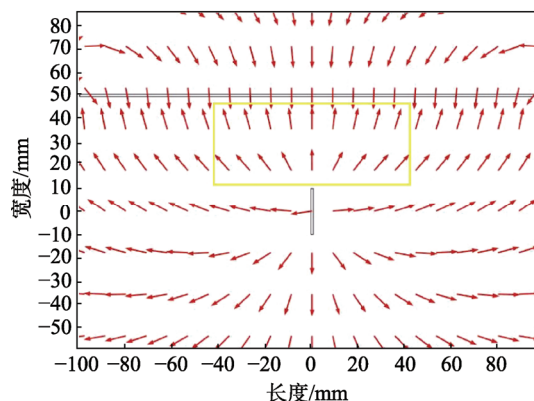


图 3 静电纺丝电场强度矢量分布

Fig.3 Electrospinning electric field intensity vector distribution

关于喷丝针头呈轴对称分布, 由于喷丝针头处施加了正电压, 而接收基板和屏蔽网内的空气介质进行接地处理, 所以在喷丝针头和接收基板之间、喷丝针头和四周的屏蔽网之间均会形成电场, 但此处主要关注及研究喷丝针头和接收基板之间的电场分布情况。

图 3 中的箭头代表该静电纺丝装置工作电场的走向趋势, 可以看出电场强度矢量均由喷丝针头针口处发散出来, 并最终汇聚于接收基板。主要观察图中黄色框内, 发现除了喷丝针头与接收基板垂直相交处的电场方向是唯一垂直以外, 其余的电场方向均由喷丝针头向外扩散, 空间中分布较为散乱, 这就意味着在实际静电纺丝实验的过程中, 电场并不能在一个较小的区域内聚集。

距离喷丝针头近的区域, 射流比较稳定, 因为刚喷射时射流的加速度很大, 能沿直线进行运动, 但由于电场力相互作用情况十分复杂, 纤维很快会发生卷曲, 进入极其不稳定的鞭动阶段, 运动轨迹为直径不断增大的螺旋环^[15]。同时纤维运动过程中, 溶剂迅速挥发, 射流不断被拉伸细化, 固化后得到纳米级别的纤维, 最终沉积在接收基板上, 但此时得到的纤维杂乱无序^[16]。

如果不能在实验中将工作电场收缩汇聚在一个较小的空间范围内, 使其不分散, 尽量实现能垂直地从喷丝针头到接收基板, 容易导致喷丝针头出来的纤维受到周围不同方向的电场力的作用, 出现鞭动现象, 影响纤维的稳定沉积。

3.3 带平行辅助电极的电场强度矢量分布分析

为了减小上述静电纺丝喷射流鞭动现象给实验带来的影响, 提出了一种利用平行辅助电极来将工作电场收缩在所需范围内, 使电场能尽量实现能垂直地从喷丝针头到接收基板。

在喷丝针头与接收基板之间添加左右各一片辅助电极, 关于中间的喷丝针头对称, 并与喷丝针头平行, 因此称之为平行辅助电极。为左右平行电极添加钢材材料, 分别给左右平行电极施加 1 kV 的正电压, 并进行网格划分, 见图 4。

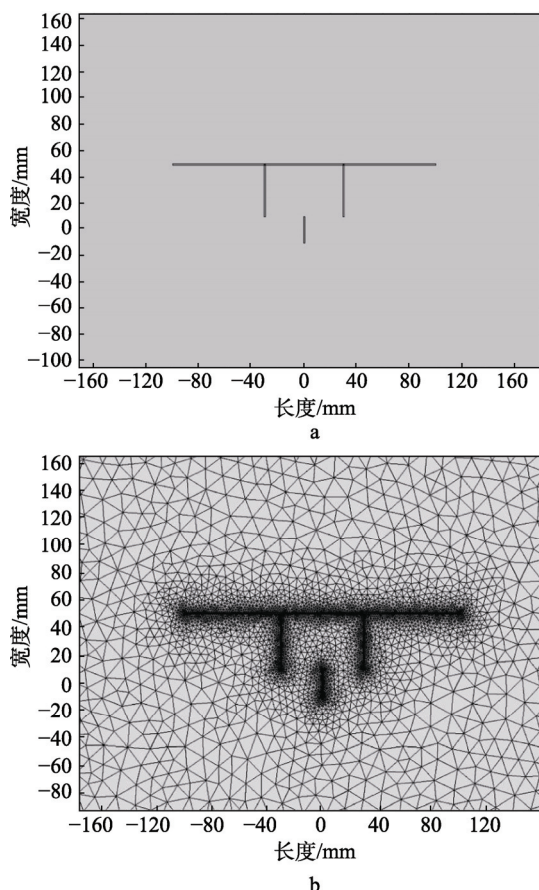


图 4 平行辅助电极

Fig.4 Parallel auxiliary electrodes

通过求解器计算后,得到的电势表面分布与等值线见图 5。可以清晰看出,喷丝针头与左右平行辅助电极周围颜色为深红色,电势大小在 0.9~1 kV 之间,且红色代表的高电势主要聚集在喷丝针头与左右平行辅助电极之间所处的区域内。由图 5 可以看出两平行辅助电极间的电场线分布较为均匀。

添加平行辅助电极后电场强度矢量分布箭头见图 6。观察发现,图 6 中的箭头(即电场的方向)整体趋势与上述图 3 类似,但若只看黄色方框内的电场方向,对比未加平行辅助电极时,电场能在该区域内聚集,由于左右极板均施加正电压,所以会对该区域内由喷丝针头射出的射流产生 2 个相向的且垂直于喷丝针头的电场力,该电场力会使得从喷丝针头射出的纺丝射流在垂直射出的时候能够尽可能地沿直线运动,减小发生高频弯曲的可能性,即减小不稳定的鞭动现象发生的概率,使得收集的纤维可以形成所需的形状,发生卷曲的几率减小。

4 静电纺丝实验研究与结果分析

4.1 实验材料与仪器准备

实验采用的纺丝溶液是质量分数为 8% 的聚氧化乙烯(PEO)溶液。实验使用的注射器及喷丝针头容

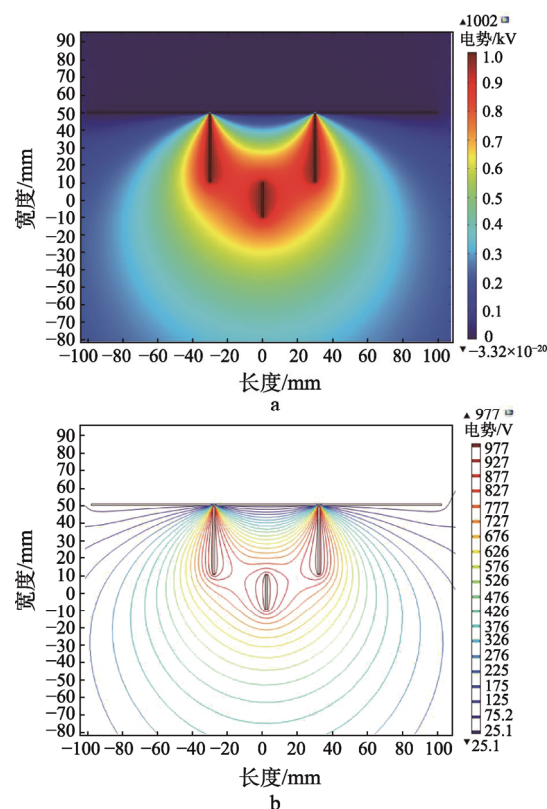


图 5 添加平行辅助电极后电势表面分布与等值线

Fig.5 The potential surface distribution and contour after the parallel auxiliary electrode were added

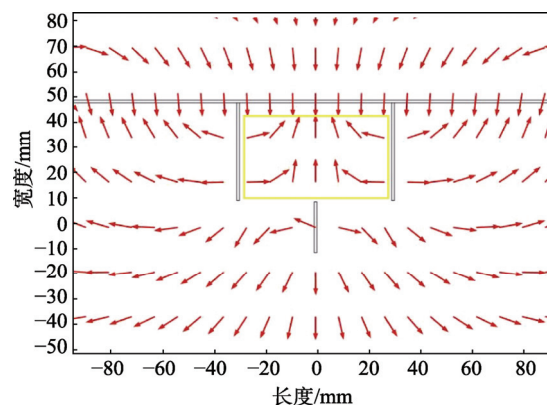


图 6 添加平行辅助电极后电场强度矢量分布

Fig.6 The distribution of electric field intensity vector after parallel auxiliary electrode was added

量为 2.5 mL, 针头采用 6 号针头, 即针头外径为 0.6 mm, 针头长度约为 12 mm。使用的注射泵为兰格牌, 可以通过按键实现溶液流量的控制, 控制挤出溶液的量, 保证实验中供液的稳定和可控。该实验的流量设置为 0.5 $\mu\text{L}/\text{min}$ 。

该次实验使用的二轴运动平台图见图 7。 x 轴运动方向通过直线电机和滑轨来实现运动, y 轴运动方向通过步进电机和丝杆来实现运动。主要是通过 x 和 y 2 个方向的联动来实现固装于 y 轴上平台的运动, 在平台上装持有实验用的接收极板, 通过平台的运动控制实现纤维在接收基板的准确沉积。

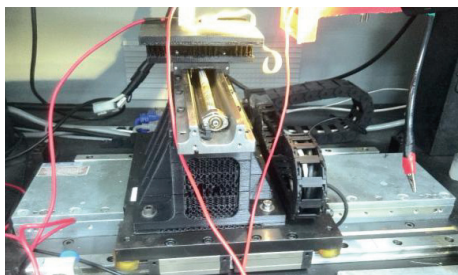
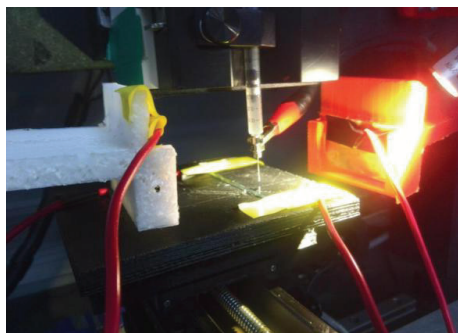


图7 实验用二轴运动平台

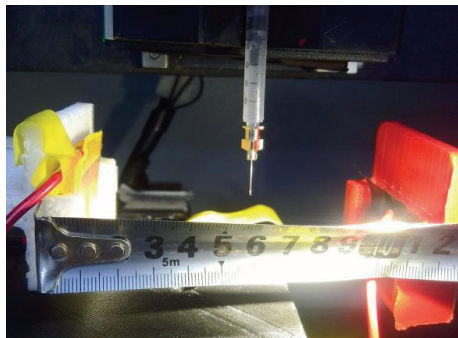
Fig.7 Two-axis motion platform used in the experiment

该次实验使用的高压电源数量为2台,采用的是东文高压电源(天津)股份有限公司生产的高压直流电源。一台加持于喷丝针头处,为静电纺丝实验提供高压静电场的高压电源;另一台用于给实验组左右2处的平行辅助电极提供电压,使其产生平行辅助电场的。2台高压电源在该实验中设置的电压大小均为1.01 kV。

平行辅助电极见图8,用于实验组,验证上文经仿真模拟分析后新提出的一种能减小纺丝喷射的流鞭动现象给稳定沉积带来不良影响的方法的可行性。实验过程中,第1台高压电源接出的正极线接在喷丝针头上,地线接在接收基板上,在针头和接收基板之间产生电场;第2台高压电源接出的正极线分成2条,分别接在左右固定块上的铜片上,使其均带正电,同样地线也接在接收基板上,在铜片和接收基板之间产生电场,用来抵消从针头发散出来的电场。实验中,左右的平行辅助电极分别距离中间的针头60 mm。



a



b

图8 实验用平行辅助电极

Fig.8 Parallel auxiliary electrode used in the experiment

4.2 实验结果表征与分析

通过CCD摄像头近距离实时拍摄,可以看到当针头施加正电压,接收基板接地后,针头处会有喷丝射流产生,在运动平台高速运动的情况下,纤维会被拉伸并附着于接收基板上,见图9。

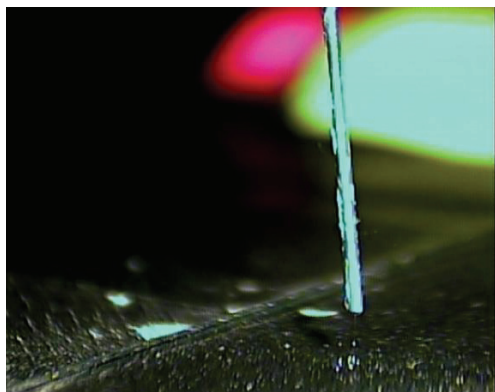


图9 静电纺丝实验喷丝射流 CCD 拍摄图

Fig.9 The CCD image of electrospinning test jet

使用扫描电镜(SEM)对未加平行辅助电场实验制备的纤维进行50倍及500倍放大观测,见图10,这组结果将作为参照组。50倍放大从宏观看,整体还是比较笔直,但仔细观察能发现单根纤维均出现不同程度的卷曲现象;经500倍放大后,只对其中一根纤维的一部分进行表征,发现卷曲现象十分严重。



a 50倍

2 mm



a 500倍

200 μm

图10 未加平行辅助电场纤维扫描电镜观测

Fig.10 Scanning electron microscopy (SEM) observation without the addition of parallel auxiliary electric field fiber

使用扫描电镜（SEM）对施加了平行辅助电场实验制备的纤维进行 50 倍及 500 倍放大观测见图 11，目的是与上述的未加平行辅助电场的实验结果进行对比。50 倍放大观察发现纤维整体十分笔直，单根纤维没有出现卷曲现象；尽管放大到 500 倍进行观察，发现单根纤维依然是十分笔直的。添加了平行辅助电极后，喷丝射流在静电场中的鞭动效应受到了平行电场的抑制作用，纤维发生卷曲的几率会大大减小。

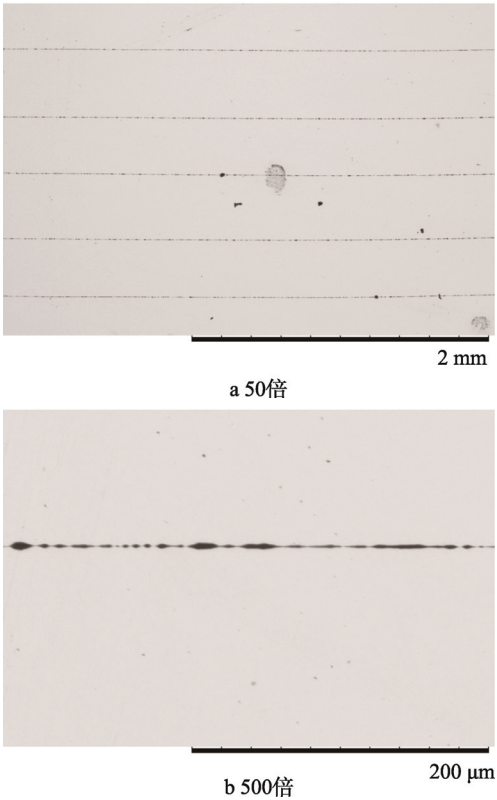


图 11 添加平行辅助电场纤维扫描电镜观测
Fig.11 Scanning electron microscopy (SEM) observation with the addition of parallel auxiliary electric field fiber

5 纤维薄膜打印数控系统

如何能够生产规律整齐的薄膜，并在其上进行电流体动力喷印，精准沉积所需的图案，是一个急需解决的难题。为了解决上述问题，文中设计了一套适用于近场直写电流体动力喷印的纤维薄膜打印数控系统，能够通过 xy 两轴方向的运动控制，实现纳米纤维的重复沉积，并最终完成纤维薄膜的打印，该方法可实现较大规模的生产，方便简单，更具成本效益。

纤维薄膜打印软件界面见图 12。黑色方框内读取用户输入的光栅数目 n 、光栅宽度 b 、光栅长度 l ，实现读取用户自定义输入的参数来进行插补运动；黄色方框内是 2 个按钮： X 启动和 Y 启动，即分别触发进行 X 和 Y 步进方向的插补运动；右上角的红色方框内读取用户输入的循环打印次数，一次大循环包含一次 X 步进方向的插补和一次 Y 步进方向的插补，当用

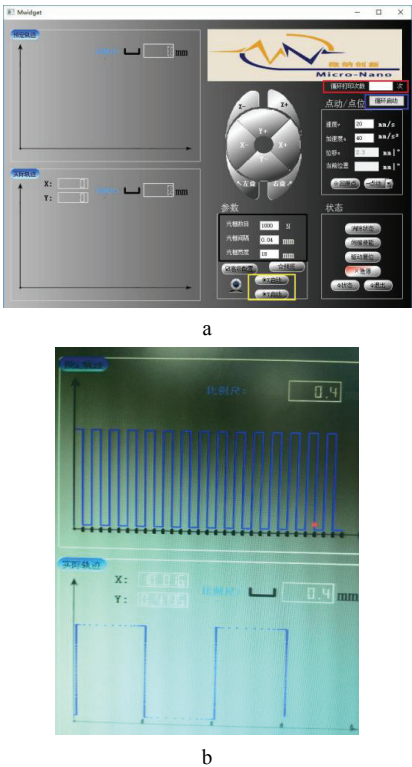


图 12 纤维薄膜打印软件界面
Fig.12 Fiber film printing software interface

户输入循环打印次数 z 后，单击下面蓝色方框内的“循环启动”按钮，进行纤维薄膜的循环插补运动。

纤维薄膜打印见图 13，针头处通过鳄鱼夹施加了高电压。可以清晰看到在接收极板上沉积有正方形的一层纤维。从图 13 中可清晰地看到此时已经通过多次循环打印，在接收极板上沉积了较厚的多层纤维，已经初

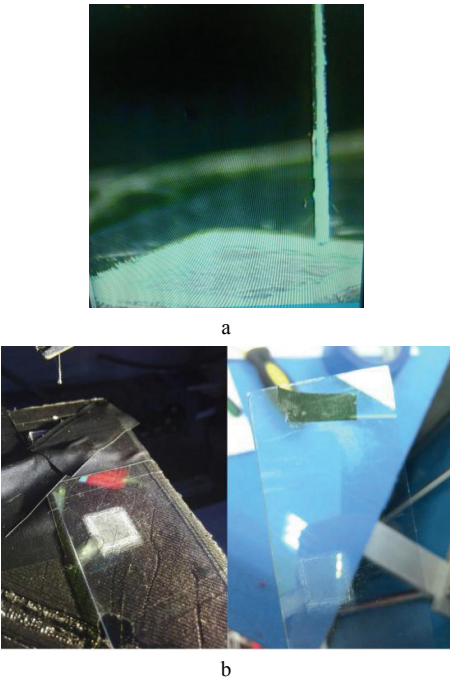


图 13 纤维薄膜打印
Fig.13 Fiber film printing

步形成了纤维薄膜的轮廓。

纤维薄膜打印成品光学显微镜拍摄图见图 14, 从图 14 可以看出使用该节设计的纤维薄膜打印数控系统, 进行 x 轴和 y 轴的插补运动, 实现水平和垂直方向上的纤维重复堆叠, 基本可以完成正方形纤维薄膜的打印。

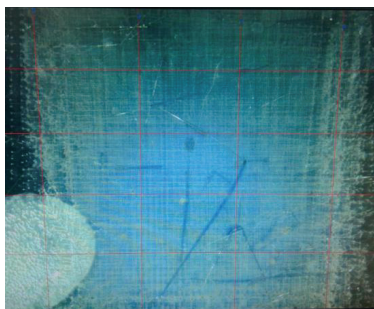


图 14 纤维薄膜打印成品光学显微镜图

Fig.14 Optical microscopy diagram of printed product of fiber film

6 结 语

利用 COMSOL Multiphysics 软件对静电纺丝装置进行简化, 对纺丝过程中有无添加辅助电极情况下的电场场强大小与分布进行了模拟分析, 添加平行辅助电极, 两平行辅助电极与接收基板之间会产生电场, 用来抵消从针头发散出来的电场, 从而使得喷丝射流在静电场中的鞭动效应受到了平行电场的抑制作用, 接收基板上沉积的纤维发生卷曲的几率会大大减小。

随后设计了一套适用于近场直写微纳喷印的纤维薄膜打印数控系统, 使用该纤维薄膜打印数控系统, 进行 x 轴和 y 轴的插补运动, 实现水平和垂直方向上的纤维重复堆叠, 基本可以完成正方形的纤维薄膜的打印。

参考文献:

- [1] RENEKER D H, YARIN A L, FONG H, et. al. Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(9): 4531—4547.
- [2] 陆陪陪, 许振良, 杨虎, 等. PFSA-PES-纳米颗粒复合那纳米纤维的制备及催化性能[J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1466—1472.
LU Pei-pei, XU Zhen-liang, YANG Hu, MA Xiao-hua. The Preparation and Catalytic Properties of the Nanofibers of the PFSA-PES-nanoparticles[J]. Journal of Chemical Engineering, 2013, 64(4): 1466—1472.
- [3] 李璐, 李若松, 刘玲娜. 静电纺丝技术制备 PMMA 纤维的分析与模型预测[J]. 化工学报, 2013, 64(5): 1870—1875.
LI Lu, LI Ruo-song, LIU Ling-na. Analysis and Model Prediction of PMMA Fibers Prepared by Electro-spinning Technology[J]. Journal of Chemical Engineering, 2013, 64(5): 1870—1875.
- [4] KIM M S, KIM G H. Electrohydrodynamic Direct Printing of PCL/Collagen Fibrous Scaffolds with a Core/Shell Structure for Tissue Engineering Applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 279(1): 317—326.
- [5] KESIK M, KANIK F E, TURAN J, et al. An Acetylcholinesterase Biosensor Based on a Conducting Polymer Using Multiwalled Carbon Nanotubes for Amperometric Detection of Organophosphorous Pesticides[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2014, 205: 39—49.
- [6] SHIN D Y, SEO J Y, TAK H, et al. Bimodally Dispersed Silver Paste for the Metallization of a Crystal-line Silicon Solar Cell Using Electrohydrodynamic Jet Printing[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 136(5): 148—156.
- [7] CHEN D, LIANG J, PEI Q. Flexible and Stretchable Electrodes for Next Generation Polymer Electronics: a Review[J]. Science China Chemistry, 2016, 59(1): 659—671.
- [8] KIM K, KIM G, LEE B R, et al. High-resolution Electrohydrodynamic Jet Printing of Small-molecule Organic Light-emitting Diodes[J]. Nanoscale, 2015, 32(7): 410—415.
- [9] KIM B H, ONSER M S, LIM J B, et al. High-resolution Patterns of Quantum Dots Formed by Electrohydrodynamic Jet Printing for Light-emitting Diodes[J]. Nano Letters, 2015, 15(2): 969—973.
- [10] GAO W, EMAMINEJAD S, NYEIN H Y, et al. Fully Integrated Wearable Sensor Arrays for Multiplexed In Situ Perspiration Analysis[J]. Nature, 2016 (7): 509—514.
- [11] PARK H G, BYUN S U, JEONG H C, et al. Photo-reactive Spacer Prepared Using Electrohydrodynamic Printing for Application in a Liquid Crystal Device[J]. Ecs Solid State Letters, 2013, 12(2): 52—54.
- [12] 万玉芹. 静电纺丝过程行为及振动静电纺丝技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2006.
WAN Yu-qin. Study on the Process Behavior of Electrospinning and Electrospinning Technology[D]. Shanghai: Donghua University, 2006.
- [13] HUANG Y A, BU N B, DUAN Y Q, et al. Electrohydrodynamic Direct-writing[J]. Nanoscale, 2013 (5): 7—17.
- [14] 王文. 单针头静电纺丝过程的数值模拟[D]. 上海: 东华大学, 2015.
WANG Wen. Numerical Simulation of the Process of Single Needle Electrospinning[D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [15] 韩瑞. 磁场辅助静电纺丝的模拟研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
HAN Rui. Simulation Study of Magnetic Field Assisted Electrospinning[D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2015.
- [16] 蒲娟. 近场纺丝制备聚合物微/纳米纤维及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
PU Juan. Preparation of Polymer Micro/Nano Fibers by Near Field Spinning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2011.