

文章编号: 1000-5013(2009)05-0502-04

空间电场对单根纳米纤维沉积的影响分析

李文望^{1,2}, 孙道恒¹

(1. 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005;

2. 厦门理工学院 机械工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于近场静电纺丝, 分别讨论单根纳米纤维在平面硅片、图案化硅片基底上的沉积规律. 当收集板运动速度大于纳米纤维喷射速度时, 将获得直线状纳米纤维; 而当收集板运动速度小于纳米纤维喷射速度, 纳米纤维易受电场力和电荷排斥力的影响而产生弯曲鞭动, 并缠绕成纳米纤维带或螺旋状结构. 采用图案化硅基作为收集板时, 电场分布发生变化, 微结构表面电场强度大于其他区域. 纳米纤维在微结构表面产生聚集, 且微结构表面电场的增强也加快纳米纤维喷射速度.

关键词: 近场静电纺丝; 纳米纤维; 电场分布; 可控沉积

中图分类号: TQ 342+.8; O 442; TN 16

文献标识码: A

静电纺丝作为一种可连续制备纳米纤维的方法^[1], 以其独特的优势在柔性电子^[2]、生物医学^[3]和微电子机械系统(MEMS)^[4]等领域都有着广泛的应用潜力. 电纺丝过程存在螺旋、分叉等不稳定现象, 传统静电纺丝不能实现纳米纤维的有序收集, 这也是静电纺丝技术应用研究的难题和关键. 近场静电纺丝(Near-Field Electrospinning)^[5]和扫描探针静电纺丝(Scanning Tip Electrospinning)^[6]方法的提出, 实现了单根纳米纤维的有序沉积, 为静电纺丝技术在电子制造和微纳米系统集成等行业的应用提供了技术基础. 纳米纤维直径小、质量轻, 其运动轨迹和沉积位置易受到静电纺丝过程的参数和环境因素的影响^[7]. 本文基于近场静电纺丝技术, 研究空间电场分布对单根纳米纤维喷射速度和沉积位置的影响.

1 实验部分

1.1 原料配制

聚乙烯(PEO, 天津市大地精细化工公司, 相对分子质量为 300 000)具有溶解性好、溶液稳定好、可纺性较好等优点, 被广泛应用于静电纺丝. 采用 PEO 作为溶质, 去离子水与乙醇的体积比为 3:2 的混合溶液作为溶剂配制电纺丝. 溶液配制好之后, 在室温下静置 48 h, 直至 PEO 完全溶解.

1.2 实验装置

图 1 为实验装置, 包括高压电源、探针、X-Y 运动平台. 电源电压为 0~40 kV, 探针针尖直径为 40 μm, 针尖至收集板距离为 0~5 cm, 是连续可调的, 以满足近场静电纺丝的工作要求. 收集板放置于 X-Y 运动平台上, 可做任意曲线运动, 收集速度为 0~1 m·s⁻¹, 也是连续可调的. 采用图案化硅基底作为收集板, 硅基上微结构的高度为 5 μm. 在电纺丝过程中, 将探针针尖浸入高分子溶液, 采用类似笔尖蘸取墨水的形式蘸取高分子溶液进行纳米纤维直写. 采用 XL30 场发射环境扫描电子

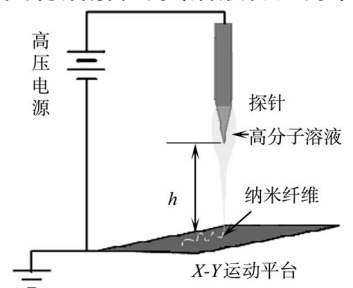


图 1 近场静电纺丝实验装置
Fig. 1 Experimental setup of near-field electrospinning

收稿日期: 2009-05-23

通信作者: 李文望(1966), 男, 副教授, 主要从事微电子机械系统及微米/纳米加工技术的研究. E-mail: xmlww@xmut.edu.cn.

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划项目(2007AA04Z308); 福建省新建本科高校新世纪优秀人才支持计划项目(2007年度); 福建省教育厅科技项目(JA06060)

显微镜,观测静电纺丝纳米纤维的形态和分布情况.

1.3 实验原理

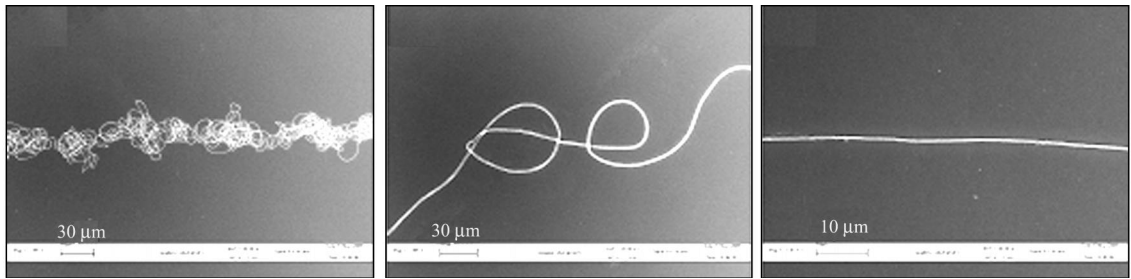
静电纺丝技术基本原理是,带电聚合物溶液在高压静电场中受静电力作用而被拉伸,在溶液尖端处形成“泰勒锥”(Taylor Cone);当电场力足以克服表面张力时,将带电射流从泰勒锥尖喷出;随着溶剂挥发,带电射流迅速变细和固化,最终形成纳米纤维沉积于收集板上.根据射流的运动状态,静电纺丝过程可分为两个阶段:第 1 阶段是有序稳定喷射阶段,第 2 阶段是螺旋劈裂阶段.

射流喷射和纳米纤维形成过程,受到空间电场分布、射流表面电荷密度、环境温湿度的等多方面因素的影响,实现电纺丝纳米纤维的可控沉积是静电纺丝技术应用发展的难点.近场静电纺丝采用实心针尖代替传统的空心喷头,降低了喷头至收集板之间距离等措施,克服了传统电纺丝纳米纤维无序收集的缺点,可实现了单根纳米纤维的可控沉积.

2 结果与仿真分析

2.1 纳米纤维在平面硅片收集板上的沉积

根据近场静电纺丝原理,采用平面硅基底作为收集板可以获得单根纳米纤维,如图 1 所示.实验时,喷头至收集板距离为 1 mm、聚合物溶液质量分数为 20%、电纺施加电压为 1.7 kV,以硅基底的收集板,此时,纳米纤维分布形态将受收集板运动速度的影响.当收集板运动速度为 $8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,纳米纤维将缠绕而呈现带状分布(图 2a).当收集板运动速度变大到 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,纳米纤维带宽度将逐渐变小而形成螺旋形纳米纤维(图 2b).当收集板运动速度进一步增大到 $32 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,基板与喷头间的纳米纤维将受到更大的拉力作用,纳米纤维受力拉伸而形成直线状单根纳米纤维(图 2c).



(a) 带状分布

(b) 螺旋形纳米纤维

(c) 直线状单根纳米纤维

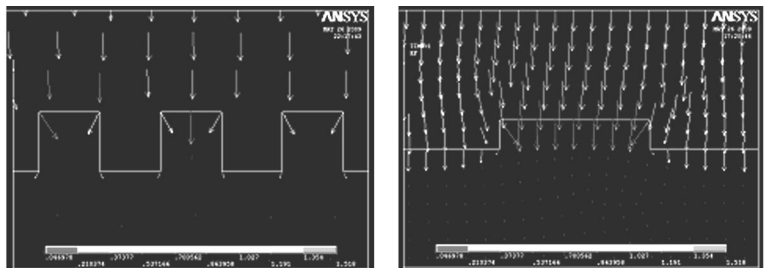
图 2 纳米纤维分布形态

Fig. 2 Distribution of nanofibers

由图 2 可知,纳米纤维在收集板运动速度较小时,喷头与收集板之间的空间运动纤维处于自由状态未被拉紧,喷头与收集板间区域的纳米纤维受电场力和电荷排斥力作用而产生弯曲鞭动;而当收集板运动速度较大时,空间运动纤维受较大拉力作用而被拉紧,此时,电场力和电荷排斥力将对纳米纤维运动轨迹的影响较小,纳米纤维在基底上呈现直线状分布.

2.2 纳米纤维在图案化硅基收集板的沉积

为进一步研究空间电场分布对纳米纤维沉积行为的影响,采用图案化硅基底作为收集板进行近场静电纺丝实验.图案化硅基底上方空间电场分布仿真,如图 3 所示.由图 3 可知,微结构上方电场强度大于其他位置的电场强度,而且微结构附近电场方向指向微结构上表面.电纺丝过程,射流或纳米纤维带有正电荷,空间运动时将受到指向微结构上表面



(a) 微结构阵列情形

(b) 单个微结构情形

图 3 图案化硅基底面电场强度仿真图

Fig. 3 Simulation of electric field on pattern silicon substract

的电场力作用.因此,电纺丝纳米纤维具有向微结构上表面运动聚集的趋势.

当收集板运动速度(v_p)大于纳米纤维喷射速度(v_n)时,纤维受较强拉伸力的作用,纳米纤维将直接横跨于微结构上方,沉积轨迹并没有因空间电场分布的不均而发生变化,纳米沉积示意图如图4(a)所示.当收集板运动速度小于纳米纤维喷射速度时,喷头与收集板之间纳米纤维处于自由状态,其运动轨迹易受到收集板上方空间电场分布的影响,从而有更多的纳米纤维在微结构上表面产生聚集,如图4(b)所示.

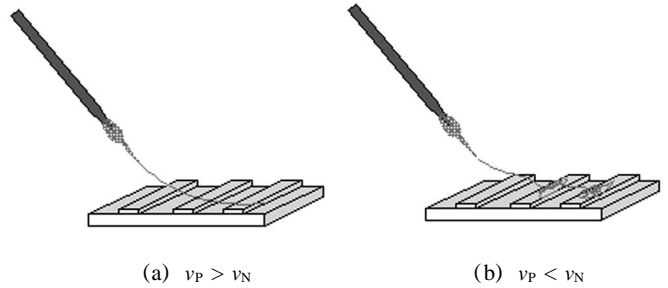


图4 纳米纤维在图案化硅基底沉积的示意图

Fig. 4 Sketch map of nanofiber deposition on pattern silicon substrate

采用图案化刻蚀的硅片作为收集板,进行近场静电纺丝实验,收集板上微结构深度为 $5\mu\text{m}$.实验时,喷头至收集板距离为 1mm 、聚合物溶液的质量分数为 20% 、电纺施加电压为 1.7kV ,单根纳米纤维的分布如图5所示(箭头表示收集板的运动方向).

从图5(a)可知,当收集板运动速度较大时,纳米纤维可以横跨于平行微结构,平行微结构宽度和两微结构间距(d)皆为 $10\mu\text{m}$.精确定位是近场静电纺丝的另一大优点,通过调节喷头与收集板的相对位置可以精确控制纳米纤维沉积位置.图5(b)显示了精确定位于微台结构上方的纳米纤维,微结构直径 $10\mu\text{m}$ 、两微结构间距离 $30\mu\text{m}$.

与平面硅基中纳米纤维受力情况相似,当收集板运动速度小于纳米纤维喷射速度时,空间运动纤维处于松弛状态,运动轨迹和沉积位置易受电场力的影响而发生变化,将有更多的纳米纤维在微结构上表面产生聚集.从图5(c)可知,当收集板运动方向与微结构边缘夹角小于 90° 时,受电场力的作用,纳米纤维将沿着微结构上表面边缘沉积.当收集板运动方向与微结构边缘夹角等于 90° 时,纳米纤维在条形微结构上聚集如图5(d)所示,两条形微结构间由单根纳米纤维连接.当纳米纤维定位于微台上方时,微台上表面同样会有纳米纤维的聚集,两微台间有一单根纳米纤维连接,如图5(e)所示.收集板运动速度相同时,纳米纤维在微结构上表面和基板底部沉积情况的对比如图5(f)所示,纳米纤维在微结构上表面呈现螺旋状分布而在基板底部为直线状分布.

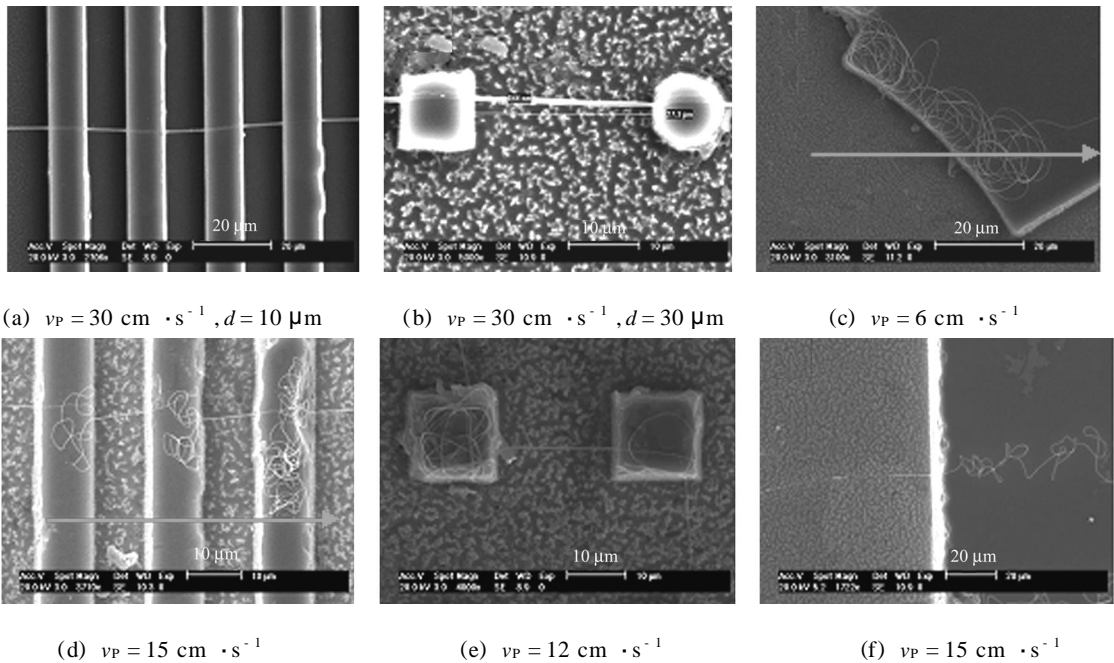


图5 图案化硅基底对纤维影响

Fig. 5 Influence of pattern silicon substrate on the fiber

从前面的讨论可知,当收集板运动速度小于纳米纤维喷射速度时,纳米纤维将可能为螺旋状分布;

当收集板运动速度大于纳米纤维喷射速度时,将有直线纳米纤维在收集板上沉积.图5(f)表明,当喷头处于微结构上方面时受较大电场力作用,纳米纤维喷射速度也将随之增大.

3 结论

利用近场静电纺丝技术,实现对单根纳米纤维喷射和沉积控制.当收集板运动速度较低时纳米纤维易受电场力和电荷排斥力的影响,在平面硅片收集上形成纳米纤维带或螺旋结构.采用图案化硅片作为收集板将改变空间电场分布,微结构上表面电场强度大于其他区域.受电场力影响,纳米纤维在微结构上表面产生聚集;同时,电场的增强也加快了纳米纤维喷射速度.

通过研究分析了收集板上空间电场分布对纳米纤维喷射与沉积过程的影响,有利于提高单根纳米纤维沉积的控制水平,增加静电纺丝技术的应用领域和范围.

参考文献:

- [1] SMIT E,BUTTNER U ,SANDERSON R D. Continuous yarns from electrospun fibers[J]. Polymer,2005,46(8):2419-2423.
- [2] ZHENG Gao-feng ,DAI Yin-hong ,WANG Ling-yun ,et al. Direct-write micro/ nano-structure for flexible electronic manufacturing[C] 7th IEEE Conference on IEEE NANO. Hong Kong:[s. n.],2007:791-794.
- [3] VAZ C M , TUIJL S V , BOUTEN C V C , et al. Design of scaffolds for blood vessel tissue engineering using a multi-layering electrospinning technique[J]. Acta Biomaterialia ,2005 ,1(5) :575-582.
- [4] LEE Sang-hoon , KEVIN L , GAO Yuan ,et al. Chip-to-chip fluidic connectors Via near-field electrospinning[C] Proceedings of 19th IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference. Kobe:[s. n.],2007:61-64.
- [5] SUN Dao-heng ,CHANG Chieh ,LI Sha ,et al. Near-field electrospinning[J]. Nano Letters ,2006 ,6(4) :839-842.
- [6] KAMEOKA J ,ORTH R ,YANG Yan-ou. A scanning tip electrospinning source for deposition of oriented nanofibers[J]. Nanotechnology ,2003 ,14(10) :1124-1129.
- [7] WANG Hong-lian ,ZHENG Gao-feng ,SUN Dao-heng. Simulation of nanofibers movement for near-field electrospinning[J]. Advanced Materials Research ,2009 ,60(1) :456-460.

Effect of Electrical Field on the Single Nanofiber Deposition

LI Wen-wang^{1,2} , SUN Dao-heng¹

(1. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering , Xiamen University , Xiamen 361005 , China ;

2. Department of Mechanical Engineering , Xiamen University of Technology , Xiamen 361005 , China)

Abstract : Near-field electrospinning was utilized to investigate the deposition rule of single nanofiber on both flat silicon substrate and pattern silicon substrate. Straight nanofiber would be deposited , when speed of collector motion is higher than the jet speed of nanofiber. When speed of collector motion is lower than the jet speed of nanofiber , the nanofiber is easily subject to the electric field force and the repulsive force of charge and have the effect of winding and whipping with the result that the nanofiber winding band or nanofiber with helical structures would be collected. When pattern silicon substrate was used as collector , the distribution of electric field was changed and the strength of electric field above the micro-structure is greater than that of other regions so that many more nanofibers would be collected on the top surface of micro-structure on the silicon substrate as well as the jet speed of nanofiber was also speeded up because of the higher electric field above the micro-structure.

Keywords : near-field electrospinning ; nanofiber ; electric field distribution ; controllable deposition

(责任编辑:黄仲一 英文审校:郑亚青)