

# 溶液静电纺丝制备热塑性聚酰亚胺超细纤维无纺布

Preparation of Thermoplastic Polyimide Ultrafine Fiber Nonwovens by Electrospinning

陈俊<sup>1</sup>, 张代军<sup>2</sup>, 张天骄<sup>1</sup>, 包建文<sup>2</sup>, 钟翔屿<sup>2</sup>, 张朋<sup>2</sup>, 刘巍<sup>1</sup>

(1 北京服装学院 材料科学与工程学院, 北京 100029;

2 中航工业复合材料技术中心, 北京 101300)

CHEN Jun<sup>1</sup>, ZHANG Dai-jun<sup>2</sup>, ZHANG Tian-jiao<sup>1</sup>, BAO Jian-wen<sup>2</sup>,  
ZHONG Xiang-yu<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of  
Fashion Technology, Beijing 100029, China; 2 AVIC Composite  
Technology Center, Beijing 101300, China)

**摘要:** 为实现热塑性聚酰亚胺(LPI)无纺布的宏量制备奠定基础, 以 N-N-二甲基乙酰胺(DMAc)为溶剂, 采用静电纺丝技术成功制备了平均直径范围为 0.36~1.47 μm 的 LPI 超细纤维, 系统探讨了纺丝液浓度、流速以及纺丝电压等工艺条件对 LPI 纤维形貌和直径的影响。结果表明: 随着浓度从 22% (质量分数, 下同) 增加到 30%, LPI 纤维的平均直径显著增大, 同时直径分布逐渐变宽, 并且在纺丝溶液浓度较低时, 有纺锤状纤维存在, 随着溶液浓度上升, 纺锤状纤维消失, 随浓度继续上升, 纤维开始产生粘连。纺丝电压的改变对纤维的形貌和平均直径变化不显著; 随着流速增加, 纤维平均直径随之增大, 当流速大于 1.5 mL/h 时, 开始出现纤维粘连, 大于 1.8 mL/h 时, 出现纺锤状纤维。通过优化工艺条件, 在 LPI 浓度 28%, 电压 15 kV, 流速 1.2 mL/h, 温度 30°C, 接收距离 25 cm 条件下, 制备了平均直径为 1.18 μm 的纤维。

**关键词:** 聚酰亚胺; 静电纺丝; 超细纤维; 微观形貌

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2016.000766

**中图分类号:** TB332    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2018)02-0041-09

**Abstract:** The superfine fiber of thermoplastic polyimide(LPI), whose average diameter ranges from 0.36 μm to 1.47 μm, was prepared through electrospinning with DMAc as solvent. It lays a good foundation for the mass preparation of LPI non-woven. The influence of electrospinning process conditions, including LPI concentration, flow rate and voltage, on morphology of LPI fiber was investigated systematically. The results show that the average diameter increases and the fibers diameter distribution turns wider with the LPI concentration increasing from 22% (mass fraction, same as below) to 30%. Meanwhile, when the concentration is rather lower, some cambiform fibers can be observed. As the concentration increases, the cambiform fiber disappears. While the concentration increases continually, the fibers are adhered to be flakiness. The change of the spinning voltage makes little difference on the average diameter of fibers; the average diameter of fibers increases with the increase of the flow rate of LPI solution; when the flow rate is more than 1.5 mL/h, the fibers start to be adhered, the cambiform fibers appear while the flow rate is over 1.8 mL/h. Through optimizing the process, the LPI fibers with average diameter of 1.18 μm were prepared under 30°C with the conditions of 28% concentration, 15 kV voltage, 1.2 mL/h flow rate and the 25cm receiving distance.

**Key words:** polyamide; electrospinning; ultrafine fiber; microstructure

聚酰亚胺(PI)是指分子主链上含有酰亚胺环基团的一类聚合物, 具有优异的力学性能、耐低温性能, 优

良的耐热性能, 良好的介电性能、耐辐射性能和生物相容性, 使其在原子能工业、航空航天、国防建设、电气绝

缘、环境产业、医疗卫生、防护产业等领域广泛应用,是现代最具发展前途的工程塑料之一<sup>[1-3]</sup>。

静电纺丝技术作为一种高效、经济、可靠的技术已被广泛地应用于各种超细纤维的制备。由于其制备的纤维直径可以达到几十纳米至几微米之间<sup>[4]</sup>,堆积排列而成的纤维膜具有大比表面积、高孔隙率等特性而被广泛地应用于各种实验研究和生产制造,尤其在生物组织工程<sup>[5]</sup>、过滤材料<sup>[6-9]</sup>、药物传输<sup>[10]</sup>、电子传感器<sup>[11-14]</sup>及医用敷料<sup>[15]</sup>等领域有着广泛的应用前景。通常热塑性聚酰亚胺(LPI)一般被用作模塑料或粉料使用,然而,随着材料技术的发展,采用 LPI 制备的超细纤维无纺布的应用需求也日益广泛,通过静电纺丝方法制备聚酰亚胺超细纤维引起了广泛关注。静电纺丝工艺制备聚酰亚胺超细纤维主要分为两种方法,一种是两步法,另一种是一步法。由于聚酰亚胺分子主链上含有大量的酰亚胺环、杂环或芳环结构,其分子链刚性大,不溶也不熔,因此,研究人员一般采用两步法制备聚酰亚胺纤维:先合成聚酰胺酸溶液,经静电纺丝方法纺制得到聚酰胺酸纳米纤维,然后经环化和热酰亚胺化得到聚酰亚胺超细纤维。张福婷等<sup>[16]</sup>通过静电纺丝制备了具有抑菌功能的含银聚酰亚胺(PI/Ag)复合纳米纤维。Liu 等<sup>[17]</sup>采用静电纺丝法,通过两步法制备了面向可用于电子包装产业的具有超低介电常数特性的聚酰亚胺纳米纤维无纺布。李学佳等<sup>[18]</sup>以二甲基甲酰胺(DMF)为溶剂,以均苯四甲酸二酐(PMDA)和 4,4'-二氨基二苯醚(ODA)为单体,合成了聚酰胺酸溶液,并采用静电纺丝制得聚酰胺酸纤维,再经热酰亚胺化得到了聚酰亚胺纤维,并利用红外光谱仪对其化学结构进行了表征,结果表明此方法制备的聚酰亚胺纤维未实现完全酰亚胺化。胡建聪等<sup>[19]</sup>以 N-N-二甲基乙酰胺(DMAc)为溶剂,同样以 PMDA 和 ODA 为单体,采用两步法制备聚酰亚胺无纺布,得到了相同结果。此方法虽然能制得力学性能较好的聚酰亚胺纤维,但纤维热酰亚胺化过程中会释放出水分子,进而产生纤维微孔<sup>[20]</sup>等问题。另一种方案一步法是指直接采用可溶聚酰亚胺溶液进行静电纺丝,该工艺相对于两步法工艺具有以下优点:第一,无须再对纤维进行酰亚胺化处理,可有效地避免纤维微孔产生,并进一步提高了聚酰亚胺纤维的力学性能;第二,酰胺酸溶液在纺丝过程中容易发生降解反应,一步法可避免这一现象的发生;第三,通常两步法制备工艺后续需要对纤维进行热酰亚胺化处理,一步法无须再进行酰亚胺化处理,使工序更加简化。基于以上优点,本工作将采用一步法工艺制备热塑性聚酰亚胺无纺布。

本工作通过静电纺丝工艺,采用线性聚酰亚胺的

DMAc 溶液作为纺丝溶液制备了聚酰亚胺超细纤维,并系统地探讨了溶液浓度、纺丝电压和纺丝液流速对纤维形貌的影响,为 LPI 超细纤维无纺布的连续化制备技术提供了参考。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验原料

可溶性热塑性的线性聚酰亚胺,LPI-A,自制;N-N-二甲基乙酰胺(DMAc),分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 纺丝液的制备及其黏度测试

将一定量的 LPI-A 粉体置于烧杯中,按照溶液浓度需要加入一定量的 DMAc 溶剂,并采用磁力搅拌器室温下搅拌直至粉体完全溶解。配制的溶液浓度分别为 20% (质量分数,下同), 22%, 24%, 26%, 28% 和 30%。采用 DV-III Ultra 旋转黏度仪对不同浓度纺丝溶液的黏度进行测试,测试条件为 30℃。

### 1.3 聚酰亚胺超细纤维无纺布的制备

采用北京富友马公司研制的高压静电纺丝机,以铝箔为接收装置,通过改变电纺电压和纺丝速率等参数以获得具有良好形貌的纤维膜。

### 1.4 纤维微观形貌表征

采用了 S-4800 型高分辨场发射扫描电镜对不同条件下聚酰亚胺纤维的结构与形貌进行表征。

## 2 结果和讨论

静电纺丝过程和制备得到的无纺布的形貌特征受众多因素影响。本工作主要从溶液浓度、纺丝电压、纺丝液流速等方面探究其对纤维直径和形貌的影响。

### 2.1 纺丝溶液浓度对纤维直径和形貌的影响

溶液浓度是高压静电纺丝的一个重要工艺参数,其直接影响着无纺布的形貌特征和最终性能。图 1 为不同浓度的 LPI-A 溶液外观图,图中可见,纺丝溶液



20% 22% 24% 26% 28% 30%

图 1 不同浓度的 LPI-A 溶液外观

Fig. 1 Appearance of different concentrations of LPI-A solution

呈棕红色,其颜色随着浓度上升而逐渐加深。图 2 为温度 30℃下不同浓度的 LPI-A 溶液黏度曲线,纺丝溶液浓度为 20%时,其黏度为 5.549Pa·s,而随着溶液浓度增大,溶液黏度呈指数模式上升,当溶液浓度为 30%时,其黏度增加至 162.565Pa·s,为溶液浓度 20%时的 29 倍。

图 3 为在温度 30℃,电压 20kV,流速 1.2mL/h,接收距离 25cm 条件下,不同纺丝溶液浓度下的纤维形貌。图 3(a)中可见,溶液浓度为 22%时,纤维的表面粗糙,并有少量较大珠状物存在,这是由于纺丝溶液黏度较低,纺丝过程中有液滴喷出,在无纺布中形成纺锤状节点。随着溶液浓度升至 24%(图 3(b))时,纤维中的纺锤状节点的数量减少,其尺寸也有所减小。当溶液浓度进一步提升至 26%(图 3(c))时,纤维形貌明显改善,不再出现明显的纺锤状节点。当溶液浓度继续增加到 28%(图 3(d))时,纤维表面光滑,纤维直径

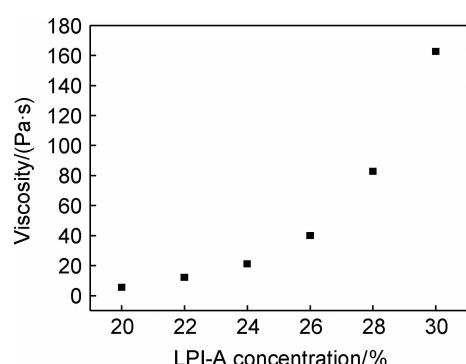


图 2 不同浓度的 LPI-A 溶液黏度图

Fig. 2 Different concentrations of LPI-A solution viscosity diagram

明显增大,纤维中同样未出现明显的纺锤状节点。当纺丝溶液浓度达到 30%(图 3(e)所示)时,纤维出现部分粘连,纤维直径显著增大且分布不均匀。

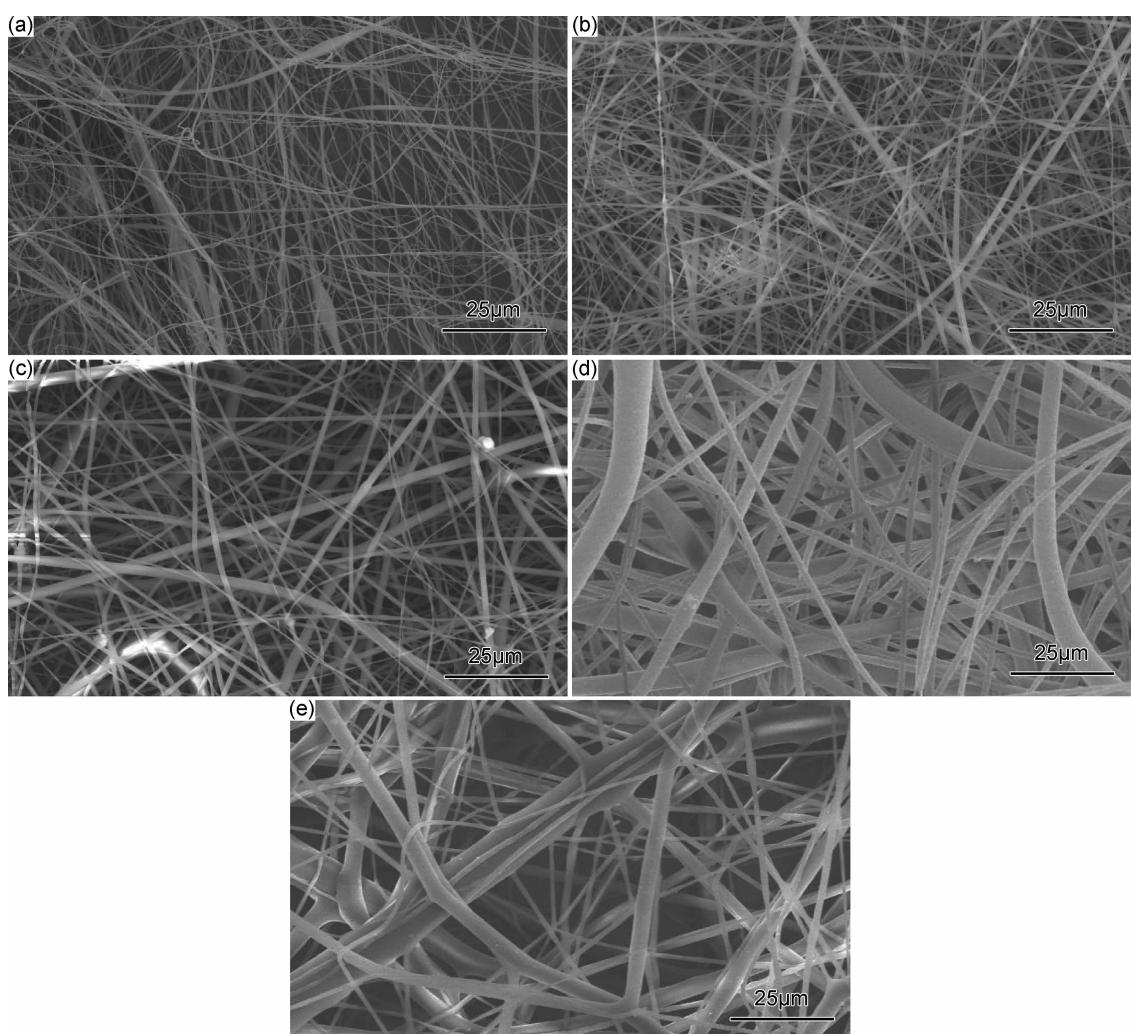


图 3 不同 LPI-A 浓度下纤维的形貌

(a) 22% LPI-A; (b) 24% LPI-A; (c) 26% LPI-A; (d) 28% LPI-A; (e) 30% LPI-A

Fig. 3 Fiber morphologies under different LPI-A concentrations

(a) 22% LPI-A; (b) 24% LPI-A; (c) 26% LPI-A; (d) 28% LPI-A; (e) 30% LPI-A

图 4 为不同纺丝溶液浓度下纤维的直径分布,图 5 为纤维平均直径与纺丝溶液浓度的关系曲线。可以看出,随着浓度从 22% 增加到 30%,纤维的直径分布逐渐变宽,平均直径总体呈现逐渐增大的趋势。其中纺丝溶液浓度为 22%,24% 与 26% 得到的平均纤维直径在 0.36~0.49 μm 之间,随浓度上升纤维直径呈逐渐增大的趋势,但当纺丝溶液浓度达到 28% 和 30% 时,纤维直径急剧上升至 1.23 μm 与 1.47 μm。这是由于浓度为 22% 至 26% 时,浓度较低,黏度较低,表面张

力、黏应力较低,溶液射流在静电场中受到的拉伸力远大于其表面张力和黏应力,可以分裂成更多更细的射流,致使纤维直径较小。但随着溶液浓度增加到 28% 时,溶液黏度急剧增大,溶液射流所受的拉伸力和表面张力、黏应力达到临界平衡,从而导致纤维直径急剧增大,但其直径分布相对均一。当浓度达到 30% 时,溶液黏度继续增大,导致溶液射流分裂产生更多更细的射流变得困难,使得纤维直径进一步增大,且随着黏度上升,纤维较难被牵引拉伸,射流不稳定,导致纤维

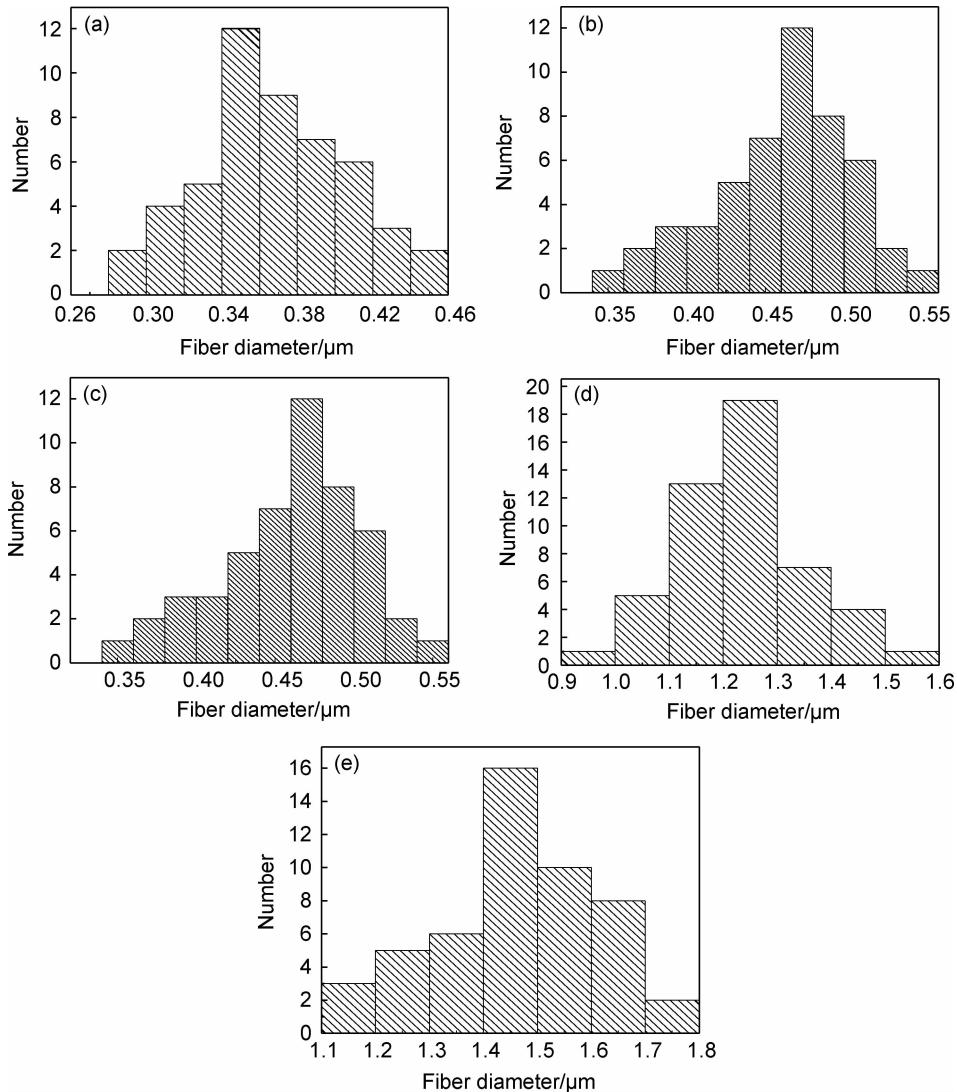


图 4 不同 LPI-A 浓度下纤维的直径分布

(a) 22% LPI-A; (b) 24% LPI-A; (c) 26% LPI-A; (d) 28% LPI-A; (e) 30% LPI-A

Fig. 4 Fiber diameter distribution under different LPI-A concentrations

(a) 22% LPI-A; (b) 24% LPI-A; (c) 26% LPI-A; (d) 28% LPI-A; (e) 30% LPI-A

直径分散性较大。

## 2.2 电压对 PI 纤维形貌和直径的影响

纺丝电压的强弱决定了溶液射流在静电场中所受的电场力的大小,会影响到纤维是否被充分拉伸取向,

从而导致纤维形貌和直径的变化,是静电纺丝过程另一个关键影响因素。图 6 和图 7 为在温度 30℃、纺丝溶液浓度 28%、流速 1.2 mL/h、接收距离 25 cm 条件下,不同纺丝电压制备的纤维形貌和直径分布情况,

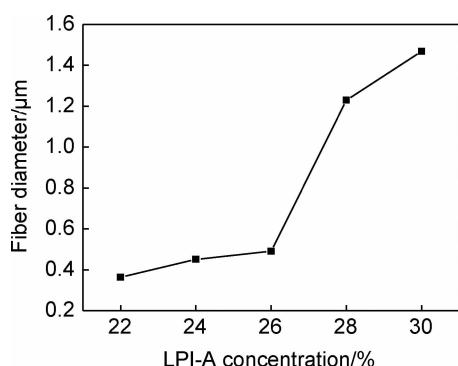


图 5 LPI-A 纤维平均直径与浓度的关系

Fig. 5 Relationship between average diameter of LPI-A fiber and concentration

图 8 为静电纺丝纤维平均直径与纺丝电压的关系曲线。可以看出,随着纺丝电压的升高,纤维直径在  $1.2\mu\text{m}$  左右,纤维的表面形貌和平均直径变化均不显著。可能原因是聚酰亚胺分子链中存在苯环结构,具有较大的刚性,溶液黏度大,由电荷密度增加而产生的静电斥力增大的效应,在该体系中不明显,所以纺丝电压的强弱对纤维表面形貌与纤维直径的影响不明显。但是在纺丝过程中,观察发现随着电压升高至  $17\text{kV}$  时,纺丝射流的鞭动增强,纤维容易向四周飘动,固定的收集装置不容易收集得到密度均匀的纤维膜。

### 2.3 纺丝液流速对 PI 纤维形貌和直径的影响

一般认为低的纺丝速率会产生直径比较细的纤

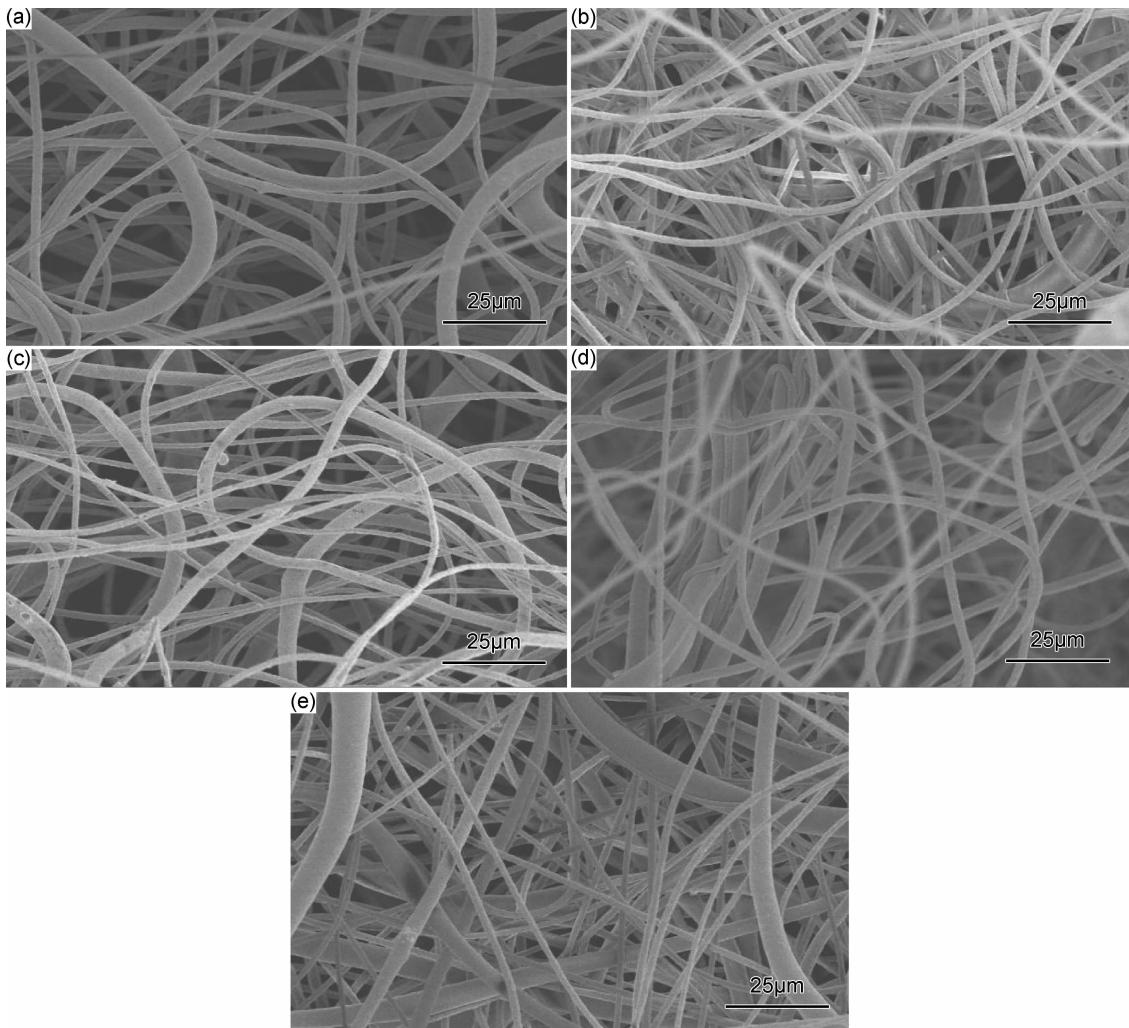


图 6 不同电压下 LPI-A 纤维的形貌

(a)  $13\text{kV}$ ; (b)  $15\text{kV}$ ; (c)  $17\text{kV}$ ; (d)  $19\text{kV}$ ; (e)  $20\text{kV}$

Fig. 6 Morphologies of LPI-A fiber under different voltages

(a)  $13\text{kV}$ ; (b)  $15\text{kV}$ ; (c)  $17\text{kV}$ ; (d)  $19\text{kV}$ ; (e)  $20\text{kV}$

维,高的纺丝速率容易产生串珠<sup>[21]</sup>。静电纺丝过程中溶液的流量会影响到所制备的纤维的形貌与直径、无

纺布的制备速率以及无纺布的缺陷等,因此,还需要研究纺丝液流速对静电纺丝工艺的影响。图 9 和图 10

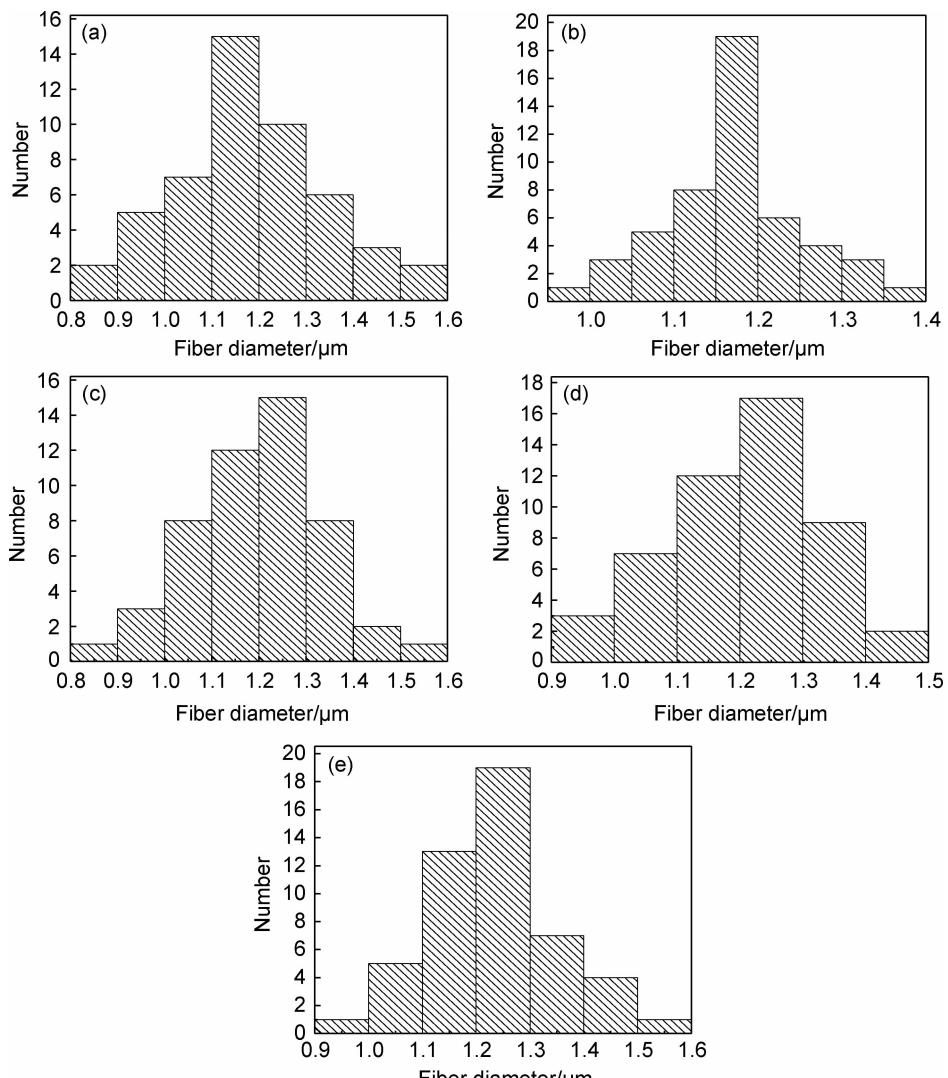


图 7 不同电压下 LPI-A 纤维的直径分布  
 (a)13kV;(b)15kV;(c)17kV;(d)19kV;(e)20kV  
 Fig. 7 Diameter distribution of LPI-A fiber under different voltages  
 (a)13kV;(b)15kV;(c)17kV;(d)19kV;(e)20kV

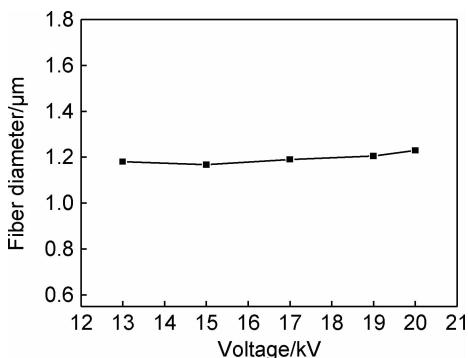


图 8 LPI-A 纤维平均直径与电压的关系  
 Fig. 8 Relationship between average diameter of LPI-A fiber and voltage

为在温度 30℃, 浓度 28%, 电压 15kV, 接收距离 25cm

条件下, 不同流速下纤维的形貌和直径分布, 图 11 为 LPI-A 纤维平均直径与流速的关系。从图 9 可以看出, 随着流速从 0.3mL/h 增加到 1.2mL/h, 纤维的形貌基本不变; 继续增加流速到 1.5mL/h 时, 纤维出现部分粘连; 当流速增加到 1.8mL/h 时, 纤维出现纺锤形柱状物。随着流速的升高, 纤维平均直径呈现逐渐增大的趋势, 可能是由于纺丝液流速的加快, 导致纺丝过程中溶液射流的电荷密度减小, 致使溶液射流在恒定电场力的作用下不能充分地裂分成更细小的射流, 因此, 纤维直径增大。

图 12 为在温度 30℃, 浓度 28%, 电压 15kV, 流速 1.2mL/h, 接收距离 25cm 条件下, 面密度为 5g/m<sup>2</sup> 的 LPI-A 纤维无纺布的照片。

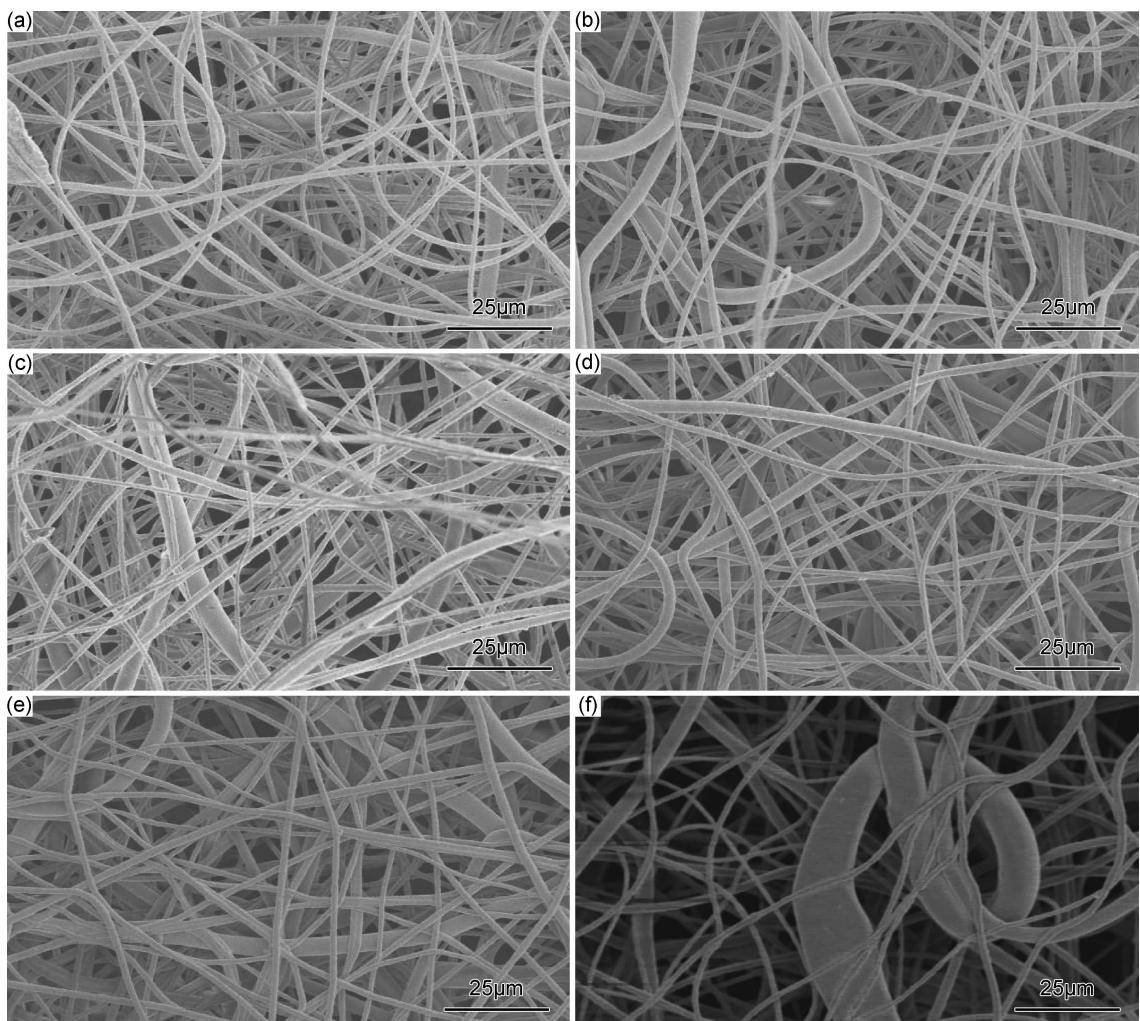


图9 不同流速下 LPI-A 纤维的形貌 (a)0.3mL/h;(b)0.6mL/h;(c)0.9mL/h;(d)1.2mL/h;(e)1.5mL/h;(f)1.8mL/h

Fig. 9 Morphologies of LPI-A fiber under different flow rates (a)0.3mL/h;(b)0.6mL/h;(c)0.9mL/h;(d)1.2mL/h;(e)1.5mL/h;(f)1.8mL/h

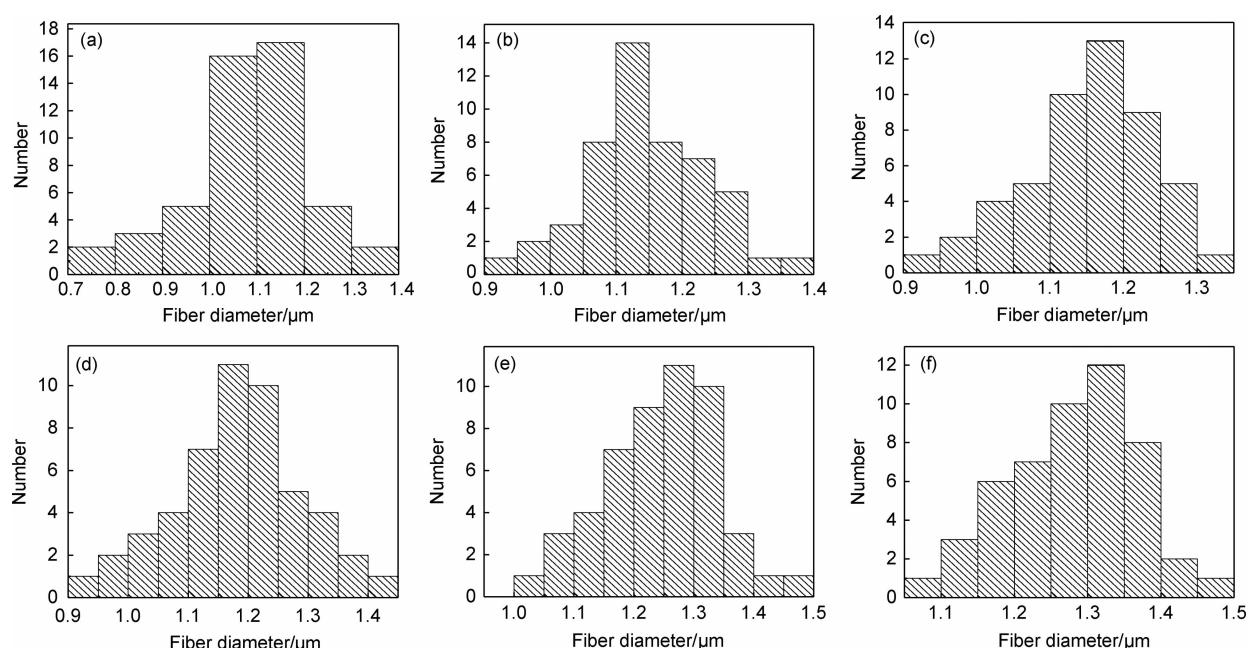


图10 不同流速下 LPI-A 纤维的直径分布 (a)0.3mL/h;(b)0.6mL/h;(c)0.9mL/h;(d)1.2mL/h;(e)1.5mL/h;(f)1.8mL/h

Fig. 10 Diameter distributions of LPI-A fiber under different flow rates

(a)0.3mL/h;(b)0.6mL/h;(c)0.9mL/h;(d)1.2mL/h;(e)1.5mL/h;(f)1.8mL/h

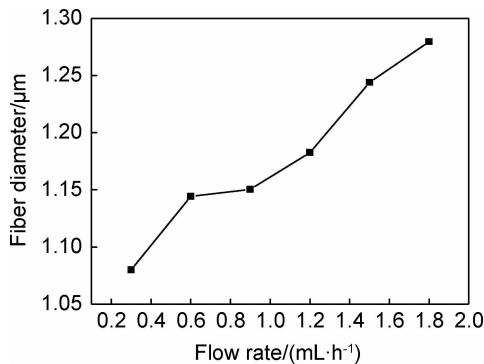


图 11 LPI-A 纤维平均直径与流速的关系

Fig. 11 Relationship between average diameter of LPI-A fiber and flow rate

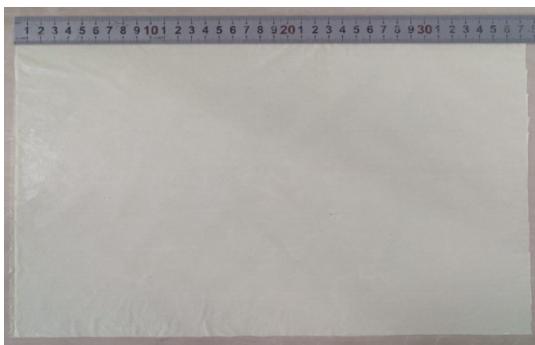


图 12 LPI-A 纤维无纺布照片

Fig. 12 Photo of fiber non-woven of LPI-A

### 3 结论

(1) 随着浓度从 22% 增加到 30%，平均直径显著增大，同时直径分布逐渐变宽，并且在纺丝溶液较低时，有纺锤状纤维存在，随着溶液浓度上升，纺锤状纤维消失，随浓度继续上升，纤维开始产生粘连。

(2) 纺丝电压的改变对纤维的形貌和平均直径变化不显著；随着流速增加，纤维平均直径随之增大，当流速大于 1.5mL/h 时，开始出现纤维粘连，大于 1.8mL/h 时，出现纺锤状纤维。

(3) 通过优化工艺条件，在 LPI 浓度为 28%，电压 15kV，流速 1.2mL/h，温度 30℃，接收距离为 25cm 条件下，制备了平均直径为 1.18μm 的纤维。

### 参考文献

- [1] 李山山. 静电纺聚酰亚胺纤维的制备及结构性能的研究[D]. 上海:东华大学,2010.
- LI S S. Study on preparation, structure and property of electro-spun polyimide fibers[D]. Shanghai, Donghua University, 2010.
- [2] 王云飞, 张朋, 刘刚, 等. 航空发动机用聚酰亚胺树脂基复合材料衬套研究进展[J]. 材料工程, 2016, 44(9): 121-128.
- WANG Y F, ZHANG P, LIU G, et al. Progress in research on

polyimide composite bushings for aeroengine[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(9): 121-128.

- [3] 刘含洋, 赵伟栋, 潘玲英, 等. 结构、耐热、透波功能一体化石英/聚酰亚胺研究[J]. 航空材料学报, 2015, 35(4): 34-38.
- LIU H Y, ZHAO W D, PAN L Y, et al. Study on structure, heat resistance property and electromagnetic property of quartz fiber reinforced polyimide composite[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(4): 34-38.
- [4] 龙娇秀. 静电纺丝法制备聚酰亚胺及聚酰亚胺-钯复合纳米纤维膜[D]. 北京:北京化工大学,2013.
- LONG J X. The preparation of polyimide and polyimide/mental nanofiber via electrospinning[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [5] SELL S A, MCCLURE M J, GARG K, et al. Electrospinning of collagen/biopolymers for regenerative medicine and cardiovascular tissue engineering[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2009, 61(12): 1007-1019.
- [6] WANG N, WANG X F, DING B, et al. Tunable fabrication of three-dimensional polyamide-66 nano-fiber/nets for high efficiency fine particulate filtration[J]. Chemistry of Materials, 2012, 22: 1445-1452.
- [7] AHN Y C, PARK S K, KIM G T, et al. Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers[J]. Current Applied Physics, 2006, 6: 1030-1035.
- [8] BARHATE R S, RAMAKRISHNA S. Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials[J]. Journal of Membrane Science, 2007, 296: 1-8.
- [9] HAJRA M, MEHTA K, CHASE G. Effects of humidity, temperature, and nanofibers on drop coalescence in glass fiber media[J]. Separation and Purification Technology, 2003, 30: 79-88.
- [10] TSUKRUK V V, RENEKER D H, BENG H, et al. Atomic force microscopy of ordered monolayer films from discotic liquid crystals [J]. Langmuir, 1993, 9(8): 2141-2144.
- [11] DE MARCO C, MELE E, CAMPOSEO A, et al. Organic light-emitting nanofibers by solvent-resistant nanofluidics [J]. Advanced Materials, 2008, 20: 4158-4162.
- [12] CHUANGCHOTE S, SAGAWA T, YOSHIKAWA S. Ultrafine electrospun conducting polymer blend fibers and their photoluminescence properties[J]. Macromolecular Symposia, 2008, 264: 80-89.
- [13] WANG Y Q, PARK J S, LEECH J P, et al. Poly(aryleneethylene)s with orange, yellow, green, and blue solid-state fluorescence[J]. Macromolecules, 2007, 40(6): 1843-1850.
- [14] ZHANG H, SONG H W, DONG B, et al. Electrospinning preparation and luminescence properties of europium complex/polymer composite fibers[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(25): 9155-9162.
- [15] KHIL M S, CHA D I, KIM H Y, et al. Electrosprun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing [J]. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 2003, 67(2): 675-679.
- [16] 张福婷, 周金龙, 黄海瑞, 等. 静电纺丝法制备抑菌性聚酰亚胺纳米纤维[J]. 高等学校化学学报, 2016, 37(4): 781-785.

- ZHANG F T, ZHOU J L, HUANG H R, et al. Preparation of polyimide nanofiber with antimicrobial activity by electrospinning [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2016, 37(4): 781-785.
- [17] LIU J Y, MIN H, CHEN J Y, et al. Preparation of the ultra-low dielectric constant polyimide fiber membranes enabled by electrospinning [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2007, 28: 215-219.
- [18] 李学佳, 王欣, 魏取福. 静电纺丝法制备聚酰亚胺纳米纤维及其表征 [J]. 化工新型材料, 2014(5): 81-82.
- LI X J, WANG X, WEI Q F. Preparation and characterization of polyimide nanofibers by electrospinning [J]. New Chemical Materials, 2014(5): 81-82.
- [19] 胡建聪. 高压静电纺丝法制备聚酰亚胺超细纤维无纺布膜 [J]. 弹性体, 2009, 19(1): 35-37.
- HU J C. Characterization of polyimide ultra-fine non-woven fabric-films prepared by electro-spinning [J]. China Elastomers, 2009, 19(1): 35-37.
- [20] 朱璇, 钱明球, 虞鑫海, 等. 聚酰亚胺及其纤维的研究与开发进展 (Ⅱ) [J]. 合成技术及应用, 2013, 28(2): 24-29.
- ZHU X, QIAN M Q, YU X H, et al. The research and development progress in polyimides and its fiber [J]. Synthetic Technology and Application, 2013, 28(2): 24-29.
- [21] PHAM Q P, SHARMA U, MIKOS A G. Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue engineering applications: a review [J]. Tissue Engineering, 2006, 12(5): 1197-1211.

收稿日期: 2016-06-22; 修订日期: 2017-09-25

通讯作者: 张天骄(1972—), 女, 副教授, 博士, 主要从事高性能纤维的研究, 联系地址: 北京服装学院材料楼 415(100029), E-mail: clyztj@bjft.edu.cn

(本文责编:解 宏)