

# 电压和辅助气流对狭缝式熔体微分电纺的影响

杨涛, 何雪涛, 丁玉梅, 谭晶, 杨卫民, 李好义

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 采用自主设计的狭缝式熔体微分静电纺丝装置, 使用聚丙烯(PP)材料进行熔体静电纺丝, 研究了电压对射流根数的影响, 同时探究了辅助气流对纤维直径的细化作用。试验结果表明: 当挤出机端温度为 200℃, 流道温度为 230℃, 纺丝距离为 90 mm, 流量大小为 0.8 g/min 时, 射流根数随着电压增大而增加; 当电压为 50 kV 时, 射流根数达到最大, 为 24 根。纤维直径随辅助气流速度的增大而减小; 当电压为 50 kV, 辅助气流速度为 8 m/s 时, 纤维平均直径可达到 1.55 μm。

**关键词:** 静电纺丝; 气流; 射流; 直径; 聚丙烯

**中图分类号:** TQ340.64

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2044(2018)03-0051-03

## Effect of voltage and auxiliary air flow on slit melt differential electrospinning

YANG Tao, HE Xuetao, DING Yumei, TAN Jing, YANG Weimin, LI Haoyi

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

**Abstract:** Based on self-made slit melt differential electrospinning device, polypropylene (PP) melt is electrospun into fibers, the effect of voltage on the number of jet roots is studied, and the refining effect of auxiliary air flow on fiber diameter is also investigated. The results show that when the extruder temperature is 200℃, the channel temperature is 230℃, the spinning distance is 90mm and the flow rate is 0.8 g/min, the jet root number increases with the increase of voltage, and when the voltage is 50 kV, the maximum number of jet roots is 24. The fiber diameter decreases with the increase of the airflow velocity, when the voltage is 50 kV and the auxiliary airflow velocity is 8 m/s, the average diameter of the fiber is 1.55 μm.

**Key words:** electrostatic spinning; air-flow; filament band; diameter; polypropylene

DOI:10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2018.03.017

狭义的聚合物纳米纤维是指直径为 1~100 nm, 长度比大于 1 000 的聚合物纳米材料<sup>[1]</sup>, 纳米纤维由于具有比表面积大、孔隙率高等优点, 在高效过滤<sup>[2-3]</sup>、传感器<sup>[4]</sup>、生物医药<sup>[5]</sup>等领域有着广泛应用。通常所讲的纳米纤维制备工艺是指能够制备纤维平均直径在 1 μm 以内的工艺方法<sup>[6]</sup>。静电纺丝是目前制备纳米纤维的高效方法之一, 可分为溶液电纺和熔体电纺, 其中熔体电纺不使用有毒溶剂, 是一种绿色环保的工艺路线, 其原理是聚合物熔体在高压静电场的作用下克服表面张力, 形成射流并固化成丝。

熔体电纺成为当前实现批量化生产纳米纤维的研究热点<sup>[7]</sup>。传统的熔体电纺装置大多为毛细管式, 只能产生单根射流, 导致纺丝效率较低。目前, 提高纺丝效率的研究重点是使用阵列毛细管或调整无针纺丝系统的射流间距。德国亚琛工业大学报道了一种通过流道分配到 64 个阵列的纺丝针头上的产量拓展研究<sup>[8]</sup>, 但针头易堵塞, 而且由于针头之间的静电叠加、干扰等

作用, 使得针头之间感应场强不均衡, 导致分布在内部的针头场强较弱, 影响纤维产品质量; Shimada 等人<sup>[9]</sup>利用线性激光器对厚度为 0.5 mm 和 1 mm 的 EVOH 片材进行融化并静电纺丝, 泰勒锥间距在 5 mm 左右, 但是激光器的高成本和安全隐患可能使其产业化受限; 澳大利亚的 Fang 等人提出了盘式熔体静电纺丝装置, 提高了纺丝效率, 但是该装置对熔体粘度要求高, 尚未实现批量化稳定可控生产; 捷克利贝雷茨科技大学的 Komarek 等人提出了一种狭缝式的纺丝装置, 试验观察发现聚丙烯射流间距为 6.3 mm, 但没有对纤维直径进行研究。

为了实现纳米纤维的批量化生产, 本文基于狭缝式纺丝装置的机理, 自主设计了一种狭缝式熔体微分静电纺丝装置, 在自由表面形成多射流, 大大提高了纺丝效率, 采用树杈形流道设计, 保证了滴料的均匀性, 均布的射流也提高了收集得到的纤维的面密度; 采用锯齿引导, 锯齿尖端产生的感应电场强度有利于泰勒锥的形成与均布; 狭缝出口两侧设有气流辅助型腔, 辅助气流有利于纤维的细化以及对纤维的下落路径进行约束。本文采用聚丙烯材料进行静电纺丝试验, 探究电压大小对射流根数的影响, 同时探究辅助气流对纤维直径的细化作用。

**收稿日期:** 2017-06-29

**基金项目:** 北京市自然科学基金资助项目(2141002); 国家重点研发计划(2016YFB0302000); 国家自然科学基金(51603009)

**作者简介:** 杨涛(1992-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事熔体微分静电纺丝工艺的研究。

**通信作者:** 李好义。E-mail: lihaoyi-hoy@163.com。

## 1 试验部分

### 1.1 原料

PP6520, 流动指数 2 000 min, 上海伊士通新材料发展有限公司。

### 1.2 主要仪器

采用自制狭缝式熔体微分静电纺丝装置见图 1。

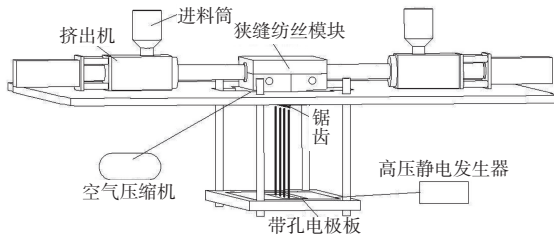


图1 狭缝式熔体微分静电纺装置

如图 1 所示, 装置主要由单螺杆挤出机、进料筒、狭缝纺丝模块、锯齿、空气压缩机、带孔电极板、高压静电发生器等组成。狭缝纺丝装置两边对称, 可单挤出供料用于一种材料的纺丝, 也可两边同时进料用于制备两种料共混纺丝而得的纤维。狭缝纺丝模块及气流管道设计见图 2。

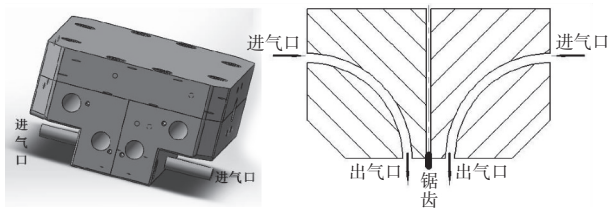


图2 狭缝纺丝模块及气流管道

如图 2 所示, 气流入口水平, 在狭缝出口两侧对称分布, 气流管道为圆弧形, 气流出口方向竖直。

### 1.3 PP 材料纺丝试验

采用自制的狭缝式熔体微分静电纺装置, 单挤出进料, 单电极进行纺丝, 设置挤出机端温度为 200℃, 流道温度为 230℃, 纺丝距离为 90 mm。将 PP 粉料从进料口加入挤出机塑化熔融, 控制料流量大小为 0.8 g/min, PP 熔体从狭缝出口流出经过锯齿, 在高压静电场的作用下克服表面张力形成射流, 然后固化成纤维; 将电压设为 50 kV, 在狭缝出口两侧通入辅助气流, 改变气流速度分别为 0、2、4、6、8 m/s, 每个试样纺丝 5 min, 制备试样 1#~5#。

### 1.4 性能测试

改变纺丝电压分别为 35、40、45、50 kV, 采用佳能 DS126311 型单反相机拍摄纺丝射流照片。

采用 MITACHIS4700 型扫描电子显微镜 (SEM) 对

PP 纤维形貌和直径进行观察, 并用 Image J 2X 软件对试样 1#~5# 的直径分别进行测算。

## 2 结果与分析

### 2.1 射流根数与纺丝电压的关系

不同纺丝电压下的射流照片见图 3。

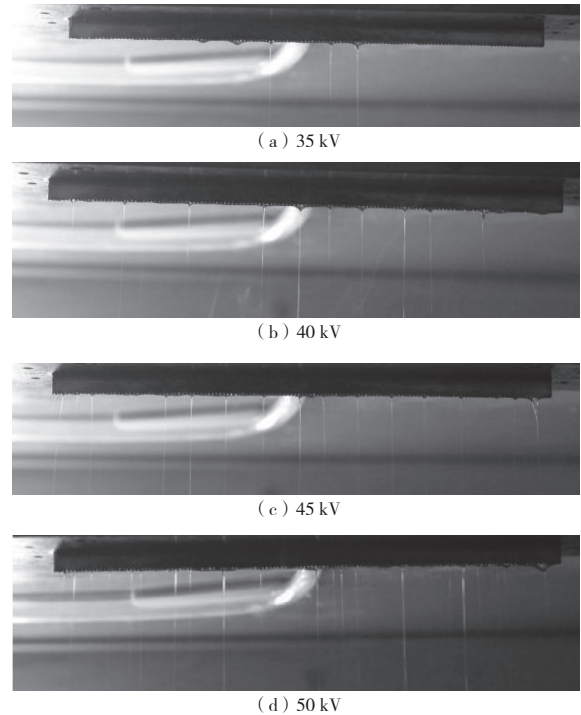


图3 不同纺丝电压下的射流根数

如图 3 所示, 当纺丝电压为 35 kV 时, 锯齿端只有 3 根射流; 随着纺丝电压的增大, 射流根数明显增多; 当电压分别为 40、45、50 kV 时, 射流根数为 10、17、24 根, 可见纺丝电压对射流根数有显著的影响。试验过程中, 当电压超过 50 kV, 会出现击穿现象, 所以当达到阈值电压 50 kV 时, 射流根数最多为 24 根。电压的升高能加速射流自组织过程, 使得射流迅速达到平衡状态, 并且电压升高以后, 熔体为了带走更多的感应电荷, 在使射流加速的同时, 产生更多的射流来抵消感应电荷的增多, 从而达到另一种平衡。所以, 在不击穿的前提下, 提高纺丝电压以提高尖端感应电场强度能产生更多的射流, 从而提高了单位时间内纤维的产量和纺丝效率。

### 2.2 辅助气流速度对纤维直径的影响

不同气流速度下纤维的 SEM 照片见图 4。可知, 当不加辅助气流时, 纤维的平均直径为 8.1 μm; 加上辅助气流后, 随着气流速度的增大, 纤维直径逐渐减小; 当气流速度分别为 2、4、6、8 m/s 时, 纤维直径分别

为 5.32、3.10、2.81、1.55  $\mu\text{m}$ 。可以看出,辅助气流对纤维细化效果明显。如果将气流速度从 8 m/s 继续增大,会加快 PP 熔体在锯齿端的冷却,使 PP 熔体直接在锯齿端固化,不再产生射流,影响了纤维的制备。在静电以及辅助气流的双重作用下,增加辅助气流可以使纤维细化。这保证了电场对纤维的拉伸作用,又产生了气流对纤维的剪切拉伸作用,在纤维下落的过程中,电场力和剪切力共同作用。同时,由于存在气流对纤维的鞭动效应,纤维得以充分拉伸细化,因此静电纺丝加辅助气流是制备超细纤维的一种有效的工艺方法。

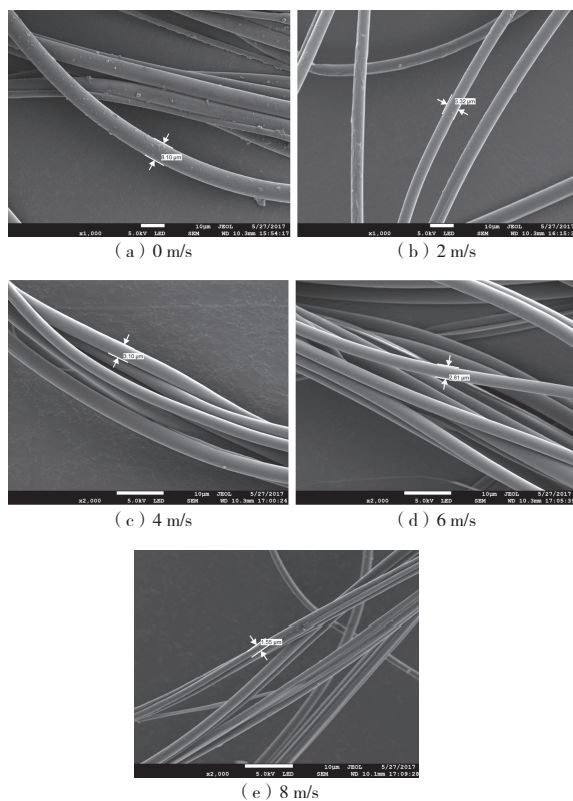


图4 不同气流速度下纤维的SEM照片

### 3 结语

使用自制的狭缝式熔体微分电纺装置进行纺丝,

(上接第44页)

#### 参考文献:

- [1] 张战旗,苏红升,齐元章,等.津田驹喷气织机氨纶品种纬停调整方法的研究[J].纺织导报,2014(7):100-102.
- [2] 刘保国,赵西涛,张海燕,等.喷气织机纬停原因与解决方法[J].纺织器材,2013,40(6):27-28.
- [3] 窆玉坤.喷气织机纬停原因分析[J].上海纺织科技,2007,35(11):43-44.
- [4] 秦胜干.JAT600A型喷气织机纬停原因分析与处理[J].棉纺织技术,2005,33(9):58-59.

当纺丝参数为挤出机端温度 200 $^{\circ}\text{C}$ , 流道温度 230 $^{\circ}\text{C}$ , 纺丝距离 90 mm, PP 料流量 0.8 g/min 时,射流根数随着纺丝电压的增大而明显增多;纺丝电压为 50 kV 时,射流根数达到最多,为 24 根,增大电压使射流根数增多,从而提高了单位时间内纤维的产量,进而提高了纺丝效率。此时,纤维直径随着辅助气流速度的增大而减小。当气流速度从 0 m/s 增大到 8 m/s 时,纤维直径从 8.10  $\mu\text{m}$  降至 1.55  $\mu\text{m}$ ,辅助气流的加入对纤维的细化作用明显。



#### 参考文献:

- [1] MACDIARMID A G, JONES W E, NORRIS I D, et al. Electrostatically-generated nanofibers of electronic polymers [J]. Synthetic Metals, 2001, 119(1-3):27-30.
- [2] SUNDARRAJAN S, TAN K L, LIM S H, et al. Electrospun nanofibers for air filtration applications [J]. Procedia Engineering, 2014(75):159-163.
- [3] KAUR S, RANA D, MATSUURA T, et al. Preparation and characterization of surface modified electrospun membranes for higher filtration flux [J]. Journal of Membrane Science, 2012(390):235-242.
- [4] DING B, WANG M, WANG X, et al. Electrospun nanomaterials for ultrasensitive sensors [J]. Materials Today, 2010, 13(11):16-27.
- [5] DALTON P D, VAQUETTE C, FARRUGIA B L, et al. Electrospinning and additive manufacturing: converging technologies [J]. Biomaterials Science, 2013, 1(2):171-185.
- [6] 刘琼珍,周舟,李沐芳,等.热塑性纳米纤维的制备及功能化[J].中国材料进展,2014(8):3.
- [7] CHU B, HSIAO B S, FANG D. Apparatus and methods for electrospinning polymeric fibers and membranes; U. S. Patent 6, 713, 011 [P]. 2004-03-30.
- [8] HUTMACHER D W, DALTON P D. Melt electrospinning [J]. Chemistry-An Asian Journal, 2011, 6(1):44-56.
- [9] SHIMADA N, TSUTSUMI H, NAKANE K, et al. Poly (ethylene-co-vinyl alcohol) and Nylon 6/12 nanofibers produced by melt electrospinning system equipped with a line-like laser beam melting device [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116(5):2998-3004.

- [5] 李洪盛,王慎,陈克炎,等.特细号高密家纺面料的试织[J].棉纺织技术,2015,43(12):65-67.
- [6] 马顺彬,黄雨薇,宋文波,等.涤棉/棉高支低密轻薄型交织物开发[J].棉纺织技术,2014(5):25-27.
- [7] 黄峰,兰恭武,李育红,等.细号高密涤棉横条织物的生产实践[J].棉纺织技术,2011,39(12):62-64.
- [8] 周红梅.棉锦交织双层布生产实践[J].纺织导报,2013(3):60-61.