

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.02.012

熔体静电纺丝的电场分布及其对 PET 纤维成形的影响^{*}

王宏,徐阳,宋明玉

(江南大学生态纺织教育部重点实验室,江苏无锡 214122)

摘要:借助 ANSYS 软件模拟聚对苯二甲酸乙二酯 (PET) 熔体静电纺丝在不同参数 (纺丝电压、接收距离、接收板面积) 条件下的电场分布,探讨电场分布对熔体静电纺丝 PET 射流运动与纤维形貌的影响。结果表明,在单喷嘴-平板结构模型中,提高纺丝电压将增强整体空间电场强度,使电场对 PET 熔体射流的控制力加强, PET 熔体射流的摆动半径减小,当纺丝电压由 24 kV 升高到 30 kV 时,摆动半径由 11.7 mm 减至 9.9 mm,而摆动角增大,由 10.1° 增至 11.2°, PET 纤维直径显著减小,由 3.275 μm 减至 2.202 μm ;接收距离的改变对接收板表面电场的影响显著,随着接收距离的增加, PET 射流的直线段比例明显下降,当接收距离由 50 mm 增加至 90 mm 时, PET 熔体射流的直线段比例由 68.0% 减至 54.0%, PET 纤维直径在适中接收距离 (70 mm) 下表现较细,可达 2.184 μm ;接收板面积的减小加强了对 PET 熔体射流的控制,使 PET 熔体射流直线段比例显著增加,当接收板面积由 15 cm $\times$ 15 cm 减小至 10 cm $\times$ 10 cm 时, PET 熔体射流直线段比例由 68.0% 增加至 82.6%,摆动半径减小,由 9.9 mm 减至 4.2 mm,沉积角因 PET 熔体射流贴服接收板而减小,由 12.2° 减至 9.1°, PET 纤维直径稍有增加,由 2.202 μm 增加至 2.537 μm 。

关键词:熔体静电纺丝;聚对苯二甲酸乙二酯纤维;电场分布;射流运动;纤维形貌

中图分类号: TQ340.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)02-0061-07

Electric Field Distribution of Melt-Electrospinning and Its Influence on PET Fiber Formation

Wang Hong, Xu Yang, Song Mingyu

(Key Laboratory of Eco-Textiles Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract : Electric field distributions under different parameters conditions (spinning voltage, accepted distance and collector area) in melt-electrospinning process were simulated by ANSYS software, the effects of electric field distribution on poly(ethylene terephthalate) (PET) jet motion and fiber morphologies were investigated. The results show that in the single nozzle-plate structure model, when improving spinning voltage, the whole space electric field intensities becomes enhanced and their control on jet gets enlarged as well. When the spinning voltage increases from 24 kV to 30 kV, the PET melt jet whipping radius decreases from 11.7 mm to 9.9 mm, while whipping angle increases from 10.1° to 11.2°, and the PET fiber diameter decreases significantly from 3.275 μm to 2.202 μm . The changes of accepted distance apparently affects the electric field on the collector surface, increasing accepted distance would decrease the PET melt jet straight segment proportion. When the accepted distance increases from 50 mm to 90 mm, the PET melt jet straight segment proportion decreases from 68.0% to 54.0%, and the fiber shows a small diameter (2.184 μm) with a moderate accepted distance (70 mm). Decreasing the collector area could enhance control of the PET melt jet motion, increase the PET melt jet straight segment proportion. When collector area decreases from 15 cm $\times$ 15 cm to 10 cm $\times$ 10 cm, the PET melt jet straight segment proportion increases from 68.0 % to 82.6 %, and whipping radius decreases from 9.9 mm to 4.2 mm, depositing angle decreases from 12.2° to 9.1° with the jet closed to collector, while PET fiber diameter increases slightly from 2.202 μm to 2.537 μm .

Keywords : melt-electrospinning ; poly(ethylene terephthalate) fiber ; electric field distribution ; jet motion ; fiber morphology

静电纺丝作为一种可连续制备微纳米纤维的技术,具有可纺聚合物品种多、原料用量少、易于操作等优点,依据纺丝聚合物的状态,静电纺丝可分为溶液静电纺丝和熔体静电纺丝^[1]。相比溶液静电纺丝,熔体静电纺丝因不使用溶剂,在过滤、生物医药等领域有着广阔的应用前景^[2]。

然而,在熔体静电纺丝过程中,较高的熔体黏度对其静电纺丝装置及加工提出了更高的要求^[3],

^{*} 国家高技术研究发展计划 (863) 资助项目 (2012AA030313),江苏省产学研联合创新资金前瞻性研究项目 (BY2014023-06)

联系人:徐阳,副教授,博士,主要从事功能纺织品的研究

收稿日期:2015-11-12

同时使得纤维在加工过程中的射流直线段比例大,所纺纤维较粗^[4]。因此,目前关于熔体静电纺丝的研究主要集中于改进静电纺丝装置与优化工艺^[5-6]、探讨纺丝机理^[7-8]、研究纤维膜结构^[9]以及尝试潜在应用^[10]等。射流运动与纤维成形是熔体静电纺丝工艺中聚合物熔体转化为微纳米纤维的重要过程之一,对所纺纤维、纤维膜的成形加工以及应用有着重要影响。E. Zhmayev 等^[7]根据能量公式、高斯定律和 Giesekus 模型仅为稳定段运动建立了模型并进行了验证;邓亮^[11]通过即时观测射流下落过程,较为系统地研究了熔体静电纺丝中物料、温度、电压和纺丝距离对纤维成形以及带电射流下落过程的影响,得到了聚丙烯熔体静电纺丝中纤维成形下落的一般规律和保持稳定射流的最优纺丝条件。Liu Yong^[8]利用耗散粒子动力学 (DPD) 方法模拟了熔体静电纺丝纤维的下落速度并研究了下落过程中纤维微观结构的变化。T. D. Brown 等^[12]通过调节接收速度,发现纤维射流可呈直线运动。Liu Zhaoxiang 等^[13]模拟分析了射流下落过程中分子链牵伸的“拔河效应”。上述这些研究虽有一定成果,但仍不够深入。电场作为静电纺纤维成形的主要受力场^[1-2],探讨电场大小及其分布对纤维成形的影响具有重要意义。因此,笔者以具有良好物理、力学性能的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 为原料^[14],采用有限元软件 ANSYS 对熔体静电纺丝的单喷嘴-平板结构的电场分布进行模拟,分析了主要工艺参数纺丝电压、接收距离、接收板面积对电场分布的影响,同时通过对 PET 熔体射流运动进行了表征,借助扫描电子显微镜 (SEM) 观察纤维表面形貌,从而探讨熔体静电纺丝电场分布对 PET 纤维成形的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PET 切片: 纤维级,熔点为 245℃,江苏仪征长江化纤有限公司。

1.2 主要仪器与设备

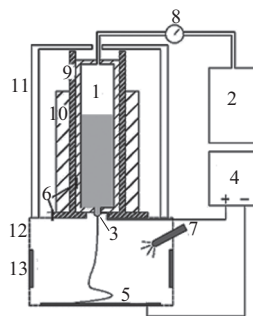
真空干燥箱: DZG-6050D 型,上海精宏实验仪器有限公司;

SEM: SU-1510 型,日本 Hitachi 公司;

三维动态分析显微镜: VW-6000 型,日本 Keyence 公司;

熔体静电纺丝装置: 熔体静电纺丝装置示意图如图 1 所示,自制。其纺丝过程为: 将聚合物加入金属料斗 1 中,经加热熔融后依靠自重和空气压缩

机 2 的喂料气压的作用喂给喷嘴 3,在与喷嘴 3 相连的高压电源装置 4 的作用下,聚合物熔体经拉伸成丝并在已接地的正方形接收板 5 上沉积。



1—金属料斗; 2—空气压缩机; 3—喷嘴; 4—高压电源装置;
5—正方形接收板; 6—温控装置; 7—聚光灯; 8—气压阀门;
9—电绝缘层; 10—加热线圈; 11—热绝缘体; 12—纺丝区; 13—加热板

图 1 熔体静电纺丝装置示意图

1.3 电场模拟

鉴于所用熔体静电纺丝实验装置具有高度轴对称性,采用 ANSYS 软件对纺丝所处电场进行二维平面模拟,建立有限元分析模型,如图 2 所示,主要包括金属喷嘴、铝质接收板和所处空气环境;坐标系原点 O 表示喷嘴正下方的接收板表面位置, X 轴为接收板所在水平方向, Y 轴为垂直于接收板的中心线方向。用 X 表示在水平方向距离纤维膜中心的距离,用 Y 表示接收板中心位置到喷头的距离。模拟过程中,接收板接地,空气电势为 0 kV,喷嘴电压设为所需的纺丝电压,接收板大小设为所需接收板面积,喷嘴与接收板间的垂直距离设为所需的纺丝距离。模拟过程的参数设置如表 1 所示。

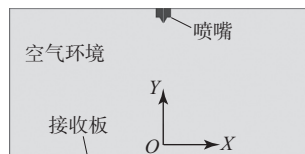


图 2 实验装置的 ANSYS 模型

表 1 电场模拟纺丝参数设置

编号	纺丝电压 / kV	接收距离 / mm	接收板面积 / (cm × cm)
1	24	50	15 × 15
2	27	50	15 × 15
3	30	50	15 × 15
4	30	70	15 × 15
5	30	90	15 × 15
6	30	50	12.5 × 12.5
7	30	50	10 × 10

1.4 PET 纤维的制备

结合表 1 电场模拟所用纺丝条件参数,制备 7 种相应参数条件下的 PET 纤维,其它固定参数为: 喷嘴直径为 0.4 mm,熔体温度为 255℃,环境温度

为 40℃, 喂料气压为 4 kPa, 纺丝时间为 10 min。

1.5 性能测试与表征

(1) PET 熔体的射流运动。

与溶液静电纺丝的射流拉伸成纤过程相比, 熔体静电纺丝的射流拉伸成纤过程表现出不同的运动特点。为探讨不同电场对 PET 熔体射流运动的影响, 实验中采用三维动态分析显微镜观察不同电场条件下的 PET 熔体射流运动情况, 如图 3a 所示, 图 3b 为 PET 熔体射流模型图, 由喷嘴至接收板的射流运动过程分为直线段运动 (AB 段) 和摆动段运动 (BC 段) 两个过程, AB 段为直线段运动长度, θ 表示射流的摆动角, 考虑 PET 熔体射流摆动沉积过程中的曲线运动, 以 β 表示沉积角, R 表示摆动半径。

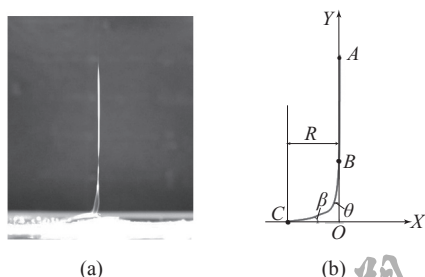


图 3 PET 熔体射流运动图
a—实物图; b—模型图

(2) PET 纤维形貌。

采用 SEM 观察 7 种不同条件下制备的 PET 纤维形貌, 并对每个试样随机选取 50 根纤维进行纤维直径统计。

2 结果与讨论

2.1 电场模拟分析

熔体静电纺丝利用高压电场对聚合物熔体进行拉伸成丝, 电场大小及其分布对纺丝纤维的成形有着重要影响, 其中纺丝电压施加方式及其大小、接收距离、接收板面积等是影响熔体静电纺丝电场的主要参数。笔者结合实验装置, 探讨纺丝电压、接收距离、接收板面积三个参数对空间电场分布的影响。

(1) 纺丝电压。

纺丝电压是激发射流并在电场中牵伸射流的主要因素。基于本实验熔体静电纺丝装置中纺丝喷嘴与平面接收板构成点面式结构, 当纺丝电压施加于纺丝喷嘴时, 在喷嘴尖端处的电荷集聚效应下, 激发聚合物熔滴形成射流。本模拟实验中纺丝电压取 24, 27, 30 kV, 接收距离为 50 mm, 铝质正方形平板接收板的面积为 15 cm × 15 cm, 纺丝电压对空间电场分布影响的模拟结果如图 4 所示。

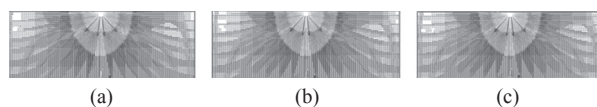


图 4 纺丝电压对空间电场分布的影响

由图 4 可以看出, 在点面式的喷嘴—平板熔体静电纺丝装置中, 电场分布明显不均匀, 强电场主要集中于喷嘴附近, 并在喷嘴尖端处达到最大值。当纺丝电压分别为 24, 27, 30 kV 时, 其电子云分布基本保持一致。

图 5 为不同纺丝电压下纺丝线所在 Y 轴方向上的电场强度分布。

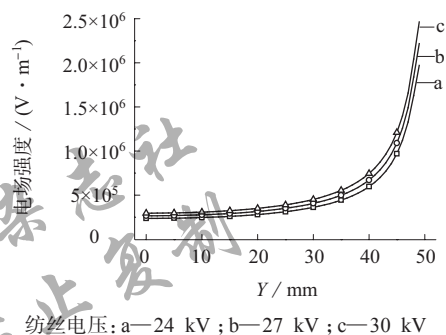


图 5 不同纺丝电压下纺丝线所在 Y 轴上的电场强度分布

由图 5 可以看出, 当 $0 < Y < 30$ mm 时, 电场强度逐渐增大, 几乎为线性增长, 且电场强度不足 4.0×10^5 V/m; 当 $30 \text{ mm} < Y < 50$ mm 时, 即接近喷嘴时, 电场强度呈指数型增长, 在喷嘴处约为 2.5×10^6 V/m, 并随着纺丝电压的增加, 在 Y 轴上所有位置的电场强度都得到增大。

图 6 为不同纺丝电压下接收板表面所在 X 轴上的电场强度分布。

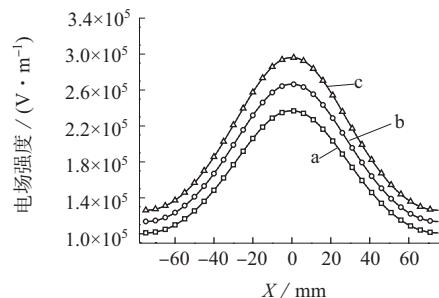


图 6 不同纺丝电压下接收板表面所在 X 轴上的电场强度分布

由图 6 可以看出, 由于纺丝装置为点面式结构, 在喷嘴正对的接收板中心处电场强度最大, 而距离接收板中心处越远, 电场强度越小; 随着纺丝电压的增加, 接收板表面所有位置的电场强度都全部增大。这说明提高纺丝电压将会增加所有位置的电场

强度,但纺丝电压对电场强度分布的影响不大。

(2) 接收距离。

接收距离作为静电纺丝的重要参数之一,在熔体静电纺丝中决定着熔体射流的牵伸距离,影响着纤维的射流运动与冷却时间。在熔体静电纺丝中,接收距离一般较小。在本模拟实验中,接收距离分别取 50, 70, 90 mm, 在方形接收板上施加 30 kV 的纺丝电压, 正方形接收板的面积为 15 cm × 15 cm。接收距离对空间电场分布的影响如图 7 所示。

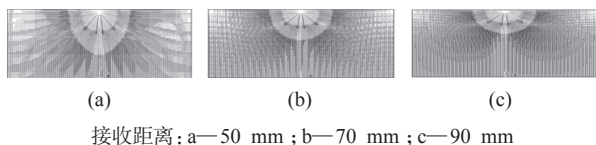
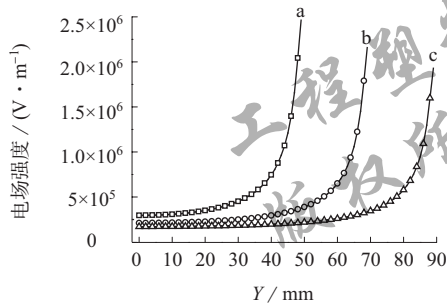


图 7 接收距离对空间电场分布的影响

从图 7 可以看出,从接收板到喷嘴的电场逐渐增强,在喷嘴处的增势变大;当接收距离较小时,强电场区域被拉长变尖。

图 8 为不同接收距离下纺丝线所在 Y 轴方向上的电场强度分布。

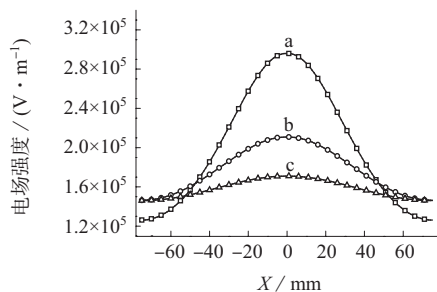


接收距离: a—50 mm; b—70 mm; c—90 mm

图 8 不同接收距离下纺丝线所在 Y 轴上的电场强度分布

由图 8 可以看出,随着接收距离的增加,在 Y 轴方向上,纺丝线上的电场强度逐渐减弱,且最大电场强度也逐渐减弱。

图 9 为不同接收距离下纺丝线所在 X 轴方向上的电场强度分布。



接收距离: a—50 mm; b—70 mm; c—90 mm

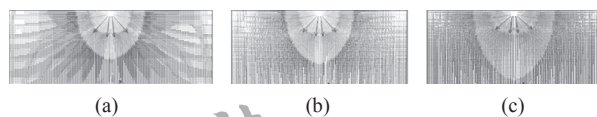
图 9 不同接收距离下纺丝线所在 X 轴上的电场强度分布

由图 9 可以看出,在接收板表面,减小接收距离

能够显著增强接收板中心位置的电场强度,而接收板四周的电场强度却变小,接收板表面中心与边缘电场分布的差异被拉大。这说明接收距离的改变对接收板附近的电场分布影响显著。

(3) 接收板面积。

在点面式结构的熔体静电纺装置中,平面接收板的尺寸是不均匀电场的重要影响因素之一,对纤维的成形影响显著。在本模拟实验中,正方形接收板面积分别取 15 cm × 15 cm, 12.5 cm × 12.5 cm, 10 cm × 10 cm, 在接收板上施加 30 kV 的纺丝电压,接收距离为 50 mm。接收板面积对空间电场分布的影响如图 10 所示。



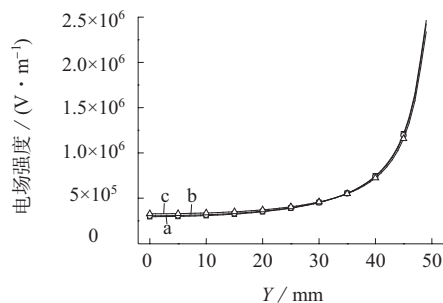
接收板面积: a—15 cm × 15 cm;

b—12.5 cm × 12.5 cm; c—10 cm × 10 cm

图 10 接收板面积对空间电场分布的影响

由图 10 可以看出,接收板的大小对不均匀电场分布有明显的影 响,当接收板面积由 15 cm × 15 cm 减小到 12.5 cm × 12.5 cm 时,电场分布变化较小,强电场强度围绕在喷嘴附近;而当接收板面积减为 10 cm × 10 cm 时,强电场强度分布区域由喷嘴向接收板急剧拉伸。

图 11 为不同接收板面积下纺丝线所在 Y 轴上的电场强度分布。



接收板面积: a—15 cm × 15 cm;

b—12.5 cm × 12.5 cm; c—10 cm × 10 cm

图 11 不同接收板面积下纺丝线所在 Y 轴上的电场强度分布

由图 11 可以看出,接收板面积的减小对射流所在 Y 轴上的电场大小影响较弱,当 35 mm < Y < 50 mm 时,随着接收板面积的减小,电场强度略有减小;而当 0 mm < Y < 35 mm 时,随着接收板面积的减小,电场强度却略有增大。

图 12 为不同接收距离下纺丝线所在 X 轴上的电场强度分布。

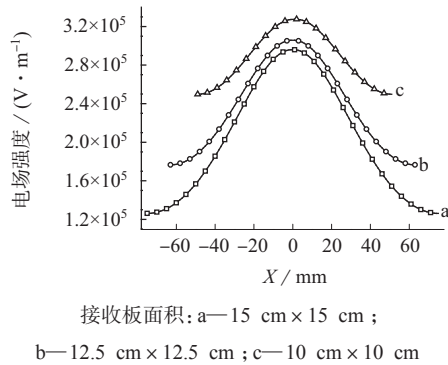
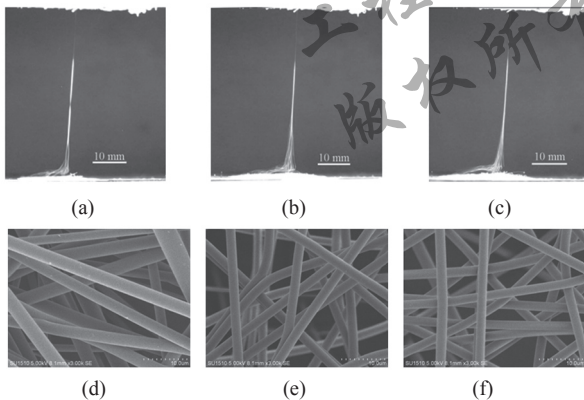
图 12 不同接收板面积下纺丝线所在 X 轴上的电场强度分布

表 2 PET 纤维的射流运动表征及平均直径

编号	纺丝工艺参数			PET 熔体射流运动					PET 纤维平均直径 / μm
	纺丝电压 / kV	接收距离 / mm	接收板面积 / cm^2	直线段长度 / mm	直线段比例 / %	摆动半径 / mm	摆动角 / ($^\circ$)	沉积角 / ($^\circ$)	
1	24	50	15 × 15	33.0	66.0	11.7	10.1	9.2	3.275
2	27	50	15 × 15	33.6	67.2	11.3	10.4	8.9	2.229
3	30	50	15 × 15	34.0	68.0	9.9	11.2	12.2	2.202
4	30	70	15 × 15	45.0	64.0	14.7	11.5	17.2	2.184
5	30	90	15 × 15	49.0	54.0	17.4	11.9	25.5	2.422
6	30	50	12.5 × 12.5	38.3	76.6	6.8	9.0	11.1	2.473
7	30	50	10 × 10	41.3	82.6	4.2	13.0	9.1	2.537

(1) 纺丝电压。

纺丝电压对 PET 熔体射流运动与纤维形貌的影响如图 13 所示。



a—纺丝电压 24 kV, PET 熔体射流运动 SEM 图;
b—纺丝电压 27 kV, PET 熔体射流运动 SEM 图;
c—纺丝电压 30 kV, PET 熔体射流运动 SEM 图;
d—纺丝电压 24 kV, PET 纤维形貌 SEM 图;
e—纺丝电压 27 kV, PET 纤维形貌 SEM 图;
f—纺丝电压 30 kV, PET 纤维形貌 SEM 图

图 13 不同纺丝电压下 PET 熔体的射流运动与纤维形貌 SEM 图

由图 13 和表 2 可以看出,随着纺丝电压的升高, PET 熔体的射流直线段长度逐渐增大,射流摆动半径逐渐减小,摆动角逐渐增大,沉积角总体呈增大趋势,而 PET 纤维的平均直径显著减小。当纺丝电压由 24 kV 升高到 30 kV 时, PET 熔体的射流直线段长度由 33.0 mm 增加至 34.0 mm,即射流

由图 12 可以看出,在接收板表面,随着接收板面积的减小,接收板表面的电场强度都得到增强,而且接收板中心与边缘的差异也变小。这说明减小接收板面积,在改变电场强度大小的同时,可以改善喷嘴与接收板间及接收板表面电场分布的均匀性。

2.2 空间电场分布对 PET 熔体射流运动与纤维形貌的影响

结合模拟实验条件工艺参数,制备了 7 种不同条件下的 PET 纤维。PET 纤维的射流运动表征及平均直径见表 2。

摆动开始点的位置依次下降,摆动半径由 11.7 mm 减至 9.9 mm,摆动角由 10.1° 增至 11.2° ,沉积角由 9.2° 增至 12.2° , PET 纤维平均直径由 $3.275 \mu\text{m}$ 减至 $2.202 \mu\text{m}$,减小 $1.073 \mu\text{m}$ 。由前述纺丝电压对空间电场分布的影响可知,随着纺丝电压的升高,在整个纺丝空间内,所有点的电场强度均得到提高,即电场对 PET 熔体射流的控制力加强,使射流的直线段运动长度逐渐增大,同时也使得 PET 熔体射流的摆动幅度减弱,即摆动半径变小;因电场分布趋势几乎不变,致使射流沉积过程中的摆动角和沉积角变化也较小。在纺丝过程中,纺丝电压的提高也增加了喷嘴尖端的电荷数,即提高了喷嘴处熔体液滴所带电荷的面密度,在一定的接收距离下, PET 熔体射流得到足够充分的牵伸并进一步变细,双重作用使得在纺丝电压提高的情况下, PET 纤维的平均直径大幅度下降,如纺丝电压由 24 kV 升高至 27 kV 时, PET 纤维的平均直径由 $3.275 \mu\text{m}$ 减为 $2.229 \mu\text{m}$;而电压较高 (30 kV) 时,因为牵伸距离受限, PET 纤维的平均直径减小幅度变小,由 $2.229 \mu\text{m}$ 减为 $2.202 \mu\text{m}$ 。

(2) 接收距离。

接收距离对 PET 熔体射流运动与纤维形貌的影响如图 14 所示。

由图 14 和表 2 可以看出,当接收距离由 50 mm 增加至 70 mm 时, PET 熔体的射流直线段

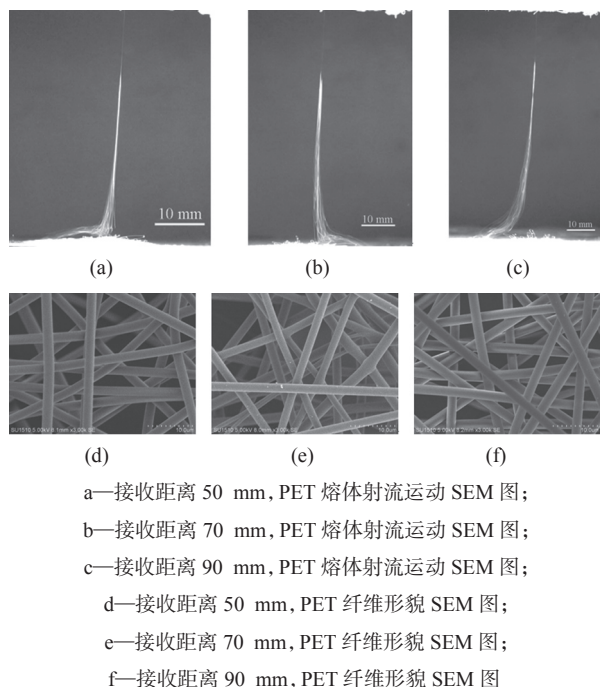


图 14 不同接收距离下 PET 熔体的射流运动与纤维形貌 SEM 图

长度明显变长,由 34.0 mm 增加至 45.0 mm,射流摆动长度和半径稍有变大;当接收距离由 70 mm 增加至 90 mm 时,射流直线段长度变化不大,由 45.0 mm 变为 49.0 mm,而沉积角度明显变化,并且当距离为 90 mm 时,射流末梢摆动幅度减小,呈现自由下落趋势。当接收距离由 50 mm 增加至 90 mm 时, PET 纤维的直径先减小后增大,在接收距离为 70 mm 处出现拐点。由前述接收距离对空间电场分布的影响可知,在 Y 轴方向上,随着接收距离的增加,电场强度整体减弱,电场对射流的控制力下降,因而射流直线段长度所占比例下降, PET 纤维不稳定摆动现象增加;当接收距离较大 (90 mm) 时,在接收板附近电场较弱,对射流运动影响很小,主要受重力作用,随惯性自由下落至接收板,因而在射流摆动沉积过程中,射流摆动角度和沉积角都明显增加,尤其是沉积角,说明电场控制力下降。同时这个运动过程直接反映了射流的牵伸效率,在接收距离较小 (50 mm) 时,电场强度较大,尤其是在喷嘴附近,对射流的牵伸作用力较强,由于时间较短且距离有限,致使射流牵伸不够充分,所纺纤维直径为 $2.202\ \mu\text{m}$;随着接收距离增加到 70 mm,电场强度减弱,牵伸力变弱,但同时增加了牵伸距离,保证射流有足够的时间得到拉伸,得到 $2.184\ \mu\text{m}$ 的 PET 纤维;随着接收距离继续增加到 90 mm,电场强度变得微弱,对射流的牵伸作用力亦很小,纤维直径表现得较粗,为 $2.422\ \mu\text{m}$,因此射流在 70 mm

的接收距离下所得纤维较细。

(3) 接收板面积。

接收板面积对 PET 熔体射流运动与纤维形貌的影响如图 15 所示。

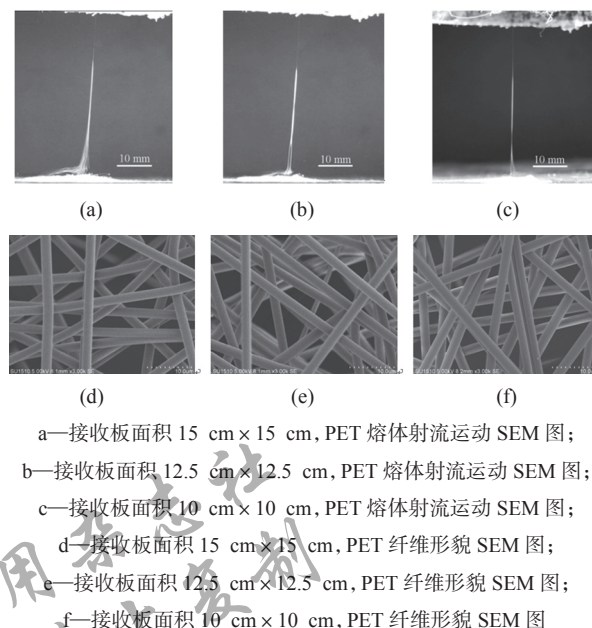


图 15 不同接收板面积下 PET 熔体的射流运动与纤维形貌 SEM 图

由图 15 和表 2 可知,当接收板面积由 $15\ \text{cm} \times 15\ \text{cm}$ 减小至 $10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$ 时, PET 熔体的射流运动直线段比例明显增大,由 68.0% 增至 82.6%,射流的摆动半径明显减小,由 9.9 mm 减至 4.2 mm,而射流沉积角因摆动半径的急剧下降而有所减小,由 12.2° 减至 9.1° ,纤维直径由 $2.202\ \mu\text{m}$ 增加至 $2.537\ \mu\text{m}$ 。由前述接收板面积对空间电场分布的影响可知,接收板面积的减小对射流所在 Y 轴上的电场大小影响较弱,增强了接收板附近的电场,同时缩小了接收板中心与边缘电场的差异,即射流摆动所在区域的电场随接收板面积的减小而增强且均匀,因此电场对射流的直线段的控制力加强,直线段比例增加,摆动角变化不大;而整个 Y 轴上,因直线段牵伸力差异较小,摆动端牵伸距离也较小,因此随着接收面积的减小,纤维直径稍有增加。

3 结论

通过模拟熔体静电纺丝主要工艺参数对空间电场分布的影响,探讨了电场分布对熔体静电纺丝 PET 熔体射流运动及形貌的影响,结论如下:

(1) 提高纺丝电压将会增加所有位置的电场强度,对空间电场分布趋势的影响不大,电场对射流的控制力加强,射流的摆动半径减小,而摆动角增大,纤维直径明显下降。

(2) 接收距离的改变对接收板表面电场的影响显著,随着接收距离的增加,PET 熔体射流的直线段比例明显下降,由 68.0% 减小为 54.0%,纤维射流末端受电场的控制力减小而惯性摆动沉积,摆动半径与沉积角均明显增大,纤维直径在适中接收距离(70 mm)下表现较细,可达 2.184 μm 。

(3) 接收板面积的减小加强了对 PET 熔体射流的控制,纤维射流的直线段比例显著增加,摆动半径减小,沉积角因射流更加贴服于接收板表面而变小,纤维直径在较强电场下因摆动牵伸距离小而稍有增大。

参考文献

- [1] Reneker D H, Yarin A L. Electrospinning jets and polymer nanofibers[J]. Polymer, 2008, 49:2 387-2 425.
- [2] 王肖娜,李莘,王宏,等. 熔体静电纺丝研究进展 [J]. 高分子通报, 2013(7):15-26.
Wang Xiaona, Li Shen, Wang Hong, et al. Process in research of melt-electrospinning[J]. Polymer Bulletin, 2013(7):15-26.
- [3] Dalton P D, Grafahrend D, Klinkhammer K, et al. Electrospinning of polymer melts: Phenomenological observations[J]. Polymer, 2007, 48(23):6 823-6 833.
- [4] Mota C, Puppi D, Gazzarri M, et al. Melt electrospinning writing of three-dimensional star poly(ϵ -caprolactone) scaffolds[J]. Polymer International, 2013, 62(6): 893-900.
- [5] 王宏,徐阳,王肖娜,等. 熔融静电纺聚对苯二甲酸乙二酯超细纤维的制备及工艺优化 [J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 26(9):120-125.
Wang Hong, Xu Yang, Wang Xiaona, et al. Preparation and process optimization of poly(ethylene terephthalate) ultrafine fibers by melt-electrospinning[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014, 26(9):120-125.
- [6] Li Xiuyan, Liu Huichao, Liu Jianli, et al. Preparation and experimental parameters analysis of laser melt electrospun poly(L-lactide) fibers via orthogonal design[J]. Polymer Engineering & Science, 2012, 52(9): 1 964-1 967.
- [7] Zhmayev E, Zhou H, Joo Y L. Modeling of non-isothermal polymer jets in melt electrospinning[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2008, 153(2):95-108.
- [8] Liu Yong, Wang Xin, Yan Hua, et al. Dissipative particle dynamics simulation on the fiber dropping process of melt electrospinning[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(24):7 877-7 882.
- [9] Li Xiaohu, Zhang Youchen, Li Haoyi, et al. Effect of oriented fiber membrane fabricated via needleless melt electrospinning on water filtration efficiency[J]. Desalination, 2014, 344: 266-273.
- [10] Góra A, Sahay R, Thavasi V, et al. Melt-electrospun fibers for advances in biomedical engineering, clean energy, filtration, and separation[J]. Polymer Reviews, 2011, 51(3):265-287.
- [11] 邓亮. 熔体静电纺丝超细纤维的成型及下落取向研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
Deng Liang. Study on forming and falling orientation of melt electrospinning superfine fibers[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [12] Brown T D, Dalton P D, Hutmacher D W. Direct writing by way of melt electrospinning[J]. Advanced Materials, 2011, 23(47):5 651-5 657.
- [13] Liu Zhaoxiang, Liu Yong, Ding Yumei, et al. Tug of war effect in melt electrospinning[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2013, 202:131-136.
- [14] Zhang Yi, Chen Li, Zhao Jingjing, et al. A phosphorus-containing PET ionomer: From ionic aggregates to flame retardance and restricted melt-dripping[J]. Polymer Chemistry, 2014, 5(6):1 982-1 991.

我国科学家制备出新型“人工肌肉”材料

复旦大学聚合物分子工程国家重点实验室彭慧胜教授课题组成功制备出新型纤维状人工肌肉材料。相关研究成果作为当期的封面文章发表于《自然·纳米技术》上。

专家认为,这种导电的人工肌肉材料对溶剂响应具有很高的灵敏度和特异的选择性,在工业生产和化学品储存中,可以用来探测毒性溶剂的泄漏和预警。

科学界对人工肌肉材料的研究很早就开始了,但传统的溶剂敏感型人工肌肉多是基于功能性的高分子材料,其对溶剂的响应速度较慢,运动形式也相对单一,多是简单的膨胀或弯曲,且不容易控制。

彭慧胜团队以具有高比表面积、优异力学和电学性能的取向碳纳米管为基本单元,并对其进行多级螺旋构筑,在纤维内部形成了大量的纳米和微米尺度的管道结构,这种多级管道结构可以使溶剂高效快速地渗透到纤维内部,并引起纤

维的快速膨胀。当具有多级螺旋结构的碳纳米管纤维与有机溶剂(如乙醇)及其蒸汽接触,可产生优异的扭转和收缩运动,该类纤维状人工肌肉还可以产生强劲的收缩响应,其收缩强度是人类骨骼肌的 10 倍,并可以在几十毫秒内完成,比传统的高分子基敏感材料快三个数量级,甚至高于植物界响应最快的植物——食蝇草的“捕食”速度。这种结构设计为制备高性能的智能响应材料和器件提供了一条新途径,有着广阔的应用前景。
(工程塑料网)

新型 γ -丁内酯塑料可实现完全被回收利用

美国科罗拉多州立大学的研究人员们利用 γ -丁内酯(GBL)单体研发出一种新型聚合物聚 GBL。这种聚合物只需在 220 ~ 300 $^{\circ}\text{C}$ 的环境下加热 1 h,它就能变回单体 GBL。这意味着这种新型塑料将会改变人们使用塑料的方式,它能完全被回收利用,不含石油成分且能够被生物体分解。

(中化新网)