

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.017

气流辅助聚合物熔体微分电纺流道优化设计

陈明军^{1,2}, 马丽³, 张有忱¹, 李好义¹, 詹瑾¹, 杨卫民¹

[1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029; 2. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 太原 030001;

3. 山西汾西矿业(集团)有限责任公司, 山西介休 032000]

摘要: 为进一步降低熔体微分电纺的纤维直径,使其达到纳米尺度,在现有直线狭缝电纺喷头的基础上设计了可以使高速气流汇聚的“V”形风道,通过高速气流对熔体微分射流进行二次牵伸细化。采用实验研究和数值模拟相结合的方法,以射流间距和喷头端电场强度为指标,研究了“V”形风道结构、材质对电纺微分射流的影响。研究表明,风道结构会不可避免地削弱喷头端的电场强度、降低射流的效率。增加风刀与喷头尖端的头端凸出量以及采用不导电的聚醚醚酮作为风刀材质都可以有效地降低风刀对射流效率的影响,而风道的宽度对喷头端电场强度影响不大。在优化的风刀结构和材质的基础上,成功制备了平均直径为 825 nm 的熔体电纺超细纤维。研究证实,在气流辅助牵伸的作用下,直线狭缝电纺能够实现熔体电纺超细纤维的批量制备。

关键词: 超细纤维; 熔体微分电纺; 电场强度; 气流; 射流

中图分类号: TQ340.64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0086-05

Optimal Design of Airflow Channel on Polymer Melt Differential Electrospinning

Chen Mingjun^{1,2}, Ma Li³, Zhang Youchen¹, Li Haoyi¹, Zhan Jin¹, Yang Weimin¹

[1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Taiyuan Research Institute Co. Ltd. of China Coal Science and Industry Group, Taiyuan 030001, China;

3. Shanxi Fenxi Mining (Group) Co., Ltd., Jiexiu 032000, China]

Abstract: In order to refine the polymer melt fibers that were fabricated by melt electrospinning, a V-shaped airflow tunnel was designed based on the existing linear slot electrospinning nozzle. The V-shaped airflow tunnel could make the high-speed airflow converge at the end lower points, which acted a strong drag-force on the surface of polymer fibers, and thus could refine the fiber into nanoscale. The effects of wind knife material and structure on the inter-jet distance and electric field were investigated by experiment and numerical simulation. The results show that the airflow channel will inevitably weaken the electric field strength of the nozzle end. However, the influence of the airflow channel on electric field can be effectively reduced by using the air knife made of PEEK material or increasing the head end protrusion. The width of the air knife has little effect on the electric field intensity at the nozzle end. The average diameter of melt electrospun fiber was reduced to 825 nm by optimizing the structure and material of wind knife. The research proved that melt differential electrospinning based on linear slot spinneret have the ability to fabricate melt ultra-fine fibers in large scale with the help of airflow-assisted stretching.

Keywords: ultra-fine fiber; melt differential electrospinning; electric field strength; airflow; jets

作为高精度空气滤膜的核心材料,聚合物熔体纺丝超细纤维被广泛应用于生活中的各个领域。从阻断病毒传播的口罩,到家用新风系统的滤膜;从洁净空间的净化器到工业用除尘系统,都离不开聚

合物熔体纺丝超细纤维^[1-2]。将熔体纺丝纤维的直径进一步降至纳米尺寸,是提高空气过滤效率、降低过滤阻力的重要途径之一^[3-4]。现有熔体纺丝超细纤维的工业化制备方法主要是熔喷,其制备纤维的

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0302002)

通信作者: 詹瑾, 博士, 研究方向是人体工程学 E-mail: 2019730007@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 2020-10-21

引用格式: 陈明军, 马丽, 张有忱, 等. 气流辅助聚合物熔体微分电纺流道优化设计 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(1): 86-90.

Chen Mingjun, Ma Li, Zhang Youchen, et al. Optimal design of airflow channel on polymer melt differential electrospinning[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1): 86-90.

直径在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。通过减小熔喷模头喷丝孔的直径,可以有效地将纤维直径降至纳米尺度,但是同时也带来了喷头易堵塞、熔体输送压力呈指数增长的难题^[4-6]。作为熔体纺丝超细纤维制备的另一方案,熔体微分静电纺丝的成纤机理不依赖于机械加工的小孔,而是在高压电场下熔体薄膜自组织成多射流,可以有效地解决喷头易堵塞的难题^[7]。通过在熔体静电纺丝的设备上设计气流辅助装置,熔体微分电纺已实现聚丙烯(PP)、聚乳酸(PLA)等多种聚合物纳米纤维的制备^[7-10]。

笔者基于课题组提出的直线狭缝微分电纺喷头^[11],在喷头的两侧设计了可以使高速气流汇聚的“V”形风道,通过高速气流对已经成形的熔体射流进行进一步牵伸细化,以期实现纳米尺度熔体纺丝纤维的批量制备。以喷头端电场强度及熔体的射流间距为指标,研究了风道结构、材质对熔体微分电纺射流的影响。

1 实验部分

1.1 直线狭缝熔体微分电纺喷头装置

直线狭缝微分喷头装置如图 1a 所示。不同于熔喷模头,线性狭缝模头的末端不是精密加工的毛细孔,而是一整条狭缝。聚合物熔体流出喷头之前,在喷头组件的约束下呈薄膜状。当聚合物熔体达到直线狭缝喷头的出口时,在高压静电场的作用下,聚合物熔体自组装形成多射流,并在电场力的作用下快速向收集板端运动^[11]。由前期的研究可知,在纺丝温度为 250°C 、纺丝电压为 45 kV 、纺丝距离为

9 cm 、纺丝材料为上海伊士通新材料发展有限公司的聚丙烯(PP6820)时,直线狭缝喷头产生的熔体射流可以沿幅宽方向均匀分布,制备的纤维平均直径约为 $4 \mu\text{m}$,单位长度直线狭缝喷头的纺丝产率可达 $237 \text{ g}/(\text{h} \cdot \text{m})$ ^[11]。

为了进一步降低纤维的直径,设计了如图 1b 所示“V”形风道。在直线狭缝喷头的两侧分别安置了一件风刀,在风刀与喷头间形成压缩空气流通的风道,两条风道呈“V”形布置。两股压缩空气在“V”形风道的顶点汇聚,气流速度达到最大,从而实现对熔体射流的二次牵伸。

“V”形流道的安装会对喷头尖端的电场强度造成影响,从而影响微分射流的效率。D. Lukas 等^[12]的研究获得了喷头端的电场强度与射流间距之间的关系,如式(1)所示。

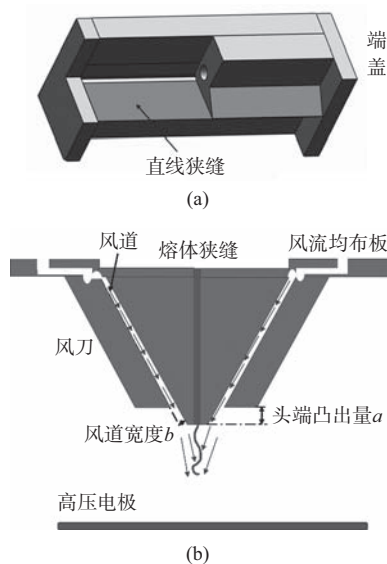
$$\lambda_0 = \frac{12\pi\gamma}{2\varepsilon E_0^2 + \sqrt{(2\varepsilon E_0^2)^2 - 12\gamma\rho g}} \quad (1)$$

式中: λ_0 为射流间距; γ 为熔体的表面张力; ε 为介电常数; E_0 为喷头端的电场强度; ρ 为熔体密度; g 为重力加速度。

在熔体性质不变的情况下,喷头端的电场强度越大,射流间距越小,越有利于提高射流效率。因此,通过模拟分析喷头端的电场强度,可以很好地预测风道结构对熔体射流的影响。

1.2 熔体微分电纺电场分析模型

采用 Ansoft Maxwell 分析风道结构对喷头端电场强度的影响。经过对纺丝喷头内部结构进行简化,建立了由狭缝喷头和接收装置构成的几何模型。几何模型的主要参数为:喷头狭缝幅宽(W)为 320 cm ,狭缝两端安装有厚度为 15 mm 的端盖。喷头的狭缝缝隙为 0.2 mm 。收集装置宽度(B)为 150 mm ,长度(A)为 400 mm 。喷头尖端与接收装置之间的距离为 90 mm 。有限元分析模型如图 2 所示。风道的宽度(b),头端凸出量(a)以及风刀的材质变化见表 1。为了减小计算域对计算结果的影



a—直线狭缝电纺喷头示意图;b—气流流道示意图

图1 微分电纺喷头装置示意图

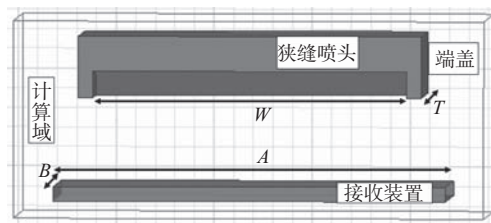


图2 电场有限元分析模型

表1 模拟参数设计表

编号	头端凸出量/mm	风道宽度/mm	风刀材质
1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.4	不锈钢
2	1.5	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	不锈钢
3	1.5	0.4	聚醚醚酮

响,将计算域在几何模型的基础上分别向+X, -X, +Y, -Y, +Z, -Z方向扩大10%。

狭缝喷头材质从Maxwell材料库中选择不锈钢,电压设置为0 kV;接收板材质设置为铜,电压设置为45 kV;计算域其它材料设置为空气^[13]。在网格划分时,Maxwell软件采用了自适应网格划分的模型,将喷头下端面的网格分辨率设置为0.2 mm,以提高空气与喷头界面处的模拟精度。由于在喷头尖端与空气的交界面上,电场强度会发生剧烈的变化,参考泰勒锥的尺寸^[14],以 $Y=0.5$ mm平面的电场强度代替喷头尖端的最大电场强度。

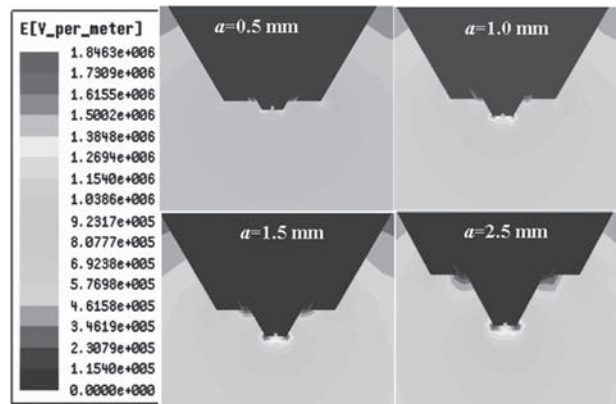
2 结果与讨论

2.1 头端凸出量对射流的影响

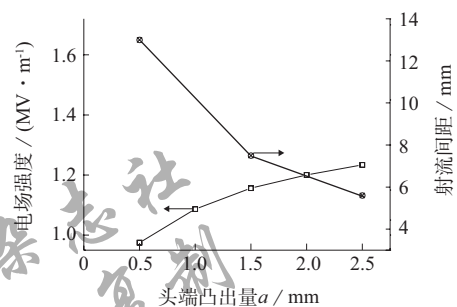
头端凸出量决定气流从流道中释放的位置,对于气流汇聚顶点的最高车速有重要影响^[15-16],但其对喷头端电场强度的影响还未见报道。图3a是不同头端凸出量下,喷头简单附件的电场分布云图。从图中可知,由于风刀外缘尖端效应的存在,风刀外缘感应了大量电荷,从而使喷头尖端感应的电荷量减小。另一方面,风刀外缘距离喷头狭缝比喷头外沿距离喷头狭缝更远,风刀外缘的电荷对喷头尖端产生的感应电场强度较弱。因此,风刀的加入削弱了喷头狭缝处的电场强度。

从图3a还可知,随着头端凸出量增加,风刀外缘尖端的电场强度越来越小,喷头尖端的电场强度越来越大,风刀对喷头端最大电场强度的影响越来越小。但是即使当头端凸出量为2.5 mm时,风刀外缘的尖端效应也无法完全消除。另外,从电场强度分布云图还可以获知,只要能保证喷头尖端的电荷密度,就能保证喷头端的最大电场强度。因此,当头端凸出量大于零时,可以通过提高纺丝电压的方法来提高喷头的总电荷量,进而弥补风刀对最大电场强度的削弱。

进一步提取了风道宽度为0.4 mm时,金属风刀下,喷头端最大电场强度随头端凸出量的变化趋势,如图3b所示。从图中可以看出,最大电场强度随头端凸出量的增加而增加,且增加的速率随着头端凸出量的增大而逐渐减小,这意味着当头端凸出



(a)



(b)

a—电场云图; b—最大电场强度和射流间距

图3 头端凸出量对射流的影响

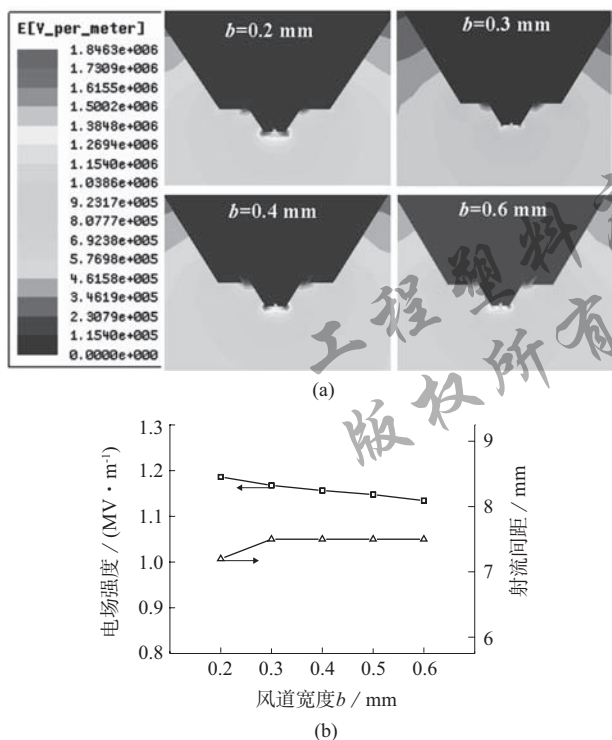
量达到某一值后,最大电场强度将不再发生变化。与没有安装风刀的最大电场强度1.69 MV/m相比^[11],安装风刀后,喷头尖端的电场强度被严重削弱。通过对头端凸出量为10 mm结构进行电场模拟,发现其喷头尖端的最大电场强度为1.40 MV/m,与无风刀时的最大电场强度相差了0.29 MV/m。这可能是由于风流均布板也是金属材质,在高压电场中也感应了一定量的电荷。在感应总电荷量不变的情况下,无形中减小了喷头端的感应电荷量,造成喷头尖端电场强度降低。因此,在风刀结构设计时必须尽量使各部件均远离喷头尖端。

实验研究发现,虽然风刀结构严重削弱了喷头尖端的最大电场,但是在头端凸出量仅为0.5 mm时,依然有熔体射流的产生。射流间距随头端凸出量的变化关系如图3b所示。当头端凸出量为0.5 mm时,电场强度为0.97 MV/m,射流间距为13 mm,比没有电场力作用时熔体自由下落的间距10 mm更大^[11]。这主要是在重力、电场力和表面张力的作用下,熔体会自组织形成多个波。当处于波峰的熔体在电场力作用下形成射流后,熔体内部的粘性力会牵引狭缝内的熔体沿着形成的射

流运动,从而使熔体在幅宽方向上的分配趋向于首先形成射流的地方。对于没有首先形成射流的地方,将出现射流缺失,故射流间距增大。随着头端凸出量的增加,射流间距逐渐减小,当头端凸出量为 1.5 mm 时,射流间距降至 7.5 mm。

2.2 风道宽度对射流的影响

风道宽度影响着气流最高速度和气流的空间分布,从而影响纤维的细化程度^[16]。图 4a 显示了在头端凸出量为 1.5 mm 的条件下,风道宽度分别为 0.2, 0.3, 0.4, 0.6 mm 时,电场强度分布云图。从图中可知虽然大量感应电荷集中于喷头尖端的两侧,但风刀尖端两侧也有电荷集中现象。随着风道宽度增加,风刀尖端附近的电场强度变化不明显。



a—电场云图; b—最大电场强度和射流分布

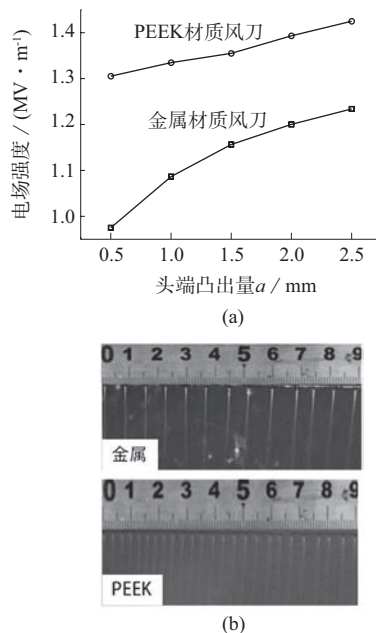
图 4 风道宽度对射流的影响

图 4b 是头端凸出量为 1.5 mm 时, 纺丝距离为 9 cm, 纺丝电压为 45 kV 时, 喷头端最大电场强度和射流间距随风刀宽度变化的情况。从图中可知, 风道宽度对喷头端最大电场强度影响不大, 当风道宽度由 0.2 mm 增加到 0.6 mm 的时候, 电场强度仅从 1.18 MV/m 降至 1.13 MV/m 。在不同的风道宽度下, 射流间距变化很小, 风道宽度为 0.2 mm 时, 射流间距为 7.1 mm, 当风刀宽度大于 0.2 mm 时, 射流间距保持不变, 均为 7.5 mm。

2.3 风刀材质对射流的影响

由熔喷研究的结果可知, 当喷头的头端凸出量越小时, 气流在“V”形风道顶点汇聚的速度越大, 纺丝空间的流场更利于纤维的细化^[15]。但是由于金属风刀的屏蔽作用, 头端凸出量太小对喷头端的电场强度削弱剧烈, 从而使熔体射流效率急剧降低。相比于金属材料, 聚合物对高压静电场的感应效应较弱, 对喷头尖端的电场强度削弱能力较低。采用聚合物材质的风刀可能既满足熔体射流产生要求, 又能满足形成高速气流需要的条件。实验采用了耐高温且绝缘的聚醚醚酮 (PEEK) 材料制作风刀, 并与金属风刀的性能进行了对比。

图 5 是风道宽度为 0.4 mm 时, 金属风刀和 PEEK 风刀在喷头尖端产生的最大电场强度。从图中可知, 在同等情况下, PEEK 风刀产生的电场强度远大于金属风刀产生的电场强度。在实验范围内, PEEK 风刀的最大电场强度均大于 1.30 MV/m , 而金属风刀的电场强度均小于 1.25 MV/m 。因此, 从对喷头尖端最大电场影响的程度而言, PEEK 材质的风刀性能更优。



a—最大电场强度; b—射流照片

图 5 风刀材质对射流的影响

图 5b 是在头端凸出量为 1.5 mm、风刀宽度为 0.4 mm、纺丝距离为 9 cm、纺丝电压为 45 kV 时, 金属风刀与 PEEK 风刀产生的熔体射流对比照片。从图中可以获知, 在相同的纺丝条件下, 金属风刀的射流间距明显小于 PEEK 风刀的射流间距。金属风刀喷头产生的射流间距为 5.7 mm, PEEK 风刀产生

的射流间距为 3.5 mm。这是由于 PEEK 材质的导电能力较弱,在相同的结构下,PEEK 风刀感应的电荷较少,更多的电荷集中于喷头尖端,从而使喷头端的电场强度更大。因此,采用 PEEK 风刀可以更好地实现熔体射流在电场和风场中的合力牵伸。

2.4 熔体微分射流“电-风”耦合牵伸细化

结合电场模拟和实验的结果,在实验条件为风刀宽度 0.2 mm、头端凸出量 0.5 mm、风刀材质为 PEEK、聚合物熔体流量为 2.0 g/min、风量流量为 30 m³/h 的条件下,制备了直线狭缝熔体微分电纺纤维,其形貌如图 6 所示。图 6 中的刻度标尺为 5 μm,使用 ImagePro +6.0 对纤维直径进行统计分析,其平均直径达到了 825 nm。实验证实气流辅助直线狭缝电纺具有批量制备超细纤维的能力。

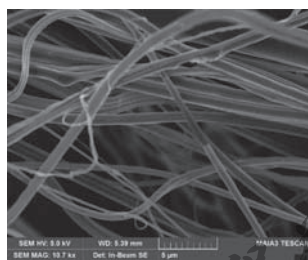


图 6 气流辅助电纺纳米纤维的扫描电镜照片

3 结论

在熔体微分电纺装置上引入了能够使气流汇聚的 V 形流道,实现了熔体射流在电场、气场多场下的合力牵伸。风刀的加入虽然在一定程度上会对喷头端的电场强度进行削弱,减低熔体微分射流的密度。但是通过减小风道宽度、增大头端凸出量、改用绝缘耐高温风刀材质以及增加纺丝电压的方法,可以将风刀对喷头端电场强度的影响降低。在 PEEK 风刀的条件下,通过优化的工艺条件,实现了平均直径为 825 nm 熔体电纺纤维的批量制备。研究结果证实了 V 形流道产生的气流能够对电纺纤维进行二次牵伸,实现了直线狭缝电纺装置对熔体电纺超细纤维的批量制备。

参考文献

- [1] Kellie G. Advances in technical nonwovens[M]. London:Wood Head Publishing, 2016:339-359.
- [2] Luan P T, Ching C T S. A reusable mask for coronavirus disease 2019 (COVID-19)[J]. Archives of Medical Research, 2020, 51(5):455-457.
- [3] Hassan M A, Yeom B Y, Wilkie A, et al. Fabrication of nanofiber melt blown membranes and their filtration properties[J]. Journal of Membrane Science, 2013, 427:336-344.
- [4] Deng Nanping, He Hongsheng, Yan Jing, et al. One-step melt-blowing of multi-scale micro/nano fabric membrane for advanced air-filtration[J]. Polymer, 2019, 165:174-179.
- [5] Rohit U, Gajanan B, Chris E, et al. Melt blown nanofiber media for enhanced quality factor[J]. Fibers and Polymers, 2013, 14(4):660-668.
- [6] Ellison C J, Phatak A, Giles D W, et al. Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions and onset of fiber breakup[J]. Polymer, 2007, 48(11):3 306-3 316.
- [7] 陈宏波. 熔体微分静电纺丝气辅细化及多锥面增效工艺及机理研究 [D]. 北京:北京化工大学, 2016.
Chen Hongbo. Study on technology and mechanism about airflow assisted fiber refinement and multi-cone synergistic of melt differential electrospinning[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [8] Zhmayev E, Cho D, Yong L J. Nanofibers from gas-assisted polymer melt electrospinning[J]. Polymer, 2010, 51(18):4 140-4 144.
- [9] Tamoka A, Takahashi M. Highly productive systems of nanofibers for novel applications[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(13):3 759-3 764.
- [10] Qin Yongxin, Cheng Lisheng, Zhang Yanping, et al. Efficient preparation of poly(lactic acid) nanofibers by melt differential electrospinning with addition of acetyl tributyl citrate[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(31).doi:10.1002/app.46554.
- [11] Chen Mingjun, Zhang Youchen, Chen Xiaoqing, et al. Polymer melt differential electrospinning from a linear slot spinneret[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(31).doi:10.1002/app.48922.
- [12] Lukas D, Sarkar A, Pokorny P. Self-organization of jets in electrospinning from free liquid surface:A generalized approach[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(8).doi:10.1063/1.2907967.
- [13] Lorrain P, Corson D. "Maxwell's equations" in electromagnetic fields and waves[M]. 2nd ed. San Francisco:W. H. Freeman and Company, 1970:439.
- [14] 李好义. 熔体微分静电纺丝原理、方法与设备 [D]. 北京:北京化工大学, 2014.
Li Haoyi. Principle, method, and equipment of melt differential electrospinning[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology 2014.
- [15] Krutka H M, Shambaugh R L, Papavassiliou D V. Effects of die geometry on the flow field of the melt-blowing process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(22):5 541-5 553.
- [16] Hao Xibo, Zeng Yongchun. A Review on the studies of air flow field and fiber formation process during melt blowing[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(27):11 624-11 637.