

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600487



本刊网刊

# 射流先导与旋风拉伸协同离心纺丝制备聚丙烯超细纤维

田嘉俊<sup>1</sup>, 胡新鹏<sup>1</sup>, 周 康<sup>1</sup>, 吴 婷<sup>1,2</sup>, 卢 翔<sup>1,2\*</sup>, 瞿金平<sup>1,2,3,4,5\*</sup>

(1. 华中科技大学 化学与化工学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学 生物医用与防护材料湖北省工程研究中心, 湖北 武汉 430074; 3. 华南理工大学 聚合物新型成型装备国家工程研究中心, 广东 广州 510640; 4. 华南理工大学 聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 广东 广州 510640; 5. 华南理工大学 广东省高分子先进制造技术及装备重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘 要:**针对高黏度聚合物熔融离心纺丝过程中物料输入不稳定、熔体易飞溅以及纤维拉伸不充分等问题,提出一种射流先导与旋风拉伸协同的离心纺丝技术,并通过仿真与实验相结合的方法研究了该技术的成型机理及关键工艺参数对纤维形貌的影响。基于 Ansys Fluent 软件建立射流先导作用下熔体在封闭式离心盘中分配过程的仿真模型,分析高黏度熔体(黏度为 10 000 g/(m·s))在盘面上的铺展行为。仿真结果表明,射流先导作用可有效抑制高黏度熔体的飞溅现象,封闭式盘面结构对于黏度高达 10 000 g/(m·s)的聚丙烯熔体仍能实现稳定分配,而无先导作用的熔体在 0.007 s 内即发生严重飞溅。在仿真结果的基础上进一步开展了相应的实验研究,通过调控离心加速度(20 000~60 000 m/s<sup>2</sup>)和纺丝温度(190~230 °C)探究纺丝最佳工艺条件。由实验结果得知,在纺丝温度 230 °C、离心加速度 40 000 m/s<sup>2</sup>条件下可以成功制备平均直径为 1.1 μm 的超细聚丙烯纤维。进一步引入旋风拉伸,纤维平均直径降至 1.0 μm,纤维单丝强度由无风场时的 3.3 cN/dtex 提升至 7.9 cN/dtex,提升幅度达 2.4 倍。本研究揭示了射流先导与旋风拉伸在高黏度聚合物离心纺丝中的协同机制,为高性能超细纤维材料的绿色高效制备提供了理论依据与技术途径。

**关键词:**射流先导;旋风拉伸;离心纺丝;超细纤维;仿真与实验

中图分类号:TQ340

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)05-0034-11

目前,超细纤维的主要制备方法包括溶液纺丝(湿法、干法)、静电纺丝和熔融纺丝等<sup>[1]</sup>。溶液纺丝虽然能制备细纤维,但需要使用大量溶剂,存在环境污染和溶剂回收等问题<sup>[2]</sup>;静电纺丝法可生产纳米级纤维,但面临产量低、高压电场安全隐患等瓶颈<sup>[3]</sup>。熔融纺丝因无须溶剂、工艺环保而备受关注,传统熔融纺丝(如熔喷法)依赖高温高速气流拉伸熔体,对物料黏度具有严格限制。Bier 等<sup>[4]</sup>建立了预测熔纺和熔喷纤维直径的通用模型,系统考虑了黏度、模头直径、产量等因素对纤维直径的影响,得出“零剪切黏度是决定纤维直径的关键参数”的核心结论;同时,过于黏稠的熔体在高速气流中难以稳定拉伸成纤维,致使纤维力学性能下降。因此,开发一种适用于高黏度聚合物、高产且环保的超细纤维制备技术具有重要意义<sup>[5]</sup>。

离心纺丝技术<sup>[6]</sup>利用高速旋转产生的离心力将熔体或溶液拉伸成纤维,具有产量高、无须高压电场、可

纺物料范围广等优势,能够有效加工高黏度物料。该技术已被用于制备聚乳酸、聚丙烯等多种聚合物纤维,所得纤维直径可达到微米甚至亚微米级。例如, Li 等<sup>[7]</sup>采用高速离心力将聚乳酸纺制成纤维膜。由于使用的聚乳酸的黏度远低于传统石油基原料,且纤维在 3 mm 的旋转流道中即可完成拉伸,因此该工艺对低黏度物料具有良好的适应性。然而,高黏度物料如聚丙烯(PP)等由于存在 Weissenberg 爬杆效应<sup>[8]</sup>,熔体注入并不稳定;同时,物料进入离心纺丝盘后难以快速分配,开放式纺丝盘易导致熔体飞溅,严重影响纺丝连续性和纤维直径均匀性<sup>[9]</sup>。

综上,本文提出了一种射流先导与旋风拉伸协同的离心纺丝技术。该技术设计了具有先导作用的注料法兰提升熔体注入速度,有效消除高黏度物料常见的爬杆效应,确保熔体稳定进入离心纺丝盘;同时,将传统开放式离心纺丝盘优化为封闭式结构,规避了高黏

收稿日期:2026-06-06 修回日期:2026-07-31 网络出版日期:2026-08-04

作者简介:田嘉俊(2003—),男,硕士生。研究方向:高分子材料加工。E-mail:m202570419@hust.edu.cn

\* 通信作者:卢 翔,教授, E-mail:luxiang@hust.edu.cn; 瞿金平,教授,中国工程院院士, E-mail:jpqu@hust.edu.cn

度熔体飞溅的弊端;并在纤维拉伸阶段引入风场,协同离心力对纤维进行拉伸。通过仿真与实验相结合的方法,揭示了射流先导与封闭式离心盘对熔体分配的协同作用,后进一步引入风场拉伸成功制备出纤维平均直径为 1.0 μm 的超细聚丙烯纤维,纤维单丝强度较无风场时提升 2.4 倍<sup>[10]</sup>。本工作为高黏度聚合物超细纤维的绿色高效制备提供了新路径,并为高性能纤维材料的开发奠定了技术基础。

1 模型及仿真参数

根据实际离心纺丝盘建立封闭式上下对扣盘面模型,内部流场最大厚度为 14.00 mm。利用几何周期性截取 60°扇形区域作为计算区域,并施加周期性边界条件以提高计算效率。为了在盘面附近捕捉熔体厚度的变化,对盘面近壁区域进行网格加密<sup>[11]</sup>,具体网格特征如图 1 所示。

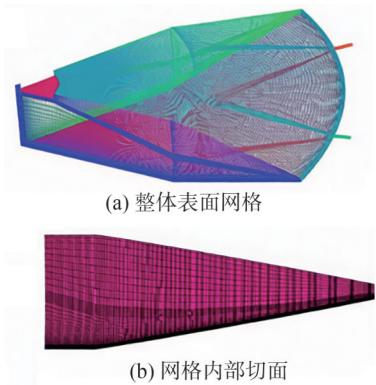


图1 网格划分  
Fig. 1 Mesh division

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

聚丙烯(PP,Z30S 型纤维级专用料,熔体质量流动速率(MFR)为 26.2 g/10 min)购自茂名分公司。

2.2 实验仪器

具体实验仪器如表 1 所示。

表1 实验仪器

Tab. 1 Laboratory equipments

| 仪器         | 型号        | 生产商               |
|------------|-----------|-------------------|
| 双轴偏心转子挤出机  | ERE-34    | 自研                |
| 离心熔喷设备     | 自研        | 自研                |
| 电热鼓风干燥箱    | DHG-9420A | 上海一恒科学仪器有限公司      |
| 场发射扫描电子显微镜 | SU8010    | 日立 Hitachi 公司(日本) |

2.3 样品制备

先将 PP 物料在温度为 50 °C 的鼓风烘箱中充分烘干 8 h,后经挤出机(转速 60 r/min,进料转速 1.0 Hz)熔融

塑化,通过具有先导作用的注料法兰(下端口直径 2.00 mm)高速注入离心纺丝盘。离心熔喷参数:纺丝温度分别设置为 190、210、230 °C;离心加速度分别为 20 000、40 000、60 000 m/s<sup>2</sup>,离心纺丝盘在高速旋转过程中甩出原丝,原丝在风场作用下拉伸形成纤维并在收集网上堆积形成纤维。

2.4 性能表征

1)微观形貌表征。将纤维附着于导电胶上,随后对其表面进行喷金处理,使用场发射扫描电子显微镜(SEM,型号 SU8010,产自日本 Hitachi 公司)在 5 kV 电压下对样品进行观察。通过 ImageJ 图像分析软件对纤维直径进行测量,每组样品随机选取不少于 100 根纤维,沿纤维轴向垂直方向测量其直径,统计得到纤维直径分布及平均直径。

2)结晶行为。使用差示扫描量热仪(DSC,型号 DSC25,产自美国 TA 公司)进行 DSC 测试,温度范围为 -20~80 °C,速率为 10 °C/min,结晶度( $x_c$ )计算如下:

$$x_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{\Delta H_m^{100\%} \times \omega_{pp}} \times 100\%$$

(1)

式中, $\omega_{pp}$  为体系中 PP 的质量分数, $\Delta H_m$  和  $\Delta H_c$  分别代表熔融焓和冷结晶焓, $\Delta H_m^{100\%}$  为 PP 的百分百熔融焓。

3)力学性能测试。采用电子万能试验机(购自深圳新三思材料测试有限公司(中国))进行单丝拉伸性能测试,强力范围为 0~100 cN,拉伸范围为 0~10%,伸长速度为 5 mm/min。具体测试参照《化学纤维 短纤维拉伸性能试验方法》(GB/T 14337—2008)执行,每种纤维测定 50 个数据结果取平均值。

3 仿真与实验结果分析

3.1 射流先导下熔体分配过程仿真与实验结果分析

3.1.1 熔体分配过程的仿真分析

仿真边界条件设置如下:将熔体入口设为速度入口,入口流速根据挤出机实际进料速率换算获得;离心纺丝盘区域采用滑移网格技术赋予旋转运动,转速设置为 6 000 r/min;熔体初始温度设定为 230 °C,环境空气温度为 25 °C;盘面壁面采用无滑移边界条件,将出口处设为压力出口。熔体黏度分别取 0.1、1.0 和 10.0 Pa·s,以对应低、中、高黏度工况。

针对高黏度熔体在离心纺丝盘上的分配行为,对比分析了在有、无射流先导作用下黏度为 10 000 g/(m·s)的熔体在盘面上的分配行为。

图 2 展示了高黏度熔体(黏度为 10 000 g/(m·s))在离心纺丝盘上不同时间点的仿真以及厚度分布。从图 2(a)和(c)可知,当  $t=0.250$  s 时,由于高黏度熔体流

动性较差,熔体尚未被完全分配到斜面上,且有部分熔体从主体脱离;这主要是因为离心力随半径增大而增加,当离心力超过熔体内部黏滞力与盘面摩擦力之和时,会发生飞溅<sup>[12]</sup>。从图 2(b)和(d)可知,当 $t=0.400$  s时,由于黏度较大,盘面出现部分空洞,分配均匀性

不足;对比无射流先导作用的工况(图 3),在停止喂料后的 0.007 s 内( $t=0.257$  s),熔体即产生显著飞溅,大量熔体被甩至盘边缘。这表明射流先导作用通过提高注入初速度,显著提升了熔体注入和分配过程的稳定性<sup>[13]</sup>。

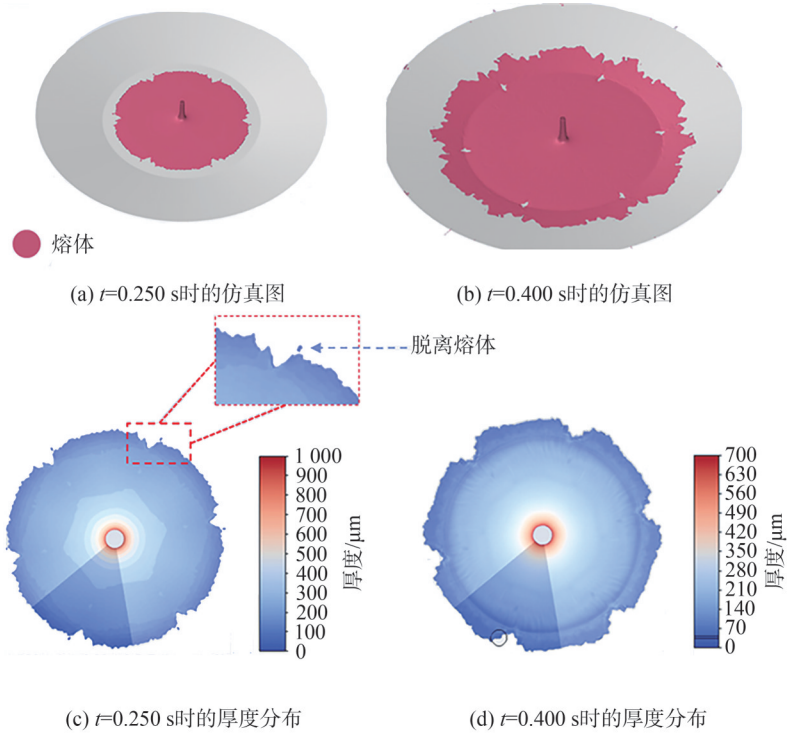


图2 黏度为 10 000 g/(m·s)的熔体在离心纺丝盘上不同时间点的厚度分布仿真

Fig. 2 Simulation of the thickness distribution of a melt with a viscosity of 10 000 g/(m·s) on a centrifugal spinning disk at different time instants

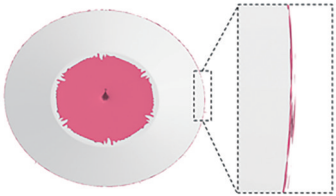


图3 无射流先导作用时( $t=0.257$  s)熔体分布  
Fig. 3 Melt distribution without jet-guided effect ( $t=0.257$  s)

由仿真结果可知,高黏度的熔体在注入离心纺丝盘时熔体厚度分布波动加剧,飞溅性增强,这主要归因于高黏度熔体较强的抗剪切变形能力<sup>[14]</sup>。本研究结果表明,射流先导作用可有效降低飞溅发生频率,而封闭式离心纺丝盘能够从物理空间上限制飞溅熔体的逸出,二者协同确保了高黏度体系下熔体分配的均匀性以及纺丝过程的稳定性。

3.1.2 射流先导对熔体注入稳定性的实验验证

由第 3.1.1 节的仿真实验可以看出熔体的进料对纺丝稳定性具有重要影响<sup>[15]</sup>,因此设计了具有先导作用的注料法兰(下端口直径 2.00 mm),通过缩小流通截面,在相同流量下大幅提升熔体线速度,克服爬杆效应和气流干扰<sup>[16]</sup>。

图 4 为安装了具有先导作用的注料法兰前后,每隔 10 s 拍摄的 PP 物料流动状态数码照片。未安装法兰时,PP 熔体柱中出现明显气泡且流动不均匀(如红色箭头所示),易受到外界因素的影响。而加入了具有先导作用的注料法兰之后,熔体柱在流动方向上变得均匀,也看不到气泡的产生。原因是加入具有先导作用的注料法兰之后,由于注射孔孔径的缩小,PP 熔体柱流动的速度明显增加,PP 熔体的流动更加均匀。

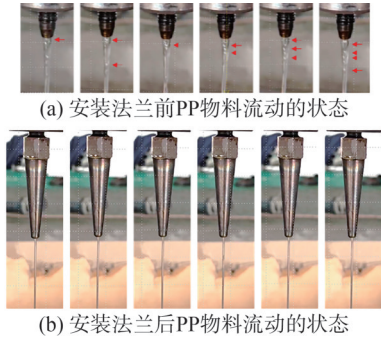


图4 具有先导作用的注料法兰安装前后 PP 物料流动状态的数码照片

Fig. 4 Digital photos of PP material flow state before and after installation of the leading-in injection flange

图5展示了安装具有先导作用的注料法兰前后PP物料注入速度在不同工艺条件下的变化规律。如图5所示,先导法兰对注入速度的提升效果显著,且在不同转速和进料频率下均保持有效。为了定量评估先导作用对注入速度的提升效果,实验测量了不同挤出机转速(10、30、60 r/min)下每10 s内熔体的注入质量,并根据式(2)和(3)计算平均流速。

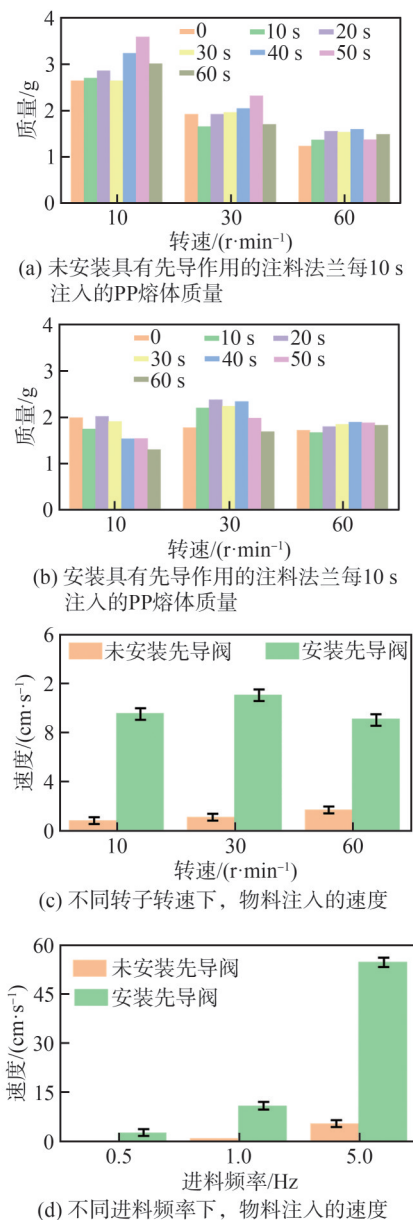


图5 安装具有先导作用的注料法兰前后PP物料注入速度变化对比

Fig. 5 Comparison of the injection speed of PP materials before and after installation of the leading-injection flange

$$q_m = \frac{\tilde{m}}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\tilde{u} = \frac{q_m}{A} \quad (3)$$

式(2)~(3)中, $\tilde{m}$ 、 $\Delta t$ 、 $A$ 、 $q_m$ 、 $\tilde{u}$ 分别代表熔体的质量、流

出时间、注料法兰出口横截面积、平均质量流速以及面平均质量流速。

未安装注料法兰时,在10、30、60 r/min转速下,PP物料的平均流速分别为0.9、1.1、1.7 cm/s。安装后,对应转速下的平均流速分别提升至9.6、11.1、9.1 cm/s(图5(c)),最大提升幅度达10.6倍。安装后不同转速下的流速差异明显缩小,表明先导注料法兰使得注入速度对挤出机转速的依赖性降低,输出更加均匀。同时观察结果发现,安装注料法兰后,60 r/min转速下的平均流速(9.1 cm/s)低于30 r/min下的11.1 cm/s,呈现非单调变化趋势。从挤出机塑化过程的热力学机制分析可知,PP为半结晶聚合物,其熔融塑化依赖于螺杆旋转产生的剪切热与机筒外部加热的协同作用。当转子转速由30 r/min升至60 r/min时,物料在挤出机内的停留时间显著缩短,单位质量物料所获取的剪切热与外部传热均相应减少,导致熔体实际温度低于设定值,黏度升高。因此,尽管螺杆转速提高,实际从挤出机出口挤出的熔体质量流量反而下降,从而使注料法兰出口流速降低。进一步计算在转子转速固定在60 r/min时,不同进料速度下,PP物料流速的变化(图5(d))。结果显示,安装注料法兰后,各进料频率下的流速均显著提升,说明该设计具有良好的工艺适应性。上述实验证实,射流先导作用有助于实现熔体稳定、快速注入,为后续稳定纺丝奠定了关键基础<sup>[17]</sup>。

### 3.2 离心熔喷与旋风拉伸协同实验结果分析

#### 3.2.1 离心加速度和纺丝温度对纤维形貌的影响

图6为在纺丝温度190℃条件下,离心加速度对纤维形貌和直径分布的影响。从图6可以看出,离心加速度较低时(20 000 m/s<sup>2</sup>),纤维大多呈现叶片状。当离心加速度提高到40 000 m/s<sup>2</sup>和60 000 m/s<sup>2</sup>时,纤维的形态变得较圆润。这主要是因为离心加速度较小时,纤维从喷丝孔喷出后初速度不足,同时喷丝孔壁对于熔体有挤压作用,产生了叶片状的纤维<sup>[18]</sup>。从图6中还可以看出,叶片状纤维及粗细不均匀的形貌在190℃条件下的各离心加速度样品中均普遍存在,并非局部区域的偶然现象。从纤维直径统计结果发现,拟合的直径分布曲线与高斯函数吻合程度偏低<sup>[19]</sup>,进一步从统计角度证实了该温度下纤维均匀性不足的整体性特征,而且随着离心加速度的提升,纤维的均匀程度进一步降低<sup>[20]</sup>。

由图6(c)、(d)、(f)可知:190℃下纤维平均直径随离心加速度呈现先降后升的非单调趋势,离心加速度从20 000 m/s<sup>2</sup>提高至40 000 m/s<sup>2</sup>时,离心力对熔体的拉伸作用增强,纤维直径细化;进一步提高至60 000 m/s<sup>2</sup>,纤维直径回升至3.0 μm。回升的原因是由于过高的离心

加速度使初生纤维在拉伸过程中所受应力超过熔体强度极限,导致纤维断裂并形成大量短纤维,这些短纤维在高速旋转气流中相互碰撞、缠结,堆积形成粗纤维及

颗粒,使统计平均直径回升<sup>[5]</sup>。同时,该温度下熔体黏度较高导致流动性不足,断裂后的短纤维难以在离心力作用下重新拉伸融合,进一步加剧了粗化现象<sup>[21]</sup>。

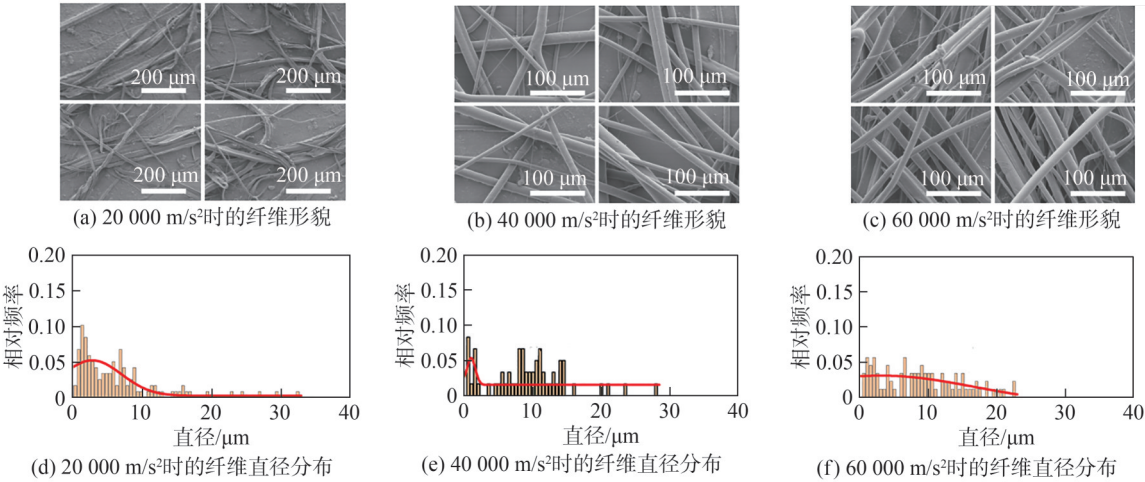


图 6 纺丝温度 190 °C 条件下离心加速度对纤维形貌和直径分布的影响

**Fig. 6 Effect of centrifugal acceleration on fiber morphology and diameter distribution at a spinning temperature of 190 °C**  
图 7 为在纺丝温度为 210 °C 条件下,离心加速度对纤维形貌和直径分布的影响。从图 7 可以看出,当纺丝温度升高到 210 °C 时,拟合曲线的决定系数相较于 190 °C 条件下明显提升,这说明 210 °C 条件下的纤维直径分布

比 190 °C 条件下更接近于高斯分布。此时的纤维形态较 190 °C 时更加圆润,没有明显的扁平纤维产生,这主要是因为温度的提升使 PP 熔体的黏度降低,流动性提高,熔体离开喷丝孔后更容易进行拉伸成圆柱状的纤维<sup>[22]</sup>。

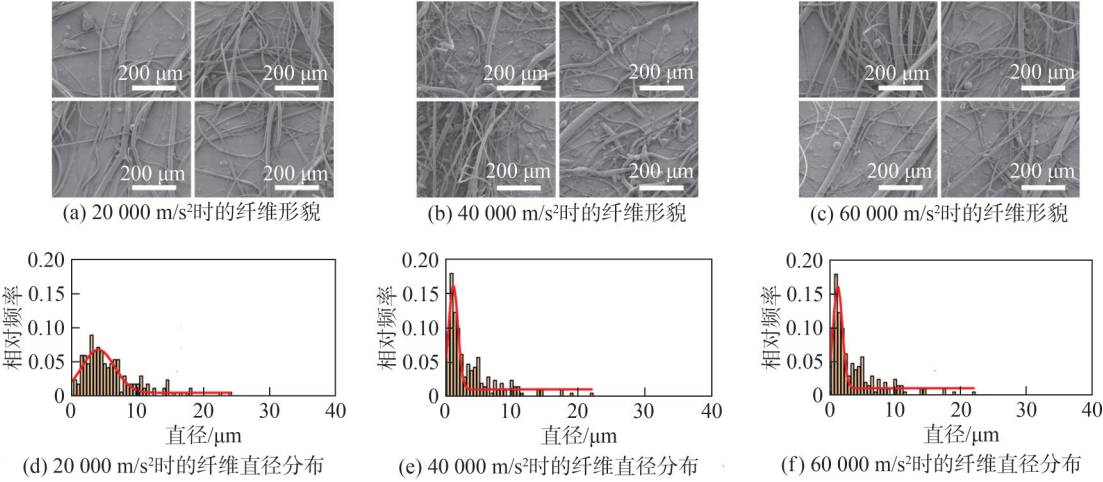


图 7 纺丝温度 210 °C 条件下离心加速度对纤维形貌和直径分布的影响

**Fig. 7 Effect of centrifugal acceleration on fiber morphology and diameter distribution at a spinning temperature of 210 °C**  
由图 7 可知,该条件下生产的纤维中也有少量的颗粒产生,颗粒的产生在 210 °C 条件下具有一定普遍性,且主要出现在纤维直径较细的区域。这是由于温度上升后,纤维在拉伸过程中更容易断裂<sup>[23]</sup>,少量的短纤维在甩出后堆积形成颗粒,属该温度条件下的非均质特征。此时的纤维分布更加均匀,离心加速度 20 000、40 000 和 60 000 m/s<sup>2</sup> 对应的纤维直径平均值分别为 4.0、1.3 和 2.1 μm,均小于 5.0 μm,说明在此温度下已经能够纺出较细的纤维。同时,从电镜和纤维直径统计中均可以看出,部分纤维的直径小于 1.0 μm,证明此工艺条件下已经成功制备出超细纤维。通过统计的平均直径变化可知,210 °C 条件下纤维平均直径随离心加速度的增加同样呈先减后增的趋势。但与 190 °C 相比,210 °C 时熔体黏度降低,流动性改善,因此,纤维断裂后短纤维堆积程度减轻,粗化效应减弱。上述变化源于拉伸和断裂两种机制的竞争:低转速时离心力拉伸细化占主导,直径减小;转速过高时断裂堆积效应占优,直径回升;竞争使得纤维直径在特定转速区间内出现极小值<sup>[24]</sup>。  
图 8 为在纺丝温度为 230 °C 条件下,离心加速度对纤维形貌和直径分布的影响。从图 8 可以看出,进一步将温度升高到 230 °C 时,纤维直径分布更接近于高

斯分布,此时的纤维形态圆润,也没有明显扁平的纤维产生,温度的提升使PP熔体离开喷丝孔后更容易被拉伸成圆柱状的纤维<sup>[25]</sup>。与190℃和210℃条件下的纤维形貌差异不同,230℃下聚集体颗粒的增多是整个样品区域的普遍现象,而非局部偶发。这表明温度升高后PP物料的流动性提升,拉伸断裂概率增加进而易形成短纤维,短纤维在拉伸过程中堆积形成颗粒的趋势加剧<sup>[26]</sup>。此温度下,离心加速度为20 000、40 000和60 000 m/s<sup>2</sup>时产生的纤维直径平均值分别为1.5、1.1和1.4 μm,均小于2.0 μm,说明该工艺下已经能够产生超

细的纤维。其中:离心加速度为40 000 m/s<sup>2</sup>时,纤维直径平均值为1.1 μm;离心加速度为20 000、40 000和60 000 m/s<sup>2</sup>时的纤维直径最小值分别为0.4、0.2与0.6 μm,说明此工艺条件下已经产生了大量纳米级的纤维,纤维尺寸与传统的静电纺丝技术获取纤维直径相当,但生产效率远超静电纺丝<sup>[27]</sup>,纤维直径分布也更均匀。并且由于230℃时熔体黏度更低、流动性更好,断裂后的短纤维在高速旋转气流中更易被重新拉伸或分散,形成的聚集体颗粒尺寸相对较小<sup>[28]</sup>,平均直径回升幅度较190℃及210℃更为平缓。

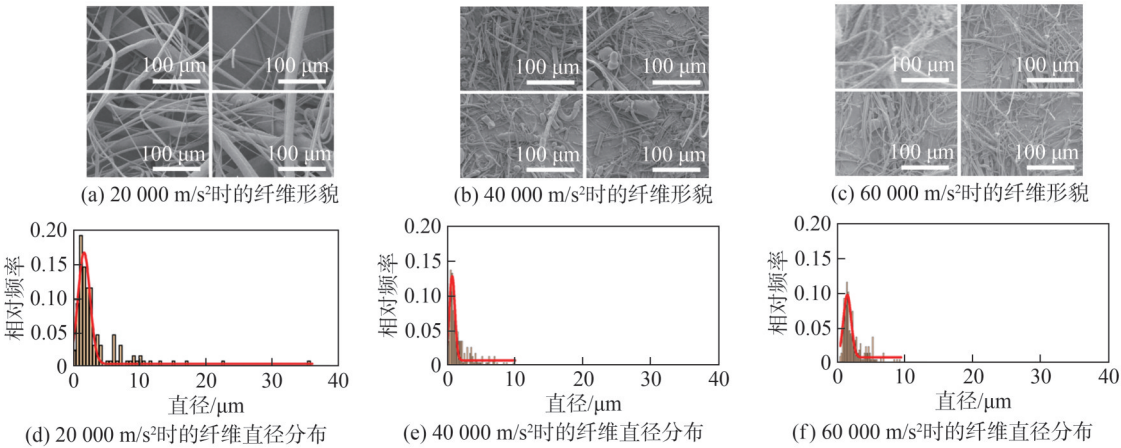


图8 纺丝温度230℃条件下离心加速度对纤维形貌和直径分布的影响

Fig. 8 Effect of centrifugal acceleration on fiber morphology and diameter distribution at a spinning temperature of 230℃

为了证明不同离心速度下,纤维的粗细是由其拉伸程度决定的,实验测定了不同离心加速度下获得的PP纤维的结晶行为,如图9所示,其中, $T_c$ 为PP的结晶温度, $\Delta H_c$ 为冷结晶焓。原始PP的结晶温度( $T_c$ )为112.3℃,冷结晶焓( $\Delta H_c$ )为93.5 J/g。在离心加速度20 000、40 000和60 000 m/s<sup>2</sup>下得到的PP纤维对应的

结晶温度分别为113.4、113.8和113.3℃,具体数据见表2。不同转速下PP纤维的结晶温度有一定上升,这是因为在离心拉伸过程中增加了纤维结晶取向速度,分子链运动受限,可能导致结晶不完善,需要更高的温度进行结晶<sup>[16]</sup>。其中,离心加速度40 000 m/s<sup>2</sup>对应的结晶温度最高,说明此时拉伸效果最明显。

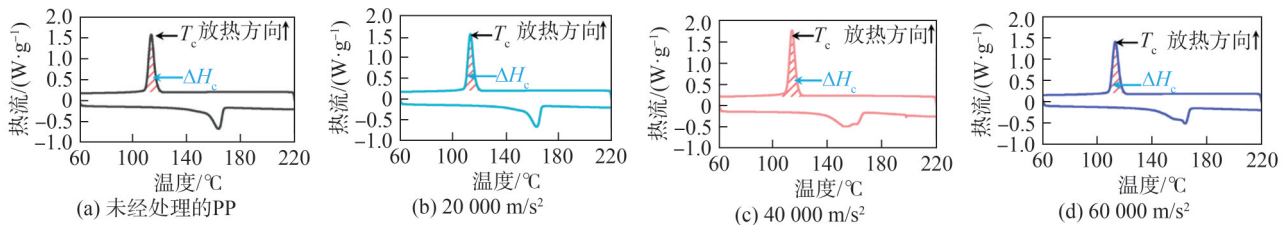


图9 离心熔喷过程中离心加速度对PP结晶性能的影响

Fig. 9 Effect of centrifugal acceleration on crystallization performance of PP in centrifugal melt-blowing process

表2 不同离心加速度下对PP结晶温度和结晶焓的统计  
Tab. 2 Statistics on crystallization temperature and enthalpy of crystallization of PP at different centrifugal accelerations

| 离心加速度/(m·s <sup>-2</sup> ) | $T_c$ /℃ | $\Delta H_c$ /(J·g <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------|----------|------------------------------------|
| 20 000                     | 113.4    | 87.0                               |
| 40 000                     | 113.8    | 99.0                               |
| 60 000                     | 113.3    | 83.3                               |

由表2数据得知,离心加速度60 000 m/s<sup>2</sup>下的结晶温度( $T_c$ )略低于离心加速度40 000 m/s<sup>2</sup>下的结晶温

度,与通常认知中高拉伸促进结晶的观点相悖,但高拉伸促进结晶的前提在于拉伸过程连续、稳定且纤维保持完整形态<sup>[29]</sup>;而该实验条件下的离心加速度60 000 m/s<sup>2</sup>过大使得熔体所受拉伸应力已超过其强度极限,纤维频繁断裂、射流不连续,分子链取向在断裂后发生松弛,有效取向程度反而降低。同时,断裂形成的短纤维在高速旋转气流中缠结堆积,生成大量结晶温度较低的颗粒和粗纤维,从而拉低了样品的整体结晶温度。据此推断,离心加速度为40 000 m/s<sup>2</sup>时纤维

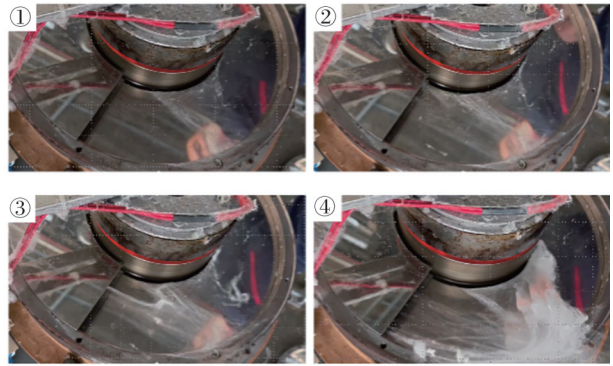
结晶温度最高,表明该条件为连续稳定拉伸的最优区间。

$\Delta H_c$  值同时证明了这一趋势,20 000、40 000 和 60 000  $\text{m/s}^2$  对应的  $\Delta H_c$  分别为 87.0、99.0 和 83.3 J/g,离心加速度为 40 000  $\text{m/s}^2$  时的  $\Delta H_c$  最高。取标准 PP 的  $\Delta H_c$  为 188.0 J/g,进一步计算出离心加速度为 20 000、40 000 和 60 000  $\text{m/s}^2$  时对应的纤维结晶度分别为 43.1%、52.7% 和 44.3%。表明成纤过程中离心加速度为 40 000  $\text{m/s}^2$  时纤维的结晶度最高,说明此时纤维的拉伸程度最高,这也和纤维的直径分布结果一致。

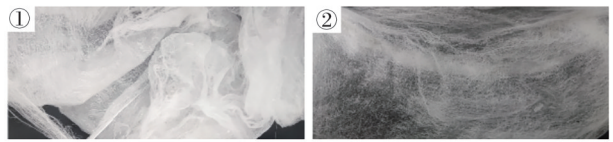
3.2.2 旋风拉伸对纤维形貌与性能的影响

采用优化工艺参数(纺丝温度 230  $^{\circ}\text{C}$ 、离心加速度 40 000  $\text{m/s}^2$ )制备纤维,对比引入风场前后的纤维性能,进一步探究旋风拉伸对纤维成型的影响。

图 10 为旋风流场对纤维拉伸时的过程照片。从图 10(a)中可以看出,纤维从风道中被拉伸后,产生的纤维较细,只能隐约地看到纤维的产生,说明纤维在风场的作用下迅速拉伸冷却。随着纺丝时间增加,纤维进一步增加,整体颜色更加亮白,且纤维直径分布更加均匀(10(b))。



(a) 风场下的纤维拉伸过程



(b) 风场下产生的纤维照片

图 10 旋风流场对纤维拉伸时的过程照片  
Fig. 10 Photographs of the fiber stretching process under the cyclone airflow field

图 11 为旋风拉伸后纤维的 SEM 图像和直径统计。由图 11 可以看出,旋风拉伸后的纤维仍保持圆柱状,无扁平结构,表明风场协同拉伸作用有效<sup>[30]</sup>。对纤维的直径进行统计(图 11(b)),拟合得到的平均直径为 1.0  $\mu\text{m}$ ,相比没有风场时的纤维平均直径(1.1  $\mu\text{m}$ ),旋风协同拉伸作用下的纤维的平均直径进一步减小。

表 3 为 3 种不同工艺下纤维的强度数据。从表 3 可

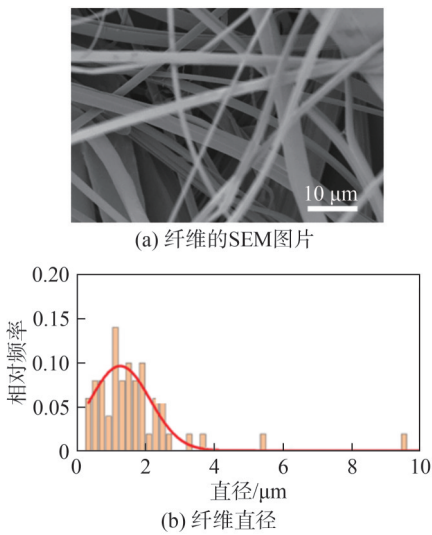


图 11 风场对于纤维形貌及直径分布的影响

Fig. 11 Effect of wind field on fiber morphology and diameter distribution

以看出,实验进一步对比了传统熔喷工艺以及有无风场拉伸时的纤维的力学强度。传统熔喷工艺生产的 PP 单丝强度仅为  $(1.5\pm 0.6)$  cN/dtex,而未加风场的纤维强度为  $(3.3\pm 0.8)$  cN/dtex,较传统工艺有大幅度提升。引入旋风拉伸后,纤维强度进一步被提升至  $(7.9\pm 1.1)$  cN/dtex,较无风场时提升 2.4 倍。这归因于风场促进了纤维的取向结晶和充分拉伸<sup>[31]</sup>,同时快速冷却有利于保持纤维的完整结构。

表 3 不同工艺下纤维的强度

Tab. 3 Strength of fibers in different processes

| 工艺方式   | 强度/(cN·dtex <sup>-1</sup> ) |
|--------|-----------------------------|
| 传统熔喷工艺 | 1.5±0.6                     |
| 无风场    | 3.3±0.8                     |
| 有风场    | 7.9±1.1                     |

4 结 论

本文针对高黏度聚合物离心熔喷纺丝过程中物料输送不稳定、熔体易飞溅及纤维拉伸不充分等问题,提出了一种射流先导与旋风拉伸协同的离心纺丝技术,并通过仿真与实验相结合的方法系统研究了该技术的成型机理及关键工艺参数对纤维形貌的影响。结论如下:

1)射流先导作用可有效抑制高黏度熔体的飞溅行为,封闭式离心纺丝盘从物理空间上限制了飞溅熔体的逸出,二者协同确保了高黏度体系下熔体分配的均匀性与纺丝过程的稳定性。无射流先导作用时,熔体在停止喂料后 0.00 7 s 内即发生严重飞溅。

2)射流先导注料法兰可使熔体注入速度最大提升 10.6 倍(由 1.7 cm/s 提升至 11.1 cm/s),有效消除了

高黏度物料的爬杆效应,实现了熔体的稳定、快速注入。

3)通过系统调控工艺参数,在纺丝温度为230℃、离心加速度为40 000 m/s<sup>2</sup>条件下成功制备出平均直径为1.1 μm的超细PP纤维。引入旋风拉伸后,纤维平均直径进一步降至1.0 μm,纤维单丝强度由3.3 cN/dtex提升至7.9 cN/dtex,较无风场时提升2.4倍。

射流先导、封闭式盘面与旋风拉伸的协同作用突破了传统离心熔喷工艺对高黏度聚合物的加工限制,为超细纤维的绿色高效制备提供了理论依据与技术途径。未来可进一步探究熔体温度、气流速度等工艺参数对纤维成型动力学的影响,并拓展该技术在其他领域的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] Xu Huaizhong, Yagi S, Ashour S, et al. A review on current nanofiber technologies: Electrospinning, centrifugal spinning, and electro-centrifugal spinning[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2023, 308(3): 2200502.
- [2] Amarakoon M, Alenezi H, Homer-Vanniasinkam S, et al. Environmental impact of polymer fiber manufacture[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(11): 2200356.
- [3] Chen Jia, Yu Zhongxun, Li Chenxi, et al. Review of the principles, devices, parameters, and applications for centrifugal electrospinning[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(8): 2200057.
- [4] Bier A M, Redel M, Schubert D W. Model to predict polymer fibre diameter during melt spinning[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2023, 2023: 7983819.
- [5] Rogalski J J, Botto L, Bastiaansen C W M, et al. A study of rheological limitations in rotary jet spinning of polymer nanofibers through modeling and experimentation[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(33): 48963.
- [6] Zhang Linmei, Narita C, Himeda Y, et al. Development of highly oil-absorbent polylactic-acid microfibers with a nanoporous structure *via* simple one-step centrifugal spinning[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 282: 120156.
- [7] Li Xiaolong, Zhang Congyuan, Gong Shang, et al. Biobased protective nonwovens integrating thermal management, antifouling, and absorption-dominated EMI shielding *via* melt centrifugal spinning[J]. *Macromolecules*, 2025, 58(5): 2649–2660.
- [8] Subbotin A V, Malkin A Y, Kulichikhin V G. The elasticity of polymer melts and solutions in shear and extension flows[J]. *Polymers*, 2023, 15(4): 1051.
- [9] Wang Chunming, Yang Bowen, Li Minghang, et al. Mechanism and performance of polypropylene fiber bundle formation based on annular airflow and hollow ring electrodes[J]. *Fibers and Polymers*, 2026, 27(5): 2485–2496.
- [10] Guo Yongkang, Zhao Fan, Rao Bingjun, et al. Centrifugal spinning technology: A study on the innovation of production equipment and the progress of CFD simulation and modelling[J]. *Journal of Donghua University(Natural Science)*, 2026, 52(1): 168–179. [郭永康, 赵帆, 饶秉钧, 等. 离心纺丝技术: 生产设备创新与CFD仿真模拟的进展研究[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2026, 52(1): 168–179.]
- [11] Wang Xinlong, Hu Xinpeng, Shi Zhanjin, et al. Polypropylene-based phase change films with enhanced optical properties achieved by hydrophilic coating for remarkable cooling performance[J]. *Polymer*, 2025, 327: 128364.
- [12] Gao Jingchen, Xiao Zhoufang, Shen Shuwei, et al. Improved hexahedral mesh generation from quadrilateral surface meshes[J]. *Computers & Structures*, 2025, 307: 107620.
- [13] Noroozi S, Hassanzadeh H, Arne W, et al. Centrifugal spinning of polymeric solutions: Experiments and modelling[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2023, 313: 104971.
- [14] Kántor J, Farnos R L, Gergely A L. Optimization of oil sorbent thermoplastic elastomer microfiber production by centrifugal spinning[J]. *Polymers*, 2023, 15(16): 3368.
- [15] Kulichikhin V G, Malkin A Y. The role of structure in polymer rheology: Review[J]. *Polymers*, 2022, 14(6): 1262.
- [16] More R V. A second opinion on the Weissenberg effect: The role of the second normal-stress difference in rod-climbing effect[J]. *Physics of Fluids*, 2026, 38(3): 033110.
- [17] Takarada W, Hatano S, Kikutani T. Experimental and numerical analysis of unstable behavior of melt blowing process[J]. *Journal of Fiber Science and Technology*, 2020, 76(7): 208–216.
- [18] Chen Boya, Wang Jiawei, Lai Zilong, et al. Modeling of spinning jet behavior and evaluation on fiber morphology for centrifugal spinning[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2022, 113(7): 1438–1449.
- [19] Malašauskiene J, Milašius R, Kuchanauskaitė E. Possibilities for the estimation of electrospun nanofibre diameter distribution by normal(Gaussian) distribution[J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2016, 24(2(116)): 23–28.
- [20] Ippolito J, Beachley V. A vertically translating collection system to facilitate roll-to-roll centrifugal spinning of highly aligned polyacrylonitrile nanofibers[J]. *Discover Materials*, 2023, 3(1): 31.
- [21] Praharn C, Roungpaisan N, Klinsukhon W, et al. Study on melt spinning of shaped hollow polypropylene fibers[J].

- International Polymer Processing, 2011, 26(1): 30–39.
- [22] Fang Yichen, Dulaney A R, Gadley J, et al. A comparative parameter study: Controlling fiber diameter and diameter distribution in centrifugal spinning of photocurable monomers[J]. Polymer, 2016, 88: 102–111.
- [23] Sokkar T Z N, El-Bakary M A, Azzam A A S, et al. Fractographic characterization of isotactic polypropylene fibers[J]. Microscopy Research and Technique, 2021, 84(5): 1022–1035.
- [24] Zhou Hongli, Tang Yufeng, Wang Zongliang, et al. Cotton-like micro-and nanoscale poly(lactic acid) nonwoven fibers fabricated by centrifugal melt-spinning for tissue engineering[J]. RSC Advances, 2018, 8(13): 6805.
- [25] Lu Ying, Lyu Dong, Han Cenhui, et al. Molecular weight and distribution dependent critical stress of fragmentation of highly oriented amorphous network in stretched isotactic polypropylene[J]. Macromolecules, 2023, 56(18): 7467–7478.
- [26] Chen Mingjing, Sun Xiaoxia, Wang Xinhou. Analysis of crystallization during polypropylene melt-blown fiber formation[J]. Textile Research Journal, 2023, 93(15/16): 3630–3641.
- [27] Hosseini Ravandi S A, Sadrjahani M, Valipouri A, et al. Recently developed electrospinning methods: A review[J]. Textile Research Journal, 2022, 92(23/24): 5130–5145.
- [28] Lim J, Choi S, Kim H S. Behavior of melt electrospinning/blowing for polypropylene fiber fabrication[J]. Polymer International, 2023, 72(1): 120–125.
- [29] Chen Liang, Liu Jie, Chen Jing, et al. New insights into orientation differences between skin and core regions of polyacrylonitrile fibers during pre-stabilization with the stretching process[J]. Polymer, 2020, 210: 123043.

- [30] Guo Dongjun, Zhu Zhisong, Yuan Jie. Numerical simulation into influence of airflow channel quantities on melt-blowing airflow field in processing of polymer fiber[J]. e-Polymers, 2023, 23: 20230126.
- [31] Ye Hao, Zhou Lele, Zhou Jing, et al. Flow field simulation and experimental study of centrifugal spinning[J]. Fibers and Polymers, 2024, 25(7): 2751–2761.

### 【校友简介】



瞿金平, 中国共产党党员, 中国工程院院士、华南理工大学教授、华中科技大学教授。国家杰出青年科学基金获得者、教育部高层次人才奖励计划特聘教授、全国先进工作者。现任华南理工

大学聚合物新型成型装备国家工程研究中心主任、广东省高分子先进制造技术及装备重点实验室主任和生物医用与防护材料湖北省工程研究中心主任。长期从事高分子材料加工成型装备技术与理论研究, 提出振动剪切形变和体积拉伸形变动态塑化输运方法及原理, 是国内外高分子产品外场强化先进制造理论及技术的奠基者与开拓者。获得中国发明专利权 100 多件、国际发明专利 20 余件; 发表 SCI 收录论文超过 300 篇, 出版著作(译著) 6 部, 其中国外出版英文专著 1 部。曾获国家技术发明奖二等奖 2 项、国家科学技术进步奖二等奖 1 项、中国专利金奖 2 项、省部级科技奖励特等奖 1 项和一等奖 5 项; 香港蒋氏科技成就奖、何梁何利基金科学技术创新奖、广东省科学技术奖突出贡献奖、全国创新争先奖、光华工程科技奖等奖励荣誉。

## Preparation of High-Viscosity Polypropylene Ultrafine Fiber Membranes by Centrifugal Spinning with Synergistic Jet-Guided and Cyclone-Assisted Stretching

TIAN Jiajun<sup>1</sup>, HU Xinpeng<sup>1</sup>, ZHOU Kang<sup>1</sup>, WU Ting<sup>1,2</sup>, LU Xiang<sup>1,2\*</sup>, QU Jinping<sup>1,2,3,4,5\*</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Engineering Research Center for Biomedical and Protective Materials, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

4. The Key Laboratory for Polymer Processing Engineering of Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Technique and Equipment for Macromolecular Advanced Manufacturing,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

### Abstract:

**Objective** Unstable melt feeding, severe splashing, and insufficient fiber stretching during centrifugal spinning of high-viscosity polymers considerably limit fiber quality and process continuity. To address these issues, this study proposes a hybrid technique combining a jet-guided feeding flange with cyclone-assisted aerodynamic stretching. The jet-guided flange was designed to stabilize melt injection by increasing the initial melt velocity, while the cyclone-induced airflow provides secondary stretching of the semi-solid fibers. The effects of spinning temperature (190–230 °C) and centrifugal acceleration (20 000–60 000 m/s<sup>2</sup>) on fiber morphology, diameter distribution, crystallinity, and mechanical properties were systematically investigated to identify the optimal processing conditions and elucidate the synergistic mechanism between flow control and

aerodynamic stretching.

**Methods** Transient melt flow on an enclosed rotating disk was simulated using ANSYS Fluent with a volume-of-fluid (VOF) multiphase model. The melt viscosity was set to 10 000 g/(m·s) at 230 °C. Two feeding modes, conventional gravity feeding and jet-guided injection, were compared under an identical disk rotation speed of 6 000 r/min. The simulation domain was discretized using hexahedral meshes, with local refinement near the disk surface. Based on the simulation results, spinning experiments were conducted using a custom-built centrifugal spinning apparatus. Polypropylene (PP, MFI = 26.2 g/10 min) was dried at 50 °C for 8 h, melted in an extruder (60 r/min; feed rate = 1.0 Hz), and injected into the spinning disk through a jet-guided flange with an exit diameter of 2.00 mm. The spinning temperature and centrifugal acceleration were varied from 190 to 230 °C and from 20 000 to 60 000 m/s<sup>2</sup>, respectively. A cyclone ring was mounted around the disk to generate an external airflow of 10 m/s for secondary stretching. The collected fibers were characterized by scanning electron microscopy for morphology, differential scanning calorimetry (DSC) for crystallization behavior, and single-fiber tensile testing for mechanical properties.

**Results and Discussions** Simulation results were used to compare the melt distribution behavior under two feeding modes: with and without jet-guided injection. Without jet-guided injection, the high-viscosity melt accumulated unevenly on the disk surface and exhibited severe splashing when feeding was interrupted. Within 0.007 s after feeding stopped, numerous melt droplets detached from the main body and were thrown toward the disk edge, resulting in significant thickness variations along the circumferential direction. In contrast, with jet-guided injection, the melt maintained a continuous and uniform film along the disk perimeter, with substantially less droplet detachment and splashing. The increased initial velocity imparted by the guiding flange effectively suppressed the rod-climbing effect and stabilized melt feeding, resulting in a more uniform melt distribution across the disk surface.

Experimental spinning revealed that spinning temperature and centrifugal acceleration significantly influenced fiber morphology and diameter distribution. At the lowest temperature (190 °C), the fibers exhibited irregular, ribbon-like morphologies and poor diameter uniformity at all tested centrifugal accelerations. The diameter distribution was broad, with some fibers reaching the nanometer scale while others exceeded 20 μm, indicating highly nonuniform melt stretching. As the temperature increased to 210 °C, the fiber morphology transitioned from ribbon-like to more cylindrical, and the diameter distribution narrowed considerably, although a small fraction of particulate material remained.

At 230 °C, uniform cylindrical fibers with smooth surfaces were consistently obtained, and the diameter distribution closely followed a Gaussian profile. The effect of centrifugal acceleration on fiber diameter exhibited a nonmonotonic trend at all temperatures. Increasing the acceleration from 20 000 to 40 000 m/s<sup>2</sup> promoted melt thinning and effectively reduced the fiber diameter. However, a further increase to 60 000 m/s<sup>2</sup> caused fiber breakage and re-entanglement of broken segments, resulting in a larger average diameter and the formation of agglomerated particles. Among all tested conditions, 230 °C and 40 000 m/s<sup>2</sup> consistently produced the finest and most uniform fibers.

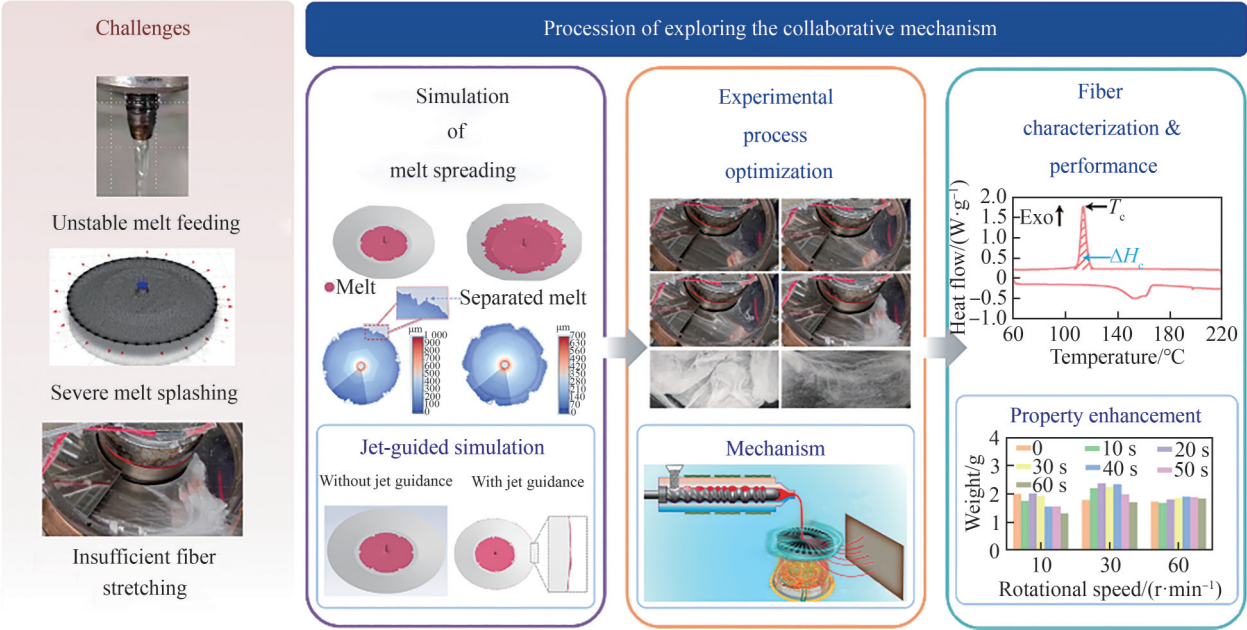
DSC analysis of the as-spun fibers revealed an upward shift in the crystallization temperature relative to that of the raw PP pellets, indicating that molecular chain orientation was induced by the elongational flow during spinning. The highest crystallization temperature was observed at 40 000 m/s<sup>2</sup>, suggesting degree of molecular chain alignment. In contrast, excessive acceleration at 60 000 m/s<sup>2</sup> resulted in reduced crystallinity, which may be attributed to frequent fiber breakage and subsequent relaxation of the molecular orientation.

The introduction of cyclone-assisted stretching further improved fiber quality. Fibers subjected to the external airflow exhibited more uniform diameters and smoother surfaces than those produced without aerodynamic stretching. The additional aerodynamic drawing force enhanced molecular orientation along the fiber axis, while the rapid cooling induced by the airflow helped preserve the oriented chain configuration, thereby improving the mechanical performance of the resulting fibers.

**Conclusions** This study demonstrates that the synergistic combination of jet-guided feeding and cyclone-assisted stretching effectively addresses key challenges in centrifugal spinning of high-viscosity polymers. The jet-guided injection flange stabilizes melt delivery by mitigating the rod-climbing effect and suppressing splashing, while the cyclone-induced airflow provides an additional aerodynamic drawing force that reduces fiber diameter and enhances molecular orientation. Under optimized conditions (230 °C and 40 000 m/s<sup>2</sup>), uniform ultrafine PP fibers with an average diameter of 1.1 μm were successfully produced. Cyclone-assisted stretching further reduced the average diameter to 1.0 μm and increased the single-fiber tensile strength by 2.4-fold. These findings demonstrate that controlled melt feeding and aerodynamic stretching can effectively overcome rheological limitations associated with high-viscosity polymer processing. The proposed approach offers a scalable pathway for producing high-performance ultrafine fibers and provides insights into the role of flow engineering in regulating fiber morphology and enhancing mechanical properties.

**Key words:** jet-guided; cyclone-assisted stretching; centrifugal spinning; ultrafine fibers; simulation and experiment

Graphical abstract:



(编辑 张 琼)

引用格式: Tian Jiajun,Hu Xinpeng,Zhou Kang,et al.Preparation of high-viscosity polypropylene ultrafine fiber membranes by centrifugal spinning with synergistic jet-guided and cyclone-assisted stretching[J].Advanced Engineering Sciences,2026, 58(5):34–44.[田嘉俊,胡新鹏,周康,等.射流先导与旋风拉伸协同离心纺丝制备聚丙烯超细纤维[J].工程科学与技术, 2026,58(5):34–44.]