

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.012

再生四中空自卷曲PET纤维的制备与性能

洪玉洁¹,任天翔²,傅玉成³,詹莹韬⁴,刘钊⁵,占海华^{2,6},戚栋明^{1,2},陈国明⁷,章松革³,徐煜东²

[1.浙江理工大学纺织科学与工程学院,杭州 310000; 2.现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室),浙江绍兴 312000; 3.浙江佳宝聚酯有限公司,浙江绍兴 312000; 4.凯泰特种纤维科技有限公司,浙江绍兴 312000; 5.浙江雅琪诺装饰材料有限公司,浙江绍兴 312000; 6.绍兴文理学院纺织科学与工程学院,浙江绍兴 312000; 7.浙江佳宝新纤维集团有限公司,浙江绍兴 312000]

摘要:为缓解聚对苯二甲酸乙二酯(PET)废弃物对环境造成的压力,采用化学法再生PET切片为原料,成功制备了再生四中空自卷曲纤维。通过系统分析原生与再生切片的流变性能,优化熔融工艺、纺丝组件、冷却工艺及卷绕工艺等关键参数,探究其对纤维可纺性及性能的影响。同时,对比了常规圆形纤维与四中空纤维的取向度差异,并观察了最佳工艺条件下纤维的横截面形貌。研究结果表明,化学法再生PET切片与原生切片的流变性能较为接近,具备良好的可纺性。在优化的工艺条件下,即当螺杆挤出机各区温度为292,296,298,297,296℃,纺丝温度为295℃,侧吹风风速为0.7 m/s,定型温度为50℃,卷绕速度为4 508 m/min时,所得纤维结晶度为26.04%,断裂强度达3.55 cN/dtex,断裂伸长率为48.69%,卷曲收缩率为13.40%,卷曲稳定度为76.59%。该纤维表现出优异的热学性能、力学性能和卷曲稳定性,同时具备良好的四中空截面结构。此外,声速法测试表明,四中空纤维取向度较低,但自卷曲性能和弹性回复能力优异,适用于功能性纺织品的应用。

关键词:聚对苯二甲酸乙二酯;化学法再生切片;中空自卷曲纤维;纺丝组件;生产工艺

中图分类号: TQ341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0091-08

Preparation and properties of recycled tetra-hollow self-crimping PET fibers

HONG Yujie¹, REN Tianxiang², FU Yucheng³, ZHAN Yingtao⁴, LIU Zhao⁵, ZHAN Haihua^{2,6}, QI Dongming^{1,2}, CHEN Guoming⁷, ZHANG Songge³, XU Yudong²

[1. School of Textile Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310000, China; 2. Key Laboratory of Modern Textile Technology Innovation Center (Jianhu Laboratory), Shaoxing 312000, China; 3. Zhejiang Jiabao Polyester Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 4. CTA High-tech Fiber Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 5. Zhejiang Aqinuo Decorative Materials Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 6. College of Textile Science and Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 7. Zhejiang Jiabao New Fiber Group Co., Ltd., Shaoxing 312000, China]

Abstract : To alleviate the environmental pressure caused by poly (ethylene terephthalate) (PET) waste, chemically recycled PET chips were used as raw materials to successfully produce four-hollow self-crimping fibers. The rheological properties of virgin and recycled chips were systematically analyzed, and key parameters (including the melting process, spinning assembly, cooling conditions, and winding process) were optimized to investigate their effects on fiber spinnability and performance. The orientation differences between conventional round fibers and four-hollow fibers were compared, and the cross-sectional morphology of fibers under optimal conditions was examined. The results show that the rheological properties of chemically recycled PET chips are close to those of virgin chips, ensuring good spinnability. Under optimized conditions, extruder temperatures of 292, 296, 298, 297, 296 °C, spinning temperature of 295 °C, side blow airflow velocity of 0.7 m/s, setting temperature of 50 °C, and winding speed of 4 508 m/min. The obtained fibers exhibit a crystallinity of 26.04%, breaking strength of 3.55 cN/dtex, elongation at break of 48.69%, crimp shrinkage of 13.40%, and crimp stability of 76.59%. The fibers demonstrate excellent thermal and mechanical properties, high crimp stability, and a well-defined four-hollow cross-sectional structure. Additionally, sonic velocity tests reveal that the

基金项目: 绍兴市产业关键技术攻关计划项目(2023B41002)

通信作者: 徐煜东, 硕士, 中级, 研究方向为差别化纤维材料

收稿日期: 2025-05-30

引用格式: 洪玉洁,任天翔,傅玉成,等.再生四中空自卷曲PET纤维的制备与性能[J].工程塑料应用,2025,53(8):91-98.

HONG Yujie, REN Tianxiang, FU Yucheng, et al. Preparation and properties of recycled tetra-hollow self-crimping PET fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 91-98.

four-hollow fibers have lower orientation but superior self-crimping behavior and elastic recovery, making them suitable for functional textile applications.

Keywords : polyethylene terephthalate ; chemical recycled chips ; hollow self-crimping fiber ; spinning assembly ; production process

在化纤产业快速发展的背景下,废弃聚酯材料及其纺织品资源化处理成为公众关注的焦点议题。鉴于环境保护和资源匮乏等多方面的压力,再生聚酯行业正迎来前所未有的发展机遇^[1]。针对聚酯类再生产品,其差异化和功能化是重要的发展方向^[2]。

自卷曲聚酯纤维是差别化纤维的一种,主要有双组分复合型和物理结构诱导型。双组分复合型主要由两种性能不同的原料进行复合纺丝,李明明等^[3]将低黏半消光聚对苯二甲酸乙二酯(PET)和聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)以50:50的质量比进行复合纺丝,实验数据显示,湿热处理的温度和时间是影响该纤维卷曲性能的关键因素。汪一栋等^[4]以PET切片和聚对苯二甲酸丙二酯(PTT)切片为原料,使用花生型喷丝孔,采取熔融纺丝的方式生产自卷曲复合纤维,研究发现,当拉伸倍数为2.85、卷绕角为6.5°、卷绕张力为0.16 cN/dtex、卷绕速度为4 100 m/min时,获得性能最佳纤维产品。物理结构诱导型自卷曲纤维主要是通过纤维截面形状或内部结构的不对称性,经受力或受热后产生卷曲。徐智泉^[5]将圆形、腰圆形、三角空腔形截面的纤维进行对比,发现三角空腔形截面的纤维卷曲数、卷曲回复率、卷曲弹性率最大,且卷曲形态的稳定程度和规整程度最佳。程强等^[6]以化学法再生聚酯PET切片为原料,采用“双C型喷丝板组件”制备仿羊毛纤维,实验表明当缓冷高度为70 mm、侧吹风为0.9 m/s、卷绕速度为4 700 m/min时,该纤维的卷曲程度最佳。目前,关于自卷曲纤维的制备工艺研究仍主要集中于以PET为代表的原生聚酯切片体系,而对再生聚酯的研究相对较少。

基于上述研究背景,笔者以化学法再生聚酯切片为原料,设计开发了一种四中空型喷丝板及四中空型喷丝孔,结合使用一种新型专用侧吹风窗,制备得到物理诱导型化学再生四中空自卷曲PET纤维,分析了原料流变性能,考察了熔融工艺、纺丝组件、冷却工艺、卷绕工艺等对纤维性能及可纺性的影响,提出了化学法再生PET高值化利用的可行技术路径,所制备的四中空自卷曲纤维在保暖、轻量化及功能性纺织品领域具有广阔的应用前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

再生半消光聚酯切片:特性黏度为 (0.640 ± 0.012) dL/g,端羧基含量为 (26 ± 4) mol/t,熔点为 (260 ± 4) °C,色度为6.7,浙江佳宝新纤维集团有限公司;

原生半消光聚酯切片:特性黏度为 (0.720 ± 0.012) dL/g,端羧基含量为30 mol/t,熔点为260 °C,色度为6.5,浙江佳宝新纤维集团有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双锥回转真空干燥机:SZG-1000,常州凯航干燥设备有限公司;

双螺杆挤出机:JK-81,北京中丽制机工程技术有限公司;

纺牵联合机:BKV546,北京中丽制机工程技术有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC1,瑞士梅特勒托利多公司;

同步热分析仪:TG/DTA6300,日本精工仪器有限公司;

转矩流变仪:HAAKE PolyLab QC,德国赛默飞世尔科技公司;

全自动长丝卷缩率测试仪:YG368,常州八方力士纺织仪器有限公司;

电子织物强力机:YG026Q,宁波纺织仪器厂;

溅射镀膜仪:MCM-100,韩国赛科有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):SU 3800,株式会社日立制作所;

纤维取向度测试仪:SCY-IV,上海凯历迪新材料科技股份有限公司。

1.3 试样制备

化学法再生PET切片经干燥结晶处理后,在螺杆挤出机中于292,296,298,297,296 °C的分区温度下充分熔融,熔体经过滤器除杂后由输送管道送至温度为295 °C的纺丝箱体。在纺丝箱体中,熔体通过计量泵精确控制流量,均匀分配至四中空型喷丝板,实现初生纤维的挤出成型;初生纤维在侧吹风风速分别为0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 m/s下冷却固化,再

通过油轮上油以改善后续加工性能;随后,纤维通过第一热辊进行拉伸取向,再于40,45,50,55,60 °C的第二热辊处进行热定型处理,以增强纤维结构的热稳定性和形态保持性;最终,纤维在设定卷绕速度为4 308,4 408,4 508,4 608,4 708 m/min的条件下完成收卷成型,制得再生四中空自卷曲纤维。

1.4 测试与表征

1.4.1 热学性能测试

采用DSC仪对样品的热学性能进行测试。称取约3~5 mg样品,在氮气氛围下,以10 °C/min的速率从25 °C升温至300 °C,并在该温度下保持3 min,最后以10 °C/min的速率降温至25 °C。结晶度(X_c)的计算公式见式(1)。

$$X_c = \Delta H_m / \Delta H_0 \quad (1)$$

式中: ΔH_m 为熔融焓,即熔融曲线中熔融峰的面积; ΔH_0 为全结晶PET的熔融热焓, ΔH_0 为125.6 J/g。

采用同步热分析仪对样品进行热重(TG)损失测试。称取约5 mg试样,在氮气气氛下测试,温度范围设定为25~700 °C,升温速率为10 °C/min。

1.4.2 流变性能测试

采用转矩流变仪对干燥后的切片进行流变性能测试。毛细管口模直径为1.5 mm,长径比为20,温度为270~300 °C(根据切片的特性黏数进行调整)。

1.4.3 力学性能测试

按GB/T 14344-2022采用织物强力机对纤维进行力学性能测试。设置试样的夹持长度为250 mm,预张力为0.05 cN,拉伸速度为500 mm/min,每个样品测试20次,取平均值。

1.4.4 形貌观察

采用SEM对纤维横截面进行观察。测试时,将样品粘贴在导电胶布上,利用溅射镀膜仪对其进行喷金处理后,在15 kV条件下进行观察。

1.4.5 卷曲性能测试

根据GB/T 6506-2017采用全自动长丝卷缩率测试仪对纤维卷曲性能进行测试。

1.4.6 取向度测试

采用纤维取向度测试仪对纤维进行取向度测试。设置预加张力为0.05 cN/dtex,分别测定长度(L)为20,40 cm的纤维内声波的传播时间 t_L (L 取值为20,40),连续记录10个 t_L ,每个试样测试5次取平均值。根据式(2)-式(4)^[7]计算样品的声速取向因子(f_s)。

$$\Delta t = 2t_{20} - t_{40} \quad (2)$$

$$C = \frac{L \cdot 10^{-3}}{(t_{40} - \Delta t) \cdot 10^{-6}} \quad (3)$$

$$f_s = 1 - \frac{C_u^2}{C^2} \quad (4)$$

式中: Δt 为延迟时间,单位s; t_{20} 为20 cm长度纤维内声波的传播时间,单位s; t_{40} 为40 cm长度纤维内声波的传播时间,单位s; C 为纤维试样的实际声速值,单位km/s; L 为纤维长度,单位cm; C_u 为无规纤维的声速值,聚酯的 C_u 为1.35 km/s。

1.4.7 沸水收缩率测试

按GB/T 6505-2017进行测试,在纤维试样中测量100 mm长度并标记 L_0 为100 mm,然后将试样置于100 °C沸水中处理15 min,取出自然晾干后测量标记间长度 L_1 ,测试10个试样取平均值。根据式(5)计算样品沸水收缩率 S 。

$$S = [(L_0 - L_1) / L_0] \times 100\% \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 原料的流变性能分析

图1为熔体表观黏度随剪切速率的变化。由图1可知,在相同剪切速率下,再生切片的表观黏度略低于原生切片,这是由于化学法再生切片在重新聚合的过程中,分子链仍可能因解聚时的断裂或残留杂质而缩短,导致平均分子量低于原生聚酯切片,致使表观黏度较低。但总体来说,随着剪切速率的提高,聚酯原生切片与再生切片的表观黏度均呈现下降趋势,表现出明显的剪切变稀行为,具有典型的假塑性流体特征^[8]。因此,化学法再生切片与原生切片的总体流变性能相近,能够满足高性能纤维制备的要求。

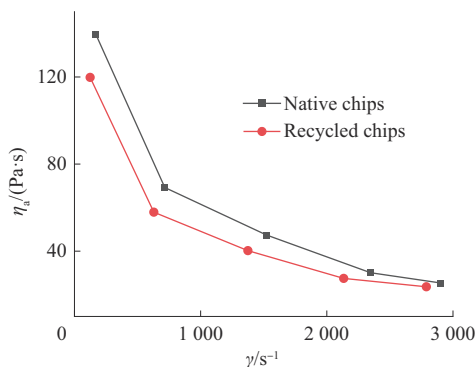


图1 熔体表观黏度(η_a)随剪切速率(γ)的变化

Fig. 1 Dependence of melt apparent viscosity(η_a) on shear rate(γ)

2.2 熔融工艺分析

2.2.1 螺杆挤出机温度

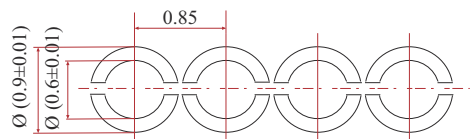
螺杆挤出机温度直接影响PET切片熔体的特性黏度,从而对纺丝质量产生影响^[10]。经试验,控制PET螺杆挤出机各区温度为292, 296, 298, 297, 296℃,纺丝过程稳定且纤维成型良好。

2.2.2 纺丝温度

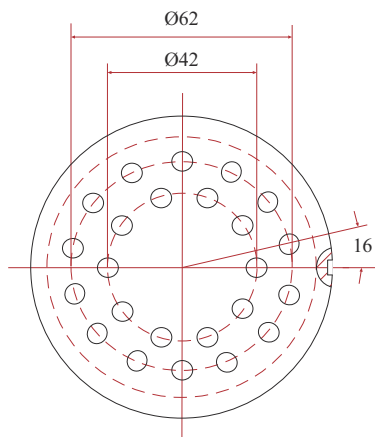
纺丝温度的设定将显著影响熔体的均一化程度和黏度指标。适宜的纺丝温度使熔体黏度较低,具有较好的流动性及均匀性。然而,过高的温度可能导致熔体在喷出时产生低分子挥发物黏连喷丝板表面,增加毛丝、断头的问题^[11]。若纺丝温度过低,熔体流动性较差,喷丝头拉伸时易发生断丝,可纺性较差。经试验,纺丝温度设定为295℃时,纤维可纺性良好。

2.3 纺丝组件选择

纺丝组件的选择直接关系到纤维可纺性及产品的质量^[12]。纺丝组件一般包括喷丝板、过滤网等。异形孔喷丝板是生产该自卷曲纤维的关键部件,通过将聚合物熔体从喷丝孔中挤出,形成特定截面的纤维^[13]。笔者采用四中空型喷丝孔,并于喷丝板上采用错位排列的方式,如图2所示。生产中,选用149~177 μm及177~250 μm金属过滤砂各60 g,纺丝过程稳定且成型良好。



(a) Spinneret specifications



(b) Spinneret hole arrangement

图2 喷丝板规格及排列(单位:mm)

Fig. 2 Specifications and arrangement of spinnerets(unit:mm)

2.4 冷却工艺分析

中空纤维是一种具有内部空腔结构的特种纤维,采用特殊设计的异形喷丝孔纺丝板加工制成^[11]。该中空纤维自然卷曲的性能主要由冷却成型条件形成,形成的机理为:当再生切片从喷丝板喷出后,采取强侧吹风冷却工艺,由于纤维内部存在四中空结构,致使纤维两侧存在不对称冷却,迎风坡丝束的冷却固化速率高于背风坡,固化速率快的一侧熔体细流内应力释放较少,大分子内部应力较为集中^[14],因此有较高的取向度和结晶度,大分子排列规整度较高。由于横截面两侧分子结构差异,经热处理后,迎风坡一侧的收缩形变程度较背风坡一侧小,呈现卷曲形态。

适宜的冷却风速利于纤维高结晶度的形成,但冷却风速过大,外部冷却快速而内部冷却缓慢,造成迎风面内外层冷却差异条件过大^[15],后期纤维拉伸过程中易出现断头和毛丝现象。冷却速度过低,易造成中空率下降,可纺性较低。控制冷却风速25℃和其他条件不变,改变冷却侧吹风风速为0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 m/s,纤维的热学性能和力学性能如图3和图4所示。

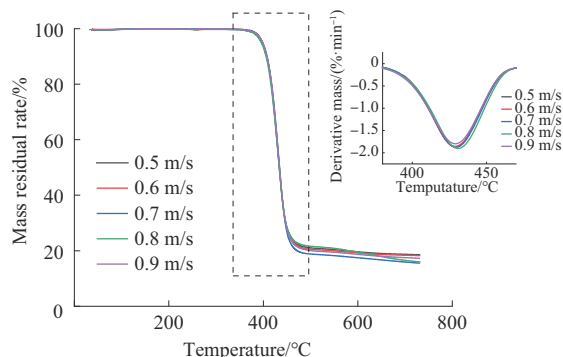


图3 不同侧吹风风速下纤维的TG曲线和DTG曲线

Fig. 3 TG and DTG curves of fiber under different side-blowing wind speed

由图3看出,在不同侧吹风风速下纤维的TG曲线和DTG曲线极为相似,质量损失率相近,均具有良好的热稳定性能。由图4可知,随着侧吹风风速的增加,纤维结晶度与断裂强度呈现先上升后下降的变化规律,而断裂伸长率则表现出相反的变化趋势。这是由于当侧吹风风速较低时,纤维冷却较缓慢,纤维大分子整体取向和结晶水平较低,导致纤维的断裂强度较低。随着侧吹风风速的提高,纤维的形变固化程度加快^[16],结晶区域增加,大分子的排列规整度提高,因此纤维断裂强度增大,但由于大

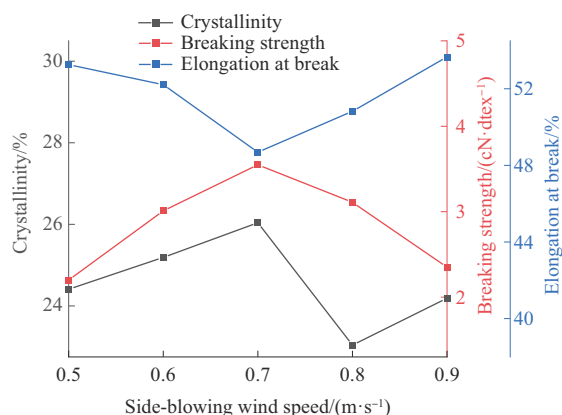


图4 侧吹风速度对纤维力学性能和结晶度的影响

Fig. 4 Influence of side-blowing wind speed on mechanics properties and crystallinity of fibers

分子之间的抱合力较强,致使纤维的断裂伸长率较低。若侧吹风风速过高,纤维冷却迅速,导致大分子链堆砌松散,无序区域比例增加,分子排列的有序性减弱使得纤维断裂强度减小,同时由于分子链可伸展性增强,表现出更高的断裂伸长率。

表2为不同侧吹风风速下纤维的卷曲性能。由表2可知,过高或过低的侧吹风风速均会导致卷曲性能下降。当风速过高时,纤维表层因快速冷却而形成高取向结构,而内层速率相对较慢,取向度较低,这种显著的冷却条件差异使得纤维在后续拉伸或热定型过程中,内层分子链难以有效收缩,导致卷曲回复力不足,最终表现为卷曲收缩率和卷曲稳定性的降低^[17]。反之,当风速过低时,纤维整体冷却速率过慢,大分子链因松弛时间过长而发生过度解取向,同时形成粗大的晶粒结构,这种低取向度高结晶度的微观结构特征严重制约了纤维的卷曲性能,使其难以形成理想的卷曲效果。

表2 不同侧吹风风速下纤维的卷曲性能

Tab. 2 Fiber crimp properties under different side-blowing wind speed

Side-blowing wind speed/(m·s ⁻¹)	Crimp shrinkage/%	Crimp stability/%
0.5	4.94	48.20
0.6	10.12	62.32
0.7	13.40	76.59
0.8	11.00	61.72
0.9	5.50	49.42

综上所述,最佳冷却侧吹风风速为0.7 m/s。

2.5 卷绕工艺分析

2.5.1 定型温度

定型温度的主要作用在于消除丝条之间的内应

力,同时优化拉伸过程诱导的超分子结构^[18]。控制其他条件不变,改变定型温度为40,45,50,55,60℃,纤维的热学性能和力学性能如图5和图6所示。

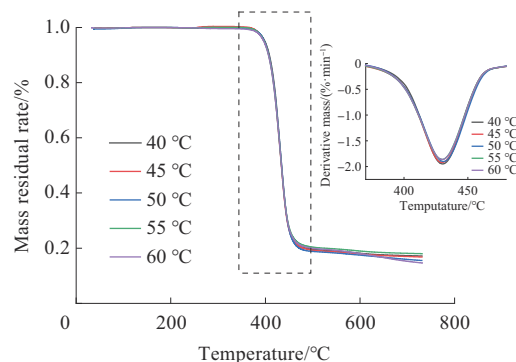


图5 不同定型温度下纤维的TG曲线和DTG曲线

Fig. 5 TG and DTG curves of fiber at different setting temperatures

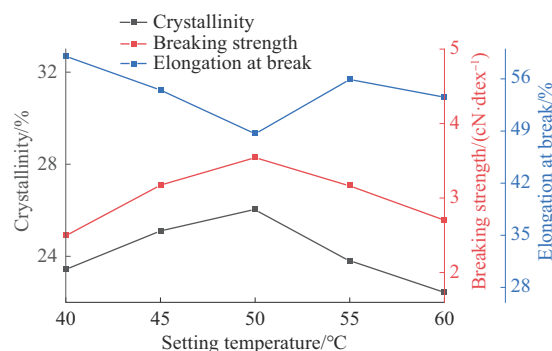


图6 定型温度对纤维力学性能和结晶度的影响

Fig. 6 Influence of setting temperature on mechanics properties and crystallinity of fibers

由图5可知,在不同定型温度下纤维的TG曲线和DTG曲线极为相似,质量损失率相近,均具有良好的热稳定性能。由图6可见,定型温度的提升使纤维结晶度和断裂强度呈现先增后减的变化规律,断裂伸长率的变化规律与之相反。这是由于随着定型温度的升高,纤维大分子因热激活效应获得更高的动能,其分子链段运动能力显著增强^[19],更易在拉伸方向发生选择排列,同时诱导更多非晶区分子链参与取向并形成有序结构^[20],内应力得到消除,直接表现为纤维的结晶度和模量提高,最终导致其断裂强度增大、断裂伸长率减小。当定型温度超过特定阈值,纤维大分子链的热运动会显著加强,解取向程度增大,分子链重排过程延长,难以在有限时间内形成稳定的晶核结构^[21],致使纤维结晶度下降,大分子间排列规整性变差,最终造成纤维断裂强度减弱。

综上所述,最佳定型温度为50℃。

2.5.2 卷绕速度

卷绕速度是影响该自卷曲中空纤维生产稳定性、产品质量及产能的关键参数之一^[22]。控制其他条件不变,改变卷绕速度为 4 308,4 408,4 508,4 608,4 708 m/min,纤维生产情况和性能见表 3。

表 3 数据显示,卷绕速度过高或过低,均不利于纤维的结晶度、力学性能和可纺性。若卷绕速度过低,纺丝张力较低,导致纤维所受的拉伸作用减弱,在此条件下,大分子链难以充分伸展并形成规整排列^[23],使得纤维内部结构的有序性下降,因此纤维的

结晶度和断裂强度较低,而分子链的可滑移性增加则使断裂伸长率升高。此外,由于纺丝张力不足,纤维在成形过程中更易发生断头和绊丝现象,严重影响生产的连续性和产品质量。若卷绕速度过高,纤维与设备之间的摩擦作用加剧^[24],同时纺丝张力也随之增大。这不仅会破坏纺丝稳定性,使断头率显著增加,还会影响纤维大分子链的取向排列过程,阻碍晶核的规整形成,导致纤维结晶度下降,最终影响力学性能。

综上所述,最佳卷绕速度为 4 508 m/min。

表 3 不同卷绕速度下纤维的生产情况和性能

Tab. 3 Production conditions and properties of fibers at different winding speeds

Winding speed/ (m·min ⁻¹)	Entanglements per unit	Breaks per unit	Crystallinity/%	Breaking strength/ (cN·dtex ⁻¹)	Elongation at break/%
4 308	19.1	8	22.14	2.30	54.26
4 408	8.7	6	22.95	3.02	50.77
4 508	1.5	1	26.04	3.55	48.69
4 608	12.3	6	23.87	2.94	49.69
4 708	19.6	9	22.59	2.33	42.85

Notes: Both entanglements and breaks are calculated based on 24-hour production data across 6 spinning positions.

2.6 纤维取向度分析

声速取向因子作为纤维分子取向的表征参数,反映了大分子链沿纤维轴向的排列程度,其数值越高说明分子链取向排列越规整^[7]。通过声速法测试分析发现,在最佳工艺参数条件下制备的四中空自卷曲纤维的声速取向因子为 2.91,而相同规格的常规圆形截面纤维的声速取向因子则达到 7.19。这一显著的声速差异主要归因于四中空纤维独特的成型机理:首先,在纺丝过程中,由于纤维截面存在四个对称分布的空腔结构,导致聚合物熔体在喷丝板出口处经历非对称的拉伸流动;其次,在后续的冷却固化阶段,由于纤维内部空气层的热阻隔效应,纤维两侧的冷却速率存在明显梯度差异,这种非均质冷却过程使得纤维截面产生不均匀的结晶度分布,进而导致大分子链沿纤维轴向的取向排列出现区域性差异,最终表现为整体取向度的显著降低。这种特殊的结构特征虽然降低了纤维的声速取向值,但恰恰赋予了纤维优异的自卷曲性能和弹性回复能力,为其在功能性纺织品领域的应用提供了独特的优势。

2.7 纤维形态及性能分析

图 7 为纤维横截面的 SEM 照片,如图 7 所示,通过 SEM 可观察到纤维截面呈现出典型的四中空结构,四个空腔水平排列。该独特的截面形貌特征表

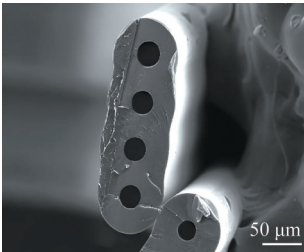


图 7 纤维横截面的 SEM 照片

Fig. 7 SEM photo of fiber cross-section

明,纤维在纺丝过程中形成了稳定的中空结构,四中空结构的存在不仅增加了纤维的表面积,更通过空气层的存在显著提升了纤维的保暖性能,同时这种特殊截面形态在后续加工过程中能够产生持久的立体卷曲效果,从而确保最终纺织品具有良好的蓬松性和弹性保持率。

笔者制备的四中空纤维与程强等^[6]采用化学再生法制备的“双 C”型自卷曲纤维的性能对比结果见表 4。通过对比分析可以发现,该四中空纤维展现出显著的性能优势:在力学性能方面,其断裂强度

表 4 纤维性能对比

Tab. 4 Comparison of fiber properties

Fiber types	Breaking strength/ (cN·dtex ⁻¹)	Elongation at break/%	Boiling water shrinkage /%
Double C- shaped fiber	2.75	56.50	3.02
Four-hole hollow fiber	3.55	48.69	7.40

达到3.55 cN/dtex,较“双C”型纤维提升了约29.1%,这主要得益于其独特的四中空对称结构能够实现更均匀的应力分布,从而显著增强了纤维的抗变形能力;在热稳定性方面,该纤维的沸水收缩率为7.4%,虽然略高于对比样品,但这种适度的收缩特性反而有利于维持和稳定纤维的卷曲结构,且符合工业应用对尺寸稳定性的要求。综合来看,该四中空结构的设计在保证纤维良好力学性能的同时,也兼顾了较好的卷曲性和尺寸稳定性,展现出优异的综合性能。

3 结论

(1)以化学法再生PET切片为原料,成功制备了四中空自卷曲纤维。在最佳工艺参数下,即侧吹风风速0.7 m/s、定型温度50℃、卷绕速度4 508 m/min,纤维表现出良好的可纺性与加工性能。

(2)最佳工艺下制备的纤维具有优异的综合性能:结晶度为26.04%,拉伸强度为3.55 cN/dtex,断裂伸长率为48.69%,卷曲收缩率为13.40%,卷曲稳定度为76.59%,声速取向因子为2.91。这些性能指标表明该纤维具备良好的力学性能和结构稳定性,在高端功能性纺织品、产业用纺织品及绿色环保材料等领域展现出广阔的应用前景,有利于推动聚酯行业的可持续发展。

参考文献

- [1] PATTI A, CICALA G, ACIERNO D. Eco-sustainability of the textile production: Waste recovery and current recycling in the composites world[J]. *Polymers*, 2021, 13(1). DOI: 10.3390/polym13010134.
- [2] 张逢书,王乾琛,吴金亮,等. 222 dtex/30 f“8”字形涤纶高取向丝的开发[J]. *合成纤维*, 2021, 50(6):10-13.
ZHANG Fengshu, WANG Qianchen, WU Jinliang, et al. Development of 222 dtex/30 f “8” shaped polyester HOY[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2021, 50(6):10-13.
- [3] 李明明,李军令,陈烨,等. 湿热处理对并列复合聚酯纤维性能的影响[J]. *合成纤维*, 2019, 48(8):12-15.
LI Mingming, LI Junling, CHEN Ye, et al. Effect of wet-heat treatment on properties of side-by-side composite polyester fiber[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2019, 48(8):12-15.
- [4] 汪一栋,卢新宇,王春燕,等. PTT/PET自卷曲复合纤维的工艺性能[J]. *合成纤维*, 2020, 49(4):8-10.
WANG Yidong, LU Xinyu, WANG Chunyan, et al. Study on the process performance of self-crimping PTT/PET composite fiber[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2020, 49(4):8-10.
- [5] 徐智泉. 三维卷曲涤纶中空纤维的形态与性能研究[J]. *广东蚕业*, 2018, 52(8):102-104.
- [6] 程强,孙亚龙,何建利,等. 化学法循环再生仿羊毛聚酯纤维卷曲风格的工艺探究[J]. *高科技纤维与应用*, 2023, 48(2):80-83.
CHENG Qiang, SUN Yalong, HE Jianli, et al. Study on the process of chemical recycling for the curling style of wool-like polyester fibers[J]. *Hi-Tech Fiber and Application*, 2023, 48(2):80-83.
- [7] 张颖,宋明根,姬洪,等. 热定形工艺对高强度聚酯工业丝结构性能的影响[J]. *纺织学报*, 2023, 44(9):43-51.
ZHANG Ying, SONG Minggen, JI Hong, et al. Influence of heat-setting process on structure and properties of high-tenacity polyester industrial yarns[J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(9):43-51.
- [8] 崔宁,原玲,王玥,等. 对聚酯切片流变行为的研究[J]. *纺织科学研究*, 2002, 13(3):36-40.
CUI Ning, YUAN Ling, WANG Yue, et al. Study on rheological behavior of polyester chips[J]. *Textile Science Research*, 2002, 13(3):36-40.
- [9] 高仪祥. 水分对PET聚酯切片流变性能测试的影响[J]. *合成技术及应用*, 2015, 30(2):56-60.
GAO Yixiang. Influence of moisture content on the rheological properties measurement of polyester chips[J]. *Synthetic Technology & Application*, 2015, 30(2):56-60.
- [10] 刘树生. HMLS涤纶工业丝生产工艺探讨[J]. *合成纤维工业*, 2024, 47(3):83-86.
LIU Shusheng. Discussion on production technology of HMLS polyester industrial yarn[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2024, 47(3):83-86.
- [11] 陈明,金管范,王永锋. 涤纶半消光中空(167dtex/24f)FDY的开发[J]. *聚酯工业*, 2022, 35(1):41-43.
CHEN Ming, JIN Guanfan, WANG Yongfeng. Development of polyester semi-dull hollow(167dtex/24f) FDY[J]. *Polyester Industry*, 2022, 35(1):41-43.
- [12] 张尚堃,沈洪良,庄剑锋,等. 熔体直纺51dtex/72f涤纶预取向丝生产工艺探讨[J]. *合成纤维*, 2024, 53(4):13-15.
ZHANG Shangduo, SHEN Hongliang, ZHUANG Jianfeng, et al. Discussion on the production process of 51dtex/72f polyester pre-oriented yarn by melt direct spinning[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2024, 53(4):13-15.
- [13] 吴万桦,钱晓明,唐孝颜,等. 熔体纺丝异形化纤维及其非织造材料的应用研究进展[J]. *现代纺织技术*, 2025, 33(2):10-22.
WU Wanhua, QIAN Xiaoming, TANG Xiaoyan, et al. Research progress on the application of melt spinning profiled fibers and nonwoven materials[J]. *Advanced Textile Technology*, 2025, 33

- (2):10-22.
- [14] 林冬. 吸光发热涤纶中空纤维生产工艺[J]. 合成技术及应用, 2019, 34(4):31-35, 44.
- LIN Dong. Production technology of absorbing light and heating polyester hollow fiber[J]. Synthetic Technology & Application, 2019, 34(4):31-35, 44.
- [15] 张明成. 锦纶6FDY分纤母丝纺丝工艺对产品质量影响的探讨[J]. 纺织机械, 2015(8):76-79.
- ZHANG Mingcheng. Discussion on the influence of spinning process of nylon 6FDY fiber splitting mother yarn on product quality[J]. Textile Machinery, 2015(8):76-79.
- [16] 陈蕾, 张桂萍, 王亚江, 等. “8”字形涤纶中空纤维生产工艺的探讨[J]. 合成纤维, 2023, 52(7):26-28.
- CHEN Lei, ZHANG Guiping, WANG Yajiang, et al. Discussion on the production technology of “8” shaped polyester hollow fiber[J]. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(7):26-28.
- [17] WU Yuhao, LANG Jiarui, ZHANG Shengming, et al. Preparation and properties of self-crimping polyamide-based side-by-side bicomponent elastic fibers[J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2024, 41(6):569-581.
- [18] 郭大生, 王文科. 聚酯纤维科学与工程[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2001.
- GUO Dasheng, WANG Wenke. Polyester fiber science and engineering[M]. Beijing: China Textile & Apparel Press, 2001.
- [19] 谢巧丽, 王建虎. 熔体直纺缝纫线用PA 66纤维生产工艺探讨[J]. 合成纤维工业, 2024, 47(2):83-87.
- XIE Qiaoli, WANG Jianhu. Discussion on production process of direct melt-spun PA 66 fiber for sewing thread[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2024, 47(2):83-87.
- [20] 李传达, 金管范, 王永锋, 等. 圆型双组分弹力纤维(66/12)工艺探究[J]. 聚酯工业, 2024, 37(3):55-57, 61.
- LI Chuanda, JIN Guanfan, WANG Yongfeng, et al. Exploration of round two-component elastic fiber (66/12)[J]. Polyester Industry, 2024, 37(3):55-57, 61.
- [21] 王昊宇, 王立诚, 马一春, 等. 回收餐盒制备细旦聚丙烯纤维的研究[J]. 合成纤维工业, 2023, 46(6):6-10, 19.
- WANG Haoyu, WANG Licheng, MA Yichun, et al. Preparation of fine denier polypropylene fiber recycled from food containers[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2023, 46(6):6-10, 19.
- [22] 王春燕, 庄维峰, 王晓明, 等. 熔体直纺288 dtex/288 f全消光扁平PET POY的生产工艺研究[J]. 合成纤维工业, 2024, 47(1):81-84, 89.
- WANG Chunyan, ZHUANG Weifeng, WANG Xiaoming, et al. Production process of direct melt-spun 288 dtex/288 f full-dull flat PET POY[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2024, 47(1):81-84, 89.
- [23] 董海良, 杨新华. PTT/PET并列复合卷曲纤维生产工艺探讨[J]. 合成纤维, 2022, 51(6):14-16, 19.
- DONG Hailiang, YANG Xinhua. Discussion on the production process of side-by-side PTT/PET composite crimp fiber[J]. Synthetic Fiber in China, 2022, 51(6):14-16, 19.
- [24] 刘创, 李永贵, 麻文效, 等. 细旦ES纤维制备工艺与性能研究[J/OL]. 化工新型材料, 2025:1-9[2025-04-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2357.TQ.20250418.1642.005>.
- LIU Chuang, LI Yonggui, MA Wenxiao, et al. Study on preparation technology and properties of fine denier ES fiber[J/OL]. New Chemical Materials, 2025:1-9[2025-04-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2357.TQ.20250418.1642.005>.