

纺丝工艺对尼龙66民用长丝物理性能的影响

庄熠¹, 方辉¹, 葛睿², 张子明², 贾丰慧², 陈晖³

(1. 福建理工大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建永荣锦江股份有限公司, 福建 福州 350212;

3. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 以尼龙66半消光切片为原料, 采用熔融纺丝工艺制备70 dtex/34 f半消光全拉伸丝, 系统研究了纺丝温度、纺丝速度及热辊温度对纤维性能的影响。结果表明: 纺丝温度290℃时, 结晶度达22.69%, 断裂强度为3.99 cN/dtex, 熔体流动性与热稳定性平衡最佳; 纺丝速度4 600 m/min时, 断裂强度达3.94 cN/dtex, 有效避免了高速纺丝的熔体破裂问题; 热辊温度设置为GR1=120℃、GR2=140℃时, 断裂强度提升至4.36 cN/dtex, 性能均匀性最优。优化后的工艺参数为运动服饰、内衣面料等民用纺织品提供了技术基础。

关键词: 尼龙66; 熔融纺丝; 工艺优化; 断裂强度

中图分类号: TQ340.6

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)06-0578-06

Effects of spinning process on physical properties of nylon 66 civil filament

ZHUANG Yi¹, FANG Hui¹, GE Rui², ZHANG Ziming², JIA Fenghui², CHEN Hui³

(1. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Eversun Jinjiang Co., Ltd., Fuzhou 350212, China;

3. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Nylon 66 semi-dull chips were used as raw material and melt spinning process was employed to prepare 70 dtex/34 f semi-dull fully drawn yarn (FDY). The effects of spinning temperature, spinning speed, and hot roller temperature on fiber properties were systematically investigated. Results show that at the spinning temperature of 290℃, the crystallinity reaches 22.69% and the breaking strength is 3.99 cN/dtex, achieving the optimal balance between melt fluidity and thermal stability; at the spinning speed of 4 600 m/min, the breaking strength reaches 3.94 cN/dtex, effectively avoiding melt fracture caused by high-speed spinning; when the hot roller temperature is set to be GR1=120℃ and GR2=140℃, the breaking strength improves to be 4.36 cN/dtex with optimal performance uniformity. The optimized process parameters provide a technical foundation for civil textiles such as sportswear and underwear fabrics.

Keywords: nylon 66; melt spinning; process optimization; breaking strength

尼龙66制成的纤维具有断裂强度高、耐热性强、耐磨、耐腐蚀等优点, 市场需求主要表现在织袜、内衣、体操服、休闲服、滑雪衫、泳装等纺织产品^[1]。近几年, 常规尼龙66民用长丝在市場中的份额逐年提升。同时, 行业内的竞争也愈加激烈,

为了能够提升纤维的力学性能和外观品质, 各大生产厂家不断更新生产设备, 提升产品质量。尼龙66民用长丝质量均匀稳定性直接影响最终生产产品质量, 由于尼龙66丝易出现断头、飘丝等情况, 为解决上述问题, 需在关注尼龙66纺丝熔

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 福州市科技重大项目(2023-ZD-002)

第一作者简介: 庄熠(2001—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 研究方向: 高分子材料。

通信作者: 方辉(1979—), 男, 福建福州人, 教授, 博士, 研究方向: 高分子材料加工与改性。

体可纺性的同时,改进纺丝工艺技术,从而提高尼龙 66 的质量^[2]。

国内聚酰胺纤维纺丝工艺研究已取得一定进展,如刘冰灵^[3]等针对 22 dtex/68 f 尼龙 6 全牵伸丝(FDY),创新采用外环吹冷却系统解决传统侧吹风冷却不均问题,通过研究定形温度、卷绕速度等参数对纤维性能的影响,为细旦聚酰胺纤维生产稳定性提供技术参考。但该研究并未涉及纺丝温度、热辊温度多参数协同作用,也未针对民用长丝特定工艺展开探究,无法满足民用场景对纤维性能多样化的需求。

国外尼龙 66 研究更注重表面功能化改性工艺机理解析,如 Weclawski 等^[4]创新性提出常压冷等离子体-紫外复合改性技术,成功在尼龙 66 织物表面引入活性官能团且兼顾纤维本体完整性,但多针对织物形态,鲜少结合民用长丝场景化性能需求开展工艺研究。

综上,本研究以 70 dtex/34 f 半消光尼龙 66 全拉伸丝(FDY)的纺制为例,在纺丝试验机上系统探讨了纺丝温度、速度及热辊温度的协同作用机制,期望为不同民用场景提供高性能产品,例如满足运动服装的高强度需求、内衣的柔软性要求及家纺面料的表面光滑特性,并为生产企业提供工艺参考。

1 实验

1.1 实验原料

尼龙 66 半消光切片:英威达公司生产,相对黏度为 2.524 dL/g,含水率为 781.8×10^{-6} ,端氨基 57.31 mol/t,可萃取物 0.34%,玻璃化转变温度 57.3 °C,熔点 259.6 °C。STANTEX S 6352AY 型纺丝油剂:德国科凯生产,油剂浓度为 7%。

1.2 实验设备参数

螺杆挤出机:淄博方辰机械科技有限公司制造,采用 TYCD-802-4 型丹东山川电机,螺杆直径为 $\phi 30$ mm,分 6 个加热区。

计量泵:HR160A-18 型浙江新菱电机,每口排量为 1.8 cc/rev。

纺丝组件:喷丝板规格为 77 mm×34 mm×0.2 mm×0.6 mm,组件滤网(层× μ)规格为 77 层×6 目×20 μ m。

甬道:侧吹风风窗高度为 117 cm(实际有效 78 cm),纺丝甬道宽度为 35 cm。

冷热辊:两组辊规格分别为热辊 GR1 为 $\phi 180 \times 220$ mm(对辊),冷辊 SR1 为 $\phi 100 \times 100$ mm,GR2 为 $\phi 180 \times 220$ mm(对辊),SR2 为 $\phi 100 \times 100$ mm。

卷绕机:采用 JHWA234 型卷绕机。

网络器:预网络器、主网络器型号分别采用 SP-3-1F-HP134A/WP20-T6 型、SP-3-1F-M130/CN14-T6 型网络器。

1.3 工艺流程

尼龙 66 全拉伸丝的制备流程如图 1 所示。将尼龙 66 半消光切片投入设备,经螺杆挤出机加热熔融后挤出熔体,再由计量泵精确控制输送量,进入纺丝组件并通过喷丝板喷出形成丝束;随即丝束通过侧吹风快速冷却,经导丝钩引导至油嘴完成初次上油,再通过预网络器初步增加纤维抱合力;之后经第二道油嘴二次上油,由导丝钩向冷辊 SR1、热辊 GR1、热辊 GR2、冷辊 SR2,通过主网络器进一步增强纤维抱合力,最后再由导丝钩引导至卷绕机卷绕成型,制得 70 dtex/34 f 半消光尼龙 66 全拉伸丝。

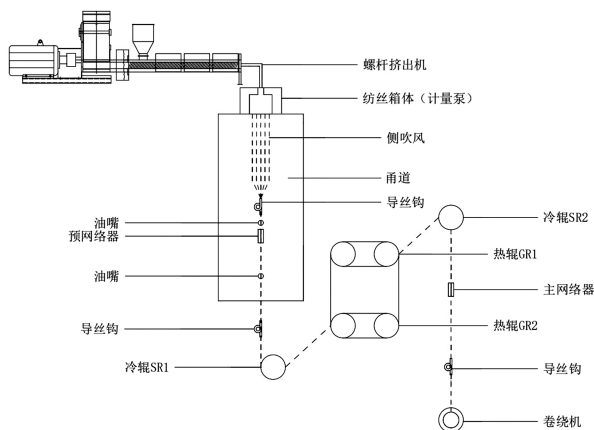


图 1 尼龙 66 全拉伸丝纺制流程图

Fig.1 Flowchart of spinning process for fully drawn nylon 66 filament

1.4 实验测试方法与表征

采用 Rigaku PXR D 粉末衍射仪进行纤维结晶度测试,选用 Cu/K α 射线作为光源, 2θ (实际测量中 X 射线衍射线与入射线之间的夹角)的测量范围在 $5^\circ \sim 60^\circ$,扫描速率为 $2^\circ/\text{min}$ 。通过式(1)测算晶区与非晶区峰面积比得到结晶度。

$$\text{结晶度} = \frac{\sum \text{晶峰面积}}{\sum (\text{晶峰面积} + \text{非晶峰面积})} * 100\% \quad (1)$$

采用 YG086 型缕纱测长仪,按 GB/T 14343-2008 标准测试纤维线密度。

采用 YG023B-II 型全自动单纱强力机,按 GB/T 14344-2022 标准测试纤维拉伸性能。

采用 YG368 型全自动沸水收缩率测试仪,按 GB/T 6505-2017 标准测试纤维条干不匀率。

2 结果与讨论

2.1 结晶度分析

结晶度作为尼龙 66 纤维关键结构参数,深刻影响其物理性能与加工特性。如图 2(a)所示,温度 290 °C 时, $2\theta=20.5^\circ$ 与 $2\theta=23.5^\circ$ 处结晶峰尖锐且高耸,非晶峰强度低,计算结晶度达 22.69%。低于 290 °C,如 285 °C 时结晶峰降低、半高宽增大,结晶度降至 18.89%,表明低温限制分子链运动,结晶受阻。300 °C 时,结晶峰急剧下降、宽化甚至分裂,结晶度仅 8.53%,说明高温破坏分子链有序排列,晶

区受损。如图 2(b)所示,仿丝速度为 4 600 m/min 时,结晶峰强度最高,非晶峰最弱,结晶度为 22.69%,此时分子链拉伸与松弛匹配良好,利于结晶。在 4 200 m/min 的低速下,因为分子链拉伸不足,结晶峰低平,非晶峰主导,结晶度仅 7.33%。5 000 m/min 的高速时,结晶峰强度回落,结晶度降至 18.06%,因高速冷却使分子链来不及规整排列,晶区产生缺陷。图 2(c)、图 2(d)和图 2(e)共同揭示了热辊温度对纤维结晶度的影响,GR2 保持不变,GR1 为 120 °C 时结晶峰最优,结晶度 22.69%。GR1 保持不变,GR2 为 140 °C 时结晶峰最佳,结晶度 22.69%,温度低于 140 °C,难以触发应力诱导结晶;高于 140 °C 时,晶粒生长无序,结晶度下降。当 GR1、GR2 两者协同影响下仅 GR1 为 120 °C 且 GR2 = 140 °C 时,结晶峰尖锐且高耸,非晶峰强度高,结晶度达 22.69%,其他组合因温度梯度失衡,结晶度降低。

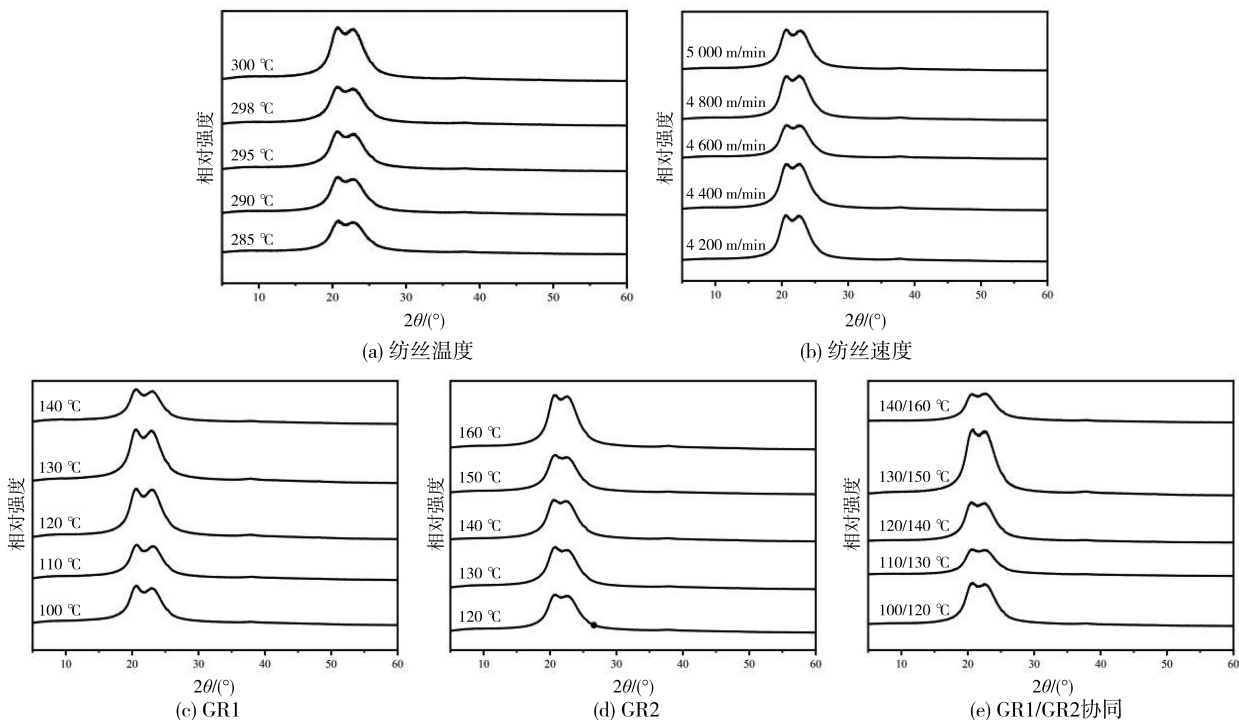


图 2 不同纺丝工艺参数对结晶度的影响

Fig.2 Effects of different spinning process parameters on crystallinity

2.2 纺丝温度分析

实验用的尼龙 66 半消光切片的熔点为 259.6 °C,分解温度在 300 °C 左右。由于尼龙 66 聚合物的熔体黏度受到温度的影响较大,并且存在己二酰结构^[5],纺丝过程中温度过低会导致熔体流动性变差,下料困难;温度过高聚合物则会发

生热裂解和交联,极易产生气泡和凝胶现象,造成飘丝和断头,严重影响可纺性^[6]。

纺丝温度直接影响尼龙 66 的纺丝稳定性及初生纤维物理机械性能^[7],所以为了探究尼龙 66 的最佳纺丝温度,实际纺丝温度应控制在 295 °C 左右。在 285 °C ~ 300 °C 之间,当纺丝熔融温度升

高时,结晶度同样呈现先上升后下降的趋势,290℃时结晶度达22.69%(峰值),300℃时因热降解骤降至8.53%。这与PA66的热稳定性特性一致,低于290℃时,熔体黏度高导致分子链运动受限,结晶驱动力不足,毛丝的数量和断丝次数会大幅增加;超过295℃后,PA66的热氧降解加剧,甚至热分解,PA66熔体“喷出”喷丝板时容易粘在喷丝板面上,造成熔体流束与喷丝板面不垂直^[8]。

从力学性能看,290℃时断裂强度达3.99 cN/dtex,虽略低于285℃的4.04 cN/dtex,但纤度CV值从0.08%升至0.15%,表明温度升高使熔体流动性改善,纤度均匀性提升。然而,295℃时断裂强度降至3.56 cN/dtex,伴随条干不匀率从1.06%升至1.57%,印证高温导致熔体破裂与纤维结构劣化。综合结晶度、强度及可纺性,290℃为兼顾性能均衡的最佳纺丝温度,此时纺制的FDY性能良好,如表1所示。

表1 不同纺丝温度下70 dtex/34 f半消光尼龙66FDY的物理性能指标

Tab.1 Physical performance indicators of 70 dtex/34 f semi-dull nylon 66 FDY at different spinning temperatures

纺丝温度/ ℃	结晶度/ %	纤度		断裂强度		断裂伸长率		条干不匀率	
		平均值/dtex	CV/ %	平均值/ (cN · dtex ⁻¹)	CV/ %	平均值/%	CV/ %	平均值/%	CV/ %
285	18.89	75.73	0.08	4.04	0.69	36.44	5.71	0.77	1.07
290	22.69	75.77	0.15	3.99	1.40	36.63	4.80	1.06	1.38
295	20.4	75.37	0.08	3.56	1.47	40.86	3.58	1.57	2.06
298	19.87	75.37	0.15	3.97	2.19	37.73	2.04	1.03	1.35
300	8.53	75.37	0.08	4.04	1.78	37.36	5.25	1.08	1.29

2.3 纺丝速度分析

尼龙66在成形过程中的牵伸工艺可促进晶体结构完善、刚性链段规整度及取向度提升^[9],而纺丝速度作为牵伸阶段的核心动力学参数,直接调控分子链的拉伸与松弛的平衡,进而塑造结晶动力学过程。实验表明,4 600 m/min中速纺丝时结晶度达22.69%,显著高于低速时(4 200 m/min, 7.33%)或高速时(5 000 m/min, 18.06%),这是因为中速下拉伸速率与分子链松弛速率匹配,先形成高取向非晶态结构,为后续热辊牵伸诱导结晶提供充足“结构前驱体”。

如表2所示,改变纺丝速度对FDY力学性能的影响呈现类似趋势:4 600 m/min时断裂强度3.94 cN/dtex,较4 200 m/min(3.49 cN/dtex)提升13%,但超过4 800 m/min后,因熔体破裂导致强度回落至3.48 cN/dtex,条干不匀率从1.87%升至1.90%。低速纺丝时断裂伸长率达53.75%,而中高速纺丝($\geq 4 600$ m/min)时降至20%以下,随着速度增加,丝束运行稳定性降低,摩擦增大导致条干不匀率上升和断头风险,从而影响生产连续性与纤维外观品质^[3]。结合高性能服饰对高强低伸长的需求,4 600 m/min为最优纺丝速度。

表2 不同纺丝速度下70 dtex/34 f半消光尼龙66FDY的物理性能指标

Tab.2 Physical performance indicators of 70dtex/34 f semi-matte nylon 66FDY at different spinning speeds

纺丝速度/ m · min ⁻¹	结晶度/ %	纤度		断裂强度		断裂伸长率		条干不匀率	
		平均值/dtex	CV/ %	平均值/ (cN · dtex ⁻¹)	CV/ %	平均值/%	CV/ %	平均值/%	CV/ %
4 200	7.33	83.8	0.24	3.49	1.52	53.75	1.66	1.45	1.82
4 400	17.64	79.17	0.36	3.48	4.46	23.43	14.69	1.63	2.20
4 600	22.69	79.80	0.57	3.94	6.57	19.05	7.06	1.87	2.52
4 800	20.46	79.57	0.48	3.48	4.76	22.77	12.03	1.90	2.77
5 000	18.06	79.80	0.33	3.75	2.33	19.82	7.54	1.63	2.24

2.4 热辊温度分析

冷辊 SR1、SR2 不加热,主要作用是引导丝束,稳定张力,让丝束在进入热辊前保持整齐,避免粘连。热辊 GR1、GR2 的主要作用是 GR1 先预热,通过传导加热使纤维表层轻度熔融,消除纺丝过程中因冷却不均产生的内应力,让纤维变软,方便后续拉伸改善表面光滑度。GR2 温度更高,进行主牵伸,同时诱导结晶,让分子链排列更整齐,提升强度。所以热辊 GR1 与 GR2 的温度梯度设计是调控纤维结晶动力学的关键^[10]。

热辊 GR1 与 GR2 的温度匹配是调控纤维结晶取向协同发展的核心,根据尼龙 66 切片的物理特性,尤其是玻璃化转变温度(57.3 ℃)和熔点(259.6 ℃),研究热辊温度对纤维物理性能的影响^[11],结果如表 3、表 4、表 5 所示。

当 GR1 温度保持在 120 ℃,GR2 温度改变时,结晶度随 GR2 温度升高先升高后下降,在 GR2 温度为 140 ℃时达到最高。当 GR2 温度保持在 140 ℃,GR1 温度改变时,结晶度随 GR2 温

度升高先升高后下降,在 GR2 温度为 120 ℃时达到最高。当 GR1 为 120 ℃、GR2 为 140 ℃时,结晶度达 22.69%,显著高于 GR1 为 100 ℃(11.18%)或 GR2 为 160 ℃(14.73%)的组合。这是因为 GR1 预热至 120 ℃时,纤维非晶区链段活化,内应力释放率达 75%,为 GR2 牵伸诱导结晶提供均匀基体;而 GR2 为 140 ℃时,机械拉伸与温度协同触发应力诱导结晶,促进 α 晶型(21.5°XRD 峰)有序排列。

改变热辊温度对 FDY 力学性能与温度梯度影响呈正相关:当 GR1 和 GR2 分别为 120/140 ℃时,断裂强度 4.36 cN/dtex,较 GR1、GR2 分别为 100 ℃、140 ℃,断裂强度 4.44 cN/dtex 略有下降,但强度 CV 值从 1.96%升至 3.13%,表明温度梯度优化提升了性能均匀性。此外,GR2 温度超过 150 ℃时,晶粒缺陷增多,断裂伸长率 CV 值从 4.96%升至 8.43%,验证高温对结晶质量的负面影响。根据 3 组热辊实验可得知当 GR1 为 120 ℃、GR2 为 140 ℃时 FDY 的性能最佳。

表 3 不同热辊温度 (GR1) 下 70 dtex/34 f 半消光尼龙 66FDY 的物理性能指标

Tab.3 Physical performance indicators of 70dtex/34 f semi-matte nylon 66FDY at different hot roller temperatures (GR1)

热辊温度/℃		结晶度/%	纤度		断裂强度		断裂伸长率		条干不匀率	
GR1	GR2		平均值/dtex	CV/%	平均值/(cN·dtex ⁻¹)	CV/%	平均值/%	CV/%	平均值/%	CV/%
100	140	11.18	75.87	0.33	4.44	1.96	32.43	3.08	1.14	1.49
110	140	12.48	76.07	0.20	4.12	2.51	31.10	4.57	1.41	1.81
120	140	22.69	76.90	0.34	4.36	3.13	33.43	4.96	1.56	2.03
130	140	17.67	76.03	0.20	4.24	2.67	33.45	4.23	1.16	1.53
140	140	14.65	76.37	0.15	4.22	2.59	29.80	8.43	1.47	1.90

表 4 不同热辊温度 (GR2) 下 70 dtex/34 f 半消光尼龙 66FDY 的物理性能指标

Tab.4 Physical performance indicators of 70 dtex/34 f semi-matte nylon 66FDY at different hot roller temperatures (GR2)

热辊温度/℃		结晶度/%	纤度		断裂强度		断裂伸长率		条干不匀率	
GR1	GR2		平均值/dtex	CV/%	平均值/(cN·dtex ⁻¹)	CV/%	平均值/%	CV/%	平均值/%	CV/%
120	120	14.28	77.1	0.13	3.79	3.88	25.31	10.79	1.9	2.41
120	130	15.50	76.7	0.47	4.08	4.07	19.78	7.67	2	2.61
120	140	22.69	76.63	0.27	4.24	2.4	24.72	10.1	1.32	1.73
120	150	18.87	76.73	0.6	4.24	3.24	28.26	5.55	2.23	2.85
120	160	14.73	75.83	0.08	4.65	3.84	24.57	6.54	1.6	2.25

表 5 不同热辊温度(GR1/GR2 协同)下 70 dtex/34 f 半消光尼龙 66FDY 的物理性能指标

Tab.5 Physical performance indicators of 70 dtex/34 f semi-matte nylon 66FDY under different hot roller temperatures (GR1/GR2 combined)

热辊温度/℃		结晶度/%	纤度		断裂强度		断裂伸长率		条干不匀率	
GR1	GR2		平均值/dtex	CV/%	平均值/(cN·dtex ⁻¹)	CV/%	平均值/%	CV/%	平均值/%	CV/%
100	120	14.95	76.73	0.53	3.58	3.27	38.98	4.45	1.41	1.81
110	130	20.48	76.50	0.23	3.99	1.82	37.31	4.32	1.21	1.57
120	140	22.69	76.47	0.59	4.13	2.11	36.79	2.98	2.21	1.56
130	150	20.37	75.93	0.53	4.12	3.43	35.73	4.88	1.33	1.70
140	160	12.13	76.10	0.39	4.12	1.30	34.53	3.79	1.22	1.57

3 结论

通过系统研究纺丝温度、纺丝速度及热辊温度对尼龙 66 民用长丝物理性能的影响,得出以下结论:

1) 采用 290 ℃ 纺丝温度时,尼龙 66 半消光切片的熔体流动性与热稳定性达到平衡,结晶度达到 22.69% 的峰值,断裂强度为 3.99 cN/dtex,纤度均匀性良好,综合性能表现最佳。

2) 纺丝速度为 4 600 m/min 时,熔体细流的拉伸应变速率与冷却速率相匹配,分子链取向度与结晶度协同提升,断裂强度达 3.94 cN/dtex,且能有效避免高速纺丝导致的熔体破裂问题。

3) 热辊温度梯度设 GR1 为 120 ℃、GR2 为

140 ℃ 时,GR1 可充分消除纤维内应力,GR2 能有效诱导 α 晶型有序排列,使结晶度维持在 22.69%,断裂强度提升至 4.36 cN/dtex,性能均匀性最优。

在场景化应用方面,优化后的工艺参数体系具有显著的适用性:用于运动服饰时,22%~25% 的结晶度与 4.0~5.0 cN/dtex 的断裂强度可满足高强耐磨需求;生产内衣面料时,将纺丝速度降至 4400 m/min,控制结晶度在 18%~22%,能使断裂伸长率提升至 30%~40%,满足柔软亲肤与高弹性回复的要求;针对家纺窗帘,提高 GR2 温度至 150 ℃,使结晶度达到 23%~25%,可将初始模量提升至 350 cN/dtex 以上,确保产品挺括性。

参考文献:

- [1] 张甲宏. 尼龙 66 纤维的应用现状及推广前景[J]. 化纤与纺织技术,2021,50(4):11-12.
- [2] 曾成,赵红艳,孙亚鑫,等. 我国锦纶 66 产业发展现状及展望[J]. 高科技纤维与应用,2022,47(6):9-16.
- [3] 刘冰灵,王献杰,金志学,等. 22 dtex/68 f 锦纶 6 全牵伸工艺及其性能[J]. 纺织导报,2023(6):69-71.
- [4] WECLAWSKI B T, HORROCKS A R, EBDON J R, et al. Combined atmospheric pressure plasma and UV surface functionalisation and diagnostics of nylon 6.6 fabrics[J]. Applied Surface Science, 2021, 562: 150090.
- [5] 尹佳伦,马小鹏,姚丽菲,等. 尼龙 66 工业长丝的纺丝工艺及关键影响因素探究[J]. 化工新型材料,2024,52(10):243-247,252.
- [6] 周淑倩. 锦纶 66 弹力丝纺丝工艺探讨[J]. 山东纺织科技,2006,47(1):25-27.
- [7] 陈广宏. 基于 $\phi 64\text{mm}$ 喷丝板熔体直纺 167dtex/288f 涤纶 FDY 生产工艺探讨[J]. 合成纤维工业,2021,44(3):90-93.
- [8] 吴江明. PA66 气囊丝纺丝工艺的技术优化及其性能研究[J]. 河南化工,2023,40(9):53-54,65.
- [9] LIANG C Y, UNIVERSITY D, HUANG W L, et al. Multiscale evolution of chain orientation and crystal structure under the dual action of temperature and stress[J]. Macromolecules, 2025, 58(9):4591-4601.
- [10] 汤成坦. 一步法 PET 异收缩混纤复合丝构造机理与成纱工艺研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2010.
- [11] 王建虎,张晓芳. 44dtex/12f 再生聚酰胺 66FDY 的生产工艺探讨[J]. 合成纤维,2025,54(4):34-36,48.

(责任编辑:方素华)