

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.12.013

高强抗紫外聚酯塑钢线的纺丝工艺

邵小群¹, 马海燕², 张书勤¹, 孙飞宇¹

(1. 南通新帝克单丝科技股份有限公司, 江苏南通 226003; 2. 南通大学化学化工学院, 江苏南通 226009)

摘要: 针对聚酯塑钢线户外使用的环境要求及力学性能要求, 选用紫外线吸收剂 UV-360, 采用液体冷却及多级拉伸工艺纺制高强抗紫外聚酯塑钢线。结果表明, UV-360 的添加明显减少聚酯塑钢线人工加速老化后的黏度降, 当其质量分数为 0.4% 时, 在人工加速老化 300 h 后的残留断裂强度达 3.90 cN/dtex; 当冷却温度为 50℃, 空气高度为 30 cm, 冷却长度为 300 cm 时, 制得的抗老化聚酯塑钢带的断裂强度为 4.66 cN/dtex, 圆整度为 99.3%, 氙灯加速老化 300 h 后强度保持率为 95.8%, 综合性能佳。

关键词: 聚酯塑钢线; 抗紫外; 高强; 液体冷却; 纺丝工艺

中图分类号: TQ342 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)12-0062-05

Spinning Process of High-Strength and Anti-UV Poly(ethylene terephthalate) Plastic Wire

Shao Xiaoqun¹, Ma Haiyan², Zhang Shuqin¹, Sun Feiyu¹

(1. Nantong NTEC Monofilament Technology Co. Ltd., Nantong 226003, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering of Nantong University, Nantong 226009, China)

Abstract: In view of the environmental requirements and mechanical properties of polyester plastic wire used outdoors, the UV absorbent UV-360 agent was selected and the high-strength anti-UV polyester plastic wire was spun by liquid cooling and multi-stage drawing process. The results show that the addition of UV-360 significantly reduces the viscosity drop after artificial accelerated aging of polyester plastic wire. When the mass fraction is 0.4%, the residual breaking strength reaches 3.90 cN/dtex after 300 h of artificial accelerated aging. When the cooling temperature of water is 50℃, the air height is 30 cm, cooling length was 300 cm, the breaking strength of anti-aging polyester plastic wire is 4.66 cN/dtex, the roundness is 99.3%, the strength retention after 300 h accelerated aging by the xenon lamp is 95.8%, and comprehensive performance is better.

Keywords: polyester plastic wire; resistant to UV; high strength; liquid cooling; spinning process

聚酯塑钢线作为聚酯单丝的一种, 具有高强度、低蠕变性及优良的耐酸碱性能, 已被广泛应用于葡萄种植架的支撑线、温室大棚的托压膜线、畜牧业护栏或深海远洋养殖的立体编织框架等, 甚至被用作复合材料的增强骨架, 代替金属丝, 性能稳定, 便于施工^[1-7]。一般聚合物单丝直径为 0.05 ~ 3.0 mm, 而聚酯塑钢线直径达到 0.90 ~ 5.0 mm。由于聚酯塑钢线直径粗, 在熔融纺丝和液体冷却过程中会出现冷却不均、后拉伸不均等问题, 影响成纤的圆整度及力学性能; 另外紫外线会使聚酯单丝发生老化降解, 影响聚酯塑钢线的使用寿命。通过优

化复合抗紫外剂的配方, 研究液体冷却及后拉伸对大直径聚酯塑钢线结构性能的影响, 以得到高强抗紫外聚酯塑钢线。

1 实验部分

1.1 主要原料

聚对苯二甲酸乙二酯 (PET): 熔点 255℃, 特性黏度 1.02 dL/g, 中石油辽阳石化公司;

紫外线吸收剂: UV-360, 天津利安隆新材料股份有限公司;

抗氧剂 168: 德国巴斯夫公司;

抗氧剂 1010: 德国巴斯夫公司;

通信作者: 马海燕, 研究员级高工, 主要从事高分子聚合物成型研究 E-mail: mhyan2528@163.com

收稿日期: 2020-10-11

引用格式: 邵小群, 马海燕, 张书勤, 等. 高强抗紫外聚酯塑钢线的纺丝工艺[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(12): 62-66.

Shao Xiaoqun, Ma Haiyan, Zhang Shuqin, et al. Spinning process of high-strength and anti-UV poly(ethylene terephthalate) plastic wire[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12): 62-66.

热稳定剂: FT-4288, 广东凡田科技有限公司。

1.2 仪器和设备

真空烘箱: DZF-6000 型, 上海一恒科学仪器有限公司;

高精度恒温槽: BY-28 型, 东华大学材料学院;

乌氏黏度计: 4-0.8 mm 型, 上海垒固仪器有限公司;

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: NEXUS-470 型, 美国 Nicolet-Thermo 有限公司;

氙灯加速老化箱: HD-E802 型, 海达国际仪器有限公司;

万能材料试验机: THM2009 型, 苏州拓博机械设备有限公司;

厚度仪: SM-112 型, 日本得乐有限公司;

高速混合机: JH-100 型, 南通金虹环保科技有限公司;

双螺杆挤出机: SK36 系列, 南京科亚化工装备有限公司;

螺杆挤出机: JWM45 / 25 型, 上海金纬机械有限公司;

后拉伸设备: NTEC-2 型, 南通新帝克单丝科技股份有限公司。

1.3 工艺流程

复合抗紫外母粒的制备。将 PET 切片在 160℃ 真空烘箱中干燥 8 h, 利用高速混合机将各种助剂和干燥的 PET 切片按比例共混, 通过双螺杆挤出机进一步混合并造粒; 挤出温度为 220, 240, 250, 260, 270℃; 在 PET 切片中添加质量分数为 0.5% 的抗氧剂 168, 1.0% 抗氧剂 1010, 2.5% 热稳定剂 FT-4288, 抗紫外吸收剂 UV-360 质量分数分别为 2%, 3%, 4%, 5%; 将制备的复合抗紫外母粒干燥备用。

高强抗紫外聚酯塑钢线的制备。将干燥的复合抗紫外母粒与 PET 切片按质量比 1 : 9 比例在螺杆挤出机熔融共混, 通过计量泵定量挤出, 采用液体冷却, 后拉伸及热定型工序, 纺制大直径高强抗紫外聚酯塑钢线。

1.4 性能测试

特性黏度按照 GB/T 14190-2017 测试, 准确称取 (0.1 ± 0.001) g 干燥后的待测样品, 加至 20 mL 苯酚和 1,1,2,2-四氯乙烷混合溶液 (质量比 3 : 2) 中溶解, 将其加热 90 ~ 100℃ 直至完全溶解; 取 10 mL 溶有样品的溶液, 放置于乌氏黏度计中, 在 (25 ± 0.05) ℃ 恒温水浴中按一点法测试并计算特性

黏度^[9], 如式 (1)、式 (2)。

$$[\eta] = \frac{\sqrt{1 + 1.4\eta_{sp}} - 1}{0.7c} \quad (1)$$

$$\eta_{sp} = \frac{t_1}{t_0} - 1 \quad (2)$$

式中: η_{sp} ——增比黏度;

c ——待测溶液的浓度, 为 0.5 g/dL;

t_0 与 t_1 分别是溶剂和溶液的流经时间。

断裂强度按照 GB/T 14344-2008 测试, 量程为 10 kN, 拉伸速度 500 mm/min, 试样定长 250 mm, 测试条件为温度 20℃, 湿度 65%。

端羧基指数 (CI) 测试: 将试样干燥处理后, 采用 FTIR 的 ATR 附件进行光谱测试, 其中 FTIR 光谱频率范围是 4000 ~ 350 cm^{-1} , 分辨率优于 0.5 cm^{-1} , 根据式 (3) 计算试样的 CI^[8]。

$$CI = \frac{A_{3290}}{A_{2970}} \quad (3)$$

式中: A_{3290} ——端羧基中的—O—H 基团伸缩振动峰 (3290 cm^{-1}) 的强度;

A_{2970} ——脂肪烃中—C—H 基团伸缩振动峰 (2970 cm^{-1}) 的强度。

强度保持率测试: 将塑钢线试样平行松弛地放置在老化箱试样台上, 根据 GB/T 16422.3-2014 进行氙灯人工加速老化实验, 加速老化后塑钢线的断裂强度与加速老化前断裂强度的百分比为强度保持率。设定黑板温度 (65 ± 3) ℃, 湿度 $(50 \pm 10)\%$, 紫外灯光照强度 550 W/m², 每隔 50 h 取样一次。

圆整度测试: 测定同一圆周处塑钢线的最小直径 ($R_{\min}$) 和最大直径 ($R_{\max}$), 并将两者的百分比作为塑钢线的圆整度。

2 结果与讨论

2.1 UV-360 用量对聚酯塑钢线结构和性能影响

制备了 4 种不同含量的复合抗紫外母粒, 在纺制直径为 2.0 mm 的塑钢线中抗紫外吸收剂 UV-360 的质量分数分别为 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 测试不同加速老化时间下抗紫外聚酯塑钢线的特性黏度和强度保持率, 结果列于表 1。

从表 1 可以看出, 随着人工加速老化时间的增加, 塑钢线的特性黏度均呈下降趋势; 随着 UV-360 添加量的增加, 人工加速老化前的塑钢线的黏度降低, 但加速老化后的黏度降明显减小; 当 UV-360 质量分数在 0.3% 以上时, 塑钢线的抗紫外效果显著提高, 进一步增加添加量, 黏度降有缩小但不显著。

表1 人工加速老化前后聚酯塑钢线的特性黏度变化 dL/g

UV-360 质量分数 / %	老化时间 / h					
	0	50	100	150	200	250
0	1.00	0.96	0.93	0.90	0.87	0.82
0.2	1.00	0.97	0.96	0.93	0.90	0.88
0.3	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96
0.4	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98
0.5	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97

对人工加速老化前后的塑钢线的断裂强度进行测试,结果列于表2。从表2可以看出,随着加速老化时间的增加,塑钢线的强度保持率的变化规律跟其特性黏度的变化规律一致。在加速老化前,未加入抗紫外剂的塑钢线的断裂强度为4.48 cN/dtex, UV-360 质量分数0.2%时断裂强度为4.26 cN/dtex, UV-360 质量分数0.3%时断裂强度为4.15 cN/dtex, UV-360 质量分数0.4%时断裂强度为4.09 cN/dtex,当UV-360 质量分数为0.5%时,断裂强度降至3.85 cN/dtex。经过人工加速老化300 h后,UV-360 质量分数为0.4%时塑钢线的残留断裂强度最高,为3.90 cN/dtex。

表2 人工加速老化前后聚酯塑钢线的强度保持率变化 %

UV-360 质量分数 / %	老化时间 / h						
	0 h	50 h	100 h	150 h	200 h	250 h	300 h
0	100	96.3	91.2	85.9	82.4	79.1	75.9
0.2	100	97.5	92.6	89.4	85.0	83.4	82.2
0.3	100	98.2	96.7	94.0	92.4	91.7	89.5
0.4	100	99.2	98.4	97.7	96.8	96.1	95.3
0.5	100	99.8	98.7	98.2	97.5	96.9	96.1

紫外光诱发 PET 分子链断裂,使得聚酯塑钢线的物理性能降低,直至失去了使用价值^[9],对 PET 材料最为敏感的波段是325 nm^[10]。被塑钢线有效吸收的紫外线激发 PET 成了初始自由基,易进一步与氧分子发生作用,光氧化作用使聚酯塑钢线进一步被降解,所以初始的紫外降解会提高降解速率^[11-14]。UV-360 为苯并三氮唑类高效紫外线吸收剂,可吸收波长为300~400 nm的紫外光,将其转化成420~440 nm的可见光反射出来,可见光不会破坏聚酯的大分子结构,其本身不因吸收紫外线而发生化学变化。所以随着添加量的增加,塑钢线强度保持率提高,尤其在质量分数为0.5%时,经过人工加速老化300 h后的强度保持率达96.1%。

对不同 UV-360 含量的塑钢线及氙灯人工加速老化300 h后的试样进行 FTIR 测试,将脂肪烃中—C—H 基团振动峰(2970 cm⁻¹)作为定量计算的內标峰,根据端羧基—O—H 的振动峰(3290 cm⁻¹)来计算 CI,计算结果见表3。由表3可见,在相同老化条件下,纯的聚酯塑钢线因加速老化引起的 CI 增

加程度明显高于添加了抗紫外剂的单丝,其在加速老化的过程中化学键断裂程度更高;随着 UV-360 添加量的增加,CI 的变化值逐渐变小,说明抗紫外剂的添加在一定程度上阻碍聚酯塑钢线发生紫外老化现象,测试结果与黏度及强度变化的结果一致。

表3 人工加速老化前后不同 UV-360 含量的塑钢线的 CI

UV-360 质量分数 / %	CI 值		ΔCI
	加速老化前	加速老化 300 h	
0	0.36	0.71	0.35
0.2	0.33	0.66	0.33
0.3	0.31	0.54	0.23
0.4	0.29	0.47	0.18
0.5	0.28	0.44	0.16

2.2 液体冷却对聚酯塑钢线结构和性能的影响

由计量泵挤出的塑钢线初生丝较粗,在由热塑态到固态过程中结合空气层和液态水进行冷却。水的导热系数[0~100℃为0.55~0.683 W/(m·K)]远大于空气的导热系数[0~100℃为0.024~0.031 W/(m·K)],初生丝经过骤冷以较快的速度形成低结晶度的结构,利于后拉伸,同时利用液态水的摩擦阻力可控制纺程上的张力。但是丝条进入冷却水时温差太大,会使初生丝的表层和内层固化收缩的速率相差大,导致初生丝内部容易出现孔隙,所以要控制初生丝在空气层中冷却的时间、液体冷却水的温度及冷却长度来减弱大直径单丝纺丝过程中易出现的“皮芯”现象^[15-18]。考察了冷却温度(A),空气高度(B),冷却长度(C)3个主要因素,每个因素各选3个水平,因素水平表见表4。

表4 液体冷却对聚酯塑钢线影响的因素水平表

水平	A / °C	B / cm	C / cm
1	20	10	200
2	50	20	300
3	80	30	400

选用正交表 L₉(3⁴) 对液体冷却工艺的3因素进行试验安排,对纺制的大直径聚酯塑钢线的断裂强度及圆整度进行了测试,实验结果见表5。塑钢线直径为2.0 mm,其中 UV-360 质量分数为0.4%,初生丝出水速度为9.8 m/min。

表5 试验方案及试验结果分析

试验号	A	B	C	断裂强度 / (cN · dtex ⁻¹)	圆整度 / %
1	1	1	1	2.05	83
2	1	2	2	2.75	88
3	1	3	3	2.63	87
4	2	1	3	4.37	96
5	2	2	1	4.42	97
6	2	3	2	4.68	99
7	3	1	2	4.03	92
8	3	2	3	4.12	93
9	3	3	1	4.28	95

对不同冷却条件下制备的大直径聚酯塑钢线的断裂强度和圆整度分别进行极差分析,分析结果见表6。

表6 试验结果分析

项目		A	B	C
断裂强度 / (cN · dtex ⁻¹)	K_1	7.43	10.45	10.75
	K_2	13.47	11.29	11.46
	K_3	12.43	11.59	11.12
	k_1	2.48	3.48	3.58
	k_2	4.49	3.76	3.82
	k_3	4.14	3.86	3.71
	极差 R	6.04	1.14	0.71
圆整度 / %	因素主次	A B C		
	优方案	A2B3C2		
	K_1	258	271	275
	K_2	292	278	279
	K_3	280	281	276
	k_1	86.0	90.3	91.7
	k_2	97.3	92.7	93.0
	k_3	93.3	93.7	92.0
	极差 R	34	10	4
	因素主次	A B C		
	优方案	A2B3C2		

注: K_1, K_2, K_3 是在每个因素下对应水平为 1, 2, 3 的实验结果的和; k_1, k_2, k_3 为 K_1, K_2, K_3 的平均值。

通过对断裂强度和圆整度两个指标的极差分析,得出 3 个因素的主次顺序均为 ABC,即冷却水温度是对指标影响最大的因素。断裂强度和圆整度的优化方案是一致的,均是 A2B3C2,即冷却温度为 50℃,空气高度为 30 cm,冷却长度 300 cm 时,直径为 2.0 mm 的抗紫外塑钢线的综合性能较佳。

当液体冷却水的温度在 20℃左右时,初生丝条进入水中抖动厉害,这是因为熔体细流通过与空气和冷却水进行热传导和热对流冷却固化的过程中,首先是初生丝外层固化收缩,此时芯部仍处于熔融状态未收缩固化,初生丝结构重新排列发生抖动现象;随着冷却温度升高,丝条抖动不明显,这是因为初生丝在冷却过程中,外层和芯层固化收缩的同步性提高,丝条均匀且空隙较少,稳态纺丝后成纤的断裂强度和圆整度显著提高^[19-20]。

初生丝在冷却槽中冷却长度的增加能使大直径的熔体细流以更快的速度达到稳态纺丝,形成利于后道拉伸的低结晶结构,但是过长的冷却长度会提高初生丝的摩擦阻力,增加了初生丝的取向和结晶,不利于后道拉伸。通过实验发现,稳态纺丝能提高成纤的圆整度和断裂强度。纺制高圆整度的聚酯塑钢线可替代铁丝或钢丝作为增强骨架,用于建筑、交通、采矿等领域。

对优化方案进行验证实验,制得的抗紫外聚酯塑钢线断裂强度为 4.66 cN/dtex,圆整度为 99.3%,氙灯加速老化 300 h 后强度保持率为 95.8%,与极差分析结果基本一致。

3 结论

(1) UV-360 的添加明显减少聚酯塑钢线人工加速老化后的黏度降,且随 UV-360 添加量的增加,人工加速老化 300 h 后的强度保持率提高且端羧基指数的变化值变小,当质量分数为 0.4% 时,在人工加速老化 300 h 后的残留断裂强度达 3.90 cN/dtex。

(2) 初生丝冷却过程中,冷却温度是影响塑钢线力学性能和圆整度的主要因素,当冷却温度为 50℃,空气高度为 30 cm,冷却长度 300 cm 时,直径为 2.0 mm 的抗紫外塑钢线的综合性能较佳,制得的抗紫外聚酯塑钢线的断裂强度为 4.66 cN/dtex,圆整度为 99.3%,氙灯加速老化 300 h 后强度保持率为 95.8%。

参考文献

- [1] 山东鼎和塑业有限公司. 温室大棚新型托幕线:CN, 201821892202.1[P].2019-07-12.
Shandong Dinghe Plastic Industry Co. Ltd. A new type of supporting screen line for Greenhouse:CN, 201821892202.1[P].2019-07-12.
- [2] 北京中农富通园艺有限公司. 用于温室的多级层叠式遮阳网装置:CN, 201821221663.6[P].2019-03-22.
Beijing Zhongnong Futong Horticulture Co. Ltd. Multi-stage cascade sunshade net device for greenhouse:CN, 201821221663.6[P].2019-03-22.
- [3] 浙江大学. 茶园的基于光伏板发电的大面积遮光装置:CN, 201710260837.3[P].2017-07-25.
Zhejiang University. Large area shading device based on photovoltaic panel for Tea Garden :CN, 201710260837.3[P].2017-07-25.
- [4] 宁波九鼎特种单丝有限公司. 一种新型塑钢线结构:CN, 201520419093.1[P].2015-11-25.
Ningbo Jiuding Special Monofilament Co. Ltd. New type of plastic steel wire structure:CN, 201520419093.1[P].2015-11-25.
- [5] 张明, 张建国. 一种用 PET 单丝纤维制成的围网:CN, 201520327129.3[P].2015-09-23.
Zhang Ming, Zhang Jianguo. A fence made of PET monofilament fiber:CN, 201520327129.3[P].2015-09-23.
- [6] 王晓玲. 拜城引进塑钢线新型葡萄架[J]. 新疆农机化, 2009(4):28.
Wang Xiaoling. New type of grape rack with plastic steel wire imported for Baicheng county[J]. Xinjiang Agricultural

- Mechanization, 2009(4):28.
- [7] 杨金魁. 2018年中国造纸网毯行业运行情况[J]. 造纸信息, 2019(5):58-59.
- Yang Jinkui. Operation Situation of China paper-making carpet industry in 2018[J]. Paper Information, 2019(5):58-59.
- [8] Fecine G J M, Rabello M S, Souto-Maior R M. The effect of ultraviolet stabilizers on the photodegradation of poly(ethylene terephthalate)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, 75(1):153-159.
- [9] 易志文. 聚酯纤维的抗紫外老化特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2015:10-12.
- Yi Zhiwen. Anti-ultraviolet aging properties of polyester fiber[D]. Shang Hai: Donghua University, 2015:10-12.
- [10] 钟世云, 许乾慰, 王公善. 聚合物降解与稳定化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002:3-15.
- Zhong Shiyun, Xu Qianwei, Wang Gongshan. Polymer degradation and stabilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002:3-15.
- [11] 翟和生. 抗紫外聚酯纤维的制备和性能[J]. 化工时刊, 2012, 26(5):1-3.
- Zhai Hesheng. Preparation and properties of anti-ultraviolet polyester fiber[J]. Chemical Industry Times, 2012, 26(5):1-3.
- [12] 陈康, 易志文, 周桂强, 等. 抗紫外老化高强聚酯纤维的制备与性能研究[J]. 合成纤维工业, 2017, 40(5):1-6.
- Chen Kang, Yi Zhiwen, Zhou Guiqiang, et al. Preparation and properties of ultraviolet aging resistant high-strength polyester fiber[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2017, 40(5):1-6.
- [13] 刘森林, 易志文, 南建举, 等. 共混纺丝法制备抗紫外老化高强PET纤维的性能研究[J]. 合成纤维工业, 2017, 40(6):12-16.
- Liu Senlin, Yi Zhiwen, Nan Jianju, et al. Properties of anti-ultraviolet aging high-strength PET fiber via blend spinning process[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2017, 40(6):12-16.
- [14] 胡蝶. 抗紫外PET纤维母粒的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018:5-7.
- Hu Die. Study on preparation and properties of uv-resistant masterbatch for polyester fibers[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018:5-7.
- [15] 马海燕. 大直径聚合物单丝成形机理及结构性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2011:7-10.
- Ma Haiyan. Study on forming mechanism structure and properties of large diameter polymer monofilament[D]. Shanghai: Donghua University, 2011:7-10.
- [16] 王城, 马海燕, 马海军. 高强粗旦聚丙烯工业丝加工条件对其结构及性能的影响[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(2):5-8.
- Wang Cheng, Ma Haiyan, Ma Haijun. Effect of processing conditions on structure and properties of High Strength Coarse denier polypropylene industrial yarn[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2020, 43(2):5-8.
- [17] 甘宇, 姬洪, 徐锦龙, 等. 聚酰胺/聚酯皮芯复合纤维的研究开发[J]. 合成纤维, 2020, 49(2):7-12.
- Gan Yu, Ji Hong, Xu Jinlong, et al. Research and development of polyamide/polyester sheath-core composite fiber[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(2):7-12.
- [18] 顾目强, 王珏, 占海华. 全消光异形收缩涤纶FDY的制备与性能[J]. 合成纤维, 2020, 49(1):11-14.
- Gu Riqiang, Wang Yu, Zhan Haihua. Preparation and properties of full extinction profiled polyester FDY[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(1):11-14.
- [19] 郭海洋, 陈康, 张焱, 等. 热定形超喂率对大直径涤纶单丝结构与性能的影响[J]. 合成纤维, 2020, 49(5):1-7.
- Guo Haiyang, Chen Kang, Zhang Ye, et al. Effect of heat setting overfeed rate on structure and properties of large diameter polyester monofilament[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(5):1-7.
- [20] 陆焯邦, 马海燕, 赵化伟, 等. r-PET扩链增粘工艺及其单丝力学性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(11):13-18.
- Lu Yebang, Ma Haiyan, Zhao Huayi, et al. Chain extending process of r-PET and its monofilament mechanical property[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(11):13-18.

(上接第50页)

- [13] 林志娇, 李兰英, 何鑫业, 等. 高伸级对位芳纶的性能、制备及应用概述[J]. 合成纤维, 2020, 49(2):27-31.
- Lin Zhijiao, Li Lanying, He Xinye, et al. Overview of properties, preparation and application of high elongation of para-aramid fibers[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(2):27-31.
- [14] 罗玉清, 王萌, 郝巍, 等. 芳纶纸基结构性能对蜂窝性能影响关系的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2018, 43(5):42-47.
- Luo Yuqing, Wang Meng, Hao Wei, et al. Study on relationships between properties of aramid paper and properties of honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2018, 43(5):42-47.
- [15] 王厚林, 王宜, 姚运振, 等. 芳纶纸结构性能及其对蜂窝力学性能的影响[J]. 功能材料, 2013, 44(15):2184-2192.
- Wang Houlin, Wang Yi, Yao Yunzhen, et al. Aramid paper's structure and performance and their effect on the mechanical properties of aramid paper[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(15):2184-2192.