

涤纶 POY 内在质量评估:动态热应力测试方法与研究

赵慧娟

江苏德力化纤有限公司,江苏 宿迁 223800

摘要:涤纶拉伸变形丝(DTY)的质量在很大程度上取决于涤纶预取向丝(POY),因此准确评估涤纶 POY 的内在质量对于提高涤纶 DTY 的品质至关重要。利用 DYNAFIL CU 动态热应力仪,对不同规格的涤纶 POY 试样进行测试,探究测试条件(包括测试温度、测试速度、测试长度)、预张力器绕丝方式、仪器维护及物检室环境等对动态热应力测试结果的影响。研究发现:动态热应力随测试温度升高而下降,且经对比确定 165 ℃ 为最佳测试温度;测试速度宜在 100~150 m/min,此速度区间既能避免试样低速时高分子链段过度松弛,又能防止高速时测试值因系统波动与线密度效应而出现异常,还实现了测试效率与测试准确性的最佳平衡;测试长度对动态热应力影响不显著,50 m 的测试长度已能满足测试值稳定的基本要求,过长将显著降低检测效率;逆时针绕丝测得的动态热应力及其变异系数(CV)值较顺时针绕丝的大。并指出,排除环境与仪器干扰是获得可靠测试数据的前提,采取合适的测试参数是确保数据真实反映涤纶 POY 质量水平的核心。研究结果可为企业生产提供参考。

关键词: 涤纶预取向丝(POY);动态热应力;测试温度;测试速度;测试长度;绕丝方式;质量控制

中图分类号:TS151.9

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)07-0030-07

Intrinsic quality evaluation of polyester POY: dynamic thermal stress testing method and research

Zhao Huijuan

Jiangsu Deli Chemical Fibre Co., Ltd., Suqian 223800, Jiangsu, China

Abstract: The quality of polyester draw textured yarn (DTY) is found to be largely dependent on that of polyester pre-oriented yarn (POY), and therefore accurate evaluation of the intrinsic quality of polyester POY is considered crucial for improving the quality of polyester DTY. Using the DYNAFIL CU dynamic thermal stress tester, polyester POY samples with different specifications were tested to investigate the effects of test conditions (including test temperature, test speed, and test length), pre-tensioner winding direction, instrument maintenance, and the environment of the physical inspection room on dynamic thermal stress test results. The results indicated that the dynamic thermal stress decreased with the increase of test temperature, and 165 ℃ was determined as the optimal testing temperature through comparison. A test speed range of 100–150 m/min was

收稿日期:2025-11-02

作者简介:赵慧娟,女,1987年生,中级工程师,主要从事涤纶长丝产品检测与研发工作,YaohuiLZ@hotmail.com

recommended, and this range not only avoided excessive relaxation of polymer chain segments at low speeds but also prevented abnormal test values caused by system fluctuations and linear density effects at high speeds, achieving an optimal balance between testing efficiency and accuracy. The test length had no significant effect on the dynamic thermal stress. A length of 50 m was found to satisfy the basic requirements for value stability, whereas excessive lengths would significantly reduce testing efficiency. Additionally, the dynamic thermal stress and its coefficient of variation (CV) values obtained via counter-clockwise winding were higher than those obtained via clockwise winding. It was also pointed out that elimination of environmental and instrumental interference was the prerequisite for obtaining reliable test data, and the adoption of appropriate test parameters was the core to ensuring that the data truly reflected the quality level of polyester POY. The research results can provide references for industrial production.

Keywords: polyester pre-oriented yarn (POY); dynamic thermal stress; test temperature; test speed; test length; winding method; quality control

涤纶拉伸变形丝(DTY)的力学性能及染色性能在很大程度上取决于涤纶预取向丝(POY)的质量,因此及时、准确地评估涤纶 POY 的质量具有双重意义:一方面可以为前道纺丝车间工艺参数的调控提供依据,另一方面能指导涤纶 POY 合理的加工条件,提高涤纶 DTY 的等品率。通常,涤纶 POY 的质量是基于国标规定的线密度、强伸性、条干等指标来评价的,但实际生产中经常出现 POY 三不匀(即断裂强度变异系数、断裂伸长率变异系数、条干不匀率等)指标都很好,但后加工却出现较困难的情况^[1]。长期生产实践发现,涤纶 POY 的动态热应力对后续加工的稳定性及成品的性质有极大影响,因此,涤纶 POY 的动态热应力是鉴别涤纶 POY 丝饼内在质量的重要依据^[2]。基于此,国内外众多生产企业引进了动态应力仪,并将动态热应力及其不匀率作为涤纶 POY 的核心内控质量指标。

为使测试数据能更真实、更稳定地反映涤纶 POY 的内在质量,本研究基于德国 Textechno 公司生产的 DYNAFIL CU 动态热应力仪,对不同规格的涤纶 POY 进行测试,旨在通过分析测试结果,系统探究并优化关键测试参数,以期为生产工艺的优化提供数据支持。

1 试验准备

1.1 试验仪器及测试流程

采用 DYNAFIL CU 动态热应力仪(图 1)展开测

试,并控制仪器使用条件为温度(20 ± 2)℃、相对湿度(65 ± 5)%、工作电源电压 210.0~235.7 V、压缩空气气压 0.4~0.6 MPa。



图 1 试验所用 DYNAFIL CU 动态热应力仪实物照片
Fig. 1 Photograph of DYNAFIL CU dynamic thermal stress tester used in experiment

测试流程:涤纶 POY 试样先经张力装置引入第一导丝辊(该导丝辊上安装的预张力调节器会在整个测试过程中对试样张力进行调节);接着,试样经罗拉和输入导丝辊进入热箱(模拟加弹机),后经张力测量头引出,此处试样的热应力被测量;最后,试样经罗拉及输出导丝辊引出,并由压缩空气吸入废丝桶。至此,测试结束。

测试过程中,拉伸倍数由输入导丝辊和输出导丝辊的速度比决定。试样因拉伸形成动态热应力。张力测量头测出动态热应力后,测试结果经测量电路转换成电信号,再由计算机采集处理后绘制出应力应变曲线,最后经计算得到动态热应力平均值和

动态热应力变异系数(CV)值等数据。

1.2 测试样

为探究纤维结构参数对动态热应力的影响,研究选取了7种不同规格的涤纶POY试样(83 dtex/144 f、134 dtex/144 f、175 dtex/144 f、275 dtex/144 f、275 dtex/48 f、275 dtex/96 f、275 dtex/288 f),并将这些试样按设计目的分为2组——A组(单丝根数固定,即83 dtex/144 f、134 dtex/144 f、175 dtex/144 f、275 dtex/144 f)和B组(总线密度固定,即275 dtex/48 f、275 dtex/96 f、275 dtex/144 f、275 dtex/288 f),其中275 dtex/144 f试样为2组共用试样。

2 测试结果与分析

2.1 测试条件对测试结果的影响

2.1.1 测试温度

为消除外部变量的干扰,测试时固定预张力为

0.05 cN、仪器拉伸倍数为1.6、测试速度为100 m/min、测试长度为50 m。需说明的是,本研究采用的预张力为固定值。尽管该值对不同试样产生的初始比应力有所不同,但作为一项对比性研究,所有试样均在相同的绝对张力基准下展开测试,测得的动态热应力差异能反映涤纶POY本身结构特性的不同。

在6种温度(95、115、135、155、165和175℃)条件下分别测试试样的动态热应力。试验设计的理论依据是,温度是激活高分子链段运动的关键因素。动态热应力的本质是涤纶POY内部“冻结”的取向应力受热后松弛。本研究设计的梯度温度范围跨越玻璃化转变温度至冷结晶温度,能全面、逐层地揭示不同涤纶POY试样分子链段的运动能力、取向度分布及热稳定性^[3]。

不同温度条件下测得涤纶POY试样的动态热应力如表1及图2、图3所示。

表1 不同温度条件下涤纶POY试样的动态热应力

Tab.1 Dynamic thermal stress of polyester POY samples at various temperatures

规格	95℃		115℃		135℃		155℃		165℃		175℃	
	动态热应力/ cN	动态热应力 CV值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV值/ %
83 dtex/144 f	63.96	1.44	52.80	0.76	51.43	0.84	51.18	0.83	51.00	0.90	50.62	1.07
134 dtex/144 f	99.93	1.25	77.77	0.66	73.44	0.74	72.58	0.82	72.25	0.97	72.13	0.92
175 dtex/144 f	114.95	2.74	91.66	1.09	81.97	1.62	80.46	1.66	80.11	1.42	79.71	1.72
275 dtex/144 f	168.99	3.02	141.65	1.12	117.03	2.01	108.35	2.29	108.23	2.07	107.09	2.14
275 dtex/48 f	121.37	2.63	102.57	3.51	80.28	4.82	69.97	4.68	69.84	4.94	69.68	4.48
275 dtex/96 f	130.79	2.31	112.42	3.29	91.06	4.44	82.12	4.88	82.17	4.96	81.65	4.74
275 dtex/288 f	214.94	1.63	174.07	0.82	146.53	0.89	132.14	1.07	130.15	1.27	127.51	1.48

分析表1及图2、图3可知:

(1)动态热应力对测试温度的响应呈现一定的规律性,即试样的动态热应力随着温度的升高先下降,并最终趋于稳定。这表明,过高的测试温度将导致取向应力快速松弛,不利于后续加工。因此,实际生产中,选择一个能灵敏区分不同批次质量且能使动态热应力处于适中、稳定区间的温度至关重要。

(2)线密度是涤纶POY重要的物理指标。当单丝根数相同时,丝束总线密度越大,其动态热应力值越大,这与相同拉伸比下,更粗的丝束所含取向分子链总数更多,宏观表现为更大的收缩力有关。当

丝束总线密度相同时,单丝根数越多,其动态热应力值也越大^[4]。动态热应力指标能够有效反映因纺丝冷却条件如风速、温度等变化导致的纤维结构差异,故其是控制工艺稳定性的有效指标。

(3)动态热应力曲线的特征转折温度(即动态热应力值从显著下降过渡到平台区的拐点温度)与试样的热稳定性有关。当单丝根数相同时,随着丝束总线密度的增大,特征转折温度向高温方向移动,这表明总线密度大的试样其分子链松弛与整体结构重组需要更多的能量,热稳定性相对更好。该结果可为不同规格产品设定差异化后加工热箱温度提供

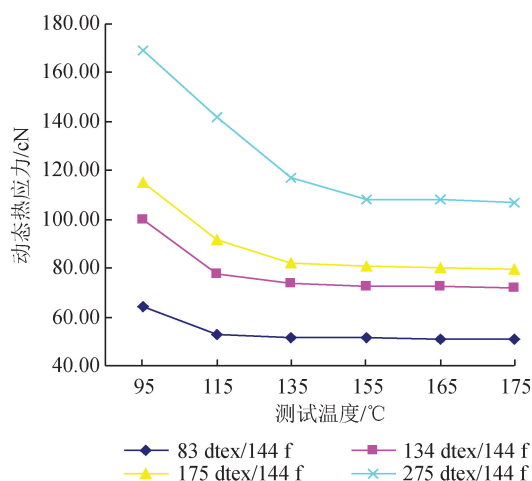


图 2 A 组试样不同测试温度下的动态热应力曲线
Fig. 2 Dynamic thermal stress curves of group A samples at different test temperatures

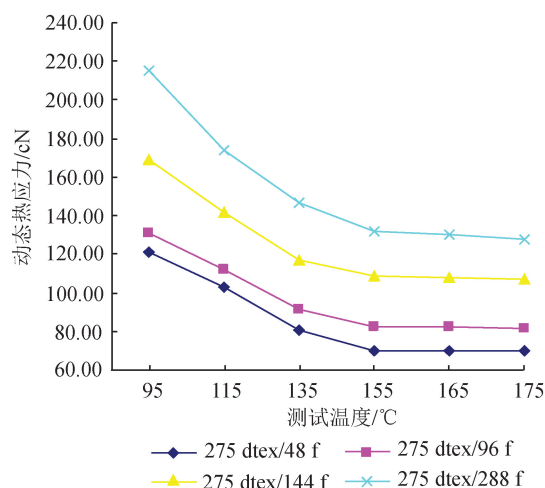


图 3 B 组试样不同测试温度下的热应力曲线
Fig. 3 Dynamic thermal stress curves of group B samples at different test temperatures

参考。

总之,为保证涤纶 POY 动态热应力测试值的准确性和稳定性,应选择合适的测试温度,过低或过高都无法为实际生产提供参考。本研究中,基于现有试样和设备,确定在 165 °C 的条件下测得涤纶 POY 的动态热应力可指导生产、优化工艺与控制质量^[4]。

2. 1. 2 测试速度

在固定预张力为 0.05 cN、拉伸倍数为 1.6、测试温度为 165 °C 及测试长度为 50 m 的条件下,改变测试速度 (20、50、100、150、200、250 m/min),测得涤纶 POY 试样的动态热应力如表 2 及图 4、图 5 所示。

表 2 不同测试速度下涤纶 POY 试样的动态热应力

Tab. 2 Dynamic thermal stress of polyester POY samples at various test speeds

规格	20 m/min		50 m/min		100 m/min		150 m/min		200 m/min		250 m/min	
	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/ %	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/ %
83 dtex/144 f	50.40	0.97	50.47	1.04	51.18	0.90	52.18	1.01	52.84	1.26	53.52	1.78
134 dtex/144 f	71.56	0.80	71.61	0.86	72.25	0.97	73.23	0.87	73.87	1.17	74.23	1.37
175 dtex/144 f	79.86	13.80	80.05	1.61	80.46	1.42	81.26	1.51	84.55	1.60	88.55	1.60
275 dtex/144 f	107.20	1.78	107.80	1.89	108.35	2.07	113.92	1.87	131.21	1.31	141.07	1.13
275 dtex/48 f	69.01	3.02	69.25	3.19	69.84	4.94	79.46	4.44	95.69	3.31	112.15	2.54
275 dtex/96 f	80.68	3.23	80.80	3.13	82.17	5.11	90.52	5.26	106.37	3.04	120.85	2.29
275 dtex/288 f	128.12	1.12	128.37	1.22	130.15	1.27	140.18	1.07	154.68	0.78	168.18	0.75

分析表 2 及图 4、图 5 可知:

(1) 当测试速度低于 100 m/min 时,各试样的动态热应力曲线趋于平缓,其值随速度增加变化很小。这是因为在较小的拉伸速度下,纤维内部分子链有足够的时间通过热运动进行调整和回缩(即松弛),释放大部分由拉伸产生的内应力。此时,进一步降低测试速度,动态热应力值也不会有显著变化,

表现为应力响应趋于饱和。

(2) 当测试速度在 100~150 m/min 时,动态热应力与测试速度呈显著的线性正相关。这是因为在较大的拉伸速度下,分子链来不及松弛就被强行拉长,导致应力不断积累。测试速度越大,这种滞后效应越显著,瞬态收缩应力越高。

(3) 当测试速度大于 150 m/min 时,总线密度

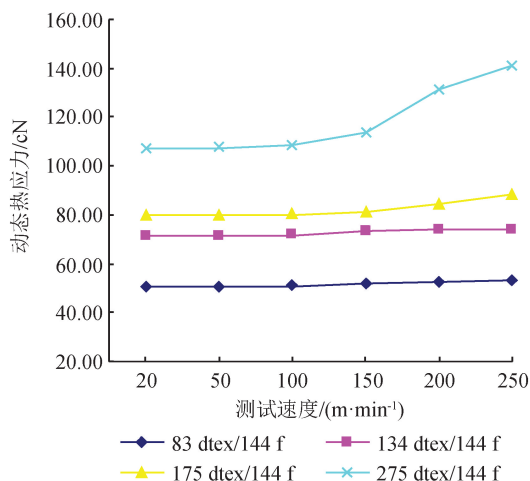


图4 A组试样不同测试速度下的动态热应力曲线

Fig. 4 Dynamic thermal stress curves of group A samples at different test speeds

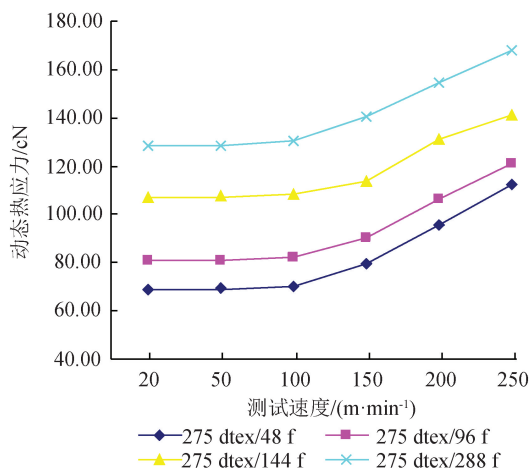


图5 B组试样不同测试速度下的动态热应力曲线

Fig. 5 Dynamic thermal stress curves of group B samples at different test speeds

成为影响动态热应力的关键因素。单丝根数相同时,总线密度越大,试样动态热应力对测试速度的变化越敏感,表现为曲线斜率更大。其机制在于,高速时丝束会承载更大的负荷。丝束越粗,其内部更多的取向分子链被同时激活,应变效应被放大。总线密度相同而单丝根数不同时,试样的动态热应力曲线变化趋势高度一致。这意味着对于总线密度相同的涤纶 POY 试样,可以采用统一且优化的测试速度评估其动态热应力。

综上,为确保测试结果既能灵敏区分产品差异,又具备良好的稳定性与测试效率,针对本研究选择的试样和设备,确定测试速度在 100~150 m/min。该测试速度区间既避开了低速区的响应迟钝,又避

免了高速区的过度敏感和数据波动,可实现快速、准确的在线质量检测。

2.1.3 测试长度

在固定预张力为 0.05 cN、拉伸倍数为 1.6、测试温度为 165 ℃ 及测试速度 100 m/min 的条件下,研究测试长度 (50、100、150、200、250 m) 对涤纶 POY 试样动态热应力的影响,结果见图 6。

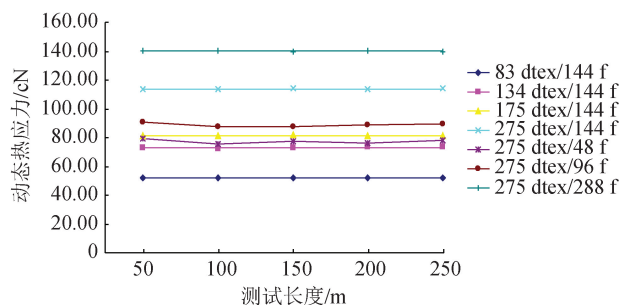


图6 测试长度对涤纶 POY 试样动态热应力的影响

Fig. 6 Effect of test length on dynamic thermal stress of polyester POY samples

测试长度是平衡测量统计代表性与实际操作效率的关键因素。从图 6 可以看出:当测试长度为 50 m 时,试样的动态热应力即进入稳定平台区,进一步增加测试长度对动态热应力影响甚微。这表明 50 m 的测试长度已能满足对数据稳定的基本要求。更长的试样其测定值理论上虽能更全面地反映涤纶 POY 卷装的内在质量均匀性,数据代表性更强,但测试需综合考虑设备磨损、测试周期及人力成本等因素。过长的测试长度将显著降低检测效率,不利于生产的快速反馈与调整。

基于上述分析,针对本研究选择的试样,在保证数据能有效反映试样质量的前提下,优先选用 50 m 的测试长度展开动态热应力测试。该测试长度能提供稳定且可靠的测量结果,实现数据统计代表性与检测操作效率之间的最优平衡。

2.2 预张力器绕丝方式对测试结果的影响

涤纶 POY 试样动态热应力测试时,预张力是确保测试结果准确性与重现性的关键。研究发现,试样在预张力器导丝轮上的绕丝方式对其动态热应力影响显著。本研究在固定预张力为 0.05 cN、拉伸倍数为 1.6、测试温度为 165 ℃、测试速度为 100 m/min、测试长度为 50 m 的条件下,以 A 组试样为例,采取 2 种预张力器绕丝方式,测得涤纶 POY 试样的动态热应力如表 3 所示。

表 3 预张力器绕丝方式对涤纶 POY 试样动态热应力的影响

Tab. 3 Effect of pre-tensioner winding methods on dynamic thermal stress of polyester POY samples

绕丝方式	83 dtex/144 f		134 dtex/144 f		175 dtex/144 f		275 dtex/144 f	
	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/%	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/%	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/%	动态热应力/ cN	动态热应力 CV 值/%
顺时针	51.18	0.87	72.73	0.99	81.17	0.81	116.78	1.64
逆时针	57.45	1.58	80.47	1.15	87.31	1.56	118.06	1.93

从表 3 可以看出:在完全相同的测试条件下,逆时针绕丝与顺时针绕丝所得动态热应力存在显著差异。此表现主要源于绕丝方式不同时,丝条进出导丝轮的包角及摩擦力的方向会发生改变,这将直接导致传递到测量区的丝条初始张力发生偏差。本研究通过测量丝条受热过程中的收缩应力,定量表征动态热应力。一个不合适的或波动的初始预张力会直接干扰收缩应力的基准,进而放大测量误差,并最终导致测试结果不可靠。

表 3 中,逆时针绕丝测得的动态热应力及其 CV 值偏大,且测试过程中存在易断纱甚至无法完成测试的情况,这与逆时针绕丝会增加丝条初始张力及其不稳定性有关。因此,为确保测试数据的准确性与可比性,基于本研究的设备与试样,确定测试均采用顺时针绕丝,并建议对同一批次产品固定丝束捻向进行测试,此举旨在消除因人为操作不一致引入系统误差项,确保动态热应力测试方法的重现性与数据的准确性。

2.3 仪器关键部件清洁状况对测试结果的影响

仪器长期稳定的运行是获得可靠数据的基础。

研究发现,测试过程中试样表面的油剂、测试环境中的灰尘及单丝断裂形成的微细废丝等,都会逐渐积聚于罗拉、导丝辊及张力传感器表面,进而改变丝条与接触部件之间的摩擦因数与接触状态,引入额外且不稳定的滑动摩擦力。当这部分力被高精度的张力传感器记录,并叠加到试样真实的热收缩应力中时,会造成显著的测量偏差与数据波动。其中,张力传感器自身感应辊上的积聚物对数据的干扰最为直接和严重,因为它直接改变了力的传递路径。

为量化这一影响,本研究以一次标准的维护事件为例,使用无水乙醇对上述部件进行彻底的擦拭,直至接触表面光洁,无可见残留物。然后随机选择了 6 种规格的涤纶 POY 试样,对比清洁前后涤纶 POY 试样的动态热应力测试结果(表 4)发现,所有清洁后的试样动态热应力值均比清洁前的小,这之前分析的残留物引入额外摩擦导致测量值偏高的机制完全吻合。

可见,仪器关键部件接触面的清洁状态不可忽视,对其进行标准化的管理是消除系统性偏差、确保测试结果准确与稳定的前提。

表 4 清洁维护前后涤纶 POY 试样的动态热应力

Tab. 4 Dynamic thermal stresses of polyester POY samples before and after cleaning and maintenance (cN)

传感器状态	53 dtex/24 f	88 dtex/72 f	83 dtex/144 f	134 dtex/72 f	175 dtex/144 f	266 dtex/288 f
清洁前	22.84	36.18	54.20	51.48	76.13	126.29
清洁后	18.98	34.84	52.11	46.67	70.54	122.12

2.4 物检室环境对测试结果的影响

为确保涤纶 POY 试样动态热应力测试数据的准确性与可比性,物检室环境应严格控制。本研究严格依据国家标准,将测试环境设定并维持在温度(20±2)℃、相对湿度(65±5)%。该标准条件的设定可排除环境的干扰,确保测试结果能真实反映纤维内在质量。

此外,研究还发现,空调送风会产生气流扰动,故空调风速也是一项需要控制的要素。过大的空调

风速会破坏局部温湿度的稳定性,并可能导致测试过程中试样抖动,引入张力噪声,影响测试结果及其稳定性。因此,测试过程中,控制空调风速在较低水平,以维持一个均匀、稳定的测试环境,很有必要。

3 结论

本研究通过系统性试验,探究了使用 DYNAFIL CU 动态热应力仪时,测试条件(即测试温度、测试

速度、测试长度)、预张力器绕丝方式、仪器维护及物检室环境等因素对涤纶 POY 动态热应力测试结果的影响,并确定了相关测试参数,以为生产质量的控制提供准确、可靠的数据参考。所得主要结论如下:

(1)测试温度是影响涤纶 POY 动态热应力测试结果的关键参数。温度可提供分子链运动所需的能量,使被冻结的取向结构得以松弛。研究基于温度梯度对比,确定 165 °C 为最佳测试温度。在此温度下,测得的动态热应力数值稳定,能有效反映产品的内在质量,便于生产工艺参数的确定。

(2)测试速度对动态热应力的测量结果影响显著。研究确定,测试速度宜在 100~150 m/min。此速度区间既能避免试样低速时高分子链段过度松弛,又能防止高速时数据因系统波动与线密度效应而出现异常,还实现了测试效率与准确性的最佳平衡。

(3)在保证测试数据具有参考意义的前提下,确定测试长度为 50 m。该长度既能充分反映涤纶 POY 的品质,又能最大限度地节约测试时间。

(4)操作应规范标准化。为保证测试数据准确,绕丝方式应统一,即预张力器导丝轮处采用顺时针绕丝。同时,仪器的日常维护和定期保养对测试结果的准确性也有一定的影响,建议定期采用无水乙醇对导丝轮、罗拉等关键部件进行清洁维护。

(5)测试时,应严格执行国家标准的实验室温

湿度要求,即控制温度在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度在 $(65 \pm 5)\%$,同时还需控制空调风速,避免气流导致试样抖动而引发张力不稳定。

总之,在涤纶 POY 动态热应力测试中,排除环境与仪器干扰是获得可靠数据的前提,采用合适的测试参数是确保数据反映涤纶 POY 质量真实水平的核心。下一步,可采用正交试验等多元统计方法探究多因子间的交互作用,建立更精确的工艺窗口预测模型,使得测试结果能更精准地反映涤纶 POY 的内在质量,从而为稳定生产、提升产品质量提供“参数控制”到“模型预测”的技术支撑。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 胡岚. 影响 POY 长丝动态热应力的因素分析[J]. 合成技术及应用, 2011, 26(4): 35-37.
- [2] 宣一岷. 用动态热应力仪评价 POY 内在质量[J]. 合成技术及应用, 2000, 15(2): 52-53.
- [3] 周丹. 影响 POY 动态热应力测试因素的探讨[J]. 合成纤维, 2024, 53(6): 16-18.
- [4] 王雪. POY 热应力测试条件选择的影响因素分析[J]. 聚酯工业, 2020, 33(4): 43-45.
- [5] Jia X L, Zhou Z H, Guo D H, et al. Low-density, large-sized SiCnw/SiOC composite aerogels with excellent thermal insulation, microwave absorption, and thermostability[J]. Ceramics International, 2024, 50(18): 33315-33324.
- [6] Zhao J Q, Lu C H, He X, et al. Polyethylenimine-grafted cellulose nanofibril aerogels as versatile vehicles for drug delivery[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(4): 2607-2615.
- [7] Jiamjirangkul P, Pongsanon P, Pangon A. Cellulose nanocrystals-reinforced lignin-based composite gel membranes: flexible and environmentally friendly quasi-solid polymer electrolytes for supercapacitors[J]. MRS Communications, 2026, 16(2): 340-347.
- [8] Jaouahar M, Ablouh EL H, Hanani Z, et al. Comprehensive characterization of hygroscopic, fire-retardant and thermally insulating sulfated nanocellulose aerogel[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 506: 160236.
- [9] Ma Y Y, Liu R X, Lei Y, et al. A lightweight, supercompressible and superelastic aramid nanofiber/nanocellulose-derived carbon aerogel with in-plane micro-wrinkle honeycomb structure for thermal insulation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 230: 139-150.
- [10] Zhu J T, Wang Y Y, Zhao X Y, et al. Anisotropic composite aerogel with thermal insulation and flame retardancy from cellulose nanofibers, calcium alginate and boric acid[J]. International Journal of Biological

(上接第 29 页)