

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.02.020

热处理温度对对位芳纶纤维表面聚集态结构和性能影响

周琴^{1,2}, 李杨³, 林昆杰³, 刘金勇³, 郝智¹, 罗筑¹

(1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550001; 2. 贵州理工学院工程训练中心, 贵阳 550003; 3. 贵州理工学院材料与能源工程学院, 贵阳 550003)

摘要: 以不同温度(200, 250, 300, 350℃)热处理对位芳纶纤维, 用傅立叶变换红外光谱(FTIR)、拉曼光谱(Raman)、X射线衍射(XRD)、X射线光电子能谱(XPS)、扫描电子显微镜(SEM)分析了氧化热处理对对位芳纶纤维表面基团和聚集态结构的影响。FTIR和XRD分析结果表明, 经250℃及以上热处理, 纤维表层分子链重排, 氢键增强。Raman和XPS分析结果表明, 经250℃及以上热处理后, 对位芳纶纤维表层分子链苯环上C(C—C, C=C或C—H)被氧化成—C—OH或—COOH, 纤维表面极性增加。经300℃热处理后, 对位芳纶纤维表层分子链运动、重排并开始收缩, 结晶度增加, 纤维单丝的拉伸强度达到25.7 cN/dtex, 提升了4.9%。经250℃热处理后, 对位芳纶纤维与环氧树脂微滴的界面剪切强度达到18.05 MPa, 与未热处理时相比增加了11.9%。

关键词: 对位芳纶纤维; 热处理; 聚集态结构; 力学性能

中图分类号: TQ342+.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)02-0117-06

Effects of Heat Treatment Temperature on Surface Aggregation Structure and Properties of Para-Aramid Fibers

Zhou Qin^{1,2}, Li Yang³, Lin Kunjie³, Liu Jinyong³, Hao Zhi¹, Luo Zhu¹

(1. College of Material and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550001, China; 2. Engineering Training Center, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 3. School of Materials and Energy Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China)

Abstract: The para-aramid fibers were heat treated at the different temperatures (200, 250, 300, 350℃), the effects of heat treatment on the surface group and the aggregate structure of para-aramid fibers were investigated by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Raman spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and scanning electron microscope (SEM). The results of FTIR and XRD analysis show that the molecular chains in the surface layer of the fibers were rearranged and the hydrogen bonds were enhanced when the temperature is greater than or equal to 250℃. The results of Raman and XPS analysis show that C (C—C, C=C or C—H) on the surface molecular chain of p-aramid fibers are oxidized to be —C—OH or —COOH at 250℃ or above, and the surface polarity of the fibers increases. After heat treatment at 300℃, the molecular chains on the surface of para-aramid fibers move, rearrange and began to shrink, the crystallinity increases, and the tensile strength of the single fiber reaches 25.7 cN/dtex, which increases by 4.9%. After heat treatment at 250℃, the interfacial shear strength of para-aramid fiber and epoxy drop reaches 18.05 MPa, which increases by 11.9% compared with the untreated fiber.

Keywords: para aramid fiber; heat treatment; aggregate structure; mechanical property

对位芳纶纤维具有高模量、高强度、耐高温等优异性能, 是一种很有价值的塑料增强材料^[1-3]。但是对位芳纶纤维表层结晶度较高, 表面相对光滑并且具有一定的化学惰性, 与基体的界面粘合力较差, 使得对位芳纶纤维的增强作用难以很好的体现。

目前对位芳纶纤维的改性方法主要是物理改性和化学改性。化学改性通过水解^[4]、硝化^[5]、氟化^[6]等工艺提升纤维的表面极性, 改性效果显著, 但是改性过程中有机溶剂的使用对纤维的损伤不可避免。物理改性方法包括表面涂覆^[7]、刻蚀^[8]、等

基金项目: 贵州省科技厅基金项目(黔科合基础[2019]1134号), 大飞机短舱用阻燃耐火有机硅橡胶关键技术研发(黔科合支撑[2019]2030号), 贵州理工学院创新创业项目(201914440347, 201914440192)

通信作者: 郝智, 副教授, 博士, 主要研究复合材料共混改性 E-mail: 19707653@qq.com

收稿日期: 2020-12-25

引用格式: 周琴, 李杨, 林昆杰, 等. 热处理温度对对位芳纶纤维表面聚集态结构和性能影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 117-122, 135.

Zhou Qin, Li Yang, Lin Kunjie, et al. Effects of heat treatment temperature on surface aggregation structure and properties of para-aramid fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2): 117-122, 135.

离子体^[9]等工艺,均能有效提高对位芳纶纤维的表面极性和粗糙度,改性过程中对纤维本体损伤较小,但是对改性过程和设备要求较高。Yuan Hao等^[10]研究发现,不同气氛等离子体处理后对位芳纶纤维表面亲水性提高,同时氧等离子体处理后纤维表层O=C—O含量增加明显,并且对位芳纶纤维的分子结构中C—C和C—H更易被氧化。罗筑等^[11]研究发现,经过热氧化处理后对位芳纶纤维表层的含氧量有一定程度的提升,含氧极性基团的增加有利于纤维与基体树脂的界面粘合。然而目前热处理对位芳纶纤维的研究较少,同时热处理后对位芳纶纤维表层基团的变化过程并不清楚,同时热处理后纤维表面含氧量增加的具体过程并不清晰。因此,研究对位芳纶纤维的热氧化行为,表征其表层基团热处理的变化以及热氧化处理条件显得尤为重要。

1 实验部分

1.1 主要原料

对位芳纶纤维:1500D,韩国ALKEX公司;

丙酮:分析纯,重庆市川东化工有限公司;

环氧树脂:E-44,上海树脂厂有限公司;

2-乙基-4-甲基咪唑固化剂:含量 $\geq 95\%$,日本四国化成工业株式会社。

1.2 主要仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱:Q/IMVPI12006型,上海琅环实验设备有限公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:AES0400911型,美国尼高力公司;

激光共焦显微拉曼光谱(Raman)仪:DXR 2型,美国Thermo Fisher公司;

扫描电子显微镜(SEM):Sirion 200型,美国FEI公司;

同步热分析仪:Q50型,美国TA公司;

X射线衍射(XRD)仪:X'Pert PRO型,荷兰Nalytical公司;

X射线光电子能谱(XPS)仪:K-Alpha+型,美国Thermo Fisher公司;

纤维强力仪:XQ-1型,上海新纤仪器有限公司;

倒置金相显微镜:AXIO型,德国蔡司公司。

1.3 对位芳纶纤维的热处理

取一定量的对位芳纶纤维放在鼓风烘箱中,适当分散,然后快速升温到设定温度(200,250,300,350℃)后,恒温处理1 h,达到设定时间后取出,分别编号为1[#],2[#],3[#],4[#]试样,密封,待用。未热处理的

原纤维编号为0[#]试样。

1.4 环氧树脂/对位芳纶纤维微滴试样的制备

首先将质量分数95%的环氧树脂和质量分数5%的2-乙基-4-甲基咪唑固化剂混合均匀,制备环氧树脂固化体系。然后将改性对位芳纶纤维固定在模具上,用针尖将环氧树脂微滴滴到对位芳纶纤维单丝的表面,再将环氧树脂/对位芳纶纤维微滴试样移入鼓风干燥箱进行热处理以使环氧树脂固化,固化条件为100℃,1 h,即得环氧树脂/对位芳纶纤维微滴试样。

1.5 性能测试与表征

FTIR测试:将热处理后的对位芳纶纤维用剪刀剪碎,与适量KBr混合后压片,对试样表面基团进行FTIR分析,光谱分辨率4 cm⁻¹,扫描32次,扫描波数测量范围400~4000 cm⁻¹。

Raman测试:对热处理后的对位芳纶纤维表面基团进行Raman分析,激光器波长532 nm,功率为8 μW,10倍目镜,50倍物镜,扫描范围50~3200 cm⁻¹。

XRD测试:对热处理后的对位芳纶纤维进行XRD分析,Cu K_α辐射,管电压40 kV,管电流40 mA,波长0.15406 nm,扫描范围10°~50°。测试后通过Jade软件对XRD图谱的分峰进行拟合,根据拟合的结晶峰与非晶峰面积依据式(1)计算结晶度:

$$X_c = \frac{\sum (A_{110} + A_{200})}{\sum (A_{110} + A_{200}) + \sum A_{FJ}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X_c ——结晶度;

A_{110} ——(110)晶的面积;

A_{200} ——(200)晶的峰面积;

A_{FJ} ——无定形峰(非结晶峰)的面积。

XPS测试:对热处理后的对位芳纶纤维表面元素和化学键进行XPS分析。光源为单色化的Al K_α源,能量1486.6 eV,电流6 mA,电压12 kV,束斑大小400 μm。扫描模式:CAE全谱扫描,通能为100 eV,步长1 eV;窄谱扫描:通能为50 eV,步长0.1 eV,扫描次数5次。测试后采用高斯-洛伦兹函数对C_{1s}谱图进行分峰拟合,根据各个谱峰的相对峰面积确定纤维表面相应官能团的含量。

SEM分析:将热处理后的对位芳纶纤维粘附在导电胶上,喷金,用SEM对纤维表面形貌进行扫描。

纤维单丝拉伸强度测试:按照GB/T 14337-2008,对热处理后的对位芳纶纤维进行单丝拉伸强

度测试。各试样夹持长度为 20 mm,拉伸速率为 5 mm/min。

界面剪切强度测试:将环氧树脂/对位芳纶纤维微滴试样在室温下静置 24 h 后,在纤维强力仪上进行测试。安装试样,用上夹具夹紧纤维上端,调整上夹具,然后以 10 mm/min 的速率从微滴试样中拉出单根纤维。纤维的直径(D)和嵌入长度(L)通过倒置金相显微镜进行测量,实验过程中记录引起脱粘的最大载荷。每组测试取 10 个有效测试数据,假设整个界面上的界面剪切强度近似为常数,则纤维微滴界面平均剪切强度可由式(2)计算得出:

$$\Gamma = \frac{F_d}{\pi DL} \quad (2)$$

式中: Γ ——平均界面剪切强度,MPa;

F_d ——界面破坏的最大荷载,N;

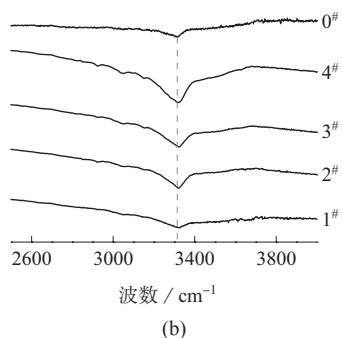
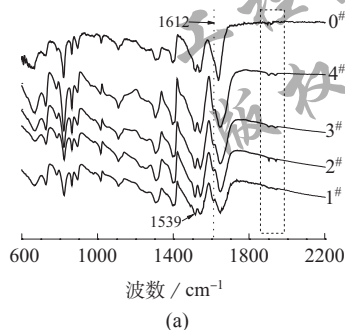
D ——纤维直径,m;

L ——嵌入长度,m。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

不同温度热处理后对位芳纶纤维的 FTIR 谱图如图 1 所示。



a—600~2200 cm⁻¹; b—2500~4000 cm⁻¹

图1 不同温度热处理后对位芳纶纤维的 FTIR 图谱

由图 1a 可以看出,对位芳纶纤维的特征吸收峰出现在 3312 cm⁻¹ (—NH),1647 cm⁻¹ (C=O, 酰胺 I 带),1260 cm⁻¹ (N—H),1539 cm⁻¹ 附近 (C—N 伸缩振动和 N—H 弯曲振动的耦合)。经不同温度热

处理后纤维的表面基团发生了一定的改变:一方面,随着热处理温度的增加,1539 cm⁻¹ 处的吸收峰振动逐渐加强,表明经 250℃ 及以上热处理,对位芳纶纤维表层分子链间的氢键有所增强;另一方面,经 250℃ 及以上热处理后,在 1900 cm⁻¹ 附近 (源于苯环的 C=C) 出现了微弱的峰。表明热处理后纤维表层分子链间氢键增强的同时,可能出现苯环取代基的变化,以致苯环的化学状态出现改变,从而使苯环双键振动加强^[12]。

由图 1b 可以看出,经 250℃ 及以上热处理后,源于氢键的 3312 cm⁻¹ 附近吸收峰向高波数偏移。表明高温热处理后纤维表层氢键有所增强,并且 300℃ 热处理与 250℃ 的差别并不明显。但是 300℃ 和 350℃ 热处理后,3312 cm⁻¹ 附近振动进一步加强,吸收峰更加明显,说明玻璃化转变温度 (T_g) 附近 (对位芳纶纤维 T_g 约 294℃),对位芳纶纤维表层分子链运动能力增强,热处理过程中纤维表层分子链重排,有序度增加。

2.2 Raman 分析

以 Raman 光谱表征对位芳纶纤维在热处理过程中纤维表层分子链主链结构的变化。不同温度热处理后对位芳纶纤维的 Raman 谱图如图 2 所示。

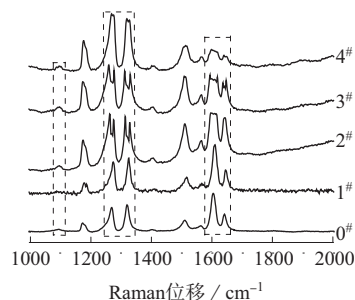


图2 不同温度热处理对位芳纶纤维的 Raman 谱图

由图 2 可以看出,1643 cm⁻¹ 处为酰胺 I 带吸收峰 (C=O 伸缩振动),1610 cm⁻¹ 处为芳纶纤维苯环 C=C 伸缩振动。苯环的取代产生的面内变形或者环“呼吸”振动一般在 1100~1200 cm⁻¹ 附近,该处的振动主要是苯环 1,3,5 碳原子构成的三角形部分的键长的收缩 (或伸长),同时伴随着 2,4,6 碳原子的伸长 (或收缩)。1185 cm⁻¹ 附近为对位双取代苯环 C=C 振动峰,而 1045 cm⁻¹ 附近为间位双取代苯环 C=C 振动峰^[13]。

由图 2 还可看出,热处理温度为 200℃ 时,不仅对位芳纶纤维分子主链结构没有任何变化,而且分子链间氢键也未受到影响。经 250℃ 及以上热处理后,1045 cm⁻¹ 附近出现了吸收峰并逐渐增强,同时

1321 cm^{-1} 和 1271 cm^{-1} 以及 1610 cm^{-1} 附近的吸收峰出现明显变化:一方面,从 250℃ 开始纤维表层分子链间酰胺键开始重构,1271 cm^{-1} 和 1321 cm^{-1} 处由单峰变为双峰;另一方面,源于苯环 C=C 双键 1610 cm^{-1} 处的振动吸收峰也从 250℃ 开始减弱,300℃ 和 350℃ 时吸收峰进一步减弱。表明经热处理,对位芳纶纤维表层的分子链可以被氧化,且纤维表层分子链中苯环间位 C—H 首先被氧化。

2.3 XPS 分析

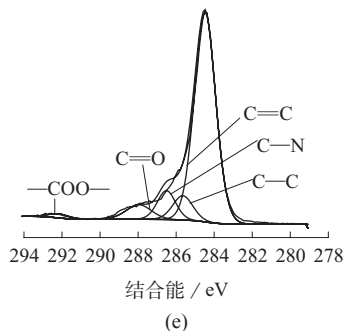
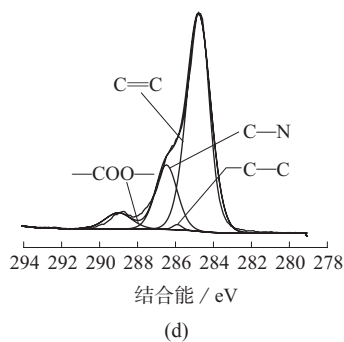
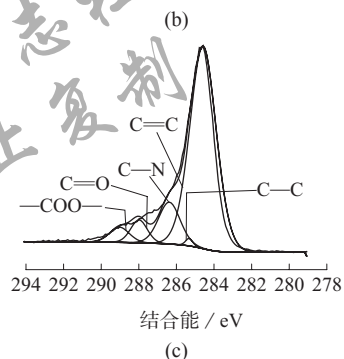
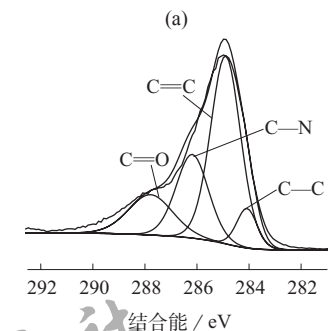
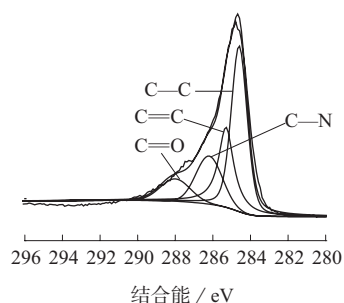
经不同温度热处理后,根据 XPS 的 C_{1s} 谱图得到的对位芳纶纤维表层的原子含量和质量比列于表 1,相应的谱图如图 3 所示。

表 1 不同温度热处理后对位芳纶纤维表层的原子含量和质量比

纤维试样 编号	含量/%			质量比	
	C_{1s}	O_{1s}	N_{1s}	C/N	O/N
0 [#]	77.16	12.12	10.72	6.36	1.13
1 [#]	71.35	13.5	15.15	5.28	0.89
2 [#]	72.89	15.68	10.43	4.64	1.50
3 [#]	74.88	15.71	9.11	4.76	1.67
4 [#]	69.88	17.13	12.99	4.07	1.32

由图 3 可看出,未热处理和 200℃ 热处理后纤维的 C_{1s} 能级谱可以拟合为四个峰^[13],分别为 C—C (284.6 eV), C=C (285.3 eV), C—N (286.2 eV), C=O (287.6 eV)。经 250℃ 及以上热处理后,各试样在 288~289 eV 的峰形出现了明显的变化。进一步对各试样分峰拟合,250℃ 及以上热处理后芳纶纤维在 289 eV (—COO—) 附近出现明显吸收峰,表明对位芳纶纤维的表层能够被氧化,表层分子链苯环上 C (C—C, C=C 或 C—H) 被氧化成 —C—OH 或 —COOH。

由表 1 可看出,对位芳纶纤维只含元素 C, N 和 O (H),不同温度热处理后纤维的 XPS 谱图基本相同。与原纤维相比 (O/N 为 1.13,因表面有上浆剂,其比值略大于 1),200℃ 热处理后,纤维表面的含氧量明显降低,这与纤维表面极性上浆剂的高温挥发有关。250℃ 热处理后,纤维表层的氧含量进一步增加 (O/N 为 1.50),这是因为纤维表层分子链被部分氧化,从而促使表层含氧量增加,这与 FTIR 和 Raman 光谱的分析结果一致。虽然 300℃ 热处理后纤维的含氧量进一步增加 (O/N 为 1.67),但是增量并不明显,同时 350℃ 热处理后纤维的含氧量有所下降 (O/N 为 1.32)。说明对位芳纶纤维在 300℃ 及以上氧化的同时出现明显分解、交联,特别是 350℃,纤维的断链降解加剧,表层碳化,含氧量反而降低^[14]。



a—原纤维; b—200℃, 1 h; c—250℃, 1 h;
d—300℃, 1 h; e—350℃, 1 h

图 3 不同温度热处理后对位芳纶纤维表层 XPS 的 C_{1s} 谱图

2.4 XRD 分析

不同温度热处理前后对位芳纶纤维的 XRD 谱图如图 4 所示,分峰拟合数据见表 2。

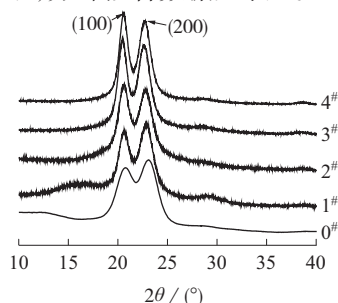


图 4 不同温度热处理前后对位芳纶纤维的 XRD 谱图

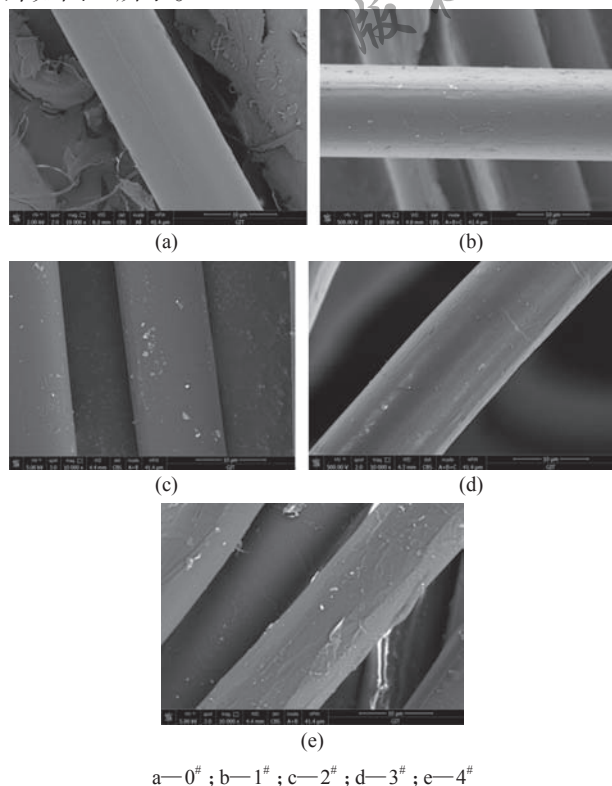
表 2 不同温度热处理前后对位芳纶纤维的晶体结构参数

纤维试样 编号	2θ/(°)		晶面间距/nm		半峰宽/(°)		平均晶粒 尺寸/nm	晶型面积比/%		结晶度/ %
	(110)	(200)	(110)	(200)	(110)	(200)		(110)	(200)	
0 [#]	20.74	23.05	0.427 87	0.385 44	1.629	1.699	5.1	36.7	63.7	76.16
1 [#]	20.69	22.77	0.430 95	0.390 14	1.632	1.621	5.3	35.5	64.5	77.04
2 [#]	20.67	22.84	0.431 40	0.389 08	1.411	1.786	5.4	39.1	60.9	82.16
3 [#]	20.61	22.59	0.434 53	0.393 26	1.086	1.432	5.9	41.2	59.8	87.86
4 [#]	20.62	22.65	0.432 38	0.392 14	1.035	1.382	6.1	40.3	59.7	88.47

运动。250℃热处理后,纤维的结晶度为 82.16%,增加了 7.88%。继续提升热处理温度(300,350℃),平均晶粒尺寸增加,但是结晶度的提升并不明显。

2.5 热处理后对位芳纶纤维微观形貌分析

不同温度热处理前后对位芳纶纤维的 SEM 照片如图 5 所示。



a—0[#]; b—1[#]; c—2[#]; d—3[#]; e—4[#]

图 5 不同温度热处理前后对位芳纶纤维的 SEM 照片

由图 4 可以看出,热处理前后对位芳纶纤维均在 2θ 为 20.0°,23.8° 附近出现了两个明显的特征衍射峰,分别对应于 (110) 和 (200) 晶面,表明经热处理后,纤维的晶体类型基本没有改变^[15]。

由表 2 可看出,热处理后, (110) 和 (200) 晶面衍射峰的 2θ 值略有减小,表明热处理后纤维表层的晶面间距稍微增加。这可能与热处理过程中纤维内部气体扩散有关^[16]。通过热处理,纤维表层分子结晶进一步完善,使得结晶半峰宽明显减小,平均晶粒尺寸增大。200℃热处理后,纤维结晶度稍有增加,为 77.04%,结晶度增加来源于—CO—NH—的局部

由图 5 可以看出,热处理温度为 200℃时,对位芳纶纤维表层的上浆剂小分子挥发后,纤维的表面形貌改变并不明显。温度升高,纤维表层的形貌开始出现变化。250℃热处理后,纤维表层存在少量的“凸起”,这与纤维表层分子链局部运动和自由体积的减小有关^[18]。300℃热处理后,纤维表层分子链开始收缩。350℃热处理后,纤维表层分子链开始出现交联,纤维的表层出现褶皱。

2.6 单丝拉伸强度分析

不同温度热处理前后芳纶纤维的单丝拉伸强度如图 6 所示。

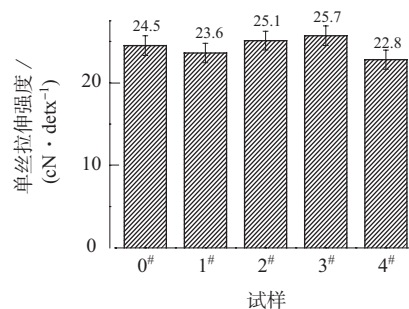


图 6 不同温度热处理前后对位芳纶纤维的单丝拉伸强度

由图 6 可以看出,200℃热处理后,对位芳纶纤维的单丝拉伸强度有一定程度的降低。这是由于对位芳纶纤维表面的上浆剂在 200℃左右挥发,上浆剂挥发后芳纶纤维单丝拉伸强度稍微下降。250℃热处理后,纤维的单丝拉伸强度为 25.1 cN/dtex,与原纤维的单丝拉伸强度(24.5 cN/dtex)相比稍

有提升,但是并不明显。300℃热处理后,纤维表层分子链的运动、重排,使纤维表层结晶度增加,其单丝拉伸强度增加到 25.7 cN/dtex,与原纤维单丝的拉伸强度相比,提升了 4.9%。350℃热处理后,纤维表层分子链交联,造成局部应力,其单丝拉伸强度为 22.8 cN/dtex,与原纤维单丝的拉伸强度相比,下降了 6.9%。

2.7 界面剪切强度分析

分别用 0[#] 和 2[#] 对位芳纶纤维单丝制备环氧树脂/对位芳纶纤维微滴试样,分别编号为 EP/AF0 和 EP/AF2,测试其界面剪切强度结果列于表 3。

表 3 热处理前后环氧树脂/对位芳纶纤维微滴试样

界面剪切强度测试结果	
微滴试样	界面剪切强度 / MPa
EP/AF0	16.13 ± 0.7
EP/AF2	18.05 ± 0.5

由表 3 可知,对位芳纶纤维未经热处理时,环氧树脂/对位芳纶纤维微滴试样界面剪切强度为 16.13 MPa。经 250℃热处理后,微滴试样的界面剪切强度达到 18.05 MPa,与未热处理时相比增加 11.9%。表明经 250℃热处理后,纤维表面产生了极性含氧基团(—COOH 等),而环氧树脂中的环氧基团可以通过亲核反应机制与这些极性基团反应,进而提升界面粘合,这与前述分析结果一致。

3 结论

(1) 200℃热处理,对位芳纶纤维表面不会产生氧化反应;热处理温度达到 250℃时,纤维表层分子链能够紧密重排,使得氢键增强,同时表层分子链也会出现氧化,对位芳纶纤维的分子链苯环 C—H 被氧化成—C—OH, —COOH。300,350℃热处理后,对位芳纶纤维虽然能够被氧化,但伴随着强烈的分子链断裂过程,分子链分解过程明显。

(2) 经 250℃热处理,对位芳纶纤维表层分子平均晶粒尺寸增加,热处理 1 h 后,结晶度达到 82.16%,比未处理纤维提升了 7.88%。300,350℃热处理后,对位芳纶纤维表层分子链开始出现交联并开始收缩。

(3) 经 250℃热处理后,对位芳纶纤维表面产生的极性含氧基团(—COOH 等)能够进一步提升其与环氧树脂的界面粘合,对位芳纶纤维与环氧树脂微滴的界面剪切强度达到 18.05 MPa,与未热处理时相比增加了 11.9%。

参考文献

[1] 刘清清,郭荣辉. 芳纶纤维的改性研究进展 [J]. 纺织科学与工程

学报,2020,37(3):86-93.

Liu Qingqing, Guo Ronghui. Research progress of modification of aramid fiber[J]. Journal of Textile Science and Engineering, 2020, 37(3):86-93.

[2] 洪波,罗筑,夏忠林,等. 芳纶纤维界面改性研究进展 [J]. 工程塑料应用,2014, (42)6:126-130.

Hong Bo, Luo Zhu, Xia Zhonglin, et al. Research progress in interfacial modification of aramid fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(6):126-130.

[3] 栗越,张京发,易顺民,等. 改性芳纶纤维增强木粉/高密度聚乙烯复合材料的力学性能 [J]. 复合材料学报,2019,36(3):638-645.

Li Yue, Zhang Jingfa, Yi Shunmin, et al. Mechanical properties of modified aramid fiber reinforced wood flour / high density polyethylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(3):638-645.

[4] Loureiro L, Carvalho V H, Bettini S H P. Reuse of p-aramid from industrial waste as reinforcement fiber in polyamide 6.6[J]. Polymer Testing, 2016, 56:124-130.

[5] Lin T K, Wu S J, Lai J G, et al. The effect of chemical treatment on reinforcement / matrix interaction in Kevlar-fiber / bismaleimide composites[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(9):1873-1878.

[6] Cheng Zheng, Zhang Lingjie, Jiang Chan, et al. Aramid fiber with excellent interfacial properties suitable for resin composite in a wide polarity range[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 347:483-492.

[7] 陈丽娟,汪君,闫叶寒,等. 聚多巴胺涂层的研究与应用进展 [J]. 高分子通报,2018(7):42-49.

Chen Lijuan, Wang Jun, Yan Yehan, et al. The progress of research and application of polydopamine coatings[J]. Polymer Bulletin, 2018(7):42-49.

[8] 张曼,黄献聪,周宏,等. 磷酸处理法和氧等离子体法改性芳纶纤维的机理探讨 [J]. 化工新型材料,2015,43(5):76-79.

Zhang Man, Huang Xiancong, Zhou Hong, et al. Study on the mechanism of phosphoric acid and oxygen plasma surface treatment on aramid fiber[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(5):76-79.

[9] Wang C X, Du M, Lyu J C, et al. Surface modification of aramid fiber by plasma induced vapor phase graft polymerization of acrylic acid. I. Influence of plasma conditions[J]. Applied Surface Science, 2015, 349(15):333-342.

[10] Yuan Hao, Wang Wenchun, Yang Dezheng, et al. Hydrophilicity modification of aramid fiber using a linear shape plasma excited by nanosecond pulse[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344:614-620.

[11] Luo Zhu, Chen Weilong, Jin Zhong, et al. Epoxy resin modified maleic anhydride-grafted-liquid polybutadiene on the properties of short aramid fiber reinforced natural rubber composite[J]. Polymer

(下转第 135 页)

- [16] 陶齐,傅光华,王天晴,等. 聚丙烯/超支化聚酯酰胺共混物的等温结晶动力学[J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(1):88-92.
Tao Qi, Fu Guanghua, Wang Tianqing, et al. Isothermal crystallization kinetics of polypropylene/hyperbranched polyester amide blends[J]. Synthetic Resins and Plastics, 2020, 37(1):88-92.
- [17] 汪子健,孟寒,邵如,等. 热塑性聚酯弹性体 TPEE 的非等温结晶动力学[J]. 弹性体, 2020, 30(1):17-21.
Wang Zijian, Meng Han, Shao Ru, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of TPEE[J]. China Elastomerics, 2020, 30(1):17-21.
- [18] Papageorgiou D G, Papageorgiou G Z, Bikiaris D N, et al. Crystallization and melting of propylene-ethylene random copolymers. Homogeneous nucleation and nucleating agents[J]. European Polymer Journal, 2013, 49:1 577-1 590.
- [19] 周仕龙,向萌,杨菁菁,等. PP/PA6/SiO₂ 纳米复合材料的非等温结晶动力学[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):115-120.
Zhou Shilong, Xiang Meng, Yang Jingjing, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of PP/PA6/SiO₂ nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):115-120.

=====

(上接第 122 页)

- Composites, 2018, 39(34):E2 006-E2 015.
- [12] Li Shineng, Gu Aijuan, Liang Guozheng, et al. A facile and green preparation of poly(glycidyl methacrylate) coated aramid fibers[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(18):8 960-8 968.
- [13] Wang Yifan, Sun Jun, Dai Lixing. The synthesis and solubility of a wholly aromatic polyamide containing para-and meta-substituted phenylene rings[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 320: 488-494.
- [14] Li Yang, Luo Zhu, Yang Le, et al. Influence of polyamide acid-coating reaction on the properties of aramid fibre[J]. Polymer, 2019, 178.doi:10.1016/j.polymer.2019.121550.
- [15] Wang Ben, Duan Yugang, Zhang Jingjing. Titanium dioxide nanoparticles-coated aramid fiber showing enhanced interfacial strength and UV resistance properties[J]. Materials & Design, 2016, 103:330-338.
- [16] 唐国平. 含杂环的芳香族共聚酯酰胺纤维在热处理过程中的结构与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
Tang Guoping. Study on structure and properties of heterocyclic aramid fiber with heat treatment[D]. Shanghai:Donghua University, 2013.
- [17] 张素凤,李鹏辉,刘媛,等. 热压温度对芳纶 1414 纤维/1313 浆粕复合纸微区结合特征的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5):1 003-1 008.
Zhang Sufeng, Li Penghui, Liu Yuan, et al. Effect of hot pressing temperature on inter-binding feature between para-aramid fiber and meta-aramid fibrils in composite paper[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5):1 003-1 008.
- [18] Jin Zhong, Luo Zhu, Yang Shirun, et al. Influence of complexing treatment and epoxy resin coating on the properties of aramid fiber reinforced natural rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(25).doi:10.1002/app.42122.

=====

(上接第 128 页)

- [11] Andrzejewski J, Cheng J, Anstey A, et al. Development of toughened blends of poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) for 3D printing applications:Compatibilization methods and material performance evaluation[J]. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2020, 8(17):6 576-6 589.
- [12] Nakayama D, Wu Feng, Mohanty A K, et al. Biodegradable composites developed from PBAT/PLA binary blends and silk powder:compatibilization and performance evaluation[J]. ACS Omega, 2018, 3(10):12 412-12 421.
- [13] Racha A, Khalid L, Abderrahim M, et al. Rheological, morphological and interfacial properties of compatibilized PLA/PBAT blends[J]. Rheologica Acta, 2014, 53(7):501-507.
- [14] Wang Xin, Peng Shaoxian, Chen Hao, et al. Mechanical properties, rheological behaviors, and phase morphologies of high-toughness PLA/PBAT blends by in-situ reactive compatibilization[J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 173.doi:10.1016/j.compositesb. 2019.107028.
- [15] 辜婷. PLA/PBS 共混体系结构及性能的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
Gu Ting. Study on the structure and properties of PLA/PBS blend system[D]. Guiyang:Guizhou University, 2018.
- [16] 张妍洁,吴栓庆,钟勇星,等. 多元环氧扩链剂对 PLA 增强 PBAT 性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(2):7-11, 15.
Zhang Yanjie, Wu Shuanqing, Zhong Yongxing, et al. Effect of multi-functional epoxy chain extender on properties of reinforced PBAT blend[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):7-11, 15.
- [17] Xu Xiaodong, Dai Jinfeng, Ma Zhewen, et al. Manipulating inter-phase reactions for mechanically robust, flame-retardant and sustainable polylactide biocomposites[J]. Composites Parts B, 2020, 190.doi:10.1016/j.compositesb.2020.107930.
- [18] Li Xin, Ai Xue, Pan Hongwei, et al. The morphological, mechanical, rheological, and thermal properties of PLA/PBAT blown films with chain extender[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29(6):1 706-1 717.