

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200197

数字出版日期: 2021-06-07; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20210604.1551.001.html>

超声辅助磷酸对对位芳纶纤维的亲水改性

刘倩, 惠岚峰, 刘子琪
(天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 为改善对位芳纶纤维水分散性、亲水性, 进行对位芳纶纤维磷酸刻蚀改性研究. 实验采用超声辅助磷酸刻蚀纤维, 对改性前后纤维的水分散性、亲水性、表观形貌、化学结构、结晶结构以及热稳定性进行表征. 结果显示: 最佳处理条件得到的对位芳纶纤维在水介质中可以单根纤维沉降, 沉降体积增加了 57.14%; 改性后的纤维表面出现凹槽刻痕且有分丝现象, 同时在纤维表面引入—OH、—COOH 等极性基团, O 原子含量增加了 1.56%; 动态接触角为 81.2°, 比原纤维降低 21.7°, 对位芳纶纤维的润湿性增强; 并且改性后纤维的结晶结构未发生变化, 热稳定性良好.

关键词: 对位芳纶纤维; 超声; 磷酸; 亲水改性

中图分类号: TS722 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2021)06-0015-07

Hydrophilic Modification of Para-aramid Fiber by Ultrasound-assisted Phosphoric Acid

LIU Qian, HUI Lanfeng, LIU Ziqi
(College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology,
Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to improve the water dispersibility and hydrophilicity of para-aramid fiber, the para-aramid fibers were modified by phosphoric acid etching. The experiment used ultrasound-assisted phosphoric acid to etch fibers, and was characterized by water dispersibility, hydrophilicity, apparent morphology, chemical structure, crystal structure and thermal stability of the fibers before and after modification. The experimental results showed that the para-aramid fibers obtained under the optimal treatment conditions could settle in a single fiber shape without flocculating in water; the settlement volume increased by 57.14%; the surface of the modified fiber had grooves and nicks and filament separation; at the same time, the surface of the modified fiber introduces —OH, —COOH and other polar groups, and the content of O atomic increased by 1.56%; the dynamic contact angle result was measured 81.2°, which is 21.7° lower than the original fiber, and the wettability of para-aramid fiber was improved; after the modification, the crystalline structure of the fiber remained unchanged and the thermal stability was good.

Key words: para-aramid fiber; ultrasonic; phosphoric acid; hydrophilic modification

对位芳纶纤维, 全称聚对苯二甲酰对苯二胺纤维, 简称 PPTA 纤维. 作为化学合成纤维, 对位芳纶纤维有着优异的高强高模量机械性能、良好的耐热绝缘性能以及化学稳定性等, 在航空航天领域如火箭和飞机等的结构材料、隔热绝缘材料、防护材料以及高性能电子器材等方面用途广泛^[1-3]; 但是, PPTA 纤维

分子链段高度规整、高结晶度以及皮-芯模型结构, 使其表面光滑、极性基团少、亲水性较差^[4-5], 导致纤维水分散性差而在芳纶纸抄造过程中絮聚成团, 纸张匀度降低并影响纸张各项性能指标. 因此, 需要对对位芳纶纤维进行改性, 以改善其水分散性.

在国内外关于 PPTA 纤维亲水改性的研究中, 常

收稿日期: 2020-11-26; 修回日期: 2021-03-13

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0308300)

作者简介: 刘倩(1995—), 女, 山西运城人, 硕士研究生; 通信作者: 惠岚峰, 教授, huipeak@163.com

用的物理方法有等离子体处理、高能射线辐照处理、超声波处理等,通过增加纤维表面的活性位点或接触面积改善纤维的亲水性,但这些方法大多对仪器设备要求高、成本大,长时间处理会极大降低纤维的力学性能^[6-9];化学方法主要有化学刻蚀和化学接枝,通过在纤维表面引入—OH、—COOH、—NH₂、—SO₃H 等活性基团达到亲水目的,但这些方法反应条件繁琐难控、时间长、试剂有毒难回收、使对位芳纶纤维的存在形态改变^[10-12];表面涂覆是选择与被涂覆物有相似相溶特性的涂覆剂(多为聚氨酯类、脂肪族类聚合物等有机溶剂)进行涂覆改性的,但大多数有机溶剂有剧毒、不好降解、难处理^[13-14]。磷酸法处理后的纤维表面出现刻痕并有少量纤丝出现,比表面积增大且暴露出更多的—OH 和—COOH 等活性基团,但高浓度磷酸处理使对位芳纶纤维力学性能降低^[10]。超声波处理是利用超声波的空化作用在空化泡破裂时产生的冲击能对纤维进行物理处理以便产生刻痕,但较长时间的超声处理会影响空化效果而使纤维又重新絮聚^[9]。本实验欲借助超声辅助磷酸改性 PPTA 纤维,以期增大纤维的比表面积和引入极性基团,达到对对位芳纶纤维亲水改性的目的。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

对位芳纶纤维(平均长度 3 mm,直径 26.8 μm)、对位芳纶浆粕纤维(平均长度 1 mm,直径 32.8 μm),深圳市特立新材料科技有限公司;十二烷基苯磺酸钠,分析纯,上海笛柏生物科技有限公司;磷酸(质量分数 85%),分析纯,天津市江天化工技术股份有限公司;去离子水,实验室自制。

SCIENTZ-D 型超声波细胞粉碎机,宁波新芝生物科技股份有限公司;HHS-21-4 型数显恒温水浴锅,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;JSM-IT300 LV 型扫描电子显微镜,日本日立公司;FTIR-650 型傅里叶变换红外光谱仪,天津港东科技发展有限公司;SDT650 型同步热分析仪,美国沃特世科技有限公司;Escalab 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪,赛默飞世尔科技有限公司;Smart Lab 型 X 射线衍射仪,日本理学公司;DSA30S 型全自动接触角测量仪,德国 KRÜSS 公司;YLF20 NS 型恒温恒湿室,德州亚太集团有限公司;062969921 型抗张强度测试仪,瑞典 Lorentzen & Wettre 公司;LAD07 型微观扫描仪,加拿大 OPTTEST 公司。

1.2 对位芳纶纤维的表面改性

1.2.1 对位芳纶纤维的预处理

将对位芳纶纤维浸入 60 ℃、1.2 mmol/L 的十二烷基苯磺酸钠溶液中,搅拌清洗 30 min,以除去纤维表面的油脂杂质,并用去离子水清洗干净,烘干后备用。

1.2.2 超声辅助磷酸改性对位芳纶纤维

将不同质量的对位芳纶纤维浸入 200 mL 不同质量分数的磷酸溶液中进行超声处理(超声工作 5 s,间隔 5 s),超声结束后用去离子水清洗至中性,50 ℃真空干燥后备用。根据前期单因素实验结果,对实验影响因素超声时间、超声功率、磷酸的质量分数以及纤维浓度设计 4 因素 3 水平正交实验(表 1),并采用纤维悬浮液的沉降体积表征分散效果,将纤维悬浮液分散效果最好的改性纤维记为 PPTA-p。

表 1 正交实验影响因素
Tab. 1 Influencing factors of orthogonal experiment

水平	(A) 超声 时间/min	(B) 超声 功率/W	(C) 磷酸质 量分数/%	(D) 纤维 浓度/%
1	2	400	10	0.2
2	5	500	20	0.4
3	8	600	30	0.6

1.3 性能测试

1.3.1 分散性能测试

将上述处理纤维配成 0.05% 的纤维悬浮液置于 250 mL 量筒中搅拌均匀,静置 2 min 记录悬浮液体积,该体积即为沉降体积。沉降体积越大,分散效果越好^[3]。沉降体积测定时以未处理纤维、超声处理后纤维(超声时间 5 min、超声功率 600 W、纤维浓度 0.4%)和磷酸处理后纤维(磷酸质量分数 10%、反应时间 5 min、纤维浓度 0.4%)为空白对照。

1.3.2 接触角的测量

采用 DSA30S 型全自动接触角测量仪测量单根纤维的接触角,表征纤维改性前后的润湿性。将纤维用双面胶悬空粘在载玻片上,然后置于光学系统的载物台上,通过升降台调节纤维成像的清晰度,测试液为去离子水,滴液后系统自启动测量程序进行接触角的测量。

1.3.3 纸张性能检测

将对位芳纶纤维与打浆度 50 °SR 的对位芳纶浆粕纤维按 3 : 7 的质量比混抄成定量为 60 g/m² 的手抄片,在 260 ℃、18 MPa 条件下热压 2 次(每次 15 s),在恒温恒湿室(温度 (23 ± 1) ℃、相对湿度 (50 ± 2)%)平衡水分 4 h 后,测量手抄片的匀度指数

并按照 GB/T 12914—2018《纸和纸板抗张强度的测定·恒速拉伸法(20 mm/min)》中的要求测定手抄片的抗张强度^[15]。

1.3.4 表面形貌观察

对处理前后的 PPTA 纤维通过导电胶粘在铜板上进行喷金处理制样,采用扫描电镜(SEM)观察改性前后纤维的表观形貌变化。

1.3.5 X 射线光电子能谱测试

X 射线光电子能谱(XPS)的测定采用 Escalab 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪,激发源为 Al $K\alpha$ 源,测试光斑的直径为 400 μm 。在仪器内置的电荷中和系统对剪碎处理的改性前后纤维样品进行荷电校正,测试样品的通过能分别设为 150 eV 和 30 eV,以获得样品的全谱图谱和高分辨率图谱。

1.3.6 红外光谱测试

将改性前后的 PPTA 纤维剪碎干燥,按 PPTA : KBr = 1 : 150 的质量比压片制样,采用 FTIR-650 型傅里叶变换红外光谱仪在波数 400 ~ 4 000 cm^{-1} 范围内进行红外光谱图的扫描分析。

1.3.7 X 射线衍射测试

采用 Smart Lab 型 X 射线衍射仪对剪碎处理的改性前后纤维结晶结构的变化进行广角($5^\circ \sim 40^\circ$)测试,衍射仪以 Cu 为靶材,运行电压和电流分别为 40 kV 和 150 mA,扫描速率 4 $^\circ/\text{min}$ 。

1.3.8 热稳定性测试

在氮气保护条件下用 SDT650 型热重分析仪测试改性前后纤维的热稳定性,温度范围设置为室温至 800 $^\circ\text{C}$,升温速率 20 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 分散效果分析

2.1.1 沉降体积分分析

采用一定时间内纤维悬浮液的沉降体积表征纤维的水分散性,沉降体积越大且纤维能以单根纤维沉降不絮聚,其分散效果越好。空白对照组未处理纤维(PPTA 纤维)悬浮液沉降体积是 140 mL,纤维间缠结大片成团、少量纤维会吸附气泡而上浮。超声处理得到的纤维(PPTA₁ 纤维)悬浮液沉降体积是 180 mL,纤维间缠结成团变少、极少量纤维吸附气泡而上浮。磷酸处理得到的纤维(PPTA₂ 纤维)悬浮液沉降体积是 160 mL,纤维间缠结成团、少量纤维吸附气泡而上浮。超声辅助磷酸改性对位芳纶纤维的正交实验

结果见表 2。

表 2 正交实验结果

Tab. 2 Results of orthogonal experiment

实验 序号	(A) 超声 时间/min	(B) 超声 功率/W	(C) 磷酸 质量分数/%	(D) 纤维 浓度/%	沉降体积/ mL
1	2	400	10	0.2	200
2	2	500	20	0.4	180
3	2	600	30	0.6	190
4	5	400	20	0.6	170
5	5	500	30	0.2	210
6	5	600	10	0.4	220
7	8	400	30	0.4	180
8	8	500	10	0.6	170
9	8	600	20	0.2	160
k_1	190.0	183.3	196.7	190.0	
k_2	200.0	186.7	170.0	193.3	
k_3	170.0	190.0	193.3	176.7	
极差 R	30.0	6.7	26.7	16.6	

分析表 2 可知:9 组实验的沉降体积均优于空白实验(未处理的 PPTA 纤维),当超声时间为 5 min、功率 600 W、磷酸质量分数 10%、纤维浓度 0.4% 时分散效果最佳,沉降体积达到最大值,为 220 mL,比原纤维 PPTA 纤维增大了 57.14%,此时纤维间无缠结现象,多以单根纤维状沉降。实验中发现,超声辅助磷酸对纤维的改性效果优于同等条件下单个超声或磷酸改性实验。超声辅助磷酸改性过程中,处理不全会出现纤维吸附气泡上浮、纤维间絮聚成团,处理过度细纤维化严重纤维又会重新絮聚成团降低分散性。对正交实验结果进行极差分析可知 $A_2B_3C_1D_2$ 的组合为最优结果,对应最佳条件为超声时间 5 min、超声功率 600 W、磷酸质量分数 10%、纤维浓度 0.4%,该组合恰好为第 6 组实验,也是 9 组实验中所获得沉降体积最大的组合。由极差结果还可知,在 4 个影响因素中,超声时间、纤维浓度、磷酸质量分数是主要影响因素,超声功率是次要影响因素。

2.1.2 改性前后纤维润湿性变化

接触角可表征改性前后纤维的表面润湿性,不同样品单根纤维的接触角如图 1 所示。由图 1 可知:未经处理的原纤维接触角为 102.9° ,PPTA-p 的接触角为 81.2° ,而单独超声或磷酸处理的纤维其接触角分别为 92.6° 和 94.5° ,可以得出超声辅助磷酸处理后对位芳纶纤维在水中的接触角减小,纤维的水表面润湿性增强,水分散性得到改善。从图中还可以看到,PPTA-p 纤维表面出现分丝现象,增大了纤维的接触面积。

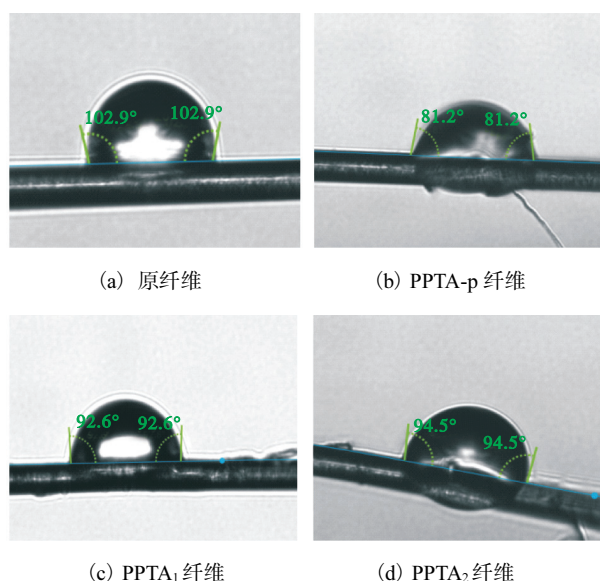


图1 单根纤维的接触角

Fig. 1 Contact angle of single fiber

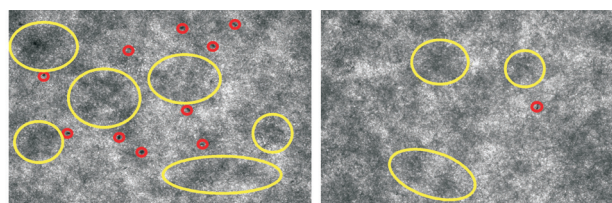
2.1.3 纸张性能检测

匀度作为纸张的重要物理性能,可以反映纤维在纸张中交织分布的均一程度,纤维分散性越好纸张匀度越好,纸张的各项物理性能也越好.本文采用匀度指数反映手抄片的匀度情况.改性前后手抄片的匀度指数和抗张指数见表3,手抄片的匀度图像如图2所示.对比最佳处理条件下的纤维和原纤维抄造的手抄片可以看出:改性处理后纤维抄造的手抄片其匀度指数比原纤维的大,手抄片中因纤维缠结形成的絮团变少、纸面更均匀,匀度指数增大到45,比原纤维手抄片增大了21.62%;抗张指数增大到 $5.20 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$,比原纤维手抄片增大了31.65%.

表3 改性前后纤维手抄片的物理性能

Tab. 3 Physical properties of fiber handsheets before and after modification

样品	匀度指数	抗张指数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1})$
原纤维手抄片	37	3.95
改性纤维手抄片	45	5.20



(a) 原纤维 (b) 改性纤维

图2 手抄片的匀度图

Fig. 2 Formation pictures of handsheets

2.2 表观形貌分析

改性前后纤维的扫描电镜照片如图3所示.从

图3中可以看出:未经处理的PPTA纤维呈棒状且表面光滑,最佳处理条件下得到的PPTA-p纤维表面有凹槽刻痕且有明显的分丝现象,而单纯超声处理得到的PPTA₁纤维和磷酸处理的PPTA₂纤维表面也均有刻痕出现.这些凹槽刻痕可能会使纤维强度降低,但纤维也变得粗糙且比表面积增大,从而使得对位芳纶纤维在水中的分散效果得到改善.

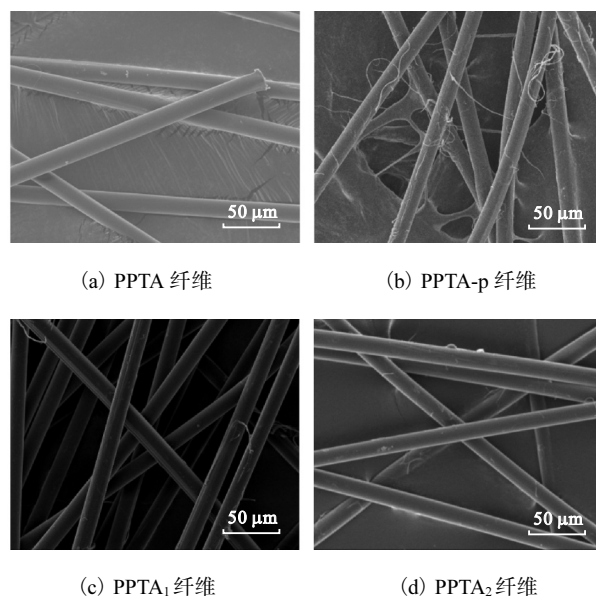


图3 对位芳纶纤维改性前后的SEM图

Fig. 3 SEM images of PPTA fiber before and after modification

2.3 表面化学元素和化学结构分析

改性前后对位芳纶纤维表面的原子含量见表4.从表4中可以看出,原纤维不含P元素,改性后纤维表面P原子含量达1.05%,O原子含量相较原纤维增加了1.56%,C原子和N原子含量相对降低,O/C比增大到0.24,说明超声辅助磷酸改性会在纤维表面引入含氧基团及含磷基团.

表4 对位芳纶纤维改性前后表面原子含量的变化

Tab. 4 Changes of surface atomic content of PPTA fiber before and after modification

试样	原子含量/%				O/C比
	C	O	N	P	
PPTA	73.11	15.81	11.08	0	0.22
PPTA-p	71.57	17.37	10.01	1.05	0.24

改性前后纤维的XPS全谱谱图及C1s、P2p电子产生的高分辨率谱图如图4所示.对比改性前后纤维的XPS全谱图谱可以看出:O1s的光电子峰明显增大,135 eV附近新出现较弱的P2p光电子峰.分析C、P元素的高分辨率谱图可以看出:285.28 eV附

近处是 C—C 的光电子峰, 288.23 eV 附近处是 C=O 的光电子峰, 改性后纤维的 C—C 峰强减弱, C=O 峰强明显增大, 可能是因为磷酸与芳纶纤维反应过程中有酰胺键断裂形成羧基所致; 135 eV 附近处新出

现了 P2p 的光电子峰, 说明磷酸改性后纤维表面引入了 P 元素, 有磷酸基团参与了反应. 改性前后对位芳纶纤维的 FTIR 谱图(图 5)分析也证实有含氧基团的引入.

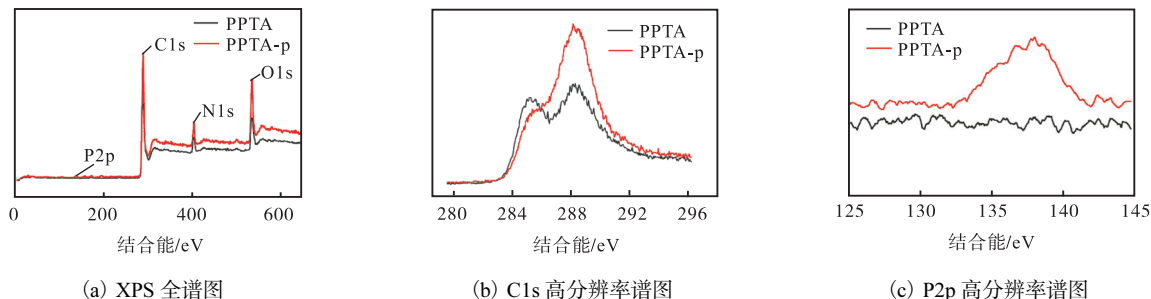


图 4 改性前后对位芳纶纤维的 XPS 图

Fig. 4 XPS images of PPTA fiber before and after modification

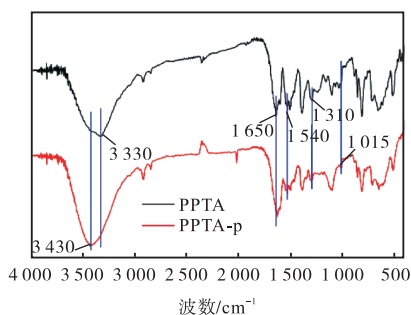


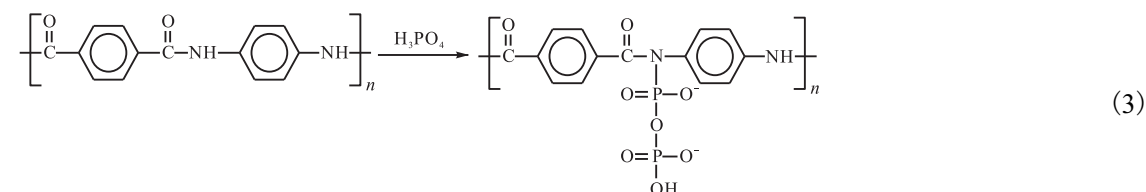
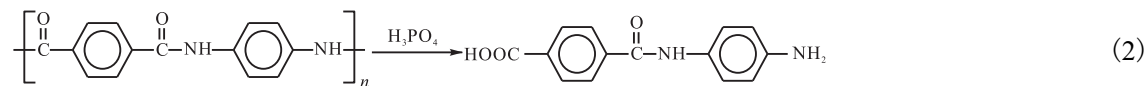
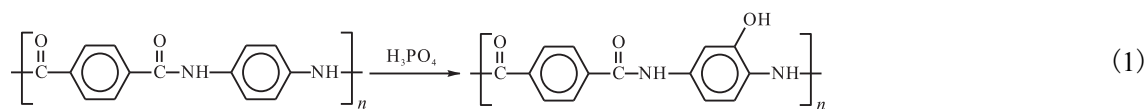
图 5 改性前后对位芳纶纤维的 FTIR 图

Fig. 5 FTIR images of PPTA fiber before and after modification

从图 5 可以看出: 3 330 cm^{-1} 处为酰胺基团中 N—H 的伸缩振动, 1 650 cm^{-1} 处为 C=O(酰胺 1 带)的伸缩振动, 1 540 cm^{-1} 处为 N—H 的面内弯曲振动(酰胺 2 带), 1 310 cm^{-1} 处为 C—N(酰胺 3 带)的伸缩

振动. 对比改性前后纤维的红外光谱图发现, 磷酸改性后的 PPTA 纤维酰胺基团的特征峰没有变, 3 430 cm^{-1} 处的峰形变宽, 可能是磷酸处理后—NH₂ 和—OH 的缔合峰, 1 015 cm^{-1} 处为新出现的 P—OH 吸收峰.

结合改性前后对位芳纶纤维表面的原子含量变化以及化学结构变化, 对位芳纶纤维与磷酸反应后, 引入了羟基, 伴随少量酰胺键的断裂. 反应机理如下: 酰胺基团属于强给电子基团, 会活化苯环的邻对位, 在亲电试剂路易斯酸的作用下, 发生亲电取代反应生成羟基, 少量酰胺基团发生水解生成羧基和氨基(反应式(1)、(2)); 部分磷酸脱水缩合生成二聚磷酸, 二聚磷酸与酰胺基上的氮原子以共价键链接, 脱水形成二磷酸基团(反应式(3))^[10,16].



2.4 X 射线衍射分析

通过分析 X 射线衍射谱图, 可以获得改性前后对位芳纶纤维结晶结构的变化信息. 改性前后对位芳纶纤维的 XRD 谱图如图 6 所示. 对位芳纶纤维是“皮-芯”结构, 对比改性前后纤维的衍射峰发现谱

图相似, 主要的 2 个衍射峰分别位于 20.82° 和 22.86° 处, 分别对应(110)晶面和(200)晶面, 即在最佳处理条件下超声辅助磷酸改性不会破坏对位芳纶纤维的主体结构, 改性主要发生在纤维的表层, 对纤维结晶结构的影响变化不大, 也没有新的结晶结构生成.

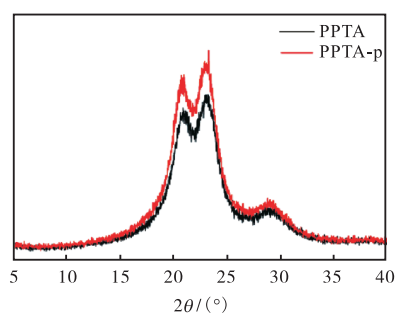
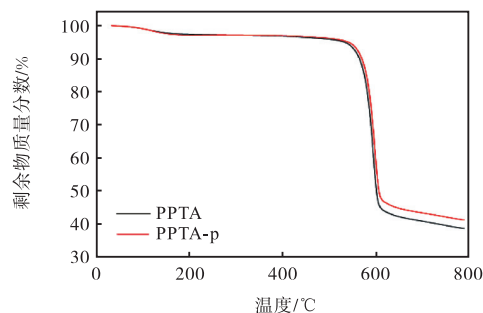


图6 改性前后对位芳纶纤维的XRD图

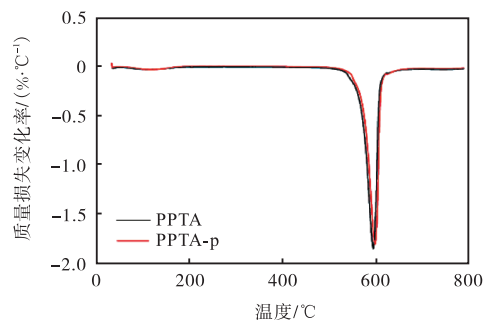
Fig. 6 XRD images of PPTA fiber before and after modification

2.5 热稳定性分析

改性前后对位芳纶纤维的热重分析结果如图7所示。图7(a)为热失重曲线图,从中可以看出:改性前后对位芳纶纤维的热失重曲线图形基本保持不变,初始热分解温度约为525℃,550~600℃是纤维的快速热分解阶段,600℃后缓慢失重且质量趋于恒定,纤维原样的残余质量为38.66%,改性纤维的残余质量为41.32%。分析纤维改性前后热失重速率曲线(图7(b))可以发现,改性前后纤维的热失重曲线形状相似,都有且只有一个热失重损失峰,590℃时热分解速率最快。综上所述,改性后对位芳纶纤维仍能保持良好的热稳定性,室温至525℃为纤维的热稳定区。



(a) 热失重曲线



(b) 热失重速率曲线

图7 改性前后对位芳纶纤维的TGA图

Fig. 7 TGA images of PPTA fiber before and after modification

3 结论

超声辅助磷酸改性处理后,对位芳纶纤维的沉降体积达到220 mL,比原纤维提高了57.14%,动态接触角由102.9°降低到81.2°,所抄造手抄片的匀度指数为45,抗张指数为5.20 N·m·g⁻¹。改性后对位芳纶纤维表面变得粗糙、比表面积增大,而且纤维表面引入了含氧极性基团,纤维的水润湿性增强;改性后纤维的亲水性和水分散性因此得到改善,但仍具有高结晶度以及良好热稳定性,说明改性发生在对位芳纶纤维的表面层,对纤维损伤小。

参考文献:

- [1] GARCÍA J M, GARCÍA F C, SERNA F, et al. High performance aromatic polyamides[J]. Progress in polymer science, 2009, 35 (5): 623-686.
- [2] SINGH T J, SAMANT S. Characterization of Kevlar fiber and its composites: a review[J]. Materials today: proceedings, 2015, 2 (4/5): 1381-1387.
- [3] 刘俊华. 国产对位芳纶纤维悬浮液体系的分散性及机理研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
- [4] GOULOUTI K, CASTRO J D, KELLER T. Aramid/glass fiber-reinforced thermal break-thermal and structural performance[J]. Composite structures, 2016, 136: 113-123.
- [5] HUSSAIN S, YORUCU C, AHMED I, et al. Surface modification of aramid fibres by graphene oxide nano-sheets for multiscale polymer composites[J]. Surface and coatings technology, 2014, 258: 458-466.
- [6] SU M, GU A J, LIANG G Z, et al. The effect of oxygen-plasma treatment on Kevlar fibers and the properties of Kevlar fibers bismaleimide composites[J]. Applied surface science, 2011, 257 (8): 3158-3167.
- [7] XING L X, LIU L, HUANG Y D, et al. Enhanced interfacial properties of domestic aramid fiber-12 via high energy gamma ray irradiation[J]. Composites part B: engineering, 2015, 69: 50-57.
- [8] LIU L, HUANG Y D, ZHANG Z Q, et al. Ultrasonic treatment of aramid fiber surface and its effect on the interface of aramid/epoxy composites[J]. Applied surface science, 2008, 254 (9): 2594-2599.
- [9] 赵开荣, 顾克军, 房静, 等. 超声对芳纶1414短切纤维分散性的影响[J]. 广州化工, 2018, 46 (4): 69-70.
- [10] LI G, ZHANG C, WANG Y, et al. Interface correlation and toughness matching of phosphoric acid functional-

- ized Kevlar fiber and epoxy matrix for filament winding composites[J]. Composites science and technology, 2008, 68(15): 3208–3214.
- [11] EVERY H A, JANSSEN G J M, SITTERS E F, et al. Performance analysis of sulfonated PPTA polymers as potential fuel cell membranes[J]. Journal of power sources, 2006, 162(1): 380–387.
- [12] LI J, CAI C L. The friction and wear properties of ECP surface-treated Kevlar fiber-reinforced thermoplastic polyimide composites[J]. Polymer-plastics technology and engineering, 2010, 49(2): 178–181.
- [13] CHEN J R, ZHU Y F, NI Q Q, et al. Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating[J]. Applied surface science, 2014, 321: 103–108.
- [14] WEI B, CAO H L, SONG S H. Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings[J]. Composites part A: applied science and manufacturing, 2010, 42(1): 22–29.
- [15] 杨兵, 惠岚峰, 刘倩, 等. 热压对芳纶纤维纸性能的影响[J]. 天津科技大学学报, 2021, 36(1): 25–29.
- [16] 邓婷婷, 张光先, 代方银, 等. 对位芳纶磷酸化表面改性[J]. 纺织学报, 2015, 36(11): 12–19.

责任编辑: 周建军

(上接第 14 页)

- 319–328.
- [32] LI Y D, ZHOU F L, HUANG J H, et al. Transcriptome reveals involvement of immune defense, oxidative imbalance, and apoptosis in ammonia-stress response of the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. Fish & shellfish immunology, 2018, 83: 162–170.
- [33] LU X, LUAN S, DAI P, et al. iTRAQ-based comparative proteome analysis for molecular mechanism of defense against acute ammonia toxicity in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Fish & shellfish immunology, 2018, 74: 52–61.
- [34] SONG Y N, LI Z X, LIN H, et al. Effect of malondialdehyde treatment on the IgE binding capacity and conformational structure of shrimp tropomyosin[J]. Food chemistry, 2015, 175: 374–380.
- [35] JIAO L F, DAI T M, ZHONG S Q, et al. *Vibrio parahaemolyticus* infection impaired intestinal barrier function and nutrient absorption in *Litopenaeus vannamei* [J]. Fish & shellfish immunology, 2020, 99: 184–189.
- [36] ELLEUCHE S, SCHAFERS C, BLANK S, et al. Exploration of extremophiles for high temperature biotechnological processes[J]. Current opinion in microbiology, 2015, 25: 113–119.
- [37] RO BANOS M, GARBAYO I, VILCHEZ C, et al. Carotenoids from haloarchaea and their potential in biotechnology[J]. Marine drugs, 2015, 13(9): 5508–5532.
- [38] JAVOR B J. Industrial microbiology of solar salt production[J]. Journal of industrial microbiology & biotechnology, 2002, 28: 42–47.

责任编辑: 郎婧