

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.018

芳纶纤维热处理对聚酰亚胺/芳纶纤维复合薄膜性能的影响

李杨¹, 肖臻², 史才雯¹, 潘小丽¹, 王姿懿¹, 刘伟¹

[1. 贵州理工学院材料与能源工程学院, 贵阳 550003; 2. 通标标准技术服务(青岛)有限公司, 山东青岛 266000]

摘要: 通过高温热处理芳纶纤维的方式提升芳纶纤维的表面极性以改善芳纶纤维与聚酰亚胺的界面相容性, 进一步制备出聚酰亚胺(PI)/芳纶纤维(AF)薄膜。以傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪和拉曼光谱研究了热处理前后芳纶纤维表面基团的变化, 并以FTIR、X射线衍射、扫描电子显微镜和偏光显微镜研究了PI/AF复合薄膜热处理前后的酰亚胺化程度和结晶情况。研究表明, 热处理后芳纶纤维表层分子链段中苯环出现了部分氧化, 而拉曼光谱面扫描也进一步证实了热处理后纤维表面部分区域分子链C—H的氧化现象, 纤维表面极性增强的同时表层分子链能够重排使得氢键重构并有所增强。热处理后PI/AF复合薄膜酰亚胺化程度为92.1%, 相对于纯PI膜提升了13.4%; 芳纶纤维通过诱导结晶作用提升了PI的结晶度和复合薄膜的酰亚胺化程度, 进而提升了与PI的界面相容性; PI/AF复合薄膜拉伸强度和拉伸弹性模量分别为70.24 MPa和584 MPa, 比热处理前分别提升了5.7%和12.9%。

关键词: 芳纶纤维; 热处理; 聚酰亚胺; 聚集态结构; 力学性能

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0112-06

The Effect of Fiber Heat Treatment on Properties of Polyimide/Aramid Fiber Composite Films

Li Yang¹, Xiao Zhen², Shi Caiwen¹, Pan Xiaoli¹, Wang Ziyi¹, Liu Wei¹

[1. School of Materials and Energy Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China;

2. SGS-CSTC Standards Technical Services (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266100, China]

Abstract : The surface polarity of aramid fiber was increased by heat treatment at high temperature, and the interface compatibility between aramid fiber and polyimide was improved, then polyimide (PI)/aramid fiber (AF) films was prepared by modified aramid fiber. The changes of groups on the surface of aramid fiber before and after heat treatment were studied by fourier transform infrared (FTIR) spectrometer and Raman surface scanning. The degree of imide and crystallization of PI/AF composite films after heat treatment were studied by FTIR spectroscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and polarizing microscope. The results show that partial oxidation of benzene ring in the surface molecular chain segment of aramid fiber occurs after heat treatment, and Raman surface scanning verified the oxidation of molecular chains in some areas on the surface of the fiber after heat treatment. While the polarity of the fiber was enhanced, the surface molecular chains can be rearranged to restructure and strengthen the hydrogen bond. The imide degree of PI/AF composite film is 92.1%, which is 13.4% higher than that of pure PI film. After heat treatment, the aramid fiber improves the crystallinity of PI and the degree of imide of composite film by inducing crystallization, then improves the interfacial compatibility with PI. The tensile strength and elastic modulus of PI/AF composite film are 70.24 MPa and 584 MPa, respectively, which are increased by 5.7% and 12.9% compared with that before heat treatment.

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

聚酰亚胺(PI)是分子主链含有酰亚胺环结构的一大类高聚物的统称。作为综合性能优异的人工合成高分子材料, PI及其复合材料具有优良的绝缘

性和化学稳定性, 分子链中的苯环赋予其优良的阻燃性能, 同时PI耐溶剂和耐高低温性能优良, 具有突出的力学性能和介电性能^[1-2]。PI因其优异的性质

基金项目: 国家自然科学基金项目(52363009), 黔科合基础-ZK[2022]一般179

通信作者: 刘伟, 教授, 研究方向为聚合物结构与性能

收稿日期: 2023-10-27

引用格式: 李杨, 肖臻, 史才雯, 等. 芳纶纤维热处理对聚酰亚胺/芳纶纤维复合薄膜性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12): 112-117.

Li Yang, Xiao Zhen, Shi Caiwen, et al. The effect of fiber heat treatment on properties of polyimide/aramid fiber composite films[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 112-117.

能,被广泛应用于电子、航空航天、轨道交通和生物医药等行业^[3]。但是,PI酰亚胺化过程中聚酰亚胺(PAA)分子链中苯环结构位阻效应使得分子链在酰亚胺化过程中运动困难,导致纯PI的酰亚胺化程度低,应用受到一定限制^[4]。

目前对于PI的研究多集中于对前驱体PAA分子链结构的设计^[5-6]和添加无机粉体^[7-8],以期通过分子链设计或无机粉体的引入来提高酰亚胺化过程中分子链的运动能力,进而改善PI的结晶和聚集态结构。与无机粉体相比,添加芳纶纤维(AF)对PI进行改性能够有效对PI进行增强并通过纤维的诱导结晶作用提升PI的酰亚胺化程度。同时AF增强PI复合材料以其优异的性能被广泛应用到耐辐射和耐摩擦等复杂的环境中^[9]。然而AF表面活性低,直接引入虽能使PI复合薄膜的强度有一定提升,但是这种单纯的物理包覆仍不能满足摩擦磨损过程中对复合材料力学性能的要求,而目前对AF的界面接枝改性工艺较为复杂,难以大规模应用^[10]。

本课题组前期通过AF的热处理,有效提升了AF的表面极性,AF表面极性的提升有效改善了与环氧树脂的界面相容性^[11-12]。同时研究发现,经热处理后AF能够与PAA有较好的界面相容性,并能够参与PAA的酰亚胺化过程^[13]。笔者对AF进行热处理并与PAA复合,通过一些测试与表征系统研究了热处理后PI/AF复合薄膜的结晶性能和力学性能,为制备出性能优异的AF增强PI复合材料提供了一种简单可行的方法和理论指导。

1 实验部分

1.1 主要原材料

AF:1500D,韩国ALKEX公司;

均苯四甲酸酐(PMDA):纯度99%,郑州阿尔法化工有限公司;

对苯二胺(m-PDA):纯度99%,郑州阿尔法化工有限公司;

N-甲基吡咯烷酮(NMP):工业级,郑州阿尔法化工有限公司。

1.2 主要实验设备及仪器

真空干燥箱:MVPI型,上海琅环实验设备有限公司;

鼓风干燥机:101-3型,天津市泰斯特仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:AES0400911

型,美国尼高力公司;

拉曼光谱仪:DXR型,美国Thermo Fisher公司;

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

偏光显微镜:XPR型,上海光学仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Sirion型,美国FEI公司;

材料万能试验机:CMT6104型,美斯特(中国)有限公司。

1.3 试样制备

(1) PAA的合成。

按照前期的研究,PAA合成过程中各单体的物质的量比(PMDA:m-PDA)为1.018:1,具体合成过程如下。将溶剂N-甲基吡咯烷酮装入三口烧瓶中,加入一定量的m-PDA并充分机械搅拌使其完全溶解,然后缓慢多次加入PMDA。合成过程中整个三口烧瓶在惰性气体的冰浴条件下连续机械搅拌10 h以上,即制得PAA溶液。PAA的结构式及合成工艺如图1所示。

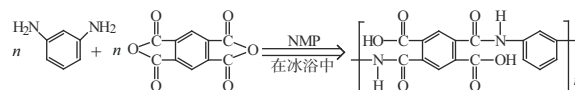


图1 PAA合成过程及分子结构示意图

(2) AF的热处理。

将AF切成2 mm的小段,用乙醇分散后放置在鼓风干燥箱中,快速升温到250 °C后恒温处理1 h,达到设定的时间后取出密封待用。

(3) PI/AF薄膜的制备。

以烧杯称取20 g的PAA溶液,加入质量分数为1%的短切AF(2 mm的小段)混合搅拌30 min使短切AF均匀分散在PAA溶液中,获得PAA/AF的混合溶液。然后用玻璃棒将PAA/AF涂敷到玻璃片并以刮刀刮至固定的厚度,静置30 min后放入真空干燥箱预处理(100 °C,30 min)以去除其中的气泡,待大部分溶剂挥发后以5 °C/min的升温速率升至250 °C停留2 h后固化PAA。降温至室温后,将PI/AF从玻璃片上剥离即得PI/AF复合薄膜。

1.4 测试与表征

FTIR测试。将热处理前后的AF经适量的溴化钾混合后充分研磨,压片后用FTIR仪对AF表面基团进行表征,光谱分辨率为4 cm⁻¹,扫描32次,扫描波数测量范围为400~4 000 cm⁻¹。直接用FTIR仪对PI/AF复合薄膜的表面进行扫描,光谱分辨率为4

cm^{-1} ,扫描32次,扫描波数测量范围为400~4 000 cm^{-1} 。

对于复合薄膜的酰亚胺化程度的标定如下:以C—N的伸缩(1 380 cm^{-1})作为亚胺化后聚酰亚胺的特征吸收峰,内标峰以苯环骨架振动(1 500 cm^{-1} 附近)为参照,按照公式(1)计算酰亚胺化程度X。

$$X = \frac{(A_{1380}/A_{1500})_{250}}{(A_{1380}/A_{1500})_{300}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,A为吸收峰面积,其下标代表波数;数值250为复合薄膜热酰亚胺化时间温度;数值300表示在300 $^{\circ}\text{C}$ 下PAA酰亚胺化。

拉曼光谱测试。将AF放进拉曼光谱样品仓,10倍目镜、10倍物镜对纤维表面单个点区域进行测试,激光器波长为532 nm,功率为8 μW ,扫描范围50~3 200 cm^{-1} 。纤维表面单个点测试后,以该点为中心选取10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的区域进行面扫描,对该10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的区域进行拉曼成像,激光器波长为532 nm,功率为8 μW ,扫描范围50~3 200 cm^{-1} 。

XRD测试。测试条件为Cu α 辐射,管电压为40 kV,管电流为40 mA,扫描范围为5 $^{\circ}$ ~35 $^{\circ}$ 。

偏光照片测试。将制备好的PI/AF复合薄膜平整置于偏光显微镜下,10倍目镜、10倍物镜观察并记录复合薄膜的偏光显微照片。

PI/AF复合薄膜力学性能测试。以裁刀将PI/AF复合薄膜切割成10 mm宽的长条,标距为25 mm,然后在万能材料试验机上按GB/T 1040-2006进行拉伸试验,拉伸速率为5 mm/min。

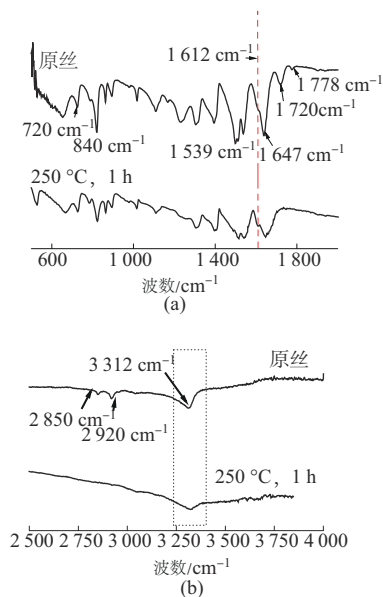
SEM测试。PI/AF复合薄膜拉伸试样断面经过喷金处理后,观察试样的断面及拉出纤维微观形貌断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 热处理后AF的FTIR分析

对热处理前后AF的表面基团进行了FTIR表征,如图2所示。从图2a可以看出,AF原丝分子链中羰基、酯基以及C—H的吸收峰分别出现在1 720,1 776,2 920 cm^{-1} 和2 850 cm^{-1} 附近,然而这些明显的吸收峰在热处理后消失,这说明羰基、酯基等极性基团来自于纤维表层的涂覆处理剂^[14]。同时从图2b可以看出,3 312 cm^{-1} 附近的吸收峰宽化,该处的吸收峰对应于结合态氢键的振动,这种变化说明在250 $^{\circ}\text{C}$ 热处理过程中AF表面的氢键出现了明显的重构过程^[15-16]。另外还发现,AF主要的吸收峰在高温热处理前后的变化不明显,1 539 cm^{-1} 和

1 612 cm^{-1} 附近苯环C=C的伸缩振动吸收峰表现出轻微的差异,这说明经过高温处理过程中分子链苯环中C—H被氧化。



波数范围:a—600~2 000 cm^{-1} ;b—2 500~4 000 cm^{-1}
图2 热处理前后AF的FTIR图谱

2.2 热处理后AF的拉曼分析

为进一步表征热处理前后AF表面分子链的氧化过程,以拉曼光谱点扫描对热处理前后AF表面进行了选点扫描,图3为拉曼光谱点扫描光谱。从热处理前后AF的拉曼图谱可以发现,热处理后的AF酰胺键(1 321 cm^{-1} 附近)、苯环C=C(1 564 cm^{-1} 附近)处吸收峰出现了明显的变化。这表明纤维表层分子链之间氢键在热处理过程中出现了重构现象,分子链被氧化^[17]。

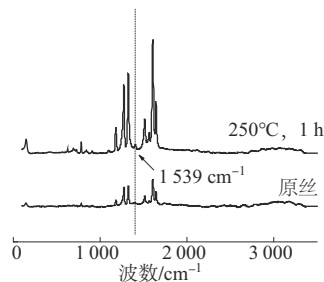
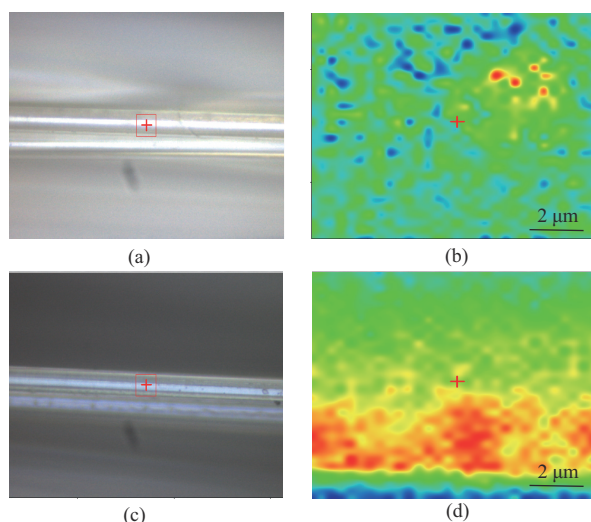


图3 热处理前后AF拉曼光谱点扫描图谱

纤维表面单个点拉曼光谱测试后,以该点为中心选取10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的区域进行面扫描,对该10 $\mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 的区域进行拉曼成像,进一步表征热处理过程中纤维表面氧化的程度。图4为热处理前后AF的光镜照片以及表面拉曼光谱面扫描成像图。从图4a和图4c热处理前后单根芳纶纤维的光镜照

片可以看出,热处理之后纤维表面因上浆剂的挥发,纤维表面外观出现了变化。用 $1\,564\text{ cm}^{-1}$ 标记纤维表面的面扫描图,图4b和图4d选区拉曼光谱成像图中红色的区域为 $1\,564\text{ cm}^{-1}$ 强度最强的区域,红色-黄色-绿色-蓝色的渐变表示 $1\,564\text{ cm}^{-1}$ 强度的变化,强度越强表示该点氧化现象越明显。从热处理前后纤维表面拉曼光谱面扫描成像可以看出,AF原丝表面红色区域极少,而经热处理后,纤维表面出现大面积的红色区域,这表明,经热处理后AF表面大部分苯环处出现了氧化的现象。



a—AF纤维原丝光镜照片;b—AF纤维拉曼光谱面扫描成像;
c—热处理后AF纤维光镜照片;d—热处理后AF拉曼光谱面扫描成像
图4 热处理后AF光镜照片及表面拉曼光谱面扫描成像

2.3 PI/AF复合薄膜的FTIR分析

图5为热处理前后PI/AF复合薄膜的FTIR图谱。PAA热处理酰亚胺化后, $1\,780, 1\,716\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,380\text{ cm}^{-1}$ 附近为固化后聚酰亚胺亚胺环上羰基的振动峰以及C—N的伸缩振动峰。酰亚胺环状结构的伸缩振动出现在 $1\,380\text{ cm}^{-1}$ 附近,PAA特有酰胺I带(C=O)和酰胺II(C—NH)的伸缩振动峰分别位于 $1\,660, 1\,550\text{ cm}^{-1}$ 附近^[18-19]。根据公式(1)计算可知,实验条件下纯PI薄膜的酰亚胺化程度为

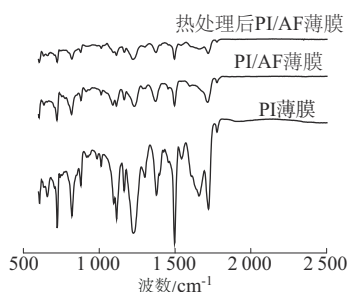


图5 PI薄膜及热处理前后PI/AF复合薄膜的FTIR谱图

81.2%,PI/AF原丝复合薄膜的酰亚胺化程度为85.6%,而热处理后PI/AF复合薄膜的酰亚胺化程度为92.1%。这表明热处理过程对AF表面极性的增加提升了AF与PAA的相容性,有利于酰亚胺化程度的提升。

2.4 PI/AF薄膜XRD分析

图6为热处理前后PI/AF复合薄膜的XRD图。从图6可以看出,酰亚胺化后纯PI的衍射峰出现在 19.4° 附近,而热处理后PI/AF复合薄膜的衍射角为 18.8° ,明显向小角度偏移。这表明加入AF后,由于AF的界面诱导结晶,复合薄膜的有序结构增加,晶粒长大,结晶度增加^[20-21]。可见热处理过的纤维表面极性的提升能够进一步提升纤维的诱导结晶的作用,进一步提升了复合薄膜的结晶度和有序化程度。

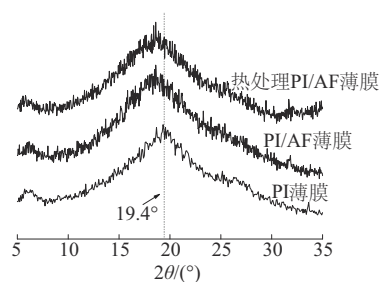
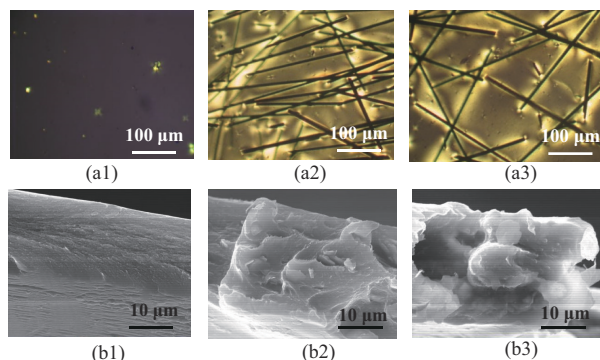


图6 热处理前后PI/AF复合薄膜的XRD图

2.5 PI/AF薄膜偏光照片分析

图7为热处理前后PI/AF复合薄膜的偏光照片及拉伸断面SEM照片。图7的a1~a3为热处理前后PI/AF复合薄膜的偏光照片,从图7a1可看出,纯PI薄膜偏光照片中十字消光并不明显,这说明纯PI结晶困难^[22]。加入AF后,在紧贴AF的地方出现一层



偏光照片:a1—PI;a2—热处理前PI/AF复合薄膜;
a3—热处理后PI/AF复合薄膜;

SEM图:b1—PI薄膜断面;b2—热处理前PI/AF复合薄膜;
b3—热处理后PI/AF复合薄膜

图7 热处理前后PI/AF复合薄膜的偏光照片及拉伸断面SEM照片

黄色的亮光,围绕纤维表面出现了明显的十字消光图案(图7a2),纤维热处理后这种现象更加明显(图7a3)。这说明热处理后AF能有效地诱导聚酰亚胺结晶^[23-24],这与XRD的结果分析一致。同时用SEM观察了复合薄膜拉伸断面的微观形貌,图7b1~b3为热处理前后复合薄膜拉伸断口的SEM照片。从图7b1可以看出,PI薄膜断口平整,呈现典型脆性断裂。加入芳纶纤维后PI/AF原丝复合薄膜断口仍旧相对平整,这也说明AF原丝与PI的界面相容性不足(图7b2)。经热处理后PI/AF复合薄膜断口粗糙并能明显观察到黏附在纤维表面上的PI,这表明热处理后AF与PI的相容性得到有效的改善(图7b3)。这与之前的分析也一致。

2.6 PI/AF复合薄膜的力学性能分析

图8为热处理前后PI/AF复合薄膜的力学性能。从图8可以看出,纯PI薄膜的拉伸强度仅为50.21 MPa,PI/AF原丝复合薄膜拉伸强度为66.45 MPa,而热处理后PI/AF复合薄膜拉伸强度为70.24 MPa,相对于热处理前提升了5.7%。这说明AF的增强和诱导结晶作用进一步提升了复合薄膜的拉伸强度。与此类似,热处理后复合薄膜的拉伸弹性模量与热处理前相比提升了12.9%。这进一步说明热处理后AF的增强和诱导结晶作用更加明显,同时表面极性的增加也进一步提升了PI的酰亚胺化程度,从而提升了复合薄膜的力学性能。但是结晶

度和酰亚胺化程度的提升使断裂伸长率小幅降低,热处理后复合薄膜的断裂伸长率由11.4%下降为10.9%。

3 结论

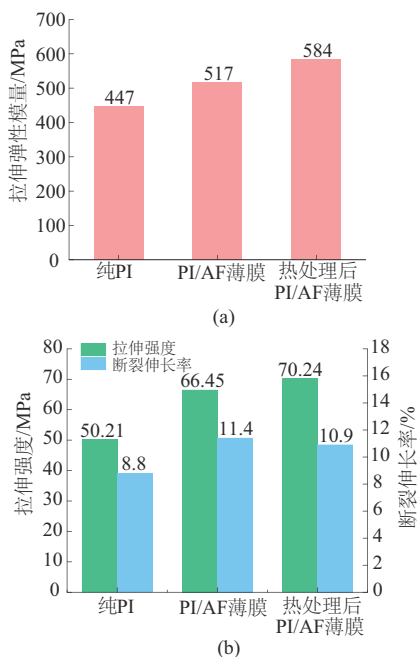
(1) AF经250℃热处理后,纤维表面氢键重构,表面分子链苯环结构出现了部分被氧化的现象。

(2) 热处理过程对AF表面极性的增加提升了AF与PAA的相容性,复合薄膜晶粒长大,结晶度增加。热处理后PI/AF复合薄膜的酰亚胺化程度为92.1%,相对于纯PI膜增加了13.4%。

(3) 热处理后AF表面极性的增加改善了其与聚酰亚胺的相容性,PI/AF复合薄膜的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提升了5.7%和12.9%,断裂伸长率小幅度下降。

参考文献

- [1] 刘远清,贾峰峰,田萃钰,等.聚酰亚胺材料界面活化及化学接枝研究进展[J].高分子材料科学与工程,2022,38(5):182-190.
Liu Yuanqing, Jia Fengfeng, Tian Cuiyu, et al. Progress on interfacial activation and chemical grafting of polyimide materials[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(5):182-190.
- [2] 彭村,尤真红,王毅,等.聚硅氧烷酰亚胺共聚物的合成及应用研究进展[J].绝缘材料,2020,53(10):16-24.
Peng Cun, You Zhenhong, Wang Yi, et al. Research progress in synthesis and application of polysiloxaneimide copolymer[J]. Insulating Materials, 2020, 53(10):16-24.
- [3] Cheng Y, Zhang X, Qin Y X, et al. Super-elasticity at 4 K of covalently crosslinked polyimide aerogels with negative Poisson's ratio [J]. Nature Communications, 2021, 12:4 092-4 103.
- [4] 刘仪,莫松,许晓洲,等.耐高温有机/无机杂化聚酰亚胺基树脂[J].复合材料学报,2023,40(1):62-70.
Liu Yi, Mo Song, Xu Xiaozhou, et al. Organic/inorganic hybrid polyimide matrix resins with high temperature resistance[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1):62-70.
- [5] 王倩倩,周燕萍,郑会保,等.耐高温聚酰亚胺树脂及其复合材料的研究及应用[J].工程塑料应用,2019,47(8):144-147.
Wang Qianqian, Zhou Yanping, Zheng Huibao, et al. Research and application of high temperature polyimide and its composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):144-147.
- [6] Liu Y, Mo S, He M H, et al. Phenylethynyl-terminated oligoimides based on bis(p-aminophenoxy)dimethyl silane: Effect of siloxane structure on processability and thermal stability[J]. High Performance Polymers, 2019, 31(6):651-661.
- [7] 薛书宇,雷星峰,连如贺,等.高性能热固性聚酰亚胺树脂研究进展[J].高分子材料科学与工程,2021,37(5):149-162.
Xue Shuyu, Lei Xingfeng, Lian Ruhe, et al. Progress of high-performance thermosetting polyimide resins[J]. Polymer Materials



a—拉伸弹性模量;b—拉伸强度和断裂伸长率

图8 热处理前后PI/AF复合薄膜的力学性能

- Science and Engineering, 2021, 37(5):149–162.
- [8] 刘仪,莫松,潘玲英,等. 耐高温有机无机杂化聚酰亚胺树脂及其复合材料[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(3):1–5.
- Liu Yi, Mo Song, Pan Lingying, et al. Organic/inorganic hybrid polyimides and their composites with high temperature resistance [J]. Aerospace Materials and Technology, 2018, 48(3):1–5.
- [9] 谢璠,宁逗逗,黄吉振,等. 芳纶沉析纤维-多巴胺/聚酰亚胺-酚醛树脂复合膜的力学及摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1):96–102.
- Xie Pan, Ning Doudou, Huang Jizhen, et al. Mechanical and friction wear properties of aramid faramid dopamine/polyimide phenolics in composite films[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1):96–102.
- [10] Luo Z, Chen W L, Jin Z, et al. Epoxy resin modified maleic anhydride-grafted-liquid polybutadiene on the properties of short aramid fiber reinforced natural rubber composite[J]. Polymer Composites, 2018, 39(S4):2 006–2 015.
- [11] 周琴,马义岚,李杨,等. 热氧化处理时间对芳纶纤维表面聚集态结构和性能的影响[J]. 塑料工业, 2021, 49(5):143–148.
- Zhou Qin, Ma Yilan, Li Yang, et al. Effect of thermal oxidation treatment time on surface aggregation structure and properties of aramid fiber[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(5):143–148.
- [12] 周琴,李杨,钟代飞,等. 芳纶纤维的热氧化处理及对环氧树脂界面黏结的影响[J]. 塑料科技, 2021, 49(5):1–6.
- Zhou Qin, Li Yang, Zhong Daifei, et al. The effect of thermal oxidation treatment of aramid fiber on interfacial adhesion of epoxy fiber[J]. Plastics Science and Technology, 2021, 49(5):1–6.
- [13] 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.
- [14] Li Y, Xie G. Y, Li R, et al. Supercritical carbon dioxide assisted impregnation and graft of polyamide acid into aramid fiber for formation of polar interface[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21:1–11.
- [15] Jin Z, Luo Z, Yang S, 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. DOI:10.1002/app.42122.
- [16] Kosareva E K., Zharkov M N, Meerov D B, et al. HMX surface modification with polymer via sc-CO₂antisolvent process: A way to safe and easy-to-handle energetic materials[J]. Chem Eng J, 2022, 428. DOI:10.1016/j.cej.2021.131363.
- [17] Lyu Junwei, Cheng Zheng, Wu Hang, et al. In-situ polymerization and covalent modification on aramid fiber surface via direct fluorination for interfacial enhancement[J]. Compos B, 2020, 182. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107608.
- [18] Zhong J C, Luo Z, Hao Z, et al. Enhancing fatigue properties of styrene butadiene rubber composites by improving interface adhesion between coated aramid fibers and matrix[J]. Composites Part B, 2019, 172:485–495.
- [19] Lyu Mei, Zheng Fei, Wang Qihua, et al. Friction and wear behaviors of carbon and aramid fibers reinforced polyimide composites in simulated space environment[J]. Tribology International, 2015, 92:246–254.
- [20] 党洪洋,张国亮,龙柱,等. 纳米结晶纤维素表面修饰聚酰亚胺纤维及其润湿功能性[J]. 化工进展, 2020, 39(1):301–309.
- Dang Hongyang, Zhang Guoliang, Long Zhu, et al. Surface modified polyimide fiber with nanocrystalline cellulose and its wettability[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(1): 301–309.
- [21] 肖娴,徐小尘,李琇廷,等. 含聚醚链段聚酰亚胺膜的制备及气体分离性能[J]. 高分子学报, 2020, 53(5):16–24.
- Xian Xiao, Xu Xiaochen, Li Xiuting, et al. Preparation and gas separation properties of polyimide membranes containing polyether segments[J]. Acta Polymerica Sinica, 2020, 53(5):16–24.
- [22] 田晓娟. 涂层与聚酰亚胺基体界面粘附及增强机制研究[D]. 烟台:烟台大学, 2019.
- Tian Xiaojuan. Study on adhesion and enhancement mechanism of coating and polyimide matrix interface[D]. Yantai: Yantai University, 2019.
- [23] 杜晓冬,林芳兵,蒋金华,等. 氧等离子体改性对聚酰亚胺纤维表面性能的影响[J]. 纺织学报, 2019, 40(9):22–27.
- Du Xiaodong, Lin Fangbing, Jiang Jinhua, et al. Influence of oxygen plasma modification on surface properties of polyimide fiber[J]. Journal of Textile Research, 2019, 40(9):22–27.
- [24] Liu T J, Chen C H, Wu P Y, et al. Efficient and adhesiveless metallization of flexible polyimide by functional grafting of carboxylic acid groups[J]. Langmuir, 2019, 35:7 212–7 221.