

## 紫外辐照对芳纶纤维结构与性能的影响

李志尧 严坤 王雯雯 赵青华 王栋 杨晨光

(武汉纺织大学 纺织纤维及制品教育部重点实验室 武汉 430200)

**摘要** 在空气中对芳纶纤维进行紫外辐照, 研究紫外辐照对芳纶纤维结构变化、热稳定性能、结晶性能、表面微观形貌以及拉伸性能的影响。采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)、热重分析仪(TG)表征分析了芳纶纤维紫外辐照前后化学结构、热稳定性的变化。采用扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)和X射线广角衍射仪(XRD)分别观察芳纶纤维紫外辐照前后的表面形貌和晶体结构转变。最后采用单丝强力仪等对样品力学性能进行表征。FTIR结果表明, 经过紫外辐照后纤维表面出现新的含氧化合物。SEM和AFM观察结果显示, 紫外辐照后纤维表面变得粗糙, 并出现沟壑, 且随辐照时间增加, 粗糙度增加。XRD结果表明, 紫外辐照对芳纶纤维晶体结构影响较小。拉伸性能结构显示随着紫外辐照时间的增加, 芳纶纤维的单丝抗拉强度出现下降。芳纶纤维经紫外辐照后, 表面化学活性提高, 粗糙度增加, 这将有效改善芳纶纤维与复合基体之间的界面黏合性, 增强界面作用力, 这对于解决高性能纤维自身难以编织以及复合强度不佳的瓶颈问题具有重要意义, 为进一步拓宽芳纶纤维在高防护服饰、防护鞋面等需要增强界面黏合的复合材料领域方面的应用提供参考。

**关键词** 对位芳纶, 紫外辐照, 力学性能, 表面形貌, 晶体结构

**中图分类号** TL13

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2024-0001

**引用该文:**

李志尧, 严坤, 王雯雯, 等. 紫外辐照对芳纶纤维结构与性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(3): 030201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0001.

LI Zhiyao, YAN Kun, WANG Wenwen, *et al.* Effects of ultraviolet irradiation on the structure and properties of aramid fibers[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(3): 030201. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0001.



### Effects of ultraviolet irradiation on the structure and properties of aramid fibers

LI Zhiyao YAN Kun WANG Wenwen ZHAO Qinghua WANG Dong YANG Chenguang

(Key Laboratory of Textile Fiber and Products, Ministry of Education, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

**ABSTRACT** The effects of UV irradiation on the chemical structure, thermal stability, surface morphology, and mechanical properties of aramid fibers were systematically studied. Changes in the chemical structure and thermal stability of the aramid fibers were characterized using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and

基金资助: 国家自然科学基金(12205225、52373063)资助

第一作者: 李志尧, 男, 1999年7月出生, 2020年6月于湖南工程学院获纺织工程专业学士学位, 现武汉纺织大学技术研究院纺织科学与工程在读硕士研究生

通信作者: 杨晨光, 博士, 副教授, E-mail: cgyang@wtu.edu.cn

收稿日期: 初稿 2024-01-05; 修回 2024-02-19

Supported by National Natural Science Foundation of China (12205225, 52373063)

Fist author: LI Zhiyao (male) was born in July 1999, and obtained his bachelor's degree in textile engineering from Hunan Institute of Technology in June 2020. Now he is a graduate student in textile science and engineering at the Institute of Technology of Wuhan Textile University

Corresponding author: YANG Chenguang, doctoral degree, associate professor, E-mail: cgyang@wtu.edu.cn

Received 05 January 2024; accepted 19 February 2024

thermogravimetric analysis, respectively. Scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM), and X-ray wide-angle diffractometry (XRD) were employed to observe the surface morphology and crystal structure transformation of the aramid fibers before and after UV irradiation, respectively. Finally, the mechanical properties of the fibers were characterized using a monofilament strength testing machine. The FTIR results showed that the aramid fiber surfaces were photodegraded after UV irradiation, and new oxygen-containing functional groups appeared. The SEM and AFM results revealed that the surfaces became rough and gullied after ultraviolet irradiation. XRD results showed that UV irradiation had little effect on the crystal structure of the aramid fibers. Finally, the tensile properties indicated that the tensile strength decreased with increasing irradiation time. Based on these results, the surface chemical activity and roughness of the aramid fibers were increased after UV irradiation, which improved the interface adhesion between the aramid fibers and composite matrix while enhancing the interface force. Thus, solving the bottleneck problem of high-performance fibers, which are difficult to weave and exhibit poor composite strengths, is important. This study provides a reference for further expanding the application of aramid fibers in the field of composite materials. These applications include high-protective clothing and protective upperwear, which require enhanced interface adhesion.

**KEYWORDS** Para aramid fiber, UV irradiation, Mechanical properties, Surface morphology, Crystal structure  
**CLC** TL13

作为世界三大高性能纤维之一<sup>[1]</sup>, 芳纶纤维是一类在两个芳环之间含有至少 85% 酰胺键的合成纤维<sup>[2]</sup>, 由于具有低密度、高比强度、高比模量、高熔点等优异的综合性能而被广泛用于航空航天、体育用品、汽车等工业领域<sup>[3]</sup>。然而, 大部分芳纶纤维所应用的环境都避不开紫外线的照射, 紫外线(UV)具有非常高的能量, 对纤维的降解能力强, 对高分子材料的损伤程度的贡献值达到 90%<sup>[4]</sup>, 在 UV 辐照下, 芳纶纤维表面会发生各种化学反应, 使纤维出现裂解和氧化, 导致纤维的各种性能下降<sup>[5]</sup>。因此, 开展芳纶纤维的 UV 辐照效应的研究, 掌握材料在使用环境下的性能下降的情况, 对芳纶纤维的进一步拓展应用具有重要意义<sup>[6]</sup>。有关芳纶纤维紫外辐照效应的探索, 前人已经做了许多研究<sup>[7-10]</sup>, Malvar<sup>[11]</sup>研究发现, 芳纶织物在经过 5 周 UV 辐照后, 力学强度损失达到近 50%, 无法作为补强材料。Davis 等<sup>[7]</sup>研究发现, 在温湿的 UV 辐照环境中, 纤维会加速降解, 纤维的力学性能出现明显下降。Li 等<sup>[9]</sup>研究发现, 芳纶纤维经功率 3 kW 峰值波长 360 nm 的 UV 辐照 48 h 后, 纤维单丝的拉伸强度降低 15%。Said 等<sup>[10]</sup>研究了 PBO、芳香族聚酯、Kevlar-49 以及超高分子量聚乙烯纤维在紫外波长 340 nm, 辐照度为 1.1 W/m<sup>2</sup> 条件下的分子链降解作用机理, 发现经过 160 h 的 UV 辐照后, 4 种纤维拉伸强度下降明显, 其中 PBO 和芳香族聚酯纤维拉伸强度下降均达 80% 以上。目前, 国内外通过 UV 辐照芳纶纤维的主要目的是探究芳纶纤维力学性能的变化, 解决

辐照对芳纶纤维力学性能的影响, 而忽略了芳纶纤维表面结构的变化以及后续作为增强黏结复合材料应用的探讨。芳纶分子结构特殊的苯环链段具有明显的位阻效应, 同时沿纤维轴向取向度很高, 芳纶结构特点导致其酰胺基团很难与常规活性基团发生反应, 其表面活性官能团含量很少, 也不易通过表面接枝等活化策略引入新的基团, 这造成与环氧树脂等复合基体的界面黏合性能差<sup>[12]</sup>。而 UV 辐照能够刻蚀芳纶纤维表面, 增加粗糙度的同时引进新的含氧基团, 可有效改善芳纶纤维与复合基体之间的界面黏合性, 同时芳纶纤维受紫外辐照后表面降解过程需要进一步完善以便对高性能芳纶的拓展应用提供指导。

本工作在空气中对位芳纶纤维进行不同时间的 UV 辐照处理, 得到 UV 辐照改性后的芳纶纤维, 研究了不同时间 UV 辐照后芳纶纤维表面化学结构、热稳定性及拉伸强度的影响。同时探究了 UV 辐照时间与芳纶纤维表面形貌的变化关系, 系统分析了不同时间下 UV 辐照对芳纶纤维结构和性能的影响关系。

## 1 样品制备及性能表征

### 1.1 原料与试剂

对位芳纶(AF, 1414), 420 dtex, 购自美国杜邦公司; 丙酮: 分析纯, 购自国药集团化学有限公司。紫外光联仪(Luyor-UCL-3500), 购于美国路阳公司, 运转功率为 230VAC 50/60 Hz, 紫外线灯

管 $6\times 15\text{ W}$ 。

## 1.2 紫外辐照处理芳纶纤维

将芳纶纤维截取一定长度放入有丙酮溶液的烧杯中，并置于超声波清洗器清洗2 h后放入烘箱中烘干，得到改性芳纶样品。紧接着在常温条件

下开展紫外辐照实验和相关表征，设置紫外强度 $50\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，将芳纶纤维分别在紫外灯下辐照0 min、5 min、10 min、20 min和40 min，得到紫外辐照处理后的芳纶样品，分别命名为AF、AF-5、AF-10、AF-20和AF-40。

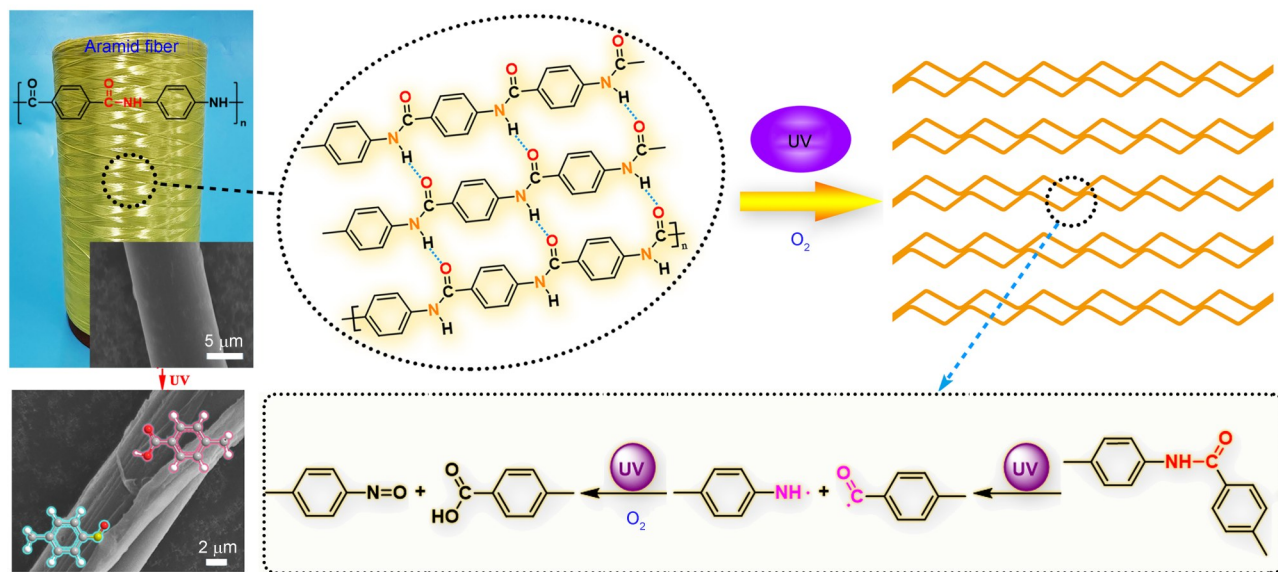


图1 紫外改性对位芳纶纤维的示意图  
Fig.1 Diagram of UV-modified aramid fiber

## 1.3 表征测试

采用衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪(Bruker Tensor 27型)对紫外辐照前后芳纶纤维的化学结构进行表征，其仪器所设置的参数为扫描波长范围是 $400\sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$ ，扫描次数为32次，分辨率是 $64\ \text{cm}^{-1}$ 。

热性能采用TG分析仪(NETZSCH 209 F3)对纤维的热分解性能进行表征。

利用扫描电子显微镜(JSM-IT300A, SEM)对纤维的表面形貌进行观察。

采用北京普瑞赛司仪器有限公司生产的光学显微镜(Primotech)对紫外辐照前后芳纶纤维的表面形貌进行观察分析。

采用由日本岛津有限公司生产的原子力显微镜(AFM)SPM-970对紫外辐照前后芳纶纤维表面的粗糙度变化进行观察分析。

采用X射线衍射分析仪(Empyrean)对紫外辐

照前后芳纶的结晶性能进行测试分析。其测试时间为3 min；测试角度为 $10^\circ\sim 60^\circ$ ，扫描速率为 $0.02\ \text{s}/\text{step}$ ，并通过积分法计算出紫外辐照前后芳纶纤维的结晶度。

采用YG001E型单丝拉力机对纤维单丝强力进行拉伸强度的测试表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 化学结构分析

如图2所示，红外谱图显示芳纶纤维的明显特征峰。在 $1\ 637\ \text{cm}^{-1}$ 位置处的吸收峰对应于酰胺键上的羰基(C=O)伸缩振动峰<sup>[13]</sup>。辐照后纤维的峰强也稍微增加，这归因于UV辐照使纤维的分子链发生断裂，同时分子末端基团被空气中O<sub>2</sub>氧化<sup>[14]</sup>。图2(b)中 $1\ 743\ \text{cm}^{-1}$ 处出现新的吸收峰，该峰出现表明-COOH基团的形成和酰胺键的断裂<sup>[15]</sup>。另

外,紫外辐照造成-C-N键发生断裂,而该化学键的断裂将导致-C-N和N-H协调振动峰( $1\ 520\ \text{cm}^{-1}$ )

以及苯-氮键( $1\ 310\ \text{cm}^{-1}$ )的峰强出现变化<sup>[15]</sup>。

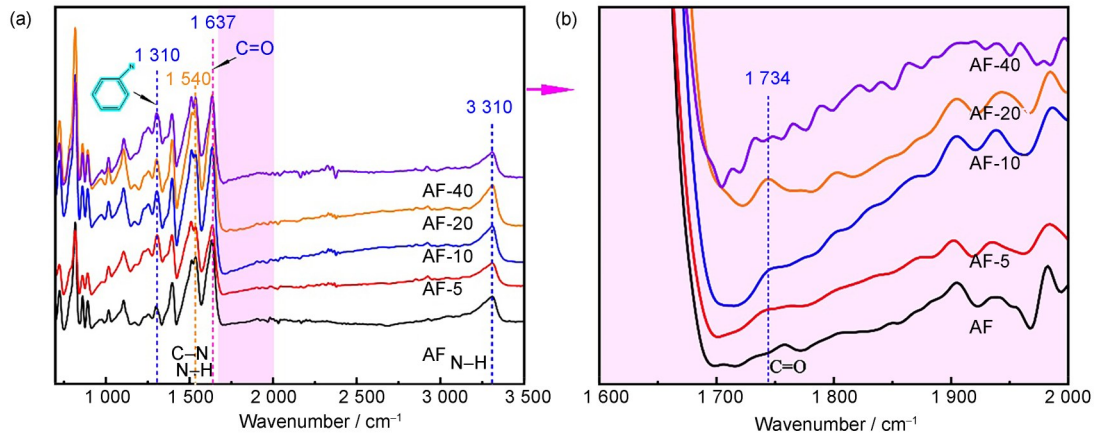


图2 UV辐照不同时间芳纶纤维红外光谱图  
Fig.2 AIR-FTIR spectra of aramid under different UV irradiation time

### 2.2 热性能分析

由图3(a)的TG曲线图可知,在芳纶纤维出现失重分解前,有部分质量的损失,这归因于纤维表面极少量水分的挥发以及一些小分子的气化。芳纶纤维原样在 $558.3\ ^\circ\text{C}$ 时,纤维开始出现失重分解,而经过UV辐照后的芳纶纤维失重分解温度略微降低。从图3(b)DTG曲线可知,经过UV辐照后的芳纶纤维最大分解速率温度降低,并且随着

辐照时间的增加,改性芳纶纤维最大分解速率温度持续降低,从 $582.1\ ^\circ\text{C}$ 降低到 $564.1\ ^\circ\text{C}$ ,同时可以看出紫外辐照后芳纶纤维的最大分解速率增加。这可能是芳纶纤维的大分子链经紫外辐照发生裂解导致分子链间的结合力减小及分子反应的活化能降低,导致纤维的热性能下降<sup>[16]</sup>。根据以上结果可得随着紫外辐照时间变长,分子链降解作用加剧。

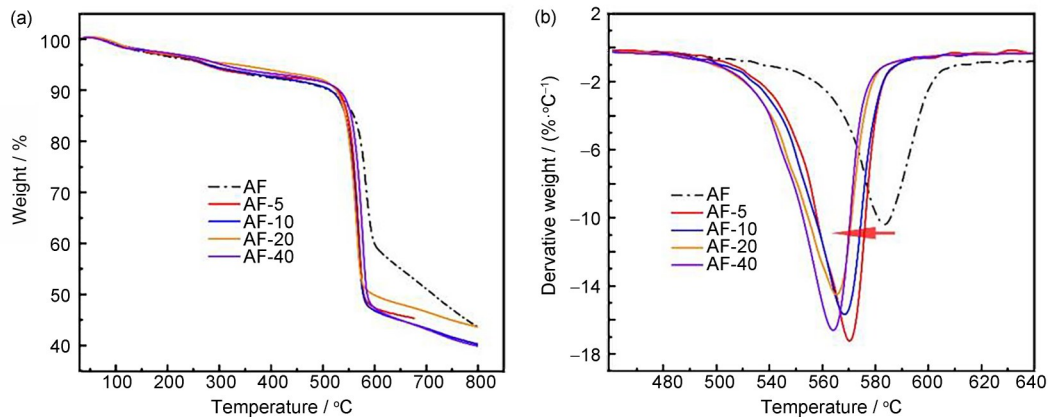


图3 不同UV辐射处理时间下芳纶纤维(a)TG曲线和(b)DTG曲线  
Fig.3 (a) TG curves and (b) DTG curves of aramid fibers under different UV irradiation time

### 2.3 微观形貌分析

图4为紫外辐照不同时间条件下芳纶纤维表面形貌变化SEM图。可以看到,未辐照的纤维表面光滑,如图4(a)所示。而经过UV辐照后,芳纶纤维表面变粗糙,同时,可以看到一些明显的裂纹

和沟壑;随着UV辐照时间增加,纤维表面的裂纹和沟壑加深,粗糙度进一步增加,当辐照时间为40 min时,纤维表面降解严重,纤维本体受到破坏,如图4(e)所示。以上结果表明,芳纶纤维经过UV辐照后,纤维表层分子内酰胺键发生断裂,

在有氧条件的作用下断裂的部分产生的自由基会发生过氧化偶联反应，由于过氧键的不稳定性，在紫外辐照下不断发生分解而产生羧酸，最终导致纤维表层逐渐被破坏<sup>[17]</sup>。可以判断随着UV辐照

时间的增加，芳纶纤维的紫外降解将逐渐深入到纤维的内部，导致纤维本体受到更为严重的破坏，如图5(a)所示。空气中紫外辐照位芳纶纤维表面可能的降解反应如图5(b)和(c)所示。

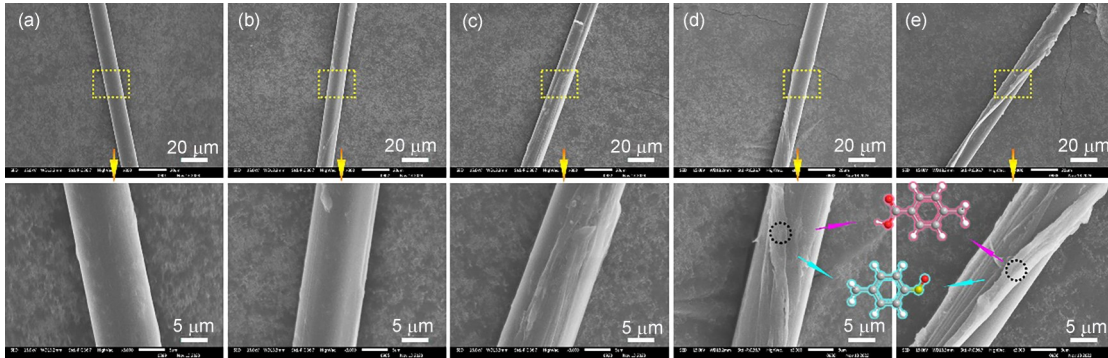


图4 不同UV辐照时间下芳纶纤维表面SEM图(a)0 min; (b)5 min; (c)10 min; (d)20 min; (e)40 min  
 Fig.4 SEM images of aramid fiber surface under different UV irradiation times: (a) 0 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 20 min; (e) 40 min

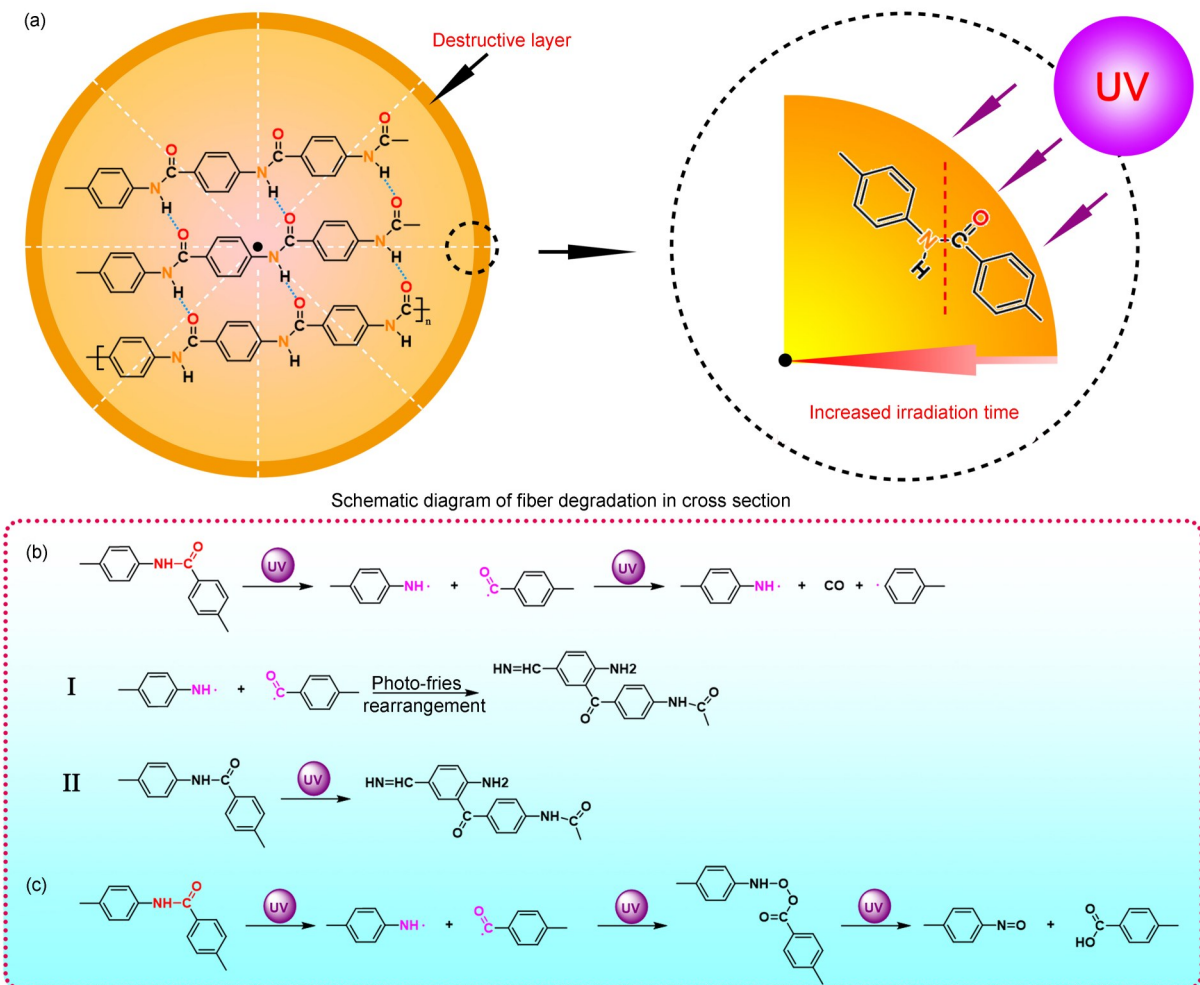


图5 芳纶纤维紫外辐照(a)降解示意图和(b)反应机理图  
 Fig.5 UV irradiation (a) degradation diagram and (b) reaction mechanism diagram of aramid fiber

### 2.4 AFM测试分析

图6显示了不同辐照时间下纤维表面形貌的AFM图。从图6(a)可知, 未经过辐照纤维表面平整光滑。当紫外辐照5 min时, 纤维表面已经开始

出现刻蚀, 并且粗糙度增加。随着UV辐照时间不断增加, 纤维表面沟壑的刻蚀程度更为严重, 粗糙度进一步增加, 纤维表面规整性进一步变差, 这与SEM图所得的形貌结果基本一致, 由此可知, UV辐照改性可明显微刻芳纶纤维表面。

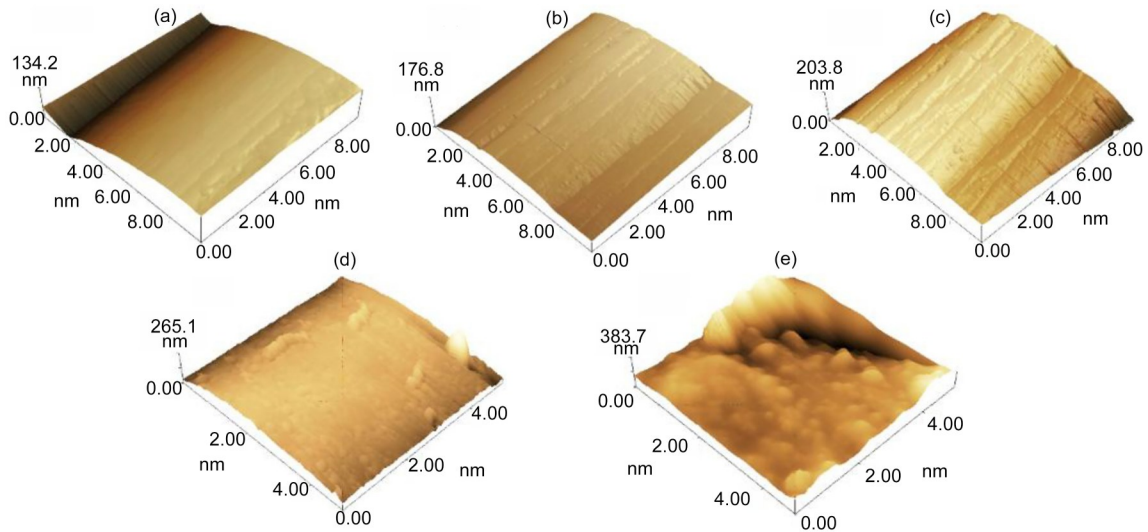


图6 UV辐照不同时间条件下芳纶纤维表面形貌的AFM图: (a)0 min; (b)5 min; (c)10 min; (d)20 min; (e)40 min  
Fig.6 AFM images of aramid fibers under different UV irradiation times: (a) 0 min; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 20 min; (e) 40 min

### 2.5 拉伸强度分析

根据图7(a)和(b)可知, 随着辐照时间增加, 芳纶纤维的拉伸强度逐渐下降, 从12.6 cN/dtex降低到1.9 cN/dtex, 强度损失超过6倍, 弹性模量从302 cN/dtex降低到48 cN/dtex。这归因于芳纶纤维中的酰胺和苯-氮键等基团使芳纶纤维对紫外光有很强的吸收能力<sup>[17]</sup>。辐照时间较短时, 纤维表层

分子链发生酰胺键断裂。随着辐照时间的增加, 吸收的紫外线会引起表层以下分子链发生一系列物理和化学反应, 使纤维分子链从表皮向内部逐步发生断裂, 造成芳纶纤维强度大幅下降。图4中随着辐照时间的变长纤维表面粗糙度增加验证了这一点, 即辐照时间越长, 纤维越深部的分子链发生断裂, 最终纤维性能下降严重。

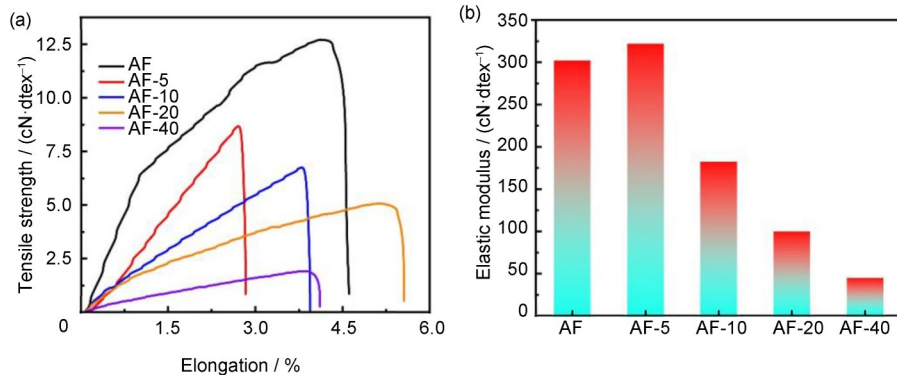


图7 不同UV辐照时间下芳纶纤维的单丝(a)拉伸强度-伸长率和(b)弹性模量  
Fig.7 Single filament (a) tensile strength elongation and (b) elastic modulus of aramid fibers under different UV irradiation times

### 2.6 结晶性能分析

图8(a)为UV辐照不同时间下纤维XRD谱图。其中20.3°、22.6°分别对应于(110)、(200)晶面归于

芳纶纤维的特征衍射峰。从XRD图谱可知, 芳纶纤维经UV辐射后, 没有出现新的晶型衍射峰, 并且各峰位置也没有出现变化, 说明UV辐照处理不

会对芳纶纤维的物相及晶面造成明显影响，也侧面表明纤维的晶体结构没有出现明显变化。然而从图8(b)可知，随UV辐照时间增加，芳纶纤维结

晶度持续下降，这可能是因为UV辐照使芳纶纤维表层分子结构发生变化，破坏了分子链的规整性<sup>[15]</sup>，从而结晶度出现下降。

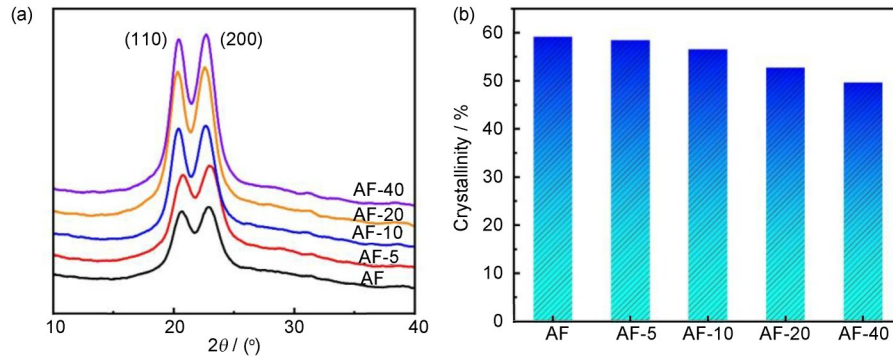


图8 UV不同辐照时间下芳纶纤维(a)XRD谱图和(b)结晶度  
Fig.8 (a) XRD patterns and (b) crystallinity of aramid fibers under different UV irradiation times

## 2.7 光学显微镜测试分析

图9为UV不同辐照时间下芳纶纤维光学显微镜图片。可以看出，UV辐照前后芳纶纤维直径约为12 μm；随着UV辐照时间增加，由于表层分子结构光降解原因，芳纶纤维的表面出现了一些细小颗粒，粗糙度增加。从图9(c)可知，芳纶纤维的表面虽然被刻蚀出一些沟壑，但仍保持着本体纤维形状。由图9(d)~(e)可知，当UV辐照时间为

40 min时，芳纶纤维被刻蚀严重，其本体结构受到破坏，表面沟壑和裂纹变大。综上可知，紫外辐照对芳纶纤维表面具有很好的微刻作用，可实现纤维表面粗糙度的增加。考虑芳纶纤维高强高模的优点与其难以编织、不易复合黏结等应用范围窄的矛盾点。在保证芳纶纤维一定强度的情况下，采用紫外微刻处理的方法可以有效提升芳纶纤维与复合基体的界面作用力，使复合材料的力学性能得到提高。

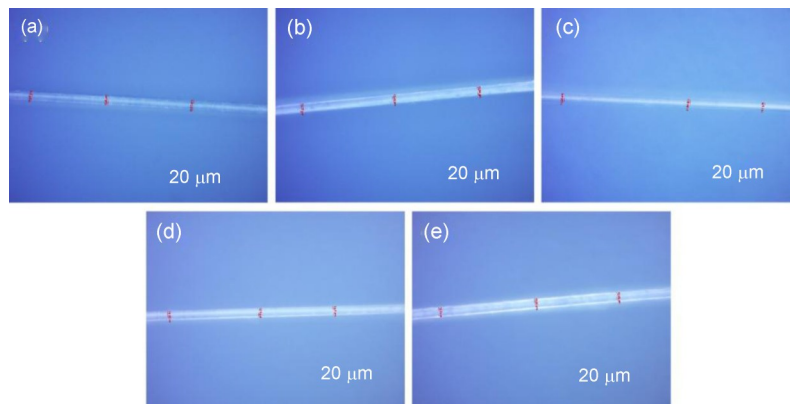


图9 不同UV辐射处理时间下芳纶纤维光学显微镜图片  
Fig.9 Optical microscope images of aramid fibers under different UV irradiation times

## 3 结论

本文通过UV在空气中辐照获得紫外改性芳纶纤维，研究了UV辐照前后芳纶纤维的化学结构变化以及热稳定性和纤维表面形貌的演变规律。研究表明：芳纶纤维经UV辐照表面分子链上的酰胺键断裂，氧化后形成新的含氧官能团。同时UV辐照对芳纶纤维表面具有微刻作用，会使表面粗糙度增加。另外，研究表明UV辐照对芳纶纤维的晶

体结构影响较小，拉伸强度影响较大。本文研究同时得出芳纶纤维经紫外辐照后，表面化学活性提高，粗糙度增加，这可能在改善芳纶纤维与复合基体之间的界面黏合性方面具有积极作用，这为进一步拓宽芳纶纤维在增强复合材料领域方面的应用提供指导。

**作者贡献声明** 李志尧和杨晨光是本研究的实验设计者和执行人，完成数据分析，论文初稿的写

作; 严坤, 王雯雯, 赵青华参与实验设计和试验结果分析; 王栋指导实验设计、数据分析、论文写作与修改; 杨晨光是项目的构思者及负责人。所有作者均已阅读并同意最终文本。

## 参考文献

- Crouch I G. Body armour—New materials, new systems [J]. Defence Technology, 2019, **15**(3): 241-253. DOI: 10.1016/j.dt.2019.02.002.
- Zhang B, Jia L H, Tian M, *et al.* Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: a review[J]. European Polymer Journal, 2021, **147**: 110352. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110352.
- Nasser J, Lin J J, Steinke K, *et al.* Enhanced interfacial strength of aramid fiber reinforced composites through adsorbed aramid nanofiber coatings[J]. Composites Science and Technology, 2019, **174**: 125-133. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.02.025.
- 闫民杰, 许瑞, 陈莉, 等. 紫外辐照芳纶纤维的概述[J]. 西部皮革, 2018, **40**(23): 123. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1602.2018.23.076.  
YAN Minjie, XU Rui, CHEN Li, *et al.* Overview of UV irradiation aramid fibers[J]. West Leather, 2018, **40**(23): 123. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1602.2018.23.076.
- Gu H. Ultraviolet treatment on high performance filaments[J]. Materials & Design, 2005, **26**(1): 47-51. DOI: 10.1016/j.matdes.2004.04.009.
- 李亚锋, 礼嵩明, 黑艳伟, 等. 太阳辐照对芳纶纤维及其复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2019, **47**(4): 39-46. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2017.001420.  
LI Yafeng, LI Songming, HEI Yanwei, *et al.* Effect of solar radiation on the properties of aramid fibers and composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, **47**(4): 39-46. DOI: 10.11868/j.issn.1001-4381.2017.001420.
- Davis R, Chin J, Lin C C, *et al.* Accelerated weathering of polyaramid and polybenzimidazole firefighter protective clothing fabrics[J]. Polymer Degradation and Stability, 2010, **95**(9): 1642-1654. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.05.029.
- Ghosh L, Fadhilah M H, Kinoshita H, *et al.* Synergistic effect of hyperthermal atomic oxygen beam and vacuum ultraviolet radiation exposures on the mechanical degradation of high-modulus aramid fibers[J]. Polymer, 2006, **47**(19): 6836-6842. DOI: 10.1016/j.polymer.2006.07.029.
- Li K, Li L, Qin J Q, *et al.* A facile method to enhance UV stability of PBIA fibers with intense fluorescence emission by forming complex with hydrogen chloride on the fibers surface[J]. Polymer Degradation and Stability, 2016, **128**: 278-285. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.033.
- Said M A, Dingwall B, Gupta A, *et al.* Investigation of ultra violet (UV) resistance for high strength fibers[J]. Advances in Space Research, 2006, **37**(11): 2052-2058. DOI: 10.1016/j.asr.2005.04.098.
- 班海娟. Kevlar 一体化拉绳—取芯软袋结构设计及紫外防护[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
BAN Haijuan. Structure design of integrated rope-coring soft bag and ultraviolet protection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- Swamy V, Wilson N C. First-principles calculations of the pressure stability and elasticity of dense TiO<sub>2</sub> phases using the B3LYP hybrid functional[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2014, **118**(16): 8617-8625. DOI: 10.1021/jp411366q.
- 厉世能. 芳纶纤维的老化及表面处理的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.  
LI Shineng. Research on ageing and surface modification of aramide fibers[D]. Suzhou: Soochow University, 2012.
- Zhang H P, Zhang J C, Chen J Y, *et al.* Effects of solar UV irradiation on the tensile properties and structure of PPTA fiber[J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, **91**(11): 2761-2767. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2006.03.025.
- 戴骏, 熊玉竹, 崔凌峰, 等. 紫外辐照改性芳纶纤维的研究[J]. 人工晶体学报, 2016, **45**(11): 2705-2710, 2716. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2016.11.024.  
DAI Jun, XIONG Yuzhu, CUI Lingfeng, *et al.* Study on modification of aramid fiber by UV irradiation[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2016, **45**(11): 2705-2710, 2716. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.2016.11.024.
- 王倩, 熊玉竹, 戴骏, 等. 芳纶纤维的紫外辐照改性及硅烷偶联剂二次改性[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, **34**(7): 78-83. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2018.07.014.  
WANG Qian, XIONG Yuzhu, DAI Jun, *et al.* Modification of aramid fiber using UV irradiation and silane coupling agent[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, **34**(7): 78-83. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2018.07.014.
- 李娇妍. 环境中的紫外辐照对有机纤维的损伤效应分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.  
LI Jiaoyan. The damage effects of ultraviolet irradiation environment on organic fibers[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.