

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.006

# 环氧树脂/多巴胺增强芳纶纤维界面性能

胡锦涛<sup>1</sup>, 李嘉杰<sup>1</sup>, 张彦飞<sup>1,2</sup>, 刘佩佩<sup>1</sup>, 关静<sup>1</sup>, 谢利鹏<sup>3</sup>

(1. 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051; 2. 山西省煤矿矿井水处理技术创新中心, 太原 030006;

3. 西安长峰机电研究所, 西安 710065)

**摘要:** 由于芳纶纤维表面光滑且呈现化学惰性, 与环氧树脂等基体材料结合后界面性能较差。为此, 采用多巴胺在不同时间下对改进型芳纶III纤维表面进行改性处理, 并研究了对环氧树脂/多巴胺改性芳纶纤维界面性能的影响。对扫描电子显微镜对纤维改性前后表面形貌进行表征, 发现纤维改性后表面粗糙度提高, 利于与环氧树脂间界面结合。利用傅里叶变换红外光谱、X射线光电子能谱对纤维改性前后基团和表面元素含量进行表征, 改性后纤维表面活性基团增加, 极性增强。通过热重分析表明聚多巴胺成功吸附在纤维表面。测量纤维表面接触角, 改性后的接触角更小, 有利于环氧树脂润湿纤维。采用横向丝束复合材料的拉伸强度表征环氧树脂/芳纶纤维的界面性能。最终确定了多巴胺浓度为2 g/L, 在多巴胺溶液中处理4 h为最佳条件, 在该条件拉伸强度比为改性前提高了28.06%, 拉伸弹性模量提高了14.68%。

**关键词:** 芳纶纤维; 复合材料; 环氧树脂; 多巴胺; 界面; 表面改性

**中图分类号:** TQ342+.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0036-06

## Interfacial Properties of Dopamine Reinforced Aramid Fiber/Epoxy Resin

Hu Jinlan<sup>1</sup>, Li Jiajie<sup>1</sup>, Zhang Yanfei<sup>1,2</sup>, Liu Peipei<sup>1</sup>, Guan Jing<sup>1</sup>, Xie Lipeng<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Coal Mine Water Treatment Technology Innovation Center, Taiyuan 030006, China;

3. Xi'an Changfeng Research Institute of Mechanical-electrical, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The surface of aramid fiber is smooth and chemically inert, and its interface performance with epoxy resin and other matrix materials is poor. For this reason, the surface of modified aramid III fiber (F-3 A) was modified with dopamine at different time, and the effect of the modification on the interfacial properties of epoxy resin/aramid fiber was studied. The surface morphology before and after the fiber modification was characterized by scanning electron microscope (SEM). The surface roughness of the modified fiber was improved, which was beneficial to the interface bonding with epoxy resin. The content of groups and surface elements before and after the modification of the fiber was characterized by infrared spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). After the modification, the surface active groups and polarity of the fiber increase. Thermogravimetric analysis shows that polydopamine is successfully adsorbed on the fiber surface. Measuring the contact angle of the fiber surface, the modified contact angle is smaller, and the epoxy resin will be easier to wet the fiber. The tensile strength of transverse tow composite (TFBC) is used to characterize the interfacial properties of aramid fiber/epoxy resin. Finally, the best condition is determined that dopamine concentration was 2 g/L and the fiber was treated in dopamine solution for 4 hours. At this condition, the tensile strength is 28.06% higher than that before modification, and the tensile modulus is 14.68% higher.

**Keywords:** aramid fiber ; composite ; epoxy resin ; dopamine ; interface ; surface modification

芳纶纤维是一种高分子合成纤维, 具有超高强度、高模量、耐高温、耐酸耐碱、质量轻等优良性能,

是一种理想的增强材料, 可分为全芳香族聚酰胺纤维和杂环芳香族聚酰胺纤维。芳纶纤维复合材料

通信作者: 张彦飞, 副教授, 研究方向为复合材料成型工艺

收稿日期: 2023-02-21

引用格式: 胡锦涛, 李嘉杰, 张彦飞, 等. 环氧树脂/多巴胺增强芳纶纤维界面性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 36-41.

Hu Jinlan, Li Jiajie, Zhang Yanfei, et al. Interfacial properties of dopamine reinforced aramid fiber/epoxy resin[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 36-41.

广泛应用于航天器结构件、火箭发动机壳体、飞机机翼、轮船外壳、轮胎帘子线、汽车胶管、体育用品等国民经济的各个方面<sup>[1-5]</sup>。笔者使用的改进型芳纶Ⅲ(F-3A)纤维属于杂环芳纶纤维。

对于环氧树脂/芳纶纤维复合材料来说,芳纶纤维表面十分光滑<sup>[6]</sup>,难以和环氧树脂间形成机械啮合,树脂不易黏附在纤维表面;另一方面,芳纶纤维表面缺少反应基团,难以和环氧树脂发生反应且芳纶纤维表面极性很低<sup>[7]</sup>,与环氧树脂极性不匹配,故导致环氧树脂/芳纶纤维界面结合性能不好。而对于复合材料,其界面用来将载荷从基体传递到增强体,若复合材料的界面性能不好则无法充分发挥增强体的力学性能<sup>[8]</sup>。除此之外,界面还可以起到减缓裂纹扩展的作用,若界面性能较差则易导致分层破坏。复合材料界面性能的好坏直接决定了整个制品的性能,这是研究增强环氧树脂/芳纶纤维界面性能的意义所在。

一般通过改性芳纶纤维表面的方式来增强芳纶复合材料界面性能。芳纶纤维改性分为化学改性和物理改性<sup>[9]</sup>,化学改性可细分为表面刻蚀<sup>[10]</sup>、表面接枝<sup>[11]</sup>、偶联剂改性<sup>[12]</sup>等,主要是通过化学方式将活性基团引入纤维表面,同时表面刻蚀还可以增加纤维表面粗糙度。物理改性可细分为等离子体改性<sup>[13]</sup>、高能射线改性<sup>[14]</sup>、超声波改性<sup>[15]</sup>、涂层改性<sup>[16-17]</sup>等。可通过等离子体、高能射线、超声波等使纤维表面粗糙来改性纤维,也可通过涂层改性使纤维表面涂覆上浆剂或沉积聚合物来改性纤维。

多巴胺在碱性环境下会自发反应成聚多巴胺(PDA)<sup>[18-19]</sup>,并在范德华力、氢键、 $\pi$ - $\pi$ 堆积的作用下黏附于芳纶纤维的表面<sup>[20]</sup>,因此可通过将多巴胺沉积在芳纶纤维表面来改性芳纶纤维。多巴胺改性芳纶纤维有两个优势:首先这种方式不会对纤维造成损害,不会降低纤维的力学性能;其次芳纶纤维表面黏附的聚多巴胺会使纤维表面变粗糙的同时,增强纤维表面极性和增加反应活性位点,以此来达到增强环氧树脂/芳纶纤维界面性能的目的。

笔者使用了多巴胺对芳纶纤维表面进行改性,以此达到增强环氧树脂/芳纶纤维界面性能的目的。通过观察改性前后纤维表面基团、形貌、元素含量、润湿性等,确定成功在纤维表面沉积了多巴胺并增加了纤维表面的粗糙度、增强了极性。此外,还研究了不同改性时间对环氧树脂/芳纶纤维复合材料

界面性能的影响,以此确定多巴胺最佳改性芳纶纤维的时间。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

对位芳纶纤维:F-3A型,四川中蓝晨光化工研究院有限公司;

盐酸多巴胺:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

三(羟甲基)氨基甲烷(Tris):分析纯,上海展云化工有限公司;

环氧树脂:E-51,工业级,江苏南通星辰树脂厂;

4,4'-二氨基二苯砜(DDS):工业级,武汉拉那白医药化工有限公司。

### 1.2 仪器及设备

磁力搅拌器:DF-101S型,杭州瑞佳精密科学仪器有限公司;

真空干燥箱:DZF-6050型,杭州瑞佳精密科学仪器有限公司;

万能试验机:AL-7000M型,东莞高铁检测仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Tensor-27型,德国Bruker公司;

热重(TG)分析仪:TGA 2型,瑞士METTLER TOLEDO公司;

接触角仪:SL200B型,上海梭伦信息科技有限公司;

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

扫描电子显微镜(SEM):TESCAN MIRA LMS型,捷克布尔诺TESCAN公司。

### 1.3 芳纶纤维改性及复合材料制备

取3 m长的纤维丝束放置于250 mL锥形瓶中,倒入丙酮直至漫过纤维丝束。将锥形瓶放置在超声波清洗机中,40 kHz下清洗3次,每次清洗30 min。将丙酮超声清理后的纤维用清水洗净,放入烘箱中烘干,然后置于密封袋中保存备用。

使用盐酸多巴胺和蒸馏水配置2 g/L的多巴胺溶液,加入Tris调节pH值,用pH计进行检测,直到pH值达到8.5,将溶液放置在磁力搅拌机中。然后将芳纶纤维丝束缠在架子上并置于多巴胺溶液中,打开磁力搅拌机,在30℃下分别搅拌1,2,3,4,5,7,9,11,13 h。然后用水洗净纤维,烘干备用。

制备芳纶纤维和环氧树脂的横向丝束复合材料(TFBC),模具如图1所示。将环氧树脂在130℃的条件下加热搅拌,并向其中加入DDS固化剂(环氧树脂和DDS质量比为100:32),搅拌至溶液淡黄色透明。放入真空烘箱中80℃脱泡30 min。将芳纶纤维放入模具狭缝中夹紧,然后将脱泡后的树脂浇注在模具中,放入烘箱中,在130℃下加热2 h然后升温至200℃加热2 h进行树脂固化。

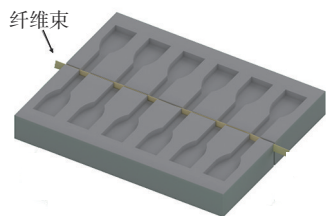


图1 TFBC模具示意图

#### 1.4 结构表征与性能测试

**纤维基团分析:**将芳纶纤维剪碎,和溴化钾粉末混合(质量比为1:100)并压片,仪器的测量范围为400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为32次。

**纤维表面元素含量分析:**使用XPS进行分析,分析室的真空度为 $5 \times 10^{-13}$  MPa,能量为1 486.6 eV。

**TG:**采用TG分析仪进行分析,试样质量为5 mg。温度区间为25~800℃,温度上升速度为10℃/min。

**纤维表面及复合材料断面形貌分析:**对改性前后的纤维试样和拉断的TFBC试样断面进行喷金,观察试样表面形貌。

**纤维丝束表面接触角分析:**使用接触角仪对纤维表面接触角进行测试,测试液体为蒸馏水。采用外形图像分析方法测试纤维表面接触角,使用座滴法将液体滴于纤维表面。

**TFBC试样拉伸测试:**尺寸参照标准ASTM D638-2010中的IV型试样,采用万能电子试验机进行拉伸测试,拉伸速度2 mm/min,拉伸至试样中间纤维界面处发生破坏,使用横向丝束复合材料的拉伸强度来表征复合材料的界面性能<sup>[21-22]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维基团分析

通过中红外区域(4000~400  $\text{cm}^{-1}$ )的透射红外光谱测试了多巴胺改性前和改性4 h后芳纶纤维表面的化学结构。

图2为芳纶纤维改性前后的FTIR光谱图。芳

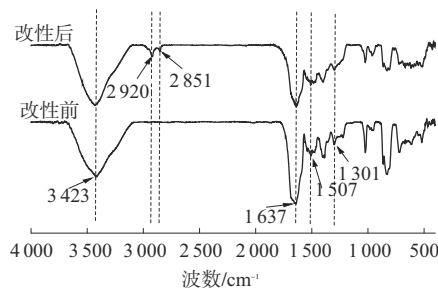


图2 改性前后芳纶纤维的FTIR图

纶纤维改性前的图像中,3 423  $\text{cm}^{-1}$ 的峰是芳纶纤维中N—H键的伸缩振动峰;1 700~1 200  $\text{cm}^{-1}$ 是芳纶纤维特征峰所在区域;1 637  $\text{cm}^{-1}$ 处是芳纶纤维中C=O键的伸缩振动的峰;1 507  $\text{cm}^{-1}$ 处是芳纶纤维N—H键弯曲振动的特征峰;1 301  $\text{cm}^{-1}$ 处是芳纶纤维C—N键的伸缩振动峰。多巴胺改性过后,芳纶纤维的特征峰都减弱,且在2 920  $\text{cm}^{-1}$ 和2 851  $\text{cm}^{-1}$ 处出现的峰是多巴胺中亚甲基非对称拉伸振动和对称拉伸振动形成。以上结果说明多巴胺成功涂覆在纤维表面。

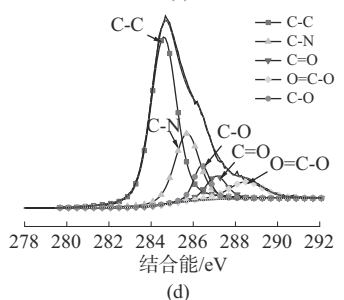
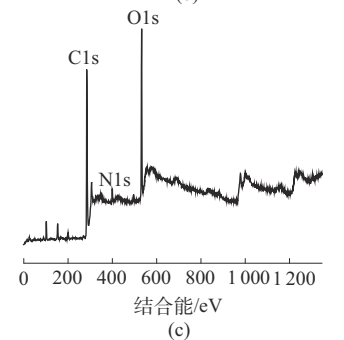
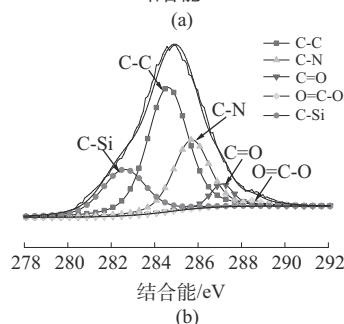
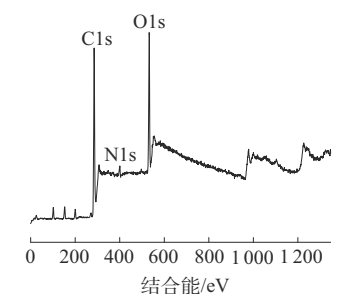
### 2.2 纤维表面元素含量分析

使用XPS对改性前和改性4 h后纤维的表面元素含量进行分析,通过比较纤维表面元素含量,确定了多巴胺改性的成功。

图3a和图3b分别为芳纶纤维改性前的XPS全谱和C 1 s精细谱,图3c和图3d分别为纤维改性后的XPS全谱和C 1 s精细谱。图3b的C 1 s谱拟合出C—C, C—N, C=O, O=C—O, C—Si这5个峰,C—Si是纤维合成过程中引入的。C—C的峰位是284.6 eV, C—N的峰位是285.7 eV, C=O的峰位是287.1 eV, O=C—O的峰位是288.5 eV, C—Si的峰位是282.6 eV。改性后的C 1 s谱中C—Si峰消失,这是由于多巴胺聚合形成的PDA中并无C—Si键,而PDA附在了纤维表面,导致该峰消失。除此之外,改性后的C 1 s谱在286.4 eV处出现了C—O峰,且C—N峰减弱。纤维几乎不含C—O键,而PDA一个重复单元含有2个C—O,这说明PDA涂层成功吸附在纤维表面。表1是由XPS测出的纤维改性前后C, N, O的元素含量,可知在多巴胺改性纤维表面

表1 F-3A芳纶纤维改性前后C, N, O元素含量 %

| 元素 | 改性前   | 改性后   |
|----|-------|-------|
| C  | 72.64 | 71.88 |
| N  | 4.21  | 3.53  |
| O  | 23.15 | 24.59 |



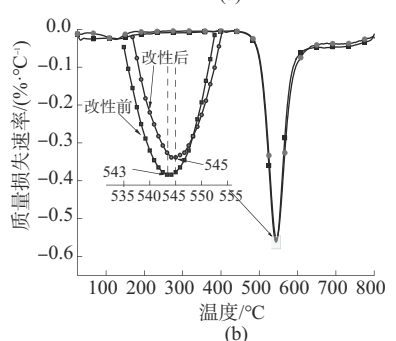
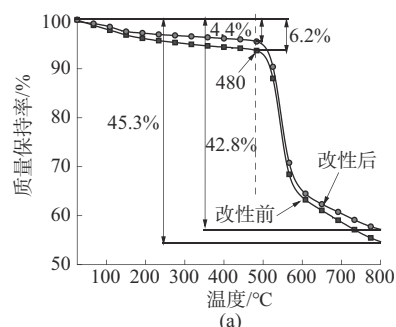
a—改性前的XPS全谱;b—改性前的C1s精细谱;  
c—改性后的XPS全谱;d—改性后的C1s精细谱

图3 芳纶纤维改性前后XPS全谱和C1s精细谱

后,O/C的比值由0.32变为了0.34,表面极性有所增强。

### 2.3 TG分析

图4为芳纶纤维改性前后的TG曲线。未改性的纤维在25℃至480℃之间失重6.2%,相当于消除了加工过程中的水和残留溶剂,在480℃至800℃之间失重39.1%,这主要是纤维本体的分解,在800℃还残留了54.7%的质量。改性后的纤维在25℃至480℃之间失重4.4%,在480℃至800℃之间失重38.4%,在800℃还残留了57.2%的质量。多



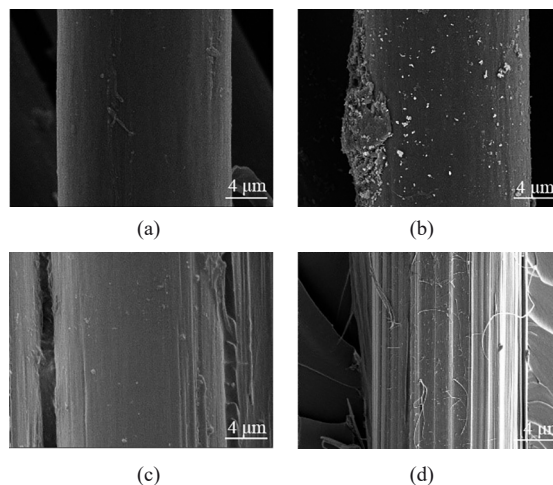
a—改性前后的TG曲线;b—改性前后的DTG曲线

图4 芳纶纤维改性前后的TG曲线

巴胺聚合成的PDA吸附在纤维表面后,质量损失更少,在800℃时的质量更高,残炭率更高,这是因为纤维表面PDA受热碳化后,在纤维表面形成炭层延缓分解。通过图4b也可以看出未改性纤维在543℃时降解速率最快,改性后的纤维在545℃时降解速率最快,且改性后的纤维质量损失速率更小,这说明了PDA成功吸附在纤维表面。

### 2.4 纤维表面及复合材料断面形貌分析

图5是对改性前和改性4h后的纤维和TFBC试样断面的SEM,由图5a可看出改性前的纤维表面



a—芳纶纤维改性前表面;b—芳纶纤维改性后表面;

c—改性前的TFBC试样断面;d—改性后的TFBC试样断面

图5 改性前后的纤维表面和TFBC试样断面SEM图

十分光滑。由图 5b 可看出在聚多巴胺成功吸附在纤维表面后,纤维表面粗糙程度加大,可以和环氧树脂形成机械啮合。由图 5c 可以看出,纤维整体光滑,纤维上的黏附的树脂也较少,表明芳纶纤维和环氧树脂间界面较弱。由图 5d 可看出,改性后的 TFBC 断面中芳纶纤维有更多的树脂残留,且纤维表面发生更多剥离破坏,有更多微纤被拉扯出来,这说明多巴胺改性加强了环氧树脂对芳纶纤维表面的附着,强化了环氧树脂/芳纶纤维的界面性能。

2.5 纤维表面接触角分析

图 6 为改性前和改性 4 h 后的纤维表面接触角,  $\theta$  为左右接触角的平均值。可知改性后纤维的接触角由  $89.18^\circ$  变为了  $76.41^\circ$ ,这是由于纤维经过多巴胺改性后,一方面表面变粗糙,比表面积变大,更易依附留存液体;另一方面,表面极性增大,可与测试液体形成更多氢键连接,以此降低接触角。纤维经过多巴胺改性后,表面润湿性增强,会更易吸附环氧树脂,环氧树脂更易润湿纤维,有利于改善环氧树脂/芳纶纤维间的界面性能。

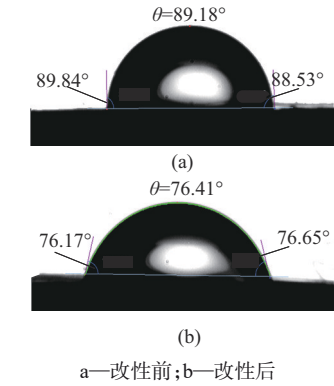


图6 改性前后芳纶纤维的表面接触角

2.6 复合材料力学性能

采用 TFBC 试样的拉伸强度来表征芳纶纤维和环氧树脂间的界面性能。表 2 为多巴胺在不同改性时间下的 TFBC 试样的拉伸强度、拉伸弹性模量和断裂伸长率,可以发现,随着处理时间的延长,复合材料拉伸强度逐步增大,力学性能有了明显的提高。在时间达到 4 h 后,拉伸强度的变化趋于平稳,这是由于芳纶纤维表面堆积的多巴胺趋于饱和。甚至时间过长,强度会有略微下降,这是因为纤维表面涂层过厚易于脱落,反而降低力学性能的稳定性。在改性 4 h 时,复合材料的拉伸强度为 28.34

MPa,而未改性的试样拉伸强度为 22.13 MPa,性能提高了 28.06%。芳纶纤维未改性时试样的拉伸弹性模量为 0.538 GPa,可知随着改性时间的增长,试样的拉伸弹性模量逐步增加,在 4 h 达到最大为 0.617 GPa 后趋于平稳,拉伸弹性模量增强 14.68%,总体而言模量变化不大。芳纶纤维的断裂伸长率随着改性时间的增长而变大,这是由于改性后树脂和纤维的吸附更为紧密,会使得界面处更难以发生破坏,故断裂伸长率的值会变大。

表2 不同改性时间下 TFBC 试样力学性能

| 时间/h | 拉伸强度/MPa | 拉伸弹性模量/GPa | 断裂伸长率/% |
|------|----------|------------|---------|
| 0    | 22.13    | 0.538      | 4.601   |
| 1    | 24.36    | 0.551      | 4.658   |
| 2    | 25.02    | 0.568      | 5.074   |
| 3    | 26.05    | 0.587      | 5.328   |
| 4    | 28.34    | 0.617      | 6.205   |
| 5    | 27.55    | 0.615      | 6.441   |
| 7    | 28.61    | 0.602      | 6.589   |
| 9    | 28.40    | 0.600      | 6.754   |
| 11   | 28.36    | 0.603      | 6.857   |
| 13   | 27.86    | 0.611      | 6.779   |

3 结论

使用多巴胺对 F-3A 芳纶杂环纤维进行表面改性,对改性前和改性 4 h 后的芳纶纤维表面进行化学成分、形貌、润湿性表征,同时研究了不同改性时间对环氧树脂/芳纶纤维界面性能的影响。结论如下:

(1)通过 FTIR、TG 及 XPS 对纤维表面化学成分进行表征,改性后纤维表面出现新的基团,热分解降解速率下降且表面氧元素含量增加。

(2)通过 SEM 对纤维表面形貌进行表征,改性后纤维表面变粗糙,复合材料试样断面附着有更多树脂且纤维发生更多剥离性破坏。

(3)通过接触角测量仪对丝束进行润湿性表征,改性后纤维表面接触角由  $89.18^\circ$  降至  $76.41^\circ$ ,纤维表面润湿性增强,更易吸附环氧树脂。

(4)通过 TFBC 试样拉伸性能表征环氧树脂/芳纶纤维界面性能。使用不同改性时间的芳纶纤维做测试,发现多巴胺改性 4 h 为最佳改性时间,在此条件下试样的拉伸强度比改性前提高了 28.06%,拉伸弹性模量提高了 14.68%。

参考文献

[1] 费有静,裴小兵.论芳纶纤维的应用与发展趋势[J].新材料产业,2019(4):35-38.

- Fei Youjing, Pei Xiaobing. Application and development trend of aramid fiber[J]. *Advanced Materials Industry*, 2019(4):35–38.
- [2] 李婷,王增效,胡祖明,等. 对位芳纶表面改性的最新研究进展[J]. *合成纤维工业*, 2018, 41(6):42–47.
- Li Ting, Wang Zengxiao, Hu Zuming, et al. Latest research progress in surface modification of p-aramid fiber[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2018, 41(6):42–47.
- [3] 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.
- [4] 沈道安,王晓映,夏光美,等. 芳纶的发展现状及其表面改性研究进展[J]. *合成纤维*, 2021, 50(1):20–25.
- Shen Xiaolan, Wang Xiaoying, Xia Guangmei, et al. The development situation of aramid fiber and its surface modification research progress[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2021, 50(1):20–25.
- [5] 王红红,霍倩,周莹莹. 芳纶及其复合材料的制备技术及应用进展[J]. *合成纤维工业*, 2018, 41(3):65–70.
- Wang Honghong, Huo Qian, Zhou Yingying. Progress in production technology and application of aramid fiber and its composite material[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2018, 41(3):65–70.
- [6] Fan W, Tian H X, Wang H H, et al. Enhanced interfacial adhesion of aramid fiber III reinforced epoxy composites via low temperature plasma treatment[J]. *Polymer Testing*, 2018, 72:147–156.
- [7] 潘泽华,高乃奎,李成磊,等. 芳纶纤维表面状态对环氧树脂复合材料力学性能的影响[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(7):15–21.
- Pan Zehua, Gao Naikui, Li Chenglei, et al. Effect of surface condition of aramid fiber on mechanical properties of epoxy resin composites[J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(7):15–21.
- [8] Cheng Z, Chen C, Huang J Y, et al. Nondestructive grafting of PEI on aramid fiber surface through the coordination of Fe (III) to enhance composite interfacial properties[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 401:323–332.
- [9] Yang X, Tu Q Z, Shen X M, et al. A novel method for deposition of multi-walled carbon nanotubes onto poly(p-phenylene terephthalamide) fibers to enhance interfacial adhesion with rubber matrix[J]. *Polymers*, 2019, 11(2):374–389.
- [10] Yang B, Li P, Luo Z, et al. Influence of thermal oxidation and maleinized liquid polybutadiene on dynamic and static performance of short aramid fiber-reinforced carbon black-ethylene propylene diene monomer composites[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(5):2 036–2 045.
- [11] Cheng Z, Han Y T, Luo L B, et al. Grafting degradable coordination polymer on aramid fiber surface to improve its interfacial properties[J]. *Materials Letters*, 2018, 233:102–106.
- [12] Kanbargi N, Lesser A J. Improving adhesion between aramid fibers and natural rubber through morphological and synthetic modification of the fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(24):45 520–45 529.
- [13] Lu Z Q, Hu W J, Xie F, et al. Argon low-temperature plasma modification of chopped aramid fiber and its effect on paper performance of aramid sheets[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(34):45 215–45 223.
- [14] Jia C Y, Zhang R Z, Yuan C C, et al. Surface modification of aramid fibers by amino functionalized silane grafting to improve interfacial property of aramid fibers reinforced composite[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(5):2 046–2 053.
- [15] Jia Z, Duan C M. Preparation and characterization of surface modified ppta fibers by ultrasonic-assisted hydrogen peroxide solutions[J]. *Fibers and Polymers*, 2019, 20(11):2 310–2 316.
- [16] 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.
- [17] Sharma S, Pathak A K, Singh V N, et al. Excellent mechanical properties of long multiwalled carbon nanotube bridged Kevlar fabric[J]. *Carbon*, 2018, 137:104–117.
- [18] Gong X Y, Liu Y Y, Wang Y S, et al. Amino graphene oxide/dopamine modified aramid fibers: Preparation, epoxy nanocomposites and property analysis[J]. *Polymer*, 2019, 168:131–137.
- [19] Sa R N, Yan Y, Wei Z H, et al. Surface modification of aramid fibers by bio-inspired poly(dopamine) and epoxy functionalized silane grafting[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(23):21 730–21 738.
- [20] Chai D L, Xie Z M, Wang Y S, et al. Molecular dynamics investigation of the adhesion mechanism acting between dopamine and the surface of dopamine-processed aramid fibers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(20):17 974–17 984.
- [21] Qi G C, Zhang B M, Du S Y, et al. Estimation of aramid fiber/epoxy interfacial properties by fiber bundle tests and multiscale modeling considering the fiber skin/core structure[J]. *Composite Structures*, 2017, 167:1–10.
- [22] Qi G C, Zhang B M, Du S Y. Assessment of F-III and F-12 aramid fiber/epoxy interfacial adhesions based on fiber bundle specimens[J]. *Composites Part A*, 2018, 112:549–557.