

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.256

# PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 上浆对碳纤维/聚酰胺 6 热塑性复合材料力学性能的影响

黄 焘<sup>1</sup>, 武肖鹏<sup>1</sup>, 宁慧铭<sup>1</sup>, 胡 宁<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

**摘要:**在碳纤维增强热塑性复合材料中, 碳纤维(CF)与热塑性树脂基体间的界面强弱对其整体力学性能有巨大的影响。为改善CF与聚酰胺6(PA6)的界面性能, 利用多巴胺(DA)的聚合与黏附特性, 将纳米相四氧化三铁(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)引入到CF表面进行协同修饰, 通过简单的浸渍共沉积, 利用DA的氧化自聚合在CF表面构建聚多巴胺/纳米四氧化三铁(PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)涂层。对CF改性前后表面微观结构与化学特性进行了表征, 结果表明PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>上浆剂能够显著提高CF表面的粗糙度与化学活性, 加强纤维与树脂基体的机械啮合作用与化学相互作用。与未改性CF/PA6复合材料相比, 制备得到的改性CF/PA6复合材料表现出优异的力学性能, 其弯曲强度、层间剪切强度分别提高了30.8%和29.1%。

**关键词:**碳纤维; 聚酰胺6; 聚多巴胺; 纳米四氧化三铁; 界面性能

中图分类号: TB332; O3 文献标志码: A 文章编号: 1000-582X(2024)08-123-09

## Effect of PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sizing agent on mechanical properties of thermoplastic carbon fiber/polyamide 6 composites

HUANG Tao<sup>1</sup>, WU Xiaopeng<sup>1</sup>, NING Huiming<sup>1</sup>, HU Ning<sup>1,2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

**Abstract:** In carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTP), the strength of the interface between the carbon fiber (CF) and the thermoplastic resin matrix has a significant impact on its overall mechanical properties. To improve the interfacial properties between CF and polyamide 6 (PA6), nano-sized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was introduced to the CF surface for synergistic modification using the polymerization and adhesion characteristics of dopamine (DA). Through simple immersion co-deposition, the poly-dopamine/nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) coating was constructed on the CF surface by oxidative self-polymerization of DA. The microstructure and chemical characteristics of the CF surface before and after modification were characterized. The results show that adding the PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sizing agent significantly improves the roughness and chemical activity of the CF surface, and strengthens the mechanical engagement and chemical interaction between the fiber and resin matrix. Compared with unmodified CF/PA6

收稿日期: 2023-01-12 网络出版日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1864208)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (U1864208).

作者简介: 黄焘(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事CF/PA6复合材料的力学性能研究。

通信作者: 宁慧铭, 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事复合材料力学方向的研究, (E-mail)ninghuiming@cqu.edu.cn。

composites, the prepared modified CF/PA6 composites exhibit excellent mechanical properties, with their bending strength and interlaminar shear strength increased by 30.8% and 29.1%, respectively.

**Keywords:** carbon fiber; polyamide 6; polydopamine; nano- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; interfacial properties

碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有高比强度、高比模量、轻量化、可回收利用等优异性能,已广泛应用于汽车制造、航空航天、智能机械等行业<sup>[1-2]</sup>。聚酰胺6(PA6)成本低、易于加工、抗冲击性能强,常被用作CFRTP的基体材料,碳纤维增强聚酰胺6复合材料在设备轻量化领域已经得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。

在碳纤维增强热塑性复合材料中,碳纤维(CF)与树脂基体间的界面强弱决定了树脂体能否有效地将应力传递到碳纤维增强相。因此,纤维与树脂的界面结合强度决定了CFRTP的力学性能<sup>[4]</sup>。未经处理的碳纤维和热塑性树脂的低表面活性基团使它们具有化学惰性和疏水性,因此,纤维和热塑性树脂基体之间的界面黏合强度通常较低<sup>[5]</sup>。目前,针对CF与PA6的界面结合问题,通过在纤维表面引入不同的活性纳米填料来改善复合材料的界面性能是当前研究的热点,如Cheon等<sup>[6]</sup>利用硅烷偶联剂将多壁碳纳米管(MWCNTs)用于修饰碳纤维表面,改善了CF与PA6基体之间的界面结合,提高了复合材料的层间剪切强度;Ma等<sup>[7]</sup>以六亚甲基二异氰酸酯三聚物(HDI)为偶联剂将石墨烯(GO)接枝到氧化CF表面,显著提高了CF/PA6复合材料的力学性能。与石墨烯和碳纳米管相比,纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 作为成熟的工业化产品,合成方式多,来源广泛,较上述材料具有明显的价格优势,同时纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 是一种应用前景广阔的功能化材料,具有较大的比表面积与活性位点<sup>[8]</sup>,也具有极高的热分解温度,使其完全能够适配CF/PA6复合材料的生产过程。现阶段关于纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 对纤维增强热塑性复合材料界面力学性能影响的研究较少,尤其是纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 对CF/PA6复合材料界面力学性能的影响。

传统的偶联剂上浆方法引入纳米粒子的方式需要在改性过程中执行复杂的程序和严格的条件,会产生挥发性有机化合物(VOC),如甲醇、乙醇等,不利于绿色可持续发展<sup>[9]</sup>,因此,迫切需要研究一种更加绿色便捷的方式将纳米粒子均匀引入到CF表面。作为一种仿生材料,多巴胺(DA)及其衍生物可以在极其温和的条件下自聚合,并在大多数类型的基材上产生黏性聚多巴胺(PDA)<sup>[10]</sup>。聚多巴胺结构中含有大量的一OH与一 $\text{NH}_2$ 可以用于接枝反应,是良好的二级反应平台<sup>[11]</sup>。笔者利用多巴胺的自聚合在CF表面引入了聚多巴胺与纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 涂层,采用一种绿色简单温和的方式对CF表面进行改性,制备得到改性CF/PA6复合材料,使用SEM与XPS等手段研究了纤维表面的微观与化学结构,通过弯曲试验和层间剪切实验研究了PDA/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 上浆对CF/PA6复合材料力学性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与试剂

聚酰胺6(PA6)薄膜:中山市华亿塑胶制品有限公司制(德国巴斯夫B3S);碳纤维织物:DSCCP-200,山东鼎晟复合材料有限公司制;盐酸多巴胺:上海阿拉丁生化科技股份有限公司制,纯度98%;三羟甲基氨基甲烷-盐酸:上海阿拉丁生化科技股份有限公司制,纯度99%;纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 分散液:上海麦克林生化科技有限公司制,质量分数25%。

### 1.2 仪器与设备

集热式恒温加热磁力搅拌器:上海予申仪器有限公司生产,型号DF-101S;真空干燥箱:上海一恒科学仪器有限公司生产,型号DZF-6050;扫描电子显微镜(SEM):日本HITACHI公司生产,型号TM4000Plus II;扫描电子显微镜(SEM):日本HITACHI公司生产,型号TM4000Plus II;X射线光电子能谱仪(XPS):美国Thermo Scientific公司生产,型号K-Alpha;小型硫化机:上海德弘橡塑机械有限公司生产,型号XLB-D350;真空干燥箱:上海齐欣科学仪器有限公司生产,型号DZF-6020;成型模具:自主设计;电子万能试验机:深

圳市兰博三思材料检测公司生产,型号 LD26-105。

### 1.3 碳纤维表面处理与改性

#### 1.3.1 碳纤维表面脱浆处理

选用碳纤维编织布作为热塑性复合材料的增强相,为了去除编织碳布表面自带的商用上浆剂,进行高温脱浆处理。将编织碳布置于管式炉中,在 Ar<sub>2</sub> 保护气氛中以 5 °C/min 的升温速率至 600 °C 脱浆处理 2 h,高温脱浆处理后用无水乙醇浸泡洗涤 3 次,再置于 60 °C 真空烘箱中烘干备用,将脱浆处理的碳布记为 CF。

#### 1.3.2 碳纤维表面改性处理

通过氧化-自聚合的方法将盐酸多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 溶液黏附在编织碳布表面。首先,配置 pH 为 8.5 的三羟甲基氨基甲烷-盐酸(Tris-HCl)缓冲溶液;随后,将盐酸多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 溶液加入到缓冲溶液中配置混合上浆溶液,混合上浆溶液中盐酸多巴胺质量浓度为 2 mg/mL,纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 质量浓度为 1 mg/mL,用于浸渍高温脱浆后的编织碳布;碳布在上浆溶液中反应 12 h 后取出,反复用去离子水浸泡清洗,去除未参与反应的聚多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>;最后,将样品置于 60 °C 真空烘箱中烘干备用。将由纯多巴胺改性的碳布记为 CF/PDA,经多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 协同改性的碳布记为 CF/PF。2 种纤维上浆方式的示意图如图 1 所示。

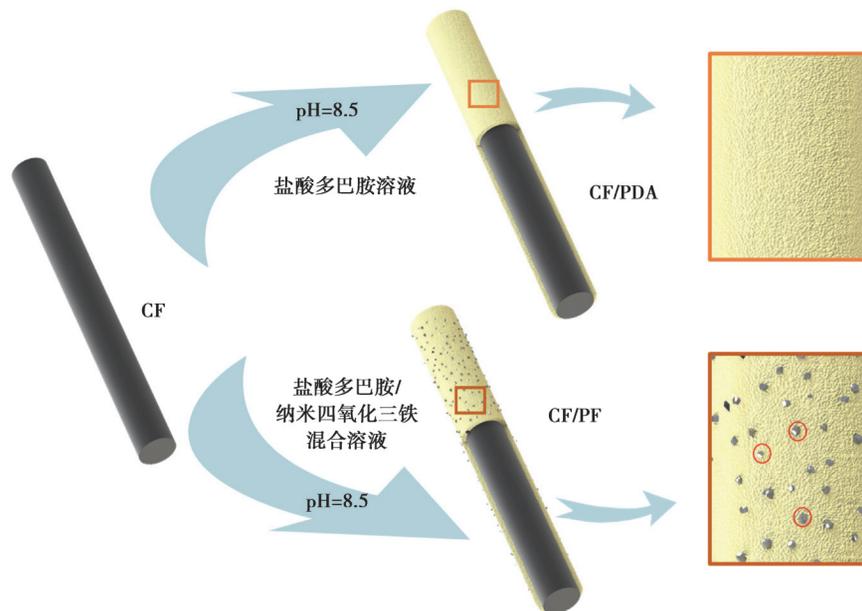


图 1 碳纤维表面改性处理

Fig. 1 Surface modification of carbon fiber

#### 1.4 碳纤维/聚酰胺 6 复合材料的制备

采用叠层模压法制备 CF/PA6 复合材料层合板。将试验所需的碳纤维编织布与 PA6 薄膜在真空烘箱中 90 °C 干燥 48 h,并将其裁剪为自制不锈钢模具相对应的尺寸(140 mm×140 mm),依次在模具中交替铺设碳纤维编织布与聚酰胺 6 薄膜。设定材料的成型温度为 250 °C,成型压力为 2 MPa,保温时间 10 min 后自然冷却至室温。将制备得到 3 种厚度约为 2 mm 的碳纤维/聚酰胺 6 复合材料,分别标记为 CF/PA6(未经改性的碳纤维/聚酰胺 6 复合材料)、CF/PDA/PA6(经盐酸多巴胺改性的碳纤维/聚酰胺 6 复合材料)和 CF/PF/PA6(经盐酸多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 协同改性的碳纤维/聚酰胺 6 复合材料)。碳纤维/聚酰胺 6 复合材料的制造工艺示意图如图 2 所示。

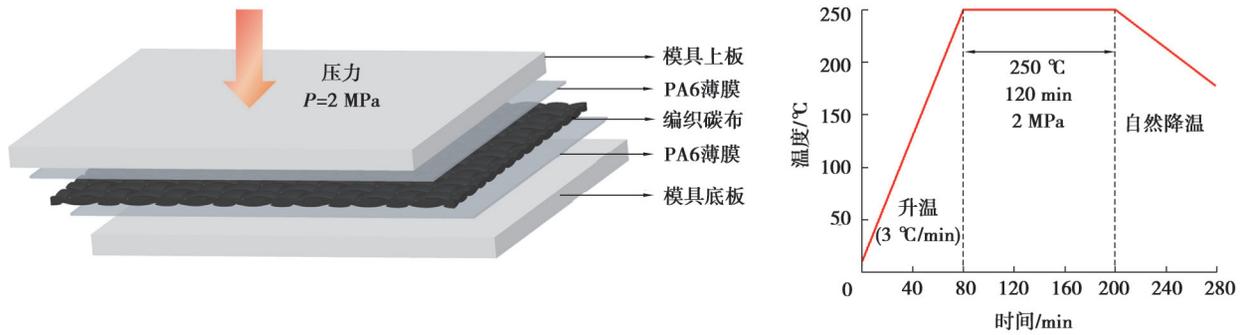


图2 薄膜叠层模压成型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thin film lamination molding

## 1.5 材料表征及性能测试

### 1.5.1 扫描电子显微镜(SEM)表征

通过扫描电子显微镜(SEM, TM4000Plus II, 日本 HITACHI)观察碳纤维改性前后的表面形貌变化。

### 1.5.2 傅里叶变换红外光谱(XPS)表征

通过X射线光电子能谱(XPS, Kratos Axis Ultra Hybrid, 日本岛津)表征了纤维的化学构成与官能团, 结合能峰以 284.8 eV 的 C1s 为基准进行校准。

### 1.5.3 动态热机械分析(DMA)测试

采用动态热机械分析仪(DMA, DMAQ850, 美国 TA)研究碳纤维/聚酰胺6复合材料的黏弹性能。采用单悬臂法测试了尺寸为 30 mm×5 mm×2.2 mm 矩形复合材料层合板在 30~140 °C 下的动态储能模量和损耗模量, 加热速率为 3 °C/min, 固定频率为 1 Hz, 振幅为 0.006 mm, 取样间隔为 5 °C 1次, 最大动态力为 2 N。

### 1.5.4 力学性能测试

使用力学拉伸试验机(LD26-105, 深圳兰博三思材料)对制备得到的碳纤维/聚酰胺6复合材料进行弯曲性能测试与层间剪切测试, 尺寸分别参考 ASTM-D7264 和 ASTM-D2344 标准对试验件进行加工, 弯曲与压缩力学性能测试示意图如图3所示。试验过程中, 弯曲与压缩速度均为 1 mm/min, 在载荷下降后停止实验, 每组试样测试 5 个样品并取其平均值。

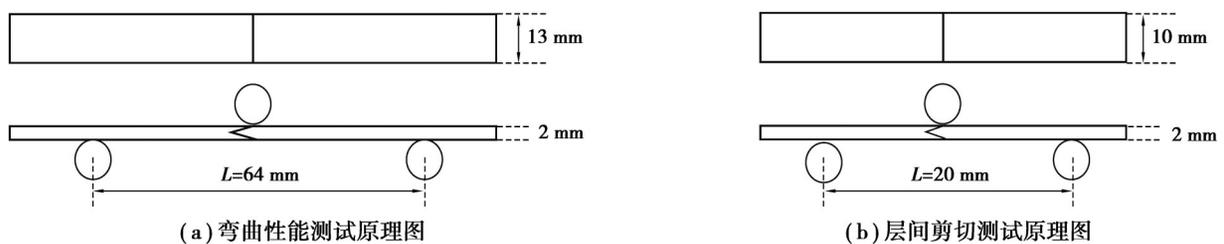


图3 力学性能测试原理图

Fig. 3 Mechanical properties test

## 2 结果与分析

### 2.1 碳纤维的表面形貌

通过 SEM 观察改性前后碳纤维的表面形貌, 如图 4(a) 所示, 经脱浆处理的原始 CF 表面比较光滑, 不利于纤维与树脂的结合。从图 4(b) 可以发现, 经多巴胺改性后的碳纤维表面变粗糙, 说明了 PDA 涂层的成功引入。观察图 4(c) 可以发现, 纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  在 CF 表面分布均匀, 在观测区域内几乎没有发现团聚现象。加入纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  后, 可以为 CF/PA6 复合材料界面提供更多的反应位点, 有利于树脂与纤维的物理与化学结合, 利于

涂层表面活跃基团与树脂中活跃基团(如酰胺基团)形成氢键,也有利于树脂与纤维的机械啮合,通过该 SEM 表征结果,可以证明在 CF 表面成功构建了 PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 涂层。

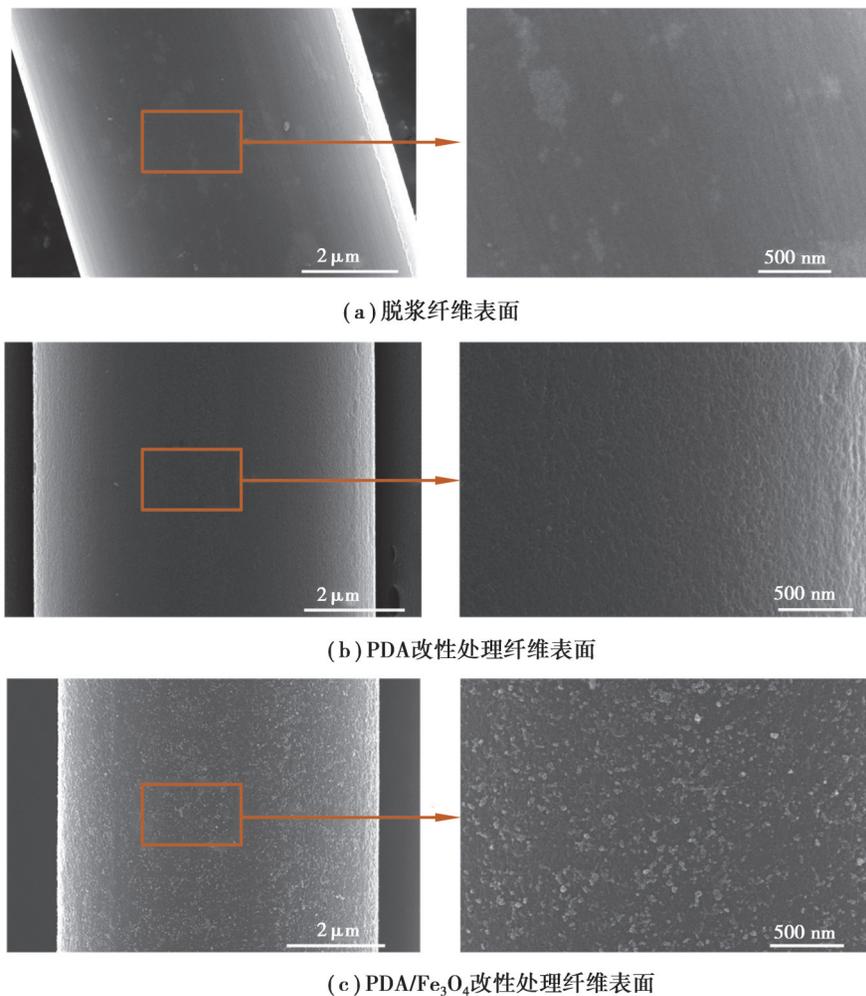


图 4 改性前后碳纤维表面 SEM 图

Fig. 4 SEM images of carbon fiber surface before and after modification

## 2.2 碳纤维表面化学分析

使用 X 射线光电子能谱(XPS)分析了上浆剂对碳纤维表面元素含量与化学键的影响。由 XPS 全谱图得到不同处理方式的元素构成如表 1 所示。对于经过高温脱浆处理后的碳纤维,C、N、O 的元素原子比例分别为 81.81%,1.06%,17.13%,表明碳纤维表面主要由 C、O 与少量的 N 元素组成;而经过上浆处理后,无论是单独的聚多巴胺上浆,还是聚多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合上浆,碳纤维表面的 N 元素含量都得到了较大提升,分别提升至 7.68%与 7.19%。同时,在 CF/PF 样品上,成功检测到 Fe 元素,含量为 1.92%。上述结果表明在碳纤维表面上成功引入了富含 N 元素的聚多巴胺涂层,也证明了纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粒子的成功黏附。

表 1 改性前后碳纤维表面元素含量

纤维	C	N	O	Fe	%
CF	81.81	1.06	17.13		
CF/PDA	75.14	7.68	17.18		
CF/PF	68.74	7.19	22.15	1.92	

对3种纤维的XPS光谱中的C1s与N1s谱图进行分峰拟合,进一步得到3种纤维中化学键与化学结构的关系。如图5所示,脱浆CF的C1s谱图可以拟合为3个峰,分别对应为C—C键(284.81 eV),C—O键(286.69 eV)和O=C—O键(288.78 eV);PDA与PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>2种上浆处理的改性CF测试得到相似的C1s谱图,可拟合为5个特征基团峰,分别为C—C键,C—N键,C—O键,O=C—O键与 $\pi$ - $\pi$ 键<sup>[12-13]</sup>,新出现的C—N键与 $\pi$ - $\pi$ 键证明了多巴胺在CF表面黏附。在N1s谱图中(见图6),原始CF只存在很弱的一NH峰,CF—P与CF—PF表面存在—NH<sub>2</sub>(398.5 eV)、—NH(399.8 eV)和—N= (401.3 eV)对应的3个峰<sup>[14]</sup>。上述结果表明,实验已经成功地在碳纤维表面沉积PDA与纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,并在CF表面引入了大量胺基、亚胺基等含N活性基团,可以为界面黏附提供更多活性位点,从而增强CF与PA6的化学结合。

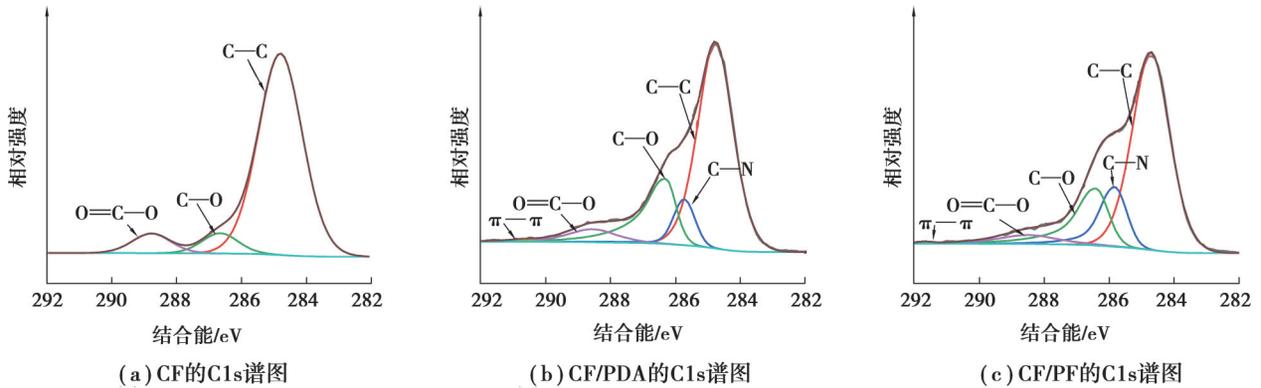


图5 改性前后碳纤维XPS的C1s谱图

Fig. 5 C1s spectra of carbon fiber XPS before and after modification

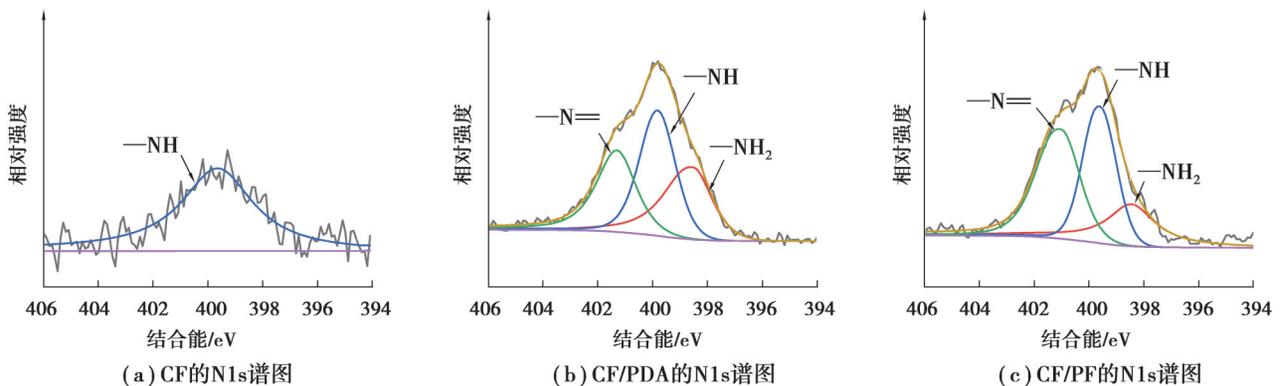


图6 改性前后碳纤维XPS的N1s谱图

Fig. 6 N1s spectra of carbon fiber XPS before and after modification

### 2.3 碳纤维/聚酰胺6复合材料的动态力学性能

通过DMA动态力学测试,在程序控温和周期性交变应力作用下,测量材料随温度变化的储能模量与损耗模量,用于间接评估CF/PA6复合材料的界面。复合材料的动态力学分析(DMA)曲线如图7所示。储能模量与损耗模量越高,复合材料的界面越强<sup>[15]</sup>。在图7(a)可以观察到,相同温度下改性CF制备得到的复合材料的储能模量较原始脱浆CF高,说明2种涂层均能够有效限制聚酰胺6树脂在界面相的流动性,对复合材料界面具有强化作用,从而表现出良好的界面性能<sup>[16]</sup>。如图7(b)所示,在相同温度范围内,3种复合材料的损耗模量表现出与储能模量相同的趋势,引入PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的复合材料具有最高的损耗模量(544 MPa)。这说明2种涂层均加强了碳纤维和聚酰胺6基体之间的相互作用,有效限制了聚酰胺6分子的运动。通过DMA测试得到,经PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>涂层改性材料的储能模量与损耗模量较脱浆原始纤维层合板分别提高了34.9%与29.7%,可以认为PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>涂层是3种复合材料中表现最强的界面结合。

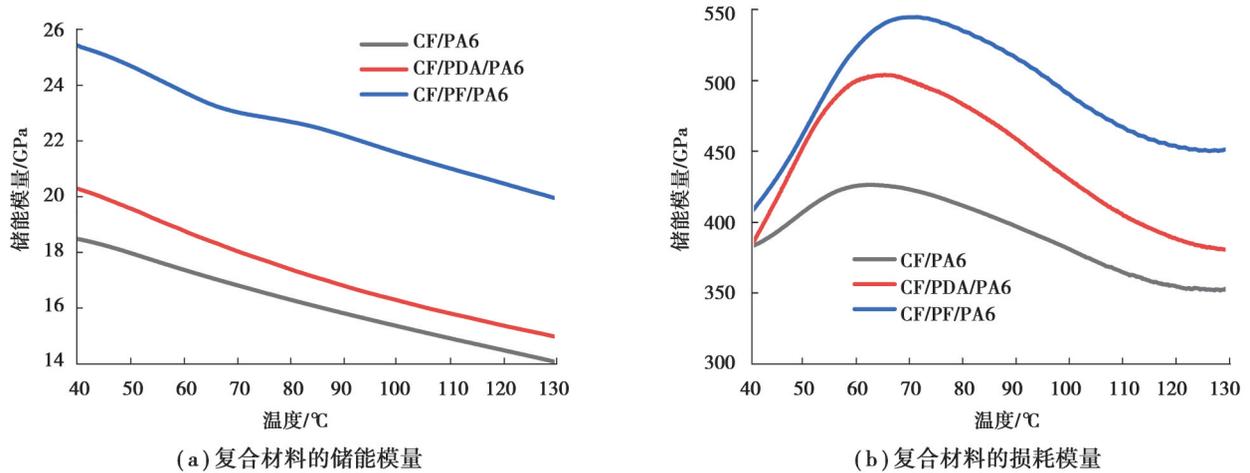


图 7 CF/PA6 复合材料的动态力学性能对比

Fig. 7 Dynamic mechanical properties of CF/PA6 composites

### 2.4 碳纤维/聚酰胺 6 复合材料的力学性能

为了探讨制备的上浆剂对 CF/PA6 复合材料力学性能的影响,参考 ASTM-D7264 与 ASTM-D2344 标准测试了复合材料层合板的层间剪切性能与弯曲性能。

层间剪切强度可以有效反映纤维与基体的结合质量<sup>[17]</sup>,图 8(a)与图 8(b)分别为层间剪切实验的位移-载荷曲线和层间剪切强度对比柱状图。商用碳布制备得到的复合材料层间剪切性能较差,仅为 20 MPa,说明该种纤维自带的商用上浆剂与聚酰胺 6 树脂不匹配,传统的商用环氧上浆剂不利于纤维与聚酰胺 6 树脂的结合。为研究 PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 涂层对复合材料的影响,以脱浆处理的复合材料层间剪切强度 50.5 MPa 为基准进行比较。经 PDA 涂层处理后,层合板的层间剪切强度为 55.2 MPa,纯 PDA 涂层对复合材料层合板层间性能提升的主要原因是多巴胺自聚合后残余胺基官能团与 PA6 树脂中的酰胺基团可能会产生强烈的氢键结合<sup>[18]</sup>,同时,该涂层也增加了纤维的粗糙度,更有利于 PA6 树脂与纤维表面形成机械啮合作用。经多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 上浆处理后,层间剪切强度为 65.2 MPa,较原始脱浆纤维聚酰胺复合材料提升 14.7 MPa(29.1%)。

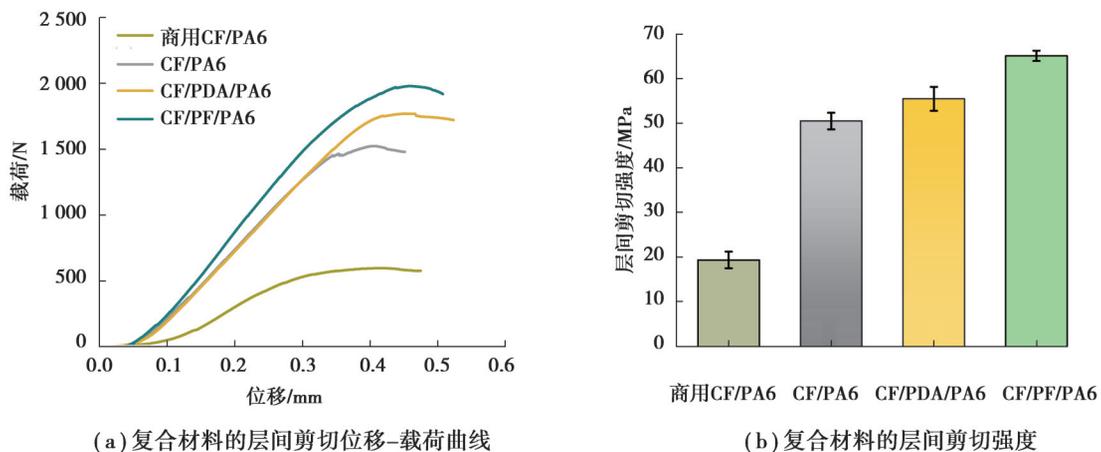
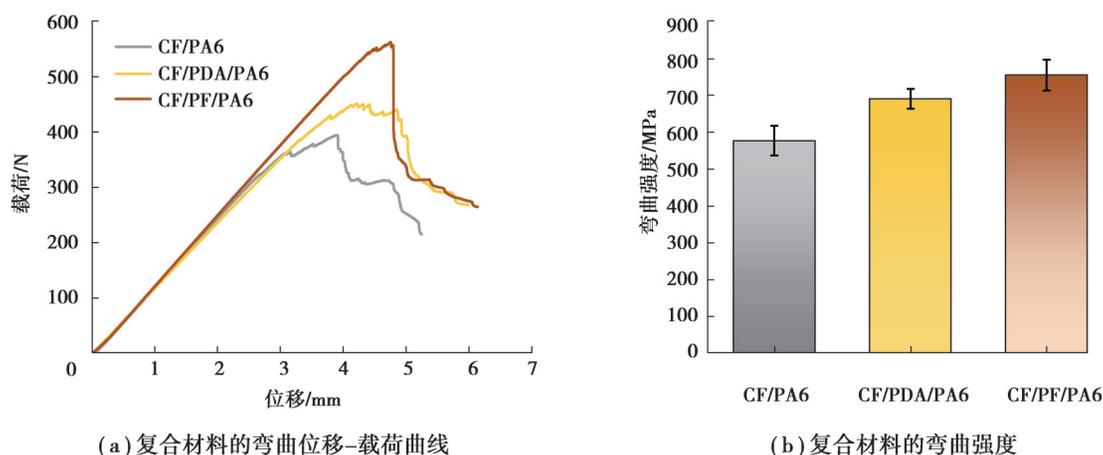


图 8 CF/PA6 复合材料的层间剪切性能

Fig. 8 Interlaminar shear properties of CF/PA6 composites

测试得到的各类纤维聚酰胺复合材料层合板弯曲强度如图 9 所示,与上述层间剪切性能类似。经脱浆处理得到的复合材料弯曲性能为 577.1 MPa,PDA 涂层处理后层合板的弯曲性能由 577.1 MPa 提升到 690.45 MPa,经多巴胺与纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 上浆处理后,复合材料弯曲性能提升明显,提升到 754.9 MPa,较脱浆纤维复合材料相比提升了 177.8 MPa(30.8%)。



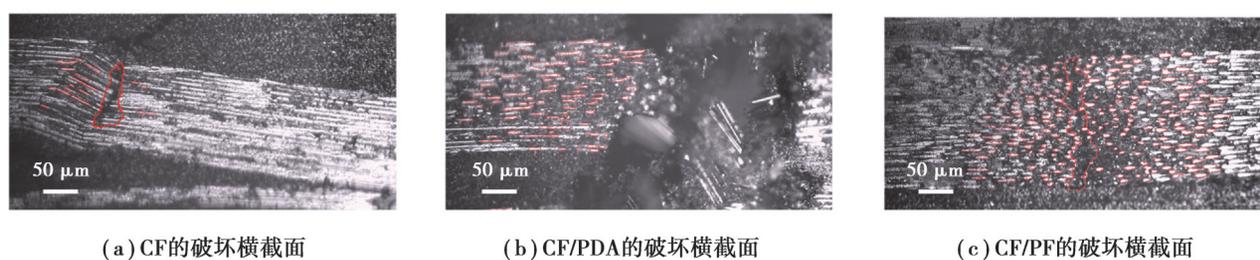
(a) 复合材料的弯曲位移-载荷曲线

(b) 复合材料的弯曲强度

图9 CF/PA6复合材料的弯曲性能

Fig. 9 Bending properties of CF/PA6 composites

上述数据分析表明,改性处理后复合材料表现出更好的宏观力学性能,这是由于未改性碳纤维复合材料表面光滑,仅存在少量活性官能团,导致纤维与树脂的结合能力差,力学性能低。经PDA改性后,碳纤维表面粗糙度增加,提高了纤维与树脂的机械啮合作用;同时,引入多种活性官能团如 $-\text{NH}_2$ 、 $\pi-\pi$ 键等,能够与PA6基体产生强烈的氢键与分子链缠结作用,界面在破坏时可以吸收更多能量,有利于提高材料的宏观力学性能<sup>[18]</sup>。PDA/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 改性碳纤维后,在纤维表面形成的PDA涂层上均匀分布球状纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,进一步增大了碳纤维表面的比表面积,为CF与PA6基体提供了更多的黏附位点。图10为3种复合材料在弯曲破坏后中间区域的破坏横截面,3种复合材料在弯曲破坏时均出现了纤维断裂,这是由于纤维与基体的断裂应变不匹配造成的。当纤维能够承受的极限载荷一定时,由应力传递理论 $F_{\max}=\tau \cdot s \cdot \pi d^2$ ( $s$ 为纤维的表面积, $d$ 为纤维的半径)可得,界面能够传递的应力 $\tau$ 越大,纤维断裂后表面积就越小。因此,观察纤维的破碎程度也可以在一定程度上反映界面传递载荷的能力<sup>[19]</sup>。纤维与树脂的界面结合越好,单位面积能够传递的载荷越大,纤维在破坏时的剩余表面积越小。从图10纤维渐进的破碎程度可以看出,在引入PDA与刚性更强的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 粒子后,过渡层的模量增大,外部载荷能够更好地通过该涂层从PA6基体传递到CF<sup>[20]</sup>。这种简单的自聚合涂层改性碳纤维方法使得碳纤维增强聚酰胺6复合材料提升了约30%的弯曲与层间剪切强度。



(a) CF的破坏横截面

(b) CF/PDA的破坏横截面

(c) CF/PF的破坏横截面

图10 CF/PA6复合材料的弯曲破坏横截面

Fig. 10 Bending failure cross section of CF/PA6 composites

### 3 结论

采用一种绿色简单的方法,利用多巴胺(DA)在弱碱性环境下的自聚合,在碳纤维表面构建了PDA/纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 涂层,制备得到了改性碳纤维。采用模压成型法制备了连续长纤维聚酰胺复合材料,随着PDA涂层的引入,纤维的表面粗糙度增加,同时,引入了活跃的含氮基团,能够与PA6树脂中的酰胺基团形成强烈的氢键结合,有利于纤维与树脂基体界面性能的改善;在加入纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 后,界面层的粗糙度进一步提高,同时,刚性纳米颗粒能够提高界面层的过渡模量,更加利于应力在树脂基体和纤维之间的传递,这使得复合材料的力学

性能进一步提升,最终制备的 PDA/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 改性复合材料的弯曲性能与层间剪切性能达到 754.9 MPa 和 65.2 MPa,相对未处理的复合材料层合板分别提升了 30.8% 和 29.1%。

### 参考文献

- [ 1 ] Ma Z Y, Pu Y C, Huang Y D, et al. Improvement in interface and mechanical properties of CF/poly(ether-imide) and CF/poly(ether-ether-ketone) by aqueous sizing of reactive cationic poly(amide-imide) with catechol pendant groups on CF[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 230: 109754.
- [ 2 ] Wegmann S, Rytka C, Diaz-Rodenas M, et al. A life cycle analysis of novel lightweight composite processes: reducing the environmental footprint of automotive structures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129808.
- [ 3 ] Kondo M Y, Montagna L S, de Melo Morgado G F, et al. Recent advances in the use of Polyamide-based materials for the automotive industry[J]. *Polimeros*, 2022, 32(2): 20220042.
- [ 4 ] Zheng H, Li Q J, Yu C Y, et al. The direct architecture of carbon fiber-carbon nanofiber hierarchical reinforcements for superior interfacial properties of CF/epoxy composites[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2019, 30(3): 620-630.
- [ 5 ] Ren T N, Zhu G M, Zhang C S, et al. Improving the interface of carbon-fibre-reinforced poly(ether-ether-ketone) composites with fibre surface coating: a review[J]. *Polymer International*, 2022, 71(7): 741-750.
- [ 6 ] Cheon J, Kim M. Impact resistance and interlaminar shear strength enhancement of carbon fiber reinforced thermoplastic composites by introducing MWCNT-anchored carbon fiber[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 217: 108872.
- [ 7 ] Ma Y Y, Yan C, Xu H B, et al. Enhanced interfacial properties of carbon fiber reinforced polyamide 6 composites by grafting graphene oxide onto fiber surface[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 452: 286-298.
- [ 8 ] Mohammed L, Gomaa H G, Ragab D, et al. Magnetic nanoparticles for environmental and biomedical applications: a review[J]. *Particuology*, 2017, 30: 1-14.
- [ 9 ] Xiao Y K, Zou H, Zhang L Q, et al. Surface modification of silica nanoparticles by a polyoxyethylene sorbitan and silane coupling agent to prepare high-performance rubber composites[J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106195.
- [ 10 ] Han W, Zhang H P, Tavakoli J, et al. Polydopamine as sizing on carbon fiber surfaces for enhancement of epoxy laminated composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 107: 626-632.
- [ 11 ] Wu Q, Wan Q Q, Yang X, et al. Effects of chain length of polyether amine on interfacial adhesion of carbon fiber/epoxy composite in the absence or presence of polydopamine bridging platform[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 547: 149162.
- [ 12 ] Szabó L, Imanishi S, Hirose D, et al. Mussel-inspired design of a carbon fiber-cellulosic polymer interface toward engineered biobased carbon fiber-reinforced composites[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(42): 27072-27082.
- [ 13 ] Wu D L, Sun X Y, Liu X D, et al. Simple-effective strategy for surface modification via annealing treatment polydopamine coating[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 567: 150813.
- [ 14 ] Xu N, Chen S H, Liu Y Y, et al. Dramatically improving the interfacial adhesion of CF/epoxy composite through synergistic deposition of silver nanoparticles and polydopamine[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 602: 154309.
- [ 15 ] Liu Y, Fang Y C, Liu X L, et al. Mussel-inspired modification of carbon fiber via polyethyleneimine/polydopamine co-deposition for the improved interfacial adhesion[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 151: 164-173.
- [ 16 ] Yan F, Liu L, Li K X, et al. A novel  $\pi$  bridging method to graft graphene oxide onto carbon fiber for interfacial enhancement of epoxy composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 201: 108489.
- [ 17 ] Wang Z Y, Guo H J, Zhou H, et al. Effect of the chain structure of self-emulsifying polyester sizing agent on ILSS of carbon fiber/unsaturated polyester resin composites[J]. *Polymers*, 2019, 11(9): 1528.
- [ 18 ] Gao L X, Yan F, Dai S T, et al. Synthesis of hyperbranched polyurethane sizing agent with high-solid content via self-catalytic method for improving interfacial adhesion of CF/PA6 composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 228: 109664.
- [ 19 ] Heim D, Hartmann M, Neumayer J, et al. Novel method for determination of critical fiber length in short fiber carbon/carbon composites by double lap joint[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 54: 365-370.
- [ 20 ] Wang X, Gong L X, Tang L C, et al. Temperature dependence of creep and recovery behaviors of polymer composites filled with chemically reduced graphene oxide[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 69: 288-298.

(编辑 郑 洁)