

# 基于等离子体改性的碳纤维/聚酰亚胺 复合材料界面性能研究

曹鹏宇\*, 李娜, 王凯, 李昕洋  
(航天特种材料及工艺技术研究所, 北京 100074)

**摘要:**分别采用 O<sub>2</sub> 等离子体和 Ar 等离子体对两种具有不同表面特征的碳纤维进行改性处理,通过 SEM、AFM、XPS、微脱粘测试等方法系统研究了等离子体改性对碳纤维表面物理化学特性及聚酰亚胺复合材料界面结合性能的影响。结果表明,碳纤维在等离子体刻蚀下形成微小沟槽并使得原有沟槽加深,表面粗糙程度增大,活性官能团含量最高分别提升 38.99% 和 36.85%。等离子体处理后碳纤维/聚酰亚胺复合材料界面结合性能均明显增强,其中 O<sub>2</sub> 等离子体表现出最优的界面改性效果,对应两种纤维的界面剪切强度分别提高 19.24% 和 23.58%。最后,结合界面剥脱断口的微观形貌及碳纤维表面物理化学特性变化,深入探究了界面改性机理。结果表明,等离子体处理通过物理啮合及化学键合的协同作用有效提高了碳纤维/聚酰亚胺界面性能。

**关键词:**等离子体;碳纤维改性;聚酰亚胺复合材料;界面性能

中图分类号:TB33

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0245-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.046

## Study on interfacial properties of plasma modified carbon fiber/polyimide composites

CAO Peng-yu\*, LI Na, WANG Kai, LI Xin-yang

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Two kinds of carbon fiber with different surface characteristics are modified by O<sub>2</sub> plasma and Ar plasma, respectively. The influences of plasma modification on the surface physical and chemical properties of carbon fiber, and the interfacial bonding properties of polyimide composite are studied by means of SEM, AFM, XPS and micro-bond test. It is shown that micro-grooves are formed on carbon fiber under plasma etching, and the original grooves on carbon fiber are also deepened. The surface roughness of carbon fiber is enhanced obviously, and the content of active functional groups increases by 38.99% and 36.85%, respectively. After plasma treatment, the interfacial bonding performance of the carbon fiber/polyimide composite improves significantly, and O<sub>2</sub> plasma shows the better interface modification effect, which makes the interface bonding strength of the two kinds of carbon fiber increase by 19.24% and 23.58%, respectively. Combined with the micro-morphology of the interface fracture and the changes in the surface physicochemical properties of carbon fiber, the mechanism of interface modification is deeply explored. It is verified that plasma treatment effectively improves the interface properties of carbon fiber/polyimide composite through the synergistic effect between physical interlocking and chemical bonding.

**Key words:** plasma treatment; carbon fiber modification; polyimide composite; interfacial properties

碳纤维增强树脂基复合材料凭借其高强度、低密度、可设计性强等诸多优异性能广泛应用于航空航天等领域<sup>[1-4]</sup>。随着应用领域对材料耐温等级的要求不断提升,聚酰亚胺复合材料得到了进一步地研究及应用,尤其是热固性聚酰亚胺树脂,其较高的交联密度和刚性的分子结构赋予复合材料高的热稳定性、优异的高低温力学性能、良好的耐腐蚀性等诸多优势,因此在高温服役环境下可作为承力结构件使用,成为重要的耐高温树脂基复合材料<sup>[5-7]</sup>。

复合材料界面性能是影响其宏观力学性能的关键因素,鉴于碳纤维表面化学反应活性低,研究人员

发现碳纤维改性是优化复合材料界面性能的有效途径<sup>[8-11]</sup>。改性方法包括表面氧化法、等离子体处理、接枝改性法、涂层法等<sup>[12-14]</sup>,其中等离子体处理改性具有易于操作,对纤维损伤小,适合连续生产等优势,具有广阔的工程应用前景。

等离子体处理通过高能量粒子作用在碳纤维表面形成部分物理刻蚀缺陷,并在纤维表面引入含氧活性官能团,从而改善其表面粗糙特性和化学活性,有利于碳纤维与树脂的界面结合<sup>[15-19]</sup>。Boroj等<sup>[20]</sup>采用 O<sub>2</sub> 等离子体处理碳纤维,研究发现碳纤维/环氧复合材料层间剪切强度(ILSS)最高提升

31.04%。Lu 等<sup>[21]</sup>的研究表明,等离子体处理有效活化了碳纤维,粗糙度及活性官能团含量显著增加,通过探索等离子体处理条件,发现 Ar、空气混合等离子体处理 1 min 后碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的界面改性效果最为显著,界面剪切强度(IFSS)提升 41.01%。Chang 等<sup>[22]</sup>研究了等离子体对碳纤维增强尼龙 6 复合材料界面性能的影响,拉伸断口形貌观测结果表明,碳纤维经过等离子体处理后与基体树脂表现出更优异的界面粘结性能。然而,由于聚酰亚胺复合材料成型温度高工艺复杂,界面性能优化表征方法难度大,关于等离子体改性处理碳纤维表面及聚酰亚胺复合材料界面性能优化的研究相对较少。

着眼于碳纤维增强热固性聚酰亚胺复合材料界面性能强化,采用 O<sub>2</sub> 等离子体和 Ar 等离子体对碳纤维进行表面改性,分别使用了表面光滑和具有沟槽结构的两种碳纤维,研究不同表面特征碳纤维的物化特性及界面强化模式。通过碳纤维表面物理形貌、表面粗糙度、化学作用等角度对表面改性碳纤维进行表征,剖析碳纤维/聚酰亚胺复合材料界面结合性能变化及规律。旨在探索一类方便高效的碳纤维表面改性方法,为实际工业应用提供理论和技术支撑。

## 1 材料与仪器

### 1.1 材料

实验采用了两种碳纤维:T700 碳纤维,日本东丽公司生产;国产 T700 级碳纤维,中简科技股份有限公司生产;基体聚酰亚胺树脂,中国科学院宁波材料研究所生产。

### 1.2 仪器

扫描电子显微镜(SEM, JSM 6010),日本电子株式会社 JEOL 生产;原子力显微镜(AFM, ICON),美国 Veeco 公司生产;X 射线光电子能谱仪(XPS, ESCALab250Xi),英国 Kratos 公司生产;低压等离子体处理装置(SP-I),中国科学院微电子研究所生产;微脱粘测试装置(HM410),北京航空航天大学生产。

## 2 实验方法

### 2.1 碳纤维预处理

碳纤维预先在丙酮中冷凝回流去除表面上浆剂,处理条件为 70℃、2 h,以排除上浆剂对碳纤维表面状态的影响。T700 碳纤维去浆后编号为 CF1,国

产 T700 级碳纤维去浆后编号为 CF2。

### 2.2 等离子体处理

根据文献<sup>[16]</sup>研究的等离子体处理时间与效果的对应关系,优选处理条件为真空度 10 Pa、功率 100 W、处理时间 3 min。分别使用氧气(O<sub>2</sub>)等离子体和氩气(Ar)等离子体对碳纤维表面进行处理,根据处理气氛的不同,分别对应编号为 CF1-O<sub>2</sub>、CF1-Ar、CF2-O<sub>2</sub>、CF2-Ar。

### 2.3 性能表征

SEM 观察:碳纤维表面物理形貌及剥脱断口形貌通过 SEM 分析,样品表面喷金处理,加速电压为 5 kV。

AFM 表征:碳纤维表面粗糙度采用 AFM 表征,通过自带软件测量样品粗糙度,包括均方根粗糙度(Rq)和平均粗糙度(Ra)。

XPS 分析:碳纤维表面元素分析通过 XPS 进行考察,测定表面化学元素种类及含量,采用 XPSPEAK 分峰软件拟合 C1s 峰。

微脱粘测试:分离碳纤维单丝,利用高温胶带将单丝两端固定于 C 型铁片上。将聚酰亚胺树脂溶于二氧六环和 N,N-二甲基乙酰胺混合溶剂中,加热至 110℃ 搅拌 4 h 进行溶解,将溶解的聚酰亚胺树脂微滴于碳纤维单丝上,试样置于高温烘箱中分别在 180℃ 保温 10 min 和 370℃ 保温 30 min,完成固化,制备试样如图 1 所示。

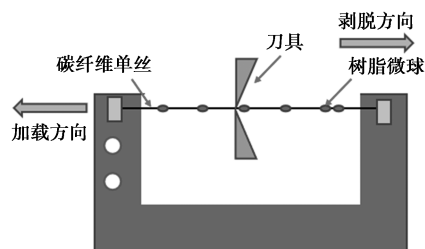


图 1 碳纤维/聚酰亚胺微脱粘测试试样示意图

复合材料界面剪切强度(IFSS)通过微球脱粘法进行测试,测试速度 0.05 mm/min,根据下述公式计算界面剪切强度:

$$\tau = F/2\pi rd \quad (1)$$

式中: $F$  为树脂微球脱粘瞬间的界面载荷, $r$  为碳纤维半径, $d$  为树脂微球长度。

## 3 结果与分析

### 3.1 碳纤维表面物理形貌

从图 2(a)中可以看出,未处理的 CF1 表面光滑不含沟槽,呈现出典型的干喷湿纺碳纤维表面形

貌<sup>[23-24]</sup>。等离子体处理后的 CF1-O<sub>2</sub>、CF1-Ar 的表面局部均出现微小沟槽,如图 2(b)和图 2(c)所示,说明等离子体处理对碳纤维产生物理刻蚀。然而,这种刻蚀效果相对不明显,体现为沟槽特征较浅,并未破坏碳纤维的内部结构。另一方面,图 2(d)表明未处理的 CF2 表面分布明显的轴向沟槽,表面凹凸不平,为典型的湿法纺丝碳纤维的表面形貌。CF2-O<sub>2</sub>、CF2-Ar 的 SEM 观察结果如图 2(e)和图 2(f)所示,原有沟槽在等离子体处理后进一步加深,这一现象与 CF1 被等离子体处理前后的表面形貌改变趋势一致。

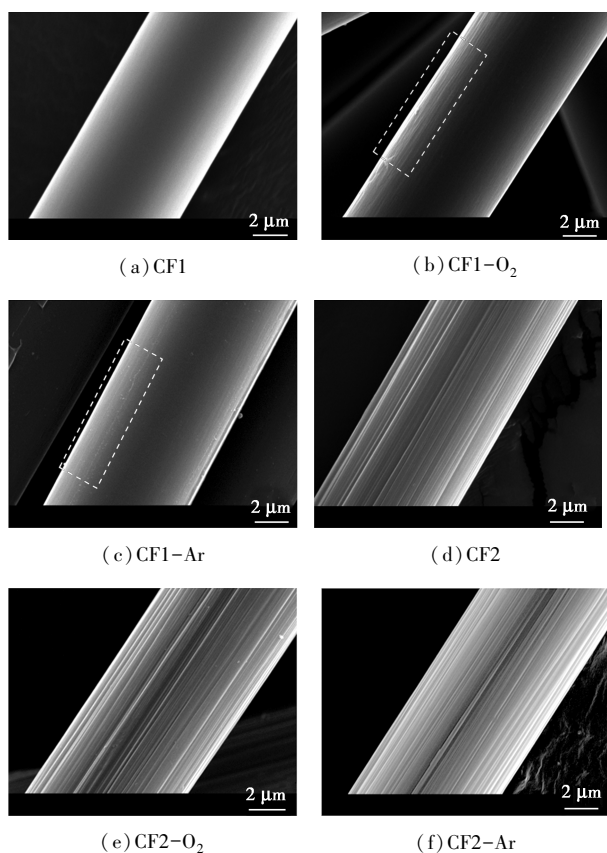


图 2 等离子体处理前后碳纤维表面 SEM 图

### 3.2 碳纤维表面粗糙特性

图 3 为 AFM 测试得到的碳纤维表面微区的形貌细节特征,结果与 SEM 观察图像基本对应,CF1 系列碳纤维表面光滑,等离子体处理后表面出现浅

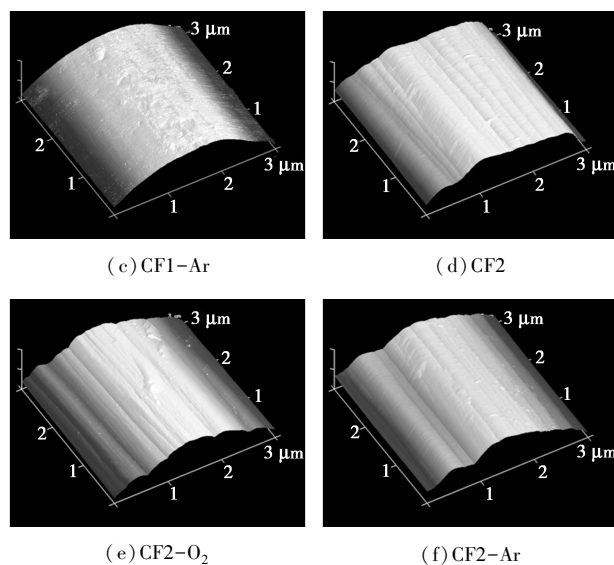
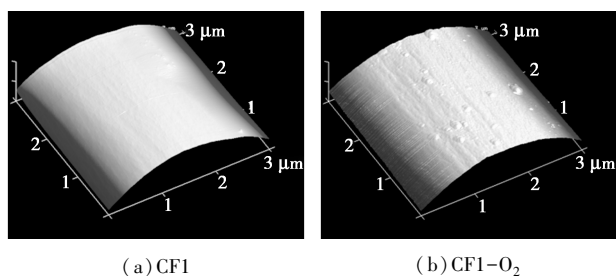


图 3 等离子体处理前后碳纤维表面 AFM 图

沟槽,局部凹凸不平。CF2 系列碳纤维表面本体具有轴向沟槽,等离子体处理后因受到刻蚀作用,表现为沟槽加深,深浅起伏程度增大。

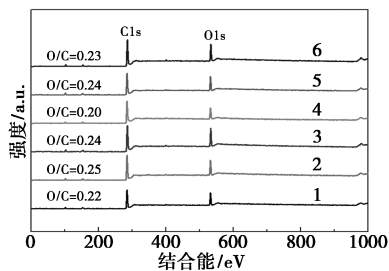
碳纤维表面粗糙度结果列于表 1。整体上看,CF2 系列碳纤维表面由于沟槽的存在,粗糙度均明显高于 CF1。不论是 CF1 还是 CF2,其均方根粗糙度(Rq)和平均粗糙度(Ra)在两类等离子体处理后均有所上升,这与 3.1 节中 SEM 观察到的形貌一致。进一步分析来看,相比 CF1,CF1-O<sub>2</sub>、CF1-Ar 的 Rq 分别提升 32.42%、15.36%,Ra 分别提升 18.67%、14.59%,表明 O<sub>2</sub> 等离子体处理带来的表面粗糙度提升幅度大于 Ar 等离子体处理,CF2 也呈现出类似规律。由此可得,两种等离子体处理均可对碳纤维表面形貌起到改变作用,在表面光滑的 CF1 上进行等离子体处理会在碳纤维表面形成浅沟槽,而在表面原有沟槽的 CF2 上进行等离子体处理则使本体沟槽加深,由此带来表面粗糙度的提高,且 O<sub>2</sub> 等离子体对碳纤维表面形貌的粗糙化影响效果更为显著。

表 1 等离子体处理前后碳纤维表面粗糙度

纤维种类	Rq/nm	Ra/nm
CF1	5.86	4.66
CF1-O <sub>2</sub>	7.76	5.53
CF1-Ar	6.76	5.34
CF2	35.70	28.10
CF2-O <sub>2</sub>	42.92	34.42
CF2-Ar	38.31	31.30

### 3.3 碳纤维表面化学特性

通过 XPS 对碳纤维表面进行全谱扫描, 根据元素含量分别对各组样品的 O/C 元素比进行了分析统计, 结果如图 4 所示。由图可知, 两种纤维表面均以 C、O 元素为主, 经过等离子体处理后表面 O1s 峰均显著增强, 且 O/C 元素比例提高, 表明等离子体处理充分活化了碳纤维, 增加了纤维表面极性, 提高了表面化学活性。



1—CF1; 2—CF1-O<sub>2</sub>; 3—CF1-Ar; 4—CF2;  
5—CF2-O<sub>2</sub>; 6—CF2-Ar

图 4 等离子体处理前后碳纤维表面 XPS 全谱扫描图

对图 4 中的 C1s 特征峰进行分峰处理, 计算可得含碳活性官能团(包括 C—O、O—C=O 等)的比例, 结果如图 5 和表 2 所示。等离子体处理均明显提高了碳纤维表面活性碳原子含量, CF1-O<sub>2</sub>、CF1-Ar、CF2-O<sub>2</sub>、CF2-Ar 的活性官能团含量分别提升至 38.75%、36.44%、36.21%、30.74%。对比不同处理气氛, O<sub>2</sub> 等离子体处理后 CF1 和 CF2 碳纤维表面活性官能团含量均显著高于 Ar 等离子体处理后。相比未处理碳纤维, O<sub>2</sub> 等离子体处理后碳纤维表面活性官能团含量分别增长 38.99% 和 36.85%。根据相关研究<sup>[21,25]</sup>, 等离子体处理能够在碳纤维表面产生大量自由基, 与活性氧原子反应后, 形成 C—O 和 O—C=O 键等活性基团。由于 O<sub>2</sub> 等离子体形成过程中会产生大量的活性离子, 纤维表面交联和氧化反应更加剧烈和复杂, 因此活性含碳官能团含量高于 Ar 等离子体处理, 表面活化效果更为显著。

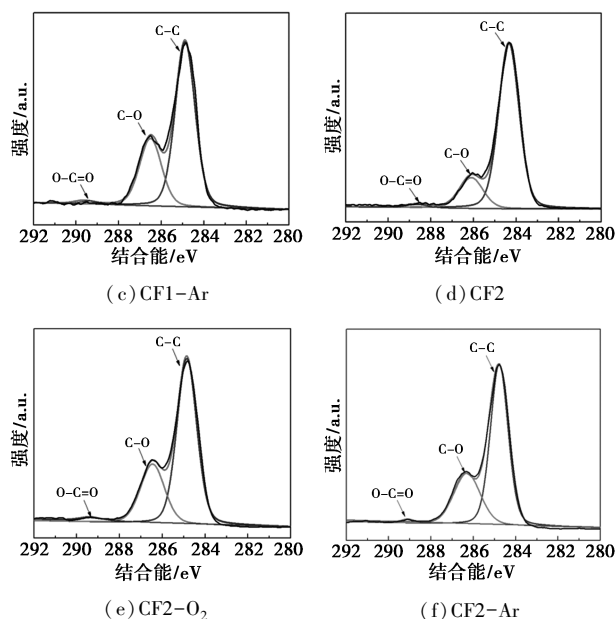
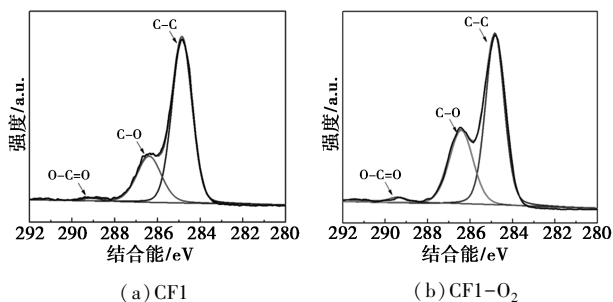


图 5 等离子体处理前后碳纤维表面 C1s 分峰图像

表 2 等离子体处理前后碳纤维表面活性官能团含量

纤维种类	C—C(C—H) 比例/%	C—O 比例/%	O—C=O 比例/%	活性官能团 比例/%
CF1	72.12	26.58	1.30	27.88
CF1-O <sub>2</sub>	61.25	35.77	2.98	38.75
CF1-Ar	63.56	34.85	1.59	36.44
CF2	73.54	24.56	1.90	26.46
CF2-O <sub>2</sub>	63.79	31.86	4.35	36.21
CF2-Ar	69.26	28.88	1.86	30.74

### 3.4 碳纤维/聚酰亚胺界面结合性能

不同等离子体处理后碳纤维/聚酰亚胺复合材料的界面剪切强度如图 6 所示。由图可知, O<sub>2</sub> 和 Ar 等离子体处理对 CF1 和 CF2 均起到了明显的界面增强效果, 复合材料界面剪切强度均有提升。针对 CF1 系列, 等离子体改性后 CF1-O<sub>2</sub>、CF1-Ar 对应碳纤维/聚酰亚胺的 IFSS 分别提升到 73.43 MPa 和

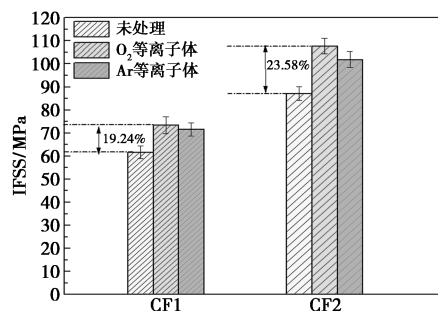


图 6 等离子体处理后碳纤维/聚酰亚胺的界面剪切强度

71.57 MPa,  $O_2$  等离子体处理后 IFSS 值略高于 Ar 等离子体处理,最高增幅为 19.24%。对于 CF2,等离子体改性后 IFSS 分别提升至 107.70 MPa 和 101.89 MPa,最高增幅为 23.58%,针对两种纤维, $O_2$  等离子体处理均表现出更优的界面增强效果。

通过 SEM 对微脱粘测试后剥脱界面断口形貌进行观察,定性分析复合材料的界面性能,各种状态纤维的剥脱断口如图 7 所示。从图中可以看出,等离子体处理前断口处纤维表面相对光滑,几乎无树脂残留,说明纤维与树脂间的作用力较弱,与未处理纤维较低的 IFSS 值对应。等离子体处理后,尤其是 CF2- $O_2$  界面剥脱处大量树脂附着在纤维表面,如图 7(b) 所示,表明纤维与树脂间产生了强烈相互作用,界面结合力明显增强<sup>[26-27]</sup>,对应  $O_2$  等离子体处理后纤维显著提高的 IFSS,表现出优异的界面结合性能。

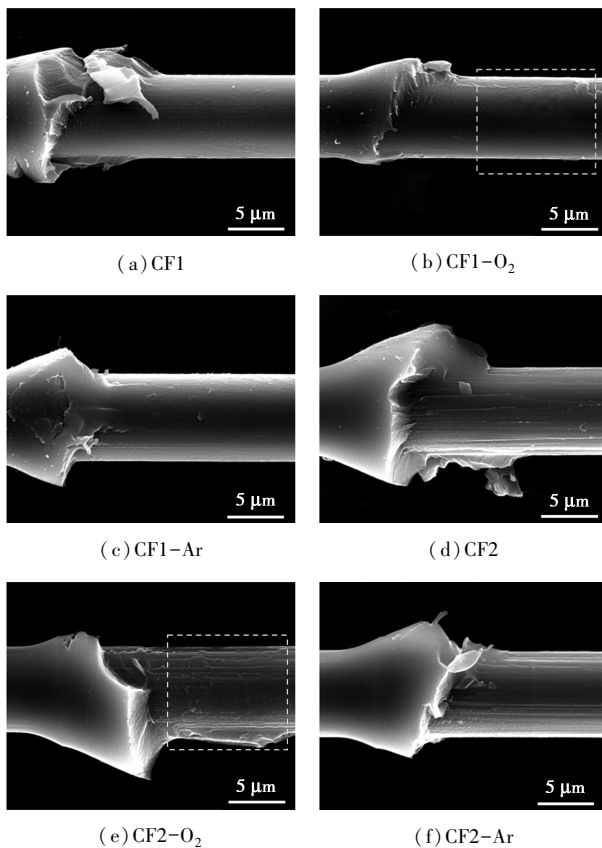


图 7 等离子体处理后微观剥脱断口形貌

### 3.5 碳纤维/聚酰亚胺界面性能增强机理分析

为了探究等离子体处理强化碳纤维/聚酰亚胺复合材料界面性能的机理,将碳纤维表面粗糙特性、化学特性、界面性能等数据列于表 3 进行深入分析。针对两种纤维体系,等离子体处理后复合材料的 IFSS 均明显升高。相比较而言,CF2 系列的 IFSS 结

果均明显高于 CF1,主要是由于两种碳纤维表面特征不同。CF2 系列碳纤维表面轴向沟槽分布较多,表面粗糙度显著高于 CF1 系列,提供了更为牢固的机械嵌合作用<sup>[28]</sup>,有利于提升界面结合效果。单独来看,CF1- $O_2$  和 CF1-Ar 的界面强度几乎持平,分析是由于两者的表面粗糙度与化学活性较为接近。CF2 的  $O_2$  等离子体处理效果更为明显,主要原因在于纤维的粗糙度和化学活性均有明显提高,与基体聚酰亚胺树脂形成了更为强烈的机械啮合和化学键合作用。根据 IFSS 测试结果,两种碳纤维被  $O_2$  等离子体处理后均表现出最优的界面性能,进一步印证了碳纤维/聚酰亚胺复合材料界面处同时存在物理啮合及化学键合作用<sup>[29-30]</sup>,二者协同作用提升了复合材料的界面结合性能。

表 3 等离子体处理后碳纤维界面强度及物理化学特性对比

指标	CF1 系列			CF2 系列		
	CF1	CF1- $O_2$	CF1-Ar	CF2	CF2- $O_2$	CF2-Ar
IFSS/MPa	61.58	73.43	71.57	87.15	107.70	101.89
平均粗糙度 $R_q$ /nm	5.86	7.66	6.76	35.70	42.92	38.31
平均粗糙度 $R_a$ /nm	4.66	5.53	5.34	28.10	34.42	31.30
O/C 比	0.22	0.25	0.24	0.20	0.24	0.23
活性官能团比例/%	27.88	38.75	36.44	26.46	36.21	30.74

## 4 结论

基于等离子体改性方法,对表面光滑的 CF1 和具有沟槽的 CF2 两种碳纤维分别进行  $O_2$  等离子体和 Ar 等离子体处理,分析研究了碳纤维表面物理化学特性及碳纤维/聚酰亚胺界面结合性能,结论如下:

(1) 两种等离子体处理均可改善碳纤维表面形貌,表面光滑的 CF1 在等离子体处理后形成了浅沟槽,表面原有沟槽的 CF2 经过等离子体处理后沟槽进一步加深,二者表面粗糙度均明显提高。

(2) 等离子体处理后,碳纤维表面 O/C 比和活性官能团含量显著提升,且  $O_2$  等离子体处理的效果更显著,活性官能团含量分别提高 38.99% 和 36.85%。

(3) 等离子体改性显著改善了碳纤维/聚酰亚胺复合材料的界面结合性能, $O_2$  等离子体处理表现出较优的界面改性效果,两种碳纤维界面强度最高分别提升 19.24% 和 23.58%。根据剥脱界面断口形貌的观察分析,等离子体改性处理后剥脱界面区

域明显粘附更多树脂,表明界面结合力增强。

(4)结合纤维表面物理化学特性分析,等离子体处理通过物理啮合及化学键合的协同作用提高了碳纤维/聚酰亚胺复合材料的界面性能,表明等离子体处理在聚酰亚胺复合材料界面性能提升方面具有一定的工程应用潜力。

### 参考文献

- [1] 邢丽英,李亚锋,陈祥宝.先进复合材料在航空装备发展中的地位与作用[J].复合材料学报,2022,39(9):4179-4186.
- [2] Lemos D M, Marques F D, Ferreira A J M. A review on bistable composite laminates for aerospace applications [J]. Composite Structures, 2024, 329: 117756.
- [3] 张涵其,谭指,彭飞,等.耐高温树脂基复合材料研究进展及其在航空航天领域的应用[J].宇航材料工艺,2024,54(2):18-28.
- [4] Akash T, Raman K, Singh J C. A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 51 (P1): 865-870.
- [5] Yi C, Li W, Shi S, et al. High-temperature-resistant and colorless polyimide: Preparations, properties, and applications [J]. Solar Energy, 2020, 195: 340-354.
- [6] 王献伟,柯红军,袁航,等.耐高温可溶性聚酰亚胺树脂及其复合材料[J].高等学校化学学报,2021,42(6):2041-2048.
- [7] 曾欣欣,白慧娟,俞娟,等.面向空天动力用聚酰亚胺树脂基复合材料介尺度结构与调控[J].化工学报,2022,73(6):2352-2369.
- [8] 刘柳薪,卢晓英,吴颖,等.碳纤维增强树脂基复合材料界面改性及应用进展[J].材料工程,2024,52(9):70-81.
- [9] 李娜,柯红军,汪东,等.碳纤维表面改性及其对热塑性复合材料界面性能影响的研究进展[J].现代化工,2024,44(2):72-75.
- [10] Pitto M, Fiedler H, Kim N K, et al. Carbon fibre surface modification by plasma for enhanced polymeric composite performance: A review [J]. Composites Part A, 2024, 180: 108087.
- [11] 李美琪,李晓飞,王瑞涛,等.碳纤维增强聚合物基复合材料界面特性研究进展[J].材料导报,2023,37(20):229-240.
- [12] Peng X, Wu Y, Wei Z. Research progress on the surface modification of carbon fiber [J]. RSC Advances, 2024, 14 (6): 4043-4064.
- [13] Fernando M, Coia P, Moloney G M, et al. On demand thermal surface modification of carbon fiber for improved interfacial shear strength [J]. Composites Part B, 2025, 289: 111959-111959.
- [14] 邸哲.碳纤维低压等离子体处理及其聚丙烯树脂复合材料界面性能的研究[D].上海:东华大学,2020.
- [15] Dey M, Deitzel J M, Jr J W G, et al. Influence of sizing formulations on glass/epoxy interphase properties [J]. Composites Part A, 2014, 63(18):59-67.
- [16] 熊舒,肇研,柳肇博.等离子体处理对国产高强碳纤维复合材料界面性能影响研究[J].化工新型材料,2023,51(8):114-118.
- [17] Yildirim C, Ulus H, Beylergil B, et al. Tailoring adherend surfaces for enhanced bonding in CF/PEKK composites: Comparative analysis of atmospheric plasma activation and conventional treatments [J]. Composites Part A, 2024, 180: 108101.
- [18] 贾海波,王永涛,张政和,等.复合材料用碳纤维表面等离子体改性技术研究进展[J].化工新型材料,2022,50(5):68-71,76.
- [19] Mengjin W U, Lixia J, Suling L U, et al. Interfacial performance of high-performance fiber-reinforced composites improved by cold plasma treatment: A review [J]. Surfaces and Interfaces, 2021, 24: 101077.
- [20] Boroj B M, Shoushtari M A, Haji A, et al. Optimization of plasma treatment variables for the improvement of carbon fibres/epoxy composite performance by response surface methodology [J]. Composites Science and Technology, 2016, 128: 215-221.
- [21] Lu C, Qiu S, Lu X, et al. Enhancing the interfacial strength of carbon fiber/poly(ether ether ketone) hybrid composites by plasma treatments [J]. Polymers, 2019, 11(5):753-753.
- [22] Chang Q, Zhao H, He R. The mechanical properties of plasma-treated carbon fiber reinforced PA6 composites with CNT [J]. Surface & Interface Analysis, 2017, 49(12):1244-1248.
- [23] 王迎芬,刘刚,彭公秋,等.国产 T700 级碳纤维/双马来酰亚胺树脂复合材料界面性能[J].材料工程,2018,46(4):144-149.
- [24] 张海燕,李根臣,刘震宇,等.国产 T700 级碳纤维及复合材料性能表征[J].化工新型材料,2020,48(4):238-240.
- [25] Dabees S, Borkar A, Randall D J, et al. Interphase mechanics vs chemical compatibility: Generating a deformable PA6-carbon fiber interphase [J]. Composites Part B, 2025, 289: 111915-111915.
- [26] Mengjin W, Lixia J, Zhenhong C, et al. Synergetic enhancement of interfacial properties and impact resistant of UHMWPE fiber reinforced composites by oxygen plasma modification [J]. Composite Structures, 2022, 292: 115663.
- [27] Chen J, Wang K, Zhao Y. Enhanced interfacial interactions of carbon fiber reinforced PEEK composites by regulating PEI and graphene oxide complex sizing at the interface [J]. Composites Science and Technology, 2018, 154: 175-186.
- [28] Gupta S B, Reiniati I, Laborie G M. Surface properties and adhesion of wood fiber reinforced thermoplastic composites [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 302 (1-3): 388-395.
- [29] Enhanced carbon fiber interface with thermoplastics via nanostructure surface modification: Failure, morphology and wettability analysis [J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 291: 112054.
- [30] Shadab M A, Sunny Z, Himanshu P. A comprehensive review of surface modification techniques for carbon fibers for enhanced performance of resulting composites [J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2023, 12: 100141. ■