

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.02.016

碳纤维的等离子体表面改性及对乙烯基酯树脂复合材料力学性能的影响

张兴刚^{1,2}, 谢天硕^{1,3}, 施旗², 杨瑞瑞², 曹泽君^{1,3}, 乔慧鑫^{1,3}, 张晓朦^{1,3}, 刘民英^{1,3}

(1. 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001; 2. 洛阳船舶材料研究所, 河南洛阳 471000;

3. 河南省先进尼龙材料及应用重点实验室, 郑州 450052)

摘要: 为提升碳纤维与树脂基体之间的界面结合性能, 并平衡碳纤维表面功能化与本体结构破坏之间的矛盾, 本文采用低功率氧等离子体处理的方法, 对国产48K碳纤维进行表面改性。通过调控等离子体处理的功率(7、11、30 W)与时间(10、15、20 min), 系统分析了不同条件等离子体处理对碳纤维表面元素组成、微观形貌及润湿性的影响。结果表明, 低功率氧等离子体处理显著提高了碳纤维表面氧含量, 主要形成C—O和C=O等含氧官能团, 增强了表面极性和亲水性, 其中经功率30 W、时间20 min的氧等离子体处理后, 碳纤维表面的氧碳比增加到了29.48%, C=O和C—O的比值降低到了0.73, 与水的接触角也由未处理的132.5°降低到了80°。同时, 低功率氧等离子体处理并未对碳纤维表面形貌造成明显损伤, 可有效保持本体高力学性能。经功率30 W、时间20 min的氧等离子体处理后, 碳纤维增强乙烯基酯树脂复合材料的层间剪切强度相比未处理时提升了约11%。因此, 低功率氧等离子体处理工艺可实现碳纤维的表面功能化并提高其增强复合材料的力学性能, 这为碳纤维及其增强复合材料的功能优化和应用拓展提供了借鉴。

关键词: 碳纤维; 氧等离子体处理; 表面改性; 界面结合性能; 力学性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)02-0122-08

Plasma surface modification of carbon fiber and its effects on mechanical properties of vinyl ester resin composites

ZHANG Xinggang^{1,2}, XIE Tianshuo^{1,3}, SHI Qi², YANG Ruirui², CAO Zejun^{1,3}, QIAO Huixin^{1,3},ZHANG Xiaomeng^{1,3}, LIU Mingying^{1,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Luoyang Ship Materials Research Institute, Luoyang 471000, China; 3. Henan Key Laboratory of Advanced Nylon Materials and Applications, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To improve the interfacial bonding performance between carbon fibers and resin matrix, and balance the contradiction between the surface functionalization of carbon fibers and the damage to their bulk structure, the low-power oxygen plasma treatment was applied to conduct a surface modification on domestic 48K carbon fibers. By adjusting the plasma treatment power (7, 11, 30 W) and time (10, 15, 20 minutes), the effects of plasma treatment under different conditions on the surface element composition, micromorphology, and wettability of carbon fibers were systematically analyzed. The results show that low-power oxygen plasma treatment significantly increases the oxygen content on the carbon fiber surface, mainly forming oxygen-containing functional groups such as C—O and C=O, which enhances surface polarity and hydrophilicity. After oxygen plasma treatment with 30 W for 20 minutes, the oxygen-to-carbon ratio on the carbon fiber surface increases to 29.48%, the ratio of C=O to C—O decreases to 0.73, and the water contact angle also decreases from the 132.5° of untreated fiber to 80°. Meanwhile, low-power oxygen plasma treatment does not cause obvious damage to the surface morphology of carbon fibers, and can effectively maintain the high bulk

基金项目: 河南省重大科技专项(241100230200), 河南省研究生教育改革与质量提升工程(YJS2025GZZ03)

通信作者: 张晓朦, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为聚合物基复合材料的制备与改性

收稿日期: 2025-11-09

引用格式: 张兴刚, 谢天硕, 施旗, 等. 碳纤维的等离子体表面改性及对乙烯基酯树脂复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(2): 122-129.

ZHANG Xinggang, XIE Tianshuo, SHI Qi, et al. Plasma surface modification of carbon fiber and its effects on mechanical properties of vinyl ester resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(2): 122-129.

mechanical properties of carbon fibers. The interlaminar shear strength of the carbon fiber reinforced vinyl ester resin composite increases by approximately 11% compared to the untreated state after oxygen plasma treatment with 30 W for 20 minutes. Therefore, the low-power oxygen plasma treatment process can achieve the surface functionalization of carbon fibers and improve the mechanical properties of their reinforced composites, which provides a reference for the functional optimization and application expansion of carbon fibers and their reinforced composites.

Keywords: carbon fiber ; oxygen plasma treatment ; surface modification ; interfacial bonding property ; mechanical property

碳纤维增强树脂复合材料具有强度高、质量轻的优势,在航空航天、国防军工、风力发电、汽车等方面有着广阔的应用前景^[1-3]。乙烯基酯树脂是一类热固性树脂,它是由环氧树脂和甲基丙烯酸等不饱和羧酸反应得到的,既有环氧树脂的力学性能和化学稳定性,又有良好的成型加工性能,在复合材料的基体树脂方面具有良好的应用前景,正逐步在一些领域替代环氧树脂^[4]。研究表明,碳纤维与树脂之间的界面相互作用对复合材料力学性能有重要的影响,良好的界面有助于增强复合材料的应力传递,避免应力集中,阻止内裂纹的产生与扩展,进而改善力学性能^[5-7]。然而,碳纤维作为一种碳含量达到90%以上的纤维,具有表面光滑、化学惰性高、表面能低的特点,从而导致其与基体的界面黏结力不足^[7-10]。为此,需要对碳纤维表面进行改性,以改善其与树脂之间的界面结合,从而获得综合性能优良的复合材料。

对碳纤维进行表面改性的方法主要包括氧化(气相氧化^[11]、液相氧化^[12]、阳极氧化^[13-14])、表面涂层/施胶处理^[15-16]、高能辐射处理^[8,17]、化学接枝^[18-20]、等离子体处理^[21-23]等。高能辐射和氧化处理工艺简单、成本较低,但后处理困难,易对碳纤维本身产生损伤,从而影响纤维本身性能^[7-8,24]。表面涂层/施胶是在碳纤维与树脂之间形成一层相容性良好的涂层,可有效避免碳纤维本身力学性能的下降。这种方法工艺简单、设计灵活,适合工业化生产,但需要针对不同的基体设计专用上浆剂^[7]。化学接枝改性主要通过向碳纤维表面引入活性官能团来提高碳纤维与树脂之间的结合力,该方法设计灵活、成本较低,但也存在操作复杂、反应时间长等问题^[18]。等离子体处理是通过高能量的等离子体轰击碳纤维表面,可实现对碳纤维表面化学氧化和物理刻蚀双重作用^[7,23],这种方法具有操作简单、效率高、无污染等优点,非常适用于工业化应用。

不同的等离子体处理功率和时间对碳纤维表面的修饰作用有很大的差别。较高的等离子体处

理功率可以增强碳纤维的表面改性效果,但同时会对碳纤维产生烧蚀作用,造成碳纤维本体拉伸强度的降低^[10]。不同的碳纤维处理气氛也对碳纤维的表面功能化具有显著的影响,目前常用的气氛主要是空气、氩气和氧气,通常氧气含量越高,碳纤维的表面改性越充分,所形成的表面含氧官能团也越多^[25]。

尽管目前对等离子体改性碳纤维已有大量相关研究,但主要是以高功率(>100 W)和氩气/空气气氛为研究条件。为了在降低烧蚀损伤碳纤维的前提下提高碳纤维表面含氧官能团的含量,本工作采用低功率氧等离子体处理的工艺条件对碳纤维表面进行活化改性,并系统研究了等离子体处理时间和功率对碳纤维表面元素组成、表面微观形貌、润湿性的影响,验证了等离子体处理对碳纤维增强树脂复合材料力学性能的提高程度。研究结果为碳纤维的表面改性工艺和碳纤维/乙烯基酯树脂高性能复合材料的设计制备提供了依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维:48K,中国船舶集团有限公司725研究所;

碳纤维编织布:0°/90° 500 g/m²双向碳纤维织物,中国船舶集团有限公司725研究所;

乙烯基酯树脂:R30系列高强树脂,中国船舶集团有限公司725研究所。

1.2 主要仪器及设备

等离子体处理仪:PDC-002,美国HARRICK PLASMA公司;

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

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:BRUKER TENSOR II,布鲁克(北京)科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-7500F,日本电子株式会社;

电子万能试验机:UTM5000,深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.3 试样制备

将48K的碳纤维束剪裁成15 cm的长度,并手工铺放在10 cm×15 cm的玻璃板上,铺层为单向铺层,角度为0°。在氧气气氛下,分别在7、11、30 W的输出功率下等离子体处理10、15、20 min,样品与等离子体源之间的距离固定为5 cm,将处理好的碳纤维束收集到密封袋中保存,用于后续表征。

将碳纤维编织布剪成10 cm×15 cm的片材(单层厚度0.5 mm,由48K碳纤维经0°和90°编织而成),放在索氏提取器中用丙酮抽提3 d,取出烘干后进行等离子体处理,处理功率为30 W,样品与等离子体源之间的距离固定为5 cm,样品每面处理10 min。在制备层压板时,铺设了4层碳纤维编织布以达到所需的厚度,采用真空辅助灌注成型方法制备碳纤维/乙烯基树脂层压板,固化温度为100 °C,固化时间为8 h。未处理的原始碳纤维记为CF-RAW,等离子体处理的碳纤维记为CF-*a* W-*b* min (*a*为功率设定值,*b*为时间设定值)。

1.4 测试与表征

XPS表征:采用XPS定性分析碳纤维表面元素组成和化学状态。样品室的真空度约为 5×10^{-7} Pa, X射线源为单色化Al K α 源(Mono Al K α),能量为1 486.6 eV,电压为12 kV,束流为6 mA,分析器扫描模式为CAE,仪器功函数为4.2 eV,测试元素为C、N、O元素。

FTIR测试:将碳纤维剪碎并研磨,随后与溴化钾混合压制成片,利用透射模式(TR模式)对样品进行红外光谱扫描,从而获得碳纤维样品的FTIR谱图。

SEM表征:剪下合适长度的碳纤维粘在导电胶带上,通过SEM观察纤维的形貌特征,如纤维表面的平整情况等。

接触角测试:采用液滴法测定碳纤维与水的接触角。具体操作是将水滴在紧密排列的碳纤维表面,将显微镜采集到的图像输入计算机,记录水对碳纤维的润湿情况,并计算接触角(每个样品测量3次取平均值)。

层间剪切强度测试:碳纤维/乙烯基树脂层压板的层间剪切强度测试采用短梁法,参照JC/T 773-2010在电子万能试验机上完成。试样尺寸为30 mm×10 mm×2 mm,试验速度为1 mm/min,跨距为10 mm(5倍厚度),压头半径为3 mm,每组样品测量5次,

去掉最大值与最小值并求平均值。

弯曲性能测试:碳纤维增强乙烯基酯树脂复合材料的弯曲性能测试参照GB/T 1449-2005在电子万能试验机上完成。弯曲试样尺寸为70 mm×10 mm×2 mm,测试时跨距为25倍厚度方向尺寸(50 mm),压头半径为5 mm,试验速度为2 mm/min,每组样品测量5次,去掉最大值与最小值并求平均值。

2 结果与讨论

2.1 等离子体处理对碳纤维表面元素组成的影响

通过XPS分析氧等离子体处理的功率和时间对碳纤维表面元素组成的影响。图1为氧等离子体处理前后碳纤维的XPS全谱图,表1为碳纤维表面元素组成随等离子体处理功率和时间的变化。表1的结果表明,经过等离子体处理后,碳纤维表面的氧碳比(O/C)显著增加,这主要是因为腔体中充满了氧气,在高能电场中这些氧气分子被活化成高能粒子,并与碳纤维反应,在表面形成含氧官能团,同时,碳纤维表面存在的缺陷碳会在等离子作用下脱落^[23]。此外,对于同一处理功率(如11 W或30 W)下的碳纤维,随着处理时间的逐渐增加,氧元素所占

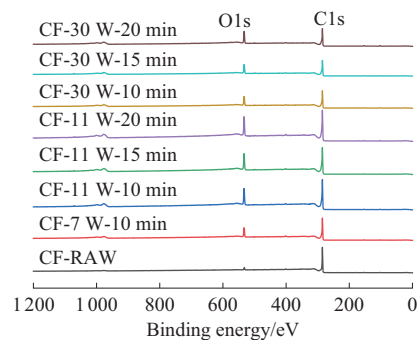


图1 原始碳纤维与不同条件等离子体处理碳纤维的XPS全谱图

Fig. 1 XPS spectra of original carbon fiber and plasma-treated carbon fiber under different conditions

表1 原始碳纤维与不同条件等离子体处理碳纤维表面的元素组成

Tab. 1 Surface elemental composition of original carbon fiber and plasma-treated carbon fiber under different conditions

Samples	Atomic percent/%		$R_{(O/C)}/\%$	$r_{C=O-C-O}$
	C1s	O1s		
CF-RAW	94.32	5.68	6.02	2.78
CF-7 W-10 min	83.47	16.53	19.80	1.00
CF-11 W-10 min	80.80	19.20	23.76	1.13
CF-11 W-15 min	79.82	20.18	25.28	1.06
CF-11 W-20 min	78.91	21.09	26.73	0.99
CF-30 W-10 min	81.20	18.80	23.15	1.17
CF-30 W-15 min	79.58	20.42	25.66	1.06
CF-30 W-20 min	77.23	22.77	29.48	0.73

Notes: $R_{(O/C)}$ is oxygen-to-carbon ratio multiplied by 100%; $r_{C=O-C-O}$ is ratio of C=O to C—O.

百分比不断提高。以 30 W 为例,当处理时间为 20 min 时,碳纤维表面的氧碳比由初始的 6.02% 提高至 29.48%。这一显著的变化说明了氧等离子体处理能有效引入含氧官能团,提高碳纤维表面极性和反应活性,而且处理时间对碳纤维表面氧化程度有着重要影响^[23]。为了进一步分析等离子体处理后的碳纤维表面氧元素的存在形式,对氧元素的 XPS 能

谱进行了分峰拟合,结果如图 2 所示。

通过图 2 可以看出,在同一处理功率下,C=O(碳氧双键)与 C—O(碳氧单键)的比值随处理时间的延长逐渐减小(具体数据见表 1)。这一趋势表明,在氧等离子体处理的过程中,引入到碳纤维表面的氧元素主要以 C—O 的形式存在,这主要是由于 C—O 的键能较 C=O 低。

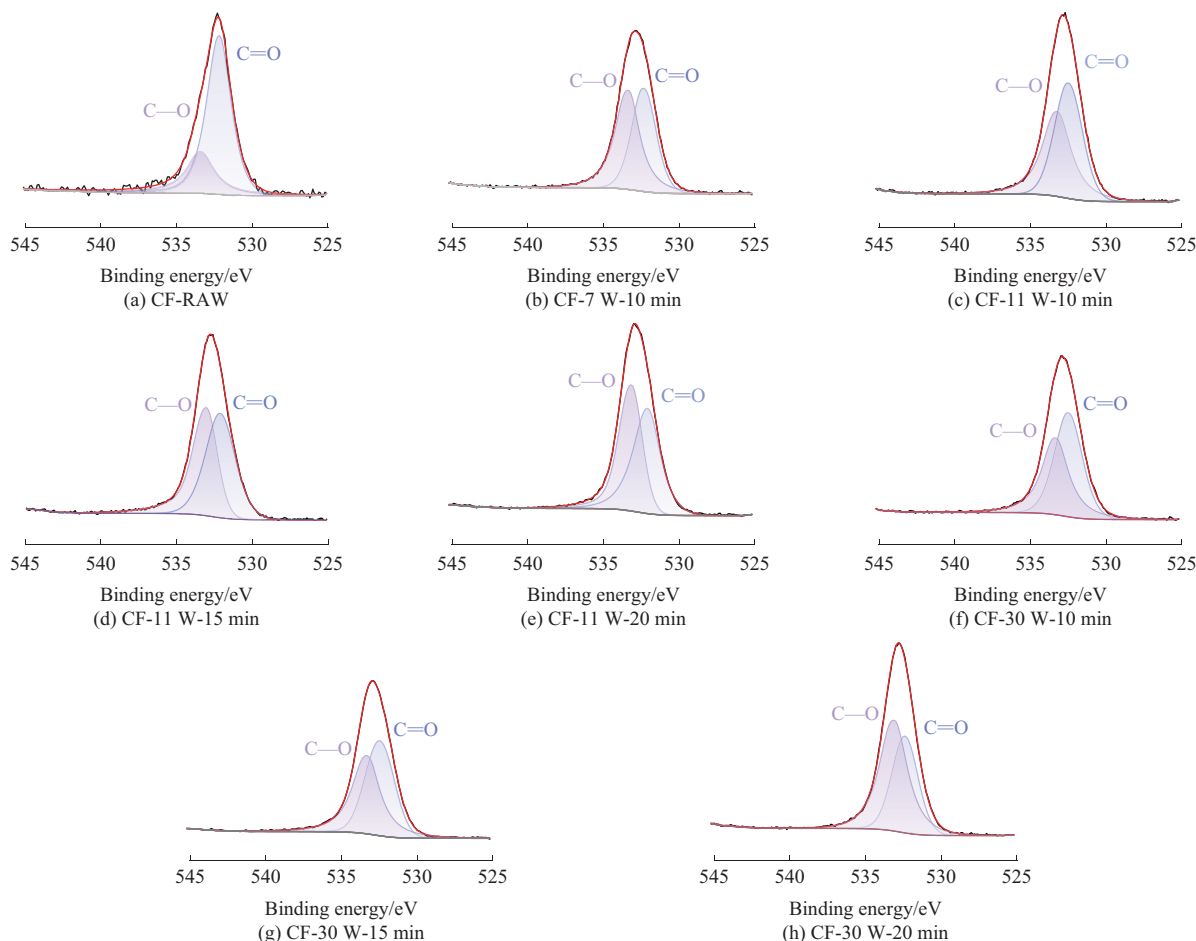


图2 原始碳纤维与不同条件等离子体处理碳纤维的O1s分峰拟合谱图

Fig. 2 Peak fitting of O1s spectra for original carbon fiber and plasma-treated carbon fiber under different conditions

通过 FTIR 对碳纤维表面的含氧官能团进行了表征,以进一步研究氧元素的具体存在形式和等离子体处理的时效性。图 3 为原始碳纤维和等离子体处理(30 W-20 min)后不同放置时间的碳纤维 FTIR 谱图。其中原始碳纤维为单独制样,等离子体处理后的碳纤维则是用同一个样品在不同放置时间进行测量表征,可反映出等离子体处理的时效性^[26]。通过表征结果可知,所有样品在 3435 cm^{-1} 处均出现明显的羟基(—OH)伸缩振动吸收峰,猜测原始碳纤维已经经过了氧化处理或存在一定量的缺陷点(XPS 的测试结果也可验证此结论)。相较之下,经

过等离子体处理后(30 W-20 min),碳纤维的羟基吸收峰急剧增大,结合 XPS 的测试结果,可以得出氧等离子体处理会在碳纤维表面引入很多的羟基。随着放置时间的延长,羟基的峰值表现出减小的趋势^[26]。这一发现为等离子体处理效果的时效性提供了实验证据,证实了表面改性效果的衰减与样品放置时间密切相关^[26]。

2.2 等离子体处理对碳纤维表面形貌的影响

等离子体处理过程中的高能粒子与碳纤维表面碰撞时,可发生物理刻蚀和化学反应^[21,23]。碳纤维通常包含晶区(原子规整排列)和非晶区(缺陷区),

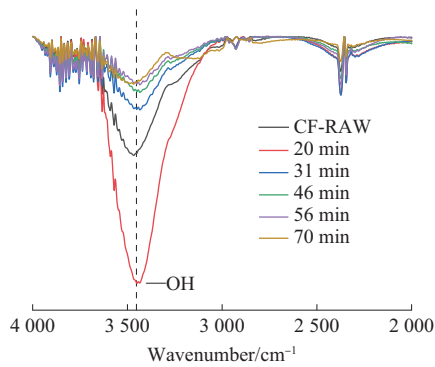


图3 原始碳纤维和等离子体处理(30 W-20 min)后不同放置时间碳纤维的FTIR谱图

Fig. 3 FTIR spectra of original carbon fiber and plasma-treated (30 W-20 min) carbon fibers at different aging periods

其中缺陷区结构不稳定且具有较高的反应活性,通常是等离子体攻击和作用的主要区域。在等离子体的作用下,缺陷区的原子可能会被剥离掉,形成凹陷,也可能与高能含氧粒子反应,形成极性基团,从而同步发生表面粗糙化和功能化。XPS和FTIR的测试结果已经直观证明等离子体处理对于碳纤

维表面功能化的显著作用效果。为了进一步探究等离子体处理对碳纤维表面结构的影响,通过SEM对等离子体处理后的碳纤维表面微观形貌进行了观察,结果如图4所示。

从图4可以观察到,未经处理的原始碳纤维表面存在十分明显的沟壑结构^[23]。经过等离子体处理后,碳纤维表面的粗糙度并未出现显著的改变。这表明在7、11、30 W不同功率下,对碳纤维进行10~20 min的等离子体处理,可以在不引起纤维表面刻蚀损伤的情况下,成功引入含氧基团,从而增加碳纤维表面的极性。因此,低功率等离子体处理可在不显著改变碳纤维表面形貌和结构完整性的前提下有效实现表面功能化,这与之前报道“温和处理可避免纤维损伤”的结论一致^[10]。

2.3 等离子体处理对碳纤维润湿性的影响

等离子体处理对碳纤维表面润湿性的影响如图5所示。为了准确评估处理前后碳纤维的表面润湿性,采用接触角测试方法对碳纤维与水的相互作用

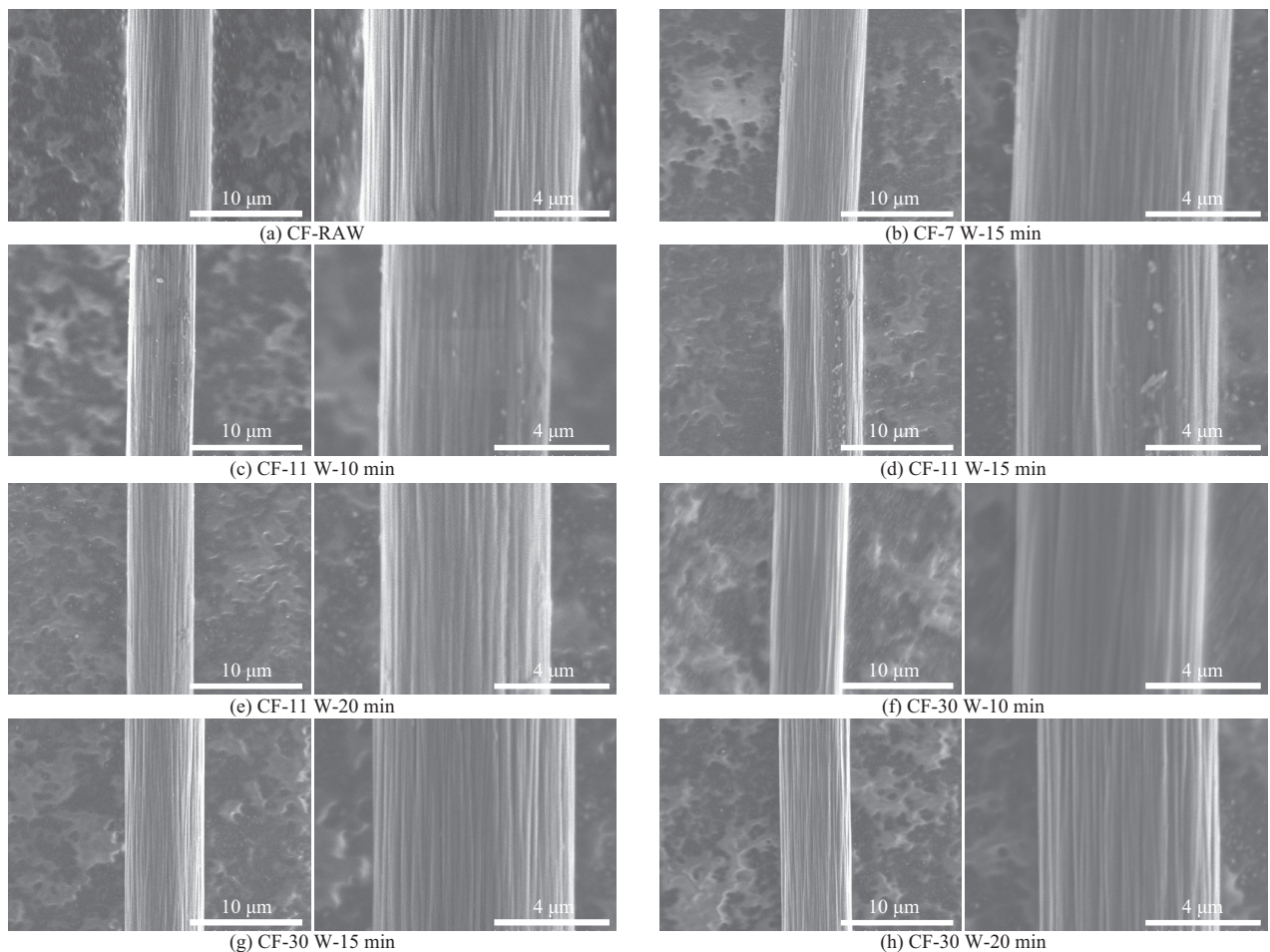


图4 原始碳纤维和不同条件等离子体处理碳纤维的表面SEM图像

Fig. 4 Surface SEM images of original carbon fiber and plasma-treated carbon fiber under different conditions

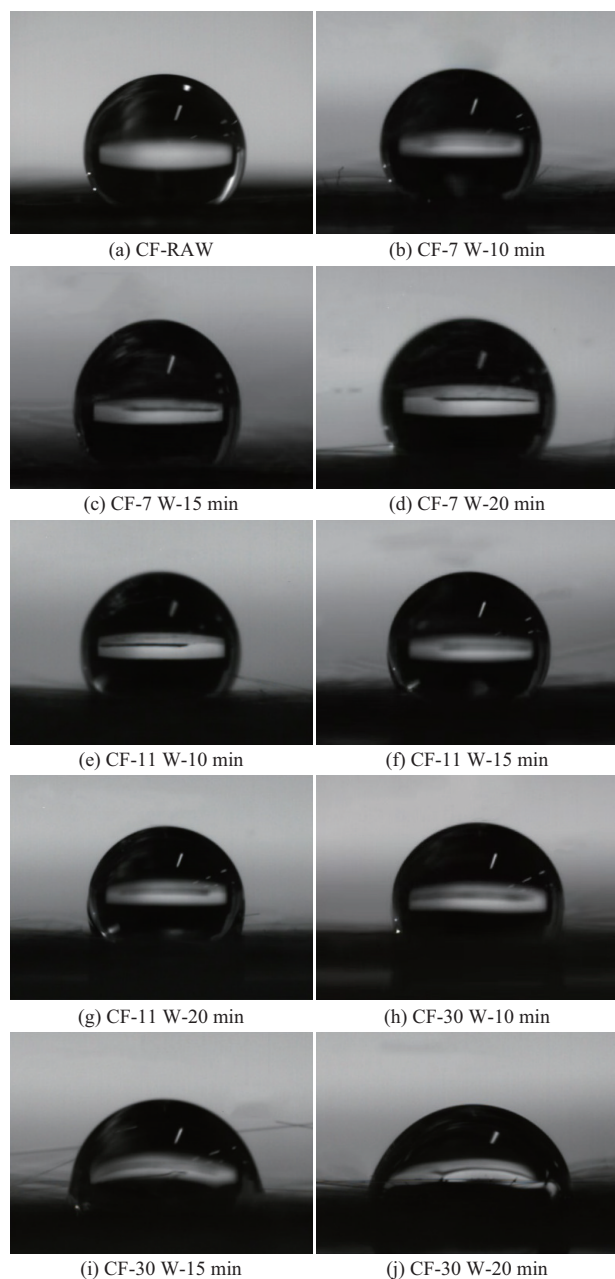


图5 原始碳纤维和不同条件等离子体处理碳纤维与水的接触角测试图像

Fig. 5 Water contact angle test images of original carbon fiber and plasma-treated carbon fiber under different conditions

用进行了量化分析。所得结果见表2。未经等离子体处理的原始碳纤维样品与水的接触角较大,说明未处理碳纤维表面极性官能团较少,从而导致表面润湿性较差。随着等离子体处理时间的延长以及功率参数的提高,可以观察到碳纤维表面的接触角逐渐减小。这一变化主要可以归因于氧等离子体处理过程中,碳纤维表面发生了化学反应,形成了亲水性基团,如C—O和C=O等,这些亲水基团的

表2 原始碳纤维和不同条件等离子体处理碳纤维与水的接触角数据

Tab. 2 Water contact angle data of original carbon fiber and plasma-treated carbon fiber under different conditions

Samples	Water contact angle/(°)
CF-RAW	132.5
CF-7 W-10 min	131.5
CF-7 W-15 min	129.0
CF-7 W-20 min	123.0
CF-11 W-10 min	117.0
CF-11 W-15 min	116.5
CF-11 W-20 min	109.0
CF-30 W-10 min	105.0
CF-30 W-15 min	103.5
CF-30 W-20 min	80.0

生成有效地降低了碳纤维与水之间的接触角^[25]。当处理功率为30 W和处理时间为20 min时,接触角从原始碳纤维的132.5°降低到80°。这一现象表明,氧等离子体处理显著改善了碳纤维表面的极性和水润湿性。

2.4 等离子体处理对碳纤维/乙烯基树脂复合材料层压板力学性能的影响

层间剪切强度和弯曲强度是反映复合材料界面黏结性和使用性能的重要参数。表3是等离子体处理(30 W、20 min)前后碳纤维/乙烯基树脂复合材料层压板的层间剪切强度和弯曲强度测试数据。从表3可以看出,等离子体处理后复合材料的层间剪切强度为27.66 MPa,与处理前的复合材料(24.92 MPa)相比,层间剪切强度提升了约11%。等离子体处理后复合材料的弯曲强度为569.58 MPa,与处理前的复合材料(558.07 MPa)相比,弯曲强度提升了2%。力学性能的提高可以归因于等离子体处理使碳纤维表面的极性增加。由于碳纤维表面极性的增加,使其与树脂基体之间的界面结合增强,进而使层间剪切强度及弯曲强度提高^[7]。

表3 等离子体处理前后复合材料层压板的层间剪切强度和弯曲强度

Tab. 3 Interlaminar shear strength and bending strength of composite laminate before and after plasma treatment

Items	Interlaminar shear strength/MPa	Standard deviation/MPa	Bending strength/MPa	Standard deviation/MPa
Before plasma treatment	24.92	1.04	558.07	13.71
After plasma treatment	27.66	1.05	569.58	12.42

3 结论

(1)低功率氧等离子体处理有效地提高了碳纤维表面的极性。XPS、FTIR和水接触角测试结果表

明,处理过程可引入大量的含氧官能团,如C—O和C=O,使碳纤维表面更加亲水,且随着处理时间的延长,氧元素含量和极性官能团数量增加。

(2)低功率氧等离子体处理对碳纤维表面形貌及结构影响较小。SEM图像显示,处理后的碳纤维表面粗糙度没有明显变化,保持了结构的完整性,也有利于保持碳纤维本体高力学性能。

(3)低功率氧等离子体处理可进一步提高碳纤维/乙烯基树脂复合材料的层间剪切强度和弯曲强度。

参考文献

- [1] 张凯强,周文明,冯永国,等.碳纤维改性增强复合材料界面研究进展[J].材料导报,2024,38(S2):535-542.
ZHANG Kaiqiang, ZHOU Wenming, FENG Yongguo, et al. Research progress on interfacial of carbon fiber modification reinforced composites[J]. Materials Reports, 2024, 38(S2):535-542.
- [2] LI C S, DONG Y Q, YUAN X M, et al. Two-step method to realize continuous multi-wall carbon nanotube grafted on the fibers to improve the interface of carbon fibers/epoxy resin composites based on the Diels-Alder reaction[J]. Carbon, 2023, 212. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.118131.
- [3] HE M, XU P, ZHANG Y J, et al. Phthalocyanine nanowires@GO/carbon fiber composites with enhanced interfacial properties and electromagnetic interference shielding performance[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 388. DOI:10.1016/j.cej.2020.124255.
- [4] 蔡焯梦. 乙烯基酯树脂用碳纤维乳液上浆剂的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
CAI Yemeng. Preparation and properties of carbon fiber emulsion sizing agent for vinyl ester resin[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [5] LYU Y H, KOUTSOS V, Ó BRÁDAIGH C M, et al. Improving the interfacial adhesion between recycled carbon fibres and polyphenylene sulphide by bio-inspired dopamine for advanced composites manufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 449. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141855.
- [6] 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.
LI Meiqi, LI Xiaofei, WANG Ruitao, et al. Research progress on the interface properties of carbon fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Materials Reports, 2023, 37(20):229-240.
- [7] 王在跃, 姜宁, 王明道. 碳纤维表面改性对其增强热塑性复合材料性能影响的研究进展[J]. 复合材料学报, 2025, 42(1):147-161.
WANG Zaiyue, JIANG Ning, WANG Mingdao. Research progress on surface modification of carbon fiber and its effect on the properties of thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(1):147-161.
- [8] 孙金贵, 李宗家, 李年华, 等. 碳纤维材料表面改性技术的研究进展[J]. 合成纤维, 2024, 53(11):8-12, 76.
SUN Jingui, LI Zongjia, LI Nianhua, et al. Research progress of surface modification technology of carbon fiber materials[J]. Synthetic Fiber in China, 2024, 53(11):8-12, 76.
- [9] 崔迪, 李双, 王宇, 等. 碳纤维的电解电位法表面处理[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2025, 52(2):47-53.
CUI Di, LI Shuang, WANG Yu, et al. Surface treatment of carbon fibers by an electrolytic potential method[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2025, 52(2):47-53.
- [10] 谢顺利, 雷红红, 张春丽, 等. 表面改性对碳纤维及其复合材料性能影响的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(11):186-195.
XIE Shunli, LEI Honghong, ZHANG Chunli, et al. Progress in surface treatment of carbon fiber and composite material[J]. Surface Technology, 2022, 51(11):186-195.
- [11] 李润民, 贺福. 气相处理对碳纤维表面及其复合材料性能的影响[J]. 材料科学进展, 1993, 7(2):173-178.
LI Runmin, HE Fu. Influence of gaseous surface treatment upon carbon fibers and its composites[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1993, 7(2):173-178.
- [12] 宋晨晨, 钱建华, 刘坐镇, 等. 液相氧化法处理碳纤维对热塑性PVDF/CF力学性能的影响[C]//上海市化学化工学会2014年度学术年会论文集. [S.l.: s.n.], 2014:43, 46.
SONG Chenchen, QIAN Jianhua, LIU Zuozhen, et al. Effect of liquid phase oxidation treatment on carbon fiber on the mechanical properties of thermoplastic PVDF/CF composites[C]//Proceedings of the 2014 Annual Academic Conference of the Shanghai Society of Chemistry and Chemical Industry. [S.l.: s.n.], 2014: 43, 46.
- [13] 刘杰, 白艳霞, 田宇黎, 等. 电化学表面处理对碳纤维结构及性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(2):16-25.
LIU Jie, BAI Yanxia, TIAN Yuli, et al. Effect of the process of electrochemical modification on the surface structure and properties of PAN-based carbon fibers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(2):16-25.
- [14] 侯永平, 王浩静, 李东风. PAN基高模碳纤维阳极氧化的表面处理[J]. 化工进展, 2007, 26(4):558-562.
HOU Yongping, WANG Haojing, LI Dongfeng. Anodic oxidation of PAN-based high-modulus carbon fibers[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(4):558-562.
- [15] 马全胜, 刘海霞, 丛宗杰, 等. 聚醚醚酮树脂用耐高温碳纤维上浆剂研究进展[J/OL]. 复合材料学报, 2025:1-15[2025-12-15]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250515.002>.
MA Quansheng, LIU Haixia, CONG Zongjie, et al. Research progress of high temperature resistance carbon fiber sizing agents for polyetheretherketone resin[J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025: 1-15[2025-12-15]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250515.002>.
- [16] 谢雨佳, 谢鑫淋, 裴维兵, 等. 耐高温溶液型聚芳醚酮上浆剂的

- 制备及其应用[J].应用化学,2025,42(1):78-85.
- XIE Yujia, XIE Xinlin, PEI Weibing, et al. Preparation and application of thermostable solvent poly(aryl ether ketone)sizing agent [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2025, 42(1):78-85.
- [17] 刘玉文,张志谦,李凤梅,等.高能电子束辐射对碳纤维表面结构的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2002,20(3):197-203.
- LIU Yuwen, ZHANG Zhiqian, LI Fengmei, et al. Effect of EB irradiation on the structures of carbon fiber surface[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2002, 20(3):197-203.
- [18] EHLERT G J, LIN Y R, SODANO H A. Carboxyl functionalization of carbon fibers through a grafting reaction that preserves fiber tensile strength[J]. Carbon, 2011, 49(13):4 246-4 255.
- [19] MA L C, ZHU Y Y, WANG M Z, et al. Enhancing interfacial strength of epoxy resin composites via evolving hyperbranched amino-terminated POSS on carbon fiber surface[J]. Composites Science and Technology, 2019, 170:148-156.
- [20] 陈林发,谢小林,江洪流,等. POSS/GO复合接枝碳纤维/环氧树脂复合材料性能研究[J].热固性树脂,2024,39(1):43-49.
- CHEN Linfa, XIE Xiaolin, JIANG Hongliu, et al. Study on the properties of POSS/GO composite grafted carbon fiber/epoxy resin composite materials[J]. Thermosetting Resin, 2024, 39(1):43-49.
- [21] 叶贝.等离子体预处理速率对碳纤维复合材料力学性能影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.
- YE Bei. Effect of plasma pretreatment rate on mechanical properties of carbon fiber composites[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [22] 董哲瑄,陈平,刘兴达.等离子体处理对CF/PI复合材料高温界面性能的影响[J].材料研究学报,2023,37(12):900-906.
- DONG Zhexuan, CHEN Ping, LIU Xingda. Effect of plasma treatment on interfacial properties of CF/PI composites at elevated temperatures[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2023, 37(12):900-906.
- [23] 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.
- XIONG Shu, ZHAO Yan, LIU Zhaobo. Effect of plasma treatment on the interfacial properties of domestic high strength carbon fiber composites[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(8):114-118.
- [24] 张陆,陈国安,龚越,等.高分子表面改性处理及其增强界面粘接研究进展[J].南京大学学报(自然科学),2025,61(2):333-351.
- ZHANG Lu, CHEN Guoan, GONG Yue, et al. Research progress of polymer surface treatment and modification to enhance interfacial adhesion[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2025, 61(2):333-351.
- [25] 董哲瑄.等离子体处理对碳纤维表面性能及其复合材料高温界面性能的影响[D].大连:大连理工大学,2023.
- DONG Zhexuan. Effect of plasma treatment on surface properties of carbon fiber and high-temperature interface properties of its composites[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2023.
- [26] 李晨颖.基于热可逆Diels-Alder反应优化碳纤维复合材料界面及界面机理研究[D].南昌:南昌航空大学,2021.
- LI Chenying. Optimization of the interface of carbon fiber composites via thermally reversible Diels-alder reaction and its interface mechanism[D]. Nanchang:Nanchang Hangkong University, 2021.

~~~~~

(上接第121页)

- [17] 梁森,张术国,梁天锡,等.大阻尼高比刚度复合材料仪表板结构设计及动态特性分析[J].振动与冲击,2017,36(6):212-217.
- LIANG Sen, ZHANG Shuguo, LIANG Tianxi, et al. Structural design and dynamic characteristics of large damping and high specific stiffness composite panels[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(6):212-217.
- [18] YAO X L, TANG D, PANG F Z, et al. Exact free vibration analysis of open circular cylindrical shells by the method of reverberation-ray matrix[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2016, 17(4):295-316.
- [19] XIE X, JIN G Y, LI W Y, et al. A numerical solution for vibration analysis of composite laminated conical, cylindrical shell and annular plate structures[J]. Composite Structures, 2014, 111:20-30.
- [20] XIANG Y, HUANG Y Y, LU J, et al. New matrix method for analyzing vibration and damping effect of sandwich circular cylindrical shell with viscoelastic core (English Edition) [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2008, 29(12):1 587-1 600.
- [21] CAO X T, ZHANG Z Y, HUA H X. Free vibration of circular cylindrical shell with constrained layer damping (English Edition) [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2011, 32(4):495-506.
- [22] 王光和,梁森,周运发,等.嵌入式阻尼环筋开口圆柱壳的振动性能分析[J].复合材料科学与工程,2020(2):54-61.
- WANG Guanghe, LIANG Sen, ZHOU Yunfa, et al. Vibration analysis of the embedded co-curing damping composite ring-opening stiffened cylindrical shells[J]. Composites Science and Engineering, 2020(2):54-61.
- [23] ZHANG S H, CHEN H L. A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers[J]. Composite Structures, 2006, 74(1):63-69.