

引文格式: 王犇, 李庆, 刘文斌, 等. 紫外纳秒激光处理对碳纤维增强树脂基复合材料胶接强度影响研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(20): 109–114, 134.

WANG Ben, LI Qing, LIU Wenbin, et al. Study on effect of ultraviolet nanosecond laser treatment on bonding strength of carbon fiber reinforced polymer[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(20): 109–114, 134.

# 紫外纳秒激光处理对碳纤维增强树脂基复合材料胶接强度影响研究

王犇<sup>1</sup>, 李庆<sup>2</sup>, 刘文斌<sup>2</sup>, 张栋梁<sup>1</sup>, 张琛<sup>1</sup>, 赵练<sup>2</sup>, 郭煜晨<sup>2</sup>, 赵朕<sup>2</sup>

(1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300;

2. 季华实验室, 佛山 528200)

[摘要] 对碳纤维增强树脂基复合材料进行了紫外纳秒激光表面处理研究, 旨在优化其表面形貌以提升胶接强度。采用不同激光功率与脉冲频率对材料表面进行处理, 并通过接触角测试、表面能分析及力学测试评价其效果。研究揭示了光化学效应和光热效应的协同作用机制, 并分析了能量密度对表面形貌的影响规律。试验表明, 在适当的能量密度(160~203 mJ/cm<sup>2</sup>)下, 可有效去除材料表面的环氧树脂, 暴露出完整碳纤维表面, 显著提升材料表面能和润湿性, 其中水滴接触角由 82.7° 降至 69.7°, 单搭接剪切强度从 23.6 MPa 提升至 26.7 MPa, 增幅为 13.1%。然而, 能量密度超过 235 mJ/cm<sup>2</sup> 会导致碳纤维断裂, 降低力学性能。本研究验证了紫外纳秒激光处理技术在提升材料胶接性能方面的有效性, 为航空航天等领域提供了高效的表面处理解决方案。

关键词: 激光处理; 复合材料; 环氧树脂; 胶接增强; 浸润性

中图分类号: V258; V261.8

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.20.109

## Study on Effect of Ultraviolet Nanosecond Laser Treatment on Bonding Strength of Carbon Fiber Reinforced Polymer

WANG Ben<sup>1</sup>, LI Qing<sup>2</sup>, LIU Wenbin<sup>2</sup>, ZHANG Dongliang<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>1</sup>, ZHAO Lian<sup>2</sup>, GUO Yuchen<sup>2</sup>, ZHAO Zhen<sup>2</sup>

(1. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China;

2. Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

[ABSTRACT] The ultraviolet nanosecond laser surface treatment of carbon fiber-reinforced polymer was studied to optimize surface morphology and enhance bonding strength. The samples were treated with various laser powers and pulse frequencies, and the effects were evaluated using contact angle measurements, surface energy analysis, and mechanical testing. The synergistic mechanisms of photochemical and photothermal effects were revealed, and the influence of energy density on surface morphology was analyzed. The results show that an appropriate energy density (160–203 mJ/cm<sup>2</sup>) effectively removes epoxy resin, exposes intact carbon fiber surfaces, and significantly improves surface energy and wettability. The water contact angle decreases from 82.7° to 69.7°, and the single lap shear strength increases from 23.6 MPa to 26.7 MPa, with an improvement of 13.1%. However, energy density exceeding 235 mJ/cm<sup>2</sup> leads to carbon fiber breakage, reducing mechanical performance. This study demonstrates the effectiveness of ultraviolet nanosecond laser treatment in enhancing sample bonding performance, offering an efficient surface treatment solution for applications in aerospace and other demanding fields.

Keywords: Laser treatment; Composite material; Epoxy resin; Bonding reinforcement; Wettability

近年来,航空航天工业对轻量化和高性能材料的需求不断增加。碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)凭借卓越的强度重量比、高刚性和优异耐热性等特点,成为飞行器结构材料的首选<sup>[1-3]</sup>。然而,飞行器行业发展对复合材料提出了新的要求,特别是在高负荷、高应力环境中,复合材料粘接强度不足可能引发结构失效,严重影响材料的整体力学性能和长期耐用性。因此,提升CFRP粘接性能不仅是确保结构完整性和安全性的关键,也是其在航空航天等高要求领域中广泛应用的前提。

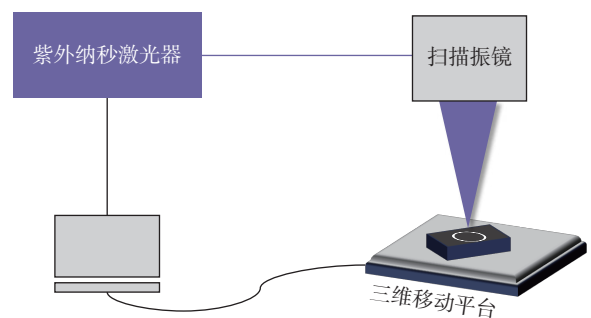
为应对这一挑战,表面预处理技术已成为增强CFRP胶接性能的必要手段。传统的CFRP表面处理技术包括等离子处理、化学蚀刻等方法,尽管能够有效去除表面污染物,调控表面粗糙度和化学活性,但化学污染与形性调控难以兼顾仍阻碍其应用与发展<sup>[4-5]</sup>。相比之下,激光表面处理技术凭借高精度和可控性强等特点,能够在不损伤基体材料前提下,有效改善其表面特性,并大幅提高黏接强度<sup>[6-9]</sup>,可以在避免化学污染同时完成界面形性调控,成为航空航天工业复合材料表面处理最具潜力的方法之一<sup>[10-11]</sup>。Romoli等<sup>[12]</sup>利用纳秒激光脉冲在CFRP表面形成微米级凹凸结构,显著增加了胶黏剂与基材接触面积,提升CFRP胶接强度约12%。Oliveira等<sup>[13]</sup>采用波长1024 nm的飞秒激光对CFRP进行表面处理,通过精确控制脉冲能量和扫描速度,观察到了激光诱导的周期性表面结构,这类结构有助于提高纤维与树脂之间粘接强度。Akman等<sup>[14]</sup>则研究了二氧化碳激光处理对表面形貌的影响,发现激光处理次数和刻痕数对机械嵌合作用有重要影响,且红外波段(1064 nm)激光处理更适用于大面积快速处理。特别地,紫外纳秒激光(波长266~355 nm)具有更高光子能量,能够有效分解有机物,且避免热量传递到基材内部,同时其脉冲持续时间极短,在处理过程中几乎不会产生多余热量积累,在碳纤维复合材料表面完整性方面表现优异。Rauh等<sup>[15]</sup>采用紫外脉冲激光(266 nm波长)对CFRP表面进行清洁处理,通过与不同激光参数对表面清洁效果进行对比,发现其相较于传统打磨方法粘接强度显著提升。然而,各激光参数对复合材料形性影响规律与紫外纳秒激光处理提升碳纤维胶接性能的深层物理机制有待进一步研究。

为此,本文针对紫外纳秒激光处理CFRP表面的作用机制开展了系统研究,重点分析了激光能量密度、脉冲频率等关键参数对表面形貌的调控规律。通过优化激光表面处理工艺,实现表面形貌与润湿性的精确控制,并探讨光化学与光热效应在去除环氧树脂及改善胶接性能中的协同作用机理。本研究为提升CFRP的胶接性能提供了新思路,同时为航空航天领域高性能复合

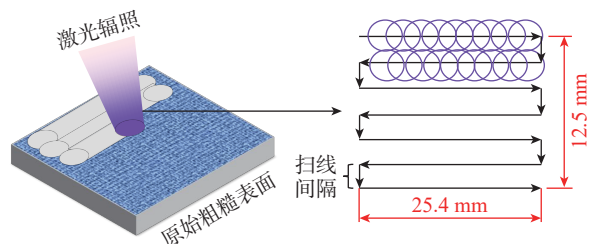
材料的应用需求提供了可靠技术支撑。

## 1 试验及方法

如图1(a)所示,复合材料表面处理采用紫外纳秒激光加工平台,该平台由紫外纳秒激光器 FOTIA-ONE-355-10 W、扫描振镜、三维移动平台与计算机控制系统4部分共同组成。将复合材料样品放置于三维移动平台上,光源发射的紫外纳秒激光(波长 $\lambda$ 为355 nm,最大功率 $P$ 为10 W,脉冲宽度 $\tau$ 为15 ns)经扫描振镜传输引导至样品表面。计算机控制系统一端连接紫外纳秒激光器与振镜系统,另一端连接三维移动平台。通过控制激光器输出可以实现激光功率调整,通过控制振镜可以实现扫描间距与扫描速度控制,通过控制三维移动平台可以精准找到激光焦点位置。图1(b)展示了紫外纳秒激光在复合材料表面的加工路径。在处理过程中,激光束通过扫描振镜引导,以平行的方式覆盖于待处理表面。每条扫描线的长度为25.4 mm,扫描间隔为指定的垂直距离,以确保均匀覆盖整个表面。激光束的扫描总宽度为12.5 mm,这意味着激光将在水平与垂直方向上多次重复,以确保均匀处理整个目标区域。这种路径设计使激光辐照能够有效去除或改性复合材料表面,同时避免热量过度集中或处理不均匀,从而达到优化表面特性的目的。本研究选用的预浸料M21C/34%/UD194/IMA/150ATL(Hexcel)为M21C中模高强碳纤维环氧树脂单向带,预浸料固化后的单层厚度为0.187 mm,密度为1.285 g/cm<sup>3</sup>。



(a) 紫外纳秒激光加工平台



(b) 激光加工扫描策略

图1 激光处理示意图

Fig.1 Schematic of laser processing

将复合材料线切割为  $101.2\text{ mm} \times 25.4\text{ mm} \times 1.68\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  厚) 的矩形块, 备用。本研究选用的胶黏剂为  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  固化的、复合材料用 LOCITIE EA 7000 050NW AERO 结构胶黏剂 (汉高), 其具有低黏度、浸渍性能优良、抗疲劳、耐热、不易开裂等特点。

为评估不同工艺参数对复合材料样品表面微观形貌与浸润性能的影响, 采用多种精密仪器对其进行详细表征和测试。首先, 利用激光共聚焦显微镜 OLS5100-SAF (OLYMPUS), 通过 5 倍物镜对激光处理前后样品表面粗糙度和微观形貌进行表征。此显微镜能够提供高分辨率的三维表面形貌图像, 可揭示不同处理参数对表面结构的影响。使用扫描电子显微镜 (SEM) 和能量色散 X 射线光谱仪 (EDS) 对复合材料表面进行分析, SEM 用于观察材料微观形貌, 以进行精细分析, EDS 则通过检测表面发射 X 射线, 分析材料表面元素组成及分布。两者的结合, 有效揭示了激光处理对复合材料表面形貌和化学成分的影响, 为进一步优化表面处理工艺提供了重要依据。其次, 采用动态接触角测量仪 OCA25 (DATAPHYSICS) 在室温条件下进行接触角测量试验, 可以实时观察液滴在样品表面接触角变化, 从而评估不同处理参数对样品浸润性能的影响。最后, 基于  $100\text{ kN}$  高低温电子万能试验机 5982 (INSTRON) 进行胶接拉伸试验, 以确定最终胶接强度。

为清楚地展示激光处理对复合材料样品表面特性改善效果, 本研究首先对未经处理光滑复合材料表面进行了浸润性能评估。如图 2 所示, 在未经过激光加工的光滑复合材料表面, 水滴的接触角 (CA) 为  $82.7^{\circ}$ , 油滴 (二碘甲烷) 接触角为  $48.2^{\circ}$  (使用了已知的水滴和油滴接触角及相关表面能参数)。经由表面能计算 Owens-Wendt 模型可知, 原始复合材料表面能为  $38.7\text{ mN/m}$ 。

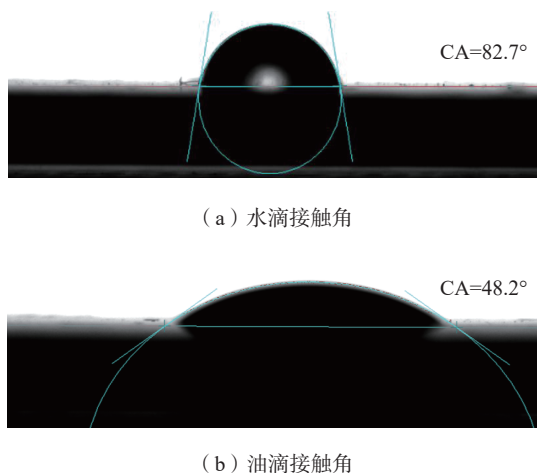


图 2 原始表面浸润性能表征

Fig.2 Initial surface wettability characterization

## 2 结果与讨论

### 2.1 能量密度对复合材料表面形貌的影响

图 3 (a) 是激光抛光前原始材料表面形貌 SEM 测试图像, 其表面光滑均匀, 鲜见局域微米尺度空洞与划痕。为了探究激光脉冲能量与复合材料相互作用关系, 试验固定激光扫描间距为  $10\text{ }\mu\text{m}$ , 光斑直径为  $25\text{ }\mu\text{m}$ , 移动速度为  $500\text{ mm/s}$ , 重复频率为  $80\text{ kHz}$ , 通过仅改变激光功率进行试验, 此时激光功率变化分别为  $2.5\text{ W}$ 、 $5.0\text{ W}$ 、 $7.5\text{ W}$ 、 $10.0\text{ W}$  4 个等级, 对应的激光峰值能量密度分别为  $63\text{ mJ/cm}^2$ 、 $126\text{ mJ/cm}^2$ 、 $189\text{ mJ/cm}^2$ 、 $252\text{ mJ/cm}^2$ 。其中考虑  $63\sim 126\text{ mJ/cm}^2$  材料表面形貌变化差异较大, 因此增加了激光能量密度为  $100\text{ mJ/cm}^2$  时的试验。当激光能量为  $63\text{ mJ/cm}^2$  时, 复合材料表面呈现类气泡状凸起结构, 其结构随机分布呈尺度为微米量级, 且气泡状凸起间相互搭接, 如图 3 (b) 所示; 当激光能量密度为  $100\text{ mJ/cm}^2$  时, 环氧树脂材料表面气泡已经消失, 表面环氧树脂材料附着物明显增加, 如图 3 (c) 所示; 当激光能量密度提升至  $126\text{ mJ/cm}^2$  时, 部分环氧树脂被清除, 表面呈现碳纤维与环氧树脂残留状, 其中环氧树脂呈液滴形态, 大小随机分布于碳纤维表面, 如图 3 (d) 所示; 当在  $189\text{ mJ/cm}^2$  能量密度下, 环氧树脂几乎完全清除, 碳纤维结构未见损伤, 且纤维清晰可见, 其尺度约为  $10\text{ }\mu\text{m}$  左右, 长直排列规整, 表面洁净, 如图 3 (e) 所

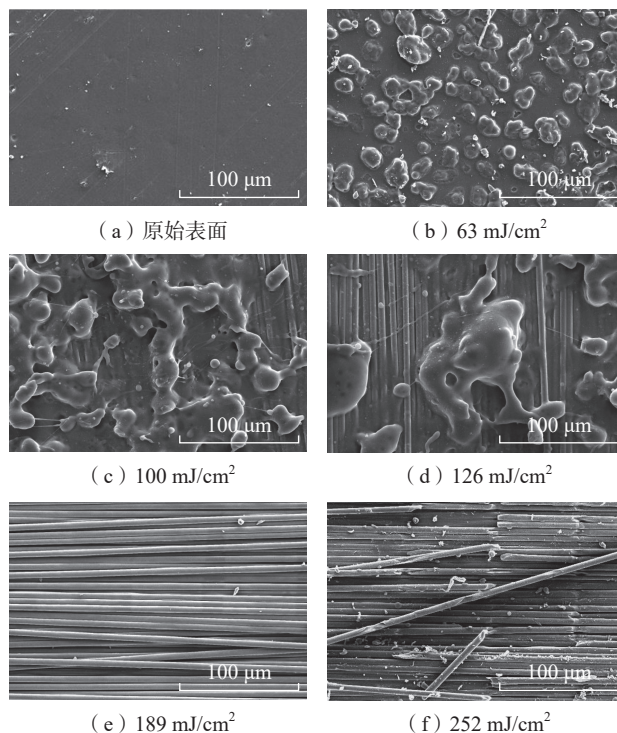


图 3 不同激光能量密度对环氧树脂的影响

Fig.3 Effect of different laser energy densities on epoxy resin

示;当能量密度提升至  $252 \text{ mJ/cm}^2$  时,显微结构形貌明显呈碳纤维断裂状,纳米颗粒附着于碳纤维表面,结构规整度降低,表面杂散颗粒增多,如图 3 (f) 所示。

### 2.2 激光频率对复合材料表面形貌的影响

激光重复频率对材料表面作用的影响,同时也对应激光能量密度变化,即进一步讨论细分激光能量密度对材料表面的影响,其中图 4 中激光频率换算后对应的激光能量密度如表 1 所示。

由表 1 可知,当激光重复频率为  $105 \text{ kHz}$  时,单脉冲激光峰值能量密度是  $145 \text{ mJ/cm}^2$ ,激光处理后的复合材料表面呈现较多剩余环氧树脂材料;当激光重复频率为  $95 \text{ kHz}$ ,激光处理后的表面复合材料环氧树脂基本完

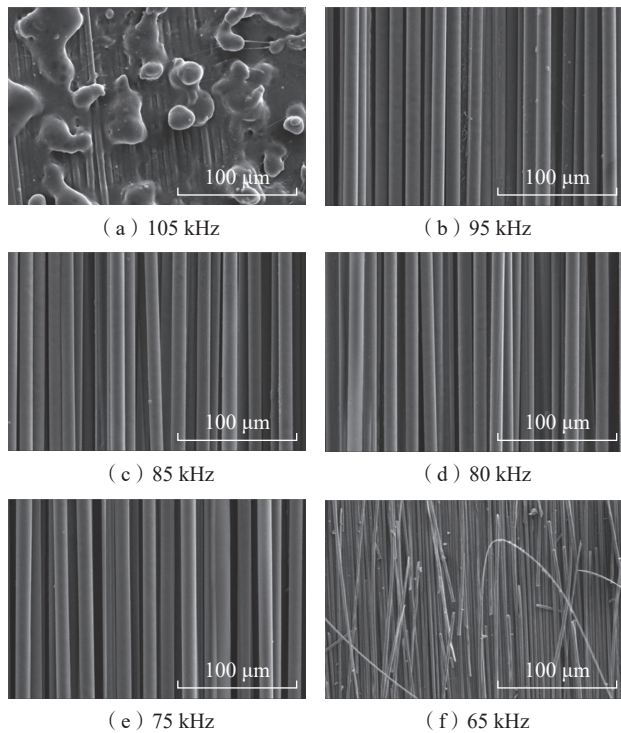


图 4 不同激光频率对环氧树脂的影响

Fig.4 Effect of different laser frequencies on epoxy resin

表 1 激光重复频率对应的激光能量密度

Table 1 Laser repetition frequency corresponding to laser energy density

频率/kHz	能量密度/( $\text{mJ/cm}^2$ )
105	145
95	160
85	179
80	189
75	203
65	235

全去除;当激光重复频率至  $65 \text{ kHz}$  时,测试结果观测到明显的碳纤维断裂。因此,当前试验条件下,激光能量密度为  $160\sim 203 \text{ mJ/cm}^2$  更适用于复合材料表面环氧树脂的去除。

图 5 展示了不同激光重复频率下复合材料表面三维形貌。图 5 (a) 为未经过激光处理的表面,其形貌相对均匀、表面较为光滑,没有明显高度变化;图 5 (b) 对应激光重复频率为  $105 \text{ kHz}$ ,能量密度为  $145 \text{ J/cm}^2$ ,表面形貌变得不均匀,出现明显的高低起伏,显示出局部环氧树脂移除和激光烧蚀迹象;图 5 (c) 展示了激光重复频率  $85 \text{ kHz}$ 、能量密度  $179 \text{ J/cm}^2$  条件下,处理后表面出现了更加显著的周期性结构,且伴随更深的沟槽和表面粗糙度增加,表明随着频率降低、更高能量密度增强了激光与材料的相互作用,导致材料表面环氧树脂去除,裸露出了干净的碳纤维材料;图 5 (d) 对应激光重复频率为  $65 \text{ kHz}$ ,能量密度为  $235 \text{ J/cm}^2$ ,此时激光重复频率进一步降低导致热累积,加剧材料移除与碳纤维断裂。

为进一步明晰 3 种典型形貌对界面浸润性的影响,分别对其开展水滴、油滴接触角测试。图 6 是接触角与激光频率关系曲线,其中,水滴接触角呈现连续下降趋势,从原始表面的  $82.7^\circ$  逐渐降至  $65 \text{ kHz}$  激光处理后的  $69.7^\circ$ ,表明材料表面润湿性增强,水滴在表面更易扩展。同样,油滴接触角也从原始表面的  $48.2^\circ$  降至  $65 \text{ kHz}$  激光处理后的  $30.8^\circ$ ,表明激光处理后复材表面亲油性提升,进一步计算显示,总表面能增加到  $47.51 \text{ mN/m}$ 。总体来看,随着激光频率降低和能量密度增加,材料表面亲水性和亲油性得到增强。值得注意的是, $65 \text{ kHz}$  激光频率下与复合材料相互作用时,材料表面出现碳纤

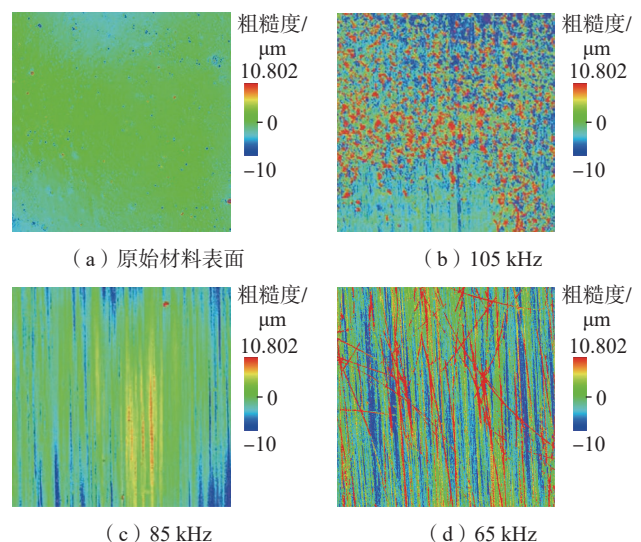


图 5 不同激光频率下碳纤维 / 环氧树脂复合材料表面三维形貌

Fig.5 Three-dimensional surface morphology of CFRP under different laser frequencies

维断裂,形成了许多小凸起和凹陷,液体会由于毛细作用被“吸入”这些结构中,从而降低接触角。但是断裂碳纤维结构会降低胶接强度,后续不再讨论断裂碳纤维的情况。

为了进一步明确激光处理后材料表面元素分布组分变化,分别对处理前后表面进行了EDS测试。图7(a)是未经激光处理界面元素分布,其原始表面元素C、O、S分布均匀,EDS分析显示C元素的质量分数为74.1%,O元素质量分数为20.4%,S元素质量分数为5.5%。从表面能谱图可以看出,原始界面没有明显

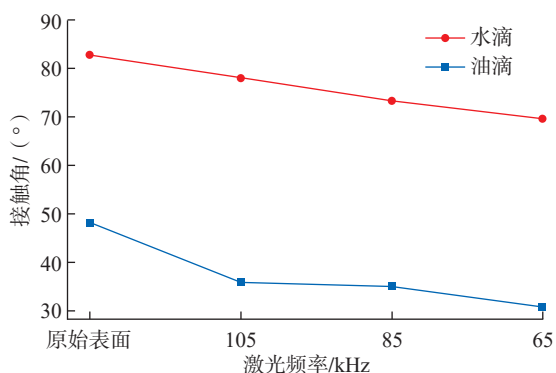


图6 不同激光频率对碳纤维/环氧树脂复合材料浸润角度的影响  
Fig.6 Effect of different laser frequencies on the wettability angle of CFRP

的周期性或条纹状结构,表面形貌保持平整,说明未经过任何处理的表面元素分布较为均匀。相比之下,图7(b)展示了85 kHz激光处理后的表面元素分布,EDS结果显示,C元素质量分数为98.4%,O元素质量分数为1.6%,S元素完全消失,这表明激光处理能够有效清除环氧树脂层,此外从C元素和O元素面分布图中可以观察到显著的周期性条纹结构,表明激光处理高度有序,碳纤维裸露界面形貌相一致。因此,通过激光能量密度可以精确控制表面形貌及化学成分分布。

图8为拉伸应力-应变曲线,展示了材料在85 kHz激光处理条件下的机械性能变化。其中包含两条原始材料的应力-应变曲线(“原始1”和“原始2”)及3条激光处理后的曲线(“85 kHz-1”、“85 kHz-2”和“85 kHz-3”),通过这些曲线可以对比材料在未经和经过激光处理后的力学性能差异。首先,未经过激光处理的两组原始材料曲线(黑色和红色)表现出相似的拉伸行为,两条线最大拉伸应力均值约为23.6 MPa,拉伸应变峰值约为0.2%,随后迅速下降,表明材料在达到最大强度后迅速断裂。这个结果显示原始材料在受到应力时的脆性特征,拉伸应力达到峰值后材料延展性较低。相比之下,经过激光处理的材料表现出不同的力学行为,3条激光处理曲线均显示出较大的延展性和抗拉强度,并且激光处理表面平均拉伸应力约为26.7 MPa,相对原始

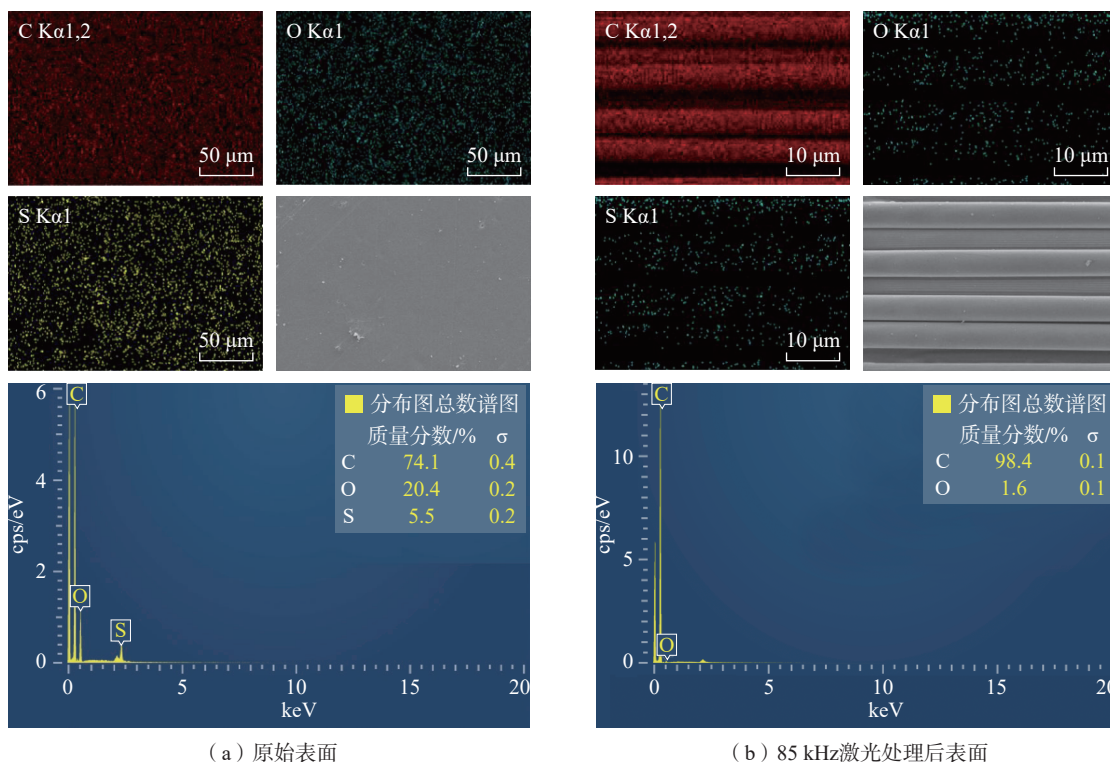


图7 碳纤维/环氧树脂复合材料表面元素分析  
Fig.7 Elemental analysis of CFRP surface

表面提升了 13.1%，表明激光处理完全去除环氧树脂材料后，能够有效增强材料的抗拉强度和延展性。此外，针对碳纤维断裂与表面环氧树脂残留情况，同样进行了拉伸测试，结果和之前报道相一致，胶接强度均不及原始材料界面胶接强度。

如图 9 所示，原始材料断裂模式主要为界面断裂和胶层断裂，其中胶水层与材料之间存在较多分离区域，表明断裂主要发生在胶水层和基体界面之间，主要原因是胶水层没有很好地与基体结合，导致断裂分离优先发生在界面处。而 85 kHz 激光处理后，断裂模式明显不同，其断裂以胶层间断裂为主，相较于原始断裂，材料界面的分离痕迹显著降低，表明激光处理的碳纤维裸露样品能够增强胶水与材料表面结合强度，使材料本身在拉伸或应力作用下更多发生胶层断裂，而不是简单的界面分离。

### 2.3 试验分析与讨论

紫外激光与复合材料的相互作用机制复杂。本试验中采用的紫外激光具有高能量单光子，其能量为 3.49 eV，超过了环氧树脂中碳—碳单键键能（3.45 eV）。当激光照射到环氧树脂表面时，这些高能光子直接破坏树脂分子中的化学键，触发光化学反应。同时，部分光子能量转化为热量，导致局部温度升高，发生光热反应。在较低能量密度（63 mJ/cm<sup>2</sup>）下，光化学效应占主导地

位，树脂表面的分子键被破坏，材料开始分解，产生的气体无法迅速逸出。在热效应的共同作用下，材料表面形成微小的隆起和凸包。这些隆起增大了表面粗糙度，提升了液体的铺展性，使接触角相较于未处理材料明显减小。当激光能量密度增加至 145 mJ/cm<sup>2</sup> 时，热效应更加明显。局部温度的持续升高，加剧了环氧树脂的分解，残留的树脂显著减少。当能量密度达到 189 mJ/cm<sup>2</sup> 时，激光能量足以引发环氧树脂的彻底光化学和热分解<sup>[15]</sup>，从而暴露出碳纤维。由于碳纤维表面能较高，接触角进一步降低。在更高的能量密度（235 mJ/cm<sup>2</sup>）下，碳纤维表面及内部温度迅速升高，热应力和机械应力超出碳纤维的承受极限，导致纤维断裂。断裂后，碳纤维表面可形成微小裂缝和孔隙，这些结构类似毛细管。当液体接触到这些毛细管时，毛细作用促使液体被吸入孔隙，进一步降低接触角。同理，复合材料表面胶接强度主要由表面能和接触面积决定。因此，当环氧树脂被完全去除而碳纤维未受损时，既保留了碳纤维的韧性和完整性，又通过提升表面能和增加接触面积，实现了最优的胶接强度。这种处理方式在确保碳纤维结构稳定的同时，显著改善了材料胶接性能。

### 3 结论

(1) 激光能量密度（160~203 mJ/cm<sup>2</sup>）可有效去除环氧树脂，暴露碳纤维表面，改善润湿性，水滴接触角由 82.7° 降至 69.7°，表面能提高至 47.5 mN/m；C 元素质量分数提升至 98.4%，表明环氧树脂几乎完全去除。

(2) 激光处理后，CFRP 单搭接剪切强度提高了 13.1%，从 23.6 MPa 升至 26.7 MPa。

(3) 紫外纳秒激光技术能在保证碳纤维完整性的同时，显著提升胶接性能，以提供高效的复合材料制造与修复解决方案。

### 参考文献

[1] WANG G D, MELLY S K. Advanced manufacturing technology for industrial applications[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(1-4): 599-614.

[2] SUN J Y, ZHOU S Y, YAMANAKA K, et al. Thermal effects in Sn coating on a carbon fiber reinforced plastic by cold spraying[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2021, 30(5): 1254-1261.

[3] WANG F Y, BU H C, MA W P, et al. Influence of the different surface treatments on fracture property of CFRP adhesive joint[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(6): 961-975.

[4] KUSANO Y. Atmospheric pressure plasma processing for polymer adhesion: A review[J]. The Journal of Adhesion, 2014, 90(9): 755-777.

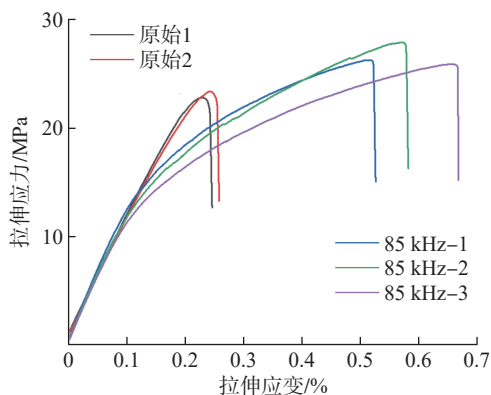
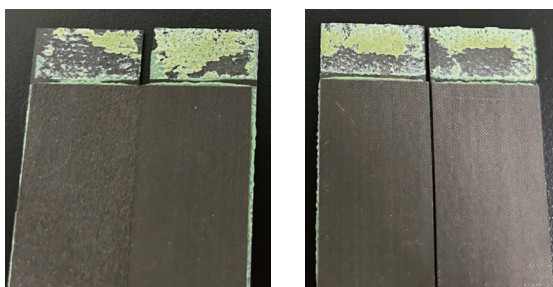


图 8 碳纤维 / 环氧树脂复合材料拉伸应力曲线  
Fig.8 Tensile stress curve of CFRP



(a) 初始表面 (b) 85 kHz 激光处理后表面  
图 9 碳纤维 / 环氧树脂复合材料拉伸断裂面实物图  
Fig.9 Tensile fracture surface photograph of CFRP

(下转第 134 页)

0.123~0.032 mm 之间,2.2~3.0 mm 镢头高度的干涉量范围在 0.132~0.039 mm 之间;随着铆接干涉量的增大,疲劳寿命逐渐升高,干涉量为 0.129 mm 的疲劳寿命是干涉量 0.043 mm 的 2.84 倍,建议 5 mm 补偿头铆钉的优选干涉量区间为 0.084~0.110 mm。

参考文献

[1] 韩志仁. 大飞机数字化制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2016, 56(1/2): 53-57.  
 HAN Zhiren. Key technology for digital manufacturing of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 56(1/2): 53-57.

[2] 刘平, 张开富, 李原. 壁板自动钻铆夹持点布局优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(7): 1625-1630.  
 LIU Ping, ZHANG Kaifu, LI Yuan. Optimization method of dynamic location layout for sheet metal ADR assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(7): 1625-1630.

[3] 陈雪梅, 刘顺涛. 飞机数字化装配技术发展与应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(1/2): 60-65.  
 CHEN Xuemei, LIU Shuntao. Development and application of digital assembly technology for aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(1/2): 60-65.

[4] 赵平. 飞机壁板自动钻铆系统应用研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 191-194.  
 ZHAO Ping. Application research on automatic drilling and riveting system for aircraft panel[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(2): 191-194.

[5] 王巍, 王诚鑫. 大型客机机身对接技术研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(13): 38-41, 53.  
 WANG Wei, WANG Chengxin. Research on docking technology of large aircraft fuselage[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(13): 38-41, 53.

[6] 杨迪. 飞机壁板自动钻铆中预连接工艺和铆接变形研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
 YANG Di. Study on pre-joining process and riveting deformation in automated drilling-riveting of aircraft panel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[7] 王仲奇, 王赢, 郭飞燕, 等. 壁板组件柔性装配工装技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 44-47.  
 WANG Zhongqi, WANG Ying, GUO Feiyan, et al. Tooling technology of flexible assembly for panel component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 44-47.

[8] 刘连喜, 李西宁, 王仲奇, 等. 无头铆钉自动钻铆工艺试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 77-82.  
 LIU Lianxi, LI Xining, WANG Zhongqi, et al. Semi-empirical research on automatic drilling and riveting process of headless rivet[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(1): 77-82.

[9] LIU Y, FANG Q, ZHAO A N, et al. Design of DOB-based riveting force controller for dual-machine horizontal drilling and riveting system[J]. Mechatronics, 2019, 63: 102263.

[10] AAMIR M, GIASIN K, TOLOUEI-RAD M, et al. A review: Drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020,

9(6): 12484-12500.

[11] NAVANEETHAKRISHNAN G, SURESHKUMAR B, PALANISAMY R, et al. Effect of cryogenic treatment on drill tool for enhancing metal cutting operation of aluminium alloy IS737.Gr19000[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1488-1501.

通讯作者: 王宏锋, 高级工程师, 研究方向为飞机装配。

(责编 阳光)

(上接第 114 页)

[5] XIONG S, ZHAO Y, SONG J P. Effect of carbon fiber surface microstructure on composite interfacial property based on image quantitative characterization technique[J]. Materials, 2021, 14(21): 6367.

[6] ROMOLI L, FISCHER F, KLING R. A study on UV laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 449-457.

[7] CRITCHLOW G W, LITCHFIELD R, CURTIS C, et al. Hot and cold cleaning methods: CO<sub>2</sub> and Nd: YAG laser ablation, sodium hydride immersion and CO<sub>2</sub> cryoblasting[J]. Transactions of the IMF, 2009, 87(6): 284-286.

[8] HUANG W, CHENG F, ZUO S, et al. The effects of combined treatments of laser engraving, plasma spraying and resin pre-coating on improving the bonding strength of titanium alloy and carbon fiber-reinforced polymer[J]. Polymers, 2024, 16(14): 2041.

[9] YE Y Y, JIA B S, CHEN J, et al. Laser cleaning of the contaminations on the surface of tire mould[J]. International Journal of Modern Physics B, 2017, 31(16-19): 1744100.

[10] GEBAUER J, BURKHARDT M, FRANKE V, et al. On the ablation behavior of carbon fiber-reinforced plastics during laser surface treatment using pulsed lasers[J]. Materials, 2020, 13(24): 5682.

[11] HERNANDEZ E, ALFANO M, PULUNGAN D, et al. Toughness amplification in copper/epoxy joints through pulsed laser micro-machined interface heterogeneities[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 16344.

[12] ROMOLI L, FISCHER F, KLING R. A study on UV laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 449-457.

[13] OLIVEIRA V, SHARMA S P, DE MOURA M F S F, et al. Surface treatment of CFRP composites using femtosecond laser radiation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 94: 37-43.

[14] AKMAN E, ERDOĞAN Y, BORA M Ö, et al. Investigation of the differences between photochemical and photothermal laser ablation on the shear strength of CFRP/CFRP adhesive joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 99: 102548.

[15] RAUH B, KRELING S, KOLB M, et al. UV-laser cleaning and surface characterization of an aerospace carbon fibre reinforced polymer[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 82: 50-59.

通信作者: 王犇, 工程师, 研究方向为复合材料胶接增强。

赵朕, 助理研究员, 博士, 研究方向为飞秒激光微纳结构加工。

(责编 阳光)