

微波辅助纳秒单脉冲激光辐照CFRP的理论 与实验研究

李东格, 孙正宇, 张 巍*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2026年2月4日; 录用日期: 2026年3月5日; 发布日期: 2026年3月13日

摘 要

为研究微波辅助条件下纳秒脉冲激光作用碳纤维增强复合材料(CFRP)的表面形貌演化规律, 构建了微波与单脉冲激光协同作用的实验平台, 系统考察了微波功率与激光单脉冲能量对材料表面形貌及粗糙度特征的影响。结果表明, 单独纳秒脉冲激光作用下, 随着激光能量的增加, CFRP表面起伏显著增强, 表面形貌呈现出较强的不均匀性; 引入微波辅助后, 在不引发明显宏观烧蚀的前提下, 材料表层初始热状态发生改变, 激光作用区域内表面起伏幅度得到一定程度的抑制。与未加入微波条件相比, 在相同激光参数下, 表面粗糙度指标整体降低, 尤其是反映极端峰谷差异的Rz从10.6038 μm 降低至8.4166 μm , Ra与Rq亦呈现不同程度下降, 表明微波辅助可有效削弱单脉冲激光作用过程中形成的极端峰谷起伏, 改善加工区域内的表面形貌稳定性。相关研究结果可为微波辅助激光加工CFRP工艺参数的优化提供实验参考。

关键词

脉冲激光, 微波辅助, CFRP, 损伤

Theoretical and Experimental Study on Microwave-Assisted Nanosecond Single-Pulse Laser Irradiation of CFRP

Dongge Li, Zhengyu Sun, Wei Zhang*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: February 4, 2026; accepted: March 5, 2026; published: March 13, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李东格, 孙正宇, 张巍. 微波辅助纳秒单脉冲激光辐照 CFRP 的理论及实验研究[J]. 应用物理, 2026, 16(3): 177-184. DOI: 10.12677/app.2026.163017

Abstract

To investigate the surface morphology evolution of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) under nanosecond pulsed laser irradiation with microwave assistance, an experimental platform combining microwave and single-pulse laser synergistic effects was established. The influence of microwave power and laser single-pulse energy on the material's surface morphology and roughness characteristics was systematically examined. Results indicate that under isolated nanosecond laser pulses, increasing laser energy significantly enhances surface undulations, resulting in pronounced surface irregularities. With microwave assistance, the initial thermal state of the material surface layer changes without inducing noticeable macroscopic ablation, partially suppressing surface undulation amplitude within the laser-treated region. Compared to the microwave-free condition, under identical laser parameters, overall surface roughness metrics decreased. Notably, the Rz value—reflecting extreme peak-to-valley variation—decreased from 10.6038 μm to 8.4166 μm , while Ra and Rq also exhibited varying degrees of reduction. This indicates microwave assistance effectively mitigates extreme peak-to-valley undulations formed during single-pulse laser processing, improving surface morphology stability within the processed area. These findings provide experimental references for optimizing process parameters in microwave-assisted laser processing of CFRP.

Keywords

Pulsed Laser, Microwave-Assisted, CFRP, Damage

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)是以树脂为基体、碳纤维为增强相的先进复合材料,兼具耐高温、高强度、低密度等优良性能,目前已广泛应用于航空航天、汽车、医疗、海洋工程等多个领域。近年来,激光加工技术依托非接触式加工、高精度的突出优势,在复合材料加工领域展现出极大的应用潜力。激光能够对复杂结构完成精细去除与高效烧蚀,尤其适用于 CFRP 这类各向异性材料的高质量加工需求,也正因如此,该技术成为当前相关领域的研究热点之一。同时,微波技术在 CFRP 加工领域的应用关注度也持续提升。该技术借助介电损耗实现分子层面的体积加热,拥有能量利用效率高、受热均匀性好等优势。针对 CFRP 的多相异构与多层复合结构特点,微波还能有效缓解传统热传导加工带来的界面热应力等问题,有助于降低材料热致损伤的可能性[1]-[3]。

近年来,众多学者围绕微波或激光与 CFRP 的相互作用开展了深入研究:在微波加工领域,张静静等人研究微波短时辐射改性碳纤维的界面调控,发现随辐射时间增加,碳纤维表面特性及 O/C 比均提升;经 90 s 微波辐射与化学改性协同处理,碳纤维/树脂界面剪切强度提高 20.47% [4]。王攀等人提出 CFRP 层合板多频能量分散微波固化控温方法,通过多频分能、驻波叠加提升固化温度均匀性,双频加热下其最大温差较单频降低 26% [5]。Ansari S M 等人研究微波在 CFRP 回收及性能恢复中的应用,先经微波辅助化学回收得到碳纤维,再微波诱导其表面原位生长 CNT;改性后纤维制得的复合材料,界面性能提升,层间剪切、极限拉伸强度和层间断裂韧性较未改性样分别提高 8%、29%、19% [6]。Sam Ang Keo 等人探究微波红外热成像技术检测 CFRP 加固混凝土试件缺陷的应用,建立数值模型并在 2.4 GHz/360W 下分析,测试多类缺陷样本且模拟结果经实验验证,评估了天线及实验配置,证实该技术对此类缺陷的识别

潜力显著[7]。在激光方面,王雪辉等人结合自研旋切系统与飞秒激光,开展 CFRP 0.3 mm 孔径盲孔加工研究,通过光束倾斜聚焦消除加工锥度,优化参数后制得 0.15 mm 深平底直盲孔,还实现半圆状异形盲孔加工,加工质量优良,热影响区控制在 5 μm 内[8]。邓彦波等人研究 523、785、1064 nm 激光波长对 CFRP 切割的影响,发现 523 nm 波长切割截面最平整、性能最佳;扫描速度提升可减小热影响区并均匀能量注入,激光功率增大则加深切缝宽度与深度,加剧材料热损伤[9]。Kelsey D 等人分析激光切割 CFRP 的热影响区对其力学性能的影响,提出扩展热影响区概念;经 2 kW 1070 nm 激光实验发现,激光切割样品力学性能较机械切割显著下降,调节辅助气体压力并采用多次扫描,可使热影响区缩小 26%、提升材料力学完整性[10]。Šlevas P 等人针对 CFRP 加工热影响区及质量难题,研究飞秒激光精密加工应用,通过烧蚀切割实验考察脉冲参数影响;发现其低中功率下呈冷加工特征、HAZ 可忽略,确定最优参数,且实现加工速度 858 mm/s、侧壁粗糙度 1.27 μm 的高质量加工,凸显飞秒激光优势[11]。

上述研究主要围绕微波或激光单独与 CFRP 的相互作用展开,证实了微波改性、激光加工等技术在 CFRP 加工中的可行性,而对于微波与纳秒脉冲激光的协同作用,缺少两者协同辐照对 CFRP 损伤程度变化规律的系统研究。针对这一问题,本文以 CFRP 为研究对象,结合同步辐照升温与受热相变特征,开展了微波辅助纳秒单脉冲激光作用下的实验研究,并引入相应的理论分析。通过改变微波功率、激光单脉冲能量等关键参数,系统研究了不同协同辐照条件下 CFRP 的损伤程度演化规律。研究结果可为微波辅助纳秒脉冲激光辐照 CFRP 的工艺参数优化提供一定的参考。

2. 原理

激光能量在 CFRP 表面遵循为:

$$1 = \frac{E_{\text{反射}}}{E_0} + \frac{E_{\text{吸收}}}{E_0} + \frac{E_{\text{透射}}}{E_0} = R + A + T \quad (1)$$

式中 R 表示激光能量的反射率, A 表示材料内部的吸收率, T 表示透过材料的透射率。其中因为碳纤维增强复合材料趋近于不透明,故式中 $T \approx 0$ 。

在空气中,激光入射材料表面时其反射率与吸收率可通过菲涅尔方程表示为:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2)$$

$$A = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2} \quad (3)$$

激光辐照至 CFRP 表面时,能量会与材料的分子或原子进行相互作用,进而被吸收。根据朗伯定律,当激光照射在材料表面时,光强度随着深度 z 呈指数衰减。

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (4)$$

该式表示激光在材料内部深度 z 处的强度分布,随着深度增加,光强度指数衰减。考虑到材料表面对激光的反射,实际进入材料并被吸收的激光强度要扣除反射部分。

$$I = (1-R)I_0 e^{-\alpha z} \quad (5)$$

式中 I 为激光在材料表面反射后的有效入射激光强度; I_0 为入射的激光光强; R 为 CFRP 表面对激光能量的反射占比; α 为激光吸收系数。

在微波加热过程中,微波能量通过电磁波辐射传递到材料中,由于材料的极化特性,会在材料内部产生电磁场。这个电磁场会与材料中的分子或电子产生相互作用,使它们产生振动,从而产生热能。这

个公式表示了微波在材料中产生的功率密度，即材料每单位体积所吸收的微波能量。在本研究中，为定性描述微波场强对能量沉积的影响，采用等效电导模型表示微波功率密度。

$$P = \frac{1}{2} \sigma E^2 \quad (6)$$

式中， P 为微波功率密度(W/m^3)， σ 为材料的电导率(S/m)， E 为微波电场强度(V/m)。

在微波加热过程中，理想实验所用封闭腔体中包含 CFRP 与空气等多种介质。由于 CFRP 具有一定介电损耗，电磁波在传播过程中除发生相位变化外，其幅值亦会随传播距离产生衰减。因此，在定性分析中可将一维电场分布表示为：

$$E_{(z)} = E_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) e^{-\alpha_m z} \quad (7)$$

式中， E_0 为入射电场振幅(V/m)， λ 为微波波长(m)， z 为沿材料厚度方向的传播距离， α_m 为等效衰减常数，用于表征有耗介质中的场强衰减特性。该表达式反映了在有耗介质腔体条件下电场强度空间分布的实际特征。其中驻波的反节点处电场强度最大，能量吸收最剧烈，导致材料边缘温度显著高于中心。结合微波功率密度公式可知，高电场区域对应更高的功率密度，从而得到更高的温度变化。

在微波能量与材料相互作用的研究中，微波的吸收系数是表征材料吸收微波能量效率的关键参数。上述公式通过电磁能量吸收与热能转化的耦合，定量定义了吸收能量与入射能量的比值。微波的吸收系数可近似看为：

$$\alpha_{\text{微波}} = \frac{\text{吸收能量}}{\text{入射能量}} = \frac{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 t}{\rho c_p \Delta T} \quad (8)$$

式中 f 表示为微波频率， ε'' 表示为材料介电常数虚部， ε_0 为真空介电常数， t 为微波作用时间， E 表示为电场强度， ρ 与 c_p 分别表示为材料的密度和比热容， ΔT 为材料温升。该表达式反映了在均匀加热假设下，微波能量向热能转化的等效吸收效率。

3. 实验研究

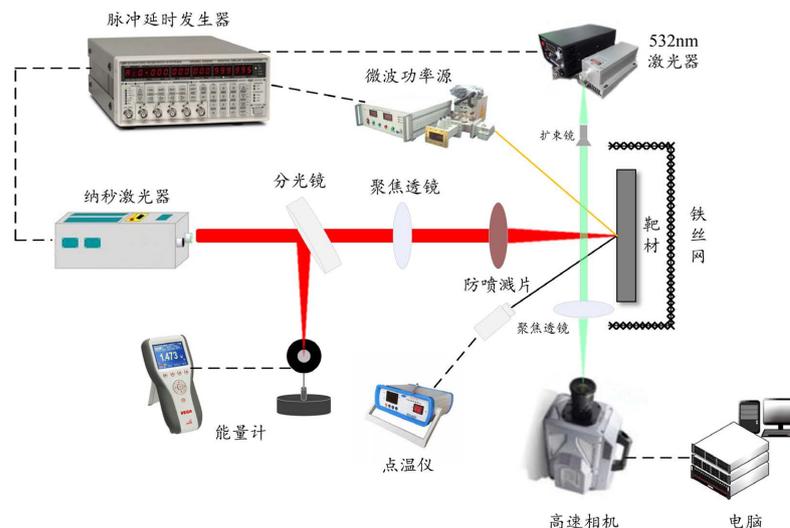


Figure 1. Experimental setup diagram
图 1. 实验装置图

如图 1 所示，激光设备使用 1064 nm 纳秒脉冲激光，脉宽为 10 ns。微波设备选用成都国光电气股份

有限公司生产的 GMG-2012 型微波功率源,微波频率为工业中常用 2.45 GHz;微波与激光组合通过 DG645 数字脉冲延时器实现二者时序同步控制。在实验系统中靶材后设置一圈金属铁丝网结构(主要材料为不锈钢材质,网孔尺寸约 1 cm × 1 cm,与靶材间距约 1 cm)。该结构主要起到微波反射与腔体场分布调节作用。由于金属铁丝网具有较高电导率,微波入射后以反射为主,从而在一定程度上改变腔体内电场分布,并将部分未被靶材吸收的微波重新反射至作用区域。同时,铁丝网结构还可起到微波屏蔽作用,降低微波泄漏风险,满足实验安全要求。实验过程中,微波加热过程由 DG645 统一触发并自动计时,微波作用总时长设定为 40 s,其中在微波作用至第 30 s 时,由 DG645 向激光系统发送触发信号,激光发射单个纳秒脉冲作用于 CFRP 表面。激光脉冲作用完成后,实验系统停止工作,靶材取出并进行后续离线装置的表面形貌与粗糙度测量。通过该方式,可在微波预热达到稳定温升状态后精确触发激光脉冲,避免人工触发带来的时序误差。

4. 实验结果分析

4.1. 单脉冲激光辐照 CFRP

本小节围绕纳秒脉冲激光单独作用条件下 CFRP 的表面形貌、树脂的去除等开展实验研究。在无微波辅助条件下,选取光斑尺寸为 2 mm 不变,改变激光能量为 140 mJ、200 mJ 和 270 mJ。通过对不同激光能量单独作用下的靶材表面形貌的系统对比,实验结果如图 2 所示。明确激光能量对 CFRP 表面损伤特征及加工效果的影响规律,为后续开展微波辅助激光协同作用的对比研究奠定参照基础。

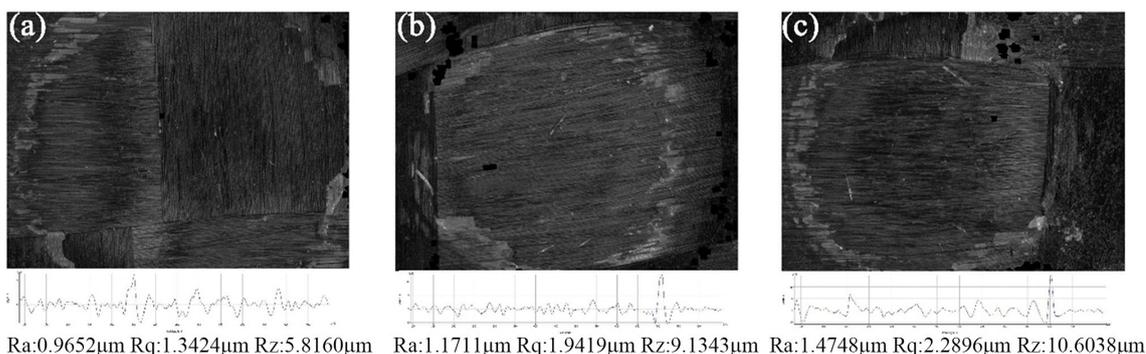


Figure 2. Single-pulse laser irradiation of CFRP under a 3D surface profiler: (a) 140 mJ; (b) 200 mJ; (c) 270 mJ

图 2. 三维表面测量仪下单脉冲激光辐照 CFRP: (a) 140 mJ; (b) 200 mJ; (c) 270 mJ

在光斑尺寸为 2 mm 的条件下,无论激光能量为 140 mJ、200 mJ 还是 270 mJ,激光作用区域周围均表现出较为显著的表面起伏变化特征。三维形貌中可观察到光斑边缘区域树脂去除过程不均匀,整体呈现出较为离散且随机的空间分布形貌。这表明在小光斑、高能量密度条件下,单脉冲激光对树脂的去除主要以瞬态热-力作用为主,去除过程具有较强的非稳定性。

从单激光作用下的粗糙度结果可知,随着激光能量的提升,CFRP 表面的粗糙度参数呈明显上升趋势:当激光能量增大时,Ra 从 0.9652 μm 逐步升至 1.4748 μm ,Rq 由 1.3424 μm 增至 2.2896 μm ,Rz 更是从 5.8160 μm 大幅上升至 10.6038 μm 。这表明激光能量越高,加工过程中表面的微观起伏越显著,局部极端峰谷的差异也随之扩大,表面粗糙程度逐步加剧。

4.2. 微波辅助单脉冲激光辐照 CFRP

4.2.1. 微波功率的影响

将激光单脉冲能量固定为 270 mJ,同时设置 2 mm、3 mm、4 mm 三种不同的光斑尺寸。这一设定旨

在消除光斑尺寸变化及低激光能量条件下加工效果不稳定等因素对实验结果的干扰，从而更精准地聚焦微波功率对 CFRP 热损伤行为的影响；在此基础上，改变微波功率为 1000 W、1100 W 和 1200 W，对 CFRP 靶材开展微波辅助激光单脉冲耦合辐照实验。各参数组合下的靶材宏观形貌如图 3 所示，其中红色框为激光光斑位置，黄色框为高功率微波作用后出现的热影响烧蚀树脂区域。

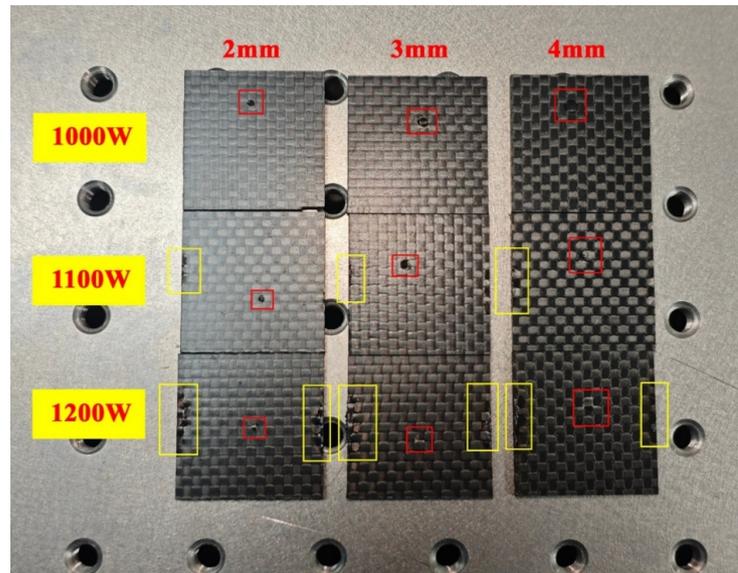


Figure 3. Macroscopic morphology images of CFRP surfaces at different microwave power levels
图 3. 不同微波功率 CFRP 表面宏观形貌图

从实验结果可以看出，随着微波功率的提高，微波辅助激光耦合作用下 CFRP 表面的热损伤程度呈现出明显增强的趋势。当微波功率为 1000 W 时，各光斑尺寸下的靶材表面未出现微波烧蚀情况，激光作用区域可见清晰的光斑痕迹，表明该微波功率条件下微波主要起到预热辅助作用。

当微波功率提高至 1100 W 时，靶材表面开始出现局部颜色加深和轻微烧蚀现象，但该烧蚀主要分布于靶材边缘区域，而激光作用区域及其附近通过宏观观察尚未表现出明显变化。这表明在该功率水平下，微波加热效应已在局部区域达到树脂耐热极限，但整体仍未引发大范围烧蚀。

进一步将微波功率提高至 1200 W 后，不同光斑尺寸下的靶材两侧边缘区域均出现明显烧蚀与碳化现象，微波热影响区显著扩大。在微波辐照过程中，由于电磁波在材料边界处的反射与叠加作用，靶材边缘区域更易形成局部电场增强区，使该区域吸收的微波功率密度高于中心区域。同时，随着功率的提高，整体微波场强上升，原本只在一侧出现的烧蚀现象逐渐向两侧扩展，最终导致双侧边缘区域同时出现明显烧蚀特征。

综合来看，在本实验条件下，微波功率对微波辅助纳秒脉冲激光辐照 CFRP 的加工形貌具有显著调控作用。当微波功率为 1000 W 时，既未引发靶材的烧蚀损伤，又能通过预热效应为后续激光辐照提供足够的热积累，可有效提升激光加工效率；而当微波功率升高至 1100 W 及以上时，微波带来的热量会达到树脂的烧蚀温度，引发靶材边缘的局部烧蚀甚至碳化，反而降低了加工质量。因此结合实验现象，1000 W 可确定为本实验体系下的较优微波功率。

4.2.2. 激光能量的影响

为探究微波辅助条件下激光能量对 CFRP 表面形貌及粗糙度的影响，本小节固定微波功率为上一小节得出的较优实验功率 1000 W，光斑尺寸沿用 4.1 节无微波实验的 2 mm，随后将激光单脉冲能量依次

设置为 140 mJ、200 mJ、270 mJ，对 CFRP 靶材进行微波辅助激光单脉冲耦合辐照处理。

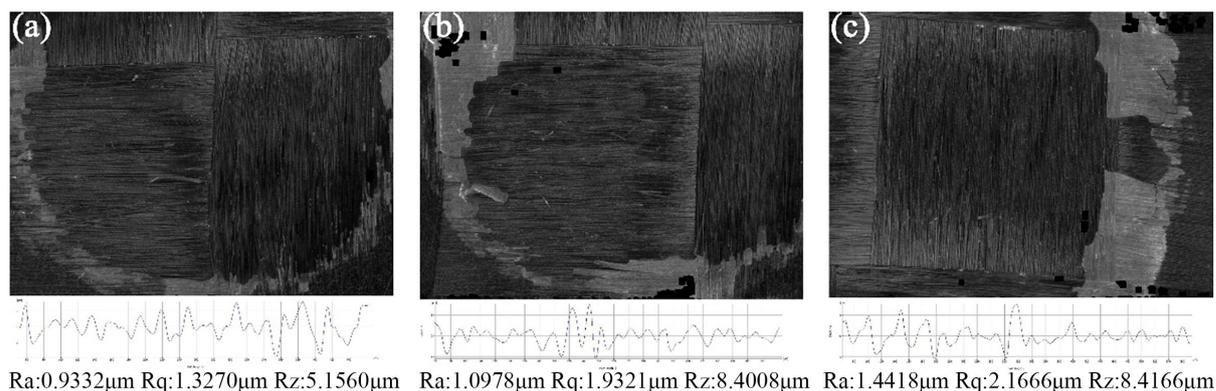


Figure 4. Microwave-assisted CFRP with different laser energies under a 3D surface profiler: (a) 140 mJ; (b) 200 mJ; (c) 270 mJ

图 4. 三维表面测量仪下微波辅助不同激光能量的 CFRP: (a) 140 mJ; (b) 200 mJ; (c) 270 mJ

图 4 为对应参数条件下 CFRP 表面的三维表面形貌。在微波辅助作用下，材料整体热状态较为一致，激光能量的变化主要影响局部形貌细节，而对整体形貌的影响相对有限。但随着激光能量的增加，光斑区域周围树脂发生体积膨胀并脱离纤维的区域明显扩大，在三维形貌中表现为白色区域范围的不断增大，反映出树脂基体在协同加热条件下发生明显软化、膨胀并逐渐脱离纤维束。同时，光斑周边区域的树脂形貌逐渐趋于平整和连续，表明在较高激光能量条件下，树脂在微波与激光协同作用下的热响应过程更加充分且稳定。

从粗糙度结果来看，在未使用微波辅助相同激光参数条件下，引入微波辅助后 CFRP 表面粗糙度参数整体呈现下降趋势。微波辅助条件下 Ra 与 Rq 略有降低，而 Rz 的下降幅度尤为明显，表明加入微波辅助有效削弱了加工过程中形成的局部极端峰谷起伏。尤其激光能量为 270 mJ 时，Rz 由单激光作用下的 10.6038 μm 降低至微波辅助条件下的 8.4166 μm ，说明微波的引入在增强树脂热响应与去除能力的同时，使表面形貌变化过程更加平缓可控，有助于抑制剧烈瞬态作用引起的深凹或突起结构。

5. 结论

本研究围绕微波辅助纳秒单脉冲激光作用碳纤维增强复合材料(CFRP)的加工损伤问题，系统开展了实验研究，重点分析了微波功率与激光单脉冲能量对表面形貌及粗糙度特征的影响规律。实验结果表明，在单独纳秒脉冲激光作用条件下，随着激光能量的增加，CFRP 表面粗糙度参数 Ra、Rq 与 Rz 均呈现显著上升趋势，表面微观起伏增强，局部深凹与尖锐突起等极端形貌特征明显增多，反映出单脉冲激光瞬态作用下热力耦合作用的增强。

引入微波辅助后，材料的损伤行为与表面形貌演化规律发生明显改变。实验发现，微波功率对加工过程具有显著调控作用，其中 1000 W 为较优辅助功率：在该功率下，微波预热可在不引发明显宏观烧蚀的前提下促进热量积累；当微波功率提高至 1100 W 及以上时，受电场叠加效应影响，靶材边缘区域出现明显烧蚀与碳化现象，加工稳定性显著下降。

在固定微波功率为 1000 W 的条件下，随着激光单脉冲能量的增加，树脂基体的热响应更加充分，激光作用区内表面形貌趋于平整，粗糙度参数整体降低，尤其 Rz 由 10.6038 μm 降低至 8.4166 μm ，表明微波辅助能够有效削弱单脉冲激光引发的瞬态极端峰谷特征，抑制深凹或突起结构的形成。

本研究揭示了微波辅助单脉冲激光辐照 CFRP 的基础规律。考虑到实际加工中多脉冲热累积的特点，

后续将开展多脉冲定点钻孔与直线刻蚀实验等，考察其对热影响区及表面质量的影响，进一步验证微波辅助方法的应用潜力。

参考文献

- [1] 胡文华, 曾文蕾, 李学磊, 等. 碳纤维复合材料加工研究综述[J]. 上海第二工业大学学报, 2023, 40(1): 39-46.
- [2] 刘善国. 国外飞机先进复合材料技术[J]. 航空制造技术, 2014(19): 26-31.
- [3] 罗银胜, 林家辉, 范方强, 等. 碳纤维增强聚合物基复合材料的海洋应用[J]. 现代塑料加工应用, 2025, 37(2): 5-8.
- [4] 张静静, 梁森, 汤超. 微波对碳纤维的改性作用及其对电子束固化 CFRP 界面性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3900-3911.
- [5] 王攀, 郭嘉炜, 周靖, 等. 多频能量分散的 CFRP 层合板微波固化温度场控制方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(17): 96-102.
- [6] Ansari, M.S., Zafar, S. and Pathak, H. (2025) Upcycling CFRP Waste for Aerospace Applications: Recovery of Carbon Fibers, CNT Growth, and Composite Fabrication. *Polymer Composites*, **46**, S142-S158. <https://doi.org/10.1002/pc.29771>
- [7] Keo, S.A., Szymanik, B., Le Roy, C., Brachelet, F. and Defer, D. (2023) Defect Detection in CFRP Concrete Reinforcement Using the Microwave Infrared Thermography (MIRT) Method—A Numerical Modeling and Experimental Approach. *Applied Sciences*, **13**, Article 8393. <https://doi.org/10.3390/app13148393>
- [8] 王雪辉, 陈航, 冯新康, 等. 碳纤维飞秒激光旋切盲孔加工工艺研究[J]. 应用激光, 2023, 43(1): 119-125.
- [9] 邓彦波, 王峰, 李建国. 车用 CFRP 脉冲超皮秒激光切割参数优化及质量分析[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(4): 343-347.
- [10] Kelsey, D., Elkington, H., Jackson-Crisp, A., Harper, L., Marithmu, S. and Voisey, K.T. (2024) Laser Cutting of CFRP Using Novel Cutting Strategies. *Procedia CIRP*, **124**, 509-512. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.163>
- [11] Šlevas, P., Minkevičius, J., Ulčinas, O., Orlov, S., Vanagas, E., Bilousova, A., *et al.* (2025) An Investigation of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Ablation by Femtosecond Laser Pulses for Further Material Cutting. *Coatings*, **15**, Article 104. <https://doi.org/10.3390/coatings15010104>