

纳秒脉冲激光切割碳纤维增强塑料的数值模拟与实验研究

赵星宇, 张 巍

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月10日; 录用日期: 2025年4月9日; 发布日期: 2025年4月27日

摘 要

本文建立了纳秒脉冲激光切割碳纤维增强复合材料(CFRP)的多物理场仿真模型, 分析了激光参数对CFRP的温度分布及加工结果的影响。通过对比不同脉冲重叠率对热影响区和切割深度的影响, 确定了50%的脉冲重叠率可获得更优的加工结果。在实验部分, 对CFRP进行了切割实验, 验证了仿真结论。研究了在50%的脉冲重叠率下, 不同脉冲能量密度对加工性能的影响。实验结果表明, 当脉冲能量密度为203.8 J/cm², 激光扫描次数为18次时, 切割效果最佳。研究结果为优化纳秒脉冲激光切割CFRP提供了有价值的理论见解和实践指导。

关键词

碳纤维增强复合材料, 脉冲重叠率, 激光切割, 多物理场仿真

Numerical Simulation and Experimental Study of Nanosecond Pulsed Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic

Xingyu Zhao, Wei Zhang

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

Received: Mar. 10th, 2025; accepted: Apr. 9th, 2025; published: Apr. 27th, 2025

Abstract

This paper presents a multi-physics field simulation model for nanosecond pulsed laser cutting of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites to analyze the effects of laser parameters on the temperature distribution and processing outcomes of CFRP. By comparing the impact of different

pulse overlap rates on the heat-affected zone and cutting depth, it was determined that a 50% pulse overlap rate yielded superior machining results. In the experimental section, cutting tests on CFRP were conducted to validate the simulation conclusions. The study examined the influence of varying pulse energy densities on machining performance under a 50% pulse overlap rate. Experimental results show that the optimal cutting effect is achieved when the pulse energy density is 203.8 J/cm², with 18 laser scans. These findings offer valuable theoretical insights and practical guidelines for optimizing nanosecond pulsed laser cutting of CFRP.

Keywords

Carbon Fiber Reinforced Plastic, Pulse Overlap Rate, Laser Cutting, Multi-Physics Simulation

Copyright © 2025 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

碳纤维复合材料(CFRP)是一种以碳纤维作为增强材料,树脂基体作为粘结剂的高性能复合材料。由于其具备轻质、高模量、高强度、低膨胀性及耐腐蚀等显著优势,CFRP被广泛应用于航空航天、汽车工业、体育器材等多个领域[1][2]。因此,CFRP在加工方面提出了更高的要求。激光加工作为一种先进的现代加工技术,与传统加工方法相比,具有明显的优势,能够有效降低加工成本、提高加工精度并获得更优质的加工效果。激光切割CFRP具有非接触式加工的特点,能够显著减少材料的变形和损伤,同时适用于复杂形状的加工,提升了加工的灵活性和适用性[3]-[5]。

李元成[6]使用Nd:YAG毫秒脉冲激光对CFRP进行切割实验,对加工后的形貌质量和元素成分进行分析,结果表明,加工后材料存在变形,产生微小的空洞、裂纹以及热损伤等现象,通过调节激光参数,获得了较好的加工质量。吕瑞虎[7]优化了激光切割CFRP的加工质量,通过有限元模拟和试验,分析了激光功率、扫描速度、光斑半径等参数对CFRP热影响区和切缝宽度的影响规律,以及对CFRP力学性能的影响。Ren[8]研究了皮秒激光切割CFRP时工艺参数对热影响区和切缝宽度的影响。研究表明,扫描速度对热影响区和切缝宽度的影响最大,其次是激光功率,脉冲频率的影响相对较小。Leone[9]在研究CFRP的激光切割过程中,深入探讨了准连续波(QCW)光纤激光器的应用。研究表明,通过采用高脉冲功率(最高可达4.5 kW)和短脉冲持续时间(0.05 ms)的工艺参数,可以有效抑制热影响区的生成。

通过对国内外研究现状的对比分析可以发现,国内外学者主要采用超短脉冲激光器或连续激光器进行碳纤维复合材料的加工研究,对于纳秒激光加工CFRP的研究相对较少。因此,本研究利用多物理场仿真软件,建立了纳秒脉冲激光切割CFRP的多物理场仿真模型,通过调整激光参数,分析了多层CFRP激光切割过程中三维温度场的动态分布及其对加工质量的影响。随后,开展了纳秒脉冲激光切割CFRP的实验研究,观察了加工后的微观形貌,并进行了详细的数据分析。

2. 仿真研究

2.1. 模型假设

对于激光切割CFRP过程很复杂,涉及到了很多因素,为了顺利模拟温度场的分布,我们做了如下假设:

- (1) 材料去除方式为气化,同时忽略了加工过程中产生的等离子屏蔽效应,CFRP气化温度如表1所示;

- (2) 环氧树脂为各向同性均匀分布，碳纤维为正交各向异性均匀分布；
(3) 不考虑随着离焦量随加工深度的增加而变化。

Table 1. Material parameters

表 1. 材料参数

	环氧树脂	碳纤维
比热 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	1800	752.76
气化温度($^{\circ}\text{C}$)	350	3500
热膨胀系数 α/K^{-1}	-4.1×10^{-6}	-2.4×10^{-6}
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.8	1.21
热导率 $k/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.47	84 (轴向) 8.4 (纵向)

2.2. 激光热源的建立

如图 1 所示，为纳秒脉冲激光切割 CFRP 的二维机理图，其展示了主要的加工机理，包括热效应、应力剥离等物理过程。纳秒脉冲激光切割 CFRP 的核心机理是热效应。因此，激光作为热源作用于材料。由于 CFRP 对激光的透射率极低，激光与 CFRP 的相互作用主要集中在材料表面，材料对激光的吸收主要表现为表面吸收。基于此，我们在仿真中采用了高斯分布的面热源来模拟激光光源。

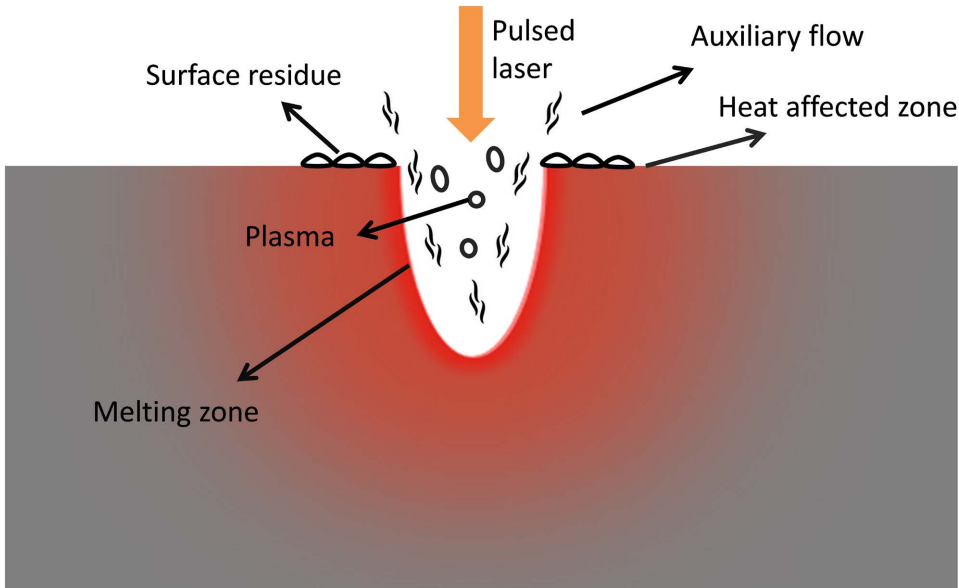


Figure 1. Two-dimensional mechanism of CFRP cutting by nanosecond pulsed laser

图 1. 纳秒脉冲激光切割 CFRP 二维机理图

因此我们得到了激光热流密度公式：

$$q_0 = \left(\frac{2P}{\pi R^2} \right)^{-2} \left(\left(\frac{x - v_0 t}{R} \right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{R} \right)^2 \right) \quad (1)$$

式中 P 是激光功率， R 是光斑半径， x_0 是激光光斑横坐标， y_0 是激光光斑横坐标， v_0 是光源移动速度， t 是时间。

2.3. 边界条件的建立

材料温度只要高于绝对零度，都会以辐射的方式向外发射电磁波，根据物体的温度和发散特性，辐射的波长和强度会有所不同。对于激光加工 CFRP，由于材料升温后与周围环境温度存在明显的差异。因此，热辐射现象会一直存在加工过程中。在研究激光加工 CFRP 的过程中，通过分析发现相较于热辐射的能量耗散，热传导与热对流在该过程中占据主导地位，因此。在激光加工 CFRP 数值模拟过程中只考虑这两类传热机制。

对于激光加工温度场的建立，需构建包含初始条件和边界约束的控制方程组。在三维瞬态传热问题中，主要涉及三类边界条件的合理设定。

第一类 Dirichlet 条件规定表面温度分布，本文在激光加工的环境主要是在室温下进行的，因此初始温度设置为 293.15 K。

第二类 Neumann 条件描述热流密度，通过上文可知激光光束呈现高斯分布，以表面热流方式作用在材料表面。

第三类 Robin 条件则表征对流换热过程，通过上文分析的热对流机制，本文设置 CFRP 与周围的对流系数为 10 W/(m·K)。

2.4. 几何模型建立

仿真中树脂为均匀各向同性材料，碳纤维为正交各向异性材料，为了更好的体现加工效果，本文构建了 CFRP 的三维几何模型，尺寸为 15.2 mm × 12.4 mm × 1.2 mm 的三维几何模型。该模型由环氧树脂表层和碳纤维组成，碳纤维以丝束为单位，为了简化计算，内部采用三层碳纤维建模，每一层的半径为 0.2 mm，厚度为 0.4 mm。纤维的排列方向分别为 0°、90°、0°三个方向。如图 2 所示。激光被设置为垂直入射到 CFRP 表面，并沿着 x 轴进行扫描。

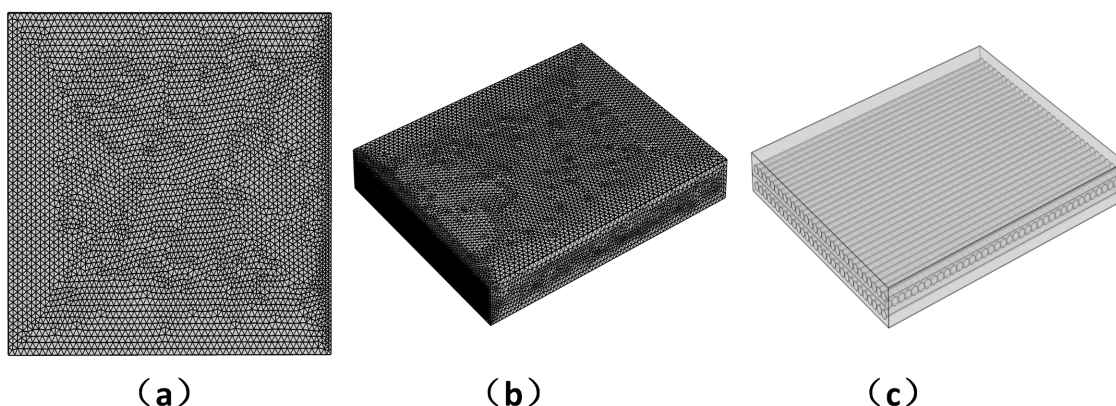


Figure 2. Schematic diagram of CFRP geometric model; (a) matrix (b) side view (c) fiber
图 2. CFRP 几何模型示意图；(a) 基体 (b) 侧视图 (c) 纤维

2.5. 仿真结果及分析

在光斑半径一定的条件下，我们使用公式(2)、(3)、(4)，计算出不同激光参数下，单脉冲能量密度和光斑重叠率。如表 2 所示。

$$E_p = \frac{P_{avg}}{f_{rep}} \quad (2)$$

式中 E_p 是激光单脉冲能量， P_{avg} 是激光平均功率， f_{rep} 是脉冲重复频率。

$$\eta = \left(1 - \frac{V_s}{Df_{rep}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中 η 是脉冲重叠率， v_s 是激光扫描速度， D 是光斑直径， f_{rep} 是脉冲重复频率。

$$E = \frac{E_p}{\pi r^2} \quad (4)$$

式中 E 是单脉冲能量密度， E_p 是激光单脉冲能量， r 是光斑半径

接下来，光斑半径一定，我们使用公式(2)~(4)，计算出不同激光参数下，单脉冲能量密度和光斑重叠率。如表 2 所示。

Table 2. Single pulse energy density and pulse heavy rate under different laser parameters
表 2. 不同激光参数下的单脉冲能量密度和脉冲重重率

序号	平均功率(W)	扫描速度(mm/s)	脉冲重频(KHZ)	单脉冲能量密(J/cm ²)	脉冲重叠率(%)
A	20	100	10	101.9	80
B	40	200	10	203.8	60
C	50	250	25	101.9	80
D	60	400	20	152.8	60
E	80	400	40	101.9	80
F	30	350	15	101.9	54

图 3 是表二中各组激光参数所得到的仿真数据。从图中可以观察到，尽管 A、C、E 三组的平均功率、扫描速度和脉冲重复频率各不相同，但三组的热影响区均接近 110.29 μm ，加工深度为 69.76 μm 。其主要原因在于，这三组的单脉冲能量和脉冲重叠率相同，即单位面积下的能量密度一致。因此，在激光切割 CFRP 的过程中，无论激光参数如何变化，只要保持单脉冲能量和脉冲重叠率相同，最终获得的加工效果将保持一致。

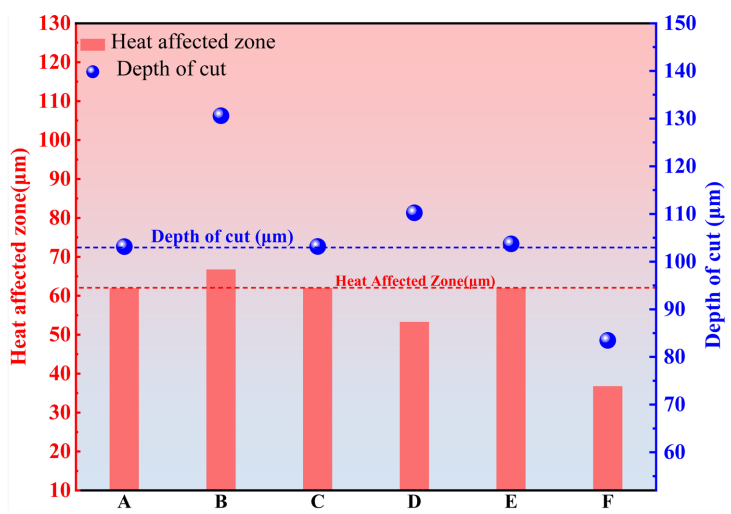


Figure 3. Influence of laser parameters on heat affected zone and processing depth of CFRP
图 3. 激光参数对 CFRP 热影响区和加工深度的影响

接下来, 我们对 B 组和 D 组进行了比较。两组的脉冲重叠率均为 60%。从图中可以看出由于 B 组的单脉冲能量密度高于 D 组, B 组的热影响区为 $103.14\ \mu\text{m}$, 加工深度为 $62.93\ \mu\text{m}$, 均显著高于 D 组的热影响区 $94.4\ \mu\text{m}$ 及加工深度 $54.92\ \mu\text{m}$ 。此外, 我们还对 E 组与 F 组进行了比较。在单脉冲能量密度 $101.9\ \text{J}/\text{cm}^2$ 的条件下, 由于 F 组的脉冲重叠率低于 E 组, 因此 F 组的热影响区和加工深度均低于 E 组。这些结果表明, 在固定单脉冲能量密度的条件下, 热影响区和切割深度会随着脉冲重叠率的增加而增大; 而在固定脉冲重叠率的情况下, 热影响区和切割深度则会随着单脉冲能量密度的增加而增大。

热积累温度在纳秒脉冲激光切割 CFRP 过程中具有至关重要的意义, 因其决定了材料在下一个脉冲到来之前的温度状态。若材料维持在较高的温度, 会直接影响加工效果, 尤其是热影响区的大小。热累积温度受脉冲重叠率的直接影响, 过高的热累积温度会导致更大的热影响区, 图 4 中显示在单脉冲能量密度为 $50.9\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时, 脉冲重叠率分别为 30%、50% 和 70%, 沿 x 轴扫描一次, 随着脉冲重叠率的减小, 热累积温度和热影响区均呈减小趋势。尤其在脉冲重叠率为 30% 时, 虽然热影响区最小, 但扫描痕迹并不平滑。其主要原因是, 脉冲重叠率过小, 导致烧蚀过程不完全。因此, 为实现优良的加工效果和高效的加工效率, 应选取合适的单脉冲能量密度与脉冲重叠率, 确保热累积温度维持在适中水平, 并避免加工深度过浅。

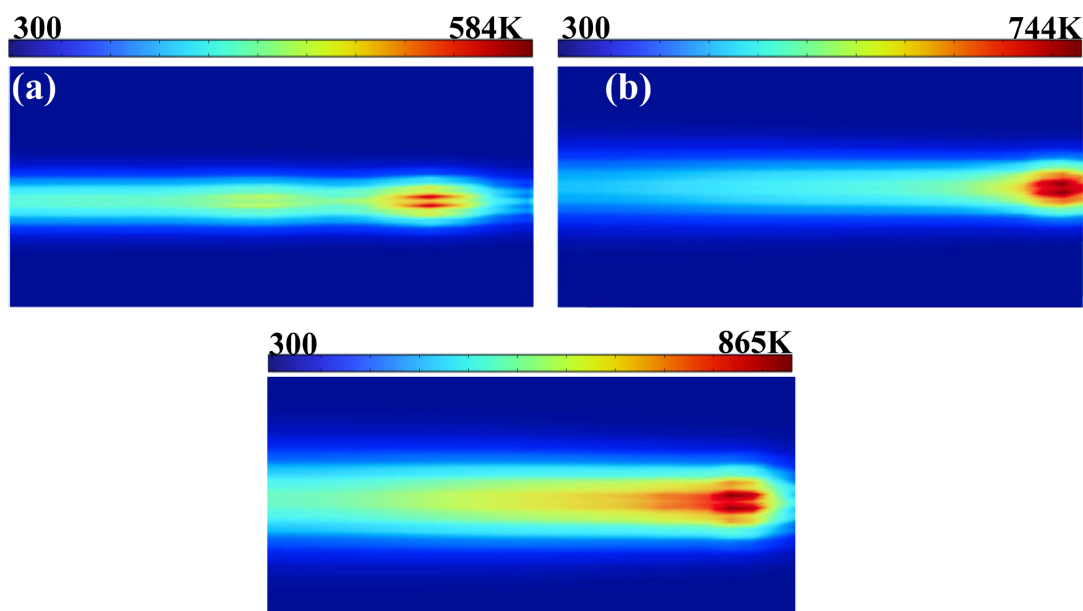


Figure 4. Heat accumulation temperature distribution at different pulse overlap rates; (a) Pulse overlap rate of 30% (b) pulse overlap rate of 50% (c) pulse overlap rate of 70%

图 4. 不同脉冲重叠率下热累积温度分布图; (a) 脉冲重叠率 30% (b) 脉冲重叠率 50% (c) 脉冲重叠率分为 70%

具体而言, 图 5 展示了在不同单脉冲能量下, 激光扫描 5 次后脉冲重叠率对热累积温度和切割深度的影响。当激光脉冲重叠率为 40% 时, 单脉冲能量密度分别为 $101.9\ \text{J}/\text{cm}^2$ 、 $152.8\ \text{J}/\text{cm}^2$ 和 $203.8\ \text{J}/\text{cm}^2$, 对应的热累积温度依次为 $486.23\ \text{K}$ 、 $548.72\ \text{K}$ 和 $624.96\ \text{K}$ 。这些热累积温度均低于环氧树脂层的气化温度 $650\ \text{K}$, 因此热影响区较小, 但切割深度也较浅。相对而言, 当激光脉冲重叠率提高至 60% 时, 热累积温度显著上升, 分别达到 $694.41\ \text{K}$ 、 $785.36\ \text{K}$ 和 $912.75\ \text{K}$, 此时切割深度增大, 热累积温度已明显超过环氧树脂层的气化温度, 导致热影响区的扩大。因此, 为实现理想的加工效果, 脉冲重叠率应控制在 40% 至 60% 之间, 理想范围为 50% 左右。此时, 切割深度较大且热累积温度较小, 有助于优化加工质量。

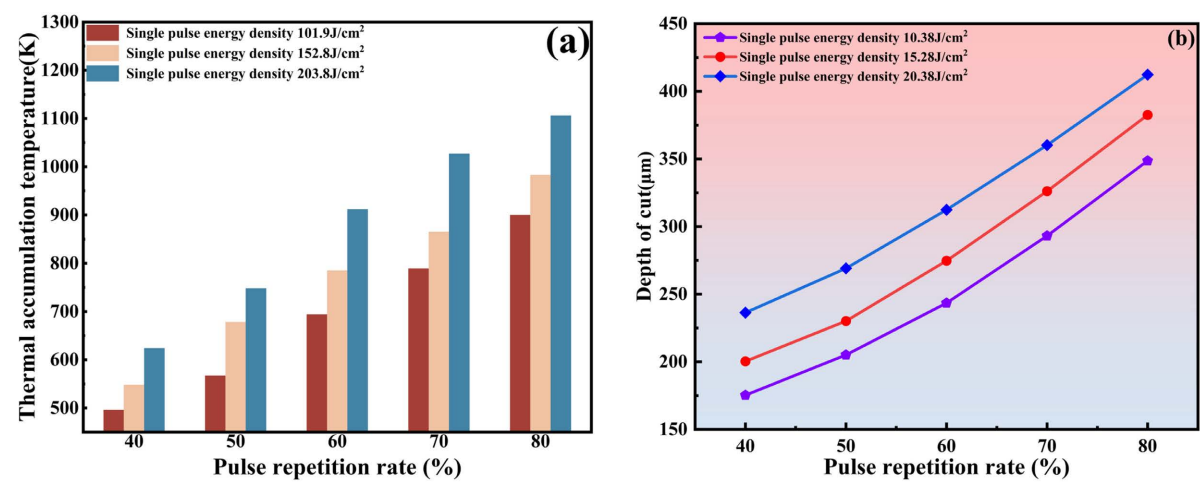


Figure 5. Influence of laser scanning for 5 times on materials under different monopulse energies; (a) Effect of pulse overlap rate on heat accumulation temperature; (b) Effect of pulse overlap rate on cutting depth

图 5. 不同单脉冲能量下, 激光扫描 5 次后对材料的影响; (a) 脉冲重叠率对热累积温度的影响 (b) 脉冲重叠率对切割深度的影响

如图 6, 展示了单脉冲能量密度为 152.8 J/cm², 脉冲重叠率分别设置为 40%、50%和 60%时, 激光扫描五次后的加工效果图。从图中可以看出, 当脉冲重叠率为 40%时, 切缝边缘不平滑, 切割效果较差; 而当脉冲重叠率为 60%时, 表面残留温度较高, 导致热影响区增大。因此, 通过对比加工后的效果图, 可以进一步确认, 当脉冲重叠率为 50%时, 切割效果最佳。

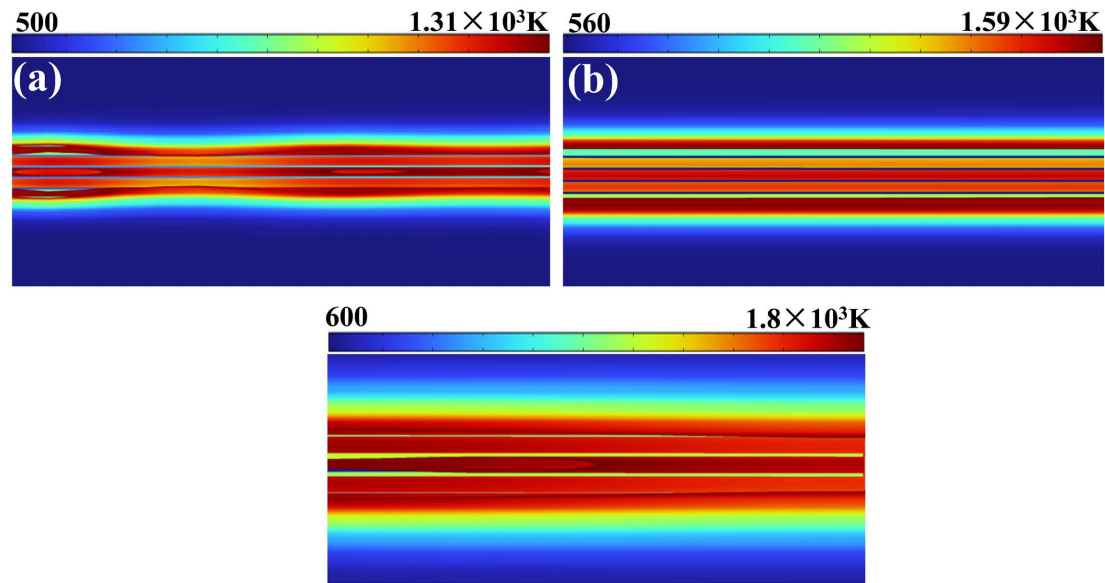


Figure 6. Morphology of monopulse energy density 152.8 J/cm² after five laser scans; (a) Pulse overlap rate of 40% (b) pulse overlap rate of 50% (c) pulse overlap rate of 60%

图 6. 单脉冲能量密度 152.8 J/cm², 激光扫描 5 次后的形貌图; (a) 脉冲重叠率 40% (b) 脉冲重叠率 50% (c) 脉冲重叠率 60%

3. 实验结果及分析

本实验中, 使用的 CFRP 材料为 T300, 尺寸为 50 × 50 × 2 mm, 编织型结构。实验过程中, 辅以空

气(压力为 0.5 MPa，流速为 1.5 m/min)作为辅助气流，其主要作用是减弱等离子屏蔽效应并增加加工深度。我们采用纳秒激光器对 CFRP 进行切割，具体的激光参数见表三。切割后的微观结构通过金相显微镜进行观察，并使用白光干涉仪进行三维形貌测量，如图 7 所示，激光器参数如表 3 所示。

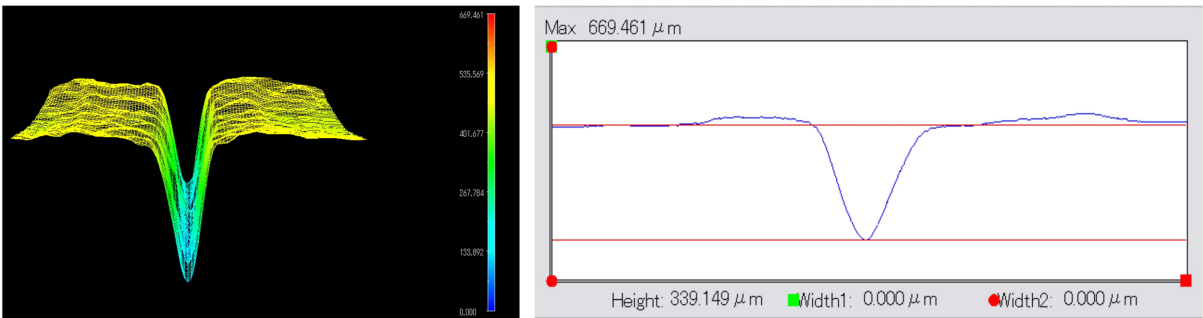


Figure 7. Three-dimensional morphology of CFRP after laser scanning
图 7. 激光扫描 CFRP 后的三维形貌图

Table 3. Laser parameters
表 3. 激光器参数

激光参数	参数范围
波长	1064 nm
脉冲宽度	12 ns
扫描速度	100~500 mm/s
平均功率	1~100 W
脉冲频率	1~100 KHz

图 8 为表 2 中 A、C、E 组的微观地形图。如图所示，最大 HAZ、切缝宽度和切割深度保持在一个稳定的范围内。这一观察结果验证了仿真模型得出的结论：无论激光参数的变化如何，当脉冲能量密度和脉冲重复率保持不变时，最终的加工结果保持一致。并且通过实验和仿真的数据对比可以发现，实验得到的加工效果和仿真效果误差在 10%~15%，因此仿真模型可以有效的预测加工效果。

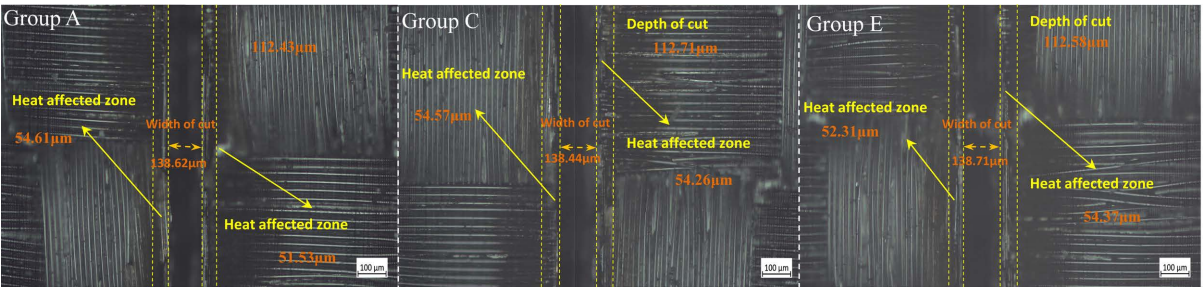


Figure 8. Microscopic topographies of Groups A, C, and E
图 8. A、C、E 三组的微观形貌图

接下来，将脉冲重叠率设置为 50%，探究不同单脉冲能量密度对加工效果的影响。如图 9 所示，在脉冲重叠率为 50%时，当单脉冲能量密度分别为 152.8 J/cm² 和 203.8 J/cm² 时，CFRP 分别在激光扫描 26 次和 18 次后被完全切割。随着单脉冲能量密度的增加，切割速度相应提高。具体而言，单脉冲能量为 152.8 J/cm²，激光扫描次数超过 20 次后，切割深度的增加速度逐渐减小，直至激光扫描 26 次时，达到最

大切割深度, 此时 CFRP 被完全切割开。图 9(a)和图 9(b)分别展示了激光扫描 20 次和 26 次后的切割形貌。通过对比可以发现, 虽然 CFRP 已被完全切割, 但加工效果不尽理想, 热影响区较大, 且热影响区周围存在聚合物沉积, 覆盖在原有的碳纤维表面。这一现象的出现主要是由于激光多次扫描后产生了较高的热累积温度, 导致环氧树脂部分碳化, 高温下树脂分解并形成炭黑沉积物, 从而影响最终的加工效果。当单脉冲能量密度为 203.8 J/cm^2 时, 加工效率较高, 且没有出现平台期。在激光扫描 18 次时, 切割深度已达到 2 mm , CFRP 完全切割开。从图 9(c)中可以看出, 最大热影响区为 $68.57 \mu\text{m}$, 且切缝边缘平滑。因此, 在单脉冲能量密度为 152.8 J/cm^2 、脉冲重叠率为 50% 时, 激光扫描 26 次时 CFRP 被完全切割, 最大热影响区为 $89.64 \mu\text{m}$, 但加工效果不理想。相对而言, 在激光扫描 22 次时, 切割深度为 1.89 mm , 最大热影响区为 $57.72 \mu\text{m}$, 展示了较好的加工效果。在单脉冲能量密度为 203.8 J/cm^2 、脉冲重叠率为 50% 时, 激光扫描 18 次时, 最大热影响区为 $68.57 \mu\text{m}$, 能够获得较理想的加工效果。

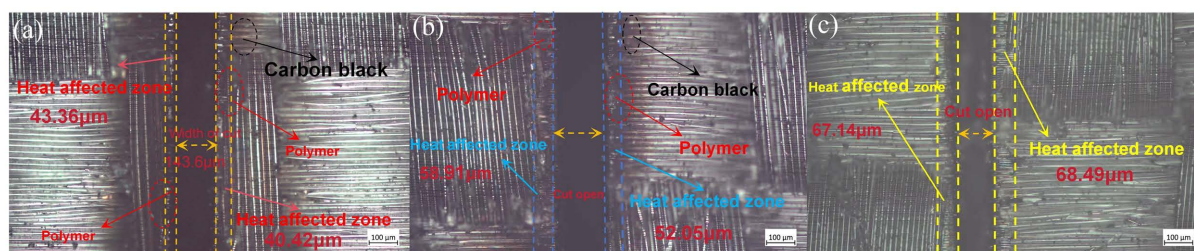


Figure 9. Morphology of laser scanning with pulse overlap rate of 50%; (a) monopulse energy density 101.9 J/cm^2 , laser scanning 22 times (b) monopulse energy density 152.8 J/cm^2 , laser scanning 30 times (c) monopulse energy density 203.8 J/cm^2 , laser scanning 18 times

图 9. 脉冲重叠率 50%, 激光扫描后的形貌图; (a) 单脉冲能量密度 101.9 J/cm^2 , 激光扫描 22 次; (b) 单脉冲能量密度 152.8 J/cm^2 , 激光扫描 30 次; (c) 单脉冲能量密度 203.8 J/cm^2 , 激光扫描 18 次

4. 结论

综上所述, 本文利用多物理场仿真软件建立了激光切割 CFRP 的多物理场仿真模型。研究表明, 在保持单脉冲能量密度和脉冲重叠率不变的情况下, 所得到的加工效果保持一致。通过对比分析, 本文探讨了在单脉冲能量固定的条件下, 脉冲重叠率对热影响区、切割深度及热累积温度的影响。最终研究结果表明, 脉冲重叠率为 50% 时, 能够获得较为理想的加工效果。

参考文献

- [1] 徐鹤, 田桂芝, 王琦. 纤维增强复合材料的机械加工技术[J]. 现代制造技术与装备, 2019, 26(4): 178-179.
- [2] 王福吉, 成德, 赵猛, 等. 冷却空气流向对 CFRP 制孔刀具磨损及孔质量的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 410-417.
- [3] 阮晓峰. 磨料水射流切割碳纤维复合材料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [4] 王伟. 高压磨料水射流切割碳纤维复合材料的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [5] 何振丰. 碳纤维增强复合材料电火花线切割加工特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [6] 李元成, 蔡敏, 毛忠, 张伟, 张晓兵, 梁恒亮. CFRP 激光加工热致损伤形貌研究[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 691-696.
- [7] 吕瑞虎. 碳纤维复合材料激光切割工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 汉中: 陕西理工大学, 2021.
- [8] Ren, X., Fan, J. and Wang, P. (2022) Optimization of Processing Parameters for Picosecond Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Polymers. *MATEC Web of Conferences*, **363**, Article No. 01009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236301009>
- [9] Leone, C. and Genna, S. (2018) Heat Affected Zone Extension in Pulsed Nd:Yag Laser Cutting of CFRP. *Composites Part B: Engineering*, **140**, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.028>