

# 水导激光加工 CFRP 质量和效率实验研究

张雨庭<sup>1,2,3</sup>, 乔红超<sup>1,2</sup>, 王顺山<sup>1,2,3</sup>, 梁金盛<sup>1,2,3</sup>, 赵吉宾<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;  
2. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:**为实现碳纤维增强复合材料的高质高效切割,采用水导激光加工技术对 CFRP 进行微槽加工,通过正交实验法、单因素实验法研究了激光功率、扫描速度和扫描路径重叠率对热影响区宽度和材料去除率的影响规律,并以此为目标进行了优化。结果表明:激光功率、扫描路径重叠率对热影响区宽度和材料去除率的影响显著;当激光功率 35 W、扫描速度 4 mm/s 和扫描路径重叠率 40% 时,热影响区宽度为 184.484  $\mu\text{m}$ ,材料去除率为 0.068  $\text{mm}^3/\text{s}$ ,能获得较小的热影响区宽度和较高的加工效率。

**关键词:**水导激光加工;碳纤维增强复合材料;正交实验;工艺优化

**中图分类号:**TN249;TG665 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.004

## Experimental study of quality and efficiency of CFRP processed by water-jet guided laser

ZHANG Yu-ting<sup>1,2,3</sup>, QIAO Hong-chao<sup>1,2</sup>, WANG Shun-shan<sup>1,2,3</sup>, LIANG Jin-sheng<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Ji-bin<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;  
2. Institute of Robotics and Intelligent Manufacturing Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to achieve high-quality and high-efficiency cutting of carbon fiber reinforced composites, water-jet guided laser processing is used for the CFRP microgroove processing. The influence of the laser power, scanning speed and scanning path overlap rate on the width of the heat-affected zone and the material removal rate are investigated by the orthogonal and one-factor experimental methods and optimized with this goal in mind. The results show that the laser power and the overlap rate of the scanning path have a significant effect on the width of the heat-affected zone and the material removal rate. When the laser power is 35 W, the scanning speed is 4 mm/s and the scanning path overlap rate is 40%, the width of the heat-affected zone is 184.484  $\mu\text{m}$ , and the material removal rate is 0.068  $\text{mm}^3/\text{s}$ , which can obtain smaller width of the heat-affected zone and higher processing efficiency.

**Keywords:** water-jet guided laser; carbon fiber reinforced polymer; orthogonal experiment; process optimization

### 1 引言

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)具有轻质、高模高强、抗疲劳和耐腐

蚀等优越性能,最先应用于航空航天领域机翼、机身和发动机等飞机结构的制造<sup>[1]</sup>,随后逐步广泛应用于海洋工程、新能源汽车、体育器械和生物医学等领

**基金项目:**国家重点研发计划项目(No. 2022YFB4601600)资助。

**作者简介:**张雨庭(2000-),女,博士研究生,主要从事水导激光加工技术研究。E-mail:zhangyuting@sia.cn

**通讯作者:**乔红超(1982-),男,研究员,硕士研究生导师,主要从事激光加工技术的研究。E-mail:hcqiao@sia.cn

**收稿日期:**2023-12-27; **修订日期:**2024-01-28

域<sup>[2]</sup>。CFRP 具有典型的非均质性和各向异性,传统的机械方法刀具磨损严重,会产生材料分层、毛刺和纤维撕裂等缺陷<sup>[3]</sup>,加工效率低<sup>[4]</sup>。采用电火花加工<sup>[5]</sup>、磨料水射流切割<sup>[6]</sup>、超声振动辅助加工<sup>[7]</sup>、激光加工<sup>[8-9]</sup>等方式也可实现对 CFRP 的加工,但仍难获得良好的加工质量和效率。

水导激光加工技术 (Water-Jet Guided Laser, WJGL) 是一种利用高压水流将激光束引导到工件表面进行切割、打孔、雕刻等加工的新型复合加工技术<sup>[10]</sup>。水射流的清洁和冷却作用能及时带走加工残渣,降低热影响区,减少材料变形和热损伤,国内外众多研究学者开展了相关研究。张旖诺<sup>[11]</sup>基于 ANSYS 有限元分析软件建立水导激光加工 CFRP 的三维瞬态模型,对微槽的切面微观形貌进行仿真与试验研究,发现降低扫描深宽比能有效减少深槽的纤维损伤,确保水射流高效的排屑率可实现水导激光高精度加工。唐文瀚<sup>[12]</sup>基于响应面法设计水导激光加工碳纤维复合材料实验,研究了主要工艺参数对热影响区和锥度的影响规律,并以热影响区、锥度和有效切割速度为目标进行了优化,能获得较好的表面加工质量和速度。Wu<sup>[13]</sup>采用水导激光加工技术对大厚度 CFRP 进行了多道次平行路径分层扫描切割,分析了碳纤维不同排列方式和角度存在暴露、拔出和脱落等损伤的产生机理,为实现大厚度 CFRP 高精度切割提供参考。

综上所述,采用水导激光技术加工 CFRP 具有极大的适用性和优越性,以往的研究主要集中在切削机理、热损伤等方面,对加工效率研究较少。对于常见的 CFRP 切削,加工质量和加工效率均属于评价的重要指标,但这两方面存在相互制约关系,实际加工中难以同时满足高质量、高效率的要求。本文基于正交实验和单因素实验的方法,采用水导激光加工技术对 CFRP 进行微槽加工,探究主要工艺参数对热影响区宽度和材料去除率的影响规律,并以上述两个评价指标为目标进行了优化,为实现 CFRP 高质高效加工参数的选择提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验设备及材料

实验采用自主研发的水射流导引激光加工系

统,主要包括激光波长为 532 nm 的 Nd:YAG 固体脉冲激光器、供水系统、激光-水射流耦合装置、气氛辅助系统以及三轴数控工作台等。水导激光加工的原理如图 1 所示,在加工过程中,工件被固定在工作台的 XY 平面上,液压泵将纯净的去离子过滤水注入水腔,并由直径为 70  $\mu\text{m}$  的喷嘴射出。采用氦气和二氧化碳的混合气体作为保护气体,形成同轴螺旋气流促进水射流的稳定性。激光束经聚焦后通过玻璃窗口进入水腔,与水射流耦合后不断地进行全反射,激光能量由稳定高速水射流引导至 CFRP 表面,实现对材料的去除。

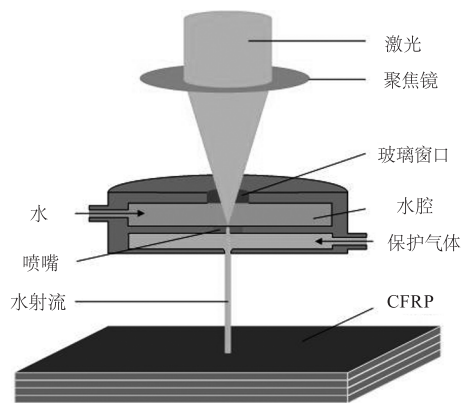


图 1 水导激光加工原理示意图

Fig. 1 Schematic of water jet guided laser processing

本文采用 3.5 mm 厚的 CFRP 实验试件,其结构如图 2 所示。CFRP 板总共 19 层,其中顶层和底层是平纹编织纤维层,内部碳纤维铺设方向按 0°、90°交替铺设。CFRP 试件碳纤维的体积分数为 60%,环氧树脂的体积分数为 40%,碳纤维和环氧树脂的热性能如表 1 所示。其他加工参数设置:水射流压力为 22 MPa,加工距离为 32.5 mm,脉冲持续时间为 100 ns,脉冲重复频率为 10 kHz。

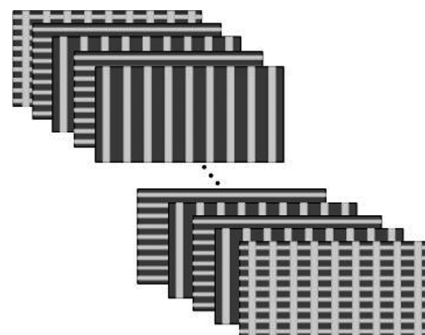


图 2 实验 3.5 mm 厚 CFRP 的示意结构

Fig. 2 Schematic structure of 3.5 mm thick CFRP used for the experiment

表 1 CFRP 热力学参数

Tab. 1 CFRP thermodynamic parameter

热力学性能	碳纤维	环氧树脂
密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	1800	1200
分解温度/K	3573	698
热导率/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	50(轴向),5(径向)	0.1
比热容/(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	710	1884

2.2 实验方案

为探究激光功率、扫描速度和扫描路径重叠率对热影响区宽度和材料去除率的影响规律,设计 L<sub>16</sub>(4<sup>3</sup>) 正交实验在 CFRP 板上加工 5 mm 长的通槽,设计因素与水平表和正交实验方案如表 2 和表 3 所示。每个因素取四个水平,每组实验重复三次,分析各因素对加工结果的影响规律,通过极差分析得到各因素对两个实验指标的影响程度和最优参数组合。

表 2 设计因素与水平

Tab. 2 Design factors and levels

水平	因素		
	激光功率/ W	扫描速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	扫描路径重叠率/ %
1	25	2	100
2	30	3	80
3	35	4	60
4	40	5	40

表 3 正交实验方案

Tab. 3 Orthogonal experiment scheme

实验序号	激光功率/ W	扫描速度/ (mm · s <sup>-1</sup> )	扫描路径重叠率/ %
1	25	2	100
2	25	3	80
3	25	4	60
4	25	5	40
5	30	2	80
6	30	3	100
7	30	4	40
8	30	5	60
9	35	2	60
10	35	3	40
11	35	4	100
12	35	5	80
13	40	2	40
14	40	3	60
15	40	4	80
16	40	5	100

针对切割大厚度 CFRP 单道往复切割效率较低的问题,本实验采用五道首尾相连的平行路径进行分层切割,如图 3(a)所示,激光按照不同的扫描路径重叠率逐层扫描,直至微槽贯通。扫描路径重叠率  $\Phi$  的表示方法如图 3(b)所示,计算公式:

$$\Phi = \frac{\Delta X}{d} = \frac{d - L}{d} = 1 - \frac{L}{d} \quad (1)$$

式中,  $\Delta X$  为相邻路径重叠距离;  $d$  为水射流的实际直径,由于缩流效应;  $d$  约为 60  $\mu\text{m}$ ;  $L$  为相邻路径之间的距离。

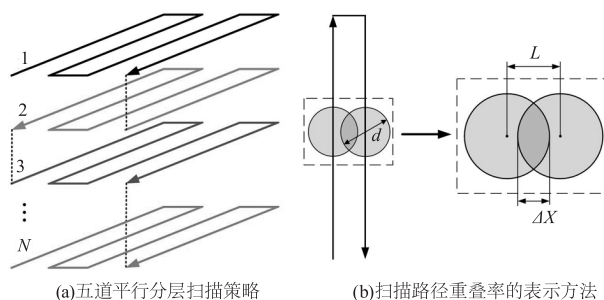


图 3 微槽加工方案

Fig. 3 Micro groove machining scheme

CFRP 试件加工后用洁净的压缩空气风干,采用光学显微镜观察微槽横截面形貌,多次测量两侧热影响区的宽度并取平均值。典型微槽横截面如图 4 所示。

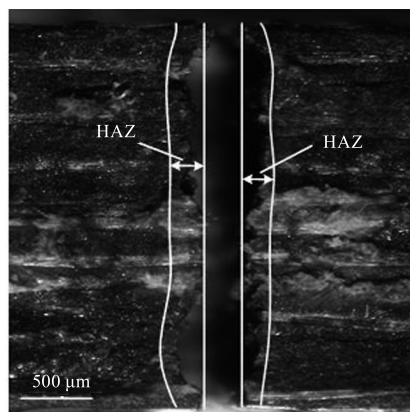


图 4 典型微槽横截面

Fig. 4 Typical microgroove cross-section

材料去除率 MRR 是指单位时间内水导激光加工去除 CFRP 的体积,由于加工后材料存在低锥度,微槽可近似于倒梯形结构。采用光学显微镜观察 CFRP 试件的上、下表面,测量通槽入口和出口切缝的宽度用于材料去除率的计算:

$$MRR = \frac{V}{t} = \frac{(d_1 + d_2)hl}{2t} \quad (2)$$

式中,  $V$  为激光去除材料的体积;  $t$  为激光加工的时间;  $d_1$  为微槽上表面宽度;  $d_2$  为微槽下表面宽度;  $h$  为板材厚度;  $l$  为微槽长度。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 正交实验的极差分析

关于热影响区宽度和材料去除率主效应图如图5所示, 激光功率和扫描路径重叠率的回归曲线起伏明显, 主效应影响显著。

激光与材料的作用过程存在光热-光化学复合机制, 可以简单分为: 能量吸收转化、材料持续升温、相变及等离子体产生四个阶段<sup>[14]</sup>。当激光脉冲刚到达材料表面时, 激光能量密度较低, 部分能量透射进材料表面转化为热能, 材料表面温度不断升高, 热量在材料内部以热传导的形式扩散。随着激光的持续作用, 激光能量密度不断增大, 材料表面温度达到树脂熔点, 树脂融化使碳纤维裸露, 温度升高达到碳纤维的升华阈值, 碳纤维气化去除。持续升温到达脉冲峰值能量附近, 材料被击穿引发大量等离子体, 等离子体膨胀溃灭释放巨大冲击波实现材料的蚀除。

随着激光功率的增加, 热影响区宽度和材料去除率明显增大。激光功率越大, 当重复频率固定时单脉冲能量越大, 蚀除的材料越多, 多个脉冲的累积作用下加工效率提升。同时, 激光能量沿加工轨迹向侧壁传递的热量增加, 由于碳纤维和环氧树脂两种材料的热性能差异显著, 树脂承温能力差, 包裹纤维的树脂易被热解, 碳纤维则需更长的时间达到升华阈值, 激光灼烧过程中易出现部分纤维暴露拉出、断裂等损伤。

采用低扫描路径重叠率能获得更小的热影响区宽度和更高的材料去除率。这是由于扫描路径重叠率较高时, 激光烧灼材料形成的微槽较窄, 积水难以排出, 底部沿侧壁会出现压力较高、速度为零的水流滞止区<sup>[11-15]</sup>, 激光能量无法完全传递到槽底用于材料的去除, 部分能量沿材料内部横向传递, 导致加工效率降低且增大侧壁热影响区。水射流持续撞击水流滞止区产生大量空化气泡, 空泡溃灭过程伴随产生局部高温、高压现象, 其压力可用下式描述<sup>[16]</sup>:

$$\frac{P_{\max}}{P_0} = 1 + \frac{\left[\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 - 4\right]^{\frac{4}{3}}}{4^{\frac{4}{3}} \left[\left(\frac{R_0}{R}\right)^3 - 1\right]^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

式中,  $P_{\max}$ 、 $P_0$  为气泡的最高压力和初始压力;  $R_0$ 、 $R$  为气泡的半径和初始半径。将空化射流引入高压水

射流后, 空化水射流冲击压力( $P_i$ ) 与普通连续高压水射流的冲击压力关系为:

$$P_i = \frac{P_s}{6.35} \exp\left(\frac{2}{3a}\right) \quad (4)$$

式中,  $P_s$  为普通连续高压射流冲击压力;  $a$  为液体内气体含量, 一般取  $1/6 \sim 1/10$ , 此时  $P_i = (8.6 - 12.4)P_s$ 。由公式(3)、(4)可知, 空泡溃灭时体积发生膨胀, 在水射流中释放压力引起更大的射流冲击压力, 易在微槽侧壁表面产生纤维损伤。

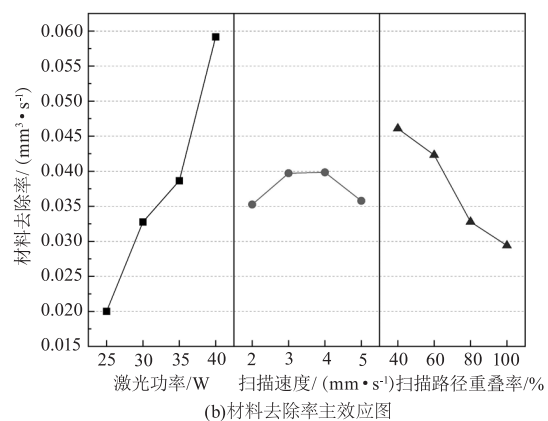
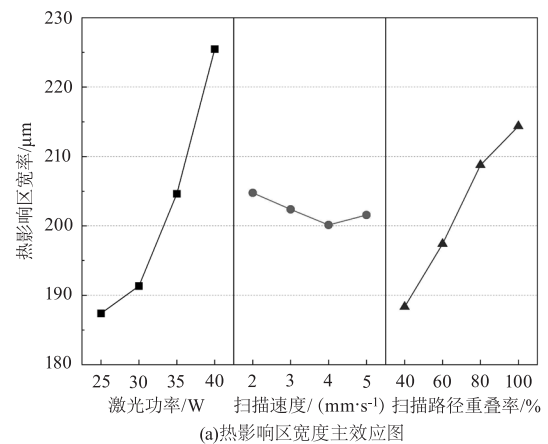


图5 主效应图

Fig. 5 Main effect diagram

热影响区宽度和材料去除率的均值响应表由表4和表5所示, 三个因素对于热影响区宽度和材料去除率的影响排序相同, 从大到小依次是: 激光功率 > 扫描路径重叠率 > 扫描速度。热影响区宽度和材料去除率的交互作用图如图6所示, 图中无明显的平行线, 说明实验的三个因素之间均有交互作用。将实验结果进行极差分析所得最优组合是 A1B3C4 (热影响区宽度) 和 A4B3C4 (材料去除率), 两组对应的工艺参数分别为: 激光功率 25 W, 扫描速度 4 mm/s, 扫描路径重叠率 40 % 和激光功率 40 W, 扫描速度 4 mm/s, 扫描路径重叠率 40 %。

表4 热影响区宽度的均值响应表

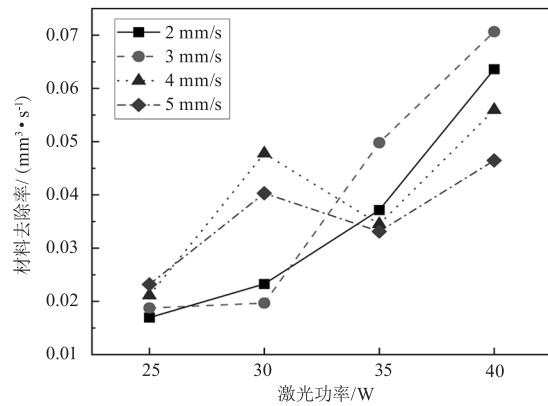
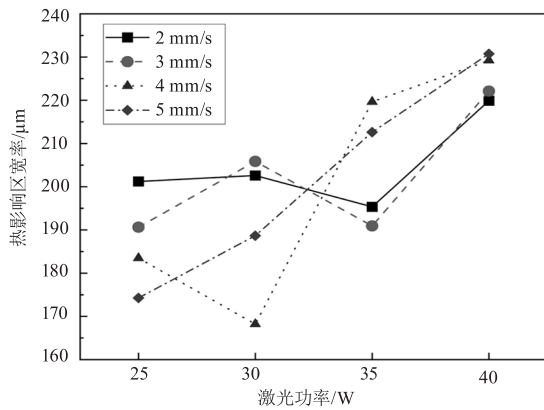
Tab.4 Mean response table of heat affected zone width

水平	激光功率/W	扫描速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描路径重叠率/ %
1	187.402	204.766	214.361
2	191.335	202.379	208.770
3	204.634	200.140	197.404
4	225.490	201.576	188.327
极差	38.088	4.626	26.034
排序	1	3	2

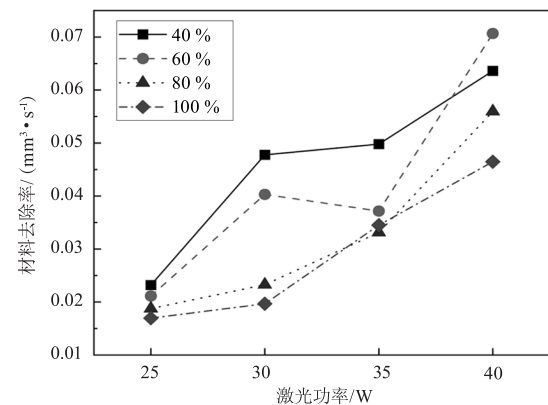
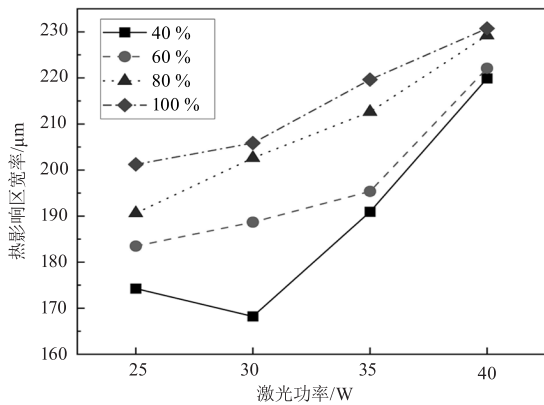
表5 材料去除率的均值响应表

Tab.5 Mean response table of material remove rate

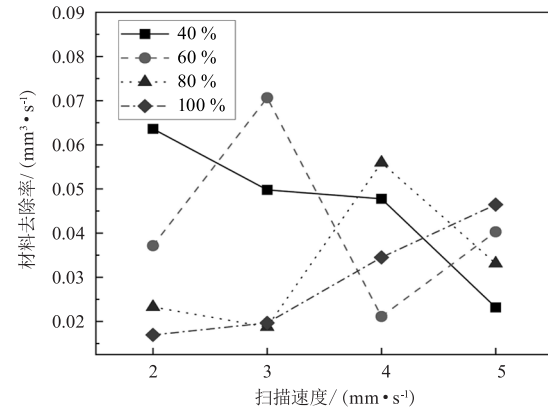
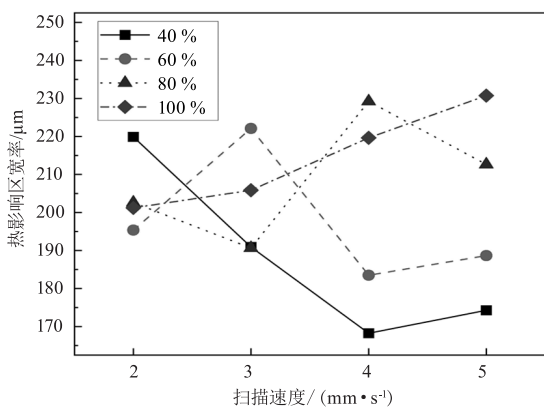
水平	激光功率/W	扫描速度/ (mm·s <sup>-1</sup> )	扫描路径重叠率/ %
1	0.0200	0.0352	0.0294
2	0.0328	0.0397	0.0328
3	0.0386	0.0398	0.0423
4	0.0592	0.0358	0.0461
极差	0.0392	0.0046	0.0167
排序	1	3	2



(a)激光功率与扫描速度



(b)激光功率与扫描路径重叠率



(c)扫描速度与扫描路径重叠率

图6 交互作用图

Fig.6 Interaction diagram

### 3.2 单因素实验设计

通过上述分析可知两个评价指标的最优解中扫描速度和扫描路径重叠率两个因素具有一致性,而对激光功率的选择则出现极端化。为实现兼顾加工质量和效率的优化目标,设计扫描速度 4 mm/s、扫描路径重叠率 40 % 固定,激光功率为自变量的单因素实验。激光功率对热影响区宽度和材料去除率的影响如图 7 所示,两个特征参数与激光功率均呈现正相关趋势。

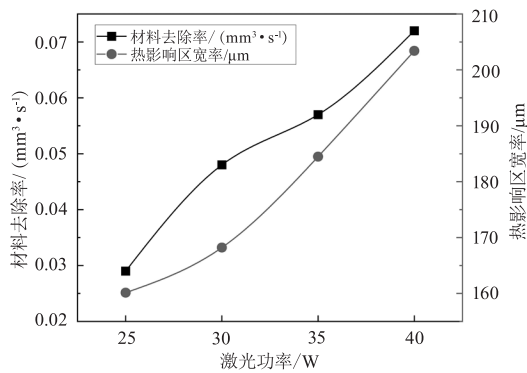
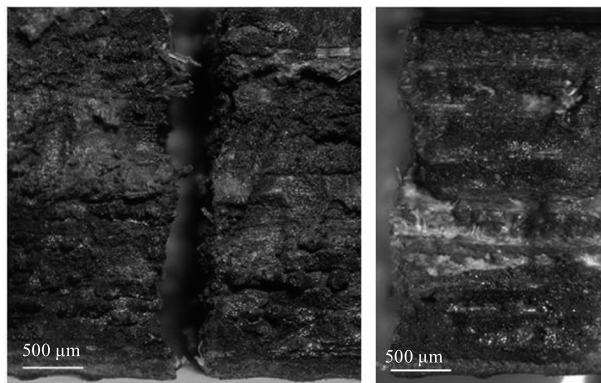


图7 激光功率对热影响区宽度和材料去除率的影响

Fig. 7 Effect of laser power on HAZ and MRR

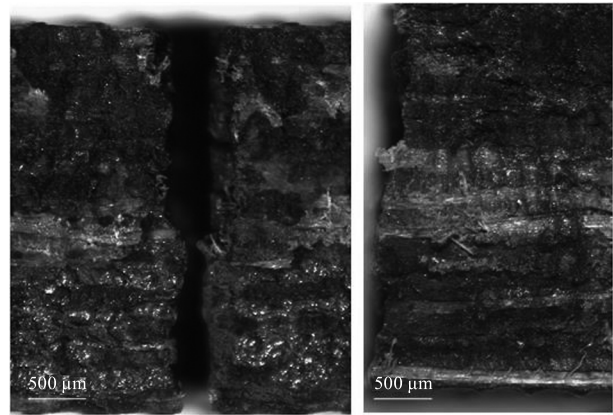
### 3.3 工艺优化

以正交实验热影响区宽度和材料去除率的单项最优值为优化目标,结合单因素实验结果,得到综合最优参数为激光功率 35 W,扫描速度 4 mm/s,扫描路径重叠率 40 %。在热影响区宽度最优参数与综合最优参数下进行加工获得微槽横截面和侧壁形貌如图 8 所示,在综合最优工艺参数下进行微槽加工所获得的热影响区宽度为 184.484 μm,材料去除率为 0.057 mm³/s。与两项指标的单项最优值相比,热影响区宽度增长 9.7 %,材料去除率达到 80.3 %,综合考虑可达到优化目标的 80 %,能获得较优的加工精度和效率。



(a) 热影响区宽度最优组横截面

(b) 热影响区宽度最优组侧壁



(c) 综合最优组横截面

(d) 综合最优组侧壁

图8 热影响区宽度最优组与综合最优组的微槽横截面和侧壁形貌

Fig. 8 Cross-section and sidewall morphology of microgrooves in the heat-affected zone width optimal group and the comprehensive optimal group

最优工艺参数下进行微槽加工的横截面形貌如图 8(c) 所示。由于碳纤维材料导热的各向异性,热量优先沿纤维轴向传递,因此当碳纤维排列垂直于加工路径时导热较快,在横截面内表现为横向去除深度更大、热影响区更大,各纤维层交替排列使得微槽横截面热影响区呈锯齿状。此外,还能看出左侧热影响区较明显,而右侧热影响区宽度小、锥度小、切割质量较高。分析原因是降低扫描路径重叠率拓宽了切缝宽度,有利于碎屑的排出,有效促进激光能量向材料深处传导,同时降低了积水层的厚度,降低气泡空化率,对去除率和侧壁精度的提升起了辅助作用。微槽侧壁形貌如图 8(d) 所示,侧壁光滑无熔渣,纤维拉出等缺陷较少,加工精度较高。这是由于加工过程中水射流的高速冲刷及时带走加工区域的残渣,避免熔融物附着在微槽侧壁,还能减小热影响区,减少材料变形和热损伤,获得精度较高的壁面。

## 4 结论

1) 各工艺参数对材料热影响区和材料去除率的影响程度排序从高到低依次为:激光功率 > 扫描路径重叠率 > 扫描速度。对实验结果进行极差分析所得最优组合是 A1B3C4 (热影响区宽度) 和 A4B3C4 (材料去除率),两组对应的工艺参数分别为:激光功率 25 W,扫描速度 4 mm/s,扫描路径重叠率 40 % 和激光功率 40 W,扫描速度 4 mm/s,扫描路径重叠率 40 %。

2) 综合考虑热影响区宽度和材料去除率两个评价指标,优化所得最优工艺参数是:激光功率

35W,扫描速度 4 mm/s,扫描路径重叠率 40%。在此参数下进行微槽加工所获得的热影响区宽度为 184.484  $\mu\text{m}$ ,材料去除率为 0.068  $\text{mm}^3/\text{s}$ 。

3)采用最优工艺参数加工微槽的横截面热影响区呈锯齿状,右侧能获得更小的热影响区宽度和锥度;侧壁光滑无熔渣,纤维拉出等缺陷较少,加工精度较高。

### 参考文献:

- [1] Jiang Liye, Li na, Chen Peng, et al. Application and prospect of carbon fiber composite in lightweight [J]. China Plastic Industry, 2022, 50(1): 14 - 19. (in Chinese)  
姜立业, 李娜, 陈鹏, 等. 碳纤维复合材料在轻量化的应用和前景[J]. 塑料工业, 2022, 50(1): 14 - 19.
- [2] Song Xuding, Pang Lisha. Research advances in molding technology and application of carbon fiber and its resin matrix composites [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(14): 81 - 91. (in Chinese)  
宋绪丁, 庞利沙. 碳纤维树脂基复合材料及成型工艺与应用研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(14): 81 - 91.
- [3] Xie Hailong. The research of helical milling of C/E composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)  
谢海龙. C/E 复合材料螺旋铣孔技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [4] Qin Xuda, Li Yonghang, Wang Bin, et al. Simulation of effect of fiber direction on cutting process of CFRP [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(3): 472 - 476. (in Chinese)  
秦旭达, 李永行, 王斌, 等. CFRP 纤维方向对切削过程影响规律的仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(3): 472 - 476.
- [5] Luis R, Fermin B, P. A V, et al. Design and analysis of CFRP drilling by electrical discharge machining [J]. Polymers, 2022, 14(7): 1340 - 1340.
- [6] Hejjaji A, Zitoune R, Toubal L, et al. Influence of controlled depth abrasive water jet milling on the fatigue behavior of carbon/epoxy composites [J]. Composites Part A, 2019, 121: 397 - 410.
- [7] Li Zhe, Wang Xin, Zhang Yi, et al. Mechanism and experiment on high-efficiency chip removal in ultrasonic vibration core drilling of CFRP [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(1): 229 - 240. (in Chinese)  
李哲, 王新, 张毅, 等. CFRP 超声振动套磨钻孔高效排屑机理和实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(1): 229 - 240.
- [8] Xu Jihao, Bai Yifan, Sun Shengyuan, et al. Research progress of carbon fiber reinforced plastics laser cutting technology [J]. Electromachining & Mould, 2022, (S1): 4 - 13. (in Chinese)  
徐纪豪, 白一凡, 孙圣元, 等. 碳纤维复合材料激光切割技术研究进展[J]. 电加工与模具, 2022, (S1): 4 - 13.
- [9] Qiu Yi, Liu Zhuang, Li Yuancheng, et al. Technological investigation of femtosecond laser drilling of CFRP composite [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(2): 196 - 201. (in Chinese)  
邱一, 刘壮, 李元成, 等. CFRP 复材飞秒激光小孔加工工艺研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(2): 196 - 201.
- [10] Liu H L H. Overview on the development and critical issues of water jet guided laser machining technology [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 137(1): 106820.
- [11] Zhang Yinuo, Qiao Hongchao, Cao Zhihe, et al. Microstructure characteristics of CFRP deep groove processed by water jet-guided laser processing technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 528 - 540. (in Chinese)  
张旖诺, 乔红超, 曹治赫, 等. 水导激光加工 CFRP 深槽微观形貌特性[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 528 - 540.
- [12] Tang Wenhan, Sun Dong, Han Fuzhu. Optimization of process parameters for water-jet guided laser processing of CFRP based on response surface model [J]. Electromachining & Mould, 2023(1): 44 - 49. (in Chinese)  
唐文翰, 孙冬, 韩福柱. 基于响应面法的水导激光加工碳纤维复合材料工艺参数优化[J]. 电加工与模具, 2023(1): 44 - 49.
- [13] Wu Y, Zhang G, Wang J, et al. The cutting process and damage mechanism of large thickness CFRP based on water jet guided laser processing [J]. Optics and Laser Technology, 2021, 141: 107140.
- [14] Linde D V D, Sokolowski-Tinten K, Bialkowski J. Laser-solid interaction in the femtosecond time regime [J]. Applied Surface Science, 1997, 109 - 110: 1 - 10.
- [15] Li C F, Johnson D B, Kovacevic R. Modeling of waterjet guided laser grooving of silicon [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(9): 925 - 936.
- [16] Yang Chunmin. The experimental research of metal surface strengthening of jet cavitation peening [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)  
杨春敏. 空化射流喷丸对金属表面性能强化影响的试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.