

## 脉冲激光烧蚀CFRP材料工艺优化

蔡颂, 宋金潮, 王遥遥, 陈达, 邓凯, 汤迎红, 李琦

### Pulsed laser ablation CFRP material process optimization

引用本文:

蔡颂, 宋金潮, 王遥遥, 陈达, 邓凯, 汤迎红, 李琦. 脉冲激光烧蚀CFRP材料工艺优化[J]. *激光技术*, 2024, 48(1): 83-91.

CAI Song, SONG Jinchao, WANG Yaoyao, et al. Pulsed laser ablation CFRP material process optimization[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 83-91.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 不同冷却方式对激光加工CFRP的影响研究

引用本文: 张炳涛, 周辽, 焦辉, 等. 不同冷却方式对激光加工CFRP的影响研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 253-259.

#### 2. 水雾对激光加工CFRP的影响特性研究

引用本文: 周辽, 龙芋宏, 焦辉, 等. 水雾对激光加工CFRP的影响特性研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 786-794.

#### 3. 基于CFRP纤维编织网格分块扫描的激光除胶工艺算法

引用本文: 朱小伟, 胡龙, 杨文锋, 等. 基于CFRP纤维编织网格分块扫描的激光除胶工艺算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 745-750.

#### 4. 纳秒脉冲激光加工高反射率铝膜

引用本文: 吴鹏, 范云茹, 郭嘉伟, 等. 纳秒脉冲激光加工高反射率铝膜[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 779-783.

#### 5. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究

引用本文: 蒋翼, 陈根余, 周聪, 等. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 821-825.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0083-09

## 脉冲激光烧蚀 CFRP 材料工艺优化

蔡颂<sup>1,2</sup>, 宋金潮<sup>2</sup>, 王遥遥<sup>2</sup>, 陈达<sup>2</sup>, 邓凯<sup>2</sup>, 汤迎红<sup>2</sup>, 李琦<sup>1\*</sup>

(1. 武昌工学院 智能制造学院, 武汉 430065, 中国; 2. 湖南工业大学 机械工程学院, 株洲 412007, 中国)

**摘要:** 为了研究 20 W 纳秒激光对碳纤维复合材料(CFRP)烧蚀的工艺质量, 采用单因素实验方法及光切法进行了理论分析和实验验证, 得到了扫描速率、峰值功率、离焦量对材料表面加工质量的影响规律, 并对 0.5 mm CFRP 材料板进行了烧蚀实验。结果表明, 调整激光器的离焦量, 让激光的焦点与材料平面在同一高度, 可使扫描线宽最小, 减少了材料烧蚀的热影响区, 提高了激光能量利用率; 设定激光扫描速率为 220 mm/s 和峰值功率为 10 W, 可得到大小为 3.50  $\mu\text{m}$  的 CFRP 最小表面粗糙度平均值, 其中粗糙度数据稳定性样本方差最佳, 约为 0.133  $\mu\text{m}^2$ , 在此条件下可得到良好的加工表现。此研究为脉冲激光加工 CFRP 材料工艺研究提供一定参考, 并为脉冲激光加工复合材料工艺应用打下了一定的实践基础。

**关键词:** 激光技术; 碳纤维复合材料; 脉冲激光; 激光烧蚀; 加工工艺

**中图分类号:** TN249; TB332

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.014

## Pulsed laser ablation CFRP material process optimization

CAI Song<sup>1,2</sup>, SONG Jinchao<sup>2</sup>, WANG Yaoyao<sup>2</sup>, CHEN Da<sup>2</sup>, DENG Kai<sup>2</sup>, TANG Yinghong<sup>2</sup>, LI Qi<sup>1\*</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Wuchang Institute of Technology, Wuhan 430065, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** In order to study the ablation quality process of carbon fiber reinforced plastics(CFRP) with 20 W nanosecond laser, theoretical analysis and experimental verification were carried out by the single-factor experimental method and photo-section method. Effects of scanning speed, peak power, and defocus amount on the surface processing quality of the material were studied. A piece of 0.5 mm thick CFRP was ablated in experiments. The results show that adjusting the defocusing amount made the focus of the laser and the material plane at the same horizontal height, which could minimize the scanning line width, reduce the heat-affected zone and improve the laser energy utilization. When the laser scanning speed is 220 mm/s and, the peak laser power is 10 W, the average surface roughness of CFRP composite is the smallest. About 3.50  $\mu\text{m}$ , and the roughness data stability sample difference is the best, about 0.133  $\mu\text{m}^2$ ; the laser process parameter combination method ablation CFRP composite materials can obtain ideal processing performance. The above research for pulsed laser processing CFRP material process research provides some references and lays a certain practical foundation for the application of pulsed laser processing composite material process.

**Key words:** laser technique; carbon fiber reinforced plastics; pulsed laser; laser ablation; processing technique

## 0 引言

在当今工业化大发展的浪潮中, 新材料和新技术不断涌现, 在轨道交通领域, 复合材料因其自身轻质化

等优点被广泛应用; 在材料加工领域, 激光加工技术因其高精度、高效率等显著优势, 对加工后材料的形状精度具有明显的提升效果<sup>[1-2]</sup>, 作为一种非接触式的先进加工技术, 在复合材料加工领域的应用潜力巨大<sup>[3]</sup>, 激光加工碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)已经成为目前研究的热点<sup>[4-5]</sup>。CFRP 具有低密度、高强度、耐高温、耐辐射、抗化学腐蚀等良好特点, 被广泛应用于航空航天、汽车、风力发电、医疗等国家竞争发展的重要领域<sup>[6]</sup>。由于 CFRP 材料本身层叠、纤维织构等特点, 采用铣削<sup>[7-8]</sup>等传统的机械加工工艺会导致材料分层, 出现梯层形式的损伤、内部纤维

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705141; 51975192); 湖南省教育厅科学研究项目(21B0523); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队科研基金资助项目(2020042); 中国博士后科学基金资助项目(2019T120650); 湖北省高等学校优势特色学科(群)建设项目

\* 通信作者: 17720163097@163.com

收稿日期: 2022-12-09; 修回日期: 2023-03-22

拔出等棘手问题,导致材料本身的力学性能降低,使其应用发展受到了限制。

碳纤维作为 CFRP 材料内的增强材料,在传热性能、能量吸收率和物质相变上与作为基体的环氧树脂存在着巨大的差异。由此激光加工 CFRP 材料会出现材料分层、内部纤维拔出及烧蚀区域周围的热影响区 (heat affected zone, HAZ) 等缺陷,严重影响 CFRP 的加工质量,这对激光加工 CFRP 材料的发展会有一些的阻碍<sup>[9-10]</sup>。

本文中采用光纤脉冲红外激光器对 CFRP 材料进行烧蚀实验,根据激光器峰值功率、离焦量、激光扫描速率多种参数构成的组合<sup>[11-13]</sup>,探究不同激光工艺参数下激光加工 CFRP 材料质量的规律,优化红外激光加工 CFRP 材料的加工工艺。

## 1 纳秒脉冲激光加工 CFRP 材料工艺流程

纳秒脉冲激光烧蚀 CFRP 材料工艺流程图如图 1 所示。激光器产生高能激光束经光纤传导,扫描振镜采用动磁式和动圈式偏转的工作方式使光纤传导后的激光束发生偏转,经场镜聚焦照射在 CFRP 材料板材上,在板材表面激光焦点一定范围的位置内,温度上升,受到烧蚀的 CFRP 材料板材发生变化。其中碳纤维在常压下没有液相,气化碳纤维所需要的能量要比激光蒸发树脂基体需要的能量高出一个数量级<sup>[14-15]</sup>。根据 XU 等人<sup>[16]</sup>的研究可知,红外激光照射在 CFRP 材料板材过程中,碳纤维对红外激光的吸收约占激光器发射激光的 80%,碳纤维吸收了绝大部分的激光能量,从而发热使碳纤维 CFRP 板材表面的环氧树脂蒸发。CFRP 材料表面树脂基体经历了由固相-液相-气相的转变,表面微量树脂基体被蒸发,扩散到空气中,气体具有一定刺激性和烧焦的气味。随着激光功率增

加,CFRP 材料中的增强材料碳纤维局部燃烧,由固相转变为气相,变成气体扩散至空气中,实现 CFRP 材料的烧蚀加工。本实验中采用的光纤激光打标机,其振镜是由  $x$  和  $y$  场镜及驱动器组成,用于激光扫描和定位的局部系统,由 Ezcad 软件控制输出伺服信号控制振镜偏转,以定位  $x$  和  $y$  平面上的目标位置<sup>[17]</sup>,使激光束能照射到目标点进行烧蚀工作,材料表面将会出现由振镜偏转控制激光束烧蚀后留下的痕迹;手动控制手轮来调整升降轴的高度位置,同时也调控 CFRP 材料表面与振镜内部透镜焦点位置之间的纵向距离,控制材料表面激光光斑的大小,结合不同的激光功率密度对 CFRP 材料进行烧蚀<sup>[18]</sup>。

## 2 实验材料及方法

本实验中采用的 CFRP 材料是平纹哑光碳板,其增强材料为 3K 花纹,即单束由 3000 根单纱正交排布组成后的单位最小的网格,其基体为耐高温、耐腐蚀、高电绝缘的环氧树脂,长 300 mm,宽 200 mm,厚度  $0.5 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ ,纤维体积含量占总板材的 60% 以上,纤维铺层的铺设方向为  $0^\circ$  (横束) 和  $90^\circ$  (纵束),加表面编制布料一起共 3 层。激光波长为 1064 nm。将材料放置在工作台,高能量激光束场镜聚焦后照射在碳纤维板上,在控制器软件上设定程序使激光在操作台 2 维  $x$  轴和  $y$  轴<sup>[19]</sup> 确定的平面上扫描移动,实现对 CFRP 材料的激光烧蚀。

加工完成后,碳纤维板材表面一定会有影响实验观察结果的碳纤维残渣、灰尘等杂质,故需要在观察材料表面面貌前,对碳纤维板材进行一定的清洗,考虑到材料的特点,一般选用超声波清洗机,使其在纯净水中清洗。打开加热开关,设置加热温度为  $35^\circ\text{C}$ ,实际温度到达设置温度的 1 min 左右,同时采用最高档位 5 档的超声功率,约 900 W。脉冲激光烧蚀 CFRP 材料板材后,表面的杂质与板材脱离进入水中。板材经清洗后,进行干燥处理。最后采用超景深 3 维显微系统观察脉冲激光烧蚀后的 CFRP 材料板材表面的形貌,获得刻蚀线宽等数据<sup>[20]</sup>。

## 3 实验结果分析

### 3.1 线宽随离焦量变化的宽窄演变规律

本实验中选用的 CFRP 板材表面由碳纤维束呈  $90^\circ$  纵横交错的网格组成,纵束网格相对横束网格较为凸起。离焦量的选定决定了激光刻蚀能量的利用效率,操控激光器的手轮,使振镜在升降轴上调整  $z$  轴的

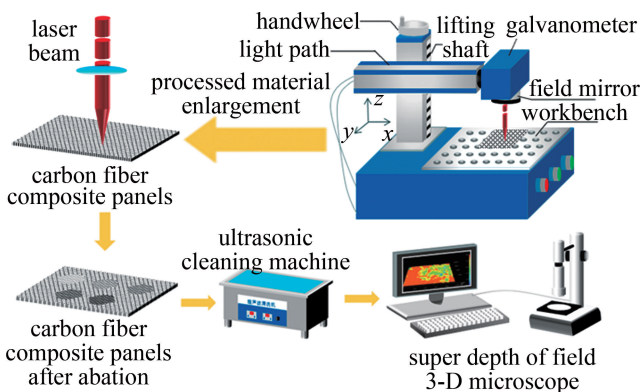


图 1 激光加工 CFRP 材料过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the process of laser processing CFRP materials



高度,以完成激光器的调焦<sup>[21]</sup>。用激光器在 CFRP 材料板上刻蚀线条,由于材料表面环氧树脂含量在横束和纵束单位网格之间交界处较网格中心区域更多,分布不均。为保证实验的准确性,故选择从正方形网格左边长中点开始,终止于接近横向第 6 个网格右侧边长中点位置,实验示意图如图 2 所示。

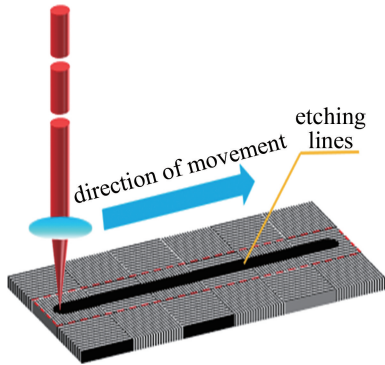


图 2 刻蚀线在材料上的位置

Fig. 2 Position of the etching line on the material

首先,选取用来刻蚀线段的激光扫描速率,对应器材说明书,将偏振镜与移动轴的连接部件高度到工作台的距离称为升降轴刻度  $h$ ,选取在聚集激光较强范围内的升降轴刻度 7.4 cm,在 CFRP 材料板上分别以激光扫描速率为 30 mm/s、50 mm/s、70 mm/s、90 mm/s、110 mm/s 刻蚀线段,如图 3 所示。图 3a~图 3e 分别对应激光扫描速率为 30 mm/s、50 mm/s、70 mm/s、90 mm/s、110 mm/s 时,CFRP 材料板刻蚀线。由此可看出,对应 70 mm/s 的激光扫描线条较其它线条连续性好,刻蚀线条没有明显的单位网格边缘环氧树脂导致的中断部分存在,故选取 70 mm/s 作为在不同离焦量下刻蚀线条的激光扫描速率。

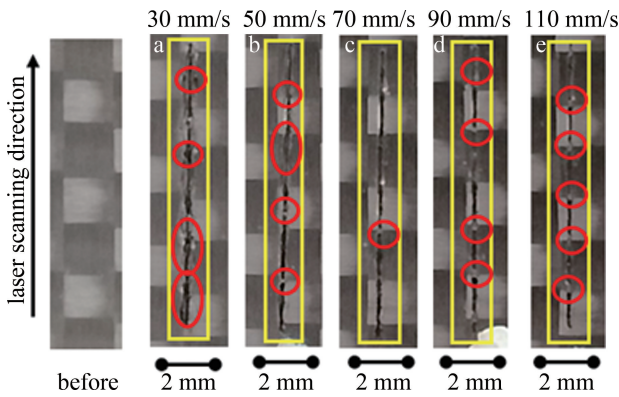


图 3 脉冲激光不同速率下的刻蚀线

Fig. 3 Etching lines at different speeds of pulsed laser

以升降轴上的刻度“ $h = 5 \text{ cm}$ ”为下限、“ $h = 10 \text{ cm}$ ”为上限,旋转手轮,每次控制振镜向上移动 1 cm,重复实验 6 次,确保穿过透镜的激光在聚焦后的焦点处于

划定的上下限范围内,如图 4 所示。图 4a~图 4f 分别对应升降轴刻度  $h$  为 5 cm、6 cm、7 cm、8 cm、9 cm、10 cm 时,CFRP 材料板刻蚀线。其中,7 cm 和 8 cm 刻度处刻蚀线线宽最细,并且是连续的线段,而其它线条几乎都有断点,且刻蚀深度不明显,故确定 0 mm 离焦量的位置就在升降轴刻度 7 cm 与 8 cm 之间。以 7 cm 为起点 0.2 cm 为步长,在 CFRP 材料板上刻蚀线条,直至到达升降轴 8 cm 刻度处,按表 1 中的参数设置进行脉冲激光线段刻蚀后的 CFRP 材料板材如图 5 所示。图 5a~图 5e 分别对应升降轴刻度  $h$  为 7.0 cm、7.2 cm、7.4 cm、7.6 cm、7.8 cm、8.0 cm 时,CFRP 材料板刻蚀线。观察到图中 7.6 cm 的刻蚀线条较细且较为连贯,为保证在 CFRP 材料板材找到激光光斑最小的离焦量位置刻度,故将振镜在 7.6 cm 处沿着升降

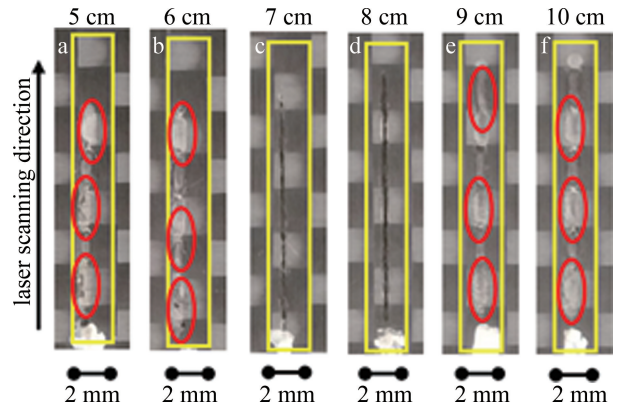


图 4 1 cm 升降轴刻度跨度的刻蚀线

Fig. 4 Etching lines for the span of 1 cm lifting axis

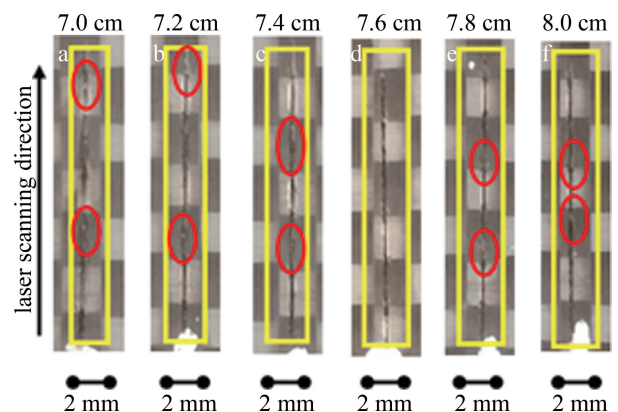


图 5 0.2 cm 升降轴刻度跨度的刻蚀线

Fig. 5 Etching lines for the span of 0.2 cm lifting axis

表 1 激光刻蚀线工艺参数

Table 1 Laser etching line process parameters

laser power $P/W$	laser wavelength $\lambda/nm$	repetition frequency $f/kHz$	scanning time $t/s$	pulse width $\tau/ns$	light out method
20	1064	200	0.171	80	line scan



轴上下各移动 1 mm 的距离,取升降轴刻度 7.5 cm、7.7 cm,测量该刻度处激光刻蚀线条的宽度。

本实验中采用超景深 3 维显微镜系统(70 倍)观察激光刻蚀后的线条在 CFRP 材料板材的横束和纵束碳纤维网格上的表面形貌,并测量刻蚀线的宽度。考虑到材料有一定的密度缺陷,刻蚀线段在 CFRP 材料上的形状会有差异。因此,为减小实验的误差,保证实验结果严谨,应测量网格上较宽的线段宽度来确定 0 mm 离焦量在  $z$  轴上的位置,刻蚀线宽度  $b_1$  和  $b_2$  于不同升降轴刻度  $h$  下的横束单位网格及纵束单位网格线宽规律图如图 6 所示。环境、仪器等多方面因素导致误差产生,其误差范围为 5%。

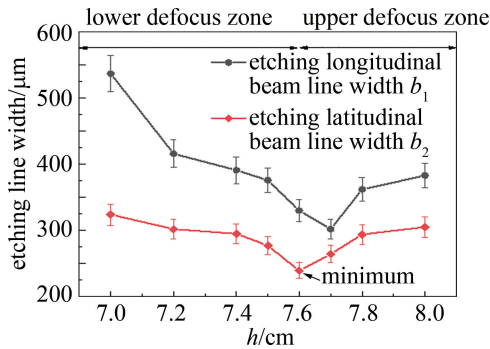


图 6 单位网格线宽随激光器升降轴刻度变化规律图

Fig. 6 Line width of the unit grid changes with the scale of the laser lift axis

由图 6 可知,当激光器升降轴刻度  $h$  由 7.0 cm 逐渐增加至 7.6 cm 时,即从下离焦区向中离焦变化时,刻蚀线条在纵束单位网格上的宽度从 537.001  $\mu\text{m}$  减少到 330.024  $\mu\text{m}$ ,此时刻蚀线条在横束单位网格上的线宽从 324.000  $\mu\text{m}$  减少到 239.017  $\mu\text{m}$ ,且到达最小横束碳纤维网格线宽;当由 7.6 cm 增加至 8.0 cm,即从中离焦向上离焦区变化时,刻蚀线条在纵束单位网格上的宽度先从 7.6 cm 刻度的 330  $\mu\text{m}$  减小到 7.7 cm 刻度的 302  $\mu\text{m}$ ,再从该刻度线宽增加到 8.0 cm 刻度的 383  $\mu\text{m}$ ,其中在 7.7 cm 刻度的纵束碳纤维单位网格刻蚀线的线宽最小;与此同时,刻蚀线条在横束单位网格上的线宽从 239  $\mu\text{m}$  增加到 305  $\mu\text{m}$ 。图 7a~图 7f 所示是升降轴刻度  $h$  分别为 7.4 cm、7.5 cm、7.6 cm、7.7 cm、7.8 cm、8.0 cm 时的 CFRP 材料板表面形貌图。此时激光峰值功率为 20 W,激光扫描速率为 70 mm/s。

碳纤维单位网格中横束碳纤维线宽与纵束网格中碳纤维线宽最小值并不在同一升降轴刻度上。故本实验中的 CFRP 复合材料板材横纵束的碳纤维网格表面材料并不在同一平面上,如图 8 所示。

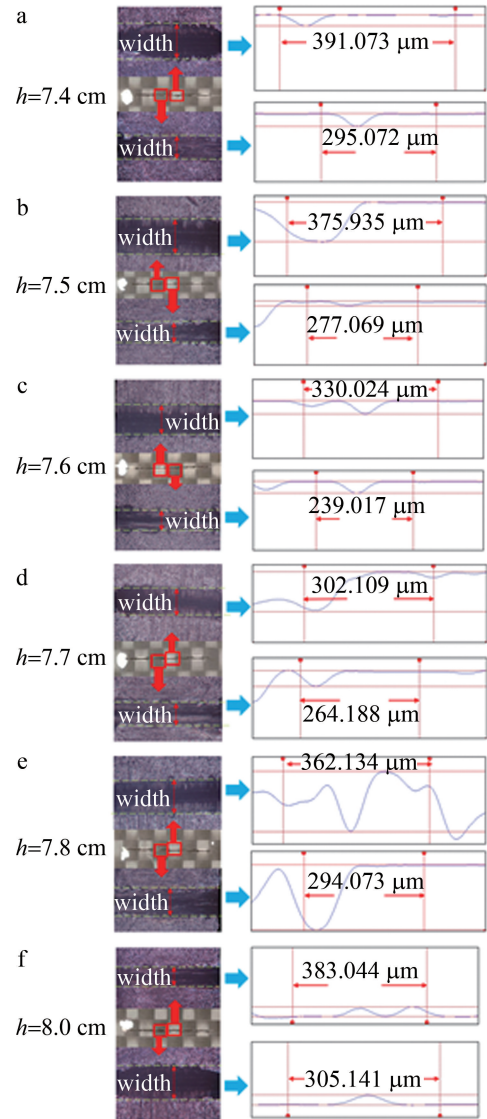


图 7 脉冲激光烧蚀 CFRP 复合材料表面形貌图

Fig. 7 Topographic map of the surface of the CFRP composite by pulsed laser ablation

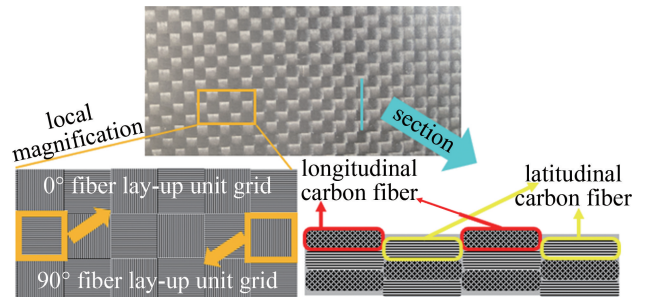


图 8 CFRP 复合材料板材剖面图

Fig. 8 Sectional view of CFRP composite sheets

横束和纵束碳纤维网格上的最小线宽并不是由同一激光器升降轴刻度下的激光所产生的。为找到激光器升降轴刻度的最佳位置,即实验中所用的最小离焦量,不能只考虑刻蚀线线宽,要将激光能量密度纳入考

虑的范畴。激光峰值功率恒定,不同升降轴刻度的激光能量密度如表 2 所示。

表 2 单位网格不同线宽对应激光功率密度

Table 2 Different line widths per unit grid correspond to laser power density

laser lift axis scale $h/\text{cm}$	etching longitudinal beam line width $b_1/\mu\text{m}$	etching latitudinal beam line width $b_2/\mu\text{m}$	line width difference $b_3/\mu\text{m}$	laser peak power $P_{\text{peak}}/\text{W}$	laser energy density $E_p/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-2})$
7.0	537±27	324±16	213±9	20	0.01062
7.2	416±21	302±15	114±6	20	0.01274
7.4	391±20	295±15	96±5	20	0.01333
7.5	375±19	277±14	80±5	20	0.01402
7.6	330±17	239±12	91±5	20	0.01606
7.7	302±15	264±13	38±2	20	0.01614
7.8	362±18	294±15	68±3	20	0.01394
8.0	383±19	305±15	77±4	20	0.01328

激光能量密度计算公式为<sup>[22]</sup>：

$$P_{\text{av}} = P_{\text{peak}} f \tau \quad (1)$$

$$E_p = P_{\text{av}} t / S \quad (2)$$

式中： $E_p$  为脉冲激光能量密度； $P_{\text{peak}}$  为激光峰值功率； $P_{\text{av}}$  为激光平均功率； $t$  为激光扫描时间； $S$  为激光扫描面积； $f$  为重复频率。

随着  $b_1$  从 537  $\mu\text{m}$  减小至 302  $\mu\text{m}$  时,  $E_p$  从 0.01062  $\text{J}/\text{mm}^2$  增加至 0.01614  $\text{J}/\text{mm}^2$ , 此时激光能量密度最大, 并且激光在纵束单位网格上的刻蚀线线宽最小, 然而刻蚀线横束线宽仅次于激光能量密度为 0.01606  $\text{J}/\text{mm}^2$  时的刻蚀线横束线宽, 此外横束单位网格中的碳纤维与激光扫描方向相差  $0^\circ$ , 因此在该角度下碳纤维材料上几乎没有热影响区; 虽然刻度 7.7 cm 处的激光能量密度大于刻度 7.6 cm 处的激光能量密度, 但是二者的激光能量密度约  $10^{-4}$   $\text{J}/\text{mm}^2$  的差距, 可忽略不计。此外碳纤维横束与纵束单位网格上的线宽差最小, 根据 JIANG 等人<sup>[9]</sup> 的研究, 在激光加工 CFRP 材料过程中, 激光扫描与碳纤维夹角  $0^\circ$  时, 几乎没有热影响区, 故确定激光光斑直径为 239  $\mu\text{m}$  最为精确, 确定升降轴刻度 7.6 cm 处为 0 mm 离焦量。

### 3.2 激光刻蚀线条的断线现象

如图 9 所示, 是以功率 2 W、频率 0.2 MHz、300 mm/s 的速率对材料进行线刻蚀, 材料表面由电脑设定的线条程序经激光器在 CFRP 材料板材上刻蚀后并不是连续的, 会在单位网格之间发生中断。这种现象不仅与基体和增强材料的相变温度有关, 也与 CFRP 的制造工艺有关。首先碳纤维比环氧树脂的气化温度高, 其次碳纤维对红外光的吸收率要比环氧树

脂对红外光的吸收率大得多, 碳纤维吸收了绝大部分的激光能量, 从而使碳纤维 CFRP 板材表面的环氧树脂基体蒸发。CFRP 材料是由多束碳纤维纺丝、碳化、编织、铺叠、层压<sup>[23]</sup> 填充并由环氧树脂粘合, 碳纤维在树脂中正交分布, 在单位碳纤维束网格之间, 由于相邻网格是呈  $90^\circ$  横纵排布, 其中纵束网格凸起, 因此环氧树脂在纵束和横束网格间高度差的缝隙处堆积。在激光划线过程中, 基质环氧树脂的激光吸收率远低于碳纤维的激光吸收率, 网格中间部分的环氧树脂较薄, 碳纤维吸收的能量会很快地将环氧树脂进行蒸发, 使其在短时间内完成由固相到液相进而到气相的转化。对于较厚树脂层的网格交界位置, 当用较小的激光刻蚀后, 堆积环氧树脂下的碳纤维吸收的能量会迅速传播到堆积的环氧树脂层, 然而积累的能量不足以融化该位置处的环氧树脂, 故不会在该位置留下刻蚀痕迹。

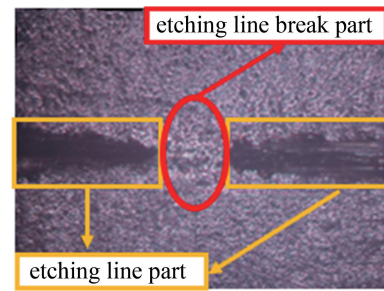


图 9 激光刻蚀 CFRP 复合材料中刻蚀线的断线区域

Fig. 9 Broken area of etching line in laser-etching CFRP composites

在此激光刻蚀线条的基础上增加一定能量时, 网格中心位置依然会在该功率下发生变化, 而在网格交界位置, 表面的环氧树脂会受其下面的碳纤维导入能量表现熔融的状态, 并没有达到该位置熔化的温度阈值, 因此激光依然不会在该位置留下痕迹。

当激光能量超过碳纤维网格交界的环氧树脂熔化的温度阈值, 交界处周围的碳纤维吸收一定能量加热该处的环氧树脂, 接近碳纤维部分的环氧树脂先熔化蒸发, 横纵束单位网格交界处树脂层最厚, 达到熔化阈值, 交界处的环氧树脂熔化, 但由于本实验中所用材料在厚度上有限, 所以再次增加激光的功率只能在一定程度上使二者刻蚀深度接近, 不能完全抹去刻蚀深度的差距。

### 3.3 CFRP 复合材料烧蚀质量演变规律

为提高脉冲激光烧蚀 CFRP 材料的效率, 选取激光器升降轴刻度 7.6 cm 及 0 mm 离焦量, 此处激光光斑面积最小, 在横束碳纤维单位网格刻蚀线宽最小。激光加工工艺参数如表 3 所示。



表3 激光加工工艺参数

Table 3 Laser processing process parameters

amount of defocus $x/\text{mm}$	laser wavelength $\lambda/\text{nm}$	laser power/W	laser energy density/ $(\text{J} \cdot \text{mm}^{-2})$	laser scanning speed $v/$ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	light out method
0	1064	2/4/6/8/10	0.01606	300/220	line scan

在 CFRP 材料板材上烧蚀如图 10 所示的六边形, 考虑到材料的厚度及碳纤维复合材料的特性等因素, 已知激光器额定功率 20 W, 选取 10%、20%、30%、40%、50% 时的激光功率, 即 2 W、4 W、6 W、8 W、10 W。烧蚀后的 CFRP 材料板材如图 11 所示。图 11a~图 11e 分别对应激光功率为 2 W、4 W、6 W、8 W、10 W 时, 烧蚀后的 CFRP 材料板材。

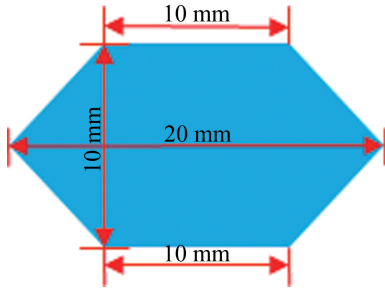


图 10 激光烧蚀 CFRP 材料图形

Fig. 10 Pattern of laser ablation CFRP material

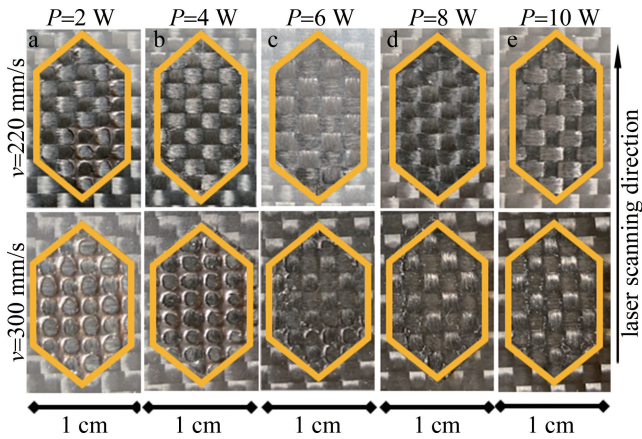


图 11 烧蚀后的 CFRP 材料板材

Fig. 11 CFRP material sheets after laser ablation

CFRP 材料由碳纤维与有机环氧树脂复合而成, 不同激光参数铣削后留下痕迹的形貌、层次、纹理有所不同, 因此可引入表面粗糙度  $R_a$  对激光刻蚀后的痕迹进行评价。表面粗糙度是指材料加工后其表面不平整形貌的峰谷间距及同平面高低差<sup>[24]</sup>,  $R_a$  越小, 测量目标表面更平整。纳秒脉冲激光的波长为 1064 nm 的红外激光。由分散碳纤维组成的微结构有效地提高了激光表面吸收率, 其中碳纤维多重反射影响着碳纤维材料的吸收率, 这使得碳纤维复合材料相对于均匀材料

的吸收率较高, 并且增强材料碳纤维的比热容相对于基质材料环氧树脂的比热容较小, 所以 CFRP 材料表面的环氧树脂并不是直接吸收激光能量蒸发, 而是由于碳纤维发热, 表面环氧树脂被蒸发。在碳纤维增强材料的激光加工过程中, 激光功率导致的激光光斑不同, 会受到吸收涨落效应的影响, 而部分功率确定的激光光斑的直径与少数纤维直径一样大, 因此在不同的位置吸收率可能不同, 这也是影响材料表面形貌的不均匀的因素。采用不同的激光功率对 CFRP 复合材料的烧蚀质量进行探究, 与此同时使用便携式表面粗糙度测量仪, 该仪器通过光切法测量光纤脉冲激光烧蚀后的 CFRP 材料的表面粗糙度质量。随着测量点数增多,  $R_a$  的测量精度越精准, 故选取烧蚀区域的 4 个测量点, 如图 12 所示。测试点 1 和 3 由左向右进行测量, 测试点 2 和 4 由右向左进行测量, 以 4 个粗糙度为 1 个六边形的 1 组数据, 取平均值。

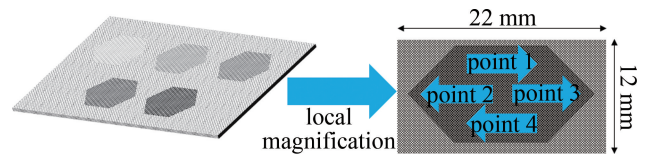


图 12 表面粗糙度测量示意图

Fig. 12 Schematic diagram of surface roughness measurement

分别选定激光功率 2 W、4 W、6 W、8 W、10 W 及激光扫描速率为 220 mm/s 和 300 mm/s 进行组合实验, 烧蚀完成后采用超声波清洗机清洗, 待干燥后使用表面粗糙度测量仪测量表面粗糙度值, 如表 4 所示。

如表 4 中的数据所示, 在激光束移动速度恒定时, 激光峰值功率由 2 W 增加到 10 W 过程中, 表面粗糙度先增加后减少, 二者都在激光功率 6 W 时, 达到最大值。激光功率一定时, 降低激光扫描速率, 会降低烧蚀后的材料表面粗糙度, 5 种激光功率对应降低激光束扫描速率后, 表面粗糙度降低的幅度分别为 24.79%、60.68%、30.05%、7.64%、24.16%, 激光扫描速率增加, 激光光斑与材料接触时间减少, 材料吸收激光的时间减少。不同情况下的测试点 2 和 4 表面粗糙度值均大于测试点 1 和 3 的表面粗糙度值, 可见激光烧蚀过程有一定不稳定性, 故引入方差来衡量数据波动和离散性的指标, 数据波动越小, 离散程度越小, 烧蚀稳定性越好。根据粗糙度数据, 求出 4 组数据的平均值, 求出样本方差  $S^2$  来判定, 能直观反应数据的离散情况, 计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (R_a - R_{a,av})^2}{n-1} \quad (3)$$



表 4 清洗后表面粗糙度数据表  
Table 4 Surface roughness data sheet after cleaning

laser power $P/W$	laser scanning speed $v/(mm \cdot s^{-1})$	surface roughness value $R_a/\mu m$				$R_{a,av}/\mu m$	$S^2/\mu m^2$
		measuring point 1	measuring point 2	measuring point 3	measuring point 4		
2	300	7.58	5.61	7.35	7.69	7.06	0.951
	220	4.85	5.05	5.70	5.40	5.25	0.142
4	300	12.20	14.67	11.17	14.76	13.20	3.238
	220	5.26	6.12	4.56	4.80	5.19	0.473
6	300	7.92	11.03	6.82	14.02	9.95	2.015
	220	6.39	6.15	7.10	8.17	6.96	0.821
8	300	4.54	6.47	7.04	6.01	6.02	1.144
	220	5.10	5.62	5.65	5.88	5.56	0.176
10	300	4.68	5.99	4.56	6.13	5.34	0.697
	220	3.50	4.30	4.52	3.88	4.05	0.133

式中： $R_a$  和  $R_{a,av}$ 、 $n$  分别为表面粗糙度、表面粗糙度平均值和测量次数，本文中取  $n=4$ 。

当激光功率为 2 W 时，样本方差  $S^2$  分别为  $0.951 \mu m^2$  ( $v=300 \text{ mm/s}$ ) 和  $0.142 \mu m^2$  ( $v=220 \text{ mm/s}$ )；当激光功率为 4 W 时，样本方差  $S^2$  分别为  $3.238 \mu m^2$  ( $v=300 \text{ mm/s}$ ) 和  $0.473 \mu m^2$  ( $v=220 \text{ mm/s}$ )；当激光功率为 6 W 时，样本方差  $S^2$  分别为  $2.015 \mu m^2$  ( $v=300 \text{ mm/s}$ ) 和  $0.821 \mu m^2$  ( $v=220 \text{ mm/s}$ )；当激光功率为 8 W 时，样本方差  $S^2$  分别为  $1.144 \mu m^2$  ( $v=300 \text{ mm/s}$ ) 和  $0.176 \mu m^2$  ( $v=220 \text{ mm/s}$ )；当激光功率为 10 W 时，样本方差  $S^2$  分别为  $0.697 \mu m^2$  ( $v=300 \text{ mm/s}$ ) 和  $0.133 \mu m^2$  ( $v=220 \text{ mm/s}$ )。清洗后的表面粗糙度和数据稳定性样本方差随激光功率和激光扫描速率的演变规律如图 13 所示。

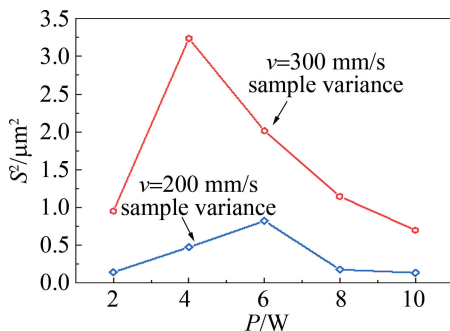


图 13 数据稳定性样本方差  $S^2$  变化规律

Fig. 13 Variation of sample data stability variance  $S^2$

考虑到测量数据量较大，故选择相同条件下的最大值  $R_{a,max}$ 、最小值  $R_{a,min}$ 、平均值  $R_{a,av}$ 。数据越小，材料表面越光滑。如图 14 所示，当  $v$  一定时， $R_{a,max}$ 、 $R_{a,min}$ 、 $R_{a,av}$  随着激光功率先增大后减小。其中在  $v=220 \text{ mm/s}$  的情况下，粗糙度在  $P=6 \text{ W}$  处取最大值，在  $P=10 \text{ W}$  处取最小值；在  $v=300 \text{ mm/s}$  的情况下，粗糙

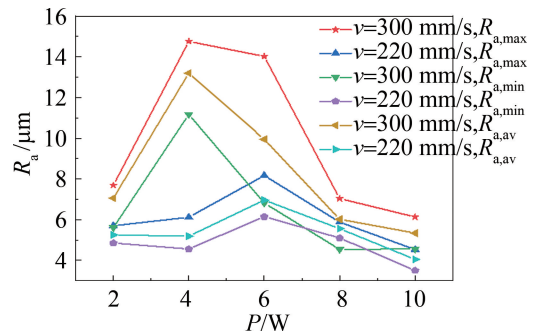


图 14 表面粗糙度变化规律

Fig. 14 Change law of surface roughness

度在  $P=4 \text{ W}$  处取最大值，在  $P=10 \text{ W}$  处取最小值；两者取最大值时激光功率并不相等，然而同在  $P=10 \text{ W}$  处得到最优粗糙度数据稳定性样本方差，数据波动最小和离散程度最小，稳定性最好。

脉冲激光烧蚀 CFRP 材料板材过程中，随着入射激光功率增加，材料吸收的能量增加。当  $P=2 \text{ W}$  时，材料表面的单位网格中间小部分的环氧树脂蒸发，其周围受到扫描的区域受到一定的热影响，颜色加深。经测量得到该激光功率下的  $R_{a,av}$  为  $7.06 \mu m$  和  $5.25 \mu m$ 。当激光功率一定程度加大时，碳纤维吸收的激光能量进一步增加，对单位网格表面的环氧树脂进一步加热，蒸发的环氧树脂区域由中间向四周大幅度延伸，接近网格边界。由于碳纤维升温较快，板材表面的环氧树脂单体受热飞溅，增加了表面的粗糙度；同时环氧树脂铺在碳纤维上，由于整体加热，厚度较大的环氧树脂层受热不均，加热后与碳纤维局部分离，这影响了材料表面粗糙度，如  $P=4 \text{ W}$  处， $R_{a,av} = 13.20 \mu m$  ( $v=300 \text{ mm/s}$ )；当  $P=10 \text{ W}$  时，CFRP 材料板材表面温度非常高，此时碳纤维吸收激光能量的密度非常大，大部分环氧树脂被下层的碳纤维蒸发掉，部分碳纤维被激光束烧蚀，发

生化学变化,产生  $\text{CO}_2$ ,因此 CFRP 材料板材表面较光滑,  $R_{a,av}$  在此处最小,分别为  $5.34 \mu\text{m}$  ( $v=300 \text{ mm/s}$ ) 和  $4.05 \mu\text{m}$  ( $v=220 \text{ mm/s}$ )。

此外,如图 14 所示,在激光扫描速率不同的情况下,达到表面粗糙度峰值的激光功率不同。当  $v=300 \text{ mm/s}$  时,表面粗糙度在  $P=4 \text{ W}$  处取峰值;当  $v=220 \text{ mm/s}$  时,表面粗糙度在  $P=6 \text{ W}$  处取峰值,这是因为激光束在材料上的驻留时间比  $v=300 \text{ mm/s}$  的驻留时间长,板材的吸收能量已经提前达到环氧树脂层与碳纤维增强材料部分分离的阈值。

综上所述,当  $P=10 \text{ W}$ 、 $v=220 \text{ mm/s}$  时,粗糙度数据稳定性最好,绝对值最小,表面形貌最光滑。

## 4 结论

本文中综合了激光峰值功率、激光扫描速率、激光束的离焦量等工艺参数对脉冲激光烧蚀 CFRP 材料的加工质量进行实验研究。

(a)对 CFRP 材料单位网格中刻蚀线断线现象的产生进行了探究。碳纤维单位网格之间堆积的环氧树脂被吸收激光能量的碳纤维加热,激光扫描后,环氧树脂积累的能量达不到蒸发阈值,因此不会蒸发,然而,网格其它部分的环氧树脂层较薄,蒸发阈值较小,激光扫描后,环氧树脂被蒸发掉,因此板材表面产生局部断线的现象。

(b)根据实验结果表明,不同激光扫描速率,达到材料烧蚀后,表面粗糙度峰值的激光功率不同。设定激光扫描速率为  $220 \text{ mm/s}$  和激光功率为  $10 \text{ W}$  时,可得到大小为  $3.50 \mu\text{m}$  的 CFRP 复合材料最小表面粗糙度平均值,其中粗糙度数据稳定性样本方差最佳,约为  $0.133 \mu\text{m}^2$ ,在此条件下可以得到良好的加工表现。

## 参考文献

- [1] GRUNER A, SCHILLE J, LOESCHNER U, *et al.* Experimental study on micro hole drilling using ultrashort pulse laser radiation[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 157-166.
- [2] WANG H J, LIU W H, ZHANG Y, *et al.* Optimization of  $\text{CO}_2$  laser ablation of PMMA materials[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(5): 75-83(in Chinese).  
王卉军,刘文昊,张阳,等.  $\text{CO}_2$  激光烧蚀 PMMA 材料工艺优化[J]. *塑料工业*, 2022, 50(5): 75-83.
- [3] AL-SULAIMAN F A, YILBAS B S, AHSAN M, *et al.* Laser hole drilling of composites and steel workpieces[J]. *Lasers in Engineering*, 2006, 16(1/2): 105-120.
- [4] ZHANG L L, JIANG Zh H, ZHANG W, *et al.* A review of laser processing fiber-reinforced flexible composite material [J]. *Applied Laser*, 2012, 32(3): 238-243(in Chinese).  
张玲玲,姜兆华,张伟,等. 超强度纤维柔性复合材料激光加工工
- [5] LEI Y Zh. Recent research advances and expectation of mechanical engineering science in China[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5): 1-11(in Chinese).  
雷源忠. 我国机械工程研究进展与展望[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5): 1-11.
- [6] YU H N, GAO Ch X, WANG Y H. Application and prospect of carbon fiber reinforced resin-based composites[J]. *China Synthetic Fiber Industry*, 2020, 43(1): 55-59(in Chinese).  
于海宁,高长星,王艳华. 碳纤维增强树脂基复合材料的应用及展望[J]. *合成纤维工业*, 2020, 43(1): 55-59.
- [7] JIAN L Y, LIN Y X. Review of milling of carbon fiber reinforced plastic[J]. *Tool Engineering*, 2014, 48(4): 3-6(in Chinese).  
简龙艺,林有希. 碳纤维复合材料铣削加工研究进展[J]. *工具技术*, 2014, 48(4): 3-6.
- [8] WANG Ch H, LI P N, LI Sh J, *et al.* Research progress on delamination defect in CFRP cutting process[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(6): 109-115(in Chinese).  
王春浩,李鹏南,李树健,等. CFRP 钻削加工过程的分层缺陷研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(6): 109-115.
- [9] JIANG Y, CHEN G Y, ZHOU C, *et al.* Research of carbon fiber reinforced plastic cut by picosecond laser[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6): 821-825(in Chinese).  
蒋翼,陈根余,周聪,等. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 821-825.
- [10] HERZOG D, JAESCHKE P, MEIER O, *et al.* Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, 48(12/13): 1464-1473.
- [11] GULER M T. Fabricating plasma bonded microfluidic chips by  $\text{CO}_2$  laser machining of PDMS by the application of viscoelastic particle focusing and droplet generation [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 73: 260-268.
- [12] CHEN Z, ZHOU H B, WU Ch, *et al.* A cleaner production method for laser transmission welding of two transparent PMMA parts using multi-core copper wire[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 16: 1-12.
- [13] PING Y Q, JIANG K Y. The influence of pulsed laser parameters over the quality of coppered lines on polyurethane surface[J]. *China Plastics Industry*, 2015, 43(9): 54-56(in Chinese).  
平玉清,江开勇. 脉冲激光参数对聚氨酯表面镀铜线条质量的影响[J]. *塑料工业*, 2015, 43(9): 54-56.
- [14] WEBER R, HAFNER M, MICHALOWSKI A, *et al.* Minimum damage in CFRP laser processing[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 302-307.
- [15] PAGANO N, ASCARI A, LIVERANI E, *et al.* Laser interaction with carbon fibre reinforced polymers[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 33: 423-427.
- [16] XU H B, HU J, YU Zh. Absorption behavior analysis of carbon fiber reinforced polymer in laser processing[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(10): 2330-2336.
- [17] LI Y H, ZHAO B Ch, HU B, *et al.* Universal calibration method for line structured light galvanometer scanning system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1015001(in Chinese).  
李明华,赵勃冲,胡泊,等. 一种线结构光振镜扫描测量系统通用标定方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1015001.

- [18] PENG J, XU H Q, WANG Y B, *et al.* Effect of laser spot size on the behavior of molten pool and keyhole in laser welding[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(7):20220130(in Chinese). 彭进, 许红巧, 王永彪, 等. 激光光斑尺寸对激光焊接熔池、匙孔行为的影响[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(7):20220130.
- [19] ZHU X W, PAN Zh H, YANG W F, *et al.* Study on multi-layered CFRP patch bonding joint based on laser 3-D engraving technology [J]. *Opto-Electron in Engineering*, 2022, 49(1):210314(in Chinese). 朱小伟, 潘哲豪, 杨文锋, 等. 基于激光三维雕刻的 CFRP 多梯层挖补胶接接头加工技术研究[J]. *光电工程*, 2022, 49(1):210314.
- [20] HE Zh H, ZHOU J B, WU Zh Q, *et al.* Analysis and characterization on material surface micro morphology based on large scene depth and 3D visualization [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2018, 54(12): 878-881 (in Chinese). 何智华, 周静波, 吴章勤, 等. 基于超景深三维可视化方案的材料表面显微形貌分析与表征[J]. *理化检验(物理分册)*, 2018, 54(12): 878-881.
- [21] DAI Zh D, FU X W, LI Zh, *et al.* Design of the edge computing based adaptive focusing control system for laser cutting head [J]. *Electromachining & Mould*, 2022(2): 53-56(in Chinese). 戴中达, 付兴威, 李正, 等. 基于边缘计算的自适应动态调焦激光切割头控制系统设计[J]. *电加工与模具*, 2022(2): 53-56.
- [22] CAI S, CHEN G Y, ZHOU C. Research and application of surface heat treatment for multipulse laser ablation of materials[J]. *Applied Surface Science*, 2015(355): 461-472.
- [23] LI B, HUANG P B, FU Ch L, *et al.* Study on the buckling properties of carbon fiber composite perforated laminates[J]. *Synthetic Fiber*, 2020, 49(9): 39-43(in Chinese). 李斌, 黄频波, 付成龙, 等. 数值分析开孔碳纤维复合材料层压板屈曲性能研究[J]. *合成纤维*, 2020, 49(9):39-43.
- [24] ZHANG W J, SHI R J, WANG R J, *et al.* Effect of surface roughness on infrared diffuse reflection photoelectric sensor [J]. *Henan Science and Technology*, 2022, 41(21): 33-39(in Chinese). 张五杰, 史润军, 王汝佳, 等. 表面粗糙度对红外漫反射光电传感器的影响[J]. *河南科技*, 2022, 41(21): 33-39.
- [25] SHENG Zh, XIE Sh Q, PAN Ch Y. Probability theory and mathematical statistics [M]. 3rd ed. Beijing: Beijing Higher Education Press, 2001:160(in Chinese). 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 第3版. 北京:北京高等教育出版社, 2001:160.