# 基于激光毛化的铝合金/CFRTP 激光 连接特性研究

宋坤林<sup>1</sup>, 曲华<sup>1\*</sup>, 张涛<sup>1</sup>, 谷世伟<sup>2</sup>, 杨海锋<sup>2</sup>

(1.国家高速列车青岛技术创新中心,山东 青岛 266108;2.哈焊国创(青岛)焊接工程创新中心有限公司,山东 青岛 266111)

摘要:目的 针对目前铝合金和碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)直接连接接头强度低的问题,对铝合 金表面进行预处理,以提升异种材料的激光连接强度。方法 通过激光毛化工艺在铝合金表面预制微织构, 然后利用光纤激光连接铝合金与 CFRTP,研究了激光焊接工艺参数对铝合金与 CFRTP 焊接接头拉剪性能的 影响。结果 当激光功率为 750 W、焊接速度为 0.2 m/min 时,铝合金/CFRTP 接头拉剪力达到最大值 5 209 N, 是未激光毛化的接头拉剪力的 2.29 倍。通过扫描电镜(SEM)对断口进行分析,发现界面断裂形式主要为 CFRTP 脱出和剪切断裂。采用 SEM 及能谱仪(EDS)对接头截面进行分析,发现结合界面处存在微观机械 嵌合作用,同时在界面处存在元素过渡层。结论 随着激光功率的增大,焊接接头的拉剪力增大,但焊接功 率较大会导致热输入过大,造成树脂发生热分解,导致焊接接头拉剪力降低。随着焊接速度的增大,焊接 热输入降低,导致焊接过程中树脂熔化量减少,焊接接头的拉剪力降低。界面的机械嵌合作用使焊接接头 具有较高的结合强度。

关键词:异种材料;微织构;激光焊接;断裂机制;连接机理

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.06.010

中图分类号: TG456.7 文献标志码: A 文章编号: 1674-6457(2024)06-0084-08

### Laser Joining Characteristics of Aluminum Alloy/CFRTP Based on Laser Texturing

SONG Kunlin<sup>1</sup>, QU Hua<sup>1\*</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, GU Shiwei<sup>2</sup>, YANG Haifeng<sup>2</sup>

National Innovation Center of High Speed Train, Shandong Qingdao 266108, China;
 HWI-NICHST Welding & Engineering Innovation Center (Qingdao) Co., Ltd., Shandong Qingdao 266111, China)

**ABSTRACT:** The work aims to deal with the low joint strength in direction connection of aluminum alloy and carbon fiber reinforced thermoplastic composites (CFRTP) to improve the laser connection strength of dissimilar materials. This paper prefabricated micro-textures on the surface of aluminum alloy through laser texturing process, and then used fiber laser to connect aluminum alloy and CFRTP. The effect of laser welding process parameters on the tensile and shear properties of aluminum alloy and CFRTP welded joints was studied. When the laser power was 750 W and the welding speed was 0.2 m/min, the tensile

**引文格式:** 宋坤林, 曲华, 张涛, 等. 基于激光毛化的铝合金/CFRTP 激光连接特性研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(6): 84-91. SONG Kunlin, QU Hua, ZHANG Tao, et al. Laser Joining Characteristics of Aluminum Alloy/CFRTP Based on Laser Texturing[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(6): 84-91.

收稿日期: 2024-01-15

Received: 2024-01-15

基金项目:山东省重大科技创新工程计划(2021ZDPT02);国家重点研发计划(2022YFB4300100)

Fund: Shandong Province Major Science and Technology Innovation Project Funding (2021ZDPT02); National Key R&D Program of China (2022YFB4300100)

<sup>\*</sup>通信作者 (Corresponding author)

shear force of the aluminum alloy/CFRTP joint reached the maximum value of 5 209 N, which was 2.29 times that of the joint without laser texturing. Fracture analysis by scanning electron microscope (SEM) revealed that the interface fracture forms were mainly CFRTP prolapse and shear fracture. The analysis of fracture with SEM and energy dispersive spectroscopy (EDS) found that there was a micro-mechanical interlocking effect at the bonding interface, and there was an element transition layer at the interface. The results show that as the laser power increases, the tensile shear force of the welded joint increases, but when the welding power is high, the heat input will be too large, causing thermal decomposition of the resin, resulting in a decrease in the tensile shear force of the welded joint. As the welding speed increases, the welding heat input decreases, resulting in a decrease in the amount of resin melted during the welding process and a decrease in the tensile and shear stress of the welded joint. The mechanical interlocking effect at the bonding interface makes the welded joint have high bonding strength.

KEY WORDS: dissimilar material; micro texture; laser welding; fracture mechanism; connection mechanism

铝合金具有比重小和耐腐蚀性好等优点,广泛应 用于轨道交通、汽车、船舶等领域。碳纤维增强热塑 性复合材料(Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, CFRTP)具有比强度和比模量高、耐疲 劳、加工成形性好等优势,在汽车、船舶等领域的应 用比例逐渐增大<sup>[1-2]</sup>。随着铝合金和 CFRTP 材料的大 量应用,异种材料连接是不可避免的问题。激光焊接 具有高精度、高效率、无接触等优点,不仅可以实现 CFRTP 与铝合金之间的有效连接,而且不会损坏 CFRTP 材料的内部碳纤维<sup>[3]</sup>。

国内外已有多位学者开展了铝合金与复合材料 的激光连接。Feng 等<sup>[4]</sup>通过在铝合金表面进行激光毛 化处理, 增大了表面粗糙度, 使制备的接头强度达到 了 23.8 MPa, 但在界面未发现新的化学键。Jung 等<sup>[5]</sup> 利用半导体激光器实现了 CFRP 和铝合金的连接,接 头最大拉伸剪切载荷达到 3 000 N,断裂主要发生在 接头界面或 CFRP 接头界面附近的熔化区。Roesner 等<sup>[6-7]</sup>研究了铝合金与玻璃纤维增强的尼龙 66 (GF-PA66)激光焊接,焊前在铝合金表面用激光加工出一 系列的微小凹槽,再与 GF-PA66 进行激光焊接,使 接头的剪切强度达到了 24 MPa。Amend 等<sup>[8]</sup>在铝合 金表面刻蚀出网格及弹坑 2 种不同的几何形状再与 PA6 进行连接,研究发现,接头剪切强度可提高至 16.3 MPa。Schricker 等<sup>[9]</sup>采用铣削加工工艺在 AA6082 铝合金表面预制"凹槽结构",然后与 PA66 进行连接, 获得的异质接头抗剪强度最高仅为 12.2 MPa。Ye 等[10] 比较了激光纹理、阳极氧化和混合预处理方法对铝 合金和 CFRTP 激光直接连接对接接头性能的影响, 获得接头的最大强度分别为 20、11、13 MPa,发现 与激光毛化处理相比,混合处理方法的接头性能有 所下降。Iwata 等<sup>[11]</sup>通过在合金表面制备微结构研究 了热压温度对铝合金和 CFRTP 连接接头界面微观 形貌及强度的影响,接头最大拉剪强度为 30 MPa (1000 N)。Bu 等<sup>[12]</sup>通过激光预处理构建了新型仿 生纹理,显著提高了接头的强度和韧性,揭示了所提 出的仿生纹理对 6061/CFRTP 接头的影响规律。Bu 等<sup>[13]</sup>还建立了 CFRTP 和 Ti-6Al-4V 激光摆动连接的 热-机耦合模型,并通过试验验证了模型的准确性, 从界面处树脂熔融区(RMZ)的尺寸以及最大应力等 方面得到了优化的工艺参数。Jiao 等[14]采用高速旋转 激光焊接技术连接了 CFRTP 和铝合金,建立了铝合 金/CFRTP 激光连接的数学模型,通过数值模拟方法 预测了铝合金/CFRTP 接头的强度。Jiao 等<sup>[15]</sup>还通过 在 TC4 表面采用激光覆塑方法预制塑料覆盖层, 然 后采用高速旋转激光焊接技术连接 TC4 和 CFRTP, 获得最大焊接接头强度为 30.25 MPa, 并对接头的强 度、疲劳和失效机理进行了研究。

本文采用激光毛化工艺对铝合金表面进行了焊 前预处理,利用光纤激光连接铝合金与 CFRTP,考 察了焊接工艺参数 (激光功率、焊接速度) 对铝合金 与 CFRTP 搭接接头强度的影响规律,并对界面形貌、 元素成分及拉剪后的断面形貌进行了分析,获取了界 面断裂机制及连接机理,通过焊接工艺参数协同优 化,实现了接头性能水平的有效提升。

#### 试验 1

#### 1.1 材料

CFRTP 板材尺寸为 50 mm×25 mm×3 mm, 其基 体为聚己二酰己二胺(PA66), 增强相为短切碳纤维, 碳纤维体积分数为 30%, 其熔点为 263 ℃, 初始分解 温度为 406 ℃。6061 铝合金尺寸为 150 mm×50 mm× 1.5 mm, 化学成分如表 1 所示。试验前将 CFRTP 放 在超声清洗机中利用乙醇清洗 30 min, 随后放入

表 1 6061 铝合金化学成分 Tab.1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy wt.%								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.4-0.8	0.7	0.1-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	Bal.

80 ℃烘干箱中烘干2h。铝合金预处理过程如下:首 先置于质量分数为5%的氢氧化钠(NaOH)溶液中浸 泡10min,再置于质量分数为5%的盐酸(HCI)溶 液中浸泡5min,然后放在超声清洗机中利用去离子 水清洗15min,随后用冷风干燥。

### 1.2 方法

试验所用激光器为 YLR-6000 型激光器, 铝合金 与 CFRTP 的激光直接连接过程示意图如图 1 所示。 通过设计专门的夹具以保证二者密切接触,夹具通过 2个夹紧螺栓来固定,每次焊接施加恒定 5.4 N 的夹 紧力,通过调整机器人位置来保证激光位于压紧工装 焊接窗口中心位置。焊接时,激光照射到铝合金表面, 热量通过热传导的方式传递到铝合金和 CFRTP 界面 处,并使 CFRTP 开始熔化并与铝合金形成接头。为 了提高铝合金对激光的吸收率,焊接前用马克笔将铝 合金表面焊接区域涂黑[16-17]。为提高焊接接头的强 度,通过纳秒激光器在铝合金表面预制微结构,工艺 参数如下: 激光功率为 50 W、脉冲频率为 80 kHz、 扫描速度为3 000 mm/s、织构间距为 0.4 mm、扫描 次数为 10, 处理后的铝合金表面形貌如图 2 所示。 由于铝合金表面对激光的反射率较高,因此试验时激 光入射角为 10°,为防止焊接飞溅,试验时采用 Ar 气进行保护, Ar 气流量为 25 L/min, 固定离焦量为+ 15 mm, 激光光斑直径约为 1.68 mm。探索焊接激光 功率和焊接速度对接头性能以及界面形貌的影响,试 验中的激光焊接参数如表2所示。为保证试验结果的 可靠性,每组参数至少重复3次。

为评估接头的力学性能,采用美特斯 E45.305 万 能材料试验机进行拉剪试验,拉伸速率为 2 mm/min;

表 2 焊接工艺参数							
Tab.2 Welding experiment parameters							
No.	Laser power/W	Welding speed/ $(m \cdot min^{-1})$					
1	500	1					
2	750	1					
3	1 000	1					
4	1 500	1					
5	2 000	1					
6	750	0.2					
7	750	0.5					
8	750	0.8					
9	750	1					
10	750	1.2					

利用 Zeiss 光学显微镜对铝合金和 CFRTP 界面形貌进 行观察,通过扫描电镜(SEM)对拉剪试验后的断口 进行分析,采用 EDS 能谱进行界面化学成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 激光功率对焊接接头拉剪性能的影响

不同激光功率下焊接接头的拉剪性能变化如图 3 所示。从图 3a 可以看出,相比于未进行激光毛化处 理的铝合金/CFRTP 焊接接头,经过激光毛化处理后, 焊接接头的强度显著提高。随着激光功率的增大,焊 接接头的拉剪力有所提高,当焊接功率为 750~ 1 500 W 时,拉剪力变化不明显,随着激光功率继续 增到 2 000 W,接头拉剪力降低,这是因为当激光 功率较小时,单位时间内的激光能量较低,传递到界



图 1 6061 铝合金和 CFRTP 激光连接示意图

Fig.1 Schematic of laser connection between 6061 aluminum alloy and CFRTP: a) laser joining process; b) laser joint



图 2 铝合金表面微结构形貌 Fig.2 Microstructure of aluminum alloy surface

2.2

面的能量较低,导致焊接热输入不足,CFRTP 熔化 量较少,当焊接激光功率较大时,焊接热输入过大, 造成界面温度超过了树脂的热分解温度,使树脂热分 解产生气泡,气泡将作为缺陷残留在界面附近,降低 了焊接接头性能<sup>[4,18-19]</sup>。图 3b 为典型的载荷-位移曲 线,可以看到当激光功率为750W时,所能达到的最 大拉剪力和位移较大,说明接头承载能力较好。

拉伸后焊接接头断口形貌如图 4 所示,可以看到 接头全部断在了界面处,随着激光功率的增大,焊接 热输入增加, CFRTP 的熔化宽度逐渐变宽, 铝合金 与 CFRTP 的黏接面积增大, 铝合金表面粘连的树脂



图 3 不同激光功率下焊接接头拉剪性能

Fig.3 Tensile-shear properties of welded joints at different laser power: a) maximum tensile shear; b) load-displacement curve



a 500 W



图 4 不同焊接功率下的断口宏观形貌 Fig.4 Macro morphology of fracture at different welding power

量也有所增加,从而提高了焊接接头的拉剪性能,这

焊接速度对焊接接头拉剪性能的影响

不同焊接速度下焊接接头的拉剪性能变化如图 5 所示。可以发现,随着焊接速度的增大,接头的拉剪

力逐渐降低,这是因为随着焊接速度的增大,激光作

用时间变短,传递到界面的能量变低,导致焊接热输

入降低, CFRTP 熔化量不足, 铝合金与 CFRTP 的黏

接面积减小,降低了接头强度。图 5b 为典型的载荷-

位移曲线,可以看到,随着拉剪力的增大,位移相应

与焊接接头的拉剪力测试结果是一致的。

增加,随着焊接速度逐渐降低,焊接接头所能达到 的最大拉剪力逐渐增大,说明焊接接头的强度逐渐 提高。

为了进一步研究焊接速度对 CFRTP 熔化量的影响,观察焊接接头断口形貌,如图 6 所示,可以看到 接头全部断在了界面处,随着焊接速度的增大,焊接 热输入减小, CFRTP 的熔化宽度变窄,铝合金与 CFRTP 的黏接面积减小,铝合金表面粘连的树脂量也 有所减少,这进一步解释了焊接接头强度降低的原因。

## 2.3 铝合金/CFRTP 焊接接头断裂机制

对 750 W 焊接功率、0.2 m/min 焊接速度下的铝

合金/CFRTP 接头断口进行观察,如图 7 所示。从铝 合金侧断口形貌可以看出,铝合金表面粘连着部分 CFRTP 母材,裸露出相当量的碳纤维和树脂基体, 部分 CFRTP 从微结构沟槽中全部脱出,还有部分嵌 入沟槽的 CFRTP 在铝合金界面处发生剪切断裂,从 图 7b 还可以看到,部分碳纤维被拉断,说明在接头 断裂过程中 CFRTP 母材被撕裂,证明铝合金和 CFRTP 具有较高的结合强度。

## 2.4 铝合金/CFRTP 焊接接头连接机理

目前,金属与树脂基复合材料的激光连接界面 结合机理主要包括弱物理吸附、机械嵌合和化学键



#### 图 5 不同焊接速度下焊接接头拉剪性能

Fig.5 Tensile-shear properties of welded joints at different welding speed: a) maximum tensile shear; b) load-displacement curve



a 0.2 m/min c 0.8 m/min c 0.8 m/min c 0.8 m/min d 1.0 m/min c 1.2 m/min

图 6 不同焊接速度下的断口宏观形貌 Fig.6 Macro morphology of fracture at different welding speed



a SEM扫描位置

b 图7a中的A区域



c 图7b中的B区域

图 7 铝合金侧断口微观形貌

Fig.7 Micromorphology of aluminum alloy side fracture: a) SEM observation position; b) area A in Fig.7 a); c) area b in Fig.7 b)

作用<sup>[4,20-22]</sup>。对 750 W 焊接功率、0.2 m/min 焊接速 度下铝合金/CFRTP 接头界面结合形貌进行观察,结 果如图 8 所示,可以看到,在靠近焊缝区域(图 8a) 的沟槽中填满了树脂,界面结合紧密,这保证了铝合 金和 CFRTP 之间的机械嵌合作用<sup>[23-25]</sup>,同时沟槽两 侧存在的毛刺在焊接过程中扎入熔融的 CFRTP 中起 到钉扎作用,有利于提高焊接接头强度。在远离焊缝 处,热输入和树脂熔化量不足导致此处织构未完全填

满树脂,界面之间存在空隙,如图 8b 所示。

对 750 W 焊接功率、0.2 m/min 焊接速度下铝合 金/CFRTP 接头界面处进行成分测量及分析 (EDS), 测试位置及测试结果如图 9 所示。可以看出,在铝合 金和 CFRTP 的界面处存在厚度约为 15 μm 的元素过 渡层,在该过渡层处 Al 元素含量逐渐变低,而 C 元 素含量逐渐升高,说明在激光连接过程中,界面元素 发生了扩散,使元素分布发生改变[26-28]。



b 远离焊缝处

图 8 铝合金/CFRTP 界面结合形貌 Fig.8 Interface bonding morphology of aluminum alloy/CFRTP: a) close to the weld; b) away from the weld



图 9 EDS 线扫描结果 Fig.9 EDS line scan results: a) line scan position; b) line scan results

# 3 结论

对铝合金和 CFRTP 进行激光连接,探索了焊接 工艺参数对接头性能的影响,研究了接头的剪切强 度、断裂机制以及连接机理,获得的主要结论如下:

1)热输入受到激光功率、焊接速度的影响。随着热输入量的增加,CFRTP 熔化宽度逐渐增大, CFRTP 熔化宽度与热输入量呈正相关,获得的接头 最高拉剪力为 5 209 N。

2) 铝合金与 CFRTP 接头的断裂方式为界面断裂。主要断裂机制为 CFRTP 剪切和脱出断裂,铝合金表面粘连部分 CFRTP,铝合金断裂表面 CFRTP的黏附面积和高度随热输入的增加而增大。

3) 铝合金与 CFRTP 接头界面靠近焊缝处的微织 构内树脂填充完全,界面紧密结合,在远离焊缝处, 树脂熔化量不足,界面存在空隙。

4) 铝合金和 CFRTP 的主要连接机理是铝合金的 微织构与 CFRTP 之间产生的机械嵌合作用,同时在 连接界面发现存在元素过渡层。

#### 参考文献:

- 贾少辉, 贾剑平, 焦俊科, 等. 碳纤维增强热塑性复 合材料/铝合金激光搅拌焊接实验及仿真研究[J]. 中 国激光, 2019, 46(7): 0702006.
   JIA S H, JIA J P, JIAO J K, et al. Experimental and Numerical Studies on Laser Stir Welding of Carbon Fiber Reinforced Thermal Polymers/Aluminum Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0702006.
   叶逸云, 贾少辉, 焦俊科, 等. 铝合金/碳纤维增强热
- 塑性复合材料的激光对接焊研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1002003.

YE Y Y, JIA S H, JIAO J K, et al. Aluminum Alloy/Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Laser Butt Welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1002003.

- [3] LI Y, BU H C, YANG H Y, et al. Effect of Laser Heat Input on the Interface Morphology during Laser Joining of CFRTP and 6061 Aluminum Alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 366-379.
- [4] FENG Z W, MA G L, SU J H, et al. Influence of Process Parameters on the Joint Characteristics during Laser Joining of Aluminium Alloy and CFRTP[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1493-1506.
- [5] JUNG K W, KAWAHITO Y, TAKAHASHI M, et al. Laser Direct Joining of Carbon Fiber Reinforced Plastic to Aluminum Alloy[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(3): 032003.
- [6] ROESNER A, SCHEIK S, OLOWINSKY A, et al. Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 370-377.

- [7] ROESNER A, OLOWINSKY A, GILLNER A. Long Term Stability of Laser Joined Plastic Metal Parts[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 169-171.
- [8] AMEND P, PFINDEL S, SCHMIDT M. Thermal Joining of Thermoplastic Metal Hybrids by Means of Mono- and Polychromatic Radiation[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 98-105.
- [9] SCHRICKER K, STAMBKE M, BERGMANN J P, et al. Macroscopic Surface Structures for Polymer-Metal Hybrid Joints Manufactured by Laser Based Thermal Joining[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 782-790.
- [10] YE Y Y, ZOU Q, XIAO Y N, et al. Effect of Interface Pretreatment of Al Alloy on Bonding Strength of the Laser Joined Al/CFRTP Butt Joint[J]. Micromachines, 2021, 12(2): 179.
- [11] IWATA K, SUZUKI A, KIM S G, et al. Enhancing the Solid-state Join Ability of A5052 and CFRTP via an Additively Manufactured Micro-structure[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2022, 306: 117629.
- [12] BU H C, LI X, LI B B, et al. Enhanced Interfacial Joining Strength of Laser Wobble Joined 6061-T6 Al Alloy/CFRTP Joint via Interfacial Bionic Textures Pre-Construction[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 261: 110787.
- [13] BU H C, ZHAN X H, YANG H Y, et al. Numerical Simulation of Thermal Distribution and Residual Stress Characteristic for Laser Wobble Joining of CFRTP and Ti-6Al-4V Alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 562-575.
- [14] JIAO J K, YE Y Y, JIA S H, et al. CFRTP-Al Alloy Laser Assisted Joining with a High Speed Rotational Welding Technology[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106187.
- [15] JIAO J K, ZOU Q, YE Y Y, et al. Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites and TC4 Alloy Laser Assisted Joining with the Metal Surface Laser Plastic-Covered Method[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 213: 108738.
- [16] 马瑜. 基于表面改性的 CFRTP/Al 激光连接接头性能 提升方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
  MA Y. Method for Improving Performance of CFRTP/Al Laser Joint Based on Surface Modification[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [17] 侯红玲, 解玉坤, 赵晋平. 激光切割铝合金吸收率试验研究[J]. 表面技术, 2016, 45(10): 193-198.
  HOU H L, XIE Y K, ZHAO J P. Experimental Research on Absorptivity of Aluminum Alloy Cut by Laser[J]. Surface Technology, 2016, 45(10): 193-198.
- [18] TAN X H, ZHANG J, SHAN J G, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Porosities in CFRP during Laser Joining of CFRP and Steel[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 35-43.
- [19] KATAYAMA S, KAWAHITO Y. Laser Direct Joining of Metal and Plastic[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(12): 1247-1250.

- [20] 冯紫薇. 6061 铝合金与 CFRTP 激光连接及界面增强机 理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.
  FENG Z W. Research on Laser Joining and Interface Enhancement Mechanism of 6061 Aluminum Alloy and CFRTP[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [21] ZHANG Z, SHAN J G, TAN X H, et al. Effect of Anodizing Pretreatment on Laser Joining CFRP to Aluminum Alloy A6061[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016, 70: 142-151.
- [22] 徐洁洁, 王栋, 肖荣诗, 等. 纤维增强热塑性树脂基 复合材料与金属激光连接研究进展[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 73-86.
  XU J J, WANG D, XIAO R S, et al. Laser Joining of Fiber Reinforced Thermoplastic Composites and Metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(10): 73-86.
- [23] SHENG L Y, LAI C, XU Z F, et al. Effect of the Surface Texture on Laser Joining of a Carbon Fiber-Reinforced Thermosetting Plastic and Stainless Steel[J]. Strength of Materials, 2019, 51(1): 122-129.
- [24] STRAETEN K, BURKHARDT I, OLOWINSKY A, et al. Laser-Induced Self-Organizing Microstructures on Steel for Joining with Polymers[J]. Physics Procedia, 2016,

83: 1137-1144.

[25] 井成虎,徐纪豪,孙圣元,等.碳纤维复合材料/钛合 金激光连接界面微织构调控工艺研究[J]. 电焊机, 2023,53(5):38-42.
JING C H, XU J H, SUN S Y, et al. Study on Interface Control Technology of Carbon Fiber Composite Tite

Control Technology of Carbon Fiber Composite Titanium Alloy Laser Welding[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(5): 38-42.

- [26] LIU Y F, SU J H, MA G L, et al. Effect of the Laser Texturing Width on Hot-Pressing Joining of AZ31B and CFRTP[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107350.
- [27] 刘一凡,周宝升,张涛,等.基于表面微织构的钛合 金与 CFRP 激光连接研究[J].中国激光, 2022, 49(18): 1803001.
  LIU Y F, ZHOU B S, ZHANG T, et al. Laser Joining of Carbon Fiber Reinforced Plastics to Titanium Alloy via Laser Texturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1803001.
- [28] 苏健晖. 钛合金/热塑复合材料激光连接界面双尺度 调控研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
   SU J H. Study on Dual-Scale Control of Laser Bonding Interface of Titanium Alloy/Thermoplastic Composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.