

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

贾少辉^{1,2}, 贾剑平^{1*}, 焦俊科^{2**}, 徐子法², 欧阳文泰², 张文武²

¹南昌大学机电工程学院, 江西 南昌 330031;

²中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

摘要 为降低碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)与铝合金进行激光焊接时,激光加热对铝合金造成的焊接缺陷,提升焊接接头的力学性能,将激光搅拌焊接方法引入到铝合金与CFRTP的焊接中。通过与传统的激光直线焊接方法进行对比后发现:在相同的激光功率和焊接速度下,激光搅拌焊接接头的连接强度为传统激光直线焊接的3.25倍;激光搅拌焊接还可以显著减少气孔缺陷,获得较好的焊缝形貌。为进一步研究CFRTP/铝合金激光搅拌焊接的机理,对CFRTP/铝合金激光搅拌焊接温度场进行仿真分析,结果表明:铝合金表面的温度场呈非等幅振荡形式变化,且出现了两个峰值,这是激光搅拌焊接能够降低焊接缺陷的主要原因之一。同时,对铝合金焊缝的熔深、熔宽进行计算,并与测量结果进行对比,仿真结果与实验结果的误差在9.87%以内。

关键词 激光技术; 激光搅拌焊接; 碳纤维增强热塑性复合材料; 7075 铝合金; 焊接缺陷; 连接强度

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0702006

Experimental and Numerical Studies on Laser Stir Welding of Carbon Fiber Reinforced Thermal Polymers/Aluminum Alloy

Jia Shaohui^{1,2}, Jia Jianping^{1*}, Jiao Junke^{2**}, Xu Zifa², Ouyang Wentai², Zhang Wenwu²

¹School of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

²Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Science,
Ningbo, Zhejiang 315201, China

Abstract In this paper, we introduce the laser stir welding method to reduce the welding defect of laser heating to aluminum alloy during the laser welding of carbon fiber reinforced thermal polymers (CFRTP)/aluminum alloy and improve the mechanical properties of welded joints during the jointing process. With the same laser power and welding speed, the jointing strength of this method is 3.25 times of that of the traditional linear welding method. Moreover, the bubble defect in laser stir welding is significantly reduced, and a good welding morphology is obtained. Further, the temperature field in the laser stir welding of the CFRTP/aluminum alloy is simulated to study the mechanism of laser stir welding in CFRTP/aluminum alloy. The results show that the temperature on the surface of aluminum alloy changes in the form of a non-equal amplitude oscillation. Two peaks are observed, and laser stir welding can reduce the welding defect owing to these peaks, amongst other reasons. The weld depth and width are calculated, and the error is within 9.87%.

Key words laser technique; laser stir welding; carbon fiber-reinforced thermal polymers; 7075 aluminum alloy; welding defect; jointing strength

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.5470; 160.3900

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-02-10; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金“两化融合”联合基金(U1609208); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2017343); 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(COMASFGS201736734); 深圳市基础研究布局项目(JCYJ20150529162228734); 宁波市国际合作项目(2017D10007)。

* E-mail: ncujjp@126.com; ** E-mail: jiaojunke@nimte.ac.cn

1 引 言

碳纤维增强热塑性复合材料(CFRTP)具有密度小、刚度高、耐疲劳性和耐蚀性优良等一系列优异的性能,已广泛应用于航空航天领域。铝合金具有密度小、比强度高、耐蚀性和成型性好、成本低等优点,已成为航空第一用材^[1]。在航空航天关键零部件轻量化制造过程中,经常面临着 CFRTP 与铝合金的连接问题。

激光焊接作为一种非接触、高效的焊接方式,与机械连接及胶接等相比,具有速度快、变形小、便于实现自动化等特点,在 CFRTP/铝合金的连接上具有一定优势。但激光焊接在应用于铝合金时,存在一些问题,主要包括几个方面:1)铝合金对激光具有很强的反射,对 CO₂ 激光的反射率高达 97%,对 YAG 激光的反射率也在 80%以上^[2];2)熔池的冷却状态会导致匙孔稳定性降低,焊缝中极易形成气孔^[3];3)在铝合金的激光焊接过程中,母材中的 β 相会因焊接热循环影响而溶解,导致铝合金接头出现软化现象^[4-5]。焊接过程中的这些问题,特别是气孔缺陷问题,将直接影响到焊接接头的疲劳寿命^[6]。因此,如何减小和控制 CFRTP/铝合金激光连接时铝合金基体中的气孔缺陷,成为实现二者高质量连接亟需解决的关键问题。

Zhang 等^[7]发现,在激光焊接过程中可以采用光束摆动的方法来抑制柱状晶的生长,减少气孔,提高焊缝的抗拉强度。周立涛等^[8]研究了激光扫描焊接工艺对铝合金气孔率的影响,发现光束为圆形轨迹的扫描方式对气孔的抑制情况最好。Fetzer 等^[9]在光束振荡形式下对“匙孔”进行了研究,发现当无法避免气泡的形成时,可以通过调整光束圆形振荡时的频率和振幅使气泡在后续运动的匙孔中收缩。因此,通过改变焊接时激光的扫描轨迹及关键工艺参数,可以有效地减少对铝合金基体的气孔数量。

基于以上分析,本文将激光搅拌焊接方法引入到铝合金与 CFRTP 的焊接中来,以光纤激光为热源,以光束的不断搅拌和工件的直线进给运动实现

了激光搅拌焊接。分析了激光搅拌焊接工艺参数对接头连接强度的影响,建立了 CFRTP/铝合金激光搅拌焊接的有限元模型,并对焊接温度场进行了仿真,对激光搅拌焊接减小铝合金焊接缺陷的机理进行了分析。本研究结果可为提高 CFRTP/铝合金激光接头的连接质量提供一定的理论和工艺基础。

2 实验设计

待焊接材料选用 7075-T6 铝合金,尺寸为 50 mm×25 mm×1.5 mm。为提高铝合金对激光的吸收率,实验前,使用马克笔对铝合金待焊区域进行黑化预处理,并使用紫外分光光度计进行测试,黑化预处理后的铝合金对 1064 nm 光的反射率为 19%。CFRTP 试样的尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm,该复合材料是由聚酰胺 PA 和碳纤维 T700 胶合后经挤压和拉拔而成,其基体为 PA 树脂,增强相为 T700 连续纤维,复合材料中 PA 树脂的体积分数约为 50%。另外,为增大焊接时熔化的树脂量,提高接头的强度,在 CFRTP 与铝合金之间添加了 80 μm 厚的 PA 层。7075-T6 铝合金的熔点为 477~638 °C^[10],这里假设为 480 °C。7075-T6 的其他热物理性能是随温度变化的,如表 1 所示。PA 和 T700 的热物理参数如表 2 所示。

表 1 7075-T6 铝合金的热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters of 7075-T6 aluminum alloy

Temperature / °C	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Specific heat / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Density / (kg·m ⁻³)
25	130	860	2788
60	134	870	2781
100	142	900	2775
149	159	935	2760
200	175	970	2750
300	185	1020	2725
400	193	1120	2700
500	197	1320	2675

表 2 PA 与 T700 的热物理参数

Table 2 Thermophysical parameters of PA and T700

Material	Specific heat / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Density / (kg·m ⁻³)	Melting point / °C	Decomposition temperature / °C
PA	2500	0.25	1150	253	330
T700	712	6.5	1760	3000	—

焊接实验在光纤激光焊接系统上进行,激光搅拌焊接路径通过扫描振镜和工件台直线进给共同完

成,焊接速度通过工作台的移动速度控制,搅拌焊接时的激光扫描速度、振幅、频率等通过扫描振镜控

制。焊接过程中激光的离焦量为 0, 气动工装的夹具压力为 0.5 MPa。此外, 为了减小焊接时焊缝的氧化, 采用侧吹氩气保护气的方式, 氩气的纯度为 99.999%, 气体流量为 8~10 L/min。图 1 为激光搅拌焊接系统示意图。

图 2 为 CFRTP/铝合金激光搅拌焊接原理示意图, 激光束不断搅拌, 配合工件随夹具沿焊接方向直线进给, 铝合金上表面的热量以热传导的方式向 CFRTP 传递, 并使树脂层熔化, 同时在夹具压力的作用下, 实现 CFRTP/铝合金的激光搅拌焊接。

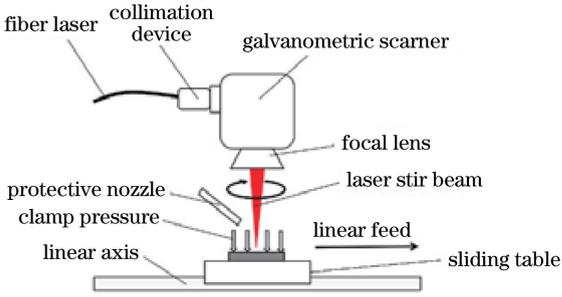


图 1 激光搅拌焊接系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser stir welding system

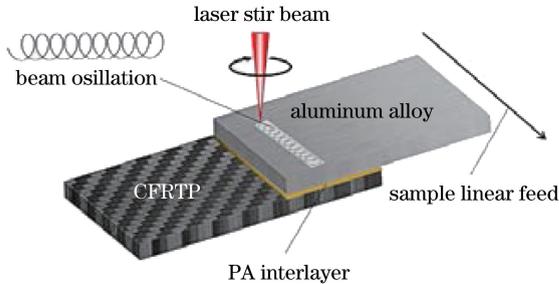


图 2 CFRTP/铝合金激光搅拌焊接原理示意图

Fig. 2 Schematic of laser stir welding of CFRTP/aluminum alloy

采用激光共聚焦显微镜对焊缝熔深、熔宽进行观察和测量。为探索激光搅拌焊接参数对接头连接强度的影响规律, 采用万能试验机在室温下对试样进行拉伸测试, 拉伸速度为 0.5 mm/min, 测量 3 次取平均值, 以确保数据可靠性。为了便于装夹, 对拉伸试样两端补上相应的垫片, 如图 3 所示, 垫片 1 为铝合金板, 垫片 2 为 CFRTP 板。另外, 为避免机械切割对 CFRTP/铝合金连接强度的影响, 并未在焊接样件进行标准试样的加工, 而是用焊接样件直接进行拉伸测试。

3 实验结果及分析

3.1 激光搅拌焊接与激光直线焊接的力学性能和缺陷比较

在相同的激光热输入(功率为 180 W, 焊接速度

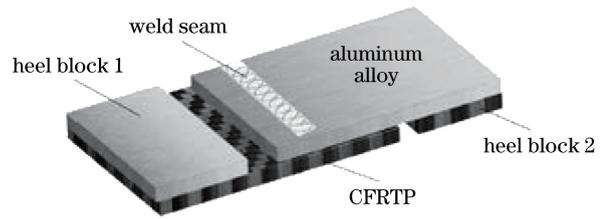


图 3 拉伸试样示意图

Fig. 3 Schematic of tensile specimen

为 3 mm/s) 和保护气氛下, 对 CFRTP/铝合金激光搅拌焊接及激光直线焊接接头的连接强度以及铝合金的热损伤进行对比分析。对比后发现, 采用激光直线焊接时, 接头的连接强度为 0.938 kN, 而激光搅拌焊接(振幅为 0.5 mm、频率为 20 Hz)得到的接头的连接强度可达 3.053 kN, 是直线焊接的 3.25 倍, 如图 4(a)所示。图 4(b)给出了 CFRTP/铝合金拉伸破坏后的断面, 可以看出, 铝合金表面黏附了大量的碳纤维和 PA 树脂材料, CFRTP 表面的树脂基体和大量纤维从基体中剥离, 黏附在铝合金表面, 说明 CFRTP 与铝合金的连接强度已经超过了 CFRTP 层间结合强度。另外, 激光搅拌焊接过程对连接部位的均匀加热, 使整个焊缝上温度分布均匀, 焊缝形貌规则, PA 树脂熔化充分, CFRTP 与铝合金连接充分, 因此强度也得到进一步提升。

另外, 在激光直线焊接过程中, 存在着大量飞溅, 焊缝截面形貌呈“V”形, 铝合金焊缝内部有大量的气孔, 如图 5(a)所示, 这将严重影响到接头的疲劳寿命。而激光搅拌焊接的焊缝截面形貌呈喇叭形, 焊缝内部的气孔缺陷显著减少, 如图 5(b)所示, 这是因为激光光束的搅拌在熔池内产生了较大的温度梯度, 从而影响到熔池的表面张力及匙孔中的蒸气压力。同时, 在激光搅拌焊接过程中, 光束的搅拌可对已凝固的金属起到重熔作用^[11], 进而使铝合金内部的气泡上浮, 气孔数量得以减少。

从以上实验可以看出, 采用激光搅拌焊接可以显著提升 CFRTP/铝合金接头的连接强度, 同时可以有效减少铝合金基体中的气孔缺陷。与传统的激光直线焊接相比, 激光搅拌焊接在 CFRTP/铝合金的连接上具有显著优势。

3.2 焊接参数对接头连接强度的影响

为了进一步研究激光搅拌焊工艺参数对 CFRTP/铝合金异质接头连接强度的影响规律, 对不同激光功率、焊接速度、搅拌振幅和搅拌频率下得到的接头的连接强度进行分析。图 6(a)给出了在搅拌振幅为 2 mm、搅拌频率为 20 Hz、焊接速度为

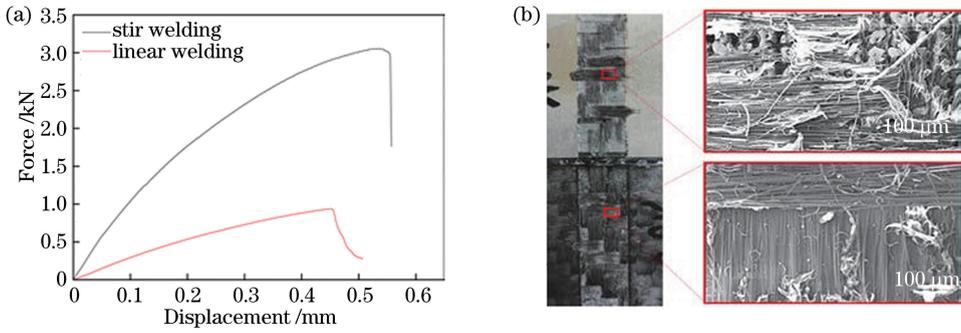


图 4 不同焊接方式下得到 CFRTP/铝合金焊接接头的连接强度及拉伸断裂形貌。(a)连接强度;(b)拉伸断裂形貌
Fig. 4 Jointing strength and tensile-fracture morphology of welded joints of CFRTP/aluminum alloy from different laser welding methods. (a) Jointing strength; (b) tensile-fracture morphology

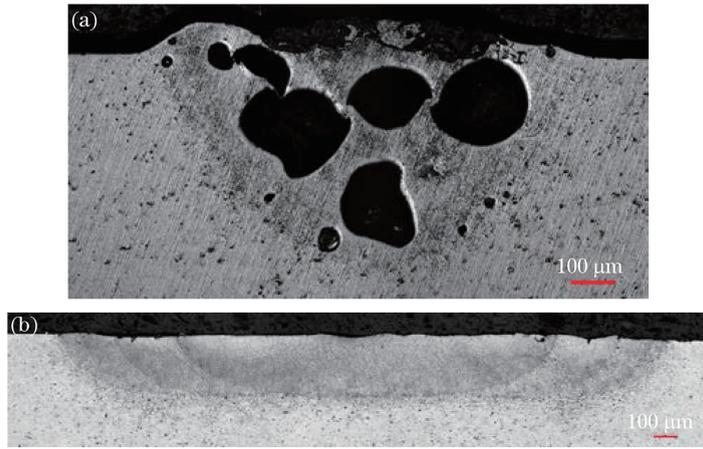


图 5 不同焊接方式下得到的 CFRTP/铝合金焊缝的截面形貌。(a)激光直线焊接;(b)激光搅拌焊接
Fig. 5 Section morphologies of welded joints of CFRTP/Al alloy from different laser welding methods. (a) Laser linear welding; (b) laser stir welding

3 mm/s 的条件下得到的接头的连接强度随激光功率的变化曲线,可以看出,在 120~180 W 之间,接头连接强度随激光功率的增加而增大。这是因为功率的增加导致热输入增加,CFRTP 与铝合金之间的树脂熔化量增加,故而连接强度随之增加。图 6(b)给出了在激光功率为 180 W、搅拌振幅为 2 mm、搅拌频率为 20 Hz 的条件下得到的接头的连接强度随焊接速度的变化曲线,可以看出,当焊接速度在 2.0~5.0 mm/s 范围内,接头连接强度随焊接速度的增加而减小,这是因为焊接速度较快时,焊接热输入过小,导致界面树脂熔化量减少,从而导致界面连接强度下降。图 6(c)给出了在激光功率为 180 W、搅拌频率为 20 Hz、焊接速度为 3 mm/s 条件下得到的接头的连接强度随搅拌振幅的变化曲线,可以看出:当搅拌振幅为 0 mm 时,即激光直线焊接时,连接强度最小,仅为 0.938 kN;当搅拌振幅在 1~4 mm 之间时,随着搅拌振幅增大,连接强度有微弱的下降趋势。这是因为搅拌振幅的增加将增

大加热面积,从而减小单位面积上的热输入,影响树脂的熔化量。图 6(d)给出了在激光功率为 170 W、搅拌振幅为 2 mm、焊接速度为 3 mm/s 条件下得到的接头的连接强度随搅拌频率的变化曲线,可以看出:当搅拌频率为 10~30 Hz 时,接头连接强度较为稳定,在 2.433~2.550 kN 范围内浮动;当搅拌频率为 40~80 Hz 时,接头连接强度随频率增加而显著降低。这是因为过高的搅拌频率会导致焊件的热累积过小,传递到 CFRTP 表面的热量过少,界面树脂的熔化量减少,从而导致接头的连接强度有所下降。

4 数值模拟分析

通过实验研究可以发现,激光搅拌焊接在保障 CFRTP/铝合金连接强度的同时,可以有效减小铝合金焊缝中的气孔缺陷。为了进一步明确 CFRTP/铝合金激光搅拌焊接热损伤减小的机理,建立了激光搅拌焊接热源模型以及 CFRTP/铝合金激光搅拌焊接的有限元模型,并对焊接过程进行了数值仿真与分析。

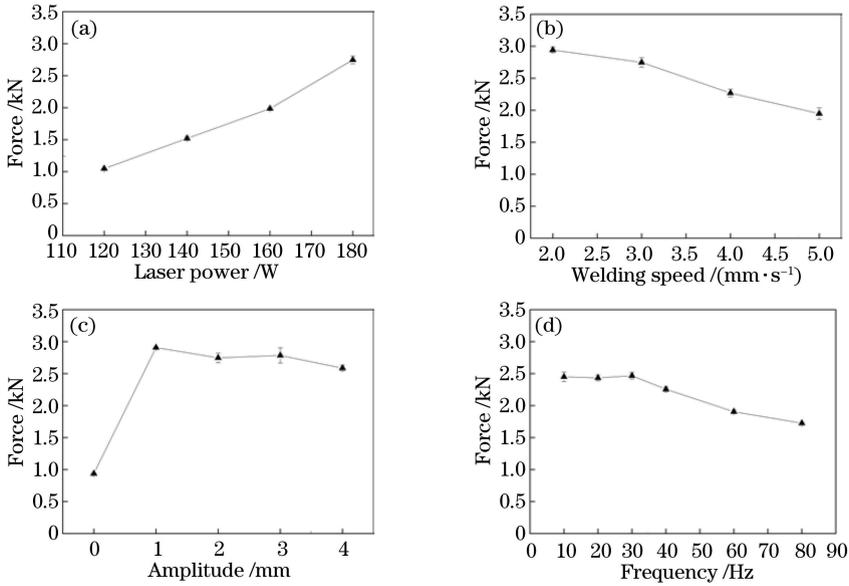


图 6 焊接参数对接头连接强度的影响。(a)激光功率;(b)焊接速度;(c)搅拌振幅;(d)搅拌频率

Fig. 6 Effects of welding parameters on joint strength of welded joint. (a) Laser power; (b) welding speed; (c) stir amplitude; (d) stir frequency

4.1 CF RTP/铝合金激光搅拌焊接热源模型及有限元模型

从CF RTP/铝合金激光搅拌焊接的原理图(图2)可以看出,焊接过程是由工件地平移和激光束的周期性圆周运动共同实现的,最终在工件上形成了类似旋轮线的曲线。对曲线进行拟合后可得^[12]

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v \cdot t + a \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \phi) \\ y(t) = y_0 + a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \phi) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: v 为焊接速度; a 为激光光束的搅拌振幅; f 为激光光束的搅拌频率; ϕ 为相位角; x 为焊接主方向上的坐标; y 为垂直于焊接主方向的坐标; t 为时间; x_0 为焊接主方向的初始坐标; y_0 为垂直于焊接主方向的初始坐标。

在热传导模型方面,热源模型选用高斯分布的面热源模型^[13-14]。模拟实验是一个旋转热源直线进给的过程,即

$$\begin{cases} q(x, y, z, v, t) = \frac{m(1-R)p}{\pi r^2} \exp\left\{-\frac{m[x_0 + a \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) - v \cdot t]^2 + [y_0 + a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)]^2}{r^2}\right\} \\ T(x, y, z, 0) = T_0 \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} = q(x, y, z, t) \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_0) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: q 为热流密度; m 为热流集中程度系数,这里取 $m=1$; p 为激光输出功率; R 为材料对激光的反射率,这里取 $R=19\%$; r 为激光的有效作用半径; T 为温度,焊接初始时刻取环境温度 $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$; k 为热导率; h_c 为对流换热系数; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为沿向的温度梯度,负号表示热量流向温度降低的方向。

在模拟分析中,采用Solid70热分析单元。为了提高计算效率,只取焊缝的一半进行计算分析。

另外,焊缝处的温度梯度较大,对焊缝区域采用加密网格,网格划分如图7所示。铝合金尺寸为



图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

25 mm×10 mm×1.5 mm, CFRTP 尺寸为 25 mm×10 mm×2 mm, CFRTP 模型由树脂层和碳纤维层依次交替构成,最上层为 PA 树脂层,厚度为 280 μm。

4.2 温度场的基本特征及分析

利用有限元软件对 CFRTP/铝合金激光搅拌焊

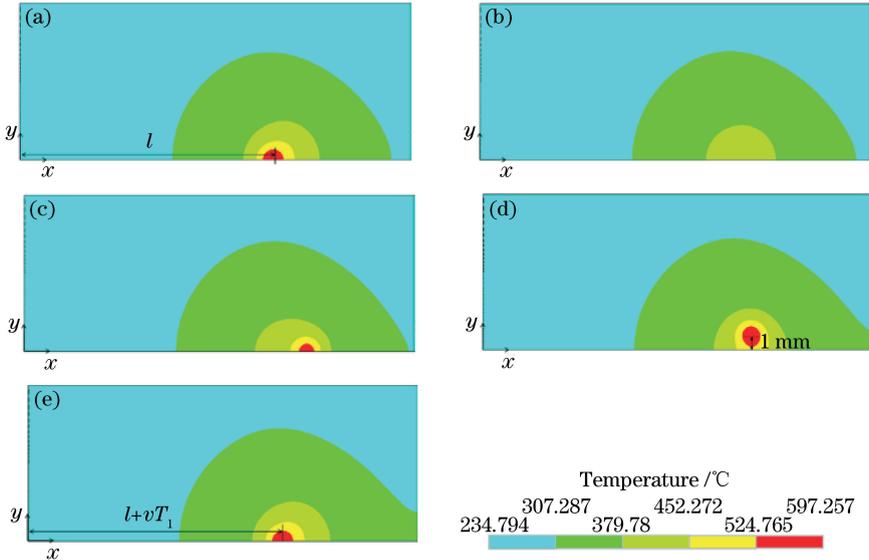


图 8 激光搅拌焊接过程中一个周期内的温度云图。(a) $t=0$; (b) $t=T_1/4$; (c) $t=T_1/2$; (d) $t=3T_1/4$; (e) $t=T_1$

Fig. 8 Temperature cloud diagrams in one period of laser stir welding.

(a) $t=0$; (b) $t=T_1/4$; (c) $t=T_1/2$; (d) $t=3T_1/4$; (e) $t=T_1$

为了进一步分析激光搅拌焊接时铝合金表面的温度变化情况,在焊缝中心宽度方向上选取 A、B、C、D、E 五个节点,如图 9(a)所示,相邻两点的间隔为 5 mm。各点的热循环曲线如图 9(b)~(c)所示,可以看出,此温度场有以下几个基本特征:1)温度的最高值从 A 点到 E 点逐渐增大,在 E 点温度达到最高值(此时 $t=7.925$ s),这是由焊接过程中激光输入热累积导致的,激光束离开工件停止加热后($t=9$ s),各点的温度逐渐趋于一致。2)在同一点上,温度出现了一小一大两个峰值,这是由于激光搅拌焊接过程中激光束两次直接照射到该点上的缘故,第一次直接照射是激光束在圆周运动的前沿,第二次直接照射是在激光束在圆周运动的后沿。由于热累积效应,A、B、C、D 点的第二次温度峰值略高于第一次温度峰值,但 E 点的第二次温度峰值低于第一次的温度峰值,这是因为该点靠近工件边沿,激光束远离该点时,热输入量小于热散失量,从而导致第二次温度峰值降低。3)同一点温度呈非等幅振荡式变化,当旋转热源靠近该点时,该点的温度以非等幅振荡形式渐进升高,在旋转热源第一次到达该点

接过程进行仿真计算。焊接过程中,由于激光束做周期性圆周运动,因此温度场表现为周期性变化。图 8 给出了激光功率为 180 W、焊接速度为 3 mm/s、振幅为 1 mm、频率为 20 Hz 时,一个周期 T_1 内铝合金表面的温度云图,其中 1 mm 为某时刻热源中心距离初始位置的长度。

时,达到第一个较小的温度峰值,当旋转热源第二次到达该点时,出现第二个温度峰值,即该点温度的最高值。随着旋转热源继续直线进给移动,该点温度以非等幅振荡形式缓慢下降。

在焊接过程中,移动热源的局部集中热输入易造成不均匀的温度场,温度场的急速改变是导致出现诸多焊接问题的原因之一^[15]。从仿真分析结果可以看出,在激光搅拌焊接过程中,熔池的温度分布和温度梯度随着旋转热源位置的不断改变而不断变化。在激光搅拌焊接过程,由于光束的搅拌速度快,热源旋转速度快、幅度大^[16],焊接热输入较为分散,没有出现激光直线焊接时明显的急冷急热,温度以折线振荡的形式渐进上升或缓慢下降,这可能是激光搅拌焊接能够减少焊接缺陷的原因之一。同时,激光搅拌焊接时激光束的高速旋转也会导致熔池快速旋转流动,这有利于气泡的上浮,从而减小焊缝的气孔率。

4.3 模拟结果与实验结果的对比

为了进一步验证理论计算的准确性,将仿真结果与实验结果进行对比分析。由于焊接过程中温度

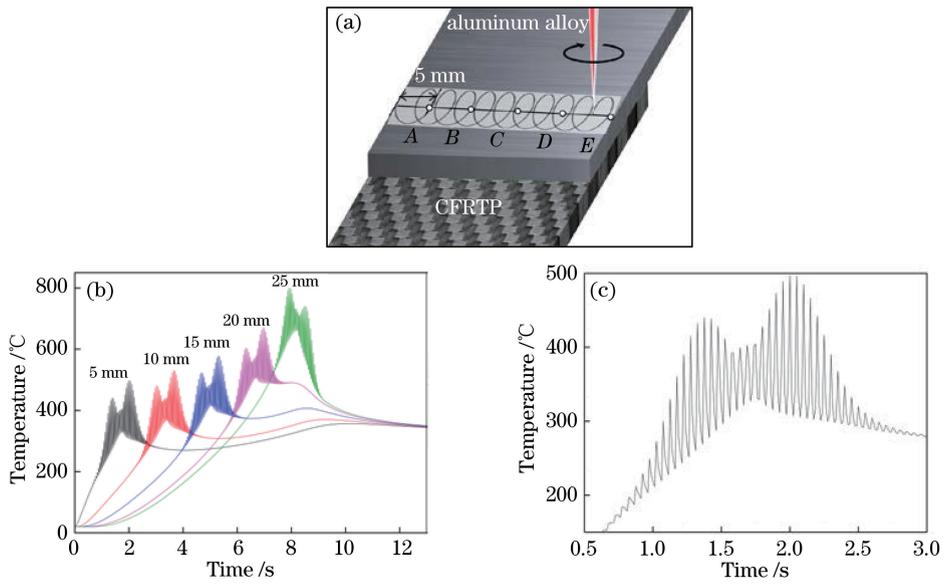


图 9 焊缝中心线上节点的选取示意图以及温度随时间的变化。(a)节点选取示意图；(b)各点温度随时间的变化；(c) a 点温度随时间的变化

Fig. 9 Schematic of node selection on center line of welded joint and temperature as function of time. (a) Schematic of node selection; (b) temperature as function of time at different nodes; (c) temperature of point 5 as function of time

场的直接测量存在一定难度,因此选择铝合金表面焊缝的熔宽和熔深进行比较。在数值模拟中,熔深 W_d 和熔宽 W_a 的定义方法如图 10 所示,在深度方向上,温度大于 $480\text{ }^\circ\text{C}$ 的熔体的深度定义为熔深 W_d 。同时可以发现,CFRTP 表面温度大于 PA 的熔化温度 $253\text{ }^\circ\text{C}$,这说明填充树脂和 CFRTP 表面树脂基体已经完全熔化,CFRTP 与铝合金形成了良好的连接。在铝合金表面垂直于焊缝方向上,温

度高于铝合金熔化温度的熔体宽度定义为熔宽 W_a 。图 11 为铝合金焊缝的剖面图,通过激光共聚焦显微镜可以测出焊缝的熔深 W_d 和熔宽 W_a 。图 12 给出了模拟计算得到的熔深 W_d 、熔宽 W_a 与实际焊缝熔深、熔宽的对比,可以看出,模拟计算得到的熔宽、熔深与测量得到的实际焊缝熔深、熔宽的变化趋势较为一致,误差在 9.87% 以内,说明数值模拟可在一定程度上反映实际焊接的物理过程。

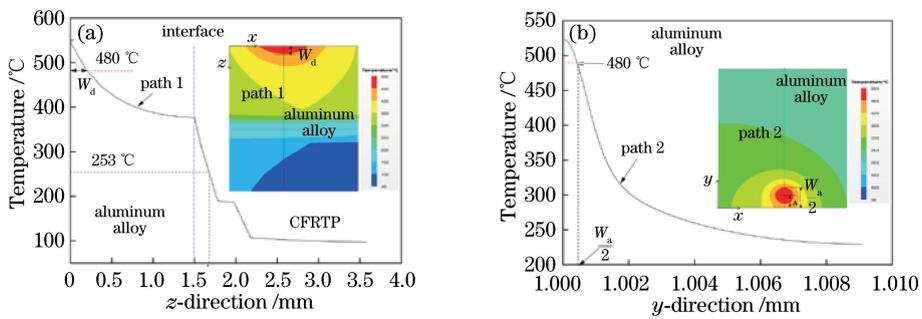


图 10 数值模拟中熔深和熔宽的定义。(a)熔深 W_d ; (b)熔宽 W_a

Fig. 10 Definitions of weld depth and weld width in numerical simulation. (a) Weld depth W_d ; (b) weld width W_a

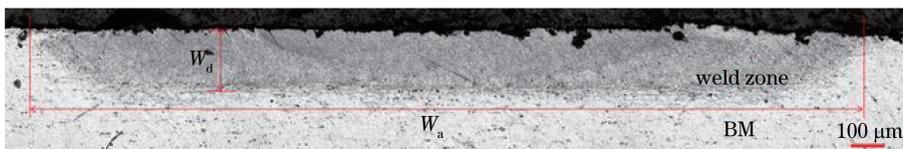


图 11 熔深 W_d 和熔宽 W_a 的实际测量

Fig. 11 Experimental measurement of weld depth W_d and weld width W_a

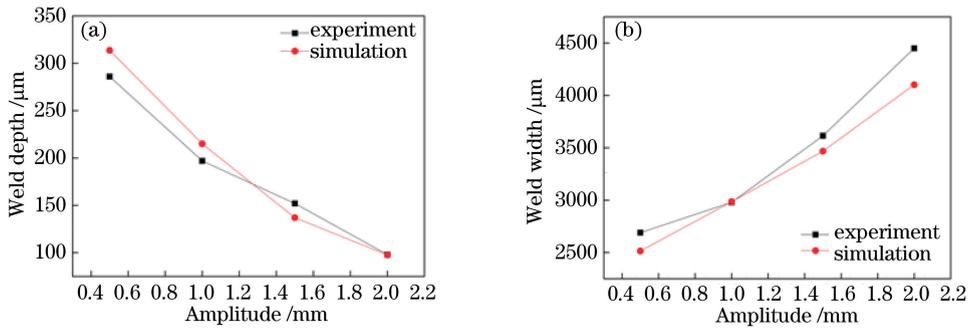


图 12 模拟与实验结果的对比。(a)熔深 W_d ; (b)熔宽 W_a 。

Fig. 12 Comparison between simulated and experimental results. (a) Weld depth W_d ; (b) weld width W_a .

5 结 论

为减少 CFRTP/铝合金激光焊接时铝合金基体中的气孔缺陷,引入激光搅拌焊接技术,并从工艺实验和数值仿真两方面对该焊接方法进行对比研究。在热输入相同的情况下,激光搅拌焊接比激光直线焊接获得了更高的连接强度,而且可以显著减少铝合金基体中的气孔缺陷;通过改变激光搅拌焊接的关键工艺参数,如搅拌振幅、搅拌频率、激光功率、焊接速度等,可以实现焊缝深宽比及连接强度的控制。模拟计算得到的铝合金焊缝的熔深、熔宽与实际测量值的误差小于 9.87%,说明了激光搅拌焊接热源模型以及 CFRTP/铝合金激光搅拌焊接有限元模型的合理性。

参 考 文 献

[1] Yang S J, Dai S L. A glimpse at the development and application of aluminum alloys in aviation industry [J]. *Materials Review*, 2005, 19(2): 76-80.
杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. *材料导报*, 2005, 19(2): 76-80.

[2] Fu B L, Meng X M, Qin G L, *et al.* Research progress on laser beam welding of aluminum alloys [J]. *Welding & Joining*, 2013(6): 20-25, 69.
付邦龙, 孟祥萌, 秦国梁, 等. 铝合金激光焊接技术的研究进展[J]. *焊接*, 2013(6): 20-25, 69.

[3] Wang H Y, Sun J, Liu L M. Formation and controlling mechanism of pores in laser-TIG hybrid welding of 6061-T6 aluminum alloys at high speed [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0302001.
王红阳, 孙佳, 刘黎明. 6061-T6 铝合金激光-电弧复合高速焊气孔形成及控制机制[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0302001.

[4] Li F Q, Feng S, Li M W, *et al.* Softening phenomenon of heat-affected zone in laser welding of 6082 Al alloys with filler wire [J]. *Chinese Journal of*

Lasers, 2018, 45(11): 1102007.

李福泉, 冯时, 李明伟, 等. 6082 铝合金激光填丝焊接热影响区的软化现象 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1102007.

[5] Tuo W H, Yang S L, Yang W T, *et al.* Microstructure and fatigue performance of MIG welded joint of 6082-T6 aluminum alloy used for rail transportation [J]. *Materials Reports*, 2015, 29(20): 105-109.
虞文海, 杨尚磊, 杨文涛, 等. 轨道交通用 6082-T6 铝合金 MIG 焊接接头组织与疲劳性能 [J]. *材料导报*, 2015, 29(20): 105-109.

[6] 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.

[7] Zhang X D, Chen W Z, Bao G, *et al.* Improvement of weld quality using a weaving beam in laser welding [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2004, 20(5): 633-636.

[8] Zhou L T, Wang X Y, Wang W, *et al.* Effects of laser scanning welding process on porosity rate of aluminum alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(10): 65-68, 72, 116.
周立涛, 王旭友, 王威, 等. 激光扫描焊接工艺对铝合金焊接气孔率的影响 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(10): 65-68, 72, 116.

[9] Fetzer F, Sommer M, Weber R, *et al.* Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMgSi [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 108: 68-77.

[10] Wu S C, Zhu Z T, Li X W. Laser welding of aluminum alloys and the performance evaluation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 66.
吴圣川, 朱宗涛, 李向伟. 铝合金的激光焊接及性能评价 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 66.

[11] Bao G, Peng Y, Chen W Z, *et al.* Study on laser welding of ultra-fine grained steel with weaving beam [J]. *Applied Laser*, 2002, 22(2): 203-205, 208.

- 包刚, 彭云, 陈武柱, 等. 超细晶粒钢光束摆动激光焊接的研究[J]. 应用激光, 2002, 22(2): 203-205, 208.
- [12] Hugger F, Hofmann K, Kohl S, *et al.* Spatter formation in laser beam welding using laser beam oscillation[J]. *Welding in the World*, 2015, 59(2): 165-172.
- [13] Jiao J K, Wang Q, Wang F Y, *et al.* Numerical and experimental investigation on joining CFRTP and stainless steel using fiber lasers [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 362-369.
- [14] Wang Q, Jiao J K, Zan S P, *et al.* Effect of thermal contact conductance on temperature field of CFRTP/stainless steel laser direct joining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402002.
- 王强, 焦俊科, 管少平, 等. 接触热导率对 CFRTP/不锈钢激光直接连接温度场的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402002.
- [15] Zheng Z T, Lü H M, Zhang K, *et al.* Fusion welding heat source model and its trend[J]. *Welding & Joining*, 2008(4): 3-6.
- 郑振太, 吕会敏, 张凯, 等. 熔化焊焊接热源模型及其发展趋势[J]. *焊接*, 2008(4): 3-6.
- [16] Haeusler A, Schürmann A, Schöler C, *et al.* Quality improvement of copper welds by laser microwelding with the usage of spatial power modulation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022422.