

## 功率调制对激光振镜焊接铝合金的影响

韩静<sup>1</sup>, 石珏<sup>1</sup>, 张刚<sup>1</sup>, 李广<sup>1</sup>, 乐望赞<sup>2</sup>, 代锋先<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050; 2. 浙江巴顿焊接技术研究院, 杭州, 311200; 3. 浙江金旦智能科技有限公司, 杭州, 311200)

**摘要:** 为了验证能量分布模式对异种铝合金焊接质量的影响, 采用全域功率调制激光振镜焊接系统对 6061 和 5052 铝合金进行了对接焊试验。对比了传统激光焊 (LW) 和两种激光振镜焊接模式 (恒功率-CP 和梯度功率-GP) 对焊缝成形、焊接气孔、显微组织和力学性能的影响。结果表明, 光束振荡改善了焊缝成形, GP 模式焊缝表面凹陷程度最小; 振镜模式下焊缝等轴晶的比例比激光焊增多, 其中 GP 模式焊缝等轴化程度最高, 显示出最高的接头强度和熔合区硬度; GP 模式焊接时降低了熔池温度梯度, 使熔池产生了最大的过冷度和异质形核率, 从而提高了焊缝中等轴晶的比例; 振镜激光焊接改变了能量分布模式, 降低了能量峰值; GP 模式下焊缝中心的能量密度高于 CP 模式, 使得焊缝熔合良好。

**创新点:** (1) 设计了梯度功率焊接模式, 验证了其对异种铝合金接头组织和性能的影响。

(2) 通过功率调制改变了能量分布模式, 计算了不同模式下的能量分布。

**关键词:** 全域; 功率调制; 光束振荡; 异种铝合金; 显微组织

**中图分类号:** TG 456. 7; TG 457. 14

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 12073/j. hjxb. 20230730001

## Influence of power modulation on laser oscillating welding of aluminum alloys

HAN Jing<sup>1</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, ZHANG Gang<sup>1</sup>, LI Guang<sup>1</sup>, LE Wangyun<sup>2</sup>, DAI Fengxian<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China; 2. Zhejiang E. O. Paton Welding Technology Institute, Hangzhou, 311200, China; 3. Zhejiang Jindan Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou, 311200, China)

**Abstract:** In order to verify the influence of energy distribution patterns on the quality of dissimilar aluminum alloy welding, a full domain power modulation (FDPM) laser oscillating welding system was used to conduct butt welding experiments on 6061 and 5052 aluminum alloys. A comparison was made on the effects of traditional laser welding (LW) and two laser oscillating welding modes (constant power-CP, gradient power-GP) on the weld seam, porosity, microstructure, and mechanical properties. The results showed that beam oscillation improved the weld seam formation, with the GP mode having the least surface depression. Under the oscillating mode, the proportion of equiaxed grains in the weld seam was higher than that in laser welding, among which the GP mode weld had the highest equiaxed degree, displaying the highest joint strength and fusion zone hardness. The GP mode reduced the temperature gradient of the molten pool during welding, resulting in the largest undercooling and heterogeneous nucleation rate of the molten pool, thus increasing the proportion of equiaxed grains in the weld seam. The laser oscillating welding altered the energy distribution pattern, lowering the energy peak. The energy density at the center of the weld seam was higher under the GP mode than the CP mode, resulting in better fusion of the weld seam.

**Highlights:** (1) A gradient power welding mode was designed and its effect on the microstructure and properties of dissimilar aluminium alloy joints was verified.

收稿日期: 2023 – 07 – 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52265050, 51961032); 中央引导地方科技发展资金项目 (23ZYQA308); 甘肃省科技重大专项 (22ZD6GA008); 甘肃省重点研发计划 (20YF3WA017); 甘肃省自然科学基金 (21JR7RA233); 陇原青年创新创业人才团队项目。

(2) The energy distribution was changed by power modulation and the energy distribution in different modes was calculated.

**Key words:** full domain; power modulation; beam oscillation; dissimilar aluminum alloy; microstructure

## 0 序言

异种铝合金的焊接可以适应更多样化的工况需求,一直受到研究界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>.由于物性参数上存在差异,在焊接时更容易产生气孔、熔合不均匀等问题,导致接头严重变形或软化,使接头性能受限.近年来,激光振镜焊接发展为一个活跃的研究领域,通过光束振荡可以有效抑制焊接缺陷,如减少气孔<sup>[4-6]</sup>,降低宏观偏析<sup>[7]</sup>,细化焊缝晶粒<sup>[8]</sup>,抑制焊接裂纹<sup>[9-10]</sup>等.虽然激光振镜焊接技术具有显著的优势,但存在功率损失率高,灵活性差的问题.

研究表明,功率调制激光焊接的能量利用率更高,通过改变能量作用的方式对焊接缺陷的抑制和性能改善更有利.Zhang 等人<sup>[11]</sup>研究发现功率调制对 AZ31 合金激光焊接质量的影响高度依赖于激光功率密度,在低功率密度范围内,采用适当的功率调制可以显著提高焊接过程的激光能量耦合效率,有效降低能量损失,其原因是形成了深匙孔并能维持数微秒<sup>[12]</sup>,这一点对于改善铝等高反射率材料的激光焊接工艺热效率意义重大.此外功率调制可以更灵活地调控匙孔行为,对激光功率进行正弦调制可以实现当激光功率处于峰值期时匙孔加深,激光功率处于低谷期时匙孔缩短<sup>[13]</sup>,对于匙孔型气孔的抑制尤为关键;Zhang 等人<sup>[14]</sup>的研究证明功率调制可以有效减少甚至消除镁合金焊缝表面的凹陷,进而提高了接头强度.由于焊接过程变量数量的增加,功率调制技术为控制能量沉积提供了多种可能性,使得焊接过程行为以及焊接接头的最终性能可以得到有利的改变.

研究开发了全域功率调制激光振镜焊接系统,该系统突出的优势为扫描轨迹内 36 个点的功率可以单独设置,从而实现了激光功率随实际扫描位置而变的特性.文中采用三种不同的焊接模式对 6061-T6 与 5052-H112 铝合金进行焊接,分别是激光焊接模式 (LW)、定功率 (CP) 激光振镜焊接和梯度功率 (GP) 激光振镜焊接模式.分析了三种模式对异种铝合金接头焊缝成形、显微组织和力学性能的影响,解释了微观组织变化的机制.为异种铝合金焊接质量提升提供了新的见解和技术指导.

## 1 试验方法

采用尺寸为 150 mm × 80 mm × 2 mm 的 AA6061-T6 铝合金和 150 mm × 80 mm × 2.2 mm 的 5052-H112 铝合金进行对接焊试验,母材的化学成分如表 1 所示.6 系铝合金是以 Mg 和 Si 为主要元素的中等强度铝合金,强化相以  $Mg_2Si$  为主,5 系铝合金为 Al-Mg 合金,镁主要以  $Mg_2Al_3$  的强化相存在.采用 PSI 振镜头和 MFSC 6000 W 光纤激光器进行焊接,光纤芯径为 0.4 mm,激光波长为 1 064 nm,扫描轨迹为圆形.激光振镜焊接示意图及 CP/GP 模式下激光功率分布如图 1 所示,其中  $x$  方向为焊接方向, $y$  方向为垂直焊缝方向.焊接时通入纯度为 99.999% 的氩气(流量为 20 L/min)作为保护气体.焊接前用丙酮擦拭铝板,再用细砂纸抛光去除油渍和氧化膜.焊接试验过程中将激光头向焊接方向倾斜 10°(在  $x-z$  平面内),以避免光的反射损坏光学元件,详细优化后焊接试验参数见表 2.

表 1 铝合金的化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical composition of aluminium alloys

材料	Mg	Fe	Mn	Si	Cr	Ti	Cu	Zn	Al
6061	0.84	0.50	0.09	0.52	0.22	0.13	0.18	0.16	余量
5052	2.22	0.19	0.07	0.09	0.20	—	0.08	0.01	余量

焊接后用相机记录所有焊缝的表面形貌,并使用标准金相制备技术切割和抛光截面样品.样品分

别用 240 ~ 2000 目的碳化硅 (SiC) 砂纸研磨,再用 3  $\mu m$ , 2.5  $\mu m$  和 0.25  $\mu m$  金刚石悬浮液进行抛光,

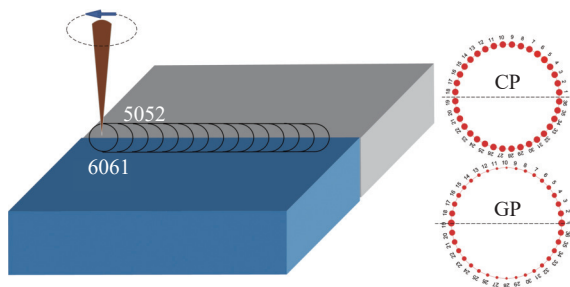


图 1 激光振荡焊接示意图及 CP/GP 模式功率分布

Fig. 1 Schematic diagram of laser oscillating welding and power settings including CP and GP mode

表 2 优化后的焊接试验参数

Table 2 Optimised experimental welding parameters

焊接参数	取值		
	LW	CP	GP
功率 $P/\text{kW}$	4.42	4.42	$\begin{cases} P = P_1 \times 0.95 (1 - 0.45y/A), y \geq 0 \\ P = P_1 \times 0.95 (1 + 0.45y/A), y < 0 \end{cases}$
焊接速度 $v_w/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$			0.6
扫描频率/Hz			100
扫描幅度 $A/\text{mm}$			0.4

注:  $P_1 = 6 \text{ kW}$ ,  $x, y$  为激光光斑的坐标位置

并用水和酒精彻底清洗, 蚀刻在含有 2 mL HF, 6 mL  $\text{HNO}_3$  和 92 mL DI 的溶液中进行. 采用蔡司 M2M 光学显微镜观察焊缝横截面形貌. 用电子背散射衍射仪 (EBSD, 步长  $2 \mu\text{m}$ ) 检测了焊接接头的微观结构. 采用工业计算机断层扫描 (CT sanyingts 20131) 检验接头内部的气孔.

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊缝形貌及显微组织

不同焊接模式下焊缝表面形貌如图 2 所示, 由图可知, 激光焊焊缝正面成形较差, 表面覆盖大量飞溅形成的小颗粒, 焊缝宽度变化大, 背面熔宽波动更显著, 表明焊接过程中大量的热量快速积聚导致焊缝不断凹陷造成过度熔合, 通常焊接一小段距离时就会发生背面焊穿现象. 而激光振荡焊接过程 (CP/GP) 的焊缝表面平整, 成形得到改善, 飞溅明显减少. 所不同的是 CP 模式焊缝背面熔合不良, 表明焊接过程能量有所分散. 而 GP 模式焊缝背面熔合程度最好. 这与三种模式的能量分布有关, 后面详细讨论.

为检测焊缝内部的气孔率和熔合情况, 对焊缝表面进行 CT 测试, 结果如图 3 所示. 图中显示激

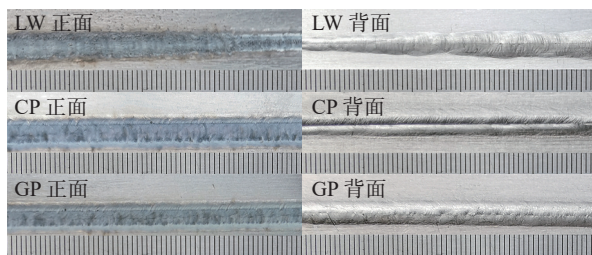


图 2 焊缝表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of weld seam

光焊焊缝内部存在较多分散的大尺寸气孔 (图 3(a)), 焊缝完全熔透. 对于 CP 模式焊缝 (图 3(b)) 内部未见明显气孔, 但熔合线上密集的链状孔洞表示焊缝熔透程度差, 并未实现冶金结合. 对于 GP 模式 (图 3(c)), 焊缝内部没有分散的气孔, 熔合线上仍存在链状孔洞, 但是相比 CP 模式, 焊缝熔透程度显著改善. 经过反复的参数优化, 最终实现了焊接接头的完全熔透, 下面对优化后的接头组织与性能进行着重分析.

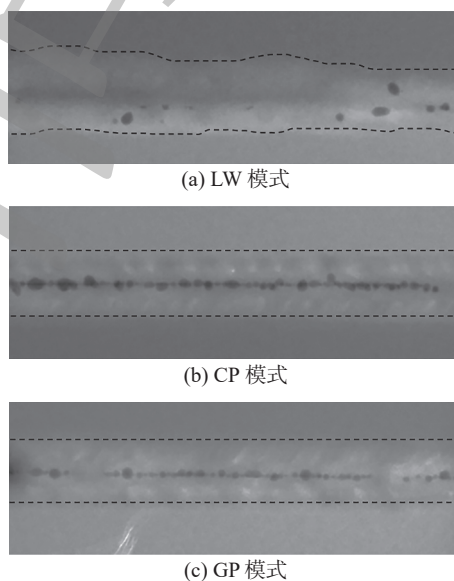


图 3 焊缝表面 CT 测试结果

Fig. 3 CT test results on weld surfaces. (a) LW; (b) CP; (c) GP

典型的焊接接头截面几何特征的宏观形貌如图 4 所示. 对于传统的激光焊 (图 4(a)), 焊缝熔合线上窄下宽, 焊缝中心凹陷明显, 说明接头经历了严重的热量冲击, 接头熔合区域最窄, 原因是激光光斑直径小, 热源能量高度集中, 光源的作用面积最小, 截面存在分散的气孔; 对于激光振荡焊接模式, 热源作用面积明显增大 (图 4(b) 和图 4(c)). CP 模式焊缝熔合线上宽下窄, 焊缝中心少量凹陷 (图 4(b)), GP 模式焊缝熔合线上下宽度接近, 焊缝中心几乎无凹陷 (图 4(c)), 表明由母材区到焊缝区



截面平滑过渡,成形均匀性更好,接头变形最小,预测 GP 模式铝合金接头在进行拉伸测试时失效的过程相对缓慢,即表现为较高的抗拉强度。

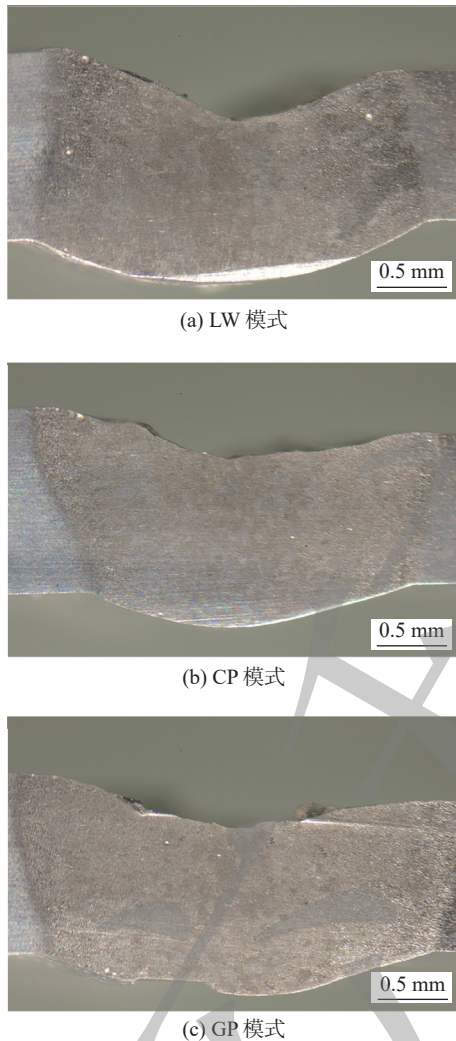


图 4 焊缝横截面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphology of the weld. (a) LW; (b) CP; (c) GP

用扫描电镜观察样品横截面的显微组织,如图 5 所示,激光焊模式下(图 5(a))焊缝熔合区(FZ)组织显示为大尺寸( $\sim 53 \mu\text{m}$ )和长晶界的枝晶,而 CP 模式下(图 5(b))焊缝熔合区组织为破碎和断裂的均匀等轴晶,尺寸约为 $\sim 24 \mu\text{m}$ ,表明焊接过程中光束的快速转动对熔池产生了强烈的搅拌作用,进而改变了熔池的凝固模式,使得大尺寸的晶粒细化为小尺寸晶粒;GP 模式下(图 5(c))焊缝熔合区组织为等轴晶,尺寸为 $\sim 26 \mu\text{m}$ ,相比 CP 模式尺寸略有增大.热影响区(HAZ)的组织变化有类似的趋势,从功率模式对两种合金组织演化的影响来看,6061 侧组织的晶粒尺寸和晶粒形貌对功率变化的敏感性明显高于 5052 侧组织,体现在

6061/HAZ 侧的晶粒尺寸随功率模式的变化比 5052/HAZ 侧更为显著。

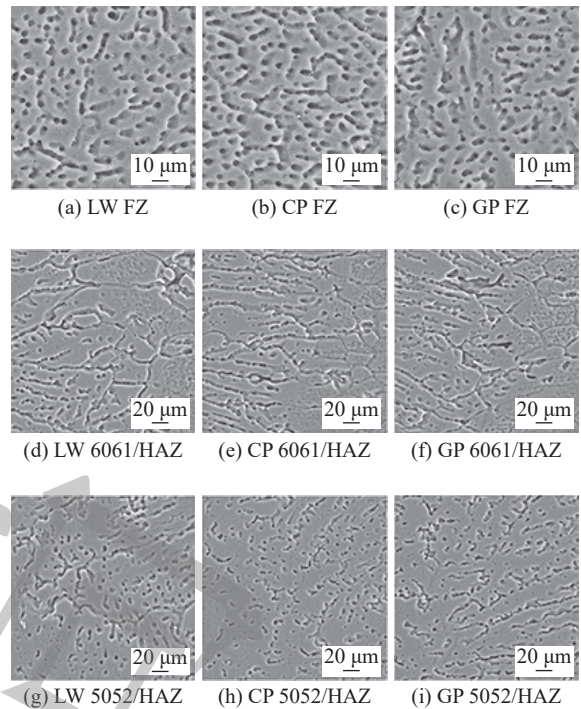


图 5 不同模式下接头横截面的 SEM 图像

Fig. 5 SEM images of the joint cross-section in different modes. (a) LW FZ; (b) CP FZ; (c) GP FZ; (d) LW 6061/HAZ; (e) CP 6061/HAZ; (f) GP 6061/HAZ; (g) LW 5052/HAZ; (h) CP 5052/HAZ; (i) GP 5052/HAZ

采用 EBSD 定量表征了不同焊接方式下焊缝的晶粒尺寸和形貌变化.图 6 为不同模式下焊接接头的晶粒组织对比.焊缝组织由熔合区的等轴晶和热影响区的柱状晶组成.经过统计得出,激光焊(LW)、CP 和 GP 模式焊缝中晶粒直径小于 $100 \mu\text{m}$ 的等轴晶所占比例分别为 31%, 69% 和 77%.图 7 为焊缝熔合区等轴晶和热影响区枝晶的晶粒尺寸统计,分析得出 LW/CP/GP 模式平均等轴晶粒尺寸分别为 $63 \mu\text{m}$ ,  $54 \mu\text{m}$  和  $58 \mu\text{m}$ .结果表明,激光振荡模式(CP 和 GP)下等轴晶的比例比激光焊(LW)模式有所增加.相比之下,GP 模式焊缝中等轴晶所占比例更高,表示焊缝熔合区晶粒的等轴化程度更高,但平均等轴晶粒尺寸略大于 CP 模式焊缝,与图 5 中焊缝熔合区组织一致.另外 LW/CP/GP 模式对应的热影响区平均晶粒尺寸分别为 $99 \mu\text{m}$ ,  $77 \mu\text{m}$  和  $80 \mu\text{m}$ ,说明热影响区柱状晶粒的大小也有类似的变化趋势.图中可以看出,热影响区晶粒在振荡模式下趋向于向等轴晶转变,这无疑将提高焊缝中等轴晶的比例。

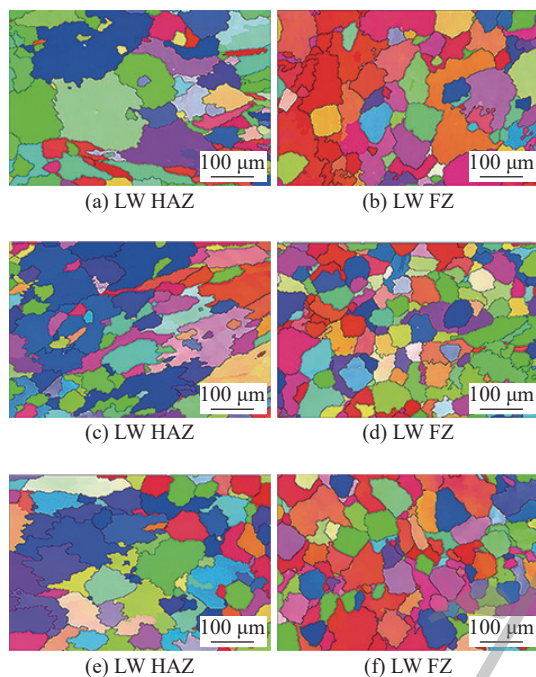


图 6 焊缝的 IPF 图

Fig. 6 IPF diagram of welds. (a) LW HAZ; (b) LW FZ; (c) CP HAZ; (d) CP FZ; (e) GP HAZ; (f) GP FZ

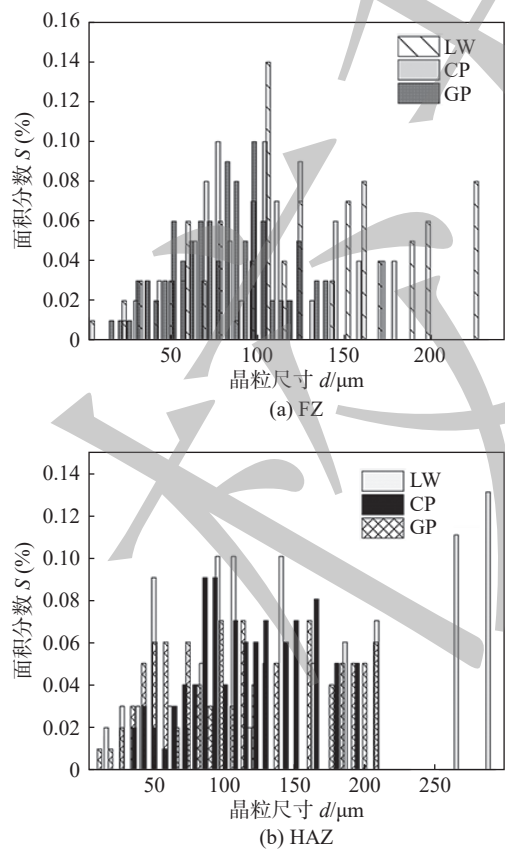


图 7 焊缝的晶粒尺寸分布

Fig. 7 Grain size statistics of weld seam. (a) FZ; (b) HAZ

## 2.2 拉伸性能测试

不同焊接模式下接头的拉伸强度测试结果如图 8 所示, 所有焊缝都在熔合区的位置失效, 每组

工艺下取 5 个试样以确定接头的平均强度. 图中显示, LW/CP/GP 模式接头的抗拉强度分别为 155.3 MPa, 158.5 MPa 和 180.8 MPa. 结果显示, 激光振镜焊接试样 (CP/GP) 的平均抗拉强度高于激光焊接试样 (LW), 表明光束振荡降低了接头的软化程度, 其中 GP 模式接头强度最高, 一方面是焊缝内产生了更多的等轴晶, 另一方面是焊缝形貌的改善. 接头强度测试结果与 2.1 部分的预测结果一致.

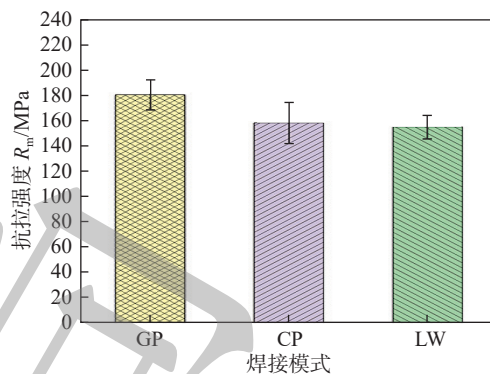


图 8 不同焊接模式下接头的拉伸强度

Fig. 8 Tensile strength of the joint in different welding modes

试样拉伸试验后的断面形貌如图 9 所示. 激光焊的焊缝断面有粗大的韧窝, 同时发现有明显的气孔存在 (图 9(a)), 而 CP 模式焊缝断面也有少量的气孔, 但韧窝相对密集, 断裂面有明显的撕裂痕迹, 很明显, 激光振镜焊接使得焊缝中的气孔减少, 其原因是扫描区域的重叠对焊缝熔合区有重复加热效应<sup>[15]</sup>. GP 模式焊缝断面为更细密的韧窝, 表明接头具有最好的断裂韧性.

## 2.3 显微硬度

试样焊缝横截面上的显微硬度测试结果如图 10 所示. 激光焊接试样熔合区的平均显微硬度为 53 HV. 而 CP 和 GP 模式分别为 65 HV 和 77 HV. 激光振镜焊接接头熔合区的平均显微硬度大于激光焊接头, 可以通过 2.1 节中讨论的焊缝晶粒细化说明, 遵循理论上的 Hall-Petch 效应<sup>[16]</sup>. 等轴晶的尺寸越小, 意味着焊缝组织中晶界所占的比例越高. 而晶界对位错的移动有阻碍作用, GP 模式焊缝中等轴晶的数量最多, 等轴化程度也最高, 因此具有最高的显微硬度. 在焊接过程中, 热循环促进了热影响区的晶粒粗化和过时效, 因此该区域的显微硬度低于基材, 显微硬度测定结果与显微组织观察结果吻合较好.



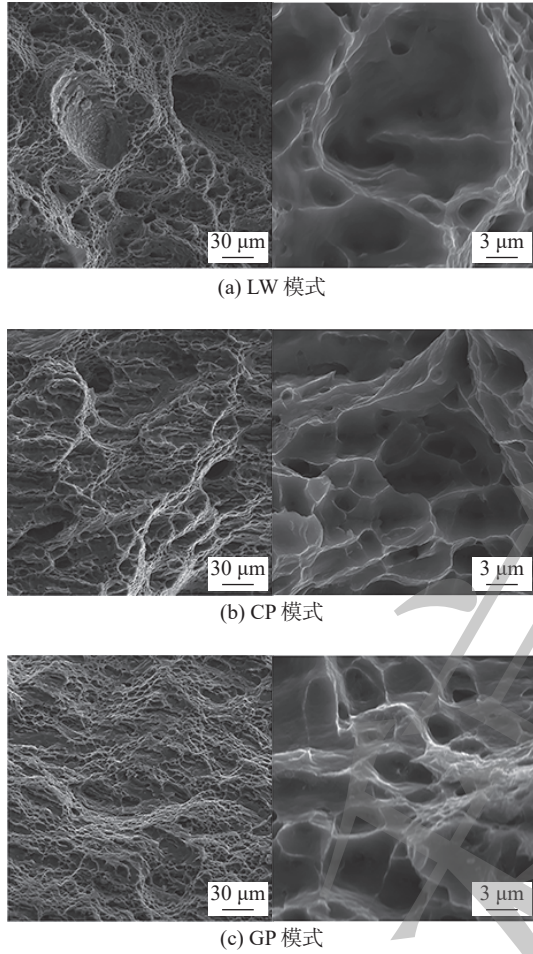


图 9 焊缝拉伸断面形貌

Fig. 9 Tensile section morphology of the weld. (a) LW; (b) CP; (c) GP

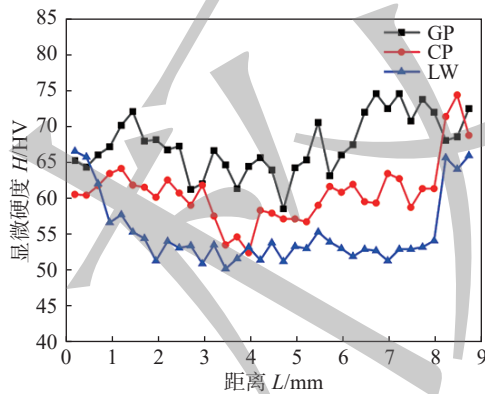


图 10 焊接接头显微硬度

Fig. 10 Microhardness results of welded joints

## 2.4 焊缝形成机制

激光振镜焊接过程中光束沿着螺旋线的轨迹扫描实施焊接,其轨迹方程表示为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_w t + A \sin(2\pi f t + \varphi_x) \\ y(t) = y_0 + A \sin(2\pi f t + \varphi_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x(t)$  和  $y(t)$  为光斑在  $x$  和  $y$  方向上的实际位置;  $x_0$  和  $y_0$  分别表示起点位置的  $x$  和  $y$  坐标;  $t$  是焊

接时间;  $(\varphi_x, \varphi_y)$  是焦点的初始相位。

综合前期学者的研究得出优化后的激光振镜焊接过程中光束能量分布模型为<sup>[18-19]</sup>

$$I = \frac{\eta P v(t)}{2\pi\alpha r_0} e^{-\frac{v(t) \cdot ((x-x(t))^2 + (y-y(t))^2)}{2\alpha r_0}} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为材料的激光吸收率;  $v(t)$  为光束扫描速度;  $\alpha$  为热扩散系数;  $P$  为激光功率;  $r_0$  为光斑直径。

激光照射在母材上的能量为

$$E(x, y) = \int_0^T I(x, y, t) dt \quad (3)$$

式中:  $I(x, y, t)$  为光束在位置  $(x, y)$  和时间  $t$  处的能量。主要参数的取值为  $r_0 = 0.4 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 3.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $x_0 = y_0 = 0$ ,  $\varphi_x - \varphi_y = \pi/2$ ,  $\eta = 0.8$ 。将表 2 中对应的参数和功率表达式代入式 (1) 和式 (2), 通过式 (3) 积分, 得到不同模式的能量分布。

图 11 显示了根据式 (1) ~ 式 (3) 得到的三种模式在 5 个振荡周期内焊缝表面及侧面能量沉积情况。图中显示, 在无振荡的情况下, 激光束的直线运动使激光能量集中在焊缝中心 (图 11(a), 11(b)), 能量密度峰值为  $482.9 \text{ J/mm}^2$ 。对于振镜焊模式, 由于在扫描轨迹的不同位置光束有不同的重叠密度, 能量最终沿焊缝边缘沉积。GP 模式有 3 个能量峰, 而 CP 模式有 2 个能量峰, GP 模式的能量密度峰值 ( $332.4 \text{ J/mm}^2$ ) 低于 CP 模式 ( $429.2 \text{ J/mm}^2$ ), 都低于激光焊能量密度峰值。此外 GP 模式下焊缝中心线处的能量密度 ( $184.6 \text{ J/mm}^2$ ) 明显高于 CP 模式 ( $143.1 \text{ J/mm}^2$ ), 因此保证了焊缝中心的良好熔合, 并提升了热源利用率。

## 2.5 微观组织形成机制

根据结晶理论, 熔池的结晶形态完全取决于结晶过程中固液界面前方成分过冷的程度。成分过冷区宽度计算式为<sup>[20-21]</sup>

$$\Delta x = \frac{2D_L}{R} - \frac{2k_0 G D_L^2}{m_L C_0 (1 - k_0) R^2} \quad (4)$$

式中:  $R$  为熔池结晶速率;  $G$  为液相温度梯度;  $D_L$  为液相溶质原子扩散系数;  $m_L$  为液相斜率;  $C_0$  为合金的原始成分浓度;  $k_0$  为平衡分布系数。激光焊接时, 焊缝中心容易形成等轴晶组织, 等轴晶的数量取决于  $G$  和  $R$  的值。  $G$  值越大,  $\Delta x$  越小。熔池结晶速率表示为

$$R = v_w \cos \alpha \quad (5)$$

式中:  $v_w$  为焊接速度;  $\alpha$  为结晶等温面法向与焊接方向之间的夹角。在中心线处,  $\alpha = 0$ , 因此  $R \approx v_w$ ,  $\Delta x$  随  $G$  的减小而增大。根据之前的研究<sup>[5]</sup>, 由于

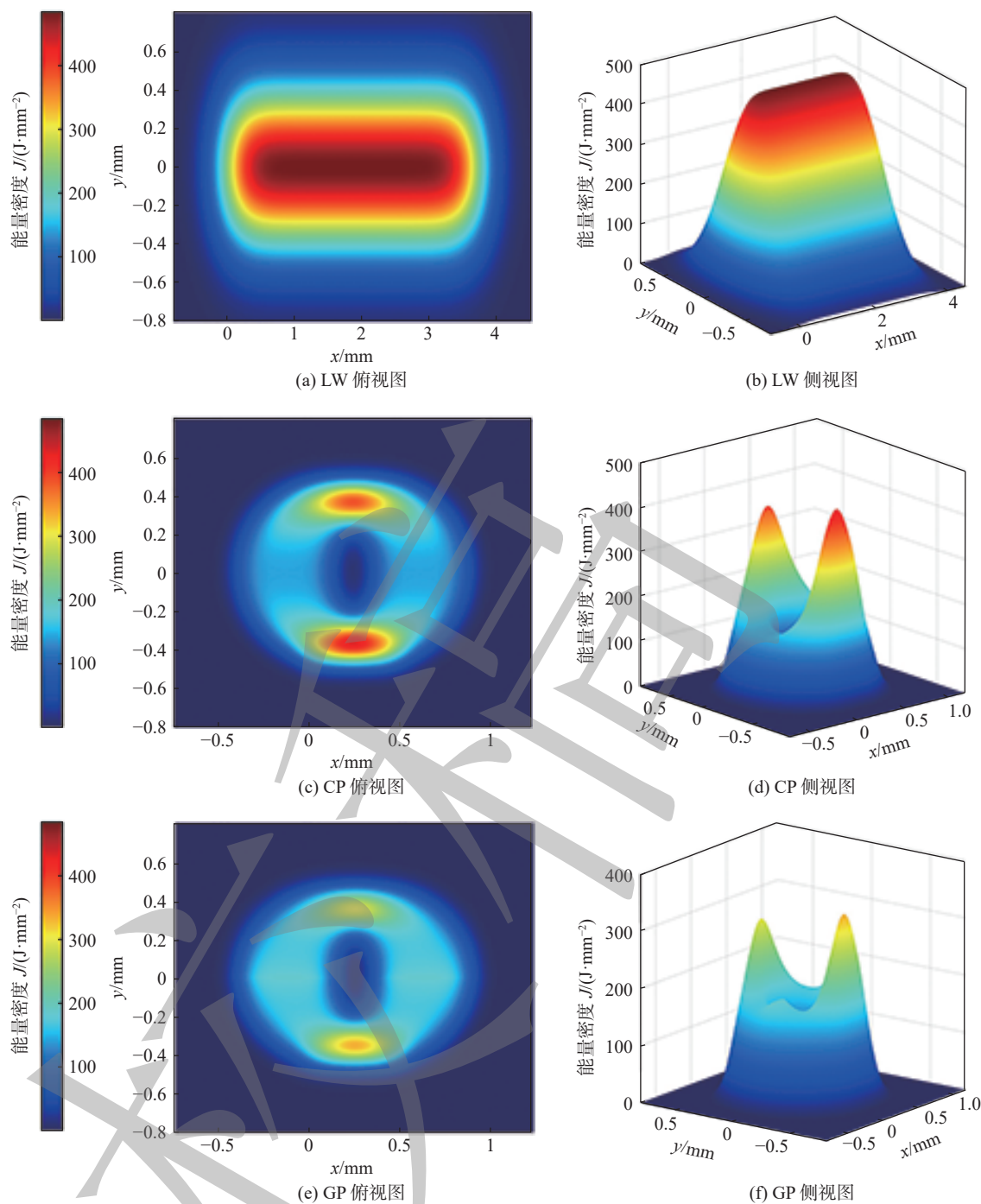


图 11 不同功率模式下的焊缝能量分布

Fig. 11 Energy distribution on weld in different power modes. (a) LW top view; (b) LW side view; (c) CP top view; (d) CP side view; (e) GP top view; (f) GP side view

GP 模式对焊缝的重熔效果更强, 熔池具有最小的温度梯度, 因此相同扫描频率下成分过冷区宽度最大. 但由于 GP 模式下焊缝中心线存在能量峰值, 导致晶粒略微长大, 平均晶粒尺寸比 CP 模式下大.

根据经典形核理论, 非均质形核速率表达式为<sup>[20-21]</sup>

$$I = I_0 \exp \left[ -\frac{16\pi\gamma^3 T_0^2}{3\Delta h_m^2 k_B T} \cdot \frac{1}{(\Delta T_C)^2} \right] \quad (6)$$

式中:  $I_0$  为指数因子;  $\gamma$  为界面能;  $\Delta h_m$  为单位体积焓;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $\Delta T_C$  为晶体生长的过冷度. 由上式可知, 温度梯度越小,  $\Delta T_C$  越大, 异质形核率  $I$  越高, 因此 GP 模式下的焊缝异质形核率最高, LW 模式下最小. 关于光束振荡对微观组织的影响, Gao 等人<sup>[22]</sup>指出, 在相同振幅下, 镁合金的扫描频率与晶粒尺寸成反比, 分析认为这是由于光束搅拌使断裂枝晶的形核位置增加所致, 其原因是振镜

过程高速转动的激光束会产生强对流,使熔池内的流量有增大的趋势,这种增强的流体流动可能会破坏次生枝晶臂,为等轴晶粒的形成提供更多的潜在核。综上,在激光振镜焊接过程中,通过调节激光功率为梯度渐变的分布模式,可以降低熔池的温度梯度,进而形成更大面积的等轴晶粒。

### 3 结论

(1) 激光功率模式对焊缝成形影响较大,振镜激光改善了传统激光焊由于热积累严重导致的焊缝表面凹陷问题,GP模式下焊缝凹陷程度最小,背面熔合程度最好。激光焊焊缝内部存在大尺寸气孔,振镜模式焊缝未见明显气孔。

(2) 振镜模式(CP和GP)下焊缝熔合区等轴晶的比例比激光焊(LW)模式有所增加,其中GP模式等轴晶比例最高为77%,原因是GP模式的熔池温度梯度最小,产生最大的过冷度和异质形核率,更有利于获得等轴晶。

(3) 晶粒尺寸的变化与材料表面的能量分布密切相关。对于振荡激光束,能量主要沿焊缝边缘沉积,能量密度的峰值小于无振荡激光模式,GP模式下焊缝中心的能量密度高于CP模式,因此保证了焊缝中心的良好熔合,并提升了热源利用率。

(4) 振荡试样的平均抗拉强度高于无光束振荡试样,这是焊缝形貌优化和晶粒尺寸细化的结果。焊缝熔合区的平均显微硬度大于激光焊接头。GP模式焊缝具有最少的焊接缺陷和最高的强度,焊缝断面显示更细密的韧窝,熔合区显微硬度最高。

### 参考文献

- [1] Chen C, Xiang Y Z, Gao M. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of dissimilar aluminum alloys[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 180 – 187.
- [2] Chen C, Yin X, Liao W, *et al.* Microstructure and properties of 6061/2A12 dissimilar aluminum alloy weld by laser oscillation scanning[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 2789 – 2798.
- [3] Yan S, Qin Q H, Chen H, *et al.* Hybrid laser welding of dissimilar aluminum alloys: welding processing, microstructure, properties and modelling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 295 – 305.
- [4] Ke W C, Bu X Z, Oliveira J P, *et al.* Modeling and numerical study of keyhole-induced porosity formation in laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloy[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 133: 106540.
- [5] Han J, Shi Y, Zhang G, *et al.* Minimizing defects and controlling the morphology of laser welded aluminum alloys using power modulation-based laser beam oscillation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 83: 49 – 59.
- [6] Wang L, Liu Y, Yang C G, *et al.* Study of porosity suppression in oscillating laser-MIG hybrid welding of AA6082 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 292: 117053.
- [7] Wang L, Gao M, Hao Z Q. A pathway to mitigate macrosegregation of laser-arc hybrid Al-Si welds through beam oscillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 151: 119467.
- [8] 张贺, 靳军, 蒋平, 等. 6061 铝合金激光摆动-电弧复合焊组织与力学性能分析[J]. 焊接学报, 2024, 45(1): 94 – 102.  
Zhang He, Jin Jun, Jiang Ping, *et al.* Study on microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy prepared by oscillating laser-arc hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(1): 94 – 102.
- [9] 肖珺, 葛欣雨, 盖胜男, 等. 基于摆动激光扫描的 GMAW 焊缝成形调控[J]. 焊接学报, 2024, 45(4): 7 – 12.  
Xiao Jun, Ge Xinyu, Gai Shengnan, *et al.* Regulation of bead formation in GMAW based on oscillating-laser scanning[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(4): 7 – 12.
- [10] 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.
- [11] Zhang L J, Zhang X J, Ning J, *et al.* Modulated fiber laser welding of high reflective AZ31[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(1-4): 721 – 733.
- [12] Ning J, Zhang L J, Yin X Q, *et al.* Mechanism study on the effects of power modulation on energy coupling efficiency in infrared laser welding of highly-reflective materials[J]. Materials & Design, 2019, 178: 107871.
- [13] Jiang P Z, Dong H, Cai Y, *et al.* Effects of laser power modulation on keyhole behavior and energy absorptivity for laser welding of magnesium alloy AZ31[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(1-2): 563 – 576.
- [14] Zhang M J, Wu J, Mao C, *et al.* Impact of power modulation on weld appearance and mechanical properties during laser welding of AZ31B magnesium alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 156: 108490.
- [15] Li J Z, Liu Y B, Tao Y J, *et al.* Analysis of vapor plume and keyhole dynamics in laser welding stainless steel with beam oscillation[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 113: 103536.



- [16] Wang L, Gao M, Zhang C, *et al.* Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 108: 707 – 717.
- [17] Schweier M, Heins J F, Haubold M W, *et al.* Spatter formation in laser welding with beam oscillation[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 20 – 30.
- [18] Mahrle A, Beyer E. Modeling and simulation of the energy deposition in laser beam welding with oscillatory beam deflection[J]. *Laser Materials Processing Conference*, 2007, 1: 714 – 723.
- [19] Wang L, Gao M, Zeng X Y. Experiment and prediction of weld morphology for laser oscillating welding of AA6061 aluminium alloy[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(4): 334 – 341.
- [20] 雷玉成, 汪建敏, 贾志宏. 金属材料成型原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Lei Yucheng, Wang Jianmin, Jia Zhihong. *Forming principle of metal materials*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [21] 刘会杰, 闫久春, 魏艳红, 等. 焊接冶金与焊接性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Liu Huijie, Yan Jiuchun, Wei Yanhong, *et al.* *Welding metallurgy and weldability*[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [22] Gao M, Wang H K, Hao K D, *et al.* Evolutions in microstructure and mechanical properties of laser lap welded AZ31 magnesium alloy via beam oscillation[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 92 – 99.
- 第一作者: 韩静, 博士; 主要研究方向为铝合金及异种金属激光焊接; Email: [295485252@qq.com](mailto:295485252@qq.com).
- 通信作者: 石玪, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: [shiyu@lut.edu.cn](mailto:shiyu@lut.edu.cn).

(编辑: 郑红)

[ 上接第 69 页 ]

- [25] Shankar V, Rao K B S, Mannan S L. Microstructure and mechanical properties of Inconel625 superalloy[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, 288(2-3): 222 – 232.
- [26] Chen X H, Li J, Cheng X, *et al.* Microstructure and mechanical properties of the austenitic stainless steel 316L fabricated by gas metal arc additive manufacturing[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 703: 567 – 577.
- [27] Yadollahi A, Shamsaei N, Thompson S M, *et al.* Effects of process time interval and heat treatment on the mechanical and microstructural properties of direct laser deposited 316L stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 644: 171 – 183.
- [28] Zhang J X, Huang Y Q, Fan D, *et al.* Microstructure and performances of dissimilar joints between 12Cr2Mo1R steel and 06Cr18Ni11Ti austenitic stainless steel joined by AA-TIG welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60: 96 – 106.
- [29] Laghi V, Palermo M, Tonelli L, *et al.* Tensile properties and micro-structural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire-and-arc additive manufacturing[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(9): 3693 – 3705.
- 第一作者: 张佳, 博士研究生; 主要从事电弧增材制造方面的研究; Email: [17794432149@163.com](mailto:17794432149@163.com).
- 通信作者: 王新鑫, 博士, 副教授; Email: [wang@cqut.edu.cn](mailto:wang@cqut.edu.cn).

(编辑: 郑红)