

铝合金高频振荡扫描激光-电弧复合焊缝成形规律与预测

苗晓军¹, 韩丽娟¹, 李凯¹, 王磊^{2,3}, 姜来合格², 廖伟², 高明²

(1. 平高集团有限公司, 平顶山, 467001; 2. 华中科技大学, 武汉光电国家研究中心, 武汉, 430074; 3. 深圳市中基自动化股份有限公司, 深圳, 518105)

摘要: 高频振荡扫描激光-电弧复合焊接能够通过扫描搅拌效应调控铝合金焊缝微观组织及其力学性能, 但是在控形方面还鲜有研究, 无法为工业应用提供理论支撑。为此, 系统研究了激光束扫描振幅 A 和频率 f 对 AA6082 铝合金激光-电弧复合焊缝成形特征的影响规律, 包括焊缝表面飞溅、焊缝下部激光区宽度和熔深占比, 并基于光束扫描的能量分布特征和激光焊接模式转变行为, 探讨了焊缝形貌转变机理。随后, 根据焊缝成形缺陷数量和激光深熔焊模式进一步确定了激光束扫描参数的优化区间范围, 具体为 $0.4\text{ mm} \leq A \leq 1.0\text{ mm}$ 和 $300\text{ Hz} \leq f \leq 500\text{ Hz}$ 。最后, 通过对光束扫描参量的线速度归一化处理, 建立了优化参数区间内的焊缝特征值的线性定量关系, 精度达到 89.8%, 为高频振荡扫描激光-电弧复合焊缝形貌特征的预测与调控提供了数据支撑。

创新点: (1) 揭示了激光束高频振荡扫描对激光-电弧复合焊缝成形特征的影响机理。

(2) 在优化参数范围内, 建立了高频扫描激光-电弧复合焊缝成形特征的预测模型。

关键词: 振荡扫描; 激光-电弧复合焊; 焊缝成形; 铝合金

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230711002

Formation law and prediction of weld morphology for high-frequency oscillating laser-arc hybrid welding of aluminum alloy

MIAO Xiaojun¹, HAN Lijuan¹, LI Kai¹, WANG Lei^{2,3}, JIANG Laihege², LIAO Wei², GAO Ming²

(1. Pinggao Group Co. Ltd., Pingdingshan, 467001, China; 2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (WNLO), Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China; 3. Shenzhen Zhongji Automation Co. Ltd., Shenzhen, 518105, China)

Abstract: High-frequency oscillating laser-arc hybrid welding has been shown to control the microstructure and mechanical properties of the weld in aluminum alloy through the stirring effect. However, there is limited research on weld morphology control, thus hindering its industrial application. In this study, the effects of laser beam oscillating frequency (f) and amplitude (A) on the formation characteristics of laser-arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy were systematically investigated, particularly focusing on the influence of surface spatters, the width of the laser-affected zone beneath the weld, and the ratio of penetration depth. The formation mechanism of weld morphology was discussed based on the energy distribution characteristics of the oscillating laser beam and the transition of the laser welding mode. Subsequently, the optimization range of the oscillating parameters was determined based on the number of weld formation defects and the laser deep penetration welding mode, specifically within the range of $300\text{ Hz} \leq f \leq 500\text{ Hz}$ and $0.4\text{ mm} \leq A \leq 1.0\text{ mm}$. Finally, by normalizing the oscillating parameters with the oscillating line velocity, a linear quantitative relationship between the characteristic values of the weld within the optimized parameter range was established with an accuracy of 89.8%, providing data support for the prediction and control of the morphological characteristics of high-frequency oscillating laser-arc hybrid welding.

Highlights: (1) The mechanism underlying the effects of high-frequency beam oscillation on weld morphology characteristics in

laser-arc hybrid welding was revealed.

(2) A predictive model for weld morphologies in high-frequency oscillating laser-arc hybrid welding within the optimized parameter range was established.

Key words: beam oscillation; laser-arc hybrid welding; weld morphology; aluminum alloys

0 序言

铝合金以优良的综合性能和较低的价格,成为结构轻量化首选材料,广泛应用于航空航天、高速列车、新能源汽车制造行业^[1-3]。如何实现铝合金结构的高质高效焊接,是变革传统工艺,提升生产力的关键。

激光扫描焊接能够通过高频振荡扫描的激光束调控焊接过程中的匙孔和熔池行为,从而有效地避免铝合金焊接中极易形成的咬边、气孔、裂纹等缺陷,具有更好的焊接稳定性和焊接适应性,被认为是现阶段最优的铝合金焊接工艺之一^[4-6]。Fetzer 等人^[7]提出采用扫描频率 f 大于 200 Hz 的圆形扫描能够有效消除铝合金激光焊接气孔。Berend 等人^[8]发现增加扫描频率 f 或扫描振幅 A 能够显著提高铝合金高速焊接的稳定性,消除驼峰缺陷。Hagenlocher 等人^[9]发现增大 A 能够减小铝合金焊接过程中的熔池温度梯度,并增加熔池凝固速率,从而促进焊缝细等轴晶的形成并降低焊缝裂纹敏感性。

为进一步扩大激光扫描焊接的工艺优势和应用范围,部分学者开始尝试将高频振荡扫描激光引入到激光填丝焊和激光-电弧复合焊中。Schultz 等人^[10]研究了铝合金激光扫描填丝焊接,通过提高 A 将对接间隙容忍度由板厚的 190% 提高至 315%。Wang 等人^[11]认为增加 f 或 A 能够显著增加激光束对熔池的“搅拌”效应,从而能够减少气孔形成、改善元素偏析、促进晶粒细化,最终在中低电弧电流下成功解决了气孔难题并大幅提升了焊缝韧性。以上分析说明,高频振荡扫描激光焊在抑制缺陷和调控冶金方面具有显著优势,并且增大 f 或 A 能够继续放大该优势。然而,一些研究表明,扫描参量突破阈值后反而会造成负面影响。Cai 等人^[12]发现高强度钢焊缝气孔率随 f 增大呈先减小后增加的趋势,当 f 增加至 80 Hz 时,气孔率为无扫描时的 9 倍。Chen 等人^[13]发现当 f 高于 500 Hz 或 A 大于 1.6 mm 以后,铝合金对接焊缝根部会出现内凹

和不连续缺陷,成形反而变差。Meng 等人^[14]发现 f 大于 150 Hz 后,铝镁异种搭接焊缝表面会出现孔洞缺陷。Wang 等人^[15]通过光束扫描成功消除了铝合金激光焊接气孔,但焊接熔深比无扫描时降低了 51%。因此,在实际应用中,必须考虑焊接熔深与缺陷控制的平衡关系。Hao 和 Wang 等人^[16-17]分别建立了不锈钢和铝合金激光扫描焊接中焊缝形貌特征与扫描参量之间的定量关系,有助于预测焊缝形貌和选择合适的工艺参数,显著扩大了激光扫描焊接工艺的应用范围。而高频振荡扫描激光-电弧复合焊接能够通过激光和电弧的相互作用,综合二者的工艺优势,既有激光振荡扫描焊接效率高、热输入小、可调控熔池的特性,又有电弧焊间隙适应性强的特性,工艺优势更为显著^[18]。但由于电弧的引入,导致焊接过程更为复杂,需调控的工艺参数相比于激光振荡扫描焊接显著增多,实施难度更大^[19]。因此,开展高频振荡扫描激光-电弧复合焊接成形特征的定量研究更具应用价值与挑战性,遗憾的是,目前未见相关报道。

为此,采用熔池流动性好、成形特征突出的 AA6082 Al-Mg-Si 合金^[20],系统地研究了激光束高频振荡扫描对复合焊缝表面和截面成形的影响规律,并据此建立了优化参数区间内的焊缝特征值的线性定量关系,为高频振荡扫描激光-电弧复合焊缝形貌特征的预测与调控提供了数据支撑。

1 试验方法

母材选用厚度为 8 mm 的 AA6082 铝合金板材,焊丝选用直径为 1.2 mm 的 ER5087 铝合金焊丝,二者化学成分如表 1 所示。焊前首先采用机械打磨的方式去除母材表面氧化膜,并采用丙酮溶液擦拭去除油污后,将母材和焊丝一并放入干燥柜中备用。

所使用的高频振荡扫描激光-电弧复合焊接试验平台主要由 6000 W 光纤激光器、6 轴工业机器人、脉冲电弧焊机以及振荡扫描激光焊接头等设备组成。其中,振荡扫描激光焊接头能够通过扫描振镜来驱动激光束以任意轨迹振荡扫描,其准直-聚

表 1 焊接材料的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of welding materials

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
AA6082	1.00	0.50	0.10	0.70	0.90	0.25	0.20	0.10	—	余量
ER5087	0.04	0.14	0.01	0.75	4.76	0.007	0.01	0.05	0.11	余量

焦距比为 0.8。

焊接试验以平板堆焊的形式进行, 重点关注未熔透条件下, f 和 A 对焊缝表面和截面成形的影响规律。工艺参数如表 2 所示, 其中 f 和 A 的变化范围根据振镜可实现的最大稳定扫描速度确定, 其余工艺参数均固定不变, 采用激光引导电弧的焊接方式, 激光束扫描图形为圆形, 保护气体流量为 20 L/min。

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Process parameters of welding

激光功率 P/W	焊接电流 I/A	焊接速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$	离焦量 Δ/mm	光丝间距 D_{LA}/mm	扫描振幅 A/mm	扫描频率 f/Hz
5000	200	2	0	3	0.2 ~ 2.5	10 ~ 500

焊后首先采用数码相机拍摄焊缝表面宏观形貌, 并选取每道焊缝中间 100 mm 长的稳定段统计表面成形特征。前期研究发现, 焊缝表面飞溅是变化最为显著的表面成形特征。图 1 为有关焊缝表面

和截面成形特征参量的定义。如图 1(a) 所示, 按照形态可将飞溅分为两类, 其一为零散分布在焊道两侧的直径大于等于 0.3 mm 的飞溅, 将其定义为大颗粒飞溅; 其二为呈密集带状分布在焊道两侧的直径小于 0.3 mm 的飞溅, 将其定义为小颗粒飞溅。分别统计大颗粒飞溅数量和焊道两侧小颗粒飞溅带宽度之和。随后, 按照标准程序制备横截面金相试样, 将其研磨抛光并采用 10% NaOH 溶液浸蚀后, 统计截面成形特征, 分别定义熔深 H , 熔宽 W , 激光区熔深 H_L , 激光区熔宽 W_L , 共 4 个特征参量来定量分析截面成形特征, 如图 1(b) 所示。为更好表征激光振荡扫描的影响, 进一步定义了激光区熔深占比 ϕ , 其等于 H_L 与 H 的比值。

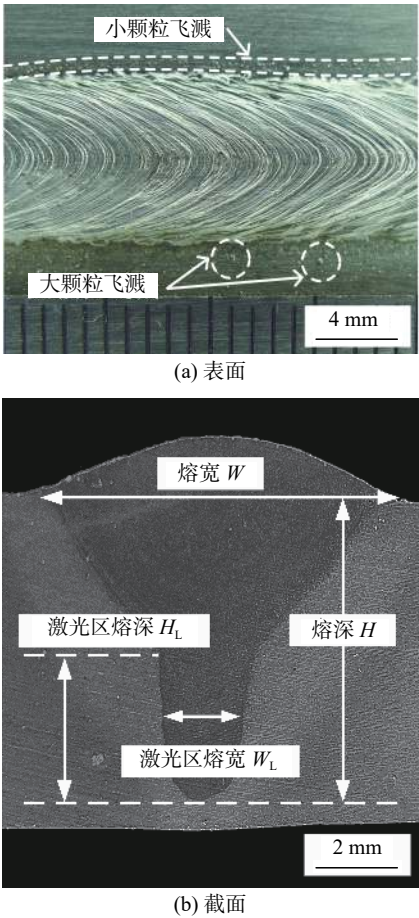


图 1 焊缝成形特征参量的定义
Fig. 1 Definition of characteristic parameters for weld morphology. (a) surface; (b) cross-section

2 试验结果与分析

2.1 激光束扫描对焊缝表面成形的影响

如图 2 和图 3 所示, 在较大的扫描振幅 ($A = 2.5$ mm) 和较小的扫描频率 ($f = 10$ Hz) 时, 焊道边缘存在熔合不良现象, 除此之外焊缝整体成形均匀, 焊道平直。图 2 为在扫描频率为 300 Hz 下, 不同扫描振幅的焊缝表面形貌。在扫描振幅 A 为 0.2 mm 时, 焊缝表面存在大颗粒飞溅。随扫描振幅增加, 焊缝表面形貌得到明显改善, 在 $A \geq 0.6$ mm 时, 表面鱼鳞纹大于 5 条/mm, 观感致密细腻, 在 $1\text{ mm} \leq A \leq 1.5$ mm 时, 焊道两侧出现小颗粒飞溅带。图 3 为在振幅为 0.6 mm 时, 不同扫描频率的焊缝表面形貌。随着扫描频率增加表面鱼鳞纹致密度增

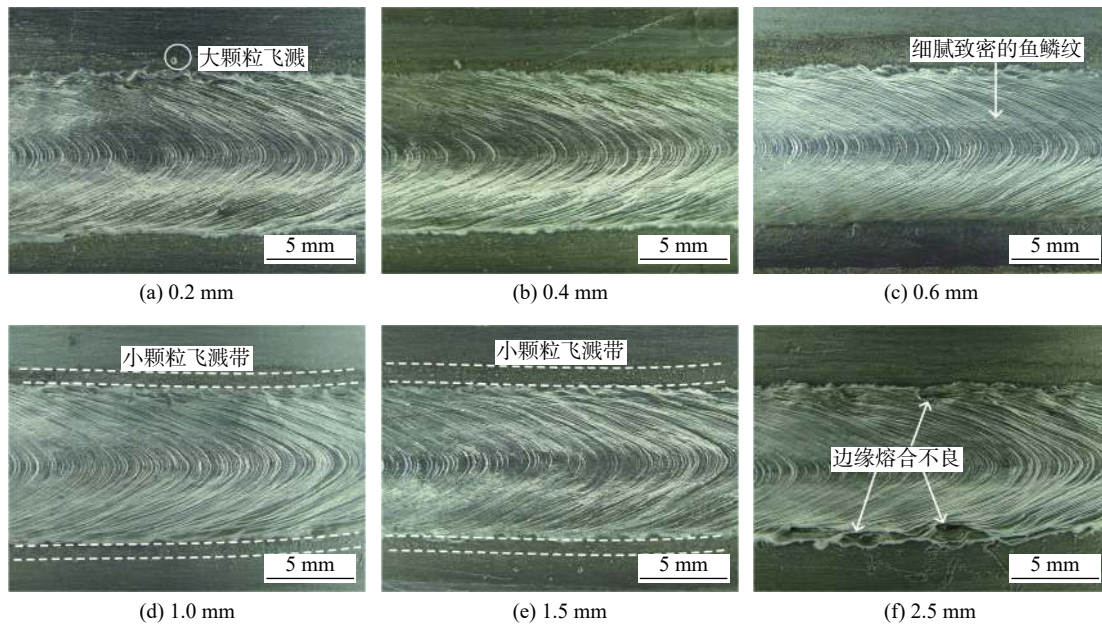


图 2 不同扫描振幅的典型焊缝表面形貌 ($f=300$ Hz)

Fig. 2 Typical surface morphology of weld with different oscillating amplitude ($f=300$ Hz). (a) 0.2 mm; (b) 0.4 mm; (c) 0.6 mm; (d) 1.0 mm; (e) 1.5 mm; (f) 2.5 mm

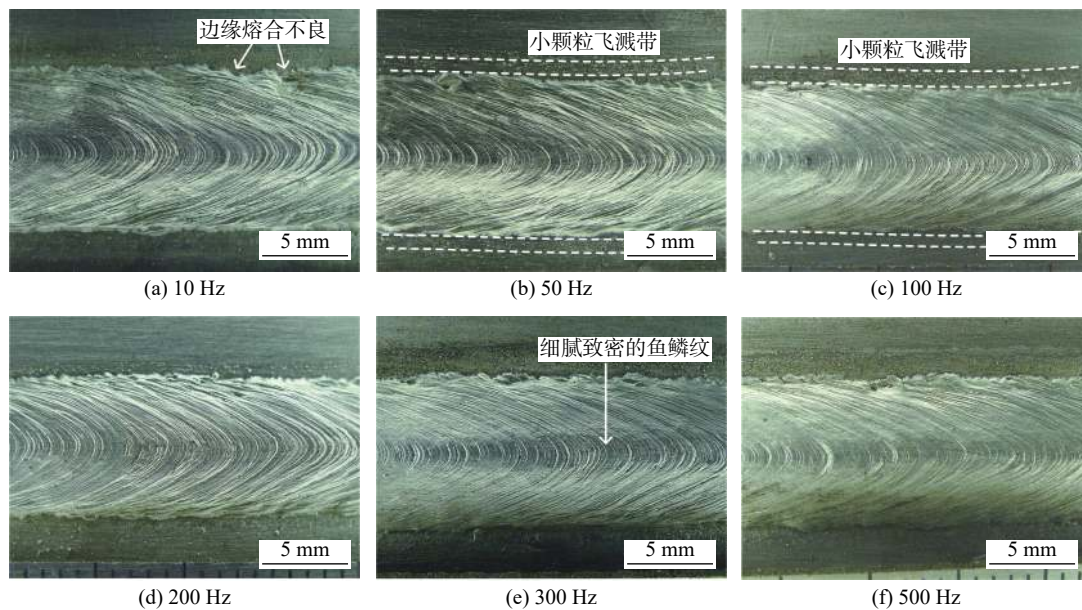


图 3 不同扫描频率的典型焊缝表面形貌 ($A=0.6$ mm)

Fig. 3 Typical surface morphology of weld with different oscillating frequency ($A=0.6$ mm). (a) 10 Hz; (b) 50 Hz; (c) 100 Hz; (d) 200 Hz; (e) 300 Hz; (f) 500 Hz

加, 焊缝成形良好, 仅在 $50\text{Hz} \leq f \leq 100$ Hz 时焊道两侧出现较窄的小颗粒飞溅带。

图 4 为进一步定量统计了焊缝表面飞溅特征。图 4(a) 为焊缝表面的大颗粒飞溅数, 在 $A < 0.4$ mm 和 $A > 1.0$ mm 时, 虽然随着 f 增加大颗粒飞溅数量有所减少, 但始终无法完全消除。并且在 1.5 mm $\leq A \leq 2.5$ mm, $f \leq 100$ Hz 时, 大颗粒飞溅增加趋势最为明显, 数量为 11 ~ 15 颗。仅在 0.4 mm $\leq$

$A \leq 1.0$ mm 且 $300\text{Hz} \leq f \leq 500$ Hz 时, 存在一个无飞溅区。总体上, 大颗粒飞溅数随 f 增大而减少。

图 4(b) 为焊缝表面的小颗粒飞溅带宽度, 在 $f \leq 100$ Hz 时, 小颗粒飞溅带宽度随扫描参数的变化趋势与大颗粒飞溅数量相反, 此时小颗粒飞溅与大颗粒飞溅不共存。此外, 在 A 固定时, 随着 f 的增加, 小颗粒飞溅带宽度均呈现先增大后减小的趋势, 飞溅带宽度最高不超过 0.6 mm。无飞溅区集中在云图

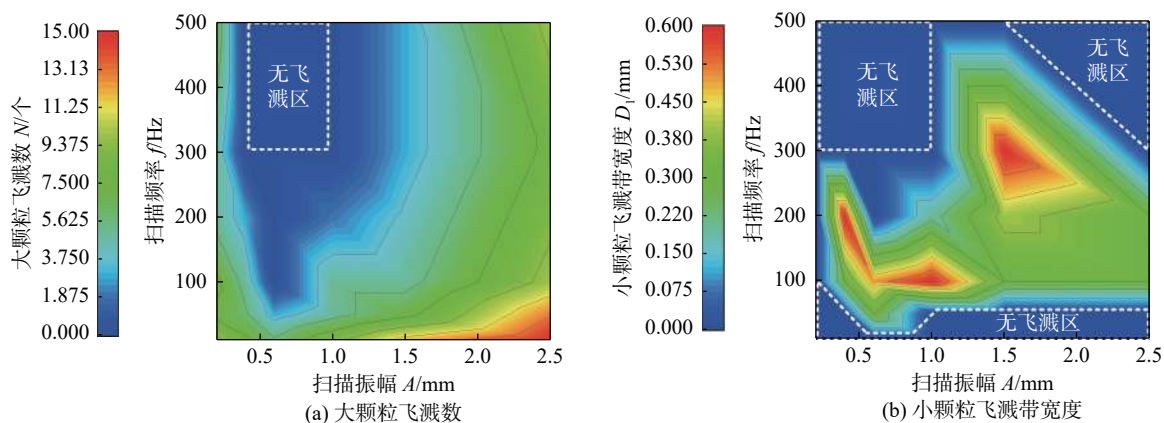


图 4 扫描振幅与频率对焊缝表面飞溅的影响

Fig. 4 Effect of oscillating amplitude and frequency on the spatter of weld surface. (a) number of large splatters; (b) width of small splatter zone

的 4 个角上, 即 A 较大 (较小) 且 f 较大 (较小) 时。

综上所述, 可以总结出获得表面无明显飞溅 (包括大颗粒飞溅和小颗粒飞溅带)、鱼鳞纹细腻致密、焊道边缘无熔合不良缺陷的优质焊缝的扫描参数范围为 $0.4 \text{ mm} \leq A \leq 1.0 \text{ mm}$ 且 $300 \text{ Hz} \leq f \leq$

500 Hz。

2.2 激光束扫描对焊缝截面成形的影响

如图 5 所示, 在 $A > 1 \text{ mm}$ 且 $f = 10 \text{ Hz}$ 时, 焊缝根部成形不规则, 当 f 继续增加时, 焊缝根部过渡趋于平滑。当 A 增加至 1.5 mm 时, 焊缝激光区开始消

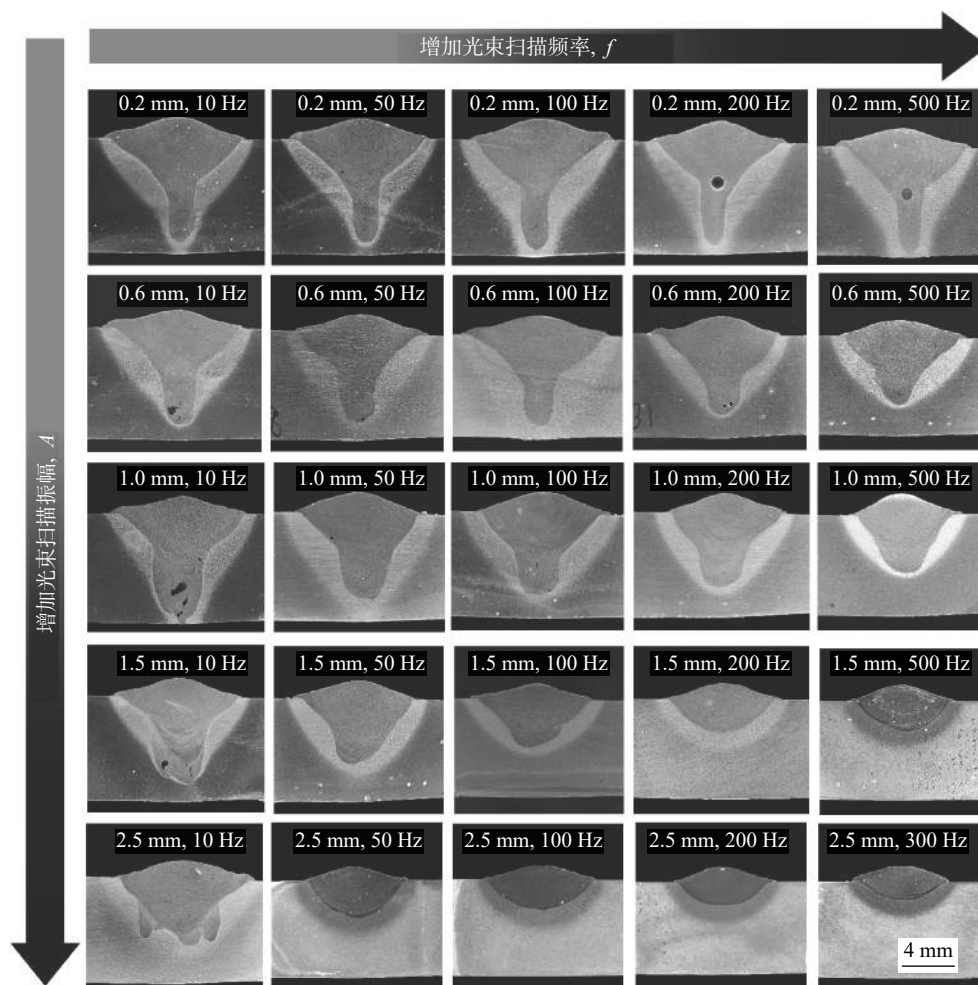


图 5 不同扫描振幅和频率下的的典型焊缝截面形貌

Fig. 5 Typical section morphology of joints welded with different oscillating amplitude and frequency

失,焊缝形貌由高脚杯状向半圆形转变。

图 6 和图 7 为进一步定量统计了焊缝截面成形特征。随着扫描参量增大, H 和 W 均呈减小趋势, 在 $A > 1.5$ mm 时, 减小趋势较为明显, 如图 6 所示。

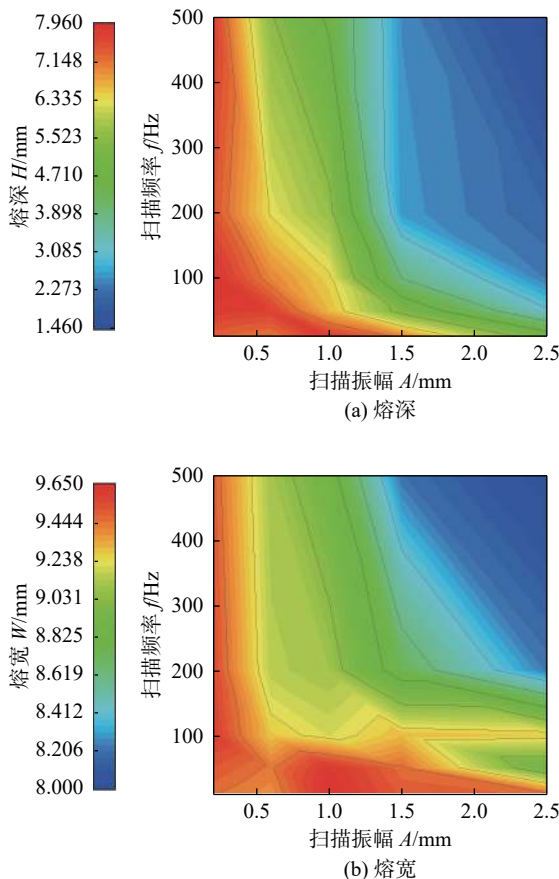


图 6 扫描振幅和频率对焊缝截面整体形貌的影响

Fig. 6 Effect of oscillating amplitude and frequency on the overall morphology of the weld cross-section. (a) penetration depth; (b) weld width

在 $f \leq 200$ Hz 时, W_L 随 A 增大而增大, 随 f 增大而减小, 如图 7(a) 所示。在 $A \leq 1.0$ mm 时, $\varphi > 45.6\%$, 焊缝截面形貌呈典型的复合焊高脚杯状。当 $f > 200$ Hz 且 $A > 1.5$ mm 时, 复合焊缝激光区消失, 焊接过程由激光深熔复合焊转变为激光传导复合焊, 如图 7(b) 所示。此时焊缝已经不具备复合焊接特征, 且激光能量利用率极低, 在实际应用中应避免该工艺区间。

2.3 焊缝成形机理

上述焊缝表面及截面成形变化可以归结于激光束高频振荡扫描改变了光束能量分布特征, 进而造成熔池热流行为转变^[13, 17]。

结合 Mahrle 等人^[21] 提出的激光束振荡扫描能量沉积模型, 可以计算不同扫描参量下的激光束能量分布特征, 结果如图 8 所示。图 8(a) 为在 A 和

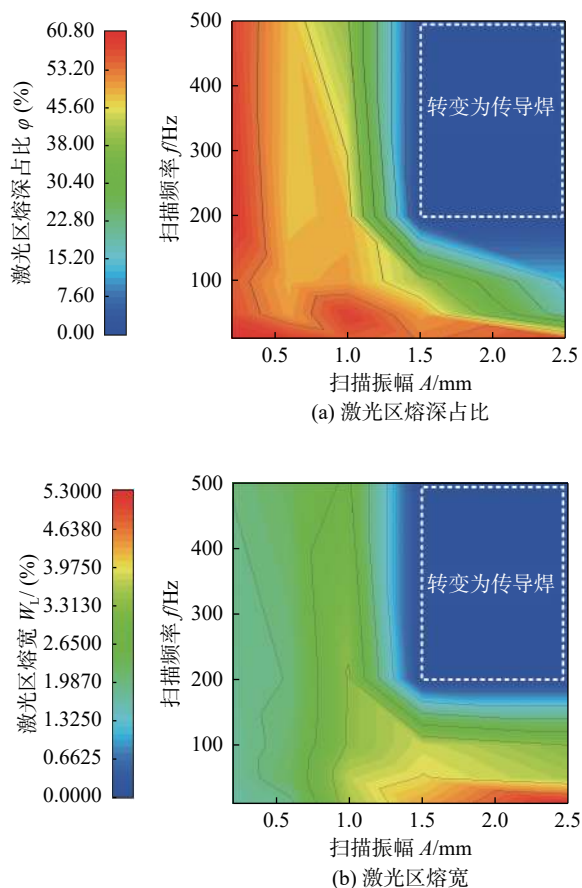


图 7 扫描振幅和频率对焊缝截面激光区形貌的影响

Fig. 7 Effect of oscillating amplitude and frequency on the morphology of the laser zone in the weld cross-section. (a) penetration depth ratio of the laser zone; (b) weld width of the laser zone

f 较小时, 激光束峰值能量密度高达 3911.2 a.u., 但分布极为不均, 会导致剧烈的匙孔波动坍塌。因此, 所得焊缝熔深大、激光区占比高, 但表面飞溅难以控制, 随着 A 和 f 提高, 激光束能量密度显著降低, 并且分布均匀性显著提高, 峰值能量和基值能量的差值由 3203.7 a.u. 降低至 161 a.u., 同比降低了 95%, 此时虽然熔深略有减小, 但焊接过程稳定性大幅增加, 飞溅能够被完全抑制, 如图 8(b) 所示。图 8(c) 为 A 增加至 1.5 mm, f 增加至 300 Hz 时, 激光束能量密度低于激光匙孔形成阈值, 焊接模式由激光深熔复合焊转变为激光传导复合焊。此时, 焊缝激光区消失, 激光能量利用率低, 并且由于激光束扫描速度过快, 对熔池的搅拌作用显著增强, 促使熔池流动模式由层流向湍流转变^[11, 22], 波动加剧, 熔池边缘液态金属在焊接过程中容易被甩出熔池进而形成大量大颗粒飞溅。

2.4 工艺区间优化及成形预测模型建立

根据上述结果, 在文中工艺条件下, 实现焊接

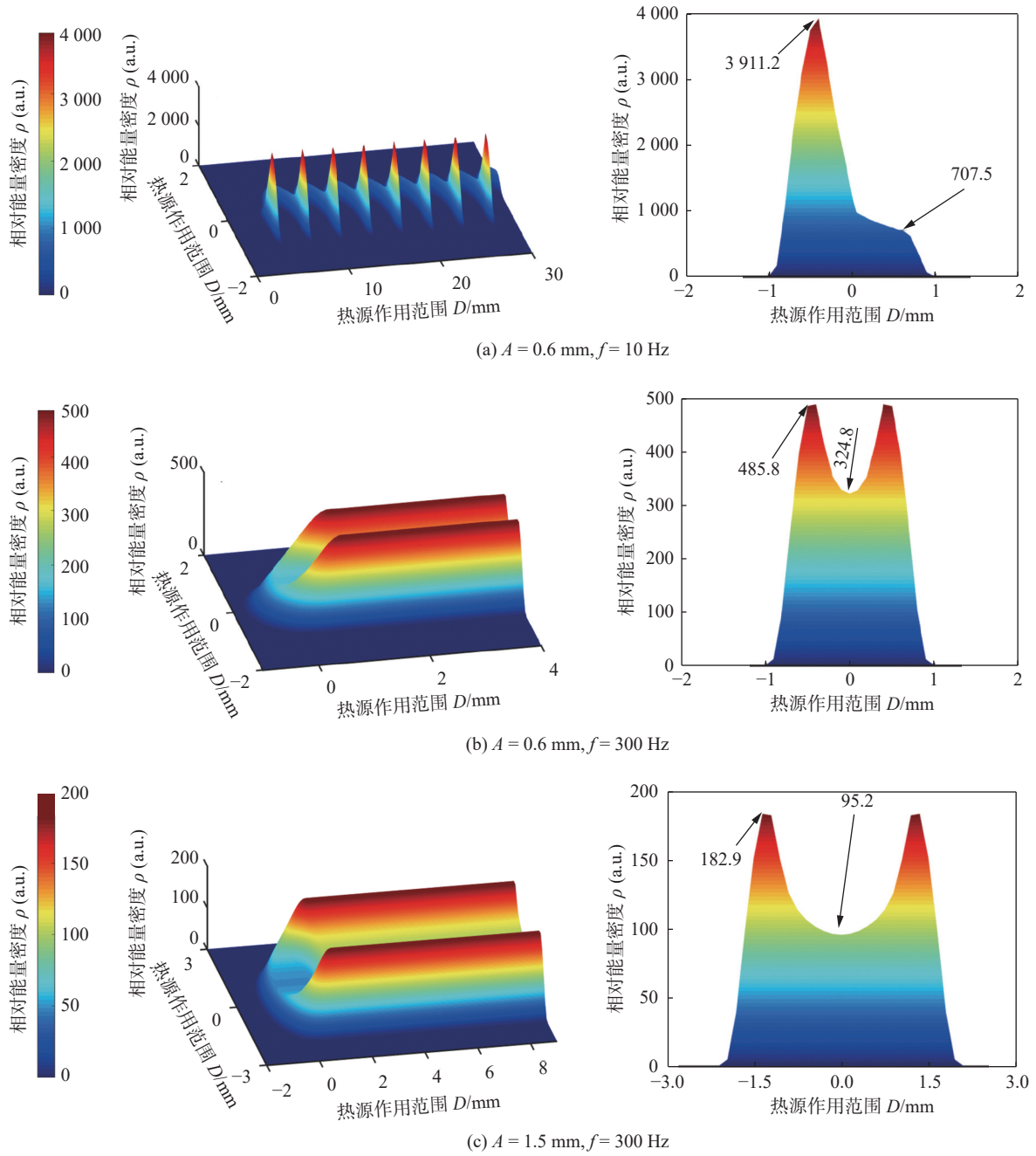


图 8 不同扫描参量下的激光束能量分布特征

Fig. 8 Energy distribution of laser beam at various oscillating parameters. (a) $A=0.6 \text{ mm}, f=10 \text{ Hz}$; (b) $A=0.6 \text{ mm}, f=300 \text{ Hz}$; (c) $A=1.5 \text{ mm}, f=300 \text{ Hz}$

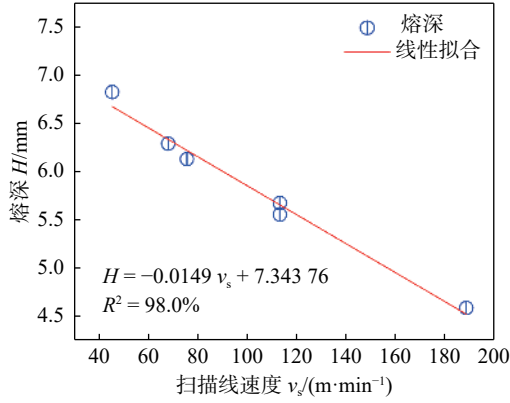
过程稳定(无飞溅)、焊缝成形良好(无焊道边缘熔合不良、鱼鳞纹致密)、激光能量利用率高(焊接过程为激光深熔复合焊)的优化工艺区间为 $0.4 \text{ mm} \leq A \leq 1.0 \text{ mm}$ 且 $300 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$ 。

在此工艺区间内, H 和 W 与扫描参量之间的呈现图 6 所示的对应关系, φ 和 W_L 与扫描参量之间呈现图 7 所示的对应关系。由于扫描参量包括 A 和 f 两个参量, 对其进行归一化能够更好地定量计算扫描参量与成形特征之间的对应关系。在扫描

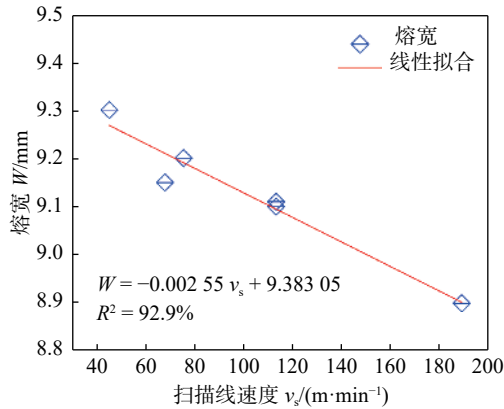
图形为圆形时, A 和 f 的变化实际上改变的是焊接过程中的激光扫描线速度 v_s , v_s 可表示为^[16]

$$v_s = 2\pi A f \quad (1)$$

进一步将优化工艺区间内 H , W , φ 和 W_L 与 v_s 的对应关系进行统计与拟合, 如图 9 和图 10 所示。为便于统计, 缩小 v_s 的取值区间, 将其单位转化为 m/min 。结果表明, 各个成形参量与 v_s 之间均具有较好的线性关系, 平均预测精度达到 89.8%, 说明所建立的数学模型能够很好地预测焊缝的形貌



(a) 熔深



(b) 熔宽

图 9 激光扫描线速度与熔深和熔宽的拟合关系

Fig. 9 Fitting relationship between laser oscillating speed and penetration depth and weld width. (a) penetration depth; (b) weld width

特征.

H , W , φ 和 W_L 与 v_s 之间的关系可表示为

$$\begin{cases} H = -0.014 9 v_s + 7.343 76 \\ W = -0.002 55 v_s + 9.383 05 \\ \varphi = -0.115 v_s + 60.954 59 \\ W_L = 0.005 9 v_s + 1.641 34 \end{cases} \quad (2)$$

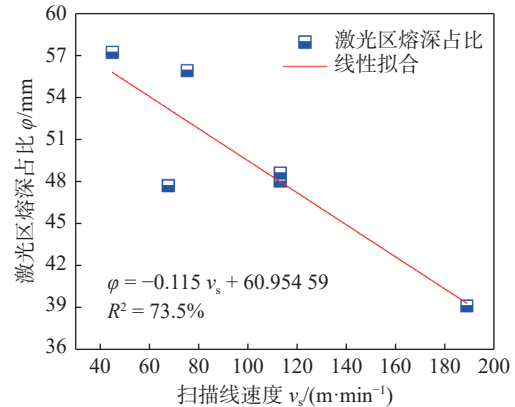
式中: v_s 的取值范围为 $45.2 \text{ m/min} \leq v_s \leq 188.4 \text{ m/min}$.

将式 (1) 带入式 (2), 最终可以得到扫描参量—焊缝成形—缺陷控制的数学模型, 即

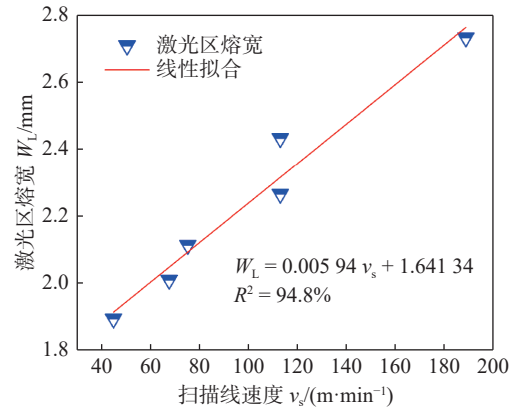
$$\begin{cases} H = -0.001 788 \pi A f + 7.343 76 \\ W = -0.000 306 \pi A f + 9.383 05 \\ \varphi = -0.115 \pi A f + 60.954 59 \\ W_L = 0.0059 \pi A f + 1.641 34 \end{cases} \quad (3)$$

式中: A 的取值范围为 $0.4 \text{ mm} \leq A \leq 1.0 \text{ mm}$; f 的取值范围为 $300 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$.

通过式 (3) 可以优化扫描参量, 并预测焊缝形



(a) 激光区熔深占比



(b) 激光区熔宽

图 10 激光扫描线速度与激光区熔深占比和激光区熔宽的拟合关系

Fig. 10 Fitting relationship between laser oscillating speed and the penetration depth ratio of the laser zone and the weld width of the laser zone. (a) penetration depth ratio of the laser zone; (b) weld width of the laser zone

貌, 能够为铝合金扫描激光—电弧复合焊实际应用提供有价值的参考.

3 结论

(1) 铝合金高频振荡扫描激光—电弧复合焊接时, 实现焊接过程稳定、焊缝成形良好、激光能量利用率高的优化扫描参量范围为 $0.4 \text{ mm} \leq A \leq 1.0 \text{ mm}$ 且 $300 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$.

(2) 随着 A 和 f 提高, 激光能量分布均匀性提高, 焊接稳定性增强. 当 A 和 f 增加至 1.5 mm 和 300 Hz 以上时, 激光能量显著降低, 不足以形成匙孔, 造成熔池深度下降、波动加剧.

(3) 在优化参数范围内, 建立了高频振荡扫描激光—电弧复合焊缝形貌特征的预测模型, 预测精度达到 89.8% , 拟合程度良好.

参考文献

- [1] Heinz A, Haszler A, Keidel C, *et al.* Recent development in aluminium alloys for aerospace applications[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 280(1): 102 – 107.
- [2] 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.
Zhou Litao, Wang Xuyou, Wang Wei, *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.
- [3] Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. *Materials and Design*, 2014, 56: 862 – 871.
- [4] 刘军, 孟宪国, 李晨曦, 等. 2219-T651 铝合金激光摆动焊接接头微观组织和力学性能 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(4): 7 – 13.
Liu Jun, Meng Xianguo, Li Chenxi, *et al.* Microstructure and properties of 2219-T651 aluminum alloy welded joint by laser oscillating welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(4): 7 – 13.
- [5] Liu T, Mu Z, Hu R, *et al.* Sinusoidal oscillating laser welding of 7075 aluminum alloy: Hydrodynamics, porosity formation and optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 346 – 358.
- [6] 余世文, 周昆, 张威, 等. 6.0mm 厚 5183 铝合金激光摆动焊接工艺研究 [J]. *激光技术*, 2018, 42(2): 254 – 258.
Yu Shiwen, Zhou Kun, Zhang Wei, *et al.* Laser-weaving welding of 5183 aluminum alloy plate with 6.0mm thickness[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(2): 254 – 258.
- [7] Fetzer F, Sommer M, Weber R, *et al.* Reduction of pores by means of laser beam oscillation during remote welding of AlMg-Si[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 108: 68 – 77.
- [8] Berend O, Haferkamp H, Meier O, *et al.* High-frequency beam oscillating to increase the process stability during laser welding with high melt pool dynamics[C]//*International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. AIP Publishing, 2005: 1032 – 1041.
- [9] Hagenlocher C, Sommer M, Fetzer F, *et al.* Optimization of the solidification conditions by means of beam oscillation during laser beam welding of aluminum[J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 1178 – 1185.
- [10] Schultz V, Seefeld T, Vollertsen F. Gap bridging ability in laser beam welding of thin aluminum sheets[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 545 – 553.
- [11] Wang L, Liu Y, Yang C, *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.
- [12] Cai C, Li L, Tao W, *et al.* Effects of weaving laser on scanning laser-MAG hybrid welding characteristics of high-strength steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 22(2): 104 – 109.
- [13] Chen C, Xiang Y, Gao M. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of dissimilar aluminum alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 60: 180 – 187.
- [14] Meng Y, Lu Y, Li Z, *et al.* Effects of beam oscillation on interface layer and mechanical properties of laser-arc hybrid lap welded Al/Mg dissimilar metals[J]. *Intermetallics*, 2021, 133: 1 – 8.
- [15] Wang Z, Oliveira J P, Zeng Z, *et al.* Laser beam oscillating welding of 5A06 aluminum alloys: Microstructure, porosity and mechanical properties[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 111: 58 – 65.
- [16] Hao K, Li G, Gao M, *et al.* Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 77 – 83.
- [17] Wang L, Gao M, Zeng X. 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.
- [18] Ono M, Shinbo Y, Yoshitake A, *et al.* Development of laser-arc hybrid welding[J]. *NKK Technical Review*, 2002, 86: 70 – 74.
- [19] Acherjee B. Hybrid laser arc welding: State-of-art review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 60 – 71.
- [20] Zhang C, Gao M, Wang D Zh, *et al.* Relationship between pool characteristic and weld porosity in laser arc hybrid welding of AA6082 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240: 217 – 222.
- [21] Mahrle A, Beyer E. Modelling and simulation of the energy deposition in laser beam welding with oscillatory beam deflection[C]//*Proceedings of the 26th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. LIA Publishing, 2007: 714 – 723.
- [22] Zhang C, Yu Y, Chen C, *et al.* Suppressing porosity of a laser keyhole welded Al-6Mg alloy via beam oscillation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 278: 116382.

第一作者: 苗晓军, 本科, 工程师; 主要研究方向为金属材料成形; Email: miaoxj519@126.com.

通信作者: 高明, 博士, 教授; Email: mgao@mail.hust.edu.cn.

(编辑: 王盈盈)