

引文格式: 魏伟, 莫鸿源, 李光先, 等. 激光焊接熔池表面氧化物运动观测分析及周期性涡流变化探究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(4): 25010028.

WEI Wei, MO Hongyuan, LI Guangxian, et al. Observation and analysis of oxide movement on laser welding pool surface and study of periodic eddy current variation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(4): 25010028.

激光焊接熔池表面氧化物运动观测分析及周期性涡流变化探究

魏伟^{1,2}, 莫鸿源¹, 李光先¹, 孔前程¹, 彭重清¹, 王伟¹, 龙雨^{1,2}

(1. 广西大学, 南宁 530004;

2. 省部共建特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室, 南宁 530004)

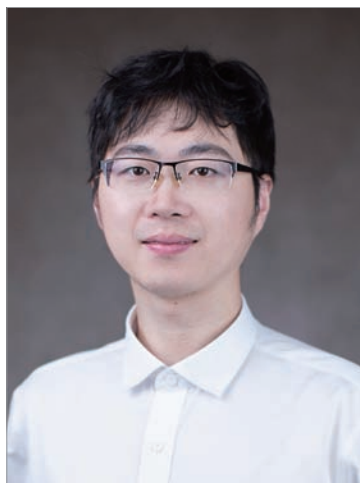
[摘要] 激光焊接凭借高焊缝质量、高加工效率及低热影响区等优势, 已在航空航天、汽车等领域广泛应用。焊接熔池表面波动直接影响焊缝成形质量, 因此探究浅层熔体的流动行为对了解焊接过程具有重要意义。本文在焊接过程中引入少量氧化铝颗粒(Al_2O_3)作为示踪剂, 结合图像处理与机器学习方法, 提取并分析了熔池表面氧化物的运动轨迹, 量化了不同熔透阶段下表面熔体的流速变化。通过关联温度、飞溅及熔池光斑频率等特征, 揭示了完全熔透阶段熔池表面两侧涡流的周期性变化规律, 并阐明其分别与飞溅行为及锁孔贯穿现象之间的关联。本研究对分析熔池浅层表面的流动和优化焊接表面质量具有重要参考价值。

关键词: 激光焊接; 熔池流动; 熔池监测; 图像处理; 机器学习

中图分类号: V261.8; TG4

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010028



魏伟

讲师, 博士, 主要从事增材制造和激光加工在线监测研究。

激光焊接因其高焊缝质量、高加工效率及低热影响区等优势, 广泛应用于金属加工领域。焊接过程中, 熔池作为激光与材料相互作用的核心区域, 其动态行为蕴含关键物理信息, 对焊接稳定性控制与焊缝质量分析具有重要意义^[1]。

目前对激光焊接熔池运动的研究主要依赖于仿真模拟^[2-6]。相比于粉末材料, 金属板材加工熔池中难以引入高熔点示踪颗粒进行直接运动观测。为此, 部分研究采用替代材料进行模拟, Limmaneevichitr 等^[7]选择用性能类似液态金属的低熔点透明材料 NaNO_3 来模拟金属熔池, 并通过添加颗粒示踪剂来反映熔池内部的

流动。Anh 等^[8]则利用双 X 射线系统观测了等离子体电弧焊中熔池的对流模式。

此外, 多项研究通过直接观测金属熔池对其运动进行描述分析^[9-10]。Xie 等^[11]通过分析熔池表面波动及流体撞击行为推断熔池流向, 并与仿真结果相互验证。Xiao 等^[12]结合红外与高速摄像, 观测了不同传导模式下熔池凝固时气泡的运动, 并阐述了不同熔体的驱动机制。Peng 等^[13]通过高速摄像机和 X 射线透射成像系统, 监测了铝合金熔池内示踪剂的运动。Soundarapandian 等^[14]同样通过 X 射线成像技术, 实时监测了粉末床增材制造加工过程中熔池内部的

收稿日期: 2025-03-06; 退修日期: 2025-05-07; 录用日期: 2025-05-19

基金项目: 广西自然科学基金(2025GXNSFBA069481); 广西重点研发项目(桂科 AB23026101); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD23026149)

通信作者: 龙雨, 教授, 博士, 主要从事增材制造、激光制造、高端装备、工业软件等研究。

流动, Zhao 等^[15] 则通过粒子图像测速技术 (PIV) 观测了 GTA 焊接中熔池氧化物颗粒的运动方式。

尽管有较多的研究对多种材料和加工方式下的熔池流动进行了观测, 但是仍然缺少对实时加工过程中熔池的详细运动过程的描述, 也少有文献对不同熔透阶段的熔池表面运动规律进行量化对比分析。为此, 本文通过引入少量氧化铝颗粒 (Al_2O_3) 实现熔池表面运动可视化, 系统分析并对比了不同熔透阶段表面运动模式, 并对其运动速度进行了定量计算。结合红外测温数据与材料成分信息, 进一步揭示了过熔透阶段熔池浅层表面熔体与氧化物周期性运动规律的成因。

1 试验及方法

1.1 试验设备及材料

本研究采用的试验设备如图 1(a) 所示, 其由高功率连续光纤激光器 RFL-C1500 W~RFL-C6000 W (Raycus)、激光焊接头 LW403A (Ospri, 准直焦距 100 mm、聚焦焦距 200 mm)、高速摄像机 X213M-64G (千眼狼)、红外测温仪 FLIR-A615 及其相关配件组成。

本试验采用激光工艺参数为激光功率 1500 W、焊接速度 15 mm/s。试验基材选用 100 mm × 50 mm 的 Q345 钢板 (表 1), 将其加工为 4 段

不同厚度的阶梯结构, 具体尺寸为: 0~30 mm 段厚度为 4 mm; 30~60 mm 段厚度为 3 mm; 60~90 mm 段厚度为 2 mm; 为保持整体平整, 末端 90~100 mm 段厚度为 4 mm。预试验表明, 在上述工艺参数下, 4 mm、3 mm 与 2 mm 区段能分别产生未熔透、部分熔透与完全熔透 3 种熔透状态。

试验采用激光焊接头位置固定, 工件随工作台运动的方式, 确保焊接熔池始终处于高速摄像机的固定视野内。为了观测熔池流动, 将直径 45 μm 球形 Al_2O_3 颗粒预先布置于未熔透区域的激光焊接路径上, 形成一条宽度为 1 mm 的添加带 (图 1(b))。激光扫描至此区域时, Al_2O_3 颗粒熔化, 以极小的斑块状浮于熔池表面, 随熔体表面的流动而运动, 从而实现对后续熔池状态的长时间示踪。采用单次的布置方式, 可在确保示踪效果的同时, 最大限度降低对激光吸收率及实际焊接过程的干扰。

图像采集系统布置如下: 高速摄像机架设于焊接路径侧方, 镜头距激光作用点约 300 mm, 并与水平面呈 45° 夹角。采用辅助激光器对监测区域进行补光, 设置摄像机帧率为 3000 帧/s, 曝光时间为 10 μs , 以清晰捕获熔池动态。后续分析中, 选取了示踪氧化物形变小、运动轨迹清晰的图像序列, 以反映熔池表面的真实流动行为。

1.2 试验数据处理

图像处理过程如图 2 所示。首先, 采用 Zero-DCE 图像增亮网络^[16] 与去雾算法对获取的熔池图像进行预处理, 以提升图像质量。随后, 选取固定区域作为 ROI 以排除反光颗粒、飞溅等干扰, 并使用 Labelme 标注数据构建训练集。最终, 基于 U-Net 网络^[17] 训练分割实现对示踪氧化物的精准分割。结合 Python 中 Opencv 库图像处理技术, 对生成的 Label 中所有非 0 像素进行统计, 计算每一个像素的 x 、 y 坐标, 取其平均值作为中心坐标值, 用于后续的运动计算分析, 以及实现其运动的可视化。

2 试验结果

2.1 未熔透阶段的熔池和示踪氧化物运动

在激光功率 1500 W、焊接速度 15 mm/s 的加工条件下, 厚度 4 mm 的 Q345 钢板未出现熔透现象。图 3 所示为氧化物在未熔透熔池的运动情况。

未熔透阶段的熔池受堆积在尾部的凝固金属影响, 呈尾部高、头部低的形态, 整体长度较短。此阶段重力带来的影响较大, 氧化物和液态金属难以运动到熔池尾部, 外轮廓变化剧烈。同样的, 该阶段熔池表面振荡大, 示踪氧化物在垂直熔池运动方向波动明显, 运动区域较大; 而沿着熔池运动方向的运动较小, 主要运动区

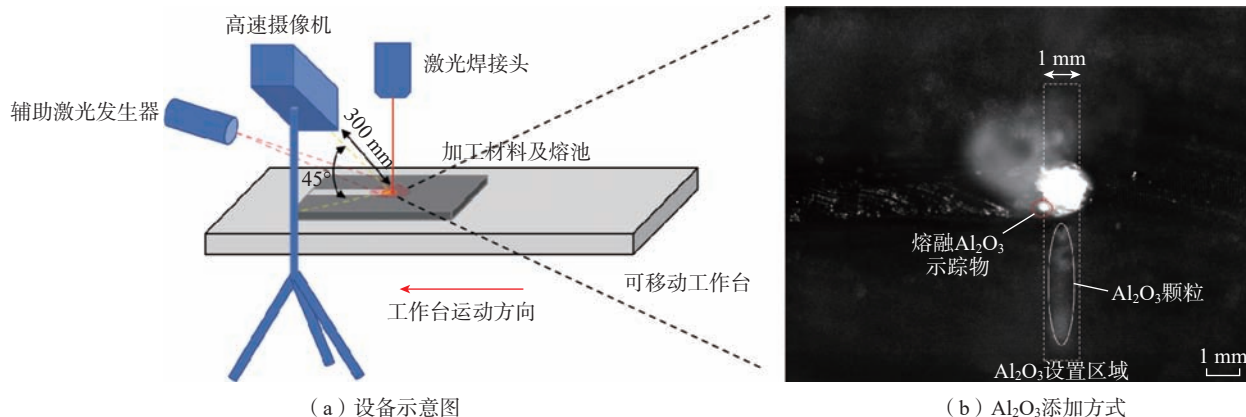


图 1 试验设备示意图及 Al_2O_3 添加方式
Fig.1 Schematics of the test equipment and the addition method of Al_2O_3 particles

域靠近熔池锁孔光斑后方,整体运动为垂直于熔池运动方向的旋转运动。

2.2 部分熔透阶段的熔池和示踪

氧化物运动

在所选试验参数下,厚度 3 mm

表 1 Q345 材料成分

Table 1 Q345 material composition %

C	Mn	Si	P	S
≤0.20	≤1.70	≤0.50	≤0.035	≤0.035

的 Q345 钢板实现部分熔透,在此条件下,氧化物在部分熔透阶段熔池表面的运动情况如图 4 所示。

部分熔透阶段的熔池长度也较短,其形态为前中部较宽、尾部收束。部分金属凝固堆积在材料背面,使正面焊缝高度变低,熔池尾部与头部高低差减小。此阶段重力作用的影响略微降低,熔池长度增加,表面振荡减弱,示踪氧化物在垂直焊接方向运

动减弱,而沿焊接方向的运动区域扩大,熔池整体更趋近圆形,氧化物主要运动区域集中于熔池中部两侧。

2.3 完全熔透阶段的熔池和示踪

氧化物运动

在所选试验参数下,厚度 2 mm 的 Q345 钢板实现完全熔透,示踪氧化物的存在时间最长,运动具有较强的规律。示踪氧化物的运动区域主要集中于熔池两侧,仅在少数情况

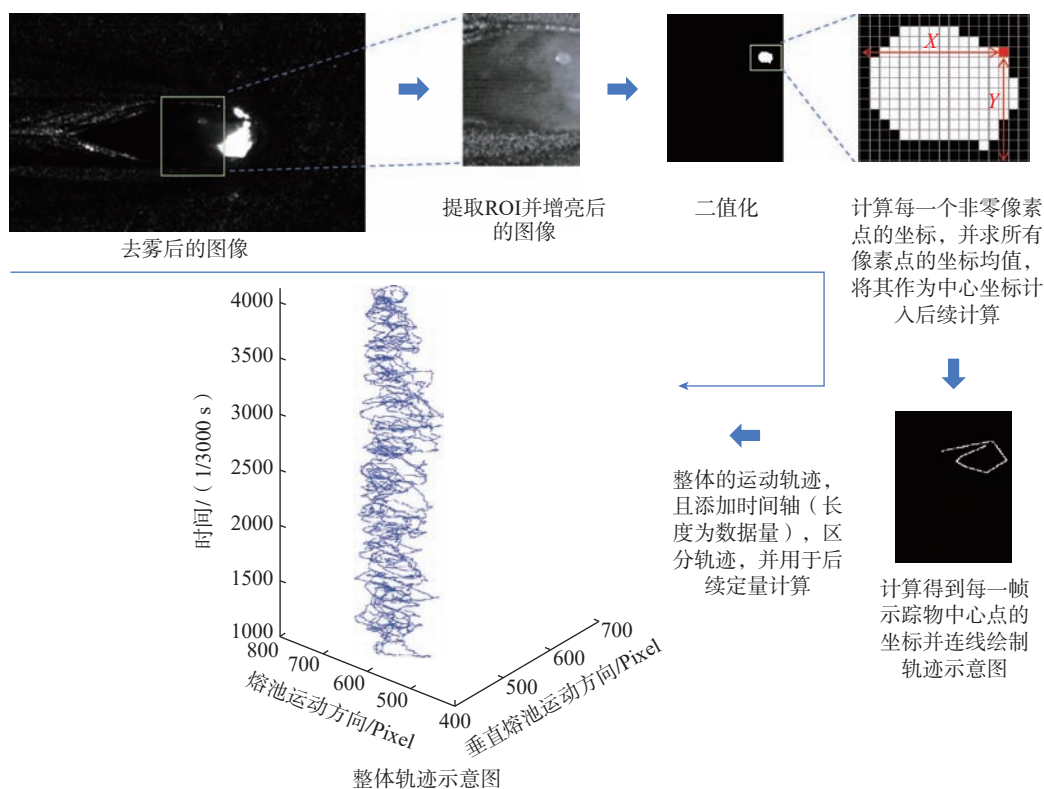
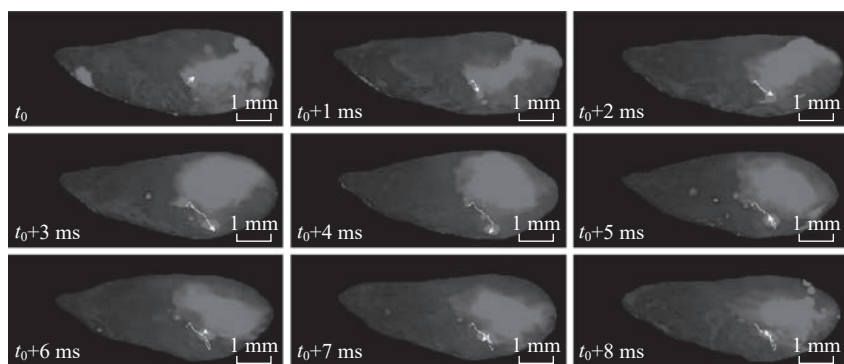
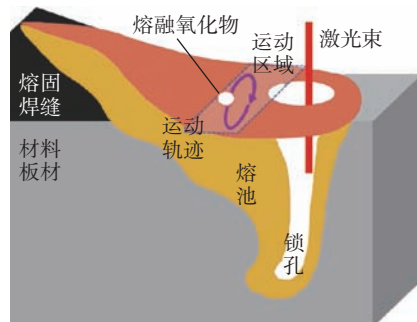


图 2 图像处理过程

Fig.2 Image processing procedure



(a) 未熔透阶段氧化物运动情况



(b) 未熔透阶段熔池示意图

图 3 未熔透阶段的氧化物运动情况及熔池示意图

Fig.3 Oxide movement and schematic of molten pool during incomplete penetration stage

下,受扰动影响,氧化物会在靠近光斑纵向区域跨越熔池中轴发生半区转移。下半区运动轨迹与上半区相似,呈类椭圆形,但转向相反,为顺时针方向。其在另一侧的运动轨迹如图5所示。

在完全熔透阶段,由于更多熔融金属从板材下方流失,导致凝固焊缝及熔池整体高度低于材料表面,熔池尾部堆积现象消失。液态金属向尾部流动的距离增加,使得熔池整体长度显著大于前两个阶段,表面流动也更为稳定。在此条件下,示踪氧化物沿熔池两侧做周期性椭圆回转运动,其整体横向运动范围较部分熔透阶段明显扩大。

在该阶段中,示踪氧化物进行类椭圆形运动时,轨迹并不恒定,多以小半径运动为主,即在进行数个小半

径回转运动后,进行一次或数次大半径的回转运动,之后运动到锁孔光斑后方区域处继续进行小半径回转运动。该现象产生的具体原因将在3.3节进行详细分析讨论。

3 数据分析与讨论

3.1 各熔透阶段示踪氧化物运动速度计算

根据连续帧间示踪氧化物中心点的位移与采样时间间隔,计算其平均运动速度。由于相机与材料呈 45° 倾角,图像中垂直于焊接方向的运动距离存在投影畸变,需进行比例校正,以获得实际运动速度,即

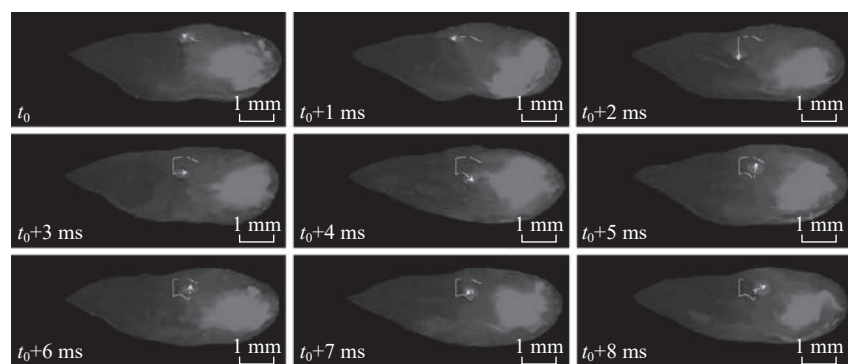
$$v_s = \frac{\Delta N_y}{\Delta t} \cdot \frac{h_s}{N_h \sin \theta} \quad (1)$$

式中, ΔN_y 为氧化物在熔池垂直方向的像素变化量; Δt 为两帧之间的时

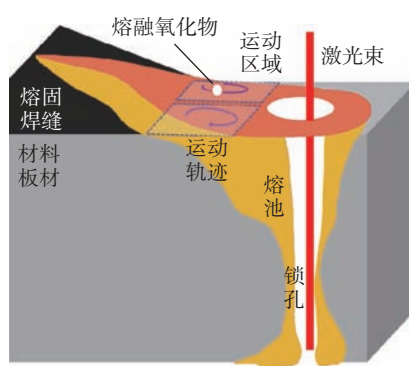
间; h_s 为图片数据中熔池宽度的像素均值; N_h 为实际焊缝宽度的3次测量均值; θ 为拍摄时相机和板材熔池之间的夹角。

图6(a)所示为各阶段部分数据。换算后结果表明,未熔透阶段的示踪氧化物整体运动速度最快,均值为 0.519 m/s ; 部分熔透阶段的示踪氧化物运动速度降低,均值为 0.401 m/s ; 熔透阶段中,尽管氧化物的横向运动范围扩大,但平均速度最低,为 0.274 m/s ,如图6(b)所示。

分析结果显示,各熔透阶段中示踪氧化物平均运动速度较高的区域主要集中于远离锁孔的外侧区域,而熔池后部回流向锁孔的运动速度相对较慢。该现象归因于锁孔区域金属蒸气喷流与前壁部分熔体向后流动的共同作用,这一复合作用使示踪



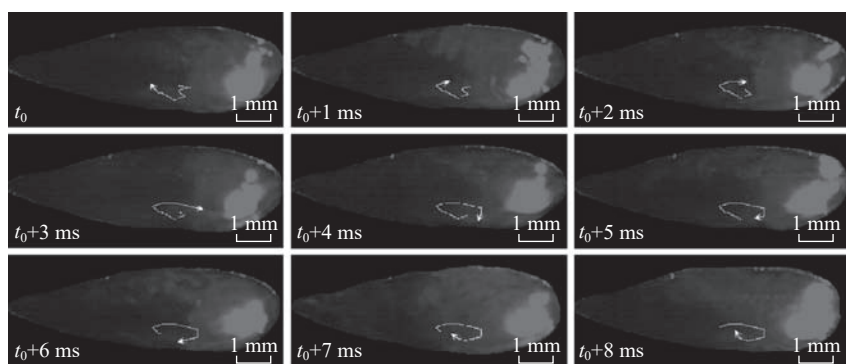
(a) 部分熔透阶段氧化物运动情况



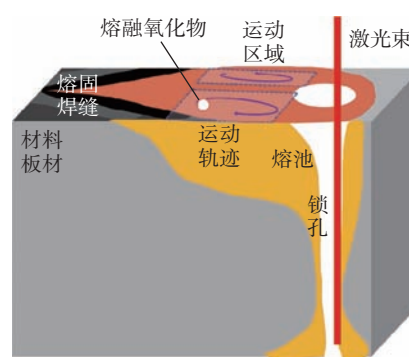
(b) 部分熔透阶段熔池示意图

图4 部分熔透阶段氧化物运动情况及熔池示意图

Fig.4 Oxide movement and schematic of molten pool during partial penetration stage



(a) 完全熔透阶段氧化物运动情况



(b) 完全熔透阶段熔池示意图

图5 完全熔透阶段氧化物运动情况及熔池示意图

Fig.5 Oxide movement and schematic of molten pool during complete penetration stage

氧化物获得较高初始速度。而在熔体回流过程中,逆向马兰戈尼力与金属蒸气剪切力相互对抗,导致氧化物运动速度减缓。

3.2 部分和完全熔透阶段的表面涡流方向

如2.2节与2.3节所述,示踪氧化物在部分熔透与完全熔透阶段的运动均呈现显著规律性。本节通过观测完全熔透阶段示踪氧化物的运动规律,探究熔池表面流动行为。

如图7所示,在完全熔透阶段,示踪氧化物运动区域位于熔池锁孔光斑后与距离熔池尾部1/3位置之间,运动轨迹呈椭圆形,在上半区以逆时针方向运动,在下半区则相反。该运动区域可以划分为3类:区域1

为示踪氧化物切换运动区域所经过的区域,处于光斑后方附近窄长方形区域,运动轨迹和方向以紫色箭头标记;区域2为常见小半径类椭圆运动所经过的区域,运动轨迹和方向以蓝色箭头标记;区域3为间歇性进行的大半径类椭圆所经过的区域,运动轨迹和方向以红色箭头标记。

示踪氧化物在浅层熔体上的流动方向与马兰戈尼力高度相关,因此,针对区域2和区域3的涡流运动现象,使用红外测温仪获取熔池表面温度并进行对比分析。

对于大多数金属和合金而言,其表面张力的温度系数为负值,熔池表面熔体会在马兰戈尼力作用下,从高温区域流向低温区域,即从锁孔流向

熔池尾部。除此之外,金属蒸气所带来的剪切力也朝向熔池尾部。值得注意的是,已有研究中,激光增材制造中熔池表面熔体向外流动,而本研究中样品的熔池表面运动与已有文献描述的流动方向相反,即从熔池尾部向锁孔方向流动。部分研究表明,熔池表面的熔体流向会因熔融金属中表面活性元素的细微变化而发生转变。例如,在铁基材料中,当硫元素质量分数超过 3×10^{-5} 、氧元素质量分数超过 1.7×10^{-5} 时,即达到对流方向转变的临界值,熔池流动遵循逆向马兰戈尼效应^[18-20]。

本研究采用的Q345钢,其硫元素质量分数 $\leq 3.50 \times 10^{-4}$,高于引发马兰戈尼力方向转变的临界值。因此,马

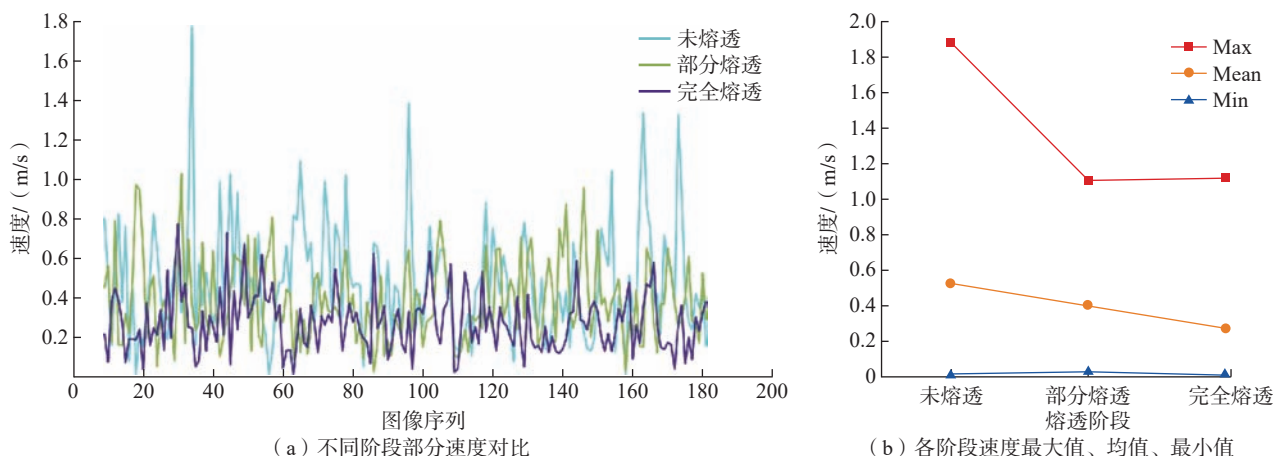


图6 各阶段速度对比及速度值
Fig.6 Comparison of velocity and velocity value at stages various

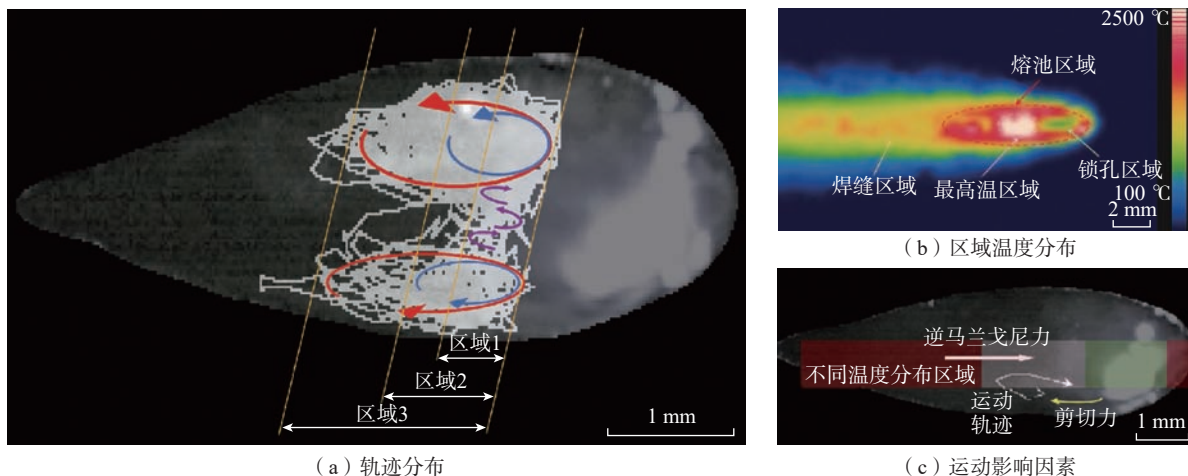


图7 熔池中示踪氧化物的轨迹分布、区域温度分布及运动影响因素

Fig.7 Trajectory distribution of tracer oxides in the molten pool, regional temperature distribution, and influencing factors of oxide movement

兰戈尼力方向发生逆转,由低温区域指向高温区域,进而促使氧化物在熔池上半区为逆时针运动、下半区为顺时针运动。

3.3 完全熔透阶段的涡流周期性频率变化与锁孔光斑面积、飞溅变化对比

为探究完全熔透阶段氧化物运动的周期性规律及其频率成因,将氧化物周期运动频率与锁孔光斑变化频率及飞溅产生频率进行对比分析。

飞溅信息提取流程,如图8所示。首先,采用去雾算法消除金属蒸气凝雾及光斑干扰,降低误判;其次,基于飞溅在图像中运动最快的特性,运用帧差法获取相邻帧之间差异显著的区域;再次,经裁剪、膨胀等预处理后,借助OpenCV中的自适应轮廓函数识别飞溅轮廓,并统计其数量与面积;最终,以飞溅总面积的像素值作为表征指标,用于后续分析。针对锁

孔光斑的处理,采用阈值分割法提取原始数据中像素值超过220的区域,并筛选出最大连通区域,以排除飞溅等因素的干扰。将飞溅数据、锁孔光斑数据的变化规律与氧化物的运动频率进行对比分析。在完全熔透阶段,对飞溅面积变化频率及氧化物在熔池运动方向上的位置信息进行快速傅里叶变换(FFT)处理,结果如图9所示。

在完全熔透阶段,锁孔光斑的振荡频率显著下降,处于130~200 Hz区间。对飞溅总面积的像素信号进行FFT分析,发现其频谱存在两个主要峰值,一个位于30~50 Hz,另一个位于150~180 Hz。与此同时,氧化物中心沿熔池运动方向的位移信号也呈现双峰特征,分别位于40~60 Hz和10~15 Hz。这两个频率分别对应熔池中两种不同尺度的周期性涡流运动,即小半径周期涡流与大半径周期变化涡流。

飞溅和氧化物位移的主要变化

频率极其接近,均在30~60 Hz,表明飞溅的产生与氧化物的周期性运动密切相关。飞溅数据中的另外一个高频分量则与完全熔透熔池锁孔光斑主要振荡频率接近,均在140~160 Hz。所以,浅层熔体随涡流向锁孔的回流可能是导致飞溅产生的主要原因。除此之外,氧化物运动频率中另一个明显的分量出现在10~15 Hz,这与观察到氧化物在做周期性小半径循环运动时(在4~6个小循环后产生大半径的循环运动)的运动频率一致。该周期性变化与上述锁孔光斑及飞溅变化频率关系较小,可能与贯穿型锁孔的动态行为有关。

4 讨论

由于完全熔透阶段是理想的焊接状态,因此需要进一步讨论完全熔透阶段表面涡流的周期性变化规律与原因。

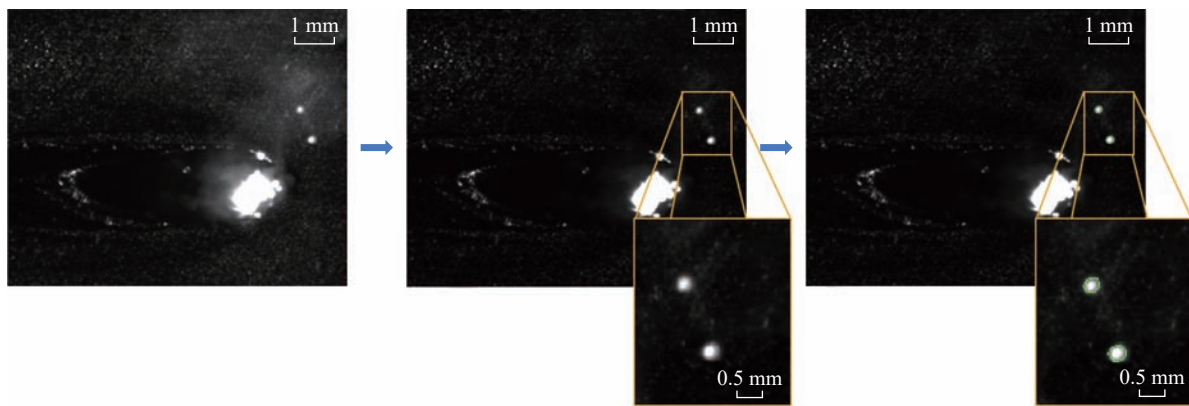


图8 飞溅数据提取流程图

Fig.8 Flowchart for spatter data extraction

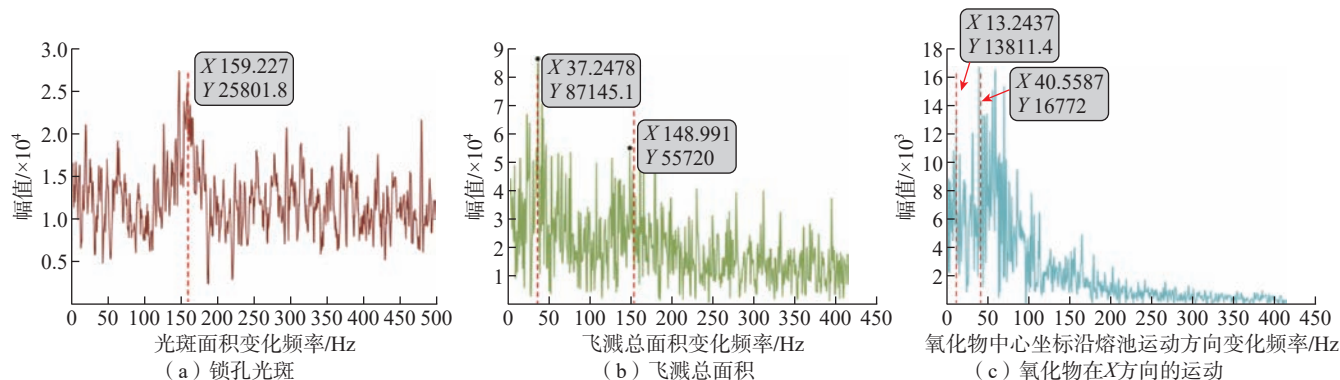


图9 完全熔透阶段FFT结果

Fig.9 FFT results in complete penetration phase

在 3.3 节中,完全熔透阶段所观测到的周期性大小涡流变化,可能与锁孔的动态振荡行为密切相关。Zhang 等^[22]的模拟研究指出,在完全熔透的准稳态熔池中,会周期性产生贯穿型锁孔,其振荡周期受激光焊接速度与光斑尺寸共同影响。

该周期性过程具体表现为:贯穿锁孔形成初期,孔周熔体持续流出,致使锁孔尺寸不断扩张;部分激光束因此直接穿透锁孔而未能与孔壁相互作用,导致能量吸收率下降;锁孔的膨胀会进一步引发板材正面和背面熔池表面隆起,此时表面张力作用增强,逐步影响熔池形貌与锁孔孔径;最终,当反冲压力无法维持锁孔继续扩张时,周围熔体在表面张力驱动下回流,促使锁孔重新闭合。上述锁孔的“形成—扩张—闭合”周期性振荡,改变了熔池内部的能量分布及流体受力状态,进而驱动了试验中观测到的大小涡流的交替演化。

本研究观察到,表面氧化物的运动模式与贯穿型锁孔的交替演化状态存在关联。当贯穿型锁孔形成时,如图 10 (a) 所示,熔池对激光能量的吸收率降低,锁孔内反冲压力减弱。此时,部分金属蒸气从板材下方逸出,残余的蒸气向上喷发,其角度偏转和剪切力较小,对表面熔体的扰动有限。因此,示踪氧化物得以维持图 7 (a) 中区域 2 所示的小半径类椭圆运动。当锁孔闭合时,如图 10 (b) 所示,贯穿锁孔底部关闭,金属蒸气无法向下逃逸,转而全部向上喷发。同时,由于激光能量吸收效率恢复,金属蒸气产量与锁孔内部压力显著增强,共同作用于熔池表面,产生更大的剪切力。该剪切力显著推动了示踪氧化物向熔池尾部运动,使其运动轨迹半径增大,呈现为图 7 (a) 中区域 3 所示的大半径类椭圆运动。根据其运动的不同阶段,本研究将其划分为 S1、S2/S2'、S3/S3'、S4/S4' 4 段,如图 11 所示。

图 12 (a) 所示为第一段 (S1),示踪氧化物在锁孔后方,远离中轴向边缘方向运动。锁孔处喷发的金属蒸气为表面熔体和氧化物提供了远离锁孔的剪切力,使向锁孔回流的氧化物发生转向,从中轴向熔池两侧边缘运动。

图 12 (b) 所示为第二段 (S2/S2'),示踪氧化物抵达熔池边缘后,受浮力作用难以向下运动。同时,表面熔体在金属蒸气剪切力及前端熔体环流共同作用下,沿边缘向熔池尾部运动。当贯穿型锁孔关闭时,能量吸收与内部压力骤增,引发更强的反向金属蒸气喷发,致使示踪氧化物向后运动距离显著增加。

图 12 (c) 所示为第三段 (S3/S3'),示踪氧化物在熔池后 1/3 的位置向中轴方向旋转。此时熔池中心温度最高,因材料含有较多的硫,氧元素改变了熔池表面的张力系数,导

致马兰戈尼力发生改变,使表面熔体从熔池边缘向中心运动。在 S2/S2' 后段,在内部熔体的影响下向中轴方向回流。

图 12 (d) 所示为第四段 (S4/S4'),表面熔体最终克服减弱的金属蒸气剪切力,重新沿熔池轴线向锁孔后方区域回流,形成闭合循环。该流动主要由逆向马兰戈尼力驱动,即熔池尾部区域因轻微氧化形成表面张力梯度,促使熔体流向熔池中心高温区。

Anh 等^[8]同样认为,第四阶段靠近熔池尾部区域被空气中非常少量的氧气轻微氧化,形成张力差,马兰戈尼力方向发生改变而转向锁孔,从而克服逐渐削弱的金属蒸气带来的力。当贯穿型锁孔形成时,锁孔后方部分熔体会通过孔壁流向板材另一侧,使更多表面熔体涌向锁孔,以补充熔体质量。

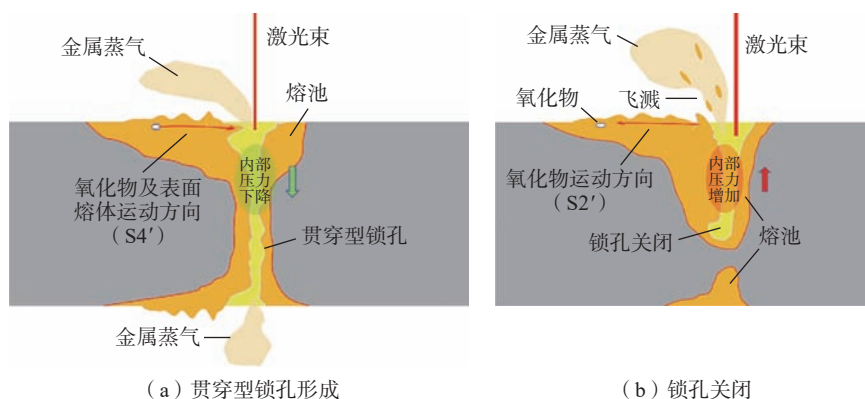


图 10 贯穿型锁孔对氧化物运动影响示意图

Fig.10 Schematic diagram of the effect of through-type keyhole on oxide motion

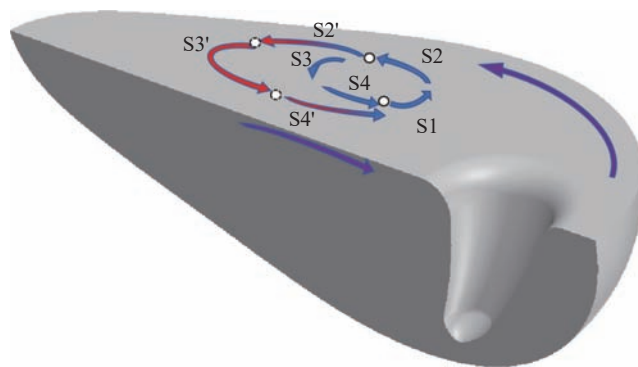


图 11 完全熔透阶段熔体流动示意图

Fig.11 Schematic diagram of molten metal flow during complete penetration stage

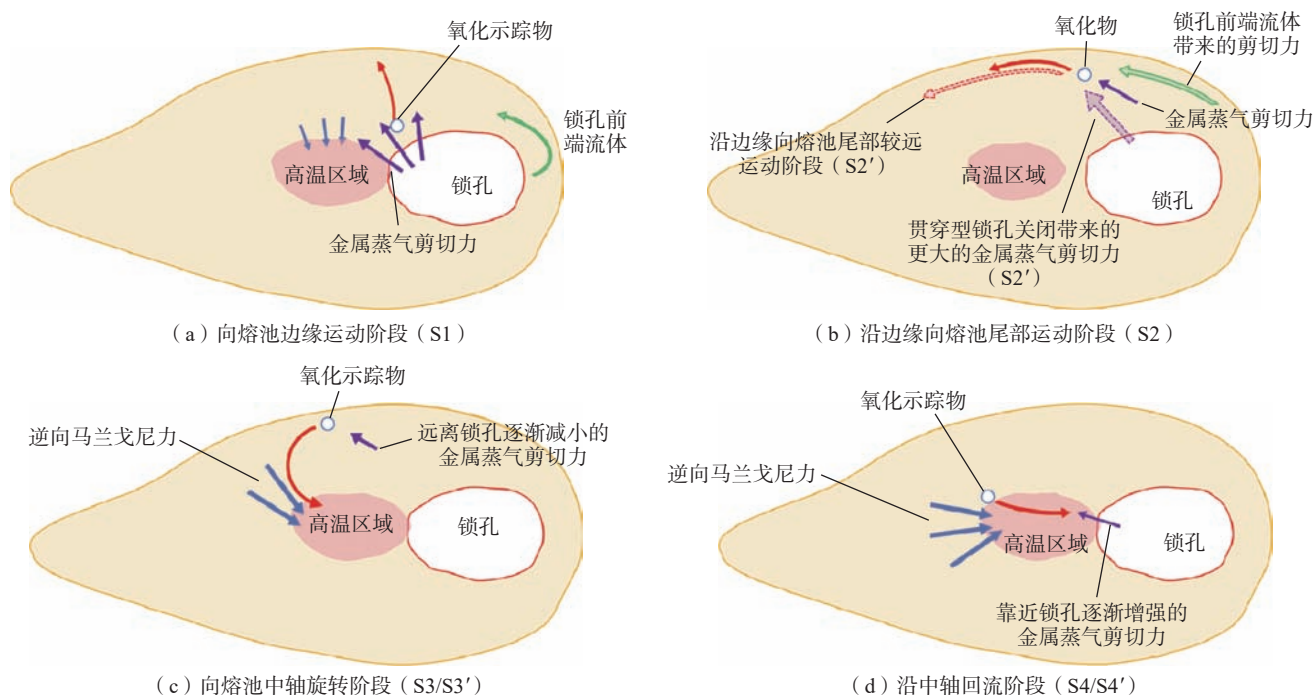


图 12 完全熔透各阶段熔体流动及氧化物受力示意图

Fig.12 Schematic of molten metal flow and oxide forces in complete penetration various stages

5 结论

本研究采用高速摄像技术,系统观测了不同熔透阶段熔池表面示踪氧化物的运动行为。基于神经网络与图像处理算法,实现了对氧化物轨迹的语义分割与定量分析,从而直观地揭示了熔池浅层熔体的流动特性。进一步地,结合图像中的其他可视信息,重点分析了过熔透阶段氧化物周期性运动的规律。主要现象及结论如下。

(1) 不同熔透阶段运动规律: 在未熔透阶段,焊缝凝固部分和熔池高低差明显,在重力影响下,熔池较短,表面熔体波动较大,示踪氧化物主要表现为垂直方向的往复振荡运动;在部分熔透阶段,重力影响减弱,熔池表面熔体波动变缓,示踪氧化物逐渐呈现出椭圆形的规律运动轨迹;在过熔透阶段,凝固焊缝与熔池近乎水平,受重力影响,熔池相对稳定,示踪氧化物呈现出明显的周期性交替的大小类椭圆形运动轨迹。在3个阶段,运动方向与元素成分差异引起的逆马兰戈尼力有关,均呈现为在熔

池上半区逆时针运动,在熔池下半区顺时针运动。

(2) 不同熔透阶段运动速度: 未熔透阶段示踪氧化物和熔池中段表面熔体的运动速度最快,平均速度为 0.519 m/s,部分熔透阶段平均运动速度为 0.401 m/s,完全熔透阶段平均速度最低为 0.274 m/s,与观测到的熔池表面波动程度一致。

(3) 过熔透阶段运动规律: 示踪氧化物于熔池中段呈现明显的大、小循环交替运动,此现象与中段涡流的周期性演化直接相关。其中,小半径循环频率(40~60 Hz)与飞溅产生频率相近,表明其可能是飞溅的来源之一;而大半径循环频率(10~15 Hz)则可能与贯穿型锁孔的周期性形成有关,两者均与锁孔自身振荡关联较弱。

参考文献

- [1] 付艳想,卢聪,叶小军,等.激光材料加工熔池流动行为实验研究进展[J].机械工程学报,2023,59(5): 291-306.
- FU Yanshu, LU Cong, YE Xiaojun, et al. Review of experimental study on melt pool flow

dynamics during laser material processing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 291-306.

[2] ZHANG C, LI X W, GAO M. Effects of circular oscillating beam on heat transfer and melt flow of laser melting pool[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4): 9271-9282.

[3] GEIGER M, LEITZ K H, KOCH H, et al. A 3D transient model of keyhole and melt pool dynamics in laser beam welding applied to the joining of zinc coated sheets[J]. Production Engineering, 2009, 3(2): 127-136.

[4] GAO Q Y, YAN T Y, LING W L, et al. Effect of vapor/plasma-liquid flow behavior on the keyhole oscillation in laser-MIG hybrid welding of Invar alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107054.

[5] MAYI Y A, DAL M, PEYRE P, et al. Physical mechanisms of conduction-to-keyhole transition in laser welding and additive manufacturing processes[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108811.

[6] WANG L, ZHANG Y M, CHIA H Y, et al. Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing[J]. NPJ Computational Materials, 2022, 8: 22.

[7] LIMMANEEVICHITR C, KOU S. Visualization of Marangoni convection in simulated weld pools: Marangoni convection

resembling that in weld pools is revealed by flow visualization[J]. Welding Journal, 2000, 79(5): 126s–135s.

[8] VAN ANH N, TASHIRO S, VAN HANH B, et al. Experimental investigation on the weld pool formation process in plasma keyhole arc welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(1): 015204.

[9] ZHU B Q, ZHANG G L, ZOU J L, et al. Melt flow regularity and hump formation process during laser deep penetration welding[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 139: 106950.

[10] AUCOTT L, DONG H B, MIRIHANAGE W, et al. Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals[J]. Nature Communications, 2018, 9: 5414.

[11] 谢小珑, 李权洪, 母中彦, 等. 304 不锈钢扫描激光焊接的熔池流动行为及焊缝成形研究[J]. 电焊机, 2021, 51(1): 42–48, 120.

XIE Xiaolong, LI Quanhong, MU Zhongyan, et al. Study on flow behavior and weld forming of 304 stainless steel by scanning laser welding[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(1): 42–48, 120.

[12] XIAO X F, FU Y S, YE X J, et al. Analysis of heat transfer and melt flow in

conduction, transition, and keyhole modes for CW laser welding[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 120: 103996.

[13] PENG J, LI L Q, LIN S Y, et al. High-speed X-ray transmission and numerical study of melt flows inside the molten pool during laser welding of aluminum alloy[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(1): 1409872.

[14] SOUNDARAPANDIYAN G, LEUNG C L A, JOHNSTON C, et al. In situ monitoring the effects of Ti6Al4V powder oxidation during laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 190: 104049.

[15] ZHAO C X, VAN STEIJN V, RICHARDSON I M, et al. Unsteady interfacial phenomena during inward weld pool flow with an active surface oxide[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2009, 14(2): 132–140.

[16] GUO C, LI C, GUO J, et al. Zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement[C//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle, 2020.

[17] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C//Medical Image

Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Cham: Springer, 2015: 234–241.

[18] MISHRA S, LIENERT T J, JOHNSON M Q, et al. An experimental and theoretical study of gas tungsten arc welding of stainless steel plates with different sulfur concentrations[J]. Acta Materialia, 2008, 56(9): 2133–2146.

[19] ZHAO C X, KWAKERNAACK C, PAN Y, et al. The effect of oxygen on transitional Marangoni flow in laser spot welding[J]. Acta Materialia, 2010, 58(19): 6345–6357.

[20] YU T, ZHAO J D. Quantifying the mechanisms of keyhole pore evolutions and the role of metal-vapor condensation in laser powder bed fusion[J]. Additive Manufacturing, 2023, 72: 103642.

[21] LI S C, CHEN G Y, KATAYAMA S, et al. Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding[J]. Applied Surface Science, 2014, 303: 481–488.

[22] ZHANG L J, ZHANG J X, GUMENYUK A, et al. Numerical simulation of full penetration laser welding of thick steel plate with high power high brightness laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1710–1720.

Observation and Analysis of Oxide Movement on Laser Welding Pool Surface and Study of Periodic Eddy Current Variation

WEI Wei^{1,2}, MO Hongyuan¹, LI Guangxian¹, KONG Qiancheng¹, PENG Zhongqing¹,
WANG Wei¹, LONG Yu^{1,2}

(1. Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. State Key Laboratory of Featured Metal Materials and Life-Cycle Safety for Composite Structures,
Nanning 530004, China)

[ABSTRACT] Laser welding has been widely used in aerospace automotive and other fields due to its advantages of high weld seam quality, high processing efficiency, and low heat-affected zone. During the welding process, fluctuations on the surface of the molten pool directly affect the quality of the weld formation, making it significant to investigate the flow behavior of the shallow melt. In this study, a small amount of aluminum oxide (Al_2O_3) particles was introduced as tracers during welding. By combining image processing and machine learning methods, the motion trajectories of surface oxides in the molten pool were extracted and analyzed, quantifying the changes in surface melt flow velocity at different penetration stages. By correlating features such as temperature, spatter, and molten pool spot frequency, the periodic variation patterns of vortices on both sides of the molten pool surface during complete penetration stage were revealed, and their respective correlations with spatter behavior and keyhole breakthrough phenomena were illustrated. This study provides valuable references for analyzing the surface flow of shallow molten pools and optimizing weld surface quality.

Keywords: Laser welding; Molten pool flow; Molten pool monitoring; Image processing; Machine learning

(责编 阳光)