

引文格式:马超,刘云浩,李鹏,等.送丝速度对镁合金激光-MIG复合焊接过程熔滴过渡行为的影响研究[J].航空制造技术,2025,68(9):71-76.

MA Chao, LIU Yunhao, LI Peng, et al. Effect of wire feed rate on transition behavior of molten droplets during Laser-MIG hybrid welding for magnesium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(9): 71-76.

送丝速度对镁合金激光-MIG 复合焊接过程熔滴过渡行为的影响研究*

马 超¹,刘云浩¹,李 鹏²,夏佩云³,赵艳秋¹,占小红¹

(1. 南京航空航天大学,南京 211106;

2. 中国航天科技集团有限公司上海航天技术研究院第八〇二研究所,上海 201204;

3. 上海航天设备制造总厂有限公司,上海 200245)

[摘要] 针对镁合金激光-MIG复合焊接稳定性提升需求,开展了复合激光焊接过程熔滴过渡行为实时监测试验,对比分析了激光-MIG复合焊接与传统MIG焊接过程的熔滴过渡行为,并研究了送丝速度对熔滴形态与过渡频率的影响。研究表明,激光热源的加入可以有效提升电弧焊接熔滴过渡稳定性,当电弧功率达到2400 W左右时,镁合金激光-MIG复合焊接过程中熔滴呈滴状过渡。送丝速度的改变对熔滴过渡形式无显著影响,但送丝速度的增大有助于压缩电弧,提升熔滴过渡的稳定性;此外,送丝速度过大极易导致熔滴尺寸过大、熔滴过渡频率降低。

关键词:激光-MIG复合焊接;镁合金;熔滴过渡行为;图像处理;送丝速度

中图分类号:V26;TG4

文献标志码:A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.09.071



马 超

博士研究生,主要从事激光焊接相关研究。

随着现代社会的高速发展与进步,镁合金作为一种高强韧轻质材料^[1],具有密度低、比强度高、比刚度高等性能优势,应用于航空航天等领域时,可在减轻零件质量的同时提升产品性能。然而,镁合金熔点较低、热导率高,导致其焊接性较差,焊接过程中极易出现熔滴过渡不稳定、焊接飞溅、气孔等缺陷,严重制约了镁合金结构的广泛应用。激光-MIG复合焊接是一种先进的连接技术,具有能量密度集中、焊接速度快、间隙容忍度高等优势,在航空航天轻量化结构研制中具有巨大的应用前景^[2]。

近年来,国内外学者现已针对激光-MIG复合焊接技术开展了大量的研究,如Zhao等^[3]发现增大电弧能量将有效增加焊缝熔宽及面积,减

小焊缝深宽;Contuzzi等^[4]采用多目标优化方法,确定了铝镁合金的最优激光-MIG复合焊接参数;杨环宇等^[5]提出了一种电弧能量更为集中的激光-双电弧复合焊接方法,既提高了焊接效率,又有效减少了焊接过程中的热输入。此外,镁合金激光-MIG复合焊接过程存在熔滴过渡稳定性差、熔池波动剧烈、元素烧损严重等问题。为探明镁合金激光-MIG复合焊接过程中的能量关联机制,Lei等^[6]基于最小能量原理建立了三维有限元模型,模拟焊接过程中熔滴的过渡行为,并精确预测了熔滴形态;Liu等^[7]研究了激光功率对激光-MIG复合焊接熔滴迁移行为的影响机理,确定了复合焊接过程中的激光功率临界值;辛立军等^[8]研究了激光-电弧复合焊接镁合金板材焊

* 基金项目:装备预先研究共用技术项目(50923050116)。

接过程中的匙孔波动行为与气孔分布之间的关联关系,证实了激光匙孔状态对气孔分布的决定性影响;Gao等^[9]发现激光功率超过4.5 kW时,过多的光致等离子体将阻碍激光能量的传播,从而诱导焊缝缺陷形成。

综上所述,国内外研究者已针对激光-MIG复合焊接开展了大量研究,然而面向镁合金复合焊接过程中熔滴过渡行为的研究相对较少。因此,本文基于航空航天结构对镁合金优质高效连接工艺需求,开展3 mm镁合金激光-MIG复合焊接试验,采用高速摄像对激光-MIG复合焊接过程中熔滴过渡稳定性及相关影响因素进行探究,明确激光与电弧热源的相互作用对复合焊接过程的影响,为镁合金激光-MIG复合焊接技术在航空航天领域的应用奠定技术基础。

1 试验及方法

试验选用的母材为NS70镁合金(郑州轻研合金科技有限公司),尺寸为100 mm×50 mm×3 mm,其合金成分如表1所示。焊接前1 h内用砂纸去除镁板表面的氧化膜后用丙酮擦洗,最后对表面进行烘干处理以保持母材干燥。

在镁合金激光-MIG复合焊接试验中,选用RFL-C6000H型连续光纤激光器(武汉锐科光纤激光技术股份有限公司)、Artsen Plus系列焊机(麦格米特)和KR30HA型机器人(库卡机器人有限公司)。焊接过程中,激光束与焊件相互垂直,焊枪与焊件之间的夹角为60°,光丝间距

为2 mm,离焦量为0,激光与电弧同时作用于待焊位置,保护气体流量为15 L/min,镁合金的激光-MIG复合焊接设备示意图如图1所示。

本文采用的3 mm厚镁合金激光-MIG复合焊接试验参数如表2所示,在焊接过程中使用高速摄像对熔滴过渡过程进行跟踪监测,拍摄频率为1000 帧/s,为确保获得清晰的熔滴过渡图像,试验开始前在相机镜头处添加红外滤光片,以便于研究熔滴形成、长大、滴落过程的焊接稳定性。

2 结果与讨论

2.1 焊缝的形貌特征

图2为电弧焊接与激光-MIG复合焊接接头表面形貌对比。结果

表明,单一电弧焊接时,焊缝表面成形不连续,存在明显的堆积现象,且焊缝附近表面受电弧灼烧影响严重。相比之下,激光热源对电弧中的引导作用明显,可实现镁合金激光-MIG复合焊接过程中的稳定成形。然而,优质的焊缝成形需要激光与电弧参数的精准匹配。试验结果表明,当送丝速度为5 m/min时,能够获得表面平直且连续成形的焊缝,且焊缝两侧无明显飞溅现象。不同工艺参数下,不同区域的焊缝宽度如图3所示。结果表明,在焊缝总热输入变化较小且焊缝成形良好的情况下(激光功率为1200 W,电弧功率约为2400 W),镁合金激光-MIG复合焊接焊缝不同区域的宽度比例无显著差异,且焊

表1 NS70 镁合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of NS70 magnesium alloy (mass fraction) %

Al	Zn	Mn	Si	Mg
6.5~8.5	0.3~1.5	0.10~0.50	0.03	余量

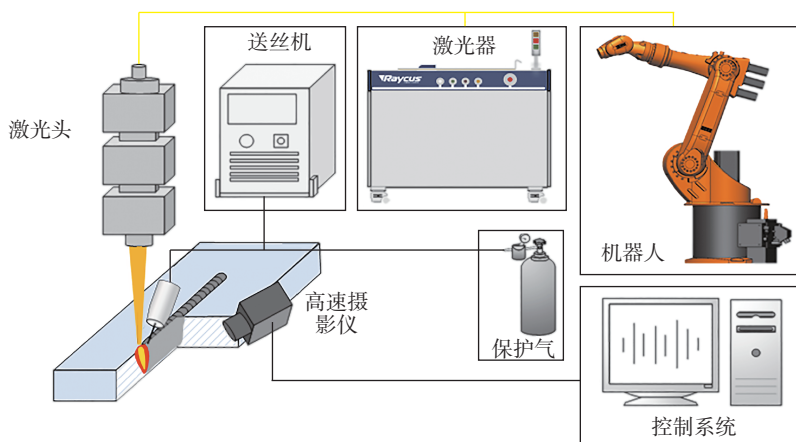


图1 镁合金激光-MIG复合焊接设备原理图

Fig.1 Schematic diagram of magnesium alloy laser-MIG hybrid welding equipment

表2 激光-MIG复合焊接试验参数

Table 2 Experimental parameters of laser-MIG hybrid welding

试验号	激光功率/kW	焊接速度/(m/min)	焊接电流/A	焊接电压/V	电弧功率/W	送丝速度/(m/min)
1	0	0.02	15.4	155	2387	5
2	1.2	0.02	19.7	122	2403.4	4
3	1.2	0.02	15.4	155	2387	5
4	1.2	0.02	13.3	180	2394	6

缝宽度与送丝速度呈正相关关系。

2.2 电弧、熔滴尺寸提取及变化规律

为精准表征镁合金激光-MIG复合焊接熔滴过渡过程中的各项参数,本文采用高速摄像的方式对熔滴过渡行为进行实时监测,同时对拍摄结果进行图像处理。然而,电弧图像与熔滴图像处理存在明显差异,需采用不同方法进行分别处理。电弧图像光暗对比明显,将原始图片去噪并转化为灰度图片后,采用二值法将电弧区域与其余区域分别转化为黑白两种颜色^[10]。在此过程中需对两大区域之间的区别灰度进行标定,确定一个临界值 α ,并以此为基准对图片中的每一个点进行检索,并与临界值进行比较,经比较后,将电弧区域标为黑色,其余区域标为白色,完成二值处理。

$$f(x, y) = \begin{cases} 0 & f_1(x, y) \geq \alpha \\ 255 & f_1(x, y) < \alpha \end{cases} \quad (1)$$



(a) 电弧焊接表面形貌



(b) 激光-电弧焊接表面形貌

图2 镁合金激光-MIG复合焊接宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphology of magnesium alloy laser-MIG hybrid welding

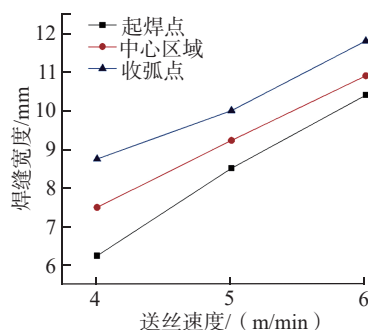


图3 镁合金激光-MIG复合焊接不同区域焊缝宽度

Fig.3 Weld width in different zones of magnesium alloy laser-MIG hybrid welding

式中, $f_1(x, y)$ 为原始图像在 (x, y) 处的像素灰度值。在本文中,用于区别电弧区域的临界值设定为250,当该点的灰度值大于临界值时,将其认定为其余区域,并标记为白色(像素灰度值为255);若该点的灰度值小于临界值时,将其认定为电弧区域,并标记为黑色(像素灰度值为0),最终获得电弧区域图像,在此基础上获得该区域的轮廓曲线,具体的提取流程如图4所示。

熔滴区域图像与背景色差区别较小,面向不同的图像难以通过同一临界值精准区分。因此,需对整体区域内的临界值进行求解,而本文中对熔滴临界值的界定则是通过OTSU法,依据灰度的分布特征计算出最佳临界值^[11]。拟定 α 为临界值, $x_1(\alpha)$ 为临界值以下的像素点比例; x_α 为像素点均值; $y_1(\alpha)$ 为阈值以下的像素点均值,表达式为

$$\alpha^* = \arg \max \sigma^2(\alpha) \quad (2)$$

$$\sigma^2(\alpha) = x_1(\alpha)(1-x_1(\alpha))(x_\alpha - y_1(\alpha))^2 \quad (3)$$

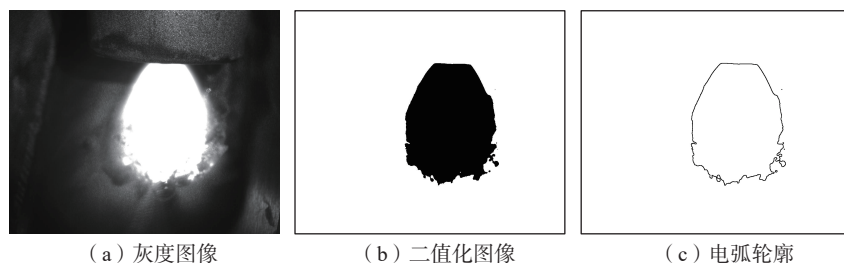
精准划分临界区域后,确定熔滴区域,获得熔滴轮廓以及熔滴尺寸,具体提取流程如图5所示。首先,依据整体图片的灰度情况确定最佳临界值,并以此将整张图片二值处理。然而熔滴滴落过程的高速摄像难以通过单次二值法完成划分,需标定其中熔滴区域,并将其余位置标记为黑色,基于该二值化图像,确定熔滴轮廓。

通过上述方法,对不同参数下

的镁合金激光-MIG复合焊接电弧面积进行测量(图6)。电弧焊接(试验1)过程中的电弧面积最大(可达 172.45 mm^2)。随着激光能量的加入,电弧面积下降明显,表明激光能量能够有效提升电弧能量的集中程度。当送丝速度由4 m/min提升至6 m/min时,电弧面积由 168.78 mm^2 降低至 156.76 mm^2 。因为送丝速度的提高使得单位时间内需要熔化的材料总量增大,从而产生更大的能量需求,迫使电弧能量更集中于焊丝,进而减少了能量的外溢。此外,本文还研究了熔滴体积的变化规律(图7)。对比分析表明,熔滴体积与送丝速度之间的关系较为密切,但与是否采用激光辅助的关系相对较小。在较高送丝速度下,熔滴尺寸明显增大。熔滴尺寸增大的具体原因与熔滴过渡过程中的受力行为密切相关,相关机理将在本文后续部分详细讨论。

2.3 复合热源作用下的熔滴过渡分析

焊接过程中,在电阻热与电弧热的共同作用下,焊丝尖端熔化并形成熔滴。依据静力学平衡理论,当促进熔滴过渡的合力大于阻碍熔滴过渡的合力时,熔滴将顺利从焊丝端脱离落入熔池内。图8展示了电弧焊接及不同工艺参数下激光-MIG复合焊接过程中熔滴过渡形态的静态图像。结果表明,在焊缝总热输入变化较小(激光功率为1200 W,电弧功率约为2400 W)的情况下,熔滴过渡形式无显著差异,均为滴状过渡模式^[12]。然而,电弧焊接过程中(试验1),



(a) 灰度图像

(b) 二值化图像

(c) 电弧轮廓

图4 镁合金激光-MIG复合焊接电弧区域图像处理流程

Fig.4 Image processing flow in the arc area of magnesium alloy laser-MIG hybrid welding

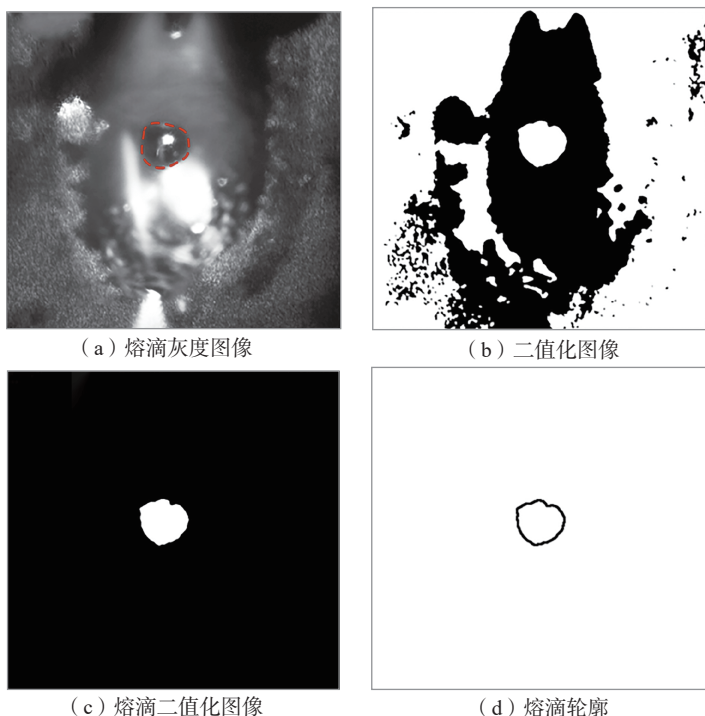


图5 镁合金激光-MIG复合焊接熔滴区域图像处理流程

Fig.5 Image processing flow of magnesium alloy laser-MIG hybrid welding melt drop region

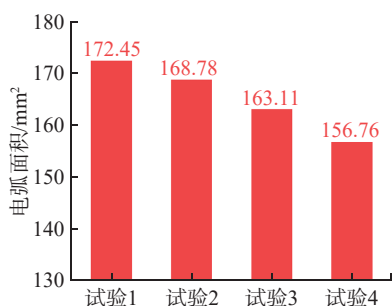


图6 镁合金激光-MIG复合焊接电弧面积
Fig.6 Arc area for laser-MIG hybrid welding of magnesium alloys

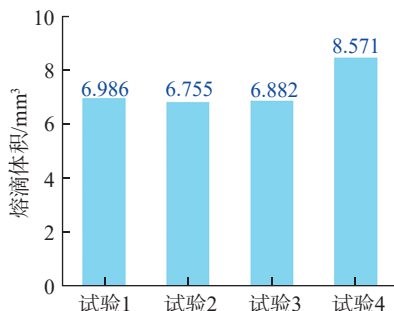


图7 镁合金激光-MIG复合焊接熔滴体积
Fig.7 Magnesium alloy laser-MIG hybrid welding melt droplet volume

由于缺少激光对电弧的诱导与压缩,电弧能量分布较为分散,能量集中度较低,导致熔滴难以稳定过渡并进入熔池,从而影响了焊缝的成形质量。

对于激光-MIG复合焊接而言,不同送丝速度下的熔滴过渡行为差异主要体现在熔滴体积以及熔滴过渡频率方面(图9)。当焊接方式为电弧焊接(试验1)时,熔滴过渡频率显著低于激光-MIG复合焊接,这是由于缺乏激光能量对金属板材和焊丝的预热作用,导致焊丝尖端的熔滴形成速度显著下降。此外,单

一电弧焊接过程中容易产生大量飞溅,导致最终产生的熔滴较小,且过渡频率较低。产生此现象的原因为送丝速度的提高使得单位时间内焊丝熔化所需的能量增大,而焊接总热输入保持不变,导致熔滴从形成到滴落所需的时间逐步延长,使得熔滴尺寸增加的同时,熔滴过渡频率也略有降低。

基于激光-MIG复合焊接熔滴过渡过程受力行为,进一步分析送丝速度变化对熔滴过渡行为的影响机理。在激光-MIG复合焊接过程中,

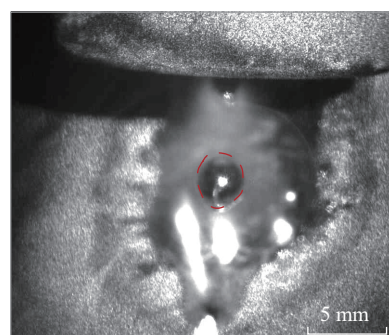
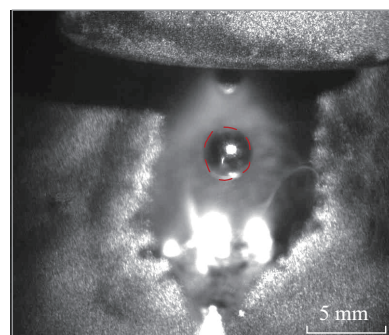
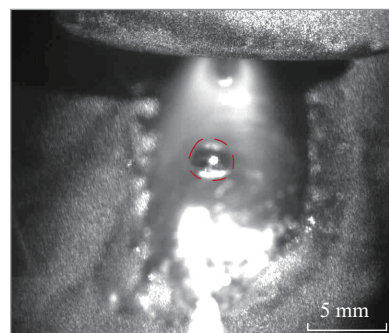
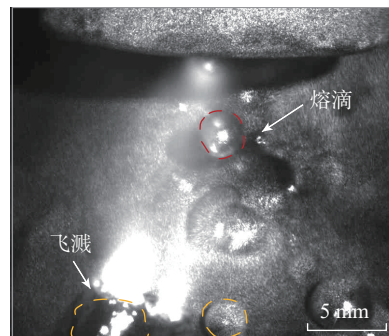


图8 镁合金激光-MIG复合焊接熔滴过渡形态

Fig.8 Mg alloy laser-MIG hybrid welding melt drop transition form

驱动熔滴过渡的力主要为重力、等离子流力、电磁收缩力等,而表面张力,反冲压力会抑制熔滴脱落^[13-14]。由

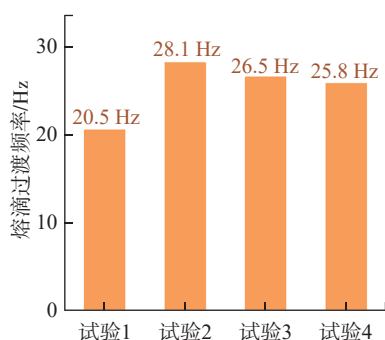


图9 镁合金激光-MIG复合焊接熔滴过渡频率

Fig.9 Frequency of melt drop transition in laser-MIG hybrid welding of magnesium alloys

试验结果可知,随着熔滴尺寸的变化,表面张力在焊丝径向方向的分力、电磁收缩力在焊丝径向方向的分力、熔滴重力均处于持续波动状态。在焊接电流随送丝速度的增大而逐步降低的情况下,随着送丝速度增加,熔滴尺寸逐步增加,即熔滴重力增加;而焊接电流降低会使得熔滴过渡的合力下降,熔滴尺寸逐步增大,且过渡频率逐渐降低。

3 结论

(1) 与单一电弧焊接相比,激光的引入有效稳定了电弧,显著提高了激光-MIG复合焊接过程中的焊缝成形质量。适当提高送丝速度有助于改善焊缝的均匀性,但过高的送丝速度将导致熔滴堆积,降低整体成形质量。

(2) 本文对镁合金激光-MIG复合焊接过程中的电弧及熔滴图像进行了数值提取。结果表明,送丝速度的增加能够增强激光与电弧能量的耦合作用,从而促进熔滴的稳定过渡。当送丝速度为5 m/min时,焊缝形貌较优。然而,当送丝速度达到6 m/min时,熔滴过渡的体积会显著增大。

(3) 在镁合金激光-MIG复合热源作用下,熔滴的过渡行为主要表现为滴状过渡。随着送丝速度的增加

和焊接电流的降低,熔滴的过渡频率逐渐减小。

参考文献

[1] 王重阳. AZ31B 镁合金超声波焊接接头组织及力学性能研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.

WANG Chongyang. Study on microstructure and mechanical properties of ultrasonic welded joints of AZ31B magnesium alloy[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.

[2] PAVAN A R, ARIVAZHAGAN B, VASUDEVAN M, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of hybrid laser+MIG welded joints of 316LN stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 163: 109410.

[3] ZHAO J Y, GAO Q Y, ZHANG J H, et al. Study on the effect of arc energy on the morphology and microstructure of laser-MIG composite welded heads of Invar alloys[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 39(S1): 51-58.

[4] CONTUZZI N, RASHKOWETS M, CASALINO G. A methodology for multi-object optimization of laser/MIG hybrid welding process[J]. Procedia CIRP, 2023, 118: 907-911.

[5] 杨环宇, 徐信坤, 巴现礼, 等. 低功率激光-双电弧焊接钛合金中厚板工艺及机理[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2023(3): 1-8.

YANG Huanyu, XU Xinkun, BA Xianli, et al. Process and mechanism of low power laser-double arc welding of titanium alloy plate[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2023(3): 1-8.

[6] LEI Z L, NI L C, LI B W, et al. Numerical simulation of droplet shapes in laser-MIG hybrid welding[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 88: 1-10.

[7] LIU F Y, YANG B, SUN H F, et al. Mechanism investigation for the influence of laser power on droplet transfer behaviors in laser-MIG hybrid welding[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108750.

[8] 辛立军, 林三宝, 刘旭平, 等. 激光-电弧复合焊接镁合金过程中匙孔行为与气孔形成的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6): 1894-1900.

XIN Lijun, LIN Sanbao, LIU Xuping, et al.

Relationship between molten pool behavior and keyhole-induced porosity in pulsed laser-arc hybrid welding of magnesium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6): 1894-1900.

[9] GAO Y K, HAO K D, XU L Y, et al. Microstructure homogeneity and mechanical properties of laser-arc hybrid welded AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12(5): 1986-1995.

[10] 李小孩. 基于同轴视觉传感的焊缝识别与跟踪研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.

LI Xiaohai. Research on weld seam identification and tracking based on coaxial vision sensor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[11] 李策. 基于计算机视觉的复杂结构快速建模方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.

LI Ce. Research on fast modeling method of complex structures based on computer vision[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.

[12] 叶广文, 刘倩雯, 范西岸, 等. 激光-MIG复合焊接熔滴过渡对焊缝表面成形的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 127-139.

YE Guangwen, LIU Qianwen, FAN Xi'an, et al. Effect of droplet transition on weld surface formation of laser-MIG hybrid welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 127-139.

[13] ZHANG X C, GAO H M, LI Z W. Forces analysis of droplets and accurate control of metal transfer in GMAW by utilizing droplet resonance[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 121-131.

[14] LIU S Y, ZHANG F L, DONG S N, et al. Characteristics analysis of droplet transfer in laser-MAG hybrid welding process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 121: 805-811.

通信作者: 占小红, 教授, 博士生导师, 主要从事轻合金焊接与先进连接、激光加工、增材制造与再制造等领域的研究。

Effect of Wire Feed Rate on Transition Behavior of Molten Droplets During Laser–MIG Hybrid Welding for Magnesium Alloy

MA Chao¹, LIU Yunhao¹, LI Peng², XIA Peiyun³, ZHAO Yanqiu¹, ZHAN Xiaohong¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. CASC 802 Research Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201204, China;

3. Shanghai Aerospace Equipment Manufacturer Co., Ltd., Shanghai 200245, China)

[ABSTRACT] With the expectation of high stability in the laser–MIG hybrid welding for magnesium alloy, the real-time monitoring experiments of droplet transfer behavior during the hybrid laser welding process were conducted. A comparative analysis between the droplet transfer behaviors in laser–MIG hybrid welding and conventional MIG welding processes was performed, and the impact of wire feeding speed on droplet morphology and transfer frequency was investigated. The results indicate that the incorporation of a laser heat source significantly enhances the stability of droplet transfer during MIG welding. At the arc power of 2400 W approximately, the droplet transfer process in laser–MIG hybrid welding of magnesium alloy exhibits a globular transfer mode. The changes of wire feed speed have no notable effect on the type of droplet transfer. However, an increased wire feed speed contributes to compressing the arc and enhancing the stability of droplet transfer. Conversely, the excessive wire feeding speed may lead to an undesirable increase in droplet size and a reduction in droplet transfer frequency.

Keywords: Laser–MIG hybrid welding; Magnesium alloy; Droplet transition behavior; Image processing; Wire feed speed

(责编 晓月)

(上接第 37 页)

Correlation of Cross-Sectional Geometry With Microstructure and Mechanical Properties of 7050–T7451 High-Strength Aluminum Alloy by Laser–Arc Hybrid Welding

XU Fei¹, GAO Wenqiang¹, LIU Bin², LEI Pengcheng², YAN Xiaofeng²

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. AVIC Qing'an Group Co., Ltd, Xi'an 710077, China)

[ABSTRACT] The high quality joints fabricated by laser arc hybrid welding have certain differences in the cross-sectional geometry of the weld seam. In order to study these differences quantitatively, the back width to surface width ratio (R_w) was proposed. Based on the optimization experiments of 7050–T7451 high-strength aluminum alloy with 3 mm thickness by laser arc hybrid welding, three typical welded seams were selected to investigate the correlation effect of different R_w on the macroscopic formation, microstructure, microhardness and tensile properties of the joints. The results show that, only when the R_w exceeds a certain threshold, the weld width on both sides becomes more uniform, and porosity defects are effectively controlled. The microstructure characteristics of the weld zone from the fusion zone to the center of the weld are fine grains layer, columnar dendritic and large-scale equiaxed grains, respectively. With the R_w increasing, the width of the columnar dendritic structure gradually decreases until it disappears, while, the average grain size at the center of the weld seam gradually increases, and the tensile properties of welded joints increase firstly and then decrease. When the R_w is about 0.70, the tensile properties reach the best, with an average ultimate tensile strength of 390 MPa and elongation after fracture of 2.9%. The tensile fractures present a mixed fracture characteristic dominated by brittle fracture.

Keywords: 7050–T7451 aluminum alloy; Laser arc hybrid welding; Back width to surface width ratio (R_w); Microstructure;

Tensile properties

(责编 晓月)