

双侧激光脉冲非对称布置驱动 GMAW 可编程熔滴过渡分析

贾亚洲¹, 姚子鹏¹, 肖珺², 陈树君², 黄文浩³, 王怀明⁴

(1. 北华航天工业学院, 材料工程学院, 廊坊, 065000; 2. 北京工业大学, 材料与制造学部, 北京, 100124; 3. 温州大学, 机电工程学院, 温州, 325000; 4. 燕京理工学院, 智能工程学院, 廊坊, 065000)

摘要: 可编程熔滴过渡的核心是在一定区域内实现熔滴的可控定向偏转过渡, 并通过匹配激光脉冲程序调控熔滴落点。在激光脉冲对称布置的基础上, 文中提出了双侧激光非对称布置驱动熔滴可编程过渡控制策略, 研究了非对称布置下的脉冲激光工艺参数对熔滴过渡行为与偏转角度的影响。结果表明, 与激光对称布置不同, 非对称布置的一侧激光照射固液界面, 并在该点起到切割作用, 另一侧激光照射熔滴本体, 主要产生对熔滴的冲击作用; 熔滴的偏转主要决定于右侧激光对熔滴的冲击作用, 熔滴的最大偏转范围增加到 55°, 根据熔滴受力情况, 建立了偏转熔滴对熔池的冲击力计算模型, 利用高速摄像拍摄熔滴过渡过程, 即可计算得到熔滴对熔池的冲击力。

创新点: (1) 采用双侧激光非对称布置驱动熔滴可编程过渡控制调控熔滴落点。

(2) 通过分析两侧不同激光功率对熔滴的作用情况建立数学模型。

关键词: 激光脉冲; 非对称阵列; 可编程熔滴过渡; 受力分析

中图分类号: TG 456.7; TG 444+.4 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20231113001

Analysis of programmable metal transfer in GMAW driven by asymmetric arrangement of bilateral laser pulses

JIA Yazhou¹, YAO Zipeng¹, XIAO Jun², CHEN Shujun², HUANG Wenhao³, WANG Huaiming⁴

(1. College of Materials Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang, 065000, China; 2. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, 325000, China; 4. School of Intelligent Engineering, Yanching Institute of Technology, Langfang, 065000, China)

Abstract: The core of programmable droplet transition is to realize the controlled directional deflection transition of the droplets in a certain area, and to regulate the droplet landing point by matching laser pulse program. On the basis of the symmetric arrangement of laser pulses, a programmable transition control strategy is proposed in the paper for the programmable transition of molten drops driven by the asymmetric arrangement of bilateral lasers. The effects of the pulsed laser process parameters on the transition behavior and deflection angle of the droplets under the asymmetric arrangement are investigated. The results show that, unlike the symmetric laser arrangement, one side of the asymmetric laser arrangement irradiates the solid-liquid interface and plays a cutting role at that point, while the other side of the laser irradiates the droplet body and mainly produces an impact effect on the droplet. The deflection of the droplet is mainly determined by the impact of the laser on the droplet on the right side, and the maximum deflection range of the droplet increases to 55°. A calculation model for the impact force of deflected droplets on the molten pool was established based on the force situation of the droplets. By using high-speed cameras to capture the transition process of the droplets, the impact force of the droplets on the molten pool can be calculated.

收稿日期: 2023-11-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52305329); 河北省自然科学基金(E2021409029); 中央引导地方科技发展资金项目(236Z1001G); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2022111); 国防创新基金项目(GFCXJJ202304); 河北省科技特派员(KJTPY202373)

Highlights: (1) The droplet programmable transfer control is used to control droplet landing point by using a double-sided laser asymmetrical arrangement.

(2) A mathematical model was established by analyzing the effect of different laser power on the droplet.

Key words: laser pulse; asymmetric array; programmable droplet transfer; force analysis

0 序言

熔化极气体保护焊 (gas metal arc welding, GMAW) 是一种应用广泛, 优质、高效的焊接方法, 至今, GMAW 在高精密焊接与增材领域还鲜有应用。现存的 GMAW 方法内部控制参数高度耦合, 热、力、质传输过程紧密关联, 理想的 GMAW 过程既可以按需精密控制焊接热输入, 又可以实现稳定可控无飞溅传质, 要实现 GMAW 传质 (熔滴过渡) 与传热 (焊接电流) 的完全解耦, 需要找到一种简单可靠的方式对熔滴施加足够强的外力作用使其脱离焊丝^[1-2]。激光-MIG(Laser-MIG hybrid welding) 复合焊是将激光热源与 MIG 热源复合在一起构成的新型焊接模式, 结合了激光焊和电弧焊的优点, 不同激光的加入形式会对复合焊接过程中的熔池、电弧、熔滴产生不同的热力输入效果。

针对熔滴过渡过程, 蔡笑宇等人^[3]利用激光照射熔池改变了短路过渡的熔滴特性, 熔滴过渡过程稳定, 激光的加入促进熔滴的铺展, 降低焊缝余高, 增加熔深; 苏沚汀等人^[4]研究了连续激光对传统 P-MIG 焊过程熔滴过渡的促进作用, 当激光功率增加到一定范围时, 无效的瞬时短路过程被抑制, 最终达到稳定的“一脉一滴”模式的射滴/细颗粒过渡; Kim 等人^[5]利用激光与 MIG 电弧复合焊接 5 mm 厚 AA5083 铝合金, 发现间隙的存在改变了电弧热作用区域、熔滴落到熔池的方位, 当激光照射在电弧中心和熔滴过渡位置时, 焊接效果最好; 韦辉亮等人^[6]认为加入激光后等离子流力发生改变, 激光导致电弧向激光偏移, 激光照射后, 会对等离子流力方向产生偏转作用, 熔滴的受力状态产生改变, 导致对熔滴的阻碍作用增加。关于激光辅助熔滴过渡技术, 陈树君团队做了大量研究^[7], 首先, 肖珺利用单侧激光照射熔滴固液界面, 在任意燃弧电流下获得稳定可控的射滴过渡^[8-9], 贾亚洲利用单侧激光驱动短路过渡, 短路过程的起始和结束得到有效控制, 得到稳定的一脉一滴短路过渡, 过渡频率从 25 Hz 增加到 75 Hz, 实现了对熔滴过渡方式的

有效控制^[10]。其次, 提出了非平衡状态下的强制缩颈技术, 利用激光照射固态焊丝, 实现了基于激光直接切断熔滴上缘固态焊丝的非平衡态弧长强制稳定, 为过渡熔体的温度控制提供了一种新的可行途径^[11-12]。最后, 利用双侧激光脉冲对称排布照射熔滴两侧固液界面处, 研究了固定体积、固定位置的熔滴在脉冲激光功率匹配、脉宽匹配与相位匹配等工艺参数对液滴从焊丝端部脱落后的偏离角度的控制效果, 使对熔滴在 0° ~ 45° 区间范围内的偏转控制成为可能 (45° 是单侧激光照射时得到), 实现熔滴的定向偏转过渡^[13-14]。

与传统双侧激光脉冲对称排列不同, 文中提出双侧激光脉冲非对称布置驱动熔滴可编程过渡方法, 一侧激光照射熔滴和焊丝的固液界面处, 另一侧激光照射熔滴本体。首先在传统熔滴受力理论基础上, 对激光照射下的熔滴受力进行具体分析, 其次, 与对称排布对比, 分析了非对称布置双侧脉冲激光对熔滴过渡行为以及偏转角度的影响, 得到了该工况下的熔滴最大偏转角。最后, 建立了偏转熔滴对熔池的冲击模型, 为熔滴组装式成形奠定了理论基础。

1 试验系统与原理

建立的非对称布置激光驱动 GMAW 可编程熔滴过渡系统, 如图 1 所示, 主要包括 MIG 焊接、激光光学、高速摄像与数据采集。其中, 焊接系统采用

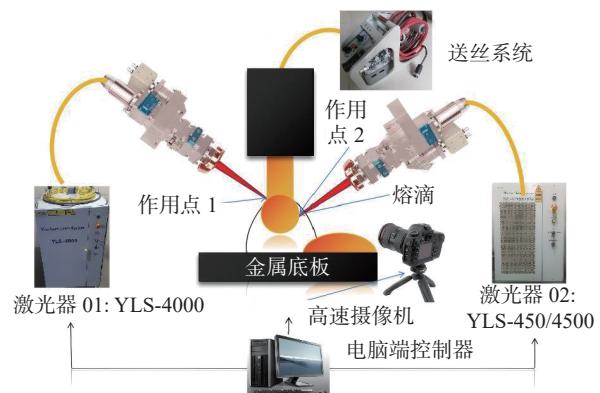


图 1 试验原理图

Fig. 1 Experimental principle

恒流源加变速送丝,送丝速度调节范围为0~25 m/min,调节精度0.005 m/min;两侧激光器分别为YLS-4000和YLS-450/4500-QCW光纤激光器;高速摄像采用I-speed 720高速摄像机,采样率设置为3 000 Hz。

系统主要实现以下功能:(1)双激光脉冲匹配

与焊接电流同步输出;(2)熔滴过渡数据采集;(3)焊接电源、行走平台和激光器的同步启停;(4)双激光与焊丝相对位置可调;(5)恒流模式配合变速送丝机构的弧长控制。激光离焦量均设为0离焦,选用99.99%的氩气进行保护,设置气体流量15 L/min,其他试验工艺参数见表1。

表1 试验工艺参数
Table 1 Experimental process parameters

序号	焊接电流 I/A	左侧激光功率 P_l/kW	右侧激光功率 P_r/kW	脉冲频率 f/Hz	脉冲宽度 t/ms
1	80	1.8	1.0	25	6
2	80	2.0	1.0	25	6
3	80	2.2	1.0	25	6
4	80	2.2	0.75	25	6
5	80	2.2	0.5	25	6
6	80	2.2	0.25	25	6

2 试验结果与分析

2.1 非对称布置激光脉冲驱动GMAW熔滴受力分析

液态熔滴在形成和过渡过程中会受到多种力的作用,表面张力是在焊丝端部上保持熔滴的主要作用力,电磁收缩力是熔化极焊接时,电流通过焊丝、熔滴、电极斑点、弧柱之间的导体时产生的电磁力。电磁收缩力可分解为径向和轴向的两个分力,对熔滴产生压缩和推动力,若弧根面积笼罩整个熔滴,电磁力形成的合力向上,促进熔滴过渡;若弧根面积小于熔滴直径,电磁力形成的合力向下,阻碍熔滴过渡。等离子流力是由电弧内部电磁力分布不均形成的压力差而产生的轴向推力,高速等离子流对熔滴产生很大的推力,使之沿焊丝轴向方向运动,促进熔滴过渡。

不同工况下的熔滴受力分析,如图2所示,在常见的平焊过程中,传统电弧焊熔滴受力过程见图2(a),在 F_g 、 F_p 、 F_e 作用下,共同克服 F_s 完成从焊丝末端脱离向熔池过渡,熔滴沿电弧轴向过渡进入熔池。对称阵列双侧激光驱动GMAW熔滴受力见图2(b),除以上受力外,熔滴在固液界面两侧还受到光致蒸发反冲力作用,蒸发反冲力会对熔滴产生轴向的拉伸和径向的偏移,熔滴落点能够有效控制在 $\pm 45^\circ$ 区间。与上述两种受力情况不一样,非对

称布置双激光驱动GMAW熔滴受力见图2(c),调整两个激光焦点的垂直距离,匹配送丝速度使左侧激光入射熔滴固液界面切割熔滴,右侧激光照射熔滴本体。左侧激光产生的力切割熔滴,右侧激光照射熔滴只产生径向向左的推力,因为激光照射熔滴产生的实际蒸气流方向为熔滴受激光照射局部表面的法线方向。

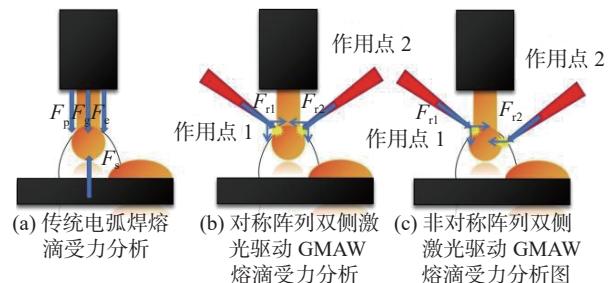


图2 不同工况下的熔滴受力分析

Fig. 2 Analysis of droplet forces under different conditions. (a) force analysis of droplet in traditional arc welding; (b) force analysis of GMAW droplet driven by laser on both sides of symmetrical array; (c) force analysis of GMAW droplet driven by asymmetric array laser on both sides

2.2 非对称布置双激光驱动GMAW熔滴过渡分析

单侧激光作用下,由于液滴的偏转造成能量的损失,激光反冲力会被熔滴缓冲掉相当一部分,对比分析了左右侧不同激光功率对熔滴过渡的影响规律,研究了双侧脉冲激光非对称布置对液滴从焊丝脱落后的偏转角度的控制效果。经过前期大量试验

验证,当激光照射固液界面时,功率到达 2 000 W 及以上,都能实现稳定过渡;而当激光照射熔滴本体时,当激光功率高于 1 000 W 时,会造成熔滴表面蒸发剧烈,熔滴被瞬间击穿,因此选用照射熔滴本体的激光功率低于 1 000 W。

2.2.1 左侧激光功率对熔滴过渡行为的影响

由非对称双侧激光可编程过渡控制策略可知,左侧激光主要负责加热与切割,迫使熔滴和焊丝分离,右侧激光主要负责冲击与偏转。当只有左侧脉冲激光照射时,设置激光功率 1 800 W,脉宽 8 ms,此时,熔滴向右侧偏转,偏转角度为 30°。而当左侧激光功率为 1 800 W 照射固液界面,右侧激光 1 000 W 照射熔滴中部时,如图 3 所示,当第 1 个脉冲作用时,与上述单侧激光照射熔滴偏转不同,熔滴只产生了拉伸,这是因为右侧激光产生的径向反冲力抑制了左侧激光对熔滴的冲击偏转,一个激光脉冲周期内,熔滴并没有被切割掉落,当激光消失后,熔滴继续沿焊丝方向上下回弹,当第 2 个脉冲作用时,熔滴再次被切割并且脱离焊丝,得到“两/多脉一滴”的过渡模式。根据高速摄像观察,该工艺下激光对液滴脱离后偏转角度的控制效果较差,而且液滴浸入熔池的落点规律性不强。当左侧激光功率增加到 2 000 W 后,虽然左侧激光对熔滴的切割作用增强,依然并不能形成稳定的切割,熔滴过渡类型混合存在着“两脉一滴”模式与“一脉一滴”模式,液滴落点的可控性依然很差。

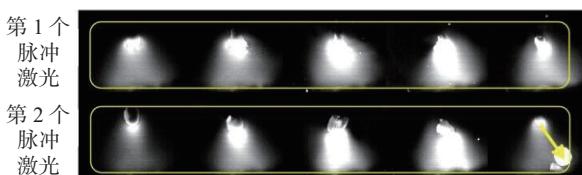


图 3 非对称排列双激光驱动熔滴过渡 (左侧 1 800 W, 右侧 1 000 W)

Fig. 3 Asymmetrically aligned dual laser-driven metal transfer (1 800 W on the left and 1 000 W on the right)

当左侧激光功率增加到 2 200 W 时,如图 4 所示,液滴在未脱离焊丝前,在两个脉冲激光的同时照射时,前 2 ms 右侧脉冲激光将熔滴稳稳托住,熔滴未发生明显偏转,第 3 ms 时,随着左侧激光的切割深度的增加,固液界面被切割后的左侧的缺口逐渐增大,固态焊丝直径也随之减小,导致对左侧激光对液滴的支撑作用减小,熔滴从不偏转转为向左侧偏转,熔滴在右侧激光的冲击作用下向左侧偏移

55°落入熔池,大于单侧脉冲激光照射时(激光功率 1 500 W,脉冲宽度 8 ms)的液滴最大偏移角度。而当对称激光参数相同照射固液界面时,熔滴偏转角度为 0°,左侧激光 2 200 W,右侧激光 1 500 W 时,熔滴向右偏转角度约为 35°。可以看出,左侧激光的切割能力是熔滴是否能实现一脉一滴过渡的主要因素。

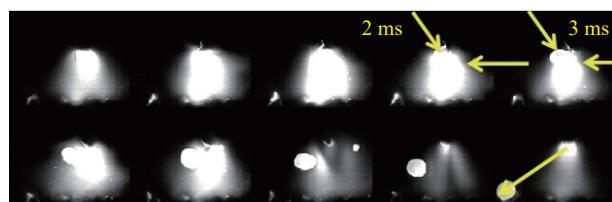


图 4 非对称排列双激光驱动熔滴过渡 (左侧 2 200 W, 右侧 1 000 W)

Fig. 4 Asymmetrically aligned dual laser-driven metal transfer (2 200 W on the left and 1 000 W on the right)

2.2.2 右侧激光功率对熔滴过渡行为的影响

试验固定左侧激光功率为 2 200 W,逐渐减小右侧脉冲激光功率,如图 5 所示,当右侧脉冲激光的功率由 1 000 W 逐渐降低到 250 W 时,熔滴的偏转角度也在减小,熔滴偏转角度区间为 5°~55°,因为施加在液滴上的蒸发反冲力在减小,使右侧脉冲激光对液滴本体的冲击效果减弱。同时激光的冲击/托举作用有助于提高左侧激光的切割效率,更有利于液滴与焊丝的分离。右侧激光的功率由 250 W 增长至 1 000 W 时,液滴从脉冲激光照射到从焊丝脱落的时间逐渐减小。当右侧激光功率继续降低到 50 W 时,由于右侧蒸发反冲力的减小,在一个激光脉冲周期内,对熔滴的托举能力降低,熔滴不能在左侧激光切割作用下有效脱离焊丝。上述方法是通过减小右侧激光功率,即减小蒸发反冲力的大小来

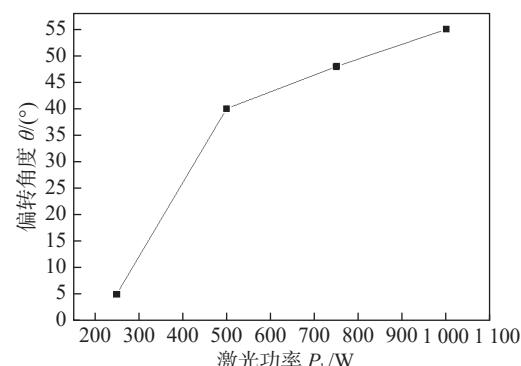


图 5 右侧激光不同功率下的熔滴偏转角度

Fig. 5 Droplet deflection angle under different power of right laser

控制熔滴受力大小,也可以通过控制右侧激光脉宽,即改变熔滴受力时间,改变作用在液滴上的冲量。

虽然左侧激光照射固液界面、右侧激光照射熔滴中部能在提高熔滴过渡效率的同时将偏转角度的区间扩展到 $5^\circ \sim 55^\circ$,但是 $5^\circ \sim 40^\circ$ 区间的工艺区间非常窄,即激光功率的极小偏差可能会引起熔滴角度产生较大的偏差。同时如果利用该方法实现可编程过渡过程就要按需实时调节激光焦点位置,对整体硬件系统或者激光器光学系统提出了更高的要求。

2.3 偏转熔滴对熔池的冲击力学模型

焊接熔池的表面变形由熔滴冲击力和电弧压力共同主导。与传统GMAW熔滴轴向过渡不同,如图6所示,当非对称阵列双侧激光脉冲驱动熔滴偏转过渡时,在重力、电磁力和蒸发反冲力的作用下,熔滴从焊丝末端以初速度 v_0 分离,由于熔滴是偏转分离,因此可以将 v_0 分成水平分量和竖直分量,其中 v_1 为液态熔滴分离时的速度在水平方向的分量, v_2 为竖直分量。

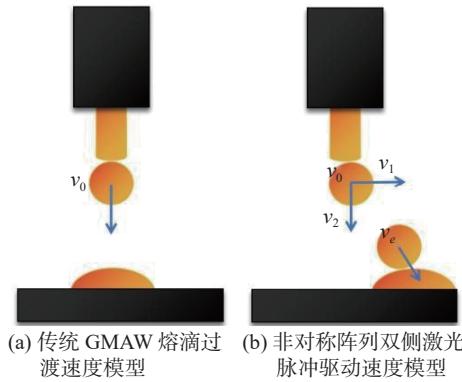


图6 熔滴脱离后的速度模型

Fig. 6 Analysis of droplet velocity after detachment from welding wire. (a) traditional GMAW droplet transfer velocity model; (b) double-sided symmetrical laser pulse driven droplet transfer velocity model

脱离焊丝后,熔滴在电弧空间向熔池方向加速运行时,不仅会受到等离子体推力的推动,也受到自身重力的作用。熔滴在这两种力的作用下加速运行,直至到达熔池表面。熔滴的加速度 a_d

$$a_d = \frac{F_d + G}{m} \quad (1)$$

假设 A_p 为熔滴在母材上的投影面积

$$A_p = \pi r_d^2 \quad (2)$$

整合上述公式可得下落熔滴在电弧空间竖直

方向的加速度

$$a_{d1} = \frac{3}{8} \frac{C_d \rho_p v_p^2}{\rho_d r_d} + g \quad (3)$$

假设 v_p 为电弧等离子体流速度。根据速度、加速度 a_{d2} 与位移之间 h_d 的关系可知

$$v_d^2 - v_1^2 = 2a_{d2}h_d \quad (4)$$

$$v_e = \sqrt{v_d^2 + v_2^2} \quad (5)$$

v_e 为熔滴进入熔池时的速度。在电弧中运行的熔滴被加速后以很高的冲击速度进入熔池,引起了熔池表面变化。熔化极气体保护焊中,焊丝端头的液态熔滴向熔池传输热量、动量以及质量。山东大学武传松、胥国祥等通过对GMAW焊接过程分析,分析了熔滴冲击力对MIG焊接熔池表面形状的影响,熔滴对熔池的冲击可以看作是单位时间内熔池表面受到来自熔滴的压力,推导得出了熔滴对熔池的冲击压力公式:

$$P_d = \frac{f_d m_d v_d}{\pi r_d^2} \quad (6)$$

整理可得

$$P_d = \frac{4 f_d \rho_d r_d}{3} \sqrt{v_1^2 + \left(\frac{3 C_d \rho_p v_p^2}{4 \rho_d r_d} + 2g \right) h_d v_2^2} \quad (7)$$

式中: F_d 为受到的等离子体推力; G 为熔滴受到的重力; m 为熔滴质量; a_{d1} 为下落熔滴在电弧空间竖直方向的加速度; C_d 为下落熔滴的比热容; ρ_p 为等离子体的密度; ρ_d 为下落熔滴的密度; g 为重力加速度; v_d 为熔滴掉落的速度; h_d 为熔滴下落的水平位移; P_d 熔滴对熔池的冲击压力; f_d 为熔滴过渡频率; m_d 为液态熔滴质量; v_d 为液态熔滴冲击熔池表面时的速度; r_d 为液态熔滴半径; v_p 可以根据经验公式求出。

其中无激光作用时的熔滴过渡频率可由高速摄像拍摄得到,加激光脉冲时,脉冲频率即为熔滴过渡频率,通过对熔滴过渡过程信号的采集,可以得知熔滴对熔池的冲击作用力。

3 总结

(1)提出了非对称激光布置驱动可编程熔滴过渡控制策略,熔滴偏转角度较对称排列时增加了 10° ,提高了熔滴的可编程能力。

(2)左侧激光主要起到熔化切割作用,右侧激

光照射熔滴主要起到偏转冲击作用,左侧激光的切割能力是熔滴是否能实现一脉一滴过渡的关键因素。

(3) 可以通过建立的偏转熔滴冲击力模型结合高速摄像系统计算得出熔滴对熔池的冲击作用力,为熔滴组装成形奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 肖珺. 基于脉冲激光与电弧力调控的 GMAW 熔滴过渡主动控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Xiao Jun. Active control of metal transfer in GMAW by pulsing laser and arc force[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [2] 王立伟. 激光辅助交流双丝间接电弧熔滴过渡行为与机理 [D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
Wang Liwei. Behavior and mechanism of laser-assisted metal transfer in alternating current inter-wire indirect arc[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [3] 蔡笑宇, 李桓, 杨立军, 等. 铝合金激光-短路过渡熔化极惰性气体保护焊复合焊缝成形改善 [J]. 中国激光, 2014, 41(5): 72–78.
Cai Xiaoyu, Li Huan, Yang Lijun, et al. Improvement of weld appearance of laser-short circuiting transfer metal-inert gas (MIG) hybrid welded aluminum alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 72–78.
- [4] 苏沚汀, 李桓, 韦辉亮, 等. 激光对脉冲 MIG 焊熔滴过渡的改善作用 [J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 91–95.
Su Zhiting, Li Huan, Wei Huiliang, et al. Improvement of laser on metal transfer in pulsed MIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 91–95.
- [5] Kim Y P, Alam N, Bang H S, et al. Observation of hybrid welding phenomenon in AA 5083 butt joints with different gap condition[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11(3): 295–307.
- [6] 韦辉亮, 李桓, 王旭友, 等. 激光-MIG 电弧的复合作用及对熔滴过渡的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 41–44.
- Wei Huiliang, Li Huan, Wang Xuyou, et al. Hybrid interaction of laser and pulsed MIG arc and its influence on metal transfer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 41–44.
- [7] Jia Y Z, Xiao J, Chen S J, et al. Characteristics and experimental analysis on force and heat transfer in laser pulse-assisted metal transfer process[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142(11): 107213.
- [8] Xiao J, Chen S J, Zhang G J, et al. Current independent metal transfer by using pulsed laser irradiation Part 1: system and verification[J]. *Welding Journal*, 2016, 95(3): 93–100.
- [9] Xiao J, Chen S J, Zhang G J, et al. Current independent metal transfer by using pulsed laser irradiation Part 2: affecting factors[J]. *Welding Journal*, 2016, 95(6): 194–201.
- [10] 陈树君, 贾亚洲, 肖珺, 等. 脉冲激光驱动的 GMAW 短路过渡行为控制 [J]. 焊接学报, 2018, 39(9): 1–5.
Chen Shujun, Jia Yazhou, Xiao Jun, et al. Pulsed laser controlled short-circuiting metal transfer in GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(9): 1–5.
- [11] 贾亚洲, 肖珺, 陈树君, 等. 2219 铝合金激光驱动 GMAW 熔滴过渡行为 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(3): 59–64.
Jia Yazhou, Xiao Jun, Chen Shujun, et al. Research on laser-driven metal transfer of 2219 aluminum alloy in GMAW[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(3): 59–64.
- [12] Jia Y Z, Xiao J, Chen S J, et al. Pulsed laser enhanced metal transfer of aluminum alloy in GMAW[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 121(10): 29–36.
- [13] Chen S J, Jia Y Z, Xiao J, et al. Double-sided pulsed laser driven metal transfer in GMAW[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 49: 196–203.
- [14] Chen S J, Jia Y Z, Xiao J, et al. Laser-driven programmable metal transfer in GMAW[J]. *Welding Journal*, 2020(3): 99s–100s.

第一作者: 贾亚洲, 博士; 主要从事激光电弧复合焊接、电弧增材制造等方面的研究和教学工作; Email: jiayazhou@163.com.

通信作者: 黄文浩, 博士, 讲师; Email: laserweldingsys@163.com.

(编辑: 刘启明)