

铝合金等离子-MIG 复合焊接电弧行为

韩蛟, 韩永全, 洪海涛, 王学龙

(内蒙古工业大学, 教育部先进轻金属材料开发与加工防护工程研究中心, 呼和浩特, 010051)

摘要: 试验发现铝合金等离子-MIG 复合焊中, 等离子弧焊接电流为 130 A, MIG 焊接电流为 180 A(基值电流 95 A) 时, 基值时期的 MIG 电弧在等离子弧附近燃弧阻抗小, 复合焊中 MIG 电弧电压在脉冲基值时期低于单独 MIG 焊, 电荷流效应使 MIG 电弧在基值时期偏向等离子弧, 偏向等离子弧方向的 MIG 电弧主要电离介质为氩气. 当 MIG 焊接电流增加到 240 A(基值电流 122 A) 后, 以上现象消失. 由于焊接电弧存在热惯性, 当 MIG 电弧在基值时期偏向等离子弧时, 在脉冲电流上升阶段, 以及电流刚达到峰值时, MIG 电弧仍会偏向等离子弧, 此阶段复合焊中 MIG 电弧电压高于单独 MIG 焊. 当复合焊中存在 MIG 电弧偏向等离子弧燃弧的现象时, MIG 电弧稳定性有所下降, 随着 MIG 焊接电流的增加, 电弧稳定性增加.

创新点: (1) 讨论了脉冲 MIG 在不同电流阶段的铝合金等离子-MIG 复合焊接电弧行为.

(2) 利用特征粒子分布情况及电信号特征揭示了复合焊中 MIG 电弧行为机理.

关键词: 复合焊接; 等离子-MIG 复合焊接; 电弧行为; 特征粒子

中图分类号: TG 403 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20210702001

0 序言

高强铝合金因其具有低密度、高强度的优点, 广泛应用于军工、交通以及航空航天等领域^[1]. 铝合金表面易产生氧化膜, 高强铝合金焊接易发生接头软化^[2]. 20 世纪 70 年代, 荷兰 PHILIPS 研究中心的 Essers 等人^[3] 提出了等离子-MIG 复合焊, 随着工业技术的发展, 依据电弧不同的空间位置, 现在形成了同轴以及旁轴两种等离子-MIG 复合焊接方法. 等离子-MIG 复合焊接是一种新型的高效的焊接方法, 同时具备了等离子弧能量集中, MIG 焊熔覆效率高的优点, 焊接过程稳定而且效率高, 焊接缺陷少.

目前国内外主要对同轴等离子-MIG 复合焊进行了较多的研究, 包括电弧光谱信息、耦合机理、熔滴过渡、电弧行为、焊接稳定性以及焊接工艺等^[4-10]. 近些年对旁轴等离子-MIG 复合焊的研究有所增多, 包括焊接工艺、焊接接头组织、熔滴过渡以及耦

合机理等^[11-15]. 洪海涛等人^[16] 研究了旁轴 VPPA-MIG 复合焊接的电弧形态及伏安特性, 认为等离子弧正反极性期间不同的自感应磁场是造成复合电弧形态变化的主要原因, 而且分析了 MIG 电弧对等离子弧电信号的影响. 实际焊接中 MIG 焊通常采用脉冲焊的形式, 脉冲 MIG 焊可以在较低的平均电流下实现射滴过渡, 进一步降低热输入. 对于旁轴等离子-MIG 复合焊, 国内外研究者未考虑脉冲 MIG 焊在不同的电流阶段的电弧行为, 包括电弧形态以及电信号的研究. 电弧特征粒子的分布可以在一定程度上反映电弧的动态变化, 辅助阐明电弧行为机理. 而对于等离子-MIG 复合焊电弧中特征粒子的分布也未见报道. 因此有必要对铝合金等离子-MIG 复合焊的电弧行为做进一步研究. 为此将考虑脉冲 MIG 焊在不同阶段的焊接电流, 研究 MIG 焊接电流对复合焊接电弧行为的影响, 包括电弧形态、电信号、特征粒子分布.

1 试验方法

试验采用旁轴式等离子-MIG 复合焊接方法, 沿焊接方向, 等离子弧在前, MIG 弧在后. 等离子-MIG 复合焊接系统包括等离子电弧电源、SUPER-

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51665044); 内蒙古自治区科技厅项目 (2020GG0313); 内蒙古自然科学基金项目 (2019LH05017).

MIG 复合焊枪、Fronius TPS4000 数字焊机和 KUKA 焊接机器人. 电弧行为检测系统如图 1 所示, 包括 Baumer HX13 高速摄像机、NI 数据采集系统、电流电压传感器等.

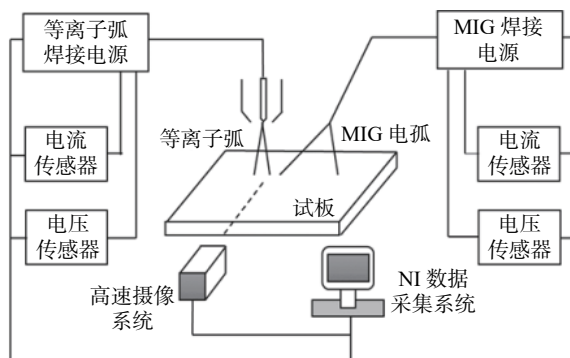


图 1 等离子-MIG 复合焊接系统

Fig. 1 Plasma-MIG hybrid welding system

试板为 12 mm 厚的 7075 铝合金, 焊丝牌号为 ER5183, 直径 1.6 mm. 试验过程中, 等离子弧采用直流正接, MIG 采用直流反接的方法, 离子气、MIG 中心气和总保护气为 99.9% 的氩气, 焊接速度 400 mm/min. 高速摄像采集频率 4 000 帧/s.

2 结果与讨论

2.1 特征粒子分布

图 2 所示为等离子弧焊接电流为 130 A, 不同

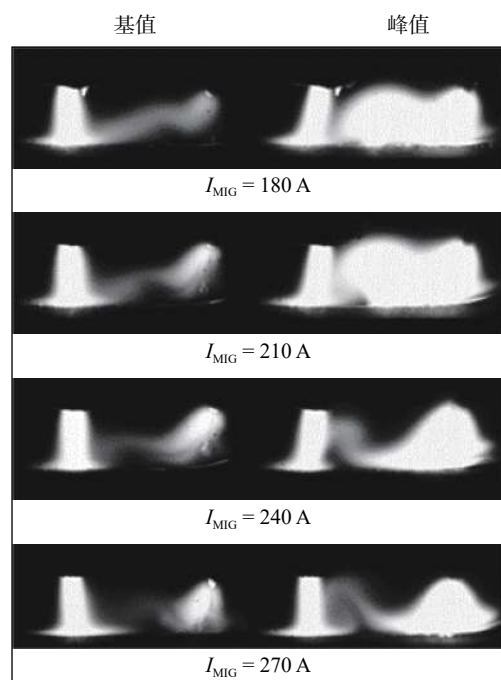


图 2 不同 MIG 焊接电流时的复合焊接电弧形态图

Fig. 2 Arc morphology of hybrid welding under different MIG currents

MIG 焊接电流时的等离子-MIG 复合焊接电弧形态图. 由图可知, 随着 MIG 焊接电流的增加, 电弧形态在脉冲基值以及峰值都发生了一定的变化. 电弧等离子体的动态变化主要依赖其内部粒子的电离及扩散, 而铝合金等离子-MIG 复合焊接电弧中的介质主要为铝金属蒸气以及氩气, 为了探究复合焊接电弧的动态变化, 采用 Ar 794.8 nm \pm 1.5 nm 及 Al 396.1 nm \pm 1.5 nm 的窄带滤波片分别观察复合电弧中特征粒子的分布, 如表 1 和表 2 ($I_{\text{plasma}} = 130$ A, $I_{\text{MIG}} = 200$ A).

由表 1 和表 2 发现, 等离子弧中主要为 Ar 794.8 谱线, MIG 电弧在脉冲基值时期电流较小 (约 95 A), 电离度低, 且高速摄像在采集图像时除使用窄带滤波片外, 还使用了中灰镜组降低曝光值, 因此 MIG 电弧在脉冲基值时期的特征粒子分布并不明显. MIG 焊在电流上升阶段, Ar 794.8 谱线分布较发散, 而 Al 396.1 谱线集中于焊丝轴线附近. 表 1 所示复合焊中, MIG 焊接电流增加时, MIG 电弧中 Ar 794.8 谱线相比单独 MIG 焊时有部分偏向等离子弧, 在 MIG 焊接电流刚达到脉冲峰值时, MIG 电弧在复合焊接中的 Ar 谱线较单独 MIG 焊偏向等离子弧膨胀. 对比表 2 发现, 复合焊中在 MIG 焊接电流上升阶段, MIG 电弧中的 Ar 794.8 谱线的分布较 Al 396.1 分布范围更广且更偏向等离子弧, 在 MIG 焊接电流刚达到脉冲峰值时, 复合焊 MIG 电弧中的 Al 396.1 谱线并未出现向等离子弧方向膨胀的现象. 由于等离子弧氛围中充满了作为保护气体及离子气体的氩气, 而且电流为 130 A 时不会产生过多的金属蒸气, 因此等离子弧主要电离介质为氩气, 且复合焊中 MIG 电弧偏向等离子弧的部分主要电离介质为氩气, 少部分铝蒸气参与了电离.

2.2 电弧动态行为

图 3 所示为复合焊中, 等离子弧焊接电流 130 A, MIG 焊接电流分别为 180 和 270 A 时 MIG 焊接电流信号与电弧形态对应图. 由图 3 发现, 等离子弧焊接电流为 130 A, MIG 焊接电流为 180 A 时, MIG 电弧在脉冲基值时期以及脉冲电流上升阶段会有部分电弧等离子体偏向等离子弧, 而当 MIG 电流为 270 A 时, 以上现象消失. 对于电弧等离子体, 其运动轨迹主要由两个因素决定: 等离子流效应和电荷流效应^[17]. 等离子流效应主要与焊接电流有关, 电流越大, 等离子流效应越强. 电荷流效

表 1 Ar 794.8 谱线在等离子焊、MIG 焊及复合焊中不同时段分布情况

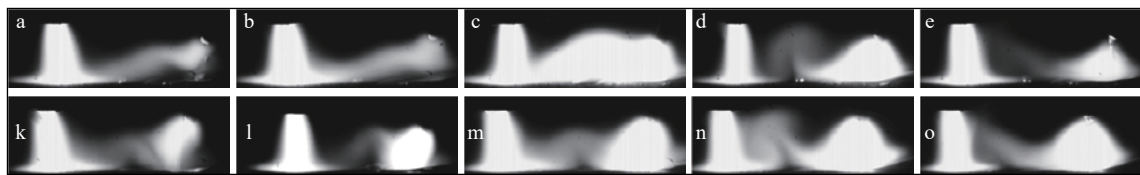
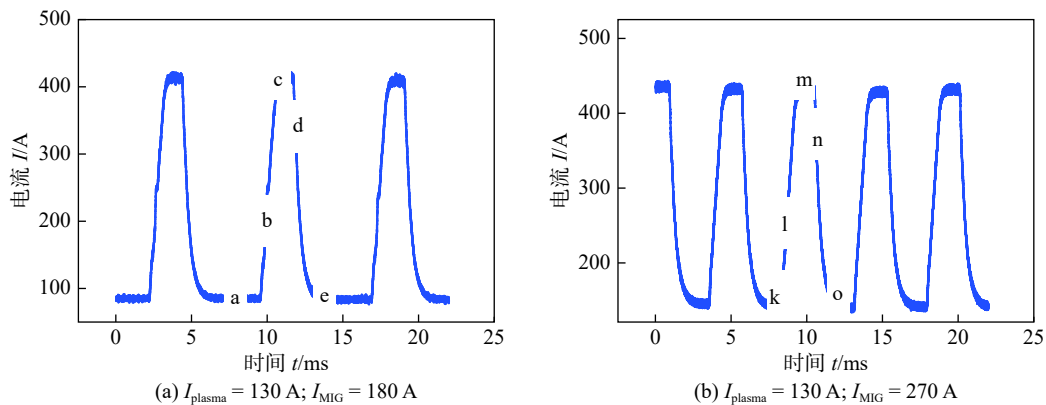
Table 1 Distribution of 794.8 nm Ar spectrum line at different times in plasma welding, MIG welding and hybrid welding

方法	MIG 焊接电流基值阶段			MIG 焊接电流上升阶段		MIG 焊接电流脉冲阶段		MIG 焊接电流下降阶段	
	t_0	$t_0 + 2.5 \text{ ms}$	$t_0 + 3 \text{ ms}$	$t_0 + 3.5 \text{ ms}$	$t_0 + 4 \text{ ms}$	$t_0 + 4.5 \text{ ms}$	$t_0 + 5 \text{ ms}$	$t_0 + 5.5 \text{ ms}$	$t_0 + 6 \text{ ms}$
等离子弧焊		...							
MIG 焊		...							
复合焊		...							

表 2 Al 396.1 谱线在等离子焊、MIG 焊及复合焊中不同时段分布情况

Table 2 Distribution of 396.1 nm Al spectrum line at different times in plasma welding, MIG welding and hybrid welding

方法	MIG 焊接电流基值阶段			MIG 焊接电流上升阶段		MIG 焊接电流脉冲阶段		MIG 焊接电流下降阶段	
	t_0	$t_0 + 2.5 \text{ ms}$	$t_0 + 3 \text{ ms}$	$t_0 + 3.5 \text{ ms}$	$t_0 + 4 \text{ ms}$	$t_0 + 4.5 \text{ ms}$	$t_0 + 5 \text{ ms}$	$t_0 + 5.5 \text{ ms}$	$t_0 + 6 \text{ ms}$
等离子弧焊		...							
MIG 焊		...							
复合焊		...							



(c) 图 3a、3b 中对应电弧形态

图 3 MIG 焊接电流波形与电弧形态对应图

Fig. 3 Correspondence between MIG current waveform and arc shape. (a) $I_{\text{plasma}} = 130 \text{ A}; I_{\text{MIG}} = 180 \text{ A}$; (b) $I_{\text{plasma}} = 130 \text{ A}; I_{\text{MIG}} = 270 \text{ A}$; (c) arc shape of Fig. 3a and Fig. 3b

应在电流较小时起主导作用, 电弧在阻抗最小的路径燃弧. 铝合金旁轴等离子-MIG 复合焊过程中, 等离子弧氛围中充满氩气, 由于等离子弧为压缩电弧, 电弧介质电离充分, 等离子弧附近会存在大量带电粒子、高温状态的氩气, 以及由等离子弧熔化试板产生的铝蒸气. MIG 焊接电流为 180 A 时, 其

脉冲基值时期的焊接电流只有约 88 A, 基值时期等离子流效应不足以使整个电弧沿焊丝轴线燃烧, 此时根据热电离的 Saha 公式, 即

$$\lg \frac{n_e^2}{n_n} = -\frac{5040}{T} V_i + 1.5 \lg T + 15.385 \quad (1)$$

式中: n_e 为电子密度; n_n 为中性粒子密度; V_i 为电离

电位; T 为弧柱温度. 等离子弧附近的带电粒子、高温氩气以及铝金属蒸气会为 MIG 电弧提供一个阻抗较小的燃弧通道, 因此可观察到基值时期 MIG 电弧的部分等离子体偏向等离子弧.

图 4 所示为等离子弧焊接电流 130 A, MIG 焊接电流 180 A 时复合焊中 MIG 电弧电压与单独 MIG 焊电弧电压对比. 可以发现脉冲基值时期, 复合焊中 MIG 电弧电压低于单独 MIG 焊时的电弧电压, 证明了脉冲基值时期复合焊中 MIG 电弧燃弧通道的阻抗相比单独 MIG 焊接更小. 当 MIG 焊接电流由基值向峰值转变时, 随着电流的增加, 等离子流效应逐渐增强, 电荷流效应逐渐减弱, MIG 电弧应与焊丝轴线保持一致, 但 MIG 焊接电流由基值到峰值的变化速度很快 (可达 330 A/ms), 由于焊接电弧存在热惯性, MIG 电流快速增加时, MIG 电弧轴线不能在瞬间与焊丝轴线保持一致, 因此可以观察到在焊接电流刚达到峰值时, MIG 电弧仍偏向等离子弧膨胀. 而此时由于 MIG 焊接电流的增加, 等离子弧附近的带电粒子、高温氩气及铝蒸气对阻抗的降低作用减弱, 但电弧弧长相比单独 MIG 焊接有所增加, 因此此刻复合焊中 MIG 电弧电压要较单独 MIG 焊更高, 如图 5 所示, 在电流上升阶段, MIG 电弧电压出现尖峰状波形, 由图 4 可知, 此时复合焊接中 MIG 电弧电压大于单独 MIG 焊. 而当 MIG 焊接电流为 270 A 时, 基值时期电流值约为 150 A, 相比基值电流为 88 A 的电弧, 等离子流效应更强, 因此复合焊时 MIG 电弧在基值时期没有出现 MIG 电弧燃弧通道偏向等离子弧的情况, 且 MIG 电弧在整个峰值时期均为规则的钟罩形, 其电流电压波形如图 6 所示, 并未出现尖峰状的电压波形.

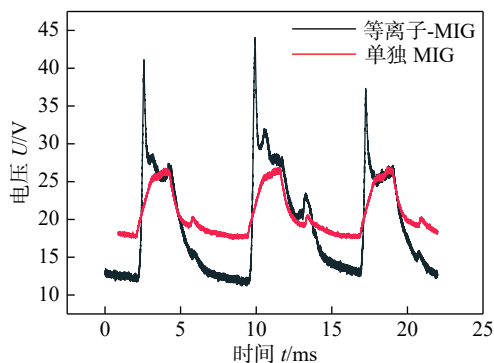


图 4 复合焊中 MIG 电压与单独 MIG 焊电压对比图

Fig. 4 Comparison of MIG voltage in hybrid welding and single MIG welding

为了探究 MIG 电弧偏向等离子弧时是否会影响电弧稳定性, 计算不同参数下, MIG 电弧处于峰

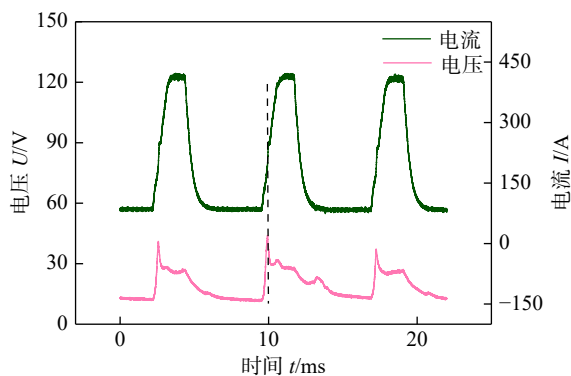


图 5 复合焊中 MIG 焊接电流及电弧电压波形 ($I_{\text{plasma}} = 130 \text{ A}$, $I_{\text{MIG}} = 180 \text{ A}$)

Fig. 5 MIG welding current and arc voltage waveform in plasma-MIG hybrid welding ($I_{\text{plasma}} = 130 \text{ A}$, $I_{\text{MIG}} = 180 \text{ A}$)

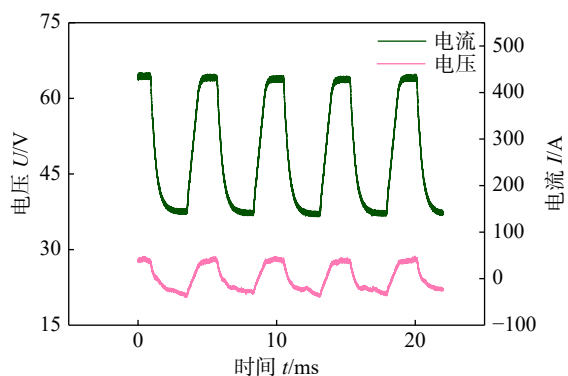


图 6 复合焊中 MIG 焊接电流及电弧电压波形 ($I_{\text{plasma}} = 130 \text{ A}$, $I_{\text{MIG}} = 270 \text{ A}$)

Fig. 6 MIG welding current and arc voltage waveform in plasma-MIG hybrid welding ($I_{\text{plasma}} = 130 \text{ A}$, $I_{\text{MIG}} = 270 \text{ A}$)

值时期的电弧电压变异系数, 变异系数是对数据离散程度进行分析的一个重要统计量, 表示被检测量的稳定性或一致性. 设变异系数为 $C.V$, 则其可表示为

$$C.V = \frac{s_d}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

式中: s_d 标准方差; \bar{x} 为均值. 由式 (2) 可知, 变异系数 $C.V$ 是一个相对变量, 无量纲并且不受样本均值的影响. 对于焊接过程, 意味着基于变异系数法的电信号特征参数不受焊接规范参数的影响, 客观的表征整个过程的波动程度, 变异系数越小表明整个过程越均匀, 结果如图 7 所示. 结合图 2 可以发现, MIG 电弧偏向等离子弧时电弧稳定性有所降低, 随着 MIG 焊接电流的增加, 电弧稳定性逐渐增加.

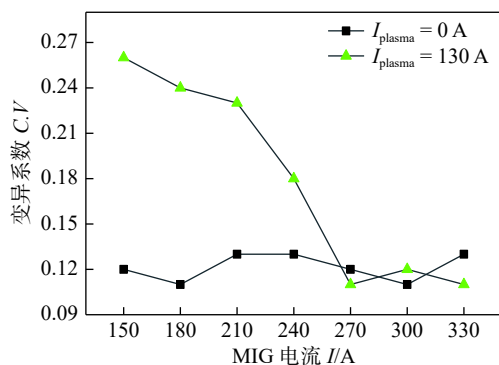


图 7 MIG 电弧在脉冲峰值期间的电压变异系数与电流

Fig. 7 Relationship between voltage variation coefficient and current of MIG arc during peak pulse

3 结论

(1) 铝合金等离子-MIG 复合焊中, 等离子弧焊接电流为 130 A, MIG 焊接电流为 180 A 时, MIG 焊接电流从脉冲基值到刚达到脉冲峰值阶段, MIG 电弧偏向等离子弧方向燃弧, 偏向等离子弧方向的 MIG 电弧电离介质主要为氩气, MIG 焊接电流增加到 240 A 后, 以上现象消失。

(2) MIG 焊接电流为 180 A 时, 复合焊中 MIG 电弧电压在脉冲基值时期低于单独 MIG 焊, 基值时期的 MIG 电弧, 偏向等离子弧方向燃弧时阻抗更小. 在 MIG 焊接电流上升阶段, 由于焊接电弧存在热惯性, 电弧形态的变化滞后于电流, 导致复合焊中 MIG 电弧电压高于单独 MIG 焊。

(3) 复合焊中, 当 MIG 电弧存在偏向等离子弧方向燃弧的现象时, MIG 电弧稳定性有所降低, 随着 MIG 焊接电流的增加, 电弧稳定性增加。

参考文献

- [1] Holzer M, Hofmann K, Mann V, *et al.* Change of hot cracking susceptibility in welding of high strength aluminum alloy AA 7075[J]. *Physics Procedia*, 2016, 83: 463 – 471.
- [2] Ericsson M, R Sandström. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(12): 1379 – 1387.
- [3] Essers W G, Liefkens A C. Plasma-MIG welding developed by Philips[J]. *Machinery and Production Engineering*, 1972, 1(11): 632 – 633.
- [4] Ton H. Physical properties of the plasma-MIG welding arc[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1975, 8(8): 922 – 933.
- [5] 陈树君, 王旭平, 张亮, 等. 等离子-MIG 复合焊接熔滴过渡及电弧耦合特性研究 [J]. *焊接*, 2014(2): 3 – 7.
- [6] Bai Y, Gao H M, Qiu L. Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminum alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(12): 2234 – 2239.
- [7] Hertel M U, Füssel, Schnick M. Numerical simulation of the plasma-MIG process—interactions of the arcs, droplet detachment and weld pool formation[J]. *Welding in the World*, 2014, 58(1): 85 – 92.
- [8] Ono K, Liu Z, Era T, *et al.* Development of a plasma MIG welding system for aluminum[J]. *Welding International*, 2009, 23(11): 805 – 809.
- [9] Cai D T, Han S G, Zheng S D, *et al.* Plasma-MIG hybrid welding process of 5083 marine aluminum alloy[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 850: 519 – 525.
- [10] Yang T, Xiong J, Chen H. Effect of process parameters on tensile strength in plasma-MIG hybrid welding for 2219 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(9-12): 2413 – 2421.
- [11] Wang Y J, Wei B, Guo Y Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of the joint of 6061 aluminum alloy by plasma-MIG hybrid welding[J]. *China Welding*, 2017, 26(2): 58 – 64.
- [12] Guo Y, Pan H, Ren L, *et al.* An investigation on plasma-MIG hybrid welding of 5083 aluminum alloy[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98: 1433 – 1440.
- [13] Hong H, Han Y, Du M, *et al.* Investigation on droplet momentum in VPPA-GMAW hybrid welding of aluminum alloys[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5): 1 – 8.
- [14] Han Y, Tong J, Hong H, *et al.* The influence of hybrid arc coupling mechanism on GMAW arc in VPPA-GMAW hybrid welding of aluminum alloys[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101: 1 – 6.
- [15] 陈芙蓉, 刘成豪, 李男. 超声冲击时间对 7A52 铝合金 VPPA-MIG 焊接接头的影响 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(9): 39 – 43.
- [16] 洪海涛, 韩永全, 童嘉晖, 等. 铝合金 VPPA-MIG 复合焊接电弧形态及伏安特性 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(9): 65 – 69.
- [17] Reis R P, Souza M D, Scotti A. Models to describe plasma jet, arc trajectory and arc blow formation in arc welding[J]. *Welding in the World*. 2011, 55 (3-4): 24-32.

第一作者: 韩蛟, 博士研究生; 主要从事先进焊接技术及工艺的研究; Email: 2532457892@qq.com.

通信作者: 韩永全, 教授, 博士研究生导师; Email: nmhyq@sina.com.

(编辑: 郑红)