

铝合金 VPPAW 穿孔焊接匙孔闭合处的 微观组织与力学性能

王小伟¹, 张斌², 曾如川², 闫朝阳¹, 陈树君¹

(1. 北京工业大学, 汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心, 北京, 100124; 2. 北京卫星制造厂有限公司, 北京, 100124)

摘要: 铝合金因其密度低, 比强度高特性, 被广泛应用到航空航天、军事工业等领域. 与其他焊接工艺相比, 变极性等离子弧焊接在大型铝合金结构件加工方面具有突出优势. 针对轻金属合金等离子弧焊接过程中匙孔难以自由闭合的问题, 提出了气电分离时序脉冲等离子弧环焊缝收弧方法, 对比研究了环焊缝收弧方法与手工钨极惰性气体保护焊 (tungsten inert gas welding, TIG 焊) 填补法焊缝匙孔闭合处的微观组织与力学性能. 结果表明, 通过调节焊接起弧、收弧策略, 实现了等离子弧匙孔自由闭合, 焊缝收弧区成形良好, 组织为均匀的等轴晶; 抗拉强度为 329.9 MPa, 断后伸长率为 16.3%, 比 TIG 填补法的抗拉强度提高了 22.91%, 断后伸长率提高了 55.24%. 平均硬度值为 78.9 HV0.2, 热影响区硬度呈下降趋势, 熔合线处硬度呈升高趋势, 焊缝区硬度波动范围为 75 ~ 81 HV0.2.

创新点: (1) 提出了气电分离时序脉冲等离子弧环焊缝收弧方法.

(2) 分析了匙孔自闭合方法相较于手工填补匙孔的优势.

关键词: 铝合金; 变极性等离子弧穿孔焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 457 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230402001

0 序言

随着制造业不断深入发展, 对铝合金结构件需求不断增多. 铝合金作为一种减重材料, 因其密度低, 比强度高, 导电性、导热性、抗蚀性优良等特点, 在航空航天、轨道交通、军事工业等领域被广泛应用^[1]. 铝合金结构件的大规模应用离不开与其密切相关的加工工艺^[2], 焊接作为一种常见的成形工艺是铝合金连接成形的典型代表.

目前, 国内外研究学者对铝合金焊接进行了许多研究, 涉及到的焊接方法包括钨极氩弧焊、搅拌摩擦焊、变极性等离子弧焊 (variable polarity plasma arc welding, VPPAW)、激光焊等^[3]. 与其他焊接工艺相比, 兼具操作简单和焊接质量高的变极性等离子弧焊在大型铝合金结构件加工方面具有突出优

势. 吕耀辉等人^[4]研制了以 80C196 单片机为控制核心的 400 A 变极性焊接电源, 搭建了包括变极性电源、步进电机控制系统在内的铝合金 VPPAW 穿孔焊接设备, 成功运用于天宫一号飞船主体结构焊接. 春兰等人^[5]提出了单电源双脉冲混合调制 VPPAW 焊接系统, 通过加入高频/低频脉冲, 使得设备能够输出高频脉冲、低频脉冲和高低频混合脉冲. 韩永全等人^[6]对比研究了 VPPAW 与传统电弧的电特性, 分析了 VPPAW 电特性的时域和频域特性, 指出 VPPAW 电特性不同特点是焊接参数选择的重要依据. 周阳等人^[7]研究了电源输出变极性焊接电流的受控稳定性, 结果表明, 减小电流波形畸变可保持输出电流受控稳定性. 陈树君等人^[8]以 VPPAW 穿孔焊接过程中的穿孔熔池为研究对象, 通过对穿孔熔池背面进行区分和定义, 分析了穿孔横焊缝成形规律, 结果表明, 温宽偏离度在垂直焊接方向上的分量与重力方向相反时, 可以有效减轻重力对穿孔熔池的负面影响. Yan 等人^[9]研究了变位置 VPPAW 焊缝力学性能和残余应力, 总结了重

收稿日期: 2023 - 04 - 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52205322), 北京市博士后工作经费资助项目 (2022-ZZ-063).

力对焊缝中气孔的产生机理的影响,通过非对称传质策略,削弱重力对熔池流动的影响来降低空隙率,很好地实现了多位置下无气孔焊接.从现有研究成果看,国内外研究学者对 VPPAW 焊接铝合金在焊接电源及设备、VPPAW 电弧特性及影响焊接过程稳定性因素、熔池形态与监测、焊接接头微观组织与力学性能等方面的研究较多,而对于 VPPAW 穿孔焊接匙孔自由闭合的研究比较稀缺.实际生产中,手工 TIG 能够对焊缝收弧处进行补焊,但因其自身工艺特性,焊缝容易出现应力集中、元素烧损、气孔率高等问题.对于结构复杂、体积较大、强度要求较高的铝合金构件手工 TIG 可能无法满足相应需求.

以 VPPAW 穿孔焊接 5A06 铝合金板起弧、收弧为研究对象,通过调节焊接起弧、收弧策略,实现等离子弧匙孔自由闭合精确调控,为解决等离子穿孔焊匙孔滞留问题提供理论基础与技术支持.

1 试验方法

1.1 试验材料与设备

按照图 1 所示的设备示意图搭建了 VPPAW 焊接系统.该系统包括 VPPAW 控制柜、冷却装置、送气系统、送丝系统、等离子枪、工作台.设备调试完成后,使用直径 1.2 mm 的 ER5183 铝合金丝材在厚度为 6 mm 的 5A06 铝合金试板上进行环焊缝起弧、收弧试验.丝材和试板化学成分如表 1 所示.作为对比,使用手工 TIG 进行焊后填补匙孔试验,所用电流为变极性电流,极性比为 50:50,电流范围为 110~120 A.

1.2 等离子弧穿孔焊接

图 2 是采用 VPPAW 穿孔焊接焊缝起弧段、收弧段和环焊缝收弧处的形貌.在等离子弧穿孔焊接过程中,电弧对熔池的热和力相互影响.受热力耦

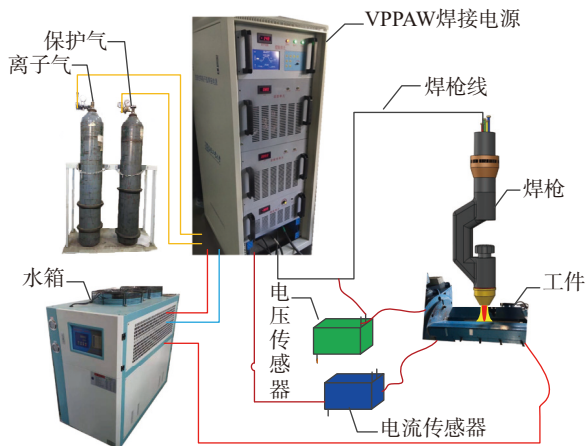


图 1 VPPAW 穿孔焊接设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VPPAW equipment

合特性的影响,在穿孔初始阶段易发生爆破式穿孔,导致焊缝起弧处正面被迫扩大形成圆形凹坑,背面形成不规则的爆破瘤.焊接结束段由于热力同步减小,匙孔不能自由闭合,以致难以完成首尾相接的环缝焊接,需要二次补焊.结合等离子弧热力耦合特性,对等离子弧耦合进行拆解.通过对各耦合元分别调控,获得能够适应穿孔焊接起弧和收弧的热力耦.各段解耦调控过程如图 3 所示,通过控制起弧段、焊接段和收弧段离子气流量、焊接电流、焊接速度和送丝速度等参数,实现环缝首尾搭接且匙孔高质量自由闭合. $t_0 \sim t_2$ 为起弧段,起弧段送丝速度、焊接速度均为 0,离子气流量和焊接电流分两段增加, $t_0 \sim t_1$ 段为起弧预热阶段,速度提升较缓, t_1 处电弧引燃,该段的电流值范围为 60~90 A,离子气流量为 1.0~1.5 L/min; $t_1 \sim t_2$ 是上升阶段,电流由预热电流向焊接电流过渡, t_2 点焊接开始. $t_2 \sim t_3$ 为焊接段,该段离子气流量、焊接电流、焊接速度和送丝速度保持不变,直至熄弧开始点 t_3 .所用电流为变极性电流,正负极性比为 24:4,电流比为 (130~140):(160~170).熄弧过程在 $t_3 \sim t_7$ 时间内完成,在该时间段内,保持离子气流量持续下降.同时,焊接电流迅速升高至特定值后再加速下降,送丝速度经历两次垂直增加后下降,焊接速度也保持下降.

表 1 丝材和试板化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of work plates and filler wire material

材料	Mg	Cu	Si	Mn	Zn	Ti	Fe	Al
5A06	6.40	0.03	0.06	0.60	—	0.05	0.13	余量
ER5183	4.50	0.10	0.25	0.50	0.25	0.15	0.40	余量

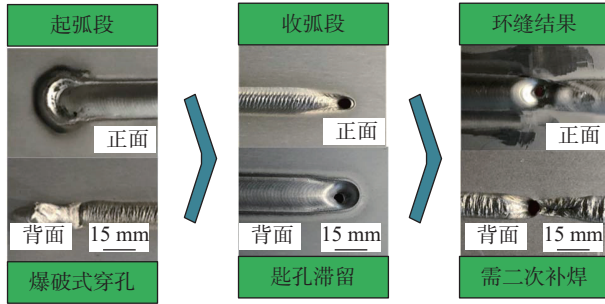


图2 穿孔焊接焊缝端部形貌

Fig. 2 Topography of the end of the perforated weld

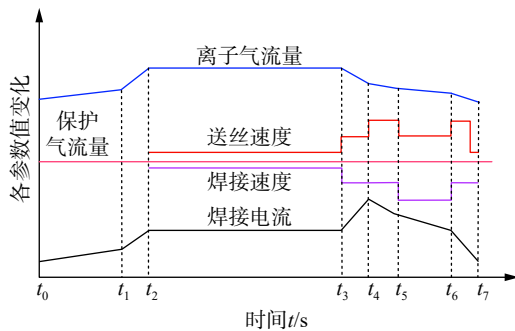


图3 焊接过程参数变化

Fig. 3 Parameters change in welding process

1.3 微观组织与力学性能试验步骤

使用线切割在工件焊缝闭合匙孔区截取金相试样和拉伸试样. 为尽可能测得闭合匙孔区实际应用时的拉伸性能, 保留了拉伸件焊缝余高, 其尺寸如图4所示. 使用 Smartproof 5 型共聚焦显微镜观察了收弧处焊缝截面宏观形貌; 使用 Olympus DSX500 型金相显微镜观察截面微观组织; 使用 HV-1MD 型转塔式显微镜硬度仪测量了焊缝硬度. 测量过程中, 加载载荷为 2 N, 加载时间为 10 s, 测量点间距为 0.5 mm; 使用 WDW-50 型万能电子拉伸试验机测量了试样抗拉强度和断后伸长率, 拉伸速率为 1 mm/min; 使用 Regulus8230 型扫描电子显微镜观察了拉伸件断口形貌.

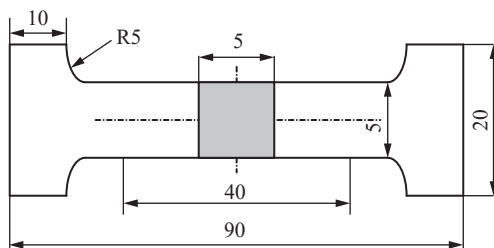


图4 拉伸试样尺寸 (mm)

Fig. 4 Dimensions of the tensile samples

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形

作为对比, 使用手工 TIG 对焊缝进行填补试验. 两种方式下焊缝收弧处形貌与截面宏观形貌如图5所示. 采用 VPPAW 收弧方式, 焊缝收弧区长度为 25 mm, 焊缝余高为 1.5 mm, 焊缝宽度为 11.5 mm, 起弧端和熄弧端连接良好, 焊缝截面未见明显气孔. 采用手工 TIG 填补的方式, 焊缝收弧区长度为 35 mm, 焊缝余高为 2.8 mm, 焊缝宽度为 13 mm, 截面有较多气孔分布, 影响焊缝收弧处的结合强度. 对比以上结果可以看出, VPPAW 收弧获得的收弧处焊缝尺寸更小, 气孔等缺陷更少.

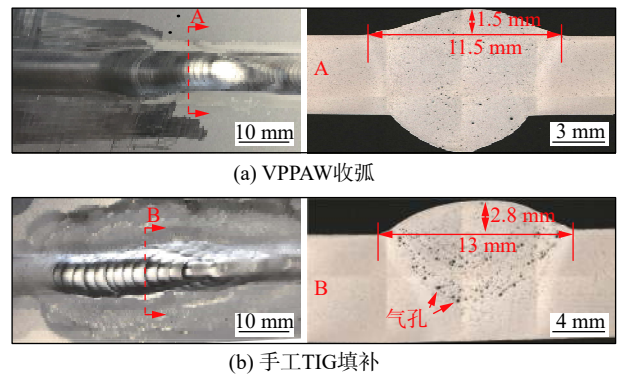


图5 收弧处焊缝形貌与截面宏观形貌

Fig. 5 Appearance of weld and the macroscopic appearance of cross section at arc closure. (a) VPPAW closure; (b) manual TIG filling

2.2 微观组织

图6为 VPPAW 收弧和 TIG 填补两种方式下收弧处熔合线和焊缝区微观组织. 从图6(a), 6(c)中可以看出, 手工 TIG 填补的焊缝热影响区长度、晶粒尺寸 (平均值为 $30.2 \mu\text{m}$) 和熔合线宽度均大于 VPPAW 收弧焊缝 (晶粒平均值为 $25.5 \mu\text{m}$). 从图6(b), 6(d)中可以看出, 两种方式下收弧处焊缝区组织均为等轴晶且组织结构相同, 为 $\alpha(\text{Al})$ 相. 不同的是, VPPAW 收弧焊缝区组织均匀, 无明显缺陷, 而 TIG 填补焊缝区组织可见明显的分层现象. 分层线上部晶粒相对较小, 分层线下部晶粒尺寸较大. 此外, 在分层区有较多的气孔分布, 气孔尺寸在 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间. 两种收弧方式下焊缝的这种差异, 主要与手工 TIG 填补匙孔过程中的多次填丝有关. 采用手工 TIG 填补匙孔时, 需要多次送丝,

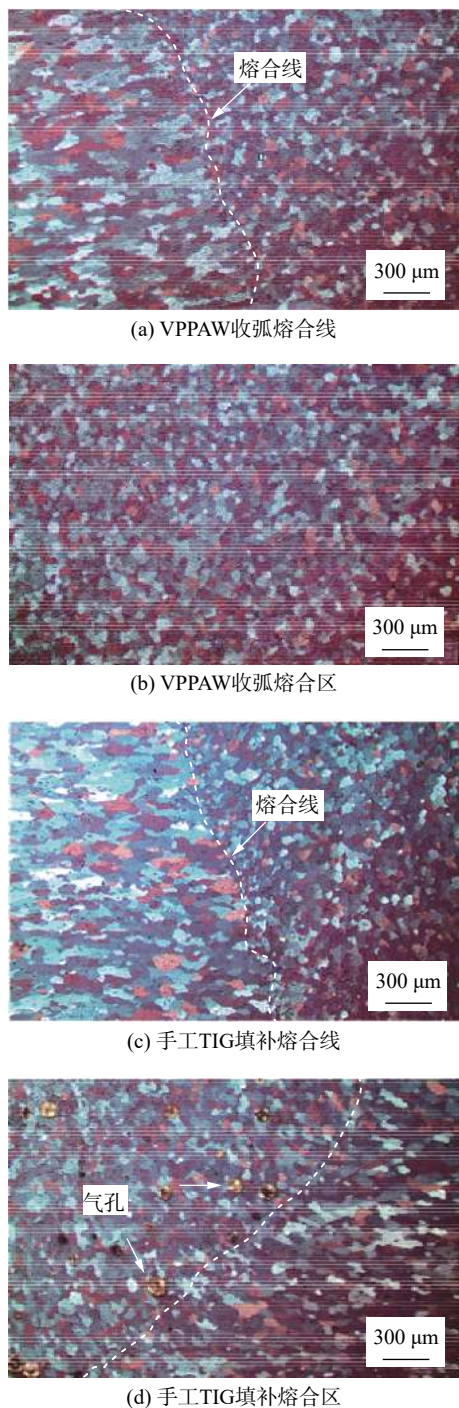


图 6 焊缝闭合匙孔处微观组织

Fig. 6 Microstructure at key hole closure of weld. (a) fusion line of VPPAW; (b) fusion area of VPPAW; (c) fusion line of the manual TIG filled keyhole; (d) fusion area of the manual TIG filled keyhole.

才能将匙孔填补完全, 这种往复填补的方式, 一方面使得填补区被多次加热, 导致该区域晶粒粗大. 另一方面, 先填丝层作为后填丝层的“基板层”, 后填入的熔融金属因为急冷而形成细晶区, 先填丝层则因受到后填入熔融金属的热影响而晶粒粗化, 形成焊缝分层现象. 氢气滞留是气孔形成的主要的原因^[10]. 手工 TIG 多次填丝工艺增加了外部含氢因

子侵入熔池的概率, 凝固时有更多氢气生成. 其次, 先填入金属表面生成的氧化物颗粒可能会成为氢气的聚集区, 导致焊缝分层处气孔数量较高. 与手工 TIG 填补工艺不同, VPPAW 在收弧时, 电弧过渡平稳连续, 不需要多次送丝, 组织较为均匀.

2.3 力学性能

测量了试样横截面硬度, 结果如图 7 所示. VPPAW 收弧区试样硬度平均值为 78.9 HV0.2, TIG 填补区试样硬度平均值为 83.1 HV0.2, TIG 填补区硬度高于 VPPAW 收弧区. 两种收弧方式收弧区硬度均表现出热影响区硬度下降和熔合线区硬度上升的变化趋势. 不同的是, TIG 填补区母材硬度高于 VPPAW 收弧区母材硬度, TIG 填补区焊缝硬度变化波动较大, 最大值为 90.9 HV0.2, 最小值为 71.2 HV0.2. VPPAW 收弧区焊缝硬度变化波动较小, 波动范围为 75~81 HV0.2. 采用 TIG 填补时需要匙孔多次填丝, 导致收弧区焊缝内部存在分层现象, 分层线上部为后填丝区, 晶粒较小, 硬度高. 分层线下部受到热影响, 晶粒被粗化, 硬度下降. TIG 填补区硬度高于 VPPAW 收弧区可能是由于 TIG 填补区拥有较高的位错密度. 这是因为手工 TIG 闭合匙孔时需要多次填入金属, 该区域经历了多次的熔化和凝固, 组织尺寸较不均匀, 内部应力较大, 位错密度高. 为保证匙孔填补完全, 填入熔融金属的体积较大, 使得冷却后填补区应力较大. 较大的应力集中导致硬度升高. VPPAW 收弧为均匀过渡, 焊缝组织尺寸较为均匀, 硬度波动小. 以上硬度变化, 与前面的组织分析结果一致.

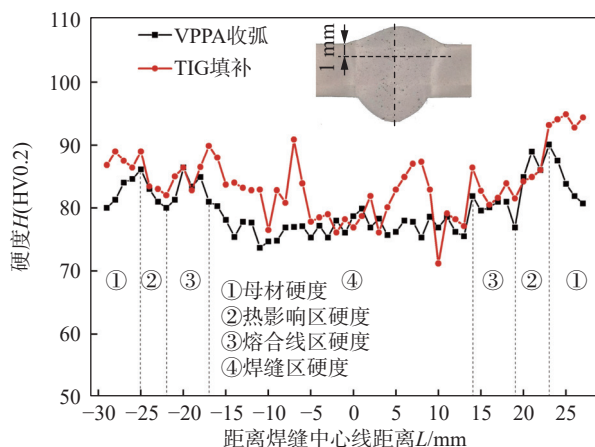


图 7 焊缝收弧处横截面硬度

Fig. 7 Cross-sectional hardness at the weld end

图 8 为 VPPAW 收弧、TIG 填补收弧区、母材的抗拉强度和断后伸长率. 母材抗拉强度为

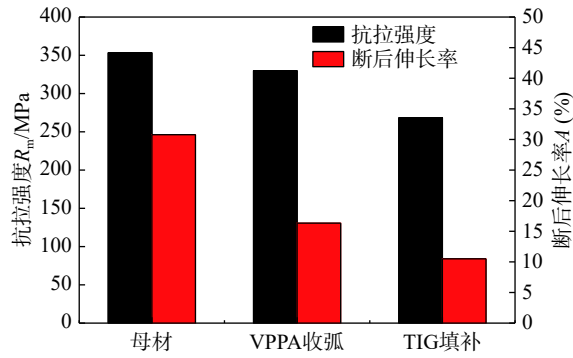


图8 焊缝收弧区抗拉强度和断后伸长率

Fig. 8 Tensile strength and elongation after fracture of weld arc closure zone

353.4 MPa, VPPAW 收弧处抗拉强度为 329.9 MPa, TIG 填补区抗拉强度为 268.4 MPa. 可以看出, VPPAW 收弧的焊缝抗拉强度与母材较为接近,

低于母材断后伸长率 30.78%. 而 VPPAW 收弧比 TIG 填补法的抗拉强度提高了 22.91%, 断后伸长率提高了 55.24%. 以上 3 组试样拉伸性能说明采用 VPPAW 收弧对母材影响程度小于 TIG 填补对母材的影响, 此结果与前面的组织分析结果一致.

图 9 为 TIG 填补、VPPAW 收弧两种拉伸件的断口形貌. 从图中可以看出, 两种试样断口形貌均为典型的韧性断裂, 断口表面有较多的韧窝分布. 与 TIG 填补试样相比, VPPAW 收弧断口韧窝分布较为均匀连续, 表面未见明显缺陷. TIG 填补试样断口局部区域可见韧窝分布密集区, 但气孔缺陷较多, 影响焊缝结合强度. 断口上韧窝分布密集区主要发生在焊缝分层线附近, 该区域晶粒较为细小, 相应的断裂韧性也较其他区域好.

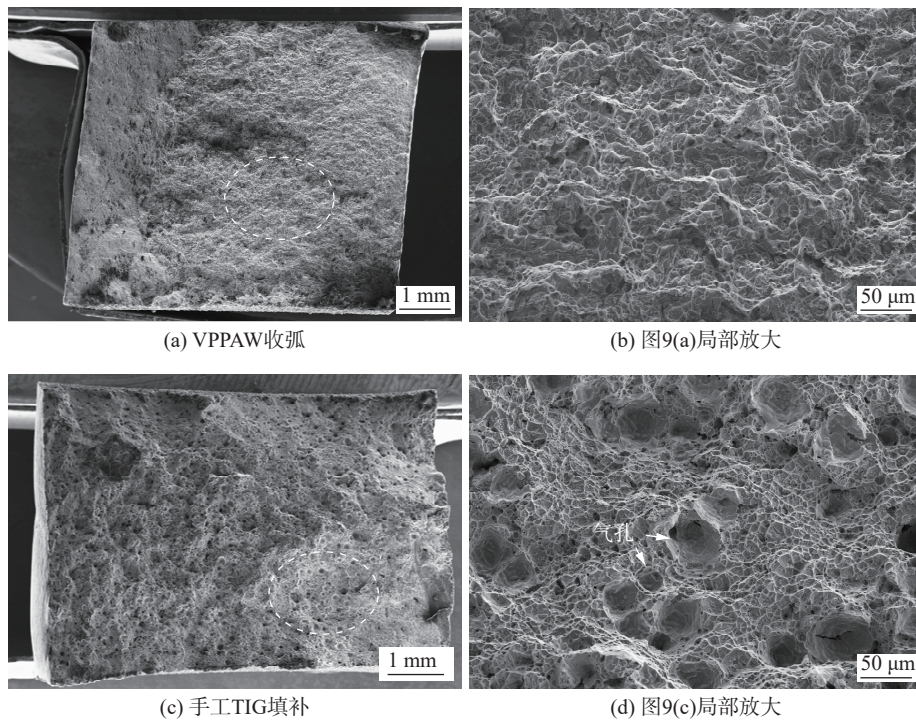


图9 拉伸件断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of tensile parts. (a) VPPA closure; (b) Fig. 9(a) partial magnification; (c) manual TIG filled; (d) Fig. 9(c) partial magnification

3 结论

(1) 提出了气电分离时序脉冲等离子弧铝合金环缝收弧方法, 通过调节焊接起弧、收弧策略, 成功实现了等离子弧穿孔焊接匙孔自由闭合, 获得了收弧区成形良好的焊缝, 横截面未出现气孔等缺陷, 热影响区晶粒无明显生长, 熔合线晶粒细小, 焊缝

区组织分布均匀, 为等轴晶.

(2) VPPAW 焊缝收弧处抗拉强度为 329.9 MPa, 断后伸长率为 16.3%, 与母材抗拉强度 353.4 MPa 较为接近, VPPAW 收弧比 TIG 填补法的抗拉强度提高了 22.91%, 断后伸长率提高了 55.24%; VPPAW 焊缝收弧处硬度平均值为 78.9 HV0.2, 热影响区硬度呈现下降趋势, 熔合线处硬度呈现升高的趋势, 焊缝区硬度变化波动较小, 波动范围为

75 HV0.2 ~ 81 HV0.2.

参考文献

- [1] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状, 趋势及展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68 – 75.
Guan Renguo, Lou Huafen, Huang Hui, *et al.* Development of aluminum alloy materials: current status, trend, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 68 – 75.
- [2] 王泽荫. 铝合金焊接技术现状研究 [J]. 世界有色金属, 2021(10): 4 – 5.
Wang Zeyin. Research on status of the aluminum alloy welding technology[J]. World Nonferrous Metals, 2021(10): 4 – 5.
- [3] 舒伟. 基于铝合金先进焊接工艺的探索 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(3): 171 – 173.
Shu Wei. Exploration of advanced welding technology based on aluminum alloy[J]. Modern Manufacturing Technology & Equipment, 2022, 58(3): 171 – 173.
- [4] 吕耀辉, 殷树言, 陈树君, 等. 变极性穿孔等离子弧焊接系统的研制 [J]. 电焊机, 2003, 33(5): 29 – 31.
Lü Yaohui, Yin Shuyan, Chen Shujun, *et al.* Development of variable polarity perforated plasma arc welding system[J]. Electric Welding Machine, 2003, 33(5): 29 – 31.
- [5] 春兰, 韩永全, 陈芙蓉, 等. 铝合金脉冲变极性等离子弧焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2016, 37(1): 29 – 32.
Chun Lan, Han Yongquan, Chen Furong, *et al.* Pulse variable polarity plasma arc welding technology of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(1): 29 – 32.
- [6] 韩永全, 陈树君, 殷树言, 等. 铝合金变极性等离子弧电特性 [J]. 电焊机, 2006, 36(2): 27 – 29.
Han Yongquan, Chen Shujun, Yin Shuyan, *et al.* Electrical characteristics of aluminum alloy VPPA[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(2): 27 – 29.
- [7] 周阳, 齐铂金. VPPAW 工艺的变极性焊接电流受控稳定性 [J]. 焊接学报, 2022(4): 16 – 25.
Zhou Yang, Qi Bojin. Controlled stability of variable polarity welding current in VPPAW process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022(4): 16 – 25.
- [8] 陈树君, 蒋凡, 张俊林, 等. 铝合金变极性等离子弧穿孔横焊缝成形规律分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(4): 29 – 32.
Chen Shujun, Jiang Fan, Zhang Junlin, *et al.* Principle of weld formation in variable polarity keyhole plasma arc transverse welding of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4): 29 – 32.
- [9] Yan Z Y, Chen S J, Jiang F, *et al.* Control of gravity effects on weld porosity distribution during variable polarity plasma arc welding of aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 282(5-8): 116693.
- [10] Xue C, Zhang Y, Mao P, *et al.* Improving mechanical properties of wire arc additively manufactured AA2196 Al-Li alloy by controlling solidification defects[J]. Additive Manufacturing, 2021, 43: 102019.

第一作者: 王小伟, 博士研究生; 主要从事电弧增材及高效焊接工艺等方面的研究; Email: 15290408287@163.com.
通信作者: 闫朝阳, 博士, 副教授; Email: yanzzy@bjut.edu.cn.

(编辑: 王盈盈)