

2219铝合金双脉冲VP-GTAW 接头组织与性能*

从保强^{1,2}, 樊 弢^{1,2}, 齐铂金^{1,2}, 王义朋^{1,2}, 祁泽武^{1,2}

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 航空高端装备智能制造工信部重点实验室, 北京 100191)

[摘要] 以4mm 2219-T87 高强铝合金平板为对象, 分别使用 ER2319 Al-Cu 焊丝和 ER5087 Al-Mg 焊丝作为填充材料, 研究双脉冲变极性钨极氩弧焊(VP-GTAW)对接接头的显微组织和力学性能。结果表明, 与常规 VP-GTAW 工艺相比, 对焊接电流进行低频脉冲调制的双脉冲 VP-GTAW 工艺可细化晶粒, 改善焊缝显微组织; 提高对接接头力学性能, 且抗拉强度和断后伸长率均在低频脉冲频率为 2Hz 时达到最大值。与 Al-Cu 焊丝接头相比, Al-Mg 焊丝接头可以在保持对接接头塑性的同时, 提高抗拉强度和显微硬度, 抗拉强度最大为 328MPa, 达到母材的 72%; 焊缝区显微硬度达到 100HV 以上。Al-Cu 焊丝接头和 Al-Mg 焊丝接头均为脆性-韧性混合断裂。

关键词: 2219 铝合金; 双脉冲 VP-GTAW; 显微组织; 力学性能; 脉冲调制

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.016



从保强

工学博士、副教授, 一直从事新型高效脉冲电弧焊接工艺装备、高效电弧填丝增材制造等方面的研究工作, 先后主持和参与国家自然科学基金、北京市自然科学基金、总装预研基金、航空科学基金等多个项目, 发表 SCI/EI 检索学术论文 60 余篇。

2219 铝合金是一种可热处理强化的 Al-Cu 系合金, 具有良好的比强度、断裂韧性、抗应力腐蚀性及焊接性, 广泛应用于航空航天领域中, 是我国新一代运载火箭贮箱的结构材料^[1]。运载火箭贮箱是一种复杂的焊接结构, 存在大量横向及纵向焊缝^[2], 焊接质量直接影响着贮箱最终性能。随着 2219 铝合金广泛应用, 国内科研人员对其焊接工艺进行了大量研究, 虽然已经研制出变极性等离子弧焊、电子束焊、搅拌摩擦焊等先进焊接工艺^[3-5], 但变极性钨极氩弧焊(variable polarity gas tungsten arc welding, VP-GTAW) 工艺因其设备简单、成本低、工艺适用性好等优点, 仍是 2219 铝合金贮箱生产制造的主导工艺。但研究表

* 基金项目: 北京市自然科学基金项目(3182020)。

明, 采用常规 VP-GTAW 工艺进行 2219 铝合金焊接存在着明显缺陷, 主要表现为气孔敏感性强、接头强度低^[6], 接头抗拉强度一般仅为母材的 60% 左右, 所以对焊接工艺进行改善十分必要。对焊接电流进行脉冲调制是一种提高焊接质量的新方法, 一方面脉冲调制可以显著增强熔池液态金属的搅拌作用, 有利于气体及时析出和晶粒细化; 另一方面脉冲加入可以降低总体热输入, 提升对接接头性能^[7]。国内对高频脉冲调制 VP-GTAW 工艺进行了很多研究^[8-10], 但对低频脉冲调制 VP-GTAW 工艺研究甚少, 本文分别使用 ER2319 Al-Cu 焊丝和 ER5087 Al-Mg 焊丝作为填充材料, 研究 2219 铝合金双脉冲 VP-GTAW 接头显微组织与力学性能, 研究成果可为 2219 铝合金变极性钨极氩弧焊

工艺设计提供参考,具有一定应用价值。

试验方法

试验所用焊接母材为 2219-T87 铝合金板材,规格为 200mm × 100mm × 4mm,焊前先用丙酮擦拭去污,然后采用化学清理方法(10% NaOH, 15% HNO₃)去除表面氧化膜,最后用酒精擦拭并吹干。填充材料分别采用直径为 1.2mm 的 ER2319 Al-Cu 焊丝和 ER5087 Al-Mg 焊丝。母材及焊丝化学成分见表 1。

试验采用自主研发的快变换极性钨极氩弧焊电源,其产生的双脉冲 VP-GTAW 电流波形如图 1 所示。图 1 中, I_p 为峰值电流幅值, I_b 为基值电流幅值, T_p 为峰值电流持续时间, T_b 为基值电流持续时间,低频脉冲频率 $F_L=1/(T_p+T_b)$,低频脉冲占空比 $\delta_L=T_p/(T_p+T_b) \times 100\%$, T_{EN} 为正极性电流持续时间, T_{EP} 为负极性电流持续时间,变极性正向导通比 $R=T_{EN}/(T_{EN}+T_{EP}) \times 100\%$ 。

本文旨在研究低频脉冲频率和填充丝材对 2219-T87 铝合金对接接头显微组织和力学性能影响,为此设计 8 组工艺试验,填充焊丝、焊接电流和低频脉冲频率等主要工艺参数如表 2 所示,表中 Al-Cu、Al-Mg 两组为常规 VP-GTAW 工艺,其他 6 组为双脉冲 VP-GTAW 工艺。其他焊接工艺参数为:低频脉冲占空比 50%,变极性频率 100Hz,变极性正向导通比 80%,焊接速度 150mm/min,送丝速度 1.5m/min,99.99% 氩气流量 15L/min,钨极 WC20 直径为 4mm,

弧长 3mm。

图 2 为 Al-Cu 2# 焊接接头正面外观,可以看出双脉冲 VP-GTAW 工艺焊缝成形良好,焊缝表面有均匀美观鱼鳞纹。垂直于焊缝方向切取拉伸试样,并去除反面余高,每组工艺取 3 个试样,试样尺寸如图 3 所示,在 HDW-50K 拉伸试验机上进行拉伸试验,拉伸速度 2mm/min。垂直焊缝方向切取金相试样,并使用 Keller 试剂(HNO₃:2.5mL; HCl:1.5mL; HF:1mL; H₂O:95mL)浸蚀抛光后试样,在蔡司 Axiocam 506 color 光学显微镜下观察显微组织并拍照。使用 D/Max-2200pc X 射线衍射仪对接头横截面进行物相分析,确定焊缝主要物相组成;使用 HVD-1000TEST 显微硬度计测定显微硬度(HV),测量时加载力为 1.96N,保持时间为 15s;使用 Camscan-3400 扫描电子显微镜观察拉伸试样断面形貌。

结果与讨论

1 显微组织

2219 铝合金双脉冲 VP-GTAW 焊接接头显微组织如图 4 所示,从焊缝中心向外,依次为焊缝区、熔合区和热影响区,最终过渡到母材。图 4 (a) 为焊缝中心显微组织,由柱状树枝晶和等轴树枝晶构成,有大量强化相分布在基体中;图 4 (b) 左下为焊缝区(weld zone, WZ)边缘,区域内有柱状树枝晶垂直于熔合线并向焊缝中心方向生长,右上为热影响区(heat affected zone, HAZ),焊缝区向热影响区过渡的窄小区域即为熔合区(fusion zone, FZ),熔合区是焊丝与基体金属形成的一种交混合金^[11],

由细小等轴晶构成;图 4 (c) 为热影响区,该区域是焊接时未熔化母材在焊接热循环作用下形成的,由等轴晶组成,近熔合线区与远熔合线区晶粒尺寸有着明显区别,近熔合线区晶粒

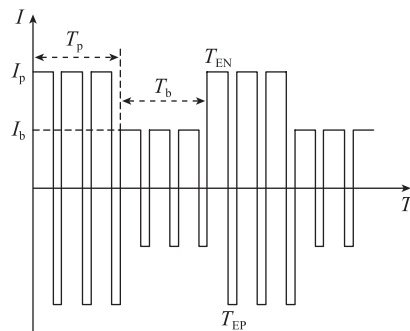


图1 双脉冲VP-GTAW电流波形示意图
Fig.1 Current waveform of double-pulsed VP-GTAW



图2 Al-Cu 2#焊接接头正面外观
Fig.2 Appearance of Al-Cu 2# welded joint

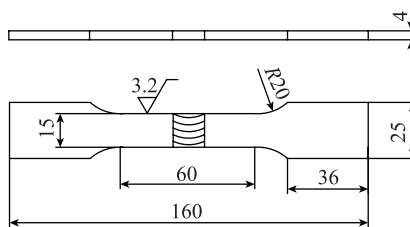


图3 拉伸试样示意图
Fig.3 Sketch map of tensile sample

表2 试验主要工艺参数

Table 2 Main process parameters

分组	填充焊丝	焊接电流 (I_p/I_b)/A	低频脉冲频率 /Hz
Al-Cu	ER2319	210	—
Al-Cu 1#	ER2319	280/140	1
Al-Cu 2#	ER2319	280/140	2
Al-Cu 3#	ER2319	280/140	3
Al-Mg	ER5087	210	—
Al-Mg 1#	ER5087	280/140	1
Al-Mg 2#	ER5087	280/140	2
Al-Mg 3#	ER5087	280/140	3

表1 母材及填充材料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of base metal and filler

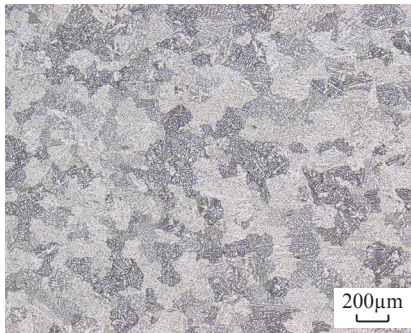
材料	Cu	Mg	Mn	Si	Zr	Fe	Zn	Ti	Al
2219	6.3	—	0.3	0.20	0.17	0.3	0.10	0.1	余量
ER2319	6.3	—	0.28	0.04	0.19	0.1	0.12	0.145	余量
ER5087	—	5.05	0.74	0.05	0.12	0.1	0.2	0.114	余量

更加粗大;图4(d)为母材显微组织,由于母材是轧制成形的,所以晶粒呈拉长状态并有一定取向。

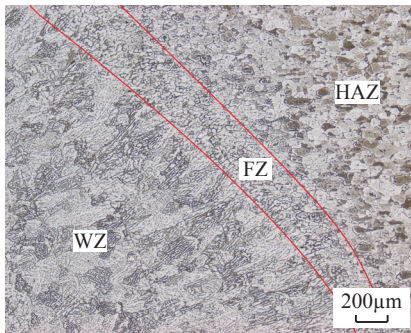
8组不同工艺条件下焊缝区显微组织如图5所示。可以看出,焊缝区均由柱状树枝晶和等轴树枝晶组成,有大量强化相分布在晶界和晶粒内,与Al-Cu焊丝接头相比,Al-Mg

焊丝接头焊缝区等轴晶更多。对比常规VP-GTAW工艺与双脉冲VP-GTAW工艺焊缝区晶粒可知,双脉冲VP-GTAW工艺下晶粒更加细小,这

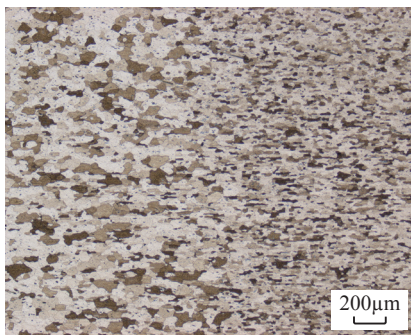
焊丝接头焊缝区等轴晶更多。对比常规VP-GTAW工艺与双脉冲VP-GTAW工艺焊缝区晶粒可知,双脉冲VP-GTAW工艺下晶粒更加细小,这



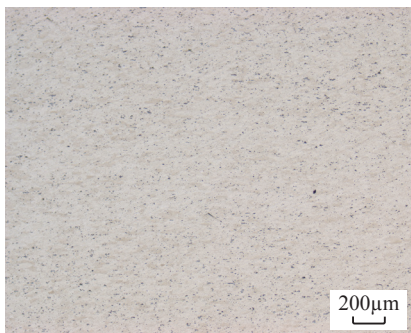
(a) 焊缝中心



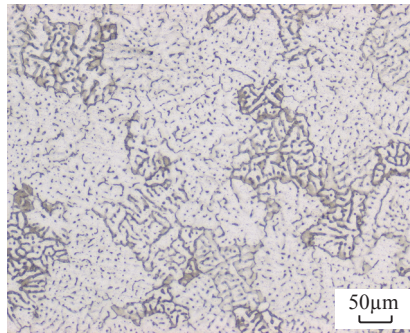
(b) 焊缝区-熔合区-热影响区



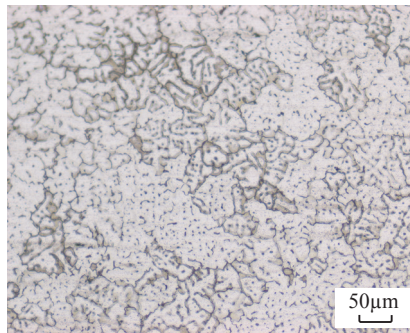
(c) 热影响区



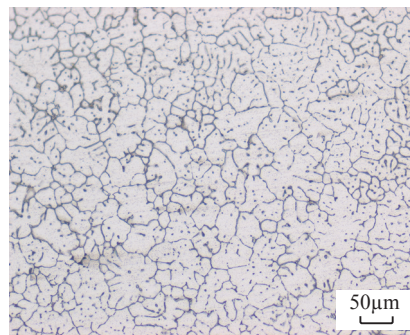
(d) 母材



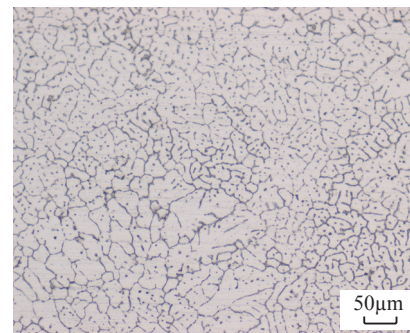
(a) Al-Cu



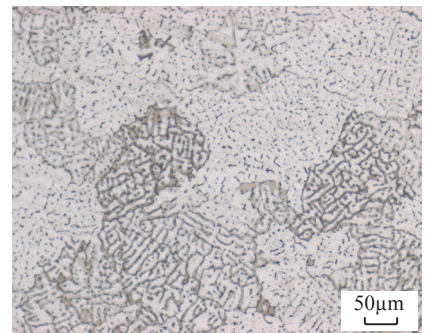
(c) Al-Cu 2#



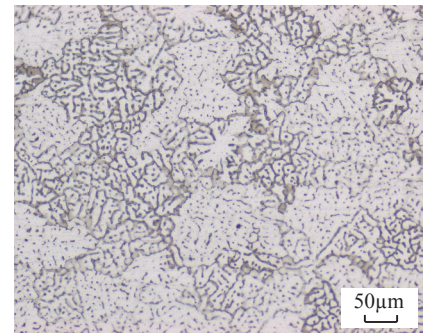
(e) Al-Mg



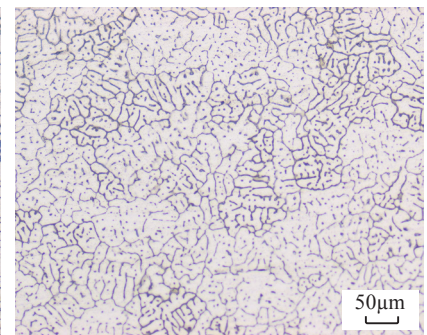
(g) Al-Mg 2#



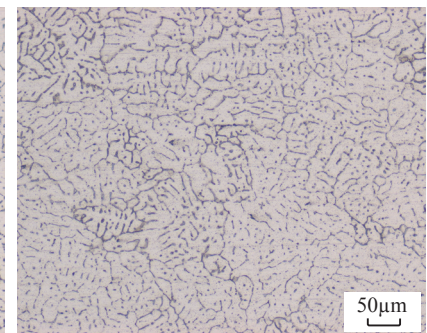
(b) Al-Cu 1#



(d) Al-Cu 3#



(f) Al-Mg 1#



(h) Al-Mg 3#

图4 Al-Cu 2#接头微观组织

Fig.4 Microstructure of Al-Cu 2# welded joint

图5 各组接头焊缝区显微组织

Fig.5 Microstructure of weld zone

是由于低频脉冲调制使焊接电流发生周期性变化,从而引起电弧压力周期性变化,导致熔池表面液态金属振动,增强熔池液态金属的搅拌作用,提高熔池流动性,使晶粒生长被抑制^[12-13]。

对 Al-Cu 焊丝接头和 Al-Mg 焊丝接头横截面进行 XRD 物相检测,发现在填充丝材相同时检测结果相似,所以挑选 Al-Cu 2# 接头与 Al-Mg 2# 接头进行分析,其 XRD 检测结果如图 6 所示,可知在 Al-Cu 焊丝接头中主要存在 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 两种相,而在 Al-Mg 焊丝接头中,由于 Mg 元素的加入,除 $\alpha(\text{Al})$ 和 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相外还存在 S(Al_2CuMg) 相。

2 力学性能

2.1 显微硬度

由图 7 可知,在使用相同焊丝的情况下,显微硬度的变化趋势相同,并没有因为采用不同工艺而产生明显差别。在距焊缝中心 5mm 左右的焊缝区内,Al-Cu 焊丝接头显微硬度在较小范围内波动,且显微硬度最小值出现在此区域内,在进入热影响区后显微硬度先升后降,在距焊缝中心 10mm 以后显微硬度上升,并最终趋于母材硬度。与 Al-Cu 焊丝接头相比,Al-Mg 焊丝接头焊缝区显微硬度提高约 40HV,达到 100HV 以上;熔合区显微硬度提高约 5HV,达到 77HV 以上;热影响区显微硬

度基本相同。这是由于 Al-Mg 焊丝接头中 Mg 元素加入会在焊缝区和熔合区中形成 S(Al_2CuMg) 相,研究表明三元强化相 (Al_2CuMg) 与 $\alpha(\text{Al})$ 基体所产生的强化作用优于二元强化相 (Al_2Cu)^[14],所以显微硬度得到提升,同时焊缝区中 S(Al_2CuMg) 相多于熔合区,所以焊缝区显微硬度提升更显著,而热影响区由母材经热循环形成,没有 Mg 元素加入,所以显微硬度与 Al-Cu 焊丝接头相同。

2.2 拉伸性能

将加工好的拉伸试样进行室温拉伸试验,断裂后拉伸试样如图 8 所示,可发现对接接头均在熔合区发生

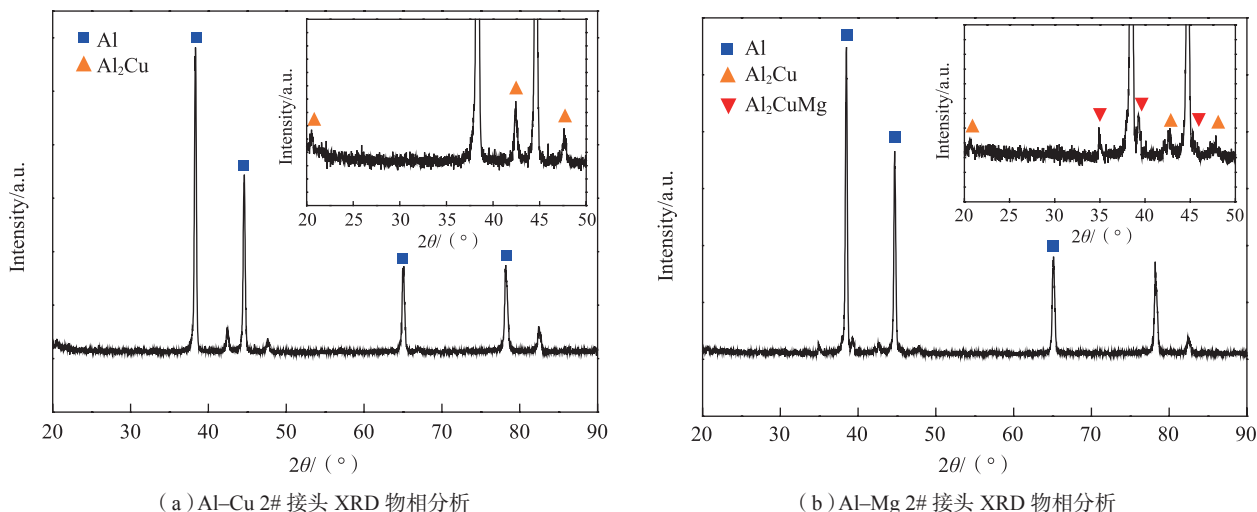


图6 接头XRD物相分析
Fig.6 XRD results of welded joints

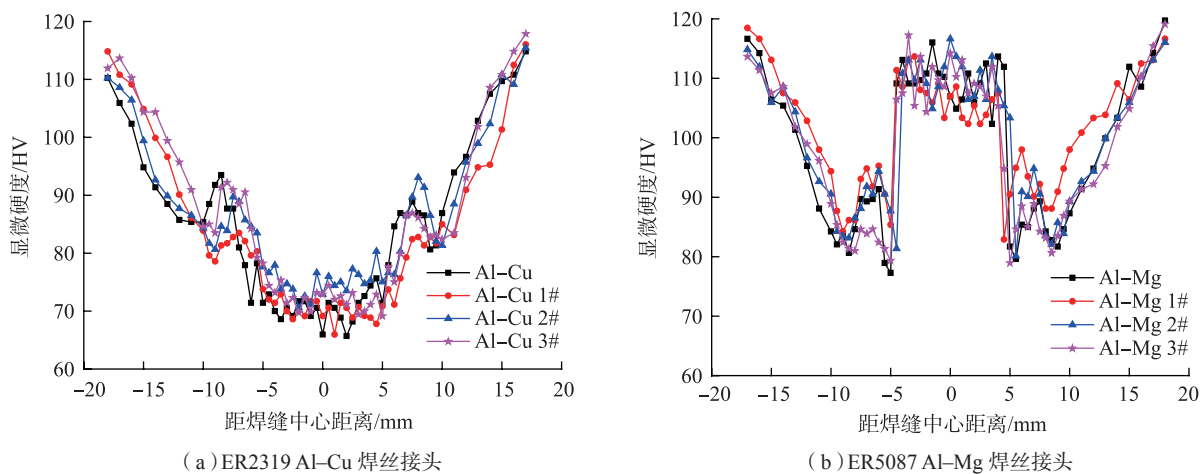


图7 接头显微硬度
Fig.7 Microhardness of welded joints

断裂。对于 Al-Mg 焊丝接头, 熔合区是显微硬度最低区域, 所以接头在此区域断裂; 对于 Al-Cu 焊丝接头, 虽然显微硬度最小值出现在焊缝区, 但焊缝余高增加了焊缝区受力面积, 使得拉伸试样同样在熔合区断裂。母材及各对接接头拉伸性能如表 3 所示, 可以看出, 与母材相比, 各对接接头抗拉强度和断后伸长率都发生了显著下降。使用 ER2319 焊丝并采用常规 VP-GTAW 工艺的 Al-Cu 接头抗拉强度为 279MPa, 仅达到母材的 61%; 断后伸长率 5.4%, 为母材的 44%。相比之下, 采用双脉冲 VP-GTAW 工艺的 Al-Cu 1#、Al-Cu 2# 和 Al-Cu 3# 接头抗拉强度和断后伸长率都得到了不同程度的提高, 其中 Al-Cu 2# 接头抗拉强度为 299MPa, 较 Al-Cu 接头提高了 7.2%; 断后伸长率为 6.6%, 较 Al-Cu 接头提高了 22.2%。在其他参数相同情况下, 与 Al-Cu 焊丝接头相比, Al-Mg 焊丝接头断后伸长率基本不变, 但抗拉强度得到提高, 这与 Al-Mg 焊丝接头熔合区显微硬度更高相符合。使用

Al-Mg 焊丝后, 与 Al-Cu 焊丝接头规律相同, 较常规 VP-GTAW 工艺, 采用双脉冲 VP-GTAW 工艺 Al-Mg 焊丝接头抗拉强度和断后伸长率都会更高, 并在低频脉冲频率时达到最大值, 此时抗拉强度为 328MPa, 达到了母材的 72%。

2.3 断口分析

从图 9 所示的对接接头断口形

表3 母材及各对接接头拉伸性能
Table 3 Tensile properties of base metal and joints

分组	抗拉强度 / MPa	断后伸长率 / %	接头强度系数
母材	458	12.3	—
Al-Cu	279	5.4	0.61
Al-Cu 1#	286	5.9	0.62
Al-Cu 2#	299	6.6	0.65
Al-Cu 3#	290	6.0	0.63
Al-Mg	316	5.5	0.69
Al-Mg 1#	320	5.8	0.70
Al-Mg 2#	328	6.4	0.72
Al-Mg 3#	321	5.9	0.70

貌可知, Al-Cu 焊丝接头与 Al-Mg 焊丝接头断裂类型相同, 均属于脆性-韧性混合断裂, 断口中存在大量韧窝, 表现出韧性特征, 但韧窝小而浅, 多为等轴韧窝, 说明试样断裂前变形量较小, 同时断口中存在层状断面, 表现出脆性特性。

结论

(1) 与常规 VP-GTAW 工艺相比, 由于低频脉冲对熔池的搅拌作用, 双脉冲 VP-GTAW 工艺对接接头焊缝区晶粒得到细化。

(2) 与常规 VP-GTAW 工艺相比, 双脉冲 VP-GTAW 工艺对接接头抗拉强度与断后延伸率都得到了提高, 且在低频脉冲频率为 2Hz 时达到最大值。

(3) 与 Al-Cu 焊丝接头相比, Al-Mg 焊丝接头在保持接头塑性的同时提高了接头抗拉强度和焊缝区显微硬度, 抗拉强度最大为 328MPa, 达到母材的 72%。

(4) Al-Cu 焊丝接头和 Al-Mg 焊丝接头均为脆性-韧性混合断裂。

参考文献

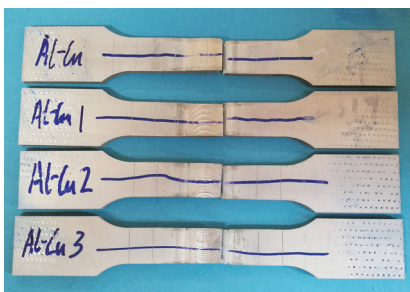
[1] 姚君山, 周万盛, 王国庆, 等. 航天贮箱结构材料及其焊接技术的发展[J]. 航天制造技术, 2002(5): 17-22.

YAO Junshan, ZHOU Wansheng, WANG Guoqing, et al. Development of structural material and welding technology of space tanks[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2002(5): 17-22.

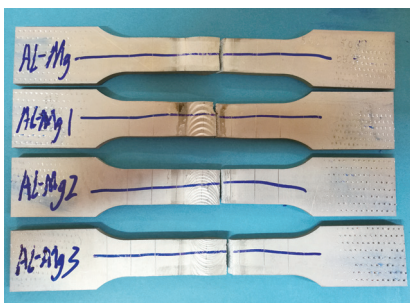
[2] 刘志华, 尚育如, 宁立芹, 等. 新一代运载火箭贮箱焊接工艺评价的概念及应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(4): 30-34.

LIU Zhihua, SHANG Yuru, NING Liqin, et al. Conception and application of welding processing evaluation for tanks in new generation launch vehicle[J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(4): 30-34.

[3] 李小宇, 杜兵, 徐良, 等. 2219-T87 铝合金变极性等离子弧焊工艺工程适应性研究[J]. 焊接, 2013(10): 45-47.



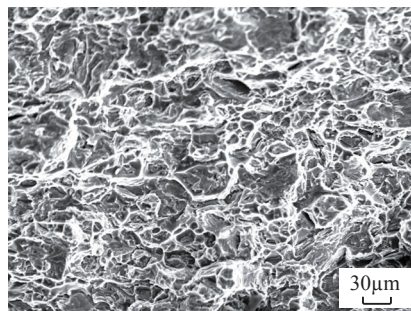
(a) Al-Cu 试样



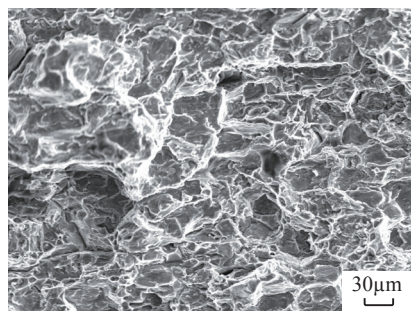
(b) Al-Mg 试样

图8 拉伸试样断裂位置

Fig.8 Fracture location of tensile sample



(a) Al-Cu 2# 接头断口形貌



(b) Al-Mg 2# 接头断口形貌

图9 对接接头断口形貌

Fig.9 Fracture morphology of welded joint

LI Xiaoyu, DU Bing, XU Liang, et al. Study on the adaptability of 2219-T87 aluminum alloy pole changing plasma arc welding process engineering[J]. *Welding & Joining*, 2013(10): 45-47.

[4] 王春炎, 曲文卿, 姚君山, 等. 2219-T87 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能 [J]. *焊接学报*, 2010(10): 77-80.

WANG Chunyan, QU Wenqing, YAO Junshan, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded 2219-T87 aluminum alloy joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010(10): 77-80.

[5] 张聃. 2219 铝合金电子束焊接工艺及焊接接头性能与机理研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

ZHANG Dan. Study of EBW processes of 2219 aluminum alloy and performance and mechanism of welded joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[6] WANG G Q, LI Q, LI Y J, et al. Effects of weld reinforcement on tensile behavior and mechanical properties of 2219-T87 aluminum alloy TIG welded joints[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(1): 10-16.

[7] 刘安华. 高低频脉冲耦合振荡对铝

合金 DP-GMAW 焊缝成形的影响机制研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

LIU Anhua. Investigation on weld formation mechanism of DP-GMAW welding on Al alloy under alternative oscillation of high-low frequency pulses[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[8] CONG B Q, YANG M X, QI B J, et al. Effects of pulse parameters on arc characteristics and weld penetration in hybrid pulse VP-GTAW of aluminum alloy[J]. *China Welding*, 2010(4): 68-73.

[9] 李玉龙, 从保强, 杨明轩, 等. 2219-T87 高强铝合金 HPVP-GTAW 焊缝成形参数 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(5): 712-716.

LI Yulong, CONG Baoqiang, YANG Mingxuan, et al. Weld appearance of 2219-T87 high strength aluminum alloy produced by HPVP-GTAW process[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(5): 712-716.

[10] OUYANG R J, CONG B Q, YANG M X, et al. Effect of pulse frequency on hardness characteristics of Al-Cu alloy HPVP-GTAW joints[J]. *China Welding*, 2015(1): 62-67.

[11] 李慧中, 郭菲菲, 梁霄鹏, 等. 焊丝成分对 2519 铝合金焊缝组织与性能的影响

[J]. *焊接学报*, 2008(4): 77-82.

LI Huizhong, GUO Feifei, LIANG Xiaopeng, et al. Effect of welding wire compositions on microstructures and mechanical properties of welded joint of 2519 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008(4): 77-82.

[12] LIU A H, TANG X H, LU F G. Study on welding process and prosperities of AA5754 Al alloy welded by double pulsed gas metal arc welding[J]. *Materials and Design*, 2013, 50: 149-155.

[13] 徐强, 国旭明, 王宗杰, 等. 双脉冲 MIG 焊对 2219Al-Cu 合金焊缝组织及性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2004(10): 3-5.

XU Qiang, GUO Xuming, WANG Zongjie, et al. Effects of the synergic-pulsed MIG welding on the microstructure and properties of 2219 Al-Cu alloy welds[J]. *Hot Working Technology*, 2004(10): 3-5.

[14] 赵志伟. 铝铜镁合金 EET 计算 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.

ZHAO Zhiwei. Use EET to calculate the properties of Al-Cu-Mg alloy[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2013.

通讯作者: 从保强, E-mail: cong bq@buaa.edu.cn.

Microstructure and Properties of 2219 Aluminum Alloy Welded Joint Produced by Double-Pulsed VP-GTAW Process

CONG Baoqiang^{1,2}, FAN Tao^{1,2}, QI Bojin^{1,2}, WANG Yipeng^{1,2}, QI Zewu^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. MIIT Key Laboratory of Aeronautics Intelligent Manufacturing, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The butt welding experiments were carried out using double-pulsed variable polarity gas tungsten arc welding (VP-GTAW) process with 4mm 2219-T87 high strength aluminum alloy as base metal, and ER2319 Al-Cu wire and ER5087 Al-Mg wire as filler wire, respectively. The microstructure and mechanical properties of welded joints were investigated. The results show that double-pulsed VP-GTAW process has benefits on refining grain size and improving mechanical properties. The maximum tensile strength and elongation can be achieved when the frequency of low-frequency pulse frequency is 2Hz. The tensile strength and microhardness of the 2219 aluminum alloy welded joints using Al-Mg wire are superior to that using Al-Cu wire with similar plastic property. The maximum tensile strength is 328MPa, which is 72% of base metal. The microhardness of weld zone is above 100HV. Fracture pattern of all welded joints is mixed fracture of brittle and ductile.

Keywords: 2219 aluminum alloy; Double-pulsed VP-GTAW; Microstructure; Mechanical property; Pulse modulation

(责编 逸飞)