

双级时效对 7050-T7451 铝合金搅拌摩擦焊组织及应力腐蚀敏感性的影响

张华¹, 郭启龙¹, 赵常宇¹, 林三宝², 石功奇³

(1. 北京石油化工学院, 北京, 102617; 2. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接技术国家重点实验室, 哈尔滨, 150001;
3. 英国焊接研究所, 剑桥, CB21 6AL, 英国)

摘要: 采用搅拌摩擦焊方法对 3 mm 厚 7050-T7451 铝合金进行焊接, 为改善接头应力腐蚀敏感性, 焊后进行 121 °C × 5 h + 163 °C × 27 h 双级时效处理. 通过对微观组织、显微硬度以及应力腐蚀敏感性的分析, 研究双级时效对焊接接头性能的影响. 结果表明, 双级时效后晶粒发生粗化, 晶界内析出相和周边无沉淀析出带 (PFZ) 变宽, 导致在热影响区和热力影响区出现大量不连续晶界; 接头热影响区的显微硬度有所下降, 但范围明显变窄, 接头组织的均一性得到改善; 时效处理后的接头在进行应力腐蚀试验 60 天后仍未发生断裂, 而未经时效处理的接头在 1 天内全部发生断裂, 说明双级时效有效降低了焊接接头的应力腐蚀敏感性.

关键词: 7050 铝合金; 搅拌摩擦焊; 双级时效; 应力腐蚀敏感性

中图分类号: TG 453+.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190513001

0 序言

7050 铝合金具有优异的比强度、韧性和抗疲劳性能, 被广泛应用于航空飞行器结构件^[1-2]. 目前对 7050 铝合金进行焊接的方法主要是搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW), 搅拌摩擦焊自 1991 年由英国焊接研究所发明以来, 成功解决了铝、镁等难焊金属的焊接问题, 得到了飞速发展和广泛应用^[3]. 目前对 7050 铝合金搅拌摩擦焊组织及力学性能研究已非常成熟^[4-6]. 由于 7050 铝合金中含有较高的 Zn 元素、Mg 元素, 导致对腐蚀非常敏感, 尤其是应力腐蚀开裂 (SCC). 同时由于搅拌摩擦焊过程中, 接头产生一定范围的软化区, 即热影响区和热力影响区. 经大量研究结果表明^[7-9], 软化区域通常为接头的腐蚀敏感区. 所以, 如何改善 7050 铝合金 FSW 接头的应力腐蚀敏感性至关重要.

为了改善搅拌摩擦焊的接头性能, 国内外研究人员提出了很多方法, 例如焊后热处理^[10]、微弧氧化^[11]、表面激光熔覆^[12]及表面喷涂^[13]等. 其中

应用最多的为焊后热处理. Sivaraj 等人^[14]研究了焊后热处理对 7075 铝合金 FSW 力学性能及微观组织的影响. 结果表明, 焊后热处理使 FSW 接头软化区的组织发生回复, 接头力学性能和显微硬度得到明显提高. Vijaya Kumar 等人^[15]发现对 7075 铝合金 FSW 进行焊后热处理, 显微硬度发生下降, 而耐点蚀能力得到显著提升. 龙社明等人^[16]利用焊后热处理提高 7003 铝合金焊接接头耐腐蚀能力, 效果显著, 并得出最佳热处理温度为 470 °C. 姜亮亮等人^[17]对钢焊接接头的 SCC 敏感性进行研究, 发现合理的焊后热处理能够显著降低接头的应力腐蚀敏感性. 对于 7050 铝合金的焊后热处理方法, 目前应用较多的为双级时效, 即通过先高温后低温或先低温后高温的时效方法, 使晶界结构发生改变, 以牺牲合金的部分强度来提高其耐腐蚀性^[18]. 该方法在 7050 铝合金上已广泛应用, 但针对 7050 铝合金搅拌摩擦焊的双级时效处理, 国内外研究极少.

文中通过对 7050 铝合金 FSW 进行双级时效处理, 观察双级时效处理前后 FSW 接头微观组织的改变, 研究双级时效处理对 FSW 接头应力腐蚀敏感性的影响. 为改善 7 系铝合金 FSW 接头的应力腐蚀敏感性提供参考.

收稿日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51774047); 北京市长城学者培养计划 (CIT&TCD20170309).

1 试验方法

焊接材料为 7050-T7451 轧制板材, 焊件尺寸为 $700\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 其主要化学成分见表 1, 力学性能见表 2. 搅拌摩擦焊试验在 TWI 焊接实验室完成, 焊接方式为单道对接焊. 焊接参数为: 焊接速度 320 mm/min , 转速 320 r/min . 搅拌头轴肩直径 25 mm , 搅拌针直径 8 mm , 搅拌针长 2.6 mm . 焊接完成后, 对 FSW 接头进行时效处理.

表 1 7050-T7451 铝合金化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 7050-T7451 Al alloy

Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Zr	Mn	Ti	Cr	V	Al
6.1	2.2	2.1	0.09	0.06	0.09	0.01	0.04	0.01	0.01	余量

表 2 7050-T7451 铝合金力学性能
Table 2 Mechanical properties of 7050-T7451 Al alloy

抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	断后伸长率 $A(\%)$
534.5	472	12.8

垂直于焊接方向切取试样用于金相组织观察、显微硬度及应力腐蚀试验. 金相试样经过打磨、抛光后, 使用金相腐蚀液腐蚀, 利用 Nikon ECLIPSE MA200 型光学显微镜观察双级时效前后接头的微观组织. 在抛光后的接头横截面中间位置 (距离上表面 1.5 mm), 使用 AMH-6L 型维氏硬度计进行硬度测量, 加载载荷为 $2\ 000\text{ g}$, 停留时间为 10 s . 拉伸试验参照国家标准 GB/T 228.1—2010, 在 WDJ-300B 型电子万能试验机上进行, 加载速度为 2 mm/min . 应力腐蚀试验采用国家标准 GB/T 15970.2—2000, 加载形式为四点弯曲 (图 1). 加载水平为母材屈服强度的 90%, 腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液.

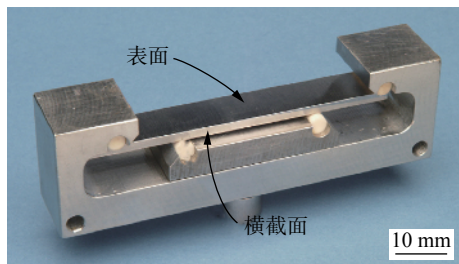


图 1 四点弯曲试样装配图

Fig. 1 Assembly drawing of four-point bending

对于 T6XXX 和 T7XXX 热处理状态下的 7 系铝合金, 主要采用的时效方法为双级时效. 双级时效包括两个过程: 第一个过程为短时低温时效处理 (例如在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 5 h), 在这个过程中, 会形成细小的 η' 析出相, 大大提高接头的拉伸强度; 第二个过程为长时高温时效处理 (例如在 $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 18 h), 析出相转变为粗大的 η 相, 该过程能够显著改善组织的 SCC 敏感性, 但会导致部分力学性能的下降. 据此设计 7 组双级时效试验, 优化后最终采用时效制度为 $121\text{ }^{\circ}\text{C} \times 5\text{ h} + 163\text{ }^{\circ}\text{C} \times 27\text{ h}$.

2 试验结果与分析

2.1 接头组织形貌

双级时效处理前后 FSW 接头各区的显微组织如图 2 所示. 焊核区由于经历大量热量输入和充分的机械搅拌, 晶粒发生动态再结晶, 表现为细小的等轴晶组织, 如图 2a. 热力影响区受到不充分的热量输入和一定的机械搅拌力, 晶粒发生长大和较大程度的扭曲变形, 呈扁长状形貌 (图 2c). 热影响区只受到热循环作用, 没有机械搅拌力, 晶粒只发生部分长大, 组织稍有粗化现象, 如图 2e.

双级时效后, FSW 接头不同微区的晶粒发生一定程度长大, 组织较为粗大. 晶界结构变化明显且各区差异较大, 如图 2b 所示, 焊核区晶界发生了明显的粗化现象. 这是由于时效过程中晶界内的析出相长大粗化, 导致晶界变宽. 但焊核区晶界内的析出相分布均匀, 粗化现象并未导致原有晶界结构的破坏. 从图 2d 可以看出, 热力影响区晶界出现了明显的不连续性, 这与热力影响区晶界处的析出相分布不均匀有关. 在双级时效过程中, 晶界内析出相发生长大, 此处晶界明显变宽. 而在晶界两侧的无沉淀析出带 (PFZ) 同样发生了生长变宽, 对晶界无析出相位置造成挤压, 最终导致该处晶界明显变窄, 甚至消失. 晶界的连续性和整体性受到严重破坏, 晶界变化原理如图 3 所示. 在热影响区, 同样能够观察到明显的不连续晶界. 原因与热力影响区相

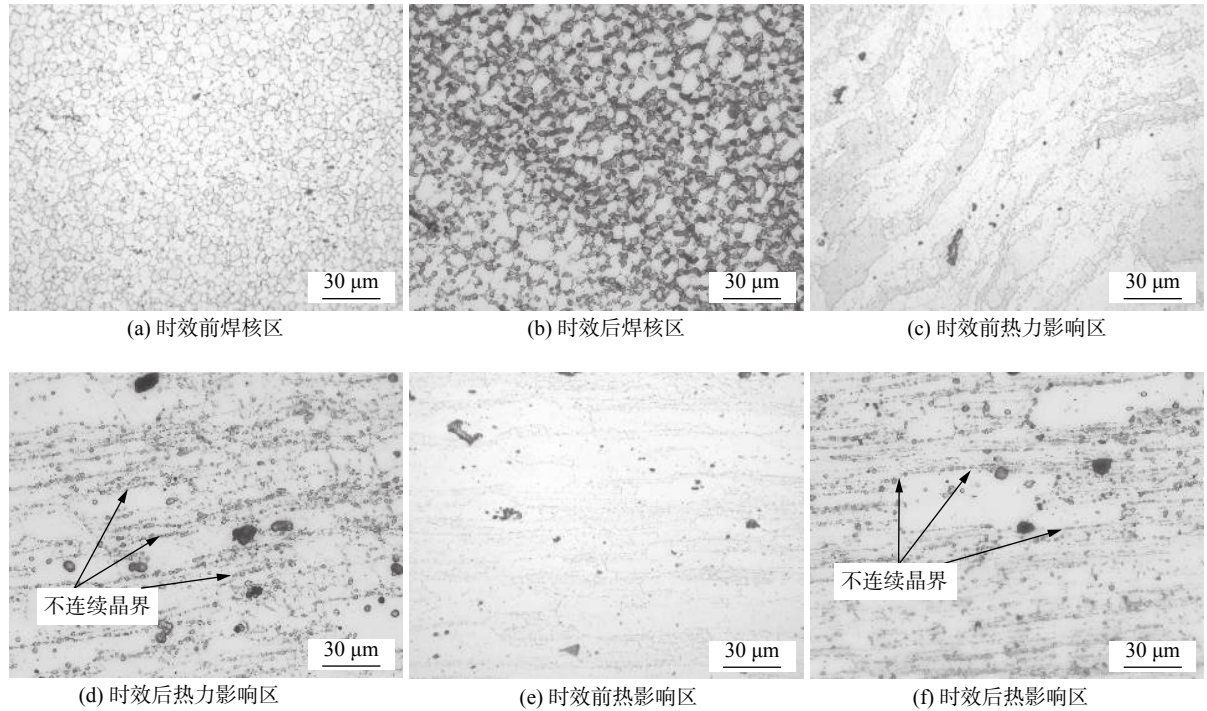


图 2 AA7050 焊接接头时效处理前后组织形貌

Fig. 2 Organization morphologies before and after aging treatment of AA7075 welding joint. (a) before aging treatment welding nugget zone; (b) after aging treatment welding nugget zone; (c) before aging treatment thermal-mechanical affect zone; (d) after aging treatment thermal-mechanical affect zone; (e) before aging treatment heat affected zone; (f) after aging treatment heat affected zone

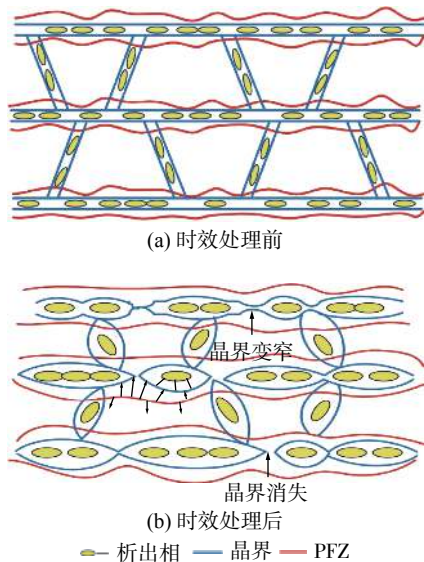


图 3 时效处理前后晶界结构模型图

Fig. 3 Grain boundary structure model before and after aging treatment. (a) before aging treatment; (b) after aging treatment

同,是由于晶界内析出相和晶界两侧的无沉淀析出带的生长造成。发生粗化的晶粒及不连续的晶界都会对接头的显微硬度及拉伸性能造成不利影响。但由于铝合金的腐蚀通常是沿晶界进行扩展,所以对晶界连续性的破坏,能够有效阻碍腐蚀的快速发展,起到改善 FSW 接头耐腐蚀性的目的。

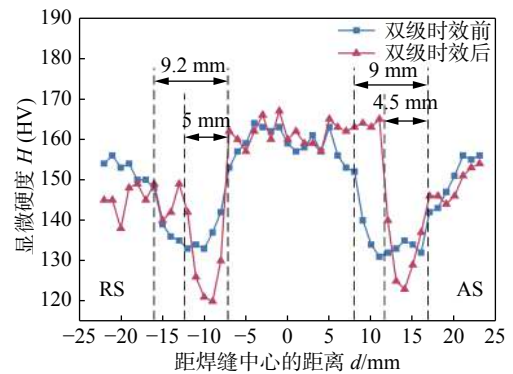


图 4 时效处理前后焊接接头硬度分布

Fig. 4 Microhardness profile before and after aging treatment of welded joint

2.2 显微硬度

图 4 为双级时效前后 FSW 接头显微硬度对比。由图可知,双级时效后,焊核区和母材区的显微硬度值基本保持不变;而热影响区的显微硬度值发生一定程度的降低。这是由于双级时效处理过程中,析出相由 GP 区和细小的 η' 相转变为粗大的 η 相,使其强化效果降低,导致显微硬度明显下降。从图 4 可以发现,时效处理后热影响区的宽度范围明显变窄,由原来 9 mm (AS 侧) 和 9.2 mm (RS 侧) 分别变为 4.5 mm (AS 侧) 和 5 mm (RS 侧)。前进侧和后退侧的变化区域也有所不同:前进侧主要

在靠近焊核区一侧的热影响区显微硬度得到明显提高,而后退侧为靠近母材区一侧的热影响区显微硬度得到明显提高。热影响区通常作为应力腐蚀敏感区,该区域的变窄,证明 FSW 接头的组织更加趋于一致性,有效降低 FSW 接头的腐蚀敏感性。

2.3 应力腐蚀敏感性

将未经时效处理的 FSW 试样及双级时效处理后的 FSW 试样进行应力腐蚀试验。当试验进行 1 天后,未经时效处理的 FSW 试样全部发生断裂,断裂位置位于前进侧的热影响区附近,如图 5a 所示。这与图 4 所示的接头硬度分布相符合,断裂发生在最低硬度分布的周围。在轴肩作用边缘位置,腐蚀程度最深,这与该处较大的应力集中有关。图 5b 为试验进行 60 天后双级时效处理的 FSW 试样,试样全部存活,未发生任何断裂,且表面各个区域腐蚀程度相差不大。由此可见,双级时效处理能够有效缓解接头的应力集中情况,显著改善 FSW 接头的应力腐蚀敏感性。

对应力腐蚀试验 60 天后的 FSW 试样进行微观组织观察,图 6 为腐蚀截面形貌。从图中可以发现,热力影响区腐蚀程度最深,达到了 $214.18\ \mu\text{m}$,



(a) 焊态 SCC 试样 (1 天断裂)



(b) 时效处理后 SCC 试样 (60 天未断裂)

图 5 焊态及时效处理后接头应力腐蚀形貌

Fig. 5 Stress corrosion morphologies of as-welded and aging treatment of welded joint. (a) as-welded; (b) aging treatment

腐蚀沿着晶粒变形方向进行扩展;而热影响区腐蚀深度为 $67.16\ \mu\text{m}$;焊核区的腐蚀程度最低,腐蚀深度只有 $36.01\ \mu\text{m}$ 。从腐蚀微观形貌可以看出,晶界通常是腐蚀发生的“便捷通道”——腐蚀沿晶界进行快速扩展。而双级时效处理后晶界内长大的析出相及变宽的 PFZ 有效破坏了晶界的连续性。不连续的晶界结构能够阻碍腐蚀的快速扩展,有效改善 FSW 接头的应力腐蚀敏感性。

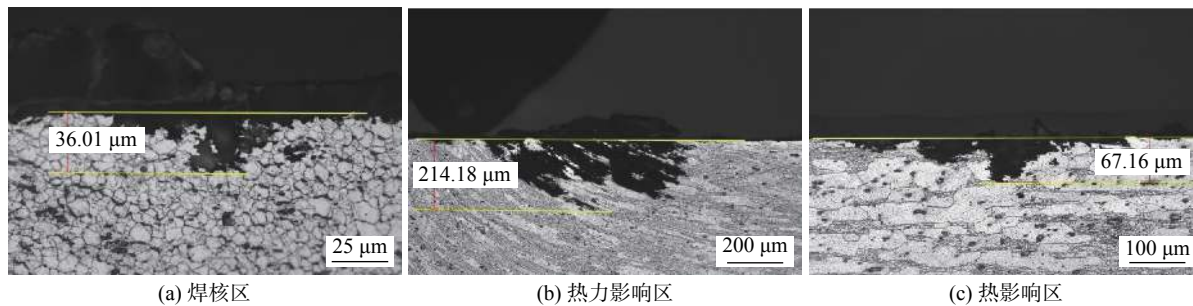


图 6 时效处理后接头腐蚀截面图

Fig. 6 Cross section of welded joint after aging treatment. (a) welding nugget zone; (b) thermal-mechanical affect zone; (c) heat affected zone

3 结论

(1) 对 7050-T7451 铝合金进行了 FSW 焊接,并对焊接接头进行双级时效处理。时效处理后接头组织较为粗大,热影响区及热力影响区出现大量不连续晶界。

(2) 双级时效能够改变 FSW 接头显微硬度的分布情况。时效处理后热影响区范围明显变窄。接头的硬度分布更加均匀,接头组织趋于一致性,有效降低了 FSW 接头的腐蚀敏感性。

(3) 双级时效处理明显改善了 FSW 接头的耐应力腐蚀敏感性,这主要与双级时效处理对接头晶界的改变有关。FSW 接头应力腐蚀敏感区出现在热力影响区。

参考文献

- [1] 张鑫,韩冬,吴军,等. 焊后热处理对 7050 铝合金 FSW 接头的影响[J]. 航天制造技术, 2018(3): 6-11.
Zhang Xin, Han Dong, Wu Jun, et al. Effect of postweld heat treatment on FSW joint of 7050 aluminum alloy[J]. Aerospace

- Manufacturing Technology, 2018(3): 6 – 11.
- [2] 王国军, 王祝堂. 铝合金在中国民用航空器上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(11): 1 – 11.
- Wang Guojun, Wang Zhutang. Application of aluminum alloy in Chinese civil aircraft[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(11): 1 – 11.
- [3] 耿子明, 宋杰, 王磊, 等. 搅拌摩擦焊应用现状及展望[J]. 焊接技术, 2019, 48(1): 1 – 4.
- Geng Ziming, Song Jie, Wang Lei, *et al.* Application status and prospect of friction stir welding[J]. Welding Technology, 2019, 48(1): 1 – 4.
- [4] 张华, 赵常宇, 林三宝, 等. 7050-T7451 铝合金静轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[J]. 焊接, 2018(9): 5 – 9.
- Zhang Hua, Zhao Changyu, Lin Sanbao, *et al.* Microstructure and properties of stationary shoulder FSW joint of 7050-T7451 aluminum alloy[J]. Welding & Joining, 2018(9): 5 – 9.
- [5] 姜宝华, 张平, 王立梅, 等. 双级时效对7050铝合金组织和力学性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(3): 56 – 58.
- Jiang Baohua, Zhang Ping, Wang Limei, *et al.* Effect of two-step aging on microstructure and mechanical properties of 7050 aluminum alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(3): 56 – 58.
- [6] 张成聪, 常保华, 陶军, 等. 7050 铝合金搅拌摩擦焊动态再结晶组织影响因素[J]. 焊接学报, 2012, 33(8): 89 – 92.
- Zhang Chengcong, Chang Baohua, Tao Jun, *et al.* Influence factors of dynamic recrystallization of 7050 aluminium alloy friction stir weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(8): 89 – 92.
- [7] Rebecca Brown, Wei Tang, Reynolds A P. Multi-pass friction stir welding in alloy 7050-T7451: effects on weld response variables and on weld properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 513: 115 – 121.
- [8] Emilie B, Angeline P Q, Monique P, *et al.* Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA2024-T3 friction stir welded joint[J]. Corrosion Science, 2011, 53(9): 3026 – 3034.
- [9] Zhang Kun, Luan Guohong, Fu Ruidong. Effect of natural aging on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7050-T7451 joints[J]. China Welding, 2016, 25(3): 16 – 22.
- [10] 李国伟, 陈芙蓉, 韩永全, 等. 焊后热处理对7075铝合金PVPPA焊接接头组织与性能的影响[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 57 – 60.
- Li Guowei, Chen Furong, Han Yongquan, *et al.* Influence of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy P-VPPA welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 57 – 60.
- [11] 刘万辉, 刘文彬, 鲍爱莲. 微弧氧化处理改善7N01-T5铝合金搅拌摩擦焊接头的耐蚀性能[J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 29 – 32.
- Liu Wanhui, Liu Wenbin, Bao Ailian. Improvement of corrosion resistance of friction stir welded joint of 7N01-T5 aluminum alloy by micro-arc oxidation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 29 – 32.
- [12] Cristiano Padovani, Alison J Davenport, Brian J Connolly, *et al.* Corrosion protection of AA7449-T7951 friction stir welds by laser surface melting with an Excimer laser[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 3956 – 3969.
- [13] Li Na, Li Wenya, Yang Xiawei, *et al.* Corrosion characteristics and wear performance of cold sprayed coatings of reinforced Al deposited onto friction stir welded AA2024-T3 joints[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 1069 – 1076.
- [14] Sivaraj P, Kanagaraian D, Balasubra-man V. Effect of post weld heat treatment on tensile properties and microstructure characteristics of friction stir welded armour grade AA7075-T651 aluminium alloy[J]. Defence Technology, 2014, 10: 1 – 8.
- [15] Vijaya Kumar P, Madhusudhan Reddy G, Srinivasa Rao K. Microstructure, mechanical and corrosion behavior of high strength AA7075 aluminium alloy friction stir welds-Effect of post weld heat treatment[J]. Defence Technology, 2015, 11(4): 362 – 369.
- [16] 龙社明, 王孟君, 陈欣怡, 等. 焊后热处理对7003铝合金焊接接头抗腐蚀性能的影响[J]. 铝加工, 2017(2): 8 – 13.
- Long Sheming, Wang Mengjun, Chen Xinyi, *et al.* Effects of post weld heat treatment on corrosion resistance of welded joints for 7003 aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2017(2): 8 – 13.
- [17] 姜亮亮, 巩建鸣, 耿鲁阳, 等. 焊后热处理对13MnNiMoR钢焊接接头在服役环境下SCC敏感性的影响[J]. 压力容器, 2012, 29(4): 1 – 6.
- Jing Liangliang, Gong Jianming, Geng Luyang, *et al.* Influence of post heat-treatment on the stress corrosion cracking sensitivity of 13Mn Ni Mo R weld joints in service condition[J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(4): 1 – 6.
- [18] 陈一进, 江长友, 秦克斌, 等. 双级时效对7050铝合金力学性能及耐腐蚀性的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(6): 133 – 136.
- Chen Yijin, Jiang Changyou, Qin Kebin, *et al.* Effect of two-step aging on mechanical properties and corrosion resistance of 7050 aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(6): 133 – 136.

第一作者简介: 张华, 1976年出生, 博士, 教授; 主要从事搅拌摩擦焊、腐蚀与防护方面研究; 发表论文40余篇; Email: huazhang@bipt.edu.cn.

(编辑: 崔炜)