

6082 铝合金搅拌摩擦焊缝的应力腐蚀行为^{*}

秦典成,袁鸽成,张 普,袁 潜,骆志捷

广东工业大学材料与能源学院,广东 广州 510006

摘 要:通过慢应变速率拉伸试验,借助电镜扫描、动电位扫描及光学显微分析等手段,对铝合金搅拌摩擦焊缝及母材的耐应力腐蚀性能及微观组织进行了对比研究.结果表明:当慢应变速率为 $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 时,在浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液中焊缝的应力腐蚀敏感性略高于母材;无论在空气还是在腐蚀液中,二者均呈现相似的韧性断裂形貌,表现出良好的抗应力腐蚀性能;焊缝的自腐蚀电位较之母材略有降低,且焊缝热影响区晶粒明显粗化,预示着焊缝在抗应力腐蚀方面性能比母材差.

关键词:搅拌摩擦焊;6082 铝合金;应力腐蚀;敏感性

中图分类号: TG178

文献标识码: A

搅拌摩擦焊接(FSW)是一种可用于各种合金板材焊接的绿色高效的固态连接技术,广泛应用于航空航天、汽车制造、轨道交通及船舶制造业等领域中^[1-2].6082 铝合金具有良好的可成形性和加工性、优异的耐蚀性及可焊接性等特点,而成为上述领域中使用最多的铝合金之一^[3-4].然而大量事实表明,焊缝是应力腐蚀(SCC)易滋生的部位,且一旦腐蚀发生,便会引发灾难性的后果.目前,国内外对该合金搅拌摩擦焊缝的研究主要集中在组织结构及力学性能等方面,而对其 SCC 行为的研究较为少见.因此,探索 6082 铝合金搅拌摩擦焊缝的 SCC 性能具有一定的理论意义和工程应用价值.

1 试验部分

利用小型搅拌摩擦焊机对 6082-T6 铝合金型材进行焊接,焊接速度为 118 mm/min,搅拌针转速为 950 r/min.焊接完毕后沿垂直焊接方向分别切取焊缝与母材的金相样品,将两组金相样品表面打磨并电解抛光,抛光至表面无划痕后进行阳极覆膜,然后用光学显微镜(OM)进行金相分析.

沿垂直焊接方向分别切取母材及焊缝的慢应变速率拉伸试验的样品,用砂纸打磨后用丙酮清洗,再用蒸

馏水清洗并吹干,用氯丁橡胶封闭非工作段表面,分别在空气及浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液中对样品进行慢应变速率拉伸(SSRT)试验,应变速率为 $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.待试样断裂后迅速取下,并用蒸馏水冲洗断口,然后在丙酮中进行超声清洗,吹干后放入干燥皿中,用 Hitachi S-3400N 型扫描电镜进行断口形貌分析.用 PS-268A 型电化学测量仪测试 6082 铝合金壁板型材极化曲线,其中参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂片.

2 试验结果与分析

2.1 SCC 性能分析

图 1 为焊缝及母材的 SSRT 曲线,由此测得的性能指标列于表 1.应力腐蚀敏感指数 I_{SSRT} 常作为 SCC 敏感性的重要判据,其计算式为:

$$I_{\text{SSRT}} = 1 - [\sigma_w (1 + \delta_w)] / [\sigma_a (1 + \delta_a)] \quad (1)$$

式(1)中: σ_w , σ_a 分别为试样在腐蚀介质及惰性介质中的断裂强度; δ_w , δ_a 分别为试样在腐蚀介质及惰性介质中的延伸率.通常情况下 $0 < I_{\text{SSRT}} < 1$,材料 SCC 敏感性随敏感指数增大而增强.

据式(1)计算,得到母材与焊缝的 SCC 敏感指数

收稿日期:收稿日期:2013-09-16

* 基金项目:广东省重大科技专项(2008A090300004)

作者简介:秦典成(1985-),男,湖北荆州人,硕士研究生.

分别为 0.006 和 0.012.说明母材与焊缝的耐应力腐 蚀性能良好,且母材的耐应力腐蚀性能比焊缝略好.

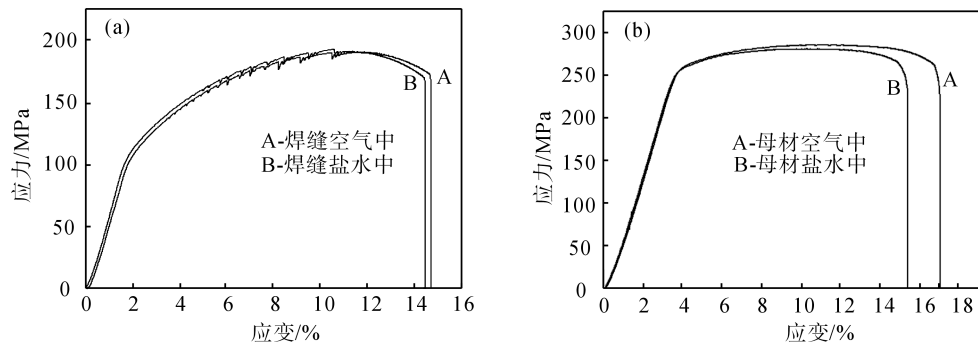


图 1 母材与焊缝的应力—应变曲线
(a)焊缝的应力—应变曲线;(b)母材的应力—应变曲线
Fig.1 Stress-strain curve of BM and weld-joint
(a) stress-strain curve of BM ;(b)stress-strain curve of joint

表 1 SSRT 实验结果		
Table 1 Experimental result		
性能指标	焊缝	母材
空气中延伸率/%	12.8	13.5
3.5% 盐水中延伸率/%	12.2	13.1
空气中断裂强度/MPa	170.27	228.55
3.5% 盐水中断裂强度/MPa	169.14	227.99
I_{SSRT}	0.012	0.006

2.2 SCC 断口形貌

图 2 为焊缝及母材的 SCC 断口形貌.从图 2 可见,无论是在空气还是在腐蚀液中,二者断口上均分布大量的韧窝,并呈现典型的韧性断裂特征,这些韧窝的形成经历了裂纹的形核长大以及微裂纹的聚集.在盐水中焊缝与母材的 SCC 断口,局部出现了韧窝变浅及少许微裂纹形貌,呈现出朝脆性断裂转变的趋势.这说明,在盐水中尽管该合金 SCC 不敏感,但母材与焊缝局部仍有轻微的应力腐蚀现象.

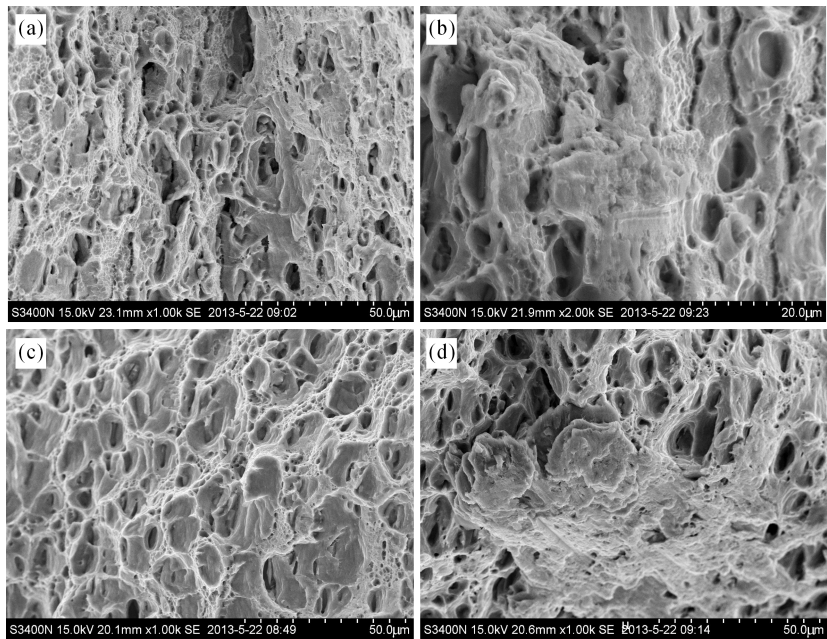


图 2 母材及焊缝的 SCC 断口形貌
(a)母材在空气中;(b)母材在盐水中;(c)焊缝在空气中;(d)焊缝在盐水中

Fig.2 SCC Fracture morphology of BM and weld-joint
(a)fracture of BM in air ;(b)fracture of BM in NaCl solution ;(c)fracture of joint in air ;(d)fracture of joint in NaCl solution

2.3 焊缝的极化曲线分析

图3为6082-T6铝合金FSW焊缝及母材的极化曲线.焊缝与母材在浓度为3.5%的NaCl溶液中的极化曲线几乎重叠,焊缝自腐蚀电位约为-729 mV,母材的自腐蚀电位约为-709 mV.母材自腐蚀电位较焊缝略高,这预示着焊缝的耐应力腐蚀性能比母材略差.

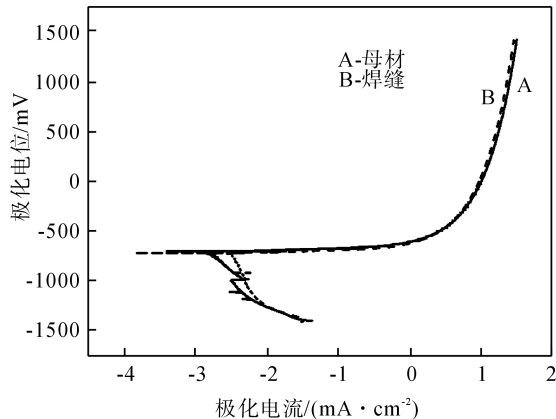


图3 焊缝及母材的极化曲线

Fig.3 Polarization curve of BM and weld-joint

2.4 焊缝组织分析

一般经搅拌摩擦加工后焊缝分为焊核区(Nugget)、热力影响区(TMAZ)和热影响区(HAZ),焊缝各区域组织与母材(BM)相比有着明显的不同,各区域组织之间的差异也较为显著^[5-6].

图4为母材及焊缝各区的微观组织.图4(a)为母材组织形貌,从图4(a)可以看出,经淬火与人工时效处理后,母材横截面的组织经挤压呈板条状分布,第二相明显地沿着挤压方向均匀分布;图4(b)为焊核区(Nugget)的微观组织形貌,此区域由于受到强烈的摩擦热和进给力的双重作用而发生塑性流变及动态再结晶,从而形成了细等轴晶区且第二相也得以重新分配;图4(c)为热力影响区(TMAZ),此区域由于搅拌头的剪切作用力及摩擦热的双重作用而发生了不完全再结晶,搅拌头产生的剪切力使晶粒沿剪切力的方向被拉长,晶粒尺寸大小不一,介于焊核区与母材之间;图4(d)为热影响区(HAZ),由于此区域仅受到摩擦热影响,因而只发生静态回复或再结晶,并且范围较窄,相对于母材晶粒明显粗化,其过程可以看成是特殊热处理.焊核区与热力影响区形成细小晶粒的同时,位错密度也大幅度降低,材料的化学成分也得以均匀化^[7].腐蚀学的观点认为^[8]:化学成分的均匀化会使基体金属局部形成腐蚀电池的倾向降低;晶体缺陷的减少,会使参与表面腐蚀反应的活性点的数目也相应地减少.因此,这二处成为了焊缝应力腐蚀敏感性较低的部位.在HAZ与TMAZ交界处是热输入最大处,化学成分不如焊核区和热力影响区均匀,晶体缺陷较多,形成局部腐蚀电池的倾向增加^[7-8],使该区域成为焊缝应力腐蚀敏感性相对较高的部位,这是6082铝合金搅拌摩擦焊缝应力腐蚀敏感性略高于母材的一个很重要原因.

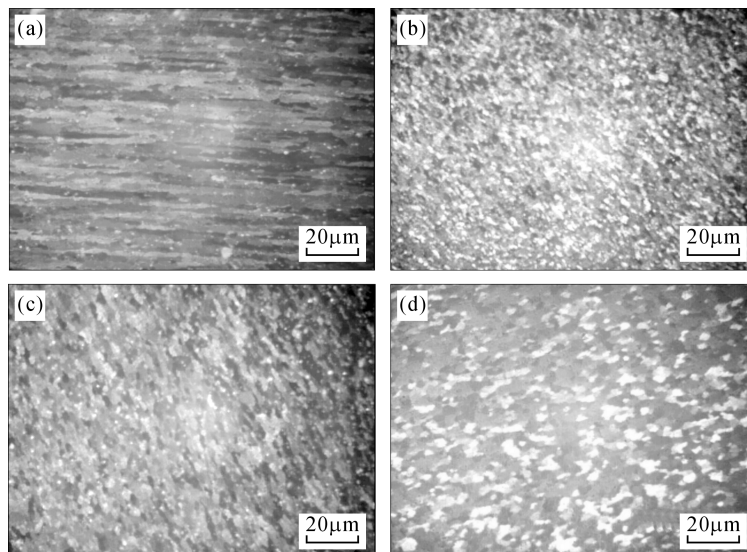


图4 母材及焊缝各区的微观组织

(a) 母材;(b)焊核区;(c)热力影响区;(d)热影响区

Fig.4 Microstructure of BM and weld regions

(a) microstructure of BM ;(b)microstructure of Nugget zone ;(c)microstructure of TMAZ zone ;(d)microstructure of HAZ zone

3 结 论

(1)当慢应变速率为 $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 时,在浓度 3.5% 的 NaCl 溶液中,6082 铝合金搅拌摩擦焊缝的抗 SCC 性能比母材的略差,应力腐蚀敏感指数 I_{SSRT} 分别为 0.012 和 0.06.

(2)6082 铝合金搅拌摩擦焊缝的自腐蚀电位比母材的略低,分别为 -729 mV 和 -709 mV ,并且焊缝的热影响区晶粒明显粗化,这与焊缝 SCC 敏感性比母材的略高相吻合.

(3)无论在空气中还是在浓度 3.5% 的 NaCl 溶液中,6082 铝合金搅拌摩擦焊缝的 SCC 断口呈现与母材断口相似的韧窝型断口形貌,部分区域有朝脆性断裂转变的趋势,表现出良好的抗 SCC 性能.

参考文献:

- [1] DAWES C J, THOMAS W M. Friction stir process welds aluminum alloys[J]. Welding, 1996, 75(3): 41-51.

- [2] 李平,孙振宇,王祝堂.铝合金轨道车辆结构及合金性能[J].轻合金加工技术,2012,40(7):1-12.
- [3] MORITA A. Aluminium alloys for automobile applications[C]. Toyohashi; Proc. of ICAA-6, 1998.
- [4] 盛建辉,彭家仁,李光,等.搅拌摩擦焊工艺及其在地铁铝合金车体上的应用[J].电力机车与城轨车辆,2009,32(3):28-31.
- [5] 夏德顺,王国庆.搅拌摩擦焊接在运载火箭上的应用[J].导弹与航天运载技术,2002(4):27-32.
- [6] 沈长斌,王忠志,权高峰,等.6082 铝合金搅拌摩擦焊街头组织及腐蚀性能研究[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(5):400-402.
- [7] CORRAL J, TRILLO E A, YING L, et al. Corrosion of friction-stir welded aluminum alloys 2024 and 2195[J]. Journal of Materials Science Letters, 2000, 19: 2117-2122.
- [8] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50(1-2):1-78.

The stress corrosion behavior of 6082 aluminum alloy joint by friction stir welding

QIN Diancheng, YUAN Gecheng, ZHANG Pu, YUAN Qian, LUO Zhijie

School of Materials and Energy of Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: The stress corrosion cracking properties and microstructure of 6082 aluminum alloy weld joint and base metal are investigated by slow strain rate tensile test, electron microscope scanning, optical microscopic structure inspection and dynamic potential scanning, etc. It was found that the base material showed a slightly higher SCC sensitivity than that of the welded joint of 6082 aluminum alloy in NaCl solution with a concentration of 3.5% at the slow strain rate of $3.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; both the weld joint and the base material demonstrated excellent stress corrosion resistance with similar ductile fracture morphology either in air or NaCl solution with a concentration of 3.5%; the self-corrosion potential of weld joint is a little lower than that of base material and the grains of weld joint obviously grow coarse in heat affected zone by comparison with base material, indicating the base material is better than the weld joint in SCC resistance.

Key words: friction stir welding; 6082 aluminum alloy; stress corrosion cracking; stress corrosion resistance