

文章编号:1673-9981(2010)04-0509-05

5083 铝合金搅拌摩擦焊缝应力腐蚀行为*

袁鹤成, 李仲华, 朱振华, 路浩东, 吴其光

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510090)

摘要:在慢应变速率拉伸试验机上,分别测定了5083-H321铝合金板材及其搅拌摩擦焊缝在空气和3.5%NaCl溶液中的应力-应变曲线;借助光学显微镜、显微硬度仪、动电位扫描仪及扫描电子显微镜分析了焊缝和母材的微观组织、硬度分布、极化曲线及应力腐蚀断口的微观形貌.结果表明:焊缝的断裂强度及表层硬度分别达到母材强度及硬度的96%和90%,伸长率超过母材的2倍;应力腐蚀敏感指数低于母材;焊缝应力腐蚀断口呈现与母材断口不同的混合型断裂形貌.焊缝的细晶组织及第二相溶解是其抗应力腐蚀性能优于母材的本质原因.

关键词:5083 铝合金; 搅拌摩擦焊; 慢应变速率拉伸; 应力腐蚀

中图分类号: TG172

文献标识码: A

搅拌摩擦焊(FSW)是一种节能环保的先进固相连接技术,自1991年由英国焊接研究所(TWI)发明至今^[1],在交通运输、航空航天、船舶制造等领域应用前景广阔.国内外已有一些关于2XXX及7XXX系铝合金FSW工艺及性能的研究报道^[2-3],而对5XXX系铝合金FSW研究相对较少.5083作为一种不可热处理强化铝合金,具有中等强度、良好的焊接性能、抗蚀性能及加工性能,广泛应用于船舶制造及海洋运输.而在海水环境中,氯离子(Cl⁻)会导致铝合金发生应力腐蚀(SCC).应力腐蚀是一种经常发生在远低于金属材料屈服强度下的脆性断裂,危害极大,因此研究铝合金在氯离子环境下的应力腐蚀行为具有重要的意义^[4].可是,国内外对该合金FSW焊缝的应力腐蚀行为及机理研究,还鲜见报道^[5].本文在模拟海水环境下,研究了5083铝合金FSW焊缝的应力腐蚀行为,并探讨了其腐蚀机理,为开发船用5xxx系铝合金FSW绿色制造工艺及其性能评价或优化提供依据.

1 试验方法

被焊材料为5083-H321铝合金壁板,单块尺寸为250 mm×80 mm×4 mm(长×宽×厚).焊接设备为小型搅拌摩擦焊机,搅拌头轴肩直径22 mm,设计为光滑凹槽形状,搅拌针设计为带有螺纹的圆台形状,长3.4 mm,近轴肩处直径7 mm,另一端直径6 mm.焊接速度为80 mm/min,搅拌转速为700 r/min,焊接倾角为3°,下压量为0.5 mm.采用慢应变速率拉伸(SSRT)试验机测定焊缝及母材在空气和3.5%NaCl溶液中的应力-应变曲线,应变速率为 $3.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.母材及焊缝硬度和金相样品经粗磨,抛光后,分别采用HVS-5型号硬度仪测定表面硬度分布,压力4.9 N,保压时间10 s;焊缝横截面用自配混合酸试剂侵蚀,采用leicaDMI-5000M数字式倒置光学显微镜(OM)拍摄金相.采用PS-268A型电化学测量仪测定极化曲线.采用Hitachi S-3400N扫描电子显微镜(SEM)观察断口形貌.

收稿日期:2010-10-27

* 基金项目:广东省重大科技专项(2008A090300004);广东省教育厅211学科建设项目

作者简介:袁鹤成(1963—),男,博士,教授.

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线

母材及焊缝在空气和 3.5% NaCl 溶液中的慢拉伸应力-应变曲线分别如图 1(a) 和 (b) 所示. 从图可见, 无论在空气还是溶液中, 母材的抗拉强度都略高于焊缝, 而焊缝的延伸率都远高于母材. 各曲线抗拉强度及延伸率的数值分别列于表 1. 从表中可见,

母材及焊缝在空气中的抗拉强度和延伸率都比溶液中略低, 说明发生了轻微的应力腐蚀. 采用如下公式^[6]计算二者的应力腐蚀敏感指数:

$$I_{SSRT} = 1 - [\sigma_{tw}(1 + \delta_{tw})] / [\sigma_{tA}(1 + \delta_{tA})] \quad (1)$$

式(1)中: σ_{tw} 、 σ_{tA} 分别为腐蚀介质及惰性介质中的断裂强度, 单位为 MPa; δ_{tw} 和 δ_{tA} 分别为腐蚀介质及惰性介质中的延伸率. 一般地, $0 < I_{SSRT} < 1$, 材料 SCC 敏感性随该指数增大而增强. 上式以腐蚀及惰性介质的抗拉强度和延伸率为综合指标可更准确地

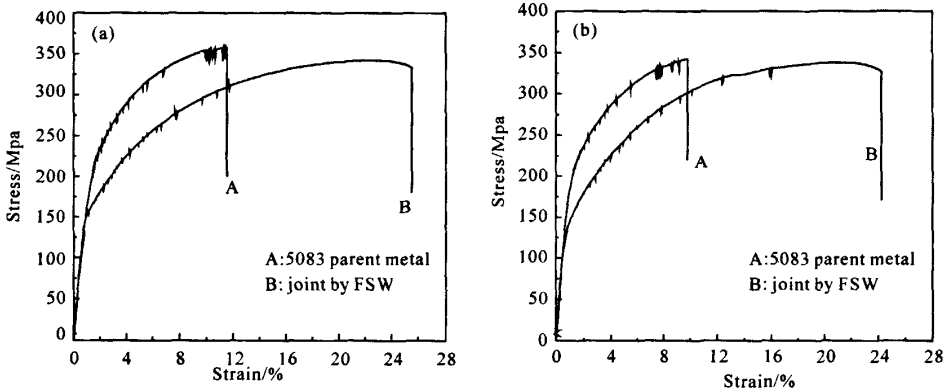


图 1 母材及焊缝慢速率拉伸应力-应变曲线
(a)空气中; (b)溶液中

表 1 5083 铝合金母材及焊缝的应力腐蚀敏感指数

样品	介质	抗拉强度/MPa	延伸率/%	敏感指数
5083 铝合金母材	空气	354	11.52	0.17
	3.5% NaCl	341	9.8	
5083 铝合金焊缝	空气	342	25.2	0.06
	3.5% NaCl	338	24.24	

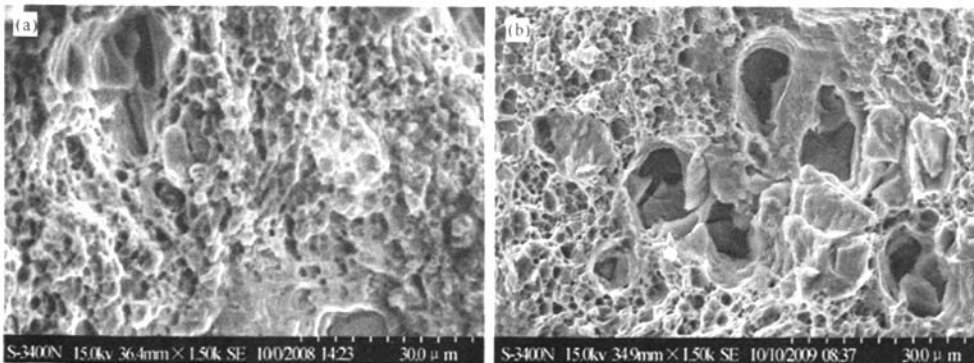


图 2 空气中慢拉伸断口
(a)母材; (b)焊缝

评价材料的抗 SCC 性能. 计算得到的母材和焊缝的应力腐蚀敏感指数分别为 0.17 和 0.06, 说明焊缝的抗 SCC 性能优于母材.

2.2 断口形貌

断口形貌是反映材料是否发生 SCC 的另一特征. 母材及焊缝在空气中的 SSRT 断口如图 2. 从图可见, 两者均为韧性断口形貌, 焊缝断口韧窝较深而大, 表现出明显高于母材的延伸率.

图 3 为母材及焊缝在溶液中的 SSRT 断口形貌. 从图 3(a) 可见, 母材断口韧窝几乎消失, 宏观端口几乎无颈缩现象, 尽管仍有近 10% 的均匀伸长率, 但微观断口仍呈现出与轧制带状组织相关的层状台阶形脆断形貌; 焊缝断口形貌与母材不同, 呈现浅小韧窝及准解理的混合断口形貌.

由表 1 知 FSW 焊缝的抗拉强度能达到母材的 96%, 可见 FSW 焊接效率远高于传统焊接方法. 与

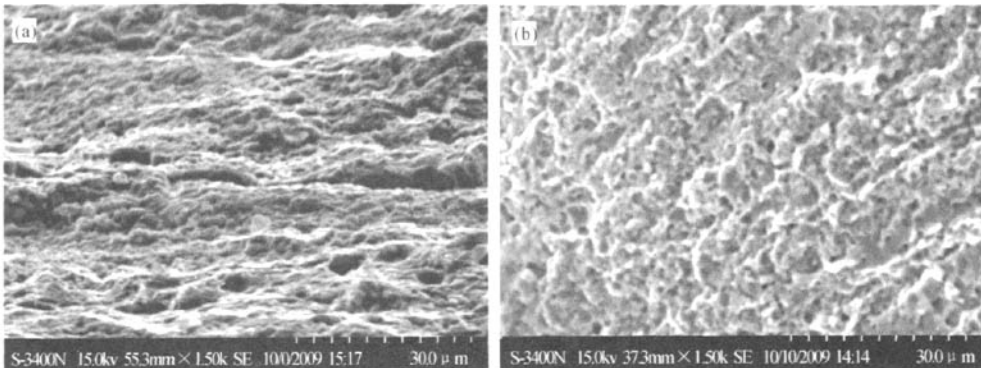


图 3 溶液中慢拉伸断口
(a)母材; (b)焊缝

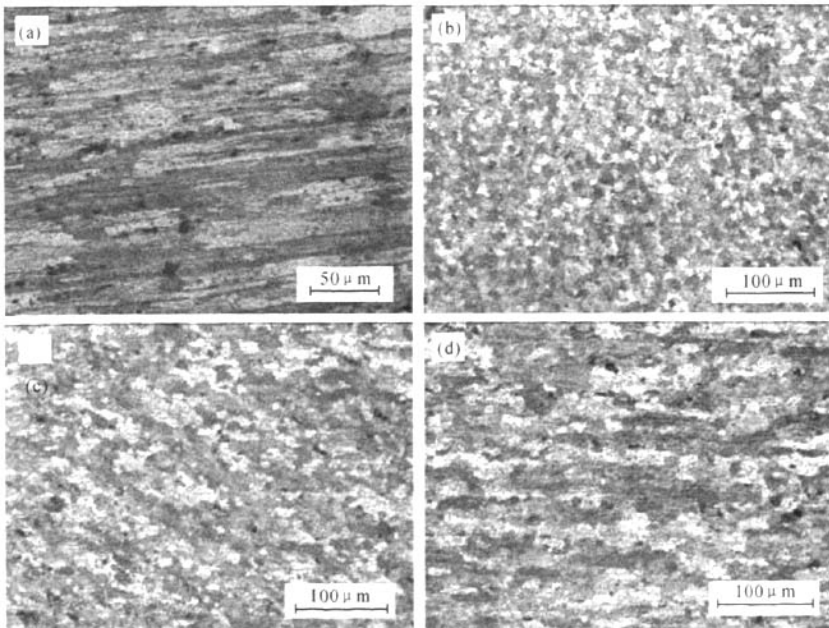


图 4 焊缝金相组织
(a)母材; (b)焊核区; (c)后退侧热影响区; (d)后退侧热影响区

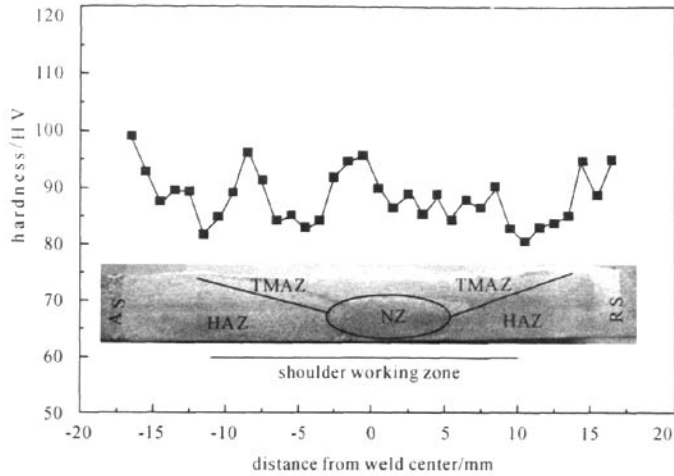


图5 焊缝硬度分布

传统熔焊焊缝分区不同,FSW 焊接过程中热量及塑性变形的共同作用将焊缝划分为焊核区、热力影响区及热影响区三个微观组织不同的区域。图4为母材及焊缝后退侧各区的金相组织。4(a)母材为典型的轧制变形组织;经搅拌工具作用,在焊核区形成了细小的再结晶等轴晶,如图4(b)所示,并且焊核区的位错密度减小^[7]。而热力影响区则为塑性变形组织,可看出晶粒有沿搅拌旋转剪切方向产生塑性流动的痕迹,如图4(c)所示,热影响区晶粒发生长大,如图4(d)。焊缝区的第二相被搅拌工具搅碎或者由于热量输入溶解于基体中,所以焊缝区第二相比母材明显减少。因此,焊缝区晶粒细小及位错密度的降低导致焊缝延伸率明显高于母材。

图5显示了5083铝合金FSW焊缝表层硬度沿焊缝横向的分布,图中AS及RS分别为焊缝前进侧与后退侧,NZ、TMAZ及HAZ分别为焊核区、热力影响区和热影响区。从图可见,相比析出型强化合金,该合金的硬度分布较均匀,平均硬度达到母材的90%,反应了焊缝性能较均匀,这与焊缝仍具有很高的抗拉强度值极为一致。但也可发现,硬度分布亦有较小波动,细小等轴晶导致中心硬度略高;前进侧硬度出现一峰值,应与表层焊核区“洋葱环”尖的扩展流动相关,轴肩边缘处因明显的晶粒粗化而显示出最低硬度值。

自腐蚀电位高低一般地可以反映材料抗腐蚀性能的好坏,母材与焊缝的极化曲线如图6所示。从图

可见,母材及焊缝的自腐蚀电位分别为 -0.82 V 和 -0.77 V ,焊缝的自腐蚀电位略高于母材。由此可推测焊缝的抗腐蚀性要优于母材,与上述SSRT结果相吻合。实际上,从图4还可见,母材中含有较多的第二相,作者另一论文已证实这些第二相多为 β 相(Mg_5Al_8)^[8],易分布于晶界。文献[9]指出基体的自腐蚀电位高于 β 相电位,分别为 -0.82 V 和 -1.15 V , β 相沿晶分布严重降低材料抗SCC性能。本文作者已在论文^[8]中采用TEM研究了5083铝合金中 β 相的分布形态,FSW过程产生的剪切变形及热量可使焊缝中的第二相细化及部分溶解,减少 β 相在晶界分布,因此提高了焊缝的抗SCC性能。

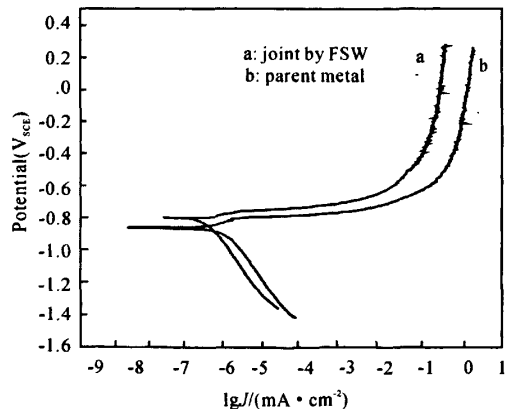


图6 母材及焊缝的极化曲线

3 结 论

(1)5083 铝合金 FSW 焊缝及母材的 SSRT 应力腐蚀敏感指数分别为 0.06 和 0.17,焊缝抗 SCC 性能优于母材,母材应力腐蚀断口呈现出与轧制带状组织相应的层状台阶形脆断形貌,而焊缝断口呈现浅小韧窝及准解理的混合断口形貌。

(2)焊缝的断裂强度达到母材强度的 96%,焊缝的表层硬度沿其横向分布波动较小,平均硬度值达到母材硬度的 90%,伸长率超过母材的 2 倍。

(3)焊缝的自腐蚀电位略高于母材,分别为 -0.77V 和 -0.82V ;焊缝的细小再结晶组织及第二相溶解是其抗应力腐蚀性能优于母材的本质原因。

参考文献:

- [1] 栾国红,柴鹏. 搅拌摩擦焊技术应用现状和发展趋势[J]. 金属加工,2004,24:19-22.
- [2] PAGLIA C S, BUCHHEIT R G. Microstructure, micro-chemistry and environmental cracking susceptibility of friction stir welded 2219-T87 [J]. Material Science and

- Engineering A,2006,429:107-114.
- [3] SUREKHA K, MURTY B S, RAO R P. Microstructural characterization and corrosion behavior of multipass friction stir processed AA2219 aluminum alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2008,202:4057-4068.
- [4] 刘继华. 高强铝合金的应力腐蚀测试方法综述与评价[J]. 材料工程,2007,10:76-80.
- [5] 王文,王快社,郭群,等. 铝合金搅拌摩擦焊接接头应力腐蚀研究进展[J]. 热加工工艺,2009,38(23):6-8.
- [6] PAGLIA C S, BUCHHEIT R G. A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds [J]. Scripta Materialia,2008,58:383-387.
- [7] WOO W, BALOGH L, UNGÁR T, et al. Grain structure and dislocation density measurements in a friction-stir welded aluminum alloy using X-ray peak profile analysis [J]. Materials Science and Engineering, 2008, 498, 308-313.
- [8] 冷文兵,袁鹤成,路浩东. 5083 铝合金慢应变速率拉伸下的应力腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护,2009,30:794-796.
- [9] HAN M S, KO S, KIM S H, et al. Optimization of corrosion protection potential for stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of 5083-H112 alloy in seawater [J]. Metals and Materials,2008,14:203-211.

The friction stir welds performance of stress corrosion cracking for 5083 aluminum alloy plate

YUAN Ge-cheng, LI Zhong-hua, ZHU Zhen-hua, LU Hao-dong, Wu Qi-guang

(Faculty of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Friction stir welding (FSW) is conducted for 5083-H321 aluminum alloy plates. The stress-strain curves of joints and parent metal (PM) in air and 3.5% NaCl solution were tested by using slow strain rate tension (SSRT) tester, respectively. The microstructure, polarization potential, fracture of stress corrosion cracking (SCC) and hardness were analyzed by using optical microscope (OM), hardness tester, potentiodynamic scanner and scanning electron microscope (SEM). The results show that the rupture strength and hardness of joints reaches 96 and 90 percent of those of PM, respectively. The elongation of joints is more than 2 times of that of PM. The SCC susceptibility index of joints is lower than that of PM. The SCC fracture shows mixed-type crack feature, which is different from that of PM. The fine microstructure and the dissolution of the second phase are the substantial reasons why the joints have better properties of anti SCC than that of PM.

Key words: 5083 aluminum alloy; friction stir welding; slow strain rate tension; stress corrosion cracking