

6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊接接头的微区腐蚀行为

王希靖, 魏学玲, 张金银, 车文斌

(兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 国内外有关铝合金的搅拌摩擦焊接(FSW)接头腐蚀性能的研究主要涉及接头的宏观腐蚀行为,对焊缝微区腐蚀行为的报道很少。通过电化学测试、静态失重试验、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等试验手段研究6082-T6铝合金搅拌摩擦焊接头不同区域的耐腐蚀性能,发现搅拌摩擦焊接试样在焊缝中间区域的耐腐蚀性能最好,其次依次是搅拌针后方和搅拌针前方,母材的耐腐蚀性能最差。6082-T6铝合金母材、搅拌针前方和搅拌针后方发生腐蚀的类型主要为晶间腐蚀和剥落腐蚀,随着时间增加,晶间腐蚀和剥落腐蚀程度加剧,焊缝中间区域基本不发生腐蚀。母材和搅拌针前方晶内沉淀相为针状沉淀相,在晶界附近存在沉淀无析出相;晶界析出相富含Mg和Si元素,晶界析出相和沉淀无析出带之间以及晶内基体与沉淀无析出带之间存在腐蚀原电池,导致腐蚀较严重;搅拌针后方和焊核区由于受到轴肩和搅拌针作用,焊后位错减少,组织细化,降低形成局部腐蚀原电池倾向,导致耐腐蚀性能较好。通过对腐蚀后FSW接头铝合金的微观组织形貌观察,结合试验所得到的微观组织,确定了影响接头腐蚀行为的原因和相应的腐蚀机理,为拓展6082-T6铝合金的运用范围提供理论依据。

[关键词] 6082-T6 铝合金; 搅拌摩擦焊; 耐腐蚀性

[中图分类号] TG172 [文献标识码] A [文章编号] 1001-1560(2017)06-0013-05

DOI:10.16577/j.cnki.42-1215/tb.2017.06.004

Micro-Zone Corrosion Behavior of 6082-T6 Aluminum Alloy as Friction Stir Welding Joint

WANG Xi-jing, WEI Xue-ling, ZHANG Jin-yin, CHE Wen-bin

(School and Material Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The corrosion resistance of 6082-T6 aluminum alloy friction stir welding (FSW) joint in different parts was investigated by means of electrochemical test, static weight loss test, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). Results showed that the corrosion resistance in the middle of joint was the best, followed by the behind of the tool, the ahead of the tool and the base material. At the substrate of 6082-T6 aluminum alloy, the ahead and the behind of tool, the corrosion types were mainly composed of intercrystalline corrosion and exfoliation corrosion. With the time extending, both intercrystalline corrosion and exfoliation corrosion became more serious, while in the middle of weld joint, almost no corrosion was observed. Moreover, the crystalline at the base material and the ahead of tool was needle-like precipitate phase, but no precipitate phase appeared in the vicinity of the grain boundary. Precipitation phase in grain boundary was rich in Mg and Si, so corrosion galvanic cells were formed among the grain boundary to precipitate-free zone, and the crystal substrate to precipitate free zone, which led to the worse corrosion. Furthermore, the behind of the tool and weld nugget zone were affected by shaft shoulder and tool pin, so the dislocations were reduced after welding, and the microstructure was refined, which decreased the formation trend of local galvanic corrosion tendency, resulting in better corrosion resistance performance than other regions. Based on the observation of microstructure of FSW joints after corrosion, combining with the microstructure obtained from the test, the reasons that affected the corrosion behavior and corrosion mechanism of the joints were determined, which provided a theoretical basis for expanding the application range of 6082-T6 aluminum alloy.

Key words: 6082-T6 aluminum alloy; friction stir welding; corrosion resistance

0 前言

6000系铝合金是指向铝基体中添加少量的Mg、Si

和其他微量元素如Cu、Fe、Mn或稀土元素形成的合金。其中6082铝合金具有中等强度、优异的成型性和耐腐

[收稿日期] 2016-12-19

[通信作者] 王希靖(1956-) 教授, 博士生导师, 主要从事焊接设备及其自动化、搅拌摩擦焊技术及焊接质量控制方面的研究工作, 电话: 13321222432, E-mail: wangxj@lut.cn

蚀性,是目前铝合金车体应用量最大的铝合金^[1]。铝合金要实现生产制造中的广泛运用,焊接是一种必不可少的加工方式。搅拌摩擦焊接(FSW)在铝合金的焊接方面具有得天独厚的优势^[2]。由于铝合金FSW接头的腐蚀是一种电化学过程,因此实际研究中常采用电化学法测量FSW接头组织开路电位、极化曲线、电化学阻抗等来评价接头的腐蚀性能^[3-8]。

在FSW过程中由于强化相发生动态迁移而形成集聚、第二相偏聚和组织成分不均匀,会造成FSW接头腐蚀行为及腐蚀机理的特殊性^[9]。在铝合金中常见的腐蚀形态有点蚀、晶间腐蚀、剥离腐蚀。点蚀是铝合金材料在氯化钠溶液中最常见的一种破坏现象,是晶间腐蚀和剥落腐蚀等其他局部腐蚀的起源^[10]。而铝合金的晶间腐蚀机理目前较成熟的3种主要理论如下:(1)阳极性的晶界构成物[溶质贫化区(SDZ)和/或沉淀相]与晶格本体的腐蚀电位差异形成电偶腐蚀,进而导致晶间腐蚀;(2)SDZ和晶格的击穿电位差异导致晶间腐蚀;(3)晶界沉淀相的溶解形成侵蚀性更强的闭塞区环境导致连续的晶界腐蚀。剥离腐蚀是材料在特定腐蚀条件下的层状腐蚀,使材料产生像树皮卷起来那样的剥离现象^[11]。

国内外有关铝合金FSW接头腐蚀性能的研究主要涉及接头的宏观腐蚀行为,对焊缝微区腐蚀行为的报道很少。由于铝合金FSW接头组织成分不均匀,同一焊缝可能会发生多种腐蚀类型,因此亟待对接头腐蚀机理进行研究。本工作通过对腐蚀后的FSW接头铝合金微观组织形貌进行观察,确定影响接头腐蚀行为的原因和相应的腐蚀机理,为拓展6082-T6铝合金的运用范围提供理论依据。

1 试验

1.1 焊接接头

选用厚2 mm的6082-T6铝合金进行搅拌摩擦焊接,其主要化学成分(质量分数,%)为Si 0.70~1.30,Fe 0.50,Cu 0.10,Mn 0.40~1.00,Mg 0.60~1.20,Cr 0.25,Zn 0.20,Ti 0.10,其他0.50,Al余量。

使用FSW-3LM-015搅拌摩擦焊机进行试验,搅拌头材料为工具钢(Cr12MoV),轴肩直径为10 mm,搅拌针为直径2 mm、长度1.8 mm的圆柱形焊针。焊接过程中搅拌头倾角为3°,下压量为0.1 mm,搅拌针旋转速度为1500 r/min,焊接速度为80 mm/min。焊后焊缝成型美观,无飞边等缺陷,在A区(轴肩作用下的搅拌针前方)、B区(轴肩作用下的搅拌针后方)、C区(焊核

区)、D区(母材)4个位置取样。

1.2 测试分析

静态失重试验中腐蚀介质为0.2 mol/L NaHSO₃+0.6 mol/L NaCl混合溶液,所用NaHSO₃,NaCl为分析纯试剂,用去离子水进行配制。样品室温悬挂于盛有200 mL腐蚀介质的长方体状电解池底部,平行样品3个,分别挂片12,24 h后取出样品,首先用50 mL H₃PO₄+20 g CrO₃+1 L蒸馏水配成溶液去除腐蚀产物,再浸入浓硝酸5 min除去残余的腐蚀产物^[12],使用精度0.1 mg的电子天平称重。腐蚀速率*v*可通过下式计算:

$$v = \frac{m_0 - m_1}{S \times t}$$

式中 m_0 —— 腐蚀试验前的试样质量 g

m_1 —— 腐蚀试验后的试样质量 g

S —— 试样与腐蚀介质相互接触的总面积 m²

t —— 腐蚀时间 h

动电位极化曲线在CHI600B型电化学工作站上进行。电解池为全玻璃电解池,三电极系统,极化范围为-1.0~1.0 V(vs SCE),扫描速度为0.01 V/s,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂电极(面积3 cm²),工作电极通过线切割从大块样品取得,工作面积为20 mm²(5 mm×4 mm),其余非工作表面镶嵌在单组分室温硫化硅橡胶中,工作电极处理方法及腐蚀介质与静态失重方法一样。采用JEM-2010透射电子显微镜(TEM)对接头不同区域进行观察,研究其微观组织结构,并用QUANTA FEG 450热场发射扫描电子显微镜(SEM)观察腐蚀形貌。

2 结果与讨论

2.1 动电位极化

6082-T6铝合金搅拌摩擦焊焊缝各微区和母材在室温0.2 mol/L NaHSO₃+0.6 mol/L NaCl溶液中的动电位极化曲线见图1;拟合得出的腐蚀电位和腐蚀电流密度见表1。

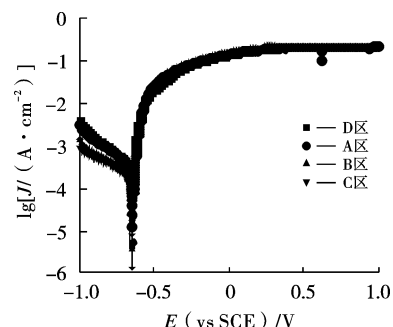


图1 6082-T6铝合金搅拌摩擦焊试样各区的动电位极化曲线

表 1 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊缝各区和母材的电化学参数

试样	E_{corr}/mV	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$
A 区	-650	0.000 334
B 区	-640	0.000 274
C 区	-600	0.000 203
D 区	-670	0.000 462

可以看出 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊核区(C 区)和搅拌针后方(B 区)的腐蚀电位大于搅拌针前方(A 区)和母材(D 区)的腐蚀电位,同时相应的腐蚀电流密度值小于母材的腐蚀电流密度值。腐蚀电位由高到低的顺序为焊核区>搅拌针后方>搅拌针前方>母材,腐蚀电流密度由低到高的顺序为焊核区<搅拌针后方<搅拌针前方<母材。可见,母材的腐蚀速度快,腐蚀程度更严重,在搅拌针后方腐蚀倾向比搅拌针前方小。由于FSW 后焊核区和搅拌针后方受到轴肩和搅拌针的作用,晶粒细小,减小了焊缝表面形成微观腐蚀电池的倾向,腐蚀倾向没有母材和搅拌针前方严重。从试验结果可以看出母材和腐蚀后焊缝各个微区的腐蚀程度从大到小为母材、搅拌针前方、搅拌针后方、焊缝中间区域。

2.2 静态失重

焊接接头 A、B、C、D 4 个位置的试样腐蚀 12、24 h 后的失重见表 2。

表 2 6082-T6 铝合金母材和搅拌摩擦焊缝各微区静态失重的腐蚀速率 $g/(m^2 \cdot h)$

试样	12 h	24 h
A 区	2.622	1.888
B 区	0.980	0.591
C 区	0.744	0.586
D 区	2.558	2.175

经过 12 h 和 24 h 的静态失重腐蚀试验,母材和搅拌针前方的平均腐蚀速率基本一样,搅拌针后方和焊缝中间区域的平均腐蚀速率接近;母材区、搅拌针前方失重高于搅拌针后方和焊缝中间区域,搅拌针后方和焊缝中间区域的耐腐蚀性能高于搅拌针前方和母材。

2.3 搅拌摩擦焊缝微区腐蚀形貌

2.3.1 腐蚀 12 h

6082-T6 铝合金焊缝不同区域腐蚀 12 h 后的微观形貌见图 2。从图 2a 可以看出母材的腐蚀现象比较严重,对图 2a 中 D_1 点位置进一步放大如图 2a 插图所示,可以看出在枝晶间部分区域向内腐蚀形成晶间腐蚀,

腐蚀严重。这是由于这些区域有夹杂物、缺陷或第二相,能量较高,形成腐蚀区域为阳极,周边区域为阴极的微区腐蚀电池。图 2b 中,搅拌针前方出现部分腐蚀现象,对 A_1 点进行局部放大如图 2b 插图所示,由于仅受到摩擦热影响,发生静态回复或再结晶,相对于母材,搅拌针前方可以看成特殊热处理,因此耐腐蚀性能同样较差。由图 2c 可知,由于搅拌针后方的焊接冷却速度低于焊核区,发生不完全再结晶,晶粒沿剪切力方向拉长,晶粒尺寸大小不一。从图 2 中可以看出,搅拌针后方耐腐蚀性程度高于搅拌针前方,大部分区域没有发生腐蚀,对 B_1 点放大如图 2c 插图所示。而对于焊核区的腐蚀形貌(图 2d),由于同时受到轴肩和搅拌针双重热机作用,发生动态再结晶,形成细小的等轴晶组织,但由于焊核区冷却时间长于搅拌针后方,再结晶程度更高,晶粒尺寸更细小^[13]。由于晶粒尺寸减小,位错密度大幅度降低,材料的化学成分得以均匀化。腐蚀学的观点认为:化学成分均匀化会使基体金属局部形成腐蚀电池倾向降低,晶体缺陷减少,使参与表面腐蚀反应的活性质点的数目也相应减少。因此,这些原因导致焊核区腐蚀表面比较平坦,耐蚀性强于搅拌针后方^[14]。

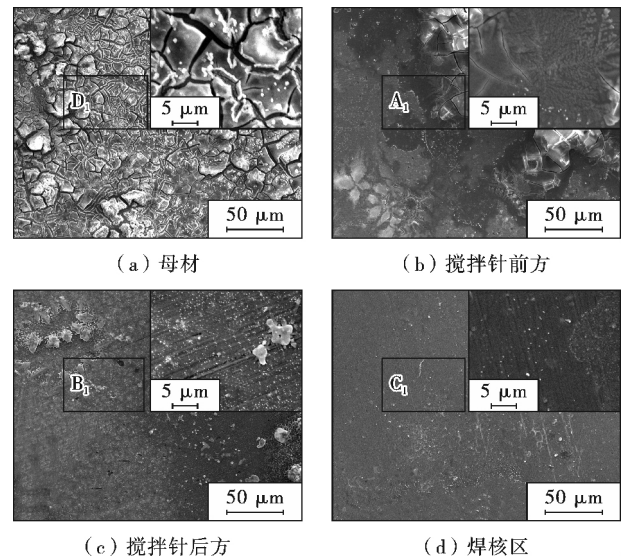


图 2 焊接接头不同区域腐蚀 12 h 后微观形貌

2.3.2 腐蚀 24 h

焊接接头不同区域浸泡 24 h 后的微观形貌见图 3。由图 3a 可知,6082-T6 母材的腐蚀试样表面出现规则连续的片状剥离现象,腐蚀现象比较严重,在腐蚀点的边缘有轻微鼓起,试样表面有少量鼓泡裂开,呈薄片,有轻微的剥落层,腐蚀的母材出现大量沿晶开裂,溶液中存在大量的剥蚀产物。图 3a 中 D_2 区域放大如图 3a 插图所示,母材发生沿晶界开裂腐蚀,并且深入

到基体,产生很大的腐蚀孔洞。由图 3b 可知,搅拌针前方试样腐蚀比较均匀,产生沿晶界开裂现象,图 3b 插图显示图中 A_2 区域发生沿晶开裂,偏白色的部分为残余的腐蚀产物,覆盖晶粒呈片状突起。由图 3c 可知,搅拌针后方发生轻微腐蚀, B_2 区域出现少量沿晶界开裂如图 3c 插图所示。图 3d 显示焊核区基本没有发生腐蚀,对 C_2 区域进行局部放大如图 3d 插图,可以看到表面比较平坦,耐腐蚀性能较好。

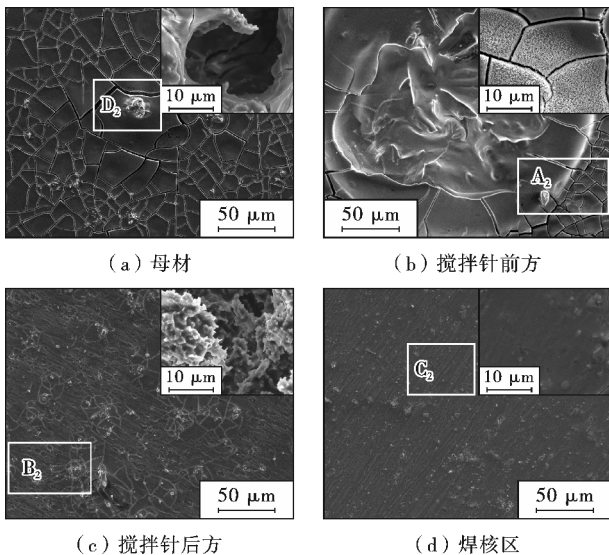


图 3 焊接接头不同区域腐蚀 24 h 后微观形貌

图 4 为母材腐蚀 24 h 后的 SEM 形貌。从图 4a 中可以看出腐蚀产物均匀覆盖在试样表面。图 4b 为相应的背散射电子成像图,对图中 F 点、G 点所示部位进行相应的 EDS 分析,结果见表 3。可以看出,腐蚀产物主要存在 Al, Mg, Si, O, Cr 等元素。

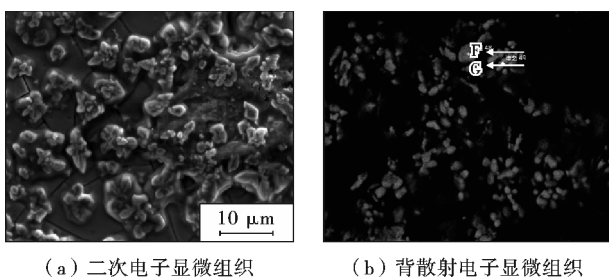


图 4 母材腐蚀 24 h 后的 SEM 形貌

表 3 母材腐蚀产物化学成分(质量分数) %

测试点	Al	Mg	Si	Cr	O
F 点	79.56	0.71	1.29	0.18	18.26
G 点	85.95	0.60	1.08	-	12.37

通过对腐蚀不同时间试样的微观形貌进行研究发
现,6082-T6 铝合金在腐蚀初期,腐蚀形态为点蚀,表现
为无规则的点状蚀坑。另外随着腐蚀时间增加,各个

区域中存在的沉淀相与铝基体电位发生变化,形成电
偶腐蚀,导致母材、搅拌针前方、搅拌针后方产生不同
晶间腐蚀,同时还出现了剥离腐蚀,这是由于在腐蚀过
程中腐蚀生成物产生一定的压力使试样产生像树皮卷
起来的腐蚀现象。由于腐蚀液中氯离子在亚硫酸氢根
存在的情况下能够更有效地产生点蚀源,破坏基体金
属表面的氧化膜,从而加速了铝合金基体与亚硫酸氢
根及其在试验过程中的中间产物发生腐蚀作用。当晶
间腐蚀沿着平行于表面的大量狭窄通道进行时,形成
的难溶物质占据了大量空间,此空间大于这些材料形
成时的原空间,这些大量的腐蚀产物起着“楔子作用”,
引起了侧向拉伸力,导致了未腐蚀金属的分离、剥落或
分层。

2.4 搅拌摩擦焊接接头腐蚀前 TEM 形貌

焊接接头各微区的 TEM 形貌见图 5,图 5a 中“1”
处 EDS 谱分析见表 4。

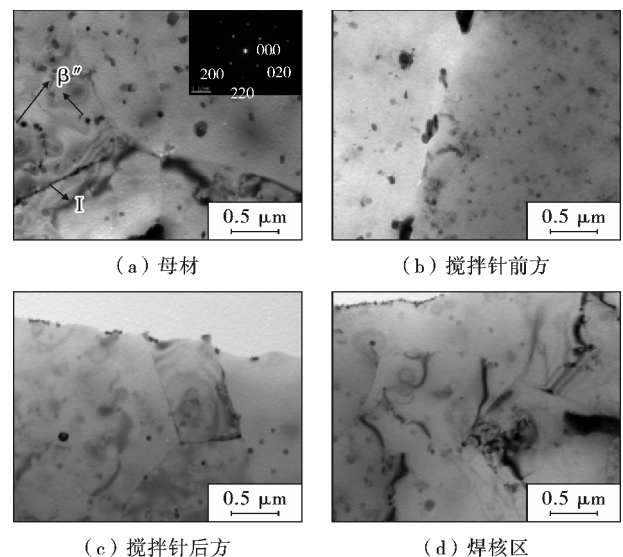


图 5 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊接焊缝各微区的 TEM 形貌

表 4 晶界析出相 I 点化学成分

元素	w/%	A/%
Al	97.96	52.32
Mg	0.89	37.64
Si	1.15	10.04

从图 5a 可看出,母材晶界出现连续分布析出相,
根据 I 点的 EDS 谱分析可知,这些晶界析出相富含 Mg
和 Si 元素,而 Si 原子的电位通常较高,在腐蚀微电池
中充当阴极,析出相在晶界上形成一个连续阴极分布,
而在晶界析出相附近形成溶质原子贫乏区,近视可以
看成纯铝,铝的电位通常较低,在腐蚀微电池中充当阳

极,在这个微腐蚀电池中沉淀无析出相可以快速被溶解,从而造成晶间腐蚀,而根据 TEM 结果可知,晶粒内部均匀分布着大量的沉淀相,部分黑色点是沿(001)_{Al}方向的针状沉淀相 β'' (Mg_5Si_6)的横截面(如图5a插图)。虽然析出相的形成消耗了部分溶质原子,但固溶体中仍然保留了部分溶质原子,这样晶粒内部基体与晶界无析出带构成一个腐蚀微电池。所以在晶界处形成两个腐蚀微电池,形成一个连续腐蚀的通道,故而造成严重的晶间腐蚀。由图5b可以看出,在搅拌针前方,虽然受到轴肩和搅拌针产热作用使晶粒内部析出针状沉淀相数量减少,基体溶质原子增加,与晶界无析出带构成腐蚀微电池倾向增加,但由于晶界上析出相间隔较大,形成不连续的阴极分布,导致搅拌针前方的腐蚀性能与母材相比降低;图5c中,在搅拌针后方,由于冷却时间短,晶粒内部析出相大部分溶解,母材中少量沉淀相保留下来,晶界上没有沉淀相分布,耐腐蚀性能较好。焊核区微观形貌如图5d,由于焊接冷却时间长于搅拌针前方和后方,大部分沉淀相粒子回溶,第二相粒子数量明显少于搅拌针前方,粒子数量减少,同时在晶内弥散分布,在晶界上基本没有发现析出相,基体主要以过饱和固溶体形式存在,电位均一,与晶界的电位差很小,此时合金的抗晶界腐蚀性能很强,使焊缝区耐腐蚀性能优于其他区域。

3 结 论

(1) 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊缝的腐蚀电位大于母材的腐蚀电位,腐蚀电流密度小于母材的腐蚀电流密度,耐蚀性更好。

(2) 6082-T6 铝合金在初期发生的腐蚀主要为晶间腐蚀和剥落腐蚀,随着时间增加,晶间腐蚀和剥落腐蚀程度加剧。焊缝中间区域基本不发生腐蚀。

(3) 在晶界附近存在沉淀无析出相,晶界析出相富含大量的 Mg 和 Si,晶界析出相和沉淀无析出相之间以及晶内基体与沉淀无析出带之间存在腐蚀原电池,导致腐蚀较严重,搅拌针后方和焊核区由于受到轴肩和搅拌针作用,焊后位错减少,组织细化,降低形成局部腐蚀原电池倾向,导致耐腐蚀性能较好。

[参 考 文 献]

- [1] 董 鹏. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头的组织与性能研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014: 1-3.
- [2] 栾国红, 郭德伦, 张田仓, 等. 铝合金的搅拌摩擦焊[J]. 焊接技术, 2003, 32(1): 1-4.
- [3] WADESON D A, ZHOU X, THOMPSON G E, et al. Corro-

sion behaviour of friction stir welded AA7108 T79 aluminum alloy [J]. Corros Sci, 2006, 48(4): 887-897.

- [4] JARIYABOON M, DAVENPORT A J, AMBAT R, et al. The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024-T351 [J]. Corros Sci, 2007, 49(2): 877-909.
- [5] JARIYABOON M, DAVENPORT A J, AMBAT R, et al. Effect of cryogenic cooling on corrosion of friction stir welded AA7010-T7651 [J]. Anti-Corrosion Methods Mater, 2010, 57(2): 83-89.
- [6] 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]. Corros Sci, 2011, 53(9): 3 026-3 034.
- [7] FONDA R W, PAO P S, JONES H N, et al. Microstructure, mechanical properties, and corrosion of friction stir welded Al 5456 [J]. Mater Sci Eng, 2009, 519(1/2): 1-8.
- [8] 张 华, 孙大同, 张 贺, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接接头腐蚀行为研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(3): 175-181.
- [9] 张新明, 吴泽政, 刘胜胆, 等. 固溶处理对 7A55 铝合金局部腐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2014(4): 26-39.
- [10] 苏景新, 张 昭, 曹发和, 等. 铝合金的晶间腐蚀与剥蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(3): 187-192.
- [11] 钱晓强. 铝合金搅拌摩擦焊接接头腐蚀行为研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 5-7.
- [12] FERRER K S, KELLY R G. Comparison of methods of removal of corrosion products from AA2024-T3 [J]. Corrosion, 2001, 57(2): 110-117.
- [13] 赵亚东, 沈长斌, 刘书华, 等. 6082 铝合金搅拌摩擦焊缝的电化学腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 105-108.
- [14] 沈长斌, 赵亚东, 刘淑华. 铝合金 5083-6082 搅拌摩擦焊缝的电化学腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2009, 29(5): 24-28.

[编校: 郑 霞]



材料保护已开通微信客服, 请扫描二维码关注材料保护公众号, 与本刊互动。