

高强度 LC4CZ 铝合金 FSW 接头腐蚀性能研究

钱晓强, 杨新岐, 郭晓娟
天津大学材料学院, 天津(300072)
E-mail: cy4804@126.com

摘要: 利用 ASTM G34 标准研究了 LC4 铝合金 FSW 接头的腐蚀行为。结果表明, LC4 铝合金 FSW 接头对剥蚀敏感, 焊缝热影响区最易受腐蚀。铝合金 FSW 接头焊接缺陷“弱连接”对剥蚀影响很大。

关键词: LC4CZ; FSW 接头; 焊接缺陷; 剥落腐蚀

1. 引言

搅拌摩擦焊 (FSW) 是一项相对较新的固态连接方法, 在铝及铝合金等轻质合金连接方面具有明显的优势。当前, 国内外 FSW 焊接接头由于摩擦热引发塑性变形导致微观组织变化的研究, FSW 过程焊接温度场模拟, 焊接应力应变场模拟, 焊接接头疲劳断裂性能等的研究都比较多, 有关 FSW 焊接接头耐腐蚀性能的系统研究较少。

国外有关 FSW 在 2XXX, 7XXX 和 5XXX 系列铝合金焊接接头的腐蚀性能研究的相关文献有: AA2024-T3 铝合金在焊核区域的腐蚀现象研究^[1], AA2024-T351, AA5456-H116, AA7010-T7651 在焊核区域的腐蚀行为研究^[2], 还有一些文献研究结果表明腐蚀主要发生在热影响区域 (HAZ), 如 AA7075-T651 合金^[3], 还有一些文献研究表明焊缝区域腐蚀性能与母材相当, 如 AA2024-T3 和 AA2195 合金^[4], 还有一些铝合金 FSW 焊接接头的耐腐蚀性能明显优于母材^[5]。

英国的 D.A. Wadeson 等人研究了 AA7108-T79 铝合金搅拌摩擦焊的腐蚀行为^[6]。腐蚀试验采用改进的 ASTM G34, EXCO 实验方法进行。金相观察表明, 在腐蚀 72h 后, 最严重的腐蚀出现在铝合金焊缝热机械影响区的边界处。在 TMAZ 表面的一些凹凸棱痕迹被完全腐蚀掉, 随着腐蚀扩展从 TMAZ 到 HAZ 进行, 腐蚀深度以原来表面计算达到 300 微米。同样明显的是保留下来的凹凸棱痕迹也被严重腐蚀, 这表明凹凸棱痕迹对腐蚀作用很敏感。这被认为是与 TMAZ 中产生的热机械过程引起的严重变形微观组织部分密切相关。电化学测试也表明, 最低开路电压出现在 TMAZ 的边缘。这都是由于在 TMAZ 内阳极反应速率的增加造成的。D.A. Wadeson 等人的腐蚀试验证明了 TMAZ 是最容易受到腐蚀的。

目前, 国内有关铝合金搅拌摩擦焊接头腐蚀行为的研究还是空白。

本文参考 ASTM G34 标准研究了 LC4CZ 铝合金 FSW 接头的腐蚀现象, 探讨了影响铝合金 FSW 接头腐蚀性能的因素。

2. 试验

2.1 试验材料

本文所用试验材料为北京赛福斯特有限公司提供的航空用高强度铝合金 LC4, 新牌号为 7A04, 母材热处理状态为 T4 (或 CZ), 即固溶热处理后自然时效至基本稳定的状态, 适用于固溶热处理后不再进行冷加工 (可进行矫直、矫平, 但不影响力学性能极限) 的产品。LC4 铝合金是超硬铝合金, 其强度高于硬铝, 塑性较低, 对应力集中的敏感性强, 耐热性较

差。LC4 铝合金 FSW 接头的化学成分和外观尺寸如下表 1，表 2 所示。

表 1 LC4 铝合金化学成分

材料	化学成分（质量分数）/%									
	Zn	Mg	Cu	Cr	Mn	Ni	Ti	Fe	Si	Al
LC4	5.0~7.0	1.8~2.8	1.4~2.0	0.1~0.25	0.2~0.6	—	0.1	0.50	0.50	余量

表 2 LC4 铝合金 FSW 接头外观尺寸

材料	板材厚度（mm）	焊缝宽度（mm）
LC4	4.8	15.0

2.2 焊接参数

LC4 铝合金试验样板由中国搅拌摩擦焊中心北京赛福斯特有限公司制备。FSW 技术的主要工艺参数是搅拌头的旋转速度 n 、焊接速度 v 、轴肩压力 p 、倾角 α 等,各参数所代表的意义见图 1 所示。本文所有焊件均采用高焊速焊接,具体焊接参数见表 3 所示(全部焊接参数由北京赛福斯特有限公司提供)。

表 3 铝合金搅拌摩擦焊接参数

焊接参数					
材料	旋转速度 n	移动速度 v	倾角 α	搅拌头插入深度 t	轴肩压力 p
LC4	800~1000rpm	150~250mm/min	3°	4.75mm	1.5~2.5KN

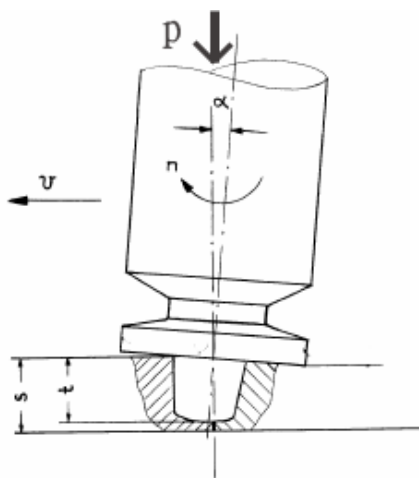


图 1 铝合金搅拌摩擦焊接参数示意图

2.3 试验方案

1. 未腐蚀对比金相试样制作

将试样沿垂直焊接方向的横截面依次用 200, 400, 600, 800 和 1000 号耐水砂纸打磨后抛光。用酒精擦洗表面后用新配的 Dix-Keller 试剂（4ml 氢氟酸，6ml 盐酸，10ml 硝酸 和 190ml 水）在抛光表面进行腐蚀，腐蚀大约 1~2min 后用无水酒精洗净吹干，在光学显微镜 OLYMPUS GX51 下观察其显微组织。用体式显微镜 TK-C921EC 观察宏观外貌。

2. 剥落腐蚀试验

本试验的目的是研究铝合金FSW接头的层状剥落性能。试验所用溶液参考ASTM G34 EXCO 标准^[7], 配置溶液方案用标准的EXCO溶液($\text{pH}=0.4$) $4\text{mol/L}^{-1}\text{NaCl}+0.5\text{mol/L}^{-1}\text{KNO}_3+0.1\text{mol/L}^{-1}\text{HNO}_3$, 合金腐蚀面与腐蚀介质面容比为 $>50\text{cm}^2/\text{l}^{-1}$ 。试样处理方法将试样沿垂直焊接方向的横截面依次用 200, 400, 600, 800 和 1000 号耐水砂纸打磨后抛光, 用丙酮去表面油污, 酒精擦洗, 烘干后放入EXCO溶液中腐蚀。腐蚀环境温度大致为 $20^\circ\text{C}\pm 3^\circ\text{C}$ 。浸泡腐蚀时间为 120h。

3. 试验结果与讨论

3.1 微观组织

根据材料的流动性差异产生的不同区域可把铝合金 FSW 接头分为四个区域: 母材区 (Base Metal, BM)、焊核区 (Weld Nugget)、机械热影响区 (Thermal Mechanical Affected Zone, TMAZ) 和热影响区 (Heat Affected Zone, HAZ), 如图 2 所示。LC4 铝合金 FSW 接头焊核厚度近似 4.4mm, 焊缝表面搅拌区宽度近似 10mm。

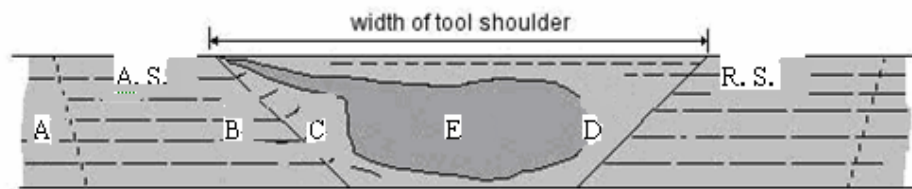


图2 LC4铝合金搅拌摩擦焊接头切面组织分区示意图

A—母材区, B—热影响区, C, D—机械热影响区, E—焊核区 A.S.—搅拌头前进侧 R.S.—搅拌头后退侧

LC4 铝合金母材组织呈现沿轧制方向拉长的等轴晶, 其间均匀弥散着黑色强化相颗粒, 其时效强化相除了 θ 相(CuAl_2)和S相(CuMgAl_2)外, 尚有强化效果强烈的 η 相(MgZn_2)和T相($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$), 在母材微观组织图中不明显, 如图 3(a)所示。LC4 铝合金FSW接头焊核区域由一系列细小的等轴再结晶颗粒相构成, 其间分布的强化弥散相很不明显, 如图 3(e, f)所示。这是由于在焊接过程中, 条状的强化相在焊接过程中随着温度的升高, 部分强化相组织熔化后进入基体中, 熔点较高的强化相在搅拌头的搅动下相组织被打碎后发生再结晶的缘故。焊核内相组织的重结晶和强化相的再分散表明焊接过程中温度超过了部分强化相的熔点但低于线材金属的熔点。

在焊核与母材之间有一过渡区, 在这一过渡区中, 母材条状的特征被高度扭曲, 形成一种高度变形的弧形条状汇合于焊核, 研究表明这一区域没有发生与焊核区内类似的再结晶过程。在焊核最边缘高度变形的区域为热机影响区, 这一区域在焊接过程中温度仅于焊核。

图 3(c)是搅拌头前进侧热机影响区, 由图中明显可以看到熔核区与母材的分界线, 图 3(d)是搅拌头后退侧热机影响区, 图中熔核区与母材的分界线不明显, 熔核到母材是逐渐过渡的。这是因为在搅拌头的旋转摩擦作用下, 前进侧熔融金属几乎即刻便被搅拌头指棒挤压出去, 该部分温度冷却快, 因此熔核与母材分界线明显。后退侧熔融金属有一个流动过程,

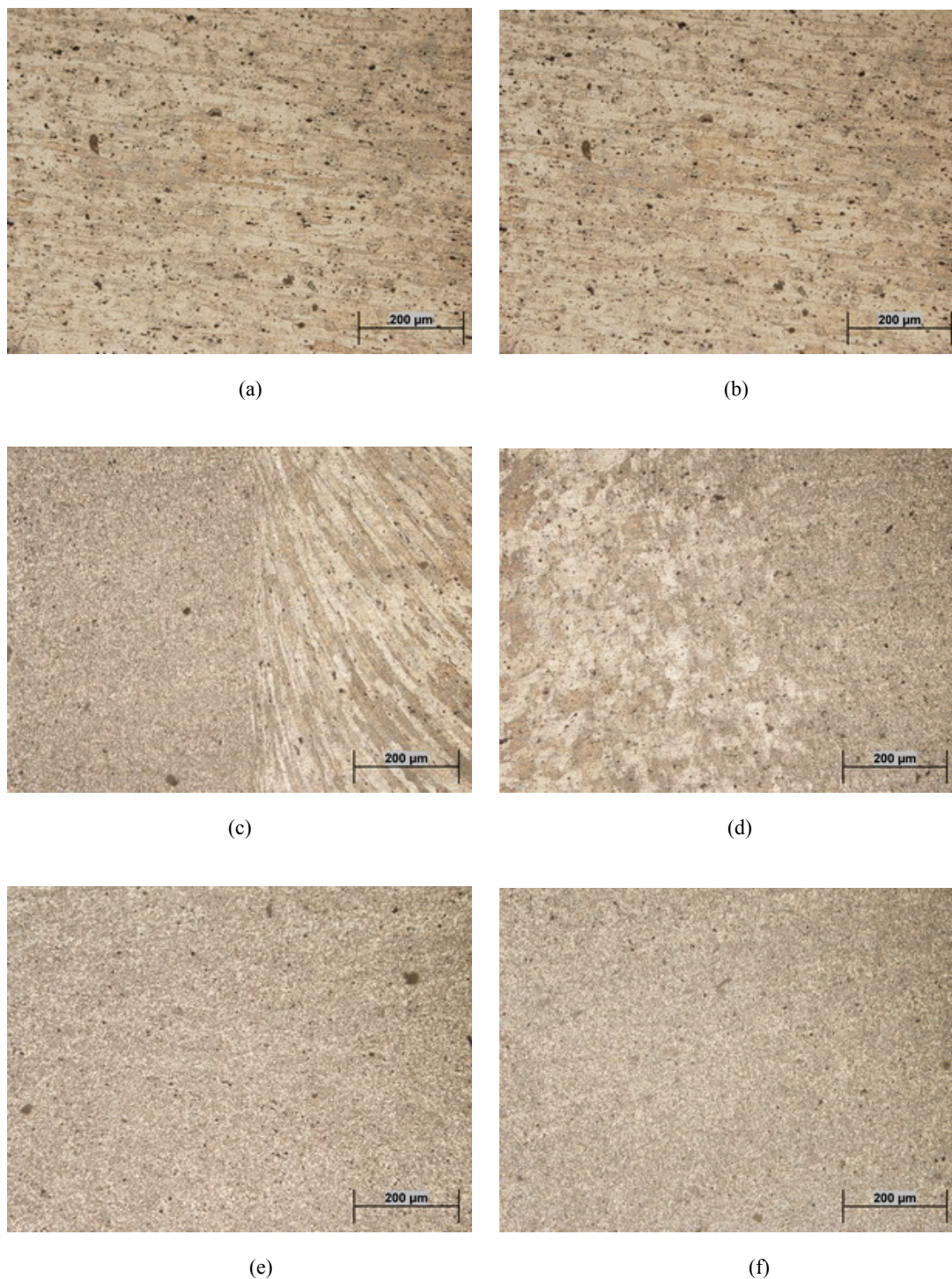


图3 LC4铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织

(a)母材 (b)热影响区 (c)前进侧热机影响区 (d)后退侧热机影响区
(e)焊核中心上部 (f)焊核中心下部

部分强化相发生熔化并伴随有晶粒长大的过程，熔核区与母材的分界线不明显。紧邻热机影响区的为焊接热影响区图 3(b)，这一区域的组织形态与母材相似，只是在焊接过程中随着温度的升高而伴随有晶粒的长大。

3.2 EXCO 腐蚀结果讨论

LC4 铝合金试样投入 EXCO 腐蚀溶液中就有气泡产生。2h 后, 继续有气泡, 试样抛光表面出现不连续的腐蚀点, 在点的边缘有轻微鼓起, 4h 后, 反应继续发展, 但速度减慢, 试样表面有少量鼓泡裂开, 呈薄片, 有轻微的剥落层, 24h 后, 试样表面严重变色, 溶液中存在大量的剥蚀产物, 剥蚀扩展到较深的基体金属内部, 母材体表微微发红, 试样表面上热机影响区腐蚀较严重, 腐蚀产物为黑色, 前进侧热机影响区腐蚀面积比后退侧要小, 焊核中心区域光亮, 腐蚀不明显, 48h 后, 热影响区腐蚀情况更严重, 表面有大量白色粉末。72h 后腐蚀变慢。

图 4 所示为 LC4 铝合金 FSW 接头腐蚀 120h 后与未腐蚀的试样的宏观对比图。从图中可以看出, LC4 铝合金 FSW 接头的两侧热机影响区和热影响区域是发生腐蚀的严重区域。接头焊核区域的腐蚀程度相比要轻。



图 4 LC4 铝合金 FSW 接头腐蚀前后宏观对比

图 5 为 LC4 铝合金 FSW 接头两侧焊缝处飞边“flash”的腐蚀图。从图中可以看出, 飞边对剥落腐蚀的影响不大。

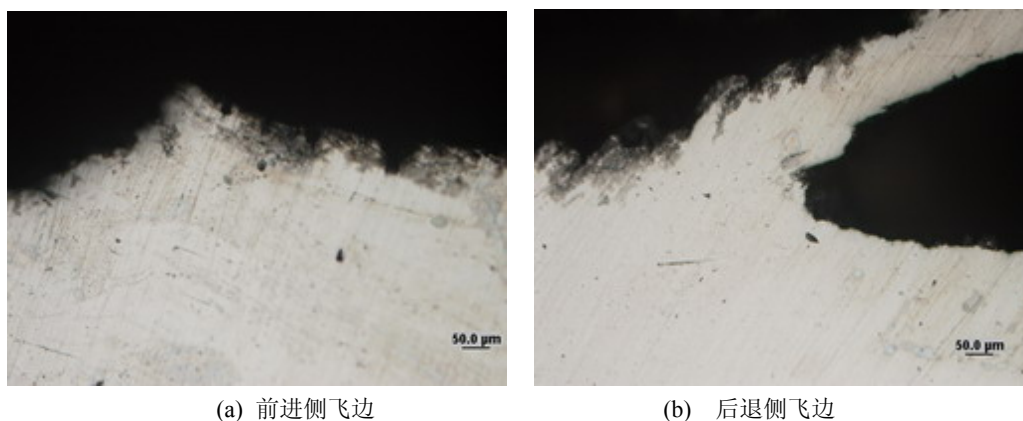


图 5 LC4 铝合金 FSW 接头飞边

在 LC4 铝合金 FSW 接头焊缝表面出现了较多的腐蚀种类, 见图 6。从图中可以看出, LC4 铝合金的剥落腐蚀现象比较严重。母材区表面蚀坑较多, 部分区域出现了较为危险的穿晶腐蚀。焊缝区焊核中心区域有孔蚀生成较多, 靠近熔合线区剥蚀严重。这说明 LC4 铝合金对剥蚀十分敏感。原因可能是 LC4 材料在热处理时, 晶界析出的强化相如 CuAl_2 、 MgAl_2Zn 、 CuAl_2Mg 等相对于晶粒本身为阳极而优先溶解, 造成晶间腐蚀。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, 导致了未腐蚀属的分离、剥落或分层^[8]。

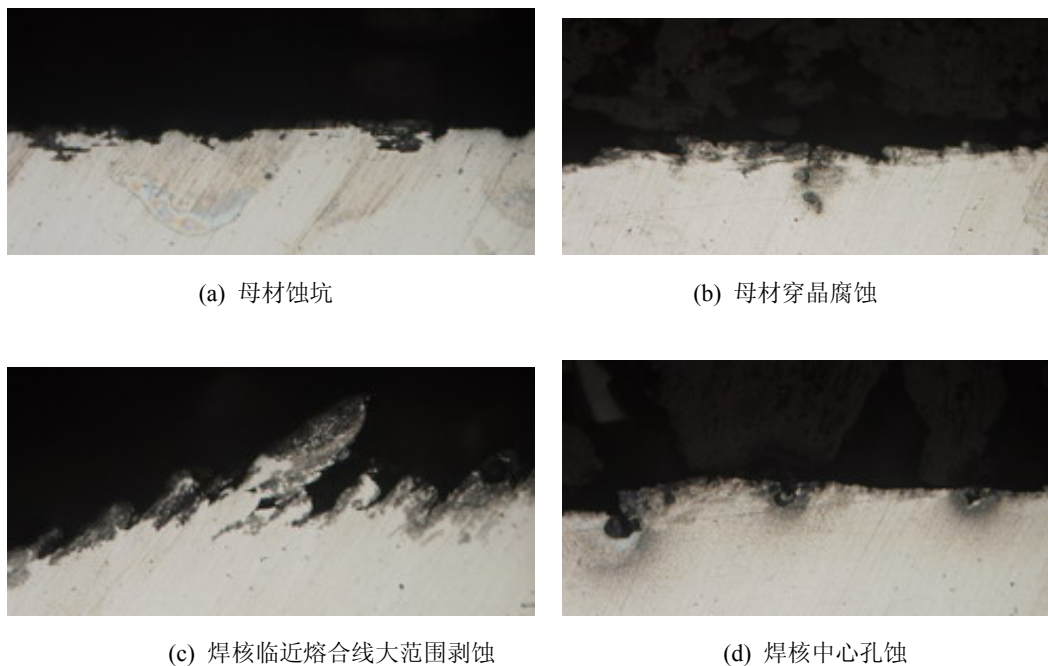


图6 LC4 铝合金 FSW 接头焊缝表面腐蚀

本次EXCO剥落腐蚀试验还观察到了铝合金FSW接头“弱连接”缺陷对剥落腐蚀的影响。“弱连接(weak-bond)”或“吻接(kissing-bond)”缺陷是搅拌摩擦焊接头特有的一种缺陷,用传统的无损检测方法(如超声波检测和X射线探伤)都无法检测到的。这些缺陷其实是由无定形的 Al_2O_3 颗粒组成的氧化队列。铝合金FSW接头弱连接缺陷主要是焊接前铝合金板材表面氧化铝薄膜在搅拌摩擦焊进程中被搅拌头打碎进熔核区域产生连续的氧化铝碎片带。

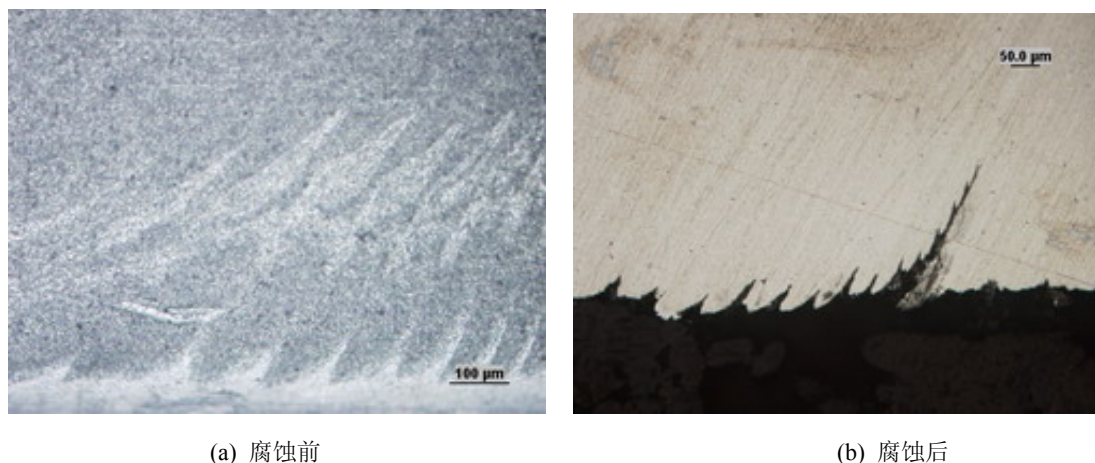


图7 LC4 铝合金 FSW 接头根部缺陷对腐蚀的影响

本次 EXCO 试验中, 铝合金接头根部的氧化物被腐蚀, 出现裂纹, 如图 7(b)所示。氧化物呈锯齿状分布, 裂纹尖端向焊核内部扩展。对比图 7(a), 可以看出, 锯齿状裂纹的前身就是这些氧化物。

4. 结论

- (1) LC4 铝合金 FSW 接头对剥落腐蚀比较敏感。
- (2) LC4 铝合金 FSW 接头两侧热影响区和热机影响区域是最易受腐蚀区域。
- (3) LC4 铝合金 FSW 接头飞边对剥蚀影响不大。
- (4) 铝合金 FSW 接头根部缺陷对剥落腐蚀有致命性影响。

参考文献

- [1] G. Biallas, R. Braun, C.D. Donne. Mechanical properties and corrosion behavior of friction stir welded 2024-T3, in: 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, 1999.
- [2] B.J. Connolly, A.J. Davenport. Localized corrosion of friction stir welds in aluminium alloys, in: 5th International Friction Stir Welding Symposium, Metz, France, 2004.
- [3] J.B. Lumsden, M.W. Mahoney, G. Pollock, etc. Corrosion 55 (1999) 1127–1135.
- [4] J. Corral, E.A. Trillo, Y. Li, etc. Sci. Lett. 19 (2000) 2117–2122.
- [5] G.S. Frankel, Z. Xia. Corrosion 55 (1999) 139–150.
- [6] D.A. Wadeson, X. Zhou, G.E. Thompson, etc. Corrosion behavior of friction stir welded AA7108-T79 aluminium alloy [J]. Corrosion Science 48 (2006) 887–897.
- [7] ASTM G34. Standard test method for exfoliation corrosion susceptibility in 2xxx and 7xxx series aluminum alloys (EXCO test)[S]. USA, 1985.
- [8] 贺斌,孙有朝,樊蔚勋. 剥蚀对铝合金疲劳性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(3): 306310.

Characterization of corrosion behaviors in friction stir welded joint of LC4CZ

Qian Xiaoqiang, Yang Xinqi, Guo Xiaojuan

Department of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin (300072)
Cy4804@126.com

Abstract

In this paper the corrosion behaviors of friction stir welded aluminium alloys joint, LC4CZ, have been investigated using accelerated test (ASTM G34 EXCO). The test showed that the FSW joint of LC4CZ was sensitive to exfoliation corrosion. Corrosion testing revealed that the edge regions of the thermo-mechanically affected zone were most susceptible to corrosion. The accelerated test proved that the defects in friction stir welded joint often referred to as “Kissing Bond” had the lethality danger to the corrosion property.

Keywords: LC4; FSW joint; welding defects; exfoliation corrosion