

搅拌摩擦与氩弧焊铝合金接头疲劳性能的比较 *

王快社¹ 张小龙¹ 王训宏¹ 徐可为²

1. 西安建筑科技大学冶金工程学院 西安 710055

2. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室 西安 710049

摘 要 建立了铝合金焊接接头的 $S-N$ 曲线, 对比分析了搅拌摩擦和氩弧焊两种工艺对其焊接接头疲劳性能的影响. 结果表明: 在载荷相同的条件下, 铝合金搅拌摩擦焊接接头的疲劳性能优于氩弧焊接头. 搅拌摩擦焊接接头的疲劳寿命 $N=10^6$ 次的疲劳强度为 59–65 MPa. 搅拌摩擦焊接接头具有比氩弧焊接头更为细小的晶粒和狭窄的焊接热影响区, 阻碍了滑移带的形成和裂纹的扩展, 从而提高了接头的疲劳性能. 铝合金焊接接头的缺陷是主要的疲劳裂纹源.

关键词 金属材料, 搅拌摩擦焊, TIG 焊接, 疲劳性能

分类号 TG407

文章编号 1005-3093(2009)01-0073-04

Comparison of fatigue properties between friction stir welds and TIG welds for Al alloy

WANG Kuaishe^{1**} ZHANG Xiaolong¹ WANG Xunhong¹ XU Kewei²

1. College of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055

2. State Key Laboratory for Mechanical of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

* Supported by National Natural Science Foundation of China No.50774059.

Manuscript received May 22, 2008; in revised form September 1, 2008.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(029)82202955, E-mail:wangkuaishhe@yahoo.com.cn

ABSTRACT The effect of welding processes friction stir welds (FSW) and tungsten inert gas welding (TIG) on fatigue properties of LF2 aluminum welded joints was analyzed, and the $S-N$ curves of the welded joints were established. The results show that the fatigue properties of FSW welded joints are better than that of TIG welded joints. Fatigue strength of friction stir welds is 59–65 MPa under $N=10^6$. The microstructures of joints are comparatively fine grain and narrow HAZ zone in the FSW welds which inhibit the growth of crack and produce high fatigue life compared to that of the TIG welds. Fracture morphologies of TIG welds show that the fatigue fracture occurs from weld defects.

KEY WORDS metallic materials, friction stir welding, TIG welding, fatigue property

氩弧焊等熔化焊存在氧化与蒸发、晶粒粗大、裂纹倾向大、气孔和较大的热应力^[1-3]等弊端. 英国焊接研究所提出的搅拌摩擦连接方法 (friction stir welding, FSW) 为铝合金、镁合金等多种熔化焊接性能差的轻质高强材料的有效连接提供了新的途径^[4-6]. 焊接结构的疲劳强度取决于接头的疲劳性能, 本文对比分析搅拌摩擦与氩弧焊接对铝合金焊接接头疲劳性能的影响.

1 实验方法

实验用 LF2 铝板材的尺寸为 143 mm×250 mm×6 mm. 搅拌摩擦焊接实验的搅拌头材质为 65Mn 钢, 轴肩直径为 20 mm, 搅拌头焊针的高度为 5.8 mm, 直径为 6 mm. 焊接速度为 95 mm/min, 搅拌头旋转速率为 750 r/min, 压力 200–400 N; 使用 WSJ-500 手工钨极氩弧焊机对上述尺寸的 LF2 铝板材进行氩弧焊接, 焊接电流为 230–270 A, 焊接速度 200–300 mm/min, 钨极直径 4–5 mm, 选用普通 AL-Mg 焊丝 (直径 4–5 mm), 气体流量为 8–11 L/min, 喷嘴直径 13–16 mm. LF2 铝母材、FSW、TIG 焊接接头的静载力学性能列于表 1.

采用轴向加载方式在 810 型 MTS 万能实验机上

* 国家自然科学基金 50774059 和陕西省重点学科 (材料加工工程) 资助项目.

2008 年 5 月 22 日收到初稿; 2008 年 9 月 1 日收到修改稿.

本文联系人: 王快社, 教授

表 1 LF2 母材、TIG、FSW 焊接接头的静载力学性能
Table 1 Mechanical properties of base material and welded joints for LF2 aluminum alloy

Test specimen	σ_b /MPa	δ /%
Base material	265	6
FSW Welding joint	235	5.5
TIG Welding joint	212	5

进行焊接接头的疲劳试验. 按照承受应力水平由高到低, 将试件分组. 应力比 $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.1$, 加载频率 $f=20\text{ Hz}$. 以焊接接头的静载拉伸强度为依据, 试验加载应力. 在 QUANTA400 扫描电镜下观察断口的形貌.

2 结果与讨论

从图 1 可见, 在相同的载荷条件下, 搅拌摩擦焊接接头的疲劳寿命高于氩弧焊接接头, 在加载应力较高的情况下更加明显. 两条 $S-N$ 曲线的变化趋势表明, FSW 焊接接头和 TIG 焊接接头的疲劳强度均随着循环次数的增加而降低. 但是, 随着循环次数的增加, TIG 焊接接头的疲劳强度降低的程度小于 FSW 焊接接头疲劳强度降低的程度. 在高应力下, 两种焊接方法对疲劳性能的影响有显著的差异; 随着应力的降低, 两种焊接方法对疲劳性能的影响的差异逐渐减小. 疲劳寿命 $N=10^6$ 次的疲劳强度值约为 59-

65 MPa. 对两条 $S-N$ 曲线进行拟合, 可得 $S-N$ 曲线的方程: 对于 FSW 焊接头 $\lg N=19.6898-7.3986\lg S$, 对于 TIG 焊接头 $\lg N=16.9363-6.2496\lg S$, 其中 S 为应力值 (MPa), N 为循环次数.

当搅拌摩擦焊接的工艺参数不当时, 焊接头处产生极其细小的隧道型裂纹, 造成疲劳循环寿命的急剧下降, 在 $S-N$ 曲线上表现为少量的离散点 (奇异点).

图 2 表明: 对于搅拌摩擦焊接, 由于焊缝中心经历了剧烈的塑性变形, 通过动态再结晶方式形成的接头组织大部分是等轴晶粒; 同时, 搅拌摩擦焊接方式的热输入并没有使材料发生熔化, 避免了常规熔化焊接方法形成的气孔、疏松等缺陷, 所形成的热影响区域狭窄, 这一点可以从过渡区域看出. 由于晶界对

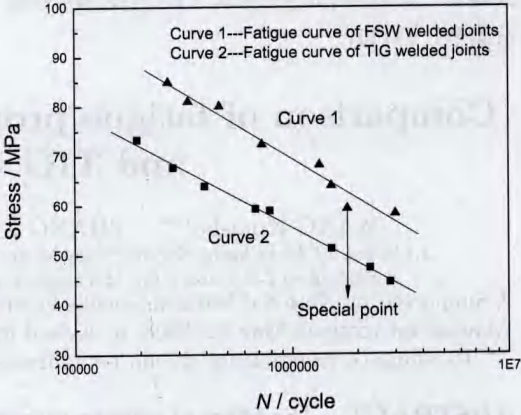


图 1 FSW 和 TIG 接头的疲劳曲线
Fig.1 Fatigue curves of FSW and TIG welded joints

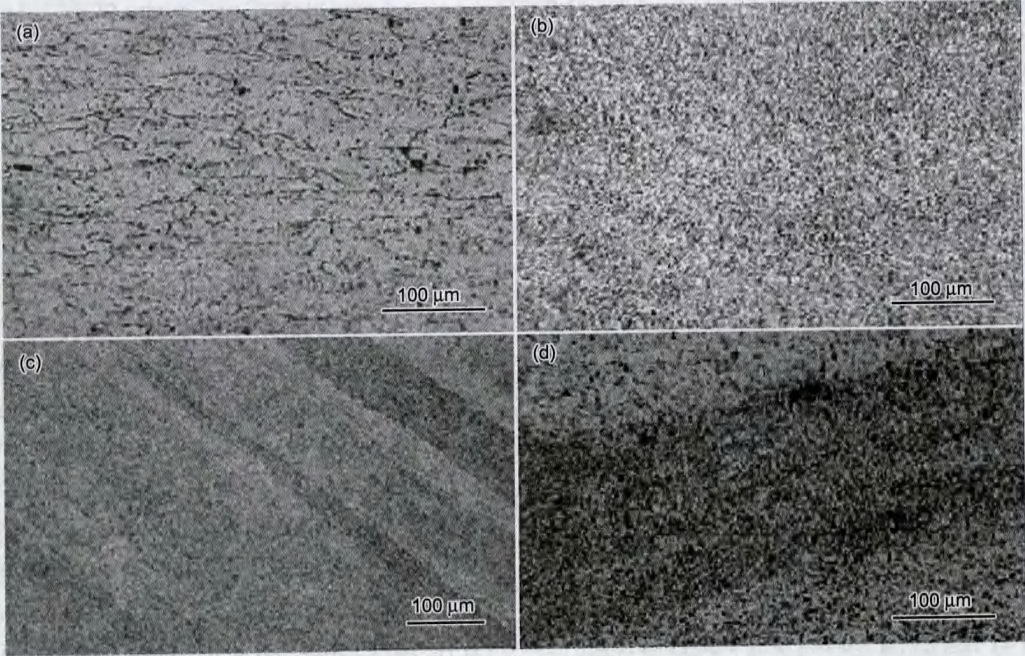


图 2 LF2 铝合金搅拌摩擦焊接接头近焊缝区显微组织
Fig.2 Microstructures of zones near the weld interfaces of FSW welded joints. (a) Base material, (b) nugget zone, (c) transition zone near HAZ, (d) TMAZ zone



图 3 焊接接头的疲劳断口形貌

Fig.3 SEM images of surfaces of welded joint after fatigue test. (a) Fatigue crack of FSW welded joints, (b) shrinkage cavity of TIG welded joints, (c) dense porosities of TIG welded joints



图 4 搅拌摩擦焊接接头的疲劳辉纹

Fig.4 Fatigue striation in FSW welded joint after fatigue test

位错运动的阻塞作用,晶粒细化可以有效地提高材料的滑移形变抗力,抑制循环滑移带的形成和裂纹的扩展。根据疲劳裂纹沿晶界开裂的位错塞积机制,细化晶粒可以有效地提高材料的疲劳强度。因此,FSW 焊接接头阻止循环滑移带的形成和开裂的程度比 TIG 接头高。而 TIG 焊焊接的热输入大、焊接速度低,在焊缝及其附近产生了较宽的热影响区,造成焊接接头的晶粒粗大。另外,TIG 焊接接头中的铸态缺陷易成为裂纹萌生处,导致在高应力范围其疲劳性能比搅拌摩擦焊接的低^[2,7]。

对于搅拌摩擦焊接的接头,大多数裂纹起源于焊接底部的结合区域(图 3a)。这说明,在试样的焊接和加工过程中应该进行超声波检测,以防止极细隧道型孔洞产生裂纹萌生,和局部缺口应力状态失稳导致裂纹缺陷的萌生。在 TIG 焊接接头试样疲劳裂纹源处,可发现显微疏松、表面气孔等缺陷(图 3b, 3c),从而为疲劳裂纹的产生创造了条件。

搅拌摩擦焊接接头裂纹扩展区中形成的疲劳辉纹表示裂纹前沿在间歇扩展中的逐次位置,疲劳辉纹形貌如图 4 所示。可以发现,由于裂纹扩展中两表面的约束和材料间的相互作用,断口裂纹区的突起部分被磨光或呈贝壳状的光泽表面。裂纹的持续扩展,使剩余截面上的应力不断增大,裂纹扩展速率也相应地

提高。当剩余面积不足以支持所加载荷时,试样即发生瞬间断裂。疲劳辉纹的间距比较致密并且均匀,说明在疲劳实验过程中裂纹扩展趋势较弱。而 TIG 焊缝中气孔、未焊透、夹杂物、组织疏松及表面机械划伤等缺陷的存在,为疲劳裂纹的早期产生创造了条件。对于搅拌摩擦焊接试样,微裂纹源也是由位错运动引起的。但是由于裂纹源较少,主要是位错的塞积作用产生微观尺度的塑性变形,引起位错在原子晶格间的运动,逐渐形成了微裂纹。

3 结 论

1. FSW 焊接接头焊缝及热影响区的晶粒细小,而且热影响区较窄,提高了材料的滑移形变抗力,抑制循环滑移带的形成和开裂,增加了抑制裂纹扩展的晶界,减少了 TIG 焊接方法所产生的熔化焊接缺陷。

2. 对于相同的应力载荷,LF2 铝合金 FSW 焊接接头的疲劳性能优于 TIG 焊接接头,在载荷较高的情况下更为显著。

参 考 文 献

- 1 ZHANG Zhao, ZHANG Hongwu, Effect of process parameters on quality of friction stir welds, Chinese Journal of Materials Research, **20**, 504(2006)
(张 昭, 张洪武, 焊接参数对搅拌摩擦焊接质量的影响, 材料研究学报, **20**, 504(2006))
- 2 LI Jingyong, MA Jianmin, Effect of welding processes on fatigue properties of 6061-T6 aluminum welded joints, Journal of Aeronautical Materials, **24**, 53(2004)
(李敬勇, 马建民, 焊接工艺方法对 6061-T6 铝合金焊接接头疲劳性能的影响, 航空材料学报, **24**, 53(2004))
- 3 WANG Kuaishe, WANG Xunhong, SHEN Yang, XU Kewei, Research on microstructure and mechanical properties of friction stir weld joints of dissimilar materials, Rare Materials and Engineering, **34**, 155(2005)
(王快社, 王训宏, 沈 洋, 徐可为, 异种材料搅拌摩擦焊接接头组织特征与性能研究, 稀有金属材料与工程, **34**, 155(2005))
- 4 K.Colligan, Material flow behavior during friction stir welding of aluminum, Welding Journal, **78**, 229(1999)

5

K.V.Jata, S.L.Semiatin, Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scripta Mater.*, **43**, 743(2000)

6

Michael A.Sutton, Anthony P.Reynolds, Bangcheng Yang, Mixed mode I / II fracture of 2024-T3 friction stir welds, *Engineering Fracture Mechanics*, **70**, 2215(2003)

7

WANG Wenxian, MA Lili, MU Wei, LI Jinyong, WANG Dongpo, HUO Lixing, DENG Caiyan, Fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy joint with TIG-welding, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **43**(10), 161(2007)
(王文先, 马丽莉, 慕 伟, 李晋永, 王东坡, 霍立兴, 邓彩艳, AZ31B 镁合金 TIG 焊焊接接头的疲劳性能, *机械工程学报*, **43**(10), 161(2007))