

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.11

6B82 铝钪合金与 6082 铝镁硅合金 FSW 接头性能对比研究

赵琦璠, 许鸿吉, 赵晓东, 朱厚淳

大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028

摘要: 采用搅拌摩擦焊对 6B82 铝钪合金与 6082 铝镁硅合金进行焊接, 并对比分析两种铝合金焊接接头的力学性能、疲劳性能和耐腐蚀性能。结果表明, 6B82 铝钪合金接头具有更好的塑性和韧性, 而 6082 铝镁硅合金接头强度略高。两种焊接接头的硬度分布趋势相似, 均呈现“W”形; 均具有良好的耐腐蚀性能; 疲劳试验结果显示, 6B82 铝钪合金与 6082 铝镁硅合金焊接接头(去余高)指定寿命为 1×10^7 次循环下的中值疲劳极限分别为 99 MPa 与 102.5 MPa, SEM 扫描显示疲劳断口终断区为典型的韧窝形貌。研究结果表明, 6B82 铝钪合金焊接接头在满足轻量化需求的同时, 其综合性能满足轨道交通关键材料连接的要求, 为轨道交通领域轻量化材料的开发和应用提供了重要参考。

关键词: 6B82 铝钪合金; 6082 铝镁硅合金; FSW; 力学性能; 疲劳性能

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0108-06

Comparative Study on Properties of 6B82 Al-Sc Alloy and 6082 Al-MG-Si Alloy FSW Joint

ZHAO Qifang, XU Hongji, ZHAO Xiaodong, ZHU Houchun

School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China

Abstract: FSW was used to weld 6B82 aluminum scandium alloy with 6082 aluminum magnesium silicon alloy, and the mechanical properties, fatigue performance, and corrosion resistance of the two aluminum alloy welding joints were compared and analyzed. The results show that the 6B82 aluminum scandium alloy joint has better plasticity and toughness, while the strength of the 6082 aluminum magnesium silicon alloy joint is slightly higher. The hardness distribution trends of the two welding joints are similar, both showing a "W" shape; both have good corrosion resistance; fatigue test results show that the specified life of the 6B82 aluminum scandium alloy and 6082 aluminum magnesium silicon alloy welding joints (with excess height removed) under 1×10^7 cycles is 99 MPa and 102.5 MPa respectively, and SEM scanning shows that the final fracture zone of the fatigue fracture is a typical dimple morphology. The research results show that the 6B82 aluminum scandium alloy welding joint meets the requirements of lightweight design while having comprehensive performance to meet the requirements of key material connections in the field of rail transportation.

Keywords: 6B82 Al-Sc alloy; 6082 Al-MG-Si alloy; FSW; mechanical properties; fatigue performance

引用格式: 赵琦璠, 许鸿吉, 赵晓东, 等. 6B82 铝钪合金与 6082 铝镁硅合金 FSW 接头性能对比研究[J]. 电焊机, 2025, 55(9): 108-113.

Citation: ZHAO Qifang, XU Hongji, ZHAO Xiaodong, et al. Comparative Study on Properties of 6B82 Al-Sc Alloy and 6082 Al-MG-Si Alloy FSW Joint[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 108-113.

0 引言

随着航空航天、轨道交通、船舶制造等产业的飞

速发展, 对结构材料轻量化、高强韧及高可靠性的需求日益迫切。铝合金凭借其优异的综合性能, 其需求越来越大。据最新市场数据, 2024 年 1-8 月, 中

收稿日期: 2025-03-20 修回日期: 2025-04-17

作者简介: 赵琦璠(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事轨道交通关键材料连接研究。E-mail: 3022014118@qq.com。

国铝消费总量已达 3 382.54 万吨,同比增长 6.75%,并预计在未来几年内将持续增长。在此背景下,如何在保证足够高强度的前提下,进一步实现轻量化,已成为铝合金材料领域亟待解决的问题。早在 20 世纪 60 年代末,苏联学者率先发现稀土元素钪(Sc)能改善铝合金的综合性能^[1],并降低质量。

钪为 3d 元素,与外层被 4f 电子围绕的稀土元素有明显的性能差别,其晶格常数、密度及某些物理、力学性能更接近于铝、钇和铈,是铝合金理想的合金化元素。钪是铝合金强有力的晶粒细化剂,可以显著细化铸态合金晶粒,并且能够提高铝合金的再结晶温度 250 ℃~280 ℃,消除焊缝热影响区的再结晶组织,使合金具有更高的强度和抗腐蚀性能。除此以外,钪对铝合金还有着很好的弥散强化作用,在热加工或退火处理状态均保持稳定的非再结晶组织,使合金具有良好的热、冷加工性和热稳定性。

现如今,国内众多学者开始重视铝钪合金。中南大学李劲风团队^[2]获国家多项铝钪合金项目基金,突破多项关键技术,如:铝钪合金中间制备技术;高镁含量铝镁钪合金大规格板、锻件、管和配用焊丝制备技术;高强耐蚀可焊铝锌镁钪合金板材、管材和配用焊丝制备技术等。汤振齐等^[3]采用熔炼铸造方法制备了不同含 Sc 量的 6066 铸态铝合金,通过对各组含 Sc 铸态合金的显微组织和力学性能的试验分析研究,确定了 6066 铝合金最佳含 Sc 量。

然而,现有研究多集中于铝钪合金材料本身的制备与性能,而关于其焊接性能,尤其是采用先进连接技术(如搅拌摩擦焊 FSW)后,接头综合性能与传统高强铝合金的对比研究尚显不足。本文选取 6B82 铝钪合金与广泛应用的 6082 铝镁硅合金为研究对象,采用搅拌摩擦焊方法制备焊接接头,并对比分析两种接头的微观组织、力学性能及耐腐蚀性,探究 6B82 铝钪合金在满足轻量化的同时其他性能要求是否达标,从而满足现代轨道车辆高速发展的需求。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验母材分别选用 8 mm 厚的 6B82 铝钪合金

与 10 mm 厚的 6082 铝镁硅合金,其化学成分及力学性能见表 1、表 2。

表 1 试验母材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of test base material (wt. %)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
6B82	0.95	0.15	0.001 8	0.59	0.9
6082	0.4	0.26	<0.1	<0.1	0.66

材料	Ni	Ti	Zr	Sc	Cr
6B82	0.02	0.093	0.094	0.15	0.001
6082	0.004 9	<0.05	<0.1	—	—

表 2 试验母材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of test base metal

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
6B82	≥216	≥270	≥15.4
6082	≥255	≥310	≥9.0

1.2 试验工艺与方法

为了获得外观合格的焊缝,验证两种合金搅拌摩擦焊接头性能,采用 S045 型搅拌头进行焊接,搅拌头类型如图 1 所示。

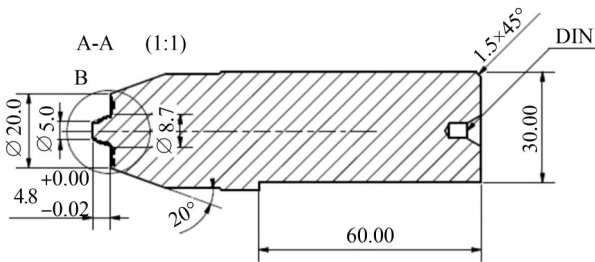


图 1 S045 搅拌头图纸

Fig. 1 S045 mixing head drawing

试验采用恒位移焊接方法,保证焊前间隙及错边值均小于 0.2 mm,焊接时,先完成正面的焊接,焊接完成后去除飞边,翻转装卡进行背面焊接,依据外观检测结果调整参数(搅拌头旋转速度、焊接速度及位移高度附加修正值),如表 3 所示。焊接过程如图 2 所示。

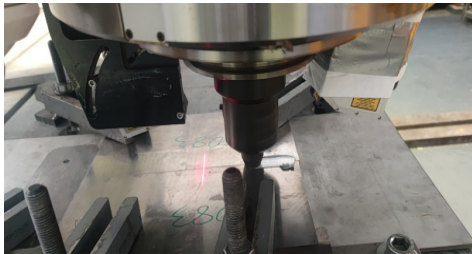


图 2 搅拌摩擦焊试验过程

Fig. 2 Friction stir welding test process picture

表3 搅拌头选用及焊接参数

Table 3 Mixing head selection and welding parameters

母材	板厚 /mm	层道数 (双面焊)	旋转速度 /($r \cdot \min^{-1}$)	焊接速度 /($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	高度附 加修正
6B82	8	1	1 500	800	-0.15
		2			-0.40
6082	10	1	1 200	600	-0.10
		2			-0.30

2 试验结果与分析

2.1 拉伸试验结果分析

拉伸试验均在WDW-300E屏显示电子万能试验机上进行,试验结果如表4所示。由表可知,两种合金的焊接接头均断裂于焊缝处,表明焊缝是接头中最薄弱的环节。6082铝镁硅合金焊接接头的平均抗拉强度为261.9 MPa,略高于6B82铝钎合金接头的222.4 MPa,但6B82铝钎合金的平均断后伸长率达到14.6%,约为6082-T6接头(8.7%)的1.7倍,其塑性与韧性有了显著的提高。因此Sc元素虽然对抗拉强度的提升作用有限,但能一定程度上提高接头的塑性与韧性,使其应用场景更加广阔。

表4 焊接接头拉伸试验结果

Table 4 Tensile test results of welded joints

母材	抗拉强度 /MPa	平均值 /MPa	强度系 数T	断后伸长 率/%	断裂 位置
6B82	225.4	222.4	0.82	14.6	焊缝
	219.4				焊缝
6082	259.7	261.9	0.83	8.7	焊缝
	264.1				焊缝

2.2 维氏硬度试验结果分析

对6B82铝钎合金与6082铝镁硅合金焊接接头进行维氏显微硬度测试。以焊缝中心为起点,沿垂直于焊接方向向两侧母材进行。测试参数为:载荷500 gf,保持时间15 s,步长为500 μm 。横截面的显微硬度分布如图3所示。由图3可知,两种合金接头的硬度分布曲线均呈现典型的“W”形特征,母材硬度最高,焊核区次之,热影响区与热机影响区最低。6B82铝钎合金的母材及热影响区显微硬度相较于6082铝镁硅合金低20~30 HV,但在热机影响区和焊核区,6B82铝钎合金的硬度则略高于6082铝镁硅合金。由此可知,搅拌摩擦焊接过程中的热

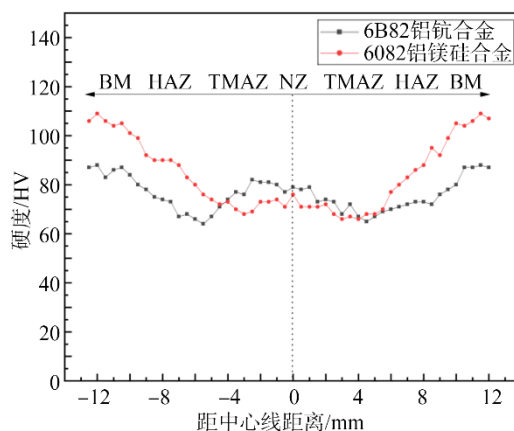


图3 焊接接头硬度分布

Fig. 3 Hardness distribution of welded joints

循环对6082合金的软化效应更为明显,尤其是在热影响区,导致其硬度下降幅度更大。

2.3 金相试验结果分析

图4为6B82铝钎合金与6082铝镁硅合金焊接接头各区域的金相显微组织。总体来看,同一区域的金相形貌相近:WNZ区是搅拌头直接作用区域,在焊接过程中受到搅拌针直接搅拌而发生剧烈的塑性变形,在焊接热循环下发生动态再结晶,晶粒受到搅拌针的不断搅拌,形成细小的等轴晶粒,同时在搅拌针剧烈的搅拌作用下,大块的第二相粒子被搅碎,形成均匀分布细小的第二相粒子。TMAZ区位于WNZ与HAZ之间,同时受到焊接热循环和机械搅拌作用,但未受到搅拌头的直接搅拌,组织发生一定扭曲,与热影响区以及熔合区晶粒成一定角度,第二相粒子随晶粒扭曲而呈弯曲的板条状;HAZ区的晶粒由于受热再结晶,晶粒尺寸比母材晶粒要大一些,而第二相粒子形貌与母材的相同,但尺寸有所减小;这可能是因为HAZ受到了焊接热循环作用但没有受到机械搅拌作用,焊接过程中产生的热使得粒子发生了部分回溶现象而导致尺寸变小。BM区未受焊接热影响,保留了原始轧制态的组织特征,晶粒沿轧制方向拉长,纤维组织细密,分布着大量尺寸较大的第二相粒子^[4],而6B82铝钎合金中的Sc元素能与基体Al发生共晶反应,形成与基体共格的 Li_2 型 Al_3Sc 相^[5],因此在6B82铝钎合金中部分第二相粒子为 Al_3Sc 。

不同之处:一方面,6B82铸态合金在凝固过程中, Al_3Sc 起到了非均匀形核作用,大大细化了铸态晶

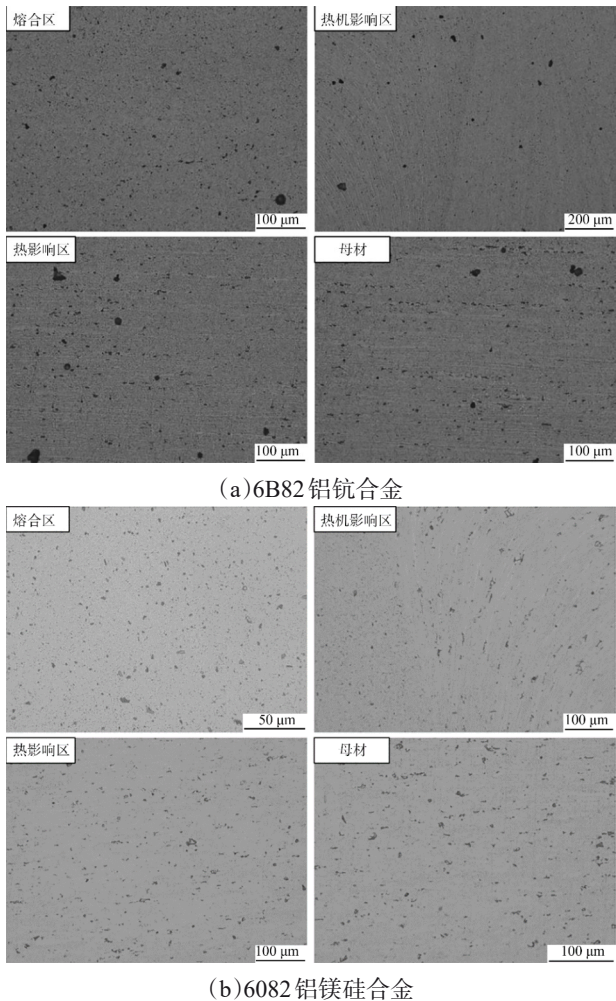


图 4 焊接接头各区域金相显微组织

Fig. 4 Metallographic microstructure of each region of the welded joint 粒;另一方面,弥散分布的纳米级 Al_3Sc 粒子对晶界和亚晶界具有强烈的钉扎作用,有效阻碍了位错的运动和晶界的迁移,从而阻止和抑制晶粒长大,产生细晶强化作用^[5],因此 6B82 铝钪合金的晶粒更加细小,这也解释了 6B82 铝钪合金韧性与塑性要更高。

2.4 慢应力应变腐蚀试验结果分析

为评估 6B82 铝钪合金与 6082 铝镁硅合金 FSW 接头在特定腐蚀环境下的应力腐蚀开裂敏感性,进行了慢应变速率拉伸试验。试验在空气和腐蚀介质中进行,应变速率控制在 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。通过对比两种环境下的试验结果,计算了时间、抗拉强度、断后伸长率的敏感性指数 ($F(t)$ 、 $F(\sigma)$ 、 $F(\delta)$) 以及强塑性综合损失指标 ISSRT,结果如表 5 所示。

由表 5 可知,两种合金各项敏感性指数都很接近,并且 $F(t)$ 指数越接近 1, $F(\sigma)$ 、 $F(\delta)$ 指数与强塑

表 5 两种合金焊接接头敏感性指数对比
Table 5 Comparison of sensitivity index of welded joint

试验材料	敏感性指数 $F(t)$	敏感性指数 $F(\sigma)$	敏感性指数 $F(\delta)$	强塑性综合损失 指标 ISSRT
6B82	0.98	0.006	0.006	0.004
6082	0.99	0.031	0.009	0.033

性综合损失指标 ISSRT 越接近 0,则耐腐蚀性能就越好,因此,6B82 铝钪合金和 6082 铝镁硅合金均有良好的耐腐蚀性能。

2.5 疲劳试验结果及分析

采用升降法测定 6B82 铝钪合金和 6082 铝镁硅合金 FSW 焊接接头在指定寿命为 10^7 次循环下的条件疲劳极限。试验在 PLG-100 型微机控制高频疲劳试验机上进行,技术规格为:静态负荷精度 $\pm 1\%$,动负荷平均波动度 $\pm 1\%$,动负荷振幅波动度 $\pm 2\%$ 。疲劳试样各选取一组(20 个)。试验过程中,当试样因疲劳裂纹尺寸足够大导致载荷加不上去时,自动卸载停振,记录循环次数,并采用德国蔡司 SUPRA 55 场发射扫描电镜对疲劳断口进行断口分析。

图 5 为焊接接头疲劳试验升降图,图 6 是焊接接头中值疲劳 $S-N$ 曲线对比图,由此可以确定两种

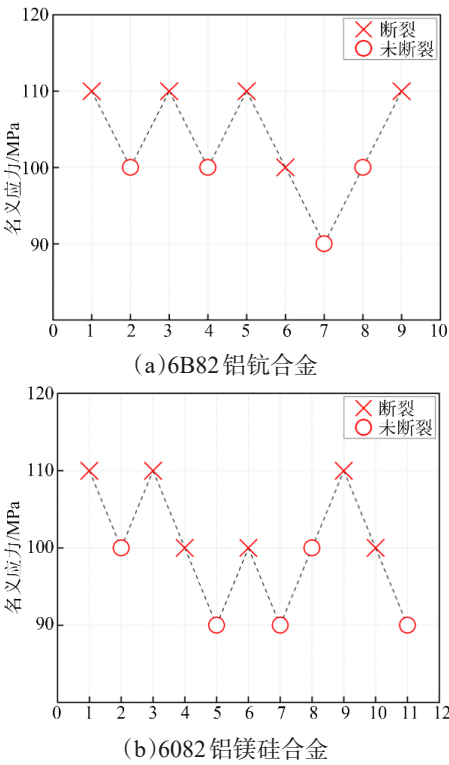


图 5 焊接接头疲劳试验升降图

Fig. 5 Fatigue test lifting diagram of welded joint

铝合金焊接接头疲劳极限分别为:

6B82 铝钎合金:

$$\sigma_{0.1} = \frac{1}{n} \sum n_i S_{ri} = (105 \times 2 + 95 \times 3) / 5 = 99 \text{ MPa}$$

6082 铝镁硅合金:

$$\sigma_{0.1} = \frac{1}{n} \sum n_i S_{ri} = (105 \times 3 + 95) / 4 = 102.5 \text{ MPa}$$

6B82 铝钎合金与 6082 铝镁硅合金疲劳中值极限分别为 99 MPa、102.5 MPa,二者接头的疲劳极限极为接近。不同的是,6B82 铝钎合金焊接接头在焊缝、热影响区、热机影响区处均发生了疲劳断裂,可能是由于热影响区与热机影响区处的晶粒受热再结晶长大,导致其疲劳性能降低,进而发生断裂;而 6082 焊接接头疲劳断裂只发生在焊缝处,所以相较于其他区域,其焊接接头的疲劳性能更差。

2.6 疲劳断口分析

图 7 为 6B82 铝钎合金和 6082 铝镁硅合金 FSW 焊接接头疲劳断口形貌。在疲劳过程中,材料受到交变载荷的作用,循环加载到一定周期后,材料发生疲劳断裂,交变载荷的持续加载导致随机且多样的微裂纹产生,一定数量的微裂纹汇聚后形成裂纹源^[6]。两种铝合金疲劳试样的启裂源均位于试样的近表面区域,并且存在着尺寸较大的第二相粒子(图 7 中 a、b 处),应力应变集中从而导致基体发生启

裂。在裂纹扩展的初始阶段,裂纹开始远离疲劳源方向扩展,放射状花样逐渐稀疏^[7];在经过疲劳源向裂纹扩展的过渡时期之后,裂纹扩展进入了相对平稳阶段,扩展区布满了疲劳弧线,呈现出清晰的“河流花样”^[8]形貌;当裂纹扩展一定程度之后,达到了临界尺寸无法承受循环应力作用而发生失稳断裂^[9],即终断区域。可以观察到终断区存在大量韧窝,但韧窝形貌存在差距,铝钎合金韧窝形状规则且较深,韧窝壁薄,铝镁硅合金韧窝浅,形状与分布不规则;韧窝越深,合金的塑性与韧性则越好,因此从韧窝的形状也可以说明 6B82 铝钎合金塑性与韧性更优越。在韧窝深处,均存在着析出的第二相颗粒(图 7 中 c、d 处),铝钎合金中由于 Sc 元素的存在,因此大量析出的第二相粒子为 Al_3Sc ^[10],而在 6082 铝镁硅合金中这些大小不一的第二相粒子包含 Mg_2Si 、 $\alpha\text{-Al}(\text{FeMn})\text{Si}$ ^[11]和 AlMgSi ^[7]粒子。

3 结论

(1) 6B82 铝钎合金焊接接头的平均抗拉强度为 222.4 MPa,略低于 6082 铝镁硅合金的 261.9 MPa,但断后伸长率(14.6%)显著高于 6082 铝镁硅合金的 8.7%,断裂均发生在焊缝处。6B82 铝钎合金 FSW

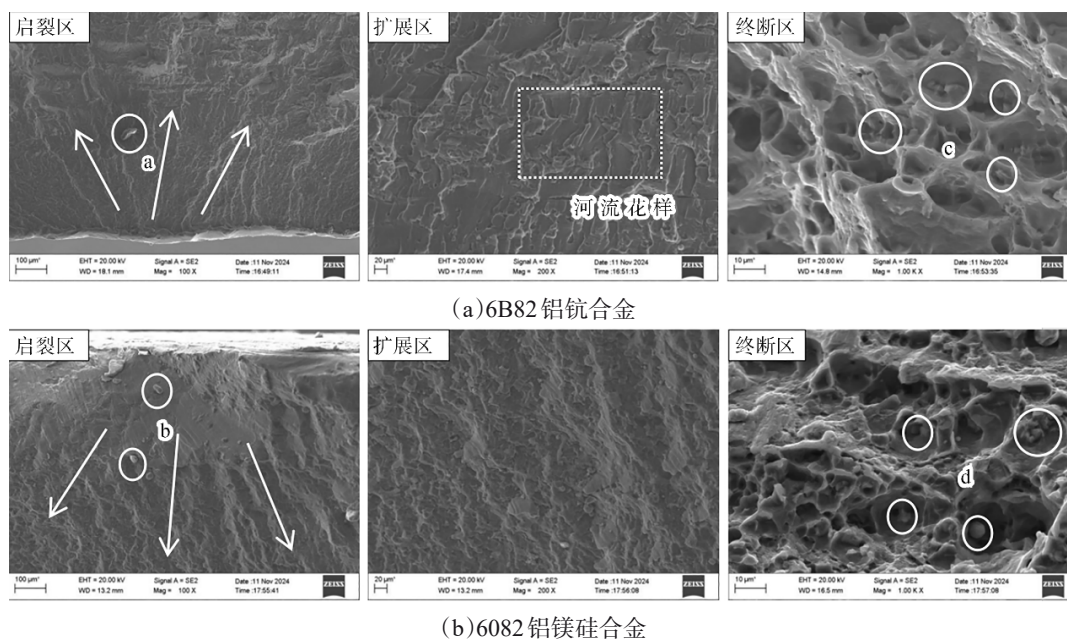


图 7 疲劳断口形貌

Fig. 7 Fatigue fracture morphology

焊接接头具有更好的塑性与韧性。

(2)两种铝合金的焊接接头硬度分布均呈现“W”形趋势,母材硬度最高,焊核区次之,热影响区和热机影响区最低。6B82 铝钪合金接头熔合区和热机影响区硬度略高于 6082 铝镁硅合金,但母材和热影响区硬度较低。

(3)6B82 铝钪合金与 6082 铝镁硅合金 FSW 焊接接头各区域金相组织形貌相似,均存在第二相粒子,但存在细微差异。6B82 铝钪合金第二相粒子主要成分为 Al_3Sc , 6082 铝镁硅合金第二相粒子包含 Mg_2Si 、 $\alpha\text{-Al(FeMn)Si}$ 和 AlMgSi 。

(4)6B82 铝钪合金和 6082 铝镁硅合金 FSW 焊接接头中值疲劳极限分别为 99 MPa 与 102.5 MPa,两者具有良好的疲劳性能,断面清晰,可观察到启裂区,布满疲劳弧线的疲劳扩展区和具有韧窝形貌的韧性终断区,均表现为典型的疲劳断裂特征。

(5)慢应变速率应力腐蚀试验结果表明,两种合金焊接接头均具有良好的耐腐蚀性能,敏感性指数接近,表明 Sc 元素对铝合金的耐腐蚀性能影响较小。

参考文献:

- [1] 黄玉凤,党惊知. 含钪铝合金的现状与开发前景[J]. 新技术新工艺,2006(12):41-43.
HUANG Y F, DANG J Z. Present Status and Development Prospects of Aluminum Alloy Contained Scandium Element[J]. New Technology & New Process, 2006(12):41-43.
- [2] 李劲风. 中南大学部分高性能铝合金研究进展[C]//2020 年中国铝加工产业年度大会论文集(上册). 中国有色金属加工工业协会,中南大学材料科学与工程学院,2020.
- [3] 汤振齐. Sc 对 6066 变形铝合金组织和性能的影响[D]. 安徽:合肥工业大学,2016.
TANG Z Q. Influence of scandium on microstructure and properties of 6066 aluminum alloys[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2016.
- [4] 苏志强,张玉芝,田志杰,等. 5B70 铝镁钪合金搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. 焊接技术,2017,46(11):32-35.
SU Z Q, ZHANG Y Z, TIAN Z J, et al. Microstructures and mechanical properties of Al-Mg-Sc alloy 5B70 welded joint by friction stir welding[J]. Welding Technology, 2017, 46(11):32-35.
- [5] 杨凯. Sc 对 7075 铝合金组织和性能的影响[D]. 安徽:合肥工业大学,2016.
YANG K. Influence of scandium on microstructure and properties of 7075 aluminum alloys[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2016.
- [6] 刘亦晨. 含 Sc 的 6005A 铝合金的时效与疲劳行为研究[D]. 湖南:中南大学,2023.
LIU Y C. Study on the aging and fatigue behavior of 6005A aluminum alloy containing Sc[D]. Hunan: Central South University, 2023.
- [7] 秦广华. 6082 铝合金疲劳过程中组织性能变化及其疲劳断裂行为[D]. 辽宁:东北大学,2021.
QIN G H. Microstructural and property changes during fatigue process and fatigue fracture behavior of 6082 aluminum alloy[D]. Liaoning: Northeastern University, 2021.
- [8] 靖青秀,杨雪晴,韦丹丹,等. Zr 元素对 Cu-6Ni-3Ti 合金微观结构和性能的影响[J]. 金属热处理,2025,50(02):61-69.
JING Q X, YANG X Q, WEI D D, et al. Effect of Zr element on microstructure and properties of Cu-6Ni-3Ti alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(02):61-69.
- [9] 赵中浩. 6082-T6 铝合金五次 MIG 补焊接头疲劳性能研究[D]. 吉林:吉林大学,2024.
ZHAO Z H. Study on fatigue performance of five-time MIG repair welded joints of 6082-T6 aluminum alloy[D]. Jilin: Jilin University, 2024.
- [10] 陈力,张嘉艺. Li+Sc 含量对 Al-Li 合金组织和性能的影响[J/OL]. 有色金属科学与工程:1-13[2025-03-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/36.1311.TF.20241205.1444.002.html>.
- [11] 王大臣,张航,马琳娜,等. 6082 铝合金型材不同厚度处的组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺,2024,53(23):108-114.
WANG D C, ZHANG H, MA L N, et al. Research on Microstructure and Tensile Property of 6082 Al Alloy Plate along Thickness Direction[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(23):108-114.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>