

TIG补焊对2219铝合金搅拌摩擦焊接接头 微观组织及性能影响

刘育宁^{1,2} 张健³ 刘德博³ 王非凡³ 周利^{1,2}

(1 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨工业大学(威海), 山东省特种焊接技术重点实验室, 威海 264209)

(3 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

文 摘 通过对原始搅拌摩擦焊(FSW)接头中间位置进行缺口挖补以模拟焊缝缺陷,采用钨极氩弧焊(TIG)补焊对其进行焊缝缺陷修复试验,研究该补焊工艺对接头微观组织及力学性能的影响规律,为贮箱的FSW焊缝性能评价提供技术支撑和后续工程指导。结果表明,相较于FSW接头,补焊接头TIG焊缝区主要由较大的等轴树枝晶组成,且与FSW焊缝交界处相互掺杂着粗大等轴晶和细小等轴晶;补焊接头固溶区受热循环影响较大,晶粒较为粗大,而过时效区受热循环影响较小,会发生过时效化并形成软化区。补焊接头抗拉强度与延伸率相较于原始FSW接头有所降低,硬度分布大致呈“W”形,WNZ区为硬度值最低处;补焊接头断裂位置始于焊趾处,断口存在大量韧窝,同时韧窝内存在第二相粒子,呈现韧性断裂机制。

关键词 2219铝合金,搅拌摩擦焊,钨极氩弧焊补焊,显微组织,力学性能

中图分类号: TG457. 14

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.011

Effect of TIG Repair Welding on Microstructure and Properties of Friction Stir Welding Joint of 2219 Aluminum Alloy

LIU Yuning^{1,2} ZHANG Jian³ LIU Debo³ WANG Feifan³ ZHOU Li^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(2 Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209)

(3 Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076)

Abstract The notch in the middle of the original friction stir welding (FSW) joint was patched to simulate the weld defects. The weld defects in the middle position of the FSW joint were repaired by Tungsten Inert Gas (TIG). The influence of the repair welding process on the microstructure and mechanical properties of the joint was studied to provide technical support and follow-up engineering guidance for the performance evaluation of the FSW weld of the tank. The results show that the TIG weld zone of the repaired joint is mainly composed of coarse equiaxed dendrites as compared to FSW joint. At the interface between the FSW joint and repaired joint coarse equiaxed grains and refined equiaxed grains are intermingled. The solid-solution zone of the repaired joint is greatly affected by the thermal cycle with coarsened grain, while the overaging zone is less affected by the thermal cycle with the occurrence of over-aging phenomenon and the presence of a softening zone. The tensile strength and elongation of the repaired joint are decreased as compared to the original FSW joint. The hardness distribution is substantially "W" shape with the lowest hardness in the WNZ. Crack initiation of the repaired joint occurs at the weld toe displaying a large number of dimples on the fracture surface. Meanwhile, second phase particles are detected in the dimples showing a typical ductile fracture mechanism.

Key words 2219 Aluminum alloy, FSW, TIG repair welding, Microstructure, Mechanical properties

0 引言

2219铝合金已广泛应用于新一代航天运载火箭

收稿日期: 2021-06-17

基金项目: 北京宇航系统工程研究所课题支持(DQ19009)

第一作者简介: 刘育宁, 1997年出生, 硕士, 主要从事高强铝合金搅拌摩擦焊接工作。E-mail: aning9706@163.com

燃料贮箱的主体结构,而搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一种固相连接技术^[1],因其具有焊缝质量高、焊接过程稳定等优点,在运载火箭贮箱的焊接制造中已成为了理想的焊接方法^[2-5]。虽然FSW具有焊接质量高、稳定性好、可重复性强等优势,但FSW焊接过程中由于结构精度、装配条件、工艺偏差等原因,可能形成外观缺陷和内部缺陷,包括飞边、孔洞(沟槽)、未焊透及弱结合等^[6-9]。这对搅拌摩擦焊接头性能及贮箱使用寿命产生影响,因此开发FSW焊缝缺陷修复技术,实现缺陷接头的高质高强修复。对于提升运载火箭贮箱质量可靠性方面具有重要的理论意义和实际应用价值,近些年国内外学者也针对FSW焊缝缺陷修复技术进行了研究。国内J. F. ZHONG等人^[10]针对FSW焊接缺欠采用MIG焊接方法进行了修复,探伤结果发现接头修复结果良好,强度满足使用要求。W. LI等人^[11]采用搅拌摩擦补焊修复FSW隧道缺陷接头,结果发现FSW补焊可消除隧道缺陷。S. M. GE等人^[12]采用熔焊+搅拌摩擦补焊复合工艺对2219C10S铝合金进行了搅拌摩擦焊缝匙孔缺陷修补,结果表明焊核区呈细小等轴晶粒,热机影响区长大粗化,存在柱状晶及树枝状晶粒。国外R. MARTIN等人^[13]使用回填式搅拌摩擦点焊对铝锂合金AA2198-T851进行了匙孔修复,通过RFSSW技术获得高质量无缺陷接头。D. F. METZ等人^[14]采用拉拔式摩擦塞补焊对2195-T8合金进行了匙孔修复并对搅拌摩擦焊材料和母材的塞焊界面的显微组织和显微硬度进行了表征。

目前国内外虽然已存在各类FSW焊缝修复技术,但针对FSW焊缝缺陷的补焊工艺研究尚浅,对补焊接头的组织性能评价仍需深入探究。本文通过对原始FSW接头中间位置进行缺口挖补,以模拟焊缝可能存在的缺陷,运用钨极氩弧焊(Tungsten Inert Gas, TIG)焊接方法进行单层盖面焊修复试验,研究该位置处的补焊工艺对接头微观组织及力学性能的影响规律,根据断口特征分析接头断裂机制,对比分析补焊条件下接头与原始FSW接头的组织性能差异,为贮箱的FSW焊缝性能评价提供技术支撑和后续工程指导。

1 试验

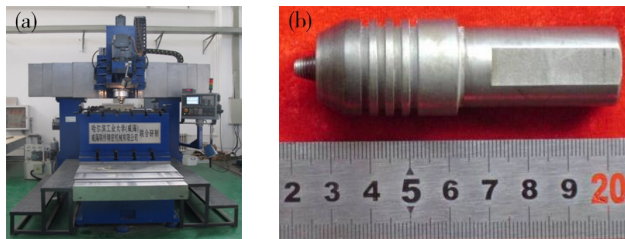
1.1 试验材料与设备

本试验选用材料为2219-T87铝合金,试样规格为300 mm×600 mm×6 mm,接头形式采用搅拌摩擦焊对接接头。2219-T87母材主要组成物为α固溶体、θ相(Al₂Cu)和T相(Al₂₀Cu₂Mn₃),化学成分及力学性能如表1所示。焊前用砂轮机对板材对接面进行轻微打磨后再用丙酮清洗,以清除表面氧化物、油污等。

表1 2219铝合金化学成分与力学性能
Tab. 1 Chemical composition of 2219-T87 aluminium alloy

化学成分/wt%					力学性能	
Al	Cu	Mn	Zr	杂质	抗拉强度σ _s /MPa	延伸率/%
余量	6.03	0.31	0.18	≤0.25	450~455	12.0~13.0

FSW试验采用的主要加工设备是自制的LQH-G15龙门式搅拌摩擦焊机,搅拌头尺寸选择如下:轴肩直径为18 mm,搅拌针根部直径为8.0 mm,搅拌头长度为5.85 mm,如图1所示。FSW工艺参数选择焊接转速为600 r/min,焊接速度为200 mm/min。



(a) FSW试验设备 (b) 搅拌头实物图
图1 FSW试验设备及搅拌头

Fig. 1 Test equipment of FSW and stirring head

1.2 试验方法

为了模拟贮箱中FSW焊缝的焊接缺陷情况,焊后在原始FSW接头中间位置区域进行挖补,缺口尺寸为宽度6 mm×深度4 mm,变极性TIG焊过程如图2所示。变极性参数如下:补焊焊接电流设置为160~210 A,焊接速度设置为160~180 mm/min,送丝速度设置为1 800~2 000 mm/min,频率为100 Hz。焊丝选用ER2325焊丝,焊缝宽度控制约13 mm。

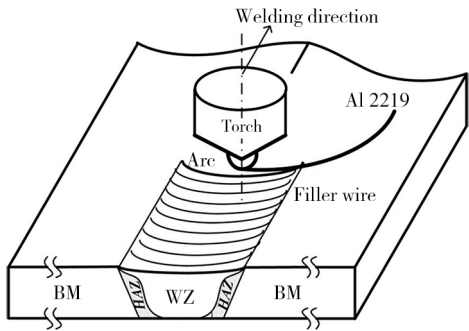


图2 变极性TIG补焊示意图

Fig. 2 Photograph of variable polarity TIG welding

TIG补焊试验完成后,采用电火花数控切割机沿垂直于焊接方向截取焊接接头横截面,并用镶牙粉制成金相试样,用金相砂纸和金刚石抛光液对金相试样进行粗磨、精磨和抛光,并用Keller试剂(2.5 mL硝酸+1.5 mL盐酸+1 mL氢氟酸+95 mL水)对抛光后的试样进行腐蚀,采用金相显微镜进行微观组织观察。参考GB/T228.1—2010金属材料室温拉伸试验方法,沿垂直于焊接方向在焊缝上切取标准拉伸试

样,在 100 kN 万能材料试验机上进行拉伸试验,设置拉伸速率为 1 mm/min,采用场发射扫描电子显微镜对断后接头横截面、断口表面的宏观形貌和微观结构进行观察分析。在硬度计上进行显微硬度测试,从 2219-T87 原始 FSW 接头及补焊接头的焊核区中心,板厚 3 mm 处开始打点,间距为 0.5 mm,试验载荷为 100 g,加载时间为 10 s,显微硬度测试点分布见图 3。

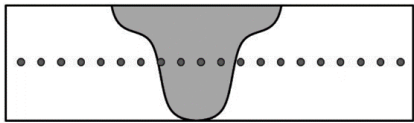


图 3 显微硬度测试点示意图

Fig. 3 Photograph of microhardness test points

2 结果与分析

2.1 微观组织分析

2.1.1 接头截面形貌

图 4 为原始 FSW 接头与 TIG 补焊中间位置 2219-T87 FSW 接头截面宏观形貌对比,焊缝前进侧及后退侧分别用 AS (Advancing Side) 和 RS (Retreating Side) 表示。图 4(a) 为搅拌摩擦焊原始 FSW 接头截面分区,包括焊核区 (Welding Nugget Zone, WNZ) (区域 a)、热机影响区 (Thermo-mechanically Affected Zone, TMAZ) (区域 b、c)、热影响区 (Heated Affected Zone, HAZ) (区域 d、e); 图 4 (b) 为 FSW 焊缝中间位置补焊接头,大致可分为 TIG 补焊焊缝区 (Repair Welding Zone, RWZ) (区域 a)、

FSW 焊核区 (区域 b)、TIG 补焊与 FSW 补焊交界 (区域 c)、前进侧以及后退侧的熔合区 (Fusion Zone, FZ) (区域 d、e),由于 TIG 补焊温度较高,补焊接头受热循环影响较大,根据沉淀相在热循环作用下的演化规律及硬度分布划分出固溶区 (Solid-solution Zone, SSZ) (区域 f、g) 以及过时效区 (Overaging Zone, OZ) (区域 h、i)。

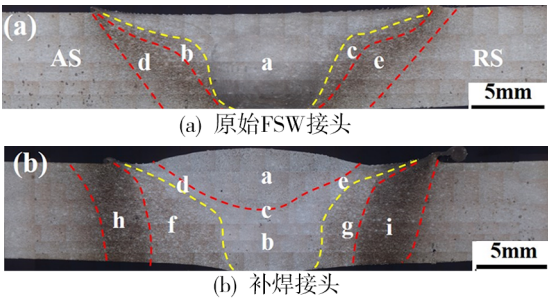


图 4 原始 FSW 接头与补焊接头截面形貌

Fig. 4 Cross-section macroscopic feature of the welded joint and the repaired joint

2.1.2 微观组织形貌

图 5 为原始 FSW 接头各区域微观组织。WNZ 组织在搅拌摩擦焊接过程中发生动态再结晶,晶粒得到显著细化,呈现为细小等轴晶^[15],晶粒平均尺寸 15 μm ,同时可发现晶界析出的黑色沉淀相在晶界处偏聚[图 5(a)]; TMAZ 晶粒发生明显的塑性变形,部分沉淀相粒子发生再次固溶、析出和长大[图 5(b)(c)]; HAZ 未发生塑性变形,晶粒发生二次长大,同时沉淀相在热作用下出现偏聚、粗化现象[图 5(d)(e)]^[16]。

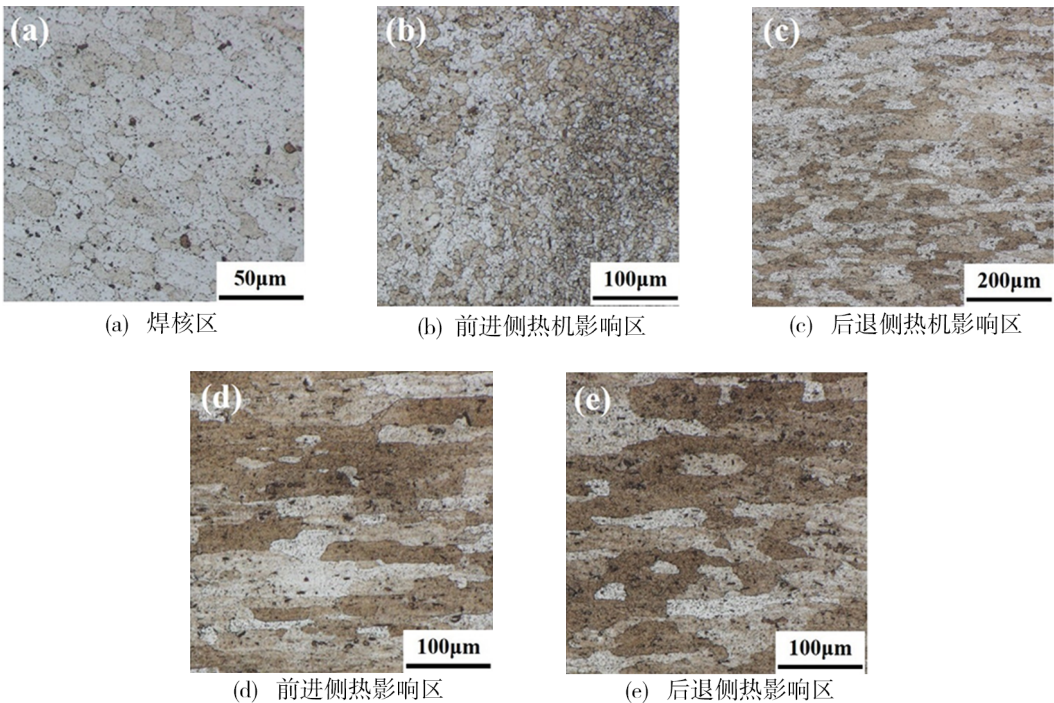


图 5 原始 FSW 接头各区域微观组织

Fig. 5 Microstructure of the welded joint

图6为中间位置TIG补焊接头各区域微观组织。TIG补焊焊缝区主要由粗大的等轴树枝晶组成,沿晶界呈网络状分布有大量粗大的 $\alpha(\text{Al})+\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 共晶相[图6(a)];受到TIG补焊热循环影响,FSW焊核区细小等轴晶与沉淀相有所长大,晶粒平均尺寸约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ [图6(b)];TIG补焊焊缝与FSW焊核交界处相互掺杂着粗大等轴晶和细小等轴晶[图6(c)];FZ靠

近SSZ附近形成一层细小等轴晶区域,相邻的是TIG补焊焊缝区域的柱状晶区域[图6(d)(e)];SSZ晶粒较粗大,合金元素固溶于基体导致其沉淀相数量减少[图6(f)(g)];OZ晶粒形貌为不连续块状,随着OZ内沉淀相的长大粗化,该区域发生过时效化并形成软化区[图6(h)(i)]。

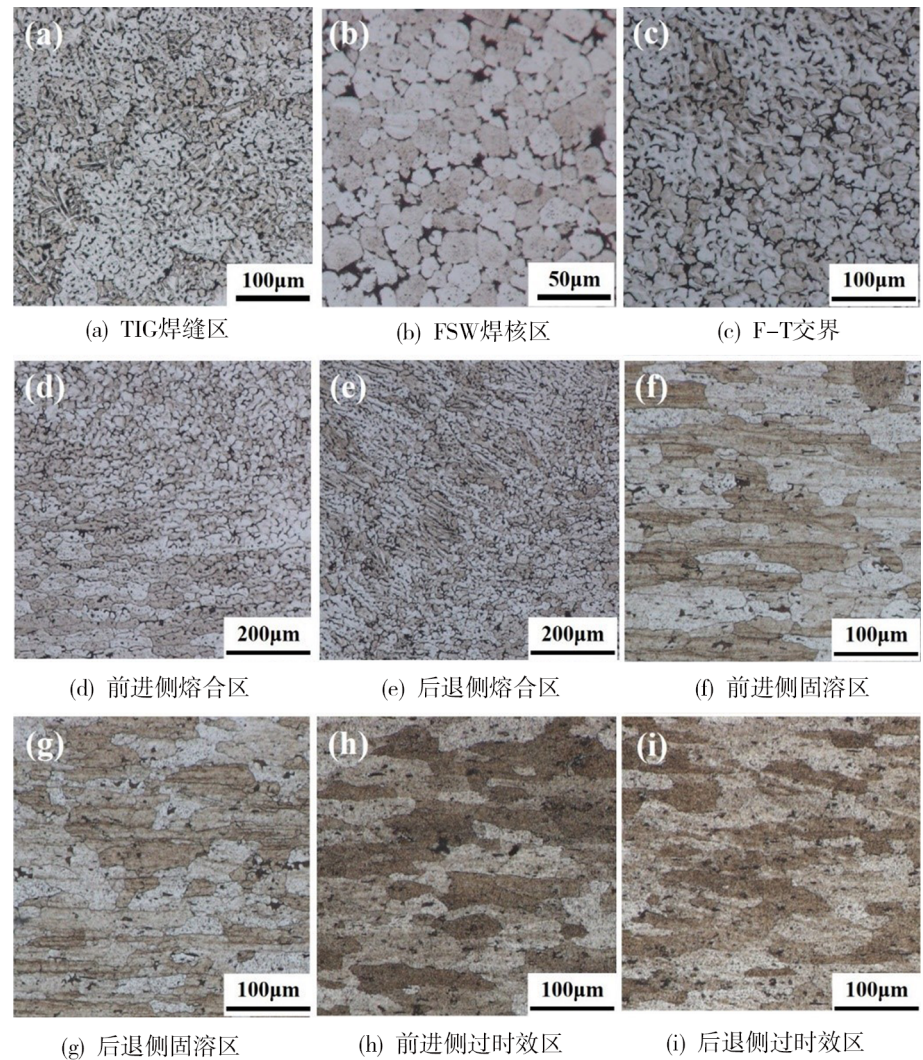


图6 补焊接头各区域微观组织

Fig. 6 Microstructure of the repaired joint

2.2 力学性能研究

2.2.1 硬度与拉伸性能分析

图7为原始FSW接头及中间位置TIG补焊FSW接头硬度分布图,可以发现接头的硬度大致呈现“W”形分布。从原始FSW接头硬度曲线可以发现WNZ由于细晶强化与沉淀强化作用硬度值在90 HV左右,但低于BM硬度值;TMAZ由于晶粒粗化及剪切作用,接头的硬度值有所下降,在TMAZ和HAZ交界处硬度值达到最小值约为81 HV,随着距离焊缝中心距离的增大,接头硬度值逐渐变大直至达到母材的硬度115 HV左右;试验发现在中间位置进行TIG补

焊时,由于原始焊核区等轴晶受到补焊热循环作用晶粒发生粗化,晶粒尺寸长大约 $5\text{ }\mu\text{m}$ 左右,且由于OZ内沉淀相长大粗化,进而形成软化区,因此硬度最低值出现在OZ;由于SSZ受热循环作用较小,该区硬度值相比RWZ有所增加;随接头区域远离焊缝中心,接头硬度值逐渐增加直至达到母材硬度值。

原始FSW与中间位置补焊条件下接头的拉伸试验结果如表2所示,原始FSW接头拉伸试样编号为1~3,补焊接头拉伸试样编号为4~6。由表2可知,其平均抗拉强度为334.88 MPa,平均延伸率为9.85%;而补焊接头的平均抗拉强度为314.53 MPa,平均延

伸率为 6.85%,可以发现补焊接头强度能达到无缺陷原始 FSW 接头的 93.9%,说明 TIG 补焊能较大幅度消除缺陷对 FSW 接头的影响,使其回归较好的力学性能水平。

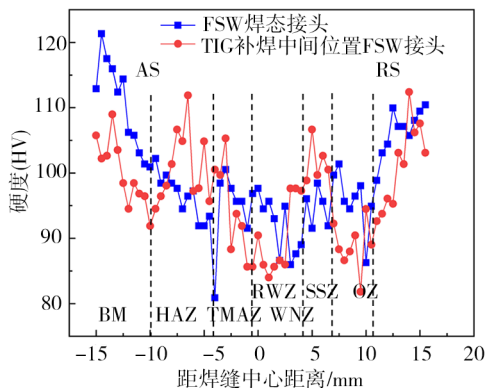


图7 不同补焊条件下接头截面硬度分布
Fig. 7 Microhardness distribution of the joint under different repair welding conditions

表2 原始 FSW 接头及补焊接头拉伸试验结果
Tab. 2 Tensile test results of the welded joint and repair welded joint

样品编号	平均抗拉强度 σ_b /MPa	平均载荷最大值 F_b /N	平均延伸率 δ /%
1~3	334.88	32614.50	9.85
4~6	314.53	30631.41	6.85

2.2.2 断裂性能分析

图8为原始 FSW 与补焊接头横截面断裂路径,由图8(a)可以看出,原始 FSW 接头的断裂位置基本位于 HAZ 附近,原因为该处受焊接热循环影响,晶粒有所长大,力学性能较差。而补焊接头的断裂裂纹萌生于补焊焊趾处并沿前进侧熔合区扩展,横跨 SSZ 和 OZ 发生断裂,根据 G. Q. WANG 等人^[17]的研究发现,焊缝余高对 2219-T87 铝合金 TIG 焊缝力学性能有显著影响,受 TIG 补焊余高的形状及过渡方式影响,焊趾处容易发生应力集中,同时 FZ 在焊接过程中产生气孔以及粗大柱状晶粒,因此更容易在此处扩展裂纹并发生断裂,如图8(b)所示。

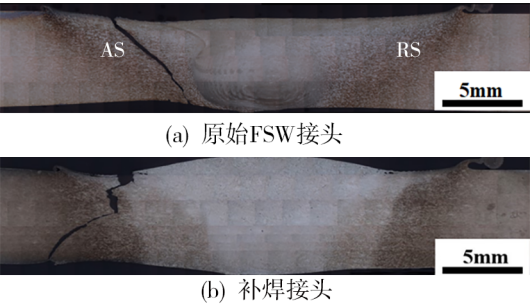


图8 原始 FSW 接头及补焊接头横截面断裂路径
Fig. 8 Cross section fracture path of the welded joint and the repaired joint

图9为原始 FSW 接头低倍及特定位置局部放大的高倍 SEM 断口形貌,可以发现断口由大量等轴韧窝和撕裂棱组成^[18],同时韧窝内存在破碎第二相颗粒,断裂机制为微孔聚集型的韧性断裂。图10为补焊接头低倍及特定位置局部放大的高倍 SEM,可以发现断口呈现韧性断裂,存在大量韧窝,同时韧窝内存在第二相粒子,由此判断接头呈现韧性断裂。通过观察二者的接头断口形貌,进一步比较韧窝大小及撕裂棱分布,可以看出塑性的高低存在差异,补焊接头断口韧窝更细小,宏观表现为延伸率更低,与拉伸试验结果相符合。

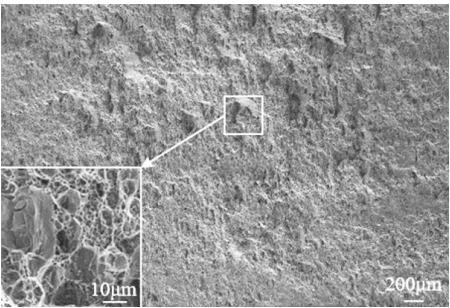


图9 原始 FSW 接头断口形貌
Fig. 9 Fracture morphology of the welded joint

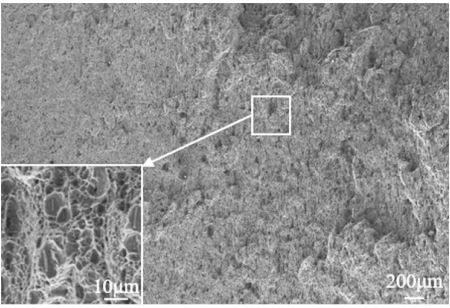


图10 补焊接头断口形貌
Fig. 10 Fracture morphology of the repaired joint

3 结论

(1)在典型焊接参数:转速 600 r/min、焊接速度 200 mm/min、补焊焊接电流 160~210 A 下,补焊接头表面成形良好,各分区组织特征明显,补焊接头硬度、抗拉强度和延伸率接近无缺陷原始 FSW 接头,基本达到 FSW 焊缝修复效果。

(2)补焊接头横截面根据微观组织特征可分为 TIG 焊缝区、TIG 热影响区(包括固溶区和过时效区)、FSW 焊核区、前进侧和后退侧熔合区以及母材区。原始 FSW 接头焊核区组织为细小等轴晶,补焊接头焊核区的细小等轴晶与沉淀相粗化,固溶区沉淀相数量减少,过时效区的强度降低,形成软化区。

(3)补焊接头平均抗拉强度接近原始 FSW 接头,二者断裂方式均为韧性断裂。原始 FSW 接头断裂位置在热机影响区附近,断口存在大量韧窝及撕裂棱;而补焊接头断裂位置始于补焊焊缝焊趾处,断口处

韧窝更细小。二者拉伸强度相近,但补焊接头塑性程度较低。

参考文献

[1] BYUNG C K, et al. Development of composite spherical bearing [J]. Composite Structures, 2006, 75 (1) : 231-240.

[2] 林一桐,王东坡,王颖. 基于Neuber公式的焊接制造对运载火箭储箱承载力的影响[J]. 焊接学报, 2016, 37 (01): 51-54,131.

LIN Yitong, WANG Dongpo, WANG Ying. Effect of welding on bearing capacity of launch vehicle tank based on neuber formula [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(01): 51-54,131.

[3] 于海静,白志富,王国庆,等. 铝合金搅拌摩擦焊在NASA的研究与应用[J]. 航天制造技术, 2019(01): 1-6.

YU Haijing, BAI Zhifu, WANG Guoqing, et al. Research and application on friction stir welding of al alloy in NASA [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(01): 1-6.

[4] 金淳,黄亮,李建军,等. 不同热处理状态下成形速率对2219铝合金成形极限的影响[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(01): 125-132.

JIN Chun, HUANG Liang, LI Jianjun, et al. Influence of forming rate on forming limit of 2219 aluminum alloy under different heat treatment conditions [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(01): 125-132.

[5] 武凯,贾贺鹏,孙宇,等. 搅拌摩擦焊技术的研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(06): 1-9.

WU Kai, JIA Hepeng, SUN Yu, et al. Research progress of friction stir welding technology [J]. Machine Building & Automation, 2020, 49(06): 1-9.

[6] 周平,戴启雷,张元杰. 6082 铝合金搅拌摩擦焊接头根部缺陷的微观特征[J]. 机械工程材料, 2019, 43(12): 29-33.

ZHOU Ping, DAI Qiming, ZHANG Yuanjie. Microscopic characteristics of root defects in friction stir welded joints of 6082 aluminum alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(12): 29-33.

[7] 苏颀瑶,吴素君,晋会锦. 焊后时效处理对2219铝合金VPTIG接头微区组织和显微硬度的影响[J]. 航空材料学报, 2015, 35(03): 49-54.

SU Diyao, WU Sujun, JIN Huijin. Effects of aging treatments on microstructure and micro-hardness of 2219-T87 welds[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2015, 35(03): 49-54.

[8] 焦君,李国鹏,湛利华,等. 蠕变时效对2219铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能与微观组织的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(02): 368-375.

JIAO Jun, LI Guopeng, ZHAN Lihua, et al. Effect of creep ageing on mechanical properties and microstructure of 2219 aluminum alloy friction stir welding joint [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52 (02) : 368-375.

[9] MARTIN Reimann, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of keyhole repair welds in AA 2219-T851 Using refill friction stir spot welding [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(10): 5220-5226.

[10] 仲积峰,王鹏,王晓波,等. MIG焊修复铝合金搅拌摩擦焊接缺欠工艺[J]. 机车车辆工艺, 2020(02): 32-33.

ZHONG Jifeng, WANG Peng, WANG Xiaobo, et al. Repair of the FSW defects with MIG process [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2020(02): 32-33.

[11] WEI Po Li, et al. Repair welding of tunnel defect in friction stir weld of Al-Zn-Mg alloys [C]. International Conference on Mechanical Engineering and Control Automation, 2017: 202-207.

[12] 葛升民,边志强,韩良军,等. 光纤陀螺随机误差特性仿真与辨识[J]. 测试技术学报, 2008, 22(4): 328-332.

GE Shengmin, BIAN Zhiqiang, HAN Liangjun, et al. Research on simulation and identification of random error properties for FOG [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(4): 328-332.

[13] MARTIN Reimann, et al. Refilling termination hole in AA 2198-T851 by refill friction stir spot welding [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2017, 245: 157-166.

[14] METZ D F, et al. A microstructure and microhardness characterization of a friction plug weld in friction stir welded 2195 Al-Li [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2012, 134(2): 021005.

[15] 邱宇,孟强,董继红,等. 6061-T6铝合金搅拌摩擦焊工艺及性能研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(02): 86-91.

QIU Yu, MENG Qiang, DONG Jihong, et al. Study on technology and properties of friction stir welding for 6061-T6 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (02): 86-91.

[16] 李超,赵英杰,孙转平,等. 2219铝合金搅拌摩擦焊缝Al₂Cu相聚集行为特征分析[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(01): 99-102.

LI Chao, ZHAO Yingjie, SUN Zhuanping, et al. Analysis of Al₂Cu aggregation behavior characteristics in 2219 aluminum alloy friction stir welding seam [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(01): 99-102.

[17] WANG Guoqing, LI Quan, LI Yanjun, et al. Effects of weld reinforcement on tensile behavior and mechanical properties of 2219-T87 aluminum alloy TIG welded joints [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27 (01): 10-16.

[18] 贺地求,杨传平,林俊渊. 2219铝合金搅拌摩擦焊和固溶处理的工序顺序研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(05): 1-4.

HE Diqu, YANG Chuanping, LIN Junyuan. Study on procedure sequence of friction stir welding and solution treatment of 2219 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (05): 1-4.