

2219 铝合金搅拌摩擦焊缝匙孔形缺陷修补技术

王国庆¹ 赵刚² 郝云飞² 陈雪峰² 赵衍华²

(1 中国运载火箭技术研究院,北京 100076)

(2 首都航天机械公司,北京 100076)

文 摘 采用固相填充+搅拌摩擦焊复合工艺进行了 2219 铝合金搅拌摩擦焊缝匙孔形缺陷的修补,焊后对接头的微观组织和力学性能进行了分析。结果显示:匙孔修补位置焊接接头焊核区呈现细小的等轴晶,热力影响区组织发生了较大程度的弯曲变形,接头抗拉强度 ≥ 335 MPa,延伸率 $\geq 8.0\%$,断裂机理为韧性断裂。

关键词 固相填充+搅拌摩擦焊修补工艺,匙孔形缺陷,微观组织,力学性能

Technique for Repairing Keyhole Defect for FSW Joint of 2219 Aluminium Alloy

Wang Guoqing¹ Zhao Gang² Hao Yunfei² Chen Xuefeng² Zhao Yanhua²

(1 China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

(2 Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract The combined process of solid-state filling+friction stir repaired welding has been used to repair the keyhole defect in 2219 aluminium alloy friction stir weld, and the microstructure and mechanical properties of the repaired joint at the keyhole position have been analyzed. As indicated, the microstructure of the repaired joint can be divided into three distinctive region: nugget zone (NZ), thermomechanical affected zone (TMAZ) and heat affected zone (HAZ). The nugget zone consists of refined equiaxed grains, and a greater bending deformation occurs in TMAZ. The mechanical properties measurements demonstrate that the tensile strength of the repaired joint can reach 335 MPa, and the ductility can get by 8.0%.

Key words Solid-state filling+friction stir welding, Keyhole defect, Microstructure mechanical properties

0 引言

搅拌摩擦焊(FSW)已经广泛地应用于各著名宇航机构运载火箭贮箱制造^[1-4]。在实际工程化应用中,必须考虑缺陷产生后的缺陷修补措施^[5-6]。FSW中搅拌针会发生折断,对折断在焊缝中的搅拌针进行手工挖排后,会在焊缝中形成一个匙孔。“匙孔形”缺陷会影响焊缝强度、气密性等。因此开展 FSW 匙孔形缺陷修补技术研究,开发出具备工程化应用能力的补焊方法,对于保证运载火箭贮箱产品质量,具有重要的理论意义和实际应用价值。本文主要对运载火箭贮箱 FSW 过程中所产生的与搅拌针形状尺寸相似的“匙孔形”缺陷进行修补技术研究。

1 实验

1.1 材料

2219C10S 铝合金, (σ_b 为 440 MPa, δ_5 为 15%), 其规格为 1 000 mm×150 mm×6 mm, 主要化学成分见表 1。匙孔区域填充材料为 $\Phi 4.0$ mm 的 ER2319 铝合金焊丝。

表 1 2219C10S 铝合金的化学成分

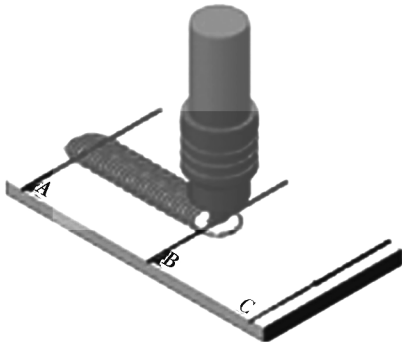
Tab.1 Chemical composition of 2219C10S aluminium alloy

wt%				
Cu	Mn	Fe	Si	Al
5.8~6.8	0.20~0.40	0.30	0.20	余量

1.2 试样制备

搅拌摩擦焊试验在自制卧式搅拌摩擦焊设备上,采用平板对接方式。焊前采用酸洗方式去除试样表面氧化膜,通过对平板试样对接面进行机械铣,保证装配间隙 ≤ 0.3 mm。

采用固相填充+搅拌摩擦焊工艺进行匙孔形缺陷的修补,具体思路如图 1(a)所示。(1)采用正式焊搅拌头进行焊接,起始于 A 点,终止于 B 点,并在 B 点留下与正式焊搅拌头搅拌针尺寸相当的匙孔[图 1(b)]。该匙孔用来模拟焊接过程中搅拌针折断,并将搅拌针从焊缝中挖排之后留下的“空腔”。(2)采用 ER2319 铝合金焊丝填充到 B 点留下的匙孔,并采取相关措施将其压实[图 1(c)]。(3)采用补焊搅拌头从 B 点开始焊接(轴肩和搅拌针尺寸都要大于正式焊搅拌头尺寸),最后终止于 C 点。搅拌摩擦焊起始处由于塑性材料外溢及没有足够的材料填充到起始焊接处,在起始点很容易出现缺陷。(4)采用补焊搅拌头对上述搅拌摩擦焊缝重新焊接,起始于 A 点,终止于 C 点。图 1(a)中的 B 点称为匙孔修补区域, A~B 点之间以及 B~C 点之间为二次焊接区。



(a) 匙孔形缺陷方案示意图



(b) 匙孔形缺陷



(c) 固相填充效果

图 1 固相填充+搅拌摩擦焊补焊工艺

Fig. 1 Combined repairing process of solid-state filling+friction stir welding

所用的正式焊搅拌头和补焊搅拌头结构设计参数如表 2 所示。正式焊和补焊所用焊接工艺参数:搅拌头转速为 800 r/min,行走速率为 180 mm/min,搅拌头倾斜角为 2.5°。

表 2 正式焊和补焊搅拌头结构设计

Tab. 2 Structural design of two different FSW tools

类型	轴肩参数		搅拌针参数		
	结构	直径/mm	结构	根部直径/mm	长度/mm
正式焊	7°内凹斜面	18	22°圆锥螺纹	6.0	5.8
补焊	10°内凹斜面+ 2个同心圆环	20	20°圆锥螺纹+ 3个斜面	7.0	5.7

1.3 性能评价

采用 X 射线探伤和相控阵超声波检测修补焊缝是否存在焊接缺陷。检测合格后制取金相试样,用混合酸(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O)溶液对抛光后的试样进行腐蚀,然后在光学显微镜下进行典型区域金相组织分析,并进行显微硬度测试。在 Instron-1186 电子万能试验机上对接头进行拉伸性能测试。利用 JSM-5910LV 扫描电镜观察拉伸断裂试样的断口形貌。

2 结果与分析

2.1 焊缝外观形貌

图 2 为采用固相填充+搅拌摩擦焊工艺修匙匙孔形缺陷后的焊缝外观形貌。图中的黑线标识位置为“匙孔修补位置”,其余区域为二次焊接区。可以看出,匙孔修补位置和二次焊接区域的焊缝外观成形良好,光滑平整,成形均匀,无毛刺、沟槽等缺陷。

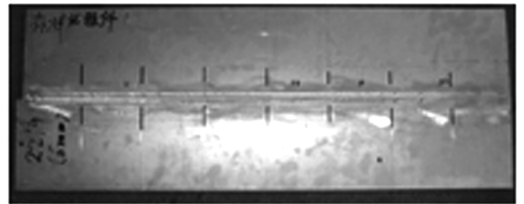
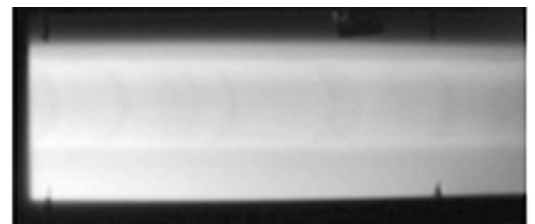


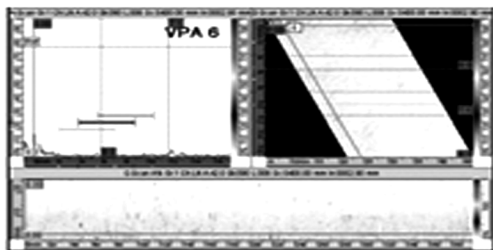
图 2 固相填充+FSW 修匙匙孔形缺陷焊缝外观形貌

Fig. 2 Surface morphology of repaired welds with solid-state filling and FSW process

匙孔修补位置的 X 射线探伤和相控阵超声波检测结果如图 3 所示。



(a) X 射线探伤



(b) 相控阵超声波检测

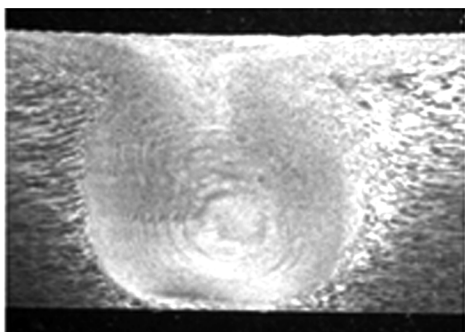
图3 匙孔形缺陷修补位置的无损探伤结果

Fig.3 Results of non-destructive evaluation at repaired key-hole position

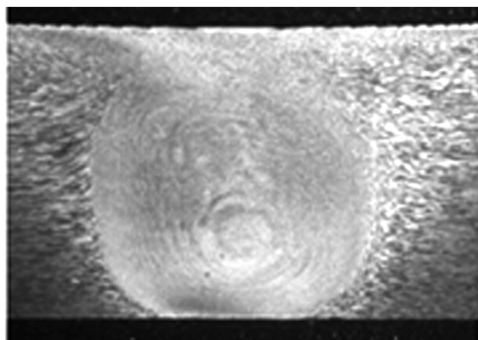
可以看出:在整条焊缝上,匙孔修补位置和二次焊接区域均没有发现孔洞、未焊透等缺陷。因此采用固相填充+搅拌摩擦焊工艺进行匙孔形缺陷修补是可以获得表面成形良好、内部无缺陷的焊缝。

2.2 焊缝微观组织形貌

图4为匙孔形缺陷修补焊缝中匙孔修补位置和二次焊接区的接头宏观形貌。



(a) 匙孔修补位置



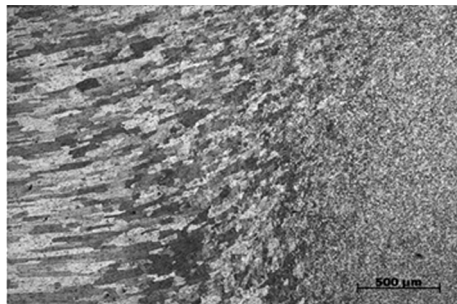
(b) 二次焊接区

图4 匙孔形缺陷修补位置和焊缝宏观形貌

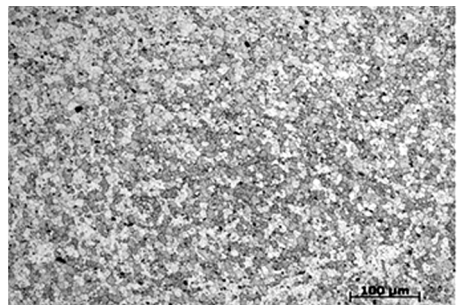
Fig.4 Sectional morphology of joint at key-hole position and the other area

可以看出:两者的组织非常相似,均由焊核区、热力影响区、热影响区、轴肩影响区等4个区域组成。图中左侧为后退侧(RS),右侧为前进侧(AS),前进侧和后退侧相对于焊缝中心并不对称,并且在焊核区下方存在不对称的扁平椭圆形洋葱圆环结构。

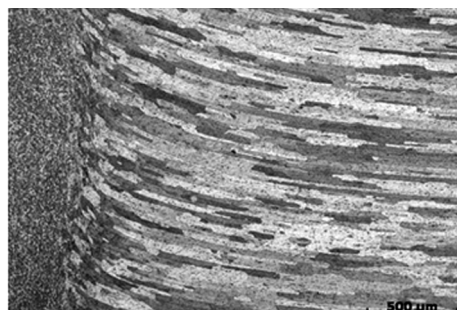
图5、图6为匙孔修补位置和二次焊接区FSW接头不同区域的微观组织形貌。



(a) 后退侧热力影响区



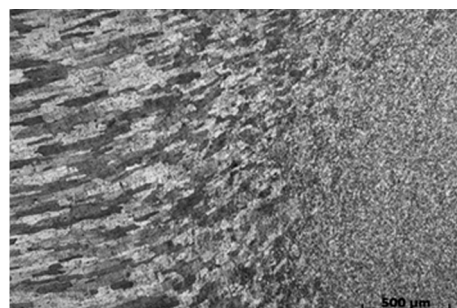
(b) 焊核区



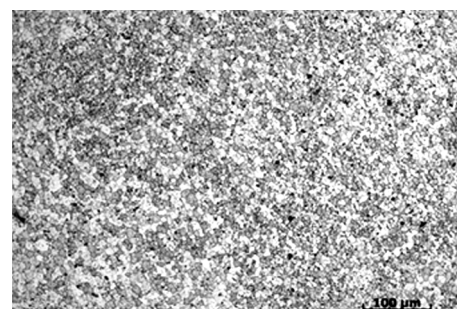
(c) 前进侧热力影响区

图5 匙孔修补位置不同区域的微观组织形貌

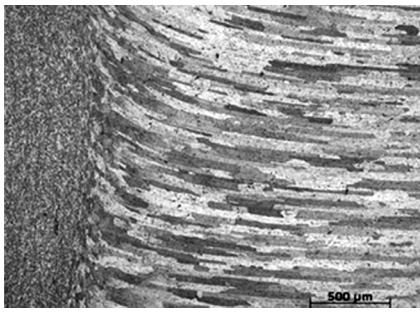
Fig.5 Microstructures of FSW joint at repaired key-hole position



(a) 后退侧热力影响区



(b) 焊核区



(c) 前进侧热力影响区

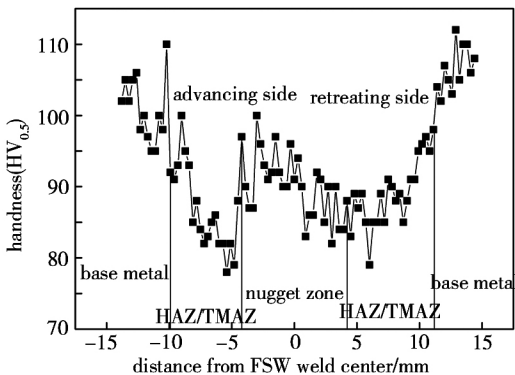
图6 二次焊接区域 FSW 接头不同区域的微观组织形貌

Fig. 6 Microstructures of the joint at secondary-FSW area

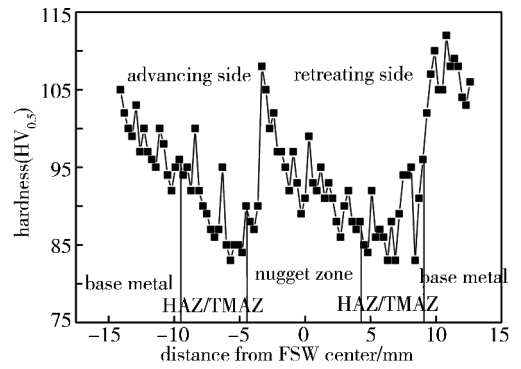
可以看出两者的微观组织形貌相同。焊核区均呈现出细小的等轴晶,根据 Hall-Petch 公式,在一定范围内金属强度和粒径呈反比关系,因此焊核区细小的等轴晶组织结构有利于焊缝强度的提高。前进侧和后退侧的热力影响区均发生弯曲拉伸变形,这是由于该区域的塑性金属位于搅拌针边缘,受到的机械搅拌作用较弱,并且受热循环影响而发生动态回复。比较两者可以发现前进侧热力影响区和焊核区界面过渡相对尖锐,而后退侧两者之间则要平滑一些。

2.3 焊接接头显微硬度分布

匙孔修补位置和二次焊接区的 FSW 接头横截面硬度分布趋势如图 7 所示。可以得出以下结论:(1) 接头显微硬度分布的大体趋势为:母材的显微硬度最高,在跨入热影响区后显微硬度逐渐降低,在热力影响区附近降到最低,然后在焊核区域内又上升,但显微硬度值不会超过母材硬度;(2) 匙孔修补位置和二次焊接区的显微硬度分布趋势一致;(3) 显微硬度分布趋势的最低点位于焊接接头后退侧的热力影响区附近;(4) 后退侧热影响区及热力影响区的宽度要高于前进侧,并且匙孔修补位置 FSW 接头的后退侧软化区域要宽于二次焊接区的;(5) 与熔化焊接接头相比,FSW 接头的软化程度相对较低^[7-8]。这主要是由于搅拌摩擦焊是一种固相焊接方法,FSW 接头经历的焊接热循环(峰值温度以及持续时间)都相对较低。



(a) 匙孔修补位置



(b) 二次焊接区

图7 匙孔修补位置和二次焊接区 FSW 接头显微硬度分布趋势

Fig. 7 Comparison of results of microhardness measurement for repaired joint at different position

2.4 焊缝力学性能

表 3 为 2219C10S 铝合金匙孔形缺陷修补的拉伸性能。可以看出:一次焊接无缺陷试样、修补焊缝的二次焊接区以及匙孔修补位置试样的抗拉强度均 ≥ 335 MPa,接头延伸率平均值从 7.67% 逐渐增加到 9.0%。三种试样焊接接头延伸率逐渐增大的趋势与其所承受不同的焊接热循环是密不可分的。对比分析二次焊接区和匙孔修补位置试样的延伸率结果发现,匙孔修补位置试样的延伸率要略微高于二次焊接区位置。这与二次焊接区、匙孔修补位置显微硬度测量获得的结果一致,在显微硬度测量中发现,二次焊接区 FSW 接头后退侧软化区域的宽度和软化程度均要低于匙孔修补位置后退侧的。以上现象的出现与制定的补焊方案过程是密不可分的。在补焊试验方案中的第 3 步中可以看出:和二次焊接区相比,匙孔修补位置存在一个搅拌针逐渐扎入的过程。本试验中的补焊搅拌头搅拌针的有效长度为 5.7 mm,搅拌针以 3 mm/min 的速率逐渐扎入工件,从搅拌针逐渐扎入工件到搅拌头压入量调整合适,时间大概有 2 min。因此匙孔修补位置所受到的热输入要高于二次焊接区,从而导致匙孔修补位置焊缝内塑性金属的软化程度相对要高一些。这也是匙孔修补位置搅拌摩擦焊接头试样延伸率高的原因所在。

表 3 2219 铝合金匙孔形缺陷修补焊缝拉伸性能

Tab.3 Tensile properties of repaired joint at different postions

试样类别	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	强度系数 /%
一次焊接无缺陷	343	7.67	78.02
修补焊缝中二次焊接区	342	8.33	77.66
匙孔修补位置	338	9.0	76.89

2.5 焊缝断口分析

图 8 为 2219 铝合金搅拌摩擦焊焊缝匙孔修补位

置与二次焊接区拉伸断裂形貌。



图8 匙孔修补位置与二次焊接区拉伸断裂形貌
Fig.8 Fracture specimen after tensile test at different position of repaired FSW joint

可以看出二次焊接区和匙孔修补位置焊接接头的断裂位置主要分布于偏离焊缝中心的前进侧或后退侧区域,该区域为热影响区或热力影响区与焊核区的交界处。搅拌摩擦焊接头拉伸试样一般在此区域发生断裂,并且拉伸试样的断裂面和焊接接头横截面呈 45° ,断口特征呈现出明显的韧性断裂。就搅拌摩擦焊接头组织而言,接头中的焊核区在焊接过程中受到搅拌针的强烈搅拌作用,焊接后形成了等轴细密的晶粒,在焊接中析出的强化相等颗粒在搅拌针的作用下重新被打碎,焊接后均匀分布在焊核区。因此整个焊核区的组织比较均匀,拉伸强度相对较高。而对于热力影响区附近的组织来说,由于搅拌摩擦焊本身的特点,其热力影响区或热影响区与焊核区之间的组织存在一定的突变性,尤其是当焊接参数选择不当时,这种组织的差异更明显^[7,9]。当这两部分的金相组织过渡不平滑时,容易产生应力集中,成为接头力学性能的薄弱区域,断裂一般发生在这个部位。图9为2219铝合金匙孔修补位置FSW接头的断口微观形貌。

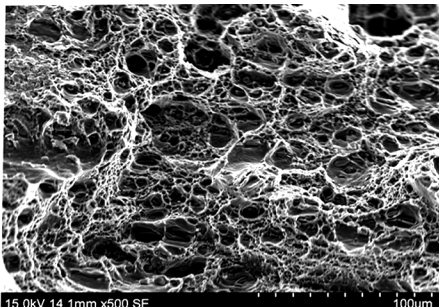


图9 焊缝匙孔修补位置接头断口微观形貌

Fig.9 Fracture morphology of FSW joint at key-hole position

可以看出断口上存在大量的韧窝结构和撕裂棱,并且在韧窝内部含有第二相粒子,由此可以判断断裂机理为韧性断裂。

3 结论

(1)采用“固相填充+搅拌摩擦焊”工艺成功实现了搅拌摩擦焊焊缝匙孔形缺陷的修补。补焊后二次焊接区和匙孔缺陷修补位置的微观组织相似,焊核区发生了动态再结晶,呈现出细小的等轴晶组织;热力影响区在机械挤压和热循环的双重作用下,发生了较大程度的变形。

(2)补焊后匙孔修补位置的焊接接头抗拉强度 ≥ 335 MPa,延伸率 $> 8.0\%$ 。与二次焊接区相比,匙孔修补位置的显微硬度分布趋势大体一致,其差异主要体现在匙孔修补位置焊接接头的后退侧热力影响区域宽于二次焊接区位置。

(3)补焊后匙孔修补位置焊接接头断裂位置均分布在前进侧或后退侧热力影响区附近,其断裂面与焊接接头横截面呈 45° ,断裂机理为韧性断裂。

参考文献

- [1] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005, R50:1-78
- [2] Zhang Hua, Lin Sanbao, Wu Lin, et al. Current progress and prospect of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3):75-79
- [3] Johnsen Marry Ruth. Friction stir welding takes off at Boeing[J]. Welding Journal, 1999, 78(2):35-39
- [4] 封小松,徐萌,钱纪红. 载人航天器结构件FSW制造工艺及应用[J]. 载人航天, 2011(1):52-57
- [5] 赵衍华,林三宝,吴林. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接头缺陷分析[J]. 焊接, 2005(7):9-12
- [6] 刘会杰,潘庆,孔庆伟,等. 搅拌摩擦焊焊接缺陷的研究[J]. 焊接, 2007(2):58-62
- [7] 王国庆,赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京:中国宇航出版社, 2010
- [8] 束彪,国旭明,张春旭. 2195 铝锂合金搅拌摩擦焊接头组织及性能[J]. 航空材料学报, 2010, 30(4):2-15
- [9] Park S H C, Sato Y S, Kokawa H. Effect of microtexture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(2):161-166

(编辑 吴坚)