

2219 铝合金 FSW 焊缝摩擦塞补焊接头性能分析

孙转平^{1,2}, 杨新岐¹, 杜 波¹, 刘凯旋¹, 宋建岭²

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300451)

摘 要: 采用顶锻式摩擦塞补焊方法, 对 8 mm 厚 2219-T87 铝合金 FSW 焊缝进行了摩擦塞补焊试验研究, 深入探讨摩擦塞补焊接头的微观组织、常温 and 低温力学性能、硬度及断口形貌变化特征. 结果表明, 摩擦塞补焊接头具有明显的组织不均匀性, 主要由塞棒区、塞棒热力影响区、再结晶区、母材热力影响区、热影响区和母材区组成; 母材热力影响区晶粒具有显著变形特征, 其硬度最低为 85 HV, 是整个接头的薄弱部分. 摩擦塞补焊接头的常温 and 低温抗拉强度均达到 FSW 接头的 80% 以上, 断后伸长率达到 70% 以上, 其断裂模式为韧性特征.

关键词: 2219 铝合金; 摩擦塞补焊; 微观组织; 力学性能; 显微硬度

中图分类号: TG 453 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400142

0 序 言

2219 属 Al-Cu-Mn 系铝合金, 具有良好的室温、高温及低温力学性能, 工作温度在 $-253 \sim 250$ °C 范围内, 焊接性能和应力腐蚀性能方面具有明显的优势^[1], 是制造运载火箭贮箱的重要结构材料^[2-3]. 目前国内外铝合金火箭贮箱焊接已大量采用搅拌摩擦焊接 (friction stir welding, FSW) 技术, 显著提高了产品质量和生产效率^[4]. 但是在工程研制过程中, 受焊前装配状态、焊接工艺规范、焊接装备等多种因素的影响, 焊接缺陷是难以避免的, 目前 FSW 焊缝一般采用重复搅拌的方式消除缺陷, 但对大直径和长焊缝重复搅拌成本高、耗时长, 在焊接操作中具有较大局限性.

摩擦塞补焊 (friction plug welding, FPW) 技术是由英国焊接研究所开发的一种固相焊接技术^[5-6], 焊接过程中在旋转和挤压作用下使材料在高温状

态发生塑性变形和流动, 主轴停转时通过施加一定的轴向力而形成连续接头^[7-9]. FPW 过程产热低、效率高, 且修补后接头性能不会明显降低^[10], 因此逐渐成为铝合金火箭贮箱焊接制造过程中的关键环节.

文中对 2219 铝合金 FSW 焊缝顶锻式 FPW 接头的微观组织、室温和低温力学性能及显微硬度等进行了深入的试验研究, 分析探讨了 FPW 接头的断裂行为和拉伸断口形貌特征, 为评估 2219 铝合金 FPW 接头的修复效果提供重要试验依据.

1 试验方法

试验材料选用厚度为 8 mm 的 2219 铝合金板材和 2219-T6 铝合金塞棒. 2219 铝合金板材热处理状态为固溶处理后经 10% 冷变形提高强度, 然后进行人工时效, 近似于 T87 状态性能. 2219 铝合金化学成分如表 1 所示.

表 1 2219 铝合金化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of AA2219

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	V	Zr	其它	Al
6.2 ~ 6.8	0.02	0.2 ~ 0.4	0.2	0.3	0.1	0.02 ~ 0.10	0.05 ~ 0.15	0.10 ~ 0.25	0.20	余量

将两块尺寸为 300 mm × 150 mm × 8 mm 的试板沿长度方向进行 FSW 对接焊, 焊接参数为: 焊接速度 150 mm/min, 搅拌头转速 800 r/min, 搅拌头倾

角 2.7°. 然后在 FSW 焊缝处开 50°圆锥塞孔, 采用 60°圆锥塞棒进行顶锻式摩擦塞补焊, 塞孔和塞棒小端直径相同均为 12 mm, 塞孔和塞棒结构如图 1 所示. FPW 焊接参数为: 主轴转速 5 000 r/min, 塞棒下移速度 80 mm/min, 顶锻压力 40 kN, 急停时间 0.25 s.

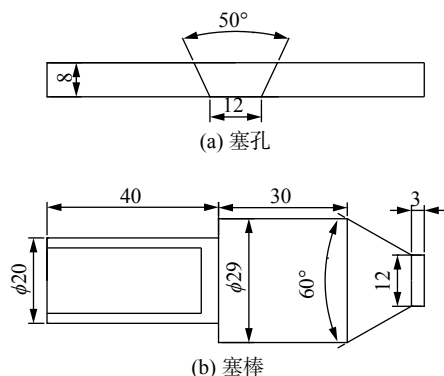


图 1 塞孔和塞棒结构示意图 (mm)

Fig. 1 Schematics of plug hole and plug stick

焊后在垂直 FSW 焊缝的方向截取试样, 经磨光、抛光后用 Keller 试剂 (1.5 mL 盐酸, 2.5 mL 硝酸, 1 mL 氢氟酸, 95 mL 水) 腐蚀处理, 在 OLYMPUS GX51 光学显微镜下观察其显微组织. 按照标准 GB/T228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》和 GB/T 13239—2006《金属材料低温拉伸试验方法》沿垂直 FSW 焊缝方向取拉伸试样, 试验温度分别为常温 25 ℃ 和低温 -196 ℃, 每组拉伸试验结果取 3 个试样的平均值. 分别在垂直和平行 FSW 焊缝的方向截取试样, 采用 Vilson-432SVD 自动转塔数显维氏硬度计测试常温 FPW 接头硬度 (载荷

为 9.8 N, 保压时间 10 s). 用 Hitachi-S4800 扫描电镜观察常温拉伸试样断口形貌.

2 试验结果与分析

2.1 塞补焊接头的微观组织及材料流动方式

图 2 为 FPW 接头横截面形貌. 可以看出, 接头形貌具有典型的铆钉状特征, 上部较宽, 下部随着深度的增加变窄, 接头整体形貌与塞棒形状相似, 结合界面比较清晰, FPW 接头具有明显宏观组织不均匀性. 从宏观组织形貌上来看, 接头主要由 A 塞棒区、B 塞棒热力影响区、C 再结晶区、D 母材热力影响区、E 热影响区及 F 母材区六个区域组成.



图 2 FSW 焊缝 FPW 接头宏观形貌

Fig. 2 Macrograph of FPW joint of FSW joint

图 3 为 FPW 接头各个区域的微观组织形貌, 图 3a~3f 分别为塞棒区、塞棒热力影响区、再结晶区、母材热力影响区、热影响区和母材区.

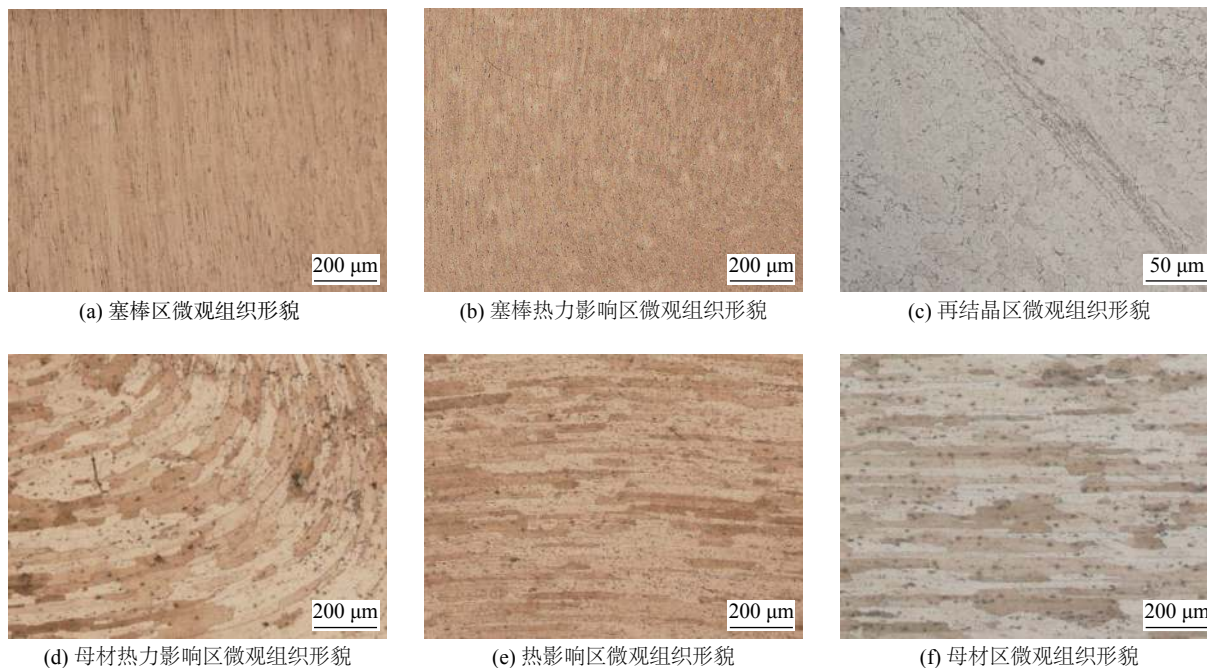


图 3 FSW 焊缝 FPW 接头各区域微观组织形貌

Fig. 3 Microstructures of different zones in FPW joint of FSW joint

从图 3a 和 3f 可以看出, 2219 铝合金母材和塞棒组织均有一定的方向性, 母材呈水平方向板条组

织特征, 有明显轧制变形痕迹, 在晶内和晶界有大量的强化相分布, 塞棒呈竖直方向拉伸变形形态.

图 3c 再结晶区位于母材与塞棒的摩擦结合界面处,晶粒均匀细小,这是由于焊接过程中高速旋转的塞棒与母材摩擦产热,使母材和塞棒圆锥面结合部位达到热塑性状态,同时,在塞棒进给作用下,塑性材料在竖直方向即轴向也会产生塑性变形以及塑性材料和母材之间的相对运动,在该过程中结合界面附近塑性材料发生连续动态再结晶,当塞棒急停后,在顶锻力的作用下再结晶晶粒被击碎形成细小等轴晶特征的冶金结合界面。图 3b 塞棒热力影响区和图 3d 母材热力影响区在焊接过程中,塞棒侧塑化层沿着塞棒向芯部扩展,母材侧塑化层向远处母材扩展,由于散热条件不同,塞棒下部的金属完全塑化,而母材侧散热较快,塑化层较窄,热力影响区由于热输入和机械力的作用较再结晶区小,晶粒发生局部再结晶和弯曲变形。图 3e 热影响区组织,在焊接过程中仅受到热循环作用,晶粒形态未发生明显变化。

FPW 过程中,材料的流动方式如图 4 所示。图 4a 为塞棒和塞孔刚接触状态,由于塞棒角度大于塞孔角度,所以在塞棒旋转并向下行走的过程中,首先塞孔的上表面与塞棒接触并摩擦产热,接触界面附近的塞棒和母材软化达到塑性状态。图 4b 为塞棒和塞孔完全接触状态,塑性材料在焊接压力作用下向下流动,由于受到塞孔形状的限制,在母材一侧的热力影响区,材料流动在某一分界点处发生改变,分界点以上的材料向上表面流动,在塞棒旋转力作用下形成上表面飞边,分界点以下的材料向下流动。图 4c 为塞棒下端通过母材状态,塞棒在焊接压力和旋转力的作用下将母材侧塑性材料带至焊缝根部并在背部刚性支撑的作用下形成挤出端。

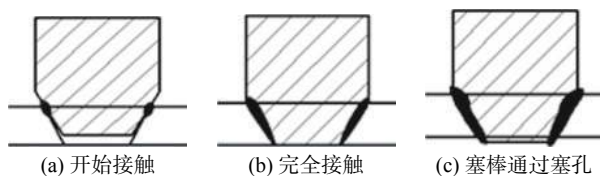


图 4 FPW 接头材料流动示意图

Fig. 4 Schematics of material flow of FPW joint

2.2 摩擦塞补焊接头的拉伸力学性能

FPW 接头常温 and 低温拉伸试样尺寸如图 5 所示。拉伸测试结果如表 2 所示。由表中数据可以看出,FPW 接头常温、低温抗拉强度和断后伸长率较母材和 FSW 接头均有下降。室温下,FPW 接头的强度系数达到 FSW 接头的 83.9%,断后伸长率达

到 FSW 接头的 75%。低温下 FPW 接头强度系数和 FSW 接头基本一致,断后伸长率达到 FSW 接头的 73%。由此可见,FPW 接头无论从强度还是塑性来看都较接近 FSW 接头,这与传统熔焊修复工艺比较,具有明显的优势。FPW 作为一种固相的补焊方法,适用于 2219-T87 铝合金搅拌摩擦焊焊接缺陷的修复。

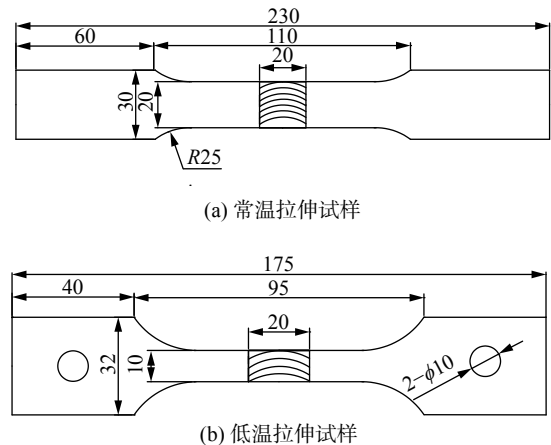


图 5 拉伸试样 (mm)

Fig. 5 Shape of specimen for tensile test

表 2 FSW 焊缝 FPW 接头拉伸测试结果

Table 2 Mechanical properties of FPW joint of FSW joint

试样类型	常温(25 ℃)		低温(-196 ℃)	
	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)
母材	440.0	12.0	565.0	12.5
FSW接头	330.0	6.0	390.0	10.0
FPW接头	276.8	4.5	375.0	7.3

图 6 为 FPW 接头的拉伸断裂位置。试验表明,FPW 接头断裂位置多位于结合面附近的母材热力影响区,该区域是 FPW 接头组织特征过渡最显著区域,从结合界面的细小等轴晶粒过渡到具有明显



图 6 FPW 接头拉伸断裂位置

Fig. 6 Tensile fracture sites of FPW joint

流动变形的晶粒组织特征,加之焊接热循环导致的沉淀强化相溶解产生软化现象,局部硬度降低,抗拉强度也就降低,说明母材热力影响区是 FPW 接头的薄弱部位。

2.3 摩擦塞补焊接头的硬度分布

测试 FPW 接头厚度中线处的显微硬度,如图 7 所示。硬度曲线总体呈 W 形分布,母材硬度最高,达到 130~140 HV,塞棒/FSW 焊缝和塞棒/母材再结晶区硬度值相当,达到 110~120 HV,热影响区、热力影响区和塞棒区材料出现软化,最低硬度值出现在热力影响区和塞棒区,为 85~95 HV,显微硬度的分布和接头的显微组织相对应。

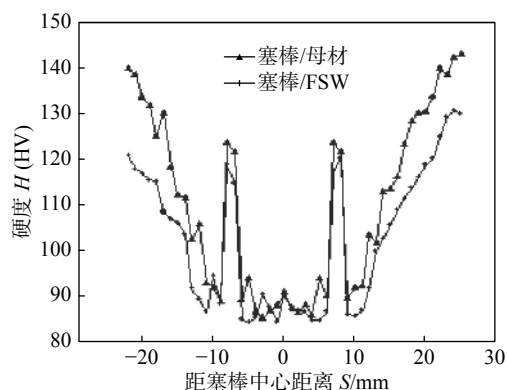
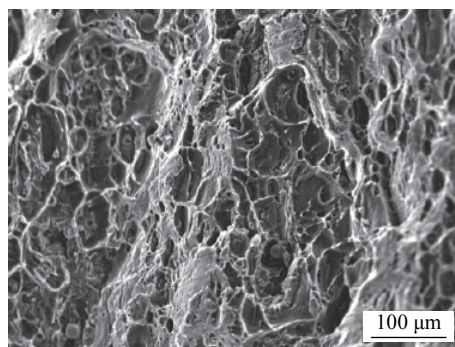


图 7 FPW 接头硬度分布
Fig. 7 Micro-hardness of FPW joint

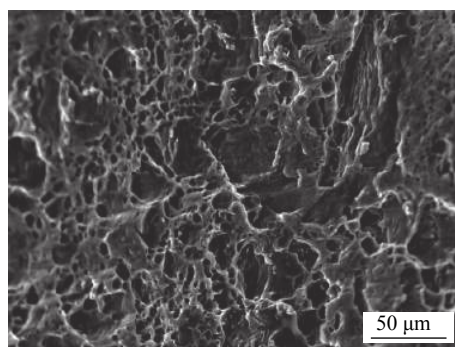
2.4 断裂模式

图 8 所示为 FPW 接头拉伸断口形貌特征,图 8a~8c 分别为近上表面、厚度中心线和近下表面断口形貌特征。可以看出,断口表面均由韧窝和撕裂棱组成,从上表面至下表面,由于断裂位置不同,韧窝尺寸、深度及形态也有所变化,近上表面断裂位置在母材热力影响区,韧窝尺寸较大较深,且窝底分布有第二相,为典型塑性断裂模式。厚度中心线韧窝比上表面稍小,窝底第二相较上表面减少。近下表面在塞棒和母材的结合界面附近处断裂,为较小尺寸的等轴韧窝,窝底存在非常细小沉淀相,断裂表面比较平整,塑性变形量比较小,有弱连接缺陷特征。

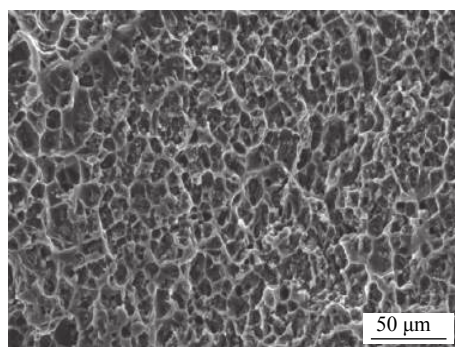
这表明,在焊接过程中接头下部由于摩擦力小及底板导热快,使得结合界面温度低,在结合界面处虽形成细小等轴晶冶金结合,但结合强度不高,加之沉淀强化相的部分溶解,并且根部容易产生弱连接缺陷,使得该区域成为 FPW 接头的最薄弱区域。



(a) 近上表面拉伸断口形貌



(b) 厚度中心线拉伸断口形貌



(c) 近下表面拉伸断口形貌

图 8 FSW 焊缝 FPW 接头拉伸断口形貌
Fig. 8 Fracture morphology of FPW joint of FSW joint

3 结 论

(1) FPW 接头具有明显的组织不均匀性,主要由塞棒区、塞棒热力影响区、再结晶区、母材热力影响区、热影响区和母材区域组成。母材热力影响区晶粒发生软化和弯曲变形。

(2) FPW 接头的常温和低温抗拉强度均达到 FSW 接头的 80% 以上,断后伸长率达到 FSW 接头的 70% 以上,2219-T6 塞棒适用于 2219-T87 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷的修复。

(3) FPW 接头的拉伸断口主要呈现韧窝形貌,断裂模式为韧性断裂。根部结合界面处断裂表面比较平整,塑性变形量比较小,有弱连接缺陷特征,是

整个接头的最薄弱区域。

参考文献:

- [1] 彭杏娜, 曲文卿, 张国华, 等. 焊接方法对 2219 铝合金性能及组织的影响 [J]. *航空材料学报*, 2009, 29(2): 57 – 60.
Peng Xingna, Qu Wenqing, Zhang Guohua, *et al.* Influence of welding processes on mechanical properties of aluminum alloy 2219[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(2): 57 – 60.
- [2] 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(1): 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(1): 125 – 132.
- [3] 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(1): 51 – 54.
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(1): 51 – 54.
- [4] Balasubramanian V, Lakshminarayanan A K. The mechanical properties of the GMAW, GTAW and FSW joints of the RDE-40 aluminum alloy[J]. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2008, 3(6): 837 – 853.
- [5] Beamish K. Friction taper plug welding of 10 mm AA6082-T6[R]. TWI Report, No. 768, 2003.
- [6] Andrews R E, Mitchell J S. Underwater repair by friction stitch welding[J]. *Metals and Materials*, 1990, 6(12): 796 – 797.
- [7] Delano A D. Friction welding with conoids: US patent, No. 6638641 [P]. 2003-10-28.
- [8] Coletta E R, Cantrell M A. Friction pull plug welding, top hat plug design: US patent, No. 6386419[P]. 2002-05-14.
- [9] 杜 波, 孙转平, 杨新岐, 等. 异种铝合金摩擦塞补焊接头微观组织及性能 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 44 – 48.
Du Bo, Sun Zhuanping, Yang Xinqi, *et al.* Microstructures and properties of friction stir welded aluminum alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 44 – 48.
- [10] Metz D F. Experimental and numerical characterization of the fatigue and fracture properties of friction plug welds in 2195-T8 dissimilar aluminum lithium alloy [D]. Tuscaloosa: the University of Alabama, 2013.

第一作者简介: 孙转平, 女, 1983 年出生, 博士. 主要从事铝合搅拌摩擦焊接及摩擦塞补焊技术的研究工作. 发表论文 3 篇. Email: sunzhuanping0703@163.com

通信作者简介: 杨新岐, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: xqyang@tju.edu.cn