

引文格式: 范金琦, 崔旭华, 马慧娟, 等. 焊后热处理对 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (6): 293-300.  
FAN Jinqi, CUI Xuhua, MA Huijuan, et al. Effect of post-welding heat treatment on friction stir welded joints of 2219 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32 (6): 293-300.

## 焊后热处理对 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头的影响

范金琦<sup>1,2,3</sup>, 崔旭华<sup>1,2,3</sup>, 马慧娟<sup>1,2,3,4</sup>, 胡志力<sup>1,2,3,4</sup>

1. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070;
3. 武汉理工大学 湖北省新能源与智能网联车工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070;
4. 东风(武汉)实业有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 研究了时效时间对 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响, 对比分析了焊后热处理对搅拌摩擦焊接头微观组织的影响。结果表明: 随着时效时间的增加, 搅拌摩擦焊接头抗拉强度和屈服强度呈现出先增大后减小的趋势, 时效时间为 18 h 时, 其抗拉强度可达 430.3 MPa, 断后伸长率为 13.7%。在相同的时效时间内, 搅拌摩擦焊接头的抗拉强度与母材相当, 但是断后伸长率较低。FSW 试样和 FSW-W-18 h 试样的几何必需位错密度分别为  $5.49 \times 10^{14}$  和  $1.06 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 。经过固溶及时效热处理后, 焊缝区域的几何必需位错密度减少了 1 个数量级。FSW 试样焊缝中以粗化的  $\theta'$  相居多, FSW-W-18 h 中主要析出相为  $\theta''$  相,  $\theta''$  相在不显著增加材料脆性的情况下, 显著提升了 2219 铝合金的屈服强度和抗拉强度。FSW 试样的断裂模式为解理加韧性断裂的混合断裂模式, 解理断裂降低了材料的塑性。FSW-W-18 h 拼接板拉伸试样的断裂模式以韧性断裂为主, 同时伴随着二次裂纹的扩展和交互, 使材料在断裂前承受了更多的塑性变形。

**关键词:** 铝合金; 搅拌摩擦焊; 焊后热处理; 析出相; 微观组织

**中图分类号:** TG441.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2025) 06-0293-08

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-2012.2025.06.031

## Effect of post-welding heat treatment on friction stir welded joints of 2219 aluminum alloy

FAN Jin-qi<sup>1,2,3</sup>, CUI Xu-hua<sup>1,2,3</sup>, MA Hui-juan<sup>1,2,3,4</sup>, HU Zhi-li<sup>1,2,3,4</sup>

1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. Hubei Research Center for New Energy & Intelligent Connected Vehicle, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
4. Dongfeng (Wuhan) Industrial Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The influence of aging time on the mechanical properties of friction stir welded 2219 aluminum alloy joints was investigated. A comparative analysis was conducted to examine the impact of post-weld heat treatment on the microstructure of the friction stir welded joints. The results show that as the aging time increases, both tensile strength and yield strength exhibit a trend of first increasing and then decreasing. At aging time of 18 h, the tensile strength reaches 430.3 MPa, the elongation after fracture reaches 13.7%. In the same aging time, the tensile strength of friction stir welded plate is similar to that of base material, but the elongation after fracture is lower. The geometric necessary dislocation densities of FSW and FSW-W-18 h samples are  $5.49 \times 10^{14}$  and  $1.06 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ , respectively. After solid solution and aging heat treatment, the geometric necessary dislocation density in the weld seam area is reduced by one order of magnitude. The coarse  $\theta'$  phase is the majority in the weld seam area of FSW, and the  $\theta''$  phase is the main precipitated phase in FSW-W-18 h.  $\theta''$  phase significantly improves the yield strength and tensile strength of 2219 aluminum alloy without significantly increasing the brittleness of

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2023YFB3307600); 武汉市知识创新专项——曙光计划项目

**通信作者:** 马慧娟, 女, 1988 年生, 博士, 副教授, 主要从事运载装备轻量化与智能制造技术研究, E-mail: mahuijuan21@whut.edu.cn

**第一作者:** 范金琦, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事运载装备轻量化研究, E-mail: fanjinqi@whut.edu.cn

**收稿日期:** 2024-08-15; **修订日期:** 2025-04-12

the material. Fractographic analysis reveals that the fracture mode of the FSW specimen is a mixed mode of cleavage and ductile fracture, with cleavage fracture contributing to a reduction in material ductility. The fracture mode of the tensile specimen of FSW-W-18 h welded plate is mainly ductile fracture, accompanied by the expansion and interaction of secondary cracks, which makes the material withstand more plastic deformation before fracture.

**Key words:** aluminum alloy; friction stir welding; post-weld heat treatment; precipitated phase; microstructure

## 引言

运载装备的轻量化和整体化一直是航空航天领域的重要课题之一。贮箱在运载火箭中扮演着至关重要的角色,其质量占据了火箭整体质量的 1/2 以上。通过采用轻量化设计,可以显著增强火箭结构效率并提升其携带能力<sup>[1]</sup>。2219 铝合金作为一种 Al-Cu 系合金,以铜为主要成分,展现出了卓越的高强度特性。它不仅力学性能稳定,还具有良好的断裂韧性、可成形性能、机械加工性能及焊接性能,在航天领域具有极高的应用价值和广阔的应用前景。因而,2219 铝合金成为制造运载火箭燃料贮箱类大型曲面钣金构件的首选材料<sup>[2]</sup>。

运载火箭贮箱箱底件需要用到焊接技术,而搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)在这方面具有显著优势。在焊接过程中搅拌摩擦焊的温度比熔化焊低,一般在材料的熔点以下,可避免焊缝区域产生凝固开裂、宏微观偏析、固态夹杂物等熔化焊中常见的焊接缺陷<sup>[3-6]</sup>。

为了达到构件最终性能要求,一般需要通过焊后热处理来提高搅拌摩擦焊接头的强度。焊后热处理可以有效细化焊缝区和热影响区的晶粒结构,消除残余应力,恢复合金的析出强化相,从而提升接头的综合力学性能<sup>[7-10]</sup>。时效温度、保温时间和冷却速率等热处理参数均会对 2219 铝合金的微观组织演变和力学性能产生显著影响<sup>[11-14]</sup>。但热处理铝合金均存在一个最佳热处理参数范围,在该热处理参数范围内获得的材料的力学性能最优。但是不同材料的最佳热处理参数并不相同。即使是同一种材料,其厚度和状态也会影响材料最佳热处理参数的选择。WANG H 等<sup>[15]</sup>研究了时效时间对 2219 铝合金力学性能的影响,发现 165 °C/24 h 时最佳,抗拉强度可以达到 411 MPa。李小霞等<sup>[16]</sup>研究了 FSW 和热处理复合工艺对 2219 的影响,发现 180 °C/6 h 可以获得较佳的抗拉强度,为 386 MPa。毛健等<sup>[17]</sup>研究了时效时间对新型高强铸造 Al-Cu-Mn 合金性能和微观组织的影响,发现材料的伸长率随着时效时间的延长而下降,时效时间大于 10 h 后,伸长率明显下降。

目前航空航天构件性能要求进一步提高,且微观组织和断裂机制的研究需要进一步深入。因此,系统研究该内容,对于指导实际工程应用和进一步优化工艺参数具有重要意义。

针对上述问题,本文以 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头为研究对象,研究了时效时间对其力学性能的影响。然后对比分析了焊后热处理对晶粒尺寸、位错、析出相及断口形貌的影响,并讨论了微观演变对力学性能的影响机制。

## 1 试验材料与方法

试验材料采用 2 mm 厚 2219 退火态铝合金,试验采用的搅拌销由 H13 模具钢制成。焊接 2 mm 厚板材的搅拌销的轴肩直径为  $\Phi 10$  mm,搅拌针长度为 1.9 mm。待焊接板料的尺寸为 300 mm×80 mm,焊缝长度为 280 mm,焊接方向垂直于板料轧制方向。热处理方案采用单级时效的热处理方式,2219 铝合金拼焊板的固溶温度设置为 535 °C,保温时间为 40 min。使用电阻炉对材料进行固溶热处理,在达到固溶时间后将拼焊板取出并立即放入水中淬火,淬火后立即进行时效处理。人工时效处理通过电热恒温鼓风干燥箱进行,型号为 101-1BS,控温范围为 RT+ (5~300) °C。依据有色金属行业标准 YS/T 591—2017<sup>[18]</sup>时效温度设置为 175 °C,时效时间分别为 0、2、6、12、18 和 24 h。后续用 FSW 表示经过搅拌摩擦焊接但未进行焊后热处理的试样,用 FSW-W-X h 表示搅拌摩擦焊后固溶淬火然后保温 X h 的试样。

拼焊板单轴拉伸试样尺寸如图 1 所示,拉伸试验通过 CMT5205 万能拉伸试验机进行,该型号拉伸

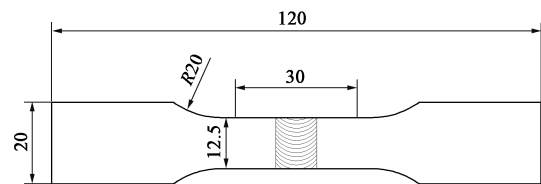


图 1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Tensile specimen size

试验机最大加载力为 200 kN, 可以满足拼焊板的拉伸需求。拉伸速度设置为  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在拉伸时通过传感器实时采集保存拉伸过程中的位移及拉力数据, 方便后续的分析计算。通过电子背散射衍射 (Electron Backscattered Diffraction, EBSD) (型号为 SYMMETRYS) 观察焊核区晶粒尺寸的分布, 该试样先在研磨机上用 400#、800#、1200#和 2000#的砂纸进行打磨然后机械抛光至镜面般光滑, 然后进行电解抛光。采用透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) (型号 JEM-2100F) 观察搅拌摩擦焊对试样的析出相和位错的形貌分布的影响, 该试样机械研磨至  $100 \mu\text{m}$ , 然后进行离子减薄后观察。将拉伸试样的断口部分切下来, 然后采用超声震荡清洗, 最后通过扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 进行观察和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 时效时间对母材和 FSW 接头力学性能的影响

焊接热输入会直接影响拼焊板焊后的力学性能和界面组织。在焊接不同类型不同厚度的材料时, 可获得其最佳力学性能的焊接参数并不相同。基于本团队搅拌摩擦焊的开发经验和前期的一些研究, 本文选择的搅拌头转速为  $1600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 焊接速度为  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 该焊接参数的下拼焊板的力学性能最优, 同时其微观组织无明显缺陷, 焊接效率可以达到 86%。

2219 铝合金单级时效热处理后的力学性能如图 2 所示。在人工时效时间为 0 h 时, 2219 铝合金的抗拉强度最低, 为 303 MPa, 断后伸长率为 27.9%, 超过了其热处理前的伸长率 22%。随着时效时间的增加, 强度先上升后下降, 断后伸长率则持续降低。2219 铝合金的峰值时效时间是 12 h, 此时抗拉强度达到 421 MPa, 母材屈服强度为 310 MPa, 伸长率为 16.8%。与经过 2 h 时效处理的样品相比, 经过 12 h 时效处理的样品在抗拉强度上实现了 24.6% 的增长, 而其伸长率则减少了 37.5%。然而, 当时效时间超过 12 h 时, 抗拉强度开始呈现递减趋势, 在 24 h 时, 抗拉强度降至 386 MPa, 降幅为 8%。但从伸长率的角度看, 24 h 时效后的母材断后伸长率保持在 16.3%, 与之前的最大值相比, 并没有显著的减少。2219 铝合金第二相析出的顺序为: GP 区 (Gaussian Precipitation Zone) -  $\theta''$  相 -  $\theta'$  相 -  $\theta$  相, 其中  $\theta''$  相为主要强化相。在固溶时, 随着温度升

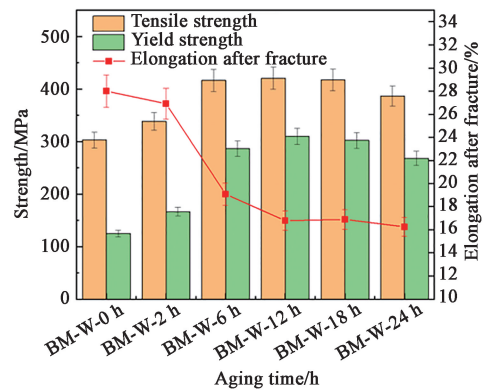


图 2 2219 铝合金热处理后的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of 2219 aluminum alloy after heat treatment

高, 会逐渐形成固溶体。在淬火至室温时, Cu 原子的溶解度迅速降低, 形成过饱和固溶体。在时效初期, 铝合金基体内 Cu 原子浓度较高, 强化相含量不断增加, 使得铝合金强度逐渐提高, 但同时塑性下降。随着时效时间的增加,  $\theta''$  相逐渐变为  $\theta'$  相和  $\theta$  相, 铝合金强度开始降低。

2219 铝合金 FSW 拼焊板焊后热处理后的力学性能如图 3 所示。在时效 2 h 时的抗拉强度为 326 MPa, 断后伸长率为 20.6%。之后, 与母材趋势相同, 2219 铝合金 FSW 拼焊板的抗拉强度随时效时间的增加而先增大后减小。人工时效 12 h 时的抗拉强度为 434 MPa, 断后伸长率为 15%。但是人工时效 12 h 时拼焊板的屈服强度为 295 MPa, 而使用要求中屈服强度需大于 300 MPa。当时效时间增加至 18 h 时, 其屈服强度增至 312 MPa, 同时抗拉强度为 430 MPa, 断后伸长率为 13.7%, 满足了使用要求。拼焊板在时效 24 h 后, 抗拉强度继续减小, 断后伸长率也有所降低。

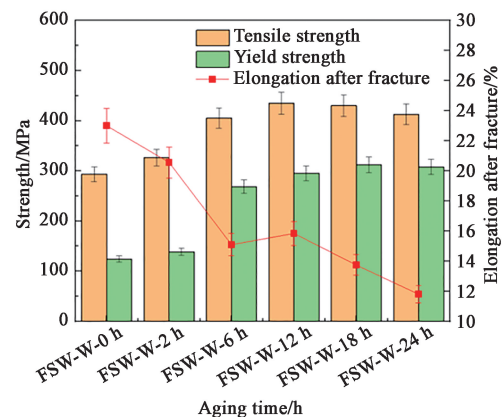


图 3 FSW 拼焊板热处理后的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of FSW welded plate after heat treatment

与 2219 铝合金表现相同的是, 2219 铝合金 FSW 拼焊板在时效 0 h 时的抗拉强度最低, 断后伸长率最高。并且随着时效时间的增加, 两者抗拉强度的变化趋势基本相同。在相同的人工时效时间内, 搅拌摩擦焊拼焊板的抗拉强度与母材相当, 但是断后伸长率较低。例如在人工时效 2 h 时, 两者的抗拉强度仅相差 3%, 但是搅拌摩擦焊拼焊板的断后伸长率与母材相比, 降低了 23%; 在时效 24 h 时, 两者的抗拉强度相差 7%, 而 2219 铝合金的断后伸长率为 16.3%, 2219 铝合金 FSW 拼焊板的断后伸长率为 11.8%, 断后伸长率降低了 27%。2219 铝合金是经过轧制而成的板料, 其表面平整, 厚度均匀。经过电火花线切割所得拉伸试样整体无应力集中, 且厚度一致性较高。因此, 2219 铝合金拉伸试样在单向拉伸过程中的变形比较均匀。而搅拌摩擦焊在焊接时, 搅拌销的轴肩向待焊接板料压入 0.2 mm。搅拌销的下压量使得拼焊板焊缝区域厚度相比母材减薄约 0.2 mm, 拼焊板沿垂直于焊缝方向的厚度分布不均匀。此外焊缝区的组织和母材相比也不同, 在单向拉伸过程中拼焊板拉伸试样沿轴向的应力分布不均, 焊缝区域的应力更高, 故拼焊板在焊缝区

域先发生断裂, 最终使得 2219 拼焊板的断后伸长率低于 2219 铝合金。因此, 最佳的焊后热处理参数为搅拌摩擦焊后固溶然后时效 18 h 即 FSW-W-18 h, 此时抗拉强度为 430 MPa, 与 FSW 状态的 297 MPa 相比提高了 133 MPa, FSW 试样的断后伸长率为 11.4%, 而 FSW-W-18 h 的断后伸长率为 13.7%。焊后热处理使得材料的断后伸长率提高了 20%。

## 2.2 焊后热处理对晶粒尺寸和位错密度的影响

对 FSW 拼焊板、FSW-W-18 h 试样的焊缝区进行 EBSD 检测, 得到的焊缝区域的微观组织如图 4 所示, 从图 4a 可以看到拼焊板的晶粒大小相对均匀且尺寸较小, 为等轴晶粒, 平均晶粒尺寸为  $1.3 \mu\text{m}$ 。而对拼焊板进行焊后热处理后的微观组织如图 4b 所示, FSW-W-18 h 试样的平均晶粒尺寸为  $77.1 \mu\text{m}$ 。FSW-W-18 h 试样的平均晶粒尺寸相比与 FSW 试样增加了  $75.8 \mu\text{m}$ 。这是因为高温热处理中出现了二次动态再结晶, 而二次再结晶最终进入了晶粒长大模式。

为了对比焊后热处理对位错密度的影响, 拼焊板在不同状态下拼焊板焊缝处的 KAM (Kernel Average Misorientation) 图如图 4c 和图 4d 所示, 图中右

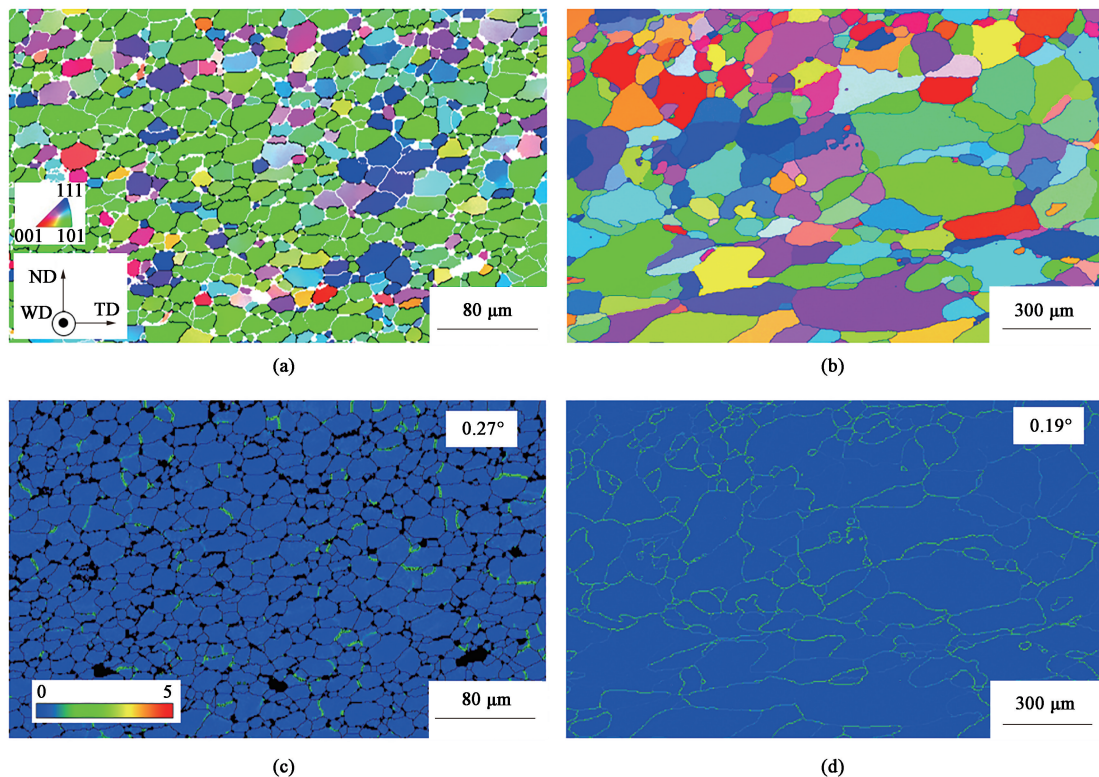


图 4 焊缝区的 EBSD 图像和 KAM 图

(a) FSW, EBSD (b) FSW-W-18 h, EBSD (c) FSW, KAM (d) FSW-W-18 h, KAM

Fig. 4 EBSD images and KAM maps of weld seam area

上角数字为试样的平均 KAM 值。材料中几何必需位错密度与 KAM 值呈正比例关系。为方便量化对比不同状态板料的位错密度, 利用平均 KAM 值通过式 (1) 可计算焊缝区域的几何必需位错密度。

$$\rho \approx \frac{\alpha\theta}{bd} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为几何必需位错密度 ( $\text{m}^{-2}$ );  $\alpha$  为与晶界混合特征有关的常数;  $\theta$  为 EBSD 测试区域的平均 KAM 值 (rad);  $d$  为 EBSD 测试时的扫描步长 (m);  $b$  为 Burgers 矢量的长度 (m)。

在本文中,  $\alpha$  取 3, Burgers 矢量的长度  $b$  为  $2.86 \times 10^{-10}$  m, FSW 试样的 EBSD 测试扫描步长为  $0.09 \mu\text{m}$ , FSW-W-18 h 试样的 EBSD 测试扫描步长为  $3.3 \mu\text{m}$ 。需要指出的是, 晶体中的位错分为几何必需位错和统计存储位错, 几何必需位错是与材料中中程变形梯度相关的位错, 与异质变形有关; 而

统计存储位错因为变形场被其他位错抵消了, 没有长距离的几何效应, 统计存储位错无法通过平均 KAM 值表示。这也使得晶体中实际存在的位错密度可能会比计算出的几何必需位错密度高。但是, 利用式 (1) 计算得到的几何必需位错密度相对于实际位错密度具有相似的趋势。FSW 试样和 FSW-W-18 h 试样的几何必需位错密度分别为  $5.49 \times 10^{14}$  和  $1.06 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ 。经过固溶及人工时效热处理后, 焊缝区域的几何必需位错密度减少了 1 个数量级。

### 2.3 焊后热处理对析出相的影响

FSW 拼焊板焊后的 TEM 微观组织形貌如图 5a 和图 5b 所示。FSW 试样焊缝区域可观察到少量位错, 焊缝内部分布着大量的棒状析出相和形状不规则的第二相, 其中粗大的棒状相为  $\theta'$  相, 而形状不规则的第二相则为  $\theta$  相, 这与李金全<sup>[19]</sup> 和 SRINICASAN P B 等<sup>[20]</sup> 观察到的现象一致。这是因为在焊接过程中, 焊接工具与待焊接板料摩擦产生高温,

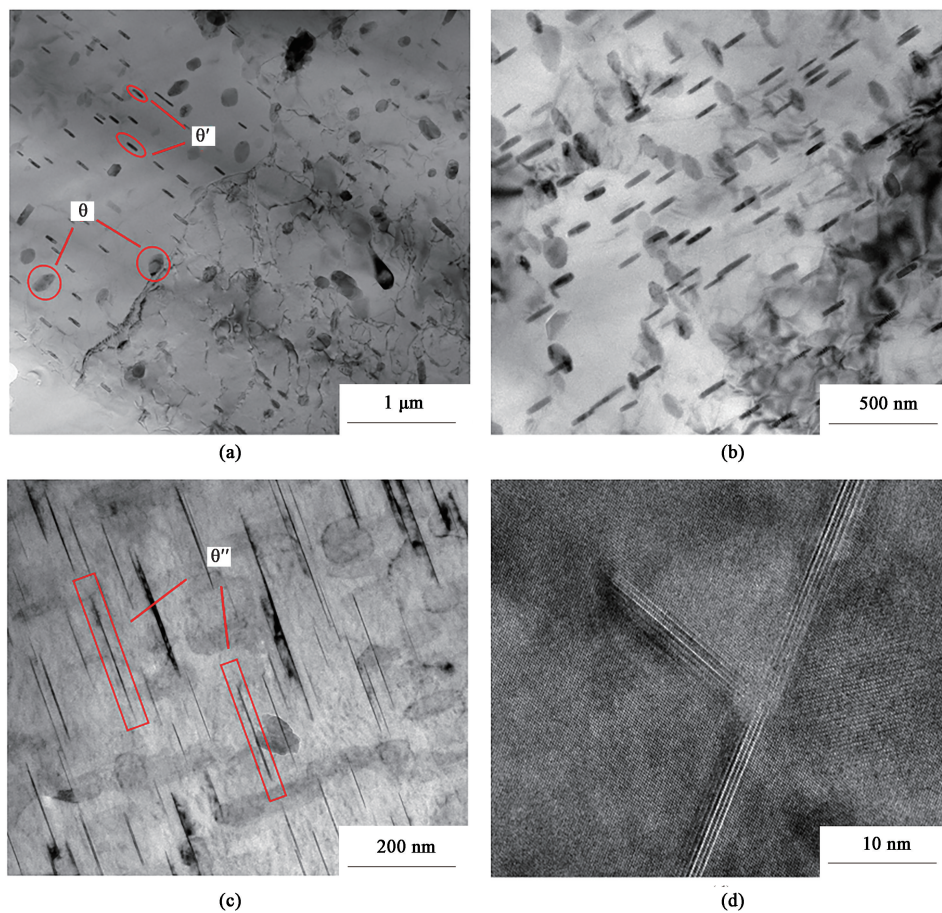


图 5 试样焊缝区域的 TEM 图像

(a) FSW 析出相分布 (b) FSW 析出相与位错交互 (c) FSW-W-18 h 析出相分布 (d) FSW-W-18 h 析出相高分辨图

Fig. 5 TEM images of weld area of specimen

(a) Distribution of FSW Precipitation (b) Interaction between FSW precipitations and dislocations  
(c) Distribution of FSW-W-18h precipitation (d) High-resolution image of FSW-W-18h precipitation

使得焊缝区域的部分析出相如  $\theta''$  相等受热溶解进入铝基体, 而  $\theta'$  相等受热发生进一步长大, 故 FSW 试样焊缝中以粗化的  $\theta'$  相居多。

FSW-W-18 h 试样焊缝区域的 TEM 高分辨图像如图 5c 和图 5d 所示。2219 铝合金 FSW 拼焊板在经过固溶淬火和 18 h 人工时效后, 焊缝区域内分布着许多的片状析出相。析出相长度处于 350 nm 以下, 该析出相为多层片状结构, 这与 SON S K 等<sup>[21]</sup>观察到的现象一致。图 5d 为放大 400000 倍得到的高分辨图像, 该析出相的厚度约为 9 nm, 经判断为  $\theta''$  相。 $\theta''$  相通过阻碍位错运动来增强材料的强度和硬度。相比初期的 GP 区,  $\theta''$  相的有序结构和更稳定性使其具有更显著的强化效果, 并且由于其纳米级尺寸和均匀分布, 在不显著增加材料脆性的情况下,  $\theta''$  相显著增强了合金的屈服强度和抗拉强度, 这也是焊后热处理可以显著增加材料强度的主要原因。

## 2.4 焊后热处理对拉伸试样断口形貌的影响

FSW 试样的断裂模式为解理加韧性断裂的混合断裂模式, 试样的断口形貌如图 6a 所示, 图 6b 中红色方框中为解理面, 红色箭头所指为碎裂的第二相质点, 图 6c 为图 6b 中方框部分放大图。断裂面中分布着大量韧窝, 同时可以观察到部分解理面, 解理断裂显著降低了材料的塑性, 这是因为在解理断裂中, 由于裂纹沿着晶体的特定晶面传播, 不涉及大量的能量吸收过程, 导致断裂突然发生, 材料无法通过塑性变形来缓解应力集中, 这也是 FSW 试样伸长率较低的一个原因。此外, 整个断面高度差较大, 使得 SEM 设备无法对整个断口进行对焦。其断裂面中的韧窝尺寸和深度并不一致, 直径大的韧窝可达  $\Phi 12 \mu\text{m}$ , 直径较小的韧窝则不足  $\Phi 1 \mu\text{m}$ 。如图 6b 中红色箭头所示, 在较大韧窝底部可观察到碎裂的质点。同时部分韧窝附近还存在面积较小的类解理断裂特征。

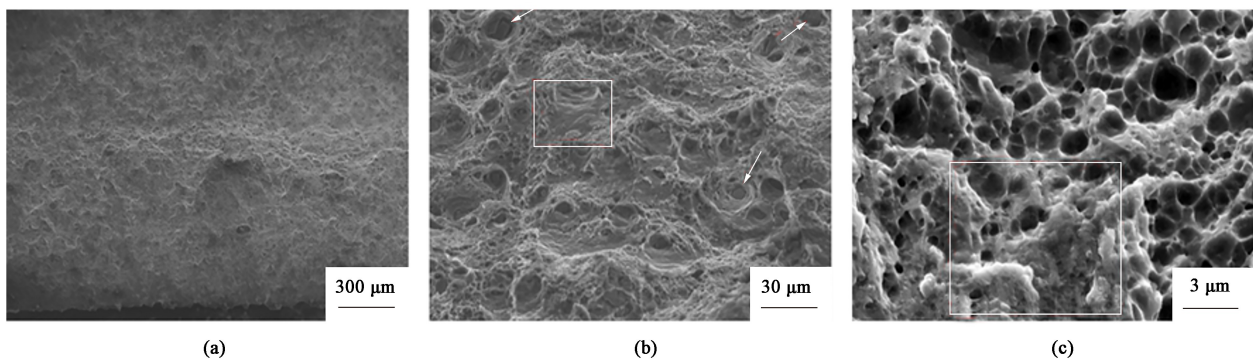


图 6 FSW 试样的拉伸断口形貌

(a) 宏观形貌 (b) 韧窝及解理特征 (c) 解理特征

Fig. 6 Tensile fracture morphologies of FSW sample

(a) Macroscopic morphology (b) Dimple and cleavage characteristics (c) Cleavage characteristics

FSW-W-18 h 拼焊板拉伸试样的断裂模式以韧性断裂为主, 试样的断口形貌如图 7a 所示, 图 7c 为图 7b 中心部分放大所得, 图中红色箭头所指为二次裂纹。以虚线为界断口呈现出明显的分层特点, 在断口上半部分以韧窝形貌为主, 而下半部分则是以沿晶断裂的特征为主。断口比较粗糙, 表面高度差较大。在断口内部可以观察到大量韧窝形貌, 以韧性断裂为主, 可观察到沿晶断裂特征及二次裂纹, 同时在韧窝底部可观察到碎裂的第二相质点。二次裂纹的扩展和交互作用通常会消耗更多的能量, 这使材料在断裂前能承受更多的塑性变形, 故焊后热处理使得材料的断后伸长率有所提高。

## 3 结论

(1) 随着时效时间的增加, 抗拉强度和屈服强度呈现出先增大后减小的趋势, 时效时间 18 h 时, 其抗拉强度可达 430.3 MPa, 断后伸长率为 13.7%。在相同的人工时效时间内, 搅拌摩擦焊拼焊板的抗拉强度与母材相当, 但是断后伸长率较低。

(2) 焊后热处理使得焊缝区域的晶粒发生了晶粒长大现象, FSW 试样和 FSW-W-18 h 试样的几何必需位错密度分别为  $5.49 \times 10^{14}$  和  $1.06 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 。经过固溶及人工时效热处理后, 焊缝区域的几何必需位错密度减少了 1 个数量级。

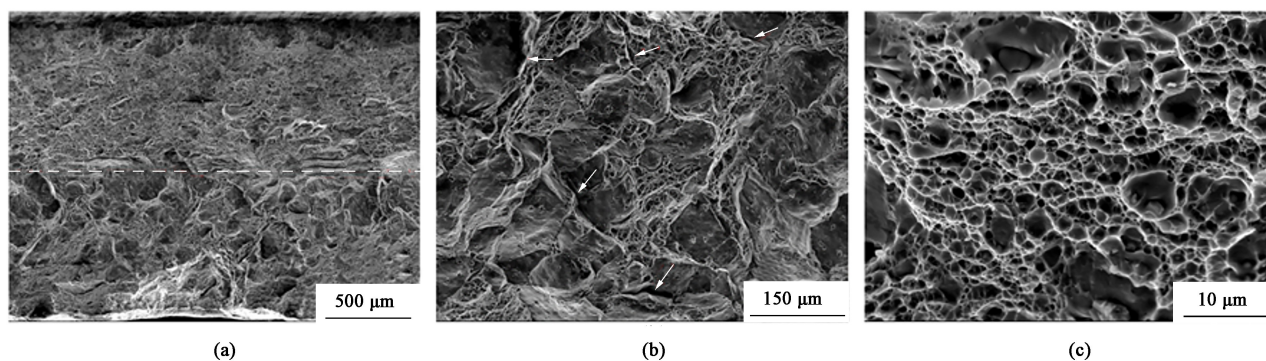


图7 FSW-W-18 h 试样的断口形貌

(a) 宏观形貌 (b) 沿晶断裂特征 (c) 韧窝形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of FSW-W-18 h specimen

(a) Macroscopic morphology (b) Intergranular fracture characteristics (c) Dimple morphology

(3) FSW 试样焊缝中以粗化的  $\theta'$  相居多, FSW-W-18 h 中主要析出相为  $\theta''$  相,  $\theta''$  在不显著增加材料脆性的情况下, 显著提升了合金的屈服强度和抗拉强度。

(4) FSW 试样的断裂模式为解理加韧性断裂的混合断裂模式, 解理断裂显著降低了材料的塑性。FSW-W-18 h 拼焊板拉伸试样的断裂模式以韧性断裂为主, 同时伴随着二次裂纹的扩展和交互作用消耗了更多的能量, 使材料在断裂前承受了更多的塑性变形。

#### 参考文献:

- [1] LEZAACK M B, SIMAR A. Avoiding abnormal grain growth in thick 7XXX aluminium alloy friction stir welds during T6 post heat treatments [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 807: 140901.
- [2] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2005, 50 (1-2): 1-78.
- [3] XU W, LIU J, LUAN G, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints in 2219-T6 aluminum alloy [J]. *Materials & Design*, 2009, 30 (9): 3460-3467.
- [4] LI H, ZOU J S, YAO J S, et al. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 727: 531-539.
- [5] 邹阳帆, 李文亚, 褚强, 等. 焊接速度对 BT-FSW 2219 铝合金接头流动行为及组织与力学性能影响分析 [J]. *焊接学报*, 2022, 43 (11): 56-62, 165-166.  
ZOU Yangfan, LI Wenya, CHU Qiang, et al. Effect of welding speed on material flow, microstructure and mechanical properties of BT-FSW 2219 aluminum alloy joints [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43 (11): 56-62, 165-166.
- [6] 赵卓帅, 姜雪峰, 杨明坤, 等. 汽车座椅滑道用 PCT980D 钢

薄板冷弯与焊接性能 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (11): 54-59.

ZHAO Zhuoshuai, JIANG Xuefeng, YANG Mingkun, et al. Cold bending and welding performance on PCT980D steel thin plate for car seat slides [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (11): 54-59.

- [7] 胡启达, 张华, 王彩妹, 等. 热带海洋大气条件下 2219 铝合金 FSW 接头力学性能研究 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53 (7): 28-30+36.

HU Qida, ZHANG Hua, WANG Caimei, et al. Study on mechanical properties of 2219 FSW joint under tropical ocean atmosphere [J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53 (7): 28-30+36.

- [8] ZHOU W B, CLEAVER C J, DUNANT C F, et al. Cost, range anxiety and future electricity supply: A review of how today's technology trends may influence the future Uptake of BEVs [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113074.

- [9] HEIDARZADEH A, MIRONOV S, KAIBYSHEW R, et al. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution [J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 117: 100752.

- [10] RATHINASURIYAN C, PAVITHRA E, SANKAR R, et al. Current status and development of submerged friction stir-welding: A review [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2021, 8 (2): 687-701.

- [11] PRABHAKAR D A P, SHETTIGAR A K, HERBERT M A, et al. A comprehensive review of friction stir techniques in structural materials and alloys: Challenges and trends [J]. *Journal of Materials Research and Technology Jmr&T*, 2022, 20: 3025-3060.

- [12] FUSE K, BADHEKA V. Bobbin tool friction stir welding: A review [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24 (4): 277-304.

- [13] 张嘉恒, 胡志力. 铝合金搅拌摩擦焊接头组织热稳定性 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58 (6): 73-80.

ZHANG Jiaheng, HU Zhili. Microstructure thermal stability of aluminum alloy friction stir welding joint [J]. *Journal of Mechanical*

- Engineering, 2022, 58 (6): 73-80.
- [14] MA H, MAO W, ZHAO N, et al. Mechanical properties and microstructure evolution of 2219 aluminum alloy via electromagnetic ring expansion & electromagnetic treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169615
- [15] WANG H, YI Y, HUANG S. Microstructure evolution and mechanical properties of 2219 Al alloy during aging treatment [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26: 1475-1482.
- [16] 李小霞, 黄亮, 李建军, 等. 搅拌摩擦焊和热处理复合工艺对 2219 铝合金组织性能的影响 [J]. 中国机械工程, 2017, 28 (23): 2880-2888.
- LI Xiaoxia, HUANG Liang, LI Jianjun, et al. Effect of friction stir welding and heat treatment on microstructure and properties of 2219 aluminum alloy [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28 (23): 2880-2888.
- [17] 毛健, 李利华, 张晓敏, 等. 时效时间对新型高强铸造 Al-Cu-Mn 合金性能和微观组织的影响 [J]. 四川大学学报, 2011, 43 (4): 227-231, 235.
- MAO Jian, LI Lihua, ZHANG Xiaomin, et al. Effect of aging time on properties and microstructure of new high strength casting Al-Cu-Mn alloy [J]. Journal of Sichuan University, 2011, 43 (4): 227-231, 235.
- [18] YS/T 591—2017, 变形铝及铝合金热处理 [S].
- YS/T 591—2017, Heat treatment of deformed aluminum and aluminum alloys [S].
- [19] 李金全. 2219 铝合金差速搅拌摩擦焊接特征及接头组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- LI Jinquan. Study on differential friction stir welding characteristics and joint microstructure properties of 2219 aluminum alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [20] SRINICASAN P B, ARORA K S, DIETZEL W, et al. Characterisation of microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of an AA2219 friction stir weldment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 492 (1-2): 631-637.
- [21] SON S K, TAKEDA M, MITOME M, et al. Precipitation behavior of an Al-Cu alloy during isothermal aging at low temperatures [J]. Materials Letters, 2005, 59 (6): 629-632.