

铝锂合金搅拌摩擦焊搭接接头组织及力学性能

张丹丹¹, 曲文卿¹, 庄来杰¹, 杨模聪², 陈洁², 孟强³, 柴鹏³

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 2. 上海飞机制造厂, 上海 200436; 3. 北京航空制造工程研究所 中国搅拌摩擦焊中心, 北京 100024)

摘要: 采用搅拌摩擦焊对 2mm 厚不同铝锂合金进行搭接, 并对接头的组织和力学性能进行分析。同时研究了焊接工艺参数、热处理状态对接头性能的影响。研究表明: 搭接接头焊核区呈“洋葱环”结构, 由细小的等轴晶组织构成; 前进侧搭接界面有“钩状”缺陷, 对接头力学性能产生不良影响。搭接接头的塑性较差, 伸长率仅有 3.18%, 不及母材伸长率的 25%; 当转速为 800r/min、焊速为 200mm/min 时, 接头的强塑性最佳, 抗拉强度达到 467MPa (母材的 94%); 热处理对搅拌摩擦焊搭接接头力学性能影响显著, 经过人工时效后, 接头强度提高了 13%~18%, 抗拉强度最高达到 526MPa, 伸长率都有所下降。断口形貌分析表明: 接头拉伸断裂是从前进侧的“钩状”缺陷起裂; 接头拉伸断口为准解理和韧窝断裂的复合断口。

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝锂合金; 力学性能; 微观组织; 断口分析

doi: 10.3969/j.issn.1005-5053.2013.2.005

中图分类号: TG453.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2013)02-0024-05

21 世纪是国内外飞机制造技术飞速发展的时期, 在众多先进飞机制造技术中, 搅拌摩擦焊 (简称 FSW) 作为一种新型的固相连接技术, 在连接飞机金属材料 (铝合金、钛合金) 时具有焊接材料兼容性好、接头性能高等特点。FSW 过程节能环保、易于控制, 应用于飞机制造具有明显的技术和经济优势^[1-3]。

铝锂合金具有低密度、高比强度、良好的低温性能、耐腐蚀性能等优点, 正逐步取代常规铝合金系成为我国飞机壁板选择采用的高性能结构材料。而采用传统的熔焊技术连接铝锂合金时, 锂元素容易发生烧损、出现焊接气孔和凝固裂纹等缺陷, 从而制约了铝锂合金的工程应用。已将 FSW 技术应用于铝锂合金连接的研究表明, FSW 技术能够获得良好的力学性能接头^[2,3]。

新型飞机机身制造时, 需要大量的对接和搭接结构, 特别是加强筋和蒙皮壁板之间的“工”形、“Z”形和“L”形搭接结构非常普遍。另外, 采用 FSW 代替铆接, 具有减重和提高结构整体性能

优势^[1], 同时搭接接头因焊前准备和装配简单、能够满足多种形式构件的焊接需要, 具有广阔的应用前景^[4-6]。

目前国内在搅拌摩擦焊 (FSW) 工艺方面的研究主要集中在焊接参数优化和对接接头性能提高上, 对于厚度为 3mm 的铝合金板, 当焊接速率为 140~220mm/min, 旋转速率为 1400~1600r/min 时, 可获得表面平整、力学性能优良的对接焊缝^[5], 汪洪峰等人^[6]研究了搅拌摩擦焊工艺参数对 7022 铝合金残余应力及耐磨耐蚀性能的影响, 徐效东等人^[7]研究了铝合金接头组织, 而对铝锂合金搭接接头性能方面的工艺研究相对较少。已有研究表明: 在 FSW 搭接接头焊缝中, 未焊合的搭接界面会发生垂直方向上的弯曲, 而这种弯曲的搭接界面将降低接头的承载能力, 在一定程度上影响了 FSW 搭接接头的推广应用, 具有重要的研究意义^[8]。所以针对 FSW 搭接接头的研究, 如搭接接头特征、接头缺陷及优化焊接工艺等方面, 无疑具有重要的学术价值和工程意义。

本工作深入分析铝锂合金 FSW 搭接接头不同区域的微观组织与界面成型性能、探索不同工艺参数和热处理状态对 FSW 搭接结构拉伸性能的影响, 为 FSW 技术在飞机壁板关键结构件的工程应用提供数据基础和技术支持。

收稿日期: 2012-03-06; 修订日期: 2012-08-11

基金项目: 北京航空航天大学研究生创新实践基金资助

作者简介: 张丹丹 (1987—), 硕士, 主要从事搅拌摩擦焊结构的组织及力学性能研究, (E-mail) ashlyn_up@163.com。

1 实验方法和材料

实验母材选用2mm厚 Al-Li-S4 和 2099 铝锂合金轧制板材,化学成分见表1和表2。采用搅拌摩擦焊机 FSW2-4CX-006 焊接获得“Z”形搭接接头。焊前用钢丝刷去除待焊表面的氧化膜,搅拌头采用 $\phi 10\text{mm}$ 的双圆环轴肩和 $\phi 3.4\text{mm}$ 的圆锥形搅拌针,搅拌针长度为2.5mm,其他工艺参数如表3所示。焊后进行人工时效处理,即 $150^\circ\text{C}/20\text{h}$,空冷。

拉伸试验根据航标 HB 5143—1996 进行,采用 WDW3050 型试验机测试,试样为标准中板形试样,每组试样5件,求平均值。焊后沿垂直焊缝的方向截取试样。采用 Olympus B \times 51M 规格光学显微镜和 JSM-5800 扫描电镜观察微观组织和断口形貌。

表1 实验用 Al-Li-S4 铝锂合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of Al-Li-S4 alloy (mass fraction/%)

| Li | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Si | Ag | Al |
|------|-------|------|-----|------|------|-------|-------|------|
| 0.72 | 0.026 | 3.56 | 0.3 | 0.72 | 0.34 | 0.025 | 0.086 | Bal. |

表2 实验用 2099 铝锂合金的化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical compositions of 2099 Al-Li alloy (mass fraction/%)

| Li | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Zr | Si | Al |
|-----|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 1.8 | 0.031 | 2.34 | 0.29 | 0.26 | 0.62 | 0.096 | 0.023 | Bal. |

表3 不同焊接工艺工艺参数

Table 3 Different FSW welding parameters

| No. | Rotational speed/(r/min) | Welding speed/(mm/min) | Rotational speed/Welding speed RW/(r/mm) |
|-----|--------------------------|------------------------|--|
| A | 800 | 400 | 2 |
| B | 600 | 200 | 3 |
| C | 800 | 200 | 4 |

2 实验结果与分析

2.1 搭接接头微观组织

图1为 Al-Li-S4 铝锂合金母材焊前组织,可以看出为轧态组织,母材晶粒沿轧制方向呈板条状分布,存在两种不同的板条型组织。

图2a给出了转速为 $800\text{r}/\text{min}$ 、焊速为 $200\text{mm}/\text{min}$ 条件下,Al-Li-S4/2099 铝锂合金搭接

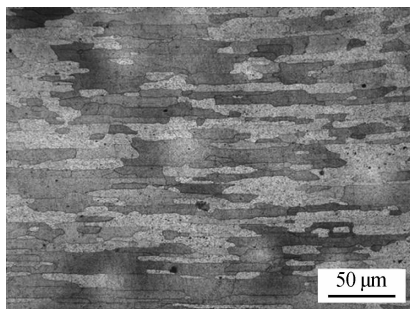


图1 Al-Li-S4 母材组织

Fig. 1 Microstructure of Al-Li-S4 alloy

接头的微观组织;图中焊缝上部为 2099 铝锂合金,下部为 Al-Li-S4 合金,接头的宏观形貌呈现典型的 FSW 接头微观组织区域即焊核区(WNZ)、热机影响区(TMAZ)和热影响区(HAZ);由于受到搅拌针形状的影响,上部轴肩影响区呈现梯形,下部焊核区为“洋葱环”结构。

对比图1和图2b可知,由于焊核区受到搅拌头强烈地搅拌作用和旋转摩擦产生的局部高温作用,组织发生动态再结晶,再结晶晶粒来不及长大就在机械搅拌的作用下发生破碎,形成细小均匀的等轴晶组织。合金原有的板条状组织完全消失,焊核区晶粒比母材细小致密。

热机影响区由于受到搅拌针的搅拌和焊接热循环作用,局部区域组织发生回复反应,晶粒由母材向焊缝弯曲变形。同时前进侧由于受到较大的摩擦剪切应力,组织发生弯曲变形的程度大于后退侧(图2c,d)。

由于搅拌头特殊的旋转和直线运动,前进侧搭接界面金属在垂直方向上发生弯曲变形,产生界面畸变,即“钩状”缺陷(图2e)。有研究表明^[5]:钩状缺陷常常出现在搭接接头中,与所选焊接工艺参数、搅拌头形状尺寸等因素有关;钩状缺陷容易引起应力集中,导致裂纹的萌生及扩展,影响接头的疲劳和拉伸性能。

另外在后退侧,原始未熔合界面会随着塑性材料的流动,迁移到焊缝内部形成新的迁移界面,造成“波浪状”曲线缺陷,它在向焊核内部延伸2mm后消失(图2f)。已有研究表明^[8]:迁移界面越尖锐,最大应力集中值越大,同时迁移界面垂直迁移量越高,焊后受拉承载的有效板厚越小,将会降低接头性能。

2.2 搭接接头拉伸力学性能

表3给出不同转速与焊速的组合,RW值越大代表热输入量越大。图3给出在不同工艺参数下,焊态及人工时效状态的搭接接头力学性能,结果表明:当转速为 $800\text{r}/\text{min}$ 、焊速为 $200\text{mm}/\text{min}$ (RW =

4) 时, 搭接接头的强塑性最佳, 抗拉强度为 467MPa, 达到母材的 94%。热处理对搅拌摩擦焊接头力学性能影响明显, 经过人工时效后, 接头强度提高了 13% ~ 18%, 最高达到 526MPa。此外, 搭接接头伸长率不佳, 最高也仅有 3.18%, 不超过母材伸长率的 25%, 经人工时效后仍有所下降。

分析其原因, 铝锂合金主要靠沉淀强化相来提高强度, 锂在铝中的溶解度较高并随温度变化明显, 所以铝锂合金具有明显的时效强化效应。在时效过程中以弥散质点形式析出的亚稳相对位错运动有强烈的阻碍作用, 因此经过时效处理后, 接头的强度会显著提高, 同时塑性降低^[2]。

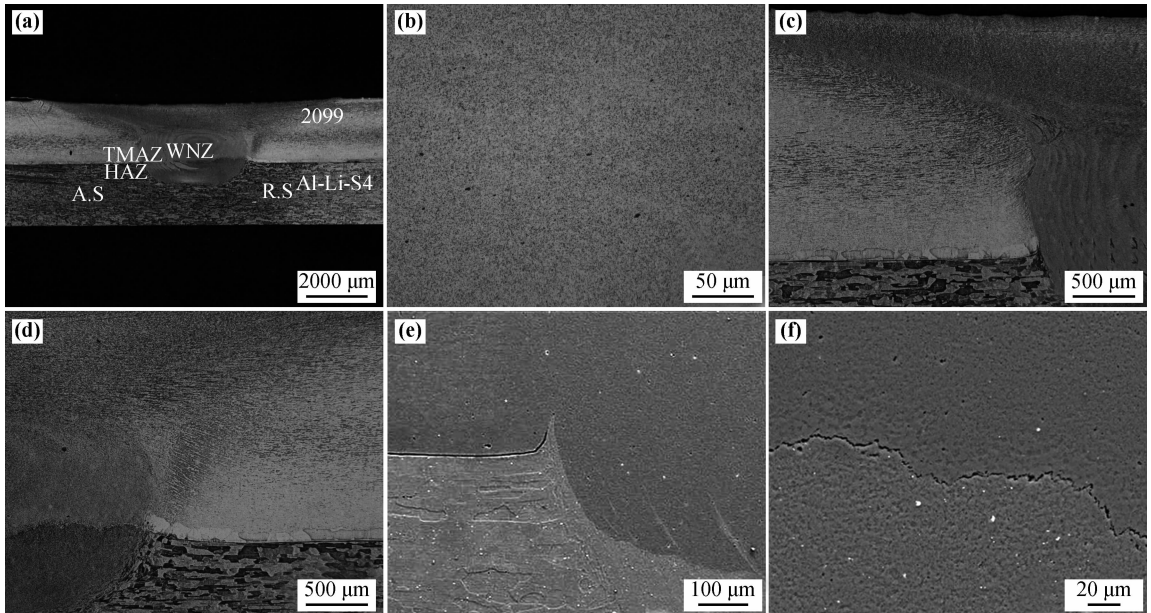


图2 FSW 搭接接头微观组织 (a) 搭接接头的宏观形貌; (b) 焊核区的等轴晶组织; (c) 前进侧热机影响区; (d) 后退侧热机影响区; (e) 前进侧背散射电镜照片: "钩状" 缺陷; (f) 后退侧背散射电镜照片: 迁移界面

Fig. 2 Microstructures of FSW overlap joints (a) overall morphology of overlap joint; (b) fine isometric crystal structure of weld nugget; (c) TMAZ on advancing side; (d) TMAZ on retreating side; (e) EBSD photographs of the "hooking" defect on advancing side; (f) EBSD photographs of the "boundary migration" on retreating side

2.3 搭接接头拉伸断口分析

搭接接头的拉伸断裂是从前进侧的“钩状”缺陷起裂, 沿 HAZ 扩展直至母材断裂。“钩状”缺陷的尖端曲率较大, 容易引起应力集中, 成为起裂源,

是接头力学性能最薄弱的位置。

图4显示了 FSW 搭接接头和 Al-Li-S4 母材的拉伸断口形貌。图4a给出了母材低倍断口, 是与拉伸方向呈 45° 的剪切断口, 断口较粗糙。图4b为搭

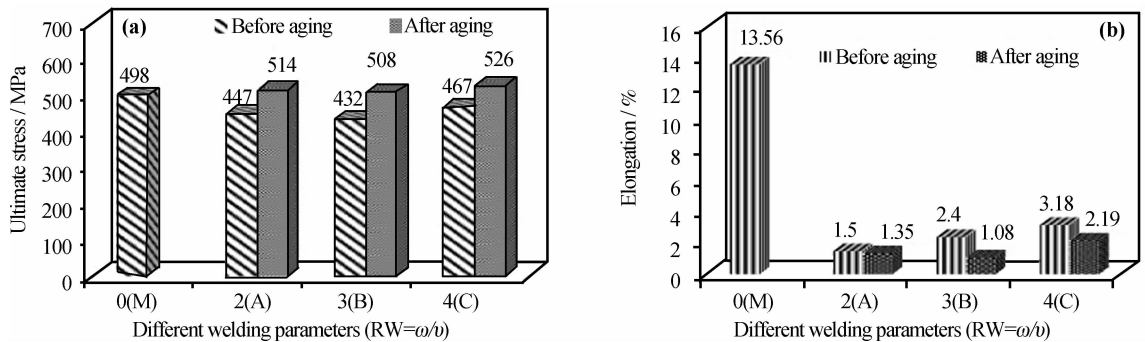


图3 不同 FSW 工艺参数下的搭接接头拉伸性能 (a) FSW 工艺参数和人工时效对搭接接头抗拉强度的影响; (b) FSW 工艺参数和人工时效对搭接接头伸长率的影响

Fig. 3 Tensile properties of Al-Li alloy overlap joints with different FSW welding parameters (a) effect of welding parameters and artificial aging on the ultimate stress of overlap joints; (b) effect of welding parameters and artificial aging on the elongation of overlap joints

接接头的宏观断口,上方约 0.5mm 较白的区域为焊缝,焊缝断口平整,说明塑性较母材有所降低。图 4c 给出了 Al-Li-S4 母材微观形貌特征:存在较多的等轴韧窝且撕裂棱明显,韧窝是微孔长大的结果,说明母材发生了一定的塑性变形,判断母材断口为韧

窝断口。图 4d 显示搭接接头的微观形貌,等轴韧窝减少,没有明显的撕裂棱,同时韧窝里能看见较平的面,即圆圈部分所示,为典型的准解理特征,说明接头脆性增加,可认为接头断口为准解理和韧窝混合断口。

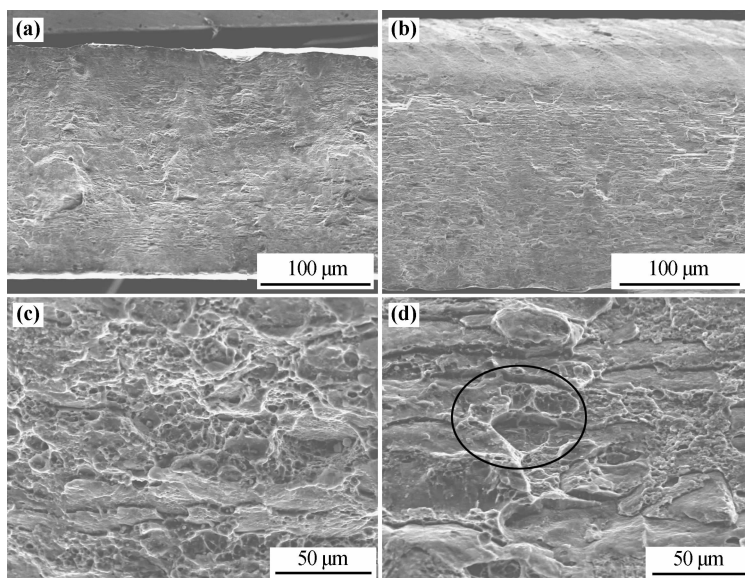


图 4 Al-Li-S4 母材与搭接接头拉伸断口形貌 (a) Al-Li-S4 母材拉伸断口 SEM 形貌;(b)搭接接头拉伸断口 SEM 宏观形貌;(c) Al-Li-S4 母材拉伸断口 SEM 微观形貌;(d) 接头拉伸断口 SEM 微观形貌

Fig. 4 Microstructure of tensile fracture (a) overall morphology of SEM tensile fracture surface of Al-Li-S4 base metal;(b) overall morphology of SEM tensile fracture surface of overlap joint;(c) microstructure of SEM tensile fracture of Al-Li-S4 base metal;(d) microstructure of SEM tensile fracture of overlap joint

3 结论

(1) Al-Li-S4 和 2099 铝锂合金搭接接头的微观组织特征是:上部轴肩影响区呈现梯形,焊核区呈现“洋葱环”结构,焊核区由再结晶的等轴晶组织构成。前进侧搭接界面位置出现“钩状”缺陷,对搭接接头的力学性能产生不良影响。

(2) 工艺参数和热处理状态对 Al-Li-S4/2099 铝锂合金搭接接头力学性能存在影响。搭接接头的塑性较差,伸长率最高仅有 3.18%,不超过母材伸长率的 25%。在转速为 800r/min、焊速为 200mm/min(RW=4)条件下,接头的强塑性最佳,抗拉强度达到 467MPa,为母材的 94%。经过人工时效后,接头强度提高了 13%~18%,抗拉强度最高达到 526MPa,而伸长率均有所下降。

(3) 搭接接头的拉伸断口分析表明:接头拉伸断裂是从前进侧的“钩状”缺陷起裂,“钩状”缺陷是接头力学性能最薄弱的位置。Al-Li-S4 铝锂合金母

材的拉伸断口为韧窝断口,而接头的拉伸断口为准解理与韧窝复合断口。

参考文献:

- [1] 栾国红. 飞机制造中的搅拌摩擦焊技术及其发展 [J]. 航空制造技术, 2009 (20): 26-31.
(LUAN G H. Friction stir welding technology and its development in manufacturing of aircraft [J]. Journal of Aeronautical Manufacturing Technology, 2009 (20): 26-31.)
- [2] 王大勇,冯吉才,王攀峰. 搅拌摩擦焊接铝锂合金接头的微观组织及力学性能 [J]. 金属学报, 2004, 40(5): 504-508.
(WANG D Y, FENG J C, WANG P F. Microstructures and Mechanical properties of Al-Li alloy friction stir weld [J]. Journal of Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(5): 504-508.)
- [3] 郭晓娟,李光,董春林,等. 1420 铝锂合金搅拌摩擦焊接力学性能 [J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 45-48.

- (GUO X J, LI G, DONG C L, *et al.* Mechanical properties of 1420 aluminum lithium alloy friction stir welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(4): 45-48.)
- [4] 郭晓娟,董春林,康举,等. 搅拌摩擦焊接界面缺陷初步研究[C]//第十五次全国焊接学术会议论文集. 2010,7.
- [5] 徐效东,杨新岐,吴铁. 铝合金搅拌摩擦焊接接头工艺及组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(15): 125-129.
(XU X D, YANG X Q, WU T. *et al.* Study on microstructure and properties of friction stir welded lap joints of aluminum alloy [J]. Journal of Hot Working Technology, 2010, 39(15): 125-129.)
- [6] 汪洪峰,左敦稳,邵定林,等. 工艺参数对搅拌摩擦焊7022铝合金残余应力及耐磨耐蚀性能的影响[J], 航空材料学报,2012,32(1):41-47.
(WANG H F, ZUO D W, SHAO D L, *et al.* Effect of process parameters on residual stress and wear and corrosion resistance of 7022 aluminium alloy by FSW[J]. Journal of Aeronautical Materials,2012,32(1):41-47.)
- [7] 徐效东,杨新岐,周光,等. 铝合金 2024-T4 搅拌摩擦焊接接头组织与性能分析[J]. 航空材料学报,2012,32(3):51-56.
(XU X D, YANG X Q, ZHOU G, *et al.* Analysis of microstructures and fatigue properties of friction stir overlap welds in AA2024-T4 alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials,2012,32(3):51-56.)
- [8] 罗凯,邢丽,杨成刚. 搅拌摩擦焊接接头的研究现状与展望[J]. 电焊机, 2010, 40(6): 5-9.
(LUO K, XING L, YANG C G. Present state and perspective on friction stir lap welding [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(6): 5-9.)

Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al-Li Alloy Lap Joints

ZHANG Dan-dan¹, QU Wen-qing¹, ZHUANG Lai-jie¹,
YANG Mo-cong², CHEN Jie², MENG Qiang³, CHAI Peng³

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China; 3. National FSW Center, Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: Two different Al-Li plates with 2mm thickness were successfully joined *via* friction-stir welding method, and the microstructure and mechanical properties of overlap joints were analyzed. The effect of welding parameters and artificial aging on the overlap joints were investigated. The results showed that the typical "onion ring" feature occurring in the weld nugget zone consisted of refined and equiaxed grains. The "hooking" defects appear at the interface of overlap joints in the advancing side, which compromise significantly the load bearing capacity of joints. The elongation of joints was only 3.18%, less than 25% that of base metal. When the rotation speed was 800r/min and welding speed was 200mm/min, the ultimate strength of joints reached 467MPa, that as much as 94% of the base metal. After artificial aging, the peak tensile strength was increased to 526MPa, and there were the obvious growth in measured ultimate strength and the corresponding reduction in the elongation of joints. In addition, the tensile fracture surface analyses indicated that the tensile cracks initiated from the "hooking" defects and the fracture mode of overlap joints was quasi-cleavage and dimple composite fracture.

Key words: friction stir welding(FSW); Al-Li alloy; microstructure; tensile property; fracture