

DOI: 10.3901/JME.2015.22.035

固溶处理对 7B04-O 铝合金搅拌摩擦焊接接头 微观组织与力学性能的影响*

韩培培¹ 杨超² 王继杰² 杜宝瑞¹ 刘晓寒¹
薛鹏³ 马宗义³ 倪丁瑞³

(1. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 沈阳 110850;

2. 沈阳航空航天大学材料科学与工程学院 沈阳 110036;

3. 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室 沈阳 110016)

摘要: 对航空用3 mm厚的带有包铝层的7B04-O铝合金板材进行搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW), 研究固溶处理对搅拌摩擦焊接接头的微观组织和力学性能的影响。结果表明, 当转速为800 r/min、焊接速度为200 mm/min、焊接工具轴肩直径为12 mm时, 可得到表面美观、致密无缺陷的搅拌摩擦焊接接头。焊核区发生动态再结晶, 形成细小的等轴晶。经固溶处理后, 焊核的上部及底部晶粒都发生了异常长大, 而中部区域晶粒仍然为细小的等轴晶组织。焊态接头的拉伸试样断裂在母材位置, 抗拉强度达到199 MPa, 与退火态母材抗拉强度相当, 断后伸长率达到12%。在新淬火状态下, 接头的抗拉强度为310 MPa, 为相同热处理母材的91.4%, 断后伸长率为11.2%, 试样断裂在焊核区, 呈不完全的韧性断裂。

关键词: 7B04 铝合金; 搅拌摩擦焊; 热处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG156

Effects of Solution Heat Treatment on Friction Stir Welding Joints of 7B04-O Aluminum Alloy

HAN Peipei¹ YANG Chao² WANG Jijie² DU Baorui¹ LIU Xiaohan¹
XUE Peng³ MA Zongyi³ NI Dingrui³

(1. AVIC Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110850;

2. College of Material Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110036;

3. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract: The aero Al-coating 7B04-O aluminum alloy plates with the thickness of 3 mm are subjected to friction stir welding (FSW), the effect of solution heat treatment on the microstructure and tensile property of the FSW joints are investigated. The results show that, with the rotation rate of 800 r/min, the welding speed of 200 mm/min and the shoulder diameter of 12 mm, sound FSW joints with no defect are obtained. Dynamic recrystallization take place in the nugget zones(NZs) with fine and equiaxed grains generated. After the heat treatment, the abnormal growth of grain is found in both the upper and the bottom parts of the NZs, whereas the fine equiaxed grains in the center part is retained. During the tensile test, the fraction position occurs in the base metal of the welded joint. The ultimate tensile strength of the welded joint is 198 MPa, which is equal to that of the base metal. the breaking elongation is about 13.2%. After the solution heat treatment, the tensile strength and breaking elongation of the FSW joint are about 310 MPa and 11.2% respectively, and the joint fails in the NZ during the tensile test, which shows incomplete ductile fracture.

Key words: 7B04 aluminum alloy; friction stir welding; heat treatment; microstructure; mechanical property

* 国家自然科学基金资助项目(51331008)。20150325 收到初稿, 20150624 收到修改稿

0 前言

7B04 铝合金是一种典型的可热处理强化 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金, 具有密度小、比强度高优点, 主要用于制造航空承力零件, 如大梁、隔框、蒙皮、翼肋等^[1]。在航空航天制造领域, 铝合金的焊接是不可或缺的工艺。然而, 铝合金表面容易形成一层致密、难熔的氧化膜, 且铝的热导率和比热容大, 导热快, 线膨胀系数大, 采用传统熔焊方法时, 易产生气孔、裂纹等缺陷, 焊接变形大, 接头性能低^[2-3], 限制了铝合金材料的进一步应用。搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是由英国焊接研究所发明的一种固态相连接技术, 其原理是利用焊接工具与焊件间的摩擦热使接缝处的金属热塑化并在搅拌工具的连续搅动作用下向后流动、填充、形成固相焊缝^[4-5]。与传统熔焊相比, FSW 具有焊接缺陷少、力学性能优异、焊接变形和残余应力小等优点^[6-10], 是一种高效优质、节能、环保、低成本的新型焊接技术, 在铝、镁等轻合金, 特别是 2 系、7 系高强铝合金结构件制造中具有独特的优势。

在飞机制造中, 铝合金蒙皮材料多为带有包铝层的高强铝合金, 其拉伸成形是利用整张板材, 零件成形后两侧的钳口余量切下即成废品, 材料利用率低, 耗费极大。希望通过 FSW 可将成形毛料改为拼焊结构, 即将蒙皮拉伸零件须用材料与钳口余量材料进行焊接, 实现钳口余量铝合金反复切割利用, 提高材料利用率, 降低生产成本。而铝合金板料拉伸成形是在退火状态预成形, 新淬火状态最终成形, 这就要求 FSW 接头热处理前后的抗拉强度均满足拉伸成形的要求。近年来, 国内外诸多学者研究了热处理对 FSW 接头组织及性能的影响。ELANGOVAN 等^[11]采用不同的热处理工艺对接头进行焊后热处理, 结果表明人工时效处理后接头强度系数从焊态的 66%提高到 77%。KRISHNAN^[12]对 6061 铝合金进行研究, 结果表明固溶处理可提高焊接接头的硬度, 但并没有提高焊缝的韧性。目前针对高强铝合金 FSW 研究主要局限于固溶+时效状态下的 FSW 接头组织及性能^[13-16], 而对退火态并带有包铝层的铝合金的 FSW 研究则较为少见。本文选取 3 mm 厚的带有包铝层的退火态 7B04 铝合金进行 FSW 对接试验, 对焊接试样进行固溶处理达到新淬火状态, 研究热处理前后焊接接头的组织和力学性能, 这对于制造航空承力零件有重要意义。

1 试验材料与方法

选用带有包铝层的 7B04-O 铝合金进行 FSW 对接焊, 试片规格为 200 mm×100 mm×3 mm, 沿板材轧制(长度)方向进行焊接。焊接设备为 FSW-5LM-020 型数控 FSW 焊机。采用钢质焊接头, 轴肩带有凹面, 直径为 12 mm, 搅拌针为 M4 的锥形螺纹针, 针长 2.85 mm。焊前打磨去掉表面氧化物, 并用丙酮清洗去除表面油污和粘附物。FSW 过程中, 转速为 800 r/min, 焊接速度为 200 mm/min, 工具倾角 2.75°, 将焊接所得的接头定义为“焊态接头”。对焊态接头进行固溶处理达到新淬火状态, 热处理工艺如下: 随炉升温至 470 °C, 保温 40 min, 然后在 10~40 °C 的水中淬火, 所得样品定义为“淬火态接头”。将原始母材称为“退火态母材”, 将退火态母材再进行固溶处理后得到的母材称为“淬火态母材”。

垂直于焊接方向切取金相样品, 经砂纸打磨后用金刚石研磨膏进行机械抛光, 抛光样品用 Keller 试剂(2.5% HNO_3 , 1.5% HCl , 1% HF , 95% H_2O)腐蚀后在金相显微镜下观察。将样品放置一段时间自然时效后, 在 Leco-LM-247AT 型显微硬度试验机上进行硬度测试, 测试载荷为 3 N, 保压时间为 15 s。沿焊缝横截面上、中、下三条水平线分别测量, 每点间隔 1 mm。室温拉伸试验在 SANS-CMT5205 电子万能试验机进行, 拉伸样品平行段尺寸: 40 mm×6 mm×3 mm, 初始应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 其中淬火态接头于淬火后 1 h 内(保证样品的新淬火状态)完成拉伸性能测试。每种接头取 3 个测试样品, 取其平均值作为最终测试结果。在 HITACHI S-3400N 扫描电镜上观察拉伸断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 焊接工艺优化

由于试验材料为退火态, 较软, 加之表面附有纯铝薄层, FSW 过程中铝很容易粘到搅拌头上, 焊缝表面易产生沟槽类缺陷, 因此同常规铝合金相比其焊接工艺参数窗口很窄。通过工艺优化, 当转速为 800 r/min, 焊接速度为 200 mm/min, 轴肩直径为 12 mm 时获得了优良的焊接接头。焊缝表面形貌如图 1 所示, 焊缝表面美观, 纹理细腻均匀, 仅存在轻微的飞边。通过 X 射线检测, 试样内部致密无缺陷, 底部无未焊透现象。

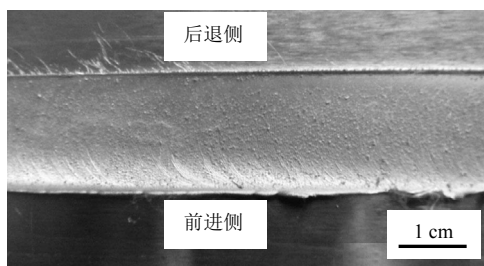
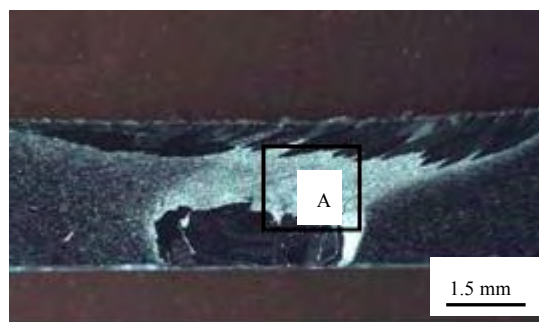


图1 FSW 焊态接头的表面形貌

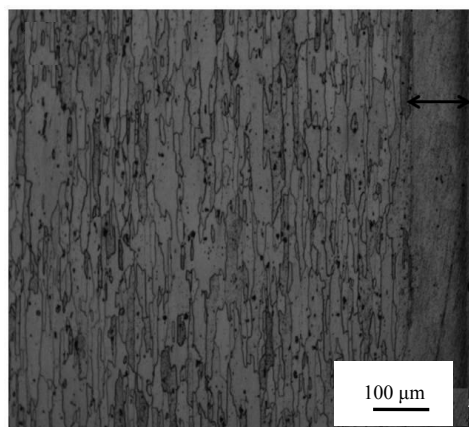


(b) 淬火态接头宏观形貌

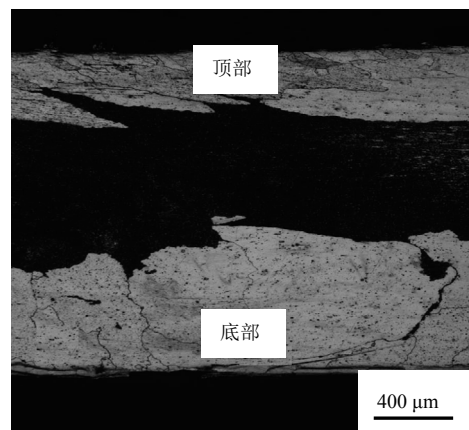
2.2 焊接接头显微组织

图2为7B04-O铝合金FSW焊态接头横截面的宏观与微观组织。可以看出,FSW接头由以下四个区域组成(图2a):焊核区(Nugget zone, NZ)、热机影响区(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(Heat affected zone, HAZ)和母材(Base metal, BM)。焊核区致密、无气孔及裂纹等缺陷,上宽下窄为盆状形状。退火态母材晶粒的显微组织为粗大的板条状,沿轧制方向拉长,母材包铝层厚度约为 $100\ \mu\text{m}$,如图2c所示。在FSW过程中包铝层如果被卷入焊缝会影响焊缝材料流动和焊接接头的力学性能,通过控制焊速或转速、轴肩压入量、搅拌针长度可避免或减少包铝层被卷入焊缝,获得良好的焊接接头^[17]。从图2a、2b可以看出本文中并没有明显的包铝层被卷入焊缝。焊核区在搅拌针搅拌和焊接热循环的共同作用下,发生剧烈的塑性变形,发生动态再结晶,形成细小的等轴晶^[18]。

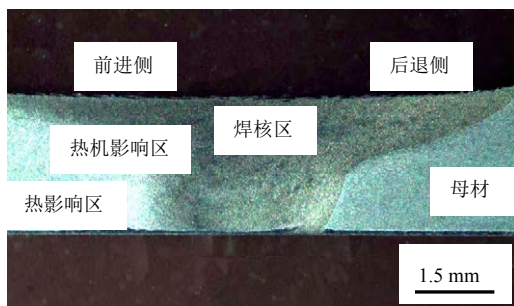
对焊接试样进行固溶处理,在淬火后的较短时间内,材料仍然具有接近于退火态的良好塑性,材料的这种不稳定的状态称为新淬火状态^[19],生产上利用新淬火状态的塑性可进行各种成形加工和校形。因此需要进一步研究新淬火状态下焊接接头的微观组织。图2b为FSW淬火态接头横截面宏观形貌,对焊核上、中、下三个位置进一步分析,如图2d中所示,焊核上部及底部晶粒都发生了异常长大,而中部区域A经放大后可以看到,其晶粒仍然为细小的晶粒组织,如图2e所示。这可能是由于保温时间(40 min)短,因此焊核中心部没有发生异常长大。



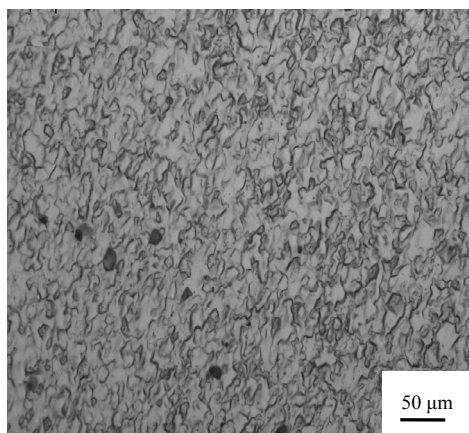
(c) 退火态母材微观组织



(d) 淬火态接头高倍组织



(a) 焊态接头宏观形貌

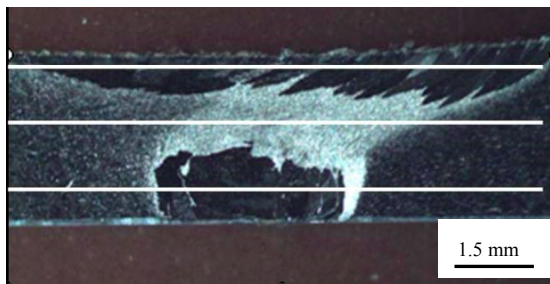


(e) 淬火态接头焊核A区放大图

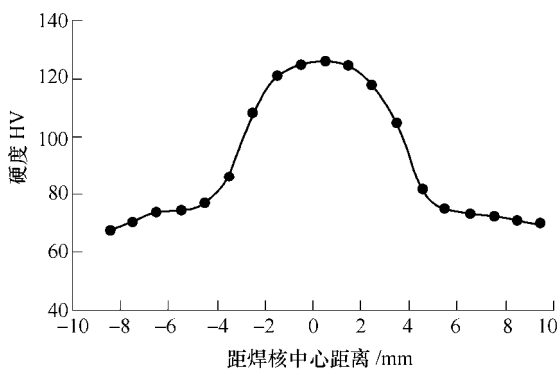
图2 FSW 7B04 接头横截面宏观与微观组织

2.3 FSW 接头硬度

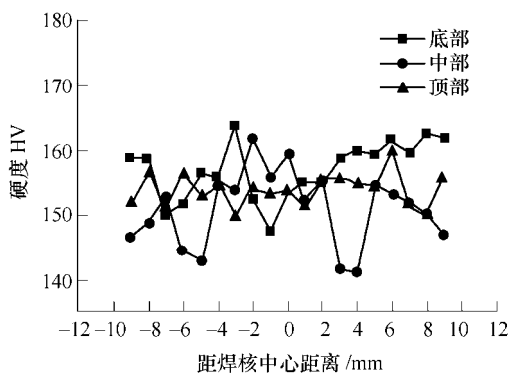
图 3a 所示上、中、下三条白线为显微硬度试验时的取点位置, 淬火态样品放置一段时间经自然时效后进行硬度测试。图 3b 为焊态接头(中部)显微硬度分布, 可以看出焊核硬度比母材大幅提升。图 3c 为淬火态接头放置一段时间经自然时效后的显微硬度分布, 与退火态母材(约 70 HV)相比, 接头硬度整体明显提升(140~160 HV)。上部和底部硬度曲线波动不是很大, 中间区域在距焊核中心 4、5 mm 左右出现了硬度最低点, 此距离位于热影响区。FSW 过程中, 焊核区发生剧烈塑性变形与动态再结晶, 硬度主要依赖于晶粒细化强化与粗大析出相破碎/溶解产生的合金元素固溶强化, 因此焊态时该处硬度会比母材大幅提升。后续的固溶与时效处理对该区域硬度的提高作用不明显, 而其他区域由于是退火态, 后续处理后硬度提高明显。



(a) 焊缝横截面显微硬度点对应位置



(b) 退火态接头显微硬度分布



(b) 淬火态接头显微硬度分布

图 3 FSW 接头的显微硬度分布

2.4 FSW 接头力学性能

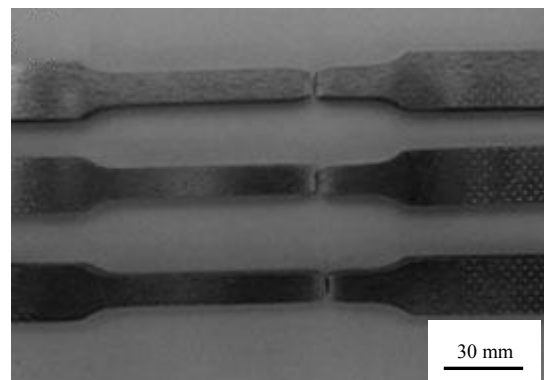
拉伸测试结果如表 1 所示, 可以看到, 焊态接头力学性能优良, 抗拉强度达到 199 MPa, 与退火态母材抗拉强度相当, 断后伸长率达到 12%, 拉伸试样断裂在离焊缝较远的母材位置(图 4c)。在新淬火状态下, 母材和 FSW 接头强度均有所提升, 这主要是由于固溶过程使合金中的析出相溶于 α 中, 得到过饱和的、不稳定的 α 固溶体, 铜与镁原子在铝中形成固溶体起固溶强化作用, 使铝晶格发生畸变, 产生强化作用^[20]。淬火态接头的抗拉强度为 310 MPa, 达到淬火态母材抗拉强度的 91.4%。可以看出, 淬火前后 FSW 接头强度均达到母材的 90% 以上。

表 1 FSW 焊接接头拉伸数据结果

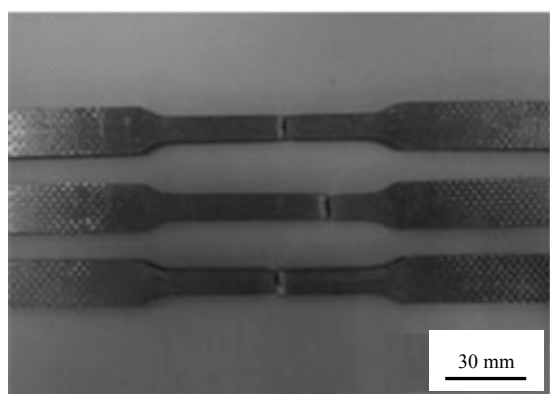
状态	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断后伸长率(%)	焊接强度系数
退火态母材	95.7	194.7	18.5	—
焊态接头	104.3	198.7	12.0	1.0
淬火态母材	136.3	338.7	18.0	—
淬火态接头	154.7	309.7	11.2	0.91

图 4 为母材和 FSW 接头淬火前后样品断后宏观照片, 可以看到, 退火态母材断口有少许缩颈, 表现出了一定的塑性, 淬火态母材断口没有缩颈现象, 呈现均匀的横断; FSW 接头的断裂情况与母材相似, 有少许缩颈, 但从断裂位置来看, 焊接态接头断于母材处, 而淬火态接头样品均断于焊核区域。这可能是由于焊接中工具压下量引起的板材薄化导致的。对于焊接态接头, 焊核区的硬度明显高于母材, 此时薄化对强度的影响不显明, 因此断在母材。热处理后, 接头整体性能提升, 焊核区硬度优势消失, 薄化影响显现, 因此断在焊核区。

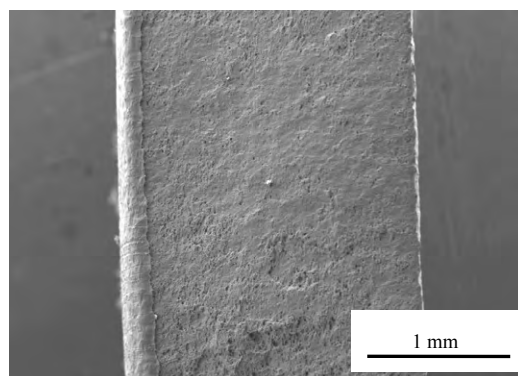
图 5 为母材与焊缝拉伸样品断口扫描照片。由图中可以看出, 退火态母材断口有一定量的缩颈, 且宏观上高低不平(图 5a); 淬火态母材断口在宏观上看较为平整, 且断裂面与受力方向呈 45° 角(图 5b)。高倍下(图 5c、5d), 退火态母材断口有大量韧窝组成, 呈韧性断裂。而淬火态母材断口韧窝很少, 且不明显, 表现出一定程度的脆断, 且断口纹理沿 45° 断裂面延伸。



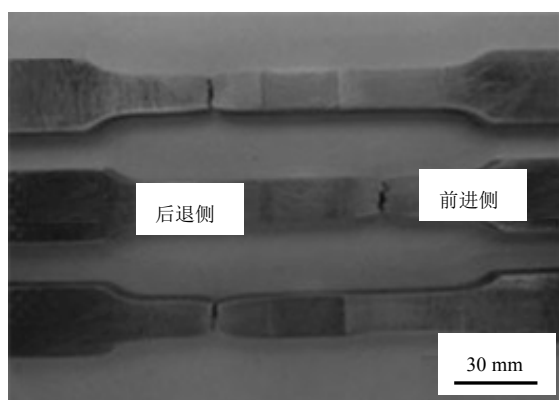
(a) 退火态母材



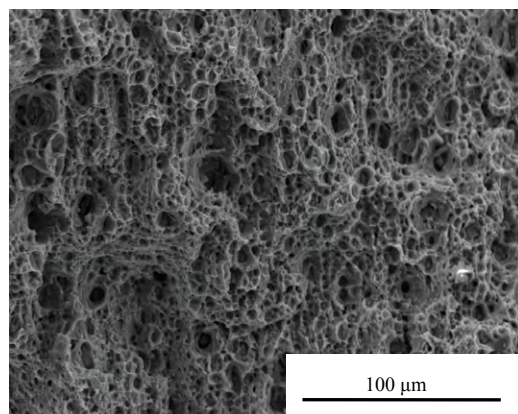
(b) 淬火态母材



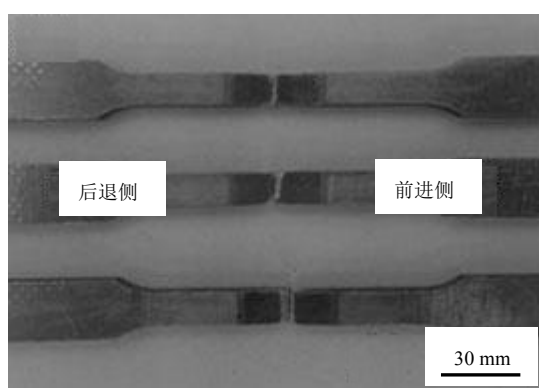
(b) 淬火态母材



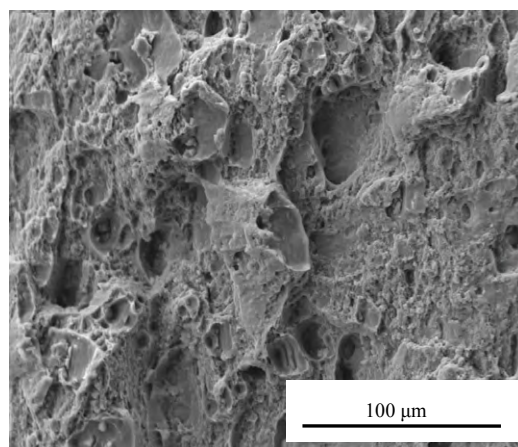
(c) 焊态接头



(c) 退火态母材高倍

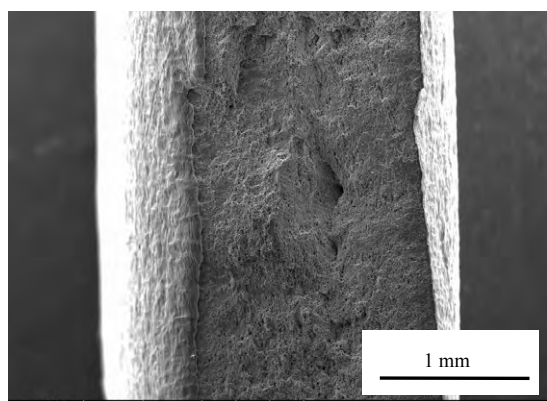


(d) 淬火态接头

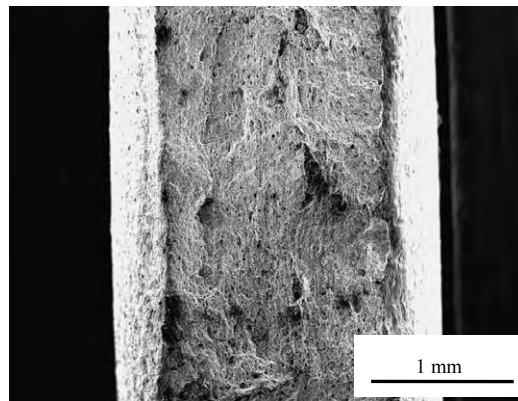


(d) 淬火态母材高倍

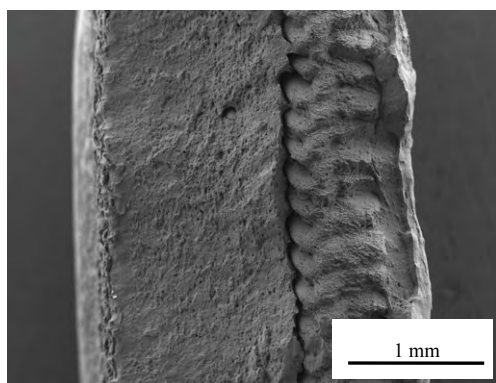
图 4 7B04 铝合金母材与 FSW 接头断后拉伸样品



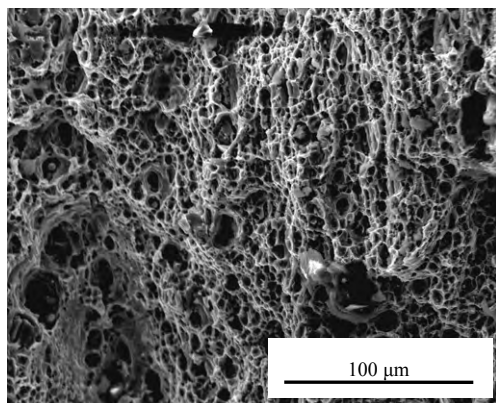
(a) 退火态母材



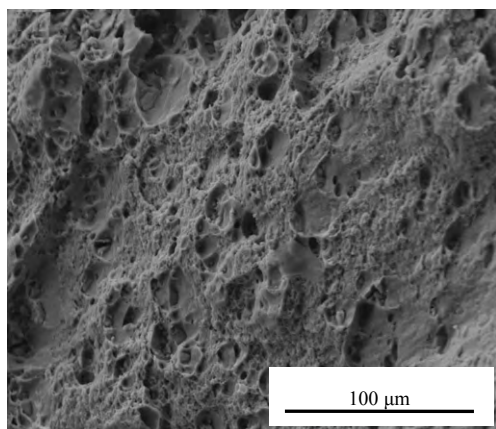
(e) 焊态接头



(f) 淬火态接头



(g) 焊态接头高倍



(h) 淬火态接头高倍

图 5 7B04 母材与 FSW 接头拉伸断口扫描照片

焊态接头拉伸样品断口在宏观看来, 缩颈情况较母材稍有减弱, 如图 5e、5g 所示; 如前所述, 淬火态接头断于焊核区域, 从宏观上可以看出, 其断口出现了分层的情况(图 5f), 上半部呈沟壑状, 底部比较平整, 局部放大后其形貌均如图 5h 所示, 与淬火态母材相似, 均呈不完全的韧性断裂。

3 结论

本文对在不同参数下对 3 mm 厚的带有包铝层的 7B04-O 铝合金板材进行 FSW 研究, 研究了固溶

处理对 FSW 接头的微观组织和力学性能的影响, 主要结论如下。

(1) 当转速为 800 r/min、焊接速度为 200 mm/min、轴肩直径为 12 mm, 可得到焊缝表面美观、致密无缺陷的 FSW 焊态接头。FSW 焊态接头力学性能优良, 抗拉强度达到 199 MPa, 与退火态母材抗拉强度相当, 断后伸长率达到 12%, 拉伸试样断裂在离焊缝较远的母材区。

(2) 在新淬火状态下, FSW 淬火态接头的抗拉强度为 310 MPa, 达到淬火态母材抗拉强度的 91.4%, 断后伸长率为 11.2%, 试样断裂在焊核区, 断口出现了分层的情况, 上半部呈沟壑状, 底部比较平整, 呈不完全的韧性断裂。

(3) 经 470 /40 min 的固溶处理后, 焊核上部与底部晶粒都发生了异常长大, 中部区域晶粒仍然为细小的晶粒组织。

参 考 文 献

- [1] 刘晓涛, 崔建忠. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强铝合金的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 47-50.
LIU Xiaotao, CUI Jianzhong. Progress in research on ultra high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Mater. Rev., 2005, 19(3): 47-50.
- [2] 赵军军, 张平, 王卫欣, 等. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊的焊缝成形[J]. 焊接学报, 2005, 26(5): 61-64.
ZHAO Junjun, ZHANG Ping, WANG Weixin, et al. Friction stir weld formation of 7A52 aluminum alloy[J]. Transactions of Welding, 2005, 26(5): 61-64.
- [3] 董继红, 董春林, 谭锦红, 等. 7A60 铝合金搅拌摩擦焊工艺及性能分析[J]. 航空制造技术, 2012(21): 73-78.
DONG Jihong, DONG Chunlin, TAN Jinhong, et al. Research on welding process and mechanical properties of 7A60 aluminum alloy by friction stir welding[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012(21): 73-78.
- [4] 张田仓, 郭德伦. 铝合金搅拌摩擦焊技术研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 127-130.
ZHANG Tiancang, GUO Delun. Aluminum alloy friction stir welding technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(2): 127-130.
- [5] 栾国红. 搅拌摩擦焊技术应用现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2007(增刊): 147-153.
LUAN Guohong. Application status and development trend of friction stir welding[J]. Aviation Manufacturing Technology(Suppl.): 147-153.
- [6] NANDAN R, DEBROY T, BHADESHIA H K D H. Recent advances in friction stir welding process,

- weldment structure and properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2008(53): 980-1023.
- [7] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2005, 50(12): 178-185.
- [8] ERICSSON M, SANDSTROM R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG[J]. *International Journal of Fatigue* 2003, 25(12): 1379-1387.
- [9] 张津, 李峰, 郑林, 等. 2024-T351 铝合金搅拌摩擦焊接件内部残余应力测试[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(2): 28-34.
ZHANG Jin, LI Feng, ZHENG Lin, et al. Internal residual stresses in the friction stir weldment of 2024-T351 Al alloy determined by short wavelength X-ray diffraction[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(2): 28-34.
- [10] 张利国, 姬书得, 邹爱丽, 等. 焊接工艺参数对5383铝合金搅拌摩擦焊接头耐腐蚀性的影响[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(2): 80-84.
ZHANG Ligu, JI Shude, ZOU Aili, et al. Effect of welding parameters on corrosion resistance of 5383 Al alloy friction stir welding joint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 80-84.
- [11] ELANGO VAN K, BALASUBRAMANIAN V. Influences of post weld heat treatment on tensile properties of friction stir welded AA6061 aluminum alloy joints[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(9): 1168-1177.
- [12] KRISHNAN K N. The effect of post weld heat treatment on the properties of 6061 friction stir welded joints[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(3): 473-480.
- [13] 王希靖, 孙桂苹, 张杰, 等. 焊后热处理对高强铝合金搅拌摩擦焊接头的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(3): 484-489.
WANG Xijing, SUN Guiping, ZHANG Jie, et al. Effects of heat treatment after welding on friction stir welding joints of high strength aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(3): 484-489.
- [14] 任淑荣, 马宗义, 陈礼清, 等. 焊后热处理工艺和背部二次焊接对搅拌摩擦焊接7075-T651铝合金性能的影响[J]. *金属学报*, 2007, 43(3): 225-230.
REN Shurong, MA Zongyi, CHEN Liqing, et al. Effects of post-weld heat-treatment and second-welding on tensile properties of friction stir welding 7075-T651 aluminum alloy[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2007, 43(3): 225-230.
- [15] 佟建华, 李光, 董春林, 等. 热处理对6061-T6 FSW接头力学性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2009(19): 66-68.
TONG Jianhua, LI Guang, DONG Chunlin, et al. Influence of heat treatment on tensile properties of friction stir welded 6061-T6 joint[J]. *Aviation Manufacturing Technology*, 2009(19): 66-68.
- [16] LEE W B, JANG H S. Effect of PWHT on behaviors of precipitates and hardness distribution of 6061 Al alloy joints by friction stir welding method[J]. *Materials Science Forum*, 2004, 449-452: 601-604.
- [17] ZHANG Z, XIAO B L, MA Z Y, et al. Effect of Alclad layer on material flow and defect formation in friction-stir-welded 2024 aluminum alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2011, 42A: 1717-1726.
- [18] 陈迎春, 刘会杰, 冯吉才. 2219-O 铝合金的搅拌摩擦焊接[J]. *焊接学报*, 2006, 27(1): 65-68.
CHEN Yingchun, LIU Huijie, FENG Jicai. Friction stir welding of the 2219-O aluminum alloy[J]. *Transactions of Welding*, 2006, 27(1): 65-68.
- [19] 高宏志, 周贤宾. 新淬火状态铝合金板的成形极限[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(9): 1083-1086.
GAO Hongzhi, ZHOU Xianbin. Forming limits of as-quenched aluminum alloy sheet[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(9): 1083-1086.
- [20] 蹇海根, 姜锋, 黄宏锋, 等. 固溶-时效处理对7B04合金组织和性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2009, 32(4): 53-58.
JIAN Haigen, JIANG Feng, HUANG Hongfeng, et al. Effect of solution and single-ageing treatment on properties of 7B04 aluminum alloy[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2009, 32(4): 53-58.

作者简介: 韩培培, 女, 1983年出生, 工程师。主要研究方向为搅拌摩擦焊和热处理技术。

E-mail: hanpp1983@126.com

倪丁瑞(通信作者), 男, 1976年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为搅拌摩擦焊接与加工。

E-mail: dnri@imr.ac.cn