

DOI: 10.11973/jxgccl202202012

焊前和焊后热处理对 2195 铝锂合金双面搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响

张骥俊¹, 曹菊勇¹, 邢彦锋¹, 张成聪²

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

摘要: 采用双面搅拌摩擦焊方法对 6 mm 厚 2195 铝锂合金板进行焊接, 对比研究了焊前与焊后热处理(410 °C × 1 h 退火 + 510 °C × 1 h 固溶 + 155 °C × 1 h 人工时效)对接头显微组织及力学性能的影响。结果表明: 焊前热处理的接头焊核区晶粒呈细小等轴状, 平均晶粒尺寸约为 9.2 μm, 而焊后热处理的焊核区晶粒发生了异常长大现象, 平均晶粒尺寸达到 0.3 mm。焊前热处理接头的抗拉强度比焊后热处理条件下的接头高约 4.7%, 断后伸长率也得到明显提高, 且焊前热处理接头的拉伸断裂方式为韧性断裂, 焊后热处理接头的拉伸断裂方式为脆性断裂。焊前热处理接头的最大弯曲角度大于焊后热处理接头, 具有良好的塑性变形能力。

关键词: 铝锂合金; 搅拌摩擦焊; 热处理; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG453.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2022)02-0075-06

Effect of Pre- and Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Properties of 2195 Al-Li Alloy Double-Sided Friction Stir Welded Joints

ZHANG Jijun¹, CAO Juyong¹, XING Yanfeng¹, ZHANG Chengcong²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200245, China)

Abstract: 6 mm thick 2195 aluminum-lithium alloy plates were connected by double-sided friction stir welding. The effects of pre- and post-weld heat treatment (410 °C × 1 h annealing + 510 °C × 1 h solution and 155 °C × 1 h artificial aging) on the microstructure and mechanical properties of joints were compared and studied. The results show that the grains in the weld nugget area of the joint with pre-weld heat treatment were small and equiaxed, and the average grain size was about 9.2 μm. The grains in the weld nugget area with post-weld heat treatment grew abnormally, and the average grain size reached 0.3 mm. The tensile strength of the joint with pre-weld heat treatment was about 4.7% higher than that with post-weld heat treatment, and the percentage elongation after fracture was improved obviously. The tensile fracture mode of the joint with pre-weld heat treatment was ductile fracture, and that with post-weld heat treatment was brittle fracture. The maximum bending angle of the joint with pre-weld heat treatment was larger than the joint with post-weld heat treatment, indicating the joint had good plastic deformation ability.

Key words: Al-Li alloy; friction stir welding; heat treatment; microstructure; mechanical property

0 引言

近年来,随着航天事业的发展,航天器轻量化对

提高运载能力、降低运输成本具有重要意义,其中研发新型材料以及结构轻量化成为首要目标。2195 铝锂合金因具有低密度、高强度、较好的高温与低温性能等特点而成为理想的结构材料,并广泛应用于航天器中的机身框架、整流罩、火箭贮箱等^[1]。然而铝锂合金表面极易形成锂的化合物,如 LiOH、Li₂CO₃ 等,在传统熔焊下,这些化合物在高温下分

收稿日期:2020-12-29;修订日期:2021-12-15

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(20ZR1422600)

作者简介:张骥俊(1997—),男,上海人,硕士研究生

通信作者(导师):邢彦锋教授

解形成的氢会扩散至熔池中,导致接头中产生气泡等缺陷^[2]。因此,如何连接铝锂合金并保证其接头强度,成为新的技术难点。

搅拌摩擦焊(friction stir welded, FSW)是由英国焊接研究所发明的一种固相焊接技术,具有焊接强度高、残余应力低以及绿色环保等特点^[3]。由于焊接温度低于固相线温度,在搅拌摩擦焊过程中可以有效避免焊缝中锂元素的损失^[4]。尽管搅拌摩擦焊能够有效连接铝锂合金,但却无法避免焊接区域的强度损失。焊接时的热输入使不同区域的强化沉淀物发生粗化或溶解,导致焊接接头的显微硬度呈“W”型分布^[5-7]。研究^[8-11]表明,热处理和喷丸处理都能提高铝锂合金 FSW 接头的强度。ZHANG 等^[10]指出焊后热处理会提高接头强度,但由于焊核区与热机影响区中晶粒明显粗化而导致延展性降低。GAO 等^[10]研究发现,固溶处理后大量 T1 相和少量 S'(Al₂CuMg)相的析出是铝锂合金 FSW 接头抗拉强度增加的原因。LIN 等^[11]研究发现,对 Al-Cu-Li 合金的 FSW 接头进行应变量 3%预变形和 152℃×30 h 回归再时效处理后,接头的屈服强度增加了 27%,抗拉强度增加了 20%,且延展性并未过度降低。戴明亮等^[12]通过固溶+冷变形+时效的处理工艺,抑制了铝锂合金 FSW 接头焊缝处异常晶粒长大现象的发生,从而提高了接头的强度。

随着新型材料以及加工技术的不断发展,火箭燃油贮箱箱底的成形技术已从复杂的瓜瓣组合焊接成形技术转变为单一板材的冲压成形技术,即板材搅拌摩擦焊后经过热处理再进行冲压成形。由于板材焊接后,过大的体积使得热处理较难实施,且焊后热处理会导致焊缝处产生异常晶粒长大,接头在冲压过程中易产生裂纹,因此提出将热处理工艺置于焊接之前,并且在热处理工艺中加入退火步骤,使材料软化以方便后续的冲压成形。作者对比研究了相同工艺焊前与焊后热处理(退火+固溶+人工时效)对 2195 铝锂合金双面搅拌摩擦焊接头显微组织与力学性能的影响,以期为 2195 铝锂合金的工程应用提供一定的理论支持和参考。

1 试样制备与试验方法

试验材料为尺寸 300 mm×200 mm×6 mm 的 2195 铝锂合金板,轧制态,其化学成分如表 1 所示。试验分为 3 组,一组仅进行焊接试验,即为 O 态焊

接,一组先进行焊接前热处理再进行焊接试验,最后一组先进行焊接试验再进行焊后热处理。试验所用热处理工艺:先进行 410℃×1 h 的退火处理,炉冷至室温,再进行 510℃×1 h 固溶处理,水淬至室温,最后进行 155℃×1 h 的人工时效处理。焊接前先用砂纸磨去板材表面氧化膜,并用乙醇擦拭除脂。采用由上海航天设备制造总厂提供的搅拌摩擦焊设备进行焊接试验,搅拌头形状为锥形带螺纹搅拌头,焊接倾斜角为 2.5°并采用平板对接方式进行搅拌摩擦焊,正面焊接完后以相同方向对反面进行焊接,基于前期经验设计的具体焊接参数如表 2 所示。

表 1 2195 铝锂合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2195 Al-Li alloy							%
元素	Cu	Li	Mg	Zr	Si	Fe	Al
质量分数	3.97	1.05	0.40	0.11	0.025	0.15	余

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters				
编号	轴肩直径/ mm	搅拌针长/ mm	旋转速度/ (r·min ⁻¹)	焊接速度/ (mm·min ⁻¹)
1 [#]	18	4	600	200
2 [#]	18	4	700	300
3 [#]	18	4	600	300
4 [#]	12	3.8	600	200
5 [#]	12	3.8	700	300

用线切割机以焊缝为中心垂直于焊接方向截取金相试样和拉伸试样,拉伸试样的尺寸如图 1 所示,图中 AS 为前进侧,RS 为后退侧。金相试样经机械抛光,用 Keller 试剂(95 mL H₂O+2.5 mL HNO₃+1.5 mL HCl+1.0 mL HF)腐蚀后,采用光学显微镜观察显微组织。按照 GB/T 228.1—2010,采用 MJDW-200B 型万能试验机对拉伸试样进行室温拉伸试验,拉伸速度为 1 mm·min⁻¹,试验结束后采用 Jsm-6390A 型扫描电镜(SEM)观察拉伸断口微观形貌。按照 GB/T 232—2010,在焊接接头处以焊缝为中心垂直于焊接方向截取尺寸为 186 mm×30 mm×6 mm 的弯曲试样,采用 Z100 KN 型电子万能试验机进行三点弯曲试验,支辊间距离为 100 mm,测试试样的最大弯曲角度。

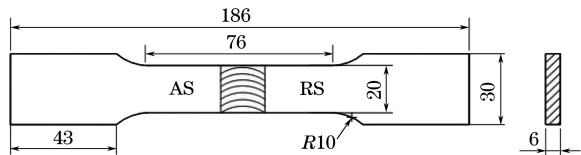


图 1 拉伸试样的尺寸

Fig. 1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 对显微组织的影响

不同双面搅拌摩擦焊接头的宏观形貌相似,均可分为4个区域,即焊核区(WNZ)、热机影响区(TMAZ)、热影响区(HAZ)、母材区(BM)。由图2可以看出,O态焊接条件下焊缝整体呈“哑铃型”,但后退侧交界线不清晰。焊前热处理接头的宏观形貌与O态焊接的宏观形貌相似,但是其焊核区的面积较小。焊后热处理焊接接头焊核区面积与O态焊接接头相似,同时在宏观形貌中可观察到晶粒异常晶粒长大现象。

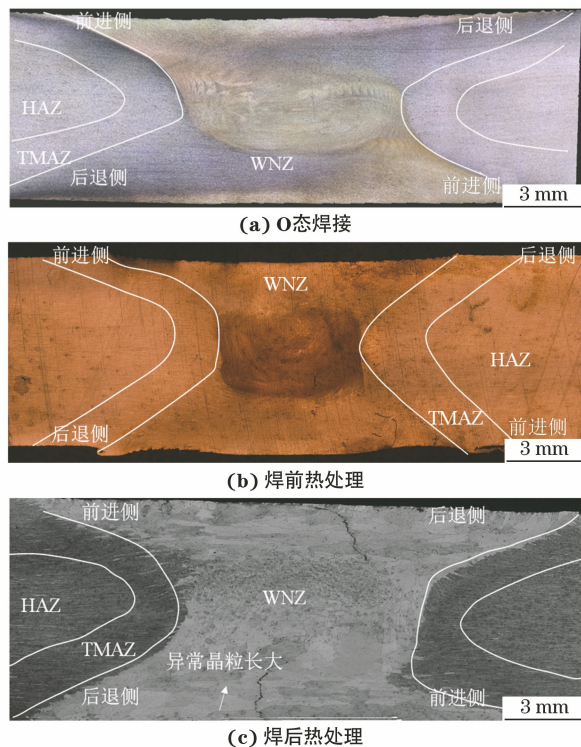


图2 不同条件下焊接接头的宏观形貌

Fig.2 Macromorphology of welded joint under different conditions:
(a) O state welding; (b) pre-weld heat treatment and
(c) post-weld heat treatment

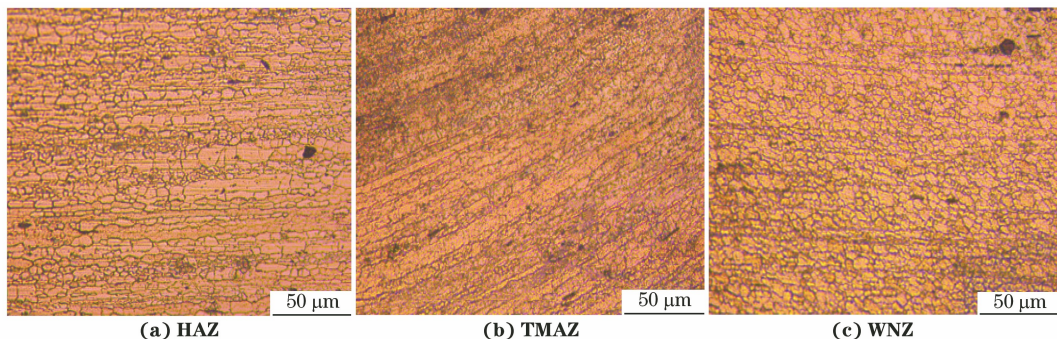


图3 焊前热处理焊接接头不同区域的显微组织

Fig.3 Microstructures of different zones in welded joint with pre-weld heat treatment

常晶粒长大现象。

以2[#]工艺下焊接得到的接头为例,对焊前和焊后热处理接头不同区域的显微组织进行观察。由图3可以看出:焊前热处理接头热影响区的晶粒因热循环的作用而粗化,平均晶粒尺寸为12.6 μm;热机影响区晶粒受到搅拌针的机械搅拌作用以及焊接热输入的影响,晶粒发生扭曲变形,以向上流动的方式旋转和拉长;焊核区晶粒分布致密且细小,呈等轴晶粒状,平均晶粒尺寸约为9.2 μm。通过退火处理可消除母材的加工硬化,使强度达到较低状态;固溶处理可使母材发生再结晶,未溶第二相颗粒减少,晶粒尺寸均匀;人工时效处理后接头中析出相数量明显多于未进行热处理接头,且弥散分布^[13]。在热输入和机械搅拌作用下搅拌摩擦焊接头焊核区第二相粒子重新析出,晶粒细小且分布均匀。同时,固溶态钢板的硬度较低,在搅拌摩擦焊接过程中有较好的塑性流动能力,从而减少了焊接缺陷。

由图4可以看出:焊后热处理接头热影响区的晶粒呈等轴状,晶粒发生粗化现象,平均晶粒尺寸约为14.3 μm,且个别晶粒发生异常长大的现象;热机影响区的晶粒在机械搅拌及焊接热输入的影响下发生粗化以及扭曲变形,沿焊缝两侧的晶粒流动方向分布;焊核区晶粒出现了明显的异常长大现象,平均晶粒尺寸达到0.3 mm,且主要集中于上下轴肩与板材接触位置。由于第二相粒子的不均匀分布和不均匀溶解,基体中微粒较少的晶粒在失去第二相粒子钉扎作用下发生长大。晶粒异常长大的过程是不连续的,第二相粒子、织构、表面效应和溶质偏析导致局部边界的驱动力和流动性不同,多边界的大晶粒在稳定的小晶粒周围形成且不断吞噬周围小晶粒,是导致晶粒异常长大的重要因素^[14]。

2.2 对拉伸性能的影响

O态焊接接头由于母材处于全软状态而具有

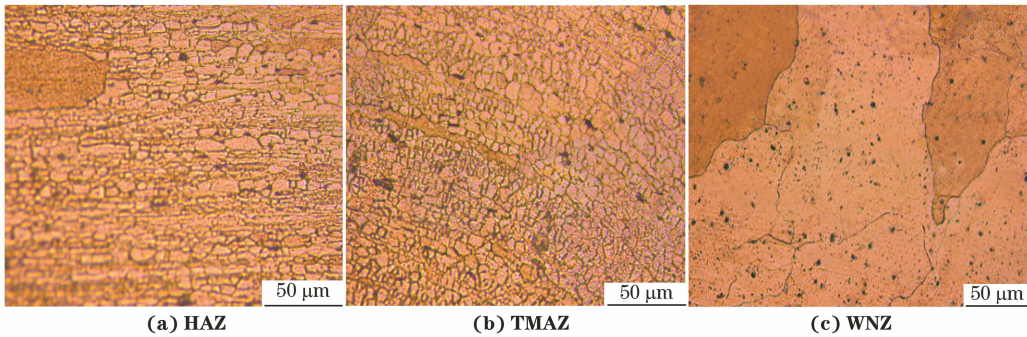


图 4 焊后热处理焊接接头不同区域的显微组织

Fig. 4 Microstructures of different zones in welded joint with post-weld heat treatment

良好的塑性,其平均抗拉强度为 189 MPa,平均屈服强度为 127.3 MPa,平均断后伸长率为 15%。由图 5 可知:焊后热处理接头,由于焊核区晶粒异常长大,不同焊接参数下接头的抗拉强度比 O 态焊接接头提高了 84%~110%,屈服强度提高了 100%~120.7%,断后伸长率降低,仅为 O 态焊接接头的 30%~60%;焊前热处理接头的抗拉强度比 O 态焊接接头提高了 94%~115.8%,屈服强度提高了

80.7%~120.7%,断后伸长率比 O 态焊接接头略有提高。焊前热处理接头的抗拉强度以及断后伸长率都高于焊后热处理接头,其中抗拉强度提高约 4.8%,断后伸长率提高了 50%,这是因为焊前热处理接头焊核区的晶粒细小,析出相分布均匀。但是焊前热处理接头的屈服强度低于焊后热处理接头的屈服强度,尤其是在焊接工艺 4# 下,降低了 16.7%。

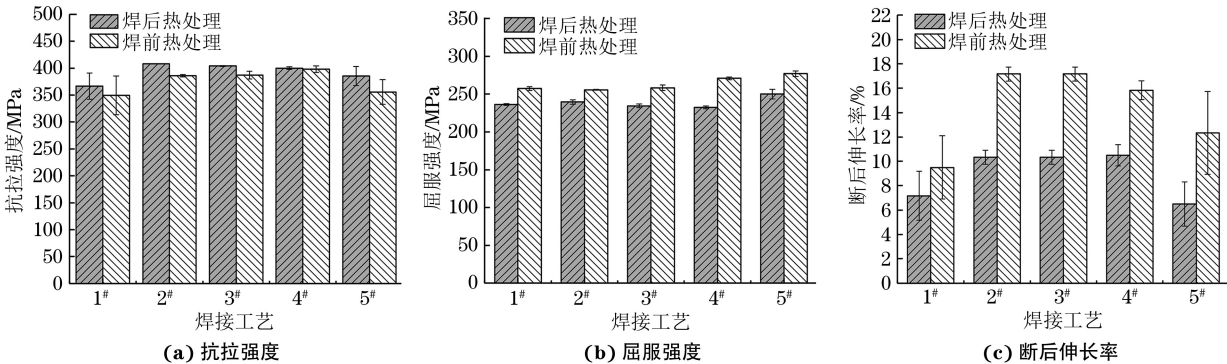


图 5 焊前和焊后热处理不同工艺制备得到焊接接头的拉伸性能

Fig.5 Tensile properties of welded joints prepared by different processes with pre- and post-weld heat treatment: (a) tensile strength; (b) yield strength and (c) percentage elongation after fracture

由图 6 可以看出:焊前热处理接头断裂处存在明显颈缩现象,为韧性断裂的明显特征;焊后热处理

接头的断裂位置均在焊核区与热机影响区,说明母材区的抗拉强度高于焊缝,同时断裂处未发现明显

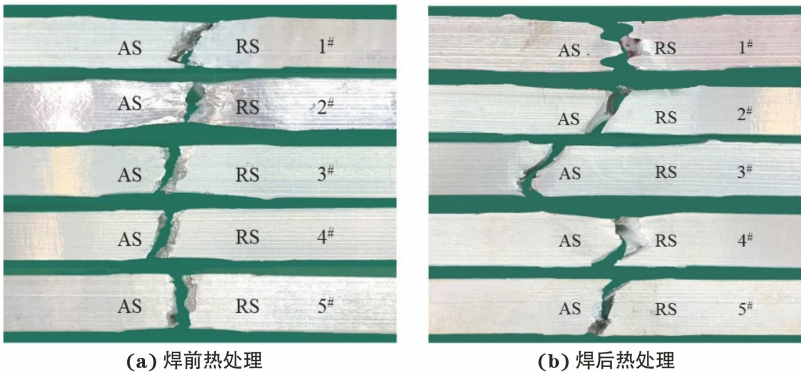


图 6 拉伸试验后焊前和焊后热处理不同工艺制备得到焊接接头的宏观断裂形貌

Fig.6 Macroscopic fracture morphology of weld joints prepared by different porcesses with pre- (a) and post-weld heat treatment (b)

颈缩现象,且断口与拉伸方向呈 45° ,是脆性断裂的表现特征。由图7可以看出:焊前热处理接头拉伸断口中存在大量韧窝,说明断裂形式为典型的韧性断裂;焊后热处理接头拉伸试样沿晶界断裂,发生典型的晶间断裂,说明断裂形式主要为脆性断裂。

2.3 对弯曲性能的影响

由图8可知,对焊前热处理接头进行三点弯曲时,仅有1#工艺下接头焊缝表面出现轻微裂纹,其余工艺下接头中均未出现宏观裂纹,具有良好的塑

性。在三点弯曲过程中,焊前热处理接头焊核区的晶粒细小且致密,原子间结合力较大,具有较大的裂纹起裂和扩展的阻力。在对焊后热处理接头进行三点弯曲时,焊缝金属发生明显变形,且沿着焊核区中线出现明显裂纹。焊核区中异常长大的晶粒影响其内部位错运动的距离和阻力,从而形成位错塞积而导致应力集中,而热机影响区中被拉长的较大尺寸晶粒对于裂纹扩展的阻力较小,裂纹扩展更加容易,从而降低了接头的弯曲强度和塑性变形能力^[15]。

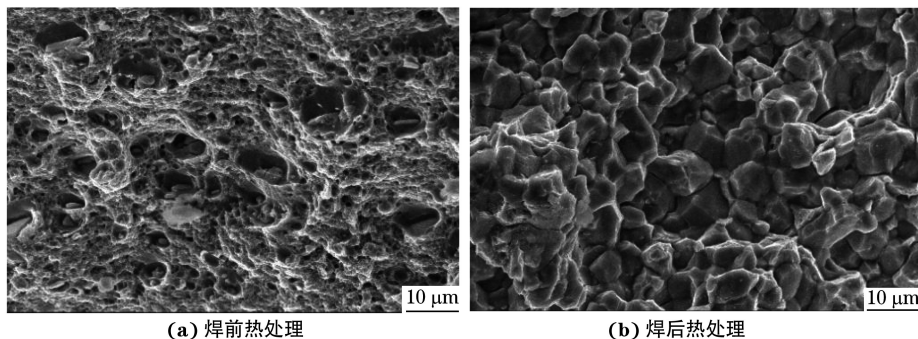


图7 焊前和焊后热处理2#工艺制备得到焊接接头拉伸断口微观形貌

Fig.7 Tensile fracture micromorphology of weld joints prepared by 2# process with pre- (a) and post-weld heat treatment (b)

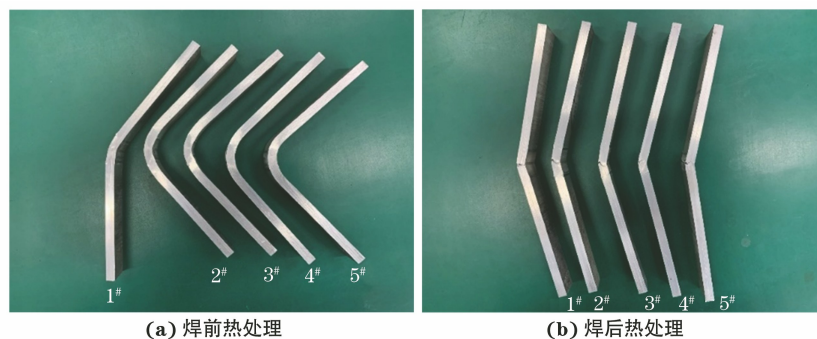


图8 焊前和焊后热处理不同工艺制备得到焊接接头三点弯曲试样的宏观形貌

Fig.8 Macromorphology of three-point bending samples of welded joints prepared by different processes with pre- (a) and post-weld heat treatment (b)

由图9可以看出,焊前热处理接头的平均最大弯曲角度为 76° ,而焊后热处理接头的平均最大弯

曲角度为 26.6° ,说明焊前热处理接头的塑性变形能力优于焊后热处理接头。

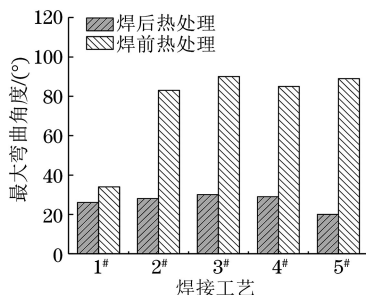


图9 焊前和焊后热处理不同工艺制备得到焊接接头的最大弯曲角度

Fig.9 Maximum bending angles of welded joints prepared by different processes with pre- and post-weld heat treatment

3 结论

(1) 经退火+固溶+人工时效的焊前热处理后,2195铝锂合金双面搅拌摩擦焊接头焊核区的晶粒呈等轴晶粒状,平均晶粒尺寸为 $9.2\mu\text{m}$ 。经相同工艺焊后热处理后焊接接头焊核区发生了异常晶粒长大现象,平均晶粒尺寸达到 0.3mm 。

(2) 焊前与焊后热处理均能有效提高焊接接头的抗拉强度,且焊前热处理接头的抗拉强度比焊后热处理接头高约4.8%。焊前热处理接头的断后伸

长率较焊态接头相比有所提高,而焊后热处理接头的断后伸长率大幅降低。焊前热处理接头具有良好的塑性,拉伸断裂方式为韧性断裂,而焊后热处理接头的断裂方式为脆性断裂。焊后热处理焊接接头三点弯曲的最大弯曲角度小于焊前热处理接头,塑性变形能力较差。

参考文献:

- [1] 李劲风,郑子樵,陈永来,等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. 宇航材料工艺,2012,42(1):13-19.
LI J F,ZHENG Z Q,CHEN Y L,et al. Al-Li alloys and their application in aerospace industry[J]. Aerospace Materials & Technology,2012,42(1):13-19.
- [2] 方文鹏,杜晓伟,潘庆军. 新技术在铝锂合金焊接中的应用[J]. 现代焊接,2008(2):17-19.
FANG W P,DU X W,PAN Q J. Application of new technology in aluminum-lithium alloy welding [J]. Modern Welding Technology,2008(2):17-19.
- [3] LEE H S,YOON J H,YOO J T,et al. Friction stir welding process of aluminum-lithium alloy 2195 [J]. Procedia Engineering,2016,149:62-66.
- [4] MISHRA R S,MA Z Y. Friction stir welding and processing [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports,2005,50 (1/2):1-78.
- [5] ZHANG D D,QU W Q,LV Q B,et al. Mechanical behaviour of Al-Li alloy joints by different friction stir welding parameters[J]. Advanced Materials Research,2014,1051:799-807.
- [6] WU Y,MAO H,YANG Q B,et al. Effect of welding parameters on defects and fracture behavior of friction stir welded 2195-T8 Al-Li alloy joints [J]. Materials Science Forum,2018,913:182-189.
- [7] 陈向荣,郑子樵,叶志豪,等. 2099 铝锂合金搅拌摩擦焊接头的微观组织[J]. 稀有金属材料与工程,2018,47(6):1786-1792.
CHEN X R,ZHENG Z Q,YE Z H,et al. Microstructure characterization of friction stir welded 2099 Al-Li alloy[J].

Rare Metal Materials and Engineering,2018,47(6):1786-1792.

- [8] HATAMLEH O. The effects of laser peening and shot peening on mechanical properties in friction stir welded 7075-T7351 aluminum [J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2008,17(5):688-694.
- [9] ZHANG J,FENG X S,GAO J S,et al. Effects of welding parameters and post-heat treatment on mechanical properties of friction stir welded AA2195-T8 Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology,2018,34(1):219-227.
- [10] GAO C,GAO R Q,MA Y. Microstructure and mechanical properties of friction spot welding aluminium-lithium 2A97 alloy[J]. Materials & Design,2015,83:719-727.
- [11] LIN Y,LU C G,WEI C Y,et al. Influences of friction stir welding and post-weld heat treatment on Al-Cu-Li alloy[J]. Advanced Engineering Materials,2018,20(2):1700652.
- [12] 戴明亮,万心勇,彭熠,等. 新型热处理工艺对搅拌摩擦焊接头性能的影响[J]. 西安交通大学学报,2017,51(8):136-141.
DAI M L,WAN X Y,PENG Y,et al. Effects of a new post-weld heat treatment process on the properties of friction stir welded joints[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2017,51(8):136-141.
- [13] CHEN K,GAN W,OKAMOTO K,et al. The mechanism of grain coarsening in friction-stir-welded AA5083 after heat treatment[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2011,42(2):488-507.
- [14] 刘大海,宗崇文,黎俊初,等. 热处理对 2A12 铝合金搅拌摩擦焊板件时效成形的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(6):71-77.
LIU D H,ZONG C W,LI J C,et al. Effects of heat treatment on creep age forming formability of friction stir welded 2A12 aluminum alloy sheet[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2015,36(6):71-77.
- [15] 刘国光,徐伟锋,姬浩,旋转速度对铝合金搅拌摩擦焊接头弯曲性能的影响[J]. 电焊机,2015,45(5):112-116.
LIU G G,XU W F,JI H. Influence of rotational speed on bending property of aluminum alloy friction stir welded joints [J]. Electric Welding Machine,2015,45(5):112-116.

(上接第 74 页)

- [15] 陈敏娟,陈浩,陆松. 锌及锌合金镀层盐雾试验腐蚀形态研究 [J]. 环境技术,2020,38(3):56-60.
CHEN M J,CHEN H,LU S. Study on corrosion morphology of zinc and zinc alloy coatings by salt spray test [J]. Environmental Technology,2020,38(3):56-60.

- [16] LANGER E W,ZUBIELEWICZ M,KUCZYŃSKA H,et al. Anticorrosive effectiveness of coatings with reduced content of Zn pigments in comparison with zinc-rich primers[J]. Corrosion Engineering Science and Technology,2019,54(7):627-635.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告