

薄壁铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能

Microstructure and Mechanical Property for Joint of Friction Stir Welded Thin Aluminum Alloy Sheet

北京航空制造工程研究所 张 磊

[摘要] 对2mm厚的LY12铝合金板进行了搅拌摩擦焊接,对接头的微观组织和力学性能进行了分析。结果表明:当搅拌头旋转速度1000r/min、焊接速度200r/min时,焊核区为细小均匀的等轴晶,晶粒大小在2~6 μm 之间;热机影响区晶粒沿流线方向被拉长,前进侧比后退侧晶粒变化明显。焊缝成形良好,接头抗拉强度为438.72MPa,为母材强度的96%;屈服强度为313.09MPa,为母材屈服强度的93.6%。接头断裂位置和显微硬度最低值均位于焊缝后退侧热机影响区和焊核区交界处。

关键词: 搅拌摩擦焊 LY12 铝合金 显微组织 力学性能

[ABSTRACT] LY12 aluminum alloy sheet with 2mm in thickness is friction stir welded and the microstructures and mechanical properties are studied. The results show that with the rotation speed at 1000r/min and the weld speed at 200r/min, fine uniform grains are formed in the weld nugget zone and the grain size is from 2 μm to 6 μm , the grains in the thermal-mechanical zone are elongated along the deformed lines, and the change of proceeding side is more obvious than that of the retreating side. The tensile strength can reach to 438.72MPa which is 96% of the base metals and the yield strength can reach to 313.09MPa which is 93.6% of the base metals. By the microstructure analysis, the micro-hardness measurement and the tensile test, it is found that the weak points of friction stir welded aluminum alloy occur in the edge between weld nugget zone and thermal-mechanical affect zone of the retreating side.

Keywords: Frictions stir welding LY12 aluminum alloy Microstructure Mechanical property

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是英国焊接研究所于1991年针对焊接性差的铝合金、镁合金等轻质有色金属开发的一种新型固相连接技术,具有焊接变形小、无裂纹、气孔、夹渣等优点^[1],使得以往通过熔焊方法无法实现的焊接材料得以实现连接,是继激光

焊后的又一革命性技术^[2]。LY12铝合金属于Al-Cu系的热处理可强化的铝合金,铜和镁是主要的合金元素,主要用于航空器蒙皮、隔框、翼肋、翼梁等,还用于建筑与交通运输工具的结构件^[3]。因此,研究LY12铝合金FSW焊接接头组织和性能可以更好地推动FSW技术在航空航天、轨道交通、建筑行业等国民经济领域的应用。

目前,对于搅拌摩擦焊焊接接头微观组织和力学性能的研究主要集中在焊接工艺参数对焊缝成型的影响,焊核区、热机影响区、热影响区微观组织晶粒大小的差异,厚板搅拌摩擦焊沿厚度方向晶粒大小的区别^[4-10]等方面。王希靖^[5]等研究了6mm厚的LY12铝合金在不同焊接参数下焊缝成型特点以及微观组织变化情况。刘孟^[7]等人对3mm厚LY12铝合金板组织性能进行了分析,发现焊接过程中焊缝材料被加热使得轧制母材中的冷作硬化效果消失,导致硬度明显降低。李炼^[8]等人研究了1mm厚的2024铝合金搅拌摩擦焊的组织性能,用电子背散射观察发现焊缝组织中存在二次晶粒,导致接头硬度和屈服强度的升高。Zahmatkesh B^[9]等人用光学显微镜和扫描电镜分析了4mm厚的2024铝合金显微组织,并分析了其显微硬度值和抗剪切强度。然而,针对2mm薄板LY12微观组织和力学性能的对应关系还不明确,焊缝各区域微观组织形成的深层次原因以及细微差别还有待研究,焊缝薄弱部位的位置还不太确定。本课题选取航空工业中常用的高强铝合金薄板LY12进行FSW试验,研究其焊后的微观组织和力学性能特征,为其作为构件材料在航空工业的应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及设备

采用规格为500mm \times 200mm \times 2mm的LY12铝合金轧制板材进行对接试验,所用铝合金在焊前经过固溶热处理并自然时效至基本稳定状态,其化学成分见表1。试验所用搅拌头材料为经过2次退火处理和1次淬火处理后的工具钢,轴肩直径为10mm,搅拌针为普通圆锥式搅拌针,长1.85mm,根部直径为3.2mm,端部直径为2.6mm,轴肩形貌为2条渐开线。搅拌头旋转速度为

表1 LY12-CZ铝合金化学成分 w/%

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Ni | Zn | Ti | 其他 | Al |
|------|------|---------|----------|---------|------|------|------|------|----|
| 0.50 | 0.50 | 3.8~4.9 | 0.30~0.9 | 1.2~1.8 | 0.10 | 0.30 | 0.15 | 0.10 | 余量 |

1000r/min,焊接速度为 200mm/min,主轴倾角为 2.5°,压入量 0.2mm。

1.2 试验方法及过程

焊前对试件打磨以去除毛刺和氧化皮,然后用酒精擦拭,将两块待焊板材刚性固定在钢垫板上,沿轧制方向进行焊接,焊后对焊缝进行 X 光无损探伤检测,沿垂直于焊接方向截取金相试样,进行粗磨、细磨、抛光,用 Keller's 试剂(盐酸 3mL、硝酸 20mL、氢氟酸 2mL、水 175mL)进行腐蚀,腐蚀时间为 10s,然后在 ZEISS Jenaphot 光学显微镜下观察焊缝横截面上的金相组织;根据 GB2651-89、GB2653-89 制取拉伸、弯曲试样,分别在 ZWICK100KN 电子万能材料试验机、Z100KN 电子万能试验机上进行拉伸、弯曲试验;根据 GB/T 4340.1-1999,采用 HXD-1000 维氏显微硬度仪在载荷 1.96N,加载时间 15s 的条件下对母材及焊缝不同区域处的显微硬度进行测试分析。

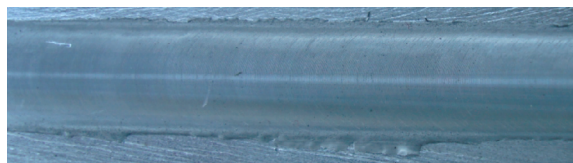
2 试验结果及讨论

2.1 焊缝成形

按照给定的工艺参数对试样进行焊接,焊缝成形照片及 X 光无损探伤照片如图 1 所示。可以看出,焊缝表面成形良好,有少量飞边出现,焊后 X 光检测结果显示焊缝中无沟槽或裂纹缺陷。



(a) 焊缝形貌



(b) X 光检测图片

图1 焊缝形貌及X光检测图片

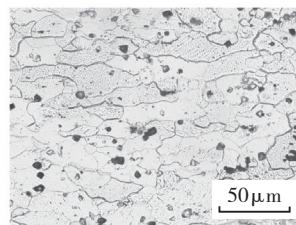
Fig.1 Surface appearance and X-ray radiograph of LY12-CZ aluminum alloy

2.2 显微组织

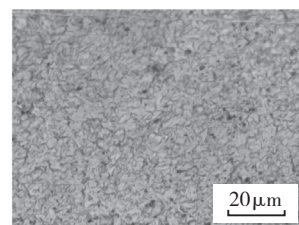
接头金相组织如图 2 所示,可以看出其接头横截面组织可分为焊核区(Weld Nugget Zone, WNZ)、热机影响区(Thermal Mechanical Affected Zone, TMAZ)、热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)以及母材区(Base Metal, BM)。其中,图 2 (b)为母材区放大组织,可以看出,



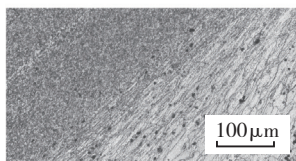
(a) 宏观全貌



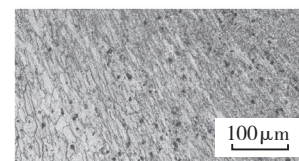
(b) 母材区



(c) 焊核区金相组织



(d) 前进侧热机影响区



(e) 后退侧热机影响区

图2 焊接接头宏观形貌及金相组织

Fig.2 Macro-morphology and cross-section microstructure of welded joint

母材区为板材状轧制组织,沿轧制方向晶粒大小约为 50~100 μm。

图 2 (c)为焊核区金相组织放大图,焊核区宏观形貌呈“碗”状,内部有几条弯曲的白色条带物质,根据相关文献[6]可知该白色条带为纯铝。可以看出,焊核区晶粒细小均匀,晶粒大小约为 2~6 μm,这主要是由于焊核区在搅拌头强烈的搅拌作用和剧烈摩擦的作用下,温度较高、应变速率较大,焊缝金属在机械变形作用下和摩擦热升温的双重作用下,组织发生动态再结晶,新形成的等轴晶逐步取代了母材中的板条状组织。

焊核区晶粒再结晶后晶粒尺寸符合约翰逊-梅尔方程:

$$d = C \times \left(\frac{I}{\mu}\right)^{-1/4}$$

其中, d 为再结晶后的晶粒尺寸, I 为形核率, μ 为长大速度, C 为常数。由于 FSW 过程中轴肩和搅拌针对焊缝金属进行了充分的机械搅拌作用,焊接金属的变形程度很大,驱动形核与长大的储存能不断增加,形核率 I 增加大于长大速度 μ ,同时由于焊核区晶粒动态再结晶呈现反复形核、有限长大的特点,因此晶粒组织得到细化。由于晶粒发生了细化,显微组织得到改善,消除了晶粒的各向异性,提高了组织的致密性。

图 2 (d)、(e)分别为前进侧和后退侧热机影响区组织局部放大图,热机影响区接近焊核区,其组织仍然会受到搅拌针旋转搅拌作用的影响。前进侧热机影响区和焊核区有明显的界面,靠近焊核区部位流线和带状组织非常明显;后退侧热机影响区和焊核区的分界面比

较模糊,这可能与后退侧所受剪切作用不如前进侧剧烈有关。热机影响区组织晶粒不再是等轴晶粒,而是沿界面方向被拉长,晶粒发生明显流线状变形。从图中可以看出,前进侧热机影响区靠近焊核区一侧由于受到搅拌头机械搅拌作用,晶粒显得细小;后退侧由于机械搅拌作用不太显著,晶粒变化不如前进侧剧烈。

2.3 硬度分布

接头不同区域的显微组织差异往往会通过不同区域的硬度差异表现出来。图3为焊缝横截面上距焊缝上表面0.8mm位置处显微硬度分布趋势。可以看出,前进侧和后退侧显微硬度沿焊缝中心分布不对称。显微硬度分布呈现出两侧母材区硬度值高,中间焊核区、热影响区、热机影响区显微硬度值较低的趋势。硬度最低值出现在后退侧热影响区和热机影响区部位,最低值为118.78HV。接头硬度分布的变化可能与沉淀相的溶解析出以及晶粒尺寸有关^[11-12]。LY12铝合金中主要强化相为Al₂CuMg(通常称为S相)和Al₂Mg(通常称为θ相),母材是经过固溶及时效处理后的板材,内部弥散分布着细小的S相和θ相颗粒,母材得到强化硬度升高。在热力影响区、热影响区和焊核区,强化相由于受到焊接热循环的作用发生溶解(根据文献[13],这2种强化相粒子熔化温度在280℃左右),导致这些区域硬度下降。同时,焊核区材料发生动态再结晶,变形储能能逐渐释放,内部的位错密度显著下降,动态再结晶的软化作用逐渐加强,也有可能是导致焊核区硬度下降的原因之一。

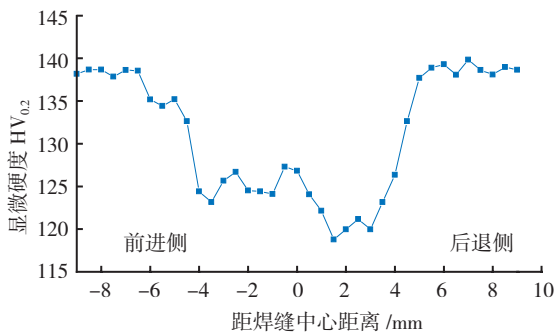


图3 LY12铝合金FSW接头硬度分布曲线
Fig.3 Micro-hardness distribution curve of welded joint

2.4 拉伸力学性能

表2为接头拉伸力学性能试验数据,可以看出,σ_b的平均值为438.72MPa,为母材抗拉强度σ_{bm}(456.57MPa)的96%;σ_{0.2}的平均值为313.09MPa,为母材屈服强度σ_{p0.2}(334.43MPa)的93.6%。平均延伸率δ达9.28%。如图4所示,接头断裂大部分与拉伸轴成

表2 LY12焊接接头拉伸力学性能

| 试样编号 | 抗拉强度 σ _b /MPa | (σ _b /σ _{bm}) /% | 屈服强度 σ _{0.2} /MPa | (σ _{0.2} /σ _{p0.2}) /% | 平均延伸率 δ/% |
|------|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---|-----------|
| 1-1 | 432.58 | 94.74 | 312.75 | 93.51 | 10.75 |
| 1-2 | 426.42 | 93.39 | 300.85 | 89.95 | 8.82 |
| 1-3 | 442.5 | 96.91 | 312.39 | 93.4 | 8.65 |
| 1-4 | 446.25 | 97.73 | 319.43 | 95.6 | 9.52 |
| 1-5 | 445.83 | 97.64 | 320.04 | 95.69 | 8.65 |
| 平均值 | 438.72 | 96 | 313.09 | 93.6 | 9.28 |
| 母材 | 456.57 | 100 | 334.43 | 100 | 21.29 |

45° 剪切断裂。5件试样中,有4件试样断裂位置发生在焊缝后退侧热机影响区和焊核区的交界处,仅有1件断裂在前进侧热机影响区和焊核区的交界处,可以认为焊缝薄弱位置位于焊缝后退侧热机影响区和焊核区的交界处。

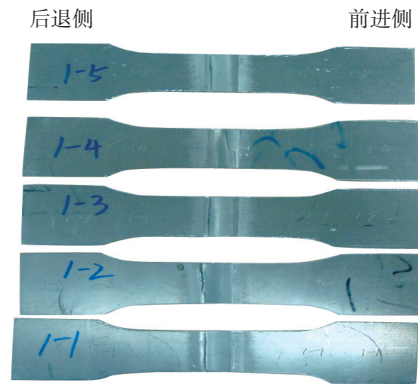


图4 试验用拉伸试样
Fig.4 Configuration of tensile specimens of LY12-CZ aluminum alloy

薄弱位置位于热机影响区和焊核区交界处的原因有:

(1)在焊接过程进行中,焊核区和热机影响区附近经历了较高温度的热循环,致使两区域中强化相粒子(S相和θ相)发生了溶解,造成了强度、硬度的下降。

(2)金相组织观察发现,焊核区晶粒细小,根据霍尔-佩奇方程 $\sigma = \sigma_i + Kd^{-1/2}$ (σ_i和K是和材料有关的常数)可知,晶粒尺寸越小,材料强度越大,这在某种程度上造成了焊核区力学性能的提高。

(3)前进侧在焊接过程中受到机械作用力比后退侧更剧烈,导致前进侧热机影响区流线带状组织比后退侧明显,强烈的塑性加工和应变使得前进侧热机影响区晶粒在一定程度上比后退侧晶粒小,力学性能得到提高。以上三者的综合作用使得后退侧热机影响区和焊核区交界位置处力学性能最差,成为焊缝薄弱区域。

3 结论

(1) 在焊接速度 200mm/min、旋转速度 1000r/min 的条件下,成功实现了 2mm 厚 LY12 铝合金的 FSW 焊接,接头成形良好,经 X 光无损探伤检测无缺陷产生。接头抗拉强度达到 438.72MPa,为母材抗拉强度的 96%;屈服强度达到 313.09MPa,为母材屈服强度的 93.6%。力学性能良好。

(2) FSW 接头焊核区发生动态再结晶,组织细小致密;热机影响区晶粒沿流线方向被拉长,前进侧流线组织比后退侧流线组织明显;热影响区由于焊接热循环作用晶粒发生聚集长大。

(3) FSW 接头母材区显微硬度值比焊缝区显微硬度值大。硬度最低值位于后退侧热机影响区附近。

参考文献

- [1] Chalmers R E. The friction welding advantage. *Manufacturing Engineering*, 2001, 126 (5): 64-68.
- [2] Thomas W M, Nicholas E D. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials&Design*, 1997, 16 (4): 269-273.
- [3] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册. 长沙:中南大学出版社, 2001.
- [4] Sutton M A, Reynolds A P, Wang D Q, et al. A study of residual stresses and microstructure in 2024-T3 aluminum friction stir butt welds. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2002 (14): 215-219.
- [5] 王希靖,李常锋,金玉花,等. LY12FSW 焊缝成型及接头微观组织分析. *焊接*, 2006, 35 (23): 24.
- [6] 严铿,叶欣,郭晓娟,等. 2024-T3 薄板 FSW 搭接界面成型及接头性能. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 23 (3): 206-208.
- [7] 刘孟,刘书华,王德庆,等. LY12 铝合金搅拌摩擦焊工艺研究. *大连交通大学学报*, 2007, 28 (1): 74-77.
- [8] Li Lian, Tong Jianhua, WAN Farong, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded thin sheets of 2024-T4 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006 (16): 1 256-1 260.
- [9] Zahmatkesh B, Enayati M H, Karimzadeh F. Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024 alloy. *Materials Design*, 2010 (31): 4 891-4 896.
- [10] Shusheng Di, Xinqi Yang, Guohong Luan, et al. Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials. *Materials Science and Engineering*. 2006 (A 435-436): 389-395.
- [11] Bussu G, Irving P E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351aluminium joints. *International Journal of Fatigue*, 2003 (25): 77-88.
- [12] Kang Ju, Fu Ruidong, Luan Guohong. Insitu investigation on the pitting corrosion behavior of friction stir welded joint of AA2024-T3 aluminium alloy. *Corrosion Science*, 2010 (52): 620-626.
- [13] Genevois C, Deschamps A, Denquin A, et al. Quantitative

investigation of precipitation and mechanical behavior for AA2024 friction stir welds. *Acta Materialia*, 2005 (53): 2 447-2 458. (责编 小颖)

(上接第 87 页)

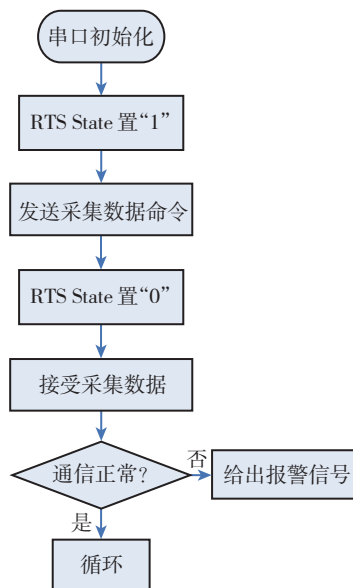


图6 通信部分流程图

Fig.6 Flow chart of COM communication

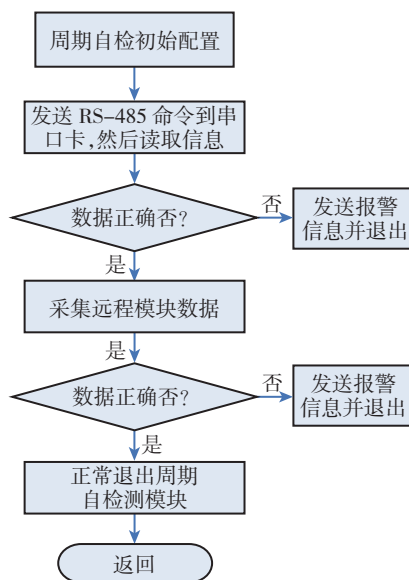


图7 自检软件流程图

Fig.7 Flow chart of software self-detection

参考文献

- [1] 梁越,李刚,王晓陵. 基于 PC/104 的多串口通讯的设计. *应用科技*, 2004 (3): 28-29.
- [2] 蔡锦福. 运算放大器原理及其应用. 北京:北京科学出版社, 2005.
- [3] Robert H. Bishop. Lab VIEW 6i 实用教程. 北京:电子工业出版社, 2003. (责编 小颖)