

doi:10.3969/j.issn.1007-7162.2013.03.023

5083 铝合金搅拌摩擦焊焊核区非均匀性组织分析

梁春朗,袁鸽成,吴红辉,吴 亚

(广东工业大学 材料与能源学院,广东 广州 510006)

摘要: 利用小型搅拌摩擦焊机焊接 5083 铝合金板材,借助电子背散射衍射技术和取向成像分析软件对焊缝焊核区的焊核前进侧、焊核中心区和焊核后退侧的晶粒形貌和取向差角度进行了对比性研究. 结果表明:经过搅拌摩擦焊接后,焊核区发生动态再结晶,晶粒由原始带状转变为等轴状,其大角度晶界含量相比于母材有明显增加,但不同部位的晶粒尺寸和大角度晶界比例均不同,焊核前进侧、焊核中心区和焊核后退侧的平均晶粒尺寸分别为 17.0、15.8 和 13.5 μm ,大角度晶界比例分别为 76.4%、68.8% 和 73.2%.

关键词: 搅拌摩擦焊;焊核前进侧;焊核中心区;焊核后退侧;微观组织

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2013)03-0118-04

Research on Heterogeneity Microstructure of 5083 Aluminum in Nugget Zones after Friction Stir Welding

Liang Chun-lang, Yuan Ge-cheng, Wu Hong-hui, Wu Ya

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The 5083-H321 aluminum magnesium alloy plates were welded on a minitype friction stir welding machine. The microstructure of friction stir welding (FSW) in each nugget zone was studied via the grain morphology and misorientation distribution of nugget advancing side, nugget median zone and nugget retreating side. The results show that there are small equiaxial grains into which lath-shaped grains turn in nugget zones after friction stir welding. However, there are differences in the grain size between the nugget advancing side, nugget median zone and nugget retreating side, and the average grain sides are 17, 15.8 and 13.5 μm , respectively. Compared with the base metal, the high angle grain boundaries (HAGB) fraction in nugget zones increase. Meanwhile the content is also different in the three zones, and they are 76.4%, 68.8% and 73.2%, respectively.

Key words: friction stir welding; nugget advancing side; nugget median zone; nugget retreating side; microstructure

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)作为一种先进的固相连接技术,其以高效、环保以及焊接性能优异等优点而被广泛地应用于金属的焊接,尤其是铝合金的焊接^[1-2]. 在搅拌摩擦焊接过程中,焊缝材料受到锻造、挤压和剪切等复杂变形力的作用,以及受强烈的摩擦热和变形热的影响,其组织发生复杂变化^[3-5]. 根据焊缝材料受到的热-力因素影响的

不同,可将焊缝分为热影响区、热力影响区和焊核区^[6]. 迄今,有关铝合金搅拌摩擦焊焊缝组织的研究报道不少^[7-9],但主要是研究上述3个区域的组织和母材组织的差异及它们的变化特点,而较少地研究焊核区内组织的差异. 本文选取广泛应用于交通运输和航天航空领域的 5083 铝合金板材作为研究对象^[10-11],利用电子背散射衍射(Electron Backscatter

收稿日期: 2012-09-05

基金项目: 广东省重大科技专项资助项目(2008A090300004);广东省教育厅 211 工程学科建设资助项目(412110903)

作者简介: 梁春朗(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为先进轻金属材料.

通讯作者: 袁鸽成,男,教授,博士,主要研究方向为先进轻金属及微粉材料, E-mail: gchuan@gdut.edu.cn.

Diffraction, EBSD) 技术和取向成像分析 (Orientation Imaging Microscopy, OIM) 软件, 对比研究了焊核前进侧 (nugget advancing side, NAS)、焊核中心区 (nugget median zone, NMZ) 和焊核后退侧 (nugget retreating side, NRS) 的组织特点, 为了解或预测该合金搅拌摩擦焊焊缝微观组织提供依据。

1 实验过程

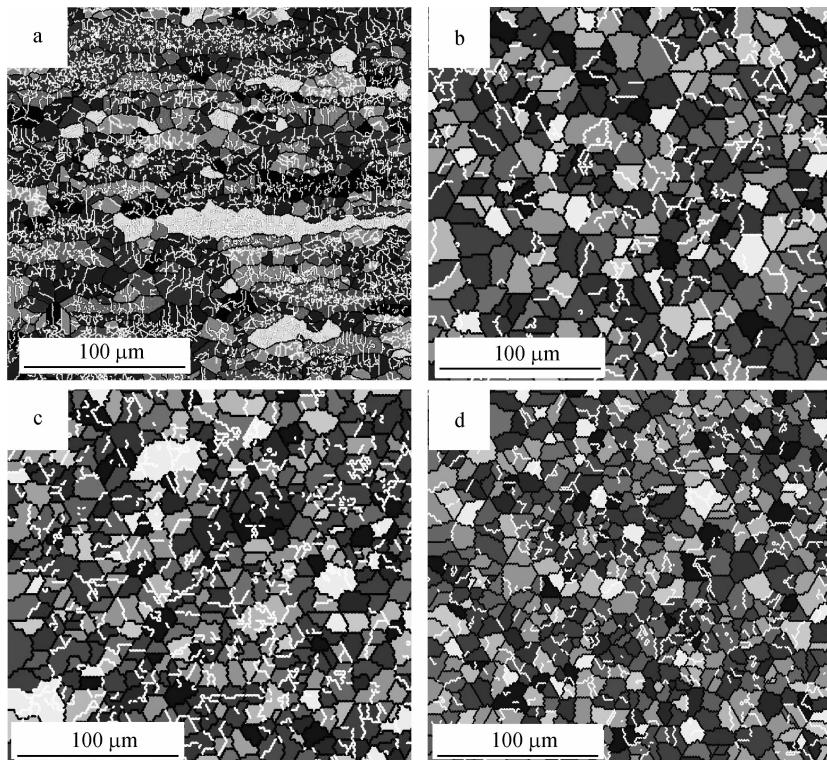
选用 5083 铝合金板材作为 FSW 焊接板, 板材长、宽、高分别为 250、80、4 mm。在小型搅拌摩擦焊机上进行焊接试验, 焊接方向与板材轧制方向垂直。搅拌工具的轴肩设计为光滑凹槽形状, 直径为 22 mm。搅拌针则采用带有螺纹的圆台形状, 长为 3.4 mm, 近轴肩处的直径为 7 mm, 另一端直径为 6 mm。焊接速度和转速分别为 80 mm/min 和 1 000 r/min, 倾角和下压量分别为 3° 和 0.5 mm。焊后, 采用线切割方法分别切取母材轧板纵截面和焊缝横截面, 制备成母材和焊核前进侧、焊核中心区和焊核后退侧的电子背散射衍射试样。试样经机械磨平、机械抛光后采用高氯酸乙醇溶液进行电解抛光, 电解抛光电压为 22 V。将电解抛光后的 EBSD 试样在带有 EDAX 探头的 FEI-Sirion 200 场发射扫描电子显微

镜上进行 EBSD 测量, 并利用取向成像分析软件分析 EBSD 数据, 获取晶粒取向差数据和绘制晶粒形貌图。本文定义当两相邻晶粒的取向差处于 2° ~ 15° 时为小角度晶界 (low angle grain boundaries, LAGB), 大于 15° 则是大角度晶界 (high angle grain boundaries, HAGB)。

2 实验结果与分析

2.1 晶粒形貌的差异

利用取向成像分析软件分析 EBSD 数据, 绘制了母材 (base metal, BM) 和焊核前进侧、焊核中心区以及焊核后退侧的 EBSD 晶粒形貌和大小角度晶界分布图, 如图 1 所示。图中的黑色线条表示大角度晶界, 白色线则表示小角度晶界。母材大部分晶粒沿着轧制方向呈带状分布, 晶粒长而窄, 同时存在少数小晶粒, 在焊接过程中不受热-力作用的影响。焊核区晶粒为等轴状, 晶粒尺寸比母材带状晶粒小。对比图 1 (b)、(c) 和 (d) 发现, 焊核区不同部位的晶粒尺寸不同, 焊核前进侧大部分晶粒比较大, 而焊核后退侧的晶粒相对较小。利用 OIM 软件计算的焊核前进侧、焊核中心区和焊核后退侧的平均晶粒尺寸分别为 17.0、15.8 和 13.5 μm 。



(a) 母材; (b) 焊核前进侧; (c) 焊核中心区; (d) 焊核后退侧

图 1 晶粒形貌及大小角度晶界分布图

Fig. 1 EBSD images of grain morphology and the distribution of LAGB/HAGB

在变形过程中,温度是影响晶粒尺寸的主要因素:温度越高,晶粒长得越大.在搅拌摩擦焊接过程中,热量来源于搅拌工具与板材摩擦产生的摩擦热和材料变形产生的变形热^[2,6].由于搅拌工具轴肩和搅拌针的共同作用,焊核区材料受到高温和大变形力的作用,发生剧烈和复杂的变形,发生动态再结晶,生成细小等轴晶粒^[6].动态再结晶晶粒在高温的影响下继续生长,由于焊核区温度分布不均匀导致了其晶粒尺寸的不均匀.焊核前进侧的晶粒尺寸比焊核后退侧大,说明5083铝合金搅拌摩擦焊焊缝焊核前进侧的温度比焊核后退侧高,而焊核中心区则位于两者之间,温度居中,因而其晶粒尺寸也处于中间位置.该结果与目前的温度分布研究结果^[12-14]相吻合:焊缝前进侧的材料流动与焊接方向相反,材料与工具间的相对摩擦速率大,产生的摩擦热多,而后退侧则恰好相反,因此前进侧的温度比后退侧的温度高.

2.2 晶体取向差的差异

图2是母材和焊核区3个不同部位的晶体取向差百分含量变化的曲线图,显示了母材和焊核前进侧、焊核中心区以及焊核后退侧的晶粒取向差角度的变化规律.相比于母材,焊核区的小角度晶界比例减少,而在 $15^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 范围内,焊核区各部分的大角度晶界比例均比母材高,焊核区的大角度晶界比例约为73%,而母材仅为34.8%,如图3所示,表明经过搅拌摩擦焊接后,焊核区的大角度晶界含量明显提高.母材和焊核区3个区域的大、小角度晶界分布如图1所示,母材带状晶粒内部出现较多的小角度晶界,焊核区大多数等轴晶粒内部也出现小角度晶界,但焊核区的小角度晶界比例明显减少.对比焊核区3部分的晶体取向差变化曲线发现:随着取向差角度的增加,各个部分的取向差角度百分含量先急剧减少然后缓慢增加,在 45° 左右达到峰值然后又

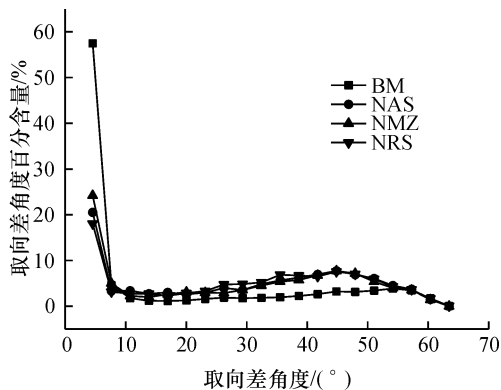


图2 晶粒取向差角度的变化曲线

Fig.2 The distribution of misorientation angle

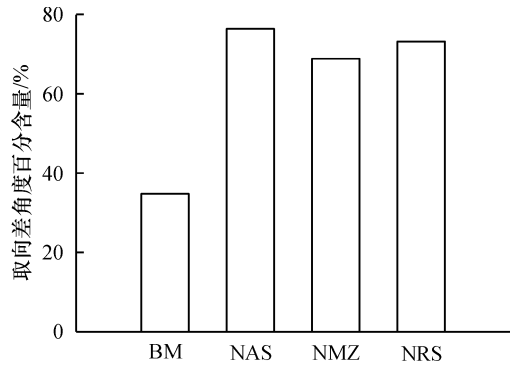


图3 大角度晶界比例的棒状图

Fig.3 The column images of HAGB

下降,最大的取向差角为 63.5° .通过OIM软件计算发现,焊核区不同部位的大角度晶界含量略有不同,焊核前进侧、焊核中心区和焊核后退侧的大角度晶界比例分别为76.4%、68.8%和73.2%.

动态再结晶是一个位错消耗的过程.在搅拌摩擦焊接过程中,焊核区发生了动态再结晶,晶粒内部的部分位错和亚结构消亡,小角度晶界比例明显减少,大角度晶界百分含量提高.但是当搅拌针移动到下一个焊接位置时,该位置发生复杂变形的材料还会对相邻的、已焊接的部位的材料产生影响,动态再结晶产生的等轴晶粒内部位错增殖,造成焊核区仍存在部分小角度晶界.而焊核中心区是搅拌摩擦焊缝变形最为剧烈的区域^[6],位错增殖多,是焊核区大角度晶界含量最低的区域.同时,温度也会影响大角度晶界的含量:温度越高,晶界移动,晶内位错、亚结构则被消耗得越多,大角度晶界比例增加.焊核区各部位大角度晶界的比例不同说明了其温度不均匀,焊核前进侧大角度晶界的含量比焊核后退侧高的现象表明前进侧温度比后退侧温度高,与2.1节所表明的观点相吻合.Devinder Yadav等^[15]研究商业纯铝搅拌摩擦加工发现焊核区大角度晶界比例为71.1%,焊核前进侧的大角度晶界含量最高,焊核后退侧的次之,焊核中心区的最低,这与本文的研究结果相似.部分研究结果^[16-21]表明合金成分和工艺参数均对大角度晶界含量有影响.

3 结论

(1) 5083铝合金板材经过搅拌摩擦焊接后,焊核区形成明显的等轴晶粒,但该区不同部位的晶粒尺寸不均匀,焊核前进侧、焊核中心区和焊核后退侧的平均晶粒尺寸分别为 17.0 、 15.8 和 $13.5 \mu\text{m}$.

(2) 相对于母材,焊核区大角度晶界的百分含量明显增高,但区内不同部位的大角度晶界含量

不同,焊核前进侧、焊核中心区和焊核后退侧的大角度晶界比例分别为 76.4%、68.8% 和 73.2%。

(3) 在搅拌摩擦焊接过程中,金属高温变形所引起的动态再结晶是焊核区形成等轴晶粒的根本原因,而焊核区内金属复杂的变形流动导致的温度分布不均都是引起上述组织不均的重要原因。

参考文献:

- [1] Mishra R S. Preface to the Viewpoint Set on friction stir processing[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5): 325-326.
- [2] 史耀武,唐伟. 搅拌摩擦焊的原理与应用[J]. 电焊机, 2000,30(1): 6-9.
Shi Yao-wu, Tang Wei. The principle and application of the friction stir welding[J]. Electric Welding Machine, 2000,30(1): 6-9.
- [3] Nandan R, DebRoy T, H. K. D. H. Bhadeshia. Recent advances in friction-stir welding-Process, weldment structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(6): 980-1023.
- [4] Gemme F, Verreman Y, Dubourg L, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA7075-T6 friction stir welded joints[J]. Fracture of Engineering Materials and Structures, 2011,34(11): 877-886.
- [5] Dehghani K, Chabok A. Dependence of zener parameter on the nanograins formed during friction stir processing of interstitial free steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13-14): 4325-4330.
- [6] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50(1-2): 1-78.
- [7] 姜玉恒,刘合金,周卫涛. 7050 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织及力学性能分析[J]. 电焊机, 2012,42(7): 86-89.
Jiang Yu-heng, Liu He-jin, Zhou Wei-tao. Microstructure and mechanical properties analysis of welding joint 7050 Aluminum alloy in friction stir welding[J]. Electric Welding Machine, 2012,42(7): 86-89.
- [8] 董鹏,孙大千,李洪梅. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能特征[J]. 材料工程, 2012(4): 27-31.
Dong Peng, Sun Da-qian, Li Hong-mei, et al. Microstructural and mechanical characteristics of friction stir welded 6005A-T6 aluminium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(4): 27-31.
- [9] Simar A, Brechet Y, de Meester B, et al. Microstructure, local and global mechanical properties of friction stir welds in aluminium alloy 6005A-T6[J]. Materials Science and Engineering A, 2008,486(1-2): 85-95.
- [10] 唐明君,吉泽升,吕新宇. 5XXX 系铝合金的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2004,327(7):1-7.
Tang Ming-jun, Ji Ze-sheng, Lü Xin-yu. The research progress of 5XXX aluminium alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2004,327(7): 1-7.
- [11] 梁岩,王国军. 舰船用 Al-Mg 系铝合金[J]. 黑龙江冶金, 2007,7(3): 3-6.
Liang Yan, Wang Guo-jun. Al-Mg aluminum alloy of ship[J]. Heilongjiang Yejin, 2007,7(3): 3-6.
- [12] Simar A, Brechet Y, de Meester B, et al. Integrated modeling of friction stir welding of 6xxx series Al alloys: Process, microstructure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2012, 57(1): 95-183.
- [13] Cho J H, Boyce D E, Dawson P R. Modeling strain hardening and texture evolution in friction stir welding of stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2005,398(1-2): 146-163.
- [14] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍. 铝合金薄板搅拌摩擦焊接残余变形的数值分析[J]. 金属学报, 2009,45(2): 183-188.
Yan Dong-yang, Shi Qing-yu, Wu Ai-ping. Numerical analysis on the residual distortion of AL alloy sheet after friction stir welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(2): 183-188.
- [15] Yadav D, Bauri R. Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminium[J]. Materials Science and Engineering A, 2012,539: 85-92.
- [16] Suhuddin U F H R, Mironov S, Sato Y S, et al. Grain structure and texture evolution during friction stir welding of thin 6016 aluminum alloy sheets[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(7-8): 1962-1969.
- [17] El-Rayesa M M, El-Danaf E A. The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012,212(5): 1157-1168.
- [18] Feng Xiu-li, Liu Hui-jie, Babu S S. Effect of grain size refinement and precipitation reactions on strengthening in friction stir processed Al-Cu alloys[J]. Scripta Materialia, 2011,65(12): 1057-1060.
- [19] Cho H H, Han H N, Hong S T, et al. Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(6): 2889-2894.
- [20] Ma Z Y, Liu F C, Mishra R S. Superplastic deformation mechanism of an ultrafine-grained aluminum alloy produced by friction stir processing[J]. Acta Materialia, 2010,58(14): 4693-4704.
- [21] Kumar N, Mishra R S, Huskamp C S, et al. Critical grain size for change in deformation behavior in ultrafine grained Al-Mg-Sc alloy[J]. Scripta Materialia, 2011,64(6): 576-579.