

镁合金 AZ80A 搅拌摩擦焊焊核区组织金属学演变

Microstructural Evolution of Nugget Zone in Magnesium Alloy AZ80A Friction Stir Welds

徐卫平, 邢 丽, 柯黎明

(南昌航空大学, 南昌 330034)

XU Wei-ping, XING Li, KE Li-ming

(Nanchang University of Aeronautics, Nanchang 330034, China)

摘要: 采用取像显微分析技术分析了变形镁合金 AZ80A 搅拌摩擦焊焊核区塑性条带间的金属学演变过程。结果表明: 搅拌摩擦焊搭接接头焊核区晶粒尺寸、极图、反极图以及晶粒的取向差均呈周期性的变化, 组织结构呈条带分布, 基体内部经历了周期性的动态再结晶过程。

关键词: 极图; 反极图; 织构; 镁合金; 搅拌摩擦焊

中图分类号: TG146.2⁺2; TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)05-0053-04

Abstract: The effect of the observed microstructural evolutions of the nugget zone in magnesium alloy AZ80A friction stir welds(FSW) was discussed by using the new technique of orientation imaging microscopy(OIM). The results showed that there were the cyclical natures of the grains size, pole figures, inverse pole figures and the distribution of misorientation. It was concluded that recrystallized grains in the nugget zone formed by a continuous dynamic recrystallized mechanism.

Key words: pole figure; inverse pole figure; texture; magnesium alloy; FSW

镁合金密度小, 有很高的比强度和比刚度, 具有良好的阻尼性能、切削加工性能、导电性、导热性、磁屏蔽性等, 在航空、航天、汽车、船舶等领域具有广阔的前景, 被誉为 21 世纪金属^[1]。但是, 镁合金焊接性能差, 传统的焊接方法在焊接镁合金时效果很不理想, 常常要通过多种方法补焊, 有的甚至根本不能焊接^[2,3], 这样无疑限制了镁合金的广泛应用。搅拌摩擦焊是 20 世纪 90 年代发展起来的一种固态焊接方法, 其工作过程如图 1 所示, 焊接过程中焊缝金属在搅拌头与待焊金属的摩擦作用下处于热塑性状态, 并在搅拌头的压力作用下被压合成一个整体。由于焊接过程中金属不发生熔化, 因此不会出现熔化焊时焊缝中出现的各种缺陷, 是一种适用于活性金属连接的有效方法。

搅拌摩擦焊自发明以来, 已迅速成为一种重要的工业连接工艺, 其优于熔焊的特点已得到许多研究者的认同, 而且搅拌摩擦焊还特别适合于无法用传统焊接方法焊接的铝合金的连接^[2,3]。研究者对铝合金搅拌摩擦焊的研究发现: 在焊核区局部部位存在明显不同的织构^[4], 且晶粒尺寸是细小的等轴晶粒; 在搅拌头周围存在动态变形区域, 且存在两个平行于板具有较强的织构倾向^[5], 但与母材织构不同^[6,7]。到目前为止,

相关的研究报道还较少。本工作的主要目的是分析变形镁合金搅拌摩擦焊搭接接头焊核区金属学演变过程。

1 实验方法

选用板厚为 3mm 的 AZ80A 变形镁合金作为待连结材料, 试板尺寸为 300mm × 300mm, 以转速 1500r/min, 焊接速度 118mm/min 的规范进行搅拌摩擦焊搭接实验。焊后, 截取焊缝横截面一段, 制成金相试样, 用 LEICA 显微图像分析仪观察和分析焊缝组织。

为研究镁合金 AZ80A 搅拌摩擦焊搭接接头在焊接过程中材料的演变过程, 本实验用高分辨率的 Leica 背散射电子衍射分析仪探头(Electron Back Scattered Diffraction, 简称 EBSD)并结合 Philips X130 SEM 扫描电镜, 即采用取像显微分析技术(Orientation Imaging Microscopy, 简称 OIM), 测试焊缝的极图、晶粒取向、取向差分布图以及测试观察部位的晶粒尺寸。EBSD 试样应先电解抛光, 电解抛光液为 25% 高氯酸 + 75% 无水乙醇, 电压 30V, 抛光时间 40s; EBSD 测量时的电压为 20kV, 步长为 0.623μm, 布拉格偏差参量为 2.5, 每一测量区域为 14336 × 14336 个像素点, 相

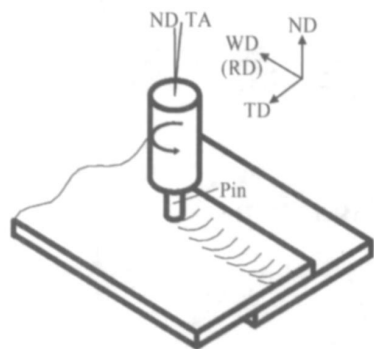


图 1 搅拌摩擦焊接示意图

Fig. 1 Diagram of a lap joint in FSW

当于 5.827mm^2 的实际尺寸。

2 实验结果及分析

2.1 焊核区形貌和晶粒尺寸

图 2 为 AZ80A 镁合金搅拌摩擦焊接接头 EBSD 测试部位。其中图 2a 为接头焊核区截面形貌, 可见焊缝金属上有清晰的塑性流动的痕迹, 塑性流动的痕迹是以搅拌头的探针为中心像“木纹”状一层层地向下、向外扩散的。图中标的 RD, ND, TD, WD 和 TA 分别表示轧制方向(Rolling Direction, 简称 RD), 轧制平板法向(Normal Direction, 简称 ND), 横向(Transverse Direction, 简称 TD)的空间取向分布和焊接方向(Welding Direction, 简称 WD)以及倾斜角(Tilt Angle, 简称 TA); 在本实验中, 轧制方向与焊接方向平行, 板法向与搅拌头插入工件的方向平行。

图 2b 为图 2a 中方框的放大图, 1- 6 点为实验中选取的测试观察部位; 可见观察部位呈条带分布形貌。1- 6 点测试部位处于相邻的不同条带。

表 1 为用 OIM 测试的焊核区各观察部位晶粒尺寸。可知, 1, 2 观察部位的晶粒尺寸分别为 2.05, $1.59\mu\text{m}$, 其组织围绕搅拌头探针杆部, 晶粒细小且尺寸接近; 在探针的下部即 3- 6 观察部位, 晶粒尺寸分别为 7.51, 1.14, 6.58, $1.02\mu\text{m}$, 晶粒尺寸相差较大且大小呈交替变化, 金相观察这些部位呈条带交替出现, 在 3 和 5 观察部位晶粒较大, 条带较宽; 在 4 和 6 观察部位, 晶粒较小, 条带较窄。

表 1 OIM 测试的各观察部位晶粒尺寸

Table 1 Grain size taken from the different sites by OIM

Tested site	1	2	3	4	5	6
Average grain size/ μm	2.05	1.59	7.51	1.14	6.58	1.02

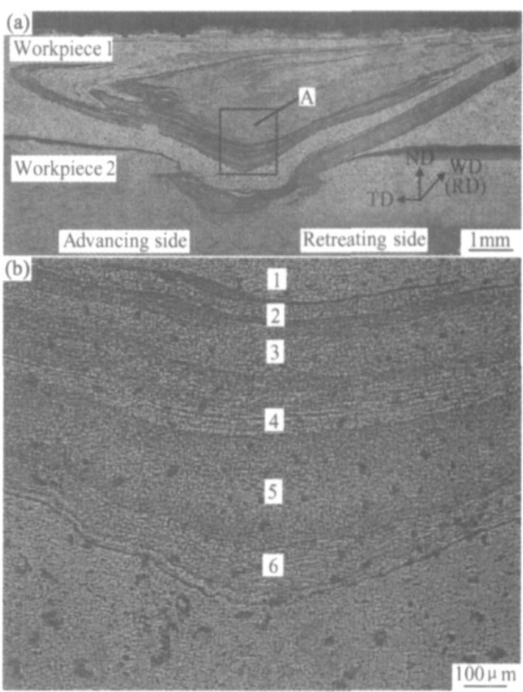


图 2 AZ80A 镁合金搅拌摩擦焊接接头测试部位

(a) 接头焊核区截面形貌; (b) OIM 测试部位

Fig. 2 The tested sites of the nugget zone of the friction stir weld (a) the observed surface is the cross-section of the workpiece; (b) the tested sites by OIM

2.2 焊核区极图分析

图 3 分别为焊核区各微区的 $\{1, 0, -1, 0\}$ 极图和 $\{1, 1, -2, 1\}$ 极图, 其观察部位同图 2 中所标部位; 图中的不同灰度表示各极图上各晶面极点密度不同的等强度线, 其密度等级分为 8 个等级, 如各图中极图下方的 8 个灰度颜色所示。比较 6 个部位的 $\{1, 0, -1, 0\}$ 极图和 $\{1, 1, -2, 1\}$ 极图可以发现, 1, 3, 5 观察点的大部分取向是一致的, 而 2, 4, 6 观察点的主要取向也是一致的, 并且随着轧制平板法向(ND)方向向下, 在上一个观察部位的低密度带间分别出现了其他的取向, 且取向的数量增大和密度增强。通过 OIM 测定, 1, 3, 5 观察点的主要取向与 2, 4, 6 观察点的主要取向明显不同, 且两种主要取向交替进行, 这可能是导致搅拌摩擦焊焊核区流线像“木纹”状一层层出现的原因。

2.3 焊核区反极图分析

图 4 为焊核区中部 3, 4 和 5 微区板法向和轧向反极图。可见, 在 3 观察点, 晶粒取向分布较为分散, 尤其是在其轧向反极图中, 极点密度分布更广泛, 并趋向 $[0, -1, 1, 0] - [2, -1, -1, 0]$ 大圆; 这说明试样轧向相对于主晶轴的取向几率分布高, 即再结晶晶粒的取向在 3 观察点以轧向(焊接方向)分布较多, 再结晶晶粒受到焊接方向的变形力影响较大。OIM 分析结果表明, 3 观察点晶粒的取向主要为 $\{3-1-2\}21\}1-540, \{4$

-1-3 14} 2-7 5 0 , { 5-2-3 13} 1-8 7 0 , { 0 0 0 1}
-3 3 0 0 , { 15-4 11 1} 7-26 19 0 , { 7-5-2 9} 1 0
-1 0 等。在该微区中, 各种取向组分所占比例都非常
微小, 而且分布较广, 因而在 3 观察点中不存在
织构。

在 4 观察点中, 无论是在板法向反极图还是轧向
反极图中, 最大极点密度分布都较为集中, 因而 4 观
察点有织构。OIM 分析结果表明, 该区晶粒取向主要
为 { 1, -1, 0, 4} 1, 0, -1, 0 , 约占该微区织构的 20% , 因
而存在一定的变形; 同时还存在其他一些较弱的取向,
如: { 3, -1, -2, 9} 1, -5, 4, 0 { 4, -1, -3, 19} 5, -1, 4,
-2 , { 1, 0, 1, 13} 3, 1, -4, -1 等; 即新生成了许多新
的再结晶取向成分。由于这些再结晶取向分布较广,
因而在 4 观察点中不存在再结晶织构但存在变形
织构。

在 5 观察点, 晶粒取向分布较为分散, 尤其是在其
轧向反极图中, 极点密度分布更广泛, 并趋向 [0,-1, 1,
0] - [2,-1,-1, 0] 大圆; 这说明试样轧向相对于主晶轴
的取向几率分布高, 即再结晶晶粒的取向在 5 点以轧向
(焊接方向) 分布较多, 再结晶晶粒受到焊接方向的变
形力影响较大。OIM 分析结果表明, 该区晶粒的取向
主要为 { 3,-1,-2, 9} 1,-5, 4, 0 , { 4,-1,-3, 19} 0,-1,
1, 0 , { 1, 0,-1, 13} 0,-1, 1, 0 , { 1, 0, 1, 14} -1, 2,-1,
0 { 6,-2,-4, 17} 38, 37,-1,-18 { 1,-1, 0, 4} 1, 0,-1,
0 等。在 5 观察点中晶粒取向组分分布较广, 因而在
5 区中不存在织构。

2.4 焊核区取向差分析

为了进一步了解导致 3- 5 观察点的织构, 测定了
上述观察点的取向差分布。图 5 为焊核区中部 3- 6
观察点的晶粒取向差分布, 图中 θ 表示晶粒间取向差
值大小, M 表示取向差所占百分比。可知, 3 观察点
小角度晶界为 15. 9% , 84. 1 % 的晶粒为高取向差的大
角度晶界。4 观察点小角度晶界仅仅只占 0. 6% , 取向
差分布显著地偏向于高取向差。5 观察点小角度晶界
高达 40. 0% , 6 观察点小角度晶界仅占 0. 9% , 取向
差分布显著地偏向于高取向差。从图 5 看, 3 点和 5
点的分布类似, 4 点与 6 点的情况类似, 这是因为在 4
和 6 观察点所处的条带区域中, 所存在大量的可动性较
好的大角度晶界发生了迁移, 使之产生大量的再结晶
晶核, 表现为该区域晶粒尺寸极小, 仅有 1. 14 μ m 和
1. 02 μ m (表 1 所示)。而在焊核区剧烈的变形和热作
用下, 再晶粒晶粒长大的同时也经历着变形, 因此, 随
着 3 和 5 观察点所处条带区的晶粒增大, 许多晶粒转
变成了稳定性较好的小角度晶界, 使小角度晶界增多,
形成变形织构。

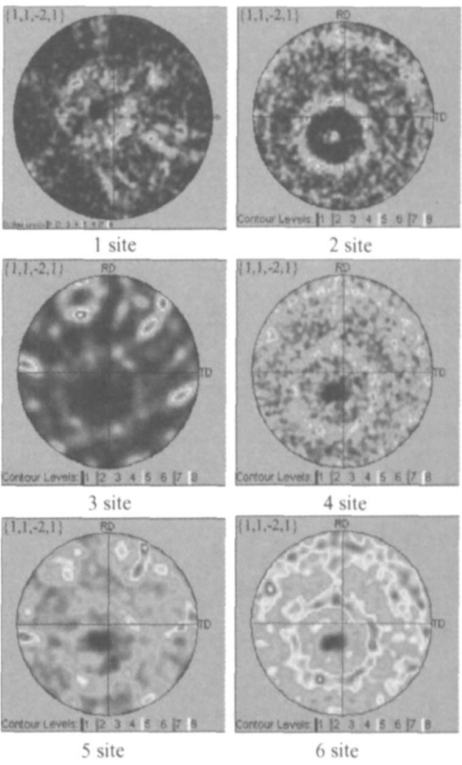


图 3 焊核区各观察点 { 1, 1, -2, 1} 极图
Fig. 3 The { 1, 1, -2, 1} pole figures taken from the
different sites in the nugget zone

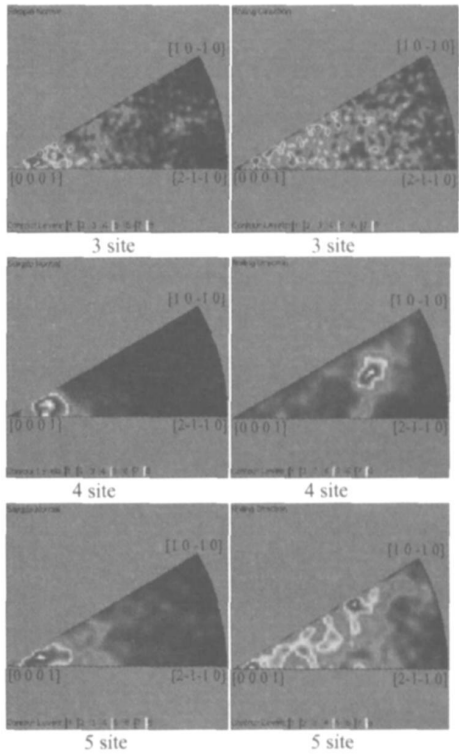


图 4 焊核区中部观察点反极图
Fig. 4 The inverse pole figures taken from the
middle zones in the nugget zone

综上所述,焊核区所发生的动态再结晶是周期性的动态再结晶,因而表现在从 1-6 点其晶粒尺寸、极

图、反极图以及晶粒的取向差均呈周期性的变化,组织结构呈条带分布。

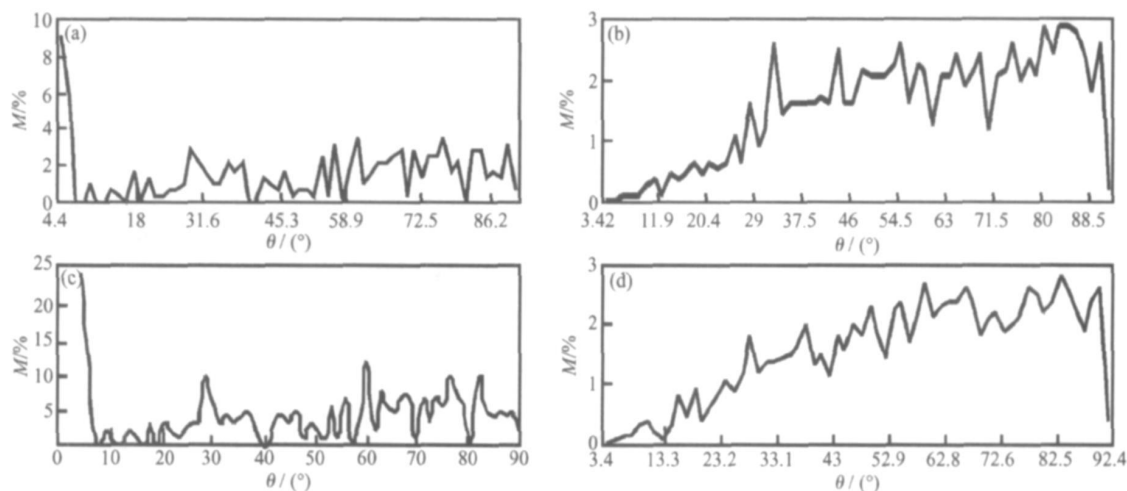


图 5 焊核区中部晶粒取向差分布图 (a) 3 点; (b) 4 点; (c) 5 点; (d) 6 点

Fig. 5 The misorientation distribution for the middle in the nugget zone

(a) 3 site; (b) 4 site; (c) 5 site; (d) 6 site

3 结论

(1) 搅拌摩擦焊搭接头焊核区晶粒尺寸、极图、反极图以及晶粒的取向差均呈周期性的变化,组织结构呈条带分布,基体内部经历了周期性的动态再结晶过程。

(2) 搅拌摩擦焊搭接头焊核区组织结构呈条带分布,条带宽时晶粒尺寸较大,条带窄时晶粒尺寸较小,小到只有 $1.02\mu\text{m}$ 。

(3) 焊核区极图和反极图呈周期性出现,条带宽处极图和反极图变形织构倾向明显,条带窄处无织构。

(4) 焊核区中条带宽处的小角度晶粒多,条带窄处绝大多数为大角度晶粒,稳定性好。

参考文献

- [1] 邢丽,柯黎明,孙德超,等. 镁合金薄板的搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 18-20.
- [2] MURR L E. Fundamental issues and industrial application of friction stir welding [J]. Mat Tech & Adv Perf Mat, 2000, 38(5): 37-48.
- [3] CLURE J C M. A thermal model of friction stir welding[A].

Trends in Welding Research Proc Int Conf, 5th[C]. 1999.

- [4] NORMAN A F, BROUGH I, PRANGNELL P B. High resolution EBSD analysis of the grain structure in an AA2024 friction stir weld[J]. Materials Science Forum, 2000, 337(331): 1713-1718.
- [5] FONDAR W, BINGERT J F, COLLIGANK J. Development of grain structure during friction stir welding [J]. Scripta Materialia, 2004, 51: 243-248.
- [6] SEUNG HWAN C PARK, YUTAKA S SATO, HIROYUKI KOKAWA. Basal plane texture and flow pattern in friction stir weld of a magnesium alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2003, 34A (4): 987-993.
- [7] SEUNG HWAN C PARK, YUTAKA S SATO, HIROYUKI KOKAWA. Effect of micro-texture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test[J]. Scripta Materialia, 2003, 49: 161-166.

基金项目: 江西省自然科学基金资助项目 (0450090); 江西省教育厅科技项目赣教技字 2007181

收稿日期: 2006-05-08; 修订日期: 2006-11-10

作者简介: 徐卫平 (1967-), 女, 副教授, 从事专业: 材料加工, 图学教育, 联系地址: 南昌丰和大道 696 号南昌航空工业学院航机学院 (330063)。