

镁合金 AZ31 搅拌摩擦焊接头的微观组织^①

张 华¹, 林三宝¹, 吴 林¹, 冯吉才¹, 郭和平²

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 北京航空工艺研究所, 北京 100024)

摘 要: 采用搅拌摩擦焊接法焊接了镁合金 AZ31, 研究了焊接参数对焊接接头微观组织和显微硬度的影响。结果表明: 焊接接头成形良好, 焊缝没有气孔、裂纹和夹渣, 焊缝区的显微硬度比母材稍有降低, 但降低幅度不大。

关键词: 搅拌摩擦焊; 镁合金; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG 453

文献标识码: A

镁合金密度低, 强度、刚度高, 价格便宜, 在航空航天和汽车制造业有广泛的应用前景, 其开发应用已被科技部列为国家“十五”重大专项。但在镁合金的焊接方面, 采用传统的弧焊方法很容易产生气孔、裂纹、夹渣、飞溅等焊接缺陷, 而且镁合金的导热系数比较大, 熔焊温度高, 容易导致大的焊接变形和残余应力^[1]。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)是一种新型的固相连接技术, 在 20 世纪 90 年代初由英国焊接研究所(TWI)首先提出并进行研究^[2]。在 FSW 过程中, 金属不熔化, 焊接时温度相对较低, 因而可以避免其它焊接方法产生的缺陷, 获得优良的焊接接头, 对镁合金的焊接具有独特的优势。同时 FSW 过程无飞溅, 无烟尘, 不需要添加焊丝和保护气体, 是一种清洁的加工技术^[3-7]。FSW 过程如图 1 所示。

目前对 FSW 技术的研究主要集中在铝合金方面, 而对镁合金的 FSW 研究较少^[8]。Trillo 等^[9]和

Park 等^[10]等分别进行了 AZ31B 及 AZ61 镁合金的搅拌摩擦焊研究。本文作者主要研究在对镁合金薄板进行搅拌摩擦焊时, 有关工艺参数对焊接接头的微观组织和显微硬度的影响。

1 实验

材料采用热轧供应态的 AZ31 镁合金板材, 板材尺寸为 200 mm × 100 mm, 厚度为 2.5 mm, 其化学成分和力学性能见表 1 和表 2。实验在北京航空工艺研究所研制的专用搅拌摩擦焊机上进行。所采用的焊接参数为: 焊接速度 37.5~950 mm/min, 搅拌头旋转速度 300~1500 r/min。

表 1 AZ31 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of magnesium alloy AZ31 (mass fraction, %)

Material	Al	Mn	Zn	Si	Fe	Cu	Ni
AZ31	3.1	0.48	0.88	0.01	0.0027	0.0015	0.0005

表 2 AZ31 镁合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of magnesium alloy AZ31

Material	0.2% proof stress/MPa	Ultimate stress/MPa	Elongation/%
AZ31	167	259	9.5

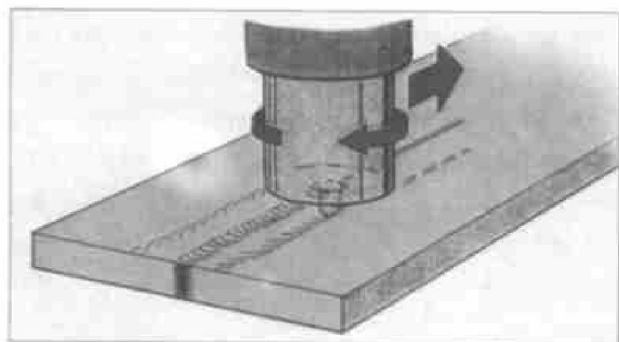


图 1 搅拌摩擦焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FSW

① 基金项目: 国家高技术研究发展专项经费资助项目(2002AA331160)

作者简介: 张 华(1977-), 女, 博士研究生。

通讯联系人: 张 华, 博士研究生; 电话: 0451-86415537; 传真: 0451-86415537; E-mail: huazh@hit.edu.cn

收稿日期: 2003-01-13; 修订日期: 2003-06-16

取力学性能测试和外观成型比较好的焊接试样, 沿横截面(即垂直于焊接方向)制取微观组织试样, 用细砂纸打磨平整后抛光, 抛光液选用 MgO 水溶液; 抛光至无划痕时, 用草酸溶液(浓度为 2%) 腐蚀后, 分别在光学显微镜和扫描电镜下观察焊接接头的微观组织形态。采用上海生产的 HX-1 000 显微硬度计进行显微硬度的测量, 压力为 0.5 N, 饱和时间为 20 s, 测试点位置如图 2 所示。

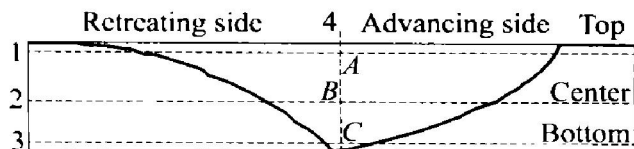


图 2 试件的显微硬度测试位置

Fig. 2 Position of micro-hardness test

1—Top line; 2—Center line;

3—Bottom line; 4—Weld center;

A, B and C—Test point

2 结果和分析

2.1 焊缝成型

镁合金 AZ31 搅拌摩擦焊的焊缝成型如图 3 所示。从图 3 可以看出, 焊缝上下表面光滑, 焊缝成形均匀一致, 焊后几乎没有明显的变形, 也没有气孔、裂纹和未熔合缺陷。

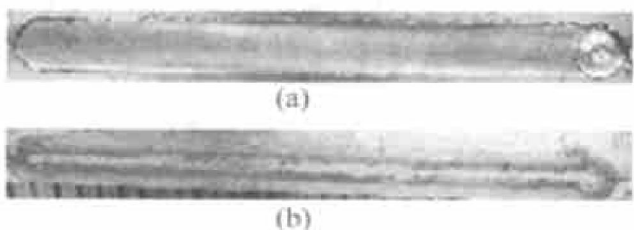


图 3 搅拌摩擦焊试样宏观照片

Fig. 3 Photos of friction stir welded test piece

(a)—Top surface; (b)—Back surface

2.2 接头的微观组织

图 4 所示为在低倍显微镜下的镁合金 AZ31 焊缝的微观组织。

从图 4 中可以看出, 从焊缝的中心向外有三个明显的分界, 这和其他材料如铝的 FSW 接头微观组织的分区是一致的^[11, 12], 即熔核区 (Weld nugget)、机械热影响区 (Thermomechanically Affected Zone-TMAZ) 和热影响区 (Heat Affected Zone, HAZ)。此外, 在接头的底部还有一个未完全焊合的区域。这个区域是 FSW 焊接接头中比较薄

弱的区域, 可以通过严格控制搅拌头的插入深度以及焊后加工处理来消除。

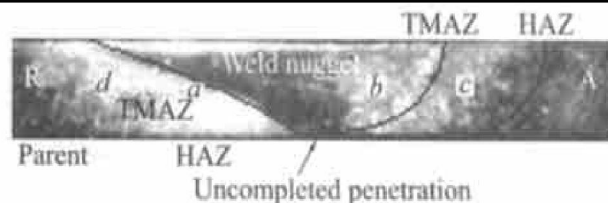


图 4 接头横截面低倍显微组织

Fig. 4 Microstructure of weld cross section

R—Retreating side; A—Advancing side

a, b, c and d—Observing points in Fig. 5

图 5 所示为上述各个区域在光学显微镜下的微观组织结构。

从上面的焊缝微观组织可以看出:

1) 熔核区由等轴、微细的晶粒组成(见图 4(a) 上部), 属于动态再结晶区域。这说明在 FSW 的过程中, 不仅有塑性流动的过程, 同时也有动态恢复和再结晶的过程。

2) 搅拌摩擦焊接微观组织的独特之处在于有 TMAZ 区。该区域的微观组织有塑性流动的趋势, 接近等轴晶粒, 只是比较粗大, TMAZ 的晶粒受母材的塑性流动和搅拌头搅拌的作用, 有明显的变形。

3) 热影响区紧邻机械热影响区, 离焊缝中心较远。热影响区不存在塑性流动, 但在热传导的作用下晶粒已经不是母材的扁长晶粒, 变得比较短小。而母材是由一系列扁长晶粒构成, 这和母材的轧制成型过程有关。

2.3 接头微观组织的演变

搅拌摩擦焊接过程中, 母材因受轴肩和搅拌头的旋转摩擦与相对运动摩擦产生的热量影响而发生塑性变形, 焊缝微观组织的形态也随之发生变化, AZ31 镁合金母材的细长晶粒被打碎, 逐渐向等轴方向发展。在热影响区, 受热和变形影响小, 仍有扁长的晶粒; 在机械热影响区, 有明显的塑性流动现象, 晶粒进一步细化, 逐渐变为等轴晶粒。

搅拌摩擦焊接温度没有达到相变点, 但存在动态恢复和再结晶过程。熔核区受热和受力最大, 焊缝两侧的金属要重新混合、冷却成为一个整体。在这个过程中, 搅拌头不仅旋转产热, 而且沿焊接方向有一个相对的运动, 塑性材料不是静态地达到塑性变形, 而是一个动态随机变化的过程。熔核区的晶粒发生动态的重结晶, 生成许多的熔核。由于镁

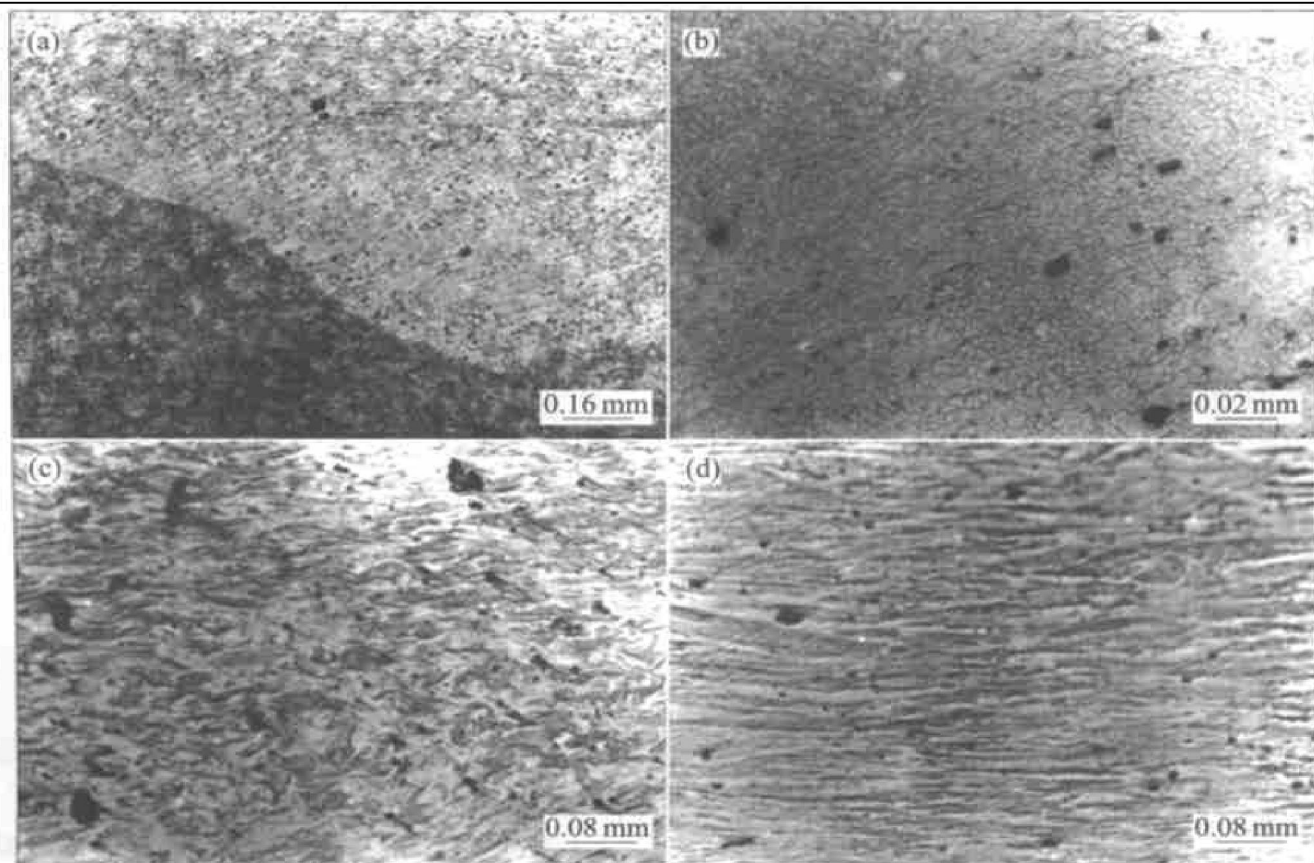


图 5 镁合金 FSW 焊接接头的微观组织

Fig. 5 Microstructure of friction stir weld of magnesium alloy
(a) —Weld nugget-TMAZ; (b) —Weld nugget; (c) —TMAZ; (d) —Parent

合金的导热性能比较好, 产热过程和散热过程都非常快, 晶粒来不及长大, 于是便形成等轴、微细的晶粒。

机械热影响区同样经历了高温、变形过程, 因此也经历了动态再结晶过程, 只是程度不如熔核区明显。热影响区主要是靠热传导受热, 不存在受外力干扰, 特点几乎和熔焊热影响区一致, 不过搅拌摩擦焊接温度比较低, 热影响区的组织变化不如熔焊明显。总之, 搅拌摩擦焊接组织的变化主要取决于搅拌头的搅拌和轴肩的产热。

显微组织分区明显, 熔核区上部比较宽, 下部很窄, 只有上部的 1/3 左右。这说明搅拌摩擦焊接的塑性流动主要在上部进行, 材料沿着搅拌头的周边向下运动。如何增加下部塑性材料的流动程度, 即增加下部熔核区宽度是提高接头性能的关键所在。塑性材料的产生和流动与搅拌头的形状密不可分, 其关系应作为搅拌摩擦焊接的关键技术进行研究。

2.4 显微硬度

沿着焊缝横截面所测量的显微硬度分布如图 6

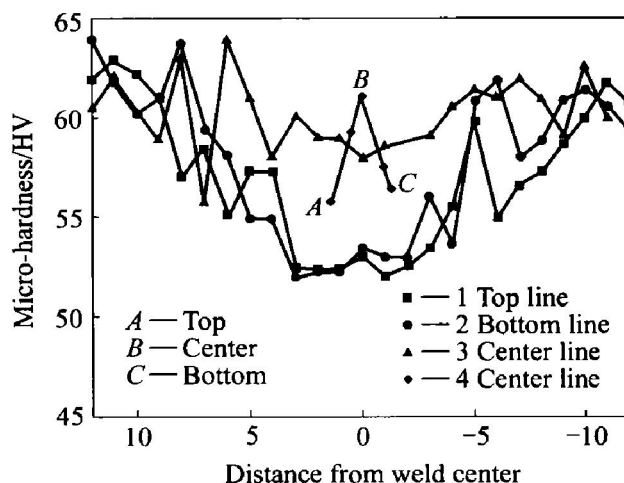


图 6 显微硬度曲线

Fig. 6 Micro-hardness profiles of
FSW welded joint

所示。接头上部(top)、中部(center)和底部(bottom)的显微硬度具有相似的变化趋势: 中部变化幅度最小, 即硬度损耗小; 而上部和下部的波动幅度大。镁合金焊接接头不存在明显的硬度损耗, 这是由于镁合金中不存在硬化相, 没有硬化相的夹杂、重熔过程, 故整体硬度变化不大。这说明中间摩擦、搅拌最充分, 焊接温度最高, 产生的塑性流体

最多, 接头连接性能最好。上部由于轴肩的加热, 材料受热最大, 变形也大, 故硬度有所损耗。

3 结论

1) 利用搅拌摩擦焊方法焊接 AZ31 镁合金可以得到表面光滑, 没有裂纹、气孔、飞边的接头, 背部熔合良好。

2) 焊接接头组织有明显的分区: 即机械热影响区、热影响区和熔核区。熔核区由微细、等轴的晶粒组成; 机械热影响区有明显的塑性流动。

3) 显微硬度测试表明, 焊缝区的显微硬度比母材稍有降低。接头中部的硬度比上部和底部都高, 与微观组织分析结果一致。

REFERENCES

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第二卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. 10: 521 - 522.
The Welding Society of Chinese Mechanical Technology Society. Welding Manuals (Volume 2) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1992, 10: 521 - 522.
- [2] Liu G M, Niou L E, Niou C S, et al. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum [J]. Scripta Materialia, 1997, 37(3) : 355 - 361.
- [3] Jata K V, Semiatin S L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys [J]. Scripta Materialia, 2000, 43: 743 - 749.
- [4] Sutton M A, Yang B, Reynolds A P, et al. Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum [J]. Materials Science and Engineering, 2002, 323(3) : 160 - 166.
- [5] Hanadi G S, Anthony P R, Lyons J S, et al. Microstructure and retention of superplasticity of friction stir welded superplastic 2095 sheet [J]. Scripta Materialia, 2002, 46: 337 - 342.
- [6] Sato Y S, Urata M, Kokawa H, et al. Retention of fine grained microstructure of equal channel angular pressed aluminum alloy 1050 by friction stir welding [J]. Scripta Materialia, 2001, 45: 109 - 114.
- [7] Benavides S, Li Y, Murr L E, et al. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(8) : 809 - 815.
- [8] Flores O V, Kennedy C, Murr L E, et al. Microstructural issues in a friction-stir-welded aluminum alloy [J]. Scripta Materialia, 1998, 38(5) : 703 - 708.
- [9] Trillo E A, Murr L E. Friction-stir welding of magnesium alloy AZ31B [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(12) : 917 - 920.
- [10] Park S H C, Sato Y S, Kokawa, H. Effect of microtexture on fracture location in friction stir weld of Mg alloy AZ61 during tensile test [J]. Scripta Materialia, 2003, 49(2) : 161 - 166.
- [11] Mishra R S, Mahoney M W, McFadden S X, et al. High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy [J]. Scripta Materialia, 1999, 42(2) : 163 - 168.
- [12] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, et al. Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum [J]. Scripta Materialia, 1997, 36(1) : 69 - 75.

Microstructure of friction stir welds in AZ31 magnesium alloy

ZHANG Hua¹, LIN San-bao¹, WU Lin¹, FENG Ji-cai¹, GUO He-ping²

(1. State Key Lab of Advanced Welding Production Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: AZ31 magnesium alloy was welded by friction stir welding(FSW), and the changes of microstructure and micro-hardness caused by different welding parameters were also studied. The results indicate that good joints without porosity, crack and dregs are obtained and micro hardness in nugget zone is a little lower than the parent metal.

Key words: friction stir welding; magnesium alloy; microstructure; micro-hardness

(编辑 何学锋)