带状组织对铝/镁异种金属搅拌摩擦焊 接头力学性能的影响

朱浩¹, 张二龙¹, 莫淑娴¹, 马泽铭¹, 王军²

(1. 石家庄铁道大学, 石家庄, 050043; 2. 河北科技大学, 石家庄, 050018)

摘要:采用搅拌摩擦焊 (FSW) 对厚度为 4 mm 的 6061 铝合金与 AZ31B 镁合金进行不同工艺的平板对接试验.采用光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 及能谱仪 (EDS) 对接头进行微观组织观察,采用电子 万能试验机对接头力学性能进行测试.结果表明,在接头焊核区 (WNZ) 中存在着明显的带状组织,带状组织是由 插入镁基体中的铝合金条以及弥散分布在条带上的金属间化合物 (IMCs) 组成; IMCs 主要为 Al₁₂Mg₁₇ 和 Al₃Mg₂; 铝/镁异种金属 FSW 接头裂纹形核和扩展均发生在带状组织内;焊接工艺影响带状组织形态和 IMCs 尺寸及数量; 随着转速 (n) 的增加或焊接速度 (v) 的降低,带状组织呈弯曲状,长度相对较短且呈不连续分布;当转速 (n) 过高或 焊接速度 (v) 过低时,带状组织变细,但 IMCs 数量增多且尺寸变大;铝/镁异种金属 FSW 接头强度主要取决于带状 组织形态和 IMCs 尺寸及数量.

关键词: 铝/镁异种合金;搅拌摩擦焊;带状组织;力学性能 中图分类号: TG 457.14 文献标识码: A doi: 10.12073/j. hjxb. 20190712002

0 序言

近年来,节能和环保理念在世界范围内不断地 深入,对产品轻量化要求越来越高. 铝合金和镁合 金作为最常用的两种轻金属结构材料,具有低密 度、较高的比强度、比刚度、耐腐蚀等优点,被广泛 应用于航空航天以及载运工具制造等领域. 采用传 统熔化焊对铝/镁异种合金进行连接时,接头容易产 生气孔、晶粒粗大、热裂纹和金属间化合物 (IMCs)等缺陷,降低接头的力学性能^[1-3]. 搅拌摩擦 焊 (Friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所 (the welding institute)于 1991年开发的一种针对高 强铝合金焊接性差的新型固相连接技术,是铝/镁异 种合金最具潜力的焊接技术之一^[4-5]. 与传统焊接 方法相比, FSW 具有优质、高效、低耗、焊接变形 小、无污染等特点^[6].

目前,国内外学者对铝/镁异种金属 FSW 开展 了大量研究工作,主要集中在铝/镁 FSW 接头微观 组织及力学性能^[7-10]、焊接工艺^[11-14] 等几个方面.

收稿日期:2019-07-12

然而目前对接头带状组织的形态、形成机理及其对 接头力学性能的影响研究较少.该研究对于优化铝/ 镁异种金属 FSW 焊接工艺,保证接头强度以及更 好地服务于载运工具制造具有重要意义.

文中借助光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、 X 射线衍射仪 (XRD) 及能谱仪 (EDS) 对不同工艺 参数下接头进行微观组织观察, 对带状组织形态及 其分布的 IMCs 种类及数量进行表征, 指导铝/镁异 种金属 FSW 焊接工艺.

1 试验方法

试验材料选取厚度为4mm的AZ31B镁合金 板和6061铝合金板(T6),试板尺寸为300mm× 150mm,焊接方式为平板对接.搅拌头为H13钢, 轴肩直径为12mm,搅拌针长为3.7mm,试验过程 中将镁板放在前进侧,铝板放在后退侧,固定下压 量为0.2mm±0.05mm,偏铝侧0.3mm.FSW焊 接工艺参数如下:搅拌头转速分别为650,750, 850r/min,焊接速度分别为10,20,35mm/min.金 相试样用5%硝酸酒精溶液腐蚀150s.采用光学 显微镜(OM)对FSW接头进行金相观察.采用 GeminiSEM300型扫描电镜(SEM)对接头中的带

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (51705344);河北教育厅重点项目 (ZD2019102).

状组织进行观察,采用能谱仪 (EDS) 和 X 射线衍射 仪 (XRD) 对带状组织内的 IMCs 进行表征.利用 WDW3100 微控电子万能试验机对 FSW 接头进行 拉伸试验.图 1 为铝/镁 FSW 搅拌头示意图.



图 1 铝/镁 FSW 搅拌头示意图 (mm) Fig. 1 Schematic of Al/Mg FSW tool

2 结果与分析

2.1 FSW 接头宏观形貌

图 2 为 750 r/min - 20 mm/min 工艺参数下铝/镁异种金属 FSW 接头横截面. 从图可以看出, 接头由焊核区 (WNZ)、热力影响区 (TMAZ) 和热影响区 (HAZ) 组成. Al 和 Mg 在 WNZ 区域发生了明显的混合而形成带状组织. 带状组织是后退侧的Al 在搅拌头的作用下通过搅拌进入前进侧的Mg 基体中,带状组织由灰色条带和黑色条带组成, 呈斜向上 45°分布.



图 2 焊接接头横截面的宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphology of cross-section of welding joint

2.2 FSW 接头微观组织分析

图 3 为铝/镁异种金属 FSW 接头带状组织 EDS 面扫结果. 从图中可以看出, 在铝/镁异种金属 FSW 接头带状组织内, Al, Mg 均发生了相互扩散, 彼此 达到一定程度的互溶, 说明接头达到了冶金结合.

对带状组织进一步放大观察,如图 4 所示.从 图可以明显看出,带状组织由明暗交替的条带组 成,在条带上分布着大小不一的颗粒状 IMCs.对 IMCs 进行 XRD 物相分析,结果如图 5 所示.从图 中可以看出,铝/镁异种金属 FSW 接头中带状组织 中的 IMCs 主要为 Al₁₂Mg₁₇ 和 Al₃Mg₂.为了进一 步对 IMCs 种类进行表征,对图 4 中 IMCs 进行 EDS 分析,结果如表 1 所示.

从表1中可以看出,带状组织中大颗粒(点1)



(a) Mg 元素的分布



(b) AI 元素的分布

图 3 铝/镁 FSW 接头元素分布

Fig. 3 Element distribution of Al/Mg FSW joint. (a) distribution of Mg element; (b) distribution of Al element



图 4 铝/镁 FSW 接头带状组织的微观组织





图 5 铝/镁 FSW 接头带状组织 XRD 分析结果



	表 1	带状组织 EDS 分析
Table 1	EDS	analysis of banded structure

点	Al元素原子分数a(%)	Mg元素原子分数a(%)	相
1	59.31	34.056	Al ₃ Mg ₂
2	29.31	42.43	$Al_{12}Mg_{17} \\$
3	31.406	45.124	$Al_{12}Mg_{17}$
4	34.35	52.8	$Al_{12}Mg_{17}+Al$
5	10.53	70.32	Mg

内 Al 元素含量多于 Mg 元素含量, 通过 XRD 验证 是 Al₃Mg₂, 小颗粒 (点 2) 内 Mg 元素含量多于 Al 元素含量, 通过 XRD 验证是 Al₁₂Mg₁₇. 带状组 织中颜色呈灰色的条带是铝, 颜色呈暗黑色的是镁 基体, 灰色条带上附着 IMCs 颗粒. 结合图 5 可以 得出, 带状组织是由镁基体和插入镁基体中的铝合 金条以及弥散分布在条带上的 Al₁₂Mg₁₇ 和 Al₃Mg₂ 组成. 从图 4 还可以看出, 带状组织中 $Al_{12}Mg_{17}$ 明显 多于 Al_3Mg_2 . 这主要是因为共析反应: L→ $Al_{12}Mg_{17}$ + Mg 所需的最低反应温度是 437 ℃, 低于 L→ Al_3Mg_2 + Al 的反应温度 450 ℃, 而 FSW 焊接热输入相对较 低; 带状组织中 Mg 基体相对 Al 片层含量较高, 所 形成的 $Al_{12}Mg_{17}$ 多于 $Al_3Mg_2^{[15]}$.

2.3 不同转速下带状组织形貌及力学性能

图 6 为在焊接速度 20 mm/min 下,搅拌头转速 分别为 650,750,850 r/min 时接头带状组织形貌, 图 6 折线为接头拉伸试验的裂纹扩展路径.从图 6 可以看出,铝/镁异种金属 FSW 接头的裂纹形核及 扩展均发在与拉伸方向成 45°方向上的带状组织 内,这主要是因为铝/镁异种金属 FSW接头在拉伸 过程中 45°方向上的剪应力最大^[16-18].带状组织中 脆硬的 IMCs 导致受载的接头变形不协调,促进裂 纹形核和扩展,说明带状组织是铝/镁异种金属 FSW 接头最薄弱环节.



图 6 不同转速下铝/镁 FSW 接头裂纹扩展路径

Fig. 6 Crack propagation path of AI/Mg FSW joints under different rotation speed. (a) rotating speed 650 r/min-welding speed 20 mm/min; (b) rotating speed 750 r/min-welding speed 20 mm/min; (c) rotating speed 850 r/min-welding speed 20 mm/min

选取图 6 中带状组织中间区域 (方框区), 对 其通过 SEM 进行形貌分析, 结果如图 7 所示. 图 7a 是转速为 650 r/min, 焊接速度 20 mm/min 下的带 状组织形貌. 从图中可以看出, 当转速为 650 r/min 时, 带状组织中的条带形态长而直, IMCs 数量较 少. 这主要是因为转速较低, 热输入较低没有达 到 IMCs 的形成温度. 由于带状组织长而直, 一旦 形成微裂纹,微裂纹会迅速扩展,接头强度较低. 图 7b 是转速为 750 r/min,焊接速度 20 mm/min 下的带 状组织形貌,从图中可以看出,带状组织中条带 呈弯曲形态,带状组织上分布 IMCs.这主要是因 为转速增大,热输入增加,金属塑性流动性增大, 从而形成弯曲状的带状组织.同时,因为温度升 高,促使生成较多的 IMCs,即冶金结合程度增



(a) 转速 650 r/min-焊接速度 20 mm/min

(b) 转速 750 r/min-焊接速度 20 mm/min

(c) 转速 850 r/min-焊接速度 20 mm/min

图 7 不同转速下铝/镁 FSW 接头带状组织的形貌

Fig. 7 Morphology of AI/Mg banded structure in FSW joints under different rotation speed. (a) rotating speed 650 r/minwelding speed 20 mm/min; (b) rotating speed 750 r/min-welding speed 20 mm/min; (c) rotating speed 850 r/minwelding speed 20 mm/min 加, 使得接头强度增大. 当转速增加到 850 r/min 时,由于热输入过大,后退侧大量的铝合金条被 搅拌针带入到镁合金的基体上同时,由于温度 高,生成的更多的 IMCs,从而导致接头强度降 低,从图8可以得到证实.

2.4 不同焊接速度下带状组织形貌及力学性能

图 9 分别是搅拌头转速为 750 r/min 不变条件 下,焊接速度为10,20,35 mm/min 时接头带状组织 形貌.图9折线为接头拉伸试验的裂纹扩展路径, 在图 9 中选取带状组织中间区域 (方框区), 对其通 过 SEM 进行形貌观察,结果如图 10 所示.



图 8 不同转速下工程应力应变曲线

Engineering stress strain curves under different Fig. 8 rotating speed



图 9 不同焊速下铝/镁 FSW 接头裂纹扩展路径

Fig. 9 Crack propagation path of AI/Mg FSW joints under different welding speed. (a) rotating speed 750 r/min-welding speed 10 mm/min; (b) rotating speed 750 r/min-welding speed 20 mm/min; (c) rotating speed 750 r/min-welding speed 35 mm/min



(a) 转速 750 r/min-焊接速度 10 mm/min

(b) 转速 750 r/min-焊接速度 20 mm/min

不同焊速下铝/镁 FSW 接头带状组织的形貌 图 10

Morphology of AI/Mg banded structure in FSW joints under different welding speed. (a) rotating speed 750 Fig. 10 r/min-welding speed 10 mm/min; (b) rotating speed 750 r/min-welding speed 20 mm/min; (c) rotating speed 750 r/min-welding speed 35 mm/min

从图 10 中可以看出, 当搅拌头焊接速度为 10 mm/min 时,单位时间搅拌头与 Al/Mg 板材的摩 擦次数相对较多,热输入大,接头塑性流动大,降低 了铝条插入到镁基体的阻力,使铝合金条变的更 细, 增加了 Al/Mg 接触面积, 且热输入偏高进而生 成更多的 Al₁₂Mg₁₇ 和 Al₃Mg₂,降低接头的强度;当 搅拌针焊接速度为 35 mm/min 时,焊接速度过快, 搅拌针停留时间较短,搅拌头相对搅拌次数较少, 热输入较低,塑性流动差,搅拌到镁基体中的铝条 较少,生成 IMCs 过少,接头冶金结合程度不高,导 致接头抗拉强度进一步降低. 当搅拌头焊接速度 为 20 mm/min 时, 接头中带状组织细密, 其上弥散 分布着 IMCs, 此时接头达到冶金结合, 所以接头抗 拉强度最高,为131 MPa,从图 11 可以得到证实.







3 结论

(1) 铝/镁异种金属 FSW 接头 WNZ 中存在着 明显的带状组织,带状组织是由镁基体和插入镁基 体中的铝合金条以及弥散分布在条带上的 IMCs 组 成, IMCs 主要 Al₁₂Mg₁₇ 和 Al₃Mg₂.

(2)随着转速(n)的增加或焊接速度(v)的降低,带状组织的呈弯曲状、长度相对较短且呈不连续分布;当转速(n)过高或焊接速度(v)过低时,带状组织变细,但IMCs数量增多且尺寸变大.

(3) 焊接工艺影响带状组织形态和 IMCs 尺寸 及数量, 进而影响铝/镁异种金属 FSW 接头的冶金 结合程度, 最终决定接头的抗拉强度;

(4)不同工艺下的铝/镁异种金属 FSW 接头的 裂纹形核与扩展均是发生在带状组织内,带状组织 是整个 FSW 接头最薄弱的区域.

参考文献

- 李达,孙明辉,崔占全,等. 工艺参数对铝镁搅拌摩擦焊焊缝成 形质量的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(8): 97 - 100.
 Li Da, Sun Minghui, Cui Zhanquan, *et al.* Effect of parameters on friction stir welding joint of 7075 Al and AZ31B Mg[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(8): 97 - 100.
- [2] 许志武, 李政玮, 冯艳, 等. 静轴肩辅助铝镁搅拌摩搭接接头的 组织与性能 [J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 1-6.
 Xu Zhiwu, Li Zhengwei, Feng Yan, *et al.* Microstructure and mechanical properties of Mg/Al friction stir lap welding joint assisted by stationary shoulder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 1-6.
- [3] 刘震磊,崔祜涛,姬书得,等.温度峰值影响 6061 铝/AZ31B 镁
 异种材料 FSW 接头成形的规律 [J]. 焊接学报, 2016, 37(6):
 23-26.

Liu Zhenlei, Cui Hutao, Ji Shude, *et al.* Effect of peak temperature on formation of 6061A1 / AZ31BMg dissimilar FSW joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 23 – 26.

- [4] Rhodnev C G, Mahonev M V, Bingel W H, *et al.* Effect of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum alloy[J]. Scripta Materialia, 2002, 37(1): 69 – 75.
- [5] Liu Liming, Tan Jinhong, Liu Xujing, *et al.* Reactive brazing of Al alloy to Mg alloy using zinc-based brazing alloy[J]. Materials Letters, 2007, 61(11): 2373 – 2377.
- [6] 张华,林三宝,吴林,等.搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报,2003,24(3):91-96.

Zhang Hua, Lin Sanbao, Wu Lin, *et al.* Current progress and prospect of friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 91 - 96.

- [7] Firouzdor Vahid, Kou Sindo. Formation of liquid and intermetallics in Al-to-Mg friction stir welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(12): 3238 – 3251.
- [8] 李丰, 党鹏飞, 刘雪松, 等. 基于不旋转轴肩的铝镁异种材料搅 拌摩擦焊 [J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 55 - 58.
 Li Feng, Dang Pengfei, Liu Xuesong, *et al.* Dissimilar friction stir welding of Al/Mg alloys based on[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 55 - 58.
- [9] 陈影,付宁宁,沈长斌,等. 镁铝异种金属搅拌摩擦焊搭接接头组织与性能分析 [J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 93 96.
 Chen Ying, Fu Ningning, Shen Changbin, *et al.* Microstructure and properties of dissimilar materials Mg/Al laped joint by friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 93 96.
- [10] 王东, 刘杰, 肖伯律, 等. 铝合金/镁合金搅拌摩擦焊接界面处 Mg/Al 反应及接头力学性能 [J]. 金属学报, 2010, 46(5): 589 -594.

Wang Dong, Liu Jie, Xiao Bolü, *et al.* Mg/Al reaction and mechanical properties of Al alloy/Mg alloy friction stir welding joints[J]. Metals Journal, 2010, 46(5): 589 – 594.

- [11] 刘奋军,傅莉,陈海燕,等. 铝合金薄板高转速搅拌摩擦焊接头 组织与力学性能 [J]. 金属学报, 2017, 53(12): 1651 – 1658. Liu Fenjun, Fu Li, Chen Haiyan, *et al.* Microstructures and mechanical properties of thin plate aluminum alloy joint prepared by high rotational speed friction stir welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(12): 1651 – 1658.
- [12] Milagre M X, Mogili N V, Donatus U, *et al.* On the microstructure characterization of the AA2098-T351 alloy welded by FSW[J]. Materials Characterization, 2018, 140: 233 – 246.
- [13] Chang Woong-Seong, Rajesh S R, Chun Chang-Keun, et al. Microstructure and mechanical properties of hybrid laser-frictionstir welding between AA6061-T6 Al alloy and AZ31 Mg alloy[J]. Journal Materials Science Technology, 2011, 27(3): 199 – 204.
- [14] 金玉花, 吴永武, 王希靖, 等. Zn 粉辅助 Al/Mg 异种合金搅拌摩 擦搭接连接 [J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(4): 26 - 30.
 Jin Yuhua, Wu Yongwu, Wang Xijing, *et al.* Zn poder-assisted friction stir lap welding of Al/Mg heterogeneous alloying plates[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(4): 26 - 30.
- [15] Wang Peng, Hu Shengsun, Shen Junqi, *et al.* Effects of electrode positive/negative ratio on microstructure and mechanical properties of Mg/Al dissimilar variable polarity cold metal transfer welded joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 652: 127 – 135.