

镍中间层对铝/镁异种金属搅拌摩擦焊接头微观组织的影响

董少康^{1,2}, 马宇航^{1,2}, 朱浩^{1,2}, 王晨雾^{1,2}, 曹志龙^{1,2}, 王军³

(1. 石家庄铁道大学, 石家庄, 050043; 2. 河北省交通工程与环境协同发展新材料重点实验室, 石家庄, 050043;
3. 河北科技大学, 石家庄, 050018)

摘要:采用搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW),引入厚度为0.05 mm镍箔作为中间层,在焊接速度不变条件下,采用不同转速对厚度为4 mm的6061铝合金和AZ31镁合金进行平板对接,对接头进行系列微观组织表征及力学性能测试,探讨转速对接头中镍颗粒分布状态,金属间化合物(intermetallic compounds, IMCs)种类与分布及接头强度的影响规律。研究结果表明:与未引入中间层接头相比,引入镍改变了铝/镁异种金属FSW接头焊核区(weld nugget zone, WNZ)中IMCs种类及分布,WNZ存在明显的镁合金与铝合金相间的带状组织,其上分布着絮状Al₁₂Mg₁₇、颗粒状Mg₂Ni、层状Al₃Mg₂及大小不一的镍箔颗粒;随着转速增加,镍箔颗粒分布愈加均匀,Al₃Mg₂数量相对减少,且脆性Al₃Mg₂由连续分布逐渐演变为断续分布;当转速为750 r/min时,接头抗拉强度达到最大值,与未引入中间层接头相比,引入镍中间层接头抗拉强度提高了56 MPa,达到镁合金的56.9%。

创新点:(1)采用系列表征手段对铝/镁异种金属FSW接头进行了微观组织表征,对IMCs的形态进行了准确表征。
(2)引入镍中间层生成了Mg₂Ni,抑制了脆性Al₃Mg₂的形成。

关键词:铝/镁异种金属;搅拌摩擦焊;镍箔中间层;金属间化合物

中图分类号:TG 457.14

文献标识码:A

doi:10.12073/j.hjxb.20211202002

0 序言

铝/镁复合结构具有密度低、比强度高以及电磁屏蔽效应等优点,广泛应用于航空航天、轨道交通等装备制造业领域^[1-3]。铝/镁异种金属焊接时,接头易形成脆性IMCs,严重降低接头力学性能,是铝/镁异种金属连接亟待解决的难题^[4-5]。FSW属于固相连接技术,可有效避免铝/镁异种金属熔化焊时出现气孔、热裂纹及热影响区(heat affected zone, HAZ)软化等问题^[6-8],同时可抑制接头中脆性IMCs的形成,在铝/镁异种金属连接方面最具发展潜力^[9-10]。

近年来,国内外众多学者对铝/镁异种金属FSW开展大量研究,主要集中在:一是优化焊接工艺,控制转速和焊接速度改善母材塑性流动行为进而改善接头微观组织;二是引入中间层元素,对接

头中IMCs种类、数量及分布进行调控,进一步提高接头强度。研究结果表明^[11-13],优化工艺参数仍无法有效避免脆性Al-Mg系IMCs的生成。因此,近年来,引入中间层元素成为铝/镁异种金属FSW研究领域的热点。Niu等人^[14]和Gan等人^[15]研究了锌中间层对铝/镁异种金属FSW接头微观组织分布特征的影响,结果表明,引入锌中间层改变了IMCs种类,接头中弥散分布的Mg-Zn IMCs代替了脆性Al-Mg系IMCs,接头抗剪强度明显提高。Zheng等人^[16]研究了锡中间层对铝/镁异种金属FSW搭接接头微观组织和力学性能的影响。结果表明,含锡接头中生成了Mg₂Sn,取代了Al-Mg系IMCs,接头最大断裂载荷达3.72 kN。Liu等人^[17]探讨了锌中间层厚度对铝/镁FSW接头抗拉强度的影响规律,研究发现,当中间层厚度为0.05 mm时,接头中连续分布的Al-Mg系IMCs被Mg-Zn系IMCs和Al-Mg-Zn三元系共晶组织完全取代,接头抗拉强度最高。

文献[18]表明Ni在Al和Mg中具有相当大的溶解度,在640和506 °C时分别发生共晶反应生

成 Al-Ni 系和 Mg-Ni 系 IMCs。基于此, 引入 0.05 mm 镍中间层, 采用不同 FSW 焊接工艺参数对铝/镁异种金属进行平板对接, 对接头进行系列微观组织表征及力学性能测试, 探讨工艺参数对接头中镍分布状态、IMCs 种类与分布及接头强度的影响规律。

1 试验方法

试验材料选用厚度为 4 mm 的 AZ31 镁合金和 6061 铝合金(供货状态 T6), 化学成分如表 1 所示。焊件尺寸为 280 mm × 150 mm × 4 mm, 焊接方式为平板对焊, FSW 装配示意图如图 1 所示。搅拌针材质为 H13 钢, 轴肩直径 12 mm, 根部直径

5 mm, 端部直径 2 mm, 针长 3.7 mm。镁合金置于前进侧, 焊接工艺参数如表 2 所示。金相试样用 4% 的硝酸酒精腐蚀镁侧 10 s, 用 Keller 试剂 (6 mL HCl + 2.5 mL HNO₃ + 1 mL HF) 腐蚀铝侧 90 s。采用 SU8010 型扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 对 FSW 接头微观组织进行分析, 借助 E1506-C2B 型能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 和 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (X-ray diffractometer, XRD) 对接头中 IMCs 种类进行精确表征。采用 CMT5105 型微机控制电子万能试验机对接头进行抗拉强度测试, 拉伸速率为 0.5 mm/min, 为保证实验数据可靠性, 每种焊接条件下制备了 3 组平行试样, 测试结果取均值。

表 1 6061 铝合金和 AZ31 镁合金的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 6061 aluminum alloys and AZ31 magnesium alloys

| 材料 | Si | Fe | Cu | Mn | Cr | Zn | Ti | Ni | Al | Mg |
|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|-----|-----|
| 6061 | 0.55 | 0.4 | 0.25 | 0.074 | 0.08 | 0.12 | 0.08 | — | 余量 | 0.8 |
| AZ31 | 0.28 | 0.001 | 0.002 | 0.33 | — | 0.71 | — | 0.0005 | 2.8 | 余量 |

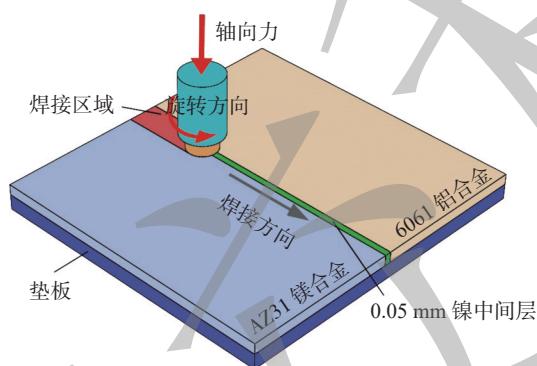


图 1 引入镍中间层铝/镁异种金属 FSW 装配示意图
Fig. 1 Schematic diagram of Al/Mg dissimilar metal FSW process with introduction of Ni interlayer

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

| 转速 $n/(r \cdot min^{-1})$ | 焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$ | 偏铝侧偏移量 d/mm | 下压量 h/mm | 倾角 $\alpha(^{\circ})$ |
|------------------------------|---------------------------------|------------------|---------------|--------------------------|
| 450, 550, 650, 750, 850 | 20 | 0.3 | 0.2 | 2.5 |

2 结果与讨论

2.1 引入镍中间层 FSW 接头微观组织

图 2 为不同转速下引入镍中间层铝/镁 FSW 接头 WNZ 微观组织形貌。从图 2 可以看出, WNZ 内母材发生明显的塑性流动而形成带状组织^[19], 转速

不同, 带状组织形貌不同。

当转速为 450 r/min 时, 由于转速相对较低, 热输入不足, 致使母材塑性流动不充分, 在 WNZ 内铝合金基体中分布着大量未完全破碎的片状镍箔颗粒, 如图 2a 所示。当转速增加到 550 r/min 时, 母材塑性流动能力增强, 大片状镍箔颗粒数量有所减少, 且分布较为离散, 如图 2b 所示。转速增至 850 r/min 时, 由于热输入过高, 热塑性金属在搅拌针搅拌和轴肩挤压的双重作用下沿轴肩边缘溢出, 使得 WNZ 内母材塑化体积减小, 从而在该区域内形成了“隧道型空洞”^[4]。

在转速 650 和 750 r/min 时得到铝/镁异种金属 FSW 接头中 WNZ 微观组织上未观察到明显缺陷, 形成了良好的机械互锁且镍元素分布较为均匀, 如图 2c 和图 2d 所示。从图 2 可以看出, 随着转速增加, 镍元素在 WNZ 内分布愈加均匀, 但接头仍然存在片状镍箔颗粒。相比转速 650 r/min, 转速为 750 r/min 的接头 WNZ 中带状组织机械互锁程度更高, 而接头强度很大程度上取决于带状组织^[20]。

为进一步探明接头 WNZ 中带状组织的微观组织构成, 对转速为 750 r/min 时接头 WNZ 微观组织进行 SEM 观察, 如图 3 所示。图 3a 为 WNZ 近镁侧边界处的微观组织形貌, 图 3b 和图 3c 为相应的放大视图, 可以看出, WNZ 由呈明暗交替的黑色条

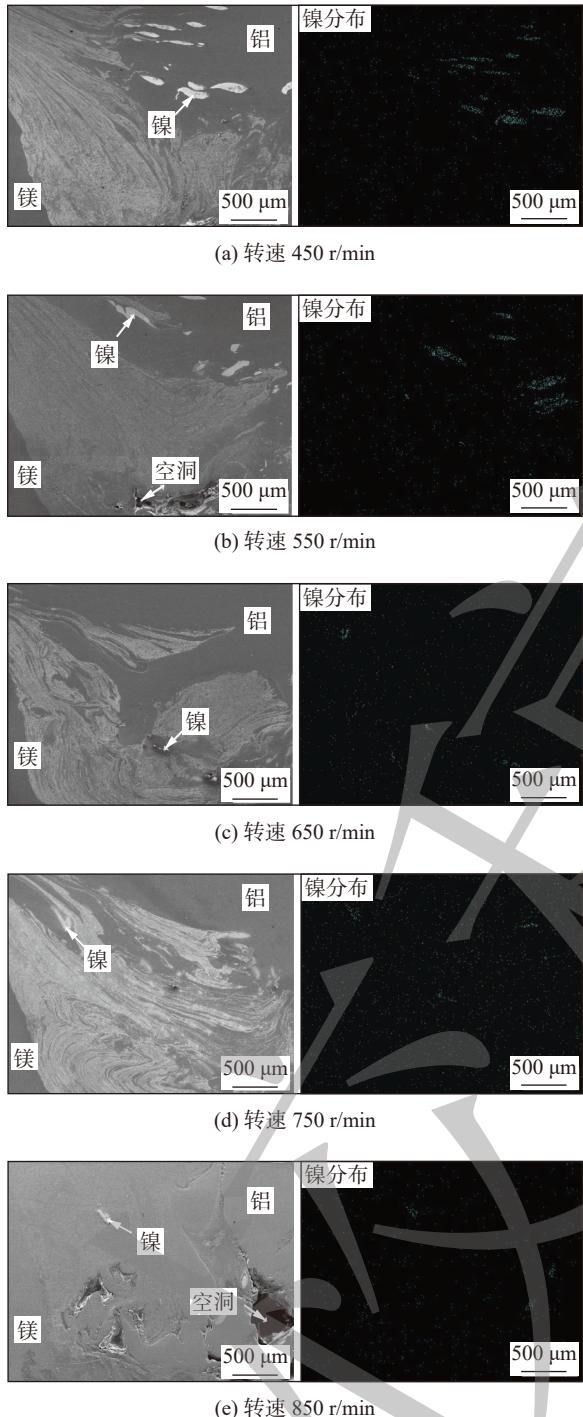


图 2 引入镍中间层 FSW 接头 WNZ 微观组织及镍元素分布

Fig. 2 Microstructure and Ni distribution of FSW joint WNZ with Ni interlayer. (a) rotation speed 450 r/min; (b) rotation speed 550 r/min; (c) rotation speed 650 r/min; (d) rotation speed 750 r/min; (e) rotation speed 850 r/min

带和白色 IMCs 所构成。为确定 IMCs 种类, 对接头 WNZ 进行 XRD 分析, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 铝/镁异种金属 FSW 接头中 IMCs 主要为 Al_3Mg_2 , $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 及 Mg_2Ni , 但未发现 $\text{Al}-\text{Ni}$ 系 IMCs。这是由于 $\text{Al}-\text{Ni}$ 系 IMCs 的最低生成温度约为 640°C ^[21], 高于铝/镁异种金属正常 FSW 工艺条

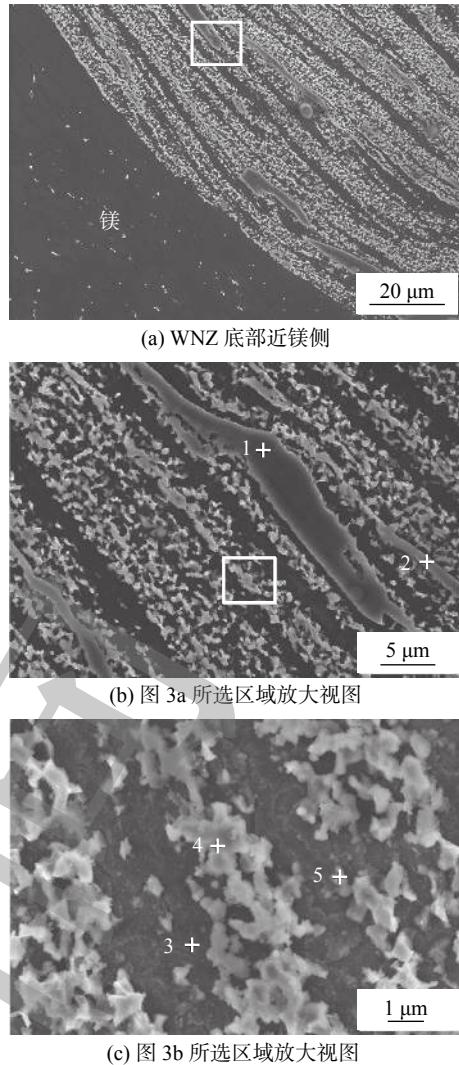


图 3 转速 750 r/min 下 FSW 接头 WNZ 微观组织

Fig. 3 Microstructure of FSW joint WNZ at rotation speed 750 r/min. (a) bottom of WNZ near Mg side; (b) enlarged view of the selected area in Fig. 3a; (c) enlarged view of the selected area in Fig. 3b

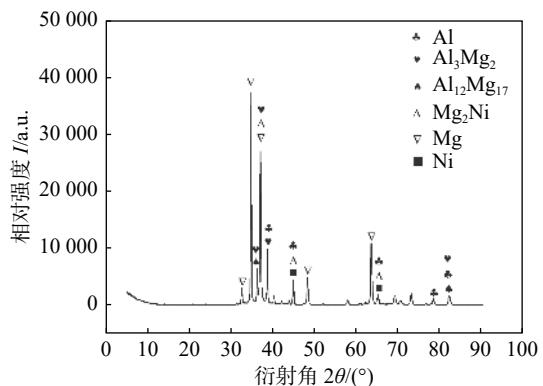


图 4 铝/镁异种金属 FSW 接头 XRD 分析结果

Fig. 4 XRD result of Al/Mg dissimilar metal FSW joint

件下的峰值温度, 在焊接过程中难以形成所致。

为进一步确定接头中 IMCs 种类, 选取图 3 所

示 5 个位置, 对 WNZ 典型 IMCs 进行了 EDS 分析, 其 EDS 结果如表 3 所示。由表 3 可知, 白色絮状 IMCs 为 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, 颗粒状 IMCs 为 Mg_2Ni , 灰色层状 IMCs 为 Al_3Mg_2 。综上所示, 镍中间层可以改变铝/镁异种金属 FSW 接头 IMCs 种类, 生成颗粒状 Mg_2Ni 抑制脆性层状 Al_3Mg_2 的形成。

表 3 WNZ 内典型 IMCs EDS 分析结果(原子分数, %)
Table 3 EDS results of typical IMCs in WNZ

| 位置 | Al | Mg | Ni | 相 |
|----|-------|-------|------|--|
| 1 | 57.52 | 42.28 | 0.20 | Al_3Mg_2 |
| 2 | 56.29 | 42.60 | 1.11 | Al_3Mg_2 |
| 3 | 3.02 | 96.52 | 0.46 | Mg 基体 |
| 4 | 35.27 | 64.62 | 0.11 | $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \text{Mg}$ |
| 5 | 2.16 | 92.47 | 5.37 | $\text{Mg}_2\text{Ni} + \text{Mg}$ |

图 5 为不同焊接工艺参数下铝/镁异种金属 FSW 接头 WNZ 微观组织形貌。当转速为 450 r/min 时, 大量镁合金条带在搅拌针的作用下沉积于 WNZ 底部, 降低了母材的冶金结合。当转速增加至 550 r/min 时, 接头冶金结合效果明显改善, 但大量脆性层状 Al_3Mg_2 呈长而直形态连续分布于近镁合金侧热力影响区(thermo mechanical affected zone, TMAZ) 和 WNZ 边界处, 如图 5b 所示。由于 Al_3Mg_2 具有较大的室温脆性^[22], 在拉伸加载过程中裂纹往往于此处萌生扩展。此外, 当转速增加到 650 和 750 r/min 时, 脆性层状 Al_3Mg_2 数量显著减少, 且其

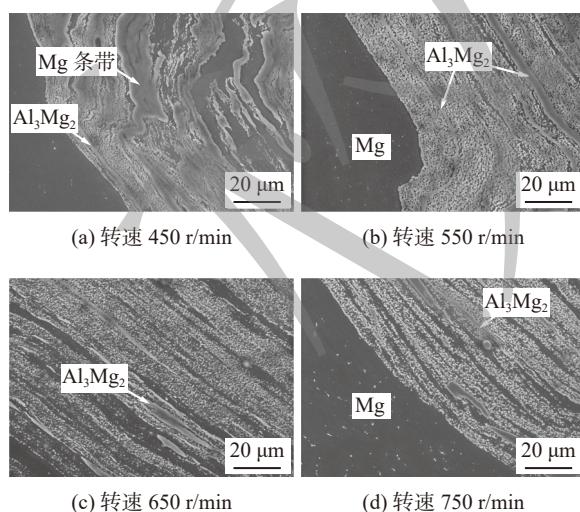


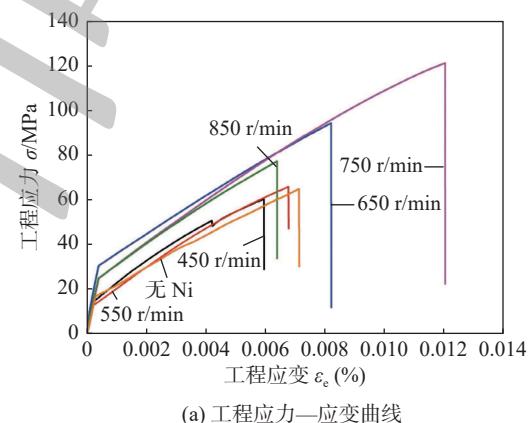
图 5 不同转速下引入镍中间层铝/镁异种金属 FSW 接头 WNZ 微观组织

Fig. 5 Microstructure of WNZ of Al/Mg dissimilar metal FSW joint with Ni interlayer under different rotation speeds. (a) rotation speed 450 r/min; (b) rotation speed 550 r/min; (c) rotation speed 650 r/min; (d) rotation speed 750 r/min

连续分布状态得到明显改善, 在 WNZ 内呈断续分布, 如图 5c 和图 5d 所示。由于 Mg_2Ni 先于 Al_3Mg_2 形成^[23], 而 Ni 在 WNZ 内的均匀分布, 促进了 Mg 和 Ni 的结合, 从而抑制了脆性层状 Al_3Mg_2 的形成。

2.2 引入镍中间层 FSW 接头力学性能

图 6 为不同转速下引入镍中间层铝/镁异种金属 FSW 接头工程应力—应变曲线和抗拉强度。从图 6 可以看出, 随着转速增加, 接头抗拉强度先增大后减小, 当转速为 750 r/min 时, 接头抗拉强度达到最大值 121 MPa。在较低转速下, 由于材料混合不充分, 致使 WNZ 出现“隧道型空洞”, 降低了接头冶金结合效果。在拉伸过程中, 缺陷边缘处存在应力集中, 严重影响接头强度。此外, 由图 5b 可知, 在近镁合金侧 TMAZ 和 WNZ 边界处存在大量连续分布的脆性层状 Al_3Mg_2 , 为裂纹的萌生和扩展提供了有利场所, 加速了接头断裂失效, 所以其抗拉强度较低, 如图 6b 所示。而在转速 650 r/min 下得到的 FSW 接头, 虽无任何明显缺陷且脆性 Al_3Mg_2



(a) 工程应力—应变曲线

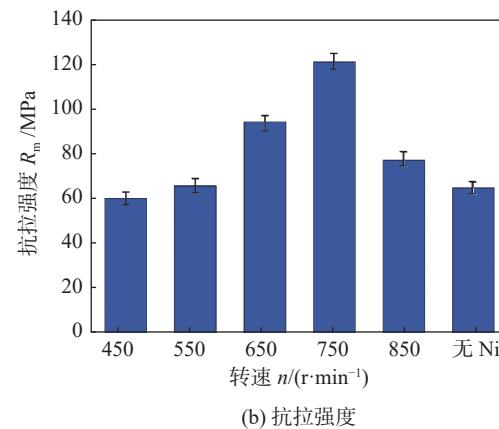


图 6 不同转速下 FSW 接头工程应力—应变曲线及抗拉强度

Fig. 6 Engineering stress—strain curve and tensile strength of the FSW joints under different rotation speeds. (a) engineering stress—strain curve; (b) tensile strength

数量及分布状态得到显著改善,但由于在其 WNZ 内存在较大体积未发生冶金反应的铝合金条带(图 2c),一定程度上阻碍了母材的有效结合,机械互锁效应减弱,使得拉伸加载过程中相邻区域变形不协调,产生应力集中,加速裂纹的萌生和扩展。

当转速增加至 850 r/min 时,热塑性变形金属以“飞边”形式于轴肩边缘溢出,使得其在 WNZ 形成了“隧道型空洞”缺陷,严重降低接头强度。而当转速为 750 r/min 时,接头 WNZ 组织均匀致密,形成了良好的机械互锁,镍的分布更加均匀,有效抑制了脆性层状 Al_3Mg_2 的生成,且断续的 Al_3Mg_2 在 WNZ 内呈弥散分布,显著增加了裂纹扩展阻力,因而其具有最高抗拉强度,达到镁合金的 56.9%。

2.3 未引入镍中间层 FSW 接头组织和力学性能

图 7 为转速 750 r/min、焊接速度 20 mm/min 下铝/镁异种金属 FSW 接头 WNZ 微观组织形貌。从图 7 可以看出,未引入镍中间层接头 WNZ 存在大量呈长而直形态连续分布的脆性层状 Al_3Mg_2 ,在拉伸加载过程中裂纹往往形核于此,并依附于脆性 IMCs 迅速扩展,严重降低接头强度,接头抗拉强度仅 65 MPa,如图 6b 所示。而引入镍中间层接头 WNZ 内 Al_3Mg_2 含量显著减少,且多为断续形态弥散分布于 WNZ 内,增大了裂纹扩展阻力。此外,由于 Mg-Ni 系 IMCs 较于 Al-Mg 系 IMCs 具有较低的脆硬性^[24],因而其接头强度较高。

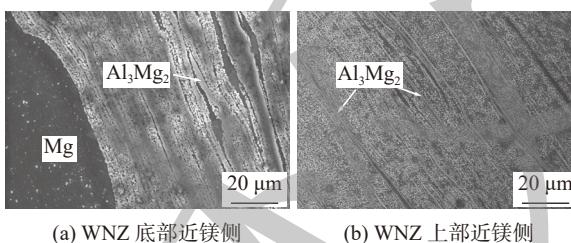


图 7 未引入镍中间层 FSW 接头 WNZ 微观组织

Fig. 7 Microstructure of WNZ of FSW joint without Ni interlayer. (a) bottom of WNZ near Mg side; (b) upper of WNZ near Mg side

3 结论

(1) 与未引入中间层接头相比,引入镍改变了铝/镁异种金属 FSW 接头 WNZ 中 IMCs 种类及分布,WNZ 存在明显的镁合金与铝合金相间的带状组织,其上分布着絮状 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 、颗粒状 Mg_2Ni 、层状 Al_3Mg_2 及大小不一的镍箔颗粒。随着转速增加,镍箔颗粒分布愈加均匀, Al_3Mg_2 数量相对减少,且

脆性 Al_3Mg_2 由连续分布逐渐演变为断续分布。

(2) 当转速为 750 r/min 时,接头抗拉强度达到最大值,与未引入中间层接头相比,引入镍中间层接头抗拉强度提高了 56 MPa,达到镁合金的 56.9%。

参考文献

- Zhao Y, Lu Z P, Yan K, et al. Microstructural characterizations and mechanical properties in underwater friction stir welding of aluminum and magnesium dissimilar alloys[J]. Materials & Design, 2015, 65: 675 – 681.
- 陈影, 沈长斌, 葛继平. Mg/Al 异种金属焊接的研究现状 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(supplement 2): 109 – 11. Chen Ying, Shen Changbin, Ge Jiping. Research progress on the welding of Mg/Al dissimilar metals[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(supplement 2): 109 – 11.
- Dorbane A, Mansoor B, Ayoub G, et al. Mechanical, microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ31B and Al6061[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 650: 720 – 733.
- Rao H M, Ghaffari B, Yuan W, et al. Effect of process parameters on microstructure and mechanical behaviors of friction stir linear welded aluminum to magnesium[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 651: 27 – 36.
- Fu B L, Qin G L, Li F. Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 218: 38 – 47.
- Mo S X, Dong S K, Zhu H, et al. Corrosion behavior of aluminum/steel dissimilar metals friction stir welding joint[J]. China Welding, 2021, 30(3): 20 – 30.
- 许志武, 李政伟, 冯艳, 等. 静轴肩辅助铝镁搅拌摩擦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.
- 李达, 孙明辉, 崔占全. 工艺参数对铝镁搅拌摩擦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. Effect of parameters on friction stir welding joint of Al and Mg[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(8): 97 – 100.
- Verma J, Taiwade R V, Reddy C, et al. Effect of friction stir welding process parameters on Mg-AZ31B/Al-AA6061 joints[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2018, 33(3): 308 – 314.
- Sachin K, Wu C S. Suppression of intermetallic reaction layer by ultrasonic assistance during friction stir welding of Al and Mg based alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827:

- 154343.
- [11] Boccarusso L, Astarita A, Carlone P, et al. Dissimilar friction stir lap welding of AA 6082-Mg AZ31: Force analysis and microstructure evolution[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44: 376 – 388.
- [12] Sun T, Wu S Y, Shen Y F, et al. Effect of traverse speed on the defect characteristic, microstructure, and mechanical property of friction stir welded T-joints of dissimilar Mg/Al alloy[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(3): 1 – 15.
- [13] Bandi A, Bakshi S R. Effect of pin length and rotation speed on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded lap joints of AZ31B-H24 Mg alloy and AA6061-T6 Al alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(12): 6269 – 6282.
- [14] Niu S Y, Ji S D, Yan D J, et al. AZ31B/7075-T6 alloys friction stir lap welding with a zinc interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 263: 82 – 90.
- [15] Gan R G, Jin Y H. Friction stir-induced brazing of Al/Mg lap joints with and without Zn interlayer[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(2): 164 – 171.
- [16] Zheng B, Zhao L, Lv Q Q, et al. Effect of Sn interlayer on mechanical properties and microstructure in Al/Mg friction stir lap welding with different rotational speeds[J]. Materials Research Express, 2020, 7(7): 076504.
- [17] Liu J L, Niu S Y, Ren R, et al. Improving joint morphologies and tensile strength of Al/Mg dissimilar alloys friction stir lap welding by changing Zn interlayer thickness[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32(11): 1385 – 1395.
- [18] Zhang J, Luo G Q, Wang Y Y, et al. An investigation on diffusion bonding of aluminum and magnesium using a Ni interlayer[J]. Materials Letters, 2012, 83: 189 – 191.
- [19] Shi H, Chen K, Liang Z Y, et al. Intermetallic compounds in the banded structure and their effect on mechanical properties of Al/Mg dissimilar friction stir welding joints[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2017, 33(4): 359 – 366.
- [20] 朱浩, 张二龙, 莫淑娴, 等. 带状组织对铝/镁异种金属搅拌摩擦焊接力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2020, 41(1): 34 – 38, 66. Zhu Hao, Zhang Erlong, Mo Shuxian, et al. Effect of banded structure on mechanical properties of aluminum/magnesium dissimilar metal friction stir welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(1): 34 – 38, 66.
- [21] Dupin N, Ansara I, Sundman B. Thermodynamic re-assessment of the ternary system Al-Cr-Ni[J]. Calphad, 2001, 25(2): 279 – 298.
- [22] Peng P, Wang W, Zhang T, et al. Effects of interlayer metal on microstructures and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar joints of magnesium and aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 299: 117362.
- [23] Hajjari E, Divandari M, Razavi S H, et al. Dissimilar joining of Al/Mg light metals by compound casting process[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(20): 6491 – 6499.
- [24] Chang W S, Rajesh S R, Chun C K, et al. Microstructure and mechanical properties of hybrid laser-friction stir welding between AA6061-T6 Al alloy and AZ31 Mg alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2011, 27(3): 199 – 204.

第一作者: 董少康, 硕士研究生; 主要研究方向为先进材料连接及接头可靠性; Email: 2454327752@qq.com.

通信作者: 朱浩, 博士, 教授; Email: zhuhao@stdu.edu.cn.

(编辑: 张芷晴)