

# 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<sup>1,2</sup>, 马宇航<sup>1,2</sup>, 朱浩<sup>1,2</sup>, 王晨霖<sup>1,2</sup>, 曹志龙<sup>1,2</sup>, 王军<sup>3</sup>

(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  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 、颗粒状  $\text{Mg}_2\text{Ni}$ 、层状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  数量相对减少, 且脆性  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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  $\text{Mg}_2\text{Ni}$ , 抑制了脆性  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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<sup>[1-3]</sup>。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<sup>[4-5]</sup>。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<sup>[6-8]</sup>, 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<sup>[9-10]</sup>。

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。研究表明<sup>[11-13]</sup>, 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<sup>[14]</sup>和 Gan 等人<sup>[15]</sup>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<sup>[16]</sup>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  $\text{Mg}_2\text{Sn}$ , 取代了 Al-Mg 系 IMCs, 接头最大断裂载荷达 3.72 kN。Liu 等人<sup>[17]</sup>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 HNO<sub>3</sub> + 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

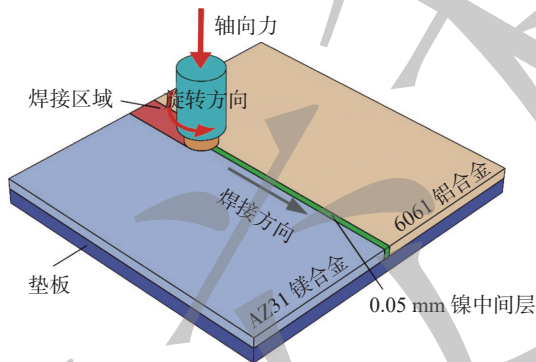


图 1 引入镍中间层铝/镁异种金属 FSW 装配示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of Al/Mg dissimilar metal FSW process with introduction of Ni interlayer

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

转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$	偏铝侧偏移量 $d/\text{mm}$	下压量 $h/\text{mm}$	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<sup>[19]</sup>, 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”<sup>[4]</sup>.

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<sup>[20]</sup>.

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



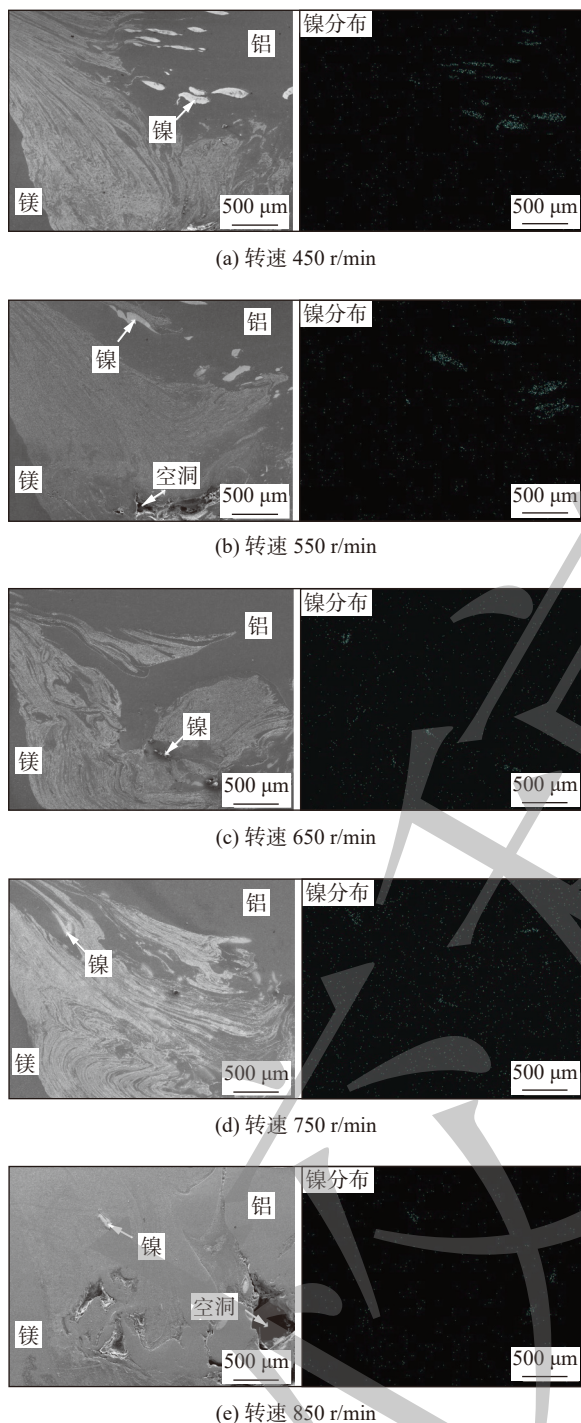


图 2 引入镍中间层 FSW 接头 WNZ 微观组织及镍元素分布

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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ,  $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  及  $\text{Mg}_2\text{Ni}$ , 但未发现 Al-Ni 系 IMCs。这是由于 Al-Ni 系 IMCs 的最低生成温度约为  $640\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[21]</sup>, 高于铝/镁异种金属正常 FSW 工艺条

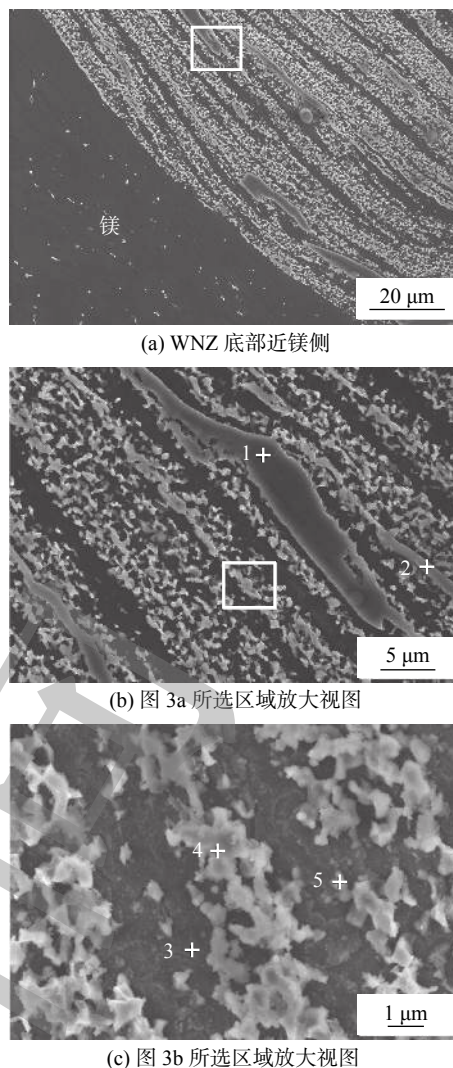


图 3 转速 750 r/min 下 FSW 接头 WNZ 微观组织

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

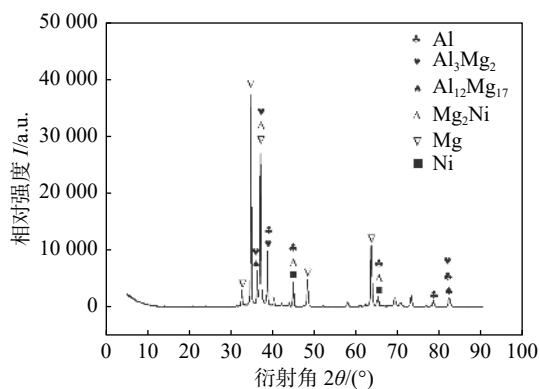


图 4 铝/镁异种金属 FSW 接头 XRD 分析结果

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  $\text{Mg}_2\text{Ni}$ ,灰色层状 IMCs 为  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ .综上所述,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  $\text{Mg}_2\text{Ni}$  抑制脆性层状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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	$\text{Al}_3\text{Mg}_2$
2	56.29	42.60	1.11	$\text{Al}_3\text{Mg}_2$
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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  具有较大的室温脆性<sup>[22]</sup>,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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  数量显著减少,且其

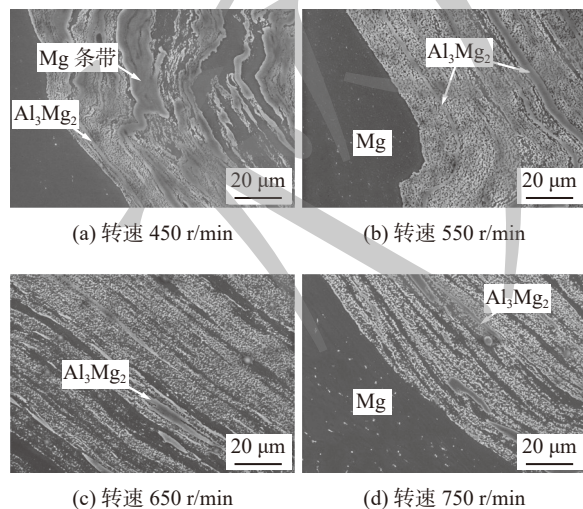


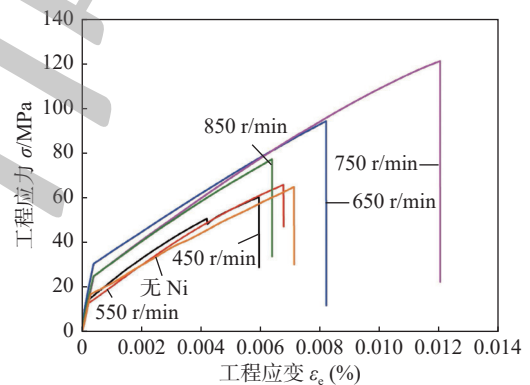
图 5 不同转速下引入镍中间层铝/镁异种金属 FSW 接头 WNZ 微观组织

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

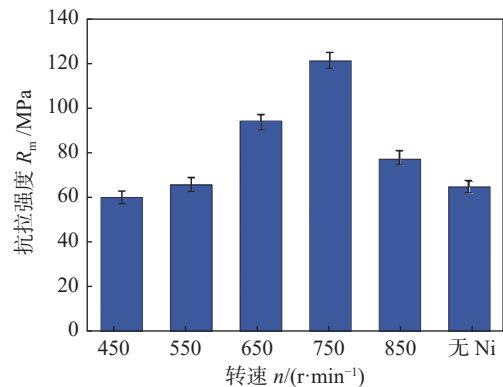
连续分布状态得到明显改善,在 WNZ 内呈断续分布,如图 5c 和图 5d 所示.由于  $\text{Mg}_2\text{Ni}$  先于  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  形成<sup>[23]</sup>,而 Ni 在 WNZ 内的均匀分布,促进了 Mg 和 Ni 的结合,从而抑制了脆性层状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  的形成.

## 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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ,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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$



(a) 工程应力—应变曲线



(b) 抗拉强度

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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  的生成,且断续的  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ,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  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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<sup>[24]</sup>,因而其接头强度较高。

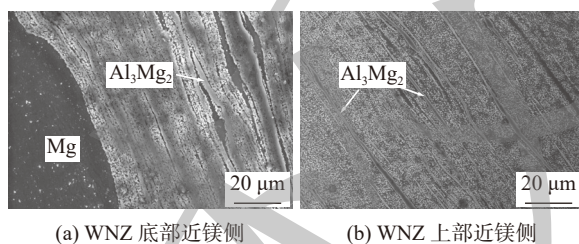


图 7 未引入镍中间层 FSW 接头 WNZ 微观组织  
Fig. 7 Microstructure of WNZ of FSW joint without Ni interlayer. (a) bottom of WNZ near Mg side; (b) upper of WNZ near Mg side

## 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  $\text{Mg}_2\text{Ni}$ 、层状  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  数量相对减少,且

脆性  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  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

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 许志武, 李政玮, 冯艳, 等. 静轴肩辅助铝镁搅拌摩擦焊接接头的组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(4): 1 – 6.
- [9] 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.
- [10] 李达, 孙明辉, 崔占全. 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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头力学性能的影响 [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: zuhao@stdu.edu.cn.

(编辑: 张芷晴)