

AZ31B 镁合金与 316L 不锈钢的 搅拌摩擦钎焊及其中间层优化

赵启宏, 张贵锋, 畅海丞, 江馨, 王书杰

(西安交通大学金属材料强度全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对镁合金耐蚀性和耐磨性较差, 以及传统熔焊方法难以有效连接镁和钢等问题, 提出了采用搅拌摩擦钎焊技术连接 AZ31B 镁合金和 316L 不锈钢。首先, 利用搅拌摩擦钎焊工艺制备不同厚度 Zn 箔和 Ni 箔的镁/钢搭接接头; 然后, 从接头的润湿性、微观组织和力学性能等方面研究其可行性; 最后, 阐明了不同钎料的界面反应特征和机制。实验结果表明: Zn 箔只对镁合金一侧有良好的润湿性, 对不锈钢表面几乎不润湿, Zn 箔熔化后在接头处形成 $\alpha\text{-Mg} + \text{MgZn}$ 的共析组织, 接头最大剪切强度为 27.38 MPa, 表现为脆性断裂; Ni 箔对两侧母材润湿良好, 在接头处形成亚共晶组织 $\alpha\text{-Mg}_I + [\text{Mg}(\text{Ni}) \text{ 或 } \alpha\text{-Mg}_{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})]$ 和共晶组织 $\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ 或 Mg_2Ni , 接头剪切强度随钎料厚度的增加先增大后减小, 在钎料厚度为 0.03 mm 时可达 58.24 MPa, 表现为脆性断裂+韧性断裂。提出的搅拌摩擦钎焊工艺可通过对中间层进行优化, 获得致密性高、润湿性良好、单道焊幅宽、强度高的镁合金/不锈钢搭接接头。

关键词: 镁/钢; 搅拌摩擦钎焊; 中间层; 微观组织; 剪切强度

中图分类号: TG454 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202508021 **文章编号:** 0253-987X(2025)08-0223-10

Stir Friction Brazing and Interlayer Optimization for AZ31B Magnesium Alloy and 316L Stainless Steel

ZHAO Qihong, ZHANG Guifeng, CHANG Haicheng, JIANG Xin, WANG Shujie

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the poor corrosion and wear resistance of magnesium alloys, as well as the challenges of effectively joining magnesium and steel using traditional welding methods, the use of stir friction brazing technology is proposed to connect AZ31B magnesium alloy and 316L stainless steel. First, different thicknesses of Zn and Ni foils are used to fabricate magnesium/steel lap joints using the stir friction brazing process. The feasibility of these joints is then examined from the perspectives of wettability, microstructure, and mechanical properties. Finally, the interfacial reaction characteristics and mechanisms of different brazing materials are elucidated. Experimental results indicate that Zn foil exhibits good wettability on the magnesium alloy side but almost none on the stainless-steel surface. When the Zn foil melts, it forms a eutectoid structure $\alpha\text{-Mg} + \text{MgZn}$ at the joint, with a maximum shear strength of 27.38 MPa, resulting in brittle fracture. Conversely, Ni foil demonstrates good wettability on both base

收稿日期: 2025-01-05。 作者简介: 赵启宏(2000—), 男, 硕士生; 张贵锋(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金

项目: 陕西省科技成果转移与推广计划-吸纳成果转化资助项目(2019CGXNG-026)。

网络出版时间: 2025-04-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250402.1537.002>

materials, leading to the formation of a hypoeutectic structure $\alpha\text{-Mg}_I + [\text{Mg}(\text{Ni}) \text{ or } \alpha\text{-Mg}_{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})]$ and eutectic structure $\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ or Mg_2Ni at the joint. The shear strength of the joint initially increases and then decreases with increasing brazing material thickness, reaching 58.24 MPa at a thickness of 0.03 mm, exhibiting a combination of brittle and ductile fracture. The proposed stir friction brazing process can achieve high density, good wettability, wide single-pass welds, and high strength in magnesium alloy/stainless steel lap joints through interlayer optimization.

Keywords: magnesium/steel; friction stir brazing; interlayer; microstructure; shear strength

作为一种轻质金属,镁的密度较低,约为铝的2/3,钢材的1/4^[1],但镁合金以其比强度高、阻尼吸震性和导热性好、电磁屏蔽能力强等优良特点已成为目前的研究热点^[2]。然而,钢材由于具有较高的强度、良好的塑韧性、较强的耐热性等优点,仍是目前工业领域最为常见的金属结构材料。镁合金和钢的连接是实现汽车等零部件轻量化的重要途径之一^[3-4],已成为异种金属焊接研究的热点与难点。

然而,镁的沸点(1 091 ℃)远远小于钢的熔点(1 495 ℃),当钢熔化时会引起镁的剧烈汽化。此外,根据 Mg-Fe 二元相图,Mg 和 Fe 之间无相互作用,既不互溶,也不会产生金属间化合物^[4],故熔焊时存在 Mg 气孔及对钢润湿性差的问题。因此,需要通过预镀层、箔片、填充粉末、焊丝等方法^[5]添加合金元素,以改善界面的润湿性与合金化。

迄今为止,已报道的连接镁/钢的方法主要有熔-钎焊、电阻点焊、扩散焊、搅拌摩擦焊等。其中,以钎焊为主的方法主要利用钎焊焊接温度低、可引入钎料改善界面润湿性的特点。Ren 等^[6]采用碳钢类焊丝对 AZ31 镁合金和 Q235 钢进行 MIG 熔-钎焊,通过加入 Cu 箔中间层,在接头内形成了 $\text{Al}_3\text{Cu}_4\text{Fe}_3$ 和 Fe_4Cu_3 金属间化合物层,最大抗剪载荷约为 3.5 kN。Nasiri 等^[7-11]采用 Mg-Al 系焊丝作为填充金属,配用氯化物钎剂,在镁合金与钢的激光熔-钎焊的实验中发现:钢表面的不同镀层(Zn、Sn、Ni、Al)均能促进填充金属对母材的润湿。Zn 镀层通常会形成 $\alpha\text{-Mg} + \text{MgZn}$ 共晶、 FeAl_3 金属间相及部分 $\text{Mg}_2(\text{Al}, \text{Zn})_3$ 相,其最大拉剪强度可达 146.5 N/mm²; Sn 镀层最重要的作用是保持钢表面无氧化,其对最终的结合并无太大帮助; Ni 镀层与钢在表面形成 Fe(Ni) 过渡层,还存在 $\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2\text{Ni}$ 的共晶层,促进了镁/钢的结合,其平均断裂抗剪强度达到 96.8 MPa; Al-12Si 涂层在钎焊界面处出现了厚度不均匀的 $\theta\text{-FeAl}_3$ 金属间化合物层,

这一界面层的生成证实了镁钢之间的冶金结合。Feng 等^[12]在电阻点焊 AZ31B 镁合金与 DP600 镀锌钢时,通过加入 Q235 镀锌钢中间层的方式使 DP600 镀锌层熔化后被挤出,并在外围形成焊接区,起到机械密封作用的同时加强了接头的固相结合和钎焊效果。文献[13-14]采用电阻点焊在镁合金与不锈钢间添加 FeCoNiCrMn 高熵合金,既减少了 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 金属间化合物的生成,有效提高了接头的力学性能,又通过在钢材表面加入镀层改善了润湿性并形成机械保护。在目前的扩散焊工艺中,通常利用(固相扩散焊+液相扩散焊)分步工艺^[15-17],先将钢材与合金层在较高温下进行固态扩散连接,然后又在较低温度下与镁合金完成液相扩散焊接。通过在钢界面处形成扩散层,提高接头的力学性能,但接头内金属间化合物又限制了强度的进一步提高。刘骁等^[18-19]采用无匙孔搅拌摩擦点焊,使得镁合金与镀锌钢的接头由机械结合和冶金结合共同作用,其中机械结合起到了决定性作用。Chen 等^[20-21]对 AZ31 镁合金与镀锌钢进行了搅拌摩擦搭接焊,结果表明:液态 Mg-Zn 共晶层能够将氧化物和杂质排出界面,改善了两母材之间的焊接性;与此同时,通过改进搅拌工具可提高接头的断裂载荷。

西安交通大学张贵锋发明了搅拌摩擦钎焊(FSB)新方法^[22-24],可用于异种金属搭接焊及制备层状复合板。FSB 能够免去在钢材表面预镀或预焊中间层的工序,具有简化焊接工艺流程、去膜效果优良(塑性变形强化基体溶解+挤出液相带走氧化膜碎屑)、消除钩状缺陷并改善界面密合、消除针尖磨损与匙孔、拓宽单道焊接宽度、提高焊接效率等优点。本文选用 AZ31B 镁合金与 316L 不锈钢开展搅拌摩擦钎焊实验,利用摩擦热使钎料箔熔化,同时利用搅拌头在镁合金表面的挤压、扭转促进破膜,再通过优化钎料改善润湿,达到冶金结合的目的。同时,通过对接头润湿性、微观组织和力学性能方面的

研究,验证搅拌摩擦钎焊 AZ31B/316L 的可行性,并阐明不同钎料的界面反应特征和机制,以优化钎料的成分与厚度。

1 试验及方法

试验选用尺寸为 150 mm×80 mm×3 mm 的 AZ31B 镁合金板(Mg、Al、Zn、Mn、S 各元素的质量分数分别为 95.405%、3%、1.0%、0.58%和 0.015%)及相同尺寸的 316L 不锈钢板(Fe、Cr、Ni、Mo、Mn、Al 各元素的质量分数分别为 69.51%、16.74%、10.26%、2.26%、1.20%和 0.03%)作为母材。所用中间层合金元素为市售纯 Zn 箔和纯 Ni 箔两种,厚度分别为 0.01、0.02、0.03 mm 和 0.01、0.02、0.03、0.04 mm。焊接设备为 X52K 立式升降铣床,搅拌工具为自行设计的直径为 40 mm 的无针宽肩搅拌头,材质为 W18Cr4V 高速钢。如图 1(a)所示,传统搅拌头一般多为窄肩带针工具,在焊接硬质材料时易出现针的磨损,并在焊后出现匙孔缺陷。为了增加产热和增强扭转作用以辅助去膜,将轴肩直径扩大到 40 mm,并去除搅拌针。由于宽肩产热较大,因此增加了较多的散热孔,并加长了搅拌头的整体长度,防止热量过高导致焊接设备烧损。

焊接前,用 240#、600# 砂纸逐次打磨母材,再用无水乙醇溶液清洗板面。将钎料箔裁剪成宽度为 40 mm、长度为 150 mm 的长方形,放于无水乙醇溶液中用超声波清洗机清洗 2 min 后取出晾干。装配采用“镁合金/钎料箔/不锈钢”的完全重叠复合结构,钎料箔放置在板材中心位置。装夹和测温方式如图 1(b)所示,采用双边压紧可最大程度限制焊后热应力所引起的收缩。焊接过程中,采用温度记录仪和 K 型热电偶仪测温。

由于 Mg-Zn 最低共晶温度仅有 340℃,因此将 Zn 箔作为中间层时,可采用较低热输入,最终优选焊接参数为:转速 1 500 r/min,倾角 2°,焊接速度 118 mm/min,压入深度 0.3 mm;由于 Ni 的熔点高达 1 455℃,FSB 工艺难以将其熔化,但其最低 Mg-Ni 共晶温度为 506℃,因此可采用较高热输入,通过共晶反应使钎料熔化,最终优选焊接参数为:转速 1 500 r/min,倾角 2°,焊接速度 37.5 mm/min,压入深度 0.5 mm。搅拌摩擦钎焊工艺焊接镁合金/不锈钢的示意图如图 1(c)所示。焊接过程中需要观察到中间层金属发生熔化后,再以设定的焊接速度前进。

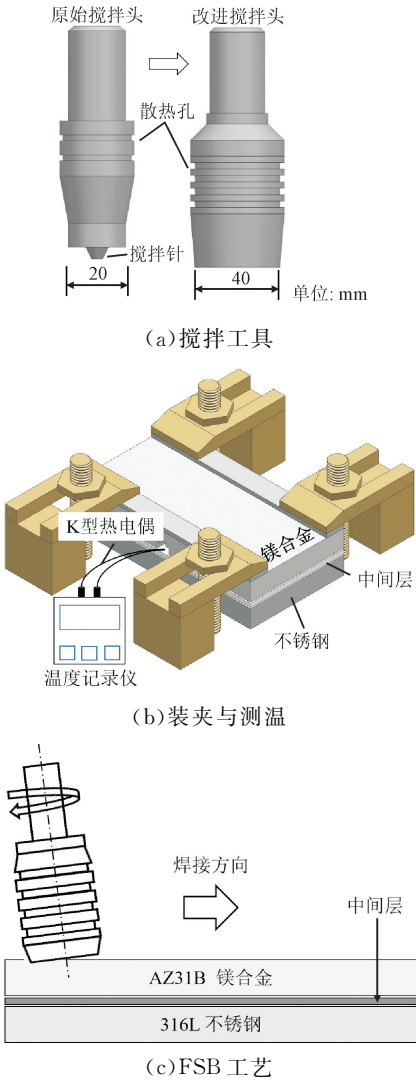


图 1 搅拌摩擦钎焊工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of friction stir brazing process

参考国标 GB/T 6396—2008 设计了压剪试样与压剪测试装置,如图 2 所示。压缩速率为 0.5 mm/min,每个工艺参数测试 3 个焊接接头。采用扫描电子显微镜(SEM)和能谱(EDS)分析钎料润湿性结果、接头微观组织、元素分布及断口形貌。

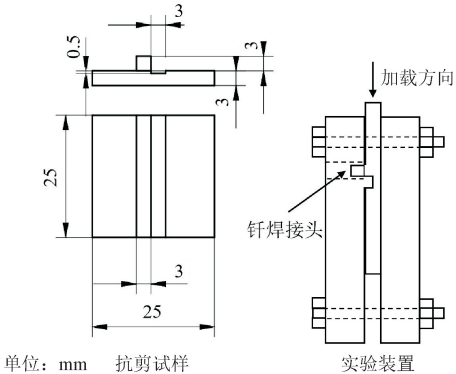


图 2 抗剪试样与抗剪实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shear sample and shear test device

2 结果与讨论

2.1 AZ31B/Zn/316L 接头显微组织

厚度为 0.03 mm Zn 箔作为中间层的搅拌摩擦钎焊结果的微观形貌如图 3 所示。图 3(a)为低倍下整个接头的全貌,可以看出,Zn 已被全部熔化,但对不锈钢一侧润湿性较差,因此仅选取接头两侧和中心两个位置进行分析。图 3(b)、3(c)给出了接头中心位置的高倍组织图,可以看到,Zn 箔在熔化后沿晶界溶解 AZ31 母材,对镁合金一侧润湿良好;而不锈钢母材侧全界面润湿性差,存在大小不等的间隙,冶金结合率接近于 0,主要以机械嵌合为主。接头中心区因为液相的挤出,钎缝厚度减小到 10~20 μm。表 1 给出了图 3 中各点的 EDS 点扫描结果,可以看出,A、B 点的能谱分析结果相近,其 Zn 原子含量恰好落在 Mg-Zn 相图的共晶成分 Mg-28.1%Zn 附近。由于在冷却中会相继发生共晶反应(340 ℃)与共析反应(325 ℃),因此判断此处生成了共析组织,但该共析组织组成相的厚度极薄导致难以区分,Li 等^[25]在镀锌钢板与 AZ31 的填丝激光熔-钎焊接头界面也观察到了类似的共析组织。图 3(d)和 3(e)分别为接头后退侧和前进侧的高倍组织图,可以看出因受到大的挤压作用,前进侧的液相厚度小于后退侧。EDS 点扫结果显示,后退侧与前进侧除共析组织外(E 点),还有大量初生 α-Mg(C 点)和 MgZn 金属间化合物(D 点),这表明钎缝的主元素已由 Zn 变为 Mg,Zn 的摩尔分数已由焊前的 100%降为 25%~46%,Mg 溶解显著而 Fe 的溶解较弱。钎缝中心的 α-Mg+MgZn 共析组织中存在着 MgZn 金属间化合物,恶化了钎缝的塑性并使热应力危害加剧,其局部已有部分显微裂纹萌生,加之中心区钎缝薄,扭转作用使得显微裂纹易从界面 MgZn 经短距离即可扩展至 AZ31 表面。

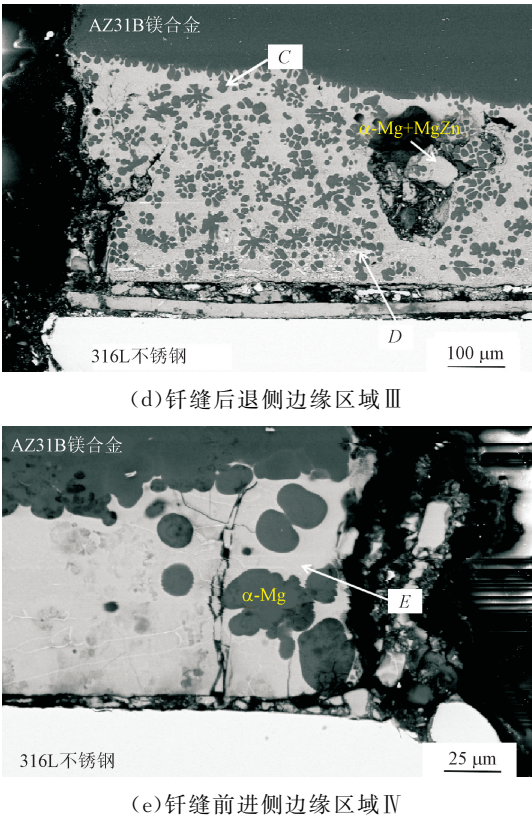
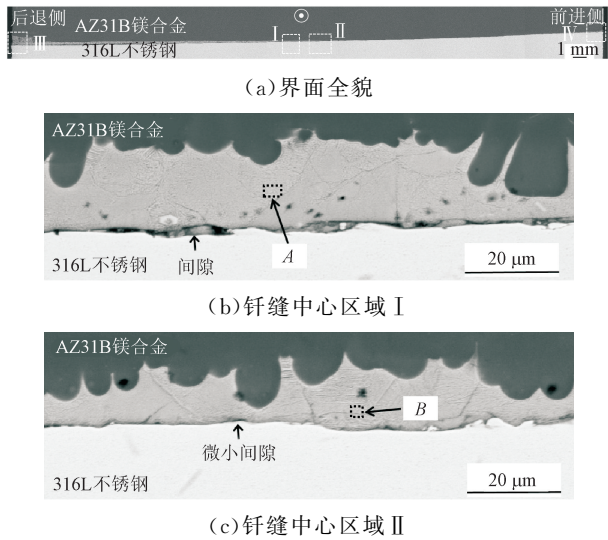


图 3 0.03 mm 厚度 Zn 箔作为中间层的搅拌摩擦钎焊接头的微观组织
Fig. 3 Microstructure of friction stir brazing joint of Zn foil as an intermediate layer with a thickness of 0.3 mm

表 1 图 3 中各点的 EDS 扫描结果

Table 1 EDS point scanning result of points in Fig. 3

位置	摩尔分数/%					推测相组织
	Mg	Zn	O	Al	Fe	
A	69.6	25.9	2.3	2.2		α-Mg+MgZn
B	67.6	25.6	3.4	2.6	0.8	α-Mg+MgZn
C	94.3	3.7	2.0			α-Mg
D	49.5	45.3	3.2	2.0		MgZn
E	64.9	29.7	3.0	2.4		α-Mg+MgZn

在钎缝中检测出微量 Fe 元素,表明搅拌摩擦钎焊工艺虽具有一定的机械去膜能力,但由于 Mg-Zn 共晶反应所得 Mg-Zn-Al 液相中 Mg 元素的原子数占比极高,即使存在着 Mg、Zn、Al 的还原去膜能力与搅拌工具的机械去膜能力,仍导致高 Mg 液相对不锈钢一侧的润湿性较差。这一分析与结果表明,高摩尔分数 Zn(25%~46%)的出现并不能提高 Mg-Zn 合金对 Fe 的溶解能力,即对不锈钢的润湿性并未得到明显改善,且使得钎缝中出现 MgZn 脆性相。由于液相未能润湿不锈钢界面,导致界面存在较大间隙,因此仅存在一小部分挤压力作用下通过机械嵌合形成的弱连接。

对 Zn 箔厚度为 0.01 mm 和 0.02 mm 的接头进行微观组织分析,结果如图 4 所示。表 2 为图 4 中各点的 EDS 点扫描结果。由图 4(a)可见,采用 0.01 mm 厚的 Zn 箔作为中间层时,焊后易出现直接开裂现象,将开裂的界面重新粘在一起后进行分析,发现中心位置液相完全被挤出,导致不锈钢界面一侧完全未润湿。在后退侧边缘,可观察到镁合金一侧由 $\alpha\text{-Mg}+\text{MgZn}$ 的共析组织(A、B 点)组成。如图 4(b)所示,选取 0.02 mm 厚的 Zn 箔作为中间层时,在接头的中心位置处存在一部分焊合区域,与图 3 所示的 0.03 mm 厚的 Zn 箔作为中间层的接头相似,其钎缝同样由 $\alpha\text{-Mg}+\text{MgZn}$ 的共析组织(C 点)组成。综合上述分析,搅拌头通过摩擦挤压产生的热量使得 Zn 箔熔化,并沿晶界快速溶解镁合金,虽然对易被氧化的镁合金一侧润湿良好,但会使钎缝出现 MgZn 脆性金属间化合物。在机械扭转作用下,不锈钢一侧界面中心区发生破碎,但高 Mg 液相反应层对不锈钢的润湿较差,使得镁和不锈钢界面存在大量微小间隙。随着厚度增加,Zn 箔对不锈钢的润湿有一定改善,但只存在很小一部分焊合,因此接头强度主要取决于母材之间机械嵌合的程度,推测接头的连接机制应是机械结合为主,冶金结合为辅。

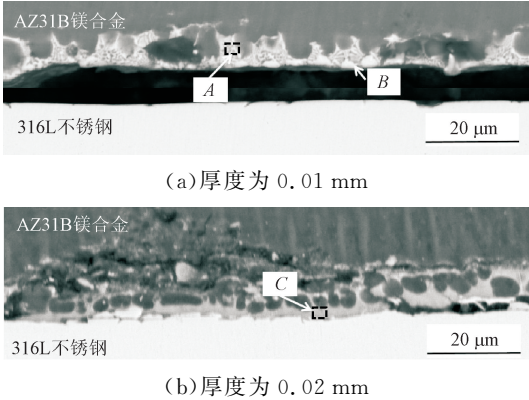


图 4 不同厚度 Zn 箔作为中间层的微观组织
Fig. 4 Microstructure of Zn foils with different thicknesses as intermediate layers

表 2 图 4 中各点的 EDS 扫描结果

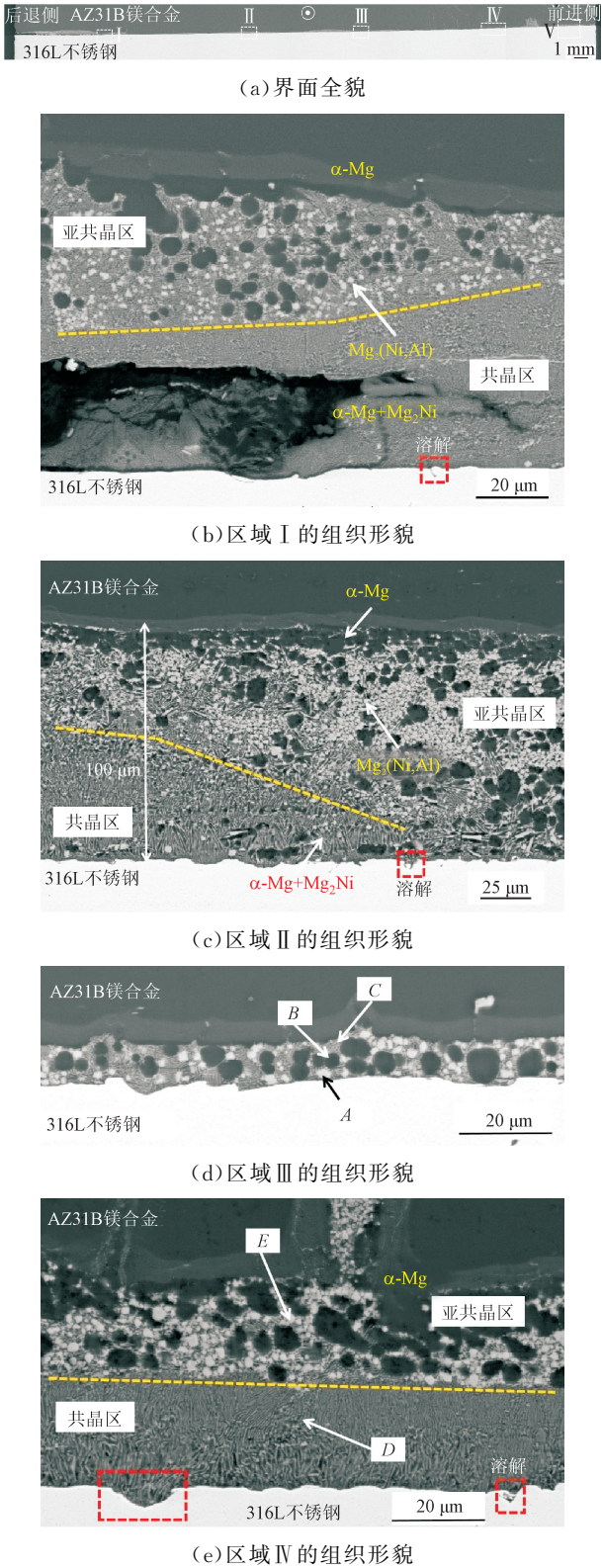
Table 2 EDS point scanning result of points in Fig. 4

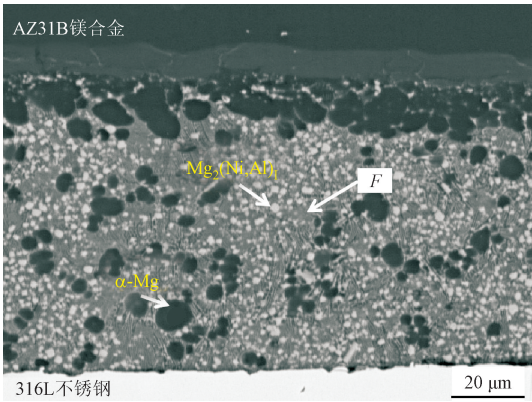
位置	摩尔分数/%					推测相组织
	Mg	Zn	O	Al	Fe	
A	75.3	17.6	1.1	5.7	0.3	$\alpha\text{-Mg}+\text{MgZn}$
B	59.3	30.0	1.9	8.1	0.7	$\alpha\text{-Mg}+\text{MgZn}$
C	81.8	10.0	4.5	3.2	0.5	$\alpha\text{-Mg}+\text{MgZn}$

2.2 AZ31B/Ni/316L 接头显微组织

图 5 给出了厚度为 0.03 mm 的 Ni 箔作为中间层的搅拌摩擦钎焊结果。图 5(a)为低倍下的接头全

貌,Ni 箔经共晶反应熔化充分(Mg-Ni 共晶温度为 506 ℃),其中I、II、III、IV、V 5 个区域分别对应后退侧焊合与未焊合过渡部分、后退侧与中心的 1/2 处、中心位置、前进侧与中心 1/2 处、前进侧焊合与未焊合过渡部分。接头焊合宽度为图 5(a)中区域I至区域V 之间的距离,可达 33.45 mm,焊合率高达 83.6%。





(f) 区域 V 的组织形貌

图 5 0.03 mm 厚度 Ni 箔作为中间层的搅拌摩擦钎焊接头的微观组织

Fig. 5 Microstructure of friction stir brazing joint of Ni foil as an intermediate layer with a thickness of 0.3 mm

表 3 给出了图 5 中各点的 EDS 点扫描结果。图 5(b)~5(f)为接头 5 个区域的高倍组织图,可以看出,亚共晶组织 $\alpha\text{-Mg}_\text{I} + [\text{Mg}(\text{Ni})$ 或 $\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ 占据绝大部分区域,其中球状白色相为 $\text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ 相(A 点),球状黑色相为 $\alpha\text{-Mg}_\text{I}$ (B 点),中心区域灰色相为 $\text{Mg}(\text{Ni})$ 相(C 点)。这些直径约为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的 $\alpha\text{-Mg}$ 能够改善性能的主要原因为:一是 $\alpha\text{-Mg}$ 自身的塑性较好;二是 $\alpha\text{-Mg}$ 可以分隔阻断脆性共晶组织;三是调节钎缝中的热膨胀系数失配度,因此亚共晶区的性能表现较为优异。后退侧边缘、中心区、前进侧边缘的亚共晶组织厚度分别为 $36, 9.6, 80\text{ }\mu\text{m}$ 。在 AZ31 界面一侧出现长度约 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的扩散影响区,区域内 Ni 的摩尔分数小于 3%,远低于形成 Mg_2Ni 相所需的 Ni 含量。在图 5(c)和 5(e)中可观察到钎缝组织出现分层现象,其中靠近 AZ31 的是 $\alpha\text{-Mg}_\text{I}$ 与 $\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ 共晶(E 点)所形成的亚共晶组织,靠近 316L 的密集短条状组织为 $\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2\text{Ni}$ 共晶(D 点),这种 Mg-Ni 共晶组织在采用 Ni 镀层的液相扩散焊中也曾有过报道^[15-16]。搅拌头的扭转与挤压作用易使熔化的共晶液相被挤至两侧边缘,由于该共晶组织含有 Mg_2Ni 脆性相,焊后收缩时处于接头边缘的共晶因热应力容易导致图 5(b)中母材内部开裂,或沿 316L 的界面开裂。在图 5(f)中,除 $\text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ 和 $\alpha\text{-Mg}_\text{I}$ 外,还能检测到 $\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2\text{Ni}$ 共晶(F 点),这使得此区域局部存在 $\alpha\text{-Mg}_\text{I} + [\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})]$ 和 $\alpha\text{-Mg}_\text{I} + (\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2\text{Ni})$ 两种亚共晶组织。同时,前进侧的润湿性优于后退侧,仅在边缘处有所下降(前进侧非致密区域宽度仅

为 1.3 mm)。这是由于在旋转工具行走过程中,前进侧产生的流动变形与挤压效果好,尤其是在前进侧表面,旋转线速度方向有利于界面之间的贴紧,而在后退侧出现的较大间隙表明,旋转线速度方向会引起界面翘离。

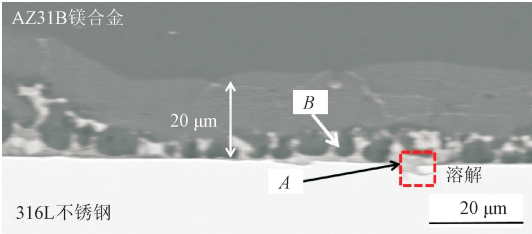
表 3 图 5 中各点的 EDS 扫描结果

Table 3 EDS point scanning result of points in Fig. 5

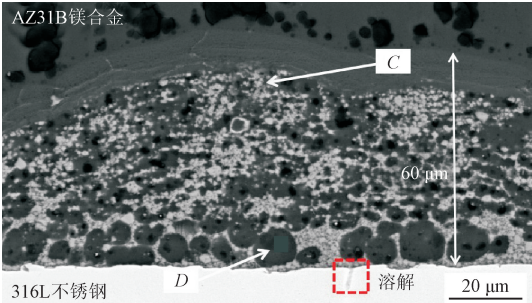
位置	摩尔分数/%					推测相组织
	Mg	Ni	Al	O	Fe	
A	63.9	23.5	9.4		3.2	$\text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$
B	92.9	3.3		3.4	0.4	$\alpha\text{-Mg}_\text{I}$
C	89.2	10.3			0.5	$\text{Mg}(\text{Ni})$
D	87.8	11.9			0.3	$\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2\text{Ni}$
E	75.6	14.7	5.8	3.8	0.1	$\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$
F	85.7	14.3				$\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2\text{Ni}$

从图 5 中还可以观察到,不锈钢一侧存在细密的起伏,同时部分区域还存在溶解浅坑和长约 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的向下溶解,在各区域也可探测到少量(摩尔分数为 $0.1\% \sim 3.2\%$)Fe 元素。由于 Mg 和 Fe 之间无相互作用,单一 Mg 元素无法溶解不锈钢表面,而 Ni 元素的加入使得界面中除了搅拌头的机械作用外还存在少部分溶解作用,这也成为镁合金与不锈钢之间形成冶金结合的关键。

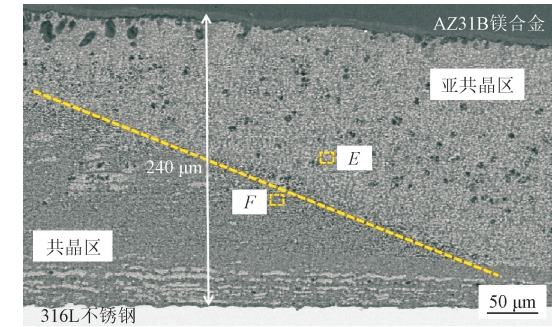
图 6 给出了同一位置(后退侧与中心 $1/2$ 处)不同厚度 Ni 箔作为中间层的接头微观组织。结合图 5(c)和图 6 可知,中间层厚度为 $0.01, 0.02, 0.03, 0.04\text{ mm}$ 的 Ni 箔,对应的钎缝厚度分别为 $20, 60, 100, 240\text{ }\mu\text{m}$,表明随着钎料厚度增加,钎缝增厚。



(a) 厚度为 0.01 mm



(b) 厚度为 0.02 mm



(c)厚度为 0.04 mm

图 6 不同厚度 Ni 箔作为中间层的微观组织

Fig. 6 Microstructure of Ni foils with different thicknesses as intermediate layers

表 4 为图 6 中各点的 EDS 点扫描结果,对于较薄(厚度为 0.01、0.02 mm)的 Ni 箔,钎缝中均为 $\alpha\text{-Mg}_\text{I}$ (B 点、D 点)与 $\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ 共晶 (A 点、C 点)组成的亚共晶组织。图 6(c)为厚度为 0.04 mm Ni 箔的高倍组织,可以看到钎缝中存在分层现象(见图中黄色虚线),在靠近 AZ31 一侧为含有较多 $\alpha\text{-Mg}$ 微粒的 $\alpha\text{-Mg}_\text{I} + [\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})]$ 亚共晶 (E 点),在靠近 316L 一侧为 $\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2\text{Ni}$ 共晶 (F 点)。钎缝增厚源于形成较多的共晶且难被挤出。当 Ni 箔较薄时,大量液相易被挤至两侧边缘,导致液相不足,减弱了钎料的溶解润湿作用。当钎料厚度逐渐增加后,钎缝中 Mg-Ni 液相充足,钎料的溶解润湿作用不断增强,且亚共晶区域面积较大,接头质量有所提高。当厚度增加至 0.04 mm 时,单一亚共晶区域和 $\alpha\text{-Mg}$ 微粒较少,亚共晶与共晶共存的分层区域以及单一共晶区域(最边缘处)增加,使得接头整体变脆,强度下降。此外,观察发现不锈钢界面同样存在微小浅坑和起伏,且随着厚度增加,界面处的起伏程度和密集度也随之增加。

表 4 图 6 中各点的 EDS 扫描结果

Table 4 EDS point scanning result of points in Fig. 6

位置	摩尔分数/%					推测相组织
	Mg	Ni	Al	O	Fe	
A	84.3	10.1	4.2		1.4	$\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$
B	91.0	3.3		5.4	0.3	$\alpha\text{-Mg}_\text{I}$
C	74.1	18.1	7.6		0.2	$\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$
D	93.6	0.6		5.5	0.3	$\alpha\text{-Mg}_\text{I}$
E	73.7	14.5	3.1	8.7		$\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$
F	78.2	10.5		11.2	0.1	$\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2\text{Ni}$

2.3 接头剪切性能及断口分析

2.3.1 接头剪切性能

中间层种类及厚度对接头剪切性能的影响如图 7 所示,可以看出,随着厚度增加,两种材料中间层的接头剪切强度均呈现先增大后减小的规律。当将 Zn 箔作为中间层时,由于分散性大,平均剪切强度仅为 17.21 MPa,而最高剪切强度为 27.38 MPa,可见不同接头的强度差异较大。由前文分析可知,Zn 箔熔化后与 Mg 反应形成 Mg-Zn 液相,当厚度为 0.01 mm 时,产生的液相不足,对不锈钢完全不润湿。随着厚度增加至 0.02 mm 时,对不锈钢的润湿有一定的改善,但焊合区域较小。当厚度达到 0.03 mm 时,钎缝中脆性的 MgZn 金属间化合物成分增加,接头强度下降。接头主要以机械嵌合为主,因此接头强度普遍偏低。

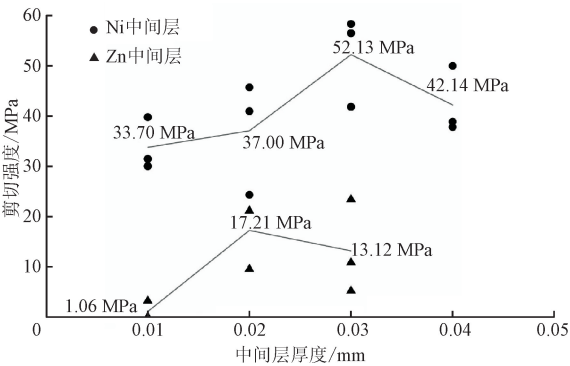


图 7 中间层种类及厚度对剪切性能的影响

Fig.7 Influence of interlayer type and thickness on shear properties

将 Ni 箔作为中间层时,接头剪切强度得到显著提高。当 Ni 箔厚度为 0.01 mm 时,剪切强度最小(平均为 33.7 MPa,最低为 29.97 MPa),这是由于在搅拌头的挤压扭转作用下,界面处的液相成分较少,钎料的溶解润湿作用较弱。随着厚度增加到 0.03 mm,液相成分充足,在与镁合金母材发生反应的同时,也能保证对不锈钢界面的润湿。此外,液相的增多也加强了其对不锈钢界面的溶解能力。塑性较好的亚共晶区域较大,使得剪切强度达到最大(平均为 52.13 MPa,最高可达 58.24 MPa)。当厚度为 0.04 mm 时,钎料对两侧母材都有良好的润湿性,且钎缝增厚使得金属间化合物成分增加,塑性较好的单一亚共晶区域宽度较小,而亚共晶与共晶共存的分层区域以及单一共晶区域(最边缘处)增加,加剧了接头的脆性,使得剪切强度下降(平均 42.14 MPa,最高 49.8 MPa)。

2.3.2 接头断口分析

不同厚度 Zn 箔作为中间层的断口形貌如图 8 所示,表 5 为图 8 中各点的 EDS 点扫描结果。由图可见,断口表面较为平整,多为撕裂痕和层片状结构,其中层片结构对应共析组织,被认为是未充分发生塑性变形所导致^[25]。根据 A、B、C 点的点扫结果,断口处存在大量 Fe 元素,表明较薄的 Zn 箔对不锈钢一侧润湿较差。根据 D、E、F 点的点扫结果,断口部分区域存在 α -Mg 和 α -Mg+MgZn 的共析组织。由此推测,接头中不锈钢的未润湿处和 MgZn 金属间化合物成为钎缝中的薄弱环节,导致剪切强度整体偏低,表现为脆性断裂。

不同厚度 Ni 箔作为中间层的断口形貌如图 9 所示,表 6 为图 9 中各点的 EDS 点扫描结果。由图

可见,断口表面均不平整且凸起明显,呈现出“撕裂棱”状的断裂特征。根据 B 点的点扫结果,Fe 元素占比较大,表明 Ni 箔厚度为 0.01 mm 时,对不锈钢一侧润湿相对较差,导致接头部分断裂在不锈钢界面处。C、E、G、H 点的点扫结果显示,断口存在 α -Mg 组织;A、D、F 点的点扫结果显示,断口存在 $Mg_2(Ni,Al)$ 、 Mg_2Ni 等金属间化合物,且在断口面未能检测到大量 Fe 元素,表明随着 Ni 箔厚度的增加,钎料对不锈钢一侧的润湿性有所改善。由于在断口位置均检测到了大量塑性较好的 α -Mg,因此判断断裂位置在钎缝中的共晶区或亚共晶区,钎缝中 Mg_2Ni 、 $Mg_2(Ni,Al)$ 等金属间化合物成为接头的薄弱环节,接头整体表现为“脆性断裂+韧性断裂”。

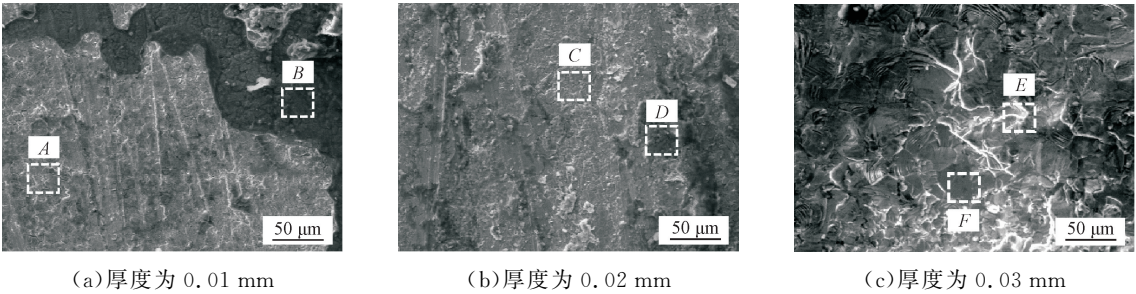


图 8 不同厚度 Zn 箔作为中间层的断口形貌

Fig. 8 Fracture surface morphologies of Zn foils with different thicknesses as intermediate layers

表 5 图 8 中各点的 EDS 扫描结果

Table 5 EDS point scanning result of points in Fig. 8

位置	摩尔分数/%							推测相组织
	Mg	Zn	Fe	Al	Cr	O	Ni	
A	21.0	3.2	44.2		21.4	4.4	5.8	Fe
B	44.9	7.0	19.0		9.8	16.8	2.5	Fe+ α -Mg+MgZn
C	30.8	1.7	36.2	4.7	17.9	3.5	5.2	Fe+ α -Mg
D	49.3	3.9	4.6	1.3	2.6	37.7	0.6	α -Mg
E	68.6	31.4						α -Mg+MgZn
F	52.7	38.7				8.6		α -Mg+MgZn

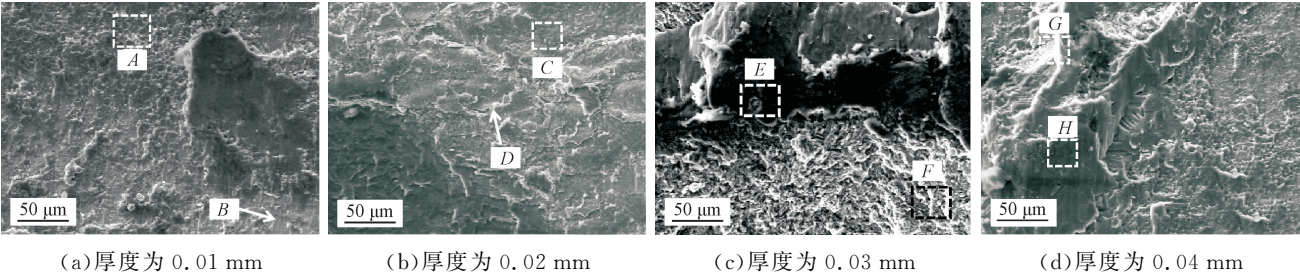


图 9 不同厚度 Ni 箔作为中间层的断口形貌

Fig. 9 Fracture surface morphologies of Ni foils with different thicknesses as intermediate layers

表 6 图 9 中各点的 EDS 扫描结果
Table 6 EDS point scanning result of points in Fig. 9

位置	摩尔分数/%							推测相组织
	Mg	Ni	Fe	Al	Cr	O	Zn	
A	82.3	9.9	0.7	4.9		2.2		$\alpha\text{-Mg}_\text{I} + [\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})]$
B	24.4	6.4	44.9		21.9	2.4		$(\text{Fe}) + (\alpha\text{-Mg} + \text{Mg}_2\text{Ni})$
C	95.6	2.4		1.0		1.0		$\alpha\text{-Mg}_\text{I}$
D	73.1	25.6	1.0		0.3			$\alpha\text{-Mg}_\text{I} + [\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2\text{Ni}]$
E	90.2	2.2	0.1	2.1		5.2	0.2	$\alpha\text{-Mg}_\text{I}$
F	64.7	26.9	1.6	1.3	0.5	5.0		$\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$
G	77.1	12.2	0.4	10.3				$\alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$
H	97.1	0.2		1.6		1.1		$\alpha\text{-Mg}_\text{I}$

3 结 论

(1)Zn 箔对镁合金的溶解与润湿良好,但对不锈钢一侧几乎未润湿,接头以机械结合为主,中心主要由 $\alpha\text{-Mg} + \text{MgZn}$ 的共析组织组成,不锈钢表面氧化膜的去除主要依靠搅拌头的机械去膜作用。

(2)Ni 箔与 Mg 发生共晶反应后可完全熔化,并显著溶解 AZ31,对 AZ31 润湿性良好。Ni 箔厚度小于 0.03 mm 时,因液相挤出,对 316L 的润湿性变差。Ni 箔厚度为 0.03 mm 时,塑性较好的亚共晶组织 $\alpha\text{-Mg}_\text{I} + [\text{Mg}(\text{Ni}) \text{ 或 } \alpha\text{-Mg}_\text{II} + \text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})]$ 占据接头绝大部分,AZ31 侧出现长度约 5 μm 的扩散影响区,不锈钢界面出现溶解浅坑和向下溶解,不锈钢表面氧化膜的去除由机械扭转和溶解作用共同完成。Ni 箔厚度为 0.04 mm 时,因脆性共晶组织的出现,使得亚共晶组织成分减少,亚共晶(AZ31 侧)与共晶(316L 侧)共存的分层组织成分增加,接头性能变差。

(3)采用 Zn 钎料的接头强度偏低,最高剪切强度为 27.38 MPa,且分散性大,其原因在于不锈钢侧的润湿性差及钎缝内存在 MgZn 脆性相。随着 Ni 箔中间层厚度的增加,强度先增大后减小,最大平均剪切强度为 52.13 MPa,金属间化合物的增加和亚共晶区域的减少,限制了强度的进一步提高。

(4)Zn 中间层接头的断口以脆性断裂为主,钎缝中的 MgZn 金属间化合物和不锈钢界面处的未焊合缺陷为接头的薄弱环节;Ni 中间层接头的断口具有脆性断裂和韧性断裂的共同特征,钎缝中心的 Mg_2Ni 、 $\text{Mg}_2(\text{Ni}, \text{Al})$ 等金属间化合物为接头的薄弱环节。

参考文献:

[1] 杨媛,李加强,宋宏宝,等. 镁合金的应用及其成形技术研究现状 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(8): 24-27.
YANG Yuan, LI Jiaqiang, SONG Hongbao, et al. Research situation on application of magnesium alloys and its forming technology [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(8): 24-27.

[2] 慕伟意,李争显,杜继红,等. 镁合金的应用及其表面处理研究进展 [J]. 表面技术, 2011, 40(2): 86-91.
MU Weiyi, LI Zhengxian, DU Jihong, et al. Application and surface treatment research progress of magnesium alloys [J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 86-91.

[3] 宋刚,赵爽,李涛涛,等. 镁合金与钢异质材料焊接的研究进展 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 1-12.
SONG Gang, ZHAO Shuang, LI Taotao, et al. Research progress on welding of magnesium alloy and steel dissimilar materials [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 1-12.

[4] LI Hui, ZHANG Jiansheng, WANG Xiaoliang. Microstructure and mechanical properties of TIG welded-brazed AZ61 Mg alloy and mild steel joints with and without interlayer [J]. Materials Research Express, 2019, 6(6): 066503.

[5] 檀财旺,臧乘伟,张泽群,等. 镁/钢异种金属焊接的研究现状与展望 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(3): 1-6.
TAN Caiwang, ZANG Chengwei, ZHANG Zequn, et al. Research status and prospect of welding for magnesium/steel dissimilar alloys [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(3): 1-6.

[6] REN Daxin, LIU Liming. Interface microstructure and mechanical properties of arc spot welding Mg-steel dissimilar joint with Cu interlayer [J]. Materials & Design, 2014, 59: 369-376.

[7] NASIRI A M, WECKMAN D C, ZHOU Yushan. Inter-

- facial microstructure of laser brazed AZ31B magnesium to Sn-plated steel sheet: brazeability, interfacial microstructure, and mechanical properties were investigated [J]. *Welding Journal*, 2015, 94(3): 61-s-72-s.
- [8] NASIRI A M, ZHOU Y. Effect of Zn interlayer on brazeability of AZ31B-Mg alloy to steel sheet [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(2): 155-163.
- [9] NASIRI A M, LI Liqun, KIM S H, et al. Microstructure and properties of laser brazed magnesium to coated steel [J]. *Welding Journal*, 2011, 90(11): 211-219.
- [10] NASIRI A M, WECKMAN D C, ZHOU Yushan. Interfacial microstructure of diode laser brazed AZ31B magnesium to steel sheet using a nickel interlayer [J]. *Welding Journal*, 2013, 92(1): 1-10.
- [11] LEE M Y, KIM S W, NASIRI A M, et al. Effects of the types of coating on the laser brazing characteristics of dissimilar joints between Mg alloy and steel sheet [J]. *Journal of Welding and Joining*, 2013, 31(4): 7-12.
- [12] FENG Yueqiao, LI Yang, LUO Zhen, et al. Resistance spot welding of Mg to electro-galvanized steel with hot-dip galvanized steel interlayer [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 114-122.
- [13] 成家龙, 程东海, 亓安泰, 等. 添加高熵合金粉末 AZ31B 镁合金/304 不锈钢电阻点焊接头组织和力学性能 [J]. *材料工程*, 2024, 52(1): 146-152.
- CHENG Jialong, CHENG Donghai, QI Antai, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy/304 stainless steel resistance spot weld joint with high entropy alloy powder [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(1): 146-152.
- [14] 郑森, 程东海, 陈益平, 等. 镁/钢异种材料电阻点焊接头中 Zn 的作用机理 [J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2015, 29(4): 62-66.
- ZHENG Sen, CHENG Donghai, CHEN Yiping, et al. Mechanism of Zn in the joint of magnesium and steel by resistance spot welding [J]. *Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences)*, 2015, 29(4): 62-66.
- [15] ELTHALABAWY W M, KHAN T I. Microstructural development of diffusion-brazed austenitic stainless steel to magnesium alloy using a nickel interlayer [J]. *Materials Characterization*, 2010, 61(7): 703-712.
- [16] ELTHALABAWY W, KHAN T. Liquid phase bonding of 316L stainless steel to AZ31 magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, 27(1): 22-28.
- [17] YUAN Xinjian, SHENG Guangmin, LUO Jun, et al. Microstructural characteristics of joint region during diffusion-brazing of magnesium alloy and stainless steel using pure copper interlayer [J]. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2013, 23(3): 599-604.
- [18] 刘骁, 王希靖, 车文斌, 等. 镁-钢无匙孔搅拌摩擦点焊接头机械连接状态分析 [J]. *材料与冶金学报*, 2017, 16(3): 225-231.
- LIU Xiao, WANG Xijing, CHE Wenbin, et al. Analysis of mechanical connection state of friction stir key-holeless spot welding of magnesium-steel [J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2017, 16(3): 225-231.
- [19] 刘骁, 王希靖, 景文霞, 等. AZ31B 镁合金/镀锌钢无匙孔搅拌摩擦点焊结合方式 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(8): 17-20.
- LIU Xiao, WANG Xijing, JING Wenxia, et al. Bonding mechanism of friction stir spot welding of magnesium to galvanized steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(8): 17-20.
- [20] CHEN Y C, NAKATA K. Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(9): 3913-3919.
- [21] CHEN Y C, NAKATA K. Effect of surface states of steel on microstructure and mechanical properties of lap joints of magnesium alloy and steel by friction stir welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(4): 293-298.
- [22] 张贵锋, 郭咏华, 徐明志, 等. 高效搅拌摩擦钎焊制备铝/钢双金属复合板的可行性研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(12): 93-98.
- ZHANG Guifeng, GUO Yonghua, XU Mingzhi, et al. Feasibility of efficiently fabricating Al/steel bimetal composite by friction stir brazing [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(12): 93-98.
- [23] ZHANG Guifeng, SU Wei, ZHANG Jianxun, et al. Friction stir brazing: a novel process for fabricating Al/steel layered composite and for dissimilar joining of Al to steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2011, 42(9): 2850-2861.
- [24] 西安交通大学. 一种搅拌摩擦钎焊制备双金属复合板的方法: CN200910021918.3 [P]. 2012-07-04.
- [25] LI Liqun, TAN Caiwang, CHEN Yanbin, et al. Influence of Zn coating on interfacial reactions and mechanical properties during laser welding-brazing of Mg to steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2012, 43(12): 4740-4754.

(编辑 李慧敏 杜秀杰)