基于添加中间层 Zn 的铝/镁合金冷金属过渡焊 工艺与性能研究

他进国,薛诚,蒋成燕,王旭东,贾浩,费文龙

(兰州工业学院材料工程学院,兰州730050)

摘要:【目的】在工业生产过程中,铝合金和镁合金的连接不可避免,由于铝合金和镁合金热物理性能差异较大,在焊接过程 中容易形成脆性的金属间化合物,导致接头强度降低。【方法】为了提高接头的强度,该文采用冷金属过渡焊接法,对1mm 厚的 6061 铝合金和 AZ31B 镁合金板通过添加中间层 Zn 箔进行搭接焊接试验,焊接速度为4mm/s,送丝速度为2.7mm/s,电弧 电压为 15 V,焊接电流分别选用 37 A,42 A,47 A。采用扫描电镜和光学显微镜研究了未添加中间层和添加中间层下接头的宏 观形貌、显微组织及界面化学成分,并采用万能拉伸试验机对接头的力学性能进行了表征。【结果】结果表明:中间层 Zn 的 加入改善了铝/镁合金冷金属过渡焊接头的成形质量,改变了异种金属界面处的结合状态和微观组织,很大程度抑制了 Al-Mg 脆性化合物的产生,进而提高接头的力学性能。【结论】该研究结果不仅丰富了铝/镁异种合金的薄板焊接,也为实际工业生 产提供了一定的理论指导。

关键词: 铝合金; 镁合金; CMT; 组织; 性能

中图分类号: TG442 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20231206001

Process and mechanical properties of cold metal transition welding of Al/Mg alloy based on adding intermediate layer Zn

Ta Jinguo, Xue Cheng, Jiang Chengyan, Wang Xudong, Jia Hao, Fei Wenlong (School of Materials Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: [**Objective**] In the industrial production process, connection of aluminum alloy and magnesium alloy was inevitable. Due to significant difference in the thermophysical properties between aluminum alloy and magnesium alloy, brittle intermetallic compounds were prone to form during welding process, resulting in a reduction in strength of welded joints. [**Methods**] To enhance strength of welded joints, cold metal transfer welding method was employed to conduct a lap welding test on 1 mm thick 6061 aluminum alloy and AZ31B magnesium alloy plates by adding an intermediate layer of Zn foil in this paper. Welding speed was 4 mm/s, wire feed speed was 2.7 mm/s, arc voltage was 15 V, and welding current was selected as 37 A, 42 A, and 47 A respectively. Macroscopic morphology, microstructure and interface chemical composition of welded joints without intermediate layer and with intermediate layer were investigated by scanning electron microscope and optical microscope. Mechanical properties of welded joints were characterized by universal tensile testing machine. [**Results**] The results showed that addition of intermediate layer Zn improved forming quality of Al/Mg alloy cold metal transfer welded joints, changed bonding state and microstructure at the interface of dissimilar metals, and significantly inhibited generation of brittle Al-Mg compounds, thereby improving mechanical properties of welded joints. [**Conclusion**] The results of this study not only enriched thin plate welding of Al/Mg dissimilar alloys but also provided certain theoretical guidance for actual industrial production.

Key words: aluminum alloy, magnesium alloy, CMT, microstructure, mechanical properties

收稿日期: 2023-12-06 基金项目: 甘肃省教育厅高等学校创新基金项目(2022B-254); 兰州工业学院青年科技创新项目(2024KJ-15)。

0 前言

随着工业技术的高速发展,结构轻量化在航空航 天、军工及交通等领域的要求越来越高,同时在《中 国制造 2025》中,也已把轻量化当成产业发展的重要 方向^[1-2]。轻金属材料铝合金和镁合金都具有密度低、 比强度高、比刚性高等优点,正被广泛地应用于工业 制造中。但是,在汽车生产过程中,不可避免的要进 行铝合金与钢、镁合金异种金属的焊接,由于铝合金 和镁合金热物理性能差异较大,焊接接头中容易出 现脆性的金属间化合物,严重恶化接头的力学性能, 因此,如何控制铝/镁焊接接头中金属间化合物的产 生和生长是目前学者们研究的重点^[3-5]。李敬福等学 者⁶⁰对铝/镁异种金属进行电阻焊试验,结果表明:添 加中间层 Zn 阻止了铝/镁合金的直接接触,抑制了 接头中脆性的金属间化合物的产生,提高了接头力 学性能。因此,该文采用 CMT 冷金属过渡焊技术, 以6061 铝合金和 AZ31B 镁合金作为研究对象进行 焊接试验,研究中间层 Zn 对焊缝成形、界面组织、元 素分布和接头力学性能的影响,并阐述影响机理,为 后续铝/镁合金异种金属的连接提供理论指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验采用尺寸为 100 mm×50 mm×1 mm 的 6061 铝合金板和 AZ31B 镁合金板,中间层采用质量分数 为 99.99% 的高纯度 Zn 箔,厚度为 0.1 mm。焊前,将 铝合金和镁合金板材表面用砂纸打磨除去氧化层, 并用丙酮将板材和 Zn 箔表面清洗干净,吹干待用。 采用搭接的焊接方式,上板是镁合金,下板是铝合金, 中间层为 Zn 箔,焊接示意图如图 1 所示。



图 1 焊接装置示意图



1.2 试验方法

试验采用 Fronius CMT 焊机进行,焊丝选用 ø1.0 mm

的 ER4043,保护气体为氩气。在铝/镁合金冷金属过 渡搭接焊过程中,采用厚度为 0.1 mm 的 Zn 箔置于镁 合金和铝合金中间,焊接速度选用 4 mm/s,送丝速度 为 2.7 mm/s,电弧电压为 15 V,焊接电流分别选用 37 A,42 A,47 A。焊后采用线切割切取拉伸试样和 金相试样,每组工艺下取 3 个拉伸试样和 2 个金相试 样。用材料拉伸试验机进行拉伸试验,金相试样依 次通过 240 号、400 号、800 号、1 200 号、1 500 号和 2 000 号砂纸打磨后抛光,采用成分为苦味酸、乙酸、 乙醇和蒸馏水的腐蚀剂对试样进行腐蚀处理,腐蚀 时间为 10~12 s,采用扫描电镜和金相显微镜分析接 头的显微组织。

2 试验结果与分析

2.1 搭接接头的宏观形貌分析

图 2 为焊接速度为 4 mm/s、焊接电流为 42 A,是 否添加中间层下试样的焊缝宏观形貌。图 2(a)为不 添加中间层 Zn 箔的焊缝宏观形貌,图 2(b)为添加中 间层 Zn 箔的焊缝宏观形貌,对比图 2(a)、图 2(b)可知, 不添加中间层的焊缝表面不平整,正面铺开长度小, 使铝/镁合金的有效结合面积变小;焊缝熔宽和余高 较大,余高较大会导致焊趾局部应力集中,容易萌发 裂纹,影响接头的承载能力。添加中间层的焊缝表 面光滑平整,没有未熔合、咬边、裂纹等缺陷,此现象 表明:在铝/镁合金冷金属过渡搭接焊过程中添加中 间层 Zn 箔可以显著改善焊接接头的宏观形貌。



(a) 不添加中间层

(b) 添加中间层

图 2 是否添加中间层下的铝/镁合金搭接焊焊缝宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphology of Al/Mg alloy lap welding weld without or with adding intermediate layer. (a) without adding intermediate layer; (b) with adding intermediate layer

图 3 为添加中间层,焊接速度为 4 mm/s,焊接电 流选用 37 A, 42 A, 47 A 下试样的焊缝宏观形貌。可 以看出, 3 种工艺下接头的宏观形貌各不相同,但是 总体上均优于未添加中间层的焊缝成形质量。在 图 3(a)中,由于焊接电流较小,刚开始电弧燃烧不稳 定,焊缝不连续而且容易出现未熔合缺陷,随着焊接 过程中热量的扩散,且电弧燃烧稳定,接头成形良好; 在图 3(b)中,由于电流大小适中,电弧燃烧稳定,接 头成形良好美观,焊缝连续均匀,无明显裂纹;在图 3(c)中,由于电流增大,焊接热输入变大,焊接过程中 热量的传递和累积导致出现穿孔性缺陷,使焊缝不 连续,直接影响接头的力学性能。因此,在添加中间 层 Zn 箔的条件下,1 mm 厚铝/镁合金冷金属过渡搭 接焊最佳工艺参数为 v=4 mm/s, I=42 A,选择该工艺 参可以获得质量可靠、优质美观的焊接接头。



(a) I = 37 A

(b) I = 42 A

(c) I = 47 A



Fig. 3 Macroscopic morphology of Al/Mg alloy lap welding weld under different welding current. (a) I=37 A; (b) I=42 A; (c) I=47 A

2.2 搭接接头界面微观组织和成分分析

铝合金和镁合金异种材料采用冷金属过渡焊连 接时由于焊接接头中产生大量的 Mg-Al 脆性相,严重 影响了接头的强度。因此,为了抑制接头脆性相的 产生,在铝合金和镁合金焊接时,添加中间层 Zn 箔, 研究中间层对组织和性能的影响。图 4 为未添加中 间层和添加中间层 Zn 箔的铝/镁合金搭接接头的金 相组织。由图可知,未添加中间层的界面过渡层很 薄,铝合金与焊缝金属形成了良好的界面结合;未添 加中间层的镁合金侧界面处形成了较厚脆性相的过 渡层,界面过渡层形态为平直型且两侧呈平面状,焊 缝形成了柱状晶组织。

添加中间层铝合金侧界面处 Zn 与铝合金形成固 溶体和少量的 Al-Mg-Zn 化合物,致使中间层的厚度 增加,界面过渡层由较薄的平直型转变为呈小锯齿 状的波浪型。添加中间层镁合金侧界面处由于锌和 镁晶体结构相同,二者相遇后更容易形成大量的金 属间化合物和少量的 Al-Mg, Al-Mg-Zn 化合物,界面



图 4 未添加中间层和添加中间层下接头的金相组织

Fig. 4 Metallographic structure of welded joints without adding intermediate layer and with adding intermediate layer

过渡层的厚度增加,形态也由较薄的平直型转变为 呈小锯齿状的波浪型,焊缝形成了等轴晶。由此可 见,中间层 Zn 的加入改变了界面过渡层、焊缝的组 织和成分,改善了铝合金、焊缝及镁合金的界面结合 状态,且界面的形态也发生了明显的变化^[7]。

图 5 为 v=4 mm/s, *I*=42 A 的添加中间层 Zn 的铝/ 镁合金搭接接头不同区域扫描电镜能谱线扫描分析 结果。由图可知, 在铝合金侧界面处从 Al 到焊缝 Al 的质量分数略程下降趋势, Mg 的质量分数略程上升 趋势; 在焊缝中, Al 的质量分数明显高于 Mg 的质量 分数, 且 Al 和 Mg 的质量分数在一定范围内波动; 在 镁合金侧界面处从 Mg 到焊缝 Al 的质量分数发生明 显下降趋势, Mg的质量分数发生了特变明显的上升 趋势。从铝合金到焊缝再到镁合金, Zn的质量分数 一直在轻微波动, 以中间层 Zn 为界, 镁合金侧界面 处 Zn 的质量分数明显低于铝合金侧界面处 Zn 的质 量分数。根据 Mg-Zn, Al-Zn 二元相图, Zn 在 Mg 中的最 大溶解度为 3.5%, Zn 在 Al 中的最大溶解度为 16.5%^[8]。 在电弧的高温作用下, 中间层 Zn 向两侧扩散, 两侧 的 Al 和 Mg 也向焊缝扩散, 通过短暂的互扩散, 铝合 金侧界面处形成少量 Al-Zn 固溶体, 镁合金侧界面形 成了少量的 Mg-Zn 固溶体, 焊缝中形成了大量的 Mg-Zn 共晶组织和少量的 Al-Mg-Zn 化合物, 从而取代了连 续的 Mg-Al 金属间化合物, 提高了接头的承载能力^[7]。



图 5 添加中间层下搭接接头不同区域线扫描结果

Fig. 5 Line scanning results of different areas in bottom lap joints with adding intermediate layer

2.3 搭接接头力学性能分析

对焊接速度为4mm/s,焊接电流选用37A,42A, 47A工艺下添加中间层得到的拉伸试样和对焊接速 度为4mm/s,焊接电流为42A工艺下未添加中间层 得到的拉伸试样进行拉伸试验测量,结果如图6所示。 由图可知,添加中间层焊接接头的最大抗拉强度随 着焊接电流的增大而先增大后减小,原因是随着焊 接电流的增大,焊接热输入增大,促进了中间层Zn 在母材表面的润湿铺展性,增大了中间层Zn与母材 铝/镁的结合面积,焊缝中Zn元素的扩散更加均匀, 从而使接头的强度有所增加;当焊接电流为42A时, 接头的最大抗拉强度达到峰值 34.1 MPa。随着焊接 电流的不断增加, 热输入增加, 焊接温度不断升高, 部分中间层 Zn 被烧损, 减少了中间层 Zn 与母材铝/ 镁的结合面积, 从而使接头的强度有所降低。添加 中间层试样的抗拉强度均高于未添加中间层试样的 抗拉强度, 由此可见, 通过添加中间层 Zn 可以提高 铝/镁合金焊接接头的强度。分析认为焊缝中加入 Zn 元素改变了界面区及焊缝中的组织和成分, 在铝 侧界面形成了 Mg-Zn, Al-Mg-Zn 化合物, 在镁侧界面 形成了 Mg-Zn 化合物, 这样就阻碍了 Al 和 Mg 形成 Mg₁₇Al₁₂ 和 Mg₂Al₃ 脆性金属间化合物, 明显改善了接



图 6 中间层和焊接电流对接头力学性能的影响



头的力学性能。

3 结论

(1)与未添加中间层的铝/镁合金冷金属过渡焊 相比,通过添加中间层 Zn可以显著改善铝/镁合金 冷金属过渡焊接头宏观形貌和成形质量。而且中间 层 Zn 的加入可以改变界面过渡层的组织、化学成分 和结合状态。

(2)添加中间层 Zn 的铝/镁合金冷金属过渡焊 接头界面由 Al-Zn 固溶体、Al-Mg-Zn 化合物和 Mg-Zn 化合物组成,由于 Zn 的存在,很大程度抑制了 Al-Mg 脆性化合物的产生,进而提高接头的力学性能。

参考文献

[1] 李邦鹏. 磁场辅助镁/铝异种金属 CMT 焊接工艺及组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
 Li Bangpeng. Research on process and structure of magnetic field assisted Mg/Al dissimilar alloys CMT welding[D].
 Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2019.

[2] 单琪,张超,谢鹏,等. 铝合金与镀铜钢 CMT 熔钎焊技术研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(1): 48 - 52, 57.
Shan Qi, Zhang Chao, Xie Peng, et al. Research on CMT welding-brazing technology of aluminum alloy and copper plated steel[J]. Hot Working Technology, 53(1): 48 - 52, 57.

[3] 王佳杰, 宋晓国, 武鹏博, 等. 铝/钛异种金属激光/激光-

CMT 复合熔钎焊工艺及其组织与力学性能 [J]. 焊接学报, 2023, 44(2): 54-60.

Wang Jiajie, Song Xiaoguo, Wu Pengbo, et al. Process, microstructures and mechanical properties of Al/Ti dissimilar metals with laser/laser-CMT hybrid weldingbrazing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(2): 54 - 60.

[4] 陈钟宋. 铝镁合金的焊接工艺及质量控制措施 [J]. 焊接技术, 2021, 50(4): 70 - 73.

Chen Zhongsong. Welding process and quality control measures of al-mg alloy[J]. Welding Technology, 2021, 50(4): 70-73.

[5] 张超,吴定勇,杨辉,等. 铝合金 CMT 熔敷工艺对添加 Nb 中间层钛/铝构件成形及组织的影响 [J]. 焊接技术, 2022, 51(8):1-6.

Zhang Chao, Wu Dingyong, Yang Hui, et al. Effect of CMT deposition processes of Al alloy on the forming and microstructure of Ti/Al dissimilar materials with Nb interlayer[J]. Welding Technology, 2022, 51(8): 1 - 6.

[6] 李敬福, 陈强. 基于添加 Zn 中间层的汽车用镁/铝异种金 属电阻点焊工艺与性能研究 [J]. 热加工工艺, 2016, 45(9): 184-186.

Li Jingfu, Chen Qiang. Study on process and properties of Mg/Al dissimilar metal resistance spot welding for automobile based on adding Zn intermediate layer[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(9): 184 – 186.

- [7] Abdollahzadeh A, Shokuhfar A, Cabrera J M, et al. The effect of changing chemical composition on dissimilar Mg/Al friction stir welded butt joints using zinc interlayer[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 18 – 30.
- [8] 金玉花, 吴永武, 毕胜, 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 -31.

Jin Yuhua, Wu Yongwu, Bi Sheng, et al. Zn powder-assisted friction stir lap welding of Al/Mg heterogeneous alloying plates [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(4): 26 – 31.

第一作者:他进国,硕士;主要从事先进焊接技术、异种金属材料连接等方面的研究;jinguota@qq.com。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

他进国,薛诚,蒋成燕,等. 基于添加中间层 Zn 的铝/镁合金冷金属过渡焊工艺与性能研究[J]. 焊接, 2024(12): 56-60. Ta Jinguo, Xue Cheng, Jiang Chengyan, et al. Process and mechanical properties of cold metal transition welding of Al/Mg alloy based on adding intermediate layer Zn[J]. Welding & Joining, 2024(12): 56-60.