

201 不锈钢与 2A11 铝合金搅拌摩擦焊焊接 接头特性研究

樊巧芳¹, 林浩², 张波¹

(1.江苏安全技术职业学院, 江苏 徐州 221011; 2.中国科学院金属研究所, 沈阳 110000)

摘要:目的 研究钢-铝异种合金搅拌摩擦焊焊接接头的力学性能, 探讨钢-铝异种合金接头组织特点。方法 在搅拌头偏移 0.2 mm 的前提下, 对 201 不锈钢和 2A11 铝合金进行了对接焊, 采用光学显微镜、XRD 及 EDS 等手段对接头微观组织进行观察和分析, 同时对焊接接头取样, 测试其抗拉强度。结果 钢-铝焊接接头成形质量较好, 接头处不存在气孔、裂纹等缺陷, 金属相互渗透层深度约为 2.5 mm。EDS 和 XRD 分析结果显示, Fe 及 Al 原子通过扩散在接头界面层主要形成 FeAl 和 Fe₃Al 韧性相。拉伸试验结果表明, 接头的平均抗拉强度为 381 MPa, 超过母材 2A11 铝合金的强度。结论 通过设置搅拌头偏移, 可实现钢-铝异种合金的 FSW 焊接, 且获得的接头力学性能较为优异。

关键词: 搅拌摩擦焊; 异种合金; 界面层; 组织; 拉伸性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2025.05.017

中图分类号: TG407; TG444⁺.77 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2025)05-0152-06

Characteristics of Friction Stir Welded Joints of 201 Stainless Steel and 2A11 Aluminum Alloy

FAN Qiaofang¹, LIN Hao², ZHANG Bo¹

(1. Jiangsu College of Safety Technology, Jiangsu Xuzhou 221011, China; 2. Institute of Metal Research,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the mechanical properties of steel-aluminum dissimilar alloy joints by friction stir welding, and discuss the microstructure characteristics of steel-aluminum dissimilar alloy joints. 201 stainless steel and 2A11 aluminum alloy were butt-welded with the mixing head offset of 0.2 mm. The microstructure of the joint was observed and analyzed by optical microscope, XRD and EDS analysis. The tensile strength of the welded joint was measured by sampling. The results showed that the forming quality of steel-aluminum welded joint was good, there was no porosity, crack and other defects in the cladding layer, and the depth of metal mutual penetration layer was about 2.5 mm. EDS and XRD analysis showed that Fe and Al atoms were diffused, and the interface layer of the joint was mainly FeAl and Fe₃Al ductile phases. The tensile test showed that the average tensile strength of the joint was 381 MPa, which exceeded the strength of the base material 2A11 aluminum alloy. In conclusion, the FSW welding of steel-aluminum dissimilar alloys can be realized by setting the offset of the mixing head,

收稿日期: 2024-07-17

Received: 2024-07-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51975277)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975277)

引文格式: 樊巧芳, 林浩, 张波. 201 不锈钢与 2A11 铝合金搅拌摩擦焊焊接接头特性研究[J]. 精密成形工程, 2025, 17(5): 152-157.

FAN Qiaofang, LIN Hao, ZHANG Bo. Characteristics of Friction Stir Welded Joints of 201 Stainless Steel and 2A11 Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(5): 152-157.

and the mechanical properties of the joint obtained are excellent.

KEY WORDS: friction stir welding; dissimilar alloys; interface layer; structure; tensile properties

在航空制造业中轻量化是一个重要的研究方向, 结构轻量化和材料替代是其降低成本的重要手段^[1-8], 采用铝合金替代钢是其中的一个研究方向。在航空及造船领域, 钢-铝复合过渡接头利用铝合金的轻量化优势和钢优异的连接性能实现了材料的优化配置。但钢和铝的物理特性、力学性能存在较大差异, Fe、Al 原子互溶程度低, 在焊接过程中易形成 FeAl₂、Fe₂Al₅、FeAl₃ 和 Fe₂Al₇ 等金属化合物^[9], 其中一些脆硬相会降低接头的韧性, 研究显示, 富 Fe 相 Fe₃Al、FeAl 具有较高的韧性, 富 Al 相具有较高脆性^[10]。采用传统焊接工艺时, 焊接过程中产生的氧化物易导致焊缝出现裂纹, 同时相的体积变化将割裂基体组织, 降低焊缝质量, 同时还易出现气孔、接头软化、残余应力大等问题^[11-13]。搅拌摩擦焊 (FSW) 作为一种先进的焊接技术, 得到了越来越多的研究和应用^[14]。Li 等^[15]研究了 AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接接头断裂性能和断裂机理, 结果表明, 接头的断裂性能达到了母材的 92.9%。Tang 等^[16]研究表明, 镁合金 SZ 组织的温度分区比其他区域更为均匀, 但是刀具的转动对材料的机械作用导致不同微区晶粒的尺寸存在差异, 搅拌摩擦焊焊接工艺对异种合金焊接质量存在一定影响^[17-22]。苗玉刚^[23]采用旁路分流 MIG 焊和搅拌摩擦焊相结合的方式, 获得了力学性能优于母材的接头。目前多数的 FSW 研究都是针对铝-铝合金的焊接, 而针对钢-铝合金的研究较少。本文基于现有研究, 以 2A11 铝合金和 201 不锈钢为对象, 采用 FSW 方法对其进行了焊接, 研究了异种合金接头的成形质量和特性, 分析了焊接接头的微观组织和相组成, 对接头的力学性能进行了测试, 从工艺层面验证了 FSW 焊接钢-铝合金的可行性。

1 试验

试验材料为 2A11 铝合金轧制板和 201 不锈钢板, 单块板规格均为长 100 mm、宽 50 mm、板厚 4 mm。由于焊件表面存在一定的氧化情况, 因此焊前使用碳化硅砂纸打磨, 以去除板材表面杂质及氧化膜, 并对表面进行脱脂处理。以上工序完成后, 将板件立即烘干备用。FSW 所有搅拌头直径为 3 mm, 杆长 3.9 mm, 旋转频率为 500 r/min, 进给速率为 50 mm/min。试验时使用改造后的数控立式铣床作为 FSW 设备, 配合专用夹具固定材料, 焊接方向为材料的轧制方向, 下压力为 0.2 mm。采用 FSW 焊接铝-铝合金时, 焊接区的温度一般不超过 500 °C, 当温度达到 660 °C 以上时, 将导致铝部件熔化, 焊接钢-钢合金时, 焊接区

的温度可达到 800 °C 以上。

由于 2A11 铝合金和 201 不锈钢物理特性及熔点方面的差异, 搅拌头中置焊接会导致结合面两侧的受热不均。为此, 本文将工具的轴线向 2A11 铝合金侧偏移 0.2 mm, 如图 1 所示。焊接完毕后, 从接头处取样, 通过宏观、微观试验, 分析 2A11 铝合金和 201 不锈钢异种合金接头的质量、成形特点以及组织结构。采用 EDS 与 XRD 对焊接接头的组成和演变进行分析; 通过拉伸试验测试了接头的抗拉强度, 并采用扫描电镜 SEM 对拉伸断口进行分析。

鉴于 2A11 铝合金与 201 不锈钢在物理特性及熔点方面的差异, 传统的搅拌头中置焊接技术会导致结合面两侧的热分布不均, 可能引起铝合金一侧的熔化问题。因此, 本研究提出将焊接工具的轴线向 2A11 铝合金一侧偏移 0.2 mm, 以期实现更均匀的热分布。

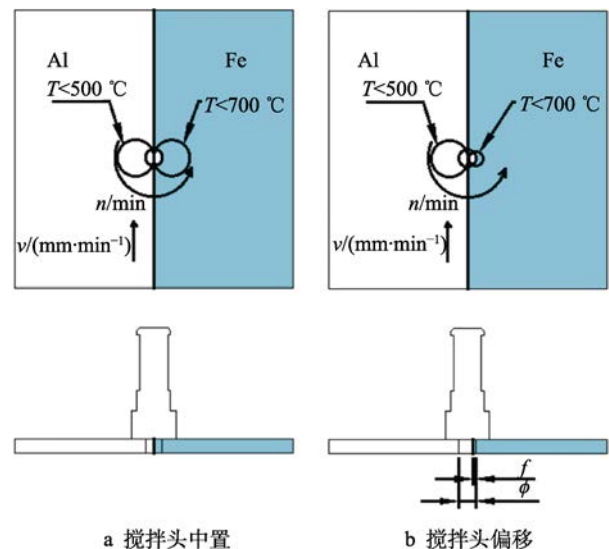


图 1 FSW 搅拌头布置方案

Fig.1 FSW stirring head arrangement scheme: a) stirring head in the middle; b) stirring head offset

2 结果与分析

2.1 接头组织结构

焊接接头的宏观形貌如图 2 所示, 左侧为 201 不锈钢, 右侧为 2A11 铝合金, 左侧为后退侧, 右侧为前进侧。从宏观形貌可以看出, 焊接接头成形较好, 两侧金属成形较好, 未出现裂纹、气孔等缺陷, 相对而言, 铝合金侧熔合线较清晰完整。后退侧左下方发生明显金属堆积, 同时小部分金属颗粒通过搅拌带到

前进侧,部分金属大颗粒以一定角度斜切入焊道,说明不锈钢合金上侧金属在搅拌作用下越过界面层,被外力推至合金的接头处中,在201不锈钢侧体现尤为明显。在FSW焊接过程中,搅拌头沿着焊接方向以一定速度前进,同时搅拌头以一定的速率进行旋转,且搅拌头肩部以一定的压力下压,使搅拌头侵入焊板处的组织中,此过程将产生热量,同时相关组织沿着搅拌头旋转的方向依次向后排列。钢/铝异种合金中钢和铝的熔化温度及力学性能不一样,导致铝板处的组织被搅拌头充分混合,组织也更为细小,熔合区与母板处的结合更为明显;201不锈钢钢板的力学性能相对于铝合金的更高,熔化温度也更高,在焊接过程中其组织不易被分割成更为细小的颗粒,故以大颗粒形式存在于焊缝熔合区,同时大颗粒不易被搅拌头带离至远处,相关组织常存在于母材附近的区域内,其力学性能高导致母材处的熔合线不明显,存在明显的搅拌头强行分离母材组织的痕迹。

焊接接头不同区域的显微放大图如图3所示。可以看出,焊缝中心组织存在金属合金相互渗透的情



图2 2A11铝合金与201不锈钢焊接接头宏观形貌
Fig.2 Cross-sectional micro-graph of 5A05 aluminum alloy and 201 stainless steel

况。在显微组织放大图中,颜色较深的部分为201不锈钢组织,201不锈钢组织呈块状散落在截面左侧,且组织尺寸较大,说明大部分组织为搅拌头从201不锈钢板上脱离进而被搅拌头带入中心的焊接组织,相比于右侧,焊接区域内左侧的熔合线呈现出复杂的扭曲状且互相侵入,说明不锈钢组织在脱离的过程中受力复杂且组织脱离不完整。研究显示,焊接接头边界部分的互相侵入有利于提高接头的力学强度。造成以上现象的主要原因之一是:采用搅拌头偏移0.2 mm弥补了异种金属间力学性能和物理性能的差异,以达到均衡焊接界面两侧温度的作用,间接说明了本文FSW焊接工艺的合理性。

2.2 接头成分和物相分析

在焊接过程中,FSW搅拌头对材料施加一定压力,并以一定的速度向前运动,整个过程存在复杂切变和产热过程,材料发生塑性变形和材料流动及原子扩散一系列物理现象。材料塑性变形率可达 $10^0 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ [24]。Liu等[25]利用FSW获得了6061铝合金TRIP780/800钢的对接接头,并研究了焊接参数对温度分布及铝钢中间层(IMCs)厚度的影响。在焊接过程中,界面处的原子发生扩散,Fe及Al原子发生金属键合,生成Fe-Al金属化合物。界面处的脆性相和粗大晶粒组织容易产生裂纹并导致其扩展,降低接头的力学性能,故焊缝界面处的IMCs厚度及种类对焊件的力学性能有着重要影响。母材中Fe、Al、Cu、Ni、Cr等元素为主要元素,焊接接头的主要相必然

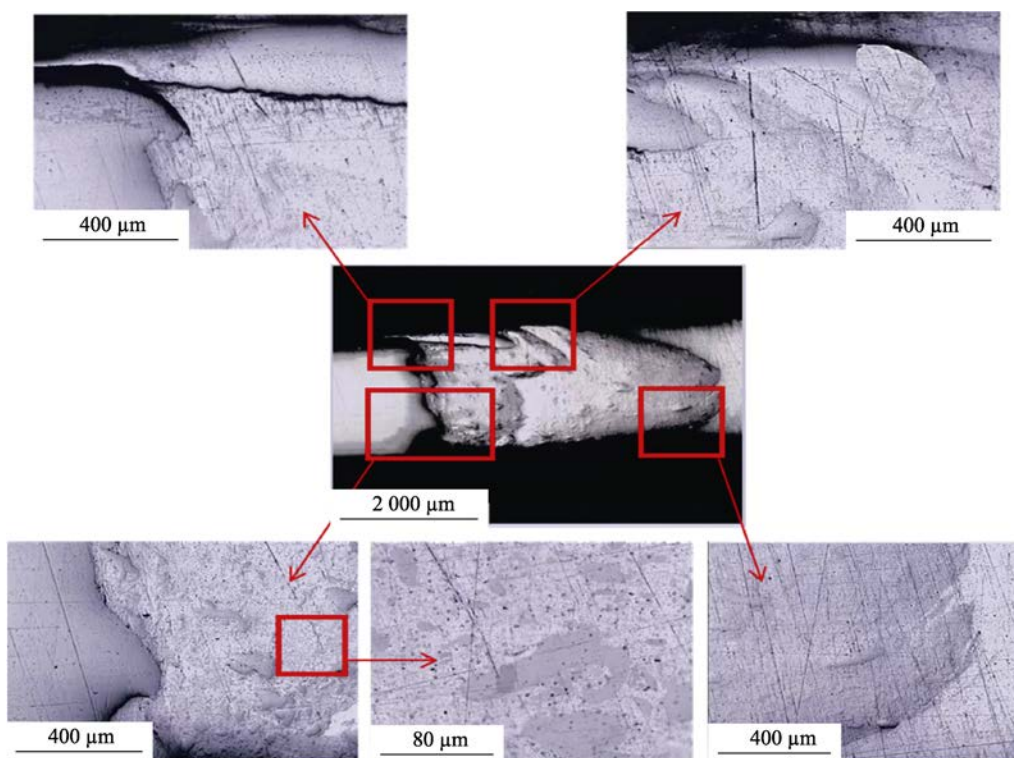


图3 焊接接头核心及部分区域的显微放大图像
Fig.3 Microscopic magnification of core and other parts of welded joint

与以上元素相关, 作为绝对主要元素 Fe 及 Al 形成的相将作为讨论的重点。

接头的微观组织如图 4a 所示, 左侧为 201 不锈钢, 右侧为 2A11 铝合金, 可测量得出焊缝界面处 IMCs 厚度约为 8 μm。在铝合金界面处, 可观察到枝状形态的组织向铝合金侧延伸, 这是由于铝合金的导热性能远大于不锈钢的导热性能, 金属相更容易朝铝合金方向生长。Fe 和 Al 的形成相对焊接接头力学性能有重要影响, 故重点对 Fe 和 Al 元素分布进行分析。图 4b 为 Fe 和 Al 的 EDS 分析图, 可知, Fe 元素在 L1 段下降, Al 元素在 L2 段上升, 两者变化的起始位置基本一致, 即在此位置 Fe 与 Al 发生金属键的键合, 导致相变。为进行更深一步的研究, 本文使用 XRD 对生成相的具体种类进行分析。

在钢-铝异种合金搅拌摩擦焊焊接过程中, 材料受到剪切/压力及塑性变形流动等外力作用。在受影响区域内, 材料内较大的温度起伏导致不同元素之间通过金属键键合产生较多种类的合金相, 可通过对以 Fe 与 Al 为主的金属相进行分析, 达到高效分析金属相的目的。由 Fe-Al 二元合金相图和以往的研究可知, Fe-Al 焊接接头的 IMCs 有 FeAl₆、FeAl₂、FeAl₄、

Fe₂Al₅、FeAl、Fe₃Al 等 Fe-Al 相。接头截面处 XRD 的衍射图如图 5 所示, 可知, 焊缝界面处的 Fe-Al 金属相为 Fe₃Al、FeAl 及 Al₃FeSi。结合图 4b 中 Fe 及 Al 元素的变化特点可知, 界面处 Fe 元素存在 L1 段、Al 元素存在 L2 段, 可以推断界面处 L1 段的 Fe-Al 相变化趋势为 Fe₃Al→Fe-Al→Fe₃Al。Fe₃Al 的 X 射线衍射峰强度高, 峰宽较窄, 说明 Fe₃Al 晶粒成形度高, 同时还有一部分完整度不高的衍射峰, 说明在 FSW 中还有一部分晶化度不高的金属相。在 FSW 焊接过程中, 复杂的机械应变、相变及产热等因素对焊缝区及其与母材结合处的材料组织结构产生显著影响, 在相同的温度作用下, 铝合金处的材料组织被带到更远的位置, 同时在一定温度作用下, 铝原子的扩散能力更强, 进入 201 不锈钢组织中, 形成新的相。结合 EDS 图可知, 铝原子的原子溶度相对更高, 说明在异种合金焊接过程中, 与铁原子相比, 铝原子的扩散更为活跃, 其原因为在一定温度下, 201 不锈钢熔点较铝合金的更高。同时, 在搅拌头的带动下, 201 不锈钢中的组织也被带至铝合金处, 在不锈钢及 2A11 铝合金侧都形成了 Fe₃Al 及 FeAl 相, 故 Fe-Al 相分析对理解整个焊接过程有重要意义。

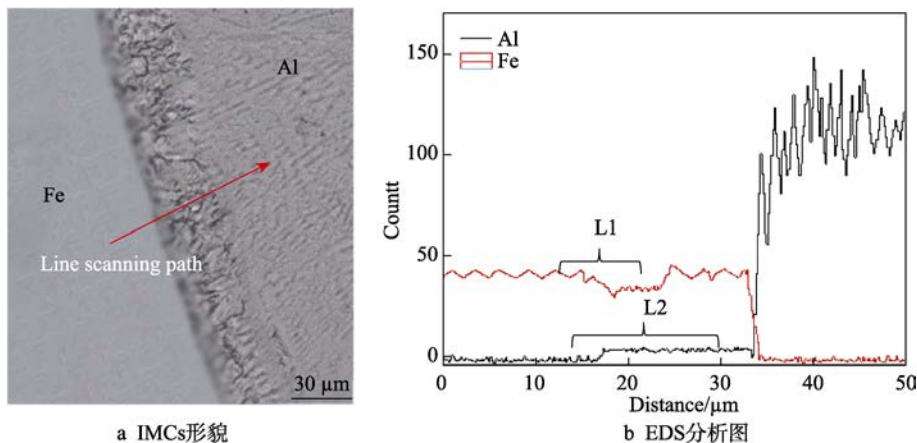


图 4 界面层

Fig.4 Interface layer: a) IMCs morphology; b)EDS analysis

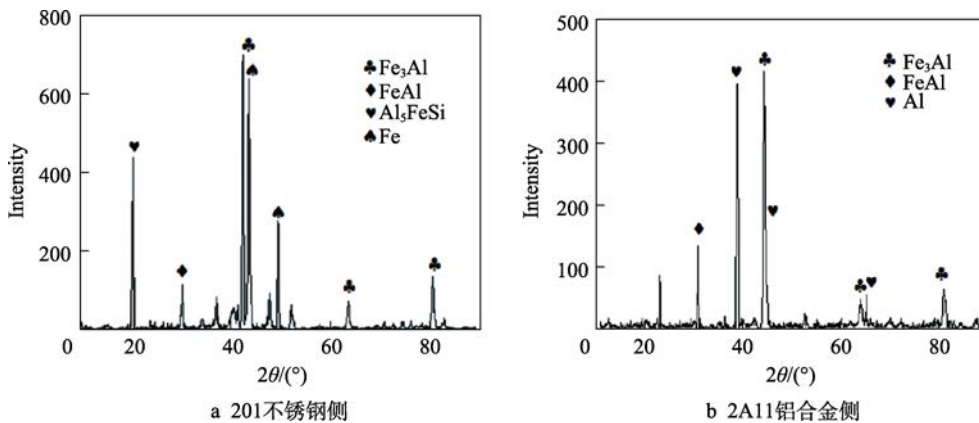


图 5 焊接接头 XRD 衍射分析

Fig.5 XRD diffraction analysis of welded joint: a) 201 stainless steel side; b) 2A11 aluminum alloy side

2.3 接头拉伸性能及断口分析

从焊接试板上截取3个拉伸试样,采用标准试样形式,其外形尺寸为55 mm×16 mm×4 mm,在室温条件下进行拉伸试验,拉伸速度为1 mm/min。接头平均抗拉强度可达381 MPa,其抗拉强度超过2A11铝合金母材的抗拉强度,断裂部位均在铝合金位置处。

在焊缝中心线两侧开设R1的应力槽,使试样在焊缝中心处断裂。拉伸断口的图示如图6a所示,可知,断口呈一定的锥度,为明显的韧性断裂特征。图6b为断口的SEM微观形貌,整体较为灰暗,可观察到大量的韧窝,为韧性断裂,与宏观断口特征相符。上述结果表明,对于钢-铝异种合金的焊接,通过调节搅拌头的偏移量,施加合理的焊接速度和转速,可以获得高质量且强度满足母材要求的焊接接头。

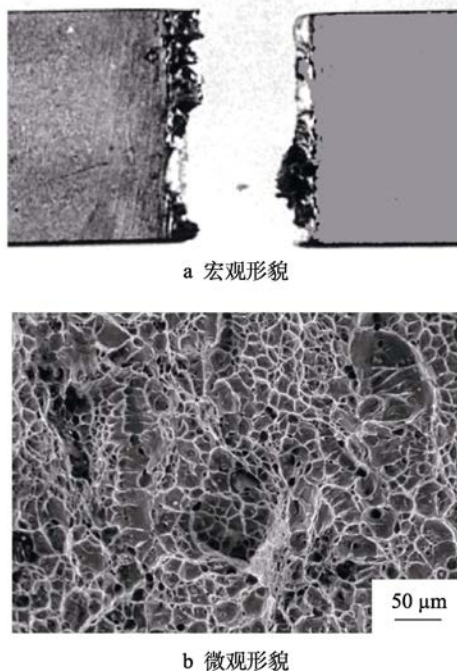


图6 焊接接头断口形貌

Fig.6 Fracture morphology of welded joint: a) macro morphology; b) micro morphology

3 结论

1) 在FSW搅拌头偏移量为0.2 mm的条件下,可实现钢-铝异种合金无气孔、裂纹等缺陷的焊接,焊缝中心异种金属合金相互渗透深度约为2.5 mm。

2) Fe-Al焊缝边缘处IMCs厚度约为8 μm,界面层主要的Fe-Al金属相为Fe₃Al等,具有一定的韧性,对铝钢焊接接头的力学性能有积极意义。

3) 焊接接头平均抗拉强度为381 MPa,超过2A11铝合金的母材抗拉强度,拉伸断口为韧性断裂。说明在位移为0.2 mm时,接头具有较为优异的力学性能。

参考文献:

- [1] SAKIYAMA T, NAITO Y, MIYAZAKI Y, et al. Dissimilar Metal Joining Technologies for Steel Sheet and Aluminum Alloy Sheet in Auto Body[J]. Nippon Steel Technical Report, 2013(103): 91-98.
- [2] 张山寅, 杨俊锋, 芦跃峰, 等. 铝/钢薄板无铆连接接头成形过程及形貌控制[J]. 精密成形工程, 2023, 15(5): 44-53.
- [3] ZHANG S Y, YANG J F, LU Y F, et al. Forming Process and Morphology Control of Mechanical Clinch Joint of Steel/Aluminum Sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(5): 44-53.
- [4] ARAKERE G. Computational-analysis Assisted Introduction of Friction Stir Welding into Development of Light-weight High-survivability Military Vehicles[J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2011, 12(2): 35-40.
- [5] 朱浩, 张二龙, 莫淑娟, 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.
- [6] ZHU H, ZHANG E L, MO S X, 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.
- [7] 侯俊良, 周博芳, 张红霞, 等. 汽车轻量化铝合金材料的搅拌摩擦焊研究现状[J]. 电焊机, 2023, 53(12): 86-94.
- [8] HOU J L, ZHOU B F, ZHANG H X, et al. Research Status of Friction Stir Welding of Automobile Light-weight Aluminium Alloy Material[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(12): 86-94.
- [9] 洪腾蛟, 董福龙, 丁凤娟, 等. 铝合金在汽车轻量化领域的应用研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(4): 1-6.
- [10] HONG T J, DONG F L, DING F J, et al. Application of Aluminum Alloy in Automotive Lightweight[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(4): 1-6.
- [11] GONG B S, LIU Z J, WANG Y L, et al. Improving the Fatigue Strength of A7N01 Aluminum Alloy by Adjusting Si Content[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 15-22.
- [12] 万彪, 孙刚, 程超群. ZL205A副车架结构设计与成形工艺仿真优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(9): 949-952.
- [13] WAN B, SUN G, CHENG C Q. Structure Design and Forming Process Optimization of the ZL205A Frame Parts[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(9): 949-952.
- [14] 史春元, 于启湛. 异种金属的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [15] SHI C Y, YU Q Z. Welding of Dissimilar Metals[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [16] 万龙. 铝/钢搅拌摩擦搭接强流变作用下界面行为及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [17] WAN L. Study on Interface Behavior and Mechanical

- Properties of Aluminum/Steel Friction Stir Lap under Strong Rheological Action[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [11] ZHU M, LI C K, ZHANG G, et al. Modeling and Control of Consumable DE-GMAW Process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2016, 24: 293-297.
- [12] ZHANG C Q, WANG S W, LUO D C, et al. Study of the Mechanical Properties and Microstructures of Conical Joints for Aluminum/Steel Continuous Drive Friction Welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 67: 241-252.
- [13] WALLERSTEIN D, SALMINEN A, LUSQUINOS F, et al. Recent Developments in Laser Welding of Aluminum Alloys to Steel[J]. *Metals*, 2021, 11(4): 622.
- [14] BAHEMMAT P, HAGHPANAHI M, BESHARATI G M K, et al. Study on Dissimilar Friction Stir Butt Welding of AA7075-O and AA2024-T4 Considering the Manufacturing Limitation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(9): 939-953.
- [15] LI X, LU Y, WANG J, et al. Microstructural Evolution of Magnesium Alloy During Hot Compression[C]// *International Conference on Mechanics and Control Engineering*, 2014.
- [16] TANG W, GUO X, MCCLURE J C, et al. Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding[J]. *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science*, 7(2): 163-172.
- [17] 赵亚东, 路尧文, 崔红保, 等. 焊接速度对铝/镁异种合金搅拌摩擦焊竖向压力、组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2023, 52(13): 42-46.
- ZHAO Y D, LU Y W, CUI H B, et al. Effect of Welding Speed on Vertical Pressure, Microstructure and Properties of Al/Mg Dissimilar Metals Friction Stir Welding[J]. *Hot Working Technology*, 2023, 52(13): 42-46.
- [18] 孙嵩, 王快社, 王文, 等. 焊接速度对镁/铝异种合金搅拌摩擦焊接头显微组织与力学性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2019, 43(2): 63-68.
- SUN S, WANG K S, WANG W, et al. Effect of Welding Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joint of Dissimilar Magnesium/Aluminum Alloys[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2019, 43(2): 63-68.
- [19] 肖熙, 刘博, 毛育青, 等. 焊接工艺参数及搅拌针形貌对铝合金搅拌摩擦焊轴向压力的影响[J]. *热加工工艺*, 2019, 48(23): 172-176.
- XIAO X, LIU B, MAO Y Q, et al. Effect of Welding Process Parameters and Stir Pin Morphology on Axial Pressure of Aluminum Alloy Friction Stir Welding[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(23): 172-176.
- [20] 聂浩, 徐洋, 柯黎明, 等. 转速对厚板铝/镁异种材料搅拌摩擦焊摩擦产热及界面组织的影响[J]. *材料导报*, 2023, 37(8): 84-89.
- NIE H, XU Y, KE L M, et al. Effect of Rotational Speed on Frictional Heat Production and Interface Structure of Thick Plate Al/Mg Dissimilar Materials by Friction Stir Welding[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(8): 84-89.
- [21] 曾浩然. 搅拌针形貌及辅助加热对铝/镁 FSW 焊缝成形的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- ZENG H R. Influence of Stirring Needle Morphology and Auxiliary Heating on Forming of Al/Mg FSW Weld[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [22] 康铭, 孙巍, 李鹏伟, 等. 转速、焊速对 6061-T6 铝合金搅拌摩擦焊性能的影响[J]. *铝加工*, 2020, 43(2): 8-11.
- KANG M, SUN W, LI P W, et al. Effect of Rotate Speed and Welding Speed on Friction Stir Welding Performance of 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. *Aluminium Fabrication*, 2020, 43(2): 8-11.
- [23] 苗玉刚, 赵羽扬, 刘吉, 等. 铝-钢堆焊-搅拌摩擦复合焊接头特性分析[J]. *焊接学报*, 2021, 42(12): 72-77.
- MIAO Y G, ZHAO Y Y, LIU J, et al. Characteristic Analysis of Aluminum-Steel Surfacing-Friction Stir Composite Welding Joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(12): 72-77.
- [24] LIANG X P, LI H Z, LI Z, et al. Study on the Microstructure in a Friction Stir Welded 2519-T87 Al Alloy[J]. *Materials & Design*, 2012, 35: 603-608.
- [25] LIU X, LAN S H, NI J. Analysis of Process Parameters Effects on Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloy to Advanced High Strength Steel[J]. *Materials & Design*, 2014, 59: 50-62.