

摆动频率及焊后热处理对 7A52 铝合金 MIG 焊接接头性能的影响

李守根¹, 杜思诺¹, 祁式孔¹, 曾才有^{1*}, 朱加雷¹, 潘静豪¹, 段继鑫²

(1.北京石油化工学院 机械学院, 北京 102612; 2.陆军航空兵学院 无人机中心, 北京 101123)

摘要: **目的** 针对高强 7A52 铝合金在 MIG 焊接过程中易出现组织不均匀及接头性能下降的问题, 系统探讨电弧摆动频率与焊后 T6 热处理对焊接接头组织演化及力学性能的调控作用, 阐明二者的协同强化机制。**方法** 以 7A52 铝合金为研究对象, 开展不同摆动频率条件下的坡口修复 MIG 焊接试验, 并对焊接接头实施 T6 焊后热处理。同时通过微观组织分析、EDS 能谱分析、显微硬度测试及拉伸性能测试对接头性能进行表征。**结果** 摆动频率的变化显著影响熔池流动行为, 随着摆动频率的提高, 焊缝组织由柱状晶向等轴晶转变, 晶粒明显细化。经 T6 热处理后, 焊缝区强化元素重新分配, 析出相数量增多且分布更加均匀, 焊接接头综合力学性能显著提升。在摆动频率为 3 Hz 并结合 T6 热处理条件下, 焊接接头性能达到最优, 其平均显微硬度为 166HV, 最高显微硬度达 180.33HV, 最大抗拉强度为 472.28 MPa。**结论** 摆动频率与焊后热处理之间存在明显的协同强化效应, 为 7A52 铝合金高性能 MIG 焊接接头的工艺优化提供了理论依据。

关键词: 摆动频率; 7A52 铝合金; 热处理; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2026.06.007

中图分类号: TG457.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2026)06-0066-09

Effect of Oscillation Frequency and Post-weld Heat Treatment on the Properties of 7A52 Aluminum Alloy MIG Welded Joints

LI Shougen¹, DU Sinuo¹, QI Shikong¹, ZENG Caiyou^{1*}, ZHU Jiale¹, PAN Jinghao¹, DUAN Jixin²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102612, China;

2. Unmanned Aerial Vehicle Center, Chinese people's Liberation Army Aviation School, Beijing 101123, China)

ABSTRACT: To address the issues of microstructural inhomogeneity and degradation of joint performance in high-strength 7A52 aluminum alloy during MIG welding, the work aims to systematically investigate the effects of torch oscillation frequency and post-weld T6 heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of welded joints, thereby elucidating their synergistic strengthening mechanism. MIG welding experiments with groove repair were conducted under different os-

收稿日期: 2026-03-13

Received: 2026-03-13

基金项目: 北京市教育委员会科研计划 (KM202310017006); 国家自然科学基金联合基金重点支持项目 (U22B20127)

Fund: R&D Program of Beijing Municipal Education Commission (KM202310017006); Key Program of the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (U22B20127)

引文格式: 李守根, 杜思诺, 祁式孔, 等. 摆动频率及焊后热处理对 7A52 铝合金 MIG 焊接接头性能的影响[J]. 精密成形工程, 2026, 18(6): 66-74.

LI Shougen, DU Sinuo, QI Shikong, et al. Effect of Oscillation Frequency and Post-weld Heat Treatment on the Properties of 7A52 Aluminum Alloy MIG Welded Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2026, 18(6): 66-74.

*通信作者 (Corresponding author)

cillation frequencies with 7A52 aluminum alloy, followed by T6 post-weld heat treatment. The joint performance was characterized by optical microscopy, energy-dispersive spectroscopy (EDS), microhardness testing, and tensile testing. The results indicated that oscillation frequency had a significant effect on molten pool flow behavior. With the increasing oscillation frequency, the weld microstructure transformed from columnar grains to equiaxed grains, with significant grain refinement. After T6 heat treatment, strengthening elements in the weld zone were redistributed, leading to an increased number of precipitates with a more uniform distribution, thereby significantly improving the overall mechanical properties of the welded joints. Under the combined condition of an oscillation frequency of 3 Hz and T6 heat treatment, the welded joint exhibited optimal performance, with an average microhardness of 166HV, a peak microhardness of 180.33HV, and a maximum tensile strength of 472.28 MPa. The results demonstrate a pronounced synergistic strengthening effect between oscillation frequency and post-weld heat treatment, providing a theoretical basis for optimizing the welding process of high-performance MIG welded joints of 7A52 aluminum alloy.

KEY WORDS: oscillation frequency; 7A52 aluminum alloy; heat treatment; microstructure; mechanical properties

7A52 铝合金属于高强铝, 因高强度、低密度特性, 被广泛用于航空航天结构件中^[1]。然而, 由于 7A52 铝合金合金化程度较高, 在焊接过程中易出现焊缝软化^[2]、组织粗化等现象, 因此力学性能下降^[3]。合理的摆动频率可有效改善熔池流动状态, 促进元素的均匀分布, 细化焊缝晶粒, 并抑制气孔等焊接缺陷的形成^[4]。此外, 焊后热处理也是改善铝合金焊接接头性能的重要手段^[5-6], 在一定程度上可恢复或提升焊接接头的强度和硬度。已有研究表明^[7-9], 焊后热处理对铝合金焊接接头的组织演变和力学性能具有明显影响, 但其效果与焊接热输入、焊缝初始组织状态密切相关。

MIG 焊接具有焊接效率高、工艺稳定性好、自动化程度高以及对铝合金适应性强等优点, 是高强铝合金结构连接中应用广泛的焊接方法之一。Zhao 等^[10]通过试验与数值模拟的方法研究了摆动频率对铝合金焊缝形貌及微观组织的影响, 结果表明, 摆动焊接能够改善熔池流动行为并促进晶粒细化, 从而提高焊缝成形质量和组织均匀性。而关于摆动频率在 MIG 焊接中的作用机制及其对焊接接头性能的影响研究仍相对较少。Li 等^[11]、杨靖琪等^[12]从微观组织演化角度出发, 深入分析了焊后热处理对铝合金焊接接头析出相行为和力学性能的影响, 研究表明, 合理的焊后热处理能够促进强化相的重新析出, 提高接头强度与塑性匹配。张晓波等^[13]对 7075 铝合金 MIG 焊接接头开展了研究, 指出焊后热处理(固溶+时效)可有效促进强化相弥散析出, 使抗拉强度提升约 37%, 显著改善焊接接头力学性能。Rajendran 等^[14]研究了焊枪摆动对 MIG 焊接接头成形质量和组织均匀性的改善作用, 研究表明, 适当的摆动参数有助于增强熔池对流、细化晶粒并降低焊接缺陷倾向, 但该研究主要集中于焊态接头性能, 对焊后热处理条件下摆动频率对组织稳定性及综合力学性能的影响缺乏系统研究。Huang 等^[15]提出了摆动 TIG-MIG 复合焊方法, 有效解决了窄间隙焊接中的侧壁熔合不良问题, 证明了机

械摆动对改善熔池有着积极作用。王志英等^[16]对摆动电弧在铝合金增材制造中的应用进行了研究, 指出摆动行为是改善成形表面质量并促进组织均匀化的方法之一, 但其研究重点偏向成形质量, 对接头力学性能及热处理后的性能演变关注不足。综上所述, 现有研究分别从焊接参数、焊后热处理或焊枪摆动等单一因素的角度对铝合金 MIG 焊接接头性能的影响进行了有益探索, 但针对摆动频率与焊后热处理耦合作用机制的研究仍较为有限, 尤其是对 7A52 铝合金这一高强铝合金体系, 相关研究尚不系统。

为满足各领域对高性能铝合金结构的应用需求, 有必要系统研究焊接接头性能的调控方法。本文使用 7A52 铝合金进行修复试验, 探究不同摆动频率下 7A52 铝合金 MIG 焊接接头的金相组织、力学性能、化学元素的变化规律, 确定该材料焊接的最优摆动频率参数以及热处理后相关性能的变化。通过揭示摆动频率与焊后热处理对焊接接头性能的影响机制, 为 7A52 铝合金高性能焊接接头的工艺优化提供理论依据和技术支持。

1 试验

试验采用 7A52 铝合金作为母材, 其尺寸为 300 mm×150 mm×10 mm。焊丝选用 7A48 型焊丝, 直径为 1.2 mm, 母材和焊丝的化学成分如表 1 所示, 选用奥太公司 PulseMIG-500RPPlus 型号 MIG 焊机, 机器人型号为 ER20-1700 六轴机器人, 焊接示意图如图 1 所示。

试验使用熔化极惰性气体保护焊(MIG)焊接工艺对 7A52 铝合金进行修复, 焊接过程中通入纯度为 99.99% 的氩气作为保护气^[17]。MIG 焊枪与母材的夹角为 73°, 坡口采用深度为 6 mm 的 U 形坡口, 坡口角度为 45°, 底部圆角半径为 2 mm, 使用 7A48 焊丝进行填充。经过多轮预试验优化后, 选取该组参数作为研究对象, 焊枪为圆弧摆动, 振幅为 2 mm, 电流

表 1 7A52 铝合金和 7A48 焊丝化学成分
Tab.1 Chemical composition of 7A52 aluminum alloy and 7A48 welding wire

Alloy	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Ti	Zr	Fe	Si	Sc	Al
7A52 Aluminum alloy	4.2	2.1	0.08	0.30	0.16	0.08	0.14	≤0.30	≤0.25	—	Bal
7A48 Welding wire	6.4-7.4	1.2-2.2	0.25-0.45	0.2-0.4	—	0.02-0.06	0.12-0.18	0.20	0.10	0.20-0.40	Bal

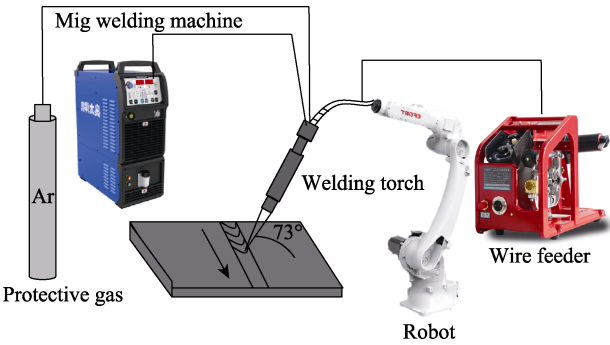


图 1 焊接示意图
Fig.1 Schematic diagram of welding

为 250 A，电压为 24.3 V，送丝速度为 15.5 m/min，焊接速度为 5 mm/s，保护气流量为 25 L/min。试验通过调整焊枪的摆动频率，探究该材料下 MIG 焊接最优摆动频率，电弧摆动频率示意图如图 2 所示。

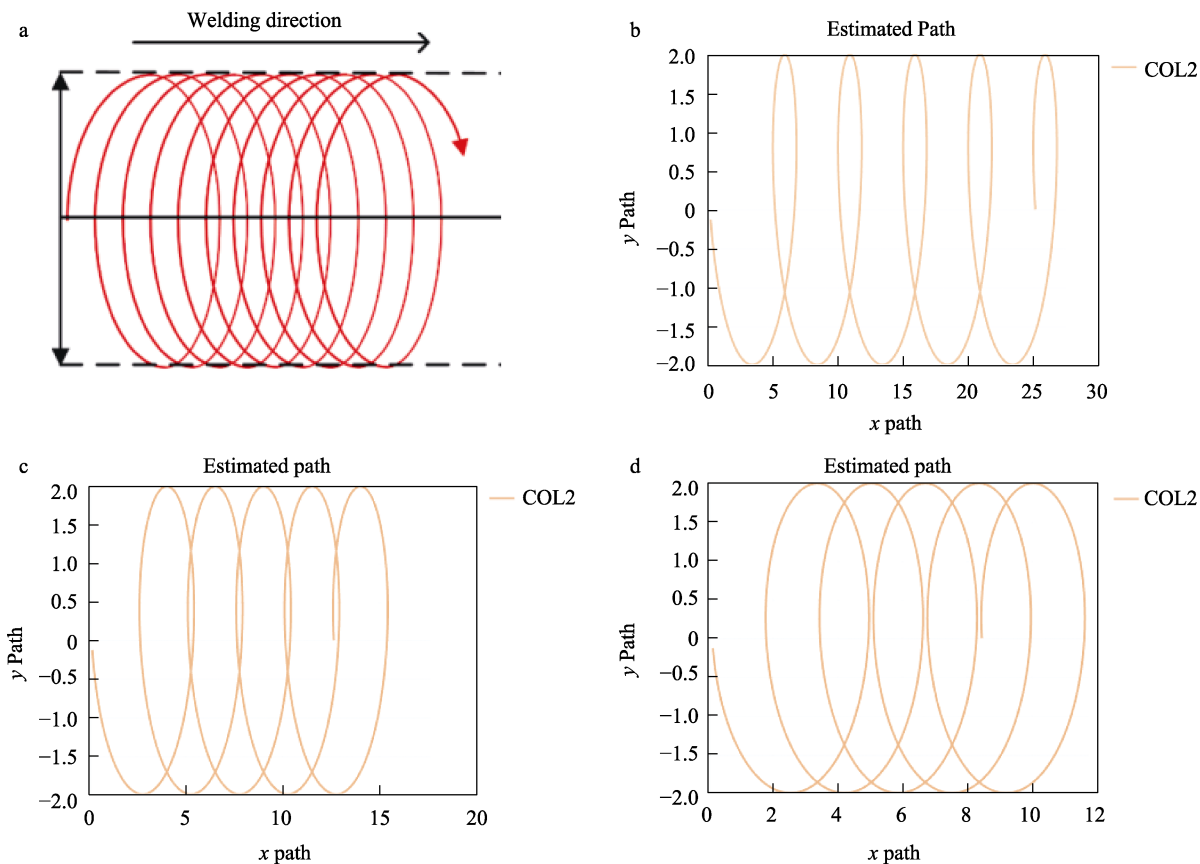


图 2 焊接方向 (a)、1 Hz 摆动图 (b)、2 Hz 摆动图 (c) 以及 3 Hz 摆动图 (d)

Fig.2 Welding direction (a), oscillation diagram at 1 Hz (b), oscillation diagram at 2 Hz (c) and oscillation diagram at 3 Hz (d)

通过高温处理炉（天津中环 SX-G07123 节能箱式电炉）对样品进行 T6 热处理^[18-19]，所有试样进行固溶处理，高温处理炉以 10 °C/min 的速度升温至 470 °C 后保温 2 h；冷水淬火；后经 120 °C、保温时间为 24 h 人工时效处理，如图 3 所示。对不同摆动频率条件下焊态及经 T6 热处理后的焊接接头进行显微硬度测试。测试位置沿焊缝横向布置，对母材以及不同频率下的摆动 MIG 焊缝试样进行拉伸试验，其测试示意图及尺寸图如图 4 所示。

2 结果与分析

2.1 微观组织

将制备的无热处理组金相试样用 Keller's 试剂腐蚀 10 s，经 T6 热处理的试样用 Keller's 试剂腐蚀

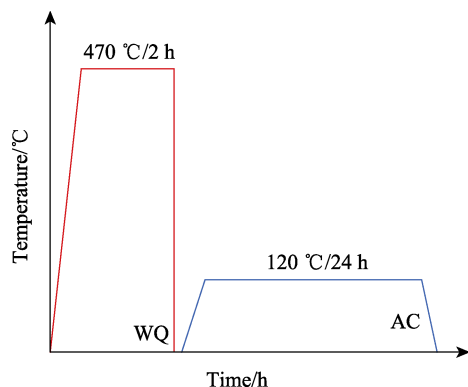


图 3 T6 热处理温度时间关系
Fig.3 Relationship between temperature and time in T6 heat treatment

15 s^[20]。熔合区是焊缝至母材的过渡区域, 组织受焊接热循环主导, 如图 5a、图 5b、图 5c (未热处理组) 所示, 低频摆动时, 能量集中, 熔池冷却快但搅拌弱, 柱状晶、枝晶沿散热方向定向生长, 组织细密但均匀性差。当频率升高至 2 Hz 时, 对熔池搅拌增强, 柱状晶进一步破碎, 等轴晶区域扩大, 晶粒尺寸比 1 Hz 时更细化。3 Hz 高频摆动使熔池搅拌作用最大化, 等轴晶比例显著提升, 晶粒尺寸达到该组最细。对于 T6 热处理组 (图 5a-1、图 5b-1、图 5c-1), 低频摆动导致区域晶粒呈等轴状, 晶界清晰, 晶粒尺寸较大, 析出相颗粒数量较少, 分布较稀疏。摆动频率增加, 等轴晶粒进一步细化, 析出相颗粒数量更多、分布更均匀, 组织的均匀性和细化程度更优。高频摆动的强搅拌作用, 使 T6 后组织的等轴晶比例最高、强化相最细密, 是该组中组织均匀性最优的状态。

从 1 Hz 到 3 Hz, 晶粒随频率升高逐渐细化, 这主要归因于高频摆动增强熔池搅拌, 打破柱状晶生长趋势, 同时促进成分均匀化, 为 T6 时效的强化相析出创造有利条件。T6 与摆动具有协同作用, 摆动频

率越高, T6 热处理对组织的修复效果越显著。说明焊接摆动频率通过改善熔池均匀性, 放大了时效工艺的强化潜力。

2.2 EDS 能谱分析

对焊缝区域进行 EDS 扫描, 如表 2 所示。定量分析结果表明, 焊态下 Mg 和 Zn 含量随摆动频率呈现非单调变化, Mg 易烧损, 导致硬度下降, 在 3 Hz 条件下, Mg 含量达到最大值, Zn 烧损程度较高, 而 Zn 在 1 Hz 条件下保留效果最好。以 1 Hz 与 3 Hz 为对比, Mg 元素的质量分数相对增加约 4.05%, Zn 元素的质量分数相对下降约 5.97%。以 1 Hz+T6 与 3 Hz+T6 为对比, Mg 元素的质量分数相对增加约 5.96%, Zn 元素的质量分数相对下降约 9.36%。频率变化不会引起主要元素 Al 发生明显变化, 但由于 Cu、Zn 等低熔点元素蒸发, Al 含量呈现轻微变化趋势。Ti 熔点高, Ti 元素含量变化不显著, 其作用主要体现在细化晶粒。随着焊缝摆动频率增加, 过渡族元素 Cr 相对含量略降, 经 T6 后 Cr 发生再分配与富集, 元素含量增加, 有利于抑制再结晶、改善高温稳定性。摆动频率有助于抑制 Mn 元素偏析, 从而降低热裂倾向, Mn 含量随频率升高略有增加, 并在 2 Hz 后趋于稳定。Cr、Mn 等元素在 T6 后对抑制再结晶和稳定组织起到辅助强化作用。在 3 Hz 时 Cu 烧损最明显, 与 7A48 丝材中 Cu 含量相差较大, Cu 含量的下降可减轻焊接裂纹风险^[21-22], 有利于硬度分布的稳定性。

焊缝中 Mg、Zn 等强化元素的演化行为对接头硬度及抗拉性能具有显著影响。Mg 与 Zn 是 7 系铝合金中形成 η' (MgZn_2) 强化相的关键元素, 其含量变化直接决定析出强化程度。随着摆动频率的提高, Mg 含量呈现一定程度的上升趋势, 而 Zn 元素则发生一定程度烧损, 两者的综合作用使焊缝中 Mg/Zn

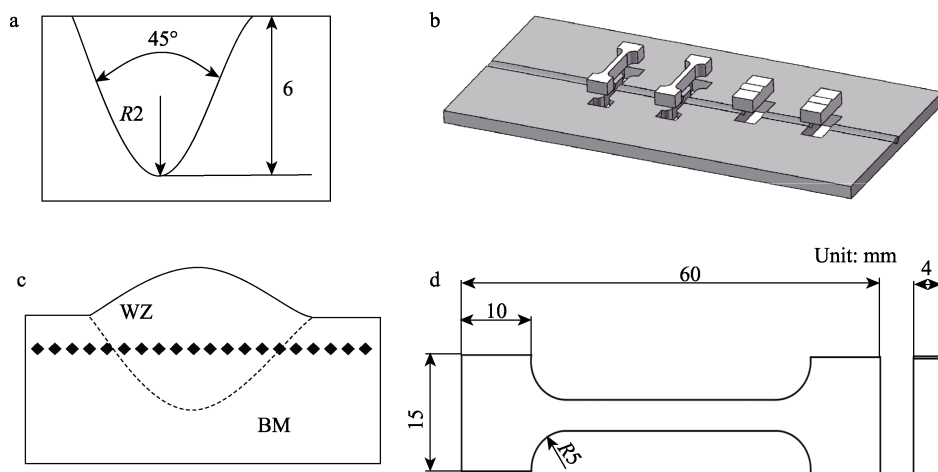


图 4 U 形坡口尺寸图 (a)、取件示意图 (b)、显微硬度测试位置示意图 (c) 以及拉伸样件示意图 (d)
Fig.4 U-shaped groove dimension (a), schematic diagram of collection procedure (b), schematic diagram of microhardness testing location (c) and diagram of tensile specimen (d)

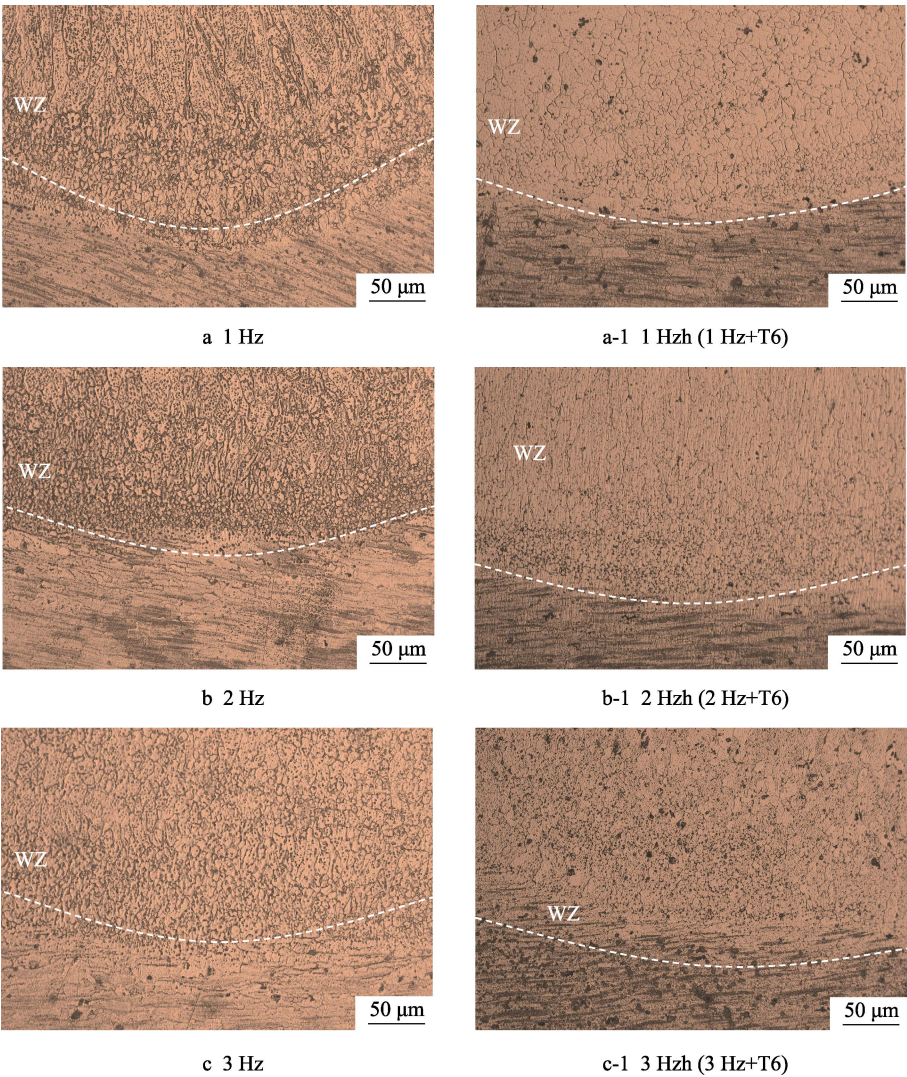


图 5 熔合区金相对照图

Fig.5 Metallographic comparison diagram of the fusion zone

Note: 1 Hzh has a swing frequency of 1 Hz and has undergone T6 heat treatment ; 2 Hzh has a swing frequency of 2 Hz and has undergone T6 heat treatment ; 3 Hzh has a swing frequency of 3 Hz and has undergone T6 heat treatment.

表 2 EDS 检测的元素含量

Tab.2 Element content detected by EDS

Oscillation frequency	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Cu	Zn	wt. %
1 Hz	3.21	91.86	0.18	0.15	0.32	0.26	4.02	
2 Hz	3.19	91.81	0.17	0.21	0.33	0.23	3.97	
3 Hz	3.34	92.17	0.16	0.17	0.31	0.22	3.78	
1 Hz+T6	3.19	91.50	0.17	0.13	0.32	0.31	4.38	
2 Hz+T6	3.33	91.53	0.18	0.15	0.31	0.28	4.24	
3 Hz+T6	3.38	91.78	0.14	0.31	0.31	0.21	3.97	

比发生变化，从而影响 η' 相的形核与长大行为。在 3 Hz 条件下，较高的 Mg 含量有利于促进细小弥散析出相的形成，结合 T6 热处理过程中元素的再分配与过饱和固溶体分解，强化相数量显著增加，从而对应显微硬度（最高达 180.33HV）及抗拉强度（472.28 MPa）的提升。Cr 与 Mn 元素在焊缝中的微量变化同样对性能产生间接影响。Cr 元素在 T6 处理

后发生富集，有助于形成弥散分布的弥散相颗粒，从而提高材料的热稳定性与强度，Mn 元素的增加则有利于抑制枝晶偏析及热裂倾向，改善组织均匀性。二者协同作用进一步优化了焊缝组织结构，降低硬度波动，并提升接头的综合力学性能。因此，可以认为焊缝性能的提升并非单一元素变化所致，而是 Mg-Zn 强化体系与 Cr、Mn 辅助强化机制协同作用的结果。

2.3 显微硬度

随着摆动频率的增加, 硬度增强, 其原因是经熔池搅拌后焊缝中部具有更细密的显微组织^[23]。如图 6 所示, 经热处理后的试样硬度明显高于未热处理试样硬度, 当摆动频率为 1~3 Hz 时, 未热处理组硬度在 125HV~140HV 之间波动, 热处理组硬度为 150HV~180HV, 其中 2 Hz+T6 和 3 Hz+T6 条件下提升最为显著, 峰值可达 175HV~180HV。热处理后, 焊缝硬度分布均匀性得到改善。在 1 Hz 低频条件下, 焊缝区硬度波动较大, 局部区域硬度偏低, 反映出组织不均匀性对力学性能的负面影响。而在 2 Hz 和 3 Hz 条件下, 由于焊缝组织均匀性的提升^[24], 硬度曲线趋于平滑, 焊缝中心与熔合区之间的硬度梯度减小。高频摆动对熔池的搅拌作用, 提高了熔池流动性, 消除了成分偏析和组织分布不均匀的现象, 导致焊缝区域晶粒细小, 硬度相对较高; 低频摆动会导致晶粒粗大, 降低硬度, 这与微观组织分析结论相一致。

2.4 抗拉性能检测

对不同摆动频率和焊后 T6 热处理的 MIG 焊缝试样进行拉伸试验, 试验检测结果如图 7 所示。当摆动频率为 1、2、3 Hz 时, 最大抗拉强度分别为 389.55、395.82、399.75 MPa, 延伸率分别为 10.71%、18.05%、16.64%。样件经过 T6 热处理后最大抗拉强度分别为 463.96、463.03、472.28 MPa, 延伸率分别为 18.05%、18.36%、13.94%。结果表明, 摆动频率的增加可以增强焊接接头的抗拉强度, 热处理后的样件抗拉强度明显提高。

在延伸率方面, T6 热处理后的接头整体塑性水平明显优于焊态。其中, 1 Hz 和 2 Hz 条件下的延伸率分别达到 18.05% 和 18.36%, 显示出较好的塑性恢复效果; 而在 3 Hz 条件下延伸率下降至 13.94%, 仍高于焊态 1 Hz 试样。这一现象表明, 在高摆动频率条件下, 焊缝区强化相密度显著提高, 位错运动受到更强的阻碍作用^[25], 导致材料在获得更高强度的同时塑性略有降低。

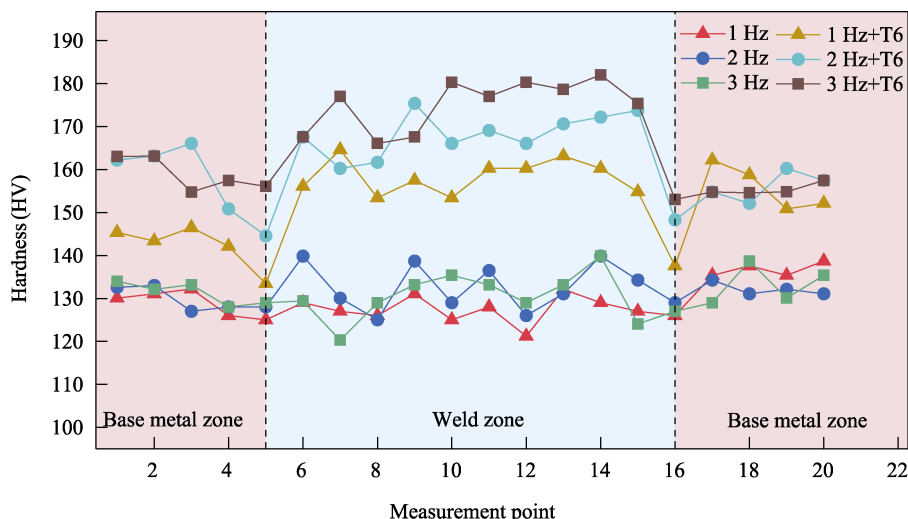


图 6 显微硬度分布图
Fig.6 Microhardness distribution map

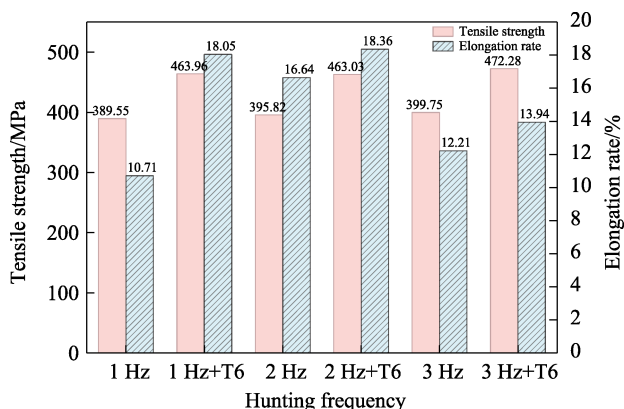


图 7 抗拉性能与延伸率测试结果
Fig.7 Tensile performance and elongation test results

为进一步揭示摆动频率为 3 Hz 时焊态与 T6 热处理状态下焊接接头拉伸性能差异的内在机制, 对 2 种状态下的拉伸断口进行了 SEM 形貌观察, 如图 8 所示。

图 8a~b 为 3 Hz 摆动频率下未经热处理的拉伸断口形貌。可见断口整体呈现典型的韧窝特征, 韧窝较浅且分布不均匀, 局部区域存在较明显的解理平面和撕裂棱, 表明断裂方式以韧性断裂为主, 但伴有准解理特征。这与其抗拉强度 (399.75 MPa) 和延伸率 (12.21%) 相对较低的结果相对应, 反映出焊态组织中强化相析出不足、晶界结合强度有限。图 8c~d 为 3 Hz 摆动频率下经 T6 热处理后的拉伸断口形貌。与焊态相比, 断口表面韧窝更加密集、均匀且深大, 韧窝内部可见细小的微孔聚集特征, 表明断裂方式转变

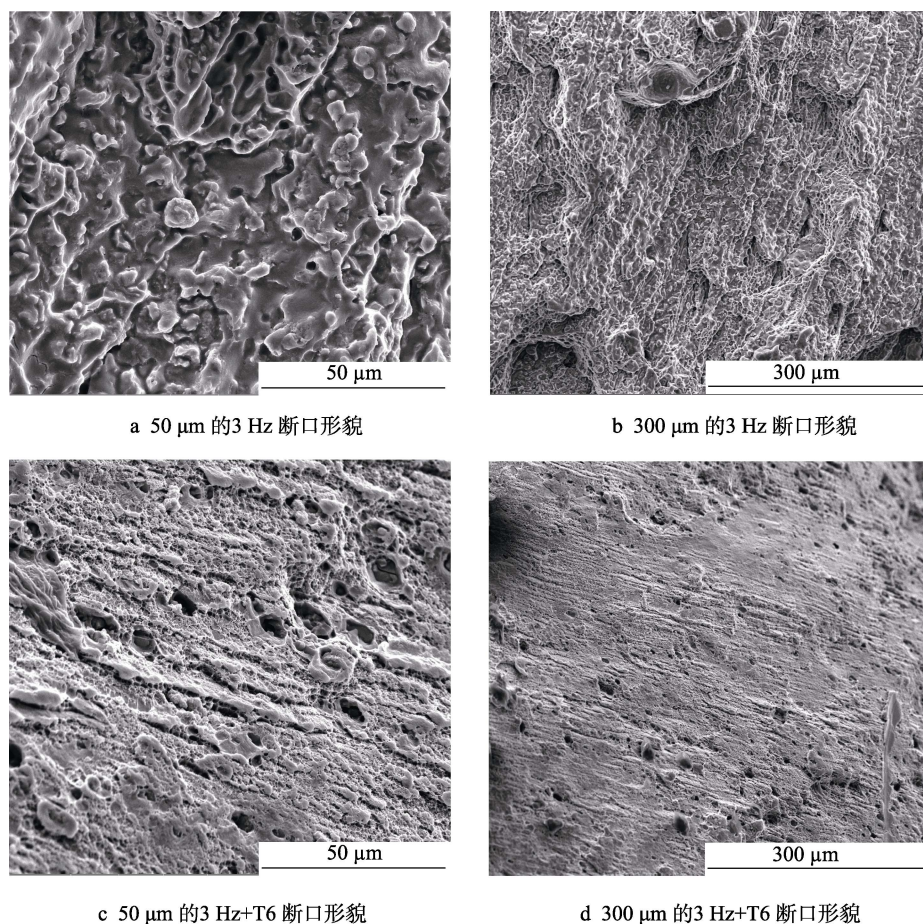


图8 断口形貌图

Fig.8 Fracture surface morphology diagram: a) 3 Hz fracture morphology with a width of 50 μm ; b) 3 Hz fracture morphology with a width of 300 μm ; c) 3 Hz+T6 fracture morphology with a width of 50 μm ; d) 3 Hz+T6 fracture morphology with a width of 300 μm

为典型的微孔聚集型韧性断裂。此外,在部分韧窝底部可观察到细小析出相颗粒,这些颗粒在拉伸过程中作为微孔形核核心,吸收了更多变形能,从而显著提高了材料的塑性和抗拉强度。这与该条件下抗拉强度达到 472.28 MPa、延伸率为 13.94%的测试结果一致。

综上,当摆动频率为 3 Hz 时,经 T6 热处理后焊缝组织显著细化,同时也有效改善了断口形貌,使断裂方式由混合型断裂向纯韧性断裂转变,这是其综合力学性能显著提升的重要微观机制。

3 结论

采用摆动 MIG 焊接方式,使用 7A48 焊丝对 7A52 铝合金 6 mm 坡口进行修复,探究不同摆动频率以及焊后经 T6 热处理对宏观形貌、微观组织及力学性能的影响。主要结论如下:

1) 采用摆动 MIG 焊接对 7A52 铝合金进行坡口修复时,摆动频率对熔池流动行为及焊缝组织形貌具有显著影响。随着摆动频率的提高,熔池搅拌作用增强,柱状晶生长受到抑制,等轴晶比例明显增加,焊缝组织逐渐细化并趋于均匀。

2) 焊后 T6 热处理可有效改善焊接接头的组织状态。在固溶-时效过程中,焊缝区强化元素重新分配并促进析出相的形成,使焊缝及热影响区组织进一步均匀化,从而显著提升焊接接头的显微硬度和抗拉性能。

3) 摆动频率与焊后 T6 热处理之间存在明显的协同强化效应。较高摆动频率通过改善焊态组织均匀性,为后续时效析出提供有利条件,从而放大了热处理的强化效果。

4) 在本研究条件下,3 Hz 的摆动频率结合 T6 热处理为 7A52 铝合金 MIG 焊接的优选工艺参数组合。在此条件下焊接接头获得最高且分布均匀的显微硬度(峰值 180.33HV),最大抗拉强度达到 472.28 MPa,综合力学性能最优。

本文系统研究了摆动频率及焊后 T6 热处理对 7A52 铝合金 MIG 焊接接头组织与性能的影响规律,仅采用单一 T6 热处理工艺,后续可进一步开展多级时效或双级时效工艺研究并配合其他摆动方式,以调控 η' 相的尺寸、形态及分布特征,从而实现强度与塑性的协同优化。以期进一步完善高强 7 系铝合金焊接接头的组织调控理论,为高性能焊接结构的工程应用

提供更加系统的理论支撑。

参考文献:

- [1] 姜成云,朱加雷,王程远,等.不同热输入对7A52铝合金摆动MIG焊接接头组织及性能的影响[J].精密成形工程,2025,17(7):145-152.
JIANG C Y, ZHU J L, WANG C Y, et al. Effect of Different Heat Input on Microstructure and Properties of 7A52 Aluminum Alloy Oscillating MIG Welding Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2025, 17(7): 145-152.
- [2] 黄浩,肖玉斌,赵飞,等.7A52铝合金摆动激光-电弧复合送丝熔覆修复工艺研究[J].电焊机,2025,55(8):74-82.
HUANG H, XIAO Y B, ZHAO F, et al. Research on the Oscillating Laser-Arc Hybrid Wire-Feeding Cladding of 7A52 Al Alloy for Repairing[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(8): 74-82.
- [3] YE Z, ZHU H Y, WANG S F, et al. Fabricate High-Strength 7075 Aluminum Alloy Joint through Double Pulse MIG Welding Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 512-522.
- [4] RAMIARISON H, BARKA N, PILCHER C, et al. Weldability Improvement by Wobbling Technique in High Power Density Laser Welding of Two Aluminum Alloys: Al-5052 and Al-6061[J]. Journal of Laser Applications, 2021, 33(3): 032015.
- [5] FENG D, LI X D, ZHANG X M, et al. The Novel Heat Treatments of Aluminium Alloy Characterized by Multistage and Non-Isothermal Routes: A Review[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(9): 2833-2866.
- [6] LIU X, WANG C Y, LI X P, et al. Investigation of 7075 Aluminum Alloy TIG Welding Joint Using 7075 Aluminum Alloy Wire before and after Heat Treatment[J]. Materials Research Express, 2023, 10(4): 046512.
- [7] JIA X D, FAN Z Y, LUO Z, et al. Impact of Heat Treatment Parameters on the Plastic Properties of 6061 Aluminum Alloy[J]. Materials, 2025, 18(8): 1705.
- [8] HU R Z, GUO C, MA M L. A Study on High Strength, High Plasticity, Non-Heat Treated Die-Cast Aluminum Alloy[J]. Materials, 2021, 15(1): 295.
- [9] QI Q W, LI M, DUAN Y H, et al. Effect of Solution Heat Treatment on the Microstructure and Microhardness of 7050 Aluminum Alloy[J]. Metals, 2023, 13(11): 1819.
- [10] ZHAO J T, JIANG P, GENG S N, et al. Experimental and Numerical Study on the Effect of Increasing Frequency on the Morphology and Microstructure of Aluminum Alloy in Laser Wobbling Welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 267-282.
- [11] LI X Y, SUN G R, REN B Q, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy Welded Joints Fabricated by MIG Welding with 7085-Sc Welding Wire[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 944: 148969.
- [12] 杨靖琪,龚红英,邱文宇,等.单级时效热处理工艺对7075铝合金微观组织及力学性能的影响[J].塑性工程学报,2026,33(1):256-262.
YANG J Q, GONG H Y, QIU W Y, et al. Effect of Single Stage Aging Heat Treatment Process on Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2026, 33(1): 256-262.
- [13] 张晓波,秦夏彤,高翔,等.焊后热处理对7075铝合金MIG焊接接头组织性能的影响[J].机械工程与自动化,2026,55(1):42-44.
ZHANG X B, QIN X T, GAO X, et al. The Effect of Post Weld Heat Treatment on the Micro Structure and Properties of 7075 Aluminum Alloy MIG Welding Joints[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2026, 55(1): 42-44.
- [14] RAJENDRAN C, SONAR T, IVANOV M, et al. Enhancing Tensile Properties of Pulsed CMT-MIG Welded High Strength AA2014-T6 Alloy Joints: Effect of Post Weld Heat Treatment[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2024, 7(2): 344-352.
- [15] HUANG J K, CHEN H Z, HE J, et al. Narrow Gap Applications of Swing TIG-MIG Hybrid Weldings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 609-614.
- [16] 王志英,白嘉瑜,李代龙,等.MIG摆动电弧对2319铝合金增材制造表面形貌和性能的影响[J].焊管,2025,48(8):80-88.
WANG Z Y, BAI J Y, LI D L, et al. Influence of MIG Oscillating Arc on Surface Morphology and Properties of 2319 Aluminum Alloy Additive Manufacturing[J]. Welded Pipe and Tube, 2025, 48(8): 80-88.
- [17] 赵云峰,周禄军,王鹏飞,等.不同惰性气节气下6005A铝合金MIG焊接接头组织演变与力学性能研究[J].焊接技术,2025,54(8):37-41.
ZHAO Y F, ZHOU L J, WANG P F, et al. Study on Microstructure Evolution and Mechanical Properties of MIG Welded Joint of 6005A Aluminum Alloy under Different Inert Gas Condition[J]. Welding Technology, 2025, 54(8): 37-41.
- [18] KIM Y, CHOI S, KIM Y, et al. Changes in Thermal Properties of 7075 Aluminium Alloy by Aging Heat Treatment[J]. Materials Science and Technology, 2023, 39(10): 1208-1213.
- [19] CHIANG M T, CHIU K Y, WU P C, et al. Improvement of the Mechanical Properties of the Diffusion-Bonded 2024 Aluminum Alloy through Post-Weld Heat Treatments[J]. Metals, 2022, 12(10): 1738.
- [20] EL GARCHANI F E, LGAZ H, KAYA S, et al. Effects of Heat Treatment on the Corrosion Behavior and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2024[J]. Journal

- of Materials Research and Technology, 2023, 25: 1355-1363.
- [21] DENG A L, CHEN H, ZHANG Y B, et al. Prediction of the Influence of Welding Metal Composition on Solidification Cracking of Laser Welded Aluminum Alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105556.
- [22] 陈宇航, 屈华, 付佳玉, 等. 焊后热处理对 2A12 铝合金脉冲 MIG 焊接接头组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2026, 47(2): 236-244.
- CHEN Y H, QU H, FU J Y, et al. Effect of Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Properties of Pulse MIG Welded Joints of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2026, 47(2): 236-244.
- [23] JIANG Z, HUA X M, HUANG L J, et al. Double-Sided Hybrid Laser-MIG Welding Plus MIG Welding of 30-mm-Thick Aluminium Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1): 903-913.
- [24] CHEN G Y, WANG B, MAO S, et al. Research on the “ ∞ ”-Shaped Laser Scanning Welding Process for Aluminum Alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115: 32-41.
- [25] WANG H Y, LIU X H, LIU L M. Research on Laser-TIG Hybrid Welding of 6061-T6 Aluminum Alloys Joint and Post Heat Treatment[J]. Metals, 2020, 10(1): 130.