

不同进给速度对铝合金焊接接头的微观组织与力学性能的影响

陈平

南京航空航天大学航空学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年11月10日; 录用日期: 2025年12月3日; 发布日期: 2025年12月15日

摘要

目的: 研究不同进给速度对铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能的影响, 分析其拉伸行为及断裂机理。方法: 采用搅拌摩擦焊对Al-Cu-Mg系铝合金进行对接焊试验, 固定旋转速度(1000 r/min), 改变前进速度。利用金相显微镜观察接头微观组织; 使用显微维氏硬度仪测试硬度分布; 通过拉伸试验机测定接头的常温拉伸性能。结果: 微观组织表明: 焊核区经历了动态再结晶, 形成细小的等轴晶组织。随着前进速度的增加, 焊核区晶粒尺寸减小。接头组织呈现显著的非对称性, 后退侧热机影响区的晶粒流线更剧烈, 边界更清晰。力学性能显示: 接头硬度分布呈“W”型, 热影响区硬度最低。当前进速度为100 mm/min时, 焊核区平均硬度最高(140.85 Hv), 接头抗拉强度达到峰值(413 MPa), 断裂伸长率为8.3%。结论: 前进速度通过调控热输入和材料流动, 显著影响铝合金FSW接头的微观组织和力学性能。在本研究的参数下, 采用1000 r/min的旋转速度和100 mm/min的前进速度, 可获得力学性能最优的焊接接头。该研究为优化铝合金搅拌摩擦焊工艺参数提供了理论依据。

关键词

搅拌摩擦焊, 2024系铝合金, 微观组织, 硬度, 拉伸性能

Effect of Different Welding Speeds on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Welded Joints

Ping Chen

School of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu

Received: November 10, 2025; accepted: December 3, 2025; published: December 15, 2025

Abstract

Objective: To investigate the influence of different welding speeds on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy Friction Stir Welding (FSW) joints, and to analyze their tensile behavior and fracture mechanism. **Methods:** Butt welding experiments were conducted on Al-Cu-Mg series aluminum alloy plates using friction stir welding, with a constant rotation speed (1000 rpm) and varying travel speeds. The microstructure of the joints was observed using a metallographic microscope; the hardness distribution was tested using a micro-Vickers hardness tester; and the room temperature tensile properties of the joints were determined using a tensile testing machine. **Results:** The microstructure analysis revealed that the Nugget Zone (NZ) underwent dynamic recrystallization, forming fine equiaxed grains. As the welding speed increased, the grain size in the NZ decreased. The joint structure exhibited significant asymmetry, with more severely deformed grain flow lines and a clearer boundary in the Thermomechanically Affected Zone (TMAZ) on the retreating side. Mechanical properties showed that the hardness distribution across the joint presented a “W” shape, with the Heat-Affected Zone (HAZ) having the lowest hardness. When the welding speed was 100 mm/min, the average hardness of the NZ reached its maximum (125.85 Hv), and the joint achieved its peak tensile strength (413 MPa) with an elongation of 8.3%. **Conclusion:** The welding speed significantly affects the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy FSW joints by controlling the heat input and material flow. Under the parameters of this study, using a rotation speed of 1000 rpm and a welding speed of 100 mm/min resulted in the optimal mechanical properties for the welded joint. This research provides a theoretical basis for optimizing the FSW process parameters for aluminum alloys.

Keywords

Friction Stir Welding, 2024 Aluminum Alloy, Microstructure, Hardness, Tensile Properties

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

高强铝合金，特别是 Al-Cu-Mg 系及 Al-Zn-Mg-Cu 系合金，因其优异的比强度、比刚度和疲劳性能，已成为航空航天、轨道交通及现代车辆制造等工业领域不可或缺的关键结构材料。以 Al-Cu-Mg 系铝合金为例，其作为典型的可热处理强化铝合金，主要通过 Cu、Mg 等元素形成 Al_2CuMg (S/S'相)和 Al_2Cu (θ/θ' 相)等纳米级沉淀强化相来获得高强度[1]-[3]。该合金在 T6 热处理状态下抗拉强度可达 481 MPa，屈服强度可达 377 MPa，尤其可在 150°C 以下保持稳定的力学性能，因此被广泛应用于飞机蒙皮、骨架、翼梁等关键承力部件。

然而，高强铝合金的传统熔焊连接(如 TIG、MIG 焊)长期面临着严峻挑战。在高能束流作用下，焊缝区金属经历熔化与凝固过程，极易产生凝固裂纹、气孔等缺陷。以航空航天领域常用的 2A14 铝合金(成分类似于 2024)为例，其高强低韧的物理属性和沉淀强化机制使其在焊接过程中比其他铝合金更易产生裂纹。同时，焊接热循环会导致热影响区(HAZ)发生过时效，强化相粗化、溶解，形成“软化区”，使该区域成为接头力学性能的薄弱环节，严重制约焊接结构的安全服役性能[4] [5]。为解决高强铝合金焊接难题，研究者们尝试了多种方法，如华中科技大学蒋平教授团队针对 2024-T4 铝合金激光焊接，创新性地设计了“锆芯铝壳”新型绞股焊丝，通过促进焊缝区形成平均尺寸仅 4 μm 的超细等轴晶组织，成功抑制

了凝固裂纹,并使接头抗拉强度达到 349 MPa (强度系数 78.9%)。尽管如此,寻找更可靠、更普适的连接方法仍是当前研究的热点。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为英国焊接研究所(TWI)于 1991 年发明的一种固相连接技术,为高强铝合金的高质高效连接开辟了新途径。其基本原理是通过高速旋转的搅拌头扎入待焊板材,并随之沿焊接方向移动,搅拌头轴肩与搅拌针通过与工件材料的摩擦产生热能,使局部金属处于热塑性状态,在搅拌针的机械搅拌与挤压作用下实现材料的冶金结合[6]。由于 FSW 过程温度低于母材熔点,可有效避免熔焊相关的凝固裂纹、气孔等缺陷,同时具有残余应力小、变形小等一系列优点,被国际焊接界认为是近年来最具革命性的焊接技术之一,尤其适合于传统熔焊难以焊接的 Al-Cu-Mg 系及 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金。

FSW 接头质量在很大程度上由焊接工艺参数所决定,主要包括旋转速度、前进速度(焊接速度)、轴向压力以及搅拌头几何形状等。这些参数共同影响着焊接过程中的热输入、材料流动行为以及最终的微观组织。其中,前进速度作为关键参数之一,直接决定了焊接效率,并对热循环特性和塑性材料的流动模式有显著影响。一般而言,在固定旋转速度下,较低的前进速度意味着更高的热输入和更长的热作用时间,这往往导致焊核区(Nugget Zone, NZ)晶粒粗大;而过高的前进速度则可能因热输入不足、材料塑性流动不充分,引发“孔洞”、“吻接”等缺陷。例如,对 6063-T6 铝合金的 FSW 研究表明,当旋转速度固定为 1500 rpm,焊接速度从 300 mm/min 增至 1400 mm/min 时,接头力学性能呈现先升高后降低的趋势,表明存在一个最优的前进速度窗口。

为进一步提升 FSW 接头性能,各种工艺创新与方法改进不断涌现。例如,双轴肩搅拌摩擦焊(BT-FSW)可用于改善板厚方向的组织均匀性;水下 FSW 和热沉辅助 FSW 通过增强冷却以抑制不利相变、减小热影响区软化;焊前表面纳米化(HSNC)预处理则展示了通过在材料表面制备梯度纳米结构(GNS)表层,使其在焊接过程中以复杂“S”线形式分布在 TMAZ 和 NZ,形成纳米层区(NLZ),从而同步提高接头强度和塑性变形能力的潜力[7] [8]。杨建海等人的研究证实,经 HSNC 处理的 2A14 铝合金 FSW 接头,其抗拉强度和延伸率分别比原始样品提高了 6.4%和 14.1%。

尽管 FSW 技术及其工艺研究已取得长足进步,但针对特定高强铝合金体系,系统揭示前进速度这一单一变量如何通过调控热输入和材料流动,进而影响接头微观组织(包括晶粒尺寸、形态、织构、第二相粒子分布)与力学性能(硬度、强度、塑性、断裂机制)之间内在关联的研究仍待深化。特别是在不同的前进速度下,接头各区域组织的梯度特征演变、软化行为及其对整体力学性能的制约机制尚需精细刻画。此外,前进速度与旋转速度等参数之间的交互作用对缺陷形成、材料流动模式及最终接头性能的影响规律也需进一步明确。

本研究以 Al-Cu-Mg 系 2024 铝合金为研究对象,但并不局限于该合金,其研究思路可推广至其他高强铝合金体系。我们重点考察不同前进速度对搅拌摩擦焊接头微观组织与力学性能的影响规律,旨在深入理解 FSW 工艺参数-组织-性能之间的内在联系,为高强铝合金搅拌摩擦焊工艺的精准控制和优化提供详实的实验数据与理论支撑,进而推动该先进连接技术在高端装备制造领域的更广泛应用。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料与制备

本研究采用轧制态 Al-Cu-Mg 系 2024 铝合金板材作为实验材料,板材尺寸为 300 mm × 150 mm × 4 mm,其化学成分如表 1 所示。该合金在 T4 状态(固溶处理加自然时效)下具有中等强度和高韧性,是航空航天结构件的典型材料状态。焊接前,使用丙酮溶液彻底清洗待焊区域,以去除表面油污和氧化膜,

确保焊接质量的一致性。

Table 1. Chemical composition of AA2024 aluminum alloy (mass fraction, %)

表 1. AA2024 铝合金化学成分(质量分数, %)

元素	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Al
含量	4.2	0.6	0.8	0.7	0.8	0.3	0.15	余量

2.2. 搅拌摩擦焊接工艺

本文焊接均在赛福斯特龙门型搅拌摩擦焊设备上, 选用 H13 钢制搅拌头, 其轴肩直径为 12 mm, 搅拌针为带螺纹的锥形搅拌头, 长度 5 mm (略小于板厚以确保全厚度焊接且不穿透), 搅拌头倾斜角度设置为 2.5°。进行焊接前, 用砂轮打磨拼接面, 防止表面氧化物对试样产生影响。将打磨处理好的试样置于工作台表面, 并装夹固定, 设置好参数后进行搅拌焊接。

为系统研究前进速度对焊接接头的影响, 本研究固定旋转速度为 1000 rpm, 变化前进速度分别为 80、100、120 mm/min, 形成 3 组对比实验。该旋转速度范围的选择基于文献调研, 已被证明能够在较宽的前进速度范围内获得无缺陷焊缝。表 2 为搅拌摩擦焊接工艺方案。

Table 2. Friction stir welding process plans

表 2. 搅拌摩擦焊接工艺方案

合金	旋转速度(r/min)	进给速度(mm/min)
1	1000	80
2	1000	100
3	1000	120

2.3. 微观组织表征方法

金相试样制备过程为经粗砂纸打磨→细砂纸打磨→清洗→抛光→清洗→烘干→腐蚀→酒精清洗→烘干。腐蚀溶液为凯勒试剂(2.5% HNO₃ + 1.5% HCl + 1% HF + 95% H₂O, 体积分数), 腐蚀时间 10~15 s。用 Nikon-MR5000 型光学金相显微镜观察合金在不同状态下的组织形貌。采用 ZEISS Sigma500 型扫描电子显微镜观察试样的高倍显微组织特征, 并对拉伸断口形貌进行观察; 同时利用能谱仪(EDS)测定元素的成分, 所用试样为抛光后腐蚀的金相试样。

2.4. 性能测试

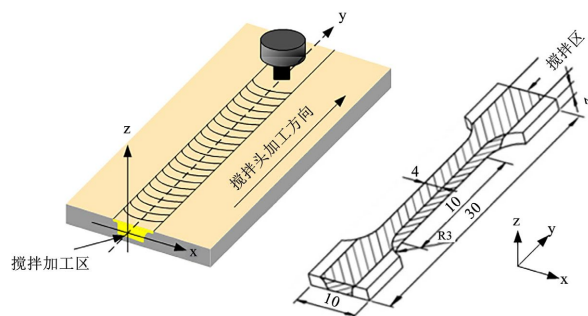


Figure 1. Sampling location and dimensions of tensile test specimens from friction stir welded aluminum alloy (Unit: mm)

图 1. 搅拌摩擦焊接后铝合金拉伸试样切割位置及试样尺寸(单位: mm)

本文力学性能测试包括显微硬度测试和室温拉伸试验。采用 HVS-1000A 型维氏硬度计测量搅拌摩擦焊接后试样的硬度。将试样表面磨平，并用砂纸打磨和机械抛光。测试选取的位置为搅拌摩擦焊接深度的中线处。加载载荷为 1.96 N，保压时间为 15 s。采用 CMT5101 万能试验机进行材料的室温拉伸测试，其中拉伸试样的形状及其尺寸如图 1 所示。拉伸试验中选择拉伸速率为 1 mm/min。相同状态下的合金进行 3~5 次的拉伸，取平均值。为分析断裂机制，使用 SEM 观察拉伸断口的形貌特征，包括韧窝尺寸、形状及分布，以及可能的第二相粒子断裂情况。

3. 实验结果及讨论

3.1. 组织特征

铝合金 FSW 横截面全貌图如下图 2 所示，该图是在 100 倍镜下拍摄的不同区域的金相图拼接而成的全貌图，旋转速度为 1000 r/min，进给速度为 80 mm/min。在搅拌头的高速旋转、机械搅拌作用下，相较于原来的组织，搅拌区发生变形、破碎、混合而成新的组织。经过搅拌摩擦焊后，接头的宏观形貌清晰地揭示了典型的 FSW 接头的四个特征迥异的区域：母材(BM)、热影响区(HAZ)、热机影响区(TMAZ)以及焊核区(NZ)。

焊核区(NZ)是焊接过程的核心区域，位于焊缝中心，由搅拌针直接作用形成。该区域材料经历了最剧烈的塑性变形、摩擦生热以及随之发生的动态再结晶过程，NZ 呈现出典型的盆状形貌，其顶部较宽的区域由搅拌头轴肩的旋转与摩擦作用形成，而底部较窄的部分则由搅拌针的机械搅拌作用主导[9]。宏观上，NZ 最为显著的特征是其明亮的、无显著方向性的等轴晶组织，这与母材原始的轧制纤维状组织形成鲜明对比。

值得注意的是，接头呈现出明显的非对称性，即前进侧(AS)与后退侧(RS)的组织形貌与边界清晰度存在差异。一般而言，后退侧(搅拌针旋转切向速度与焊接方向相同的一侧)的 TMAZ 与 NZ 边界更为陡峭，晶粒流线弯曲更为剧烈；而前进侧(搅拌针旋转切向速度与焊接方向相反的一侧)的边界相对平缓。这种非对称性源于焊接过程中两侧材料所经历的热-力耦合历史与材料流动模式。



Figure 2. Microstructure morphology of the friction stir welded aluminum alloy joint
图 2. 铝合金经过搅拌摩擦焊接后接头的组织形貌图

图 3(a)~(c)是不同前进速度下 Al-Cu-Mg 系铝合金焊接接头焊合区的微观组织图。由图可知，在所有实验参数下，NZ 均形成了细小的等轴晶组织，这证实了该区域经历了完全的动态再结晶过程。在 FSW 过程中，搅拌针剧烈的塑性变形在材料内部积累了高密度的位错，同时摩擦热使材料温度升高，为再结晶提供了驱动力。两者共同作用，导致旧晶界被打破，并形成新的、无应变的小角度晶界，最终演变为细小的等轴晶。

前进速度对 NZ 晶粒尺寸有显著影响。可以观察到, 随着前进速度从 1 号试样增加到 3 号试样, NZ 的晶粒尺寸呈现减小的趋势。其机理在于: 在固定旋转速度(1000 rpm)的前提下, 前进速度直接决定了焊接的热输入率和材料在高温下的停留时间。当采用较低的前进速度(如 1 号样)时, 单位长度焊缝上的热输入较高, 且高温停留时间较长。这为再结晶后的晶粒长大提供了充足的热驱动力和时间, 导致晶粒尺寸相对粗大。当采用较高的前进速度(如 3 号样)时, 热输入率降低, 且材料从峰值温度冷却的速率加快, 高温停留时间缩短。这使得再结晶形成的细小晶粒没有足够的时间长大, 从而被“冻结”下来, 因此获得了更为细小的晶粒组织。根据 Hall-Petch 关系, 晶粒越细小, 材料的屈服强度通常越高。因此, 仅从 NZ 的组织来看, 较高的前进速度有利于获得更强的焊缝中心区域。

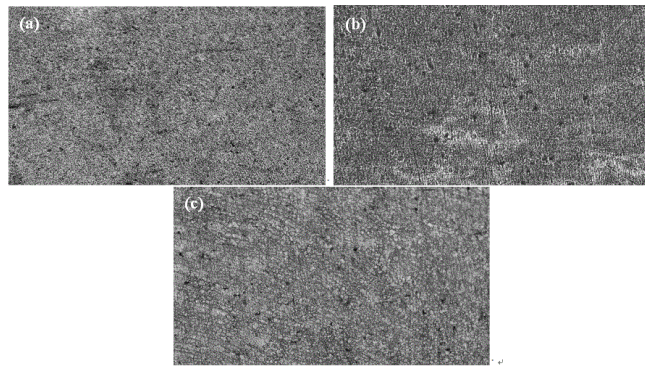


Figure 3. Microstructure of the weld nugget zone in Al-Cu-Mg series aluminum alloy welded joints: (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3

图 3. Al-Cu-Mg 系铝合金焊接接头焊合区的微观组织图: (a) 1 号; (b) 2 号; (c) 3 号

图 4 是不同焊接工艺下铝合金焊接接头前进侧的微观组织图。由图可知, 不同焊接工艺下焊接接头的进给侧组织不同, 前进侧各区域的过渡相对平缓。从 NZ 到 TMAZ, 晶粒形态由细小的等轴晶逐渐转变为被剧烈剪切和拉长的纤维状组织, 晶粒流线方向与焊接方向呈一定的夹角。这种相对平缓的过渡是由于在前进侧, 搅拌针的旋转方向与焊接方向相反, 材料被“铲起”并带入焊接中心, 其流动受到较大阻力, 导致应变梯度相对和缓。

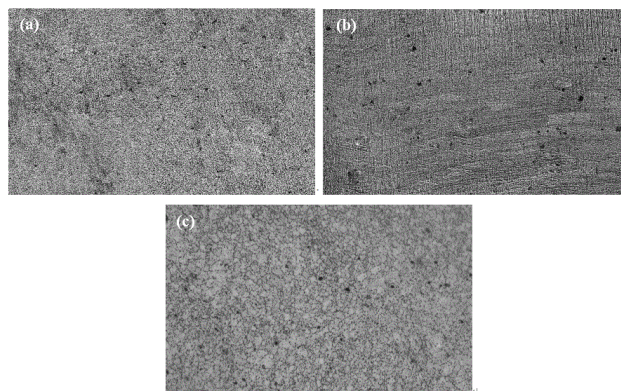


Figure 4. Microstructure on the advancing side of Al-Cu-Mg aluminum alloy welded joints: (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3

图 4. Al-Cu-Mg 铝合金焊接接头前进侧的微观组织图: (a) 1 号; (b) 2 号; (c) 3 号

图 5 是不同焊接工艺下铝合金焊接接头前进侧的微观组织图。由图可知，不同焊接工艺下焊接接头的后退侧组织不同，该侧的组织梯度变化更为剧烈。TMAZ 与 NZ 的边界通常比前进侧更为清晰陡峭。在后退侧，搅拌针的旋转方向与焊接方向相同，材料更容易被“卷吸”进入焊核区，流动速度更快，导致在 TMAZ/NZ 界面处存在一个极高的应变速率和应变梯度。因此，后退侧 TMAZ 的晶粒通常被拉伸得更长，弯曲程度更甚。

这种两侧的非对称性对接头的力学行为有重要影响。首先，两侧的硬度分布会有所不同。其次，由于后退侧 TMAZ 经历了更剧烈的变形且常与软化区相邻，它往往是微裂纹萌生和扩展的优先路径，在拉伸实验中，接头也常在此区域发生断裂。不同前进速度下，这种非对称性的明显程度可能有所不同。通常，较低的前进速度(热输入高，材料流动性好)可能使两侧过渡稍趋平缓，而极高的前进速度(热输入不足)可能加剧这种非对称性甚至引发缺陷(如孔洞)。

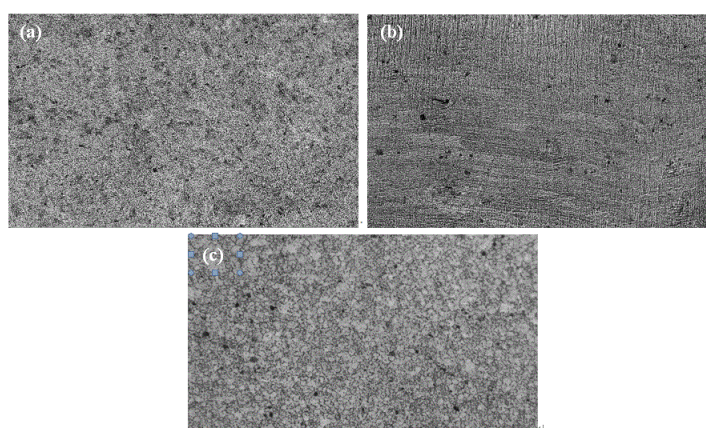


Figure 5. Microstructure on the retreating side of Al-Cu-Mg aluminum alloy welded joints: (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3

图 5. Al-Cu-Mg 铝合金焊接接头后退侧的微观组织图：(a) 1 号；(b) 2 号；(c) 3 号

综合以上对各区域的分析，可以系统地阐述前进速度这一关键工艺参数对 Al-Cu-Mg 铝合金 FSW 接头微观组织的调控机制。在热输入控制方面，在旋转速度固定的情况下，前进速度是热输入的主要控制变量。前进速度越低，热输入越高，反之亦然；在对焊核区(NZ)的影响方面，高热量输入(低前进速度)促进再结晶晶粒长大，导致 NZ 晶粒粗化；低热量输入(高前进速度)抑制晶粒生长，有利于获得细晶组织；在对前进侧组织的影响方面：高热输入会加剧 TMAZ 的回复过程和 HAZ 的过时效程度，可能导致软化区更宽、硬度更低。而低热输入虽然可能减轻软化，但若热输入过低，可能导致材料塑性流动不充分，在 TMAZ/NZ 界面产生“吻接”等缺陷；在对材料流动与非对称性的影响方面，适宜的热输入能保证材料具有最佳的塑性流动性，使材料在焊核区内充分混合，并形成均匀、致密的组织。过高或过低的前进速度都可能破坏这种平衡，要么因过热导致组织粗大，要么因流动不足而引入缺陷，并可能加剧接头的非对称性。

综上所述，通过微观组织分析证实，前进速度通过调控焊接过程的热输入和材料流动行为，从根本上决定了铝合金搅拌摩擦焊接头各区域的微观组织结构。这些微观结构的差异，特别是 NZ 的晶粒尺寸、TMAZ 的变形程度以及 HAZ 的软化行为，将直接决定接头的最终力学性能。

3.2. 力学性能

图 6 为不同焊接工艺下铝合金焊接接头截面中心横向上硬度分布图，由图可看出，不同加工工艺下

的焊接接头硬度不一样，焊合区的中心硬度略高；且同一接头上的各区域硬度也不一样，同一接头截面的硬度分布规律大致形成一不对称的“W”型。表 3 为根据铝合金焊接接头截面中心横向上硬度分布结果对焊合区的硬度进行了统计分析，结果发现，随着进给速度的增加，焊接接头焊合区的硬度先增加后降低，其中进给速度为 100 mm/min 时，焊合区的硬度达到最大值，为 140.85 Hv。由于搅拌焊接中心受到了搅拌针的高速搅拌作用，原始组织破碎，摩擦产生热量，使得该区域组织发生回复动态再结晶，形成细小的等轴晶，高转速下焊接温度偏高，分散的强化相变得粗大，使得析出的强化效果变差，使得这一区域的硬度比基体低。热影响区因受 FSW 加热而仅进行热循环，析出物向非共格态的 β 相转化，导致析出物的强化效果降低[10] [11]，同时析出物的晶粒度比焊合区更大，该区域晶粒受热作用发生长大粗化。

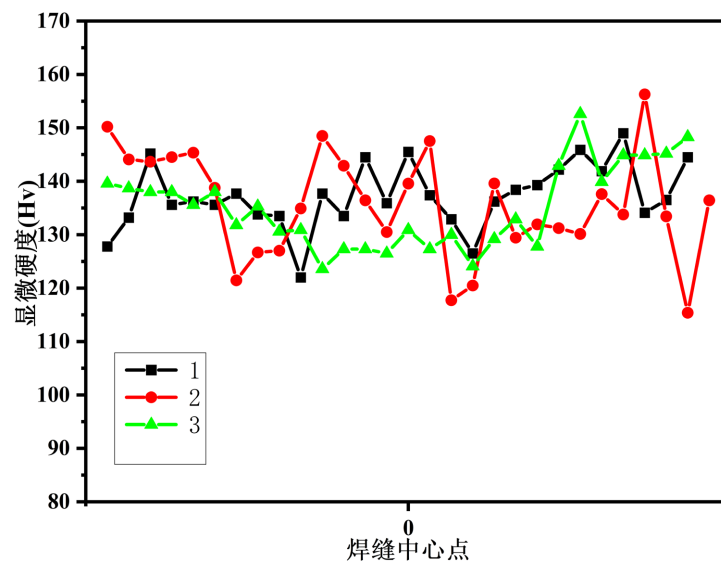


Figure 6. Transverse hardness distribution diagram across the center of aluminum alloy welded joints under different welding parameters

图 6. 不同焊接工艺下铝合金焊接接头截面中心横向上硬度分布图

Table 3. Statistical table of average hardness of the weld nugget zone in aluminum alloy under different feed rates
表 3. 不同进给速度下铝合金焊合区的平均硬度统计表

试样编号	平均值	极差	最大值	分散度	最小值
1	137.82	47.92	145.59	39.99%	121.67
2	140.85	44.03	154.66	34.99%	113.63
3	129.97	52.28	152.10	42.17%	123.82

图 7 为不同焊接工艺下铝合金焊接接头的常温拉伸力学性能。由图 7 可以看出，当旋转速度不变时，随着进给速度的增大，铝合金焊接接头的抗拉强度也逐渐增大，在旋转速度为 1000 rpm 且前进速度为 100 mm/min 时，试样获得最大的抗拉强度值，为 413 MPa，断裂伸长率为 8.3%。这是因为旋转速度不变时，提高进给速度时，旋转搅拌的机械作用不变，单位时间单位体积内的焊接区域热量不变，进给速度较慢时，焊接区域热量较大，导致材料晶粒粗大；提高进给速度到 100 mm/min，使得单位时间单位体积内的热量降低，有效地抑制了焊接区域的晶粒粗大现象；进一步增加进给速度到 120 mm/min 时，单位时间单位体积内热量降低，导致焊合区热量不够，影响了材料的抗拉强度[12]-[14]。基体铝合金抗拉强度为 461 MPa，延伸率为 12.5%；与旋转速度为 1000 rpm 且前进速度为 100 mm/min 时试样性能相比略高。

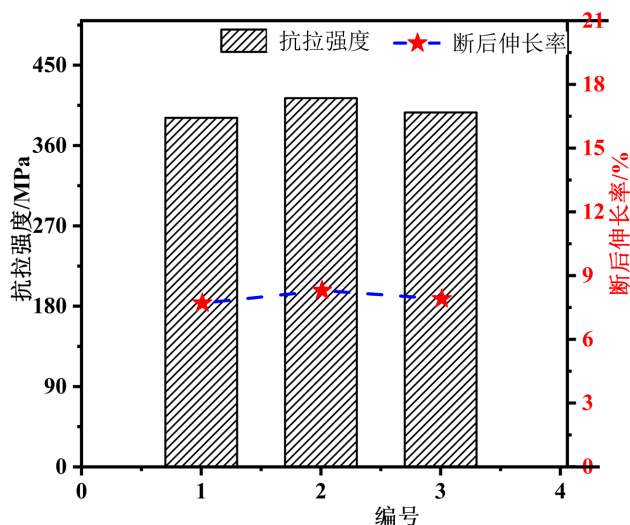


Figure 7. Variation curves of tensile strength and elongation after fracture of aluminum alloy under different friction stir welding parameters

图 7. 不同搅拌摩擦焊接工艺下铝合金的抗拉强度与断后伸长率变化曲线

4. 结论

本文采用搅拌摩擦焊接技术对 2024 铝合金板材进行焊接，研究了不同进给速度下焊接接头的组织、硬度、抗拉强度及延伸率等方面的影响，并深入分析了搅拌摩擦焊接工艺对该系列铝合金焊接接头组织的影响规律及力学性能的提升机理。主要结论如下：

1) 随着前进速度的增加(在固定旋转速度 1000 rpm 下)，焊核区的晶粒尺寸减小。较高前进速度降低了热输入和材料在高温下的停留时间，抑制了再结晶后晶粒的长大，从而形成更细小的等轴晶组织。

2) 当前进速度为 100 mm/min 时，焊合区的平均硬度达到最大值(140.85 Hv)，同时接头的抗拉强度也达到峰值(413 MPa)。适中的前进速度能优化热输入，既抑制晶粒粗大又避免热输入不足导致的缺陷，从而实现最佳的硬度和强度平衡。前进速度过高或过低都会导致硬度下降和强度降低。

3) 接头的前进侧和后退侧在组织形貌和边界清晰度上存在差异，后退侧的热机影响区与焊核区边界更陡峭，晶粒流线更剧烈，易成为微裂纹萌生和扩展的优先路径。较低前进速度(高热输入)可能使过渡稍趋平缓，但可能加剧软化；较高前进速度(低热输入)可能加剧非对称性甚至引入缺陷，影响接头的力学行为和断裂位置。

参考文献

- [1] 周海波, 浦娟, 龙伟民, 等. 基于田口法的高硅铝合金超高旋转速度搅拌摩擦焊接工艺优化[J]. 焊接, 2022(2): 32-38.
- [2] 陈忱, 朱怡超, 邱晨阳, 等. 化铣用 2024 铝合金热变形行为及组织影响研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(12): 1717-1719.
- [3] 张新明, 邓运来, 张勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 257-271.
- [4] 张璐霞, 林乃明, 邹娇娟, 等. 铝合金搅拌摩擦焊的研究现状[J]. 热加工工艺, 2020, 49(3): 1-6.
- [5] 尹德猛, 李充, 姚肖洁, 等. 6082-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接接头成形及力学性能[J]. 焊接, 2023(6): 38-43.
- [6] 王鹏, 吴璇, 张喆, 等. 搅拌摩擦焊在镁合金焊接中的应用与进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2025, 48(1): 155-164.
- [7] Sharma, C., Upadhyay, V., Dwivedi, D.K. and Kumar, P. (2017) Mechanical Properties of Friction Stir Welded Armor Grade Al-Zn-Mg Alloy Joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27, 493-506.

-
- [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(17\)60056-6](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(17)60056-6)
- [8] Jin, Y.H., Chen, Y.S., Ma, Y.M., *et al.* (2023) Fatigue Crack Propagation of 7050 Aluminum Alloy FSW Joints after Surface Peening. *China Welding*, **32**, 18-26.
- [9] 曾祥浩, 倪丁瑞, 薛鹏, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接接头的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1654-1659.
- [10] 霍仁杰, 金玉花, 王广山, 等. 不同焊接速度下 2024 铝合金搅拌摩擦焊接接头的显微硬度与拉伸性能[J]. 机械工程材料, 2019, 43(1): 50-53.
- [11] 朱海, 孙朝伟, 孙金睿, 等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数对焊接质量的影响研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(23): 159-162.
- [12] Liu, X.C., Ye, T., Li, Y.Z., Pei, X.J. and Sun, Z. (2023) Quasi-*in-Situ* Characterization of Microstructure Evolution in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, **25**, 6380-6394. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.101>
- [13] 张成聪, 常保华, 陶军, 等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊过程组织演化分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 57-60.
- [14] Wang, H., Xu, W., Wang, Y. and Lu, H. (2025) Creep-Fatigue Behavior of a Friction Stir Welding 7050-T7451 Aluminum Alloy: Microstructure Evolution and Microscopic Damage Mechanisms. *International Journal of Fatigue*, **194**, Article ID: 108840. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.108840>