

2024 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织演化及力学性能

何 寒¹ 张天鹏²

(1. 安阳工学院机械与航空制造工程学院, 安阳 455000; 2. 安阳工学院电子电气与无人机学院, 安阳 455000)

摘 要 采用电子背散射衍射、数字图像相关技术和扫描电镜对不同旋转速度下 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能进行研究。结果表明,随着热输入量的增加(600~800 r/min 时),焊核区和热机影响区的再结晶比例呈增加趋势,其平均晶粒尺寸随再结晶比例的升高而减小,而当热输入量过高(1000 r/min 时),材料会出现粘接现象,焊核区和热机影响区的再结晶比例降低,其平均晶粒尺寸相较于 $\omega=800$ r/min 时变大。当 $\omega=600$ r/min 时接头具有最高的平均抗拉强度(456.8 MPa),而热影响区材料的软化是导致接头在前进侧热影响区和母材的界面附近发生断裂的原因,其断口形式为准解理断裂。接头横截面的硬度呈“W”形分布,硬度(HV)最高的区域位于焊核区中,约为 178.0。

关键词 2024 铝合金;搅拌摩擦焊;微观组织演化;力学性能

中图分类号 TG456.9;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250183

Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 2024 Aluminum Alloy Friction Stirring Welding Joints

HE Han¹, ZHANG Tianpeng²

(1. School of Mechanical and Aviation Manufacturing Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000; 2. School of Electronics & Electrical Engineering and Unmanned Aerial Vehicle, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of 2024 aluminum alloy stirring friction welded joints under different rotational speeds were investigated by electron backscatter diffraction, digital image correlation technology and scanning electron microscope. The results indicate that as heat input rises from 600 r/min to 800 r/min, the recrystallization ratio of weld nugget zone and therm-mechanically affected zone presents an increasing trend, and the average grain size is decreased with the increase of the recrystallization ratio. However, when the heat input reaches up to 1 000 r/min, the recrystallization ratio of weld nugget zone and therm-mechanically affected zone is reduced due to the adhesion phenomenon, and the average grain size becomes larger compared to that with $\omega=800$ r/min. with $\omega=600$ r/min. The joint exhibits the maximum tensile strength of 456.8 MPa, and the softening of heat-affected zone is attributed to the fracture of the joint near the interface between the heat-affected zone at the forward side and base metal, which is characterized by quasi cleavage fracture. The hardness of cross-section of joint is distributed in a "W" shape, and the highest hardness of 178.0 HV can be observed in nugget zone.

Key Words: 2024 Aluminum Alloy, Friction Stirring Welding, Microstructure Evolution, Mechanical Properties

收稿日期:2025-04-28;修订日期:2025-06-09

基金项目:河南省科技攻关资助项目(252102220051);安阳市科技计划资助项目(2025C01GX053)

第一作者简介:何寒,男,1983年出生,讲师,E-mail:hh-1129@163.com

通信作者:张天鹏,男,1980年出生,教授,E-mail:zhangtp80@163.com

引用格式:何寒,张天鹏. 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头微观组织演化及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2025,45(10):1 574-1 580.

HE H, ZHANG T P. Microstructure evolution and mechanical properties of 2024 aluminum alloy friction stirring welding joints[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10): 1 574-1 580.

- [18] FLEISCHER R L. Substitutional solution hardening[J]. Acta Metallurgica, 1963, 11(3): 203-209.
- [19] MEYERS M A, CHAWLA K K. Mechanical Behavior of Materials [M]. London: Cambridge University Press, 2008.
- [20] GOTTSTEIN G. Physical Foundations of Materials Science [M]. Berlin: Springer, 2004.
- [21] ZHAO Y H, LIAO X Z, JIN Z, et al. Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing[J]. Acta Materialia, 2004, 52(15): 4 589-4 599.
- [22] MA K K, WEN H M, HU T, et al. Mechanical behavior and

strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy [J]. Acta Materialia, 2014, 62: 141-155.

- [23] LI Y, ZHAO Y H, ORTALAN V, et al. Investigation of aluminum-based nanocomposites with ultra-high strength[J]. Materials Science and Engineering, 2009, A527(1-2): 305-316.
- [24] WITKIN D, LEE Z, RODRIGUEZ R, et al. Al-Mg alloy engineered with bimodal grain size for high strength and increased ductility[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(4): 297-302.

(编辑:刘晨辉)

2024 铝合金属于 Al-Cu-Mg 系中典型的硬铝合金, 其具有比强度高、良好的成形加工性能及耐腐蚀性能, 已成为航空航天工业中广泛使用的商业合金之一^[1-3]。搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW)技术具有接头质量高、焊接变形小和焊接过程中绿色无污染等特点, 可用来焊接一些熔焊方法难以连接的金属材料, 如铝、镁等合金^[4-6]。

近年来, 研究者针对 2024 铝合金 FSW 工艺参数对接头组织及性能的影响进行了分析。张嘉恒等^[7]研究了退火态 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头组织热稳定性, 发现增大搅拌头转速、降低焊接速度有利于提高接头组织热稳定性。霍仁杰等^[8]研究了焊接速度对 2024-T4 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响, 发现随着焊接速度增大, 焊接接头的抗拉强度和伸长率均呈先增大后略微降低的趋势。朱海等^[9]研究了工艺参数对 2024-T4 铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的影响, 发现焊接速度为 200 mm/min, 旋转速度为 600~800 r/min 时, 接头无宏观缺陷, 具有较好的力学性能。FURD 等^[10]研究了旋转速度对 2024-T3 铝合金薄板搅拌摩擦焊接头硬度的影响, 发现旋转速度对焊核区硬度的影响较大, 随着旋转速度的增加, 焊核区硬度提高, 且焊核区晶粒细化对改善 2024 铝合金的硬度分布没有明显作用。

由于接头不同区域的热输入量和塑性变形程度不同, FSW 接头可以划分为焊核区(Nugget zone, NZ)、热机影响区(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)和热影响区(Heat affected zone, HAZ)。FSW 接头中不同区域的微观组织差异在一定程度上影响了接头的力学性能。WANG H 等^[11]研究了 7B50-T7451 铝合金厚板搅拌摩擦焊接头的组织不均匀性和蠕变性能。结果表明, 沿焊缝厚度方向接头的蠕变性能由上而下逐渐恶化, 焊核区的晶粒尺寸和小角度晶界比例均由上而下逐渐减小。RAKESH K 等^[12]对 7075-T651 铝合金单道焊接接头组织和性能进行了研究, 发现焊核区具有非常细小的等轴晶粒, 母材的平均硬度高于焊接接头, 热影响区的硬度最低。LIU X C 等^[13]采用准原位研究方法研究了旋转速度为 800 r/min, 焊接速度为 100 mm/min 时 1050 铝合金搅拌摩擦焊过程中的微观组织演变。张成聪等^[14]利用电子背散射衍射(Electron back-scattering diffraction, EBSD)技术研究了旋转速度为 600 r/min、焊接速度为 150 mm/min 时 2024 铝合金 FSW 接头不同区域的微观组织演化。然而, 关于不同焊接工艺参数下 2024 铝合金 FSW 接头微观组织演化仍需进一步探讨研究。因此, 本研究利用 EBSD 技术, 对不同旋转速度下 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的微观组织演化进行分析, 并借助数字图像相关(Digital image correlation, DIC)技术对接头的拉伸性能进行分

析, 旨在为 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的应用提供参考。

1 试验材料与方法

选用尺寸为 150 mm×100 mm×5 mm 的 2024-T3 铝合金轧制板作为母材(Base metal, BM), 其化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。

表 1 2024 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of 2024 aluminum alloy %								
w_B								
Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ni	Cr	Al
4.82	1.75	0.79	0.45	0.42	0.21	0.11	0.07	余量

表 2 2024 铝合金的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of 2024 aluminum alloy		
屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
334	483	11

2024 铝合金母材的组织由沿轧制方向均匀分布的纤维状晶粒组成(见图 1), 其平均晶粒尺寸为 35.5 μm 。焊接试验在 HT-JM16×8/1 型龙门式一维搅拌摩擦焊机上进行, 采用带有右旋螺纹的搅拌头, 螺纹间距为 1 mm, 轴肩直径为 16 mm, 搅拌针长度为 4.8 mm, 搅拌针根部和端部直径分别为 5 mm 和 3.5 mm。固定焊接速度(v)为 200 mm/min 时, 旋转速度(ω)为 600、800 和 1 000 r/min, 焊接长度为 120 mm。焊接过程中搅拌头倾角为 2.5°, 呈逆时针旋转, 其轴肩下压量为 0.48 mm。

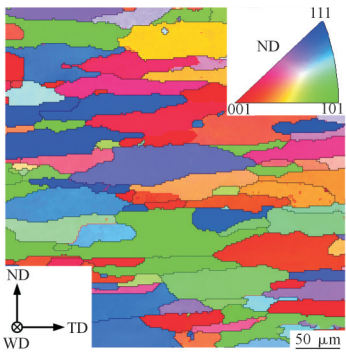


图 1 母材的晶粒取向分布图

Fig.1 Grain orientation distribution of base metal

截取尺寸为 18 mm×10 mm×5 mm 焊接接头的金相试样, 机械研磨抛光后用 Keller's 试剂(2.5 mL 硝酸+1.5 mL 盐酸+1.0 mL 氢氟酸+95 mL 水)腐蚀 20 s, 然后用无水乙醇清洗试样并吹干, 在 Zeiss Axio Scope A1 光学显微镜下观察接头横截面的宏观形貌。图 2 为取样示意图和拉伸试样尺寸示意图。使用 Leica EMRES 102 氩离子抛光仪制备 EBSD 试样, 抛光时间为 140 min, 抛光电压为 5 kV。用配有 HKL Channel 5 系统的 Sigma 550 FEG 扫描电镜对离子抛光好的试样进行 EBSD 测

试,采用等效圆直径法统计平均晶粒尺寸。利用FM-810显微硬度计测试硬度,载荷为0.98 N,加载时间为10 s。垂直于焊接方向加工拉伸试样,其规格尺寸参考ASTM E8/E8M-09 标准(见图2b)。在CRIMS DNS300电子万能试验机上以0.5 mm/min的加载速率进行拉伸试验,并借助数字图像相关技术(DIC)记录拉伸过程中的应变分布情况。用Nano SEM450 扫描电镜观察试样的拉伸断口形貌。

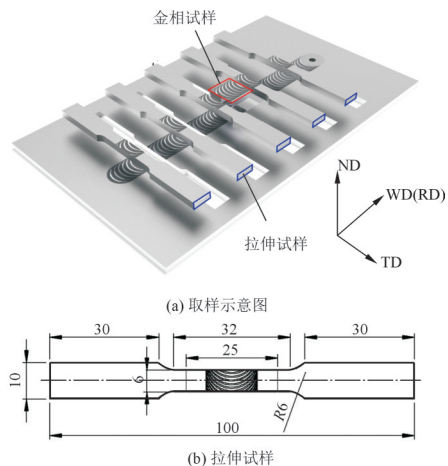


图2 取样示意图和拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling and tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 接头宏观形貌与EBSD测试位置

图3为 $v=200$ mm/min, $\omega=600$ 、800和1 000 r/min时接头横截面宏观形貌和EBSD测试位置。ND、TD和WD分别代表法向、横向和焊接方向。选择NZ和前进侧(Advancing side, AS)的TMAZ作为EBSD测试区

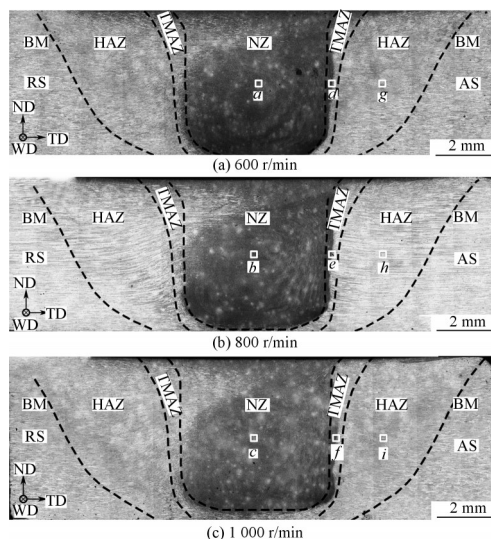


图3 焊速为200 mm/min时不同旋转速度下接头横截面宏观形貌和EBSD测试位置

Fig.3 Macro morphologies of cross section of joint at different rotation speeds with welding speed of 200 mm/min and EBSD test location

域,旋转速度为600、800和1 000 r/min的测试位置分别见图3。可以看出,3种不同工艺参数下的接头横截面均无明显的缺陷,焊缝组织均匀。

2.2 接头的晶粒组织

图4为 $v=200$ mm/min, $\omega=600$ 、800和1 000 r/min时接头NZ、TMAZ和HAZ的反极图,图中不同颜色表示晶粒平行于ND的取向。图5为不同旋转速度下接头NZ、TMAZ和HAZ的平均晶粒尺寸。从图4a~图4c可以明显看出,在焊接过程中,NZ材料在强烈的机械搅拌和热循环作用下,发生了较为充分的动态再结晶,母材中粗大的扁平状组织被细小的等轴晶完全取

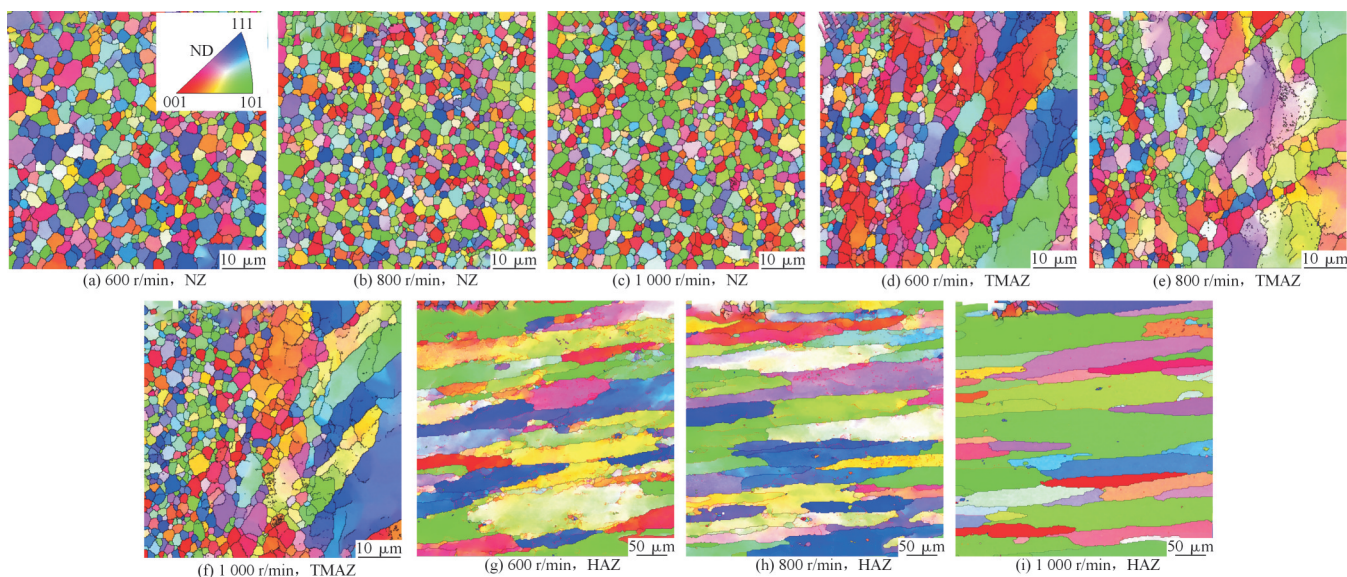


图4 不同旋转速度下接头NZ、TMAZ和HAZ的反极图

Fig.4 Inverse pole figures of joint at NZ, TMAZ and HAZ under different rotational speeds

代,其平均晶粒尺寸分别为1.84、1.50和1.64 μm(见图5)。从图4d~图4f可以看出,与NZ相比,TMAZ在搅拌针的机械搅拌和热循环作用下,发生部分动态再结晶,其晶粒组织由粗大的晶粒和细小的等轴晶共同组成,且粗晶内存在着大量由LAGBs围成的胞状亚结构,其平均晶粒尺寸分别为3.55、3.05和3.29 μm(见图5)。从图4g~图4i可以看出,HAZ仅受到焊接热循环的影响,未发生塑性变形,显微组织没发生明显变化,组织与BM组织相似,其平均晶粒尺寸分别为25.02、29.92和30.75 μm(见图5)。

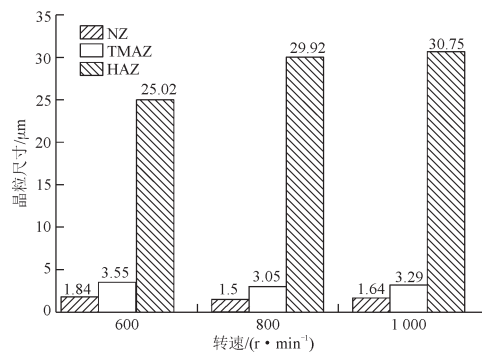


图5 不同旋转速度下接头NZ、TMAZ和HAZ的平均晶粒尺寸
Fig.5 Average grain size of joint at NZ, TMAZ and HAZ under different rotational speeds

图6为不同旋转速度下接头NZ的晶界图和再结晶图。晶界图中,取向差超过15°的高角度晶界(HAGBs)用黑线表示,取向差在2°~15°范围内的低角度晶界(LAGBs)用红线表示(基于原因为彩色表述)。从图6可以看出,当 $\omega=600$ 、800和1 000 r/min时,NZ的LAGBs占比分别为22.4%、20.1%和28.4%,其再结晶晶粒比例分别为69.9%、73.4%和47.9%。接头NZ主要是由具有HAGBs的细小等轴再结晶晶粒组成;随着旋转速度增加,NZ的再结晶程度呈先增大后减小的趋势。这可能是过低的旋转速度($\omega=600$ r/min)导致了NZ的热输入量不足,NZ中动态再结晶不充分,部分LAGBs不断吸收位错转化为HAGBs,形成新的晶粒,即再结晶晶粒。随着旋转速度的增加($\omega=800$ r/min),NZ中热输入量充足,发生了充分的动态再结晶,大量的LAGBs吸收到足够的位错,转化为HAGBs,形成再结晶晶粒。在FSW过程中,接头NZ中再结晶程度不仅和温度有关,还和NZ中材料的塑性变形程度相关,而随着旋转速度增加到1 000 r/min时,NZ内过高的热输入量,会使材料粘黏到搅拌针螺纹缝隙中,搅拌针变得光滑,严重削弱了搅拌针转移材料的能力,NZ中的塑性变形程度降低^[15],这可能是导致NZ中再结晶比例降低而小角度晶界增加的原因。

图7为不同旋转速度下接头TMAZ的晶界图和再

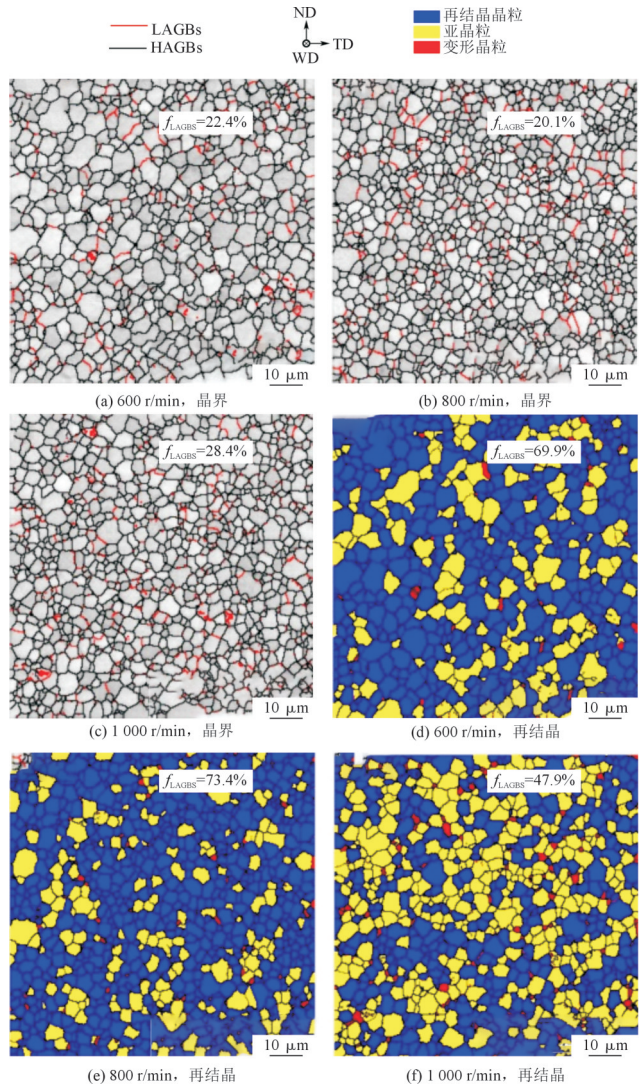


图6 不同旋转速度下NZ的晶界图和再结晶图
Fig.6 Grain boundary and recrystallization diagram of NZ under different rotational speeds

结晶图。可以看到, $\omega=600$ 、800和1 000 r/min时TMAZ的LAGBs占比分别为73.3%、62.7%和71.0%,其再结晶比例分别为13.1%、24.4%和17.2%。随着旋转速度增加,接头TMAZ中LAGBs的占比先降低后升高,再结晶比例先升高后降低。与 $\omega=800$ r/min时相比,当 $\omega=1 000$ r/min时,过高的热输入量导致材料的粘附现象,从而使TMAZ的塑性变形程度降低,这可能是其小角度晶界增加而再结晶比例降低的原因。

对比相同旋转速度下接头NZ(图6)和TMAZ(图7)可以发现,TMAZ中LAGBs的占比更高而再结晶比例更低,对于同一接头而言,与NZ相比,TMAZ的热输入量和塑性变形程度更低,只能发生部分动态再结晶,这可能就是TMAZ小角度晶界占比增高而再结晶比例降低的原因。

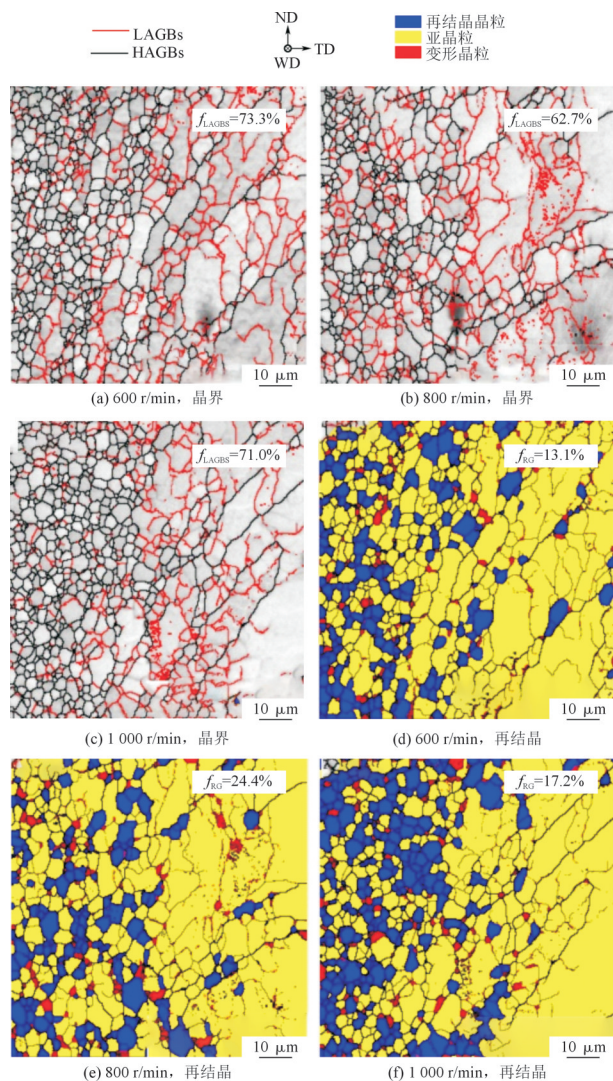


图7 不同旋转速度下TMAZ晶界图和再结晶图

Fig.7 Grain boundary and recrystallization maps of TMAZ under different rotational speeds

2.3 接头的力学性能

2024铝合金作为一种时效硬化铝合金,FSW接头的拉伸性能与显微硬度的分布密切相关^[10]。图8为 $\omega=600$ r/min时接头横截面的显微硬度分布图。可以看出,接头横截面的硬度呈“W”形分布,NZ的硬度明显高于其他区域,这可能是因为NZ经过动态再结晶后,晶粒得到了细化,晶粒尺寸与金属硬度呈现出负相关的趋势,即晶粒尺寸越小,其硬度越高^[16]。硬度最高的区域位于NZ中,最高硬度(HV)约为178.0。

图9为 $\omega=600$ 、800和1000 r/min时接头的抗拉强度与断裂位置,图9b中黑色虚线为NZ中心位置。由图9a可知, $\omega=600$ 、800和1000 r/min时接头的平均抗拉强度分别为456.8、442.0和442.0 MPa,均达到母材抗拉强度的90%以上,伸长率分别为6.75%、6.78%和6.38%。从图9b可以看出, $\omega=600$ 、800和1000 r/min

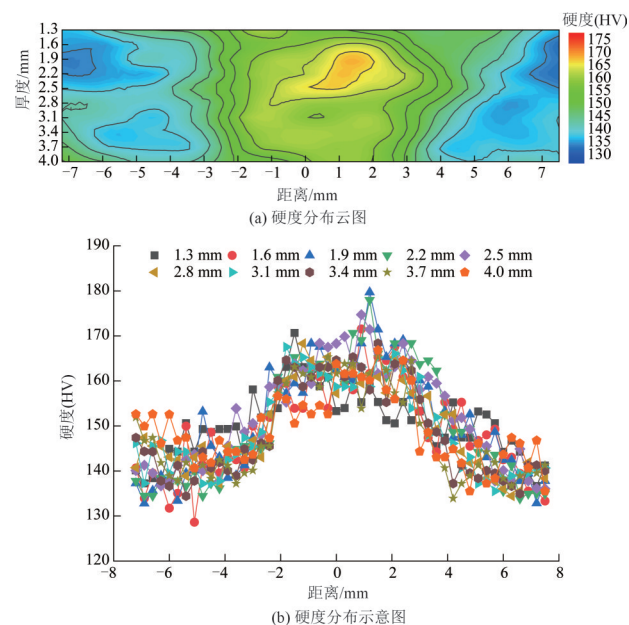


图8 接头横截面显微硬度分布图

Fig.8 Microhardness distribution diagram of cross section of joint 时接头断裂的位置十分接近,几乎在接头同一位置区域发生断裂(断裂位置位于HAZ与BM界面附近靠近HAZ一侧),断口与拉伸方向呈45°角。 $\omega=600$ 、800和1000 r/min时接头的成形质量均良好,与BM相比,NZ和TMAZ的晶粒细小。根据Hall-Petch效应^[17],NZ和TMAZ区域组织晶粒细小,导致其具有较高的强度。因HAZ和BM具有相似的组织特征,HAZ的平均晶粒尺寸与母材基本一致,晶粒尺寸较为粗大,粗大的晶粒会弱化HAZ的强度^[18]。此外,HAZ在搅拌工具的循环热作用下,位错相互抵消,位错密度下降,HAZ处的加工硬化效应减弱,HAZ处发生软化,导致其显微硬度值降低(见图8),从而使HAZ成为FSW接头的薄弱区,接头容易在此处附近发生断裂。而 $\omega=600$ r/min时,相较于800 r/min和1000 r/min,其热输入量相对较低,HAZ的软化相对较弱,这可能是 $\omega=600$ r/min时接头平均抗拉强度最高的原因。

图10为采用数字图像相关(DIC)技术记录得到的 $\omega=600$ r/min时接头拉伸试样沿TD的应变分布图,图

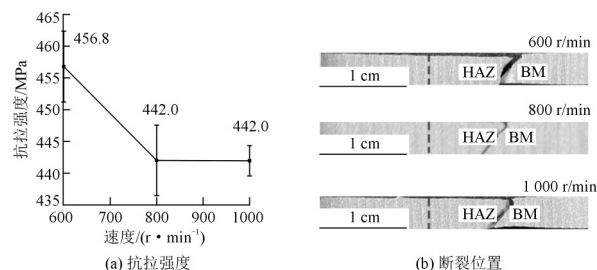


图9 不同旋转速度下接头抗拉强度和断裂位置

Fig.9 Tensile strength and fracture location of joints under different rotational speeds

中不同颜色表示试样拉伸时沿TD应变的大小,红色虚线为NZ中心位置。从图10a和图10b可以看出,在加载初期,应变很小,且在ND-TD平面上分布较均匀;随着拉伸力不断增加,接头HAZ与BM的界面附近出现了应力集中(图10c),而处在前进侧的HAZ与BM的界面附近的应力集中程度最高;随着拉伸力进一步增加,前进侧的HAZ与BM的界面附近应力集中程度不断增加(图10d);在拉伸的最后阶段,接头在前进侧的HAZ与BM的界面附近断裂(图10e)。

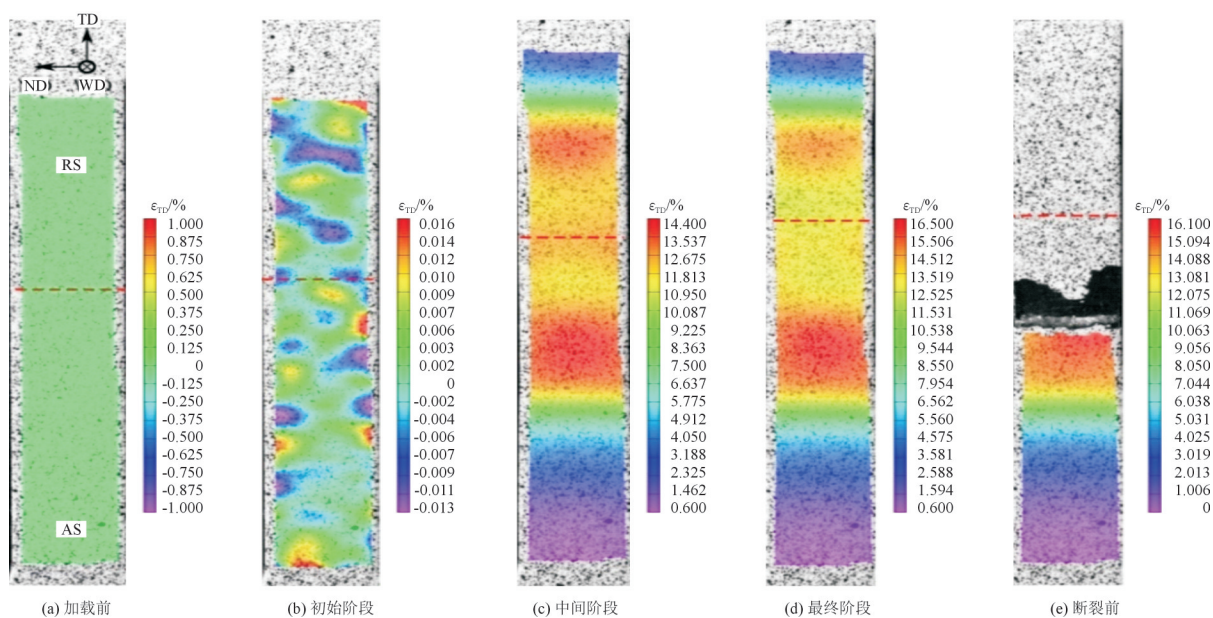


图10 试样拉伸过程中的应变分布图

Fig.10 Strain distribution diagram during the tensile of specimen

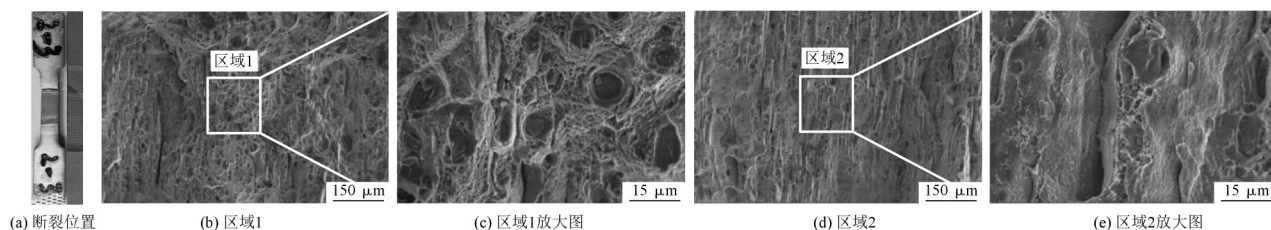


图11 $\omega=600$ r/min时接头断裂位置及断口形貌

Fig.11 Fracture position and fracture morphologies of joints at $\omega=600$ r/min

3 结 论

(1)热输入量对2024铝合金接头焊核区和热机影响区的微观组织具有显著影响。低转速(600 r/min)时,再结晶比例低,晶粒粗大;转速增加(800 r/min)时,再结晶充分,晶粒细化;转速过高(1 000 r/min)时,因搅拌头粘黏导致再结晶比例下降,晶粒粗化。这一现象表明,焊接参数的优化对于控制微观组织演化至关重要,尤其在工程应用中,应避免因转速过高导致的组织恶化问题。

(2)接头的抗拉强度随转速增加而降低,600 r/min

图11为 $\omega=600$ r/min时接头的断裂位置及断口形貌图。断裂位置出现在接头前进侧HAZ与BM的界面附近,断口未出现明显的颈缩现象,且断口呈现出明显的45°准解理断裂特征(图11a)。从图11b中可以看出,断口表面有大量的韧窝存在,对其进行放大(图11c),可以发现这些韧窝为深型韧窝。此外,断口表面存在解理台阶(图11d),而从图11e可以看出,未有明显的韧窝出现。综上,此接头的断裂形式为准解理断裂。

时,抗拉强度最高(456.8 MPa),但热影响区软化导致断裂发生在热影响区与母材界面附近,呈准解理断裂特征。这表明,尽管低转速能提高接头强度,但需注意热影响区的软化问题,以避免接头在实际服役中出现早期失效。此外,600 r/min时硬度呈“W”形分布,焊核区因晶粒细化硬度(HV)最高(178.0)。

参 考 文 献

- [1] 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): 1 717-1 719.
- [2] SUN L, GUO Y Y, CHEN L, et al. Effects of solution and aging treatments on themicrostructure and mechanical properties of cold

- rolled 2024 Al alloy sheet [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 1 126-1 142.
- [3] 谢尚恒, 孙有平, 何江美, 等. 深冷处理对超低温轧制 2524 铝合金板材组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(3): 420-424.
- [4] 张香云, 刘通, 耿家源. 7075 铝合金搅拌摩擦焊工艺及性能研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(8): 1 114-1 118.
- [5] 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.
- [6] KUBIT A, DERAZKOLA H A, JURCZAK W, et al. Effects of process parameters on dynamic and static load capacity of EN AW-2024-T3 aluminum alloy joints prepared by friction stir welding [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2025, 25(3): 1-23.
- [7] 张嘉恒, 胡志力. 铝合金搅拌摩擦焊接头组织热稳定性 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(6): 73-80.
- [8] 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头的显微硬度与拉伸性能 [J]. 机械工程材料, 2019, 43(1): 50-53.
- [9] 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.
- [10] FU R D, ZHANG J F, LI Y J, et al. Effect of welding heat input and post-welding natural aging on hardness of stir zone for friction stir-welded 2024-T3 aluminum alloy thin-sheet [J]. Materials Science & Engineering, 2013, A559: 319-324.
- [11] WANG H, XU W F, LU H J, et al. Effect of microstructure inhomogeneity on creep behavior of friction stir welding 7B50-T7451 aluminum alloy thick plate joint [J]. Materials Characterization, 2022, 193: 112 292.
- [12] RAKESH K, SHAILENDRA S B, VARUN S, et al. Effect on microstructure and mechanical properties of single pass friction stir welded aluminium alloy AA-7075-T651 joint [J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 80:40-47.
- [13] LIU X C, YE T, LI Y Z, et al. Quasi-in-situ characterization of microstructure evolution in friction stir welding of aluminum alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 6 380-6 394.
- [14] 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.
- [15] WU B S, LIU J L, SONG Q, et al. Controllability of joint integrity and mechanical properties of friction stir welded 6061-T6 aluminum and AZ31B magnesium alloys based on stationary shoulder [J]. High Temp. Mater. Process, 2019, 38: 557-566.
- [16] DEJENE N D, TUCHO W M, LEMU H G. Effects of scanning strategies, part orientation, and hatching distance on the porosity and hardness of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2025, 9(3): 78.
- [17] WANG H, XU W F, WANG Y F, et al. Creep-fatigue behavior of a friction stir welding 7050-T7451 aluminum alloy: Microstructure evolution and microscopic damage mechanisms [J]. International Journal of Fatigue, 2025, 194: 108 840.
- [18] TONG M M, CHEN C, ZHU J B, et al. Mechanical properties and microstructure evolutions of the SLM fabricated Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy when deforming at elevated temperatures [J]. Materials Characterization, 2025, 222: 114 832.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

