

引用格式: 谢泽豪, 张聪毅, 徐宁, 等. 5083 铝合金超声振动辅助 MIG 焊工艺探究 [J]. 热加工工艺, 2026, 55 (4): 43-53. XIE Zehao, ZHANG Congyi, XU Ning, et al. Research on Ultrasonic Vibration Assisted MIG Welding Process of 5083 Aluminum Alloy [J]. Hot Working Technology, 2026, 55 (4): 43-53.
DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20241322

5083 铝合金超声振动辅助 MIG 焊工艺探究

谢泽豪¹, 张聪毅¹, 徐宁¹, 李喜晨¹, 王鹏云^{1,2}

(1. 洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471023; 2. 海洋腐蚀与防护全国重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要:采用超声振动辅助 MIG 焊接方法, 对 4 mm 厚 5083 铝合金板材进行仿真分析及工艺研究。针对该工艺方法, 利用 ANSYS Workbench 有限元分析软件, 构建超声辅助焊接模型和振动分析模型, 对施加超声振动后的焊接熔池流动情况及母材受到超声振动作用后的谐振响应情况进行了仿真模拟分析。结果表明, 施加振动后的熔池液固界面更为光滑和平坦, 较大的液面范围也有利于气体的逸出。同时对超声振动辅助 MIG 焊进行了工艺探究, 对接头宏观形貌、显微组织及拉伸性能进行分析。结果表明, 施加了超声振动的接头气孔率及焊缝中心晶粒度相较于未施加振动的接头有明显的下降, 抗拉强度能基本稳定在 290 MPa 以上, 相较于指标要求有 15 MPa 的提高; 断口由细小且密集的韧窝构成, 具有良好的塑性特征; 超声振动辅助焊缝性能得到强化的原因主要是由于晶粒的细化以及气孔率的下降。

关键词:超声波振动; 有限元仿真; 熔滴过渡; 焊接气孔; 晶粒细化

中图分类号: TG444⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)04-0043-11

Research on Ultrasonic Vibration Assisted MIG Welding Process of 5083 Aluminum Alloy

XIE Zehao¹, ZHANG Congyi¹, XU Ning¹, LI Xichen¹, WANG Pengyun^{1,2}

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China; 2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang 471023, China)

Abstract: Using ultrasonic vibration assisted MIG welding method, the simulation calculation and process research on 5083 aluminum alloy plate with the thickness of 4 mm were carried out. For this process, the finite element analysis software ANSYS Workbench was used to build a model of ultrasonic welding and vibration analysis, simulated the flow of the welding molten pool and the resonant response of the base material under the action of ultrasonic vibration. The simulation results show that the solidification interface of the molten pool after the vibration is smoother and flatter, and the larger liquid surface area is also beneficial for gas escape. An investigation was also conducted into the ultrasonic vibration assisted MIG welding process, with the macroscopic shape, microstructure, and tensile properties of the joint analyzed. The results show that the porosity and central grain size of the joint with ultrasonic vibration are significantly lower than those of the joint without ultrasonic vibration, and the tensile strength can be basically stabilized at 290 MPa or above, which is 15 MPa higher than the required standard; the fracture surface consists of fine and dense ductile pits, with good plastic characteristics; the reason why the ultrasonic vibration-assisted weld seam can be strengthened is mainly due to the refinement of grains and the reduction of porosity.

Key words: ultrasonic vibration; the finite element simulation; droplet transition; welding porosity; grain refinement

铝合金是一种优质的结构轻量化材料, 具有低密度、高强度和良好的耐蚀性^[1-3]。然而, 在焊接过程中, 由于铝合金的特性, 例如熔点低、导热率高, 导致冷却速度快、高温停留时间短, 给焊接质量带来了很大挑战。目前, 铝合金焊接质量保证面临 3 大挑战:

容易产生气孔、焊缝晶粒粗大以及接头拉伸性能波动大。消除气孔的常见方法是降低焊缝冷却速度, 让气泡有时间逸出, 但这也会加快焊缝柱状晶的生长, 导致性能下降。这一矛盾制约了铝合金装备的发展。因此, 需要在传统熔焊方法基础上进行工艺改进, 不仅要减少气孔, 还要细化焊缝晶粒, 保证焊缝性能。在这方面, 引入超声振动是一个新的思路, 可以有效改善焊接质量, 提高接头可靠性。通过这种创新方法, 铝合金焊接的质量和稳定性有望得到提

收稿日期: 2024-06-18 修回日期: 2025-08-18

基金项目: 广西科技重大专项项目(桂科 AA22068074-3)

作者简介: 谢泽豪, 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事船用铝合金焊接方面的相关研究; E-mail: 571030453@qq.com

升,可推动铝制装备的进一步发展。

超声波是一种频率高于 20 kHz 的声波,其作为一种高频声波,具有良好的方向性和穿透能力,能够在铝合金铸造和焊接过程中发挥重要作用。它不仅细化晶粒、弥散分布第二相,还能提高材料的力学性能。在焊接过程中,超声波可以通过作用于电弧^[4]、母材^[5]和电极^[6]等多种方式影响过程,进而实现焊接质量的提升。在焊接领域中超声的应用也越来越广泛,比如超声辅助电弧焊^[7]、超声辅助激光焊^[8]、超声辅助-TIG 复合焊接^[9]以及超声辅助-MIG 复合焊等一系列新型焊接技术^[10]。超声波的声流效应和空化作用以及机械和热作用,为铝合金的加工提供了更多可能性。因此,充分利用超声波技术,有助于改善铝合金制品的质量,提高生产效率,满足市场需求。通过对超声波在焊接过程中的应用研究,可以不断探索其潜力,为铝合金加工技术的进步贡献力量。

图 1 为超声振动辅助 MIG 焊示意图。利用超声振动辅助 MIG 焊接技术,通过将超声波引入铝合金焊接熔池中,改善熔池状态及凝固过程,从而提升焊接质量。熔焊过程被视为微型铸造过程,其中熔池状态和凝固过程对焊接质量至关重要。然而,熔焊过程时间极短,如何在短暂的时间内优化熔池状态和凝固过程一直是学者们关注的焦点^[11]。通过搭建超声辅助熔焊装置,本项目旨在细化焊接熔池的结晶条件,减少晶粒大小,抑制气孔和热裂纹的生成,从而提高焊接接头的力学性能,增加铝制装备的建造和使用可靠性。超声波作用下,焊接熔池中的液态金属将发生快速振动,有助于消除气体夹杂物,使晶粒细化并减少气孔数量。这一技术的引入将为铝合金焊接提供新的技术路径,为提高焊接质量和可靠性提供新的可能性。期待通过超声振动辅助 MIG 焊接技术的应用,推动铝制装备的发展水平,提高其

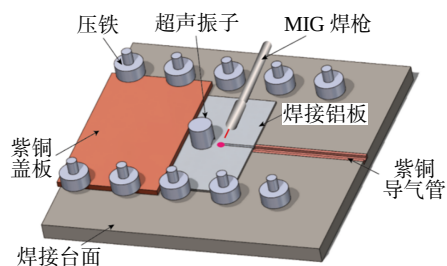


图 1 超声振动辅助 MIG 焊示意图
Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted MIG welding

在各个领域的应用价值和安全性。

本文研究了 4 mm 厚 5083 铝合金超声振动辅助 MIG 焊工艺方法。通过有限元软件建立超声辅助焊接模型和振动分析模型,确定超声振动对焊缝的影响方式。仿真结果为相关工艺的探究提供了理论和数据支撑,为该方法的应用推广奠定基础。

1 实验材料及方法

母材为 5083 铝合金,该铝合金主要合金元素为 Mg 元素,含量为 4%~5%,Mg 元素主要起固溶强化作用^[12]。采用平板堆焊和对焊的方式,堆焊试板尺寸为 300 mm×150 mm×4 mm,对焊试板尺寸为 500 mm×150 mm×4 mm,焊丝为 $\phi 1.2$ mm 的 5183 焊丝。表 1 为母材 5083 和 ER5183 焊丝的化学成分。焊丝中 Mg 元素的含量较高,可以在一定程度上弥补在焊接过程中 5083 母材 Mg 元素的烧损。焊前用刮刀将表面氧化膜清除干净。

表 1 5083 母材和 ER5183 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of 5083 base metal and ER5183 welding wire (wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
5083	0.099	0.325	0.049	0.502	4.25	0.075	0.025	0.023
ER5183	≤0.25	≤0.4	≤0.1	0.5~1.0	4.3~5.2	0.05~0.25	≤0.1	≤0.15

铝合金超声振动辅助焊接设备如图 2 所示。焊枪和变幅杆的移动采用伺服电机控制,通过 PLC 编程软件,使其能够实现在不同速度下的同步移动功能,突破了传统的固定式超声振动对试板长度的限制。图 3 为“马蹄形”超声振动头。这种振动头结构形式的设计想法是在焊接过程中,既能够让两侧的母材都产生超声振动,在不影响焊缝熔融金属的前提下将振动传导进熔池中,还能够保证保护气体的输

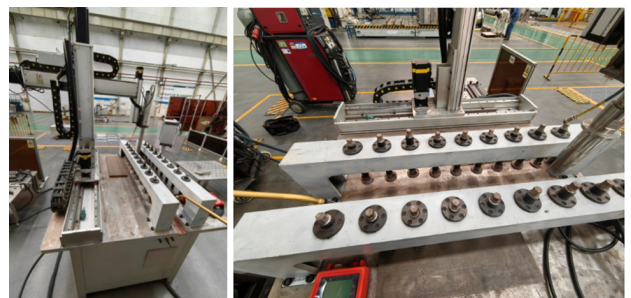


图 2 铝合金超声振动辅助焊接设备
Fig.2 Ultrasonic vibration assisted welding equipment for aluminum alloys

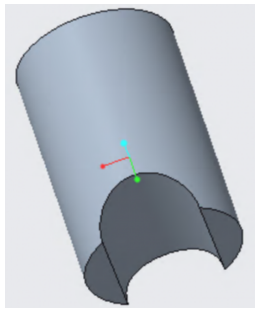


图3 “马蹄形”超声振动头
Fig.3 A horseshoe-shaped ultrasonic vibration head

入,最大限度的发挥超声振动的作用。

2 实验结果与分析

2.1 铝合金超声振动辅助焊接有限元仿真模拟

采用 ANSYS Workbench 软件构建超声助焊和振动分析模型,研究超声振动对焊接熔池流动和母材谐振响应的影响。通过仿真模拟分析,指导优化焊接工艺,提高焊接质量和效率。深入探讨超声振动在焊接过程中的作用机制,为工程实践提供理论依据。

2.1.1 仿真区域几何模型建立

仿真分析几何模型如图4所示。取焊缝处微域为仿真区域。将此区域定为1个长方体,尺寸为长14mm、宽8mm、高8mm,几何模型为对称模型,表示整体三维模型的1/2,对称面为ABCD面。几何模型的原点选择在ABCD(对称面)的中间,将模型分为上下两部分,上部分为气相区(gas zone),下面为熔池液相区(liquid zone)。气相区域设置为99.99%的纯氩环境,模拟焊接时候的保护气,本仿真过程暂时不考虑氩气流动对焊接过程的影响,即保护气氛设置为静止环境。焊丝熔化形成液滴将逐滴从气相区上部进入到仿真区域,然后逐滴下落到下部液相区域。液相区初始条件为室温,流体呈现固态,在电弧热源和铝液滴熔的作用下,逐步升高温度,形成熔池。

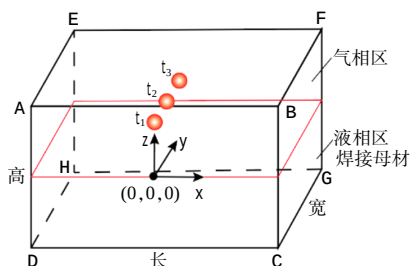


图4 仿真分析模型
Fig.4 Simulation analysis model

此模型建立专注液滴滴落后熔池界面的变化和流场的变化,即模拟焊接瞬态过程,此过程中焊丝已经融化母材形成较为水平的熔池,故暂不考虑母材开的焊接坡口所产生的影响。其中,ABCD面为对称面,AEFB面为质量流量入口,AEHD、EFGH、BFGC、CDHG面为壁面。

2.1.2 模型网格划分

仿真所需的几何模型为规则的六面体,采用相应的六面体结构网格。其中,核心区域是液滴和热源作用的地方,网格相对密集,边长为0.125mm;而其他区域则采用较稀疏的网格,边长为0.5mm。整体网格模型如图5所示。总计约248700个网格。经过网格质量检查,全部网格质量均在0.95~1.00,全部占比为100%。这意味着六面体网格质量良好,有利于仿真计算的稳定收敛。通过合理设置不同区域的网格密度,有效提高了仿真计算的精确性和效率。

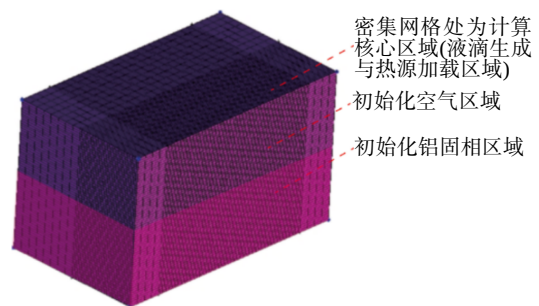


图5 网格模型
Fig.5 Grid model

2.1.3 仿真结果分析

通过对比施加超声振动前后的液滴形貌、温度场分布以及液态熔池体积,可以看出施加超声振动对焊缝产生的影响。图6为施加超声振动前后的液滴形貌对比。当未施加超声振动时,单个熔滴从形成至滴落到熔池中所需要的时间为0.010s,熔滴体积较小,呈圆球状;施加了超声振动后,单个熔滴的过渡周期从之前的0.010s增加至0.014s,过渡频率下降了约40%,且熔滴的体积通过对比可以发现增大了不少,可能的原因是由于超声波振动产生的空化效应,增加了熔滴的粘稠性,导致熔滴以更大的体积进行过渡,因此过渡频率也有所降低。

图7为焊接过程中温度场分布对比。对比二者温度场的变化可以明显看出,未施加超声振动的温度场,热量集中的范围较小,且峰值温度较低,而施加了超声振动后,高热量区域分布于整个熔池中,且

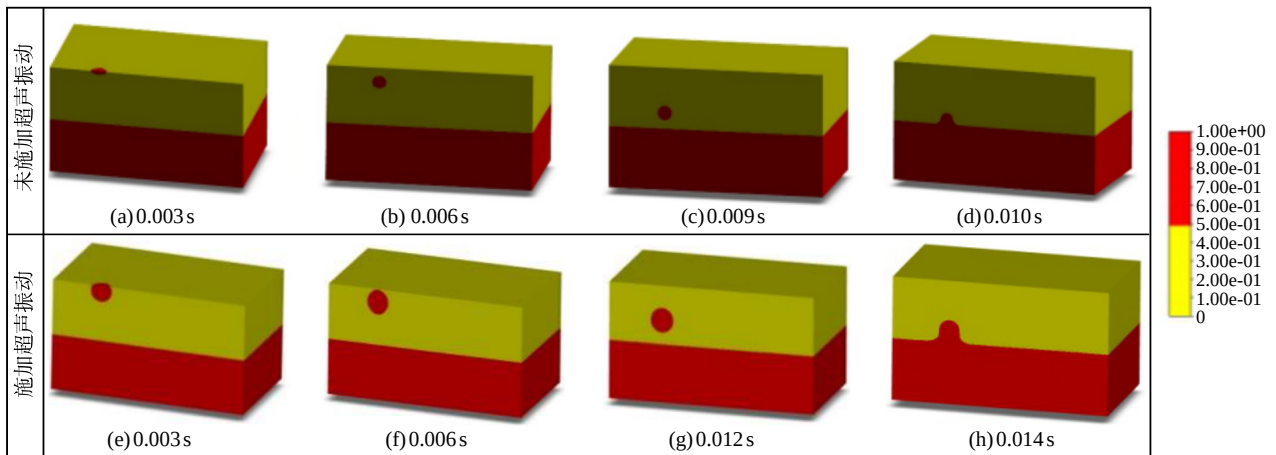
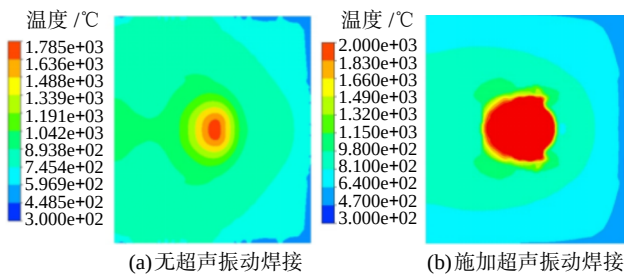


图6 施加超声振动前后的液滴形貌对比

Fig.6 Drop morphologies comparison before and after applying ultrasonic vibration



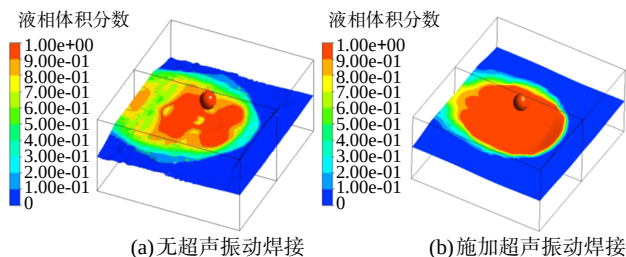
(a) 无超声振动焊接 (b) 施加超声振动焊接

图7 焊接过程中温度场分布对比(°C)

Fig.7 Comparison of temperature field distribution during welding process (°C)

峰值温度也有所提高。这是由于施加超声振动后,超声的声流效应加速了熔池的流动性,有从中心部分向边缘两侧的流动趋势,这样使得从焊丝滴落下的熔融液滴在焊缝中破碎成大量小液滴,均布于整个焊缝中,熔池两侧边缘的温度也得以提高。

图8为焊接过程中熔池内部液态溶液体积分数计算结果对比。对比了在焊接行进过程中,两种工况下形成的熔池范围。在无振动的情况下,熔滴以一定的横向间距逐滴进入熔池后,熔池底部出现不规则的液固界面,不规则的液固界面有可能会造成不光滑的焊缝表面以及固液两相区增加,造成空气的卷入形成气孔、夹渣、焊接裂纹等缺陷;在有振动



(a) 无超声振动焊接 (b) 施加超声振动焊接

图8 焊接过程中熔池内部液态体积分数计算结果对比

Fig.8 Comparison of the calculated integral liquid fraction in the molten pool during welding process

的情况下,可以明显观察到焊缝区域平滑的液固界面,熔池边缘清晰可见,显示了振动有助于焊接形成的液滴进入熔池并重复铺开,形成均匀的熔池界面,有利于形成光滑致密的高质量焊缝。

对熔滴滴入熔池的过程及熔池流动进行动态模拟分析,可以有利于对在超声振动情况下熔滴过渡的稳定性以及熔池缺陷产生机理进行更好的理解和研究,焊接过程中液滴滴入熔池及熔池流动过程模拟如图9所示。可见在开始焊接时,母材在热源的作用下已经形成局部熔化的熔液。当液滴滴落前,熔池内部并没有明显的流场变化,但液滴的落入会引起空气流动在熔池上部的散开。液滴撞击熔池瞬间,熔池中间会形成下凹,有较快的向下速度,而熔池周围则会在液滴的撞击下凸起并具有径向铺展速度。液滴完全铺展并熔入熔池后,由于超声振动的作用,液滴与母材的润湿角会减小,促进了熔液的铺展。随后,熔池在表面张力的作用下恢复,中间形成向上的微凸起,这是由于液态面受到表面张力导致的震荡。随着熔滴不断滴入,熔池液面周围的震荡导致的凸起,在表面张力的作用下容易在空气中结合,形成不规则的气孔,这也是MIG焊易产生气孔的原因之一。通过图9(a)~(h)可以看出,在液态熔池中随着液滴的滴落,不规则气泡有增加的趋势,不过由于加入了超声振动,液态熔池的不规则气泡会很快被破碎或者逸出熔池外,从而能有效降低焊缝的气孔率。当液滴以一定前进距离连续滴落时(图9(e)~(h)),熔池出现明显变化,由于液滴滴落位置相对前一颗液滴有一定的位移量,流场发生不对称流动:在前进方向上,靠近前进位置熔池一侧,向下速度很大,随后在表面张力作用下,形成显著凸起(图9(f));远

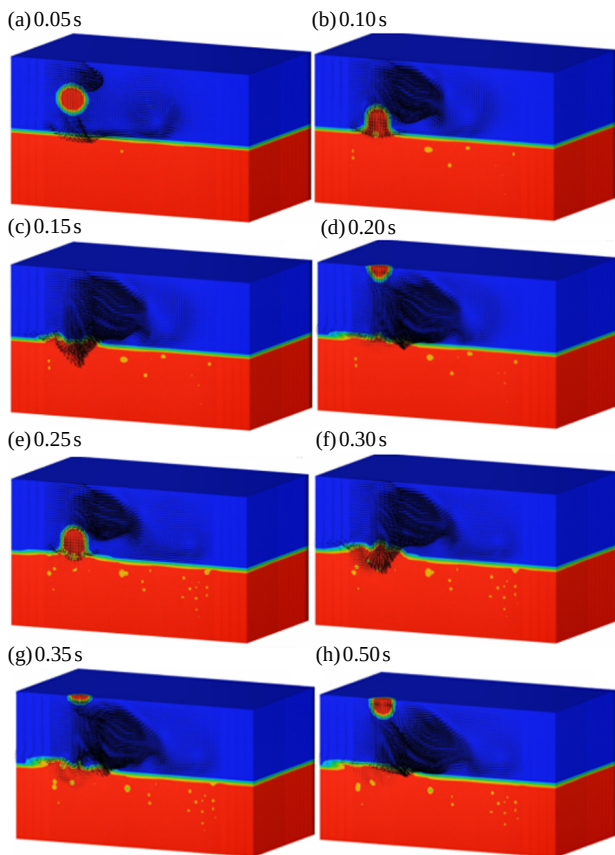


图9 焊接过程中液滴滴入熔池及熔池流动过程模拟
Fig.9 Simulation of liquid droplet injection into the pool and pool flow during welding process

离前进位置一侧,受液滴撞击的影响,熔池中边缘的金属液体被滴入的液滴排挤,也会形成部分凸起,并具有向后上方流动的趋势。值得注意的是,熔池在受到液滴撞击后,在表面张力作用下恢复的过程中,在熔池后方易形成涡旋,且随着液滴滴入的增多,熔池后部的涡旋位置会有所移动。

通过对熔滴-熔池-振动耦合过程的模拟,初步探明了超声振动对焊接熔池的影响机理问题。模拟结果显示,在超声振动的作用下,液滴形成的熔池中瞬态的液固界面更加光滑和平坦,液态范围也更大,说明振动对熔池凝固过程中气体的逸出起到了一定的促进作用。

2.2 铝合金超声振动辅助 MIG 焊工艺研究

在超声振动辅助铝合金 MIG 焊过程中,工艺参数对焊缝的质量至关重要。焊接电流、焊接速度以及变幅杆压力等参数的选择会直接影响熔池流动、凝固过程以及熔滴过渡稳定性。若参数设置不当,可能会导致焊缝出现咬边、飞溅、热裂纹和气孔等缺陷。因此,为了确保焊接质量,必须找到合适的工艺区

间,从而获得成形良好的焊缝。

在超声焊接的过程中,变幅杆是至关重要的辅助工具,它需要以一定的压力压在母材上,以确保超声波能够稳定地输入母材和熔池。同时,变幅杆必须与焊接热源同步运动,保持相对静止状态。为了施加变幅杆的压力,我们使用气缸装置,并通过压力阀控制气压来对变幅杆的压力进行调节。然而,要注意的是,变幅杆的压力必须在适当的范围内变化。如果压力过小,超声能量将无法稳定、连续地输入;而压力过大则会导致振动效果过于强烈,变幅杆与母材的摩擦力过大,进而导致变幅杆移动不畅,熔池剧烈飞溅,影响焊接成形效果,同时还会损害变幅杆的使用寿命。结合设备气缸压强大小以及相关资料查阅,本次实验气缸压强采用 0.15、0.30、0.46 以及 0.60 MPa,用压力传感器对这些压强下的压力进行直接测量,对应变幅杆压力分别为 70、140、220、280 N。在此基础上,设定焊接电流为 90 A,焊接速度为 300 mm/min。

2.2.1 不同参数下超声辅助堆焊结果分析

(1) 变幅杆下压力对焊缝成形的影响

通过调整变幅杆下压力、焊接电流以及焊接速度 3 个参数,进行表面堆焊实验。当焊接电流为 90 A,焊接速度 300 mm/min 时,通过改变变幅杆下压力,变幅杆下压力对焊缝成形的影响见表 2。当未施加超声振动时,焊缝截面呈现上宽下窄的形貌,呈现“倒梨”状,润湿角角度大,润湿效果较差。当变幅杆施加压力为 70 N 时,焊缝熔宽明显增加,焊缝深宽比相较于未施加超声振动的焊缝来说没有明显降低;随着变幅杆下压力的增加,焊缝表面的鱼鳞纹有变得更加致密的趋势,但熔宽的变化较不明显。

表 2 变幅杆下压力对焊缝成形的影响
Tab.2 Influence of downward pressure of amplitude transformer on the weld bead shape

变幅杆下压力 /N	表面成形	截面成形
0		
70		
140		
220		
280		

对本组的焊缝截面熔深和熔宽进行统计,不同变幅杆下压力下焊缝的横截面尺寸变化如图 10 所

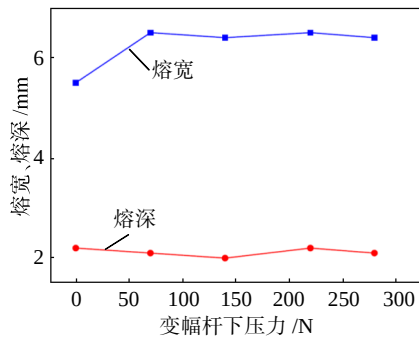


图 10 不同变幅杆下压力下焊缝的横截面尺寸变化
Fig.10 Changes in cross-section dimensions of welds under different pressure of amplitude transformer

示。在超声引入后,整体上熔宽有较为明显的上升,由无超声时的 5.5mm 上升到了施加 70N 变幅杆压力的 6.6mm,后续再增加超声变幅杆下压力后,熔宽变化幅度减小。但对于熔深来说,施加超声振动与否对熔深的影响不大。

(2) 焊接电流对焊缝成形的影响

保持变幅杆下压力 70N,焊接速度 300mm/min 不变,改变焊接电流,焊接电流对焊缝成形的影响见表 3。当焊接电流为 90A 时,较小的焊接电流导致焊接熔深较浅,熔透能力大约为母材厚度的 1/2 左右;当焊接电流增加到 100A 时,焊接熔深增加,焊缝熔池呈现“倒三角”的形状;当焊接电流增加到 110A 时,焊缝熔深进一步增加,且在母材背面也形成一部分余高。出现这种现象有两个原因:一是熔融金属在超声作用下产生声流效应,熔池上下层之间有层间压力,上层高温液态金属向下流动,使得底部焊缝深度增加;二是超声在熔池中传播时,需要克服熔融金属的粘滞力做功,超声衰减的能量转化为热量,延长了熔池高温停留时间,增加了母材的熔化量。

表 3 焊接电流对焊缝成形的影响
Tab.3 Influence of welding current on weld bead shape

焊接电流 /A	表面成形	截面成形
90		
100		
110		

对本组的焊缝截面熔深和熔宽进行统计,不同焊接电流下焊缝横截面尺寸变化如图 11 所示。当电流增加后,焊缝熔宽和熔深都有所提高,但熔深提高的较为明显,从 90A 的 2.1mm 熔深提高至焊接

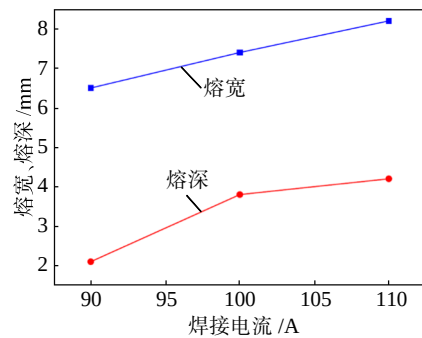


图 11 不同焊接电流下焊缝横截面尺寸变化
Fig.11 Changes in cross-section dimensions of weld seam at different welding current

电流为 110A 的 4.2mm,熔宽从 90A 的 6.5mm 提高至 110A 的 8.1mm,其主要原因就是随着焊接电流的增加,焊接热输入以及单位时间内的焊接熔敷率均有所提高,从而导致焊接熔深及焊接熔宽增大。

(3) 焊接速度对焊缝成形的影响

保持变幅杆下压力 70N,焊接电流 90A 不变,改变焊接速度,焊接速度对焊缝成形的影响见表 4。随着焊接速度的增加,堆焊焊缝熔宽减少,熔深减低,余高增加,润湿角角度增大,润湿性能下降,焊缝深宽比降低,其主要是因为随着焊接速度的增加,在不改变焊接电流的基础上,焊接热输入降低,且单位时间内熔敷金属的填充量减少,导致焊缝成形性能下降。

表 4 焊接速度对焊缝成形的影响
Tab.4 Effect of welding speed on weld bead shape

焊速 / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	表面成形	截面成形
300		
320		
340		

对本组的焊缝截面熔深和熔宽进行统计,不同焊接速度下焊缝横截面尺寸变化如图 12 所示。当焊接速度增加后,焊缝熔宽和熔深均有所下降,熔深从焊接速度为 300mm/min 的 2.1mm 下降至焊接速度为 340mm/min 时的 1.4mm,熔宽从 300mm/min 时的 6.5mm 下降至 340mm/min 时的 5.3mm,其主要原因是热输入的下降所导致。

2.2.2 不同工艺参数下对接实验结果分析

超声振动在焊接过程中的作用机理十分复杂,主要包括空化效应、声流效应和机械振动效应。这些效应可以促进熔池的流动,破碎粗大的柱状晶粒,细

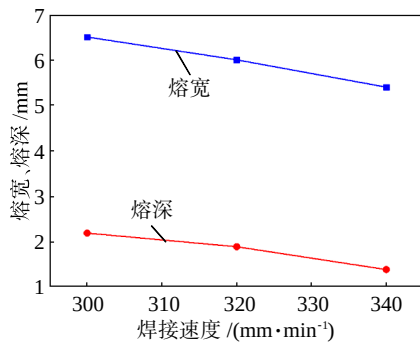


图 12 不同焊接速度下焊缝横截面尺寸变化
Fig.12 Changes in cross-section dimensions of weld seam at different welding speeds

化晶粒,改善焊接接头的缺陷。在对接接头进行焊接实验时,通过对比加入超声振动前后以及不同参数下的焊接接头组织和性能,可以更好地理解超声对焊接过程的影响

(1) 焊缝力学性能分析

不同参数下的接头拉伸性能见表 5。在不加超声振动的情况下,编号①的屈服强度达到指标要求,而抗拉强度未达到指标要求,且波动较大,分析原因可能是焊缝中存在一些微小气孔,探伤无法发现,因此即使探伤合格,但微小气孔缺陷还是削减了焊缝

表 5 不同参数下的接头拉伸性能
Tab.5 Tensile properties of joints under different parameters

试样编号	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	伸长率(%)
①	169	262	6.5
	171	248	5.5
②	172	299	9.5
	168	298	11.0
③	167	289	8.0
	168	302	10.5
④	167	291	8.0
	168	300	10.0
⑤	166	239	3.5
	153	154	2.0
⑥	172	296	8.0
	167	282	7.0
⑦	166	276	7.0
	165	267	6.0
⑧	172	289	8.0
	170	294	8.5
⑨	175	303	8.0
	175	289	8.0
指标要求	≥ 145	≥ 275	-

的有效冶金结合面积,导致抗拉强度降低,后续在金相部分也证明了该结论。在加入超声振动后,编号①、②、③的屈服强度并未有太大的改变,但抗拉强度得到了较为显著的提升,能稳定在 290~300 MPa,相比于指标的 275 MPa 要求,也有接近 15 MPa 左右的提高,可以看出,一定的超声振动能够改善铝合金焊接接头的力学性能。但⑦的结果显示,过大的变幅杆下压力不利于接头力学性能,主要是由于下压力过大,变幅杆振动受阻,母材对超声反射作用增强,超声传入效率降低,且在移动过程中与母材表面的摩擦力过大,导致变幅杆行走阻力增大,左右晃动致使熔滴过渡不稳定,焊接飞溅大,从而影响了性能,280 N 压力下的接头表面宏观形貌如图 13 所示。对于后续保持 70 N 下压力的实验中,电流过大也导致力学性能出现一定程度的下降,见编号⑧,主要原因可能是电流过大,导致焊接热输入量过高,晶粒发生长大从而恶化了接头性能。



图 13 280 N 压力下的接头表面宏观形貌
Fig.13 Macro-morphology of joint surface under 280 N pressure

图 14 为不同参数下的接头抗拉强度变化趋势。通过对比可以看出,抗拉强度随着变幅杆下压力的增大先增加后减小,随着焊接电流的增大缓慢下降,随着焊接速度的增加,抗拉强度变化不大。

(2) 焊缝显微组织分析

在铝合金焊接过程中,焊缝中的氢元素的来源有以下几个方面:焊接材料未烘干,含有水分、有机物等含有氢元素的物质;母材和填充材料中的固溶氢;保护气中含有水分,或者保护效果不佳,空气中的水分进入等。而在铝合金焊接过程中,由于氢元素在固相和液相中固溶度存在差异,就会析出产生气孔,在焊缝中,存在着各种溶质、熔渣、固液界面、枝晶间隙为气孔提供形核质点,因此气孔会优先在这些地方形核。图 15 为不同参数接头的截面宏观形貌,未施加超声振动的接头(图 15(a)),在焊缝区域仍在存在较小的气孔缺陷,这些缺陷无法在探伤底片中显示出来,但仍然会对强度造成影响。施加超声振动后,由于超声在熔池中产生的空化效应,使得熔体经历正负压的交变,负压作用下,产生空化泡,同

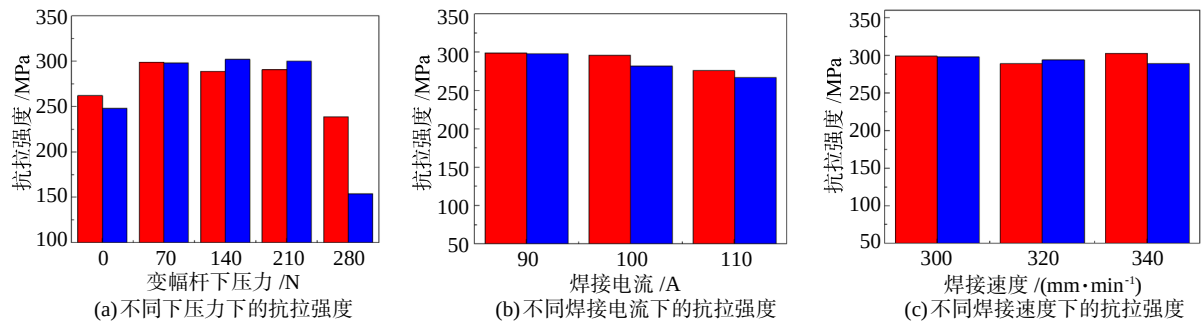


图 14 不同参数下的接头抗拉强度变化趋势

Fig.14 Trends of tensile strength of joints under different parameters

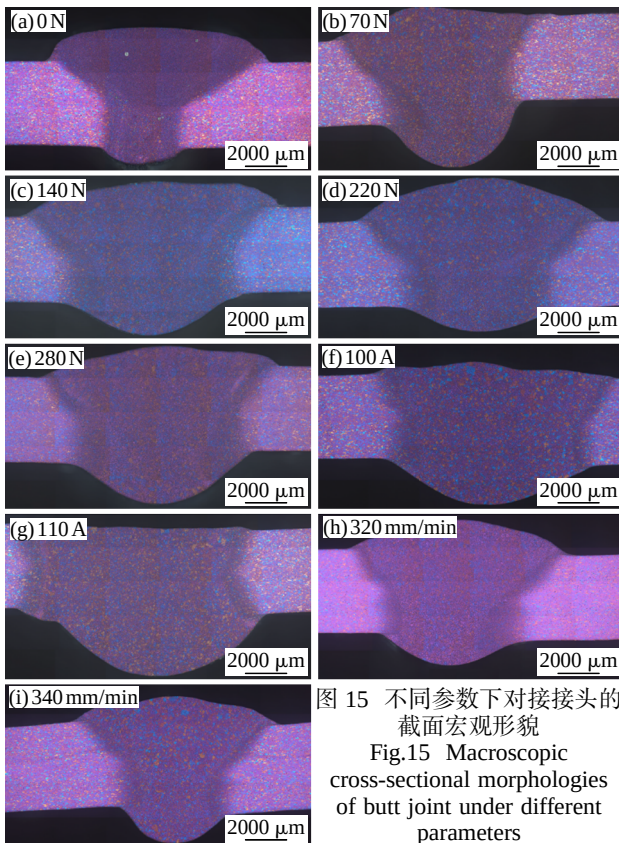


图 15 不同参数下对接接头的截面宏观形貌
Fig.15 Macroscopic cross-sectional morphologies of butt joint under different parameters

时空化泡内存在着很大的负压,在此负压作用下,游离态的氢元素可以通过扩散作用聚集在一起,产生气孔,而在正压时,已经聚合成氢气分子的游离氢难以再次分解,从而稳定的存在于气孔中。在熔体金属温度下降的过程中,氢元素的溶解度还会不断下降,而超声振动增大了氢原子的振动频率,促进了氢气孔的析出。对比图 15(b)、(c)、(d)等施加了超声振动的接头金相也能看出,超声振动对于降低接头气孔率方面起到了较为显著的作用。通过对比图 15(f)、(g)能看出,当焊接电流增大后,焊接热输入量增加,熔池下坠导致焊缝余高不足;图 15(h)、(i)为不同焊接速度下的接头截面,可以看出,当焊接速度

达到 340 mm/min 时,由于焊接速度过快,导致出现驼峰焊道,填充的熔融焊丝不能充分的润湿铺展就已凝固。

不同下压力焊缝中心的微观组织形貌如图 16 所示。其中,无超声振动时的焊缝中心如图 16(a)所示,由于焊缝中心的温度分布较为均匀,主要为等轴晶生长,呈现出 $\alpha+\beta$ 的共晶网络状组织。随着超声的加入,焊缝中心区域组织并无明显变化,仍然为等轴枝晶,因此超声并不能改变焊缝中心区域的组织种类。但随着变幅杆压力增大,在超声振动的作用下,晶粒尺寸得到细化,其中下压力 220 N 是细化效果较为明显(图 16(d))。当下压力为 280 N 时,可以观察到焊缝晶粒有大量的第二相析出,晶粒内部及晶界处均有,这可能是由于在超声作用下,合金元素的扩散速率上升,一些使得强化相大量析出、长大、聚集,从而导致焊缝处产生过时效。

(3) 焊缝晶粒度分析

未施加超声振动接头横截面焊缝的微观组织组织如图 17 所示,施加超声振动接头横截面焊缝的微观组织组织如图 18 所示。图 17(a)和 18(a)为焊缝区域的取向成像图,由图可见该区域晶粒形状各异、尺寸不一,且呈现等轴晶的形貌特征。根据不同晶面的极图(图 17(b)和图 18(b))可知,焊缝区域主要存在 $\{111\}<110>$ 板织构, $\{011\}<100>$ 高斯织构,同时还有部分 $\{100\}<001>$ 立方织构等组分。中心区域的焊缝晶粒尺寸分布如图 17(c)及 18(c)所示,除去分布在 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的晶粒度统计误差外,未施加超声振动时,其晶粒度主要在 $30\sim 60\mu\text{m}$,统计出来的平均晶粒度为 $37\mu\text{m}$ 左右,而施加了超声振动的接头晶粒度主要分布在 $10\sim 30\mu\text{m}$,统计出来的平均晶粒度为 $27\mu\text{m}$ 左右,晶粒度下降了 27%左右,由此看出,超声振动起到了细化组织晶粒的作用。

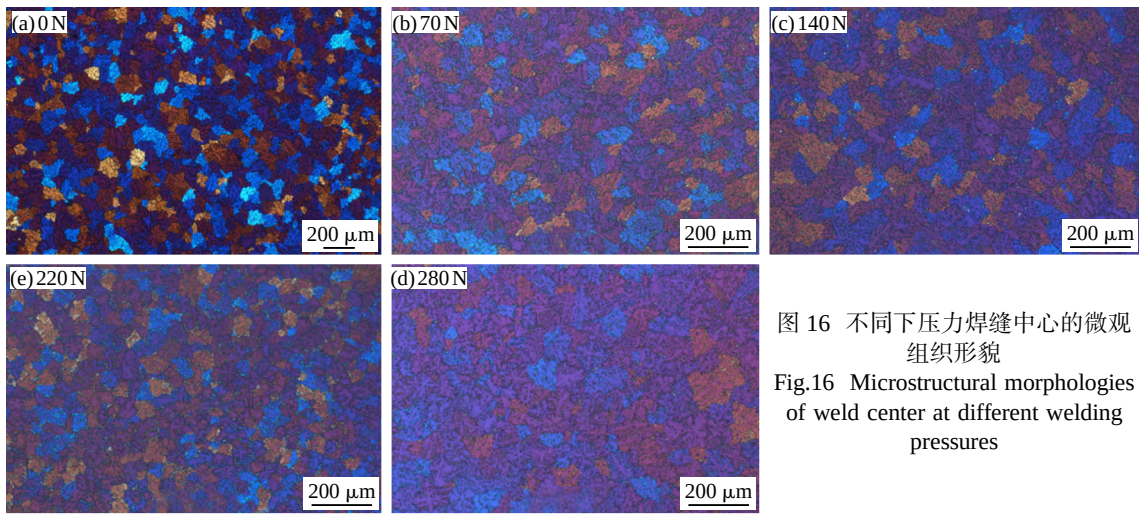


图 16 不同下压力焊缝中心的微观组织形貌
Fig.16 Microstructural morphologies of weld center at different welding pressures

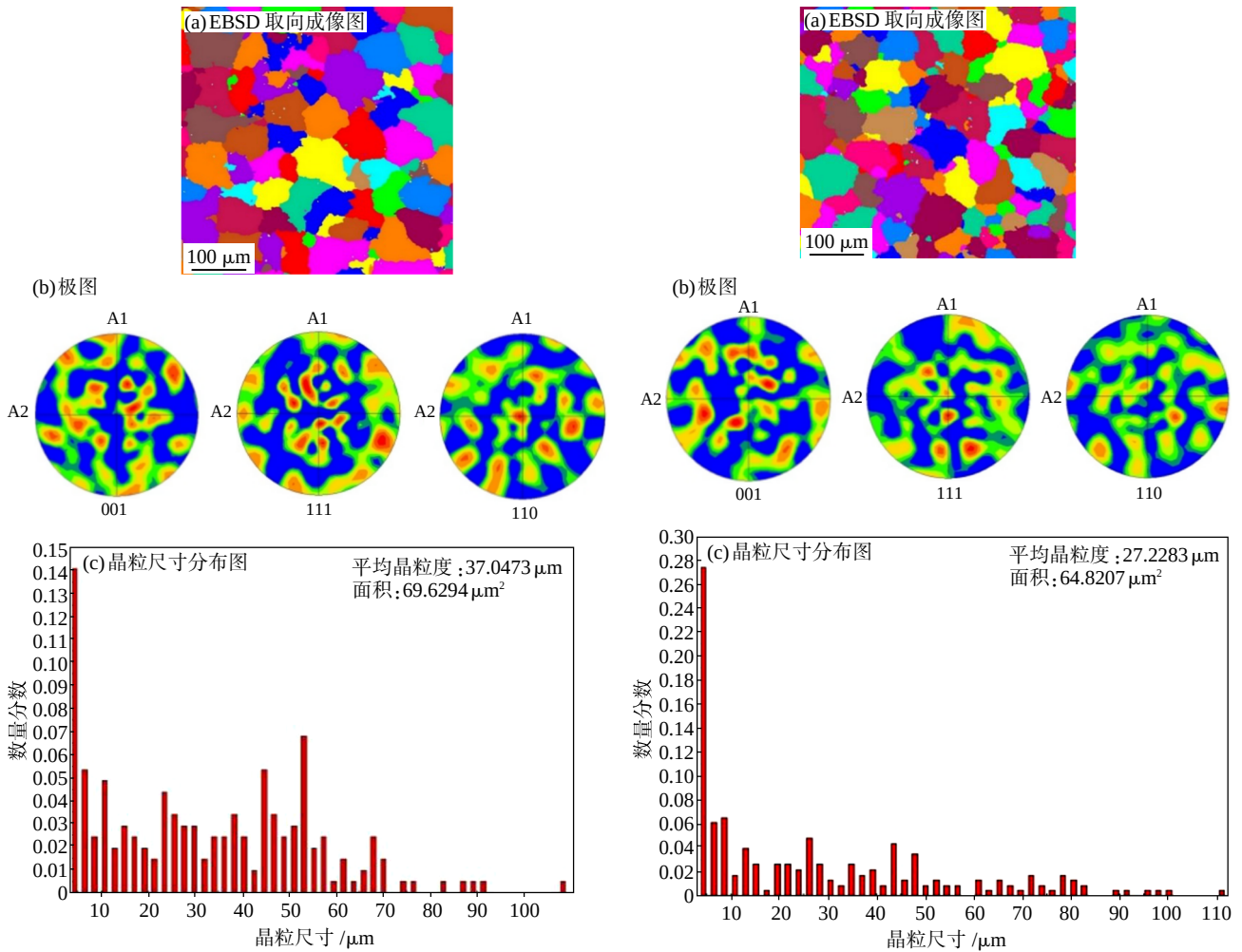


图 17 未施加超声振动接头横截面焊缝的微观组织织构
Fig.17 Microstructural texture of welded joint cross-section without ultrasonic vibration

图 18 施加超声振动接头横截面焊缝的微观组织织构
Fig.18 Microstructural texture of welded joint cross-section with ultrasonic vibration

(4) 焊缝显微硬度分析

经过对无超声振动和施加 70 N 变幅杆压力下的焊接接头横向位置进行显微维氏硬度测试, 得到结果如图 19 所示。在无超声振动的情况下, 由于焊

缝区合金元素的烧损, 导致焊缝区整体硬度低于母材, 同时焊接热影响区出现了软化现象。而在施加超声后, 晶粒细化和第二相析出的影响使得焊缝区的硬度增加, 接头热影响区的硬度也有所提高, 并且热

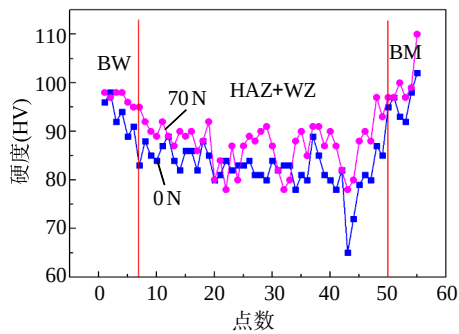


图 19 未加超声与施加超声接头横向硬度分布对比
Fig.19 Comparison of lateral hardness distribution of unwelded and welded joints with ultrasonic assistance

影响区的软化现象也减弱了, 这些变化可能与晶粒的细化以及热影响区第二相分布的改变有关。

结合前面仿真结果来看, 施加超声振动后的熔池峰值温度提高, 且高温范围变大, 焊后接头理应软化而导致硬度下降, 但实际结果上来看硬度却有所提升, 分析原因可能是超声振动导致晶粒细化而带来的细晶强化效果更为显著, 而振动带来峰值温度上的提升所导致的软化效果较不明显。综合对比, 施加超声振动, 对接头的横向硬度有一定的提高作用。

(5) 接头断口分析

图 20 为接头断口形貌对比。接头拉伸试样的断口形貌表明, 在未加入超声振动时, 断口呈微孔聚集型断裂, 具有部分粗大的韧窝, 韧窝区域较浅(图 20(a)红色线框), 表现出塑性变形较小的特征。而施加超声振动后, 断口处的韧窝变得细小且密集, 韧窝区域也更深(图 20(b)红色线框), 呈现出更大的塑性变形特点。通过晶粒细化, 晶界和晶粒数增加, 细密的晶粒可以有效阻碍裂纹的扩展, 提高接头的延展性。因此, 超声振动可以细化焊缝晶粒, 增强接头的抗失稳能力。

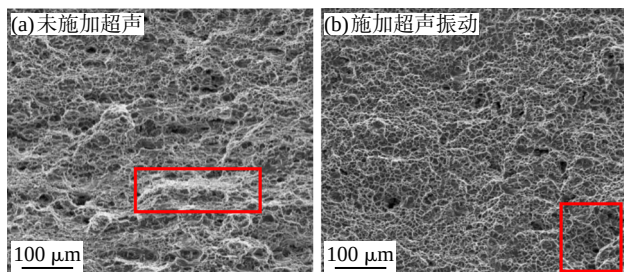


图 20 接头断口形貌对比
Fig.20 Comparison of joint fracture morphology

2.2.3 接头强化机制分析

实验数据表明, 超声振动对焊缝强化作用主要

体现在减少气孔率和细化晶粒两个方面。具体来说, 通过超声振动处理可以有效降低焊缝中气孔的形成率, 同时使晶粒结构更加细小, 从而提高焊接质量和性能。

超声技术在焊接中的应用对气孔问题的解决起到了积极的作用。超声的引入加剧了熔池的搅拌振动, 有效促进气孔上浮, 通过超声空化作用产生的压力变化, 加速氢元素向气孔扩散, 增大气孔尺寸并加快上浮速度。这些因素协同作用降低了气孔率, 增加了冶金结合面积, 提高了焊缝强度。通过超声作用形成的空化效应和机械搅拌效应对细化晶粒尺寸有着积极的影响。超声振动可以产生空化泡, 这些空化泡需要周围液态金属提供表面能来膨胀, 导致局部过冷, 从而增加了晶核形成的驱动力。当空化泡受到正压时会产生爆破, 释放出强烈的冲击波, 为晶胚的形成提供了结构起伏和能量变化。同时, 这种冲击波还能破碎正在生长的枝晶, 使其成为新的晶核质点。因此, 晶粒越小, 晶界也越多, 这会增加位错滑移和攀移的阻碍, 进而提高材料的强度。超声的作用不仅可以细化晶粒, 还可以增强金属的力学性能, 对提高材料的综合性能有着积极的促进作用。因此, 在材料制备过程中, 合理利用超声辅助技术可以有效地优化金属材料的微观结构, 提高材料的性能和品质。

3 结论

(1) 建立了铝合金超声辅助焊接振动分析模型和数值仿真模型, 实现了铝合金板材在超声振动作用下的振动状态模拟以及实现了熔滴-熔池-振动三者耦合过程模拟, 模拟结果显示增加了超声振动的熔池瞬态固液界面更加光滑和平坦, 液面范围也更大, 说明振动对熔池凝固过程中气体的溢出起到了一定的促进作用。

(2) 通过对 5083 超声振动辅助 MIG 焊进行工艺探究, 总结发现接头抗拉强度有较为明显的提升, 能基本稳定在 290 MPa 以上, 相较于指标要求提升了 15 MPa, 且气孔率和晶粒度也有较为明显的降低, 接头软化现象减少, 整体焊缝硬度提高, 断口由聚集的韧窝构成, 具有良好的塑性特征, 施加超声振动的接头断口韧窝细小且密集, 区域较深, 具有更加优良的抗失稳能力。

(3) 通过总结实验结果数据可以发现, 超声振动辅助焊缝强化机制主要包括两方面: 一方面是通

过空化效应及振动搅拌效应降低了焊缝气孔率,提高有效冶金结合面积,提高了焊缝强度;另一方面是通过空化效应及机械振动效应,增加了形核质点,降低了形核功,使得晶粒细化从而提高了焊缝强度。

参考文献:

- [1] 肖荣诗,陈锐,左铁钊. 高强铝合金激光焊接进展[J]. 应用激光,2002(2):206-208.
- [2] 李俐群,陈彦宾,陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光,2008(11):1783-1788.
- [3] Chen C, Shen Y, Gao M, et al. Influence of welding angle on the weld morphology and porosity in laser-arc hybrid welding of AA2219 aluminum alloy [J]. Journal of Neurosurgical Sciences,2020,64(1):1-9.
- [4] Chen C, Fan C, Lin S, et al. Effect of ultrasonic pattern on weld appearance and droplet transfer in ultrasonic assisted MIG welding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018,35:368-372.
- [5] Yuan T, Kou S, Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool[J]. Acta Materialia,2016,106:144-154.
- [6] Watanabe T, Shiroki M, Yanagisawa A, et al. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration [J]. Journal of Materials Processing Technology,2010,210(12):1646-1651.
- [7] Chen S J, Jia Y Z, Huang W H, et al. Laser-driven programmable metal transfer in GMAW [J]. Welding Journal, 2020,99(3):93-100.
- [8] 王冉,王玉玲,姜美林. 超声辅助激光熔覆技术研究现状[J]. 工具技术,2020,54(8):3-9.
- [9] Chao C, Fan C, Lin S, et al. A new discovery of arc shape in pulsed ultrasonic wave assisted TIG welding [J]. Physics of Plasmas,2018,25(8):080703.
- [10] Sun X. Characteristics of welding arc and metallurgical fluorine base type sintered flux and its application[J]. Electric Welding Machine,2014.
- [11] 郭亨通,张登明,赵耀邦,等. 5A06 铝合金超声辅助激光填丝焊接焊缝成形及组织性能研究[J]. 中国科学:技术科学,2020,50(4):1-8.
- [12] 郭超慧,王鹏云,褚少旗,等. CMT+P 焊接电流对 5083 铝合金焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 材料开发与应用,2022,37(4):71-76. 

(上接第 42 页)

- [10] Arlazarov A, Bouaziz O, Masse J P, et al. Characterization and modeling of mechanical behavior of quenching and partitioning steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2015,620:293-300.
- [11] Seo E J, Cho L, De Cooman B C. Application of quenching and partitioning processing to medium Mn steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2015,46:27-31.
- [12] Liu L, He B B, Cheng G J, et al. Optimum properties of quenching and partitioning steels achieved by balancing fraction and stability of retained austenite [J]. Scripta Materialia, 2018,150:1-6.
- [13] 左智成,苏钰,李军. 加热速率和配分时间对低碳 Q&P 钢组织及性能的影响[J]. 材料导报,2021,35(12):12156-12160.
- [14] Santofimia M J, Nguyen-Minh T, Zhao L, et al. New low carbon Q&P steels containing film-like intercritical ferrite [J]. Materials Science and Engineering A,2010,527 (23):6429-6439.
- [15] Seo E J, Cho L, Estrin Y, et al. Microstructure-mechanical properties relationships for quenching and partitioning (Q&P) processed steel[J]. Acta Materialia,2016,113:124-139.
- [16] Chou L. Application of quenching and partitioning processing to medium Mn steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2015,46(1):27-31.
- [17] 王颖,张柯,郭正洪,等. 残余奥氏体增强低碳 QPT 钢塑性的新效应[J]. 金属学报,2012,48(6):641-648.
- [18] Baek M S, Kim K S, Park T W, et al. Quantitative phase analysis of martensite-bainite steel using EBSD and its microstructure, tensile and high-cycle fatigue behaviors[J]. Materials Science and Engineering A,2020,785:139375.
- [19] Kumar S, Singh S B. Microstructure-property relationship in the quenching and partitioning (Q&P) steel[J]. Materials Characterization,2023,196:112561.
- [20] Huyghe P, Malet L, Caruso M, et al. On the relationship between the multiphase microstructure and the mechanical properties of a 0.2C quenched and partitioned steel [J]. Materials Science and Engineering A,2017,701:254-263. 