

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.11

焊后冷轧对 Al-Cu 异质 FSW 接头组织及性能的影响

邓清洪^{1,2}, 刘晓东^{1,2*}, 沈言锦^{1,2}, 杨升平¹, 谭望¹, 付瑞东³

1. 湖南汽车工程职业大学, 湖南 株洲 412001
2. 湖南汽车工程职业大学 先进材料加工与成形研究所, 湖南 株洲 412001
3. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要: 铝-铜异种金属搅拌摩擦焊接头在电力与电子工业中应用前景广阔,但其界面处易生成的脆性金属间化合物层严重制约接头性能。为突破此瓶颈,本文提出采用焊后冷轧工艺对铝-铜搅拌摩擦焊接头进行改性。系统研究了冷轧处理对接头微观组织、显微硬度、拉伸性能及断裂行为的影响规律。研究表明:焊后冷轧使接头厚度由3 mm成功减薄至0.3 mm,并促使界面处的金属间化合物层发生断裂,有效缓解了其连续分布所导致的不利影响;同时,冷轧变形显著提升了接头各区域的显微硬度,并使接头的抗拉强度从焊态的80 MPa大幅提升至385 MPa,断裂位置由铝-铜界面转移至铝侧。研究表明焊后冷轧是一种能够显著提升铝-铜异种金属FSW接头力学性能的有效方法。

关键词: 铝-铜; 搅拌摩擦焊; 焊后冷轧; 金属间化合物; 力学性能

中图分类号: TG457.14 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0088-06

Effect of Post-Weld Cold Rolling on Microstructure and Properties of Al-Cu Dissimilar FSW Joints

DENG Qinghong^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,2*}, SHEN Yanjin^{1,2}, YANG Shengping¹, TAN Wang¹, FU Ruidong³

1. Hunan Automotive Engineering Vocational University, Zhuzhou 412001, China
2. Hunan Automotive Engineering Vocational University, Institute of advanced materials processing and forming, Zhuzhou 412001, China
3. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: Al-Cu dissimilar friction stir welding joints hold significant promise for applications in the electrical and electronic industries. However, their performance is often severely limited by the brittle intermetallic compound layer formed at the interface. To address this challenge, this study introduces post-weld cold rolling as a modification technique for Al-Cu friction stir welding joints. The effects of cold rolling on the microstructural evolution, microhardness distribution, tensile properties, and fracture behavior of the joints were systematically investigated. The results demonstrate that post-weld cold rolling successfully reduced the joint thickness from 3 mm to 0.3 mm. Crucially, the rolling process fractured the continuous brittle intermetallic compound layer at the interface, mitigating its detrimental effects. Furthermore, cold rolling significantly increased the microhardness across all regions of the joint and remarkably enhanced the ultimate tensile strength from 80 MPa in the as-welded state to 385 MPa. The fracture location shifted from the Al-Cu interface to the aluminum side. This work confirms that post-weld cold rolling is an effective method for significantly improving the mechanical properties of Al-Cu dissimilar FSW joints.

Keywords: Al-Cu; friction stir welding; post-weld cold rolling; intermetallic compounds; mechanical properties

引用格式: 邓清洪, 刘晓东, 沈言锦, 等. 焊后冷轧对 Al-Cu 异质 FSW 接头组织及性能的影响[J]. 电焊机, 2026, 56(7): 88-93.

收稿日期: 2025-10-07 修回日期: 2026-04-08

基金项目: 湖南省自然科学基金(2024JJ8007); 2025年度湖南省教育厅科学研究项目(25C1171); 湖南省教育厅优秀青年项目(23B0995); 湖南汽车工程职业大学校级研究项目(HQZYKY2023A11)

作者简介: 邓清洪(1990—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事搅拌摩擦焊研究。E-mail: qhdengysu@yeah.net。

通讯作者: 刘晓东(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事铝合金强化机理研究。E-mail: liuxd0352@126.com。

Citation:DENG Qinghong, LIU Xiaodong, SHEN Yanjin, et al. Effect of Post-Weld Cold Rolling on Microstructure and Properties of Al-Cu Dissimilar FSW Joints[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 88-93.

0 引言

Al-Cu 异种金属接头综合了铝的轻质与铜的优异导电性,在电力输配、电子及制冷等领域应用前景广阔。然而,铝与铜在物理、化学及力学性能上差异显著,高温下易反应生成脆性金属间化合物(Intermetallic Compounds, IMC),传统熔焊方法难以避免其过量形成,导致接头脆性断裂,严重制约工程应用^[1-2]。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一种固相连接技术,焊接峰值温度低于材料熔点,可有效抑制 Al-Cu 接头中 IMC 的过度生长。然而,FSW 过程仍会在界面处形成以 Al_2Cu 、 Al_4Cu_9 为主的 IMC 层。研究表明,当 IMC 层厚度超过 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时,将显著引起接头脆性断裂并加剧电化学腐蚀,成为制约接头性能的核心瓶颈^[3-4]。

当前研究聚焦于界面 IMC 层的调控与性能协同提升,主要技术路径包括:一是改进焊接工艺以调控热过程,如采用静轴肩^[5-6]或水下 FSW^[7-8]以降低峰值温度,抑制 IMC 生长;二是引入超声等外场改善连接过程,利用声软化效应降低热输入与原子扩散^[9-11];三是添加 Mg、Zn、Ni 等中间层,改变界面反应路径,抑制有害 IMC 生成^[12]。尽管上述方法在一定程度上改善了接头质量,Al-Cu 异质 FSW 接头仍普遍面临材料混合不均、界面结合强度不足及力学性能偏低等问题。因此,在现有焊接技术基础上,发展有效的焊后处理工艺,对已成形的接头进行组织优化与性能提升,具有重要研究价值与工程意义。

在众多焊后处理方法中,冷轧作为典型的形变强化工艺,在调控组织、引入压应力及提升强度方面潜力显著。然而,目前关于焊后冷轧对 Al-Cu 异质 FSW 接头界面 IMC 演化及力学性能影响的研究尚属空白。为此,本文以工业纯铝与 T2 紫铜为研究对象,在实现 FSW 连接基础上,系统研究焊后冷轧处理对接头微观组织、力学性能及断裂行为的影响规律,旨在突破 Al-Cu 接头界面 IMC 难以原位抑制

的瓶颈,为开发高性能 Al-Cu 异种金属 FSW 接头提供新的焊后改性方法与理论支撑。

1 试验及方法

实验采用 3mm 厚工业纯铝和 T2 紫铜作为基体材料,尺寸均为 $300\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 。纯铝的主要化学成分如表 1 所示。T2 紫铜的主要化学成分为: $\text{Cu}\geq 99.9\%$, $\text{O}\leq 0.06\%$,其他杂质 $\leq 0.04\%$ 。焊接前,对材料表面进行机械打磨去除氧化层,并用丙酮清洗去除油污。

表 1 工业纯 Al 的化学成分(质量分数,%)

Al	Si	Cu	Mn	Ti	V	Fe	Zn
Bal.	0.45	0.035	0.05	0.005	0.05	0.35	0.01

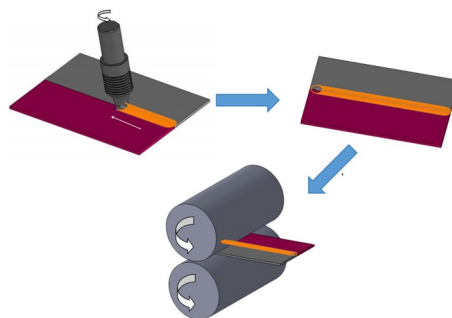


图 1 试验方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental procedure

采用台式 FSW 焊机进行焊接,工具钢搅拌头由轴肩和搅拌针组成,轴肩直径为 13 mm ,搅拌针为锥形螺纹针,根部直径 $\varnothing 7.8\text{ mm}$,端部直径 $\varnothing 4\text{ mm}$,长度 2.85 mm 。FSW 所使用的参数为:搅拌头逆时针旋转,转速为 900 r/min ,焊接速度 50 mm/min ,前倾角 2.5° 。焊接时,将铝板置于前进侧,铜板置于后退侧,搅拌针偏向铝侧 1 mm 。

如图 1 所示,焊接完成后,采用双辊冷轧机对 FSW 接头进行轧制处理,轧制方向平行于焊接方向,轧制过程使用冷轧铝专用润滑油,每次下压力为 0.30 mm ,实测厚度方向具体尺寸(mm)变化为: $3.0\rightarrow 2.7\rightarrow 2.51\rightarrow 2.35\rightarrow 2.27\rightarrow 2.13\rightarrow 1.88\rightarrow 1.75\rightarrow 1.5\rightarrow 1.43\rightarrow 1.31\rightarrow 1.21\rightarrow 0.97\rightarrow 0.7\rightarrow 0.5\rightarrow 0.3$ 。

采用线切割方法垂直于焊接方向截取金相试样,经镶嵌、打磨和抛光后,使用Keller试剂(铝侧)和 FeCl_3 盐酸溶液(铜侧)腐蚀。利用Axiovert-200-MAT金相显微镜观察接头宏观形貌和微观组织。

采用HVS-1000数显显微硬度计测量接头截面显微硬度分布,测试载荷为50 g,保压时间10 s,测点间距0.3 mm,在焊缝横截面上中部进行测量。

根据GB/T 2651—2008标准,在电子万能试验机上进行室温拉伸试验,拉伸应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。每个参数测试2个试样,取平均值。采用HITACHI-S4800扫描电镜观察断口形貌,以探讨它们的断裂行为。

2 结果与讨论

2.1 焊后冷轧对接头微观组织的影响

2.1.1 焊态接头微观形貌特征

如图2所示,焊接接头的表面成型表现出色,未出现任何表面缺陷。焊缝从起焊点至收焊点的整个过程中,展现出高度的一致性。



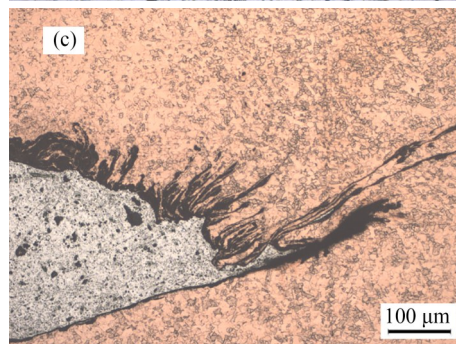
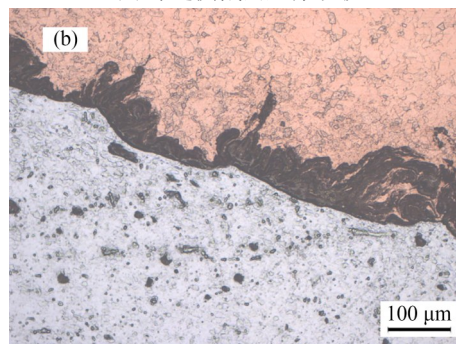
图2 Al-Cu焊态接头表面成型照片

Fig. 2 Surface morphology of as-welded Al-Cu joint

如图3a所示,焊后铝-铜异质FSW接头的焊缝横截面呈现出典型的镶嵌结构。由于搅拌针向铝侧偏置,焊核区主要由铝和铜两种材料相互交错镶嵌而成,其中铝的占比显著高于铜。在铜侧,结构呈现出明显的层状交替特征;而在铝侧,则表现为颗粒状铜与铝的混合结构。这一现象表明,搅拌针向铝侧偏置的工艺方法能够有效提升焊缝成型,同时利用较软的铝作为主要的塑性流动介质,实现对铜表面的刮擦与机械啮合。从局部放大图3b、3c可以看出,铝以棉絮状的塑性流动形式嵌入铜基体中,而铜则通过搅拌针的刮擦作用以颗粒状形式均匀分散于铝基体中。



(a) 焊缝横截面整体形貌



(b-c) 铝-铜界面形貌

图3 Al-Cu焊态接头微观金相照片

Fig. 3 Metallographic images of as-welded Al-Cu joint

2.1.2 焊后冷轧接头微观形貌特征

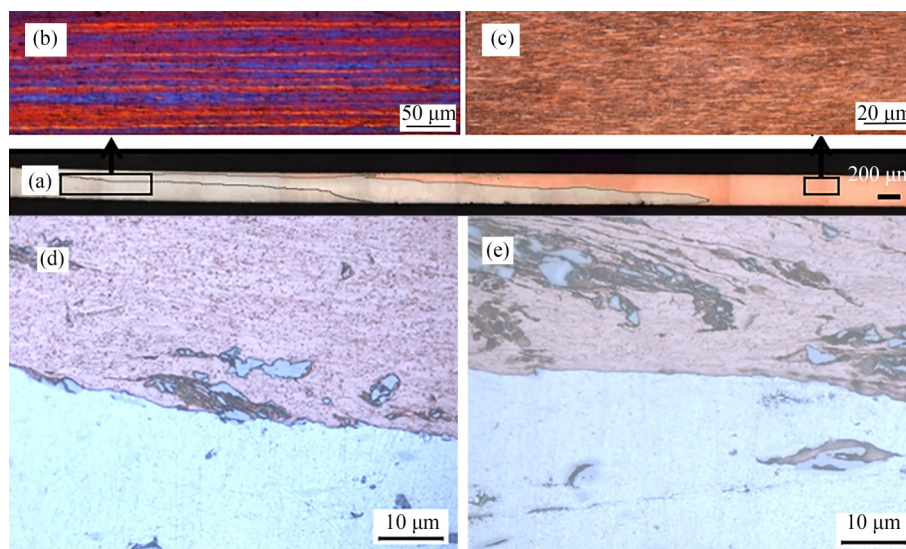
如图4所示,经过冷轧处理后,接头的整体厚度从3 mm显著减薄至0.3 mm。轧制后的表面呈现出光亮的外观,且焊缝表面未出现裂纹等缺陷。铝/铜界面保持平直且清晰可辨。由于焊缝的拘束效应以及金属的各向异性,焊缝在纵向方向上出现了不均匀变形,两端呈现出V型特征,焊缝区纵向延展性不如两侧母材。



图4 焊后冷轧接头表面照片

Fig. 4 Surface morphology of post-weld cold-rolled joint

如图5a所示,焊核区的形状发生了显著变化,由小角度镶嵌结构转变为大角度镶嵌结构,铝/铜界面变得更加平直且清晰,与板平面的夹角显著减小。如图5b、5c所示,由于在厚度方向上经历了较



(a-b)界面两侧母材组织;(c)接头横截面;(d-e)界面局部放大

图5 冷轧接头微观金相观察

Fig. 5 Metallographic observation of cold-rolled joint

大的轧制变形,两侧母材均形成了带状组织。经过轧制处理后,如图5d、5e所示,Cu基体中分布的Al带状结构与界面分离,这表明在冷轧过程中界面受到了剪切力的作用,导致Al带状结构与界面断开。Al-Cu界面变得尖锐,且界面处的Al基质被刮削并转移到Cu侧基体中。在剪切应力的作用下,Al带状结构断裂后转移到靠近界面的Cu基体中。

2.1.3 焊后冷轧对接头界面IMC的影响

图6为焊态接头与冷轧接头界面SEM对比照片。对比图6a、6b可以看出,与焊态接头相比,冷轧制后接头的界面微观结构发生了显著变化。焊态接头中界面处IMC层相对完整、连续;而经轧制变形后,焊缝处原本连续的Al/Cu界面不再保持其原有的连续分布状态,界面区域出现了明显的结构不连续性,表现为大量孔洞和微裂纹。

产生这一现象的原因在于:Al/Cu界面处的IMC层为脆性相,硬度高、塑性极低,难以与两侧具有良好塑性的铝基体和铜基体实现协调一致的塑性变形。在轧制施加的宏观塑性变形过程中,当两侧基体材料发生显著塑性流动时,界面处脆而硬的IMC层因无法承受由此产生的应力集中而发生断裂破碎。随着变形的持续进行,IMC层的完整性遭到破坏,原本连续的界面逐渐演变为不连续分布。与此同时,IMC层的断裂在界面处诱发了一系列微

裂纹的萌生,这些微裂纹不仅局限于界面本身,部分裂纹还在应力的进一步作用下向铜侧基体内部扩展延伸,形成更为严重的损伤形态。

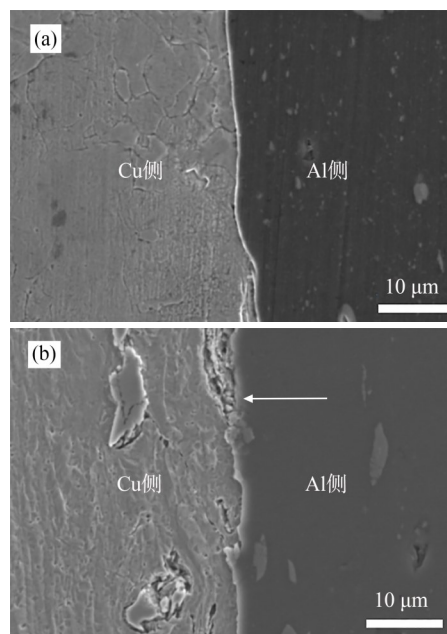


图6 铝-铜异质焊态接头与焊后冷轧接头界面SEM照片

Fig. 6 SEM images of the interface in Al-Cu heterogeneous as-welded joint and post-weld cold-rolled joint

2.2 焊后冷轧对接头力学性能的影响

2.2.1 显微硬度分布

图7为焊态接头沿焊缝横截面中心的显微硬度分布曲线。焊态接头的硬度分布存在明显的性能

梯度特征为:铜母材区的硬度高于焊核区,而焊核区的硬度又高于铝母材区。在焊核区内,存在离散分布的高硬度点,这些高硬度点是由界面处的脆性IMC层所致。整个焊缝横截面呈现出两个明显的硬度软化区,分别位于铝侧和铜侧的热影响区。

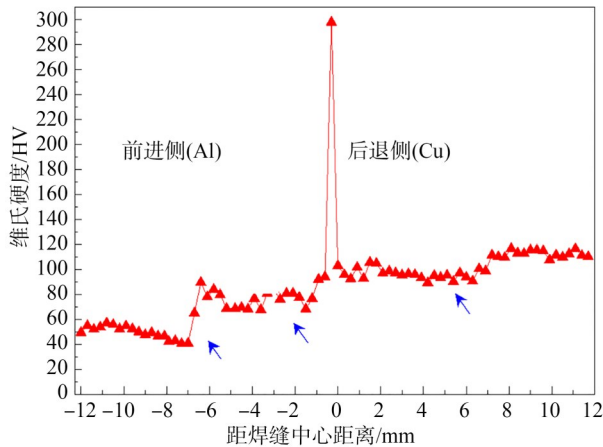


图7 焊态接头焊缝横截面显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution across the weld cross-section of the as-welded joint

如图8所示,经过冷轧处理,接头横截面的硬度分布呈现出铝侧较低、铜侧较高,以及界面处离散分布并逐渐过渡的总体特征。接头各区域的硬度均有所提高,其主要原因包括:冷轧引起的塑性变形导致位错密度增加,晶粒细化产生的强化效应,以及IMC分布优化所引发的二次强化效应。

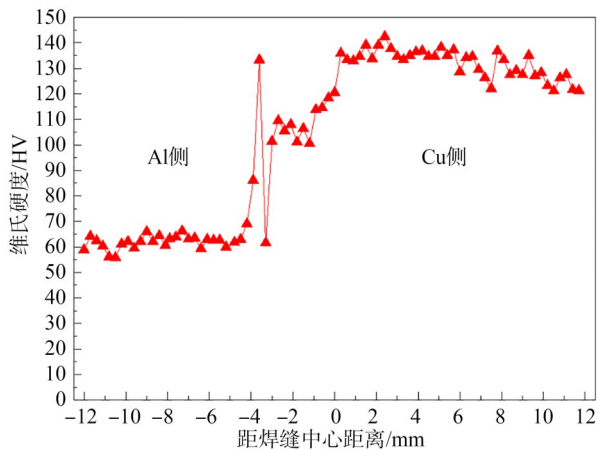


图8 焊后冷轧接头焊缝横截面显微硬度分布

Fig. 8 Microhardness distribution across the weld cross-section of the post-weld cold-rolled joint

2.2.2 拉伸性能与断裂行为

图9为母材与接头的拉伸性能对比。焊态接头的抗拉强度为80 MPa,分别为铝母材的74.5%,延

伸率仅为铝母材的14.3%,表明其塑性较差。经过冷轧处理后,接头的抗拉强度大幅提升至385 MPa,分别较铝母材、铜母材和焊态接头提高了279 MPa、158 MPa和305 MPa。然而,由于焊后冷轧过程中接头发生了加工硬化,消耗了焊缝中储备的塑性,冷轧接头的延伸率仅为0.95%,与焊态接头相近。冷轧接头强度的大幅提升可从以下方面解释:冷轧引发剧烈的加工硬化,使焊缝区产生高密度位错缠结,显著增大变形抗力;同时,冷轧的塑性变形能有效抑制并减薄界面处脆性IMC层,优化其形态与分布。

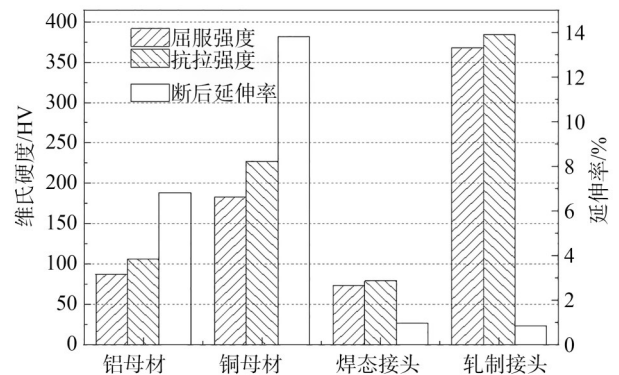


图9 母材、接头拉伸性能对比

Fig. 9 Comparison of tensile properties between base material and joint

图10为接头的拉伸断裂位置。焊态接头的断裂位置位于铝-铜界面,属于典型的界面脆性断裂,原因是界面处连续分布的IMC层在拉伸应力作用下优先开裂并迅速扩展。经冷轧处理后,断裂位置由铝-铜界面转移至铝侧母材。这表明:一方面,IMC层的断裂破碎消除了界面处的应力集中源,使

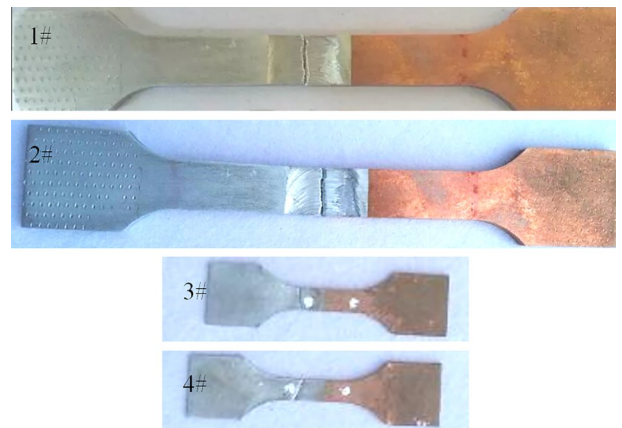


图10 接头拉伸断裂位置

Fig. 10 Tensile fracture location of the joint

界面承载能力得到改善;另一方面,冷轧引起的加工硬化使铝侧基体强度提升幅度大于界面结合强度的提升幅度,最终断裂发生在铝侧。

3 结论

(1)焊后冷轧使 3 mm 厚 Al-Cu FSW 接头发生显著塑性变形,厚度减薄至 0.3 mm。轧制变形导致界面处原本连续分布的脆性 IMC 层发生断裂破碎,转变为不连续的碎片状分布,并在界面区域诱发了微裂纹和孔洞。

(2)冷轧处理通过形变强化、晶粒细化及 IMC 分布优化,显著提升了接头各区域的显微硬度。接头的抗拉强度由焊态的 80 MPa 大幅提升至 385 MPa,增幅达 381%。断裂位置由焊态的铝-铜界面脆性断裂转变为冷轧后的铝侧断裂,表明界面承载能力得到显著改善。

(3)冷轧后接头延伸率仅为 0.95%,与焊态相近,表明剧烈冷轧变形使材料塑性储备基本耗尽。实际应用中需权衡强度提升与塑性损失之间的关系。

参考文献:

- [1] Das J, Sahu P K. Influence of tool positions variation on axial force, torque sensitivity, mechanical and microstructure properties of Al/Cu dissimilar FSW[J]. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2025, 11(1):299-319.
- [2] Habba M I A, Ahmed M M Z. Friction stir welding of dissimilar aluminum and copper alloys: A review of strategies for enhancing joint quality[J]. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2025, 11:100293.
- [3] 尤佳庆. Al-Cu 动静轴肩搅拌摩擦焊接头组织性能调控机理[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.
YOU J Q. Regulation Mechanism of Microstructure and Properties in Al-Cu Stationary Shoulder Friction Stir Welded Joints[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [4] 刘鑫. 铝/铜异种材料搅拌摩擦焊成形控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
LIU X. Study on Shape and Property Control in Friction Stir Welding of Aluminum/Copper Dissimilar Materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [5] Zhao Y, You J, Qin J, et al. Stationary shoulder friction stir welding of Al-Cu dissimilar materials and its mechanism for improving the microstructures and mechanical properties of joint [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 837:142754.
- [6] You J, Zhao Y, Dong C, et al. Improving the microstructure and mechanical properties of Al-Cu dissimilar joints by ultrasonic dynamic-stationary shoulder friction stir welding [J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2023, 311:117812.
- [7] 周立成,冯志军,谢广明,等. 水下搅拌摩擦焊对铝/铜接头组织与性能的影响[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(3):97-104.
ZHOU L C, FENG Z J, XIE G M, et al. Effect of Underwater Friction Stir Welding on Microstructure and Properties of Aluminum/Copper Joints [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2023, 15(3):97-104.
- [8] 王盈辉,王快社,王文,等. 转速对铝铜异种材料水下搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. *材料工程*, 2019, 47(11):155-162.
WANG Y H, WANG K S, WANG W, et al. Effect of Rotation Speed on Microstructure and Properties of Aluminum-Copper Dissimilar Materials Underwater Friction Stir Welded Joint [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(11):155-162.
- [9] Tang J, Shi L, Wu C, et al. Ultrasonic vibration enables the in-situ control of microstructure and mechanical properties of Al/Cu dissimilar friction stir welded joint [J]. *Transactions of Materials Research*, 2025, 1(2):100018.
- [10] Shi L, Wu C S, Liu X C. Modeling the effects of ultrasonic vibration on friction stir welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 222:91-102.
- [11] 赵庆桢. 铝/铜异质合金超声振动强化搅拌摩擦焊接过程与接头组织性能研究[D]. 济南:山东大学, 2022.
ZHAO Q Z. Study on Ultrasonic Vibration Enhanced Friction Stir Welding Process and Joint Microstructure/Properties of Aluminum/Copper Heterogeneous Alloys [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [12] Thounaojam A, Sahadevan A, Krishnalal M S, et al. Studies on impact of magnesium (Mg) interlayers on dissimilar friction stir welding of aluminum and copper [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2025, 78(5):120.