

7075-T6 铝合金和低碳钢搅拌摩擦焊界面微结构特征

黄耀光^{1,2,3} 陆文怡¹ 阮尚载¹ 李梅珠¹

(1. 百色学院材料科学与工程学院, 百色 533000; 2. 百色学院广西生态铝绿色制造重点实验室, 百色 533000; 3. 百色学院生态铝产业学院, 百色 533000)

摘 要 研究了 3 mm 厚 7075-T6 铝合金与低碳钢的搅拌摩擦焊接工艺及其界面特性。采用硬质合金搅拌头, 主轴转速为 1 000 r/min, 焊接进给速度为 20 mm/min, 轴肩下压量为 0.2 mm, 搅拌针插入钢板深度为 0.1 mm。采用扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)观察了焊接界面的微观结构和 Al、Fe 元素扩散规律, 发现 Al 和 Fe 在界面处发生互扩散, 界面处形成了钩状结构和细小的钢颗粒嵌入铝基体的混合层, 提高了界面处硬度, 形成脆性带, 界面处的显微硬度(HV)高达 416.69, 显著高于母材基体硬度。断裂主要发生在铝钢界面, 起始于铝基体侧, 部分铝材料粘附于钢表面。钢侧为韧脆混合断裂, 铝侧呈现脆性断裂特征。

关键词 搅拌摩擦焊(FSW); 铝合金; 低碳钢; 界面微观结构; 断裂行为

中图分类号 TG456.9; TG146.21

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250064

Microstructural Characteristics of Friction Stir Welding Interface Between 7075-T6 Aluminum Alloy and Low Carbon Steel

HUANG Yaoguang^{1,2,3}, LU Wenyi¹, RUAN Shangzai¹, LI Meizhu¹

(1. Material Science and Engineering School, Baise University, Baise 533000; 2. Guangxi Key Laboratory of Green Manufacturing for Ecological Aluminum Industry, Baise University, Baise 533000; 3. College of Ecological Aluminum Industry, Baise University, Baise 533000)

Abstract: Friction stir welding (FSW) process and interfacial characteristics of 7075-T6 aluminum alloy with 3 mm thickness and low carbon steel were investigated. A cemented carbide stirring tool was employed with spindle speed of 1 000 r/min, welding feed rate of 20 mm/min, shoulder plunge depth of 0.2 mm, and pin insertion depth into steel plate of 0.1 mm. The microstructure of welding interface and diffusion behavior of Al and Fe were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive spectroscopy (EDS). The results reveal that Al and Fe undergo inter-diffusion at the interface to form a hook-like structure and a mixed layer where fine steel particles are embedded in the aluminum matrix, enhancing hardness at the interface and forming a brittle zone with a microhardness up to 416.69 HV, which is significantly higher than that of base matrix. Fracture predominantly occurs at Al-steel interface, which initiates from Al matrix side with partial Al adhering to the steel surface. The steel side is characterized by mixed ductile-brittle fracture, while aluminum side displays brittle fracture.

Key Words: Friction Stir Welding (FSW), Aluminum Alloy, Low Carbon Steel, Interface Microstructure, Fracture Behavior

随着航空航天、汽车制造和船舶工程等领域对轻量化和高性能结构件的需求不断增加, 铝/钢异种金属复合材料的应用日益广泛^[1-2]。其中, 7075 铝合金因其高强度和良好的抗疲劳性能, 常被用于关键结构部件, 而低碳钢则以其优异的韧度和较低的成本被广泛使用^[3]。将两者通过焊接技术连接起来, 能够充分发挥各自的优点, 实现结构的轻量化与高性能化。然而, 由于

铝和钢在物理化学性质上的巨大差异, 如熔点、热导率、线膨胀系数以及化学活性等, 传统的熔焊方法在焊接过程中容易产生脆性金属间化合物(IMC), 导致焊接接头的力学性能显著下降, 难以满足实际工程应用的需求^[4-5]。

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)作为一种固相连接技术, 因其低热输入、焊接变形小、无熔化等

收稿日期: 2025-02-16; 修订日期: 2025-04-07

基金项目: 百色市科学研究与技术开发计划资助项目(百科 20230560); 大学生创新创业训练计划资助项目(202410609067)

第一作者: 黄耀光, 男, 1979 年出生, 副教授, E-mail: 269942601@qq.com

引用格式: 黄耀光, 陆文怡, 阮尚载, 等. 7075-T6 铝合金和低碳钢搅拌摩擦焊界面微结构特征[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(6): 933-938.

HUANG Y G, LU W Y, RUAN S Z, et al. Microstructural characteristics of friction stir welding interface between 7075-T6 aluminum alloy and low carbon steel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 933-938.

特点,为解决铝/钢异种金属焊接难题提供了新的途径。在搅拌摩擦焊过程中,焊接参数如搅拌头转速、焊接速度以及轴向力等对焊接接头的微观结构和性能有着重要影响^[6-8]。KIMAPONG K等^[9]发现,提高工具转速会降低接头的抗拉强度,搅拌头转速的增加会导致焊接热输入的增加,从而影响金属间化合物的形成和分布。焊接速度对宏观形貌影响较大,焊速较低时,焊核处无孔洞缺陷,焊接速度较高时,焊核处出现了隧道式孔洞,且搅拌工具倾角对工艺参数窗口和冶金结合强度有重要影响^[10-11]。韩世伟等^[12]研究表明,搅拌头结构对铝/钢搅拌摩擦焊接头的组织和性能有重要影响,优化搅拌头结构可以显著提高焊接接头的质量和性能。莫淑娴等^[13]研究表明,搅拌头偏移量越大(搅拌针偏钢侧),接头两种母材的相互扩散越充分;热输入量越高,界面过渡区也就越厚。刘涛等^[14]发现附加超声能量能显著改善焊缝表面成形,细化晶粒组织,提高接头的力学性能。申志康等^[15]利用镀锌层作为中间层,避免了铝和钢的直接接触,显著提高了接头的力学性能和疲劳性能。然而,由于焊接过程中热量输入、搅拌头设计和焊接参数等因素的复杂性,搅拌摩擦焊异种金属接头的微观结构和性能仍存在许多需要深入研究的问题。

目前,关于搅拌摩擦焊异种金属接头的研究主要集中在焊接工艺参数的优化、微观结构的表征以及力学性能的测试等方面。对于 7075-T6 铝合金与低碳钢搅拌摩擦焊接头界面微观结构的形成机制和演变规律的研究仍相对较少。因此,深入研究 7075-T6 铝合金与低碳钢搅拌摩擦焊接头界面的微观结构特征,对于优化焊接工艺参数、提高焊接接头的力学性能和可靠性具有重要的理论和实际意义。

本研究旨在通过系统地对 7075-T6 铝合金和低碳钢的铝钢界面微观结构的研究,探索焊接过程中界面 Al 和 Fe 元素扩散规律,分析铝钢异种材料接头的硬度分布和断裂行为,旨在为轻量化结构设计提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为 7075-T6 铝合金与低碳钢板,其成分分别见表 1 和表 2。两种材料试板尺寸均为 300 mm×100 mm×3 mm,焊接长度为 100 mm,采用 T-XJ16-1510-05 型静龙门搅拌摩擦焊机,搅拌头材料为硬质合金。搅拌头的轴肩直径为 16 mm,轴针小端直径为 5 mm,针长为 2.9 mm。焊接工艺参数:主轴转速为 1 000 r/min,焊接进给速度为 20 mm/min,轴肩下压量为 0.2 mm,搅拌针插入钢板深度为 0.1 mm。焊接采用搭接方式,7075-T6 铝板在上,低碳钢板在下,见图 1。

焊前分别用丙酮溶液对铝板和钢板进行清洗,去除表面杂质和油污,在装夹时需要在试样板材下放置垫板,保证板材放置平整,用夹具夹紧。

表 1 铝合金 7075-T6 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 7075-T6 aluminum alloy %

w_B								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.139	0.291	1.383	0.092	2.525	0.208	5.776	0.043	余量

表 2 低碳钢的化学成分

Tab.2 Chemical composition of low carbon steel %

w_B					
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.081	0.031	0.167	0.278	0.02	余量

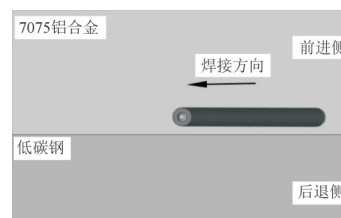


图 1 铝钢搭接焊示意图

Fig.1 Schematic diagram of aluminum-steel overlap welding

焊接完成后用电火花线切割沿垂直于焊缝方向截取焊接接头金相试样和拉伸试样,金相试样尺寸为 25 mm×30 mm×6 mm,经研磨、抛光后,采用日立 SU5000 热场发射扫描电镜观察铝钢结合界面形貌及拉伸断口形貌。采用 HVT-1000 型数字式显微硬度计检测显微硬度,载荷为 100 N,加载时间为 15 s;断口扫描电镜观察采用日立 SU5000 热场发射扫描电镜;力学性能测试采用 Wance ETM1015D 微机控制电子万能试验机,拉伸试样由两块厚度为 3 mm 的板材铝和钢搭接而成,总长度为 160 mm,试样平行段宽度为 12.5 mm,平行长度 60 mm,原始标距 35 mm,拉伸速率为 2 mm/min,垂直于焊接方向施加载荷,为保证载荷方向与搭接界面平行,在拉伸试样两端夹持处放置侧垫板。

2 试验结果分析

2.1 界面形貌

图 2 为 7075-T6 铝合金/低碳钢搅拌摩擦焊焊缝界面背散射电子成像图,可见铝/钢接头有效连接,结合区上宽下窄,呈碗形。在搅拌摩擦焊接过程中,钢铝混合的过程复杂。当搅拌针插入钢板时,产生的摩擦热使钢侧部分达到热塑化状态。同时搅拌针的高速旋转施加了巨大的搅拌力,对钢侧材料进行剧烈的剪切和

挤压。在高速搅拌过程中,搅拌针的旋转和进给方向力促使钢材中的微小颗粒进行激烈的搅拌,未热塑化的钢母材在激烈的搅拌作用下,部分被破碎成更加细小的碎片或颗粒,这些大小不均匀的钢碎片被嵌入到了铝侧基体中,和铝基体形成良好的混合。钢碎片在靠近界面的区域比较密集,因为在焊接初期,热量主要集中在钢与铝的接触区域,此外温度较高,促使更多的钢颗粒与铝基体更好地结合,形成了较为明显的界面层。远离焊接界面的区域,随着搅拌针剪切作用的逐渐减弱,钢碎片的分布也变得越来越稀疏,直至最终逐渐消失^[16]。在铝/钢连接界面两侧形成钩状结构机械结合特征,当受到热机循环的作用,钢侧部分金属被软化,发生了塑性流动,在轴肩和搅拌针的旋转作用下,被挤出的塑性钢侧材料在钢铝搭接焊接头的界面处向铝侧基体插入,在前进侧(AS)和后退侧(RS)形成了飞边,形成钩状结构^[17]。刑丽等^[18]认为这种钩状结构能提高接头抗剪切性能。

图3为焊缝界面微观组织。可以看出,铝/钢接头界面流动存在平流状结构和涡流状结构。在焊接过程中,各区材料的塑性流动不同。后退侧区域受到搅拌

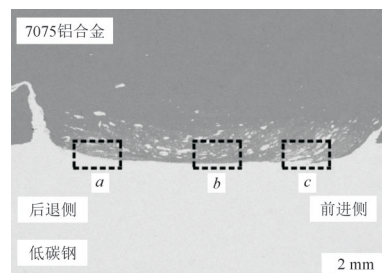


图2 铝/钢搅拌摩擦焊焊缝界面形貌

Fig.2 Interfacial morphology of aluminum/steel friction stir weld joint

针水平方向旋转牵引力和底部材料向左侧挤出力的综合影响,由于旋转牵引力与材料向左侧挤出力方向相反,造成塑性流动受阻,产生涡流状结构,流动性差。焊缝界面中心、前进侧呈平流状结构。在搅拌针底部端面的热机作用下,铝侧界面中心主要受到搅拌针水平方向旋转牵引力影响,铝层和钢层分层明显,层层交错,水平向前进侧方向塑性流动,流动性好。前进侧受到搅拌针水平方向旋转牵引力和底部材料向右侧挤出力的合力影响,以一定角度向前进侧方向流动,产生平流状结构。

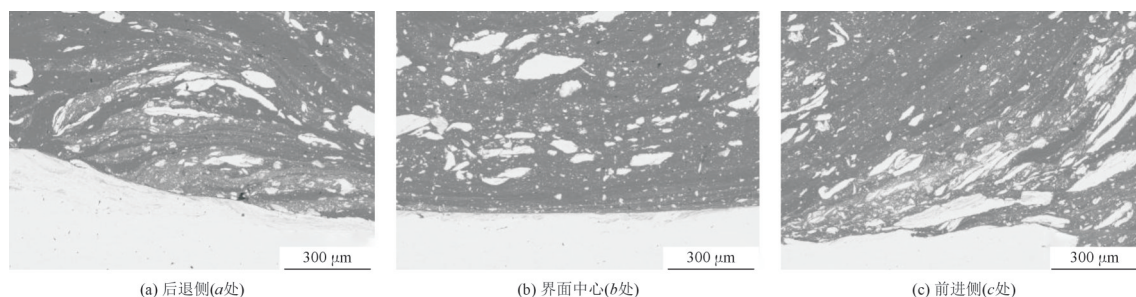


图3 焊缝界面微观组织图(图2中不同位置)

Fig.3 Microstructure at the joint interface

2.2 界面元素分析

图4为7075-T6铝合金与低碳钢结合界面后退侧、界面中心、前进侧的Al、Fe元素线扫描图。可以看出,后退侧、前进侧界面存在明显的铝合金与低碳钢界限,界限清晰。而界面中心则存在明显的铝钢混合层,从图4c中可观察到有很多细小的钢颗粒均匀分散在钢铝混合层内,铝基体中钢增强颗粒之间的间距很小,钢增强颗粒含量高,能显著提高界面处硬度,形成脆性带。

在搅拌摩擦焊接过程中,7075-T6铝合金与低碳钢在高温、高挤压力的作用下,由于原子间的热运动和元素浓度梯度的影响,两者之间的元素可能会发生相互扩散。铝合金中的Al、Mg、Zn等元素可能会渗透到低碳钢的基体中,而低碳钢中的Fe、C等元素也可能扩散

到铝合金中去。这种元素的相互扩散不仅会影响两种材料的原始化学成分和微观结构,还可能导致界面区域出现新的化合物或相,从而进一步影响材料的力学性能、耐腐蚀性能和焊接性能等。由于搅拌针和钢之间产生了局部过热,搅拌作用为Al和Fe之间提供了短行程的扩散路径。为了进一步分析界面层的元素浓度梯度变化情况,对铝钢结合界面进行EDS线扫描。在界面附近Al和Fe含量呈相反的浓度梯度变化。在图4a接合处的界面上,从图4b可见Al元素浓度梯度快速上升,Fe元素浓度梯度快速下降,浓度梯度曲线快速相交,斜率陡峭,扩散速率高,而扩散距离很短,约为2 μm,说明Al和Fe在合金中发生了互扩散,但Al和Fe元素相互扩散率低,扩散不充分,因此没有观察到IMCs层。图4f中Al和Fe的元素浓度梯度变化曲线也是类似的

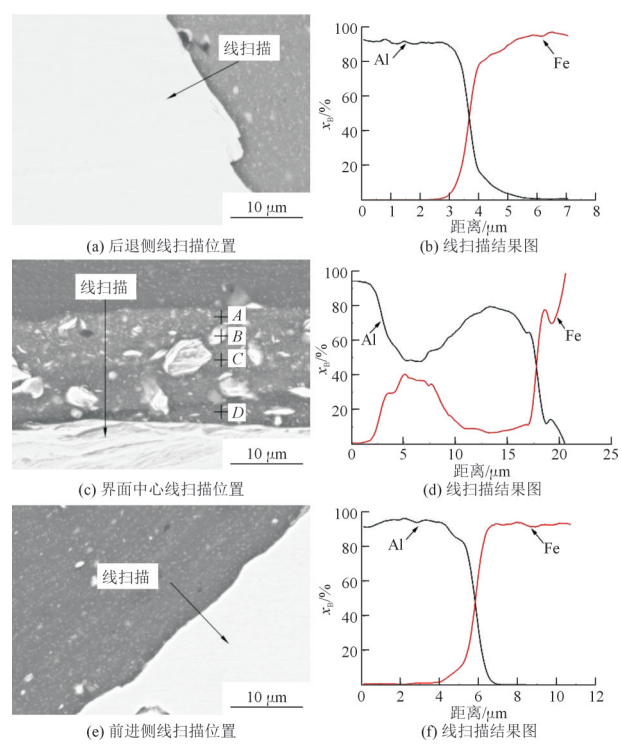


图4 界面处Al、Fe元素线扫描图

Fig.4 Linear scanning results of Al and Fe elements across the interface

梯度变化情况。由图4d可见,在靠近铝侧,Al元素浓度曲线快速下降,Fe元素浓度曲线快速上升,但是并没有相交,随后Al元素浓度曲线再次缓慢上升,Fe元素浓度曲线再次缓慢下降,呈喇叭口形状分散;在靠近钢侧,Al元素浓度曲线快速下降,Fe元素浓度曲线快速上升,两根曲线快速相交,整个扩散距离约为16.4 μm。Al和Fe元素浓度变化明显,这说明元素互扩散现象充分,可能形成铝钢金属间化合物。在铝钢IMCs中,Fe₂Al₅和FeAl₃的形成负焓最大,因此在铝钢界面具有较高的沉淀驱动力。为了观察IMCs的成分,在图4c不同位置进行EDS点分析,结果见表3。根据EDS定量数据并考虑到Al-Fe相图,Fe₂Al₅和FeAl₃很可能分别在铝钢界面上形成。通过计算Al和Fe元素的摩尔分数,大致推断出点A、D可能生成FeAl₃金属间化合物,点C可能生成Fe₂Al₅金属间化合物,点B的成分主要是Fe元素,推断为分散的钢颗粒。

表3 界面区各点的EDS分析

Tab.3 EDS analysis of selected points at the interface

位置	$x_B/\%$					相
	Fe	Al	Mg	Zn	Cu	
A	11.14	81.32	2.02	4.09	1.17	FeAl ₃
B	93.38	6.62	0	0	0	Fe
C	21.53	71.00	1.68	4.59	1.20	Fe ₂ Al ₅
D	14.29	78.29	1.98	4.32	1.11	FeAl ₃

对图4c进行EDS能谱面扫描分析,得到了Al、Fe、Mg、Zn、Cu等元素的分布图像,见图5。在铝基体中观察到分离的钢碎片是铝钢搅拌摩擦焊的常见现象。图5b中Al元素的面扫描图上有明显颜色梯度,图5c中Fe元素的面扫描图上也有明显颜色梯度,证实了Al和Fe元素相互扩散。从扫描结果可以清晰地看到在界面处Al、Mg、Zn、Cu等元素从铝合金侧向钢侧扩散,而Fe元素则从钢侧向铝侧扩散。进一步分析发现,在界面处,Al元素的扩散深度相对较深,而Mg、Zn、Cu等元素的扩散深度则相对较浅。这可能与这些元素在两种材料中的扩散速率和反应活性有关。

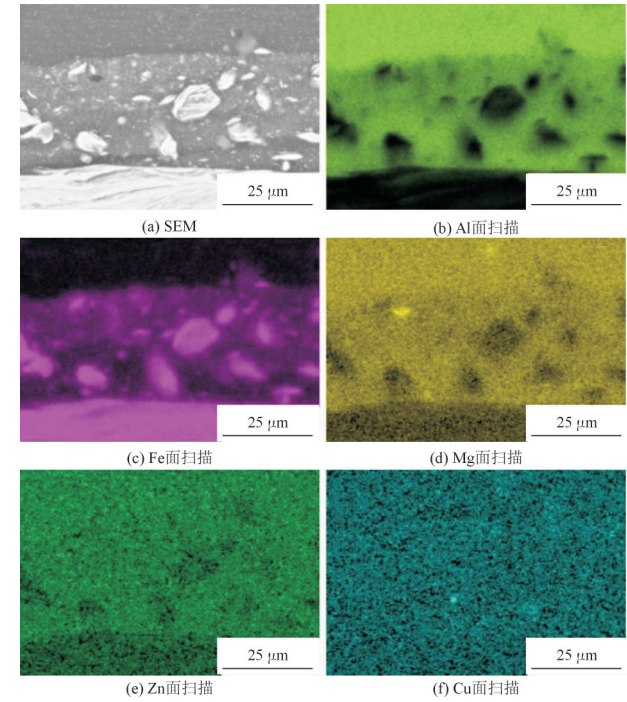


图5 焊缝界面中心铝钢混合层SEM形貌及元素面扫描图

Fig.5 SEM image and element mapping of Al-steel mixed layer at the center of welding interface

2.3 界面显微硬度

图6为7075-T6铝合金和低碳钢焊缝横向截面显微硬度。可以看出,从界面起向铝侧距离1 mm处的显微硬度分布曲线呈现出典型的“W”型特征,即硬度值在此范围内先减后增再减再增。值得注意的是,该“W”型曲线的中心区域(焊核区)硬度(HV)达到200.12,接近母材。最低点恰好位于焊接过程中的前进侧(热影响区),其显微硬度(HV)为134.39,热影响区的硬度相对较低。焊核区的材料在搅拌头的作用下发生剧烈的塑性流动和动态再结晶,晶粒细化,硬度增加。热影响区的材料虽然受到热影响,但流动程度较小,动态再结晶不充分,晶粒尺寸较大,硬度较低。铝

钢界面处显微硬度曲线见图6c,硬度分布曲线呈“几”字形特征,越靠近界面中心显微硬度越高,铝钢接头界面显微硬度(HV)远高于其他界面区域,最高值为416.69。界面上细碎的钢颗粒起到硬度强化作用,在界面处可能有硬的金属间化合物产生。接触界面中心流动性最好,钢铝搅拌最充分,搅拌针剧烈地机械搅拌,钢颗粒被破碎细化,界面处的钢颗粒达到几个 μm ,甚至是几百nm,这种微小的钢颗粒沉积在铝侧基体界面处,密集分布,使得界面处硬度显著提高。图6d为从界

面起向钢侧距离0.3 mm处的显微硬度变化趋势,硬度分布曲线呈现“尖顶”型特征,在靠近界面中心的位置显微硬度值快速上升,然后又急速下降,最高显微硬度(HV)达到364.36,远高于钢侧母材显微硬度(HV)值160.00。在搅拌过程中,搅拌针的旋转和前进运动使得钢侧的晶粒结构受到强烈的剪切和破碎,从而实现了晶粒的细化。由于晶粒细化导致的晶界增多,增加了位错运动的障碍,从而提高了靠近界面钢侧材料的硬度。

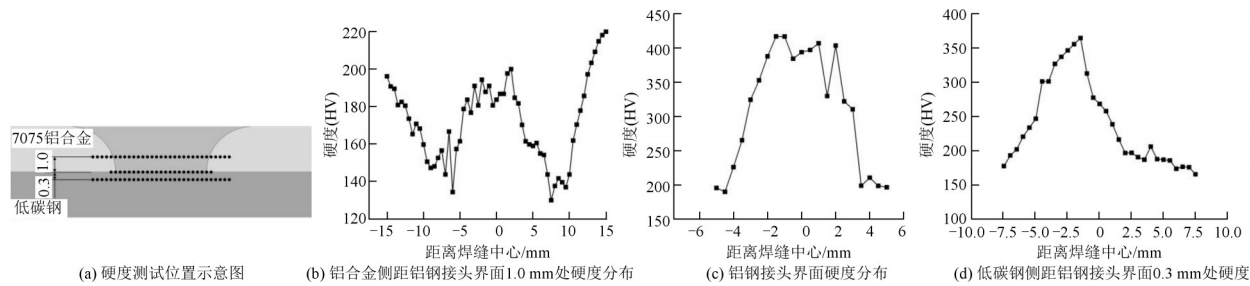


图6 界面显微硬度图

Fig.6 Microhardness of interface

2.4 断口分析

对7075-T6铝合金和低碳钢接头焊缝进行拉伸试验,结果见图7,拉伸断口形貌见图8和图9。从图8a中可观察断裂发生在铝钢搭接界面处,从图8b观察到有部分铝材料粘附在钢表面,这一现象说明断裂过程最初是在铝基体侧开始的。这种铝层的粘附可能是由于在断裂过程中,铝材料的塑性较好,导致在断裂发生时铝材料被拉出并附着在钢表面。从图9a可以观察到断口以解理面结构为主,同时发现局部位置有浅显韧窝状坑洞和撕裂棱,带有少量韧性断裂特征,断裂形式为韧脆混合断裂。由图9b可知,铝侧断口呈现出明显的河流状脆性断裂特性,其特征表现为弯曲的条带状结构,类似于河流状图案,主要断裂形式为脆性断裂。根据上述现象可以推断出断裂过程是由铝基体侧开始,随后在铝钢搭接界面处扩展,最终导致整个试样的断裂。

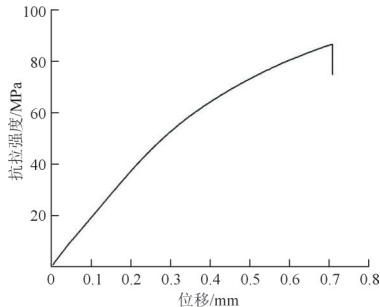


图7 拉伸试验抗拉强度-位移曲线图

Fig.7 Tensile strength-displacement curves for tensile test

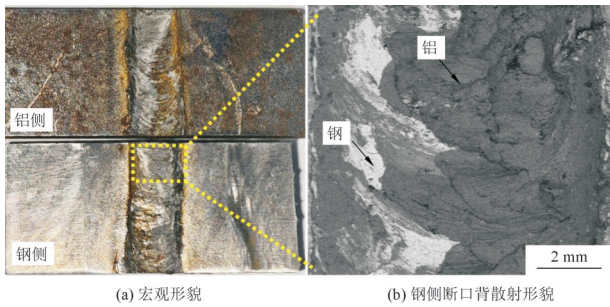


图8 拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphologies

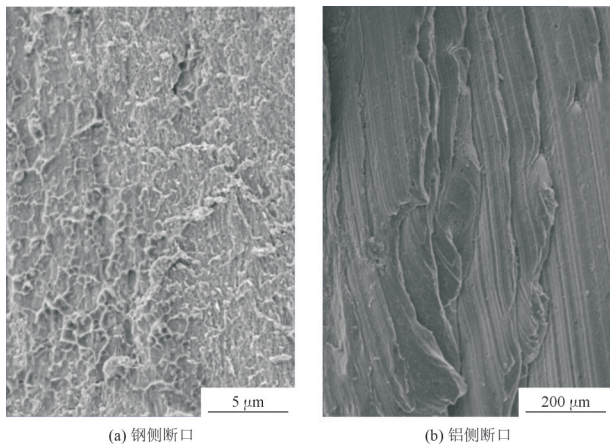


图9 拉伸断口SEM图

Fig.9 SEM images of tensile fracture

3 结 论

(1)7075-T6铝合金与低碳钢的焊接接头在界面处形成了有效连接,界面形貌呈碗形,形状上宽下窄。铝

钢焊核区内,钢以碎片或颗粒的形式嵌入铝基体中。钢碎片在界面附近密集分布,远离界面则逐渐稀疏。搅拌针将钢表层带入铝基体,在前进侧及后退侧形成钩状结构,钩状结构能增强机械结合。铝侧焊核区中心底部和前进侧底部的塑性流动呈现平流状结构,而后退侧底部则因搅拌针牵引力与材料挤出力方向相反而形成涡流状结构,流动性较差。

(2)在铝钢接头界面中心位置产生界面层,界面层内钢增强颗粒之间的间距很小,钢增强颗粒含量高,能显著提高界面处硬度,形成脆性带,界面处的显微硬度(HV)高达416.69,显著高于母材基体硬度。

(3)通过EDS线扫描和点分析,发现Al和Fe元素在界面处发生了明显的相互扩散,形成了金属间化合物(IMCs)。界面中心区域的扩散现象更为显著,扩散距离可达16.4 μm 。根据EDS分析结果,推测在铝钢界面上可能形成了 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 等金属间化合物。

(4)铝钢断口观察到断裂起始于铝基体侧,有部分铝材料粘附于钢表面。断裂过程是由铝基体侧开始,随后在铝钢搭接界面处扩展,最终导致整个试样的断裂。钢侧主要断裂形式为韧脆混合断裂,而铝侧主要断裂形式为脆性断裂。

参 考 文 献

- [1] BEYGI R, CARBAS R, QUEIROS A, et al. Comparative study between stainless steel and carbon steel during dissimilar friction stir welding with aluminum: Kinetics of Al-Fe intermetallic growth[J]. Metals and Materials International, 2022, 28: 1 948-1 959.
- [2] REZA-E-RABBY M, ROSS K, OVERMAN N R, et al. Joining thick section aluminum to steel with suppressed FeAl intermetallic formation via friction stir dovetailing[J]. Scripta Materialia, 2018, 148: 63-67.
- [3] JOSHANI E, BEIDOKHTI B, DAVODI A, et al. Evaluation of dissimilar 7075 aluminum/AISI 304 stainless steel joints using friction stir welding[J]. Journal of Alloys and Metallurgical Systems, 2023, 3: 100 017.
- [4] NGUYEN T-D, SINGH C, KIM Y S, et al. Mechanical properties of base metal and heat-affected zone in friction-stir-welded AA6061-T6 at ultra-low temperature of 20 K[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31: 1 547-1 556.
- [5] SALEH M, MORISADA Y, USHIODA K, et al. Improvement of weldability and fracture behavior of mild steel and A7075 aluminum alloy dissimilar friction stir welded joints by increasing welding speed[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107 372.
- [6] 韩亚洲,刘骞,黎帮金,等.转速对5A06铝/1Cr18Ni9Ti钢填丝搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响[J].航天制造技术,2023(4): 40-45.
- [7] 孔德凝,林健,雷永平,等.铝/钢FSW接头界面层组织和力学性能的研究[J].热加工工艺,2013,42(19): 185-188.
- [8] 马潇天,闫德俊,孟祥晨,等.铝/钢搅拌摩擦焊金属间化合物调

控研究进展[J].焊接学报,2020,41(7): 1-11,97.

- [9] KIMAPONG K, WATANABE T. Lap joint of A5083 aluminum alloy and SS400 steel by friction stir welding[J]. Materials Transactions, 2005, 46(4): 835-841.
- [10] 罗璟玥,周咏琦,刘小超,等.5083铝合金与304不锈钢异种材料涡流搅拌摩擦搭接焊工艺研究[J].电焊机,2023,53(3): 62-71.
- [11] 钟万亮,徐萌,罗展,等.旋转速度对铝/钢填丝搅拌摩擦焊接头性能的影响[J].电焊机,2022,52(5): 33-39.
- [12] 韩世伟,周长征,彭小洋,等.搅拌头结构对铝/钢搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(4): 151-156.
- [13] 莫淑娴,朱浩,姜月,等.偏移量对铝钢异种金属搅拌摩擦焊接头微观组织及力学性能的影响[J].热加工工艺,2020,49(1): 123-127.
- [14] 刘涛,高嵩,肖光春,等.附加超声对6061-T6铝合金/Q235钢搅拌摩擦焊搭接工艺优化[J].焊接学报,2022,43(5): 69-75,117.
- [15] 申志康,王波,杨益,等.铝/钢搅拌摩擦钎焊连接机理及疲劳性能研究[J].机械工程学报,2024,60(22): 130-138.
- [16] 于明润,赵洪运,蒋智华,等.铝/黄铜异种金属搅拌摩擦焊搭接接头显微组织与力学性能[J].机械工程学报,2019,55(6): 39-45.
- [17] 张方元,侯方军,唐强,等.搅拌摩擦焊搭接hook缺陷研究现状[J].铝加工,2023(6): 3-6.
- [18] 邢丽,柯黎明,黄春平.铝合金与钢的搅拌摩擦焊焊缝成形及接头性能[J].焊接学报,2007(1): 29-32,114.

(编辑:栗万仲)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵,文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家最新研究成果)



特种铸造及有色合金杂志
(文章动态时刻关注)