

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.018

铝和不锈钢 FSW 对搭接接头界面结构及性能研究

徐海升 沈以赴 冯晓梅 陈文华

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,211106)

摘要:采用搅拌摩擦焊接方法,设计了基于“差高-偏置”的对搭接接头,对厚度为 4 mm 的 5A06 铝合金和厚度为 2 mm 的 316L 不锈钢进行了搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW)焊接试验。通过观察焊缝金相形貌发现,焊接界面光滑平整,没有形成 Hook 钩,在焊缝靠近界面位置形成了钢颗粒增强铝基复合组织和河流状花样组织结构。通过 SEM 观察,铝-钢之间形成了一层厚度约为 3 μm 的中间过渡层。显微硬度及拉伸测试结果表明,过渡层的显微硬度较高,接头的拉伸强度达到了铝合金母材强度的 89.7%。

关键词:搅拌摩擦焊接;铝/钢异种材料;对搭接接头

中图分类号: TG456.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)03-0436-04

Interface Structure and Properties on Friction Stir Welding Dissimilar Alloys Lap-Butt Joint of Aluminum and Stainless Steel

Xu Haisheng, Shen Yifu, Feng Xiaomei, Chen Wenhua

(College of Materials Science and Technology,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: 4 mm thick plates of 5A06 aluminum alloy and 2 mm thick plates of 316L stainless steel are successfully lap-butt jointed using friction stir welding (FSW). In order to solve the lack of penetration and hook problem, a lap-butt configuration is adopted based on the principle of "height difference-pin offset". The interface which exhibits characteristics of smoothness, no hook and incomplete penetration is found by observing the microstructure of the joint. There are steel particle reinforced aluminum matrix composite tissue structure and river pattern structures near the interface of the welds. Meanwhile, the element diffusion and the generation of intermetallic compound occur in the interfacial zone, and the thickness of the layer is about 3 μm . The microhardness value in the bonding interface reaches the maximum. The tensile strength of the joint reaches 89.7% of the aluminum alloy base metal strength.

Key words: friction stir welding(FSW); Al-Fe dissimilar materials; lap-butt joint

在轨道交通、船舶、航空航天等工业中,为了减轻重量以及满足使用要求,用铝合金来代替部分钢组成铝-钢复合结构成为越来越普遍的选择^[1-2]。但是,铝和钢存在较大的物理和化学性能差异:熔点和密度差异明显;热导率和热膨胀系数差别明显;焊缝中容易形成脆硬的铝-钢金属间化合物,容

易导致焊缝裂纹。因此,铝-钢之间的焊接问题一直是业内关注的热点和难点^[3]。

搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW)属固态连接技术^[4]。铝-钢 FSW 传统对接接头易在接头界面处出现过多的金属间化合物,并且在界面根部出现未焊透的缺陷或者 Hook 钩,这些都对焊

基金项目:国家自然科学基金(51475232)资助项目;江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目。

收稿日期: 2015-03-10; **修订日期:** 2015-04-19

通信作者: 沈以赴,男,教授,博士生导师, E-mail: yifushen@nuaa.edu.cn。

缝性能有不利影响。本文针对铝-钢异种金属的 FSW,基于“差高-偏置”原理设计了对搭接接头进行 FSW,可有效避免焊接过程中出现 Hook 钩和焊缝根部未焊透缺陷^[5-7]。

1 实验材料和方法

实验材料选择厚度分别为 2 mm 的 316L 不锈钢和 4 mm 的 5A06 铝合金板材,材料的化学成分分别如表 1,2 所示。焊接实验前将铝板和不锈钢板表面用砂纸打磨,然后用丙酮清洗表面油污,以避免表面氧化膜等对焊接质量产生不利影响。对搭接接头示意图如图 1(a)所示;搅拌头采用组合式结构,如图 1(b)所示,轴肩材料为镍基高温合金,直径为 16 mm,搅拌针为螺旋形,材料为 W-Co,直径为 4 mm。焊接时将不锈钢置于前进侧,即焊接方向与搅拌针旋转方向相同的一侧^[6]。经过焊接参数优化,搅拌头的转速为 1 200 r/min,焊速为 90 mm/min,搅拌针的前倾角为 0°,搅拌头轴肩相对于铝合金表面的下压量为 0.2 mm,搅拌针偏进钢一侧的偏置量为 0.2 mm 时可得到完整的焊接接头。焊后沿垂直于焊缝的方向取试样,并打磨抛光,经腐蚀后在光学显微镜观察金相组织。利用显微硬度计沿垂直于对接界面,在焊缝截面的上中下 3 个位置分别进行显微硬度测试。用扫描电镜观察焊缝焊接界面的微观组织结构,并用能谱仪分析接头的元素分布和含量。根据 GB/T2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》,制作接头拉伸试样,选取每种焊接参数在 WDW-1000 万能试验机上进行拉伸实验,拉伸速率为 0.5 mm/min。为了增加实验数据的准确性,选取 3 个样品进行拉伸然后取其平均值。拉伸后利用扫描电镜分析断口断裂形貌和断口中的元素分布。

表 1 316L 不锈钢化学成分(质量分数)

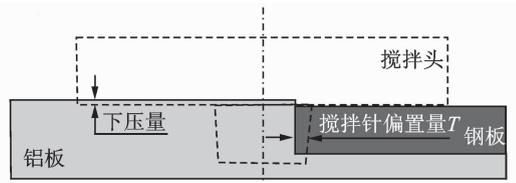
Tab.1 Chemical compositions of 316L stainless steel

材料 型号									%
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	S	P	S	Fe
316L	0.03	16~18	12~15	2.0~3.0	2.00	1.00	0.035	0.03	Bal

表 2 5A06 铝合金化学成分(质量分数)

Tab.2 Chemical compositions of 5A06 aluminum alloy

材料 型号								%
	Si	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Al	
5A06	0.40	0.10	0.5~0.8	5.8~6.8	0.02~0.10	0.2	Bal	



(a) 对搭接接头示意图



(b) 组合式搅拌头

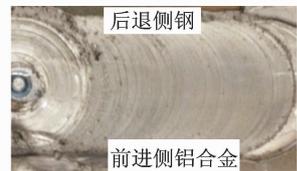
图 1 改进型对接接头示意图和组合式搅拌头

Fig.1 Schematic diagram of modified butt joint and compositional welding tool

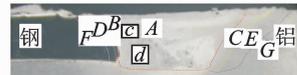
2 实验结果和分析

2.1 铝合金和不锈钢对接接头形貌分析

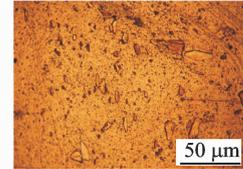
图 2 为搅拌头转速 $n=1\ 200\ r/min$,焊接速度 $v=90\ mm/min$,偏置量 $T=0.2\ mm$ 时的焊接接头的截面宏观形貌和局部区域放大图。由图 2 可知,在该工艺参数下,对搭接接头的表面完整,截面没有孔洞和裂纹等缺陷。对搭接焊接接头的组织



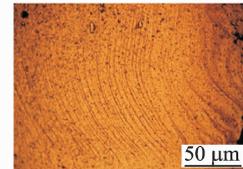
(a) 焊缝宏观形貌图



(b) 焊接接头截面宏观形貌图



(c) 图2(b)中c区域局部放大



(d) 图2(b)中d区域局部放大

图 2 焊接接头宏观截面图和局部区域放大图

Fig.2 Macro structure of welded joint of Al and Fe and partial enlarged detail

特点可以将接头分为:焊核区(A)、钢侧热机影响区(B)、铝侧热机影响区(C)、钢侧热影响区(D)、铝侧热影响区(E)、钢侧母材区(F)和铝侧母材区(G)等。图2(c,d)分别为图2(b)中c和d区域的局部放大图,由图2(b)可以看出,该区域富集较多的钢颗粒,形成了钢颗粒增强的铝基复合区域,这是因为在焊接过程中,在铣削式搅拌针的作用下,搅拌针铣削下来大量的钢颗粒,随着搅拌针的搅拌作用均匀弥散分布在焊缝近界面位置,形成了近界面增强层,提高了该部位的接头强度。从图2(d)可以看出该部分有典型的河流状流动花样,这是因为在搅拌针的搅拌作用下,焊缝区塑性状态的金属材料形成了连续的流动,最后形成了该区域的连续河流状流动花样。

2.2 焊接接头界面微观结构成分分析

使用扫描电镜和能谱仪对焊缝界面进行微观结构和成分进行分析,结果如图3所示。图3(a)为焊缝界面微观区域图,图中左侧(灰白色区域)是钢基体,右侧(深色区域)是焊核区的铝合金一侧,中间(浅灰色区域)是焊接界面处的中间过渡层。由此可以看出,焊缝界面结合良好,焊接界面中间过渡层致密均匀,没有微裂纹等缺陷;在近界面处的铝合金一侧有随机分布的钢颗粒。

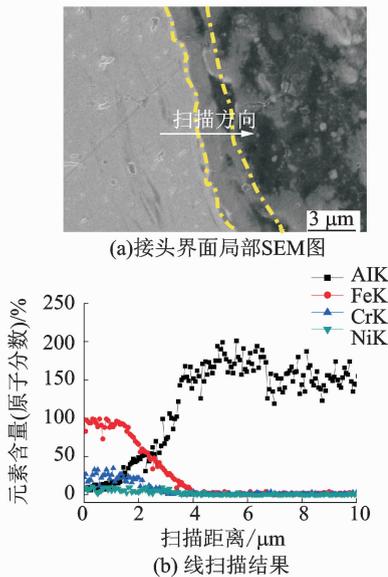


图3 焊缝接头界面微观区域扫描电镜图

Fig. 3 SEM of FSW weld between Al and Fe

对图3(a)的中部界面沿图中白色箭头方向进行扫描能谱分析,结果图3(b)所示。从图中可以看出,从左侧到右侧,中间有明显的元素成分梯度变化,形成了梯度分布的中间过渡层。该中间过渡层的存在说明了在焊缝界面处有明显的Al-Fe原

子的扩散、固溶和金属间化合物,铝-钢达到了良好的焊接冶金结合。

2.3 焊接接头显微硬度分析

图4为焊缝截面垂直于焊接面的显微硬度分布。由图可以发现,铝的显微硬度为55HV_{0.2}左右,靠近焊接搭接面位置的铝合金硬度呈缓慢上升的趋势,这是因为靠近焊接界面过渡层位置的铝合金在搅拌针的作用下组织较为均匀,致密。过渡层区域的最高硬度可达370HV_{0.2},明显高于不锈钢母材的220HV_{0.2},这是因为在过渡层区域内可生成金属间化合物增强相^[6,8]。

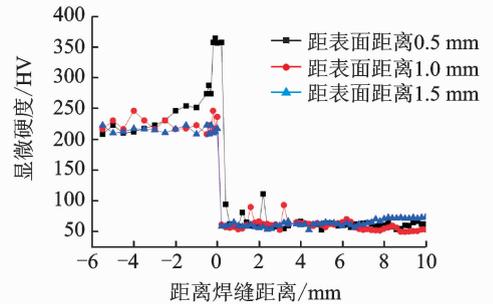


图4 焊缝显微硬度分布图

Fig. 4 Microhardness distribution across nugget

2.4 拉伸及断口分析

图5为焊接接头在搅拌头旋转速度为1 200 r/min,焊接速度为90 mm/min,搅拌针偏置量为0.2 mm时的对搭接接头,其拉伸强度为282.5 MPa,

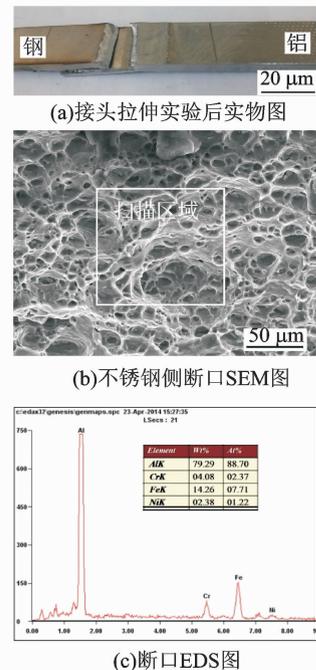


图5 拉伸试样断裂宏观形貌和断口SEM

Fig. 5 Macro structure of tensile sample and SEM of morphology fracture

达到了铝合金母材强度(315 MPa)的89.7%。分析认为原因主要有以下方面:首先,在焊接过程中,焊核区的铝合金和不锈钢发生了充分的搅拌混合作用,形成了钢颗粒增强铝基复合区域;其次,在焊接过程中,对接界面处生成了厚度均匀且较薄的中间过渡层,形成了铝-钢的金属间冶金结合;最后,在焊接过程中有效地避免了Hook钩的形成,避免了焊缝的应力集中现象的产生。

图5(a)为拉伸实验后断裂形貌。由图可以看出,断裂位置为焊缝靠近焊接界面的铝合金一侧。断口呈现典型的45°韧性断裂形貌^[9]。图5(b)为拉伸断口局部放大形貌图,由图可以看出,断口呈现典型的韧性断口形貌,韧窝大小不一,且韧窝较深。图5(c)为断口成分EDS图,由图可以看出,断口中主要为Al,有少量的Fe、Cr、Ni等。这是因为断裂位置是在焊缝前进侧靠近焊接界面的铝合金一侧,在靠近界面位置有钢颗粒和一些金属间化合物存在,这些是断裂裂纹源,是整个焊缝的薄弱位置,因此控制焊缝中的金属间化合物的数量、大小、形状及其分布是得到性能良好焊缝的关键。

3 结 论

(1)采用对接接头形式实现了铝-钢异种金属的搅拌摩擦焊接。当焊接转速为1 200 r/min,焊接速度90 mm/min,搅拌针偏置量为0.2 mm时焊接接头表明成形良好,焊缝内部没有空洞、裂纹等缺陷。

(2)焊接界面结合良好,形成了厚度约为3 μm的中间过渡层,界面根部没有Hook钩和未焊透现象出现。

(3)焊缝接头的断裂强度达到了282.5 MPa,达到了铝合金母材强度(315 MPa)的89.7%。断裂位置在焊缝界面铝合金一侧,断口是典型的韧性断裂。

参考文献:

[1] Sahin M. Joining of stainless-steel and aluminium materials by friction welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009 (41):487-497.

[2] 郭训忠,陶杰,孙显俊,等.爆炸焊接316L不锈钢/Al复合管的界面及性能研究[J].南京航空航天大学学报,2010,42(5):641-644.

Guo Xunzhong, Tao Jie, Sun Xianjun, et al. Investigation on interface and performance of explosive welded SS316L/Al clad tube[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42 (5):641-644.

[3] 邢丽,柯黎明,黄春平.铝合金与钢的搅拌摩擦焊缝成形及接头性能[J].焊接学报,2007,28(1):29-31.

Xing Li, Ke Liming, Huang Chunping. Weld appearances and mechanical properties of friction stir welded joint of Al alloy and mild steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(1):29-31.

[4] 邵青,何宇廷,张腾,等.平板焊接变形对铝合金搅拌摩擦焊加筋板轴压稳定性能的影响[J].南京航空航天大学学报,2014,46(6):943-968.

Shao Qing, He Yuting, Zhang Teng, et al. Study on stability performance of friction stir welded stiffened panel under uniaxial compress load [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(6):943-968.

[5] Li Bo, Shen Yifu. A feasibility research on friction stir welding of a new-typed lap-butt joint of dissimilar Al alloys [J]. Materials and Design, 2012(34):725-731.

[6] Huseyin U, Claudio D D, Alberto A. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 To X5CrNi18-10 stainless steel [J]. Materials and Design, 2005(26):41-46.

[7] Watanabe T, Takayama H, Yanagisawa A. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006(178):342-349.

[8] 王希靖,申志康,张忠科.铝和镀锌钢板的搅拌摩擦焊搭接分析[J].焊接学报,2011,32(12):97-100.

Wang Xijing, Shen Zhikang, Zhang Zhongke. Study of friction stir welded lap joint of aluminum and zinc-coated steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32 (12):97-100.

[9] 姚磊,沈以赴,李博,等. Cu/Ti 异种金属搅拌摩擦焊搭接接头组织与性[J].焊接学报,2014,35(2):109-112.

Yao Lei, Shen Yifu, Li Bo, et al. Microstructure and properties of dissimilar materials Cu /Ti lapped joint by friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(2): 109-112.

