

铝铜复合板搅拌摩擦焊接接头组织性能研究*

乔柯¹, 王文¹, 吴楠², 李天麒¹, 王快社¹

(1 西安建筑科技大学冶金工程学院, 西安 710055; 2 国核宝钛铝业股份公司, 宝鸡 721013)

摘要 采用搅拌摩擦焊接对铝铜层状复合板进行了焊接, 研究了接头组织性能。结果表明, 焊接接头焊核区 (Nugget zone, NZ) 产生了细小等轴状的动态再结晶晶粒, 铝层、铜层平均晶粒尺寸分别为 $4\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 。NZ 铝层、铜层平均显微硬度为 29.21HV、86.9HV。抗拉强度为 154.6 MPa, 为母材的 61.6%, 延伸率为 6%。铜颗粒在铝层中形成夹杂是拉伸性能下降的主要原因。

关键词 搅拌摩擦焊接 铝铜层状复合板 微观组织 力学性能

中图分类号: TG453+.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11896/j.issn.1005-023X.2016.12.019

Research on Microstructures and Property of Friction Stir Welding Joint of Al/Cu Clad Plates

QIAO Ke¹, WANG Wen¹, WU Nan², LI Tianqi¹, WANG Kuaishe¹

(1 School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055;
2 State Nuclear Bao Ti Zirconium Industry Company, Baoji 721013)

Abstract Al/Cu clad plates were joined by friction stir welding (FSW), and mechanical properties of joints and microstructures in nugget zone were investigated. The result showed that the equiaxed dynamic recrystallized grain was formed in the nugget zone and the grain size in the layer of aluminum and copper was $4\ \mu\text{m}$ and $3\ \mu\text{m}$ respectively. The average microhardness of the Al and Cu plates was 29.2HV and 86.9HV respectively. Ultimate tensile strength was 154.6 MPa, 61.6% of the as-received metal and elongation is 6%, the main reason why the ultimate tensile strength dropped was that copper formed as a foreign substance in the layer of aluminum.

Key words friction stir welding, Al/Cu clad plates, microstructure, mechanical property

0 引言

铝铜复合板具有铜的导电、导热率高、接触电阻低等优点, 同时具有铝的质量轻、耐腐蚀、价格低廉等优点, 故广泛应用于电子、电器、电力、冶金设备、汽车、机械、能源以及生活用品等各个工业领域。在层状复合板的加工和使用过程中, 焊接是一项必不可少的工艺环节。目前, 复合板主要通过熔化焊接方法进行连接, 具体包括: 电弧焊^[1]、药芯焊丝电弧焊^[2]、激光焊^[3]等。这些传统的融化焊接方法焊接复合板时易产生气孔、焊接工艺复杂、晶粒粗大、抗腐蚀性差等问题。

搅拌摩擦焊接 (Friction stir welding, FSW) 是一种新颖而有潜力的固相焊接技术, 由英国焊接研究所 (The Welding Institute, 简称 TWI) 于 1991 年研发并应用^[4]。FSW 时, 待焊接材料将发生剧烈的塑性变形, 有助于细化焊接接头组织并使其均匀化^[5-7]。焊接过程中焊接温度较低, 将会避免裂纹、气孔等熔化焊接缺陷的产生, 组织粗化的倾向降低, 焊接接头的强度和韧性均得到提高^[8]。目前, FSW 已成功地应用

于铝合金、铜合金、镁合金、复合材料以及异种金属材料的焊接, 具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景。

目前, 国内外学者针对铝铜异种材料 FSW 接头的组织性能开展了大量研究, 但关于铝铜层状复合板 FSW 的研究未见报道。铝铜异种金属的 FSW 包括对接焊与搭接焊。李夏威^[9]以搅拌针正对中缝与搅拌针偏向铝两种方式进行铝铜异种金属焊接, 发现搅拌针偏向铝时获得完整焊缝的参数范围较大。张秋征^[10]对铝铜异种材料进行 FSW, 结果表明晶粒细化和位错强化使焊核区的平均硬度高于母材, 最大值高达 487HV, 同时搅拌针相对于配合面向铝侧偏移时, 可以减小搅拌针粘连问题, 获得成形良好的焊接。陶娟^[11]对铝铜异种材料进行 FSW, 结果表明, 搅拌头转速为 800 r/min, 焊接速度为 100 mm/min, 搅拌头向铝侧偏置 0.5 mm 时, 获得的平均抗拉强度最大, 为 117.3 MPa, 大约为低强度母材的 94%。董丰波^[12]研究了铝铜异种金属的 FSW 对接与搭接焊, 发现在转速为 1050 r/min, 焊接速度为 40~50 mm/min 时进行对接焊, 所获接头成型质量良好, 接头强度最高可达 236 MPa; 搭接焊时, 铜置于上层可获得成型良好的接头, 铝

* 国家自然科学基金 (51274161; U1360105; 51404180)

乔柯: 男, 1990 年生, 硕士生, 主要研究方向为有色金属的搅拌摩擦焊接和搅拌摩擦加工 E-mail: qiaokemarshall@126.com 王文: 通讯作者, 1985 年生, 工程师, 主要研究方向为有色金属的搅拌摩擦焊接和搅拌摩擦加工 E-mail: 282361936@qq.com

置于上层则易产生孔洞与隧道缺陷。陈华斌^[18]对紫铜与LF5铝合金进行FSW,发现焊核区存在薄层状混结构,金属呈显著的塑性流动特征。因而,本实验拟开展铝铜层状复合板FSW研究,研究焊接接头的微观组织特征,重点分析铝铜层状复合板FSW之后的组织和性能,以期对铝铜复合板高效优质连接提供理论指导和技术支持。

1 实验

实验选用70.0 mm(长)×60.0 mm(宽)×2.0 mm(厚)铝铜层状复合板进行FSW实验,铝铜厚度比为1:1。铝层材料为1060工业纯铝,铜层材料为T2纯铜。铝铜复合板的抗拉强度为251.1 MPa,延伸率为9.2%,铝、铜层的显微硬度分别为32.8HV和121.6HV。FSW实验在改造的X5032型立式升降台铣床上进行,搅拌头材料选用W18Cr4高速钢,实际压下量为0.2 mm,旋转速度为1500 r/min,焊接速度为60 mm/min。首先用钢丝刷将工件铝层表面打磨干净,然后,铝层向上,将待焊工件用夹具和螺栓紧压固定于工作台上进行焊接。利用PLOVER-MET型光学显微镜对表面形貌进行照相;利用401MVD型显微维氏硬度计测量试样硬度;利用WDW-100D型拉伸机进行室温拉伸测试;利用JSM-6390A型扫描电子显微镜观察接头微观表面形貌。

2 结果与分析

2.1 微观组织

焊接接头的横截面形貌主要由焊核区(Nugget zone, NZ)、轴肩影响区(Shoulder affected zone, SAZ)、热机械影响区(Thermo mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(Heat affected zone, HAZ)以及母材(Base metal, BM)组成。由于铝铜复合板双金属呈层状分布,又因FSW时焊缝塑性流动金属主要作水平方向上的流动,故复合板FSW接头的NZ、TMAZ以及HAZ也呈层状分布,但是NZ中铝铜界面发生向下迁移。图1为接头横截面宏观形貌。

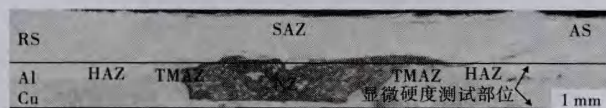


图1 接头横截面宏观形貌

Fig. 1 Cross-sectional macrograph of welded joint

图2为铝(a)、铜(b)BM的显微组织,铝铜复合板的BM为典型轧制组织,晶粒沿轧制方向被拉长,部分晶粒破碎,铝

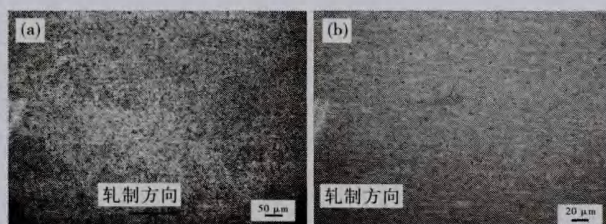


图2 母材显微组织

Fig. 2 Microstructures of base metal

层破碎较为严重。BM晶粒粗大,铝层晶粒尺寸约为15 μm,铜层晶粒尺寸约为20 μm。

在焊接过程中,处在NZ的金属在搅拌摩擦热和机械搅拌作用下,发生剧烈塑性变形,接头铝层NZ产生了细小等轴状的动态再结晶晶粒,平均晶粒尺寸为4 μm(见图3(a)铝层),并且铝层中有铜颗粒夹杂,形貌不均匀,多呈长条形。接头铜层NZ均无铝颗粒分布,铜晶粒都为等轴的动态再结晶组织,平均晶粒尺寸为3 μm(见图3(b)铜层)。

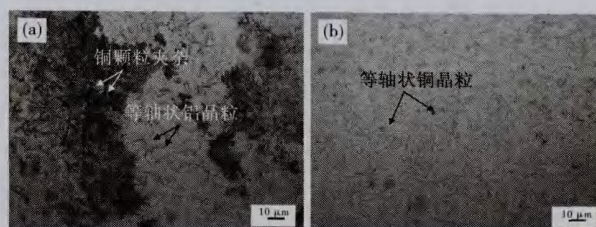


图3 FSW接头焊合区接头组织

Fig. 3 Microstructures of FSW joint

为了对上述铜颗粒进行印证,对接头NZ进行成分分析,图4为NZ中的背散射电子形貌图,选择其中的A、B、C三点进行能谱定量分析。经观察分析可知:A点处铝、铜元素质量比为3.8:96.2,说明该处亮白色材料为被搅拌针搅拌并镶嵌在铝基体中的铜颗粒;B点处的铝、铜元素质量比为94.9:5.1,铝含量占绝大多数,说明该处深灰色材料为铝基体;C点处的铝、铜元素质量比为61.8:38.2,该处材料为浅灰色,处在铜颗粒和铝基体之间,是铜、铝材料之间的扩散过渡区域。

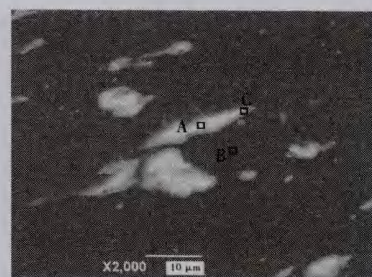


图4 NZ背散射电子形貌图

Fig. 4 Back-scatter detector morphology of NZ

2.2 力学性能

2.2.1 显微硬度分析

图5为FSW接头横截面不同层显微硬度分布。由图5可见,在焊缝中心附近,铝层NZ平均显微硬度为29.2HV。铝层显微硬度在小范围内波动,FSW产生剧烈塑性变形使得晶粒发生再结晶软化,使得铝层NZ区平均显微硬度略低于母材硬度(32.8HV)。铜层横截面的显微硬度大致呈“W”型分布,NZ硬度在小范围内波动,其硬度值低于母材。分析其原因是,在焊接热循环的作用下,母材铜金属由加工硬化态发生软化;同时,由于受到搅拌针的搅拌挤压以及高温作用,接头区域发生动态再结晶,晶粒内部位错密度降低,位错强化作用减小,硬度下降。在NZ搅拌针对晶粒的破碎作用

使得 NZ 区域的晶粒尺寸减小(见图 3), 细晶强化作用使得 NZ 显微硬度高于 TMAZ 显微硬度。

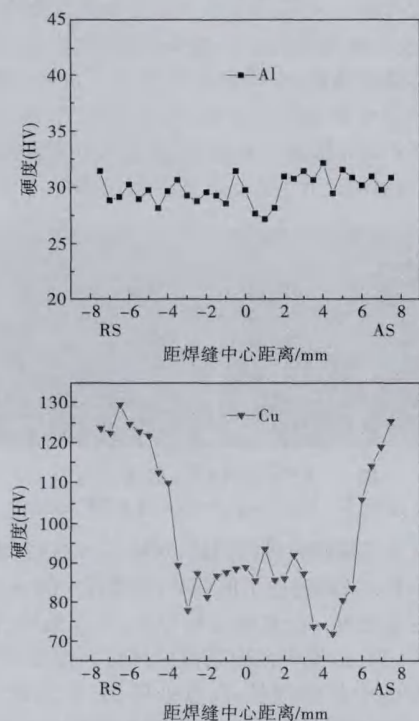


图 5 焊接接头横截面不同层显微硬度分布

Fig. 5 Microhardness distribution of the cross-sectional FSW joint at different layer

2.2.2 拉伸性能和断口形貌分析

拉伸试验结果显示, 焊接接头的抗拉强度达到 154.6 MPa, 为母材抗拉强度的 61.6%, 延伸率为 6%。如图 6 所示 ((a) 拉伸断裂后试样宏观照片; (b) 断口宏观照片), 铝铜复合板 FSW 拉伸断裂的断裂位置位于 TMAZ (见图 6(a)), 说明 TMAZ 是焊接接头性能的薄弱区域, 这与图 5 中显微硬度测试结果相符。接头断口位置有一定的“颈缩”, 说明在试样断裂之前发生了一定的塑性变形, 材料表现出一定的韧性断裂特征。由图 6(b) 可见, 铝铜复合板 FSW 接头中金属分布不均, 在铝层之中存在铜颗粒夹杂, 且有与拉伸方向呈一定角度的铝铜界面, 使得 FSW 接头组织的不均匀性增加, 焊接接头力学性能与母材相差较大。图 7 为拉伸断口宏观形貌, 在 FSW 后, 铜层相比铝层变的更薄, 这是因为在 FSW 时, 大量的铜被卷入 NZ 区域。在铝层底部选取一定区域进行高倍扫描, 扫描图片如图 8 所示, 河流花纹和韧窝较为集中, 中部为解理平面, 呈现出解理断裂的特征。对解理平面 (见图 8(b)B) 和右侧亮白色颗粒 (见图 8(b)A) 进行能谱分析 (见表 1), 可以发现, 左侧解理平面含有一定比例的铜元素,

表 1 断口的能谱面分析结果(质量分数/%)

Table 1 Elemental analysis result of fracture(wt%)

	Al	Cu
A	0.29	5.15
B	9.90	90.10

有尺寸约为 260 nm 的铜颗粒夹杂被卷入铝层。可见, FSW 后铜颗粒在铝层中的夹杂应是导致拉伸性能降低的主要因素。

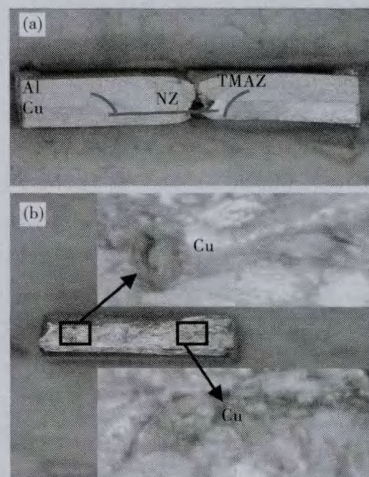


图 6 焊接接头断口宏观形貌

Fig. 6 The macrograph of FSW joint fracture

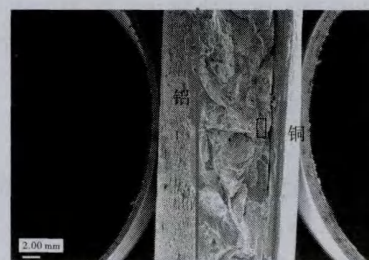


图 7 拉伸断口形貌

Fig. 7 The fracture morphology after tensile test

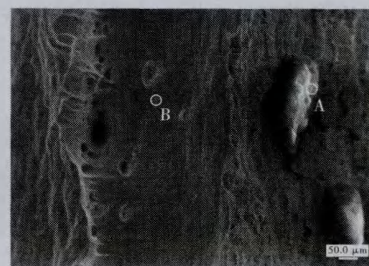


图 8 断口的高倍扫描电镜图像

Fig. 8 SEM image of the high magnification fracture

3 结论

(1) 在焊接过程中, 接头铝层产生了细小等轴状的动态再结晶晶粒, 平均晶粒尺寸为 4 μm , 并且铝层中有铜颗粒夹杂, 形貌不均匀, 多呈长条形。接头铜层 NZ 中均无铝颗粒的分布, 铜晶粒都为等轴的动态再结晶组织, 平均晶粒尺寸为 3 μm 。

(2) 焊后铝层和铜层的显微硬度呈现出不同的分布, 铝层接头 NZ 平均显微硬度 29.2HV; 铜层接头 NZ 铜层平均显微硬度达到 86.9HV。

(3)抗拉强度可达到 154.6 MPa,达到母材的 61.6%,延伸率为 6%。FSW 后,铜颗粒在铝层中形成夹杂,是 FSW 铝层复合板拉伸性能下降的主要原因。

参考文献

- 1 Shen Z, Chen Y, Haghshenas M, et al. Interfacial microstructure and properties of copper clad steel produced using friction stir welding versus gas metal arc welding[J]. Mater Charact, 2015, 104: 1
- 2 Mai T A, Spowage A C. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality[J]. J Mater Process Technol, 2006, 176(1-3): 230
- 3 Mai T A, Spowage A C. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 374: 224
- 4 Thomas W M, Needham J C, Dawes C J, et al. Friction stir butt welding; UK, 9125978. 8[P]. 1991-12-06
- 5 Dong Peng, Sun Dagan, Li Hongmei, et al. Microstructural and mechanical characteristics of friction stir welded 6005A-T6 aluminum alloy [J]. J Mater Eng, 2012(4): 27 (in Chinese)
董鹏, 孙大千, 李洪梅, 等. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头组织与力学性能特征 [J]. 材料工程, 2012(4): 27
- 6 Li Jizhong, Ma Zhengbin, Dong Chunlin, et al. Material flowing behaviors of friction stir welding by dissimilar aluminum alloys[J]. J Mater Eng, 2014(6): 1 (in Chinese)
李继忠, 马正斌, 董春林, 等. 异种铝合金搅拌摩擦焊材料流动行为研究[J]. 材料工程, 2014(6): 1
- 7 He Diqui, Luo Wei, Wu Hongguang. Microstructure and mechanical property analysis on double-sided friction stir welding joints of 60mm 6061-T6 aluminum alloy plate[J]. J Mater Eng, 2011(9): 20 (in Chinese)

(上接第 80 页)

- 8 Kakehi K. Effect of plastic anisotropy on tensile strength of single crystals of an Ni-based superalloy[J]. Scr Mater, 2000, 42: 197
- 9 亨利 G, 豪斯特曼 D. 宏观断口学及显微断口学[M]. 曾祥华, 田继平, 柯伟, 等. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 10 赵明汉, 张继, 冯涤. 高温合金断口分析图谱[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006
- 11 钟群鹏. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- 12 Itz A, Lagerpusch U, Nembach E. CRSS anisotropy and tension/compression asymmetry of a commercial superalloy[J]. Acta Mater, 1998, 46(13): 4769
- 13 Smith W F, Hashemi J. Foundations of materials science and engi-

neering[M]. Beijing: China Machine Press, 2011

- 8 Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing [J]. Mater Sci Eng R, 2005, 50: 1
- 9 Li Xiawei. Research on the technology of friction stir welding of aluminum/copper metals [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012 (in Chinese)
李夏威. 铝-铜异种金属搅拌摩擦焊接技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012
- 10 Zhang Qiuzheng. Research on microstructure and properties of the Al/Cu dissimilar metals jointed by friction stir welding [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015 (in Chinese)
张秋征. 铝/铜异种金属搅拌摩擦焊接接头组织及性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2015
- 11 Tao Juan. The Mechanism research on the friction stir welding procedure of aluminum-to-copper dissimilar materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015 (in Chinese)
陶娟. 铝-铜异种金属搅拌摩擦焊接机理和工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015
- 12 Dong Fengbo. Research on friction stir welding of aluminum/copper materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 (in Chinese)
董丰波. 铝/铜异种材料的搅拌摩擦焊工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011
- 13 Chen Huabin. Study on friction stir welding joint properties of pure copper and aluminum alloy [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2005 (in Chinese)
陈华斌. 紫铜及铝合金搅拌摩擦焊接头性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2005

(责任编辑 周媛媛)

neering[M]. Beijing: China Machine Press, 2011

- 14 Li Jiarong, Shi Zhenxue, Yuan Hailong, et al. Tensile anisotropy of single crystal superalloy DD6[J]. Mater Eng, 2008(12): 6 (in Chinese)
李嘉荣, 史振学, 袁海龙, 等. 单晶高温合金 DD6 拉伸性能各向异性[J]. 材料工程, 2008(12): 6
- 15 Shen Jian. Microstructure and properties of one kind of nickel-based single crystal superalloy [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013 (in Chinese)
申健. 一种镍基单晶高温合金的组织与性能[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013

(责任编辑 余波)