DOI: 10.3901/JME.2019.06.039

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*

于明润¹ 赵洪运² 蒋智华² 周利^{1,2} 黄永宪¹ 宋晓国^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学(威海)山东省特种焊接技术重点实验室 威海 264209)

摘要: 采用搅拌摩擦焊方法对 5052 铝合金及 H62 黄铜异种金属进行搭接, 搅拌头转速固定为 1 000 r/min, 焊速为 100~300 mm/min, 对接头微观组织和力学性能进行研究。结果表明: 搭接接头铝侧分为焊核区、热机影响区和热影响区。接头铝侧与搅拌头直接作用的区域, 晶粒发生一定的细化。搭接界面处两板间分界明显, 界面处有黄铜和铝的机械混合, 且有金属间化合物产生。接头显微硬度分布表明铝侧焊核区显微硬度最高, 硬度最低点在热影响区。界面处的硬度明显大于铝及黄铜母材。随着焊速的增大, 接头拉剪载荷先增大后减小。接头拉伸时断于界面区, 断口为解理断裂。

关键词: 搅拌摩擦焊; 铝/铜异种金属; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG453

Research on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum/Brass Dissimilar Joint

YU Mingrun¹ ZHAO Hongyun² JIANG Zhihua² ZHOU Li^{1,2}
HUANG Yongxian¹ SONG Xiaoguo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology,
Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209)

Abstract: 5052 aluminium alloy and H62 brass dissimilar metals are friction stir lap welded. The rotation speed is kept constant at 1 000 r/min with welding speed varying from 100 mm/min to 300 mm/min. Microstructure and mechanical properties of the joint are studied. The joint at Al side is divided into weld nugget zone, thermo-mechanically affected zone and heat-affected zone. Grains are refined within the area contacted with the welding tool at Al side. Obvious dividing line is formed between the two plates at the Al/Brass interface with the existence of brass with different size and shape. There are interface compounds produced and mechanical mixture of brass and aluminium produced near the brass at the interfaces. Hardness distribution of joint cross-section along the aluminum side show hardness at welding nugget are highest and the lowest appear on the heat affected zone. Hardness at the interface is significantly higher than that of Al and Brass base metal. With the increasing welding speed, the tensile shear strength increases first and then decreases. Tensile test indicates that the joint fractures at interface layer of the brass side with cleavage fracture surface.

Key words: friction stir lap welding; Al/Cu dissimilar metals; microstructure; mechanical properties

0 前言

铜及其合金有优良的导热、导电性能, 稳定的化学性能以及优异的可加工性能和抗腐蚀性。但铜材为稀缺金属, 属于战略资源, 国内每

年需要进口大量铜材^[1-2]。铝合金的导电、导热性能与铜相差不大, 且价格、密度较低。铝/铜复合接头不仅能减轻构件的重量、降低生产成本, 还能满足结构件的强度要求。铝/铜异种金属广泛采用焊接^[3-5]的方法进行连接, 但由于铜和铝合金的物理、化学性能差异很大, 采用熔化焊^[6-7]方法难以实现铝/铜的可靠连接^[8], 而钎焊^[9-11]方法焊接效率相对较低。

* 国家自然科学基金(51205084)和教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。20180813 收到初稿, 20190220 收到修改稿

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)作为一种新型的固相连接技术,具有高效、环保、节能等优点。随着搅拌摩擦焊技术不断成熟,其应用领域得到了很大的拓展,除了铝、镁等低熔点材料现已实现高熔点材料甚至异种材料的焊接。铝/铜搅拌摩擦焊^[12-17]过程中多种脆性化合物、共晶体的产生及搅拌头粘连是影响接头性能的主要因素。吴小伟等^[12]对 2 mm 厚度的铝/铜异种金属进行搅拌摩擦焊搭接,研究表明减小焊接热输入可抑制共晶体的生成。焊接热输入越大,铜/铝界面处越容易发生共晶反应,生成共晶体组织 Al-CuAl_2 , 恶化接头力学性能。PIERPAOLO 等^[13]在铝/铜的搅拌摩擦焊中发现富铝相 Al_2Cu 及富铜相 Al_4Cu_9 金属间化合物会首先分别在铝侧及铜侧产生。BEYGI 等^[14]对铝/铜搅拌摩擦焊搭接接头断裂行为及金属间化合物结构进行分析。研究表明在高的轴肩压力及高温作用下,界面处主要有 Al_2Cu 、 AlCu 及 Al_4Cu_9 产生,这使得接头变脆,强度降低。ZHANG 等^[15]对 3 mm 厚的 1060 铝合金与纯铜进行搅拌摩擦焊对接,发现接头 Cu 侧界面处有 Al_4Cu_9 及 Al_2Cu 生成,所得接头强度达到 148 MPa,高于铝母材。

本工作对 5052 铝合金/H62 黄铜进行搅拌摩擦焊搭接,并探讨了焊接速度对接头组织、界面化合物结构及力学性能的影响。

1 试验材料与方法

试验材料为 5052 铝合金和 H62 黄铜,其主要化学成分及力学性能分别如表 1~4 所示,焊接试件尺寸分别为 200 mm×75 mm×2 mm 和 200 mm×75 mm×1 mm。搅拌头轴肩直径 7.5 mm,搅拌针直径 3.5 mm,针长 2.15 mm^[16]。焊前用丙酮擦去工件表面的油污。图 1 为铝/黄铜搭接示意图,采用铝板在上、铜板在下的搭接方式,焊接工艺参数为:搅拌头转速为 1 000 r/min、轴肩下压量为 0.1 mm,倾角为 3°、焊接速度分别设置为 100 mm/min、200 mm/min、300 mm/min。

表 1 5052 铝合金化学成分(质量分数) %

Si	Mg	其他	Al
0.17	2.48	≤0.5	余量

表 2 5052 铝合金力学性能

抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)
230	16

表 3 H62 黄铜化学成分(质量分数) %

Cu	Fe	其他	Zn
60~63	0.15	≤0.5	余量

表 4 H62 黄铜力学性能

抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ (%)
315	15

图 1 铝/黄铜搅拌摩擦焊搭接示意图

沿垂直于焊接方向截取试样,进行标准金相样品制备,使用凯勒试剂(3 mL HNO_3 , 6 mL HCl , 6 mL HF , 150 mL H_2O)腐蚀 120 s,采用 GX51 金相显微镜(Optical microscopy, OM)对接头各个区域组织进行观察,利用 TESCAN VEGA3 扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)分析界面组织并通过配套能谱仪(Energy disperse spectroscopy, EDS)进行物相判定。采用 MICRO-586 型显微硬度计测试接头的显微硬度分布,测试点如图 1 所示,分别沿接头铝侧横截面方向及接头厚度方向进行显微硬度分析。所取硬度点相邻间隔距离为 0.4 mm,测试压力为 0.98 N,停留时间为 10 s。采用 INSTRON 1186 电子力学性能试验机对接头进行拉剪试验,为保持搭接界面与拉伸加载方向平行,在拉伸试样两侧添加铝/黄铜板等厚支持板。拉伸速率为 1 mm/min,采用三个拉伸试样的平均值进行性能评定。

2 结果与分析

2.1 接头成形

2.1.1 接头宏观成形

图 2 为不同焊接速度所得的铝/黄铜搭接接头铝表面形貌,其中焊缝上侧为后退侧(Retreating side, RS),下侧为前进侧(Advancing side, AS)。搅拌头转速固定为 1 000 r/min,焊接速度为 100 mm/min 时,焊接热输入较大,随着摩擦热的积累,局部温度过高,铝合金过热而导致飞边过大;焊接速度增大到 300 mm/min 时,单位长度上的热输入减少,但足以使待焊金属达到热塑性状态,并获得成形良好,没有明显飞边的焊缝。

图2 接头表面形貌

2.1.2 接头截面成形

图3为铝/黄铜异种金属搅拌摩擦焊搭接接头(焊速 100 mm/min)典型截面成形,可知铝/黄铜在界面处形成机械混合和冶金结合,其中上方较为明亮的区域为铝侧,下方较为灰暗的区域为黄铜侧。接头铝侧在轴肩的挤压和搅拌针的摩擦作用下,材料达到充分的混合,可分为焊核区(Nugget zone, NZ)、热机影响区(Thermo-mechanic affected zone, TMAZ)和热影响区(Heat affected zone, HAZ)。铝/黄铜结合区(Interface zone, IZ)上宽下窄,呈U形。在搅拌头压力及高速旋转作用下,结合区内材料发生塑性流动且有黑色环状物质形成而产生结合。同时由于动态再结晶,结合区晶粒更加细小。

图3 典型接头横截面的宏观形貌(焊速 100 mm/min)

2.2 接头显微组织

图4为典型接头(焊速 100 mm/min)横截面铝侧各区域的显微组织。图4a为焊核区,方框内为铝母材的显微组织。焊核区为细小的等轴晶晶粒,比其母材的晶粒组织有所细化。这是因为在搅拌头搅拌和摩擦作用下,焊缝区的金属经历了强烈的热机械过程,使焊核区的温度超过了再结晶温度但低于其熔化温度,从而在高温和大变形作用下,变形晶粒中位错密度急剧增大,并形成许多作为再结晶核心的胞状亚结构,进而通过这些再结晶晶核直接形成新的再结晶晶粒,最终得到了细小的等轴晶结构。

热影响区(图4b)的晶粒组织形貌与母材相似,但因为受热循环作用,体积比母材晶粒略为粗大。热机影响区(图4c、4d)在焊接热和机械共同作用下发生弯曲变形,且局部区域在热循环作用下发生回复或再结晶,晶粒被拉长,具有一定的方向性。在不同焊接速度下,虽然焊接过程的热输入量各有不同,但是铝侧接头焊核区、热机影响区和热影响区显微组织变化不大,其晶粒形态与晶粒尺寸基本类似。

(a) 焊核区

(b) 热影响区

(c) 前进侧热机影响区

(d) 后退侧热机影响区

图4 典型接头铝侧显微组织(焊速 100 mm/min)

而接头结合界面区对焊接速度比较敏感(图 5), 同时接头结合区也是影响搭接接头力学性能的关键因素。

图 5 为不同焊接速度下铝/黄铜搭接接头结合区的显微组织金相照片, 由图可知接头以冶金结合为主, 并伴有机械结合。焊速 100 mm/min 时, 热输入较大, 铝/黄铜界面处机械混合剧烈, 如图 5a 所

(a) 焊速 100 mm/min

(b) 焊速 200 mm/min

(c) 焊速 300 mm/min

(d) 焊速 300 mm/min 钩状结构

图 5 接头结合区显微组织

示。随着焊速的增大, 热输入减小, 单位面积内热量积累减少且互扩散的时间变短, 搅拌混合作用减弱, 结合区宽度减小, 结合区界面化合物生成减少, 且接头的机械结合减弱。在焊速较小时(100~200 mm/min), 界面处附近及焊核区内有黄铜以碎片或颗粒的形式嵌入在铝基体中, 这主要是由于在搅拌针的高速搅拌作用下, 部分未能达到热塑状态的黄铜母材逐渐碎化并与金属铝发生机械混合, 如图 5b 所示。随焊接速度继续提高, 黄铜碎片或颗粒嵌入铝基体的情况基本消失。而在铝/黄铜板的交界处, 同样可以发现黄铜被搅拌针带入铝板形成类似钩状结构, 如图 5c、5d 所示, 其中图 5d 为图 5c 中方框的放大图。这种钩状结构形成机械结合有助于提高接头的抗拉剪能力, 随着焊速的增大, 钩状结构逐渐变小, 机械结合减弱。

图 6 为铝/黄铜搅拌摩擦焊典型接头连接界面处扫描组织图片, 如图 6a 所示, 在铝/黄铜界面及进入焊核区的黄铜碎片界面处有金属间化合物形成, 且在搅拌针的作用下, 部分化合物呈现出流线结构。界面处金属的流动和相互作用过程复杂, 在搅拌针直接作用处, 温度较高, 铝/黄铜连接界面处接近或已达到铝母材的熔点^[12], 在焊接过程中铝/黄铜界面处相互扩散, 生成金属间化合物。对图 6a 的上部方框进行放大分析, 如图 6b 可看到在铝/黄铜界面处发生扩散, 生成厚度不一的金属间化合物层, 厚度在 10~150 μm。对图 6b 中 A 点进行能谱分析, 结果如表 5 所示。结合铝-铜合金相图, 在 500 °C 以下铝-铜会形成六种稳定的金属间化合物组和一些亚稳定的金属间化合物组, 但对与扩散焊、搅拌摩擦焊等而言, 只能形成两到三种金属间化合物^[17], 可推测其为 AlCu 相。由于 Zn 元素的固溶, Al、Cu 原子比不是准确的 1:1。图 6b 中线 1 的线扫描结果如图 6e 所示, 可知铝/黄铜在界面处发生了 Al、Cu 及 Zn 的原子扩散, 且在界面处形成金属间化合物层。图 6a 下部方框放大图如图 6c 所示, 可看到有厚度均匀的层状物质产生, 层状物质由暗黑色基体及嵌入其中的灰色颗粒组成。对其进行线扫描(线 2), 结果如图 6f 所示, 可知层状组织中元素主要以 Al 为主, Cu 元素含量在靠近界面处逐渐增大。对铝/黄铜界面进行进一步放大分析, 发现在界面处也有金属间化合物产生, B 点能谱分析结果如表 3 所示, 推测其为 AlCu 相, 故此结构主要由 Al+AlCu 组成。ABDOLLAH-ZADEH 等^[18]在研究中也发现在界面处有 AlCu 产生, 并指出脆硬的金属间化合物的产生会影响接头的力学性能。

图 6 铝/黄铜搅拌摩擦焊接接头界面处 SEM 照片及能谱分析结果(焊速 100 mm/min)

表 5 图 7 中各位置成分(质量分数) %

位置	Al	Cu	Zn
A	48.54	43.42	8.04
B	49.31	42.15	8.54

2.3 接头显微硬度

图 7 是接头横截面的显微硬度分布图。由图 7a 可知，接头横截面铝侧垂直于焊接方向显微硬度分布呈 W 形，前进侧和后退侧的硬度相差不明显，硬度最高点都出现在焊核区，而最低点都在热影响区。

(a) 接头横截面铝侧横向硬度分布图

(b) 接头横截面厚度方向硬度分布图

图 7 接头显微硬度分布图

由于搅拌摩擦过程引起的再结晶作用, 铝板焊缝区显微硬度比母材有不同程度的降低。图 7b 为搭接接头横截面竖向硬度分布图, 可知在铝铜界面附近出现硬度峰值。由于界面附近在搅拌针热和机械作用下形成脆硬铝铜化合物, 因而界面处硬度突然增大。

2.4 接头拉伸性能

图 8 为不同焊速下接头拉伸载荷, 可知随着焊速的增大, 拉伸载荷先增大后减小。当焊接速度为 200 mm/min 时, 拉伸载荷最大为 2 103 N。由于铝/黄铜主要形成的是冶金结合和机械结合, 故拉伸荷载会受到两个因素的影响: 界面脆硬金属间化合物生成量和机械结合强度。当焊接速度减少时, 因为在铝和铜之间的界面处产生更高数量脆硬的金属间化合物, 使接头变脆, 拉伸载荷减小。而焊速提高, 金属间化合物生成量减少的同时, 界面处钩状结构减小, 机械结合减弱, 另外, 极高的焊速也易形成不完整的接头^[19]。故接头强度主要受金属间化合物及机械结合的影响, 随着焊速的增大, 先增大后减小。

图 8 接头拉伸载荷

图 9a 为典型铝/黄铜搅拌摩擦焊搭接接头拉伸

(a) 宏观断口

(b) 断口形貌

图 9 接头拉伸断口形貌图

断口形貌图。由于界面化合物的生成, 断口出现在铝/铜界面处。断口上表面发亮。对断口进行扫描分析及能谱分析, 如图 9b 所示, 断口比较光滑, 有河流状花样, 表现为典型的脆性断裂特征。

3 结论

(1) 对 5052 铝合金及 H62 黄铜搅拌摩擦焊接, 选择搅拌头转速为 1 000 r/min, 下压量为 0.1 mm, 焊速为 100~300 mm/min, 可得成形良好的接头。焊缝表面光滑, 没有明显的飞边, 接头内部没有气孔、裂纹。

(2) 接头铝侧显微组织可分为焊核区、热机影响区和热影响区。焊核区上宽下窄, 呈 U 形。且焊核宽度随着焊速增大而减小。铝/黄铜界面处附近及焊核区内有黄铜以碎片或颗粒的形式嵌入在铝基体中。黄铜被搅拌针带入铝板形成钩状结构。钩状结构的生成将有助于提高接头的抗拉剪能力。

(3) 沿接头横截面铝侧横向显微硬度分布呈 W 形, 焊核区硬度最高, 而硬度最低点出现在热影响区。沿接头横截面竖向显微硬度分布表明界面处的硬度明显大于铝与铜母材。随着焊速的增大, 接头拉伸载荷先增大后减小。接头拉伸载荷主要受界面脆硬金属间化合物生成量和机械结合强度的影响。当转速 1 000 r/min、焊接速度 200 mm/min 时, 接头剪切力最高, 为 2 103 N。断口表面光滑, 为解理断裂。

参 考 文 献

- [1] LACAZE J, TIERCE S, LAFONT M C, et al. Study of the microstructure resulting from brazed aluminum materials used in heat exchangers[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 413-414: 317-321.
- [2] 黄伯云. 我国有色金属材料现状及发展战略[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 122-127.
HUANG Boyun. Status and developing strategy for China's nonferrous metal materials industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 122-127.
- [3] 周利, 李志勇, 赵洪运, 等. 铝/黄铜异种金属 TIG 熔钎焊接头显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2389-2395.
ZHOU Li, LI Zhiyong, ZHAO Hongyun, et al. Microstructure and mechanical properties of Al/brass dissimilar metals TIG welding-brazing joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2389-2395.

- [4] 董鹏, 陈凯华, 肖荣诗. 铝-铜异种金属激光深熔钎焊接头力学性能[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 129-133.
DONG Peng, CHEN Kaihua, XIAO Rongshi. Mechanical properties of aluminum-copper joint by laser penetration brazing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 129-133.
- [5] 张旭超. 铝合金/黄铜异种金属 TIG 熔钎焊温度场和流场的数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
ZHANG Xuchao. Numerical simulation of temperature field and fluid flow field during TIG fusion-brazing of aluminum alloy and brass[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [6] LEE S J, NAKAMURA H, KAWAHITO Y, et al. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(2): 111-118.
- [7] 薛志清, 胡绳荪, 左迪, 等. 铜铝异种金属激光焊接头组织特征及力学性能[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 115-116.
XUE Zhiqing, HU Shengsun, ZUO Di, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of laser-welded copper and aluminum[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 115-116.
- [8] 毕应利. 铝-铜异种材料焊接工艺及其质量评价[J]. 价值工程, 2015, 34(9): 69-71.
BI Yingli. Welding technology of aluminum-copper dissimilar material and its quality evaluation[J]. Value Engineering, 2015, 34(9): 69-71.
- [9] 冯立臣. 铜/铝感应钎焊接头的界面行为及耐腐蚀性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
FENG Lichen. Study of the interfacial behavior and corrosion resistance of the Cu/Al joints by frequency induction brazing[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [10] YANG H, HUANG J H, CHEN S H. Influence of the brazing methods on the interface structure and property of the Cu/Al brazed joint[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 751: 66-71.
- [11] JI F, XUE S B, LOU J Y, et al. Microstructure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn-Al filler metals[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 281-287.
- [12] 吴小伟, 沈以赴, 李博, 等. 铝-铜搅拌摩擦焊搭接焊缝共晶组织形成与抑制[J]. 焊接学报, 2014(1): 87-90, 117.
WU Xiaowei, SHEN Yifu, LI Bo, et al. Formation and inhibition of eutectics in Al /Cu dissimilar metal lap joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(1): 87-90, 117.
- [13] PIERPAOLO C, ANTONELLO A, GAETANO S P. Microstructural aspects in Al-Cu dissimilar joining by FSW[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 75(5): 1109-1116.
- [14] BEYGI R, KAZEMINEZHAD M, KOKABI A H, et al. Friction stir welding of Al-Cu bilayer sheet by tapered threaded pin: Microstructure, material flow, and fracture behavior[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(6): 2544-2553.
- [15] ZHANG Q Z, GONG W B, LIU W. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints by friction stir welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 1779-1786.
- [16] RAI R, DE A, BHADESHIA H, et al. Review: Friction stir welding tools[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(4): 325-342.
- [17] HEIDEMAN R, JOHNSON C, KOU S. Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2010, 15(7): 597-604.
- [18] ABDOLLAH-ZADEH A, SAEID T, SAZGARI B. Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 460(1-2): 535-538.
- [19] LIU H J, FJII H, MAEDA M, et al. Tensile properties and fracture locations of friction stir welded joints of 2017-T351 aluminum alloy[J]. Materials Processing Technology, 2003, 142: 692-696.

作者简介: 于明润, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要从事异种材料连接方面的研究。

E-mail: yu.larry@foxmail.com

周利, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要从事先进连接技术方面的研究。

E-mail: zhouli@hit.edu.cn