

本文参考文献引用格式:黄健康,王梓懿,梁菲菲,等.铝/铜异种金属熔钎焊焊接研究现状[J].电焊机,2019,49(01):10-13,47.

铝/铜异种金属熔钎焊焊接研究现状

黄健康¹,王梓懿¹,梁菲菲²,石 玦¹,樊 丁¹

(1.兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室,甘肃 兰州 730050;
2.甘肃铭峰建筑装饰工程有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘要:随着工业中“以铝代铜”国家战略的提出,铝/铜的连接成为当前焊接领域的研究热点。总结了铝/铜熔钎焊技术的国内外研究现状,阐述了该技术目前存在的问题,提出了目前仍然有待提高的方面及在今后研究中需要解决的问题。综合以上研究,深入理解并进一步明确铝/铜熔钎焊连接工艺等基本科学问题,为工业应用提供可靠的技术支持和科学的理论支撑。

关键词:铝/铜熔钎焊;界面性能;连接机理

中图分类号:TG442;TG454 **文献标志码:**C **文章编号:**1001-2303(2019)01-0010-05

DOI:10.7512/j.issn.1001-2303.2019.01.02

Research status of fusion brazing for Al/Cu dissimilar alloys

HUANG Jiankang¹, WANG Ziyi¹, LIANG Feifei², SHI Yu¹, FAN Ding¹

(1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals,Lanzhou University of Technology,Lanzhou 730050,China;2.Gansu Ming Feng Building Decoration Engineering Co.,Ltd.,Lanzhou 730030, China)

Abstract:With the national strategy of "Substituting aluminum for copper" in industry is proposed,aluminum/copper joining has become a hotspot in the field of welding. The current research situation of aluminum/copper fusion brazing technology at home and abroad are summarized,the existing problems of this technology are expound,and the aspects still need to be improved and the problems need to be solved in the future research are put forward. Based on above research,the basic scientific problems such as the aluminum/copper fusion welding technology are deeply understood and further clarified,which can provide reliable technical support and scientific theoretical support for industrial application.

Key words: Al/Cu fusion brazing;interfacial properties;joining mechanism

0 前言

目前,铜资源匮乏且价格较高,促使需求铜资源较大的行业、工业界积极寻求代用材料。而铝资源丰富、价格低、导电率高,是一种较好的导电材料。所以,用铝线作为电能传输的导体,提出“以铝代铜”已逐步上升为我国的国家战略。但是,纯铝由于强度低、耐腐蚀性能差,且表面极易形成坚固的氧

化膜,使得其接头部分接触电阻大,难以与铜等金属牢固连接,所以对于铝/铜异种金属焊接的研究显得尤为重要^[1]。

在铝/铜异种金属材料中,如何实现两者的连接是关键。利用机械方法连接铝/铜较难保证优良的导电或导热性能,难以满足使用需求,因此通常采用焊接方法来获得铝/铜异种金属的连接,但铝与铜的冶金反应极易形成 CuAl、CuAl₂ 等脆性金属间化合物层,使得接头的力学性能较差^[2];同时,铝/铜异种金属之间的物理性质差异较大,这也是导致两者焊接性较差的原因,因此必须采用恰当的焊接方法才能实现铝/铜连接;此外,铝材表面存在的致密氧

收稿日期:2018-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51865029);兰州理工大学红柳青年项目(Q201202)

作者简介:黄健康(1981—),男,副教授,博士,主要从事焊接过程检测与控制、焊接物理等方面的研究。E-mail: sr2810@163.com。

化铝薄膜也将对铝/铜金属的焊接性产生很大影响;这些因素使得当前常规的熔化焊难以获得铝/铜异种金属的优质连接^[1]。因此,高性能铝/铜接头的制备已成为工业应用的一大技术壁垒。熔钎焊是利用铝/铜熔点的差异,通过控制焊接热输入,使高熔点铜不熔化,低熔点的铝熔化,熔化的铝及填充金属与固态的铜实现钎焊连接。相比于其他焊接方法,熔钎焊的生产成本低,生产效率高,接头形式不受限制,是当前研究中的热点方向^[3]。目前,对于铝/铜连接技术,国内外研究主要涉及熔焊^[4]、压焊^[5]、摩擦焊^[6-9]、激光焊^[10-11]及钎焊^[12-13]等方法。本研究对铝/铜异种金属熔钎焊技术的研究现状进行总结,讨论熔钎焊焊接方法中存在的问题,对其今后的发展趋势进行探讨。

1 铝/铜熔钎焊技术研究现状

由于铝/铜之间物理性质的差异性使得国内外学者应用不同的焊接方法实现铝/铜异种金属连接,主要有熔焊、压焊、激光焊、搅拌摩擦焊、钎焊等方法。其中熔焊、压焊、激光焊等属于较为传统的手段,如早期就有前苏联的里亚博夫^[14]利用埋弧焊及 TIG 焊实现铝/铜异种金属焊接,由于焊缝中生成脆性铝/铜金属间化合物导致接头力学性能较差,为改变接头的力学性能,在预置 Ag、Ni 等金属后,获得了性能较好的接头。韩国 W.B. Lee 等^[15]人应用摩擦焊实现了纯铜与 1050 铝合金的连接,并发现接头的电阻率随金属间化合物层宽度的增大而增大,抗拉强度随金属间化合物层宽度的增大而减小。日本的 S.J. Lee 等^[16]利用激光焊进行铝/铜搭接,如图 1 所示。研究发现焊接速度影响界面金属间化合物的形成,获得力学性能良好的激光焊接头。对于熔焊等铝/铜焊接方法,由于其热输入较大,使得铝铜金属间化合物多且厚,大大降低了接头力学性能。同时金属间化合物使得接头的耐腐蚀性能下降,故造成传统的熔焊方法在铝/铜连接上几乎没有应用价值。

在铝/铜钎焊焊接方面,有火焰钎焊、感应钎焊和超声波钎焊等焊接方法实现铝/铜连接。如薛松柏等人^[17]采用火焰钎焊焊接铝/铜,张洪涛等^[18]人运用感应钎焊实现铝/铜焊接,李明雨等人^[19]利用超声钎焊的方法焊接 Al/Zn-Al/Cu 接头。对于铝/铜钎焊来说,控制金属间化合物层的厚度才能获得性能较好的异种接头,因此需要不断改善钎料性能,以求获得铜铝良好的接头。对于钎料,当前主要有

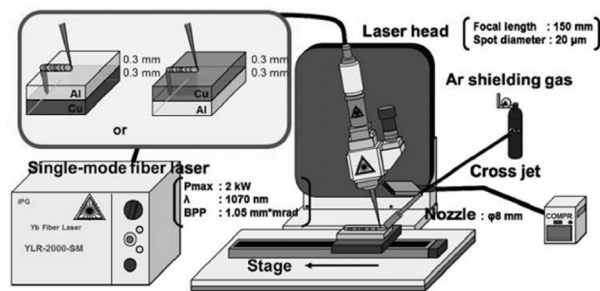


图 1 单模光纤激光器焊接铝铜异种薄板搭接实验装置示意

Fig.1 Schematic experimental set-up for lap welding of dissimilar Al and Cu sheets with single mode fibre laser

Sn-Pb 系、Sn-Zn 系、Cd-Zn 系、Zn-Al 系等钎料体系来满足铝铜的焊接^[1],如李亚江等^[20]人对低温 Sn-Pb 钎料钎焊 Cu/Al 接头的组织结构进行了试验研究。

近几年来,针对熔焊和钎焊的焊接方法提出了熔钎焊的新型焊接方法。熔钎焊是利用铝和铜熔点差异大的特点,在焊接时将热源置于铝侧,由于铝的熔点较低,导热性较差,过程中铝被热源熔化,在铜母材上铺展润湿从而形成焊接接头。对于熔钎焊主要有 TIG 熔钎焊、MIG 熔钎焊、激光熔钎焊、CMT (Cold Metal Transfer) 技术等,学者们针对铝/铜、铝/钢、铝/钛等异种金属开展了相关研究,使得用熔钎焊方法来进行异种金属焊接成为当前研究的热点。

对于 TIG 铝铜熔钎焊,周利等^[21]人选用 Zn-2% Al 和 Al-12%Si 两种药芯焊丝作为填充材料,开展了 5052 铝合金和 H62 黄铜的 TIG 熔钎焊搭接研究,分析了不同填充材料下的铝铜界面金属间化合物生长情况。在 MIG 熔钎焊方面,程东海等^[22]人利用 8515 药芯锌-铝焊丝对 T2 紫铜与 LY16 铝合金异种材料进行了 TIG 电弧填丝对接焊,获得了力学性能较好的接头,并开展接头金属间化合物分析研究。在激光铝铜熔钎焊方面,T. Solchenbach 等^[23]人研究了铝/铜异种金属的激光熔钎焊。焊接过程中通过控制热输入使得焊后铝/铜界面处形成了厚度均匀的金属间化合物层。肖荣诗等^[24]人采用激光深熔钎焊的方法实现铝/铜异种金属焊接。董刚等^[25]人采用 Zn-15%Al 实心焊丝开展了铝合金/黄铜 TIG 电弧熔钎焊搭接试验,对接头力学性能、显微组织和界面层成分进行了测试分析。在 CMT 铝/铜熔钎焊方面,曹睿等^[26-27]人利用 CMT 技术可有效降低母材的热输入这一特性,在填丝下实现铝/铜 CMT

熔钎焊焊接,获得接头性能较好的铝铜焊接接头,并对铝铜接头的金属间化合物层厚度、金属间化合物厚度进行了分析。

现今提出了脉冲旁路耦合电弧 MIG 焊(Pulsed DE-GMAW),如图 2 所示,以及微束等离子旁路耦合电弧焊方法(DE-MPAW)^[1],在此基础上开展了大量的铝/钢^[28-29]、镁/钢^[30]等熔钎焊研究,并初步尝试了铝/铜熔钎焊连接。旁路耦合电弧焊(DE-GMAW)是由美国肯塔基大学的张裕明教授提出的一种新型焊接方法^[31-32],该方法可较好地解决熔滴与母材的热分配,获得较好的焊接效果,由于其母材热输入低,国内众多学者利用旁路耦合电弧焊开展了相关熔钎焊研究^[1]。在国内,武传松等^[33]人也开展了旁路耦合电弧焊相关的研究。

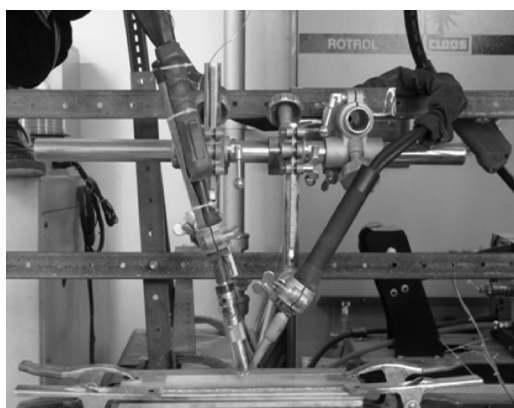
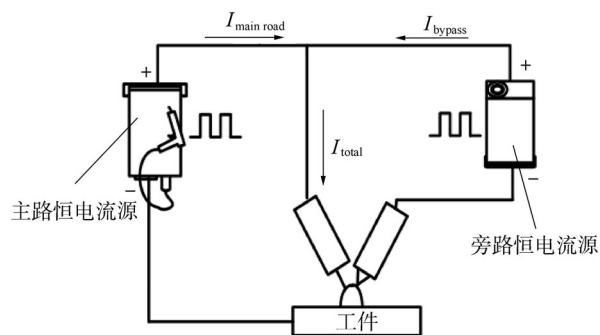
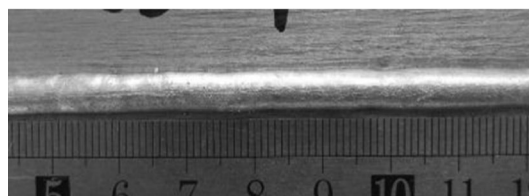


图 2 Pulsed DE-GMAW 基本原理及实物

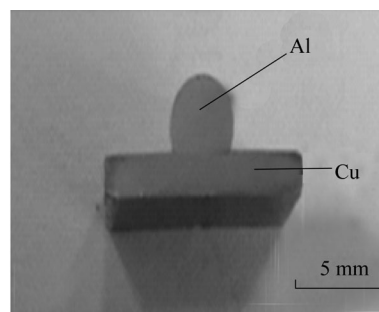
Fig.2 Pulsed DE-GMAW Basic principles and objects

脉冲旁路耦合电弧熔钎焊(Pulsed DE-GMAW)能精确的控制热输入和对熔滴过渡的可控制性,因此该工艺较为适合金属熔点温度相差较大的异种金属熔钎焊,故课题组开展了大量的异种金属熔钎焊研究,如铝/钢,镁/钢等。对于铝/铜的研究,在利用脉冲旁路耦合电弧熔钎焊焊接方法的基础上采用 4043 焊丝在 T2 铜表面进行堆焊的试验结果,如图 3 所示。由图 3 可知,采用 Pulsed DE-GMAW 可让

4043 焊丝在 T2 铜上实现良好的堆焊,且铜几乎没有融化。



a 焊缝正面



b 焊缝侧面

图 3 4043 焊丝在铜基体堆焊焊缝

Fig.3 4043 welding wire in the copper substrate welding seam

2 铝/铜熔钎焊技术目前存在的问题

从当前国内外研究现状中发现,在铝/铜异种金属电弧熔钎焊方面仍存在几个问题^[1]:

(1)铝铜熔钎焊焊接热源问题。对于不同种类的焊接热源,如激光、脉冲 MIG 以及 CMT 焊接方法都可以进行铝/铜焊接,但是这些焊接方法并不能完全适用于异种金属焊接,并获得性能良好的接头。对于铝/铜熔钎焊焊接,焊接热源要精确可控,减小热输入,并同时可以调节铝、铜、填充材料这三者之间的热量平衡,即控制三者之间的热输入。

(2)铝母材表面致密的氧化铝薄膜。纯铝在固态或者液态情况下都极易氧化并形成致密的氧化膜 Al_2O_3 ,附着在液态铝的表面,氧化膜的形成使得铜很难与铝进行冶金结合;同时,表面氧化铝薄膜将降低铝的流动性,对铝在铜表面的浸润与铺展存在影响。且铝在铜表面的浸润铺展机理还尚未明确^[1]。

(3)铝铜界面及接头性能。当前对铝/铜的焊接,主要研究接头界面的金属间化合物及力学性能。对于铝/铜异种金属突出的导电性、导热性以及耐腐蚀性等性能研究的较少,这使得铝铜接头特别是导电铝与导电铜之间的连接与应用缺少科学的基础^[1]。

3 结论

对于铝/铜熔钎焊,已经开展相关研究并取得一定的成果,但铝/铜异种金属的熔钎焊还存在着若干关键的基础科学问题需要深入、系统地研究。

(1)铝/铜异种金属熔钎焊过程中液态金属的浸润与铺展。在铝/铜异种金属熔钎焊过程中,特别是导电铝(纯铝)与导电铜的连接时,液态铝或铝合金在铜表面的浸润、流动及铺展性能对接头的形成有至关重要的作用,所以明确液态铝表面氧化膜生长机制与清除方法是非常重要的。

(2)铝/钢异种金属熔钎焊界面结构与界面性能机理。以往的研究普遍采用热力学平衡状态理论与平衡金相相图等方法来进行界面结构分析;但对于焊接,特别是熔钎焊这种温度剧烈变化的过程,显然已不适用;因而提出在非平衡条件下建立金属间化合物生长的热力学与动力学模型,特别是其他元素对金属间化合物生成作用机制。

(3)填充材料的铝/铜界面多性能兼顾及作用机制。对于导电铝与导电铜的连接,为获得较好的应用性能,填充材料的加入是不可避免的,填充材料可提高液态铝的流动铺展,也可以提高铝铜界面的导电能力,同时可增强接头的耐腐蚀性能。因此,铝/铜多方面优良性能是当前迫切需要解决的。这些科学问题的研究和解决,将对我国“以铝代铜”的战略具有重要意义,为导电铝和铜的工业现场连接等应用提供可靠的技术支持。

参考文献:

[1] 王梓懿. 铜/铜熔钎焊工艺及其界面机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.

[2] Murray J L, Massalski T B. Binary Alloy Phase Diagrams [M]. ASM International, 1990: 141-143.

[3] 石玢, 温俊霞, 黄健康, 等. 基于旁路耦合电弧的铝钢 MIG 熔钎焊研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 25-29.

[4] Mai T A, Spowage A C. Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminum[J]. Materials Science and Engineering, 2004, 374(1-2): 224-233.

[5] Liu Peng, Shi Qingyu, Wang Wei, et al. Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials[J]. Materials Letters, 2008, 62(25): 4106-4108.

[6] Ouyang J H, Yarrapareddy E, Kovacevic R. Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper[J]. Journal of Materi-

als Processing Technology, 2006, 172(1): 110-122.

[7] Saeid T, Abdollah-zadeh A, Sazgari B. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 490(1-2): 652-655.

[8] 柯黎明, 刘鸽平, 邢丽, 等. 铝合金 LF6 与工业纯铜 T1 的搅拌摩擦焊接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(9): 1534-1538.

[9] Wang X J, Zhang Z K, Da C B. Microstructures and properties analysis of dissimilar metal joint in the friction stir welded copper to aluminum alloy[J]. China Welding, 2007, 16(1): 57-61.

[10] Mohammad M. Hailat, Ahsan Mian. Laser micro-welding of aluminum and copper with and without tin foil alloy[J]. Microsystem Technologies, 2012, 18(1): 103-112.

[11] 董鹏, 陈凯华, 肖荣诗. 铝-铜异种材料激光焊接实验研究[C]. 第 13 届全国特种加工学术会议论文集, 2009: 459-462.

[12] 闫飞, 孙钦德, 徐道荣, 等. 铜铝异质金属火焰钎焊试验研究[J]. 电焊机, 2011, 41(3): 65-69.

[13] Ji F, Xue S B. Growth behaviors of intermetallic compound layers in Cu/Al joints brazed with Zn-22Al and Zn-22Al-0.05Ce filler metals[J]. Materials & Design, 2013(51): 907-915.

[14] 里亚博士. 铝及铝合金与其他金属的焊接[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.

[15] 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.


[16] Lee W B, Bang K S, Jung S B. Effects of intermetallic compound on the electrical and mechanical properties of friction welded Cu/Al bimetallic joints during annealing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 390(1-2): 212-219.

[17] 薛松柏, 董健, 吕晓春, 等. Al/Cu 管异种材料火焰钎焊连接[J]. 焊接, 2003(2): 23-25.

[18] 张洪涛, 刘多, 冯吉才, 等. 铝/铜高频感应接触反应钎焊[J]. 焊接学报, 2012, 33(3): 89-92.

[19] Xiao Y, Ji H, Li M, et al. Ultrasound-induced equiaxial flower-like CuZn5/Al composite microstructure formation in Al/Zn-Al/Cu joint[C]. Langford Lane, Killington, Oxford, OX51GB, United Kingdom: Elsevier Ltd, 2014: 135-139.

[20] 夏春智, 李亚江, 王娟. 基于 Sn-Pb 钎料的 Cu/Al 钎焊接头组织结构分析[J]. 焊接, 2003, 47(3): 23-25.

[21] 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  Page 47