

铝-铜外导槽式磁脉冲焊接接头组织与性能

熊永锋, 廖祯松, 马天宇, 邓将华, 范治松

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: **目的** 对铝板和铜板进行外导槽式磁脉冲焊接, 研究不同晶粒度的母材对焊接接头界面形貌和力学性能的影响。**方法** 采用万能拉伸试验机、扫描电镜、EDS 能谱以及显微硬度计等分析方法, 观察焊接接头界面形貌, 测试焊接接头的力学性能。**结果** 在电压 9 kV, 间隙 2 mm 的条件下, 获得了铝板和不同退火温度的紫铜板外导槽式磁脉冲焊接接头; 铜母材的晶粒度大小会影响铝-铜板焊接接头界面形貌, 经 450 °C 退火处理的铜板与铝母材形成界面波形最明显且过渡区厚度最大; 过渡区是铝铜元素的混合区, 宽过渡区界面形成稳定的化合物, 如 CuAl 和 CuAl₂; 焊缝处的显微硬度值总是比两侧母材的硬度值高, 远离焊缝的硬度值保持稳定, 未热处理的铜板与铝板形成的焊缝硬度最高。**结论** 铝-铜外导槽式磁脉冲焊接接头强度高于铝母材。

关键词: 外导槽式磁脉冲焊接; 铝-铜板; 界面形貌; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.06.025

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)06-0170-08

Microstructure and Properties of Aluminum-copper Joints Fabricated by Outer-channel Magnetic Pulse Welding

XIONG Yong-feng, LIAO Zhen-song, MA Tian-yu, DENG Jiang-hua, FAN Zhi-song

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

ABSTRACT: The paper aims to carry out outer-channel magnetic pulse welding of aluminum plate and copper plate to study the influence of base metal with different grain sizes on the interface morphology and mechanical properties of welded joints. Analytical methods such as universal tensile testing machine, scanning electron microscope, EDS spectrum and microhardness tester were used to observe the interface morphology of the joint and test the mechanical properties of the joint. Under the condition of voltage 9 kV and gap 2 mm, outer-channel magnetic pulse welded joints of aluminum plate and copper plate of different annealing temperature were obtained. The grain size of the copper base metal had an effect on the interface morphology of the aluminum-copper plate welded joint. The interface waveform between the copper plate and the aluminum base material which was annealed at 450 °C was the most obvious and the thickness of the transition zone was the largest. The transition zone was a mixed zone of aluminum and copper elements, and a wide transition zone interface formed stable compounds such as CuAl and CuAl₂. The microhardness value at the weld was always higher than that of the base metal on both sides, and the hardness value away from the weld remained stable. The welds formed by the unheated copper and aluminum plates had the highest hardness. The joint strength of aluminum-copper outer-channel magnetic pulse welding is higher than that of the aluminum base material.

KEY WORDS: outer-channel magnetic pulse welding; aluminum-copper plate; interface morphology; mechanical properties

收稿日期: 2019-07-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51705081, 51774097); 福建省自然科学基金 (2018J05079); 福建省高校青年自然科学基金 (JZ160417); 2018 年福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划

作者简介: 熊永锋 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为磁脉冲焊接。

通讯作者: 范治松 (1986—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为磁脉冲焊接。

铜具有良好的导电性和耐腐蚀性,铝具有较为良好的导热、导电性能,导电性能仅次于铜和银,资源丰富,价格低廉。铝-铜复合结构不仅具有高导电、导热等性能,又具有轻质、耐磨、经济等优势,在电线电缆等方面应用广泛^[1—4]。但铝铜两种金属之间的熔点、密度、导热率、比热容等物理性质方面存在较大的差异^[5],传统的熔化焊接方法容易在冶金反应过程中形成 CuAl 和 CuAl₂ 等脆性金属间化合物层,大幅降低了接头处的力学性能^[6]。

目前,铝-铜板连接方法有激光焊、搅拌摩擦焊、线性摩擦焊、钎焊等^[7—11]。磁脉冲焊接作为一种新型的固相连接技术,近年来引起越来越多的广泛关注。这种工艺能够在常温条件下实现连接,焊接过程无粉尘、飞溅、电磁辐射等,形成的构件装配精度高,气密性、耐腐蚀性好,接头强度比较弱母材高,对于异种金属焊接具有良好的适配性,是一种绿色环保的连接工艺。线圈作为磁脉冲焊接的一个工装,起着重要的作用。T. Aizawa 等用 E 型线圈研究了钢板和不同类型的铝板的磁脉冲焊接工艺参数和接头性能,连接的电流峰值可以达到 150 kA^[12]; M. Watanabe 等用 E 形线圈研究了纯铝和金属玻璃的磁脉冲焊接接头界面微观结构^[13]; S. D. Kore 等设计了 I 形线圈,并研究了不同线圈几何形状对铝-铝板显微组织和剪切性能的影响,试验时电流峰值可以达到 200 kA^[14],在此基础上,又用 I 形线圈研究了铝-钢板、铝-锂板、铝-镁板的组织和性能^[15—17]; 苏德智等用 I 形线圈对铝-铜板进行了磁脉冲焊接试验,研究了放电电压和两板之间的间隙对接头抗剪强度及焊缝宽度的影响^[18]。

E 形线圈和 I 形线圈,都是单匝线圈,与板坯的耦合程度低,磁力线大多分布于空间中,为了达到磁脉冲焊接的速度要求,连接时不得不提高放电电压幅值以提高磁脉冲驱动力幅值。但是放电电压过高,大幅降低了线圈和设备的使用寿命。采用外导槽式(亦称为“匀压式”)磁脉冲焊接方法可以解决上述问题,其基本原理如图 1 所示:将电容充至预设电压,然后闭合高压放电开关,对线圈进行放电,在线圈回路中产生巨大的电流,并产生变化的强磁场,根据楞次定律,会在飞板和外导槽中产生巨大的感应电流,在强磁场的作用下,飞板上产生巨大向下的磁场力,使飞板在数十微秒内加速到百米每秒的速度,与靶板相撞,在角度合适的情况下与靶板形成冶金连接。外导槽和飞板形成的回路能够达到“集磁-控力”的效果,可以有效降低磁脉冲焊接电压幅值。C. Weddeling 等使用匀压线圈实现了铝-铝接头的磁脉冲焊接^[19]。于海平等采用匀压线圈对铝-钢板进行了磁脉冲焊接,分析了放电电压、两板之间的间隙和间隙宽度对焊接质量的影响^[20]。目前还未见到利用外导槽式磁脉冲焊

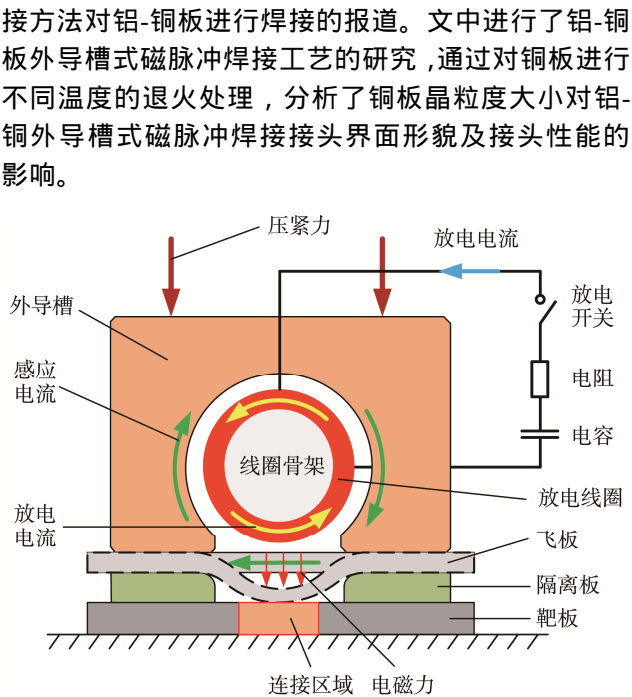


图 1 外导槽式磁脉冲焊接原理
Fig.1 Schematic diagram of outer-channel magnetic pulse welding

1 材料与方法

试验材料为 5052 铝板和 T2 紫铜板,其中 5052 铝板作为飞板,T2 紫铜板作为靶板,铝板和铜板的试样尺寸和力学性能如表 1 所示。试验采用的是 EMF_50/20 型磁脉冲连接设备,设备额定放电能量为 50 kJ,额定放电电压为 20 kV,电容值为 250 μF。试验工装如图 2 所示,整个工装由外导槽、飞板、靶板、线圈、隔离板和压紧装置组成。隔离板采用的是环氧树脂板,厚度为 2 mm,间隙宽度为 15 mm。线圈采用的是 3 mm×5 mm 的铜线,一共有 8 匝。

表 1 铝-铜板试样尺寸及力学性能
Tab.1 Size and mechanical property of aluminum-copper plate

材料	长度/ mm	宽度/ mm	厚度/ mm	屈服 强度/MPa	抗拉 强度/MPa	熔点/ ℃
T2紫铜	105	50	2	255	337	1083
5052铝	105	50	1	145	191	660

试验的 T2 紫铜板分为 4 组,一组无处理(轧制态),作为对照组,其余 3 组分别进行 450, 650, 850 ℃ 的退火处理,升温速率为 5 ℃/min,保温时间为 2 h。热处理过后的紫铜金相如图 3 所示。表 2 是经过测量的紫铜晶粒尺寸。由表 2 可知,随着退火温度的升高,紫铜板的晶粒尺寸变得越大,850 ℃退火处理的紫铜板的晶粒尺寸是其他退火温度的 3 倍左右。

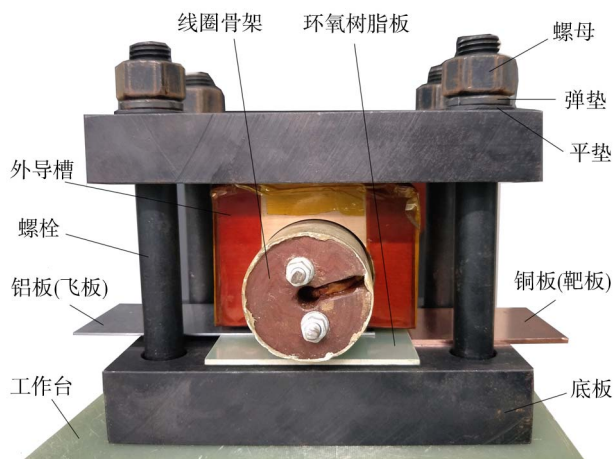


图2 试验工装
Fig.2 Test fixture

表2 不同热处理温度下的紫铜晶粒尺寸
Tab.3 Copper grain size at different heat treatment temperature

热处理温度/℃	未热处理	450	650	850
晶粒尺寸/ μm	19.3	25	29.7	78.8

磁脉冲焊接试验前, 撕掉包覆在铝板外面的薄膜, 用酒精清洗铝板、铜板待连接区域以及铝板和外导槽连接部分的油污。试验后, 利用万能拉伸试验机测试连接件的焊接强度, 扫描电镜观察界面的连接情

况, EDS 设备表征界面元素分布情况, 显微硬度计测试连接界面区域的显微硬度。

2 结果与讨论

2.1 接头拉伸性能

铝-铜板在 7 kV 和 8 kV 电压下未焊接上的试样经过拉伸试验之后的宏观形貌如图 4a 所示, 拉脱试样中铝板在铜板上留有矩形形状的铝屑, 与铜板长度方向平行的两边遗留的铝屑特别的粗厚。如图 4b 和 4c 所示, 5052 铝板和不同退火温度 T2 紫铜板在 9 kV 下完成了磁脉冲焊接, 经过拉伸试验, 焊接试样都是铝母材断裂, 接头强度比铝母材高。试样的焊接区域成凹陷的椭圆状, 拉伸断裂处都在铝母材椭圆处的边缘。图 5 是 4 个试样的拉伸曲线, 由于都是铝母材断裂, 所以拉伸试样的峰值力不是相差很大。

2.2 组织特征分析

图 6 是拉伸试验后试样线切割的位置示意图, 图 7 是不同热处理温度下 T2 紫铜板与 5052 铝板磁脉冲焊接接头界面形貌以及其局部放大图。由图 7 可知, 450 °C 退火处理的铜板与铝板形成的焊接界面形貌波形最明显, 过渡区的范围也最广, 过渡区最厚处的厚度约有 2.94 μm 。未经热处理的铜板与铝板的焊接界面中铜母材的分布比较凌乱, 有些铜母材被单独分



a 无热处理 (轧制态)



b 450 °C



c 650 °C



d 850 °C

图3 不同热处理温度下的紫铜金相

Fig.3 Copper metallographic phase at different heat treatment temperature

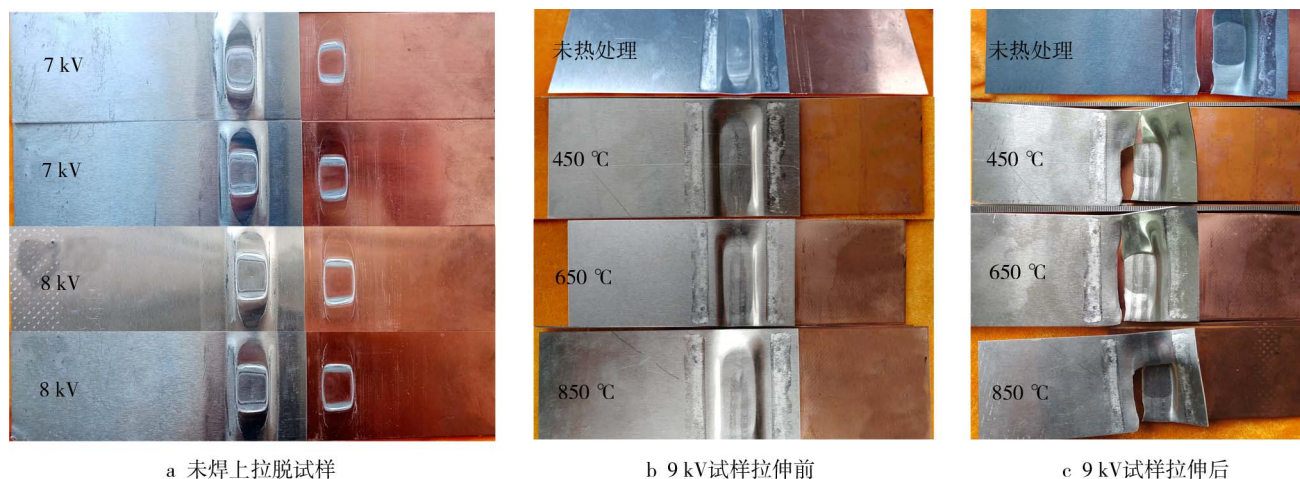


图 4 拉伸试样
Fig.4 Tensile specimen

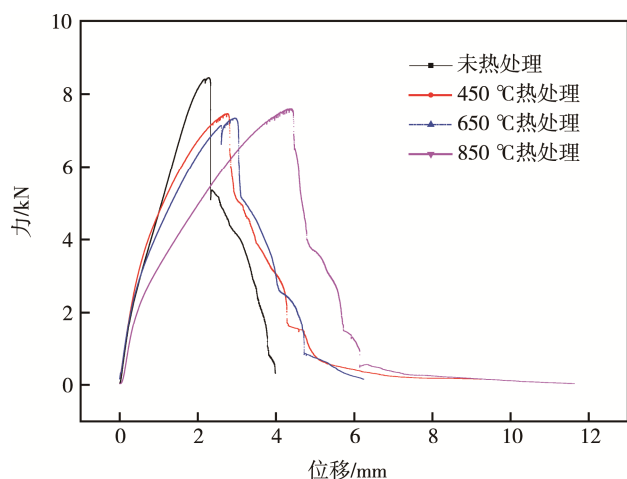


图 5 拉伸曲线
Fig.5 Tensile curve

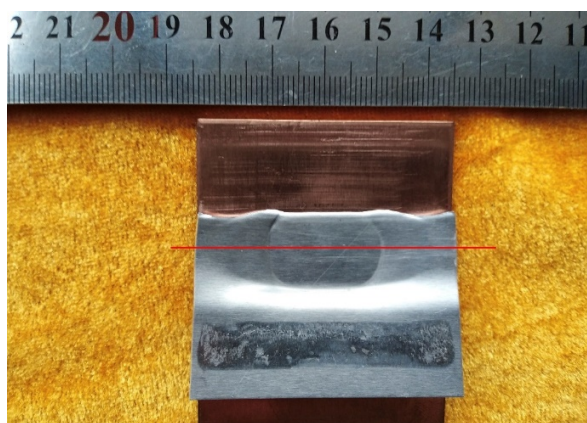


图 6 切割位置示意图
Fig.6 Diagram of cutting position

裂开，过渡区的最大厚度约为 $2.22 \mu\text{m}$ 。650 °C 和 850 °C 退火处理的铜板与铝板形成的焊接形貌波形界面也不是很明显，过渡区的最大厚度也越来越小，分别为 $1.77 \mu\text{m}$ 和 $1.67 \mu\text{m}$ 。由表 3 可知，退火温度

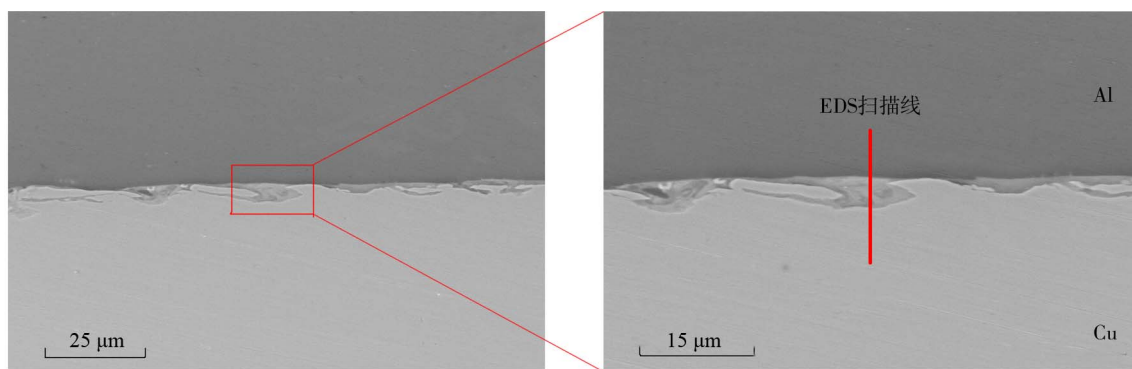
越高，晶粒尺寸越大，在形成焊接界面时就需要越多的能量来细化晶粒，用于形成过渡区的能量减少，过渡区的范围和最大厚度也越来越小。

以上波状的波长和波幅都不稳定，铜侧界面形成的波状基本上都是以尖角状的形式嵌入到铝侧，铝侧界面形成的波状以比较平缓的方式嵌入到铜侧，就是这两种不稳定的相互交错的嵌入方式，形成了不规则的波状界面。根据 Kelvin-helmholtz 失稳模型^[21]，由于在铝板的高速冲击下，与铜板在界面处产生了持续性的压力，由于铝板较铜板更为质地柔软，界面处的铝先发生局部塑性变形失稳，由于压力的持续作用，加工硬化严重，铝的塑性变形抗力显著提高。当铝侧的变形抗力大于铜侧的变形抗力时，塑性失稳发生在铜侧。进行到一定程度时，铝侧的受压状态得到缓解，加工硬化降低，塑性失稳又重新发生在铝侧。如此反复，再考虑到铝-铜板其他物理性能之间的差距，形成了铝-铜板磁脉冲焊接界面的不规则波状界面。

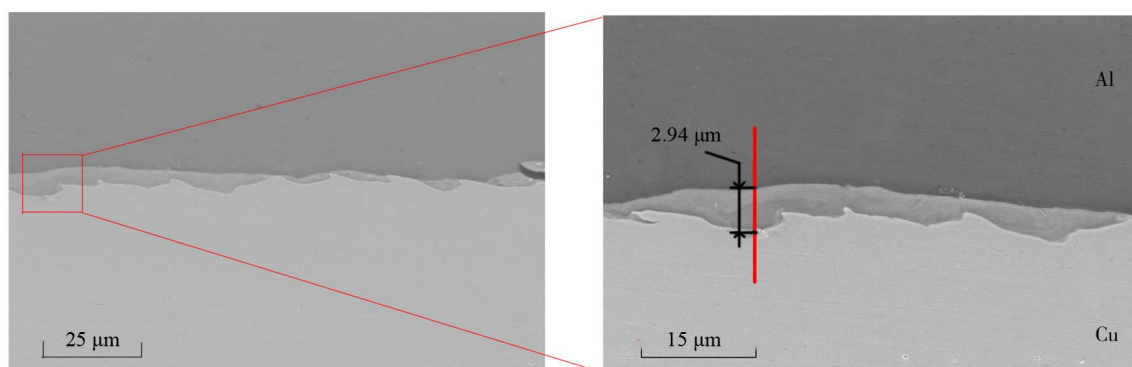
图 8 所示是界面局部位置线扫描能谱图(位置为图 7 中 EDS 扫描线所示)。从图 8 可以看出，在过渡区中存在铝铜两种元素，元素含量随着位置的变化而变化。图 8a 和 8b 过渡区中成分趋于稳定，图 8c 和 8d 过渡区中元素呈梯度扩散。图 8a 中元素稳定位置处铝的质量分数为 40%，铜的质量分数为 60%，图 8b 中元素稳定位置处铝质量分数为 60%，铜质量分数为 40%。由铝铜合金相图可知，图 8a 位置可能生成了 $\text{CuAl}(\eta_2)$ 和 $\text{CuAl}_2(\theta)$ 中间相，图 8b 位置可能生成了 $\text{CuAl}_2(\theta)$ 中间相。

2.3 界面硬度分布

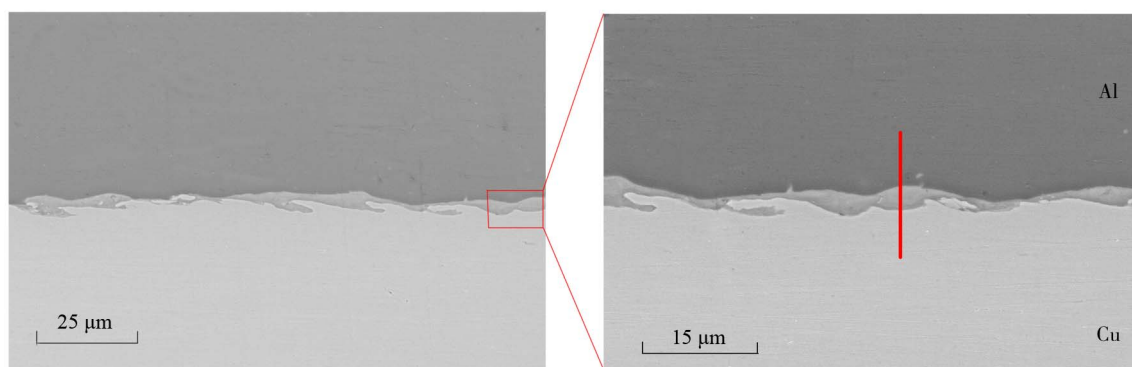
铜母材经过 650 °C 热处理与铝板形成的磁脉冲焊接界面硬度分布如图 9 所示，其他样品测试方法参



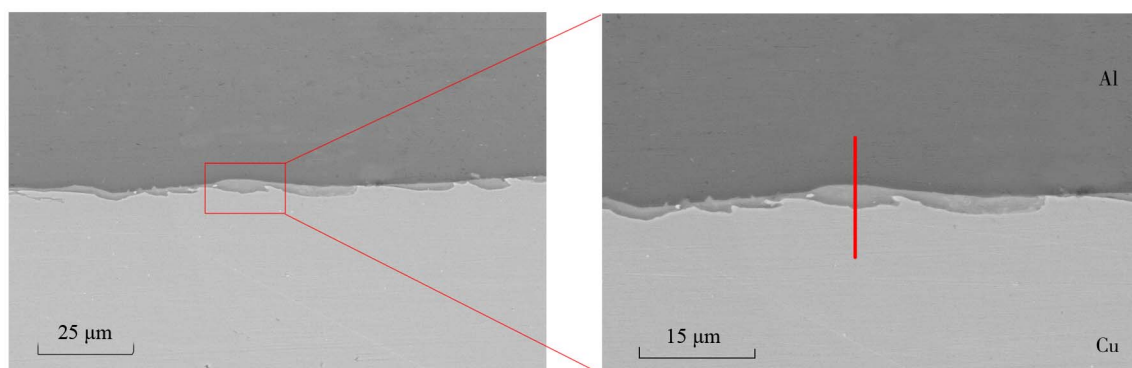
a 无热处理



b 450 °C热处理



c 650 °C热处理



d 850 °C热处理

图7 不同热处理温度下焊接界面形貌
Fig.7 Welding interface morphology at different heat treatment temperature

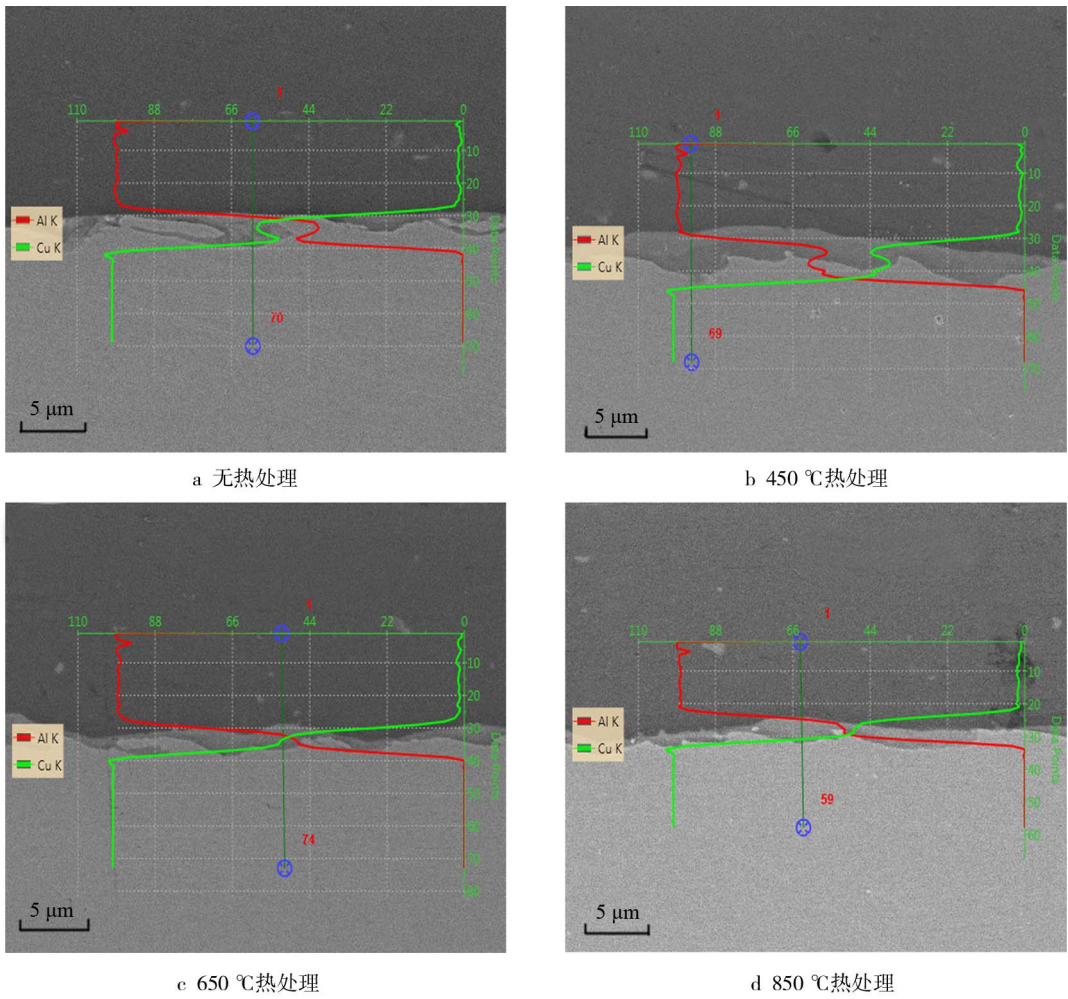


图 8 界面局部位置线扫描能谱图
Fig.8 Line scan energy spectrum of interface local position

照图 9，形成的各个样品显微硬度值如图 10 所示。从图 10 可以看出焊缝处的显微硬度值总是比两侧母材的硬度值高，远离焊缝硬度值保持稳定，无热处理的铜母材与铝板形成的焊缝界面硬度最高。无过渡区焊缝处由于铝板 and 铜板在高速碰撞下产生了加

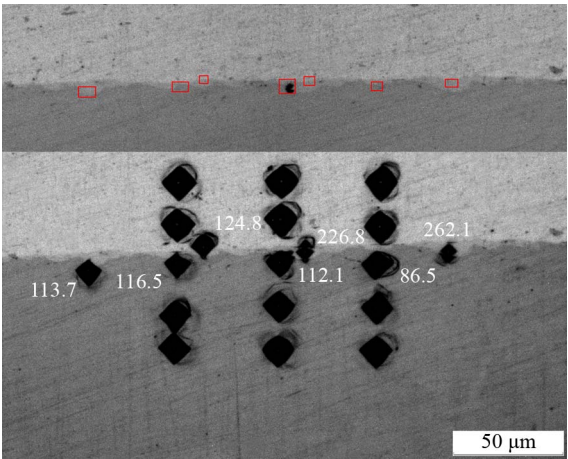


图 9 650 °C热处理界面硬度分布
Fig.9 Hardness distribution of heat treatment at 650 °C

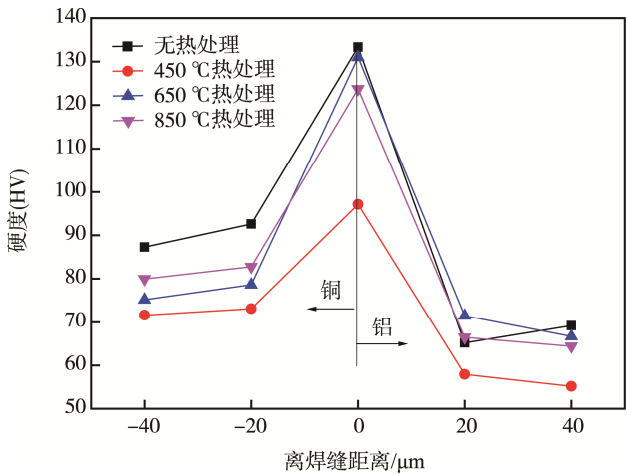


图 10 焊缝及焊缝两侧显微硬度
Fig.10 Micro-hardness of weld and its both sides

工硬化所以硬度值比两侧母材高。过渡区中含有脆硬的金属间化合物，因此硬度值会显得比无过渡区的焊缝硬度更高。从 650 °C热处理界面焊缝处来看，过渡区硬度能够达到 HV262.1，这个硬度是母材硬度的 4 倍。

3 结论

1) 在电压 9 kV, 间隙 2 mm 的条件下, 获得了 5052 铝板和不同退火温度 T2 紫铜板外导槽式磁脉冲焊接接头。

2) 铜母材的晶粒度大小会影响铝-铜板焊接接头界面形貌, 经 450 °C 退火处理的铜板与铝母材形成界面波形最明显且过渡区厚度最大。

3) 过渡区是铝铜元素的混合区, 宽过渡区界面形成稳定的化合物, 如 CuAl 和 CuAl_2 。

4) 焊缝处的显微硬度值总是比两侧母材的硬度值高, 远离焊缝硬度值保持稳定, 未热处理的铜板与铝板形成的焊缝硬度最高。

参考文献:

- [1] 邓怀波, 陈玉华, 陈伟, 等. 铜合金增材制造技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 95—101.
DENG Huai-bo, CHEN Yu-hua, CHEN Wei, et al. Research Progress in Additive Manufacturing Technology of Copper Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 95—101.
- [2] 吴新勇, 廖娟, 薛新, 等. 钛/铝异种合金脉冲激光焊接接头裂纹产生机理[J]. 精密成形工程, 2018, 10(6): 87—93.
WU Xin-yong, LIAO Juan, XUE Xin, et al. Mechanism of Crack Generation in Pulsed Laser Welded Joint of Titanium/Aluminum Dissimilar Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(6): 87—93.
- [3] 徐荣正, 张德良, 李慧, 等. 铝/铜异种金属搅拌摩擦焊研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 7—10.
XU Rong-zheng, ZHANG De-liang, LI Hui, et al. Study on Friction Stir Welding of Al/Cu Dissimilar Metals[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(11): 7—10.
- [4] 王梓懿. 铝/铜熔钎焊工艺及其界面机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
WANG Zi-yi. Study on the Al/Cu Welding-brazing Process and Its Interfacial Mechanism[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.
- [5] 刘会杰, 沈俊军. 铝/铜异种材料的焊接研究[J]. 焊接, 2009(3): 14—18.
LIU Hui-jie, SHEN Jun-jun. Welding Research of Dissimilar Materials[J]. Welding, 2009(3): 14—18.
- [6] 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(1): 10—13.
HUANG Jian-kang, WANG Zi-yi, LIANG Fei-fei, et al. Research Status of Fusion Brazing for Al/Cu Dissimilar Alloys[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(1): 10—13.
- [7] MAI T A, SPOWAGE A C. Characterization of Dissimilar Joints in Laser Welding of Steel-Kovar, Copper-Steel and Copper-Aluminium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 374(1/2): 224—233.
- [8] 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.
DONG Feng-bo. The Investigation of Friction Stir Welding Process for Dissimilar Metals of Aluminium Alloy to Copper[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [9] 张骁, 王敏, 张会杰, 等. 薄板铝铜搭接搅拌摩擦焊工艺[J]. 精密成形工程, 2017, 9(5): 187—191.
ZHANG Xiao, WANG Min, ZHANG Hui-jie, et al. Friction Stir Welding Process for Lap Joint of Aluminum Copper Sheet[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(5): 187—191.
- [10] 周楠, 戚文军, 宋东福. 铝铜异种材料线性摩擦焊接头的微观组织与力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(5): 1255—1259.
ZHOU Nan, QI Wen-jun, SONG Dong-fu. Microstructure and Mechanical Properties of Linear Friction Welded Joints of Aluminum-Copper Dissimilar Materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(5): 1255—1259.
- [11] 刘正林. 铝铜钎焊用 Zn-Al 钎料及其焊接工艺的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
LIU Zheng-lin. Study on Zn-Al Brazing Filler Metal for Aluminum Brazing and Its Welding Process[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [12] AIZAWA T, OKAGAWA K, KASHANI M. Application of Magnetic Pulse Welding Technique for Flexible Printed Circuit Boards (FPCB) Lap Joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(7): 1095—1102.
- [13] WATANABE M, KUMAI S, HAGIMOTO G, et al. Interfacial Microstructure of Aluminum/Metallic Glass Lap Joints Fabricated by Magnetic Pulse Welding[J]. Materials Transactions, 2009, 50(6): 1279—1285.
- [14] KORE S D, DATE P P, KULKARNI S V. Effect of Process Parameters on Electromagnetic Impact Welding of Aluminum Sheets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(8): 1327—1341.
- [15] KORE S D, DATE P P, KULKARNI S V. Electromagnetic Impact Welding of Aluminum to Stainless Steel Sheets[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1/2/3): 486—493.
- [16] KORE S D, DATE P P, KULKARNI S V, et al. Electromagnetic Impact Welding of Al-to-Al-Li Sheets[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(3): 034502.

- [17] KORE S D, IMBERT J, WORSWICK M J, et al. Electromagnetic Impact Welding of Mg to Al Sheets[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14(6): 549—553.
- [18] 苏德智, 王义峰, 冉洋, 等. 铝-铜平板磁脉冲焊接工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(23): 229—233.
SU De-zhi, WANG Yi-feng, RAN Yang, et al. Study on Magnetic Pulse Welding of Aluminum and Copper Plate[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(23): 229—233.
- [19] WEDDELING C, HAHN M, DAEHN G S, et al. Uniform Pressure Electromagnetic Actuator-An Innovative Tool for Magnetic Pulse Welding[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 18: 156—161.
- [20] YU H, TONG Y. Magnetic Pulse Welding of Aluminum to Steel Using Uniform Pressure Electromagnetic Actuator[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5/6/7/8): 2257—2265.
- [21] BEN-ARTZY A, STERN A, FRAGE N, et al. Interface Phenomena in Aluminium-Magnesium Magnetic Pulse Welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(4): 402—408.