

doi: 10.3969/j.issn.1007-7545.2014.05.015

高纯铝与铜爆炸焊接性能分析

陈明, 万小勇, 董亭义, 何金江, 高岩, 吕保国

(北京有色金属研究总院 有研亿金新材料股份有限公司, 北京 100088)

摘要: 使用爆炸焊接对高纯铝与铜坯料进行连接, 将超声 C-scan 应用于爆炸焊接复合板坯的无损探伤, 并从坯料微观组织和力学性能等方面分析了焊接性能。结果表明, C-scan 能够在不破坏板坯的情况下, 全面快速检测爆炸焊合率; 焊接完成后, 铝板坯晶粒间有条状应力带, 热处理后应力带消失且晶粒未异常长大。爆炸焊接能实现高纯铝与铜的高强度焊接, 焊接强度约 43 MPa。

关键词: 高纯铝; 爆炸焊; 超声无损探伤; 微观组织

中图分类号: TG456.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2014)05-0056-04

Performance Analysis on Interlayer of High Purity Aluminum and Copper Bonded by Explosive Welding

CHEN Ming, WAN Xiao-yong, DONG Ting-yi, HE Jin-jiang, GAO Yan, Lü Bao-guo

(General Research Institute for Non-ferrous Metal, Grikin Advanced Materials Co Ltd, Beijing 100088, China)

Abstract: High purity aluminum and copper were bonded by explosive welding. The bonding plate was nondestructive tested by C-scan. The welding properties of Al/Cu composite plate were analyzed in terms of microstructure and mechanical properties. The results show that C-scan, as a nondestructive testing method, can detect bonding quality rapidly. Existing in combined interface after welding, strip stress zones disappear with no grain growth after heat treatment. Explosive welding can realize the strength weld between high purity aluminum and copper with tensile strength of combined interface of about 43 MPa.

Key words: high purity aluminum; explosive welding; ultrasonic nondestructive testing; microstructure

爆炸焊接是爆炸加工新技术中一种特种金属焊接方法, 利用炸药爆炸产生的冲击力造成工件迅速碰撞而实现焊接, 适合于焊接异种金属, 如铝、铜、钛、镍、钽、不锈钢与碳钢的焊接, 铝与铜的焊接等^[1-2]。

高纯铝在电子行业有广泛应用, 它们通常与铝、铜等焊接制成产品。由于高纯铝的再结晶温度不超过 300 °C, 为保证材料的高强度可靠焊接, 同时又要防止材料微观组织在焊接热加工中不发生变异, 焊接一直是研究的重点和难点^[3]。目前铝和铜的大面积连接方法主要有两种, 即钎焊和扩散焊接。钎焊

焊料一般为 In、Sn 及其合金^[4], 但由于焊料熔点限制和焊接强度影响, 钎焊并不适合铝和铜的高强度连接。大量研究表明^[5-7], 扩散焊接能实现铝/铜的高强度焊接, 铝/铜扩散焊接焊前需对金属表面严格处理, 工艺较为复杂, 且扩散温度一般都在 500 °C 以上, 在这个温度下高纯铝晶粒会异常长大, 影响坯料性能; 同时扩散焊接过程热循环时间长, 生产率低, 且焊接工件的尺寸受到设备的限制, 大规模生产成本高, 因此需要一种经济化生产并保证连接质量的大面积高纯铝与铜的焊接方法。

本文采用高纯度铝与无氧铜板坯进行爆炸焊接研

收稿日期: 2013-10-16

基金项目: 国家 02 重大科技专项(2011ZX02705)

作者简介: 陈明(1980-), 男, 陕西商洛人, 工程师。

究,分析爆炸焊接组织性能,结合超声 C-scan 对爆炸复合的背板进行无损探伤,评估爆炸焊接的可靠性。

1 试验方法

本试验复板为无氧铜坯料,尺寸为 400 mm ×

400 mm × 9 mm,基板材料为超纯铝(>99.999%)坯料,尺寸为 400 mm × 400 mm × 20 mm,复板与基板均精加工表面,表面粗糙度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$,爆炸焊接时两板平行放置,间距 8 ~ 10 mm,选用膨化炸药,坯料边角处引爆,焊接示意图如图 1 所示。

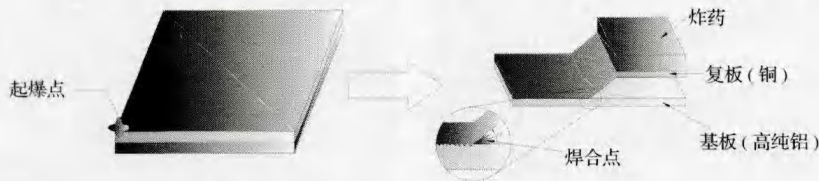


图 1 爆炸焊接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of explosive welding

爆炸焊接完成后,对复合坯料进行退火压平,并采用超声设备进行超声探伤,探伤时使用 4 寸 10 MHz 聚焦探头。

使用 Olympus BX51 型光学显微镜分析超纯铝坯料焊接前后的金相组织,用 SU-1500 扫描电镜及其自带 EDS 分析焊接后焊接界面微观组织和结合区的成分,采用 CSS44200 电子万能拉伸机分析焊接坯料的结合强度。

2 试验结果及讨论

2.1 超声扫描分析

图 2 是爆炸焊接坯料超声检测图。图 2a 中 A 区为未焊合区,B 区表示已焊合,其中 B 区中夹杂着

少量 B' 区,B' 区对应的回波强度稍低于 B 区,这是由焊接界面的波峰波谷和中间过渡层对声波反射不同造成的^[8]。图中右下角为起爆点,从图上可看到,坯料焊接方向沿起爆点成放射状展开,起爆点及坯料边缘焊接质量较差,经计算,去除坯料边角,本次爆炸焊接坯料焊合率 $\geq 98\%$,焊接质量良好。

为了进一步确认超声检测准确性,分别在图 2a 中的 A 区与 B 区切取试样,观察其纵截面的金相组织,结果如图 3 所示。从图 3a 可看到,两种坯料未结合,焊接失效。而图 3b 中的焊接面焊接状况较好,铝坯料与铜已完全贴合。从上述结果可确定:超声无损探伤能准确检测爆炸焊接坯料的结合情况。

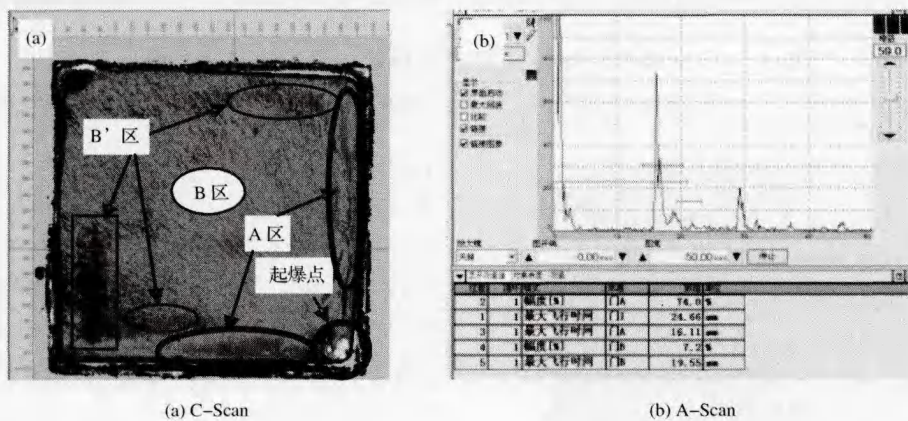


图 2 焊接坯料超声检测图

Fig. 2 Ultrasonic testing of explosive welding billet

造成边缘处未焊合的主要原因是:爆炸焊接时,基板和复板之间有一夹角 β ,炸药爆炸时产生复板结合面法向向下的力^[9]。根据物理学原理,这个力分可为使复板下落的分力(使基板和复板结合)和一

个向前作用力,向前作用力对后面复板和基本起到拉扯作用,当这个拉力作用到坯料边缘时,极可能会使材料开裂,因此图 2 中起爆点及其两侧边缘的焊合率较差。

2.2 爆炸焊接界面

爆炸焊接坯料的纵截面形貌如图4所示。由图4可见,爆炸焊接结合界面呈波状(图4a),铝坯料与铜坯料之间有明显的中间过渡层(图4b),每个波峰

前存在一漩涡,漩涡不仅有气孔,裂纹和疏松等缺陷,还有新生成的金属间化合物和其它小颗粒残留物质。

中间层的线扫描分析结果如图5所示。

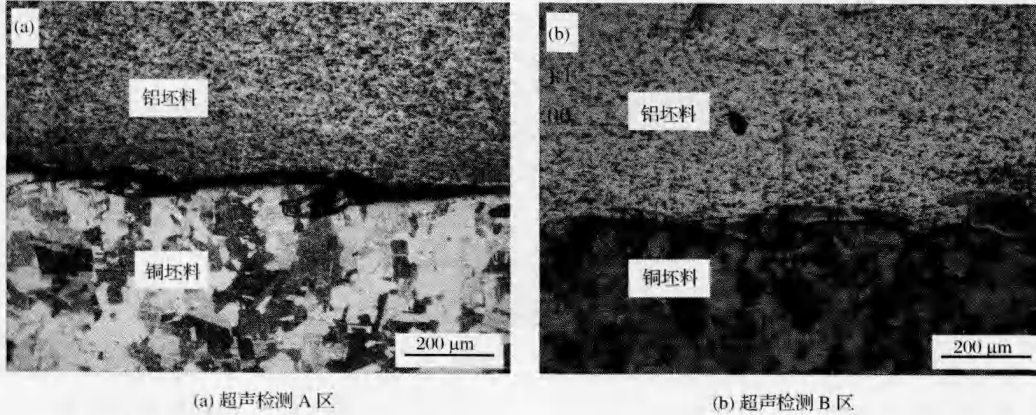


图3 坯料焊缝组织
Fig. 3 Interfacial microstructure of explosive bonding

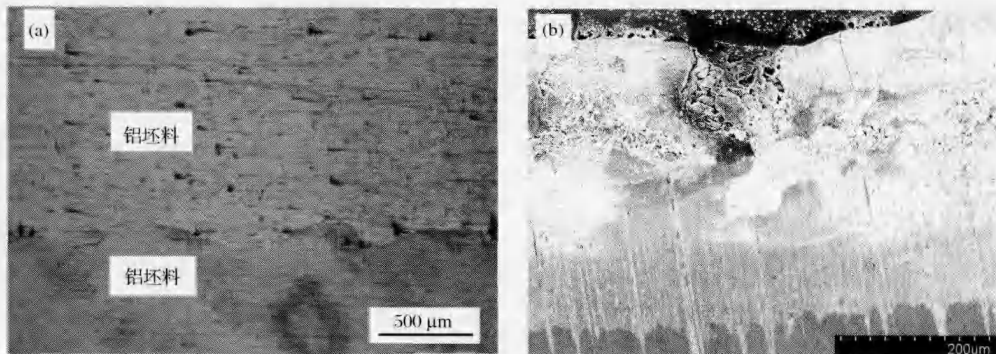


图4 铝-铜爆炸焊接纵截面宏观形貌(a)和SEM形貌(b)

Fig. 4 Macrostructure (a) and SEM morphology (b) of longitudinal section of Al-Cu explosive welding

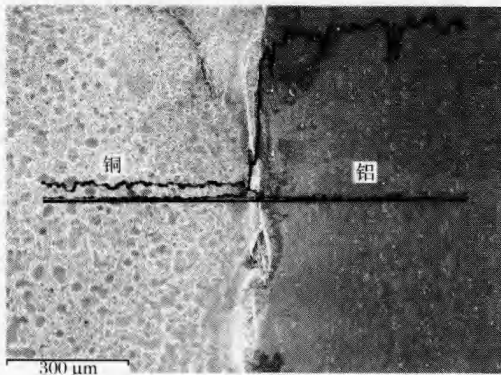


图5 中间层线扫描图
Fig. 5 Line scanning of interlayer

从图5可看出,铝与铜坯料间互相有扩散,厚度约为40 μm,定量分析表明,中间层中铝和铜的原子

百分数分别为69.56%和30.44%,二者的原子比接近2:1,可确定中间层主要为Al₂Cu。Al₂Cu为脆性相,由于爆炸焊接界面两侧基体都发生了剧烈的塑性变形而存在大量残余应力,这就导致局部过厚的Al₂Cu层开裂。爆炸焊接在瞬间完成,如果只有扩散,中间层厚度应该极薄,一般不超过1 μm,因此爆炸焊接界面还有其它反应发生,这可根据爆炸焊接机制进行分析。爆炸焊接以压力焊为主,同时也存在有熔化焊和扩散焊机制。在爆炸焊接过程中,当复板向基板倾斜撞击时,界面两侧薄层金属在切应力的作用下,在碰撞点上,由于高速倾斜撞击产生很大的压力,该处的金属受到很大的剪切作用,塑性剪切功转变成热量,由热传导所消耗的热量只占很小一部分,大部分热量促使金属温升,在爆炸瞬间,

碰撞区处于近似绝热状态,界面两侧薄层金属温度急剧升高而使其中一部分熔化,这层熔化了金属在塑性变形和波形成的过程中,大部分被推向了漩涡区,由金属物理学原理可知,在爆炸焊接的过程中,由于不同金属间的高的浓度梯度,界面两侧不同的金属在高压、高温、高温下的塑性变形和熔化及其

综合作用的条件下,原子相互发生扩散^[10-12]。当铝-铜爆炸焊接工艺参数不合适时,必然导致界面处出现连续熔化区和过厚的扩散层,生成大量脆性相,导致焊接质量下降。

2.3 金相分析

图6为爆炸焊接前后的金相组织。

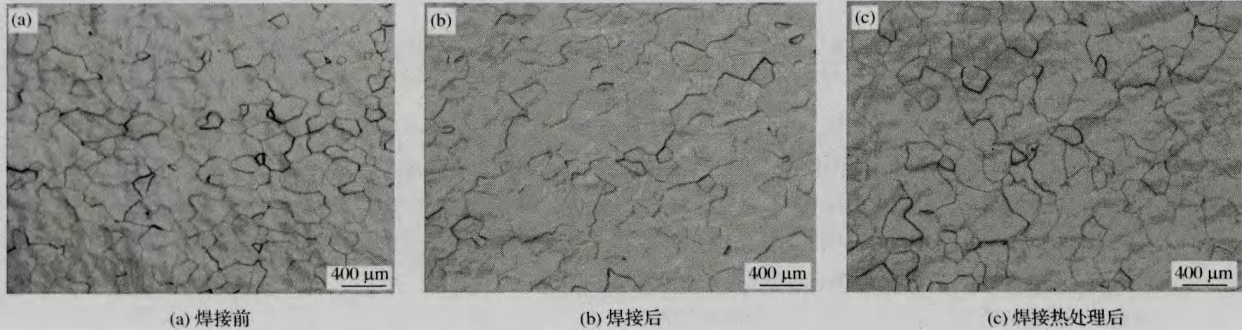


图6 铝坯料金相组织

Fig. 6 Metallograph of aluminum billet

焊接前铝坯料晶粒等轴均匀(图6a),平均晶粒尺寸约为164 μm 。焊接后铝坯料的内晶界平直完整(图6b),晶粒尺寸与形貌与焊前无明显差异,但晶粒内部出现大量应力带,这是由焊接时爆炸产生的冲击波造成的。应力带的存在会降低靶材性能,因此必须对坯料进行热处理消除内部残余应力,热处理后晶粒等轴均匀(图6c),晶界完整,应力带消失,晶粒尺寸约为173 μm ,与焊前无明显变化。

爆炸焊接前后硬度测试结果显示,焊前超纯铝坯料已完全再结晶,维氏硬度约为HV13;爆炸焊接后由于应力带的存在导致硬度升高,硬度值约为HV21;焊接坯料热处理后,坯料内应力带消失,大部分残余应力消除,硬度降低,达到HV16。

2.4 拉伸性能分析

爆炸焊接的铝与铜板坯的拉伸曲线见图7,坯料抗拉强度约为43 MPa,远高于普通软钎焊的抗拉强度11 MPa,符合高强度焊接需要。

3 结论

1)通过超声C-scan无损探伤,能够反应爆炸焊接的结合程度。

2)爆炸焊接存在过渡区,过渡区主要为中间层 Al_2Cu 金属间化合物。

3)爆炸焊接后晶粒内部存在大量应力带,导致铝坯料硬度升高,热处理后应力带消失,坯料硬度值下降,晶粒尺寸与爆炸焊接前无明显变化。

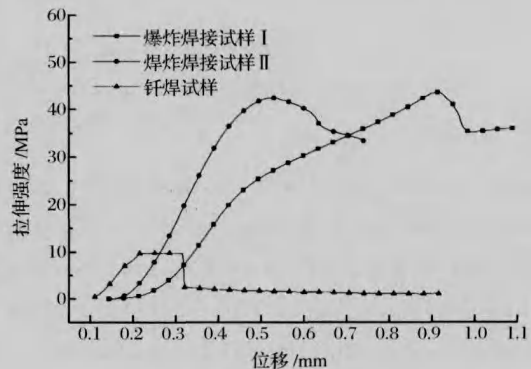


图7 焊接坯料拉伸曲线

Fig. 7 Tensile curves of welding samples

4)采用爆炸焊接,能够实现高纯铝和无氧铜的高质量焊接。

参考文献

- [1] 郑远谋,黄荣光,陈世红. 爆炸焊接和金属复合材料[J]. 复合材料学报,1999,16(1):14-21.
- [2] 董亭义,刘小鱼,马万珍,等. 管式结晶器爆炸成型试验研究[J]. 工程爆破,2004,10(3):31-33.
- [3] 何金江,郭立山,王欣平,等. 高纯铝合金与6061铝合金的电子束焊接[J]. 2007,36(19):33-35.
- [4] Gickler A E, Leprevost F H. Tips for soldering aluminum[J]. Welding Journal, 2004, 83(2):46-47.

(下转第67页)

由图3可知,铸态Al-Mg合金中只含有Al及 Al_3Mg_2 相,而在Al-10Mg铸造合金中分别加入锆和钪后,在合金凝固前,形成了具有较高熔点的金属间化合物 Al_3Zr 和 Al_3Sc ,可以成为非自发结晶的核心,并且这些粒子还能够阻碍晶粒的长大,使铸态枝晶分布更弥散、更细小^[9]。同时,在 Al_3Zr 和 Al_3Sc 等金属间化合物形成过程中,锆和钪与铝原子发生了置换固溶,使纯铝的晶格发生畸变,阻碍了位错的运动而产生固溶强化。

3 结论

1)添加0.4%的钪和0.35%的锆,可以显著提高Al-10Mg铸造合金的抗拉强度和延伸率,而且钪对其抗拉强度的影响强于锆,而锆对延伸率的影响高于钪。

2)在Al-10Mg铸造合金中加入钪、锆,是通过细晶强化作用使其力学性能得到改善的。

3)在Al-10Mg铸造合金中,同时加入0.4%的钪和0.2%的锆具有更好的综合性能。

参考文献

[1] 丁宏升,郭景杰,苏彦庆,等. 我国铸造有色合金及其特

种铸造技术发展现状[J]. 铸造,2007,56(6):561-566.

[2] 马高山,张颂阳. 变形铝镁合金温成形技术研究和现状[J]. 金属铸锻焊技术,2010,39(11):23-27.

[3] Verma R, Ghosh A K, Kim S, et al. Grain refinement and superplasticity in 5083Al[J]. Materials Science and Engineering,1995,A191:143-150.

[4] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的作用和机制[J]. 金属功能材料,1996,3(3):81-83.

[5] 孙伟成,张淑荣,侯爱芹. 稀土在铝合金中的作用及研究进展[J]. 北京工业大学学报,2002,28(4):500-505.

[6] 孔凡校,姚素娟,胡迎春,等. 钪对AZ91合金组织和性能的影响[J]. 有色金属(冶炼部分),2013(6):51-53.

[7] 蒋晓军,李依依,贵全红,等. Sc对Al-Li-Cu-Mg-Zr合金组织与性能的影响[J]. 金属学报,1994,30(8):A355-A361.

[8] 郭中正,甘国友,严继康,等. 铝钪合金的现状与展望[J]. 云南冶金,2005,34(3):34-39.

[9] 王喜峰,齐台台,蔡启舟,等. 混合稀土对AZ91镁合金在NaCl溶液中的腐蚀行为影响[J]. 材料开发和应用,2002,17(5):34-36.

(上接第59页)

[5] 李亚江,吴会强,陈茂爱,等. 铜/铝扩散焊工艺及结合界面的组织性能[J]. 焊接,2001,45(10):7-10.

[6] 张杰,周友龙,刘兴秋,等. 焊前处理方式对LF6铝合金扩散焊的影响[J]. 材料科学与工艺,1995,3(4):108-111.

[7] Shirzadi A A, Assadi H, Wallach E R. Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films[J]. Surface and Interface Analysis,2001,31(7):609-618.

[8] Fan Y, Sinclair A, Ryan C, et al. Ultrasonic non-destructive evaluation of explosive welds[C]// Ultrasonics Symposium,2001 IEEE. Atlanta,GA,2001,1:773-776.

[9] 冯健,史和庆. 钛钢复合板爆炸焊接后周边端部被撕裂的机理分析[J]. 压力容器,2008,25(2):1-4.

[10] 肖宏滨,朱锦洪,祝要民,等. 铝/铜爆炸复合板结合界面的微观观察[J]. 洛阳工学院学报,2001,22(4):26-28.

[11] 张保奇. 一种金属爆炸焊接结合界面的研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学,2005.

[12] Grignon F, Benson D, Meyers M A, et al. Explosive welding of aluminum to aluminum: analysis, computations and experiments[J]. International Journal of Impact Engineering,2004,30(10):1333-1351.