

退火温度对爆炸焊铜/钢复合板界面与组织的影响

范祎欣, 吴志生, 李岩, 赵菲, 崔超

(太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:通过爆炸焊接法生产铜/钢复合板,并对该复合板进行不同温度的退火处理,以研究不同温度对复合板界面与组织的影响。结果表明:爆炸焊生产的铜/钢复合板界面几乎没有化合物;当退火温度低于700℃时,铜与钢的晶粒都较细小,且结合界面无化合物产生,但当温度高于750℃后,铜的晶粒急剧长大,且产生一定厚度的化合物,对性能是不利的,所以700℃左右为铜/钢复合板合适的退火温度;结合界面显微硬度最大,离界面距离增加,硬度降低;退火处理后的硬度明显降低,且退火温度越高,硬度降低越多。

关键词:退火温度;铜/钢复合板;界面;组织

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.04.032

中图分类号:TB333

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2018)04-0134-04

Effect of Annealing Temperature on Interface and Microstructure of Copper/steel Clad Plate by Explosive Welding

FAN Yixin, WU Zhisheng, LI Yan, ZHAO Fei, CUI Chao

(School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The copper/steel clad plate was produced by explosive welding, and the clad plate was annealed at different temperatures to study the effect of different temperatures on the interface and microstructure of the clad plate. The results show that the interface of copper/steel clad plate produced by explosive welding nearly has no compounds. When the annealing temperature is lower than 700 °C, the grains of copper and steel are relatively small, and the bonding interface does not produce compounds. When the temperature is higher than 750 °C, the copper grain grows rapidly and produces a certain thickness compound, which is detrimental to the performance, so about 700 °C is suitable heat treatment temperature for copper/steel clad plate. The microhardness of the bonding interface is the largest, and the hardness decreases with the increase of the distance from the interface. After annealing treatment, the hardness decreases obviously, and the higher the annealing temperature, the more the decrease of the microhardness.

Key words: annealing temperature; copper/steel clad plate; interface; microstructure

金属复合板材因兼有复层材料的特殊性能,又兼有基层材料的强度和刚度而得到广泛应用^[1]。以碳钢作为基层,与铜复层结合而生产的铜/钢复合板现在越来越受到重视,这种复合板充分发挥了两种材料的优势,既具有铜的耐蚀性、耐磨性及高导电导热等性能,又具有碳钢的强度高且价格便宜的优点,所以铜/钢复合板具有很大的应用前景。主要应用在军工、电子、炊具及建筑装饰等领域,其他领域包括汽车工业中的热交换器、同步器坠环、减速机涡轮、轴瓦等以及冶金工业中的电极等^[2-3]。

铜/钢复合板目前主要通过爆炸复合、爆炸+轧制复合及扩散复合等方法来生产,本文采用的复

合板是通过爆炸实现复合的。爆炸复合法的生产工艺如下:首先将复板放于基板上,且中间用间隙垫以保持一定距离,复板上面放置一层炸药与雷管,当炸药被雷管引爆后,炸药便以爆轰速度在复板上向前传播。爆轰波和炸药的急剧膨胀产生的巨大动能传递给复板,从而推进复板向基板高速运动,复板与基板随即在接触点上依次碰撞,而产生强烈的塑性变形。此过程中动能绝大部分转化为热能,大量的热能在近乎绝热的条件下使金属熔化,在高压作用下实现焊接结合^[4]。图1为爆炸焊接工艺安装示意图。

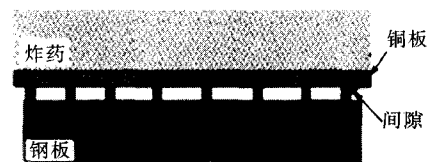


图1 爆炸焊接工艺安装示意图
Fig.1 Schematic diagram of explosive welding process

收稿日期:2016-08-10

作者简介:范祎欣(1990-),男,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向:

金属复合板的焊接技术;电话:18234156602;

E-mail:1002722784@qq.com

由于爆炸复合的塑性变形会引起结合界面加工硬化,而使性能发生很大变化,所以有必要对该复合板进行再结晶退火处理。在爆炸焊接过程中,因不同金属间高浓度梯度,界面上高压、高温及熔化等条件的综合作用,必然导致两金属原子间的相互扩散,故有必要对这些问题进行研究。

1 试验材料与方法

通过爆炸复合方法,将强度和耐蚀性比黄铜和锡青铜还高的铸造铝青铜 ZCuAl10Fe3 复合在碳钢 Q235B 上,规格为(8+32)mm,材料的化学成分如表 1、2 所示。为了提高复合板的性能,需要对爆炸焊后的复合板进行退火热处理,这对消除焊接时产生的残余应力及爆炸硬化有重要作用。因爆炸焊复合板由两种物化性能差别很大的材料组成,故退火温度要兼顾两种材料各自的热处理温度。据文献[4-5],钢的退火温度为 650~750℃,铜的退火温度为 650~800℃,所以本试验确定退火温度为 650~800℃,保温时间 2h,然后空冷。退火热处理工艺参数见表 3。

表 1 铜板 ZCuAl10Fe3 的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of copper plate ZCuAl10Fe3 (wt%)

Al	Fe	Mn	Zn	Pb
8.5~11.0	2.0~4.0	≤1.0	≤0.4	≤0.2

表 2 钢板(Q235B)的化学成分(质量分数,%)

Tab.2 Chemical composition of steel plate (Q235B) (wt%)

C	Mn	Si	S	P
0.16	0.50	0.19	0.019	0.011

表 3 退火处理工艺参数

Tab.3 Annealing treatment process parameters

试样编号	0#	1#	2#	3#	4#
退火温度/℃	-	650	700	750	800
保温时间/h	-	2	2	2	2
冷却方式	-	空冷	空冷	空冷	空冷

用线切割机在复合板上切取若干试样,试样尺寸为 16mm×10mm×10mm,首先分别将各组试样放于 ZDXS5 箱式电阻炉按不同温度加热保温,之后将各试样表面磨平利用 TD-3500 型号 X 射线衍射仪进行 XRD 分析以确定界面的化合物。再磨制金相并抛光,铜侧、钢侧分别用 FeCl₃ 盐酸乙醇溶液与 4%硝酸酒精溶液进行腐蚀并通过 VHX-2000 超景深观察金相。用扫描电镜(附带 EDS 能谱仪)进行界面微区扩散层与能谱分析。最后通过 HV-1000B 显微硬度计测定试样结合界面附近的硬度分布。

2 复合板界面性能

2.1 界面形态

爆炸焊接结合的界面形貌如图 2 所示,可看出,铜/钢爆炸焊复合板结合界面呈连续和规则的波形,波长约 950 μm,波高约 300 μm,这也是爆炸焊与其他焊接方法明显不同的界面特征,这主要是由炸药爆炸后产生的爆轰波传播所形成的。因碰撞的压力远超过其动态屈服强度,并在爆炸产物的作用下,最终形成波状的结合界面^[6];且波状结合界面增加了铜和钢的结合面积,对提高结合强度有利^[7]。同时也观察到界面上存在不连续的金属熔化块状物,这是因为炸药产生的能量大部分转化为热能,在近乎绝热的条件下必然会引起金属的熔化。

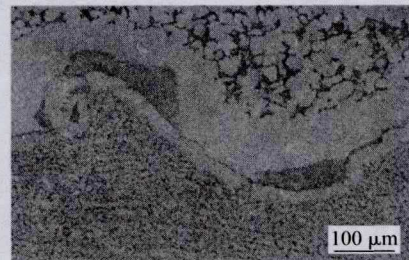


图 2 界面波状结合特征

Fig.2 Bonding characteristics of wavy interface

观察界面处组织可得出,钢侧与铜侧都有塑性变形,这种塑性变形是伴随波的形成而同时产生的,且距界面越近,塑性变形程度越大。但不同的是铜侧组织晶粒被拉长且平行于冲击方向^[8](图 3),这是因为塑性很好的铜在巨大的压力作用下强烈的变形,形成密集流线;钢侧并没有发现晶粒拉长的现象,但晶粒明显比远离界面处的细小(图 4)。这是因为:在焊接过程中温度急剧升高,金属熔化后又迅速冷却使晶粒细化;界面处剧烈的塑性变形破坏了原有晶粒,发生重结晶而细化了晶粒。



图 3 结合界面铜侧特征

Fig.3 Characteristics of interface of copper side

图 5 为未退火处理时钢侧与铜侧的组织。分析

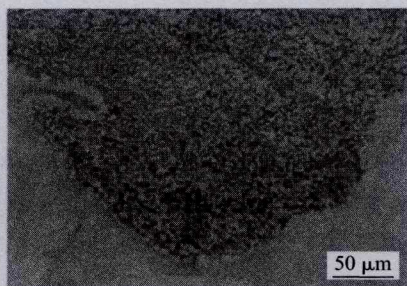


图4 结合界面钢侧特征
Fig.4 Characteristics of interface of steel side

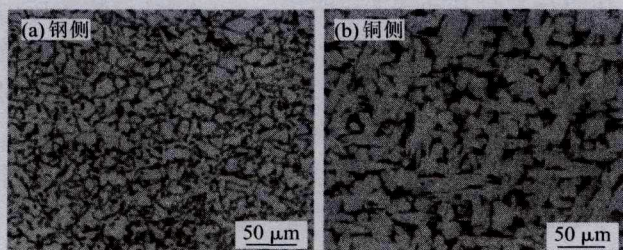


图5 未热处理时的钢、铜侧组织
Fig.5 Microstructure of steel side and copper side before heat treatment

可知,钢侧的室温组织为F+P,白色基体为F,灰黑色块状为P,因Q235B的碳含量低,故F组织较多;铜侧基体组织为 α 固溶体,其上分布着弥散点状铁相, α 晶间分布着黑色($\alpha+\gamma_2$)共析体。

2.2 XRD 物相分析

在爆炸焊过程中,结合面处会受爆炸焊高温、高压及熔化等条件的影响而产生金属间化合物,但铜和Q235B中的合金元素很难形成金属间化合物。又由铜-铁合金相图知,Fe与Cu也不会形成金属间化合物,也就是说本次试验中界面处出现化合物,只会是Fe与铜合金的合金元素产生化合物。

图6为铜/钢复合板结合界面的XRD图谱。可看出,只出现了Fe与Zn形成的化合物,但因铝青铜中Zn的含量很少,故界面虽出现了金属化合物,

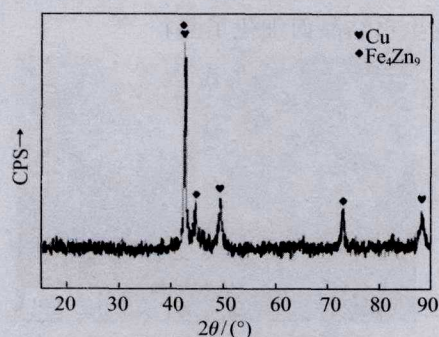


图6 铜/钢复合板结合界面的XRD图谱
Fig.6 XRD pattern of bonding interface of copper/steel clad plate

但金属化合物含量很少。所以此铜/钢复合板的结合界面还是比较理想的。

2.3 退火对显微组织的影响

铜/钢复合板在退火时会经历回复、再结与晶粒长大三个不同的阶段,利用这些可改变金属的组织来获得可靠的性能。不同热处理温度会对铜/钢复合板的组织产生影响,但Q235B的组织及温度低于700℃时铜的组织变化均不大,说明此温度下发生回复。图7为750、800℃退火时铜的组织。可看出,750℃时为完全长大的再结晶组织,可以确定在750℃以上变形基体中重新生成无畸变的新晶粒,随温度升高,会发生晶粒长大。所以可确定700℃左右的退火温度是铜/钢复合板发生回复与再结晶的临界温度。

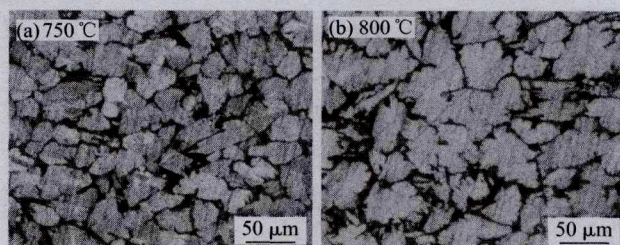


图7 不同退火温度下铜的组织
Fig.7 Microstructure of copper at different annealing temperatures

2.4 SEM 和 EDS 分析

由于爆炸焊接时伴随有元素的扩散,再加之退火处理的保温作用,结合界面会发生元素扩散,主要是Fe与Cu的扩散。一方面元素扩散有利于结合界面强度的提高;另一方面又可能产生金属化合物以降低结合强度。

图8为不同退火温度下铜/钢复合板结合界面处Cu、Fe元素的扩散及界面扩散层厚度。可看出,随退火温度的升高,合金元素扩散层厚度变宽。但在未热处理、650及700℃以下(限于篇幅这两个温度下的曲线没有给出),无化合物产生,厚度层变化不大,分别为1.5、1.8、2.0 μm ,700℃退火是合适的。当温度高于750℃时扩散层厚度明显变宽,且出现台阶,说明界面上产生了化合物,且800℃时扩散层急剧变厚,熔化层也变厚。对比图9波峰处熔化层厚度也可得出上述结论。

图10分别为图9(b)中1、2点的EDS分析结果。可看出,靠近铜侧与钢侧有元素扩散,1处靠近铜侧,所以Cu含量多,且有Fe的扩散;2处靠近钢侧,故Fe含量多,有Cu的扩散。

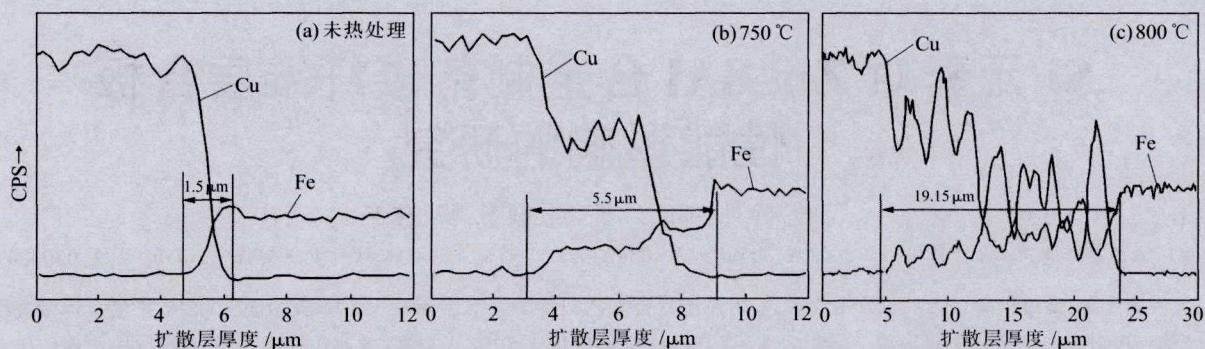


图8 不同温度下元素线扫描曲线

Fig.8 Line scanning curves of elements at different temperatures

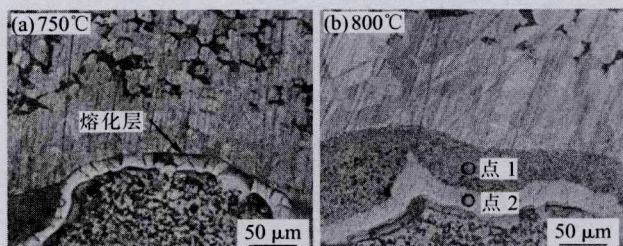


图9 不同退火温度下的界面特征

Fig.9 Interface characteristics at different annealing temperatures

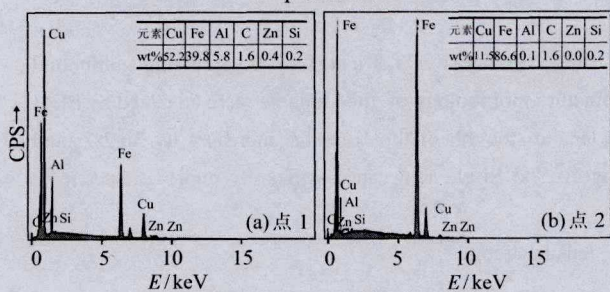


图10 不同点处的EDS分析图

Fig.10 EDS analysis at different points

2.5 显微硬度测试

爆炸焊接过程中铜与钢会在结合界面附近产生一定塑性变形而导致加工硬化,这会使结合界面附近的显微硬度发生变化。图11为不同退火温度下试样的显微硬度(试验加载力100g,加载时间15s)。

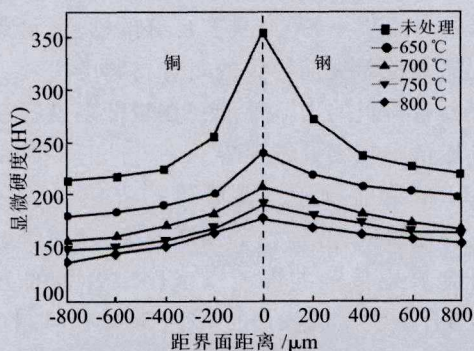


图11 铜/钢复合板显微硬度曲线

Fig.11 Microhardness curves of copper / steel clad plate

可看出,结合界面处硬度最大,随距界面距离的增加,硬度逐渐降低,直到降至两侧母材本身的硬度。原因是爆炸焊过程中高速碰撞导致冷变形而引起加工硬化。即碰撞过程中只有在界面很窄的区域发生加工硬化现象,而在离界面较远处不会发生此种现象,所以硬度不会发生明显变化^[9]。另外,复合板经退火后硬度明显降低,且退火温度越高,显微硬度下降越多,这是因为经过退火处理后,金属发生了回复与再结晶,加工硬化程度明显缓解。

3 结论

(1) 当退火温度低于700 °C时,铜的组织没有发生明显变化,且铜/钢复合板结合界面元素扩散层厚度变化不大;而当温度高于750 °C时,铜的组织明显变大,并且两侧均产生化合物,并且随温度升高而增厚。

(2) 爆炸焊铜/钢复合板采用700 °C的退火温度是合适的,结合界面产生元素扩散有利于提高强度,且不会产生化合物。

(3) 铜/钢复合板结合界面处的硬度最大,离界面距离增加,硬度降低;退火处理后硬度均明显降低,且退火温度越高,硬度降低越多。

参考文献:

- [1] 夏兆辉,姚辉,孙谊端,等. 铜铝复合材料在电力行业的研究和应用[J]. 热加工工艺,2016,45(22):24-28.
- [2] 李宝绵,李兴刚,许光明,等. 铜/钢复合材料的研究及应用[J]. 材料导报,2002,16(2):22-24.
- [3] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用[M]. 长沙:中南大学出版社,2002.
- [4] 崔忠圻,覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [5] 中国机械工程学会热处理学会编. 热处理手册工艺基础篇[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

(下转第140页)

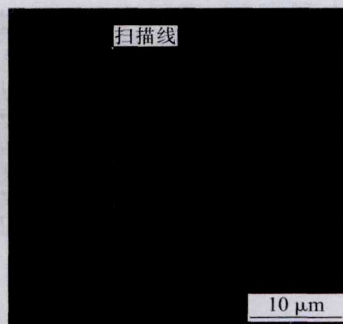


图4 复合板层界面的SEM图
Fig.4 SEM image of the interface of laminates

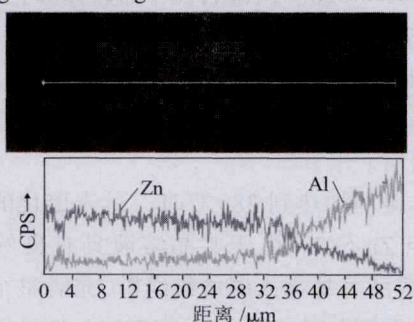


图5 界面的SEM图和EDS线扫描图
Fig.5 SEM image and EDS line scan analysis of the interface
纤维增强层合板的目的。

2.3 力学性能

图6是层合板的拉伸应力-应变曲线。可看出,相比5052板的抗拉强度(177 MPa^[3]),复合板的抗拉强度提高到241 MPa,提高了36.2%;相较于Zn-8Al作连接剂的层合板,抗拉强度提高了20.5%。

连接剂的引入很好解决了铝板与碳纤维难浸润的问题^[6],同时Zn-8Al-0.5Si作连接剂相较于不添加Si元素的Zn-8Al, Si元素大部分以单质硅存在,拉伸过程中可阻碍位错的滑移,从而增强了层合板的抗拉强度。

从图6还可知,曲线发生台阶式下降,并不是瞬

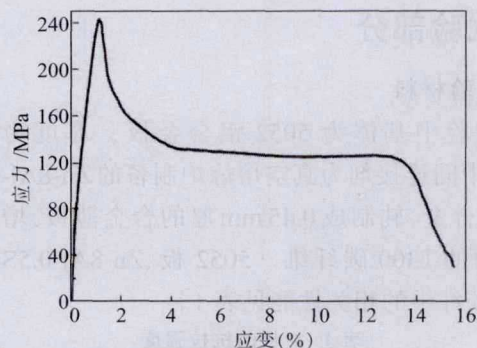


图6 层合板的拉伸应力-应变曲线
Fig.6 Stress-strain curve of the laminates

间断裂,试样在断裂过程中伸直状态的碳纤维最先断裂,然后试样中弯曲的碳纤维被拉直后又承受拉伸力,所以曲线断裂阶段发生台阶,最后整体断裂。从应力-应变曲线也可得出,碳纤维在复合板内部并不都是拉直状态,而是有一定弯曲,这主要是因为手工平铺导致纤维不直。

3 结论

(1) 使用Zn-8Al-0.5Si合金作为中间连接剂,能够很好浸渗碳纤维,无缩孔、缩松等缺陷。

(2) Si元素的添加,在中间连接剂中形成单质硅,一定程度阻碍了位错滑移,提升了连接剂合金的抗拉强度。

参考文献:

- [1] 庄严陈,程锦,孟璇,等. 表面改性碳纤维增强金属基的方法[J]. 热加工工艺, 2014, 43(16): 6-13.
- [2] 高伦. 锌与锌合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [3] 汪乾,叶哲,李线绒,等. Zn-8Al合金制备碳纤维层合板界面及性能研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(8): 151-153. [4]

(上接第137页)

- [6] 郑远谋. 不锈钢-碳钢爆炸复合板和爆炸焊接机理探讨[J]. 光电子术, 1993, 3(2): 133-138.
- [7] 周存龙,陈少航,黄庆学. 热轧碳钢/不锈钢复合板的界面厚度分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(5): 132-133.

- [8] Bina M H, Dehghani F, Salimi M. Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel[J]. Materials & Design, 2013, 45: 504-509.
- [9] Durgutlu A, Gülen Ç B, Findik F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding[J]. Materials & Design, 2005, 26(6): 497-507. [5]