

铜/不锈钢爆炸焊界面组织及性能

姜超¹, 龙伟民^{1,2}, 冯健³, 张雷¹, 张硕²

(1. 郑州机械研究所有限公司, 新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 郑州 450001;

2. 中机智能装备创新研究院(宁波)有限公司, 浙江 宁波 315700; 3. 舞钢神州重工金属复合材料有限公司, 河南 平顶山 462500)

摘要: 采用通过经验公式估算的焊接工艺参数制备了 T2 紫铜/06Cr19Ni10 不锈钢爆炸焊复合板。通过金相显微镜、扫描电子显微镜和能谱扫描仪等分析方法并结合力学性能试验, 研究了爆炸焊复合板的界面组织与性能。研究发现紫铜与不锈钢爆炸焊后形成了规律的波状界面, 界面主要为固相结合, 波峰与波谷区域分别嵌入了不连续的漩涡状铸态组织, 该组织主要由 ϵ -Cu, γ -Fe 及不锈钢微粒组成; 爆炸焊后, 界面附近不锈钢组织中形成了绝热剪切带, 奥氏体不锈钢发生了马氏体转变。紫铜组织中能够观察到退火和再结晶现象; 界面的结合强度达 280.3 MPa, 且界面附近组织的显微硬度明显得到了提高; 复合板的最大抗拉强度为 561 MPa, 界面结合区断口观察到混合断裂特征, 而漩涡状铸态组织的存在未对拉伸断裂失效产生明显的影响。

关键词: 爆炸焊; 微观组织; 力学性能; 紫铜; 不锈钢

中图分类号: TG456.6

0 前言

随着先进装备制造向高性能、高可靠、高精度、低成本、结构功能一体化发展, 单一结构材料已难以满足更高要求, 高性能异质复合材料重要性日益凸显^[1]。铜/不锈钢复合构件因其能够克服单一铜材作为结构材料强度低、成本高的问题, 充分发挥铜良好的导电性、导热性及耐腐蚀性, 综合利用不锈钢高强度、高耐腐蚀性的特点, 在核电站和真空室换热系统^[2-3]、铜电解精炼设备^[4]、核聚变试验装置^[5-6]等领域有着极大的应用前景。

爆炸焊是利用炸药爆炸产生的巨大冲击波, 驱动金属材料发生高速运动和碰撞, 从而实现冶金结合的特种焊接技术, 利用爆炸焊技术可以实现铜/不锈钢^[5-7]、钢/不锈钢^[8]、钛/钢^[9-10]、铜/铝^[11-12]等众多异质金属大厚度、大面积复合, 结合强度高、质量好。经过几十年的发展, 爆炸焊已经成为国内工业上生产

铜/不锈钢层状复合材料的主要生产方法之一^[13]。在理论研究方面, 研究人员提出了很多关于波状界面的形成机理, 主要有覆板流侵彻机理、涡街机理、流体不稳定机理、应力波机理 4 种, 然而尚未有一种成熟的理论得到研究人员的普遍认同, 仍需进一步对波状界面的结合特征进行研究。

文中采用经验公式估算的爆炸焊工艺参数, 制备了铜/不锈钢爆炸焊复合板。通过对复合界面组织形貌、成分、显微硬度、结合强度及板材拉伸试验结果进行分析, 探究材料组织和性能的变化特征, 以为爆炸焊波状界面形成机理的研究提供参考。

1 试验材料及方法

爆炸焊覆板采用 T2 紫铜, 基板采用 06Cr19Ni10 不锈钢, 两种材料规格均为 400 mm × 400 mm × 8 mm, 不锈钢的化学成分见表 1, 两种材料的主要力学性能参数见表 2。

表 1 不锈钢的化学成分(质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.04	0.41	1.16	0.030	0.01	18.24	8.00	0.04	余量

1.1 工艺参数计算

爆炸焊试验采用平行安装法进行, 如图 1 所示。采用预先配置的粉状乳化铵油炸药, 爆炸速度 2 500 m/s, 密度 0.60 g/cm³。计算装药厚度及板间隙距离的

收稿日期: 2021-07-28

基金项目: 郑州市重大科技创新专项(2020CXZX0060)

doi: 10.12073/j.hj.20210728004

表2 铜和不锈钢的力学性能

材料	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	硬度 H/HBW
紫铜	—	304	8	95
不锈钢	273	681	54.5	177

经验公式如式(1)和式(2)所示^[14]:

$$\delta_0 = \frac{K_g \sqrt{\rho_1 \delta_1}}{\rho_0} \quad (1)$$

$$h = 0.2(\delta_0 + \delta_1) \quad (2)$$

式中: K_g 为装药系数,取值1.4; δ_0, δ_1 分别为装药厚度和覆板厚度; ρ_0, ρ_1 分别为炸药密度和覆板密度; h 为板间距离。

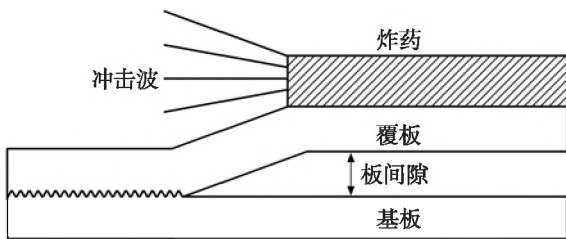


图1 爆炸焊示意图

覆板 T2 紫铜密度为 8.90 g/cm^3 , 厚度为 8 mm , 由式(1)和式(2)可计算出理论装药厚度为 6.2261 cm , 两板间隙距离约为 1.4052 cm 。为确保试验精度对计算的参数进行修正, 实际装药厚度为 62 mm , 板间隙 14 mm 。

1.2 微观组织观察

爆炸焊试验完成后, 沿爆轰波方向对紫铜/不锈钢复合板进行切割取样, 金相腐蚀剂采用氯化高铁盐酸水溶液。采用 Zeiss AxioVert. A1 金相显微镜进行界面组织观察, 采用带有能谱分析功能的 Zeiss EVO 10 扫描电镜进行背散射图像采集和成分分析, 采用 Phenom XL 台式扫描电镜进行断口形貌观察。

1.3 力学性能试验

采用 MTS E45.105 电子万能试验机进行力学性能试验。显微硬度分析采用 HV-1000A 维氏硬度仪, 载荷 100 g , 保荷 15 s 。结合强度检测参照 GB/T 6396—2008 进行, 试样及试验装置剖视图如图 2a 所示。拉伸试验参照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法》进行, 加载速率为 2 mm/min , 试样尺寸如图 2b 所示。

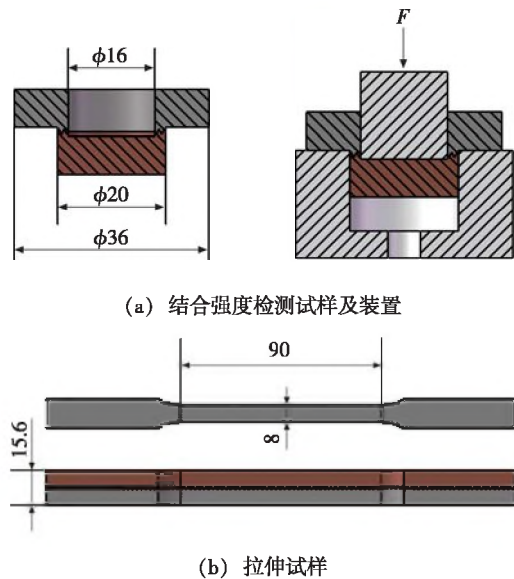


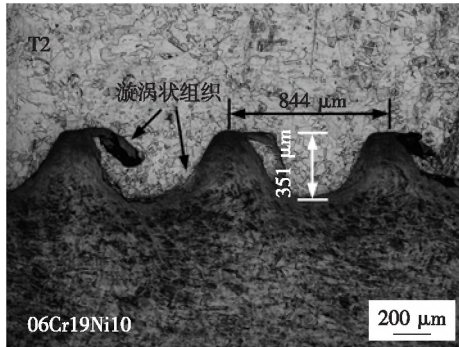
图2 力学性能试验试样示意图

2 结果及讨论

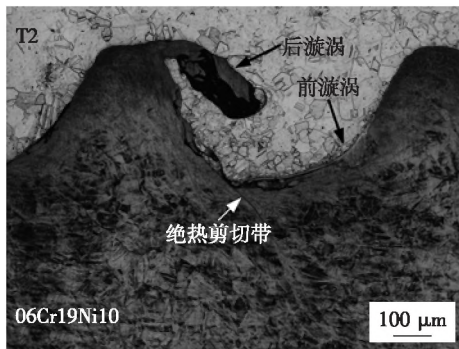
2.1 组织形貌及成分分析

铜/不锈钢爆炸焊界面组织如图 3 所示。铜与不锈钢爆炸焊后形成了规律的波状界面, 波长在 $850 \mu\text{m}$ 左右, 波高约为 $350 \mu\text{m}$ 左右, 宏观上没有明显可见的中间结合层, 在波状界面波谷与波峰附近可见到漩涡状的铸态组织(图 3a)。研究表明, 波状界面的形成能够增大铜与不锈钢界面的结合面积, 并阻止裂纹的传播, 提高复合材料的力学性能^[15]。而爆炸焊过程中射流的产生是形成良好波状界面的重要基础^[16], 在脉冲爆炸冲击波的作用下, 覆板与基板高速碰撞, 剧烈塑性变形的同时产生高温高压形成金属射流, 射流冲刷基、覆板表面形成活化结合面, 促进了波状界面的形成。漩涡状组织是基板和覆板在脉冲压力作用下, 周期性捕获射流形成的铸态组织, 它能够反应波状界面形成的运动规律, 是爆炸焊典型的界面特征之一。根据相对界面位置的不同及爆炸冲击波的运动方向, 可将漩涡组织分为前漩涡与后漩涡, 如图 3b 所示。图中还观察到紫铜呈明显的退火孪晶结构, 并在靠近界面处发生了再结晶, 大量细小的晶粒集中在界面附近; 不锈钢靠近界面区域为剧烈变形的奥氏体组织, 部分晶粒呈流线型, 波谷附近还观察到典型的绝热剪切带(ASB)组织。远离界面区域组织主要为板条状马氏体和残余奥氏体。界面附近与远离界面组织存在差异, 这与其塑性变形程度有关, 06Cr19Ni10 不锈钢对应变比较敏感, 应变的增加有利于马氏体的形成, 然而靠

近界面区域没有发现马氏体的相变,这是由于高速应变引起的温度升高会抑制马氏体晶胚的长大。此外,在炸药高速冲击载荷的作用下,波谷附近区域剪切变形量可达 $10 \sim 100$,应变率达 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$,温度急剧上升,且升温速度高于热传导速度,从而导致绝热剪切带的形成^[15]。



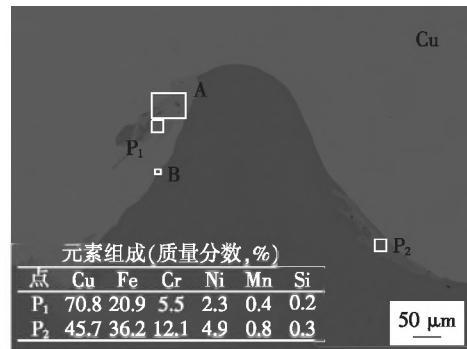
(a) 界面微观组织



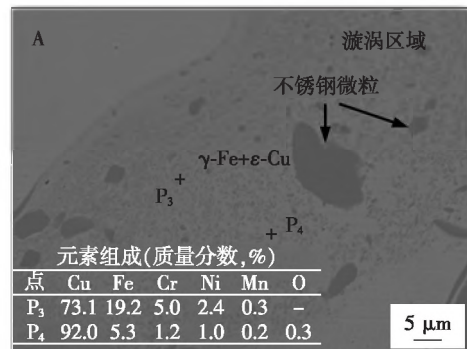
(b) 界面局部放大图

图3 爆炸焊界面微观组织

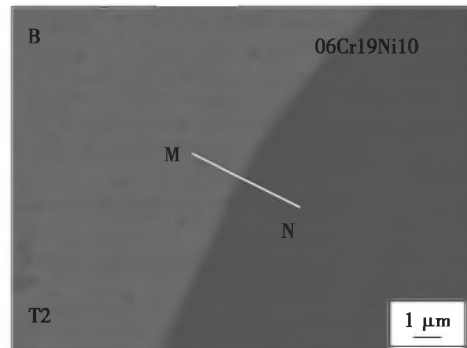
图4为界面附近组织的背散射图像。分别对前、后漩涡部分区域进行能谱分析,结果如图4a所示,后漩涡区域中Cu含量高于前漩涡区域,而不锈钢组成元素如Fe, Cr, Ni的含量低于前漩涡区域,这表明基板和覆板在不同区域参与形成漩涡组织的熔化比例不同。对区域A放大以观察漩涡组织形貌,如图4b所示,漩涡组织主要由铜基体相、灰色颗粒状析出相和破碎状不锈钢微粒组成。铜基体相(P_4)含有少量的Fe,由铜-铁二元相图可推断基体相为 ϵ -Cu相。灰色颗粒状析出相(P_3)主要由Cu, Fe, Cr, Ni元素组成,由于界面间金属射流的凝固速度较快,熔体冷却速度达 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ^[16-17],且高含量的Ni能够保留富铁相的奥氏体结构^[18],因此推断灰色析出相为 γ -Fe相。进一步观察界面形貌(区域B),紫铜与不锈钢之间固相结合,扩散层厚度约在 $1.5 \mu\text{m}$ 左右,如图4c~图4d所示。



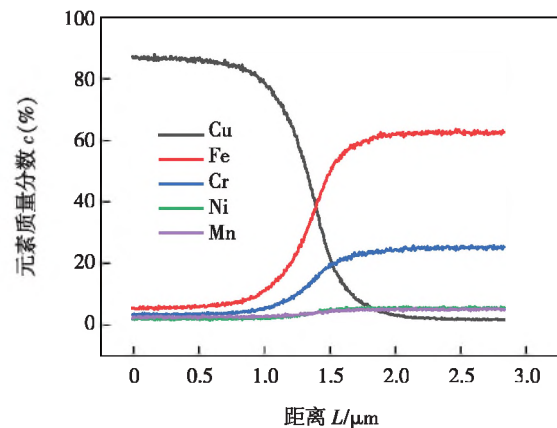
(a) 漩涡区域能谱分析



(b) 图4a中A区组织形貌及物相分析



(c) 图4a中B区组织形貌



(d) 图4a中B区线扫描结果

图4 界面组织的背散射图像

2.2 显微硬度

为进一步分析波状界面附近区域硬度分布情况,分别间距 $50\ \mu\text{m}$ 测定界面附近区域 7×14 个点的硬度值,得到该区域显微硬度分布云图,如图 5 所示。可以看出界面两侧显微硬度随着与界面距离的增加而逐渐减小,且前漩涡硬度大于后漩涡^[19]。

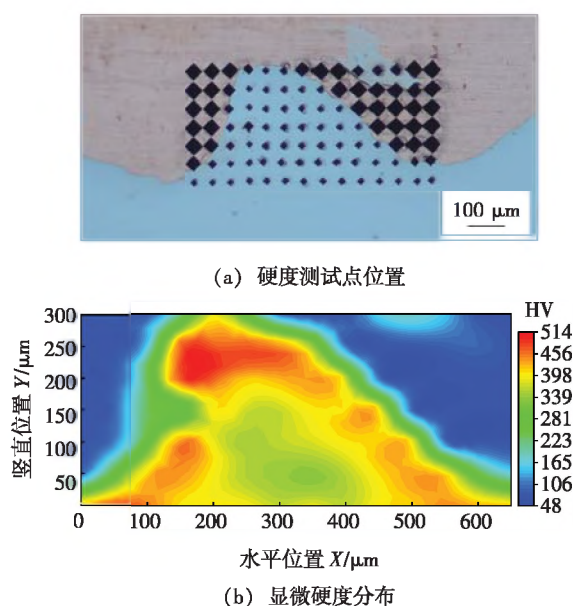


图 5 界面区域显微硬度分布云图

结合组织分析结果可知,材料硬度的提高归因于爆炸焊过程对近界面区产生的加工硬化和晶粒细化现象,而加工硬化程度随离界面距离的增加而降低,界面附近大量的细化晶粒能够阻碍位错的运动,导致材料硬度的增加。此外,前漩涡较后漩涡 $\gamma\text{-Fe}$ 颗粒的含量更高,对铜基体的弥散强化作用更强,使其具有较高的硬度。

2.3 结合强度检测

为评价铜与不锈钢爆炸复合的结合质量,对其结合强度进行检测,试验后试样的宏观形貌如图 6 所示。试样在铜侧断裂失效,未在界面处发生分离,断裂强度最高为 $280.3\ \text{MPa}$,达到铜母材(板材)抗拉强度的 92.2% 。试验表明紫铜/不锈钢爆炸复合界面结合质量较好,结合强度高于铜的强度。

2.4 拉伸试验及断口分析

由于结合强度检测试验中断裂发生在紫铜侧,为了观察断裂失效后复合界面区域断口形貌,进行了紫铜/不锈钢爆炸焊复合板的拉伸试验,试验结果见表 3。试样平均抗拉强度 $559\ \text{MPa}$ 、平均屈服强度 $347\ \text{MPa}$,拉伸过程中没有观察到明显的屈服平台,随着应变量

的提高,名义应力平稳增长,呈现显著的应变强化特征,应力-应变曲线如图 7 所示。



图 6 结合强度检测试样断后宏观形貌

表 3 紫铜/不锈钢复合板拉伸试验结果

试样编号	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
1	347	557	55.2
2	349	561	53.3
3	345	560	53.6

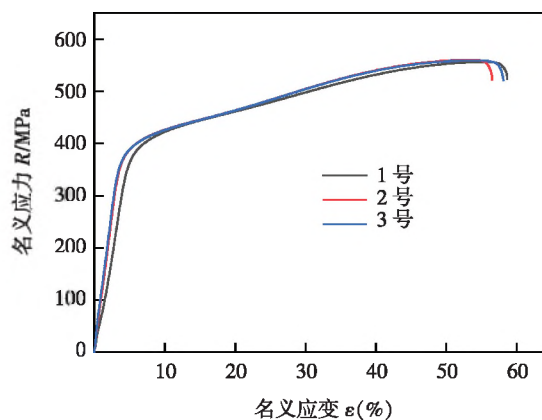


图 7 应力-应变曲线

图 8 为爆炸焊复合板拉伸试样断口形貌照片,整个断口由紫铜断裂区、不锈钢断裂区、界面结合区 3 个区域组成。这 3 个区域都观察到大量的韧窝特征,表明材料在断裂过程中发生了充分的塑性变形。铜断裂区的拉伸断口呈典型的韧性断裂特征,韧窝尺寸大而深,断口起伏较大,如图 8b 所示。不锈钢断裂区宏观形貌呈纤维状,颜色灰暗,微观上由韧窝花样构成,韧窝尺寸相对铜断裂区较小,且表面较为平整,如图 8c 所示。界面结合区如图 8d ~ 图 8f 所示,左部靠近不锈钢断裂区一侧为准解理断口形貌夹杂少量韧窝,中部可以同时观察到韧窝状韧性断口及河流状脆性准解理

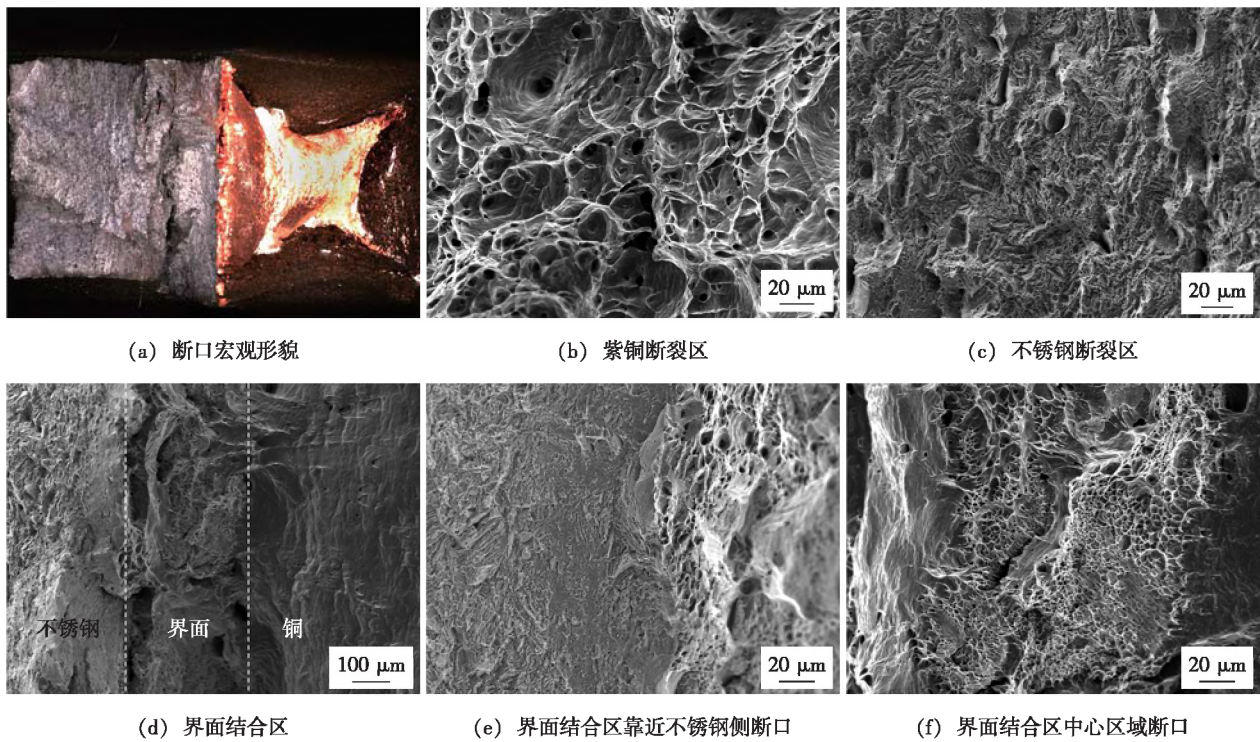


图8 断口形貌

断口,说明在紫铜与不锈钢爆炸复合后,界面结合区塑性有所降低。

对断裂后的拉伸试件磨抛后观察界面形貌,如图9所示。断后波状界面波峰区域未发生明显变形,波谷区域明显拉长,呈凹槽状,槽底中部及漩涡区域有少量裂纹萌生。槽底裂纹萌生后向不锈钢一侧斜向扩展,为断裂主裂纹源,漩涡组织缺陷未对断裂失效的产生明显影响。

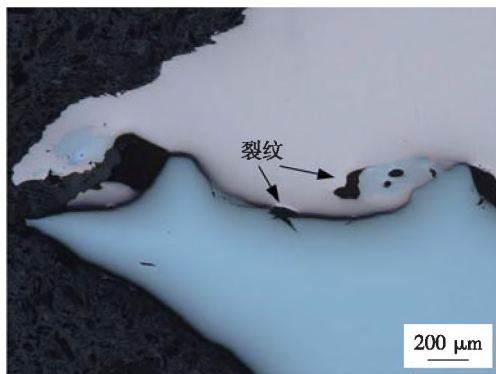


图9 断后界面形貌

3 结论

(1) 铜与不锈钢爆炸焊后形成了规律的波状界面,波长在 $850\ \mu\text{m}$ 左右,波高约为 $350\ \mu\text{m}$ 左右。界面主要

为固相结合,波峰与波谷区域分别嵌入了不连续的漩涡状铸态组织,该组织主要由 $\varepsilon\text{-Cu}$ 基体、 $\gamma\text{-Fe}$ 析出相及不锈钢微粒组成。

(2) 不锈钢在靠近界面区域发生了剧烈的塑性变形,波谷附近形成了绝热剪切带,在远离界面区域发生了马氏体转变。

(3) 爆炸复合界面的结合强度达 $280.3\ \text{MPa}$,界面附近组织的显微硬度明显提高;复合板拉伸断口界面结合区呈混合断裂特征。

参考文献

- [1] 钟素娟,张丽霞,龙伟民,等. 异质材料连接研究进展[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 118-133.
- [2] 朱元皓,吴宝生,郭柏征,等. 焊丝对 T2 紫铜/316L 不锈钢 GTAW 接头组织及性能的影响[J]. 焊接学报, 2021, 42(6): 13-21.
- [3] 宁亮亮. 紫铜和不锈钢氩弧钎焊在核电换热器的应用[J]. 国网技术学院学报, 2017, 20(6): 52-54.
- [4] 石玢,高海铭,李广,等. 铜-钢高频感应钎焊工艺及其对接头组织和导电性的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(6): 909-914.
- [5] Wang Y, Li X J, Wang X H, et al. Fabrication of a thick copper-stainless steel clad plate for nuclear fusion equipment by explosive welding [J]. Fusion Engineering and Design,

- 2018, 137: 91–96.
- [6] 王宇新, 李晓杰, 范述宁, 等. 爆炸焊接研制核聚变用大厚度铜-不锈钢复合板[J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 77–81.
- [7] Gladkovsky S V, Kuteneva S V, Sergeev S N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper/steel composites produced by explosive welding [J]. *Materials Characterization*, 2019, 154: 294–303.
- [8] 杨明, 马宏昊, 沈兆武, 等. 304 不锈钢/Q235 钢的多层爆炸焊接[J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 65–70.
- [9] Yang M, Ma H H, Shen Z W. Study on explosive welding of Ta2 titanium to Q235 steel using colloid water as a covering for explosives [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(6): 5572–5580.
- [10] Shi Changgen, Sun Zerui, Fang Zhonghang, et al. Design and test of a protective structure for the double vertical explosive welding of large titanium/steel plate [J]. *China Welding*, 2019, 28(3): 7–14.
- [11] Zeng X Y, Wang Y X, Li X Q, et al. Effect of inert gas-shielding on the interface and mechanical properties of Mg/Al explosive welding composite plate [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 166–175.
- [12] 周国安, 马宏昊, 沈兆武, 等. 正火处理对 Cu/Al 爆炸焊接板显微结构及力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 46–51.
- [13] 李龙, 毕建华, 周德敬. 我国金属复合板带材的生产及应用[J]. 轧钢, 2017, 34(2): 43–47.
- [14] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [15] 韩顺昌. 爆炸焊接界面相变与断口组织[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [16] 刘玉存, 狄建华, 王作山, 等. A3 钢-黄铜爆炸焊接机理研究[J]. 华北工学院学报, 2003, 24(2): 94–97.
- [17] Bataev I A, Lazurenko D V, Tanaka S, et al. High cooling rates and metastable phases at the interfaces of explosively welded materials [J]. *Acta Materialia*, 2017, 135: 277–289.
- [18] Zhao H, Sheng L Y. Microstructure and mechanical properties of the Ag/316L composite plate fabricated by explosive welding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 265–275.
- [19] Yang M, Ma H H, Shen Z W, et al. Study on explosive welding for manufacturing meshing bonding interface of Cu-CrZr to 316L stainless steel [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 143: 106–114.

第一作者简介: 姜超, 1997 年出生, 硕士; 主要从事爆炸焊接技术的研究。

通信作者简介: 龙伟民, 1966 年出生, 博士, 研究员; 主要从事新型钎焊材料及其生产技术、钎焊工艺与设备研发及应用。

(编辑: 王龙权)

[上接第 9 页]

- friction stir welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(6): 497–501.
- [11] Zhou L, Zhou W L, Huang Y X, et al. Interface behavior and mechanical properties of 316L stainless steel filling friction stir welded joints [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(1–4): 577–583.
- [12] Ju Chuan, Gong Wenbiao, Liu Wei, et al. Microstructure and mechanical/conductivity properties of pure copper joint welded by friction stir welding [J]. *China Welding*, 2020, 29(3): 26–32.
- [13] Yang C, Ni D R, Xue P, et al. A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates [J]. *Materials Characterization*, 2018, 145: 20–28.
- [14] Li W, Fu T, Hüttsch L, et al. Effects of tool rotational and welding speed on microstructure and mechanical properties of bobbin-tool friction-stir welded Mg AZ31 [J]. *Materials & Design*, 2014, 64: 714–720.
- [15] Zhang H, Wang M, Zhang X, et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of bobbin tool friction stir welded 2A14-T6 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2015, 65: 559–566.
- [16] Wan L, Huang Y, Lv Z, et al. Effect of self-support friction stir welding on microstructure and microhardness of 6082-T6 aluminum alloy joint [J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 197–203.
- [17] 吉华, 邓运来, 邓建峰, 等. 焊接速度对 6005A-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 24–29.

第一作者简介: 李充, 1991 年出生, 硕士, 工程师; 主要从事轨道交通车辆焊接技术的研究。

通讯作者简介: 黄永究, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士生导师; 主要从事搅拌摩擦焊接及其衍生技术基础与应用的研究; 已发表论文 150 余篇。

(编辑: 王龙权)

plusive welding were increased by high velocity impact, which provided a channel for the diffusion of atoms and realized metallurgical bonding. The results of numerical simulation were consistent with the experimental results, which revealed the forming mechanism of Ti/Al explosive welding interface.

Key words: Ti/Al composite plate, explosive welding, interface forming mechanism, numerical simulation

Laser ultrasonic detection for surface defect of stainless steel additive manufacturing parts

Fang Haiji^{1,2}, Ye Guoliang², Lü Bo¹, Zhang Yanxi¹, Gao Xiangdong¹

(1. Guangdong Provincial Welding Engineering Technology Research Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Dongguan University of Technology, Dongguan 523000, Guangdong, China). p16 – 21

Abstract Laser ultrasonic technology was used to detect surface defects of the additive manufactured parts, and the finite element method was used to simulate the propagation process of laser-excited ultrasonic waves under the thermoelastic mechanism. The surface wave reflection signals received from different detection positions were analyzed, and the influence of the depth and width of defects on the surface wave reflection signal was studied. Laser ultrasonic testing experiments on 316L stainless steel additive manufacturing parts verified the correctness of the model, and then the wavelet soft threshold denoising algorithm was used to process the collected laser ultrasound signal. The results showed that the numerical simulation was basically consistent with the experimental results. The arrival time difference of the RS wave and the RR wave generated by the surface wave and the defect could detect the depth of defects, and the width of defects had almost no effect on the detection result.

Key words: laser ultrasonic detection, numerical simulation, surface defects, additive manufacturing

Interfacial microstructure and mechanical properties of copper/stainless steel fabricated by explosive welding

Jiang Chao¹, Long Weimin^{1,2}, Feng Jian³, Zhang Lei¹, Zhang Shuo²

(1. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Zhengjiang, China; 2. China Innovation Academy of Intelligent Equipment Co., Ltd., Ningbo 315700, Zhejiang, China; 3. Wugang Shenzhou Heavy Industry Clad Metal Materials Co., Ltd., Pingdingshan 462500, Henan, China). p22 – 27

Abstract T2 copper/06Cr19Ni10 stainless steel explosive welding clad plate was fabricated with welding parameters estimated by empirical formula. Interfacial microstructure and mechanical properties of copper/stainless steel clad plate were studied through optical microscope, scanning electron microscope, energy spectrum scanner, and mechanical test. It was founded that a regular wavy interface formed between copper and stainless steel after explosive welding. The interface was mainly solid-solid joining, and the discontinuous vortex-like cast microstructure was embedded in the wave peak and trough regions respectively. The microstructure was mainly composed of an ϵ -Cu matrix, γ -Fe precipitated phase, and stainless steel particles. Adiabatic shear band and austenite transformation were found in the microstructure of stainless steel after explosive welding. Annealing and recrystallization were observed in copper. Interfacial bonding strength was 280.3 MPa and microhardness of the microstructure near the interface was significantly improved. The maximum tensile strength of the clad plate was 561 MPa, mixed fracture characteristics were observed on the fracture of the bonding area, and the vortex microstructure defects had no obvious effect on the tensile fracture failure.

Key words: explosive welding, microstructure, mechanical properties, copper, stainless steel

Effect of laser incident angle on microstructure and mechanical properties of Ir-Rh alloy and Ni-based alloy by laser welding

Yang Huimu¹, Zhao Shifang², Hu Guoyi¹, Deng Jun¹, Du Dekui¹, Tao Wei¹

(1. Weichai Torch Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China; 2. Central South University, Changsha 410083, China). p28 –