

铝合金-纯铝-钢复合板爆炸焊接试验及性能研究

王建民, 朱 锡, 刘润泉

(海军工程大学 船舶与动力学院, 武汉 430033)

摘 要: 通过设计爆炸焊接试验复合了铝合金-纯铝-钢爆炸复合板, 对其界面形态、显微硬度及力学性能进行了研究。结果表明, 铝合金-纯铝界面纯规则正弦波形, 纯铝-钢复合板界面波形较小, 铝合金-纯铝-钢复合板的界面剪切强度在 75 MPa 以上, 爆炸复合过程中, 纯铝与钢界面生成了金属间化合物, 其界面处基体金属发生强烈的塑性变形。复合板变形及组织变化的结果造成复合板界面处的显微硬度最高, 随着距界面距离的增加, 两侧基体金属的硬度逐渐降低。

关键词: 爆炸焊接; 铝合金; 钢; 显微硬度; 力学性能

中图分类号: TG456.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-3486(2008)02-0105-04

Explosive welding tests and property study on aluminum alloy-pure aluminum-steel cladding plates

WANG Jian-min, ZHU Xi, LIU Run-quan

(College of Naval Architecture and Power, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aluminum alloy-pure aluminum steel cladding plates were manufactured by explosive welding, and the interface configuration, micro-hardness and mechanical performance were studied. The results show that the sine wavy interface forms at the boundary between the aluminum alloy and pure aluminum, while the wave between pure aluminum and steel is smaller. Mechanical property tests show that the shearing strength of aluminum alloy-pure aluminum steel cladding plates reaches 75 MPa or more. Intermetallic compound forms and strong plastic deformation appear in the explosive welding, which results in higher hardness at the boundary. Hardness value will decrease with an increase in the distance from the boundary.

Key words: explosive cladding; aluminum alloy; steel; micro-hardness; mechanical property

随着生产的发展和科学技术的进步, 人们对材料使用性能的要求越来越高。爆炸焊接作为一种新型的焊接技术, 其最大特点是能将异种材料在瞬间复合起来, 这就极大地拓展了现有金属材料的应用空间^[1, 2]。

铝的密度小, 比强度高, 塑性和韧性好, 导热和导电性好, 耐蚀能力强; 钢的强度高, 延展性好, 由它们组成的复合材料兼具二者的物理和化学特性, 具有良好的综合性能, 是一种具有广泛用途的新型结构材料。铝合金-钢的爆炸焊接研究已有近 50 年的历史, 然而有关铝合金-钢爆炸焊接复合板应用性能的研究却很少见报道。因此, 对铝合金-钢复合板的爆炸焊接及性能进行研究可进一步推进铝合金-钢爆炸复合板在工业领域的应用, 获得更大的经济效益。

收稿日期: 2007-11-15; **修回日期:** 2007-12-20。

作者简介: 王建民(1979-), 男, 博士生, 主要研究方向为爆炸焊接, E-mail: green_apples@163.com。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验选用 5083 防锈铝为复板, Q235 钢为基板。由于铝-镁合金与钢直接爆炸复合存在一定困难, 一般需在铝-镁合金与钢爆炸焊接时加中间过渡层。虽有文献建议可采用纯铝、钛、镍等作为中间过渡层^[3,4], 然而尚未检索到以纯铝作中间过渡层进行爆炸焊接的试验研究。本文以纯铝作为中间过渡层爆炸焊接, 以对铝合金-纯铝-钢复合板爆炸焊接试验及其性能进行系统研究。试验选用基、复板及中间过渡层的尺寸分别为 1 000 mm×120 mm×6 mm、1 050 mm×130 mm×6 mm、1 050 mm×130 mm×2 mm。试验材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 试验材料的化学成分
Tab. 1 Chemical composition of test materials

材料	C	S	P	Si	Mn	Cu	Mg	Ti
Q235	0.17	0.023	0.032	0.30	0.46			
5083				0.50	0.42	0.10	5.24	0.15
1060				0.25	0.03	0.05	0.03	0.03

1.2 试验方法

爆炸焊接是以炸药为能源的特殊焊接技术, 在工程应用中常采用平行安装法和角度安装法两种方式进行爆炸焊接(见图 1)。本文采用平行安装法, 三层两次爆炸焊接方式, 炸药选用 2 号岩石硝铵炸药。工艺参数的选择依据文献[1]给出的式(1)计算, 并在试验基础上对其作了改进, 式中 m_e 为装药量, δ 为基、复板之间的安装间隙, ρ_p, t_p 分别为复板材料的密度和厚度, ρ_e, t_e 分别为炸药密度及厚度。 k 为与试验材料有关的系数。

$$m_e = K \sqrt{t_p \rho_p};$$
$$\delta = 0.2(t_e + t_p).$$

(1)

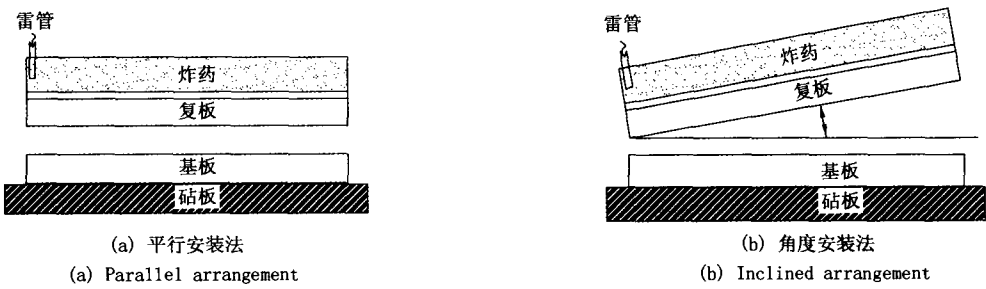


图 1 爆炸焊接装置示意图

Fig. 1 Schematic illustrations of explosive welding arrangement

1.3 复合板性能测试

- 1) 复合板界面形态观察 在光学显微镜下对爆炸焊接后复合板的界面形态进行了观察分析, 考察爆炸复合界面的形态特征。
- 2) 复合板性能测试 对复合板的剪切强度及显微硬度进行测试分析, 讨论复合板性能的影响因素。

2 试验结果及分析

2.1 复合板界面形态及组织

爆炸焊接后对复合板的界面形态及组织进行了观察分析。图 2 为在光学显微镜及电子探针下观察

到的复合板的界面形态。图 2(a)为低倍显微镜下的复合板的界面波形;图 2(b)为经侵蚀后的试样在电子探针下纯铝-钢的形貌;图 2(c)为高倍显微镜下经侵蚀后纯铝-钢的界面组织形貌。从图 2(a)中可看到纯铝-钢界面波形较小,近似呈平直状结合,而铝合金与纯铝之间为规则的正弦波状结合。由图 2(b)可见铝侧晶粒由于在爆炸焊接热循环的作用下,界面铝基体发生再结晶,晶粒明显长大。在纯铝与钢的结合界面处可看到有一明显不同于钢基体与铝基体的中间层,通过电子探针对图 2(b)中的各点进行了能谱分析,结果表明该中间层为 Al、Fe 组成的金属间化合物(见图 3)。根据图 2(c),基、复板靠近复合界面处的金属发生了较大的塑性变形,尤其是钢板一侧晶粒明显被拉长,呈流线状。

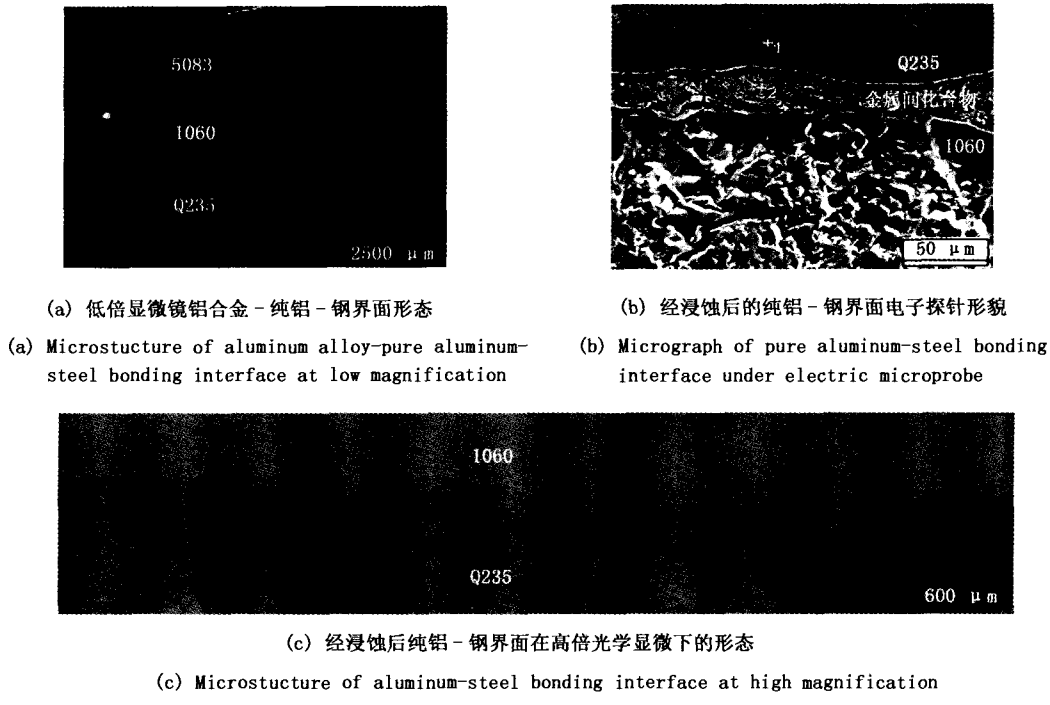


图 2 铝合金-纯铝-钢复合板界面微观结构特征

Fig. 2 Micro-graphs of the aluminum alloy-aluminum-steel explosive cladding plate

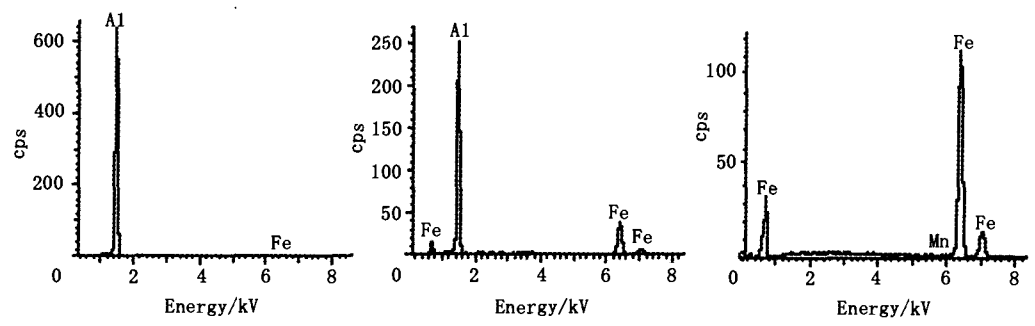


图 3 界面化学成分分析能谱图

Fig. 3 Energy spectrum of the chemical composition near bonding interface

2.2 爆炸复合板显微硬度

对界面显微硬度的测试采用 HV-1000 型显微硬度计,测试垂直于试样截面。加载时间 20 s,载荷为 0.245 N,压头为 Knop 型压头。图 4 为试样截面的显微硬度分布,从图中可看到试样纯铝与钢的结合界面处的硬度最高,最大可达 330 MPa,由试样界面向基、复板两侧硬度逐渐降低。金属硬度的变化反映了金属在爆炸载荷作用下,金属间的界面和内部发生了不同程度的塑性变形及组织变化。界面处的硬度最高说明界面处的中间层成分不同于两侧基体,这与前文光学显微镜观察及电子探针分析是一

致的。一方面,爆炸焊接过程中界面金属发生冶金反应,界面生成 Al、Fe 的金属间化合物,这种金属间化合物是一种硬度极高的脆性材料,根据文献报道这种金属间化合物显微硬度在 9 600~11 500 MPa 之间^[5]。另一方面,由于爆炸焊接过程中界面金属发生强烈的塑性变形,其变形速率可达 $10^6 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ ^[6],在如此强烈的塑性变形及高应变率下,材料将产生高密度位错并发生动态再结晶,这种变化必然导致界面处金属硬度的提高。复合界面的硬化造成铝合金-钢复合板的加工适应性及抗脆断破坏能力的下降,对复合板的使用是非常不利的。

2.3 复合板的力学性能

根据 GB6396-95《复合钢板力学及工艺性能试验方法》对铝合金-纯铝-钢爆炸复合板的剪切性能进行了测试,测试结果如表 2 所示。由表 2 可以看到测得的铝合金-纯铝-钢复合板的界面剪切强度都在 75 MPa 以上,高于标准规定的要求。试验发现试样自纯铝与钢的结合界面处起裂,并逐渐扩展至纯铝,沿纯铝扩展并最终断裂。分析其原因主要是由于在界面金属间化合物中有大量微裂纹,在受到外加载荷时,这些微裂纹成为裂纹的萌生源,裂纹由此起裂^[4]。然而由于纯铝的强度较低,在爆炸过程中,由于爆炸载荷的冲击作用及靠近界面纯铝基体金属的晶粒变大使得纯铝的强度降低明显,从而使纯铝在受到外载荷时容易失效。因此,在铝合金-纯铝-钢复合板的剪切过程中,由金属间化合物起裂的裂纹就容易沿强度较低的纯铝扩展并最终断裂。

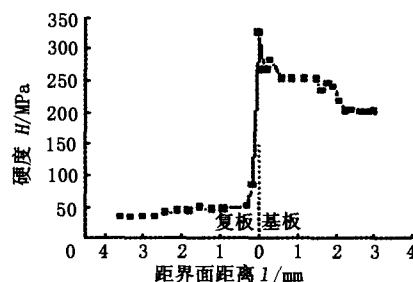


图 4 复合板截面显微硬度分布
Fig. 4 Micro-hardness of samples

表 2 铝合金-纯铝-钢爆炸复合板界面剪切强度
Tab. 2 Shearing strength of samples

试样	剪切面积/mm ²	剪切力/kN	剪切强度/MPa
A	9.96×7.20	5.52	77
B	10.02×7.12	5.54	78
C	10.00×7.26	5.74	79

3 结 论

- 1) 铝合金-纯铝-钢爆炸复合板的铝合金-纯铝界面呈规则正弦波形,纯铝-钢的结合界面近似直线结合。
- 2) 爆炸焊接界面靠近基体的金属有明显塑性变形的痕迹,金属发生再结晶。
- 3) 复合板结合界面的剪切强度在 75 MPa 以上,高于标准规定的使用要求。
- 4) 纯铝-钢的结合界面由金属间化合物产生,复合板结合界面处的硬度最高,由界面向基体两侧硬度值降低。硬度的变化同时也表明了金属发生塑性变形的强烈程度。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] CROSSLAND B. Explosive Welding of Metals and Its Applications [M]. New York: Oxford University Press, 1982.
- [3] HOKAMOTO K, IZUMA T, FUJITA M. New explosive welding technique to weld aluminum alloy and stainless steel plates using a stainless steel intermediate plate [J]. Metallurgical Transactions A, 1993(24A), 5: 2 289—2 297.
- [4] HAN J H, AHN J P, SHIN M C. Effect of interlayer thickness on shear deformation behavior of A5083 aluminum alloy/SS41 steel plates manufactured by explosive welding [J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(1): 13—18.
- [5] 沈 黎. 铝-铜、钢-铝层状金属复合材料的界面反应研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.
- [6] MEYERS M A. 材料的动力学行为 [M]. 张庆明, 刘 彦, 黄风雷, 等 译. 北京: 国防工业出版社, 2006.