

爆炸焊接工艺对铝-钢复合板界面性能的影响

王建民,朱 锡,刘润泉

(海军工程大学船舶与海洋工程系,武汉 430033)

摘 要: 通过不同的爆炸焊接工艺对铝合金-铝-钢进行了爆炸复合,并对爆炸复合后的铝合金-铝-钢复合板的界面组织及力学性能进行了测试分析,探讨了不同爆炸焊接工艺对铝合金-铝-钢复合板界面性能的影响。结果表明:铝合金-铝-钢复合板的铝-钢界面在爆炸复合时界面容易产生一层金属间化合物。随着装药密度的增加,中间层变得愈加连续,界面强度降低明显,而铝-钢界面相互扩散距离变化不明显。

关键词: 爆炸焊接; 界面; 结合性能; 微观分析; 复合板

中图分类号: TG 456.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-4431(2007)07-0103-03

Effect of Explosive Welding Technology on Bonding Interface Property of Aluminum-steel Cladding

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

(Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aluminum-aluminum-steel cladding was made by different explosive welding technologies. Micro-structures and properties of the bonding interfaces had been tested and analyzed. According to the results, the effect of the explosive welding technology on the bonding interfaces properties had been discussed. The results showed that a layer of hard compounds was produced between aluminum and steel during explosive welding process. The interlayer becomes more continuous as density of explosive was increasing. However, the diffusion distance had no remarkable change with the density of explosive increasing.

Key words: explosive welding; interface; bonding performance; micro-analysis; aluminum-steel cladding

铝-钢复合板是一种具有特殊使用性能的新型结构材料。由于铝和钢的一些性质,特别是熔点和强度的差别,以及它们之间可生成很多金属化合物的特性,很难用常规的工艺将它们制成复合材料^[1]。爆炸焊接作为一种特殊的新型焊接技术,为实现铝-钢之间的焊接提供了可能。铝合金、钢的爆炸焊接研究起始于上个世纪 70 年代,迄今已发展了 40 余年。然而,由于铝合金、钢的物理、化学性能的差异,在其爆炸焊接研究中,还存在许多技术难题,特别是在铝合金、钢的爆炸焊接工艺研究方面,尚未见系统报道。这些问题的存在直接限制了铝-钢爆炸复合板的应用及发展。因此有必要对铝-钢复合板的爆炸焊接工艺进行系统研究,以促进爆炸复合板在工程上的应用,进一步揭示爆炸焊接机理,促进爆炸焊接技术的发展。

1 爆炸焊接工艺及参数

由于铝合金与钢的物理性能和力学性能等相差较大,直接爆炸焊接有一定难度,尤其是含镁量较高的铝-镁合金与钢爆炸焊接时,在界面易形成低熔点的脆性金属间化合物,影响焊接质量,甚至未达到焊接。因此,为了获得良好的焊接质量,通常采用加中间过渡层的办法,经理论分析和试验研究,过渡层材料可选用纯铝、钛合金、银合金、铜等。但由于钛合金等金属价格昂贵且属于战略资源,因此,选择了 2 mm 厚的纯铝

收稿日期:2007-03-02.

作者简介:王建民(1979-),男,博士生. E-mail:green_apples@163.com

1060 作为中间过渡层,采用了3种不同的爆炸焊接工艺对铝-钢的爆炸焊接工艺进行了系统研究,探讨了爆炸焊接工艺对铝-钢复合板界面性能的影响。研究所用材料的化学成分见表1,基、复板尺寸分别为 1 000 mm × 100 mm × 6 mm、1 050 mm × 120 mm × 6 mm,中间过渡层的尺寸为 1 050 mm × 120 mm × 2 mm。

爆炸焊接工艺参数直接影响爆炸复合板的质量优劣。爆炸焊接可分为平行安装法和角度安装法(见图1),其主要参数是焊接工艺参数及焊接过程的动力学参数。爆炸焊接工艺参数主要包括炸药类型、炸药爆速、装药密度、基、复板间距及安装角等。为了简化研究,3种工艺条件下均采用平行安装法,基、复板间距保持相同。改变装药密度研究爆炸焊接工艺对铝-钢爆炸复合板界面性能的影响,所采用的爆炸焊接工艺参数见表2。爆炸后的铝合金-铝-钢复合板的编号分别为A、B、C。

表1 试验用化学材料成分 w/ %

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

表2 爆炸焊接工艺参数

材料 复板-基板	炸药类型	装药密度/ (g cm ⁻²)	安装间隙/ mm	安装方式	复合方式
1060-Q235	2# 岩石硝酸铵	2.9	8	平行法	端部起爆
5083-1060/Q235		1.2	6		3层2次
1060-Q235	2# 岩石硝酸铵	2.4	8	平行法	端部起爆
5083-1060/Q235		1.2	6		3层2次
1060-Q235	2# 岩石硝酸铵	1.5	8	平行法	端部起爆
5083-1060/Q235		1.2	6		3层2次

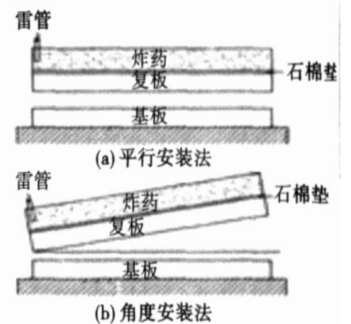


图1 爆炸焊接装置示意图

2 试验结果与讨论

2.1 复合板界面微观分析

对铝合金-铝-钢复合板的铝-钢界面进行了金相显微观察及电子探针分析。图2是3种爆炸焊接工艺获得的铝合金-铝-钢复合板铝-钢界面的显微组织,从图2中可看到3种爆炸焊接工艺下铝-钢界面波形都较小,近似呈平直状结合,是波状结合和直接结合的一种混合结合方式。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。同时,由于界面处严重的变形使晶粒破碎且位错密度大,故抛光侵蚀后的组织特征不很清楚。在高倍显微下观察表明,随着装药量的增加,界面波长变小,波幅变大。



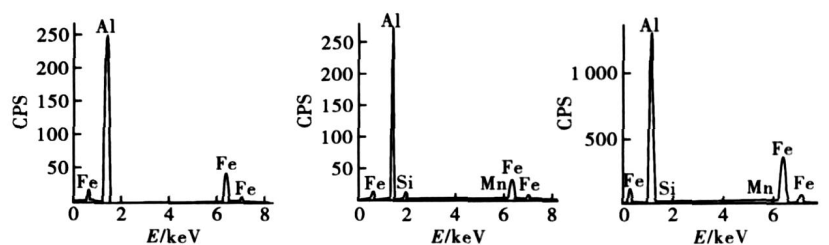
(a) 复合板A界面形态

(b) 复合板B界面形态

(c) 复合板C界面形态

图2 复合板铝-钢结合界面形态

多数学者认为爆炸焊接过程中,金属界面发生物理、化学冶金反应,界面产生熔化及扩散等冶金现象^[2-4]。为研究铝-钢复合界面的扩散及熔化现象,探讨爆炸焊接工艺对其界面金属熔化及扩散的影响,对其进行了电子探针分析。能谱分析发现,3种条件下的铝-钢界面均产生 Al、Fe 的金属间



(a) 复合板A能谱分析

(b) 复合板B能谱分析

(c) 复合板C能谱分析

图3 复合板中间化合物处能谱分析

化合物,界面发生冶金反应(图 3),经成分分析 3 种焊接工艺条件下,中间化合物均为 FeAl_3 。可见焊接工艺对中间化合物的成分影响不明显,仅对其数量与形态有影响,随着装药密度的增加,中间化合物的厚度有微量增加,在界面处的分布也愈加连续。

通过电子探针对复合界面的扩散进行了研究。结果表明,3 种爆炸焊接

工艺下,复合板界面扩散现象均不明显,仅有数 $10 \mu\text{s}$ 的扩散距离,且其区别不明显。出现此种现象主要是由于爆炸焊接过程仅有几微秒的时间,时间极短暂,爆炸过程产生的高温、高压持续时间极短。在这样极短的时间内界面不可能发生长距离的扩散,故爆炸焊接工艺对其扩散影响不明显。

2.2 复合板界面结合性能

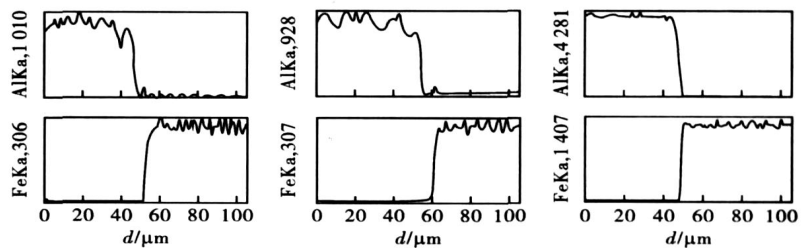
根据船舶行业标准 CB1343—98《铝-钢过渡接头规范》的规定对铝-钢复合板界面抗剪强度作了测试,试验结果表明 3 种条件下获得的复合板的界面剪切强度分别为 43 MPa、52 MPa、79 MPa。随着药量的增加,铝-钢界面的剪切强度降低,结合性能变劣。这主要与铝-钢爆炸复合界面的结合形态及组织特征有关。如前所述爆炸焊接过程中产生了 Al、Fe 的金属间脆性化合物。这层化合物对铝-钢复合板界面性能有不利影响,一方面容易产生裂纹,引起界面开裂;另一方面是恶化界面的结合性能,降低界面强度^[5]。随着装药密度的增加,中间层变得愈加连续,复合板 C 的界面特点有利于阻止金属间化合物中裂纹的扩展,当自金属间化合物萌生的裂纹遇到韧性较好的金属基体时,裂纹的扩展受到抑制,从而对提高界面强度有利;而复合板 A 的界面特征不利于阻止裂纹的扩展。因此复合板 C 表现出优良的接合性能,而 A 的界面剪切强度较低。

3 结 语

爆炸焊接使铝合金与钢的结合成为可能,研究表明:爆炸焊接工艺对铝-钢复合板的界面性能具有重要影响。铝-钢复合板的界面不易形成波状结合,而是形成一种直接结合与波状结合的混合结合方式,在铝、钢的爆炸复合中,界面发生冶金反应,产生脆性金属间化合物。随着装药密度的增加,界面基体金属熔化量增加,生成的金属间化合物变得愈加连续,其厚度有微量增加,复合界面剪切强度明显降低;爆炸焊接工艺对铝-钢复合界面的扩散影响不明显。在铝-钢的爆炸焊接中宜采用小药量焊接,以提高爆炸复合板的强度。

参考文献

- [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,2000.
- [2] Li Yan, Hastujiro H, Eichichi S, et al. Morphology and Structure of Various Phases at the Bonding Interface of Al/ Steel Formed by Explosive Welding[J]. Journal of Electron Microscopy, 2005, 49 (1): 5-16.
- [3] Szecket A, Inal O T, Viguera DJ, et al. A Wavy Versus Straight Interface in the Explosive Welding Aluminum to Steel[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1985, 3(6): 2588-2593.
- [4] 杨 扬. 金属爆炸复合技术与物理冶金[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [5] Jun H H, Jae P A, Myung C S. Effect of Interlayer Thickness on Shear Deformation Behavior of AA5083 Aluminum Alloy/ SS41 Steel Plates Manufactured by Explosive Welding[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(1): 13-18.



(a) 复合板A界面扩散特征 (b) 复合板B界面扩散特征 (c) 复合板A界面扩散特征
图4 复合板铝-钢界面扩散特征