

铝/钢爆炸复合界面的显微分析

Micro-analysis of Bonding Interfaces of Explosive
Welded Aluminum/Steel Plates

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)

WANG Jian-min, ZHU Xi, LIU Run-quan (Department of Naval

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

摘要: 通过金相显微镜与电子探针对于铝/钢复合板的界面进行了显微分析。结果表明, 铝、钢爆炸复合过程中不易形成波状界面, 复合界面呈平直状, 界面处金属发生了冶金反应; 爆炸焊接过程中, 铝/钢复合界面处的基体金属发生了熔化, 界面处的晶粒发生了严重的塑性变形, 并且在铝/钢直接结合的界面两侧存在着距离约为 $5\mu\text{m}$ 的扩散。分析认为爆炸焊接的工艺特点及铝、钢的物理性质决定了铝/钢界面的显微特点。并据此探讨了影响铝/钢复合强度的因素。

关键词: 爆炸焊接; 显微分析; 熔化; 扩散

中图分类号: TG456.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2006)11-0036-04

Abstract: The bonding interfaces of explosive welded aluminum-steel plates were analyzed by means of metallographic microscope and electron probe micro-analyzer (EPM A). The results indicated that the bonding interfaces of aluminum-steel was of straight shape and brittle layers were produced at the interfaces and in which some micro-cracking were observed. During explosive welding, a thin metal layer near the interfaces was melted with the explosive energy and plastic deformation was found on the grains at the interfaces. A $5\mu\text{m}$ diffusion distance was found on the both sides of base metals at the direct bonding interfaces. It was analyzed that the characteristics of explosive welding technology and physical characteristics of aluminum and steel decided the micro-structure of the aluminum-steel bonding interfaces. Furthermore, the effects on the bonding strength of aluminum-steel were discussed.

Key words: explosive welding; micro-analysis; smelting; diffusion

铝是地壳中含量最多的金属元素, 具有密度小, 耐腐蚀、导热率高等优点^[1], 但铝合金的强度低; 而钢的强度高。由它们组成的复合材料兼具二者的物理和化学特性, 是一种具有广泛用途的新型结构材料, 已被广泛的应用于舰船结构、压力容器、车辆部件等。

铝、钢的密度、熔点、导热率等物理性能相差很大, 用传统的焊接工艺很难将它们复合在一起。爆炸焊接作为一种焊接工艺已经广泛应用于铝/钢的复合。铝、钢的爆炸复合研究早在 20 世纪 60 年代就已开始, 但到目前, 铝/钢爆炸复合板的强度普遍不高, 其复合机理尚未有人深入分析。研究铝/钢的爆炸复合界面的结合特征对于改善爆炸焊接工艺、提高复合强度及揭示铝/钢爆炸焊接机理具有十分重要的意义。

1 实验材料及方法

爆炸焊接的基板分别选用了普碳钢、低合金钢及不锈钢三种, 编号分别为 A, B, C, 尺寸为 $1000\text{mm} \times$

$120\text{mm} \times 6\text{mm}$; 复板为 LF5 防锈铝, 尺寸为 $1050\text{mm} \times 130\text{mm} \times 6\text{mm}$; 中间层为纯铝 L2, 尺寸为 $1050\text{mm} \times 130\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。材料的化学成分见表 1。

对含镁量较高的铝合金和钢直接爆炸焊接存在一定困难。为此, 本工作在铝合金与钢爆炸复合时采用纯铝作中间过渡层。爆炸焊接采用平行安装法, 采用三层二次方式, 即首先以纯铝为复板与钢爆炸复合, 再以防锈铝为复板与纯铝/钢复合板爆炸复合。炸药选用爆速较低的 2[#] 岩石炸药, 炸药与复板之间加缓冲层以保证复板表面的外观均匀性。爆炸焊接参数的选取参考了经验公式:

$$m_e = k \sqrt{\rho_p} \quad (1)$$

$$s = 0.2(t_e + t_p) \quad (2)$$

式中: m_e 为装药密度; s 为基、复板间的间隙; k 为系数, 铝/钢复合取 $k=2$; 铝/铝复合取 $k=1$; ρ_p 为复板密度; t_e 与 t_p 分别为炸药与复板厚度。

表 1 材料化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of the test materials(mass fraction/%)

Material	C	S	P	Si	Mn	Cu	Mg	Ti	Ni	Cr	Others
A	0.12-0.20	≤0.045	≤0.045	0.30	0.39-0.70						
B	0.12	≤0.035	≤0.035	0.8-1.1	0.5-0.8	0.4-0.6			0.5-0.8	0.6-0.9	
C	0.12	≤0.020	≤0.035	0.8	2.0			0.02-0.15	9.0-11.0	17.0-19.0	
LF5				0.5	0.3-0.6	0.1	4.8-5.5				Fe: 0.5
L2				0.25	0.03	0.05	0.03	0.03			

2 结果与分析

2.1 铝/钢复合界面的金相分析

宏观观察(图 1)发现纯铝/钢之间的界面结合为平直状结合,而纯铝/防锈铝之间的结合为近似正弦状的波形结合。在高倍光学显微镜下观察铝/钢界面的金相组织发现(见图 2):铝/钢界面波形较平坦且不明显,近于直线状结合,波形的涡内卷入了破碎的铝的颗粒。出现此种现象主要是由于铝与钢的物理性质差异

较大,铝的密度小、熔点低,而钢的密度大、熔点高。两者物理性质相差较大,故容易产生波形的不对称性。同时也发现,基板、复板均产生较大的塑性变形,尤其是基板一侧晶粒明显被拉长,呈流线状。由于界面处严重的变形使得晶粒破碎且位错密度大,故抛光侵蚀后组织特征不很清楚。

2.2 铝/钢复合界面的电子探针分析

运用电子探针针对铝/钢复合界面的组织、成分及界面扩散情况进行了定性和定量分析。

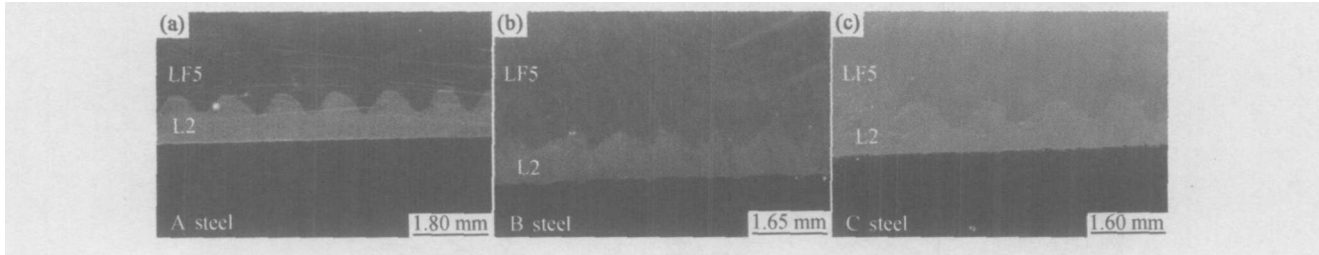


图 1 铝/钢爆炸复合板界面的宏观形态 (a) A 钢; (b) B 钢; (c) C 钢

Fig. 1 Macro-configuration of bonding interfaces of Al/steel explosive cladding

(a) matrix: steel A; (b) matrix: steel B; (c) matrix: steel C

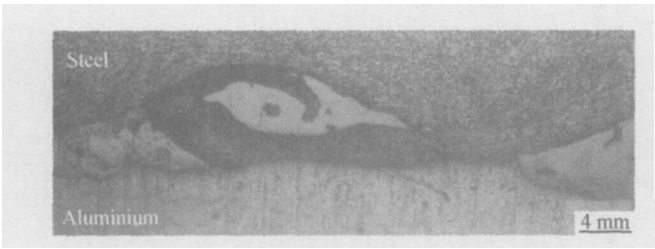


图 2 铝/钢(A 钢)界面经 4% 硝酸酒精腐蚀后的形貌

Fig. 2 Micro-structure of bonding interfaces of

Al/steel A etched by 4% nitric acid alcohol

通过图 3 中铝/钢界面处的二次电子像发现铝/钢之间的界面保持周期性的规则形状,波形较平,铝与钢之间的熔化金属被固态与固态的直接结合所隔开。

进一步分析发现铝/钢界面之间的界面处有一中间层,明显不同于两侧的基体,其厚度约 50~100μm。经能谱分析表明这一中间层为铝、铁形成的金属间化合物。表 2 是图 4 中标注各点的化学成分分析,结果表明这层化合物的化学成分并不固定,是几种铝铁化合物组成的机械混合物。这与文献[2]中报道的中间

层是 FeAl₃ 有所不同。此外,实验发现铝/钢界面熔化生成的化合物是裂纹的萌生源。从图 4 中可看到裂纹在铝铁化合物中萌生,多数裂纹垂直于铝/钢之间的界面,并向两侧的基体扩展,最长裂纹可达 200μm,并且部分裂纹已经相互连接。

表 2 结合界面处不同区域内成分(原子分数/%)

Table 2 Compositions of the bonding interfaces (atom fraction/%)

	1		2		3		4	
	Al	Fe	Al	Fe	Al	Fe	Al	Fe
a	0	100	29.87	70.13	65.98	34.02	100	0
b	0	100	61.67	38.23	49.11	50.89	100	0
c	0	100	64.11	35.89	25.37	74.63	100	0
d	62.32	37.68	-	-	-	-	-	-

为研究铝/钢爆炸复合界面的扩散情况,对复合界面进行了线分析。图 5 是试样表面的线分析结果(限于篇幅,仅以 A 钢为例)。从图 5a 中可看到,铝/钢界

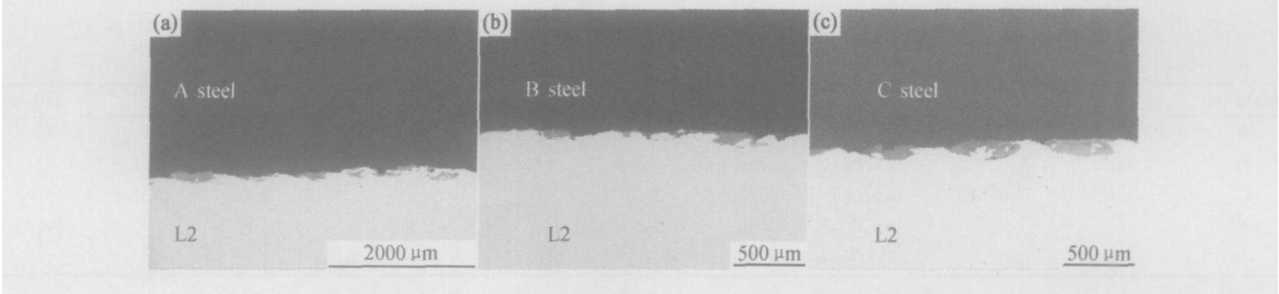


图 3 铝/钢复合界面的二次电子像 (a) A 钢; (b) B 钢; (c) C 钢

Fig. 3 The second electric photos of the Al/steel explosive cladding bonding interfaces

(a) matrix: steel A; (b) matrix: steel B; (c) matrix: steel C

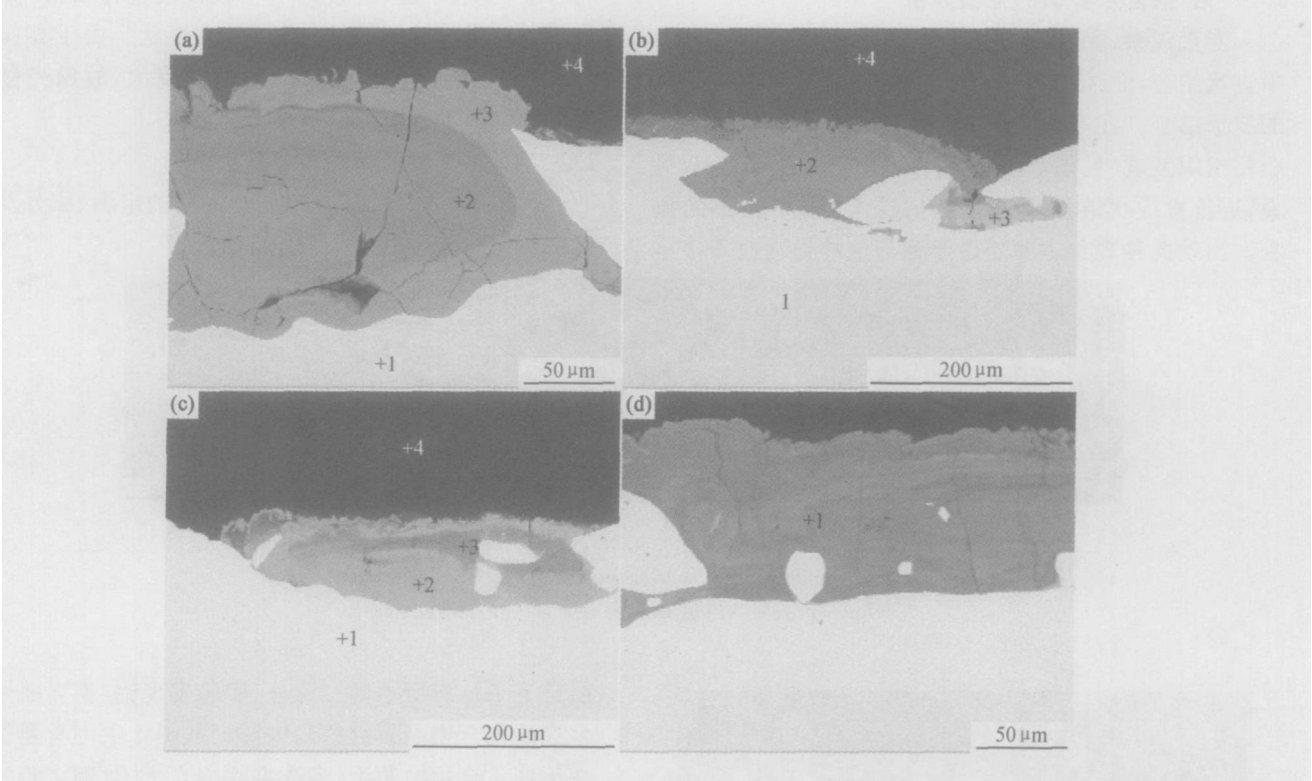


图 4 铝/钢界面的显微形貌 (a) Al+ steel A; (b) Al+ steel B; (c) Al+ steel C; (d) Al+ steel C

Fig. 4 Morphology of the Al/steel explosive cladding bonding interfaces

(a) Al+ steel A; (b) Al+ steel B; (c) Al+ steel C; (d) Al+ steel C

面处有长约 100 μm 的平台,表明钢/铝界面生成了铝铁化合物。图 5b 表明铝/钢直接结合的界面处铝、铁原子的含量并非陡然垂直上升或下降的,而是有一个斜率,这一斜率是铝、钢之间相互扩散的标志。从图中可看到铝与钢的直接连接处约有 5 μm 的扩散距离。

3 讨论

铝/钢爆炸复合界面的特点是结合区波形小,结合界面较平直,界面处有一宽度约 100 μm 的中间层,这一中间层明显不同于两侧的钢基体与铝基体,与其有明显的边界。在界面两侧的基体中,发生了铝与钢的相互扩散。因此,爆炸焊接综合了熔化焊、压力焊和扩

散焊的特点。

爆炸焊接结合界面的形态主要取决于爆炸工艺和被复合材料的物理性质。爆炸焊接过程中,炸药引爆后产生高压脉冲载荷,使复板向基板高速倾斜撞击。这种撞击使界面两侧的一薄层金属发生强烈的塑性变形。塑性变形过程中,外加载荷的能量会借助该过程将其大部分转化为热能。在近似绝热的条件下,引起碰撞处界面温度的迅速升高。当温度达到材料的熔点时,必然使紧靠界面处的一薄层金属熔化,产生冶金过程。从 Al+Fe 二元系的平衡相图(见图 6)^[5] 中可看到 Al 与 Fe 可以形成固溶体、金属间化合物和共晶体。但室温下,Al 在 Fe 中或 Fe 在 Al 中的固溶度非常小,

室温下 Al 与 Fe 极易形成金属间化合物, Al 与 Fe 形成的金属间化合物主要有 FeAl_2 (含铝 49.13%, 质量分数, 下同), Fe_2Al_5 (含铝 54.71%), FeAl_3 (含铝 59.18%), Fe_3Al (含铝 13.87%), Fe_2Al_7 (含铝

62.93%), FeAl (含铝 32.57%)。实验也表明中间层既有既有 Fe_3Al , 又有 FeAl_3 , FeAl 等, 是几种金属间化合物组成的机械混合物。

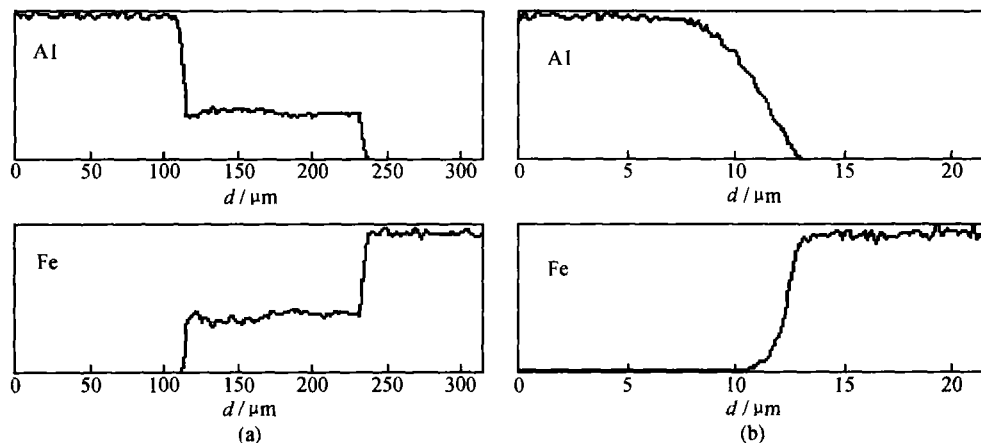


图5 铝/钢(A 钢)界面处铝与铁之间的相互扩散

Fig. 5 Diffusion curves of the bonding boundary between aluminum and steel A

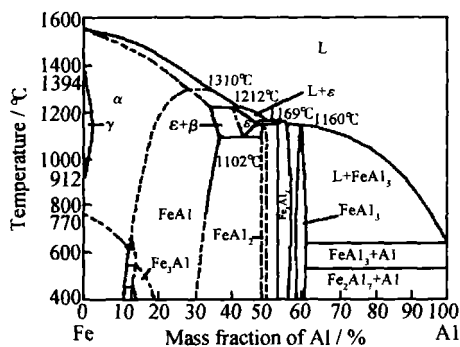


图6 Al-Fe 二元系平衡相图

Fig. 6 Equilibrium phase diagram of Al-Fe alloy

根据电子探针分结果, 可看到铝/钢界面存在短距离相互扩散。在爆炸焊接的情况下, 造成界面扩散的因素很多。根据菲克扩散定律, 在铝/钢爆炸焊接过程中的高温、高压、熔化及铝/钢界面之间高的浓度差必然导致铝与铁元素的相互扩散, 电子探针的实验结果也表明了铝与钢之间相互扩散的存在。但由于爆炸焊接过程是很短暂的(μs 数量级), 因而原子间相互扩散的时间是很短暂的, 它们彼此扩散的深度相应就浅。

爆炸焊接界面主要有三种形态: 波状结合、直接结合和连续的熔化层结合。一般认为波状结合为最理想的结合方式, 后一种结合为非理想的结合方式。在本实验条件下, 铝/钢界面并未产生明显的波形, 而是形成一种有直接结合与熔化层结合组成的混合结合, 力学性能实验表明这种结合方式达到了铝/钢复合板的强度要求。文献[4]认为在密度不同的材料的爆炸焊

接中, 往往形成非对称的波形, 而且密度相差越大, 这种非对称性越大。由于铝与钢之间密度的差异, 故两者很难形成理想的波状结合界面。作者认为除了两者的密度相差较大外, 铝与钢之间熔点的差别也是导致铝/钢不能形成波状结合的原因之一。铝的熔点较低, 而钢的熔点较高, 在爆炸冲击引起的高温作用下, 铝必然首先产生熔化, 发生相变, 波状界面就不易形成。此外, 爆炸焊接参数的选择对铝/钢之间界面波形的形成也有重要影响。

基于以上分析发现, 铝和钢存在一定的爆炸焊接性, 但焊接窗口较小, 在工艺上存在一定困难。经力学性能测试, 铝/钢复合板界面剪切强度达到 80MPa 以上, 满足铝钢复合板的强度要求, 表明铝/钢复合板的这种界面结合形态是理想的。但同时也应看到由于爆炸焊接中熔化的产生, Al 与 Fe 形成了硬度较大的脆性相, 脆性化合物的存在恶化了界面的结合性能, 是影响焊接质量的重要因素。因此, 该区存在使铝/钢爆炸焊接的工艺参数范围变窄, 在爆炸焊接中, 应采用小药量, 尽量减少界面的熔化和脆性相的生成。

4 结论

(1) 被焊材料的物理性质和焊接工艺是影响铝/钢界面结合形态的主要因素。因铝、钢的密度、熔点相差较大, 爆炸焊接时不易产生波状结合, 而是一种有直接结合和熔化层结合组成的混合方式。

(下转第 44 页)

电线路向外输出,故只能以产生焦耳热的形式消耗掉,导致材料温度上升^[11],介电常数实部 ϵ' 因此随交变电场频率的升高而逐渐降低;同时由于介电常数虚部与电导率的关系即 $\epsilon'' = \sigma / 2\pi f$ ^[12],如果电导率一定,则随频率的增大镍纤维的介电常数虚部 ϵ'' 降低。

3 结论

(1)制备的金属镍纤维直径在 10~20 μm 。加入乙二醇作为添加剂可以改善前驱体溶胶的稳定性,提高其可纺性。

(2)前驱体纤维的热分解转化过程大致分为 3 个阶段:第一阶段主要是游离柠檬酸的裂解;第二阶段主要是前驱体纤维的分解,由有机的前驱体纤维转变为氧化镍纤维;第三阶段为氧化镍纤维随着温度的升高被逐步还原,得到金属镍纤维。

(3)不同的热处理气氛对最终纤维的物相组成有重要影响。在空气中,前驱体纤维经 500 $^{\circ}\text{C}$ 焙烧后得到的纤维为 Ni 和 NiO 的混合物;在氮气气氛中热处理可获得金属镍纤维,具有面心立方结构;在氢气气氛中焙烧所得镍纤维其结晶程度较高,产物晶化更为完整。

(4)镍纤维试样的复介电常数、复磁导率在 2~18GHz 范围内随微波测试频率的增大而降低,表现了较好的频散特性,有望成为一种性能优越的新型电磁波吸收剂材料。

参考文献

- [1] 刘古田. 金属纤维综述[J]. 稀有金属材料与工程, 1994, 23(1): 7-15.
- [2] RUDKOWSKI P, RUDKOWSKA G, ZALUSKA A, et al. The properties of sub 20 micro permalloy fiber formed by melt extraction [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1992, 28(4): 1899-

1903.

- [3] RUDKOWSKI P R, RUDKOWSKA G, STROMLSEN J. The fabrication of fine metallic fibers by continuous melt extraction and their magnetic and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering, 1991, A133: 158-161.
- [4] SCHLADITZ H J. High strength metal filaments and the process and apparatus for forming the same [P]. USA Patent: 34414081969.
- [5] GERSHENSON M, SCHELL T. Method and apparatus for the manufacture of metallic filaments [P]. USA Patent: 4853036, 1989.
- [6] YOSHIAKI SAWADA, YOSHITERU KAGEYAMA, MASASHI IWATA, et al. Synthesis and magnetic properties of ultrafine iron particles prepared by pyrolysis of carbonyl iron [J]. Appl Phys, 1992, 31(12a): 3858-3861.
- [7] 曹凯, 沈湘黔, 王涛平, 等. 溶胶凝胶法制备纳米结构氧化铝陶瓷纤维[J]. 矿冶工程, 2004, 24(5): 76-79.
- [8] VENKATESH R, ROY RAMANAN S. Effect of organic additives on the properties of sol-gel spun alumina fibres [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2000, 20: 2543-2549.
- [9] 王涛平, 沈湘黔, 景茂祥. 柠檬酸盐凝胶原位还原法制备超细金属镍纤维[J]. 矿冶工程, 2004, 24(5): 127-130.
- [10] 孟令芝, 龚淑玲, 何永炳. 有机波谱分析[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003. 213.
- [11] 张有纲, 黄永杰, 罗迪民. 磁性材料[M]. 北京: 电子科技大学出版社, 1988. 73-78.
- [12] 楼仁海, 符果行, 袁敬阔. 电磁理论[M]. 北京: 电子科技大学出版社, 1996. 162-165.

收稿日期: 2005-10-09; 修订日期: 2006-05-20

作者简介: 邓橙(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事陶瓷纤维材料研究, 联系地址: 湖南省长沙市国防科技大学航天与材料工程学院新型陶瓷纤维及其复合材料国防科技重点实验室(410073)。

(上接第 39 页)

(2)铝/钢爆炸焊接界面处的组织存在着严重的塑性变形,晶粒呈流线状,界面存在熔化和扩散现象。

(3)铝与钢之间存在一定的爆炸焊接性,但焊接窗口较小,在工艺上存在一定困难。爆炸焊接过程中容易产生硬度较大的脆性相,是影响铝钢复合强度的重要因素。在铝/钢的炸焊接过程中应尽量消除或减少界面的熔化。

参考文献

- [1] 李标峰. 船用铝合金焊接及其建造工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] YAN LI, HASTUJIRO H, EIICHI 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] 郑远谋, 张胜军. 不锈钢-钢爆炸复合板结合区的研究[J]. 钢铁研究, 1998, 10(1): 30-34.
- [4] 郑哲敏. 爆炸加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [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] 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.

收稿日期: 2006-03-16; 修订日期: 2006-09-08

作者简介: 王建民(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事材料爆炸焊接方面的研究, 联系地址: 武汉海军工程大学 102 教研室(430033)。