

水下爆炸焊接制备 NiTi 合金与铜箔复合板

孙伟¹, 李晓杰^{1,2}, 闫鸿浩¹, 刘凯欣²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023;

2. 北京大学 湍流研究国家重点实验室, 北京 100871)

摘要:应用水下爆炸焊方法进行了 NiTi 形状记忆合金与铜箔的爆炸焊研究. 利用大型有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对水下爆炸冲击波驱动飞板的飞行过程进行了数值模拟. 飞板的飞行速度与爆炸焊产生射流的最小碰撞速度对比表明,可以实现焊接. 通过分析微观组织和断裂机理,评估复合板焊接效果. 结果表明,微观组织观察显示界面为连续均匀的波纹形态,界面结合处无裂纹,焊接性能良好. 断口形貌分析显示断裂主要表现为解理和准解理断裂,界面处端口形貌与微观组织形态观察一致. 水下爆炸焊方法将解决脆性、薄板金属用传统爆炸焊方法难以焊接的问题.

关键词:形状记忆合金; 水下爆炸焊; 波纹形态; 断口形貌

中图分类号: TG456.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)10-0063-04



孙伟

0 序 言

NiTi 形状记忆合金由于具有自身优异的形状记忆效应和超弹性,成为了一种新型的功能材料,受到了广泛的关注. 在航空航天、武器研发以及医疗器械等领域, NiTi 形状记忆合金兼有的高比强度、抗腐蚀、抗磨性和优良的生物相容性能得到了充分的应用^[1]. 但是 NiTi 形状记忆合金与其它材料的连接问题却成为工程师的一个难题,由于材料的成形性差、高温性能不稳定会导致材料焊接时产生热变形和焊缝组织变异^[2].

爆炸焊接是利用炸药爆炸产生的能量使材料在瞬间高压下结合的一种固态连接技术. 爆炸焊接的一个最大优点是能将不同种类的金属焊接在一起,这种焊接效果常常是其它方法所不能达到的^[3]. 但是,对于一些厚度很薄、成型性差的脆性材料,比如形状记忆合金和非晶薄带,常规爆炸焊接往往很难达到效果. 文中提出水下爆炸焊接法,这种方法有以下优点:(1)以水作为爆炸能量传递的媒介,即使很薄的飞板,也能得到一个均匀的加速;(2)在一个很短的加速距离内,飞板可以得到很大的速度,实现焊接;(3)由于水相比于空气的不可压缩性,爆炸产生的能量将不会使水的温度显著上升,绝大部分用

于推动水的运动,金属薄板不会被爆炸产生的高温烧蚀^[4]. 日本学者成功用水下爆炸焊方法将非晶薄带焊接到了不锈钢表面^[5].

文中采用水下爆炸焊方法,对 NiTi 形状记忆合金与铜箔进行焊接试验研究. 利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对水下爆炸冲击波驱动飞板与基板碰撞过程进行了数值模拟,并且基于爆炸焊产生射流的最小碰撞速度进行了讨论. 通过焊缝微观组织观察和复合板的断裂机理分析,评估水下爆炸焊方法的试验效果.

1 试验方法

NiTi 形状记忆合金作为基板,铜箔为飞板,尺寸分别为 100 mm × 50 mm × 1 mm 和 100 mm × 50 mm × 0.5 mm. 水下爆炸焊试验采用平行安置法,装置模型见图 1.

铜箔与 NiTi 合金的间距为 1 mm,将焊接部件密封在密封袋中. 炸药爆速为 3 000 m/s. 所有装置放入水中,炸药与飞板间的水层厚度为 10 mm. 炸药从边缘起爆,水下冲击波驱动飞板,碰撞瞬间产生的高温高压使得飞板与基板形成焊接.

焊接后的样品沿着爆轰方向切割,试样经过初磨、抛光、腐蚀,在 MEF-3 光学显微镜(OM)下分析显微组织. 利用 JSM-5600LV 扫描电镜(SEM)观察试样断裂的断口形貌,评估焊接所得复合板结合情况.

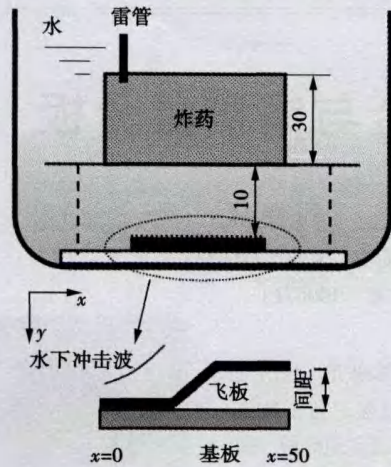


图1 水下爆炸焊装置图 (mm)

Fig. 1 Experimental set-up employed for underwater explosive welding

2 模拟分析

利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对水下爆炸冲击波驱动飞板与基板碰撞过程进行了数值模拟,炸药、水、飞板和基板分别进行了网格划分,定义了材料属性. 计算结果可以读出每一个单元的压力、速度、变形、位移等过程.

图2为水下爆炸冲击波作用下飞板与基板焊接的变形过程以及压力分布情况. 水下冲击波在与飞板接触时产生反射波,飞板在冲击波作用下向下加速与基板碰撞,碰撞点附近压力增加. 所以在飞板与基板的焊接过程中,可以观察到压力分布显现出两个压力峰.

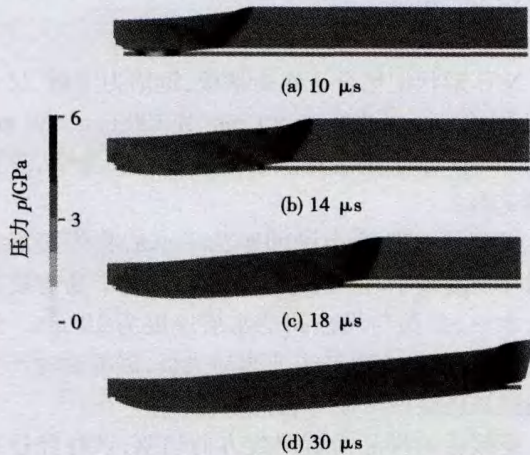


图2 焊接过程中飞板和基板的变形过程以及压力分布

Fig. 2 Deformation process of flyer and base plate and pressure distributions during welding process

为了得出飞板向基板碰撞的飞行速度 v_p , 选取稳定爆轰后飞板水平方向 2, 3, 4, 5, 6 cm 处的节点单元, 绘制出节点处垂直速度随时间分布曲线如图3所示. 从图3中可以看出, v_p 的平均速度大约在 700 m/s.

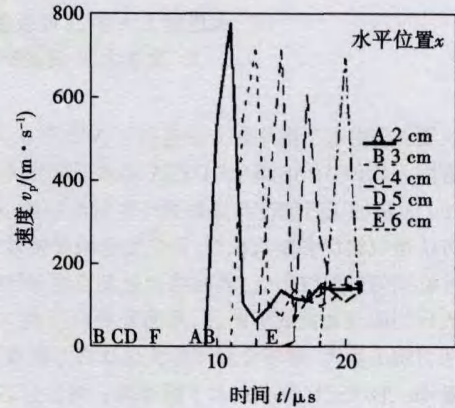


图3 飞板 x 方向 2 ~ 6 cm 处节点的垂直 y 方向的速度随时间的分布图

Fig. 3 Vertical velocity distribution of flyer plate at various horizontal position x from 2 - 6 cm

爆炸焊中基复板产生金属射流速度的下限条件为

$$v_{p \min} = k \sqrt{\frac{\gamma_{Hv}}{\rho}} \quad (1)$$

式中: k 为取值在 0.6 ~ 1.2 之间的系数; γ_{Hv} 为板材的硬度; ρ 为板材的密度.

试验中由于基复板预先经过细磨, k 取 0.6, 硬度较高的 NiTi 形状记忆合金的硬度 γ_{Hv} 为 4 ~ 4.5 GPa, 密度 ρ 为 6 500 kg/m², $v_{p \min}$ 计算结果为 470 ~ 500 m/s. 很显然, 试验中飞板的飞行速度满足了速度下限. 由于试验中飞板为厚度很薄的铜箔, 速度上限可以不用考虑.

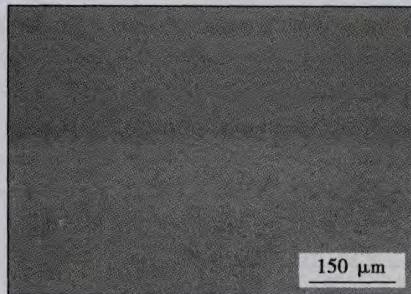
3 结果分析

3.1 显微组织观察

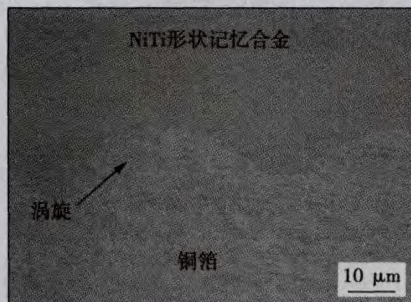
爆炸焊过程中, 飞板与基板的碰撞压力大大地超过了金属板材自身的动态屈服极限, 碰撞点附近的金属板材表现出流体性质, 基复板之间的碰撞会产生一股金属射流并喷离母材. 由于金属射流是从基复板的结合界面上剥离下来的, 因此射流可带走基复板表面的氧化层与玷污层, 起到焊接自清理的作用. 碰撞射流后方自清理干净, 在碰撞点附近的极高压力和极大变形作用下, 即可达到

冶金结合,实现焊接. 通常成功地爆炸焊接基复板界面是呈规则的波状界面,这些波也称为界面波^[6].

水下爆炸焊所得的复合板焊缝形态见图 4. 从图 4a 可以看出,焊缝结合区呈现出规律和连续的正弦波状结合形态,焊接区域结合紧密. 图 4b 为波纹的局部放大图,可以观察到带有漩涡的波纹形状. 由于高速碰撞下高温高压导致金属熔化,汇集到波峰之间,形成了漩涡区域. 波长大约在 40 ~ 45 μm , 振幅大约在 15 ~ 20 μm . 焊接区域结合均匀,没有产生明显地脆性金属间化合物,将得到优良的结合强度^[7].



(a) 结合界面



(b) 结合界面放大图

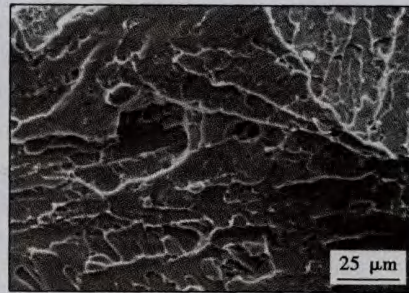
图 4 水下爆炸焊接 NiTi 合金和铜箔的结合界面

Fig. 4 Interface of underwater explosive welding of NiTi alloy/ copper foil combination

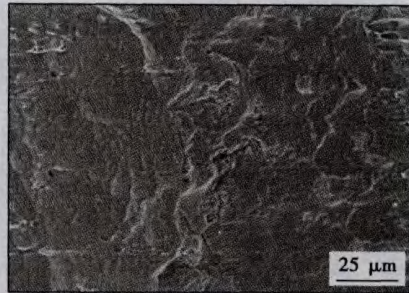
3.2 断口分析

为了进一步分析复合板的性能,试验分析了复合板的断裂行为,通过扫描电镜观察,断口形貌如图 5 所示.

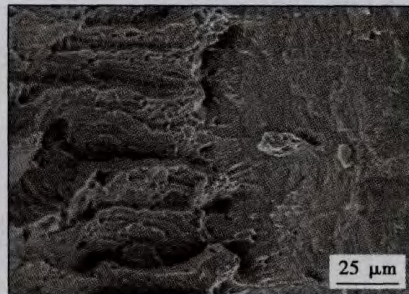
图 5a 为 NiTi 合金的断口形貌,断口整体显现为大小不一的准解理面和少量的浅韧窝以及局部裂缝,准解理断裂为主要的断裂机理. 图 5b 为铜箔的断口形貌,断口显现出平整的解理面,表明为解理断裂. 图 5c 为焊接结合区域的断口形貌,显现出准解理和解理两种形态. 图 5d 为焊接区的局部放大图,



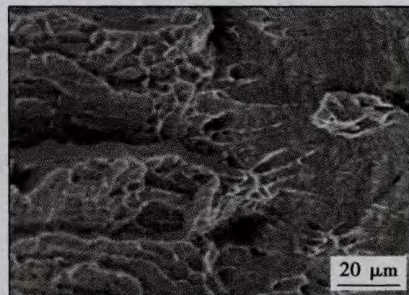
(a) NiTi合金断口形貌



(b) 铜箔断口形貌



(c) 结合区的断口形貌



(d) 放大的结合区域断口形貌

图 5 断口形貌 SEM 分析

Fig. 5 SEM image of fractography

可以观察到一些类似“射流”形态的物质,结合前面的界面显微形态,这些“射流”长度大约为 10 ~ 20 μm ,与波纹的振幅一致. 这些“射流”的形成可以解释为在高速碰撞下飞板和基板的表层部分熔化、相互混合,与爆炸焊机理相符. 由断口形貌可见,复合板中基复板各自保持了自身的断裂性能,水下爆炸焊并未对基复板本身的属性造成影响.

在试验中, NiTi 合金与铜箔在水下爆炸焊方法下成功结合. 可以看出, 水下爆炸焊方法对成形性差、高脆性的薄板材料(如 NiTi 形状记忆合金、非晶薄板)的结合有很好的应用前景, 这正是传统爆炸焊的难点. 水下爆炸焊接将是对爆炸加工的一次拓展和丰富.

4 结 论

(1) 利用 LS-DYNA 可以准确地预测水下爆炸焊过程. 合理地水下爆炸焊工艺参数其爆速为 3 000 m/s, 间距为 1 mm, 间隔水层为 10 mm.

(2) 通过金相显微形态观察, 界面表现出均匀连续的波纹形状, 界面结合区无明显缺陷, 基复板结合紧密.

(3) 断口形貌分析显示, 断裂主要为解理和准解理断裂, 界面处断裂微观形态与界面组织观察所得波纹形状尺度一致.

参考文献:

- [1] 丁彦军, 佟 铮, 李进福, 等. NiTi 合金爆炸焊接试验分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 109-112.
Ding Yanjun, Tong Zheng, Li Jinfu, *et al.* Experimental analysis of explosive welding of NiTi alloy[J]. Transactions of the China

Welding Institution, 2010, 31(12): 109-112.

- [2] Falvo A, Furgiuele F M, Maletta C. Laser welding of a NiTi alloy: Mechanical and shape memory behaviour[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 412: 235-240.
- [3] Akbari-Mousavi S A A, Barrett L M, Al-Hassani S T S. Explosive welding of metal plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202: 224-239.
- [4] Lyama H, Fujita A K M, Kubota S, *et al.* An investigation on underwater explosive bonding process[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2001, 123(4): 486-492.
- [5] Hokamoto K, Nakata K, Mori A, *et al.* Dissimilar material welding of rapidly solidified foil and stainless steel plate using underwater explosive welding technique[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472: 507-511.
- [6] 史长根, 王耀华, 蔡立良, 等. 爆炸焊接界面的结合机理[J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 55-58.
Shi Changgen, Wang Yaohua, Cai Ligen, *et al.* Bonding mechanism of interface in explosive welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(2): 55-58.
- [7] Mousavi A A A, Al-Hassani S T S. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding[J]. Journal of the Mechanics and Physics Solids, 2005, 53: 2501-2528.

作者简介: 孙 伟,男,1986 年出生,博士研究生. 主要从事爆炸理论以及爆炸效应研究. Email: dust911@163.com

通讯作者: 李晓杰,男,教授,博士研究生导师. Email: arosin@163.com

[上接第 62 页]

- [6] Fude Wang. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57: 597-603.

作者简介: 李 伟,男,1979 年出生,博士研究生. 主要研究方向为新型弧焊电源技术及应用、焊接过程控制等. Email: liweiipu@sohu.com

通讯作者: 从保强,男,讲师. Email: cong bq@buaa.edu.cn