

# 基于超声相控阵技术的双金属复合板缺陷研究

郑钢丰,夏皖东,周凯峰,闫迎春

(安徽理工大学 材料科学与工程学院,安徽 淮南 232001)

**摘要:**针对双金属复合板在制作及使用过程中会产生缺陷的问题,阐述了超声相控阵检测原理及辐射声场理论。对含有 $\varnothing 3$  mm横孔和腐蚀坑缺陷的不锈钢-碳钢试件进行实验研究。结果表明:该技术能对不锈钢-碳钢复合板中的缺陷进行实时成像检测,能较准确地得到缺陷的位置、大小,两种缺陷的测量误差分别在6%、12%以内。

**关键词:**超声相控阵;辐射声场;实时成像;双金属复合板

中图分类号:TN384

文献标识码:A

## Study on the Defects of Bimetallic Composite Plate Based on Ultrasonic Phased Array Technology

ZHENG Gangfeng, XIA Wandong, ZHOU Kaifeng, YAN Yingchun

(College of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the bimetallic composite plate may produce defects during the processing of fabrication and usage, the principle of ultrasonic phased array detection and the theory of radiation sound field are introduced in this paper. Through the experiment research on the stainless steel-carbon steel specimens with the cross-drilled hole of  $\varnothing 3$  mm and corrosion pits, it is found that the ultrasonic phased array technology can measure the artificial defects in the stainless steel-carbon steel by real-time imaging, the location and size of defects can be accurately obtained and the measurement errors of the two kinds of defects are less than 6% and 12%, respectively.

**Key words:** ultrasonic phased array; radiated sound field; real-time imaging; bimetallic composite plate

### 0 引言

随着现代工业技术的飞速发展,人们对金属性能的要求日益增高,在有些工况下传统单一金属组元已很难满足性能要求。双金属复合板是由两种性能不同的金属板通过特殊加工方法复合而成,经过合理设计组合后的双金属复合板既满足高强度、抗疲劳、尺寸稳定、耐磨及耐蚀等使用性能的要求,又节约了大量的稀有资源,降低了生产成本,已被广泛应用于航天、机械、建筑、轮船、电力及日用品等领域<sup>[1]</sup>。双金属复合板常用的加工制作方法有爆炸焊接复合、轧制复合、爆炸+轧制复合,由于难以对各种工艺参数进行精确控制,双金属复合板质量不稳定,存在缺陷<sup>[2]</sup>。另外,使用过程中静载荷、动载荷、机械损伤、疲劳、蠕变等也会引起双金属复合板中损伤的产生,从而加速材料的老化,造成材料性能下降,甚至会造成严重的安全事故。因此,在双金属复

合板出厂前及使用过程中对其进行无损检测十分必要。

目前,应用于双金属复合板的无损检测方法主要有超声检测技术、红外热波技术、声-超声技术、微波检测技术<sup>[3]</sup>,这些方法普遍存在效率低、灵敏度差和对缺陷无法实时成像等问题。因此,本文尝试采用超声相控阵技术(超声检测的分支)来检测双金属复合板的缺陷。

### 1 超声相控阵工作过程及辐射声场

#### 1.1 工作过程

超声相控阵检测技术的主要设计思想是惠更斯-菲涅尔原理和亥姆霍兹声压积分定理<sup>[4]</sup>,其关键元件是相控阵探头。它由若干个独立阵元按照一定的顺序排列组成,各阵元具有独立的发射与接收电路,通过控制各阵元的发射与接收延迟时间,实现声束的偏转与聚焦,从而完成扫查成像。

收稿日期:2016-07-21

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51374015)

作者简介:郑钢丰(1972-),男,安徽淮南人,教授,硕士生导师,博士,主要从事无损检测新方法的研究。

超声相控阵检测系统的核心在于相位调控<sup>[5]</sup>,它包括发射和接收两部分。如图1所示,相控阵发射时,各阵元被同一频率的脉冲信号激励,在电子系统的控制下按预定的聚焦法则发射超声波,具有不同相位的超声子波在空间叠加干涉,形成一个新的波阵面及合成声束;接收时,依据回波到达各阵元的时间差对回波信号进行延时补偿,然后进行信号合成,将待定方向的回波信号叠加增强,而其他方向的回波信号削弱,甚至抵消<sup>[6]</sup>。最后将合成信号以图像方式实时显示出来,实时成像是超声相控阵检测显著优于常规检测的地方。

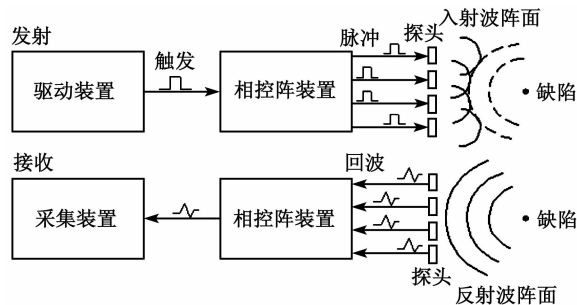


图1 超声相控阵检测原理图

## 1.2 辐射声场

换能器的辐射声场是研究超声相控阵实时成像的基础<sup>[7]</sup>,辐射声场描述的是换能器在空间的声压分布。

相控阵线性阵列探头由  $N$  个阵元组成。对于单阵元而言,假设单阵元宽度为  $a$ ,如图2(a)所示,利用线元声压公式通过对阵元宽度积分<sup>[8]</sup>,可计算阵元在空间的声压分布为

$$p(r, \theta, t) = \left(\frac{p_0}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right)}{\frac{ka \sin \theta}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{jka \sin \theta}{2}\right) \cdot \exp[j(\omega t - kr)] \quad (1)$$

式中: $r$ 为从声源辐射的距离; $\omega$ 为角频率; $j$ 为虚数单位; $k$ 为角波数; $p_0$ 为线元在单位距离上产生的声压; $\theta$ 为偏转角。

假设相控阵线性阵列的几何参数如图2(b)所示,根据惠更斯-菲涅尔原理<sup>[9]</sup>,相控阵线性阵列在某点处的声压可通过各阵元在该处的声压叠加得到:

$$p(r, \theta, t) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{p_0}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\sin\left(\frac{ka \sin \theta}{2}\right)}{\frac{ka \sin \theta}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{jka \sin \theta}{2}\right) \cdot \exp[j(\omega(t - \Delta t_n) - k(r - (n-1)d \sin \theta))]$$

$$\exp\left(-\frac{jka \sin \theta}{2}\right) \cdot \exp\{j[\omega(t - \Delta t_n) - k(r - (n-1)d \sin \theta)]\} \quad (2)$$

式中: $d$ 为阵元中心间距; $\Delta t_n$ 为第  $n$  个阵元的延迟时间。

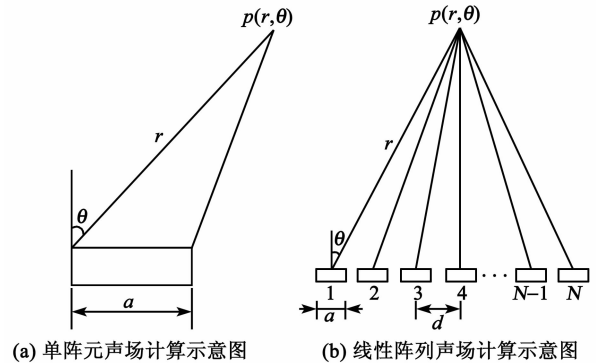


图2 声场计算示意图

根据式(1)、(2)可得到声场各点处的声压分布,用不同颜色表示扫描区域中各点处的声压强弱,从而实现超声相控阵实时成像检测的功能。

## 2 检测试验

常见双金属复合板有:钛-钢复合板、铜-钢复合板、钛-锌复合板、钛-镍复合板、铜-铝复合板、不锈钢-碳钢复合板等,本次试验以压力容器所用的不锈钢-碳钢复合板作为检测试件。不锈钢-碳钢复合板基层使用普通的碳钢,满足机械性能要求,而复层采用不锈钢,实现耐腐蚀功能,两者通常采用爆炸焊接在一起。

### 2.1 检测试件

试验工件为两块不锈钢-碳钢复合板,长100 mm,宽50 mm,厚12 mm(其中不锈钢层厚为3 mm)。如图3所示,在1号复合板侧面设置两个横孔(分别设为1号横孔和2号横孔),两横孔直径都为 $\varnothing 3$  mm,1号横孔长度为26 mm,2号横孔长度为24 mm。1号横孔在不锈钢-碳钢界面处,模拟双金属复合板界面部分未结合的缺陷,2号横孔在基层(碳钢)中间厚度处。在2号复合板复层(不锈钢)表面设置3个长条形凹坑(分别设为1号凹坑、2号凹坑及3号凹坑),模拟压力容器长期使用后内壁产生的腐蚀坑,其中1号腐蚀坑长为20 mm,最大腐蚀厚度为1.6 mm;2号腐蚀坑长为30 mm,最大腐蚀厚度为2.5 mm;3号腐蚀坑长为20 mm,最大腐蚀厚度为1.2 mm。

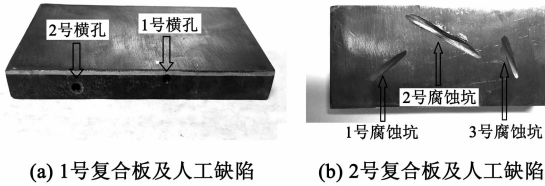


图 3 不锈钢-碳钢复合板及其人工缺陷图

### 2.2 试验仪器

试验使用的超声相控阵检测仪为 OmniScan MX2, 配套使用 5L64-A12 型线性阵列探头和 SA12-0L 型直楔块, 如图 4 所示。

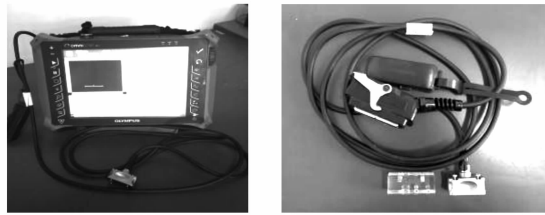


图 4 超声相控阵检测设备

### 2.3 检测过程

试验使用润滑剂作为耦合剂, 在相控阵探头与楔块、楔块与试件之间均匀抹上耦合剂, 实现良好耦合。参数设置依据向导指示一步完成, 主要检测参数的设置如表 1 所示。

表 1 主要检测参数的设置

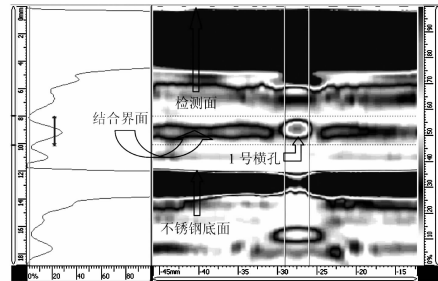
参数名称	具体设置
检测材料	碳钢
聚焦深度/mm	11
法则配置	零度线性
触发方式	内部时钟触发扫查
探头配置	5L64-A12
楔块配置	SA12-0L
晶片设置	一组激发 8 个晶片
第一晶片	1
最后晶片	64
晶片步距	1
成像显示	A-B、A-C
扫查方式	手持探头扫查
扫查速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	20

检测时, 相控阵探头在复合板基层(碳钢)表面进行 B 扫描及 C 扫描, 先粗扫确定缺陷的大致位置, 再对每个缺陷进行细扫, 从而确定其大小、形状及位置。检测过程中还需要根据具体情况调整闸门、增益、调色板等, 以获得清晰的检测图像。成像显示方面, 1 号复合板检测以 A-B 和 A-C 成像方式显示缺陷, 2 号复合板检测以 A-C 成像方式显示缺陷。得到复合板缺陷检测图像后, 通过移动参考光标和测量光标得出缺陷的相关信息。

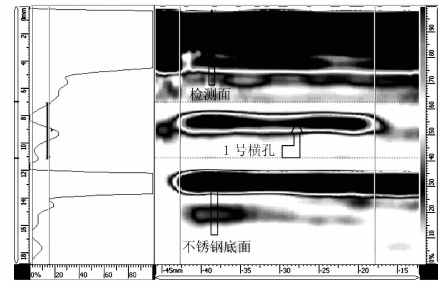
## 3 结果及分析

### 3.1 1 号复合板

以基层(碳钢)作为检测面, 使用相控阵探头对 1 号复合板进行 B 扫描, 检测结果以 A-B 成像方式显示, 如图 5、6 所示。这些图中左侧为扫查区域的 A 型成像图, 横轴表示波幅相对高度, 纵轴表示深度(即距离检测面的深度); 图中右侧为扫查区域的 B 型成像图, 横轴表示探头的水平位置, 纵轴与 A 型成像图合用同一深度轴, 最右侧的调色板用黑白程度表示反射信号的强弱。

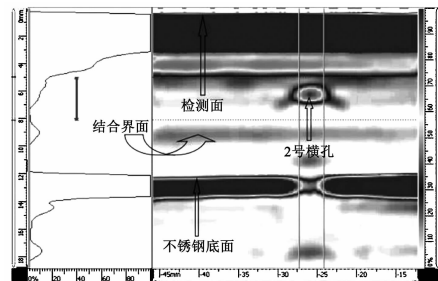


(a) 1 号横孔横截面

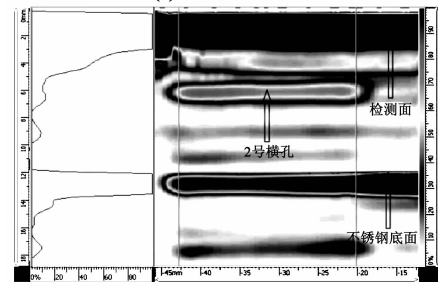


(b) 1 号横孔纵剖面

图 5 1 号缺陷 A-B 扫查图



(a) 2 号横孔横截面



(b) 2 号横孔纵剖面

图 6 2 号缺陷 A-B 扫查图

图5(a)的B型成像图中,黑色区域表示反射信号强的地方,第1个黑色区域表示检测面(即碳钢层表面),第2个黑色区域表示不锈钢底面,两个黑色区域中间的灰色区域表示碳钢-不锈钢结合界面处,圆形灰色区域表示1号横孔的横截面。将闸门分别移动到结合界面、1号横孔、不锈钢底面处,通过读数栏分别读出结合界面深度为9.13 mm,1号横孔深度为9.16 mm,不锈钢底面深度为11.86 mm。再将参考光标和测量光标(图中两条白色竖线)分别移至1号横孔左、右两侧,通过读数栏读出1号横孔直径为 $\varnothing 3.14$  mm。

图5(b)的B型成像图中,黑色区域表示反射信号强的地方,第1个黑色区域表示检测面(即碳钢层表面),第2个黑色区域表示1号横孔纵剖面,第3个黑色区域表示不锈钢底面。将参考光标和测量光标(图中两条白色竖线)分别移至1号横孔左、右两侧,通过读数栏分别读出1号横孔长度为24.88 mm。

图6(a)的B型成像图中,黑色区域表示反射信号强的地方,第1个黑色区域表示检测面(即碳钢层表面),第2个黑色区域表示不锈钢底面,两个黑色区域中间的灰色区域表示碳钢-不锈钢结合界面处,圆形灰色区域表示2号横孔的横截面。将闸门移动到2号横孔处,通过读数栏读出2号横孔深度为6.23 mm。将参考光标和测量光标(图中两条白色竖线)分别移至2号横孔左、右两侧,通过读数栏读出2号横孔直径为 $\varnothing 3.18$  mm。

图6(b)的B型成像图中,黑色区域表示反射信号强的地方,第1个黑色区域表示检测面,第2个黑色区域表示2号横孔纵剖面,第3个黑色区域表示不锈钢底面。将参考光标和测量光标(图中两条白色竖线)分别移至2号横孔左、右两侧,通过读数栏读出2号横孔长度为22.68 mm。

### 3.2 复合板

以碳钢作为检测面,使用相控阵探头对2号复合板进行C扫描,检测结果以A-C成像方式显示。如图7所示,上面为扫查区域的A型成像图,横轴表示深度(即距离检测面的深度),纵轴表示波幅相对高度;下面为C型成像图,它表示扫查区域的俯视图,横轴表示扫查轴(即探头扫查走过的距离),纵轴表示步进轴(即探头长度方向)。最右侧调色板使用黑白程度代表金属复合板的剩余厚度,黑色表示剩余厚度正常区域,白色或灰色表示腐蚀坑区域。

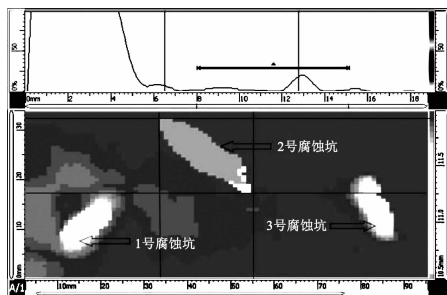


图7 不锈钢腐蚀坑A-C扫查图

由图7可见,1号腐蚀坑长度为17.61 mm,最大腐蚀厚度为1.43 mm;2号腐蚀坑长度为27.13 mm,最大腐蚀厚度为2.15 mm;3号腐蚀坑长度为17.63 mm,最大腐蚀厚度为1.07 mm。

将检测数据与不锈钢-碳钢复合板实际值进行对比,如表2所示。1号复合板横孔缺陷的深度、直径及长度与检测结果基本相符,误差在6%以内,说明整套超声相控阵检测系统能够准确地检测出双金属复合板中横孔类缺陷。2号复合板不锈钢层的腐蚀坑长度、最大腐蚀厚度与检测结果大致相符,误差在12%以内,误差较大。这主要有两方面的原因:

1) 2号复合板的腐蚀坑缺陷是用砂轮机制成的,导致人工腐蚀坑中间深、两边浅,检测难度系数增大,使得腐蚀坑的检测值都偏小于真实值。

2) 检测时采用人工时基扫查方式,实验人员手持探头扫查的速度与设定值不一致,导致测出的缺陷存在较大误差。

表2 各检测项目误差分析表

检测项目		真实值/ mm	检测值/ mm	误差/%
结合界面深度		9.0	9.13	1.5
不锈钢底面深度		12.0	11.86	1.2
1号横孔	深度	9.0	9.16	1.8
	直径	3.0	3.14	4.7
	长度	26.0	24.88	4.3
2号横孔	深度	6.0	6.23	3.8
	直径	3.0	3.18	6.0
	长度	24.0	22.68	5.5
1号 腐蚀坑	长度	20.0	17.61	11.9
	最大腐蚀厚度	1.6	1.43	10.6
2号 腐蚀坑	长度	30.0	27.13	9.6
	最大腐蚀厚度	2.5	2.27	9.2
3号 腐蚀坑	长度	20.0	17.63	11.8
	最大腐蚀厚度	1.2	1.07	10.8

## 4 结论

双金属复合板可以发挥各金属组元的优势,实现组元材料资源的最佳配置,这既可降低生产成本,又可满足客户对使用性能的要求。双金属复合板在加工制作及现场使用过程中都不可避免地出现各种缺陷,通过利用超声相控阵检测技术对不锈钢-碳钢复合板的试验研究,得出以下结论:

1) 超声相控阵检测技术能准确地测量双金属复合板基层与复层的厚度,并清晰显示双金属结合界面。

2) 超声相控阵检测技术通过 B 扫查可对双金属复合板中的横孔缺陷实时成像检测,准确测量缺陷位置及大小,测量误差在 6% 以内。

3) 超声相控阵检测技术通过 C 扫查能够对双金属复合板腐蚀坑缺陷进行实时成像显示,并能较准确地测出腐蚀坑长度及最大腐蚀厚度,检测误差在 12% 以内。

### 参考文献:

- [1] 师红旗,丁毅,马立群,等. 不锈钢/碳钢双金属复合板开裂过程研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12): 244-245.  
SHI Hongqi, DING Yi, MA Liqun, et al. Research on cracking process of stainless steel/carbon steel compound panel[J]. Hot Working, 2015, 44(12): 244-245.
- [2] 刘环,郑晓冉. 层状金属复合板制备技术[J]. 材料导报, 2012, 26(20): 131-134.  
LIU Huan, ZHENG Xiaoran. The manufacturing technique of clad metals sheet[J]. Materials Review, 2012, 26(20): 131-134.
- [3] 李龙,张心金,刘会云,等. 金属层状复合材料结合性能的评价方法[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(3): 195-199.  
LI Long, ZHANG Xinjin, LIU Huiyun, et al. Methods for evaluating interfacial bonding of laminated metal composites[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2013, 36(3): 195-199.
- [4] SUN F. Research on several key issues of ultrasonic phased array technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 14-36.
- [5] 潘亮,董世运,徐滨士. 相控阵超声检测技术研究与应用概况[J]. 无损检测, 2013, 35(5): 26-29.  
PAN Liang, DONG Shiyun, XU Binshi. The review of study and application of phased array ultrasonic testing technology[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(5): 26-29.
- [6] 郭艳. 超声相控阵检测系统成像技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [7] CHEN Jinzhong, HE Renyang, KANG Xiaowei. Simulation and experiment for the inspection of stainless steel bolts in servicing using an ultrasonic phased array[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2015, 30(4): 373-386.
- [8] YUAN Chao, XIE Congzhen, LI Licheng. Ultrasonic phased Array detection of internal defects in composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 525-531.
- [9] 史振. 超声相控阵成像检测技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [6] 张东,吴科如,李宗津. 0-3 型水泥基压电陶瓷复合材料的制备和性能[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(2): 161-166.
- [7] 黄世峰,常钧,程新,等. 0-3 型压电陶瓷-硫酸盐水泥复合材料的压电性能[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 73-78.
- [8] HUANG Shifeng, CHANG Jun, CHENG Xin, et al. Piezoelectric properties of 0-3 PZT/sulphoaluminate cement composites [J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13(2): 270-274.
- [9] 程新,黄世峰,胡雅莉,等. 环境湿度对 1-3 型水泥基压电复合材料性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5): 626-629.
- [10] 黄世峰,叶正茂,王守德,等. 1-3 型水泥基压电复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 122-126.
- [11] 李焰. PVDF 应力计的动态测量技术及其应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [12] 周广宇. 压缩载荷下 PZT 压电陶瓷非线性本构特性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2005.
- [13] 张智丹,纪松,张延松. 冲击载荷下 PVDF 和 PZT-5 压电材料的动态性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(2): 65-69.

(上接第 436 页)