

相控阵检测在爆炸焊接金属复合板中的应用探究

王 茹^{1,2}, 樊科社^{1,2}, 王礼营^{1,2}, 吉 飞^{1,2}, 张向阳^{1,2}

(1. 西安天力金属复合材料股份有限公司, 陕西 西安 710201)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 相控阵检测技术是无损检测超声领域的新技术, 将该技术应用到爆炸焊接金属复合板结合界面波纹特征的检测是一种新的尝试。介绍了相控阵检测技术的基本原理和技术特点, 分析了爆炸焊接复合板界面超声波传播特点和相控阵 C 扫成像基本原理, 并在多种材质的爆炸焊接金属复合板上进行试验性应用研究, 结果发现相控阵扫查方向影响爆炸波纹的成像效果, 通过相控阵检测技术, 能够快速获取爆炸焊接复合板结合界面的爆炸波纹特征图像, 并能够对波纹特征进行清晰识别与准确评判, 有效辅助爆炸复合工艺的改进, 提高爆炸焊接复合板产品质量, 同时也实现了以无损检测方法评价爆炸焊接复合质量的新突破。

关键词: 相控阵检测; C 扫成像; 爆炸焊接复合板; 应用

中图分类号: TG456.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)03-0272-05

引用格式: 王茹, 樊科社, 王礼营, 等. 相控阵检测在爆炸焊接金属复合板中的应用探究[J]. 中国材料进展, 2023, 42(3): 272-276.

WANG R, FAN K S, WANG L Y, *et al.* Application of Phased Array Testing in Explosive Welded Metal Clad Plate[J]. Materials China, 2023, 42(3): 272-276.

Application of Phased Array Testing in Explosive Welded Metal Clad Plate

WANG Ru^{1,2}, FAN Keshe^{1,2}, WANG Liying^{1,2}, JI Fei^{1,2}, ZHANG Xiangyang^{1,2}

(1. Xi'an Tianli Clad Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Phased array testing technology is a new technology in the field of ultrasonic nondestructive testing. It is a new attempt to apply it to the detection of interface ripple characteristics of explosive welded metal clad plates. This paper introduces the basic principle and technical characteristics of phased array testing technology, analyzes the interface ultrasonic propagation characteristics of explosive welded clad plate and the basic principle of phased array C-scan imaging, and carries out the experimental application research on explosive welded metal clad plate of various materials. It is found that the scanning direction of phased array affects the imaging effect of explosive ripple, it can quickly obtain the explosive wave feature image of the bonding interface of explosive welded clad plate, clearly identify and accurately judge the wave feature, effectively assist the improvement of explosive welded process and improve the product quality of explosive welded clad plate. At the same time, it also realizes a new breakthrough in the evaluation of explosive welded clad quality by non-destructive testing method.

Key words: phased array testing; C-scan imaging; explosive welded clad plate; application

1 前 言

爆炸焊接复合板是化工、船舶、航空航天和国防等领域广泛使用的一种金属复合材料, 因兼具耐腐蚀和承压的特点, 应用前景非常广泛。爆炸焊接又被称为爆炸复合, 利用炸药爆炸产生的冲击力使工件迅速碰撞而实现复合, 常用于常规焊接方法不能焊接在一起的异种金属(如钛、铜、铝、镍和钢等)之间的焊接, 在高压作用

下形成两种金属的冶金粘接,界面通常呈波纹状。复合板的整体性能主要依赖于复合板界面的结合情况。目前,评价爆炸焊接复合板结合界面爆炸波纹特征的方法主要是通过电镜对结合面处材料的组织进行观察,即金相法,但是这种方法属于破坏性方法,不适用于实际工件的大范围检测^[1,2]。对复合板的结合界面波纹特征实现产业化的检测必须采用无损检测的方法,即无损检测方法。相控阵检测技术是无损检测领域的新技术,相控阵检测方法对工件无破坏性,且操作方法简单快捷,检测效率较高,可以对爆炸波纹进行实时成像且清晰直观。本文通过对西安天力金属复合材料股份有限公司生产的多种材质的爆炸焊接复合板试板的结合界面进行相控阵 C 扫成像检测,分析爆炸波纹成像结果,总结相控阵检测技术在爆炸焊接金属复合板中应用的适宜性。

2 相控阵检测基本原理与技术特点

2.1 相控阵检测基本原理

常规超声检测多采用单晶探头,超声波声束以一定的发射角沿声束轴线传播。与此不同的是,相控阵检测的核心技术是基于惠更斯原理的相位控制。相控阵探头由多个相互独立的压电晶片按照一定形状排列而成,每个晶片均可视为超声波源,通过电子系统控制各个晶片阵元,按一定延迟时间激发各个阵元,各个阵元的波阵面相互叠加,形成一个新的波阵面,可以达到改变聚焦特性、声束偏转、声束位移等相控效果^[3-6]。

2.2 相控阵检测技术特点

相控阵超声信号具有多种显示。A 扫显示脉冲信号波形;B 扫显示与声束传播方向平行且与工件测量表面垂直的剖面;C 扫显示的是工件的平面投影显示方式,通过显现的图像可以发现工件内部某平面上的缺陷信息;S 扫显示的是由扇扫描声束组成的扇面形状的图像显示;除此之外,还有 D 扫图以及各种组合图像。相控阵扫描图像中可以用各种色彩来标注信号幅度。

相控阵的线性扫查,也叫电子扫描,相控阵线阵探头的晶片总数为 N ,晶片间距为 d ,一次激励的晶片数量为 A 。如第 1 次激励的晶片序列为 1 至 A ,第 2 次激励的晶片序列为 2 至 $A+1$,依次类推,第 n 次激励晶片序列为 n 至 $A+n-1$ 。采用电子扫描时相控阵超声波束总数为 $N-A+1$,一次扫查时相控阵探头声束有效覆盖宽度为 $(N-A+1) \times d$ 。与常规超声 C 扫需要通过单晶探头做锯齿形的二维扫查方式不同,相控阵扫查只需要做单轴直线扫查,因此,相控阵扫查方式的效率明显提高很多,根据相控阵探头移动的距离 L ,则可计算出工件一次扫查的面积为 $(N-A+1) \times d \times L$ ^[7,8]。

2.3 爆炸焊接复合板界面超声波传播特点和相控阵 C 扫成像基本原理

分析爆炸焊接复合板界面成像就要了解复合层的超声波传播特性,包括这两种复合材料的声阻抗。复合板超声探伤多数从复层材料一侧进行,超声波由第一种介质即复层材料垂直入射到复合界面时,在第一种介质中产生反射波,方向与入射波方向相反,在第二种介质即基体材料中产生透射波,方向与入射波方向相同。反射波与透射波的声压由声压反射率和透射率来表征。假设入射波声压为 P_0 ,界面回波声压为 P_r ,则超声波入射到复合板界面回波声压为:

$$P_r = P_0 \times r \quad (1)$$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

$$t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

$$Z = \rho \times c \quad (4)$$

式中, r 为声压反射率, Z_1 为第一种介质的声阻抗, Z_2 为第二种介质的声阻抗, t 为声压透射率, Z 为介质的声阻抗, ρ 为介质的密度, c 为介质的超声波声速。

了解复合板复层材料和基层材料的声速、密度、声阻抗等特征参数后,通过式(2)和式(3)可知,当复层材料和基层材料存在声阻抗差异时,复合界面会产生超声声压反射;当复层材料和基层材料的声阻抗差异近乎为 0 时,界面处声压几乎全透射,无反射^[9]。

复合板界面的相控阵 C 扫显示的是工件在界面深度的平面投影面的横断面,通过闸门设置选择在界面深度反射回来的超声波信号,用颜色色彩代表回波信号幅度的大小。若相控阵检测分辨率和信噪比足够时,能够区分结合界面的反射信号,可以通过 C 扫显示方式获得结合界面成像图。

3 相控阵 C 扫成像检测有效性分析

针对爆炸焊接层状金属复合板,使用相控阵技术中的线性电子扫查,即将探头中的晶片等间距地设定多个激发组,每组激发的晶片数量相同,同时通过施加延迟,使得各组晶片依次激发,由于各组激发间距极短,可以看成是同时激发,这就相当于同时激发多个常规探头,使得检测效率大大提高。

实验检测对象为西安天力金属复合材料股份有限公司生产的钛/钢复合板试板,材质为 SB265 Gr1/SA516 Gr70,钛层厚度为 3.5 mm,钢板厚度为 66 mm。

实验设备采用 OmnicCan X3 相控阵仪器,线阵相控阵探头,探头频率为 10 MHz,晶片数量为 128,阵元间距为 0.5 mm,有机玻璃楔块厚度为 20 mm,将探头和编码器固定在手持扫查架上,构成一套完整的相控阵 C 扫

快速成像检测系统,以水为耦合剂,压紧探头使它与板面耦合良好,扫查方式为线性扫查,聚焦位置为复合板结合界面深度处,扫查面为复合板的覆层表面。成像色彩设置选择黑灰白模式,即回波幅值由高到低对应图像灰阶显示,移动探头,相控阵 C 扫图像实时出现。

钛/钢复合板试板结合界面的相控阵 C 扫成像扫查结果如图 1a 所示,界面波纹清晰直观,波纹形貌整体连续

均匀;通过机械方式剥离钛包覆层后,露出真实的结合界面形貌,如图 1b 所示,对比图 1a 和 1b 可以发现相控阵 C 扫成像图与实物界面高度吻合。相控阵 C 扫反映界面形貌的真实度较高,满足对波纹走向和特征的评判。需要说明的是,机械剥钛属于人为机械去除复合板的复层金属,在操作过程中难免会存在对复合界面的机械损伤,如铲刀痕迹等,但是并不影响对波纹的整体判断。

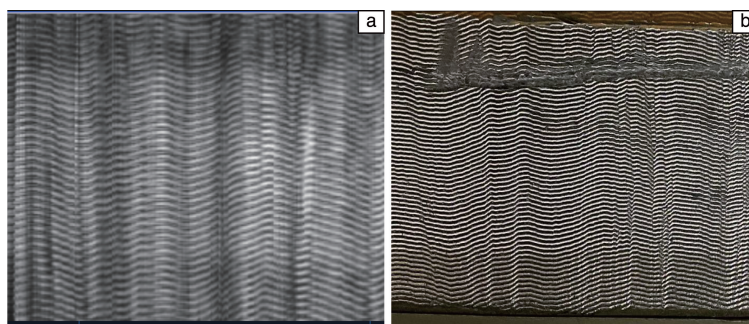


图 1 钛/钢复合板试板的界面相控阵 C 扫成像(a)和钛层机械分离后的真实界面形貌(b)

Fig. 1 Interface phased array C-scan imaging (a) and real interface after mechanical separation of titanium layer (b) of titanium/steel clad plate test plate

爆炸波纹的特征类似水波纹,是一种有起伏的立体形态,波纹宽度和深度大多在 2 mm 以下,在小范围区域内波纹走向相对平直。相控阵成像系统分辨力指分辨空间中两个目标点最小间隔的能力,其中横向分辨力是指垂直于声束传播方向上能够分辨出两个目标反射体最小间隔的能力。要实现对爆炸波纹 C 扫成像,就要求横向分辨力足够高,能够区分爆炸波纹结构中波峰与波谷的回波信号,以达到最佳分辨率,如图 2 所示的相控阵 B 扫图。经过反复试验探究发现,当线阵探头扫查方向与爆炸波纹纹路延伸方向相平行,即线阵探头的电子束方向与波纹纹路延伸方向相垂直时,分辨力可以满足分辨出爆炸波纹,实现清晰的波纹 C 扫成像,如图 1 所示。当线阵探头的电子束方向与波纹纹路延伸方向非垂直而是呈一定角度,如图 3a 呈 45° 角度时,由于分辨力降低,波纹成像

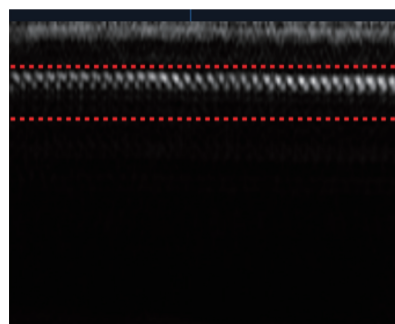


图 2 爆炸波纹正常处的相控阵 B 扫成像

Fig. 2 Phased array B-scan imaging at normal explosion wave

的清晰度有所降低。当线阵探头的电子束方向与波纹纹路延伸方向相平行时,由于分辨力不足,无法辨别波纹以及成像,如图 3b 所示,界面成像已无法看到波纹。

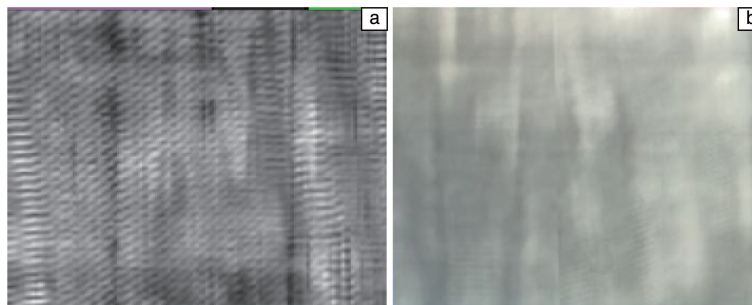


图 3 电子束方向与波纹延伸方向呈 45°(a)以及电子束方向平行于波纹延伸方向(b)的相控阵 C 扫成像

Fig. 3 Phased array C-scan imaging with the direction of the electron beam is 45° from the direction of the ripple extension (a) and the direction of the electron beam is parallel to the direction of the ripple extension (b)

爆炸焊接复合板的起爆点是引发爆炸复合用雷管的放置位置,在瞬间的爆炸复合后,复合板板面形成特有的起爆点结构,即圆滑的凹坑。由于爆炸复合过程的特殊性,在起爆点及其周边区域的爆炸波纹非常细且波纹起伏非常小,形成以起爆点为圆心并向四周以近似圆环状波纹发散式分布的结构。对起爆点及其周边相控阵扫查 C 扫成像结果如图 4 所示,从图中可以看出,起爆点凹坑内有水,因超声波在水/钛界面反射强烈,图像呈现亮白色影像,凹坑四周为圆弧状,与探头耦合不良,因此在起爆点四周呈现黑色影像。由于分辨力与扫查方向的特定关系以及起爆点周围波纹分布的特点,当线阵探头沿着直线横跨起爆点扫查时,这一扫查过程中仅仅有一小段距离的扫查方向与爆炸波纹纹路延伸方向相平行,即线阵探头的电子束方向与波纹延伸方向相垂直,可以清晰地看到波纹的成像。这也是首次实现了对爆炸焊接复合板起爆点及周边波纹形貌的认识。

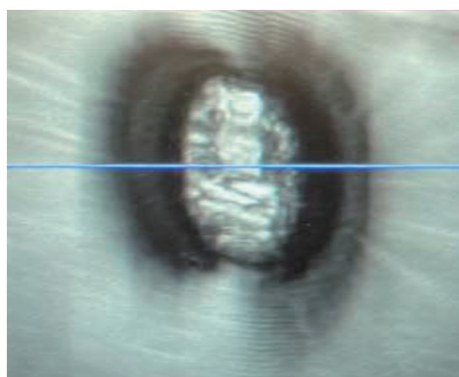


图4 起爆点及附近区域相控阵 C 扫成像

Fig. 4 Phased array C-scan imaging of initiation point and nearby area

4 相控阵 C 扫成像检测在爆炸焊接金属复合板中的应用实例

案例 1 检测对象为铝/钢复合板,材质为 5083/CCSB,铝层厚度为 10 mm,钢板厚度为 20 mm。铝/钢复

合板结合界面的相控阵 C 扫成像结果如图 5a 所示,可以看出界面波纹清晰直观,波纹形貌整体连续均匀。由于铝/钢复合板中铝与钢的爆炸结合工艺特殊性,相比于图 1 钛/钢复合板界面波纹特点,铝/钢界面波纹纹路相对起伏较大,波纹相对较粗。铝与钢两种材料对声阻抗差异较大,界面回波声压反射率较大,界面成像清晰度较理想,满足对爆炸波纹形貌和走向的判断和评价。在铝/钢复合板界面成像中,同样要注意线阵探头扫查方向与爆炸波纹纹路延伸方向相平行,即线阵探头的电子束方向与波纹纹路延伸方向相垂直时,分辨力可以满足分辨出爆炸波纹,实现波纹成像。

案例 2 检测对象为铜/钢复合板,材质为 BFe30-1-1/Q345R,铜板厚度为 6 mm,钢板厚度为 35 mm。铜/钢复合板结合界面的相控阵成像扫查结果如图 5b 所示,可以看出界面波纹较细。因材料铜与钢的声阻抗较为接近,界面回波声压反射率较小,回波信号幅值较低,导致整体成像色彩偏黑,波纹成像图的清晰度不佳,对波纹特征的评判存在一定的影响。

案例 3 检测对象为不锈钢/钢复合板,材质为 316L/Q345R,不锈钢层厚度为 5 mm,钢板厚度为 40 mm。不锈钢/钢复合板结合界面的相控阵成像扫查结果如图 5c 所示,因不锈钢与钢材质的特性相近,声阻抗近乎相同,界面声压透射率约为 1,声压反射率约为 0,即界面处超声波几乎全透射,无反射,因此界面波纹成像困难,无法清晰辨别波纹特征与走向。

5 结 论

超声相控阵检测技术现已成为工业无损检测的重要手段之一,并具有广阔的发展前景。本文通过研究相控阵检测的基本原理和技术特点,分析爆炸焊接复合板界面超声波传播特性和 C 扫成像基本原理,分别对西安天力金属复合材料股份有限公司生产的 4 种材质的爆炸焊接复合板试板的结合界面进行相控阵 C 扫成像检测,分析对比成像结果发现受材料特性差异的影响,相控阵 C 扫

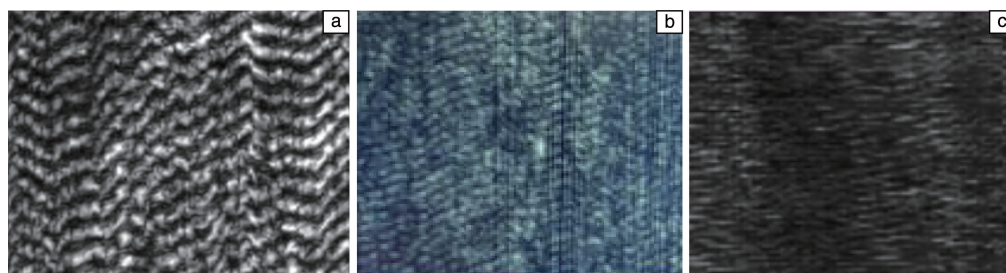


图5 铝/钢复合板(a),铜/钢复合板(b)和不锈钢/钢复合板(c)界面相控阵 C 扫成像

Fig. 5 Interface phased array C-scan image of aluminum/steel clad plate (a), copper/steel clad plate (b) and stainless steel/steel clad plate (c)

成像对于钛/钢、铝/钢复合板可以清晰直观地判断界面爆炸波纹的形貌特征；对于铜/钢复合板爆炸波纹成像的清晰度欠佳，影响对波纹特征的评判；对于不锈钢/钢复合板界面波纹成像困难。此外，相控阵探头扫查方向同样影响成像结果，当线阵探头扫查方向与爆炸波纹纹路延伸方向相平行，即线阵探头的电子束方向与波纹纹路延伸方向相垂直时，相控阵设备的分辨力可以满足分辨出爆炸波纹实现 C 扫成像。采用相控阵检测技术实现了爆炸焊接复合板结合层的工业化成像检测，极大地提高了 C 扫成像检测效率，实现了对结合质量的深入评估，对爆炸复合工艺的提升、复合板质量的保证具有很大的指导意义。

参考文献 References

- [1] 王茹, 张磊, 吴江涛, 等. 无损检测[J], 2021, 43(1): 9-11.
WANG R, ZHANG L, WU J T, *et al.* Nondestructive Testing[J], 2021, 43(1): 9-11.
- [2] 赵峰, 张鹏辉, 车宇锋. 热加工工艺[J], 2017, 46(21): 9-12.
ZHAO F, ZHANG P H, CHE Y F. Hot Working Technology[J], 2017, 46(21): 9-12.
- [3] 张侃, 杨力, 王学权, 等. 无损检测[J], 2017, 39(5): 42-48.
ZHANG K, YANG L, WANG X Q, *et al.* Nondestructive Testing[J], 2017, 39(5): 42-48.
- [4] 白小宝, 孙建罡, 周建平, 等. 无损检测[J], 2015, 35(12): 45-48.
BAI X B, SUN J G, ZHOU J P, *et al.* Nondestructive Testing[J], 2015, 35(12): 45-48.
- [5] 周正干, 高翌飞. 航空制造技术[J], 2009, 52(4): 47-50.
ZHOU Z G, GAO Y F. Aeronautical Manufacturing Technology[J], 2009, 52(4): 47-50.
- [6] 周正干, 孙广开, 李洋. 航空制造技术[J], 2016, 59(4): 30-35.
ZHOU Z G, SUN G K, LI Y. Aeronautical Manufacturing Technology[J], 2016, 59(4): 30-35.
- [7] 付如龙, 陈建华, 林丹源, 等. 无损检测[J], 2015, 37(5): 38-41.
FU R L, CHEN J H, LIN D Y, *et al.* Nondestructive Testing[J], 2015, 37(5): 38-41.
- [8] 施克仁. 相控阵超声成像检测[M]. 郭寓岷译. 北京: 高等教育出版社, 2010: 61-70.
SHI K R. Phased Array Ultrasonic Imaging Detection[M]. Translated by GUO Y M. Beijing: Higher Education Press, 2010: 61-70.
- [9] 郑辉, 林树青. 超声检测[M]. 2 版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008: 32-35.
ZHENG H, LIN S Q. Ultrasonic Testing[M]. Version 2. Beijing: China Labour and Social Security Publishing House, 2008: 32-35.

(编辑 吴 锐)