

不等厚复合构件相控阵超声脱粘 检测技术仿真研究

赵 霞, 王召巴, 陈友兴

(中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西太原 030051)

摘要: 鉴于不等厚复合构件结构的特殊性, 采用传统超声检测技术检测此类构件的粘接质量是非常困难的。采用超声相控阵技术实现界面粘接质量的检测。分析研究了不等厚复合构件脱粘检测的特殊性。建立了相控阵超声换能器的辐射声场模型, 基于仿真得到的声场, 研究了采用超声相控阵技术检测不等厚复合构件界面脱粘的可行性。仿真结果表明, 通过控制相控延时, 可使检测声束在检测区域内聚焦到任意位置处, 保证在厚度变化的界面处回波信号幅度的一致性, 可用于此类构件的界面脱粘检测。

关键词: 超声; 相控阵; 不等厚; 界面; 粘接质量

中图分类号: V435; TB553

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-04-0341-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.04.011

Phased array ultrasonic debond testing of non-uniform thickness compound

ZHAO Xia, WANG Zhao-ba, CHEN You-xing

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: Due to the special structure, there is no effective testing method for adhesive interface of non-uniform thickness metal and nonmetallic compound components. The phased array ultrasonic detection technique using auto-focused mode can provide a new idea. This article describes the ultrasonic phased array technique to realize quality detection of interface bonding. The sound field of ultrasonic phased array transducer is established. Based on it, the possibility of using ultrasonic phased array method to detect component with non-uniform thickness is studied. The simulation results show that it is possible to control the radiation beam focused at every desired point by calculating the time delay. This can ensure the amplitude of reflected signal from the interface is almost same. The results indicate that the technique of applying phased array to ultrasonic detection can be used to detect the interface debond of non-uniform thickness metal and nonmetallic compound structure.

Key words: ultrasonic; phased array; not uniform thickness; interface; debond

0 引言

近年来, 不等厚金属非金属复合构件被广泛应用于航空航天工业。如压力容器封头、固体火箭发动机封头等。此类构件由金属和非金属材料粘接而成, 但是由于粘接工艺、环境、老化等原因往往导致最终产品粘接面出现脱粘现象。脱粘现象的存在会导致产品性能参数和可靠性的降低, 特别是在某些特殊应用场合(如固体火箭发动机中), 粘接界面的脱粘缺陷导致的事故将严重威胁人员安全, 并造

成巨大经济损失。

因此需采用有效的检测手段对其进行界面粘接质量检测^[1-3]。而由于此类构件结构的特殊性, 其厚度是变化的, 采用传统的超声检测技术检测这种结构的粘接质量是非常困难的。

相控阵超声检测技术是近年来出现的先进的超声检测技术, 该技术可通过电子延时控制的方式使合成的检测声束在所需的任意位置上实现偏转、聚焦。同时相比传统的超声检测过程, 该技术可在不移动换能器的情况下实现大范围、多角度的检测, 从而提高了检测效率。该方法已成功用于金属构件中缺陷及焊缝检测^[4-6]。鉴于该技术的检测特点, 本文提出采用相控阵超声检测技术实现不等厚复合构件界面脱粘检测, 基于声场分析研究了该方法的可行性。

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61201412)、山西省科技攻关项目(20110321029)、山西省基金(2012021011-5)资助项目。

作者简介: 赵霞(1981—), 女, 山西太原人, 讲师, 研究方向为相控阵超声检测、信息处理。

通讯作者: 赵霞, E-mail: zhaoxianuc@126.com

1 相控阵超声脱粘检测原理

1.1 脱粘检测原理

在实际的脱粘检测过程中，脉冲反射式超声波应用的最为广泛。该方法是指在超声波传播过程中遇到两种具有不同声阻抗的介质界面时，根据超声波传播原理可知，在界面处会产生反射与透射现象。对于钢/橡胶粘接构件来说，其粘接界面会导致超声波产生反射和透射。当钢与橡胶界面发生脱粘时，超声波首先到达钢/空气界面，这时的声波将会发生全反射，没有声波进入橡胶层中；当钢与橡胶界面没有发生脱粘时，超声波到达钢/橡胶界面后，发生反射和折射现象，这时反射回波信号和发生脱粘时的反射回波信号幅值不同，因此可通过比较界面处反射回波信号的幅值大小来判断检测位置是否脱粘。

1.2 相控阵超声检测技术

1.2.1 超声相控阵聚焦原理

相控阵超声检测系统主要由换能器阵列和控制单元组成，换能器阵元按照一定的规则进行排列，具有独立的收/发控制模块。相控监测如图 1 所示。

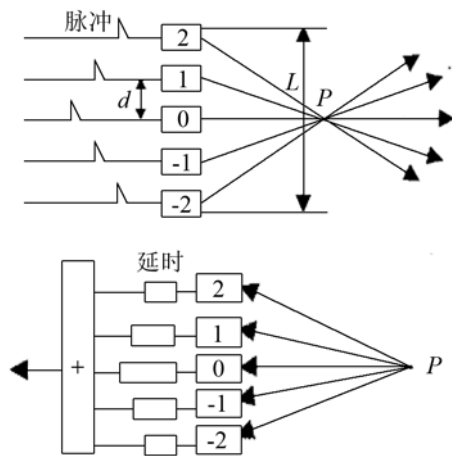


图 1 相控发射检测原理
Fig.1 Principle of ultrasonic phased array testing

当换能器处于发射状态时，控制单元按照一定的延时规律，控制发射超声波束的聚焦和指向，主要通过控制换能器各阵元的发射延时时间，实现检测声束在一定范围内的偏转和聚焦。换能器接收过程同样遵守上述几何聚焦延迟规律，与换能器的发射状态是一互逆过程。检测中，声束按照一定的规律在介质中进行传播，当介质中某处(如 P 点)的声阻抗发生变化时，会产生一定声强的反射信号。该

点到达换能器阵列中各阵元的路径不同，从而导致该点处产生的反射信号到达各阵元时间存在一定的差异。各阵元按照设定的延迟量 Δt 对回波信号进行延时求和，使来自 P 点的回波信号实现同相，达到增强的目的，实现接收聚焦。

1.2.2 相控阵换能器辐射声场

在相控阵检测模式下，换能器发射和接收延时法则一旦确定，相应地换能器的声场分布也就确定了^[7-10]。声场分布决定着检测结果，研究相控阵换能器的辐射声场对实际检测具有重要的指导意义。

对单源换能器的辐射声场来说，设 Q 为辐射声场中的任意一点，则单源换能器在 Q 点的辐射声场为：

$$p = \frac{j\rho_0 c_0 u_a}{\lambda} \iint_S \frac{e^{-jkr(x,y,z)-\omega t}}{r(x,y,z)} dS \tag{1}$$

其中： c_0 、 ρ_0 为常量； $u_a(x,y,z)$ 为垂直于面源表面的质点振动的速度幅值； $r(x,y,z)$ 为振动质点到 Q 点的距离；S 为单源换能器的面积；k 为波数； λ 为超声波波长。

由式(1)可以获得单源矩形换能器的辐射声场表达式，单源矩形换能器辐射声场计算模型如图 2 所示。

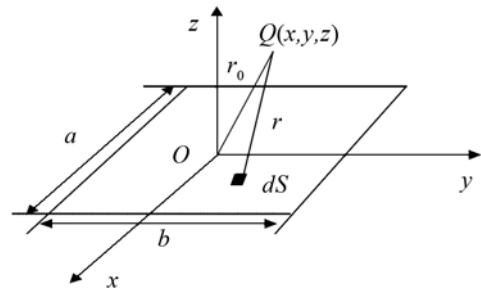


图 2 单源矩形换能器声场的计算模型
Fig.2 Calculation model of acoustic field for rectangular transducer

如图 2 所示，单源矩形换能器向外辐射声波，在 Q(x, y, z) 点处的声场是换能器各面元在 Q 点辐射声场的叠加。因此 Q(x, y, z) 处的声场表达式为

$$p = j \frac{\rho_0 c_0 u_0 e^{j\omega t}}{\lambda} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{e^{-jkr}}{r} d_{x_1} d_{y_1} \tag{2}$$

式中： $r = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + z^2}$ ；a 为单源矩形换能器的长度；b 为单源矩形换能器的宽度。

在此基础上计算得到相控阵换能器的辐射声场。图 3 为矩形相控阵换能器辐射声场的计算模型。

设相控阵换能器是由 N 个阵元组成，由相控阵技术原理可知，各个阵元的辐射时间不同步，因此要引入初始相位 α_n 。矩形相控阵换能器在空间某点 Q 处的辐射声场为单源矩形换能器在 Q 点处辐射声

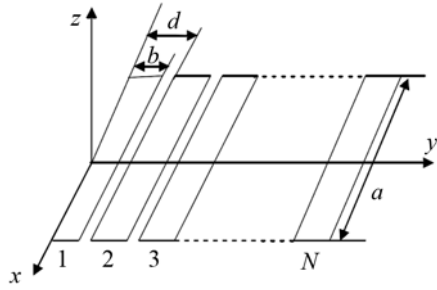


图 3 相控阵换能器声场的计算模型

Fig.3 Calculation model of acoustic field for phased array transducer

场的叠加。其表达式为

$$p(x, y, z) = \frac{\rho_0 c_0 u_0 e^{j\omega t}}{\lambda} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} d_{x_1} \sum_{n=1}^N \int_{(n-1)d}^{(n-1)d+b} \frac{e^{-j(kr_n + \alpha_n)}}{r_n} d_{y_1} \quad (3)$$

其中：N 为矩形相控阵换能器的阵元数；a 为阵元长度；b 为阵元宽度；d 为阵元间距； $r_n = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + z^2}$ 。

根据公式(3)可计算得到在不同延时规律下的相控阵换能器辐射声场。

1.3 不等厚复合构件脱粘检测的特殊性

图 4 所示是一不等厚复合构件的示意图。该构件是由金属和非金属粘接而成。构件的长度是 800 mm，其中金属层厚度是变化的，厚度变化范围从 8.6~11.5 mm。

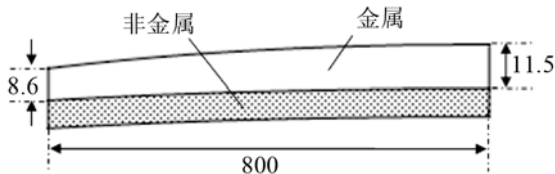


图 4 不等厚复合构件示意图

Fig.4 Schematic diagram of component with non-uniform thickness

不等厚复合构件的特点是被检测表面厚度连续变化，由于厚度的连续变化，使得传统超声检测方法无法完成界面脱粘检测。如采用超声直探头检测时，即使不存在脱粘的情况下，直探头在变化界面不同位置处得到的回波信号幅值均不相同，因此决定了直探头超声回波检测法不适用；传统聚焦探头声能可实现固定位置的聚焦，但出厂时聚焦点位置是固定的，不可调，所以采用传统聚焦探头对不等厚构件界面脱粘检测时，若要保证在变厚度界面各位置处的聚焦声能保持一致，需要不断调整探头位置以适应复合构件的厚度变化，操作繁琐，检测效率低。因此传统超声检测方法对此类构件不适用。

采用相控阵检测技术检测时，发射和接收通过延时规律设定，可实现波束在检测区域内任意位置产生最强合成波，形成聚焦；在焦点以外的区域互

相叠加减弱甚至消失。改变延时规律，即可实现对不同点和不同方向上的聚焦，使得在不移动探头的情况下，可以检测探头下方的全部检测区域。

此外，相控阵超声采用自动电子聚焦，检测时可以通过改变各通道的延时，控制检测声束在不等厚构件的界面处实现声聚焦。相对于传统聚焦探头的频繁移动，相控阵可以在较少的移动下完成对构件的扫描检测。鉴于此，超声相控阵检测技术对此类构件界面粘结质量检测具有可行性。

2 不等厚复合构件相控阵超声脱粘检测仿真研究

2.1 超声相控阵辐射声场仿真

基于上述建立的相控阵声场模型，仿真得到在单层介质中相控阵换能器偏转、聚焦声场的分布情况。其中钢的声速为 5920 m/s，密度为 78503 kg/m³。超声波以纵波方式入射到介质中并在介质中以球面波的形式传播，相控阵换能器在介质中的偏转、聚焦声场如图 5 和 6 所示。

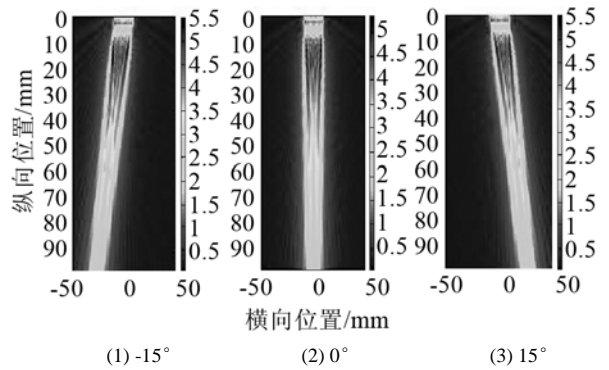


图 5 钢块中相控阵换能器的偏转声场

Fig.5 The deflected field of phased array transducer in steel

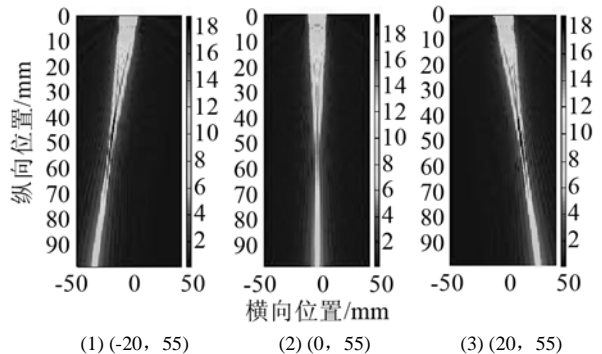


图 6 钢块中相控阵换能器的聚焦声场

Fig.6 The focused field of phased array transducer in steel

如图 5、6 所示，通过改变相控阵换能器各阵元的延时时间，可使合成声束实现在检测区域内任意方向或位置的偏转和聚焦，且声束在偏转方向或

聚焦点上获得最大辐射。

2.2 基于声场的不等厚复合构件相控阵超声脱粘检测可行性仿真研究

根据上述声场仿真结果可知,相控阵检测技术可通过电子聚焦的方法控制声束在不同位置实现聚焦、偏转,该检测特点适用于不等厚构件。鉴于不等厚构件的界面厚度是变化的,因此可通过调整相控阵换能器的延时,使其聚焦于厚度变化界面的不同深度,达到检测的目的,仿真结果如图7所示。

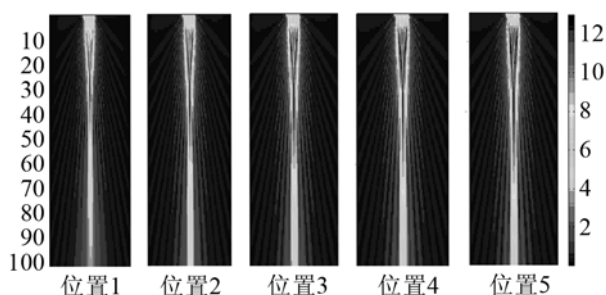


图7 聚焦到斜面中各检测界面处的声场图

Fig.7 The sound field focused on each testing point in the interface of component with non-uniform thickness

观察图7可以看出,通过采用相控阵动态聚焦检测方式可使检测声束在检测区域内聚焦到任意位置处。聚焦位置处的声能明显大于非聚焦区域位置的声能,这样可保证在厚度变化的界面处回波信号幅度的一致性。因此相控阵超声检测方式对变厚度复合构件进行脱粘检测具有可行性。

由于超声相控阵通过延时触发和延时积分实现声束聚焦和聚焦区域信号的探测,因此可根据构件的结构特征设计控制时序,从而灵活地控制声束聚焦点的位置。因此,相比传统超声检测方法,采用相控阵检测技术可实现在不移动或少移动换能器的情况下,实现对构件内大范围检测区域的快速扫查,有效提高检测效率。

3 结 论

本文针对不等厚复合构件的结构特点,提出了采用超声相控阵检测方法实现界面粘接质量检测的方法。分析研究了不等厚复合构件脱粘检测的特殊性及传统超声检测方法检测该类构件不适用的原因。建立了相控阵超声换能器的辐射声场模型,基于仿真得到的声场,研究了采用超声相控阵技术

检测不等厚复合构件界面脱粘的可行性。仿真结果表明,通过控制相控延时,可使检测声束在检测区域内聚焦到任意位置处,保证在厚度变化的界面处回波信号幅度的一致性,适用于此类构件的界面脱粘检测。

参 考 文 献

- [1] 徐猛,徐彦霖,王增勇,等. 粘接结构的超声检测技术及其进展[J]. 机械, 2007(6): 56-58.
XU Meng, XU Yanlin, WANG Zengyong, et al. Ultrasonic testing techniques and progress of adhesive structure[J]. Machinery, 2007 (6): 56-58.
- [2] 陈友兴,王召巴. 多界面脱粘超声检测信号处理[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(1): 201-203.
CHEN Youxing, WANG Zhaoba. The signal processing for ultrasonic testing multi-layered adhesive interface[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(1): 201-203.
- [3] 万敏,王海涛,程继隆,等. 超声相控阵声束控制特性分析[J]. 无损检测, 2009, 31(11): 859-861.
WAN Min, WANG Haitao, CHENG Jilong, et al. The analysis on the features of the propagating waves control of the ultrasonic phased array[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(11): 859-861.
- [4] Bruce W Drinkwater, Paul D Wilcox. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [5] Roy O, Mahaut S, Serre M. Adaptive ultrasonic inspection of specimens with varying profile using phased array techniques[J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2000, 42(9): 594-596.
- [6] 黄佩,王召巴,赵霞. 层状多界面的超声相控阵换能器声场研究[J]. 压电与声光, 2010, 32(6): 1059-1062.
HUANG Pei, WANG Zhaoba, ZHAO Xia. Study on the beam field of ultrasonic phased array transducers with multi-layered interface[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(6): 1059-1062.
- [7] 宋志明,王黎,周小红,等. 超声相控阵技术中的声场仿真[J]. 压电与声光, 2012, 34(4): 565-570.
SONG Zhiming, WANG Li, ZHOU Xiaohong, et al. Simulation for sound-field of ultrasound phased array technique[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(4): 565-570.
- [8] 丁辉,张俊,张益成,等. 超声检测声场计算模型的建立与仿真软件的开发[J]. 无损检测, 2009, 31(8): 614-618.
DING Hui, ZHANG Jun, ZHANG Yicheng, et al. The establishment of ultrasonic field calculation model and the development of simulation software[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(8): 614-618.
- [9] 王海涛,史振,程继隆,等. 超声相控阵技术的仿真实验[J]. 无损检测, 2011, 33(2): 31-34.
WANG Haitao, SHI Zhen, CHENG Jilong, et al. The Simulation Experiment of the Phased Array Ultrasonic Technology[J]. Non-destructive Testing, 2011, 33(2): 31-34.
- [10] Satyanarayan L, Sridhar C, Krishnamurthy C V, et al. Simulation of ultrasonic phased array technique for imaging and sizing of defects using longitudinal waves[J]. Pressure Vessels and Piping, 2007, 84(12): 716-729.