

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.004

复合粘接结构脱粘缺陷全聚焦 成像模拟及算法优化研究^{*}

范学腾¹, 伏喜斌², 黄学斌², 钟舜聪^{1,3*}, 方波¹, 林起本¹, 唐长明¹

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000; 3. 上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

摘要:针对材料声学参数差异较大的复合粘接结构脱粘缺陷检测困难的问题,研究了复合粘接结构的检测原理及难点,分析了脱粘尺寸对回波幅值的影响,提出了将全聚焦算法应用于复合粘接结构的成像检测方法。分别建立了复合粘接结构的常规 PA 成像检测和全聚焦算法成像检测的有限元检测模型,提出了基于指向性理论的分序列局部全聚焦加速算法,通过设定角度阈值筛选有效阵元序列来提高计算效率。研究表明:对于复合粘接结构脱粘缺陷的检测,全聚焦算法成像检测相对常规 PA 成像检测具有更高的检测精度;应用加速算法后,对于 32 阵元的相控阵探头,[-4 mm, 4 mm]和[4 mm, 8 mm]之间矩形目标区域的全聚焦成像检测,计算量降低了 34.7%,且未降低成像质量。

关键词:复合粘接结构;脱粘缺陷;全聚焦算法成像检测;PA 成像检测;加速算法

中图分类号:TH878⁺.2;TB553

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0791-06

Total focusing imaging simulation and algorithm optimization of debonding defect of composite bonding structure

FAN Xue-teng¹, FU Xi-bin², HUANG Xue-bin², ZHONG Shun-cong^{1,3},
FANG Bo¹, LIN Qi-ben¹, TANG Chang-ming¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China;

3. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficulty to detect the debonding defects of composite bonded structures with large differences in material acoustic parameters, the detection principle and difficulties of such structures were studied, the influence of the size of the debonding on the amplitude of echo was analyzed. The finite element detection model of conventional PA imaging detection and total focusing method imaging detection for composite bonding structure was established respectively, a partial-sequence local total focusing acceleration method based on directivity theory was proposed. The effective array element sequence was selected by setting the angle threshold to improve the imaging efficiency. The simulation results indicate that the total focusing imaging method has superiority over the conventional PA imaging detection for the detection of such composite bonding structures. After the algorithm is improved, for the 32-element phased array probe, the calculation time of imaging detection of the rectangular area between [-4mm, 4mm] and [4mm, 8mm] by the acceleration method is reduced by 34.7%, without reducing the imaging quality.

Key words: composite bonding structure; debonding defects; total focusing method(TFM) imaging detection; PA imaging detection; acceleration algorithm

收稿日期:2019-01-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675103);机械系统与振动国家重点实验室开放课题基金资助项目(MSV-2018-07);上海市自然科学基金资助项目(18ZR1414200);福建省质量技术监督局科技项目(FJQI2016050, FJQI2017021, FJQI2012028)

作者简介:范学腾(1993-),男,山东招远人,硕士研究生,主要从事超声无损检测方面的研究。E-mail:fan_xueteng@163.com

通信联系人:钟舜聪,男,教授,博士生导师。E-mail:sczhong@fzu.edu.cn

0 序 言

粘接结构具有比强度、比模量高,减震性能优越和工艺简单的特点,不增加组件的额外重量,能使材料结合面具有分散和均匀的应力分布^[1]。在工业制造领域,尤其是航空航天、交通、能源、军事等领域中,粘接结构逐渐替代了传统的组合技术,如螺栓、铆接和焊接^[2]。但在加工和使用过程中,粘接层不可避免会出现脱粘、孔洞、微孔隙和强度弱化等缺陷,严重影响其使用寿命及安全。

因此,研究一种高效准确的粘接结构无损检测方法具有重要的现实意义。目前,关于粘接结构的超声检测方法主要集中在反射法^[3-5]、谐振法^[6-8]和导波法^[9-12],普遍通过传统的超声仪器并结合一定的信号处理技术实现粘接结构界面缺陷的检测,过程较为繁琐,且检测的结果不够直观。

近年来,超声相控阵从医学领域逐渐开发应用到无损检测领域。相控阵与传统的超声检测仪器不同,相控阵的探头是由一系列具有独立的控制电路的阵元组成。通过电子技术控制换能器阵元激励脉冲的时间和振幅,可以方便地控制声束的方向和形状,灵活地控制声束焦点,实现焦点位置和聚焦方向的动态调整^[13]。

相控阵超声检测技术在声束的激发接收过程中通过控制其相位延时,能对不同角度、孔径所获得的回波信号进行实时 A 型、B 型、电子 B 型、C 型、D 型及 S 型检测成像,但在检测精度以及缺陷表征能力等方面无法完全发挥相控阵的优势^[14]。先进的成像算法能推动相控阵超声检测技术的发展^[15]。2005 年, HOLMES 等^[16-20]基于全矩阵数据提出全聚焦成像算法 (total focusing method, TFM), 并证明全聚焦算法具有诊断常规超声检测所不能识别的微小缺陷和复杂结构缺陷的能力;2010 年,在常规 TFM 的基础上扩展出 half-skip TFM (HSTFM) 和 full-skip TFM (FSTFM) 算法^[21]。目前,TFM 算法已经应用于诸多领域并且得到广泛的认可。

为解决复合粘接结构界面脱粘缺陷检测难度高这一问题,在分析钢-橡胶此类金属与非金属粘接结构检测难点基础上,本研究提出使用全聚焦算法进行成像检测。

1 检测原理及难点

超声波在不同材料中有不同的衰减特性。当声波从一种介质传播至另一种介质时,若两种介质声阻抗值存在差异,两种介质对质点振动的阻碍作用不同,在

两种介质的交界面会发生反射、透射的现象。

理论上,薄层即胶层的声强透射率计算公式为^[22]:

$$T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2 \cos^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2} + \left(Z_2 + \frac{Z_1Z_3}{Z_2}\right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}} \quad (1)$$

式中: Z_1, Z_3 —胶层上下粘接层的声阻抗值; Z_2 —胶层声阻抗值; λ_1, λ_3 —胶层上下粘接层中的声波波长。

随着胶接工艺的提高,胶层的厚度逐渐降低,当胶层厚度 $d_2 \rightarrow 0$ 时,式(1)可简化为:

$$T \approx \frac{4Z_1Z_3}{(Z_1 + Z_3)^2} \quad (2)$$

由式(2)可知:当胶层厚度趋于零时,透射率只与胶层上下两侧介质的声阻抗有关,胶层影响忽略不计。本研究中,此后建立的有限元检测模型皆默认忽略了胶层的影响。

反射率 r 表示界面反射声波的能量的大小,其表达式为:

$$r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (3)$$

式中: ρ_1, ρ_2 —两种介质的密度; c_1, c_2 —两种介质的声速。

若复合粘接结构的两种介质声学参数接近,如钢-铝金属与金属粘接结构,声波在其中传播时,粘接良好的界面反射率较低,通过式计算约为 42.46%,大部分声波可透过界面继续在下一介质层传播。而当界面存在脱粘缺陷时,脱粘区域的界面两侧为金属与空气,两种介质的声学参数相差较大,经式计算反射率可达 99.99%。声波传播至脱粘界面时,声波几乎被完全反射。

钢-铝粘接结构界面脱粘尺寸对回波幅值的影响如图 1 所示。

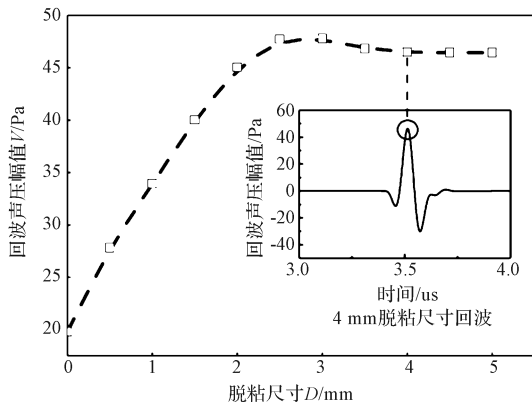


图 1 钢-铝粘接结构界面脱粘尺寸对回波幅值的影响

图 1 表明:存在脱粘缺陷时,探头接收到的回波信号远高于没有缺陷时的回波信号,且随着脱粘尺寸的增大,回波幅值越来越高,当脱粘尺寸接近孔径长度后,回波幅值趋于稳定。

利用存在脱粘缺陷时,回波幅值要远高于粘接良好界面回波幅值这一特性,结合常规 PA 成像检测技术,能容易地实现金属-金属粘接结构中脱粘缺陷的成像检测。

针对钢-橡胶这类金属与非金属的粘接结构,两者声学参数差别较大,具体数值如表 1 所示。

表 1 材料参数				
材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵波声速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	杨氏模量/Pa	泊松比
45 号钢	7 850	5 850	$2.1\text{E}+11$	0.269
丁腈橡胶	1 220	2 110	$2.0\text{E}+7$	0.499
空气	1.29	340	—	—

由式(3)可得:钢-橡胶界面的反射率约为89.4%,与钢-脱粘区域的反射率相差很小,且由于反射的能量无法被探头全部接收到,这类结构的界面脱粘缺陷检测一直都较为困难。为实现此类金属-非金属粘接结构的检测,有必要采用一种具有更高检测精度的成像检测算法。

2 PA 成像检测及 TFM 成像检测仿真

2.1 PA 成像检测仿真

本研究在 COMSOL 中建立钢-橡胶粘接结构空气脱粘缺陷的有限元检测模型,模拟中采用探头与工件表面直接接触的检测方式。声源的设置是通过在探头的各个阵元晶片与工件接触的相应位置施加时变的压力信号。仿真中,设置了 32 个线阵元,钢-橡胶的粘接界面深度为 8 mm,在界面水平位置 0 ~ 2 mm 预置一个空气脱粘缺陷。

仿真过程中,本文模拟了常规 PA 检测中定点发射聚焦、动态接收聚焦和电子扫描的过程,常规 PA 成像检测结果如图 2 所示。

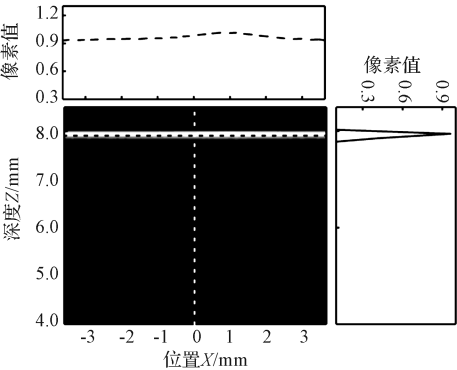


图 2 常规 PA 成像检测结果

图 2 中,界面位置的像素点的灰度值在 0 ~ 2 mm 的位置出现波动,与预设的脱粘区域位置吻合。

2.2 TFM 成像检测仿真

全聚焦成像依赖于全矩阵数据。 N 阵元相控阵全矩阵数据的采集方式为:首先阵元 1 发射,同时所有阵元接收回波信号并存储,分别记为: $A_{11}, A_{12}, A_{13}, \dots, A_{1N}$ 。然后阵元 2 发射,所有阵元接收回波信号并存储。重复这一规则,直至所有阵元都发射一遍。最终采集的回波信号存储为一个三维的数据矩阵,即为全矩阵数据。

与常规的由扫描线拼接组成的超声成像检测图不同,全聚焦算法的超声图像是通过目标区域中若干个像素点组成。每个像素点的像素值是根据各像素点到每个阵元的距离计算声程,从全矩阵数据中提取能表征各点信息的声压幅值进行虚拟聚焦产生。对于 N 个阵元的相控阵探头,全聚焦成像中每个像素点的像素值的计算公式为:

$$PixelValue = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij} \left(\frac{SoundPath}{c} \right) \tag{4}$$

式中:PixelValue—离散像素点成像像素值;SoundPath—声波飞行距离; c —声速。

相对常规的超声成像检测,全聚焦算法可获得更多信息,因而对缺陷的描述更加精确。但是对于复合粘接结构界面脱粘缺陷,应用 TFM 算法对界面进行成像检测时,TFM 存在容易在界面上产生伪缺陷的弊端。

TFM 界面伪缺陷形成原理示意图如图 3 所示。

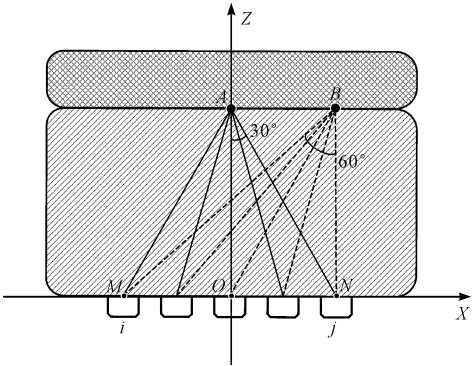


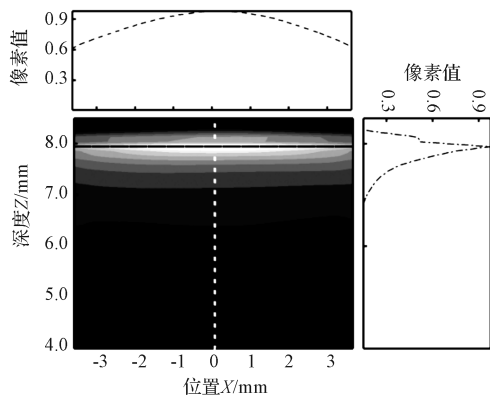
图 3 TFM 界面伪缺陷形成原理示意图

当粘接界面上存在粘接状态相同且粘接良好的 A、B 两点时,且 A 点分布在各阵元发射的声束中心轴线的 -30° 到 30° 范围内,B 点分布在 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 范围内,由于越靠近孔径中心的界面,接收到的回波能量越多。而全聚焦成像算法的成像图中,各像素点的像素值计算方法如式,是回波幅值的深度累加,声波能量的大小

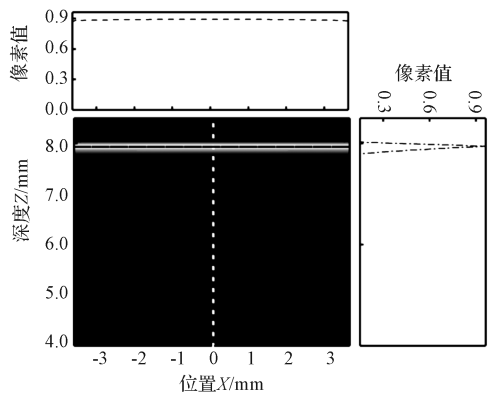
会影响累加值的大小,导致 A 点的像素值会大于 B 点,从而误以为 A 点存在缺陷。

为验证上述分析,本研究建立钢-橡胶粘接模型,进行成像检测仿真。模型中,粘接界面深度为 8 mm,界面粘接良好,未预置缺陷。采集全矩阵数据并进行 TFM 成像。

TFM 校正前后 B 截面成像图如图 4 所示。



(a) TFM校正前B截面成像图



(b) TFM校正后B截面成像图

图 4 TFM 校正前后 B 截面成像图

图 4(a)中,在深度为 8 mm 的位置有一条亮带,与模型的粘接界面位置吻合。但是界面位置,中心的像素值高于两侧,形成亮斑,这对脱粘的判定会造成极大的干扰,甚至掩盖缺陷的存在,因此有必要进行校正。

图 3 中,在 i 阵元发射, j 阵元接收时的情况下, B 点的校正系数 $\text{correctioncoefficient}(\text{CC})$ 计算公式如下^[23]:

$$CC_B = \frac{\sqrt{|MB|} \cdot \sqrt{|BN|}}{\text{sinc}\left(\frac{\pi w \sin 60^\circ}{\lambda}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{\pi w \sin 90^\circ}{\lambda}\right)} \quad (5)$$

式中: w —阵元晶片的宽度; λ —波长; $|MB|$, $|BN|$ —声波从 M 点到 B 点和从 B 点到 N 点的飞行距离。

按照式进行校正后,每个像素点像素值的计算公式为:

$$\text{PixelValue} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N CC_{ij} A_{ij} \left(\frac{\text{SoundPath}}{c} \right) \quad (6)$$

按照式(5,6)的方法对图 4(a)进行校正,结果如图 4(b)所示。在深度 8 mm 的位置同样有一条亮带,与图 4(a)相比,各点的像素值基本一致,未出现中心位置像素值远高于两侧的情况,完整地表现了粘接界面的特征。校正全聚焦算法后,对图 2 中常规 PA 检测对象—钢-橡胶粘接模型,同样使用 32 个阵元的相控阵探头进行全矩阵数据采集并进行 TFM 成像的结果。

TFM 校正后成像检测结果如图 5 所示。

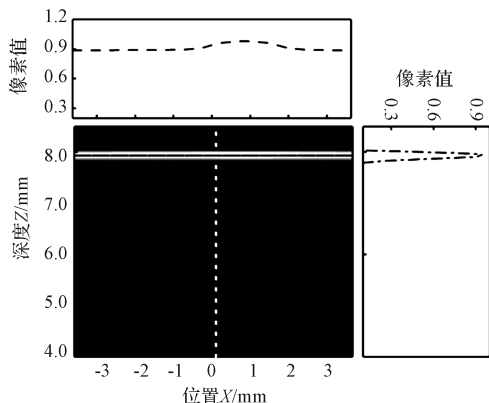


图 5 TFM 校正后成像检测结果

常规 PA 成像检测与 TFM 成像检测结果中,粘接界面的归一化灰度值如图 6 所示。

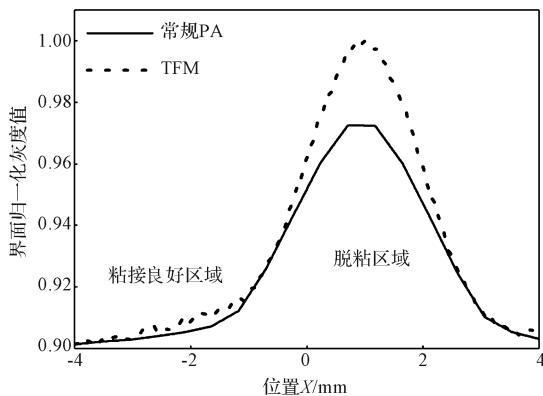


图 6 粘接界面归一化灰度值

由图 6 可以看出: TFM 成像检测中,脱粘区域与粘接良好区域的灰度值差异更大,对比度更高,表明了 TFM 具有更高地检测灵敏度。

3 基于声束指向的分序列局部全聚焦

全聚焦算法成像数据量大,计算耗时长,使其在实时检测现场的应用受到了极大的限制。对于 N 阵元相控阵探头,进行全聚焦算法成像检测时,若目标区域被离散为 $m \times n$ 个像素点,则每一个像素点的灰度值是 N^2 个数据的累加,一幅完整的成像检测图共需要累加 $m \times n \times N^2$ 次。随着数据处理能力的迅速提高,使

得全聚焦算法应用到工业现场成像检测成为可能。近几年许多学者对全聚焦算法的简化展开了大量的研究。2017 年,贾乐成等人^[24]提出了三角矩阵数据采集和索引技术,优化了全聚焦的处理速度;胡宏伟^[25]基于稀疏矩阵的优化了全聚焦算法,将 32 阵元换能器的全聚焦计算效率提高了 4 倍。本研究为进一步增强全聚焦算法的实时性,基于声束指向性理论,提出了一种分序列局部全聚焦的加速算法。

点声源的声波会呈球面传播扩散,各个角度能量一致。实际应用中,由于技术限制使得相控阵探头阵元尺寸并不能被忽略,其产生的超声波会有一定的指向性。目前市场上常用的阵元宽度为 0.4 mm,该尺寸下,声束已经有了明显的指向性,其主瓣大约分布在 $-55^{\circ} \sim 55^{\circ}$,主瓣之外角度范围只有很少的能量辐射传播,全孔径的全聚焦算法将这一部分回波同样接收处理成像。本研究通过设定角度阈值,筛选有效阵元序列的回波信号进行处理成像,具体实施方式如下:

建立坐标系如图 7 所示。

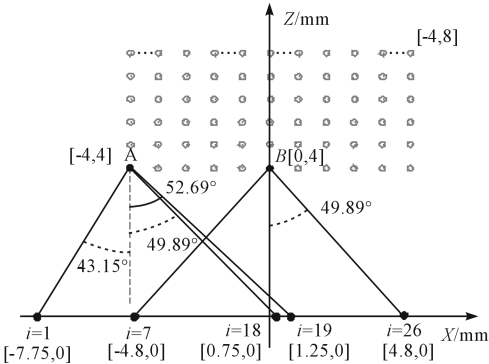


图 7 目标区域离散

使用中心间距为 0.5 mm 的 32 阵元的相控阵探头进行全孔径的 TFM 成像检测,记 32 个阵元的序号为 1~32 号,则 i 号阵元形心坐标可表示为:

$$\begin{cases} x_i = -7.75 + (i - 1) \cdot d \\ y_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

图 7 中目标检测区域为 $[-4 \text{ mm}, 4 \text{ mm}]$ 和 $[4 \text{ mm}, 8 \text{ mm}]$ 之间的矩形区域,将目标区域分割为 51×51 个像素点。

图 7 中,A 点相对 1 号阵元和 18 号阵元的角度分别为 -43.15° 和 48.89° ,相对 19 号阵元角度为 52.69° 。当进行全孔径的 TFM 成像检测时,A 点的像素值由公式(4)可知,共需要 32×32 个值累加。经过前文分析,A 点相对 19 号阵元的角度接近主瓣角度临界值,19 号阵元接收到的回波中关于 A 点的信息十分微弱,没有使用价值。本研究提出的加速算法将 A 点的像素值的计算限制在 50° 范围内的阵元,即 A 点像

素值是 1~18 号阵元序列的局部全聚焦,采用这一方法,则 A 点像素值是由 18×18 个值累加得到,相对全孔径的全聚焦减少了 64.7% 的计算量。同理,B 点的有效序列为 7~26 号阵元,其相对全孔径全聚焦减少了 60.9% 的计算量。为验证加速算法中有效阵元序列的筛选角度对结果的影响,笔者对上文复合粘接结构使用该加速算法进行成像检测。

不同角度阈值成结果像粘接界面归一化灰度值如图 8 所示。

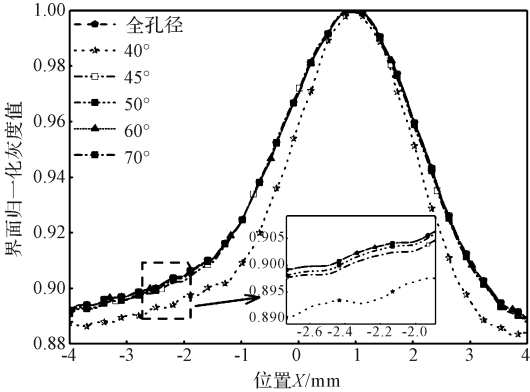


图 8 不同角度阈值成结果像粘接界面归一化灰度值

图 8 中,目标区域成一幅完整的图像共需要累加 2 663 424 个值,而采用此加速算法仅需累加 1 739 326 个值,减少了 34.7% 计算量。

图 8 中,加速算法的有效阵元序列筛选的角度阈值分别为 40° 、 45° 、 50° 、 60° 、 70° ,不同角度阈值粘接界面的灰度值归一化后,整体趋势与全孔径的全聚焦算法基本吻合。角度阈值在 $45^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间时,与全孔径全聚焦重合度极高,表明主瓣之外的阵元序列接收到的回波信号对表征像素点的贡献可以忽略不计。

4 结束语

为解决复合粘接结构界面脱粘缺陷检测难度高这一问题,本研究提出使用全聚焦算法进行成像检测。通过有限元仿真,建立了常规的 PA 成像检测模型和全聚焦算法成像检测模型。模拟结果表明:对于复合粘接结构界面脱粘缺陷,全聚焦算法具有更高的检测精度。

针对全聚焦算法计算量过大、计算时间过长这一问题,基于阵元指向性理论,本研究提出分序列局部全聚焦的加速算法,当采用 32 阵元相控阵探头对 $[-4, 4]$ 和 $[4, 8]$ 之间的矩形区域进行成像检测时,加速算法相对全孔径的 TFM 计算量降低了 34.7%;应用此加速算法对复合粘接结构界面脱粘进行成像检测,结果与全孔径 TFM 成像检测成像完全吻合,表明加速算法在提高计算速度的同时,保证了成像质量。

参考文献 (References):

- [1] 刘 瑜. 多层结构超声检测理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] 刘 婧, 徐卫疆, 胡文祥. 三层介质超声谐振模式随材料和界面粘接性能变化的演变规律[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 228-240.
- [3] VINE K, CAWLEY P, KINLOCH A J. Comparison of normal and oblique incidence ultrasonic measurements for the detection of environmental degradation of adhesive joints [J]. **NDT & E International**, 2002, 35(4): 241-253.
- [4] ZHOU H, LIU G. A model-based ultrasonic quantitative evaluation method for bonding quality of multi-layered material[J]. **Measurement**, 2012, 45(6): 1414-1423.
- [5] TITOV S A, MAEV R G, BOGACHENKOV A N. Pulse-echo NDT of adhesively bonded joints in automotive assemblies[J]. **Ultrasonics**, 2008, 48(6-7): 537-546.
- [6] LEIDERMAN R, BRAGA A M B, BARBONE P E. Scattering of ultrasonic waves by defective adhesion interfaces in submerged laminated plates[J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2005, 118(4): 2154-2166.
- [7] BELLONCLE V V, ROUSSEAU M, TERRIEN N. Effects of the microstructure of pretreated aluminum joints AA2024 T3 on the ultrasonic evaluation of adhesion[J]. **NDT & E International**, 2007, 40(6): 419-427.
- [8] BALTAZAR A, WANG L, XIE B, et al. Inverse ultrasonic determination of imperfect interfaces and bulk properties of a layer between two solids[J]. **Journal of the Acoustical Society of America**, 2003, 114(3): 1424-34.
- [9] ZHANG R, WAN M X, CAO W W. Guided wave in ultrathin layered composite structure with weak and slip interface in different depth[J]. **Acta Physica Sinica**, 2000, 49(7): 1301-1302.
- [10] REN B, LISSENDEN C J. Ultrasonic guided wave inspection of adhesive bonds between composite laminates [J]. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 2013, 45(2): 59-68.
- [11] GAO G J, DENG M X, LI M L, et al. Influence of the interfacial properties on guided circumferential wave propagation in the circular tube structure[J]. **Acta Physica Sinica**, 2015, 64(22): 284-293.
- [12] CASTAINGS M. SH ultrasonic guided waves for the evaluation of interfacial adhesion [J]. **Ultrasonics**, 2014, 54(7): 1760-1775.
- [13] 黄跃鑫, 钟舜聪, 伏喜斌, 等. 聚乙烯管道电熔接头的超声相控阵成像及缺陷特征[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 119-123.
- [14] 周正干, 李 洋, 周文彬. 相控阵超声后处理成像技术研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 1-11.
- [15] 周正干, 彭 地, 李 洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1-7.
- [16] LI C, PAIN D, WILCOX P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays [J]. **NDT & E International**, 2013, 53(1): 8-17.
- [17] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Autofocusing ultrasonic imagery for non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries [J]. **NDT & E International**, 2010, 43(2): 78-85.
- [18] VELICHKO A, WILCOX P D, THOMPSON D O, et al. Reversible back-propagation imaging algorithm for postprocessing of ultrasonic array data [J]. **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control**, 2009, 56(11): 2492-2503.
- [19] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array [J]. **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control**, 2008, 55(11): 2450-2462.
- [20] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation [J]. **NDT & E International**, 2005, 38(8): 701-711.
- [21] 于 朋, 刚 铁, 孙昌立. 基于 FSTFM 技术的焊缝表面裂纹的成像检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 15-18, 28.
- [22] 胡玉平. 金属/金属与复合材料粘接质量超声检测[D]. 南昌: 南昌航空大学测试与光电工程学院, 2017.
- [23] 周正干, 彭 地, 李 洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 1-7.
- [24] 贾乐成, 陈世利, 白志亮, 等. 超声全聚焦成像校正模型及加速算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1589-1596.
- [25] 胡宏伟, 杜 剑, 李 洋, 等. 基于稀疏矩阵的两层介质超声相控阵全聚焦成像[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 128-135.

[编辑: 程 浩]

本文引用格式:

范学腾, 伏喜斌, 黄学斌, 等. 复合粘接结构脱粘缺陷全聚焦成像模拟及算法优化研究[J]. 机电工程, 2019, 36(8): 791-796.

FAN Xue-teng, FU Xi-bin, HUANG Xue-bin, et al. Total focusing imaging simulation and algorithm optimization of debonding defect of composite bonding structure[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(8): 791-796.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>