

缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究*

周进节¹, 郑 阳², 张宗健², 谭继东²

(1. 中北大学机械与动力工程学院 太原 030051;

2. 中国特种设备检测研究院 国家质量监督检验检疫总局无损检测与评价重点实验室 北京 100029)

摘要:相控阵超声全聚焦成像充分利用了检测信号,具有成像精度高、可进行缺陷识别等特点,是未来最具应用前景的相控阵成像算法之一。然而,目前相控阵超声全聚焦成像仍不能实现缺陷的高分辨率成像,无法对缺陷进行准确的定性、定量分析。为此,采用有限元仿真相控阵传感器的全阵列采集(FMC)过程,在全矩阵数据的基础上设计全聚焦成像程序,对圆孔和裂纹两种典型缺陷进行TFM成像,研究典型缺陷的TFM成像规律,从缺陷散射的角度分析影响相控阵超声全聚焦成像的因素。结果表明,实际检测中相控阵超声传感器只能接收到缺陷的部分散射信息,而相控阵超声在缺陷处的散射场分布与缺陷的类型、尺寸、角度及入射波类型、入射角度等因素有关,因此能否接收到缺陷散射的主要能量是影响全聚焦成像精度的关键。

关键词:相控阵;散射;全聚焦;成像;超声

中图分类号:TB52⁺5 TB553 TH878 TG115.28⁺5 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:140.20

Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging

Zhou Jinjie¹, Zheng Yang², Zhang Zongjian², Tan Jidong²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing and Evaluation of AQSIIQ, China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: Fully utilized the detection signal, phased array ultrasonic total focus method (TFM) imaging can achieve high imaging precision and identify defects, which is one of the most promising future phased array imaging algorithms. However, the TFM imaging can not achieve high resolution imaging of defects, and can not make accurate qualitative and quantitative analysis. Therefore, in this paper, the finite element method (FEM) is used to simulate the full matrix capture (FMC) process of phased array sensors. A TFM imaging program is designed based on the full matrix data. TFM imaging is performed on two typical defects of circular hole and crack, and the TFM imaging law of typical defects is studied. The factors affecting phased array ultrasound imaging are analyzed from the perspective of the defect scattering. The results show that phased array ultrasonic sensor can only receive the partial scattering information of the defect in the actual detection. Moreover, the scattered field distribution of phased array ultrasound is related to the type, size, angle of the defect and incident wave type, and incident angle and so on. Thus, the main energy of the defect scattering can be received is the key factor to the accuracy of the TFM imaging.

Keywords: phased array; scattering; total focus method; imaging; ultrasonic

1 引言

相控阵超声检测采用一定的成像算法能将检测结果形象具体地展现出来,以便检测者对检测结果进行分析

判读,传统的相控阵超声成像算法有傅里叶成像算法、合成孔径算法等,主要应用于实时成像检测。在硬件技术的推动下,相控阵超声检测系统得到了快速发展,传统的成像检测方法已逐渐不能满足检测需求。为此,近年来相控阵超声后处理成像方法得到了快速发展,兴起了多

种后处理成像算法^[1-3],其中相控阵超声全聚焦成像方法因其信噪比好、分辨率高、缺陷重构性好等特点,成为了相控阵后处理成像的研究热点之^[4-5]。Holmes C等人^[6]研究了相控阵超声检测中的全聚焦成像算法;随后,Wilcox P. D.等人^[7]采用矢量化的全聚焦成像算法解调缺陷在不同角度下的散射信息,并利用矢量全聚焦方法处理全矩阵数据,通过判断缺陷矢量场方向来识别裂纹方向;Hunter A. J.等人^[3]提出了一种在频域中进行全聚焦成像的方法,并建立了一种用于检测复杂形状构件件的自聚焦检测方法^[8];Zhang J等人^[9]利用相控阵超声入射到缺陷处的散射系数矩阵来表征缺陷的特征,随后Zhang J等人^[10]又分析了相控阵换能器阵元不一致对全聚焦算法成像的影响,并提出将超声在缺陷处的散射特性引入全聚焦成像算法来改善成像分辨率的思想,但目前还不能从散射信息中解调出缺陷的特征信息;焦敬品等人^[11]发展了一种超声脉冲压缩技术,并将其应用于相控阵超声全聚焦成像,以提高检测信号的时间分辨率,实现相邻缺陷识别;之后焦敬品等人^[12]从相控阵子阵列中提取散射系数进行裂纹方向识别,并研究了子阵列参数及探头位置对裂纹方向识别的影响;周正干等人^[13]针对斜入射相控阵超声检测,从超声传播衰减的角度,引入校准系数对全聚焦成像算法进行修正,结果显示修正后的算法可获得更好的成像分辨率;张昊等人^[14]针对全聚焦成像算法计算量大的问题,提出了一种加速算法,加快了缺陷的全聚焦三维成像的计算速度。

纵观对相控阵全聚焦成像的相关研究,主要集中于改进成像算法,改善成像精度及提高缺陷的判读能力,然而目前仍不能实现缺陷的高精度成像,无法对缺陷进准确的定性、定量分析。为此本文采用有限元仿真相控阵全采集过程(full matrix capture, FMC),设计全聚焦成像程序,研究典型缺陷的全聚焦成像规律,从缺陷散射的角度分析影响相控阵超声全聚焦成像的因素。

2 全聚焦成像方法及FMC仿真

2.1 全聚焦成像方法

相控阵超声全聚焦成像方法,是以全矩阵数据为基础,将检测信号通过后处理聚焦于检测区域中的每一个点上,利用检测区域中每一个点的幅值信息重构出二维图像的,可获得高分辨率的成像效果,实现缺陷的准确定位以及定量分析。全聚焦成像算法原理如图1所示。

选取成像区域的左上角作为坐标原点 O ,建立直角坐标系 Oxz ,并根据传感器布置的位置,确定各阵元的中心坐标。对于成像检测区域的任意一点 (x, z) ,利用全矩阵数据 $P_{ij}(i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, N)$,根据各阵元到该点的波程关系,求解所有超声回波信号在该点的信

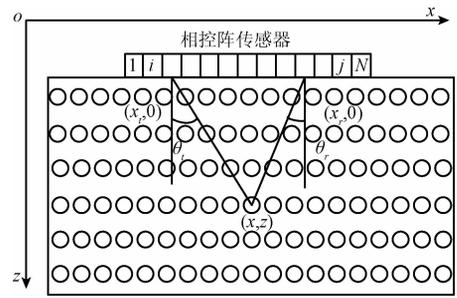


图1 相控阵超声全聚焦成像原理

Fig. 1 Principle of phased array ultrasonic TFM imaging

号幅值,将各幅值进行叠加获得表征该点信息的幅值 $I(x, z)$ 。重复以上过程,便可求得到成像检测区域内所有像素点的幅值信息。

特定聚焦点 (x, z) 的幅值 $I(x, z)$ 可表示为:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{ij}(t_{ij}(x, z)) \quad (1)$$

式中, $P_{ij}(t_{ij}(x, z))$ 表示第 i 个阵元发射、第 j 个阵元接收的一组超声检测信号在坐标点 (x, z) 处的幅值。

$t_{ij}(x, z)$ 是通过聚焦法则计算出的用于提取聚焦点幅值的延迟时间,该时间包含了声波从发射元 i 到聚焦点 (x, z) ,再由聚焦点返回到接收元 j 所需要的整个历程时间,参考图1的几何关系,可知:

$$t_{ij}(x, z) = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + z^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + z^2}}{C_L} \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 分别代表发射阵元和接收阵元的横坐标; C_L 为被检工件中的纵波声速。由式(3)就可以得到确定的检测区域中每一个像素点的幅度信息,然后将整个检测区的每个点的幅度信息恢复就得到整个检测区域的图像。

2.2 FMC仿真

相控阵超声全聚焦成像的数据基础是全矩阵数据,因此成像的首要任务是获取全矩阵数据,所采用的数据获取方法为FMC,即指依次激发相控阵换能器内的每一个阵元,利用包括自身在内的所有阵元来接收回波信号,便可获得换能器所有的发射-接收阵元组合的信号。由于在实际检测中,总可以通过移动相控阵探头,使其位于缺陷的正上方,因此可建立缺陷位于探头正下方的相控阵超声检测模型,来模拟相控阵超声全矩阵数据采集过程,如图2所示。

此外,考虑相控阵超声在实际检测中粗糙表面需要先进行打磨,以便于传感器更好地接触测件表面,产生良好的耦合效果,因此不考虑表面粗糙度的影响,假定模型中测件表面为理想表面。模型中传感器采用线阵相控阵换能器,阵元数为32,激活孔径为19.2 mm,阵元中心间距为0.6 mm。为了描述缺陷的角度信息,建立如图所示坐标系 oxy 。相关仿真参数如表1所示。

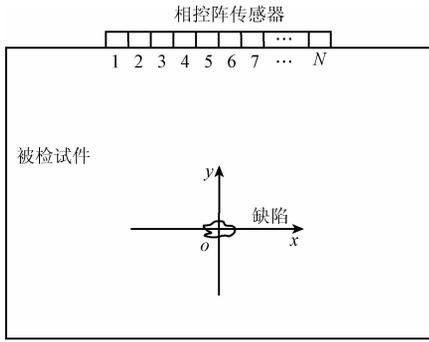


图2 全矩阵采集二维有限元模型

Fig. 2 2-D FE model of full matrix capture

表1 相控阵 FMC 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters of phased array FMC

参数	值
被检材料	钢
尺寸/mm	50 × 40
密度/(kg · m ⁻³)	7.85 × 10 ⁻⁹
杨氏模量/MPa	2.1 × 10 ⁵
泊松比	0.26
单元类型	CPE4R、CPE3
时间步/s	1 × 10 ⁻⁹

3 相控阵超声全聚焦成像程序设计

在获取全矩阵数据的基础上,设计相控阵超声全聚焦成像程序。全聚焦成像过程如图3所示。

1) 全矩阵数据采集:依次激发探头内部阵元,所有阵元同时接收,获取全矩阵数据;

2) 信号预处理:在采集信号时,不可避免会包含噪声成分,因此需对采集到数据进行一定处理,如滤波等;

3) 全聚焦处理:根据具体的成像精度要求将整个成像区域离散为多个像素点,并按照全聚焦算法,逐一计算各离散点的幅值,得到整个区域成像数据;

4) 成像与后处理:将全聚焦算法计算所得整个区域的成像数据按照各离散点能量值与颜色值一一对应,并将其绘制到二维色彩图中,通过区域色彩变化判断缺陷的位置与大小。

图4所示为相控阵超声全聚焦成像程序设计的主要流程。1) 设置传感器位置、晶元数、成像区域等参数;2) 读取全矩阵数据,并完成信号滤波和修正;3) 将成像区域离散为 $MM \times NN$ 个像素点,接着利用全聚焦算法处理全矩阵数据,逐一计算各离散像素点的能量值;4) 将各离散点的能量值映射到色彩图中,并根据色彩的变化判别图中缺陷位置和大小。

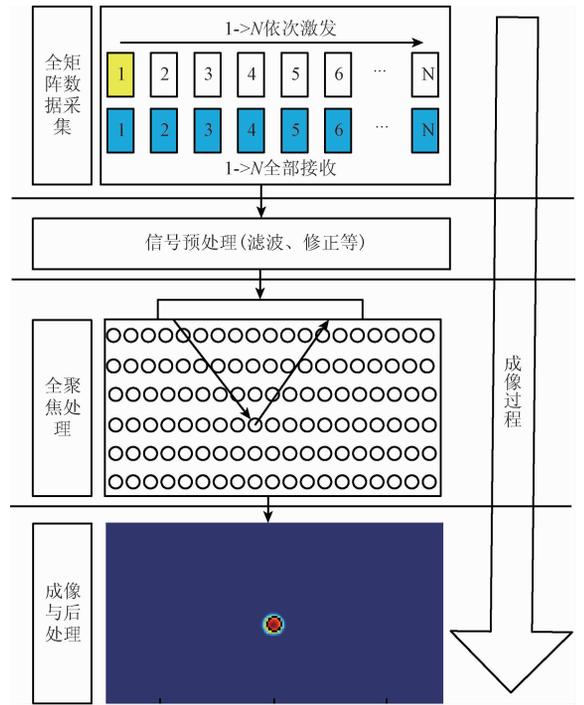


图3 相控阵超声全聚焦成像过程

Fig. 3 Phased array ultrasonic TFM imaging process

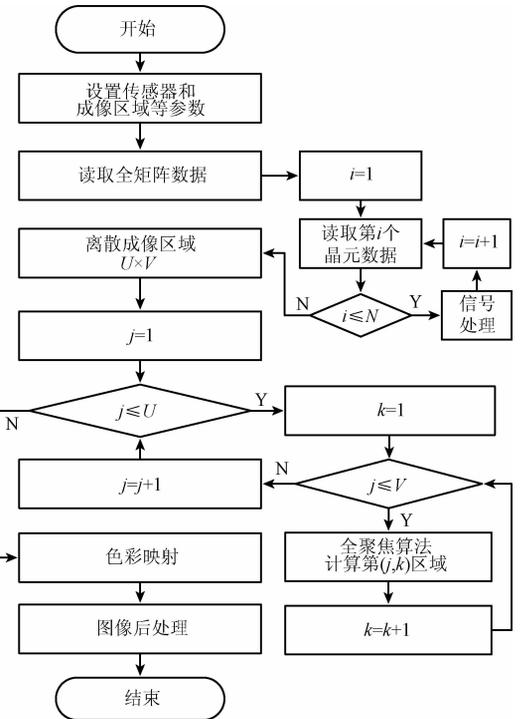


图4 全聚焦成像程序设计流程

Fig. 4 The flow chart of TFM imaging program design

4 典型缺陷的相控阵超声全聚焦成像

在有限元模型中设计不同直径圆孔缺陷及不同长度

的裂纹缺陷,通过有限元仿真 FMC 过程,采集这些缺陷的全矩阵数据,在此基础上利用设计的相控阵全聚焦成像程序进行全聚焦成像,对比研究典型缺陷的 TFM 成像规律,并从缺陷散射的角度分析影响相控阵超声全聚焦成像的因素。

4.1 圆孔缺陷的全聚焦成像

设计直径分别为 0.5λ 、 1λ 、 1.5λ 和 2λ 的圆孔缺陷,其中 λ 为超声纵波波长,并利用各圆孔的相控阵超声检测全矩阵数据进行全聚焦成像。图 5 所示圆孔缺陷的全聚焦成像,图中色彩值表示幅值能量,以缺陷成像幅值最大下降 6 dB 范围作为缺陷区域。为了便于更直观清晰地分析圆孔的全聚焦成像规律,局部放大显示带缺陷的区域,并用黑色的圆标记处缺陷的实际位置和大小。

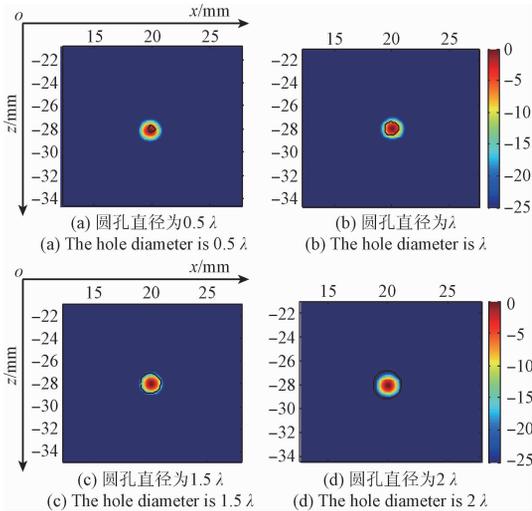


图 5 圆孔缺陷的全聚焦成像

Fig. 5 TFM imaging of the hole defects

分析图 5 可以直观地看出,1) 缺陷区域中心与标记圆的中心重合,表明采用全聚焦方法对不同直径的圆孔成像时,可获得缺陷准确的位置信息;2) 全聚焦成像出的缺陷区域外形非常接近于圆形,主要表现为缺陷在靠近传感器的上半部分区域成像为圆形,而在下半部为椭圆形;3) 随着圆孔直径的增加,TFM 成像获取到的缺陷区域的大小在增加,但与实际圆孔的大小存在差异。总体而言,圆孔的相控阵超声全聚焦成像可获得准确的位置信息,但还不能获取到缺陷准确的形貌和尺寸特征。

4.2 裂纹缺陷的全聚焦成像

依据裂纹的形貌特征,设计椭圆表征的裂纹缺陷,固定椭圆的短轴为 0.2 mm ,分别设置长轴为 0.5λ 、 1λ 、 1.5λ 和 2λ ,其中 λ 为超声纵波波长。采用全聚焦方法对不同大小的裂纹进行成像,如图 6 所示,裂纹水平时(角度为 0°)全聚焦成像的局部放大图,黑色椭圆标记了缺

陷的实际位置和大小。

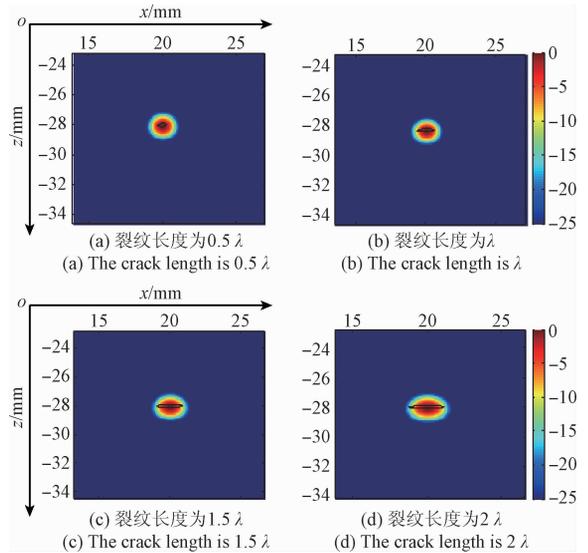


图 6 不同长度裂纹的全聚焦成像

Fig. 6 TFM imaging of crack in different lengths

分析图 6 可得,1) TFM 成像的缺陷位置与裂纹实际位置相符合;2) 不同长度裂纹的 TFM 成像为椭圆形,随着裂纹增长,缺陷区域面积在变大;3) 裂纹为 0° 时,TFM 成像出的缺陷区域长度非常接近裂纹实际长度,但在宽度方向上要比实际裂纹宽。

在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 等间距设置 5 个角度的裂纹,研究不同角度裂纹的全聚焦成像规律。图 7 所示为不同角度裂纹的全聚焦成像,裂纹长度为 1λ ,对于 0° 裂纹的成像如图 6(b) 所示。

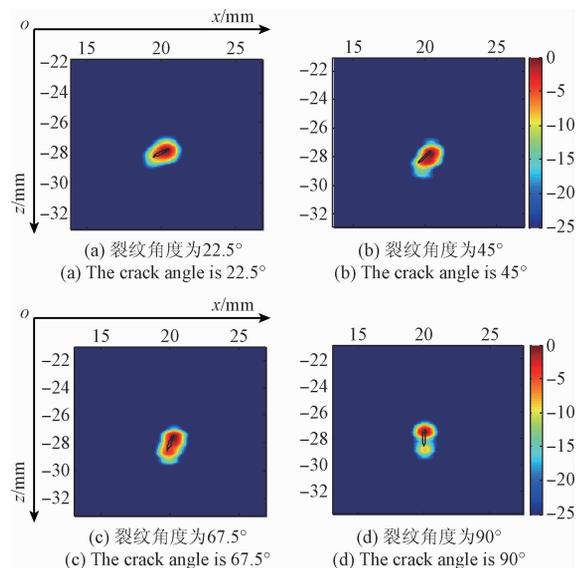


图 7 不同角度裂纹的全聚焦成像

Fig. 7 TFM imaging of crack in different angles

分析图7中可以发现,1)裂纹在不同角度下的TFM成像外形近似椭圆形,形态也呈现出一定的方向性,特别是角度为90°时TFM成像的裂纹由上下两个分开的区域构成;2)TFM对不同角度裂纹成像的位置与缺陷的实际位置相符;3)TFM成像获取到的缺陷区域比实际的裂纹大;4)成像获取的缺陷在靠近传感器一端幅值能量高于远离传感器一端的能量。

4.3 缺陷散射对全聚焦成像的影响

为了进一步分析典型缺陷全聚焦成像规律,在有限元模型中以缺陷中心为圆心设置一半径10 mm的信号监测圆,在信号检测圆上等间距设置32个信号监测点,来获取缺陷的周向散射信息^[15],如图8所示。考虑缺陷尺寸与超声波波长量级相当,在超声入射到缺陷处时除了会发生反射、散射、透射现象外,还会发生衍射现象,因此超声波与缺陷交互作用在缺陷处形成了新的声场。在通过求解缺陷周向散射系数来获取新声场分布特性的过程中,提取的散射信息包含了超声波在缺陷处的反射、散射、衍射等信息。

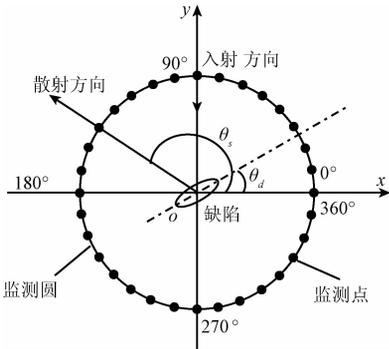


图8 提取缺陷的周向散射信息

Fig. 8 Extraction of defect circumferential scattering information

激励单一阵元使声波从90°方向入射到缺陷,从监测圆上提取出各缺陷的散射纵波信息,并在极坐标系中绘制成周向散射系数图来表征缺陷的散射特性,如图9所示。

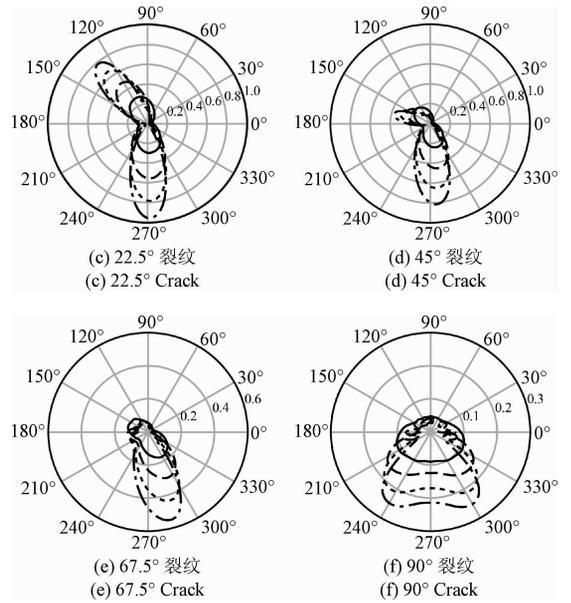
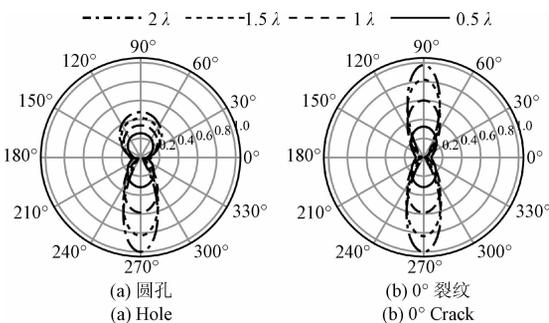


图9 缺陷的周向散射系数图

Fig. 9 The circumferential scattering coefficient of defects

从图9可以看出,超声经过缺陷时产生的散射场分布与缺陷的类型、大小和角度有关。如图9(a)所示对于圆孔缺陷,散射场分布主要集中在正反射区和正透射区附近,且缺陷的尺寸影响散射能量但不影响散射的分布趋势。如图9(b)~(f),对于裂纹缺陷,在入射声场方向不变时,散射场的分布具有明显的方向指向性,特别是正反射区域的散射随着裂纹角度增加表现出较为明显的偏转,且能量在逐渐减少。

为了便于模拟仿真,在此固定入射角 θ_i 不变,改变缺陷角度来达到不同入射角的效果,对于其他入射角下的缺陷散射系数,可以通过求解散射系数矩阵(S 矩阵)来获取。 S 矩阵将散射位移场和入射位移场联系在一起,是入射波模态、散射波模态和激励频率的函数,它记录了同一缺陷在全部入射角下所有周向散射信息,可表示为 $S^{\alpha,\beta}(\theta_s, \theta_i, \omega)$,其中 α 是入射波模态, β 是散射波模态, θ_i 为声波入射角, θ_s 是散射角, ω 为入射波的频率。对于超声波来说, α 和 β 是纵波 L 或横波 S 。检测中,传感器可直接探测位移的变动,因此常用散射位移场与入射位移场的比来计算散射矩阵^[16]。

$$S^{\alpha,\beta}(\theta_s, \theta_i, \omega) = \frac{u_s}{u_{in}} \sqrt{\frac{r_s}{\lambda_\beta}} \exp(-ik_\beta r_s) \quad (3)$$

式中: u_s 表示散射位移场, u_{in} 为入射位移场, r_s 为监测点到缺陷的距离, λ_β 为散射模式的波长, k_β 为散射模式的波数。求解 $S^{\alpha,\beta}(\theta_s, \theta_i, \omega)$ 时可根据 θ_i 与 θ_d 的关系及缺陷的对称性,通过角度变换求得其他缺陷入射角下的缺陷散射系数。

由于相控阵超声传感器的阵元数和宽度有限,使得超声入射角度有限,且传感器能接收到的缺陷散射信息有限,导致传感器采集到的全矩阵数据仅为缺陷的部分散射信息。从对相控阵超声在缺陷处的散射场分布可知,随着裂纹长宽比减小,其散射场分布越接近与圆孔的散射场分布,使得小裂纹的全聚焦成像与圆孔缺陷的成像结果相似,如图 5(a)与图 6(a)所示。此外,随着裂纹角度的增大,其正反射区的散射场分布逐渐减弱,散射场分布主要集中在正透射区,特别是在裂纹角度为 90°时,正反射区的散射能量极小,相控阵超声传感器不能接收到裂纹散射场的主要能量,导致全聚焦成像不能获得高分辨率的成像效果。

综上所述,利用全聚焦方法实现高分辨率成像的关键是获取缺陷散射的主要能量,全聚焦成像主要是利用位于正反射区域内的缺陷散射信息,而且相控阵传感器只能接收到部分的散射信息,很难获取到透射区域的散射信息,这直接影响了全聚焦成像的精度及缺陷的定性定量分析。

5 相控阵超声全聚焦成像实验研究

前面通过仿真 FMC 过程,研究了相控阵超声全聚焦成像方法及缺陷散射对其的影响,在此通过实验研究典型缺陷的相控阵超声全聚焦成像规律。

5.1 相控阵超声检测实验系统

以 M2M 公司的 Multi2000 多路便携式超声相控阵设备作为实验平台,探头选用 Olympus 公司的相控阵超声换能器 5L32A5,其中心频率为 5 MHz,阵元数为 32 个,激活孔径为 19.2 mm,如图 10 所示。

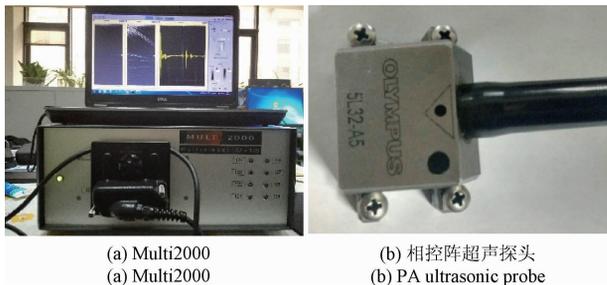


图 10 相控阵超声实验系统

Fig. 10 Phased array ultrasonic experimental system

相控阵超声全聚焦成像的实验对象为多孔缺陷模拟试件和裂纹模拟试件,具体如图 11 所示。

图 11 中白色区域为待检模拟缺陷,图 11(a)是 12 个圆孔缺陷,直径为 1.5 mm、水平间距为 3.5 mm、竖直间距为 2.5 mm;图 11(b)是刻槽模拟的裂纹缺陷,刻槽长度为 3 mm、宽度为 1 mm,缺陷离上端面距离为 50 mm。此外,两个模拟试件材料均为铝。

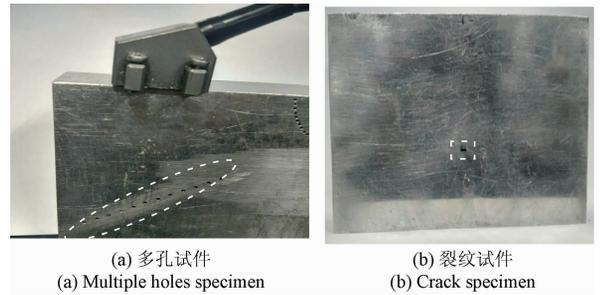


图 11 实验检测模拟试件

Fig. 11 Experimental specimen

5.2 相控阵超声全聚焦成像实验

采用全阵列采集方式获取模拟缺陷的全矩阵数据。然后,利用所设计的成像程序对模拟缺陷进行全聚焦成像,成像结果如图 12 所示,在图像中以幅值最大下降 6 dB 范围作为缺陷区域,为了更清晰的展示成像结果,对缺陷区域进行局部放大。

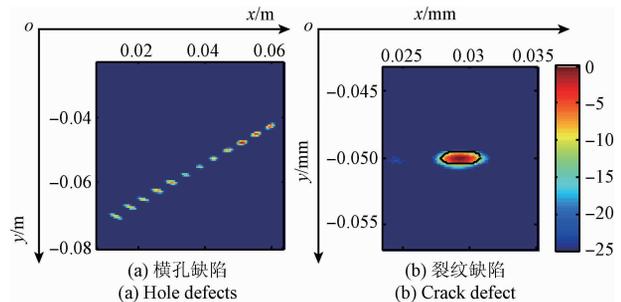


图 12 模拟缺陷的全聚焦成像

Fig. 12 The TFM imaging of the artificial defect

图 12(a)为多孔缺陷的全聚焦成像结果,从中可以看出,12 个圆孔均被检测出,表明检测多缺陷时全聚焦成像能够获得很好的缺陷检出率。分析图像可看出在探头正下方的缺陷的形貌更接近实际圆孔缺陷,而在偏离探头正下方的缺陷成像结果为椭圆形,且沿远离传感器的方向缺陷成像出的椭圆形态在顺时针旋转,从图像不能够直观地判别其缺陷的类型。从声波传播衰减的角度,全聚焦对缺陷成像时应该是靠近传感器的缺陷能量高,远离传感器的缺陷能量低,然而从图中可以发现位于传感器正下方的几个孔呈现出的能量比旁边的能量都低,分析原因主要是由相控阵实验系统的阵元不一致性引起的。

图 12(b)为模拟 0°角裂纹缺陷的全聚焦成像,图中用黑色椭圆标记了裂纹的实际长度和宽度,可以看出刻槽模拟裂纹的成像显示为椭圆形,成像出的缺陷在长度上与刻槽的实际长度相当,但就成像整体而言并不能精确的表征刻槽的外形。对比圆孔缺陷和裂纹缺陷的全聚

聚焦成像结果,可以看出全聚焦成像可以获得缺陷的准确定位,但在实际检测中缺陷类型未知的情况下,从全聚焦成像结果中很难对缺陷进行准确的定性、定量分析。

6 结 论

通过仿真 FMC 采集过程,设计全聚焦成像程序,研究了典型缺陷的全聚焦成像规律,并分析了缺陷散射对全聚焦成像的影响,最后通过实验验证了全聚焦成像的效果,得出如下结论。

1) 采用全聚焦方法可获得较好的成像精度及缺陷检出率,但很难直接从成像结果上判别缺陷的类型及尺寸。

2) 缺陷散射对全聚焦成像的影响主要表现在传感器不能采集到缺陷的全散射信息,全聚焦成像只利用了部分散射信息,导致不能准确地成像出缺陷的外形轮廓;检测裂纹时,缺陷散射会导致传感器不能采集到与声波入射方向夹角小的裂纹的散射主能量,使得裂纹长度方向与声波入射方向的夹角越小全聚焦成像对裂纹的分辨力越低;尽量多地获取缺陷散射的主要能量是改善全聚焦成像精度、实现缺陷准确性定量分析的关键。

参考文献

- [1] 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.
- [2] PÖRTZGEN N, GISOLF D, BLACQUIÈRE G. Inverse wave field extrapolation: A different NDI approach to imaging defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(1): 118-127.
- [3] 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, and Frequency Control, 2008, 55(11): 2450-2462.
- [4] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.
JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement And Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.
- [5] 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.
ZHOU ZH G, LI Y, ZHOU W B. Ultrasonic phased array post-processing imaging techniques: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 1-11.
- [6] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: application to defect detection and classification in non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2008, 48(6-7): 636-642.
- [7] WILCOX P D, HOLMES C, DRINKWATER B W. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(8): 1541-1550.
- [8] 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.
- [9] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(10): 2254-2265.
- [10] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance [J]. NDT & E International, 2011, 44(4): 361-368.
- [11] 焦敬品, 马婷, 刘德宇, 等. 基于脉冲压缩技术的相邻缺陷识别方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1614-1621.
JIAO J P, MA T, LIU D Y, et al. Study on identification method of adjacent defects using pulse compression technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1614-1621.
- [12] 焦敬品, 马婷, 李光海, 等. 用于裂纹方向识别的超声散射系数分析方法研究[J]. 声学学报, 2016, 41(1): 13-24.
JIAO J P, MA T, LI G H, et al. Characterization of the directivity of crack-like defects based on the distribution of scattering coefficient and its influencing parameters[J]. Acta Acustica, 2016, 41(1): 13-24.
- [13] 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.
ZHOU ZH G, PENG D, LI Y, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7.
- [14] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,

30(7): 992-999.

ZHANG H, CHEN SH L, JIA L CH. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array [J]. Journal of Electronic Measurement And Instrumentation, 2016, 30(7): 992-999.

- [15] 郑阳, 周进节. 兰姆波在裂纹处的模态转换及散射特性研究[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 21-29.

ZHENG Y, ZHOU J J. Mode conversion and scattering properties of lamb waves near localized cracking [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 21-29.

- [16] 郑阳. 基于散射系数矩阵法的超声兰姆波与典型缺陷交互作用研究[D]. 北京:北京工业大学, 2012.

ZHENG Y. Interaction of Lamb wave with typical defects using scattering parameter matrix [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.

作者简介



周进节, 2004 年于景德镇陶瓷学院获得学士学位, 2007 年于北京机械工业学院获得硕士学位, 2012 年于北京工业大学获得博士学位, 现为中北大学讲师, 主要研究方向为超声检测方法、传感器与检测仪器、声场可视化技术等。

E-mail: zhoujinjiechina@126.com

Zhou Jinjie received his B. Sc. degree from Jingdezhen Ceramic Institute in 2004, and received his M. Sc. degree from Beijing Institute of Machinery Industry in 2007, and received his Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2012. Currently, he is a lecturer in North University of China. His main research interests include ultrasonic testing method, sensors and detection equipment, sound field visualization technology, etc.



郑阳(通讯作者), 2007 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2012 年于北京工业大学获得博士学位, 现为中国特种设备检测研究院高级工程师, 主要研究方向为电磁超声、相控阵超声、超声导波、磁声多参数等检测方法以及传感器与检测仪器开发等。

E-mail: zhengyangchina@126.com

Zheng Yang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihang University in 2007, and received his Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2012. Currently, he is a senior engineer in China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests include electromagnetic ultrasound, phased array ultrasound, ultrasonic guided waves, magnetic sound parameters and other detection methods, sensors and detection equipment development, etc.