

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2023.02.016

基于动态阵元合成孔径聚焦超声成像的平板陶瓷膜内部 缺陷三维重建

雷震霆, 朱兴龙, 孙 进, 马昊天, 梁 立

(扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要: 针对平板陶瓷膜内部缺陷可视效果差和超声三维重建运算数据量大等问题, 提出了一种基于动态阵元合成孔径聚焦超声成像的平板陶瓷膜内部缺陷三维重建方法。动态阵元合成孔径聚焦超声成像方法是通过在缺陷区域使用多阵元合成孔径, 在非缺陷区域使用单阵元合成孔径。采用动态阵元合成孔径聚焦超声成像方法获取多个位置序列的平板陶瓷膜的缺陷 B 扫描图像, 并采用体绘制的方法, 实现了平板陶瓷膜缺陷的三维可视化。实验结果表明, 采用动态阵元合成孔径聚焦超声成像方法时划痕的重建相对误差在 1.27%~2.70% 之间, 对孔洞的重建相对误差在 2.38%~3.03% 之间, 重建速度平均提高了 26.57%。通过对缺陷的三维重建, 使得缺陷的呈现更加直观, 为后续的缺陷分析的客观性提供了保障。提出的方法具有良好的适应性、经济性, 在无损检测领域有重要的意义。

关键词: 动态阵元; 合成孔径聚焦成像; 平板陶瓷膜; 超声成像; 三维重建

中图分类号: TQ174.75

文献标志码: A

文章编号: 1000-2278(2023)02-0345-09

Three-dimensional Reconstruction of Defects Inside Flat Ceramic Membranes Based on Dynamic Array Element Synthetic Aperture Focused Ultrasound Imaging

LEI Zhenting, ZHU Xinglong, SUN Jin, MA Haotian, LIANG Li

(School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu, China)

Abstract: A 3D reconstruction method of defects inside flat ceramic membranes is proposed, basing on dynamic array element synthesis aperture focusing ultrasound imaging, in order to address the problems of poor visualization of defects inside flat ceramic membranes and to reduce the data requirement for ultrasonic 3D reconstruction. In the dynamic array synthetic aperture focused ultrasound imaging method, a multi-array synthetic aperture in defective areas and a single-array synthetic aperture in non-defective areas are used. By using this method to acquire B-scan images of defects in flat ceramic membranes at multiple location sequences and a body drawing method, three-dimensional visualization of defects in flat ceramic membranes is achieved. It is found that relative errors of the reconstruction of scratches using the dynamic array element synthetic aperture focused ultrasound imaging method range from 1.27% to 2.7%, while the relative errors of the reconstruction of holes range from 2.38% to 3.03%, with an average increase in reconstruction speed of 26.57%. The three-dimensional reconstruction method makes the defects more intuitive and provides an objective condition for subsequent defect analysis. The method is well adapted and economical, with potential applications in the field of non-destructive testing.

Key words: dynamic array element; synthetic aperture focusing imaging; flat ceramic membrane; ultrasound imaging; three-dimensional reconstruction

收稿日期: 2022-09-08。

修订日期: 2022-11-10。

基金项目: 国家自然科学基金(51775484, 51475409); 2022 年扬州市科技计划项目(YZ2022184); 2021 年扬州市产业前瞻与共性关键技术项目(YZ2021020); 2020 年江苏省产学研合作项

目(BY2020663); 2020 年扬州大学市校合作专项(YZ2020166)。

通信联系人: 朱兴龙(1964-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-09-08.

Revised date: 2022-11-10.

Correspondent author: ZHU Xinglong (1964-), Male, Ph.D., Professor.

E-mail: xlzhu@yzu.edu.cn

0 引言

平板陶瓷膜凭借无污染、使用寿命长等优点,被广泛应用于污水处理、水循环、水净化等领域^[1-2]。平板陶瓷膜在生产使用过程中都会出现内部损伤等情况。传统做法是采用超声波探伤仪对平板陶瓷膜进行探伤,只能获取到一维信号信息和二维图像信息^[3]。对于内部缺陷只能获取到二维图像信息,不能获取到平板陶瓷膜内部缺陷的三维形貌信息,使得工作人员无法直观地观察到缺陷的三维形貌,不利于对生产工艺的优化和改进。

2009 年, Davies 等^[4]针对管道周向裂纹和孔洞等缺陷问题,使用合成聚焦方法对管道的裂纹和孔洞进行成像。最后,通过仿真的方法验证了该方法的成像具有高信噪比。2010 年, Kitazawa 等^[5]针对内部缺陷问题,提出一种三维相控阵技术。利用矩阵的阵列探头发射聚焦光束一次性对物体进行体积扫描。通过对不锈钢试样中的平底孔进行 3D 扫描,最后得到了孔的三维形貌。2014 年,杜英华等^[6]针对单阵元换能器具有扫描频率低、成像信噪比差等问题,提出了多阵元合成孔径聚焦超声成像方法。通过对实验块进行缺陷成像,验证了多阵元合成孔径比单阵元合成孔径的聚焦成像效果较好。2015 年, Schickert^[7]针对混凝土内部缺陷成像问题,通过采用合成孔径聚焦技术对接收的多个孔径的超声信号进行相干叠加生成混凝土内部缺陷图像。

2020 年,孙进等^[8]针对中空板式陶瓷膜内部缺陷的三维可视化问题,提出了三角形合成孔径聚焦成像的方法。通过将获取的 B 扫图像经过预

处理和基于缺陷轮廓的三维重建获取了平板陶瓷膜的内部缺陷的三维模型。三角形合成孔径聚焦成像方法的缺点是回波的全矩阵数据不可能是完全对称的矩阵,全矩阵的 1/2 数据无法代表所有的回波信息。虽然 1/2 矩阵法在计算量和信噪比方面优于全矩阵算法,但是 1/2 矩阵丢失了部分边缘缺陷的信息^[9]。2021 年, Ni 等^[10]针对铝中水平孔缺陷的可视化问题,使用合成孔径聚焦技术对采集的超声的缺陷信号进行处理。使用这种方法通过对频率维度的处理具有宽频带的特点,提高超声波信号的信噪比。

传统的超声相控阵技术虽然能对缺陷成像,但具有成像不清晰等问题^[11]。单阵元合成孔径成像速度较快,但是具有发射能量较低、信噪比差、存放空间大等缺点。为了改进发射能量较低、信噪比差等问题,学者提出了多阵元合成孔径聚焦方法。多阵元合成孔径具有成像清晰、发射能量高等优点,但是多阵元合成孔径还具有计算量较大、成本较高、成像速度较慢等缺点^[12-13]。

针对上述问题,本文提出了一种基于动态阵元合成孔径聚焦超声成像的平板陶瓷膜内部缺陷三维重建方法,通过融合单阵元合成孔径聚焦方法和多阵元合成孔径聚焦方法,能有效地提高超声成像速度,降低超声三维重建的运算数据量。

1 技术

本文基于动态阵元合成孔径聚焦超声成像的平板陶瓷膜内部缺陷三维重建方法的整体流程图,如图 1 所示。本文三维重建主要包括动态阵元合

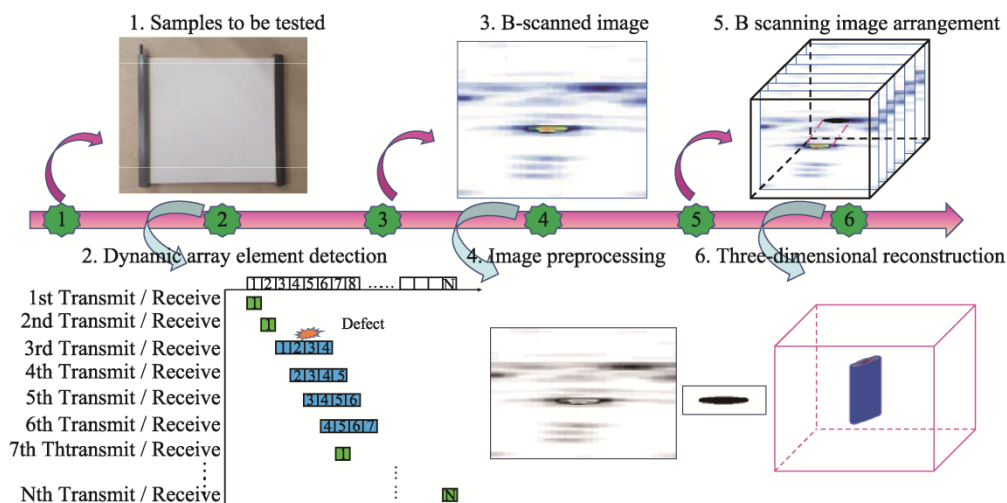


图 1 三维重建的总体流程图

Fig. 1 General flow chart of the 3D reconstruction

成孔径聚焦超声成像、图像预处理、三维重建等步骤。

1.1 单阵元和多阵元的声场分析

单阵元声场的坐标系如图 2(a)所示, 取阵元的中心 O 为坐标原点, 阵元平面为 XOY , 设场点 M 位于第一象限, 且距离坐标原点的距离为 R , 矢量 R 和 Z 的夹角为 γ , N 是场点 M 的在 XOY 平面的投影点。矩形的长度为 L , 宽度为 H , ON 与 X 轴正向方向的夹角为 θ , ON 与 Y 轴正向方向的夹角为 φ 。

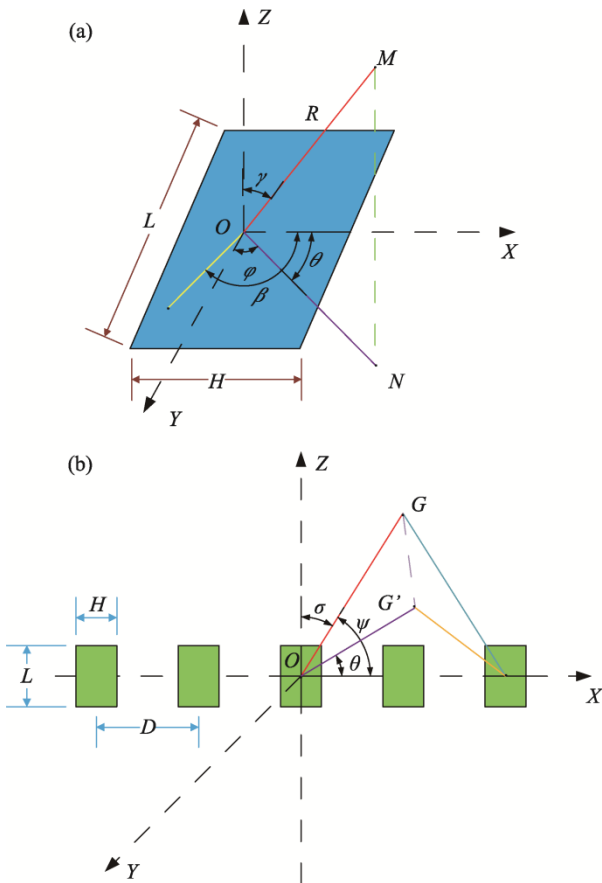


图 2 阵元的声场计算示意图: (a)单阵元声场计算示意图; (b)多阵元声场计算示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of sound field calculation of the array element: (a) single element and (b) multi element

在 M 点的声场的计算公式如式(1)所示:

$$F_M = H \cdot \frac{2c \sin\left(\frac{H \omega \sin \gamma \cos \theta}{2c}\right)}{H \omega \sin \gamma \cos \theta} \exp[j(2\pi f t - kR)] \quad (1)$$

式中: f 为超声波频率; ω 为角速度; ρ 为均匀或各相同性的介质密度; u 为阵元的振速; R 表示 M 的位置矢量。

多阵元的声场如图 2(b)所示, 多阵元声场可以视为由多个单阵元叠加而成的, 多阵元的声场的计算如下式所示:

$$F = \sum_{k=0}^Q F_k = A \cdot B \cdot C \quad (2)$$

$$A = \frac{j\rho f u L H \cdot 2c}{R} \sin\left(\frac{\omega L \sin \gamma \sin \beta}{2c}\right) \frac{\omega L \sin \gamma \sin \beta}{\omega L \sin \gamma \sin \beta} \quad (3)$$

$$B = \frac{2c \sin\left(\frac{H \omega \sin \gamma \cos \theta}{2c}\right)}{H \omega \sin \gamma \cos \theta} \quad (4)$$

$$C = \sum_{k=0}^Q \exp\left\{j\left[\omega(t - \Delta t_k) - \frac{\omega}{c} P_k\right]\right\} \quad (5)$$

式中: F_k 为第 k 个阵元在焦点处的声压; P 为阵列中心到焦点的距离; P_k 为第 k 个阵元中心到焦点的距离; Δt_k 为第 k 个阵元与第一个阵元之间的延迟时间。

1.2 动态阵元合成孔径聚焦方法的原理

缺陷的检测和评估高度依赖于数据采集和后处理技术^[14]。合成孔径聚焦技术(SAFT)是一种基于相控阵超声信号后处理技术, 其有两大优势: (1) 合成孔径聚焦提高超声成像的横向分辨率; (2) 能够在聚焦区域产生动态聚焦的效果^[15]。合成孔径技术可将小孔径虚拟化为大孔径成像, 可大幅提高图像空间分辨率。在相同的采集数据下, 基于合成孔径重建图像的方法, 其图像的分辨率会更高。

合成孔径成像是将超声换能器阵列分成若干个发射或接收单元。根据阵元发射和接收的数量可以分为单阵元、多阵元合成孔径聚焦方法等^[16-17]。单阵元合成孔径及发射和接收子孔径均由同一个阵元组成; 多阵元合成孔径采用多阵元发射、全阵列接收的技术, 将发射和接收子孔径增大, 以改善信噪比低的问题。

在检测平板陶瓷膜内部未知缺陷时, 单独使用单阵元合成孔径聚焦成像的方法, 虽然可以快速检测出平板陶瓷膜内部缺陷, 但成像的信噪比较大、成像速度较慢。基于此, 本文提出基于动态阵元合成孔径聚焦的方法, 通过融合单阵元合成孔径方法和多阵元合成孔径方法, 提升超声成像速度。

动态阵元是融合单阵元和多阵元的采集模

式,其融合过程如图 3 所示。动态阵元采集方法的流程:首先,设置相应的临界值;其次,移动探头进行单阵元扫描;最后,通过对 A 扫描信号的检索,判断出是否有缺陷信号。如果检测出缺陷信号,单阵元检测会相应地变成多阵元检测。同理,进行多阵元检测时,未遇到缺陷时,相应的多阵元检测会变成单阵元检测。以此类推,直至扫描结束。在缺陷采集的过程中实现了单阵元和多阵元之间的切换,提高了采集的效率。

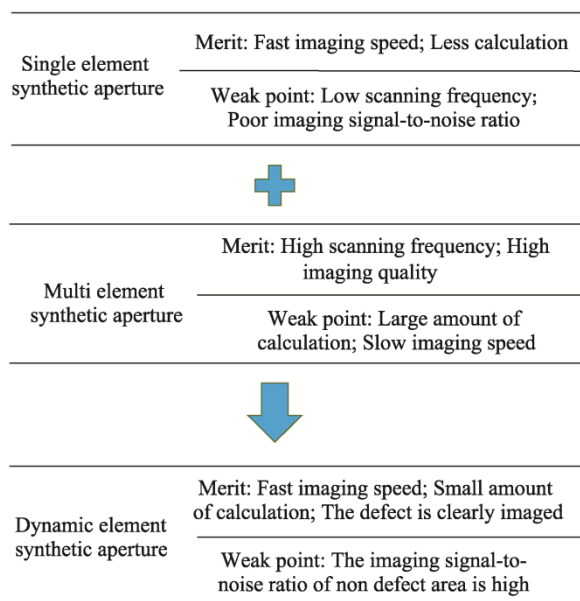


图 3 动态阵元的演变

Fig. 3 Evolution of dynamic array elements

动态阵元采集数据的工作示意图,如图 4 所示:通过在 Acquire 软件中的软件工具开发包(SDK)进行二次开发,编写动态阵元采集方法的程序。

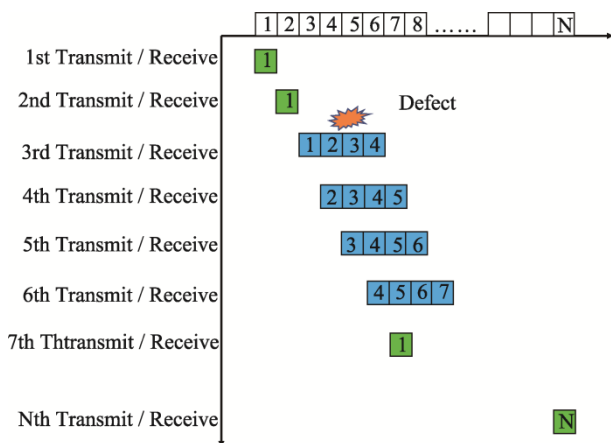


图 4 动态阵元的工作模式

Fig. 4 Working mode of dynamic array element

1.3 二维图像的预处理

因受超声检测设备的固有因素影响,在超声成像过程中会形成斑点噪声、内部电路产生的各种热噪声和周围设备的干扰噪声等会使得超声二维图像存在信噪比低、边缘模糊等问题。虽然设备已经通过低通滤波器对噪声信号进行了一定程度上的消除,但是,这种方法对放大频器带内的噪声降噪效果不是很理想。提高图像的成像质量、边缘特征和信噪比有利于缺陷特征的分割和重构^[18]。因此,需要对采集的超声二维图像进行预处理。

平板陶瓷膜的二维图像预处理步骤为:(1)数据采集平台控制超声探头移动,获取多个位置序列的平板陶瓷膜 B 扫描图像;(2)将 B 扫描的图像转换为灰度图像,空白处用背景灰度填充消除多余边界;(3)采用中值滤波对图像进行降噪处理,对 B 扫描的图像进行降噪的目的是增强图像、抑制干扰图像和突出有用信息;(4)对降噪后的图像进行阈值分割和分割 ROI,采用 Canny 算子提取缺陷的边缘;(5)将图像凸显缺陷的边缘信息,获取只有缺陷区域的二维图像。

1.4 缺陷的三维可视化

本文三维可视化采用体绘制方法,体绘制的重建方法不仅保留了原有二维图像信息^[19],而且还可以通过剖切来生成原来没有的二维图像。基于缺陷的三维可视化流程为:(1)对经过预处理后的图像进行投影处理,将二维数据放入笛卡尔坐标系中^[20],如图 5 所示;(2)对采集的数据进行缩减处理、插值处理和进行光滑处理;(3)从三维体数据中提取等值面数据,计算等值面顶点的法向量;(4)对重建模型进行颜色的设定并添加光照条件,进而实现平板陶瓷膜缺陷的三维可视化效果。

2 实验评估

2.1 数据采集平台

探头移动装置是由电源、控制器、步进驱动、“H”型支架和 I、II、III 三根滚珠丝杠等组成。I、II 滚珠丝杠固定在两根竖直设置的支架上,“H”型支架实现对滚珠丝杠的稳定支撑,如图 6(a)所示。II 滚珠丝杠两端固定在 I、III 滚珠丝杠的滑动块上;在 II 滚珠丝杠上的滑块底端装有超声探头夹持装置,方便滚珠丝杠带动超声探头在平板陶瓷膜表面移动。与此同时,本文采用水作为耦合剂来消除探头与工件之间存在空气间隙,提高检

测的清晰度和检测精度。

M2M PANTHER 实时全聚焦 TFM 的工业在线相控阵检测仪可以进行线性扫描、切片扫描、并行拍摄、超快混合模式的相控阵，如图 6(b)所示。重建通道可以达到 128 个，最大采样频率可以达到 125 MHz，数字化深度可达到 16 K 点，最大 A 扫描范围为 65 K 点。通过 Acquire 软件中的开发包 (SDK)，可以实现用户自定义扫描。

2.2 平板陶瓷膜缺陷描述

试块样本为平板陶瓷膜，是采用碳化硅、碳化硼等无机材料，混合少量的金属材料后在稀有气体的环境中烧结而成。试块的厚度为 10 mm。划痕缺陷尺寸：长 55.1 mm，宽度在 1.5 mm~3.3 mm 之间，深度在 0.8 mm~2.9 mm 之间，缺陷如图 7(a)所示。孔洞缺陷尺寸：深度为 3.3 mm，直径为 4.2 mm，缺陷如图 7(b)所示。

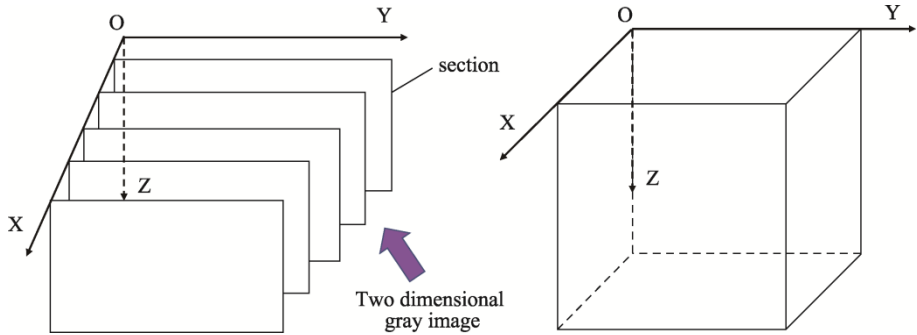


图 5 构造三维数据体示意图
Fig. 5 Schematic diagram for constructing a 3D data body

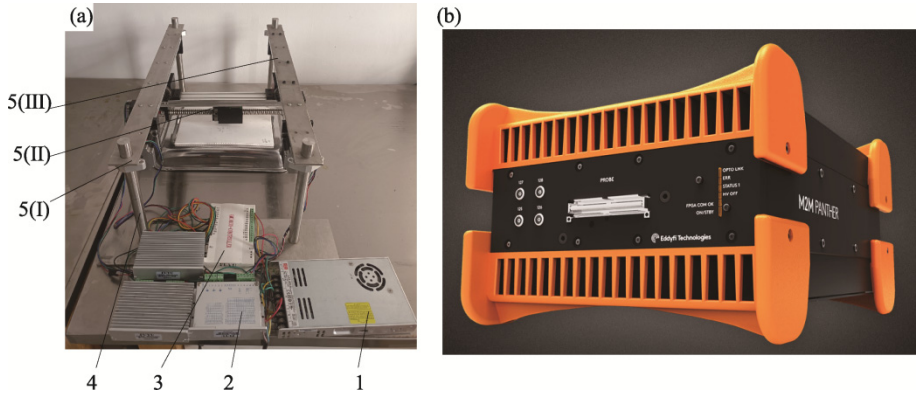


图 6 超声采集装置：(a)探头移动装置；(b)超声相控阵检测仪
1-电源；2-步驱动；3-控制器；4-H 型支架；5 (I、II、III)-滚珠丝杠
Fig. 6 Ultrasound acquisition device: (a) probe moving device and (b) ultrasonic phased array detector
(1-power supply, 2-step drive, 3-controller, 4-H support, 5 (I, II, III)-ball screw)

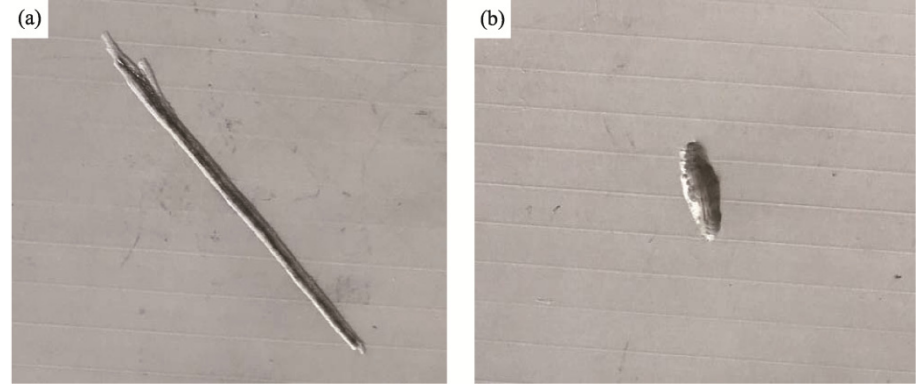


图 7 陶瓷膜缺陷图像：(a)划痕缺陷；(b)孔洞缺陷
Fig. 7 Images of the defects in ceramic film: (a) scratch defect and (b) void defect

2.3 动态阵元合成孔径成像

检测平板陶瓷膜试块时, 沿着缺陷的方向用机械扫描, 垂直于缺陷方向用电子扫描^[21]。扫描平板陶瓷膜试块时, 通过探头移动装置将超声探头在平板陶瓷膜表面进行移动, 可以获取多个位置序列的 B 扫描图像。通过将使用动态阵元采集方法采集的超声 B 扫描图像进行图像预处理, 最终得到只含缺陷的部位图像, 如图 8 所示。

2.4 三维可视化

图像预处理是通过选定合适的阈值对动态阵元缺陷成像图进行灰度化处理, 提取图像中的缺陷轮廓信息, 得到各个切片层截面内的缺陷轮廓^[22]。三维重建时, 需要根据图像在空间中的实际映射

关系进行等值面等处理, 等值面算法处理的图像为预处理之后的图像, 等值面即为在空间中所有具有相同灰度值大小的点的集合。在该过程中要求明确各切片层图像的灰度值大小, 为此需要对图像进行灰度变换等处理^[23]。

由数据采集平台采集的 17 张 B 扫描图像经过预处理之后, 采用基于序列图像的重建方法。通过分析序列图像间的关联信息, 采用插值等方法补充序列图像间丢失的数据, 按照各点在空间的先后顺序和观察方向进行投影到图像平面, 从而可得到三维图像, 进而实现平板陶瓷膜缺陷的三维可视化效果, 划痕与孔洞的重建效果分别如图 9、图 10 所示。

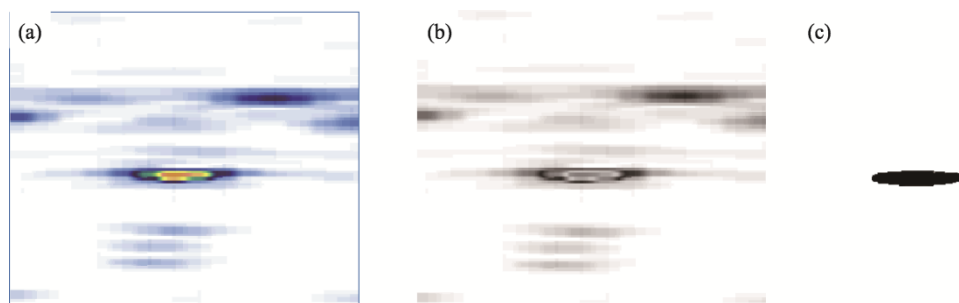


图 8 动态阵元缺陷成像图以及预处理: (a) 动态阵元 B 扫描图像; (b) 灰度化图像; (c) 缺陷的图像
Fig. 8 Dynamic array defect imaging map and pre-processing: (a) B scan image of dynamic array element, (b) grayscale image and (c) image of defect

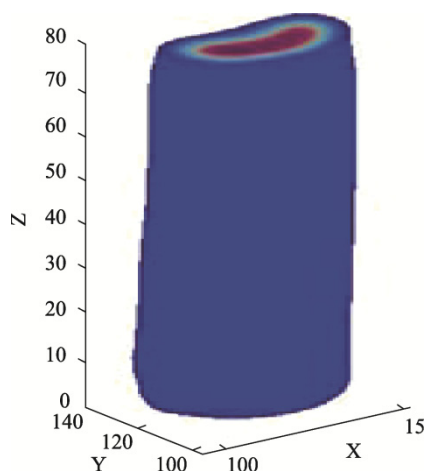


图 9 划痕的三维重建图像
Fig. 9 3D reconstruction image of the scratch

划痕重建的具体参数如表 1 所示, 通过对比横向位置、纵向位置以及深度重建划痕缺陷的三维重建值与真实值的差值, 可以清晰地发现重建的相对误差在 1.27%~2.70%之间, 划痕的相对误差较小。说明本文提出的动态阵元合成孔径聚焦成像的方法, 能符合实际工况检测的要求。

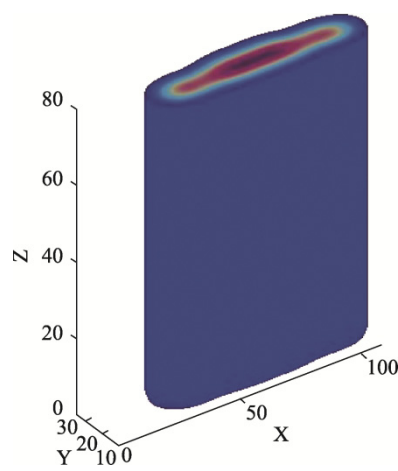


图 10 孔洞的三维重建图像
Fig. 10 3D reconstructed image of the hole

孔洞的三维重建的具体参数如表 2 所示, 通过对比直径值和深度值孔洞缺陷的三维重建值与真实值的差值, 可以清楚地发现孔洞重建的相对误差在 2.38%~3.03%之间, 孔洞的相对误差较小。说明本文提出的动态阵元合成孔径聚焦成像的方法, 能符合实际工况检测的要求。

3 结果与讨论

为了实现平板陶瓷膜缺陷的三维可视化显示及其评估，本文提出基于动态阵元合成孔径聚焦超声成像的方法。一方面为了降低采集数据量，提出了动态阵元的采集方法，另一方面实现了缺陷的三维可视化，划痕缺陷的三维模型，如图 9 所示。裂纹呈现扁平形状，符合实际缺陷的三维情况。孔洞缺陷的三维模型，如图 10 所示。重建出的缺陷模型具有客观性和直观性强、易于理解，为后续的产品生产流程提供依据。下面就重建速度和重建精度这两个方面对三维重建出的模型进行评估。

3.1 重建速度

不同方法成像时间的对比信息如表 3 所示，

在重建时间上，本文所提出的方法是介于单阵元合成孔径和多阵元合成孔径成像之间。在划痕重建时间上，本文重建方法相比多阵元合成孔径成像节省的时间为 29.94%。在孔洞的重建时间上，本文重建方法相比多阵元合成孔径成像节省的时间为 23.20%。

3.2 重建精度

划痕重建精度的比较信息如表 4 所示，多阵元合成孔径的方法和本文方法的划痕重建精度都高于单阵元合成孔径的方法。本文方法的划痕重建精度高于单阵元合成孔径的精度为 4.17%~8.11%之间，本文方法的划痕重建精度是单阵元合成孔径的 3 倍。

表 1 划痕缺陷测量值
Tab. 1 Measured values of scratch defects

Compare Items	Measured value in image/mm	Actual defect position value/mm	Relative error/%
Lateral position	55.8	55.1	1.27
Longitudinal position	1.7–3.2	1.5–3.3	2.08
Depth	0.7–3.1	0.8–2.9	2.70

表 2 孔洞缺陷测量值
Tab. 2 Measured values of hole defects

Compare items	Measured value in image/mm	Actual defect position value/mm	Relative error/%
Diameter value	4.1	4.2	2.38
Depth value	3.4	3.3	3.03

表 3 单阵元、多阵元合成孔径和本文方法的三维成像时间的比较
Tab. 3 3D imaging times for single-array, multi-array synthetic aperture and the method in this work

Defect type	Total time from acquiring B-scan image to 3D reconstruction/s		
	Single element synthetic aperture method	Multi element synthetic aperture method	Methods in this work
Scratch	10.6	18.1	13.9
hole	9.8	17.7	12.4

表 4 单阵元、多阵元合成孔径和本文方法的划痕重建精度的比较
Tab. 4 Scratch reconstruction accuracies for single-array, multi-array synthetic aperture and the method in this work

Compare items	True value/mm	Single element synthetic aperture		Multi element synthetic aperture		Methods in this work	
		Measured value/mm	Relative error/%	Measured value/mm	Relative error/%	Measured value/mm	Relative error/%
Lateral position	55.1	58.3	5.63	55.7	1.08	55.8	1.27
Longitudinal position	1.5–3.3	1.1–3.6	6.25	1.5–3.4	2.08	1.7–3.2	2.08
Depth position	0.8–2.9	1–3.2	10.81	0.9–3.0	5.40	0.7–3.1	2.70

表 5 单阵元、多阵元合成孔径和本文方法的孔洞重建精度的比较

Tab. 5 Hole reconstruction accuracies for single-array, multi-array synthetic aperture and the method in work

Compare items	True value/mm	Single element synthetic aperture		Multi element synthetic aperture		Methods in this work	
		Measured value/mm	Relative error/%	Measured value/mm	Relative error/%	Measured value/mm	Measured value/mm
Diameter Value	4.2	3.5	16.66	4.3	2.38	4.1	2.38
Depth Position	3.3	2.7	18.18	3.4	3.03	3.4	3.03

表 6 超声重建的相对误差的比较

Tab. 6 Relative errors of ultrasound reconstruction

Reconstruction method	Compare items	Maximum relative error/%	Minimum relative error/%	Average error/%
3D ultrasonic reconstruction of contour node [24]	Strip shape defect	19.10	0.14	7.21
	Spherical shape error	10.60	0.20	4.04
	Cylindrical defect	3.80	0.19	1.43
Methods in this paper	Strip shape defect	2.70	1.27	2.02
	Cylindrical defect	3.03	2.38	2.71

孔洞重建精度的比较信息如表 5 所示。多阵元合成孔径的方法和本文方法的孔洞重建精度都高于单阵元合成孔径的方法, 本文方法的孔洞重建精度高于单阵元合成孔径的精度为 13.78%~15.15% 之间, 本文的孔洞重建精度是单阵元合成孔径的 6 倍。

不同方法的相对误差对比信息如表 6 所示, 本文提出的动态阵元合成孔径的方法在最大相对误差值方面相比于其他的方法相对较好, 虽然最小相对误差值较大, 但是整体的重建误差较小, 重建精度相对误差值较为稳定。

4 结 论

针对平板陶瓷膜内部缺陷可视效果差的问题和降低超声三维重建运算数据量等问题, 本文提出了一种基于动态阵元合成孔径聚焦超声成像的平板陶瓷膜内部缺陷三维重建方法。通过在缺陷区域使用多阵元合成孔径来提高成像的清晰度, 在非缺陷区域使用单阵元合成孔径来提高成像速度和降低数据量。实现结果表明: 本文重建方法相比多阵元节省的时间为 30.22%, 划痕重建精度是单阵元合成孔径的 3 倍, 孔洞重建精度是单阵元合成孔径的 6 倍。划痕的重建精度在 1.27%~2.70% 之间。孔洞的重建精度在 2.38%~3.03% 之间。在缺陷重建时间上节省时间在 23.20%~29.94% 之间。方法能客观和直观地反映出平板陶

瓷膜内部缺陷的形态分布和尺寸大小。通过使用基于动态阵元合成孔径聚焦超声成像的平板陶瓷膜内部缺陷三维重建方法可以实现对平板陶瓷膜内部缺陷的三维检测, 具有良好的适应性、经济性, 在无损检测领域有重要的意义。

参考文献:

- [1] ASIF M B, ZHANG Z H. Ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A critical review of performance, full-scale applications, membrane fouling and prospects [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 418: 129481.
- [2] EWIS D, ISMAIL N A, HAFIZ M A, et al. Nanoparticles functionalized ceramic membranes: Fabrication, surface modification, and performance [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(10): 12256–12281.
- [3] CUI X M, WANG Z, KANG Y H, et al. A robust indicator based on SVD for flaw feature detection from noisy ultrasonic signals [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055009.
- [4] DAVIES J, CAWLEY P. The application of synthetic focusing for imaging crack-like defects in pipelines using guided waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2009, 56(4): 759–771.
- [5] KITAZAWA S, KONO N, BABA A, et al. Three-dimensional visualization and evaluation techniques for volumetrically scanned data of ultrasonic phased arrays [J]. Insight, 2010, 52(4): 201–205.
- [6] 杜英华, 祁欣. 多阵元合成孔径聚焦超声成像研究[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 12(3): 162–166.

DU Y H, QI X. Nanotechnology and Precision

- Engineering, 2014, 12(3): 162–166.
- [7] SCHICKERT M. Three-dimensional ultrasonic imaging of concrete elements using different SAFT data acquisition and processing schemes [J]. American Institute of Physics, 2015, 1650(1): 104–113.
- [8] SUN J, WANG N, DING Y, et al. Three-dimensional reconstruction of ceramic membrane with internal defects based on ultrasound imaging technique applying triangular matrix-synthetic aperture focusing [J]. Ceramics International, 2020, 46(15): 23397–23405.
- [9] 张杰, 莫润阳. 超声相控阵全聚焦成像算法比较分析 [J]. 声学技术, 2021, 40(1): 71–76.
ZHANG J, MO R Y. Acoustic Technology, 2021, 40(1): 71–76.
- [10] NI C Y, CHEN C, YING K N, et al. Non-destructive laser-ultrasonic synthetic aperture focusing technique (SAFT) for 3D visualization of defects [J]. Photoacoustics, 2021, 22: 100248.
- [11] NANEKAR P, JOTHILAKSHMI N, KUMAR A, et al. Characterization of planar flaws by an integrated approach using phased array and synthetic aperture focusing technique [J]. Measurement, 2019, 147: 106845.
- [12] NOWICKI A, GAMBIN B. Ultrasonic synthetic apertures: Review [J]. Archives of Acoustics, 2014, 39(4): 427–438.
- [13] SELIM H, TRULL J, PRIETO M D, et al. Fully noncontact hybrid NDT for 3D defect reconstruction using SAFT algorithm and 2D apodization window [J]. Sensors, 2019, 19(9): 2138.
- [14] JOOST N, FOKKEMA J T, PETER M B, et al. Ultrasonic synthetic-aperture interface imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2019, 66(5): 888–897.
- [15] GUAN X F, HE J J, RASSELKOR E M. A time-domain synthetic aperture ultrasound imaging method for material flaw quantification with validations on small-scale artificial and natural flaws [J]. Ultrasonics, 2015, 56: 487–496.
- [16] GUAN X F, ZHANG J D, ZHOU S H, et al. Probabilistic modeling and sizing of embedded flaws in ultrasonic non-destructive inspections for fatigue damage prognostics and structural integrity assessment [J]. NDT&E International, 2014, 61: 1–9.
- [17] DAHER N M, YEN J T. 2-D array for 3-D ultrasound imaging using synthetic aperture techniques [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2006, 53(5): 912–924.
- [18] SCHMITZ V, MÜLLER W. Synthetic aperture focusing technique for industrial applications [J]. Springer Netherlands, 2004, 27: 57–68.
- [19] STEEN E, OLSAD B. Volume rendering of 3D medical ultrasound data using direct feature mapping [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1994, 13(3): 517–525.
- [20] 孙昌立, 刚铁, 刘斌, 等. 基于超声相控阵的 FSW 缺陷三维可视化[J]. 焊接学报, 2015, 36(4): 47–50, 115.
SUN C L, GANG T, LIU B, et al. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 47–50, 115.
- [21] BRIZUELA J, CAMACHO J, COSARINSKY G, et al. Improving elevation resolution in phased-array inspections for NDT [J]. NDT&E International, 2018, 101: 1–16.
- [22] QIN L, ZHANG S Z, SONG Y F, et al. 3D ultrasonic imaging based on synthetic aperture focusing technique and space-dependent threshold for detecting submillimeter flaws in strongly scattering metallic materials [J]. NDT&E International, 2021, 124: 102523.
- [23] 施克仁, 杨平, 陈斌. 基于二维阵列的相控阵超声三维成像实现[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(11): 1805–1808.
SHI K R, YANG P, CHEN B. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(11): 1805–1808.
- [24] YAN B, CHEN L, WU C K, et al. 3D ultrasonic reconstruction of contour node represented voids and cracks [J]. NDT&E International, 2021, 117: 102382.

(编辑 王三海)