第 42 卷　第 1 期
2021 年 1 月

仪　器　仪　表　学　报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 42 No. 1
Jan. 2021

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007019

基于全模式全聚焦方法的裂纹超声成像定量检测*

金士杰[1],刘晨飞[1],史思琪[1],廖静瑜[2],林　莉[1]
(1. 大连理工大学无损检测研究所　大连　116085; 2. 中国核工业二三建设有限公司　北京　101300)

摘　要:利用超声成像方法对关注区域成像,对获取缺陷形状、尺度和取向等特征具有重要意义。考虑了 21 种不同声束路径的模式波,复合叠加各重建点能量最强信号,提出全模式全聚焦方法(FTFM)。利用一组探头楔块,通过一次信号采集实现未知裂纹的轮廓重建与定量检测。针对厚度 40 mm 碳钢中长度 4 mm,中心深度 25 mm,取向角度分别为 0°、±20°、±50°和±80°的裂纹,采用 64 阵元、中心频率 5 MHz 线阵探头配合 45°纵波楔块实施全矩阵捕捉(FMC)和 FTFM 成像,仿真和实验均重建了裂纹完整轮廓,裂纹长度、取向和中心深度定量误差分别不超过 0.60 mm、2.39°和 0.73 mm。最后,为保证 FTFM 成像质量,检测时应合理选择相控阵探头参数,并移动探头至最佳位置处采集 FMC 信号。

关键词: 全模式全聚焦方法;裂纹;定量检测;全矩阵捕捉
中图分类号: TB553　TH142　　**文献标识码**: A　　**国家标准学科分类代码**: 510.40

Quantitative crack detection by ultrasonic imaging with the full-mode total focusing method

Jin Shijie[1], Liu Chenfei[1], Shi Siqi[1], Liao Jingyu[2], Lin Li[1]
(*1. NDT & E Laboratory, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;*
2. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: The reconstruction of the region of interest (ROI) by ultrasonic imaging is meaningful to obtain defect features, e.g., shape, dimension and orientation. In this study, the full-mode total focusing method (FTFM) is proposed by using the strongest response signal among 21 views with different ray paths at each reconstructed point. The profile reconstruction and quantitative detection of unknown cracks are realized by signal acquisition with a set of phased array (PA) probe and wedge. A number of 4 mm length cracks with 25 mm central depth and different angles, e.g., 0°, ±20°, ±50° and ±80°, are designed in the 40 mm thickness carbon steel specimens. Full matrix capture (FMC) is performed by using 45° wedge and 64-element linear array probe with a central frequency of 5 MHz to obtain FTFM images. The crack profiles are reconstructed intuitively by simulation and practical experiments. Measurement errors of crack length, orientation angle and central depth are no more than 0.60 mm, 2.39° and 0.73 mm, respectively. Finally, appropriate parameters and position for PA probe are beneficial to achieve optimal FTFM image.

Keywords: full-mode total focusing method; crack; quantitative detection; full matrix capture

0　引　　言

工程构件在加工和使用过程中易产生裂纹等面积型缺陷,尖锐缺口引起应力集中,造成材料强度降低,严重威胁设备安全运行[1]。超声检测具有穿透力强、灵敏度高、定量精度高等优点,被广泛应用于裂纹检测[2-3]。相控阵超声检测技术(phased array ultrasonic testing, PAUT)通过计算机控制各阵元声束延迟时间,能够提高聚焦检测能量,进一步提升缺陷定位、定量精度[4-5]。然而,PAUT 仅能接收裂纹端点散射波,难以表征裂纹完整轮廓,可能造成缺陷类型和数量误判[6]。

收稿日期:2020-10-20　　Received Date: 2020-10-20
*基金项目:国家重点研发项目(2019YFA0709003)、国家自然科学基金项目(51905079)、辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1902082)、大连市科技创新基金项目(2020JJ26GX041)、中央高校基本科研项目(DUT20ZD204)资助

针对上述问题,国内外学者结合成像处理技术重建裂纹轮廓,实现取向和尺度等特征的准确辨识。逆时偏移方法(reverse time migration, RTM)[7]以时间一致性为理论基础,通过对逆传播信号与正传播信号进行相关性运算,实现缺陷重建,但方法适用性受噪声影响较大,且计算效率偏低。合成孔径聚焦技术和全聚焦方法(total focusing method, TFM)等延时叠加类算法通过逐点聚焦提升成像分辨力和信噪比[8-9]。当裂纹取向与主声束方向接近垂直时,可以给出完整轮廓,否则成像结果发生间断[10-11]。矢量全聚焦算法通过合成各子阵列的方向矢量实现小尺寸裂纹取向识别,随着裂纹尺寸增大,裂纹端点会发生分离[12]。实际检测过程中,探头接收到的缺陷信号除了来自声束与缺陷的直接作用外,还包含经试块底部反射至缺陷再返回探头的信号,以及经试块底部反射至缺陷再沿原路径返回的信号,上述声束传播路径分别被称为直接、半跨和全跨模式[13-14]。对于特定取向裂纹,选用合适模式结合 TFM 能够重建裂纹轮廓,且具有较高定量精度[15-16]。在此基础上,Sy 等通过计算反射波弹性场,预测已知取向、深度裂纹对应不同模式波的灵敏度,从而选择最佳模式波重建裂纹轮廓[17]。然而,受楔块角度与裂纹取向相对关系影响,每种模式波可表征的裂纹取向范围有限[18]。特别是待测缺陷取向未知时,难以明确成像所用模式波,导致检测效率和可靠性降低。

本文同时考虑直接、半跨和全跨模式,提出基于全矩阵捕捉(full matrix capture, FMC)的全模式全聚焦成像方法(full-mode total focusing method, FTFM)。随后,通过仿真和实验,利用一组相控阵探头和楔块对不同取向裂纹实施 FTFM 成像和定量检测,验证方法可行性。最后,讨论了探头与缺陷的相对位置,以及相控阵探头参数对裂纹轮廓重建的影响。

1 全模式全聚焦方法

FMC 是实现 TFM 成像的基础,即从相控阵探头第一阵元开始依次激励信号,并使用全部阵元进行接收,重复该过程直到最后一个阵元激励信号被接收。对于一个阵元数为 n 的相控阵探头,经过 FMC 采集后得到的 A 扫描信号数量为 n^2[19]。利用 TFM 成像时,根据分辨率需求,将被检区域划分成若干个网格,每个网格点就是一个重建点。针对每个重建点,对阵列接收信号做希尔伯特变换并进行延时叠加处理,即可实现逐点聚焦成像。

常规 TFM 仅利用了 A 扫描信号中的直接模式进行成像检测,如图 1(a)所示。同时,入射波会在试块底面发生反射,产生半跨和全跨模式声波,如图 1(b)和 1(c)所示。由于超声波在表界面(包括楔块与试块耦合界面,试块底面和缺陷表面)处发生波型转换产生纵波和横波,结合上述 3 类模式可得不同模式波。仅考虑一次底面反射时,被检试块内声束的发射-接收路径来自 L、T、LL、LT、TL 和 TT(L 表示纵波,T 表示横波)等 6 种模式波的组合[20]。因此,接收信号理论上包括 3 类模式 21 种模式波,即直接模式 3 种、半跨模式 8 种和全跨模式 10 种。

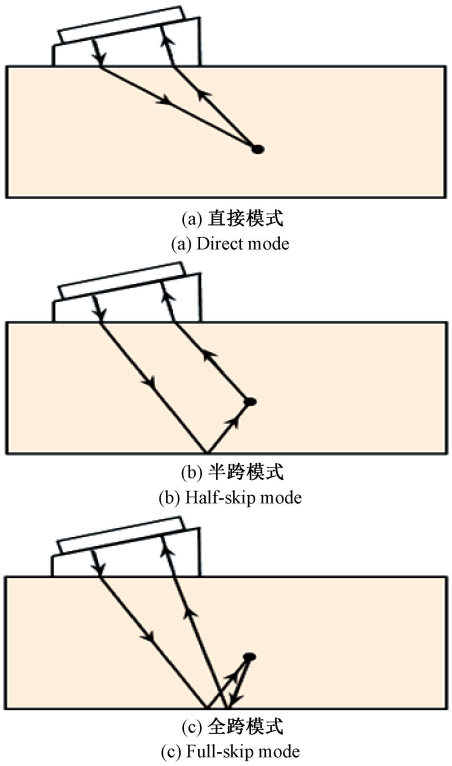


图 1 不同模式声束传播路径

Fig. 1 Ray paths in different modes

以半跨模式 LLT 为例,图 2 所示为相控阵探头和斜楔块组合的声束传播路径示意图。点 P 为任意重建点,定义其坐标为(x_0, y_0),发射阵元和接收阵元的坐标分别为(x_i, y_i)和(x_j, y_j)。此外,试块厚度为 h,楔块纵波声速为 c_{1L},试块纵波和横波声速分别为 c_{2L} 和 c_{2T}。

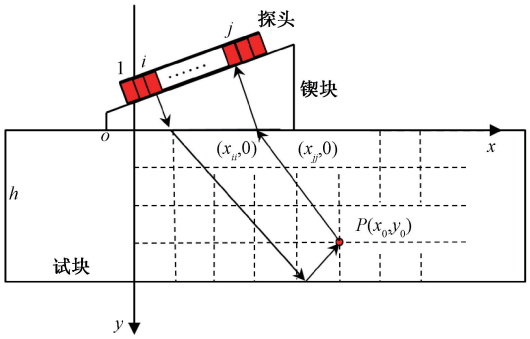


图 2 半跨模式 LLT 声束传播路径

Fig. 2 Ray paths in LLT view

基于费马定理,入射信号和接收信号在楔块和试块界面处的折射点横坐标 x_{ii} 与 x_{jj} 可根据式(1)给出:

$$\frac{\partial t_{ip}(x_0,y_0)}{\partial x_{ii}}=\frac{\partial t_{pj}(x_0,y_0)}{\partial x_{jj}}=0 \tag{1}$$

式中:$t_{ip}(x_0,\ y_0)$ 表示第 i 个阵元发射声波传播到点 P 所用时间;$t_{pj}(x_0,\ y_0)$ 表示点 P 散射回波到达第 j 个阵元所用时间。传播时间 $t_{ip}(x_0,\ y_0)$ 与 $t_{pj}(x_0,\ y_0)$ 可分别由式(2)和(3)计算得到:

$$t_{ip}(x_0,y_0)=\frac{\sqrt{(x_i-x_{ii})^2+y_i^2}}{c_{1L}}+\frac{\sqrt{(x_{ii}-x_0)^2+(2h-y_0)^2}}{c_{2L}} \tag{2}$$

$$t_{pj}(x_0,y_0)=\frac{\sqrt{(x_j-x_{jj})^2+y_j^2}}{c_{1L}}+\frac{\sqrt{(x_{jj}-x_0)^2+y_0^2}}{c_{2T}} \tag{3}$$

根据延时叠加成像原理,LLT 模式下重建点 P 的聚焦幅值为:

$$I_{\mathrm{LLT}}(x_0,y_0)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}A_{\mathrm{LLT}-ij}(t_{ip}(x_0,y_0)+t_{pj}(x_0,y_0)) \tag{4}$$

式中:$A_{\mathrm{LLT-ij}}$ 为 LLT 模式下第 i 个阵元发射、第 j 个阵元接收的 A 扫描信号。同理,利用不同的模式波成像时,仅式(4)中 $t_{ip}(x_0,\ y_0)$ 和 $t_{pj}(x_0,\ y_0)$ 的具体表达式因声束传播路径不同而有所差异。

考虑到声束指向性,每种模式波的裂纹取向表征范围有限[18]。为实现不同取向裂纹的轮廓重建,本文利用全部 21 种模式波实施 TFM 成像,并将该方法称为 FTFM。

利用 FTFM 成像时,分别得到 21 种模式波在被检区域内任意重建点 P 处的信号幅值。然后,针对每一个重建点,从上述 21 种模式波中筛选能量最强信号,使得能量较强的裂纹面信息得到保留,能量较弱的杂波信号与伪显示被抑制。最后,通过逐点实施延时叠加处理,可实现不同取向裂纹的轮廓重建。

需要指出的是,相控阵探头阵元激励产生的各种模式波中,直接模式波传播声程最短且能量较强,其产生的裂纹端点散射波甚至与半跨和全跨模式波幅值相当,易保留在最终的 FTFM 图像中,影响裂纹轮廓重建效果[20-21]。因此,可结合-6 dB 法定量思想,对 LL、TT 和 LT 3 种直接模式波乘以系数 0.5 后再进行能量筛选。一方面,对适于半跨或全跨模式表征的裂纹,在-6 dB 范围内可以抑制直接模式干扰;另一方面,对适于直接模式表征的裂纹,裂纹表面反射波能量更强,其与半跨和全跨模式引起的端点散射波幅值差远超 6 dB,加权成像带来的衰减不足以影响裂纹轮廓重建。此时,每个图像重建点 $(x_0,\ y_0)$ 对应的幅值 $I(x_0,\ y_0)$ 为:

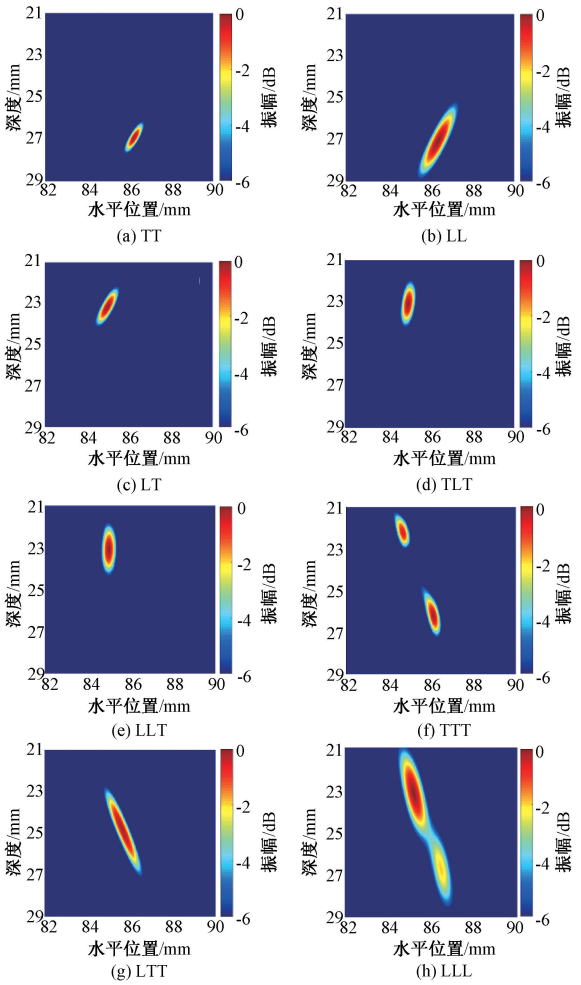
$$I(x_0,y_0)=\max\begin{pmatrix}I_M(x_0,y_0),0.5\cdot I_{\mathrm{LL}}(x_0,y_0),\\0.5\cdot I_{\mathrm{TT}}(x_0,y_0),0.5\cdot I_{\mathrm{LT}}(x_0,y_0)\end{pmatrix} \tag{5}$$

式中:M 表示 LL、TT 和 LT 3 种模式波之外的 18 种模式波。

利用式(5)逐点计算被检区域各重建点,得到 FTFM 图像。读取成像区域内的峰值坐标点,利用-6 dB 法可获得不同取向裂纹的深度、尺寸与取向角度信息。

2　仿真模拟

定义垂直方向裂纹为 0°,顺时针方向为正方向。利用 CIVA 仿真软件建立厚度 40 mm 碳钢模型,设置中心深度 25 mm、长度 4 mm,取向角度分别为 0°、±20°、±50°和±80°的埋藏型模拟裂纹。碳钢的纵波和横波声速分别设置为 5 900 m/s 和 3 230 m/s。选择中心频率 5 MHz 的 64 阵元线阵探头(阵元尺寸 0.52 mm,阵元中心间距 0.60 mm),匹配 45°纵波楔块采集全矩阵数据。以取向角度-20°裂纹为例,图 3 所示为关注区域-6 dB 显示下的 21 种模式波成像结果。



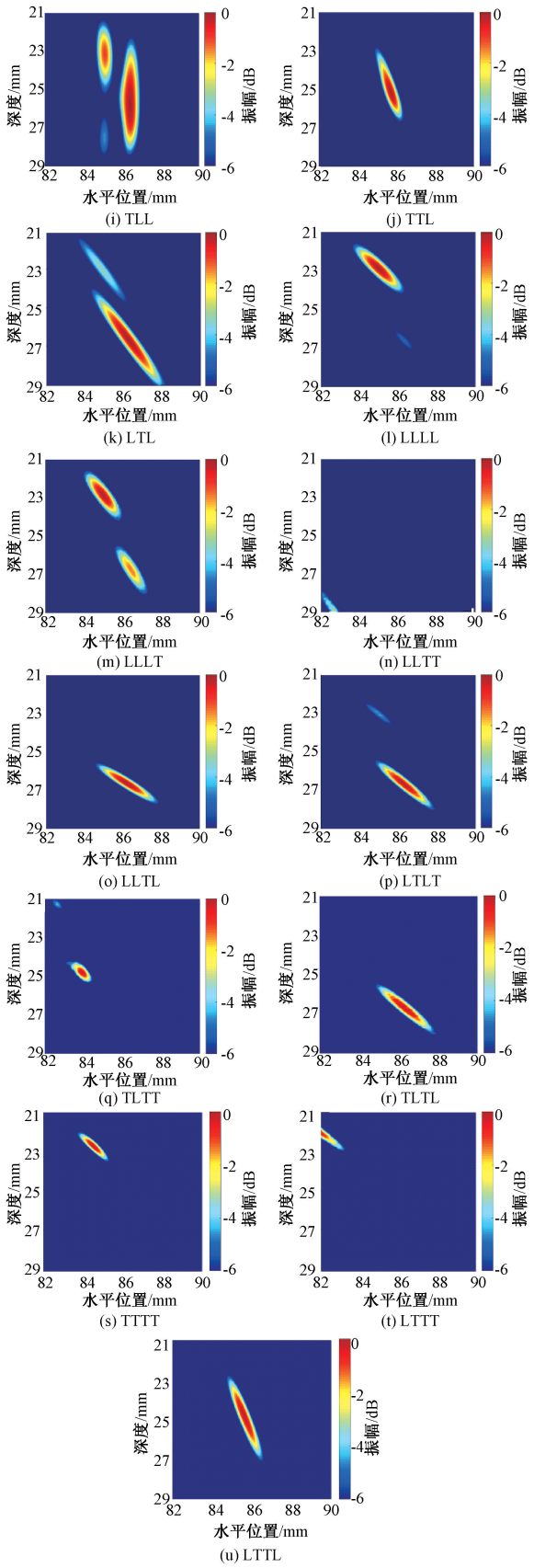


图 3 不同模式下的-20°裂纹仿真成像结果

Fig. 3 Simulated images of the crack at -20° in different views

显然,不同模式波的成像结果存在较大差异,当裂纹信息未知时,难以准确判断区域内缺陷真实信息。与之相比,图 4(c)所示为同时结合上述 21 种模式波的 FTFM 成像结果,准确、直观地重建了裂纹轮廓且无伪像存在。同理,FTFM 可以利用 21 种模式波复合得到其他取向裂纹的重建图像,如图 4 所示。

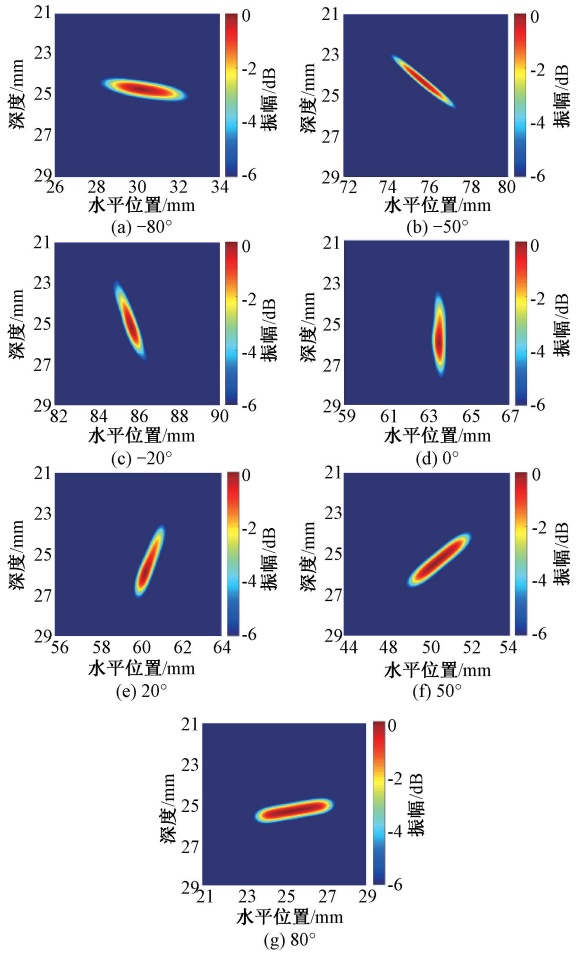


图 4 不同取向裂纹的 FTFM 仿真成像结果

Fig. 4 Simulated FTFM images of the cracks with different orientation angles

由图 4 可知,各角度裂纹成像结果完整,与预设裂纹基本一致。使用-6 dB 法进行裂纹长度、取向角度和中心深度定量,测量误差分别不超过 0.37 mm、2.39°和 0.73 mm,结果如图 5 所示。因此,FTFM 利用一组探头与楔块实现了不同取向裂纹的轮廓重建,且定量误差较小。

3 实 验

参考仿真模型,在厚度 40 mm 碳钢块中加工长度 4 mm、中心深度 25 mm、取向角度分别为 0°、20°、50°和

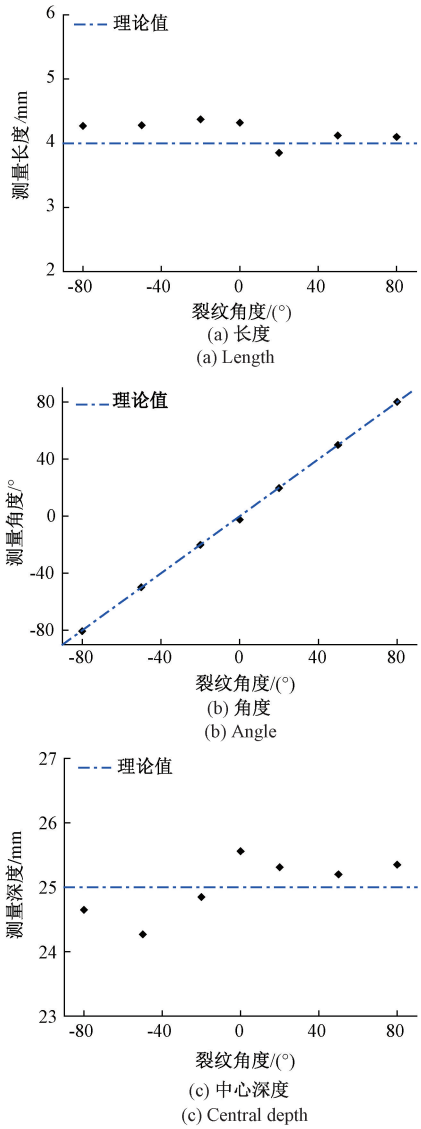


图 5　不同取向裂纹的 FTFM 仿真定量检测结果

Fig. 5　Simulated FTFM measurement results of the cracks with different orientation angles

80°的人工槽模拟裂纹,如图 6 所示。选用中心频率 5 MHz、64 阵元相控阵探头与 45°纵波楔块,从人工槽两侧分别采集 FMC 数据,以实现正、负取向槽的成像检测。

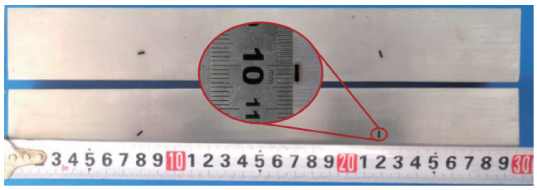


图 6　加工不同取向人工槽的碳钢试块

Fig. 6　Carbon steel specimens containing artificial slots with different orientation angles

图 7 给出不同人工槽的 FTFM 成像结果,可见缺陷轮廓基本完整呈现。利用-6 dB 法对图 7 所示缺陷进行定量,结果如图 8 所示。人工槽的长度、取向角度和中心深度定量误差分别不超过 0.60 mm、1.03°和 0.67 mm,与仿真结果一致性较好,验证了 FTFM 方法的有效性。

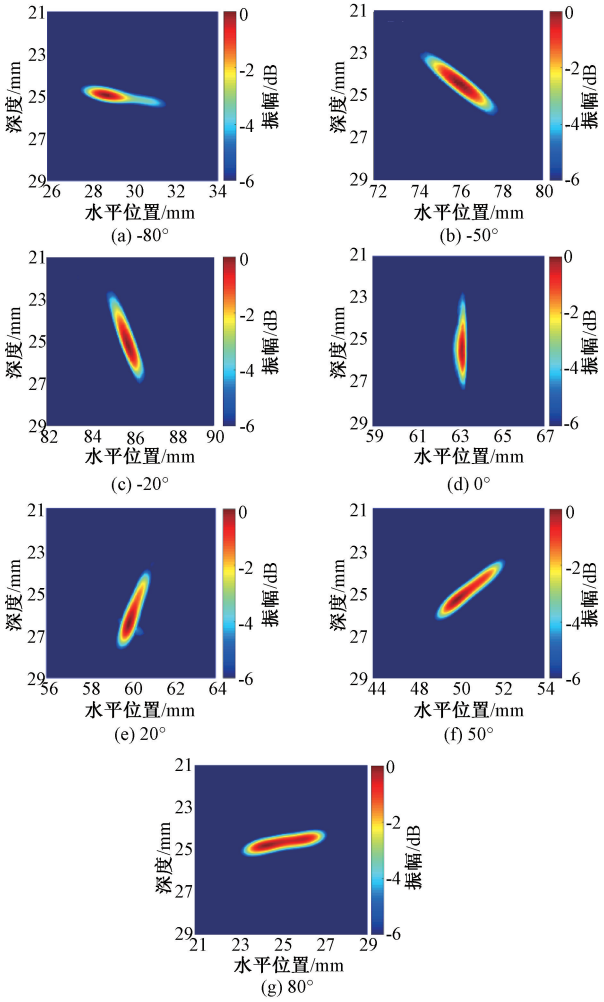
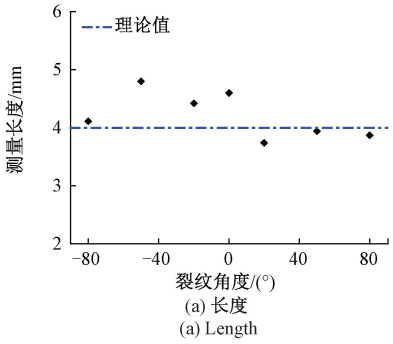


图 7　不同取向人工槽的 FTFM 实验成像结果

Fig. 7　Experimental FTFM images of the artificial slots with different orientation angles



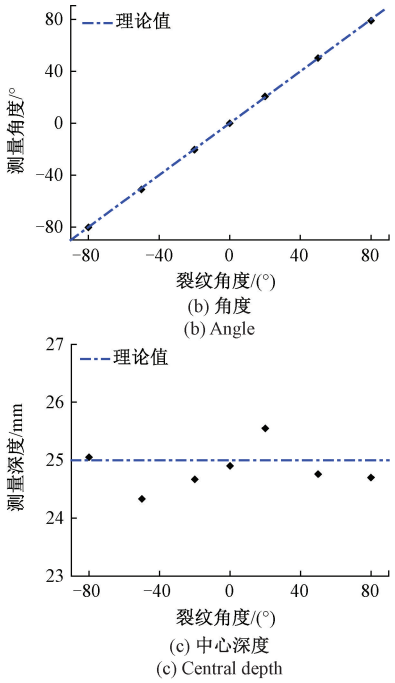


图 8 不同取向槽的 FTFM 实验定量检测结果

Fig. 8 Experimental FTFM measurement results of the cracks with different orientation angles

4 讨 论

本文为实现不同取向特征裂纹轮廓重建,从 21 种模式波中筛选能量最强信号实施 FTFM 成像。仿真和实验结果显示,该方法能够完整呈现 0°、±20°、±50°和±80°埋藏型裂纹轮廓,且定量精度较高。此外,也有文献对直接、半跨和全跨模式下的缺陷图像进行直接加和处理,并实施成像检测[22]。然而,裂纹尖端在多种模式波图像中均能得到显示,对不同模式波直接加和成像处理导致端点信号能量较裂纹面显著提高。-6 dB 成像结果中,裂纹面部分甚至可能消失,造成缺陷性质和数量误判。以实验部分-50°人工槽为例,图 9 所示为 21 种模式波直接加和成像结果。与图 7(b)对比可见,前者仅能呈现裂纹

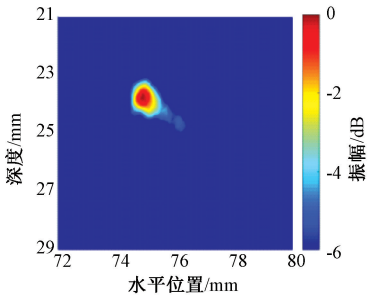


图 9 -50°人工槽加和处理实验成像结果

Fig. 9 Experimental image of -50° artificial slot by naive sum

上端图像,而后者可以完整重建裂纹轮廓,反映了 FTFM 方法的优越性。

FTFM 主要利用对裂纹取向更敏感的表面反射波成像,裂纹轮廓重建质量主要取决于接收到的表面反射信号能量强弱,这与探头、缺陷之间相对位置直接相关。FMC 采集过程中,不断移动探头能够识别来自不同模式波的多个缺陷信号,但裂纹轮廓信息主要存在于与裂纹面近似垂直的模式波中。当裂纹处于该模式波主声束范围内时,回波能量最强,FTFM 处理后能够抑制其它较弱的模式波信号,裂纹轮廓重建效果最佳。当待测裂纹偏离主声束范围时,轮廓重建质量下降。以 80°人工槽为例,图 10 所示为相控阵探头偏离最佳位置 10 mm 和 15 mm 时的 FTFM 实验成像结果。与图 7(g)相比,随着探头偏离位置增加,缺陷近探头端回波能量明显强于远端,轮廓重建图像愈加不完整。

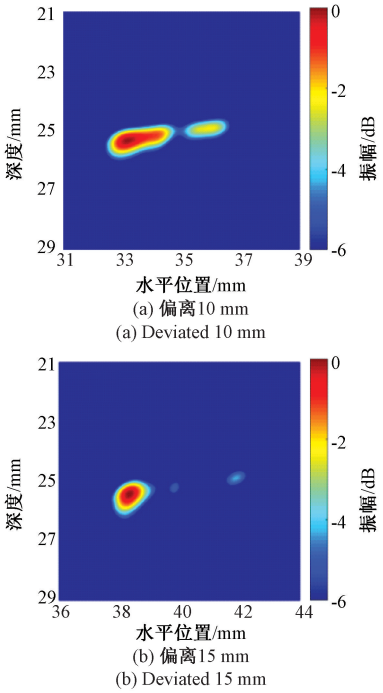


图 10 相控阵探头偏离最佳位置时的 80°人工槽 FTFM 实验成像结果

Fig. 10 Experimental FTFM images of 80° artificial slot by PA probe deviated from the optimal position

调整探头与缺陷的相对位置,一定程度上能够获得能量较强的裂纹面反射信号,但不能保证所得信号含有缺陷完整信息。增加成像所用阵元数量能够扩大空间中信号采集范围,使得 FMC 数据中包含更多来自缺陷表面的反射信号并改进成像质量。以图 6 中的-80°人工槽为例,采用 32 阵元、5 MHz 探头配合 45°纵波楔块进行 FTFM 成像时,结果如图 11 所示。对比图 7(g)可知,阵

元减少导致用于 FTFM 成像的有用信息减少,缺陷轮廓重建不完整。实际检测中,阵元数量选择以声束范围恰好覆盖缺陷为宜,过少成像不完整,过多则增加运算量,降低成像效率,且对重建效果无明显改善[23]。此外,阵元尺寸和中心间距增大也会扩大探头孔径和声束覆盖范围,增加用于 FTFM 成像的有用信息,从而提高缺陷重建质量;提高探头频率能够改善检测分辨力,有利于小尺寸缺陷轮廓重建。但是,阵元数量、尺寸、中心间距和频率等参数的选择受试件厚度、缺陷深度和材料衰减等多因素共同影响,实际检测中应合理选择参数,提高缺陷轮廓重建质量。

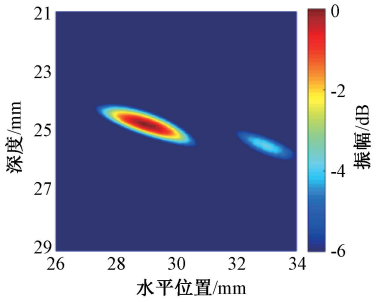


图 11　-80°人工槽的 32 阵元探头 FTFM 实验成像结果

Fig. 11　Experimental FTFM image of -80° artificial slot with 32-element linear array probe

5　结　　论

本文在传统 TFM 基础上,同时考虑了 21 种不同声束路径的模式波,针对待检区域内每个重建点进行能量最强信号筛选和复合叠加处理,提出 FTFM。仿真和实验结果表明,该方法通过一次 FMC 信号采集,利用一组探头和楔块能够表征-80°~80°裂纹,且长度、取向和中心深度定量误差分别不超过 0.60 mm、2.39°和 0.73 mm。相比于各模式波直接加和的处理方式,本文方法克服了裂纹尖端衍射波掩蔽裂纹面反射波的问题,适用于更大角度范围的裂纹表征,为工程中未知缺陷的准确评价提供了理论依据和参考。实际检测中应合理选择相控阵探头的阵元数量、尺寸、中心间距和频率等参数,并将探头移动至最佳检测位置处采集 FMC 信号,以提升 FTFM 成像质量和裂纹轮廓表征效果。

参考文献

[1] TORIBIO J, KHARIN V. Finite-deformation analysis of the crack-tip fields under cyclic loading[J]. International Journal of Solids & Structures, 2009, 46(9): 1937-1952.

[2] DWIVEDI S K, VISHWAKARMA M, SONI P A. Advances and researches on non destructive testing: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 3690-3698.

[3] 宋寿鹏,乔梦丽. 基于 NLFM Barker 编码的板材焊缝缺陷超声检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 246-254.
SONG SH P, QIAO M L. Research on ultrasonic testing of plate weld flaw based on NLFM Barker coded excitation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 246-254.

[4] 王阳,金士杰,林莉,等. 考虑余高的焊缝内部缺陷全聚焦超声成像检测[J]. 材料保护, 2019, 52(9): 61-66.
WANG Y, JIN SH J, LIN L, et al. Ultrasonic imaging testing of defects in welds having caps with total focusing method[J]. Materials Protection, 2019, 52(9): 61-66.

[5] 章东,桂杰,王晓玲,等. 等高度聚焦算法的超声相控阵检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 42-47.
ZHANG D, GUI J, WANG X L, et al. Phased array ultrasonic detection using equal height focusing algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 42-47.

[6] 杨平华,林莉,刘春伟,等. 相控阵超声检测横向分辨力实验测试及分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1384-1389.
YANG P H, LIN L, LIU CH W, et al. Experimental measurement and analysis of the lateral resolution of phased array ultrasonic detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1384-1389.

[7] RAO J, SAINI A, YANG J, et al. Ultrasonic imaging of irregularly shaped notches based on elastic reverse time migration[J]. NDT & E International, 2019, 107: 102135.

[8] 孙宝申. 合成孔径成像的应用及发展[J]. 应用声学, 2018, 37(5): 787-793.
SUN B SH. Applications and development of synthetic aperture imaging[J]. Applied Acoustics, 2018, 37(5): 787-793.

[9] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46(11): 677-680.

[10] 周进节,郑阳,张宗健,等. 缺陷散射对相控阵超声全聚焦成像的影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 454-461.
ZHOU J J, ZHENG Y, ZHANG Z J, et al. Research on the effect of defect scattering on phased array ultrasonic TFM imaging[J]. Chinese Journal of Scientific

Instrument, 2017, 38(2): 454-461.

[11] 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.

[12] 焦敬品,杨素方,何存富,等. 相位加权的矢量全聚焦超声阵列成像方法研究[J]. 声学学报, 2017, 42(4): 485-494.
JIAO J P, YANG S F, HE C F, et al. Investigation of an ultrasonic array imaging method of phase weighting vector total focusing [J]. Acta Acustica, 2017, 42(4): 485-494.

[13] RATTANASUWANNACHART N, TAKAHASHI K, MIKI C, et al. Development of 3D flaw detection system with multi-channel planar array probes and 3D SAFT algorithms development [J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 2005, 22(1): 27S-39S.

[14] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Defect detection using ultrasonic arrays: The multi-mode total focusing method[J]. NDT & E International, 2010, 43: 123-133.

[15] JIN S J, WANG C, LIU S L, et al. Simulation on qualitative detection of defects with multi-mode total focusing method [C]. 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 2018: 127-131.

[16] MERABET L, ROBERT S, PRADA C. The multi-mode plane wave imaging in the Fourier domain: Theory and applications to fast ultrasound imaging of cracks [J]. NDT & E International, 2020, 110: 102171.

[17] SY K, BRÉDIF P, IAKOVLEVA E, et al. Development of the specular echoes estimator to predict relevant modes for total focusing method imaging [J]. NDT & E International, 2018, 99: 134-140.

[18] JIN S J, LIU C F, SHI S Q, et al. Comparison of morphology characterization for regular cracks with multi-mode total focusing method[C]. 2019 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 2019: 21-25.

[19] 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.
JIA L CH, CHEN SH L, BAI ZH L, et al. Correction model and accelerating algorithm for ultrasonic total focusing method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1589-1596.

[20] ZHANG J, BARBER T, NIXON A, et al. Investigation into distinguishing between small volumetric and crack-like defects using multi-view total focusing method images[J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1806(1): 40003.

[21] BUDYN N, BEVAN R L T, ZHANG J, et al. A model for multiview ultrasonic array inspection of small two-dimensional defects [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(6): 1129-1139.

[22] HAN X L, WU W T, LI P, et al. Combination of direct, half-skip and full-skip TFM to characterize multi-faceted crack [C]. 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings(IUS), 2015: 1-4.

[23] SAINI A, FELICE M V, FAN Z, et al. Optimisation of the half-skip total focusing method (HSTFM) parameters for sizing surface-breaking cracks [J]. NDT & E International, 2020, 116: 102365.

作者简介

金士杰,2008 年于北京大学获得学士学位,2014 年于中国科学院声学研究所获得博士学位,现为大连理工大学副教授,主要研究方向为材料无损检测与评价。
E-mail: jinshijie@dlut.edu.cn

Jin Shijie received his B. Sc. degree from Peking University in 2008, and received his Ph. D. degree from the Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences in 2014. He is currently an associate professor at Dalian University of Technology. His research interests include nondestructive testing and evaluation for materials.

林莉(通信作者),1997 年于大连理工大学获得学士学位,2003 年于大连理工大学获得博士学位,现为大连理工大学教授,主要研究方向为材料无损检测与评价。
E-mail: linli@dlut.edu.cn

Lin Li (Corresponding author) received her M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Dalian University of Technology in 1997 and 2003, respectively. She is currently a professor at Dalian University of Technology. Her main research interests include nondestructive testing and evaluation for materials.