

多模式全聚焦法对焊缝内部条状缺陷的检测及定量

宋泽宇, 胡静, 莫润阳

(陕西师范大学 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119)

摘要: 研究多模式全聚焦方法对钢板对接焊缝内部不同倾斜角度缺陷的定量能力。以矩形刻槽代表焊缝内的条状缺陷, 采用有限元方法获取刻槽单频散射系数, 同时与波传播模型结合进行全矩阵数据模拟, 对倾角不同的刻槽进行仿真成像。结果表明, LL-L, TT-T, TT-L 等 3 种半跨模式可覆盖 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 倾角的缺陷, TL-LT, LL-LL, TL-TL, TT-TL, TT-LL 等 5 种全跨模式可覆盖 $10^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 倾角的缺陷, 对缺陷角度表征能力最佳, 应在实际检测中优先考虑。另外, 刻槽长度定量易受散射强度影响, 用同一阈值进行定量识别并不适合全部模式。

关键词: 超声相控阵; 全矩阵数据; 多模式全聚焦方法

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2023)07-0053-08

Detection and quantification of weld internal defects by multi-mode total focus method

SONG Zeyu, HU Jing, MO Runyang

(Key Laboratory of Ultrasound of Shaanxi Province, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: The quantitative ability of multi-mode total focus method for defects with different inclination angles in butt weld of steel plate was studied. The rectangular slot was used to represent the sliver defect in the weld, the single-frequency scattering coefficient of the slot was obtained by the finite element method, and combined with the wave propagation model for full matrix data simulation, the slots with different dip angles were simulated and imaged. The results showed that different modes had different coverage for defect angle. Three half-span modes, LL-L, TT-T and TT-L, can cover the defects of $0\sim 40^{\circ}$ dip angle, and five full-span modes, TL-LT, LL-LL, TL-TL, TT-TL and TT-LL, can cover the defects of $10\sim 70^{\circ}$ dip angle, they had the best characterization ability for defect angle, and should be given priority in practical detection. In addition, the quantitative identification of slot length was easily affected by the scattering intensity, and the quantitative identification with the same threshold was not suitable for all modes.

Key words: ultrasonic phased array; full matrix data; multi-mode total focus method

超声相控阵近年在工业无损检测领域得到了广泛应用^[1]。基于全矩阵捕捉(FMC)数据的全聚焦方法(TFM)相较传统相控阵技术, 具有更高的分辨

率和更广的成像范围, 已成为后处理成像技术的热点研究方向之一^[2]。作为 TFM 的扩展, 多模式全聚焦方法(MTFM)^[3]考虑声波在界面的反射以及模式转换, 可利用缺陷在不同方向的散射信息进行多种模式成像, 更适合检测裂纹、未焊透、未熔合和夹渣等条状焊接缺陷。FIDAHOUSSEN 等^[4]结合 CIVA 仿真和试验方法, 研究了 MTFM 对垂直于检测面裂纹的成像性能。JIN 等^[5]发现, MTFM 能够有效检出与检测面垂直的裂纹及平行于声入射方向的裂纹, 且可对裂纹长度和角度进行精确定量, 但每

收稿日期: 2022-12-26
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12074238, 11974232, 11727813)
作者简介: 宋泽宇(1998—), 男, 硕士, 主要研究方向为超声无损检测
通信作者: 莫润阳, 女, 博士, 教授, 主要研究方向为超声无损检测, mmrriycn@snnu.edu.cn

种模式对角度的精确定量范围不超过 20° 。采用 MTFM 中任一模式成像时,可能会将其他模式的回波信号在错误的位置重建为伪像。为排除伪像干扰,李衍^[6]分析了伪像来源和滤除方法,提出了多模式融合方法以降低伪像影响,并总结了不同模式适宜检测的缺陷类型;金士杰等^[7]提出全模式 TFM,即在每个成像点筛选各模式中的最强信号,通过综合 MTFM 结果抑制伪像产生。

无论是多模式融合法还是全模式 TFM,单一模式始终是根本和基础,了解各个模式性能有利于改善成像质量、提升效率和解析缺陷特性。考虑到模式分析一般需要大量不同参数的标准反射体样本,逐一加工试样并对其进行检测成像成本大且效率极低,故采用 FMC 模拟数据成像成为增加先验样本的一种重要方法。业内常使用 Feild II 超声仿真工具包^[8]、基于半解析法的 CIVA 软件^[9]和有限元 (FE) 方法^[10]来模拟 FMC 数据。Feild II 仅适合对单一介质中的规则反射体建模^[11];CIVA 软件与 FE 方法模拟 FMC 数据时,每修改一次模型参数(如结构形状、阵元位置、阵列方向角度和散射体位置)都需重新构建模型,应用不便且工作量大。ZHANG 等^[12]提出了一种测量裂纹散射系数矩阵的 FE 模型并试验验证了其准确性;其还将散射系数矩阵与波的射线传播模型^[13]结合,并称之为混合模型,用于生成 FMC 模拟数据。BUDYN 等^[14]对混合模型作单频近似后提出了灵敏度模型,能够快速生成缺陷的 MTFM 强度预测图像。

采用仿真方法对焊缝中的条状缺陷进行多模式全聚焦成像及定量检测研究,能够避免很多不必要的干扰。以不同角度的刻槽为对象,首先采用单频近似的混合模型方法生成 FMC 模拟数据并据此进行多模式全聚焦成像;为对仿真结果进行检验,采用全聚焦采集系统对刻槽进行成像,并将仿真结果与试验结果进行对比,分析各模式对刻槽角度、长度的定量能力。研究不仅检验了单频混合模型对刻槽缺陷的成像性能,也为钢板对接焊缝中条状缺陷 MTFM 成像检测的参数选择及优化提供参考。

1 MTFM 成像及 FMC 仿真模型

1.1 MTFM 成像基本原理

多模式声束传播路径如图 1 所示(图中 T 表示横波,L 表示纵波,短横线用以区分到达缺陷前后的路径),其中直接模式即常规 TFM,图中的模式分别命名为 T-T,LT-T,TT-LT,每条路径可为横波或

纵波,排列组合并根据声场的互易性排除冗余模式,能够得到 3 种直接模式,8 种半跨越模式和 10 种全跨越模式,共计 21 种。

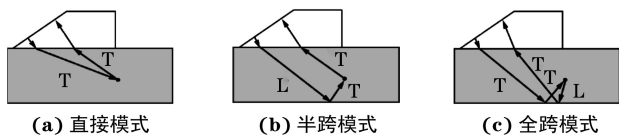


图 1 多模式声束传播路径示意

MTFM 成像时,21 种模式分别使用各自的路径计算时延,任一模式的计算都需要在成像区域划分网格点,以作为信号后处理的聚焦点,对 FMC 数据中的 A 扫描信号进行希尔伯特变换,并根据时延对信号幅值求和得到聚焦点的像素值 $I(\mathbf{y})$ 为

$$I(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{g}_{ij}[t_{ij}(\mathbf{y})] \quad (1)$$

式中: \mathbf{y} 为聚焦点位置矢量; \tilde{g}_{ij} 为经过希尔伯特变换后的信号(由 i 号阵元发射 j 号阵元接收); n 为阵元总数; t_{ij} 为回波信号的时延。

以上述方法处理全部聚焦点则可得检测图像。

1.2 FMC 数据仿真模型

FMC 数据作为 MTFM 成像的基础,包含全部模式的散射信息,采集原理为:激励相控阵探头的一个阵元,令全部阵元接收,遍历激励每个阵元后,可得到所有发射阵元和接收阵元的 A 扫描信号。仿真 FMC 数据时,需要限定模式类型以计算波传播中的各个参数,因此可单独生成各模式的 FMC 仿真数据。任一模式的 FMC 数据均基于 Thompson-Gray 线性时不变超声检测模型^[13],预测接收到的 A 扫描信号频谱为

$$G_{ij}(\omega, \mathbf{y}) = P_{ij}(\omega, \mathbf{y}) U(\omega) e^{i \text{out}_{ij}(\mathbf{y})} \quad (2)$$

式中: $G_{ij}(\omega, \mathbf{y})$ 为接收信号频谱, ω 为角频率; $U(\omega)$ 为发射信号频谱; $P_{ij}(\omega, \mathbf{y})$ 为整个系统的频率响应,包括电响应和机械响应(考虑到阵列产品的电子电路和电声特性是固定的,故忽略系统的电响应)。

$$P_{ij}(\omega, \mathbf{y}) = T_i(\mathbf{y}) T_j(\mathbf{y}) R_i(\mathbf{y}) R_j(\mathbf{y}) B_i(\mathbf{y}) B_j(\mathbf{y}) \cdot D_i(\omega, \mathbf{y}) D_j(\omega, \mathbf{y}) S_{ij}(\omega, \mathbf{y}) \quad (3)$$

式中: $T(\mathbf{y})$ 和 $R(\mathbf{y})$ 分别为透射和反射系数; $B(\mathbf{y})$ 为波束展宽系数; $D(\omega, \mathbf{y})$ 为阵元的声束指向性系数; $S_{ij}(\omega, \mathbf{y})$ 为缺陷的散射系数。

考虑到碳钢中超声衰减较小,数据模拟中忽略声衰减系数, $S_{ij}(\omega, \mathbf{y})$ 可使用有限元方法获取,其余系数可看作超声传播过程中的传递函数,其相关参数如图 2 所示(图中 M_0 为阵元中心, M_1 为声波

在试块表面的入射点, θ_{p1} 为纵波入射角, θ_{s1} 为横波反射角, θ_{p1} 为纵波反射角, θ_{p2} 为纵波折射角, θ_{s2} 为横波折射角)。

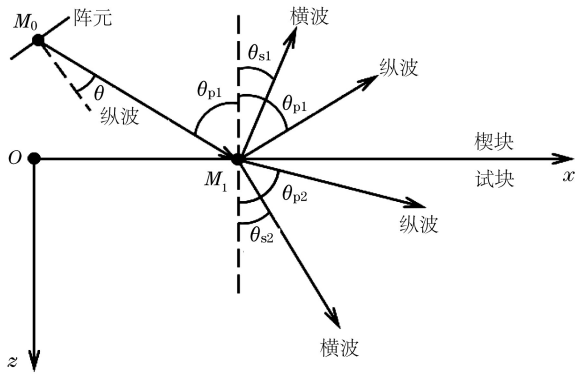


图2 超声传播过程中传递函数的相关参数

使用带楔块的纵波探头检测时, 楔块中的纵波在被检试块表面发生折射, 纵波和横波的透射系数分别为 T_{pp} 和 T_{ps} 。

$$T_{pp} = \frac{2c_{p1} \cos 2\theta_{s1} \cos 2\theta_{s2}}{c_{p2} \Delta} \quad (4)$$

$$T_{ps} = \frac{-2c_{s2} c_{p1} \sin 2\theta_{p2} \cos 2\theta_{s1}}{c_{p2}^2 \Delta} \quad (5)$$

式中: c 为声速, 下标 1, 2 分别表示介质为楔块, 试块, p, s 表示纵波和横波。

Δ 表达式为

$$\Delta = \frac{c_{p1} \cos \theta_{p2}}{c_{p2} \cos \theta_{p1}} \left[\cos^2 2\theta_{s1} + \frac{c_{s1}^2 \sin 2\theta_{s1} \sin 2\theta_{p1}}{c_{p1}^2} \right] + \frac{\rho_2}{\rho_1} \left[\cos^2 2\theta_{s2} + \frac{c_{s2}^2 \sin 2\theta_{s2} \sin 2\theta_{p2}}{c_{p2}^2} \right]$$

式中: ρ 为介质密度。

试块底部的反射过程需要额外考虑横波入射时的反射系数, R_{pp} 为纵波入射纵波反射的反射系数, 其余类比。

$$R_{pp} = \frac{\sin 2\theta_{p1} \sin 2\theta_{s1} - (c_{p1}^2 / c_{s1}^2) \cos^2 2\theta_{s1}}{\Psi} \quad (6)$$

$$R_{ps} = \frac{-2c_{p1} \sin 2\theta_{p1} \cos 2\theta_{s1}}{c_{s1} \Psi} \quad (7)$$

$$R_{sp} = \frac{2(c_{p1} / c_{s1}) \sin 2\theta_{s1} \cos 2\theta_{s1}}{\Psi} \quad (8)$$

$$R_{ss} = \frac{\sin 2\theta_{p1} \sin 2\theta_{s1} - (c_{p1}^2 / c_{s1}^2) \cos^2 2\theta_{s1}}{\Psi} \quad (9)$$

式中: $\Psi = \sin 2\theta_{p1} \sin 2\theta_{s1} + (c_{p1}^2 / c_{s1}^2) \cos^2 2\theta_{s1}$ 。

指向性函数 $D(\omega, \theta)$ [15] 表达式为

$$D(\omega, \theta) = \frac{((c_{p1} / c_{s1})^2 - 2 \sin^2 \theta) \cos \theta}{F_0(\sin \theta)} \cdot \text{sinc} \left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda(\omega)} \right) \quad (10)$$

式中: $F_0(\zeta) = \left(2\zeta^2 - \left(\frac{c_{p1}}{c_{s1}} \right)^2 \right)^2 - 4\zeta^2 (\zeta^2 - 1)^{1/2} \left(\zeta^2 - \left(\frac{c_{p1}}{c_{s1}} \right)^2 \right)^{1/2}$, ζ 为中间变量, 指代 $\sin \theta$; a 为阵元宽度; $\lambda(\omega)$ 为角频率 ω 对应的波长; $D(\omega, \theta)$ 与式(3)中 $D(\omega, y)$ 含义相同。

Nicolas 推导了多层介质中的波束展宽系数 $B_i(y)$

$$B_i(y) = \left(\sum_{q=0}^{n-1} \frac{|M_q M_{q+1}|}{\prod_{l=1}^q \gamma_l} \right)^{-1/2} \quad (11)$$

式中: $\gamma_q = \nu_q \frac{\cos^2 \beta_q}{\cos^2 \alpha_q}$, ν_q 为第 q 层介质中的折射率, α_q 为声波在第 q 层界面的入射角, β_q 为第 q 层界面的折射角或反射角; M_q 为声波经过第 q 层介质分界面的折射点。

1.3 刻槽散射系数矩阵及 FMC 仿真

缺陷的散射特性常用散射系数矩阵描述, 散射系数矩阵是入射角、散射角和频率的函数。由于全聚焦算法属于一阶启发式方法[14], 受频率影响较小, 为快速获得散射系数在此作单频近似, 散射矩阵描述了远场散射振幅与入射角 θ_1 和散射角 θ_2 的关系[12]。

$$S(\theta_1, \theta_2) = \frac{u_s}{u_0} \sqrt{\frac{r_1}{\lambda}} \exp[-ik(r_1 - \lambda)] \quad (12)$$

式中: $S(\theta_1, \theta_2)$ 为式(3)中 $S_{ij}(\omega, y)$ 的单频表示; u_s 和 u_0 分别为散射波和入射波振幅; r_1 为信号测量点到散射体的距离; λ 为散射波波长; k 为波数。

为获取刻槽的散射矩阵, 建立如图 3 所示的二维有限元模型, r_2 为缺陷外切圆半径, h 为缺陷中心到信号发射边界的距离。通常情况下, 当使用超声相控阵探头在样品表面扫查时, 缺陷位于阵元的远场区域, 入射声波可近似为平面波[12], 在边界 AB 处激励 2.5 MHz 的正弦信号模拟入射波。

为便于计算, 旋转刻槽以得到不同声入射角的仿真结果。设监测圆上的探针数目为 N 且等间隔排列, 通过插值方法还原散射系数所需探针数 N 为 $\frac{\pi e r_2}{\lambda} + N_0$, 其中 $N_0 = 3$, 为表征亚波长缺陷散射所需的最少探针数[16], N 仅取决于散射体外接半径 r_2 。考虑 r_2 为 3 mm 时, N 须不小于 20, 以 3° 为间隔旋转刻槽改变入射角, 并在监测圆上设置 120 个探针, 用于捕获不同散射角的信号。由于测量信号包含入射波和散射波, 减去无缺陷模型中的测量结果可得单纯的缺陷散射信号。有限元仿真材料为碳钢,

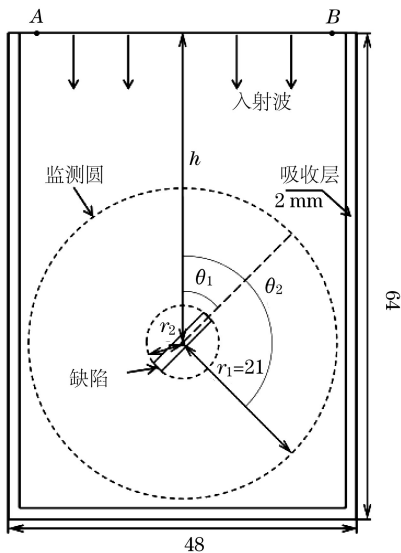


图3 刻槽缺陷散射矩阵仿真模型

其密度为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 杨氏模量为 $2.1\times10^{11}\text{ Pa}$, 缺陷尺寸(宽 \times 长)为 $1\text{ mm}\times6\text{ mm}$, 泊松比为 0.3 , 网格类型为自由三角形, 网格尺寸为 0.15 mm , 时间步为 $2\times10^{-9}\text{ s}$ 。

为获取 L-L 及 L-T 两种模式的散射系数, 需设定合适的 h 、 r_2 以避免不同模式的散射信号同时到达探针造成信号混叠。另外, 为模拟 T-T 和 T-L 的散射系数, 在激励边界与模型材料之间增加一层介质, 调整边界至合适角度使折射纵波全反射且横波垂直向下传播, 以此模拟横波入射情况。

2 结果与讨论

2.1 刻槽的散射系数矩阵色度图

矩形刻槽的 L-L, L-T, T-T, T-L 散射矩阵的可视化图像如图 4 所示(散射系数无量纲)。图 4(a) 中 L-L 模式的 a_1 区域和 a_2 区域分别表示缺陷长边的镜面散射以及透射产生的遮挡效应, a_3 区域较小的散射系数来自于刻槽窄边的端角反射, 与 L-L 散射模式相比, T-T 散射模式[图 4(c)]的波长更短, 镜面散射和透射遮挡区域较小, 但对于 L-L 模式中散射系数小于 0.2 的区域, T-T 模式在这些区域中具有更强的散射系数, 能够反映更多端角散射信息。可见, 散射矩阵能够反映刻槽缺陷的散射特性。

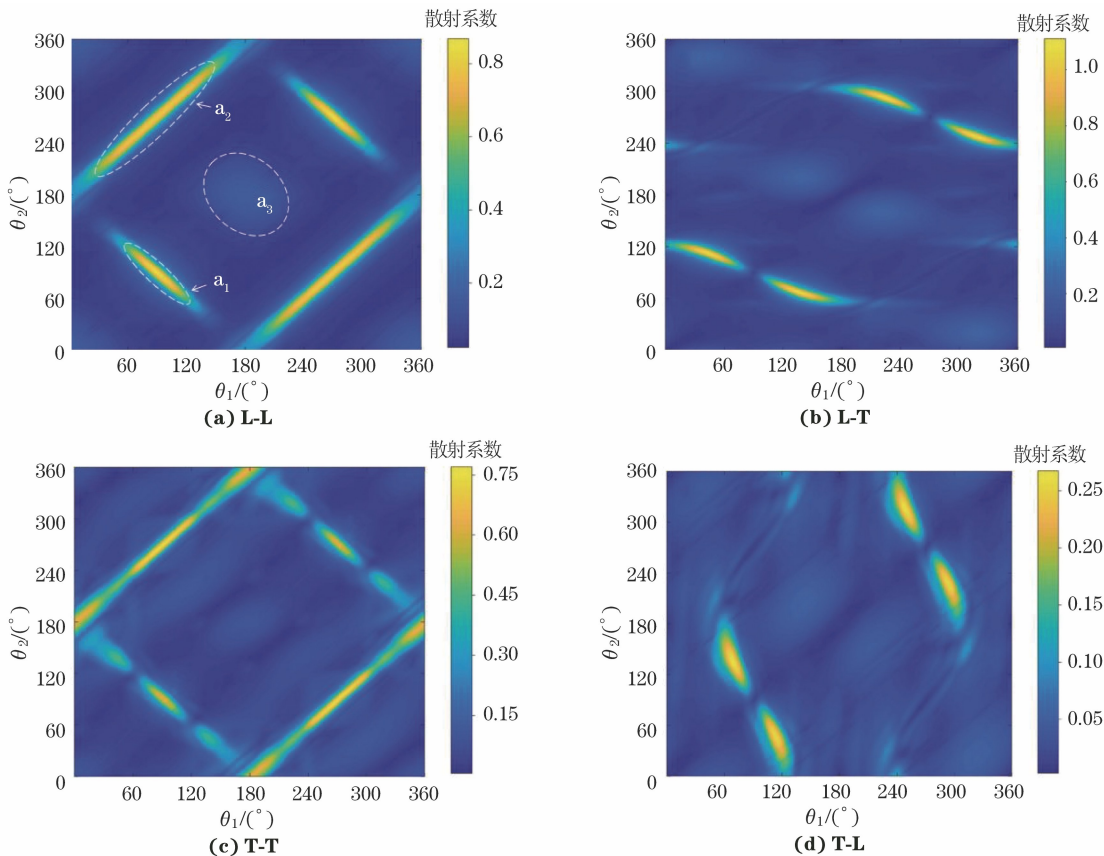


图4 刻槽缺陷各模式下散射矩阵的可视化图像

2.2 刻槽 FMC 数据仿真结果

焊缝的相控阵超声检测布置如图 5 所示, 检测

所用楔块角度为 35° , 被检焊板材料为碳钢, 板厚为 30 mm , 以探头左下角为坐标原点建立坐标系, 刻槽

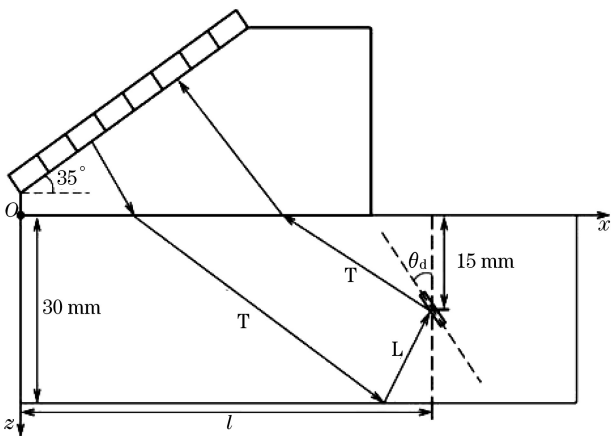


图5 焊缝的相控阵超声检测布置

中心与坐标原点的水平距离为 l ，刻槽深度为 15 mm，倾角为 θ_d 。令 $\theta_d = 30^\circ$ ，计算 l 为 0 ~

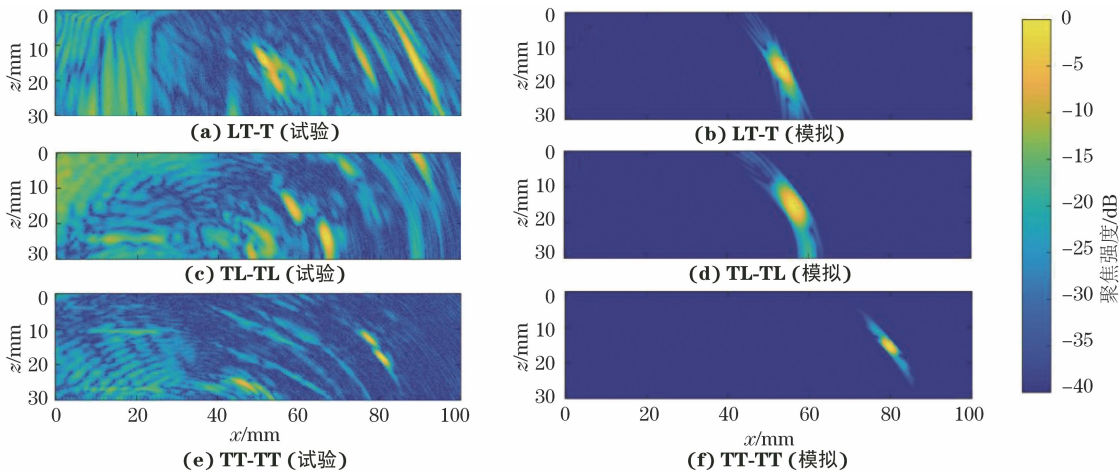


图6 各模式下刻槽的 FMC 图像

为便于缺陷量化评定，对模拟和试验图像分别进行强度标定。

$$Q_s = 20 \lg \frac{I_s}{I_{s\max}} \quad (13)$$

$$Q_m = 20 \lg \frac{I_m}{I_{m\max}} \quad (14)$$

式中：下标 s 和 m 分别表示来自试验和模拟的 FMC 数据， Q 为标定后的缺陷强度； I 为单一模式的最大强度； $I_{s\max}$ 和 $I_{m\max}$ 分别为所有模式中试验和模拟的最大强度。

模拟图像和试验图像的强度对比如图 7 所示，可见，模拟图像的相对变化幅度大于试验图像的相对变化幅度。考虑到试验成像中存在噪声、伪像叠加及模型本身的误差，模拟结果对试验结果的预测仍有较大误差，但无论模拟还是试验成像，TT-TT 模式的缺陷图像强度均最大，且多数模拟结果的强度大小与试验结果具有相似的规律。

100 mm 内所有位置的焦点强度，并以强度最大处的 l 值作为最佳成像位置生成多模式模拟图像。各模式下刻槽的 FMC 图像如图 6 所示。所用楔头为 32 阵元相控阵探头，中心频率为 2.5 MHz，阵元数为 32，阵元芯距为 1 mm，设备为中科院声学所 UT-studio32/128 型相控阵超声检测系统。对比图 6 中 TT-TT 试验图像和模拟图像发现，试验图像存在两个明显的端角反射，而模拟图像仅显示出一个反射体，这是由于提取散射矩阵时仅考虑每个散射方向最强的散射系数，两个端角的散射信息被综合反映为一个反射点。另需注意到，在模拟和试验图像中缺陷走向基本一致，但模拟图像因无噪声、底面回波和其他模式伪像的干扰，更有利于缺陷定量，这正是模拟方法的优势。

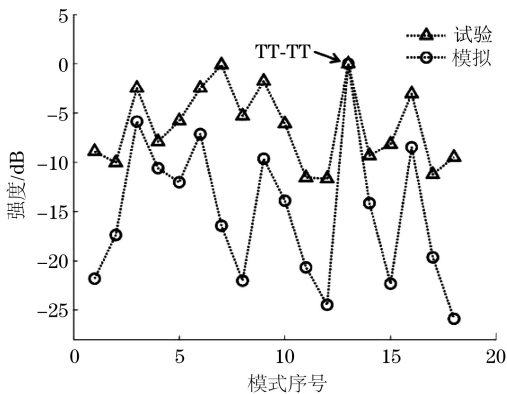


图7 FMC 模拟图像和试验图像的强度对比

2.3 刻槽倾斜角度及长度定量结果

使用混合模型生成 1 mm × 6 mm (宽 × 长) 刻槽的全矩阵模拟数据，倾角 θ_d 以 10° 为间隔从 0° 到 80° 变化进行 MFTM 成像，并使用 MATLAB 编程 (拟合矩形框方法^[17]) 测量强度高于 -6 dB 的缺陷图像尺寸，再与预设缺陷形态对比，分析 MFTM 对

缺陷角度和长度的定量能力。

以 $\pm 10^\circ$ 为基准线(虚线),不同模式对刻槽倾角的测量误差如图 8 所示。以半跨模式为例,将角度定量结果分为 3 类,当 θ_d 分别为 $0^\circ\sim 25^\circ$, $15^\circ\sim 40^\circ$, $0^\circ\sim 35^\circ$ 时,LL-L,TT-T,TT-L 模式的误差小于 $\pm 10^\circ$,能够较准确地定量刻槽倾角,说明这些模式能覆盖倾角在该范围的缺陷并捕捉刻槽较强的镜面反射信息,对该范围走向的缺陷具有最强的角度表征能力;LL-T,LT-T 模式虽然存在误差较稳定的角度区域但误差较大,对缺陷角度的表征能力较弱;TL-L,TL-T,LT-L 模式的角度定量误差随缺陷倾角变化而线性改变,其成像不受缺陷实际角度的影

响,不具备角度定量能力。

考虑到缺陷倾角对缺陷轮廓的表征影响最大,应重点关注角度表征能力最强的模式。各模式对刻槽的强度和长度的定量结果如图 9,10,图中两条虚线内的范围表示角度定量较准确的范围。

图 9 中各模式在虚线之间均存在强度峰值点,说明在对应角度捕捉到了最强的镜面反射信号,随着横轴远离峰值点,TT-T 和 TT-TL 等模式强度先下降后上升,在角度表征范围外趋于平稳,反映了镜面反射到端角散射的变化过程,且镜面反射较弱时的成像强度可能会小于端角散射的成像强度,如 TT-T 模式在 θ_d 为 30° 处产生强度极小值。

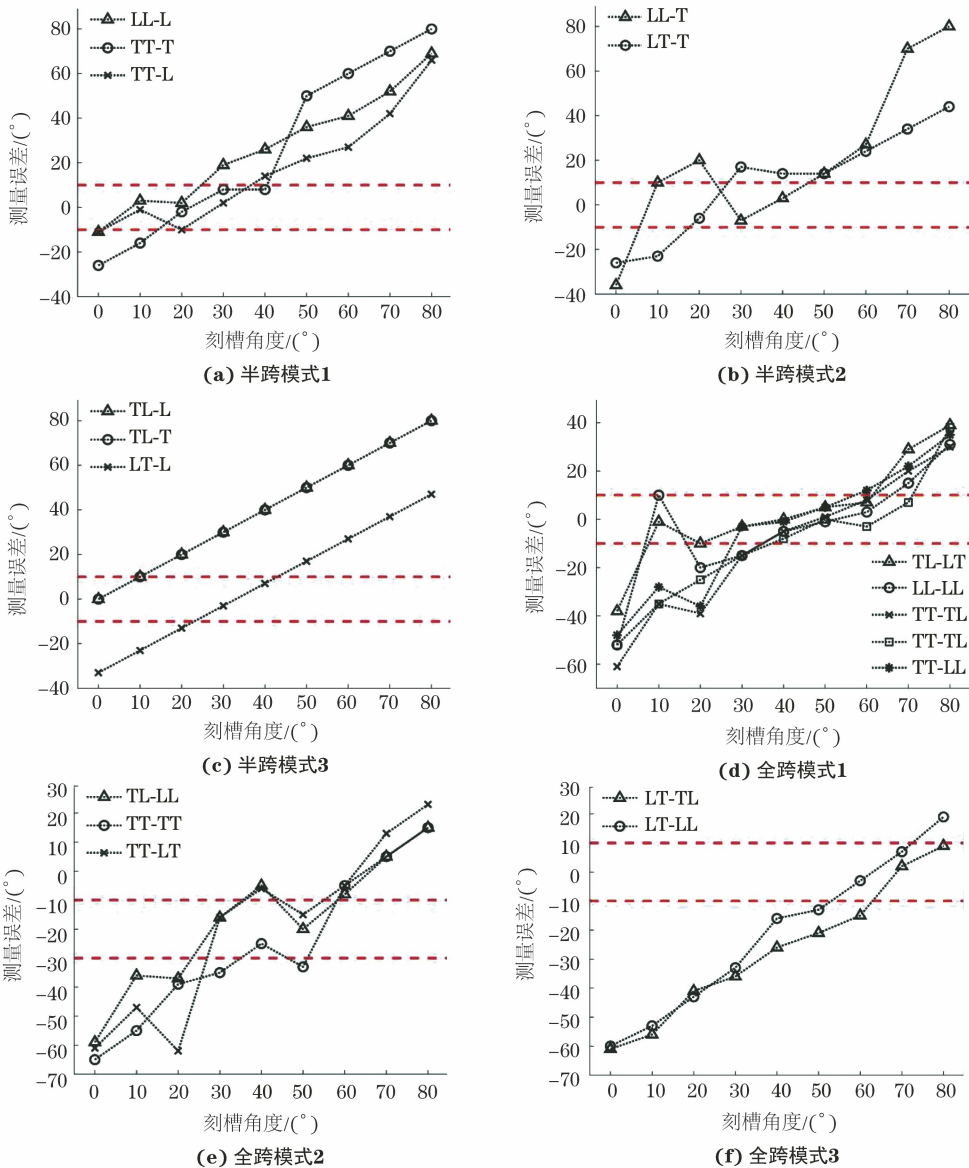


图 8 不同模式对刻槽倾角的测量误差

由于统一采用-6 dB法定量,缺陷长度定量精度受到散射强度的影响。图 10 中部分模式的强度

和图 9 中的长度定量结果呈负相关关系,如半跨模式中角度定量精度较高的LL-L,TT-T,TT-L模式

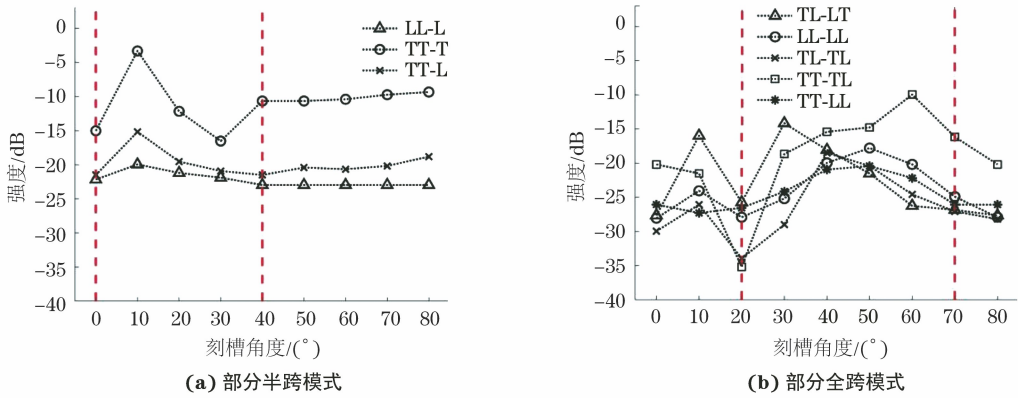


图9 各模式对刻槽的成像强度

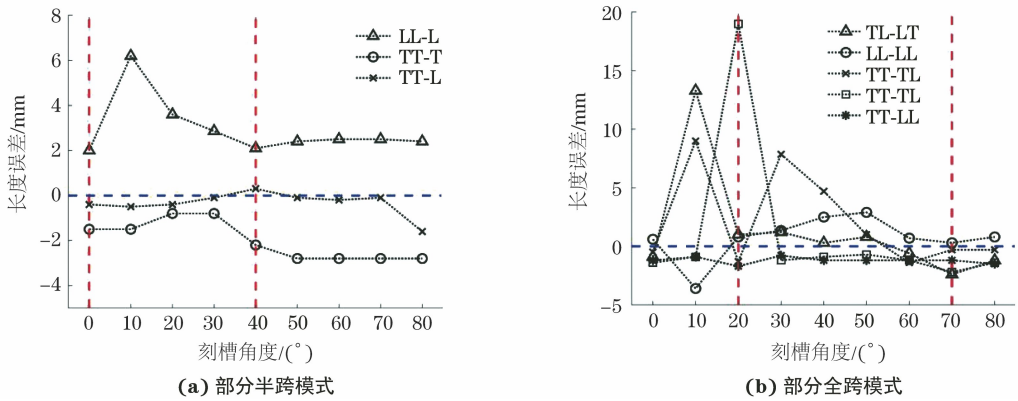


图10 各模式对刻槽长度的定量误差

强度较高,缺陷长度的定量反而偏短,强度适中的模式反而具有更精确的长度定量能力,如 TT-L 和 TT-LL 模式。

3 结语

为分析 MTFM 各模式对焊缝条状缺陷的定量能力,利用单频近似的混合模型生成全矩阵模拟数据并对刻槽缺陷进行 MTFM 成像,分析各模式对刻槽的定量评价能力,并与试验数据进行对比以验证模型性能。从结果看,LL-L,TT-T,TT-L 等 3 种半跨模式和 TL-LT,LL-LL,TL-TL,TT-TL,TT-L 等 5 种全跨模式分别覆盖了 θ_d 为 $0^\circ\sim40^\circ$ 和 $10^\circ\sim70^\circ$ 的刻槽缺陷,基本包含了直接模式中的所有难检角度,对缺陷角度表征能力最优,在实际检测中可优先采用;LL-T,LT-T,TL-LL,TT-TT,TT-LT 等 5 种模式的角度定量精度较低,可根据实际情况作次要参考;TL-L,TL-T,LT-L,LT-TL,LT-LL 等 5 种模式的成像角度不受缺陷实际角度影响,仅适用于缺陷检出,在进行多模式融合处理时,可以排除这些模式以减少计算量,并获得更准确的缺陷轮廓。另外,在统一使用 -6 dB 法进行缺陷测长时,缺陷强

度高的模式测量结果可能偏短,因此不同模式定量时的强度阈值有待进一步研究。此外,单频近似的混合模型精度有待提高,考虑频率对散射系数的影响能进一步提升模拟成像精度。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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(2): 123-133.

[4] FIDAHOUSSEN A, CALMON P, LAMBERT M, et al. Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data [J]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1211(1): 847-854.

[5] 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 Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). Qingdao, China; IEEE, 2020; 21-25.

[6] 李衍. 多模式全聚焦法成像解析[J]. 无损探伤, 2021, 45(4): 1-6.

[7] 金士杰, 刘晨飞, 史思琪, 等. 基于全模式全聚焦方法的裂纹超声成像定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 183-190.

[8] 宋小军, 张璠, 黄琼, 等. 基于全聚焦算法的骨折超声成像研究[J]. 声学技术, 2021, 40(4): 475-481.

[9] 张超才, 韩军, 龙晋桓, 等. 基于超声相控阵的小径薄壁管座角焊缝检测 CIVA 仿真[J]. 中国测试, 2021, 47(7): 19-25.

[10] 池强强. 超声相控阵检测的数值模拟及全聚焦成像研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2019.

[11] 宋寿鹏, 陈仪倩. 超声全聚焦成像中等声程线伪影剔除方法[J]. 应用声学, 2022, 41(4): 527-534.

[12] 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.

[13] SCHMERR L W. Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation[M]. Switzerland: Springer, 2016.

[14] 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.

[15] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.

[16] ZHANG J, FELICE M V, VELICHKO A, et al. Angular and frequency behaviour of elastodynamic scattering from embedded scatterers[J]. Ultrasonics, 2019, 99: 105964.

[17] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The use of ultrasonic arrays to characterize crack-like defects[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2010, 29(4): 222-232.



(上接第 19 页)

[8] LIFTON J J, LIU T. Evaluation of the standard measurement uncertainty due to the ISO 50 surface determination method for dimensional computed tomography[J]. Precision Engineering, 2020, 61: 82-92.

[9] HEINZL C, KLINGESBERGER R, KASTNER J, et al. Robust surface detection for variance comparison and dimensional measurement[J]. Physik in Unserer Zt, 2006, 13(1): 14-21.

[10] LORENSEN W E, CLINE H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 163-169.

[11] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. Readings in Computer Vision, 1987: 184-203.

[12] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Readings in Computer Vision, 1987: 726-740.

[13] FELDKAMP L A, DAVIS L C, KRESS J W. Practical cone-beam algorithm [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1984, 1(6): 612.

欢迎网上投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告