

盾构机刀盘大壁厚焊缝超声相控阵探伤仿真研究

李龙¹, 李东升², 杨伦磊², 宋文涛¹, 马怀祥¹

(1. 石家庄铁道大学机械工程学院, 河北石家庄 050043; 2. 中铁十四局集团装备有限公司, 江苏南通 226000)

摘要: 针对盾构机刀盘角焊缝质量检测中传统超声检测效率低、覆盖不全等问题, 提出基于超声相控阵的快速成像检测方法。采用有限元软件进行数值模拟, 设计了声束覆盖角焊缝的扫查方式。仿真结果表明: 当采用 1 MHz 中心频率、0.5 mm 阵元间距的楔块斜探头时, 可实现 45°~70° 的有效声束偏转, 对角焊缝出现的裂纹情况进行有效检测。在此基础上, 引入相干因子 (coherence factor, CF) 对传统全聚焦成像结果进行像素级加权处理, 有效抑制虚影与噪声干扰, 提升缺陷图像的对比度与边界清晰度。所提方法面向盾构机刀盘角焊缝区域的大壁厚结构特征进行建模与成像分析, 研究成果为后续专用超声相控阵传感器的设计以及检测实验提供理论依据。

关键词: 盾构机刀盘; 大壁厚; 超声相控阵; 角焊缝探伤; 相干因子

中图分类号: U451.3

文献标志码: A

Research on Phased Array Simulation of Weld Defects in Shield Tunneling Cutterhead

LI Long¹, LI Dongsheng², YANG Lunlei², SONG Wentao¹, MA Huaixiang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. China Railway 14th Bureau Group Equipment Corporation Limited, Nantong 226000, China)

Abstract: To address the low efficiency and incomplete coverage of conventional ultrasonic testing in detecting weld quality at the fillet welds of shield machine cutterheads, a rapid imaging detection method based on ultrasonic phased array is proposed. Numerical simulations were carried out using finite element software to design the sound beam scanning strategy for weld coverage. Simulation results indicate that when a wedge probe with a center frequency of 1 MHz and an element spacing of 0.5 mm is employed, an effective beam deflection ranging from 45° to 70° can be achieved, enabling accurate detection of cracks in fillet welds. On this basis, a coherence factor (CF) weighting algorithm was applied to the traditional Total Focusing Method (TFM) imaging to enhance pixel-level consistency, effectively suppressing artifacts and noise, and improving image contrast and edge clarity. The proposed method is specifically tailored for thick-walled cutterhead structures with complex fillet weld geometries. The results provide a theoretical foundation for the subsequent development of dedicated phased array probes and experimental procedures.

Key words: Shield machine cutterhead; Thick-walled weld; Ultrasonic phased array; Fillet weld detection; Coherence factor

盾构机刀盘作为掘进设备的核心部件, 其稳定程度直接影响到整个隧道施工的安全。因此, 对盾构机刀盘内部缺陷进行快速、准确的检测具有重要意义。刀盘结构中, 角焊缝作为主要的连接形式之一, 因其大壁厚且受力复杂, 是缺陷高发区域。实际工程中, 角焊缝常见缺陷包括裂纹、气孔及夹渣等。其中, 裂纹由于受焊缝根部应力集中影响, 极易在工作循环中产生疲劳扩展, 最终引发结构破坏; 选取盾

收稿日期: 2025-07-25

基金项目: 中铁十四局集团装备有限公司科研项目 (CRCC14-ZB-KYHT-2023-002); 河北省自然科学基金 (E2019210309)

构刀盘角焊缝中的三类典型缺陷类型中最常见的裂纹为目标，结合先进的超声相控阵检测技术开展识别与评估研究，有利于提升复杂焊缝区域缺陷的探测精度与定量能力。

超声相控阵全聚焦算法（Total Focusing Method, TFM）作为一种先进的超声成像技术，具有成像分辨率高、缺陷定位准确等优势，可实现对复杂结构内部缺陷的精准检测。近年来，TFM 在焊缝检测领域得到广泛研究和应用。例如，舒江鹏等^[1]在混凝土梁的内部裂缝识别中引入了全聚焦超声阵列技术。彭炎等^[2]基于 TRL 面阵探头，对厚壁不锈钢焊缝进行了成像仿真研究。此外，焦敬品^[3]、蒋盖等^[4]也进行了相关研究。面对结构复杂度更高的对象，鲍子阳等^[5]提出适应性更强的多模式成像方法。与此同时，杨博等^[6]对超声相控阵的全聚焦定位能力展开分析，进一步扩展了该算法在多场景应用中的潜力。将超声波检测技术与全聚焦算法相结合，对盾构机刀盘内部裂纹进行检测和识别，能够有效提升厚壁焊缝缺陷的识别精度与检测可靠性。

尽管目前相关研究已取得诸多成果，但对于工程设备内部结构复杂、缺陷类型多样的情况，全聚焦成像算法仍存在优化空间。研究者在图像增强方向提出了相性因子（Coherence Factor, CF）加权机制，以提高成像一致性和信噪比。易立等^[7]提出补偿-加权相干因子策略，显著改善了平面波合成图像质量。张浩文等^[8]研究了 9%Ni 钢焊缝中的相位相干成像方法，提高了角焊缝边界识别能力。杨懿等^[9]在 PE 热熔焊接结构中引入矢量相干因子，优化了非金属材料中的信号一致性问题。汪翔等^[10]通过实验分析了奥氏体不锈钢焊缝中 CF 因子的加权效果，进一步验证其图像增强能力。郝思思等^[11]还在微波成像算法中引入缩放相干因子，拓展了其在多物理场成像中的适应性。

由此可见，超声相控阵技术在厚壁复杂结构的无损检测中逐渐展现出优势，已被应用于球罐、球铁件等典型结构的缺陷识别与组织评价中^[12-14]，在水下焊接等复杂环境中也取得了一定成果^[15]，为其在盾构刀盘中的推广应用提供了技术支撑。但针对盾构刀盘角焊缝区域的缺陷检测研究仍相对薄弱。该部位结构复杂、厚度大，实验布设难度高，实施成本较大。因而在实际验证前，开展仿真研究更具可行性，不仅可辅助优化探头参数和成像策略，还为后续工艺设计和实验实施提供理论支持。

1 全聚焦成像原理及算法

1.1 全矩阵数据采集原理

全矩阵数据采集（full matrix capture, FMC）是一种先进的数据采集技术。相控阵探头中的所有阵元依次发射超声波，每次只有一个阵元发射，而其它所有阵元均处于接收状态以此类推将每个发射接收对的回波数据存储起来，便可组成一个二维矩阵，矩阵中的每个元素都是一个特定的发射和接收组合。

全矩阵数据采集具体过程，如图 1 所示。以包含 X 个阵元的一维线性阵列换能器为例，其工作原理如下：首先，激励第 1 个阵元产生超声波，所有阵元分别接收回波信号并储存，所获得的数据定义为 X_{1j} （其中 $j=1,2,\dots,N$ ），这样就完成了一组数据的采集。随后，激励第 2 个阵元，重复上述过程。所有阵元的依次完成激励后，最终获得 $X \times X$ 条 A 扫回波数据。将阵元 i 发射、阵元 j 接收的超声回波数据记为 X_{ij} （即全矩阵数据中第 i 行、第 j 列的数据），其中包含每个时间采样点接收信号的幅值。全矩阵采集方法所得到的数据集涵盖了所有单个阵元发射与所有阵元接收的组合关系，形成了接收数据的完备集。

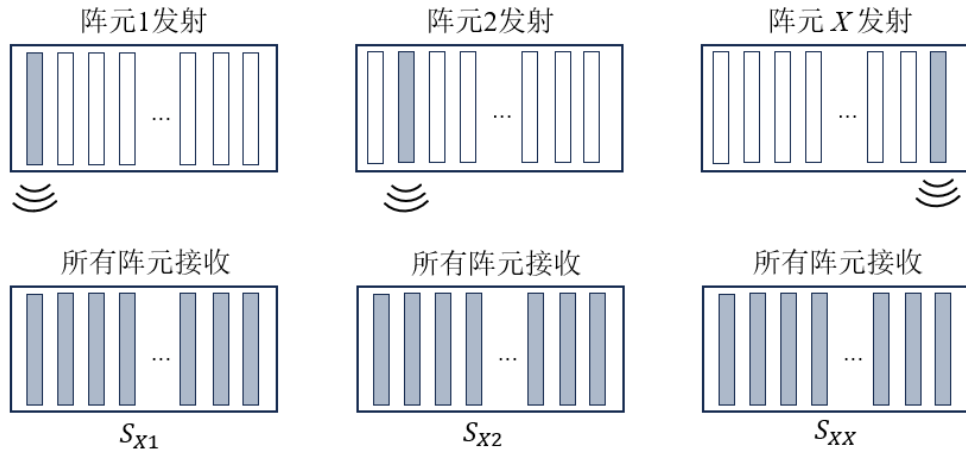


图 1 全矩阵数据采集过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the full matrix data acquisition process

1.2 全聚焦成像算法

旨在得到目标区域的高分辨图像，利用全聚焦成像算法对全矩阵数据进行处理，从而实现对被测材料内部缺陷的检测和精确定位，其原理如图 2 所示。在二维坐标系中，相控阵换能器 1 号晶片的中心位置为坐标原点 O ； x 轴表示相控阵换能器中阵元的阵列方向，与介质表面平行； z 轴垂直于介质表面并指向介质内部^{[16],[17]}。假设换能器晶片数量为 N ，阵元中心距为 p ，阵元宽度为 d 。

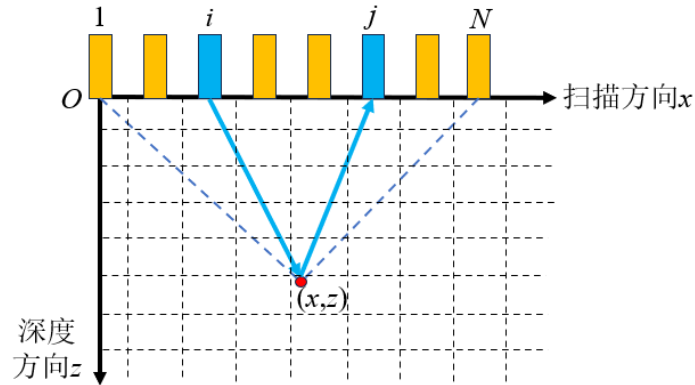


图 2 全聚焦成像算法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the principle of full-focus imaging algorithm

将发射晶片的坐标表示为 (x_i, z_i) ，接收晶片坐标表示为 (x_j, z_j) ， $z_i = z_j = 0$ 。根据几何传播关系

可以得到，波速为 c 的超声波从晶片 i 发射，经焦点 (x, z) 到晶片 j 的时间为^[18]：

$$t_{ij}(x, z) = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (z - z_i)^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + (z - z_j)^2}}{c} \quad (1)$$

由上式(1)可得到每个收发晶片所对应的 A 扫信号传播时间，将每个 A 扫描相对应的时间幅值累加可得到单个像素点的幅值，即：

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N S_{i,j}(t_{i,j}(x, z)) \quad (2)$$

由式(2)可得到成像区域内所有像素点的幅值信息,全聚焦成像算法通过对全矩阵采集数据进行时域信号叠加和误差处理,从而实现高分辨率的图像重建,二者相结合使得全聚焦成像技术拥有了高水平的检测精度和可靠性。

1.3 基于阵列 A 扫描信号实现 B 扫成像

阵列 A 扫描相控阵成像实现方法是基于超声相控阵检测成像原理,通过对阵列 A 扫描信号的延时、叠加合成处理,将所接收的回波信号以图像的方式显示,实现相控阵检测成像。使用一个标准工件作为检测对象,该工件中,有三个直径为 3mm 的通孔。阵列换能器的阵元分布在模型的上边界,阵列换能器与通孔的位置关系如图 3 所示。该图显示了缺陷试样与阵列换能器的布置方案。换能器由若干阵元组成,沿试样上边界均匀排列;缺陷为直径 3 mm 的通孔,位于试样内部特定位置。探头入射方向与缺陷位置关系经过精确设计,以确保声束在扫查过程中能够覆盖缺陷区域,从而在后续成像中产生清晰的回波响应。

根据上述 TFM 成像原理,阵列 A 扫矩阵到 B 扫矩阵的算法流程如图 4 所示。该算法首先读取模型基本参数,通过计算发射与接收探头之间的距离,消除对应时段的表面直达波数据,利用声程信息对满足条件的数据进行超声信号的叠加,得到初步成像结果,进而通过希尔伯特变换将结果进行包络处理,并归一化后生成最终图像。

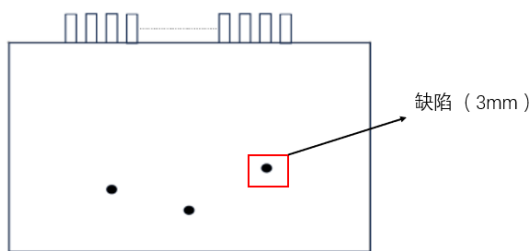


图 3 缺陷试样换能器的布置方案
Fig.3 Arrangement scheme of transducers for defective specimens

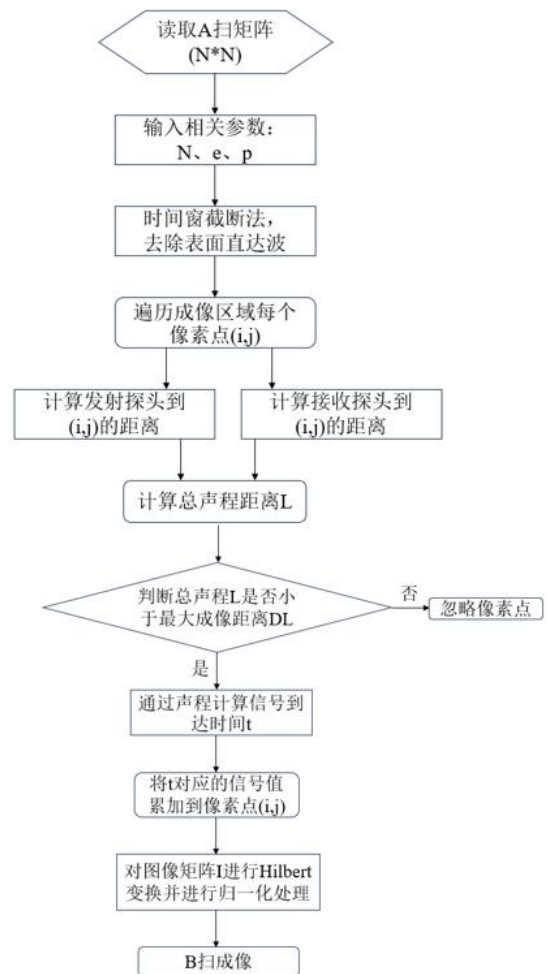


图 4 TFM 成像算法流程图
Fig.4 Flowchart of TFM imaging algorithm

2 相干因子图像增强算法

在相控阵超声全聚焦成像（TFM）过程中，成像算法通常采用所有通道信号经延时补偿后直接叠加的方式生成图像强度。这种方式虽然在理想条件下具有良好的聚焦性能，但在复杂材料、强散射背景或存在多路径传播的情况下，易出现虚假反射增强、边界模糊和噪声干扰等问题，严重影响缺陷识别的准确性。

为提高图像的对比度，在传统 TFM 算法基础上引入相干因子（Coherence Factor, CF）作为像素级加权机制，对每一个成像点的信号一致性进行量化评价，从而实现真实反射信号的增强与虚假信号的抑制。

2.1 算法原理

设某一成像点 (x, z) 对应的延时补偿后的通道回波信号为 s_1, s_2, \dots, s_N 其中 N 为总通道数，则该点的相干因子定义^[19]为：

$$CF(x, z) = \frac{\left| \sum_{n=1}^N s_n(x, z) \right|^2}{N \cdot \sum_{n=1}^N |s_n(x, z)|^2} \quad (3)$$

相干因子（CF）作为评价信号相位一致性的重要指标，广泛应用于超声成像领域中图像质量的增强处理中。其数值始终位于区间 $[0, 1]$ 内，越接近 1，表明通道间信号具有较高的一致性，越可能对应真实反射信号；反之，若通道间相位差异显著，CF 值趋近于 0，通常反映为噪声、虚影或边缘模糊区域。

CF 实质上是对信号能量集中程度的一种量化。当多通道接收到的信号在某一点表现出较高的相干性时，该点更可能为结构缺陷的真实回波；而相位随机、能量分散的区域则往往对应伪影或背景干扰。因此，CF 在成像中具有显著的区域识别与信号增强能力。

2.2 加权成像过程

为进一步提升超声全聚焦成像（TFM）的信噪比与边界清晰度，在传统 TFM 成像图像 $I_{TFM}(x, z)$ 基础上引入 CF 加权，最终图像^[20]计算方式如下

$$I(x, z) = CF(x, z) \cdot I_{TFM}(x, z) \quad (4)$$

通过对原始成像结果进行像素级加权抑制，将信号一致性高的真实反射区域予以保留和增强，而对一致性低的伪影、背景噪声则进行抑制。该方法不仅有效提升了缺陷回波的聚焦性能，还在实际成像中改善了细节边界表现，有助于提高缺陷识别的准确性与可靠性。

3 刀盘焊缝伤损分析与扫查工艺设计

3.1 盾构刀盘角焊区域结构特性与检测建模

刀盘作为盾构机的核心掘进部件，其表面安装的切刀承担主要的土层切削任务，切刀通过高强度螺栓连接于面板上，并采用 $10^\circ \sim 20^\circ$ 前角及 $5^\circ \sim 10^\circ$ 后角的结构设计，以提高切削效率。在实际掘进过程中，切刀与刀盘面板之间的焊接连接，特别是角焊区域，需承受循环载荷与渣土冲刷的双重作用，极易形成诸如焊缝裂纹、热影响区脆化等结构性缺陷，其根本原因多与焊接残余应力或施工工艺控制不当有关。

基于上述结构特性，在刀盘模型的基础之上，构建了如图 5 所示的角焊区域的三维模型，并开展缺陷响应特性分析，并制定相应的超声相控阵检测工艺参数及探头布置方案，以实现典型缺陷的精确定位与可靠识别。

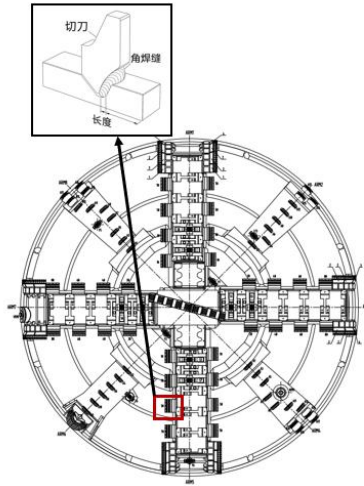
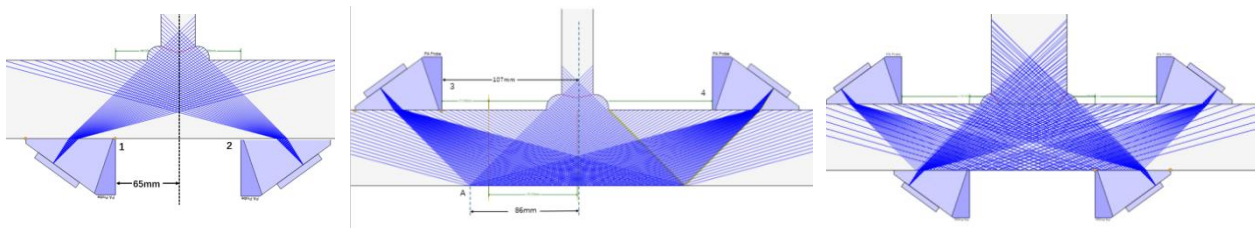


图 5 刀盘模型
Fig.5 Cutterhead model

3.2 超声扫查工艺

采用奥林巴斯公司开发的 BeamTool 声束仿真软件对相控阵超声检测方案进行建模与分析。该软件可对不同楔块、探头及材料参数下的声束传播路径进行可视化模拟，支持对检测盲区、声束入射角与覆盖范围的精确评估。在完成探头类型与布置参数初步设定的基础上，进一步结合盾构刀盘角焊缝的结构特点，利用 BeamTool 构建声束传播模型，调节楔块角度、阵列参数与检测距离，分析不同扫描角度下的覆盖效果与缺陷响应区域，验证所设计探头布置方案的合理性。该仿真过程为后续超声全聚焦成像（TFM）技术在缺陷识别中的应用提供了参数依据与图像优化方向。

在检测布置方面，采用带有楔块的相控阵横波探头布设于角焊接缝区域的两个典型位置（位置 1 与位置 2），探头中心距焊缝中心线 65 mm，如图 6(a)所示。考虑到盾构刀盘属于大壁厚结构，为提高缺陷覆盖率与检测灵敏度，系统中额外配置两个横波探头，具体布置如图 6(b)所示。该组探头的最小检测距离为 86 mm，扫描角度范围覆盖 45°~70°，可实现对角焊缝区域的双向覆盖式检测。最终的检测系统整体布置方案见图 6(c)，能够确保角焊缝全区域覆盖，满足结构安全评估的需求。



(a) 探头一次波扫查布置方案

(b) 探头二次波扫查布置方案

(c) 总体探头布置方案

图 6 刀盘焊缝声束模拟

Fig.6 Acoustic beam simulation of cutterhead welds

4 TFM 聚焦原理与仿真验证

4.1 阵列 A 扫信号的全聚焦成像

根据前文调研盾构机刀盘常见的三种伤损类型，以刀盘与刀座连接处作为划分标准，选取一种典型的缺陷伤损进行分析研究。基于前文推导的声场聚焦理论，在仿真过程中在刀盘背面布置超声探头，采用全矩阵采集方法获取伤损的 A 扫信号，并通过全矩阵全聚焦成像算法将一维 A 扫信号转换为二维 B 扫图像，实现对刀盘缺陷的可视化检测。

本模型为角焊的盾构刀盘，并按照实际检测需求进行简化。刀盘模型纵向长度为 100 mm，高度为 70 mm，内设半径为 3 mm 的圆形孔模拟缺陷，孔的圆心距离焊缝垂直方向中心线 20 mm，如图 7。为了减少边界反射干扰并提高计算效率，在模型两侧设置了完美匹配层（PML），下表面施加低反射边界条件。网格划分遵循‘波长的六分之一’原则，以兼顾精度与计算量；时间步长设置为 0.01 μs ，总计算时长为 16 μs ，以保证声波传播全过程能够被完整捕获。

PML 在仿真的研究过程中，声波到达模型边界会发生反射现象，当模型形状比较复杂时，边界回波杂乱无章，对与特定回波的观测研究与信号的接收都有较大的干扰，本模型的主要目的是分析超声波在不同时刻波形的转换和传播，因此为减小边界回波的干扰，并且降低计算量，通过增加低反射边界和完美匹配层的方式减小回波干扰，保证计算效率。在模型中刀盘两侧设置了完美匹配层，并在下表面施加了低反射边界条件。

压电阵列：压电探头的工作原理是对压电晶片施加交变电场时，会发生机械变形，产生超声波，对待测物体进行检测。阵元宽度为 0.5 mm，中心距为 1 mm。在 COMSOL 仿真模型中，于阵元上添加速度载荷，模拟压电晶片的震动。

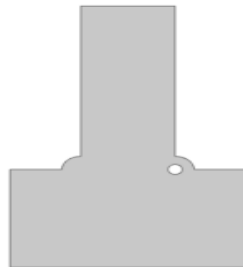


图 7 焊缝几何模型

Fig.7 Weld geometric model

4.2 时域仿真结果分析

主要研究超声横波对缺陷的检测效果，利用有限元仿真对阵元进行激励，通过不同时间下的超声波传播云图，可以直观地看到各个波的传播状态，并通过计算与之对应，证明了阵元参数与横波检测的可行性。

当缺陷的位置位于靠近刀盘与刀座连接处踏面时，由于超声波在检测缺陷的过程中会穿过多个界面，对超声波能量的衰减非常大，因此首选直达波对其进行检测。图 8 为直射法检测模型在不同时刻的声场云图，图 8(a) $t=2.3 \mu\text{s}$ 时，阵元振动激发出超声波。图 8(b) $t=28.81 \mu\text{s}$ 时，超声波已经通过缺陷，在图 8(c) $t=55.03 \mu\text{s}$ 时回到阵元处。

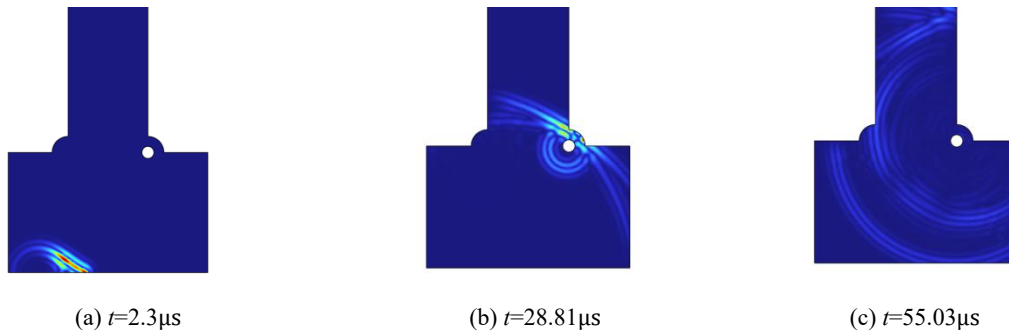


图 8 焊缝仿真声场云图

Fig.8 Simulation sound field cloud map of welds

4.3 刀盘刀座裂纹损伤全聚焦仿真成像

针对远表面检测，为了能够得到较为准确的伤损位置，采用直接接触的方式，通过在阵元上添加压力来模拟压电晶片的震动，换能器的中心频率为 1MHz，阵元数量为 32，阵元宽度为 0.5mm，阵元中心距为 1mm，刀盘的材料选择为 COMSOL 内置库中的 Structural steel，网格划分为波长的六分之一，在瞬态求解器中，将时间步长设置为 0.01μs，总时长设置为 16μs。

选用高斯包络函数进行调制的正弦波作为激励信号，其函数表达式(5)如下。

$$y(t) = e^{-\left[2t - \frac{2}{f}\right]^2 \times f_0^2} \times \sin(2 \times \pi \times f_0 \times t) \quad (5)$$

其表达式如式 (5) 所示。各参数含义如下：

t : 时间变量; f : 高斯包络调制宽度参数; f_0 : 信号的中心频率; 将激励函数 $y(t)$ 绘制 3 个周期，其时域信号如图 9 所示。

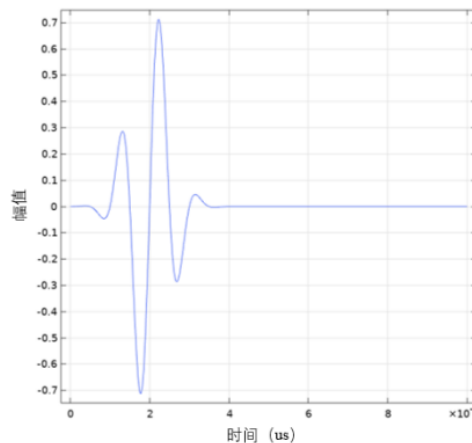


图 9 激励函数时域波形图

Fig.9 Time-domain waveform diagram of the excitation function

采用全矩阵的方法进行 A 扫信号采集时，对应利用 COMSOL 中参数化扫描的方式模拟不同的阵元中心位置，以第一阵元的中心位置为初始距离，阵元间距为步进，第 32 阵元的中心位置为最终距离，进行参数化求解。在数据的后处理中，以参数化扫描的解为基础，构建一组二维截点的数据集，此数据集的坐标来源就是各阵元的中心点。进而通过一维绘图组，得到一系列相关的回波数据，如图 10 所示。

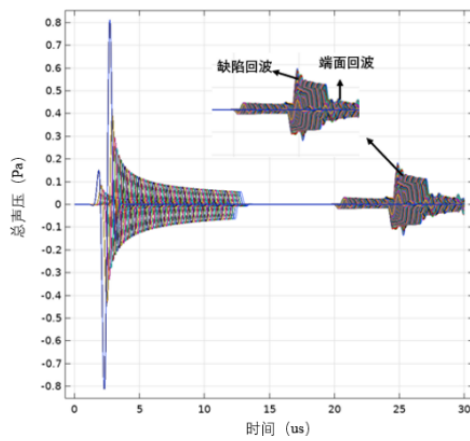


图 10 阵元 A 扫回波信号图

Fig.10 A-scan echo signal diagram of array elements

基于全矩阵采集得到的 A 扫回波信号，利用全聚焦成像技术，通过阵元组合所有可能的发射、接收信号来形成高分辨率的图像。对 A 扫信号进行处理后，得到的二维 B 扫图像如图 11 所示。由图可以直观的看出缺陷的反射回波，根据水平位置和深度位置可以大致确定缺陷所在位置。

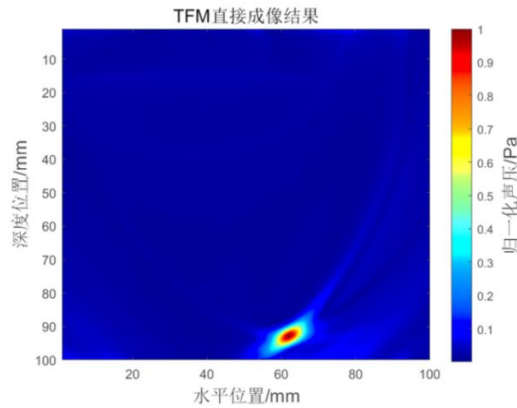


图 11 TFM 成像结果图

Fig.11 TFM imaging result diagram

4.4 相干因子加权成像图像分析

为进一步提升成像图像的对比度与缺陷识别清晰度，在传统全聚焦成像（TFM）算法基础上引入相干因子（Coherence Factor, CF）进行加权处理。图 12 展示了刀盘缺陷场景下，采用传统 TFM 与引入 CF 加权处理后的图像对比结果。

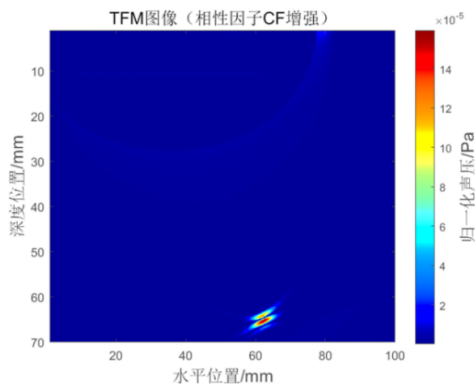


图 12 CF 加权后图像

Fig.12 Image after CF weighting

从图像对比结果可见,传统 TFM 图像虽能基本还原缺陷位置与轮廓,但在非目标区域仍存在一定程度的背景虚影与能量泄散现象,影响整体成像效果。CF 加权图像则在保持缺陷主信息的同时,有效压制了非一致性通道所带来的图像干扰,使图像聚焦能力增强,边缘过渡更为锐利,缺陷轮廓更加清晰,整体图像层次感得到提升。

为进一步验证 CF 加权在成像质量上的改进效果,对典型缺陷位置的成像指标进行了量化分析。结果显示,CF-TFM 图像的信噪比(SNR)由 18.7 dB 提升至 26.3 dB,对比度(Contrast Ratio)由 0.42 提升至 0.68,缺陷边界清晰度由 0.35 mm 提升至 0.21 mm。这表明,CF 加权不仅有效抑制了背景噪声与旁瓣虚影,还显著提高了缺陷与背景的灰度分离度,并增强了缺陷轮廓的锐利程度。

需要指出的是,图 11 与图 12 的 colorbar 范围存在差异,主要由于 CF 加权处理对像素强度进行了重新归一化,使得最大值位置相较原始 TFM 成像略有变化。此外,两图中缺陷深度位置的轻微差异源于加权过程中低一致性信号的抑制作用,从而使缺陷峰值在成像中出现轻微上移。但该变化幅度较小,对缺陷的准确定位与识别无实质性影响。

5 结论

为实现盾构刀盘角焊区域的高效检测,开展了超声相控阵声束仿真、COMSOL 建模分析及全聚焦成像仿真等多方面研究。通过对声束覆盖范围和成像效果的系统评估,验证了所提检测方案在识别典型角焊缝缺陷方面的适用性与有效性。相关成果为后续的实试验证与工艺优化提供了理论基础,也为其他大壁厚角焊缝相控阵探伤工艺和成像效果增强提供理论参考。基于以上研究,得到以下结论。

1) 采用 45°~70°的扇形扫查范围可有效覆盖刀盘角焊缝的检测区域,进一步提高了厚壁区域的检测分辨率,为刀盘检测的工艺标准化提供了依据。

2) 利用有限元仿真对阵元进行激励,通过不同时间下的超声波传播云图,可以直观地看到各个波的传播状态,并通过计算与之对应,证明了阵元参数与横波检测的可行性。

3) 利用全聚焦成像(TFM)原理,通过全矩阵捕获(FMC)数据重建刀盘角焊缝的缺陷图像。相较于传统 B 扫描,TFM 技术可以直观地检测出缺陷的具体位置。

4) 引入 CF 加权机制可在保证目标反射信息完整性的基础上,有效抑制成像虚影与边缘模糊问题,为复杂结构中的缺陷检测与识别提供了更高质量的图像支持。

5) CF 加权成像相较于传统 TFM,在信噪比(SNR)上提升约 7.6 dB,对比度提高约 62%,缺陷边界清晰度(基于梯度幅值计算)由 0.35 mm 优化至 0.21 mm,提升幅度约 40%。这些可量化的改进结果表明,CF 加权不仅显著改善了缺陷目标的可视化效果,还增强了边界轮廓的锐度与层次感,从而提高了复杂焊缝缺陷的识别准确性与检测可靠性。

参考文献:

- [1] 舒江鹏,李斯涵,杨涵,等.基于深度学习的钢筋混凝土梁内部裂缝阵列超声全聚焦成像方法[J/OL].Journal of Southeast University(English Edition),1-14[2025-06-28].
SHU J P, LI S H, YANG H, et al. Ultrasonic Full-Focus Imaging Method for Internal Crack Arrays in Reinforced Concrete Beams Based on Deep Learning [J/OL]. Journal of Southeast University (English Edition), 1-14 [2025-06-28].
- [2] 彭炎,严宇,王俊龙,等.厚壁奥氏体不锈钢焊缝 TRL 面阵探头全聚焦成像检测的仿真与分析[J].无损检测,2025,

47(05): 8-17.

PENG Y, YAN Y, WANG J L, et al. Simulation and Analysis of Total Focusing Method Imaging Detection for Thick-Wall Austenitic Stainless Steel Welds Using TRL Matrix Array Probes [J]. *Nondestructive Testing*, 2025, 47(05): 8-17.

- [3] 焦敬品, 梁士通, 李晨旭, 等. 一种基于缺陷响应空间补偿的多模式超声全聚焦复合成像及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(04): 173-183.
- JIAO J P, LIANG S T, LI C X, et al. A Multi-Mode Ultrasonic Total Focusing Composite Imaging Based on Spatial Compensation of Defect Response and Its Application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(04): 173-183.
- [4] 蒋盖, 胡少鹏, 左浩. 基于超声导波模态分离的全聚焦加权成像方法[J]. *振动与冲击*, 2025, 44(07): 8-15.
- JIANG G, HU S P, ZUO H. A Total Focusing Weighted Imaging Method Based on Ultrasonic Guided Wave Mode Separation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2025, 44(07): 8-15.
- [5] 鲍子阳, 陈钦, 等. 基于直接视图的自适应多模式全聚焦成像方法[J]. *无损检测*, 2025, 47(04): 64-71.
- BAO Z Y, CHEN Q, et al. An Adaptive Multi-Mode Total Focusing Imaging Method Based on Direct View [J]. *Nondestructive Testing*, 2025, 47(04): 64-71.
- [6] 杨博, 万策, 王永锋, 等. 超声相控阵全聚焦缺陷定位技术分析[J]. *物理测试*, 2025, 43(02): 38-42.
- YANG B, WAN C, WANG Y F, et al. Analysis of Ultrasonic Phased Array Total Focusing Defect Localization Technology [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2025, 43(02): 38-42.
- [7] 易立, 彭建平, 邱春蓉, 等. 使用补偿-加权相干因子的平面波复合成像[J]. *应用声学*, 2025, 44(04): 1-11.
- YI L, PENG J P, QIU C R, et al. Plane Wave Composite Imaging Using Compensated Weighted Coherence Factor [J]. *Applied Acoustics*, 2025, 44(04): 1-11.
- [8] 张浩文, 王强, 肖权旌, 等. 9%Ni 钢 T 角焊缝相位相干全聚焦成像[J]. *声学技术*, 2025, 44(02): 220-225.
- ZHANG H W, WANG Q, XIAO Q J, et al. Phase-Coherent Total Focusing Imaging for 9%Ni Steel T-joint Welds [J]. *Acoustical Technology*, 2025, 44(02): 220-225.
- [9] 杨懿, 王强, 张浩文, 等. 埋地燃气聚乙烯管热熔接头的矢量相干全聚焦成像检测分析[J]. *压力容器*, 2024, 41(11): 66-73.
- YANG Y, WANG Q, ZHANG H W, et al. Vector Coherent TFM Analysis for PE Pipe Fusion Joints in Gas Systems [J]. *Pressure Vessel*, 2024, 41(11): 66-73.
- [10] 汪翔, 王强. 奥氏体不锈钢焊缝的优化相位相干加权因子全聚焦成像实验分析[J]. *应用声学*, 2025, 44(05): 1-10.
- WANG X, WANG Q. Experimental Study on Optimized Coherent Weighted TFM Imaging for Austenitic Stainless Steel Welds [J]. *Applied Acoustics*, 2025, 44(05): 1-10.
- [11] 郝思思, 李建瀛, 李相龙. 基于缩放相干因子的微波成像算法[J]. *微波学报*, 2025, 41(02): 1-6.
- HAO S S, LI J Y, LI X L. Microwave Imaging Algorithm Based on Scaled Coherence Factor [J]. *Journal of Microwaves*, 2025, 41(02): 1-6.
- [12] 王红源, 邱心纪, 邓红星, 等. 基于相控阵超声衍射波成像的球罐厚壁结构内部缺陷的定量检测[J]. *无损检测*, 2025, 47(03): 22-28.
- WANG H Y, QIU X J, DENG H X, et al. Quantitative Detection of Internal Defects in Thick-Wall Structures of Spherical Tanks Based on Phased Array Ultrasonic Diffraction Wave Imaging [J]. *Nondestructive Testing*, 2025, 47(03): 22-28.
- [13] 孙留鹤, 刘强虎, 等. 相控阵相位相干成像技术在厚壁球铁件晶粒度测量评价中的应用[J]. *无损检测*, 2025, 47(01): 20-26.
- SUN L H, LIU Q H, et al. Application of Phased Array Phase Coherence Imaging Technology in Grain Size Evaluation of Thick-Wall Ductile Iron Castings [J]. *Nondestructive Testing*, 2025, 47(01): 20-26.
- [14] 周至伟, 饶静, 牛伟. 基于改进稀疏表示的高衰减厚壁结构超声相控阵全聚焦成像[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(12): 246-255.
- ZHOU Z W, RAO J, NIU W. Full Focusing Imaging of Ultrasonic Phased Array in High-Attenuation Thick-Wall Structures Based on Improved Sparse Representation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(12): 246-255.

- [15] 叶建雄, 李志刚. 超声相控阵在水下焊接中的应用研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(02): 129-134.
YE J X, LI Z G, Q. Application of Ultrasonic Phased Array in Underwater Welding [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(02): 129-134.
- [16] Gantala T, Balasubramaniam K. Automated defect recognition for welds using simulation assisted TFM imaging with artificial intelligence[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40: 1-24.
- [17] Njiki M, Elouardi A, Bouaziz S, et al. A multi-FPGA architecture-based real-time TFM ultrasound imaging[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2019, 16: 505-521.
- [18] 王寒露. 超声相控阵近表成像检测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
WANG H L. Near-Surface Imaging Detection with Ultrasonic Phased Array [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [19] 陈阳, 陶知, 吴鑫, 等. 基于相干因子的高斯加权合成孔径聚焦技术的光声信号处理[J]. 生命科学仪器, 2022, 20(03): 54 - 60.
CHEN Y, TAO Z, WU X, et al. Photoacoustic Signal Processing Using Gaussian-Weighted Synthetic Aperture Focusing Technology Based on Coherence Factor [J]. Life Science Instruments, 2022, 20(03): 54 - 60.
- [20] 郑驰超, 张路南, 王浩, 等. 短阶相干系数加权的平面波复合成像算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(12): 2919 - 2927.
ZHENG C C, ZHANG L N, WANG H, et al. Plane Wave Compounding Imaging Algorithm Weighted by Short-Lag Spatial Coherence Coefficient [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(12): 2919 - 2927.



第一作者: 李龙 (2000—), 男, 研究方向为超声检测。E-mail: 1428754700@qq.com。



通信作者: 宋文涛 (1986—), 男, 讲师, 硕导, 研究方向为超声无损检测与评估。E-mail: songwt@stdu.edu.cn。