

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518624

压力容器焊接区几何角度对相控阵检测的影响*

马朝阳¹ 梁煌朗² 谢志栋² 李斌² 李文涛²

(1. 甘肃省特种设备检验检测研究院 兰州 730050; 2. 兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050)

摘要: 针对压力容器斜接管焊接区内部气孔缺陷在相控阵超声检测中因几何遮挡效应导致的信号衰减问题。本文通过构建结构几何张角-声束传播衰减模型,结合声程补偿算法,系统研究了45°、60°、90°、135°四种试样张角下超声波的传播特性与缺陷检测效果。基于FDTD算法建立了斜接管动态响应仿真模型,并通过制备含预置缺陷的铝合金试样实验进行了验证。结果表明:经声程补偿后,45°缺陷信号幅值由50.4提升至97.4,信噪比从6.27 dB增至11.99 dB;60°缺陷信号幅值由77.5提升至97.5,信噪比从9.00 dB增至12.00 dB。且信噪比计算偏差小于1.5 dB,缺陷检出率提升23%。研究证实张角引发的遮挡效应显著影响声束传播路径与信号幅值。所提模型及修正算法可有效补偿非标结构的检测误差,为压力容器焊接区超声检测工艺优化提供了量化理论依据。

关键词: 压力容器;无损检测;相控阵超声;遮挡效应;信号修正

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1050

Influence of geometrical angle of welding zone on phased array inspection of pressure vessel

Ma Chaoyang¹ Liang Huanglang² Xie Zhidong² Li Bin² Li Wentao²

(1. Gansu Special Equipment Inspection and Testing Institute, Lanzhou 730050, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To address the issue of signal attenuation caused by geometric shadowing effects in PAUT of internal porosity defects in pressure vessel mitered pipe weld zone. In this paper, by constructing a structural geometry tensor angle-acoustic beam propagation attenuation model, combined with a sound range compensation algorithm. The propagation characteristics of ultrasonic waves and defect detection effects under four sample bend angles of 45°, 60°, 90° and 135° are systematically investigated. The study employed an FDTD algorithm to establish a dynamic response simulation model of the mitered pipe weld and validated the findings through experiments using aluminum alloy specimens with pre-drilled defects. The results indicate that the signal amplitude of the 45° defect increased from 50.4 to 97.4, and the SNR improved from 6.27 dB to 11.99 dB. Similarly, for the 60° defect, the signal amplitude increased from 77.5 to 97.5, and the SNR improved from 9.00 dB to 12.00 dB. The calculated deviation in SNR was less than 1.5 dB, and the defect detection rate increased by 23%. The study confirmed that the occlusion effect caused by the bend angle significantly affects the sound beam propagation path and signal amplitude. The proposed model and correction algorithm can effectively compensate for detection errors in non-standard structures, providing a quantitative theoretical basis for optimizing ultrasonic testing procedures for the pressure vessel weld zone.

Keywords: pressure vessel; non-destructive testing; phased array ultrasound; shadowing effect; signal correction

0 引言

压力容器广泛应用于石油、化工、电力等行业,是承载高压流体的设备,任何微小的结构缺陷都可能导致重大事故。因此对压力容器及其传输管道进行有效的无损检测至

关重要^[1]。在化工工艺中,斜接管会设计有不同的几何角度:锐角、直角和钝角。斜接管常用于非正交方向的流体传输或结构支撑,可实现流体旋流分离、便于装卸料。针对大尺寸或异形斜接管,其生产方式通常采用焊接拼制法,焊缝在焊接和服役过程中易产生夹渣、裂纹、气孔等不同类型缺

收稿日期:2025-04-18

*基金项目:甘肃省重点研发计划-工业类项目(23YFGA0036)、国家自然科学基金地区科学基金(52405594)项目资助

陷^[2]。这些缺陷会严重影响压力容器的承载稳定性和从业人员的人身及财产安全,为确保其安全稳定运行,需定期加强对斜接管尤其是焊缝结构的质量检测^[3]。

目前,关于焊缝相控阵超声检测(phased array ultrasonic testing, PAUT)的研究主要集中在标准焊缝和直角结构的检测。例如,Li 等^[4]针对直角对接焊缝建立阵列仿真模型,Zhou 等^[5]开发了适用于奥氏体焊缝的射线追踪技术,这些研究为超声检测技术的发展奠定了基础。然而,压力容器斜接管焊接的几何角度多样性(锐角、直角、钝角)对检测性能的影响尚未得到系统性研究。尽管何慈武等^[6]通过有限元仿真优化了直角接管检测工艺,但其模型未涵盖锐角区域的遮挡效应;周扬帆等^[7]提出的曲面相控阵聚焦演示方法虽改善了声束入射条件,但未量化张角对声程差异的影响;王松等^[8]通过超声相控阵方法在复合材料 R 区取得进展,但未解决金属结构多角度声束衰减的补偿问题。值得注意的是,Virkkunen 等^[9]针对异种金属焊缝的虚拟循环实验表明,复杂几何界面会导致声束偏折伪像,显著降低缺陷定量精度;Li 等^[10]进一步指出,V 型坡口焊缝的声场分布对几何角度高度敏感,传统直角模型难以直接推广至非标结构。上述研究揭示了现有方法的局限性:一方面,锐角结构的声束遮挡效应易掩盖缺陷信号,杨宸旭等^[11]提出的小波降噪法虽能提升信噪比,但未从声场传播机理上解决幅值衰减问题;另一方面,钝角结构的声束发散与多重反射可能引发伪像干扰,现有校准模型由康亚轩等^[12]提出的双层介质全聚焦成像方法难以兼顾复杂声程补偿。

针对上述问题,本文通过构建几何张角-声束传播衰减模型,定量揭示 45°~135°范围内超声波传播特性与缺陷信号响应的映射关系,开发基于声程补偿的信号修正算法,克服锐角遮挡与钝角伪像对检测精度的影响。通过仿真与实验验证,为非标斜接管结构的超声检测工艺提供普适性优化依据,填补现有方法在复杂几何适应性上的空白。

1 斜接管超声波检测基础理论

1.1 相控阵超声

相比于单一阵元的超声探头,相控阵探头由多个阵元组成,可以通过电子系统控制各阵元发射或接收超声波的时间(相位)实现声束在一定角度范围内的偏转和聚焦。具备更高的信噪比和对缺陷更强大的评估能力^[13],并在焊接结构无损检测中的应用显著增加。超声波在非垂直入射的情况下,当经过不同几何角度时,会发生折射或反射,使得声束的传播方向和传播距离受到影响,可能会产生不真实的反射,形成伪像。这些伪像可能会干扰缺陷的准确定位和评估,使得对斜接管内部的缺陷探测变得更加困难。同时接管几何角度的改变可能导致超声波在某些角度下难以到达特定焊缝区域,从而产生盲区,使得某些潜在缺陷无法被有效探测^[14]。

超声相控阵检测技术以其高分辨率、实时成像等优点成为无损检测领域内的研究热点。一个由 n 个阵元组成的超声相控阵,阵元位于介质 1 中,目标聚焦点 r_f 位于介质 2 内。两介质的分界面为平面 $z=z_0$,声波从阵元发射后经此平面折射聚焦于 r_f 。阵元 n 的位置定义为 $r_n=(x_n, y_n, z_n)$,其发射的声波在折射面处的入射点为 $r'_n=(x'_n, y'_n, z'_n)$ 。声波在均匀介质中的传播由波动方程描述:

$$\nabla^2 p(r, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: $p(r, t)$ 为声压场(单位为 Pa), c 为当前介质的声速(单位为 m/s), $r=(x, y, z)$ 为空间坐标(单位为 m)。

声波从阵元 r_n 发射,由楔块经平面分界面 $z=z_0$ 折射进入试样后传播至焦点 r_f 。入射点 r'_n 的坐标由直线传播路径与分界面的交点确定:

$$r'_n = r_n + t_n \mathbf{d}_n \quad (2)$$

式中: $\mathbf{d}_n = \frac{r_f - r_n}{|r_f - r_n|}$ 为发射方向单位向量, t_n 为入射段路径长度(单位为 m)。

由平面方程 $z=z_0$ 解得:

$$t_n = \frac{z_0 - z_n}{d_{n,z}} \quad (3)$$

式中: $d_{n,z}$ 为 d_n 的 z 分量。入射角 θ_i 满足:

$$\sin\theta_i = \sqrt{d_{n,x}^2 + d_{n,y}^2} \quad (4)$$

式中: $d_{n,x}$ 和 $d_{n,y}$ 分别为 d_n 的 x 分量和 y 分量,根据 Snell 定律,折射角 θ_t 满足:

$$\frac{\sin\theta_i}{c_{\text{wedge}}} = \frac{\sin\theta_t}{c_T} \quad (5)$$

式中: c_{wedge} 为楔块声速, c_T 为试样横波声速。入射声波的总传播路径由楔块入射段(介质 1)和试样折射段(介质 2)组成:

$$L_n = \underbrace{|r_{n'} - r_n|}_{L_n^{(1)}} + \underbrace{|r_f - r_{n'}|}_{L_n^{(2)}} \quad (6)$$

式中: L_n 代表总传播路径。声波在介质中的总传播时间为:

$$\tau_n = \frac{L_n^{(1)}}{c_{\text{wedge}}} + \frac{L_n^{(2)}}{c_T} \quad (7)$$

式中: τ_n 为声波从阵元发射到缺陷的传播时间(单位为 s)。考虑声波在介质内部的衰减效应,阵元 n 的声压贡献为:

$$p_n(r_f, t) = \frac{U_n}{L_n} e^{-(\alpha_1 L_n^{(1)} + \alpha_2 L_n^{(2)})} e^{i(k_1 L_n^{(1)} + k_2 L_n^{(2)} - \omega(t - \tau_n) + \phi_n)} \quad (8)$$

式中: U_n 为阵元 n 的发射振幅(单位为 Pa·m), $k_1 = \omega/c_{\text{wedge}}$ 、 $k_2 = \omega/c_T$ 分别为两介质的波数, ϕ_n 为阵元初始相位(单位为 rad)。 α_1 、 α_2 分为两介质的衰减系数。总声场为所有阵元声压的线性叠加:

$$p_{\text{total}}(r_f, t) = \sum_{n=1}^N p_n(r_f, t) \quad (9)$$

1.2 结构张角对声束传播的影响

斜接管在设计和使用过程中,会因不同的角度设计不同的结构张角。斜接管实物图如图 1 所示。



图 1 斜接管实物图

Fig. 1 Physical diagram of mitered pipe

试样的几何张角对超声波的反射、透射、散射和遮挡效应有显著影响^[15],不同张角 θ 会影响声束的声线覆盖区域,试样的张角若仅遮挡部分声束,可能会导致回波幅值有小幅下降,若几何张角几乎完全遮挡声束,如图 2 所示,则会导致后方区域信号显著衰减,信号分辨率大幅降低。

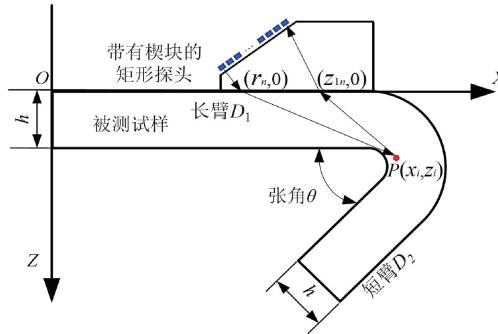


图 2 斜接管 R 区声线传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of acoustic propagation in R-area of mitered pipe

几何角度差异将从 3 个层面影响检测可靠性:通过改变声学边界条件使折射系数和反射系数产生变化,导致波束聚焦特性发生偏移,引发时域信号的多重反射叠加现象。现有的数学模型大多数聚焦于直角结构的声波传播特性^[16-17],对于锐角和钝角的建模较少。尽管有些研究尝试通过仿真模拟声束传播过程,但对于实际压力容器中的复杂结构,尤其是不同几何角度下的传播特性,仍然缺乏详细的定量分析和系统性研究。

由于斜接管的 R 区为复杂曲面,垂直入射声束易因曲面反射导致声能分散,难以覆盖缺陷区域。采用楔块斜入射设计,通过调整声束折射角,可使声束准确覆盖,避免近场干扰并提升声场聚焦能力^[18]。选用有机玻璃楔块,其声阻抗与铝合金试样匹配度较高,可减少界面反射损失。此外,楔块与探头接触面存在微小间隙,直接耦合时空气层(声阻抗 $\approx 0 \text{ Rayl}$)会导致大量声能反射损失。实际使用时应选用声阻抗匹配的水基凝胶作为耦合剂,在填补间隙

且降低界面反射率的同时,显著提高透射效率^[19]。缺陷位置设定在张角 θ 的角平分线上,距内径 3 mm 处。若是固定检测楔块的位置,则声束会以固定的折射角 θ_r 进入试样,在较小的张角 θ (如 45°),超声波因试样本身的结构发生遮挡效应,导致信号难以准确聚焦至缺陷处。考虑超声波在遮挡结构中的声波衰减,建立包含遮挡效应的衰减模型,表征幅值 $A(z, \theta)$ 的衰减程度。声束在弯曲段的实际作用曲率与张角 θ 相关幅值衰减模型可以写为:

$$A(z, \theta) = A_0 \cdot k(\alpha) \cdot e^{-\alpha z} \quad (10)$$

式中: $A(z, \theta)$ 为缺陷修正后的超声波响应幅值, A_0 为初始发射波幅值, α 为材料固有衰减系数,由介质的吸收、散射等引起, z 为检测深度。

遮挡比例系数 $k(\alpha)$ 定义了声波通过遮挡区域时的声波衰减率:

$$k(\alpha) = \frac{H_{\text{遮挡距离}}}{W} \quad (11)$$

式中: $H_{\text{遮挡距离}}$ 是超声波以固定的折射角 θ_r 进入试样时其传播路径上被试样内径结构所阻挡的轴向距离分量, W 为声束宽度(单位为 m), 数学表达式如下:

$$W = 2z \cdot \tan(\gamma_{-6}) \quad (12)$$

式中: γ_{-6} 为宽度方向矩形晶片的声束半扩散角,计算方法如下:

$$\gamma_{-6} = \arcsin\left(0.44 \frac{\lambda}{L}\right) \quad (13)$$

式中: L 为探头晶片宽度, λ 为波长, z 为缺陷与探头表面距离。 $H_{\text{遮挡距离}}$ 的数学表达式如下:

$$H_{\text{遮挡距离}} = \left(R_1 + \frac{W}{2} \right) - (d + R_1) \times \sin \left[\arctan \left(\frac{h + R_1 - (d + R_1) \sin \frac{\theta}{2}}{D_1 + (d + R_1) \cos \frac{\theta}{2} - r'_{x1}} \right) + \frac{\theta}{2} \right] \quad (14)$$

式中: h 为试样厚度, R_1 为内径, d 为缺陷与内径 R_1 切线的距离, D_1 为斜接管长臂长度, r'_{x1} 为第一入射点横坐标值。

缺陷点位置 (x_i, z_i) 的设置与张角 θ 由几何关系得到:

$$\begin{cases} x_i = D_1 + (R_1 + d) \cos \frac{\theta}{2} \\ z_i = D_2 - (R_1 + d) \sin \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: D_2 为斜接管短臂长度。

2 模型仿真验证

2.1 仿真结构划分及参数赋值

超声波的传播特性(如声速、衰减系数、波束扩散角)会直接影响仿真结果的准确性。为验证上述结构张角-声束传播衰减模型在计算上的优势与有效性,本文基于各向同

性假设,采用时域有限差分法(finite difference time domain,FDTD)计算声场分布,建立了斜接管 R 区结构动态响应仿真模型,用于分析超声波的传播特性。

在网格尺寸($\Delta X = \Delta Z = 0.02$ mm)划分上满足 Nyquist 采样定理,确保 $\Delta \leq \lambda/12$ 的精细分辨率。若仿真过程中网格尺寸过大(如 $\Delta > 0.05$ mm),声压幅值计算误差将超过 15%,导致遮挡效应的声程差被噪声掩盖,无法区分不同张角的衰减规律^[20]。时间步长 $\Delta t = 2.0\ \mu s$ 严格满足 Courant 稳定性条件^[21],若 $\Delta t > 3.0\ \mu s$,声场幅值将超过 $\pm 20\%$,可能错误放大钝角结构的伪像信号。

在材料参数赋值中,横波声速误差控制在 $\pm 1\%$,聚焦深度偏差才能小于 0.5 mm。弹性常数误差通常需控制在 $\pm 3\%$ 以内,若弹性常数 C_{11} 偏差达 5%,横波声速计算误差将导致声程偏移 $\Delta L = 0.8$ mm,对应 $\theta = 45^\circ$ 试块缺陷定位误差随之增加到 ± 1.5 mm,直接影响遮挡比例系数 $k(\alpha)$ 的标定精度。因此,参数精确赋值是验证模型有效性的关键前提^[22]。

基于 FDTD 算法建立了铝合金斜接管 R 区的相控阵超声动态响应仿真模型。考虑到斜接管通常管径曲率较大,在仿真时近似将曲面简化成平面,以 90°的斜接管为例长短两臂分别建立 X-Z 坐标系。模型厚度 h 设置为 15 mm,长臂 D_1 为 80 mm,短臂 D_2 为 30 mm,内径 R_1 和外径 R_2 分别为 5 mm 和 20 mm 曲率半径的 1/4 圆弧,如图 3 所示。

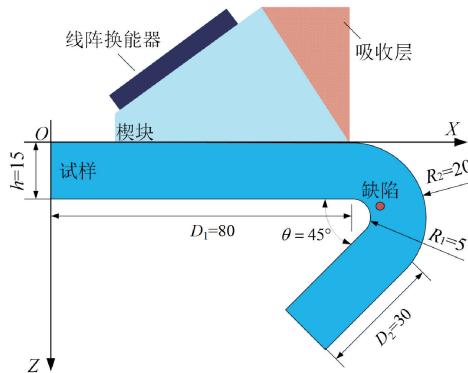


图 3 斜接管 R 区结构动态响应仿真模型

Fig. 3 Dynamic response simulation model of R-area structure for mitered pipe

材料为 6061 铝合金,其材料参数表如表 1 所示,根据各向同性固体材料中横波声速计算公式可得:

$$c_T = \sqrt{\frac{C_{11} - C_{12}}{2\rho}} = 3130 \text{ m/s} \quad (16)$$

式中: C_{11} 、 C_{12} 为材料弹性常数, ρ 为材料密度。

该模型划分为换能器结构、楔块结构、吸收边界结构、耦合层结构、铝合金斜接管 R 区结构和缺陷结构。铝合金斜接管结构及材料参数如表 2 所示。相控阵超声换能器结构设置为线性阵列相控阵超声换能器,换能器参数如表 3

表 1 仿真材料参数

Table 1 Parameters of simulation materials

参数	符号	数值	单位
密度	ρ	2 700	kg/m^3
弹性常数	C_{11}	68.9×10^9	Pa
弹性常数	C_{12}	39.6×10^9	Pa

所示。楔块结构设置为有机玻璃常规斜楔块,楔块参数如表 4 所示。4 个缺陷结构均设置为直径 2 mm 的球形缺陷,且位于斜接管 R 角区域张角的角平分线上距离内径 3 mm,坐标及偏移量参数如表 5 所示。

表 2 铝合金斜接管结构及材料参数

Table 2 Structural and material parameters of aluminum alloy mitered pipe

纵波 声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横波 声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	内径/ mm	外径/ mm	结构尺 寸/mm
6 300	3 120	2 700	5	20	$100 \times 100 \times 30$

表 3 线性阵列相控阵超声换能器参数

Table 3 Parameters of linear array phased array ultrasonic transducer

阵元 数量	阵元间 距/mm	阵元宽 度/mm	中心频 率/MHz	换能器 尺寸/mm
64	0.6	0.5	7.5	$20 \times 10 \times 5$

表 4 有机玻璃常规楔块参数

Table 4 Parameters of polymethyl methacrylate (PMMA) conventional wedge

倾角/ ($^\circ$)	声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	楔块尺 寸/mm	第一阵元参数/mm
36	2 337	1 050	$60 \times 30 \times 40$	3 5

表 5 试件缺陷参数

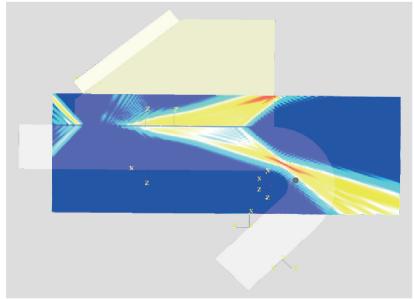
Table 5 Defect parameters of specimens

缺陷 编号	缺陷坐 标/mm	张角/ ($^\circ$)	与底面的 Z 轴偏移量/mm
A1	(87.39, 16.94)	45	-1.94
A2	(86.93, 16.00)	60	-1.00
A3	(85.65, 14.34)	90	+0.66
A4	(83.06, 12.61)	135	+2.39

2.2 仿真声场特性验证

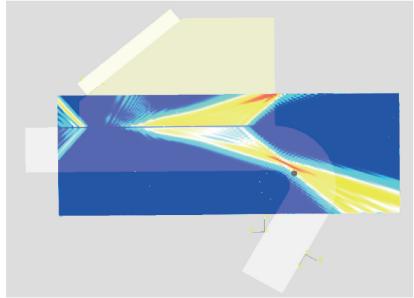
FDTD 算法广泛应用于超声波在弹性各向同性介质中的传播问题。一般用于规则形状弹性固体的二维超声声场计算,具有较高的检测效率和精度^[23]。换能器参数设置对

相控阵超声检测成像结果起到至关重要的作用。通过研究相控阵换能器合成波束的稳态声场特性,针对不同张角的试样进一步验证所提出的遮挡效应。基于 FDTD 的声场特性分析方法,对铝合金斜接管不同张角 θ 的 4 个试样的横波波束传播特性进行分析,其声压分布如图 4 所示。由



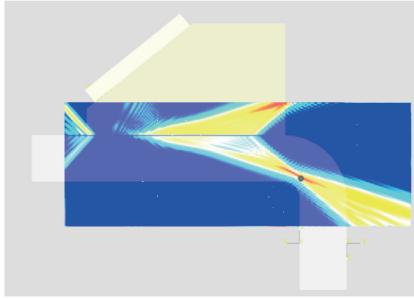
(a) 试样张角为45°的声压分布

(a) Sound pressure distribution with the bend angle of 45°



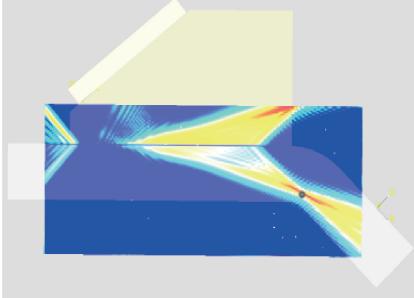
(b) 试样张角为60°的声压分布

(b) Sound pressure distribution with the bend angle of 60°



(c) 试样张角为90°的声压分布

(c) Sound pressure distribution with the bend angle of 90°



(d) 试样张角为135°的声压分布

(d) Sound pressure distribution with the bend angle of 135°

图 4 相控阵超声动态响应仿真模型中声压分布

Fig. 4 Acoustic pressure distribution in phased array ultrasonic dynamic response simulation model

于缺陷的设置与张角之间存在式(15)的线性函数关系,且声束主瓣宽度 W 在聚焦深度处最窄。当缺陷的纵坐标值随着试样张角的变小而减小,超声波易被试样转角处的结构遮挡住部分能量,导致部分信号无法准确聚焦至缺陷处。随着试样张角增大,缺陷位置的纵坐标值逐渐增大,缺陷位于 R 区结构之上,超声波主声束能准确地抵达缺陷位置。

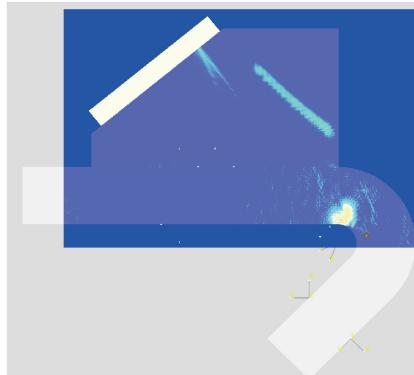
2.3 相控阵超声动态响应仿真

在完成声场特性验证后,兼顾仿真计算精度和效率。由上述 2.1 节讨论确定了仿真模型的网格尺寸为 $\Delta X = 0.02 \text{ mm}$, $\Delta Z = 0.02 \text{ mm}$ 。根据 Courant 稳定性条件,二维 FDTD 计算中的时间步长 Δt 满足下式:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta X^2 + \Delta Z^2}}} \quad (17)$$

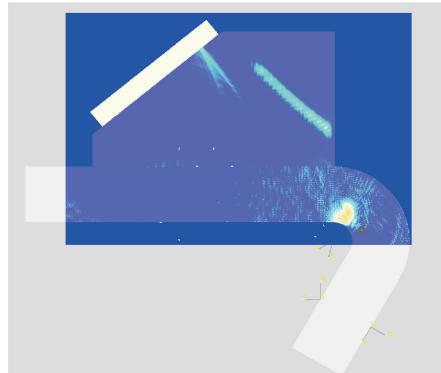
根据上述条件,设定 FDTD 算法中 Δt 确定为 $2.0 \mu\text{s}$ 以满足稳定性的要求。完成参数的选定后开展铝合金斜接管的相控阵超声动态响应仿真。为了研究试样张角的变化对超声波传播影响,在仿真激励信号的过程中设定线性阵列换能器参数和检测位置保持不变,试样的张角 θ 分别设置为 45° 、 60° 、 90° 、 135° 进行 4 组相控阵超声动态响应仿真。

如图 5 所示,动态响应仿真结果表明超声波在试样几何张角 θ 分别为 45° 和 60° 的试样介质内传播时,其声束路径受内部几何特征影响会产生遮挡效应,无法保持原有聚



(a) 试样张角为45°的动态响应仿真

(a) Dynamic response simulation of the bend angle of 45°

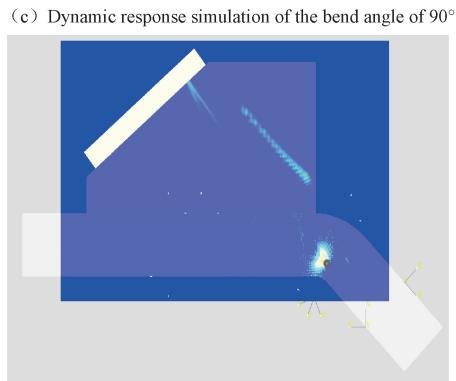


(b) 试样张角为60°的动态响应仿真

(b) Dynamic response simulation of the bend angle of 60°



(c) 试样张角为90°的动态响应仿真



(d) 试样张角为135°的动态响应仿真

图 5 铝合金斜接管 R 区的相控阵超声动态响应仿真结果
Fig. 5 Simulation results of phased array ultrasonic dynamic response in R-area of aluminum alloy mitered pipe

焦状态抵达缺陷处,且张角 θ 越小该效应越显著。

如图 6 所示,根据相控阵超声 A 型信号成像可知,当试样张角 θ 为 45° 和 90° 时,遮挡效应的发生使得回波信号的幅值只有 1 350 和 1 750。当试样张角 θ 达到 90° 和 135° 时,均录得信号最大回波幅值 2 200,超声波的遮挡效应基本消除。造成该结果的原因是声波与结构界面相互作用引发的能量耗散,使得入射声束在 R 区发散并伴随幅值衰减。根据这 4 种张角的 A 型信号显示成像,得出了几何张角的大小会对检测信号的幅值存在影响,验证了理论模型的正确性。

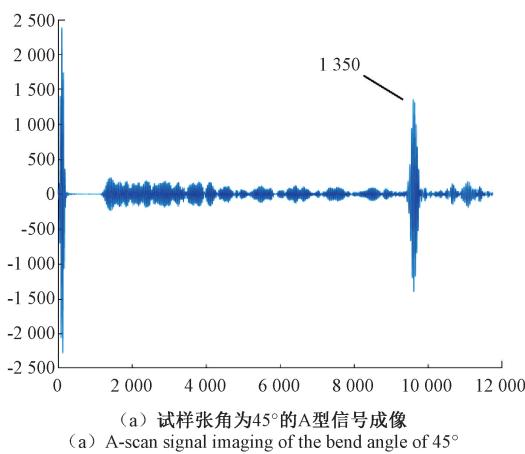
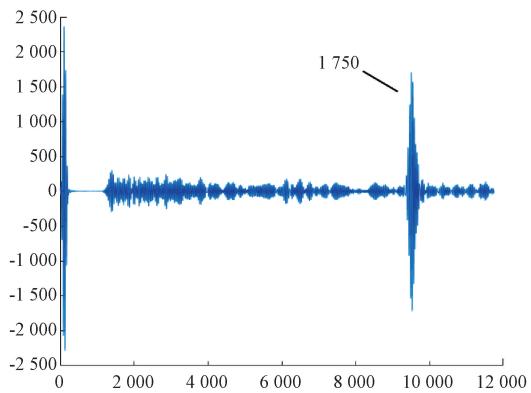
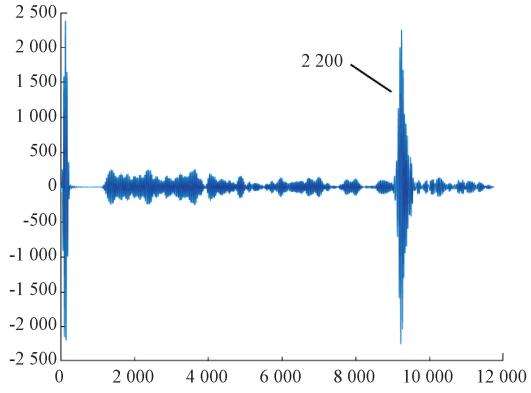
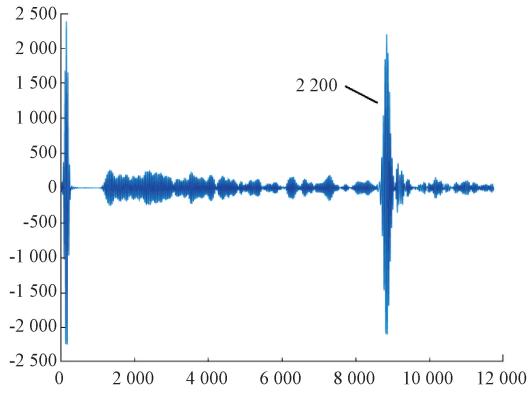
(a) 试样张角为45°的A型信号成像
(a) A-scan signal imaging of the bend angle of 45°(b) 试样张角为60°的A型信号成像
(b) A-scan signal imaging of the bend angle of 60°(c) 试样张角为90°的A型信号成像
(c) A-scan signal imaging of the bend angle of 90°(d) 试样张角为135°的A型信号成像
(d) A-scan signal imaging of the bend angle of 135°

图 6 铝合金斜接管 R 区的相控阵超声 A 型信号成像

Fig. 6 A-scan signal imaging of phased array ultrasonic in R-area of aluminum alloy mitered pipe

3 实验与仿真对比验证

3.1 实验设计

为了验证该模型的有效性及实际检测能力,根据仿真试件尺寸及含缺陷信息,设计并制备了如图 7 所示不同张角的铝合金 L 型试块,张角分别为 45°、60°、90°、135°,对应缺陷编号分别是 A1、A2、A3 和 A4。在试块的 R 区加工直

径为 2 mm 的圆孔,以模拟实际出现的气孔缺陷。相控阵超声检测系统包括相控阵超声检测系统、相控阵超声板卡、有机玻璃楔块及 7.5 MHz 线性阵列相控阵换能器,如图 8 所示。试验检测参数,如试件和楔块的波速、激励信号、探头参数等均与文中的仿真模型一致。

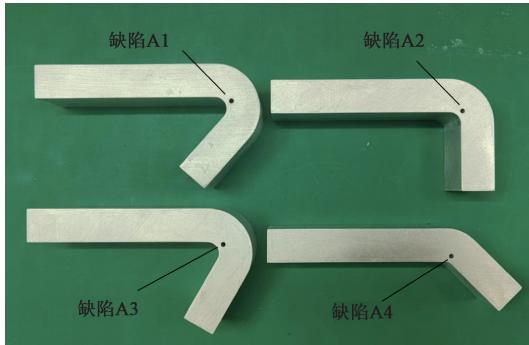


图 7 预加工气孔缺陷的铝合金斜接管试样

Fig. 7 Aluminum alloy miter joint specimens with pre-drilled porosity defects

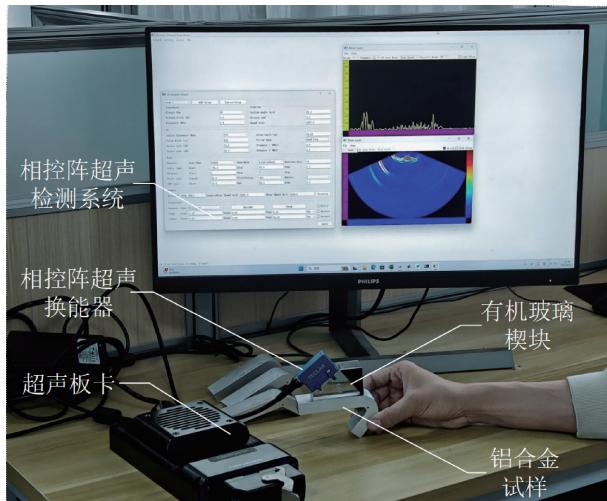


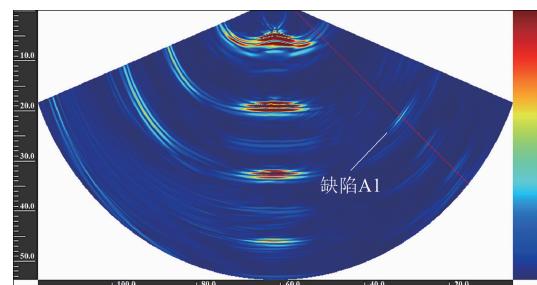
图 8 铝合金斜接管相控阵超声检测系统

Fig. 8 Phased array ultrasonic testing system for aluminum alloy mitered pipe

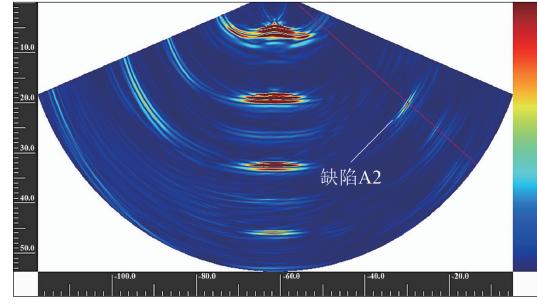
3.2 实验结果与模型对比

针对模拟气孔缺陷的不同张角的铝合金 L 型试块,采用相控阵超声检测技术对 4 个 L 型试样进行了相控阵超声检测,获得的 S 型成像结果如图 9 所示,并在图 9 中标注各试样的缺陷位置。

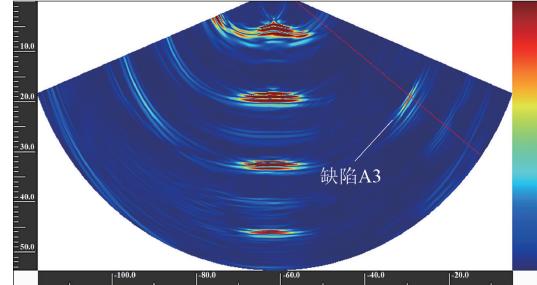
S 型显示成像结果表明,通过斜楔块入射、调整相控阵超声合成声束偏转角度和调整聚焦深度的方式,PAUT 对不同张角的 L 型试块内部缺陷均具较好的检出能力。从缺陷 A1~A4 的 S 型显示成像结果看出缺陷位置分辨率逐渐增高,缺陷信号回波逐渐增强,气孔缺陷成像质量相对清晰。为量化相控阵超声对不同张角的检测能力,引入衡量有效回波信号强度与背景噪声能量的关键参数信噪比



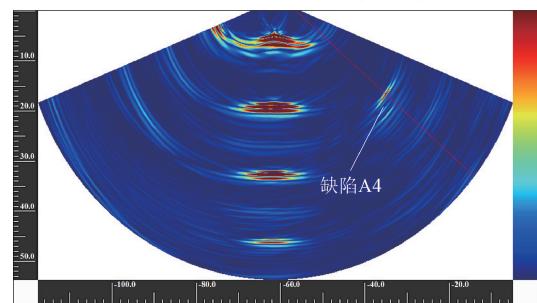
(a) 缺陷 A1 S型成像图($\theta=45^\circ$)
(a) Defect A1 S-scan imaging($\theta=45^\circ$)



(b) 缺陷 A2 S型成像图($\theta=60^\circ$)
(b) Defect A2 S-scan imaging($\theta=60^\circ$)



(c) 缺陷 A3 S型成像图($\theta=90^\circ$)
(c) Defect A3 S-scan imaging($\theta=90^\circ$)



(d) 缺陷 A4 S型成像图($\theta=135^\circ$)
(d) Defect A4 S-scan imaging($\theta=135^\circ$)

图 9 铝合金斜接管相控阵超声 S 型显示成像结果

Fig. 9 S-scan imaging results of phased array ultrasonic for aluminum alloy mitered pipe

(signal-to-noise ratio, SNR)。缺陷检测信噪比的计算公式为:

$$SNR = 20\lg \frac{H_1}{H_2} \quad (18)$$

式中: H_1 为回波信号中缺陷信号的最大幅值, H_2 为噪声

信号的最大幅值。

提取 A1、A2、A3、A4 四个缺陷所在通道的 A 型显示成像回波信号,如图 10 所示。针对试样 A1 与 A2 中存在的负向 Z 轴偏移缺陷特征,即缺陷位置低于试样底面的情况,需采用基于幅值衰减模型的信号补偿方法式(10)进行修正处理。修正后的缺陷信噪比 SNR 如表 6 所示。

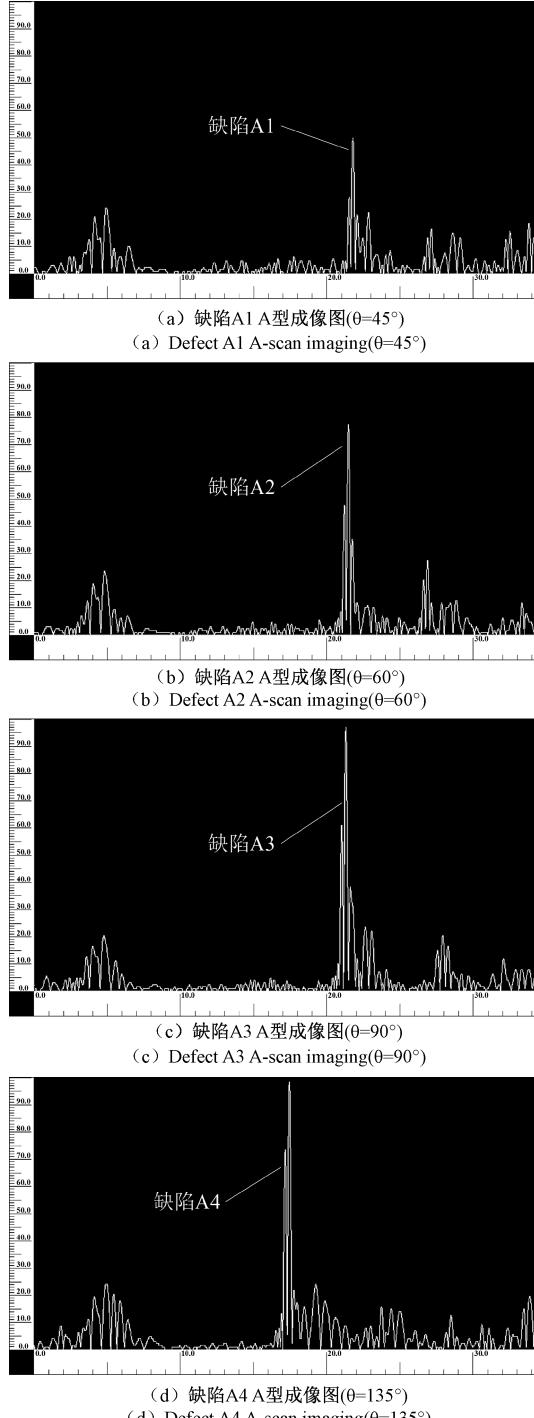


图 10 铝合金斜接管相控阵超声 A 型显示成像结果
Fig. 10 A-scan imaging results of phased array ultrasonic for aluminum alloy mitered pipe

表 6 相控阵缺陷回波信号与噪声信号

Table 6 Phased array defect echo signals and noise signals

编号	回波信号	修正值	噪声信号	信噪比/dB	修正后信噪比
A1	50.40	97.4	24.50	6.27	11.99 dB
A2	77.50	97.5	27.50	9.00	12.00 dB
A3	97.60	—	23.50	12.37	—
A4	98.80	—	24.50	12.11	—

注:—代表回波信号满足回波信号幅值要求无需修正。

通过结合图 10 和表 6 可知,相控阵缺陷回波信号与噪声信号的信噪比 SDR 在未修正前均大于 6 dB,满足常规超声检测的要求。当试样几何张角 θ 为 45° 和 60° 时,由于缺陷位置过于靠近下表面,超声波受到显著的试样几何结构遮挡效应,导致缺陷回波幅值较低,信噪比较低,实际检测中可能会发生误判。当试样 θ 达到 90° 和 135° 时,超声波的遮挡效应基本消除,缺陷信号幅值明显提升。对经过修正后的信号进行对比可以得出,缺陷信号幅值由 50.4 提升至 97.4,信噪比从 6.27 dB 增至 11.99 dB。45° 和 60° 试样的信噪比计算偏差小于 1.5 dB,缺陷检出率提升 23%。

该实验为理论模型和仿真模型的正确性提供了数据支撑。随着 θ 的增大,遮挡比例系数 $k(\alpha)$ 减小,超声波响应幅值 $A(\theta)$ 增大,缺陷信号的信噪比和幅值均得到显著提升。

4 结 论

在考虑超声波路径和试样几何结构遮挡效应的情况下,本文系统研究了斜接管张角设计对相控阵超声检测性能的影响,得出以下结论。

通过建立了结构几何张角-声束传播衰减模型,揭示了不同张角 θ 条件下超声波传播特性与缺陷检测效果之间的内在关联,针对 45°、60°、90°、135° 四种不同张角的斜接管结构,验证了相控阵超声声场的定量映射关系。

进行了铝合金斜接管气孔缺陷的相控阵超声检测仿真分析和实验验证。结果表明斜接管张角变化导致的几何遮挡效应会显著影响超声检测性能,直接影响检测信号的回波幅值、信噪比以及缺陷识别能力。

本研究为压力容器非标结构的超声检测提供了可量化的优化依据。未来研究可进一步结合材料特性、焊接残余应力及服役环境等因素,建立更全面的检测参数优化体系,以提升复杂结构无损检测的工程适用性。

参考文献

- [1] QIU SH C, ZHANG L Y. Application of nondestructive testing in inspection of boiler and pressure vessel and pressure piping [J]. Technical Gazette/Tehnički Vjesnik, 2021, 28(6): 1864-1870.

- [2] SUN J, LI CH, WU X J, et al. An effective method of weld defect detection and classification based on machine vision[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6322-6333.
- [3] ZANG X L, XU ZH D, LU H F, et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: A review[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 206: 105033.
- [4] LI W T, ZHOU ZH G, LI Y. Inspection of butt welds for complex surface parts using ultrasonic phased array[J]. Ultrasonics, 2019, 96: 75-82.
- [5] ZHOU H P, HAN Z D, DU D, et al. A combined marching and minimizing ray-tracing algorithm developed for ultrasonic array imaging of austenitic welds[J]. NDT and E International, 2018, 95: 45-56.
- [6] 何慈武, 杨萌萌, 龙晋桓, 等. 小径薄壁管座角焊缝典型缺陷的超声相控阵 CIVA 仿真研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9): 1065-1072.
- HE C W, YANG M M, LONG J H, et al. Ultrasonic phased array CIVA simulation of typical defects in fillet welds of small-diameter thin-walled tube bases[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(9): 1065-1072.
- [7] 周扬帆, 涂君, 毛轶豪, 等. 用于曲面构件超声相控阵检测的聚焦延时方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2): 222-230.
- ZHOU Y F, TU J, MAO Y H, et al. Research on focus delay method for ultrasonic phased array inspection of curved surface components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(2): 222-230.
- [8] 王松, 王铮, 席欢. 复合材料 R 区超声相控阵检测声场仿真试验研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(22): 60-68.
- WANG S, WANG ZH, XI H. Simulation and experimental study on ultrasonic phased array inspection for R-zone of composite material [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(22): 60-68.
- [9] VIRKKUNEN I, KOSKINEN T, SILJAMA O. Virtual round robin 2-Phased array inspection of dissimilar metal welds[J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 414: 112555.
- [10] LI W T, ZHANG W B, YANG G P, et al. Application research on ultrasonic phased array detection algorithm for austenitic stainless steel with V-groove weld[J]. Measurement, 2024, 226: 114169.
- [11] 杨宸旭, 高鸿波, 沈佳卉, 等. 基于小波包分解的超声相控阵前置阈值降噪研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(10): 1368-1374.
- YANG CH X, GAO H B, SHEN J H, et al. Research on pre-threshold denoising of ultrasonic phased array based on wavelet packet decomposition[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35 (10): 1368-1374.
- [12] 康亚轩, 陈俊超, 龚真珍, 等. 面向非规则界面双层介质超声全聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2024, 44(12): 307-315.
- KANG Y X, CHEN J CH, GONG ZH ZH, et al. Ultrasonic total focusing method for double-layer media with irregular interface[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 44(12): 307-315.
- [13] 张楠, 许才彬, 邓明晰. 检测声学成像原理与技术综述[J]. 应用声学, 2025, 44(1): 13-35.
- ZHANG N, XU C B, DENG M X. Review of principles and techniques of acoustic inspection imaging methods[J]. Journal of Applied Acoustics, 2025, 44(1): 13-35.
- [14] SHENG T CH, SHI W J, ZHAO B. Ultrasonic guided wave pipeline defect detection based on spectral subtraction[C]. 2023 17th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA). IEEE, 2023: 1-5.
- [15] 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.
- [16] 周正干, 李尚凝, 李洋. 相控阵超声检测方案设计关键技术及其在航空航天领域的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 461-467.
- ZHOU ZH G, LI SH N, LI Y. Key techniques of ultrasonic phased array testing solution design and its application in aerospace [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 461-467.
- [17] 罗忠兵, 曹欢庆, 林莉. 航空复材构件 R 区相控阵超声检测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 67-75.
- LUO ZH B, CAO H Q, LIN L. Progress in study of phased array ultrasonic testing on CFRP radii in aerospace component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 67-75.
- [18] 邓江勇, 陈振华, 董德秀, 等. 超声相控阵传感器阵元间串扰源分析及其隔离方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2): 222-230.

- 报, 2022, 36(9): 132-139.
- DENG J Y, CHEN ZH H, DONG D X, et al. Analysis and isolation method of crosstalk between the elements in ultrasonic phased array transducer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 132-139.
- [19] 曹欢庆, 朱启民, 赵培含, 等. 复杂型面结构超声成像检测研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 42-53.
- CAO H Q, ZHU Q M, ZHAO P H, et al. Survey on ultrasonic imaging of complex-shaped structures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 42-53.
- [20] 孔惠元, 王鉴, 李仰军, 等. 圆柱类构件超声相控阵聚焦模型[J]. 应用声学, 2024, 43(1): 213-222.
- KONG H Y, WANG J, LI Y J, et al. The ultrasonic phased array focusing model of cylindrical component [J]. Journal of Applied Acoustics, 2024, 43(1): 213-222.
- [21] 张鑫宇, 范惜梅, 李忠虎, 等. 管道超声相控阵全聚焦成像仿真及算法优化 [J]. 电子测量技术, 2024, 47(6): 151-156.
- ZHANG X Y, FAN X M, LI ZH H, et al. Simulation and optimization of ultrasonic phased array full-focus imaging for pipes [J]. Electric Measurement Technology, 2024, 47(6): 151-156.
- [22] 沙经伟, 范孟豹, 曹丙花, 等. 金属构件硬度的无损检测研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 1-17.
- SHA J W, FAN M B, CAO B H, et al. Non-destructive testing for hardness of metal components: recent advances and future perspectives [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(24): 1-17.
- [23] LI W T, ZHANG W B, YANG G P. Research on ultrasonic phased array detection algorithm for TA15/Ti2AlNb multi-layer gradient material structure [J]. Applied Acoustics, 2023, 204: 109240.

作者简介

马朝阳,硕士,高级工程师,主要研究方向为承压类特种设备检验检测。

E-mail:276898942@qq.com

梁煌朗(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为阵列超声无损检测技术。

E-mail:lut_eddie@foxmail.com