

管道缺陷超声波水耦合内检测技术

夏琦¹ 王国庆¹ 杨理践¹ 张华凯¹ 贝师丞¹ 綦振国²

1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院; 2. 抚顺市检验检测认证中心特检所

摘要:管道在长期服役过程中会产生腐蚀、裂纹等缺陷。为了探究超声波水耦合检测技术对钢管内外表面缺陷的检测规律,提高管道缺陷检测精度,基于超声波传播理论,建立了水耦合厚壁钢管超声检测有限元仿真模型,研究了超声波在水介质及钢管中的传播和声场分布,分析了水层厚度与入射角度对回波信号的影响规律,并搭建平台进行验证。研究结果表明:①回波信号幅值随水层厚度的增加呈递减趋势,两次回波峰值比亦随水层厚度的增加而减小;②在水层厚度为10 mm时,回波信号的幅值达到最大;③当水层厚度超过25 mm时,回波信号的幅值大小逐渐趋于平稳,与回波峰值比趋势相同;④当水层厚度相同时,内表面裂纹检测的最佳入射角度为30°,外表面裂纹检测的最佳入射角度为20°。结论认为,该研究成果为水耦合超声检测系统的参数优化及检测工艺制订提供了理论依据。

关键词:厚壁钢管;超声波检测;水耦合;回波信号

中图分类号:TB553

文献标志码:A

文章编号:2097-5260(2025)05-0024-09

DOI:10.26949/j.issn.2097-5260.2025.05.003

Water-coupled ultrasonic in-line inspection technique for pipeline defects

XIA Qi¹, WANG Guoqing¹, YANG Lijian¹, ZHANG Huakai¹, BEI Shicheng¹, QI Zhenguo²

1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology; 2. Special Equipment Supervision and Inspection Institute of Fushun Inspection, Testing and Certification Center

Abstract: Pipelines are susceptible to defects such as corrosion and cracking during long-term service. This study aims to investigate patterns in detecting internal and external surface defects in steel pipelines using the water-coupled ultrasonic detection technique and to enhance the accuracy of pipeline defect detection. To achieve this, a finite element simulation model was developed to replicate the water-coupled ultrasonic detection of thick-walled steel pipes, based on ultrasonic propagation theory. Subsequent studies examined the propagation and sound field distribution of ultrasonic waves in both water media and steel pipelines, as well as the influence of water layer thickness and incident angle on echo signals. To verify the study results, an experimental platform was constructed. The study results are summarized as follows: ① The amplitude of echo signals decreases with increasing water layer thickness, and the ratio of any two echo peaks also declines as the water layer thickness increases. ② The amplitude of echo signals reaches its peak at a water layer thickness of 10 mm. ③ When the water layer thickness exceeds 25 mm, the amplitude of echo signals gradually stabilizes, exhibiting a trend that aligns with the ratio of echo peaks. ④ At a given water layer thickness, the optimal angle of incidence for detecting internal surface cracks is 30°, whereas the optimal angle for detecting external surface cracks is 18°. The research results provide a theoretical basis for water-coupled ultrasonic detection systems, particularly in relation to parameter optimization and the

收稿日期: 2025-03-12

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目“管道弱磁应力内检测信号特征及风险评价研究”(2024-39/2023MK032)。

作者简介: 夏琦,女,1997年生,硕士研究生,就读于沈阳工业大学仪器科学与技术专业。地址:沈阳经济技术开发区沈辽西路111号,邮编110870。电话:15804299160。Email:xiaqi@smail.sut.edu.cn

通信作者: 王国庆,男,1980年生,副教授,2017年博士毕业于沈阳工业大学测试计量技术与仪器专业,现从事管道无损检测、超声波检测等方向的科研和教学工作。地址:沈阳经济技术开发区沈辽西路111号,邮编110870。电话:13941317116。Email:wangguoqing@sut.edu.cn

formulation of detection processes.

Keywords: thick-walled steel pipe, ultrasonic detection, water-coupled, echo signal

自20世纪90年代以来,随着中国经济的快速发展,油气管道迎来第三次建设高峰,快速规划建设了大量长输油气管道,使其逐步成为不可替代的能源基础设施^[1]。近年来,随着长距离输油气管线里程的增多,油气在输送过程中的安全性问题也日益暴露出来。在我国,管道是石油、天然气等重要能源的主要运输工具,定期对管道检修,可及时发现潜在问题,如裂纹、腐蚀或材料疲劳等,防止这些问题演变为重大事故,确保运输过程的安全。

在无损检测领域,超声波检测在管道检测体系中发挥着重要作用,能够对管道缺陷情况进行准确识别,为后续管道的维护和使用寿命预测提供依据。马天天等^[2]采用超声波衍射时差法对厚壁管道进行周向检测。蔡亮学等^[3]学者针对有缺陷管道壁厚的检测,开发了超声内检测技术。Abbaszadeh 和 Mostafapour^[4]通过实验测定了针对金属管壁厚的最佳超声波频率。在海底管道领域,赵湘阳等^[5]成功应用了超声回波技术。孔令天等^[6]着重研究了超声波在金属复合管道中的传播特性。刘韧等^[7]创新性地提出了多点多频复合方案,显著提高了管道检测的效率与准确度。超声波水耦合检测技术耦合效果稳定高效,干扰较少,提高了超声波检测的准确性。在目前的国内外研究中,针对管道中采用超声波水耦合检测方式的研究投入较少,没有形成具有普适性的检测理论体系和可应用的工程化检测方案。

在对超声波检测理论分析的基础上,以厚壁钢管为研究对象,本文提出了一种超声波水耦合内检测的检测方法。通过构建厚壁钢管超声波检测仿真模型,对超声波仿真信号进行了对比分析,并用平板实验进行了结果验证,研究了超声波在水耦合钢管中的传播和衰减规律,结合超声回波信号的幅值和峰值比变化,提出了一种厚壁钢管缺陷超声波内检测方案。

1 超声波检测理论

超声波脉冲反射法是一种基于超声波传播原理的检测技术(图1,其中 d 为管道厚度)。该方法通过换能器向管道发射超声波脉冲信号,当超声波在传播过程中遇到管道内部的界面或缺陷时,由于声阻抗的不同,部分能量会被反射,接收传感器采集并将其转化为电信号,通过对其特性的分析,可获得管道的缺陷信息。

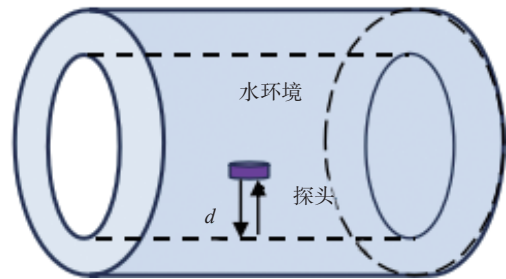


图1 超声波检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic detection

脉冲反射法利用声波的速度和时间确定管道中缺陷的位置,公式如下:

$$d = \frac{ct}{2} \quad (1)$$

式中: d 为管道厚度,m; t 为管道中两次回波之间的时间差,s; c 为管道中的超声波的声速,m/s。

1.1 超声波在界面处的传播理论

超声波的传播如图2所示。

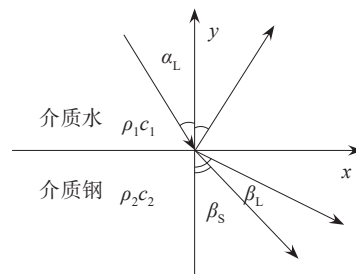


图2 超声波传播图

Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic propagation

根据声学理论,由于水和钢材在声阻抗特性上存在差异,入射声波的能量在水钢界面处会重

新分配,引起反射系数和折射系数的变化。图2中 x 为水和钢的界面,界面的法向为坐标轴 y 。超声波从水中入射到与钢的交界处, $\rho_1 c_1$ 为水的声阻抗, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $\rho_2 c_2$ 为钢的声阻抗, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α_L 为水中入射角, $(^\circ)$; β_L 为在钢中的纵波折射角, $(^\circ)$; β_S 为横波折射角, $(^\circ)$ 。

以 ϕ 表示纵波的势函数, ψ 表示横波的势函数,界面上超声波传播规律符合以下波动方程:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{c_S^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中: c_L 为钢中纵波声速, m/s ; c_S 为钢中横波声速, m/s 。通过空间二阶变化率与时间二阶变化率与波速建立关系,反映纵波和横波的传播规律。

钢中纵波相关参量用 B 为脚标,由水和钢界面上的边界条件为应力和位移的法向分量和切向分量连续可得:

$$\lambda \nabla^2 \phi = \lambda_B \nabla^2 \phi_B + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} \right) \quad (4)$$

式中: λ 、 λ_B 和 μ 为拉曼系数; x 、 z 为横纵坐标; ϕ_B 为钢中纵波势函数, m^2 。通过弹性系数将水和钢的波势函数关联起来。

水中超声波总波势为:

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_i + \phi_r \\ &= \phi_{i_0} \left(e^{-j \frac{\omega}{c_1} x \cos \alpha_L} + r_p e^{j \frac{\omega}{c_1} x \cos \alpha_L} \right) e^{j \frac{\omega}{c_1} z \sin \alpha_L} e^{j \omega t} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ϕ_i 是入射超声波势, m^2 ; ϕ_r 是反射波势, m^2 ; ϕ_{i_0} 是入射超声波势的振幅, m^2 ; r_p 是超声波的反射系数; ω_1 是入射波的角频率, rad/s ; ω 是反射波的角频率, rad/s 。

因为横、纵波均存在于钢中,可得

$$\begin{aligned} \phi_B &= \phi_{i_0} t_{L_p} e^{j \left[\omega t - \frac{\omega}{c_2} (x \cos \beta_L + z \sin \beta_L) \right]} \\ &= \phi_{i_0} t_{L_p} e^{-j \frac{\omega}{c_2} x \cos \beta_L} e^{-j \frac{\omega}{c_2} z \sin \beta_L} e^{j \omega t} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \psi &= \phi_{i_0} t_{S_p} e^{j \left[\omega t - \frac{\omega}{c_s} (x \cos \beta_s + z \sin \beta_s) \right]} \\ &= \phi_{i_0} t_{S_p} e^{-j \frac{\omega}{c_s} x \cos \beta_s} e^{-j \frac{\omega}{c_s} z \sin \beta_s} e^{j \omega t} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: t_{L_p} 为纵波势折射系数; t_{S_p} 为横波势反射系数。

超声波从水入射到钢界面时,其纵、横波的折射角度均满足折射定律:

$$\frac{\omega}{c_1} \cos \alpha_L (r_p - 1) = -t_{L_p} \frac{\omega}{c_2} \cos \beta_L + t_{S_p} \frac{\omega}{c_s} \sin \beta_s \quad (8)$$

得到水中纵波势的反射函数(r_p)、钢中纵波势的折射系数(t_{L_p})和钢中的横波势的折射系数(t_{S_p})分别表示为:

$$r_p = \frac{\frac{\rho_2 c_2}{\cos \beta_L} \cos^2 2\beta_s + \frac{\rho_2 c_s}{\cos \beta_s} \sin^2 2\beta_s - \frac{\rho_1 c_1}{\cos \alpha_L}}{\frac{\rho_2 c_2}{\cos \beta_L} \cos^2 2\beta_s + \frac{\rho_2 c_s}{\cos \beta_s} \sin^2 2\beta_s + \frac{\rho_1 c_1}{\cos \alpha_L}} \quad (9)$$

$$t_{L_p} = -\frac{2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\rho_2 c_2}{\cos \beta_L} \cos 2\beta_s}{\frac{\rho_2 c_2}{\cos \beta_L} \cos^2 2\beta_s + \frac{\rho_2 c_s}{\cos \beta_s} \sin^2 2\beta_s + \frac{\rho_1 c_1}{\cos \alpha_L}} \quad (10)$$

$$t_{S_p} = -\frac{2 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\rho_2 c_s}{\cos \beta_s} \sin 2\beta_s}{\frac{\rho_2 c_2}{\cos \beta_L} \cos^2 2\beta_s + \frac{\rho_2 c_s}{\cos \beta_s} \sin^2 2\beta_s + \frac{\rho_1 c_1}{\cos \alpha_L}} \quad (11)$$

当超声波垂直从水中入射到钢中时,可得:

$$r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (12)$$

$$t_L = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = 1 + r \quad (13)$$

式中: r 为声压的反射系数; t_L 为折射系数。

因此,在裂纹缺陷检测时,入射角度的变化影响水钢界面反射系数和折射系数的大小。

1.2 超声波在介质中的衰减规律

声波在非均匀介质中传播方程可表示为^[8]:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p - \frac{1}{\rho} \nabla \rho \nabla p \quad (14)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi_B}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (15)$$

式中: c 为声速, m/s ; ∇ 为拉普拉斯算子; ρ 为介质密度, kg/m^3 ; p 是声压, Pa 。

若介质密度仅沿(z 轴)变化,即 $\rho = \rho(z)$,则

$$(\nabla^2 + k^2)p = \frac{1}{\rho} \nabla \rho \nabla p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \frac{dp}{dz} \quad (16)$$

式中: k 为波数, k^2 反映波的空间周期性。声压垂直

于传播平面时,声压仅发生相位变化,可以表示为:

$$p = e^{-i(k_x x + k_y y)} p(z) \quad (17)$$

式中: k_x 和 k_y 是 x 轴和 y 轴方向上的波数分量, m^{-1} 。

介质密度仅在一个方向变化时,声波方程变为:

$$\frac{d^2 p}{dz^2} - \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \frac{dp}{dz} + k_z^2 p = 0 \quad (18)$$

式中: k_z 是 z 方向上的波数分量, m^{-1} ; $k_z^2 = k^2 - (k_x^2 + k_y^2) > 0$, (k_z 为实数)。

引入变量 $q(z)$,令 $p = \rho^{\frac{1}{2}} q(z)$,得到:

$$\frac{d^2 q}{dz^2} + \gamma^2 q = 0 \quad (19)$$

$$\gamma^2 = k_z^2 + \frac{1}{2\rho} \frac{d^2 \rho}{dz^2} - \frac{3}{4} \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \right)^2 \quad (20)$$

式中: γ 是等效波数, $\rho(z)$ 是 z 轴方向上的介质密度, kg/m^3 。

根据求解偏微分方程的原理,当 γ^2 为常数时,有解析解。令 $\gamma^2 - k_z^2 = 0$,得到方程解为:

$$\rho(z) = A(z - z_0)^2 \quad (21)$$

式中: A 为任意常数; z_0 为基准点, m 。

波动方程的解析解可以表示为:

$$p \approx e^{i k_z z} / (z - z_0) \quad (22)$$

因此,在超声波对厚壁钢管检测过程中,随着传播距离的增加,声压的幅值越来越小。

2 厚壁钢管水耦合超声仿真研究

超声波检测结果受到多方面因素影响,因此采用COMSOL有限元分析的方法能够准确呈现出超声波在不同介质中的传播特点。建立厚壁钢管水耦合检测的仿真模型,确定仿真激励频率,更改水层厚度和探头倾斜角度,最终得到不同条件下的回波信号。

2.1 建立COMSOL有限元模型

在COMSOL仿真软件中,建立厚度为20 mm的部分钢管模型,在钢管上面放置一个直径为10 mm的压电探头,超声波信号激励源加在模型的探头位置上,模拟水浸超声波中探头的声场分布和检测信号接收,采用全浸式水耦合环境(图3)。

图3模型中,钢管材料设置为建筑钢材,压电探头选用PZT-5H压电陶瓷,并在钢管四周设置水。在COMSOL软件的材料库中选择模型各部分所需要的材料,各材料的声学参数如表1所示。

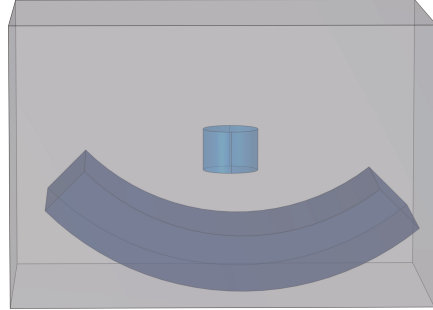


图3 三维超声波检测模型图

Fig. 3 Illustration of three-dimensional ultrasonic detection model

表1 材料声学系数表

Table 1 Acoustic coefficients of materials

材料	声速/($m \cdot s^{-1}$)	密度/($kg \cdot m^{-3}$)
水	1 450	1 000
钢	5 800	7 850
陶瓷	1 850	7 750

以正弦脉冲信号为激励源,进行超声波检测,信号表达式如下:

$$\sin(2\pi f_0 \times t) \quad (t \leq T_0) \quad (23)$$

式中: f_0 为激励信号的频率,Hz; t 为时间,s; T_0 为激励信号的周期,s。

为了检验超声波正弦激励能否通过脉冲反射法实现对20 mm厚壁钢管的检测,设置检测频率为2.5 MHz,时间步长为0.02 μs 。设置水层为压力声学模块,压电探头和钢为固体力学模块,模型两侧边界设置为低反射边界,避免多余杂波与回波信号叠加产生影响。

2.2 不同水层厚度对回波信号的影响

在超声波检测中,水层厚度的大小对检测结果有很大影响,在传播过程中超声波的能量衰减受到传播介质和传播距离的影响。本文通过对比不同水层厚度下的回波幅值以及两次回波的峰值比大小,得到水层厚度对检测信号的影响。分别将水层深度设置为10 mm、15 mm、20 mm、25 mm

和 30 mm,对比检测信号随水层厚度的变化规律,得到仿真信号(图4)。

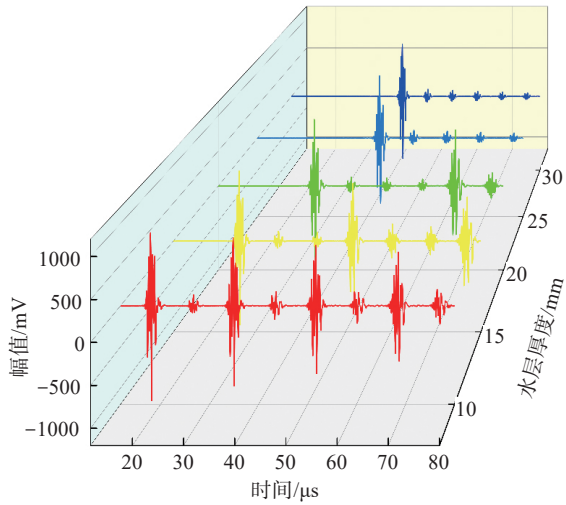


图4 不同厚度下仿真信号图

Fig. 4 Signal patterns from simulations at various water layer thicknesses (coordinates of thicknesses to be verified)

图4可以看出,随着水层厚度的增加,回波信号出现的时间逐渐后移,在两次上表面回波之间的下表面回波信号的数量也逐渐增加,信号的幅值也逐渐改变,采集对应数据信号进行对比。

绘制水层厚度与信号幅值的关系(图5)。

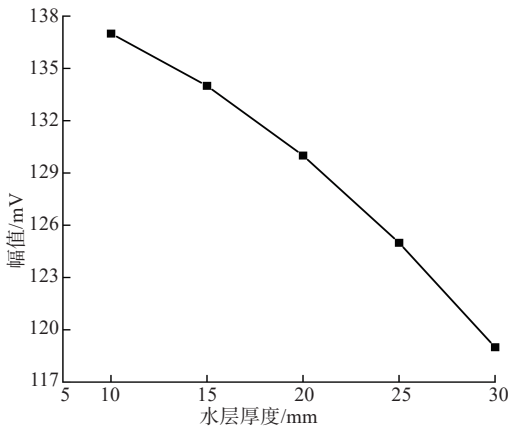


图5 水层厚度与信号幅值的关系图

Fig. 5 Relationship between water layer thickness and signal amplitude

对比图5中回波信号幅值可以看出,回波信号幅值随水层厚度的增加而逐渐递减,说明超声波在水中的衰减逐渐增加,导致回波信号的幅值逐渐降低,并随着水层厚度的增加变化逐渐明显。

峰值比是对比超声波传播时两次回波信号的幅值之间的相对差异。峰值比越小,超声波的衰减越大。绘制水层厚度与峰值比例的关系(图6)。对比水层厚度不同情况下峰值比可以看出,两次回波的峰值比在水层厚度为 10 mm 时最高,随着水层厚度的增加逐渐减小,在水层厚度超过 25 mm 后趋于稳定。因此在使用 2.5 MHz 频率时,水层厚度尽量保持在 10 mm 左右,且不宜超过 25 mm。

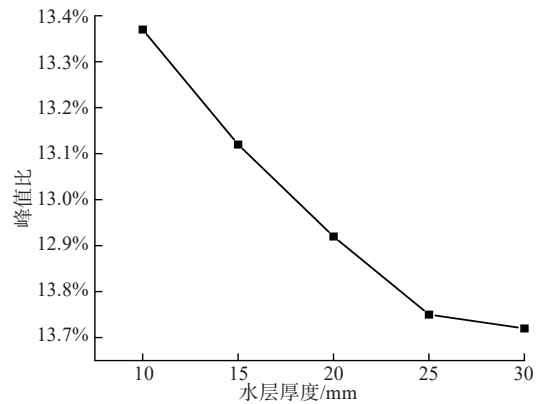


图6 水层厚度与峰值比例的关系图

Fig. 6 Relationship between water layer thickness and peak ratio

2.3 不同角度对检测裂纹信号的影响

模型中设置模拟长度为 1 mm、深度为 5 mm 的内外表面裂纹,将探头倾斜,探头表面与管道内表面的夹角为入射角度,入射角度从 14° 逐渐增加到 30°,观察不同角度时内表面裂纹的检测效果,当角度达到 27° 时裂纹信号明显,记录下不同角度下裂纹检测信号的幅值(图7)。

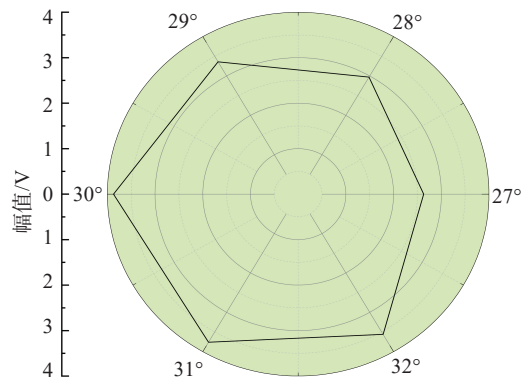


图7 不同角度内表面裂纹信号幅值图

Fig. 7 Signal amplitudes of internal surface cracks at various angles

从图7可以看出,随着入射角度的增加,超声波裂纹信号的幅值逐渐增大,到30°时达到顶峰,

将27°到32°的裂纹信号进行对比(图8)。

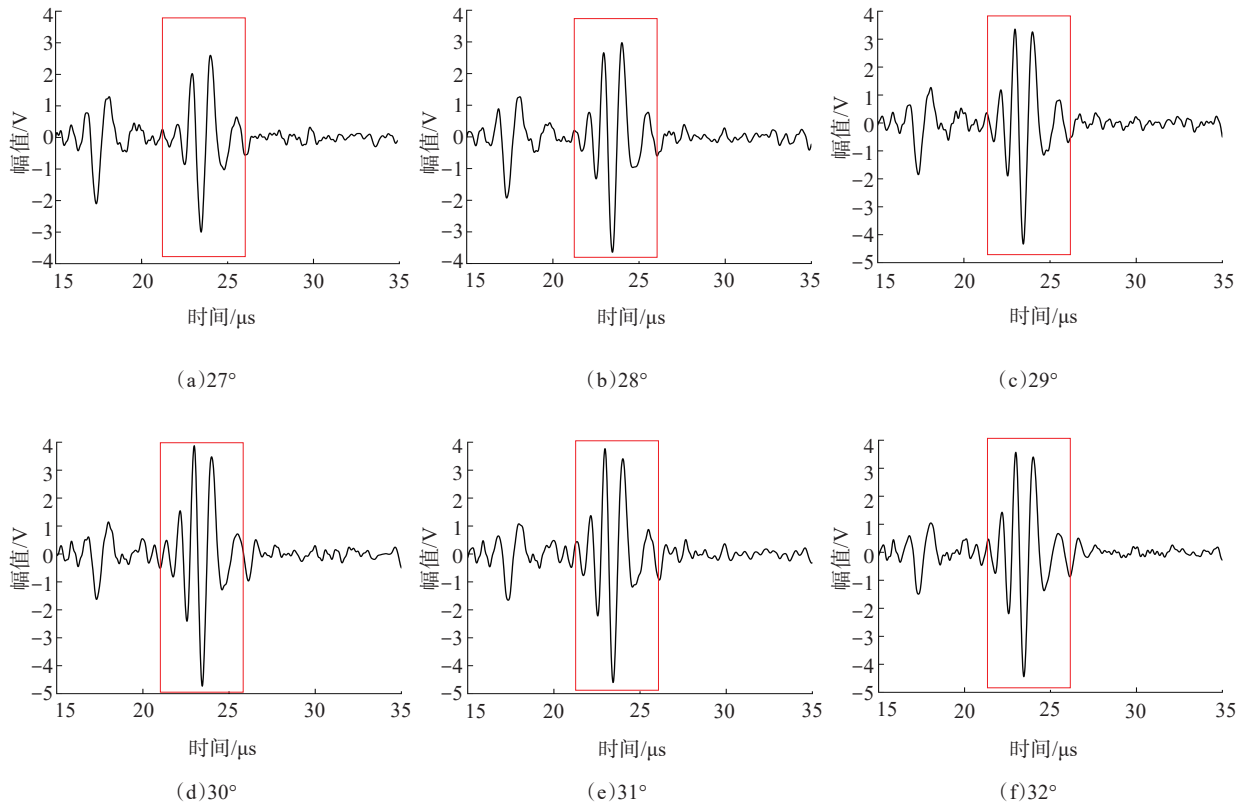


图8 不同角度下内表面裂纹检测信号图

Fig. 8 Signal curves for internal surface crack detection at various angles

对比不同角度的检测信号,可以得出在角度为30°时,能够看到明显的内表面裂纹检测信号,此时裂纹信号幅值最大,探头与检测钢管的提离距离为12.5 mm,通过理论计算回波时间,与仿真结果一致。因此在检测管道的内表面裂纹缺陷时,选择入射角度为30°。

保持裂纹大小不变,调整探头入射角度,观察不同角度时外表面裂纹的检测效果,当角度达到17°时裂纹信号明显,记录下不同角度下裂纹检测信号的幅值(图9)。可以看出,裂纹检测信号的幅值变化趋势为入射角度增加,回波信号幅值逐渐增大,入射角度在20°时,裂纹信号的幅值达到顶峰。将17°到22°的裂纹信号进行对比(图10),可以看出角度达到20°时,信号幅值最高,检测效果明显,此时探头与检测钢板的提离距离为12.5 mm,与理论计算回波时间

一致。因此在裂纹外检测中,20°为最佳入射角度。

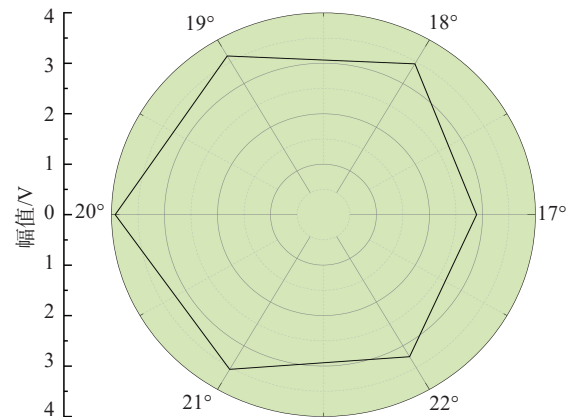


图9 不同角度外表面裂纹信号幅值图

Fig. 9 Signal amplitudes of external surface cracks at various angles

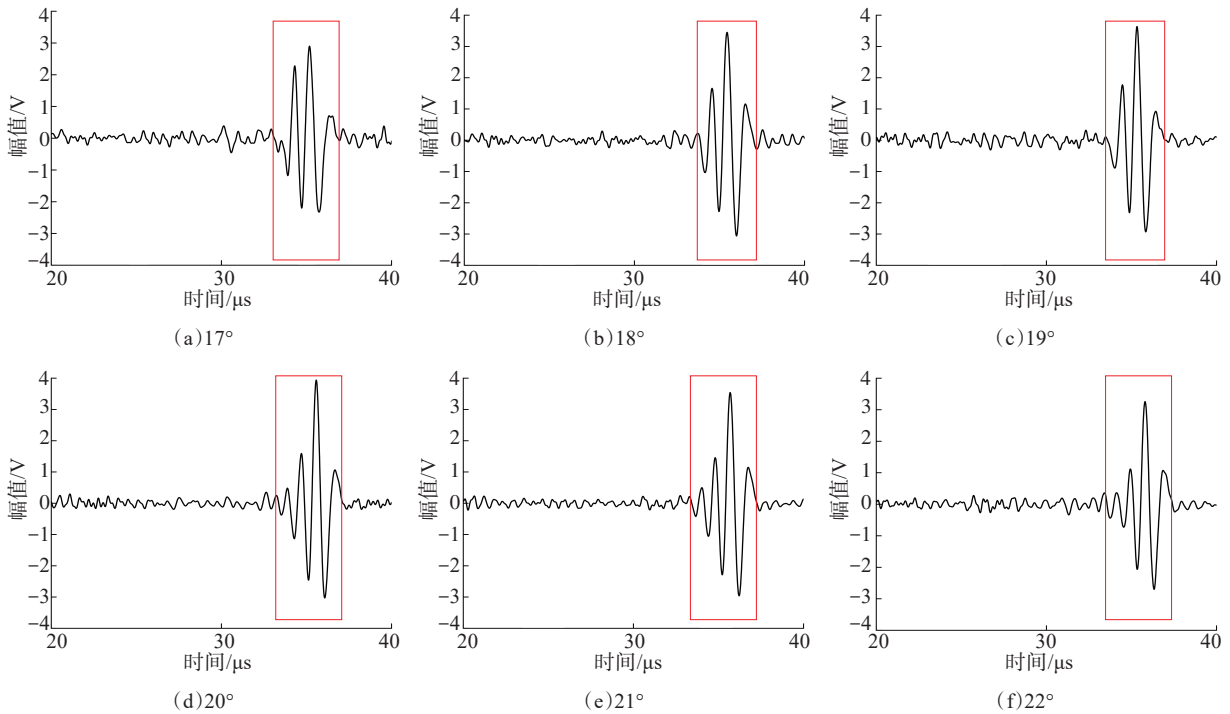


图10 不同角度下外表面裂纹检测信号图

Fig. 10 Signal curves for external surface crack detection at various angles

3 实验与结果分析

根据仿真结果搭建超声检测实验平台(图11),使用频率为 2.5 MHz 的超声纵波直探头,将 20 mm 的钢板固定,更改水层厚度和探头倾斜角度,通过示波器显示实验波形。

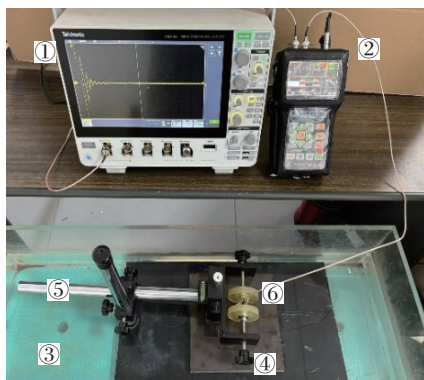


图11 实验装置图

Fig. 11 Experimental setup

注:图中①为示波器;②为超声激励装置;③为水槽;

④为钢板;⑤为实验支架;⑥为超声纵波直探头

3.1 不同水层厚度对检测信号影响实验

打开超声激励装置,调整频率到 2.5 MHz,用

探头支架固定探头,旋转高度调节旋钮,将探头与钢板的距离从 0 逐渐调整到 30 mm,记下水层厚度为 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 以及 30 mm 时示波器的波形和幅值,对数据进行对比(图12、图13)。

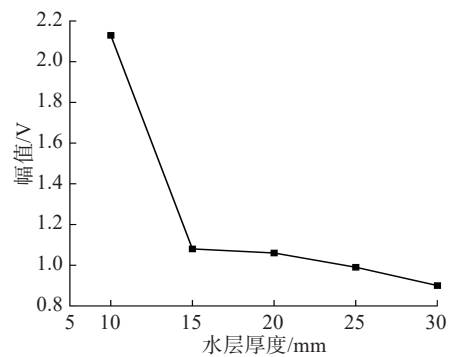


图12 水层厚度与信号幅值的关系图

Fig. 12 Relationship between water layer thickness and signal amplitude

通过对比图中实验中的回波信号幅值可以看出,回波信号的幅值仍然是随着水层厚度的增加逐渐递减,说明超声波在水中的衰减逐渐增加,导致回波信号的幅值逐渐降低,并随着水层厚度的

增加变化逐渐明显,与仿真基本一致。幅值在15 mm时的变化更为显著,说明在实际实验中,对超声波衰减影响的因素更多,衰减也更加严重。

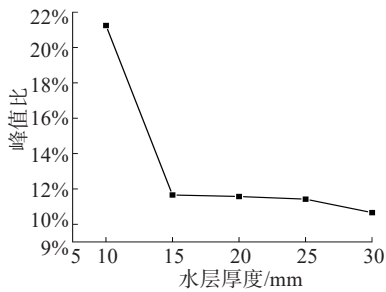


图13 水层厚度与峰值比例的关系图

Fig. 13 Relationship between water layer thickness and peak ratio

对比实验中不同水层厚度下两次回波的峰值比,可以看出峰值比在水层厚度为10 mm时最高,随着水层厚度的增加逐渐减小,25 mm以后峰值比的降低速率逐渐稳定。因此在实际检测中,水层厚度为10 mm时检测效果最好,且尽量保持水层厚度在25 mm以内,与仿真结果一致。

3.2 不同角度对检测裂纹信号的影响实验

在水耦合环境中进行裂纹检测,根据仿真结果,选择入射角度 $28^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 对内表面裂纹进行检测,步进为 2° ,记录下示波器中裂纹回波信号的波形和幅值,与仿真结果进行对比(图14)。

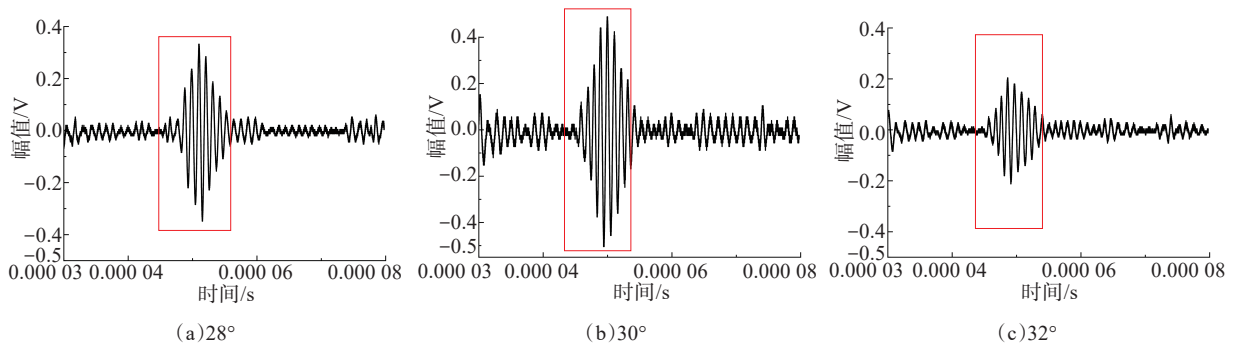


图14 内表面裂纹实验波形图

Fig. 14 Experimental waveforms from internal surface crack detection

由实验结果可知,入射角度为 $28^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 时,能够检测到明显内表面裂纹信号,入射角度为 30° 时,示波器中波形幅值最高,通过声速计算,时间与理论结果一致,因此在检测内表面裂纹时,角度 30° 左右为最佳入射角度,与仿真结果基本相符。

相同实验过程对外表面裂纹检测信号结果进行验证。选择入射角度在 $18^{\circ} \sim 22^{\circ}$ 时对外表面裂纹进行检测,步进为 2° ,记录下示波器中裂纹回波信号的波形和幅值,与仿真结果进行对比(图15)。

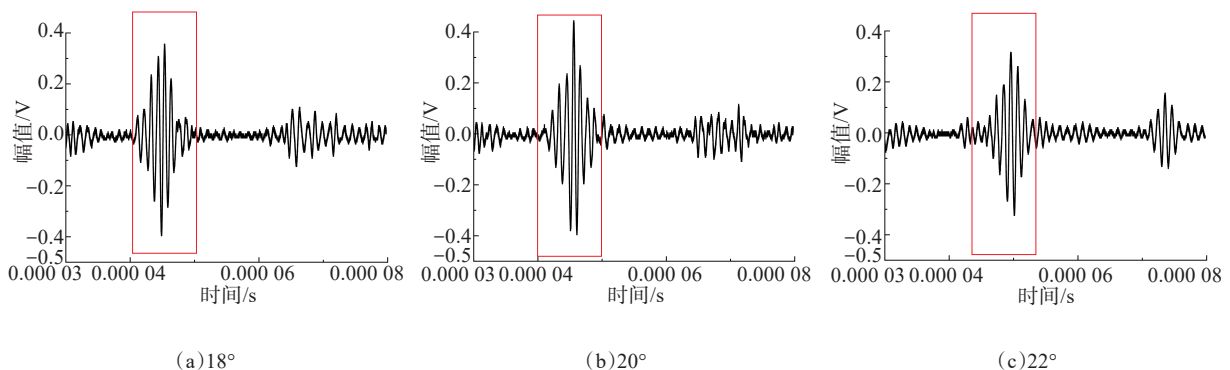


图15 外表面裂纹实验波形图

Fig. 15 Experimental waveforms from external surface crack detection

由实验结果可知,入射角度为 $18^{\circ} \sim 22^{\circ}$ 时,能够检测到明显外表面裂纹信号,入射角度为 20° 时,示波器中波形幅值最高,通过声速计算,时间与理论结果一致,因此在检测外表面裂纹时,角度 20° 左右为最佳入射角度,与仿真结果基本相符。

4 结论

针对厚壁钢管水耦合超声检测中的缺陷识别问题,本研究基于COMSOL Multiphysics建立了超声波传播仿真模型,系统分析了超声波在多层介质中的传播特性及衰减规律。通过对比不同水层厚度及探头倾斜角度下的检测信号波形特性,并结合钢板内外壁面回波峰值的变化规律,得出以下结论:

1)在厚壁钢管水耦合超声内检测中,水层厚度对回波信号幅值具有显著影响。结果表明,当水层厚度为10 mm时,回波信号幅值达到最优;而当水层厚度增至25 mm时,仍可保持较好的检测效果。

2)探头倾斜角度对裂纹缺陷的检测灵敏度具有关键作用。对于外表面裂纹缺陷,检测灵敏度在 20° 左右达到最佳;而对于内表面裂纹缺陷,最佳检测角度约为 30° 。

本研究为厚壁钢管水耦合超声波检测的参数优化提供了理论依据,但仍存在若干可拓展研究方向,例如:结合机器学习算法对回波信号进行智能特征提取与缺陷分类,进一步提高检测效率与自动化水平。未来研究可围绕上述方向展开,以推动水耦合超声波检测技术在海底管道等复杂工

程场景中的实际应用,为管道安全运维提供更可靠的技术支持。

参考文献

- [1] 姜昌亮. 油气管道全生命周期质量管控与安全管理探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1081-1091. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.001.
- [2] 马天天, 林莉, 张东辉, 等. 基于TOFD周向扫查的厚壁管道倾斜裂纹精准定量[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 23-29. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804529.
- [3] 蔡亮学, 董辉, 陈飞, 等. 超声内检测含缺陷管道壁厚确定方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13293-13300. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.30.019.
- [4] ABBASZADEH J, MOSTAFAPOUR M. Determination of proper ultrasonic frequency based on wall thickness of the metal pipes in ultrasonic tomography systems[J]. IETE Journal of Research, 2021, 67(4): 499-513. DOI: 10.1080/03772063.2018.1557085.
- [5] 赵湘阳, 曹学文, 曹恒广, 等. 超声回波法海底管道外涂层检测技术[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 162-169. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2022.05.018.
- [6] 孔令天, 李兵, 张云飞, 等. 超声界面波在充液双金属复合管道中的传播特性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3475-3480. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.09.006.
- [7] 刘韧, 吴斌, 高翔, 等. 管道缺陷和特征的多点多频超声导波检测方法[J]. 应用声学, 2025, 44(3): 772-779. DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2025.03.026.
- [8] ROBINS A J. Exact solutions of the Helmholtz equation for plane wave propagation in a medium with variable density and sound speed [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(3): 1347-1352. DOI: 10.1121/1.405420.

(编辑:孙冰冰)