

文章编号 1004-924X(2021)06-1468-14

采用超声导波的储罐罐顶腐蚀深度检测方法

刘文才^{1,2*}, 樊建春¹, 杨 进³

(1. 中国石油大学(北京), 北京 102249;

2. 中国石油天然气股份有限公司安全环保技术研究院, 北京 102200;

3. 重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:目的:目前对石油储罐的检测评估主要是针对罐底、罐壁等部位,但是对储罐罐顶的检测还没有受到足够重视。然而,储罐罐顶结构复杂,工作环境特殊易发生腐蚀,严重时会引起火灾等重大安全事故,因此,对储罐罐顶腐蚀缺陷的检测具有十分重要的意义。方法:提出基于 Lamb 波的反射/透射信号幅值比系数法,用于储罐罐顶腐蚀深度程度评估。通过分析腐蚀缺陷对导波的调制机理,研究了腐蚀深度与反射波和透射波信号幅值间的关系,进而推导了基于导波传播衰减特性的反射/透射信号幅值比系数理论表达式,通过数值分析和电化学腐蚀深度实验验证了腐蚀深度与幅值比系数间的关系。结果实验结果表明:导波传播衰减因子 β 为 $\sqrt{0.5}$ 、1 和 $\sqrt{2}$ 时,均能对 3 mm 板厚的腐蚀缺陷进行深度等级的划分;在某石化基地进行了实际测试,成功将罐顶腐蚀程度划分为了轻微、中度和严重腐蚀三个等级。结论该方法有效实现了腐蚀缺陷深度评估,可为板状结构的腐蚀缺陷程度评估提供指导。

关键词:超声导波;腐蚀缺陷深度;幅值比系数法

中图分类号:TB553 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20212906.1468

Corrosion depth detection of tank top based on ultrasonic guided waves

LIU Wen-cai^{1,2*}, FAN Jian-chun¹, YANG Jin³

(1. *China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;*

2. *China National Petroleum Corporation, Beijing 102200, China;*

3. *Chongqing University, College of Opto-electronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems (Ministry of Education), Chongqing 400044, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wencailiu@cnpc.com.cn*

Abstract: The method of inspecting and evaluating an oil storage tank currently focuses on the bottom and outer wall of the tank, and the roof the tank does not typically receive sufficient attention. However, the complicated structure and the unique physical and chemical environment lead to corrosion of the roof, which in severe cases may result in sudden failure or fire. Estimating the extent of corrosion of a tank roof is therefore of great significance. A new method based on the Lamb-wave reflection/transmission amplitude ratio is proposed to evaluate the corrosion depth. By analyzing the nonlinear modulation of guided waves in corroded materials, the relationship between corrosion depth and the reflected and transmitted

收稿日期:2020-10-30;修订日期:2020-12-07.

基金项目:中国石油重点项目(No. 2019D-2312)

wave amplitudes is obtained. Then, using the attenuation characteristics of guided waves, a theoretical expression for the ratio of reflected and transmitted signal amplitudes is derived. Numerical analysis and electrochemical corrosion experiments verified the relationship between the corrosion depth and the amplitude ratio. Using realistic experimental parameters and assuming a plate thickness of 3 mm, it is noted that guided wave attenuation factors (β) equal to $\sqrt{0.5}$, 1 and $\sqrt{2}$ are capable of distinguishing the degree (i. e., depth) of corrosion. A practical test was conducted at a petrochemical facility; an ultrasonic guided wave categorization of corrosion into three grades, namely, slight, medium, and severe, was successfully correlated with the observed degrees of corrosion. This method can therefore effectively measure the corrosion defect depth and can provide guidance for evaluating the degree of corrosion defects affecting plate structures.

Key words: ultrasonic guided wave; corrosion defect depth; amplitude ratio coefficient method

1 引言

大型石油储罐作为保障我国油气资源的基础性关键装备,一旦发生腐蚀,不仅使储罐结构强度降低,严重情况下还会引发火灾爆炸事故^[1-4]。目前对储罐的完整性检测评估主要是针对罐底、罐壁等部位,对储罐罐顶的检测还没有受到足够的重视,由于大气和氧浓差化学作用不可避免的引起罐顶腐蚀,当腐蚀严重并引起介质泄漏时将导致火灾爆炸等事故。虽然目前对板状结构的腐蚀检测有漏磁检测、声发射检测、射线检测、超声测厚等技术^[5-7]以及基于深度学习进行图像后处理显示定位技术^[8],但罐顶高空作业和危险品区域检测的条件限制了这类离线、局部腐蚀缺陷检测技术的应用。与传统无损检测方法相比,超声导波的应力分布在板结构的整个厚度上,具有传播距离远、衰减较小、无辐射且受环境影响因素小等优点^[9-10],被认为是最具潜力的结构健康监测技术之一,能对储罐的健康状态做出判断,减少危险事故发生。

国内外学者采用导波技术对板结构的腐蚀缺陷检测做了大量的研究。智达^[11]等人对锥形剖面腐蚀缺陷板中S0波进行数值仿真分析,得到不同深度、剖面倾角及直径对导波信号的影响。张瑾超^[12]等人,利用有限元数值模拟分析了激发效率与信号频率的关系以及激发出的导波场分布特征,比较了损伤对SH0波和S0波的反射系数,评估SH波检测腐蚀损伤的可行性。禹化民等人利用Lamb波对阶梯孔和球形孔缺陷的标准件检测,得出回波幅值随横截面积与缺陷深度的增加而增加。肖贤军^[13-14]等人研究表明导波

对通孔最敏感,对锥形孔最不敏感,对阶梯孔的敏感度处于二者之间。Gao H^[15-16]等人用有限元法对1 mm厚铝板上腐蚀缺陷损伤过程进行了研究,根据能量的变化得到缺陷在板中位置的分布。郑阳^[17]等人通过激发单一A0模态Lamb波和利用全聚焦成像算法,对一块包含直径为27 mm通孔的3 mm厚铝板进行了成像,实现了对板类结构的大面积粗检。Xu K^[18]采用时域有限差分的方法,通过有限元仿真研究了超声Lamb波在槽型缺陷处的模态转换和传播规律。Paul Fromme^[19-21]等人提出利用高频导波技术对腐蚀缺陷进行检测,得出缺陷深度与振幅拍长存在一定的关联。以上工作主要研究了超声导波某一特性与腐蚀缺陷程度的对应关系,但较少的考虑实际应用过程中的影响因素,比如腐蚀缺陷与反射和透射接收传感器相对空间距离的影响等,因此,对于不同相对距离下腐蚀缺陷深度的评价参数及定量研究还有待深入。

本文考虑导波传播距离衰减因素,研究如何利用缺陷的反射波和透射波信号实现缺陷深度的评价,并利用端面加载的传感器激励A0模态导波对矩形和圆形腐蚀缺陷深度进行测试分析,从而研究了传感器不同接收位置下的反射与透射幅值比系数与腐蚀深度的关系。

2 腐蚀深度检测原理

2.1 Lamb波频散方程

Lamb波在无限大平板中的弹性应力波,属于自由板问题。Lamb波在板中传播问题的求解,满足运动方程(1)和边界条件(2)的公式(这

里利用了笛卡尔张量符号)。

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i, \quad (1)$$

$$t_i = \sigma_{ji} n_j, \quad (2)$$

其中： μ 、 λ 和 ρ 分别是板材料的 Lamé 常数和密度， u 为应力场位移。根据上述方程可进一步推导出板中 Lamb 波振动形态的特征频率方程(3)，即与板的板厚、频率、波数等有关的函数^[22]。

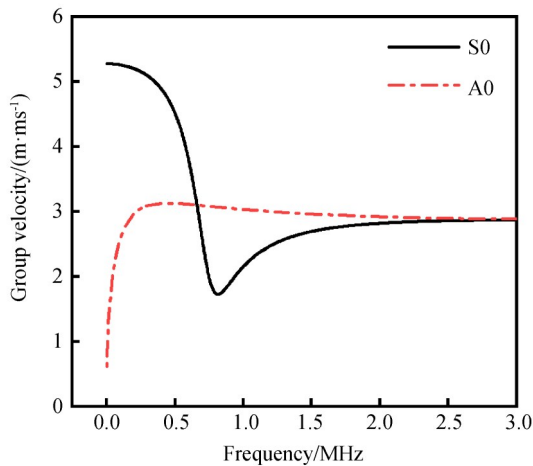
$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = \frac{4k^2 qp\mu}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2)(k^2 - q^2)}, \quad (3)$$

式中， $p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$ 、 $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ ，其中 k 为波

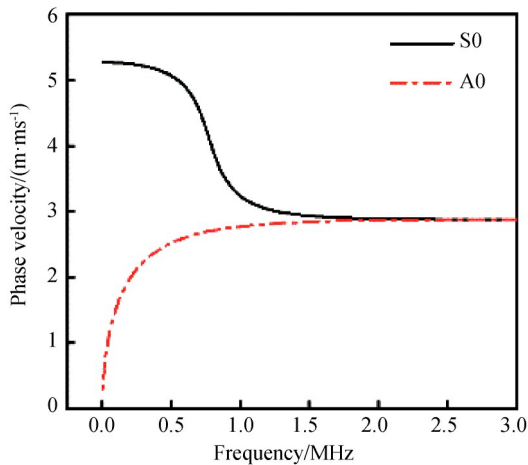
数， c_L 为纵波声速， c_T 为横波声速， ω 为频率， h 为板厚。上述方程体现了 Lamb 波多模态、频散的特性。Lamb 波模态大体上分为两种，即 S 模态(对称性 Lamb 波)和 A 模态(反对称 Lamb 波)。导波的频散特性是由于波数 k 与频率 ω 之间的非线性引起的。本研究所用试件为 Q235 钢，板厚为 3 mm，板中横波波速为 3 100 m/s，纵波波速为 5 900 m/s。结合上述特征方程与板的参数可通过 Disperse 软件计算得出 Lamb 波的特征曲线，即频率与群速度、相速度的关系曲线，如图 1 所示。

2.2 Lamb 波模态及频率的选择

导波的 A0 模态在厚度方向上与空洞、裂缝作用时，仅产生散射的 A0 模态。为避免导波的多模态现象对检测结果的判断造成影响，这里采用 A0 模态作为检测模态。为获取合适的激励频率，进行了激励频率的仿真实验，其中激励信号的频率从 80 kHz~350 kHz 变化，得到不同激励频率下 S0 和 A0 模态波的位移幅值变化如图 2 所示。从图中可知，240 kHz 下的缺陷回波明显、幅值较大，最终选取 240 kHz 下的检测信号供分析处理。



(a) 群速度频散曲线
(a) Group velocity dispersion curve



(b) 群速度频散曲线
(b) Group velocity dispersion curve

图 1 3 mm 厚钢板的频散特性曲线

Fig. 1 Dispersion characteristic curve of 3 mm thick steel plate

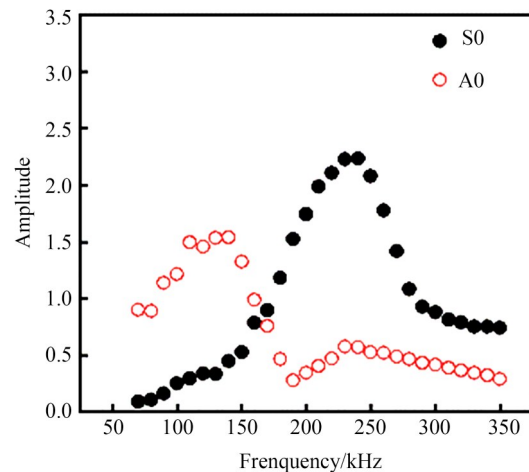


图 2 激励信号 A0 与 S0 模态下幅值随频率的变化曲线
Fig. 2 Amplitude of excitation signal A0 and S0 mode changes with frequency

2.3 反射/透射波幅值比系数法

由于缺陷的存在，板结构的刚度发生改变，当导波通过缺陷时，因抵抗变形和介质的不连续性等原因，会发生反射、透射和模态转换的现象。

当腐蚀缺陷的深度和距离发生改变时,相应的散射波信号幅值也会发生改变,因此,为了准确表征腐蚀缺陷深度对导波信号幅值的影响,定义反射/透射波幅值比系数 δ 作为评价参数。根据2.1节中分析,利用超声波换能器在结构的一点激励超声导波,并考虑导波在传播过程中的频散特性,假设换能器所在位置为时间-空间域的零点,则入射波在沿 x 轴方向的位移分量为^[23]:

$$u_x = A_1 e^{i(kx - \omega t)} + A_2 e^{-i(kx + \omega t)}, \quad (4)$$

其中:第一项表示沿着 x 轴正方向传播的波,第二项表示沿着 x 轴负方向传播的波,且 $k = \frac{\omega}{c_L}$,

$$c_T^2 = \frac{\mu}{\rho}, c_L^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}.$$

若仅考虑单方向直入射到缺陷位置的波,则入射波的位移 $u_x^{(i)}$ 表达式可表示为:

$$u_x^{(i)} = I e^{i(k_1 x - \omega t)}, k_1 = \frac{\omega}{c_L}. \quad (5)$$

这种情况下,在时间-空间域内任意点 (x, t) 处的反射回波 $u_x^{(R)}$ 和透射波 $u_x^{(T)}$ 的位移可以分别表示为:

$$u_x^{(R)} = A_R e^{-i(k_1 x + \omega t)}, \quad (6)$$

$$u_x^{(T)} = A_T e^{i(k_2 x - \omega t)}, k_2 = \frac{\omega}{c_L}. \quad (7)$$

气固两相介质中的声衰减按照不同损失机制主要分为三种类型:吸收衰减、散射衰减和扩散衰减。在这里主要考虑板状结构的扩散衰减,振幅随传播方向和距离 L 的函数拟合为以下方程式^[24]:

$$A(L, x) = \frac{A_0(x)}{\sqrt{L}}, \quad (8)$$

$A_0(x)$ 是入射波的峰值幅度, L 为沿传播方向与激励源的距离, $A(L, x)$ 是在 x 方向上距离激励源 L 的波包峰值幅度。

假设缺陷所在位置为时间-空间域的零点,传播示意图如图3所示,入射波沿着传播方向向前传播遇到缺陷时,由于介质的不连续性,发生波的反射、透射和散射等现象,根据能量守恒原理可知,缺陷处的反射波能量、缺陷处的透射波能量与缺陷处的散射波能量之和为缺陷处的总能量。对于在板状结构中传播的特定导波模式,结合公式(6)~(8),则在距离缺陷 L_1 处接收点 r_1

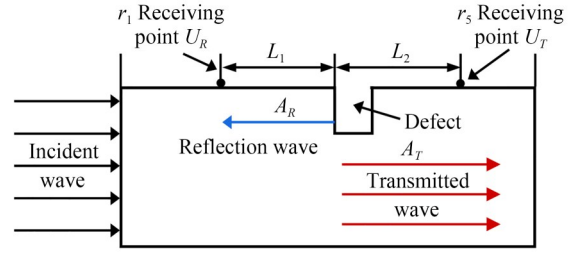


图3 Lamb波与缺陷作用的波场传播图

Fig. 3 Wave field propagation diagram of Lamb wave and defect

的反射波幅值 U_R ,在距离缺陷 L_2 处接收点 r_5 的透射波幅值 U_T 可分别表示为:

$$U_R = \frac{A_R}{\sqrt{L_1}}, U_T = \frac{A_T}{\sqrt{L_2}}, \quad (9)$$

其中: A_R 为入射波在缺陷处的反射波包幅值, A_T 为入射波在缺陷处的透射波包幅值。频率相同的条件下,反射波和透射波的能量只与接收反射波和透射波的传感器距离有关。定义缺陷处的反射信号与透射信号幅值比系数 δ 为:

$$\delta = \frac{A_R}{A_T} = \frac{U_R}{U_T} \times \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}} = \frac{U_R}{U_T} \times \beta, \quad (10)$$

其中, $\beta = \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}}$ 定义为导波传播衰减因子,由反

射波和透射波传播距离决定。公式(10)中的接收点与缺陷之间的距离 L_1 和 L_2 可以通过实测数据的波时信息得出,该公式适用于任意相对距离下的腐蚀缺陷检测。

2.4 腐蚀深度检测的有限元仿真分析

利用Abaqus软件进行动态有限元分析,研究不同深度的腐蚀缺陷与导波的相互作用。钢板的基本参数为:密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,泊松比为0.3,弹性模量为210 GPa。模型布置如图4所示,其中仿真模型尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。为了减小边界回波对接收信号的影响,在除激励源边界的其他三个边均设置宽度为80 mm的吸收层,吸收到达边界的导波。为研究缺陷深度引起传播场的反射及透射信号的变化,腐蚀缺陷类型设为圆形和矩形,其中心位于几何对称线且距离激励中心300 mm。其中矩形缺陷的尺寸为 $20 \times 20 \text{ mm}$,圆形缺陷的直径 $D=20 \text{ mm}$ 。仿真过程中改变缺陷的深度 h ,且 h 从0 mm至3 mm

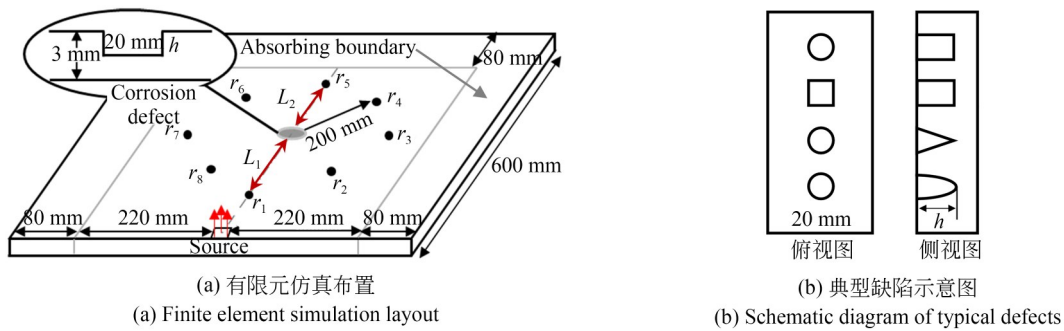


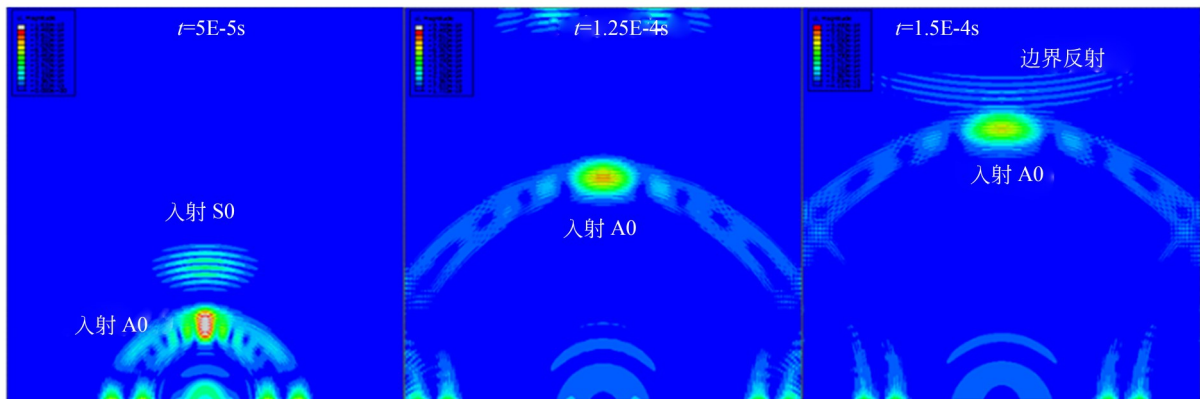
图 4 有限元仿真模型

Fig. 4 Finite element simulation model

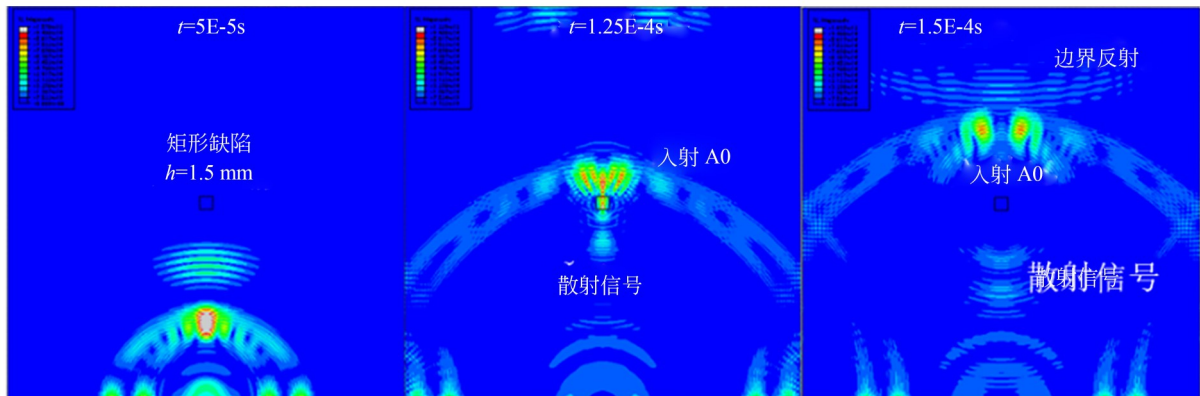
以间隔 0.2 mm 的规律变化。同时考虑导波的衰减特性,改变反射距离 L_1 和透射距离 L_2 ,使得导波传播衰减因子 β 为 $\sqrt{0.5}$, 1 和 $\sqrt{2}$ 。网格尺寸设为 1 mm,时间步长 $0.0005 \mu\text{s}$,分别满足有限元求解过程中空间迭代和时间收敛准则的稳定

条件需要,施加载荷的力为 $1\text{E}-8$ 。

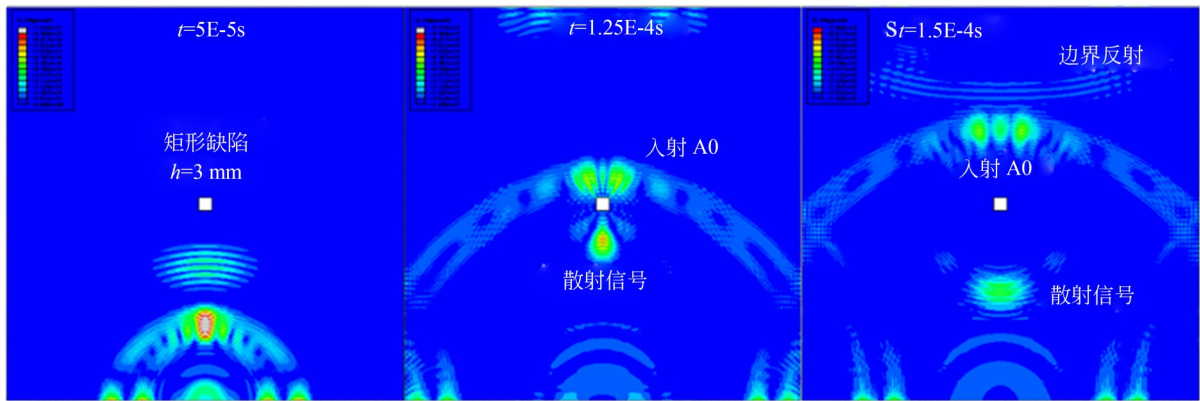
导波在矩形缺陷和圆形缺陷中传播的云图如图 5 和图 6 所示。图中显示了无缺陷、缺陷深度为 1.5 mm 和 3 mm 的仿真结果,选取相同传播时刻下的云图组合而成。



(a) 无缺陷
(a) No defect



(b) 缺陷深度为 1.5 mm
(b) A defect with a depth of 1.5 mm



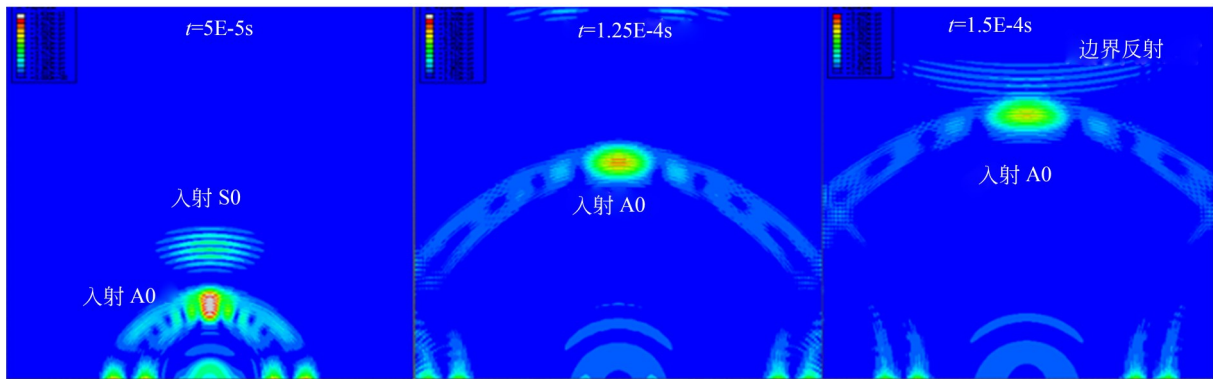
(c) 缺陷深度为 3 mm
 (c) a defect with a depth of 3 mm

图 5 矩形缺陷的波场传播应力云图

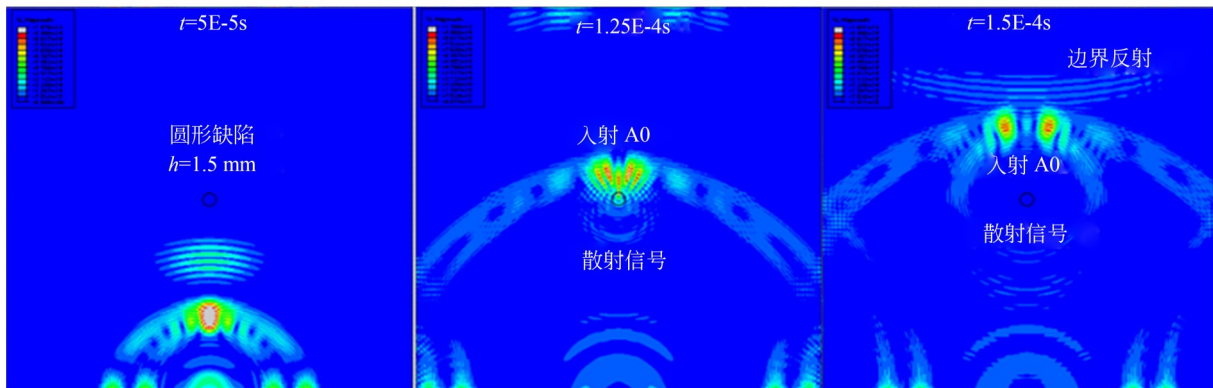
Fig. 5 Rectangular defect wave field propagation stress cloud

图 7 为有限元仿真中接收点 r_1 和 r_5 经滤波处理后的反射和透射典型波形,其中,信号①是激励源传播到接收点的直达波,信号②是缺陷引起的反射波,信号③是接收点的透射波。为了进一步研究不同腐蚀深度下,反射和透射幅度之间

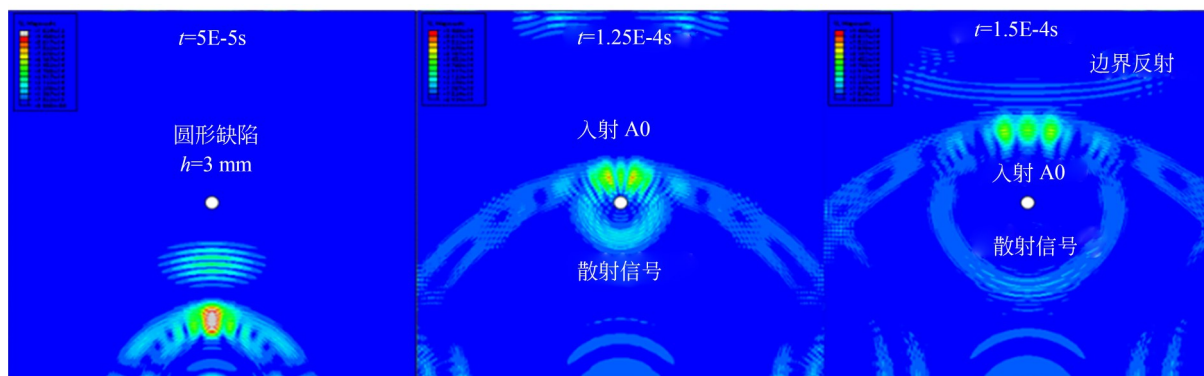
的关系,根据图 7 中②和③的幅值,分别画出了矩形和圆形缺陷深度与相应反射波、透射波幅值曲线,如图 8 所示(此时,导波传播衰减因子 β 为 1)。从图 8 可知,不管圆形还是方形缺陷,反射回波幅值均随深度的增加而增加;在深度相同时,矩形



(a) 无缺陷
 (a) No defect



(b) 缺陷深度为 1.5 mm
 (b) A defect with a depth of 1.5 mm



(c) 缺陷深度为 3 mm
(c) A defect with a depth of 3 mm

图 6 圆形缺陷的波场传播应力云图

Fig. 6 Circular defect wave field propagation stress cloud

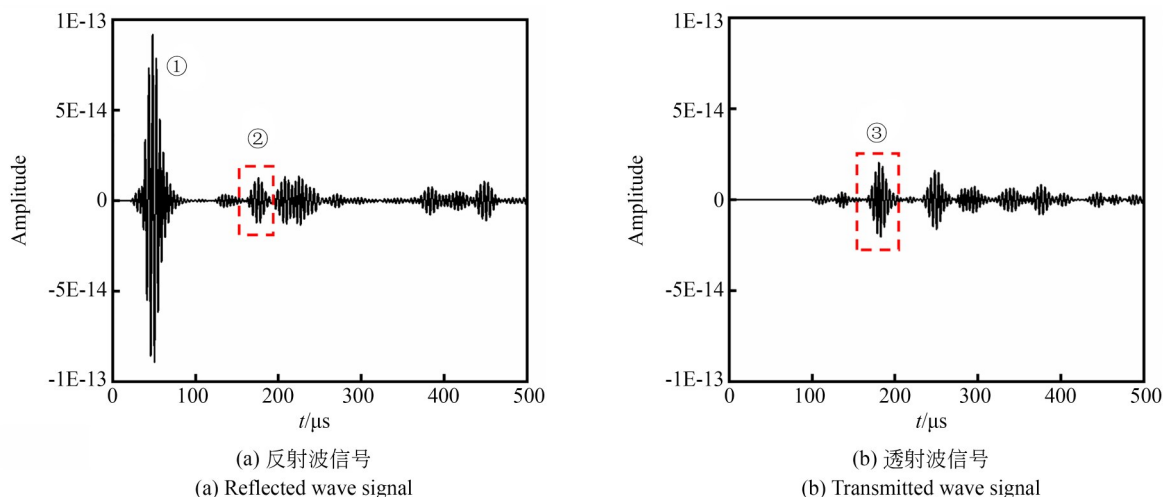


图 7 同一深度下矩形腐蚀缺陷的时域波形

Fig. 7 Time-domain waveform of rectangular corrosion defects at the same depth

缺陷的反射幅值大于圆形缺陷的反射幅值。对于透射波幅值来讲,随缺陷深度的增加呈先增加后减小的趋势,整体幅值随缺陷深度的增加有高低起伏的现象,这是因为:导波与缺陷相互作用时会在介质不连续处发生散射,即有向后传的缺陷反射波、继续向前传播的透射波和其他方向的散射波,当缺陷尺寸一定时,缺陷反射波幅值只受缺陷深度的影响,而接收点的透射波是经缺陷边界调制后的波与继续向前传播的入射波相互干涉后的结果,波形复杂,透射波幅值出现高低起伏的现象。

在实际腐蚀缺陷检测中,腐蚀缺陷与反射和透射波接收传感器间相对位置不确定,体现在公

式(10)中导波传播衰减因子 β 不同,从而幅值比系数 δ 也不同,因此,为了研究考虑导波传播衰减下的反射和透射波幅值比关系,对不同导波传播衰减因子 β 下反射及透射波幅值比与深度关系进行处理,如图9所示。从图中可知,不同的衰减因子 β 下,矩形和圆形缺陷的幅值比系数 δ 均与缺陷深度呈正相关,且衰减因子 β 越小,同一缺陷深度下的幅值比系数 δ 反而越大;腐蚀深度 h 和衰减因子 β 相同的条件下,矩形缺陷的幅值比系数 δ 大于圆形缺陷的幅值比系数(当无腐蚀和腐蚀穿孔时,二者的幅值比系数几乎无差别)。为验证利用幅值比系数法分析实际腐蚀缺陷腐蚀程度的可行性,接着对圆球形和圆锥形腐蚀缺陷进

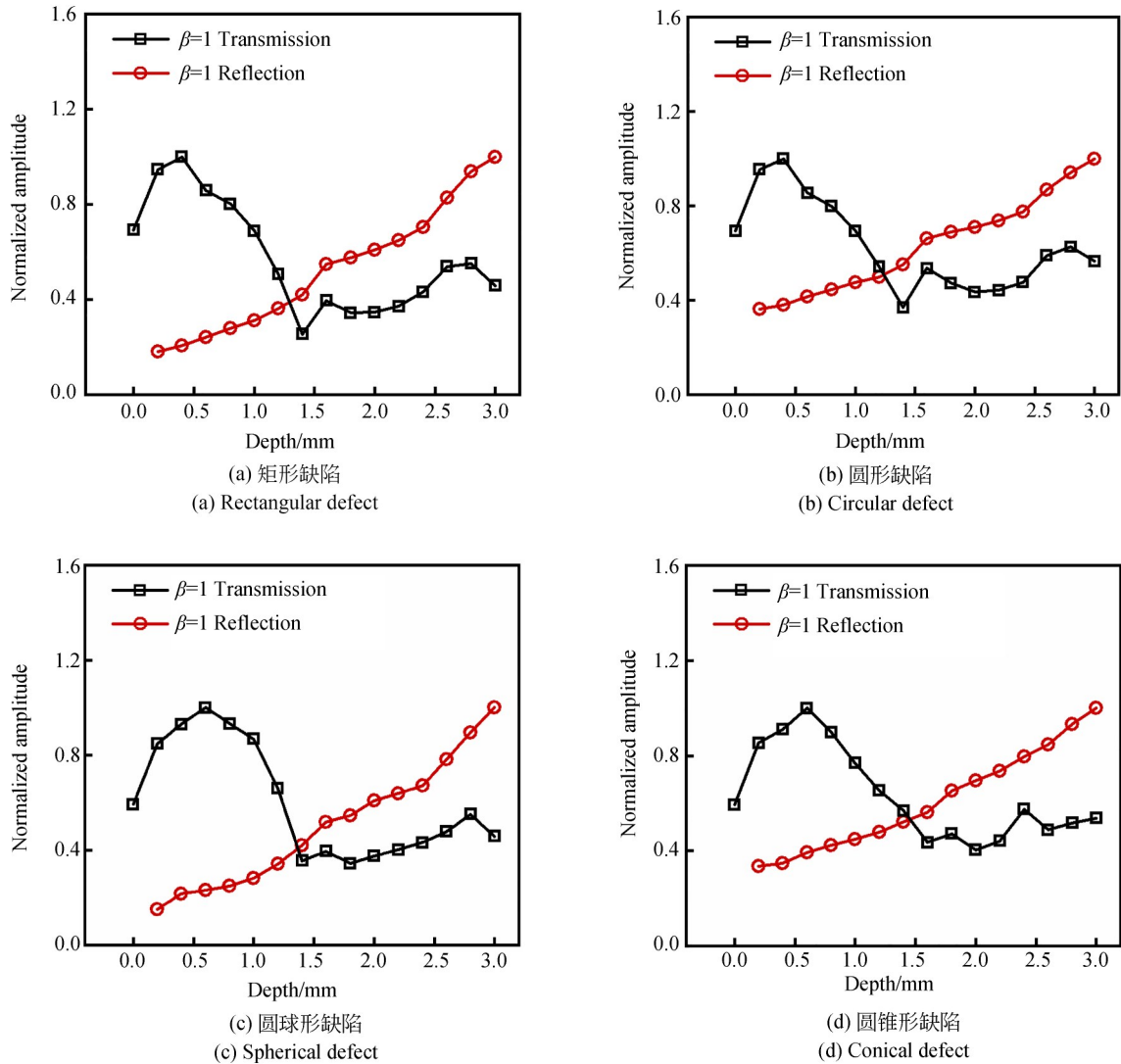


图 8 $\beta = 1$ 时缺陷深度与反射、透射归一化幅值的仿真曲线图

Fig. 8 Simulation curve of defect depth and normalized amplitude of reflection and transmission when $\beta = 1$

行了仿真研究,如图 8 和图 9 所示,从图中可以看出四类缺陷的比值系数曲线变化规律与圆形腐蚀和矩形腐蚀基本一致。可见,依据考虑导波传播衰减时的缺陷深度-幅值比曲线,可得到对应的腐蚀缺陷深度,从而判断缺陷的腐蚀程度。

3 腐蚀深度检测实验

实验测量系统如图 10 所示,由超声导波信号激励系统、超声传感器、信号采集系统和计算机组成。其中实验所用的超声波传感器为日本富士 FUJI 系列的 AE144S 传感器。试样采用

600 mm×600 mm×2.7 mm 的 Q235 钢板,激励和接收传感器按图 6 布置,其中激励换能器位于紧靠钢板一侧的中垂线上,接收换能器布置成以钢板中心为原点,半径为 200 mm 且间隔角度为 45°的圆周阵列,同时在缺陷的中轴线上布置多个接收传感器,使得导波传播衰减因子 β 为 $\sqrt{0.5}$, 1 和 $\sqrt{2}$ 。激励信号采用汉宁窗调制的 10 个周期的正弦信号,中心频率确定为 240 kHz。腐蚀过程采用电化学法,用胶粘住边长或直径为 20 mm 的腐蚀器皿与钢板,形成电解质池,然后倒入 NaCl 溶液,形成腐蚀电池。施加 15 V 的恒压源,每腐蚀 10 min 后,停止腐蚀,采集并记录该腐蚀深度下的

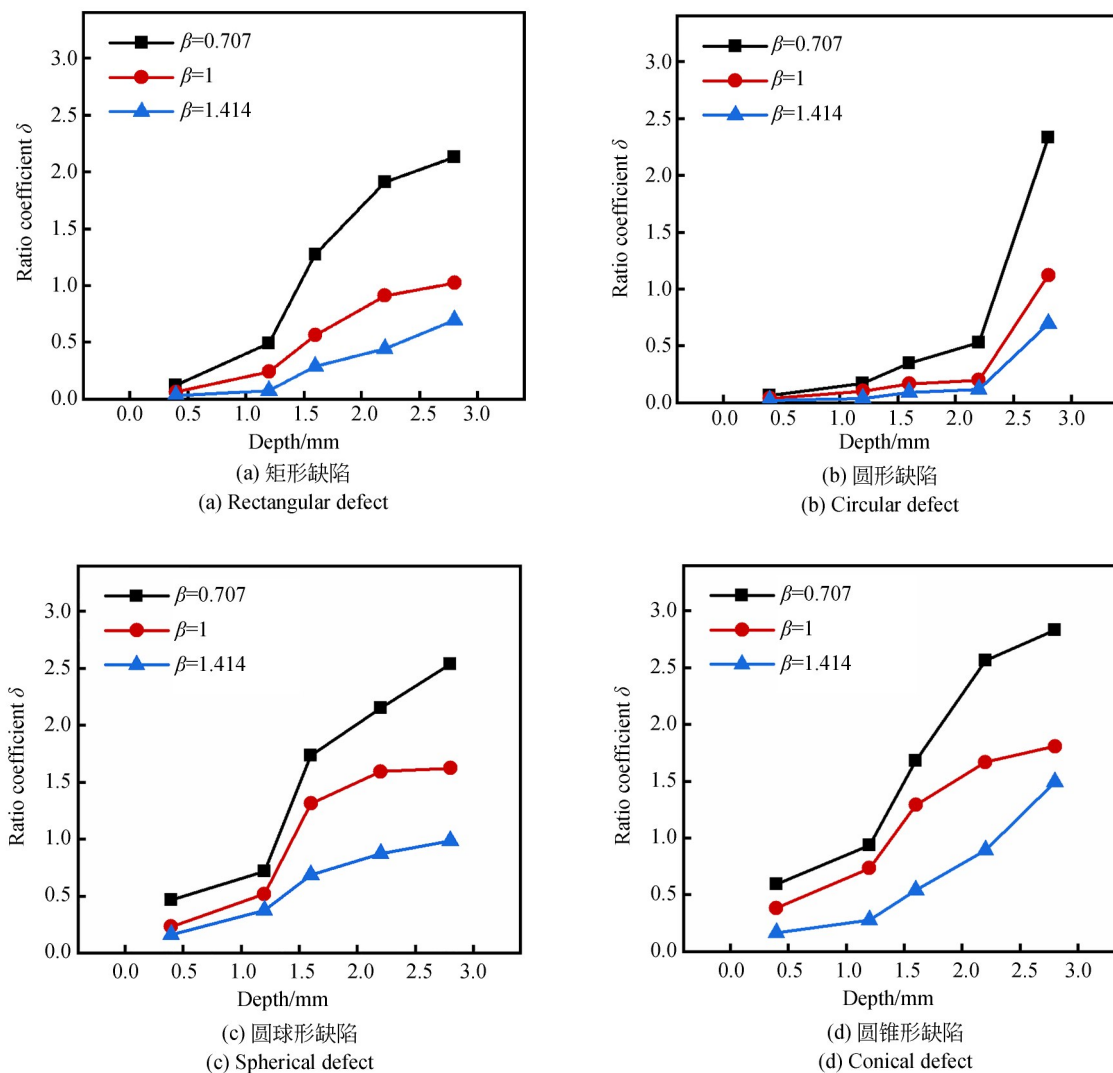


图 9 不同衰减因子下缺陷深度与比值系数的仿真曲线图

Fig. 9 Simulation curve of defect depth and ratio coefficient under different attenuation factors

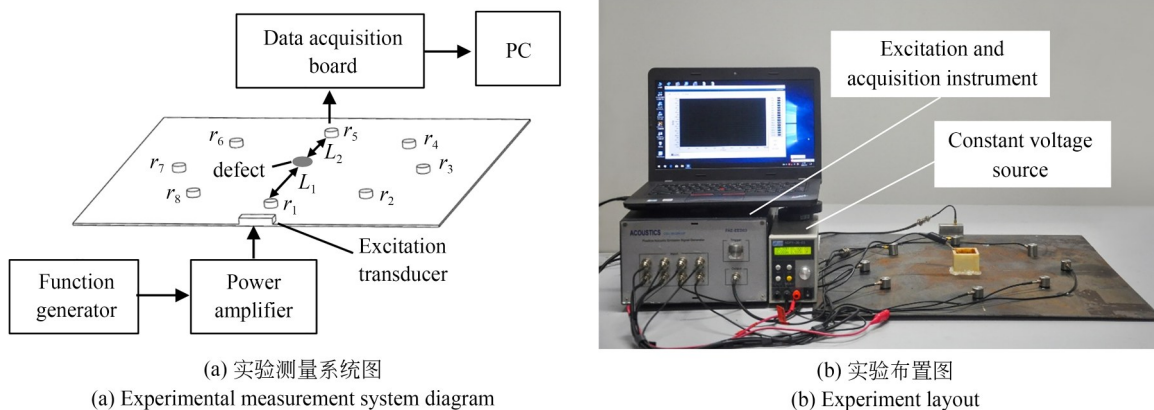
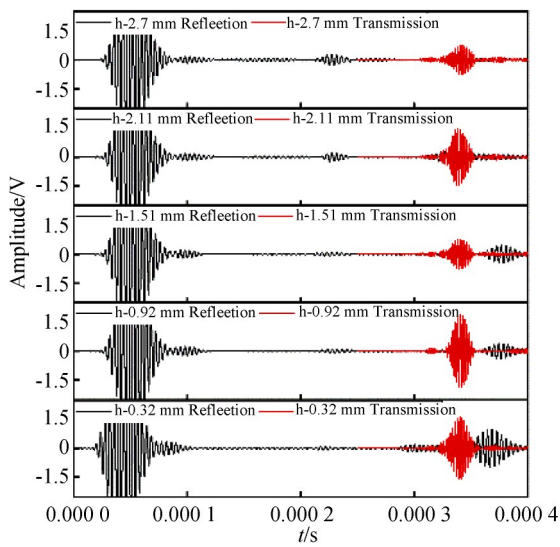


图 10 实验测试平台

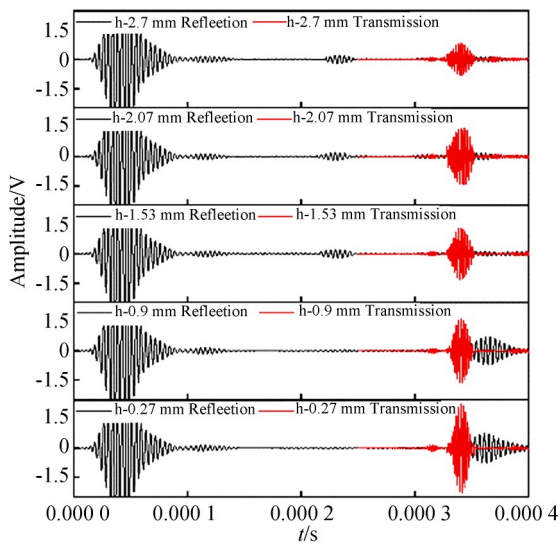
Fig. 10 Experimental test platform

导波数据,直至腐蚀通孔后停止腐蚀。如图 11 所示,绘制了 $\beta=1$ 时矩形和圆形缺陷不同深度下(矩形 $h=0.32, 0.92, 1.51, 2.11$ 和 2.7 mm;圆形 $h=0.27, 0.9, 1.53, 2.07$ 和 2.7 mm)传感器 $r1$ 接收到的反射波时域信号和 $r5$ 接收到的透射波时域信号。

图 12 是 $\beta=1$ 时的矩形腐蚀缺陷和圆形腐



(a) 矩形缺陷
(a) Rectangular defect



(b) 圆形缺陷
(b) Circular defect

图 11 不同腐蚀深度下的反射波和透射波时域信号
Fig. 11 Time-domain signals of reflected and transmitted waves at different corrosion depths

蚀缺陷的深度与反射波和透射波幅值之间的曲线图。在图 12(a)矩形腐蚀缺陷中,当 $h < 1$ mm 时,由于腐蚀缺陷深度较浅,缺陷的反射回波能量较小,能量衰减影响较大,此时反射幅值随深度增加缓慢上升,随着 h 的增加(1 mm 至 2.23 mm 之间),缺陷的反射幅值相对于 h 的变化近乎线性,且在 $h=2.23$ mm 处增至最大值,当 h 在 2.23 mm 至 2.7 mm 之间时,反射幅值又基本保持稳定;对于透射波幅度而言,当深度小于 0.8 mm 时,透射幅值随深度增加而增加,当 h 在 0.8 mm 至 1.62 mm 之间时,透射波幅值随深度增加而减小,且在 $1/2$ 板厚处降至极小值,当深度 h 大于 $1/2$ 板厚时,出现周期性波动现象。在图 12(b)圆形腐蚀缺陷中,当深度 $h < 0.27$ mm 时,圆形缺陷的反射幅值基本不变,当深度 h 在 0.27 mm 至 2.25 mm 之间,反射幅值与缺陷深度呈正相关,随着深度 h 的增大,板的对称性增加,反射幅值基本保持不变;当缺陷深度 h 小于 0.8 mm 时,透射幅值对缺陷深度不敏感,随着 h 的增加,当深度在 0.8~1.32 mm 时,透射幅值随 h 增加线性减小,且在 1.32 mm 处降至最小值。与仿真结果相比,当缺陷深度大于 $1/2$ 板厚时,透射波幅值也出现高低起伏的波动现象。

根据公式(10)求出不同缺陷深度下的幅值比系数,绘制如图 13 所示不同衰减因子 β 下矩形和圆形缺陷深度与幅值比系数 δ 的实验变化曲线,求解过程中透射波幅值为多项式拟合后的值。从图中可知,当腐蚀深度 h 较大时,矩形腐蚀缺陷的幅值比系数 δ 更大,此时导波信号对矩形缺陷更为敏感;且衰减因子 β 不同,幅值比系数 δ 皆随缺陷深度的增加而增加。当矩形缺陷深度 h 在 1 mm 至 2.1 mm 之间时,幅值比系数 δ 与缺陷深度同向增长,且增长率最大;当圆形缺陷深度 h 大于 2.1 mm 时,幅值比系数 δ 随圆形缺陷深度的增加而快速增加,且此区间内的增长率最大。这一趋势与仿真结果一致。

表 1 为不同距离比下矩形缺陷和圆形缺陷的三个腐蚀区间的比值系数,总体来看,比值系数与缺陷深度是正相关的。参考《SY/T 6620-

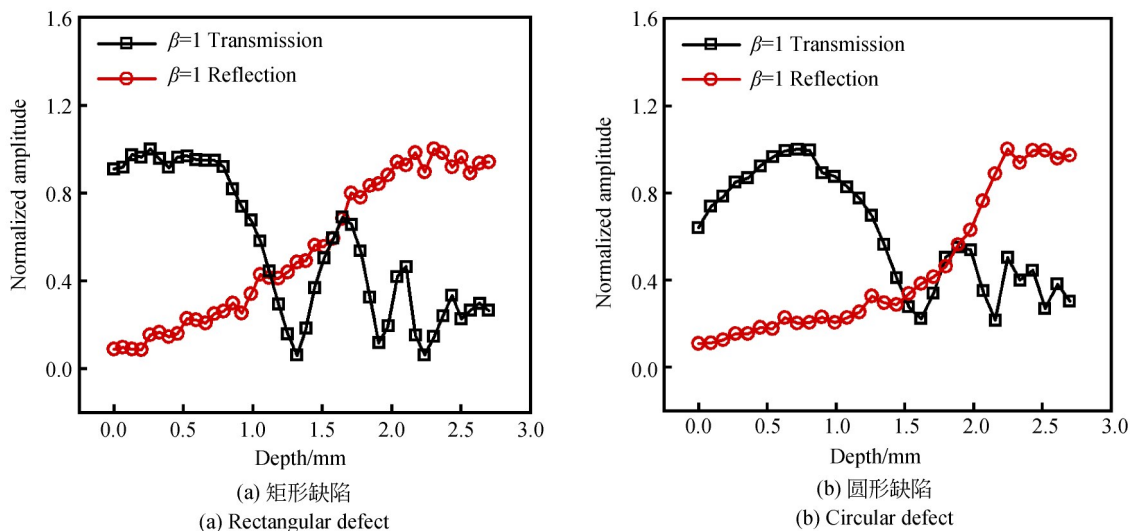


图 12 $\beta=1$ 时缺陷深度与反射、透射归一化幅值的实验曲线图

Fig. 12 Experimental graph of defect depth and normalized amplitude of reflection and transmission when $\beta=1$

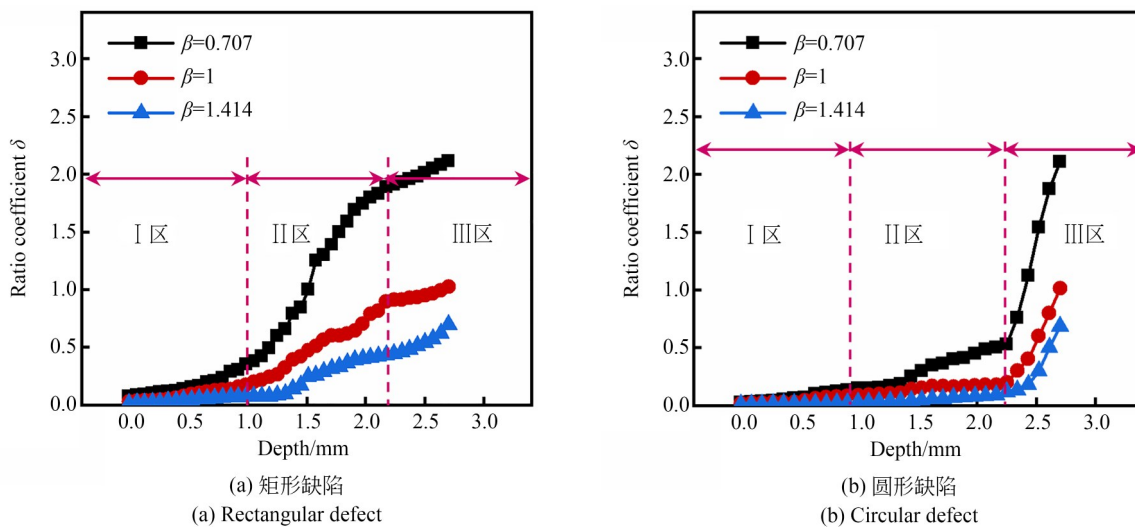


图 13 不同衰减因子下缺陷深度与比值系数的仿真曲线图

Fig. 13 Simulation curve of defect depth and ratio coefficient under different attenuation factors

表 1 矩形和圆形缺陷不同腐蚀区间的比值系数

Tab. 1 Ratio coefficient of different corrosion intervals for rectangular and circular defects

腐蚀区间	矩形比值系数 δ			圆形比值系数 δ		
	$\beta=0.707$	$\beta=1$	$\beta=1.414$	$\beta=0.707$	$\beta=1$	$\beta=1.414$
轻微腐蚀区(I区)	0—0.36	0—0.18	0—0.08	0—0.15	0—0.09	0—0.03
中等腐蚀区(II区)	0.36—1.87	0.18—0.88	0.08—0.42	0.15—0.5	0.09—0.18	0.03—0.09
严重腐蚀区(III区)	1.87—2.12	0.88—1.02	0.42—0.69	0.5—2.11	0.18—1.01	0.09—0.68

2005》标准可知,检修储罐板的临界厚度是不超过原始罐厚的 20%,因此,根据比值系数的变化

率将腐蚀缺陷深度分为三个区间:轻微腐蚀区(I区),中等腐蚀区(II区)和严重腐蚀区(III区),当

腐蚀缺陷深度 $0 < h < 1$ mm 时,为轻微腐蚀缺陷;
 $1 < h < 2.16$ mm 时,为中等腐蚀缺陷;
 $h > 2.16$ mm 时,为严重腐蚀缺陷。因此无论是何种腐蚀缺陷类型,均能根据表中不同距离下的比值系数来反映缺陷腐蚀程度。

4 现场实验

对某中石化实验基地的储油罐进行了实地的腐蚀缺陷检测试验。储罐直径大约 6 m, 高约 10 m, 壁板厚度 5 mm, 如图 14 所示。储罐罐顶结构健康监测示意图如图 15 所示, 将 36 个传感器间隔 10° 均匀分布在罐顶四周。检测系统包括自研的 PAESHM-100S 导波信号激励源、8 通道数据采集仪器和电脑。



图 14 储罐实物图

Fig. 14 Physical map of storage tank

将腐蚀缺陷实验检测深度值和实际现场测厚深度值进行对比, 结果如表 2 所示, 现场检测结果表明, 腐蚀评价结果与实际测量结果基本相符, 误差较小。从而验证了前期搭建的储罐罐顶结构健康监测系统能够较好地完成对于腐蚀缺陷深度的超声检测, 并为腐蚀评价提供较为准确的数据。

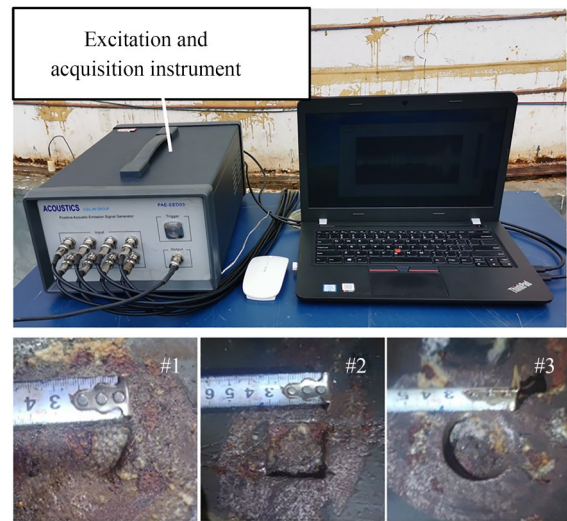


图 15 储罐罐顶结构健康监测系统及缺陷示意图

Fig. 15 Schematic diagram of health inspection system and defect of storage tank roof structure

表 2 储罐罐顶(板厚 3 mm)评级表

Tab. 2 Storage tank roof (plate thickness 3 mm) rating table (mm)

缺陷编号	实际腐蚀深度	检测结果
#1	0.8	轻微腐蚀
#2	1.9	中等腐蚀
#3	2.6	严重腐蚀

5 结 论

(1) 利用有限元仿真的方法建立了矩形和圆形腐蚀缺陷模型, 通过绘制的频散曲线确定了 A0 为主要检测模式, 同时腐蚀缺陷的深度不同, 波场的散射能量分布不同。通过有限元分析得出不同导波传播衰减因子 β 下, 反射波和透射波幅值随缺陷深度 h 的变化曲线, 得到缺陷的反射波幅值与缺陷深度有较好的正相关现象, 而透射波幅值随深度变化有高低起伏的现象, 推导了考虑导波传播衰减时的缺陷深度-幅值比理论表达式;

(2) 通过搭建的测量系统进行腐蚀深度检测实验, 得到的腐蚀缺陷深度与反射波、透射波幅值变化趋势和仿真结果相吻合, 验证了缺陷深度与幅值比变化曲线的关系; 实验结果表明: 根据比值系数随深度变化的曲线能对 3 mm 厚的钢板实现腐蚀深度等级的划分, 且能定量的最小腐蚀

深度为 0.2 mm。

(3) 腐蚀缺陷的反射与透射波信号幅值与缺陷深度、缺陷尺寸和缺陷相对位置有关, 本文重点

针对板状结构腐蚀缺陷深度、相对位置进行了研究, 为腐蚀缺陷程度评估提供了指导, 但对于缺陷尺寸对幅值比系数的影响还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 马金足, 崔建龙. 在役原油储罐的在线检测技术应用现状[J]. 石化技术, 2020, 27(4): 5-6.
MA J Z, CUI J L. Application status of on-line detection technology for in-service crude oil storage tank [J]. *Petrochemical Technology*, 2020, 027(4): 5-6. (in Chinese)
- [2] 张耀焯, 李冬生, 周智. 超声导波针对均匀腐蚀的无基准评定方法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2): 115-120.
ZHANG Y Y, LI D S, ZHOU Z. Baseline-free method for the evaluation of uniform corrosion based on ultrasonic guided waves [J]. *Vibration and shock*, 2019, 38(2): 115-120. (in Chinese)
- [3] 凤飞龙, 陈文生. 阶梯板兰姆波散射特征模式展开法研究[J]. 失效分析与预防, 2012, (1): 25-30.
FENG F L, CHEN W S. Scattering characteristics of lamb wave of step plate [J]. *Failure analysis and prevention*, 2012, (1): 25-30. (in Chinese)
- [4] 韩文礼, 蒋林林, 刘苒, 等. 在役原油储罐的在线检测技术应用现状[J]. 石油工程建设, 2019, 45(4): 01-03.
HAN W L, JIANG L L, LIU R, *et al.* Current application status of on-line inspection technology for oil storage tanks in-service [J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2019, 45(4):01-03. (in Chinese)
- [5] 冯文林, 彭进, 余佳浩, 等. 端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4):33-37.
FENG W L, PENG J, YU J H, *et al.* Double Fabry-Perot optical fiber temperature sensor with end face corrosion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4):33-37. (in Chinese)
- [6] 吕东喜, 陈明达, 姚友强, 等. 基于概率统计的BK7玻璃磨削亚表层损伤深度在线预测技术[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1):102-109.
LV D X, CHEN M D, YAO Y Q, *et al.* On-line prediction technology of BK7 glass grinding subsurface damage depth based on probability and statistics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1):102-109. (in Chinese)
- [7] 刘红婕, 王凤蕊, 耿峰, 等. 荧光成像技术无损探测光学元件亚表面缺陷[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1):51-57.
LIU H J, WANG F R, GENG F, *et al.* Fluorescence imaging technology non-destructively detects sub-surface defects of optical components[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1):51-57. (in Chinese)
- [8] 马逸东, 周顺勇. 基于连通性检测的图像椒盐噪声滤波算法[J]. 液晶与显示, 2020, 35(2):168-171.
MA Y D, ZHOU S Y. Image salt and pepper noise filtering algorithm based on connectivity detection [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(2):168-171. (in Chinese)
- [9] 周云双, 陈平, 丁克勤. 浮顶储油罐安全监控与预警管理系统设计开发[C]. 2015 远东无损检测新技术论坛——基于大数据的无损检测, 中国, 珠海, 2015: 575-578.
ZHOU Y S, CHEN P, DING K Q. Design and development of security monitor and early alarming system of floating roof tank [C]. *2015 Far East Nondestructive Testing New Technology Forum-Non-destructive testing based on big data, Zhuhai, China*, 2015, 575-578. (in Chinese)
- [10] 刘增华, 何存富, 吴斌, 等. 利用兰姆波对板状结构中隐蔽腐蚀缺陷的检测[J]. 实验力学, 2005, 20(2):166-167.
LIU Z H, HE C F, WU B, *et al.* Hidden corrosion detection in plate-like structure using lamb waves [J]. *Experimental mechanics*, 2005, 20(2):166-167. (in Chinese)
- [11] 智达, 赵军辉, 许焯东, 等. 超声 S_0 导波检测腐蚀缺陷[J]. 无损检测, 2015, 37(1):16-21.
ZHI D, ZHAO J H, XU Y D, *et al.* Detection of corrosion defects in plate by S_0 guided wave [J]. *Non-destructive testing*, 2015, 37(1): 16-21. (in Chinese)
- [12] 张超瑾, 徐桂东. SH波的激发及与金属板中损伤相互作用[J]. 电子科技, 2018, 31(2):8-11.
ZHANG C J, XU G D. SH wave generation and interaction with defects in metallic plates [J]. *Electronic technology*, 2018, 31(2): 8-11. (in Chinese)

- [13] 肖贤军,刘丽川,潘三和. 超声导波确定储罐底板缺陷腐蚀程度的实验研究[J]. 石油和化工设备, 2007, 45-46.
XIAO X J, LIU L C, FAN S H. Experimental research on determining defects and corrosion degree of tank bottom by ultrasonic guided waves[J]. *Petroleum and chemical equipment*, 2007, 45-46. (in Chinese)
- [14] 肖贤军,刘丽川,刘子厚,等. 超声导波技术检测储罐底板缺陷[J]. 无损检测, 2008, 30(1):6-8.
XIAO X J, LIU L C, LIU Z H, *et al.* Flaw testing of tank floor by ultrasonic guided waves [J]. *Non-destructive testing*, 2008, 30(1):6-8. (in Chinese)
- [15] GAO H, GUERS M J. Flexible ultrasonic guided wave sensor development for structural health monitoring[J]. *Proc Spie*, 2006: 61761I-61761I-12.
- [16] ZHAO X, ROSE J, GAO H. Determination of density distribution in powder compacts using ultrasonic tomography [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2006, 53(2):360-369.
- [17] 郑阳,何存富,吴斌,等. 采用超声导波阵列技术研究板类结构大面积检测[J]. 声学学报, 2013, (1):73-81.
ZHENG Y, HE C F, WU B, *et al.* Guided wave arrays for large plate structures inspection [J]. *Acta Acoustica*, 2013, (1):73-81. (in Chinese)
- [18] XU K, TA D, SU Z, *et al.* Transmission analysis of ultrasonic Lamb mode conversion in a plate with partial-thickness notch [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1):395-401.
- [19] CHAN H, FROMME P. High frequency guided waves for hidden fatigue crack growth monitoring in multi-layer aerospace structures [J]. *Smart Materials & Structures*, 2015, 1650(2):237-244.
- [20] MASSEREY B, FROMME P. On the reflection of coupled Rayleigh-like waves at surface defects in plates [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(1):88.
- [21] MASSEREY B, FROMME P. High-frequency guided waves for defect detection in stiffened plate structures [J]. *Insight*, 2009, 51(12):667-671.
- [22] 张伟伟. 基于模态分析和应力波技术的结构裂纹识别方法研究[D]. 暨南大学, 2010.
ZHANG W W. *Studies on Crack Identification Methodology for Structure Based on Mode Analysis and Stress Wave* [D]. Jinan University, 2010.
- [23] L. ROSEJOSEPH. *Ultrasonic Waves in Solid Media* [M]. British: Cambridge University Press. 1999, P. 40-45.
- [24] MEI H, GIURGIUTIU V. Guided wave excitation and propagation in damped composite plates [J]. *Structural health monitoring*, 2019, 18(3): 690-714.

作者简介:



刘文才(1984—),男,黑龙江明水人,硕士,高级工程师,现为中国石油大学(北京)工程博士,主要从事石油石化设备检测与评估技术方面的研究。E-mail: wencailiu@cnpc.com.cn

导师简介:



樊建春(1964—),男,陕西汉中,人,教授,博士生导师,1985年于陕西工学院获得学士学位,1991年于武汉理工大学获得硕士学位,1995年获得武汉理工大学获得博士学位,1998年清华大学精仪系摩擦学国家重点实验室博士后,主要从事状态监测与智能诊断、安全检测及预警、油井管完整性检测及评价、摩擦学相关研究工作;E-mail: fjc688@126.com