

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306281

煤矿主接地电极腐蚀超声 SH 波检测方法研究*

闫孝姮 李朝政 陈伟华 王 帅
(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘 要:煤矿井下主接地电极腐蚀检测对于保护工作人员的安全起着极其重要的作用,当前通过运至井上人工肉眼检测的方法耗时耗力且无法定损,因此本文提出了一种基于超声 SH 波回波特性的煤矿井下主接地电极在线腐蚀检测新方法。首先推导了液浸板结构中 SH 波的频散方程,选取频散小、传播距离长的零阶 SH 波作为检测激励信号,建立液浸板结构有限元模型,确定了最佳超声激励频率;其次构建煤矿主接地电极声-固-流多物理场耦合检测模型,仿真研究超声 SH0 波在主接地电极上的传播特性以及对于腐蚀的检测能力,分析了 1~5 mm 腐蚀深度以及 5~25 mm 腐蚀半径下的回波信号特征;最后搭建了煤矿主接地电极无损检测系统,开展了实验验证工作。实验结果表明,通过超声 SH 波检验井下主接地电极腐蚀缺陷具有可行性,在 500 mm×375 mm×5 mm 的主接地极板上腐蚀定位误差为 5.64%,同时腐蚀信号的幅值与不同程度的腐蚀缺陷与成正相关性,为煤矿井下主接地电极腐蚀检测以及腐蚀程度的定量评估提供了一种有效的方法。

关键词:主接地电极;腐蚀缺陷检测;SH 波;频散方程

中图分类号: TH17;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

Study on structural corrosion detection of main grounding electrode in coal mine based on ultrasonic SH wave

Yan Xiaoheng Li Chaozheng Chen Weihua Wang Shuai
(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: The corrosion detection of main ground electrode in underground coal mine is crucial to the safety of the staff. Traditional manual visual inspection detection by transporting the electrode overground is time-consuming and the damage magnitude cannot be confirmed. Therefore, a new online corrosion detection method based on ultrasonic SH wave echo characteristics is proposed. Firstly, the dispersion equation of SH wave in the liquid-immersed plate structures is derived. The zero-order SH wave with small dispersion and long propagation distance is selected as the detection excitation signal, and the finite element model of liquid-immersed plate structure is constructed to determine the optimal ultrasonic excitation frequency. Secondly, the coupled flow-solid-acoustic multi-physical field detection model of the main grounding electrode in coal mines is constructed and the corrosion detection ability of ultrasonic SH0 wave on the main ground electrode is studied by simulation, then the echo signal characteristics under 1~5 mm corrosion depth and 5~25 mm corrosion radius are analyzed. Finally, the non-destructive testing system of the main ground electrode in coal mine is constructed, and experimental verification is carried out. The experimental results prove the feasibility of the proposed method, the corrosion location error is 5.64% on a 500 mm×375 mm×5 mm main grounding plate, the corrosion signal amplitude is positively correlated with the magnitude of corrosion defects. The research provides an effective method for corrosion location and damage assessment of underground coal mine main ground electrode.

Keywords: main grounding electrode; corrosion defect detection; SH wave; dispersion equation

0 引言

接地装置不仅为各种电气设备提供了一个公共的参考地,而且在发生故障时,能够将故障电流迅速散流,限制地电位升高,保证人身和设备安全^[1-2]。煤矿井下主接地电极作为井下接地装置的重要组成部分,由于常年放置在井下水仓中,受酸性矿井水的影响极易造成腐蚀而腐蚀层的存在会影响正常的电流耗散过程,削弱接地性能^[3]。因此需要定期对井下主接地电极进行腐蚀检测,保证井下供电系统安全运行。目前人工腐蚀检测方法耗时耗力且具有较大的盲目性^[4],急需研究一种利用先进技术进行煤矿井下主接地电极腐蚀缺陷在线检测的新方法。

常规板结构无损检测手段包括:常规超声检测、漏磁检测、涡流检测以及声发射检测等^[5-7],这些检测方法原理不同、适用性不同且各有其检测的特点,国内外学者对此开展了不同程度的研究。Zhouzhou 等^[8]在理论上探索了光纤布拉格光栅在超声波作用下的响应,弥补了光纤光栅传感器在超声检测应用中光纤长度和超声频率之间关系不明确的空白;刘真伟等^[9]针对传统漏磁检测有限元模型计算时间长的问题,提出了一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法,经验证计算性能有明显的变化且计算精度也有较高的提升;张娜等^[10]研究了一种基于高分辨率隧道效应磁阻(TMR)传感器阵列和双排圆形三相激励线圈磁场成像的新型涡流检测探头,该探头可有效检测出不同方向的缺陷以及尺寸微小的缺陷,极大的促进了涡流检测检测精度的提高;Barat 等^[11]提出了一种将样品力学测试中获得的实验声发射数据应用到缺陷发出的声信号的先验估计方法,估计出了声发射信号的记录发射率和振幅的条件概率,为解决声发射检测中缺陷检测概率估计问题提供了新思路。

以上检测手段在工业领域得到了广泛的应用,但同时其本身也具有一定的局限性。其中常规超声检测技术对工件表面状况要求较高并且灵敏度单一易于造成误检或漏检;漏磁检测受到工件磁导率的影响较大且检测效率较低、成本高;涡流检测只能对工件表面或近表面的缺陷进行检测,对缺陷的定性和定量较为困难误差较大;声发射检测受材料的影响较大,同时噪声的存在很大程度上影响检测的效果并且对于缺陷的信息表征有限。而与以上方法相比,超声导波无损检测技术(SGW-NDT)作为一种新发展的检测技术具有沿传播路径受干扰小、传播距离远、灵敏度强等优点^[12-13],其中作为板结构导波主要组成模式之一的低频 SH 波,凭借其极强的穿透性能、宽广的检测范围以及灵敏的检测精度,在大尺寸板结构无损检测方面有重要的实用价值^[14-15]。

Liu 等^[16]提出了一种新型的采用周向周期永磁阵列

的全向电磁声换能器,可以在铝板中产生和接收全向 SH0 模态导波,实现对金属板全方位的大规模结构健康检测;Choi 等^[17]在高温辐射条件下用电磁声传感器激发接受 SH 波,并利用机器人无损检测系统对不锈钢板裂纹进行检测;Furusawa 等^[18]利用激光诱导超声导波技术对关闭的福岛第一核电站的钢筋混凝土结构进行了远程无损检测,结果表明超声信号频域内腐蚀引起的强度变化可以被区分;Mei 等^[19]利用纯横波检测复合材料中的层层数并确定其大小,并通过 SH0 波层析成像,发现 SH 导波在航空复合材料层合检测、尺寸估计和定位方面的良好性能。

以上研究成果分别从 SH 波激励方式、检测环境、待检测工件结构等方面,为理解超声 SH 导波在特殊结构中的传播特性及腐蚀缺陷的识别性能提供了建设性参考。因此本文提出一种基于超声 SH 波的回波特性实现腐蚀缺陷在线检测的新方法,选取激励频率为 150 kHz 的零阶 SH 波作为检测激励信号,构建了煤矿井下主接地电极三维结构腐蚀检测模型,利用回波反射法实现腐蚀的测量和定位,同时研究了不同腐蚀面积和腐蚀深度下的超声 SH0 波与腐蚀缺陷作用后的回波信号,为主接地电极腐蚀程度的定量评估提供依据。

1 液体负载下板状结构导波传播特性

超声导波的检测效果主要取决于所选导波的传播特性,如频散特性、波结构及衰减特性等。由于煤矿井下主接地电极长期处于水环境中,因此需要对液体负载下,不同模态超声导波信号在板结构中的传播特性进行分析,选取适合井下主接地电极无损检测的超声导波模态类型和激励频率范围。

1.1 液浸薄板中超声 SH 导波理论基础

不同于自由边界板结构导波性质,液浸板结构中的导波具有自己独特的边界条件和传播特性,如图 1 所示。沿 x_2 方向偏振的体剪切波在板结构的上下边界来回反射叠加,形成了沿 x_1 方向传播的 SH 波。同时由于横波在液体和固体之间无法实现位移变化,故在液体中无法因波的叠加干涉产生导波。

对于液浸各向同性板状结构,忽略其自身体力影响,由弹性力学可知,波在板状结构传播的质点位移 $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ 可满足 Navier 运动方程,即:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u}(x, y, z, t) + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}(x, y, z, t)) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}(x, y, z, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ 为位移矢量场; λ 与 μ 为弹性材料的拉梅常数; ρ 为弹性材料的密度。利用势分解法可得到固体层和液体层之中的声场分布如下:

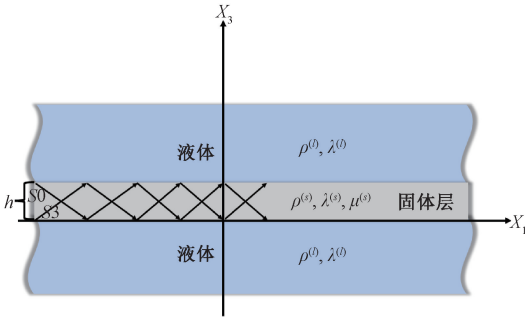


图 1 液浸板结构中 SH 波传播切面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SH wave propagation in liquid immersion plate structure

1) 固体层

板结构厚度为 h , 密度和拉梅常数分别为 $\rho^{(s)}$ 、 $\lambda^{(s)}$ 和 $\mu^{(s)}$, 剪切波在该层传播时会产生两个部分波: 部分波 1 为入射横波, 部分波 2 为反射横波。式(2)描述了这两个部分波的解, 由于入射波在 x_3 方向的投影沿 $-x_3$ 方向, 因此其波数为负值。

$$\begin{cases} u_{31} = -\frac{1}{a_1} = -\frac{1}{\sqrt{-1 + \frac{\rho^{(s)}}{\mu^{(s)}}c_p^2}} \\ u_{32} = -\frac{1}{a_2} = \frac{1}{\sqrt{-1 + \frac{\rho^{(s)}}{\mu^{(s)}}c_p^2}} \end{cases} \quad (2)$$

根据斯涅尔定律所有部分波在 x_1 方向具有相同的波数, 因此所有部分波的相速度 $c_p = \omega/k$ 。由于导波总位移场和总应力声场由这两部分波的线性叠加而成, 那么总的波动声场可以表示为式(3), 其中 B_1 和 B_2 分别为入射波和反射波的幅值。

$$\begin{cases} u_1^{(s)} = \sum_{n=1}^2 B_n e^{ik_1(x_1 + a_n x_3 - c_p t)} \\ u_3^{(s)} = \sum_{n=1}^2 B_n u_{3n} e^{ik_1(x_1 + a_n x_3 - c_p t)} \\ \sigma_{33}^{(s)} = \sum_{n=1}^2 B_n \lambda^{(s)} (ik_1) e^{ik_1(x_1 + a_n x_3 - c_p t)} + \sum_{n=1}^2 (\lambda^{(s)} + 2\mu^{(s)}) a_n u_{3n} (ik_1) e^{ik_1(x_1 + a_n x_3 - c_p t)} \\ \sigma_{31}^{(s)} = \sum_{n=1}^2 B_n (a_n + u_{3n}) \mu^{(s)} (ik_1) e^{ik_1(x_1 + a_n x_3 - c_p t)} \end{cases} \quad (3)$$

2) 液体层

由图 1 可知在 $x_3 > h$ 和 $x_3 < 0$ 的半无限空间均为液体负载, 且煤矿井下水仓中的液体密度和拉梅常数分别为 $\rho^{(l)}$ 和 $\lambda^{(l)}$ 。但考虑到无论是入射波还是反射波, 横波部分均无法在液体环境中进行传播, 因此在无限大液体负载中的波数为:

$$\begin{cases} u_{33} = a_3 = 0 \\ u_{34} = a_4 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

因此在无限大液体环境中导波总位移场和总应力声场如式(5)所示, 式中上标 l^1 和 l^2 分别代表 $x_3 > h$ 和 $x_3 < 0$ 的无限大液体区域。

$$\begin{cases} u_1^{(l^1)} = B_3 e^{ik(x_1 - c_p t)} \\ u_3^{(l^1)} = 0 \\ \sigma_{31}^{(l^1)} = 0 \\ \sigma_{33}^{(l^1)} = B_3 [\rho^{(l)} c_p^2] (ik) e^{ik(x_1 - c_p t)} \\ u_1^{(l^2)} = B_4 e^{ik(x_1 - c_p t)} \\ u_3^{(l^2)} = 0 \\ \sigma_{31}^{(l^2)} = 0 \\ \sigma_{33}^{(l^2)} = B_4 [\rho^{(l)} c_p^2] (ik) e^{ik(x_1 - c_p t)} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 无限大液体负载下板结构频散方程

在板状结构中由任意模态 SH 波引起的质点振动(速度和位移)位于平行于层面的平面内, 故液体与板结构交界处的应力分量 σ_{31} 均为 0。同时考虑固体板结构中导波的传输情况以及和液体之间的相互作用, 对于板结构和液体负载的交界处来说, 其切向位移 u_3 以及切向应力 σ_{33} 需具有一定的连续性, 即:

$$\begin{cases} (u_3^{(s)})_{z=h} = (u_3^{(l^1)})_{z=h} \\ (u_3^{(s)})_{z=0} = (u_3^{(l^2)})_{z=0} \\ (\sigma_{33}^{(s)})_{z=h} = (\sigma_{33}^{(l^1)})_{z=h} \\ (\sigma_{33}^{(s)})_{z=0} = (\sigma_{33}^{(l^2)})_{z=0} \\ (\sigma_{31}^{(s)})_{z=h} = 0 \\ (\sigma_{31}^{(s)})_{z=0} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: l 为上标, 表示水负载; s 为上标, 表示板结构; z 为下标, 表示板结构的高度; h 表示板结构的下表面到上表面的距离。将边界条件中各层相应的物理量代入可得到关于 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 的齐次线性方程组。该方程为液浸板结构中超声 SH 波的频散方程。

本文研究主接地电极示意图如图 2 所示, 模型中主接地电极板为型号 Q235 的钢板, 尺寸为 1 000 mm × 750 mm × 5 mm, 接地导线为镀锌扁钢, 由于现场工作需求的不同, 需要设定的接地导线长度也有所不同, 因此本研究中接地导线的进行尺寸暂设定为 200 mm × 40 mm × 5 mm, 板结构及酸性水的参数如表 1 所示。

将材料参数代入频散方程, 在此基础上通过数值解法求解该频散方程得到反应不同模态导波波速和频率之间关系的频散曲线。

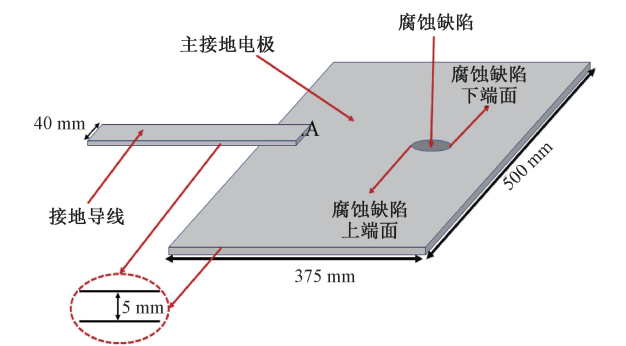


图 2 井下主接地电极三维模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of three-dimensional model of underground main grounding electrode

表 1 双面液体负载板模型参数

Table 1 Model parameters of double-sided liquid load plate

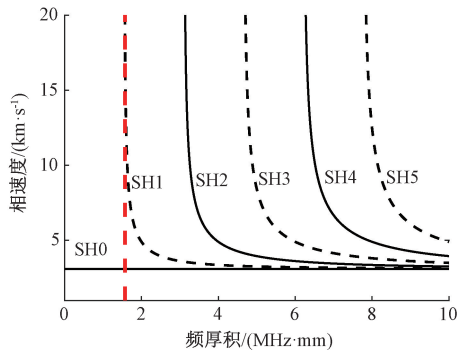
介质	纵波波速 $c_L/(m \cdot s^{-1})$	横波波速 $c_T/(m \cdot s^{-1})$	厚度 $h/$ m	密度 $\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa
板结构	5 578	3 099	0.005	7 850	0.3	210
酸性水	1 494	—	—	998	—	—

1.3 SH 波模式及频率选择

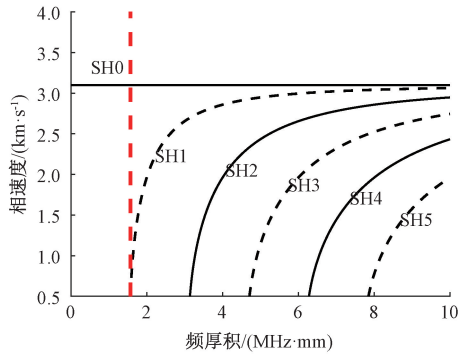
超声导波具有多模态特性,一般在同一工作频率下,至少存在两种或者两种以上的模态,频率低时模态数量较少,随着频率的增加,模态数量随之增加^[20]。因此为避免该特性对检测效果的影响,保证腐蚀回波信号易于提取和分析会,需要对缺陷检测信号的模态和频率进行选择以达到高效识别腐蚀缺陷的目的。利用上节理论,通过 MATLAB 软件绘制了 5 mm 液浸钢板的超声 SH 波的频散关系曲线,如图 3 所示。

在 314 kHz 频率点之后频散现象复杂,不适合板结构的腐蚀缺陷检测,在激励频段 0~314 kHz 之间时,导波模态单一且水平剪切速度变化幅度较小,可大大减少信号分析难度满足缺陷检测研究。为了进一步探究换能器的最佳激励频率同时避免导波过量衰减对检测结果的判断造成影响,本文对激励频段 0~300 kHz 的频率信号进行了研究。利用有限元法对双侧无限大液体负载下的板结构模型进行了声压仿真,通过对 100~300 kHz 频率范围进行步长为 50 kHz 的扫描,得到了图 4 所示的 100、150、200、250 和 300 kHz 激励信号下外部水环境声压分布图。

图中黑色虚线框架区域内为外部液体环境中声压的分布情况,即能量的泄露状态,其中声压分布颜色深浅代表不同的声压分布状态,颜色越深代表外部环境中漏 SH 波的能量越大,即能量衰减程度越高反之则越低。从绘制出的 $t=80 \mu s$ 声压分布图可以看出,外部水环境中声压分布颜色呈现出由深入浅再入深的变化态势,即表面



(a) 相速度频散曲线
(a) Phase velocity dispersion curve



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

图 3 钢板中 SH 导波频散曲线

Fig.3 Dispersion curve of SH guided wave in steel plate

泄露的导波能量随着激励频率的增大先减小后增加,而在 150 kHz 时的声压分布颜色最浅即此频率下能量泄露最少,导波衰减程度最低有利于导波在大结构类型的工件中进行检测。

此外为了满足腐蚀缺陷特征信息更加准确化识别的预期,需要激励能量较强的导波信号,图 5 为 100~310 kHz 激励频段范围内腐蚀回波信号的幅值随频率的变化曲线。从图中可以看出随着激励频率的增加回波信号的幅值呈现先上升后下降的趋势,在当激励频率为 150 kHz 时达到最高值,为了使腐蚀缺陷的回波幅更加明显。因此,本文选择 150 kHz 作为信号的激励频率。

同时从频散曲线中可以看出在所选择的激励频率点所激发出的导波模态为变化平坦且传播速度较快的零阶 SH 波,由于超声导波的波结构决定了该模态导波的传播能力、对缺陷的灵敏度以及对于环境介质的敏感度。为了研究 SH0 波对于腐蚀缺陷检测的能力,本文绘制了 150 kHz 下不同模态的 SH 波的波结构图,并对 SH0 的波结构进行详细分析,如图 6 所示。

由超声 SH 波的波结构图可以看出不同模态下 SH 导波的离面位移为 0,因此在水环境中 SH 波向周围介质中的能量泄漏较小使得导波能够在板中传播较长的距

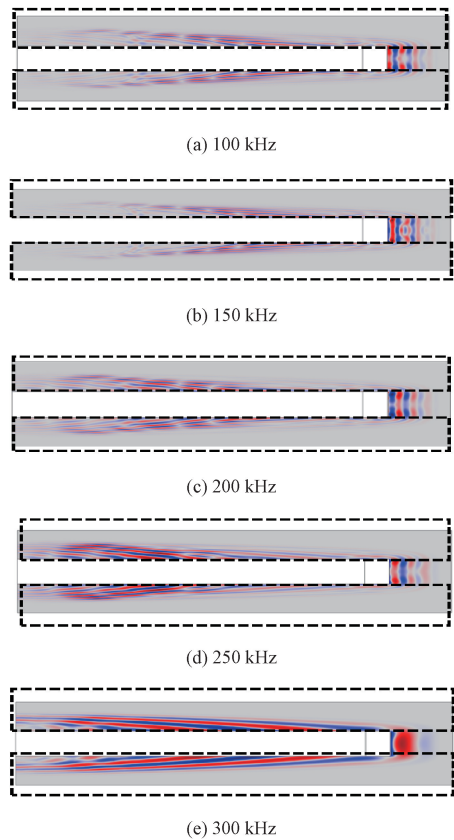


图 4 不同激励频率下声压随时间变化图
Fig. 4 Variation of sound pressure with time at different excitation frequencies

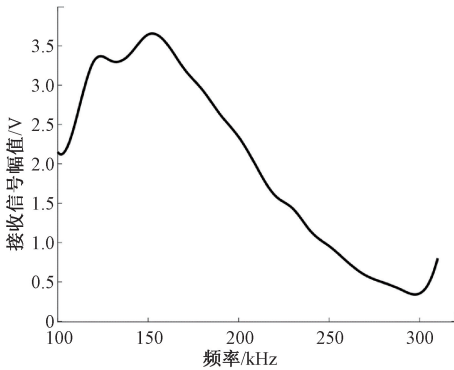


图 5 100~310 kHz 范围内的幅值随频率变化图
Fig. 5 Amplitude variation with frequency in the range of 100~310 kHz

离,同时 SH0 波的面内位移沿厚度方向均匀分布对于板厚度不同深度缺陷具有相同的灵敏度,可提高检测精度,因此本文选择频率为 150 kHz 的 SH0 模态展开进一步研究。

综上所述,本文选择 150 kHz 作为激励信号的中心频率,以经过 Hanning 窗调制的五周期 toneburst 信号作为激励信号,激励的时域信号及频谱如图 7 所示。

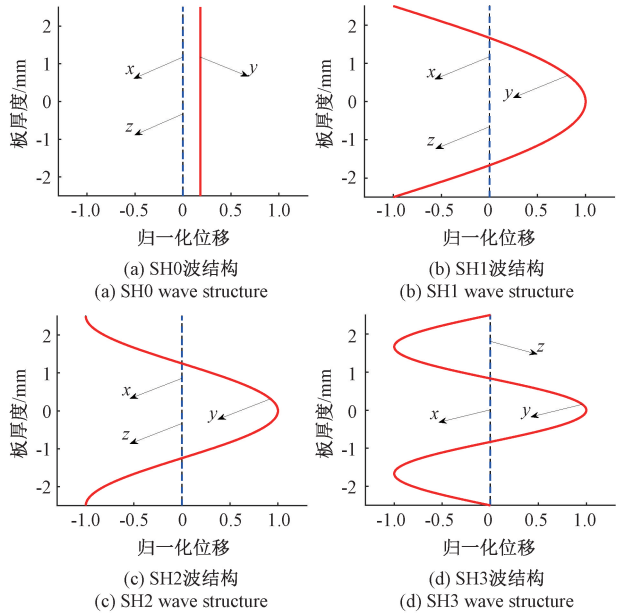
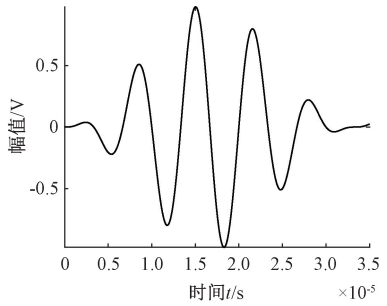
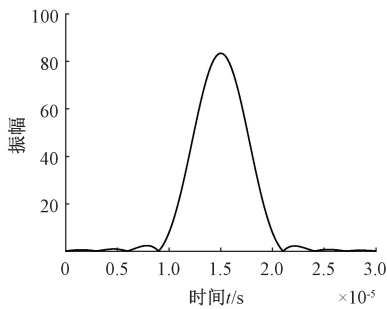


图 6 5 mm 厚板中 SH 波结构
Fig. 6 SH wave structure in 5 mm plate



(a) 激励信号时域图
(a) Excitation signal time domain diagram



(b) 激励信号频谱图
(b) Spectrum diagram of excitation signal

图 7 井下主接地电极腐蚀检测激励信号
Fig. 7 Excitation signal of underground main grounding electrode corrosion detection

2 煤矿主接地电极腐蚀检测仿真分析

2.1 SH 波在主接地电极结构中传播特性仿真分析

对于零阶 SH 导波模态,其波结构简单,波形转换少,单模态激励较易。为了验证超声 SH 波对于煤矿主

接地电极腐蚀检测的灵敏性,本文首先以实际工程中煤矿主接地电极为原型利用 COMSOL 软件建立了超声导波检测模型如图 8 所示,研究超声 SH0 波在主接地电极的传播特性,该模型尺寸与图 2 中一致。由于煤矿井下主接地电极模型尺寸较大,为保证超声换能器有较远的传播距离以及较高的激发和接收性能,选用 PZT-5H (Lead Zirconate Titanate) 为压电材料并且采用反平行 d_{15} 压电片构成的换能器结构^[21]来产生能量较高且集中的超声 SH 波,同时为了减少计算量此处假设焊缝高度无限小,即用接地导线与主接地电极相接触的交线作为焊缝且搭接的长度为接地导线宽度的 2 倍^[22]。

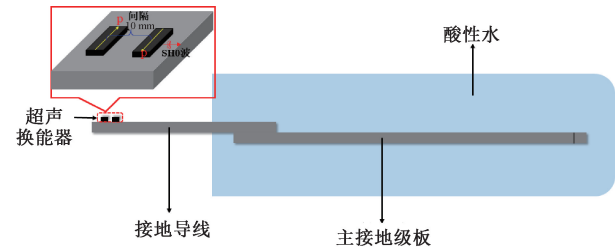


图 8 井下主接地电极仿真模型图
Fig. 8 Simulation model diagram of underground main ground electrode

水仓中的接地导线和主接地极板为 COMSOL 内置材料库中的钢结构,其参数设置如表 1 所示。为贴合煤矿主接地电极在井下的实际工作环境,并且减少边界回波对于接收信号的影响,在模型四周添加了吸收层。考虑到模型计算的精确度,元件的最大尺寸应小于或等于 $1/8$ 的波长,同时时间步长不大于 $1/6$ 的周期。根据以上原则该仿真的最大单元大小设置为波长的 $1/10$,时间步长设置为 $1/8$ 周期,自由三角形网格总数为 78 525。

图 9 显示主接地电极中 $t = 30 \mu\text{s}$ 、 $t = 120 \mu\text{s}$ 和 $t = 180 \mu\text{s}$ 时的位移云图,从图中可以看出 SH0 波在传播过程中由于经过了焊缝结构发生了反射和透射但波束很少发生改变,即意味着零阶 SH 波未发生频散和模式转换的现象适于用于无损检测。

对仿真信号进行模式提取,绘制了位移随时间的变化曲线如图 10 所示,根据激励信号与接地导线 A 端面的位移以及传播时间,可以计算出 SH0 模态导波的传播速度,如表 2 所示。比较 SH0 导波计算速度和理论速度,两者之间的误差为 0.74%,说明了该煤矿主接地电极仿真模型准确率较高适于进行下文的腐蚀检测。

表 2 超声 SH0 波仿真速度分析

Table 2 Simulation velocity analysis of ultrasonic SH0 wave					
导波 模态	传播距离/ mm	传播时间/ μs	计算速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	仿真速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	误差/ %
SH0	100	32.5	3 076.92	3 099	0.74

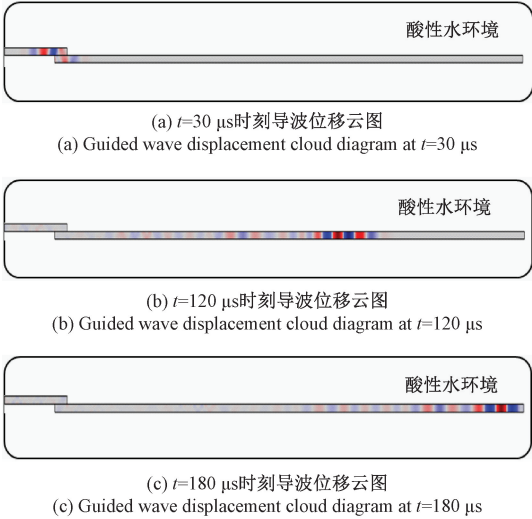


图 9 导波位移云图

Fig. 9 Guided wave displacement cloud diagram

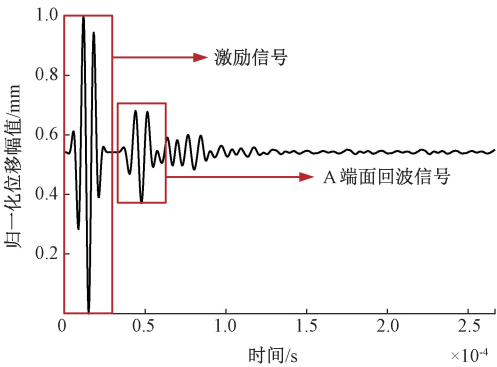


图 10 回波信号

Fig. 10 Echo signal

2.2 主接地电极单一腐蚀缺陷检测仿真分析

煤矿主接地电极长时间浸泡在酸性水环境中极易造成腐蚀损伤,进而影响电极的导电性能威胁相关工作人员的生命安全。为了研究 SH0 模态导波对于煤矿井下主接地电极腐蚀损伤的检测能力以及对于损伤位置的定位性能,构建了主接地极腐蚀缺陷模型,如图 11 所示。其中腐蚀缺陷类型设为圆柱形,其中心位于几何对称线且距离激励中心 480 mm,同时为了使检测结果更加明显本研究选择腐蚀程度较深的腐蚀缺陷类型即腐蚀深度为 4 mm 的类通孔腐蚀。

由于超声 SH 波与缺陷发生作用时,会有携带损伤信息的反射回波产生。基于此本文利用回波定位法实现腐蚀缺陷的定位以及腐蚀程度的定量评估。如图 12 显示 25 mm 腐蚀半径下不同时刻的煤矿井下主接地电极中声压瞬态分布。

由图 13 可以看出 SH 波在传播过程中遇到腐蚀缺陷

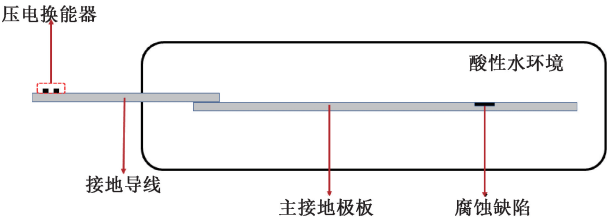


图 11 单腐蚀缺陷仿真模型图

Fig. 11 Single corrosion defect simulation model diagram

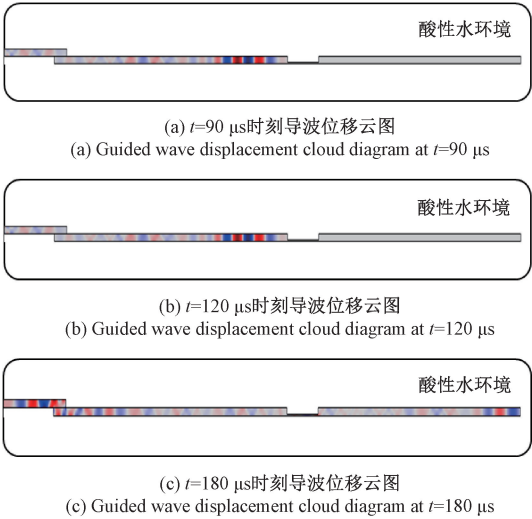


图 12 井下煤矿主接地电极声压瞬态分布

Fig. 12 Transient distribution of sound pressure of main grounding electrode in underground coal mine

后发生了透射和反射现象但无模态转换和频散现象的发生,避免了因频散或模态转换造成腐蚀回波信号单一性降低进而影响检测精度。通过绘制接收点采集到的回波信号并与无腐蚀条件下的回波信号进行对比,如图 13 所示。从图中可以明显看出当腐蚀缺陷存在时,一部分导波在缺陷处发生反射导致腐蚀回波产生,与无腐蚀条件下接受的回波信号形成了鲜明对比。

根据 SH0 模式导波在钢板中的传播速度,以及压电传感器与腐蚀缺陷的距离和传播时间对腐蚀曲线位置进行定位分析,如表 3 所示。从分析结果中可以看出二者的误差仅为 1.87%,具有较高的定位精度同时也说明了零阶超声 SH 波检测煤矿井下主接地电极腐蚀缺陷的可行性。

表 3 腐蚀缺陷位置分析

Table 3 Location analysis of corrosion defects					
导波 模态	仿真波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	传播时间/ μs	计算距离/ mm	理论距离/ mm	误差/ %
SH0	3 099	175.867	545.01	535	1.87

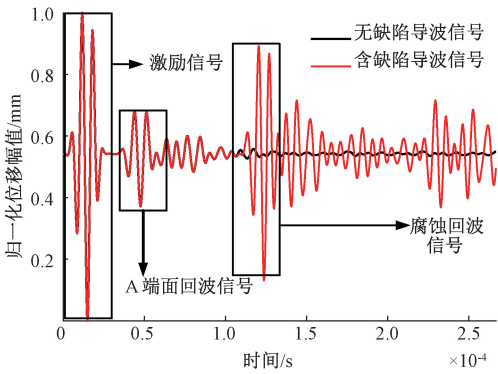


图 13 腐蚀回波信号的位移-时间图

Fig. 13 Displacement-time diagram of corrosion echo signal

2.3 主接地电极多腐蚀缺陷仿真分析

在现场环境中,因酸性分子的存在,造成煤矿主接地电极的多处腐蚀损伤也时有发生,因此建立有限元模型对主接地极板的多处腐蚀缺陷进行定位分析具有一定的必要性。鉴于此本文在图 11 煤矿主接地电极单腐蚀仿真模型的基础上,构建了双腐蚀点孔缺陷如图 14 所示,对超声 SH 多处腐蚀损伤检测性能进行了探索。

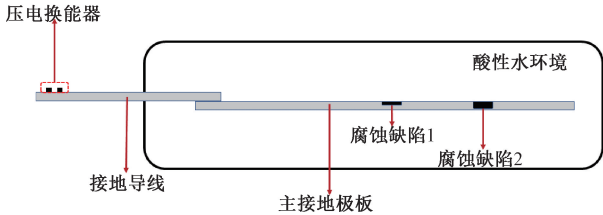


图 14 多腐蚀缺陷仿真模型图

Fig. 14 Multi-corrosion defect simulation model diagram

腐蚀缺陷距离激励源的位移距离分别为 250 和 350 mm,每个缺陷通孔为半径 25 mm,其中腐蚀损伤 1 的腐蚀深度为 2 mm,腐蚀损伤 2 的腐蚀深度为 4 mm。此外为了增加导波与损伤作用后在直观性,绘制了不同时刻导波在主接地极板中的传播速度瞬态分布,如图 15 所示。

图中细箭头大小代表导波声速值大小,箭头方向代表导波声速方向,观察图 15(a)可以发现当导波信号未与腐蚀缺陷相互作用时,导波信号通过在板的上下表面完成复杂的反射及透射过程并以一定的群速度向前传播,但当导波信号传播到缺陷位置并与缺陷损伤进行相互作用后如图 15(b)和(c)所示,可以发现导波信号的反射和透射现象更为复杂,但并未发生频散现象并且在不同位置的腐蚀损伤都会产生一个与传播方向相反的回波速度,该回波信号携带损伤缺陷的信息向后传播直至被接收,因此为了确定不同腐蚀损伤的位置信息,通过采集接收位置的回波信号绘制了如图 16 所示的导波位移随

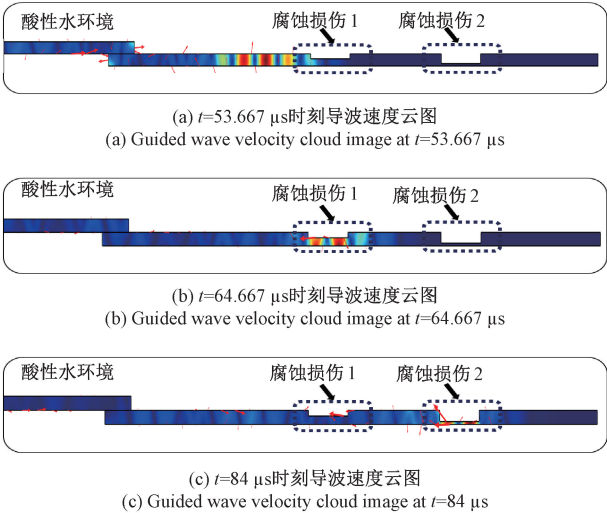


图 15 多腐蚀缺陷的导波速度云图

Fig. 15 Guided wave velocity cloud of multiple corrosion defects

时间变化的曲线图。

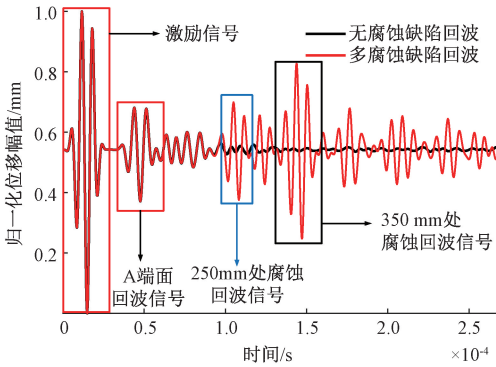


图 16 多腐蚀缺陷回波信号位移时间

Fig. 16 Displacement-time plots of corrosion echo signals at different position

结果表明,零阶 SH 波可以区分不同位置的腐蚀缺陷且受缺陷之间的影响较小,验证了导波检测煤矿主接地电极板腐蚀缺陷的可行性。同时随着缺陷腐蚀程度的增加,腐蚀回波振幅呈现逐渐增加的态势,这为利用超声 SH 波实现煤矿主接地电极腐蚀损伤的定量评估提供了理论基础,下文将对此进行详细分析。

根据 SH0 导波在钢板中的传播速度、激励源与腐蚀缺陷之间的距离以及传播时间,对腐蚀缺陷进行定位分析,如表 4 所示。从表中可以看出腐蚀缺陷在不同位置的定位误差分别为 1.33% 和 1.35%。结果表明 SH0 波对于检测多处腐蚀缺陷损伤具有较高的精度为利用超声 SH 波实现煤矿主接地电极多缺陷检测进一步的提供了理论支撑。

表 4 腐蚀缺陷位置分析

Table 4 Location analysis of corrosion defects

导波模式	腐蚀位置	模拟波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	传播时间/ μs	计算距离/ mm	理论距离/ mm	误差/ %
SH0	腐蚀位置 1	3 099	163. 48	253. 32	250	1. 33
	腐蚀位置 2	3 099	228. 93	354. 73	350	1. 35

2. 4 不同面积和深度的腐蚀缺陷仿真分析

由上文可知当腐蚀缺陷呈现不同的腐蚀特征时,接收到的超声 SH 波也会呈现不同的信息特性,因为使用时间或使用环境的差异造成腐蚀缺陷的大小和深度也会有不同,为实现导波检测信号对煤矿主接地电极腐蚀损伤程度的定量评估,要求零阶 SH0 波对于不同腐蚀程度的缺陷损伤具有精确的检测能力。

故本文在图 11 模型基础上进行了不同腐蚀程度下缺陷回波信号研究,建立了图 17 所示的腐蚀损伤模型。其中针对于不同腐蚀面积的仿真研究选取了腐蚀深度为 4 mm 的圆形点孔腐蚀,腐蚀半径 5~25 mm 变化步长为 5 mm,针对不同腐蚀深度对于腐蚀回波产生的影响,本文采用腐蚀半径为 15 mm,腐蚀深度为 1~5 mm 变化步长为 1 mm 的圆形腐蚀面进行探究,两者情况下的腐蚀缺陷均位于几何对称线上且距离激励中心 300 mm。

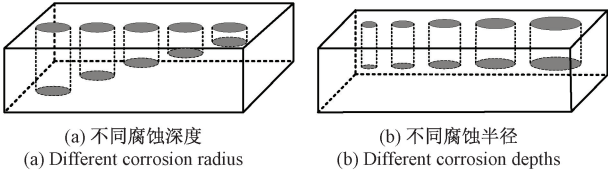


图 17 不同腐蚀缺陷类型示意图

Fig. 17 Diagram of different corrosion defect types

通过采集接受位置的回波信号并利用连续小波变换法对仿真声压信号进行模式识别与提取,绘制了如图 18 所示的导波位移随时间变化曲线图。

零阶 SH 波被激励并与腐蚀缺陷进行交互后不会发生模式转换现象,由图 18(a)可以清楚的看出,在不同类型的腐蚀条件下腐蚀回波都集中在同一个区域内,结合频散曲线通过对回波所在区域进行时序分析,发现该区域所对应的便是腐蚀所在位置,说明了超声 SH 波对于不同类型的腐蚀缺陷具有一定的定位能力。此外为了使仿真结果更加清晰对不同腐蚀类型的回波数据进行 CWT 变换,得到图 18(b)所示的腐蚀回波曲线可以清楚的看到,在相同的腐蚀深度下随着腐蚀半径的增加,缺陷处的回波信号幅值越高即回波信号越强烈,同理在一定的腐蚀半径下随着腐蚀深度的增加,腐蚀回波信号也是呈现正相关性。这也验证了上文所提到的理论假设。在此基础上通过绘制腐蚀回波信号随腐蚀程度的变化曲线

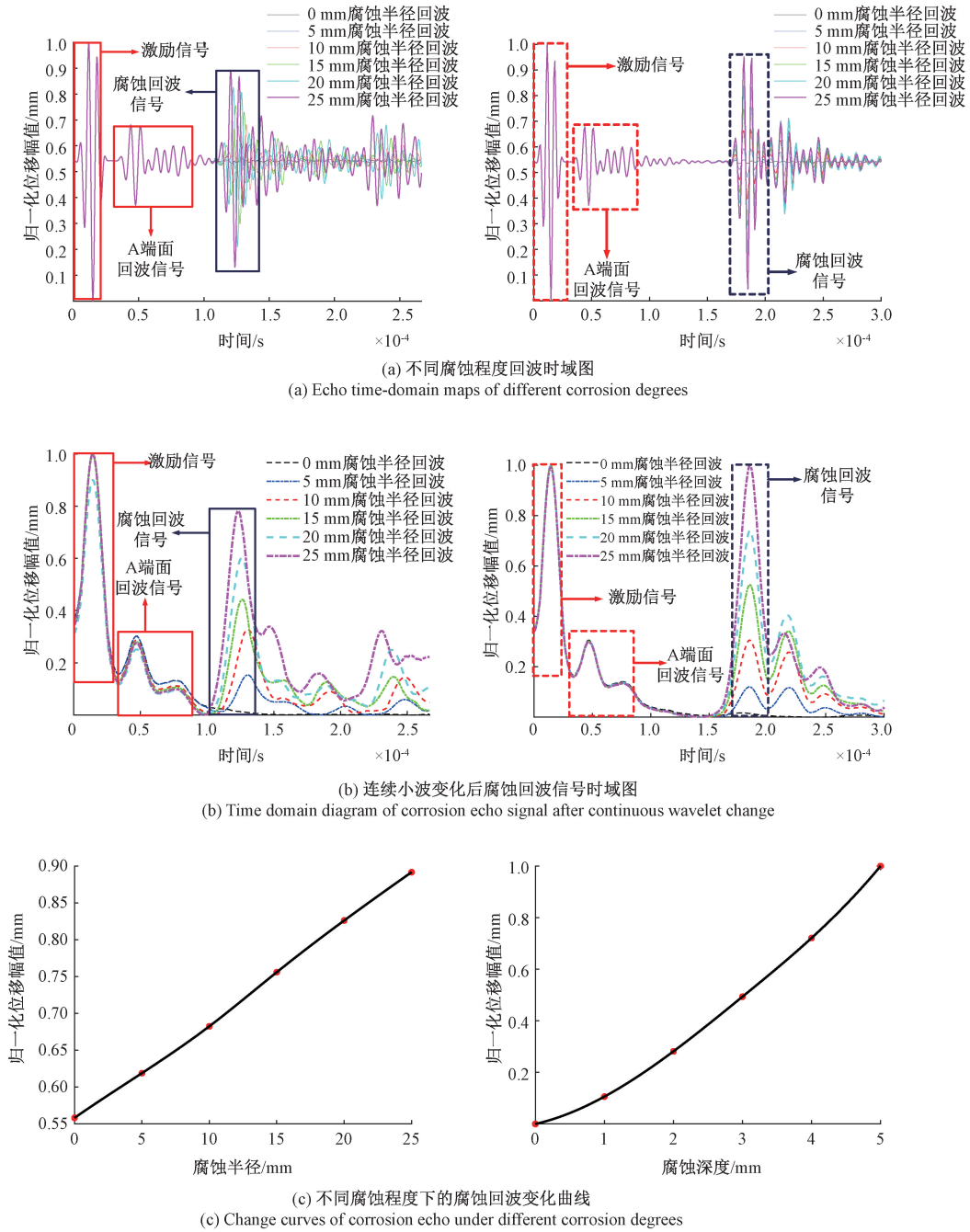


图 18 不同腐蚀程度下的回波信号

Fig. 18 Echo signals under different corrosion degrees

如图 18(c) 所示, 可以更加明显的看出在不同的腐蚀程度下腐蚀回波的变化趋势, 即腐蚀回波信号幅值与腐蚀程度成正比, 进而为利用超声导波实现煤矿主接地电极腐蚀程度的精确评估提供了有力佐证。

3 实验

为了进一步研究基于超声 SH 波对于煤矿井下主接

地电极腐蚀缺陷检测的可行性, 本文搭建了一套煤矿井下主接地电极腐蚀检测实验系统。为了使实验方便开展, 本文实验中煤矿井下主接地电极由尺寸为 $500\text{ mm} \times 375\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 Q235 钢板构成的主接地板和尺寸为 $200\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的镀锌扁钢构成的接地导线搭接焊接构成。实验的材料特性均与上文数值仿真所用的参数相同。

实验装置具体结构如图 19 所示, 任意波形发生器

33500B 产生汉宁窗口调制的 5 周期正弦信号激励信号作为激励信号,中心频率为 150 kHz。通过 ATA-1220D 宽带放大器放大后加载到固定在接地导线上的 PZT5 双向压电换能片上,激励产生零阶 SH 导波用于检测腐蚀缺陷,同时通过主接地电极板上的接收传感器收集缺陷损伤的回波信号,并将其与 SDS 1102X-E 示波器进行连接以显示腐蚀回波信号波形。本文的腐蚀缺陷设置方式参考了文献[23]的设置理念如图 20(b)所示,利用人工手段来模拟主接地电极板中的腐蚀损伤并设置了无缺陷主接地电极板作为对照组如图 20(a)所示。

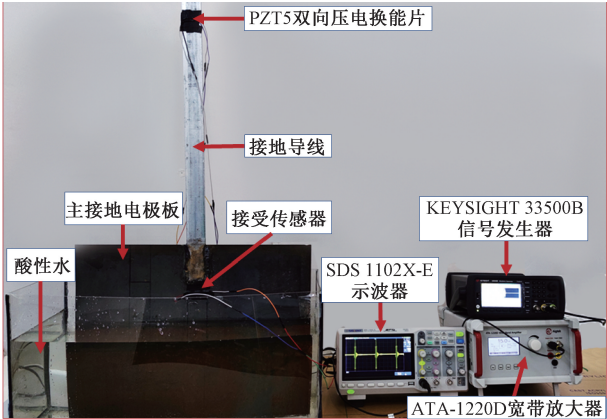


图 19 实验系统
Fig. 19 Experimental system

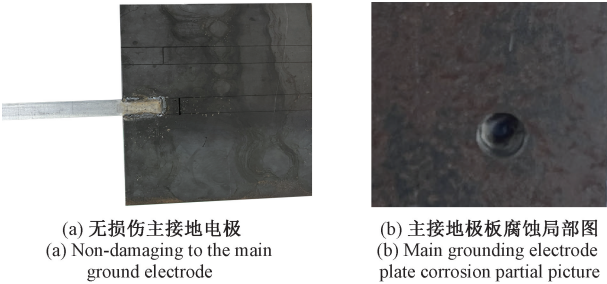


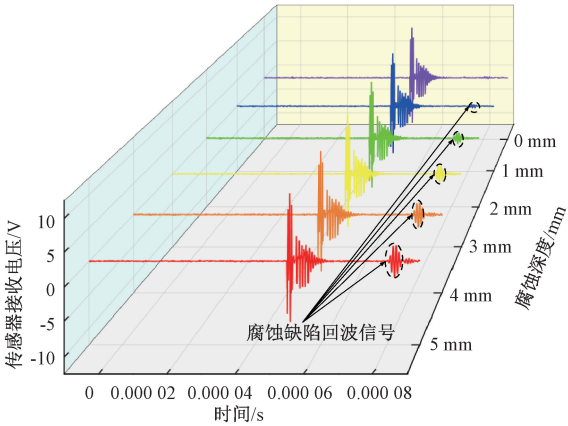
图 20 模拟腐蚀损伤示意图

Fig. 20 Schematic diagram of simulated corrosion damage

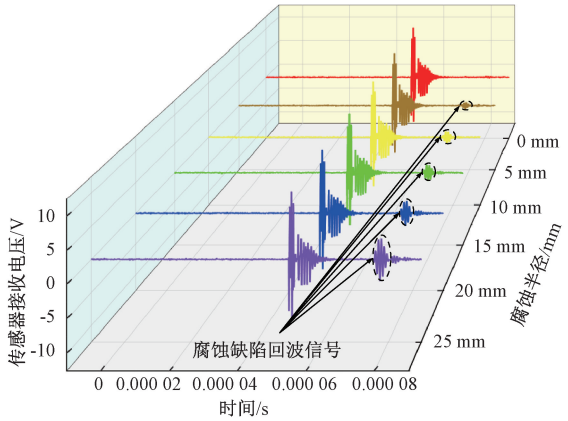
为了验证该设计方法的可行性设置腐蚀半径范围为 5~25 mm 步长为 5 mm,腐蚀深度为 1~5 mm 步长为 1 mm,腐蚀缺陷位于距离接收传感器 50 mm 处采用一收一发的形式进行腐蚀缺陷的检测。

图 21 为不同腐蚀类型下接收器传感器接收到的腐蚀回波信号,图中黑色圆圈内腐蚀缺陷的回波信号,通过观察可以发现随着腐蚀面积和腐蚀深度的增加回波信号的幅值呈现出增长的态势,这与仿真的分析的模态幅值变化规律一致,与仿真分析的腐蚀曲线回波变化规律相一致。

在此基础上为了使实验结果更加清晰,本文绘制了



(a) 不同腐蚀深度下回波信号
(a) Echo signals at different corrosion depths



(b) 不同腐蚀半径下回波信号
(b) Echo signals under different corrosion radii

图 21 不同腐蚀程度下回波信号

Fig. 21 Echo signal under different corrosion degree

如图 22 所示的腐蚀回波信号随腐蚀程度变化的曲线,同数值模拟的变化趋势一致,即随着腐蚀程度的增加腐蚀回波信号也越来越强烈,这同时也验证了通过腐蚀缺陷回波幅值定量评估腐蚀程度的可行性。

为进一步验证超声 SH 波对于腐蚀缺陷的定位能力,根据接收器接收到的电压波形图对腐蚀缺陷进行定位分析,利用回波反射法经导波时序计算可知二者的速度误差为 5.64%,比仿真的误差略高,考虑到实验环境以及实验装置对测试结果造成的影响,该误差结果也在合理的范围之内,分析结果如表 5 所示。实验验证了超声 SH0 导波不仅可以检测出煤矿井下主接地电极腐蚀的存在,同对于腐蚀缺陷定位具有较高精确度的优越性能。

表 5 实验腐蚀缺陷位置分析

Table 5 Corrosion defect location analysis in the experiment

导波模式	实际距离/ mm	传播时间/ μs	理论波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	实际波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	误差/%
SH0	50	30.55	3 098.53	3 273.32	5.64

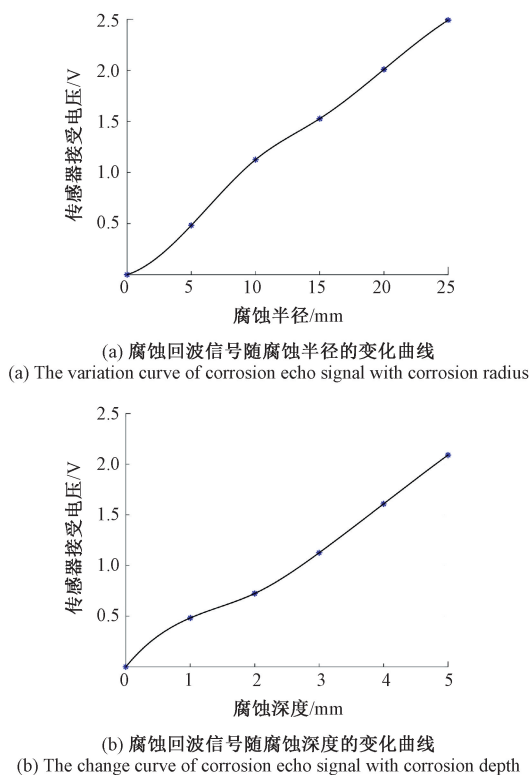


图 22 回波信号随腐蚀程度的变化曲线

Fig. 22 Echo signal variation curve with corrosion degree

4 结 论

为建立高效便利的煤矿井下主接地电极腐蚀检测方法,本文首先研究了零阶横向 SH 导波在煤矿主接地电极结构中的传播特性,然后对 SH0 导波与主接地电极中腐蚀缺陷交互过程进行了仿真分析,利用回波反射法对无腐蚀缺陷的回波信号进行具体分析来获取腐蚀缺陷的定位,在此基础上系统的研究了煤矿主接地电极上不同腐蚀大小和腐蚀深度的缺陷对回波信号的影响,分析了不同腐蚀程度缺陷的回波信号得到以下结论:

1) 通过推导液体负载下薄板中 SH 波的频散方程绘制了 5 mm 板厚度下的频散曲线,结合有限元方法模拟分析了液浸板结构外部环境声压分布和导波能量特性,确定了最佳激励频率为 150 kHz,同时通过绘制该激励频率下不同模式的波结构验证了零阶 SH 波的检测性能。

2) 以超声导波缺陷检测原理为基础,构建了煤矿主接地电极流-固-声多物理场耦合检测模型,根据端面导波速度误差验证了模型建立的准确性;结合导波信号特征利用时序计算法,实现了主接地板板中单腐蚀和多腐蚀缺陷的定位分析,位置误差分别为 1.87%、1.33% 和 1.35%,定位精度较高揭示了超声 SH 波对于主接地电极板缺陷检测具有一定的适用性。同时对 1~5 mm 腐蚀深

度以及 5~25 mm 腐蚀半径下的损伤缺陷进行了定量评估,结果表明:腐蚀回波信号与腐蚀大小以及腐蚀深度成正相关,即腐蚀程度越深回波信号幅值越高,验证了导波检测法的精准性和有效性。

3) 搭建煤矿主接地电极缺陷检测实验系统,对腐蚀深度为 1~5 mm 以及腐蚀半径为 5~25 mm 的损伤缺陷回波信号展开了研究;得到随着腐蚀大小及深度的改变,反射波的变化趋势和仿真结果相吻合,验证了利用腐蚀缺陷程度和回波信号幅值的关系曲线实现腐蚀程度的定量评估的可行性;同时对腐蚀位置进行定位分析,位置误差为 5.64%,精度较高为导波定位检测的提供了实验佐证。

参考文献

- [1] 张波,何金良,曾嵘. 电力系统接地技术现状及展望[J]. 高电压技术,2015,41(8):2569-2582.
ZHANG B, HE J L, ZENG R. Current status and outlook of power system grounding technology[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(8): 2569-2582.
- [2] GAN Y, CHEN N, ZHENG X, et al. Electric field and spraying characteristics of electrospray using concave ground electrode[J]. Journal of Electrostatics, 2022, 115:103662.
- [3] ZHANG Z, ZOU J, DAN Y, et al. Analysis the influence of corrosion layer on the grounding performance of grounding electrodes[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(13):2602-2609.
- [4] HU H, FANG M, HU F, et al. A new design of substation grounding based on electrolytic cathodic protection and on transfer corrosion current[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 195(2):107174.
- [5] ABU-NABAH B A, AL-SAID S M, GOUIA-ZARRAD R. A simple heat diffusion model to avoid singularity in estimating a crack length using sonic infrared inspection technology[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019 (293):77-86.
- [6] ZHANG F, ZHANG B, ZHANG X. Automatic forgery detection for X-ray non-destructive testing of welding[J]. Weld World, 2021:1-12.
- [7] SACAREA A I, OANCEA G, PARV L. Magnetic particle inspection optimization solution within the frame of NDT 4.0[J]. Processes, 2021, 9(6):1067.
- [8] ZHOUSHOU Y U, JIANG Q, ZHANG H, et al. Theoretical and experimental investigation of fiber bragg gratings with different lengths for ultrasonic detection[J]. Photonic Sensors, 2016(2):6.
- [9] 刘真伟,韩文花,杨婷. 一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法[J]. 仪器仪表学报, 2023,

- 44(2):192-202.
- LIU ZH W, HAN W H, YANG T. A finite element modeling and solving method for fast calculation of two-dimensional defect leakage magnetic field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2):192-202.
- [10] 张娜, 彭磊, 吴瑶, 等. 高分辨率 TMR 传感器阵列磁场成像涡流检测探头[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7):45-53.
- ZHANG N, PENG L, WU Y, et al. High-resolution TMR sensor array magnetic field imaging eddy current detection probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7):45-53.
- [11] MACHIKHIN A. Empirical approach to defect detection probability by acoustic emission testing [J]. Applied Sciences, 2021, DOI:10.3390/app11209429.
- [12] 张闯, 魏琦, 刘素贞, 等. 小尺寸试件检测用单向单模态电磁超声换能器设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17):3563-3571.
- ZHANG CH, WEI Q, LIU S ZH, et al. Design of unidirectional unimodal electromagnetic ultrasonic transducer for small-size specimen inspection [J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2019, 34(17):3563-3571.
- [13] 何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8):1713-1735.
- HE C F, ZHENG M F, LYU Y, et al. Development, application and challenges of ultrasonic guided wave detection technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8):1713-1735.
- [14] 李兵, 唐涛, 秦峰. 基于二维延时叠加的激光诱导声表面波成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6):56-63.
- LI B, TANG T, QIN F. Research on laser-induced acoustic surface wave imaging based on two-dimensional time-delay superposition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6):56-63.
- [15] KODALIL D, RAJAGOPAL P, BALASUBRAMANIAM K. Quantifying adhesive thickness and adhesion parameters using higher-order SH guided waves [J]. Ultrasonics, 2021:106429.
- [16] LIU Z, HUO Z, LI A, et al. Development of an omnidirectional SH0 mode electromagnetic acoustic transducer employing a circumferential periodic permanent magnet array [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6):7691-7701.
- [17] CHOI S, CHO H, LISSENDEN C J. Selection of shear horizontal wave transducers for robotic nondestructive inspection in harsh environments [J]. Sensors, 2017, 17(12):5.
- [18] FURUSAWA A, TAKENAKA Y, NISHIMURA A. Proposal of laser-induced ultrasonic guided wave for corrosion detection of reinforced concrete structures in Fukushima Daiichi nuclear power plant decommissioning site[J]. Applied Sciences, 2019, 9(17):3544.
- [19] MEI H, JAMES R, GIURGIUTIU V. Pure SH0 wave tomography for delamination detection in aerospace composites [C]. Health Monitoring of Structural and Biological Systems XV. SPIE, 2021, 11593:138-148.
- [20] 闫孝姮, 光思辰, 胡宇, 等. 换流阀冷却系统均压电极结垢超声导波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):251-263.
- YAN X CH, GUANG S CH, HU Y, et al. Research on ultrasonic waveguide detection method for scaling of equal pressure electrode in converter valve cooling system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10):251-263.
- [21] QIANG H, CHEN M, LI F. A high-sensitivity and long-distance structural health monitoring system based on bidirectional SH wave phased array [J]. Ultrasonics, 2020, 108:106190.
- [22] 许煌翔, 刘晓波, 龚岩峰, 等. 一种用于搭接焊缝偏差检测的声传感器仿真与设计[J]. 热加工工艺, 2022, 51(13):112-115, 120.
- XU H X, LIU X B, GONG Y F, et al. Simulation and design of an acoustic sensor for lap weld deviation detection [J]. Thermal Processing Technology, 2022, 51(13):112-115, 120.
- [23] 闫孝姮, 吕秋皓, 林晓雪, 等. 基于 Tikhonov 和 TV 混合正则化的接地网电阻成像算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11):160-171.
- YAN X H, LYU Q H, LIN X X, et al. Research on electrical impedance imaging algorithm of grounding network based on Tikhonov and TV hybrid regularization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11):160-171.

作者简介



闫孝姮, 2005 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2008 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为无损检测和生物医学成像。

E-mail: xiaohengyan@163.com

Yan Xiaoheng received her B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2005, M. Sc. degree from Liaoning Technical

University in 2008 and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016, respectively. Now she is an associate professor at Liaoning Technical University. Her main research interests include nondestructive testing and biomedical imaging.



李朝政(通信作者),2020 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为无损检测。
E-mail: 15804292579@163.com

Li Chaozheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Liaoning Technical University. His main research interest includes ultrasonic guided wave detection.



陈伟华,2002 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位,2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位,现为辽宁工程技术大学副教授,主要研究方向为电磁超声检测和无线电能传输技术。

E-mail: fxlgd@163.com

Chen Weihua received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2002, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2006 and Ph. D. degree from Liaoning Technical University in 2016, respectively. Now he is an associate professor at Liaoning Technical University. His main research interests include electromagnetic ultrasound detection and wireless energy transmission technology.



王帅,2020 年于辽宁工程技术大学获得学士学位,现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为无线电能传输技术和电磁耦合。

E-mail: 1401623967@qq.com

Wang Shuai received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2020. Now he is a M. Sc candidate at Liaoning Technical University. His main research interests include radio energy transmission technology and electromagnetic coupling.