

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.23092602 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.23092602

引用格式: 汪隆臻, 刘耀徽, 赵 蹇, 等. 水泥基材料裂隙及其注浆超声全波形反演研究[J]. 声学技术, 2025, 44(0): 1-10. [WANG Longzhen, LIU Yaohui, ZHAO Qian, et al. Study on ultrasonic full waveform inversion for fissure in cement specimens and slurry diffusion[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(0): 1-10.]

# 水泥基材料裂隙及其注浆超声全波形反演研究

汪隆臻<sup>1</sup>, 刘耀徽<sup>4</sup>, 赵 蹇<sup>3</sup>, 章耀辉<sup>1</sup>, 刘常鸿<sup>1</sup>, 葛 维<sup>2,4</sup>, 韦 宇<sup>1</sup>,  
方振邦<sup>3</sup>, 张 忠<sup>1</sup>, 宋 雷<sup>2,4</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司马鞍山供电公司, 安徽马鞍山 243000; 2. 深地科学与工程云龙湖实验室, 江苏徐州 221116; 3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽合肥 230061; 4. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程重点实验室/力学与土木工程学院, 江苏徐州 221116)

**摘要:** 水泥基材料是工程建设中不可或缺的材料之一, 其质量更是工程建设安全的保障, 因此对水泥基材料的质量检测尤为重要。水泥基材料的无损检测技术受到了广泛关注, 尤其是超声波无损检测技术, 因其速度快、穿透能力强被广泛应用。全波形反演算法是目前地震勘探领域理论精度最高的反演成像方法之一, 具有多参数建模和高精度成像的优点。文章开展了水泥试样的裂隙形态及其注浆质量检测试验, 将全波形反演算法应用于超声波检测数据处理中。试验结果表明, 全波形反演成像方法可以有效反映水泥裂隙的形态, 串行反演策略可以有效避免反演陷入局部极小值, 提高反演精度; 双差法可以有效减小背景场的影响, 凸显浆液扩散位置。研究结果为超声波在水泥裂隙及其注浆检测的应用提供了重要参考。

**关键词:** 水泥基材料; 裂隙形态; 超声波无损检测; 全波形反演算法

中图分类号: TU525.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-00-0001-10

## Study on ultrasonic full waveform inversion for fissure in cement specimens and slurry diffusion

WANG Longzhen<sup>1</sup>, LIU Yaohui<sup>4</sup>, ZHAO Qian<sup>3</sup>, ZHANG Yaohui<sup>1</sup>, LIU Changhong<sup>1</sup>, GE Wei<sup>2,4</sup>,  
WEI Yu<sup>1</sup>, FANG Zhenbang<sup>3</sup>, ZHANG Zhong<sup>1</sup>, SONG Lei<sup>2,4</sup>

(1. State Grid Anhui Electric Power Company Ma'anshan Power Supply Company, Ma'anshan 243000, Anhui, China; 2. Yunlong Lake Laboratory, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., LTD. Electric Power Research Institute, Hefei 230061, Anhui, China; 4. Department of State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

**Abstract:** Cementitious materials are indispensable in engineering construction, and their quality guarantees the safety of construction projects. Therefore, it is crucial to conduct quality inspections on cementitious materials. Nondestructive testing technology, especially ultrasonic nondestructive testing technology, has gained attention due to its high efficiency and strong penetrating ability. The full-waveform inversion algorithm is a highly accurate imaging method used in seismic exploration, offering advantages such as multi-parameter modeling and high-precision imaging. In this study, we conducted tests on the fissure morphology of cement specimens and evaluated their grouting quality with full-waveform inversion algorithm. The experimental results demonstrate that the full waveform inversion imaging method effectively reflects the morphology of cement fissures. Additionally, employing a serial inversion strategy can prevent falling into local minima during inversion and improve accuracy. Furthermore, utilizing the double-difference method effectively reduces background field interference while highlighting slurry diffusion locations. These research findings provide valuable insights for applying ultrasound in detecting cement fissures and evaluating grouting effectiveness.

**Key words:** cementitious materials; fissure morphology; ultrasonic nondestructive testing; full waveform inversion algorithm

## 0 引言

水泥材料结构在使用过程中容易出现裂隙, 裂隙的出现会降低建筑物的抗渗性以及耐久性, 使建筑物出现安全问题, 从而造成严重的经济损失。水

收稿日期: 2023-09-26; 修回日期: 2023-11-08

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2022709)

作者简介: 汪隆臻 (1984—), 男, 安徽合肥人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压绝缘技术研究及监督管理工作。

通信作者: 宋雷, E-mail: songlei@cumt.edu.cn

泥裂隙注浆是解决此问题的一种有效方法,因此需要对水泥材料裂隙及其注浆质量进行检测。

20世纪60年代以来,国外学者率先把超声脉冲检测技术用于水泥混凝土的裂隙检测,开创了混凝土裂隙超声检测这一新领域。随着科技发展,超声波检测的测定参数已发展到声速、波幅和频率等多种参数<sup>[1-4]</sup>。21世纪后,Aggelis等<sup>[5]</sup>采用超声平测法检测水泥混凝土裂隙的位置及深度,验证了当混凝土存在裂隙时,超声波的波形和振幅相比声速对裂缝更敏感。Mutlib等<sup>[6]</sup>利用超声波法对桥梁等水泥混凝土结构进行检测,研究了声学参数与混凝土质量的关系;Loseva等<sup>[7]</sup>利用超声波对水泥混凝土桩的质量进行检测,建立了波速与水泥混凝土桩使用寿命的关系。国内学者也对水泥混凝土超声波裂隙检测进行了大量研究。成勃等<sup>[8]</sup>采用超声波法对完好的水泥混凝土及裂缝灌浆前、后水泥混凝土进行检测,并对超声波波幅和声时进行了比较,验证了使用超声波法检测水泥混凝土裂缝灌浆质量的可行性。许延春等<sup>[9]</sup>应用超声波检测技术测定不同裂隙宽度下岩体的声波传播速度,并对比分析了岩体注浆前后声波波速的变化规律。孙茂循等<sup>[10]</sup>利用超声导波对材料损伤进行定位。虽然众多学者针对水泥基材料裂隙及其注浆质量的超声检测做了大量研究,但是这些研究大多仅利用了超声波数据中的声速信息,忽略了超声波信号中的波形、振幅等信息,从而在一定程度上影响了超声波检测的精度。

全波形反演是一种从弹性波的完整波形中提取有效信息,通过不断匹配模拟记录和实测数据来更新速度模型,最终获取地下介质速度分布的高精度反演方法。由于利用了更多的信息,全波形反演相比传统的波速反演方法具有更高的分辨率和精度。全波形反演利用了弹性波信号中的全部数据,是理论上精度最高的反演方法,但是计算成本太高,在其提出后的相当一段时间内无法投入实际应用。近年来,随着计算机技术的不断提升,全波形反演具备了更高的可行性,同时因其极高的成像精度,逐渐成为地球物理学的研究热点<sup>[11]</sup>。1986年,Tarantola<sup>[12-13]</sup>利用模拟和实测地震数据的差值作为全波形反演的目标函数,对模型进行更新优化,最终获得反演结果。在此基础上,Plessix等<sup>[14]</sup>实现了对二维陆上地震数据的全波形反演,验证了全波形反演陆上地震数据的可行性;Rao等<sup>[15]</sup>研究了与波形结合的全波形反演层析成像法。杜泽源等<sup>[16]</sup>研究了基于测井约束的全波形反演方法,将测井信息引入全波形反演,并应用于实际地震数据,其结果表明该方法提高了反演精度。杨元芸<sup>[17]</sup>提出依赖震

源能量的能量互相关全波形反演方法,提高了反演成像的精确度。

超声波的波动方程及传播规律与弹性波基本相同,理论上,全波形反演同样适用于超声波成像领域。然而,目前的全波形反演研究大多聚焦于大尺度的地震波反演成像领域。在医学成像领域,李盼盼等<sup>[18]</sup>提出了针对环形阵列超声层析成像全波形反演法,并应用于医学成像。在材料缺陷检测领域,Rao等<sup>[19]</sup>实现了对管道腐蚀进行超声导波全波形反演成像。Seidl<sup>[20]</sup>在有缺陷的铝板上,用超声波无损检测和基于时间反演方法的全波形反演方法检测出铝板的缺陷位置、尺寸等。

本文将全波形反演算法应用于超声波数据处理,提出了超声波全波形反演方法,开展了水泥基材料裂隙形态及浆液扩散位置的超声波检测试验。试验结果表明,超声波全波形反演成像方法可以有效反映裂隙位置及形态,由低频到高频的串行反演策略可以有效提升反演精度,利用双差法检测浆液扩散位置,可以有效去除背景场的影响,从而凸显浆液扩散位置。试验结果为使用超声波法检测水泥材料裂隙形态及注浆质量提供了重要技术支撑。

## 1 全波形反演基本原理

全波形反演方法是利用叠前地震波场的运动学和动力学信息,重建地下速度结构,具有揭示复杂地质背景下构造与岩性细节信息的潜力。原则上全波形反演适用所有类型的弹性波,如直达波、绕射波、折射波、透射波、反射波等。超声波的传播原理与弹性波类似,波动方程相同,因此理论上,全波形反演同样适用于超声波的反演成像。

全波形反演本质上是一种优化方法,其目的是寻找一个最优的介质模型,使得模型对应的模拟数据与实际观测数据达到最优匹配,在拟合模拟数据和观测数据过程中,包含了旅行时、振幅、相位等全量信息,因而全波形反演方法能够得到高精度的反演模型,超声全波形反演流程图如图1所示。超声全波形反演的主要步骤如下:

(1) 定义参数空间的初始模型  $m_1$ 。

(2) 在第  $n$  步:

① 解决每一激发数据的正演问题,如式(1)所示。为每一个真实模型赋予数值模拟数据  $u^{\text{mod}}$  和波场数据  $u(x,t)$ 。

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ij} = f_i \\ \sigma_{ij} - c_{ijkl} \varepsilon_{kl} = T_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

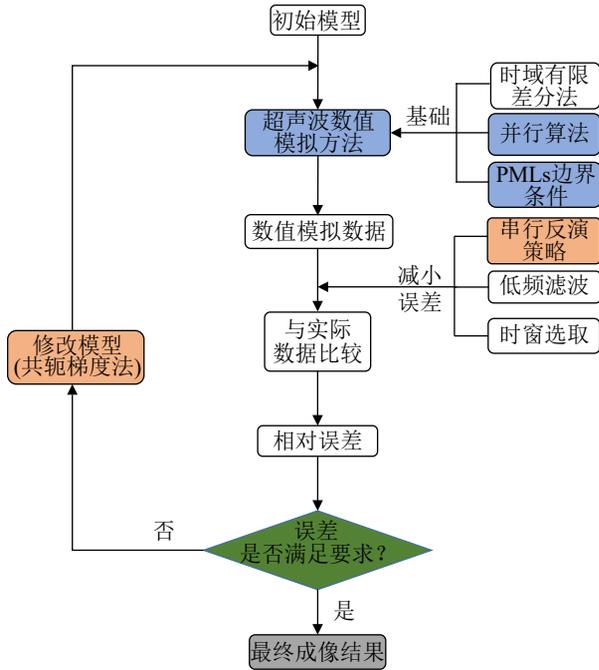


图1 超声全波形反演流程图

Fig.1 Flow chart of ultrasonic full waveform inversion

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

其中： $\rho$ 为介质密度； $\sigma_{ij}$ 是应力张量； $\varepsilon_{ij}$ 是应变张量； $c_{ijkl}$ 是刚度张量； $f_i$ ， $T_{ij}$ 分别是体积和表面积的源项。

② 计算超声波数据  $x$  方向和  $y$  方向的波场误差：

$$\delta u = u^{\text{mod}} - u^{\text{obs}}$$

③ 通过对接点位置的误差进行反演以产生波场  $\Phi(x, t)$ 。

④ 计算每个介质参数的梯度  $\delta m_n$ 。

⑤ 将近似的预处理算子  $P$  应用于梯度  $\delta m_n$  以增加收敛速度：

$$\delta m_n^p = P \delta m_n \quad (2)$$

⑥ 计算第  $n$  步的共轭梯度方向以进一步增加迭代速度：

$$\delta c_n = \delta m_n^p + \beta \delta c_{n-1} \quad (3)$$

其中权重因子的表达式为

$$\beta_n^{\text{PR}} = \frac{\delta m_n^T (\delta m_n - \delta m_{n-1})}{\delta c_{n-1}^T (\delta m_{n-1}^T - \delta m_{n-1})} \quad (4)$$

⑦ 通过线性搜索算法估算步长。

⑧ 使用梯度法更新介质参数：

$$m_{n+1} = m_n - u_n \delta c_n \quad (5)$$

(3) 当能量残差  $E$  小于给定值时终止迭代，否则就继续进行下一步迭代。

## 2 超声波检测试验

### 2.1 水泥试块裂隙的制备

为了研究水泥材料不同裂隙结构对超声探测的影响，结合常见裂隙形态以及参考文献[21]，设计了三组水泥试块裂隙方案，分别为倾斜单裂隙、平行双裂隙以及复合裂隙，如图2所示。倾斜裂隙为一个倾角为  $45^\circ$ 、长度为 10 cm、宽度为 1 cm 的裂隙(图2(a))。平行裂隙为两条相互交错的长度为 10 cm、宽度为 1 cm 的平行裂隙(图2(b))。复合裂隙由长度为 25 cm、宽度为 1 cm 的长裂隙和长度为 8 cm、宽度为 1 cm 的短裂隙组合而成，其中短裂隙与长裂隙之间的倾角为  $45^\circ$ (图2(c))。

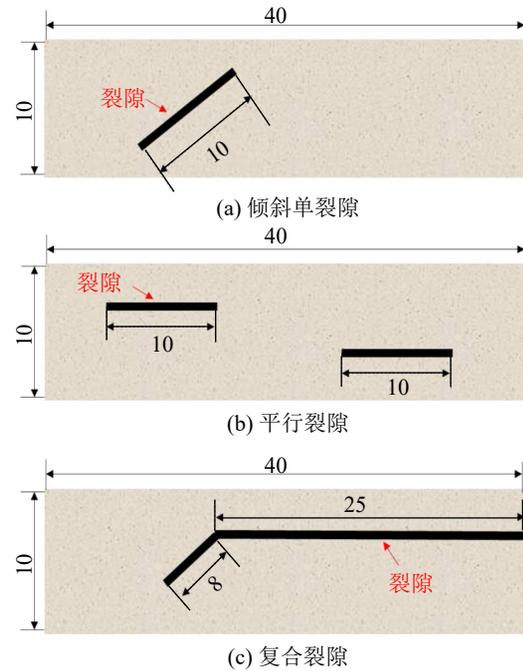


图2 裂隙形状及尺寸示意图(单位: cm)

Fig.2 Schematic diagram of shape and size of fissures (unit: cm)

试样制作使用的材料包括：P.O42.5 的海螺牌水泥，尺寸为 400 mm×100 mm×100 mm 的可拆卸模具，厚度为 1 cm 的不锈钢板。试样制作使用的设备包括：振动台，水泥搅拌机(功率为 3 000 W)，电子秤等。试样的制作过程如下：

(1) 在模具 5 个内表面、不锈钢板表面均匀涂抹一层凡士林，方便后期脱模，如图3(a)所示。

(2) 取 6 000 g 水泥和适量水，按照 0.45 的水灰比使用搅拌机进行搅拌，搅拌时间为 60 s。

(3) 将搅拌均匀的水泥倒入模具中。然后将其放置在振动台中振动 15 s。充分的振动可以挤出水泥中的气泡，使水泥更为均匀，如图3(b)所示。



(a) 涂抹凡士林



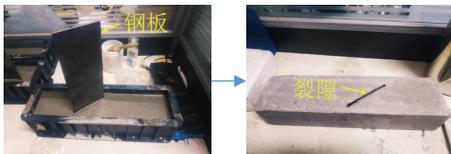
(b) 振动台振动

图3 水泥试样制作过程

Fig.3 Cement specimen making process

(4) 使用保鲜膜包裹在水泥模具上表面，避免水分流失。

(5) 待模具静置 4 h 后，按照预设方案插入涂有润滑油的铁板，如图 4 所示。以此种状态保持 3 h 左右，待裂隙形状固定后，抽出铁板。



(a) 倾斜单裂隙



(b) 平行双裂隙



(c) 复合裂隙

图4 插片法制作水泥裂隙试样

Fig.4 Cement fissure specimen prepared by insertion method

(6) 继续养护试样 24 h 后进行脱模，取出具有预制裂隙的水泥试样。将试样放置在养护室中养护，在养护 7 d 后，打磨水泥试样以增加后续试验中超声波接收器与试块之间的耦合度。

## 2.2 试验仪器

本文所使用的超声波无损检测仪器为 Pundit Lab 混凝土超声波检测仪 (瑞士)，主要包括主机、发射器、接收器、校准棒、耦合棒、电脑等，如图 5 所示。仪器具有发射频率为 54 kHz 和 150 kHz 的两组发射器和接收器。发射器与接收器直径均为 1 cm。本次试验采用的超声波操作面板如图 5(b) 所示，主要技术指标如表 1 所示。Pundit Lab 混凝土超声波检测仪是目前最常用的混凝土超声波检测仪器之一，主要功能包括测量超声波波速、水泥试块长度，记录波形、测量裂痕深度等功能。



(a) 检测仪组成部分



(b) 检测仪面板

图5 超声波检测仪

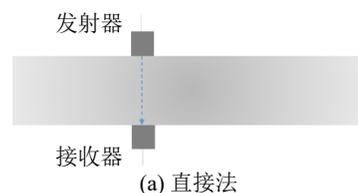
Fig.5 Photo of ultrasonic testing instruments

表1 超声波检测仪器主要技术指标

Table 1 Main technical specifications of ultrasonic testing instruments

测量范围/ $\mu\text{s}$	分辨率/ $\mu\text{s}$	增益步长
0.1~9 999	0.1	-1*、10*、100*、自动
带宽/kHz	输出	操作温度/ $^{\circ}\text{C}$
20~500	触发和波形输出	-10~60

根据发射器和检波器的相对位置，水泥试样的超声波测量方式分为直接法、半直接法以及间接法，原理如图 6 所示。在实际工程中，结合钻孔，这三种方法也分别被称为跨孔检测、单孔检测以及



(a) 直接法

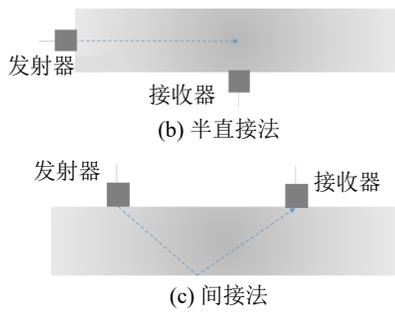


图 6 超声波检测方式原理图

Fig.6 Schematic diagram of ultrasonic detection methods

井地测量。

### 2.3 裂隙形态超声波无损检测

为了研究测量方式以及裂隙形态等因素对超声波检测的影响，试验方案设计如表 2 所示。

表 2 超声波无损检测试验方案  
Table 2 Test scheme for ultrasonic nondestructive testing(NDT)

试验序号	超声波频率/ kHz	裂隙形态	测量方式
1	54	倾斜裂隙	直接法
2	54	倾斜裂隙	半直接法
3	54	倾斜裂隙	间接法
4	54	平行双裂隙	间接法
5	54	复合裂隙	间接法

首先使用校准棒对超声波仪器进行校准。在校准棒、发射器和接收器表面涂抹耦合剂，增加超声波仪器和校准棒之间的耦合度。然后使用超声波仪器测得超声波在校准棒内的传播速度，如图 7 所示。如果测量速度与校准棒的真实声速一致，说明超声波仪器精度可靠。

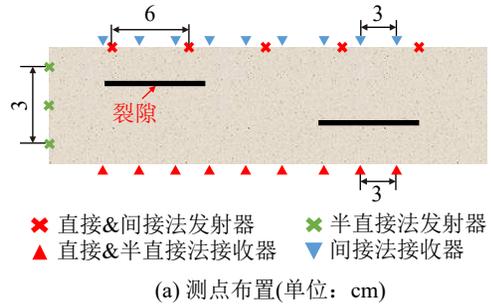


图 7 超声波仪器校准图

Fig.7 Photo of ultrasonic instrument calibration

为了监测超声波在整个试样中的传播情况，每个超声波检测试验中均设置了 12 个间距为 3 cm 的接收点，位置示意图如图 8(a) 所示。在直接法测量和间接法测量中，发射点的数量为 5 个，间距为 6 cm。在半直接测量中，由于试样侧面的面积较小，仅布置了 3 个间距为 3 cm 的发射点。测量

的图片如图 8(b) 所示，按照表 2 中的试验方案依次进行超声波无损检测试验。在同步移动测量中，每组试验包括 12 次测量，移动步距为 3 cm。



× 直接&间接法发射器 × 半直接法发射器  
▲ 直接&半直接法接收器 ▼ 间接法接收器

(a) 测点布置(单位: cm)



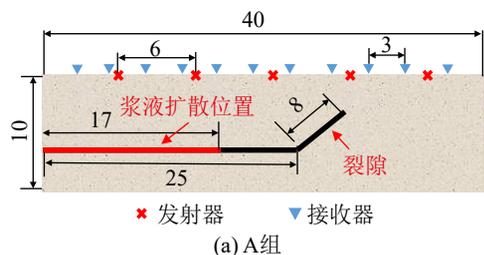
(b) 测量图片

图 8 超声波检测测点示意图及测量图片

Fig.8 Layout of ultrasonic detection points and measurement picture of ultrasonic inspection

### 2.4 浆液扩散位置定位

为了研究超声波无损检测技术在浆液扩散位置检测方面的效果，基于水泥裂隙检测试验进行了注浆后浆液扩散位置的超声波检测试验。为了更好地模拟浆液在不同时间的扩散距离，设计了不同浆液扩散位置的两组水泥试样试验 (A 组和 B 组)。试验所用裂隙模型均为复合裂隙，在复合裂隙中注入水泥基浆液，分别将浆液的范围限定在不同的范围内，A 组试验中浆液扩散的范围为 0~17 cm，而在 B 组试验中为 0~22 cm，如图 9 所示。在浆液凝固后 (5 h)，分别对两组试样进行超声波检测。检测方式为间接检测法，超声波频率为 54 kHz，测点布置方式与裂隙形态检测试验一致，发射器间距为 6 cm，接收器间距为 3 cm，发射器与接收器位于试样同一侧，如图 9 所示。



(a) A组

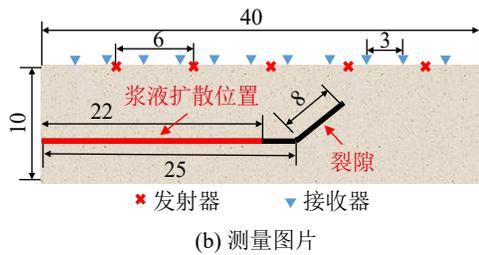


图9 裂隙注浆位置示意图(单位: cm)  
Fig.9 Schematic diagram of grouting position in compound fissures (unit: cm)

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 串行反演策略对无损检测精度的影响

反演的初始模型为  $44\text{ cm} \times 14\text{ cm}$  的剖面, 剖面被划分为  $220 \times 70$  个网格, 每个网格尺寸为  $0.2\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$ , 吸收边界宽度为  $2\text{ cm}$ 。对表2中的各个试验结果(多点接收测量)进行全波形反演, 反演模型中震源和接收点的位置与实际情况一一对应。纵波和横波全波形反演的初始模型均使用均匀模型, 其中纵波初始波速为  $3\ 100\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 横波初始波速为  $2\ 000\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 如图10所示。由于试样尺寸有限, 过长时间的超声波记录数据中会包含大量由试样表面反射的超声波, 因此在试验数据处理中设置了相应的时间窗口。

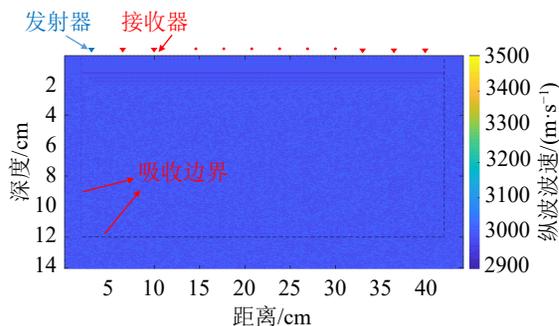


图10 全波形反演的初始模型(纵波)  
Fig.10 Initial model for full waveform inversion (longitudinal wave)

环境噪声以及水泥材料表面附近的不均匀性往往会对全波形反演的结果产生不利影响。一般情况下, 低频超声波的反演对初始模型的要求低, 更容易使反演结果稳定收敛到最优点。因此本研究使用从低频到高频的串行反演策略以消除高频噪声, 提高反演的分辨率。

以倾斜裂隙的频率为  $54\text{ kHz}$  间接法无损检测试验(试验3)为例, 滤波频率分别为  $20$ 、 $40$  和  $60\text{ kHz}$ 。由于低频滤波频率不同, 全波形反演可分为三个阶段。当第一阶段( $20\text{ kHz}$  滤波)的反演达到极限后, 自动进入下一阶段的反演( $40\text{ kHz}$  滤

波), 同时将上一阶段的反演结果作为新的初始模型。同样地,  $40\text{ kHz}$  滤波的反演结果也将作为  $60\text{ kHz}$  滤波反演的初始模型。不同阶段的反演结果如图11(a)~11(c)所示。从图11中可以看出, 随着角频率的增加, 虽然反演结果与真实裂隙之间始终有一定误差, 但是纵波反演结果中裂隙的边界和形状越来越清晰, 准确率也越来越高。与固定频率反演结果(图11(d))相比, 从低频到高频的串行反演结果的干扰和畸变更小, 形状也更贴近于真实裂隙形状。因此, 从低频到高频的串行反演策略同样可以有效提高超声波全波形无损检测中纵波的反演精度。

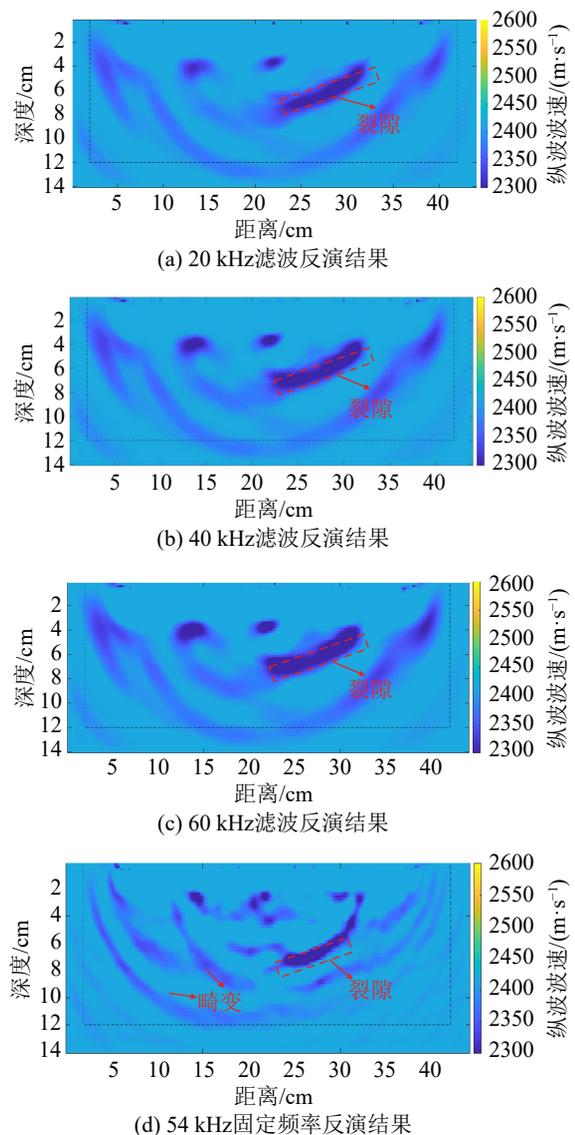


图11 倾斜裂隙纵波串行反演和固定频率反演结果  
Fig.11 Inversion results of inclined fissure with longitudinal waves obtained by serial inversion and fixed frequency inversion

超声波横波的串行反演结果如图12(a)~12(c)所示, 随着滤波频率的增加( $20\sim 60\text{ kHz}$ ), 裂隙的

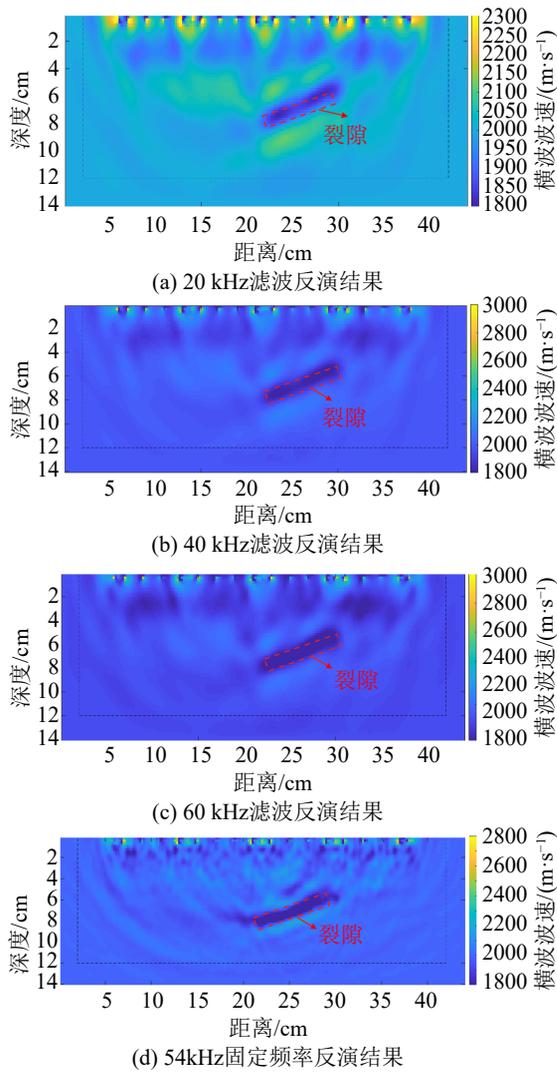


图 12 倾斜裂隙横波串行频率反演结果和固定频率反演结果  
 Fig.12 Inversion results of inclined fissure with transverse waves by serial frequencies and fixed frequency

位置和形状越来越明显，精确度也越来越高。而固定频率的超声波全波形反演的效果(图 12(d))也比较好，可以清晰反映出裂隙的位置，但是结果中的裂隙厚度要小于串行反演结果中的裂隙厚度。无论是从低频到高频的串行反演结果还是固定频率反演结果，横波的全波形反演精度都要明显好于纵波。另外，横波反演结果中的畸变和干扰也明显少于纵波反演结果。

迭代过程中误差变化如图 13 所示，从图 13 中可以看出，误差会随着迭代次数以及滤波频率的增加而减小。在 20 kHz 阶段误差减小较快，而 40 kHz 和 60 kHz 阶段减小速度较慢，这也与实际结果中 20 kHz 的反演结果与初始模型之间的差异最大，随着频率的升高，反演结果之间的差异变小这一现象一致。最终结果表明通过从低频到高频的反演策略可以有效减少拟合数据和实际数据之间的误差。

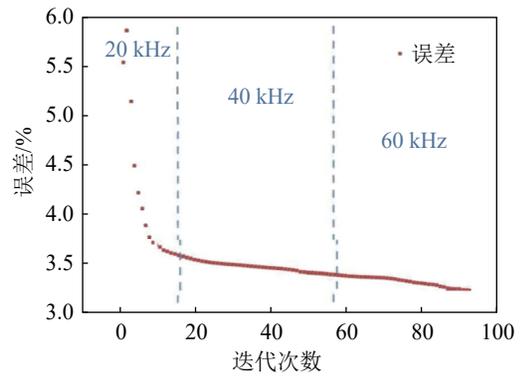


图 13 误差随迭代次数变化图  
 Fig.13 Plot of error with number of iterations

### 3.2 裂隙形状对无损检测精度的影响

以频率为 54 kHz 的超声波无损检测试验(试验 3、试验 4 和试验 5)为例，双裂隙模型的超声波全波形无损检测结果如图 14 所示。横波的波长比纵波的波长短，所以对异常体更加敏感，横波的探测精度优于纵波。由图 14 可知，从纵波的检测结果中很难看出裂隙的精确位置，整个检测结果已经发生了较严重的畸变。而在横波无损检测结果中，能够清晰观察到存在两个裂隙，裂隙的形状和位置也基本正确。但是其中裂隙 A 的探测度略高于裂隙 B，这是三方面原因造成的：(1) 两个裂隙的位置不同，其中裂隙 A 更靠近发射器和接收器，因此探测精度更高；(2) 裂隙 A 的存在在一定程度上影响了超声波的传播，导致超声波的反演结果在裂隙 B 处产生略微的畸变，这也说明了当水

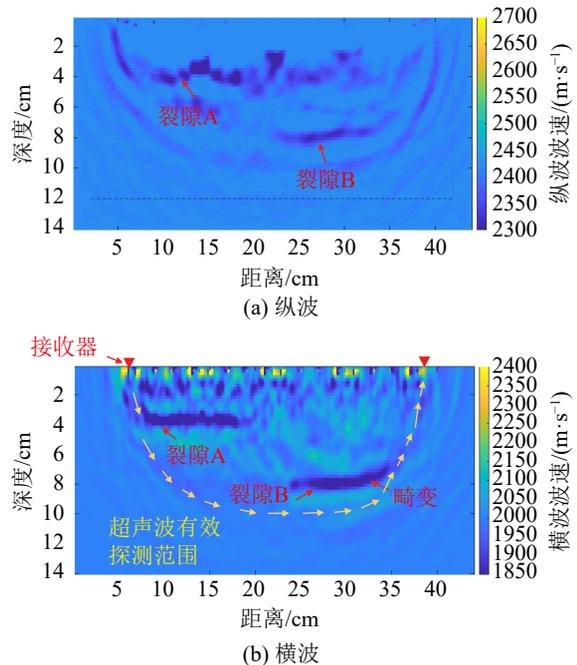


图 14 双裂隙超声波全波形无损检测结果  
 Fig.14 NDT results of two fissures with ultrasonic full waveform

泥试样中存在多个裂隙时全波形反演的精度会受到影响；(3) 边界效应的影响，受布线方式的限制，超声波的探测范围并不是一个标准的长方形，往往是一个随着布线方式而改变的半圆形，如图 14(b) 中黄线范围所示。因此，靠近探测范围边界的异常体的反演会出现一定的畸变。因此，在实际工程中，接收器(检波器)和发射器(震源)的布线长度往往要远大于目标体的范围。而在本节中，由于试样尺寸的限制，发射器和接收器的覆盖范围并没有远远超过裂隙的范围，从而导致了裂隙 B 右侧的向上畸变。

复合裂隙模型的反演结果如图 15 所示。从图 15(a) 可以看出，纵波的全波形反演结果分辨率有限，隐约可以看到裂隙的存在，但是不够明显。仅凭纵波的全波形无损检测结果难以判定裂隙的具体形状。而横波的全波形无损检测结果(图 15(b)) 则明显好于纵波的全波形无损检测结果，从横波结果中可以清晰看到复合裂隙的位置及形状。由于接收器位置的局限性，超出超声波检测范围的部分无法有效进行全波形反演，因此，在图 15(b) 中超声波全波形反演无法有效检测出左端超出检测范围的裂隙。这也说明在实际工程中，应该提前预判裂隙的可能范围，尽可能使超声波检测的覆盖范围远大于存在裂隙的范围。

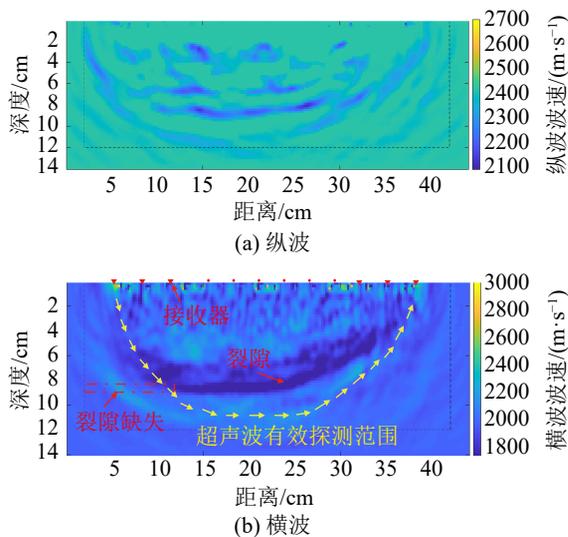


图 15 复合裂隙超声波全波形无损检测结果

Fig.15 NDT results of composite fissure with ultrasonic full waveform

在实际工程中进行超声波无损检测的难点主要在于：(1) 实际工程中裂隙的形态更加复杂多变，裂隙的形态越复杂，超声波的反射和绕射情况就越复杂，在一定程度上会影响检测精度。针对此问题，可以通过使用雷达等物探技术进行共同探测，

从而提高探测精度。(2) 裂隙的形态可能会垂直于水泥材料表面，这也在一定程度上为无损检测带来了困难。针对这个问题，可以将钻孔法与超声波检测相结合，进行单孔超声波全波形无损检测，从而提高检测精度。

### 3.3 测量方式对无损检测精度的影响

以频率为 54 kHz 的倾斜裂隙模型超声波全波形无损检测试验(试验 1、试验 2 和试验 3)为例，半直接法的无损检测结果如图 16 所示。从图 16 中可以看出，半直接法的无损检测效果极差，完全无法反映出裂隙的存在。这主要是两方面原因造成的：首先，由于传播方向问题，超声波发射的大部分直射波和反射波并未被接收器接收，从而导致了接收信号中的信息量不足；另外，由于本次试验中，试块是长方体而非正方体，导致半直接法测试中仅有三个发射点，发射点数量小于间接法(五个发射点)。上述原因都导致了半直接法精度降低。在以往的超声波探测中，跨孔测量(直接法测量)是最常见的探测方法。然而在本次试验中，直接法的全波形反演却因迭代不稳定、迭代无法收敛等原因而无法有效进行。这是由于在直接法测量中，裂隙的存在严重影响了接收器对超声波的接收。超声波极高的频率导致其衰减极快的同时波长也非常短。当裂隙较大时，超声波无法“绕过”或“穿过”裂隙而到达“对面”的接收器，从而导致部分接收器中的信号严重缺失。而全波形反演严重依赖接收信号的波形和振幅信息，因此无法有效处理直接法测得的残缺超声波数据。而与之相比，间接法中超声波在遇到裂隙后发生反射，大部分反射信号可以成功被接收器接收，从而为间接法的高精

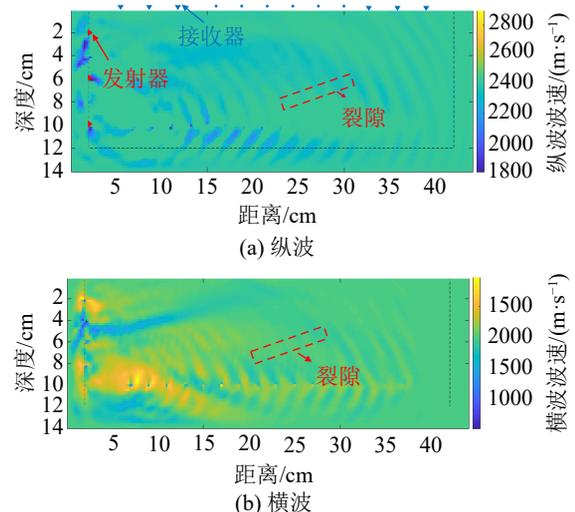


图 16 半直接法超声波全波形无损检测结果

Fig.16 NDT results with ultrasonic full waveform using semi-direct method

度反演提供了数据基础。因此，当裂隙尺寸较大时，间接法的检测结果可能要优于直接法和半直接法。

### 3.4 浆液扩散位置检测结果

注浆前后的超声波全波形无损检测结果如图 17 和图 18 所示。反演参数设置与裂隙形态检测试验一致，反演的初始模型为 44 cm×14 cm 的模型，模型被划分为 220×70 个尺寸为 0.2 cm×0.2 cm 的网格，吸收边界宽度为 2 cm。由图 17 及 18 可知，与大多数裂隙检测结果一致，横波全波形反演的效果要明显好于纵波全波形反演。由于浆液中的声速介于空气中与水泥中的声速之间，导致浆液的位置不明显，仅通过注浆后的无损检测结果难以判断出浆液的具体扩散位置。

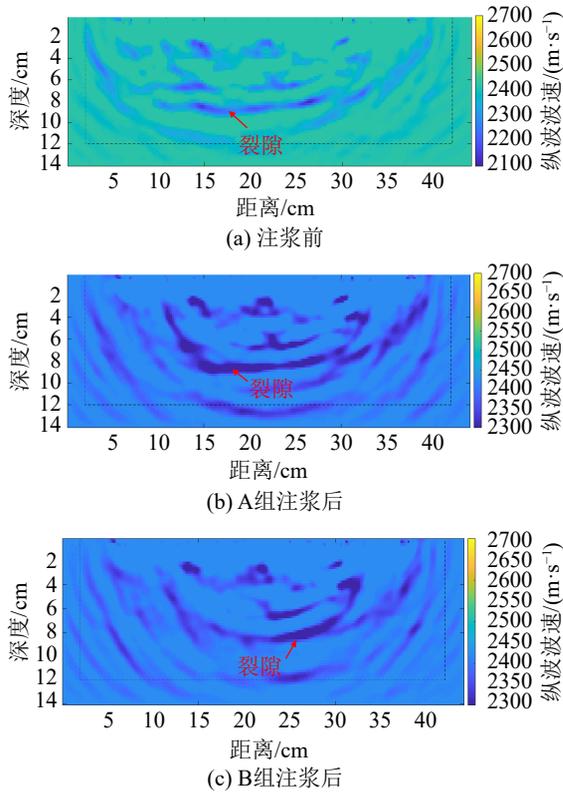


图 17 浆液扩散位置的纵波检测结果  
Fig.17 Slurry diffusion locations detected by longitudinal wave

在注浆前、后，背景场(即试样)中的波速是没有变化的。浆液的扩散是导致注浆前后波速场发生变化的唯一因素，因此，注浆前、后波速变化最剧烈的位置往往对应着浆液扩散的位置。因此，本文使用双差法来凸显浆液所引起的波速场变化。双差法即用注浆后的波速场减去注浆前的波速场(背景场)，从而根据速度差图像判断出浆液的大致扩散位置。本次试验中的双差法结果如图 19 和图 20 所示，在横波的速度变化图像中可以很清晰地观察

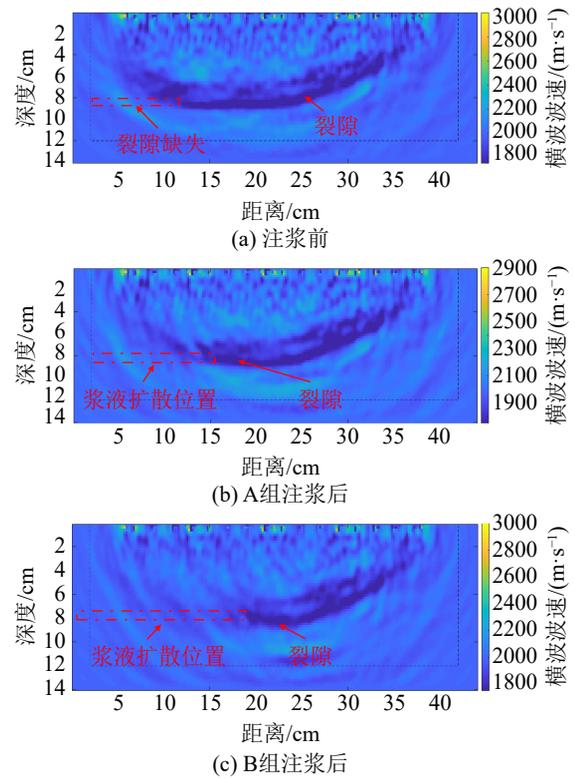


图 18 浆液扩散位置的横波检测结果  
Fig.18 Slurry diffusion locations detected by transverse wave

到浆液的扩散位置，A 组与 B 组中浆液扩散位置的区别也可以从超声波全波形反演中很直观地分辨出来。当然，由于接收器接收范围的限制，超出超声波检测范围的浆液仍然无法被探测到。试验结果表明，双差法可以有效去除背景场的影响，更精确地反映出浆液的扩散位置，为实际工程中注浆质量检测 and 二次注浆提供重要判断依据。

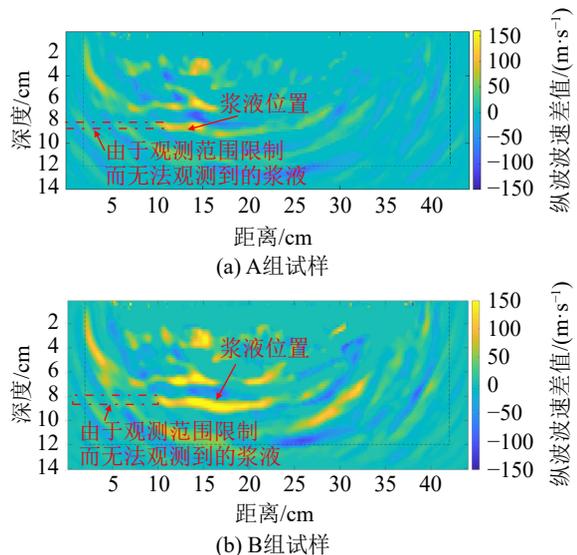


图 19 注浆液扩散位置的纵波双差法检测结果  
Fig.19 Slurry diffusion locations detected by longitudinal wave with double difference method

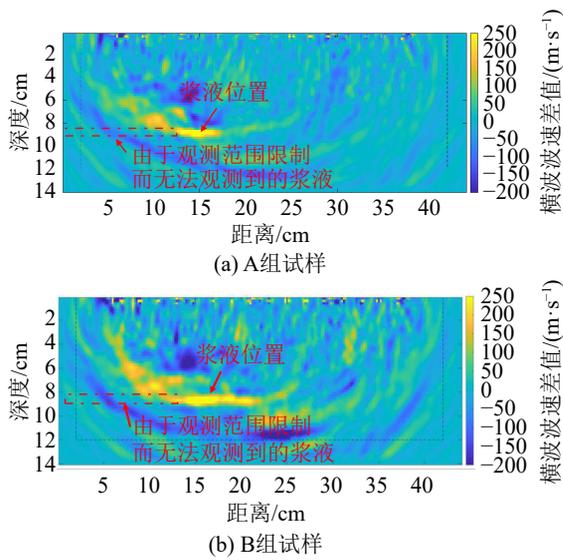


图20 注浆液扩散位置的横波双差法检测结果

Fig.20 Slurry diffusion locations detected by transverse wave with double difference method

## 4 结论

本文通过水泥裂隙以及二次注浆超声检测物理试验,研究串行反演策略、裂隙形态以及测量方式对水泥裂隙及浆液扩散的全波形反演精度的影响,得出以下结论:(1)使用串行反演策略可以有效提高超声波全波形反演的精度,避免迭代陷入局部最小值。(2)在水泥试块裂隙检测中,横波的反演成像精度普遍高于纵波的反演成像精度。(3)测量方式对全波形反演的成像精度有直接影响。当裂隙尺寸较大时,间接法的检测精度高于直接法和半直接法的检测精度。(4)在浆液扩散位置超声波检测试验中,使用双差法,可以有效凸显反演结果中浆液在裂隙中的扩散位置。本文的研究结果可以为实际工程提供重要参考。

## 参考文献

- VINCENT G, GILLES C, ERIC T, et al. Non-destructive evaluation of concrete damage by ultrasounds[C]//15th World Conference on Non-Destructive Testing. 2000.
- POPOVICS J S. Ultrasonic testing of concrete structures[J]. Materials Evaluation, 2005, **63**(1): 50-55.
- 林维正. 土木工程无损检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- 赵明. 超声波无损检测技术应用[J]. 山东工业技术, 2017(8): 50. ZHAO Ming. Application of ultrasonic nondestructive testing technology[J]. Shandong Industrial Technology, 2017(8): 50.
- AGGELIS D G, LEONIDOU E, MATIKAS T E. Subsurface crack determination by one-sided ultrasonic measurements[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, **34**(2): 140-146.
- MUTLIB N K, BIN BAHAROM S, EL-SHAFIE A, et al. Ultrasonic health monitoring in structural engineering: buildings and bridges[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, **23**(3): 409-422.
- LOSEVA E S, POTAPOV A I, OSOKIN A I. Ultrasonic testing of concrete hardening in pile foundations[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, **1728**(1): 012011.
- 成勃, 崔士起, 崔全岳, 等. 超声波法检验混凝土裂缝灌浆质量研究[J]. 建筑结构, 2007, **37**(S1): 261-263. CHENG Bo, CUI Shiqi, CUI Quanyue, et al. Study on quality inspection of concrete crack grouting by ultrasonic method[J]. Building Structure, 2007, **37**(S1): 261-263.
- 许延春, 谢小锋, 李昆奇, 等. 基于超声波检测的岩体裂隙及注浆影响的试验研究[J]. 煤矿开采, 2016, **21**(2): 60-63,82. XU Yanchun, XIE Xiaofeng, LI Kunqi, et al. Experimental studying on rock fractures and grouting influence based on ultrasonic testing[J]. Coal Mining Technology, 2016, **21**(2): 60-63,82.
- 孙茂循, 项延训, 肖飏, 等. 超声导波混频特征和定位早期局部损伤的研究进展[J]. 声学技术, 2022, **41**(3): 313-322. SUN Maoxun, XIANG Yanxun, XIAO Biao, et al. Early detection of the localized damage using nonlinear mixing of guided waves: a review[J]. Technical Acoustics, 2022, **41**(3): 313-322.
- 祝贺君, 刘沁雅, 杨继东. 地震学全波形反演进展[J]. 地球与行星物理理论评(中英文), 2023, **54**(3): 287-317. ZHU Hejun, LIU Qinya, YANG Jidong. Recent progress on full waveform inversion[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2023, **54**(3): 287-317.
- TARANTOLA A. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data[J]. Geophysics, 1986, **51**(10): 1893-1903.
- TARANTOLA A. Theoretical background for the inversion of seismic waveforms including elasticity and attenuation[J]. Pure and Applied Geophysics, 1988, **128**(1): 365-399.
- PLESSIX R É, BAETEN G, DE MAAG J W, et al. Full waveform inversion and distance separated simultaneous sweeping: a study with a land seismic data set[J]. Geophysical Prospecting, 2012, **60**(4): 733-747.
- RAO J, RATASSEPP M, FAN Z. Investigation of the reconstruction accuracy of guided wave tomography using full waveform inversion[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, **400**: 317-328.
- 杜泽源, 吴国忱, 王玉梅. 基于测井约束的地震全波形反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 2017, **52**(6): 1184-1192,1119. DU Zeyuan, WU Guochen, WANG Yumei. Full waveform inversion based on well logging data constraint[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, **52**(6): 1184-1192,1119.
- 杨元芸. 基于能量互相关理论的地震全波形反演研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. YANG Yuanyun. The study on full waveform inversion of earthquakes based on energy cross-correlation theory[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- 李盼盼, 李玉冰, 苏畅, 等. 环形阵列超声断层扫描高分辨率成像方法[J]. 声学学报, 2023, **48**(1): 182-192. LI Panpan, LI Yubing, SU Chang, et al. High resolution imaging methods for circular-array based ultrasound computed tomography[J]. Acta Acustica, 2023, **48**(1): 182-192.
- RAO J, RATASSEPP M, FAN Z. Guided wave tomography based on full-waveform inversion[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, **63**(5): 737-745.
- SEIDL R. Full waveform inversion for ultrasonic nondestructive testing[D]. Munich: Technical University of Munich, 2018.
- 吴顺涛. 超声波在类岩石材料裂隙扩展过程中的传播特性及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018. WU Shuntao. Propagation characteristics and application of ultrasound in crack extension process of rock-like material[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.