

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513713

基于导波的套管井完整性评价技术研究*

张斯琪¹, 杨 涵¹, 曾周末¹, 陈世利¹, 苏远大², 刘 洋^{1,3}

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 中国石油大学(华东)深层油气全国重点实验室 青岛 266580; 3. 天津大学浙江国际创新设计与智能研究院 绍兴 312000)

摘 要:套管井固井质量检测作为保障油气井全生产周期安全、提升油气资源开发效益以及支持碳捕获与封存战略的关键技术,其研究紧密契合国家重大战略需求,是当前油气工程领域待解决的挑战性课题。声波测井技术因其对介质声阻抗特性、水泥环空损伤及胶结界面状态具有较高的敏感性而得到广泛应用。然而,传统声波测井技术的探测灵敏度主要集中于套管-水泥界面,且经典弹性波理论仅能描述理想条件下的波动现象,对界面弱胶结状态的模拟存在局限性。针对上述问题,以单层套管井为对象,将不同界面弱胶结特征表征为滑移边界条件,构建滑移界面理论的声波测井模型,基于阵列声波测井仪器探究了多模态导波在不同界面胶结状态下的传播特性,提出利用导波频散特征对水泥环损伤进行表征的新方法。开展不同界面胶结状态的单层套管井模型实验,数据结果有效验证了利用频散特征评价固井质量的可能性。研究表明,根据不同导波频散特性可以反演和评价套管井固井损伤和力学性能,对了解复杂水泥缺陷条件下的导波传播特性具有参考意义,为综合利用套管内多模态波传播特性进行固井质量评价和水泥封隔效果评价提供了理论依据。

关键词: 声波测井; 固井质量评价; 套管井; 滑移界面; 频散曲线

中图分类号: TH762 TB52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Well integrity evaluation technology with borehole guided waves in cased wells

Zhang Siqu¹, Yang Han¹, Zeng Zhoumo¹, Chen Shili¹, Su Yuanda², Liu Yang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

3. International Institute for Innovative Design and Intelligent Manufacturing of Tianjin University in Zhejiang, Shaoxing 312000, China)

Abstract: As a pivotal technology to ensure the safety of oil and gas wells during the entire production cycle, to enhance the efficiency of resource development and to support the strategy of carbon capture and sequestration, the research of cased well cementing quality evaluation closely matches the needs of the national major strategies. It remains a critical and challenging issue in the field of oil and gas engineering. Sonic logging technology has been extensively adopted due to its high sensitivity to the acoustic impedance characteristics of the medium, the integrity of the cement annulus, and the state of the interface. However, the detection sensitivity of traditional acoustic logging technique is mainly focused on the casing-cement interface, and the classical elastic wave theory only describes the fluctuation phenomenon under ideal conditions, limiting its ability to simulate the weak cemented interface state. To address the limitations, the present study focuses on single cased wells as the target, aim to characterize the weak cementation features of different interfaces as slip boundary conditions. The acoustic wave logging model of slip interface theory is constructed, and the propagation characteristics of multimodal guided waves in different interfacial cementation states are investigated based on the array sonic log. A new method is proposed for characterizing the damage of the cement annulus by using the dispersion features of guided waves. Experiments on single cased wells with different interfacial cementation states are carried out, and the data results effectively verified the possibility of evaluating cementing quality through dispersion characteristics. The findings demonstrate that the cementing damage and mechanical properties can be inverted and evaluated according to different guided waves dispersion characteristics, offering valuable insights into wave propagation under complex cementing damage conditions. Furthermore, this provides a theoretical basis for comprehensively

收稿日期: 2025-01-22 Received Date: 2025-01-22

* 基金项目: 国家自然科学基金(12474459)、浙江省自然科学基金(LY23E010001)项目资助

utilizing multimodal guided wave propagation characteristics in the cased wells, contributing to both cementing quality assessment and evaluation of cement seal effectiveness.

Keywords: acoustic logging; cementing quality evaluation; cased wells; slip boundary; dispersion curve

0 引 言

多层套管井的固井质量检测关系到油气井安全生产寿命、油气资源开发效益及碳捕集与封存等诸多关键领域,是紧密贴合国家重大需求的业界难题^[1-7]。为了保障井筒完整性和油气生产的环境友好性,声波以及超声波测井技术已被广泛应用于水泥环的无损评价和结构健康监测中^[8-13]。基于上述技术开发的不同声学测井工具可以为井筒的完整性评估提供不同的测量模式,如声幅测井仪器、声幅变密度测井仪器、套后成像测井技术等^[14-17]。声波幅度测井仪器主要是基于套管波幅度评价套管-水泥界面胶结质量。然而该技术面临着检测参数单一等诸多挑战。声幅变密度测井仪器采用单发双收声系,两个接收传感器与激励传感器的距离分别为 3 和 5 ft^[18-20]。其中近源距传感器接收到的套管波幅度体现了第一界面的胶结状态。基于第一界面胶结质量良好的前提下,利用远源距传感器接收到的全波列中地层波对第二界面胶结状态进行定性分析^[21-22]。但是该技术高度依赖自由套管刻度的存在,容易出现误判现象。套后成像测井仪器通过将超声脉冲回波技术与超声弯曲波技术测量的声阻抗数据相结合,并利用 SLG (solid, liquid or gas) 三相图实现对套管后介质固-液-气的精确划分。Morris 等^[23]利用该仪器分析了现场不同完井环境的响应,表明该技术可提升对各种水泥类型评价的准确性,显著降低了做出挤压或者不挤压决策的不确定性。尽管上述声波和超声波测量仪器都取得了显著成效,但当前仪器的灵敏度仅局限于内层水泥环空范围内,而对于其余水泥环及胶结界面的检测仍存在巨大挑战。因此,有必要进一步研究套管井中不同界面不同胶结条件对井内声场中各分量波的产生及传播机制的影响^[24]。

为了解决上述问题,Tubman 等^[25-26]以柱状分层模型为基础,引入流体层建立 4 种经典套管井模型,探究了不同界面胶结情况对套管波幅度的影响。He 等^[27]利用二维/三维有限差分方法模拟了单层套管井中的超声弯曲波声场,阐明了弯曲波对诸如水泥-地层界面的通道、通道流体、水泥阻抗和扇形脱粘的方位角宽度等各种缺陷的响应机制。Wang 等^[28-29]利用三维有限差分法进一步模拟了不同固井条件下单层套管井单极子和偶极子源的波场传播过程,系统地总结了不同模式波在不同套管、水泥层和地层之间检测流体微环的能力。基于这些发现,他们提出了一种适用于现场的数据处理程序,可显著提

高水泥评价的准确性。在双层套管井声波传播特性研究中,陈雪莲等^[30]采用三维有限差分法和实轴积分方法对具有不同胶结界面的套管井中单极子源的响应特性进行了仿真,并进一步分析了套管波、伪瑞利波和斯通利波的频散特性。Liu 等^[31-32]基于扫频有限元和有限差分方法,揭示了单极子、偶极子和四极子声波的频散特性和传播规律。其研究成果揭示了基于丰富的声信号特征可实现多层套管井中水泥健康状况的可靠评估。

然而针对不同界面胶结不良的情况,上述研究普遍采用传统弹性波理论进行表征,即在界面之间添加流体层模拟不良的胶结状态^[33],从而导致水泥环与套管或水泥环与地层之间失去剪切耦合作用。Schoenberg^[34]针对此问题提出了滑移界面理论,即应力保持连续而位移不连续。针对传统弹性理论在波场模拟中的不足,唐晓明等^[35-36]将套管与地层之间的水泥层描述为具有复杂耦合刚度的粘弹性滑移界面,利用界面的剪切刚度和法向刚度描述波传播中的衰减和速度变化现象。基于实际测井数据的实验对比表明滑移界面理论能够模拟不同胶结质量,为评价胶结质量奠定了理论依据。陈雪莲等^[37]进一步将滑移界面理论应用于套管-水泥界面,探究了在套管中传播的兰姆波与套管后介质之间的耦合机制,提出了一种综合弯曲型兰姆波和拉伸波的方法评价第一界面胶结质量,并在现场数据中得到了验证。Jiang 等^[38]利用滑移界面理论分析了套管波幅值随剪切耦合刚度的变化趋势。然而,对于不同水泥胶结条件下不同模式波的变化趋势,特别是基于滑移界面理论的研究还缺乏深入的探索。同时对于水泥环的力学性能与多层圆柱结构支撑的复杂高阶模态之间的相互作用关系机制,尚缺乏充分的理解。因此,基于格林函数方法对单层套管井进行建模,为利用模式波准确表征水泥环损伤提供了一种新方法。基于滑移界面理论建立单层套管井结构在健康与含缺陷状态下的对照组模型,对导波频散特性进行了研究,揭示了不同界面胶结程度复杂工况对模式波的影响。并利用阵列声波测井仪器对不同工况的套管井进行实验测量,分析不同导波模式在套管井不同典型缺陷中表现出的不同频散特性,为评价固井质量提供依据。

1 原 理

1.1 套管井声场理论

对于具有一定密度、拉梅常数的均匀各向同性弹性介质,其弹性介质位移场满足波动方程^[39]如式(1)所示。

$$L(\mathbf{u}) = (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}) + \omega^2 \rho \mathbf{u} = -\mathbf{f} \quad (1)$$

式中: ω 代表角频率; L 表示 \mathbf{u} 的运算符。对于多层柱状分层结构的套管井结构(如图1所示),每层材料的性质假设为恒定。因此,每一层中的介质位移场均满足式(1)。

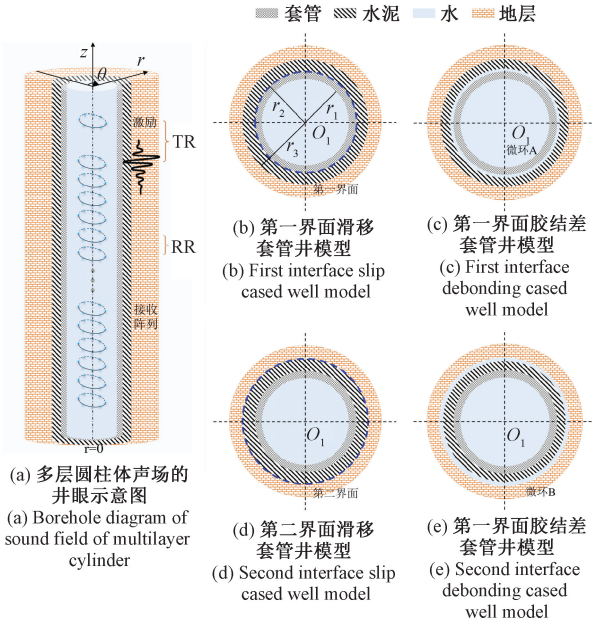


图1 单层套管井几何模型以及不同模型的横截面示意图

Fig. 1 The geometric model and schematic various cross-section of a single cased well

首先用偏微分方程定义并矢格林函数,即:

$$L(\bar{\mathbf{G}}) = -\bar{\mathbf{I}}\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (2)$$

式中: $\bar{\mathbf{I}}$ 和 $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$ 分别表示单位并矢和狄拉克 delta 函数,式(2)定义的并矢格林函数是一个张量,它的第 i 列对应于在第 i 个方向上的单位点力引起的位移场。

给定式(2)中的格林函数 $\bar{\mathbf{G}}$,通过将格林张量作用于源向量,可以求得任意源 \mathbf{f} 的位移场。通过将式(1)和(2)进行叠加,式(1)的解可以改写为:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \int_V d\mathbf{x}' \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{x}') \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}') \quad (3)$$

因此,对于式(2)中的多层柱状分层结构的并矢格林函数,都可以利用式(3)求解出由任意源引起的位移场。

一般来说,式(3)适用于任何非均匀的各向同性介质。由于介质中的不连续存在,层界面处会发生反射。如图1(a)所示,根据层界面的类型,有2组不同的边界条件:1)对于固-固界面体系,其界面处的位移及应力分量均呈现连续性;2)对于固-液界面体系,流体介质中的剪切应力为0。因此图1(a)中所示模型的边界条

件可推导^[40]为:

$$\begin{cases} \mathbf{B}_{\text{Fluid}}(r_1) = \mathbf{B}_{\text{Casing}}(r_1) \\ \mathbf{B}_{\text{Casing}}(r_2) = \mathbf{B}_{\text{Cement}}(r_2) \\ \mathbf{B}_{\text{Cement}}(r_3) = \mathbf{B}_{\text{Formation}}(r_3) \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{B} 为层界面处的边界条件。

因此,在点源所在的层中,格林函数 $\bar{\mathbf{G}}$ 可以分为两部分:一部分对应于源在均匀介质中无限延伸的场;另一部分则对应于界面反射^[41]。

$$\bar{\mathbf{G}} = \begin{cases} \bar{\mathbf{G}}_o + \bar{\mathbf{G}}_R \in \text{sourcelayer} \\ \bar{\mathbf{G}}_R \in \text{source} - \text{freelayer} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{\mathbf{G}}_o$ 为有源层; $\bar{\mathbf{G}}_R$ 为无源层。

$$L(\bar{\mathbf{G}}_o) = -\bar{\mathbf{I}}\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \quad (6)$$

$$L(\bar{\mathbf{G}}_R) = 0 \quad (7)$$

1.2 滑移界面理论表征的套管井模型

经典弹性模型不能准确描述不同界面处的胶结程度。针对这一局限性,本研究采用滑移界面理论模拟界面胶结程度,探讨不同胶结质量对波传播的影响。

滑移程度定义^[34]为:

$$\sigma = \eta[u] \quad (8)$$

式中: η 为耦合刚度,其大小为界面介质的弹性模量与层厚度的比值; σ 和 u 分别表示应力和位移。

依据应力不同,耦合刚度分为剪切耦合刚度 η_T 和法向耦合刚度 η_N 。其中 η_T 主要用来描述流体耦合关系,如自由套管等;而 η_N 主要描述胶结不良的界面,可用于表征套管-水泥系统与地层之间的整体耦合关系^[38]。将不同的刚度参数应用于水泥胶结评估时,便可以模拟从自由套管到胶结良好状态之间胶结质量变化的各种波动现象^[42]。

因此,对于单层套管井,当套管与水泥界面出现胶结不良情况时,其滑移界面边界条件可以表示为:

$$\mathbf{B}_{\text{Casing}}(r_2) = \mathbf{M}_1 \mathbf{B}_{\text{Cement}}(r_2) \quad (9)$$

式中: \mathbf{M}_1 为第一界面滑移现象所对应的边界条件特征矩阵,将其定义为:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\eta_N^{(1)} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1/\eta_T^{(1)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

当水泥与地层界面胶结不良时,水泥环外半径与地层内半径之间的边界条件可以表示为:

$$\mathbf{B}_{\text{Cement}}(r_3) = \mathbf{M}_2 \mathbf{B}_{\text{Formation}}(r_3) \quad (11)$$

式中: \mathbf{M}_2 为第二界面滑移现象所对应的边界条件特征矩阵,将其定义为:

$$\boldsymbol{M}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\eta_N^{(2)} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1/\eta_T^{(2)} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(12)

其中,用于描述介质中轴对称波动现象的位移-应力矢量可表示为 $\boldsymbol{B}_{Medium}(r) = (u_r, u_z, \sigma_{rr}, \sigma_{rz})^T$ 。 u_r 与 u_z 为介质的径向和轴向位移, σ_{rr} 和 σ_{rz} 为径向分层界面上的正应力和切应力,T代表对矩阵进行转置运算。

从特征矩阵 \boldsymbol{M}_1 和 \boldsymbol{M}_2 表达式可得出,其在耦合刚度为 ∞ 时会演化为单位矩阵,边界退化为传统弹性边界范畴^[43]。以上理论推导主要基于轴对称套管井模型。与居中测量工况相比,偏心测量时套管井的声场呈现出更为复杂的特征。但是仪器偏心并不会改变滑移界面的本质边界特征,各层界面处的边界条件依然可以通过滑移界面进行有效表征,因此理论角度上本方法具有适用性。

表 1 套管井建模的材料属性

Table 1 Material properties and parameters for modeling of the cased well

材料	材料属性			尺寸/mm		
	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$DTc/(\mu\text{s}\cdot\text{ft}^{-1})$	$DTs/(\mu\text{s}\cdot\text{ft}^{-1})$	r_1	r_2	r_3
水	1 000	203. 200 0	—	78. 537 0	—	—
套管	7 392	51. 148 7	94. 383 1	—	88. 900 0	—
水泥	1 900	84. 082 8	151. 265 5	—	—	107. 950 0
地层	2 090	115. 717 4	175. 555 8	—	—	—

测井工具安装了一系列的发射传感器和接收传感器。一组接收器放置在与发射器的同一径向位置,接收传感器与发射传感器之间的距离设为 100 mm,轴向相邻接收传感器之间的距离设为 10 mm,接收传感器阵列用于接收测井全波列信号进行后续数据分析工作。对于井眼受损的情况,水泥环可能会被钻井液、流体或气体取代,套管与水泥以及水泥与地层界面便会发生弱胶结或者脱粘等工况。因此,利用格林函数与滑移界面理论对单层套管井结构进行建模,以便研究不同井眼受损情况对多模式导波频散的影响。为了提高模型的收敛性,选择中心频率为 50 kHz 的 Blackman-Harris window (BHW) 窗的二阶导数作为源函数,该函数能够激励几何结构中 0~100 kHz 不同的导波模式。汇总计算得到的阵列测井波形,利用矩阵束算法^[44-45]提取慢度频散曲线以便后续研究。

采用 1.2 节中的滑移界面理论与经典模型理论分别模拟界面之间的不胶结情况,通过测井信号的对比较验证滑移界面理论模型的适用性与准确性。采用法向耦合刚度趋于 ∞ 且切向耦合刚度趋于零的方式模拟第一界面不胶结工况,而第二界面为维持切向和法向耦合刚度均趋于无穷的边界条件参数。图 2 表示利用滑移界面理论模

2 实验验证及应用

2.1 模拟数据研究

套管井结构可以建模为沿 z 井轴线方向无限延伸的多层圆柱形声波导。该系统通常由嵌入无限地层的套管和水泥环组成,内套管中填充钻井液。图 1 显示了单层套管井的几何模型以及不同工况模型的横截面。如图 1(a)所示,所建立的单层套管井模型主要包括 4 种介质,从中心到最外的圆柱体分别表示为钻井液、套管、水泥和无限地层,其对应的几何尺寸分别为表 1 中的 r_1 、 r_2 和 r_3 这 3 个尺寸。表 1 提供了单层套管井建模的各材料特性和几何参数信息。

型以及经典理论模型分别计算井轴上不同传感器接收到的时域测井信号,其中虚线和实线分别代表滑移界面理论表征的新模型与经典弹性模型的计算结果。

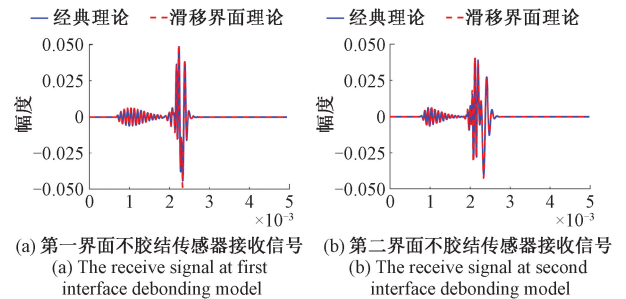


图 2 不同理论模型表征不同界面完全不胶结时传感器的接收信号对比情况

Fig. 2 Comparison of received signals of the sensors when different interfaces debonding characterized by different theoretical models

图 2 结果表明,两种模型的计算结果具有高度一致性。两种不同的模型信号在波形和到时上具有非常高的相似性以及一致性,因此可以证明该方法的正确性。图 3 为完整单层套管井结构的频散曲线,根据导波对传

播介质的依赖性,将其分为套管与流体相互作用模式、骨架模式和流体共振模式3类。套管与流体相互作用模块在单极子激励的情况下也被称为斯通利波模式,主要由流-固界面支撑,如图3中的区域1。骨架模式是存在于固体骨架中决定流固复合体系中频散特征整体形状的特征模式。流体共振模式则是由流体柱支撑的特征模式,如图3中的区域2。

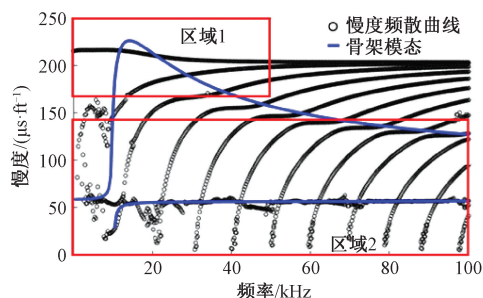


图3 单层套管井胶结良好时的频散曲线

Fig. 3 The slowness dispersion curve of a well bonded single cased well

图1(b)显示了具有第一界面弱胶结的单层套管井的横截面示意图。通过设置第一界面法向刚度为0,改变剪切刚度用以模拟弱胶结界面。利用基于滑移界面理论的格林函数方法实现了两种弱胶结情况,即弱胶结条件以及第一界面完全脱粘。通过该方法可以得到不同胶结程度下套管井中阵列接收传感器的全波列信号,将不同传感器的波形进行汇总,利用矩阵束算法提取慢度频散曲线如图4所示。

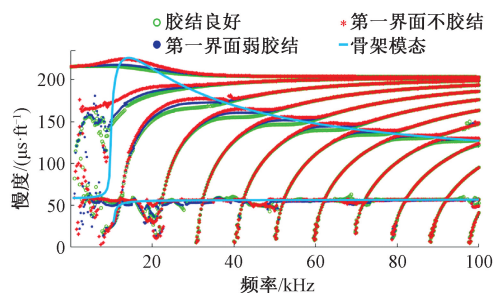


图4 单层套管井第一界面弱胶结时慢度频散曲线变化情况

Fig. 4 Slowness dispersion curves in a single cased well with 1st interface weak bonding

图4为第一界面不同胶结程度下,单层套管井结构的慢度频散曲线变化情况。空心圆圈标记表示胶结良好的套管井结构的慢度频散曲线,星号标记表示第一界面完全脱粘时的慢度频散曲线,实心圆点表示第一界面弱胶结程度的慢度频散曲线。曲线表示具有第一界面弱胶结的单层套管井结构的骨架模式。从图4中可以看出不同的模式波对胶结参数的敏感程度表现出显著差异,且

每种模式波对特定频率范围的敏感性各有不同。模式波的慢度值随着第一界面胶结程度变弱呈现增加的趋势。在第一界面处于完全不胶结的情况下,慢度增量最大,此时套管完全脱离水泥,系统可视为充液管道几何结构。第一界面弱胶结的存在会使得整体系统变软,并且随着第一界面弱胶结程度的减弱,系统有效刚度的减小导致慢度值的增加。慢度值变化主要发生在低频套管-流体相互作用模式和骨架模式附近,而流体共振模式几乎没有变化。从图4中可以看出在第一界面存在弱胶结或者完全不胶结时,几何结构的骨架模式不会改变。通过对低频套管相互作用模式的研究,可以对第一界面弱胶结程度进行识别与表征。

图1(d)表示了第二界面存在弱胶结情况的单层套管井模型的横截面示意图。通过滑移界面理论模拟第二界面从轻度退化到完全脱粘时的不同胶结强度变化过程。为了使模拟结果具有可比性,建模参数与表征第一界面弱胶结情况相一致,即令第二界面的法向耦合刚度为0,通过改变切向刚度表征不同胶结情况。并且采用相同的算法和反演参数从阵列数据中提取慢度频散曲线。

图5显示了单层套管井结构第二界面弱胶结时的慢度频散变化情况。空心圆圈表示胶结良好时的单层套管井结构的慢度频散曲线,星号标记表示第二界面完全不胶结时的频散曲线。实心圆点表示弱胶结时单层套管井的慢度频散曲线。曲线表示单层套管的骨架模式,虚线表示套管-水泥双层圆柱体的骨架模式。

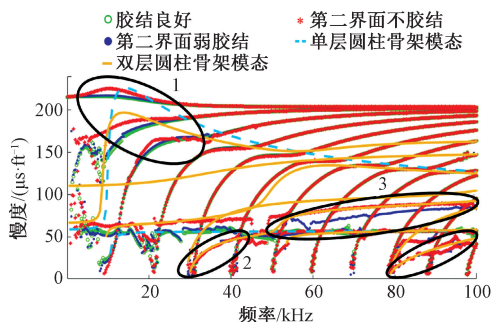


图5 单层套管井第二界面弱胶结时慢度频散曲线变化情况

Fig. 5 Slowness dispersion curves in a single cased well with 2nd interface weak bonding

从图5中可以看出,随着第二界面的胶结程度逐渐减弱,低频套管-流体相互作用模式的慢度值增加,缓慢增量是由于第二界面弱胶结的存在使几何结构发生软化所致。此外,第二界面的弱胶结和弱剥离导致其几何骨架由套管转变为套管-水泥双层圆柱体,其慢度频散曲线如图5中的曲线和虚线所示。几何骨架的转变导致了单层套管井频散曲线的结构变化,其中出现了图5中2~4

区域所示的额外慢度分支,新出现的分支是骨架套管-水泥双层圆柱体的特征模态。与完整单层套管井结构相比,这些特征模态的慢度和频率响应明显不同,因此可用于诊断第二界面潜在的缺陷情况。

2.2 实验数据验证

以中国石油大学(华东)声学测井实验室井群建设基地为依托,对3种不同胶结程度的等比例单层套管井模型进行了系统性测量。具体包括:1)完全胶结良好模型;2)套管-水泥界面存在微环模型;3)水泥-地层界面存在微环模型。对于套管-水泥界面或者水泥-地层界面存在微环时,采用在不同界面处放入圆环形状5 mm厚的软橡胶薄层,用来模拟套管与地层之间完全不胶结的状况。所有套管井模型中,模型井的井径均为25 cm,

套管尺寸为7 in,内径为160 mm,套管壁厚为10 mm,水泥环厚度为35 mm。套管井实验模型的具体工况以及所用到的材料参数如表2和3所示。

表2 不同套管井固井工况汇总

Table 2 Summary of cementing conditions of different cased wells			
工况	水泥种类	地层种类	界面情况
1	水泥1	灰岩	完全胶结
2	水泥1	灰岩	一界面5 mm微环
3	水泥1	地层1	完全胶结
4	水泥1	地层1	二界面5 mm微环

表3 套管井模型所用到的材料特性

Table 3 Material properties used in cased well models						
材料特性	水	套管	软橡胶	水泥1	地层1	灰岩
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 000	7 392	1 000	2 400	2 180	2 540
$DTc/(\mu\text{s}\cdot\text{ft}^{-1})$	207.346 9	52.013 6	196.645 2	74.724 2	76.486 8	48.573 7
$DTs/(\mu\text{s}\cdot\text{ft}^{-1})$	381.000 0	96.761 9	358.588 2	136.375 9	145.281 3	97.070 0

图6 表示实验测量原理图,图6中展示了获得声波测井数据的仪器设备和模型井况。

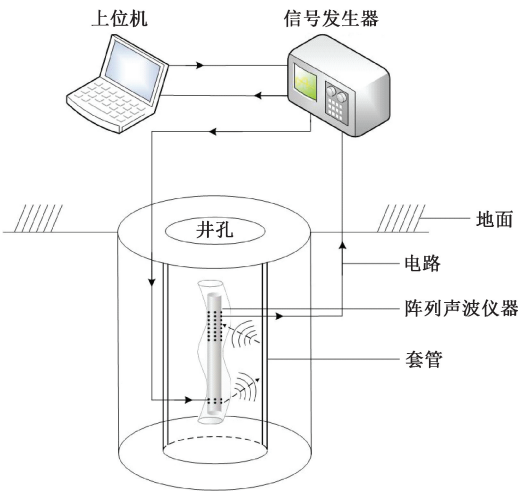


图6 实验原理
Fig. 6 Experimental schematic

参照实际的测井作业流程,利用如图7和8所示的实验室测井装置开展数据采集工作。图7显示了实验过程中使用的阵列声波测井仪器,仪器总长为5 m,发射换能器到接收阵列的距离为2.15 m,图7中从下至上依次为偶极发射换能器,单极发射换能器和接收阵列换能器。声系系统由9个主频为12 kHz的换能器组成,其中一个

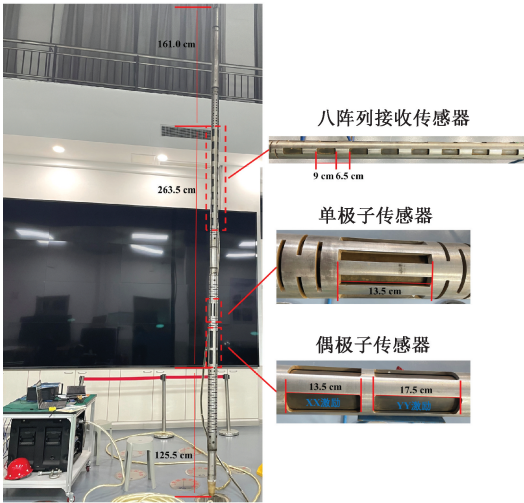


图7 阵列声波测井仪器
Fig. 7 Array sonic log

负责发射声波作为声源,其余8个作为接收器,接收器的间距为0.152 4 m。在实验过程中,将阵列声波测井仪器置于不同工况的模型井中,发射换能器与阵列接收换能器均通过电路与信号发生-接收器连接,使用上位机下发指令控制信号的产生与数据接收。测量过程中,使用起重将声波测井仪器吊起后置于模型井中,由手动绞盘通过滑轮组控制声系的上提与下放,控制仪器在井内不同深度处移动并记录阵列声波测井数据。



图8 实验测量装置

Fig. 8 Diagram of experimental measurement setup

在本章的实验测量中,单极子声源函数均采用脉冲信号,波形记录采样点数为1 000,采集间隔为10 μs 。不同工况下的阵列声波测井数据如图9所示。

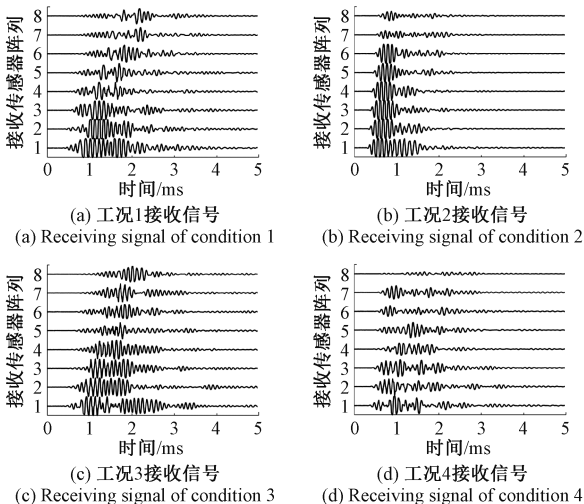


图9 不同工况的接收阵列信号

Fig. 9 Receiving array signals in different working conditions

对比图9(a)和(b)可以发现,当套管井处于胶结良好工况时,全波列信号中套管波幅度较弱,斯通利波占主导地位。当套管井的套管-水泥界面存在微环时,此时套管波幅度增强,并作为首波被传感器接收。当水泥-地层界面出现微环时,其接收信号阵列规律与套管-水泥界面出现微环的工况类似。利用矩阵束方法以及时间-慢度相干法^[46-47]处理不同工况下的阵列声波测井数据,得到不同套管井模型的频散数据如图10和11所示。

图10显示了使用时间-慢度相干法与矩阵束法从实测波形中计算的时间-慢度相干图以及频散曲线图,其中图10(a)、(c)对应于工况1的胶结良好套管井模型的数据分析,图10(b)、(d)对应于工况2的套管-水泥界面存在微环的套管井模型的数据分析。套管波模式作为泄漏模式泄漏到套管内部和外部的区域。当套管被胶结良好时,大部分套管模式波会泄漏到地层中,因此其在井眼中检测微弱,如图10(a)所示。但是套管-水泥界面胶结不良时,水泥会填充套管与地层之间的大部分空间,只有少部分的声波能量通过水泥环传入地层中,大部分声波

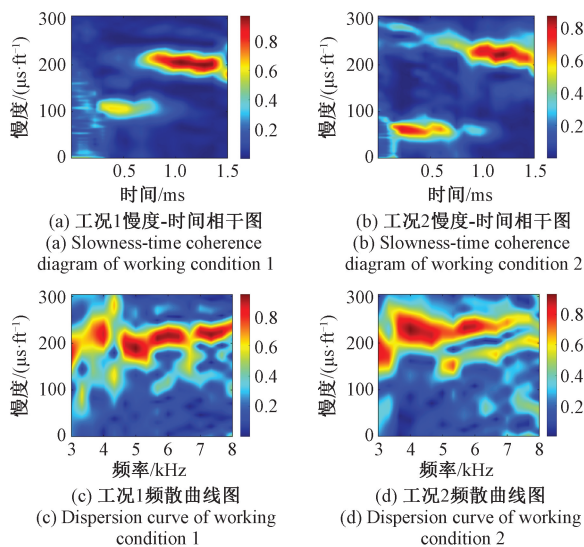


图10 胶结良好与套管-水泥界面存在微环工况下的慢度-时间相干图与频散曲线图

Fig. 10 Slowness-time coherence diagram and slowness dispersion curves for cased wells of well bonded and annulus at the casing-cement interface

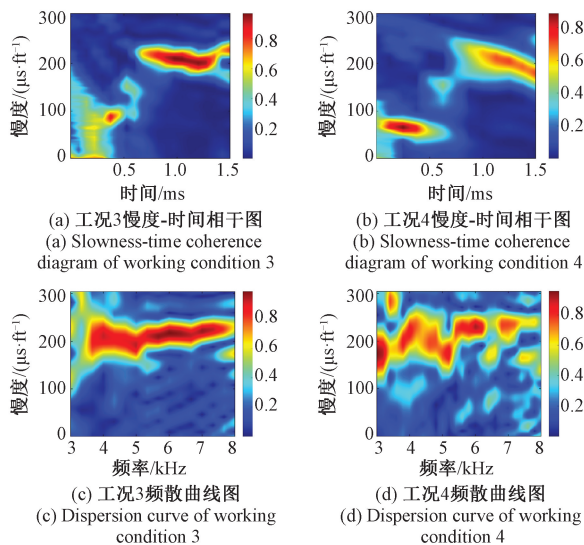


图11 胶结良好与水泥-地层界面存在微环工况下的慢度-时间相干图与频散曲线图

Fig. 11 Slowness-time coherence diagram and slowness dispersion curves for cased wells of well bonded and annulus at the cement-formation interface

能量沿套管进行传播,因此造成套管波幅度的增加,如图10(b)所示。除此之外,相比于胶结良好套管井的频散曲线,图10(d)中显示的套管-水泥界面存在微环时套管井模型的斯通利波慢度值呈现增加的趋势,主要是由于微环的存在会使得模型整体系统变软,系统有效刚度的减小导致慢度的增加,与2.1节中的结论相同。因此

通过套管波与斯通利波可以推断套管与水泥界面的胶结质量。

图 11 显示了使用时间-慢度相干法与矩阵束法从实测波形中计算的时间-慢度相干图以及频散曲线图,其中图 11(a)、(c)对应于工况 3 胶结良好套管井模型的数据分析,图 11(b)、(d)对应于工况 4 的水泥-地层界面存在微环套管井模型的数据分析。与套管-水泥界面存在微环时的模式波变化趋势一致,水泥-地层界面微环的存在会使套管波模式的幅度增加。但是相比于套管-水泥界面存在微环的工况,在水泥-地层界面存在微环的模型井中,套管外壁上固结了一定厚度的水泥,套管波在由套管和水泥组成的材料中传播时,其速度低于套管中的传播速度,因此其慢度值增加,如图 11(b)所示。除此之外,斯通利波的慢度值也呈现增加的趋势,因为界面微环的存在也使套管井模型整体系统变软,系统有效刚度的减小从而导致慢度的增加,与 2.1 节中的规律相一致,因此通过此规律可以对水泥-地层界面的胶结质量进行评价。

对不同工况下的单层套管井模型进行实验测量以及数据分析,数据结果有效支撑了前述理论推导的准确性,证实了利用慢度频散特征对套管井固井质量进行定性评价具备可行性。

3 结 论

由于受模型复杂性以及井中不同模式波传播的影响,固井质量评价在资料解释方面存在多解性。在实际工作条件下,流体通道、界面环空的存在等因素会导致被测信号的改变,进一步为问题求解带来了挑战。然而,传统弹性波动理论仅限于理想条件下的波动现象。因此,有必要对理论进行扩展,以适应实际问题中的非弹性耦合效应。将以弱胶结界面为特征的滑移界面理论引入声波测井领域,在第一或第二界面处应用滑移界面理论,构建以滑移界面理论为特征的声波测井模型。该模型不仅克服了传统弹性模型在界面胶结条件变化模拟上的局限,还成功地模拟了测井中传统理论框架下难以解释的多种复杂声波传播特性。

基于阵列声波测井仪器,对多层管柱充液井筒中导波模式的激发进行了数值研究。首先,分别建立了基于经典理论和滑移界面理论表征的单层套管井模型,并通过传感器接收信号验证了基于滑移界面理论表征的声波测井模型的正确性。然后将滑移界面理论应用于单层套管井结构中,研究了不同界面胶结程度缺陷对导波频散的影响,提出利用导波频散特征对套管井中的水泥环损伤进行表征的方法。通过对实际测井数据的分析,结果表明在套管与流体的低频相互作用模式下,水泥缺陷降

低了复合材料结构的整体刚度,从而导致慢度值增加。独特的导波频散特征不仅提供了一种新的固井质量定性评价方法,还为单层套管井固井损伤识别和力学性质反演提供了可能。因此,该方法为更好地理解波物理提供了基础,并为有效的检查方法提供了手段,以确保安全生产,最终达到安全封堵和废弃油井的目的。

参考文献

- [1] 石少鹏,王华,李胜亚,等. 不规则充液管柱模型中几何参数与流体声速反演[J]. 仪器仪表学报,2024,45(9):206-218.
SHI SH P, WANG H, LI SH Y, et al. Inversion of geometric parameters and ultrasonic wave velocity in an irregularly liquid-filled pipe model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(9):206-218.
- [2] 张斯琪,曾周末,李健,等. 套管井固井质量声学检测技术现状与展望[J]. 仪器仪表学报,2024,45(6):2-28.
ZHANG S Q, ZENG ZH M, LI J, et al. Current situation and prospect of acoustic logging for casing well cementing quality[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(6):2-28.
- [3] TELLISI M, RAVI K, PATTILLO P. Characterizing cement sheath properties for zonal isolation[C]. Proceeding of the 18th World Petroleum Congress, 2005.
- [4] BELLABARBA M, BULTE-LOYER H, FROELICH B, et al. Ensuring zonal isolation beyond the life of the well[J]. Oilfield Review, 2008, 20(1):18-31.
- [5] 孙兴伟,李宜霖,杨赫然,等. 流体粘度对涡轮流量计计量特性影响研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(4):182-190.
SUN X W, LI Y L, YANG H R, et al. Influence of fluid viscosity on metering characteristics of the turbine flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4):182-190.
- [6] 李宜霖,孙兴伟,杨赫然,等. 基于响应面和人群搜索算法的固井泥浆流量计叶轮结构参数优化[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(5):12-20.
LI Y L, SUN X W, YANG H R, et al. Optimization of impeller structure parameters of cementing mud flowmeter based on response surface and crowd search algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(5):12-20.
- [7] 曾祥安,朱丹丹,周昊,等. 基于特征融合的微电阻率成像测井空白带无监督填充方法[J]. 电子测量技术,2024,47(8):171-180.
ZENG X AN, ZHU D D, ZHOU H, et al. Unsupervised

- filling method of micro-resistivity imaging logging blank zone based on feature fusion[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(8): 171-180.
- [8] HE X, CHEN H, WANG X M. Ultrasonic leaky flexural waves in multilayered media: Cement bond detection for cased wellbores [J]. *Geophysics*, 2014, 79(2): A7-A11.
- [9] WANG H, TAO G, SHANG X F. Understanding acoustic methods for cement bond logging [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(5): 2407-2416.
- [10] ZEROUG S, BOSE S. Recent advances in the use of acoustics across the frequency spectrum in the oil and gas industry [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1949(1): 020014.
- [11] 苟阳, 付欣. 随钻声波发射换能器宽频阻抗匹配设计及实验[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(3): 186-193.
- GOU Y, FU X. Broadband impedance matching design and experiment for acoustic while drilling transducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(3): 186-193.
- [12] 陶钧, 张炳军, 白庆杰, 等. 过钻具声波仪水平井测井问题分析与解决方案[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(13): 46-51.
- TAO J, ZHANG B J, BAI Q J, et al. Problems and solutions of thru-drilling acoustic logging tool in horizontal well[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(13): 46-51.
- [13] 郑杰, 文畅, 谢凯, 等. 参数优选残差网络下的井震联合反演方法[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(12): 168-174.
- ZHENG J, WEN CH, XIE K, et al. Well-to-seismic joint inversion method based on parameter optimization residual network[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(12): 168-174.
- [14] ZEROUG S, BOSE S, SINHA B, et al. Sonic and ultrasonic measurement applications for cased oil wells[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2016, 58(8): 423-430.
- [15] LI J, LIU ZH D. Research on improvement measures of cementing acoustic amplitude logging [J]. *Academic Journal of Science and Technology*, 2023, 5(2): 4-9.
- [16] 杨耿骁, 王华. 同时反演泥浆与环空介质声阻抗的超声脉冲回波固井质量评价方法[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(10): 4370-4385.
- YANG G X, WANG H. An algorithm to simultaneously inverse the mud and cement acoustic impedances from the ultrasonic pulse-echo measurement in a cased-hole [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(10): 4370-4385.
- [17] ZHANG S Q, ZENG ZH M, WANG X C, et al. Imaging in double-casing wells with convolutional neural network based on inception module[J]. *APL Machine Learning*, 2024, 2(2): 026105.
- [18] WANG CH R. Application of acoustic variable density logging technology in petroleum energy development[C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 770: 012029.
- [19] FANG CH F, WANG ZH, SONG X ZH, et al. A novel cementing quality evaluation method based on convolutional neural network [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(21): 10997.
- [20] DE CASTRO RIBEIRO M G, RABELO PARENTE L E, GUANDALINI BATISTA J H, et al. Machine-learning based evaluation of eccentricity and acoustical impedance in oil well using VDL data [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 231: 212288.
- [21] 苏远大, 孙建孟, 李召成, 等. 裸眼时差与变密度测井地层波能量相结合改进固井 II 界面评价[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2006(4): 38-41.
- SU Y D, SUN J M, LI ZH CH, et al. Improved second interface cementing evaluation using open hole slowness and formation wave energy of variable density log [J]. *Journal of Chain University of Petroleum*, 2006(4): 38-41.
- [22] TANG J, ZHANG CH G, ZHANG B X, et al. Cement bond quality evaluation based on acoustic variable density logging [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 514-521.
- [23] MORRIS C, SABBAGH L, WYDRINSKI R, et al. Application of enhanced ultrasonic measurements for cement and casing evaluation [C]. *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference, Society of Petroleum Engineers*, 2007: 1-15.
- [24] 唐晓明, 古希浩, 李杨虎, 等. 井孔与弹性波的相互作用: 理论、方法和应用 [J]. *地球物理学报*, 2021, 64(12): 4227-4238.
- TANG X M, GU X H, LI Y H, et al. The interaction between borehole and elastic waves: Theory, method and application [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(12): 4227-4238.
- [25] TUBMAN K M, CHENG C H, TOKSÖZ M N. Synthetic

- full waveform acoustic logs in cased boreholes [J]. *Geophysics*, 1984, 49(7):1051-1059.
- [26] TUBMAN K M, CHENG C H, COLE S P, et al. Synthetic full-waveform acoustic logs in cased boreholes, II-poorly bonded casing [J]. *Geophysics*, 1986, 51(4):902-913.
- [27] HE X, CHEN H, WANG X M. Numerical simulations of ultrasonic flexural waves in cased wellbores and evaluations of the cement bond quality[C]. 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2015, 1-4.
- [28] WANG H, FEHLER M. The wavefield of acoustic logging in a cased-hole with a single casing-Part I: A monopole tool [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 212(1):612-626.
- [29] WANG H, FEHLER M. The wavefield of acoustic logging in a cased hole with a single casing-Part II: A dipole tool[J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 212(2):1412-1428.
- [30] 陈雪莲,潘金林,唐晓明,等. 双层套管井中界面胶结差时单极全波响应特征的对比[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3):72-80.
- CHEN X L, PAN J L, TANG X M, et al. Comparison of full waveform response characteristics of monopole acoustic logging with poorly bonded interface in a double-casing well[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(3):72-80.
- [31] LIU Y, D'ANGELO R M, SINHA B K, et al. Acoustic guided waves in cylindrical solid-fluid structures: Modeling with a sweeping frequency finite element method and experimental validation[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1806(1):030004.
- [32] LIU Y, D'ANGELO R M, SINHA B K, et al. Theoretical and experimental investigations of acoustic waves in embedded fluid-solid multi-string structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(10):101906.
- [33] YANG M EN, LYU W G, WU Y, et al. Numerical study of dispersion characteristics of dipole flexural waves in a cased hole with different cement conditions [J]. *Applied Geophysics*, 2022, 19(1):29-40.
- [34] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 68(5):1516-1521.
- [35] 唐晓明,江灿,苏远大,等. 用黏弹滑移界面表征的固井声波测井理论[J]. *中国科学:地球科学*, 2018, 48(8):1045-1052.
- TANG X M, JIANG C, SU Y D, et al. An acoustic-wave theory for casing bond evaluation using viscoelastic slip boundary modeling[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2018, 48(8):1045-1052.
- [36] 潘金林,陈雪莲,唐晓明. 滑移界面表征的套管井声场的理论计算[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(1):442-453.
- PAN J L, CHEN X L, TANG X M. Theoretical calculation of casing well sound field represented by slip interface [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(1):442-453.
- [37] 陈雪莲,唐晓明,李盛清,等. 基于黏弹滑移界面理论揭示套管中模式波的传播特征[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(9):3562-3571.
- CHEN X L, TANG X M, LI SH Q, et al. Study on the propagation characteristics of the casing waves in cased wells by viscoelastic slip theory[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(9):3562-3571.
- [38] JIANG C, CHEN X L, SU Y D, et al. Cased borehole acoustic-wave propagation with varying bonding conditions: Theoretical and experimental modeling [J]. *Geophysics*, 2019, 84(4):D161-D169.
- [39] MICHALSKI K A, MOSIG J R. Multilayered media Green's functions in integral equation formulations [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, 45(3):508-519.
- [40] LU C CH, LIU Q H. Three-dimensional dyadic Green's function for elastic waves in multilayer cylindrical structures [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1995, 98(5):2825-2835.
- [41] ZHANG S Q, ZENG ZH M, WANG X C, et al. Imaging and characterization of cement annulus and bonding interfaces in cased wells with fully connected neural network[J]. *Geophysics*, 2023, 88(6):D357-D369.
- [42] CHEN X L, TANG X M, LI SH Q, et al. Characterizing cement bond quality using slip-interface theory and coupling stiffness[C]. *Proceedings of the SPWLA 62nd Annual Logging Symposium*, 2021:1-8.
- [43] DING J C, WU B, HE C F. Reflection and transmission coefficients of the SH0 mode in the adhesive structures with imperfect interface [J]. *Ultrasonics*, 2016, 70:248-257.
- [44] LIN J Y, LI J, JIANG C, et al. Theoretical and experimental investigation of circumferential guided waves in orthotropic annuli [J]. *Ultrasonics*, 2022, 123:106715.
- [45] EKSTROM M P. Dispersion estimation from borehole

acoustic arrays using a modified matrix pencil algorithm[C]. Proceedings of the Conference Record of The Twenty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 1996, 449-453.

[46] CHEN D, YIN Y G, ZHANG CH, et al. Ultrasonic Lamb wave detection of a channel in a double-casing well[J]. Ultrasonics, 2023, 130:106916.

[47] KIMBALL C V, MARZETTA T L. Semblance processing of borehole acoustic array data[J]. Geophysics, 1984, 49(3):274-281.

作者简介



张斯琪, 2017 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 2020 年于中国石油大学(华东)获得硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为基于声波的固井质量检测技术。

E-mail: zhangsq_0201@tju.edu.cn

Zhang Siqi received her B. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2017, received her M. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2020. Now she is a doctoral candidate at Tianjin University. Her main research interest is the acoustic logging technology for cementing quality evaluation.



曾周末(通信作者), 1982 年和 1985 年于华中工学院分别获得学士学位和硕士学位, 1993 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院讲席教授、博士生导师, 主要研究方向为检测技术及仪器。

E-mail: zhmzeng@tju.edu.cn

Zeng Zhoumo (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Huazhong University of Science and

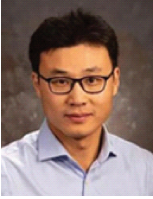
Technology in 1982 and 1985, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1993. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include detection technology and instrument.



苏远大, 2001 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 2004 年于中国石油大学(华东)获得硕士学位, 2014 年于中国石油大学(华东)获得博士学位, 现为中国石油大学(华东)教授、博士生导师, 主要研究方向为地球物理测井。

E-mail: syuanda@sina.com

Su Yuanda received his B. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2001, received his M. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2004, and received his Ph. D. degree from China University of Petroleum (East China) in 2014. He is currently a professor and a Ph. D. advisor of China University of Petroleum (East China). His main research interest includes geophysical logging.



刘洋, 2007 年于重庆大学获得学士学位, 2010 年于浙江大学获得硕士学位, 2014 年于宾夕法尼亚州立大学得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为极端环境检测声学。

E-mail: ultrasonicslab@tju.edu.cn

Liu Yang received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2007, received his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2010, and received his Ph. D. degree from Pennsylvania State University in 2014. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interest is acoustic detection for extreme environment.