◇ 研究报告 ◇

套管井超声弯曲波测井逆时偏移数值实验研究*

李 萌^{1,2†} 肖梦想^{1,2} 陶爱华³ 王 华⁴ 石少鹏⁴ 汪 强⁴

(1 西安石油大学地球科学与工程学院 西安 710065)
 (2 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室 西安 710065)
 (3 中海油田服务股份有限公司 天津 300451)
 (4 电子科技大学资源与环境学院 成都 611731)

摘要:在套管井复杂测量环境中,水泥-地层界面的反射波幅度弱且易受多次波与散射波的干扰,使得基于走时信息的处理方法难以有效确定地层界面的位置与产状。该文将综合运用动力学和运动学特征的叠前逆时偏移技术引入套管井固井质量评价领域,基于数值模拟研究了水泥类型、套管尺寸、水泥胶结质量和II界面产状对套管井超声弯曲波逆时偏移成像结果的影响规律。研究结果表明,套管井逆时偏移方法适用于各种尺寸的套管,其成像质量与水泥和地层的波阻抗之差呈正相关,具备识别I界面和II界面水泥缺失的潜力。此外,由于目前缺乏对水泥和地层介质的有效速度分析方法,需要综合多种偏移速度模型的逆时偏移成像结果来确定II界面的构造产状与几何位置。

关键词:声波测井;套管井;逆时偏移;固井质量评价 中图法分类号:P631.8+14 文献标识码:A DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.013

文章编号:1000-310X(2024)06-1302-11

Numerical study on cased-hole reverse time migration for ultrasonic pitch-catch measurements

LI Meng^{1,2} XIAO Mengxiang^{1,2} TAO Aihua³ WANG Hua⁴ SHI Shaopeng⁴ WANG Qiang⁴

(1 School of Geosciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(2 Shaanxi Key Lab of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an 710065, China)

(3 China Oilfield Services Limited, Tianjin 300451, China)

(4 School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The reflections from cement-formation interface has weak amplitude and is easy to be distorted by multiples and scatters in complex cased-hole ultrasonic pitch-catch measurements. It makes the arrival based methods difficulty to effectively image the cement-formation interface. In this study, the effects of cement type, casing size, cement bond quality and shape of cement-formation interface are investigated based on numerical studies. The results revealed that the cased-hole reverse time migration is feasible in various casing size measurements and its imaging quality is mainly depended on the impedance between cement and formation.

²⁰²³⁻⁰⁸⁻¹¹ 收稿; 2023-09-29 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (41974150, 42174158), 陕西省自然科学基金项目 (2023-JC-YB-220)

作者简介:李萌(1988-),男,新疆克拉玛依人,博士,副教授,研究方向:井孔声场信息提取与分析。

[†]通信作者 E-mail: meli@xsyu.edu.cn

The proposed method is illustrated to hold the potential to reveal the cement absence both at casing-cement interface and cement-formation interface. Finally, it requires to employ various migration velocity models to determine the position and structural geology of the cement-formation interface since effective velocity analysis approaches are scare.

Keywords: Acoustic logging; Cased well; Reverse time migration; Cement bond evaluation

0 引言

固井质量定量评价是油气与地热资源开采、储 气库建设和二氧化碳地质埋存等领域必不可少的 重要环节^[1-3]。套管外环空介质的成像可以定量 评价套管-水泥界面(I界面)和水泥-地层界面(II界 面)的胶结质量,从而估算水泥环空介质的厚度,判 断井筒的完整性,实现油、气、水层的封隔,防止层 间流体和可燃气体的窜槽,对射孔层位的准确确定、 提高油气井开采效率和使用寿命、保障生态环境和 开采安全具有重要意义^[4-6]。

声幅-变密度测井是固井质量评价测井的基本 方法,这种方法能够定性或半定量评价I界面和II 界面的胶结质量,但是无法识别局部水泥缺失,评 价标准受套管尺寸、仪器偏心、水泥厚度和泥浆性 质等因素影响较大^[7-8]。超声脉冲回波测井采用套 管厚度共振模式的超声声源沿套管法向入射并进 行旋转测量,在套管中激发一阶对称Lamb波,通过 反射回波的衰减计算套管厚度和套后环空介质的 阻抗。该方法具有较高的周向和垂向分辨率,但是 难以适用于轻质水泥的胶结质量评价^[9-10]。超声 弯曲波测井基于单发-双收测量声系(图1(a)),采用 特定的入射角向井壁激发声场,在套管中激发沿着 井轴方向传播的零阶反对称模式 Lamb 波 (A0 模式 波)。图1所示的I界面和II界面分别为套管-水泥 界面和水泥-地层界面。在声学领域也将II界面称 为第三声学反射界面。A0首波衰减与超声脉冲回 波计算的套后介质声阻抗交会分析可以有效地识 别固-液-气三相介质^[11-14]。A0模式波在传播过程 中部分能量泄露到环空介质并被地层界面反射回 井内,形成携带环空介质-地层界面信息的第三声 学界面反射回波 (Third interface echo, TIE)。分析 TIE反射波的初至、频散和幅度特征可估算水泥环 空介质的厚度和套管偏心量,为II界面胶结质量的 定量评价奠定基础[15-17]。

基于 TIE 反射波特征定量评价套管井 II 界面 的胶结质量是当前测井学术界和工业界的研究难 点。He 等^[18]基于有限差分数值模拟分析了 II 界面 不同水泥胶结质量与TIE反射波幅度的关系,揭示 了采用TIE反射波幅度特征评价II界面胶结质量 的潜力。Duan等^[19]分析了TIE反射波与A0模式 波之间的时差与水泥层厚度的关系,探讨了采用 TIE与A0到时差估算水泥环空介质厚度的可行性。 杨旭辉等^[20]研究了TIE反射波的衰减率与不同种 类水泥胶结质量的关系,其变化规律比较复杂,指出 仅使用TIE的衰减率无法准确评价II界面的水泥 胶结质量。胡文祥等[21]基于中海油田服务股份有 限公司研制的超声兰姆波成像测井仪 (Ultrasonic corrosion and cement bonding scanner, UCCS),分 析了TIE反射波包络的衰减与水泥材料的关系,结 合脉冲回波测井的阻抗反演结果,给出了环空介质 空间的水力联通图像,为有效识别"窜槽"提供技术 支撑。Sirevaag等^[22]基于物理模型实验,通过拾取 TIE 反射波与A0模式波之间的到时差,结合套管和 环空介质的速度信息,估算了水泥环空介质的厚度。

然而,受套管厚度、声源频率、入射角、仪器倾 斜、仪器与套管偏心等因素的影响,TIE反射波往 往在时域与套管反射波和A0模式波混叠且难以分 离。其次,当环空介质-地层界面不规则时,TIE不 再为镜面反射,其波长与界面粗糙程度处在相同量 级,加重了散射现象,降低了TIE的幅度。此外,套 管与水泥、地层界面的多次波使得超声弯曲波测井 的波场传播特征较为复杂,TIE的到时往往无法准 确拾取,在复杂测量环境中难以通过TIE的到时计 算地层界面的准确位置。这些因素使得基于TIE走 时信息的方法无法对II界面的构造形态进行精确 成像,难以定量评价复杂井孔环境中的II界面胶结 质量。

Wang等^[23]借鉴勘探地震学中的逆时偏移 (Reverse time migration, RTM)方法,综合使用 TIE反射波的运动学和动力学特征对其进行偏移归 位,基于三维合成数据证明了该方法能够对环空介 质-地层界面的构造形态进行高精度成像(图1(b)), 在水泥环空介质厚度的估算、判断局部水泥缺失 和定位水泥返高面等领域具有应用价值。随后,Li 等^[24]基于中海油服等比例物理实验刻度井数据验 证了该方法在实测数据中的可行性并且通过II界 面成像结果估算了套管偏心量和水泥环厚度。然 而,上述研究仅针对环空介质为普通水泥的情况进 行了算法验证。套管井测量环境复杂,环空介质与 地层的波阻抗之差、II界面的不规则产状以及水泥 胶结质量对RTM成像精度与准度的影响尚不清楚, 缺乏成像结果影响因素的系统性研究。因此,本文 基于合成数据,分析水泥类型、套管尺寸、水泥胶结 质量、不规则II界面产状和偏移速度模型对套管井 RTM成像结果的影响规律,为实际复杂套管井测 量环境中的井壁高精度超声成像提供理论与技术 支撑。



图1 套管井超声弯曲波测井模式及RTM示意

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic pitch-catch measurements and reverse time migration in a cased hole

1 套管井超声弯曲波测井RTM方法

RTM成像技术基于双程波动方程和时间一致 性成像条件,不受反射界面的倾角限制,能够对反 射波进行深度归位,收敛绕射波。目前该方法广泛 应用于地震勘探的地下复杂反射构造界面成像、天 然地震与微地震监测的震源定位和远探测声反射 成像测井的井旁反射构造界面成像[25-28]。近年来, RTM技术逐步应用于超声Lamb波金属材料无损 检测领域,成功实现了金属板材中纵向裂缝的定位, 为套管井超声弯曲波测井的井壁结构成像提供了 可以借鉴的经验^[29-31]。由于目前超声弯曲波测井 仅包含两个检波器,在偏移过程中有限的检波器波 场难以与震源波场有效叠加,导致成像结果包含较 强的噪声。Wang等^[23]基于A0模式波的理论频散 曲线,采用相移插值法重构原始两个检波器之间的 阵列波形,在一定程度上弥补了空间采样有限的问 题,并且讨论了插值误差对成像结果的影响。本文 基于合成数据假定超声弯曲波测井采用的是检波 器阵列,仅分析水泥类型、套管尺寸、水泥胶结质量 等模型因素对成像结果的影响。

1.1 修正声源位置

大斜度井和水平井易引起仪器偏心和倾斜,使 得声源和检波器偏离标准偏移基准面。因此,本文 首先采用长短时窗能量比法自动拾取A0模式波的 初至,然后根据其时距曲线计算声源与套管内壁的 距离 *R*:

$$T_{\rm A0} = \frac{d}{V_{\rm A}} + R \bigg[\frac{1}{V_{\rm f} \cos \theta_1} + \frac{1}{V_{\rm f} \cos \theta_3} - \frac{(\tan \theta_1 + \theta_3)}{V_{\rm A}} \bigg],$$
(1)

其中,*T*A0 为A0模式波的初至,*d*为源距,*V*A 和*V*f分 别为A0模式波在套管中的传播速度和流体纵波速 度,*θ*1 和*θ*3 分别为声源入射角和A0模式波由套管 向井内流体的透射角。套管内壁的位置与厚度可由 超声脉冲回波测井进行确定,从而根据声源距离套 管内壁的距离*R*对非轴对称套管井中的声源与检 波器位置进行校正,为RTM提供准确的偏移基准 面,该步骤与地震勘探中的静校正类似,用于消除超 声测井仪在测量过程中偏离井轴中心的距离。

1.2 波场外推与成像条件

RTM的本质是震源正向波场与检波器反向波 场在时间一致性成像条件下的干涉叠加,如图1(b) 所示。本文采用空间4阶-时间2阶的交错网格有限 差分离散模型内部和流固边界的波动方程,加载相 控阵声源模拟超声弯曲波测井的指向性声源,使用 复频变换完美匹配层吸收边界人工反射^[32]。在偏 移过程中保存每个时间步长的正向外推波场,同时 在应力节点逆时加载实际采集的阵列波形,进行波 场逆时重构,以二维各向同性介质为例,逆时传播的 波场可表示为

$$\rho \frac{\partial^2 \boldsymbol{u}}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \boldsymbol{u} + \mu \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{u}$$
$$= \boldsymbol{d}(x, z, T - t), \qquad (2)$$

其中,*d*为实际观测到的波形数据,*T*为记录时间总 长,*x*、*z*为空间坐标,λ和μ为拉梅系数,ρ为介质密 度,*u*为逆时外推的波场。由于目前超声弯曲波测 井仪器仅记录声压波形,因此在计算反向波场时本 文将实际记录的波形加载在各正应力节点。计算每 个时间步长的正向波场和反向波场进行零延迟互 相关,采用震源补偿照明条件压制检波器稀疏产生 的成像噪声,将所有声源互相关结果进行叠加即可 得到RTM成像*I*:

$$I(z,x) = \int_{1}^{N_s} \frac{\int_{0}^{T} S(z,x,t) R(z,x,t) dt}{\int_{0}^{T} R^2(z,x,t) dt}, \quad (3)$$

其中, S(z, x, t)为空间位置(z, x)正向外推声源波场, R(z, x, t)为逆时外推接收器波场, T为总接收时间。由于 RTM 会产生低频噪声,因此拟采用拉普拉斯滤波进行成像域去噪:

$$I_F(z,x) = \frac{\partial^2 I(z,x)}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 I(z,x)}{\partial x^2}, \qquad (4)$$

其中, *I_F* 为去噪后的偏移成像, 其本质为偏移成像 结果在成像域的二阶空间导数, 以此增强反射界面 的成像效果。

2 套管井超声弯曲波 RTM 影响因素分析

2.1 水泥类型对成像结果的影响

为了分析套管井 RTM 成像方法针对不同类型 水泥的应用效果,本文分别模拟环空介质为超轻质 水泥、轻质水泥、普通水泥和重质水泥的二维超声 弯曲波测量结果。模型大小为0.14 m×0.6 m,网 格大小为0.3 mm,套管井模型的弹性参数如表1所示。声源采用的是中心频率为240 kHz的Ricker子 波,时间采样间隔为0.03 μs,总记录时间为300 μs。 接收器阵列包含11个间隔为0.1 m的检波器,共模 拟60个声源点的波场记录,各声源点之间的距离 为3 mm。图2(a)~(d)为不同水泥类型的纵波速度 模型,其中沿井轴方向的红星和红圈分别为震源与 检波器。图2(e)为不同类型水泥的合成波形,其中 A0模式波的到时基本不变,TIE反射波的到时随 着水泥速度的增加而减小。由于重质水泥与地层 的波阻抗之差较小,因此产生的TIE反射波幅度较 弱。本文将正演模型的大尺度平滑作为偏移速度模 型,降低介质边界对成像结果的影响,如图3(a)~(d) 所示。

表1 套管井模型中地层、套管、水泥与井筒流体 的弹性参数

Table 1 Elastic parameters of formation,casing, cement and borehole fluid used incased-hole models

| 参数 | | $V_{\rm P}/({\rm m}{\cdot}{\rm s}^{-1})$ | $V_{\rm S}/({\rm m}{\cdot}{\rm s}^{-1})$ | 密度/(kg·m ⁻³) |
|------|-----|--|--|--------------------------|
| 地层 | | 4500 | 2455 | 2320 |
| 套管 | | 5860 | 3130 | 7850 |
| 水泥 | 重质 | 4000 | 2100 | 2400 |
| | 普通 | 2823 | 1729 | 1920 |
| | 轻质 | 1960 | 1120 | 1200 |
| | 超轻质 | 1600 | 1000 | 1100 |
| 井筒流体 | | 1500 | 0 | 1000 |

图3(e)~(h)为不同水泥类型的RTM成像结 果,其中黑色虚线为理论套管内外壁与Ⅱ界面的 位置。整体上看, RTM 成像的水泥-地层界面的同 相轴与理论 II 界面的位置基本吻合。然而,随着环 空介质充填水泥波阻抗的增加,其对应的成像结果 在模型底部靠近声源位置处的成像噪声愈发严重。 其次,随着水泥与地层波阻抗差异的减小,成像结 果中在水泥-地层理论界面位置处产生的虚像逐步 增加,尤其是重质水泥的成像结果产生多个与理论 界面平行的成像同相轴,干扰真实地层界面的确定。 这是因为随着波阻抗差异的降低, TIE 反射波的幅 度越弱,正向与反向波场进行互相关叠加的能量易 被成像噪声湮没。此外,TIE反射波有多种震相,表 现为在时域紧邻的多个波串,采用常规成像条件容 易产生多个与真实界面相似的成像伪像,干扰真实 地层界面的确定。最后,由于偏移孔径的限制,RTM 得到的水泥-地层界面的长度无法覆盖整个井深。



图 2 不同水泥类型的纵波速度模型与合成波形





Fig. 3 Migration velocity models and RTM images for various cement types

2.2 套管半径对成像结果的影响

本节基于二维数值模拟技术,研究套管尺寸 对超声弯曲波RTM成像的影响。图4(a)~(c)分别 为套管尺寸7 in (17.78 cm)、9-5/8 in (24.45 cm) 和13-3/8 in (33.97 cm)的纵波正演速度模型,环 空介质为普通水泥,套管厚度10 mm,模型大小 为0.14 m×0.6 m,网格大小为0.3 mm,弹性参数 如表1所示。偏移速度模型仍然采用正演速度模 型的大尺度平滑,其RTM结果如图4(d)~(f)所示。 由图可知,超声弯曲波RTM成像的地层界面与其 理论位置基本吻合,成像结果清晰,表明超声弯 曲波RTM技术在表层套管(13-3/8 in即33.97 cm)、 技术套管(9-5/8 in即24.45 cm)和油层套管(7 in 即17.78 cm)测量环境中均能够对水泥-地层界面 进行成像,为全井段II界面高精度成像提供理论 支撑。





2.3 水泥胶结质量对成像结果的影响

本节研究套管井超声弯曲波测井RTM方法 在水泥胶结质量有缺陷情况的应用效果。图5(a) 为本次模拟实验设置的正演速度模型,其中在 *z* = 0.15 m处和*z* = 0.45 m位置设计了2个厚度为 20 mm充填物为井内流体的窜槽,以此表征部分的 水泥缺失,从而分别模拟在某个测量井段中出现的I 界面与II界面胶结质量较差的情况。图5(d)为该正 演模型的合成波形,由于模型上部I界面的窜槽产 生了较强的散射波与多次反射波,而模型下部由于 II界面的窜槽使得来自地层界面的TIE反射波的幅 度较弱。由于超声弯曲波测井采用的是斜入射的单 发多收测量系统非自激自收观测系统,因I界面和 II界面窜槽引起的反射波异常范围与正演模型中的

m·s

窜槽位置存在偏差。图5(b)和图5(c)分别为本次模 拟实验的两组偏移速度模型,其中图5(c)为不考虑 水泥缺失情况下的大尺度速度平滑,图5(d)是环空 介质全部为水泥的偏移速度模型。

图 5(e) 和图 5(f) 分别为这两组偏移速度模型对 应的 RTM 成像结果。整体上看,在水泥胶结质量较 好的井段,大尺度偏移速度模型能得到理想的成像 结果,其成像的 II 界面位置与理论位置(黑色虚线) 基本一致,而环空介质全部为水泥的偏移速度模型 的成像结果产生了多个与理论位置紧邻平行的伪 像,这是由于偏移速度模型中仅包含水泥的速度,导 致超声弯曲波多个周期的波形能量无法完全收敛, 这在实际情况中对识别真实 II 界面的位置具有一 定的难度。此外,图5(e)和图5(f)所示成像结果中 的顶部黑色方框对应为正演速度模型中的I界面水 泥缺失,由于该部分套管-水泥界面的胶结情况较差 使得该区域的成像同相轴受到了强烈的扭曲,成像 能量无法收敛。图5(e)和图5(f)底部的黑色方框对 应为正演速度模型中II界面的水泥缺失位置,由于 该区域的TIE 反射波幅度较弱,使得成像结果难以 在真实界面处聚焦。这些成像能量异常的大小与理 论模型设置的窜槽大小接近、位置在深度方向上基 本一致,这表明超声弯曲波RTM成像技术能够将 窜槽引起的反射波幅度异常偏移归位至其真实的 深度位置,该方法具备识别I界面和II界面窜槽位 置的潜力。





Fig. 5 Forward velocity model and RTM images when part of the cement is absent

2.4 水泥-地层界面产状对成像结果的影响

本节研究超声弯曲波 RTM 在大斜度和起伏 II 界面的应用效果。图 6(a)为本次数值模拟设置的大 斜度倾斜 II 界面速度模型,图 6(d)为全井段的合成 波形。A0模式波的同相轴基本沿井轴方向不发生 改变,TIE 反射波呈现连贯的倾斜同相轴,但是由于 水泥-地层界面与套管不再平行,此时的 TIE 反射 波不再是镜面反射,存在多次波和散射波干扰,在时 域上拾取准确的 TIE 反射波初至较为困难。图 6(b) 和图 6(c)分别为假定 II 界面垂直情况下的大尺度 平滑偏移速度模型和环空介质全部为水泥的偏移 速度模型。图6(e)和图6(f)分别为这两种偏移速度 模型对应的RTM成像结果。与3.3节的实验结果类 似,使用环空介质全部为水泥的偏移速度模型可以 展现II界面的倾斜构造形态。然而,受多种TIE反 射波震相的影响,成像结果包含多个与真实界面类 似的成像同相轴,干扰真实II界面位置的确定。与 之相比,采用环空介质为竖直II界面大尺度平滑的 速度模型也能够恢复II界面的倾斜产状,并且多成 像同相轴的现象得到了压制,其最终的水泥-地层 界面成像结果与理论反射界面的产状和位置较为 吻合。





Fig. 6 Forward velocity model and RTM images for inclined cement-formation interface

为了进一步测试套管井超声弯曲波 RTM 算法 对复杂 II 界面的成像能力,本节设置如图 7(a) 所示 的起伏 II 界面模型,图 7(d) 为该模型对应的合成波 形。由于 II 界面起伏较为剧烈,产生了严重的散射 波和多次波,直接从时域上难以分辨来自II界面一次反射波的初至,使得基于走时信息的II界面位置确定方法难以适用。本节仍然采用大尺度平滑和环空均为水泥的偏移速度模型进行RTM定位,其成

应用声学

2024 年 11 月

像结果分别如图7(e)和图7(f)所示。对比可知,环 空介质为水泥的偏移速度模型能够很好地恢复原 始II界面的产状,但是会在成像结果中产生多个 伪像。大尺度平滑的偏移速度模型能够很好地确 定II界面的位置,但是难以得到起伏II界面的构造 特征。这说明在实际应用中,需要综合多种偏移 速度模型的成像结果来确定II界面的构造特征与 几何位置。



图7 起伏 II 界面的正演速度模型与 RTM 成像结果

Fig. 7 Forward velocity model and RTM images for ragged cement-formation interface

3 结论与建议

本文基于数值模拟研究了水泥类型、套管尺寸、 水泥胶结质量和II界面产状对套管井超声弯曲波 叠前RTM成像结果的影响规律,得到以下结论:

(1)超声弯曲波测井RTM的成像质量取决于 环空介质与地层的波阻抗之差,当环空介质与地层 波阻抗差异较大时且不存在水泥缺失时,RTM技术 可以得到Ⅱ界面的真实位置与几何形态; (2) RTM 技术适用于各类尺寸的套管,能够为 全井段 II 界面高精度成像提供理论支撑;

(3) RTM 具备识别 I 界面和 II 界面水泥缺失的 潜力;

(4) 多次波会产生多个与理论界面位置平行紧 邻的伪像,未来可以在偏移之前采用预测反褶积或 Randon变换等方法压制多次波,提高RTM的成像 质量;

(5) 在多层套管的超声测量环境中,水泥-外层 套管界面等价于单层套管的水泥-高阻抗地层界面, 因此RTM技术可以实现对外层套管的成像,确定 外层套管的位置与偏心程度;

(6) 速度模型是 RTM 成像的关键,目前超声弯曲波测井缺乏对水泥和地层介质的有效速度分析 方法,未来可以发展套管井全波形反演方法,计算套 后介质的弹性参数分布,为 RTM 成像提供合理的 速度模型。

参考文献

- 李维彦,章成广.固井质量测井评价 [M].北京:科学出版社, 2016: 5-36.
- [2] 王华,陶果,尚学峰,等. 轻质水泥固井质量声波测井评述与 方法研究 [J]. 测井技术, 2014, 38(2): 165–173.
 Wang Hua, Tao Guo, Shang Xuefeng, et al. Review and study on acoustic/ultrasonic methods for low-density cement bond logging[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(2): 165–173.
- [3] 孙建孟, 苏远大, 李召成, 等. 定量评价固井 II 界面胶结质量的方法研究 [J]. 测井技术, 2004, 28(3): 199-202, 269.
 Sun Jianmeng, Su Yuanda, Li Zhaocheng, et al. Quantitative evaluation of second interface cementing quality[J].
 Well Logging Technology, 2004, 28(3): 199-202, 269.
- [4] van Kuijk R, Zeroug S, Froelich B, et al. A novel ultrasonic cased-hole imager for enhanced cement evaluation[C]//International Petroleum Technology Conference. IPTC, 2005: IPTC-10546-MS.
- [5] 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.
- [6] 李盛清,林剑松,江灿,等.随钻声波测井固井质量评价理论与数值模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2762–2773.
 Li Shengqing, Lin Jiansong, Jiang Can, et al. Theoretical and numerical simulation of LWD acoustic cement logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7): 2762–2773.
- [7] 陈德华,王秀明,张海澜,等.水泥密度和套管尺寸对油井套 管波的影响 [J]. 声学学报, 2008, 33(1): 15-20.
 Chen Dehua, Wang Xiuming, Zhang Hailan, et al. The effects of cement density and casing dimension on casing waves in oil wells[J]. Acta Acustica, 2008, 33(1): 15-20.
- [8] Song R L, Liu J S, Lyu X M, et al. Effects of tool eccentralization on cement-bond-log measurements: numerical and experimental results[J]. Geophysics, 2013, 78(4): D181–D191.
- [9] Che X H, Qiao W X, Ju X D, et al. Azimuthal cement evaluation with an acoustic phased-arc array transmitter: numerical simulations and field tests[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(1): 194–202.
- [10] 王华, 陈蒙, 刘露梅, 等. 复杂井况下的超声波 Lamb 波场 特征 [C]. 2020 年中国地球科学联合学术年会论文集 (二十)

六)—专题七十六:深部矿产资源探测技术与应用,专题七十 七:岩石物理与井中探测前沿,专题七十八:井孔地球物理及 深部钻测,2020.

- [11] van Kuijk R, Zeroug S, Froelich B, et al. A novel ultrasonic cased-hole imager for enhanced cement evaluation[C]//International Petroleum Technology Conference. IPTC, 2005: IPTC-10546-MS.
- [12] Morris C, Sabbagh L, Wydrinski R, et al. Application of enhanced ultrasonic measurements for cement and casing evaluation[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. SPE, 2007: SPE-105648-MS.
- [13] Froelich B. Multimode evaluation of cement behind steel pipe[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(5): 3648.
- [14] 陈雪莲,李建赛,唐晓明,等. 套管中泄漏弯曲型 Lamb 波的 传播特征 [J]. 声学学报, 2016, 41(3): 296-304.
 Chen Xuelian, Li Jiansai, Tang Xiaoming, et al. The propagation characteristics of leaky flexural-Lamb waves in casing[J]. Acta Acustica, 2016, 41(3): 296-304.
- [15] Thierry S, Klieber C, Lemarenko M, et al. New-generation ultrasonic measurements for quantitative cement evaluation in heavy muds and thick-wall casings[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro, 2016.
- [16] Viggen E M, Johansen T F, Merciu I A. Analysis of outer-casing echoes in simulations of ultrasonic pulseecho through-tubing logging[J]. Geophysics, 2016, 81(6): D679–D685.
- [17] 许飞龙. 斜入射有限声束超声波固井质量检测方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [18] He X, Chen H, Wang X. Ultrasonic leaky flexural waves in multilayered media: cement bond detection for cased wellbores[J]. Geophysics, 2014, 79(2): A7–A11.
- [19] Duan W X, Qiao W X, Che X H, et al. Acoustic evaluation of cementing quality using obliquely incident ultrasonic signals[J]. Applied Geophysics, 2014, 11(3): 269–276.
- [20] 杨旭辉, 余厚全, 陈强, 等. 泄漏 Lamb 波在固井质量评价中的应用 [J]. 应用声学, 2017, 36(3): 241-248.
 Yang Xuhui, Yu Houquan, Chen Qiang, et al. The application of leaky Lamb waves in cementing quality evaluation[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36(3): 241-248.
- [21] 胡文祥, 王浩, 马琦, 等. 套管井超声导波成像系统开发与工程应用研究 [J]. 应用声学, 2020, 39(1): 20-28.
 Hu Wenxiang, Wang Hao, Ma Qi, et al. Development and application for ultrasonic imaging system based on guided waves in cased boreholes[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(1): 20-28.
- [22] Sirevaag T, Johansen T F, Larsen I, et al. A study of the flexural attenuation technique through laboratory measurements and numerical simulations[J]. Petrophysics, 2020, 61(4): 334–351.
- [23] Wang H, Li M, Fang Z, et al. Cased-hole reverse time migration imaging using ultrasonic pitch-catch measurement: theory and synthetic case studies[J]. Geophysics,

2023, 88(4): D241–D258.

- [24] Li M, Wang H, Shi S, et al. Imaging of cased-hole structures using reverse time migration based on ultrasonic pitch-catch measurements[C]//84th EAGE Annual Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers, 2023, 2023(1): 1–5.
- [25] Whitmore N D. Iterative depth imaging by backward time propagation: 58th Annual International Meeting[C]//SEG, Expanded Abstracts, 1983, 2(5): 646.
- [26] Li M, Shen H, Guo Y, et al. Locating microseismic events using multiplicative time reversal imaging based on decoupled wavefields in 2D VTI media: theoretical and synthetic cases studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 202: 108547.
- [27] Li J, Tao G, Zhang K, et al. An effective data processing flow for the acoustic reflection image logging[J]. Geophysical Prospecting, 2014, 62(3): 530–539.
- [28] 徐琰锋, 胡文祥. 纵向带状裂隙形貌的逆时偏移超声成像 [J]. 物理学报, 2014, 63(15): 154302.

Xu Yanfeng, Hu Wenxiang. Ultrasonic imaging for appearance of vertical slot by reverse time migration[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(15): 154302.

- [29] 张海燕,杨杰,范国鹏,等.基于模式分离的兰姆波逆时偏移 成像 [J].物理学报,2017,66(21):214301.
 Zhang Haiyan, Yang Jie, Fan Guopeng, et al. Reverse time migration Lamb wave imaging based on mode separation[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(21):214301.
- [30] Nguyen L T, Modrak R T. Ultrasonic wavefield inversion and migration in complex heterogeneous structures: 2D numerical imaging and nondestructive testing experiments[J]. Ultrasonics, 2018, 82: 357–370.
- [31] Chen D, Yin Y G, Zhang C, et al. Ultrasonic Lamb wave detection of a channel in a double-casing well[J]. Ultrasonics, 2023, 130: 106916.
- [32] Wang H, Tao G, Shang X. Understanding acoustic methods for cement bond logging[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, 139(5): 2407–2416.