

DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2412843

套管井固井质量声学检测技术现状与展望*

张斯琪¹, 曾周末¹, 李健¹, 陈世利¹, 何晓³, 王秀明³, 刘洋^{1,2}

(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. 天津大学浙江国际创新设计与智能研究院 浙江 312000; 3. 中国科学院声学研究所声场与声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 套管井的固井质量检测在保护油气层和环境保护等方面具有重要的意义。在固井质量评价方法中, 声波测井技术作为现代测井方法之一, 因其对介质声阻抗大小、水泥环内部缺失及层间粘接状况敏感等优点被广泛应用。井孔声场理论是声波测井技术的基础, 本文阐述了单层以及多层套管井的声场理论研究现状; 介绍了几种国内外传统的声波测井技术, 概括了不同技术的原理及特点。同时介绍了人工智能方法在固井质量检测中的应用, 强调了多种机器学习方法在处理测井资料提供更大的函数空间, 以及帮助测井专业人员以非线性方式从高维空间发掘知识等方面的优势。从5个方面展望了声波测井技术未来可能的发展趋势, 为固井质量检测提供进一步的发展建议。

关键词: 固井质量检测; 声波测井技术; 声场理论; 人工智能; 地球物理测井; 综述

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 5351045

Current situation and prospect of acoustic logging for casing well cementing quality

Zhang Siqi¹, Zeng Zhoumo¹, Li Jian¹, Chen Shili¹, He Xiao³, Wang Xiuming³, Liu Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. International Institute for Innovative Design and Intelligent Manufacturing of Tianjin University in Zhejiang,
Shaoxing 312000, China; 3. State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The assessment of cementing quality in well casings is crucial for reservoir protection, ensuring safety and environmental protection in oil and gas exploration and development. Acoustic logging technology, a prominent modern well logging technique, is widely utilized for its sensitivity to the acoustic impedance of the medium, the loss of cement annulus, and the state of bonding interfaces. The foundation of acoustic logging technology lies in the theory of the acoustic wave propagation in a borehole. This article provides an examination of the current research status of the acoustic field theory for both single and double casing wells. Additionally, it introduces various traditional acoustic logging techniques employed both domestically and internationally, summarizing the principles and characteristics inherent in these technologies. Furthermore, the article explores the application of artificial intelligence methods in cementing quality evaluation, highlighting the advantages of various machine learning methods in processing logging data to create a broader function space, and helping logging professionals explore knowledge from high-dimensional spaces in a nonlinear way. In conclusion, the article anticipates potential future directions and trends in acoustic logging technology across five dimensions, offering further development recommendations for the evaluation of cementing quality.

Keywords: cementing quality evaluation; acoustic logging technology; sound field theory; artificial intelligence; geophysical logging; review

0 引言

固井作业涉及向井内下入套管,并在井眼与套管之间的空间填充水泥。其主要的目的是为井内的套管提供稳固的支撑与保护,同时实现油、气、水层的有效封隔,防止不同压力的油气水层间互窜等。套管井固井作为油气勘探和开采领域中至关重要的工程环节,对于保障井下安全、提高产能以及延长井寿命具有不可忽视的作用。随着油气行业的迅猛发展,固井质量不过关导致的套管井不安全事故频繁发生,给人们的生命、财产和环境带来严重损失。以2010年美国马科隆油田为例,由于固井质量不佳,BP公司(BP p. l. c.)在墨西哥湾的某钻井平台突发爆炸事故,随后平台沉入海底,导致人员伤亡惨重,其中11人不幸遇难,另有17人受伤,同时也对环境造成严重破坏。2015年墨西哥湾深水地平线油井事故也由于一口油井失控引发大规模的泄漏,导致数十亿美元的经济损失,同时对环境造成了极大污染。因此,在套管井固井过程中,固井质量的优劣直接关系到井下作业的稳定性、产能的提升以及环境保护等多个方面^[1-5],对套管井进行固井质量检测是非常有必要的。

固井质量检测主要聚焦于套管井内水泥环的完整性评估,涉及套管与水泥环、水泥环与地层之间的胶结状况,水泥分布和套管后介质的强度、厚度和状态等参数的检测^[6]。固井质量评价依赖各种测井仪器对井下情况进行探测,并结合仪器的探测结果给出最终的评价结论。为实现套管井固井质量的准确监测与评估,各种先进的检测技术得到了广泛应用。在众多的检测方法中,声波固井质量检测方法具有检测分辨率高、价格低廉、传输速率快、信道稳定、形式多样、操作方便等优势。因此基于声波测井的固井质量检测方法逐步兴起,其占比逐年提升,逐渐成为主流测井手段。声波测井的原理是通过在井孔中发射声波,根据声波的传播速度、衰减等参数,精准测量水泥环内部缺失或者胶结面粘接情况等。目前,基于声波的固井质量检测团队主要有斯伦贝谢道尔研究所 Zeroug 等^[7-12],主要集中于复杂结构介质声场理论计算,以及深部钻测仪器的新方法,新设计以及新的信息数据处理及成像方法研究,推动了现代固井质量检测技术的发展,为现代固井质量检测技术奠定了坚实的理论基础与技术支撑。中国科学院声学研究所王秀明教授团队^[13-18],实验室主要集中于固体声学及深部钻测的研究,包括深部固体地球钻探测量与测井研究、井孔中的声波传播理论、多极子阵列声波测井、声波测井质量检测和随钻多极子声波测井等,在应用基础研究和高新技术研发等方面做出了突出贡献。中国石油大学(华东)唐晓明教授团队^[19-24]主要攻关声波测井理论、方法与装备,在远

探测声波测井技术、随钻声波测井技术、过套管声波测井技术等方面取得了重要的标志性成果,形成了一套国际一流的声波测井高新技术研发体系。哈尔滨工业大学胡恒山教授团队^[25-29]以地球物理和资源勘探为背景,长期从事孔隙介质力学与声学、岩石物理与声测井等研究,揭示了随钻声波测井中钻铤波传播特性,并且针对含井孔结构的声场-弹性波场,得出波动互易关系,为远探测声波测井理论提供夯实的基础。中国石油大学(北京)乔文孝教授团队^[30-33]系统地研究了流体饱和多孔介质声学理论及其在石油勘探中的应用,在相控声波测井方面进行了开拓性的研究工作,参与组织了多极子阵列声波测井仪器、方位固井质量评价仪、三维声波测井技术和方位反射声波测井技术等先进声波测井技术的开发,并在实际生产应用中取得了巨大的成功,在声波测井领域打破了国外技术垄断,走出了自主创新的路子。除此之外,随着人工智能技术的不断发展,将人工智能技术与固井质量检测相结合逐渐成为趋势,例如电子科技大学王华教授团队^[34-39]在应用仪器设计与研发、人工智能技术在地球物理中的应用、复杂环境下波场传播规律与探测等方面取得了重要进展等。

固井质量在生产过程中的重要性日益凸显,这推动了对固井质量检测技术的深入探索与不断进步。专家们不断提出各种检测方法,如井温测井、放射性示踪测井以及噪声测井等。然而,这些方法均存在一定的局限性,其应用效果并不理想。直至1961年,声波测井技术的出现,为固井质量评价带来了显著进展。随着这一技术的逐步成熟与发展,声波固井质量检测技术得到了长足的发展,其中声幅-变密度测井技术、扇区水泥胶结测井技术、衰减率测井技术以及反射回波固井质量测井技术等相继涌现^[19]。这些技术现已成为固井质量评价的主要手段,对于提高固井质量、保障生产安全具有重要意义。本文旨在综述基于声波测井技术的固井质量评价方法的发展历程及研究现状,以期为该领域的研究提供有益的参考和借鉴。首先阐述了单层套管井和多层套管井声场理论及其研究现状。其次梳理了传统声波测井技术,包括各种声波测井技术、工作原理及数据解释方法等,为读者提供了一个全面了解声波测井技术的基础。随后深入讨论了声波测井技术与人工智能技术融合在固井质量评价中的应用,强调了这种融合对提高固井质量评价的精度和效率的重要性。本文旨在为后续的固井质量检测及应用提供一些建议,推动基于声波测井技术的固井质量评价方法在油气勘探和开发领域更广泛的应用,提高固井操作的可靠性和效益。

1 井孔声场理论及现状

井孔声场理论是固井质量检测的理论基础,国内外

许多学者在这方面进行了大量的理论研究、数值计算和实验工作。但是需要指出的是现阶段的研究仅针对单层套管井固井质量评估与声场理论进行了比较深入的研究与分析,而对于多层套管井中的声场的深入研究相对较少,尤其针对多层套管井非轴对称结构耦合对声场传播的影响规律还需要进一步探索与发展。

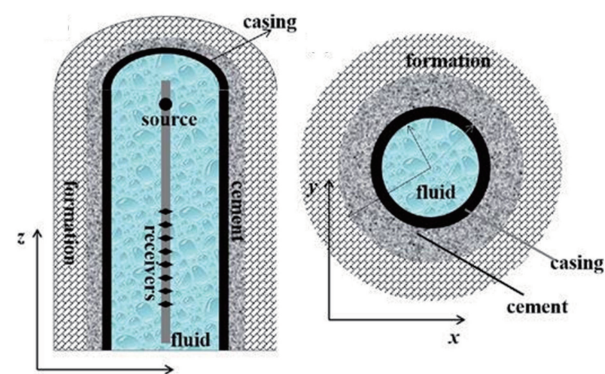
1.1 单层套管井声场理论研究现状

目前,国内外针对单层套管井的固井质量检测与声场理论的研究相对比较成熟^[34]。董庆德等^[40]对套管波形态以及幅度受到套管与水泥环或者是水泥环与地层之间胶结状况的影响进行了定性的分析,指出全波记录中初至波幅度明显增强是两胶结面窜槽的重要标志。在 Thomson^[41]和 Haskell^[42]的工作基础上, Schoenberg 等^[43]深入研究了胶结良好套管井中模式波的传播特性,包括伪瑞利波和斯通利波等,基于频率-波数域分析方法理论计算结果和实验测量模式波的频散数据具有较好的吻合度。在 Schoenberg 的实验模型基础上, Chang 等^[44]于 1983 年利用实轴积分法计算了套管井中的阵列波形,他们采用径向位移和应力表征为连续,而切向应力为零的形式表征套管与水泥环之间的不胶结情况,分别对胶结良好和不胶结情况下的理论和实验数据进行了研究。李整林等^[45]基于 Chang 和 Everhart 相同的边界条件,分别对胶结良好、套管与水泥界面不胶结以及自由套管模型下的套管井中单极子和偶极子的声场特性进行了模拟,指出结合单极子和偶极子测井数据计算波速信息可能更有利于评价三种胶结情况。Tubman 等^[46-48]以柱状分层模型为基础,引入流体环建立 4 种经典套管模型,深入探究了不同界面胶结情况对套管波幅度的具体影响。在此基础上, Schmitt 等^[49]进一步采用频率-波数域内二维谱方法,对套管井中部分模式波在套管与地层之间不同胶结情况下的传播特性进行了定性分析。Liu 等^[50]提出采用双频声波测量方法检测两个胶结面的胶结状态,结果表明测量系统为 10 kHz 的低频源和 150 kHz 的高频源组合时,通过不同频源的套管波幅度不仅可以对不同胶结面进行评价,也可以对普通砂岩和页岩地层进行有效评估。张海澜等^[51]对黎曼叶的选择进行了系统的总结,并在二维谱技术的基础上对套管井中模式波的频散特性进行了深入剖析。吴海燕等^[52]基于实轴积分法和二维谱技术分析不同胶结情况的二维谱和频散曲线,并根据理论分析设计了阵列声波测井仪器,得到的实际测量波形和处理结果证明了理论分析的正确性。

然而对于更符合实际工况的井孔声场,如井眼不规则声场等,只能借助数值分析方法如有限差分方法进行求解。唐军等^[53]基于实轴积分法和 2.5 维有限差分模拟与刻度井群相结合的方法,分别研究了窜槽角度、水泥与地层界面胶结质量对声幅-变密度测井的影响,提出了

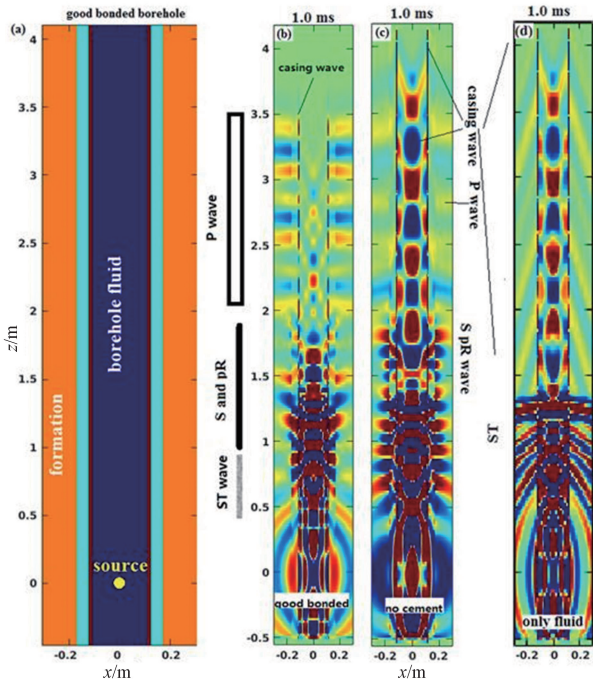
新的声幅/变密度测井 (cement bond logging/variable density log, CBL/VDL) 测井资料固井质量评价标准。周吟秋等^[54]利用实轴积分法研究了不同中心频率下首波幅度衰减和套管与水泥、水泥与地层界面胶结状况的变化规律,为单层套管井固井质量定量解释提供了一定的理论依据。林伟军等^[55-56]利用模拟与实验相结合的方式,利用有限差分方法对带窜槽的套管井声场进行模拟,通过与实轴积分法对比验证了利用有限差分研究非对称井孔声场的正确性,并且将井孔上不同源距得到的接收波列进行二维谱处理,数据结果表明当窜槽角度大于 30° 时,才能从接收波列中被鉴别。Song 等^[57]使用二维有限差分法对水泥环空中充水空隙对弯曲波衰减、群速度以及缺陷的散射效应的影响进行了数值模拟研究,其模拟结果为弯曲波测井提供了更深的理解。Wang 等^[35]利用二维有限差分方法模拟了单层套管井中的声场传播,分析了胶结良好情况下井中不同界面的脉冲回波波形,并研究了轻质水泥填充下的自由套管、部分粘结模型和全粘结模型弯曲波声场传播,指出了脉冲回波法和投捕法相结合的方式可以对水泥胶结进行有效评估。除此之外,他们进一步采用三维有限差分方法对单极子和偶极子在不同胶结条件下的单层套管井中声场传播情况进行了模拟与分析,提出了一种基于沿套管与地层间水泥环传播的斯通利波作为固井质量评价的方法^[36-37],如图 1 所示。此外,赵琪琪等^[58-59]将相控圆弧阵声波换能器引入固井质量评价中,利用有限差分方法分别模拟了方位声波固井检测仪在水泥与地层界面存在窜槽以及偏心情况下的测量响应。研究表明可通过分析声波接收站中不同方位阵元接收到的套管波首波幅度,获得窜槽的中心方位,但是仪器偏心对结果影响较大,需要利用自由套管下的响应特征进行校正,从而获得水泥窜槽方位。经典弹性波理论往往是在界面之间增加流体环模拟胶结差的测井响应^[60],这样会导致套管与水泥环之间失去剪切耦合,为了克服经典弹性波在套管井声场模拟中的局限性,唐晓明等^[20-21, 61]将套管与地层之间的水泥环表征为具有复数耦合刚度的粘弹性滑移界面,通过采用界面的剪切刚度和黏滞刚度两个参数,描述套管波传播中的各种衰减和速度变化,通过与实际声波数据对比,验证了滑移界面理论模拟水泥胶结的适用性,为固井质量检测提供了理论基础,如图 2 所示。

除此之外,随着大斜度井和水平井技术的广泛应用,仪器或者套管重量等原因导致的仪器偏心或者套管偏心而形成的非轴对称结构加大了固井质量检测的难度,非轴对称井孔声场研究逐渐成为声波测井领域的热点之一。沈建国等^[62-63]综合理论模拟与实验测试深入探讨了偏心点源在圆管内所激发的声场特性。张秀梅等^[64]利用有限差分方法对具有不同外径尺寸的套管和偏心率的



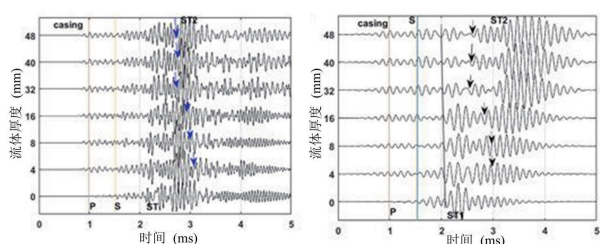
(a) 良好胶结的套管井模型

(a) A cased well model with good bonding



(b) 胶结良好、自由套管以及套管浸水情况下的压力快照

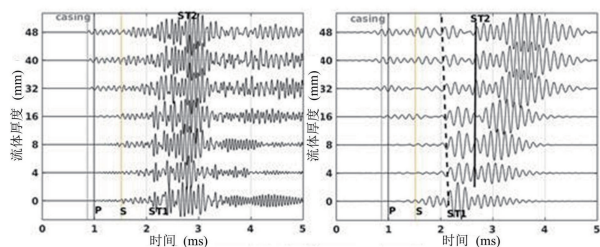
(b) Pressure snapshots for situations where the cement is perfectly bonded, free casing and casing immersed in fluid



(c) 套管与水泥之间存在不同厚度流体时

合成波形以及带通滤波器在5-8 kHz范围内滤波波形

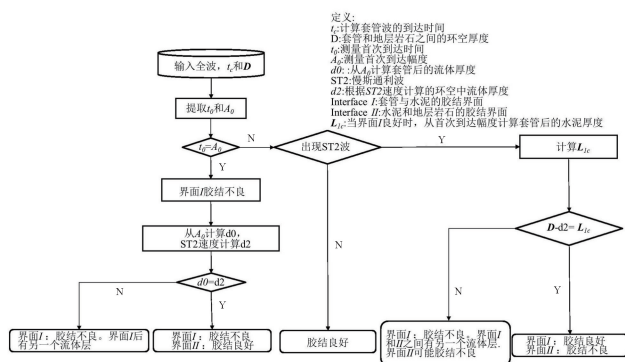
(c) Synthetic waveforms and waveforms filtered with a bandpass filter from 5 to 8 kHz for the models with fluid of various thicknesses between the casing and cement



(d) 水泥与地层之间存在不同厚度流体时合成波形、

带通滤波器5-8 kHz范围内滤波波形

(d) Synthetic waveforms, waveforms that have been filtered with a bandpass filter from 5 to 8 kHz for models with fluid of various thicknesses in front of formation



(e) 全波形水泥胶结评价方法流程图

(e) Flow chart diagram of the full waveform cement bonding evaluation method

图1 单层套管井中的声场研究^[36]Fig. 1 The wavefield of acoustic logging in a single casing well^[36]

组合下的声场传播情况进行了数值仿真,在此基础上研究了套管偏心和仪器偏心情况下偏心率的大小对声场特征的影响规律。研究表明套管波及地层波幅度变化随着偏心率增加而增大。Song 等^[65]从理论和实验两方面深入分析了仪器偏心对自由套管情况下的声波传播特征的影响,并给出了套管波的幅度随偏心率大小的线性变化规律。王瑞甲等^[30]研究了钻铤偏心、各向异性和不规则井孔形状等复杂井孔条件下,非轴对称的圆片状声源向地层中辐射的声场特征,进一步分析了不同井孔条件对声场的影响。Xu 等^[25]针对非轴对称声场提出了一种能够计算具有特定尺寸偏心声源激发声场的半解析

方法,并模拟了套管井中偏心定向波束的反射波。Ji 等^[13]研究了偏心单极子随钻测井工具在快速和慢速地层中的波场问题,分析了工具偏心对剪切头波的影响。卫建清等^[66]利用三维有限差分研究了偏心点声源在水平横向各向同性慢速地层井孔中激发的声波传播规律。饶博等^[67]建立了双柱坐标系偏心随钻声波测井模型,分别研究了快速和慢速地层中钻铤居中和偏心时声源激发的声场特征以及接收波场的方位角变化。对于声波测井中的各向异性引起的非轴对称井孔声场等情况,He 等^[14]利用三维有限差分计算了各向异性地层中的偶极子声场,研究了仪器偏心对偶极声场传播的影响。

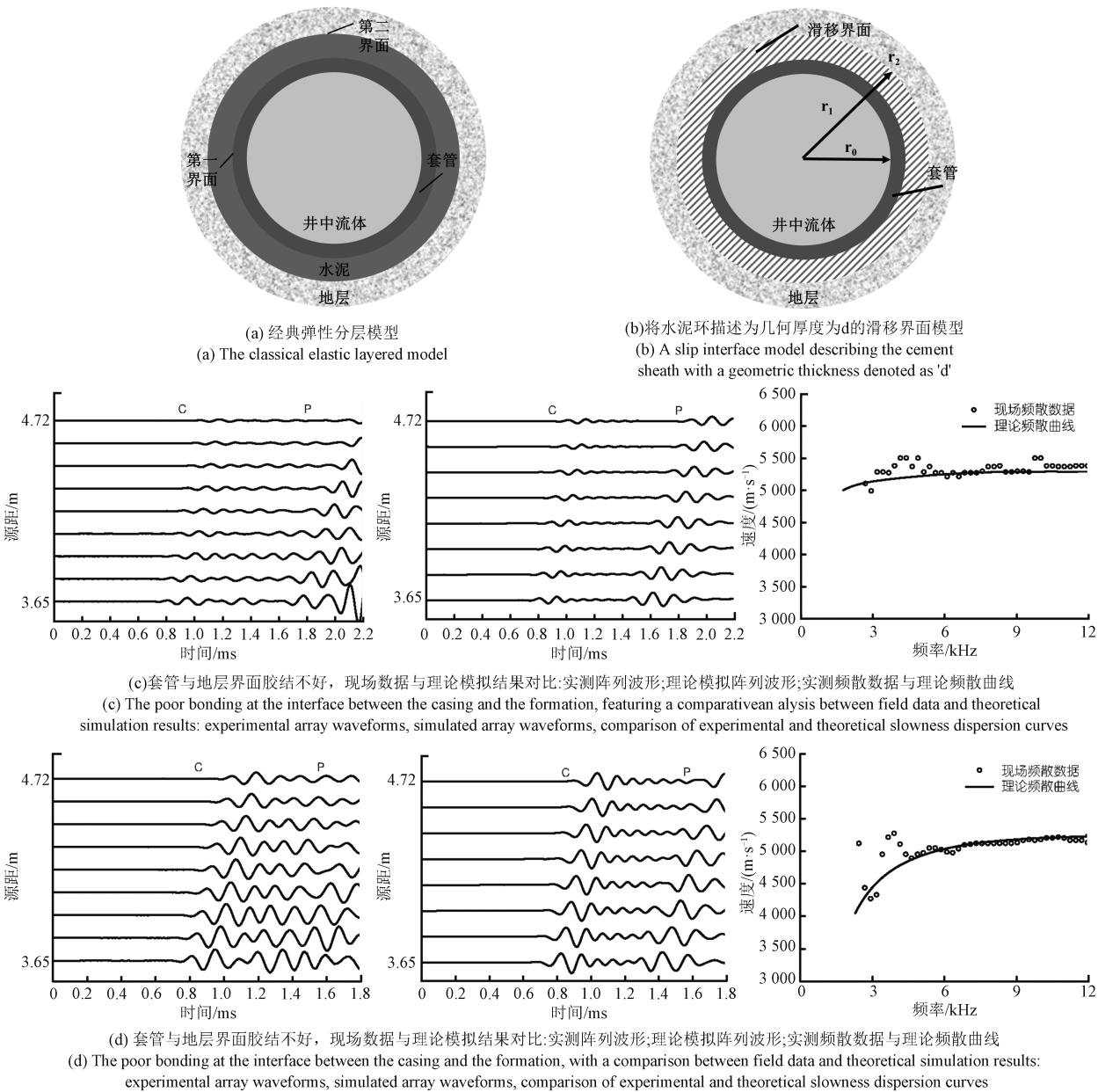


图 2 滑移界面表征的套管井声场的理论计算^[20]

Fig. 2 Theoretical computations of the acoustic field in casing wells characterized by the slip interface^[20]

Li 等^[15]开发了一种利用随钻测井单极子和偶极子频散数据同时反演地层剪切波各向异性和垂直剪切波速度的联合方法, 基于频散特性的变化构造反演目标函数, 并以多极波谱为权重, 结果表明联合方法不仅可以缓解反演问题的非唯一性问题, 而且也可以提高反演结果的精度。在井孔非轴对称声场与缺陷耦合机理方面, He 等^[16]利用二维/三维有限差分方法对单层套管井中弯曲波声场进行了模拟, 阐明了弯曲波受到微环、水泥部分环空等不同缺陷时的响应规律。Xie 等^[68]研究了特征波幅值随直井扇形缺失角或者水平井中缺少

高度的变化规律, 为建立特征首波幅值与缺失量变化的分布规律提供了依据, 也为复杂井筒声场分析提供了参考。Tao 等^[17]采用有限差分方法研究了单层套管井中粗糙界面对兰姆波传播的影响, 总结了套管腐蚀和水泥-地层粗糙界面对弯曲波首波和次波波幅影响的规律。唐晓明等^[23]利用井孔波场的柱面波展开和波数积分通解与波的远场渐近解及井孔辐射和接收的互易性相结合, 对井孔与弹性波相互作用进行了求解, 通过该方法可准确模拟各种有关的波动现象并分析其波场特征。

1.2 多层套管井声场理论研究现状

随着石油勘探技术的持续进步,深井以及超深井的完井模式更多的采用双层套管乃至多层套管。多层套管井的声波传播涉及到径向分层介质中的声波导,全波波形中包含的波成分与单层套管相比更加复杂,使得多层套管井的固井质量检测难度增大,因此对多层套管井质量评价的需求也越来越迫切。

最初,研究人员主要依赖波形信息对双层套管井进行固井质量检测。例如,黄文新等^[69]利用柱状多层理论模型分别计算了裸眼井、单层套管井和双层套管井的声波波形,分别利用地层纵波、横波和套管波信息对双层套管井中不同条件下的胶结情况进行了评价。李维彦等^[70]在《固井质量测井评价》中总结了双层套管井质量评价中存在的问题,并且提出了初步的评价标准。Viggen 等^[71-72]使用有限元方法模拟超声脉冲在双层套管井中的传播过程,探究了第三界面回波以及兰姆波波包等信息与固井质量检测的对应关系。Tiago 等^[73]研究了多层管柱井筒中水泥环的不同缺陷对导波扩散以及单极声源的响应的影响,为降低与油气资产弃置支出(Plug & Abandonment, P&A)操作相关的成本奠定了基础。Rao 等^[74]基于贝塞尔平移加法定理,分别计算了双层套管井中内层套管居中和偏心下的多极声场,探讨了利用

多极阵列声波测井并进行双层套管井固井质量评价的可行性。考虑到多层套管井固井质量检测中时域信息容易受到噪声等干扰,导致接收信号不准确,因此研究人员引入频域分析来解决上述问题。陈雪莲等^[75-77]利用三维有限差分法和实轴积分相结合的方法,对单极子和偶极子在双层套管井中的响应特性以及单极子激发下不同界面胶结差时的双层套管井模型分别进行了数值模拟,并且对套管波、伪瑞利波以及斯通利波的频散特性进行了分析。此外,她们^[78-79]还对贴井壁声源在多种胶结状态下的套管井模型中的非轴对称声场特性进行了数值仿真;深入探讨了多层介质模型的频散、衰减和套管后介质间的相互关系,并对不同胶结条件下弯曲波的传播机制进行了系统的分析。Liu 等^[7-10]利用扫频有限元、有限差分等方法研究了双层套管中单极子、偶极子及四极子波的传播规律,结果表明可利用慢度相干、慢度频散、衰减特性等丰富的声信号特征对多层套管井水泥环健康状况进行可靠评价,并对低频到高频段声波在固井质量检测中的应用技术做了详细梳理。如图 3 所示,Liu 等^[10]开展了关于双层套管井中声场-外层水泥环缺陷耦合的理论与实验研究,大量实验结果验证了理论预测,为双层套管井外层水泥环缺陷检测与评估提供了良好的基础。

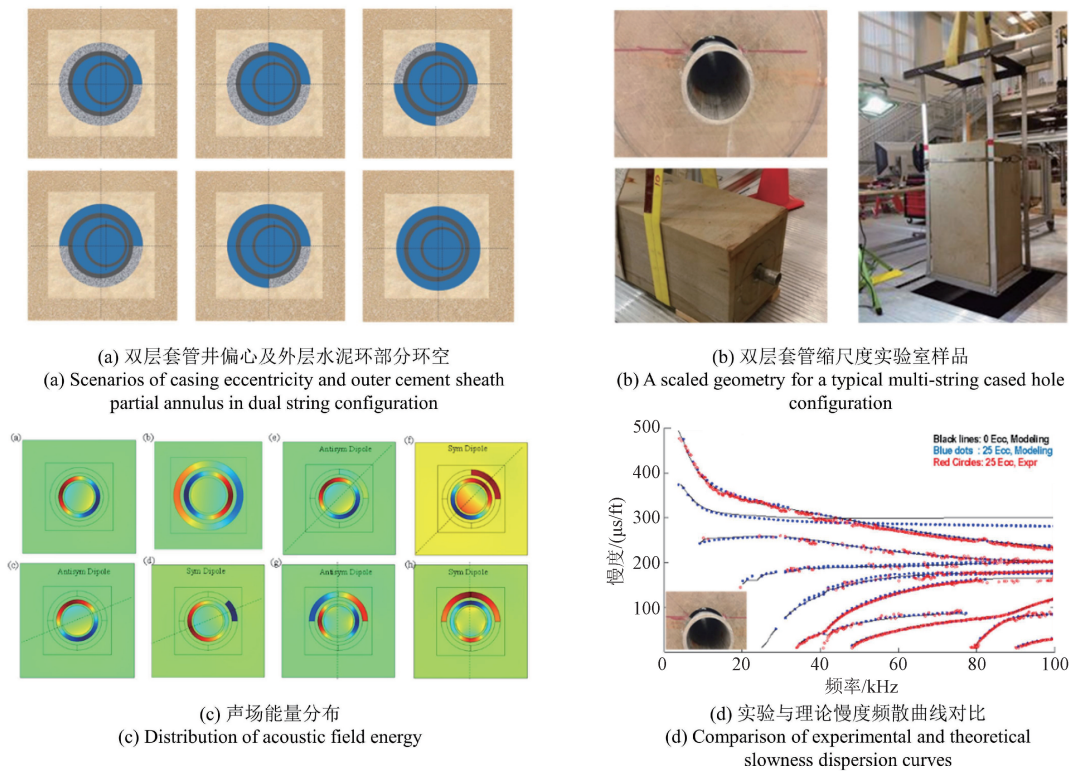


图 3 双层偏心套管井典型外层水泥环缺陷实验试样及声场传播特征示例^[10]
Fig. 3 Experimental samples of typical outer cement sheath defects in double-layer eccentric casing wells and examples of sound field propagation characteristics^[10]

现阶段的研究仅对单层套管井固井质量评估及声场理论进行了较为系统的分析,而对多层套管井中的声场还缺乏深入的研究,并且多层套管井全波波形各分波的传播机制及它们与套管、水泥环、地层参数之间的关系有待进一步的探索。

2 声波固井质量检测仪器和传统评价方法

图 4 显示了 2015 年至 2023 年间关于固井质量评价的文章数量,可以看出,近年来国内外关于固井质量检测的研究逐渐增加,并且文章数量也呈现逐年增加的趋势。作为评价固井质量的重要手段,固井质量检测技术经历了从初级阶段的井温测井到高级阶段的超声成像测井的演进。传统的固井质量检测方法主要依赖于人工检测和常规检测仪器,存在检测精度低、过程复杂、效率低下等问题,无法满足现代油气勘探开发对固井质量检测的高精度、高效率以及高自动化的要求。直到 60 年代早期声幅测井技术的出现才使得声波测井技术在实际的应用中逐渐发展与完善。近年来,以声幅-变密度测井,扇区水泥胶结测井及超声脉冲回波测井为代表的声波固井质量检测技术相继问世,在油气井固井质量评价方面发挥着

重要作用,图 5 中展现了几种典型的声波测井技术^[80-81]。本文对比了不同的声波测井技术,具体对比结果如表 1 所示。

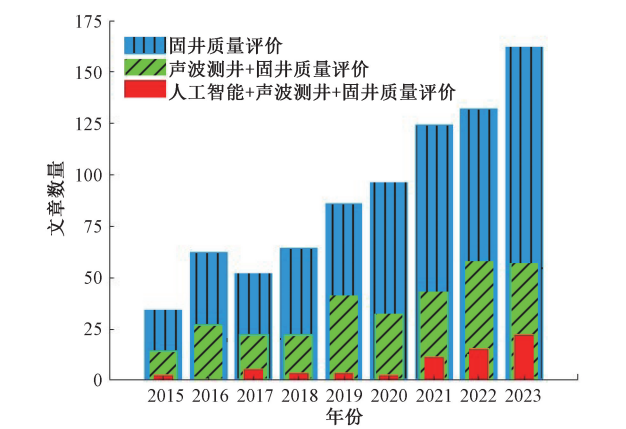
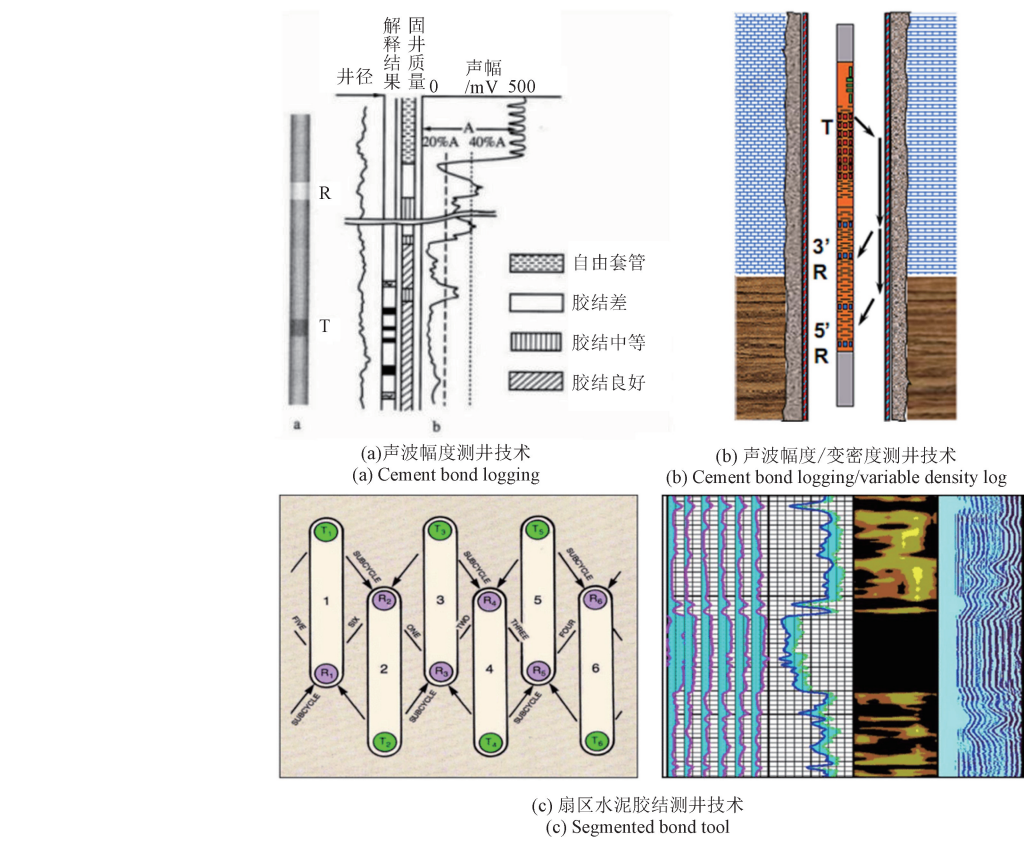
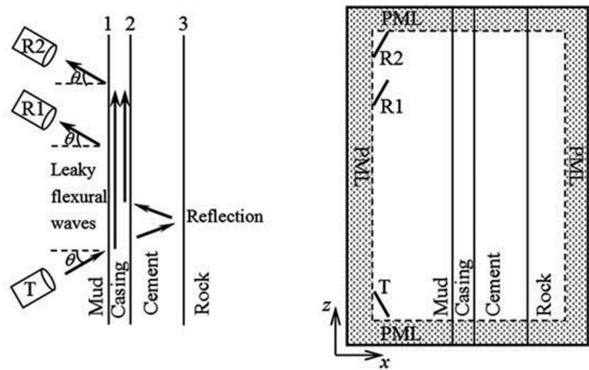


图 4 近九年来关于固井质量检测以及基于声波的固井质量检测的文献发表量的变化,统计数据来源于 Google Scholar
Fig. 4 Changes in the published literature on cementing quality evaluation and cementing quality evaluation based on acoustic logging in recent nine years, statistical data from Google Scholar





(d) 超声脉冲回波技术和pitch-catch技术，探测并成像套管后胶结情况
(d) Ultrasonic pulse-echo measurement technique and the pitch-catch technique probing and image the content of the cemented annulus behind the casing

图 5 不同声波测井技术^[11, 80]

Fig. 5 Different acoustic logging techniques^[11, 80]

表 1 不同声波测井技术对比

Table 1 Comparison of different acoustic logging techniques

声波测井方法	特征参数	波形	主要用途和目的	优点	缺点
声波幅度测井	幅度	套管波	地层裂缝;套管井水泥环胶结程度(判断第一界面胶结情况)	测量简单;费用低	第二界面情况无法判断;易受快速地层、仪器偏心等影响
声波变密度测井	幅度	套管波、水泥波、地层波、泥浆波	固井(检查套管井第一、二界面的胶结程度)	能够对两个界面进行胶结状况评价;施工效率高;可评价快速地层井段的固井质量;可选择好的射孔层位,防止水窜	难以有效检测水泥环局部缺失;需要自由刻度;受因素影响易误判
扇区水泥胶结测井	幅度	套管波	固井质量评价	纵向、环向分辨率高;不受重泥浆、快速地层、偏心等影响;以彩色图方式出现,直观、清晰	结构复杂;无法区分微环隙和差胶结;测井成本高;理论建模数量大,计算时间长
MAK-II 声波测井	长、短源距声波初至时间时差;长、短源距声波初至衰减系数;衰减率	套管滑行波的首波	水泥固井质量的综合评价	仪器免刻度;稳定性好,测井操作简单;采用磁致发射器,声波能量大,有利于反映地层信息;与井眼伽马密度-套管壁厚测井仪一起可进行综合解释	对固井质量好射孔后出现水窜的油气井验证效果差;受到套管尺寸和地层特性等的影响
声波全波列测井	速度、幅度、频率	纵波、横波、伪瑞利波、斯通利波	岩性分析;孔隙度计算;判断气层和裂缝;计算岩石力学参数	信息量大	波形提取存在难度
超声脉冲回波测井	幅度	声波的反射波	探测裂缝和评价井眼垮塌;确定井径的变化;确定地层厚度和倾角,进行鞣形态和沉积构造分析;固井质量评价	信息多;分辨率高;可识别局部窜槽;直观;便于分析	成像质量受泥浆性能、井眼形状和仪器偏心影响;只能评价第一界面质量
套后成像测井	衰减率	脉冲回波、弯曲波	辨别高性能水泥和液体;套后环境介质(固体、液体和气体)SLG 成像;确定水泥是否水力封隔;识别水泥环中的通道和其他缺陷;测定套管内径和壁厚,评价套管腐蚀情况	三维方式显示,可判断套管柱结构,不受微环境、快地层和双层套管影响,能适应厚套管和重泥浆环境	无法准确判定较细的套管穿透裂纹的确切位置;技术相对封锁

2.1 声波幅度测井

声幅测井(cement bond logging, CBL)的基本原理是基于声波在介质中的传播特性,通过测量套管波幅度来评价套管与水泥界面胶结质量。由于两者声阻抗无明显差异,在固井质量较好的井段时,套管波能量在由水泥环向地层传播过程中,产生较大的能量衰减,因此接收探头接收到的折射波幅度较小。相反,在胶结质量较差的井段中,存在的气体或液体与套管的声阻抗差异显著,导致套管波能量衰减较小,从而传感器接收到的波幅较高^[54]。

声幅测井作为 20 世纪 60 年代发展起来的固井质量检测方法,因其能够快速直观地评价套管-水泥界面胶结质量的特点而备受关注。然而,此方法存在的挑战之一是其检测参数相对单一,并且其仅能对水泥胶结情况进行定性估计,且环向分辨率有限,难以准确定位水泥胶结差的地方,这限制了其对固井质量多方面特征的全面评估。

2.2 声幅变密度测井

声幅变密度测井技术(cement bond logging/variable density log, CBL-VDL)采用单发双收声系,其中近、远接收器源距分别为 3 ft 和 5 ft。3 ft 套管波的幅度反映了套管-水泥界面的胶结状态,首波幅度较大时表明固井第一界面的胶结质量较差,反之则为质量较好。为了进一步解释水泥-地层界面的胶结状态,基于第一界面胶结质量良好的前提下,采用 5 ft 全波列中的地层波进行定性解释。如果地层波强度较大,则说明第二界面的胶结质量较好,反之则为质量较差。然而,当第一界面胶结质量不佳时,套管波的拖尾较长可能会影响地层波,从而导致无法使用地层波判断第二界面的胶结状态^[35,82]。

CBL-VDL 是目前常用的固井质量检测方法之一,吸引了大批学者对其进行深入的研究,他们致力于提高测井数据解释的准确性和可靠性,以推动该检测技术的发展^[83]。基于 VDL 技术,孙建孟等^[84]采用开窗提取地层波的方法,在频谱上求得能量,并通过目的层地层波能量、目的层地层波衰减率、胶结良好时衰减最大的地层波能量以及衰减最小的地层波能量定义新的胶结指数,对第二界面胶结质量进行评价。苏远大等^[85]探究了地层声速对二界面评价的影响,并指出在进行第二界面胶结质量的评价时,必须将地层波能量和地层声波时差结合起来。在此基础上,苏远大等^[86]提出基于裸眼井声波时差与井径相结合从而确定地层波到时,对地层波能量进行了求解,并根据第一、二界面水泥完全胶结时地层波能量和声波时差的关系定义新的反映水泥-地层界面胶结指数,改进了第二界面的评价质量。

尽管 CBL-VDL 在评价第一界面胶结质量方面具有

显著优势并在实际生产中得到了广泛应用,但其无环向分辨能力,因此难以有效检测水泥环的局部缺失。此外,CBL-VDL 还存在其他不足之处:例如微间隙虽然具有水力封隔能力,但可能会导致套管波幅度增大,从而造成“水泥胶结不良”的误判;除此之外,此技术还要求有自由套管刻度,否则刻度的准确性无法得到保证^[87]。

2.3 扇区水泥胶结测井

为提高固井质量评价的环向分辨率,新的声波测井仪器开始采用多换能器分扇区的设计。90 年代初,Baker Hughes 公司推出了扇区水泥胶结测井仪(segmented bond tool, SBT),该仪器采用六发六收声系,它有 6 个动力推靠臂,每个臂将一块发射和接收换能器滑板贴在套管内壁上,将套管周围分为 6 个 60°扇区。根据全方位、高分辨率的补偿式衰减率测量结果,可对水泥胶结质量进行有效评价。如果衰减率高,表明水泥的胶结质量良好;反之,则表明水泥的胶结质量不佳^[88]。Computalog 公司研发了更为复杂的八发八收声系的 SBT 仪器,其声系由两个不同截面上的各八个探头组成,分别为发射和接收探头,同一轴向上的两两对应为一组,八组探头能够全方位探测套管外周围 360°的水泥胶结质量^[89]。

近些年来,水泥局部缺失检测的重要性也越来越受到人们的关注。相比于其他固井质量检测方法,SBT 在识别环向胶结质量问题上具有显著优势,取得了重要的成果^[90-91]。采用三维有限差分并行计算方法,宋若龙博士^[92]对套管井中扇区水泥缺失的非轴对称声场进行了模拟,针对 SBT 的解释方法进行了完善,并且在 2010 年^[93]提出了一种用于模拟非轴对称套管井扇区水泥胶结测井的声场算法,通过分析套管幅度随水泥缺失-换能器夹角的变化,得到非轴对称套管井新的声场规律,提出了反演水泥缺失及方位的方法。陈雪莲等^[78]采用三维交错网格高阶有限差分方法对贴壁声源在套管井中激发的非轴对称声场特征进行了模拟研究,通过对比不同胶结状况的数值模拟,得到了贴壁声源在套管井中激发的声场特性和传播规律,为利用贴壁声源激发接收的波形实现水泥-地层界面井周不同角度上的胶结评价奠定了理论基础。虽然扇区水泥胶结测井在环向检测方面取得了良好的效果,但是该技术对水泥-地层界面并不敏感,李佩笑等^[94]通过优化声源入射角改进了扇区声系结构下水泥胶结检测灵敏度,利用检波幅度衰减程度实现了水泥-地层界面胶结检测。

SBT 仪器在斜井和水平井的固井质量检测中展现出广阔的应用前景因其贴壁测量技术可以成功克服偏心对测量结果的影响。此外,SBT 仪器也具备评估水泥胶结的周向和径向全方位固井质量的能力。同时,该仪器也可对第一界面存在的孔穴和孔道的大小与分布情况进行识别,尤其对纵向上窜槽孔洞具有较好的分辨能力^[95]。

分析扇区水泥胶结测井数据并解释水泥胶结质量是一个热门的研究方向,扇区测井理论研究通常采用有限差分方法进行模拟计算。但是其声源频率相对较高,因此模型中网格数量极为庞大,进而导致计算耗时冗长;并且其结构过于复杂,导致测井成本相对较高。因此,对于该仪器结构的进一步优化是未来发展的一个关键方向。

2.4 MAK-II 声波测井

MAK-II 声波测井仪又称为声波水泥胶结测井仪器,被用于对套管井水泥胶结质量进行评价。该仪器运用单发双收声系的设计,主要由一个磁致伸缩探头(发射端)以及两个压电陶瓷探头(接收端)组成。在结构方面,源距是1 m,间距是0.5 m。在测井作业中,发射探头会发射15 kHz的声脉冲,随后经过套管、水泥环、地层及泥浆传播最终被两个接收传感器接收,并且生成2个全波列声波图。处理之后的全波列声波图会转化成2个相应的变密度灰度图。MAK-II 声波测井的核心关注点在于首波的幅度衰减和时间特性等信息^[96]。在一次下井作业中,该仪器可以同时记录首波分别到达两个接收传感器的时间、首波时差、两个接收传感器分别记录的首波衰减以及首波的衰减系数等关键信息。

通过对收集的测井数据进行分析与解释,研究人员便可以对一、二界面胶结情况进行评估。在两界面胶结良好的情况下,地层波的信息会更加明显,仪器记录的时差值也会相应增大,同时可以观察到两条首波幅度衰减明显,衰减系数呈现高值。相反,当两界面胶结质量较差时,仪器记录的首波信息主要是套管波,由于套管波随传播距离变化幅度变化较小,此时记录的时差值会偏小,两条首波幅度衰减也不明显,衰减系数呈现低值。目前,在利用 MAK-II 测量资料进行水泥胶结质量评价时,主要依赖于衰减系数曲线、声波时差曲线、两条衰减幅度曲线以及变密度曲线来综合判断水泥胶结的整体情况。但是这些曲线的变化趋势在水泥胶结状态相对极端的情况下才会显著。并且在实际操作过程中,衰减系数可能会受套管尺寸和地层特性等的影响,对定量评价造成一定的干扰^[97]。

2.5 声波全波列测井

声波全波列测井技术的基本原理是通过捕捉发射声脉冲后先后到达接收器的不同波形,例如滑行纵波、横波以及伪瑞利波等波形信息,结合速度和幅度综合判断地层性质。在特殊地层的测井中,声波全波列测井可以对整个地层进行测量。通过发射不同类型的声波,并标记声波的发射时间、发生顺序以及声波的类型,不仅能够获取地层的类型和差异等重要信息,还能够实现对不同地层的同时测量,同时还能够通过交叉对比的方式提高测量效果^[31]。

然而,声波全波列测井在对声波进行正确的排序和标记方面面临着挑战。当声波的排序和标记发生错误时,可能导致绘制出的声波图形出现问题^[98]。为提高测井数据的准确性和可靠性,后续工作可以更专注于开发更为智能和自动化的排序和标记算法。这可能包括应用先进的机器学习技术,以自动识别和校正声波数据中的错误,从而进一步提升声波全波列测井的实用性和可靠性。此外,对于特殊地层条件下的测井,还可以探索更先进的信号处理和波形分析方法,以应对复杂地质情况下的排序和标记挑战。这些改进有望为声波全波列测井技术在地质勘探和油气开发领域的应用提供更强大的支持。

2.6 超声脉冲回波测井

超声脉冲回波测井技术主要依赖于超声波的传播特性以及井壁或套管井内壁对超声波的反射特性,对井身剖面进行详细研究。其利用超声声源垂直向套管内壁发射短脉冲,接收回波中涵盖了各界面的反射波及在界面间多次反射的波。通过分析波的衰减率,可识别套管后介质的声阻抗特性。此外,还可以通过分析回波的幅度衰减程度对套管外水泥胶结质量情况进行评估。测得的反射波幅度和传播时间按照井眼内360°方位进行图像显示,不仅能分析井壁岩性、表面特征,还能观察套管内壁的变化^[99]。

基于超声脉冲反射测厚原理,余厚全等^[100]提出一种套管腐蚀和缺陷的超声波检测方法;还进一步探讨仪器偏心对超声回波的影响^[101],结果表明随着偏心程度与入射角的改变,回波信号的幅度与频谱均会发生变化。丁燕等^[102]利用有限差分法研究了斜入射套管内的超声脉冲波产生的各种模式波的声学特征与水泥环性质之间的关系,表明通过对接收波形的频谱分析有望反演出水泥环的厚度。孙志峰等^[103]对微环厚度与声源频率以及水泥声阻抗材料的变化关系进行了模拟分析,并得到了MUIL 仪器实验数据的验证。乔文孝等^[32]综合理论与实验两方面研究了超声脉冲反射技术测量井下套管厚度的方法,通过利用谱陷点作为套管的共振频率,能够相对准确地计算套管的厚度。在超声脉冲回波技术的基础上,杨耿骁等^[104]利用多层介质模型研究了水泥声阻抗、泥浆声阻抗与脉冲回波波形在时域共振波区间内变换后的拟合直线的特征斜率与特征截距的变化规律,形成了同时得到水泥声阻抗与泥浆声阻抗的数据处理流程,并在某油田实测数据中得到了应用。

相比较于 CBL-VDL 与 SBT 技术,超声脉冲回波测井展现出更高的分辨率优势,不仅可识别局部窄槽,而且具备抵抗微环隙干扰及消除快速地层影响的能力,还可对相关的井眼信息进行有效测量。然而由于测量方式以及记录评价方式的原因,该方法仅适用于对第一界面的胶

结质量进行评估,对第二界面的胶结质量评估以及低密度水泥与井液的区分能力有限^[105]。

2.7 套后成像测井

套后成像测井技术^[12]作为固井质量检测领域的新兴力量,是 Schlumberger 公司研发的 Isolation Scanner 仪器的基础。该仪器将超声脉冲回波技术和超声弯曲波检测技术相结合,其原理是通过测量弯曲波的衰减率,并与超声脉冲回波技术测量的声阻抗数据相结合,利用 SLG (solid, liquid or gas) 三相图可以实现对套管后介质固-液-气三相的精确划分。该技术能够以三维方式展示套管后成像数据,具备评估水泥环窜槽情况与封隔能力、分析套管居中程度及水泥厚度、观测套管腐蚀变形和壁厚变化等能力。此外,该技术还可分析水泥与地层界面反射波的衰减率、幅度及速度等获得更多第二界面胶结信息^[33]。

近年来,研究人员对该技术理论进行了不断的探索和研究^[24,38,106-107]。基于反射系数法,陈雪莲等^[79,108]分别对套管井中弯曲泄漏波的波场快照及全波列信号进行了模拟计算,并且对所得的模拟信号进行了详细的分析,但其只能进行定性分析,而利用套管井成像可以对胶结质量进行定量评价。Zeroug 等^[11]对高声阻抗层(套管)后的超声泄漏 Lamb 波成像技术进行了深入研究,对弯曲波的传播机制进行了探讨,通过对实测数据的处理获得了水泥环成像结果,并反演出水泥环厚度。Hamawi 等^[109]结合脉冲回波技术与弯曲波成像技术研究了套后材料的性质,并可视化展示了套管在井中的居中情况,对水泥胶结质量的评估具有重要意义。Morris 等^[110]利用该仪器对现场各种完井环境的响应进行了分析,表明该技术可提高对所有水泥类型的评价,显著降低做出挤压或者不挤压决策的不确定性,此外也能够对水泥-地层界面进行成像,及评估双层套管井的潜在损坏情况。Froelich^[111]针对不同的水泥条件,分别详细计算了弯曲波的相速度及群速度频散曲线,并探讨了胶结良好与不良时弯曲波衰减率随声阻抗变化的规律。He 等^[18]采用有限差分方法对径向多层介质中超声泄漏弯曲模态进行了模拟研究,揭示了弯曲波衰减随窜槽流体层厚度的变化规律,表明通过提取一次和二次弯曲波可对水泥环空两个界面进行综合评价。

套后成像测井仪因环向扫描的方式具备较好的方位识别能力,并且通过测量弯曲波的幅度和衰减率,能够精确区分套管后不同的声阻抗介质。此外,该技术在轻质水泥套管井及第二界面胶结质量评估上也表现出色,有广阔的应用前景。然而,由于商业竞争和保密的需要,国外相关文献对于这一领域的研究细节披露有限,导致国内相关领域面临一定的技术壁垒。

3 声波测井与人工智能融合的固井质量检测方法

传统的固井质量评价方法高度依赖专家知识,需要人工判断,因此存在主观性和不可靠性。即使同一固井质量评价方法在不同专家的解释下,其结果也可能存在较大的差异。近年来,大数据、机器学习以及人工智能技术已在各行各业中展现出了巨大的应用潜力^[112],这些技术也越来越多地被应用于固井质量检测中。人工智能的优势在于提高客观性、高效处理大数据、适应性强、可以减少人工工作负担、提高预测准确性以及获得高质量解释结果等,在固井质量检测中得到广泛应用^[113-115]。机器学习可以根据学习任务的特点分为监督学习、无监督学习和半监督学习。数据分析人员可以根据数据的特性以及待求解任务的需求,选择或者定制最佳的机器学习方法处理数据。

利用大数据分析和机器学习算法,人工智能技术可以实现对固井质量的自动检测和评估,从而可以提高检测效率和准确性,因此提出了“智能固井”的概念。智能固井的提出旨在实现固井质量的准确评价和预测,主要包括固井质量的预测和解释。其中,智能固井质量预测主要以测井资料为基础,借助智能算法对测井信息进行修正处理,从而实现对固井质量的预测评估。智能固井质量解释主要是通过将智能解释引入到传统的解释流程中,协助测井分析人员快速挖掘隐藏的高价值信息。利用大数据工具将数据连接到智能模型中,实现大数据和智能算法的融合,从而实现更准确、高效的固井质量解释。Bergen 等^[116]探讨了在固体地球科学中应用数据驱动的机器学习,对领域知识和学习研究范式进行了比较,并从自动化、正反演模拟、新应用场景和未来方向等方面分析了机器学习在地球科学数据分析中的应用,这项研究为该领域带来了宝贵的启示。

3.1 智能固井质量预测

应用人工智能技术进行固井质量评价时,主要利用从传统测井数据中获取的水泥胶结质量信息作为监督学习的目标,通过将固井质量划分多个不同的类别,如胶结质量好、胶结质量一般、胶结质量差等,从而实现对固井质量的自动化评价^[39,117],如图 6 所示。

Santos 等^[118]利用高斯过程回归算法生成基于 CBL 和 VDL 数据的合成测井曲线,该曲线能够准确地反映水泥的非均质性,实现了良好的水泥胶结质量预测效果。Fang 等^[117]提出一种具有不同大小核的多尺度感知卷积神经网络用于 VDL 测井中不同尺寸信息的提取与融合,并在塔里木油田中进行了训练与验证,结果表明固井质量智能评价模型的识别准确率达到 90%。朱玉玺等^[119]

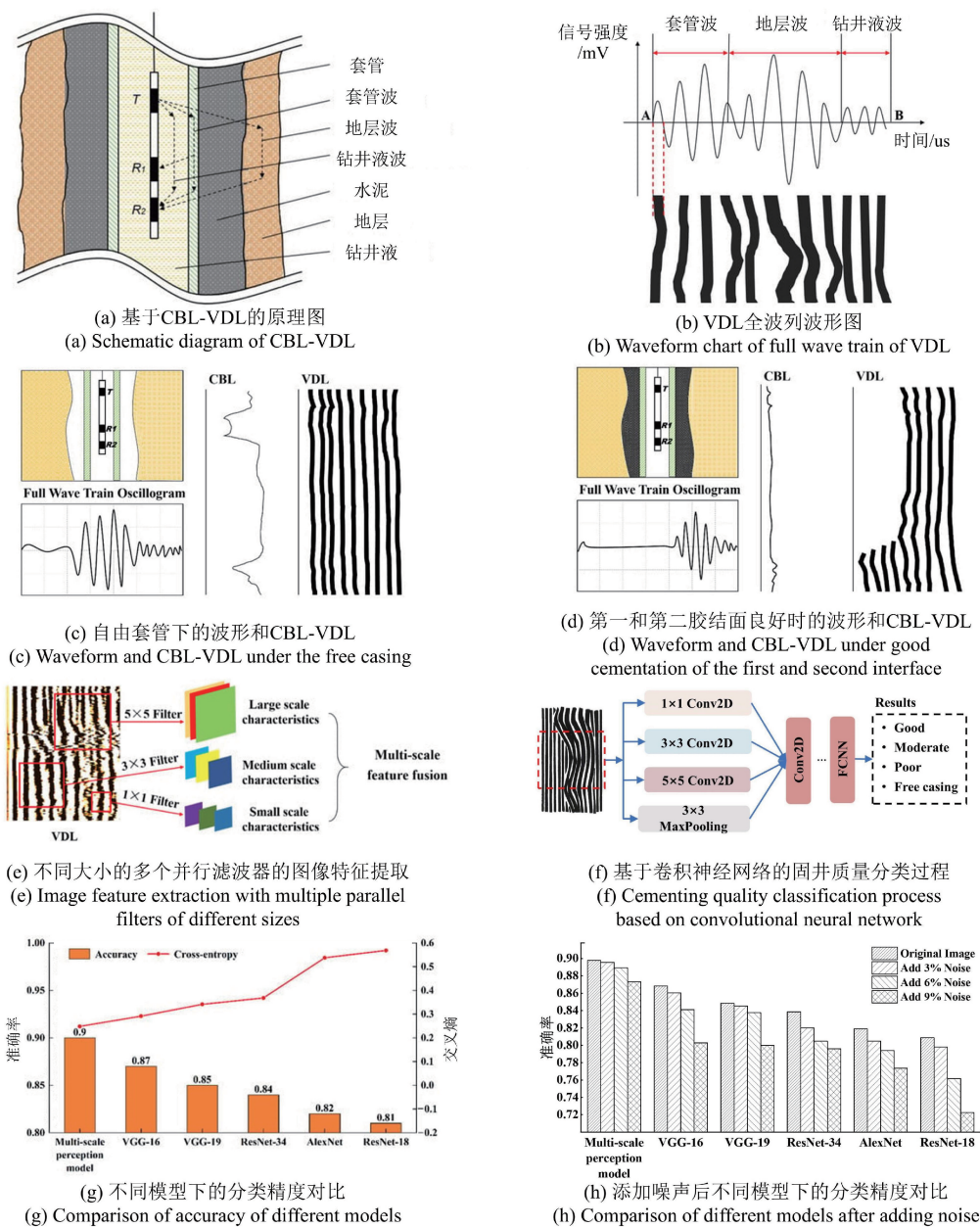


图 6 固井质量预测的多尺度感知卷积网络模型示意图^[117]

Fig. 6 Schematic diagram of multi-scale perceptual convolutional network model for cementing quality prediction^[117]

将 BP 神经网络 (back propagation) 用于固井质量的预测中, 基于该算法构建了固井质量与其影响因素之间的数学模型, 并应用于大庆油田中, 结果表明预测准确率均在 90% 以上。尽管如此, BP 神经网络还是存在一些缺陷, 如学习效率低, 收敛速度慢等。为克服 BP 网络的缺点, 倪红梅等^[120] 引入免疫算法以提高网络的收敛速度和精度, 并将两者相结合用于固井质量预测, 其结果表现出更高的预测准确率与更快的求解速率。此外, 进一步将 BP 神经网络与粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 算法相结合用于固井质量预测, 预测精度较高, 但

是计算时间较长^[121]。

随着人工智能技术的发展, 研究人员逐渐考虑多种影响因素以提高固井质量预测精度, 使其更加符合实际测井工况。艾池等^[122] 利用正交小波神经网络首次建立了基于多因素的固井质量评价模型, 将大庆油田某区块 99 口固井数据作为学习样本, 21 口井作为检验数据, 模型预测值与实际值最大误差仅为 6.87%。Xie 等^[123] 基于 XGboost 算法提出了一种解决油气井固井质量预测问题的物理模型, 该模型充分考虑了影响因素的非线性、时变性和不确定性以及数据集的高纬度、数据缺失、数据不

平衡等特点,可以有效预测影响质量的关键因素,从而提高工艺质量并降低成本。Zhao 等^[124]利用灰色正交小波网络建立了一种固井质量预测的新方法,通过将一些影响固井质量的因素作为模型的输入参数,固井质量的量化值作为输出参数,并将其应用于大庆油田北1区块20口井进行固井质量评价与预测,最大误差结果仅为2.66%。基于西北油田顺北区块历史固井数据,郑双进等^[125]基于固井数据量级及特征建立了基于支持向量回归的固井质量预测模型,结果表明其在预测固井质量表现较好,与实际固井质量的均方根误差和平均相对误差分别是2.318和7.3%。Liu 等^[126]基于 PSO 优化支持向量机(support vector machines, SVM)的参数,建立了基于 PSO 和 SVM 的固井质量智能评价模型,该模型综合了粒子群优化算法的全局优化特点以及支持向量机的求解

速度快、描述非线性关系的特性,并且评价结果与实际情况吻合度达到98%。上述研究结果表明该模型具有收敛速度快以及检测精度高的特点,为快速准确地评价固井质量提供了一种新的方法和途径。以上的研究更多的是对固井质量进行定性分析,利用人工智能技术同样可以对固井质量进行定量评价。如图7所示,Zhang 等^[127-129]利用神经网络分别对单层套管井胶结良好,第一,第二胶结界面均存在微环以及双层套管井的实井尺寸模型进行成像用于定量评价胶结情况,并对成像之后的结果进行优化用以评价固井质量,结果表明预测模型与真实模型非常相似,误差很小。除此之外,Li 等^[130]提出一种使用分层模型评估地层径向横波速度剖面的反演方法,采用卷积神经网络长短期记忆深度学习模型建立频散曲线与速度曲线之间的非线性映射关系,并将其应用于现场数据

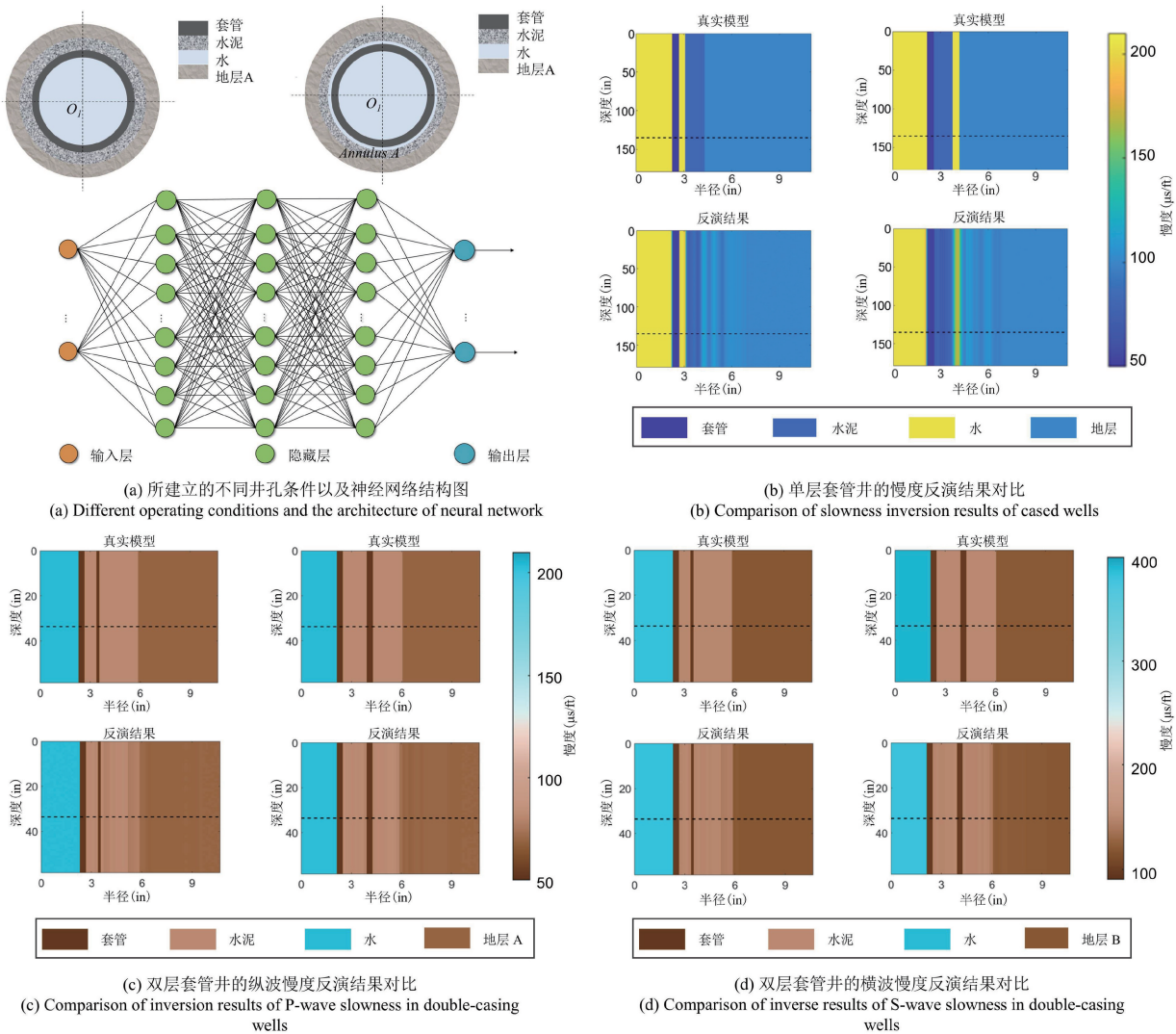


图7 基于神经网络的套管井成像示意图^[127-129]

Fig. 7 Image diagram of cased wells based on neural network^[127-129]

集中证明了该方法在近井弹性成像中的潜力。

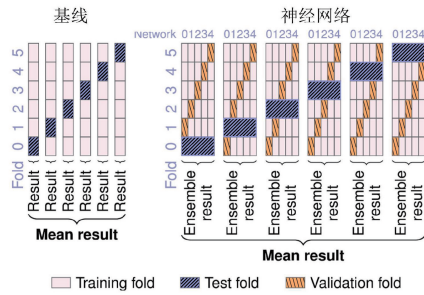
3.2 固井质量智能解释

测井解释方法对于客观、准确评价固井质量十分重要。传统的固井质量评价需要训练有素的专家根据已有经验将测井结果与井相结合对水泥状态进行评估,这会导致固井质量评价解释缓慢,效率低下。除此之外,固井质量也容易受到多种因素的综合作用,其中包括地层条件、流体性能、井眼状况和固井参数等。这些因素之间相互制约又相互关联,建立多因素条件下的固井质量预测解析模型十分具有挑战性,因此需要寻求更为高效以及可靠的解决方法^[131-132]。考虑到测井曲线的智能化解释是固井质量评价和优化的基础,在人工智能领域的启发下,研究人员逐渐将测井曲线等序列数据及对应的解释结果或敏感参数作为机器学习算法模型的输入以训练模型。基于数据驱动的机器学习算法,通过探索数据本身蕴含的更大函数空间,以新的视角挖掘数据内潜在的知识,通过训练建立已有数据和待求参数之间的映射关系,以非线性方式在高维空间中发现变量之间的关系,从而实现测井资料的近实时解释^[39]。近年来,国际石油公司和服务公司也在积极地调整发展战略,在数据科学与人工智能等领域进行深入的探索,例如全球最大的油田技术服务公司, Schlumberger 公司正在致力于开发自身的智能化测井处理解释平台^[133]。

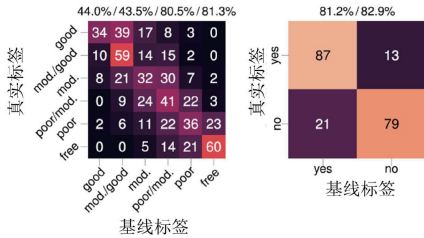
一些学者对测井自动解释进行了研究。Gupta 等^[134]利用深度神经网络开展井眼图像解释工作,从获取的井眼图像中自动检测和分类地质特征,结果表明该方法可以准确检测到多样化和复杂的井眼图像。Kherroubi 等^[135]利用监督学习方法对 60 公里的测井数据集进行训练,通过对比人工对日志数据的解释与参考解释的匹配程度,该网络的解释结果与参考解释的匹配程度更高。Voleti 等^[136]测试了不同机器学习方法,如随机森林分类、神经网络预测方法和智能数据训练方法,结果表明通过使用嵌套模型可以输出固井质量预测结果,实现固井质量的自动解释。Gkortsas 等^[137]构建了支持向量机以及卷积神经网络的算法,对 Isolation Scanner 仪器脉冲回波及弯曲波检测信号进行特征提取与分析,成功实现了单层套管井水泥环健康状况智能化自动评估。Nezhed 等^[138]对用于自动解释的神经网络的性能进行了评估,其输入为采样可变密度日志(variable density log, VDL)的图像,并且使用 Bees algorithm 算法和 fuzzy-CNN 算法替换其学习网络的权重,该研究探讨了每个网络的输出和效率,调查并讨论了训练网络作为自动解释系统时以最佳方式运行时遇到的问题。如图 8 所示, Viggén 等^[139]采用有监督学习的方法训练了深度卷积神经网络,该方法对套管井现场测井数据的解读准确率在某些层面甚至优于经验丰富的地球物理学家,成功实现

了多种界面胶结及水泥环缺陷的有效识别。在随后的工作中,他基于特征工程技术在相同的数据基础上进行了分类,结果表明当使用领域知识从数据中提取特征的分类结果要优于使用神经网络自主学习提取特征的结果,并且展示了一种基于机器学习的辅助水泥测井解释工具,帮助测井解释专家进行水泥完整性评估^[140-141]。但是由于解释数据的可用性问题的,采用无监督学习框架进行水泥完整性测井解释可能是监督学习方法的替代方案。因此在此基础上, Camerini 等^[142]使用了不同的无监督学习方法和输入特征组合以优化模型用于评价水泥环胶结质量,结果表明结合 CBL 和 BI(bond index)参数作为输入可以获得更好的聚类性能,并且 K-means 模型具有最好的评价结果。Bao 等^[143]提出了一种基于深度神经网络的测井解释特征学习方法,该方法使用深度神经网络自动编码分析测井数据的原始特征,准确率高达 99.8%。Imrie^[144]提出了一种水泥智能评价补充技术,利用机器学习和模式识别的方法实现水泥数据分析。该方法使用图像的模式识别进行自动、学习和智能胶结评价,在解释过程中消除了分析人员的偏见,并且可以通过监督训练不断提高解释准确性。De-castro 等^[145]通过使用监督学习模型评估油井套管后介质的偏心率和声阻抗平均值等信息,结果表明在考虑模型成本以及复杂度的情况下,将信号的主成分、K 邻近(k-nearest neighbors, KNN)模型和有效的超参数三者进行优化组合是最佳的方法,精度大于 80%。Reolon 等^[146]通过识别声波和超声测井中的模式,利用基于图的多分辨率聚类算法(multi-resolution graph-based clustering, MRGC)算法通过数十口井学习测井结果与常见固井情况的关系,然后将其集成到贝叶斯框架中,实现了井下水泥胶结相及水力间隔相的分类,通过熵计算提供了分类相概率和不确定性。该方法可以在苛刻的环境以及时间效率高的模板中有效的模拟高技能专家的工作,对结果进行无偏评价,缩短了传统方法的解释时间。Abdollahian 等^[147]利用神经网络和迁移学习对位于挪威和中国的两口不同固井的水泥封隔潜力进行分类,将评估水泥封隔潜力的关键 VDL 时间序列转换为图像格式,然后利用迁移学习增强分类能力。这项研究是最早将迁移学习应用于水泥评价领域的研究之一,强调了迁移学习在水泥评估自动化方面的潜力,可以激发其在行业中的广泛应用。

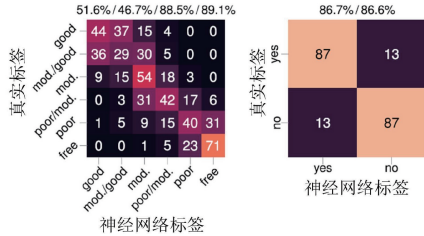
随着人工智能技术及地球物理测井领域的日益发展,测井人员可基于人工智能强大的非线性映射能力,挖掘测井资料中更多的有用信息,进而突破传统知识的局限,获得比现有技术和方法更为准确的结果。人工智能在测井领域中的应用远不止所述内容,但是由于起步较晚,目前尚未形成一套完善且成熟的工作流程。



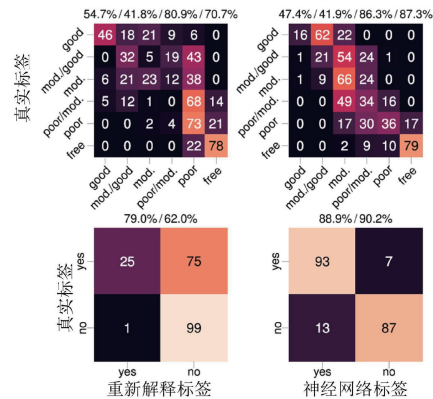
- (a) 基线案例使用6次交叉验证, 神经网络案例使用一种形式的集成交叉验证
(a) For the baseline case, which uses 6-fold cross-validation, and the neural network case, which uses a form of ensemble cross-validation



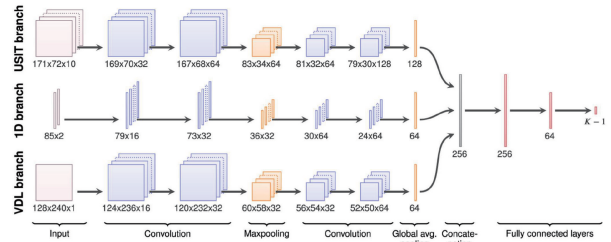
- (c) 基线方法的总体混淆矩阵, 左边为胶结质量结果, 右边为液压隔离结果
(c) Overall confusion matrices for the baseline method, found by averaging the results from all test folds, for bond quality (left) and hydraulic isolation (right)



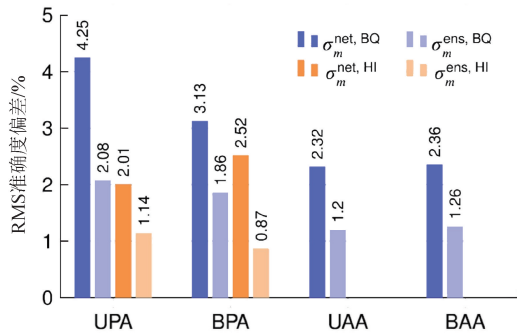
- (d) 神经网络的总体混淆矩阵, 左边胶结质量结果, 右边为液压隔离结果
(d) Overall confusion matrices for the neural networks, found by averaging the results from all test folds, for bond quality (left) and hydraulic isolation (right)



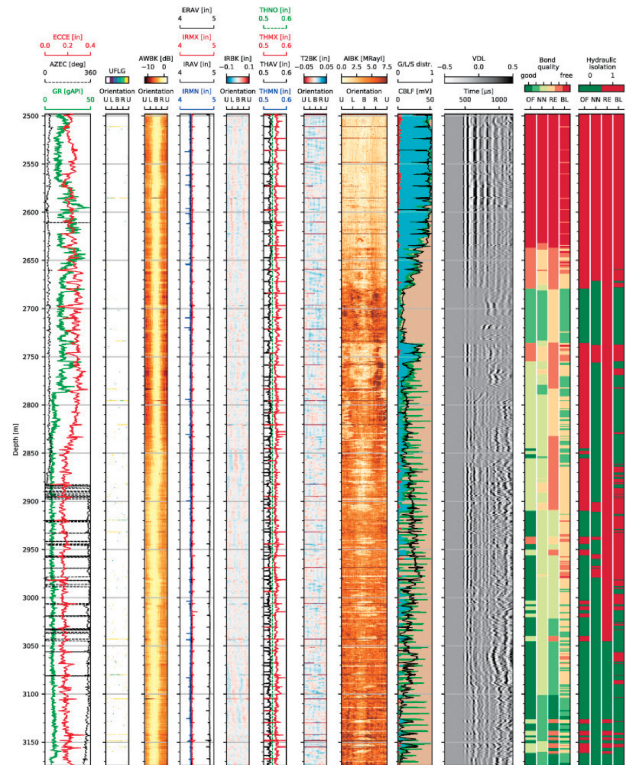
- (e) BQ (上) 和 HI (下) 混淆矩阵, 官方解释与人工重新解释 (左) 和相同数据的神经网络解释 (右) 的比较结果
(e) BQ (upper) and HI (lower) confusion matrices comparing the official interpretation with the manual reinterpretation (left) and the neural network interpretation of the same data (right)



- (b) 神经网络结构
(b) Setup of the neural networks



- (f) 相同条件下训练时的准确度指标变化情况
(f) Variation in accuracy metrics when training under the same conditions



- (g) Volve 15/9-F-11 B测井数据结果, 添加了BQ和HI的四种解释: 官方解释, 神经网络解释, 重新解释以及基线解释
(g) Log plot of data from Volve 15/9-F-11 B, with two extra columns comparing four interpretations of BQ and HI: The official interpretation (OF), the neural network interpretation (NN), the reinterpretation (RE), and the baseline interpretation (BL)

图8 利用监督深度神经网络自动解释套管井水泥评价测井资料^[139]

Fig. 8 Automatic interpretation of cement evaluation logs from cased boreholes by utilizing supervised deep neural networks^[139]

4 固井质量评价的思考与展望

固井质量评价不仅仅是钻完井工程中的环节之一,更是对井下注入液体稳定性、井壁完整性和油气井长期产能维护等方面的综合考量。尽管现代固井质量检测方法能够在一定程度上协助工程师对固井质量进行评估,但存在高度依赖专业技术人员、不能实时监控、数据质量要求高、不具有普适性等不足。现阶段固井质量的智能诊断与评价方法已经逐步走向成熟,但固井质量预测与优化方法在实际应用中仍然比较少,因此,未来的重心在于进一步推动人工智能算法与不同的实际应用场景、专业领域知识以及声波测井工具等之间的深度融合,主要体现在以下几个方面^[148]。

4.1 套管井非轴对称声场理论

水平井和斜井采油已经逐渐成为常规油田采油技术,然而,水平井段常常存在套管偏心、测径仪偏心、不规则井孔和近井水平层等复杂的非轴对称井孔环境。这种非轴对称结构给声场理论研究带来了难度,因为多模态的激发、声波分布轴向非均匀、信噪比降低等因素可能对声波传播产生显著影响。因此,对于非轴对称结构下声

场特性的深入研究是当前声波测井领域的一项关键难题。此外,多层套管井的外层胶结面、水泥环以及过油管固井质量的有效检测也是现阶段声波测井领域的重大挑战。对于多层套管井中各分波的传播机制以及它们与套管、水泥环和地层参数之间的关系,还需要进一步深入探索和研究。

未来的研究应该聚焦于开发更加全面的声波测井技术,深入研究非轴对称井孔环境下的声场理论,以推动声波测井领域在复杂工况下的应用和发展,这些研究将为油气勘探与生产提供更为可靠和精确的技术支持。

4.2 机理与数据融合的建模方法

随着科技的迅猛发展,采用物理模型来解决油气井固井质量问题已成为不可避免的趋势^[149]。油气井固井质量预测主要基于神经网络理论构建相关模型。然而,固井质量受多种特征参数的影响,为了确保数据的准确性,必须实现机理与数据的有机融合,通过优化设计神经网络结构,增强神经网络模型对多元特征的提取能力;融入先验知识构建约束条件,构建机理约束的损失函数,并据此更新物理模型用以提升模型的稳定性和鲁棒性,使其输出结果更贴近实际物理规律,从而提高模型的预测精度^[150],具体如图9所示。

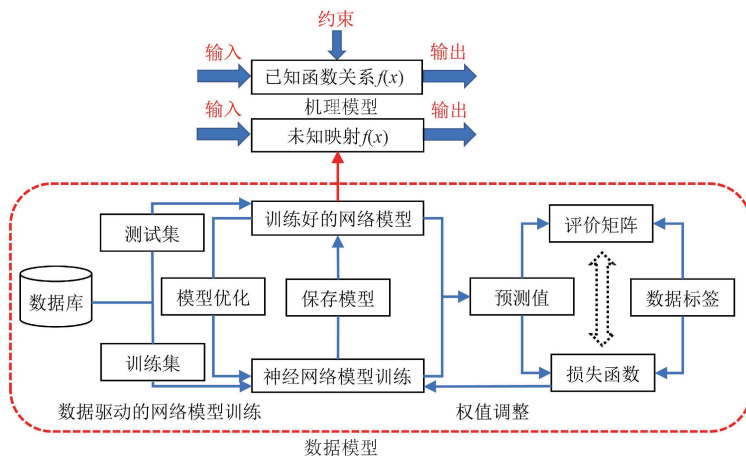


图9 机理模型和数据模型的研究范式^[152]

Fig. 9 Research paradigm of mechanism model and data model^[152]

因此,开发一套基于大数据挖掘和智能计算的固井质量智能分析方法和模型以推动固井工程技术的研发具有重大意义^[151-152]。这种智能分析方法不仅能够全面考虑各种特征参数的影响,还能够通过数据挖掘深入挖掘固井工程中的隐藏规律。智能计算的引入有望为固井质量评估提供更全面、准确的工具,为优化固井工程流程、提高施工效率以及降低潜在风险提供重要支持。这一方法和模型的发展将有助于实现更加智能、高效的固井质量预测与优化,进一步推动油气勘探与生产领域的技术进步。

4.3 小样本学习的模型优化方法

固井质量检测中出现的不安全工况类型繁多,复杂度极高,且数据量相对较少,这限制了传统大数据驱动的机器学习方法在小样本数据的深度挖掘和学习方面的应用。为克服这一挑战,迫切需要建立适用于小样本数据的机器学习方法,以解决数据不均衡和特征向量较少等问题。在这一背景下,利用小样本数据对预训练网络模型进行微调,成为一种优化模型性能的有效方法。通过微调,模型能够更好地适应固井质量检测中的多样化和

高度动态的工况。除此之外,也可通过引入数据增强方法增加固井质量评价不佳的样本数据量和提高特征多样性。通过数据增强,可以有效提升模型的泛化性和鲁棒性,增加模型对于复杂工况的适应能力。这一步骤有助于模型更全面地学习和理解固井质量的多方面特征,从而提高预测精度。

在小样本学习方法中,除了模型微调和数据增强之外,还包括度量学习和元学习等策略^[153-155]。度量学习通过计算不同样本之间的距离,可帮助模型在复杂工况中的高效分类。元学习框架赋予模型从先验任务中自动学习元知识的能力,从而能够在固井质量检测等特定数据空间中实现快速准确的学习。这一综合利用不同小样本学习方法的策略,有望提升固井质量检测模型的性能,使其更适用于实际工程应用。未来的研究还可以探索更先进的小样本学习方法,以不断提高固井质量检测的精度和可靠性。

4.4 智能固井模型的可解释方法

大规模应用智能固井模型的前提是决策的透明程度与结果的可解释性。为了实现这一目标,需要将多种层面的固井领域知识融合到智能模型中,以增强其可信度与稳定性。可解释性方法的应用可以从三个维度进行深入探讨:首先是数据的可解释性。根据测井解释专家的经验知识对测井数据进行处理分析,提取对模型结果影响显著的关键特征参数^[156]。数据的可解释性提高使得模型基于真实、实用的信息做出更可靠的决策。其次是模型的可解释性。即运用注意力机制揭示模型的决策依据和关键特征^[157],从现场测井数据中挖掘新的物理规律。通过关注模型决策中的关键特征,可以更深入地理解模型的内在工作机制,同时发现潜在的领域知识。这种可解释性方法有助于提高智能固井模型的透明度,使其决策更具说服力。第三是结果的可解释性。通过分析评估对模型决策影响显著的参数,为智能测井模型结果提供符合实际测井规律的解释^[158]。这意味着能够清晰地阐明模型决策的原因,使得油气工程人员能够更好地理解模型的输出,并在需要时做出相应的调整。这种结果的可解释性有助于提高智能固井模型的实际应用价值。

随着模型透明度的提高,例如简化为一组规则或描述符等,利用机器学习解决地球科学问题将会得到更大的促进^[159]。这意味着更易于理解和解释的模型将更加被接受,并且在油气勘探与生产领域的实际应用中更具可行性。因此,不仅在模型的设计过程中要注重透明性,还需要将可解释性的方法贯穿于整个智能固井模型的应用与发展过程。

4.5 现代声波测井技术发展

目前,声波测井技术的发展特点重点体现在阵列化

与集成化两个方面。阵列化技术主要体现在增加接收传感器的数量、允许自由调整和控制发射的声波频率以及多元化记录波形等,而集成化则强化了多种探测模式下的组合性,从而在固井质量评价应用中展现出更为协调的性能等。这两方面的发展为声波测井提供了更大的灵活性和综合性能。

随着技术的不断革新,目前的声波测井仪器虽然取得了显著进展,但仍存在一些不足之处。例如,随着声源距离的逐渐增加,仪器的声波信号强度逐渐减小,从而影响测井的灵敏度;并且仍存在声波探头结构不完善、振动模态中对声波探头的调整以及信号采集数字化等问题。除此之外,随着油气勘探逐渐向深层领域开展,高温、高压等井况环境愈加恶劣,以及为提高油气开采效率,大斜度井、水平井也越来越多。因此对测井仪器性能指标及适应能力提出了更高的要求,这要求研究人员需要加大对声波测井仪器的研制力度,优化仪器的性能,解决信号强度衰减的问题,改善仪器结构适应不同的工况,以提高测井成功率和效率,推动测井领域的进一步发展。

5 结 论

声波测井技术以其独特的优势,为准确评估固井质量提供了可靠的技术支持。通过声波测井,可以实现对固井层位的精确识别、水泥胶结质量的定量评价以及潜在隐患的及时发现,从而为优化固井工艺、提高油田生产效率提供重要依据。因此,声波测井技术在保障油田安全、提升生产效益方面发挥着举足轻重的作用,是石油勘探与生产领域不可或缺的重要技术手段。本文概述了井孔声场理论研究现状、声波测井技术以及人工智能方法在地球物理测井领域数据分析中的适用性与应用潜力。井孔声场理论作为固井质量检测与评价的重要前提与基础,目前的研究主要集中在单层套管井,对于多层套管井的声场分布特征以及非轴对称结构的研究仍需进一步深入探索。其次,将人工智能技术应用于固井质量检测可以提高固井质量的稳定性和可靠性,减少人为干预和误判的风险,从而为石油勘探和生产提供更高效、更安全的保障。目前为止,智能固井质量检测技术正处于基础理论研究向实际工程技术应用转化的初级阶段,仍然存在一些需要解决的问题,这包括但不限于算法的鲁棒性、实际工程中的适应性、数据质量和隐私保护等。同时,为了确保智能固井技术在实际应用中的可靠性,还需要加强对数据质量的管理和控制,这便涉及到数据采集的准确性、实时性和完整性,以及对大规模数据的高效处理和分析。此外,提高检测结果的可靠性和精度需要进一步综合考虑地质条件、井孔结构和固井材料等多方面因素,以建立更为精准的预测模型。

因此,未来的研究需要加强对智能固井技术基础理论和关键技术的攻关,加强数据质量的管理和控制,进一步优化算法和模型,以提高其在不同地质条件下的适用性和鲁棒性。除此之外,在推动我国油气智能固井技术的应用方面,除了技术创新之外,还需要加强与工程实践的结合,进行实地验证和案例研究。通过不断完善技术方案,提高实用性和可操作性,将智能固井技术更好地融入油气勘探与生产的各个环节。这些举措必将能够推动智能固井技术的进一步发展,并为油气工业的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 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.
- [2] CHOI Y S, YOUNG D, NEŠIĆ S, et al. Wellbore integrity and corrosion of carbon steel in CO₂ geologic storage environments: A literature review [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 16(S1): S70-S77.
- [3] 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.
- [4] 马东, 师奕兵, 张伟, 等. 随钻数据声波 NC-OFDM 传输及噪声抑制的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1): 8-16.
MA D, SHI Y B, ZHANG W, et al. Research on acoustic NC-OFDM transmission and noise reduction for logging while drilling data [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 38(1): 8-16.
- [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] ZUO C J, QIAO W X, CHE X H, et al. Evaluation of azimuth cement bond quality based on the arcuate phased array acoustic receiver station[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107902.
- [7] ZEROUG S, BOSE S. Recent advances in the use of acoustics across the frequency spectrum in the oil and gas industry [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1949(1): 020014, 1-11.
- [8] 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, 1-5.
- [9] 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 [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1806(1): 030004, 1-8.
- [10] LIU Y, D'ANGELO R M, CHOI G, et al. Understanding acoustic physics in oil and gas wellbores with the presence of ubiquitous geometric eccentricity[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1949(1): 020018.
- [11] ZEROUG S, FROELICH B. Ultrasonic leaky-lamb wave imaging through a highly contrasting layer[C]. *Proceedings of the IEEE Symposium on Ultrasonics*, IEEE, 2003, 1: 794-798.
- [12] VAN KUIJK R, ZEROUG S, FROELICH B, et al. A novel ultrasonic cased-hole imager for enhanced cement evaluation[C]. *Proceedings of the International Petroleum Technology Conference*, 2005, 1-14.
- [13] JI Y J, HE X, CHEN H, et al. Acoustic fields for monopole logging while drilling with an eccentric collar[J]. *Geophysics*, 2021, 86(2): D43-D63.
- [14] HE X, CHEN H, WANG X M. Cross-dipole acoustic logging with eccentric tools in anisotropic formations[C]. *Proceedings of the 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands: EAGE, 2020.
- [15] LI J C, HE X, JIANG C. Joint inversion method of formation shear-wave anisotropy from logging-while-drilling acoustic data[J]. *Applied Geophysics*, 2022, 19(4): 503-512.
- [16] HE X, CHEN H, WANG X M. Numerical simulations of ultrasonic flexural waves in cased wellbores and evaluations of the cement bond quality[C]. *Proceedings of the 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. IEEE, 2015: 1-4.
- [17] TAO B, CHEN D H, HE X, et al. Rough interfaces and ultrasonic imaging logging behind casing[J]. *Applied Geophysics*, 2016, 13: 683-688.
- [18] 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.

- [19] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- TANG X M, ZHENG CH H. Quantitative logging acoustics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [20] 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]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(8): 1057-1064.
- [21] 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.
- [22] RAO B, SU X D, LI S Q, et al. Effects of collar eccentricity on azimuthal response characteristics for acoustic reflection measurement while drilling [J]. Geophysics, 2023, 88(5): D325-D337.
- [23] 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.
- [24] LI S Q, CHEN X L, TANG X M. Directed radiation of an ultra-sonic transducer for casing-cement evaluation: Modeling and experiment[C]. Proceedings of the 21st International Congress on Sound and Vibration, Beijing, China: 2014.
- [25] XU F L, HU H S. A semi-analytical approach to calculate the reflected wave of an eccentric source in a borehole reflected wave of an eccentric source [J]. Geophysics, 2019, 84(1): D1-D9.
- [26] ZHANG C, CHEN D, HU H S, et al. A method for transforming aliased modes to true modes based on density clustering and Riemann sheets selection in acoustic logging dispersion inversion [J]. Geophysics, 2024, 89(1): D15-D29.
- [27] XU F L, HU H S. Inversion of the shear velocity of the cement in cased borehole through ultrasonic flexural waves[J]. Geophysics, 2017, 82(2): D57-D68.
- [28] XU J Q, HU H S, LIU Q H. Combination of FDTD with analytical methods for simulating elastic scattering of 3-D objects outside a fluid-filled borehole [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(6): 5325-5334.
- [29] GAO Y, HU H S, XU J Q. Elastic reverse time migration method for single-well imaging and elimination of azimuthal ambiguity with a combined receiver system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 5921215.
- [30] 王瑞甲, 乔文孝, 卢俊强. 圆弧片状声源向地层中辐射声场的有限差分模拟 [J]. 声学学报, 2017, 42(1): 76-84.
- WANG R J, QIAO W X, LU J Q. A finite difference modeling of acoustic wave field in the near-borehole formation excited by an arcuate source [J]. Acta Acustica, 2017, 42(1): 76-84.
- [31] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花, 等. 声波测井技术研究进展[J]. 测井技术, 2011, 35(1): 14-19.
- QIAO W X, JU X D, CHE X H, et al. Progress in acoustic well logging technology [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(1): 14-19.
- [32] 乔文孝, 车小花, 杜光升. 井下套管厚度评价的方法研究[J]. 测井技术, 2000, 24(6): 403-406.
- QIAO W X, CHE X H, DU G SH. On the measurement of thickness of downhole casing [J]. Well Logging Technology, 2000, 24(6): 403-406.
- [33] 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.
- [34] WANG H, TOKSÖZ M N, FEHLER M C. Wave propagation in a cased borehole and cement bond evaluation [J]. Borehole Acoustic Logging-Theory and Methods, 2020: 83-128.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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, 2018, 212(2): 1412-1428.
- [38] 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 H, TAO G, SHANG X F, et al. Review and study on acoustic/ultrasonic methods for low-density cement bond logging [J]. Well Logging Technology, 2014, 38(2): 165-173.
- [39] 王华, 张雨顺. 测井资料人工智能处理解释的现状与展望[J]. 测井技术, 2021, 45(4): 345-356.
- WANG H, ZHANG Y SH. Research status and prospect of artificial intelligence in logging data processing and interpretation [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(4): 345-356.
- [40] 董庆德, 王克协, 许吉庆. 柱状多层准弹性介质中声压波形的数值计算与分析—声法测井理论研究(II)[J]. 地球物理学报, 1985, 28(2): 208-217.
- DONG Q D, WANG K X, XU J Q. Numerical evaluation and analysis of the acoustic pressure waveform in cylindrical multilayer quasi elastic media—A theoretical study of acoustic logging method (II) [J]. Acta Geophysica Sinica, 1985, 28(2): 208-217.
- [41] THOMSON W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium[J]. Journal of Applied Physics, 1950, 21(2): 89-93.
- [42] HASKELL N A. The dispersion of surface waves on multilayered media [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1953, 43(1): 17-34.
- [43] SCHOENBERG M, MARZETTA T, ARON J, et al. Space-time dependence of acoustic waves in a borehole[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1981, 70(5): 1496-1507.
- [44] CHANG S K, EVERHART A H. A study of sonic logging in a cased borehole[J]. Journal of Petroleum Technology, 1983, 35(9): 1745-1750.
- [45] 李整林, 杜光升, 王耀俊. 套管井体胶结状态对井孔中声传播的影响[J]. 声学学报, 2001, 26(1): 6-12.
- LI ZH L, DU G SH, WANG Y J. The effects of bonding conditions on the propagation of acoustic wave along a cased borehole[J]. Acta Acustica, 2001, 26(1): 6-12.
- [46] TUBMAN K M. Full waveform acoustic logs in radially layered boreholes[D]. America: Massachusetts Institute of Technology, 1984.
- [47] TUBMAN K M, CHENG C H, TOKSÖZ M N. Synthetic full waveform acoustic logs in cased boreholes [J]. Geophysics, 1984, 49(7): 1051-1059.
- [48] 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.
- [49] SCHMITT D P, BOUCHON M. Full-wave acoustic logging: Synthetic microseismograms and frequency-wavenumber analysis [J]. Geophysics, 1985, 50(11): 1756-1778.
- [50] LIU P, WU H L, YANG S B, et al. A dual-frequency acoustic measurement method for detecting fluid-filled channels at two boundaries in cased holes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208(Part A): 109295,2-12.
- [51] 张海澜, 王秀明, 张碧星. 井孔的声场和波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- ZHANG H L, WANG X M, ZHANG B X. Acoustic fields and waves of boreholes [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [52] 吴海燕, 沈建国, 任月娥, 等. 套管井阵列声波测井技术研究及应用[J]. 测井技术, 2007, 31(2): 128-134.
- WU H Y, SHEN J G, REN Y E, et al. A research on array sonic logging technology in cased hole and its application [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(2): 128-134.
- [53] 唐军, 章成广, 张碧星, 等. 基于声波-变密度测井的固井质量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 469-475.
- 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): 469-475.
- [54] 周吟秋, 王秀明, 陈德华. 套管井声波测井中首波幅度衰减研究[J]. 测井技术, 2007, 31(4): 321-326.
- ZHOU Y Q, WANG X M, CHEN D H. Study of numerical simulation on amplitude attenuation of first arrivals in cased-hole acoustic logging[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(4): 321-326.
- [55] 林伟军, 张澄宇, 张海澜, 等. 带扇形窄槽的套管井声场[J]. 声学学报, 2005, 30(1): 9-14.
- LIN W J, ZHANG CH Y, ZHANG H L, et al. Acoustic field in a cased well with a sectorial crossing channel[J]. Acta Acustica, 2005, 30(1): 9-14.
- [56] 林伟军, 张澄宇, 张海澜, 等. 非轴对称结构井孔声场的实验研究[J]. 声学学报, 2004, 29(4): 319-322.
- LIN W J, ZHANG CH Y, ZHANG H L, et al. The experimental study of acoustic field in an axial

- asymmetric borehole[J]. *Acta Acustica*, 2004, 29(4): 319-322.
- [57] SONG R L, DONG H F, BAO X S. Numerical study of the effect of cement defects on flexural wave logging[J]. *Geophysics*, 2019, 84(4): E171-E177.
- [58] 赵琪琪, 杨书博, 车小花, 等. 偏心情况下方位声波固井质量评价测井数值模拟研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(28): 12291-12297.
- ZHAO Q Q, YANG SH B, CHE X H, et al. Numerical simulation of azimuthally acoustic cementing quality evaluation logging under eccentric conditions [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(28): 12291-12297.
- [59] 赵琪琪, 杨书博, 车小花, 等. 基于方位声波固井质量检测仪的Ⅱ界面窜槽响应特性分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(31): 13699-13706.
- ZHAO Q Q, YANG SH B, CHE X H, et al. Characteristic analysis of channeling response at interface Ⅱ based on azimuthally acoustic bond tool[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(31): 13699-13706.
- [60] YANG M E, 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.
- [61] 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.
- [62] 沈建国, 陈宇, 卢克安. 圆管内的偏心声源在圆管内外激发的声场[J]. *声学学报*, 2003, 28(5): 475-480.
- SHEN J G, CHEN Y, LU K AN. The acoustic field of pipe generated by eccentric source in the liquid[J]. *Acta Acustica*, 2003, 28(5): 475-480.
- [63] 沈建国, 陈宇, 张海澜. 铝筒内贴壁声源激发的声场的实验研究[J]. *声学学报*, 2002, 27(3): 229-233.
- SHEN J G, CHEN Y, ZHANG H L. The experimental study on the acoustic field generated by a source on the wall of the aluminium tube[J]. *Acta Acustica*, 2002, 27(3): 229-233.
- [64] 张秀梅, 林伟军, 王秀明, 等. 套管井中偏心对声场的影响分析[J]. *应用声学*, 2014, 33(1): 1-8.
- ZHANG X M, LIN W J, WANG X M, et al. Effects of the eccentricization on acoustic wave propagation in cased boreholes [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2014, 33(1): 1-8.
- [65] SONG R L, LIU J S, LYU X M, et al. Effects of tool eccentricization on cement-bond-log measurements: Numerical and experimental results [J]. *Geophysics*, 2013, 78(4): D181-D191.
- [66] 卫建清, 何晓, 李希强, 等. 含偏心点声源的随钻测井声场模拟和地层各向异性反演研究[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(4): 1554-1564.
- WEI J Q, HE X, LI X Q, et al. Simulation of acoustic LWD with an eccentric source and inversion of formation anisotropy[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(4): 1554-1564.
- [67] 饶博, 苏远大, 李盛清, 等. 钻铤偏心对随钻四极子横波测井影响: 理论与实例分析[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(1): 111-121.
- RAO B, SU Y D, LI SH Q, et al. Influence of drill collar eccentricity on quadrupole shear-wave logging while drilling: Theory and field case[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(1): 111-121.
- [68] XIE D Y, QIAN J, YANG W. A comparison research into characteristic waves of the well hole Ⅱ interface cement part missing sound field[C]. *Advanced Science and Industry Research Center*, 2018 2nd International Conference on Modeling, Simulation and Optimization Technologies and Applications (MSOTA 2018), DEStech Publications, 2018: 400-406.
- [69] 黄文新, 章成广, 胡文祥, 等. 双层套管井中声波波形分析[J]. *测井技术*, 1993, 17(3): 190-196.
- HUANG W X, ZHANG CH G, HU W X, et al. Analysis of acoustic waveforms from bi-layered cased hole [J]. *Well Logging Technology*, 1993, 17(3): 190-196.
- [70] 李维彦, 章成广. 固井质量测井评价[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- LI W Y, ZHANG CH G. Log evaluation for cementing quality[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [71] VIGGEN E M, JOHANSEN T F, MERCIU I A. Analysis of outer-casing echoes in simulations of ultrasonic pulse-echo through-tubing logging [J]. *Geophysics*, 2016, 81(6): E679-E685.
- [72] VIGGEN E M, JOHANSEN T F, MERCIU I A. Simulation and modeling of ultrasonic pitch-catch through-tubing logging[J]. *Geophysics*, 2016, 81(4): D383-D393.

- [73] DE ALMEIDA R V, CORREIA T D M, HIDALGO J A S, et al. Analytical and numerical modeling of through-tubing acoustic logging [C]. Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2020.
- [74] RAO B, SU Y D, LI S Q, et al. Response characteristics of multipole sonic log in double casing strings [C]. 49th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. American Society of Mechanical Engineers, 2023, 86595: V001T07A006.
- [75] 陈雪莲, 江灿, 庄春喜, 等. 双层套管井中单极子声波测井的响应特征 [J]. 地球物理学报, 2020, 63(11): 4268-4276.
- CHEN X L, JIANG C, ZHUANG CH X, et al. Response characteristics of monopole sonic log in double casing strings [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(11): 4268-4276.
- [76] 陈雪莲, 唐晓明. 偶极子声波测井在双层套管井中激发的声场特征 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(1): 363-371.
- CHEN X L, TANG X M. The wavefield characteristics of dipole acoustic logging in a double-casing well [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(1): 363-371.
- [77] 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.
- [78] 陈雪莲, 唐晓明, 张聪慧, 等. 套管井贴壁声源激发的非轴对称声场的有限差分模拟及结果分析 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(1): 318-326.
- CHEN X L, TANG X M, ZHANG C H, et al. Finite-difference numerical simulation and analysis on nonaxisymmetric acoustic fields in cased borehole [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1): 318-326.
- [79] 陈雪莲, 李建赛, 唐晓明, 等. 套管井中泄漏弯曲型 Lamb 波声场的模拟与分析 [J]. 声学技术, 2016, 35(1): 38-43.
- CHEN X L, LI J S, TANG X M, et al. Simulation and analysis of leaky flexural-Lamb wavefield in a cased wellbore [J]. Technical Acoustics, 2016, 35(1): 38-43.
- [80] KYI K K, WANG A G J. Issues with cement bond and cement evaluation logs-case studies from offshore Malaysia [C]. Proceeding at the International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar: 2015: D041S038R004.
- [81] LI J, LIU Z D. Research on improvement measures of cementing acoustic amplitude logging [J]. Academic Journal of Science and Technology, 2023, 5(2): 4-9.
- [82] 王梅英, 刘继生, 吕秀梅, 等. 固井质量综合评价技术与声波变密度测井技术对比分析 [J]. 测井技术, 2011, 35(2): 176-179.
- WANG M Y, LIU J SH, LYU X M, et al. Contrastive analysis between MAK&SGDT and SBB cementation quality evaluation [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(2): 176-179.
- [83] WANG C R. Application of acoustic variable density logging technology in petroleum energy development [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 770(1): 012029.
- [84] 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.
- SUN J M, SU Y D, LI ZH CH, et al. On quantitative evaluation of second interface cementing quality [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(3): 199-202.
- [85] 苏远大, 孙建孟, 施振飞, 等. 地层声速对固井质量评价的影响及消除方法 [J]. 石油钻探技术, 2005, 33(4): 39-41.
- SU Y D, SUN J M, SHI ZH F, et al. Effects of formation velocity on cementing evaluation and its elimination [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(4): 39-41.
- [86] 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, 30(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 China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(4): 38-41.
- [87] 尚如良, 孟庆国, 冯红霞, 等. 固井质量评价方法综述 [J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(18): 57-58.
- SHANG R L, MENG Q G, FENG H X, et al. Review of cementing quality evaluation methods [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(18): 57-58.
- [88] 王爱民. 扇区水泥胶结测井仪及在套管井的应用 [J]. 测井技术, 2003, 27(Z1): 56-58.

- WANG AI M. Sector cement bond tool and its applications in the cased holes [J]. Well Logging Technology, 2003, 27(Z1): 56-58.
- [89] SONG R L, LIU J X, HOU C H, et al. Numerical simulation of sector bond log and improved cement bond image[J]. Geophysics, 2012, 77(4): D95-D104.
- [90] 何峰江, 陶果, 王锡莉. 贴井壁声波测井仪的有限差分模拟研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 923-928.
- HE F J, TAO G, WANG X L. Finite difference modeling of the acoustic field by side wall logging devices [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 923-928.
- [91] 张秀梅, 孙建孟, 陈雪莲. 扇区水泥胶结测井(SBT)响应的数值模拟[J]. 测井技术, 2004, 28(6): 515-517.
- ZHANG X M, SUN J M, CHEN X L. Numerical simulation of the logging response of segmented bond tool (SBT) [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(6): 515-517.
- [92] 宋若龙. 非轴对称套管井声场并行计算及声波固井质量评价理论与方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- SONG R L. Parallel computation of acoustic field in non-axisymmetric cased holes & theory and method studies of acoustic cementing quality evaluation [D]. Jinlin: Jilin University, 2008.
- [93] 宋若龙, 刘金霞, 姚桂锦, 等. 非轴对称套管井中声场的并行有限差分模拟[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2767-2775.
- SONG R L, LIU J X, YAO G J, et al. Parallel finite difference modeling of acoustic fields in nonaxisymmetric cased hole [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11): 2767-2775.
- [94] 李佩笑, 林伟军, 张秀梅. 分扇区水泥胶结测井胶结质量的定量评价研究[J]. 应用声学, 2016, 35(1): 27-35.
- LI P X, LIN W J, ZHANG X M. Research on quantitative evaluation of cementing quality using the segmented bond logging technique [J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(1): 27-35.
- [95] SONG R L, HE L. Cement bond evaluation method in horizontal wells using segmented bond tool [J]. Geophysical Journal International, 2018, 213(3): 1492-1502.
- [96] 何建新. 俄罗斯固井质量测井仪器刻度井群实验数据分析[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 120-124.
- HE J X. The data analysis of calibration well group experiment in the Russian equipment [J]. Well Logging Technology, 2010, 34(2): 120-124.
- [97] 唐军, 章成广. MAK-II 声波测井资料在定量评价固井质量中的应用[J]. 测井技术, 2011, 35(3): 266-269.
- TANG J, ZHANG CH G. Application of MAK-II log data to cement bond quantitative evaluation [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(3): 266-269.
- [98] 刘新锋. 声波测井在测井中的应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(7): 34-35.
- LIU X F. Research on the application of acoustic logging in logging [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(7): 34-35.
- [99] 韩守志. 声波测井技术特点及应用[J]. 石化技术, 2020, 27(5): 77-78.
- HAN SH ZH. Characteristics and application of acoustic logging technology [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(5): 77-78.
- [100] 余厚全, 屈万里, 黄载祿. 利用超声脉冲回波检测套管腐蚀和缺陷[J]. 测井技术, 1997, 21(2): 129-132, 147.
- YU H Q, QU W L, HUANG Z L. A scheme of detecting casing corrosion and defect using ultrasonic pulse echoes [J]. Well Logging Technology, 1997, 21(2): 129-132, 147.
- [101] 余厚全, 屈万里, 黄载祿. 套管井中仪器偏心对超声回波的影响[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(1): 40-43.
- YU H Q, QU W L, HUANG Z L. The influence of tool eccentricity in a casing well on ultrasonic echo [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1997, 25(1): 40-43.
- [102] 丁燕, 乔文孝, 车小花. 固井水泥声阻抗对垂直入射超声脉冲反射波的影响[J]. 测井技术, 2011, 35(1): 55-57.
- DING Y, QIAO W X, CHE X H. The influence of cementing acoustic impedance on the ultrasonic pulse reflection waves [J]. Well Logging Technology, 2011, 35(1): 55-57.
- [103] 孙志峰, 王春艳, 罗瑜林, 等. 微环厚度对垂直入射超声脉冲反射波影响分析[J]. 测井技术, 2016, 40(3): 270-275.
- SUN ZH F, WANG CH Y, LUO Y L, et al. On effect of microannulus thickness on ultrasonic pulse reflection waves [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(3): 270-275.

- [104] 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.
- [105] 丁燕, 乔文孝, 车小花, 等. 固井水泥声阻抗对斜入射超声脉冲波的影响[J]. 测井技术, 2012, 36(5): 460-464.
- DING Y, QIAO W X, CHE X H, et al. Influence of cementing acoustic impedance on oblique incident ultrasonic pulse waves[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(5): 460-464.
- [106] TIAN J, WANG Q H, GUO Q B, et al. Casing integrity evaluation in deep well with extreme heavy mud in Tarim Basin[C]. Proceedings of the SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria: Society of Petroleum Engineers, 2011, 1-9.
- [107] HUSSAIN A, KHAN M R, GILANI R H, et al. Flexural attenuation with SLG (solid liquid gas) mapping-a new technology to evaluate light and contaminated cements first case study in Pakistan[C]. SPE/PAPG Pakistan section Annual Technical Conference. SPE, 2015: SPE-181119-MS.
- [108] 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 X L, LI J S, TANG X M, et al. The propagation characteristics of leaky flexural-Lamb waves in casing[J]. Acta Acustica, 2016, 41(3): 296-304.
- [109] HAMAWI M, MASOOD R, AL-KINDI Z, et al. A pioneering ultrasonic technique that enhances light eight cement evaluation and allows cement sheath thickness imaging [C]. SPWLA Middle East Regional Symposium. SPWLA, 2007: SPWLA-MERS-2007-II.
- [110] MORRIS C W, 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.
- [111] FROELICH B. Multimode evaluation of cement behind steel pipe[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 123(5): 3648-3652.
- [112] 吴天舒, 陈蜀宇, 吴朋. 基于应力波分析的状态监控与故障预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3061-3070.
- WU T SH, CHEN SH Y, WU P. Condition monitoring and fault prediction based on stress wave analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 3061-3070.
- [113] LIANG L, LEI T. Machine-learning-enabled automatic sonic shear processing [J]. Petrophysics, 2021, 62(3): 282-295.
- [114] CHEN X H, XIA J H, PANG J Y. Deep learning inversion of Rayleigh-wave dispersion curves with geological constraints for near-surface investigations[J]. Geophysical Journal International, 2022, 231(1): 1-14.
- [115] 张志厚, 石泽玉, 马宁, 等. 瑞雷波频散曲线的深度学习反演方法[J]. 地球物理学报, 2022, 65(6): 2244-2259.
- ZHANG ZH H, SHI Z Y, MA N, et al. Deep learning inversion of Rayleigh dispersion curves[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(6): 2244-2259.
- [116] BERGEN K J, JOHNSON P A, DE HOOP M V, et al. Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience[J]. Science, 2019, 363(6433): 1299.
- [117] 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.
- [118] SANTOS L, TALEGHANI A D. Machine learning framework to generate synthetic cement evaluation logs for wellbore integrity analysis [C]. ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA, 2021: ARMA-2021-1769.
- [119] 朱玉玺, 倪红梅, 王瑞仙, 等. 人工神经网络在固井质量预测中的应用[J]. 大庆石油学院学报, 2002, 26(2): 52-55.
- ZHU Y X, NI H M, WANG R X, et al. Application of artificial neural network to forecasting cementing quality[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(2): 52-55.
- [120] 倪红梅, 王维刚. 免疫神经网络在固井质量预测中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2009, 26(7): 267-269, 324.
- NI H M, WANG CH G. Application of immune neural network in cementing quality prediction[J]. Computer Simulation, 2009, 26(7): 267-269, 324.
- [121] NI H M, YI ZH AN, LI P CH, et al. Application of BP

- network based on PSO algorithm in cementing quality prediction[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 926: 4433-4436.
- [122] 艾池, 卜志丹, 赵万春, 等. 用正交尺度小波网络方法预测固井质量[J]. *石油钻探技术*, 2008, 36(6): 56-58.
- AI CH, BU ZH D, ZHAO W CH, et al. Cementation quality prediction using wavelet neural network based on orthogonal scaling function [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(6): 56-58.
- [123] XIE Y CH, ZHANG J F, WANG J CH, et al. A physical model for calculating cementing quality based on the XGboost algorithm[J]. *Open Physics*, 2022, 20(1): 224-231.
- [124] ZHAO W CH, WANG T T, AI CH, et al. The study and application of gray-orthogonal wavelet network forecasting mode on cementing quality[C]. *Proceedings of the 2010 International Conference on E-Business and E-Government*, Guangzhou, China: IEEE, 2010: 5327-5330.
- [125] 郑双进, 程霖, 龙震宇, 等. 基于 GA-SVR 算法的顺北区块固井质量预测[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(4): 467-473.
- ZHENG SH J, CHENG L, LONG ZH Y, et al. Predicting the cementing quality in Shunbei block based on GA-SVR algorithm[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 467-473.
- [126] LIU J CH, WANG H T, ZENG SH P, et al. Intelligent evaluation model for cementing quality based on PSO-SVM and application [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 71: 4293-4299.
- [127] ZHANG S Q, ZENG Z 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.
- [128] ZHANG S Q, ZENG ZH M, WANG X C, et al. Structures inversion and optimization in cased-wells based on deep learning[C]. *Proceedings of the 2022 49th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, San Diego, California: 2022.
- [129] 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.
- [130] LI J CH, HE X, CHEN H, et al. Inversion of radial shear velocity profile for acoustic logging using CNN-LSTM network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 1-10.
- [131] WILSON M A. Cementing horizontal wells in preparation for stimulation[J]. *World Oil*, 1989, 209(4): 718-721.
- [132] WANG T T, ZHAO W CH, SUN CH Y, et al. The study and application of Gray-Orthogonal wavelet network forecasting mode on cementing quality [J]. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 2014, 7(2): 99-101.
- [133] LIANG L, LEI T, DONALD A, et al. Physics-driven machine-learning-based borehole sonic interpretation in the presence of casing and drill pipe[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2021, 24(2): 310-324.
- [134] GUPTA K D, VALLEGA V, MANIAR H, et al. A deep-learning approach for borehole image interpretation[C]. *Proceedings of the SPWLA 60th Annual Logging Symposium*, The Woodlands, Texas, USA: SPWLA, 2019:D043S005R001.
- [135] KHERROUBI J K, LABORDE F, LEMARENKO M. Automation of well integrity operations: Machine learning framework for diagnosis of ultrasonic waveforms[C]. *Proceedings of the SEG International Exposition and Annual Meeting*, Virtual: SEG, 2020:D021S009R006.
- [136] VOLETI D K, REDDICHARLA N, GUNTUPALLI S, et al. Smart way for consistent cement bond evaluation and reducing human bias using machine learning[C]. *Proceedings of the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, UAE: Society of Petroleum Engineers, 2020:1-17.
- [137] GKORTSAS V M, BOSE S, ZEROUG S. Machine learning for the automated detection of diagnosis-revealing features on leaky flexural wave imager data[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2102(1): 050008,1-10.
- [138] NEZHAD M S, AKBARIZADEH G, KAVIAN Y S, et al. Automatic interpretation of oil and gas well cement evaluation logs using fuzzy convolutional neural networks [J]. *SPE Drilling & Completion*, 2023, 38(3): 535-545.
- [139] VIGGEN E M, MERCIU I A, LØVSTAKKEN L, et al. Automatic interpretation of cement evaluation logs from cased boreholes using supervised deep neural networks[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 195: 107539.

- [140] VIGGEN E M, LØVSTAKKEN L, MÅSØY S E, et al. Better automatic interpretation of cement evaluation logs through feature engineering[J]. *SPE Journal*, 2021, 26(5): 2894-2913.
- [141] VIGGEN E M, SINGSTAD B J, TIME E, et al. Assisted cement log interpretation using machine learning[J]. *SPE Drilling & Completion*, 2023, 38(2): 220-234.
- [142] CAMERINI I G, FERREIRA G R B, DE SOUZA L P B, et al. Machine learning assisted cement integrity evaluation during plugging and abandonment operations[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, 2023: D041S127R001.
- [143] BAO L Y, CAO X J, YU CH J, et al. A deep neural network based feature learning method for well log interpretation[C]. International Conference on Internet of Things as a Service. Cham: Springer International Publishing, 2021: 543-556.
- [144] IMRIE A. The application of pattern recognition and machine learning to determine cement channeling & bond quality from azimuthal cement bond logs[C]. Proceedings of the SPWLA 62nd Annual Logging Symposium, Virtual: SPWLA, 2021: D031S022R001.
- [145] DE CASTRO RIBEIRO M G, FERREIRA G R B, PARENTE L E R, et al. Machine-learning based evaluation of eccentricity and acoustical impedance in oil well using VDL data[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2023, 231: 212288.
- [146] REOLON D, MAGGIO F D, MORIGGI S, et al. Unlocking data analytics for the automatic evaluation of cement bond scenarios[C]. Proceedings of the SPWLA 61st Annual Logging Symposium, Virtual Online Webinar: SPWLA, 2020:1-8.
- [147] ABDOLLAHIAN A, WANG H, LIU H, et al. Transfer learning for acoustic cement bond evaluation: An image classification approach using acoustic variable density log[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2024, 239: 212960.
- [148] 李根生, 宋先知, 祝兆鹏, 等. 智能钻完井技术研究进展与前景展望[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4): 35-47.
- LI G SH, SONG X ZH, ZHU ZH P, et al. Research progress and the prospect of intelligent drilling and completion technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 35-47.
- [149] SOHAIL M, ALI U, ZOHRA F T, et al. Utilization of updated version of heat flux model for the radiative flow of a non-Newtonian material under Joule heating: OHAM application[J]. *Open Physics*, 2021, 19(1): 100-110.
- [150] RAI R, SAHU C K. Driven by data or derived through physics? A review of hybrid physics guided machine learning techniques with cyber-physical system (CPS) focus[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 71050-71073.
- [151] ELMABOUD Y A, ABDELSALAM S I. DC/AC magnetohydrodynamic-micropump of a generalized Burger's fluid in an annulus[J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(11): 115209.
- [152] 肖立志. 机器学习数据驱动与机理模型融合及可解释性问题[J]. *石油物探*, 2022, 61(2): 205-212.
- XIAO L ZH. The fusion of data-driven machine learning with mechanism models and interpretability issues[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(2): 205-212.
- [153] CHEN Y T, ZHANG D X. Physics-constrained deep learning of geomechanical logs[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(8): 5932-5943.
- [154] 王艳新, 闫静, 王建华, 等. 基于特征融合度量学习的高压断路器机械故障诊断[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(9): 98-105.
- WANG Y X, YAN J, WANG J H, et al. Mechanical fault diagnosis for high voltage circuit breaker via a novel feature fusion metric learning[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(9): 98-105.
- [155] 赵宗扬, 康杰虎, 吴斌, 等. 基于FRL-Net的高鲁棒性多尺度小样本轨道入侵异物检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(1): 239-249.
- ZHAO Z Y, KANG J H, WU B, et al. Research on the high robust multi-scale few-shot railway intrusion obstacles detection method based on FRL-Net[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(1): 239-249.
- [156] GILPIN L H, BAU D, YUAN B Z, et al. Explaining explanations: An overview of interpretability of machine learning[C]. Proceedings of the 2018 IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Turin, Italy: IEEE, 2018: 80-89.
- [157] CHOI E, BAHADORI M T, KULAS J A, et al. RETAIN: An interpretable predictive model for healthcare using reverse time attention mechanism[C].

Proceedings of the 30th Conference on Neural Information Processing Systems, 2016: 3512-3520.

- [158] KUMARAKULASINGHE N B, BLOMBERG T, LIU J T, et al. Evaluating local interpretable model-agnostic explanations on clinical machine learning classification models [C]. Proceedings of the 2020 IEEE 33rd International Symposium on Computer-Based Medical Systems (CBMS), Rochester, MN: IEEE, 2020: 7-12.
- [159] REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science [J]. Nature, 2019, 566(7743): 195-204.

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, and received her M. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2020. She is currently a Ph. D. 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: zhzmeng@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

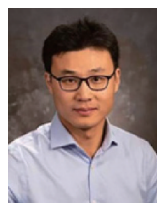
and a Ph. D. advisor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include detection technology and instrument.



王秀明, 1984 年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 1987 年于中国石油勘探开发研究院获得硕士学位, 1995 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院声学研究所教授、博士生导师, 主要研究方向为固体声学及深部钻测。

E-mail: wangxm@mail.ioa.ac.cn

Wang Xiuming received his B. Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 1984, received his M. Sc. degree from China National Research Institute of Petroleum Exploration and Development in 1987, and received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 1995. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in the Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences. His main research interests include elastodynamics and solid acoustics, borehole geophysics and deep drilling exploration.



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, 主要研究方向为结构健康检测与无损评估, 超高分辨率医学成像。

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 interests include structural health monitoring and nondestructive evaluation, super-high resolution medical imaging.