

随钻超声井眼成像技术进展

张硕^{1,2}, 高文凯^{2*}, 滕鑫森², 丁华华², 刘珂²

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206

摘要 随钻超声井眼成像技术是当前随钻测控领域的前沿技术,可以在随钻工况下实时生成高分辨率的井眼图像,能够准确反映井眼形状,识别裂缝、孔隙、层理等特征,在监测井眼工程状况和质量方面发挥着重要作用。阐述了随钻超声井眼成像系统的成像原理及构成要素,综述了发展历程及现状,分析了国外最新研发的随钻超声井眼成像系统的技术特点,总结了随钻超声井眼成像技术未来发展趋势,探讨了随钻超声井眼成像领域在仪器设计及发展的方向。

关键词 随钻测井;成像测井;超声成像

随着常规油气资源的不断消耗,中国油气资源的勘探开发正向着非常规领域拓展^[1-2],相比于常规油气,非常规油气地质条件与钻井工况复杂,勘探开发难度大。在此前提下,研发可以实时生成井眼图像的随钻成像工具,可有效降低钻井成本、提高钻井效率与储层钻遇率。随钻电阻率成像常作为获取实时高分辨率井眼图像的主要获取方式,但其通常仅适用于水基泥浆,在油基泥浆中得到的图像分辨率相对较低,导致在页岩气等非常规油气的开发中受限。为此,2019年起斯伦贝谢、哈里伯

顿、贝克休斯三大油服公司陆续推出相关随钻超声成像系统,通过随钻高精度井径测量与高分辨率井壁成像,能够兼容油基泥浆与水基泥浆,生成的井眼图像可以用于评价井眼形状,监测井壁稳定性,识别裂缝、孔隙与层理特征,帮助钻井工程师在作业过程中做出详细的分析和正确的决策^[3-10]。对非常规油气资源优质、安全、高效的勘探开发具有重要工程意义。

目前,中国随钻超声井眼成像相关技术研究仍处于起步阶段,国内目前多家研究单位与高校进行

收稿日期:2022-08-04;修回日期:2022-09-19

基金项目:中国石油天然气集团有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目(2020D-5008-13)

作者简介:张硕,硕士研究生,研究方向为井下信息测量与控制技术,电子信箱:2498211703@qq.com;高文凯(通信作者),高级工程师,研究方向为井下控制工程,电子信箱:gaowenkai@cnpc.com.cn

引用格式:张硕,高文凯,滕鑫森,等. 随钻超声井眼成像技术进展[J]. 科技导报, 2023, 41(9): 75-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.

09.009

超声测井方面研究,但大部分仪器仅能实现随钻井径测量与电缆超声成像,并且在成像扇区、测量精度、成像分辨率等关键技术指标上与世界先进水平还存在较大差距。因此,加快研发具有自主知识产权的随钻超声井眼成像系统对提高中国在随钻超声成像技术领域的话语权,实现随钻超声成像系统的升级迭代具有重要意义。

1 随钻超声井眼成像系统简介

1.1 随钻超声井眼成像原理

随钻超声井眼成像系统由收发一体的超声波换能器与测控电路系统构成(图1)。换能器安装

在钻铤表面,以脉冲-回波模式工作,由电路系统激发产生超声波脉冲,脉冲穿过井眼流体(钻井液)到达井壁,由井壁反射后返回换能器(图1(a))。换能器将接收到的反射回波转换为电信号,并交由电路系统采样、解算。通过分析超声波脉冲从发射到被接收的传输时间,结合井眼流体(钻井液)声速,可以推导出换能器距井壁的距离与井眼半径。通过对超声波回波信号幅值的分析,可以得到井眼表面的声阻抗。换能器跟随钻铤旋转的同时连续发射与接收超声波,以此实现360°井眼周向扫描(图1(b)),获取井眼曲线与井壁图像^[11-16]。综合分析井眼曲线与井壁图像,最终生成井眼图像。

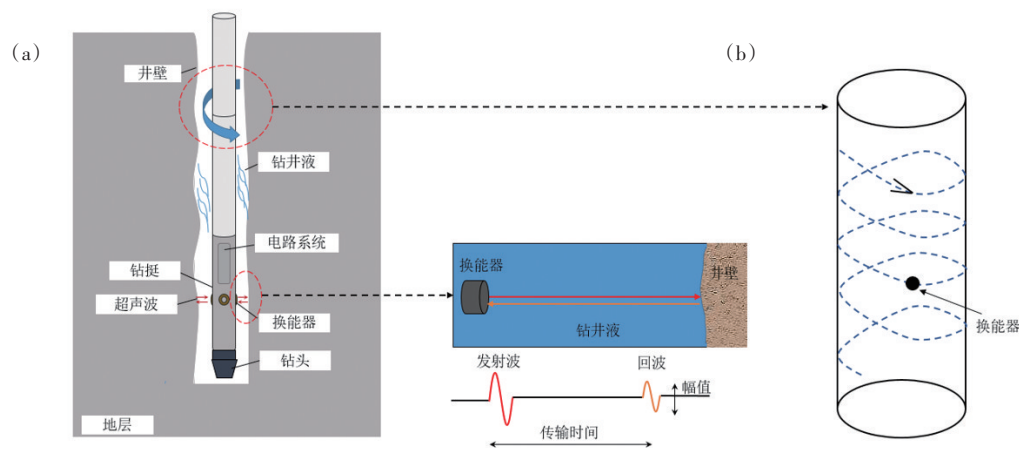


图1 随钻超声井眼成像示意

1.2 系统组成

随钻超声井眼成像系统按照功能不同可以划分为主控模块、换能器激发模块、信号采集存储模块、工具面测量模块、MWD(measure while drilling)通信模块与换能器阵列(图2)。主控模块是系统的“大脑”,负责协调各模块间的工作。换能器激发模块用于激励超声换能器发射超声波脉冲。信号采集存储模块用于:(1)回波信号的放大、滤波、采集与解算;(2)回波信号与解算后信息的存储。工具面测量模块负责实时读取换能器所在位置的工具面角信息。MWD通信模块负责传输井下解算后用于生成井眼图像的数据。换能器阵列用于发射

超声波脉冲并接收由井壁反射回的超声波回波信号^[17-26]。

2 国外发展历程及现状

20世纪50年代,国外首先把超声井眼成像技术运用到石油领域。1969年,美孚(Mobil)公司的Zemanek等^[27]研制出BHTV(borehole televiewer),第一次用声学方法获得井壁的二维图像,但由于成像质量差、测井速度慢,在生产中没有得到广泛应用。

1980年,Amoco公司的Wiley^[28]在BHTV的基础上进行了改进,研制了新版井眼成像工具,一次下

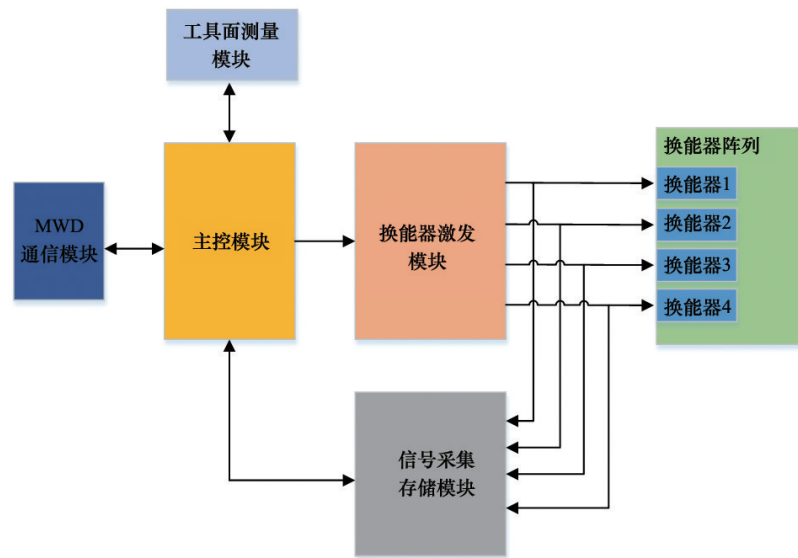


图2 随钻超声井眼成像电路系统架构

并可获取多条测井曲线,同时运用图像增强技术提高了图像的分辨率。

1989年,Atlas公司的Faraguna等^[29]开发了改进的井眼成像测井系统CBIL(circumferential borehole imaging log),集成了改进的换能器,优化了图像处理能力,能够提供更高质量的井眼图像。

1990年,哈里伯顿公司的Seller等^[30]研制了井眼超声扫描仪CAST(circumferential acoustic scanning tool),改进了机械、电子与换能器设计,开发了用于增强图像和自动识别井眼特征的软件。

1997年,哈里伯顿公司的Graham等^[31]基于CAST研制了CAST-V(visualization version of circumferential acoustic scanning tool),可以同时用于裸眼井和套管井成像。

1998年,斯伦贝谢公司的Hayman等^[32]基于套管井成像工具USI(ultrasonic imager)研制出了UBI(ultrasonic borehole imager),增加了聚焦换能器和扶正器,提高了成像质量,可以同时用于裸眼井和套管井成像。

近年来,随着水平井在非常规油气钻井中的占比不断增加,CBIL、CAST-V、UBI等电缆式超声成像工具由于水平段难以下入、成本高、效率低等缺点,逐渐不能满足现场需求。随钻超声成像测井技术开始迅速发展,国外油服公司通过改进换能器与

测控电路系统,研制出具备随钻功能的超声成像系统,能够兼容油基与水基泥浆,满足复杂地层与工况下生成高分辨率井眼图像的需求,已于现场成功应用。下文将对三大油服公司哈里伯顿、贝克休斯、斯伦贝谢最新推出的代表性产品进行详细分析。

2.1 哈里伯顿(Halliburton)公司的Pixstar随钻超声井眼成像系统

哈里伯顿近年来对随钻超声井眼成像系统进行了大量研究,Morys等^[33]于2011年提出使用双传感器(超声波传感器与电阻率传感器)实现油基泥浆中的随钻成像,并取得了初步研究成果。2019年,Li等^[34-37]连续发表数篇文章,介绍了能够在油基和水基泥浆中提供高分辨率井径测量与井壁成像的新型随钻超声波测井技术,超声图像分辨率达3.81 mm,并进行了现场试验,生成了声阻抗图像、传输时间图像、井眼半径阵列图、平均井眼尺寸图、井眼三维声阻抗图和井眼三维剖面图,可有效识别井眼形状与地层特征。

2019年,哈里伯顿正式推出商业化的Pixstar随钻超声井眼成像系统(图3^[35]),工具外径120.65 mm,最大工作温度150℃,最大工作压力172 MPa。

Pixstar的技术特点如下。

1) 搭载4个高性能聚焦式收发一体超声波换能器。能够提供更高的信号强度、更宽的带宽、更

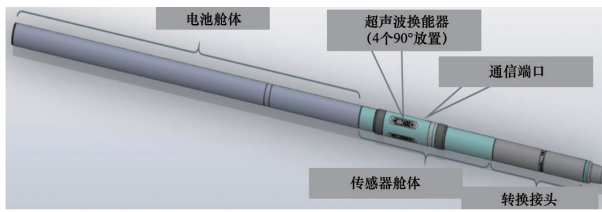


图3 Pixstar随钻超声井眼成像系统

高的灵敏度、更小的振铃与更高的信噪比。同时四换能器设计可以定位仪器在井眼中的位置,获取更加精确的测量数据。

2) 应用噪声过滤算法。对原始波形特征实时分析和提取,应用滑动窗口对比和识别回波信号,实现了在井下高噪声环境中回波信号的准确获取。

3) 应用偏心校正算法。在软件层面解决了由于仪器偏心导致的井眼图像失真的问题。

4) 具备高速数据处理能力。每秒可以激励换能器500次发射,并获取和处理2000次回波。

5) 发射电路功率可调。可以根据不同的泥浆密度调节换能器发射功率,克服了不同密度的泥浆中超声波衰减率不同的问题。

6) 搭载陀螺仪和磁力仪。陀螺仪能够提供精确的工具面信息,磁力计用于进行数据补偿,消除误差。工具面测量精度为 1.4° ,即扫描井眼一周可以获取256扇区数据。

7) 采用套管标定和环境修正2种方式计算泥浆声速。

2.2 贝克休斯(Baker Hughes)公司的ImageTrak随钻超声井眼成像系统

2016年,贝克休斯公司的Leonard^[38]通过改进传统超声换能器的结构,开发了用于随钻测井的超声换能器,并于2017年与Leonard等^[39]研制出了基于FPGA(field programmable gate array)+DSP(digital signal processor)的井下电路系统。2018年,Gillen等^[40]进行了随钻超声、电缆超声、随钻伽马、随钻密度成像质量对比,实验表明随钻超声图像分辨率为6.86 mm,与电缆图像的质量相当,与随钻伽马和密度成像工具相比,图像质量更高。2019年,Ritzmann等^[41]介绍了随钻高分辨率超声成像技术,并在美国俄克拉荷马州对随钻超声井眼成像系统

进行了现场测试,该系统在密度为 $1.10\sim 1.56\text{ g/cm}^3$ 的油基钻井液和水基钻井液中总计工作了2378.4 h,获取了26705.6 m的高质量井眼图像,可以直观地观察到发育的断层和裂缝等信息。

2019年,贝克休斯正式推出商业化的ImageTrak随钻超声井眼成像系统(图4^[41]),工具外径171.45 mm,最大工作温度 150°C ,最大工作压力172 MPa。



图4 ImageTrak随钻超声井眼成像系统

ImageTrak的技术特点如下。

1) 搭载3个高性能聚焦式收发一体超声波换能器。换能器等间隔 120° 安装在仪器的圆周上,能够计算工具相对于井眼中心的位置,并测量更精确的井眼信息。换能器焦距范围 $15.24\sim 55.88\text{ mm}$,焦宽为6.86 mm,工作频率 $200\sim 300\text{ kHz}$ 。具有更大的信号强度与更小的振铃,能够克服在高密度泥浆中的衰减与钻井过程中产生的井下噪声,同时承受井壁与钻井液中岩屑的冲击。

2) 搭载更先进的电路系统。采用FPGA+DSP作为控制器,系统时钟120 MHz,具备更高的采样速率、更强的数据处理能力与读写能力。方位分辨率达 1.4° ,可以获取256扇区数据。

3) 应用图像校正算法。解决了由于仪器偏心导致的井眼图像失真的问题。

4) 具备大容量存储。可以存储长达430 h的超声波传播时间与回波幅值数据。

2.3 斯伦贝谢(Schlumberger)公司的TerraSphere随钻双成像系统

2018年,斯伦贝谢公司的Maeso等^[42-43]介绍了一种用于随钻测井的双物理成像仪(超声成像和电阻率成像),并于现场成功测试。2019年,Gelman

等^[44]创新性地提出了图像压缩方法,实现了井下实时高分辨率图像传输;斯伦贝谢公司正式推出了商业化的 TerraSphere 随钻双物理成像仪(图 5),工具外径 171.45 mm,最大工作温度 150℃,最大工作压力 207 MPa,可以在钻井过程中实时生成超声波图像与电阻率图像,超声图像分辨率 5.08 mm,电阻率图像分辨率<25.4 mm。在墨西哥湾、中东、北非、北海和美国进行了 30 多次现场试验,成功生成了井眼图像。TerraSphere^[45-48]的技术特点如下。

1) 集成了超声波测量模块和电阻率测量模块。电阻率图像具有丰富的层理特征,超声图像对裂缝和井径更为敏感,测量的图像具有互补性,为钻井时油基泥浆环境的详细地质和井眼形状测量提供了解决方案。

2) 搭载 4 个新型几何聚焦超声波换能器与 2 个电阻率传感器。电阻率成像采用 4 种电磁频率测量,以覆盖井下不同的电阻率范围,超声波成像采用 2 种频率测量,以解释钻井过程中泥浆密度和井壁特征的变化。

3) 应用图像压缩算法。能够在数据高速实时上传的同时保证图像质量。

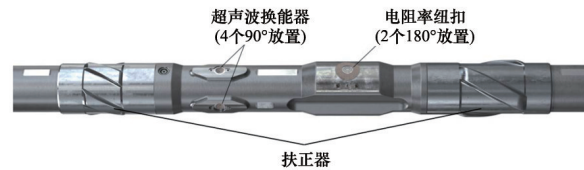


图 5 TerraSphere 随钻双成像系统

4) 集成了 212.7 mm 的稳定器和 203.2 mm 的磨损带。使仪器尽可能在井眼中居中,避免换能器接触地层,减少偏心影响。

5) 集成了高精度磁力计。工具旋转一周可以生成 180 扇区的超声图像与 72 扇区的电阻率图像。

2.4 Pixstar、ImageTrak、TerraSphere 对比

目前主流的随钻超声井眼成像仪器常采用多换能器(换能器个数 ≥ 3)设计,此种设计能够定位仪器在井眼中的位置,提供更加精确的测量数据。最大工作温度、最大工作压力分别达到了 150℃与 172 MPa(TerraSphere 为 207 MPa),能够适应恶劣的井下随钻工况。超声图像分辨率分别为 3.81、6.86、5.08 mm,满足准确识别井眼形状与井壁特征的需求。关键技术参数对比见表 1。

表 1 Pixstar、ImageTrak、TerraSphere 关键技术参数

仪器名称	外径/mm	换能器数量	超声成像分辨率/mm	扇区数	工作形式	适用钻井液	最大工作温度/℃	最大工作压力/MPa
PixStar	120.65	4	3.81	256	随钻成像	油基、水基	150	172
ImageTrak	171.45	3	6.86	256	随钻成像	油基、水基	150	172
TerraSphere	171.45	4	5.08	180	随钻成像	油基、水基	150	207

3 随钻超声井眼成像技术发展趋势

随钻超声井眼成像技术是近年来新兴的一种随钻成像测井技术,能够满足在油基/水基钻井液条件下实时提供高清声成像资料的需求,经过不断发展,最新研发的系统可以在更加复杂的环境下实现井眼的准确、高分辨率成像。围绕着更好地获取实时、高质量的井眼图形,进一步提升系统性能、扩大应用,随钻超声井眼成像技术未来的发展趋势主要集中在以下 5 个方面。

1) 优化换能器设计。

进一步优化换能器的结构与电路设计,加大超声换能器新材料的研发力度,提高超声波信号发射能量,增大信噪比,克服高密度泥浆下超声波衰减严重问题;减小换能器振铃,克服振铃信号干扰识别回波信号的问题;提高灵敏度与分辨率,获取更微小的井眼细节特征;增加耐温耐压程度、抗冲击与抗干扰能力,提高工作稳定性。

2) 增强电路性能。

提高电路系统运行速度与数据解算能力,实现

井下数据的高速解算与井眼图像的实时生成;压缩数据量,提高数据上传效率;提高数据采集速率与精度;优化工具面角测量电路,增加成像扇区数;采用主动降温方式或者被动降温方式(即采用高温芯片),提高电路系统的耐温能力。

3) 消除偏心影响。

随钻测量过程中,仪器跟随井底钻具组合(BHA)在井眼中无规则运动,仪器不能一直保持在井眼中心,影响测量数据的准确性,图像不能真实呈现出井眼形状和井壁特征。应分别在软件(校正算法)层面与硬件(仪器机械设计)层面进行仪器偏心的补偿与校正。

4) 提高集成度。

测井仪器集成化是测井技术发展的方向和趋势,应根据现场情况与实际需求合理安排随钻超声井眼成像系统与其他随钻成像测井装备(如随钻电阻率、随钻伽马、随钻密度、随钻核磁共振等)的集成应用,突破技术局限性,综合评价井壁与地层特征,实现高精度随钻“多参数”成像。

5) 基于人工智能的图像特征识别。

图像细节特征的精度关系着地质解释的准确性。人工智能是新时期油气智能勘探开发突破现有技术的局限性、提高井眼图像特征识别精度的利器。针对超声图像细节特征模糊,对比度、分辨率低的问题,利用计算机视觉、深度学习、大数据、监督学习、图像增强和复原方法等方式,突出局部细节特征,增强裂缝、孔隙轮廓,进一步推进人工智能在井壁特征识别和测井资料解释方面的应用。

4 结论

阐述了随钻超声井眼成像系统的成像原理、构成要素、发展历程及现状,分析了国外最新研发的随钻超声井眼成像系统的技术特点,总结了随钻超声井眼成像系统的未来发展趋势,得出如下3点结论。

1) 随钻超声井眼成像系统拓宽了随钻测井技术的应用范围,在评价井眼形状、识别井壁裂缝孔隙、监控井眼质量发挥着重要作用。相比于电缆超

声成像工具,随钻实时成像的优势更加明显,并且解决了在大斜度井与水平井情况下,电缆工具难以下入的问题。相比于常规随钻电阻率成像测井工具,解决了不适用于非导电油基钻井液的技术缺陷。随钻超声井眼成像系统以其适用范围广、成像分辨率高、结构简单的优势,将成为未来非常规油气钻井作业中常用的一种测井方法。

2) 随着随钻超声井眼成像系统的愈发完善,其应用领域也更加广泛,拓展到了勘探、开发、钻井等各个方面。此系统的应用有助于降低油气田开发难度,提高经济效益,对克服复杂、非常规油气藏的勘探开发问题具有重大意义。国内在随钻超声井眼成像技术仍处于发展初期,随钻超声成像理论基本完善,但在影响测量精度与成像质量的核心技术难题上仍需进一步攻关。缩短国内随钻测井技术水平与世界先进水平之间的差距,打破国外先进技术的垄断,研发具有自主知识产权的随钻超声井眼成像系统,提高国内随钻成像测井行业在国际市场的竞争力。

3) 为了真正实现随钻超声井眼成像系统的产业化、规模化应用,超声波换能器的研发应向高分辨率、高灵敏度、高能量转换效率、高信噪比、高耐温耐压、低振铃方向发展,保证机械强度的同时最大限度地提高声学性能。电路系统应向着数字化、模块化、智能化方向发展,进一步提高系统采样速度、处理速度、通信速度,增强系统抗干扰能力、数据存储能力与外部兼容能力。综上所述,持续优化随钻超声井眼成像系统测量精度与探测范围仍为中国下一步重点攻关方向。

致谢:部分资料与插图来源于国外有关公司网站。

参考文献(References)

- [1] 邹才能,张国生,杨智,等.非常规油气概念、特征、潜力及技术:兼论非常规油气地质学[J].石油勘探与开发,2013,40(4):385-399,454.
- [2] 贾承造,郑民,张永峰.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
- [3] 许明亮,任大明,黄焱淞,等.多功能超声成像测井仪在工程测井中的应用[J].天津科技,2021,48(2):66-69.

- [4] 秦绪英, 肖立志, 索佰峰. 随钻测井技术最新进展及其应用[J]. 勘探地球物理进展, 2003(4): 313-322.
- [5] 路保平, 倪卫宁. 高精度随钻成像测井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 148-155.
- [6] 朱祖扬. 随钻声波测井技术发展现状[J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(6): 6-9, 15.
- [7] 章俊燕. 超声波技术在成像测井仪中的应用[J]. 舰船电子工程, 2005, 25(4): 92-95.
- [8] 孙加华, 肖洪伟, 么忠文, 等. 声电成像测井技术在储层裂缝识别中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(3): 100-102, 110.
- [9] Ciuperca C L, Tommaso D D, Dawber M, et al. Determining wellbore stability parameters using a new LWD high resolution ultrasonic imaging tool[C]/SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. Richardson: SPE, 2019: SPE-194074-MS.
- [10] 李红欣, 李天林, 杜江. 成像测井技术的现状及其应用[J]. 石油和化工设备, 2013, 16(6): 40-41.
- [11] Morys M, Knizhnik S, Duncan A R, et al. Advances in borehole imaging in unconventional reservoirs[C]/SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Houston: URTEC, 2018: URTEC-2903065-MS.
- [12] 范斐, 庞巨丰, 徐佳, 等. 井周声波成像测井仪原理与应用[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(8): 74-76.
- [13] 张建军, 潘恒超, 李浩. 超声成像测井工作原理与影响因素[J]. 声学与电子工程, 2001(2): 32-36.
- [14] 聂世均. 超声波在泥浆中的传输规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2007.
- [15] 占志鹏. 井周超声成像仪主控系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [16] 陶钧, 白庆杰, 肖占山, 等. 超声测井仪器数据压缩算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(6): 32-39.
- [17] 胡海杰. 超声波随钻测井仪的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [18] 孟丽杰. 高性能超声反射测井仪控制部分设计与实现[D]. 荆州: 长江大学, 2015.
- [19] 何允禄. 超声测井仪回波信号检测算法研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [20] 倪卫宁, 朱祖扬, 张卫, 等. 高精度微距超声波测距系统[J]. 仪表技术与传感器, 2014(1): 75-76, 92.
- [21] 夏琼. 基于超声波技术的井壁成像系统设计[J]. 化工管理, 2018(24): 65.
- [22] 邹骁. 超声随钻测井仪方案设计和处理与存储部分的实现[D]. 荆州: 长江大学, 2014.
- [23] 黄昕. 井周超声成像仪前端电路模块设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [24] 林书玉. 超声技术的基石: 超声换能器的原理及设计[J]. 物理, 2009, 38(3): 141-148.
- [25] 贾宝贤, 边文凤, 赵万生, 等. 压电超声换能器的应用与发展[J]. 压电与声光, 2005, 27(2): 131-135.
- [26] 曾凡冲. 超声换能器的设计理论研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2013.
- [27] Zemanek J, Caldwell R L, Glenn E E Jr, et al. The borehole Televue: A new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection[J]. Journal of Petroleum Technology, 1969, 21(6): 762-774.
- [28] Wiley R. Borehole televue—Revisited[C]/SPWLA 21st Annual Logging Symposium. Lafayette: SPWLA, 1980: SPWLA-1980-HH.
- [29] Faraguna J K, Chance D M, Schmidt M G. An improved borehole televue system: Image acquisition, analysis and integration[C]/SPWLA 30th Annual Logging Symposium. Denver: SPWLA, 1989: SPWLA-1989-UU.
- [30] Seller D, Edmiston C, Torres O, et al. Field performance of a new borehole televue tool and associated image processing techniques[C]/SPWLA 31st Annual Logging Symposium. Lafayette: SPWLA, 1990: SPWLA-1990-H.
- [31] Graham W L, Silva C I, Leimkuhler J M, et al. Cement evaluation and casing inspection with advanced ultrasonic scanning methods[C]/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: SPE, 1997: SPE-38651-MS.
- [32] Hayman A J, Parent P, Cheung P, et al. Improved borehole imaging by ultrasonics[J]. SPE Production & Operations, 1998, 13(1): 5-14.
- [33] Morys M, Chemali R, Goodman G, et al. Field testing of an advanced LWD imager for oil-based mud applications [J]. Petrophysics, 2011, 52(2): 84-95.
- [34] Li P, Lee J, Taher A, et al. High-resolution ultrasonic borehole imaging enhances reservoir evaluation in oil-based muds[C]/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: SPE, 2019: SPE-196126-MS.
- [35] Li P, Lee J, Taher A, et al. New 4 $\frac{3}{4}$ -in. high-resolution ultrasonic borehole imaging for unconventional reservoir evaluation[C]/SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Denver: URTEC, 2019: URTEC-2019-322-MS.
- [36] Li P, Lee J, Coates R, et al. New 4 $\frac{3}{4}$ -in. ultrasonic LWD technology provides high-resolution caliper and imaging in oil-based and water-based muds[C]/SPWLA 60th Annual Logging Symposium. The Woodlands: SPWLA, 2019: SPWLA-2019-T.
- [37] Al-Azmi M S, Al-Otaibi F B, Joshi G K, et al. Optimizing completion design through fracture evaluation in oil-based mud using high-resolution LWD ultrasonic images [C]/ Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Richardson: SPE, 2019: SPE-197844-MS.
- [38] Leonard Z S. Development of a downhole ultrasonic transducer for imaging while drilling[C]/2016 IEEE International Ultrasonics Symposium. Piscataway: IEEE

- Press, 2016: 1-4.
- [39] Leonard Z S, Rahman S, Steinsiek R R. Development of transducer and electronics technology for an LWD ultrasonic imaging tool[C]//Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2017: OTC-27758-MS.
- [40] Gillen M E, Moody B, Dymmok S. New LWD technology provides high-resolution images in oil- and water-based muds for improved decision making in real time [C]//Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2018: OTC-28952-MS.
- [41] Ritzmann N, Steinsiek R, Dymmok S, et al. High-resolution LWD acoustic borehole imaging in WBM and OBM[C]//Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. Ravenna: OMC, 2019: OMC-2019-1064.
- [42] Maeso C, Horstman M, Dua R. A New High-resolution integrated resistivity and acoustic LWD imager in oil-base mud: A case study from offshore norway[C]//80th EAGE Conference and Exhibition 2018. Copenhagen: European Association of Geoscientists & Engineers, 2018(1): 1-5.
- [43] Maeso C, Legendre E, Hori H, et al. Field test results of a new high-resolution, dual-physics, logging-while-drilling imaging tool in oil-base mud[C]//SPWLA 59th Annual Logging Symposium. London: SPWLA, 2018: SPWLA-2018-U.
- [44] Gelman A, Maeso C, Godet V, et al. Feature compensated borehole image compression for real-time logging while drilling[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: SPE, 2019: SPE-196103-MS.
- [45] Shrivastava C, Maeso C, Wibowo V. Image logs worth hundred applications: Industry's first innovative high-resolution dual-imager logging-while-drilling technology overcomes barriers of oil-base-mud[C]//Third EAGE Borehole Geology Workshop. Muscat: European Association of Geoscientists & Engineers, 2019(1): 1-5.
- [46] Shrivastava C, Maeso C, Wibowo V, et al. Multi-measurement logging-while-drilling imager: New enabler for wide-scale comprehensive geosciences applications in oil-base mud[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Richardson: SPE, 2019: SPE-197402-MS.
- [47] Shrivastava C, Maeso C, Wibowo V, et al. Overcoming the oil base mud barrier for high resolution imaging while drilling: An industry first technology advancement for borehole image acquisition[C]//Offshore Technology Conference Asia. Kuala Lumpur: OTC, 2020: OTC-30169-MS.
- [48] Blyth M, Sakiyama N, Hori H, et al. Revealing hidden information: High-resolution logging-while-drilling slowness measurements and imaging using advanced dual ultrasonic technology[J]. *Petrophysics*, 2021, 62(1): 89-108.

Status and prospects of ultrasonic borehole imaging technology while drilling

ZHANG Shuo^{1,2}, GAO Wenkai^{2*}, TENG Xinmiao², DING Huahua², LIU Ke²

1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, China National Petroleum Corporation, Beijing 100083, China
2. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China

Abstract Ultrasonic borehole imaging while drilling is a cutting-edge technology in the field of measurement and control for drilling. It can generate high-resolution borehole images in real time under the working conditions of drilling. The borehole images can accurately reflect borehole shape, identify fractures, pores, bedding and other characteristics, and play an important role in monitoring borehole engineering condition and quality. To summarize ultrasonic borehole imaging while drilling, based on a large number of literature research, this paper expounds the imaging principle and system components, summarizes the development process and current situation, analyzes and studies the characteristics of the latest overseas research and development of ultrasonic borehole imaging while drilling tools, and summarizes the development trend, in order to provide reference for the development of ultrasonic borehole imaging in China.

Keywords logging while drilling; imaging logging; ultrasonic imaging ●



(责任编辑 刘志远)