

随钻超声井眼成像技术在地热勘探中的应用

徐军军¹, 郭强^{1*}, 贺云超¹, 翁炜¹, 周思源², 吴烁¹, 赵永尚¹

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中海油田服务股份有限公司, 北京 101149)

摘要:针对地热勘探中井壁涌水层特征解析存在较大不确定性, 本文基于常规综合测井的局限性, 重点阐述了随钻超声成像测井的工作原理及技术优势。对随钻超声成像测井技术在MD-01地热井应用情况的分析表明, 该技术可直观识别出井壁涌水层的地层结构特征, 可对裸眼井壁裂缝、局部孔洞及复杂破碎带等特征进行表征。同种井壁特征下常规综合测井与随钻超声成像测井的结果基本一致, 说明了随钻超声成像测井技术的可行性和准确性。该测井技术可有效改善常规综合测井的局限性, 大幅缩短测井作业周期, 显著提升测井效率, 降低测井作业成本, 在深部地热水平井测井中具有推广应用价值。

关键词:随钻超声成像; 测井技术; 特征识别; 地热勘探; 降本增效

中图分类号:P631.8; TE249; P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0338-05

Application of ultrasonic imaging logging while drilling technology in geothermal exploration

XU Junjun¹, GUO Qiang^{1*}, HE Yunchao¹, WENG Wei¹, ZHOU Siyuan², WU Shuo¹, ZHAO Yongshang¹

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. China Oilfield Services Limited, Beijing 101149, China)

Abstract: In view of the large uncertainty in the analysis of the characteristics of borehole water gushing layer in geothermal exploration, based on the limitations of conventional comprehensive logging, this paper focuses on the working principle and technical advantages of ultrasonic imaging logging while drilling. The analysis of its application in MD-01 geothermal well shows that the technology can directly identify the formation structure characteristics of the water gushing layer in the borehole wall, and can externally characterize the characteristics of open hole wall fractures, local holes and complex fracture zones. The feasibility and accuracy of the ultrasonic imaging logging while drilling technology can be verified as the basically same results with the conventional comprehensive logging under the same borehole wall characteristics. This logging technology can effectively improve the limitations of the conventional comprehensive logging, greatly shorten logging operation cycle, significantly improve logging efficiency and cutting the logging operation cost, which has popularization and application value in deep geothermal horizontal well logging.

Key words: ultrasonic imaging while drilling; logging technology; feature recognition; geothermal exploration; cost reduction and efficiency increase

0 引言

目前地热资源勘探中主要通过常规电阻率测

井判断地层孔隙流体性质, 同时辅以孔隙度、井温测井等数据, 并根据地层岩性综合判断井下涌水层

收稿日期: 2026-05-20; DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.044

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD202605202307)

第一作者: 徐军军, 男, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 探矿工程专业, 硕士, 主要从事随钻地质导向研究及深部能源钻探等工作, 北京市海淀区学院路29号, 47971710@qq.com。

通信作者: 郭强, 男, 汉族, 1990年生, 高级工程师, 机械工程专业, 硕士, 主要从事井下动力钻具研发及随钻地质导向工艺研究等工作, 北京市海淀区学院路29号, 1171136936@qq.com。

引用格式: 徐军军, 郭强, 贺云超, 等. 随钻超声井眼成像技术在地热勘探中的应用[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 338-342.

XU Junjun, GUO Qiang, HE Yunchao, et al. Application of ultrasonic imaging logging while drilling technology in geothermal exploration[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 338-342.

位置。该方式具备介质分层能力强、识别流体灵敏度高、技术成熟、成本低等特点,是地热井探测井壁裂隙、划分地层岩性及判断井下热储的重要手段。但通过此方式判断地热井涌水层,易受钻井液侵入地层及钻井液矿化度高等因素干扰,且无法提供井壁空间结构信息,同时其测井曲线的多解性也会导致结果存在不确定性^[1-2]。

为改善这一现状,更加直观有效地获取地热井储层裂隙分布,采用了随钻超声井眼成像技术进行地热井测井。该技术可直接反映井壁裂隙构造,在钻井过程中实时获取井壁地质特征,辅助地层评价和地质导向。同时,随钻超声井眼成像技术适用于油基和水基钻井液,克服了常规电阻率测井技术在油基钻井液中无法有效工作的缺陷。相较于常规电阻率测井,随钻超声井眼成像技术可满足大斜度井、水平井等易卡钻遇阻复杂工况要求,具有较强的适应性^[3-4]。随钻超声成像测井仪器在环境适应性与成像分辨率等方面取得了较大提升,可满足深部地热勘探耐高温、耐高压的复杂工况需求,为深部地热资源的精准勘探与储层评价提供了重要技术支持。

1 随钻超声成像测井作用机理及优势分析

1.1 工作原理

随钻超声成像测井是利用聚焦换能器,采用高速旋转与高密度采样向井壁发射高频脉冲声波,以脉冲回波的方式对井眼四周进行高精度扫描。脉冲声波被井壁反射回来后由换能器接收,测井系统测量并记录井壁地层反射的回波幅度和回波时间^[5]。

随钻超声成像测井仪器的主体为无磁钻铤短节及其内置探管。钻铤壳体用于传递扭矩和钻压,其上设置有扶正器,为钻具提供居中约束,使超声波探头旋转中与井壁距离保持一致。内置探管主要包含了各种电路模块、电池组及传感器等部件,根据功能模块差异主要分为换能器发射单元、主控单元、接收存储单元及工具面测量单元等。换能器发射单元用于将控制信号转化为高压脉冲激励信号。主控单元主要根据地面指令,协同处理各模块间工作,确保系统整体平稳有序运行。接收存储单元用于对超声波回波信号进行滤波、放大,提升信号的抗干扰能力,并对其进行采集与解算,同时对

采集的回波数据进行存储。工具面测量单元负责实时读取换能器所处位置的工具面信息。此外,该仪器通过电源模块对电池组进行电压调节后,给各功能模块进行供电,保证整个电路系统稳定持续运行^[6-7]。

其中,超声成像扫描探头装置是随钻超声成像测井仪的核心部件,用于对裸眼井井壁或套管内壁进行超声波扫描从而生成图像。仪器的探头发射高频声波脉冲并测量回波的到达时间和幅度。回波幅度大小受井壁结构影响,到达时间反映了探头到井壁的距离^[8-9]。超声探头安装于仪器旋转部分,可对井壁做环井周360°的扫描测量,如图1所示。

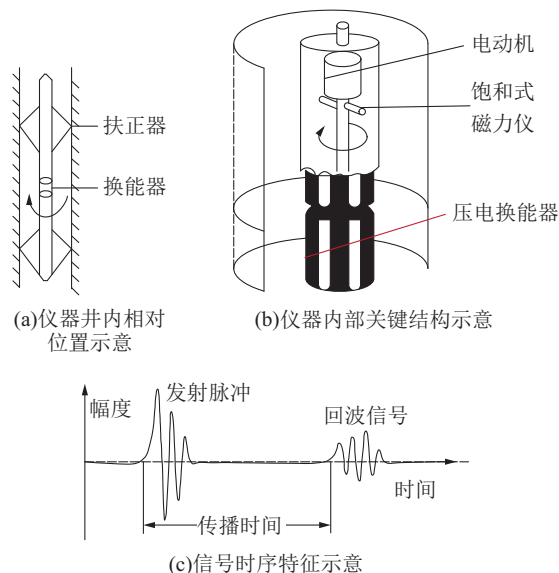


图1 随钻超声成像测井仪器工作示意

超声波换能器发射的脉冲声波在介质中传播时,遇到不同声阻抗介质会在二者分界面处产生反射。不同声阻抗物质表面粗糙度不同,对声波的反射能力相应不同。回波幅度生成的图像反映了井壁特征,一般高反射层显示设置为亮色,低反射层显示设置为暗色,介于两者之间的幅值赋予一定灰度,该灰度与测量值成正比。该图像在确定井壁裂缝等低反射层时效果显著^[10-11]。回波幅度测量结果受钻井液衰减、仪器居中状态及井壁粗糙度等多重现场工况因素的综合影响。解算后用于生成井壁图像的数据通过MWD通信模块传输至地面。

1.2 技术优势

(1)常规综合测井方式须完钻后进行地面组装

调试仪器,下放电缆至井底进行上提测量,测量完成后开展原始数据处理与测井曲线成果解释。整个作业周期较长,且存在井眼坍塌及钻井液侵入影响数据真实性等风险。随钻超声成像测井是将仪器集成在钻具中,进行随钻测井,实时采集数据后通过钻井液脉冲实时传输至地面,实现全过程动态监测,该方式无需额外起下钻作业,大幅提升了测井作业的可操作性,有效缩短了测井时间^[12-13]。

(2)常规综合测井方式多用于直井和定向井,测井数据获取存在滞后,无法为钻井工艺的实时调整提供依据。随钻超声成像测井主要用于大斜度井、水平井等复杂结构井,可实现井壁周向扫描成像,识别裂缝、孔洞、破碎带等复杂井壁特征,数据实时采集传输,近似反映井壁真实状态,可有效支持随钻轨迹调整及地质导向工作。

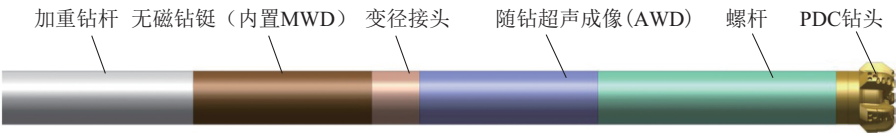


图2 随钻超声成像测井钻具组合

根据地面钻探设备载荷能力及现场作业工况,结合区块邻井地质资料及作业井的工程设计,确定

2 现场应用

2.1 施工概况

随钻超声成像测井仪器在钻井过程中可实时生成高分辨率的井壁图像,实现精准监测井眼工况与质量,识别井壁裂缝、孔隙等特征,这有助于降低钻井风险,为优化地热井开采方案和地热储层评价提供地质依据。为评估随钻超声成像仪器在地热井裸眼井壁的高分辨率成像效果,本文选取了MD-01定向地热井,该井位于滇西弥渡断裂带,富水性强,含水层以砂岩为主,设计井深1000 m,二开井身结构,造斜段700 m,完钻孔径215.9 mm。该井采用MWD随钻测量+随钻超声成像+螺杆钻具+PDC钻头进行定向施工,并开展常规测井以评估获取地层参数的可靠性,钻具组合如图2所示。

随钻超声成像仪器的适配工况参数,具体性能指标如表1所示。

表1 随钻超声成像仪器性能参数

规格/mm	成像分辨率/mm	探头频率/kHz	连续工作时间/h	耐温/℃	耐压/MPa
Ø172	4	100~500	200	205	140

井口组装仪器前,须对其进行地面测试,以确保仪器性能稳定,各项功能指标符合作业要求(图3)。完成仪器地面测试后,在井口进行钻具组装,开泵完成钻具井口测试,下钻至出套管后再次进行钻具测试,确保井下工况运行正常。在钻进过程中机械钻速控制在8~12 m/h,有利于保障轨迹控制与成像精度,平衡钻进效率和测井质量。同时,测井仪器与井筒要保持相对居中,避免因仪器偏心,造成换能器发射的声波入射井壁不垂直,导致反射波能量分散,信号强度不足,造成图像失真或局部缺失,这对识别裂缝走向,判断裂缝与井筒倾角等关键地质参数存在不利影响^[14-15]。

钻进过程中,通过固控系统严格控制钻井液固相含量,确保钻井液性能参数符合设计要求,有效降低仪器砂卡、钻具起下钻遇阻等复杂事故风险,



图3 随钻超声成像仪器地面测试

保障井筒安全与钻进效率。

2.2 应用效果分析

针对MD-01井造斜段,开展了随钻超声成像裸眼测井作业。通过对成像图像进行分析,可以直观获取井壁裂隙分布情况。根据随钻超声成像测井

原理,由于井壁裂缝属于低反射层,对声波反射能力弱,导致回波幅度低,图像灰度暗,在图像中显示为暗色^[12]。由图4可以看出,裸眼井壁成像图像中

存在多个暗色区域,这些暗色区域很大程度上反映了井壁裂缝、孔洞、泥质充填层或井壁不规则等多种真实地质现象。

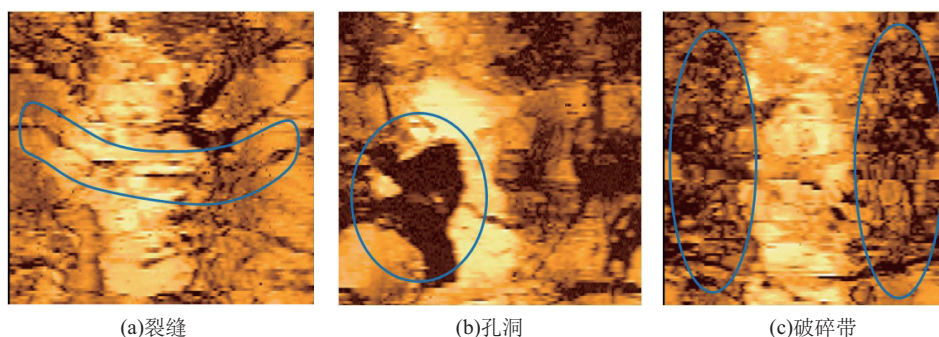


图4 裸眼井壁随钻超声成像图像

其中,图4(a)随钻超声成像图中,表现为暗色线状或条带状,具有一定倾斜角度,综合成像特征及地质规律分析,其符合裂缝型地质构造特征。同时,井壁围岩裂隙或层状岩体中可能有泥质物充填。图4(b)成像图像表现为孤立的暗斑状,形状不规则,边界清晰,符合孔洞地质构造特征。此外,井壁破碎带发育,其图像表现为密集杂乱的暗色网状结构,形成大范围非均质反射区,如图4(c)所示。

在随钻超声成像测井中,井眼不规则、井壁表面状态差异、仪器与井眼不居中、钻井液性能波动等测井仪器或环境因素导致的成像干扰,造成部分图像失真或缺失。为进一步准确判断涌水层位置,验证随钻超声成像的测井解释结果,采用常规测井对裸眼井壁进行测量,通过选取特征响应显著、辨识度高的裂缝地质构造,开展了多组平行结果的差异性对比分析,如图5所示。

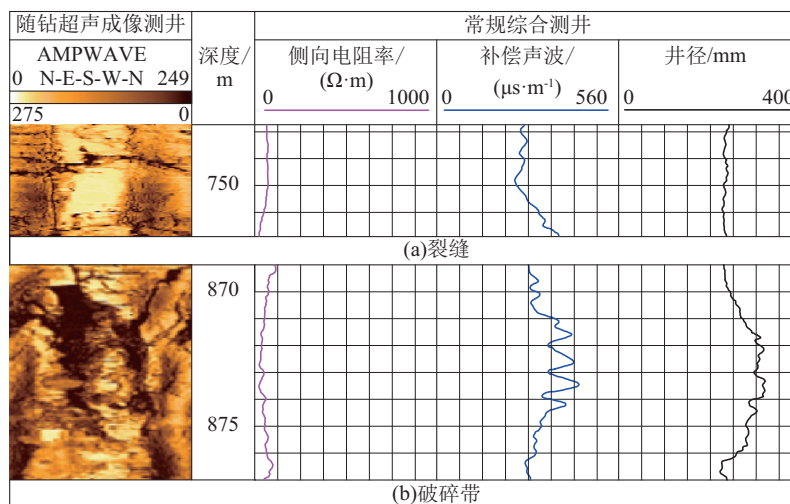


图5 不同井壁地质特征的常规测井和超声成像测井结果对比

图5以地热井裸眼井壁典型地质特征中的裂缝和破碎带为例,结合常规测井中电阻率、补偿声波及井径等特征参数,对比分析超声成像测井结果。图5(a)中超声成像测井显示井下750 m左右井壁存在裂缝,图像中裂缝呈现类似正弦波形,说明裂缝与井筒存在一定倾角。常规测井曲线中,电阻率曲

线在750 m处开始降低,这是由于裂缝处伴随有地层水的渗流与涌出,地层水电阻率显著低于围岩基质,会在裂缝周围形成低阻导电通路,导致常规综合测井曲线中对应井段的电阻率值呈现明显降低趋势。该响应特征是识别地下裂缝的重要指标之一。该井常规补偿声波测井采用的是声波时差测

井方法,补偿声波测井曲线在对应位置出现显著增大趋势,分析认为井壁裂缝会对声波造成能量散射和吸收,增加声波传播路径和时长,导致声波时差增大。受井壁裂缝宽度影响,常规测井仪器的测量精度和响应范围对微小局部扩径的表征不明显,导致图5(a)中裂缝处井径参数未出现显著异常波动。

同时,图5(b)中超声成像测井显示了井下870 m处裸眼井壁情况。该处井壁属局部孔洞、密集杂乱裂缝等同时存在的复杂地层。该地层内部因裂隙发育会出现大范围的涌水现象,导致该处电阻率值显著降低。同时,由于该地层周向非均质,局部变化较大,导致补偿声波时差增大后波动较明显。局部大面积孔洞导致井眼扩大率异常增大,引起井径曲线参数发生正向偏移,这些变化与图5(b)中常规测井曲线所示基本吻合。

通过对同种井壁地质特征下不同类型测井结果进行对比分析,说明随钻超声成像测井结果与常规综合测井解释结果一致,进一步验证了随钻超声成像测井方法的可行性和准确性。

裂缝、破碎带等复合型复杂井壁发育区因有地层水涌入井筒,在随钻测量(MWD)或常规测井过程中,该区域井温会呈现显著降低的异常波动特征。同时,由于地层岩体破碎,导致机械钻速出现突发性异常升高。上述井温、钻速的异常响应,可作为识别复合型复杂井壁的有效辅助判识指标。此外,测井仪器与井筒的相对位置偏差,以及机械钻速异常过快等工程因素,均会对测井曲线的形态特征及解释精度产生影响。

由图5(a)、(b)可以得出,针对裂缝、局部孔洞及破碎带等复杂井壁特征,常规综合测井曲线的变化规律比较相似,不能对井壁进行明确表征。而随钻超声成像测井可直观地呈现出相应区域的井壁特征,快速获取裂缝位置、尺寸及其与井筒的夹角,井壁孔洞和破碎带分布,锁定涌水层位置,评估井壁的完整性,快速优化调整现场钻探工艺参数,很大程度上避免了复杂井下事故的发生。

3 结论及建议

(1)随钻超声成像测井通过对井壁进行周向扫描,实时传输数据,实现了钻井中井壁特征全过程动态监测,直观识别裂缝、局部孔洞及破碎带等复杂井壁特征,可对涌水层具体位置、裂缝倾角等关

键参数进行表征,为钻进工艺调整提供技术支撑。

(2)相较于常规综合测井,随钻超声成像测井可实现钻井和测井同步进行,大幅节省了测井时间,有效提高了测井效率,彻底解决了常规测井模式下数据滞后易失真的问题,降低了井下测井作业风险,为大斜度井和水平井测井提供了新的技术手段。

(3)针对相同井壁地质特征,常规综合测井和随钻超声成像测井的结果基本一致,结合机械钻速、井温等工程参数进行联动分析,进一步验证了随钻超声成像测井方法的可行性和准确性。

(4)由于钻井中仪器偏心、钻井液性能、钻井速度及井下振动等因素均会对随钻超声成像测井结果产生影响,因此在地热井应用中,现场可根据实际图像质量对相关参数进行优化调整。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王希吉.超声成像测井技术在地质勘探中的应用[J].煤炭经济研究,2024,44(S1):155-161.
- [3] 崔明.科学钻探超声成像测井技术在深部找矿中的应用[J].西部探矿工程,2023,35(11):74-76,80.
- [4] 王冬冬,刘世伟,侯振永.多功能超声成像测井仪在塔里木油田应用效果评价[J].测井技术,2023,47(3):364-370.
- [5] 周京吾.小井眼随钻超声成像测井仪器电路研制[D].成都:电子科技大学,2022.
- [6] 张硕,高文凯,滕鑫森,等.随钻超声井眼成像可行性实验研究[J].钻采工艺,2022,45(6):42-47.
- [7] 卢俊强,吴金平,车小花,等.超声成像测井换能器的实验研究[J].地球物理学进展,2023,38(2):832-838.
- [8] 汪兴明,鲜林,陈璐思,等.基于响应面法的煤矿钻孔随钻超声成像仪器受力部件优化设计[J].中国安全生产科学技术,2021,17(7):97-102.
- [9] 张思博.随钻超声成像测井仪传感器测试控制系统研究[D].北京:中国石油大学(北京),2022.
- [10] 王怡宁,谭宝海,苏远大,等.随钻超声阵列测井仪激励电路设计[J].测井技术,2024,48(3):341-347.
- [11] 张建伟,杨卓静,王新杰,等.碳储深孔超声成像测井系统设计与应用[J].物探与化探,2022,46(6):1500-1506.
- [12] 雷均.油基泥浆下超声成像测井仪裂缝识别效果探析[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(20):103-104.
- [13] 刘梓轩.基于FPGA的随钻超声井壁成像数据采集系统设计[D].荆州:长江大学,2024.
- [14] 王文梁,陶爱华,程林波.多功能超声成像测井仪在油基泥浆井中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(16):158-160,163.
- [15] 许明亮,任大明,黄峻淞,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.

(编辑 王文)