



随钻四极子声波测井仪的设计及试验

刘西恩 孙志峰 仇傲 李杰 罗博 彭凯旋 罗瑜林

Design and Experiment for a Quadrupole Acoustic LWD Tool

LIU Xien, SUN Zhifeng, QIU Ao, LI Jie, LUO Bo, PENG Kaixuan, LUO Yulin

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

随钻前视声波测井钻头前方声场特征研究

The Characteristics of the Acoustic Field Ahead of the Bit in “Look-Ahead” Acoustic Logging While Drilling

石油钻探技术. 2021, 49(2): 113–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021020>

便携式岩屑声波录井系统研制与测试

Development and Testing of a Portable Acoustic Logging System on Cuttings

石油钻探技术. 2020, 48(6): 109–115 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020141>

随钻方位电磁波电阻率测井仪分段组合线圈系设计

The Design of the Coil System in LWD Tools Based on Azimuthal Electromagnetic-Wave Resistivity Combined with Sections

石油钻探技术. 2017, 45(2): 115–120 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702019>

随钻测井仪流道转换器优化设计与数值分析

Optimization Design and Numerical Analysis of Flow Passage Converters in LWD Tools

石油钻探技术. 2021, 49(5): 121–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021069>

螺绕环激励式随钻侧向测井仪测量强度影响因素及响应特性

Influence Factors of Measured Signal Intensity and the Response Characteristics of the Toroidal Coil Excitation LWD Laterolog Instrument

石油钻探技术. 2018, 46(1): 128–134 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018025>

随钻电阻率成像测井仪定量评价地层界面探究

Probe into Quantitative Stratigraphic Interface Evaluation Using a Resistivity Imaging LWD Tool

石油钻探技术. 2020, 48(4): 124–130 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020087>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2022058

引用格式: 刘西恩, 孙志峰, 仇傲, 等. 随钻四极子声波测井仪的设计及试验 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 125-131.

LIU Xien, SUN Zhifeng, QIU Ao, et al. Design and experiment for a quadrupole acoustic LWD tool [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 125-131.

随钻四极子声波测井仪的设计及试验

刘西恩, 孙志峰, 仇傲, 李杰, 罗博, 彭凯旋, 罗瑜林

(中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 北京 101149)

摘 要: 针对随钻单极子声波测井仪器无法随钻测量软地层横波速度的问题, 设计了一种随钻四极子声波测井仪。该测井仪由 Drilog[®] 随钻测井系统、接收电路、扶正器、接收声系、隔声体、发射声系及发射电路组成。详细介绍了随钻四极子声波测井仪关键部件发射换能器、隔声体和接收声系的设计实现方法, 并通过试验和模拟方法验证了这些关键部件的功能。该测井仪在新疆轮台 KS3-B1Sa 井进行了试验, 测得了高质量单极子全波及四极子横波信号, 且硬地层单极子全波中的横波时差与四极子横波时差吻合。现场试验表明, 随钻四极子声波测井仪的功能达到了设计要求, 可以随钻测量地层的横波速度, 为准确评价地层提供测井数据。

关键词: 随钻声波测井; 四极子; 发射换能器; 隔声体; 接收声系

中图分类号: P631.5⁺3 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2022)03-0125-07

Design and Experiment for a Quadrupole Acoustic LWD Tool

LIU Xien, SUN Zhifeng, QIU Ao, LI Jie, LUO Bo, PENG Kaixuan, LUO Yulin

(Oilfield Technology Department, China Oilfield Services Limited, Beijing, 101149, China)

Abstract: Because the monopole acoustic logging while drilling (LWD) tool cannot measure the velocity of shear waves in soft formations while drilling, a quadrupole acoustic LWD tool (QUAST) was designed. This logging tool is composed of LWD System Drilog[®], a receiving circuit, centralizer, receiving acoustic system, isolator, transmitting acoustic system, and the transmitting circuit. This paper introduces in detail the design method of the key technologies of the logging tool, such as the transmitting transducer, isolator and receiving acoustic system and verified their functions through experiment and simulation. The logging tool was tested in Well KS3-B1Sa in Luntai, Xinjiang, and high-quality signals of monopole full waves and quadrupole shear waves were detected. In hard formations, the time slowness in the shear waves of monopole full waves was consistent with that in quadrupole shear waves. The field test showed that the function of quadrupole acoustic LWD tool could meet the design requirements, and so as to measure the velocity of shear waves in the formation while drilling, and provide logging data for accurate formation evaluation.

Key words: acoustic logging while drilling; quadrupole; transmitting transducer; isolator; receiving acoustic system

随着油气勘探开发不断深入, 水平井应用越来越广泛。为了提高水平井储层的钻遇率、降低钻井风险, 需要采用地质导向技术, 而随钻测井技术是地质导向技术的重要组成部分^[1-7]。利用随钻声波

测井技术实时测量的地层速度可以识别超压地层, 降低钻井风险^[8]。目前, 商业化的随钻声波测井仪发展经历了 2 代: 第一代随钻声波测井仪能实时测量地层纵波速度, 例如斯伦贝谢公司的 Isonic/

收稿日期: 2021-09-15; 改回日期: 2022-03-01。

作者简介: 刘西恩 (1966—), 男, 河南偃师人, 1988 年毕业于西安交通大学无线电技术专业, 正高级工程师, 主要从事声波测井仪器的研制工作。E-mail: liuxe@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“随钻多极子声波成像测井仪研制” (编号: 2017ZX05019002-006) 和中国海洋石油集团有限公司科研项目“475 型随钻多极子声波测井仪研制” (编号: YJB18YF010) 部分研究内容。

sonicVISION、哈里伯顿公司的 CLSS 和威德福公司的 ShockWave; 第二代随钻声波测井仪利用四极子声源实现了地层横波速度的实时测量, 如斯伦贝谢公司的 SonicScope、贝克休斯公司的 APX/SoundTrack 和哈里伯顿公司的 QBAT。国内的随钻声波测井仪技术研究起步较晚, 相关科研单位进行了随钻声波仪设计及数据处理等相关研究^[9-13], 目前, 仅中海油田服务股份有限公司于 2015 年推出了随钻单极子声波测井仪 (MAST), 实现了国产随钻声波测井仪的商业化应用^[14], 但这仅达到了国外第一代随钻声波测井仪的技术水平, 与国际先进技术水平还有一定的差距。唐晓明等人^[15]于 2002 年提出了利用四极子声源实现随钻地层横波速度测量的理论方法, 但是研制可以实际应用的随钻四极声波测井仪尚需突破很多关键技术, 如传感器技术、钻铤隔声技术、井下电路设计技术、井下信号实时处理及上传技术和波形数据处理方法等^[16-19]。

笔者在随钻单极子声波测井仪的基础上, 采用低频大功率的随钻四极子发射换能器、高性能的隔声体和高灵敏度的随钻声波接收声系^[20-21], 设计了随钻四极子声波测井仪 (QUAST)。现场实钻测量表明, 该测井仪可测得高质量的地层横波信息。

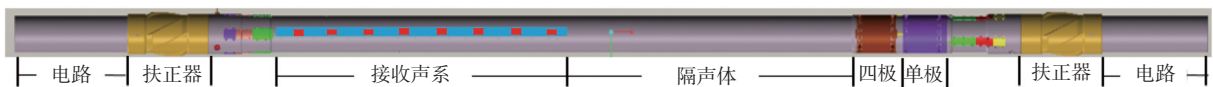


图 1 随钻四极子声波测井仪井下部分的结构

Fig.1 Downhole structure of QUAST

随钻四极子声波测井仪 (QUAST) 具有以下技术特点: 1) Drilog[®] 随钻测井地面系统可实时显示慢度相关投影图, 且可以实时提取可靠的纵波、横波慢度曲线, 为现场工程师第一时间提供地层地质信息; 2) 采用低频单极激励可以测得高质量的斯通利波信号, 可评价井壁裂缝发育程度和反演地层渗透率; 3) 四极子横波模式采用低频激发技术, 可有效避免四极子钻铤螺旋波对测量信号的影响, 在超软地层中也可以测得高质量横波信号; 4) 利用四极子横波频散校正技术, 可提取到地层横波的最大慢度为 $2\ 300\ \mu\text{s}/\text{m}$; 5) 可在套管井进行测量, 评价水泥胶结质量或计算水泥返高; 6) 配置了 8 GB 的存储器, 记录速度可以达到 1 次/s, 所有模式的测量数据都可记录存储起来, 最长工作时间可达 200 h; 7) QUAST 可与电阻率、中子、密度等其他随钻测井仪组合, 随钻声波测井资料可进行多种应用, 包括地

1 结构设计

1.1 整体结构及技术特点

随钻四极子声波测井仪 (QUAST) 由 Drilog[®] 随钻测井系统^[22] 和井下部分组成。井下部分由接收电路、扶正器、接收声系、隔声体、发射声系、扶正器及发射电路组成, 如图 1 所示。发射声系由一组单极子发射换能器和一组四极子发射换能器组成。隔声体采用了一种新型的隔声结构, 其外表面光滑, 内壁刻有周期性凹槽, 测井仪可以测得高质量的地层波信号。接收声系采用了阵列接收方式, 即每条接收声系内安装 8 个等间隔的接收换能器, 相邻 2 个接收换能器的间距为 0.152 4 m, 仪器外壳圆周方向上每隔 90° 安装一条接收声系, 因此该测井仪共有 32 个接收换能器。为了防止钻井液对传感器冲蚀, 发射换能器及接收声系外面均安装了金属薄壁罩。为确保钻井过程中随钻四极子声波测井仪居中, 发射声系上面和接收声系下面都安装了扶正器。发射电路和接收电路安装在仪器外壳内部, 通过过线杆实现通讯。随钻四极子声波测井仪有 3 种测量模式, 分别为单极子全波模式、四极子横波模式及低频斯通利波模式。

震相关分析、确定孔隙压力、复杂岩性测井解释及岩石力学特性分析等。

1.2 随钻声波发射换能器设计

随钻声波发射换能器是随钻声波测井仪的核心部件, 其涉及压电晶体理论设计、晶体的真空封装工艺和耐高温高压技术等, 目前国内外没有该方面的公开资料。笔者以一种圆弧状压电晶体为核心, 采用环氧树脂或橡胶作为封装材料, 应用了真空封装工艺, 研制了一种耐高温高压的随钻声波发射换能器, 如图 2 所示。随钻单极子换能器由 2 个半圆环组成, 随钻四极子换能器由 4 个四分之一圆环组成。每片圆环有 2 条引线, 分别对应压电晶体的正负极, 供电激励时采用不同的组合方式可产生单极子声源、偶极子声源或四极子声源。该换能器最高工作压力 140 MPa, 最高工作温度 150 °C。

孙志峰等人^[23]对圆弧状压电晶体随钻声波换

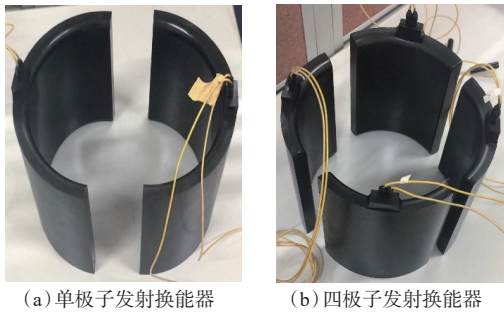


图 2 随钻声波发射换能器

Fig.2 Transmitting transducers while drilling

能器进行了理论分析, 笔者在此主要分析随钻声波换能器的实测效果。把随钻单极子换能器和随钻四极子换能器分别安装在测试短钻铤的凹槽内, 并进行机械固定, 放入消声水池进行声学测试, 随钻单极子和四极子换能器发射电压级曲线和水平指向性曲线分别如图 3 和图 4 所示。

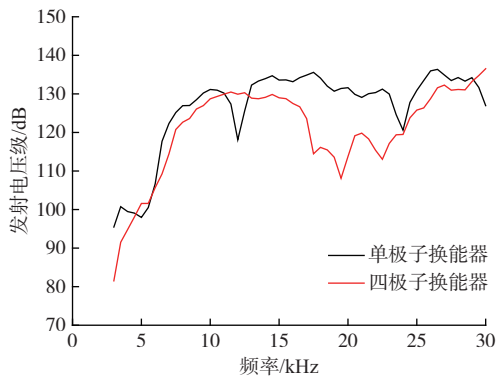


图 3 随钻声波换能器发射电压级

Fig.3 Transmitting voltage level of transmitting transducers while drilling

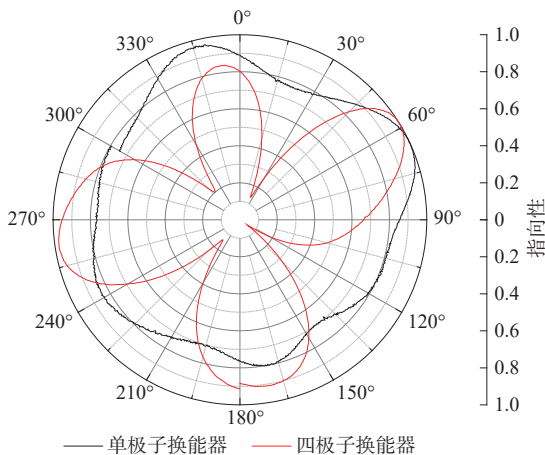


图 4 随钻声波换能器指向性曲线

Fig.4 Directivity of transmitting transducers while drilling

从图 3 可以看出: 随钻单极子换能器的谐振频

率在 10 kHz 附近, 此时发射电压级较高, 约 130 dB; 四极子换能器在 4 kHz 附近没有发生谐振, 发射电压级较低, 约 95 dB, 只能采用高电压受迫激励方式产生较强的激发能量。测量时, 随钻单极子和四极子换能器水平指向性曲线的激发频率分别为 10 和 4 kHz。

从图 4 可以看出: 随钻单极子换能器的声压幅度在 0°~360°变化不大, 其指向性接近一个圆形, 符合单极子声场辐射特性; 随钻四极子换能器的声压幅度在 59.1°、174.2°、260.2°和 353.1°处有极大值, 而在 24.9°、126.5°、220.0°和 319.2°处声压幅度有极小值, 指向性曲线近似 2 个正交的“∞”形, 符合四极子声源的辐射特性。

1.3 隔声体设计

随钻声波测井仪工作时, 声源激发出一种沿着钻铤传播的导波^[24], 若不作隔声处理, 钻铤波将会在测量信号中占主导地位, 从而严重干扰地层波速的测量。迄今为止, 所有的随钻声波隔声都采用在发射和接收换能器之间周期性刻槽的方法来阻隔沿着钻铤传播的波^[25-26], 但都是采用经验方法或数值模拟方法设计刻槽方案^[27]。笔者采用在外表面光滑钻铤内部刻周期性凹槽的方法制作隔声体, 其结构如图 5 所示。隔声体中间部位安装过线杆, 过线杆与隔声体内壁之间是钻井液通道。

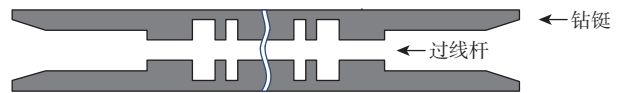


图 5 隔声体结构示意图

Fig.5 Structure of the isolator

笔者采用柱坐标系下的三维有限差分方法, 模拟了隔声体和钻铤的声场分布, 得到了某时刻的声场快照。数值模拟时, 隔声体和钻铤居中放置在半径为 0.50 m 的水柱中, 水柱高度 4.00 m, 声源为主频 10 kHz 的 Richer 子波, 水柱外表面为完全吸收边界条件。图 6 所示为 $t=580 \mu\text{s}$ 和 $t=880 \mu\text{s}$ 时隔声体、钻铤的声场快照。由图 6 可知, 钻铤波的传播速度最快, 隔声体极大地削弱了钻铤波的能量。

图 7 所示为数值模拟的隔声体和钻铤的时域波形、频谱曲线及其声衰减曲线, 图 7(a)和图 7(b)中的黑色曲线分别为钻铤的阵列接收波形和频谱曲线, 红色曲线分别为隔声体的阵列接收波形和频谱曲线。从图 7(a)可以看出, 隔声体会使钻铤波信号幅度明显衰减。从图 7(b)可以看出, 钻铤的钻铤波固有阻带为 11~14 kHz, 隔声体的隔声阻带为 8~15 kHz。单极子声源的激发频率只需在此隔声阻带内, 就可避免钻铤波对测量信号的干扰。由图 7

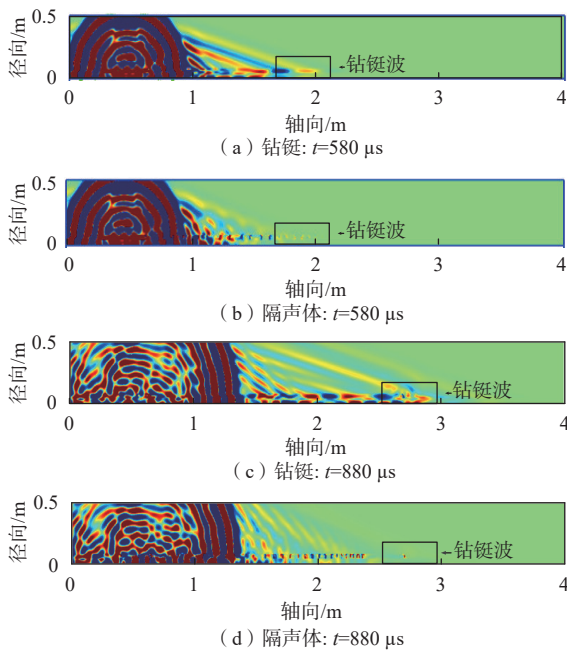


图6 隔声体和钻铤的声场快照

Fig.6 Acoustic field snapshots of the isolator and drill collar

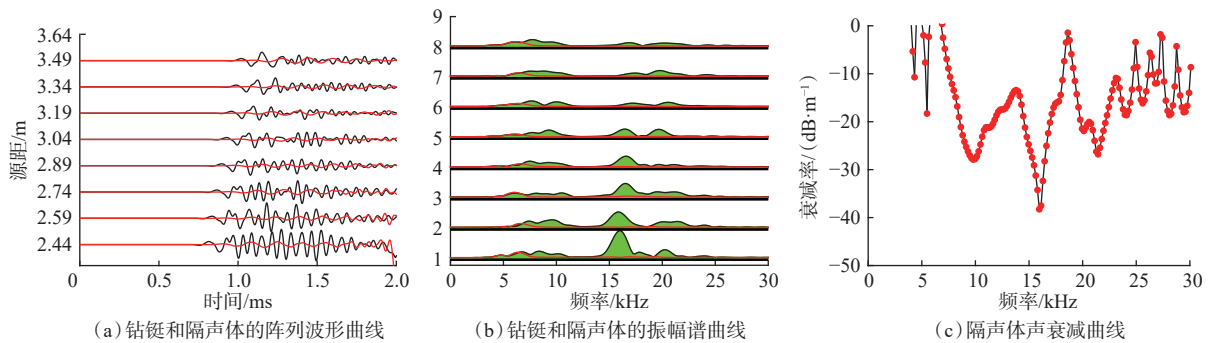


图7 隔声体数值模拟结果

Fig.7 Numerical simulation results of the isolator



图8 随钻声波接收声系示意

Fig.8 Receiving acoustic system while drilling

装、固定、封装和减振等难题，而且采用了模块化设计，便于安装和保养。

将随钻声波接收声系置于消声水池中进行了接收灵敏度测量，采用与标准水听器作比较的方法进行测量^[29]。测量时，以4个周期的Burst信号激励圆管状单极子发射器，电压峰峰值为200V。为了保证换能器能够达到稳态条件，扫频范围设为5~40kHz。图9所示为随钻声波接收声系在消声水池测量的接收灵敏度曲线。从图9可以看出，接收声系在频率为10kHz时的接收灵敏度最高，为-201.5dB，在频率为19kHz时的接收灵敏度最低，为-206.8dB，灵敏度起伏量为5.3dB。该接收声系在整个频率范

(c)可知，在隔声体的钻铤波隔声阻带内，最大隔声量可达-28dB。

1.4 随钻声波接收声系设计

电缆多极子阵列声波测井仪的接收换能器安装在声系骨架上，骨架外围采用橡胶皮囊包裹，内部充满硅油，以保证测量时接收换能器内外压力平衡。而随钻声波测井仪的接收声系需要固定在仪器外壳上，测量时要考虑振动、隔声和压力平衡等诸多因素的影响，因此随钻声波测井仪不适于采用电缆声波测井仪的橡胶皮囊密封方式。

笔者设计了一种金属壳的长方体状随钻声波接收声系，如图8所示，8个接收换能器采用机械方式固定在接收声系骨架上^[28]，相邻2个接收换能器的间距为0.1524m。声系骨架采用了“三明治”结构的包裹方式，以保护接收晶体及电路板；利用平衡活塞解决金属壳内外压力平衡问题。金属外壳采用异形橡胶包裹，既能起到减振作用，又能更好地隔离钻铤直达波。该设计不但解决了接收换能器安

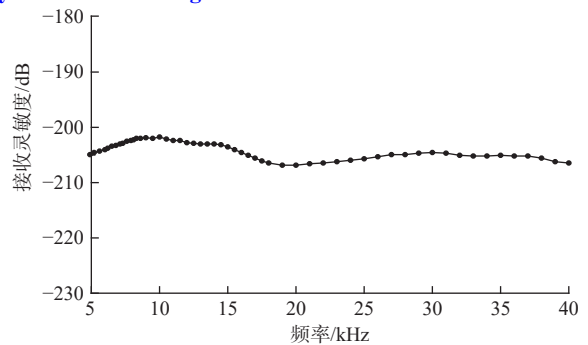


图9 随钻声波接收声系接收灵敏度曲线

Fig.9 Sensitivity curve of receiving acoustic system while drilling

围内, 接收灵敏度幅度变化很小, 非常有利于单极子或四极子等不同频率信号的接收。

2 现场试验

新疆轮台 KS3-B1Sa 井 1 495.00~1 615.00 m 井段进行了随钻四极子声波测井仪试验。钻进该井段的钻具组合为 $\phi 215.9$ mmPDC 钻头+旋转导向测量仪+随钻四极子声波测井仪+随钻电阻率测井仪+定

向测量仪+工程参数测量仪+高速率钻井液传输短节, 机械钻速 40~60 m/h, 钻井液排量 1 700 L/min, 井底压力约 50 MPa, 温度 80 ℃。试验时首先将钻具组合下至井深 1 495.00 m, 开泵测试, 地面系统显示井下随钻四极子声波测井仪工作正常, 然后进行旋转导向钻进, 钻至井深 1 615.00 m, 试验结束, 起钻, 读取随钻四极子声波测井仪内存中的测井数据, 进行处理分析。随钻四极子声波测井仪测得的原始波形及处理分析结果如图 10 所示。

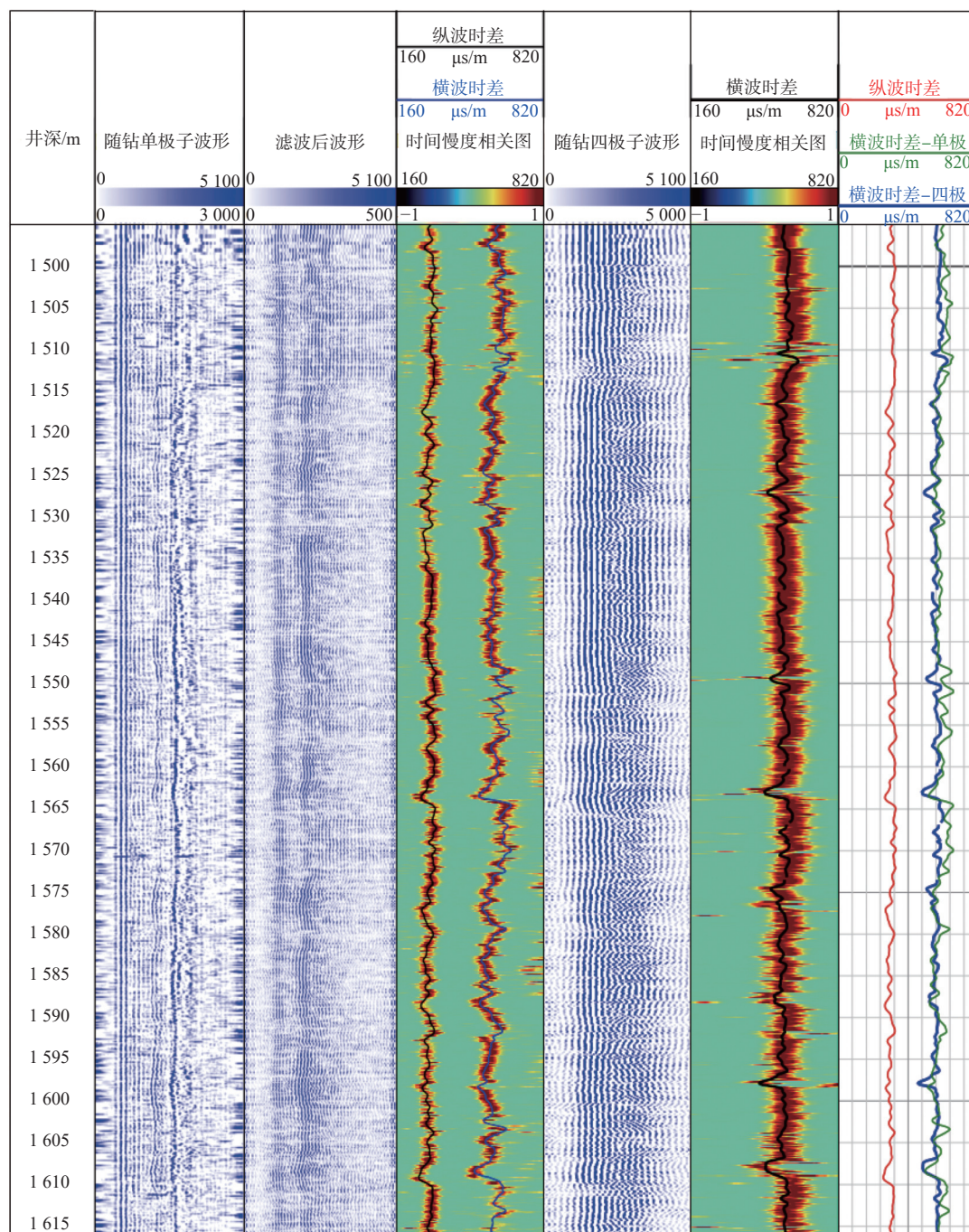


图 10 随钻四极子测井仪 (QUAST) 实钻测量结果

Fig.10 Field drilling measurements of QUASt

图 10 中,第 1 道是井下内存记录的单极子全波原始波形变密度图,从原始波形可看到钻井低频噪声信号、到时基本不随井深变化的钻铤波信号、到时较晚的低频斯通利波信号及地层波信号。随钻四极子声波测井仪的最佳隔声阻带是 8~15 kHz,对原始波形进行 8~15 kHz 的带通滤波,得到第 2 道的滤波后波形和第 3 道的速度分析结果。从第 2 道可以看出,滤波后的波形纯净,无钻铤波干扰,为来自地层的声波信号;进一步进行速度分析表明,地层波信号包含纵波和横波成分,信噪比和相关性很好(见第 3 道)。第 4 道为原始四极子全波波形,可以清晰观察到随地层速度变化的低频四极子横波信号,速度分析表明,四极子横波的相关性很好(见第 5 道),具有明显的低频特征,无钻铤四极子波干扰信号。第 6 道为单极子测量的纵波、横波时差与四极子横波时差,可以看出,单极子全波测量的横波时差与四极子横波测量的时差吻合很好,这证明随钻四极子横波测量模式及时差测量结果是正确的。

以上对随钻四极子声波测井仪现场实钻测量数据的处理分析表明,该测井仪测得的地层纵波及横波信息可靠,测量结果可为准确评价地层提供依据。

3 结论与建议

1)介绍了随钻四极子声波测井仪(QUAST)的结构和技术特点,阐述了该测井仪传感器、隔声体及接收声系等关键部件的设计方法。现场试验结果表明,该测井仪的电路系统、机械性能和声波时差实时上传等稳定可靠。

2)在硬地层,QUAST 采用单极子全波模式可测得高质量的地层纵波及横波信号,测量结果不受钻铤波信号的影响。四极子横波模式测得横波信噪比高,波形相关性好,与单极子横波吻合,无钻铤四极子横波干扰。因此,采用四极子横波模式测井不需要对隔声体进行特别设计,就能测得地层的横波速度。

3)未来随钻声波测井仪的研究重点,应该是解决地层周向速度成像问题、探测地层边界附近不同方位测量的地层纵波速度的差异,进而描述井周围三维岩石力学特征。

参 考 文 献

References

- [1] 杨晓峰. CPR 随钻测井系统在薄油层中的应用[J]. 特种油气藏, 2011, 18(2): 129-131.
YANG Xiaofeng. Application of CPR logging while drilling in thin reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(2): 129-131.
- [2] 高彦峰, 赵文帅. FEWD 地质导向技术在深层页岩气水平井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(4): 427-431.
GAO Yanfeng, ZHAO Wenshuai. Application of FEWD geology steering technology in deep shale gas horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(4): 427-431.
- [3] 王谦, 苏波, 李震, 等. 随钻地质导向在 S7-59H 井中的应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(2): 252-257.
WANG Qian, SU Bo, LI Zhen, et al. Application of LWD geosteering in S7-59H Well[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(2): 252-257.
- [4] 杨彬, 李琳艳, 孔健, 等. 随钻地质建模技术在水平井地质导向中的应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(2): 30-36.
YANG Bin, LI Linyan, KONG Jian, et al. Application of geology modeling while drilling technology in horizontal well geosteering[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(2): 30-36.
- [5] 房超, 项德贵, 赵庆, 等. 地质导向软件发展现状、趋势及国产化建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 385-392.
FANG Chao, XIANG Degui, ZHAO Qing, et al. Development status and trend of geosteering software and the suggestions for its localization[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 385-392.
- [6] 林昕, 苑仁国, 谭伟雄, 等. 地质导向钻井着陆关键技术及分析图版[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 700-705.
LIN Xin, YUAN Renguo, TAN Weixiong, et al. Key technology and analysis chart of geosteering drilling landing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(5): 700-705.
- [7] 陆自清. 基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 113-120.
LU Ziqing. Geosteering methods of a dynamic geological model based on Kalman filter[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 113-120.
- [8] DEGRANGE J M, HAWTHORN A, NAKAJIMA H, et al. Sonic while drilling: multipole acoustic tools for multiple answers[R]. SPE 128162, 2010.
- [9] 朱祖扬, 吴海燕, 李永杰, 等. 钻铤结构对随钻声波测井响应的影响[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(6): 117-122.
ZHU Zuyang, WU Haiyan, LI Yongjie, et al. The effect of collar structure on acoustic logging response while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(6): 117-122.
- [10] 吴金平, 陆黄生, 朱祖扬, 等. 随钻声波测井声系短节模拟样机试验研究[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(2): 106-111.
WU Jinping, LU Huangsheng, ZHU Zuyang, et al. Experimental study on the simulation prototype of acoustic nipples for logging-while-drilling (LWD)[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(2): 106-111.
- [11] 朱祖扬, 陆黄生, 张卫, 等. 随钻声波测井声系短节的研制与测试[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 83-87.
ZHU Zuyang, LU Huangsheng, ZHANG Wei, et al. Development and testing of acoustic nipples while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(5): 83-87.
- [12] 许连明. 全频率小波去噪方法在随钻四极横波测井中的应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2034-2040.
XU Lianming. Application of full frequency wavelet denoising

- method in quadrupole logging while drilling[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 2034–2040.
- [13] 杨书博, 乔文孝, 赵琪琪, 等. 随钻前视声波测井钻头前方声场特征研究 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(2): 113–120.
YANG Shubo, QIAO Wenxiao, ZHAO Qiqi, et al. The characteristics of the acoustic field ahead of the bit in “look-ahead” acoustic logging while drilling[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 113–120.
- [14] SUN Zhifeng, LIU Xien, QIU Ao, et al. Evaluation on application effect of homemade LWD acoustic logging tool: 2016 SEG Rock Physics & Borehole Geophysics Workshop, Beijing, August 29–30, 2016[C].
- [15] TANG Xiaoming, CHENG A, CHENG Chuen Hon. Quantitative borehole acoustic methods[M]. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [16] 王华, 陶果, 王兵, 等. 多极子随钻声波测井波场模拟与采集模式分析 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(9): 2402–2409.
WANG Hua, TAO Guo, WANG Bing, et al. Wave field simulation and data acquisition scheme analysis for LWD acoustic tool[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(9): 2402–2409.
- [17] WANG Hua, TAO Guo. Wavefield simulation and data-acquisition-scheme analysis for LWD acoustic tools in very slow formations[J]. *Geophysics*, 2011, 76(3): E59–E68.
- [18] 王瑞甲, 乔文孝, 鞠晓东. 利用随钻正交偶极子声波测井评价地层各向异性的数值研究 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3870–3882.
WANG Ruijia, QIAO Wenxiao, JU Xiaodong. Numerical study of formation anisotropy evaluation using cross dipole acoustic LWD [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3870–3882.
- [19] 李希强, 陈浩, 何晓, 等. 横向各向同性地层中随钻声波测井模式波分析 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(9): 3212–3222.
LI Xiqiang, CHEN Hao, HE Xiao, et al. Analyses on mode waves of acoustic logging while drilling in transversely isotropic formations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9): 3212–3222.
- [20] 仇傲, 刘西恩, 陈洪海, 等. 随钻声波测井仪电路系统设计及关键技术实现 [J]. *石油仪器*, 2015, 1(1): 23–26.
QIU Ao, LIU Xien, CHEN Honghai, et al. Design and key technologies of the circuit system of acoustic LWD tool[J]. *Petroleum Instruments*, 2015, 1(1): 23–26.
- [21] SUN Zhifeng, TANG Xiaoming, HE Xiao, et al. Numerical simulations of wave fields for acoustic logging while drilling tools in a fluid-filled trough[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2020, 17(4): 602–617.
- [22] 菅志军, 尚捷, 彭劲勇, 等. Welleader[®]及 Drilog[®]系统在渤海油田的应用 [J]. *石油矿场机械*, 2017, 46(6): 57–62.
JIAN Zhijun, SHANG Jie, PENG Jinyong, et al. Application of Welleader[®] & Drilog[®] system in the Bohai Oilfield[J]. *Oil Field Equipment*, 2017, 46(6): 57–62.
- [23] 孙志峰, 唐晓明, 苏远大, 等. 随钻声波测井圆弧状压电阵子的有限元分析 [J]. *应用声学*, 2019, 38(5): 807–814.
SUN Zhifeng, TANG Xiaoming, SU Yuanda, et al. The finite element analysis of arcuate shaped piezoelectric vibrator used in LWD acoustic logging[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2019, 38(5): 807–814.
- [24] 杨勇, 车小花, 李俊, 等. 基于时域有限差分法的随钻声波测井仪隔声体隔声效果的数值模拟 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(3): 66–70.
YANG Yong, CHE Xiaohua, LI Jun, et al. Sound isolation numerical simulation on isolator of logging while drilling sonic tool using finite difference time-domain method[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2009, 33(3): 66–70.
- [25] 闫向宏, 苏远大, 孙建孟, 等. 周期性轴对称凹槽结构隔声特性数值模拟 [J]. *计算物理*, 2010, 27(6): 869–876.
YAN Xianghong, SU Yuanda, SUN Jianmeng, et al. Acoustic characteristics of axisymmetric periodic groove structures[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2010, 27(6): 869–876.
- [26] 苏远大, 庄春喜, 唐晓明. 随钻声波测井钻铤模式波衰减规律研究与隔声体设计 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(9): 2419–2428.
SU Yuanda, ZHUANG Chunxi, TANG Xiaoming. LWD acoustic color mode wave attenuation character research and isolator design[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(9): 2419–2428.
- [27] 苏远大, 庄春喜, 唐晓明, 等. 一种刻槽式随钻声波测井隔声体的理论与实验研究 [J]. *地球物理学报*, 2016, 59(12): 4521–4528.
SU Yuanda, ZHUANG Chunxi, TANG Xiaoming, et al. Theoretical and experimentation of a carved collar isolator for logging-while-drilling acoustic tool[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(12): 4521–4528.
- [28] 孙志峰, 唐晓明, 苏远大, 等. 随钻多极子声波测井仪接收换能器的数值模拟 [J]. *测井技术*, 2019, 43(2): 118–121.
SUN Zhifeng, TANG Xiaoming, SU Yuanda, et al. Numerical simulation of transducer of LWD multipole acoustic logging tool[J]. *Well Logging Technology*, 2019, 43(2): 118–121.
- [29] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵 [M]. 修订版. 北京: 北京大学出版社, 2005: 326–336.
LUAN Guidong, ZHANG Jinduo, WANG Renqian. Piezoelectric transducer and transducer array[M]. Revision. Beijing: Peking University Press, 2005: 326–336.

[编辑 刘文臣]