

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2022089

引用格式: 孙志峰, 仇傲, 金亚, 等. 随钻多极子声波测井仪接收声系的优化设计与试验 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 114-120.

SUN Zhifeng, QIU Ao, JIN Ya, et al. Optimal design and experimental study of the receiver sonde in multipole acoustic LWD tools [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 114-120.

随钻多极子声波测井仪接收声系的优化设计与试验

孙志峰, 仇傲, 金亚, 李杰, 罗博, 彭凯旋

(中海油田服务股份有限公司, 北京 101149)

摘 要: 随钻多极子声波测井仪的接收声系直接影响采集信号的质量和测井仪机械结构的稳定性。为此, 采用有限元法与试验测量相结合的方法, 优化设计了随钻多极子声波测井仪器的接收声系。接收声系模拟分析结果表明, 接收声系的性能主要受压电陶瓷片厚度、面积、封装外壳厚度及表面平整度的影响: 压电陶瓷片厚度越大, 接收灵敏度越高, 频率在 15 kHz 以下时压电陶瓷片表面积对接收灵敏度影响不大; 接收声系封装外壳的厚度越小, 表面平整度越好, 接收灵敏度的变化幅度越小。在此基础上, 采用 3D 打印技术加工了厚度分别为 0.5 和 2.0 mm 的长条方管铝制金属外壳, 并对制作的接收声系进行了灵敏度试验, 试验结果与理论计算结果基本吻合, 采用薄壁接收声系外壳更有利于接收测量信号。随钻多极子接收声系的优化设计为国产随钻声波测井仪的研制提供了新思路。

关键词: 接收换能器; 接收声系; 灵敏度; 随钻声波测井; 优化设计; 实验室试验

中图分类号: TE27⁺1; P631.8⁺14

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)04-0114-07

Optimal Design and Experimental Study of the Receiver Sonde in Multipole Acoustic LWD Tools

SUN Zhifeng, QIU Ao, JIN Ya, LI Jie, LUO Bo, PENG Kaixuan

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

Abstract: The receiver sonde of multipole acoustic logging while drilling (LWD) tools directly affects the quality of collected signals and the stability of the tool's mechanical structure. Therefore, the receiver sonde of multipole acoustic LWD tools was optimized in this study by combining finite element method and experimental measurements. The analysis of the receiver sonde simulation showed that the performance of the receiver sonde was mainly affected by the thickness and area of piezoelectric ceramic slices as well as the thickness and surface flatness of packaging shells. In addition, receiving sensitivity would be enhanced as the thickness of piezoelectric ceramic slices increased, and the area of piezoelectric ceramic slices had no obvious effect on receiving sensitivity when the frequency was below 15 kHz. Furthermore, the variation range of the receiving sensitivity would be smaller as the thickness of packaging shells decreased and the surface flatness increased. On this basis, long square tubes with aluminum shells were processed using 3D printing technology, with a thickness of 0.5 mm and 2.0 mm, respectively. Then, the fabricated receiver sonde was tested in terms of sensitivity, and the test results were in good agreement with the calculated results. As a result, it was demonstrated that thin-wall shells were more beneficial to the signal receiving of measurement. The optimal design of receiver sonde in multipole acoustic LWD tools will provide new possibilities for designing and developing acoustic LWD tools in China.

Key words: receiving transducer; receiver sonde; sensitivity; acoustic LWD; optimal design; laboratory test

随钻声波测井在提高钻井效率、节省平台占用时间和实时地层评价等方面比传统的电缆声波测井

具有较大优势, 因此, 近些年广泛应用于油气田勘探与开发^[1-3]。与电缆声波测井仪的测量环境相比,

收稿日期: 2022-02-17; 改回日期: 2022-06-15。

作者简介: 孙志峰 (1979—), 男, 河北沧州人, 2004 年毕业于石油大学 (华东) 应用物理专业, 2020 年获中国石油大学 (华东) 资源与地质工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事声波测井方法研究。E-mail: sunzhf3@cnoc.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目“随钻声波远探测成像测井理论与实验方法” (编号: U21B2064)、中国海洋石油集团有限公司科研项目“旋转导向谱系化技术与产业化研究” (编号: YJB22YF002) 联合资助。

随钻声波测井仪的测量环境更加复杂,不可避免地受到钻具振动、钻井噪声等因素影响,因此提高随钻声波信号的信噪比更有利于地层评价^[4-5]。随钻声波测井仪的接收声系包含接收传感器、近探头采集电路系统等,主要用于地层信号的采集处理,其设计非常复杂。因此,接收声系设计和研制成为我国研制随钻多极子声波测井仪的关键^[6]。

电缆多极子阵列声波测井仪的接收声系,一般采用橡胶皮囊作为封装外壳,外壳里面充满硅油,以保证声系内外压力平衡^[7-8]。而随钻测井环境复杂、恶劣,钻井液中的岩石碎屑对测井工具外壳的冲刷非常严重,传统的橡胶皮囊很容易被划破;另外,接收换能器需要安装在钻铤狭小的凹槽内,传统橡胶皮囊封装接收声系的方式也不适用于随钻声波测井仪。目前,随钻声波测井仪接收声系主要有 2 种设计方案:1)接收换能器采用多个压电陶瓷片串联或并联,利用非导电材料对其封装,采集电路安装在钻铤内部,该设计方案的优点是结构简单、易维保,但封装工艺复杂,且无法接收方位信号^[9];2)采用充油型长条方管金属外壳,在钻铤的 4 个方位凹槽内分别安装接收声系,采集多方位的阵列声波信号,进行相位叠加获取地层的纵横波信息^[10]。第 2 种设计方案适用于随钻多极子信号或随钻方位信号的测量,优点是不需要复杂的换能器封装工

艺,但涉及接收换能器设计、安装方式等其他技术问题;另外,需要采用声系外壳密封保护接收换能器,因此,需要对接收声系外壳进行优化设计。

基于以上分析,笔者采用有限元分析方法,对适用于随钻多极子声波测井仪的叠片型接收换能器进行了优化设计^[11],并设计制作了一种长条方管形薄壁铝壳的接收声系封装外壳,然后在室内对接收声系进行了接收灵敏度及声学试验,以期随钻多极子声波测井仪接收声系的优化设计提供理论依据和工程指导。

1 随钻多极子接收声系模拟模型

随钻多极子声波测井仪采用四方位阵列接收方式,每个方位安装 8 个阵列接收换能器,为保证接收换能器不受钻铤振动的影响,需要把换能器固定在声系骨架上。图 1 为其中一条接收声系的二维截面。换能器采用两端钳定边界方式固定在声系骨架上,相邻 2 个接收换能器的距离为 0.152 4 m。为了减小钻铤波对接收信号的影响,把相邻 2 个接收换能器之间的骨架镂空,镂空位置安装近探头电路板。骨架外面采用长条方管外壳封装,外壳内充满硅油。方管的一端安装压力平衡装置,以保证测井仪接收声系在高温高压条件下内外压力平衡。

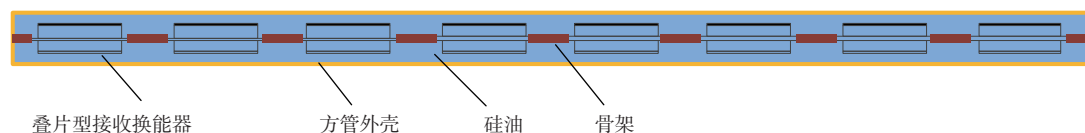


图 1 随钻多极子接收声系二维截面示意

Fig.1 Two-dimensional cross section of receiver sonde in multipole acoustic LWD tool

接收声系中的换能器采用了叠片型接收换能器,其基本结构如图 2 所示。接收换能器由 2 片相同尺寸的压电陶瓷片和 3 个金属基片粘接而成。压电陶瓷片及金属基片均采用矩形板状结构,上下 2 个金属基片的长度和宽度与压电陶瓷片一致。因接收换能器通过中间金属基片固定在接收声系骨架上,其长度略大于上下 2 个金属基片,宽度与上下 2 个金属基片相同。2 片压电陶瓷片的极化方向相反,换能器采用并联工作方式,中间的金属基片接电源负极,2 片压电陶瓷片外侧面接电源正极。换能器受外部声场的作用发生形变,从而产生电信号。

孙志峰等人^[12]采用有限元法分析了边界条件对叠片型随钻多极子接收换能器接收灵敏度的影

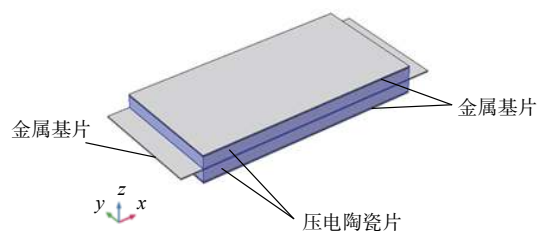


图 2 叠片型接收换能器的三维结构

Fig.2 Three-dimensional structure of laminated receiving transducer

响,本文在此基础上对叠片型接收换能器进行几何尺寸优化设计。数值模拟分析计算时,采用的压电陶瓷片材料为 PZT-5A,金属基片材料为铜,长条方

管材质为铝,骨架材质为PEEK。计算分析时忽略粘接、引线及电路板等装配结构的影响。图2所示模型中,压电陶瓷片的长度为50.0 mm,宽度为25.0 mm,厚度为2.5 mm。上下2个金属基片的长度和宽度与压电陶瓷片相同,厚度均为0.2 mm;中间金属基片的长度为55.0 mm,宽度为25.0 mm,厚度取1.0 mm;中间金属基片两端打孔,采用两端钳定边界方式用螺栓固定在接收声系骨架上。

2 压电陶瓷片的优化设计

通过分析陶瓷片厚度、面积对接收灵敏度的影响,进行了压电陶瓷片的优化设计。数值模拟分析中,为了减小计算量,忽略接收声系骨架、接收声系外壳等结构的影响,仅考察单个接收换能器的灵敏度响应。

2.1 陶瓷片厚度对接收灵敏度的影响

压电陶瓷片厚度分别为1.5、2.0、2.5、3.0和3.5 mm,其他参数保持不变,模拟分析压电陶瓷片厚度对接收换能器灵敏度的影响,结果如图3所示(压电陶瓷片厚度记为 D)。

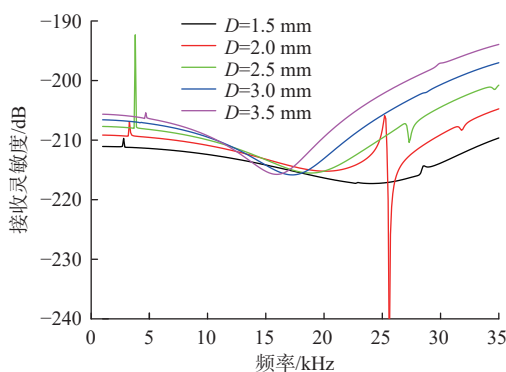


图3 不同厚度陶瓷片的接收灵敏度曲线

Fig.3 Receiving sensitivity curves of piezoelectric ceramic slices with different thicknesses

从图3可以看出:不同厚度压电陶瓷片的接收灵敏度曲线变化规律相似,均存在一个灵敏度极小值;随着压电陶瓷片厚度增大,灵敏度极小值频率点向低频移动;频率低于15 kHz时,压电陶瓷片厚度越大,接收灵敏度越高;压电陶瓷片厚度越小,灵敏度曲线的变化幅度越小。由于压电陶瓷片的厚度决定了接收声系凹槽深度,为了保证钻铤的机械强度,压电陶瓷片的厚度不宜太大。因此,压电陶瓷片厚度取2.5 mm。

2.2 陶瓷片表面积对接收灵敏度的影响

其他参数保持不变,2个压电陶瓷片的厚度均为2.5 mm,表面积(长×宽)分别为40.0 mm×20.0 mm、50.0 mm×25.0 mm、60.0 mm×30.0 mm,模拟分析压电陶瓷片表面积对接收换能器灵敏度的影响,结果如图4所示(压电陶瓷片的长度记为 L ,宽度记为 W)。

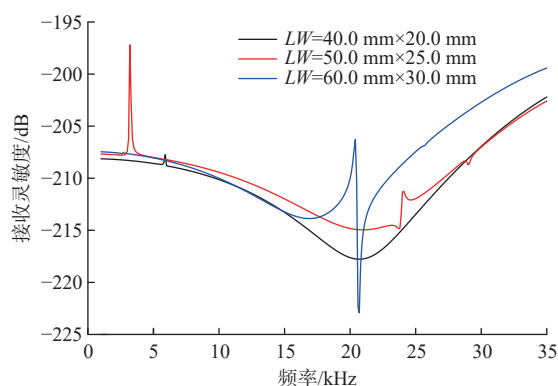


图4 不同表面积压电陶瓷片的接收灵敏度曲线

Fig.4 Receiving sensitivity curves of piezoelectric ceramic slices with different areas

从图4可以看出,换能器的工作频率低于15 kHz时,不同表面积陶瓷片的灵敏度相近,且随着频率增大而逐渐降低;频率在15~35 kHz时,表面积小的陶瓷片灵敏度较低,而表面积大的陶瓷片灵敏度较高。由于随钻声波测井仪的工作一般频率低于15 kHz,在该频率范围内不同表面积的陶瓷片灵敏度差异不大。因此,为了节省钻铤开槽空间,压电陶瓷片尺寸取40.0 mm×20.0 mm。

3 接收声系的优化设计

除了接收换能器的厚度和表面积对接收灵敏度有较大影响外,接收换能器的封装外壳对接收信号的灵敏度也有很大影响,因此对图1中的长条方管铝壳接收声系建立了有限元分析模型,考察铝壳特性对接收灵敏度的影响(每个叠片型接收换能器取优化后的几何尺寸)。

3.1 铝壳厚度对接收灵敏度的影响

考察铝壳厚度分别为0.1、0.3、0.5和0.7 mm时的接收灵敏度,结果如图5所示(铝壳厚度记为 T)。

从图5可以看出:在随钻声波测井仪工作频段内(低于15 kHz),铝壳厚度为0.1 mm时,在频率14.8 kHz处出现最小值-220.6 dB,在频率2.6 kHz处出现最大值-202.6 dB,变化幅度为18.0 dB;铝壳厚度为0.3 mm时,在频率9.8 kHz处出现最小值

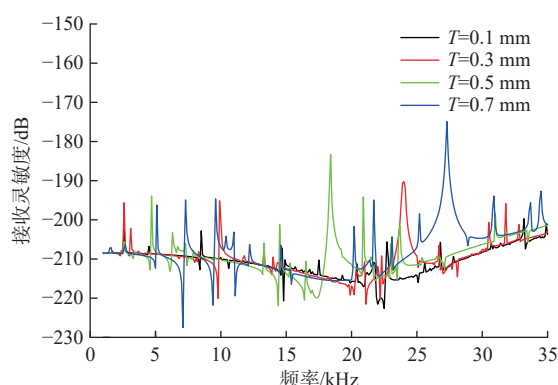


图 5 不同铝壳厚度下的接收灵敏度曲线

Fig.5 Receiving sensitivity curves of different aluminum shell thicknesses

-220.1 dB, 在频率 10.0 kHz 处出现最大值-195.4 dB, 变化幅度为 24.7 dB; 铝壳厚度为 0.5 mm 时, 在频率 14.4 kHz 处出现最小值-222.0 dB, 在频率 4.7 kHz 处出现最大值-193.7 dB, 变化幅度为 28.3 dB; 铝壳厚度为 0.7 mm 时, 在频率 7.1 kHz 处出现最小值-227.5 dB, 在频率 9.6 kHz 处出现最大值-194.6 dB, 变化幅度为 32.9 dB。模拟结果表明, 金属铝壳厚度越薄, 换能器接收灵敏度变化幅度越小, 反之越大。因此, 在铝壳厚度加工能力允许范围内, 尽量采用较薄的铝壳封装换能器, 这样更有利于不同频率接收信号的采集。

3.2 铝壳表面平整度对接收灵敏度的影响

考察铝壳表面的平整度对接收换能器灵敏度的影响时, 利用接收换能器模型的对称性, 只需模拟二分之一结构即可。二分之一接收声系的二维(XZ向)截面如图 6 所示。图 6 中, 铝壳的表面有随机分布的凹槽凸起结构, 截取一个接收换能器结构单元, 其他接收器单元未显示。铝壳的上下表面对称分布, 凹槽和凸起高度均为 0.1 mm, 铝壳厚度为 0.5 mm。接收换能器位于铝壳中心, 两端采用钳定边界方式固定, 铝壳内充满硅油。

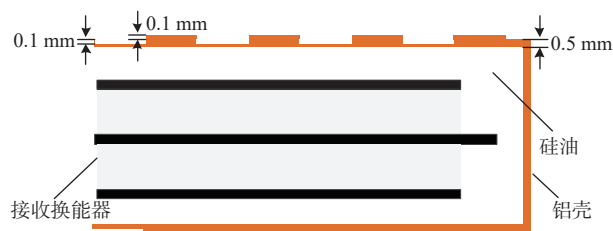


图 6 接收声系的二维截面

Fig.6 Two-dimensional cross section of receiver sonde

图 7 所示为平整铝壳与不平整铝壳接收灵敏度曲线对比。

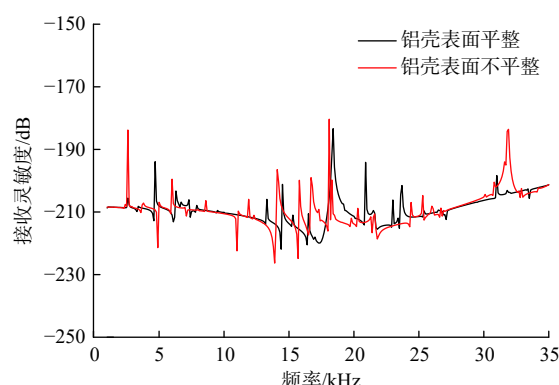


图 7 平整铝壳与不平整铝壳接收灵敏度的对比

Fig.7 Comparison of receiving sensitivity between flat and uneven aluminum shells

从图 7 可以看出: 在声波测井仪工作频段内(低于 15 kHz), 铝壳表面不平整时, 在频率 13.9 kHz 处出现最小值-225.8 dB, 在频率 2.6 kHz 处出现最大值-183.7 dB, 变化幅度为 42.1 dB; 铝壳表面平整时, 2.1 中模拟厚度为 0.5 mm 铝壳接收声系的灵敏度变化幅度为 28.3 dB。因此, 表面平整铝壳的灵敏度变化幅度远小于表面不平整铝壳。另外, 铝壳表面不平整, 还会产生更多的灵敏度跳跃点, 因此, 保持铝壳表面平整, 更有利于接收测量信号。

4 多极子接收声系的制作及试验

4.1 接收声系的制作

根据优化设计的叠片型接收换能器的几何参数, 加工制作了一种随钻多极子接收声系, 其内部骨架结构如图 8 所示。8 个接收换能器采用机械安装方式固定在接收声系骨架上, 接收换能器之间固定近探头采集电路板; 另外, 采用非导电材料对接收声系骨架包裹, 以有效保护压电陶瓷片及采集电路板。

根据前述数值模拟结果, 应该采用厚度较薄且表面均匀的铝壳, 但传统的制作方法是把圆柱管轧成长条方形铝壳, 这种制造工艺会导致铝壳厚度不均匀, 表面不平整。为了更好地接收测量信号, 采用最新的 3D 打印技术制作了长条方管铝壳(见图 9)。实际打印的铝壳厚度为 0.5 mm, 且厚度非常均匀, 表明平整平滑。把图 8 所示的接收声系骨架放入到铝壳中, 并充满硅油。

4.2 接收灵敏度试验

在消声水池进行接收声系灵敏度试验, 水池尺寸 50 m×15 m×10 m。采用与标准水听器作比较的方

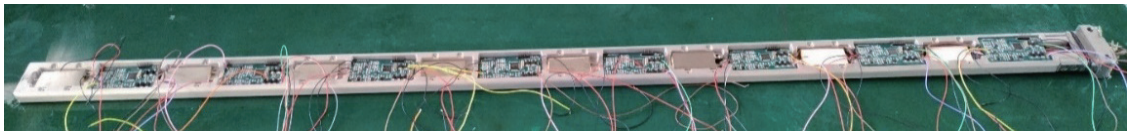


图8 接收声系骨架实物

Fig.8 Skeleton of receiver sonde



图9 3D 打印的铝壳实物

Fig.9 Aluminum shell processed by 3D printing technology

法进行测量^[13],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100 V,扫频范围4~20 kHz,步长500 Hz。随钻多极子接收声系通过试验得到的接收灵敏度曲线,以及数值计算得到的灵敏度曲线如图10所示。

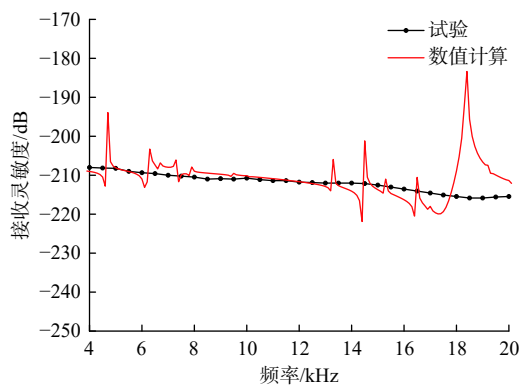


图10 试验与数值计算得到的接收灵敏度曲线对比

Fig.10 Comparison of receiving sensitivity curves between experiment and calculation results

从图10可以看出,接收声系的接收灵敏度在频率4 kHz处出现最大值-207.8 dB,在频率19 kHz处最小,为-215.8 dB,变化幅度为8.0 dB。试验结果表明,该接收声系在整个频率范围内接收灵敏度幅度变化很小,非常有利于单极或四极等对不同频率测量信号的接收。对比理论计算结果可知,4~18 kHz频率范围内,灵敏度曲线均缓慢降低,但理论计算的灵敏度曲线跳跃点比较多。导致两者存在这些差异的原因可能是,有限元计算时所选用的材料参数与实际接收器的材料参数不完全一致,有限元计算时忽略了近探头采集电路板和换能器粘接层等因素,测量时流体介质模型与有限元计算模型也不完全相同,实验室试验的扫频步长大于数值模拟时的频率步长,同时试验也存在一些误差。由于接收声系实际的灵敏度变化幅度小于8.0 dB,说明优化设计后接收声系中各项参数是合理的,该接收声系具

有高灵敏度、宽频带的特点。

4.3 接收声系水槽试验

为了验证接收声系外壳厚度对接收信号幅度的影响,制作了厚度分别为0.5和2.0 mm的长条方管铝壳,并分别封装了接收声系,在实验室半开口水槽进行试验^[14]。试验装置如图11所示:把单条的接收声系放置在充满水的半开口水槽底部,发射端放置一个自制发射测试短钎,测试短钎安装随钻单极子发射换能器^[15-16];发射换能器距离接收声系第一个接收换能器的距离为3.50 m;水槽内径200 mm、开口120°,壁厚2.0 mm,要保证水的深度覆盖发射测试短钎;采用自制的高压发射电路激励单极发射换能器,发射电压为 $\pm 2\,000\text{ V}$ 的脉冲信号,声源中心激发频率为10 kHz;采用示波器记录套管波信号。

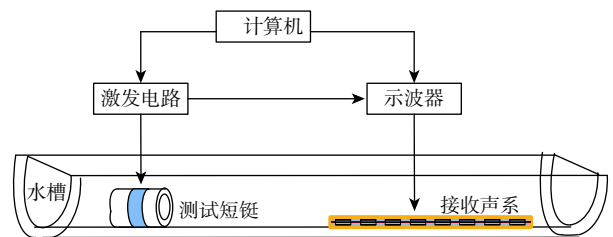


图11 试验装置示意

Fig.11 Experimental setup

不同厚度铝壳的接收声系在水槽中接收到的信号如图12所示。其中,图12(a)、图12(b)分别为壁厚2.0和0.5 mm铝壳的接收声系时域接收信号的波形及时间慢度相同分析结果。

从图12(a)可以看出:套管波信号约0.8 ms到达接收声系,第1,3,4,5和8道接收信号的首波较为明显,而其他道的接收器信号幅度非常弱,且噪声信号干扰很大;由时间慢度相关分析结果可见,该信号的慢度约为200 $\mu\text{s}/\text{m}$,且相关系数较低,表明接收到信号的误差较大。

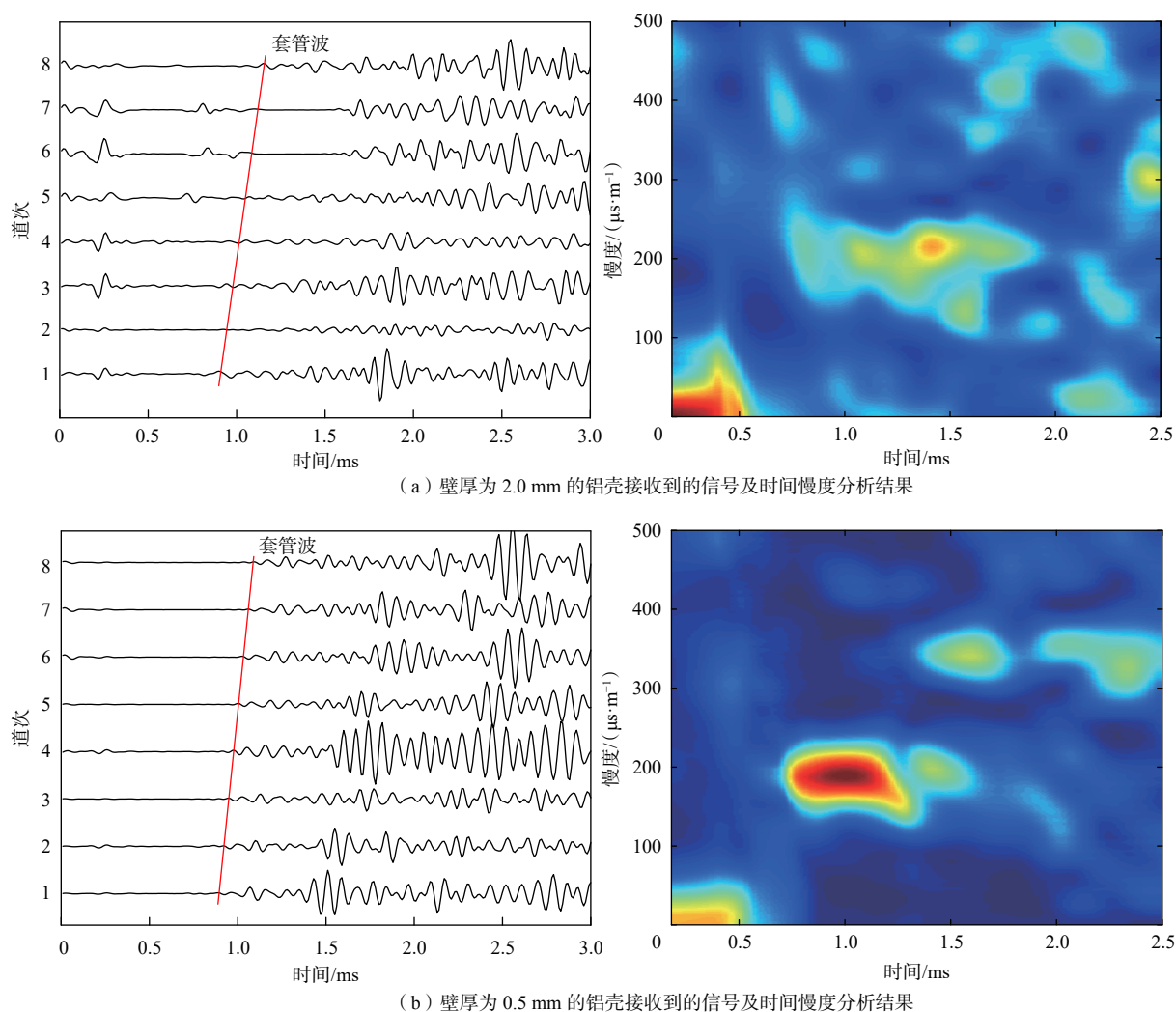


图 12 试验记录的测量波形

Fig.12 Waveforms recorded in experiments

从图 12(b)可以看出:套管波信号约 0.8 ms 到达接收声系,且 8 个接收器首波信号幅度都比较强,噪声信号很小;由时间慢度相关分析结果可见,该信号的慢度约为 $192 \mu\text{s}/\text{m}$,且相关系数很大,波形相关性良好,因此接收到信号的误差很小。

接收声系水槽试验结果表明,采用薄壁长条方管封装的接收声系可以接收到套管波信号,且接收声系外壳厚度对接收信号有很大影响,实际制作接收声系时封装外壳应该尽量采用薄壁外壳。

5 结 论

1)数值模拟结果表明,在随钻声波测井仪的工作频率内,随着压电陶瓷片厚度增大,接收换能器的灵敏度增强;压电陶瓷片的表面积增大对接收灵敏度影响不大。实际制作接收换能器时,压电陶瓷

片太厚会导致钻铤开槽深度太深,使钻铤机械强度降低。压电陶瓷片厚度以 2.5 mm 左右为宜,表面积取 $40.0 \text{ mm} \times 20.0 \text{ mm}$ 。

2)数值模拟结果表明,接收声系外壳表面平整度越好,外壳厚度越小,接收灵敏度的变化幅度越小。采用 3D 打印技术制作超薄声系外壳,可以提高声系外壳的平整度,有利于提高采集信号的质量。

3)优化设计后的接收声系的灵敏度试验表明,在频率为 $4 \sim 18 \text{ kHz}$ 频带内,接收灵敏度最小值为 -215.8 dB ,灵敏度变化幅度小于 8.0 dB 。水槽声学试验表明,接收声系铝壳壁厚为 0.5 mm 比为 2.0 mm 接收到的套管波信号更强,波形相关性更好。

参 考 文 献

References

- [1] TANG X M, CHENG A. Quantitative borehole acoustic me-

- thods[M]. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [2] 庄春喜, 李杨虎, 孔凡童, 等. 随钻斯通利波测井反演地层渗透率的理论、方法及应用[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(11): 4482–4492.
ZHUANG Chunxi, LI Yanghu, KONG Fantong, et al. Formation permeability estimation using Stoneley waves from logging while drilling: theory, method, and application[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2019, 62(11): 4482–4492.
- [3] 林剑松, 李盛清, 刘忠华, 等. 随钻划眼采集模式的过套管声波测井数值模拟与实验研究[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(6): 2496–2502.
LIN Jiansong, LI Shengqing, LIU Zhonghua, et al. Numerical simulation and experimental research of through casing sonic logging with redressing LWD acquisition mode[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(6): 2496–2502.
- [4] DEGRANGE J M, HAWTHORN A, NAKAJIMA H, et al. Sonic while drilling: multipole acoustic tools for multiple answers[R]. SPE 128162, 2010.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘西恩, 孙志峰, 仇傲, 等. EXDT 正交偶极阵列声波测井仪在地层各向异性评价中的应用[J]. *测井技术*, 2010, 34(6): 564–568.
LIU Xien, SUN Zhifeng, QIU Ao, et al. Application of the EXDT cross-dipole array acoustic logging tool to anisotropic formations evaluation[J]. *Well Logging Technology*, 2010, 34(6): 564–568.
- [8] 李世平, 唐炼, 丛健生. 叠片型多极子阵列声波测井仪接收换能器灵敏度分析[J]. *测井技术*, 2012, 36(6): 620–623.
LI Shiping, TANG Lian, CONG Jiansheng. Finite element analysis of receiving transducers for multipole acoustic array logging tool[J]. *Well Logging Technology*, 2012, 36(6): 620–623.
- [9] JIANG Runkun, MEI Lei, LIU Xien, et al. Understanding logging-while-drilling transducers with COMSOL Multiphysics® software[C]//COMSOL Conference 2014, Boston: Monix Energy Solutions, Inc, 2014.
- [10] TANG X M, WANG T, PATTERSON D. Multipole acoustic logging-while-drilling[R]. SEG-2002-0364, 2002.
- [11] 吴金平, 乔文孝, 车小花. 声波测井高灵敏度宽带接收器研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6): 54–60.
WU Jinping, QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua. Research on high-sensitivity and wide-band receiver used in acoustic well logging[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(6): 54–60.
- [12] 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.
- [13] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 修订版. 北京: 北京大学出版社, 2005: 326–336.
LUAN Guidong, ZHANG Jinduo, WANG Renqian. Transducers piezoelectric and arrays[M]. Revised ed. Beijing: Peking University Press, 2005: 326–336.
- [14] 何晓, 陈浩, 王秀明. 充液圆槽中单极声波仪器响应数值模拟与分析[J]. *应用声学*, 2014, 33(2): 95–101.
HE Xiao, CHEN Hao, WANG Xiuming. Numerical simulations and analyses of monopole sonic logging responses in a liquid-loaded trough[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2014, 33(2): 95–101.
- [15] 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.
- [16] 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.

[编辑 令文学]