

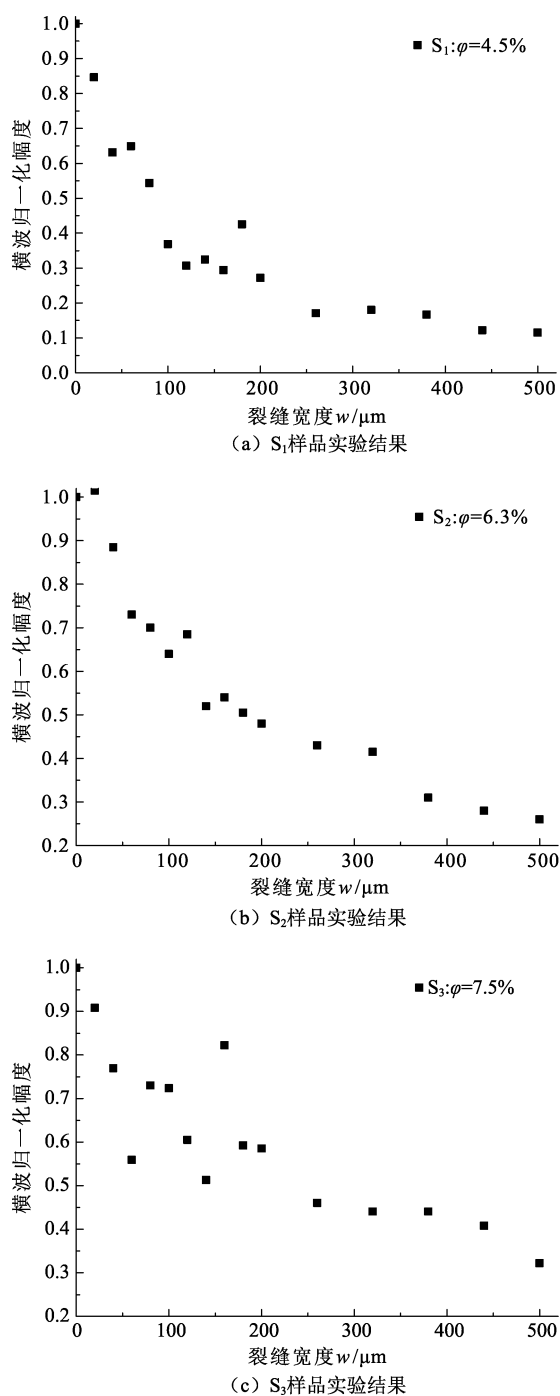


图4 横波归一化幅度随裂缝宽度变化关系

Fig. 4 Relationship of normalized shear wave amplitude and fracture width

由上述统计的3组岩心样品在不同裂缝宽度条件下测量的横波波形幅度,并结合式(1)可计算出3组岩心样品在不同裂缝宽度条件下测量横波的衰减系数,进而得到横波衰减系数随裂缝宽度变化关系,分别如图5(a)~(c)所示,其中散点为不同裂缝宽度对应的衰减系数,实线为相应的二次多项式拟合曲线。3条拟合曲线的对比图如图

5(d)所示。由图5(a)~(c)可以看出,不同孔隙度的3组岩心样品对应的横波衰减系数均随裂缝宽度的增加而增大,且裂缝宽度约小于250 μm 时横波衰减系数随裂缝宽度变化相对更快,说明横波衰减对窄裂缝宽度的变化更为敏感。由图5(d)可以看出,同等裂缝条件下孔隙度较小的岩心样品对应的横波衰减系数相对更大,且随裂缝宽度变化更快,这可能是由于孔隙度较小的岩心样品中横波本底衰减(由除裂缝之外的因素引起的衰减)较小,当出现裂缝时衰减明显增大;而孔隙度相对较大的岩心样品中横波本底衰减较大,当出现裂缝时衰减增大相对平缓。

4 基于横波衰减的微裂缝张开度测井评价

上述实验结果表明,对于平板状裂缝且当裂缝面与横波传播方向近似垂直时,横波衰减系数与微米级裂缝宽度(张开度)具有较好的对应关系。因此可利用横波衰减系数对微裂缝张开度进行定量评价。对于图5(a)~(c)中的实验结果,以横波衰减系数 α 作为自变量,以裂缝张开度 w 作为因变量进行拟合可得到裂缝宽度关于横波衰减系数的实验公式

$$w = \begin{cases} 2.2188\alpha^2 + 2.4581\alpha + 20.0248, \\ \varphi = 4.5\%, R^2 = 0.9410; \\ 3.4253\alpha^2 + 23.4856\alpha + 11.0506, \\ \varphi = 6.3\%, R^2 = 0.9776; \\ 7.2963\alpha^2 + 7.7654\alpha + 28.9941, \\ \varphi = 7.5\%, R^2 = 0.8312. \end{cases} \quad (2)$$

利用阵列声波测井采集到的单极全波阵列波形或偶极横波阵列波形数据获取裂缝横波衰减系数(以无裂缝段地层横波幅度作为参考幅度 A_0 ,式(1)中 l 取声源到接收器的距离),并结合上述实验公式(2)即可对储层微裂缝张开度进行定量评价。由图5(d)可知,不同孔隙度条件下,裂缝横波衰减系数随裂缝宽度变化曲线趋势一致,但形态存在一定的差异。因此利用实验公式(2)评价储层微裂缝张开度可根据储层孔隙度分布范围选择合适的公式进行计算,也可根据公式(2)的拟合曲线进行插值得到精度更高的微裂缝张开度与裂缝横波衰减系数关系图版进行评价。

由于在单极全波列测井和偶极横波测井过程中,横波(或弯曲波)在井壁附近几米范围内的地层

中传播^[5],故利用裂缝横波衰减系数可以对井壁附近地层中的裂缝张开度和有效性进行评价,避免井

壁上的诱导缝等非有效裂缝的干扰,弥补成像测井裂缝评价法在裂缝有效性评价方面的不足。

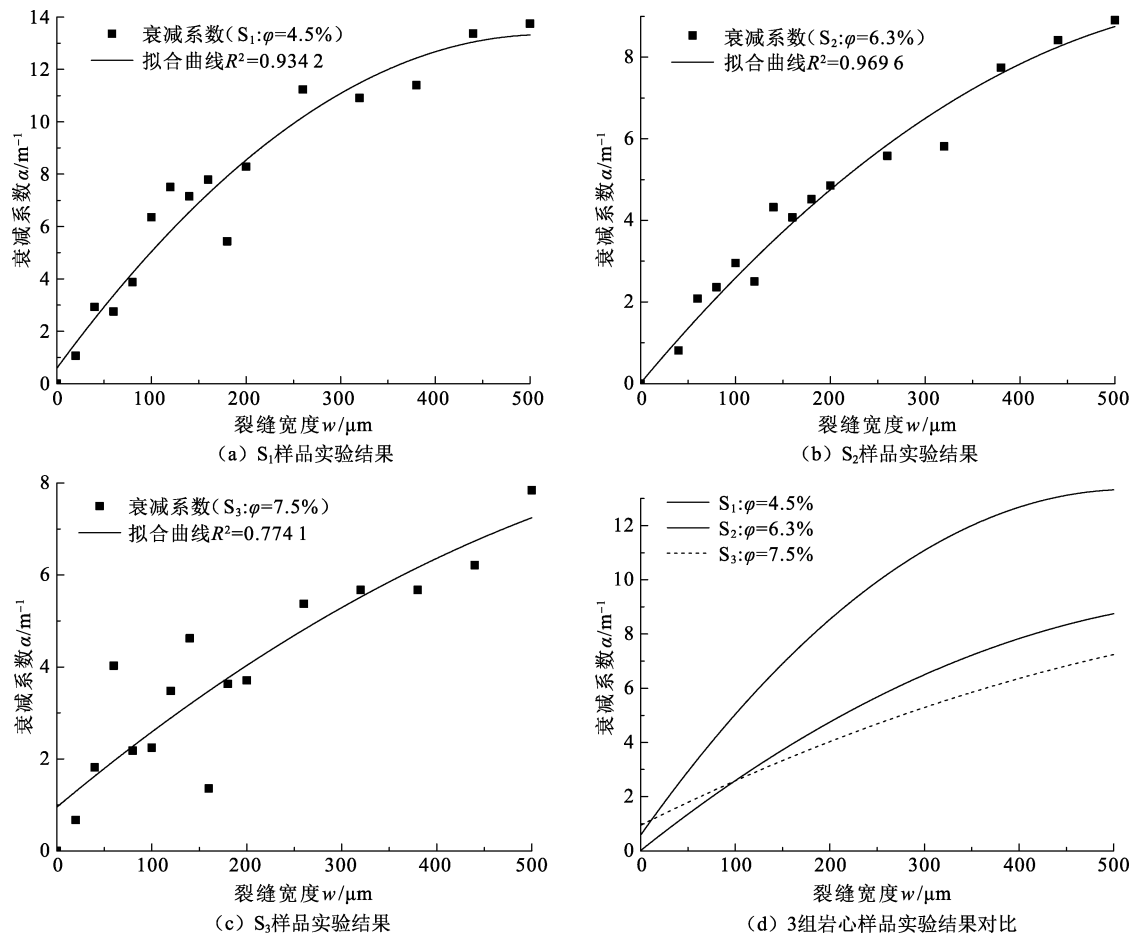


图 5 横波衰减系数随裂缝宽度变化关系

Fig. 5 Relationship of shear wave attenuation coefficient and fracture width

利用塔里木油田 X 井的 XMAC 阵列声波测井和微电阻率成像等资料,结合上述微裂缝张开度评价方法对塔里木油田库车地区致密砂岩储层裂缝发育情况进行评价,得到的成果图如图 6 所示。由图 6 中纵横波幅度及裂缝等效宽度曲线与电成像裂缝处理解释结果对比可以看出,纵波幅度变化对裂缝不够敏感,而横波幅度变化对裂缝较为敏感,且由裂缝横波衰减计算的裂缝等效宽度与电成像解释成果图中显示的裂缝发育程度吻合较好,证实了基于横波衰减的裂缝张开度评价方法的可行性和正确性。

需要说明的是,由裂缝横波衰减计算的裂缝

等效宽度经岩心观察裂缝参数刻度后可能更好地反映裂缝的发育情况和有效性,为进一步利用横波衰减信息反演裂缝渗透率提供条件。另外,本次实验研究未考虑裂缝倾角对声波衰减的影响,且未研究毫米级及以上的裂缝对横波衰减的影响规律,因此实验结论主要适用于指导利用横波测井资料对水平的或低角度的微裂缝张开度进行评价。另外,本次实验数据量有限,故研究规律的适用范围可能具有区域局限性,对于其他区域,可采用与本文类似的方法研究取得适用于研究区的更准确的裂缝宽度对横波衰减的影响规律,并用于指导微裂缝张开度测井评价。

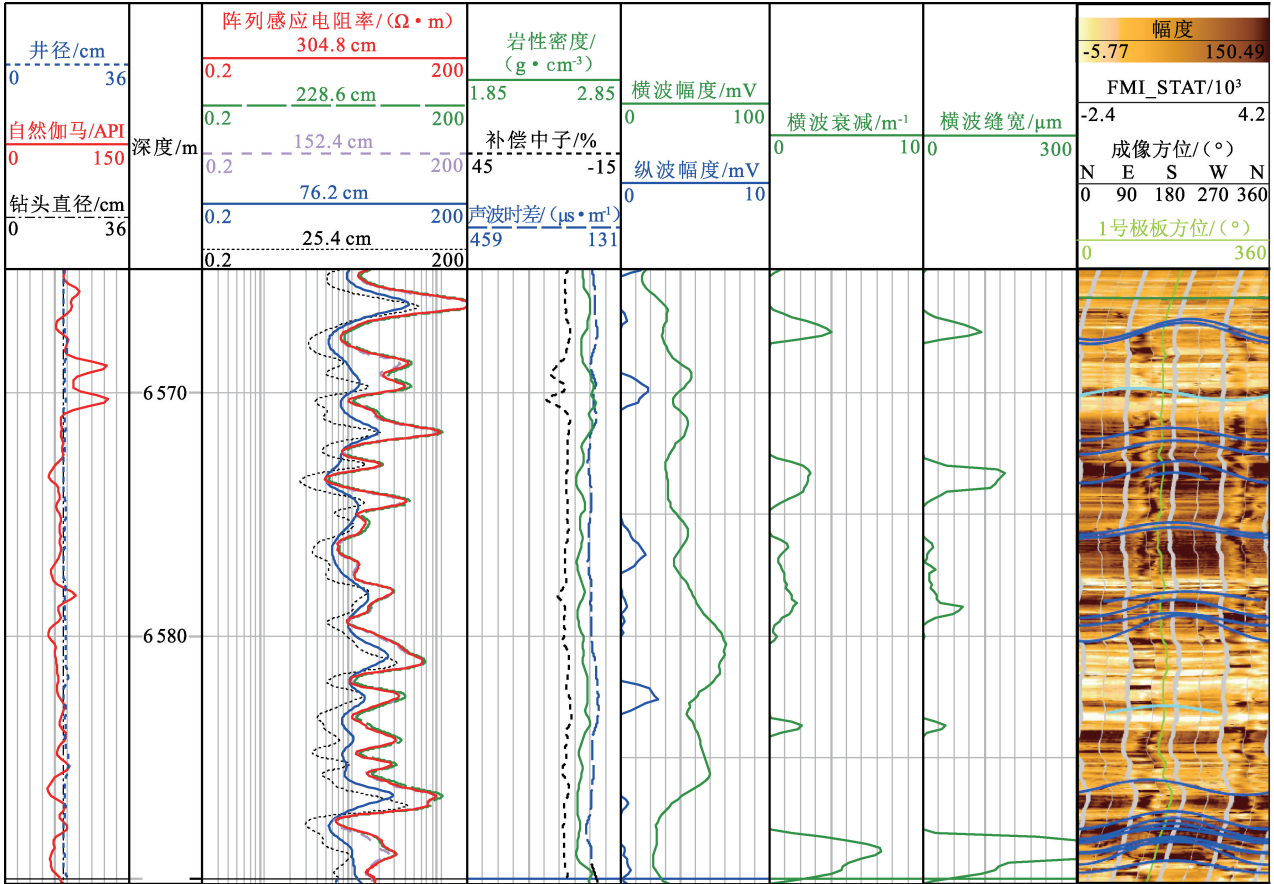


图 6 X 井裂缝评价成果

Fig. 6 Fracture evaluation results of well X

5 结束语

针对致密砂岩储层裂缝评价问题,采用物理实验手段研究了裂缝宽度对横波衰减的影响。3 组岩心样品在不同裂缝宽度条件下的实验测量结果表明,横波幅度随裂缝宽度的增加逐渐减小,横波衰减系数随裂缝宽度的增加有规律地增大,且裂缝宽度约小于 250 μm 时横波幅度和衰减系数随裂缝宽度变化相对更快;另外,同等裂缝条件下孔隙度较小的岩心样品对应的横波衰减系数相对更大,且随裂缝宽度变化更快,说明横波衰减系数对致密砂岩储层微裂缝宽度变化更为敏感。将实验研究结果用于指导利用横波测井资料评价致密砂岩储层裂缝张开度,对塔里木油田库车地区致密砂岩储层横波测井资料的处理结果表明,由裂缝横波衰减计算的裂缝等效宽度与电成像解释成果图中显示的裂缝发育程度吻合较好,证实了基于横波衰减的裂缝张开度评价方法的可行性和正确性。该裂缝评价方法可在一定程度上弥补成像测井裂缝评价法的不足,进一步完善裂缝评价方法体系。本文中主要通过岩石物理

实验研究了平板状裂缝宽度对横波衰减的影响规律及其在储层微裂缝张开度评价中的应用。裂缝倾角、裂缝填充情况、毫米级及以上的裂缝宽度等因素对横波衰减的影响规律及其应用等还需要进一步开展研究工作。

参考文献:

[1] 唐军,章成广,信毅. 油基钻井液条件下裂缝声波测井评价方法:以塔里木盆地库车坳陷克深地区致密砂岩储集层为例[J]. 石油勘探与开发,2017,44(3):389-397,406.
TANG Jun, ZHANG Chengguang, XIN Yi. A fracture evaluation by acoustic logging technology in oil based mud: a case from tight sandstone reservoirs in Keshen area of Kuqa field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(3):389-397,406.

[2] 赖锦,王贵文,孙思勉,等. 致密砂岩储层裂缝测井识别评价方法研究进展[J]. 地球物理学进展,2015,30(4):1712-1724.
LAI Jin, WANG Guiwen, SUN Simian, et al. Research advances in logging recognition and evaluation method of fractures in tight sandstone reservoirs[J]. Progress in

- Geophysics, 2015,30(4):1712-1724.
- [3] 肖小玲,靳秀菊,张翔,等. 基于常规测井与电成像测井多信息融合的裂缝识别[J]. 石油地球物理勘探, 2015,50(3):542-547.
- XIAO Xiaoling, JIN Xiujia, ZHANG Xiang, et al. Fracture identification based on information fusion of conventional logging and electrical imaging[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015,50(3):542-547.
- [4] 陈胜,章成广,范姗姗. 双侧向幅度差异评价裂缝参数在油田中应用[J]. 工程地球物理学报,2012,9(1):114-118.
- CHEN Sheng, ZHANG Chengguang, FAN Shanshan. Application of dual laterolog range differences in evaluation fracture parameters to oilfield[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012,9(1):114-118.
- [5] 蔡明. 方位反射声波成像测井信号处理方法研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2016.
- CAI Ming. Study on signal processing method for borehole azimuthal acoustic reflection imaging logging[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.
- [6] 李曦宁,沈金松,李振苓,等. 用多尺度形态学方法实现成像测井电导率图像的缝洞参数表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):69-77.
- LI Xining, SHEN Jinsong, LI Zhenling, et al. Characterization of reservoir fracture and vug parameters by conductivity image of FMI based on multi-scale mathematical morphology method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(1):69-77.
- [7] 高建申,孙建孟,姜艳娇,等. 油基钻井液环境下电成像测井响应分析及定量反演[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(3):50-56.
- GAO Jianshen, SUN Jianmeng, JIANG Yanjiao, et al. Response analysis and quantitative inversion of electrical imaging logging in oil based drilling fluid environment[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(3):50-56.
- [8] 屈海洲,张福祥,王振宇,等. 基于岩心-电成像测井的裂缝定量表征方法:以库车坳陷 ks2 区块白垩系巴什基奇克组砂岩为例[J]. 石油勘探与开发,2016,43(3):425-432.
- QU Haizhou, ZHANG Fuxiang, WANG Zhenyu, et al. Quantitative fracture evaluation method based on core-image logging: a case study of Cretaceous Bashijiqike Formation in ks2 well area, Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(3):425-432.
- [9] 甘泉,章成广,朱雷,等. 油基泥浆下超声成像测井仪裂缝识别效果分析[J]. 能源与环保,2017,39(4):57-63.
- GAN Quan, ZHANG Chengguang, ZHU Lei, et al. Analysis on effects of fracture identification based on ultrasonic imaging logging instrument in oil-based mud condition[J]. China Energy and Environmental Protection, 2017,39(4):57-63.
- [10] LUTHI S M, SOUHAITE P. Fracture apertures from electrical borehole scans[J]. Geophysics, 1990,55(7):821-833.
- [11] SU Y D, LI Z, XU S, et al. Elastic-wave evaluation of downhole hydraulic fracturing: modeling and field applications[J]. Geophysics, 2017,83(1):D1-D8.
- [12] TANG X M, CHENG C H. Quantitative borehole acoustic methods[M]. Amsterdam: Elsevier Science Published, 2004.
- [13] TANG X M, PATTERSON D, HIND S M. Evaluating hydraulic fracturing in cased holes with cross-dipole acoustic technology[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2001,4(4):281-288.
- [14] HORNBY B E, JOHNSON D L, WINKLER K W, et al. Fracture evaluation using reflected Stoneley-wave arrivals[J]. Geophysics, 1989,54(10):1274-1288.
- [15] 闫怡飞,赵云,宋胜利,等. 基于反射声波测井有限元方法的井旁裂缝分布特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(3):57-63.
- YAN Yifei, ZHAO Yun, SONG Shengli, et al. Near wellbore fracture distribution characteristics based on acoustic reflection logging finite element method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(3):57-63.
- [16] 蔡明,车小花,柴细元,等. 基于相控接收指向性的反射界面方位定量判定方法及装置:ZL201510412055.8[P]. 2015-11-11.
- [17] HUDSON J A. Overall properties of a cracked solid[J]. Math Proc Camb Phil Soc, 1980,88:371-384.
- [18] BAKKUSK, FEHLER M, BURNS D R. Fracture compliance estimation using borehole tube waves[J]. Geophysics, 2013,78(4):D249-D260.
- [19] ASS'AD J M, TATHAM R H, MCDONALD J A. A physical model study of microcrack-induced anisotropy[J]. Geophysics, 1992,57(12):1562-1570.
- [20] WEI Jianxin. A physical model study of different crack densities[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2004,1(1):70-76.
- [21] LAMBERT G, GUREVICH B, BRAJANOVSKI M. Numerical modeling of attenuation and dispersion of P-waves in porous rocks with planar fractures; SEG Techni-

- cal Program Expanded Abstracts, Denver, October 10-15, 2004 [C]. Colorado: Society of Exploration Geophysicists Published, 2004.
- [22] 李琼, 贺振华, 黄德济, 等. 单孔洞缝模型超声波实验测试与分析[J]. 石油物探, 2007, 46(1): 100-104.
LI Qiong, HE Zhenhua, HUANG Deji, et al. Ultrasonic experiment and analysis of single fracture-cave physical model [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(1): 100-104.
- [23] TILLOTSON P, SOTHCOTT J, BEST A, et al. Experimental verification of the fracture density and shear-wave splitting relationship using synthetic silica cemented sandstones with a controlled fracture geometry[J]. Geophysical Prospecting, 2012, 60(3): 516-525.
- [24] 陈乔, 刘向君, 梁利喜, 等. 裂缝模型声波衰减系数的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2044-2052.
CHEN Qiao, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Numerical simulation of the fractured model acoustic attenuation coefficient [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2044-2052.
- [25] 李天阳, 王瑞和, 王子振, 等. VTI 介质中裂缝对弹性波传播影响的模拟研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(7): 943-949.
LI Tianyang, WANG Ruihe, WANG Zizhen, et al. Numerical simulation of the effect of cracks on elastic wave propagation in VTI media [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(7): 943-949.
- [26] YUAN M, PAN B, LIU W. Acoustic experimental measurement of fractured rocks and application to log evaluation of fractured reservoirs: proceedings of the SEG Rock Physics & Borehole Geophysics Workshop, Beijing, August 28-30, 2016 [C]. Beijing: Society of Exploration Geophysicists Published, 2016.

(编辑 修荣荣)

利用水声通信原理解决随钻数据传输问题

耿艳峰¹, 贾梦之¹, 郑 重¹, 闫宏亮^{1,2}, 岳耀宾^{1,3}, 李 芳¹

(1. 中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东青岛 266580; 2. 西安石油大学陕西省钻机控制技术重点实验室, 陕西西安 710065; 3. 青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东青岛 266042)

摘要:在现有随钻数据传输技术的基础上,首次提出利用水声通信原理解决随钻数据传输难题的设想。首先选择钻杆内的钻井液作为水声通讯信道,并将其简化为一维、有限长、均匀、等截面波导。根据理想流体的小振幅波方程,讨论随钻水声信道的截止频率与黏滞力、非线性特性等因素的影响,确定通讯系统的频率、功率与传输距离等基本参数。然后提出建立随钻信道的分段、时变、分布式模型思路,适应信道结构分段变化、钻井深度随时间增加、信道参数时变分布等特点,仿真分析随钻水声信道的传输特性。最后通过定量计算水基钻井液、油基钻井液对水声信号的衰减,提出通过相控阵技术增强信源功率,提高信源质量与信宿检测能力。结果表明:利用水声通信原理解决随钻数据的高速传输问题是可行的,有望使随钻数据传输技术取得突破性进展,彻底解决随钻数据传输问题;结合钻井工程参数,可以选用的水声信号频率大于 2 kHz,有效地避开了钻井过程噪声,有利于随钻信号提取;现有水声换能器、传感器可以满足 3 000 m 以内的随钻通信需求。

关键词:水声通信; 随钻测量; 钻井液信道; 相控阵; 声波换能器

中图分类号:TP 29; TE 927 **文献标志码:**A

引用格式:耿艳峰,贾梦之,郑重,等. 利用水声通信原理解决随钻数据传输问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 53-60.

GENG Yanfen, JIA Mengzhi, ZHENG Zhong, et al. Solving the problem of data transmission while drilling based on underwater acoustic communication principle[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(1): 53-60.

Solving the problem of data transmission while drilling based on underwater acoustic communication principle

GENG Yanfeng¹, JIA Mengzhi¹, ZHENG Zhong¹, YAN Hongliang^{1,2}, YUE Yaobin^{1,3}, LI Fang¹

(1. College of Control Science and Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Key Laboratory of Drilling Rigs Controlling Technique of Shaanxi Province, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;
3. College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: After a brief introduction of measurement-while-drilling (MWD) and available wireless MWD technology, a new proposal was put forward to solve the problems of high-speed data transmission while drilling based on underwater acoustic communication principles. Firstly, drilling fluid in the pipe was selected as the communication channel, which was simplified to a one-dimensional, finite length, uniform, equal section waveguide. Based on the basic equation for small amplitude waves of ideal fluid, several properties of the channel were discussed, including the cut-off frequency of mud channel, the effect of viscous force and nonlinear factors. This lays a foundation for the parameters determination of MWD system, such as acoustic carrier frequency, required power and attainable distance. A proposal of creating a piecewise, time-varying, distributed model for real-time channel was then presented to simulate the channel properties of data transmission, which adapts to variations of drilling fluid channel, such as the increase of drilling depth, the variation and displacement of fluid density and

收稿日期:2019-04-01

基金项目:高等学校自主创新基金项目(15CX08014A);国家重点研发计划项目(2016YFC0302800)

作者简介:耿艳峰(1969-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为随钻测控技术、多相流计量技术。E-mail:gengyf@upc.edu.cn。

viscosity with increasing borehole temperature and pressure. . Thirdly the attenuation results of acoustic signal in mud channel with water-based and oil-based drilling fluid were calculated, and the methods of enhancing acoustic source power and improving sink detection sensitivity based on phased array were explained. All of the results show that this proposal is feasible, and a breakthrough of MWD technology is expected to be made which solves the problem of MWD thoroughly. The optional low frequency limit is greater than 2 kHz based on the existing drilling engineering parameters, far beyond the range of process noise and therefore favorable for useful signal extraction. This makes the minimum communication requirement and makes it possible for drilling longer than 3000 meters based on existing acoustic transducers and sensors.

Keywords: underwater acoustic data transmission; measurement while drilling; mud channel; phased array; acoustic transducer

近十多年来,钻井工程技术进步主要表现在两个方面:一是随钻测量技术由单纯的井眼轨迹参数测量逐步转变为由井眼轨迹参数、钻井工程参数和地质参数等组成的随钻综合测量;二是钻井技术由以“开环控制”为特征的“几何导向”向以“闭环控制”为特征的“地质导向”转变。需要在钻井过程中实时传输到地面系统的井下数据越来越多,但随钻数据传输技术却一直停滞不前,已经成为制约钻井工程技术发展的瓶颈^[1]。随钻数据的高速传输不仅有助于及时准确地发现油气储集层,从而最大限度地保证钻头在油气层中穿行,提高油气采收率;而且能够及时发现各种井下异常工况,保证钻井过程安全,甚至实现“透明钻井”的梦想。随钻数据高速传输技术既是实现钻井过程智能化的必要条件,又是深海、深地资源勘探开发的支撑技术,已经成为钻井工程、科学钻探等领域持续关注的难点和热点问题^[2-3]。笔者首次提出利用水声通信原理解决随钻数据传输难题的设想,对水声通信原理应用于随钻数据传输系统的信源合成、信道建模以及信宿检测技术进行分析与讨论。

1 随钻数据传输原理

随钻数据传输系统是一个典型的通信系统,由信源、信道、信宿3部分组成。在钻井过程中,位于井下的信源通过多种方式对井下仪器的实时测量数据进行调制,经不同信道传输到位于地面的信宿,经解调解码过程实现随钻数据传输。按照信道不同,现有随钻数据传输技术分为有线传输与无线传输两大类。

有线传输技术包括电缆、光纤和智能钻杆3种,具有速度快,距离远,传输信息量大等优点。由于常规钻井的井深可达数千米,高压、大流量的钻井液,从地面系统进入强振动并且旋转的钻杆后向下流动,穿过钻头、达到井底,携带着井底钻屑从钻杆与井壁的环空中返回地面系统,滤除固相杂质后,钻井

液循环使用。由此产生的大深度、大流量、高压和强振动等异常恶劣的钻井环境导致有线传输方式可靠性差,故障检修极其困难,实用性差且成本高。

无线传输技术更适合随钻应用,因为钻头不停地向远处延伸。钻井系统包括地面井架、从地面到井底的钻杆、钻头以及循环流动的钻井液等部分。以钻头为界,钻井液在井下被分为两部分:由地面流向钻头处位于钻杆内的部分,称为杆内钻井液;由钻头处流向地面的位于环空中的部分,称为环空钻井液。总体上,前者较为干净;后者由于被钻屑与地层产出物污染,成分非常复杂,是一种气液固混合的多相流,通常被称为钻井液。由此可见:能够用于随钻数据传输的无线信道包括钢制钻杆、杆内钻井液、环空钻井液和大地4种。其中环空钻井液由于成分复杂,不适合无线数据传输。因此除特别说明外,本文中的钻井液信道均指钻杆内的钻井液。

2 无线随钻数据传输技术分析

2.1 现有无线随钻数据传输技术

现有无线随钻数据传输技术有钻井液脉冲、电磁波与钻杆声波,分别利用了钻井液、大地和钻杆3种信道。其中钻井液脉冲技术应用最为普遍,电磁波次之,钻杆声波仍然处于现场测试与部分应用阶段。

2.1.1 钻井液脉冲随钻数据传输技术

通过控制脉冲发生器的运动部件对钻井液产生节流作用,进而生成不同频率与幅度的水力脉冲,实现井下数据调制,由地面信宿完成压力脉冲信号的检测、解调与解码功能。钻井液脉冲器分为正脉冲、负脉冲和连续波脉冲3种,其中负脉冲发生器对井壁的冲刷作用较大,已经淘汰。国内的现役产品是正脉冲发生器,国外是正脉冲发生器和连续波脉冲器共用。由于机械传动产生的脉冲频率受到一定限制,信号传输速率相对较低,正脉冲发生器一般小于2 bit/s,连续波脉冲器为1~10 bit/s。目前国内研

究重点是连续波脉冲器研制^[4-6],国外已经转向连续波脉冲器转子结构优化、信号增强、高效简洁的数据调制等^[7-11]。三大国际著名的油气技术服务公司均拥有各自的连续波脉冲器,国内北京海蓝、普利门、中天启明等公司都成功地开发出正脉冲发生器。

2.1.2 电磁波随钻数据传输技术

电磁波从井下发射源向周围无限空间(大地)辐射,由固定在地表的天线探头接收井下发射的电磁波,实现随钻数据传输。地面和井下天线均为收发两用天线,可以实现双向通信。尽管电磁波通信在空气与真空中取得了巨大的成功,但受制于地层电阻(主要受地层含水率影响)对电磁波的衰减,只有低频电磁波能够应用于有限井深、特定区块与钻井工艺的随钻测量^[12-13]。如美国APS公司使用2~12 Hz的电磁波进行数据传输,传输速率可以达到12 bit/s,应用于气体钻井、泡沫钻井以及欠平衡钻井过程。国内外目前的研究重点是信道特性、电磁波中继与信号处理技术等^[13-15]。三大油服公司均拥有各自的产品,俄罗斯的电磁波随钻数据传输技术处于国际领先地位,国内的相关研究尚未产业化。

2.1.3 钻杆声波随钻数据传输技术

位于井下的声波换能器通过压电晶体或者磁致伸缩元件在钻杆中激发声波,该声波沿钻杆由井下向地面传播,位于地面立管上的加速度传感器检测该信号,然后进行解调解码,获得井下数据。国内外目前的研究重点是地面信号处理方法、信道特性、信号中继、换能器等。钻杆声波技术的优缺点都很明显,钻杆信道既不依赖于钻井液,也不依赖于地层,而且声波在钻杆中衰减较小,数据传输速率可达10 bit/s。但是钻杆是由6~13 m长的中空钢管通过螺纹连接而成的,长度达到数千米。声波信号在钻杆接头处衰减严重、甚至发生波形畸变与波形转换,需要间隔600~1000 m加装一个中继放大器来维持信号幅度,实际应用困难。

综上所述,现有无线随钻数据传输技术尚难以满足钻井工程技术需求。其中钻井液脉冲器获得了广泛应用,但数据传输速率太低;电磁波技术的应用条件受限;钻杆声波技术取得了初步成功,但遇到了钻杆接头处声波衰减与畸变难题。截至目前,尚未开发出一种理想的随钻数据传输技术,既具有较高的传输速率,又能适用于各种钻井工艺,这严重制约了钻井过程自动化与智能化水平的提升。

2.2 一种新的随钻数据传输方案

基于现有随钻数据传输问题,提出利用水声通

信原理解决随钻数据高速传输问题的思想。

首先解决通信速率问题,广泛应用的钻井液脉冲数据传输速率为0.2~10 bit/s,常规油气钻井不超过10 km,2009年水声通信在10 km范围内已达到1200 bit/s^[16],是随钻数据传输的120~6000倍。因此利用水声通信技术解决随钻数据传输问题,有望使随钻数据传输技术取得突破性进展,满足当下以至未来的钻井工程技术需求。

其次解决信道的选择问题,杆内钻井液是最佳的无线随钻信道。与环空钻井液信道相比,该信道相对干净,不含地层产出物与钻屑,水声信号吸收与散射衰减减小,有利于水声信号的稳定传输。与钻杆信道相比,该信道连续,不存在钻杆接头处信号的衰减与畸变,有利于提高传输距离。与大地信道相比,该信道介质物性参数相对稳定,与地质区块、地层导电特性等无关,因此该技术的适用范围更广。

最后解决通信系统的可靠性问题,井下仪器的可靠性是非常重要的性能指标,因为一旦发生故障,需要将数千米的钻杆从井眼中抽出才能对仪器进行维修,严重影响钻井作业进程。与钻井液脉冲器相比,水声信源无机械可动部件,具有功率小、寿命长等优点。

钻井工程中,只要随钻数据的传输速率达到10 bit/s,即可基本满足随钻成像测井的通信需求,从而为地层识别、导向决策等工作提供可靠依据,大幅度提高油气勘探开发的效率与水平。

3 基于水声通信原理的随钻数据传输

3.1 随钻信道建模

随钻信道可以简化成一维有限长、均匀、等截面波导。由声学理论可知,用于数据传输的理想声源是平面纵波,因为平面纵波在细长管道中传播时只存在由于管壁非刚性导致的沿程衰减、钻井液吸收与散射衰减,不存在扩散衰减,有利于信号远传。与钻井液水声信道相关的3个边界条件是:地面空气包的声波吸收与反射、井底钻头处的声波反射与透射、钻杆管壁弹性模量的影响。

3.1.1 理想流体一维小振幅波方程

水声通信利用的是振幅远小于波长的小振幅波,忽略钻井液黏度与密度的影响,略去流体微元运动方程中二阶以上的微量,对运动方程进行简化^[16],简化过程为

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} \rightarrow \rho_0 \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$