

声波无线遥测技术在南海东部古近系地层测试中的应用

田立强¹, 于伟强¹, 李纪智², 徐鑒婧³

1. 中法渤海地质服务有限公司 天津 300457
2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东深圳 518000
3. 中国电子科技集团公司第十一研究所 北京 100010

通讯作者: Email: yuwq@cfbgc.com

引用: 田立强, 于伟强, 李纪智, 等. 声波无线遥测技术在南海东部古近系地层测试中的应用[J]. 油气井测试, 2023, 32(4): 10-16.

Cite: TIAN Liqiang, YU Weiqiang, LI Jizhi, et al. Application of acoustic wireless telemetry technology in paleogene formation testing in the eastern South China Sea [J]. Well Testing, 2023, 32(4): 10-16.

摘要 南海东部古近系储层埋藏深, 探井 DST 地层测试风险大, 传统的存储式和电缆地面直读式压力传输方式均不能同时保证测试的实时性、安全性和时效性。声波无线遥测技术利用声波在测试管柱中的传播实现信号传递, 通过井下中继器克服声波信号传输中的衰减问题, 实现井下压力温度数据上行和操作指令下行的双向传输功能。应用该技术对南海东部 X 井古近系储层进行 DST 测试, 在不同测试阶段下载实时压力数据, 辅助判断了射孔情况、产能测试稳定情况、以及关井压力恢复阶段, 获取有效的井底压力和温度数据, 准确解释得到测试井产能和储层参数, 并提高了作业时效性。该技术为海上油气井的测试提供了一种安全、高效、准确的井下数据传输方式, 具有良好的实用性。

关键词 DST 测试; 井底压力; 地面直读; 声波无线遥测; 中继器; 试井解释; 边界特征; 现场应用

中图分类号: TE27 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.04.002

Application of acoustic wireless telemetry technology in paleogene formation testing in the eastern South China Sea

TIAN Liqiang¹, YU Weiqiang¹, LI Jizhi², XU Liujing³

1. China-France Bohai Geoservices Co., Ltd., Tianjin 300457, China
2. Shenzhen Branch, CNOOC(China) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China
3. China Electronics Technology Group Corporation eleventh Research Institute, Beijing 100010, China

Abstract: The paleogene reservoirs in the eastern South China Sea are deeply buried, so the risk of DST well testing in exploration wells is high. Traditional storage and cable surface direct-reading pressure transmission methods cannot simultaneously ensure the real-time, safety, and timeliness of testing. The wireless telemetry technology of sound waves utilizes the propagation of sound waves in the test string to achieve signal transmission. Through underground repeaters, the attenuation problem in sound signal transmission is overcome, achieving bidirectional transmission functions of upward propagation of underground pressure/temperature data and downward propagation of operation instructions. This technology was applied to conduct DST well testing on the Paleogene reservoir of Well X in the eastern South China Sea. Real time pressure data was downloaded at different testing stages to assist in judging the perforation situation, stability of production capacity testing, and the recovery stage of build-up pressure. By obtaining effective bottom hole pressure and temperature data, the production capacity and reservoir parameters of the test well are accurately explained, and the timeliness of the operation is improved. This technology provides a safe, efficient, and accurate underground data transmission method for the testing of offshore oil and gas wells, and has good practicality.

Keywords: DST well testing; bottom hole pressure; surface direct-reading; acoustic wireless telemetry; repeater; well testing interpretation; boundary features; application

探井和评价井的 DST 测试, 通过不同制度的求产和关井压力恢复, 可以求取测试井的产能情况和储层物性, 其中数据源除了产量数据, 还包括井底各个阶段的压力数据。常规的海上 DST 试油测试

主要采用存储式压力计测试的方式, 压力计托筒承载压力计, 随测试管柱下入, 整个测试过程中测试管柱处于坐封状态, 地面无法在测试中途获取压力计数据, 整个测试过程属于不具有实时性的被动过

程^[1]。虽然试井设计可以辅助指导关井时间,但在储层非均质性较强的井中,设计关井时间和实际需要达到测试目的流动阶段的关井时间往往存在较大的误差。特别是井下工具或传感器出现故障后,地面无法判断。

地面直读的压力传输方式,可以通过电缆直接携带压力计下入,或电缆下入对接装置与井下固定位置的壓力计建立连接,实现压力数据的采集和传输。关井期间通过压力地面直读,可以实时监测井下各个阶段的生产动态,节省不必要的关井时间,从而提高测试成功率和时效。但通过电缆地面直读的测试方法要将传导性电缆输送装置至井下,电缆绞车和井口防喷设备占用井口,且起下电缆的操作增加了测试作业的风险,特别是在高温/高压井、高硫化氢井中,电缆输送方式作业安全性得不到保证^[2-4]。在大斜度井、水平井、稠油井中,电缆输送困难,在深水钻井平台日费昂贵的情况下,该技术受到了限制。

声波无线遥测技术在油气井测试中的研究为钻杆地层测试提供了一种新的途径,特别是面对声波传输过程中出现的衰减问题,发展了中继器,使得声波无线传输技术往前推进了一步^[5]。声波无限遥测技术基于声波双向无线传输,拾取井下仪器信号,通过中继站传递到地面,也可以通过卫星通讯,实现远距离实时传输,测量并记录井下压力/温度,使探井 DST 测试时可以实时掌握测试全过程井下流动状态^[6-9]。声波无线遥测的井下仪器数量不限,而且不需电缆穿越封隔器,可在单层、多层、不同深度测试关键位置安装压力/温度仪器,为现场提供决策依据。国外对于无线直读的理论研究和实际应用较为广泛,比如 Schlumberger、Halliburton、Metrol 等,但国内对于地层测试时无线直读技术的研究主要在理论研究阶段,没有进行实际引入和应用。本文基于南海东部古近系复杂储层的 DST 测试,利用声波无线遥测技术,设计合理的井下测试管柱,并通过对井下压力数据的实时下载和资料解释,降低了测试制度选择的盲目性,保证数据满足解释需求的情况下,提高作业的时效。

1 声波无线遥测技术原理及测试系统组成

为了提高测试智能化水平,将声波无线遥测技术与测试系统相结合。

1.1 声波无线遥测技术原理

声波无线遥测技术以声波作为传输媒介,可以将储层参数、井筒工具状态等信息通过测试管柱传输到地面,与地面形成信息交互^[10-13]。但由于井下环境复杂,使得传输信道往往受到多重因素的干扰,声波在管柱中的传播出现信号衰减的情况。声波无线遥测技术的关键问题主要包括钻柱信道特性、声波在管柱中的衰减、噪声影响等。

1.1.1 钻柱传输信道特性

声波在空气中的传播速度约为 340 m/s,在水中的速度约为 1 500 m/s,在钢中的传播速度能够达到 5 000 m/s^[14],声波无线遥测技术就是利用声波在钢制的钻杆中传播。井下声波遥测理想的钻柱信道模型如图 1 所示。由于阻抗不匹配,传输信道存在通阻带交替和窄通带的色散特性^[15]。

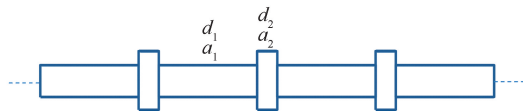


图 1 理想钻柱结构信道模型

Fig. 1 Channel Model of Ideal Drilling String

理想结构的色散方程为

$$\cos kd = \cos \frac{\omega d_1}{c} \cos \frac{\omega d_2}{c} - \frac{1}{2} \left(\frac{z_1}{z_2} + \frac{z_2}{z_1} \right) \times \sin \frac{\omega d_1}{c} \sin \frac{\omega d_2}{c} \quad (1)$$

其中

$$d = d_1 + d_2$$

$$z = a_1 \rho c$$

$$\omega = 2\pi f$$

式中: d 为钻杆和接箍一个周期的长度, m; d_1 为钻杆长度, m; d_2 为接箍长度, m; z 为声阻抗, z_1 和 z_2 分别为钻杆和接箍的声阻抗; ρ 为钻柱密度, kg/m^3 ; a_1 为面积, a_1 和 a_2 分别为钻杆和接箍的面积, m^2 ; c 为声速, m/s ; ω 为角速度, s^{-1} ; f 为频率, Hz ; k 为波数。

测试管柱中钻杆的接箍周期性出现,接箍的外径大于钻杆本体的直径,导致在信号传输过程中,通带和阻带交替出现,呈现出梳妆滤波器的特征。

1.1.2 声波信号在管柱中传播损失的影响因素

声波遥测能够满足直井、斜井或水平井的套管射孔、裸眼测试,但由于钻杆接头的影响,声波在传输过程中会受到回波、码间干扰等因素影响,限制信道的传输能力,出现信号能量减弱的情况^[16]。

(1) 钻柱通带和阻带的梳妆频率特征。梳妆频率周期性分布,在一个周期内通带先变窄,然后再



图 4 中继器与井下压力计连接图
Fig. 4 Connection method of repeater and downhole pressure gauge

流压判断流动状态是否达到稳定,并可以粗略估算地层产能情况,辅助制定合适的测试产量;

(3)中继器随测试管柱下入井内,实现数据和指令的双向传递,相比于电缆地面直读技术,开关井过程中无需井口作业,不占井口时间;

(4)对于测试层位较深的井,射孔地面感应普遍不明显,本技术可以辅助判断是否完成射孔动作;

(5)通过测试管柱上的每个中继站可以获得全井筒温度和泥面温度。

2 南海东部古近系储层测试现场应用

南海东部古近系储层是目前勘探开发的关键,随着勘探技术的发展,勘探开发的重点领域已经从中浅层逐渐向深层-超深层发展。针对南海东部古近系储层埋藏深,探井 DST 地层测试风险大的特点,各油田为有效控制作业风险,引入了不同类型的地面直读技术,但主要是通过电缆进行传输的直读方式,需要在关井期间将电缆下入,辅助判断关井压力恢复的阶段,无法监测整个测试过程中的井下压力情况。因此决定引入“声波无线遥测技术”,在南海东部古近系低渗储层的地层测试中实现对产能测试制度优选和压力恢复测试时间的指导。

2.1 X 井测试概况

南海东部 X 井是古近系储层的一口预探井,位于中央背斜带南侧翼部位置,属于珠江口盆地陆丰凹陷。该井设计井深 4 300 m,测试层位为恩平组,砂岩储层,测试段深度 3 696~3 702 m,测段位于 177.8 mm 套管中。测试井所在位置的水深约 139.5 m,作业平台南海五号为一艘半潜式钻井船。

X 井根据作业实际需求和技术指标,选用了声

波无线遥测方式进行井底压力数据的直读测试;测试管柱上设计有两个无线直读压力计托筒,分别位于 LPR-N 阀上部(3 638.29 m)和下部(3 650.83 m);为了确保声波信号的传输稳定性,下入井下中继站,中继站的位置和数量根据井深、管柱类型和结构进行优化(见表 1);水下中继站安装在水下树上部提升短节上。通讯电缆和水下树的液压控制管线一同捆绑在钻杆外部入井。

表 1 中继器安装位置 Table 1 Repeater installation position		
序号	中继器位置/m	间隔距离/m
1	172.60	
2	354.30	181.70
3	622.60	268.30
4	947.20	324.60
5	1 272.50	325.30
6	1 625.80	353.30
7	1 979.50	353.70
8	2 333.10	353.60
9	2 581.60	248.50
10	2 889.50	307.90
11	3 178.00	288.50
12	3 428.30	250.30
13	3 512.70	84.40
14	3 603.90	91.20

按照测试设计流程,本井进行两次开井、两次关井的测试程序。一开井射孔后清井;一关井获取地层压力情况;二开井求取产能;二关井压力恢复分析储层参数。

2.2 射孔情况判断

由于本井深度较大,射孔程序执行时地面感应不明显,在一关井期间通过声波无线遥测下载井下压力数据,如图 5 所示。

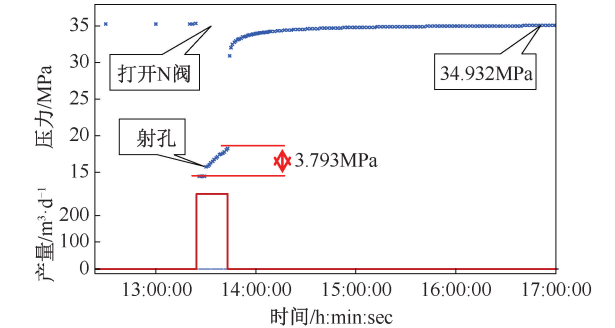


图 5 射孔阶段无线遥测井底压力数据
Fig. 5 Wireless telemetry of bottom hole pressure data during perforation

通过井底压力数据可以判断射孔枪成功激发,根据初开井压力增加 3.793 MPa,推算液面上升了约 387 m,粗略判断储层物性和产能情况。

2.3 求产期间井底流压稳定性判断

产能测试更换为 14.29 mm 油嘴一段时间后,井口压力和单产趋向于稳定,如图 6(a)所示,根据油田试井技术规范或凭借经验判断此时生产制度应达到稳定状态。但根据井下直读的流压数据可知,井底流压存在较大波动情况,并未达到完全稳定状态。如果仅按照井口压力和产量,此时调整其他工作制度后,将会影响实际产量和井底流压数据的准确性和可靠性。

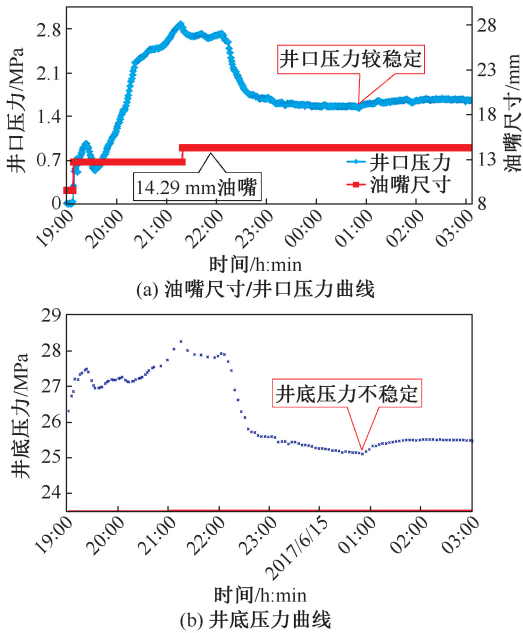


图 6 井口压力和遥测井底压力对比
Fig. 6 Comparison of wellhead pressure and telemetry bottomhole pressure

2.4 关井压力恢复时间决策

关井压力恢复期间,分别在关井后 0.3 h、1.2 h、4.0 h、7.4 h 采集了井底压力恢复数据,根据导数曲线的形态决策是否需要结束关井(见图 7)。

关井 0.3 h 后的压力导数曲线如图 7(a)所示。压力导数显现出了井储段和过渡段,过渡段之后出现了“下凹”形态,与径向流水平直线特征存在差别,而且曲线后期上扬走势不易判断,此时的渗流特征认识具有非常大的不确定性。

关井 1.2 h 后的压力导数曲线如图 7(b)所示。压力导数后期上扬趋势开始变缓,结合储层岩性,判断 0.05~0.1 h 之间为系统径向流阶段,后期上扬特征仍具有多解性,判断可能由于一条断层,或径向上的非均质性导致。鉴于无法确定远端特征,决策继续保持关井状态。

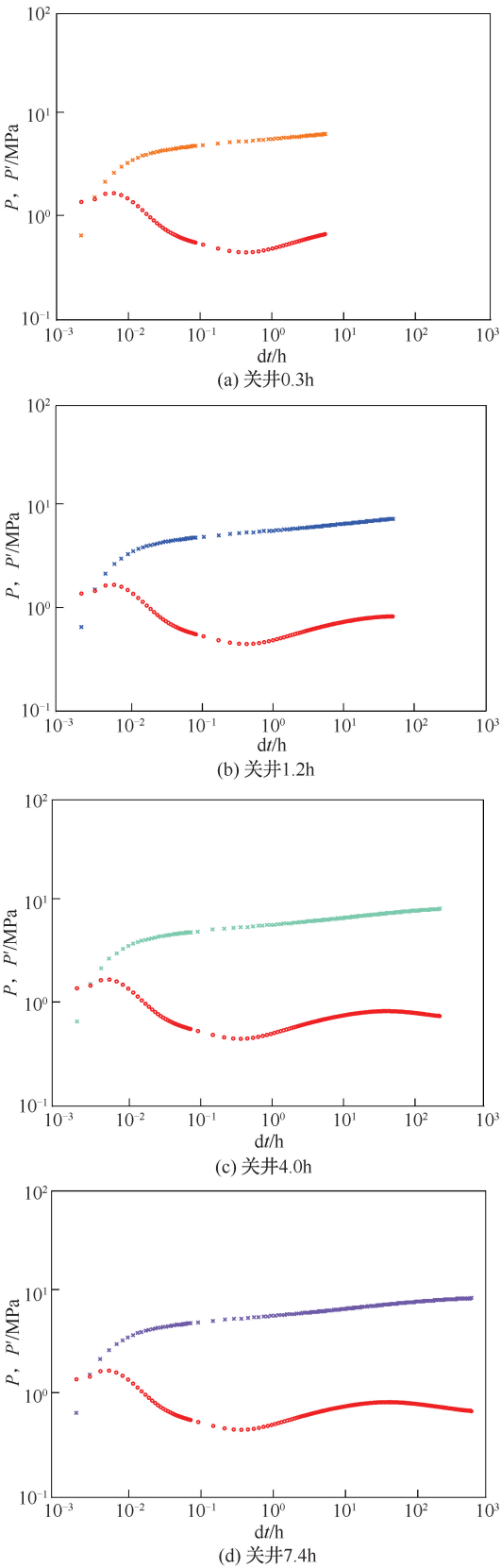


图 7 不同关井阶段压力导数曲线形态
Fig. 7 Characteristics of pressure derivative curves at different shut-in stages

关井 4.0 h 后的压力导数曲线(图 7(c))显示后期上扬特征达到高点后开始下倾。测试层位的地震剖面图和顶面构造图显示有一条大的断层向该井位延伸,考虑是一条泄露断层或未完全封闭断层,导致曲线后期上扬后下倾的特征。但断层的封堵性或延伸程度从地震资料中显示模糊,不易判别,决定继续保持关井以探测更多信息。

关井 7.4 h 后的压力导数曲线如图 7(d)所示。导数曲线后期的下倾趋势变缓,基本能够保证模型的判断和拟合分析准确性的需求。为了保证足够的探测范围,决定再关井 7 h 后测试结束。

压力恢复测试实际关井时间为 14.7 h,比经验关井时间 26 h 节约了 11.3 h。本井整个试油测试阶段比设计提前了 23.7 h。

2.5 试井解释分析

测试结束后起出 DST 测试管柱并下载存储式压力计数据,关井恢复段的压力和压力导数如图 8 所示,从曲线图可以看出,完整的压力导数和地面直读压力导数(图 7(d))曲线形态一致。声波无线遥测技术保证在没有额外冗余时间的情况下,取得了齐全、准确的测试资料。

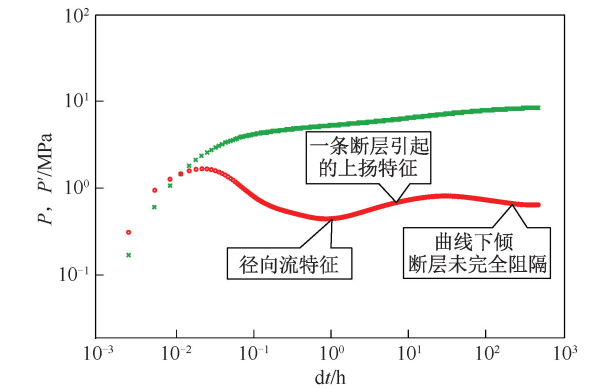


图 8 完整关井阶段的压力导数曲线
Fig. 8 Pressure derivative curve during the complete shut-in stage

本井测试层位的顶面构造图如图 9 所示,一条较大的断层朝着井位方向延伸,井位距离断层距离较近。从而选取“均质+一条不完全封闭断层”模型进行拟合分析,压力导数拟合曲线如图 10 所示。最终解释获取到储层的物性参数,并判断了断层的阻挡程度。试井解释渗透率 42.5 mD;地层系数 208.25 mD·m;表皮系数 1.3;探测半径 210 m;井位到断层距离较近约 20 m。断层阻隔程度如图 11 所示。

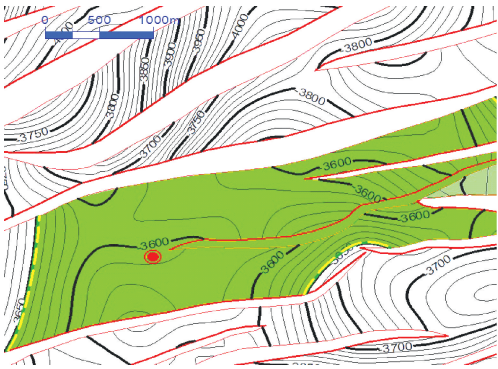


图 9 测试层位井位-顶面构造图
Fig. 9 Well location/top structure map of the testing horizon

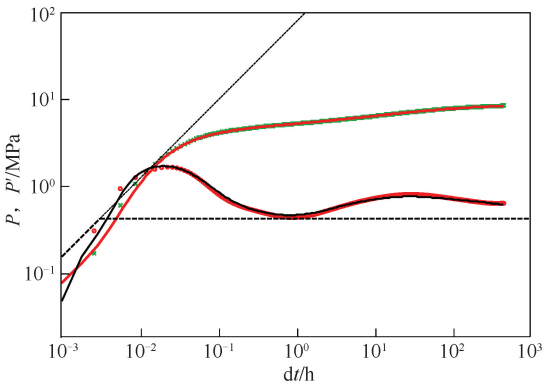


图 10 压力导数拟合分析曲线
Fig. 10 Pressure derivative fitting analysis curve

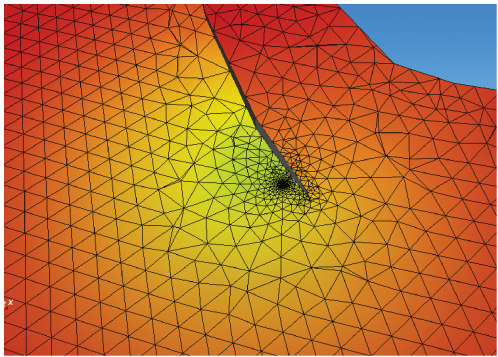


图 11 井位-断层附近关井压力分布数值模拟
Fig. 11 Numerical simulation of shut-in pressure distribution near well location/fault

3 结论

(1)分析声波无线遥测技术的信道特征及影响因素,结合海上探井 DST 测试条件确定声波无线遥测系统的组成,以及优化测试作业程序。

(2)与常规压力计直读相比,声波无线遥测作业不需井下电缆、井口防喷和注脂系统,降低了地面泄露和井下作业的风险。

(3)通过实时传输井下压力、温度数据,及时了

解测试全过程井下情况,辅助判断射孔情况、求产制度稳定情况、关井压力恢复阶段等,提高测试成功率和作业时效。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司深圳分公司对本文技术现场应用的支持,感谢中法渤海地质服务有限公司领导和同事在方法研究及论文修改方面的帮助。

参考文献

- [1] 左红军,焦艳红,王涛. 无线声波遥测钻杆(中途)测试技术[J]. 石油机械, 2016,44(5):22-27.
ZUO Hongjun, JIAO Yanhong, WANG Tao. Acoustic wireless telemetry drill stem test technology [J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(5):22-27.
- [2] 张永涛,张俊斌,张自印,等. 深水非旋转高效 APR 测试技术[J]. 油气井测试, 2019,28(5):16-20.
ZHANG Yongtao, ZHANG Junbin, ZHANG Ziyin, et al. Non-rotating and high efficiency APR test technology in deep water [J]. Well Testing, 2019,28(5):16-20.
- [3] 胡长翠,张明友,张琴,等. 井下测试数据无线传输技术探讨[J]. 钻采工艺, 2011,34(1):48-51.
HU Changcui, ZHANG Mingyou, ZHANG Qin, et al. Research on wireless telemetry technology of down-hole test data [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(1):48-51.
- [4] 李成,丁天怀. 油气井测试的井下远程遥测方式分析[J]. 油气井测试, 2005,14(6):34-37.
LI Cheng, DING Tianhuai. Analysis of down-hole remote telemetry methods in oil well testing [J]. Well Testing, 2005,14(6):34-37.
- [5] PIERRE H, RYAN N A, SHANGKAR V, et al. An innovative and efficient approach to deepwater well testing for a challenging carbonate reservoir offshore Malaysia [C]. SPE 187308, 2017.
- [6] ANDY H, SERGIO A. New wireless acoustic telemetry system allows real-time down-hole data transmission through regular drillpipe [C]. SPE 187082, 2017.
- [7] ELIAS T, YERMEK K, CARLOS M, et al. Bringing flexibility and automation to well testing operations through wireless telemetry-case study [C]. OTC 31275, 2021.
- [8] OZGUR K, SOFIANE B, BERTRAND T. A methodology that enables real time large volume reservoir testing for deeper reservoir targets in old wells without damaging the existing upper reservoir layers [C]. SPE 206061, 2021.
- [9] ELIAS T, NAHOMI A M, YERMEK K. Bringing new levels of automation and flexibility to well testing operations-case study [C]. SPE 204746, 2021.
- [10] CARL W, YURI P, PATRICIO L, et al. Efficient deep-water well testing [C]. SPE 176728, 2015.
- [11] ELIAS T, DEIVEINDRAN S. Fully automated and wirelessly enabled drillstem tests: seven-zones campaign case study in Sakhalin [C]. SPE 204401, 2021.
- [12] SHUMAKOV Y, MUNRO J, HOLLAENDER F, et al. Acoustic firing for intelligent reservoir perforation [C]. SPE 183282, 2016.
- [13] ELIAS T, SEBASTIEN C, NAHOMI Z M, et al. Smart reservoir depth correlation with tubing conveyed wireless gamma ray position tool-Case Studies [C]. SPE 199816, 2020.
- [14] 李志刚,管志川,王以法. 随钻声波遥测及其关键问题分析[J]. 石油矿场机械, 2008,37(9):6-9.
LI Zhigang, GUAN Zhichuan, WANG Yifa. Acoustic telemetry while drilling and analysis on its key problems [J]. Oil Field Equipment, 2008,37(9):6-9.
- [15] SHUBIN Z, CHEN J F, LIU J G. Channel characterization of drill string acoustic wireless telemetry using a novel high-precision integration algorithm [C]. SEG 2016-1397084, 2016.
- [16] 刘飞,贺秋云,肖军,等. 井下测试数据地面直读技术发展现状[J]. 钻采工艺, 2013,36(4):48-51.
LIU Fei, HE Qiuyun, XIAO Jun, et al. Development situation of surface readout technology of down-hole test data [J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(4):48-51.
- [17] 赵国山,管志川,刘永旺. 声波在钻柱中的传播特性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010,34(1):55-59.
ZHAO Guoshan, GUAN Zhichuan, LIU Yongwang. Acoustic transmission properties in drill string [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010,34(1):55-59.
- [18] 马西庚,李超,柳颖. 钻杆中声波传输特性测试[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010,34(4):70-74.
MA Xikang, LI Chao, LIU Ying. Transmission characteristics test of acoustic wave in drill pipe [J]. Journal of China University of Petroleum, 2010,34(4):70-74.
- [19] 林炳南,关利军,李纪智. 声波无线遥测技术在钻杆地层测试中的应用[C]. 2015 油气田勘探与开发国际会议论文集. 2015:1-8.
LIN Bingnan, GUAN Lijun, LI Jizhi. Application of acoustic wireless telemetry technology in the drill stem test [C]. IFEDC 2015364, 2015:1-8.

编辑 邵振鹏

第一作者简介:田立强,男,1977 年出生,工程师,毕业于长江大学石油工程专业,现主要从事录试井技术支持与管理工作。电话:13682118938, Email: tianlq@cfbgc.com。通信地址:天津经济开发区信环西路 19 号天河科技园 1 号楼 3 层中法渤海地质服务有限公司,邮政编码:300457。