

气体钻井 MMWD 随钻测量方法研究

李 皋¹, 陈 泽¹, 孟英峰¹, 陈一健¹, 蒋祖军²

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 2. 中国石化西南油气分公司工程技术研究院, 四川德阳 618000)

摘 要: 气体钻井中 EM-MWD 技术受复杂地层影响大、信号衰减快和抗噪声能力差, 导致其信号测传深度受限, 为此提出了在气体钻井中利用钻杆作为微波波导实现井下参数随钻测量与信号传输的 MMWD 技术。在研究钻杆内高频波传输特性与影响微波传输的主要因素基础上, 优选了微波频率并验证了其适用性, 得到了可在钻杆中传播的 8 个波形及其衰减系数, 研制出了 MMWD 样机, 并开发了配套的控制处理软件。该样机在元坝气田元陆 x 井进行了多次下井试验, 单次入井无故障工作时间达 120.0 h, 总工作时间 234.0 h, 最大测传深度超过 3 000.00 m, 测传的井下温度数据基本符合地层温度分布规律, 且测传井斜角与测井井斜角也较为吻合。研究表明, MMWD 技术弥补了 EM-MWD 技术测传深度受限的不足, 测量结果准确可靠, 为气体钻井提供了一种新的高效随钻测量手段。

关键词: 气体钻井; 随钻测量; 微波随钻测量; 电磁随钻测量; 现场试验

中图分类号: TE27⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2018)05-0052-05

Research on Measurement Methods of MMWD during Gas Drilling

LI Gao¹, CHEN Ze¹, MENG Yingfeng¹, CHEN Yijian¹, JIANG Zujun²

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Engineering Technology Research Institute of Sinopec Southwest Branch Company, Deyang, Sichuan, 618000, China)

Abstract: EM-MWD technology has limited signal transmission efficiency during gas drilling, because of a high degree of interference from complex strata, rapid signal attenuation, and poor noise-resistance capacity. To solve the problems, MMWD technology would be used because it can use the drillstring as a microwave waveguide to use the MWD for parameters and signal transmission during the gas drilling. Based on the study of the high frequency wave transmission characteristics and the main influencing factors of microwave transmission along the string, the selected microwave frequency was verified, and eight wave types that could propagate along the string and their attenuation coefficients were obtained. After completing that phase, the MMWD prototype and supporting control and processing software were developed. The prototype was tested several times in Well YL-x of the Yuanba Gas Field in Sichuan, and the fault-free operation duration for one run reached 120.0 h, and the total operation time reached 234.0 h. The maximum measured depth exceeded 3 000.00 m, and the measured and transmitted downhole temperature data generally conformed to the ground temperature distribution law; the well inclination was in consistence with the wire-logging inclination. The study showed that MMWD technology could solve the problem of limited measured depth of EM-MWD technology, and had accurate and reliable measurement results, which provided a new high-efficiency MWD method for gas drilling.

Key words: gas drilling; measurement while drilling; microwave measurement while drilling; electro-magnetic measurement while drilling; field test

无线随钻测量(measurement while drilling, MWD)按传输通道的不同可分为钻井液脉冲、电磁波和声波等方式^[1], 其中钻井液脉冲传输方法不适用于气体钻井^[2-3]。目前, 气体钻井中普遍使用电磁随钻测量(electromagnetic measurement while drilling, EM-MWD)技术^[4-6], 但该技术存在许多限制, 信号传输时受复杂地层影响大、衰减快及抗噪声

收稿日期: 2017-11-07; 改回日期: 2018-04-18。

作者简介: 李皋(1976—), 男, 四川武胜人, 1999年毕业于西南石油学院资源勘查工程专业, 2002年获西南石油学院地质资源与地质工程专业硕士学位, 2005年获西南石油大学油气井工程专业博士学位, 研究员, 博士生导师, 主要从事欠平衡钻井、控压钻井、气体钻井和储层保护等方面的研究。E-mail: lgmichael@263.net。

基金项目: 国家科技重大专项课题“复杂地层钻井提速提效关键工具与装备”(2016ZX05021-003)和四川省省属高校科研创新团队基金(编号: 2014TD0006)联合资助。

能力差,导致信号传输频率和测量深度受限^[7-9]。

微波随钻测量(microwave measurement while drilling, MMWD)技术是在现有随钻测量技术的基础上,在近钻头安装随钻测量短节采集数据、利用钻杆作为微波波导将井下测量数据传输到井口并进行处理的一种新方法,以实现井下地层特性参数和钻井参数的测量。王苏虹等人^[10-11]研究认为,频率 2.4 GHz 的微波更适用于在钻杆中传输;刘清友等人^[12]在气体钻井过程中利用微波随钻监测的方法实现了对返出气体湿度的在线连续监测;徐小祥等人^[13]对扭矩传感器进行了校正,提高了 MMWD 的测量精度;张从邦等人^[14]将微波无线中继应用于气体钻井井眼轨迹控制中,大幅降低了井眼轨迹监测的误差。但目前还没有研制出应用于井下的 MMWD 随钻测量装置。笔者在前人研究成果的基础上,验证了频率 2.4 GHz 微波在钻杆中传输的可行性,分析了可在钻杆中传播的波形,利用设计的 MMWD 样机及配套软件开展了现场试验。试验结果表明,MMWD 技术采用多级中继接力在钻杆内部空间中传输,能够有效避免地层因素的影响,提高传输效率,增大测量深度。

1 MMWD 随钻测量技术研究与设计

1.1 钻杆内高频波传输特性研究

为了验证频率 2.4 GHz 微波在井下环境中传输的可行性,在四川 X 井进行了井下信号传输试验。试验结果显示,样机在下井过程中有信号返回,当下至井深 1 350.00 m 时图像信号变差,下至井深 1 400.00 m 处接收不到信号,样机上提至井深 1 350.00 m 时图形信号恢复良好,说明在井下可以利用频率 2.4 GHz 微波传输信号。

微波功率的衰减主要来源于波导内壁的表面电流和波导内部的传输介质。由于气体钻井中气体对微波功率衰减的贡献可忽略不计,将钻杆看作理想圆波导,则微波的传输主要使用波导技术,产生微波功率衰减的主要因素就是波导内壁表面的电流。

由波导理论可知,波导内只能存在横磁波(TM 波)或横电波(TE 波)。对于 TM 波,其衰减系数为:

$$\alpha_{\text{TM}} = \frac{R_s}{aZ_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{TM}}}\right)^2}} \quad (1)$$

式中: n, m 为整数,每一对 n, m 值对应波导中的一个波形; α_{TM} 为 TM_{nm} 波形的衰减系数, Np/m ; a 为波导半径, m ; R_s 为波导表面电阻, Ω ; Z_0 为自由空间波阻抗, $\text{g/cm}^3 \cdot (\text{m/s})$; λ 为波长, m ; λ_{TM} 为 TM_{nm} 波形或 TE_{nm} 波形的截止波长, m 。

由于理想导体的电导率趋近于无穷大,因而 $R_s = 0$, 所以对于理想导体来说,衰减系数 $\alpha = 0$ 。由于钻杆不是理想导体,所以微波在钻杆内传输一定会有衰减。截止波长与波导截面的形状有关, TM 波的截止波长满足:

$$\frac{\lambda_{\text{TM}}}{a} = \frac{2\pi}{\rho_{nm}} \quad (2)$$

式中: ρ_{nm} 表示第一类 n 阶贝塞尔函数 $J_n(k_c a)$ 的第 m 个根。

对于 TE 波,其衰减系数为:

$$\alpha_{\text{TE}} = \frac{R_s}{aZ_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{TE}}}\right)^2}} \left[\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{TE}}}\right)^2 + \frac{n^2}{(\rho'_{nm})^2 - n^2} \right] \quad (3)$$

式中: α_{TE} 为 TE_{nm} 波形的衰减系数, Np/m ; ρ'_{nm} 为第一类 n 阶贝塞尔函数导数 $J'_n(k_c a)$ 的第 m 个根。

TE 波的截止波长满足:

$$\frac{\lambda_{\text{TE}}}{a} = \frac{2\pi}{\rho'_{nm}} \quad (4)$$

由式(2)和式(4)知, $\frac{\lambda_{\text{TM}}}{a}$ 的值分别由第一类贝塞尔函数的零点 ρ_{nm} 或第一类贝塞尔函数导数的零点 ρ'_{nm} 决定,而 ρ_{nm} 和 ρ'_{nm} 的值可以查表获得,所以各波形的截止波长只与圆波导半径有关,表 1、表 2 分别给出了若干个 TM 波和 TE 波的 $\frac{\lambda_{\text{TM}}}{a}$ 值。

表 1 圆波导中 TM_{nm} 波的 $\frac{\lambda_{\text{TM}}}{a}$ 值

Table 1 $\frac{\lambda_{\text{TM}}}{a}$ Value of TM_{nm} wave in a circular waveguide

m 取值	$\frac{\lambda_{\text{TM}}}{a}$ 值			
	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$
1	2.612 7	1.639 8	1.223 5	0.984 9
2	1.138 2	0.895 6	0.746 5	0.643 7

若频率 2.4 GHz 的微波在钻杆中传播,对应的波长 $\lambda = 125 \text{ mm}$,所采用钢质钻杆的内径 $d = 107.0 \text{ mm}$,则微波波长与套管内径的比值为 1.168 2,其为截止波长对应 $\frac{\lambda_{\text{TM}}}{a}$ 的门限值。根据截止波长

表 2 圆波导中 TE_{nm} 波的 $\frac{\lambda_{nm}}{a}$ 值Table 2 $\frac{\lambda_{nm}}{a}$ Value of TE_{nm} wave in a circular waveguide

m 取值	$\frac{\lambda_{nm}}{a}$ 值			
	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$
1	1.639 8	3.412 6	2.057 2	1.495 6
2	0.895 6	1.178 5	0.936 9	0.783 8
3	0.617 6	0.736 1	0.630 2	0.553 8

的定义,表 1、表 2 中所有 $\frac{\lambda_{nm}}{a}$ 值大于 1.168 2 的波形,其理论截止波长 λ_{nm} 均超过该门限值,实际波长均小于截止波长,都可以在钻杆中传播。对照表 1、表 2 有 8 个数据满足要求,由文献[15]可知,钻杆中可以传播 8 个波形,包括 3 个 TM 波形(TM_{01} , TM_{11} 和 TM_{21})和 5 个 TE 波形(TE_{01} , TE_{11} , TE_{21} , TE_{31} 和 TE_{12}),其中 TE_{11} 的截止波长最长。

钢制套管的电导率 $\sigma=5 \times 10^6 \Omega \cdot m$,磁导率 $\mu \approx \mu_0$,频率 $f=2.4 \text{ GHz}$,将其代入式(1)或式(3),计算可得这 8 种波形的衰减系数,可知 8 种波形的衰减系数差别很大,其中 TE_{11} 波形的衰减系数最小,为 $6.15 \times 10^{-4} \text{ Np/m}$, TE_{12} 的衰减系数最大,为 $8.40 \times 10^{-3} \text{ Np/m}$ 。如果选择合适内径的钻杆,限制衰减系数大的波形的形成,则能显著提高微波传输的距离和效率。

1.2 MMWD 技术设计方案

气体钻井过程中由于信号衰减,单级微波的传输距离是受限的,可以通过多级无线中继接力传输技术延长微波信号的传输距离。位于钻头处的信号发射模块将实时采集的参数通过钻杆中多个中继短节构成的链式中继网络不断向上接力传输,最终传输至井口信号接收器,再利用井口信号接收器将微波信号从钻具内部传送到外部自由空间,由地面中继器接收后传至终端接收器,从而实现井下测量信息的上传。该方案中微波信号中继传输采用透明式传输方式,即中继不进行信号纠错等处理,直接转发接收信号,中继部分电路不需要有信号处理功能,因此能降低功耗并减小其体积(见图 1)。

1.3 MMWD 仪器结构与功能特点

MMWD 随钻信号传输短节有 2 种结构,分别适用于 API 钻杆和双台阶钻杆。姿态模块中加装了井下参数采集模块,其主要功能是采集井下井

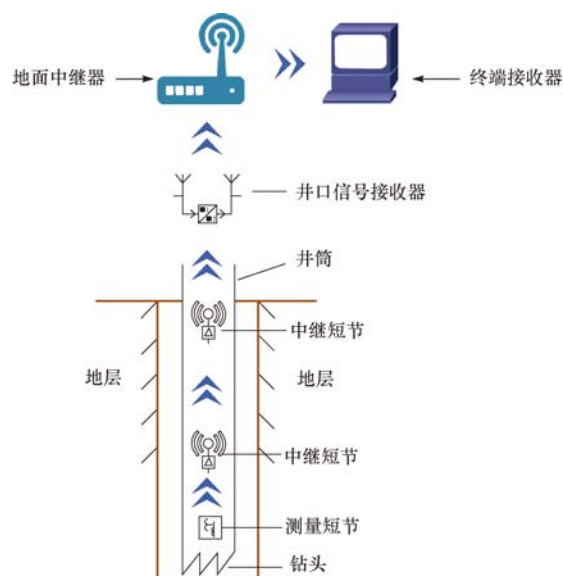


图 1 MMWD 中继接力传输示意

Fig. 1 Schematic diagram of MMWD relay transmission

斜角、温度等相关信息,经过一系列调制操作,以微波信号的形式向地面传输,如图 2 和图 3 所示。

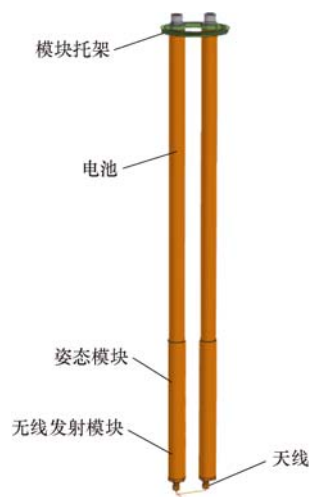


图 2 适用于 API 钻杆的测量短节结构

Fig. 2 Structure design of measurement sub applicable for API drill pipe

测量与信号传输系统采用 ZigBee 无线网络技术,具有通讯距离远、抗干扰能力强、组网灵活和性能稳定可靠等优点。ZigBee 模块包括中心协调器、路由器及终端节点。中心协调器具有网络发起组织、维护和管理功能;路由器负责数据的路由中继转发;终端节点只进行该节点数据的发送和接收。经室内测试,ZigBee 模块的数据传输速率能达到 128 kb/s。

终端接收器负责数据的采集与处理,主要利用 MMWD 配套处理软件实现井下测量参数的监控。

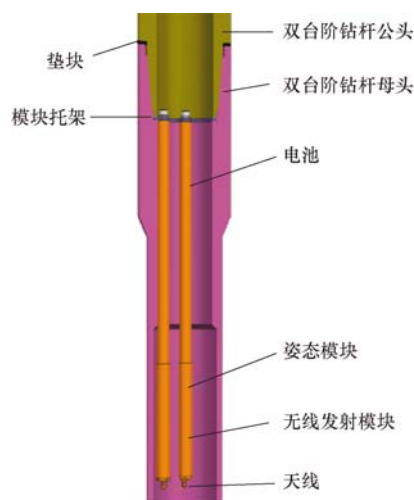


图 3 适用于双台阶钻杆的测量短节结构

Fig. 3 Structure design of measurement sub applicable for double-step drill pipe

软件根据功能分为 2 部分,即数据监控部分和数据处理部分,数据监控部分以实时数据为核心,主要实现实时曲线绘制、实时数据显示和报警等功能,达到分析井下情况与微波通讯状况的目的;数据处理部分以历史数据为核心,主要实现文件格式转换、文件分类存储、历史曲线显示和历史数据显示等功能,能将数据监控部分记录存储的二进制数据文件转换为可直接调用的文本格式文件,依据模块的不同地址将文件分类存储,并能将每个分类存储的数据文件绘制成历史数据曲线,同时具备数据显示功能,便于对测量数据和微波通讯系统运行情况进行详细分析。

2 现场试验

研发的 MMWD 样机在元坝气田元陆 x 井进行了现场试验。该井设计井深 4 930.00 m,二开采用气体钻井技术从井深 702.00 m 钻至井深 3 402.00 m。MMWD 样机在该井气体钻井井段进行了试验。样机第一趟钻井下工作时间 120.0 h,进尺 1 270.43 m,纯钻时间 76.3 h;第二趟钻工作时间 58.0 h,进尺 345.67 m,纯钻时间 36.6 h;第三趟钻工作时间 56.0 h,进尺 256.12 m,纯钻时间 28.2 h,3 趟钻均基本实现了井底测量数据的传输。

第一趟钻,开钻注气后井下测量短节处温度骤降,然后随着井深增大逐渐上升;第二趟钻,开钻后由于使用牙轮钻头钻进,钻具振动加剧,致使设备工作不稳定,信号干扰严重,因此下钻过程中能够接收到连续稳定的数据,开钻后数据间

断直至信号微弱;第三趟钻,下钻到底后井下测量短节距离地面 2 753.44 m,能够正常接收数据,测得井底最高温度为 51℃,设备仍可正常工作,地面接收到的数据格式正确,无乱码现象。

3 趟钻井下测量短节上传的温度数据如图 4 所示,随钻测量井斜角与测井井斜角对比情况如图 5 所示。由图 4、图 5 可知,3 趟钻测得的温度基本符合地层温度分布规律,测传井斜角曲线与测井井斜角曲线吻合度也较高。

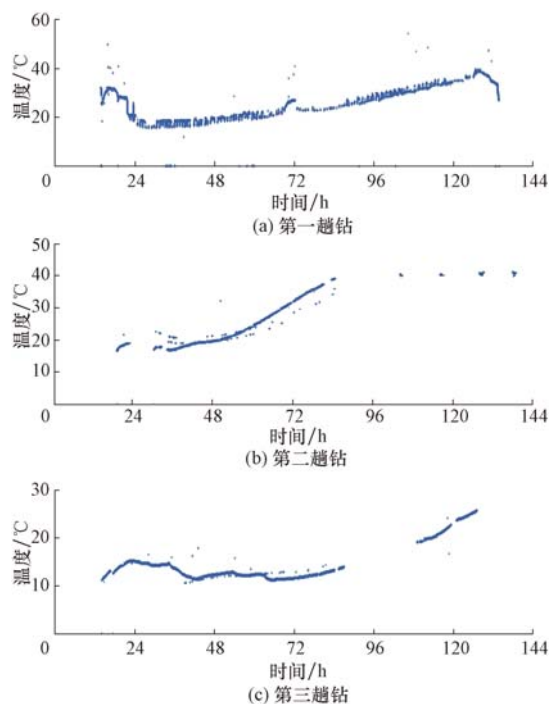


图 4 3 趟钻井下测量短节上传温度数据

Fig. 4 Uploaded temperature data of measurement sub during three trips

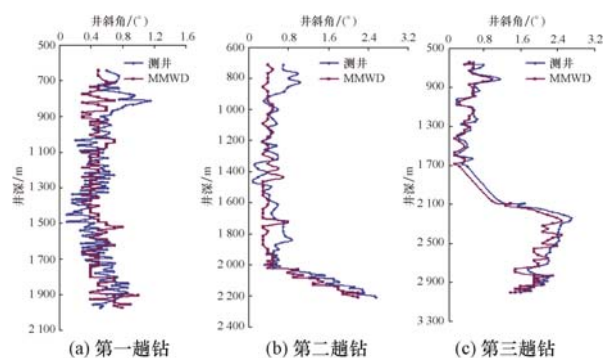


图 5 3 趟钻随钻测量井斜角数据与测井井斜角对比

Fig. 5 Comparison of the inclination data by MMWD and by wire-logging during three trips

现场试验结果在一定程度上验证了 MMWD 样机在气体钻井过程中测传数据的可靠性和准

确性。在试验过程中,微波传输信号最大测传井深达到3 010.00 m,单次入井无故障工作时长达120.0 h,3趟钻总工作时间234.0 h,且样机仍能正常工作,井下数据测量、存储和上传均正常,地面数据解码处理无误。同时,在试验中发现采用高强度钛合金通讯天线可以提高天线的抗冲蚀能力;钻具在入井前做好清洁除锈工作,可以延长信号中继短节的有效通讯距离和提高信号传输的稳定性。

3 结 论

1) 钻杆中可以传播8个波形,包括3个TM波形(TM_{01} , TM_{11} 和 TM_{21})和5个TE波形(TE_{01} , TE_{11} , TE_{21} , TE_{31} 和 TE_{12}),其衰减系数存在较大差异。

2) 现场试验结果表明,MMWD样机在气体钻井过程中能够稳定工作,测传深度达到3 000.00 m以上,测得的地层温度及井斜角也基本符合实际情况。

3) 室内测试时MMWD样机中安装的ZigBee模块的数据传输速率能达到128 kb/s,建议在现场开展MMWD样机数据传输速率试验。

参 考 文 献

References

- [1] 袁鹏斌,余荣华,欧阳志英.无线随钻测量信息传输的现状与问题[J].焊管,2010,33(10):65-69.
YUAN Pengbin, YU Ronghua, OUYANG Zhiying. The current status and problems of wireless signal transmission in measurement while drilling[J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(10):65-69.
- [2] 张东旭,白璟,谢意,等.电磁波接力传输随钻测量系统研制与应用[J].天然气工业,2014,34(2):76-80.
ZHANG Dongxu, BAI Jing, XIE Yi, et al. Development and application of an electromagnetic relay transmission MWD system[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(2):76-80.
- [3] 高珺.矿用随钻测量系统中数据传输技术研究[J].中州煤炭,2016(4):115-117,121.
GAO Jun. Research on data transmission technology in mine-used MWD systems[J]. Zhongzhou Coal, 2016(4):115-117, 121.
- [4] 王立双,陈晓晖,宋朝晖,等.电磁随钻测量技术在泡沫定向钻井中的应用[J].石油机械,2016,44(8):20-25.
WANG Lishuang, CHEN Xiaohui, SONG Zhaozhui, et al. Research on electromagnetic telemetry technology application in foam directional drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(8):20-25.
- [5] 廖少波.电磁随钻测量技术的发展探讨[J].石化技术,2016(2):60-61.
LIAO Shaobo. Discussion on the development of electromagnetic measurement-measurement while drilling technology[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016(2):60-61.
- [6] 涂玉林.井下电磁传输特性研究[J].西部探矿工程,2013,25(12):70-72,77.
TU Yulin. Research on the characteristics of downhole electromagnetic transmission[J]. West-China Exploration Engineering, 2013, 25(12):70-72, 77.
- [7] 刘伟,黄崇君,连太伟.电磁波随钻测量仪器测量效果影响因素分析[J].钻采工艺,2017,40(5):11-14.
LIU Wei, HUANG Chongjun, LIAN Taiwei. Analysis of influence factors of electromagnetic measurement while drilling instrument[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(5):11-14.
- [8] 刘修善,侯绪田,涂玉林,等.电磁随钻测量技术现状及发展趋势[J].石油钻探技术,2006,34(5):4-9.
LIU Xiushan, HOU Xutian, TU Yulin, et al. Developments of electromagnetic measurement while drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(5):4-9.
- [9] 胡越发,杨春国,高炳堂,等.井下电磁中继传输技术研究及应用[J].科技导报,2015,33(15):66-71.
HU Yuefa, YANG Chunguo, GAO Bingtang, et al. Research and application of downhole electromagnetic relay transmission technology[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(15):66-71.
- [10] 王苏虹,李伟勤.空气钻井随钻微波接力传输系统研究[J].计算机仿真,2016,33(9):155-158,203.
WANG Suhong, LI Weiqin. Research on microwave relay transmission system[J]. Computer Simulation, 2016, 33(9):155-158, 203.
- [11] 陈玉华,王希勇.气体钻井MMWD随钻数据传输及试验研究[J].钻采工艺,2015,38(4):11-14.
CHEN Yuhua, WANG Xiyong. Data transmission and experimental research on MMWD in gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2015, 38(4):11-14.
- [12] 刘清友,包凯,任文希.气体钻井过程中地层出水的微波随钻监测方法[J].石油天然气学报,2014,36(5):93-96.
LIU Qingyou, BAO Kai, REN Wenxi. MMWD monitoring method for formation water in gas drilling[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(5):93-96.
- [13] 徐小祥,夏文鹤.气体钻井井下扭矩测量无线传输系统研究设计[J].现代电子技术,2016,39(19):95-98.
XU Xiaoxiang, XIA Wenhe. Research and design of downhole torque measurement wireless transmission system for gas drilling[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(19):95-98.
- [14] 张从邦,王大勇,夏文鹤.钻井工艺气体钻井微波中继传输随钻测量系统研究[J].钻采工艺,2017,40(4):4-6.
ZHANG Congbang, WANG Dayong, XIA Wenhe. Research on drilling process of MMWD system in gas drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(4):4-6.
- [15] 孟晓峰,陈一健,周静.钻杆中微波传输特性的分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(2):151-155.
MENG Xiaofeng, CHEN Yijian, ZHOU Jing. Analysing microwave propagation properties in drilling stem[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(2):151-155.

[编辑 滕春鸣]