

随钻地层压力测量仪研究新进展

杨川 陈平 夏宏泉 韩雄 马天寿

“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学

杨川等.随钻地层压力测量仪研究新进展.天然气工业,2013,33(2):71-75.

摘 要 随钻地层压力测量仪是保证井下作业安全的重要仪器。为此,调研了国内外典型随钻地层压力测量仪的结构原理以及应用情况,重点介绍了国内 2 种自主研发产品已取得的重要进展:①西南石油大学和中海石油研究中心共同研制的随钻地层压力测量系统的样机,室内模拟实验表明,该仪器最高耐压 70 MPa,适用温度 0~125 °C,工作钻压 0~250 kN,扭矩 0~10 kN·m;②中国石油大庆钻探工程公司研制成的 SDC-I 型随钻地层压力测试器,现场测试结果表明:该测试器设计合理,可靠性高,压力测量精度达到 0.1%,温度测量精度达到±0.5 °C,井下供电功率达到 160 W,实现了随钻数据上传和井下存储功能,地面可随钻获取井下准确的环空压力、温度、地层压力和地层流度,已初步具备商业化应用的条件。但与国外同类产品相比,国内研制的产品在技术指标上还有一定差距:产品规格少,局限在 $\varnothing 215.9$ mm 井眼中使用;仅适用最高耐压 70 MPa,温度小于 125 °C 的中深井井下环境。最后建议:国内应加大现场试验验证,加强合作交流,以便尽快商业化应用。

关键词 随钻测量 地层压力 工具 结构 自主研发 国内产品 差距

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.02.015

Progress in research and development of measurement-while-drilling apparatuses

Yang Chuan, Chen Ping, Xia Hongquan, Han Xiong, Ma Tianshou

(State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 2, pp.71-75, 2/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The measurement-while-drilling apparatus and method are developed to keep safe downhole operation with the real-time measured formation data. Therefore, an investigation was first made into the basic structure, working principle and application of such representative apparatuses at home and abroad, with a focus on the achieved major progress in two independently developed products in China. The first one is a prototype jointly developed by Southwest Petroleum University and CNOOC Research Center. An indoor simulation experiment was made on the key parts of this prototype apparatus with a tailor-made ground simulator. The experimental data was thus recorded on this prototype apparatus; the allowable highest pressure is 70 MPa; the applicable temperature is in a range of 0 - 125°C, working bit weight is 0 - 250 kN; and torque is 0 - 10 kN·m. The second one is SDC-I apparatus, developed by CNPC Daqing Oilfield Drilling Engineering Co., Ltd., which has been tested on site for popularization. Pilot tests showed that this apparatus is of reasonable design and high reliability; the precision rate of formation pressure measurement is 0.1% and that of temperature measurement is ±0.5°C; and downhole power efficiency is 160 W. With such an apparatus, the measurement-while-drilling data can be uploaded and stored downhole at the same time, thus, such accurate downhole data as annulus pressure, temperature, formation pressure and fluidity can be sent up to ground while drilling. However, compared with the like products abroad, there is still a wide gap in terms of technical qualification of the above independently developed apparatuses. For example, due to their limited sizes, they can be used only in $\varnothing 215.9$ mm borehole wells or in the downhole environment of moderately deep wells with the highest pressure of 70 MPa and the temperature of less than 125°C. In the end, this paper points out that only if more field tests are performed and cooperation with foreign companies is strengthened, should these developed apparatus be verified and quickly put into commercial production and application in China.

Key words: measuring while drilling, formation pressure, instrument, structure

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目子课题“深水表层钻井随钻环空压力及温度测量监测溢流技术”(编号:2007AA09A103-03),西南石油大学研究生创新基金“随钻测量数据传输技术研究”(编号:GIFSS0708)。

作者简介:杨川,1988 年生,硕士研究生;研究方向为油气井过程测量与控制。地址:(610500)四川省成都市新都区西南石油大学研究生院。电话:15881176713。E-mail:yangchuandsg@126.com

地层压力是指作用在地层孔隙内流体(油、气、水)上的压力,亦称地层孔隙压力^[1]。地层压力的检测与预测对于保障油气井安全钻进^[2],提高钻井效率,优化钻井工艺,降低钻井成本等都具有重要的指导意义。

传统的地层压力信息的获取方法主要包括:①钻井前,采用地震法,声波时差法得到地震资料和声波测井曲线来预测区块地层的孔隙压力;②钻井过程中,采用机械钻速法、dc 指数法^[3],结合现场资料(如井漏、溢流时钻井液的密度,测试资料等)估算地层孔隙压力;③完井后采用密度测井,电缆测井,试油等测试方法检测地层孔隙压力。

随着钻井所面临的恶劣条件(如高温高压钻井,深水钻井,高含硫化氢钻井)越来越复杂,人们迫切需要实时地了解钻达地层的孔隙压力,以确定准确的地层压力梯度,探测未知区块高压层,及时调整钻井液密度,从而实现高效、安全地钻进。

随钻地层压力测量仪的研制,利用了钻井期间的短暂停顿完成测试,实时获取地层压力信息,地层受钻井液滤液侵入影响小,测量精度高,同时解决了大斜度井、水平井中电缆工具下入困难问题,可应用于 NDS 和 MPD 钻井系统中。

1 国外研究现状

目前国外随钻地层压力测量 FPWD (Formation Pressure While Drilling) 已形成较为完善的系统,早期的测量仪主要为双封隔器式随钻地层压力测量装置,以哈里伯顿的 EFPS (Early Formation Pressure System) 系统和 Panthfinder 能源服务公司 DFT (Drilling Formation Tester) 系统为主,目前应用较为广泛的是探头式随钻地层压力测量仪,最具代表性的主要有斯仑贝谢公司的 Stetho-Scope 系统,哈里伯顿公司的 Geo-Tap 系统以及贝壳休斯公司的 TesTrak 系统。

1.1 双封隔器式随钻地层压力测量仪

双封隔器式随钻地层压力测量系统由上下封隔器、压降泵和石英压力计等组成,它通过钻井液脉冲遥测技术将井下测量信息实时传递到地面上,经多次测试后即可建立较为准确的地层压力梯度剖面。早在 20 世纪 90 年代,哈里伯顿公司的研究人员就已经开始了随钻地层压力测量仪的研究^[4],其 EFPS 系统可以在钻井过程中,利用起下钻对地层压力进行一系列的快速测试,通过详细的数值模拟和数据解析,测量效果和电缆测井相当。1999 年,Pathfinder 能源服务公司的 DFT 测试器作为随钻测井系统 LWD 的一部分,

能够随钻测量不同井深的地层孔隙压力^[4],并通过井下电子控制短节实时传递信息到地面。典型的双封隔器式随钻地层压力测量仪结构如图 1 所示,由两个封隔器作为钻铤的一部分,开始进行测试时,井下钻井液分流器引导钻井液通过井下钻具组合,上下两个封隔器膨胀坐封,压降泵将封隔器之间的流体泵出,地层流体在欠平衡的作用下进入封隔器之间,直到封隔器之间的压力达到地层压力。

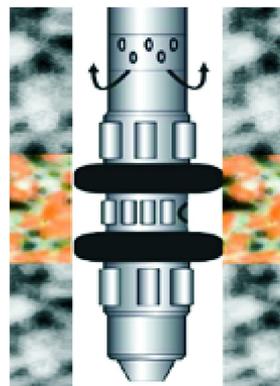


图 1 双封隔器式随钻地层压力测试仪结构图

DFT 测试仪利用一次起下钻可以测量多点压力,建立地层压力梯度,确定油、气、水的接触面,一次测试的周期一般在 20~30 min,极大减小了非生产时间。在由道达尔公司和壳牌,埃克森美孚公司合作开发的英国北海北部的 Otter 油田中^[5],由于井身结构的特殊性,油井水平穿入储层段,电缆地层测试需下入钻杆才能下入井中测量,所以采用随钻地层测试器(DFT)下入井中采集地层压力数据,获得了成功,真实地反映了地层压力的原始状态,帮助实现了有效的决策方案,节省了钻井时间。

1.2 探头式随钻地层压力测量仪

探头式随钻地层压力测量系统主要由带有密封垫的活塞探头、抽吸泵、石英压力计、电子短节等构成。在钻进的过程中,利用中途短暂的停歇,地面控制系统传递命令到井下激活测试系统,压力探头从测量短节处伸出,与地层接触,待形成有效密封后,探针打开,抽吸地层内流体,利用智能化的闭合回路控制系统进行一系列压降测试和压力恢复测试,以测得准确的地层压力信息。测试数据可存储在井下或通过钻井液脉冲遥测系统传送到地面。探头式 FPWD 应用范围较广,可在任何井斜条件下测量地层孔隙压力,钻井液循环与否都可进行测试,系统可采用自带电池或涡轮发电机进行供电,一次测试周期仅为 5~7 min,最大限度的节省了钻井时间,节约了生产成本。

在探头式随钻压力测量系统中,哈里伯顿公司的 Geo-Tap 随钻地层压力测量系统是最先成功利用电缆型极板和探头设计的随钻地层压力测试器^[6],它通过每一个点进行 3 次测试,取最稳定的值作为该点的最终压力来进行测量结果的优化。而贝克休斯公司的 TesTrak 测量系统^[7]拥有基本测试和优化测试两种选择,可以优化压降速率,压降大小和压力恢复时间。同时,还可测量任意井周方向的地层压力。斯仑贝谢公司的 Stetho-Scope 测量系统和哈里伯顿的 Geo-Tap 系统原理相似,通过对预测试体积和压降速率进行优化后,它在常规钻井情况下有较高的测试精度。典型的探头式随钻地层压力测量仪的测量原理和基本结构如图 2、3。

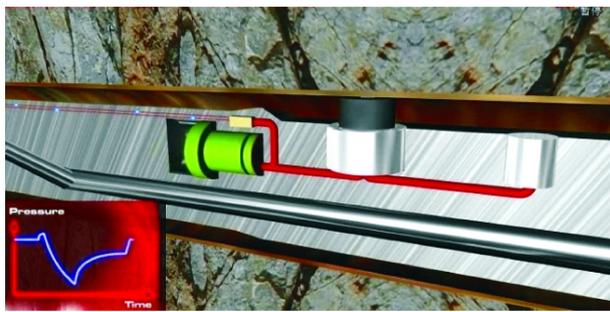


图 2 探头式随钻地层压力测量原理图

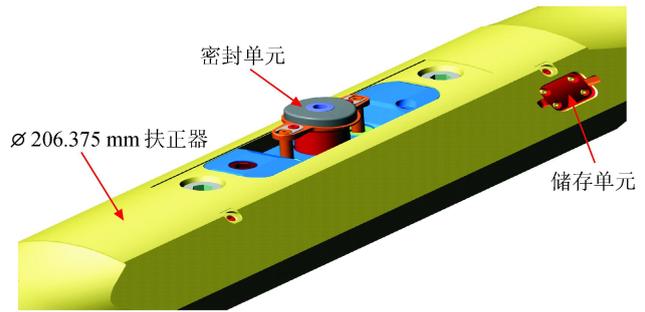


图 3 探头式随钻压力测试仪基本结构图

从国外随钻地层压力测量仪的调研分析可知,双封隔器式测量装置将钻铤坐封在井壁上,虽然探测范围较大,流体流动模拟比较准确,但封隔器间的流体抽吸量较大,环空固相可能被吸进仪器从而堵塞系统;测试时间较长,导致发生井下复杂情况的概率增加;封隔器在多次使用后可靠性严重降低,这些问题都限制了它在现场中的广泛应用。而几大国外油田技术服务公司的探头式随钻地层压力测量系统已经各自形成了一套系列^[8-10],已广泛应用于世界各地并推广,多次指导钻井,采油作业,产生了较大的经济效益。其相关配套的软件、硬件均具有很好的现场适应性(表 1)。

表 1 FPWD 主要技术参数表

生产厂家及名称	哈里伯顿公司 Geo-Tap				贝克休斯公司 Tes Trak			斯仑贝谢公司 Stetho-Scope		
尺寸/mm	120.65	171.45	209.55	241.30	120.65	171.45	209.55	120.65	171.45	209.55
稳定器直径/mm	133.350	196.850	247.650	254.000	142.875	206.375	304.800	142.875	206.375	292.100
长度/m	7.315	8.656	8.138	8.138	7.924	7.376	7.437	8.077	9.448	9.601
适用井眼/mm	∅146.050 ~187.375	∅212.725 ~269.875	∅269.875 ~406.400	∅311.200 ~457.200	∅146.050 ~165.100	∅212.725 ~269.875	∅269.875 ~444.500	∅146.050 ~165.100	∅212.725 ~269.875	∅269.875 ~444.500
最高工作压力/MPa	138	138	138	138	—	—	—	172	138/172	138/172
最高工作温度/℃	150	150	150	150	—	—	—	175	150	150

表 2 国内主要单位 FPWD 指标表

仪 器	西南石油大学	大庆钻探 SDC-I 型
仪器尺寸/mm	171	178
稳定器直径/mm	204	195
长度/m	7.3	9.4
适用井眼/mm	204~232	210~250
最高工作压力/MPa	70	140
工作温度/℃	0~120	-40~150

2 国内研究现状

国内关于随钻地层压力测试仪器的研究比较晚,近几年经过技术攻关已有多家单位研发出了随钻地层压力测量仪。具有代表性的有中国石油西部钻探克拉玛依钻井工艺研究院的双封隔器式随钻地层压力测量仪^[11],西南石油大学课题组“十一五”期间完成的探头式随钻地层压力测量装置^[12-13],北京六合伟业科技有限公司的探头式随钻地层压力测量仪^[14]以及中国石油大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院的 SDC-I 型探头式随钻地层压力测试器^[15-16](表 2)。

2.1 西南石油大学随钻地层压力测量系统样机

西南石油大学和中海石油研究中心在“十一五”期间,共同研制出了随钻地层压力测量系统的地面样机

及部件^[12]。完成了测量方案设计和测量仪器的试制以及数字化样机的制作,并应用研制的地面模拟装置^[13]对测量仪器关键部件进行了室内模拟实验,模拟环境达到了井下作业标准,仪器最高耐压 70 MPa,适用温度 0~125 ℃,工作钻压 0~250 kN,扭矩 0~10 kN·m。形成了一套随钻地层压力测量实施方案及地层压力解释分析方法,研制出了适用于此套测量仪的数据采集与控制系统,完成了随钻测量装置与 MWD 的通讯连接,能够达到随钻测量的效果。其装置总体结构如图 4 所示。



图 4 随钻地层压力测量装置实物图

它由涡轮发电机模块、电气短节、钻井液分流器、增压装置、执行机构总成、执行机构液压控制系统、抽吸系统、探测头、下接头等主要部件组成。它是基于钻井液分流提供液压动力,三点定位井壁保证合适推靠力,以钻井液脉冲作为下传信号的测试启动控制系统(图 5)。

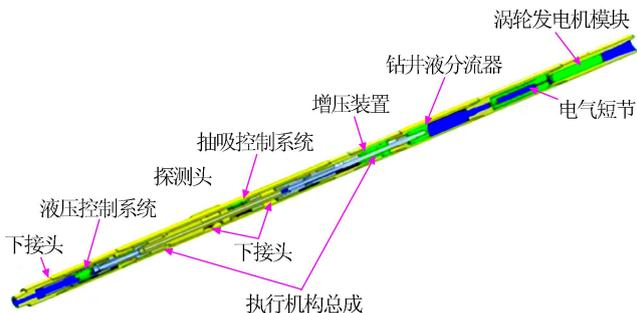


图 5 随钻地层压力测量装置装配剖面图

2.2 大庆 SDC-I 型随钻地层压力测试器

中国石油大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院于 2009 年 5 月研制完成了 SDC-I 型随钻地层压力测试器^[16],并进行了 6 口井的现场试验,收到了较好的效果。该测试器分为井下测试系统、地面信息接收及处理系统两部分。井下测试系统(图 6)负责完成地层压力的测试并存储和上传数据,地面信息接收及处理系统负责对数据进行接收和处理。现场试验表明,该测试器设计合理,可靠性高,压力测量精度达到 0.1%,

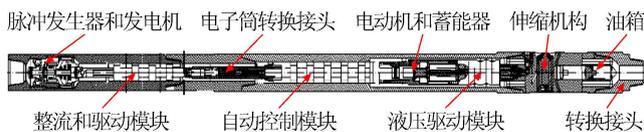


图 6 SDC-I 井下测试系统组成示意图

温度测量精度达到 ± 0.5 ℃,井下供电功率达到 160 W。可随钻实现数据上传和井下存储功能,地面可随钻获取井下准确的环空压力、温度、地层压力和地层流度(地层流度表示流体在该地层中流动的难易程度。是油层有效渗透率与流体黏度的比值)。经过一年半的推广,SDC-I 目前共完成 12 口井的现场测试工作,井下测试最高压力 47.02 MPa,最高温度 109.7 ℃。这种测试器已初步具备商业化应用的条件^[17]。

3 结束语

1)从国内随钻地层压力测量仪的研究趋势看,地层压力的实时测量已开始同 LWD、MWD 以及旋转导向钻井系统、地质导向钻井系统等联合使用。随着各研究机构对于测量精度和数据传输方面的攻关,其自动化、智能化程度必将大大提升。

2)国内探头式 FPWD 测量仪在抽吸地层流体过程中并未对不同岩性地层、高流度地层、低渗透地层进行抽吸速率、压降、压力恢复时间的优化,在测量时可能会导致数据的不准确。建议加大这方面的理论研究,采用数值模拟的方法,开发出适用于各种情况下的模型及控制系统,完善整个随钻压力测量系统。

3)国内外 FPWD 测量仪数据传输方式均采用钻井液脉冲遥测技术,无法满足欠平衡技术、空气钻井技术等随钻测量的需要,在相同的传输方式下,国内的传输数据不管从容量上还是从传输速度上都明显落后于国外。建议相关研究单位在增大钻井液脉冲传输的可调密度范围和应用条件的基础上加大声波、电磁波等无线随钻传输技术攻关,从而满足更多更复杂的随钻测量需求。

4)目前国外在仪器及配套系统方面应用已比较成熟,具备较为全面的应用体系,其技术指标也相对较高,能够适应较为恶劣的钻井环境(如高温高压井、深水钻井等)。国内虽有多家单位已研制出随钻地层压力测量仪,但技术水平参差不齐,技术指标较低,适用情况较为局限,仍然存在许多不足,还需在大量的现场试验中发现问题,解决问题,促使随钻测量技术更加完善。

参 考 文 献

- [1] 陈平. 钻井与完井工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2005: 18-19.
CHEN Ping. Drilling and completion engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 18-19.
- [2] 李伟廷, 侯树刚, 兰凯, 等. 自适应控制压力钻井关键技术及研究现状[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 50-52.
LI Weiting, HOU Shugang, LAN Kai, et al. Key technologies and research progress of the adaptive managed pressure drilling[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(11): 50-52.
- [3] 马英杰, 姜勇, 王秋成, 等. PES 地层压力随钻检测评价系统及应用[J]. 录井工程, 2010, 21(4): 5-9.
MA Yingjie, JIANG Yong, WANG Qiucheng, et al. PES while drilling formation pressure detection and evaluation system and its application[J]. Mud Logging Engineering, 2010, 21(4): 5-9.
- [4] SKINNER N, PROETT M, RINGGENBERG P, et al. New early formation pressure system field test results and advances in early time pressure buildup analysis[C]// paper 38648-MS presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 5-8 October 1997, San Antonio, Texas, USA. New York: SPE, 1997.
- [5] HOOPER M, MACDONALD C, SHALHOPE R, et al. Applications for an LWD formation tester[C]// paper 52794-MS presented at the SPE/IADC Drilling Conference, 9-11 March 1999, Amsterdam, Netherlands. New York: SPE, 1999.
- [6] LONGIS C, HOLM G, HILL J, et al. An LWD formation pressure test tool (DFT) refined the Otter Field development strategy[C]// paper 87092-MS presented at the IADC/SPE Drilling Conference, 2-4 March 2004, Dallas, Texas, USA. New York: SPE, 2004.
- [7] 刘鹏飞, 刘良跃, 司念亭, 等. 哈里伯顿 Geo-Tap 随钻测压工具在渤中 25-1E₃ 井的应用[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 42-44.
LIU Pengfei, LIU Liangyue, SI Nianting, et al. Application of Geo-Tap in Wells of Bozhong 25-1 Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 42-44.
- [8] 刘建立, 陈会年, 高炳堂. 国外随钻地层压力测量系统及其应用[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 94-98.
LIU Jianli, CHEN Huinian, GAO Bingtang. Foreign measurement system for formation pressure while drilling and its application[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 94-98.
- [9] Schlumberger. VISION, Scope[EB/OL]. [2012-03-10]. <http://www.slb.com/StethoScope>.
- [10] Halliburton. Geo-pilot[EB/OL]. [2012-03-10]. <http://www.halliburton.com>.
- [11] Bakerhughes. TesTrak[EB/OL]. [2012-03-10]. <http://www.bakerhughes.com>.
- [12] 陈若铭, 周强, 罗维, 等. 一种随钻地层压力测试方法及装置: 中国专利, CN200910002450.3[P]. 2010-07-21.
CHEN Ruoming, ZHOU Qiang, LUO Wei, et al. A method and instrument for formation pressure while drilling tester: Chinese Patent, CN 200910002450.3[P]. 2010-07-21.
- [13] 姜伟, 陈平, 蒋世全, 等. 一种随钻地层压力测量装置: 中国专利, CN201120001231.6[P]. 2011-09-21.
JIANG Wei, CHEN Ping, JIANG Shiquan, et al. A measurement instrument of formation pressure while drilling: Chinese Patent, CN 201120001231.6[P]. 2011-09-21.
- [14] 郑华林, 陈平, 姜伟, 等. 一种随钻地层压力地面模拟测量装置: 中国专利, CN 201120001606.9[P]. 2011-09-07.
ZHENG Hualin, CHEN Ping, JIANG Wei, et al. A surface simulation instrument for formation pressure while drilling tool: Chinese Patent, CN 201120001606.9[P]. 2011-09-07.
- [15] 冯建宇, 吴晓毅. 随钻地层压力测量装置: 中国专利, CN 201110085245.5[P]. 2011-07-20.
FENG Jianyu, WU Xiaoyi. Formation pressure while drilling instrument: Chinese Patent, CN 201110085245.5[P]. 2011-07-20.
- [16] 赵志学, 韩玉安, 高翔, 等. SDC-I 型随钻地层压力测试器[J]. 石油机械, 2011, 39(2): 52-54.
ZHAO Zhixue, HAN Yu'an, GAO Xiang, et al. SDC-I type formation pressure while drilling tester[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(2): 52-54.
- [17] 李天威. SDC-I 型随钻地层压力测试器具备商业化应用条件[EB/OL]. [2011-08-30]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2011/08/30/001346810.html>.
LI Tianwei. SDC-I type formation pressure while drilling tester has its commercial application conditions[EB/OL]. [2011-08-30]. <http://news.cnpc.com.cn/system/2011/08/30/001346810.html>.

(修改回稿日期 2012-12-09 编辑 凌忠)