

阵列成像测井技术在筛管完井大斜度气井产出剖面的应用

胡守林

中国石油集团油田技术服务有限公司 北京 100007

项目支持: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2017ZX05009-004)

通讯作者: Email: husl@cnpc.com.cn

引用: 胡守林. 阵列成像测井技术在筛管完井大斜度气井产出剖面的应用[J]. 油气井测试, 2023, 32(6): 41-45.

Cite: HU Shoulin. Application of multiple array production suite on production profile of highly deviated gas well with screen completion[J]. Well Testing, 2023, 32(6): 41-45.

摘要 针对常规生产测井在筛管完井的大斜度井应用中存在产水段不清、产气精度不足等问题, 引进了 Sondex 的阵列成像测井仪器, 包括阵列电容持率仪、阵列电阻持率仪、阵列涡轮流量计, 通过阵列电容持率仪、阵列电阻持率仪实现了流体类型的识别, 通过阵列涡轮流量计可识别井筒内不同流体的速度, 综合应用有效提升筛管大斜度井产出剖面的识别精度。中亚地区某气田东部 XXX-103D 井井斜 81.5°、斜井段 666.34 m, 生产水气比 8.22 m³/10⁴ m³, 通过应用阵列成像测井仪器获得了准确的产出剖面。该技术为后续大斜度井、水平井产出剖面的仪器组合、施工流程优化提供了实践依据, 为制定筛管完井的大斜度井增产措施提供了技术支撑。

关键词 大斜度井; 筛管完井; 阵列电容持率仪; 阵列电阻持率仪; 阵列涡轮流量计; 产气剖面; 产水剖面

中图分类号: TE37 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.06.007

Application of multiple array production suite on production profile of highly deviated gas well with screen completion

HU Shoulin

China Petroleum Technical Service Corporation Limited, Beijing 100007, China

Abstract: In response to the problems of unclear water invasion and inaccuracy of gas production in the application of conventional production logging in highly deviated wells with screen completion, Sondex's Multiple Array Production Suite (MAPS) is introduced to identify fluid types with Capacitance Array Tool (CAT) and Resistance Array Tool (RAT), and identify velocities of different fluids in wellbore with Spinner Array Tool (SAT), comprehensive application effectively improves the recognition accuracy of production profiles in highly deviated wells. The well XXX-103D in gas field in Central Asia has production water gas ratio of 8.22 m³/10⁴ m³ (inclination 81.5° and inclined section 666.34 m). Accurate production profiles were obtained by using array imaging logging tools. (Conclusion) The technique provides a practical basis for the tools combination and operation process optimization of the production profile of highly deviated and horizontal wells in future, and provides technical support for the development of stimulation measures for highly deviated wells with screen completion.

Keywords: highly deviated well; screen completion; CAT; RAT; SAT; gas production profile; water production profile

中亚地区某气田为裂缝-孔隙型和孔洞型碳酸盐岩气藏^[1], 边部和底部水体发育, 且存在明显的高温、高压特征。自 2014 年 4 月投产至今, 生产井有 80 余口, 其中大斜度井占比达 62.5%, 基本为筛管完井。由于气藏储层纵向非均质性强、裂缝发育复杂导致气井产出剖面不均匀, 随着开发逐渐进入中后期, 地层能量不足加剧了层间和层内矛盾。

为理清产出剖面的情况, 特别是大斜度井、水平井的气水产出剖面, 国内外开展了很多相关的研究。倪国军等^[2]提出在水平井应用多项持率测井仪-电容阵列多相持率测井仪 (CAT), 成功应用于塔里木盆地水平井测试作业中。宋红伟等^[3]针对水平井及大斜度井中气液两相复杂流型问题, 从管流动力学特性出发, 建立了气液段塞流动力学模

型,在多相流动环路模拟实验资料分析的基础上对该理论模型进行了正反演计算。李沁泽等^[4]为解决水平井多相流测量难题,基于模拟实验装置,采用电容阵列、电阻阵列和改进型涡轮阵列仪器进行水平井油水两相不同流量不同含水率的模拟测量,得出基于阵列涡轮和阵列持率仪的分层流解释模型,该模型对水平井油水两相的流量解释具有一定的适用性。牛月等^[5]针对水平井中混合流体的流型复杂多变,利用阵列电容持率仪 CAT 进行了低产水平井油水两相流(流量 100 m³/d)不同含水率条件下的物理实验,在水平井特有的分层流中,阵列电容持率仪 CAT 较传统单探头持率计 CWH 可更好地识别分层流中流体的分布情况,利用成像插值算法可实现井筒流体分布的重构。马焕英等^[6]为了研究水平井油水两相在不同流量和不同含水率条件下的流型流态,采用多探头系列仪器组合常规涡轮,在多相流模拟实验室进行水平井油水两相模拟实验。通过实验研究,油水两相在水平井中的流型类别可分为分层流、油包水-水、水包油-水、油包水和水包油五种,建立了流型图,可为水平井生产测井施工设计和状态分析提供流型参数。路菁等^[7-8]研究了用包括新型 CAT 仪器在内的生产测井仪器串,对不同流动条件下的气水两相混合流动进行仪器测量和关井模拟,观测并划分出了实验流型。

从目前研究成果来看,大部分研究基于水平油井,针对水平气井、特别是高产气井的研究较少,而且主要研究的是室内实验,针对中亚地区边部和底部水体发育的碳酸盐岩气藏研究和应用较少。目前大斜度井和水平井由于井斜角的变化,导致气相和水相出现明显的重力分异,气相在井筒的上部即高边,水相在井筒的下部即低边,而常规生产测井(PLT)主要采用居中测量方式,当井筒主要以气相为主时难以识别到水,当井筒以水相为主时难以识别到气,难以满足大斜度井和水平井产出剖面的有效识别。为了明确该地区大斜度气井产出剖面,指导下一步生产措施,利用 Sondex 阵列成像生产测井仪器开展了产出剖面测井,通过资料分析为下一步开展封堵、射孔措施提供了科学依据,也为今后在该地区开展大斜度井生产测井系列优化指明了方向。

1 阵列成像测井技术

阵列成像测井仪器^[9-11]包括阵列电容持率仪

(CAT)、阵列电阻持率仪(RAT)、阵列涡轮流量仪(SAT)。

阵列电容持率仪采用 12 根弹簧配 12 个探头,主要通过阵列电容传感器测量不同流体间的电容,根据不同流体间的介电常数差异(介电常数:空气为 1,油为 2~4,水为 81.5),来确定某一深度处探头所在区域截面的流体分布,能有效识别气水、油水差异,在油气水三相分层情况下较准确,持水率高于 45%,仪器的识别精度会降低,在气水混合程度高情况下不准确。阵列电容持率仪如下图 1 所示,(a)为 CAT 探头分布,传感器分布在弹簧弓内侧,能根据井径大小调节张开程度,(b)为气井某一深度处井筒截面气水分布。

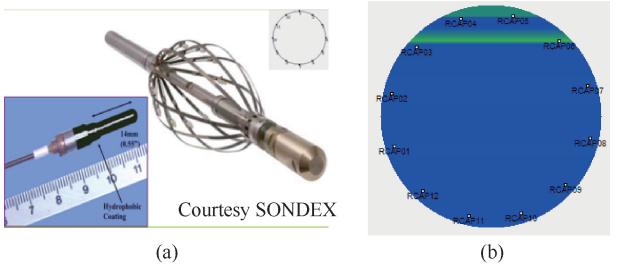


图 1 阵列电容持率仪 CAT 及井筒截面气水分布
Fig.1 CAT & Gas-water distribution in wellbore

阵列电阻持率仪,其结构与工作方式与 CAT 相同,不同的是 12 个微电阻率传感器,测试原理是通过测量井中油、气、水中的电阻率来区分流体性质,传感器可以探测到很小的流动很快的液泡,能用于确定井筒截面持水率。阵列电阻持率仪如图 2 所示,(a)为 RAT 探头分布,电阻率传感器与 CAT 探头分布类似,均分布在弹簧弓内侧,(b)为气井某一深度处井筒截面气水分布。

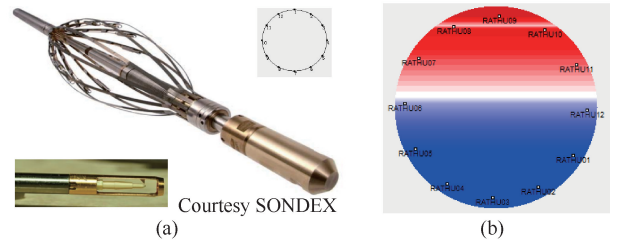


图 2 阵列电阻持率仪 RAT 及井筒截面气水分布
Fig.2 RAT & Gas-water distribution in wellbore

阵列涡轮流量仪,主要是由安装在弓形弹簧臂上有 6 个小型涡轮转子流量传感器组成,均匀分布在弹簧笼的四周,采用低摩擦宝石轴承,有效降低了转子的机械摩擦力,具有较高的灵敏度,可直接测量单相或混相的流速及方向。测井时流体可通过动态流动或上提下放仪器流过涡轮叶轮使其转

动。涡轮叶轮都存在一定的启动速度,并随着流体介质黏度的变化其启动速度存在较大差异。阵列涡轮流量仪如图 3 所示,(a)为 SAT 探头分布,与 CAT、RAT 探头分布类似,也分布在弹簧弓内侧,当仪器通过受限内径时,弹簧弓会出现塌陷,防止涡轮损坏,(b)为气井某一深度处井筒截面气水速度分布。

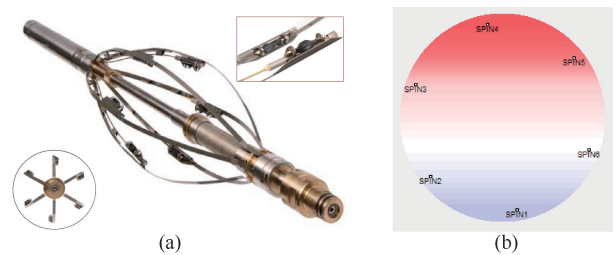


图 3 阵列涡轮流量仪 SAT 及井筒截面气水速度分布
Fig. 3 SAT & Gas-water velocity distribution in wellbore

MAPS 的三种仪器都带有相对方位测量传感器,用于记录仪器的旋转角度,可用于指示井眼的高低边,参数指标见表 1 所示。三种仪器的连接方式为串联,为防止出现偏心,一般在一个仪器上下加入两个扶正器,并与连续式流量计、井径仪、磁定位、伽马仪、密度仪、压力仪和温度仪串接在一起,并根据井斜和完井情况调整下井仪器串长度。同时由于三种仪器之间是硬连接,部分大斜度井或水平井的狗腿度较大,为保证安全,只选取其中的两种仪器组合下井。

表 1 MAPS 仪器参数指标					
Table 1 MAPS tools parameter index					
工具类型	探头数量	外径/ mm	温度/ ℃	压力/ MPa	张开时最大 外径/mm
SAT	6	43	177	103.4	177.8
RAT	12	43	177	103.4	177.8
CAT	12	43	177	103.4	177.8

当前大斜度井和水平井生产测井常用的测井传输工艺^[12-14]是爬行器输送或连续油管输送。爬行器在垂直井段靠仪器自然下放,到造斜段和水平段后采用地面供电驱动爬行器前进至测井井段,遇砂子等杂质或缩径时容易出现阻塞,对井况要求高,施工风险大,一般只能上测,同时无法确定流量计启动速度,因此海外大斜度井大多采用连续油管输送,考虑经济成本往往选用的是存储模式输送。

2 阵列成像测井技术在筛管完井大斜度井的应用

中亚地区某气田东部的 XXX-103D 井为气水同

产井,最大井斜角为 81.5°,井深 4 345 m,筛管完井,筛管尺寸为 139.7 mm,长度为 666.34 m,筛管外有一个封隔器。该井投产放喷过程中,10 mm 油嘴进分离器求产,井口压力 15.33 MPa,折日产水 120.00 m³,折日产气 14.6×10⁴ m³,生产水气比为 8.22 m³/10⁴ m³。为了得到该井的产出剖面,特别是明确出水点,采用存储模式连续油管输送工艺,开展 PLT、MAPS 两趟分开测井作业。在目标筛管段采用 5 m/min、10 m/min、15 m/min、17 m/min 上测和下测速度,为计算总流量的一致性,分别在油管段以 4 种速度上测和下测,并在不同深度点测。利用套管伽马与裸眼伽马进行深度校正。利用 Emeraude 生产测井解释平台,结合常规测井曲线、构造等综合解释得到各层的贡献率(见图 4)。

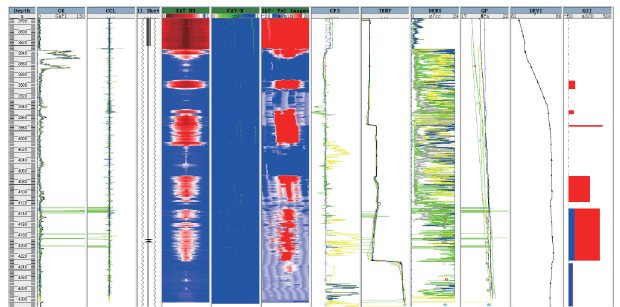


图 4 XXX-103D 井 MAPS 解释成果图
Fig. 4 XXX-103D MAPS interpretation results

解释成果图中第 5 道~第 7 道是 RAT、CAT 和 SAT 成像图,RAT 成像图红色为高边气相,蓝色为低边水相,SAT 成像图中红色为正速度,蓝色为负速度,速度的增加表现为产出,CAT 成像图中主要识别为水,RAT 与 SAT 响应具有较好的一致性,CAT 识别流体性质的效果并不好;第 8 道为连续式流量计 CFS;第 9 道~第 12 道是温度、密度、压力和井斜;第 13 道为最终解释产出剖面。

从下而上,从 RAT、SAT 和温度来看,在底部 4 228.0~4 308.5 m 存在温度略为上升,RAT 在高边有轻质相气体,SAT 在高边和低边都出现正速度,CFS 在该处出现一定正向波动,同时常规电成像测井结果显示 4 135 m 以下裂缝密度较大,斯通利波流体流动指数较大,裂缝可能是与水源的连通的主要通道,从地质构造和连井剖面来看,该井处在卡洛夫牛津阶南部斜坡带上,储层比邻井直井低 100 m 左右,因此 MAPS 解释结果与地质认识是一致的,认为该处出现底水的可能性较大,同时由于该井生产时间短,也是筛管完井,常规测井曲线具有一定参考意义,因此该段为以水为主的气水同出段;4 125.7~4 222.7 m,从 RAT 和 SAT 可知,高边有气

相且出现速度增加,说明有气体的明显产出,而温度略上升,SAT 在低边有速度增加,说明此处还有水的产出,解释为气水同出,以气为主;3 885.7 ~ 3 902.2 m、3 941.4~3 949.2 m、3 969.3~4 007.6 m、4 064.2~4 113.0 m,RAT 显示四个井段气相持率有明显增加,对应 SAT 在该井段流体速度有明显增大趋势,结合温度变化分析认为此 4 个井段有气相产出。MAPS 显示 3 828 m 附近为油管鞋位置,3 828 m 以上流体速度急剧增大,持水率降低,表明斜井段内存在大量的水无法被举升出地面,在斜井段内循环流动,仅有少量的水随气体进入油管被采出地面。

MAPS 解释的产层与常规测井资料的解释结果具有较好一致性,如图 5 所示。

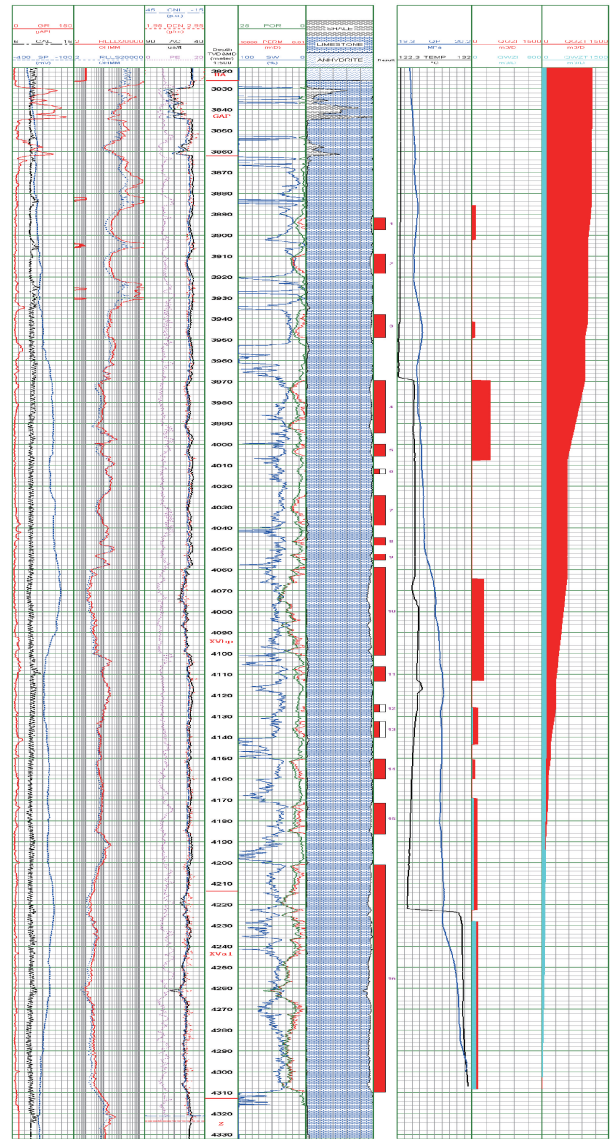


图 5 XXX-103D 井常规解释成果图
Fig. 5 XXX-103D well conventional interpretation results

气水两相流态、井眼环境、筛管外流动的多重因素^[15-17]导致当前 MAPS 资料无法完全覆盖水平段流体流动状态,对产量计算结果产生了一定的影响,建议后期采用噪声仪器用于识别筛管外流体产出,提高 MAPS 解释的精度;同时本井筛管外封隔器处未见到 SAT 和 RAT 明显变化,未起到集束作用,加大了产量解释的难度,建议在大斜度井完井方式可采用多个筛管外封隔器完井,进一步提高 MAPS 测井解释精度。

3 结论

(1)常规生产测井居中测量,无法实现大斜度井产出剖面的识别,阵列成像测井技术 MAPS 能实现井筒截面的重力分异流体分布。

(2)阵列成像测井技术 MAPS 在生产水气比较大的大斜度气井应用时,RAT 与 SAT 响应具有较好的一致性,CAT 适用性较差,因此建议对于该类井在工具优化上首选 RAT+SAT 仪器组合,同时增加阵列持气率仪器提高产气剖面的精度。

(3)大斜度井井筒气水两相复杂流态、井眼环境,无法识别到筛管外流体流动增加了 MAPS 解释的不确定性,需要结合常规测井、地质构造和生产动态资料提高解释精度,并通过加测噪声测井、氧活化测井等技术对筛管外流动识别,增强解释结果的可靠性。

(4)建议在大斜度井完井时增加多个筛管外封隔器,能为产出剖面以及后续增产措施的作业奠定施工基础。

致谢:感谢中油技服、中油测井等在论文素材、方法研究方面做出的贡献。

参考文献

[1] 刘荣和,高仪君,冷有恒,等. 阿姆河右岸气田复杂出水模式精细识别和长效治理对策[J]. 特种油气藏,2019,26(6):96-101.
LIU Ronghe, GAO Yijun, LENG Youheng, et al. Fine identification and long-term countermeasure of complex water production patterns in the gasfields, the right bank of the Amu Darya[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019,26(6):96-101.

[2] 倪国军,郑雪祥. 在水平井中应用的一种新型多相持率测井仪-电容阵列多相持率测井仪(CAT)[J]. 油气井测试,2004,13(4):86-89.
NI Guojun, ZHENG Xuexiang. Application of a new model multiple phase holdup logging instrument in horizontal well-capacitance array multiple phase holdup logging instrument



- (CAT)[J]. Well Testing, 2004, 13(4): 86-89.
- [3] 宋红伟, 郭海敏. 大斜度井中气液两相段塞流动力学模型分析[J]. 测井技术, 2016, 40(2): 127-131.
- SONG Hongwei, GUO Haimin. Analysis of gas and liquid two-phase slug flow dynamics model in highly deviated well[J]. Well Logging Technology, 2016, 40(2): 127-131.
- [4] 李沁泽, 刘军锋, 高峰, 等. 基于阵列涡轮和阵列持率仪的水平井油水两相流量解释方法[J]. 测井技术, 2021, 45(4): 405-410.
- LI Qinze, LIU Junfeng, GAO Feng, et al. Interpretation method of oil-water two-phase flow in horizontal well based on array spinner and array holdup tools[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(4): 405-410.
- [5] 牛月, 郭海敏, 卢鑫. 低产水平井油水两相中的 CAT 流体成像分析[C]//中国地球物理学会. 首届全国矿产勘查大会论文集, 2021: 1.
- NIU Yue, GUO Haimin, LU Xin. Fluid imaging analysis of CAT about oil-water two-phase flow in low production horizontal wells[C]//Chinese Geophysical Society. Proceedings of the First National Mineral Exploration Conference, 2021: 1.
- [6] 马焕英, 李家骏, 李恒, 等. 水平井油水两相流型实验研究[J]. 云南化工, 2021, 48(7): 52-55.
- MA Huanying, LI Jiajun, LI Heng, et al. Experimental study on oil-water two-phase flow pattern in horizontal well[J]. Yunnan Chemical Technology, 2021, 48(7): 52-55.
- [7] 路菁, 吴锡令, 黄志洁, 等. 气水两相水平流动测井的流型实验研究[J]. 科技导报, 2010, 28(3): 59-62.
- LU Jing, WU Xiling, HUANG Zhijie, et al. Experimental study of horizontal gas-water flow pattern during production well logging[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(3): 59-62.
- [8] 郭海敏, 戴家才, 陈科贵. 生产测井原理与资料解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 247-251.
- [9] 徐昊洋, 王燕声, 牛润海, 等. 水平井连续油管输送存储式产液剖面测试技术应用[J]. 油气井测试, 2014, 23(3): 46-48.
- XU Haoyang, WANG Yansheng, NIU Runhai, et al. Application of memory fluid production profile testing technology conveyed by coiled tubing to horizontal well[J]. Well Testing, 2014, 23(3): 46-48.
- [10] 张向林, 刘新茹. 大斜度和水平井的生产测井[J]. 石油仪器, 2007, 21(6): 1-4.
- ZHANG Xianglin, LIU Xinru. Production logging in high inclination wells and horizontal wells[J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(6): 1-4.
- [11] 朱洪征, 郭靖, 黄伟, 等. 低液量水平井存储式产液剖面测井技术与应用[J]. 钻采工艺, 2018, 41(6): 50-52.
- ZHU Hongzheng, GUO Jing, HUANG Wei, et al. Development and application of memory type fluid production profile logging technology in low liquid output horizontal wells[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(6): 50-52.
- [12] 聂飞朋, 石琼, 郭林园, 等. 水平井找水技术现状及发展趋势[J]. 油气井测试, 2011, 20(3): 32-34.
- NIE Feipeng, SHI Qiong, GUO Linyuan, et al. Present situation and development trend of water detection tech in horizontal well[J]. Well Testing, 2011, 20(3): 32-34.
- [13] 秦昊, 戴家才, 秦民君, 等. 低产水平井油水两相流阵列持水率计实验研究[J]. 测井技术, 2017, 41(6): 637-641.
- QIN Hao, DAI Jiakai, QIN Minjun, et al. Experimental study on oil-water two-phase flow array water holdup tool in horizontal well[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(6): 637-641.
- [14] 黄春辉, 李军, 胡金海, 等. 气相介入对伞集流涡轮流量计及阻抗含水率计响应影响[J]. 测井技术, 2017, 41(6): 648-651.
- HUANG Chunhui, LI Jun, HU Jinhai, et al. Influence of gas injection on responses of petal type turbine flowmeter and impedance watercut meter[J]. Well Logging Technology, 2017, 41(6): 648-651.
- [15] 侯振永, 付焱鑫, 马焕英, 等. 生产测井技术在低产水凝析气藏出水层位识别中的综合应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(4): 29-33.
- HOU Zhenyong, FU Yanxin, MA Huanying, et al. Comprehensive application of production logging technology in water level of low-water-production condensate gas reservoirs[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020, 17(4): 29-33.
- [16] 余鉴桥, 刘红岐, 郭永红, 等. YML 凝析气田产气剖面解释模型研究[J]. 测井技术, 2020, 44(2): 209-214.
- YU Jianqiao, LIU Hongqi, GUO Yonghong, et al. Gas production interpretation model of YML condensate gasfield[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(2): 209-214.
- [17] 邱小雪, 戴家才, 赫长平, 等. 积液井气相携液能力影响因素的数值模拟[J]. 测井技术, 2020, 44(1): 92-97.
- QIU Xiaoxue, DAI Jiakai, HE Changping, et al. Numerical simulation to factors influencing the gas-carrying-liquid ability in liquid-loading wells[J]. Well Logging Technology, 2020, 44(1): 92-97.

编辑 吴志力

第一作者简介: 胡守林, 男, 1968 年出生, 高级工程师, 大学本科, 1992 年毕业于长江大学开发系钻井专业, 目前从事井下作业管理方面工作。电话: 010-59984997; Email: husl@cnpc.com.cn。通信地址: 北京市东城区东直门北大街 9 号石油大厦 A 座, 邮政编码: 100007。