

海上稠油热采井微差井温测试技术

顾启林¹, 孙永涛¹, 马增华¹, 冯祥¹, 赵晓², 李友平²

- 1. 中海油田服务股份有限公司油田生产研究院 天津 300459
- 2. 中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院 山东东营 257000

通讯作者:Email: guql2@cosl.com.cn
项目支持: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“规模化多元热流体热采工程技术示范”(2016ZX05058-003-009)

引用: 顾启林, 孙永涛, 马增华, 等. 海上稠油热采井微差井温测试技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 73-78.
Cite: GU Qilin, SUN Yongtao, MA Zenghua, et al. Differential well temperature testing technology for offshore heavy oil thermal recovery wells [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 73-78.

摘要 海上稠油热采井多为水平井, 油藏非均质性强, 多轮次吞吐出现气窜, 水平段动用不均衡, 热采效果变差。热采井微差井温测试技术利用油管或者连续油管将微差井温测试仪下入热采井水平段, 对水平段进行温度、压力测试, 然后通过吸汽剖面分析方法和数值模拟分析方法对测试数据进行解释, 分析水平段的吸汽和动用情况。渤海某油田热采水平井 X1 井应用该技术成功录取了水平段的温度、压力数据, 认识到水平段的吸汽情况及动用程度均呈现出“前端<中部<末端”的三段式分布规律, 并根据测试分析结果, 优化注汽方案, 提出优化注汽管柱结构, 水平段分段、选段注汽以及末端堵调的下步措施建议。该技术为海上稠油热采水平井提供了有效的测试和分析手段。

关键词 海上稠油; 热采井; 微差井温测试仪; 温度测试; 压力测试; 吸汽剖面; 数值模拟

中图分类号: TE353 **文献标识码**: B **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.05.013

Differential well temperature testing technology for offshore heavy oil thermal recovery wells

GU Qilin¹, SUN Yongtao¹, MA Zenghua¹, FENG Xiang¹, ZHAO Xiao², LI Youping²

- 1. Oilfield and Production Research Institute of COSL, Tianjin 300459, China
- 2. Petroleum Engineering Technology Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China

Abstract: Most of the offshore heavy oil thermal recovery wells are horizontal wells, which have the following characteristics: the strong reservoir heterogeneity, the gas channeling after multiple cyclic steam stimulation, and the uneven utilization of reservoirs in horizontal sections, which leads to low thermal recovery. In order to solve these problems, the DTEM test technology of thermal recovery wells is used to test the temperature and pressure of the horizontal section. Then, based on the steam injection profile analysis and numerical simulation analysis, the test data is interpreted to analyze the steam injection and utilization of the horizontal section. This technology provides an effective test and analysis method for offshore heavy oil thermal recovery horizontal wells. Taking the well X1 of the thermal recovery horizontal well in an oilfield in Bohai as an example, after applying this technology, the well successfully recorded the temperature and pressure data of the horizontal section, based on that it is found that both of the steam injection and utilization degree of the horizontal section showed a three-stage distribution law, that is, the end of the horizontal section is the best, the middle is the second, and the front end is the worst. This conclusion, combined with the test analysis results, provides a reference for the steam injection plan and the optimization of the steam injection tubular structure. It also provides suggestions for the stages of the horizontal section, the selection of the steam injection position and the next step of the terminal plugging-control.

Keywords: offshore heavy oil; thermal recovery well; differential well temperature tester; temperature test; pressure test; steam injection profile; numerical simulation

热力采油是开采稠油最有效的方法之一, 自 2008 年以来, 渤海某油田热采已取得了显著的增产效果^[1]。但由于油藏非均质特性, 导致水平段动用不均衡, 经过多周期的吞吐开采, 制约了单井热采效果^[2]。因此, 为提高热采效果, 全面了解热采井

水平段的吸汽剖面、动用情况^[3], 需要对海上稠油热采井进行温度、压力测试, 指导注汽及采油工艺措施的实施, 实现水平井均衡、有效动用。

水平井测试是水平井开发的关键难题, 而热采水平井由于高温、高压等因素, 更是一个新的技术

领域。邵立民^[4]介绍了国内外水平井找水、产出剖面测试、砾石充填评价以及仪器输送技术,分析得出了水平井生产测试技术以多种仪器组合测试,并配合快速准确的输送为发展方向。张瑞等^[5]对比分析了井下永置式压力监测与连续油管测试工艺的优缺点,并在石南油田 31 井区进行了现场应用。石国强^[6]、崔文昊等^[7]和徐昊洋等^[8]都报道了存储式水平井产液剖面测试技术,通过油管/连续油管将测试仪下入水平段,可测量温度、压力、流量、持水率等关键参数,定性定量地分析解释生产井层间产能以及产油、产水状况,但该项工艺无法满足高温的要求,仅适用于冷采井。艾尼瓦尔^[9]提出了利用抽油杆输送测试仪器的双管井水平井温度、压力监测工艺技术,但只能在井口无压力、地层温度不太高时进行测试。针对现有测试技术无法满足热采水平井注蒸汽参数测试需要的状况,赵占锋等^[10]、吴国伟等^[11]和程国强等^[12]报道了高温高压多参数测试仪在河南油田、胜利油田热采井中的应用,成功实现了对水平段的温度、压力、流量及干度的测试。张丁涌^[13]针对热采水平井测试难度大的问题,提出了采用连续钢铠电缆测温技术,进行稠油水平井吸汽剖面测试,并建立了稠油热采井吸汽剖面模糊综合评价模型,得到了更为合理的吸汽剖面。宫继刚^[14]、李燕^[15]报导了热电偶-毛细管温压一体化测试技术在辽河油田、克拉玛依油田蒸汽吞吐井、蒸汽驱井观察井的应用,该项测试技术具有工艺简单,耐高温高压,适用范围广等特点。郑金中等^[16]研究了井下永久式光纤温度-压力测试技术,配套研制了井下光纤测试系统,并在胜利油田进行了现场试验,适应井下高温(200 ℃)、高压(50 MPa)环境。

但是,存储式水平井产液剖面测试技术无法满足热采井耐高温的要求,仅适用于冷采井;高温、高压多参数测试仪在高温高压条件下工作时间短,而且通常难以下入水平段;热电偶-毛细管温压一体化测试技术监测的温度、压力点有限,属于笼统测压,而且毛细管有损坏、发生堵塞的风险;光纤测试技术难以满足 250 ℃ 以上高温下的压力监测^[17],而且对钻井有较高的要求、费用高。稠油热采水平井动态监测技术目前尚不成熟,国内外还没有比较完善的工艺技术,更没有针对海上油田热采井水平段进行测试的应用案例。因此,有必要结合海上热采特点,综合不同测试工艺的特点,提出一种适用于海上热采水平井的测试新工艺。

1 微差井温测试技术简介

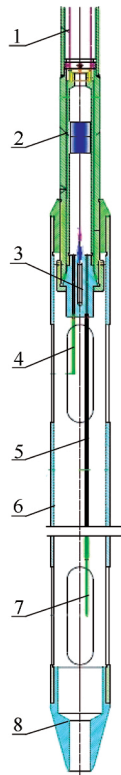
为满足海上热采测试对设备占地面积小、施工工艺简便、作业周期短、安全可靠的要求,开展了微差井温测试技术研究。

1.1 技术原理

该技术通过测试管柱/连续油管将微差井温测试仪下入热采井预定位置,对水平段进行温压测试;测试期间传感器采集到的四路电信号经放大器放大后,转换成数字信号并存储到数据存储器中。测试完成后,将数据存储器中的时间、温度、微差、压力以及含水信号进行回放及数据归并,形成完整的时间、深度、温度、压力、含水数据,掌握水平段的温度场分布及变化状况^[18-19]。然后结合地质油藏资料及注汽、生产动态,分析热采井水平段的吸汽情况、动用情况,判别气窜及出水层段^[20],为后续的注汽参数调整及调堵工艺实施提供科学依据。

1.2 测试仪器

微差井温测试仪主要由温度传感器、压力传感器、含水传感器、采集存储系统、保温绝热部分,以及仪器保护部分等组成(图 1)。



1-保温瓶;2-磁定位器;3-压力传感器;4、7-温度传感器;
5-数据采集电路;6-外保护筒;8-导向头

图 1 微差井温测试仪结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the differential well temperature tester

1.2.1 结构及特点

能够测量温度、温差、压力等多参数,为防止信号相互干扰,提高测量精度,优选传感器,合理安排仪器的结构,并满足高温高压测量的要求^[18,21]。仪器可通过油管或者连续油管输送至水平段。

1.2.2 主要技术指标

采样点间隔:0.5 m;
温度测量范围:0~350 ℃;
压力测量范围:0~25 MPa;
含水测量范围:5%~100%;
测温精度:±0.1 ℃;
测压精度:0.2% FS。

1.3 解释分析技术

采用吸汽剖面分析和数值模拟分析两种方法,分析水平段的动用程度,为后续的注汽参数调整及调堵工艺实施提供科学依据。

1.3.1 吸汽剖面分析方法

通过研究储层的传热,建立能量守恒方程,反复迭代测取的水平段温度场数据,定性判断水平段的吸汽百分比及动用程度。

1.3.2 数值模拟分析方法

根据地质油藏资料,结合微差井温测试数据,精细化建立单井数值模型,拟合生产动态及井温测试结果,分析水平段温度场、压力场的分布情况,进一步验证测试结果。

2 现场应用及解释分析

X1井为渤海某油田一口热采水平井,完钻井深1 954 m,水平段1 615~1 916 m。2017年进行第3轮注热,水平段设计分四段注热,共下入11个配注阀,前疏后密。注汽量3 000 t,初期注汽温度260~265 ℃,逐渐降至220~225 ℃,注汽压力9.1~14.3 MPa。焖井2 d后放喷,未见液产出,放喷结束,进行微差井温测试,成功获取测试数据后,进行了解释分析,并给出了下步措施建议。

2.1 测试过程

该井放喷结束后进行洗压井作业,然后起出原井注热管柱。校验、连接测试仪器,下入测试管柱至水平段进行测试;然后上提测试管柱,再次对水平段进行测试。在测试仪器进出水平段期间,严格控制下放、上提管柱速度2.5~3.0 m/min,并且每根油管停留2~3 min直至完成水平段测试。在测试过程中,测试仪器起下顺利,没有出现卡阻

现象^[22-23],成功获取了有效的温度、压力和微差测试数据。

2.2 测试解释分析

将从测试数据、数值模拟两方面进行分析。

2.2.1 测试数据分析

(1)在测试仪器下入、提出水平段期间,对水平段进行了2次测试,从测试温度曲线(图2)可以看出,两次测试的温度变化趋势基本一致,最大温差仅为2.28 ℃。

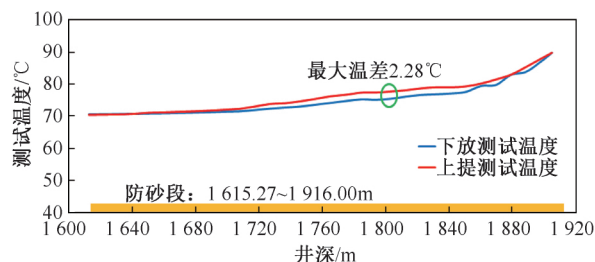


图2 X1井下放/上提测试温度曲线图

Fig.2 Test temperature curve of hoisting up or setting down in well X1

(2)从水平段温压测试剖面图(图3)可以看出,经过焖井、放喷后,该井水平段的最高温度不超过90 ℃,说明在测试前的洗、压井作业,注入大量的地热水对温度场造成了一定的影响,在一定程度上削弱了整个水平段的温度场响应。水平段前端温度为70.58 ℃,末端温度为89.79 ℃,随着深度增加井温不断升高,整体呈现前低后高的趋势。本周期注汽使用的配注阀在水平段前端布点稀、后端布点密集,在一定程度上影响了前端的动用效果。水平段前端压力8.69 MPa、末端压力为7.94 MPa,前后压力差为0.75 MPa,压力场呈现前高后低的情况。而水平段垂深最大差值为4.17 m,理论分析造成的压力差异约为0.04 MPa。因此压力数据也从侧面证明了水平段末端可能是动用较好的井段,亏空相对严重。

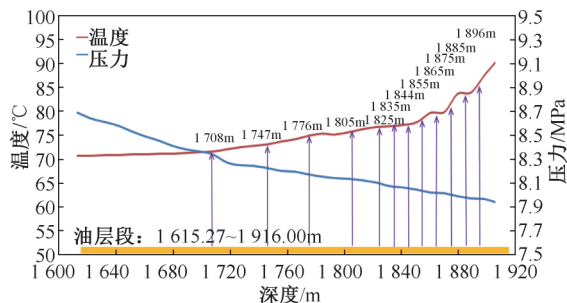


图3 X1井水平段温压测试剖面图

Fig.3 Temperature and pressure test profile of the horizontal section in well X1

(3)结合地质资料、油层物性参数、生产资料,对该井的吸汽情况进行分析,从吸汽分析结果(图4)可以看出,随着井深的增加,吸汽比例逐渐升高。其中前端1615~1710 m井段,每10 m的吸汽比例均小于

2.0%,吸汽量较小;中部1710~1810 m井段,每10 m的吸汽比例为2.0%~3.5%,上升速度加快且明显增大;末端1810~1910 m井段,每10 m的吸汽比例为3.7%~7.4%,上升速度最快且最大。

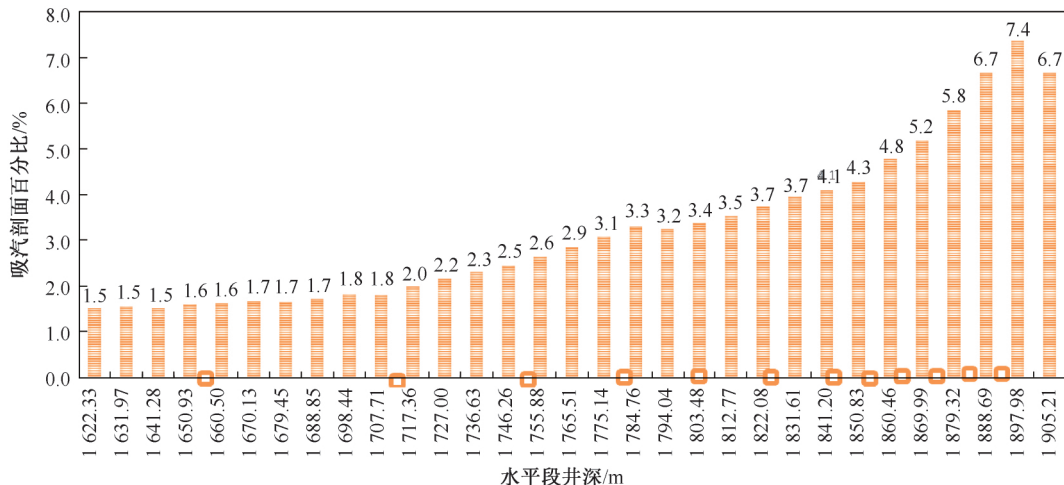


图4 X1井吸汽剖面解释数据图

Fig.4 Data interpretation of the gas entry profiling in well X1

2.2.2 数值模拟分析

为进一步对X1井进行分析,加深对该井动用程度的认识,开展了该井的数值模拟研究^[24-25]。

(1)模型建立。采用灵活井模型,布置两口井:一口井射孔、模拟筛管,一口井按照配注阀的实际布置位置模拟注汽管柱。为消除层内和层间拐点对温度场的影响,将全井段设计在一个油层中,采用实际注汽数据,模拟最近一个周期的注汽。

(2)模拟结果。从模拟的井温剖面(图5)可以看出,随着深度的增加,水平段温度整体呈现上升趋势,与实测的数据趋势一致。由于采用的理想模型,更多反映的是油层而不是实际井筒的情况,而且也无法模拟洗压井作业,因此模拟结果没有呈现出较大的温度差异,但是趋势上基本一致。

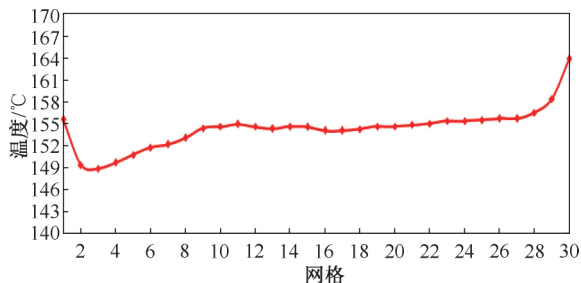


图5 X1井数值模拟井温曲线图

Fig.5 Numerical simulation of well temperature curve in well X1

2.3 措施建议

综上所述,X1井经过三个周期注汽,水平段的

动用效果呈现了前端较差,末端较好的特点,建议采取综合措施,提高前端和中部的动用程度,降低汽窜的影响,提高水平段整体的动用效果。

(1)将注汽管柱下入尾深上提70~80 m。

(2)增加水平段前端配注阀的数量,并且增大布孔密度,减小末端配注阀的数量。

(3)采取分段、选段注汽。选择低温区、不同点进行注汽,并在末端下入封隔器及圆堵(代替开口引鞋)。

(4)对水平段末端进行堵调^[26-27],抑制末端汽窜现象的发生,提高热采效果。

3 结论

(1)通过微差井温测试技术研究和现场应用,解决了海上热采井多轮次吞吐后,水平段温压参数无法获取,吸汽情况、动用程度不明的难题。

(2)经过现场应用表明,该技术实施便捷、安全可靠,工作稳定,测试数据准确可靠,为海上稠油热采水平井测试提供了一种新的技术手段。

(3)微差井温测试技术对注汽方案及工艺措施调整,提高水平段动用程度,措施效果评价,经济、高效开采海上稠油油藏具有很好的指导意义,建议进一步研究完善该项技术,并在海上稠油热采井推广应用。

致谢:感谢中海油田服务股油田公司孙永涛专家对完善本文提出的宝贵意见;感谢“十三五”国家重大专项“大型油气田

及煤层气开发”子课题“规模化多元热流体热采工程技术示范”资助。

参考文献

- [1] 唐晓旭,马跃,孙永涛.海上稠油多元热流体吞吐工艺研究及现场试验[J].中国海上油气,2011,23(3):185-188.
TANG Xiaoxu, MA Yue, SUN Yongtao. Research and field test of complex thermal fluid huff and puff technology for offshore viscous oil recovery [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(3): 185-188.
- [2] 王卓飞,魏新春,江莉,等.浅层稠油热采水平井测试技术研究及应用[J].石油地质与工程,2008,22(6):112-113.
WANG Zhuofei, WEI Xinchun, JIANG Li, et al. Research and application of horizontal well testing technology for shallow heavy oil thermal recovery [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(6): 112-113.
- [3] 阮林华,王连生,吴军,等.稠油热采水平井测试技术的研究与应用[J].石油科技论坛,2009(6):43-46.
RUAN Linhua, WANG Liansheng, WU Jun, et al. Application of testing technology of horizontal wells of thermal production in dense oilfields [J]. Oil Forum, 2009(6): 43-46.
- [4] 邵立民.国内外水平井生产测试技术[J].油气井测试,2016,25(1):73-74.
SHAO Limin. Production test technology to horizontal well at home and abroad [J]. Well Testing, 2016, 25(1): 73-74.
- [5] 张瑞,单永乐,吴胜利,等.涩北气田水平井测试工艺研究与应用[J].油气井测试,2015,24(6):47-48.
ZHANG Rui, SHAN Yongle, WU Shengli, et al. Research on testing technology to horizontal well in Sebei gas field and its application [J]. Well Testing, 2015, 24(6): 47-48.
- [6] 石国强.水平井产出剖面测试工艺在大牛地气田的应用[J].中国石油石化,2017(1):59-60,61.
SHI Guoqiang. Application of horizontal well production profile testing technology in Daniudi gas field [J]. China Petrochem, 2017(1): 59-60, 61.
- [7] 崔文昊,高榕,常莉静,等.井下存储式浮子流量计在水平井产液剖面测试中的应用[J].测井技术,2017,41(4):458-461.
CUI Wenhao, GAO Rong, CHANG Lijing, et al. Application of downhole memory float flowmeter to production fluid profile logging in horizontal wells [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(4): 458-461.
- [8] 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 continuous oil tube transportation and storage liquid profile testing technology in horizontal wells [J]. Well Testing, 2014, 23(3): 46-48.
- [9] 艾尼瓦尔.双管井水平井温度、压力监测工艺技术[J].新疆石油科技,2010,20(4):13-15.
ANWAR. Monitoring technology of horizontal well temperature and pressure in double pipe well [J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2010, 20(4): 13-15.
- [10] 赵占锋,冯红波,刘建朴,等.河南油田泌浅10区稠油热采测试技术[J].中国石油和化工标准与质量,2014(9):80.
ZHAO Zhanfeng, FENG Hongbo, LIU Jianpu, et al. Thermal recovery test technology for heavy oil in shallow 10 area of Henan oilfield [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2014(9): 80.
- [11] 吴国伟,刘明,尚跃强,等.热采水平井注蒸汽四参数测试仪研制及应用[J].石油机械,2012,40(12):102-104.
WU Guowei, LIU Ming, SHANG Yueqiang, et al. Development and application of steam injection on four-parameter tester for thermal recovery horizontal well [J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(12): 102-104.
- [12] 程国强,杨国武,叶志权,等.动态监测新技术在稠油热采中的应用[J].石油天然气学报,2010,32(2):333-335.
CHENG Guoqiang, YANG Guowu, YE Zhiqian, et al. Application of dynamic monitoring technology in thermal recovery of heavy oil [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(2): 333-335.
- [13] 张丁涌.稠油热采水平井温度测试及注汽剖面分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(2):124-130.
ZHANG Dingyong. Temperature test and injection profile analysis in heavy oil thermal recovery horizontal well [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(2): 124-130.
- [14] 宫继刚.毛细管温压一体化监测技术[J].甘肃科技,2008,24(13):51-52.
GONG Jigang. Integrated monitoring technology of capillary temperature and pressure [J]. Gansu Science and Technology, 2008, 24(13): 51-52.
- [15] 李燕.毛细管动态压力监测技术在新疆稠油注蒸汽井中的研究及应用[J].新疆石油天然气,2006,2(3):80-85.
LI Yan. Research of dynamic capillary pressure monitoring technology on steam injection wells in Xinjiang heavy oil and its application [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2006, 2(3): 80-85.
- [16] 郑金中,姜广彬,陈伟,等.井下永久式光纤温度一压力测试技术研究[J].石油机械,2010,38(10):55-57.
ZHENG Jinzhong, JIANG Guangbin, CHEN Wei, et al. Research on the testing technology of the borehole permanent optical fiber temperature-pressure [J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(10): 55-57.

- [17] 贾振甲,孙达,李方宇,等.致密油储层试油分布式光纤传感监测技术[J].油气井测试,2018,27(3):58-65.
JIA Zhenjia, SUN Da, LI Fangyu, et al. Monitoring technique involving distributed optical fiber sensor for well testing in tight oil reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(3):58-65.
- [18] 梁栋,刘明,杨琴琴,等.热采水平井井温剖面测试及分析技术研究与应用[J].化学工程与装备,2012(6):89-91.
LIANG Dong, LIU Ming, YANG Qinqin et al. Research and application of horizontal well temperature profile test and analysis technology in thermal recovery [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2012(6):89-91.
- [19] 韩祥立.微差井温测井技术在油井找水中的应用[J].内蒙古石油化工,2011(8):168-169.
HAN Xiangli. Application of differential temperature logging technology in water finding in oil wells [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011(8):168-169.
- [20] 邵立民.微差井温与硼中子测井技术在胜利油田控水中的应用[J].国外测井技术,2013,198(6):57-60.
SHAO Limin. Differential temperature and boron neutron logging technology to water control in Shengli oilfield [J]. World Well Logging Technology, 2013, 198(6):57-60.
- [21] 高振涛,郑庆龙,郑德胜,等.微差井温仪的研制及在油田开发中的应用[J].石油管材与仪器,2016,2(4):18-21.
GAO Zhentao, ZHENG Qinglong, ZHENG Desheng, et al. Development and application of the differential temperature logging tool in oilfield development [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2016,2(4):18-21.
- [22] 王荣艳,王红兵.孤东油田稠油热采测试技术应用[J].油气井测试,2007,16(4):46-47.
WANG Rongyan, WANG Hongbing. Application of well testing tech of thermal recovering for dense oil in Gudong oilfield [J]. Well Testing, 2007,16(4):46-47.
- [23] 刘富,谢嘉析,樊玉新.稠油热采水平井生产测试技术[J].新疆石油天然气,2007,3(2):17-21.
LIU Fu, XIE Jiayi, FAN Yuxin. The production testing technology in horizontal wells with thermal recovery of shallow heavy oil [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(2):17-21.
- [24] 王超,刘述忍,魏艳梅,等.高含水油田开发方案调整数值模拟研究[J].油气井测试,2016,25(5):5-8.
WANG Chao, LIU Shuren, WEI Yanmei, et al. Numerical simulation study on development plan adjustment for oil field with high water cut [J]. Well Testing, 2016, 25(5):5-8.
- [25] 李延杰,张艳玉,张贤松,等.海上稠油油藏蒸汽吞吐周期注汽量优化研究[J].油气地质与采收率,2014,21(5):87-89,93.
LI Yanjie, ZHANG Yanyu, ZHANG Xiansong, et al. Cyclic steam injection volume optimization of steam huff and puff in offshore heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5):87-89,93.
- [26] 刘延坡,罗全民,徐星光,等.春光油田春10井区热采水平井层间窜封堵剂研制及其性能评价[J].长江大学学报(自然科学版),2017,14(11):63-68,81.
LIU Yanpo, LUO Quanming, XU Xingguang, et al. Study on blocking agent technology between horizontal wells in Chun 10 Area [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(11):63-68,81.
- [27] 王智林,杨胜来,马铨峰,等.稠油油藏蒸汽吞吐助排开发方案优化研究[J].石油化工高等学校学报,2016,29(5):54-59.
WANG Zhilin, YANG Shenglai, MA Quanzheng, et al. Optimization study on cleanup scheme of steam stimulation in heavy oil reservoirs [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2016, 29(5):54-59.

编辑 王 军

第一作者简介:顾启林,男,1986年出生,工程师,2010年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发工程专业,主要从事海上稠油开采技术研究工作。电话:022-59551933,18222231256;Email:guql2@cosl.com.cn。通信地址:天津市塘沽区海洋高新技术开发区海川路1581号A座,邮政编码:300459。