

注水油藏水平井含水变化规律研究

吴晓慧 王 雨 杨 明 周凤军 陈存良

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘 要:目前水平井含水率研究多集中在边底水油藏,而关于注水油藏水平井的研究较少。针对上述问题,首先统计分析注水油田实际数据,发现储层非均质性是水平井含水率台阶跃升的主要影响因素,然后建立数值模拟机理模型,分别就储层渗透率级差和不同渗透率带储量比例对水平井含水率的影响进行研究,并据此建立无因次含水率台阶跃升时间的理论图版,实现水平井含水率台阶跃升时间的准确预测。研究结果表明:在储量比例一定的条件下,渗透率级差越大,见水越早,见水后含水率台阶跃升越晚;在渗透率级差一定的条件下,低渗储量占比越小,见水越晚,见水后含水率台阶跃升越晚;当渗透率级差 ≤ 1.5 或相对低渗储量比例 $\leq 33\%$ 时,含水率不会出现明显的台阶跃升。利用BZ油田实际生产数据进行验证,实际水平井含水变化与理论研究基本一致,含水率台阶跃升出现时间预测精度高。研究成果可用来预测注水油藏水平井含水变化趋势,指导水平井水淹动态认识及剩余油挖潜。

关键词:注水油藏;水平井含水变化规律;渗透率级差;高低渗储量比例;无因次含水率台阶跃升时间

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.05.010

Research on the Law of Water Cut Change in Horizontal Well of Waterflooding Reservoir

Wu Xiaohui, Wang Yu, Yang Ming, Zhou Fengjun, Chen Cunliang

Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300459, China

Abstract: At present, the research on the water cut change of horizontal well is mostly concentrating on the reservoir with edge or bottom water, while there is little research on the water cut change of horizontal well in water injection reservoir. Aiming at this issue, the actual data of the oilfield is statistically analyzed. And it is found that the reservoir heterogeneity has the greatest influence on the water cut step rise for horizontal well. Then, a model for the numerical simulation mechanism is established to study the effects of reservoir permeability ratio and proportion of reserves in different permeability areas on the horizontal well water cut. Based on this, a theoretical chart of the dimensionless occurrence time of water cut step rise is established. It can accurately predict the occurrence time of water cut step rise. The results show that given constant low-permeability reserve ratio, the greater the permeability ratio is, the earlier the water breakthrough occurs, and the later the water cut step rises after the water breakthrough.

收稿日期:2020-05-23

基金项目:国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016 ZX 05058001)

作者简介:吴晓慧(1987-),女,河北张家口人,工程师,硕士,主要从事油气田开发方面研究工作。E-mail:wuxh21@cnooc.com.cn

Under constant permeability ratio, the smaller the ratio of low-permeability reserve is, the later the water breakthrough occurs, and the later the water cut step rises after the water breakthrough. When the permeability ratio is up to 1.5 or the relative low-permeability reserve ratio is up to 33%, the horizontal well water cut will not increase significantly. Then the actual production data of oilfield BZ is used for verification analysis. The actual water cut change of horizontal well is basically consistent with the theoretical research, and the prediction for water cut step rise time is of high accuracy. The research results can be used to predict the change trend of horizontal well water cut in water injection reservoir and guide the understanding of flooding dynamic.

Keywords: Water injection reservoir; Water cut change law of horizontal well; Permeability ratio; Low-permeability reserve ratio; Dimensionless occurrence time of water cut step rise

0 前言

渤海南部油田主要为中轻质油藏,储层展布复杂且平面非均质性强,油田水平井含水变化规律复杂多样,很多井均会出现含水台阶跃升的现象,造成开采效果变差。目前国内外学者针对水平井水淹动态及含水率变化规律的研究取得了很多认识,但主要集中在底水油藏的水平井水脊脊进规律^[1-4]和整体水淹模式^[5-11]的研究上,关于注水油藏水平井的水淹规律研究较少。并且目前关于水平井含水率变化规律的研究,多集中在见水时间^[12-17]以及几种典型的含水上升类型^[18-20]的研究上,关于水平井含水台阶跃升的原因及预测方面的研究极少。针对上述问题,建立注水油藏数值模拟机理模型,分析水平井含水变化规律的影响因素,进一步研究水平井含水台阶跃升的原因及水淹状态。同时,为了定量预测含水率台阶跃升的时间,提出一种新的物理表征参数——无因次含水率台阶跃升时间,并建立相应的理论图版来指导水平井含水变化趋势的预测及水平井水淹动态认识,指导后续剩余油挖潜。

1 水平井含水变化主控因素分析

统计分析 BZ 油田水平井的地质油藏参数与含水率变化的对应关系,发现储层非均质性强的水平井在开采过程中更易出现含水率的台阶跃升,部分水平井还会出现多次含水率的台阶跃升。而储层的非均质程度不仅与渗透率级差有关,还与不同渗透率段的储量占比有着直接的关系。

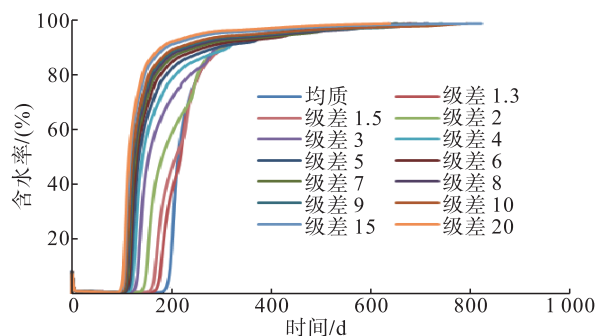
1.1 理论模型建立

为研究储层非均质性对水平井含水率变化的影响,在 BZ 油田精细地质油藏描述的基础上,建立相应的数值模拟机理模型。模型设置条件:1)油藏为封闭油藏,油层厚度 4 m;2)储层平均渗透率 $1\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度 0.3;3)原油黏度 6.0 mPa·s;4)油藏注采井距 300 m,水平井长度为 270 m;5)采用 1 注 1 采水平井注

采井网开发,注采比 1.0。

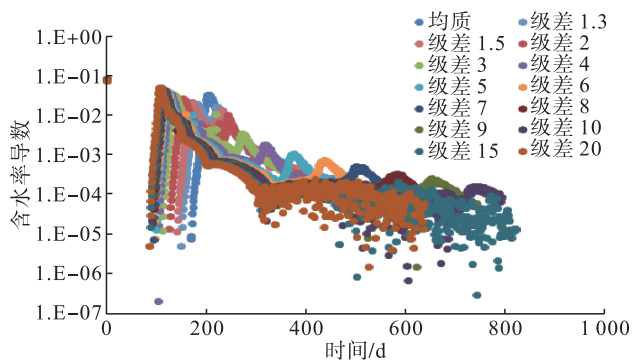
1.2 渗透率级差对含水率影响

为研究储层渗透率级差对含水率变化的影响,在上述机理模型的基础上,将注采井间储层分为高渗段与低渗段两段,高低渗储量比例为 1:1,通过改变渗透率级差设计了 14 个方案。为了更敏感地、量化衡量含水率变化,引入含水率导数来评价。为放大信号,将含水率导数与时间曲线绘制在单对数坐标下。各方案的含水率及含水率导数曲线对比见图 1。



a) 不同渗透率级差下的含水率图

a) Water cut under different permeability ratios



b) 不同渗透率级差下的含水率导数图

b) Water cut derivative under different permeability ratios

图 1 不同渗透率级差下的含水率及含水率导数曲线对比图

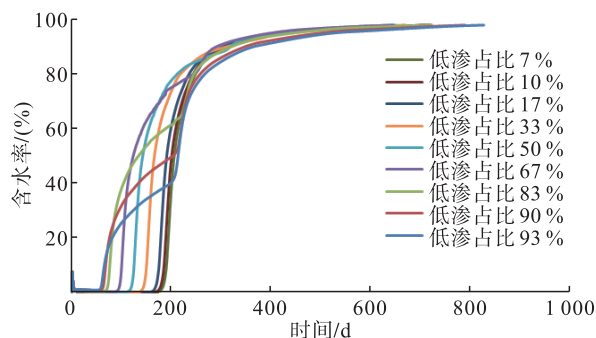
Fig. 1 Water cut and derivative of water cut under different permeability ratios

综合分析图1可知以下三点:1)在高低渗储量比例一定的条件下,渗透率级差越大,见水越早;2)渗透率级差越大,见水后含水跃升台阶出现越晚;3)在高低渗储量比例为1:1的条件下,只有当 $1.5 \leq \text{渗透率级差} \leq 9$ 的范围内,含水率导数才会出现2个明显的驼峰,即可观测到见水后含水率有明显的台阶跃升。

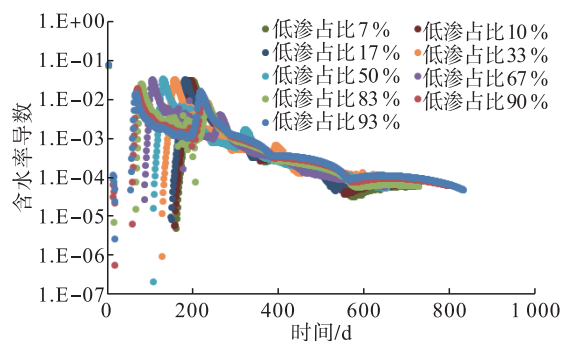
根据机理模型水淹动态分析,水平井段高渗带最先水淹,然后低渗带会随着水驱的不断推进逐步水淹。在高低渗储量比例一定的条件下,渗透率级差越大,高渗带注水推进越快,因此见水时间会越早。而在水平井见水后,渗透率级差越大,低渗带水淹越慢,相应的含水台阶跃升时间越晚。当渗透率级差太小时,高渗带和低渗带先后水淹时间间隔太短,含水率曲线不会出现明显的变化响应,故含水率曲线不会出现台阶变化。而当渗透率级差太大时,全井达到极限含水率(98%)的时候,低渗段仍未水淹,故含水率曲线也不会出现台阶变化。

1.3 储量比例对含水率影响

在上述机理模型的基础上,将注采井间储层分为高渗段与低渗段两段,渗透率级差设置为4,通过改变低渗(相对)段储量占比设计了9个方案。各方案的含水率及含水率导数曲线对比见图2。



a) 不同储量占比下的含水率图
a) Water cut under different reserve ratios



b) 不同储量占比下的含水率导数图
b) Water cut derivative under different reserve ratios

图2 不同储量占比下的含水率及含水率导数曲线对比图

Fig. 2 Water cut and derivative of water cut under different ratio of low-permeability reserve

综合分析图2可知以下三点。

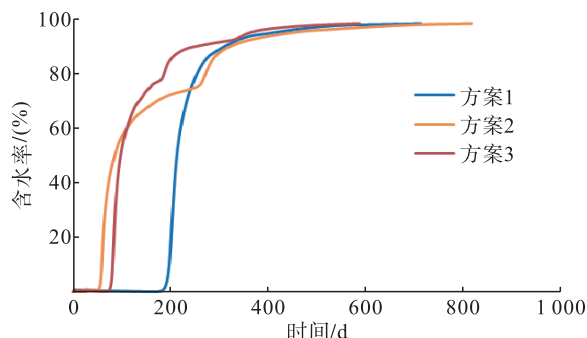
1)在级差一定的条件下,低渗储量占比越小,见水越晚。

2)低渗储量占比越小,见水后含水跃升台阶出现越晚。

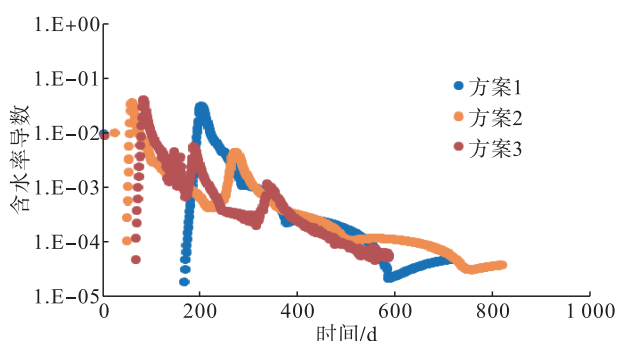
3)在级差为4的条件下,当低渗储量占比大于三分之一(33%)时,含水率导数才会出现2个明显的驼峰,即可观测到见水后含水率有明显的台阶跃升。根据机理模型水淹动态分析,而当水平井低渗带储量占比太小时,高渗带为水平井的主要产液段,当低渗带开始水淹时对整井的含水率不会有明显的影响,故含水率曲线不会出现台阶跃升。

1.4 水平井含水台阶跃升原因分析

根据上述两组实验研究结果可知,水平井段储层渗透率级差和不同渗透率带储量比例均会对含水率曲线形态有直接的影响,造成水平井含水率的台阶跃升。在油田实际生产过程中,部分水平井含水率会出现多次台阶跃升,为了进一步研究含水率台阶跃升次数的影响因素,在上述机理模型的基础上,通过改变高渗(相对)条带数设计3个方案,不同方案的含水率和含水率导数的变化曲线见图3,其参数见表1。



a) 不同方案的含水率图
a) Water cut under different schemes



b) 不同方案的含水率导数图
b) Water cut derivative under different schemes

图3 不同方案含水率及含水率导数曲线对比图

Fig. 3 Water cut and derivative of water cut curves of different schemes

表 1 不同方案参数表

Tab. 1 Parameters of different schemes

方案	高渗带条数	渗透率比例	不同渗透率储量比例 (高:中:低)
1	0	1	1
2	1	6:1	1:5
3	2	7:1:2	1:1:1

从图 3 可知如果水平井有 n 条高渗带,那么会出现 n 个台阶,相应的含水率导数曲线形态上会出现 $n+1$ 个驼峰,其中第一个驼峰代表水平井初始见水。

2 水平井含水率台阶跃升预测

2.1 无因次含水率台阶跃升时间

由上述研究可知,渗透率级差和高低渗储量占比的不同均会对含水率的变化规律产生影响。而水平井的见水时间不仅与储层物性有关,还与注采井距等参数有关。为消掉其他参数的影响,更准确地预测含水率出现台阶的时间,本次研究引入无因次含水率台阶跃升时间 (ΔDt) 概念,定义其等于含水率台阶跃升时间 ($t_{\text{台阶跃升}}$) 与见水时间 ($t_{\text{见水}}$) 的差值除以见水时间。

$$\Delta Dt = \frac{t_{\text{台阶跃升}} - t_{\text{见水}}}{t_{\text{见水}}}$$

根据上述定义可知,无因次含水率台阶跃升时间值越大,即水平井见水后,含水率出现台阶跃升的时间越晚;无因次含水率台阶跃升时间值越小,即水平井见水后,含水率出现台阶跃升的时间越早。

2.2 含水率台阶跃升时间预测

根据机理研究,计算各参数条件下的无因次含水率台阶跃升时间,并绘制成理论图版,见图 4。在实际生产过程中,当一口水平井见水后,已知水平井周边的渗透率级差和高低渗储量比例,就可根据理论图版预测该井是否会出现含水率台阶跃升并预测无因次含水率台阶跃升时间,从而更好地指导水平井水淹动态认识以及后续的剩余油挖潜。

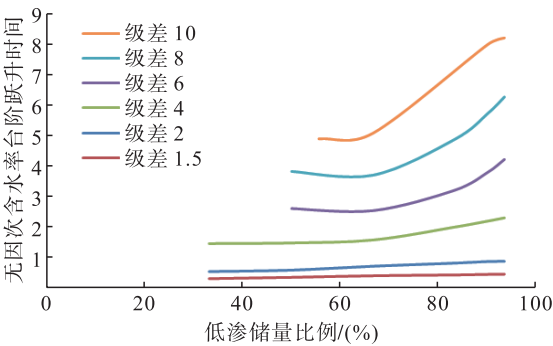


图 4 无因次含水率台阶跃升时间图版

Fig. 4 Theoretical chart of dimensionless occurrence time of water cut step rise

由图 4 可知,低渗储量比例越大,无因次含水率台阶跃升时间值越大;渗透率级差越大,无因次含水率台阶跃升时间值越大;当级差 ≤ 1.5 或低渗储量比例 $\leq 33\%$ 时,含水率不会出现明显的台阶跃升。

3 矿场应用

统计 BZ 油田水平井含水变化规律,与上述研究结论基本一致。以 A 15 H 井为例,该井含水率变化曲线图见图 5,目前 A 15 H 井的累产油仅 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,含水率已达到 90%,在生产过程中共出现 1 个台阶。计算 A 15 H 井无因次含水率台阶跃升时间是 0.68,根据理论图版预测该井无因次含水率台阶跃升时间是 0.72,误差仅 5.9%,验证了理论图版的准确性。

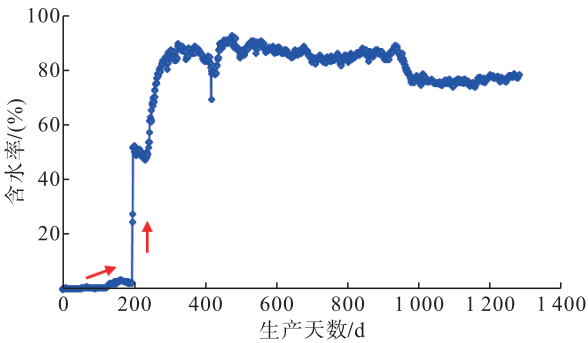


图 5 A 15 H 井含水率变化曲线图

Fig. 5 Water cut change curve of well A 15 H

表 2 为 A 15 H 井水平段参数表,从表 2 可知水平段渗透率共分为三段,第二段由于渗透率最高会最早水淹,而第一段和第二段的渗透率级差仅为 1.2,根据上述研究可知当级差 ≤ 1.5 时,含水不会出现明显的台阶跃升,因此认为第一段水平段水淹时含水率不会出现明显的台阶跃升,而在第三段水平段全面水淹时会出现一次含水率台阶跃升。故 A 15 H 井在实际生产过程中的含水台阶跃升反映的是第三段水平段的全面水淹。

表 2 A 15 H 井水平段参数表

Tab. 2 Parameters of well A 15 H

渗透率分布	长度 /m	渗透率 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$
第一段	19.2	4 238
第二段	14.1	5 001
第三段	79.3	1 806

虽然 A 15 H 井累产油量仅 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,但是根据上述分析可知,该井水平井段已全面水淹,井周围潜力不大。为进一步动用相对低渗段的剩余油,抑制相对高渗段的低效水循环,建议对 A 15 H 井对应注水井实施调剖措施,措施见效后 A 15 H 井日增油 $12 \text{ m}^3/\text{d}$,含水率下降 9%,措施效果明显。

4 结论

1) 水平井周边的储层非均质性是含水率台阶跃升的主要影响因素。在高低渗储量比例一定的条件下,渗透率级差越大,见水越早,见水后含水台阶跃升出现越晚;在级差一定的条件下,低渗储量占比越小,见水越晚,见水后含水台阶跃升出现越晚。

2) 引入无因次含水率台阶跃升时间并编制理论图版,指导水平井水淹动态认识和含水率变化预测。根据理论图版可知,当渗透率级差 ≤ 1.5 或低渗储量比例 $\leq 33\%$ 时,含水率不会出现明显的台阶跃升。

3) BZ 油田水平井实际含水率变化与理论研究基本一致,含水台阶跃升出现时间预测精度高。研究成果可用来预测注水油藏水平井含水变化趋势,并指导水平井水淹动态认识及剩余油挖潜。

参考文献:

- [1] 王家禄,刘玉章,江如意,等.水平井开采底水油藏水脊脊进规律的物理模拟[J].石油勘探与开发,2007,34(5):590-593.
Wang Jialu, Liu Yuzhang, Jiang Ruyi, et al. 2-D Physical Modeling of Water Coning of Horizontal Well Production in Bottom Water Driving Reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34 (5): 590-593.
- [2] 李立峰,岳湘安,李良川,等.底水油藏水平井开发水脊规律研究[J].油气地质与采收率,2013,20(1):89-91.
Li Lifeng, Yue Xiang'an, Li Liangchuan, et al. Study on Water Crest of Horizontal Wells in Reservoirs with Bottom Water [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20 (1): 89-91.
- [3] 程林松,郎兆新,张丽华.底水驱油藏水平井锥进的油藏工程研究[J].石油大学学报(自然科学版),1994,18(4):43-47.
Cheng Linsong, Lang Zhaoxin, Zhang Lihua. Reservoir Engineering Problem of Horizontal Wells Coning in Bottom-Water Driven Reservoir [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1994, 18 (4): 43-47.
- [4] 尹俊禄,赵丁楠,东甲山,等.底水油藏水平井水淹规律影响因素[J].油气地质与采收率,2012,19(4):90-92.
Yin Junlu, Zhao Dingnan, Dong Jiashan, et al. Numerical Simulation on Factors Affecting Flooding Mechanism of Bottom-water Reservoir in Horizontal Wells [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19 (4): 90-92.
- [5] 刘欣颖,胡平.非均质底水油藏水平井三维物理模拟实验[J].石油学报,2011,32(6):1012-1016.
Liu Xinying, Hu Ping. A 3-D Visible Physical Experiment on Horizontal Wells of Heterogeneous Reservoirs with Bottom Water [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32 (6): 1012-1016.
- [6] 王敬,刘慧卿,刘松原,等.非均质底水油藏水平井水淹规律研究[J].石油学报,2010,31(6):970-974.
Wang Jing, Liu Huiqing, Liu Songyuan, et al. A Flooding Law in Horizontal Wells of Heterogeneous Reservoirs with Bottom Water [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31 (6): 970-974.
- [7] 姜汉桥,李俊键,李杰.底水油藏水平井水淹规律数值模拟研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(6):172-176.
Jiang Hanqiao, Li Junjian, Li Jie. Investigation on Water-out Mechanism of Bottom Water Driven Reservoir in Horizontal Wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31 (6): 172-176.
- [8] 刘广为,周代余,姜汉桥,等.塔里木盆地海相砂岩油藏水平井水淹规律及其模式[J].石油勘探与开发,2018,45(1):128-135.
Liu Guangwei, Zhou Daiyu, Jiang Hanqiao, et al. Water-out Performance and Pattern of Horizontal Wells for Marine Sandstone Reservoirs in Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (1): 128-135.
- [9] 周代余,江同文,冯积累,等.底水油藏水平井水淹动态和水淹模式研究[J].石油学报,2004,25(6):73-77.
Zhou Daiyu, Jiang Tongwen, Feng Jilei, et al. Waterflooding Performance and Pattern in Horizontal Well with Bottom Water Reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25 (6): 73-77.
- [10] 郑强,刘慧卿,薛海庆,等.底水油藏水平井沿程水淹识别[J].油气地质与采收率,2012,19(1):95-98.
Zheng Qiang, Liu Huiqing, Xue Haiqing, et al. Identification of Waterflooding Along Horizontal Wells in Bottom-water Drive Reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19 (1): 95-98.
- [11] 郑俊德,高朝阳,石成方,等.水平井水淹机理数值模拟研究[J].石油学报,2006,27(5):99-102.
Zheng Junde, Gao Chaoyang, Shi Chengfang, et al. Numerical Simulation of Watered-out Mechanism in Horizontal Well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27 (5): 99-102.
- [12] 王嘉淮,刘延强,杨振杰,等.水平井出水机理研究进展[J].特种油气藏,2010,17(1):6-11.
Wang Jiahuai, Liu Yanqiang, Yang Zhenjie, et al. Research Progress on Water Breakthrough Mechanism for Horizontal Wells [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2010, 17 (1): 6-11.
- [13] 毕永斌,张梅,马桂芝,等.复杂断块油藏水平井见水特征及影响因素研究[J].断块油气田,2011,18(1):79-82.

- Bi Yongbin, Zhang Mei, Ma Guizhi, et al. Research on Water Breakthrough Characteristics and Influence Factors of Horizontal Well in Complex Fault-block Reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2011, 18 (1): 79-82.
- [14] 唐 韵. CB 油田水平井出水特征及影响因素研究[J]. 复杂油气藏, 2015, 8(3): 59-62.
- Tang Yun. Characteristics of Water Breakthrough of Horizontal Wells in CB Oilfield and Its Influence Factors [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8 (3): 59-62.
- [15] 徐燕东, 李冬梅, 李 江. 塔河油田底水油藏水平井见水特征[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(2): 167-169.
- Xu Yandong, Li Dongmei, Li Jiang. Water Breakthrough Characteristic of Horizontal Well in Bottom Water Reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32 (2): 167-169.
- [16] 于蓬勃. 底水稠油油藏水平井见水特征及影响因素[J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 36-40.
- Yu Pengbo. Water Breakthrough Characteristics and Influence Factors of Horizontal Well in Heavy Oil Reservoir with Bottom Water [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (5): 36-40.
- [17] 曹立迎, 刘慧卿, 张宗元, 等. 边水油藏水平井见水规律及控水措施研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(4): 448-450.
- Cao Liying, Liu Huiqing, Zhang Zongyuan, et al. Research on Law of Water Breakthrough and Water Control for Horizontal Well in Edge Water Reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17 (4): 448-450.
- [18] 李 林, 罗东红, 陶 彬, 等. 番禺油田薄层边底水稠油油藏水平井含水率上升特征[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 106-110.
- Li Lin, Luo Donghong, Tao Bin, et al. Water Cut Rising Performance of Horizontal Wells in Thin-bed Heavy oil Reservoir with Edge-bottom Water in Panyu Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23 (3): 106-110.
- [19] 李传亮, 朱苏阳. 关于油藏含水上升规律的若干问题[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 1-5.
- Li Chuanliang, Zhu Suyang. Some Topics About Water Cut Rising Rule in Reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28 (3): 1-5.
- [20] 苑志旺, 杨宝泉, 杨 莉, 等. 深水浊积砂岩油田含水上升机理及优化注水技术——以西非尼日尔三角洲盆地 AKPO 油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 287-296.
- Yuan Zhiwang, Yang Baoquan, Yang Li, et al. Water-cut Rising Mechanism and Optimized Water Injection Technology for Deepwater Turbidite Sandstone Oilfield: A Case Study of AKPO Oilfield in Niger Delta Basin, West Africa [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (2): 287-296.



(上接第35页)

- SAC/TC 244. Natural Gas—Determination of Sulfur Compound—Part 8: Determination of Total Sulfur Content by Ultraviolet Fluorescence Method: GB/T 11060.8-2012 [S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [13] 全国天然气标准化技术委员会. 天然气 含硫化合物的测定 第4部分: 用氧化微库仑法测定总硫含量: GB/T 11060.4-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- SAC/TC 244. Natural Gas—Determination of Sulfur Compound—Part 8: Determination of Total Sulfur Content by Ultraviolet Fluorescence Method: GB/T 11060.4-2017 [S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [14] 全国天然气标准化技术委员会. 进入天然气长输管道的气体质量要求: GB/T 37124-2018 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
- SAC/TC 244. Quality Requirements for Gases Entering Long-Distance Transportation Gas Pipeline: GB/T 37124-2018 [S]. Beijing: China Quality Inspection Publishing House, 2018.
- [15] 全国天然气标准化技术委员会. 天然气水露点的测定 冷却镜面凝析湿度计法: GB/T 17283-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- SAC/TC 244. Determination of the Water Dew Point of Natural Gas—Cooled Surface Condensation Hygrometers [S]. Beijing: China Standards Press, 2014.
- [16] 罗 勤, 邱少林. 天然气中水含量分析方法标准简介[J]. 石油与天然气化工, 2000, 29(2): 96-99.
- Luo Qin, Qiu Shaolin. Synopsis to Standard of Analysis Test Methods of Water Content in Natural Gas [S]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2000, 29 (2): 96-99.