

高含水期水平井提高水驱采收率机制

肖 康¹, 姜汉桥¹, 李俊键²

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院 采油所, 北京 100083)

摘要:以孤岛油田地质及开发动态特征为基础,应用水驱油相似原理,建立三维大型物理胶结正韵律多层模型。当井组物理模型生产至高含水阶段,应用水平井以及直井在剩余油富集区进行挖潜,并结合数值模拟方法,研究不同储层参数以及工作制度条件下,水平井相对于直井扩大波及系数与提高驱油效率对提高采收率的贡献程度。结果表明:应用水平井进行高含水期剩余油挖潜,相对直井有着较大的优势;水平井相对于直井主要是通过扩大波及系数来提高水驱采收率,并且储层条件以及工作制度对波及系数与驱油效率的贡献率差异程度有着较大影响;随着含水率的上升,波及系数与驱油效率贡献率差异程度逐渐减小,但二者贡献率比值始终大于 1。

关键词:油藏; 水平井; 高含水; 物理模拟; 数值模拟; 波及系数; 驱油效率

中图分类号:TE 327

文献标志码:A

Mechanisms of improving oil recovery efficiency by horizontal well in high water-cut stage

XIAO Kang¹, JIANG Han-qiao¹, LI Jun-jian²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Oil Production Institute, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the geological and production performance data in Gudao Oilfield, a large scale artificial consolidated multi-layer model reflecting the normal rhythm was established according to the similar principle of waterflooding. Considering different reservoir parameters and working system, horizontal and vertical wells were used to tap the potential respectively when well group physical model reaches high water-cut stage. And combined with numerical simulation, mechanisms of both sweep and displacement efficiency contributing to improving oil recovery with horizontal well compared with vertical well were studied. The results show that the effect of horizontal well tapping remaining oil is better than that of vertical well. Contribution of sweep efficiency to improving oil recovery with horizontal well compared with vertical well occupies main position, and difference between sweep efficiency and displacement efficiency contribution is affected by reservoir parameters and working system. With the increase of water cut, though the contribution differentiation degree between sweep efficiency and displacement efficiency becomes smaller and smaller, contribution ratio of sweep efficiency to displacement efficiency is always more than 1.

Key words: reservoir; horizontal well; high water-cut; physical simulation; numerical simulation; sweep efficiency; displacement efficiency

目前,大部分油田已进入高含水阶段,局部区块甚至进入了特高含水阶段,但由于油藏非均质性、开发方式等原因,仍然存在未被波及或动用程度较少的剩余油富集区^[1-2]。应用水平井作为挖潜的主要

技术手段,可以有效提高剩余储量控制程度以及采收率^[3-5]。众多学者对高含水期水平井挖潜原理及效果进行了研究^[6-11]。但是,针对水平井提高水驱采收率的机制,即水平井相对直井扩大波及系数与

提高驱油效率关系的研究较少。因此,笔者以孤岛油田地质及动态开发特征为基础,建立具有正韵律特征的三维大型物理胶结模型,进行水平井高含水期挖潜试验,并结合油藏数值模拟方法,研究在不同地质条件以及工作制度下,水平井相对直井扩大波及系数与提高驱油效率对提高采收率贡献程度。

1 物理模拟试验

基于三维物理模型,在对不同挖潜方式动用效果进行评价的基础上^[12-15],考察水平井波及系数与驱油效率的关系。

计算水平井相对直井扩大波及系数与提高驱油效率对提高采收率的贡献率的基本原理见图 1。

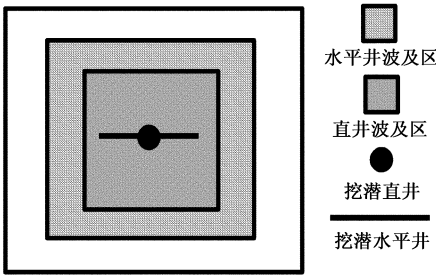


图 1 波及系数与驱油效率贡献率示意图
Fig.1 Schematic diagram of sweep and displacement efficiency contribution

首先确定挖潜井处于特定含水阶段,模拟每个网格饱和度相对挖潜初始时的变化量。因模型在驱替及饱和度探针检测过程中存在不可避免的误差,所以当网格饱和度变化大于 5% 时,即认为此网格被波及。

表 1 水平井相对直井扩大波及系数与提高驱油效率贡献率

Table 1 Contribution of sweep and displacement efficiency with horizontal well compared to vertical well

挖潜井含水率 $f_{ww}/\%$	水平井垂直注入井连线			水平井平行注入井连线		
	波及系数贡献率 $C_{si}/\%$	驱油效率贡献率 $C_{di}/\%$	C_{si}/C_{di}	波及系数贡献率 $C_{si}/\%$	驱油效率贡献率 $C_{di}/\%$	C_{si}/C_{di}
80	93.80	6.20	15.14	86.79	13.21	6.568
90	87.85	12.15	7.23	76.07	23.93	3.178
98	65.16	34.84	1.87	47.73	52.27	0.913

2 数值模拟

2.1 建立模型

以胶结模型水驱油试验以及实际现场动态资料为基础,建立数值模拟模型,其中数值模型尺寸、工作制度等与物理试验模型保持一致,网格数为 $54 \times 62 \times 3 = 10044$ 个,并对模型进行精细拟合,拟合情况

其次,在已得到的直井波及区域内,分别计算直井与水平井在挖潜阶段其特定含水率下相对挖潜初始时所提高的采收率,二者之差与水平井相对直井所提高整体采收率的比值即为驱油效率贡献率。

用 1 减去驱油效率贡献率,为波及系数贡献率,即为水平井波及区大于直井波及区的区域,计算式为

$$E_f = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (S_{oji} - S_{oij}) \varphi_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m S_{oji} \varphi_{ij}}, \tag{1}$$

$$C_{di} = \frac{E_{hiv} - E_{viv}}{E_{hi} - E_{vi}}, C_{si} = -C_{di}. \tag{2}$$

式中, E_f 为挖潜井处于某一含水阶段下模型采出程度; S_{oij} 为第 i 层的第 j 个网格的含油饱和度; S_{oji} 为挖潜初始时含油饱和度; φ 为孔隙度; C_{di} 、 C_{si} 分别为驱油效率、波及系数贡献率; E_{hiv} 、 E_{viv} 分别为直井波及区内水平井、直井的采出程度; E_{hi} 、 E_{vi} 分别为应用水平井、直井挖潜的模型整体采出程度。

以试验饱和探针所得到的饱和度数据为基础,通过插值方法得到不同含水阶段波及系数与驱油效率对提高采收率贡献程度(表 1)。由表 1 可以看出,水平井相对于直井,主要是靠扩大波及系数来提高水驱采收率。当水平井垂直注入井连线向平行注入井连线过渡时,扩大波及系数的贡献率逐渐减小;并且随着含水率的上升,扩大波及系数的贡献率逐渐减小,而提高驱油效率的贡献率逐渐升高。但是在高含水时期,扩大波及系数与提高驱油效率贡献率比值一般都大于 1,因此在注入体积倍数较高时,相对于提高驱油效率,扩大波及系数仍然占主导地位。

见图 2。

由图 2 可以看出,建立的数值模型与试验结果基本保持一致,因此可以在试验基础上利用建立的数值模型进行不同地质特征及工作制度下水平井相对直井提高采收率机制研究,研究区含水率为 75%~98%。

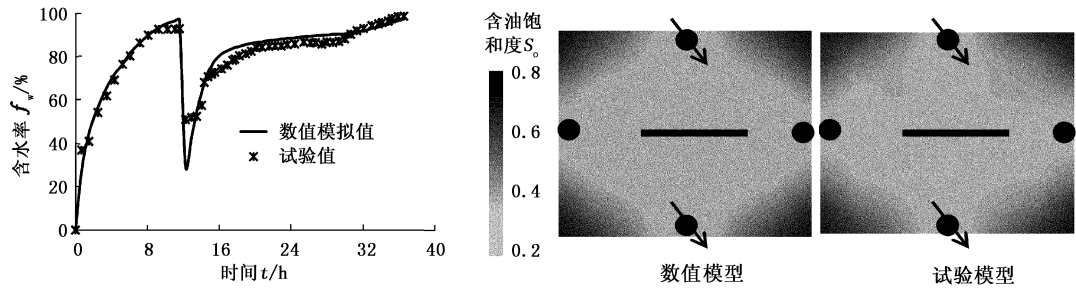


图 2 数值模拟拟合试验

Fig. 2 Numerical simulation matching experiment

2.2 挖潜机制

2.2.1 储层纵向渗透率级差

模型目标区块储层类型属于河流相储层,其纵向渗透率基本呈正韵律发育特征,高含水期纵向非均质对剩余油分布有着较大的影响。图 3 为不同纵向渗透率级差下水平井提高采收率机制。可以看出,随含水率上升,同一级差下的波及系数与驱油效率

率的贡献率比值(C_{si}/C_{di})逐渐减小,不同渗透率级差下二者比值的差异下降。挖潜井含水率达到 98% 时,波及贡献率仍大于驱油效率贡献率,此时,随着储层渗透率级差的增大,贡献率比值逐渐减小,而水平井与直井的采收率比值(R_H/R_V)逐渐增大。当级差大于 8 时,比值变化趋于平缓。

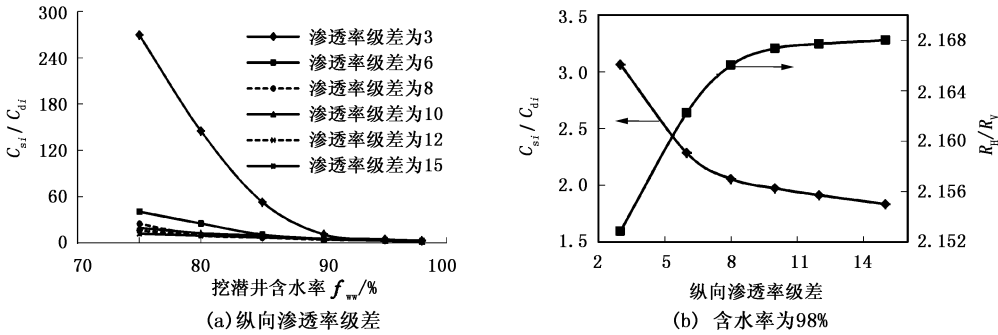


图 3 不同纵向渗透率级差下水平井提高采收率机制

Fig. 3 Mechanism of improving water drive recovery with horizontal well under different permeability contrast

2.2.2 挖潜时机

不同挖潜时机含水率示意图见图 4。不同挖潜时机(用含水率表示)下水平井提高采收率结果如图 5 所示。

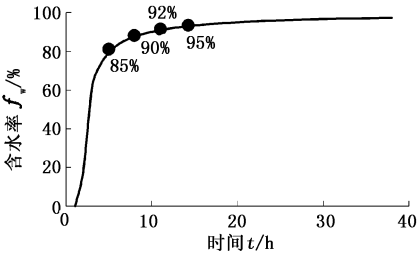


图 4 不同挖潜时机含水率示意图

Fig. 4 Water cut curve at different potential tapping time

由图 5 可以看出,随含水率上升,同一挖潜时机下的波及系数与驱油效率贡献率比值逐渐减小,不同挖潜时机下二者比值的差异下降。挖潜井含水率达到 98% 时,二者比值仍大于 1,随着挖潜时机的延

后,波及系数与驱油效率的贡献率比值逐渐增大,而水平井与直井采收率的比值则逐渐减小,当挖潜时机含水率大于 90% 时,贡献率比值与采收率比值变化都趋于平缓。

2.2.3 夹层渗透率

图 6 为不同夹层渗透率下水平井提高采收率机制。由图 6 可以看出,随着含水率上升,同一渗透率下的波及系数与驱油效率贡献率比值逐渐减小,并且不同渗透率下二者比值的差异也下降。但挖潜井含水率达到 98% 时,比值仍大于 1,此时夹层渗透率约为 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,贡献率比值达到最大,而夹层渗透性向 0 过渡时,比值递减较快,而向 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 过渡时,比值递减较慢;采收率比值在含水率为 98% 时的变化规律,正好与效率贡献率比值相反。

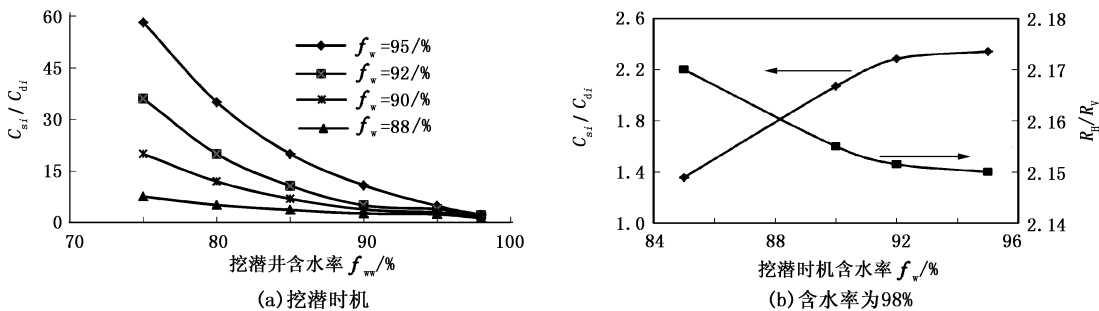


图 5 不同挖潜时机下水平井提高采收率机制

Fig.5 Mechanism of improving oil recovery with horizontal well under different potential tapping time

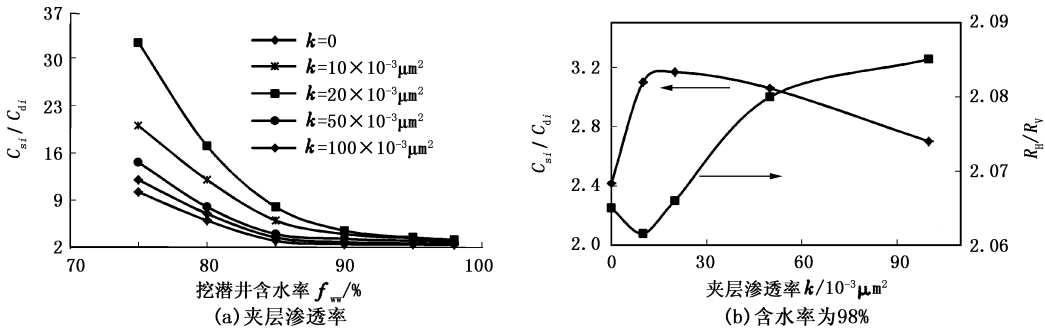


图 6 不同夹层渗透率下水平井提高采收率机制

Fig.6 Mechanism of improving oil recovery with horizontal well under different interlayer permeability

2.2.4 夹层规模

夹层规模影响着剩余油分布,进而对水平井相对直井提高采收率产生影响。夹层规模示意图见图 7。

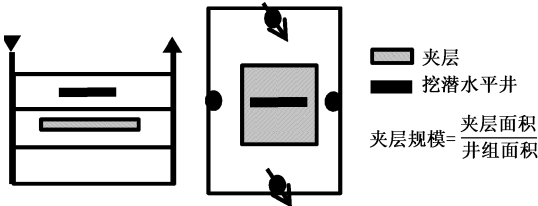


图 7 夹层规模示意图

Fig.7 Schematic diagram of interlayer scale

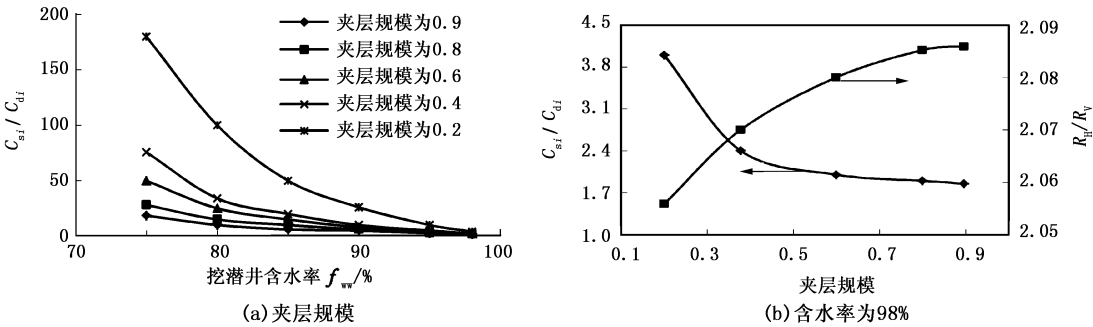


图 8 不同夹层规模下水平井提高采收率机制

Fig.8 Mechanism of improving oil recovery with horizontal well under different interlayer scale

3 结 论

(1) 水平井主要通过扩大波及系数来提高采收

率。不同夹层规模下水平井提高采收率机制见图 8。由图 8 可以看出,随着含水率上升,同一夹层规模下波及系数与驱油效率贡献率比值逐渐减小,不同夹层规模下二者比值的差异下降。但挖潜井含水率达到 98% 时,贡献率比值仍大于 1,此时,随着夹层规模增大,波及系数与驱油效率贡献率比值逐渐减小,而水平井与直井采收率比值逐渐增大,但贡献率比值与采收率比值变化都逐渐趋于平缓。

率。但波及系数与驱油效率的贡献率差异程度随储层参数以及工作制度变化而变化。

(2) 随着含水率上升,即水驱程度的深入,水平

井相对直井扩大波及系数的贡献率比值逐渐下降,但在高含水时期,波及系数与驱油效率贡献率比值仍然大于1;在贡献率比值减小的过程中,水平井与直井采收率比值呈增大的趋势。

参考文献:

- [1] 窦松江,周嘉玺. 复杂断块油藏剩余油分布及配套挖潜对策[J]. 石油勘探与开发, 2003,30(5):90-93.
DOU Song-jiang, ZHOU Jia-xi. Remaining oil distribution in complicated faulted blocks and its accessory potential exploitation measures[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(5):90-93.
- [2] 冯仁鹏,何同均,周兴,等. 高含水期剩余油分布及挖潜技术研究[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版, 2009,11(6):26-29.
FENG Ren-peng, HE Tong-jun, ZHOU Xing, et al. Remaining oil distribution and its potential tapping technique in high water-cut stage[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2009,11(6):26-29.
- [3] 江琴. 应用水平井技术改善稠油油藏开发效果[J]. 断块油气田, 2008,15(5):82-84.
JIANG Qin. Application of horizontal well technology in improving development efficiency of heavy oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2008,15(5):82-84.
- [4] Al-SHARJI H, BEHAIRY H, HOUWELINGEN Jacob V, et al. Capturing remaining oil in a giant mature carbonate waterflood field in Oman[R]. SPE 109202, 2007.
- [5] FISCHBUCH D B, TAIBAH O A, Al-ZHRANI T M. Optimizing horizontal well configurations for effective drainage of thin oil zones overlying productive formations under strong water drive[R]. SPE 136939, 2010.
- [6] 岳大力,吴胜和,刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报, 2007,28(4):100-103.
YUE Da-li, WU Sheng-he, LIU Jian-min. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007,28(4):100-103.
- [7] 俞启泰. 论侧钻水平井是开采“大尺度”未波及剩余油最重要的技术[J]. 石油学报, 2001,22(4):44-48.
YU Qi-tai. On the horizontal sidetrack as the most important technology to exploit “large scale” unswept remaining oil in mature oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001,22(4):44-48.
- [8] 王家禄,江如意,蒋志祥,等. 侧钻水平井开采剩余油的三维物理模拟研究[J]. 石油学报, 2000,21(6):50-56.
WANG Jia-lu, JIANG Ru-yi, JIANG Zhi-xiang, et al. An experimental study of 3-D physical model on sidetrack horizontal well to improve oil recovery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000,21(6):50-56.
- [9] 刘玉章,吕静,王家禄,等. 水平井置胶成坝深部液流转向物理模拟[J]. 石油勘探与开发, 2011,38(3):332-335.
LIU Yu-zhang, LÜ Jing, WANG Jia-lu, et al. Physical modeling of in-depth fluid diversion by “gel dam” placed with horizontal well[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011,38(3):332-335.
- [10] HADIA N, CHAUDHARI L, MITRA S K, et al. Experimental investigation of use of horizontal wells in waterflooding[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007(56):303-310.
- [11] 李德庆. 胜利油田整装油藏高含水正韵律厚油层水平井挖潜技术研究[J]. 石油地质与工程, 2009,23(3):59-61.
LI De-qing. Technique of tapping latent power of thick oil layer of positive rhythm with high-content water cut in self-contained pool in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2009,23(3):59-61.
- [12] 肖康,姜汉桥,李俊键,等. 高含水期水平井挖潜物理模拟[J]. 东北石油大学学报, 2012,36(6):42-48.
XIAO Kang, JIANG Han-qiao, LI Jun-jian, et al. Investigation of physical simulation with horizontal well tapping remaining oil at high water cut stage[J]. Journal of Northeast Petroleum, 2012,36(6):42-48.
- [13] 束青林,张本华,徐守余. 孤岛油田河道砂储集层油藏动态模型及剩余油研究[J]. 石油学报, 2005,26(3):64-67.
SHU Qing-lin, ZHANG Ben-hua, XU Shou-yu. Dynamic model and remaining oil distribution of fluvial reservoir in Gudao Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(3):64-67.
- [14] 张智春,刘广友,李拥安,等. 孤岛油田河流相砂岩油藏储集层非均质性定量表征方法[J]. 石油勘探与开发, 2003,30(5):68-70.
ZHANG Zhi-chun, LIU Guang-you, LI Yong-an, et al. The method Gudao fluvial facies sandstone reservoirs non-equal matter fix quantify token[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(5):68-70.
- [15] 孔祥言,陈峰磊,裴柏林. 水驱油物理模拟理论和相似准则[J]. 石油勘探与开发, 1997,24(6):56-60.
KONG Xiang-yan, CHEN Feng-lei, PEI Bo-lin. Similar theory, similar rule and data conversion software for water drive modeling[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997,24(6):56-60.

(编辑 李志芬)