

韵律层内剩余油分布的数值模拟研究

李春英^{1,2}, 吴晓东¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化国际石油勘探开发有限公司, 北京 100083)

摘要:韵律层内的剩余油已成为油田开发后期调整挖潜的主要目标,根据精细数值模拟研究结果认识层内剩余油的分布规律,可以指导高含水油田后期的开发调整。以胜坨油田胜二区8砂组的地质条件为基础建立概念模型,采用油藏数值模拟方法,分析了同一个韵律层内剩余油的分布规律。研究表明:水驱计算至高含水期后,在同一个韵律层内,垂向上上部小层剩余油饱和度高,下部小层剩余油饱和度低,接近于残余油饱和度;小层厚度越小,油、水的地下密度差越大,原油黏度越小,这种现象越明显;而注水井射孔位置对韵律层内垂向上剩余油的分布基本没有影响。因此,对已进入高含水开发阶段的胜坨油田,后期调整挖潜的目标是韵律层内的上部层段。

关键词:韵律层 剩余油分布 数值模拟 胜坨油田

中图分类号:TE319 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)01-0088-04

Numerical Simulation of Remaining Oil Distribution in Cyclothem

Li Chunying^{1,2}, Wu Xiaodong¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. Sinopec International Petroleum Exploration and Production Corporation, Beijing, 100083, China)

Abstract: The remaining oil distribution in cyclothem is playing more and more important role in the later period of oilfield development, so it is very important to study the remaining oil distribution in cyclothem for the later development adjustment of the high water-cut reservoirs using the fine numerical reservoir simulation. Conceptual models have been built on the basis of geological condition of 8th sand set of Sheng II Block in Shengtuo Oilfield to analyze the distribution rule of remaining oil in the same cyclothem. The results show that, when water flooding is calculated till the high water-cut period, vertically, remaining oil saturation of upper layers is high and that of lower layers is low and close to irreducible oil saturation in the same cyclothem. Furthermore, the smaller the layer thickness, the bigger the density difference between oil and water, and the smaller the oil viscosity, the more obvious this trend will be. But the location of perforation in injection wells has little effect on the remaining oil distribution. So the upper layers in cyclothem should be the target for later development adjustment in high water-cut period of Shengtuo Oilfield.

Key words: cyclothem; remaining oil distribution; numerical simulation, Shengtuo Oilfield

目前,我国东部各油田大多已进入高含水开发阶段,开采难度越来越大,准确了解剩余油分布规律,对于油藏开发后期的调整、挖潜、提高最终采收率具有重要意义^[1]。目前,国内外对剩余油分布进行了大量的物理模拟和数值模拟研究,其中物理模拟研究^[2-5]主要集中在微观孔隙驱替及平面和纵向渗透率的非均质性影响方面,层内剩余油的数值模拟研究多集中在隔夹层对剩余油的影响方面^[6-7],对同一个韵律层内部垂向上剩余油的分布规律及影响

因素研究很少。另外,常规数值模拟侧重从渗透率的韵律性和平面非均质性来研究剩余油的宏观分布^[8-10],到了油田开发后期剩余油已高度分散,单砂

收稿日期:2010-09-08; **改回日期:**2011-11-12。

作者简介:李春英(1970—),女,山东东明人,1992年毕业于石油大学(华东)油藏工程专业,2009年获中国石油勘探开发研究院油气田开发工程专业博士学位,高级工程师,在站博士后,主要从事油气田开发工作。

联系方式:(010)82334865, cyli@sipc.cn。

体及其渗透率的宏观韵律性已不能详尽揭示韵律层内部(以下简称层内)的剩余油分布,而层内剩余油又是油田开发后期调整挖潜的主要目标。因此,开展精细数值模拟研究,认识层内剩余油的分布规律,对下一步调整挖潜具有重要的指导意义^[11-14]。

胜坨油田胜二区 8 砂组精细油藏数值模拟研究发现,在同一个层内,垂向上上部小层含水率低,剩余油饱和度高;下部含水率高,已基本全部水淹,剩余油饱和度接近于残余油饱和度。常规的油藏数值模拟(即将一个韵律层作为一个模拟小层)是不能够发现这一现象的。因此,为了解层内剩余油分布的影响因素,建立了概念模型,对影响层内垂向上剩余油分布规律的因素进行了敏感性分析。

1 概念模型的建立

胜坨油田胜二区储层为厚层三角洲前缘河口坝沉积,储层厚度大,内部非均质性强,经过 40 多年的开发,开发对象由早期的油层组到中期的小层乃至如今的单层、单砂体,开采的主要矛盾已由层间矛盾转为层内和砂体内部构型要素之间的矛盾。为此,以胜坨油田胜二区 8 砂组的地质条件为基础建立了概念模型^[15-17],分析层内剩余油的分布规律。

考虑均质油藏五点井网,模型 x 和 y 方向上的长度均为 420 m,划分为 21×21 的网格,网格平均长度 20 m,纵向上一个韵律层,划分为 10 个模拟小层,各模拟小层是连通的。各个模型中小层厚度有所不同。设计反五点井网,封闭边界,注水井位于中心,周围 4 口生产井,模拟计算中保持注采平衡。油藏平面渗透率为 300 mD,垂向渗透率为 30 mD,孔隙度为 25%,油藏顶部深度 2 000 m。流体及岩石物性参数见表 1,油水相对渗透率曲线见图 1。

表 1 模拟区块的流体及岩石物性参数

Table 1 Physical properties of fluid and rock of simulated block

参数	数值
地面水密度/($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	1.00
地面原油密度/($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	0.92
水的压缩系数/(GPa^{-1})	0.44
原油压缩系数/(GPa^{-1})	1.00
原油体积系数	1.15
岩石压缩系数/(GPa^{-1})	0.88
水的体积系数	1.00
水的黏度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	0.45

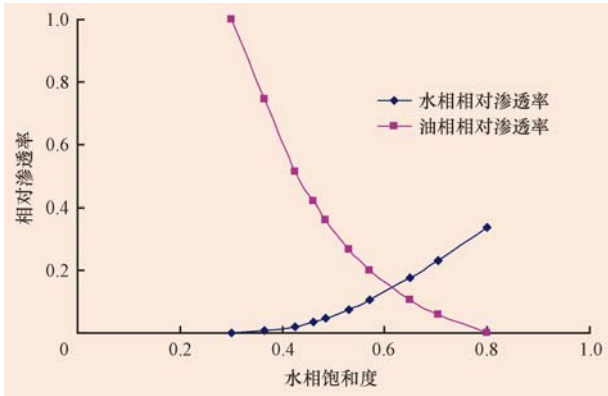


图 1 油水相对渗透率曲线

Fig. 1 Relative permeability curve

2 影响因素分析

2.1 小层厚度

模型 1, 2, 3, 4 的模拟小层厚度分别为 0.1, 0.2, 2.0 和 5.0 m,注水井和生产井的 10 个模拟小层全部射开,地下原油黏度取 $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,不同小层厚度下的生产动态数据见表 2,模拟计算至特高含水期(含水率 90%),各小层的剩余油饱和度见图 2。从图 2 可以看出:各个模型垂向上的含油饱和度表

表 2 不同厚度模型对应的注采量

Table 2 Injection and production rate of different thickness models

模型	单层厚度/m	单井产液量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	注入量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
1	0.1	1.25	5.15
2	0.2	2.50	10.30
3	2.0	25.00	103.00
4	5.0	62.50	257.50

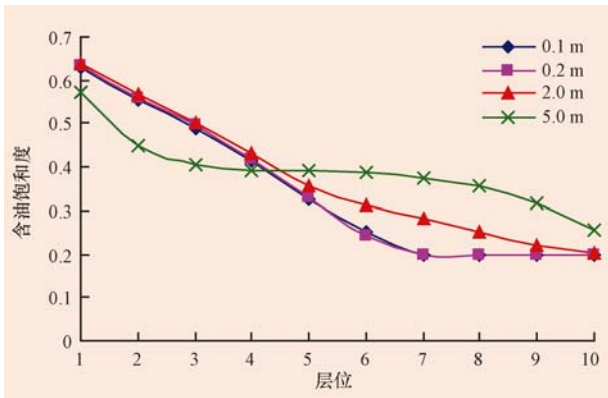


图 2 不同小层厚度对各小层剩余油饱和度的影响

Fig. 2 Influence of thickness on remaining oil saturation

现出相同的规律,即从上到下各模拟小层的剩余油饱和度逐渐降低,底部小层已基本水淹。在注采平衡及产液强度相等的条件下,厚度越薄,这种现象越明显。出现上述现象的原因是:各模拟小层垂向上具有连通性,注入水在重力作用下首先进入下面的模拟小层,而该油藏原油为黏度较小的轻质油,注入水进入下部小层后将下面的轻质油驱替到上部小层,然后从上部小层采出。

2.2 注水井射孔位置

以模型 2 为基础,考虑上部射孔(1~5 层)、下部射孔(6~10 层)和全部射开 3 种情况下各模拟小层的剩余油饱和度(见图 3)。从图 3 可以看出,注水井射孔位置不同对垂向上各模拟小层的剩余油饱和度分布几乎没有影响。

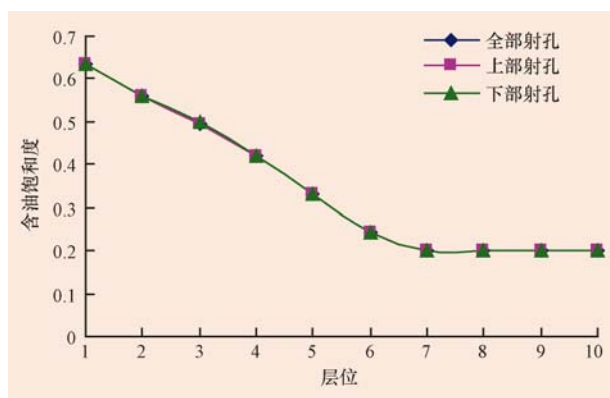


图 3 注水井不同射孔位置对各小层剩余油饱和度的影响

Fig. 3 Influence of perforation location of injection well on remaining oil saturation

2.3 原油密度

以模型 2 为基础,注入水密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$, 地下原油密度分别取 $600, 800$ (模型 2), $900, 950, 980, 990$ 和 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 时,得到垂向上各模拟小层的剩余油饱和度(见图 4)。从图 4 可以看出,在地下原油密度小于 950 kg/m^3 时,因油、水密度差较大,注入水的重力作用明显,即上部小层剩余油饱和度高,下部小层剩余油饱和度低;当原油密度大于 950 kg/m^3 但小于水的密度时,上述规律仍然存在,但上部小层与下部小层的剩余油饱和度差别逐渐减小;当地下油、水密度相同时,注入水的重力作用完全消失,垂向上各小层开采效果完全相同。这表明地下油、水密度差对垂向上各小层的剩余油分布影响较大。

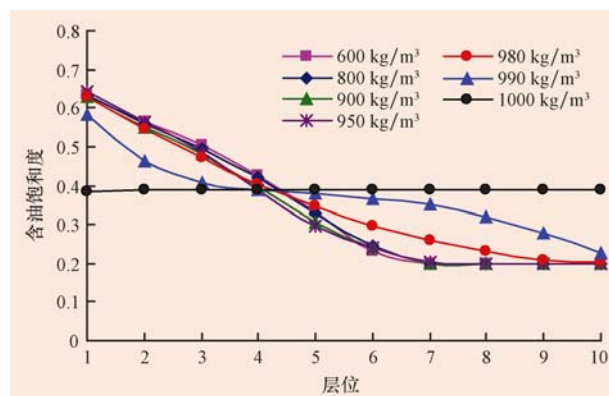


图 4 不同地下原油密度时各小层剩余油饱和度

Fig. 4 Remaining oil distribution at different crude oil density

2.4 原油黏度

以模型 2 为基础,原油黏度分别为 $5, 10$ 和 $20\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时,模拟得到各小层的剩余油饱和度(见图 5)。从图 5 可以看出,原油黏度越大,垂向上从上到下剩余油饱和度的差别就越小。这是因为原油黏度越大,油相的渗流速度越小,使得下部小层的原油不易被驱替到上部,从而使上、下部的剩余油饱和度差别减小。

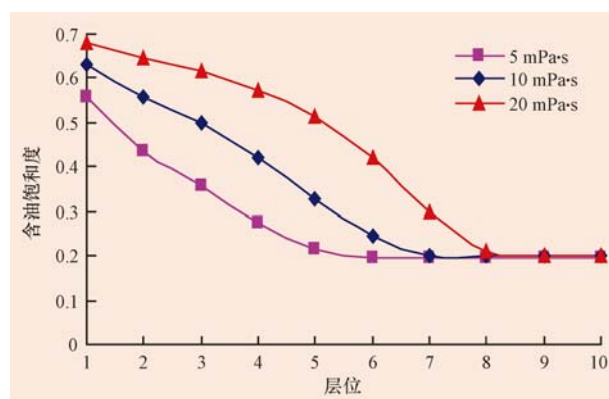


图 5 不同原油黏度对各小层剩余油饱和度的影响

Fig. 5 Influence of oil viscosity on remaining oil saturation

3 结论与建议

1) 对已进入开发后期的油田,韵律层内的剩余油是调整挖潜的主要目标。由于韵律层内具有垂向连通性,在开采过程中各模拟小层的剩余油饱和度从上到下逐渐降低,下部小层已基本全部水淹,而且各模拟小层厚度越小,油、水的地下密度差越大,原油黏度越小,这种现象越明显;注水井的射孔位置对韵律层内垂向上剩余油的分布基本没有影响。

2) 胜坨油田已进入高含水开发阶段,后期调整挖潜的目标应该是韵律层内的上部层段。建议在生产工艺可行的情况下,封堵生产井的下部高含水小层,以降低含水率。

参 考 文 献

References

- [1] 韩大匡. 准确预测剩余油相对富集区 提高油田注水采收率研究[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 73-78.
Han Dakuang. Precisely predicting abundant remaining oil and improving the secondary recovery of mature oilfields[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 73-78.
- [2] 陈霆. 非均质储层模型微观水驱油实验[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(4): 72-75.
Chen Ting. Experimental study of water-oil displacement with microscopic models of heterogeneous reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(4): 72-75.
- [3] 苏娜, 黄健全, 韩国辉, 等. 微观水驱油实验及剩余油形成机理研究[J]. 断块油气田, 2007, 14(6): 50-51.
Su Na, Huang Jianquan, Han Guohui, et al. Microscopic water-flood test and study on remaining oil forming mechanism[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007, 14(6): 50-51.
- [4] 王玉斗, 李茂辉, 温科扬. 泡沫渗流机理及渗流模型研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 104-107.
Wang Yudou, Li Maohui, Wen Keyang. Study on mechanism and modeling of foam flow in porous media[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 104-107.
- [5] 李洪玺, 刘全稳, 何家雄, 等. 物理模拟研究剩余油微观分布[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(3): 351-353.
Li Hongxi, Liu Quanwen, He Jiaxiong, et al. A study on micro-distribution of residual oil by physical simulation process[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(3): 351-353.
- [6] 杜庆军, 陈月明, 侯键, 等. 胜坨油田厚油层内夹层分布对剩余油的控制作用[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 111-114.
Du Qingjun, Chen Yueming, Hou Jian, et al. Control of inter-layer on the distribution of remaining oil in thick reservoirs of Shengtuo Oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(4): 111-114.
- [7] 胡丹丹, 唐玮, 常毓文, 等. 厚油层层内夹层对剩余油的影响研究[J]. 特种油气藏, 2009, 16(3): 49-52.
Hu Dandan, Tang Wei, Chang Yuwen, et al. Study on the influence of intercalation on remaining oil distribution in thick reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(3): 49-52.
- [8] 束青林. 正韵律厚油层剩余油分布模式及水平井挖潜: 以孤岛油田中一区 Ng5-3 层为例[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(6): 34-38.
Shu Qinglin. Distribution mode of remaining oil and tapping the potential by horizontal wells in thick positive-rhythm oil layers: taking Ng5-3 layer in Zhong 1 Area of Gudao Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(6): 34-38.
- [9] 赵红兵. 三角洲前缘韵律层特高含水期剩余油分布及调整[J]. 特种油气藏, 2006, 13(2): 58-63.
Zhao Hongbing. Residual oil distribution and reconciliation for delta front rhythm zone in extra high water cut stage[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(2): 58-63.
- [10] 刘均荣, 冯其红, 韩松. 浅层正韵律厚油层高含水期挖潜方法探讨[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 128-130.
Liu Junrong, Feng Qihong, Han Song. Method for tapping the potential for positive rhythm thick reservoirs at high water-cut stage[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 128-130.
- [11] 孙梦茹. 胜坨油田精细地质研究[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 158-170.
Sun Mengru. Finely geological research of Shengtuo Oilfield [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004: 158-170.
- [12] 魏兆亮, 黄尚军. 高含水期油藏数值模拟技术和方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(1): 103-105.
Wei Zhaoliang, Huang Shangjun. Reservoir numerical simulation technology and methods in high water cut period[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(1): 103-105.
- [13] 郑浩, 马春华, 姜振海. 高含水后期“低效、无效循环”形成条件的数值模拟研究[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(4): 80-83.
Zheng Hao, Ma Chunhua, Jiang Zhenhai. Numerical simulation of the forming conditions of low and useless circling with high water cut reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(4): 80-83.
- [14] 盖玉国. 喇嘛甸油田特高含水期开发潜力分析[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(1): 105-108.
Gai Yuguo. Analysis of the development potential in Lamadian Oilfield with ultra-high watercut[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009, 33(1): 105-108.
- [15] 冯明生, 袁士义, 许安著, 等. 高含水期剩余油分布数值模拟的平面网格划分[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(4): 81-83.
Feng Mingsheng, Yuan Shiyi, Xu Anzhu, et al. Planar grid division of the numerical simulation of remaining oil distribution during high water-cut period[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(4): 81-83.
- [16] 周炜, 唐仲华, 温静, 等. 应用数值模拟技术研究剩余油分布规律[J]. 断块油气田, 2010, 17(3): 325-329.
Zhou Wei, Tang Zhonghua, Wen Jing, et al. Study on distribution law of remaining oil by using reservoir numerical simulation technology[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(3): 325-329.
- [17] 李淑霞, 谷建伟. 油藏数值模拟基础[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009: 211-226.
Li Shuxia, Gu Jianwei. Fundamental of reservoir numerical simulation [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009: 211-226.