

# 复杂断块油藏人工边水驱影响因素敏感性

张戈<sup>1</sup>,王端平<sup>2</sup>,孙国<sup>1</sup>,肖淑明<sup>1</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司 现河采油厂,山东 东营 257068; 2.中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257000)

**摘要:**人工边水驱技术能够有效提高复杂断块油藏采收率,但其影响因素较多;目前各影响因素对驱替效果的影响规律尚不明确,制约了该技术的区块优选及方案实施。为了研究油藏特征对人工边水驱效果的影响规律,为区块优选提供依据,以矿场实践取得显著效果的复杂断块油藏为例,应用数值模拟技术,研究油藏单因素对人工边水驱提高采收率幅度的影响规律,最终得到构造、储层、流体3大类共8个主要影响因素;并利用油层物理、油藏渗流等理论对其内在机理进行解释,建立人工边水驱区块优选标准,明确了油藏单因素的具体量化标准及关系图版。从矿场试验来看,人工边水驱能够有效提高复杂断块油藏的开发效果,但仍处于探索阶段。

**关键词:**复杂断块油藏 人工边水驱 提高采收率 参数敏感性 优选标准

中国分类号:TE347

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)02-0103-04

## Sensibility study on influencing factors of artificial edge water flooding in complex fault-block reservoir

Zhang Ge<sup>1</sup>, Wang Duanping<sup>2</sup>, Sun Guo<sup>1</sup>, Xiao Shuming<sup>1</sup>

(1.Xianhe Oil Production Plant of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257068, China; 2.Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstracts:** Artificial edge water flooding technology can enhance oil recovery of the complex fault-block reservoir effectively. Influencing factors on the effect of the artificial edge water flooding are various. The sensibility of the influencing factors on the oil displacement effect is not clear, which has limited reservoir optimization and execution of planning. Taking the complex fault-block reservoir with obvious field result as an example, the effect of reservoir influencing factors on the degree of enhancing oil recovery by the artificial edge water flooding were studied using reservoir numerical simulation so as to provide basis for block optimization. Eight influencing factors were determined covering three aspects of structure, reservoirs and fluid. The influence mechanism was interpreted based on the theory of reservoir physics and reservoir percolation. Optimization standards of the complex fault-block reservoir were established for the artificial edge water flooding. Quantified standards and relationship charts of single reservoir factors versus enhanced oil recovery were given.

**Key words:** complex fault-block reservoir; artificial edge water flooding; EOR; sensibility of influencing factors; optimization standard

人工边水驱技术是近两年胜利油区提出的一项水驱开发技术,该技术通过在复杂断块油藏构造低部位大井距、大排量注水,来模拟天然强边水驱,从而改善油藏的开发效果;对于特高含水后期复杂断块油藏,通过先注后采方式能够使高度分散的剩余油重新运移聚集到构造高部位,并且能够有效地

提高采收率<sup>[1-2]</sup>。但该技术为提高采收率机理、影响因素、区块优选标准以及开发技术政策等方面的研究仍处于探索阶段,为此,笔者重点对人工边水驱效果的影响因素进行敏感性研究,并在此基础上建立其区块优选标准,以期矿场应用提供理论支撑。

收稿日期:2015-01-20。

作者简介:张戈(1981—),男,山东淄博人,高级工程师,博士,从事油藏工程及数值模拟研究。联系电话:18054606805, E-mail: zhanggeslyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“胜利油田特高含水期提高采收率技术”(2011ZX05011)。

## 1 人工边水驱模拟基础模型

胜利油区辛1断块沙一段4砂层组(简称辛1Es<sub>1</sub><sup>4</sup>)是典型的反向屋脊窄条带的人工边水驱油藏,该断块在进行人工边水驱前,仅有位于构造高部位的1口井在生产,含水率为97.7%,产油量为1.1 t/d,其他生产井均因已达到极限含水率而关井。在进行人工边水驱过程中,首先将注采井距增大到500~1 000 m时再进行注水,总注水量为 $15 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,然后对构造高部位油井进行扶停和补孔等措施,实施的4口生产井均获得较高的产能,单井最高产油量达到40 t/d,采取自喷方式生产,采收率提高了5.9%。

为了研究油藏因素对人工边水驱开发效果的影响规律,以辛1Es<sub>1</sub><sup>4</sup>断块油藏为例建立模拟基础模型。该模型参数包括:含油面积为1.1 km<sup>2</sup>,石油地质储量为 $65 \times 10^4$  t,原始水油体积比为10,埋深为1 900 m,地层倾角为12.5°,孔隙度为0.25,渗透率为 $464 \times 10^{-3}$  μm<sup>2</sup>,油层厚度为8 m,含油条带宽度为200 m,地下原油粘度为2.5 mPa·s。应用黑油模拟器模拟,共设计2套方案对不同油藏因素的敏感性进行模拟。方案1为常规边缘注水直至区块综合含水率达到99%,注采井距为280 m;方案2为常规边缘注水直至区块综合含水率达到97%,然后关闭油井,增大注采井距至540 m进行人工边水驱。通过对比2套方案的采收率,来进行各影响因素敏感性研究。

## 2 人工边水驱影响因素敏感性研究

借鉴常规水驱开发经验以及前人的研究成果,将复杂断块油藏人工边水驱效果的影响因素划为构造因素主要包括地层倾角和断块面积,储层因素主要包括油层厚度、平均渗透率和渗透率变异系数,流体因素主要包括地层油水粘度比、含油条带宽度和原始水油体积比<sup>[3]</sup>,通过数值模拟技术对上述8个单因素的敏感性进行了逐一研究。

### 2.1 构造因素

胜利油区复杂断块油藏多为反向屋脊断块,在构造上,地层倾角以及断块面积是影响水驱效果的主要因素,地层倾角决定了水驱过程中的重力作用大小,断块面积决定了井网的完善程度以及注采井距,通过数值模拟技术研究了2个构造因素对人工边水驱效果的影响规律。

#### 2.1.1 地层倾角

模拟结果表明,随着地层倾角的不断增大,常规注水开发和人工边水驱采收率都随之增大,且人工边水驱采收率明显高于常规注水开发的采收率。主要是由于地层倾角越大,剩余油重新聚集后的底部最小含油条带越宽和含油高度越高,纵向水驱更加均衡,减弱了底部水淹速度;当油层厚度为8 m、条带宽度为200 m和地层倾角大于8°时,提高采收率幅度较大。

#### 2.1.2 断块面积

受储量规模及注采井距的限制,极复杂小断块油藏<sup>[4-6]</sup>(断块面积一般小于0.05 km<sup>2</sup>)最多只能形成一注一采开发井网,无法拉大注采井距,难以进行人工边水驱,因此仅对断块面积为0.1~1.0 km<sup>2</sup>的油藏敏感性进行模拟。结果表明,断块面积越大弹性产率越高,常规注水补充能量之后采收率基本一致;人工边水驱后采收率明显提高,且随着断块面积增大,提高采收率幅度增大,主要是由于人工边水驱注采井距放大后,注水波及更加均衡,当断块面积大于0.3 km<sup>2</sup>后,提高采收率幅度逐渐变大(图1)。

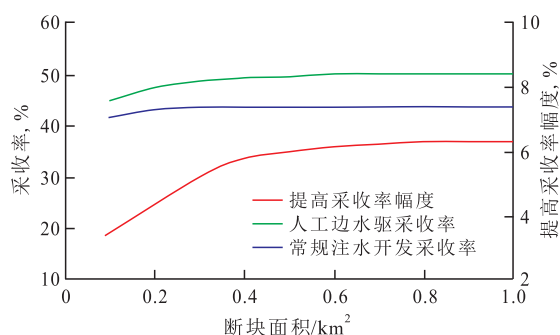


图1 断块面积对人工边水驱效果的影响

Fig.1 Effect of block area on artificial edge water flooding

### 2.2 储层因素

油层厚度影响层内纵向水淹规律,平均渗透率影响毛管压力及残余油饱和度,平面非均质性影响水驱平面波及的均匀程度,应用数值模拟技术研究3个储层因素的敏感性对人工边水驱效果的影响规律。

#### 2.2.1 油层厚度

受重力影响,油层厚度越大,水沿油层底部推进越快,而推进速度同时又受地层倾角和含油条带宽度的影响,地层倾角、油层厚度、最大含油条带宽度和最小含油条带宽度四者之间的关系式为

$$L = W - \frac{d_o}{\tan \theta} \quad (1)$$

式中:  $L$  为最小含油条带宽度,即油层底部条带宽度, m;  $W$  为最大含油条带宽度,即油层顶部条

带宽度,  $m$ ;  $d_o$  为油层厚度,  $m$ ;  $\theta$  为地层倾角, ( $^\circ$ )。

为了反映4个影响因素的共同作用,将油层厚度进行无因次处理,得到无因次油层厚度表达式为

$$d_{ob} = \frac{d_o}{W \tan \theta} \quad (2)$$

式中:  $d_{ob}$  为无因次油层厚度。

无因次油层厚度越大,常规注水开发剩余潜力越大,这对于人工边水驱是有利因素,但同时油藏底部水淹速度也越快,二者存在一个最优平衡点。模拟结果表明,当无因次油层厚度小于0.25时,人工边水驱提高采收率幅度逐渐递增,说明常规注水开发剩余潜力的影响大于油藏底部水淹变快的影响;当无因次油层厚度大于0.25时,人工边水驱提高采收率幅度逐渐递减,说明油层底部水淹影响加剧,注水开发次生水的水锥影响大于剩余潜力的影响,因此无因次油层厚度的最优值为0.25左右(图2)。

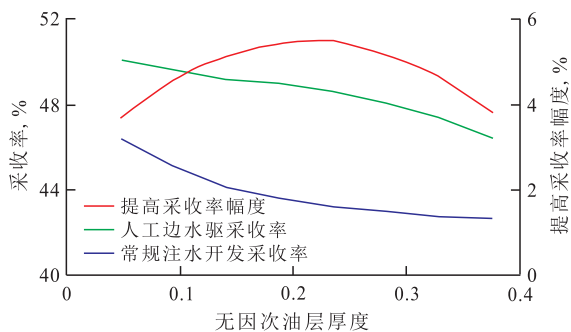


图2 无因次油层厚度对人工边水驱效果的影响

Fig.2 Effect of dimensionless reservoir thickness on artificial edge water flooding

### 2.2.2 平均渗透率

由 Carman-Kozeny 公式<sup>[7]</sup>及毛管压力公式<sup>[8]</sup>可以得到平均渗透率与毛管压力的关系式为

$$p_c = \frac{\sigma \cos \theta}{\sqrt{\frac{2\tau K}{\phi}}} \quad (3)$$

式中:  $p_c$  为毛管压力,  $MPa$ ;  $\sigma$  为界面张力,  $mN/m$ ;  $\theta$  为润湿角, ( $^\circ$ );  $\tau$  为孔喉迂曲度, 流体质点实际流经路程长度与岩石外观长度之比;  $K$  为平均渗透率,  $\mu m^2$ ;  $\phi$  为储层孔隙度。

由式(3)可以看出,随着平均渗透率的增大,毛管压力减小。根据毛管压力与油水过渡带高度之间的关系可以看出,毛管压力越小,油水过渡带高度越低。因此,平均渗透率直接影响剩余油重新聚集的油水过渡带高度,平均渗透率越大,油水过渡带高度越高,重力作用下水淹速度越慢。同时,根据阿普斯对73个水驱开发油藏的统计结果<sup>[9]</sup>可以看出,油藏平均渗透率影响水驱残余油饱和度,平

均渗透率越大,水驱残余油饱和度越小。在理论研究的基础上,对平均渗透率的敏感性进行了数值模拟研究,结果表明,人工边水驱提高采收率幅度随平均渗透率的增大而增大,当平均渗透率大于  $200 \times 10^{-3} \mu m^2$  时,提高采收率幅度最大(图3)。

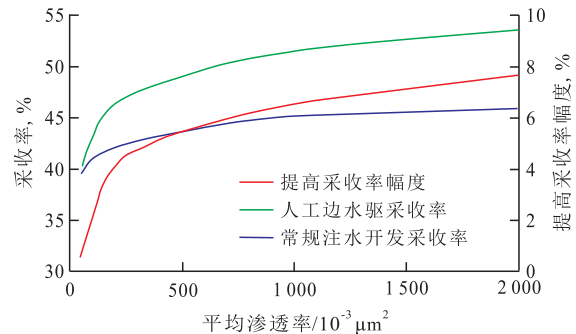


图3 平均渗透率对人工边水驱效果的影响

Fig.3 Effect of average permeability on artificial edge water flooding

### 2.2.3 渗透率变异系数

渗透率变异系数<sup>[10]</sup>是表征油藏非均质性的重要参数,以河道型沉积特征为例,研究了渗透率在平面上的变化。模拟结果表明,渗透率变异系数越大,常规注水波及系数越小,采出程度越低。人工边水驱后,在保持油井生产制度不变的情况下,人工边水驱提高采收率的幅度随渗透率变异系数增大而降低,当渗透率变异系数大于0.3后递减速度加快,当人为减小高渗透率带油井的生产压差,也就是根据非均质性对注采参数进行矢量化调配后,人工边水驱提高采收率幅度随渗透率变异系数增大而增大。因此,渗透率变异系数对人工边水驱效果的影响,取决于注采参数与非均质性的匹配关系,非均质性越强对后期注采参数的调配要求越高,人工边水驱的实施难度越大。

### 2.3 流体因素

主要研究了地层油水粘度比、原始含油条带宽度以及水体体积的敏感性,油水粘度比影响油水两相的流动能力,原始含油条带宽度影响见水时间,水体体积影响驱替能量,通过数值模拟技术研究了3个流体因素对人工边水驱效果的影响规律。

#### 2.3.1 地层油水粘度比

模拟结果表明,人工边水驱受地层油水粘度比影响较大,尤其是油水粘度比大于50后,提高采收率幅度下降较快,这与胜利油区实际边底水驱断块开发规律的统计结果一致,因此实施人工边水驱的断块油藏地层油水粘度比最好小于50。

#### 2.3.2 含油条带宽度

含油条带宽度主要影响了常规注水开发注采



井距和人工边水驱时边水距油井的距离,含油条带宽度越大,边水距油井的距离越远。人工边水驱提高采收率幅度受到常规注水开发剩余潜力和人工边水驱时油井含水上升速度影响,含油条带宽度与油井井距比值越小,常规注水开发剩余潜力越大,但人工边水驱油井含水上升速度也越快,两者的作用存在一个平衡点,在该平衡点附近,人工边水驱提高采收率幅度最大。模拟结果表明,该平衡点含油条带宽度与油井井距比值为0.5,当比值小于0.5时,剩余潜力作用更大,人工边水驱提高采收率幅度递增;当比值大于0.5后,油井含水率上升速度加快影响更大,提高采收率幅度递减(图4)。

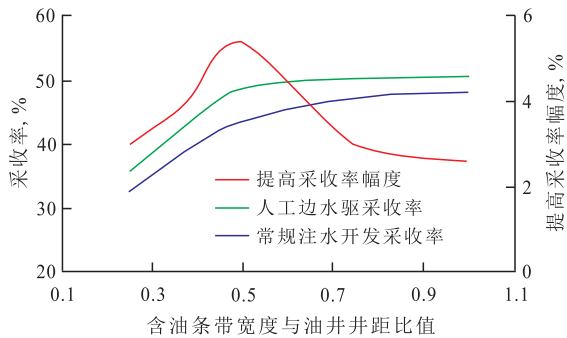


图4 含油条带宽度对人工边水驱效果的影响

Fig.4 Effect of oil zone width on artificial edge water flooding

### 2.3.3 原始水油体积比

原始水油体积比能够体现复杂断块油藏的封闭程度,原始水油体积比越大,能量衰减越慢,油藏封闭程度越低,越接近于强边水驱开发。模拟结果表明,完全依靠天然能量开发时,原始水油体积比越大,能量保持越好,采收率越高;原始水油体积比越小,人工边水驱提高采收率幅度越大,说明油藏越封闭人工边水驱效果越好。

## 3 复杂断块油藏人工边水驱区块优选标准

根据上述油藏单因素影响规律研究结果,制定复杂断块油藏人工边水驱区块优选标准如下:①地层倾角、油层厚度及含油条带宽度3个因素相互关联,当油藏参数取值位于三者关系图版(图5)对应油层基线右侧时,认为人工边水驱效果较好;②断块面积大于0.3 km<sup>2</sup>;③平均渗透率大于200×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>;④渗透率变异系数大于0.3;⑤地层油水粘度比小于50;⑥封闭弱边水油藏。

需要说明的是,该优选标准不是判断油藏是否适用人工边水驱的界限,而是满足优选标准的复杂

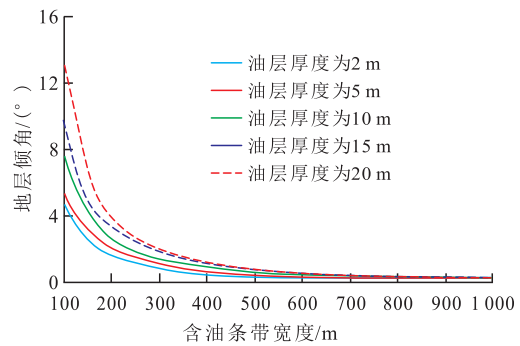


图5 地层倾角、油层厚度及含油条带宽度关系

Fig.5 Relationship among angle of bedding, reservoir thickness and oil zone width

断块油藏进行人工边水驱的效果更好。

## 4 结束语

油藏因素对人工边水驱效果的影响规律研究以及人工边水驱区块优选标准的建立,提高了人工边水驱技术的区块优选效率及可靠性,并为该技术的开发技术政策制定提供了依据。从矿场试验来看,人工边水驱能够有效提高复杂断块油藏开发效果,但该技术仍处于探索阶段,尤其是对于合理注采井网、注采参数的研究需要与实际区块紧密结合,只有因地制宜地制定相应实施方案才能取得较好的开发效果。

### 参考文献:

[1] 王建,胡罡.胜利断块油藏人工边水驱提高采收率技术研究[J].科学技术与工程,2012,12(15):3 598-3 601.  
Wang Jian, Hu Gang. Research on technology of enhance water drive recovery by simulating strong edge-water to develop fault-block oil reservoirs [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(15): 3 598-3 601.

[2] 王端平.对胜利油区提高原油采收率潜力及转变开发方式的思考[J].油气地质与采收率,2014,21(4):1-4.  
Wang Duanping. Some thoughts about potential of oil recovery efficiency and development model transition in Shengli district [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 1-4.

[3] 崔传智,杨赤宸,牛栓文,等.复杂断块油藏高含水期合理井距确定方法及其影响因素[J].油气地质与采收率,2013,20(4):53-56.  
Cui Chuazhi, Yang Chichen, Niu Shuanwen, et al. Determination of reasonable well spacing and influencing factors for the complicated fault-block reservoirs at high water cut stage [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 53-56.

[4] 王光付,许坚,王端平,等.中国石化不同类型断块油藏水驱采收率分析[J].石油勘探与开发,2004,31(4):96-98.

(下转第111页)