

文章编号: 0253-0697(2010)01-0096-04

# 聚合物驱宏观剩余油受效机制及分布规律

侯健<sup>1,2</sup> 杜庆军<sup>3</sup> 束青林<sup>4</sup> 张本华<sup>4</sup> 高达<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061; 2. 中国石油大学化学科学与工程学院 北京 102249;  
3. 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061; 4. 中国石化胜利油田分公司孤岛采油厂 山东东营 257231)

**摘要:**基于油藏数值模拟定义了“聚合物驱受效剩余油饱和度”新概念,研究了聚合物驱作用下宏观剩余油受效机制及受效剩余油在油藏中的分布部位和形态,讨论了储层韵律性、原油黏度和注聚用量对受效剩余油分布的影响。研究结果表明,受效剩余油在油层内纵向上主要分布于注入水窜流区的上部,呈斜纺锤体形状,平面上受效区域则位于注采井间,呈环状分布。不同韵律储层剩余油受效机制及受效剩余油分布有所不同。随着原油黏度的增加,受效剩余油主体区向油层底部移动,且受效剩余油饱和度峰值降低。随着注聚用量的增多,受效剩余油范围沿斜纺锤体的轴线向两侧扩大。

**关键词:**油藏模拟;聚合物驱;剩余油分布;影响因素;原油黏度;聚合物注入量

**中图分类号:** TE357.431

**文献标识码:** A

## Macroscopic response mechanism and distribution rules of remaining oil in polymer flooding

HOU Jian<sup>1,2</sup> DU Qingjun<sup>3</sup> SU Qinglin<sup>4</sup> ZHANG Benhua<sup>4</sup> GAO Da<sup>1</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;  
2. Faculty of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
3. College of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;  
4. Gudao Production Plant, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257231, China)

**Abstract:** A new concept of response remaining oil saturation in polymer flooding was defined on the basis of reservoir numerical simulation. The macroscopic response mechanism of remaining oil was discussed. The places and shapes of response remaining oil in reservoirs with polymer flooding were investigated. The influences of reservoir rhythm, oil viscosity and the amount of polymer injection on the distribution of response remaining oil were analyzed. The research results showed that the response remaining oil vertically distributed in the upper parts of the cross-flow zones and took on the shape of spindle. The response zones were horizontally located between the injected wells and producing wells and took on the circular shape. The response mechanism and distribution of remaining oil were various in the different rhythm formations. The body of response remaining oil moved to the lower parts of formation, and the peak values of response remaining oil saturation declined with the increase of oil viscosity. As the injection amount of polymer increased, the boundary of response remaining oil extended bilaterally along the axis of spindle.

**Key words:** reservoir simulation; polymer flooding; remaining oil distribution; influential factor; oil viscosity; polymer injection amount

聚合物驱是目前中国最有效的提高采收率的三次采油技术之一,已在大庆油田、胜利油田等油田工业化推广应用<sup>[1-6]</sup>。聚合物驱比水驱能更大幅度地提高原油采收率,以孤岛油田中一区 Ng3 聚合物驱先导试验区为例,研究了聚合物驱宏观剩余油受效机制,分析了受效剩余油在油藏中的分布部位、形态及其影响因素。

## 1 油藏数值模拟模型

孤岛油田中一区 Ng3 注聚合物先导试验区位于中一区中部<sup>[7]</sup>,由 4 个反五点法注采井组组成,其中中心采油井 1 口,边角平衡井 9 口。试验区面积为 0.56

km<sup>2</sup>,平均有效厚度为 16.1 m,地质储量为 165 × 10<sup>4</sup> t。聚合物驱前水驱采出程度为 30.9%,综合含水率为 91.2%。该区先导试验于 1992 年 9 月开始注第一段塞,1993 年 8 月注第二段塞,1996 年 9 月注第三段塞,1997 年 3 月注完聚合物溶液转后续水驱,累计注入量为 0.29 PV,聚合物干粉用量为 1389 t。

实际的地质模型的影响因素较多,往往会对影响因素及规律产生干扰。因此在先导试验区为原型的基础上,建立了能够反映该区整体地质特征的概念模型。概念模型采用排状交错井网,井网排距为 260 m,井距为 300 m。纵向划分为两个小层,各小层内划分为 12 个韵律

段,两小层间设置隔层。模型选取其中一注一采系统,大小为反五点井网的1/4。模型构造顶深为1190 m,初始含油饱和度为0.68,原油黏度为40 mPa·s。

模型两个小层平均有效厚度分别为9.0 m和4.5 m。为了反映实际模型的特点,每小层有效厚度在平面上以变异系数0.3分布,纵向上平均分配12个韵律段。平面渗透率分布以变异系数为0.55随机产生。两个小层平均渗透率分别为 $2\mu\text{m}^2$ 和 $1\mu\text{m}^2$ ,层内韵律层间垂向变异系数为0.5,以正韵律分布。层内韵律层间垂向渗透率为平面渗透率的0.1倍,由于考虑有隔层存在,小层间垂向渗透率为零。

为了能够反映实际模型的动态变化规律,生产井以采出程度为标准,注水井以注入孔隙体积倍数为标准,将中一区Ng3注聚合物先导试验区生产动态平均到概念模型单井动态上建立生产动态数据。

## 2 聚合物驱受效剩余油分布特征

通过对比水驱含水率达到90%时和聚合物驱含水率恢复到注聚合物前水平(含水率为90%)时沿注采井间的垂向剩余油分布(图1),可以看出,无论是水驱还是聚合物驱,剩余油主要分布于正韵律层的顶部,并且越靠近生产井,剩余油越富集,聚合物驱后剩余油分布明显少于水驱后的剩余分布。

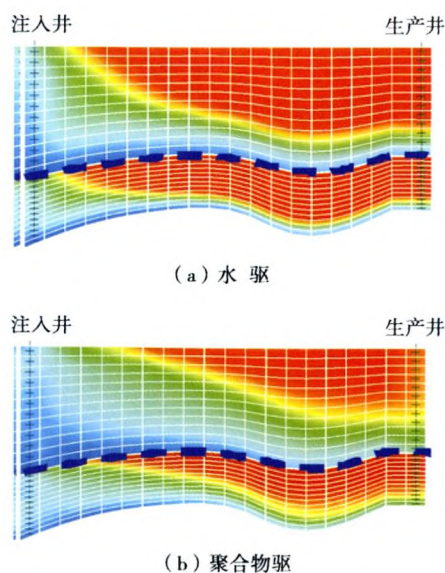


图1 水驱和聚合物驱后剩余油分布

Fig. 1 The remaining oil distribution after water flooding or polymer flooding

为进一步确定聚合物驱受效剩余油部位,定义了“聚合物驱受效剩余油饱和度”的概念,即相同的模拟条件下,纯水驱后与聚合物驱后剩余油饱和度的差值。图2为受效剩余油饱和度的垂向分布,由于聚合物

液的调驱作用,受效剩余油主要存在于水驱注入水窜流区的上部,注采井附近受效剩余油饱和度较低,注采井中间部位受效剩余油饱和度相对较高,并且分布范围较大。同时距离注水井越近,受效剩余油越靠近顶部,因此呈现斜“纺锤体”形状。由于聚合物驱仍然存在一定窜流,“纺锤体”的上部不能够波及,不存在受效剩余油。“纺锤体”的下部由于水驱作用剧烈,水淹已经很严重,聚合物驱再提高其开发效果作用有限,受效剩余油也较少。

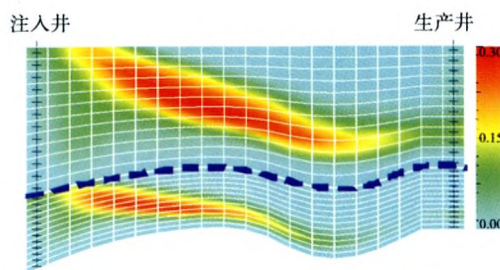


图2 聚合物驱受效剩余油垂向分布

Fig. 2 The vertical distribution of response remaining oil after polymer flooding

由图3可以看出,聚合物驱受效层段中的受效剩余油主要分布于注采井间,呈环状分布,最大受效剩余油分布于中部韵律段(如第1小层的6—8韵律层);越靠近底部,受效剩余油分布逐渐向注采井主流线的两翼移动。这主要是由于底部主流线部位水驱效果已经很好,聚合物驱增大了水油流度比,波及到了流线边部剩余油,扩大了波及系数,动用了水驱未波及的剩余油。

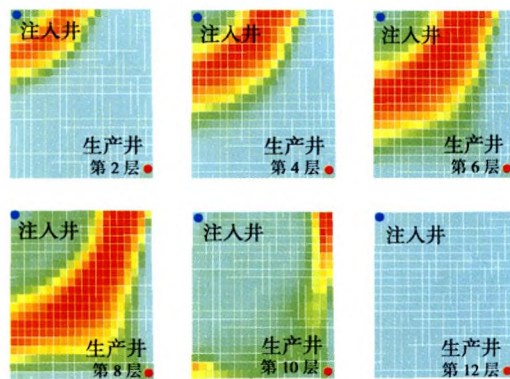


图3 聚合物驱受效剩余油平面分布

Fig. 3 The horizontal distribution of response remaining oil after polymer flooding

图4定量统计了各韵律段平均受效剩余油饱和度分布,同样反映了聚合物驱调驱作用和扩大波及系数的提高采收率机理,受效最大的第8层聚合物驱平均剩余油饱和度比水驱减小了0.151。底部韵律段平均受效剩余油饱和度出现负值。这说明聚合物驱抑制了底部强烈水淹,改善了开发效果。

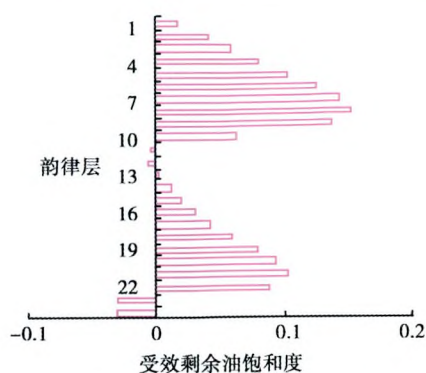


图 4 各韵律层受效剩余油饱和度分布

Fig. 4 The saturation distribution of response remaining oil in rhythmic layers

### 3 聚合物驱受效剩余油影响因素

#### 3.1 储层韵律性的影响

在概念模型基础上,保持各小层平均渗透率不变,为每个韵律段分别设置不同的垂向渗透率分布,建立不同垂向渗透率变异系数下的正韵律、反韵律和均质模型。正韵律、反韵律模型渗透率变异系数分别取 0.3、0.5、0.7 和 0.9。均质模型各层平面渗透率分布相同,可将它看作是韵律性储层的特例。

(1) 正韵律储层。对于正韵律储层,无论是聚合物驱还是水驱,变异系数越大对开发越不利。储层非均质和重力的双重作用导致水向底部窜流、开发效果变差。但对于平均受效剩余油饱和度,正韵律油层聚合物驱存在最优变异系数。在本算例中,当变异系数为 0.7 时,聚合物驱平均受效剩余油饱和度最高。

图 5(b)中反映了正韵律储层不同变异系数下聚合物驱受效剩余油的部位。与图 5(a)均质模型相比,随着渗透率变异系数的增大,受效部位逐渐下移。当变异系数为 0.7 时受效的层位达到最多;而当变异系数为 0.9 时,受效部位仅为底部几个韵律段。如第 1 小层为 9—12 韵律段,反映出聚合物驱对开发效果的改善也是有限的。如果正韵律储层变异系数过大,聚合物驱也会形成窜流,不利于聚合物驱开发。

(2) 反韵律储层。反韵律油层水驱和聚合物驱开发效果普遍好于正韵律油层。反韵律油层顶部物性较好,同时重力作用导致水向底部低渗透层位渗流,使反韵律油藏各分层间的矛盾得以缓和,因此存在一定非均质性,有利于反韵律油藏的开发,甚至优于均质模型。在本次算例中,当变异系数为 0.3 时,水驱和聚合物驱开发效果最好。

对于平均受效剩余油饱和度,反韵律储层由于水驱开发效果好,因此聚合物驱受效剩余油饱和度较低。从图 5(c)可以看出,聚合物驱主要动用的是水驱过程

中由于重力作用而未波及到的顶部剩余油。随着渗透率变异系数的增加,平均受效剩余油饱和度减小。与均质模型和正韵律模型相比,受效剩余油更加靠近生产井,更加靠近小层上部,且受效韵律段较少。

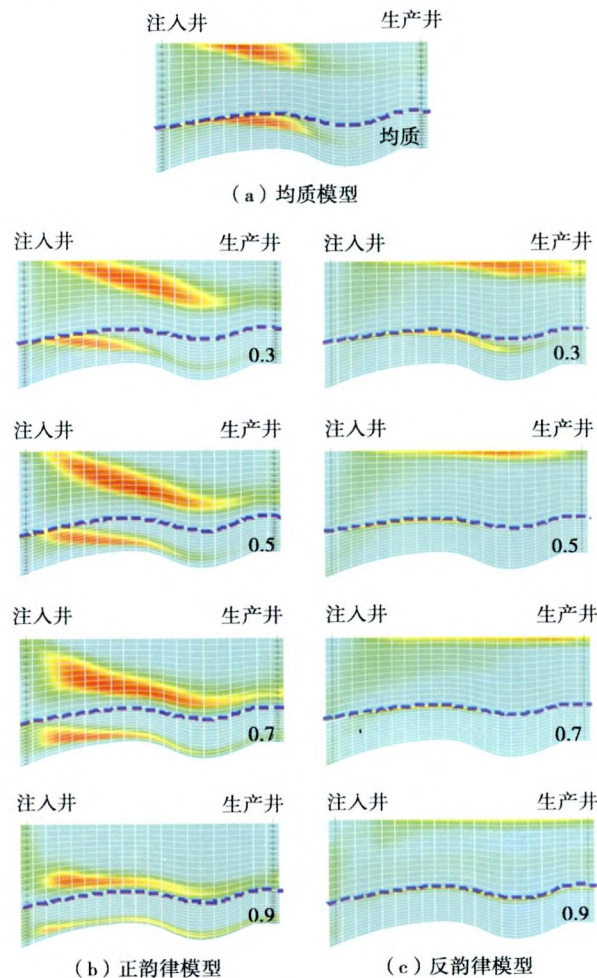


图 5 不同韵律性油层受效剩余油分布模式

Fig. 5 The distribution pattern of response remaining oil for different rhythmic reservoir

(3) 不同韵律性储层的对比。反韵律油层聚合物驱最终开发效果好于正韵律油层。但从受效剩余油饱和度来看,正韵律油层的水驱开发效果较差,因此受效剩余油饱和度远远大于反韵律油层。对于正韵律油层,在一般情况下聚合物驱均能有效地提高原油采收率;而对于反韵律油层,在其他条件相同的前提下,聚合物驱提高采收率的幅度一般比正韵律油层要小。反韵律油层在某些油藏条件下,聚合物驱对提高原油采收率几乎不能起到太大的作用。

#### 3.2 原油黏度的影响

原油黏度是影响聚合物驱增油效果的关键参数。聚合物驱的主要增油机理在于增大驱替液黏度,通过提高水油黏度比提高原油采收率。王新海等人油藏数值模拟研究表明,对于正韵律油层,聚合物驱效果较好,但

油层非均质程度不同时,聚合物驱提高采收率达到峰值时的油水黏度比也有所不同。而对于反韵律油层,原油黏度较高时聚合物驱才可能取得较好的效果<sup>[8]</sup>。

以正韵律储层为例,原油黏度分别取值为 10 mPa·s、40 mPa·s、80 mPa·s、150 mPa·s、300 mPa·s 时的计算结果如图6所示。在本算例渗透率变异系数为 0.5 的正韵律模型中,原油黏度为 40 mPa·s 时,聚合物驱受效剩余油饱和度最高。而当原油黏度增加,注入水向底部窜流变得严重,受效剩余油饱和度越靠近底部,并且其形态由“纺锤形”变为了“三角形”,靠近注水井一侧受效层位增加,聚合物驱受效剩余油饱和度值降低。

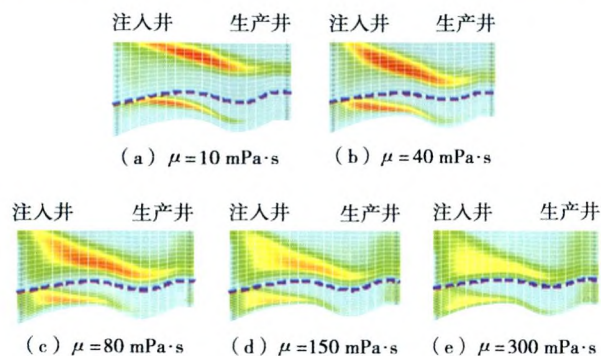


图6 不同原油黏度受效剩余油分布模式

Fig. 6 The distribution pattern of response remaining oil under different oil viscosity

### 3.3 聚合物注入量的影响

保持注入聚合物溶液浓度为 1 500 mg/L 不变,改变注入孔隙体积倍数,设计聚合物用量分别为 400 mg/(L·PV)、450 mg/(L·PV)、500 mg/(L·PV)、550 mg/(L·PV)。可以看出,聚合物注入量越多,注入段塞越大,聚合物驱波及体积越大,聚合物驱开发效果越好,剩余油饱和度越低,受效剩余油饱和度越高。聚合物注入量增加到一定程度,提高开发效果的趋势将减缓。随着聚合物注入量的增多,受效剩余油范围沿斜纺锤体的轴线向两侧扩大(图7)。

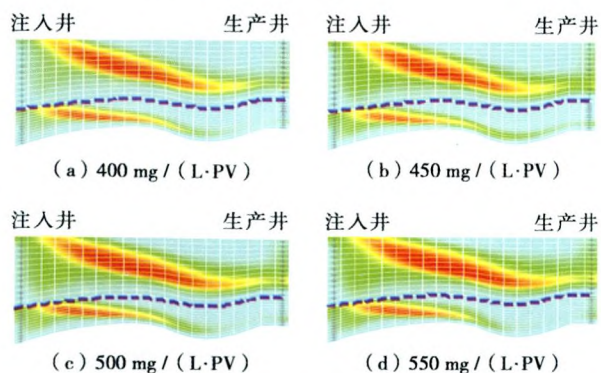


图7 不同聚合物用量受效剩余油分布模式

Fig. 7 The distribution pattern of response remaining oil under different polymer injection amount

## 4 结 论

(1) 以孤岛油田中一区 Ng3 聚合物先导试验区为例,建立了精细数值模拟概念模型,进行了聚合物驱作用下宏观剩余油受效机制及受效剩余油在油藏中的分布部位和形态研究。

(2) 定义了“聚合物驱受效剩余油饱和度”的新概念,讨论了储层韵律性、原油黏度和聚合物注入量对受效剩余油分布的影响。

(3) 聚合物驱受效剩余油在油层内纵向上呈斜纺锤体形状,平面上在受效区域呈环状分布。不同韵律储层、原油黏度和聚合物用量条件下,剩余油受效机制及受效剩余油分布有所不同。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Demin, Zhao Lanshui, Cheng Jiecheng, et al. Actual field data show that production costs of polymer flooding can be lower than water flooding[R]. SPE 84849, 2003.
- [2] Wang Demin, Cheng Jiecheng, Wu Junzheng, et al. Experiences learned after production more than 300 million barrels of oil by polymer flooding in Daqing Oilfield[R]. SPE 77693, 2002.
- [3] 侯健,郭兰磊,元福卿,等.胜利油田不同类型油藏聚合物驱生产动态的定量表征[J].石油学报,2008,29(4):577-581.  
Hou Jian, Guo Lanlei, Yuan Fuqing, et al. Quantitative characterization of polymer flooding production performance in different reservoirs of Shengli Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4):577-581.
- [4] 王德民,程杰成,吴军政,等.聚合物驱油技术在大庆油田的应用[J].石油学报,2005,26(1):74-78.  
Wang Demin, Cheng Jiecheng, Wu Junzheng, et al. Application of polymer flooding technology in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1):74-78.
- [5] 兰玉波,杨清彦,李斌会.聚合物驱油效率和波及系数的研究与认识[J].石油学报,2006,27(1):64-68.  
Lan Yubo, Yang Qingyan, Li Binhui. Experimental research on sweep efficiency and oil-displacement efficiency of polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1):64-68.
- [6] 李振泉.孤岛油田中一区特高含水期聚合物驱工业试验[J].石油勘探与开发,2004,31(2):119-121.  
Li Zhenquan. Industrial test of polymer flooding in superhigh water cut stage of central No. 1 Block, Gudao Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(2):119-121.
- [7] 张贤松,郭兰磊,屈智坚,等.孤岛油田中一区聚合物驱先导试验区效果评价及驱油特征[J].石油勘探与开发,1996,23(6):54-57.  
Zhang Xiansong, Guo Lanlei, Qu Zhijian, et al. The effectiveness evaluation and displacement characteristics analysis of polymer flooding pilot test in Zhong-1 unit of Gudao Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(6):54-57.
- [8] 王新海,韩大匡,郭尚平.聚合物驱油机理和应用[J].石油学报,1994,15(1):83-90.  
Wang Xinhai, Han Dakuang, Guo Shangping. Mechanism and application of polymer flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(1):83-90.

(收稿日期 2009-02-30 改回日期 2009-07-06 编辑 黄小娟)