

# 海上厚层油藏早期聚合物驱 剩余油分布特征实验研究

周凤军, 李金宜, 瞿朝朝, 徐豪飞, 张国浩

(中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院, 天津 300452)

**摘要:**渤海海域LD油田为典型的厚层油藏,采用大套多层合采的开发方式,为了提高油田采收率,该油田开展了早期聚合物驱矿场试验,厚油层开发受重力影响以及在聚合物驱等因素的共同作用下,在中、高含水期油藏剩余油分布较为复杂。为进一步研究聚合物驱后油藏剩余油分布状况,开展了室内岩心驱替实验。结合油藏属性,根据相似原则设计物理模拟参数,研究了不同韵律地层对早期聚合物驱剩余油分布规律以及生产动态的影响。研究结果表明:均质韵律条件下受到重力分异作用,油层为底部水淹,而早期聚合物驱能在一定程度上减缓重力分异作用,剩余油主要富集在生产井附近储层顶部;正韵律条件下受到重力分异和储层非均质性的共同影响,底部高渗透层水淹,剩余油主要分布在顶部低渗透层中,早期聚合物驱能有效动用中、低渗透层中的剩余油,而剩余油主要分布在靠近采油井的低渗透层;反韵律条件下,水驱波及程度较均匀,剩余油主要富集在局部未波及区域,早期聚合物驱能进一步扩大波及程度;复合韵律条件下,水驱和注聚合物驱与均质韵律驱替状况类似,剩余油主要分布在靠近生产井的低渗透层。

**关键词:**早期聚合物驱 厚层油藏 剩余油分布 沉积韵律 海上油田

中图分类号:TE357.431

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)06-0092-05

## Laboratory core experiments of remaining oil distribution at the early polymer flooding in offshore thick reservoirs

Zhou Fengjun, Li Jinyi, Qu Zhaozhao, Xu Haofei, Zhang Guohao

(Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch Company, CNOOC China Ltd., Tianjin City, 300452, China)

**Abstract:** Bohai LD Oilfield is developed by commingling production in thick layers. Due to the field test at early polymer injection and the effect of gravity on developing the thick reservoirs, the remaining oil in the period of middle and high water cut is relatively complicated. In order to further study the remaining oil distribution of oil reservoir after the polymer flooding, laboratory core displacement experiment was carried out. Combined with the reservoir properties, physical simulation parameters were designed according to the similarity principle, and the effect of different stratum rhythm on remaining oil distribution in the early polymer injection and the production performance was researched. The research results indicate that due to gravitational differentiation, the oil reservoir is flooded at the bottom under the condition of homogeneous rhythm, and early polymer injection can slow the gravitational differentiation to a certain extent, so the remaining oil is mainly concentrated at the top of the reservoir near the production well; under the condition of positive rhythm, influenced by the gravitational differentiation and the reservoir heterogeneity, the high permeability layer is flooded at the bottom and the remaining oil is concentrated in the lower permeability layer at the top; early polymer injection can effectively drive the remaining oil in the medium and low permeability layer, and the remaining oil is concentrated in the low permeability layer near the production well; under the condition of reverse rhythm, the swept degree of water flooding is relatively uniform, and the remaining oil is mainly concentrated in the locally non-swept region, and the early polymer injection can further ex-

收稿日期:2017-07-11。

作者简介:周凤军(1984—),男,天津人,工程师,硕士,从事油田开发生产及提高采收率方面的研究。联系电话:15102235689, E-mail: zhoufengjunpk@sina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058-001-005)。

tend the swept degree; under the condition of composite rhythm, the displacement situation of water drive and the polymer drive are similar to that of the homogenous rhythm, and the remaining oil is concentrated in the low permeability layer near the production well.

**Key words:** early polymer flooding; thick oil reservoir; remaining oil distribution; sedimentary rhythm; offshore oilfield

剩余油分布研究是油田开发工作的重点,其分布规律主要受油藏沉积特征以及开发因素的影响。对于水驱开发油田,室内实验及矿场实践结果均表明<sup>[1-5]</sup>,储层纵向非均质性的存在,使得注入水单层突进、层间干扰严重、纵向各层动用程度差异较大;在大注采井距、多层合采条件下,海上油田层间干扰现象更为突出<sup>[6]</sup>。合理的层系划分、水平井局部挖潜、调剖、卡堵水等诸多措施,是改善油田开发效果的主要手段<sup>[7-9]</sup>。此外,注入聚合物溶液对油水流度比能起到控制作用,并能有效改善纵向的水驱波及效果,从而提高油田最终采收率<sup>[10-13]</sup>。前人主要研究了水驱油田不同控制因素下的剩余油分布规律,对厚油层聚合物驱剩余油分布规律的研究较少。此外,陆地油田一般在油藏高含水后期开展聚合物驱,对于油藏早期实施聚合物驱的相关研究较少,对剩余油分布规律的研究有待进一步加强。为此,笔者针对LD油田实际地质特征,从油田实施聚合物驱井组中选取几个典型非均质储层,根据相似原则建立典型模型,开展室内岩心驱替实验,模拟油田早期聚合物驱过程,认识剩余油分布规律,为后期油田调整挖潜提供有利依据。

## 1 油田概况

LD油田为典型的厚层油藏,单井钻遇油层厚度高达60 m,单层厚度大于25 m,属于三角洲前缘沉积,层内非均质性严重,具有高孔、高渗透的特征(孔隙度为24%~33%,渗透率为200~3 000 mD),地层原油粘度为17 mPa·s,密度为0.87 g/cm<sup>3</sup>,为常规原油。LD油田为海上第1个低含水期就实施聚合物驱的油田(投产2 a,含水率小于60%),LD油田实施聚合物驱近8 a,截止到2016年底该油田综合含水率小于80%,采出程度为30%。

## 2 实验准备

**实验材料** 实验材料主要包括:①平板模型为人工岩心,长×宽×高为28 cm×0.45 cm×7 cm;②实验用水是根据LD油田水源井离子组成复配的地层水,总矿化度为8 878 mg/L,25℃下粘度为0.92

mPa·s;③聚合物为LD油田现场注聚合物样品,聚合物溶液质量浓度为600 mg/L,有效粘度为7.2 mPa·s;④实验用油是真空泵油与煤油按体积比为2:1配制,25℃下粘度为19.8 mPa·s。

**实验装置及流程** 可视化实验装置由平流泵、中间容器、六通阀、高精度压力表、油水分离器和图像采集系统等组成(图1)。为使实验效果更明显,水中加入甲基蓝染成蓝色,油被苏丹三染成红色。

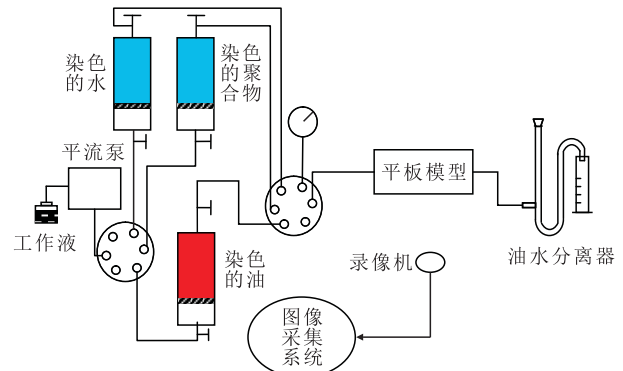


图1 可视化实验装置及流程

Fig.1 Visualized experimental devices and processes

**实验步骤** 实验步骤主要包括:①根据实验设计要求,准备平板模型。②称干重,饱和油,测定孔隙度。③平板模型注水驱替至含水率为98%时,停止实验,记录注入压力、累积产出油、累积注入量和见水时间。④当平板模型出口端含水率大于30%时改为聚合物驱,驱替至含水率为98%,停止实验,更换另一块平板模型,重复步骤②—④。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 均质地层

#### 3.1.1 模型基础参数

针对均质地层模型共进行3组实验,模型渗透率分别为500,1 500和2 800 mD,均质地层模型实验参数见表1。

#### 3.1.2 实验结果对比

从3个均质地层模型水驱和早期聚合物驱的油水分分布对比(图2)可以看出:水驱时,随着模型渗透率的增大,重力作用逐步明显,注入水沿着底部突破,大量剩余油集中分布在油层顶部;而聚合物驱能够提高驱替相的粘度,减弱重力分异作用,早

表1 均质地层模型实验参数  
Table1 Experiment parameters of the homogeneous formation model

模型编号	渗透率/mD	干重/g	湿重/g	孔隙度/%	饱和油/mL
1	500	457.9	490.7	37.4	33.0
2	1 500	470.0	501.9	36.2	31.9
3	2 800	470.8	505.3	34.8	35.1

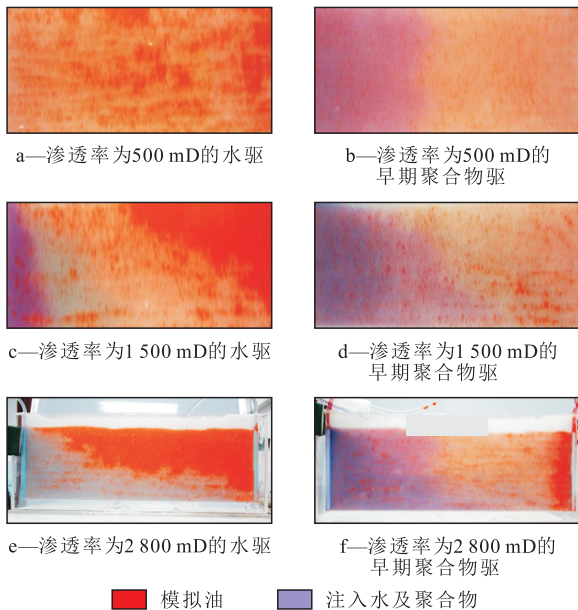


图2 3个均质地层模型不同开发方式的油水分布对比

Fig.2 Comparison of oil and water distribution under different development modes of three homogeneous formation models

期聚合物驱实验中的驱替接近于活塞式驱替,大幅提高了纵向波及程度,剩余油较少,主要分布于靠近生产井区域。

从最终采收率结果(图3)可以看出:水驱时,厚油层主要受重力分异的影响,渗透率越高由重力分异造成的上部剩余油越多,采收率越低;早期聚合物驱最终采收率均高于水驱,而且渗透率越高,采收率提高幅度也越大。

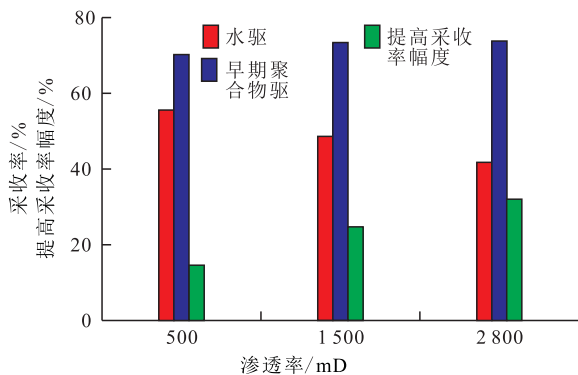


图3 3个均质地层模型不同开发方式的采收率对比

Fig.3 Comparison of the recovery rate under different development modes of three homogeneous formation models

### 3.2 单一韵律地层

#### 3.2.1 模型基础参数

针对单一韵律地层模型共进行正韵律和反韵律2组实验,实验参数如表2所示。

表2 单一韵律地层模型实验参数  
Table2 Experiment parameters of the single rhythm formation models

地层模型	总厚度/cm	小层厚度/cm	小层渗透率/mD	干重/g	湿重/g	孔隙度/%	饱和油/mL
正韵律	7	2	600	472.8	501.8	32.1	28.4
		3	1 300				
		2	1 900				
反韵律	7	3	2 500	458.7	487.4	31.7	28.0
		2	1 500				
		2	800				

#### 3.2.2 实验结果对比

从正韵律和反韵律地层模型水驱和早期聚合物驱的油水分布对比(图4)可以看出:水驱时,正韵律地层模型重力作用与物性级差共同作用,注入水沿底部高渗透层突破,剩余油集中分布在上部中、低渗透层中,而反韵律地层模型重力作用起到正向作用,水驱过后剩余油分布相对均匀,中、低渗透层能够被有效动用,剩余油集中分布在近采油井地带的低渗透条带;早期聚合物驱时,正韵律地层模型聚合物驱改善纵向波及效果明显,波及面积大,剩余油集中分布在靠近生产井附近的上部三角区域内,而反韵律地层模型的剩余油在靠近采油井分布较少,其原因是在重力和模型韵律性的双重影响下,聚合物溶液仍优先流向高渗透层。

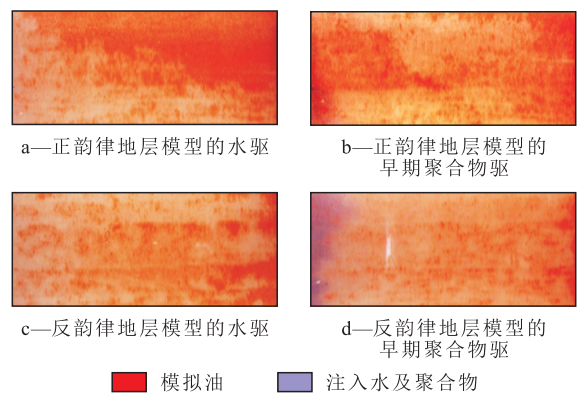


图4 正、反韵律地层模型不同开发方式的油水分布对比

Fig.4 Comparison of oil and water distribution under different development modes of the positive and reverse rhythm formation models

从正、反韵律地层模型的水驱与聚合物驱采收率对比(图5)可以看出:反韵律地层模型早期聚合物驱的开发效果好于正韵律地层模型,这说明聚合物驱调整重力分异的能力是有限的。正、反韵律地



层模型早期聚合物驱开发效果好于水驱,其中正韵律地层模型早期聚合物驱的采收率比水驱的提高了19.2%,而反韵律地层模型的提高了14.5%。

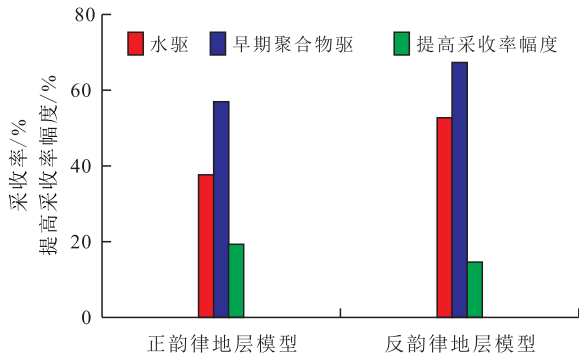


图5 单一韵律地层模型不同开发方式的采收率对比

Fig.5 Comparison of the recovery rate under different development modes of the single rhythm models

### 3.3 复合韵律地层

#### 3.3.1 模型基础参数

为了考察不同韵律组合条件下的聚合物驱特征,依据井组韵律组合形式,设计了复合正韵律以及复合正、反韵律地层模型,模型实验参数如表3所示。

表3 复合韵律地层模型实验参数  
Table3 Experiment parameters of the composite rhythm formation models

地层模型	总厚度/cm	小层厚度/cm	小层渗透率/mD	干重/g	湿重/g	孔隙度/%	饱和度/mL
复合正韵律	8.0	1.0	800	505.5	538.6	37.9	33.4
		1.0	1 500				
		1.5	3 000				
		1.0	1 000				
		2.0	2 000				
		1.5	1 500				
复合正、反韵律	8.5	1.5	1 000	518.1	556.8	45.5	40.2
		1.0	2 000				
		2.0	3 500				
		1.0	2 500				
		2.0	1 700				
1.0	500						

#### 3.3.2 实验结果对比

复合正韵律地层模型剩余油主要分布在低渗透层,且渗透率越低的小层,剩余油富集程度越高;与水驱相比,早期聚合物驱开发效果较好,剩余油分布较少。复合正、反韵律地层模型剩余油分布规律主要受渗透率的影响,早期聚合物驱的剩余油主要富集在靠近生产井的低渗透层,呈三角形分布(图6)。

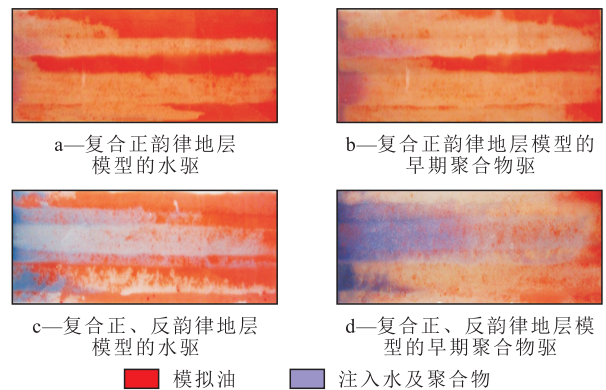


图6 复合韵律地层模型不同开发方式的油水分布对比  
Fig.6 Comparison of oil and water distribution under different development modes of the composite rhythm formation models

复合韵律地层模型单层厚度小于单一韵律地层模型单层厚度,因此复合韵律地层模型层内重力作用对剩余油分布的影响小于单一韵律地层模型,所以复合韵律地层模型开发效果好于单一韵律地层模型(图7)。

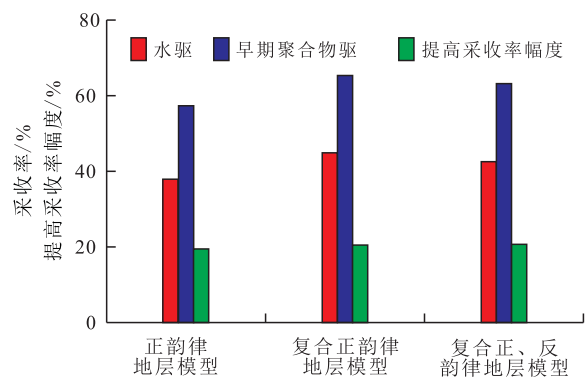


图7 复合韵律地层模型不同开发方式的采收率对比

Fig.7 Comparison of the recovery rate under different development modes of the composite rhythm formation models

## 4 结论

室内岩心驱替实验结果表明,受到韵律和重力作用的双重影响,均质韵律、正韵律、复合韵律条件下表现为底部高渗透层水淹,水驱剩余油主要分布在低渗透层中,早期聚合物驱能够减缓厚油层重力作用以及由于纵向非均质性造成的注入水突进,聚合物驱后剩余油主要分布在靠近生产井附近的低渗透层;而反韵律条件下,韵律作用和重力作用相互影响,水驱波及程度相对较均匀,剩余油主要富集在局部未波及区域,早期聚合物驱能进一步扩大波及程度,提高采收率。实验结果能为油田后期调整挖潜方向提供依据,在油田开发后期主要以局部挖潜顶部剩余油为主,可以考虑局部厚油层顶部部

署水平井进行挖潜措施。

#### 参考文献:

- [1] 岳陆,张还恩.多层水驱油室内模拟试验研究[J].断块油气田,1994,1(3):33-37.  
Yue Lu, Zhang Huanen. Laboratory simulating the waterflooding recovery for the multi-layer reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1994, 1(3): 33-37.
- [2] 于春生,李闽,乔国安,等.纵向非均质油藏水驱油实验研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(1):84-86.  
Yu Chunsheng, Li Min, Qiao Guoan, et al. Vertically heterogeneous reservoir water flooding oil test [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2009, 31(1): 84-86.
- [3] 徐洪玲.油藏非均质性对聚合物驱开发效果的影响[J].油气地质与采收率,2015,22(5):99-102.  
Xu Hongling. Impact of plane heterogeneity of oil reservoir on development effect of polymer flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(5): 99-102.
- [4] 许建红,钱俐丹,库尔班.储层非均质对油田开发效果的影响[J].断块油气田,2007,14(5):29-31.  
Xu Jianhong, Qian Lidan, Kuerban. Influence of reservoir heterogeneity on oilfield development effectiveness [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2007, 14(5): 29-31.
- [5] 王军,孟小海,王为民,等.微观剩余油核磁共振二维谱测试技术[J].石油实验地质,2015,37(5):654-659.  
Wang Jun, Meng Xiaohai, Wang Weimin, et al. 2D NMR distribution function for microscale remaining oil [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 654-659.
- [6] 张浩,李廷礼,贾晓飞,等.海上稠油油田层间干扰变化研究[J].断块油气田,2015,22(5):656-659.  
Zhang Hao, Li Tingli, Jia Xiaofei, et al. Study on interlayer interference changes in offshore heavy oil reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(5): 656-659.
- [7] 冯有奎,唐颖,闫伟,等.疏松砂岩稠油油藏调剖试验效果评价[J].油气地质与采收率,2015,22(3):124-128.  
Feng Youkui, Tang Ying, Yan Wei, et al. Effect evaluation on pro-
- file control experiments in the unconsolidated sandstone heavy oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 124-128.
- [8] 马贤圣,呼舜兴,耿师江,等.多层水驱油实验在桥口油田开发中的应用[J].西安石油学院学报:自然科学版,2003,18(6):47-49.  
Ma Xiansheng, Hu Shunxing, Geng Shijiang, et al. Water driving oil test in heterogeneous reservoir and its application in Qiaokou oilfield [J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2003, 18(6): 47-49.
- [9] 宋勇.胜利油区整装油藏特高含水期水平井提高采收率技术[J].油气地质与采收率,2015,22(3):119-123.  
Song Yong. EOR technology for the horizontal wells at extra-high water cut stage in integrated oil reservoirs of Shengli oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 119-123.
- [10] 李宜强,隋新光,李洁,等.纵向非均质大型平面模型聚合物驱油波及系数室内实验研究[J].石油学报,2005,26(2):77-84.  
Li Yiqiang, Sui Xinguang, Li Jie, et al. Experimental study on sweep efficiency of polymer flooding with longitudinal heterogeneous plane model [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(2): 77-84.
- [11] 李振泉,祝仰文,刘坤,等.三维非均质模型上聚合物及有机交联聚合物提高采收率研究[J].油田化学,2002,19(1):73-76.  
Li Zhenquan, Zhu Yangwen, Liu Kun, et al. A study of oil recovery enhanced by polymer and phenolic resin-crosslinked polymer on heterogeneous sand packs [J]. Oilfield Chemistry, 2002, 19(1): 73-76.
- [12] 王伦雨.中低渗透油层层间非均质性对提高采收率影响[D].大庆:大庆石油学院,2006:38-46.  
Wang Lunyu. The effect of interlayer heterogeneity on enhanced oil recovery in mid-low permeability reservoir [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2006: 38-46.
- [13] 王晓超,沈思,王锦林,等.渤海S油田聚合物驱剩余油分布规律研究[J].特种油气藏,2016,23(3):102-105.  
Wang Xiaochao, Shen Si, Wang Jinlin, et al. Remaining oil distribution of polymer flooding in Bohai S Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(3): 102-105.

编辑 王星