

·油气采收率·

# 聚合物驱后井网调整与非均相复合驱 先导试验方案及矿场应用

## ——以孤岛油田中一区 Ng3 单元为例

孙焕泉<sup>1,2</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257001; 2.中国石化化学驱提高石油采收率重点实验室,山东 东营 257015)

**摘要:** 为了进一步提高聚合物驱后油藏原油采收率,提出了井网调整与非均相复合驱相结合的提高采收率方法,并在孤岛油田中一区 Ng3 单元开展了先导试验。根据试验区油藏特点,将原井网调整为变流线强波及的 135 m×150 m 行列式井网;研制了由粘弹性颗粒驱油剂 B-PPG、聚合物和表面活性剂配制而成的非均相复合驱油体系,2010 年 7 月,试验区新钻油井投产,新水井投注,于 2010 年 10 月开始注入前置调剖段塞。矿场应用效果显著:注入井平均注入压力上升了 2.6 MPa,启动压力平均上升了 2.7 MPa,霍尔阻力系数达 2.2;流线分布更均匀,驱替更均衡;试验区总产油量由 4.5 t/d 上升到 81.2 t/d,油井综合含水率下降了 18.5%,截至 2013 年 2 月,已累计增产原油 4.3×10<sup>4</sup> t,提高采收率 3.5%。

**关键词:** 井网调整 非均相复合驱 变流线强波及 提高采收率 孤岛油田

**中图分类号:** TE357.431

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2014)02-0001-04

聚合物驱作为化学驱三次采油最为成熟的技术,在中外油田得到了广泛应用。聚合物驱后油藏最终采收率可达 40%~50%,但仍有约 50% 的剩余油滞留地下,资源潜力仍较大,由于聚合物驱后油藏非均质性更强,剩余油分布更加零散<sup>[1-3]</sup>,使得常规井网调整、单一聚合物驱、单一二元复合驱等开发方法均见效甚微,难以满足进一步大幅度提高采收率的需求。为此,针对聚合物驱后油藏,首次提出了井网调整与非均相复合驱相结合的提高采收率方法。研制了由驱油剂 B-PPG<sup>[4-5]</sup>、表面活性剂和聚合物固液共存的非均相复合驱油体系,同时结合井网调整改变流线,可大幅度提高聚合物驱后油藏采收率,并在孤岛油田中一区 Ng3 聚合物驱后油藏开展了矿场先导试验,获得了显著的应用效果。

## 1 试验区概况

先导试验区位于孤岛油田中一区 Ng3 单元东南部,含油面积为 0.275 km<sup>2</sup>,石油地质储量为 123×10<sup>4</sup> t。试验区含油层系为 Ng3 砂层组,目的小层为

Ng3<sup>3</sup>, Ng3<sup>4</sup> 和 Ng3<sup>5</sup>, 为高渗透、高饱和度、中高粘度、河流相沉积的疏松砂岩亲水油藏<sup>[6]</sup>,油藏南高北低,埋藏深度浅,为 1 173~1 230 m。试验区储层物性好,胶结疏松,出砂严重,非均质性较强,有效厚度为 14.2 m,渗透率变异系数为 0.538,孔隙度为 33%,空气渗透率为 1.5×10<sup>-3</sup>~2.5×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>。地层原油粘度为 46.3 mPa·s,地层水矿化度为 5 923 mg/L,二价阳离子的质量浓度为 90 mg/L,原始地层温度为 69.5 ℃。

试验区于 1971 年 9 月投产,1974 年 9 月投入注水开发。1992 年 10 月开展了聚合物驱先导试验,1997 年 3 月转后续水驱,2005 年 12 月聚合物驱结束,提高采收率为 12.5%。实施非均相复合驱前试验区综合含水率为 98.3%,采出程度为 52.3%。

## 2 先导试验方案

### 2.1 井网调整

依据聚合物驱后油藏剩余油普遍分布、局部富集<sup>[7]</sup>的特点,考虑井网完善、流线改变等,对原行列

收稿日期:2013-12-03。

作者简介:孙焕泉,男,教授级高级工程师,博士,从事油气田开发研究与管理工。联系电话:(0546)8552265, E-mail: sunhuanquan.slyt@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),中国石化重大先导试验项目“孤岛中一区 Ng3 聚合物驱后井网调整非均相复合驱先导试验”。

式注采井网(270 m×300 m)进行了调整。在老水井间加密新油井,在老油井间加密新水井,油水井排间加密新井,隔井转注,设计注入井15口,油井10口,其中新钻井共17口,包括8口油井,9口水井,形成135 m×150 m的变流线强波及的加密井网(图1)。井网调整后,驱替压力梯度增加1~5倍,改变了原井网流线方向,原分流线变为主流线,强化了井网控制,扩大了波及体积,提高了原油采收率<sup>[8]</sup>。

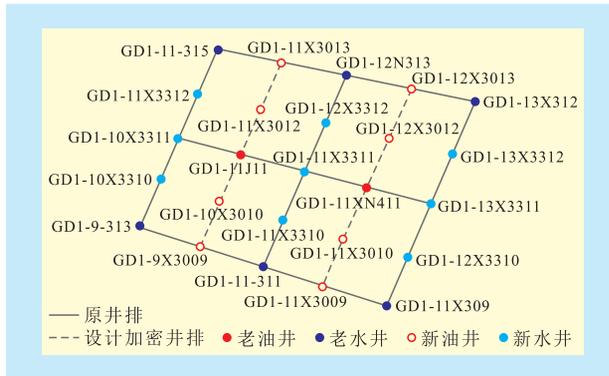


图1 试验区调整前、后井网示意

## 2.2 非均相复合驱油体系

### 2.2.1 粘弹性颗粒驱油剂B-PPG的性能

B-PPG是一种通过多点引发将丙烯酰胺、交联剂和支撑剂等聚合在一起的、具有星型或三维网络结构的新型液流向剂,在溶液中吸水溶胀变形后可通过多孔介质,具有良好的粘弹性、运移能力和耐高温抗盐性<sup>[5]</sup>。

对比聚合物与B-PPG的运移性能(图2)可知:聚合物溶液在岩心中运移能力强,压力增幅小,注入压力最高不到0.35 MPa,表明试验条件下聚合物溶液调堵能力较差;注入B-PPG后,压力明显上升,最高可达9 MPa,且在后续水驱阶段,随着B-PPG的继续运移使驱替过程持续有效,后续水驱仍可保持相对较高的注入压力,说明后续水驱岩心渗透率恢复能力较好,B-PPG具有较好的运移性能<sup>[9]</sup>。

设计渗透率分别为 $5\ 000\times 10^{-3}$ 和 $1\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的高、低渗透管岩心组合模型,以合注分采的方式

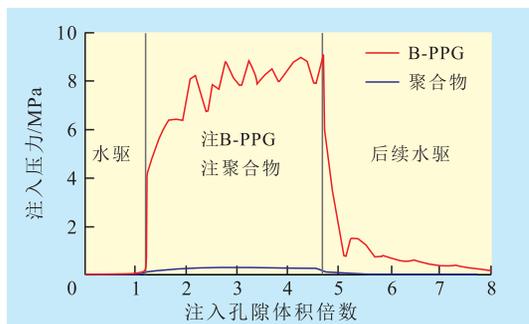


图2 粘弹性颗粒驱油剂B-PPG的运移性能

注入B-PPG,考察B-PPG对油藏非均质性的调整能力。结果(图3)表明,在B-PPG注入过程中发生了液流转向,高渗透管的分流量迅速下降,低渗透管的分流量迅速上升,并且超过了高渗透管的分流量;由于B-PPG在岩心深部的不断运移,分流量出现波动,且在后续水驱阶段,仍然持续有效。表明粘弹性颗粒驱油剂B-PPG既具有较强的调节非均质能力,又具有较好的运移性能。

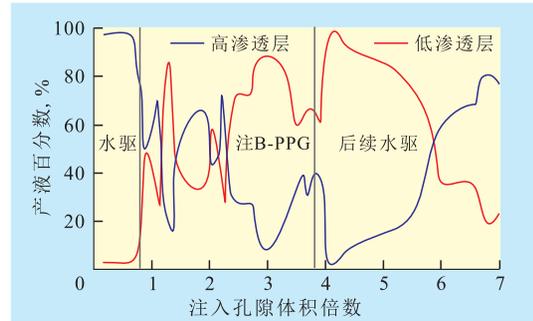


图3 粘弹性颗粒驱油剂B-PPG改善非均质性能

### 2.2.2 B-PPG、聚合物与表面活性剂的配伍性

对比单一聚合物、单一B-PPG及其复配体系的粘弹性能,考察B-PPG对体系粘弹性能的影响。结果显示,质量浓度为1 200 mg/L的单一聚合物、质量浓度为1 200 mg/L的单一B-PPG及两者复配体系的粘度分别为19.8, 5.7和34.8 mPa·s,弹性模量分别为0.04, 0.46和0.75 Pa,说明与单一体系相比,聚合物与B-PPG复配体系的表现粘度和弹性模量均大幅度增加。

在表面活性剂(石油磺酸盐和非离子表面活性剂GD-3)中加入聚合物和B-PPG后形成的非均相复合驱油体系中,油水界面张力仍然能够达到超低,但时间较长(图4),这是由于体相粘度增大,降低了表面活性剂向油水界面富集的速度造成的。

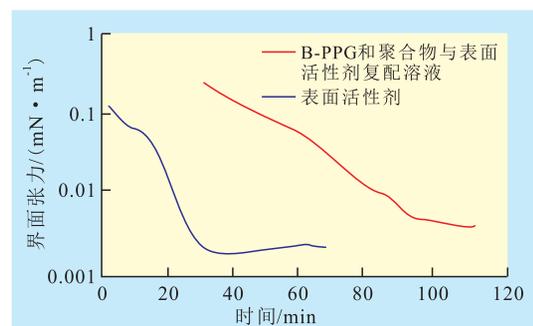


图4 B-PPG和聚合物对表面活性剂降低界面张力能力的影响

综上所述,B-PPG、聚合物与表面活性剂复配后,在保持较高洗油效率的同时,还可提高粘弹性能,增强体系的非均质调整和液流转向能力,更大

程度地发挥体系中各组分优势,从而达到大幅度提高采收率的目的。因此,研制的非均相复合驱油体系由质量浓度为1 200 mg/L的B-PPG、质量浓度1 200 mg/L的聚合物、质量分数为0.2%石油磺酸盐和0.2%的非离子表面活性剂GD-3组成。

### 2.2.3 驱油效果

利用渗透率分别为 $5\ 000\times 10^{-3}$ 和 $1\ 000\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 高、低渗透管组合的岩心模型来研究聚合物驱后油藏非均相复合驱的驱油效果。结果表明:聚合物驱后二元驱虽能提高剩余油的洗油效率,但由于波及能力不强,最终采收率为57.7%,仅比聚合物驱的采收率提高了3.9%;而非均相复合驱能够有效扩大波及体积,进入聚合物驱波及不到的剩余油富集区,最终采收率为67.4%,比聚合物驱提高采收率13.6%,说明非均相复合驱油体系能够有效改善剩余油丰富的相对低渗透区域的开发效果。

## 2.3 非均相复合驱矿场注入方案

在室内实验研究的基础上,利用数值模拟手段对驱油剂注入浓度、注入段塞尺寸及注入速度等参数进行了优化,确定孤岛油田中一区Ng3聚合物驱后油藏非均相复合驱矿场注入方案:注入速度为0.1倍孔隙体积/a,注入段塞总量为0.35倍孔隙体积,分2个段塞注入,其中前置调剖段塞注入量为0.05倍孔隙体积,聚合物和B-PPG的注入浓度均为1 500 mg/L;非均相复合驱主体段塞注入量为0.3倍孔隙体积,聚合物和B-PPG的注入浓度均为1 200 mg/L,石油磺酸盐和非离子表面活性剂GD-3的质量分数均为0.2%;聚合物、B-PPG、石油磺酸盐和非离子表面活性剂GD-3总用量分别为2 678,2 678,3 324和3 324 t。利用数值模拟对方案进行了预测,结果表明,采收率可提高8.5%。

## 3 矿场应用

2010年7月,试验区新钻油井投产,新水井投注,2010年10月开始注入前置调剖段塞,注入量为0.08倍孔隙体积,聚合物和B-PPG的平均注入浓度均为1 660 mg/L,注入液井口粘度约为60 mPa·s;2011年11月注入非均相复合驱主体段塞,聚合物和B-PPG的平均注入浓度均为1 339 mg/L,注入液井口粘度约为50 mPa·s,注入的石油磺酸盐和非离子表面活性剂GD-3的平均质量分数均为0.2%。截至2013年2月,主段塞已注入0.1倍孔隙体积,完成方案设计的34.2%。矿场注入非均相复合驱体系后,注入系统和产出系统均取得明显的应用效果。

**注入压力上升** 实施非均相复合驱后,注入井注入压力普遍上升,单井压力上升了1.1~3.7 MPa,平均注入压力由7.6 MPa升至10.2 MPa,上升了2.6 MPa。同类油藏聚合物驱后同期压力从6 MPa上升到6.8 MPa,仅上升了0.8 MPa,表明非均相复合驱注入压力升幅高于聚合物驱。

**启动压力上升** 注入井测试资料分析结果表明,启动压力明显上升,注入井GD1-11-315试验前的启动压力为5.07 MPa,试验后启动压力逐步上升,截至2012年12月,启动压力上升为8.26 MPa,上升了3.19 MPa。对比试验区5口注入井试验前后的指示曲线变化可见:试验前启动压力为2.6~6 MPa,平均为4.6 MPa,试验后启动压力为6.2~8.26 MPa,平均为7.3 MPa,平均上升了2.7 MPa。

**吸水指数下降** 分析试验区吸水指数变化,水驱时吸水指数为 $27.8\ \text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,1994年聚合物驱后吸水指数下降到 $21.6\ \text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,2008年转后续水驱后吸水指数为 $23.1\ \text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,非均相复合驱后吸水指数降至 $8.8\ \text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,与试验前相比,吸水指数下降了61.9%。

**霍尔曲线斜率发生明显变化** 霍尔曲线直线段斜率反映了地层渗流能力的变化,利用霍尔曲线可计算非均相复合驱的阻力系数。从注入井GD1-11-115的霍尔曲线来看,曲线发生了明显的转折(图5),斜率变大,表明地层的渗流能力明显下降,渗流阻力增大,计算的阻力系数平均为2.2。与同类油藏聚合物驱和二元复合驱单元对比发现,孤岛油田中一区Ng3单元聚合物驱时的阻力系数<sup>[10]</sup>为1.43,孤东油田七区西Ng5<sup>4</sup>-6<sup>1</sup>二元复合驱先导试验时的阻力系数为1.79,非均相复合驱的阻力系数明显高于聚合物驱和二元复合驱,说明非均相复合驱增加地层渗流阻力的能力更强。

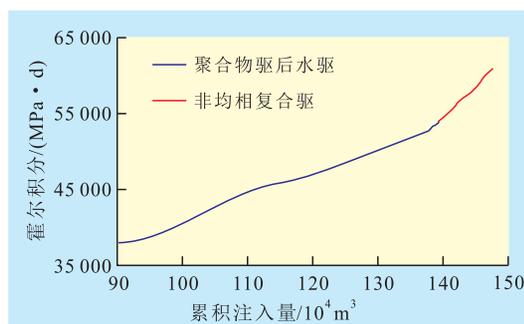


图5 注入井GD1-11-315的霍尔曲线

**平面驱替更趋均衡** 对比了2011年8月和2012年5月注入井GD1-11X3310井的示踪剂测试资料发现,实施非均相复合驱后,平面驱替更趋均

衡,新增加了GD1-11X3310井到GD1-11J11, GD1-10X3010和GD1-12-411井3个受效方向,且推进速度较大的南部外围油井(GD1-8N11和GD1-9N9井)方向得到有效封堵,平面水线分布更均衡(图6),说明非均相复合驱油体系具有较强的调堵能力。

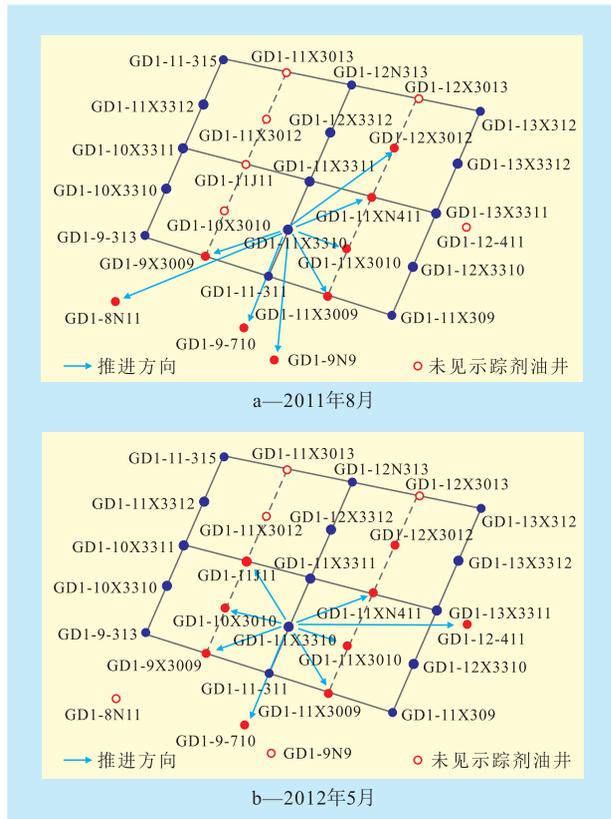


图6 注入井GD1-11X3310示踪剂水线推进方向

降水增油效果显著 截至2013年2月,试验区已有7口油井明显见效,见效率达到70%。其中GD1-12X3012和GD1-10X3010井见效最显著, GD1-12X3012井产油量由注非均相复合驱油体系前的4.7 t/d上升到37 t/d;含水率由92.2%降至30.3%,且稳定时间近1 a(图7);GD1-10X3010井产油量由4 t/d上升到23 t/d,含水率由90.9%降至30.1%。

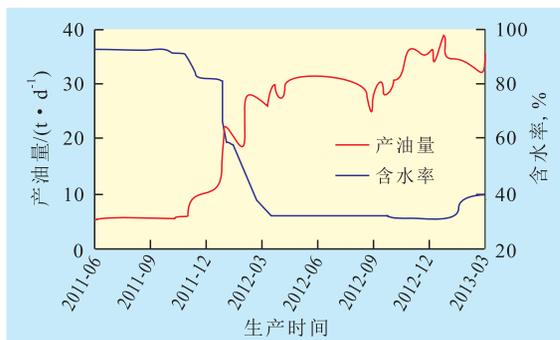


图7 GD1-12X3012井生产曲线

GD1-12X3012和GD1-10X3010井均为新油井,处于原井网的油水井间分流线,原油动用程度和驱油效率均相对较低,剩余油比较富集,井网调整后,该部位原油得到高效动用,同时非均相复合驱进一步扩大了波及体积,并提高了洗油效率。

试验区总产油量由4.5 t/d上升到81.2 t/d,增加了76.7 t/d;综合含水率由98.3%下降到79.8%,下降了18.5%。截至2013年2月,试验区已累积增产原油 $4.3 \times 10^4$  t,提高采收率3.5%。

## 4 结论

针对聚合物驱后油藏,研发了由聚合物、B-PPG和表面活性剂组成的非均相复合驱油体系,该体系比聚合物溶液具有更强的扩大波及体积和提高洗油效率的作用,驱油效果明显。室内驱油实验结果表明,该体系应用后可提高采收率13.6%。

在孤岛油田中一区Ng3单元开展聚合物驱后井网调整与非均相复合驱先导试验,矿场应用效果显著。流线发生转向,注入压力上升,渗流阻力增加,油井降水增油效果明显,说明井网调整与非均相复合驱结合提高原油采收率的方法在聚合物驱后油藏应用是行之有效的。

## 参考文献:

- [1] 李振泉. 孤岛油田中一区特高含水期聚合物驱工业化试验[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 119-121.
- [2] 姜颜波. 孤岛油田中一区聚合物驱后油层的波及状况[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(1): 66-67.
- [3] 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效果评价及驱油特征[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(6): 54-57.
- [4] 陈晓彦. 非均相驱油剂应用方法研究[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(5): 85-88.
- [5] 曹绪龙, 蒋生祥, 孙焕泉, 等. 阴离子表面活性剂与聚丙烯酰胺间的相互作用[J]. 应用化学, 2002, 19(9): 866-869.
- [6] 张本华. 曲流河储层构型中废弃河道的识别及其分布模式——以孤岛油田馆上段为例[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 18-21, 25.
- [7] 辛治国. 胜利油区密闭取心评价剩余油动态分布研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [8] 黄金山. 油田经济极限井网密度计算新方法[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 53-55, 59.
- [9] 曹绪龙. 非均相复合驱油体系设计与性能评价[J]. 石油学报: 石油加工, 2013, 29(1): 115-121.
- [10] 马世焜. 聚合物驱油实用工程方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.