

# 三元复合驱组分协同作用规律研究

刘哲宇<sup>1</sup>, 李宜强<sup>1</sup>, 王晓光<sup>2</sup>, 楼仁贵<sup>2</sup>, 余昭艳<sup>1</sup>, 田 坤<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学提高采收率研究院, 北京 102249; 2. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000)

**摘要:**三元复合驱中聚合物、碱以及表面活性剂的协同作用能够大幅提高原油采收率,各组分存在的色谱分离会使协同作用大为减弱。通过一维长岩心研究二元/三元体系各组分在线性流过程中吸附规律差异,然后制作二维平面物理模型研究三元复合驱径向流过程中各组分运移规律,判断出三者的协同作用距离,通过数值模拟以及矿场试验结果论证用变浓度多段塞代替单一段塞的可行性。研究表明:三元体系中由于碱的存在可以使超低界面张力保持距离和乳化能力强于二元体系,三元体系一维长岩心的采出程度比二元体系增加了6.32%;三元体系各组分协同作用距离集中在主流线1/2处,各组分运移距离为:聚合物>碱>表面活性剂,在后续水驱的过程中表面活性剂存在解吸附现象;使用变浓度多段塞组合注入,可以在保持相近采收率情况下减少15%的表面活性剂和4.5%的聚合物用量。

**关键词:**三元复合驱; 色谱分离; 协同距离; 乳化; 多段塞

**中图分类号:**TE 357      **文献标志码:**A

**引用格式:**刘哲宇,李宜强,王晓光,等.三元复合驱组分协同作用规律研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):118-125.

LIU Zheyu, LI Yiqiang, WANG Xiaoguang, et al. Synergy effects of different components during ASP flooding[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(6):118-125.

## Synergy effects of different components during ASP flooding

LIU Zheyu<sup>1</sup>, LI Yiqiang<sup>1</sup>, WANG Xiaoguang<sup>2</sup>, LOU Rengui<sup>2</sup>, YU Zhaoyan<sup>1</sup>, TIAN Kun<sup>1</sup>

(1. Enhanced Oil Recovery Institute in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

**Abstract:** The synergy effect of polymer, alkali and surfactant in ASP flooding can enhance oil recovery significantly. However, the synergy effect will be receded due to chromatographic separation. The differences of adsorption process in liner flow for different components in SP/ASP systems were investigated using the one-dimensional long core model. And the two-dimensional physical model was made to study the radial flow regularity of each component during ASP flood. Then, the synergy distance of three components was determined. And the feasibility of using the variable concentration multi-slug to replace the single slug was studied by the numerical simulation and the pilot result. It is found that the distance of ultra-interfacial tension and the stability of emulsion during ASP flood are better than SP flood due to the alkali. The displacement efficient of ASP flooding is 6.32% higher than that of SP flooding in one-dimensional long core flood experiments. Also, the ASP synergy distance is within the half of main streamline, and the removed distance of these components is: polymer>alkali>surfactant. The desorption can be observed when water is injected after ASP flooding. And the amount of surfactant and polymer can be greatly reduced down to 15% and 4.5% respectively by using variable concentration multi-slug in the case of keeping similar recovery.

**Keywords:** ASP flooding; chromatographic separation; synergy distance; emulsion; multi-slug

碱、活性剂以及聚合物的三元复合驱是聚合驱后重要的提高采收率手段,其设计思想是把扩大波

及体积与提高洗油效率集中于一身,通过三者间的协同作用大幅提高采收率<sup>[1-3]</sup>。其中碱与原油的石油酸类化合物发生皂化反应产生新型活性物质可以进一步降低油水界面张力,同时碱也可以起到牺牲剂的作用来降低表面活性剂吸附量<sup>[4-5]</sup>。然而由于三者岩石表面的吸附差异、离子交换作用以及不可入体积的影响,使得三元复合驱中各组分在地层运移过程中的运移速度不同,存在色谱分离现象,严重影响开发效果<sup>[6-8]</sup>。当前的研究<sup>[9-13]</sup>多数用一维模型研究三者发生色谱分离的时间或者对影响各组分色谱分离的敏感因素进行分析。笔者首先通过一维长岩心研究二元与三元体系中各组运移距离,同时用显微镜观测采出液形态,对比了二元与三元体系差异;在此基础上通过二维物理模型模拟七点井网径向流中的三元复合驱各组分运移规律,进而判断出三者间的协同作用距离;最后基于实验结果解释三元多段塞组合注入扩大三者间协同作用距离的原理,通过数值模拟效果预测以及矿场试验对三元体系中各组分监测结果论证此方法的合理性。

## 1 二元/三元复合驱线性流动中协同作用

为了较真实地模拟二元/三元体系(SP/ASP)中各组分在井网主流线上的运移差异,选择160 cm的长岩心为实验模型<sup>[14]</sup>,设置距入口60 cm和出口处2个取样点。通过取样点取样测定表面活性剂界面张力以及黏度,用酸碱滴定法测定碱浓度,进而研究二元/三元体系在线性流状态下各组分的运移规律,同时对采出液拍照观察二元/三元体系形成乳状液的差异。

### 1.1 实验材料及步骤

根据克拉玛依砾岩油藏的物性以及流体特点,选取被广泛应用于矿场试验的抗盐聚合物以及表面活性剂。其中聚合物为北京恒聚生产的KYPAM-1C抗盐型聚合物,根据其于砾岩油藏的配伍关系选择相应的相对分子质量及质量浓度<sup>[15]</sup>,相对分子质量为1000万,质量浓度低于1.5 g/L。表面活性剂为克拉玛依油田KPS石油磺酸盐表面活性剂,有效含量40%,考虑到二元与三元体系的界面张力均要达到 $1 \times 10^{-3}$  mN/m,选取活性剂的质量分数为0.3%。碱为纯度98%的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,浓度为矿场试验中采用的1.2%。实验用油采用现场脱水原油,黏度为17 mPa·s(25℃),实验过程用水为现场过滤污水,总矿化度为7.031 g/L。同时为了对比二元/

三元体系中由于碱存在照成组分运移规律以及驱油效率的差异,配制黏度相近的二元/三元体系。

聚合物/活性剂二元复合体系配方:聚合物质量浓度为1.2 g/L,表面活性剂质量分数为0.3%,体系剪前黏度为30.1 mPa·s,剪后黏度为16.8 mPa·s,界面张力为 $5 \times 10^{-3}$  mN/m。

聚合物/活性剂/碱三元复合体系配方:聚合物质量浓度为1.5 g/L,表面活性剂质量分数为0.3%,碱浓度为1.2%,体系剪前黏度为28.1 mPa·s,剪后黏度为15.1 mPa·s,界面张力为 $3 \times 10^{-3}$  mN/m。

实验步骤如下:①选取两根渗透率 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的人造长岩心(160 cm),抽真空饱和水;②饱和油制造束缚水,并放置恒温箱老化;③水驱至含水率80%;④分别注入二元/三元 $1V_p$ ( $V_p$ 为孔隙体积),间隔 $0.1V_p$ 取样检测;⑤后续水驱至含水98%,在后续水驱过程中仍然间隔 $0.1V_p$ 取样检测。

### 1.2 实验结果分析

表1为二元/三元体系驱油实验结果。可以看出,在水驱至含水80%后注入 $1V_p$ 的三元体系采出程度可以提高30.45%,注二元体系可提高24.13%,由于碱的加入使得采出程度进一步提高6.32%。在二者的界面张力均能达到 $1 \times 10^{-3}$  mN/m情况下采出程度存在明显差异,说明它们界面张力保持距离不同。

表1 二元/三元体系驱油实验结果

Table 1 Core flood experiment results of SP/ASP

化学驱体系	原始含油饱和度 $S_0/\%$	化学驱采收率 $R/\%$	化学驱提高值 $\Delta R/\%$	最终采收率 $R_{\text{总}}/\%$
二元	78.34	46.16	24.13	70.29
三元	77.91	45.52	30.45	75.97

在二元驱替过程中取样点对碱浓度检测结果(图1)表明,碱浓度随着三元体系的注入逐渐升高,距离入口60 cm处的碱浓度在 $0.25V_p$ 后增幅变缓,出口处在 $0.6V_p$ 后增幅变缓;两个取样点处的碱浓度在后续水驱过程中均有小幅上升然后下降。对界面张力检测表明,距离入口60 cm处界面张力在注入三元体系 $0.45V_p$ 后达到平稳,为 $1 \times 10^{-3}$  mN/m;此时出口处界面张力也达到了平稳,但只停留在0.10 mN/m,这并不是由于活性剂到达了出口,而是因为碱的影响使界面张力有所降低;在后续水驱过程中,距离入口60 cm处的超低界面张力可以保持 $0.15V_p$ ,之后大幅上升,出口处的界面张力开始缓慢下降,在 $0.46V_p$ 时达到最低然后升高,表明水对活性剂有一个解吸附作用,使之可以运移到出口处。

图2是对二元体系驱替过程中2个取样点界面

张力的检测,发现在距入口 60 cm 处注入二元 0.48V<sub>p</sub> 后降幅开始变缓,在后续水驱 0.26V<sub>p</sub> 会出现一个凹点;出口处全程均检测不到界面张力,后续水驱时界面张力仍会出现一个下降,但此时界面张力只降低到 0.1 mN/m。综合两个取样点处的界面张力仍可以发现水对活性剂有一定的解吸附作用。

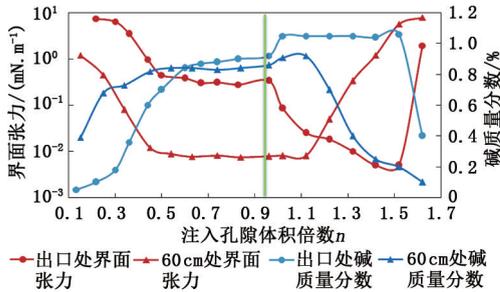


图1 三元体系中碱浓度以及界面张力随注入量的变化

Fig. 1 Changing of alkali concentration and IFT during ASP flood

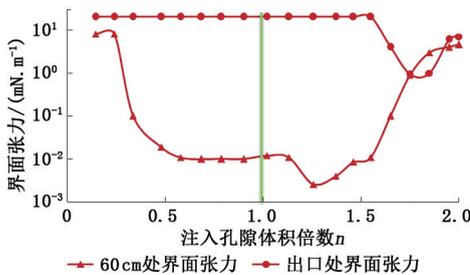


图2 二元体系中界面张力随注入量的变化  
Fig. 2 Changing of IFT during SP flood

以界面张力达到  $1 \times 10^{-3}$  mN/m、碱质量分数达到 0.7%、聚合物黏度为注入黏度 80% 做判断标准,得到 3 种组分运移到 2 个取样点时对应的注入孔隙体积倍数,结果见表 2。可以发现,三元/二元体系中均存在色谱分离现象,在线性流动过程中各组分到达检测点的时间为聚合物 < 碱 < 表面活性剂。比较二元以及三元驱替过程,发现由于有碱的存在可以使活性剂运移得更远,这是因为黏土矿物在碱性环境下带负电荷,减少了阴离子表面活性剂在其表面的吸附。同时出口处的色谱分离程度高于第一个取样点,表明可见色谱分离随着注采距离的增大而加剧,在实际矿场中,色谱分离会更加严重。

图 3 为距离入口 60 cm 处对二元/三元体系的采出液进行显微镜拍照观测,照片放大倍数为 270 倍,视野标尺均为 50 μm。可以发现,界面张力越低,形成的乳状液也越多,这是因为界面张力越低,

在相同驱替压力情况下可以更有效地拉动油膜运动而形成油滴,形成乳状液。同时三元体系的乳化能力大于二元体系,这是由于碱的存在使得附着在岩石表面的油膜更容易剥离,结合表 1 中二种体系的采出程度增幅,说明越容易乳化采出程度越高。

表 2 二元/三元体系各组分到达检测点的孔隙体积倍数

Table 2 Different comments arrived check point time during SP and ASP flood

体系	表面活性剂		碱		聚合物	
	60 cm	出口	60 cm	出口处	60 cm	出口处
二元	0.58	检测不到	—	—	0.16	0.32
三元	0.45	后水 0.36	0.25V <sub>p</sub>	0.5V <sub>p</sub>	0.17	0.35

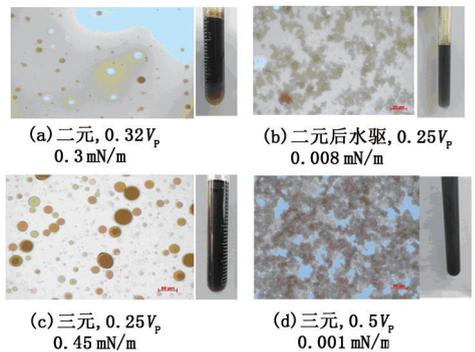


图3 距入口 60 cm 处二元/三元采出液乳化情况  
Fig. 3 Emulsion of production liquid during SP and ASP flood at first check point

## 2 三元复合驱平面径向流组分协同作用

流体在实际地层中的流动均为平面径向流,在明确线性流中各组分运移规律的基础上用二维平面模型开展了径向流物理模拟实验,进而判断三元中各组分的协同作用距离。

### 2.1 二维物理模型

使用二维平面物理模型,通过在主流线、分流线上布置取样井取样判断三元复合驱协同作用距离范围<sup>[16-17]</sup>。建立模拟七点井网的一注二采人造平面物理模型,模型的长宽高分别为 60 cm×53 cm×2.5 cm,模型渗透率为油藏的平均渗透率  $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过对颗粒类型、粒度分布特征及含量、胶结物成分及用量等参数的控制,设计和制作与实际油藏孔隙结构相似的平面物理模型,利用 X 射线衍射确定出地层中真实的黏土矿物含量,保证模型中矿物组成与地层中相同以满足化学剂的吸附相似<sup>[18]</sup>。同时间隔注入一定孔隙体积倍数对模型中的取样井

进行取样,测定碱浓度以及界面张力的变化情况,取样井位分布如图 4 所示。

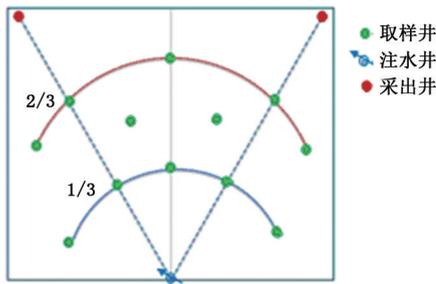


图 4 取样井井位

Fig. 4 Distribution of sampling wells

### 2.2 实验材料及步骤

实验步骤如下:①抽真空饱和水;②从模型不同角度均匀的饱和油造束缚水,并放置恒温箱老化;③水驱至含水率 95%;④先注入聚合物前置段塞  $0.05V_p$ ,再注入  $0.6V_p$  三元体系,按照要求取样检测;⑤后续水驱至含水率 98%,在后续水驱过程中仍然取样检测。

实验流程图如图 5 所示。在实验过程中注入速度为  $1 \text{ mL/min}$ ,每隔  $1 \text{ min}$  测定一次压力,每隔  $30 \text{ min}$  测定一次含油饱和度分布,注入三元复合体系  $0.2V_p$  后间隔  $0.1V_p$  利用取样井取样(每次每口井取样  $2 \sim 3 \text{ mL}$ ),后续水驱仍然间隔  $0.1V_p$  取样,直至含水率达到 98%,测定样品界面张力及碱浓度,同时在出口处测定聚合物的黏度。

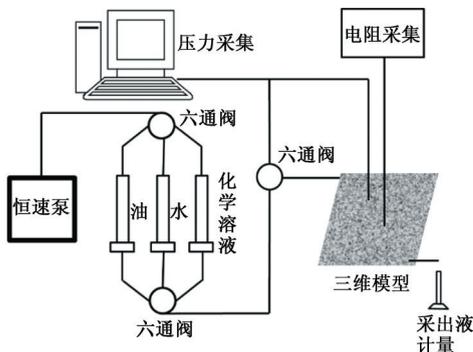


图 5 实验装置流程

Fig. 5 Schematic illustration of studying phase separate during ASP flooding

### 2.3 开采效果分析

三元复合驱开采效果:孔隙度为 26.1%,含油饱和度为 73.62%,水驱采收率为 45.02%,化学驱提高值为 18.32%,最终采收率为 63.34%。含水率、采出程度与注入压力随注入液量的变化见图 6。

从图 6 看出,水驱  $0.19V_p$  时采出端开始见水,

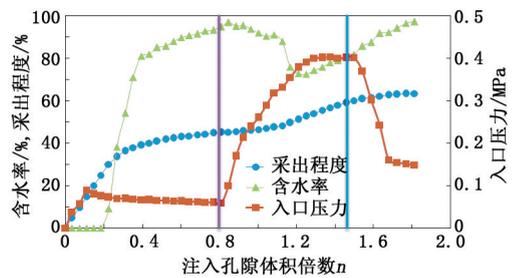


图 6 含水率、采出程度与注入压力随注入液量的变化  
Fig. 6 Variety of water cut, recovery and injection pressure with injection pore volume

之后含水率迅速上升,当含水率达到 80% 时,含水率上升速度变缓,最终当水驱  $0.81V_p$  时含水率达到 95%;注入聚合物前置段塞后,含水率并没有明显下降,但压力快速上升;注入三元体系  $0.21V_p$  时,含水率开始迅速下降,呈“U”字型变化,低含水期含水率停留在 70%,持续  $0.2V_p$  后开始缓慢上升,注三元结束时含水率达到 80%。后续水驱  $0.3V_p$  时,出口含水率达到 98%,实验结束。采收率在注入三元体系中后期开始大幅度上升,直至后续水驱前期开始变缓。

通过注入井压力变化可以看出:水驱阶段,随着水的注入两相流动区域扩大,注入压力从最高压力  $0.09 \text{ MPa}$  逐渐降低至  $0.059 \text{ MPa}$ ;聚合物前置段塞及三元复合驱阶段注入压力明显迅速增加,当采出端含水开始下降时,注入压力增幅开始变缓,直到含水率达到最低点,压力近于稳定在  $0.4 \text{ MPa}$ ;在此阶段由于三元体系的超低界面张力以及较高的黏度,油滴不断被剥离下来形成油墙启动了残余油,同时油水两相流作用以及油滴的贾敏效应增加了渗流阻力,提高洗油效率的同时也扩大了波及体积;后续水驱时,压力先迅速降低后缓慢降低,直至稳定在  $0.15 \text{ MPa}$ ,但仍高于水驱阶段的稳定压力。主要因为驱替相黏度迅速由三元体系的  $16.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  降低到水相黏度的  $0.85 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,这导致压力迅速降低,但由于主流通道仍充填着较高黏度的聚合物,短时期后压力降低开始变缓;当后续水驱  $0.2V_p$  后,注入压力趋于稳定,由于三元复合体系吸附、滞留等作用,残余阻力系数较大,高于水驱阶段的压力可以增加后续水驱的波及范围<sup>[3,19]</sup>。

### 2.4 三元体系中各组分协同距离

测定各个取样点不同时刻样品中碱的浓度以及界面张力变化情况,绘制出碱以及活性剂在模型中的运移状况分布图,如图 7 所示。可以看出,在三元复合驱结束时,碱运移到主流线的  $2/3$  处,此处碱浓

度为初始浓度的 60%, 表面活性剂运移到主流线的 1/2 处, 可以在此处检测到界面张力为  $1 \times 10^{-2}$  mN/m; 而在后续水驱结束时, 可以在出口处检测到碱浓度为初始浓度的 80%, 主流线的 2/3 处界面张力变为  $1 \times$

$10^{-2}$  mN/m。此实验表明碱在均质地层中的运移速度是大于表面活性剂的, 可以先于活性剂吸附起到牺牲剂的作用; 同时后续水驱对表面活性剂有解吸附作用, 使之随着采出水向前推进并采出。

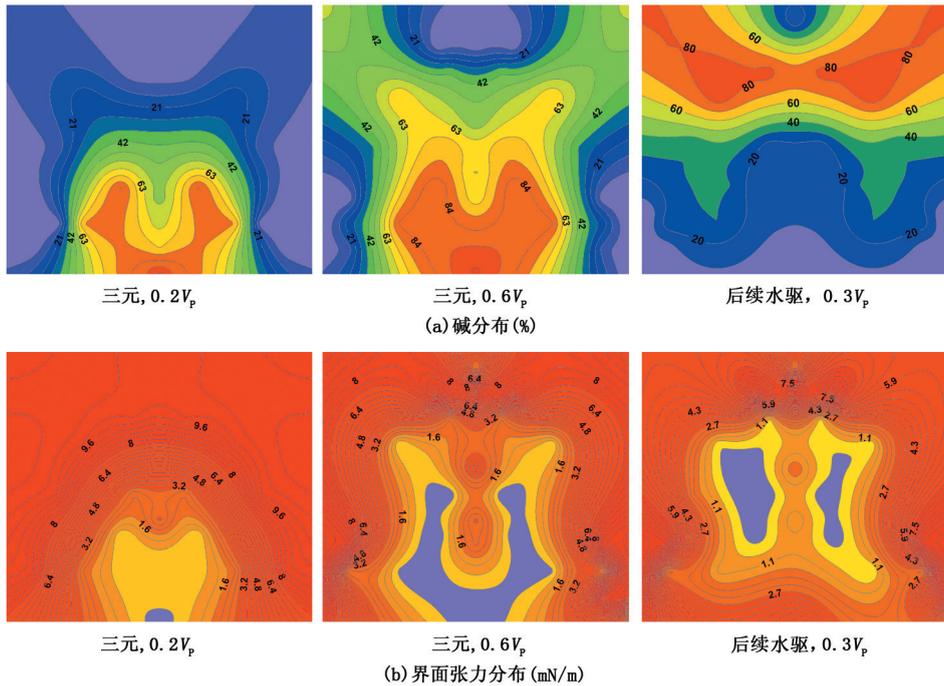


图7 三元体系中碱及表面活性剂运移分布

Fig. 7 Distribution of alkali and surfactant during ASP flooding

在出口处检测了聚合物含量变化, 见图 8。可以看出, 在注入三元 0.3V<sub>p</sub> 时聚合物就已经达到出

这样既可以达到相同的采出程度, 又可以节省三元体系的用量, 进而获得最大的经济效率。

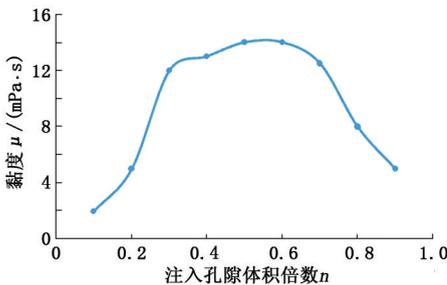


图8 出口处聚合物黏度变化

Fig. 8 Variety of polymer viscosity at production wells

口处, 在后续水驱 0.1V<sub>p</sub> 时产出液的黏度开始下降, 三元体系中各组分的运移速度为: 聚合物>碱>表面活性剂。可以推断, 当聚合物达到出口处时, 碱运移到了主流线的 1/2 处, 而表面活性剂只运移到了主流线的 1/4 处, 存在严重的色谱分离现象; 当三元结束时, 三者的协同作用只停留在主流线的 1/2 处。研究表明协同作用距离越远, 采出程度越高, 所以三元复合驱成功的关键是让碱/聚合物/活性剂的协同作用距离保持得更远。基于活性剂在地层中存在解吸附作用, 考虑用多段塞保持三者的协同作用距离,

### 3 三元复合驱多段塞的设计

#### 3.1 设计思想

基于三者协同作用最大化的思想, 考虑把三元驱替过程中单一段塞变为主段塞加副段塞的组合方式, 同时加入保护段塞。主段塞以高浓度的表面活性剂和碱为主, 碱可以剥离岩石表面油膜, 减少活性剂吸附起到快速乳化作用<sup>[20-21]</sup>; 副段塞以低浓度的活性剂和碱为主, 降低了体系中活性剂与岩石表面活性剂的浓度差, 会使得吸附与解吸附成动平衡过程, 用更少的活性剂可以达到相近的协同作用效果; 保护段塞使用聚合物溶液, 此时聚合物的注入会使吸附在近井地带的活性剂和碱发生解吸附, 随之向前移动, 在地层中形成三元体系。此种设计方法充分利用了吸附在岩石表面的活性剂和碱, 可以达到最高效的驱替效果。

#### 3.2 数值模拟优化

选取 X 区块为代表进行数值模拟研究, 此区块由 7 个井组的反七点井网构成, 包括 7 口注水井, 24

口生产井,平均渗透率  $181 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,建立了三维数值模型如图9所示。在历史拟合的基础上应用 STARS 模型根据实验及拟合情况设定相关参数,包括用聚合物的非线性混合参数、流变性、渗透率下降系数、不可入孔隙体系,以及聚合物、表面活性剂、碱的吸附量以及浓度与界面张力的关系等,进行三元复合驱方案的数值模拟效果预测<sup>[22]</sup>。

按照多段塞设计的思想,设计了15种主副段塞组合方案,包括不同尺寸的单一主段塞以及变尺寸的主、副段塞组合。其中三元主段塞:0.3%石油磺酸盐,1.2%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液,聚合物质量浓度为1.5 g/L,体系黏度为16 mPa·s,界面张力为  $1 \times 10^{-3}$  mN/m;副

段塞:0.1%石油磺酸盐,1.0%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液,聚合物质量浓度为1.2 g/L,体系黏度为12 mPa·s,界面张力为  $1 \times 10^{-2}$  mN/m。各方案的三元复合驱提高采收率值如表3所示。

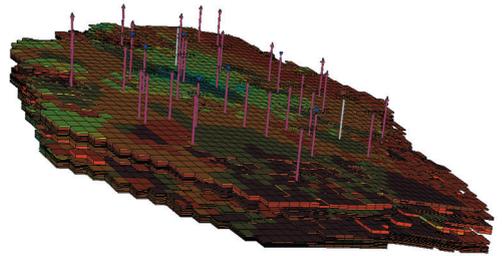


图9 X区块三维数值模型

Fig. 9 Three dimensional numerical model for X block

表3 三元驱多段塞设计方案及对应的采收率

Table 3 Design plans and recoveries of different ASP flooding slugs

段塞总尺寸	方案	单一尺寸段塞		方案	主副段塞组合(一)			方案	主副段塞组合(二)		
		尺寸	提高率/%		主段塞	副段塞	提高率/%		主段塞	副段塞	提高率/%
0.30V <sub>p</sub>	1	0.30V <sub>p</sub>	13.66	7	0.20V <sub>p</sub>	—	12.36	—	—	—	
0.35V <sub>p</sub>	2	0.35V <sub>p</sub>	14.63	8	0.25V <sub>p</sub>	—	14.45	2	0V <sub>p</sub>	14.63	
0.40V <sub>p</sub>	3	0.40V <sub>p</sub>	15.54	9	0.30V <sub>p</sub>	0.1V <sub>p</sub>	15.33	13	0.35V <sub>p</sub>	0.05V <sub>p</sub>	15.51
0.45V <sub>p</sub>	4	0.45V <sub>p</sub>	16.51	10	0.35V <sub>p</sub>		16.25	10		0.10V <sub>p</sub>	16.25
0.50V <sub>p</sub>	5	0.50V <sub>p</sub>	16.82	11	0.40V <sub>p</sub>		16.79	14		0.15V <sub>p</sub>	16.66
0.55V <sub>p</sub>	6	0.55V <sub>p</sub>	17.23	12	0.45V <sub>p</sub>		17.17	15		0.20V <sub>p</sub>	16.11

从表4中看出,三元总段塞尺寸为0.45V<sub>p</sub>时的方案10经济效果最好,大于此段塞尺寸采收率增幅变缓。同时使用主副段塞的组合在减少三者用量的情况下并没有明显降低采收率,这是因为在注三元后期近井地带吸附了大量的活性剂,使用低浓度的副段塞可以使之发生解吸附作用,同时由于体系中含有了表面活性剂,也不会因为浓度差异过大导致解吸附作用瞬间完成。这种方法可达到和高浓单一一段塞相同的协同作用距离。

在确定主副段塞组合的情况下研究了保护段塞对采出程度的影响,设计4种聚合物后置保护段塞尺寸,各方案的采出程度如图10所示。可以看出当聚合物后置段塞尺寸超过0.1V<sub>p</sub>时采出程度增幅变缓。后置段塞可以避免水快速冲散前端的高黏度三元体系,使得协同作用在三元结束后仍可以保持一定范围。

综上所述,基于三元体系的吸附与解吸附作用及不同组分协同作用距离最大化的考虑,用三元体系主副段塞组合代替单一高浓度段塞,同时设置聚合物后置保护段塞,可在节省15%表面活性剂用量、4.5%聚合物用量的情况下,仍能保持相近的采

收率。

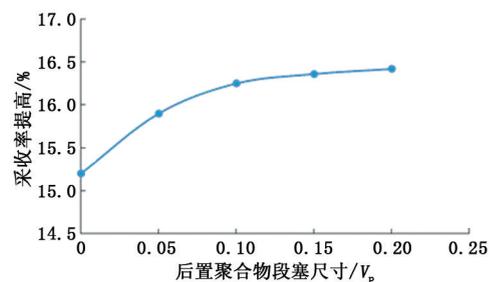


图10 不同尺寸后置段塞对应的采收率

Fig. 10 Recovery of different post slug during ASP flooding

### 3.3 矿场试验效果分析

Y区块试验井组为150 m井距,五点法开发,应用此种多段塞组合方式进行三元复合驱矿场试验,试验结束后中心井采出程度提高了21.6%;在注入主段塞0.35V<sub>p</sub>后采出井的活性剂质量浓度为73 mg/L,继续注入副段塞0.2V<sub>p</sub>后活性剂质量浓度变为69 mg/L,在后续段塞结束后活性剂质量浓度为40 mg/L,可见多段塞组合的方式可以保持活性剂一个稳定的分布状态,从矿场监测结果可知活性剂在地层中的吸附量仍然大于聚合物和碱。

## 4 结 论

(1)采出程度与协同作用距离密切相关,由于碱的存在三元中组分的协同作用距离大于二元体系,乳化情况好于二元。

(2)三元体系中各组分运移距离为:聚合物>碱>表面活性剂,其中注三元体系 $0.6V_p$ 后碱运移到主流线 $2/3$ 处,表面活性剂运移到主流线 $1/2$ 处,协同作用距离集中在主流线 $1/2$ 处。

(3)使用变浓度多段塞组合注入,可以在保持相近采收率情况下大幅减少表面活性剂和聚合物的用量。

### 参考文献:

[1] BAVIERE M, GLENAT P, PLAZANET V, et al. Improved EOR by use of chemicals in combination [R]. SPE 27821, 1995.

[2] JAMES J S. A comprehensive review of alkaline-surfactant-polymer (ASP) flooding [R]. SPE 165358, 2013.

[3] LAKE L W. Enhanced oil recovery [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1989.

[4] 绳德强,杨普华,刘彦丽. 碱/聚合物相互作用与碱+聚合物/原油界面张力研究[J]. 油田化学, 1993, 10(1):46-50,61.  
SHENG Deqiang, YANG Puhua, LIU YanLi. Alkaline and polymer interactions in relation to interfacial tensions between alkaline/polymer solution and crude oil [J]. Oilfield Chemistry, 1993, 10(1):46-50,61.

[5] HARWELL J H, HELFFERICH F G, SCHECHTER R S. Effects of mixedmicelle formation on the chromatographic movement of surfactantmixtures [J]. Application Technology Chem, 1982, 28(3):448-459.

[6] ZHU Youyi, HOU Qingfeng, YUAN Hong, et al. Synthesis and properties of petroleum sulfonates for weak alkali ASP/alkali-free SP combination flooding [R]. SPE 133419, 2010.

[7] TROGUS F J, SCHECHTER R S, POPE G A, et al. Adsorption of mixed surfactant systems [R]. SPE 6845, 1979.

[8] 王红艳,叶仲斌,张继超,等. 复合化学驱体系吸附滞留与色谱分离研究[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(2):64-66.  
WANG Hongyan, YE Zhongbin, ZHANG Jicao, et al. Study of adsorption and chromatographic separation of flooding system of Shengli petroleum sulfonate [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(2):64-66.

[9] 郭英,刘卫东,孙灵辉,等. 新疆砾岩油藏三元复合驱色谱分离现象研究[J]. 油田化学, 2008, 25(4):362-365.  
GUO Ying, LIU Weidong, SUN Linghui, et al. Chromatographic separation of components of ASP flooding system for conglomerate reservoir in Xinjiang oil fields [J]. Oilfield Chemistry, 2008, 25(4):362-365.

[10] 高振环,王克亮,徐典平,等. 三元复合驱油体系的色谱分离机制及其研究方法[J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(1):76-78.  
GAO Zhenhuan, WANG Keliang, XU Dianping, et al. Mechanism and research method of chromatographic separation of surfactant/alkaline/polymer flooding [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(1):76-78.

[11] 王克亮,田同辉,宋合龙,等. 填砂管模型上三元复合驱油体系的色谱分离实验研究[J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(1):79-80.  
WANG Keliang, TIAN Tonghui, SONG Helong, et al. Experimental study of chromatographic separation of surfactant/alkaline/polymer flooding in porous media [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(1):79-80.

[12] 王克亮,闫文华,王天凤,等. 渗透率对三元复合体系色谱分离及驱油效果影响的实验研究[J]. 油田化学, 2000, 17(2):164-167.  
WANG Keliang, YAN Wenhua, WANG Tianfeng, et al. Chromatographic separation of components in ASP flooding system and its oil displacing efficiency in relation to core permeability [J]. Oilfield Chemistry, 2000, 17(2):164-167.

[13] 郝宏达,侯吉瑞,赵凤兰,等. ASP体系在大庆二类油层中的色谱分离现象及其对采收率的影响[J]. 油田化学, 2015, 32(1):119-122.  
HAO Hongda, HOU Jirui, ZHAO Fenglan, et al. Chromatographic separation of ASP system and its effect on recovery in Daqing second-class oil layer [J]. Oilfield Chemistry, 2015, 32(1):119-122.

[14] 杨长春,岳湘安,张立娟,等. 尺度效应对三元复合驱色谱分离的影响[J]. 日用化学工业, 2015, 45(7):375-380.  
YANG Changchun, YUE Xiang'an, ZHANG Lijuan, et al. Effect of length scale on chromatographic separation of alkali-surfactant-polymer flooding [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2015, 45(7):375-380.

[15] 朱怀江,刘强,沈平平,等. 聚合物分子尺寸与油藏孔隙的配伍性[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5):609-613.

- ZHU Huaijiang, LIU Qiang, SHEN Pingping, et al. Compatibility between polymer molecular size and pore throat in reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(5): 609-613.
- [16] 王家禄,沈平平,陈永忠,等. 三元复合驱提高原油采收率的三维物理模拟研究[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 61-66.
- WANG Jialu, SHEN Pingping, CHEN Yongzhong, et al. 3-D physical modeling of enhanced oil recovery by alkali-surfactant-polymer flooding [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 61-66.
- [17] 王家禄,沈平平. 饱和度测量方法及测量探头: 1123944 [P]. 2001-08-17.
- [18] 李宜强,李彦阅,王付勇,等. 一种人造砾岩岩心、制备方法及其用途: 103910514 [P]. 2014-03-25.
- [19] LIU Q, DONG M, ZHOU W, et al. Improved oil recovery by adsorption-desorption in chemical flooding [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 41(1/2): 75-86.
- [20] 朱友益,侯庆锋,简国庆,等. 化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 90-96.
- ZHU Youyi, HOU Qingfeng, JIAN Guoqing, et al. Current development and application of chemical combination flooding technique [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(1): 90-96.
- [21] 赵凤兰,岳湘安,侯吉瑞,等. 碱对复合驱油体系与原油乳化作用的影响[J]. *石油钻探技术*, 2010, 38(2): 62-66.
- ZHAO Fenglan, YUE Xiang'an, HOU Jirui, et al. Impact of alkali on emulsification of compound flooding system and crude oil [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(2): 62-66.
- [22] AMITABH P, DENNIS B, DOUGLAS W, et al. Design of an ASP pilot for the Mangala field: laboratory evaluations and simulation studies [R]. SPE 113131. 2008.

(编辑 刘为清)