

文章编号: 1000-0747(2018)02-0305-07 DOI: 10.11698/PED.2018.02.13

三元复合驱靶向输送提高采收率技术

吴凡^{1,2,3,4}, 侯吉瑞^{1,2,3}, 汪志明¹, 马云飞^{1,2,3}, 王东营¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京 102249; 3. 中国石油三次采油重点实验室低渗油田提高采收率应用基础理论研究室, 北京 102249; 4. 教育部油田开发重点实验室, 北京 102249)

基金项目: 国家自然科学基金项目“ASP复合驱油藏油水界面张力变化规律及残余油启动机制研究”(51174216);

国家科技重大专项“油田开采后期提高采收率技术”(2011ZX05009-004)

摘要: 针对三元复合驱在注入井近井地带的损耗问题, 提出了将高压水射流钻超短半径径向水平井与三元复合驱相结合的靶向输送提高采收率技术, 利用水平井作为“靶向通道”, 将三元复合体系直接输送至剩余油富集区, 避免了三元复合体系在注入井近井地带的损耗。平板均质模型室内实验与数值模拟参数优化研究证实, 该技术可显著扩大波及效率, 改善驱油效果, 大幅度提高原油采收率; 靶向输送技术最佳驱替参数组合为: 直角靶向输送, 通道长度约为井距的15%, 三元复合体系段塞注入量为0.4倍孔隙体积; 三元复合驱靶向输送技术在合理参数下, 相对于水驱可提高采收率48.87%, 相对于常规三元复合驱可提高采收率22.04%。靶向输送技术解决了三元复合驱近井地带化学剂的高损耗问题, 同时弥补了三元复合驱成本高、应用受限的缺陷, 具有广阔的应用前景。图8表2参16

关键词: 三元复合驱; 靶向输送; 平板模型; 参数优化; 提高采收率

中图分类号: TE357.463

文献标识码: A

An enhanced oil recovery technique by targeted delivery ASP flooding

WU Fan^{1,2,3,4}, HOU Jirui^{2,3,4}, WANG Zhiming¹, MA Yunfei^{1,2,3}, WANG Dongying¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Enhanced Oil Recovery Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, PetroChina, Beijing 102249, China; 4. Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education, Beijing 102249, China)

Abstract: Aiming at the problem of the loss of the ASP flooding near the injection wells, this paper gives a new idea to enhance oil recovery called “Technique of Targeted Delivery”, which combines the radial horizontal well with ultra-short radius drilled by high pressure water jet with the ASP flooding, the horizontal wells work as the “Target channel” transport the ternary composite system to the remaining oil enrichment area directly, to avoid the loss of the ternary composite system near the injection wells. The plate homogeneous experiment and numerical simulation show that the technique can significantly improve the sweep efficiency and the effect of the oil displacement, and greatly improve the oil recovery rate. The optimal flooding parameters of the target transport technique are: the right angle target, the length of the channel is about 15% of the well distance and the injection volume of the ternary composite system is 0.4 PV. Under such conditions, this technique can enhance recovery by 48.87% and 22.04% respectively, compared with the water flooding and conventional ASP flooding. The target transport technique solves the problem of high loss of chemical agent in near-wellbore area during the ASP flooding, and compensates for the high cost of ASP flooding and the limitation of application, and has a broad application prospect.

Key words: ASP flooding; targeted delivery; plate model; parameter optimization; enhanced oil recovery

引用: 吴凡, 侯吉瑞, 汪志明, 等. 三元复合驱靶向输送提高采收率技术[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 305-311.

WU Fan, HOU Jirui, WANG Zhiming, et al. An enhanced oil recovery technique by targeted delivery ASP flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 305-311.

0 引言

三元复合驱作为三次采油技术可以大幅度提高原油采收率^[1-4], 但是三元复合体系在地层中的损耗问题一直是制约三元复合驱发展的瓶颈之一, 特别是在注入井附近, 水驱之后近井地带冲刷充分, 含水饱和度

较高, 此时注入三元复合体系会造成严重的损耗, 极大影响三元复合体系提高采收率的性能。国内外在三元复合体系的损耗方面做了大量研究^[5-6], 认为三元复合体系在油层中渗流传质的影响因素主要包括物理及化学吸附、机械捕集、剪切降解、色谱分离、扩散弥散等。刘刚等^[7]的研究表明, 三元复合体系在二类油层

中驱替时各组分损失严重,表面活性剂在运移距离的前 20% 损失率达到 80%,碱与聚合物的损失率也达到 23% 和 12%。目前降低复合体系损耗的方法主要是在注入主段塞前注入前置预冲洗段塞以及在主段塞中直接加牺牲剂,但这两种方法并不能有效降低三元复合体系的损失,特别是在近井地带的损失,而且成本较高。因此,如何降低注入井附近三元复合体系的损耗,提高三元复合驱的驱油效率成为急需解决的技术难题。

近年来随着油田的深入开发、老油田的挖潜,利用高压水射流破岩作用的水力喷射径向钻孔技术越来越成熟。2007 年,在刘家区煤矿采用水力喷射径向水平井技术完钻了直径大于 50.8 mm、长度 100 m 的多个水平井眼^[8];2011 年,在埃及 Belayim 油田 1 号井的两个层位完钻了 5 个长 50 m 和 1 个长 90 m 的径向水平段^[9];2012 年,在延长油田的 M 井,成功完钻多个长度 100 m 的径向水平段^[10]。

为提高三元复合体系的利用效率,将高压水力喷射径向钻水平井技术与三元复合驱结合起来,提出一种靶向输送三元复合体系的注入方式,即在水驱后利用高压水射流技术^[11-14],以富集油的区域为目标靶位,从注入井到目标靶位钻出超短半径径向水平井作为靶向通道,三元复合体系经过靶向通道被直接输送至富集油的区域,以达到减少三元复合体系在注入井附近损耗的问题,充分发挥三元复合体系的利用效率,提高采收率。为优选出最佳驱替方案,利用平板均质岩心模型,开展相关的驱替物理模拟实验,并结合数值模拟技术优化驱替参数。

1 三元复合驱靶向输送实验设计

1.1 实验材料

①碱(NaOH):分析纯;②表面活性剂:烷基苯磺酸钠类混合物,有效含量 50%;③聚合物:相对分子质量 $2\ 400\times 10^4\sim 2\ 600\times 10^4$,平均 $2\ 500\times 10^4$,有效固含量 90%,水解度 22%;④实验用水:模拟大庆油田地层水,矿化度 6 778 mg/L(其中 KCl:20 mg/L, NaCl:3 488 mg/L, Na_2SO_4 :114 mg/L, $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$:564 mg/L, CaCl_2 :64 mg/L, NaHCO_3 :2 828 mg/L);⑤实验用油:大庆采油二厂脱气脱水原油与航空煤油配制,模拟油黏度 $7.9\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ (使用布氏黏度计在 $45\ ^\circ\text{C}$ 下,以 7.34 r/s 测定);⑥三元复合体系:用模拟地层水配制浓度 1 500 mg/L 聚合物溶液,然后分别加入

1.2% 碱(NaOH)和 0.3%(有效质量分数)表面活性剂,得到三元复合驱油体系。该三元复合驱油体系的表观黏度为 $36.8\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ (测定方法同材料⑤),三元复合体系在 $45\ ^\circ\text{C}$ 下与所配制的模拟油之间的界面张力为 $2.05\times 10^{-3}\ \text{mN/m}$;⑦平板岩心模型(见图 1):均质浇筑,其上分布注入井、采出井、电极对及饱和油水井(岩心饱和油、水时使用)。电极对用于测试电阻计算含油饱和度,绘制含油饱和度分布图。模型尺寸 $50\ \text{cm}\times 50\ \text{cm}\times 3\ \text{cm}$,渗透率 $500\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。

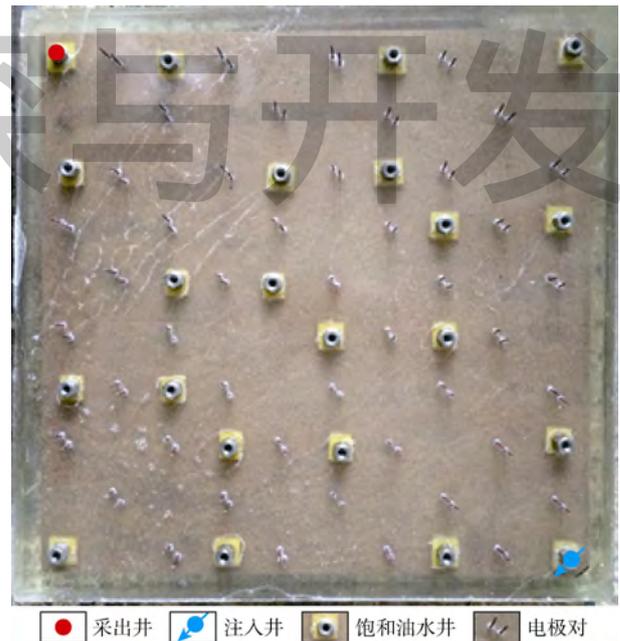


图 1 实验平板模型

1.2 实验仪器

驱替实验仪器包括 HDH-100C 型高温高压恒速泵、静音空气泵、HW-II 型恒温箱、高压中间容器、电阻测试装置、SVT20N 型旋转滴界面张力仪、DV-II+Pro 型 Brookfield 黏度计、量筒等。

1.3 实验步骤

为便于靶向通道的设置,平板模型注采方式为四分之一五点井网的一注一采方式。受模型及实验条件的限制,实验中采用钻孔方式替代水射流过程来设置靶向通道,其长度 25 cm、直径 3 mm。

实验步骤:①模型抽真空、饱和水;②饱和油、老化;③水驱油至出口含水率 98%,计算水驱采收率;④常规三元复合驱替,水驱后直接注入 0.3 倍孔隙体积三元复合体系,继续水驱至含水 98%;⑤重复①—③步后测试平板模型各部分的电阻,计算含油饱和度,绘制含油饱和度分布图;⑥根据含油饱和度分布确定

目标靶位；⑦钻靶向通道（直角或对角），由靶向通道注入 0.3 倍孔隙体积三元复合体系，继续水驱至含水 98%，计算总采收率；⑧绘制后续水驱结束后含油饱和度分布图，与常规驱替进行对比分析。

1.4 靶位确定方法

确定目标靶位就是找出水驱后剩余油富集的区域，电阻法测电阻的方式可以计算平板模型中含油饱和度，绘制出水驱后的含油饱和度分布图，从而确定目标靶位。

通常地层水电阻率较低，原油电阻率无穷大（ $1 \times 10^{16} \sim 10 \times 10^{16} \Omega \cdot m$ ），岩石电性可以反应出含水饱和度的变化。测量计算平板模型各部分的电阻率，由阿尔奇公式计算出含水饱和度^[15-16]：

$$I_R = \frac{R_t}{R_w} = \frac{b}{S_w^n} \quad (1)$$

式中 b ——系数，无因次； I_R ——电阻率比值，无因次； n ——饱和度指数，无因次； R_t ——含油电阻率（实测电阻率）， $\Omega \cdot m$ ； R_w ——完全含水电阻率， $\Omega \cdot m$ ； S_w ——含水饱和度，%。 b 和 n 的值可由岩心驱替实验确定。

平板模型系统中，饱和用模拟地层水电极对间电阻在 $1 \times 10^3 \Omega$ 数量级，水中加入三元复合体系后溶液电阻值比原模拟地层水有所降低，为 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3 \Omega$ 数量级，饱和原油后电阻达到 $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7 \Omega$ 数量级。可以看出，驱替用模拟地层水、三元复合体系溶液、原油电阻值差异显著，因此驱替过程中可以通过测试电阻的方法来计算油水饱和度分布。

图 2 为水驱后含油饱和度分布图，可以看出，水驱过后注入井和采出井对角线上为明显的渗流通道，其含油饱和度下降明显。注入井和采出井连线的垂直方向由于波及效率和驱油效率较低，剩余油较多，该区即为目标靶位。为验证不同靶向通道下的三元复合驱效果，特设计直角靶向通道与对角靶向通道（见图 3a、图 3b），开展三元复合驱靶向输送对比实验。

2 靶向输送三元复合驱效果

表 1 为相同条件下常规与靶向三元复合驱实验结果，可看出水驱采收率相差不大，模型可重复性较好；三元复合驱阶段，相对于水驱，常规三元复合体系注入方式采收率提高 19.47%；而靶向输送注入方式提高采收率幅度明显高于常规注入方式，对角靶向注入方式比水驱采收率提高 29.24%，比常规三元复合体系注入方式采收率提高 9.77%；直角靶向注入方式采收率提

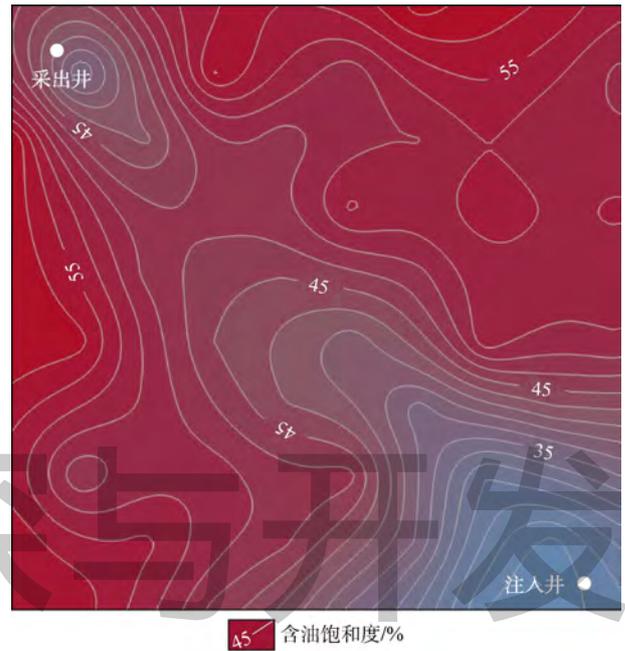


图 2 平板模型水驱后含油饱和度分布

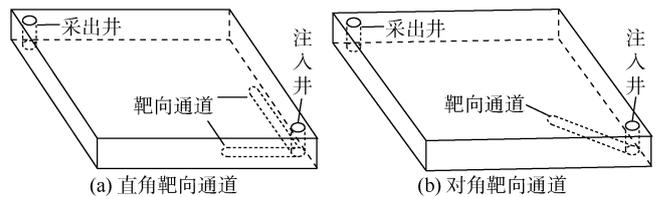


图 3 靶位及靶向通道设计示意图

表 1 常规与靶向输送三元复合驱实验结果

实验方案	注入方式	注入孔隙体积倍数	水驱采收率/%	三元复合驱采收率提高值/%	总采收率/%
1	常规	0.3	34.04	19.47	53.51
2	对角靶向	0.3	32.08	29.24	61.32
3	直角靶向	0.3	35.47	35.02	70.49

高幅度最大，比水驱提高 35.02%，比常规三元复合体系注入方式提高 15.55%，这主要是直角靶向三元复合驱波及面积更大，波及效率更高。

根据实时监测的电阻，分别计算出常规注入、对角靶向注入、直角靶向注入三元复合体系结束后后续水驱结束后的含油饱和度，并绘制出含油饱和度分布图（见图 4、图 5）。由图 4a 可见，注入井到采出井有明显的渗流通道，该通道上驱替效率较高，但整体波及效果较差；常规注入三元复合体系后续水驱结束后，图 5a 与图 4a 相比，渗流通道上冲刷更为充分，但波及面积变化不大，因而采收率提高幅度有限。

图 4b、图 4c 分别为对角靶向和直角靶向三元复合驱结束时含油饱和度分布，与常规注入方式相比，注入井与采出井连线上驱替效果有所降低，但波及面积

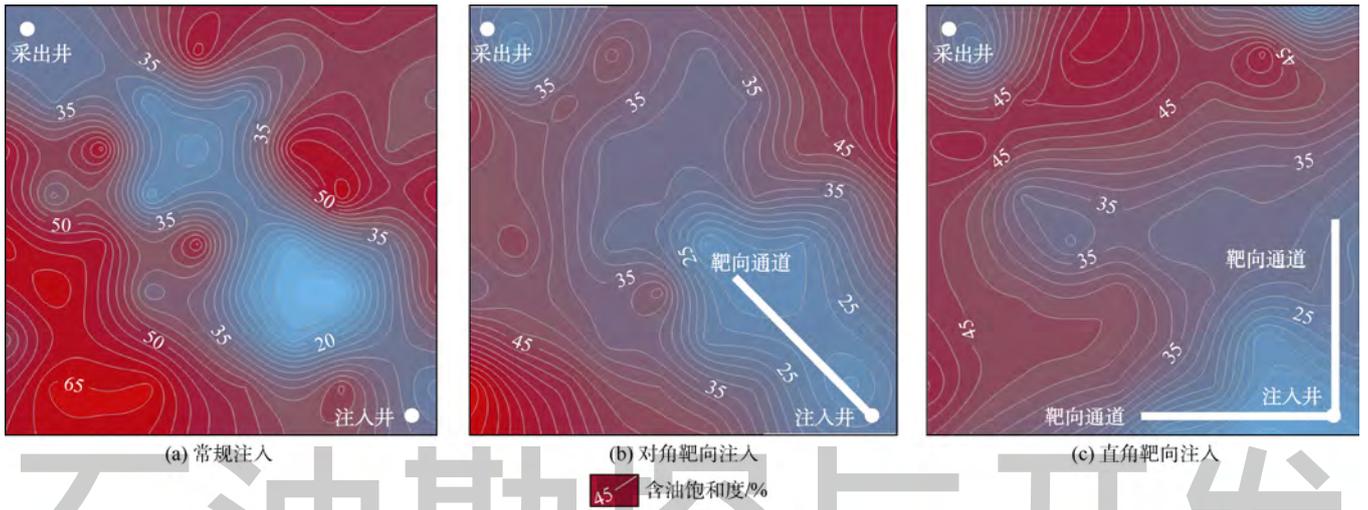


图4 三元复合驱结束后含油饱和度分布

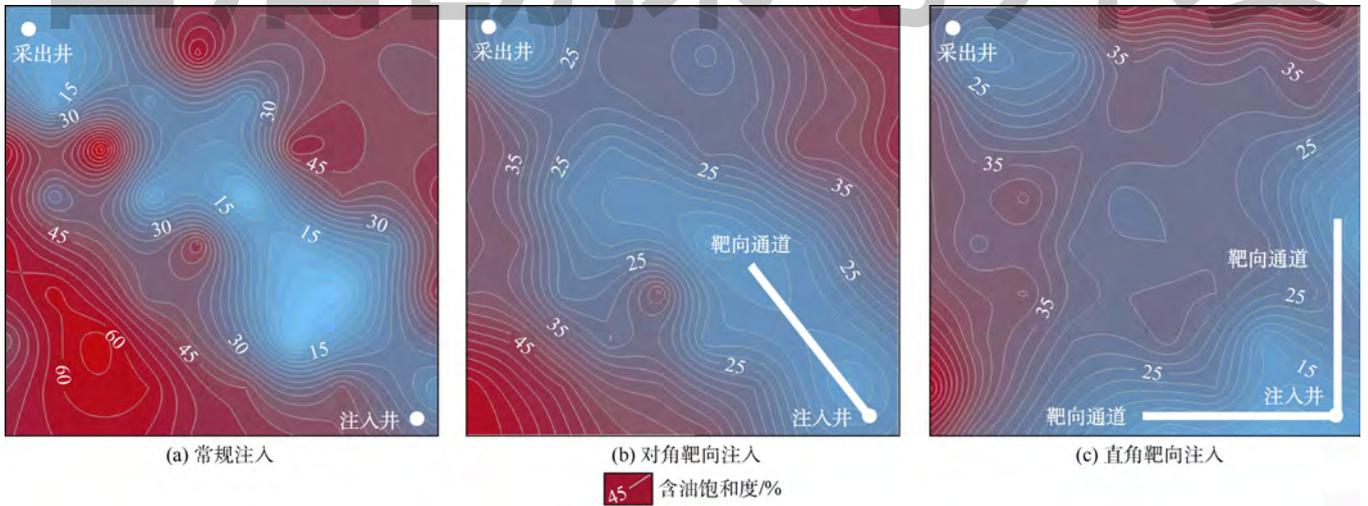


图5 后续水驱结束后含油饱和度分布

显著增大，直角靶向波及效率优于对角靶向。

图 5b、图 5c 分别为对角靶向和直角靶向后续水驱结束后含油饱和度分布，可以看出，靶向三元复合驱增大了波及面积，提高了驱替效率。沿靶向方位驱替效率更高，直角靶向优于对角靶向，因此，直角靶向三元复合驱在后续水驱阶段提高采收率程度最高，对角靶向三元复合驱次之，常规三元复合驱最低。

3 靶向输送三元复合驱动态特征

图 6 为常规、对角靶向和直角靶向三元复合驱的含水率、采出程度和注入压力随注入量变化关系曲线。

分析图 6a，可得 3 点认识：①经过一段时间的三元复合驱后，随着三元复合体系向模型深处运移，各注入方式下含水率均开始下降。常规注入方式下三元复合体系沿之前的渗流通道运移，而靶向注入方式下

三元复合体系沿靶向通道快速到达剩余油富集区域，因此靶向注入方式下含水率下降更快，且两种靶向注入方式下含水率下降曲线基本一致。②常规三元复合驱含水率最低降至 35%左右，最低含水率维持时间较短；靶向三元复合驱含水率最低为 20%左右，最低含水率维持时间较长。③含水率到达最低点后，常规注入方式下含水率迅速上升，很快达到 98%并逐渐趋于平稳；靶向注入方式含水率上升相对缓慢平稳，因直角靶向注入方式下波及面积更大，波及效率更高，置换出更多的剩余油，因此，后续水驱阶段含水率上升速度与幅度均小于对角靶向注入方式，直角靶向注入方式洗油、控水效果更明显。

图 6b 显示，水驱结束后 3 个模型采收率基本一致。①三元复合驱阶段，靶向注入方式采出程度上升率与上升幅度要优于常规注入方式。②后续水驱阶段，常

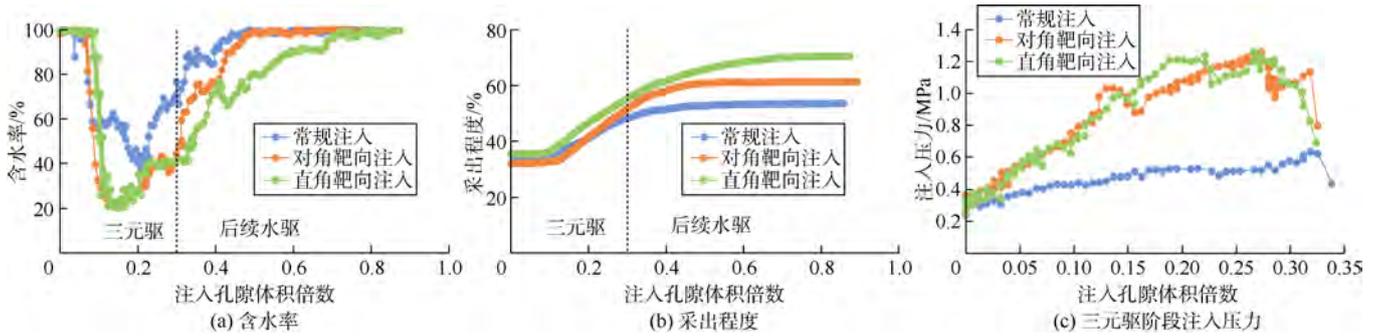


图6 不同动态参数随注入量变化关系曲线

规注入三元复合驱采出程度变化趋于平稳, 最终采出程度为 53.51%; 对角靶向驱替方式采出程度仍有一定程度上升后趋于平稳, 最终采收率 61.32%; 直角靶向驱替采收率有较大上升, 比对角靶向驱替高出 5.78%, 最终采收率达 70.49%。靶向输送注入方式波及效率更高, 驱油效果更好, 且直角靶向注入方式更优。

图 6c 为不同注入方式三元复合驱阶段注入压力随注入量的变化情况, 水驱结束后各注入方式下注入压力基本一致。三元复合驱阶段, 对于常规注入, 随着三元复合体系前缘不断运移, 到达一定深度之后体系的增黏效果显现出来, 压力不断上升至 0.65 MPa 左右, 注入量达 0.32 倍孔隙体积后压力开始下降。靶向注入方式在三元复合驱开始后压力上升更为明显, 这是由于常规三元复合驱方式下, 近井地带剩余油较少, 三元复合体系经过近井地带时因吸附滞留化学反应等作用, 有很大的消耗; 而靶向输送经过靶向通道使得三元复合体系的性能在到达剩余油富集区之前能够更多地保留, 体系黏度更高, 所以注入压力上升更快。对角靶向与直角靶向注入压力最终上升至 1.30 MPa 左右, 注入压力越高, 在相同距离内则压力梯度更高, 驱油效果更好。

4 靶向输送参数优化

采用 CMG 数值模拟软件模拟平板模型径向流三元复合驱, 研究不同靶向通道长度、三元复合体系注入量、靶向通道方位条件下的驱替效果变化, 优选最佳的靶向驱替方案。

数值模型基本参数与实际物理模型一致, 模型网格数为 $50 \times 50 \times 1$, 平面上网格步长为 1 cm, 因模型均质, 故纵向上划分为一层, 网格步长为 3 cm, 共 2 500 个网格, 渗透率 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4.1 靶向通道长度优化

为确定最佳的靶向通道长度, 设计模拟驱替过程

与物理模拟实验过程一致, 即先水驱至含水 98%, 然后打通靶向通道, 从通道注入 0.3 倍孔隙体积三元复合体系 (0.3% 表面活性剂+1.2% 碱+1 500 mg/L 聚合物), 最后再水驱至含水 98%, 驱替过程结束。

模拟计算水驱至含水 98% 时, 采收率为 34.59%, 水驱结束后, 保证其他条件不变, 将通道长度分别设置为 4, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35 cm, 模拟计算各三元复合驱方式下的采收率, 结果见图 7。图中靶向通道长度为 0 时即为常规三元复合驱, 相对于水驱, 采收率提高 23.01%。对角靶向通道长度从 4 cm 增加到 35 cm 的过程中, 对应的采收率提高值呈先上升后下降的趋势, 当靶向通道长度等于 10 cm 时达到最大值 36.41%; 直角靶向注入方式下采收率提高值曲线变化趋势与对角靶向方式一致, 但整体采收率提高值要大大高于对角靶向方式, 同样靶向通道长度等于 10 cm 时达到最大值 46.84%。模拟结果显示靶向通道的长度最佳为 10 cm, 为井距的 14.14%。

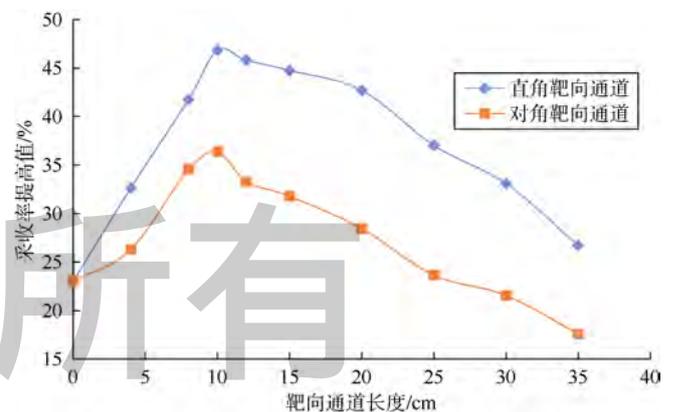


图7 采收率提高值与靶向通道长度关系曲线

图中曲线显示, 随着靶向通道的变长, 三元复合体系减少了不必要的损耗, 采收率大幅提高, 但随着通道长度的继续增加, 采收率提高值反而下降。分析原因, 注入井近井地带在水驱过程中已经冲刷较为充

分, 剩余油较少, 剩余油集中在中后部位, 适当长度的靶向通道正好可以避免剩余油较少的区域, 充分发挥三元复合体系的洗油效果; 相反, 如果靶向通道过长就会跳过一部分剩余油分布区域, 即波及面积相应减少, 采收率提高值相应降低。

4.2 三元复合体系注入量优化

根据上述靶向通道长度优化结果, 设置对角靶向通道长度为 10 cm, 在靶向注入阶段, 分别注入 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 倍孔隙体积段塞的三元复合体系, 模拟三元复合体系注入量对采收率的影响 (见图 8)。随着三元复合体系注入量不断增加, 采收率提高值快速上升, 当注入量达到 0.4 倍孔隙体积后, 曲线上升幅度逐渐趋缓, 三元复合体系提高采收率效率降低。综合考虑矿场应用成本及三元复合体系的利用效率, 推荐三元复合体系段塞的大小为 0.4 倍孔隙体积。

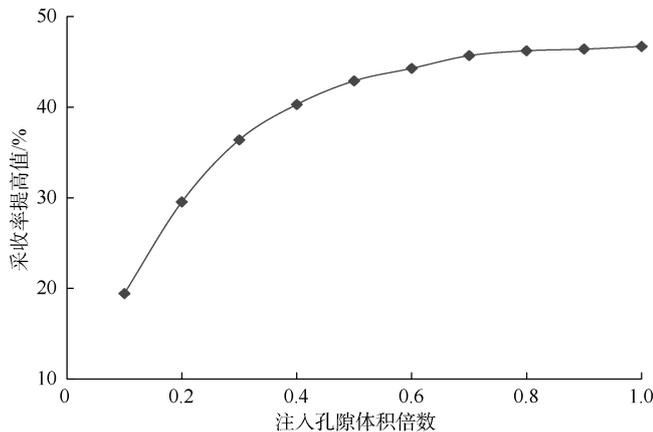


图 8 采收率提高值与三元复合体系注入量关系曲线

4.3 靶向通道方位优化

同样采用前面最优靶向通道长度和最优三元复合体系注入量, 设计对角、直角及二者叠加形成的复合靶向通道进行驱替模拟, 对比最终采收率提高情况, 优选出最佳的靶向通道设计方案。模拟结果见表 2, 表中无靶向通道方式即为常规三元复合体系注入方式, 相对于水驱, 采收率提高 26.83%。数据显示, 对角靶向、直角靶向、复合靶向在通道长度 10 cm, 注入三元复合体系段塞 0.4 倍孔隙体积时, 相对于水驱, 采收率提高值分别为 40.31%、48.87%、43.94%, 直角靶向通道方式采收率提高程度最大。

直角靶向与对角靶向相比, 由于波及效率更高, 提高采收率效果更明显, 而复合靶向方式虽然靶向通道更多波及面积更大, 但在三元复合体系段塞量一定

表 2 靶向通道方位优化模拟结果

模拟方案	靶向通道方式	靶向通道长度/cm	注入孔隙体积倍数	相对于水驱采收率提高值/%
1	无	0	0.4	26.83
2	对角靶向	10	0.4	40.31
3	直角靶向	10	0.4	48.87
4	复合靶向	10	0.4	43.94

的情况下, 每条靶向通道中的复合体系量减少, 则复合体系会更快地被稀释损耗, 驱替效率相应降低。在三元复合体系总量一定的情况下并不是靶向通道越多提高采收率程度越大, 所以复合靶向三元复合驱提高采收率效果低于直角靶向。综上所述推荐使用直角靶向的靶位设计方式。

4.4 应用前景及技术难点

三元复合驱技术的发展存在两大瓶颈: 一是三元复合体系在地层中的损耗, 二是高成本。三元复合驱靶向输送技术将高压水射流钻径向水平井技术与三元复合驱相结合, 三元复合体系可直接输送到剩余富集区, 避免了在注入井近井地带的损耗, 基本解决了瓶颈一。平板模型实验与数值模拟参数优化研究证实, 三元复合驱靶向输送在合理参数下, 相对于常规三元复合驱可提高采收率 22.04%, 采收率提高所带来的经济效益基本可解决钻靶向通道的成本与三元复合驱本身的高成本问题。因此, 可以预见, 通过进一步的深入研究与矿场试验, 该技术成熟后具有广阔的应用前景。

三元复合驱靶向输送技术目前还处于室内实验阶段, 真正应用于现场还有两大关键技术问题需要解决: ①非均质、多储集层注水开发条件下如何准确预测剩余油富集区; ②非均质、多储集层条件下靶向通道参数及三元复合体系注入量优化。

5 结论

三元复合驱靶向输送技术将高压水射流钻径向水平井技术与三元复合驱相结合, 三元复合体系可直接被输送到剩余油富集区, 避免了注水井近井地带的损耗, 可显著扩大波及效率, 改善驱油效果, 大幅度提高原油采收率。靶向输送最佳驱替参数为: 直角靶向输送, 通道长度约为井距的 15%, 三元复合体系段塞注入量为 0.4 倍孔隙体积。

靶向输送技术解决了三元复合驱近井地带化学剂的高损耗问题, 同时弥补了三元复合驱成本高、应用受限的缺陷, 具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王德民, 王刚, 夏惠芬, 等. 天然岩芯化学驱采收率机理的一些认识[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 1-11.
WANG Demin, WANG Gang, XIA Huifen, et al. Chemical flooding recovery mechanism of natural cores[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(2): 1-11.
- [2] 侯吉瑞, 刘中春, 岳湘安. 复合体系超低界面张力和碱在驱油过程中的实际作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 82-86.
HOU Jirui, LIU Zhongchun, YUE Xiang'an. Effect of multi-system ultra-low interfacial tension and alkali in oil displacement process[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(6): 82-86.
- [3] 刘卫东, 罗莉涛, 廖广志, 等. 聚合物-表面活性剂二元驱提高采收率机理实验[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 600-607.
LIU Weidong, LUO Lita, LIAO Guangzhi, et al. Experimental study on the mechanism of enhancing oil recovery by polymer-surfactant binary flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 600-607.
- [4] 王家禄, 沈平平, 陈永忠, 等. 三元复合驱提高石油采收率渗流机理的实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2005, 35(9): 996-1008.
WANG Jialu, SHEN Pingping, CHEN Yongzhong, et al. Experimental investigations on the fluid flow mechanism in porous media of enhanced oil recovery by alkali/surfactant/polymer flooding[J]. SCIENCE CHINA Technological Sciences, 2005, 48(4): 454-467.
- [5] 侯吉瑞, 张淑芬, 杨锦宗, 等. 复合驱过程中化学剂损失与超低界面张力有效作用距离[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(4): 496-500.
HOU Jirui, ZHANG Shufen, YANG Jinzong, et al. Chemical agent loss and effective distance of ultra-low IFT in ASP flooding[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(4): 496-500.
- [6] 王宝瑜, 曹绪龙. 三元复合驱油体系中化学剂在孤东油砂上的吸附损耗[J]. 油田化学, 1994, 11(4): 336-339.
WANG Baoyu, CAO Xulong. The losses of alkaline, surfactant and polymer in tricomponent chemical flooding solution measured as adsorption on reservoir sand of Gudong oil field[J]. Oilfield Chemistry, 1994, 11(4): 336-339.
- [7] 刘刚, 侯吉瑞, 李秋言, 等. 二类油层中三元复合驱体系的损耗及有效作用距离[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(6): 171-177.
LIU Gang, HOU Jirui, LI Qiuyan, et al. Chemicals loss and effective distance of ASP flooding in second-class oil layers[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(6): 171-177.
- [8] 梁壮, 葛勇, 李洁, 等. 水力喷射径向水平井技术在煤层气开发中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(3): 349-352.
LIANG Zhuang, GE Yong, LI Jie, et al. Application of waterpower injector radial horizontal well technology in CBM exploration[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(3): 349-352.
- [9] RAGAB A M S, KAMEL A M. Radial drilling technique for improving well productivity in Petrobel-Egypt[R]. SPE 164773, 2013.
- [10] 余海棠, 杜素珍, 俞忠宝, 等. 水力喷射径向钻孔技术的现场试验[J]. 复杂油气藏, 2013, 6(4): 62-64.
YU Haitang, DU Suzhen, YU Zhongbao, et al. Field test of hydraulic jetting radial drilling technique[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2013, 6(4): 62-64.
- [11] 曹有好, 吴迪, 孟宪瑞. 水力喷射微小井眼径向水平井产能影响规律研究[J]. 内江科技, 2016, 37(7): 63-64.
CAO Youhao, WU Di, MENG Xianrui. Influence of hydraulic jet on productivity of micro radial horizontal well[J]. Nei Jiang Ke Ji, 2016, 37(7): 63-64.
- [12] 赵金洲, 陈曦宇, 李勇明, 等. 水平井分段多簇压裂模拟分析及射孔优化[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 117-124.
ZHAO Jinzhou, CHEN Xiyu, LI Yongming, et al. Numerical simulation of multi-stage fracturing and optimization of perforation in a horizontal well[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 117-124.
- [13] 蔡文军, 吴仲华, 聂云飞, 等. 水射流径向钻孔关键技术及试验研究[J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 1-4.
CAI Wenjun, WU Zhonghua, NIE Yunfei, et al. Key technologies and experimental study on water jet radial drilling[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(4): 1-4.
- [14] 沈忠厚. 高压水射流技术在钻井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 1981, 3(1): 8-15.
SHEN Zhonghou. Application of high pressure water jet technology in drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1981, 3(1): 8-15.
- [15] 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.
- [16] 沈平平, 王家禄, 田玉玲, 等. 三维油藏物理模拟的饱和度测量技术研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(增刊 1): 71-76.
SHEN Pingping, WANG Jialu, TIAN Yuling, et al. Saturation measurement technique for 3D reservoir physical modeling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(Supp.1): 71-76.

第一作者简介: 吴凡(1991-), 男, 江苏泰兴人, 中国石油大学(北京)在读博士, 主要从事提高采收率、井筒复杂流动与完井工程方面的研究。地址: 北京市昌平区府学路18号, 中国石油大学(北京)石油工程学院, 邮政编码: 102249。E-mail: wufanhmm@126.com

联系作者简介: 侯吉瑞(1965-), 男, 吉林九台人, 博士, 中国石油大学(北京)教授, 主要从事提高采收率和油田化学方面的研究工作。地址: 北京市昌平区府学路18号, 中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 邮政编码: 102249。E-mail: houjirui@126.com

收稿日期: 2017-09-01 修回日期: 2017-10-23

(编辑 唐俊伟)