

文章编号: 0253-2697(2018)06-0697-06 DOI:10.7623/syxb201806008

# 全过程调剖技术与三元复合驱协同效应的动态特征

李永太<sup>1</sup> 孔柏岭<sup>2</sup> 李辰<sup>3</sup>

(1. 西安石油大学石油工程学院 陕西西安 710065; 2. 中国石油化工股份有限公司河南油田分公司勘探开发研究院 河南南阳 473132; 3. 陕西石油化工研究设计院 陕西西安 710054)

**摘要:**三元复合驱技术提高采收率幅度远高于聚合物驱技术,对于高含水、高采出程度的中国东部老油田具有明显的技术优势。但是三元复合驱技术现场应用时,出现明显的“低界面张力窜流”现象,导致三元复合体系渗流阻力系数小、注入压力低、产出液聚合物浓度高的动态特征。以交联聚合物体系为调剖剂的化学驱全过程调剖技术,具有渗流阻力高、波及能力强的特点,可以克服和弥补低界面张力窜流现象,解决三元复合驱过程中的窜流和后续注水快速指进的问题。现场应用结果表明,全过程调剖技术和三元复合驱技术配套应用,产生良好的协同效应,可以在扩大波及体积的基础上大幅度提高驱油效率,取得优异的增油降水效果,最终提高油藏采收率。

**关键词:**提高采收率;三元复合驱;全过程调剖;低界面张力窜流;阻力系数;动态特征

中图分类号:TE357

文献标识码:A

## Dynamic characteristics of synergistic effect between profile control technology throughout flooding and ASP flooding

Li Yongtai<sup>1</sup> Kong Bailing<sup>2</sup> Li Chen<sup>3</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Shaanxi Xi'an 710065, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Henan Oilfield Company, Henan Nanyang 473132, China; 3. Shaanxi Research Design Institute of Petroleum and Chemical Industry, Shaanxi Xi'an 710054, China)

**Abstract:** As compared with polymer flooding, ASP flooding can achieve rather higher enhanced oil recovery, exhibiting its obvious technical strength while applied to old fields in eastern China with high water cut and high recovery. However, during the onsite application of ASP flooding technology, the obvious phenomenon of low-interfacial-tension breakthrough flow occurs, resulting in the dynamic characteristics of ASP system such as low percolating resistance coefficient, low injecting pressure and high polymer concentration of produced fluid. With the linked polymer system as profile control agent, the profile control technology throughout chemical flooding is characterized by high percolating resistance and strong spread ability, which can overcome and compensate the phenomenon of low-interfacial-tension breakthrough flow as well as solve the problems during ASP flooding such as breakthrough in ASP flooding and subsequent water injection for rapid fingering. The onsite application shows that good synergistic effect is produced by the combined application of ASP flooding technology and profile control throughout flooding, which has considerably improved oil flooding efficiency based on expanding the sweeping volume and thus achieved excellent oil-increase and water-reduction effect, and finally enhanced oil recovery.

**Key words:** enhanced oil recovery; ASP flooding; profile control throughout flooding; low interfacial tension breakthrough flow; resistance coefficient; dynamic characteristics

引用:李永太,孔柏岭,李辰.全过程调剖技术与三元复合驱协同效应的动态特征[J].石油学报,2018,39(6):697-702,718.

Cite:LI Yongtai,KONG Bailing,LI Chen.Dynamic characteristics of synergistic effect between profile control technology throughout flooding and ASP flooding[J].Acta Petrolei Sinica,2018,39(6):697-702,718.

三元复合驱技术<sup>[1-9]</sup>提高采收率幅度远远高于聚合物驱技术<sup>[10-13]</sup>,对于中国高含水、高采出程度的东部老油田具有非常明显的技术优势。随着三元复合驱技

术研究的日渐深入和矿场应用规模的扩大,一些学者发现并提出“低界面张力窜流”现象<sup>[14]</sup>。三元复合体系洗油能力强,进入高渗透部位后降低含油饱和度,从

基金项目:中国石油化工集团公司提高采收率重大先导项目“特高含水高温油藏三元复合驱技术研究与应用”(P07067)资助。

第一作者及通信作者:李永太,男,1963年7月生,1986年获西南石油学院学士学位,2004年获西南石油学院博士学位,现为西安石油大学教授,主要从事提高采收率的教学和科研工作。Email:yongtaili@sina.com

而增加高渗透部位的水相渗透率。低渗透部位进入的表面活性剂少,相对渗透率增加不明显,因此出现驱替过程中非均质性更严重、波及系数下降的现象,导致岩心驱油实验的采收率不上升反而下降。岩心的非均质越严重、表面活性剂与原油之间的界面张力越低,上述现象越明显。三元复合驱现场应用时,低界面张力窜流现象影响到波及系数的提高,出现注入压力低,窜流明显和含水上升快等动态特征。要保证三元复合驱现场应用的效果,就要配套波及能力强的技术,克服低界面张力窜流现象。

以交联聚合物体系为调剖剂的“化学驱全过程调剖技术”<sup>[15-19]</sup>,包括注化学剂前调剖、注化学剂过程中调剖以及化学驱结束转后续水驱前调剖 3 部分,具有渗流阻力高、波及能力强的特点,可以克服和弥补低界面张力窜流现象,解决三元复合驱过程中的窜流和后续注水快速指进的问题,进一步扩大波及体积。河南油田从 2001 年开始,在 10 个聚合物驱区块和 2 个复合驱区块都应用化学驱全过程调剖技术,有效地扩大了驱油体系的波及体积,取得良好的现场应用效果。因此,化学驱全过程调剖与三元复合驱配套应用,会产生良好的协同效应,在全过程调剖扩大波及体积的基础上,充分发挥三元复合驱提高驱油效率作用,大幅度提高采收率。河南油田特高含水高温油藏 IV 5-11 层系工业化应用三元复合驱技术,同时配套应用化学驱全过程调剖技术,取得优异的增油降水效果,峰值含水由 97.9% 降至 90.2%,日产油由 23.0 t/d 升至 106.1 t/d,阶段提高采收率为 9.1%,预计最终提高采收率为 14.2%。

## 1 全过程调剖和三元复合驱工艺实施

### 1.1 层系开发概况

双河油田 IV 5-11 层系位于南襄盆地泌阳凹陷西南斜坡双河鼻状构造带上,油藏类型为受鼻状构造控制的层状岩性油藏,储层处于扇三角洲前缘。IV 5-11 层系油藏温度为 81℃、空气渗透率为 0.543 D、地下原油黏度为 3.3 mPa·s,原油酸值为 0.055 mgKOH/g,地层水为 NaHCO<sub>3</sub> 型,矿化度为 7947 mg/L。IV 5-11 层系 1977 年 12 月投入开发,1978 年开始注水,先后经历早期注水开发、细分层系综合调整、井网一次加密和二次加密为主的调整、局部细分与完善调整等 4 个开发阶段。截至 2010 年 12 月,综合含水为 97.9%,采出程度为 53.3%。由于三元复合驱技术具有提高驱油效率的技术优势,IV 5-11 层系应用三元复合驱技术,在水驱高采出程度的基础上,进一步大幅度提高采收率。为了提高三元复合驱的现场应用效果,配套应

用波及能力强的化学驱全过程调剖技术。

### 1.2 室内研究与现场实施

三元复合体系的配方筛选和性能评价已有文献报道<sup>[20-21]</sup>,三元复合体系的综合性能优于二元复合体系、交联聚合物体系和聚合物溶液。三元复合体系与其他波及能力更强的驱油体系组合应用,提高采收率幅度会进一步增加。采用 3 倍渗透率级差(400 mD/1 200 mD)的人造层间非均质模型和不同的驱油体系(新型阴阳离子复配表面活性剂 SH6;耐高温聚合物 ZL-II,相对分子质量为  $2.4 \times 10^7$ ;有机酚醛交联剂),进行单一驱油体系及其组合应用的驱油实验,结果如表 1 所示。

表 1 3 倍级差人造非均质岩心化学体系驱油实验

Table 1 Oil flooding experiment of triple differential artificial heterogeneous core chemical system

化学驱油体系	水驱 采收率/%	化学驱 采收率/%	提高 采收率/%
0.5 PV 聚合物溶液	42.6	53.8	11.2
0.5 PV 交联聚合物体系	42.5	58.6	16.1
0.5 PV 三元复合体系	42.6	64.4	21.8
0.10 PV 高浓度聚合物 + 0.35 PV 三元体系 + 0.05 PV 高浓度聚合物	41.4	62.5	21.1
0.05 PV 交联体系 + 0.40 PV 三元 复合体系 + 0.05 PV 交联体系	42.1	66.5	24.4
0.10 PV 交联体系 + 0.35 PV 三元 复合体系 + 0.05 PV 交联体系	41.9	67.6	25.7

单一三元复合驱(1 500 mg/L ZL-II + 2 000 mg/L SH6 + 8 000 mg/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)提高采收率为 21.8%,远远高于单一聚合物驱(1 500 mg/L ZL-II)的 11.2%和交联聚合物驱的 16.1%(1 500 mg/L ZL-II + 200 mg/L 交联剂)。三元复合体系与 2 000 mg/L ZL-II 高浓度聚合物溶液交替注入,提高采收率为 21.1%、与单一三元复合驱提高采收率相当,但是化学驱剂成本有所下降。三元复合体系与交联聚合物体系交替注入,提高采收率可以达到 25.7%、高于单一的三元复合驱和交联聚合物驱,并且化学驱剂成本也低于单一的三元复合驱。因此,推荐现场应用交联聚合物体系 + 三元复合体系 + 交联聚合物体系的注入方式。

依据室内研究成果,采用 IV 5-11 层系实际油藏模型和 CMG 模拟器,利用数值模拟方法优化三元复合驱注入参数和注入方式。数值模拟结果如下:注入速度为 0.11 PV/a,注采比为 1.1 : 1,注入段塞尺寸为 0.60 PV。段塞注入顺序与化学剂注入质量浓度为:①0.10 PV 交联聚合物体系前置段塞(1 800 mg/L 聚合物 + 300 mg/L 交联剂);②0.25 PV 三元复合体系主段塞(1 800 mg/L 聚合物 + 3 000 mg/L 表活剂 + 8 000 mg/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>);③0.20 PV 三元复合体系副段塞(1 800 mg/L 聚合物 +

2000 mg/L 表面活性剂 + 6000 mg/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ); ④ 0.05 PV 交联聚合物体系后置段塞 (1800 mg/L 聚合物 + 300 mg/L 交联剂)。

IV5-11 层系三元复合驱井网由水驱不规则井网调整为近五点法井网<sup>[22]</sup>, 控制地质储量为  $315.7 \times 10^4 \text{ t}$ , 注入井为 32 口, 生产井为 38 口, 平均注采井距为 252 m。现场实施采用交联聚合物体系和三元复合体系交替注入方式; 过程调剖是在三元复合体系注入过程中, 根据动态分析决定调剖次数和调剖剂量。

IV5-11 层系 2010 年 12 月开始注入, 到 2016 年 9 月注入化学驱油体系 0.72 PV, 然后转入后续水驱阶段。具体实施过程中, 各种化学剂注入浓度按照方案设计不变, 段塞注入量有一定调整, 实际注入量为: 0.12 PV 交联聚合物体系前置段塞 + 0.25 PV 三元复合体系主段塞 + 0.02 PV 交联聚合物体系调剖段塞 + 0.10 PV 三元复合体系副段塞 + 0.02 PV 交联聚合物体系调剖段塞 + 0.15 PV 三元复合体系副段塞 + 0.06 PV 交联聚合物体系后置段塞。

## 2 全过程调剖和三元复合驱的动态特征

双河油田 IV1-3 层系的油藏物性与 IV5-11 层系接近, 且已经完成 0.62 PV 聚合物驱技术的现场应用, 取得提高采收率 5.6% 的良好应用效果。为了更好地评价 IV5-11 层系三元复合驱的动态特征, 表 2 列出 2 个层系的主要油藏开发参数, IV5-11 层系原油黏度低、水驱含水与水驱采出程度高, 提高采收率的技术难度大于 IV1-3 层系聚合物驱。

表 2 IV5-11 层系与 IV1-3 层系油藏开发参数比较  
Table 2 Comparison of reservoir parameters between IV5-11 and IV1-3 zones

类型	区块	渗透率/ D	油藏 温度/ °C	原油 黏度/ (mPa·s)	水驱 含水/ %	水驱采出 程度/%
聚合物驱	IV1-3	0.630	79.6	6.5	96.2	37.2
三元复合驱	IV5-11	0.543	81.0	3.3	97.8	53.3

### 2.1 注入动态特征

#### 2.1.1 注入压力曲线

由 IV5-11 层系三元复合驱注入压力与 IV1-3 层系聚合物驱注入压力对比曲线 (图 1) 可以看出: ① IV5-11 层系三元复合驱注入压力上升 6.9 MPa, 其中 0.12 PV 的前置段塞上升 3.8 MPa, 0.60 PV 的三元复合体系段塞上升 3.1 MPa; 注三元复合体系期间, 压力上升缓慢; 三元复合驱注入压力上升幅度和上升速度均低于交联聚合物体系。② IV1-3 层系聚合物驱注入压力上升 9.0 MPa, 其中 0.06 PV 的前置段塞上升 3.5 MPa,

0.56 PV 的聚合物段塞上升 5.5 MPa, 注聚合物期间, 压力上升较快。③ IV1-3 层系聚合物驱注入压力曲线高于 IV5-11 层系三元复合驱注入压力曲线, 前置段塞压力上升幅度相当, 注聚合物期间压力上升幅度高于注三元复合体系期间压力上升幅度。交联聚合物体系注入压力上升幅度大于聚合物溶液、更大于三元复合体系。

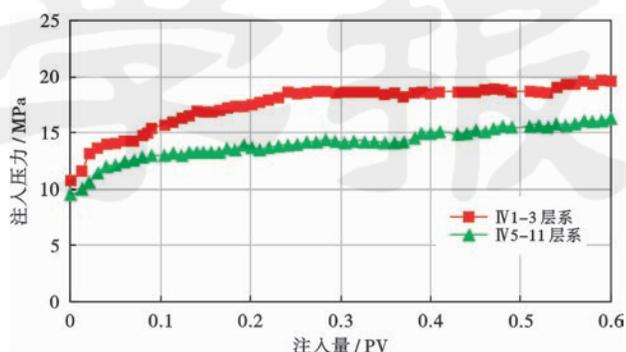


图 1 不同层系注入压力对比

Fig. 1 Injection pressure comparison in different zones

#### 2.1.2 视吸水指数曲线

注入的驱油体系渗流阻力越高, 视吸水指数下降幅度越大。随着注入量增大, 化学驱视吸水指数呈下降趋势 (图 2)。交联聚合物体系前置段塞期间, IV5-11 层系视吸水指数下降幅度为 20.4%, IV1-3 层系视吸水指数下降幅度为 23.2%, 交联聚合物体系在 2 个区块建立的渗流阻力都较高。注入主段塞期间, 视吸水指数继续下降; IV5-11 层系三元复合驱视吸水指数下降到 0.22 PV 时出现回升现象, 与前置段塞吸水指数相比, 视吸水指数回升 9.3%, 三元复合体系的渗流阻力远低于交联聚合物体系; IV1-3 层系聚合物驱视吸水指数继续下降, 与前置段塞视吸水指数相比, 视吸水指数下降幅度为 12.7%。

#### 2.1.3 霍尔曲线

图 3 是 IV5-11 层系水驱、交联聚合物驱和三元复合驱三段式霍尔曲线。注入 0.12 PV 交联聚合物体系前置段塞期间, 渗流阻力系数  $R_f$  为 1.82, 交联聚合物体系建立较高的渗流阻力系数, 这种趋势延续到注三元复合体系阶段; 到注入 0.25 PV 时, 也就是注三元复合体系 0.13 PV 后, 霍尔曲线斜率下降, 渗流阻力系数下降到 1.67, 说明三元复合体系的阻力系数低于交联聚合物体系; 与此对应, 图 2 中的视吸水指数在 0.22 PV 之后也出现类似的回升现象。IV1-3 层系聚合物驱渗流阻力系数为 1.70, 由此可知, 交联聚合物体系阻力系数高于聚合物、更高于三元复合体系。前置段塞交联聚合物体系具备扩大波及体积的能力, 有利于后续注入的三元复合体系发挥驱油作用。

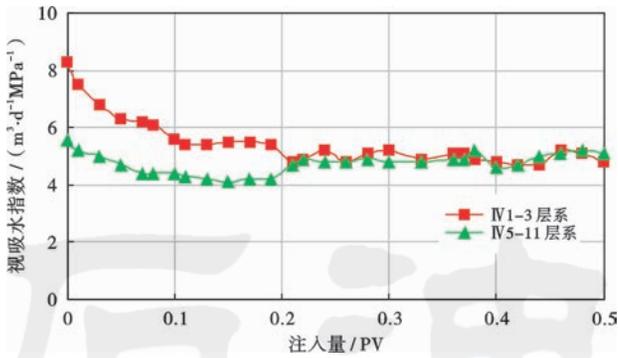


图2 不同层系视吸水指数对比

Fig. 2 Apparent water injectivity index comparison in different zones

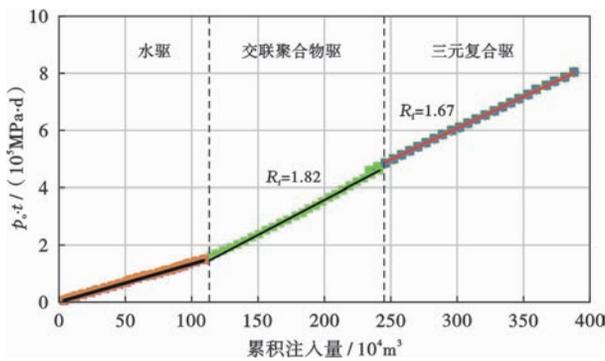


图3 IV 5-11层系三元复合驱的霍尔曲线

Fig. 3 Hall curve of ASP flooding in IV 5-11 zone

## 2.2 产出动态特征

### 2.2.1 产出液聚合物质量浓度

从三元复合驱产出液聚合物质量浓度曲线(图4)可以看出:①注入0.12 PV前置段塞交联聚合物体系至0.28 PV期间,产出聚合物质量浓度上升缓慢。交联体系前置段塞有效充填高渗透层并建立较高的渗流阻力,抑制了高渗透层驱替液的指进。②注入0.34 PV时,进行第1次过程调剖,注入交联聚合物体系0.02 PV,产出聚合物质量浓度由260 mg/L下降到150 mg/L,有效地

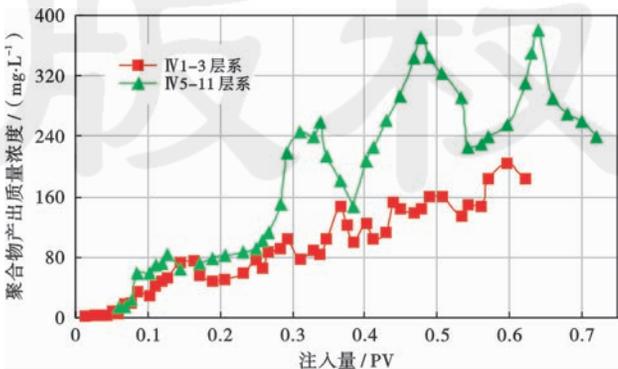


图4 不同层系产出聚合物质量浓度对比

Fig. 4 Produced polymer concentrations comparison in different zones

抑制了产出聚合物质量浓度上升速度。③注入0.49 PV时,产出液聚合物质量浓度上升到370 mg/L,进行第2次过程调剖,注入交联聚合物体系0.02 PV,产出聚合物质量浓度下降到210 mg/L,第2次过程调剖也起到防止聚合物窜流的效果。④注入0.66 PV时,产出液聚合物质量浓度上升到380 mg/L,注入交联聚合物体系后置段塞0.06 PV后,产出聚合物质量浓度下降到240 mg/L,后置段塞具有一定的封堵作用,可以抑制后续水驱的指进。

IV 1-3层系聚合物驱也是交联聚合物体系前置段塞+聚合物段塞+过程调剖的注入方式,产出聚合物质量浓度平稳上升,没有出现明显的起伏的现象(图4)。IV 5-11层系三元复合驱采用交联聚合物体系前置段塞设计和进行两次过程调剖,产出液聚合物质量浓度仍然远远高于IV 1-3层系聚合物驱,应该是三元复合体系超低界面张力窜流现象的动态反映。从产液指数看,注入交联聚合物体系期间,产液指数由4.3 t/(d·m)下降到3.6 t/(d·m);注入三元复合体系后产液指数回升,又逐渐回升到4.3 t/(d·m)。再结合三元复合驱注入压力上升幅度小、视吸水指数回升和霍尔曲线斜率下降等动态特征分析得出,这种低界面张力的窜流现象确实存在。三元复合体系阻力系数低,必然导致其渗流能力强、产出液化学剂浓度高等动态特征。

克服三元复合驱低界面张力窜流的技术途径是设计交联聚合物体系前置段塞和应用过程调剖。因此,IV 5-11层系三元复合驱前置段塞的设计和过程调剖十分必要。为了更好地抑制超低界面张力的窜流现象,过程调剖还应该增加调剖的次数和加大调剖的段塞量,既可以保证三元复合驱的效果,又能降低三元复合驱的成本、提高经济效益。

### 2.2.2 单井生产动态

双河油田 H2-115 井为中心生产井,开采IV 5-11层系,水驱含水率99.0%,三元复合驱见效时间0.27 PV,见效峰值含水由99.0%降至82.7%,含水率下降16.3%;日产油量由0.5 t/d升至12.2 t/d(图5)。在水驱剩余油

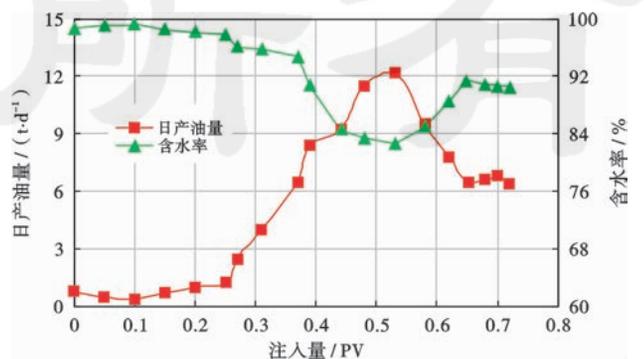


图5 三元复合驱 H2-115 井生产动态

Fig. 5 Production dynamic of ASP flooding in Well H2-115

接近残余油状态下,含水大幅度下降,说明三元复合体系的超低界面张力具有较强的启动残余油能力,启动的残余油逐渐富集,并被高黏度三元复合体系携带聚集,高度分散的剩余油逐渐形成类油墙的状态,三元复合驱流度控制和超低界面张力的协同作用十分明显。

双河油田 H2-115 井是典型的强水淹生产井,开采 IV 5-11 层系,注水井与生产井之间形成水驱优势通道,直接注入三元复合体系,很容易发生窜流现象。应用前置段塞调剖和过程调剖,对优势通道形成有效的封堵;在整个三元复合驱注入期间,H2-115 井产出液聚合物质量浓度一直低于区块平均产出液聚合物质量浓度,全过程调剖与三元复合驱协同作用良好。

同时应该指出的是,对于含水率近 100% 强水淹层,直接采用三元复合体系驱替,易被地层水稀释,从而失去有效的驱替作用,造成高成本的三元复合体系的损失与浪费。先注 0.12 PV 交联聚合物体系,除有效封堵优势通道之外,交联聚合物体系还可以起到充填孔隙空间和排驱地层存水的作用,有利于三元复合体系转向含油饱和度高的部位,更好地发挥驱油作用。交联聚合物体系的成本远远低于三元复合体系,应用前置段塞调剖和过程调剖,可以降低三元复合体系的用量,具有降低成本的作用。

### 2.2.3 区块生产动态

IV 5-11 层系应用低度交联聚合物体系,地下交联反应速度慢、成胶强度低,具有良好的可动性。注入交联聚合物体系 0.06 PV 期间,区块含水上升、日产油量下降,含水率从水驱 97.9% 上升到 98.3%,日产油量从 38.8 t/d 下降到 31.8 t/d,属于典型的充填强水淹层的排水过程。交联聚合物体系从 0.06 PV 增大到 0.12 PV,进入含水下降、日产油量上升的见效期,含水率从 98.3% 下降到 95.7%,日产油量从 31.8 t/d 上升到 73.3 t/d (图 6);其动态特征与聚合物驱的动态特征具有良好的一致性。因此交联聚合物体系不仅具有封堵高渗层的作用,同时也具有良好的驱油作用。此后转

注三元复合体系,含水快速下降,日产油量快速上升,见效高峰期时间长(0.35~0.65 PV),产油倍数是水驱的 4.3 倍,大于 IV 1-3 层系聚合物驱产油倍数的 2.0。由此可知,在全过程调剖扩大波及体积的基础上,三元复合驱驱油效率高的技术优势得到充分发挥。

### 2.2.4 后置段塞封堵作用

由于注入水的黏度(0.5 mPa·s)远低于三元复合体系的黏度(43 mPa·s),三元复合体系段塞易于被后续注水突破。因此三元复合驱转水驱前需要进行区块整体调剖(交联聚合物体系后置段塞),防止后续水驱的快速指进。IV 5-11 层系注入到 0.66 PV 三元复合体系副段塞结束时,改注 0.06 PV 交联聚合物后置段塞,产出液聚合物质量浓度从 380 mg/L 下降到 240 mg/L,起到良好的封堵作用,为防止后续水驱的指进打下基础。

从图 5、图 6 可以看出,无论是单井生产曲线或是区块生产曲线,转后续水驱后,原油产量不仅没有下降,而且出现含水下降、产油量回升的现象;交联聚合物体系后置段塞用于其他聚合物驱区块也有类似的动态特征,并且这种调剖的效果还会保持相当长一段时间<sup>[16]</sup>。

全过程调剖技术和三元复合驱技术配套应用,产生良好的协同效应,扩大波及体积的基础上大幅度提高驱油效率,取得优异的增油降水效果。截至 2016 年 12 月,IV 5-11 层系累计注入 0.72 PV 化学体系,累计增油为  $23.37 \times 10^4$  t;中心区油井见效效率 100%,峰值含水率由 97.9% 降至 90.2%,日产油量由 23.0 t/d 升至 106.1 t/d;阶段提高采收率为 9.1%,预计最终提高采收率为 14.2%,油藏采收率可以达到 67.5%。

综上所述,全过程调剖与三元复合驱协同效应的动态特征明显,交联聚合物体系前置段塞不仅起到防止化学剂窜流的效果,同时也具有良好的驱油作用。两个 0.02 PV 的交联聚合物体系的过程调剖段塞,可以抑制化学剂的窜流,有效弥补低界面张力的窜流现象。交联聚合物体系后置段塞,抑制后续水驱的快速指进,保护三元复合体系段塞的完整性,延长三元复合体系驱油作用的有效期。

## 3 结 论

(1) 全过程调剖技术和三元复合驱技术配套应用,产生了良好的协同效应,可在扩大波及体积的基础上进一步提高驱油效率,取得了优异的增油降水效果。中心区峰值含水率由 97.9% 降至 90.2%,日产油量由 23.0 t/d 升至 106.1 t/d;阶段提高采收率为 9.1%,预计最终提高采收率为 14.2%。

(2) 三元复合体系的超低界面张力启动残余油能

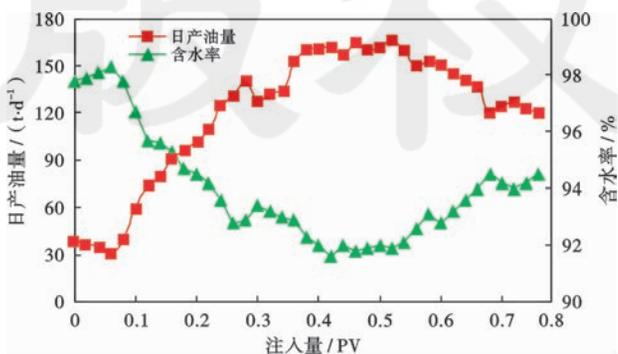


图 6 IV 5-11 层系三元复合驱区块生产动态

Fig. 6 Production dynamic of ASP flooding in IV 5-11 zone

力强,但存在明显的低界面张力的窜流现象,导致三元复合体系渗流阻力系数小、产出液聚合物质量浓度高的动态特征。

(3) 以交联聚合物体系为调剖剂的化学驱全过程调剖技术,具有渗流阻力高、波及能力强的特点,可以克服低界面张力窜流现象,解决三元复合驱过程中的窜流和后续注水快速指进的问题,进一步扩大波及体积。

符号注释: $p_0$ —油压,MPa; $t$ —时间,d; $R_1$ —渗流阻力系数。

### 参 考 文 献

- [1] 程杰成,王德民,李群,等. 大庆油田三元复合驱矿场试验动态特征[J]. 石油学报,2002,23(6):37-40.  
CHENG Jiecheng, WANG Demin, LI Qun, et al. Field test performance of alkaline surfactant polymer flooding in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 37-40.
- [2] 李士奎,朱焱,赵永胜,等. 大庆油田三元复合驱试验效果评价研究[J]. 石油学报,2005,26(3):56-59.  
LI Shikui, ZHU Yan, ZHAO Yongsheng, et al. Evaluation of pilot results of alkali-surfactant-polymer flooding in Daqing oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 56-59.
- [3] 程杰成,廖广志,杨振宇,等. 大庆油田三元复合驱矿场试验综述[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(2):46-49.  
CHENG Jiecheng, LIAO Guangzhi, YANG Zhenyu, et al. Pilot test of ASP flooding in Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology & Oil field Development in Daqing, 2001, 20(2): 46-49.
- [4] 王正茂,廖广志. 大庆油田复合驱油技术适应性评价方法研究[J]. 石油学报,2008,29(3):395-398.  
WANG Zhengmao, LIAO Guangzhi. Evaluation method for adaptability of alkali-surfactant-polymer flooding technology in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 395-398.
- [5] 赵长久,鹿守亮,李新峰. 极限含水条件下三元复合驱及聚合物驱提高采收率效果分析[J]. 石油勘探与开发,2007,24(3):354-357.  
ZHAO Changjiu, LU Shouliang, LI Xinfeng. On the effectiveness of increasing oil recovery factors with ASP flooding and polymer flooding under the limit water-cut conditions[J]. Petroleum Exploration & Development, 2007, 24(3): 354-357.
- [6] 曹绪龙,孙焕泉,姜颜波,等. 孤岛油田西区三元复合驱矿场试验[J]. 油田化学,2002,19(4):350-353.  
CAO Xulong, SUN Huanquan, JIANG Yanbo, et al. Enlarged field test on ASP-flood at east district of gudao oil field[J]. Oil-field Chemistry, 2002, 19(4): 350-353.
- [7] 宋万超,张以根,王友启,等. 孤岛油田碱-表面活性剂-聚合物复合驱油先导试验效果反动态特点[J]. 油气采收率技术,1994,1(2):8-12.  
SONG Wanchao, ZHANG Yigen, WANG Youqi, et al. Field test performance of alkaline surfactant polymer flooding in Gudao oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 1994, 1(2): 8-12.
- [8] 廖广志,王强,王红庄,等. 化学驱开发现状与前景展望[J]. 石油学报,2017,38(2):196-207.  
LIAO Guangzhi, WANG Qiang, WANG Hongzhuang, et al. Chemical flooding development status and prospect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 196-207.
- [9] 程杰成,王庆国,王俊,等. 强碱三元复合驱钙、硅垢沉积模型及结垢预测[J]. 石油学报,2016,37(5):653-659.  
CHENG Jiecheng, WANG Qingguo, WANG Jun, et al. Ca/Si scale sedimentary model in the strong-base ASP flooding block and scaling prediction[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5): 653-659.
- [10] 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.
- [11] 孙焕泉. 胜利油田三次采油技术的实践与认识[J]. 石油勘探与开发,2006,33(3):262-266.  
SUN Huanquan. Practice and understanding on tertiary recovery in Shengli oilfield[J]. Petroleum Exploration & Development, 2006, 33(3): 262-266.
- [12] 沈平平,袁士义,韩冬,等. 中国陆上油田提高采收率潜力评价及发展战略研究[J]. 石油学报,2001,22(1):45-48.  
SHEN Pingping, YUAN Shiyi, HAN Dong, et al. Strategy study and potentiality evaluation of eor for onshore oil fields in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 45-48.
- [13] 谭锋奇,许长福,王晓光,等. 砾岩油藏水驱与聚合物驱微观渗流机理差异[J]. 石油学报,2016,37(11):1414-1427.  
TAN Fengqi, XU Changfu, WANG Xiaoguang, et al. Differences in microscopic porous flow mechanisms of water flooding and polymer flooding for conglomerate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1414-1427.
- [14] 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.
- [15] 赵光,由庆,谷成林,等. 多尺度冻胶分散体的制备机理[J]. 石油学报,2017,38(7):821-829.  
ZHAO Guang, YOU Qing, GU Chenglin, et al. Preparation mechanism of multiscale dispersed particle gel[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(7): 821-829.
- [16] 孔柏岭,孔昭柯,王正欣,等. 聚合物驱全过程调剖技术的矿场应用[J]. 石油学报,2008,29(2):263-265.  
KONG Bailing, KONG Zhaoke, WANG Zhengxin, et al. Field application of profile control throughout polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 263-265.
- [17] 孔柏岭,刘文华,皇海权,等. 聚合物驱前区块整体调剖技术的矿场应用[J]. 大庆石油地质与开发,2010,29(1):105-109.  
KONG Bailing, LIU Wenhua, HUANG Haiquan, et al. Field application of block-wide overall profile controlling technology before polymer flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2010, 29(1): 105-109.

- 工艺,2007(12):31-34.  
ZHU Lin, WU Songping. The design of horizontal well logging instrument hauling crawling[J]. New Technology & New Process, 2007(12):31-34.
- [23] 赵永铸. 牵引机器人动作单元动力学仿真与关键部件优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.  
ZHAO Yongzhu. The dynamic simulation and optimal design for the movement units of well tractor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [24] 侯松伟. 水平井牵引器运动学仿真与应用研究[D]. 大庆:东北石油大学,2017.  
HOU Songwei. Research on kinematics simulation and application for horizontal well tractor[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [25] 张勇,高德利,陈亮帆,等. 水平井电缆牵引器驱动装置参数优化[J]. 石油矿场机械,2015,44(1):30-33.  
ZHANG Yong, GAO Deli, CHEN Liangfan, et al. Parameter optimization of drive device of cable tractor in horizontal wells[J]. Oil Field Equipment, 2015, 44(1): 30-33.
- [26] 唐德威,王新杰,邓宗全,等. 水平油井检测仪器拖动器[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(9):1395-1397.  
TANG Dewei, WANG Xinjie, DENG Zongquan, et al. Driver of horizontal oil well detecting instruments[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(9): 1395-1397.
- [27] 闫泽. 裸眼井检测仪器拖动器的设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.  
YAN Ze. Design and research on open hole logging tools tractor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [28] 李子丰,王长进,田伟超,等. 钻柱力学三原理及定性模拟实验[J]. 石油学报,2017,38(2):227-233.  
LI Zifeng, WANG Changjin, TIAN Weichao, et al. Three principles of drill string mechanics and qualitative simulation experiments[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(2): 227-233.
- [29] 高佳佳,邓金根,闫伟,等. 基于井壁稳定控制建立井眼轨迹优化预测模型[J]. 石油学报,2016,37(9):1179-1186.  
GAO Jiajia, DENG Jingen, YAN Wei, et al. Establishment of a prediction model for the borehole trajectory optimization based on controlling wellbore stability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1179-1186.
- [30] 赵金洲,彭瑀,林啸,等. 考虑复杂应力分布的数值缝宽计算模型及其应用[J]. 石油学报,2016,37(7):914-920.  
ZHAO Jinzhou, PENG Yu, LIN Xiao, et al. Numerical fracture width model considering complex stress distribution and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7): 914-920.
- [31] 李子丰. 油气井杆管柱力学研究进展与争论[J]. 石油学报,2016,37(4):531-556.  
LI Zifeng. Research advances and debates on tubular mechanics in oil and gas wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(4): 531-556.

(收稿日期 2017-09-25 改回日期 2018-04-08 编辑 宋 宁)

(上接第 702 页)

- [18] 孔柏岭,宋振宇. 耐温抗盐的低浓度交联聚合物体系研究[J]. 石油学报,2000,21(4):70-74.  
KONG Bailing, SONG Zhenyu. Study on the low concentration polymer crosslinking system at high temperature and salinity condition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 70-74.
- [19] 孔柏岭,昌润珍,海玉芝,等. 河南油田微凝胶驱技术的矿场实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(6):99-103.  
KONG Bailing, CHANG Runzhen, HAI Yuzhi, et al. Field practice and understandings of microgel flooding technique in Henan Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(6): 99-103.
- [20] LI Yingcheng, ZHANG Weidong, KONG Bailing, et al. Mixtures of anionic cationic surfactants: a new approach for enhanced oil recovery in Low-Salinity, high-temperature sandstone reservoir [J]. SPE Journal, 2016, 21(4): 1164-1177.
- [21] 刘艳华,孔柏岭,肖磊,等. 特高含水油藏复合驱技术提高采收率研究[J]. 油田化学,2013,30(4):570-574.  
LIU Yanhua, KONG Bailing, XIAO Lei, et al. Study on combination flooding enhanced oil recovery technique in ultra-high water cut reservoir [J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(4): 570-574.
- [22] 王艳霞. 双河油田 IV 5-11 层系复合驱剩余油分布与井网重组研究[J]. 石油地质与工程,2012,26(1):29-32.  
WANG Yanxia. Research on residual oil distribution and well pattern reconstruction of IV 5-11 layer series with combination flooding of Shuanghe oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(1): 29-32.

(收稿日期 2017-10-30 改回日期 2018-04-15 编辑 王培玺)