

文章编号: 1000-0747(2013)01-0090-07

化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势

朱友益^{1,2}, 侯庆锋^{1,2}, 简国庆^{1,2}, 马德胜^{1,2}, 王哲^{1,2}

(1. 提高石油采收率国家重点实验室; 2. 中国石油勘探开发研究院)

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05010)

摘要: 近年来化学复合驱技术应用基础研究及现场试验得到了长足发展。国内采用低浓度复合驱体系, 通过碱、表面活性剂的协同作用, 降低油水界面张力达到超低数量级, 同时采用抗盐聚合物使污水配制驱替液黏度达到要求, 三元复合驱或二元复合驱具有提高驱油效率和扩大波及体积双重作用。大庆油田三元复合驱先导性试验和工业化试验提高采收率幅度达到 18.6%~26.5%, 复合驱进入工业化推广应用阶段, 在复合驱试验过程中逐步形成了系列配套技术。复合驱存在的主要问题为强碱引起的检泵周期较短和采出液处理难度大、成本高。国外复合驱技术早期主要采用表面活性剂胶束-聚合物驱, 由于成本高未能推广应用, 近年来随着油价上涨, 开始研究低浓度复合驱体系。国外采用化学驱的油藏大部分为高温高盐油藏, 瓶颈技术为耐温抗盐驱油剂的研制。图 2 表 5 参 25

关键词: 化学复合驱; 驱油机理; 现场试验; 三次采油

中图分类号: TE357.46

文献标识码: A

Current development and application of chemical combination flooding technique

Zhu Youyi^{1,2}, Hou Qingfeng^{1,2}, Jian Guoqing^{1,2}, Ma Desheng^{1,2}, Wang Zhe^{1,2}

(1. State Key Laboratory of EOR, Beijing 100083, China; 2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Great success has been achieved in the fundamental study and field test of chemical combination flooding in recent years. In China, a low concentration ASP formula is employed to achieve ultra-low interfacial tension by the synergistic effect of alkali and surfactant. The viscosity of polymer solution made from produced water can meet the technological requirement when salt tolerance polymer is applied. ASP or SP flooding can increase oil displacement efficiency and enlarge the sweep volume simultaneously. ASP pilot test and industrial field test in Daqing Oilfield have resulted in an oil recovery increase of 18.5%-26.5%. The chemical combination flooding has entered into the industrial promotion and application stage, with a series of supporting techniques formed in the field tests. The main challenges in this technique include short pump-checking period and difficulty in produced liquid handling and high cost. Micelle-polymer flooding as the major chemical flooding technique was applied abroad in the early stage of chemical flooding test. However, the micelle-polymer flooding has not been applied widely due to its high cost. With the rise of oil price in recent years, low concentration chemical combination flooding has drawn more attention. Because of high temperature and high salinity in most reservoirs abroad where chemical combination flooding is used, high performance temperature and salt tolerance oil displacement agents are the bottleneck for future chemical flooding.

Key words: chemical combination flooding; oil displacement mechanism; field test; enhanced oil recovery

0 引言

中国油田多为陆相沉积, 油藏非均质性严重, 原油中蜡含量、芳烃含量高, 原油黏度大, 因此水驱采收率低, 平均为 33%左右。注水开发油田主体已进入高含水、高采出程度的“双高”开发阶段。三次采油提高采收率技术研究表明, 化学复合驱是一种大幅度提高原油采收率的技术。复合驱是在单一化学剂驱(如聚合物驱、碱水驱、表面活性剂驱)基础上, 将两种以上不同的化学剂组合形成的多种复合驱油体系, 如表面活性剂与聚合物组合形成表面活性剂-聚合物驱, 碱、表面活性剂和聚合物组合形成碱-表面活性剂-聚合

物(ASP)三元复合驱。通过化学剂的组合和药剂之间的协同作用, 复合驱的驱油效果比单一化学剂驱好。ASP三元复合驱已在大庆油田、胜利油田和新疆油田进行了现场先导性试验, 采收率提高 20%以上^[1-2]。因此大庆油田在此基础上进行了 ASP三元复合驱工业化试验, 也取得了大幅度提高采收率的效果^[1-2], 使复合驱成为经济有效的三次采油提高采收率技术之一。随着化学复合驱提高采收率技术的发展和完善, 其将逐渐取代聚合物驱成为中国三次采油大幅度提高原油采收率的主导技术。

近年来随着油价不断攀升, 国外也开展了各种化学复合驱研究和试验。国外油田储集层大多为海相碳

酸盐岩，大部分为高温高盐油藏，化学复合驱的应用具有挑战性。

本文介绍了国内化学复合驱技术的驱油机理、配方、油藏适应性以及国内外化学复合驱技术试验与应用现状。

1 化学复合驱驱油机理研究进展

原油采收率由驱油效率和波及效率共同决定，为二者的乘积，化学复合驱具有提高驱油效率和波及效率双重功效。

化学复合驱可以充分利用碱、表面活性剂、聚合物 3 种化学剂的不同功能和药剂之间的协同作用达到良好的驱油作用。

复合驱驱替液中添加高分子聚合物可使水溶液黏度提高几十甚至百倍以上，因而可较大幅度地降低水油流度比，减少驱替液流动指进，提高波及效率。表 1 为固定注入速度下某均质油藏（五点井网）水油流度比与波及效率的关系^[3]。

表 1 水油流度比对波及效率的影响

水油流度比	波及效率/%	
	水突破时	采出液含水 90%时
10.0	51	83.0
2.0	60	88.0
1.0	70	98.0
0.5	82	99.0
0.3	87	99.5

目前油田配注化学剂的水大部分采用油田产出水，因此对聚合物的性能要求更高。图 1 为 5 种聚合物样品在大庆油田污水（矿化度 4 500 mg/L）和油层温度（45 ）条件下的黏度-浓度关系曲线。可见，新

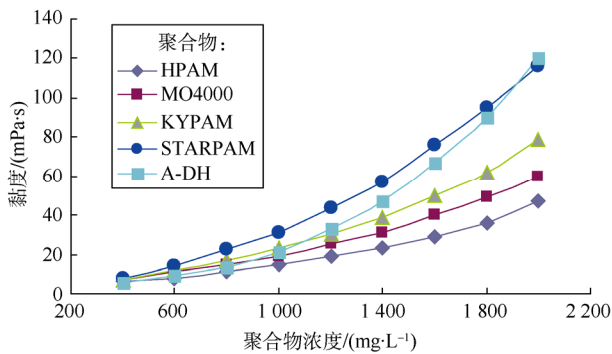


图 1 5 种聚合物浓度-黏度关系曲线

型抗盐聚合物在污水配制时增黏效果优于传统聚合物产品 MO4000 和聚丙烯酰胺（HPAM）。

复合驱中表面活性剂和碱的作用主要是降低油水

界面张力。根据 Foster、Lake 等人提出的毛管准数理论，毛管准数为两相渗流过程中驱动力和毛细管阻力的比值，对存在于不同孔隙介质、不同大小的油滴，其能否开始移动，都直接与毛管准数值有关^[3-4]。

$$N_c = \frac{\mu_w v}{\phi \sigma_{ow}}$$

(1)

式中 N_c ——毛管准数，无量纲； v ——驱替液驱替速度， cm/s ； ϕ ——孔隙度，%； μ_w ——驱替液的黏度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ； σ_{ow} ——油水界面张力， mN/m 。

毛管准数与驱油效率和剩余油饱和度的关系可通过实验得到（见图 2）^[5]。水驱结束时毛管准数一般为 1×10^{-6} ，要降低残余油饱和度大幅度提高驱油效率，毛管准数需大于 1×10^{-3} 。根据毛管准数理论，提高毛管准数的方法有 3 个：增加驱替液速度（一般为 2~3 倍）；增加驱替液黏度（一般 10~50 倍）；降低油水界面张力（3~4 个数量级）。通过在水中添加表面活性剂可大幅度降低油水界面张力，使其降至 1×10^{-3} mN/m 数量级。复合驱中碱与表面活性剂有良好的协同作用，能降低油水界面张力至 $1\times 10^{-4}\sim 5\times 10^{-3}$ mN/m ，可以使毛管准数提高 3~4 个数量级，从而启动孔隙介质中的残余油，提高驱油效率。这是化学复合驱提高驱油效率的理论基础之一。

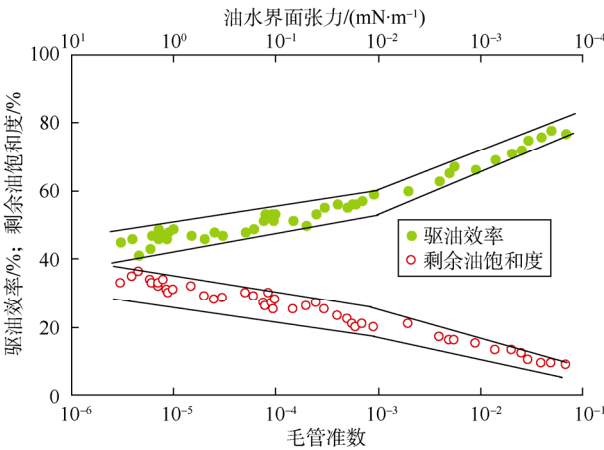


图 2 驱油效率和剩余油饱和度与毛管准数的关系

综上，ASP 三元复合驱或表面活性剂-聚合物（SP）二元复合驱可以通过提高驱替液黏度和降低油水界面张力实现提高波及效率和驱油效率双重作用，从而大幅度提高原油采收率。

最新室内实验研究和现场试验表明，复合驱体系乳化性能有利于提高驱油效率^[6-8]。不同乳化程度体系的驱油实验表明^[6-7]，随着乳化能力的增加，原油易于

分散成小油滴、形成可连续流动的富油带而被采出，驱油效率提高。在界面张力为 1×10^{-1} mN/m 的复合驱体系，增加乳化强度，可提高采收率 5% ~ 10%。由于碱对原油的乳化作用明显，ASP 三元体系驱油效率大于无碱 SP 二元体系。

研究表明^[8]，碱或表面活性剂可以改变岩石表面的润湿性，使岩石由油润湿变为水润湿，可以降低油水界面膜黏度，有利于剩余油的启动并从岩石上剥离，从而提高驱油效率。

最近研究表明，复合体系黏弹性也有助于提高驱油效率^[9]。采用高分子量聚合物，驱替液的第一法向应力增加，流体韦伯数也增加，这会影响驱替液在孔隙中的流线，驱替液微观流线改变后，其微观惯性也改变。微观惯性力作用在残余油上，使突出部位变形并移动，膜状、盲端残余油变成可动油，从而提高驱油效率。

2 化学复合驱配方体系和油藏适应性研究进展

复合驱配方体系主要有 2 种。一种是国外早期研究的高浓度小段塞体系，该体系采用较高的表面活性剂浓度，表面活性剂在水中形成胶束，再加上助剂，使油水形成中相微乳液体系，微乳液体系对原油的增溶和乳化能力强。典型代表是美国 Marathon 公司设计的胶束-聚合物驱体系。表面活性剂浓度为 2.5% ~ 5.0%，段塞大小一般小于 0.4 PV，体系形成微乳液，室内驱油效率可以达到 80% 以上^[10]。

另一种为低浓度大段塞体系。国内从 20 世纪 80 年代后期采取 ASP 三元低浓度的策略，其驱油基本原理主要基于毛管准数理论，通过碱与表面活性剂良好的协同作用，降低油水界面张力至 $1 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$ ，体系中表面活性剂的浓度一般为 0.05% ~ 0.40%，碱浓度一般为 0.6% ~ 1.4%，碱可以是强碱（NaOH）也可以采用弱碱（ Na_2CO_3 等）。低界面张力配方不仅适用于高酸值的原油，也适用于低酸值甚至是酸值接近零的原油。表 2 为加入石油磺酸盐、弱碱的三元体系（污水配制）与大庆原油间界面张力测试结果^[11]，聚合物 KYHPAM 浓度为 1 500 mg/L，可见石油磺酸盐工业产品可以在表面活性剂浓度为 0.05% ~ 0.30%、碳酸钠浓度为 0.4% ~ 1.4% 条件下使大庆油水界面张力达到超低。由于碱能使岩石表面负电性增强，减少表面活性

表 2 加入石油磺酸盐、弱碱的三元体系（污水配制）与大庆原油间界面张力测试结果

活性剂 浓度 /%	不同 Na_2CO_3 浓度下三元体系与原油间界面张力 / (mN · m ⁻¹)					
	0.4%	0.6%	0.8%	1.0%	1.2%	1.4%
0.30	1.66×10^{-3}	3.12×10^{-3}	1.49×10^{-3}	1.48×10^{-3}	1.00×10^{-3}	1.14×10^{-3}
0.20	1.85×10^{-3}	6.60×10^{-4}	3.35×10^{-3}	6.54×10^{-4}	1.40×10^{-3}	6.18×10^{-3}
0.10	4.45×10^{-3}	6.93×10^{-4}	5.93×10^{-4}	6.01×10^{-4}	3.50×10^{-4}	4.99×10^{-4}
0.05	4.41×10^{-2}	1.66×10^{-3}	1.13×10^{-3}	7.93×10^{-4}	5.82×10^{-4}	5.60×10^{-4}

剂在岩石上的吸附，所以可适当降低表面活性剂的用量。室内岩心驱油实验表明^[8,11]，采用该三元复合驱配方体系，强碱三元复合驱体系在水驱采收率 40% 的基础上可以提高采收率 20% ~ 25%，弱碱三元复合驱体系可以提高采收率 18% ~ 22%。现场复合驱试验配方中表面活性剂使用浓度一般为 0.2% ~ 0.3%，复合驱段塞一般为 0.4 ~ 0.6 PV。低浓度复合驱配方体系驱油剂使成本大幅度降低，复合驱将成为经济有效的大幅度提高采收率的三次采油技术。

20 世纪 90 年代，复合驱进入现场试验阶段，大庆油田提出了三元复合驱适宜的油藏应用条件（油藏温度小于 75℃，原油黏度小于 50 mPa · s，矿化度小于 10 000 mg/L，二价阳离子含量小于 100 mg/L），这是基于当时的复合驱室内研究及驱油用表面活性剂和聚合物的研究现状而定的。早期开展三元复合驱试验采用的聚合物为 HPAM，耐温抗盐性能较差，适用油藏温度低于 75℃，清水配制才具有良好的增黏性能；表面活性剂大部分采用磺酸盐类，抗盐抗二价阳离子能力较差。

近年来，随着复合驱用驱油剂研制力度的加强，新型耐温抗盐聚合物产品不断研发成功，如图 1 中的梳形聚合物 KYPAM，星形聚合物 STARPAM，疏水缔合聚合物 A-DH。这些聚合物在矿化水中的增黏性能比常规高分子质量 HPAM 要好。新型耐温抗盐聚合物的出现使油田采用污水配注成为主流，对节约淡水资源和保护环境有利，同时适用的油藏水矿化度和温度范围得到扩展。驱油用表面活性剂研制也有长足发展，新型两性表面活性剂、阴离子-非离子、季铵表面活性剂的出现，使抗盐和抗二价阳离子能力增强，可用于不同的复合驱体系（强碱三元复合驱、弱碱三元复合驱和无碱二元驱）^[3,12]。复合驱应用逐步由低温低矿化度油藏向高温高矿化度油藏扩展（油藏温度为 95℃，矿化度为 70 000 mg/L）。国外对低渗透油藏复合驱注入性的研究表明，复合驱可适用于平均渗透率为 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏^[9]；同时，国内在不同类型油藏

开展的复合驱先导性试验研究表明^[13-15]，复合驱可用于砾岩油藏、复杂断块油藏。可见，复合驱技术应用的油藏条件得到了扩展。

3 国内外化学复合驱技术试验现状与发展趋势

3.1 国内化学复合驱技术试验与应用现状

3.1.1 整装砂岩油藏的试验与应用现状

大庆油田为整装砂岩油藏，油藏基本参数为：油层平均有效厚度 6~11 m，平均渗透率 $300 \times 10^{-3} \sim 1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，非均质性较强，油藏温度 45℃，地层水总矿化度为 4 000~6 000 mg/L，原油密度平均 0.85 g/cm^3 ，蜡含量平均 26%，硫含量平均 0.1%，原油的酸值为 0.04 mg/g，属于低含硫石蜡基原油。

自 1994 年起，大庆油田先后在不同地区开展了 5 个三元复合驱先导性矿场试验，均取得了比水驱提高采收率 20% 左右的效果^[1-2]，表面活性剂主要采用美国 OCT 公司产品（产品代号 B-100，ORS41）。

在三元复合驱先导性试验取得成功的基础上，2000 年以来，大庆油田利用自主研发的重烷基苯磺酸盐表面活性剂产品（HABS）和石油磺酸盐产品（DPS）开展了更大规模的强碱、弱碱三元复合驱工业性矿场试验（见表 3）。三元复合驱由渗透率高、物性好的一类油层向渗透率中等的二类油层扩大应用。

表 3 大庆油田三元复合驱工业化矿场试验效果

区块	油层及复合驱类型	井网	注采井距/m	表面活性剂	碱型	阶段采收率/%	预测采收率/%
大庆杏二	一类油层 强碱复合驱	17 注 27 采 五点法	250	HABS	NaOH	18.2	18.6
大庆南五区	一类油层 强碱复合驱	29 注 39 采 五点法	175	HABS	NaOH	16.9	19.5
大庆北一断东	二类油层 强碱复合驱	49 注 63 采 四点法	125	HABS	NaOH	23.5	26.5
大庆北二西	二类油层 弱碱复合驱	35 注 44 采 五点法	125	DPS	Na_2CO_3	18.6	20.3

大庆油田三元复合驱现场试验取得了良好效果，主要体现在以下方面。

采收率提高幅度大。强碱三元复合驱平均提高采收率 22%、弱碱三元复合驱平均提高采收率 20%。

形成了三元复合驱用化学剂生产体系，确保进入现场的表面活性剂、聚合物和碱等产品的质量达到要求。大庆炼化公司形成聚合物产业链，目前年产驱油用聚合物 $17 \times 10^4 \text{ t}$ 。大庆东昊化工公司已经形成了年

产重烷基苯磺酸盐表面活性剂 $5 \times 10^4 \text{ t}$ 的生产能力，产品已经应用于大庆油田三元复合驱现场试验和推广应用区块。大庆炼化公司建设了年产 5 000 t 的石油磺酸盐中试生产装置，石油磺酸盐产品满足弱碱三元体系在北二区西部二类油层矿场试验的需要。

合理的注入方案设计和地面工程优化设计保证了现场试验效果。在三元复合驱矿场试验和工业化推广中形成了油藏工程方案、钻井设计方案、采油工程方案、地面建设方案的研究和设计技术。地面工程中采用点滴配注工艺流程、高压三元低压二元配注工艺流程等针对性配注技术，保证三元复合驱体系能经济有效地注入油藏。地面脱水系统保证三元复合驱采出液的处理基本达到要求，使试验得以正常进行。

采油工艺不断完善。由于强碱三元复合驱结垢严重，对原油举升有一定影响。以陶瓷螺杆泵替代合金泵，同时添加防垢、阻垢化学剂，提高了防垢、阻垢能力，形成了适合三元复合驱的采油工艺技术^[16]。

基于复合驱技术现场试验的良好效果，2007 年 8 月—2009 年 10 月大庆油田三元复合驱先后开辟了 4 个工业化推广应用区块：杏一—二区东 1 块，南六区，杏六区东 1 块，杏六区东 2 块，共动用地质储量 $2\,861 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

大庆油田在三元复合驱试验和推广应用过程中逐步形成了系列配套技术，包括：配方体系优化技术、层系组合及井网优化技术、油水井动态及采出化学剂变化规律预测技术、跟踪调整技术、采出液破乳与脱水技术、防垢技术、动态监测技术、经济评价技术。

三元复合驱现场试验和推广应用中也暴露出一些问题^[1-2,17]，主要体现在：碱引起结垢、腐蚀，造成生产维护工作量大。强碱结垢使检泵周期大幅度缩短，采出液中碱含量高时出现此类现象，持续时间 1 a 左右，虽然采取了物理防垢和化学防垢措施，使平均检泵周期从 100 d 延长到 160 d 左右，但仍比聚合物驱检泵周期缩短了一半，造成生产过程维护工作量大。采出液乳化严重，处理难度大、成本高。在南五区、北一断东试验区出现产出液乳化严重、油水分离困难的情况，导致电脱水器电场运行不平稳，跨电场次数多，外输油含水率多数超标，水中固体悬浮物含量超标。采出液中碱、表面活性剂含量高时出现此类现象，持续时间 3~5 个月，高峰期 1 个月左右。通过改进电脱水器电极，投加大量破乳剂、消泡剂，增加净水剂和强化水处理工艺，可以基本解决产出液破乳脱水问

题，但处理成本较高。

3.1.2 砾岩油藏、复杂断块油藏的试验与应用现状

新疆克拉玛依砾岩稀油油藏主要特点为^[14,18]：油藏平均深度 1 203 m，油层平均有效厚度 15 m；平均渗透率 $200\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，其中小于 $50\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的占 40.0%，大于 $1\,000\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的占 26.7%，渗透率级差大，非均质性较强；平均孔隙度 18.2%；油藏温度 34℃；地层水总矿化度 7 000 ~ 29 000 mg/L，二价阳离子含量 70 ~ 620 mg/L；原油密度平均 0.816 g/cm³，原油酸值为 0.08 ~ 4.87 mg/g，属于环烷基原油。储集层岩性主要为砾岩，含不等粒砂砾岩和粉砂砾岩，砾石含量 33% ~ 50%，砾石成分以花岗岩为主。

克拉玛依油田在二中区北部采用石油磺酸盐（KPS）进行弱碱三元复合驱先导性矿场试验，小井距试验取得提高采收率 24.5% 的良好效果（见表 4）^[13]。

表 4 砾岩油藏、复杂断块油藏三元复合驱矿场试验效果

区块	油藏类型	井网	注采井距/m	表面活性剂	碱型	阶段采收率/%	提高采收率/%
克拉玛依二中区北部	砾岩	4 注 9 采五点法	50	KPS	Na ₂ CO ₃		24.5
胜利孤岛小井距	断块		50	非离子表面活性剂	Na ₂ CO ₃		13.4
胜利孤岛西区	断块	6 注 13 采	212	WPS	Na ₂ CO ₃	12.7	15.5

胜利孤岛油田属于复杂断块油藏，主要特点为：油藏平均深度 1 190 ~ 1 310 m，油层平均有效厚度 16.2 m，平均渗透率 $1\,300\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，非均质性较强。平均孔隙度 32%，油藏温度 60 ~ 80℃，地层水总矿化度为

8 000 ~ 26 000 mg/L，二价阳离子含量 123 ~ 500 mg/L。原油密度平均 0.93 g/cm³，硫含量 2.1%，原油酸值为 1.6 ~ 3.1 mg/g，属于含硫环烷-中间基原油。储集层岩性以粉细砂岩为主，油层胶结疏松，成岩性差，胶结物以泥质为主，泥质含量为 2% ~ 3%，碳酸盐含量 0.7%。

“八五”期间在孤东油田含水 98%、产出程度 54.4% 的断块油藏开展了小井距三元复合驱先导性试验，采收率提高 13.4%^[14-15]。为了进一步检验复合驱在断块油藏的试验效果，胜利油田于 1997 年在孤东西区开展了弱碱表面活性剂（WPS）三元复合驱扩大试验，数值模拟预测提高采收率 15.5%，目前阶段提高采收率 12.7%（见表 4）。

3.2 国内化学复合驱技术发展趋势

为了削弱和避免碱的负面作用，进一步发展完善化学复合驱技术，弱碱三元、SP 二元复合驱成为目前研究的热点^[7]。大庆油田北二西二类油层弱碱复合驱提高采收率取得良好效果，采出液比强碱复合驱采出液容易处理，呈现良好应用前景，目前正在计划扩大试验区规模，进一步验证其效果。同时中国石油在辽河油田、吉林油田、新疆油田等开展了无碱复合驱现场试验，油藏类型分别为中高渗透率、中低渗透率的砂岩油藏和砾岩油藏。吉林油田 SP 二元复合驱开始于 2008 年，辽河油田、新疆油田 SP 二元复合驱于 2010—2011 年进入现场试验。胜利油田也在孤东七区开展了断块油藏 SP 二元复合驱现场试验（见表 5），目前阶段提高采收率 10.3%^[7,14-15]。

表 5 国内 SP 二元复合驱现场试验区块油藏性质及复合驱提高采收率效果预测

油田及区块	原油黏度/ (mPa · s)	油层温度/ ℃	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	地层水矿化度/ (mg · L ⁻¹)	二价阳离子含量/ (mg · L ⁻¹)	原油酸值/ (mg · g ⁻¹)	表面活性剂	预测提高采收率/%
吉林红岗	12.9	55	163	14 000	43 ~ 55	0.14	石油磺酸盐	13.8
新疆七中区	26.0	40	119	6 500 ~ 8 000	90 ~ 170	0.18	KPS+助剂	15.5
辽河锦 16 块	14.0	55	2 859	3 500	42.2	0.40 ~ 1.16	两性表面活性剂	15.4
长庆马岭	2.3	51	67	12 610 ~ 26 130	510		两性表面活性剂	15.1
胜利油田孤东七区	45.0	68	1 320	8 200	230	2.98	WPS+助剂	12.7

目前中国化学复合驱技术总的发展趋势是：复合驱体系由强碱三元复合驱向弱碱三元复合驱、无碱二元复合驱体系转变，适用油藏类型由高渗透率油藏向中低渗透率油藏推广，由整装砂岩油藏向砾岩、复杂断块油藏推广，由低矿化度油藏向高矿化度油藏推广。

化学复合驱推广应用需要解决的关键技术问题主要有：复合驱用高效廉价表面活性剂产品研制；

适合高温高盐油藏条件的新型耐温抗盐聚合物和表面活性剂的研制；复合驱现场配套工艺技术改进；复合驱现场跟踪调整优化技术。

3.3 国外化学复合驱技术试验现状与发展趋势

国外复合驱研究与试验分两个阶段，早期重点在胶束-聚合物驱的研究与试验（主要在美国）。20 世纪 80 年代以来，美国开展了三元复合驱先导性试验。近

年来随着原油价格上升,印度、沙特、马来西亚等多个国家也开展了各种化学复合驱研究和试验。

美国早在 1986 年以前就进行了大量的化学驱技术室内研究。20 世纪 60—80 年代, Marathon、Texaco、Exxon 和 Shell 石油公司在美国 Illinois 盆地开展了大量的胶束-聚合物驱油试验^[7,19]。Marathon 石油公司在该盆地的胶束-聚合物驱试验项目约有 20 个,绝大多数获得了成功,注入段塞 0.10~0.18 PV,采收率提高约 15%~25%。如:美国 Wilmington Field 胶束-聚合物驱试验项目始于 1979 年 10 月,4 注 6 采,至 1981 年 12 月结束,Marathon 公司曾报道增产油量 2.6×10^4 t 左右。胶束-聚合物驱存在的主要问题是使用的表面活性剂浓度较高(2.5%以上)。由于使用了高浓度的表面活性剂溶液,每桶油的化学剂花费为 10~25 美元。为了降低成本,80 年代后开始研究低浓度的 ASP 三元复合驱,ASP 驱每桶油化学剂花费为 0.95~2.42 美元。美国在 Tanner 油田、Cambridge 油田、West Kiehl 油田进行了 ASP 三元复合驱试验^[20-22]。如 Tanner 油田,油藏深度 2 717 m,孔隙度 20%,平均渗透率 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油层平均有效厚度 7.62 m,属于砂岩储集层。原油密度 0.9279 g/cm^3 ,黏度 $11 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,油藏温度 79℃。1997 年 10 月—2000 年 4 月采用水驱,采出程度 43%时开始实施 ASP 三元复合驱,试验从 2000 年 4 月开始,至 2003 年底结束,ASP 配方为 1.0% NaOH + 0.1% 表面活性剂(ORS-41HF) + 1 000 mg/L 的 1275A 型聚合物,再注入 0.25 PV 的聚合物保护段塞。三元复合驱试验提高采收率 12.8%。

2010 年美国在 Illinois 盆地 Bridgeport 砂岩油藏开始实施三元复合驱方案^[23]。该先导性试验区油藏平均渗透率 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油藏温度 27℃,矿化度 16 000 mg/L,原油黏度 $11 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。至 2009 年 7 月完成了室内岩心驱油实验评价、数值模拟研究和化学配方的设计。2010 年 2 月,新增钻井 17 口,4 月开始预注。2010 年 8 月开始注入 ASP 段塞。该先导试验由 6 个常规五点法井网构成。目前监测井的综合含水率已经由注水后的 99%降到 88%。

近几年,印度尼西亚 Medco 石油公司、马来西亚 Petronas 石油公司等计划针对本国一些已开发老油田开展三元/二元复合驱技术现场试验^[24-25],这些区块为高温高盐油藏,采用化学复合驱面临新的挑战。

Medco 石油公司 2008 年开始对印度尼西亚 Kaji-Semoga 油田进行三元/二元复合驱的可行性研

究^[24]。Kaji-Semoga 油田为碳酸盐岩油藏,1997 年投入开发,油藏面积 16.43 km^2 ,深度 841 m,孔隙度 19%,油层厚度 17.68 m,平均渗透率 $285 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率变异系数 0.7,原始地层压力 8.5 MPa,油藏温度 83℃,原油密度 0.846 g/cm^3 ,地层水矿化度 15 000 mg/L。室内配方筛选出抗盐聚合物和两性离子表面活性剂,岩心驱油实验表明,采用 SP 二元复合驱可以提高采收率约 17%。

马来西亚 Petronas 石油公司拟对海上 Dulang 油田开展化学复合驱试验研究^[25]。Dulang 油田为高温高盐复杂断块油藏,油藏温度 100~120℃,矿化度 36 000 mg/L,平均渗透率 $67.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,地下原油黏度 $0.7 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。2011 年初水驱采收率为 22.5%,综合含水率为 75%。化学复合驱作为极具潜力的进一步提高采收率技术,已经进入室内筛选评价阶段,采用有机酸-碱-聚合型表面活性剂的配方体系,有效克服了活性剂与二价阳离子产生沉淀的问题,已初步筛选出耐盐的表面活性剂配方和耐温 100℃的新型聚合物室内样品。

高温高盐油藏复合驱技术应用难度大,主要瓶颈是耐高温抗盐聚合物和表面活性剂的开发。随着耐高温抗盐驱油剂和新配方的不断研发,化学复合驱将会得到更大的发展和应用。

4 结论

随着近年来化学复合驱驱油机理和配方体系研究的逐步深入,驱油剂研制不断取得突破,化学复合驱矿场试验项目不断增多,化学复合驱正逐步成为经济有效的大幅度提高采收率的三次采油技术。化学复合驱总的发展趋势是由强碱三元复合驱向弱碱、无碱复合驱体系转变。化学复合驱的应用对象和条件也逐步扩展,由高渗透率油藏向低渗透率油藏推广应用,由整装砂岩油藏向砾岩油藏、碳酸盐岩油藏和复杂断块油藏推广应用,由低温低盐油藏向高温高盐油藏推广应用。

复合驱中聚合物的主要作用是增加驱替液黏度以扩大波及体积,碱和表面活性剂的主要作用是降低油水界面张力、乳化原油和改变岩石润湿性以提高驱油效率,ASP 三元、SP 二元复合驱具有提高驱油效率和扩大波及体积的双重作用,提高采收率效果优于单一聚合物驱或表面活性剂驱。低浓度复合驱配方体系经济有效,是目前化学复合驱技术的主要发展方向。

中国三元复合驱技术目前在大庆油田进入工业化

试验和推广应用阶段,现场应用效果良好。在复合驱试验过程中逐步形成了系列配套技术。存在的主要问题是碱引起的检泵周期较短和采出液处理难度大、成本高。为了减少强碱的负面影响,弱碱三元和 SP 二元复合驱成为研究热点,已经部署了弱碱三元扩大试验和多个二元复合驱先导性试验项目,试验效果有待考察。国外化学复合驱现场先导性试验也取得了一定进展,开展复合驱试验的国家增多,国外油藏应用对象大部分为高温高盐油藏、碳酸盐岩油藏,耐温抗盐驱油剂的研制力度有待加强。

参考文献:

- [1] 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 & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 46-49.
- [2] 李士奎, 朱炎, 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, 63.
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, 63.
- [3] 朱友益, 沈平平. 三次采油复合驱用表面活性剂合成、性能及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
Zhu Youyi, Shen Pingping. Synthesis, properties and application of chemical combination flooding surfactants[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [4] Lake L W. Enhanced oil recovery[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc. Press, 1989.
- [5] 张景存. 提高采收率方法研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
Zhang Jingcun. Study of EOR methods[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [6] 赵凤兰, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. ASP 体系与大庆原油的乳化作用及影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(3): 66-69.
Zhao Fenglan, Yue Xiang'an, Hou Jirui, et al. Evaluation and influencing factors of emulsification between ASP system and Daqing crude oil[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(3): 66-69.
- [7] 朱友益, 张翼, 牛佳玲, 等. 无碱表面活性剂-聚合物复合驱技术研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 346-351.
Zhu Youyi, Zhang Yi, Niu Jialing, et al. The progress in the alkali-free surfactant-polymer combination flooding technique[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 346-351.
- [8] 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.
- [9] Wang D, Xia H, Yang S, et al. The influence of visco-elasticity on micro forces and displacement efficiency in pores cores and in the field[R]. SPE 127453, 2010.
- [10] 高树堂, 沈希宝, 李华斌, 等. 三元复合驱提高油田采收率试验的进展[J]. 国外油田工程, 1992, 3: 1-8, 57.
Gao Shutang, Shen Xibao, Li Huabin, et al. Progress of ASP combination flooding tests[J]. Foreign Oilfield Engineering, 1992, 3: 1-8, 57.
- [11] 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.
- [12] Zhu Youyi, Jian Guoqing, Wang Zhe, et al. Development progress of surfactants for chemical combination flooding[J]. Advanced Materials Research, 2012, 524-527: 1673-1680.
- [13] Gu Hongjun, Yang Ruiqi, Guo Shuanggeng, et al. Study on reservoir engineering: ASP flooding pilot test in Karamay Oilfield[R]. SPE 50918, 1998.
- [14] Qu Z, Zhang Y, Zhang X, et al. A successful ASP flooding pilot in Gudong Oil Field[R]. SPE 39613, 1998.
- [15] Wang Chenlong, Wang Baoyu, Cao Xulong, et al. Application and design of alkaline/surfactant/polymer system to close well spacing pilot Gudong Oilfield[R]. SPE 38321, 1997.
- [16] 梁亚宁, 曹刚, 师国臣, 等. 大庆油田三元复合驱螺杆泵综合防垢技术[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 483-489.
Liang Yaning, Cao Gang, Shi Guochen, et al. Progressing cavity pump anti-scaling techniques in alkaline-surfactant-polymer flooding in the Daqing Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 483-489.
- [17] Zhu Youyi, Hou Qingfeng, Liu Weidong, et al. Recent progress and effects analysis of ASP flooding field tests[R]. SPE 151285, 2012.
- [18] 许长福, 刘红现, 钱根宝, 等. 克拉玛依砾岩储集层微水驱油机理[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 725-732.
Xu Changfu, Liu Hongxian, Qian Genbao, et al. Microcosmic mechanisms of water-oil displacement in conglomerate reservoirs in Karamay Oilfield, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 725-732.
- [19] Rai K, Johns R T, Lake L W, et al. Oil-recovery predictions for surfactant polymer flooding[R]. SPE 124001, 2009.
- [20] Wyatt K, Pitts M J, Surkalo H. Mature waterfloods renew oil production by alkaline-surfactant-polymer flooding[R]. SPE 78711, 2002.
- [21] Vargo J, Turner J, Vergnani B, et al. Alkaline-surfactant-polymer flooding of the Cambridge Minnelusa Field[R]. SPE 68285, 2000.
- [22] Pitts M J, Dowling P, Wyatt K, et al. Alkaline-surfactant-polymer flood of the Tanner Field[R]. SPE 100004, 2006.
- [23] Sharma A, Aziz-Yarand A, Clayton B, et al. The design and execution of an alkaline-surfactant-polymer pilot test[R]. SPE 154318, 2012.
- [24] Zhu Youyi, Han Dong, Wang Zhe, et al. Experimental study of EOR for Kaji-Semoga Oil Fields, Part : Experimental study of chemical flooding[R]. Beijing: EOR Research Center, RIPPED, PetroChina, 2006.
- [25] Elraies K A, Tan I M. Design and application of a new acid-alkali-surfactant flooding formulation for Malaysian Reservoirs[R]. SPE 133005, 2010.

第一作者简介: 朱友益 (1963-), 男, 江苏常熟人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事化学驱提高采收率技术研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油采收率研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: zhyy@petrochina.com.cn

收稿日期: 2011-06-18 修回日期: 2012-11-26

(编辑 郭海莉 绘图 刘方方)