

# 国内外三元复合驱各“元”驱油效果的研究进展

杨双春<sup>1,2\*</sup>, 张传盈<sup>2</sup>, 潘一<sup>2</sup>, 杨二龙<sup>1</sup>, 郭永成<sup>3</sup>

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆163318; 2. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺113001; 3. 中国石油天然气股份有限公司抚顺洗化厂, 辽宁抚顺113001)

**摘要:**介绍了三元复合驱各“元”对驱油效果的影响和驱替机理,包括碱(无机碱、有机碱、复碱)、表面活性剂(生物表面活性剂、离子表面活性剂、非离子表面活性剂、非离子-阴离子表面活性剂、两性表面活性剂)、聚合物对三元复合驱驱油效果的影响,对各种化学环境下三元复合驱驱油效果的影响进行了比较和评价,并对以后三元复合驱驱油的发展提出了建议。

**关键词:**ASP; 碱; 表面活性剂; 聚合物

**中图分类号:**TE357

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2017)01-0028-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.01.007

## Research advance in the oil-displacement effect of ASP flooding system

YANG Shuang-chun<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Chuan-ying<sup>2</sup>, PAN Yi<sup>2</sup>, YANG Er-long<sup>1</sup>, GUO Yong-cheng<sup>3</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

3. Fushun Petrochemical Company Synthetic Detergent Factory, Fushun 113001, China)

**Abstract:** The roles of each component of alkaline/surfactant/polymer (ASP) flooding system playing in the oil displacement efficiency are introduced, including alkali (inorganic base, organic base, mixed alkaline), surfactant (bio-surfactant, ionic surfactant, nonionic surfactant, non ion-anion surfactant, amphoteric surfactant) and polymer. Their corresponding displacement mechanisms are also described. The effect of various chemical environments on oil displacement efficiency of ASP is compared. Some suggestions about the development of oil displacement of ASP are put forward as well.

**Key words:** ASP; alkali; surfactant; polymer

三元复合驱是一种产生于20世纪80年代的石油采油技术,1977年美国第一次报道三元复合驱采油技术,三元复合驱技术逐渐被各国重视。20世纪90年代由于石油价格的大幅度回落,国外三元复合驱的研究受到冲击,主要的石油公司也停止对其的研究。2000年以后随着世界石油资源的影响,各国又重新开始对三元复合驱的研究。三元复合驱主要以碱、表面活性剂、聚合物为驱替剂的驱油技术。三元复合驱是目前驱油手段的研究热点,备受各国学者关注。2014年中国发布的《能源发展战略行动计划》中提到要加强国内能源开发,稳步提高石油产量,到2020年基本形成比较完善的能源安全体系,储采比提高到14~15。计划指出应推广应用先进技术,推进能源创新技术发展。据报道,马来西亚<sup>[1]</sup>已进行碳酸盐储层的酸碱表面活性剂驱油,尼日利亚<sup>[2]</sup>利用阿拉伯树胶三元复合驱驱油;美国也有采用氢氧化铵碱<sup>[3]</sup>、三苯乙烯基苯酚阴离子表面活性剂<sup>[4]</sup>三元复合驱驱油的报道;国内有腰果酚磺酸盐类<sup>[5]</sup>表面活性剂等三元复合驱驱油剂的报道。

学者们目前对三元复合驱的研究主要是三元复合驱中的各“元”对驱油效果的影响和驱油机理。本文中介绍了碱性环境、表面活性剂、破乳剂、聚合物对三元复合驱驱油效果的影响和研究现状,以期对相关研究提供参考。

## 1 碱性环境对三元复合驱驱油效果的研究现状

研究表明,不同类的碱对三元复合驱驱油效果的影响是不同的。学者们提出碱提高采收率的机理包括:碱能降低油水的界面张力进而提高驱油率;碱能与油酸反应使原油乳化,进而控制流体速度,使原油与药剂接触时间延长,间接地提高原油采出率;聚合物黏稠度的提高也依赖于碱的存在。此外,油层中的钙镁离子与碱反应后可以保护加入其中的聚合物与表面活性剂。

### 1.1 无机碱

作为预冲剂的牺牲剂一般是一些易发生吸附的廉价碱剂,弱碱与强碱的驱油效果是不同的。杨

雪<sup>[6]</sup>在大庆油田萨北开发区北二区西部的萨 II10-12 层进行了弱碱三元复合驱油效果的研究,结果表明,弱碱三元复合驱见效高峰期增油倍数高于强碱:弱碱三元复合驱见效高峰期增油 295 t,增油倍数 9.93,而强碱三元复合驱在北-断东的实验中最大增油倍数仅为 3.70。刘忠和等<sup>[7]</sup>以大庆采油四厂原油和 NaHCO<sub>3</sub> 为对象研究了弱碱对界面张力的影响。结果表明,当聚合物质量分数为 0.3% 时界面张力值随着 NaHCO<sub>3</sub> 质量分数的增加先降低后升高:当碳酸氢钠质量分数为 0.8% 时界面张力值最低。Song 等<sup>[8]</sup>以强碱氢氧化钠为碱剂在室内进行岩心驱替三元复合驱实验,结果表明,强碱三元复合驱比弱碱三元复合驱提高 14.7% 的原油采收率。

无机碱三元复合驱能提高原油采收率但也有弊端,使用无机碱会出现系统结构破坏严重,采出液乳化困难等问题,也正因为此限制了三元复合驱的推广应用。

### 1.2 有机碱

很多学者研究用有机碱代替无机碱来提高原油采收率。石静<sup>[9]</sup>针对胜利油田原油,进行了(质量分数 0.5%)乙醇胺和(质量分数 1.0%)氯化钠与 SLPS(胜利石油磺酸盐)作用的试验,结果表明,醇胺和胜利石油磺酸盐之间在降低油水界面张力上存在协同作用,对原油黏度影响很小。宗丽平等<sup>[10]</sup>研究了某些弱聚合物酸性钠盐复合驱油的效果。实验中当无机碱碳酸钠和有机碱质量分数都为 0.01% 时,加入碳酸钠后油的界面张力为 0.006 mN/m,加入有机碱后油的界面张力为 0.005 mN/m(界面张力与原油采收率一般呈反比,界面张力越低原油的采收率越高)。同时作者还发现在软化盐水中加入

碳酸钠会降低聚合物黏度:质量分数同为 0.01% 的碳酸钠和有机碱在软化盐水中,加入碳酸钠的聚合物黏度为 9.3 mP·s,加入有机碱的聚合物黏度为 14.6 mP·s,说明采用有机碱作为三元复合驱的碱剂能提高三元体系的采收率。Xie 等<sup>[11]</sup>对比研究了在常温下乙醇胺分子溶液与氢氧化钠溶液对原油的驱油效果,结果表明,乙醇胺分子溶液在岩心驱替实验中的采收率比氢氧化钠提高了 14.8%。同时作者还发现以乙醇胺分子溶液作为碱剂的驱替实验承受注入压力更高,这有利于原油的采出。

### 1.3 复碱

碱对三元复合驱提高原油采收率有很大影响,复碱结合了无机碱的增油减水和有机碱在三元复合驱里减垢增强乳化的作用。邹爱华等<sup>[12]</sup>研究了 SDDAB/脂肽复配体系对原油采收率的影响。实验表明,油水动态界面张力随 SDDAB 质量浓度的增大先逐渐增加后降低,当 SDDAB 质量浓度为 1.0 g/L 时油水界面张力最低能降到 1 mN/m。同时,作者发现 SDDAB/脂肽/NaHCO<sub>3</sub> 复配体系降低原油界面张力的能力弱于 SDDAB/脂肽/NaCO<sub>3</sub> 复配体系。李寅等<sup>[13]</sup>研究了十二烷基甜菜碱(SB-12)与 HABS(重烷基苯磺酸盐)的驱油协同作用,实验中原油取自大庆采油四厂杏五西区块,质量比为 1:1 的 BS-12 与 HABS(总质量浓度为 0.5 g/L)在 1.2 g/L 复碱 NaSiO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 存在下具有明显的协调作用,原油与 BS-12-HABS 复碱三元复合驱体系的界面张力最低可降至 10<sup>-4</sup> mN/m 数量级。

总之,无机碱对三元复合驱的驱油效果是明显的,但存在系统结构破坏严重,采出液难以液化等问题;有机碱能够减少碱剂对当地土质的影响,但现在

(上接第 27 页)

[20] Cieplak M, Ceborska M, Jarosz S. Synthesis of higher carbon sugars from dihydroxyacetone and D-arabinose: An organocatalytic approach[J]. *Tetrahedron: Asymmetry*, 2012, 23: 1213-1217.

[21] Mylin A M, Levytska S I, Sharanda M E, et al. Selective conversion of dihydroxyacetone-ethanol mixture into ethyl lactate over amphoteric ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> catalyst[J]. *Catalysis Communications*, 2014, 47: 36-39.

[22] Dapsens P Y, Kusema B T, Pérez-Ramírez J. Gallium-modified zeolites for the selective conversion of bio-based dihydroxyacetone into C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub> alkyl lactates[J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2014, 388: 141-147.

[23] Sudara M, Findrika Z, Lozanoc C. Aldol addition of dihydroxyacetone to N-Cbz-3-aminopropanal catalyzed by two aldolases variants in microreactors[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2013, 53: 38-45.

[24] Pavlovic-Djuranovic S, Kun J F J, Schultz J E, et al. Dihydroxyace-

tone and methylglyoxal as permeants of the Plasmodium aquaglyceroporin inhibit parasite proliferation[J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2006, 1758: 1012-1017.

[25] Fesq H, Brockow K, Strom K. Dihydroxyacetone in a new formulation-A powerful therapeutic option in vitiligo[J]. *Dermatology*, 2001, 203(3): 241-243.

[26] Niknahad H, Ghelichkhani E. Antagonism of cyanide poisoning by dihydroxyacetone[J]. *Toxicology Letters*, 2002, 132: 95-100.

[27] Brown D. Skin pigmentation enhancers[J]. *J Photochem Photobiology B*, 2001, 63(1/2/3): 148-161.

[28] Stanko R T, Arch J E. Inhibition of regain in body weight and fat with addition of 3 carbon compounds to the diet with hyper energetic feeding after weight reduction[J]. *Int J Obes Relat Metab Disorders*, 1996, 20: 925-930.

[29] 郑裕国, 王亚军, 胡忠策. 一种瘦肉型饲料添加剂及应用: CN, 101524119A[P]. 2009-09-09. ■

能在三元复合驱油中用的有机碱种类不多;复碱在某些方面能够结合无机碱和有机碱的优点,但一般需要与其他助剂复配来提高三元复合驱的驱油效果。

## 2 表面活性剂对三元复合驱的驱油效果研究现状

碱对三元复合驱油有提高采收率、降低原油含水率的作用,但可用碱剂价格一般较高,而表面活性剂能够减少碱的应用,从而降低三元复合驱的成本,且表面活性剂对三元体系的驱油效果也存在一定的影响。目前看来,不同的表面活性剂对相同的三元体系的驱油效果是不同的,同类的表面活性剂对不同的三元体系的驱油效果也是不同的。

### 2.1 生物表面活性剂

生物表面活性剂具有能重复利用、可一次大量培养、污染小等优点,很多学者研究了生物表面活性剂对三元复合驱体系驱油的影响。李道山等<sup>[14]</sup>研究了生物表面活性剂鼠李糖脂发酵液(RH)与表面活性剂(ORS)按一定比例复配后的协同作用,结果表明,鼠李糖脂发酵液分子属于非离子型表面活性剂,对于胶束的形成具有强烈的促进作用,当表面活性剂的总质量分数达到 0.06% 以上时,油水界面张力达到  $10^{-3}$  mN/m 数量级,作者在萨尔图油田的三元复合驱先导性矿场实验区进行了使用生物表面活性剂的中试,结果试验区平均提高原油采收率 16.64%。Wang 等<sup>[15]</sup>研究了乙醇发酵的生物表面活性剂(SF)与烷基苯磺酸盐(ORS)按一定比例复配降低油水表面界面张力的协同作用,结果表明,质量分数 0.1% SF 与 0.1% ORS 复配后进行岩心驱替实验得到的采收率比单独用质量分数 0.1% ORS 得到的采收率高 7%,与质量分数 0.3% ORS 单独实验时取得的采收率相同。Hanaa 等<sup>[16]</sup>研究了从阿曼油田石油污染土壤中培养的枯草杆菌与化学表面活性剂以 1:1 的比例混合后对原油采收率的影响,实验表明,在 Berea 砂岩岩心上进行润湿性实验发现,表面活性剂与岩心表面的接触角从  $70.60^\circ$  减少到  $25.32^\circ$ (含油岩石因润湿性的变化呈现出吸水排油的现象,即接触角越小原油的采出率越高),试验中的残油率达 50%(即残油中的 50% 原油被采出),该生物表面活性剂有提高原油采出率的作用。

### 2.2 阴离子表面活性剂

生物表面活性剂虽然能降低三元复合驱的成本,但生物表面活性剂的制备复杂,目前对离子或非

离子表面活性剂研究较多。陈明贵等<sup>[17]</sup>研究了磺酸盐阴离子双子表面活性剂(即双  $\alpha$ -磺化棕榈酸甲酯二钠盐,GS)和疏水缔合聚合物对油水表面张力的影响,结果表明,当疏水缔合聚合物的质量浓度达到 1 000 mg/L 以后表面张力趋于稳定,说明聚合物会在空气与水界面上发生吸附,从而替代部分表面活性剂;同时作者发现 GS 能使聚合物大分子的表观粒径减小,黏度降低:当 GS 达到约 50 mg/L 时聚合物黏度最大,随后逐渐减小。Zhu 等<sup>[18]</sup>以烷基苯磺酸盐为表面活性剂,实验中表面活性剂质量分数 0.05% ~ 0.30% 都可获得超低界面张力,有利于原油的采收;同时笔者发现,以弱碱为碱剂进行三元复合驱油实验能比水驱油实验提高 22% ~ 23% 的采收率。范海明等<sup>[19]</sup>进行了一种新型阴离子 Gemini 表面活性剂二油酰胺基胱氨酸钠(SDOLC)三元复合体系的驱油试验,试验对象为均质和非均质岩心。均质岩心试验结果为:在水驱初始阶段采收率为 43.88%, Gemini 型表面活性剂三元复合驱油体系注入体积达到 0.6 PV 时,采收率提高了 10.33%。非均质岩心结果为:水驱阶段采收率 34.57%,注入 0.6 PV Gemini 表面活性剂三元复合驱油体系后采收率提高了 15.14%。可见水驱后进行该三元复合驱油体系驱能提高采收率。Onuoha 等<sup>[20]</sup>分别以硫酸月桂酸(SDS)和吐温 80 为三元复合驱油实验的表面活性剂进行驱替,结果表明,硫酸月桂酸为表面活性剂驱替的采收率比以吐温 80 为表面活性剂提高 15%。

### 2.3 非离子表面活性剂

目前的 ASP 主要采用阴离子表面活性剂,但阴离子表面活性剂易受到外界环境条件的影响(诸如 pH 等),使得体系性能变差(如加入氢氧化钠会使体系易腐蚀地层)。于佰林等<sup>[21]</sup>研究了壬基酚聚氧乙烯醚(NP)非离子表面活性剂与合成石油磺酸盐对三元复合驱油效果的影响。实验中采用配方一[质量分数 1.0% NaOH + 1 500 mg/L Polymer(800 万聚合物) + 0.4% 复配表面活性剂]和配方二[质量分数 1.0% NaOH + 1 500 mg/L Polymer(800 万聚合物) + 0.4% 纯石油磺酸盐 DQ01],在同样大小段塞非均质岩心上做物模实验,结果表明,三元复合化学驱采收率提高值均在 20% 左右。同时发现试验中当加入 SNP173 非离子表面活性剂且和石油磺酸盐配比为 1:1 时较大区域内界面张力值达到了超低  $10^{-3}$  mN/m 数量级,可见非离子表面活性剂能有效提高三元复合驱采油率。杨希志等<sup>[22]</sup>进行了改性

烷醇酰胺类表面活性剂(NBS)与重烷基苯环酸盐的三元复合体系室内驱油物理模拟实验,试验中在恒温90 d前后体系有较好的界面稳定性,且体系中碱的用量也由1.0%~1.2%降至0.3%左右,当强碱质量分数在0.28%~0.35%时,三元复合体系的界面张力值可以维持在超低范围内,超低的界面张力值有助于提高采油率。

#### 2.4 非离子-阴离子表面活性剂

油藏的地下环境复杂,很多油藏是处于高温、高矿条件下的,因此HABS/碱/原油体系的界面张力很难达到超低界面张力值,现在有学者采用非离子-阴离子表面活性剂复配的体系驱油。李立勇等<sup>[23]</sup>开发了一种非离子-阴离子型表面活性剂——脂肪醇聚氧乙烯醚磺酸盐(AESO)。实验中的脱水脱气原油取自江苏苏北油田;实验中所用水(苏北油田地层水)总矿化度为9 000 mg/L,钙镁离子质量浓度150 mg/L。在45℃单独使用HABS时,氯化钠质量分数在2.0%以下时界面张力达到较低界面张力,但当氯化钠质量分数达到3.0%时HABS作为表面活性剂的体系就会有新相生成,而AESO与HABS复合表面活性剂在氯化钠质量分数达到10.0%时才有新相生成,对比表明,AESO的耐盐性比HABS强,若将其用于三元复合驱,可提高三元复合驱在高矿区的石油采收率。Wu等<sup>[24]</sup>研究了SPS1708表面活性剂对原油采收率的影响。对SPS1708表面活性剂(配方:质量分数0.6%  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  + 0.3%表面活性剂 + 0.1%聚合物)进行岩心驱替实验,相对于水驱采收率提高了17%~18%。

#### 2.5 两性表面活性剂

两性表面活性剂结构中同时带有阴离子和阳离子基团,具有其他表面活性剂所没有的优良性能。Khaled等<sup>[25]</sup>研究了一种新型的酸碱高分子表面活性剂对Angsi原油采收率的影响,表面活性剂的碳酸根离子来自碳酸钠,酸取自麻风树油。结果表明,该酸碱高分子表面活性剂能降低界面张力,注入0.5 PV的表面活性剂较水驱驱油量提高18.8%。同时作者还发现该表面活性剂不会在采油过程中产生沉淀,可用海水复配,符合环保的理念。张荣明等<sup>[26]</sup>研究了十八烷基羟基磺基甜菜碱体系三元复合驱时的界面张力变化。研究中加入不同浓度十八烷基羟基磺基甜菜碱且以氢氧化钠和碳酸钠为碱剂下的体系界面张力均保持在 $10^{-3}$  mN/m数量级,随着时间的延长体系的界面张力甚至可达到 $10^{-5}$  mN/m数量级,表明添加十八烷基羟基磺基甜菜碱后能使

三元复合驱油体系长期保持低界面张力,且该体系受碱剂的强弱影响较小。Zhang等<sup>[27]</sup>研究了一种新型甜菜碱表面活性剂对三元复合驱驱油效果的影响,实验表明,该表面活性剂能维持超低界面张力180 d,在实验结束后表面活性剂黏度保留率大于90%,能减少成本,此外该新型甜菜碱表面活性剂能在低温低盐度和高温高盐度的油田中具有较好的乳化能力,因此可用于低温低盐、高温高盐地区的原油驱替中。

生物表面活性剂、离子表面活性剂、非离子表面活性剂、非离子-阴离子表面活性剂、两性表面活性剂,都能在某种条件下使复合体系的界面张力降到较低界面张力水平。生物表面活性剂能够降低三元复合驱的成本,但是制备比较复杂;阴离子表面活性剂容易受到外界环境的影响;非离子表面活性剂洗油效果好,能降低地层受到氢氧化钠的损害;非离子-阴离子表面活性剂在高温、高压条件下的三元复合体系增油效果良好;两性表面活性剂因为具有阴阳离子基团,驱油性能好。

### 3 聚合物对三元复合驱驱油效果的影响

目前三元复合驱驱油体系中使用的聚合物都是部分水解的聚丙烯酰胺,但由于油水中的阳离子使得聚丙烯酰胺不能完全舒展,体系黏度大幅度下降,不能较好地对流度进行控制。罗健辉等<sup>[28]</sup>研究了梳形聚丙烯酰胺(KYPAM)和日本产的MO-4000型聚合物对胶结石英砂心驱油效果的影响。研究表明,当聚合物注入量相同时,0.1% KYPAM提高采收率约为12.1%,而MO-4000提高采收率约5.61%,前者提高采收率比后者高1倍。Ujuanbi等<sup>[29]</sup>对比研究了黄原胶与阿拉伯树胶作为三元复合驱中的聚合物对原油采出率的影响,试验中所用的碱剂为氢氧化钠,烷基硫酸钠为表面活性剂,结果表明,以黄原胶为聚合物的三元复合驱驱油的置换效率为49.51%,以阿拉伯树胶为聚合物的原油置换效率为32.20%,黄原胶作为三元复合驱中的聚合物具有更好的驱油效果,且在稠油中黄原胶比阿拉伯树胶更稳定,黄原胶对于稠油的开采有重要意义。Kharma等<sup>[30]</sup>研究了以氢氧化钠、硫酸月桂酸、阿拉伯胶作预冲剂对三元复合驱驱油的影响,结果表明,单一氢氧化钠作预冲剂是试验中提高采收率最高的,达7.9%。

不同的聚合物对三元复合驱的驱油效果的影响不同,聚合物对三元复合驱的驱油效果明显。

## 4 结论

三元复合驱是目前提高驱油技术效率的重要研究方向。本文中对化学环境对三元复合驱驱油效果的影响进行了综述,笔者建议:①目前我国在生物破乳剂、生物表面活性剂方面技术比较落后,研究生物技术对三元复合驱驱油效果的影响,研究更多的适合三元复合驱的生物剂,加强微生物对三元复合驱驱油理论的研究。②目前国内对于三元复合驱的研究很多还处于试验阶段,要实现三元复合驱驱油性能的提高还有很多工作需要做,三元复合驱驱油相关理论和实践应同时推进。③研究低成本高效率的试剂降低采油所用的材料成本。

### 参考文献

- [1] Kalwar Shuaib Ahmed, Elraies Khaled A, Memon, Muhammad Khan. A new approach to asp flooding in high saline and hard carbonate reservoirs [A]. International Petroleum Technology Conference [C]. IPTC - 17809 - MS, 2014.
- [2] Jerome Avwioroko, Oluwaseun Taiwo, Ismail Mohammed. A laboratory study of ASP flooding on mixed wettability for heavy oil recovery using gum arabic as polymer [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 172400 - MS, 2014.
- [3] Jeffrey G Southwick, Esther van den Pol, Carl H T van Rijn, *et al.* Ammonia as alkali for ASP floods-comparison to sodium carbonate [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 169057 - MS, 2014.
- [4] Pathma Jithendra Liyanage, Sriram Solairaj, Gayani Pinnawala Arachchilage. Alkaline surfactant polymer flooding using a novel class of large hydrophobe surfactants [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 154274 - MS, 2012.
- [5] 王玉伟. 腰果酚磺酸盐表面活性剂的合成及性能研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
- [6] 杨雪. 大庆油田北二西弱碱三元复合驱实验动态变化特征 [J]. 内蒙古石油化工, 2012, (7): 114 - 116.
- [7] 刘忠和, 彭书丰, 张卫平. 弱碱代替强碱的三元复合驱研究 [J]. 日用化学品科学, 2008, (11): 33 - 37.
- [8] Song Rue, Zhang Dong, Xue Cong. An evaluation on strong base ASP flooding efficiency of multiple layers [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 174580 - MS, 2015.
- [9] 石静. 有机碱三元复合驱油体系与胜利原油的协同作用 [J]. 石油化工应用, 2013, (1): 16 - 19.
- [10] 宗丽平, 易泽勇, 马秀伟. 应用有机碱改进三元复合驱 (ASP) 工艺 [J]. 国外油田工程, 2007, (8): 1 - 4.
- [11] Xie Donghai, Hou Jirui, Ankit Doda. Organic alkali for heavy oil chemical EOR improves the performance over inorganic alkali [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 172895 - MS, 2014.
- [12] 邹爱华, 邓雅晴, 靳颖. 十二烷基甜菜碱/脂肽复配体系与原油界面 [J]. 油田化学, 2012, (4): 464 - 469.
- [13] 李寅, 杨世忠, 牟伯中. 十二烷基甜菜碱-重烷基苯磺酸盐/碱复合体系与大庆原油的界面行为 [J]. 油田化学, 2010, (1): 88 - 91.
- [14] 李道山, 廖广志, 杨林. 生物表面活性剂作为牺牲剂在三元复合驱中的应用研究 [J]. 石油勘探与开发, 2002, (2): 106 - 109.
- [15] Wang Dawei, Zhang Yuguang, Liu Yongjian. The application of surfactin biosurfactant as surfactant coupler in ASP flooding in daqing oil field [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 119666 - MS, 2009.
- [16] Hanaa Al-Sulaimani, Yahya Al-Wahaibi, Saif Al-Bahry. Residual-oil recovery through injection of biosurfactant, chemical surfactant and mixtures of both under reservoir temperatures: Induced-wettability and interfacial-tension effects [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2012, 2, (15): 210 - 217.
- [17] 陈明贵, 叶仲斌. 磺酸盐阴离子双子表面活性剂与疏水缔合聚合物的相互作用 [J]. 油气地质与采收率, 2009, (5): 60 - 62.
- [18] Zhu Youyi, Cao Fengying, Bai Ziwu. Studies on ASP flooding formulations based on alkylbenzene sulfonate surfactants [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 171433 - MS, 2014.
- [19] 范海明, 孟祥灿, 郁登朗. Gemini 型表面活性剂三元复合体系性能和驱油效果 [J]. 石油化工高等学校学报, 2014, (1): 79 - 83.
- [20] Onuoha S O, Olafuyi O A. Alkali/surfactant/polymer flooding using gum arabic; a comparative analysis [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 167572 - MS, 2013.
- [21] 于佰林, 孙国荣, 宋桂侠. NP 类非离子表面活性剂在油田开发中的应用 [A]. 2004 (第八届) 国际表面活性剂和洗涤剂会议论文集 [C]. 大连, 2009: 136 - 138.
- [22] 杨希志, 李海峰. 改性烷醇酰胺类表面活性剂驱油体系研究 [J]. 精细与专用化学品, 2012, (1): 51 - 53.
- [23] 李立勇, 周忠, 崔正刚. 脂肪醇聚氧乙烯醚磺酸盐耐温耐盐性研究 [J]. 精细石油化工进展, 2008, (1): 4 - 7.
- [24] Wu Kangyun, Long Hang, Wang Zhe. Enhanced oil recovery by chemical flooding from the biostromal carbonate reservoir [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 165208 - MS, 2013.
- [25] Khaled Abdalla Elraies, Isa M Tan. Design and application of a new acid-alkali-surfactant flooding formulation for malaysian reservoirs [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 133005 - MS, 2010.
- [26] 张荣明, 林士英, 李柏林. 十八烷基羟基磺基甜菜碱的合成及应用 [J]. 精细石油化工进展, 2006, (12): 1 - 3, 10.
- [27] Zhang Fan, Zhang Qun, Zhou Zhaohui. Development of novel surfactant for alkali-free surfactant/polymer combination flooding green technology [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 174581 - MS, 2015.
- [28] 罗健辉, 卜若颖, 朱怀江. 梳形聚丙烯酰胺的特性及应用 [J]. 石油学报, 2004, (2): 65 - 68, 73.
- [29] Ujuanbi Solomon, Taiwo Oluwaseun, Olafuyi Olalekan. Alkaline-surfactant-polymer flooding for heavy oil recovery from strongly water wet cores using sodium hydroxide, lauryl sulphate, shell enordet 0242, gum arabic and xanthan gum [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 178366 - MS, 2015.
- [30] Kharna Rieborue, Taiwo Oluwaseun. A comparative study of the mechanism of asp flooding for light oil recover in strongly water wet cores using sodium hydroxide, lauryl sulphate, and gum arabic [A]. Society of Petroleum Engineers [C]. SPE - 178363 - MS, 2015. ■