

# 色谱分离对三元复合体系界面张力的影响及对策

任佳维, 吴文祥, 张 栋

(东北石油大学提高采收率教育部重点实验室, 黑龙江大庆 163318)

**摘 要:**针对三元复合驱由于存在色谱分离现象而改变了体系原有性质的问题,利用实验室优选超低界面张力的三元复合体系进行填砂管流动实验,展开色谱分离对三元复合体系界面张力影响的研究。以“突破时间”和“产出时差”两个参数描述色谱分离程度,测定每次出口端采出液 120 min 时的界面张力。研究表明:复合体系中的三种化学剂间存在色谱分离现象,聚合物最早突破,表面活性剂最后突破;表面活性剂与聚合物之间的色谱分离程度最明显,聚合物与碱之间的色谱分离程度最小;色谱分离使三元复合体系界面张力由  $10^{-3}$  数量级增加到  $10^{-2}$  数量级,影响了三元复合体系的驱油效果,因此降低表面活性剂在地层中的损失将成为降低色谱分离程度的主要措施。采用槐糖脂作为牺牲剂代替部分表面活性剂放在三元复合体系前注入地层,可以有效降低色谱分离的影响,更有效地提高最终采收率。

**关键词:**表面活性剂;色谱分离;界面张力;三元复合体系;采收率;驱油效果;牺牲剂

**中图分类号:**TQ028;TE357.43 **文献标志码:**A

## Effect of chromatographic separation on ASP system interface tension and the countermeasures

REN Jiawei, WU Wenxiang, ZHANG Dong

(Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery of Education Ministry, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

**Abstract:** Because of the existing chromatographic separation phenomenon, ASP flooding changes original nature of the system. Therefore, in laboratory ultra-low interfacial tension ASP system is preferred for sand packs flow experiment to research on the effect of chromatographic separation on ASP system interface tension. The two parameters of "breakthrough time" and "output difference" are used to describe the degree of chromatographic separation, and the produced fluid interfacial tensions at the outlet end at 120 min is measured. The research shows that there exists chromatographic separation between three chemicals of ASP system, with first polymer breakthrough and finally surfactant breakthrough; there is most serious chromatographic separation between surfactant and polymer, while minimum chromatographic separation between alkali and polymer; chromatographic separation makes ASP interfacial tension increase from  $10^{-3}$  magnitude to  $10^{-2}$  magnitude, affecting flooding effect of

收稿日期:2016-03-30;修回日期:2016-04-12;责任编辑:冯 民

基金项目:国家重大专项课题(2011ZX05009-004);东北石油大学研究生培养创新基地创新科研项目(YJSJD2015-001NEPU)

作者简介:任佳维(1990—),男,河北承德人,硕士研究生,主要从事提高原油采收率原理与技术方面的研究。

通讯作者:吴文祥教授,博士生导师。E-mail: sygcwuwenxiang@sina.com

任佳维,吴文祥,张 栋. 色谱分离对三元复合体系界面张力的影响及对策[J]. 河北科技大学学报,2016,37(3):249-254.

REN Jiawei, WU Wenxiang, ZHANG Dong. Effect of chromatographic separation on ASP system interface tension and the countermeasures[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(3): 249-254.

ASP system. Thus, reducing the loss of surfactant in the formation will be the main measure to reduce the degree of chromatographic separation. Using sophorolipid as sacrificial agent to replace part of the surfactant injected into formation before ASP system can effectively reduce the impact of chromatography separation and more effectively improve the ultimate recovery ratio.

**Keywords:** surfactant; chromatographic separation; interface tension; ASP system; recovery ratio; oil displacement efficiency; sacrificial agent

三元复合驱因显著降低界面张力从而提高采收率得到广泛关注,并且作为大庆油田主要开发手段之一得到深度研究。强碱三元复合体系具有良好的协同效应,极大地降低了表面活性剂用量、扩大波及体积,具有良好的驱油效果,采收率提高幅度在20%左右<sup>[1-5]</sup>。然而三元复合体系所含化学剂受到竞争吸附、离子交换、液-液分配、多路径运移和滞留损失等因素的影响导致色谱分离现象出现<sup>[6]</sup>,使得聚合物、碱和表面活性剂在油藏内运移过程中彼此分离,破坏了三元复合体系的完整性,从而影响了三元复合体系的驱油性能,因此有必要研究色谱分离对三元复合体系界面张力的影响。在室内实验中,优选出低界面张力的三元复合体系,研究其注入填砂管后三元复合体系中各化学剂之间的流动情况,分析色谱分离对三元复合体系界面张力的影响;用槐糖脂作为生物表面活性剂代替部分表面活性剂,放在三元复合体系前注入地层,降低表面活性剂的吸附损失,以此减弱色谱分离的影响和降低界面张力,提高最终采收率。

## 1 实验概况

### 1.1 实验材料及仪器

选用分子量为 $1\ 600 \times 10^4$  聚合物(HPAM),固含量为90%,大庆炼化一厂提供;表面活性剂为重烷基苯石油磺酸盐(HABS),有效质量分数为50.23%;无机试剂: $\text{Na}_2\text{CO}_3$ (分析纯,天津市巴斯夫化工有限公司提供), $\text{NaOH}$ (分析纯), $\text{NaCl}$ (分析纯), $\text{CaCl}_2$ (分析纯), $\text{MgSO}_4$ (分析纯), $\text{Na}_2\text{SO}_4$ (分析纯), $\text{NaHCO}_3$ ;大庆油田第一采油厂原油和煤油配制的模拟油,黏度为 $10\ \text{mPa} \cdot \text{s}$ ( $45\ ^\circ\text{C}$ );大庆油田模拟污水,矿化度为 $708\ \text{mg/L}$ 。

TX500C 全量程旋转滴界面张力仪,RS6000 型高精度流变仪,德国 HAAKE 公司提供;T50 型电位滴定仪,德国梅特勒公司提供;UV-2100 型紫外分光光度计,美国尤尼柯公司提供。

### 1.2 实验步骤

1)使用 TX500C 型旋转滴界面张力仪,在温度为 $45\ ^\circ\text{C}$ ,转速为 $5\ 000\ \text{r/min}$  条件下测量初始三元复合体系界面张力,10 min 读取 1 个数值,待 2 h 后记录平衡时的界面张力值;

2)在填砂管出口放置流出液采集器,每注入 0.1 PV(注入孔隙体积倍数)便在出口端采集 1 次流出液;

3)测定每次出口端采出液 120 min 时的界面张力。

采用盐酸滴定法(使用甲基橙指示剂和 $0.05\ \text{mol/L}$  的 HCl 标准滴定液)检测碱;采用两相滴定法检测表面活性剂;对聚合物采用淀粉-碘化镉比色法<sup>[7]</sup>。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 不同碱类型下三元复合体系界面张力测定

由图 1 可知:0.15% HPAM-0.5% 碱-0.3% HABS 的界面张力是 $10^{-2}$ 数量级,且弱碱三元复合体系降低界面张力的能力大于强碱三元复合体系。0.15%HPAM-0.5%碱-0.3%HABS 与油和 0.15% HPAM-0.9%碱-0.1%HABS 与油的界面张力规律表明:碱的类型会影响三元复合体系的界面张力,而重烷基苯磺酸盐(HABS)更适合与强碱复配形成三元复合体系以达到低界面张力。经测试可知,0.3% HABS-0.5%碱-0.15%HPAM 体系中强碱三元复合体系的 pH 值为 13,弱碱三元复合体系 pH 值为

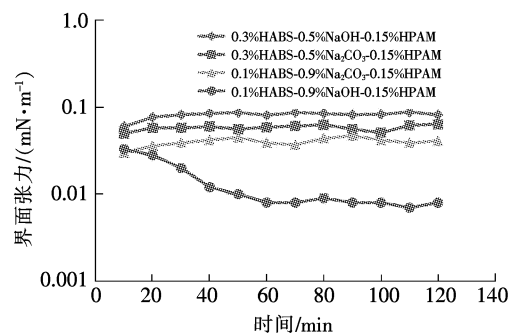


图 1 不同碱类型三元复合体系界面张力随时间变化曲线

Fig. 1 Different types of alkali ASP system interfacial tension vary with time

8,0.1% HABS-0.9% 碱-0.15% HPAM 体系中强碱三元复合体系的 pH 值为 14,弱碱三元复合体系 pH 值为 10~11,两者 pH 值不同,从而激发原油极性物质的能力不同;另外,由于两种碱的相对分子质量不同,三元复合体系溶液中离子浓度便不同,则表面活性剂在油水两相和界面上分配浓度也不同。碱与表面活性剂发生协同作用使强碱与重烷基苯磺酸盐(HABS)复配的三元复合体系具有较低界面张力。0.1% HABS-0.9% NaOH-0.15% HPAM 体系的界面张力在短时间内由  $10^{-2}$  数量级降低至  $10^{-3}$  数量级,说明此体系能达到低界面张力要求。

### 2.2 不同碱浓度下三元复合体系界面张力测定

由不同碱类型三元复合体系的界面张力得到最优体系是 0.1% HABS-0.9% NaOH-0.15% HPAM,在此基础上通过仅改变碱的浓度再次优化。由图 2 可知:碱浓度对三元复合体系界面张力的影响是比较大的。当聚合物质量浓度为 1 500 mg/L,重烷基苯磺酸盐体积分数为 0.1%,碱体积分数为 0.3%~1.2%时,随着碱体积分数的增加,界面张力由  $10^{-1}$  数量级降至  $10^{-3}$  数量级。得到最优体系是 0.15% HPAM-1.2% NaOH-0.1% HABS;将此三元复合体系作为优选体系注入填砂管,研究色谱分离的影响。

大庆原油属于石蜡基原油,碱在降低三元复合体系界面张力中的作用机理有两种观点<sup>[8]</sup>:一是加入碱导致三元复合体系具有高 pH 值,这样可以激发体系的表面活性,降低界面张力;二是加入碱调整了体系的矿化度,即改变离子浓度,调节表面活性剂分子在油水相的平衡分布。而大庆原油酸值较低,碱与其反应后生成具有表面活性物质的量较少,因此降低界面张力的主要影响因素是矿化度。研究表明:随着溶液中盐浓度变化,油水之间的表面活性剂分配系数也会改变,而该分配系数会影响界面张力变化<sup>[9]</sup>。随着碱浓度增加,水相中表面活性剂浓度逐渐减少,而表面活性剂在油相和油水界面的比例逐渐增加,有利于降低界面张力。

### 2.3 色谱分离对三元复合体系界面张力的影响

以出口端检测到的各化学剂浓度与该化学剂初始浓度之比  $C/C_0$  为纵坐标,以注入孔隙体积倍数(PV)为横坐标绘图,得到出口端流出液中各化学剂的浓度变化规律曲线,如图 3 所示<sup>[6]</sup>。用“突破时间”和“产出时差”2 个参数描述色谱分离程度,突破时间是指在填砂管出口端最早检测到流出液中化学剂的出现时的 PV 数,产出时差是各种化学剂驱替前缘达到同一相对浓度时的注入孔隙体积之差<sup>[10]</sup>。

图 3 中聚合物、碱和表面活性剂的浓度曲线在图中的位置反映了其在多孔介质中运动速度的快慢;曲线越靠左,运动速度越快(如聚合物);曲线越靠右,运动速度越慢(如表面活性剂),而曲线间的距离则反映了化学剂间的色谱分离程度<sup>[6]</sup>。

分析图 3 曲线可以发现:碱曲线下所占面积最大,表明碱的色谱分离程度最为严重。聚合物最早突破是由于岩石内存在不可入孔隙体积,相对分子质量较高的聚合物分子线团不能进入;在碱作用下聚合物水解度增大,分子链上负电荷增加;吸附过程中聚合物被排斥等诸多因素都将导致聚合物超前突破<sup>[11]</sup>。

表 1 列出了三元复合体系在  $C/C_0=0.30$  条件下的色谱分离程度。

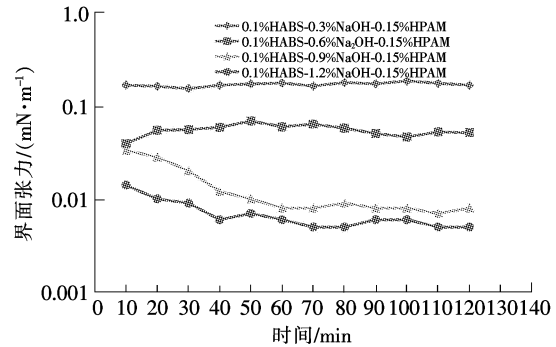


图 2 不同碱浓度三元复合体系界面张力随时间变化曲线

Fig. 2 Different concentration of alkali ASP system interfacial tension vary with time

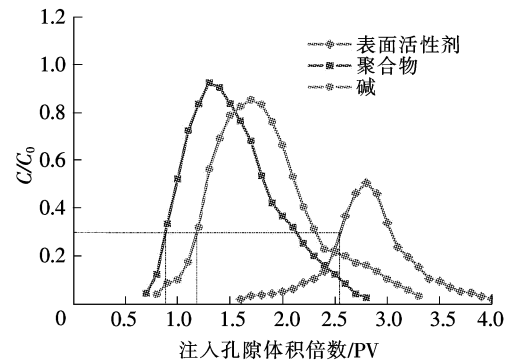


图 3 流出液化学浓度变化

Fig. 3 Effluent chemical concentration variation

表1 三元复合体系色谱分离程度( $C/C_0=0.30$ )

Tab.1 ASP system chromatographic separation degree

| 突破时间/PV |      |      | 产出时差/PV |      |      |
|---------|------|------|---------|------|------|
| P       | A    | S    | P-A     | A-S  | P-S  |
| 0.71    | 0.83 | 1.65 | 0.33    | 1.38 | 1.61 |

由表1分析可知:在地面按一定配方配制的三元复合体系注入地下后会发生组分改变,聚合物的运动速度最快,注入量为0.71 PV时聚合物最先突破;碱随后流出;表面活性剂的运动速度最慢,注入量为1.65 PV时表面活性剂最后突破,突破顺序为聚合物>碱>表面活性剂。各种化学剂之间的产出时差:聚合物-碱(P-A)、碱-表面活性剂(A-S)和聚合物-表面活性剂(P-S)依次增加,即表面活性剂与聚合物之间的色谱分离程度最为严重,聚合物与碱间的色谱分离程度最小,说明三元复合体系的色谱分离主要发生在表面活性剂与聚合物、表面活性剂与碱之间。而竞争吸附、离子交换、液-液分配、多路径运移和滞留损失都可能大量损耗表面活性剂用量<sup>[6,12]</sup>,因此降低表面活性剂在地层中的损失将成为减小色谱分离程度的主要措施。

当0.1% HABS-1.2% NaOH-0.15% HPAM体系注入填砂管后发生色谱分离,流出液中先后检测到聚合物、碱和表面活性剂的存在。测定每次出口端采出液120 min时的界面张力,其变化如图4所示。当注入量达到0.5 PV时,界面张力升高,是由于此时碱的突破,原油中的活性物质与碱反应生成的表面活性物质减少,界面张力变大;但是随后界面张力增加幅度趋于平缓,这是由于复合体系中的碱与表面活性剂之间的协同效应起到降低界面张力的作用。此外,体系中的碱还可以起到增强离子强度的作用,使表面活性剂降低界面张力<sup>[13]</sup>。当注入量达到1.7 PV时,界面张力再一次显著增大,此时检测到表面活性剂突破,即与碱发生协同效应的物质减少,导致界面张力升高。当注入量达到2.5 PV时,检测到大部分碱由于色谱分离而流出,此时复合体系中表面活性剂降低界面张力起主要作用,随着油水界面上吸附的分子逐渐增多,分子排列变得紧密而整齐,达到吸附饱和,界面张力下降<sup>[14]</sup>;然而单独的碱或者表面活性剂都不易使复合体系界面张力达到协同效应的效果,因此依然没能达到超低界面张力。即色谱分离使得三元复合体系各化学剂间彼此分离,不能有效实现各化学剂间的协同作用,使得三元复合体系不易达到超低界面张力,影响三元复合体系的性能以及油田最终采收率。

#### 2.4 槐糖脂作为牺牲剂降低表面活性剂的损失

为了避免表面活性剂在采油过程中被吸附,降低表面活性剂损失最好的方法就是在加入主表面活性剂前先加入牺牲剂,使其先被岩石吸附或进入细小裂缝,减少表面活性剂损失。有研究表明,生物表面活性剂作为牺牲剂无论对油砂进行预吸附还是和表面活性剂混合后吸附,可降低表面活性剂损失25%~30%,不仅提高了三元复合驱的效果,减弱了色谱分离的影响,还大大降低了经济成本<sup>[15-21]</sup>。

选用质量浓度分别为10 mg/L和100 mg/L的重烷基苯石油磺酸盐(HABS)作为优选三元复合体系中表面活性剂(实验1和2),而在原复合体系基础上分别加入质量浓度为10 mg/L和100 mg/L的内脂型槐糖脂前置牺牲剂(实验3和4)进行驱油实验。将实验1与实验3对比、实验2与实验4对比可知,添加了内脂型槐糖脂前置牺牲剂体系的驱油效果较好,复合驱采收率分别提高3.78%和4.41%(见表2)。内脂型槐糖脂活泼性强,不仅具有良好的乳化性能,还具有能较好地降低界面张力的特性;具有无毒、可生物降解,对环境无污染等特性。因此选择槐糖脂作为牺牲剂可降低表面活性剂的损失,减弱色谱分离的影响,更为有效地降低油水间的界面张力,提高最终采收率。

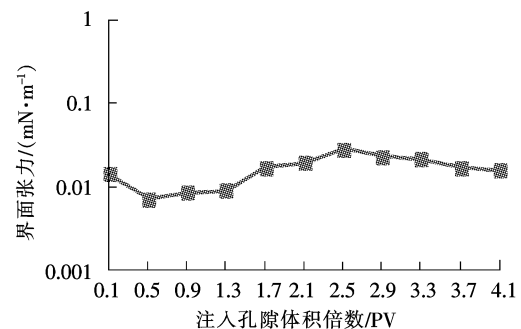


图4 界面张力随注入孔隙体积倍数变化曲线

Fig.4 Interfacial tension variation with PV

表2 物理模拟驱油实验基础数据及结果

Tab. 2 Basic data and results of physical simulation flooding experiment

| 实验编号 | 驱油体系                  | 孔隙度/% | 气测渗透率×<br>10 <sup>3</sup> /μm <sup>2</sup> | 原始含油<br>饱和度/% | 采收率/% |        |
|------|-----------------------|-------|--|---------------|-------|--------|
|      |                       |       |  |               | 水驱    | 复合驱提高值 |
| 1    | 10 mg/L HABS          | 31.90 | 1 102                                      | 93.89         | 41.59 | 4.54   |
| 2    | 100 mg/L HABS         | 30.52 | 1 238                                      | 94.25         | 44.78 | 5.76   |
| 3    | 前置牺牲剂 10 mg/L 内脂型槐糖脂  | 27.89 | 1 357                                      | 93.17         | 42.03 | 8.32   |
| 4    | 前置牺牲剂 100 mg/L 内脂型槐糖脂 | 29.36 | 1 694                                      | 94.01         | 40.28 | 10.17  |

### 3 结 论

1) 强碱三元复合体系比弱碱三元复合体系更易达到低界面张力,且同一体系中,碱的浓度在 0.3%~1.2% 范围内时,碱浓度越大越易达到低界面张力。

2) 由于色谱分离的影响,三元复合体系中聚合物最先突破,表面活性剂最后突破;三元复合体系的色谱分离主要发生在表面活性剂与聚合物、表面活性剂与碱之间;降低表面活性剂在地层中的损失将成为减小色谱分离程度的主要措施。

3) 色谱分离会破坏三元复合体系的超低界面张力,影响复合体系的驱油效果。

4) 选用内脂型槐糖脂作为牺牲剂可以对油砂预吸附,降低复合体系表面活性剂损失,有效地提高最终采收率。

### 参考文献/References:

- [1] 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-aufactant-polymer flooding in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 56-59.
- [2] TSYPEROVICH A S, KOLODZEISKAIA M V, KONOPLICH L A. Aminopeptidase system of aspergillus flavus[J]. Ukrains'kyi Biokhimichnyi Zhurnal, 1977, 49(1): 491-493.
- [3] WANG Jialu, YUAN Shiyi, SHI Fashun, et al. Experimental study of chemical concentration variation of ASP flooding[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(2): 527-530.
- [4] 闫文华,王天凤,张玉龙,等. 三元复合体系的色谱分离现象及驱油效果[J]. 大庆石油学院学报, 2000, 24(4): 21-24.  
YAN Wenhua, WANG Tianfeng, ZHANG Yulong, et al. Oil displacement and chromatographic separation of surfactant alkaline polymer flooding in homogenous artificial core[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2000, 24(4): 21-24.
- [5] 刘凯,岳湘安,杨长春,等. 三元复合体系色谱分离实验研究[J]. 日用化学工业, 2014, 44(12): 671-675.  
LIU Kai, YUE Xiang'an, YANG Changchun, et al. Experimental study on chromatographic separation phenomenon of ternary composite oil displacement agent system[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2014, 44(12): 671-675.
- [6] 杨红,朱庆祝,南宇峰,等. 三元复合体系色谱分离的实验研究及影响因素分析[J]. 石油地质与工程, 2013, 27(5): 139-141.  
YANG Hong, ZHU Qingzhu, NAN Yufeng, et al. Experimental study on chromatographic separation phenomenon of ternary composite oil displacement agent system and analysis of effect factors[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(5): 139-141.
- [7] 高振环,王克亮,徐典平,等. 三元复合驱油体系的色谱分离机理及其研究方法[J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(1): 78-80.  
GAO Zhenhuan, WANG Kelian, 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): 78-80.
- [8] PORWAL P K, AHMAD R A, CHHAJED S, et al. Liquid chromatographic method for simultaneous quantitation of clopidogrel, aspirin and atorvastatin in rat plasma and its application to the pharmacokinetic study[J]. Journal of Chromatographic Science, 2015, 53(3): 537-541.
- [9] FOSTER W R. A Low-tension waterflooding process[J]. J Petrol Technol, 1973, 25(2): 205-210.
- [10] 康万利,祁宝艳,单希林,等. 应用络合剂提高复合驱油体系的界面活性[J]. 大庆石油学院学报, 1998, 22(1): 19-20.  
KANG Wanli, QI Baoyan, SHAN Xilin, et al. Interfacial activity of three-compound-combination system increased by means of complex agent[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1998, 22(1): 19-20.
- [11] 吕江艳. 三元复合体系界面特性及其在驱油中的作用[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.  
LYU Jiangyan. The Interfacial Properties of ASP System and Its Role in the Oil-displacement Effcet[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.

- [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] 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.
- [14] KENJI H, YURIKA M, KYOKO U, et al. Simultaneous determination of hydrophilic amino acid Enantiomers in mammalian tissues and physiological fluids applying a fully automated micro-two-dimensional high-performance liquid chromatographic concept[J]. Journal of Chromatography A, 2010, 50(5): 1056-1062.
- [15] NIMURA N, FUJIWARA T, WATANABE A, et al. A novel chiral thiol reagent for automated precolumn derivatization and high-performance liquid chromatographic enantioseparation of amino acids and its application to the aspartate racemase assay[J]. Analytical Biochemistry, 2003, 315(4): 262-269.
- [16] 李柏林, 金占鑫, 杨凤艳, 等. 大庆萨中二类油层三元体系色谱分离特性研究[J]. 化学工程师, 2014, 26(8): 26-29.  
LI Bolin, JIN Zhanxin, YANG Fengyan, et al. Research of permeability on the chromatographic separation of ASP compound system of second-class reservoir in Sazhong of Daqing[J]. Chemical Engineer, 2014, 26(8): 26-29.
- [17] 李道山, 侯吉瑞, 徐瑞娟. 三元复合驱油液各组分在大庆油砂上的吸附研究[J]. 油田化学, 2001, 18(4): 358-361.  
LI Daoshan, HOU Jirui, XU Ruijuan. Adsorption of components from ASP flooding solution onto reservoir rock of Daqing[J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(4): 358-361.
- [18] 刘红娟. 三元复合体系界面张力影响因素分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(16): 132-134.  
LIU Hongjuan. ASP system interfacial tension influencing factors[J]. Journal of Yangtze University(Nat Sci Edit), 2013, 10(16): 132-134.
- [19] 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.  
LI Daoshan, LIAO Guangzhi, YANG Lin. The application studies of bio-surfactant as sacrificial adsorbate in ASP flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002(2): 106-109.
- [20] 马歌丽, 彭新榜, 马翠卿, 等. 生物表面活性剂及其应用[J]. 中国生物工程杂志, 2003, 23(5): 42-45.  
MA Geli, PENG Xinbang, MA Cuiqing, et al. The biosurfactants and its application[J]. China Biotechnology, 2003, 23(5): 42-45.
- [21] 伍晓林, 陈坚, 伦世仪. 生物表面活性剂在提高原油采收率方面的应用[J]. 生物学杂志, 2000, 17(6): 25-28.  
WU Xiaolin, CHEN Jian, LUN Shiyi. Application of biosurfactant in enhanced oil recovery[J]. Journal of Biology, 2000, 17(6): 25-28.