

# 强碱三元复合驱色谱分离及其影响因素

——以大庆油区喇嘛甸油田为例

周彦霞<sup>1</sup>, 卢祥国<sup>1</sup>, 王宝江<sup>2</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 曹豹<sup>1</sup>, 徐典平<sup>3</sup>, 张纪英<sup>2</sup>

(1.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; 2.中国石油大庆油田有限责任公司 采油六厂, 黑龙江 大庆 163114; 3.中国石油大庆油田有限责任公司 海外油田提高采收率项目经理部, 黑龙江 大庆 163711)

**摘要:**三元复合驱油体系中驱油剂的协同效应,会使油水间的界面张力大幅度下降,原油采收率大幅度提高;但三元复合驱油体系的色谱分离现象也会破坏其协同效应和完整性,揭示色谱分离现象及其影响因素对于改善三元复合驱油效果具有十分重要意义。以油藏工程和分析化学理论为指导,以化学分析和物理模拟为技术途径,并以大庆喇嘛甸油田典型区块地质特征和流体性质为研究对象,开展强碱三元复合驱色谱分离现象及其影响因素研究。结果表明,采用前置高浓度聚合物段塞后,可以有效扩大波及体积,但表面活性剂与碱和聚合物之间无因次等浓距增加,色谱分离现象加剧。大庆油区喇嘛甸油田不同区块油水性质差异对色谱分离现象存在影响,原因在于部分重烷基苯石油磺酸进入油相,影响水相中浓度检测值。强碱三元复合驱油体系中表面活性剂与碱和聚合物之间色谱分离程度比较严重,碱与聚合物之间较弱。

**关键词:**强碱三元复合驱 色谱分离 影响因素 物理模拟 无因次等浓距

中图分类号:TE357.43

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)05-0074-05

## Chromatographic separation and its influencing factors of strong-base alkali-surfactant-polymer flooding: a case of Lamadian oilfield in Daqing

Zhou Yanxia<sup>1</sup>, Lu Xiangguo<sup>1</sup>, Wang Baojiang<sup>2</sup>, Wang Lei<sup>2</sup>, Cao Bao<sup>1</sup>, Xu Dianping<sup>3</sup>, Zhang Jiying<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery of Ministry of Education of China, Northeast Petroleum University, Daqing City, Heilongjiang Province, 163318, China; 2. No.6 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing City, Heilongjiang Province, 163114, China; 3. Project Manager Department of Enhanced Oil Recovery in Overseas Oilfield, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing City, Heilongjiang Province, 163711, China)

**Abstract:** The favorable synergistic effect of oil displacing agent in alkali-surfactant-polymer (ASP) flooding system can greatly reduce the interfacial tension between oil and water, thus can greatly enhance oil recovery. But the chromatographic separation of ASP flooding system will do great damage to its synergistic effect, which can destroy its integrity. It is important to reveal the chromatographic separation and its influencing factors for improving the oil displacement effect of ASP flooding. Chromatographic separation and its influencing factors of strong-base ASP flooding system were researched in a technical way of chemical analysis and physical simulation guided by reservoir engineering and analytical chemistry theory. The research focuses on geological characteristics and fluid properties of the typical blocks in Daqing. The results show that the sweep volume can be effectively enlarged after using high concentration polymer pre-slug. But the dimensionless distance at the same concentration between surfactant and alkali/polymer is increased, which can make the chromatographic separation phenomenon aggravated. The difference in properties of oil and water of different blocks in Daqing oilfield may have influence on chromatographic separation phenomenon. Because part of heavy alkyl-benzene mahogany acid gets into

收稿日期:2015-07-31。

作者简介:周彦霞(1979—),女,山东烟台人,在读博士研究生,从事提高采收率理论和技术方面的研究。联系电话:(0459)6503406, E-mail:zhouyanxia781023@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“海上稠油油田热采技术示范”(2011ZX05057-005)。

oil phase, which can influence the concentration measurement value of water phase. In ASP flooding with strong base system, the chromatographic separation degree between surfactant and alkali/polymer is more serious, and that between alkali and polymer is weaker.

**Key words:** strong-base alkali-surfactant-polymer flooding; chromatographic separation; influencing factor; physical simulation; distance between the same dimensionless concentration

碱、表面活性剂、聚合物(ASP)三元复合驱油技术能提高驱替相粘度,降低驱替相的流度,改善油水流度比,提高波及体积<sup>[1-3]</sup>;同时,利用碱和原油中的酸性物质作用生成的表面活性剂与加入的表面活性剂之间的协同作用产生超低界面张力<sup>[4]</sup>,提高洗油效率。但三元复合驱油体系中各药剂相对分子质量不同,在多孔介质内流动时,会发生差速运移现象,即色谱分离<sup>[5-6]</sup>,将破坏三元复合驱油体系的完整性,从而降低碱与表面活性剂间的协同作用<sup>[7-8]</sup>,影响其洗油效率。王克亮等在填砂管模型上进行了三元复合驱油体系的流动实验,研究了润湿性、渗透率、渗流距离对三元复合驱油体系色谱分离的影响<sup>[9]</sup>;闫文华等人在人造均质岩心上进行了三元复合驱油体系的驱油实验,研究了注入量、粘度、注入方式对驱油效果及色谱分离的影响<sup>[10]</sup>;杨红等人在无油均质岩心上分析了岩心入口端注入速度和岩心渗透率对色谱分离的影响<sup>[11]</sup>。这些色谱分离实验都是在填砂管或无油均质岩心上进行的,而在饱和油、不同的段塞设计和不同的油水驱替情况下,色谱分离程度暂无人研究。笔者以油藏工程和分析化学理论为指导,以化学分析和物理模拟为技术途径,以大庆油区典型区块地质特征和流体性质为研究对象,开展了强碱三元复合驱色谱分离现象及其影响因素研究,以期改善三元复合驱的增油效果提供有利依据。

## 1 实验要求

### 1.1 材料

实验用油为模拟油,由大庆油区采油六厂的脱水原油与煤油混合而成,模拟油在45℃下的粘度为9.8 mPa·s;实验用水为采出污水,取自大庆油区采油六厂;聚合物是由大庆炼化公司提供的部分水解聚丙烯酰胺,其相对分子质量为 $2\,500\times 10^4$ ,固含量为90%;表面活性剂是由大庆东昊公司生产的重烷基苯石油磺酸盐,其有效成分为50%;碱为NaOH,其固含量为96%;实验岩心由13%的天然油砂和87%的石英砂混合后经环氧树脂胶结压制而成<sup>[12]</sup>,天然油砂取自大庆油区喇嘛甸9—检PS2604取心

井,该岩心包括 $2\,500\times 10^{-3}$ 、 $600\times 10^{-3}$ 和 $200\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 共3个渗透层,其尺寸为4.5 cm×4.5 cm×30 cm,各小层厚度均为1.5 cm。

### 1.2 装置

三元复合驱油体系实验置于45℃恒温箱内(平流泵和手摇泵除外)(图1)。采出液中聚合物的检测应用淀粉-碘化隔分光光度法,表面活性剂的检测应用两相滴定法,碱的检测应用酸碱滴定法<sup>[13]</sup>。

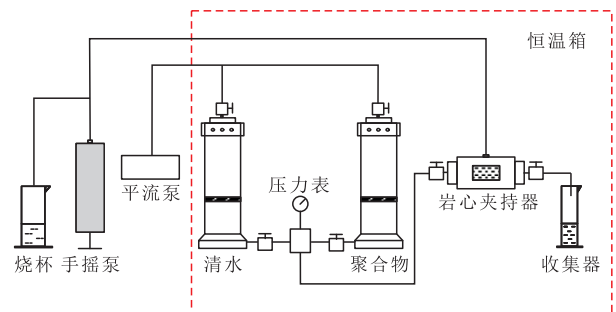


图1 三元复合驱油体系实验流程

Fig.1 Experimental process of alkali-surfactant-polymer flooding system

### 1.3 方案设计

设计了1-1,1-2,2-1,2-2,3-1,3-2和3-3共7个实验方案,除方案2-2外,方案设计中的三元复合驱油体系组成均为:聚合物质量浓度为2 000 mg/L,表面活性剂质量分数为0.3%,碱质量分数为1.2%。方案2-2中三元复合驱油体系中前置段塞聚合物质量浓度为2 000 mg/L,主段塞聚合物质量浓度为2 000 mg/L,表面活性剂质量分数为0.3%,碱质量分数为1.2%,副段塞聚合物质量浓度为2 000 mg/L,表面活性剂质量分数为0.1%,碱质量分数为1.0%,保护段塞聚合物质量浓度为1 800 mg/L。

**岩心含油饱和度的影响** 方案1-1为岩心饱和和地层水,驱替0.73倍孔隙体积的三元复合驱油体系,然后后续水驱。方案1-2为岩心饱和地层水,然后饱和油,水驱至含水率为92%,驱替0.73倍孔隙体积的三元复合驱油体系,然后后续水驱。

**段塞组成的影响** 方案2-1为水驱至含水率为92%,驱替0.73倍孔隙体积的三元复合驱油体系,后续水驱到含水率为98%。方案2-2为水驱至含水率为92%,驱替0.73倍孔隙体积的三元复合驱油体系,其中前置段塞注入量为0.075倍孔隙体积,主段

塞注入量为0.3倍孔隙体积,副段塞注入量为0.15倍孔隙体积,保护段塞注入量为0.2倍孔隙体积,后续水驱。

**油水性质的影响** 方案3-1为水驱至含水率为92%,驱替0.73倍孔隙体积的三元复合驱油体系,采用大庆油区采油六厂油水,后续水驱。方案3-2采用大庆油区采油一厂油水,方案3-3采用大庆油区采油四厂油水,其余方案设计与方案3-1相同。

## 2 实验结果分析

### 2.1 岩心含油饱和度

室内物理模拟实验揭示了方案1-1和1-2的采出液(水相)药剂无因次浓度与孔隙体积倍数的关系(图2)。从图2可以看出,注入相同孔隙体积倍数的三元复合驱油体系,碱、表面活性剂和聚合物的无因次浓度均不同;碱和聚合物突破时间相同,而表面活性剂突破时间相对滞后,表明3种化学剂间出现了色谱分离现象。例如当无因次浓度为0.3时,方案1-1中表面活性剂与碱、表面活性剂与聚合物、碱与聚合物之间的无因次等浓距分别为0.41, 0.5, 0.1倍孔隙体积;方案1-2中对应的无因次等浓距依次为0.37, 0.55和0.18倍孔隙体积。由此表明,表面活性剂分别与碱和聚合物之间的色谱分离程度较严重,而碱与聚合物之间则相对较弱;其含油饱和度对采出液药剂滞留率存在影响。与方案1-1

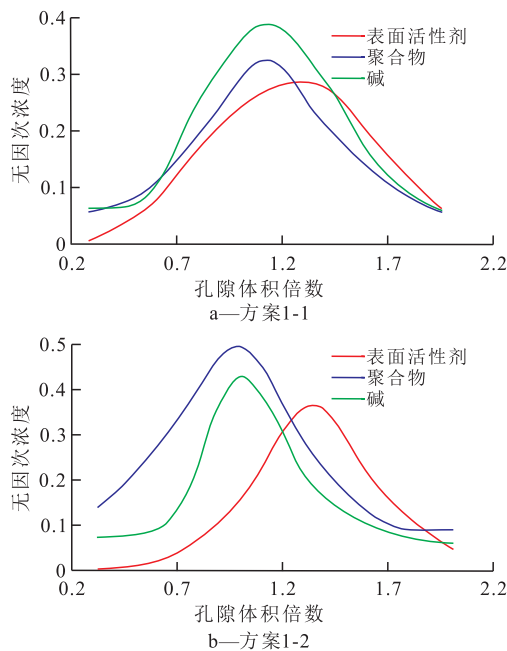


图2 不同含油饱和度下无因次浓度与孔隙体积倍数的关系

Fig.2 Relationship between dimensionless concentration and pore volume at different oil saturations

相比,方案1-2的采出液中表面活性剂和碱质量分数较低,聚合物质量浓度较高,分析其原因为表面活性剂和碱在岩心中与油的作用,增加了药剂损耗量,使药剂滞留量增大;而聚合物在岩心中饱和油后,不可及孔隙体积增大,在岩心中流经途径缩短,聚合物突破时间较早,在岩心中滞留率较小。

### 2.2 驱油剂段塞组成

室内物理模拟实验揭示了方案2-1和2-2的采出液(水相)药剂无因次浓度与孔隙体积倍数的关系(图3)。从图3中可以看出,注入相同孔隙体积倍数的三元复合驱油体系,其各组分的无因次浓度不同,突破时间也不同,顺序依次为聚合物、碱和表面活性剂。例如当无因次浓度为0.3时,聚合物、碱和表面活性剂间的无因次等浓距同样存在差异,表面活性剂分别与碱和聚合物之间的色谱分离程度较严重,而碱与聚合物之间相对较弱。这主要是因为方案2-2中的聚合物段塞质量浓度较高,驱油剂的粘度增加,则扩大波及体积的作用增强,阻碍了碱、表面活性剂和聚合物沿高渗透层的运移,而表面活性剂和碱滞留量的增加,延长了其无因次突破时间;表面活性剂与碱和聚合物之间的无因次等浓距增加,使各组分间的色谱分离程度加剧。

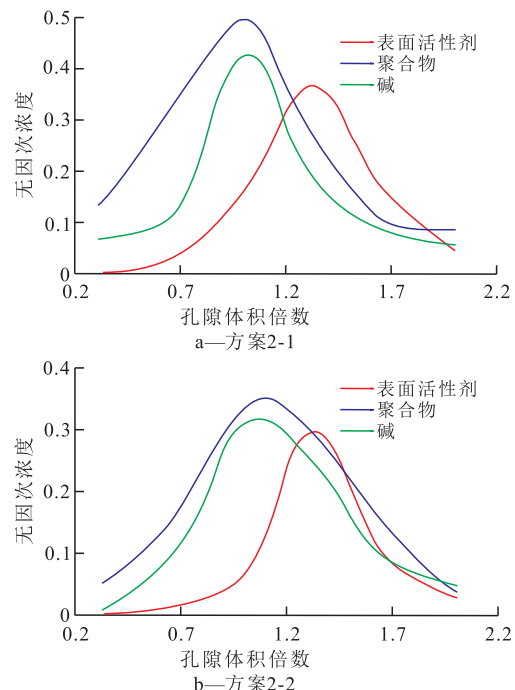


图3 不同驱油剂段塞组成时的无因次浓度与孔隙体积倍数的关系

Fig.3 Relationship between dimensionless concentration and pore volume at different slug compositions of oil displacing agent

### 2.3 原油和水质

室内物理模拟实验揭示了方案3-1, 3-2和3-3



无因次浓度与孔隙体积倍数的关系(图4)。从图4中可以看出,3个采油厂的三元复合驱油体系中的碱、表面活性剂和聚合物突破时间基本相同,采出液中检测到碱时三元复合驱油体系注入了0.29倍孔隙体积,检测到表面活性剂时注入了0.35倍孔隙

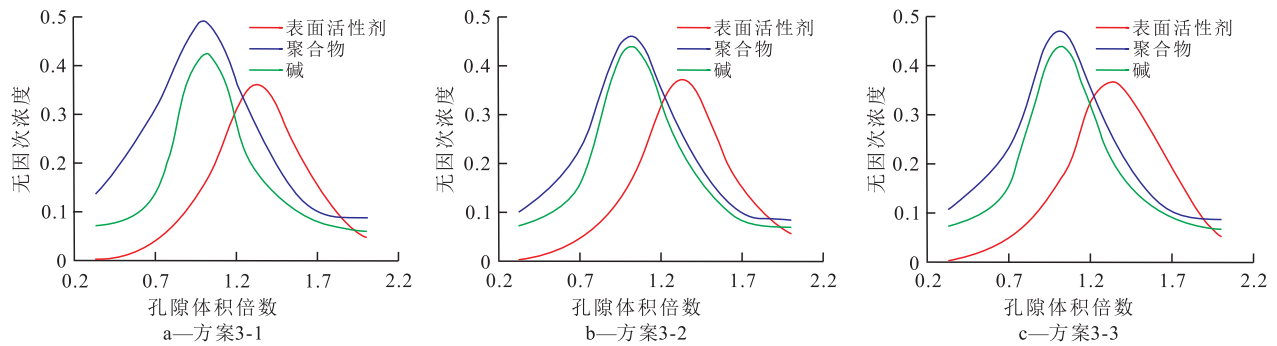


图4 不同油品性质时的无因次浓度与孔隙体积倍数的关系

Fig.4 Relationship between dimensionless concentration and pore volume at different oil properties

采用气相色谱—质谱联用(GC-MS)仪器分析不同区块原油组分可知,采油六厂萃余油正构烷烃中重质组分含量较高, $n_{C_{21}}$ 之后重质组分占67.84%,而采油一厂和四厂 $n_{C_{21}}$ 之后的重质组分仅分别为54.91%和59.75%。此外,采油六厂原油重质组分碳链分布范围较广,从 $n_{C_{21}}$ — $n_{C_{40}}$ 均有分布,采油一厂为 $n_{C_{21}}$ — $n_{C_{36}}$ ,采油四厂为 $n_{C_{21}}$ — $n_{C_{38}}$ 。重烷基苯石油磺酸盐是以重烷基苯为原料磺化而成,R基为 $C_{14}$ 以上,主要成分在 $C_{17}$ 左右。与采油一厂和四厂相比较,采油六厂原油主峰碳为 $n_{C_{23}}$ ,重质组分含量较高,而且碳链分布范围较广。根据相似相溶原理,表面活性剂更易于溶解到采油六厂的油相中去,使其水相中的表面活性剂质量分数降低,加剧了色谱分离程度。

### 3 结论

岩心饱和油后,加剧了色谱分离现象,表面活性剂和碱的滞留量增加,聚合物的减小。注入相同孔隙体积倍数的三元复合驱油体系的条件下,采用前置高质量浓度聚合物段塞后,可以有效扩大波及体积,但色谱分离现象加剧,主要是由于表面活性剂分别与碱和聚合物间的无因次等浓距增加。采油六厂原油主峰碳为 $n_{C_{23}}$ ,重质组分含量较高,而且碳链分布范围较广。根据相似相溶原理,表面活性剂更易于溶解到六厂油相中去,造成被检测的水相中表面活性剂质量分数降低,表观上加剧了色谱分离程度。强碱三元复合体系中表面活性剂与碱和聚合物之间色谱分离程度比较严重,碱与聚合物之

体积,检测到聚合物时注入了0.26倍孔隙体积。例如无因次浓度为0.3时,方案3-1的三元复合驱油体系中聚合物和表面活性剂无因次等浓距大于方案3-2和3-3的。这与采油厂的油藏地质特征、注入驱油剂、段塞组合方式和原油组成有关。

间较弱。

#### 参考文献:

- [1] 张丽波,蔡红岩,王强,等.三元复合驱体系各组分静态吸附规律[J].油气地质与采收率,2014,21(2):32-34,50.  
Zhang Libo, Cai Hongyan, Wang Qiang, et al. Study on static adsorption of each components during the process of ASP flooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21 (2) : 32-34, 50.
- [2] 于盛鸿,幺世椿,姜江,等.三元复合驱的驱油特征研究[J].河南石油,2005,19(2):33-35,38.  
Yu Shenghong, Yao Shichun, Jiang Jiang, et al. A study on displacement of alkali-surfactant-polymer flooding [J]. Henan Petroleum, 2005, 19(2):33-35, 38.
- [3] 闫文华,姚振杰,石晓博,等.三类油层弱碱三元复合体系动态驱油实验研究[J].特种油气藏,2013,20(2):102-104,114.  
Yan Wenhua, Yao Zhenjie, Shi Xiaobo, et al. Experimental study on the displacement of oil by ASP weak alkali system in class III reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20 (2) : 102-104, 114.
- [4] 刘立伟,侯吉瑞,岳湘安.大庆原油中活性物质对界面张力的影响[J].油气地质与采收率,2011,18(2):58-61.  
Liu Liwei, Hou Jirui, Yue Xiang'an. Influence of active substance on interfacial tension in crude oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(2):58-61.
- [5] 张同凯,李永环,赵凤兰.双河油田IV5-11层系复合驱油体系实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(1):62-65.  
Zhang Tongkai, Li Yonghuan, Zhao Fenglan. Laboratory research of oil displacement compound system for layer IV5-11, Shuanghe oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19 (1) : 62-65.
- [6] 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):76-78.  
Gao Zhenhuan, Wang Keliang, Xu Dianping, et al. Mechanism

- and research methods of chromatographic separation of surfactant/alkaline/polymer flooding [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(1): 76-78.
- [7] 隋希华, 曹绪龙, 王得顺, 等. 孤岛西区三元复合驱体系色谱分离效应研究[J]. 油气采收率技术, 2000, 7(4): 1-3.  
Sui Xihua, Cao Xulong, Wang Deshun, et al. Study on chromatographic fractionation effect of three-component compound flooding system in western area of Gudao [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2000, 7(4): 1-3.
- [8] 朱维耀, 隋新光, 龙运前, 等. 三元复合体系在二类油层中的色谱分离作用效果研究[C]. 渗流力学与工程的创新与实践——第十一届全国渗流力学学术大会论文集, 2011.  
Zhu Weiyao, Sui Xinguang, Long Yunqian, et al. Experimental study on chromatographic separation of alkaline/surfactant/polymer flooding system in class II reservoirs [C]. Seepage Mechanics and Engineering Innovation and Practice: the Eleventh National Academic Conference Proceedings of Percolation Mechanics, 2011.
- [9] 王克亮, 田同辉, 宋合龙, 等. 填砂管模型上三元复合驱油体系的色谱分离实验研究[J]. 大庆石油学院学报, 1999, 23(1): 79-82.  
Wang Keliang, Tian Tonghui, Song Helong, et al. Experimental study of chromatographic separation of surfactant/alkaline/polymer flooding in porous media [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(1): 79-82.
- [10] 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.
- [11] 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 and influencing factor analysis of chromatographic separation of surfactant/alkaline/polymer flooding [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013, 27(5): 139-141.
- [12] 卢祥国, 高振环, 阎文华. 人造岩心渗透率影响因素试验研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1994, 13(4): 53-55.  
Lu Xiangguo, Gao Zhenhuan, Yan Wenhua. Experimental study of factors influencing permeability of artificial core [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1994, 13(4): 53-55.
- [13] 唐涤, 张鉴, 王兰生, 等. SY/T 5523—2006 油田水分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2007.  
Tang Di, Zhang Jian, Wang Lansheng, et al. SY/T 5523—2006 Practice for analysis of oilfield waters [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.

编辑 王星

(上接第73页)

- [8] 元福卿, 赵方剑, 夏晞冉, 等. 胜坨油田二区沙二段3砂组高温高盐油藏低张力氮气泡沫驱单井试验[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 70-73.  
Yuan Fuqing, Zhao Fangjian, Xia Xiran, et al. A single-well test with low-interfacial tension nitrogen foam flooding in high-temperature and high-salinity reservoir, No.3 sand group, Shengtuo2 area, Shengtuo oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 70-73.
- [9] 王长久, 刘慧卿, 郑强, 等. 稠油油藏蒸汽泡沫调驱物理模拟实验——以吉林油田扶北3区块为例[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(5): 76-78, 83.  
Wang Changjiu, Liu Huiqing, Zheng Qiang, et al. Physical modeling research of profile control and displacement by steam foam flooding in heavy oil reservoir—case of Fubei3 block in Jilin oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(5): 76-78, 83.
- [10] 王其伟. 泡沫驱油发展现状及前景展望[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(2): 94-97.  
Wang Qiwei. Present situation and development prospect of foam flooding [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(2): 94-97.
- [11] 张广卿, 刘伟, 李敬, 等. 泡沫封堵能力影响因素实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 44-46.  
Zhang Guangqing, Liu Wei, Li Jing, et al. Experimental study on the factors influencing the blocking ability of foam [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 44-46.
- [12] 李爱芬, 唐健健, 陈凯, 等. 泡沫在不同渗透率级差填砂管中的调驱特性研究[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(4): 119-122, 128.  
Li Aifen, Tang Jianjian, Chen Kai, et al. Characteristics of foam driving and profile controlling in heterogeneous sand pack tube [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(4): 119-122, 128.
- [13] 李粉丽, 侯吉瑞, 刘应辉, 等. 改性淀粉强凝胶堵剂的研制[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(2): 80-82.  
Li Fenli, Hou Jirui, Liu Yinghui, et al. Preparation for strong gels plugging agent of modified starch [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(2): 80-82.
- [14] 曹功泽, 侯吉瑞, 岳湘安, 等. 改性淀粉-丙烯酸胺接枝共聚调堵剂的动态成胶性能[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 72-74.  
Cao Gongze, Hou Jirui, Yue Xiang'an, et al. Dynamic gelling property of modified graft starch-acrylamide copolymer as profile control/water shutoff agent [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(5): 72-74.

编辑 常迎梅