

聚合物/表面活性剂二元体系在多孔介质中运移的黏度和界面张力变化

赵玉集¹, 罗莉涛^{2,3,4}, 刘卫东², 严文翰^{3,4}, 苟斐斐^{3,4}, 许可^{3,4}

1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007
3. 中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊 065007
4. 中国科学院大学, 北京 100190

摘要 黏度和界面张力是评价聚合物/表面活性剂二元体系驱油能力的主要指标, 研究二者在多孔介质中运移过程中的变化对提高二元体系驱油能力有重要指导意义。设计4种注入段塞的二元体系在3种长度的填砂模型运移的室内实验, 对体系运移过程中黏度和界面张力的变化进行研究。结果表明: 在注入速度和运移距离相同的条件下, 注入段塞越大, 流出液的最低界面张力更低, 保持低界面张力的时间更长, 黏度保留率也更高; 在注入速度和段塞相同的条件下, 运移距离越长, 流出液的界面张力保持低界面张力程度越高, 黏度保留率越高。研究结果对现场二元体系的注入方案设计具有一定指导作用。

关键词 聚合物/表面活性剂二元体系; 段塞; 填砂管; 界面张力; 黏度

中图分类号 TE39

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.16.005

Variations of Viscosity and Interfacial Tension of Polymer/Surfactant Binary Flooding in Porous Media

ZHAO Yuji¹, LUO Litao^{2,3,4}, LIU Weidong², YAN Wenhan^{3,4}, GOU Feifei^{3,4}, XU Ke^{3,4}

1. China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China
2. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang 065007, China
3. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Viscosity and interfacial tension are the main indexes of polymer/surfactant binary flooding to evaluate the oil displacement efficiency. Study on the variations of viscosity and interfacial tension of polymer/surfactant binary flooding in porous media plays a guiding role. In order to study the variation of the system in porous media, flood test is designed which uses four kinds of injected slugs and three kinds of sand filling tubes to study the variation of viscosity and interfacial tension of the system. The results show that under the same injection speed and the flow distance, the greater slug injected, the lower minimum interfacial tension obtained, a longer time maintained and a higher viscosity retained. Under the same injection speed and injected slug, the longer the flow distance, the lower minimum interfacial tension obtained, a longer time maintained and a higher viscosity retained. These results have an important guiding role for the binary system of injection plan design.

Keywords polymer/surfactant binary flooding; injected slug; sand filling tube; interfacial tension; viscosity

聚合物/表面活性剂二元驱是近几年发展起来的一种三次采油技术^[1]。聚合物有增大黏度作用^[2]、表面活性剂有降低油水界面张力作用^[3], 二元体系结合这些特点后显著改善驱油效果, 提

高原油采收率^[4-8]。因此黏度和界面张力是评价二元体系驱油能力的主要指标, 研究二者在多孔介质中运移过程中的变化对提高二元体系驱油能力具有重要意义。

收稿日期: 2014-02-24; 修回日期: 2014-04-22

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05031)

作者简介: 赵玉集, 高级工程师, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: zhyj@petrochina.com.cn

引用格式: 赵玉集, 罗莉涛, 刘卫东, 等. 聚合物/表面活性剂二元体系在多孔介质中运移的黏度和界面张力变化[J]. 科技导报, 2014, 32(16): 34-38.

聚驱时,聚合物会由于表面吸附、机械捕集、流体动力学捕集和聚合物分子之间的相互作用等,在多孔介质中滞留^[9]。聚合物/表面活性剂二元驱时,聚合物和表面活性剂在岩石表面会产生竞争吸附,造成其有效含量降低^[10,11],同时由于多孔介质的吸附作用和地层水的稀释作用^[12],体系遭到破坏,使得黏度降低和界面张力增大,降低了体系的驱油能力^[13]。三元复合驱时,体系会因滞留和稀释作用的影响导致黏度和界面张力分别呈现不断降低和升高趋势^[14]。

目前,化学驱的化学剂在多孔介质运移的过程中会发生损耗,减弱了原体系的驱油效果,这一问题已经引起广泛重视。但针对聚合物/表面活性剂二元驱,注入段塞、运移距离对二元体系在多孔介质中运移过程中的损耗影响程度研究较少。

本文对3种不同长度的填砂模型中注入4种不同孔隙体积倍数(PV)的段塞(驱油剂注入后,形成明显的驱油带,又被后续的另一驱油剂所驱替,前者驱油剂所形成的驱油带称为段塞),研究二元体系在运移过程中的黏度和界面张力。

1 实验材料和方法

1.1 材料

聚合物:2500万分子量的聚合物(北京恒聚化工集团);表面活性剂:DWS-3(大港油田采油工艺研究院);注入水和地层水:注入水矿化度6726 mg/L、地层水矿化度13454 mg/L(大港油田港西三区);吸附剂:油井洗井返排油砂(大港油田港西三区);模拟油:大港油田港西三区地下原油加煤油配制,黏度为21.5 mPa·s(港西三区地下原油黏度为21.5 mPa·s)。

1.2 仪器

黏度计,DV-II型, Brookfield公司,美国;旋转液滴界面张力仪,VT20型, Dataphysics公司,德国,界面张力测量范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^3$ mN/m, 100DX型双计量泵, Teledyne, ISCO公司,美国;活塞容器ZR-3,海安发达石油仪器科技有限公司,400 mL/70 MPa;热鼓风干燥箱,上海市实验仪器总厂,0~300℃;填砂管模型,海安发达石油仪器科技有限公司,工作压力为0~50 MPa,工作温度为常温至180℃,材质为哈氏合金;电子精密天平,常州市宏衡电子仪器厂,YP300001,最大量程为30000 g;单相电容运转电动机,天津市中环天虹微电机有限公司。

1.3 方法和步骤

为更好体现对现场的模拟,所用实验材料及配方都与大港油田现场应用一致,为体现单一变量的影响,填砂管模型的渗透率基本集中在 $1200 \times 10^{-3} \sim 1350 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

1) 二元体系配制。

(1) 将DWS-3表面活性剂加入大港油田港西三区现场注入水中,配制出质量分数为0.3%的表活剂溶液。

(2) 将聚合物加入质量分数为0.3%的表活剂溶液中,在搅拌机下搅拌3 h,配制1800 mg/L聚合物溶液。

(3) 形成质量分数0.3%表活剂+1800 mg/L聚合物二元复合体系。

2) 填砂管模型制作。

(1) 将大港油田港西三区油井洗井返排油砂粉碎后用苯/乙醇清洗干净、放入80℃热鼓风干燥箱中烘干24 h。

(2) 将烘干后的油砂填充到填砂管模型中,在电子精密天平上称重。

(3) 将模型管在单相电容运转电动机作用下抽真空24 h,然后采用大港油田港西三区现场地层水饱和填砂管中的油砂12 h。

(4) 称量填砂管模型管的湿重,计算孔隙体积。

(5) 利用注入水测定填砂管模型的初始渗透率。实验参数如表1所示。

表1 模型及参数

Table 1 Experimental model and parameters

模型	长度/cm	直径/cm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	注入二元体系量/PV
1	100	2.5	1240	0.3
2	100	2.5	1310	0.6
3	100	2.5	1264	1.0
4	100	2.5	1320	2.0
5	50	2.5	1220	1.0
6	30	2.5	1305	1.0

3) 流动实验。

(1) 在53℃(大港油田港西三区油藏温度)烘箱中,将流动实验的设备连接好,如图1所示。

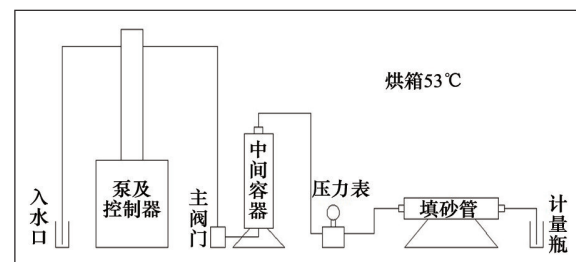


图1 实验流程

Fig. 1 Flow chart of the experiment

(2) 利用100DX型双计量泵,以0.5 PV/h的注入速度向模型管中注入液体,先注入质量分数0.3%表活剂+1800 mg/L聚合物的二元复合体系见表1,再注入水驱替。

4) 测定流出液的黏度和界面张力。

(1) 待模型出口端有液体流出后,立即用黏度计每20 min测定一次流出液黏度,计算出黏度保留率(最大黏度与原始黏度的比值)。

(2) 待模型出口端有液体流出后,立即利用旋转液滴界

面张力仪每 20 min 测定流出液的最低界面张力(测定液体中的多组界面张力值中最小值,称为最低界面张力)。

2 分析与讨论

2.1 二元体系黏度和油水界面张力变化

聚合物驱可以增大水相黏度,改善水油流速比,提高波及体积^[2]。表面活性剂驱可以降低油水界面张力,增加毛细管数,提高洗油效率^[3]。聚/表二元体系高黏度、低界面张力的协同效应,能够显著改善驱油效果,提高原油采收率^[4-7]。因此如果二元体系能够同时保持稳定的高黏度、低界面张力特点时,其体系的稳定性就越好,驱油效果也就越好。

为研究聚合物/表面活性剂二元体系在地层中运移过程中,黏度和界面张力的变化,目前室内实验多采用填砂管模拟地层,注入不同 PV 数二元体系模拟二元体系的注入段塞,模型长度模拟二元体系的运移距离。

由图 2 可以看出,注入速度和运移距离相同时,注入不同 PV 数段塞的二元复合体系,其黏度和最低界面张力的变化趋势基本相同。黏度开始随着注入液量的增加变化不明显,当注入的二元体系到达出口后,黏度快速上升并达到最大值,随后逐渐减小至实验开始时流出液的黏度值。最低界面张力开始随着注入液量流出液体积的增加变化不明显,当注入的二元体系到达出口后,最低界面张力快速下降并达到最小值,随后逐渐增大至实验开始时流出液的最低界面张力值。随着注入段塞 PV 数的增加,黏度在最大值处、最低界面张力在最小值处能持续更长的时间。

与注入 0.3、0.6、1.0 PV 段塞的二元体系相比,注入 2.0 PV 段塞的二元体系,流出液的最低界面张力更低,保持较小的最低界面张力的时间更长,同时黏度保留率也更高,保持高黏度的时间更长,说明注入 2.0 PV 段塞的二元体系更稳定,更有利于维持二元驱的驱油能力。

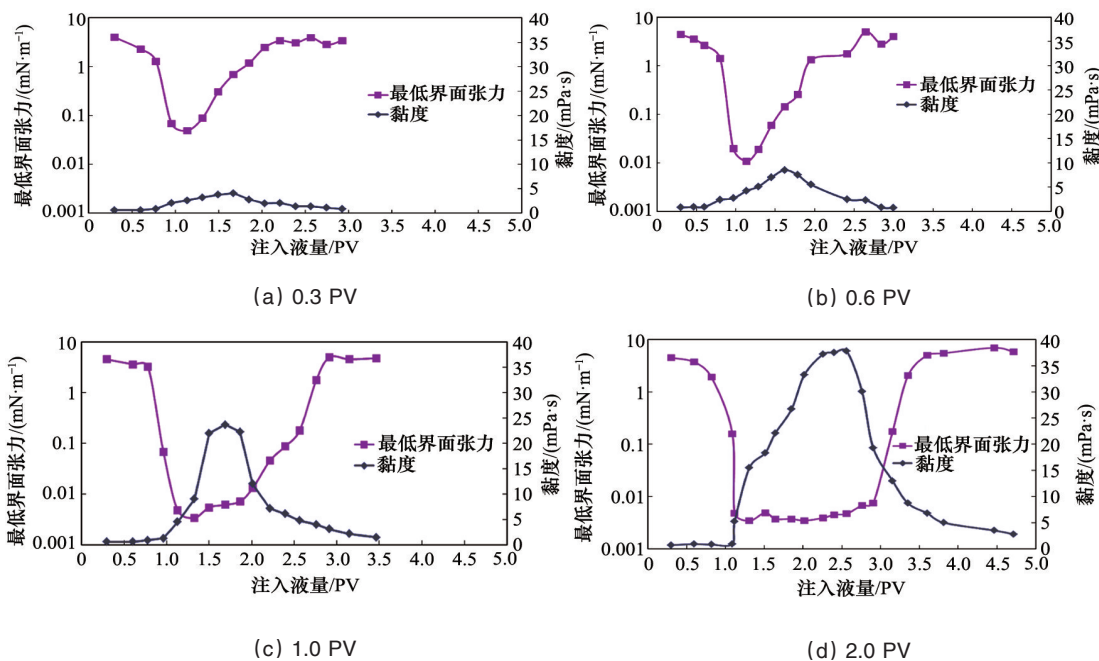


图 2 不同段塞时的黏度及最低界面张力变化曲线

Fig. 2 Variation curves of viscosity and interfacial tension under different injected slugs

2.2 段塞对二元体系的黏度和界面张力的影响

图 3 为注入速度和运移距离相同、注入不同 PV 数段塞,二元复合体系模型出口流出液黏度对比,经过多孔介质后,二元复合体系的黏度在注入的初期(1.0 PV 以下)变化不大,在注入液量大于 1.0 PV 后,随着注入液量的 PV 数的增加而增大,并快速上升至最大值,而且维持高黏的时间随着注入段塞 PV 数的增大而增大,随着后续注入的进行,其下降至实验开始时流出液的黏度值。

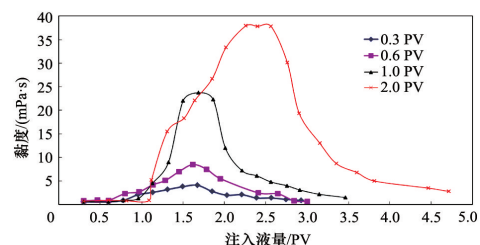


图 3 不同段塞时的黏度对比曲线

Fig. 3 Variation curves of viscosity under different injected slugs

由表2可以看出,注入速度和运移距离相同、注入不同PV数段塞,最大黏度值和黏度保留率都随着注入段塞PV数的增大而增大,注入2.0 PV段塞的二元体系,黏度保留率达到100%。

表2 不同段塞时,黏度变化

Table 2 Variations of viscosity under different injected slugs

模型	长度/cm	注入段塞/PV	原始黏度/(mPa·s)	最大黏度/(mPa·s)	黏度保留率/%
1	100	0.3	37.8	4.1	10.85
2	100	0.6	37.8	8.5	22.49
3	100	1.0	37.8	23.7	62.70
4	100	2.0	37.8	37.8	100.00

图4为注入速度和运移距离相同、注入不同PV数段塞,二元复合体系模型流出液油水界面张力对比。开始经过多孔介质后,二元复合体系的界面张力在注入的初期(注入液量在0.75 PV以下)变化不大,在注入液量大于0.75 PV后,随着注入液量的PV数的增加而降低,并会快速下降至最小值,而且注入段塞PV数越大,最低界面张力越能较长时间地维持最小值,随着后续注入的进行,其上升至实验开始时流出液的最低界面张力。

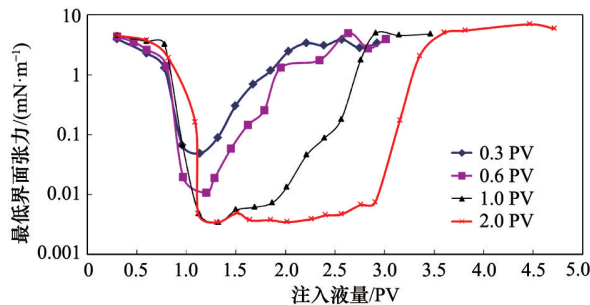


图4 不同段塞时的界面张力对比曲线

Fig. 4 Variation curves of interfacial tension under different injected slugs

当二元体系的注入速度和运移距离相同时,注入不同PV数段塞,模型出口流出液的黏度在注入液量于1.0 PV后,出现突升;界面张力在注入液量大于0.75 PV后,出现突降。说明表面活性剂和聚合物在多孔介质中发生了一定的分离,减弱了二者的协同作用。注入二元体系的段塞PV数越大,最大黏度值越大,黏度保留率越大,维持最大值的能力越强;同时最低界面张力越小,维持最小值的能力越强,此时二元复合体系破坏程度最轻。

2.3 运移距离对二元体系的黏度和界面张力的影响

图5为注入速度和注入段塞PV数相同、运移距离不同,二元复合体系模型出口流出液黏度对比。由图5可看出,注

入相同PV数段塞(绝对量不同)的二元复合体系,运移距离越长,体系经过多孔介质渗流后的最大黏度越大、最大黏度保留率越大。这说明运移距离越长,体系的维持高黏度的能力越好。

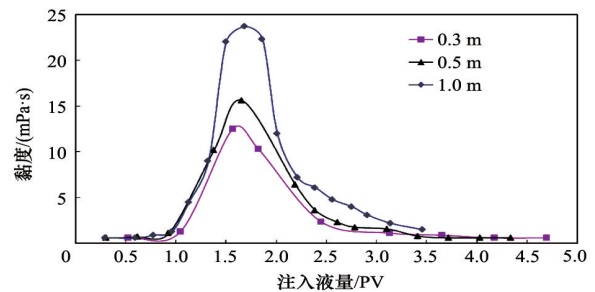


图5 不同运移距离时的黏度对比曲线

Fig. 5 Variation curves of viscosity under different flow distances

图6为注入速度和注入段塞PV数相同、运移距离不同,二元复合体系模型出口流出液油水界面张力对比。由图6可见:注入相同PV数段塞(绝对量不同)的二元复合体系,运移距离越长,流出液的最低界面张力越小,并且最低界面张力保持较小值的能力越强。说明运移距离越长,体系维持较小的最低界面张力能力越强。

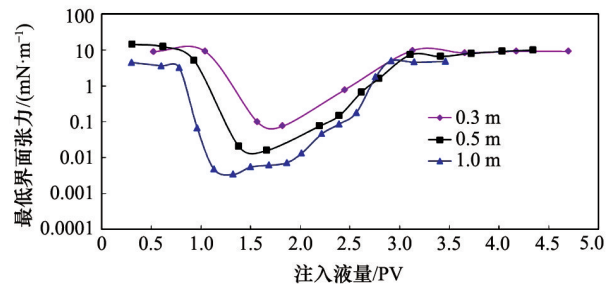


图6 不同运移距离时的界面张力对比曲线

Fig. 6 Variation curves of interfacial tension under different flow distances

当二元体系的注入速度和注入段塞PV数相同(绝对量不同)时,运移距离越长,二元体系经过多孔介质后的最大黏度值越大、油水最低界面张力越小,二者的协同作用越好。

3 结论

1) 二元体系在多孔介质中运移的过程中表面活性剂和聚合物发生一定分离,损耗一部分,减弱了二者的协同作用,降低二元体系的驱油能力。

2) 当二元体系的注入速度和运移距离相同时,注入段塞PV数越大,体系维持高黏、低界面张力的能力越好,二元复合体系破坏程度越小;当二元体系的注入速度和注入段塞PV数相同(绝对量不同)时,运移距离越长,体系在多孔介质中

运移过程中的最大黏度值越大、油水最低界面张力越小,二者的协同作用越好。

3) 在保证一定经济效益的前提下,增大二元复合驱段塞能更好地保持二元体系在运移过程中高黏度和低界面张力的性能,充分发挥聚合物/表面活性剂二元驱的协同作用。

参考文献(References)

- [1] 何江川, 王元基, 廖广志, 等. 油田开发战略性接替技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
He Jiangchuan, Wang Yuanji, Liao Guangzhi, et al. Oil field development strategic technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [2] 郭兰磊, 李振泉, 李树荣, 等. 一次和二次聚合物驱驱替液与原油度比优化研究[J]. 石油学报, 2008, 29(5): 738-741.
Guo Lanlei, Li Zhenquan, Li Shurong, et al. Optimization of oil-to-polymer viscosity ratios in the primary and secondary polymer flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 738-741.
- [3] 刘卫东. 聚合物-表面活性剂二元驱提高采收率技术研究[D]. 廊坊: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2010.
Liu Weidong. Studies on enhancing oil recovery technology of polymer/surfactant binary flooding[D]. Langfang: Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [4] 吕鑫, 张健, 姜伟. 聚合物/表面活性剂二元复合驱研究进展[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(3): 127-130.
Lǚ Xin, Zhang Jian, Jiang Wei. Progress in polymer/surfactant binary combination drive[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(3): 127-130.
- [5] 熊生春, 孙军昌, 何英, 等. 低渗透油藏二元复合驱微观机制研究[J]. 科技导报, 2012, 30(35): 20-24.
Xiong Shengchun, Sun Junchang, He Ying, et al. Microscopic mechanism of binary combination flooding in low permeability reservoir [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(35): 20-24.
- [6] Xia H F, Wang G, Ma W G. Influence of viscoelasticity and interfacial tension of non-alkalibinary compound solution on reeovery effieieny of residual oil after water flooding[J]. Aeta Petrolei Siniea, 2008, 29(1): 107-110.
- [7] 郑浩, 苏彦春, 张迎春, 等. 聚合物-表面活性剂驱数值模拟技术理论与实践[J]. 科技导报, 2013, 31(16): 30-34.
Zheng Hao, Su Yanchun, Zhang Yingchun, et al. Eclipse numerical simulation techniques for polymer surfactant flooding: Theory and practice[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(16): 30-34.
- [8] 郭东红, 辛浩川, 崔晓东, 等. 聚合物驱后利用 OCS 表面活性剂/聚合物二元体系提高采收率的研究[J]. 精细石油化工进展, 2006, 7(1): 1-3.
Guo Donghong, Xin Haochuan, Cui Xiaodong, et al. Study on enhanced oil recovery by using OCS surfactant/polymer binary system after polymer flooding[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2006, 7(1): 1-3.
- [9] 翁蕊. 聚合物的滞留类型及相应的测定方法[J]. 油气采收率技术, 1998, 5(4): 51-56.
Weng Rui. Types of polymer retention and their determined methods[J]. Oil & Gas Recovery Technolog, 1998, 5(4): 51-56.
- [10] 李宜强, 曲成永. 水溶性聚合物在多孔介质中动态滞留量研究[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(1): 76-80.
Li Yiqiang, Qu Chengyong. Research on dynamic hold-up of water-soluble polymer in porous medium[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(1): 76-80.
- [11] 夏惠芬, 张新春, 马文国, 等. 超低界面张力的二元驱油体系对水驱残余油启动和运移机理[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(6): 55-59.
Xia Huifen, Zhang Xinchun, Ma Wenguo, et al. Start up and migration effect of the polymer/surfactant solution with ultralow interfacial tension on the residual oil after water flooding[J]. Journal of Xi an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(6): 55-59.
- [12] 于立军. 阴离子表面活性剂在油水界面吸附行为的实验和理论研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
Yu Lijun. Theoretical and experimental study of anionic surfactant adsorbed behavior at water/oil interface[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [13] 闫文华, 王鹏, 姚振杰, 等. 二元复合驱采出液性能变化规律实验研究[J]. 断块油气田, 2013, 20(1): 136-139.
Yan Wenhua, Wang Peng, Yao Zhenjie, et al. Experimental study on performance variation law of produced fluid in binary combination flooding[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(1): 136-139.
- [14] 牛丽伟, 刘晓光. 弱碱三元复合驱过程中黏度和界面张力变化规律实验研究[J]. 海洋石油, 2009, 29(4): 61-65.
Niu Liwei, Liu Xiaoguang. Experimental study on changing law of viscosity and interfacial tension in weak base ASP flooding[J]. Offshore Oil, 2009, 29(4): 61-65.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300 dpi;文章篇幅不限,需要说明研究背景、方法、取得的结果及结论。在线投稿:www.kjdb.org。