

DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2015.04.03.13

文章编号: 1674-5086(2016)05-0157-08

中图分类号: TE357

文献标志码: A

## 三元复合驱后关键储层特征参数实验研究

赵凤兰<sup>1,2,3\*</sup>, 李子豪<sup>1,2,3</sup>, 李国桥<sup>4</sup>, 宋兆杰<sup>1,2,3</sup>, 侯吉瑞<sup>1,2,3</sup>

1. 中国石油大学(北京)提高采收率研究院, 北京 昌平 102249

2. 中国石油三次采油重点实验室低渗油田提高采收率应用基础理论研究室, 北京 昌平 102249

3. 石油工程教育部重点实验室, 北京 昌平 102249

4. 中国石油大庆油田有限责任公司第二采油厂, 黑龙江 大庆 163414

**摘要:** 确定三元复合驱对储层关键物性特征参数变化的影响程度是保证三元复合驱应用效果的重要前提。利用岩芯驱替及原子力显微镜探测等实验, 对大庆油田某区块三元复合驱前后岩芯润湿性、敏感性、孔隙度与渗透率等物性参数的变化规律进行系统评价和分析。相对渗透率测定结果表明三元复合驱后储层岩石润湿性会发生改变, 亲油性储层岩芯可反转为亲水润湿性; 敏感性实验表明, 三元复合体系对储层不同敏感性造成不同影响, 主要表现在驱后水敏性增加但速敏性、酸敏性、碱敏性等有所降低。对储层孔渗统计分析表明, 三元复合驱后岩芯孔隙度和渗透率绝对值均有所增加, 且二者相关性较好; 结合原子力显微镜对岩芯微观孔隙结构的观测结果进一步验证了孔渗改善的相关认识。

**关键词:** 三元复合驱; 润湿性; 敏感性; 孔隙度; 渗透率

## Variation of Key Parameters of Reservoir Characteristics by ASP Flooding

ZHAO Fenglan<sup>1,2,3\*</sup>, LI Zihao<sup>1,2,3</sup>, LI Guoqiao<sup>4</sup>, SONG Zhaojie<sup>1,2,3</sup>, HOU Jirui<sup>1,2,3</sup>

1. Enhanced Oil Recovery Research Institute, China University of Petroleum(Beijing), Changping, Beijing 102249, China

2. EOR Applied Basic Theory Research Institute in Low Permeability Oilfields, Key Laboratory of Tertiary Oil Recovery, CNPC, Changping, Beijing 102249, China

3. Key Laboratory of Petroleum Engineering, China Ministry of Education, Changping, Beijing 102249, China

4. No.2 Oil Production Company, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing, Heilongjiang 163414, China

**Abstract:** The important prerequisite ensuring the application effect of ASP flooding is determined by the extent of the impact of characteristic parameters variations of reservoir. The variations of the characteristic parameters such as wettability, sensitivity, porosity, permeability of cores, which were drilled before and after ASP flooding in Daqing Oilfield, are analyzed systematically by core-flooding experiments and AFM. The measurement results of relative permeability show that the wettability of reservoir core will change from oil wet to water wet after ASP flooding. The sensitivity experiments indicate that ASP flooding will lead to different influence on types of sensitivity, mainly including the increase of water sensitivity, but the decrease of sensitivity of velocity, acid and alkali. Statistical analysis of the reservoir porosity and permeability shows that both the absolute value of porosity and permeability of core increase and they relate well with each other. The observations of AFM for microscopic pore structure of core further validate the understanding of the porosity and permeability improvement.

**Key words:** ASP flooding; wettability; sensitivity; porosity; permeability

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20160928.1450.008.html>

赵凤兰, 李子豪, 李国桥, 等. 三元复合驱后关键储层特征参数实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 157-164.

ZHAO Fenglan, LI Zihao, LI Guoqiao, et al. Variation of Key Parameters of Reservoir Characteristics by ASP Flooding[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(5): 157-164.

\* 收稿日期: 2015-04-03 网络出版时间: 2016-09-28

通信作者: 赵凤兰, E-mail: zhaoflan123@163.com

基金项目: 国家重大科技专项示范工程(2011ZX05052); 国家自然科学基金(51174216)。

## 引言

ASP三元复合驱是自20世纪80年代以来发展起来的提高采收率技术,该技术集中表面活性剂、碱、聚合物的优势于一体,并充分发挥三者之间的协同作用,因而无论在室内实验或矿场试验中均能够大幅提高原油采收率<sup>[1-6]</sup>。但由于三元复合体系化学组分较为复杂,且其中的碱组分会和储层中大部分矿物发生化学反应,有可能会造成井筒结垢、渗透率降低、润湿性反转、矿物颗粒释放等一系列不利影响,阻碍原油采收率的进一步提高。

有效了解三元复合驱对储层物性特征参数变化的影响是保证三元复合驱获得较高采收率的重要前提,有关此方面的研究前人多集中于对三元复合驱后储层的成垢与防垢机理等方面<sup>[7-18]</sup>,对三元复合驱前、后储层物性参数变化规律等方面尚需进一步研究与讨论。为研究三元复合驱影响储层参数的变化规律,利用岩芯驱替实验和原子力显微镜探测<sup>[19-20]</sup>等多种室内评价方法,对分别取自三元复合驱前、后岩芯的基础物性参数进行评价与验证,重点研究三元复合驱前、后储层岩芯的润湿性、敏感性、孔隙度和渗透率等物性参数的变化规律,为深化三元复合体系驱油机理相关认识和方案设计提供实验基础。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

三元复合驱前、后岩芯样品,经加工后直径为25 mm,长约5~7 cm;孔隙度3%~34%,渗透率0.11~3 084.00 mD;取自大庆油田某三元复合驱试验区块,取样深度970~980 m,岩芯样品的埋藏深度和层位均基本一致。

三元复合体系配方为浓度1 650 mg/L聚合物溶液,质量分数为0.3%表面活性剂溶液以及1.2%NaOH溶液。

岩芯相对渗透率测定实验、孔渗性质测定实验以及敏感性实验(除水敏性实验外)注入水均采用矿化度为6 778 mg/L的KCl溶液,与大庆油田该三元复合驱试验区块地层水矿化度相一致。水敏性实验注入水采用KCl溶液,矿化度分别为6 000, 4 000, 2 000, 0 mg/L(即蒸馏水)。

酸敏性实验用酸采用质量分数为15%的HCl溶液;碱敏性实验用碱采用质量分数为15%的NaOH溶液。

### 1.2 实验设备

TY-4型岩芯夹持器、HW-III A型双联恒温箱、ZR-3型活塞容器,均由江苏海安华达石油仪器厂生产;2PB00C系列平流泵,北京卫星制造厂生产;2XZ-4型旋片式真空泵,北京中兴伟业仪器有限公司生产;MCGS全中文工业自动化控制组态软件,北京昆仑通态自动化软件科技有限公司;SPM-9600型原子力显微镜,日本京都岛津公司生产;NSG-03型原子力显微镜单臂针尖,弹性系数为0.35~6.06 N/m,俄罗斯NT-MDT公司生产。

### 1.3 实验方法

采用中华人民共和国石油天然气行业标准SY/T 5345—2007岩石两相相对渗透率非稳态测定方法测定油水相对渗透率曲线,进而对岩芯润湿性进行判断。具体方法是将岩样(已建立束缚水饱和度)用实验用水驱替至10倍孔隙体积,准确记录见水时间、见水时的累积产油量、累积产液量、驱替速度或岩样两端的驱替压差,并根据达西定理测定油相有效渗透率和残余油时的水相渗透率。

岩芯敏感性测定采用中华人民共和国石油天然气行业标准SY/T 5358—2002储层敏感性流动实验评价方法。将装有符合规范岩芯的夹持器置于合适温度条件下,在不同敏感性实验所要求的不同变量条件下对岩芯进行驱替,随后进行渗透率的测定与对比,并计算对应的敏感指数,确定敏感性所属的强弱区间。

岩芯孔隙度和渗透率测定采用中华人民共和国石油天然气行业标准SY/T 5336—2006岩芯分析方法;将加工完毕的岩芯放入夹持器中并置于恒温条件下,按照规范流程进行岩芯孔隙度和渗透率的测定。

岩芯微观孔隙结构采用原子力显微镜进行测定和评价。在保证样品的清洁和直径不变的情况下将岩芯样品加工至厚度为4~5 mm,再放入原子力显微镜下进行测定和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 岩芯润湿性变化分析

润湿性是储层评价中的重要参数,它决定了毛细管力的方向并影响流体运动自由度和束缚水含

量,对水驱油藏原油采收率具有很大影响<sup>[21-23]</sup>。大量资料表明,大庆油田储层的原始润湿性属于偏亲油的非均匀性润湿性。王传禹等<sup>[24]</sup>研究发现,在注水开发时储层润湿性会由偏亲油润湿性向偏亲水润湿性转变。对于采用三元复合驱开发的储层,通过测定三元复合驱后储层相对渗透率曲线,并与三元复合驱前相对渗透率曲线进行对比,分析三元复合驱对储层润湿性的改变程度。为此,对 30 组三元复合驱后岩芯相对渗透率进行测试,并分别选用 3 块层位相同相邻井驱前的相对渗透率曲线作为对比,逐段分析所得相渗曲线。

图 1 为该某段储层所取的 3 段岩芯在三元复合驱后相对渗透率曲线。根据相渗曲线形态及油水等渗点位置可知该段储层岩石呈现出水湿性。统计分析全部三元复合驱后相对渗透率曲线发现,目的层中岩芯的相渗曲线均具有水湿的特征,岩石润湿性发生了反转。

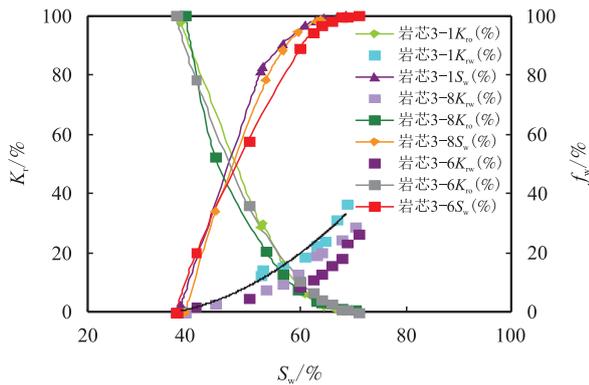


图 1 三元复合驱后岩芯相对渗透率曲线

Fig. 1 Relative permeability curves of the cores after ASP flooding

造成这种情况的原因是由于三元复合体系中的表面活性剂组分在含油储层颗粒表面产生吸附

后,使表面亲油储层颗粒向亲水转换,阻止亲油储层颗粒吸附残余油;同时注入储层的三元复合体系中的表面活性剂和碱可以改变油水界面张力,进而对润湿性产生影响;另外由于碱可以溶解岩石表面的油膜,这些油膜的减少也降低了亲油岩石的表面积<sup>[25]</sup>。

## 2.2 储层敏感性变化特征分析

### 2.2.1 速敏性质评价

岩芯速敏性是指因流体流速变化引起地层中微粒运移、喉道堵塞而造成储层渗透率下降的现象。若储层存在速敏性,为了解储层中流体流速变化与渗透率改变的关系,则需测定临界流速并评定速敏性程度。

分别选取三元复合驱前、后样品进行对比分析,评价结果见图 2。由图可知驱前样品渗透率随着流体流速增加先缓慢增加而后迅速降低,有渗透率突降的临界点,临界速度在 5~7 m·d<sup>-1</sup> 左右,经评价后确定为属于中等偏弱速敏;而在驱后当流动速度升高时,样品的渗透率趋于稳定并略有提高。

在驱前出现渗透率突降的原因是储层中微粒在大流速作用下脱落形成栓塞造成岩芯孔道被堵塞。而在驱后岩芯渗透率未降低说明驱后岩芯速敏性基本消失。据同期驱后岩芯取样矿物组成分析结果显示,高岭石在黏土矿物中的相对含量下降幅度较大,质量分数由最初的 88.4% 下降到三元复合驱之后的 36.4%,这是造成三元复合驱后岩芯速敏性降低的主要原因。另外由于三元复合体系所造成的孔隙结构改变包括其他黏土矿物溶蚀和绿泥石形成胶结等也是造成速敏性消失的原因之一。

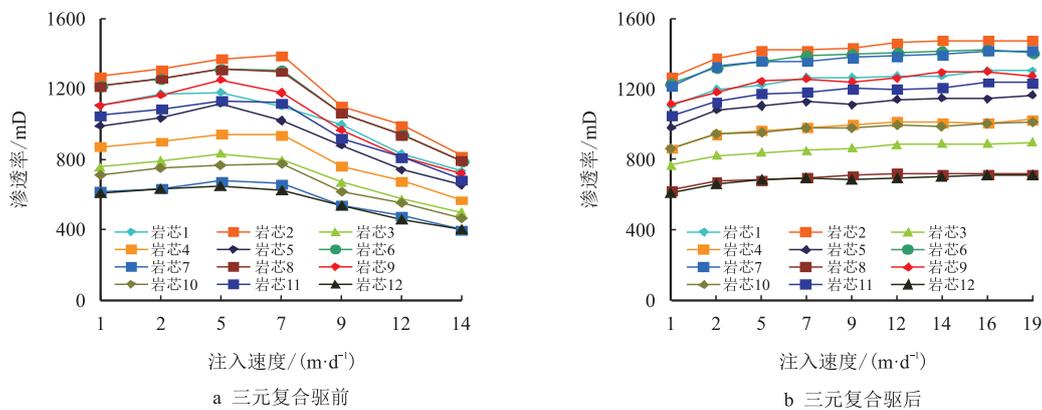


图 2 三元复合驱前后岩芯渗透率与流速关系曲线

Fig. 2 Permeability vs flow rate curves of the cores before and after ASP flooding

2.2.2 水敏性质评价

岩芯水敏性评价是通过测定不同矿化度下样品渗透率的变化来确定矿化度递减条件下样品渗透率明显下降的临界矿化度。

分别选取三元复合驱前、后天然岩芯,并根据

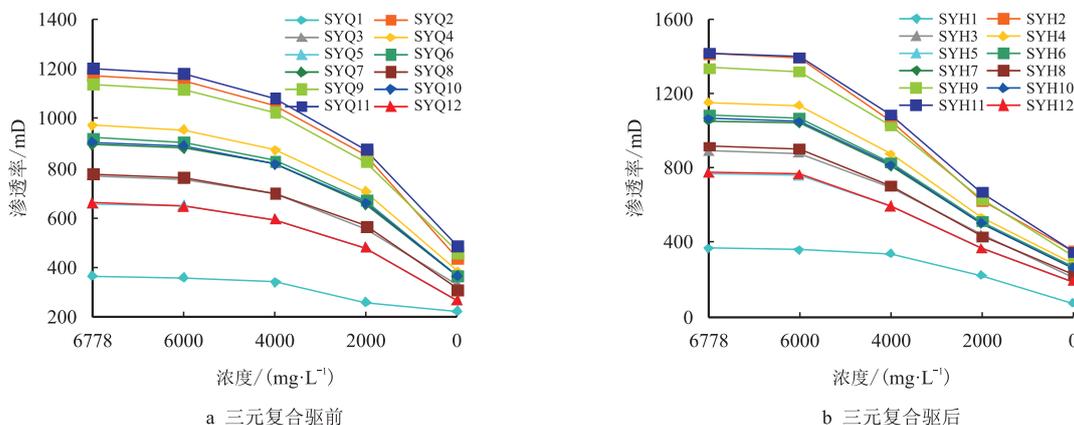


图3 三元复合驱前、后岩芯盐度曲线  
Fig. 3 Permeability of cores vs salinity curves before and after ASP flooding

分析认为这是由于三元复合体系中表面活性剂及聚合物中 Na<sup>+</sup> 与地层中阳离子交换,产生沉淀,同时化学剂在岩石表面吸附,改变了储层颗粒的表面性质,产生更亲水的钠型黏土,增加了储层黏土矿物对地层水矿化度的敏感性。

2.2.3 酸敏性质评价

岩芯酸敏性是因酸液与地层中的酸敏性矿物发生反应产生沉淀或释放出可动微粒,使地层渗透率下降的现象。分别选取三元复合驱前、后样品进行酸敏性评价,结果见表1。根据酸敏性判断指标,表1中数据表明三元复合驱前储层的酸敏指数在

地层水特征配制不同浓度模拟地层水,结果如图3所示。结果表明,该区块在三元复合驱前地层临界盐度约为2 000 mg/L,为中等偏强水敏;在三元复合驱之后,地层水敏性增强,临界盐度为4 000 mg/L,变为强水敏性。

20%~30%,属于中等偏强酸敏伤害。而驱后的储层样品在注入酸之后岩芯渗透率反而略有上升,说明在三元复合驱后没有造成储层酸敏伤害。

酸敏性储层中孔喉堵塞的主要成分是 Fe(OH)<sub>3</sub> 类沉淀物。当 pH 值较低时,绿泥石类矿物由于一般含 Fe<sup>2+</sup>,在氧化条件下可转化为 Fe<sup>3+</sup>,故易析出 Fe(OH)<sub>3</sub> 类沉淀造成堵塞孔隙。三元复合驱过程中,地层长时间处在碱性条件下,不会生成此类 Fe(OH)<sub>3</sub> 沉淀物。同时由于三元复合体系中碱会与地层产生碱垢<sup>[26]</sup>,因此在三元复合驱后注入酸可起到酸洗的效果,故会造成相应岩芯渗透率的增加。

表1 三元复合驱前、后岩芯酸敏性评价数据表

Tab. 1 Acid sensitivity of the cores before and after ASP flooding

岩芯编号	三元复合驱前			三元复合驱后		
	注酸前渗透率/mD	注酸后渗透率/mD	酸敏指数/%	注酸前渗透率/mD	注酸后渗透率/mD	酸敏指数/%
1	448.0	319.2	28.8	389.50	410.30	0
2	473.9	356.7	24.7	510.60	534.60	0
3	825.6	628.4	23.9	771.50	753.50	2.33
4	960.1	744.0	22.5	895.55	891.35	0.46
5	1 015.3	762.4	24.9	906.80	918.40	0
6	1 092.9	831.6	23.9	930.15	907.55	2.42
7	1 148.9	898.6	21.8	936.90	937.30	0
8	1 281.7	998.2	22.1	1 119.60	1 129.20	0
9	1 337.7	1 053.2	21.3	1 154.20	1 145.40	0.76
10	1 470.5	1 139.8	22.5	1 188.80	1 161.60	2.28
11	1 526.5	1 207.8	20.9	1 378.25	1 383.25	0
12	1 904.1	1 517.0	20.3	1 412.85	1 399.45	0.95

### 2.2.4 碱敏性质评价

碱敏性是由于高 pH 值流体进入储层后, 对储层中黏土矿物和硅质胶结物的结构破坏, 从而造成储层堵塞, 发生渗透率伤害的现象。

分别取三元复合驱前、后样品进行碱敏性评价, 结果见图 4。结果表明, 三元复合驱前岩芯渗透率曲线随着 pH 值增加, 呈现为初期较为平缓, 随后迅速下降, 然后再平缓的变化趋势, 碱敏临界 pH 值大约为 9, 可确定岩芯碱敏指数为 31.6%, 属弱碱敏。

三元复合驱后岩芯注入碱液后, 渗透率降低程度不太明显。说明经过三元复合驱后, 储层碱敏

性质程度降低。造成碱敏伤害的主要原因是碱与蒙脱石等黏土矿物表面上的  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等进行交换, 这些离子进入溶液中会生成不溶性沉淀物。而原本覆盖在黏土矿物表面的  $Ca^{2+}$  转化为沉淀, 失去了  $Ca^{2+}$  覆盖的黏土矿物膨胀性增加。另外, 碱可在温度较高时与高岭石等矿物反应, 生成可堵塞储层喉道的产物造成渗透率降低<sup>[27]</sup>。对于三元复合驱后的岩芯, 由于驱替液中组分如碱等已与储层岩石发生了相应反应, 生成的产物多不与碱发生反应, 使得三元复合驱后岩芯对碱伤害的敏感性降低。

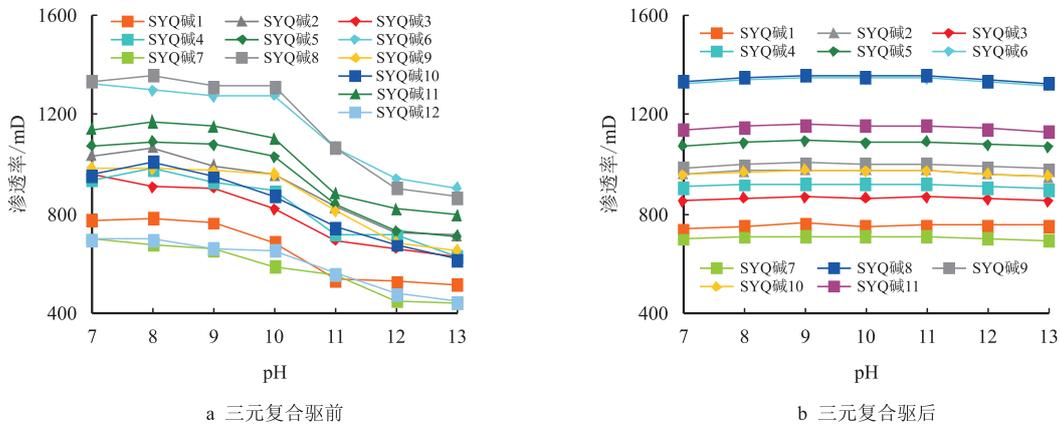


图 4 三元复合驱前后岩芯碱敏曲线

Fig. 4 Alkaline sensitivity curves of the cores before and after ASP flooding

### 2.3 储层孔渗参数变化特征研究

#### 2.3.1 岩芯孔渗参数变化分析

选取三元复合驱前、后岩芯样品进行孔渗相关性对比分析, 结果见图 5。结果表明, 三元复合驱前孔隙度分布在 3%~33%, 大部分岩芯渗透率小于 200 mD; 三元复合驱后孔隙度分布在 15%~34%, 渗透率基本大于 200 mD, 说明三元复合驱后储层物性

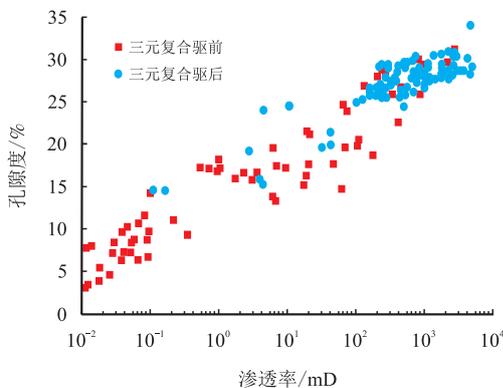


图 5 三元复合驱前、后岩芯孔隙度与渗透率相关性

Fig. 5 Correlation between porosity and permeability of the cores before and after ASP flooding

明显改善。此外三元复合驱前后孔隙度、渗透率的相关性基本保持一致。

#### 2.3.2 原子力显微镜岩芯微观孔隙结构分析

通过原子力显微镜获取三元复合驱后岩芯二维形貌, 扫描范围为  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ , 截取部分测试分析结果见图 6。并对岩芯二维形貌进行二值化, 结果见图 7。经过二值化处理可较为清楚地分辨孔隙间连通关系, 从而对孔隙结构及渗透率的分析提供佐证。

图 7 中黑色的部分为岩芯, 白色的部分为孔隙及喉道, 其孔隙在微观形貌下表现出不规则连通状态。

由图 6 和图 7 分析可知, 岩芯在经过三元复合驱之后孔道明显出现两极分化, 存在明显的大孔道, 且在少量大孔道里出现填充的细碎砂粒。出现大孔道的原因是三元复合体系中的碱组分所造成的溶蚀。而碱溶蚀同样会产生岩屑, 造成孔道的充填, 同时部分溶蚀的微粒随注入液体发生运移, 堵塞较小的喉道, 很多细碎的颗粒堆积形成许多小尺度喉道, 最终导致渗透率很低。由此可以认为, 三元复合驱会导致溶蚀矿物微粒发生运移, 使得部分孔隙

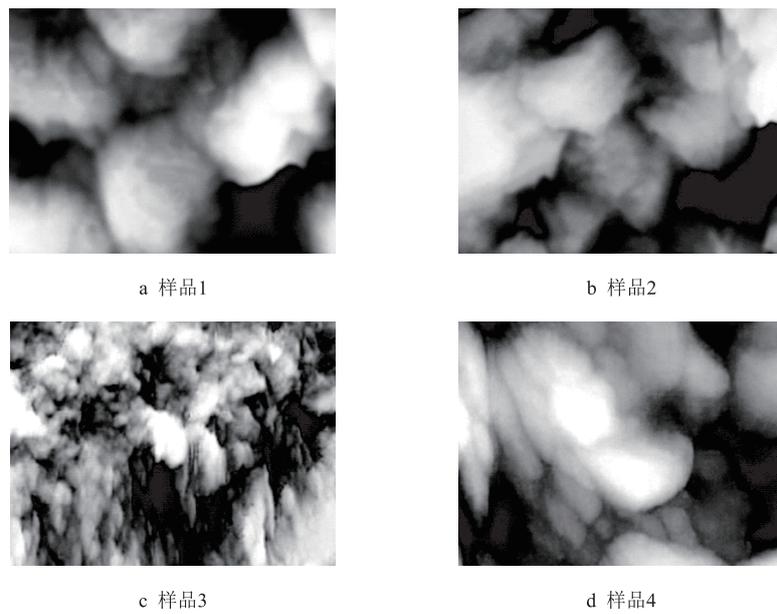


图6 三元复合驱后岩芯原子力显微镜图  
Fig. 6 AFM images of the cores after ASP flooding

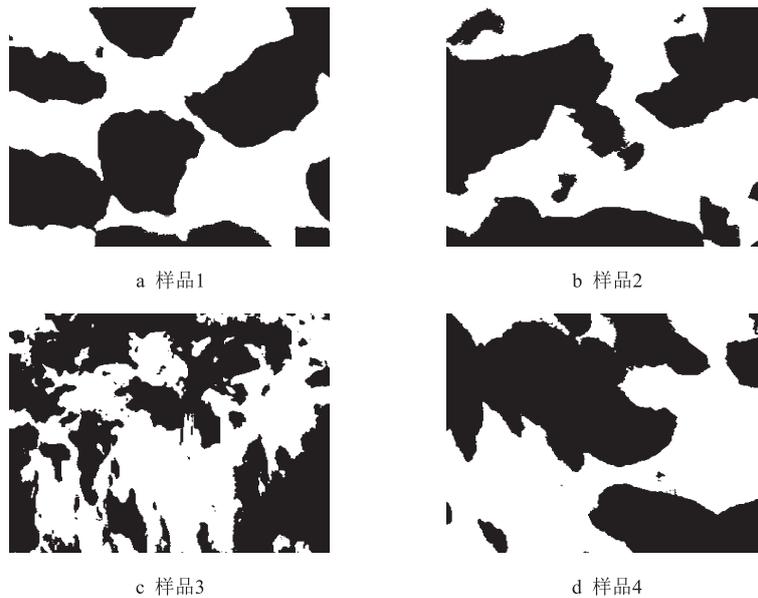


图7 三元复合驱后岩芯原子力显微镜二值化图  
Fig. 7 AFM binary images of the cores after ASP flooding

喉道因溶蚀而变大,一部分孔隙因微粒沉降而变小,造成孔隙尺度的两极分化。这与岩芯孔渗参数变化分析所得的结果是一致的。

### 3 结论

(1) 三元复合驱前后储层岩芯的润湿性由偏油湿向水湿转换。产生转换的原因包括各相之间界面张力的改变、各化学剂在岩石上的吸附、碱对岩石

表面油膜溶解等。

(2) 三元复合体系对储层敏感性的影响主要表现在驱后储层水敏性增加,而速敏性、酸敏性、碱敏性有所降低。这主要是由于三元复合体系中碱组分与储层矿物发生反应,改变了储层结构与矿物组成,进而影响各类敏感性的变化。

(3) 三元复合驱前后储层物性差别较大且驱替前后孔隙度和渗透率相关性基本保持一致,可以认

为是由于三元复合体系中碱的溶蚀作用形成的大孔道以及随之导致的溶蚀矿物生成的微粒发生运移造成部分喉道的堵塞,造成了孔隙尺度的两极分化。

## 参考文献

- [1] 王德民. 大庆油田“三元”“二元”“一元”驱油研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(3): 1-9.  
WANG Demin. Study on ASP flooding, binary system flooding and mono system flooding in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(3): 1-9.
- [2] 王德民. 发展三次采油新理论新技术确保大庆油田持续稳定发展(上)[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3): 1-7.  
WANG Demin. Develop new theory and technique of tertiary production to ensure continuous and stable development of Daqing Oilfield(I)[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(3): 1-7.
- [3] 王德民. 发展三次采油新理论新技术确保大庆油田持续稳定发展(下)[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(4): 1-5.  
WANG Demin. Develop new theory and technique of tertiary production to ensure continuous and stable development of Daqing Oilfield(II)[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(4): 1-5.
- [4] 王家禄, 沈平平, 陈永忠, 等. 三元复合驱提高原油采收率的三维物理模拟研究[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 61-66.  
WANG Jialu, SHEN Pingping, CHEN Yongzhong, et al. 3-D physical modeling of enhanced oil recovery by alkali-surfactant-polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 61-66.
- [5] 沈平平, 袁士义, 邓宝荣, 等. 化学驱波及效率和驱替效率的影响因素研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(增): 1-4.  
SHEN Pingping, YUAN Shiyi, DENG Baorong, et al. Influence factors of oil displacement efficiency and sweep efficiency in chemical flooding[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(S): 1-4.
- [6] 程杰成, 王德民, 李群, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验动态特征[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 37-40.  
CHENG Jiecheng, WANG Demin, LI Qun, et al. Field test performance of alkaline surfactant polymer flooding in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 37-40.
- [7] 王庆国. 大庆油田三元复合驱油井清防垢技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.  
WANG Qingguo. Study on scale removal and inhibition technology for ASP flooding wells in Daqing Oilfield[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [8] YUAN Bin, MOGHANLOO R G, ZHENG Da. Analytical model of nanofluid injection to improve the performance of low salinity water flooding in deepwater reservoirs[C]. OTC 26363, 2016.
- [9] 姚振杰. NP 油田不同注水开发阶段孔渗变化规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.  
YAO Zhenjie. Research of porosity and permeability change rule at the different flooding development stage for NP Oilfield[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [10] 庞仁山. 三元复合驱集输系统淤积及结垢规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.  
PANG Renshan. Research on the depositing and scaling laws of ASP flooding gathering and transportation system[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [11] YUAN Bin, MOGHANLOO R G, PATTAMASINGH P. Applying method of characteristics to study utilization of nanoparticles to reduce fines migration in deepwater reservoirs[C]. SPE 174192, 2015.
- [12] 程杰成, 周万富, 王庆国, 等. 大庆油田三元复合驱结垢样品中碳酸钙的结晶特性及形貌特征[J]. 高等学校化学学报, 2012, 33(6): 1138-1142.  
CHENG Jiecheng, ZHOU Wanfu, WANG Qingguo, et al. Morphology and crystallization character of calcium carbonate in scaled sample formed during alkaline-surfactant-polymer(ASP) flooding in Daqing Oilfield[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2012, 33(6): 1138-1142.
- [13] 王倩. 三元复合驱垢的溶解实验研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.  
WANG Qian. Study on experiment of dissolving the filth about ASP[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.
- [14] ZHANG Ronglei, WU Yushu, FAKCHAROENPHOL P. Non-Darcy displacement in linear composite and radial aquifer during CO<sub>2</sub> sequestration[J]. International Journal of Oil Gas and Coal Technology, 2014, 7(3): 244-262.
- [15] 吕翠杰, 高峰. 三元复合驱后储层孔渗参数变化及剩余油分布特征研究[C]//油气藏监测与管理国际会议论文集, 2011.  
LÜ Cuijie, GAO Feng. Study on changement of poroperm parameter and feature of residual oil distribution after ASP flooding[C]// International Conference & Exhibition on Reservoir Surveillance and Management, 2011.
- [16] 胡淑琼, 李雪, 卢祥国, 等. 三元复合驱对储层伤害及其作用机理研究[J]. 油田化学, 2013, 30(4): 575-580.  
HU Shuqiong, LI Xue, LU Xiangguo, et al. Damage of alkali/surfactant/polymer flooding to reservoir rock[J]. Oilfield Chemistry, 2013, 30(4): 575-580.
- [17] ZHANG R, YIN X, WINTERFELD P H, et al. A fully coupled thermal- hydrological- mechanical-chemical model for CO<sub>2</sub>, geological sequestration[J]. Journal of

- Natural Gas Science & Engineering, 2015, 28: 280–304.
- [18] 李子豪, 侯吉瑞, 唐永强, 等. 强碱三元复合体系对储层矿物组分的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(6): 100–105.  
LI Zihao, HOU Jirui, TANG Yongqiang, et al. Influences of the strong-base ASP system on the mineral components of the reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(6): 100–105.
- [19] 魏香奕, 张文华, 石碧. 原子力显微镜对胶原各级结构和聚集形态的观测[J]. 皮革科学与工程, 2013, 23(6): 5–11.  
WEI Xiangyi, ZHANG Wenhua, SHI Bi. Detection of collagen and its assembly structures by atomic force microscope[J]. Leather Science and Engineering, 2013, 23(6): 5–11.
- [20] 白永强, 李娜, 杨旭, 等. 基于原子力显微镜表征的含油储层微观孔隙结构分析及应用[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(1): 45–50.  
BAI Yongqiang, LI Na, YANG Xu, et al. Analysis and applications of microscopic pore structure characterization of oil reservoir by atomic force microscopy[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(1): 45–50.
- [21] 刘丽, 宋考平, 皮彦夫, 等. 水驱后三元复合驱全过程的相渗曲线变化趋势研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(24): 5773–5776.  
LIU Li, SONG Kaoping, PI Yanfu, et al. The research on relative permeability curves of the full term of alkali-surfactant-polymer flooding after water flooding[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(24): 5773–5776.
- [22] 王立军, 付百玲. 油水相对渗透率曲线的形态特征分析[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(9): 2160–2162.  
WANG Lijun, FU Bailing. Analysis of oil-water relative permeability curve's characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(9): 2160–2162.
- [23] 马永海. 用相对渗透率曲线鉴定润湿性[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(2): 80–85.  
MA Yonghai. A technique for an evaluation of formation wettability from relative permeability curves[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(2): 80–85.
- [24] 王传禹, 杨普华, 马永海, 等. 大庆油田注水开发过程中油层岩石的润湿性和孔隙结构的变化[J]. 石油勘探与开发, 1981, 8(1): 54–67.
- [25] 赵明国. 大庆油田三元复合驱中岩石润湿性的变化[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(2): 34–36.  
ZHAO Mingguo. Rock wettability change in ASP flooding in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(2): 34–36.
- [26] 高清河. 强碱三元复合驱成垢及化学控制技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.  
GAO Qinghe. Research on Chemistry of scaling and

descaling process in concentrated alkali ASP flooding[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.

- [27] 熊生春, 刘卫东, 杨焯, 等. 高岭石与碱性驱替剂反应实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(3): 130–133.

XIONG Shengchun, LIU Weidong, YANG Ye, et al. Experimental study on the reaction between kaolinit and alkaline flooding agents[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2009, 31(3): 130–133.

## 作者简介



赵凤兰, 1973年生, 女, 汉族, 山东商河人, 副研究员, 博士, 主要从事油田化学和提高采收率方面研究。E-mail: zhaoflan123@163.com



李子豪, 1991年生, 男, 汉族, 湖北荆州人, 硕士, 主要从事提高采收率方面研究。E-mail: sydxlzh@126.com



李国桥, 1981年生, 男, 满族, 黑龙江双城人, 高级工程师, 硕士, 主要从事三次采油方面室内研究工作。E-mail: liguoqiao\_2001@163.com



宋兆杰, 1985年生, 男, 汉族, 山东聊城人, 副研究员, 博士, 主要从事油藏数值模拟、缝洞型油藏提高采收率等方面的研究工作。E-mail: songzhaojie1210@163.com



侯吉瑞, 1965年生, 男, 汉族, 吉林九台人, 教授, 博士, 主要从事提高采收率与油田化学相关机理方面研究。E-mail: houjirui@126.com

编辑: 牛静静

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>