

# 强碱三元复合驱对储层孔隙结构影响研究

宋考平<sup>1</sup>, 何金钢<sup>1,2</sup>, 杨晶<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江大庆 163318; 2. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163000)

**摘要:** 储层孔隙结构变化规律是进行强碱三元复合驱后后续水驱和进一步提高采收率方法研究的基础。利用铸体薄片分析、SEM 图像、恒速压汞和电子探针结合现场检测等方法, 对强碱三元复合驱前后岩样孔隙结构变化进行定性和定量研究。研究表明: 强碱三元复合驱后颗粒边界经过强碱溶蚀呈“锯齿状”, 石英颗粒去棱角化明显, 长石溶蚀严重, 同时能够观察到大量溶蚀孔隙, 黏土矿物中大量的书页状高岭石被溶蚀, 同时在黏土矿物表面出现次生石英; “白色云雾状”垢沉淀充填在孔隙中, 主要成分为 Ca 和 Si, 同时含有少量 Mn、Fe、Ti, 结垢造成孔隙结构发生变化, 部分孔隙阻塞, 使强碱三元复合驱后岩心喉道半径平均值较水驱岩心下降 6.528%, 孔隙半径平均值下降 3.360%, 孔喉比分布范围更大, 平均增加 12.84%。

**关键词:** 强碱三元复合驱; 孔隙结构; 恒速压汞; 电子探针

**中图分类号:** TE 357.46 **文献标志码:** A

**引用格式:** 宋考平, 何金钢, 杨晶. 强碱三元复合驱对储层孔隙结构影响研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 164-172.

SONG Kaoping, HE Jingang, YANG Jing. Influence of base ASP flooding on the reservoir pore structure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 164-172.

## Influence of base ASP flooding on the reservoir pore structure

SONG Kaoping<sup>1</sup>, HE Jingang<sup>1,2</sup>, YANG Jing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery of Ministry of Education of China,

Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163000, China)

**Abstract:** The reservoir pore structure change after alkaline-surfactant-polymer (ASP) flooding is the basis for subsequent water flooding and oil recovery enhancement. The pore structure change before and after ASP flooding was studied qualitatively and quantitatively using casting thin sections, SEM image, rate-controlled mercury penetration, and electron probe analysis method. It is found that after base ASP flooding the particles boundary present the "zigzag" shape by alkali dissolution. And the angularity removal for quartz grains is significant. The feldspar dissolution is serious, and it can be observed a large number of dissolution pores. A lot of kaolinite in clay mineral is dissolved, and the secondary quartz on clay mineral surface is found after flooding. "White nebulous" scale fills and blocks in the pores, in which the Ca and Si are dominant, while Mn, Fe and Ti are small. The scale changes the pore structure, and blocks some pores. This causes the average throat radius is dropped by 6.528% compared with water flooding core, and the average pore radius is reduced by 3.360%. Also the pore distribution is greater, and it is increased by 12.84% on average after ASP flooding.

**Keywords:** base ASP flooding; pore structure; rate-controlled mercury penetration; electron probe

强碱三元复合驱技术<sup>[1-6]</sup>综合了碱驱和表面活性剂/聚合物驱的优点, 不仅能扩大波及体积、提高

驱油效率, 而且能较大幅度地降低表面活性剂的用量, 使其具有较好的技术经济可行性。工业化试验

表明采收率较相同地质条件下的聚合物驱提高 1.5 ~ 2.0 倍<sup>[4-6]</sup>,但是由于碱的存在而引起的垢沉积,不仅会造成卡泵等工程问题,而且在强碱的溶蚀作用与聚合物较强的携带能力作用下溶蚀颗粒将形成架桥使部分孔喉半径减少,造成储层损害,进一步影响化学剂的微观波及体积。笔者通过对密闭取心井的天然岩心进行铸体薄片和 SEM 图像分析定性确定颗粒结构变化,通过恒速压汞定量确定强碱三元复合驱前后储层的孔喉结构的变化程度;采用电子探针对结垢的成分和位置进行确定。

## 1 岩样的选取

选取水驱后密闭取心井(该层平均孔隙度 30.4%,平均渗透率  $1883 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )和强碱三元复合驱后密闭取心井(平均孔隙度 30.3%,平均渗透率  $1359 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )相同层位的天然岩心。水驱后密闭取心井完钻之后改为强碱三元复合驱采出井,强碱三元复合驱后密闭取心井位于三元井网注采主流线上,距水驱后密闭取心井 30 m。

## 2 实验方法

孔隙结构类型划分利用水驱后密闭取心井的天然岩心采用常规压汞进行。将岩心洗油后对孔隙结构进行定量分析,根据排驱压力和喉道半径结果划分出孔隙结构类型。

孔隙结构定量研究采用恒速压汞方法。由于地层孔隙结构非均质性的影响,相同层位不同位置的岩心依然存在差异。为了更好地模拟强碱三元复合体系对孔隙结构的影响,考虑岩心具有孔隙级均质,取一根水驱后密闭取心井的天然岩心截成两段,一段直接用作恒速压汞确定水驱后岩石孔隙结构,另一段采用与地下相同的强碱三元复合驱体系(三元

主段塞:0.3% S+1.2% A+2.0% P( $1900 \times 10^4$ ),三元副段塞:0.2% S+1.0% A+2.0% P( $2500 \times 10^4$ ))进行驱替,驱替  $0.937 V_p$  ( $V_p$  为孔隙体积)后浸泡 3 个月,模拟驱替后化学剂与岩石充分接触反应的过程,之后进行岩石孔隙结构的测定。室内实验的过程模拟化学剂驱替、充分接触和反应生成物沉积的过程,还原强碱三元复合驱后密闭取心井位置处的情况。

大尺度的孔隙结构和矿物变化的定性研究采用铸体薄片方法。图像中蓝色部分为孔隙中充填的树脂,根据图像能够计算出面孔隙率等孔隙结构参数。将水驱后和强碱三元复合驱后的密闭取心井的岩心洗油后制片,用以确定强碱三元复合驱前后岩石骨架颗粒变化和矿物的溶蚀情况。

小尺度的孔隙结构和矿物变化的定性研究采用 SEM 方法。得到的 SEM 灰度图像可以定性观察岩石孔隙结构和颗粒表面的形貌。将水驱后和强碱三元复合驱后的密闭取心井的岩心洗油后取新鲜断面进行 SEM 图像分析,用以确定三元复合驱前后岩石骨架颗粒变化和黏土矿物变化情况。

强碱三元复合驱结垢状况和结垢成分分析采用电子探针进行。将强碱三元复合驱后的密闭取心井的岩心洗油后制片,能够得到背散射灰度图像、元素组成和元素面积分布图像,元素面积分布图像采用颜色表示相应的含量,用以定性和定量确定结垢的成分和位置。

## 3 孔隙结构类型的划分

采用常规压汞对储层岩样进行孔隙结构类型的划分。常规压汞实验采用迈克公司的 9500 型压汞仪,孔径测量范围为  $3.8 \sim 360 \mu\text{m}$ ,压汞仪最大进汞压力为 228 MPa,汞体积精确到  $0.1 \mu\text{L}$ 。常规压汞实验结果如表 1 所示。

表 1 孔隙结构划分结果

Table 1 Results of type of pore structure

孔隙结构类型	样品数 个	数值	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	排驱压力 $p/\text{MPa}$	孔喉半径 $\gamma/\mu\text{m}$	中值半径 $\gamma_m/\mu\text{m}$	分选系数	最大进汞量/%	退汞效率/%
I	27	分布	3942 ~ 1036	0.034 ~ 0.021	15.95 ~ 7.779	20.18 ~ 7.553	3.982 ~ 2.223	97.66 ~ 87.06	94.31 ~ 88.13
		均值	2629	0.027	11.14	13.17	2.881	95.13	91.18
II	32	分布	2325 ~ 770.0	0.049 ~ 0.035	11.361 ~ 5.936	14.62 ~ 2.153	4.773 ~ 2.636	96.37 ~ 81.42	92.83 ~ 84.21
		均值	1628	0.041	8.678	8.939	3.578	90.31	88.53
III	32	分布	1014 ~ 76.50	0.05 ~ 0.118	2.229 ~ 8.535	10.81 ~ 0.061	2.757 ~ 4.471	92.82 ~ 56.11	88.88 ~ 68.98
		均值	412.2	0.067	5.15	4.256	3.683	78.73	83.21

根据 91 块样品的常规毛管压力曲线形态和参数特征分析,可将研究区孔隙结构划分为低排驱压力-粗喉道型(I类)、中排驱压力-中喉道型(II

类)、高排驱压力-细喉道型(III类)3类。由于储层发育良好,因此分类中的“细喉道”仅是相对于研究储层偏细,整体物性良好,有利于强碱三元复合驱的

开展。

## 4 强碱三元复合驱后孔隙结构变化

### 4.1 恒速压汞孔隙结构定量研究

由于常规压汞在孔喉结构研究中并不能够区分孔隙和喉道,因此根据常规压汞实验结果,分别选取3种孔隙结构的岩心进行恒速压汞,定量确定水驱后和强碱三元复合驱后的储层孔喉结构的变化程度,岩心的渗透率分别在  $500 \times 10^{-3}$ 、 $2\,000 \times 10^{-3}$ 、 $3\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  级别。

恒速压汞是由 Yuan 等<sup>[7]</sup>提出并发展应用的一种微观孔喉特征的研究方法,在极低并且恒定的压汞速率下(ASPE-730 压汞仪注入速度为 0.0001 和 0.00005 mL/min),使用高敏感度压力测量仪器记录注汞压力变化。恒速压汞汞以恒定的速率不断注入,填充孔隙中半径更小的部分<sup>[8-9]</sup>,注入端压力随之升高,随着汞突破喉道进入孔隙,压力发生突降,

之后下一个孔隙被填满,压力再次上升。因而可以通过高精度的压力测量分辨驱替过程中通过孔喉空间半径的微小变化,从进汞过程的压力涨落获得喉道的数量分布<sup>[10-11]</sup>,能够同时得到孔隙、喉道及其分布频率。通过天然岩心化学驱前后对比定量确定孔喉结构的变化程度,进汞速度采用 0.00005 mL/min,整个压汞过程为准静态过程,压力最高达到 7 MPa。

确定孔喉结构特征参数如表 2 所示。其中岩心编号为 W 的代表水驱后岩心,ASP 代表强碱三元复合驱后的岩心。不同渗透率级别的强碱三元复合驱前后岩心特征参数具有类似的结果。总孔隙进汞饱和度和总喉道进汞饱和度结果表明,强碱三元复合驱后进汞饱和度均有所下降,表明了强碱三元复合驱对于岩石具有一定损害,使孔隙结构发生变化,产生相圈闭损害同时增加孔隙的不可及体积。

表 2 强碱三元复合驱与水驱不同渗透率岩心的恒速压汞特征参数

Table 2 Results of rate-controlled mercury penetration for different permeability cores in ASP flooding and water flooding

组别	样号	孔隙度 $\varphi/\%$	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	平均喉道半径 $\gamma_t/\mu\text{m}$	平均孔隙半径 $\gamma_p/\mu\text{m}$	平均孔喉半径比 $\eta$	总孔隙进汞饱和度 $S_p/\%$	总喉道进汞饱和度 $S_t/\%$	分选系数 $S_p$	峰态 $K_p$	歪度 $S_{kp}$	排驱压力 $p_d/\text{MPa}$
1	W-1	27.10	502.23	9.301	173.612	22.091	36.920	51.341	3.387	2.063	0.885	0.054
	ASP-1	29.18	460.75	9.103	173.512	25.713	36.666	57.182	3.467	2.055	0.842	0.058
2	W-2	31.61	2023.76	13.778	192.385	15.176	44.118	49.352	4.399	3.789	1.836	0.042
	ASP-2	29.88	1899.22	12.556	180.544	16.885	33.837	45.441	4.832	2.475	1.277	0.045
3	W-3	30.59	2795.70	16.732	191.325	15.533	47.238	45.824	5.512	3.561	1.788	0.031
	ASP-3	28.96	2617.92	15.294	183.928	17.219	41.755	44.505	6.118	3.514	1.812	0.030

分选系数分析结果表明,强碱三元复合驱后岩心的分选系数均大于水驱岩心的分选系数,表明孔隙结构均向着物性变差的方向改变,增加了地层的岩心级非均质性,使得在相同驱替相对被驱替相的作用时岩心中产生“指进”和“窜流”的可能性增加。排驱压力的结果也表明,强碱三元复合驱后的排驱压力大于水驱岩心的排驱压力,但随着渗透率的增加,这种增加的趋势逐渐放缓,表明了强碱三元复合驱替剂具有对渗透率越小的岩样损害程度越大的特点。

通过对比强碱三元复合驱后岩心渗透率与相同水驱岩心渗透率能够得到强碱三元复合驱后岩心的损害率(损害率 =  $(k_{\text{三元}} - k_{\text{水驱}}) / k_{\text{水驱}}$ ),1、2、3 组损害率分别为 8.259%、6.154%、6.359%,损害率基本与渗透率呈现负相关性。强碱的溶蚀作用使得微粒脱落,与聚合物的较强携带能力共同作用下溶蚀颗粒或次生矿物颗粒将形成架桥使部分孔喉半径减少,造成储层损害,进一步影响化学剂的微观波及体积。

#### 4.1.1 喉道半径分布特征分析

6 块代表性样品的孔隙半径分布见图 1。可以看出:水驱时,1 组的主峰在 9  $\mu\text{m}$ ,2 组的主峰在 13  $\mu\text{m}$ ,3 组的主峰在 18  $\mu\text{m}$ ,峰值强度与渗透率呈正相关关系;强碱三元复合驱后喉道半径峰值向左偏移,且喉道半径减小,说明在产生垢沉积的情况下,经过强碱的溶蚀作用与聚合物的较强携带能力作用下溶蚀颗粒将部分在喉道处形成架桥而封堵喉道,同时有部分矿物经过物理化学作用生成次生颗粒,进一步封堵喉道。

通过表 3 对比孔喉结构参数的变化程度可知,强碱三元复合驱后喉道半径平均值下降,1 组平均喉道半径下降 2.128%,2 组平均喉道半径下降 8.862%,3 组平均喉道半径下降 8.594%,渗透率与喉道半径下降程度并没有较好的相关性。

强碱三元复合驱与水驱不同渗透率岩心的孔/喉特征参数对比见表 3。

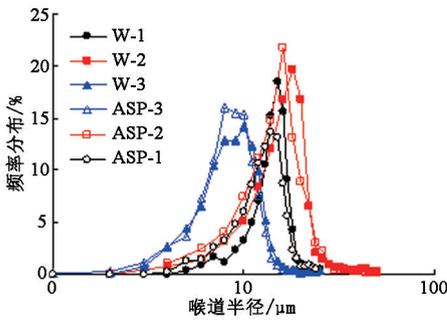


图 1 喉道半径与频率关系

Fig. 1 Relationship between radius of throat and frequency

表 3 强碱三元复合驱与水驱不同渗透率岩心的孔/喉特征参数对比

Table 3 Results of pore throat structure for different permeability cores in ASP flooding and water flooding

组别	样号	喉道半径 平均值 $\gamma_t/\mu\text{m}$	变化 比例/ %	孔隙半径 平均值 $\gamma_p/\mu\text{m}$	变化 比例/ %	孔喉半径 比平均值 $\eta$	变化 比例/ %
1	W-1	9.3010	2.129	173.612	0.0576	22.091	-16.396
	ASP-1	9.1030		173.512		25.713	
2	W-2	13.778	8.862	192.385	6.155	15.176	-11.268
	ASP-2	12.557		180.542		16.886	
2	W-3	16.732	8.594	191.325	3.866	15.533	-10.854
	ASP-3	15.294		183.928		17.219	

4.1.2 孔隙半径分布特征分析

孔隙半径分布见图 2。可以看出:水驱岩心孔隙半径分布特征呈正态分布,1 组的主峰在 173  $\mu\text{m}$ ,2 组的主峰在 180  $\mu\text{m}$ ,3 组的主峰在 184  $\mu\text{m}$ ,峰值强度与渗透率呈正相关关系;强碱三元复合驱后,岩心喉道半径峰值强度有所下降,但是主峰没有发生变化。

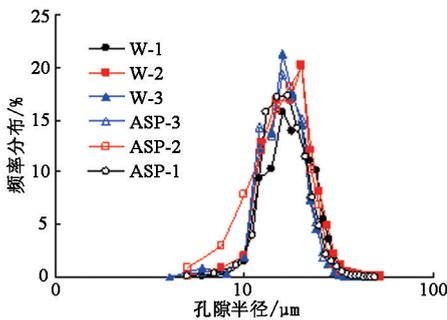


图 2 孔隙半径与频率关系

Fig. 2 Relationship between radius of pore and frequency

通过对比表 3 看出,强碱三元复合驱后孔隙半径平均值均较水驱岩心有所下降,1 组平均孔隙半径下降 0.058%,2 组平均孔隙半径下降 6.155%,3 组平均孔隙半径下降 3.866%,说明虽然经过强碱对孔隙壁面的溶蚀,但在聚合物的携带能力作用下溶蚀物质随后运移、沉淀并生成新矿相,在其他孔隙

表面沉积,因此平均孔隙半径略有减小。在较大孔隙由于渗流速度相对较小,因此相对于小孔隙其新矿相沉积的可能更大,孔隙减小程度越大。通过对比喉道和孔隙半径下降值,喉道下降幅度大于孔隙半径下降幅度。

4.1.3 孔喉半径比特征分析

孔喉半径比的特征分布见图 3。结合表 3 可知,渗透率越小孔喉比变化程度越大,说明相对低渗透率的岩心进行三元复合驱的过程中更需对注入参数进行优化。但总体上强碱三元复合驱后孔喉半径比较水驱的孔喉半径比增加,也意味着在强碱三元复合驱后进行后续水驱或者下一步提高采收率方法时,由于喉道半径的减小,注入能力将会变差,同时对单一孔隙,其孔隙半径减小幅度较小,因此在注入能力变差的条件下水或化学剂的微观波及效率将进一步下降,影响对孔隙壁面上残余油的清洗效果。

分别计算水驱和强碱三元复合驱后的 3 块岩样的渗透率变异系数,水驱后 3 块岩样的渗透率变异系数为 0.4216,强碱三元复合驱后的为 0.4251,因此岩心实验表明,强碱三元复合驱后地层的非均质程度较水驱有所增加,增加了岩心中产生“指进”和“窜流”的可能性。

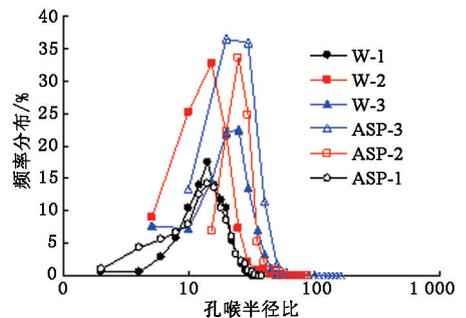


图 3 孔喉半径比与频率关系

Fig. 3 Relationship between pore throat radius ratio and frequency

利用 Yuan 提出的最终含油饱和度计算模型,采用恒速压汞确定的各个孔隙、次孔隙的体积以及它们之间可能的配置关系,通过  $S_{of} = S_{or} F_{IV}^*$ ,可以得出该孔隙体系最终含油饱和度系数  $F_{IV}^*$  [7,10-11]。式中,  $S_{or}$  为残余油饱和度;  $S_{of}$  为最终含油饱和度。  $F_{IV}^*$  数值越大说明最终含油饱和度越小,孔隙结构越好。计算的  $S_{or}$  与  $S_{of}$  关系见图 4。可以看出,在相同残余油饱和度下,强碱三元复合驱后的岩心由于受到损害,其孔隙结构相应变差,在相同驱替方式下最终含油饱和度相对较大,最终饱和度相对较高意味着强碱使孔隙结构参数变差。

残余油饱和度与最终含油饱和度关系表明,同一组岩心强碱三元复合驱后较三元复合驱前  $F_{IV}^*$  小,1组水驱后  $F_{IV}^*$  为 0.774,三元复合驱后为 0.708;2组水驱后  $F_{IV}^*$  为 0.744,三元复合驱后为 0.709;3组水驱后  $F_{IV}^*$  为 0.825,三元复合驱后为 0.817。计算得

到的强碱三元后岩心的最终含油饱和度较水驱岩心高,进一步说明三元复合驱后岩心孔隙结构变差的特征,对下一步提高采收率方案具有影响。同时各个参数的变化率均与渗透率呈负相关关系,说明渗透率越小,其孔隙结构发生损害的程度越大。

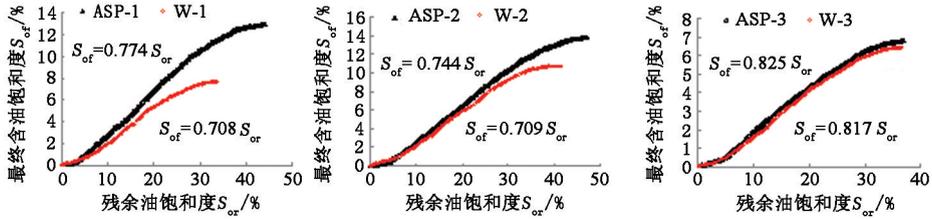


图4 残余油饱和度与最终含油饱和度关系

Fig. 4 Relationship between residual oil saturation and final oil saturation

### 4.2 铸体薄片孔隙结构变化

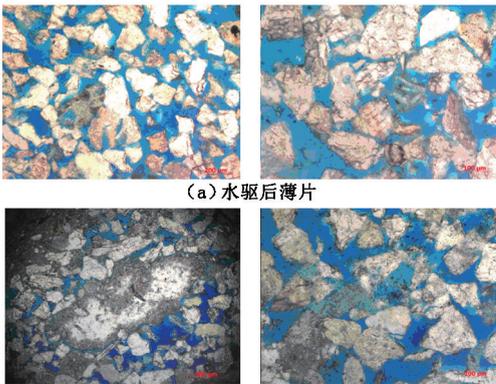
将岩心洗油后制成铸体薄片用以确定三元复合驱前后岩石骨架颗粒变化。薄片厚度为 0.03 mm,避免颗粒上下遮挡和光干扰。

隙结构发生变化,部分孔隙阻塞。计算面孔隙率分别为 24.05% 和 22.06%,实测岩样孔隙度 29.77%。由于结垢的影响,强碱三元复合驱后的面孔隙率和实测孔隙度较水驱岩心均有所下降。

水驱和强碱三元复合驱后的薄片分析见图 5。

### 4.3 SEM 图像孔隙结构和矿物定性

通过 SEM 图像可以定性观察岩石孔隙结构和颗粒的形貌<sup>[12-14]</sup>。将岩心洗油后取新鲜断面进行 SEM 图像分析,结果见图 6。



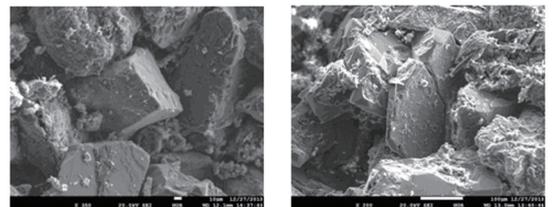
(a) 水驱后薄片

(b) 三元复合驱后薄片

图5 薄片分析

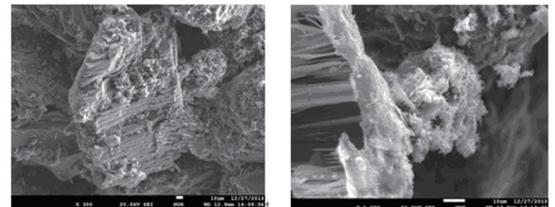
Fig. 5 Analysis of casting thin-section

水驱后的骨架颗粒形貌表明,研究区原生粒间孔发育,颗粒接触方式以线接触和面接触为主,胶结类型为接触式胶结,胶结物为泥质。颗粒接触紧密,颗粒棱角化分明,边界平滑,长石见微裂缝,孔隙结构完整,说明在长期水动力作用下岩石颗粒形态并没有发生较大变化。计算面孔隙率分别为 28.15% 和 29.36%,实测岩样孔隙度 31.61%。



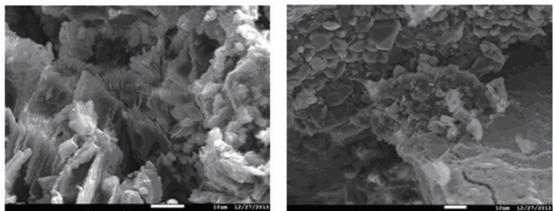
(a) 水驱SEM图像

(b) 石英溶蚀



(c) 长石溶蚀后表面发育黏土

(d) 伊利石



(e) 黏土矿物溶蚀

(f) 次生石英

图6 SEM 图像

Fig. 6 SEM images

强碱三元复合驱后的骨架颗粒形貌表明,研究区颗粒接触方式仍以线接触和面接触为主,颗粒接触紧密,碱的溶蚀作用并不能改变颗粒接触方式。颗粒边界经过强碱溶蚀后呈“锯齿状”,颗粒去棱角化明显。长石溶蚀严重,溶蚀残余结构清晰可见,同时能够观察到大量粒内溶蚀孔隙。白色云雾状为产生的垢沉淀,大量钙垢、硅垢充填在孔隙中,造成孔

水驱后长石颗粒棱角化明显,颗粒表面光滑。三元复合驱后石英颗粒部分溶蚀,长石颗粒溶蚀严

重,边缘“锯齿化”,可以明显看出表面在强碱的作用下被溶蚀的现象。由于被溶蚀的部位相对粗糙,生成的次生黏土或垢类等成分易附着在被溶蚀处,在溶蚀表面发现大量次生高岭石和少量伊利石。通过对次生高岭石的进一步放大,在高岭石片六方板状结构边缘具有溶蚀现象,因此强碱对次生黏土矿物依旧具有较强的溶蚀现象,出现高岭石残片。同时在强碱溶蚀后的孔隙中发现次生石英。

密闭取心样品 XRD 全岩分析(表 4)表明,成分主要是长石和石英。黏土含量为 3.60%,其中高岭石含量较高,间层矿物含量较低,对表面活性剂的吸附滞留量较少,对三元复合驱油比较有利,但天然岩心中的长石、石英、黏土矿物均可以和三元复合驱体系中的碱发生溶蚀反应,反应的顺序是黏土矿物、长石、石英。以上现象表明部分钾长石、斜长石和石英溶蚀现象明显,孔隙中充填大量的黏土矿物,且其含

量增加,并且矿物表面出现次生石英。由于储层流体 pH 较高时,微晶石英、方解石、黏土矿物等表面同时带负电荷。同种电荷相互排斥,黏土矿物及微晶石英与方解石等脱落、运移并堵塞孔喉。碱液与储层中的微晶石英、长石、白云石反应,生成损害更严重的硅酸盐、高岭石及水镁石等新矿相并沉淀堵塞孔喉/裂缝,严重损害储层,反应式见式(1)~(3)。当 pH 值进一步升高时,储层流体中的  $\text{Ca}^{2+}$  以  $\text{CaCO}_3$  甚至  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  形式析出,堵塞储层<sup>[12-15]</sup>,进一步影响化学剂的微观波及体积。

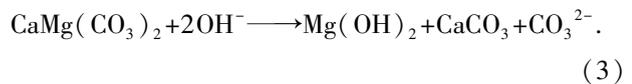
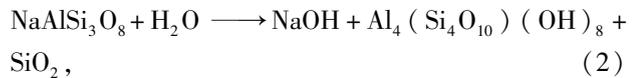
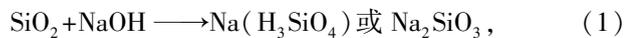


表 4 全岩 XRD 分析

Table 4 XRD analysis

驱替方式	样品个数	类型	石英	钾长石	斜长石	方解石	铁白云石	菱铁矿	黏土矿物					
									总量	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	绿/蒙混层
水驱	6	分布	22.20 ~ 37.10	15.10 ~ 25.40	42.70 ~ 55.30	0.00 ~ 1.00	0.40 ~ 1.20	0.00 ~ 2.50	2.70 ~ 4.20	0.46 ~ 0.67	1.76 ~ 2.50	0.1 ~ 0.71	0.05 ~ 0.17	0.24 ~ 0.35
		均值	27.5	18.5	48.2	0.33	0.76	0.96	3.6	0.54	2.2	0.43	0.11	0.32
		分布	36.30 ~ 52.10	12.90 ~ 28.40	29.60 ~ 41.30	0.00 ~ 2.10	0.60 ~ 2.20	0.00 ~ 0.50	3.30 ~ 6.10	0.30 ~ 2.14	2.11 ~ 3.71	0.23 ~ 0.67	0.04 ~ 0.37	0.00 ~ 0.49
均值	39.5	18.4	34.8	1.05	1.18	0.08	4.86	0.78	3.21	0.44	0.15	0.29		

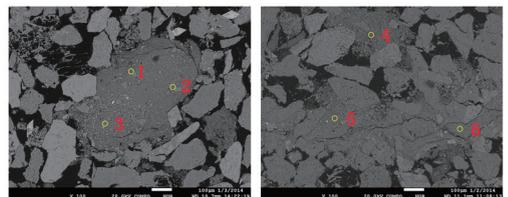
## 5 电子探针结垢成分分析

### 5.1 电子探针结垢元素

电子探针可对试样进行微小区域成分分析。除 H、He、Li、Be 几个较轻元素和 U 之后的元素以外都可进行定性和定量分析,成为研究亚微观结构的有力工具<sup>[16-18]</sup>。通过电子探针点扫描对结垢的元素成分进行定量研究。电子探针选点位置见图 7,其分析结果见表 5。图 7 为背散射图像,图像中孔隙内充填物质并没有固定的晶体形状,与周边的晶体形态差异较大,根据其不规则形态和其散碎的状况,判断其为结垢成分。

图 7 和表 5 表明,强碱三元复合驱结垢的部位多在孔喉处,结垢的成分具有差异,但是主要成分为 Ca 和 Si 同时含有少量的 K、Fe、Mn、Ti,分别形成钙垢和硅垢。Fe 的来源主要是由于地层中含有一定含量的黄铁矿。在强碱的作用下岩石发生溶蚀并与  $\text{SiO}_3^{2-}$  形成硅酸钙、硅酸镁等,进而影响了之后后续

水驱和提高采收率的微观波及体积。



(a) 钙垢 (b) 硅垢

图 7 电子探针选点位置

Fig. 7 Electronic probe setpoint

表 5 电子探针分析结果

Table 5 Electron microprobe analysis results %

岩心	测点	Si	K	Ca	Fe	Ti	Mn
ASP-4	1	4.746	0.497	90.764	1.121		2.871
	2	4.411	0.574	87.984	2.411		4.619
	3	4.844	0.453	88.012	3.263		3.427
ASP-5	4	83.359	6.784	0.537	6.091	3.228	
	5	91.646	5.564		2.790		
	6	83.414	5.745	0.812	7.775	2.253	

### 5.2 强碱三元复合驱储层中的钙垢

在电子探针点扫描的基础上,通过元素面扫描确定结垢元素在面积上的分布位置和分布差异。钙垢的Ca元素分布见图8。可以看出,钙的含量相对较高,钙作为结垢的主要成分以面积状与溶蚀碎屑结合充填在孔隙中。在强碱三元复合驱的注入过程中氢氧化钠与储层矿物交换反应使得Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>增加。同时氢氧化钠与注入液和地层水中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>反应(方程4),生成碳酸盐沉淀,从而使得Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度降低:

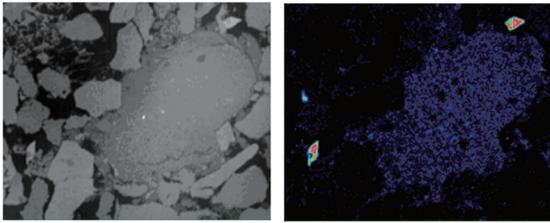
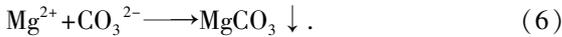
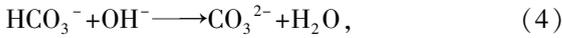


图8 钙垢的Ca元素分布

Fig.8 Element distribution of Ca scale

在强碱三元复合驱采出液表现为碱在Ca<sup>2+</sup>浓度刚下降时出现,之后随着Ca<sup>2+</sup>浓度的大幅度下降而迅速上升,在Ca<sup>2+</sup>消失时达到最高。Ca<sup>2+</sup>的浓度下降说明沉淀物超过了过饱和度,随着碱的继续注入,pH值进一步增加,使Ca(OH)<sub>2</sub>、CaCO<sub>3</sub>的溶解度进一步降低,这就进一步超过了沉淀物的过饱和度,直至Ca<sup>2+</sup>消失,采出液中才出现碱。试验区伴生气中CO<sub>2</sub>含量高,导致碳酸氢根和碳酸根在强碱三元驱阶段持续上升;地层水、长石中释放的钙质浓度增大到过饱和后即形成少量钙质沉淀,故钙质含量略有增加。由于钙的来源多、成垢条件相对容易,因此钙垢在试验区中所占的比例较大。

### 5.3 强碱三元复合驱储层中的硅垢

图9为硅垢的Si元素分布。可以看出,硅的含量相对较高,钠和钾的含量次之,同时含有铝、镁等元素。钠和钾的含量较高,为长石的溶蚀颗粒运移后再次通过硅质胶结进而形成硅垢。其中pH、温度、其他离子、聚合物和表面活性剂均对硅垢的生成产生影响。随着pH值的增加,可溶性硅离子浓度增加,且pH>10后,可溶性硅离子浓度增加趋势加快。钙、镁的存在可以大大降低可溶性硅离子浓度。同时温度高于45℃时,可溶性硅离子浓度增加明显。聚丙烯酰胺和表面活性剂的存在使得结垢更加

明显,且大大降低了可溶性硅离子的浓度,因为聚丙烯酰胺的增粘作用促进了硅胶体的聚集及成垢,表面活性剂产生的低界面力使得硅酸盐垢更加明显,因此也大大降低了可溶性硅离子的浓度<sup>[16]</sup>。硅垢的充填形式也为大面积充填在孔喉处。

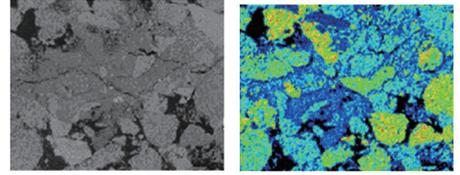


图9 硅垢的Si元素分布

Fig.9 Element distribution of Si scale

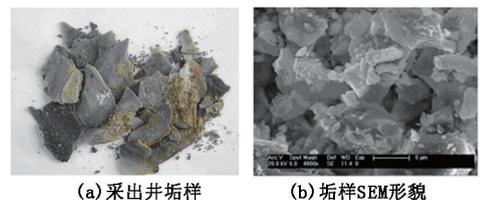
结合试验区举升设备结垢检测结果见表6。举升设备结垢检测结果为强碱三元复合驱体系注入前期的结果,表明垢质成分以钙垢为主,硅垢次之,现场采出井检验结果与室内实验分析结果能够高度吻合,进一步证实了储层中的结垢现象,也与得到的强碱结垢特点:初期以碳酸盐垢为主,结垢速度快;中后期以硅酸盐为主,结垢速度慢能够相互印证。

表6 举升设备结垢检测结果

Table 6 Results of scaling test in lifting device %

井号	取样时间	总有机物	钙垢	硅垢	杂质
1-40	2009.10.27	36.40	30.03	22.93	10.64
1-61	2010.01.10	14.91	54.57	26.89	3.63
1-53	2010.05.24	3.67	74.14	16.56	5.63
1-44	2010.08.29	0.53	68.32	25.08	6.07
1-55	2011.04.29	7.88	67.87	18.99	5.26

井筒中取出的垢形态表明,井口结垢较为严重,垢破碎后呈块状(图10),且硬度较大,容易造成抽油机井频繁卡泵,螺杆泵井频繁断杆,因此使检泵周期大幅度缩短。SEM图像表明,垢的微观形态具有一定的晶体形态,但是由于长期在井筒中同时受到强碱三元复合驱体系的溶蚀的作用,使得晶体结构并不完整,但胶结紧密。综合以上信息表明,结垢成分为其在强碱的作用下发生溶蚀并重新结晶形成阻塞喉道的垢,进而影响了之后后续水驱和提高采收率的微观波及体积。



(a) 采出井垢样

(b) 垢样SEM形貌

图10 采出井垢样及其SEM图像

Fig.10 Scales in production well and its SEM image

## 6 讨论

在强碱三元复合驱过程中,地层同时受到多种物理化学作用的影响。驱替过程不同位置渗流速度的差异将导致储层受到不同水动力学作用,生成的新矿相和地层微粒的运动将产生明显差异(运移或堵塞)。沿程驱替剂与岩石和原油的相互作用使得强碱的溶蚀作用结果不同,表现为“碱耗”的影响;驱替剂沿程的离子浓度变化将使得离子过饱和和沉淀作用有所不同,表现为在地层的不同位置结垢的类型具有差异。

强碱三元复合驱密闭取心井位于主流线上距离采出井 30 m,注采井井距 150 m,假设地层为均质地层,根据径向流渗流理论,30 m 位置的平均渗流速度比地层中部 75 m 处的平均渗流速度高 1.269 倍,但远远小于近井地带的渗流速度,因此可以认为密闭取心井处的渗流速度与地层平均速度大致相当,两处具有相似的水动力学作用程度,能够代表地层整体的力学作用情况。由于渗流速度相对较小,因此驱替剂的水动力较弱,微粒产生运动也通常会由于“架桥”作用发生堵塞,而非在近注入井端的强水动力作用下发生运移。因此,在地层中部容易发生孔喉封堵使得孔隙结构变差而在注入井端容易发生孔喉溶蚀使得孔隙结构变好的现象。

密闭取心井更靠近采出井端,在“碱耗”的影响下强碱的溶蚀作用相对于注入井端相对较弱;由于强碱的溶蚀产生的各类离子溶解在驱替剂中并随着驱替剂运移,使得取心井位置处的总离子含量相对采出井端高;由于聚合物的携带作用,地层中可以运移的微粒将随之发生运移,使得在靠近采出井端更容易发生结垢现象,因此取心井仅能够代表靠近采出井端的化学作用情况。

恒速压汞、SEM 图像和铸体薄片图像的分析结果表明,取心井位置处的地层受到结垢和堵塞作用使孔隙结构变差的程度远远大于溶蚀使得孔隙结构变好的程度,因此表现为孔隙结构变差的现象。损害结果说明渗透率越大,发生的损害程度越小。计算损害前后渗透率变异系数变化表明,强碱三元复合驱后地层的非均质程度较水驱有所增加,增加了岩心中产生“指进”和“窜流”的可能性,因此意味着在后续水驱阶段,由于孔隙结构损害程度的差异,薄差层的动用难度将进一步增加。

## 7 结论

(1)强碱三元复合驱后颗粒边界经过强碱溶蚀

呈“锯齿状”,颗粒去棱角化明显,长石溶蚀严重,溶蚀残余结构清晰可见,同时能够观察到大量溶蚀孔隙,“白色云雾状”垢沉淀充填在孔隙中,造成孔隙结构发生变化。

(2)强碱三元复合驱后储层黏土矿物中大量的书页状高岭石被溶蚀物,同时在黏土矿物表面出现次生石英。

(3)强碱三元复合驱后岩心喉道半径平均值均较水驱岩心下降 6.528%;孔隙半径平均值均较水驱岩心下降 3.360%;孔喉比分布范围更大,平均增加 12.839%。强碱三元复合驱后岩心的最终含油饱和度较水驱岩心低,最终油饱和度系数  $F_{IV}^*$  较小。

(4)结垢元素主要为 Ca 和 Si,含有少量 Mn、Fe、Ti。经过面扫描确定的元素成分分布,钙垢、硅垢多以沉淀分布在孔喉处,因此影响后续水驱和提高采收率的微观波及体积。

### 参考文献:

- [1] 王德民,程杰成,吴军政,等. 聚合物驱油技术在大庆油田的应用[J]. 石油学报,2005,26(1):74-78.  
WANG Demin, CHENG Jiecheng, WU Junzheng, et al. Application of polymer flooding technology in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(1):74-78.
- [2] 王启民,廖广志,牛金刚. 聚合物驱油技术的实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发,1996,18(4):1-5.  
WANG Qimin, LIAO Guangzhi, NIU Jingang. The practice and knowledge of Polymer flooding technology[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1996,18(4):1-5.
- [3] 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):1-10.  
WANG Demin. Study on “ASP Flooding” “Binary system flooding” “Mono system flooding” in Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003,22(3):1-10.
- [4] 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):37-41.  
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):37-41.
- [5] 王启民,冀宝发,隋军,等. 大庆油田三次采油技术的实践与认识[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(2):1-9.  
WANG Qimin, JI Baofa, SUI Jun, et al. Practice and knowledge of tertiary recovery technique in Daqing oilfield

- [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 20(2):1-9.
- [6] 郭万奎, 程杰成, 廖广志. 大庆油田三次采油技术研究现状及发展方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 21(3):1-6.  
GUO Wankui, CHENG Jiecheng, LIAO Guangzhi. Present situation and direction of tertiary recovery technique in the future in Daqing Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 21(3):1-6.
- [7] YUAN H H. Advances in apex technology: determination of cementation exponent and absolute permeability [J]. *The Log Analyst*, 1991, 32(5):557-570.
- [8] TOLEDO P G, SCRIVEN L E, DAVIS H T. Pore-space statistics and capillary pressure curves from volume-controlled porosimetry [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1994, 9(1):46-54.
- [9] 柴智, 师永民, 徐常胜, 等. 人造岩芯孔喉结构的恒速压汞法评价[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2012, 48(5):770-774.  
CHAI Zhi, SHI Yongmin, XU Changsheng, et al. Pore-throat structure evaluation of artificial cores with rate-controlled porosimetry [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(5):770-774.
- [10] YUAN H H. Pore-scale heterogeneity from mercury porosimetry data [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1989, 6(2):233-240.
- [11] PICKELL J J, SWANSON B F, HICKMAN W B. Application of air-mercury and oil-air capillary pressure data in the study of pore structure and fluid distribution [J]. *SPE Journal*, 1966, 6(1):55-61.
- [12] 何金钢, 康毅力, 游利军, 等. 流体损害对页岩储层应力敏感性的影响[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(5):915-920.  
HE Jingang, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Influence of fluid damage on shale reservoir stress sensitivity [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(5):915-920.
- [13] 何金钢, 康毅力, 游利军, 等. 矿物成分和微结构对泥质岩储层应力敏感性的影响[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(2):129-134.  
HE Jingang, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Effects of mineral composition and microstructure on stress-sensitivity of mudrocks [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(2):129-134.
- [14] 何金钢, 康毅力, 游利军, 等. 特低渗透砂岩油藏压裂液损害实验评价[J]. *油田化学*, 2013, 30(2):173-178.  
HE Jingang, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Damage evaluation of fracturing fluids on sandstone reservoir with extra-low permeability [J]. *Oilfield Chemistry*, 2013, 30(2):173-178.
- [15] 何金钢. 流体敏感性损害对页岩纳米孔的影响[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2014, 38(1):98-104.  
HE Jingang. Influence of fluid sensitivity damage on nano-pores of shale reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(1):98-104.
- [16] 刘祥文, 金振民, 曲晶, 等. 石榴石异剥橄榄岩中橄榄石的钛铁矿和含铬钛铁矿出溶体[J]. *中国科学: D辑*, 2005, 35(10):949-956.  
LIU Xiangwen, JIN Zhenmin, QU Jing, et al. Exsolution from Ilmenite of wehrlite in olivine and magnetite contain Cr-Ti [J]. *Science China: D Ser*, 2005, 35(10):949-956.
- [17] 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 等. 角闪石变形变质过程及其变形机制:以山西恒山地区斜长角闪岩为例[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43(1):52-60.  
JI Mo, HU Ling, LIU Junlai, et al. The process and mechanisms of metamorphism and deformation of hornblende: an example from the Hengshan Mountains, Shanxi Province [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(1):52-60.
- [18] 刘春燕, 郑和荣, 胡宗全, 等. 碎屑岩中的碳酸盐胶结特征-以鄂尔多斯盆地南部富县地区延长组长6砂体为例[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(11):1681-1689.  
LIU Chunyan, ZHENG Herong, HU Zongquan, et al. Characteristics of carbonate cementation in clastic rocks from the Chang 6 sandbody of Yanchang Formation, southern Ordos Basin [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(11):1681-1689.

(编辑 刘为清)