

文章编号:1673-5005(2009)06-0142-06

# 表面活性剂对水湿砂岩的渗吸规律及其对采收率的影响

韩冬<sup>1</sup>, 彭昱强<sup>1,2</sup>, 郭尚平<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中海油田服务股份有限公司, 北京 101149)

**摘要:**利用国产露头砂岩岩心,研究水湿条件下盐水、非离子表面活性剂、阴离子表面活性剂和阳离子表面活性剂溶液的自发渗吸规律及其对采收率的影响,对比盐水渗吸、表面活性剂溶液渗吸和先盐水渗吸后表面活性剂溶液的渗吸情况。结果表明:在岩心渗透率范围内,各种溶液渗吸的最终采收率为盐水(0.32~0.50) $w_{\text{OIP}}$ ( $w_{\text{OIP}}$ 为原始含油量),非离子表面活性剂溶液(0.38~0.50) $w_{\text{OIP}}$ ,阴离子表面活性剂溶液(0.44~0.55) $w_{\text{OIP}}$ ,阳离子表面活性剂溶液(0.38~0.44) $w_{\text{OIP}}$ ;同一类型的非离子表面活性剂在具有特定结构时渗吸效果才达到最好,阴离子表面活性剂的渗吸效果一般好于其他类型表面活性剂;盐水渗吸后再进行表面活性剂渗吸,可提高采收率(0.02~0.04) $w_{\text{OIP}}$ 。

**关键词:**自发渗吸;露头砂岩;水湿岩心;表面活性剂;渗吸采收率

**中图分类号:**TE 357.46 **文献标识码:**A

## Imbibition behavior of surfactant in water-wet sandstone and its effects on recovery efficiency

HAN Dong<sup>1</sup>, PENG Yu-qiang<sup>1,2</sup>, GUO Shang-ping<sup>1</sup>

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China*;  
2. *China Offshore Oilfield Services Company Limited, Beijing 101149, China*)

**Abstract:** Spontaneous imbibition behavior of brine, nonionic surfactant solution, anionic surfactant solution, and cationic surfactant solution and its effects on recovery efficiency were studied in water-wet Chinese outcrop sandstones. The imbibition characteristics were compared in brine, surfactant solution, and sequence of brine and surfactant solution. The results show that the ultimate imbibition recovery efficiency of brine is between 0.32  $w_{\text{OIP}}$  and 0.50  $w_{\text{OIP}}$ , where  $w_{\text{OIP}}$  refers to the original oil-cut, and that of nonionic surfactants is between 0.38  $w_{\text{OIP}}$  and 0.50  $w_{\text{OIP}}$ , and that of anionic surfactants is between 0.44  $w_{\text{OIP}}$  and 0.55  $w_{\text{OIP}}$ , and that of cationic surfactants is between 0.38  $w_{\text{OIP}}$  and 0.44  $w_{\text{OIP}}$ . The same type of nonionic surfactant with a specific structure could reach the best imbibition results. The imbibition recovery efficiency of anionic surfactant is generally better than that of any other type surfactant. Moreover, if cores are first imbibed in brine and then in surfactant solution, the ultimate recovery efficiency will be improved by (0.02–0.04)  $w_{\text{OIP}}$ .

**Key words:** spontaneous imbibition; outcrop sandstone; water-wet cores; surfactant; imbibition recovery efficiency

在天然裂缝性油藏和多层非均质油藏开发中,自发渗吸驱油在石油开采中起着重要作用<sup>[1-2]</sup>。自发渗吸驱油研究在国外开展较早,使用较多的砂岩岩心是 Berea 砂岩<sup>[3-10]</sup>。我国的渗吸研究中以人造岩心<sup>[11-13]</sup>居多。天然露头岩心更接近于地下油藏岩石,其中的流体流动能更真实地反映渗吸过程。笔者应用国产露头水湿砂岩岩心,研究其在盐水和

不同类型不同结构表面活性剂溶液中的渗吸规律及其对采收率的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

(1)岩心。岩心来源于中国石油勘探开发研究

收稿日期:2009-07-12

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2005CB221300)

作者简介:韩冬(1961-),男(汉族),辽宁辽中人,教授级高级工程师,博士,博士生导师,主要从事三次采油研究和管理工作。

院采收率所采集的国产天然露头砂岩,岩心长度 4.50 ~ 6.41 cm,直径 2.42 ~ 2.59 cm,孔隙度 22.9% ~ 24.7%,空气渗透率  $550 \times 10^{-3} \sim 880 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。使用中性煤油和标准盐水,按照石油行业标准 SY/T5153-1999 评价岩心润湿性,岩心的相对润湿指数在 0.76 ~ 0.90,其润湿性属于强亲水。

(2)油。实验用油为饱和烷烃(癸烷,  $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ ),化学纯,北京化学试剂公司生产。

(3)盐水。使用自制蒸馏水和氯化钾配制实验使用的盐水,其质量分数为 1.2%。氯化钾为分析纯,北京化学试剂公司生产。

(4)表面活性剂。非离子表面活性剂: SXNO 系列和 SXNA 系列两类脂肪醇聚氧乙烯醚,分子结构式为  $\text{RO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$ ,其中, SXNO 系列表面活性剂含有芳烃基团, SXNA 系列表面活性剂含有直链烷基基团。选取了 6 种 SXNO 表面活性剂,其烷氧基数分别为 8, 9, 10, 12, 15 和 21,相应代号分别为 SXNO-8, SXNO-9, SXNO-10, SXNO-12, SXNO-15, SXNO-21; 选取 5 种 SXNA 表面活性剂,其烷氧基数分别为 7, 9, 15, 20 和 25,相应代号分别为 SXNA-7, SXNA-9, SXNA-15, SXNA-20, SXNA-25。非离子表面活性剂由杭州久灵、天津浩元和中国石油勘探开发研究院采收率所提供。阴离子表面活性剂为 SXAA(硫酸盐)、SXAN(硫酸盐)和 SXAW(磷酸盐),由中国石油勘探开发研究院采收率所提供。烷基甲基溴化铵类阳离子表面活性剂为 SXCD, SXCT, SXCC, 烷基碳数依次为 12, 14 和 16,由 Alfa Aesar 提供。

使用 1.2% KCl 盐水溶液配制所有表面活性剂溶液,表面活性剂质量分数均为 0.3%。

### 1.2 岩心处理方法

岩心从同一块天然露头砂岩岩石上钻取,然后用自来水冲洗干净,在 105 °C 下烘干至恒重,放入干燥器中冷却。测量岩心的气相渗透率后,对岩心抽真空,然后饱和盐水,称量岩心饱和盐水后的湿重,根据饱和盐水前后岩心质量差求取岩心的孔隙度。然后使用驱替方法对岩心造束缚水,饱和油结束后,从岩心夹持器中取出岩心,将其浸没于油中,待用。

### 1.3 渗吸实验方法

提前配制实验用盐水和表面活性剂溶液,对盐水和表面活性剂溶液抽真空 2 ~ 3 h,以消除其中的溶解气对岩心渗吸驱油的不利影响。

在室温常压下,首先将岩心放入自吸仪中(如图 1),然后加入准备好的盐水或者表面活性剂溶

液,溶液淹没岩心并且进入自吸仪上部刻度管中适当位置。溶液接触岩心底部的时间作为渗吸时间的起点,记录不同时间岩心的渗吸情况。

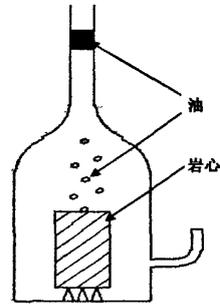


图 1 自吸仪示意图

Fig. 1 Schematic drawing of imbibition apparatus

采取了 2 种自发渗吸方式:一种是直接使用表面活性剂溶液进行渗吸(简称“表吸”);另一种是先使用盐水进行渗吸(简称“水吸”),盐水渗吸结束后再使用表面活性剂溶液进行渗吸(简称“后表吸”),整个渗吸过程统称“先盐水渗吸后表面活性剂渗吸”。

## 2 结果分析

### 2.1 盐水渗吸特征

不同渗透率的岩心在盐水中的自发渗吸特点见图 2。由实验结果看出,自发渗吸早期,渗吸速度快,随着时间的延长,渗吸速度迅速变慢。各岩心的渗吸规律不同,但是一般都遵循渗透率越大,渗吸速度越快,最终渗吸采收率越高的规律,本文中岩心水吸采收率为 (0.32 ~ 0.50)  $w_{\text{OoIP}}$  ( $w_{\text{OoIP}}$  为原始含油量)。岩心渗透率高于  $800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  后,盐水渗吸采收率趋于平稳。

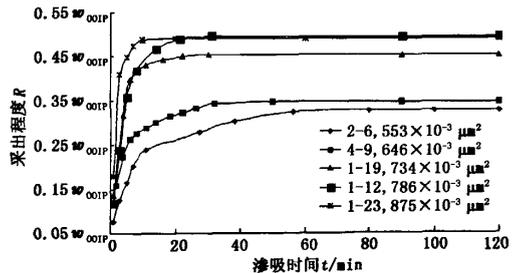


图 2 盐水渗吸采收程度与渗吸时间的关系

Fig. 2 Imbibition oil recovery curve of cores in brine

### 2.2 非离子表面活性剂的渗吸特征

在岩心物性接近的情况下,研究了 SXNO 系列 6 种表面活性剂和 SXNA 系列 5 种表面活性剂的渗吸

特点,结果见表1,2和图3,4。

表1 SXNO系列表面活性剂溶液渗吸与盐水渗吸结果

Table 1 Imbibition results of cores in brine with and without SXNO series surfactant

岩心	长度 l/cm	直径 d/cm	孔隙度 φ/%	空气渗透率 k <sub>air</sub> /10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	束缚水饱 和度 S <sub>wc</sub> /%	渗吸结束 时间 t/min	水吸采收 率 E <sub>RH</sub>	表吸采收 率 E <sub>RF</sub>	渗吸使用的溶液
2-4	5.30	2.58	24.4	742	33.8	19	—	0.449 w <sub>OPIP</sub>	1.2% KCl + 0.3% SXNO-8
2-3	6.38	2.58	24.3	865	35.9	20	—	0.454 w <sub>OPIP</sub>	1.2% KCl + 0.3% SXNO-9
2-5	6.02	2.57	23.9	773	38.3	16	—	0.500 w <sub>OPIP</sub>	1.2% KCl + 0.3% SXNO-10
2-12	5.08	2.54	23.1	644	36.3	38	—	0.453 w <sub>OPIP</sub>	1.2% KCl + 0.3% SXNO-12
2-18	5.64	2.58	24.5	829	37.8	22	—	0.456 w <sub>OPIP</sub>	1.2% KCl + 0.3% SXNO-15
2-16	5.08	2.53	24.0	682	36.6	52	—	0.449 w <sub>OPIP</sub>	1.2% KCl + 0.3% SXNO-21
2-6	4.98	2.57	22.9	553	32.9	80	0.329 w <sub>OPIP</sub>	—	1.2% KCl
4-9	5.30	2.57	22.9	646	39.6	50	0.347 w <sub>OPIP</sub>	—	1.2% KCl
1-12	6.05	2.58	24.3	786	34.6	31	0.496 w <sub>OPIP</sub>	—	1.2% KCl
1-23	4.74	2.58	24.6	875	36.2	23	0.492 w <sub>OPIP</sub>	—	1.2% KCl

表2 SXNA系列表面活性剂溶液渗吸与盐水渗吸结果

Table 2 Imbibition results of cores in brine with and without SXNA series surfactant

岩心	长度 l/cm	直径 d/cm	孔隙度 φ/%	空气渗透率 k <sub>air</sub> /10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	束缚水饱 和度 S <sub>wc</sub> /%	渗吸结束 时间 t/min	水吸采收 率 E <sub>RH</sub>	表吸采收 率 E <sub>RF</sub>	渗吸使用的溶液
2-26	4.55	2.58	23.8	689	36.2	13	—	44.2	1.2% KCl + 0.3% SXNA-7
2-23	5.75	2.55	24.0	879	30.9	17	—	41.2	1.2% KCl + 0.3% SXNA-9
2-29	5.89	2.54	24.1	807	33.1	13	—	38.4	1.2% KCl + 0.3% SXNA-15
2-30	5.32	2.56	23.8	722	32.7	17	—	47.7	1.2% KCl + 0.3% SXNA-20
2-32	4.34	2.57	24.3	670	34.2	16	—	38.9	1.2% KCl + 0.3% SXNA-25
4-9	5.30	2.57	22.9	646	39.6	50	34.7	—	1.2% KCl
1-12	6.05	2.58	24.3	786	34.6	31	49.6	—	1.2% KCl
1-23	4.74	2.58	24.6	875	36.2	23	49.2	—	1.2% KCl

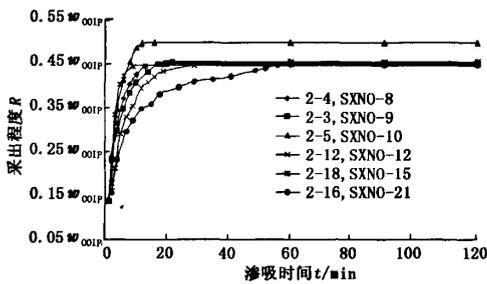


图3 SXNO系列表面活性剂渗吸采出程度与渗吸时间的关系

Fig. 3 Imbibition oil recovery curve of cores in SXNO series surfactant solution

由实验结果看出:非离子表面活性剂的结构不同,相应岩心的渗吸速度也各有不同,但是最终渗吸采出程度比较接近;对于SXNO系列,烷氧基数为10时,表面活性剂的渗透性能最佳,渗吸效果最好,而对于SXNA系列,烷氧基数为20时,表面活性剂的渗透性能达到最佳,渗吸效果最好,也就是说,非离子表面活性剂的烷氧基(即亲水基)数只有在一个合适的值时,才能有效提高岩心渗吸采出程度。

从实验结果中还发现,岩心渗透率低于700 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>时,相近渗透率岩心的表吸最终采收率大

于水吸最终采收率,而岩心渗透率高于700 × 10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>时,表吸最终采收率与水吸相当。可见,非离子表面活性剂在岩心渗透率较低时能够提高渗吸采收率,而渗透率较大时,基本没有促进作用。

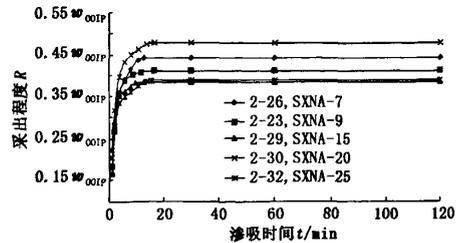


图4 SXNA系列表面活性剂渗吸采出程度与渗吸时间的关系

Fig. 4 Imbibition oil recovery curve of cores in SXNA series surfactant solution

### 2.3 离子表面活性剂的渗吸特征

研究了SXAA, SXAN和SXAW等3种阴离子表面活性剂以及SXCD, SXCT和SXCC等3种阳离子表面活性剂的渗吸特点,结果见表3和图5。

从实验结果可见:不同结构的阴离子表面活性剂的渗吸特征不同,最终渗吸采收率也不同;SXAW的渗吸效果较好;与非离子表面活性剂相似,岩心渗

透率对表吸采收率有一定影响,阴离子表面活性剂在一定渗透率范围内才能较大幅度提高渗吸采收率,而渗透率较大时,表面活性剂提高采收率幅度很小或者不能提高渗吸采收率;对于水湿砂岩,磷酸盐表面活性剂的渗吸效果要好于硫酸盐类表面活性剂。

从实验结果还可以看出:不同结构的阳离子表面活性剂的渗吸特征不同,最终渗吸采收率也不同,

其中SXCC的渗吸采收率较高;阳离子表面活性剂渗吸时,岩心表面渗出的油滴与表面接触角一般小于 $50^\circ$ ,呈润湿状态,表明阳离子表面活性剂与孔隙表面带负电的砂岩发生吸附。对比发现,阳离子表面活性剂出油速度比阴离子表面活性剂慢,最终渗吸采收率低于阴离子表面活性剂,故水湿砂岩不宜使用阳离子表面活性剂进行渗吸。

表3 离子表面活性剂溶液渗吸与盐水渗吸结果

Table 3 Imbibition results of cores in brine with and without ionic surfactant

岩心	长度 l/cm	直径 d/cm	孔隙度 $\phi/\%$	空气渗透率 $k_{air}/10^{-3} \mu\text{m}^2$	束缚水饱和度 $S_{wc}/\%$	渗吸结束 时间 t/min	水吸采收 率 $E_{RH}$	表吸采收 率 $E_{RF}$	渗吸使用的溶液
2-33	5.05	2.59	24.3	706	33.5	16	—	44.7	1.2% KCl + 0.3% SXAA
2-36	4.77	2.42	24.0	758	38.2	15	—	55.1	1.2% KCl + 0.3% SXAW
3-4	5.51	2.54	24.0	671	42.7	12	—	49.4	1.2% KCl + 0.3% SXAN
2-34	6.37	2.55	24.1	803	35.6	13	—	47.9	1.2% KCl + 0.3% SXAN
3-2	5.22	2.56	24.0	552	37.2	18	—	44.9	1.2% KCl + 0.3% SXAW
3-11	5.95	2.56	24.4	695	35.8	19	—	37.9	1.2% KCl + 0.3% SXCD
3-12	5.88	2.56	24.0	673	40.0	23	—	42.5	1.2% KCl + 0.3% SXCT
3-13	5.09	2.56	24.2	674	39.4	22	—	44.2	1.2% KCl + 0.3% SXCC
2-6	4.98	2.57	22.9	553	32.9	80	32.9	—	1.2% KCl
4-9	5.30	2.57	22.9	646	39.6	50	34.7	—	1.2% KCl
1-12	6.05	2.58	24.3	786	34.6	31	49.6	—	1.2% KCl
1-23	4.74	2.58	24.6	875	36.2	23	49.2	—	1.2% KCl

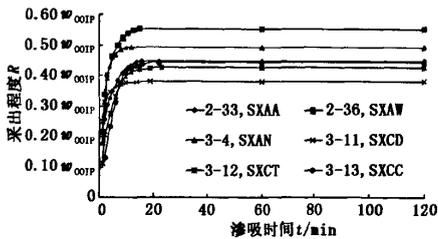


图5 离子表面活性剂渗吸采收程度与渗吸时间的关系

Fig. 5 Imbibition oil recovery curve of cores in ionic surfactant solution

2.4 各种表面活性剂渗吸结果对比

(1) 非离子表面活性剂SXNO系列与SXNA系列渗吸对比。为了对比SXNO系列和SXNA系列渗吸特点,在岩心物性接近和相同烷基基数下,选取4种表面活性剂,即SXNO-9, SXNA-9和SXNO-15, SXNA-15,进行了对比,结果见表4。从结果看出, SXNO-9, SXNO-15的最终渗吸采收率大于对应的SXNA-9, SXNA-15,而SXNO-9和SXNO-15渗吸结束的时间与SXNA-9和SXNA-15比较接近。可见,在相同烷基基数下, SXNO表面活性剂比SXNA表面活性剂更能提高水湿砂岩岩心的渗吸采收率。

表4 非离子表面活性剂渗吸结果对比

Table 4 Imbibition results contrast of cores in nonionic surfactant solution

岩心	长度 l/cm	直径 d/cm	孔隙度 $\phi/\%$	空气渗透率 $k_{air}/10^{-3} \mu\text{m}^2$	束缚水饱和度 $S_{wc}/\%$	渗吸结束 时间 t/min	表吸采收 率 $E_{RF}$	渗吸使用的溶液
2-3	6.38	2.58	24.3	865	35.9	20	45.4	1.2% KCl + 0.3% SXNO-9
2-23	5.75	2.55	24.0	879	30.9	17	41.2	1.2% KCl + 0.3% SXNA-9
2-10	5.01	2.57	24.2	777	32.9	25	48.8	1.2% KCl + 0.3% SXNO-15
2-29	5.89	2.54	24.1	807	33.1	13	38.4	1.2% KCl + 0.3% SXNA-15

(2) 阴离子表面活性剂与非离子表面活性剂渗吸对比。比较了阴离子表面活性剂和SXNO, SXNA 2个系列非离子表面活性剂的渗吸特点,结果见表5。从结果看出,阴离子的渗吸结束时间最快。就最终渗吸采收率而言, SXAN与SXNO系列和SXNA

系列中效果最好的表面活性剂相似; SXAA与SXNO系列中的效果较差的表面活性剂结果相似,而与SXNA系列中效果最好的表面活性剂接近; SXAW的渗吸效果好于所有非离子表面活性剂。可见,对于使用的水湿砂岩岩心,阴离子表面活性剂的

渗吸效果一般好于非离子表面活性剂。

表5 非离子表面活性剂和阴离子表面活性剂渗吸结果对比

Table 5 Imbibition results contrast of cores in nonionic surfactant and anionic solution

岩心	长度 <i>l/cm</i>	直径 <i>d/cm</i>	孔隙度 $\varphi/\%$	空气渗透率 $k_{air}/10^{-3}\mu m^2$	束缚水饱和度 $S_{wc}/\%$	渗吸结束 时间 <i>t/min</i>	表吸采收 率 $E_{RF}$	渗吸使用的溶液
2-4	5.30	2.58	24.4	742	33.8	19	44.9	1.2% KCl + 0.3% SXNO-8
2-3	6.38	2.58	24.3	865	35.9	20	45.4	1.2% KCl + 0.3% SXNO-9
2-5	6.02	2.57	23.9	773	38.3	16	50.0	1.2% KCl + 0.3% SXNO-10
2-12	5.08	2.54	23.1	644	36.3	38	45.3	1.2% KCl + 0.3% SXNO-12
2-18	5.64	2.58	24.5	829	37.8	22	45.6	1.2% KCl + 0.3% SXNO-15
2-16	5.08	2.53	24.0	682	36.6	52	44.9	1.2% KCl + 0.3% SXNO-21
2-26	4.55	2.58	23.8	689	36.2	13	44.2	1.2% KCl + 0.3% SXNA-7
2-23	5.75	2.55	24.0	879	30.9	17	41.2	1.2% KCl + 0.3% SXNA-9
2-29	5.89	2.54	24.1	807	33.1	13	38.4	1.2% KCl + 0.3% SXNA-15
2-30	5.32	2.56	23.8	722	32.7	17	47.7	1.2% KCl + 0.3% SXNA-20
2-32	4.34	2.57	24.3	670	34.2	16	38.9	1.2% KCl + 0.3% SXNA-25
2-33	5.05	2.59	24.3	706	33.5	16	44.7	1.2% KCl + 0.3% SXAA
3-4	5.51	2.54	24.0	671	42.7	12	49.4	1.2% KCl + 0.3% SXAN
2-36	4.77	2.42	24.0	758	38.2	15	55.1	1.2% KCl + 0.3% SXAW

2.5 先盐水渗吸后表面活性剂渗吸结果对比

选取部分表面活性剂开展了先盐水渗吸后表面活性剂渗吸研究,结果见表6和图6(图6只给出了一组曲线,其他各组曲线与此类似)。由实验结果

发现:在后表吸阶段,大部分的油在10 min内渗出;先水吸后表吸的渗吸最终总采收率为(0.35 ~ 0.52)  $w_{OOIP}$ 。

表6 先盐水渗吸后表面活性剂渗吸结果对比

Table 6 Imbibition results contrast of cores in sequence of brine and surfactant solution

岩心	长度 <i>l/cm</i>	直径 <i>d/cm</i>	孔隙度 $\varphi/\%$	空气渗透率 $k_{air}/10^{-3}\mu m^2$	束缚水饱和度 $S_{wc}/\%$	水吸采收率 $E_{RH}$	后表吸 收率 $E_{RF}$	总渗吸采 收率 $E_R$	后表吸使用的 表面活性剂溶液
1-12	6.05	2.58	24.3	786	34.6	49.6	2.4	52.0	1.2% KCl + 0.3% SXNO-8
1-19	5.55	2.56	23.9	736	35.5	47.7	2.5	50.2	1.2% KCl + 0.3% SXNO-9
1-23	4.74	2.58	24.6	875	36.2	49.2	2.6	51.8	1.2% KCl + 0.3% SXNO-10
2-6	4.98	2.57	22.9	553	32.9	32.9	3.0	35.9	1.2% KCl + 0.3% SXNO-12
2-11	4.77	2.57	24.2	735	35.5	39.7	2.9	42.6	1.2% KCl + 0.3% SXNO-15
2-13	4.63	2.54	24.7	835	34.5	43.4	2.9	46.3	1.2% KCl + 0.3% SXNO-21
2-20	5.45	2.57	23.9	739	34.8	47.5	2.3	49.8	1.2% KCl + 0.3% SXNA-7
2-31	5.40	2.57	24.3	862	34.8	46.4	2.5	48.9	1.2% KCl + 0.3% SXNA-20
2-27	6.41	2.59	23.6	555	34.3	31.7	3.8	35.6	1.2% KCl + 0.3% SXAW
4-6	5.61	2.57	23.2	621	39.4	41.5	3.7	45.1	1.2% KCl + 0.3% SXAN
4-9	5.30	2.57	22.9	646	39.6	34.2	3.9	38.2	1.2% KCl + 0.3% SXCC

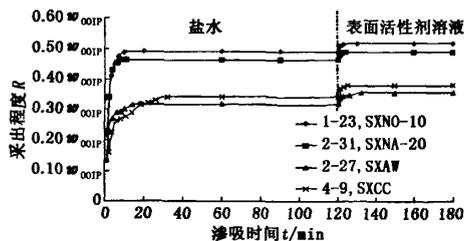


图6 先盐水渗吸后表面活性剂渗吸  
采出程度与渗吸时间的关系

Fig. 6 Imbibition oil recovery curve of cores in  
sequence of brine and surfactant solution

非离子表面活性剂 SXNO 系列的 6 种表面活性

剂,其后表吸的采收率为(0.024 ~ 0.030)  $w_{OOIP}$ ,可见,在使用盐水渗吸后,SXNO 表面活性剂提高采收率的幅度很小。同时也表明,对于水湿砂岩,SXNO 系列的各种表面活性剂的渗吸采收率相当接近。

非离子表面活性剂 SXNA 系列的 SXNA-7 和 SXNA-20,其后表吸时渗吸曲线的变化规律与 SXNO 系列表面活性剂相似。水吸之后,SXNA-7 和 SXNA-20 的渗吸采收率分别为 0.022  $w_{OOIP}$  和 0.025  $w_{OOIP}$ 。

离子表面活性剂 SXAW, SXAN 和 SXCC,其后表吸时渗吸曲线的变化规律与非离子表面活性剂也比较相似,不过水吸之后,离子表面活性剂的渗吸采

收率为(0.037~0.040) $w_{\text{OIP}}$ 。与非离子表面活性剂相比,离子表面活性剂在后表吸时的渗吸采收率稍有提高。可见,水吸结束后,离子表面活性剂比非离子表面活性剂更有利于提高水湿砂岩岩心的渗吸采收率。

### 3 结论

(1)在相同条件下,不同类型不同结构的表面活性剂具有不同的渗吸特征,最终渗吸采收率也不同,非离子表面活性剂结构与渗吸采收率有明确的对应关系。各种溶液的最终渗吸采收率为:盐水(0.32~0.50) $w_{\text{OIP}}$ ;非离子表面活性剂溶液(0.38~0.50) $w_{\text{OIP}}$ ;阴离子表面活性剂溶液(0.44~0.55) $w_{\text{OIP}}$ ;阳离子表面活性剂溶液(0.38~0.44) $w_{\text{OIP}}$ ,且阳离子表面活性剂对渗吸有一定抑制作用,水湿砂岩不宜使用阳离子表面活性剂进行渗吸。

(2)岩心的渗吸效果受其渗透率制约:岩心渗透率较低时,表面活性剂能够较好地促进自发渗吸驱油,从而较大幅度地提高最终渗吸采收率;岩心渗透率较大时,表面活性剂对渗吸的有利影响减弱,甚至不能提高渗吸采收率。

(3)非离子表面活性剂SXNO系列的自发渗吸效果一般好于非离子表面活性剂SXNA系列;阴离子表面活性剂的自发渗吸效果一般好于非离子表面活性剂和阳离子表面活性剂。总的看来,阴离子表面活性剂对水湿砂岩岩心提高渗吸采收率比较有利。

(4)盐水渗吸结束后再进行表面活性剂溶液渗吸,虽然可以提高最终渗吸采收率,但是幅度很小。离子表面活性剂比非离子表面活性剂提高渗吸采收率幅度大。

致谢 感谢中国石油勘探开发研究院采收率所张祖波高级工程师提供露头砂岩岩石。

#### 参考文献:

- [1] VAN GOLF-RACHT T D (法). 裂缝油藏工程基础[M]. 陈钟祥,金玲年,秦同洛,译. 北京:石油工业出版社,1989:71-96.
- [2] CHIMIENTI M E. Influence of temperature and interfacial tension on spontaneous imbibition process[R]. SPE 53668, 1999.
- [3] AL-LAWATI S, SALEH S. Oil recovery in fractured oil reservoirs by low IFT imbibition process [R]. SPE 36688, 1996.
- [4] DONMEZ A. Investigation of the effect of temperature on heavy oil recovery by imbibition mechanism [R]. SPE 37555, 1997.
- [5] BABADAGLI T. Analysis of oil recovery by spontaneous imbibition of surfactant solution[R]. SPE 84866, 2003.
- [6] HATIBOGLU C U, BABADAGLI T. Experimental analysis of primary and secondary oil recovery from matrix by counter-current diffusion and spontaneous imbibition[R]. SPE 90312, 2004.
- [7] FISCHER H, MORROW N R. Spontaneous imbibition with matched liquid viscosities[R]. SPE 96812, 2005.
- [8] GHEDAN S G, POETTMANN F H. Effect of polymers on the imbibition process; a laboratory study [R]. SPE 20244, 1991.
- [9] SCHECHTER D S, DENQEN Z, ORR Jr F M. Capillary imbibition and gravity segregation in low IFT systems [R]. SPE 22594, 1991.
- [10] PEREZ J M, S W POSTON, Q J SHARIF. Carbonated water imbibition flooding an enhanced oil recovery process for fractured reservoirs[R]. SPE/DOE 24164, 1992.
- [11] 魏发林,岳湘安,张继红,等. 润湿反转剂提高灰岩裂缝油藏基质系统水驱采收率实验[J]. 油气地质与采收率,2003,10(4):42-44.  
WEI Fa-lin, YUE Xiang-an, ZHANG Ji-hong, et al. Experiment of enhanced oil recovery of matrix system in fractured limestone reservoirs by reverse wetting agent [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2003,10(4):42-44.
- [12] 李士奎,刘卫东,张海琴,等. 低渗透油藏自发渗吸驱油实验研究[J]. 石油学报,2007,28(2):109-112.  
LI Shi-kui, LIU Wei-dong, ZHANG Hai-qin, et al. Experimental study of spontaneous imbibition in low permeability reservoir [J]. Acta Petrolei Sinic, 2007,28(2):109-112.
- [13] 刘卫东,姚同玉,刘先贵,等. 表面活性剂体系渗吸[M]. 北京:石油工业出版社,2007:15-17, 34-37.  
(编辑 刘为清)