

文章编号: 0253-2697(2007)05-0104-05

利用磷硅酸盐-表面活性剂-聚合物复合体系 提高原油采收率

卢祥国¹ 陈业生¹ 仲 强¹ 赵劲毅² 邓明胜³

(1. 大庆石油学院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
第二采油厂 黑龙江大庆 163414; 3. 中亚石油有限公司 黑龙江大庆 163712)

摘要:“表面活性剂-碱-聚合物”三元复合体系是提高采收率的实用技术之一,但其中强碱 NaOH 会引起采油设备腐蚀和地层结垢问题,这影响了该技术的大规模推广应用。SJT-B 助剂是一种磷硅酸盐化学助剂,用助剂代替碱进行了三元复合体系驱油实验。对表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物三元复合体系的缓蚀防垢作用、界面张力、吸附、色谱分离、流动特性和驱油效果进行的研究结果表明,表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物三元复合体系具有缓蚀防垢、降低界面张力的效果,且其动静吸附量低。以大庆杏树岗油田的地质特征为基础建立的物理模型上进行了驱油实验,结果证实,表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物三元复合体系的调驱效果好于现有表面活性剂-碱-聚合物三元复合体系。

关键词: 磷硅酸盐-表面活性剂-聚合物驱体系;界面张力;缓蚀防垢;色谱分离;驱油效果

中图分类号: TE357.43

文献标识码: A

Phosphorus silicate-surfactant-polymer complex system applied to enhance oil recovery in chemical flooding

Lu Xiangguo¹ Chen Yesheng¹ Zhong Qiang¹ Zhao Jinyi² Deng Mingsheng³

(1. Key Laboratory for Enhancing Oil Recovery of the Ministry of Education, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China; 2. No. 2 Oil Production Plant, PetroChina Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163414, China; 3. Zhongya Petroleum Company, Ltd., Daqing 163712, China)

Abstract: Alkaline-surfactant-polymer (ASP) flooding is one of the technologies for enhancing oil recovery. But its application is often restricted by some problems such as corrosion and scaling in the oil production equipments caused by NaOH in ASP flooding. The SJT-B aid is a newly developed phosphorus silicate chemical additive. Some experiments on the corrosion-prevention and anti-scaling properties, interfacial tension, adsorption, the chromatographic separation degree of mixed solution, and the oil-displacement effect of the SJT-B aid-surfactant-polymer complex system were carried out. The results indicated that the complex system could efficiently decrease the interfacial tension and prevent the corrosion and scaling. The dynamic and static adsorptions of the surfactant-SJT-B aid-polymer complex system is almost the same as ASP in scale-prevention and anti-corrosion. The flooding experiments on the physical model with the same geological characteristics as Xingshugang Oilfield in Daqing validated that the flooding effect of the SJT-B aid-surfactant-polymer complex system was better than that of ASP.

Key words: phosphorus silicate-surfactant-polymer flooding system; interfacial tension; corrosion-prevention and anti-scaling; chromatographic separation; oil-displacement effect

表面活性剂-碱-聚合物三元复合驱以提高采收率幅度大、技术相对简单而受到石油开发工作者的广泛重视^[1-2]。但在三元复合驱工业化试验过程中,油田采出液的乳化和地层结垢问题一直制约其推广应用^[3-4]。近年来,为减少采出液乳化和结垢给正常生产带来的不利影响,在矿场,一方面是在采出井中添加破乳剂和

防垢剂,另一方面是采用弱碱替代强碱或研制无碱表面活性剂^[5-6]。尽管采取了各种技术措施,但现有三元复合体系在获取超低界面张力和缓蚀防垢方面还难以做到完全兼顾。

SJT-B 助剂是一种磷硅酸盐溶胶体系,笔者利用室内检测和评价技术方法,对表面活性剂/SJT-B 助剂

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50634020)“低渗透油层提高驱油效率的机理研究”部分成果。

作者简介: 卢祥国,男,1960年6月生,1983年毕业于西南石油学院开发系,2002年获日本早稻田大学博士学位,现为大庆石油学院石油工程系教授、博士生导师,主要从事提高采收率等方面的教学和科研工作。E-mail: Luxiang2003@yahoo.com.cn

三元复合体系的缓蚀防垢、界面张力、渗流、吸附和色谱分离性质进行了测试和分析。在具有大庆杏树岗油田地质特征的物理模型上,对表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物三元复合体系的调驱效果进行了物理模拟,并与现有“表面活性剂-碱-聚合物”三元复合体系的调驱效果进行了对比。

1 实验

1.1 实验材料

表面活性剂为大庆油田生产的烷基苯石油磺酸盐(简称 DQ 表面活性剂)和美国 Witco 公司生产的烷基苯石油磺酸盐(ORS-41),有效质量分数均为 0.5。SJT-B 助剂由中亚石油有限公司提供,磷硅酸盐有效质量分数为 0.1。三元复合体系用大庆油田第二采油厂采出污水配制。

大庆油田岩心为柱状,几何尺寸为 $\phi 2.5 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$,渗透率为 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}^2$ 。美国贝雷岩心几何尺寸为 $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,渗透率约为 $1 \mu\text{m}^2$ 。人造岩心为 3 层纵向非均质岩心,由石英砂与环氧树脂胶结而成,几何尺寸为 $4.5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,包括高、中、低 3 个渗透层,渗透率分别为 $1.2 \mu\text{m}^2$ 、 $0.6 \mu\text{m}^2$ 和 $0.200 \mu\text{m}^2$ 。

1.2 检测方法和仪器

采用岩心驱替装置评价阻力系数、残余阻力系数和驱油效果,采用重量法检测硅和磷浓度,采用两相指示剂滴定法检测表面活性剂浓度,粘度检测采用布氏粘度计,界面张力检测采用旋滴式界面张力仪。

1.3 实验原理

1.3.1 阻力系数和残余阻力系数

阻力系数(F_R)和残余阻力系数(F_{RR})指标定义为

$$F_R = \frac{\delta p_2}{\delta p_1}$$

$$F_{RR} = \frac{\delta p_3}{\delta p_1}$$

式中 δp_1 为岩心水驱压差; δp_2 为复合驱压差; δp_3 为后续水驱压差。

上述驱替过程必须保持相同注液速度,液体注入量应当达到 4~5 倍孔隙体积数(简称 PV 数)。

1.3.2 静动吸附

将表面活性剂/SJT-B 助剂混合液与大庆天然油砂按不同液固比置于具塞三角瓶中,搅拌均匀,再置于 45°C 恒温水浴内。振荡 24 h 后取样离心分离,取上层清液进行浓度分析。利用初始浓度和平衡浓度之差,计算化学剂在天然岩心上的静吸附量。为减少实验误差,每个浓度水平测试 2 个样,取平均值。

动态吸附与阻力系数和残余阻力系数实验同时进行,其实验步骤为:①取大庆油田油层岩心,抽空饱和油田模拟水,计算孔隙度、水相渗透率;②以相同速度注入复合驱油剂,直至压力稳定(约 5PV);③注入模拟水至压力稳定(约 5PV)。记录上述各驱替过程的压差,收集驱替过程所有流出液,计量体积和质量,检测表面活性剂和 SJT-B 助剂中磷和硅的浓度。根据注入与采出化学剂质量之差和岩心质量,计算动态吸附量。

1.3.3 色谱分离

色谱分离现象会破坏复合体系的完整性,进而影响碱与表面活性剂间的协同效应。描述三元复合体系色谱分离程度的参数有无因次突破时间和无因次等浓距等。前者是采出液中最早检测到某种化学剂时所对应的岩心孔隙体积(PV)倍数,后者是采出液中 2 种化学剂达到相同无因次浓度时所对应 PV 数之差。三元复合体系中各组分无因次突破时间愈接近、无因次等浓距愈小,色谱分离程度就愈不严重。

1.3.4 物理模拟

在具有油藏典型地质特征物理模型上,改变注入三元复合体系配方组成和段塞组合,分析采收率、含水率和压力变化特征,进而对三元复合体系配方组成和段塞组合方式的相对优劣程度做出评价。

除浓度检测外,上述其他实验操作在 45°C 条件下进行。

2 结果分析

2.1 缓蚀防垢和降低界面张力效果

缓蚀防垢性能检测结果表明,SJT-B 助剂的水解性、固含量、缓蚀率、防垢率和成垢量等技术指标都符合行业标准要求。“SJT-B 助剂/表面活性剂”二元复合体系界面张力测试结果见表 1。

表 1 二元复合体系组成和体系界面张力(10^{-2} mN/m)

Table 1 Composition and interfacial tension of SJT-B aid-surfactant complex system

表面活性剂 质量分数/%	SJT-B 质量分数/%				
	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
0.05	2.405	0.409	0.132	0.200	0.594
0.10	0.359	0.113	0.191	0.188	0.596
0.20	1.024	0.597	0.260	0.232	0.421
0.30	3.755	2.543	0.290	1.786	0.550
0.40	4.366	3.024	0.546	2.073	0.268

从表 1 可以看出,化学组成对二元复合体系界面张力有一定的影响。在 25 个配方中,界面张力都在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ mN/m}$ 之间,表明“表面活性剂/SJT-B 助

剂”二元复合体系与大庆杏树岗油田原油间可以实现超低界面张力。

2.2 渗流特性

“表面活性剂/SJT-B 助剂”二元复合体系的阻力系数和残余阻力系数测试结果见表 2, 复合体系组成为: 0.3% 表面活性剂 + 0.4% SJT-B。

表 2 阻力系数和残余阻力系数

Table 2 Resistance factor and residual resistance factor

岩心 编号	渗透率/ μm^2	阻力系数	残余阻力		平均值	
			系 数	系 数	阻力系数	残余阻力系数
3-2	2.127	1.94	4.03			
4-1	2.022	2.58	5.32	2.98	4.68	
9-2	0.769	2.87	6.19			
23-3	0.632	2.89	6.31	2.88	6.25	
54-2	0.242	3.72	6.71			
42-2	0.209	3.36	5.80	3.54	6.26	

从表 2 可以看出, 渗透率对二元复合体系流动性存在影响。渗透率愈小, 阻力系数和残余阻力系数愈大。尽管由 0.3% 表面活性剂 + 0.4% SJT-B 助剂组成的二元复合体系粘度较低, 但其阻力系数和残余阻力系数绝对值却较大, 而且残余阻力系数大于阻力系数, 表现出良好的流度控制能力^[7]。

2.3 吸附性质

表面活性剂/SJT-B 助剂二元复合体系中表面活性剂以及 SJT-B 助剂中磷和硅静吸附量测试结果见表 3, 复合体系与油砂质量之比为 20:1。

表 3 天然油砂静吸附量测试结果

Table 3 Static adsorptions of oil sands with different diameter

油砂粒径范围/ μm	静吸附量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$		
	磷	硅	表面活性剂
380~160	2.23	6.13	5.00
159~113	4.21	9.43	9.23
112~75	8.89	15.49	11.13
<75	13.15	22.56	13.84

从表 3 可以看出, 液固比和油砂粒径对静吸附量存在影响。液固比愈大, 静吸附量愈大; 粒径愈大, 静吸附量愈小。从表面活性剂/SJT-B 助剂二元复合体系中表面活性剂静吸附量来看, 其吸附水平与现有强碱三元复合体系的吸附水平相当^[8-9]。

表面活性剂/SJT-B 助剂二元复合体系中表面活性剂和 SJT-B 助剂内磷和硅动吸附量测试结果见表 4。

从表 4 可以看出, 岩心渗透率对二元复合体系中主要化学成分的动吸附量有影响。渗透率愈大, 表面活性剂和磷的动吸附量愈大。在 3 种化学组分中, 表

面活性剂的动吸附量最大, 硅次之, 磷最小。

表 4 天然岩心动吸附量测试结果

Table 4 Dynamic adsorptions of Daqing cores with different permeability

岩心 编号	渗透率/ μm^2	动吸附量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$					
		磷		硅		表面活性剂	
		单块	平均值	单块	平均值	单块	平均值
1	2.127	0.142	0.153	0.402	0.362	1.351	1.431
2	2.022	0.164		0.332		1.511	
3	0.769	0.136	0.144	0.433	0.462	1.232	1.223
4	0.632	0.152		0.491		1.214	
5	0.242	0.140	0.133	0.515	0.563	1.171	1.102
6	0.209	0.126		0.611		1.033	

贝雷岩心上化学剂动吸附量测试结果见表 5, 其中岩心 1 没有饱和油, 二元复合体系注入量为 1.5PV, 岩心 2 饱和油, 三元复合体系注入量为 0.5PV。

表 5 贝雷岩心动吸附量

Table 5 Dynamic adsorptions of Bailey cores

岩心 编号	渗透率/ μm^2	复合体系组成/%			动吸附量/ $(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$		
		SJT-B	表面 活性剂	聚合物	表面 活性剂	磷	硅
1	1.151	0.4	0.3	0.12	0.204	0.032	0.087
2	1.008	0.8	0.3		0.120	0.021	0.040

从表 5 可以看出, 仍然是表面活性剂的动吸附量最大, 硅次之, 磷最小。与表 5 中数据相比较, 各组分动吸附量普遍减小。主要原因是注入量减小, 分别只有 1.5PV 和 0.5PV, 远没有达到饱和吸附所需注入量。此外, 聚合物和油对动吸附性也有影响。

2.4 色谱分离

国内通常采用“无因次突破时间”和“无因次等浓距”来描述复合体系在多孔介质中运移时各组分间的色谱分离程度^[10]。利用表 5 中岩心 1 的各组分注入浓度 C_0 和不同阶段采出浓度 C , 绘制了无因次浓度 C/C_0 与孔隙倍数 (PV) 关系曲线 (图 1)。

从图 1 可以看出: ① 磷、硅和表面活性剂的无因次突破时间几乎相同, 这表明三元复合体系中各组分间运移速度基本相同, 色谱分离程度弱。② 考察 C/C_0 为 0.5 时三元复合体系中各组分间的无因次等浓距, 其中磷与硅间无因次等浓距为 0.25, 磷与表面活性剂间无因次等浓距为 0.39, 表面活性剂与硅间无因次等浓距为 0.15。结果表明, 磷与表面活性剂间色谱分离程度最大, 磷与硅间次之, 表面活性剂与硅间最小。

从无因次等浓距角度来看, 表面活性剂-SJT-B

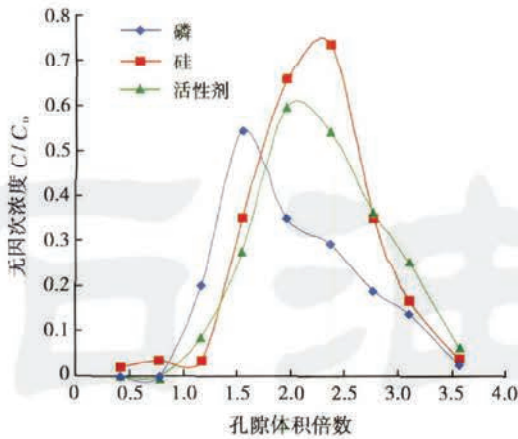


图 1 采出液中各组分 C/C₀ 与 PV 数关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between C/C₀ and PV in production solution

助剂-聚合物三元复合体系在多孔介质中流动时,各组分间存在一定程度的色谱分离,会对组分间的协同效应产生影响,但与普通表面活性剂-碱-聚合物三元复合体系的色谱分离程度相比^[11],“表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物”中各组分间的色谱分离程度较弱。

2.5 驱油效果

2.5.1 均质贝雷岩心

利用均质贝雷岩心开展三元复合驱油效率实验,复合体系注入量为 0.38PV。方案 1-1 所用复合体系组成为:0.4% SJT-B + 0.3% 表面活性剂(DQ) + 0.12% 聚合物;方案 1-2 为:0.3% ORS-41 表面活性剂 + 0.4% SJT-B + 0.12% 聚合物;方案 1-3 为:1.2% NaOH + 0.3% DQ 表面活性剂 + 0.12% 聚合物;方案 1-4 为:0.3% ORS-41 表面活性剂 + 0.8% SJT-B + 0.12% 聚合物。采收率数据见表 6。

表 6 三元复合体系组成和采收率

Table 6 Chemical compositions of flooding solution and recovery efficiency factor

方案编号	粘度/(mPa·s)	含油饱和度/%	采收率/%		采收率增加值/%
			水驱	化学驱	
1-1	28.5	74.0	38.70	78.91	40.21
1-2	30.5	73.8	42.87	82.13	39.26
1-3	31.5	73.3	41.40	81.58	40.18
1-4	30.0	76.1	39.82	81.79	41.97

从表 6 可以看出:

(1) 表面活性剂类型对采收率的影响。方案 1-1 和方案 1-2 所用聚合物和 SJT-B 助剂相同,表面活性剂不同。前者使用大庆生产表面活性剂 DQ,后者为美国表面活性剂 ORS-41。从采收率增加值来看,2 个方案基本相同,表明表面活性剂 DQ 与表面活性剂

ORS-41 性能相当。

(2) 助剂类型对采收率的影响。方案 1-1 与方案 1-3 采收率增加值也基本相同,表明 SJT-B 助剂和 NaOH 的作用效果相同。

(3) SJT-B 助剂浓度对采收率的影响。方案 1-1 与方案 1-4 的主要差别在于 SJT-B 助剂浓度,前者 SJFB 质量百分数为 0.4%,后者为 0.8%。实验结果表明,SJT-B 助剂浓度愈高,采收率增幅愈大。

2.5.2 非均质人造物理模型

利用二维纵向层内非均质人造物理模型进行了复合体系驱油效果实验(表 7),复合体系注入量为 0.38PV。方案 2-1 和方案 2-2 分别是水驱和聚合物驱基础实验。方案 2-3 至方案 2-5 为表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物三元复合驱油实验。各方案的聚合物和表面活性剂质量百分数分别为 0.12% 和 0.3%,SJT-B 助剂质量百分数分别为 1.2%、0.8% 和 0.4%。方案 2-7 和方案 2-8 采用 SJT-B 助剂水溶液进行驱油实验,SJT-B 助剂的质量百分数为 0.4%。前者水驱至含水率 98% 时转注 SJT-B 助剂水溶液,后者含水率 70% 时转注。方案 2-6 为表面活性剂-NaOH-聚合物三元复合驱油实验,碱的质量百分数为 1.2%,聚合物和表面活性剂类型和质量百分数与方案 2-3 相同。除特别说明外,所有方案均在水驱至含水率 98% 后转注相关驱油剂。

物理模型驱替实验结果见表 7。

表 7 物理模型驱替实验结果

Table 7 Experimental data of oil recovery in artificial heterogeneous core

方案编号	粘度/(mPa·s)	含油饱和度/%	采收率/%		采收率增加比率/%	
			水驱	化学驱	相对水驱	相对聚驱
2-1	0.7	75.0	35.2	—	—	—
	0.7	74.1	36.4	—	—	—
2-2	32.5	75.9	32.7	61.7	25.3	—
	32.5	75.0	32.3	59.9	24.7	—
2-3*	36.5	74.5	33.0	75.9	40.1	15.1
	35.6	75.0	32.5	74.8	39.0	14.0
2-4*	39.5	75.8	32.6	72.4	37.2	11.6
2-5	35.5	74.7	35.2	70.7	34.9	9.9
2-6	27.5	75.5	32.7	72.2	36.4	11.4
2-7	0.8	75.9	30.2	42.9	7.7	-17.9
2-8	0.8	75.6	27.9	44.0	8.8	-16.8

注: * 代表后续水驱有乳化现象。

从表 7 可以看出:①水驱至含水率为 98% 时模型平均采收率为 35.8%,与模拟油藏的实际采收率接近,表明模型非均质状况基本符合油藏非均质特征,这有利于后续聚合物驱和三元复合驱增油效果评价。②

相对于水驱,聚合物驱采收率平均增幅为 25.0%,可用于三元复合驱增油效果评价。③在方案 2-3、方案 2-4 和方案 2-5 中,三元复合体系化学组成相同,SJT-B 助剂质量分数分别为 1.2%、0.8% 和 0.4%。相对于聚合物驱,3 个方案采收率增幅分别为 14.5%、11.6% 和 9.9%。结果表明,SJT-B 助剂质量分数愈高,采收率增幅愈大。④在方案 2-3 和方案 2-6 中,三元复合体系中聚合物和表面活性剂都相同,只是助剂类型不同,前者为 SJT-B 助剂,后者为 NaOH。相对于聚合物驱,方案 2-3 采收率增幅为 15.5%,方案 2-6 采收率增幅为 11.4%。2 个方案在采收率方面存在差异,前者主要得益于 SJT-B 助剂中 SiO_2 溶胶颗粒的调剖作用^[8],导致方案 2-3 的注入压力高于方案 2-6,增加了波及体积。

3 驱油机理

SJT-B 助剂是通过改变无机盐原来稳定的分子结构,引入足够量的一价碱金属阳离子,替代起稳定作用的二价金属阳离子,把无机盐分子中非金属氧化物“桥氧键”变为“非桥氧键”,把原来稳定的分子结构变为亚稳定。这种“改性”无机盐在常温下为固态,在水中受水分子作用而缓慢溶解,形成一价碱金属阳离子(K^+ 和 Na^+)和非金属酸根阴离子团(SiO_3^{2-} 和 PO_4^{3-})共存的水溶液,这就组成了 SJT-B 驱油增效剂体系的基体。

这种无机盐分子结构中的网络空穴离子 Na^+ 和 K^+ 在水中很容易受水分子的作用并脱离网穴而游离于水溶液中。与此同时,原分子结构瓦解,分子结构中的非金属酸根阴离子团也游离于水中,形成 SJT-B 驱油增效剂母液。在母液中引入适量的“活性因子”,可使母液中 SiO_3^{2-} 和 PO_4^{3-} 分子结构发生变异,形成具有特殊活性并带有 2 个负电荷的硅酸根阴离子、带有 3 个负电荷的磷酸根阴离子和 5 个负电价的硅酸根阴离子链,最终形成酸根阴离子和碱金属阳离子共存的水溶液。带有 5 个负电价“硅磷酸根阴离子链”的静电引力作用对二价硬离子有极强的亲合力,当它遇有 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 等硬离子时,离子链会发生卷曲,形成“纳米级硅磷酸盐胶体粒子”。这种胶体粒子可随流体流动,从而杜绝 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 硬离子在流体中形成结垢物,从而起到缓蚀防垢作用。

SJT-B 助剂中“纳米级硅磷酸盐胶体粒子”自身还具有降低界面张力功能,与表面活性剂产生良好的协同效应,大幅度降低复合体系与原油间的界面张力。此外,“纳米级硅磷酸盐胶体粒子”间具有一定亲合力和集聚性,它们的集聚作用会形成粒径较大的粒子,对

岩石孔隙喉道产生堵塞,进而产生良好的调整吸液剖面作用。

4 结 论

(1) SJT-B 助剂具有缓蚀防垢功能,其缓蚀率、防垢率和成垢量等指标均符合有关行业技术要求。

(2) 表面活性剂/SJT-B 助剂二元复合体系与大庆原油间可以实现超低界面张力,具有良好的流度控制能力,各组分的动吸附量大于静吸附量。其中,表面活性剂吸附量与现有强碱三元复合体系相当。

(3) 表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物三元复合体系中各组分间存在运移速度差异,但其差异程度小于现有强碱三元复合体系。

(4) 表面活性剂-SJT-B 助剂-聚合物三元复合驱增油效果好于表面活性剂-NaOH-聚合物,SJT-B 助剂可以替代表面活性剂-NaOH-聚合物体系中的 NaOH。

致谢 参加研究工作的还有:大庆石油学院盖翠平、张云宝、姜维东和徐新霞;大庆油田有限责任公司第二采油厂李佰广;吉林省信源石油科技开发有限公司桑景堂等同志。

参 考 文 献

- [1] 杨承志,韩大匡. 化学驱油理论与实践[M]. 北京:石油工业出版社,1996:23-45.
Yang Chengzhi, Han Dakuang. Theory and application of chemical flooding[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996:23-45.
- [2] 特留申斯. 化学驱提高原油采收率[M]. 杨普华,译. 北京:石油工业出版社,1988:22-43.
Trushenski. Enhanced oil recovery using chemical flooding [M]. Translated by Yang Puhua. Beijing: Petroleum Industry Press. 1988:22-43.
- [3] 陈卫东,于会宇,倪锡成. 萨北油田三元复合驱防垢技术研究[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(2):89-91.
Chen Weidong, Yu Huiyu, Ni Xicheng. Scale control technology of ASP flood in Sabei Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 89-91.
- [4] 王贤君,王国庆. 三元复合驱矿藏采油井结垢及清垢剂研究及应用[J]. 油田化学,2003,20(1):1-3.
Wang Xianjun, Wang Guoqing. A study on inorganic scale formed and scale removing fluid used in production wells of ASP-flooding reservoirs [J]. Oilfield Chemistry, 2003, 20(1): 1-3.
- [5] 卢祥国,戚连庆,牛金刚. 低表面活性剂浓度三元复合体系驱油效果实验研究[J]. 石油学报,2002,23(5):59-63.
Lu Xiangguo, Qi Lianqing, Niu Jingang. Laboratory evaluation of flooding efficiency for ASP solution of lower surfactant and alkaline concentration in the Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(5): 59-63.

(下转第 113 页)

- on hydraulic fracture propagation [J]. JPT, 1987, 21 (3): 209-220.
- [5] Renshaw C E, Pollard D D. An experimentally verified criterion for propagation across unbonded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics, 1995, 32(3): 237-249.
- [6] Blair S C, Thorpe R K, Heuze F E, et al. Laboratory observations of the effect of geological discontinuities on hydrofracture propagation [R]. UCRL-99662, 1989: 1-12.
- [7] Beugelsdijk L J L, de Pater C J, Sato K. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium [R]. SPE 59419, 2000: 1-8.
- [8] 金衍, 张旭东, 陈勉. 天然裂缝地层中垂直井水力裂缝起裂压力模型研究 [J]. 石油学报, 2005, 26(6): 113-118.
Jin Yan, Zhang Xudong, Chen Mian. Initiation pressure models for hydraulic fracturing of vertical wells in naturally fractured formations [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 113-118.
- [9] 张广清, 陈勉. 水平井水力裂缝非平面扩展研究 [J]. 石油学报, 2005, 26(3): 95-97.
Zhang Guangqing, Chen Mian. Non-planar propagation of hydraulic fracture near horizontal wellbore [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(3): 95-97.
- [10] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 868-872.
Chen Mian, Pang Fei, Jin Yan. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size tri-axial simulator [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(zk): 868-872.
- [11] Renshaw C E. Are large differential stresses required for straight fracture propagation paths [J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16(6): 817-822.
- (收稿日期 2006-10-30 改回日期 2006-12-30 编辑 孟伟铭)

(上接第 108 页)

- [6] 卢祥国, 牛金刚, 戚连庆. 非均质油藏复合驱合理界面张力实验研究 [J]. 石油学报, 2006, 27(3): 84-86.
Lu Xiangguo, Niu Jingang, Qi Lianqing. Experimental study on interfacial tension of alkaline-surfactant-polymer flooding in heterogeneous reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27 (3): 84-86.
- [7] 沈钟, 赵振国, 王果庭. 胶体与表面化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 123-130.
Shen Zhong, Zhao Zhenguo, Wang Guoting. Colloid and surface chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 123-130.
- [8] 魏举鹏, 曹宝格, 李华斌, 等. 疏水缔合聚合物三元复合体系静动吸附行为 [J]. 钻采工艺, 2005, 28(6): 82-85.
Wei Jupeng, Cao Baoge, Li Huabin, et al. Absorbance behavior of hydrophobically associating polymer compound flooding [J]. Drilling & Production Technology, 2005, 28(6): 82-85.
- [9] 李道山, 侯吉瑞, 徐瑞娟. 三元复合驱各组分在大庆油砂上的吸附研究 [J]. 油田化学, 2001, 18(4): 358-361.
Li Daoshan, Hou Jirui, Xu Ruijuan. Adsorption of components from ASP flooding solution onto reservoir rock of Daqing [J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(4): 358-361.
- [10] 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 method of chromatographic separation of surfactant/alkaline/polymer flooding [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(1): 76-78.
- [11] 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.
- (收稿日期 2006-09-23 改回日期 2006-12-13 编辑 孟伟铭)

版权所有