

三元复合驱采出污水回注驱油处理方法探讨

袁 敏^{1,2}, 赵 宇^{1,2}, 于少君^{1,2}, 王新江^{1,2}, 金禹含^{1,2}

¹中国石油天然气集团公司, 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆

²黑龙江省油层物理与渗流力学重点实验室, 黑龙江 大庆

Email: yuanm@petrochian.com.cn

收稿日期: 2021年8月10日; 录用日期: 2021年9月10日; 发布日期: 2021年9月22日

摘 要

大庆地区三元复合驱采出污水与聚合物驱采出污水均为弱碱性水。利用室内物理模拟实验系统, 测试了界面张力、粘度对三元复合驱采出污水驱油效率的影响。实验结果表明, 三元复合驱采出污水与原油间的界面张力为 10^{-1} mN/m数量级, 油水粘度比为4, 驱油效率仅为2.3%; 根据三元复合驱采出污水复配三元体系的注入能力与驱油效率实验结果, 三元复合驱采出污水在悬浮物含量、含油量达标的情况下, 复配的三元体系提高采收率的幅度与普通污水配制三元体系相当, 为17%。因此三元复合驱采出污水可以直接回注地层, 又可复配三元复合体系。

关键词

三元复合驱采出污水, 界面张力, 粘度, 驱油效率

Discussion on the Treatment Method of ASP Flooding Produced Sewage Back Injection and Oil Displacement

Min Yuan^{1,2}, Yu Zhao^{1,2}, Shaojun Yu^{1,2}, Xinjiang Wang^{1,2}, Yuhan Jin^{1,2}

¹Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Daqing Heilongjiang

²Heilongjiang Key Laboratory of Reservoir Physics and Seepage Mechanics, Daqing Heilongjiang

Email: yuanm@petrochian.com.cn

Received: Aug. 10th, 2021; accepted: Sep. 10th, 2021; published: Sep. 22nd, 2021

Abstract

The produced sewage from ASP flooding and polymer flooding in Daqing area are both weakly al-

kaline water. The effects of interfacial tension and viscosity on oil displacement efficiency of ASP flooding produced sewage were tested by using the laboratory physical simulation experiment system. The results of the experiment show that the interfacial tension between ternary flooding produced water and crude oil is 10^{-1} mN/m order of magnitude, the oil-water viscosity ratio is 4, and the oil displacement efficiency is only 2.3%; According to the experimental results of the injection capacity of the ternary flooding produced sewage compound system and oil displacement, the enhanced recovery rate of the ternary flooding produced sewage compound system is 17% as compared with the ordinary ternary system under the condition that the suspended matter and oil content of the produced sewage compound system meet the standard. Therefore, the produced sewage from ASP flooding can be directly injected back into the formation, and can be compounded with the ASP system.

Keywords

Waste Water in ASP Flooding, Interfacial Tension, Viscosity, Oil Displacement Efficiency

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三元复合驱采出污水是伴随三元复合驱驱替过程排出地面的地下水, 主要包括聚合物、表面活性剂、悬浮物颗粒, 油等物质。在油田注水开发后期, 水驱、聚合物驱均不能大幅度提高原油采收率时, 三元复合驱技术就成为原油持续稳产、高产的动力。从上个世纪九十年代开始, 大庆油田分区块部署三元复合驱技术, 该技术应用规模不断扩大, 现已进入工业化推广阶段。随着现场试验推广区块的不断增加, 在提高采收率的同时, 如何处理和利用三元复合驱采出污水对石油工作者来说是一个巨大的挑战。顾敏等提出了将三元复合驱采出污水, 经过现场污水处理后直接回注地层的观点。目前, 国内外对三元复合驱采出污水处理技术有着广泛的研究[1] [2] [3] [4] [5]。本着节约成本和保护环境的原则, 将三元复合驱采出污水直接回注地层, 或者代替普通污水配制三元复合体系, 都是值得参考的方法。本文对三元复合驱采出污水在水驱后及在复配三元复合体系后, 提高采收率的幅度分别作了机理分析评价, 提出三元复合驱采出污水复配三元复合体系是可行的观点。

2. 实验条件及方法

2.1. 实验用油、水

1) 室内实验用模拟地层水由大庆油田地层水资料配制而成, 矿化度 6770 mg/L。

2) 实验用注入水由取自现场的三元复合驱采出污水根据实验需要通过处理、配制而成, 用于测定不同条件下的注入水水驱采收率。

实验用油、水的粘性采用 AR-G2 型流变仪测量(测定温度 45℃)的结果如下:

a) 模拟油为牛顿流体, 剪切速率 7.34 (1/s), 粘度为 9.8 mPa·s, 见图 1(a);

b) 模拟地层水溶液为牛顿流体, 剪切速率 7.34 (1/s), 粘度为 0.62 mPa·s, 见图 1(b)。

2.2. 岩心样品

采集大庆油田均质性好的天然岩心样品, 样品直径为 2.5 cm, 长度 4~5 cm 的圆柱体。样品空气渗透率分别为小于 100 mD、(100~300) mD、(300~600) mD 和(600~800) mD。

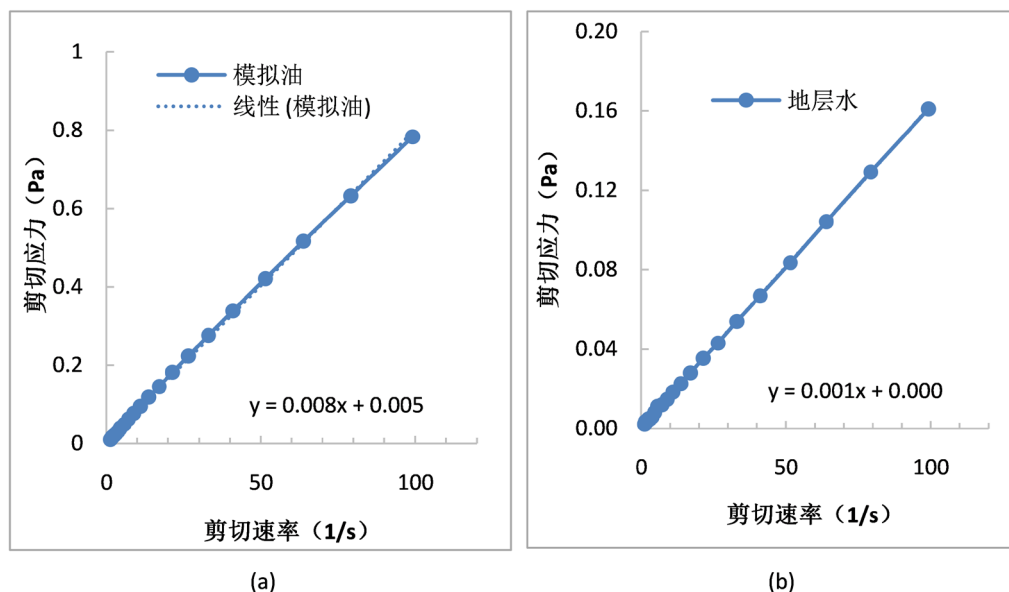


Figure 1. (a) Stress-strain relationship for simulated oil; (b) Stress-strain relationship for water
图 1. (a) 模拟油的应力 - 应变曲线; (b) 地层水的应力 - 应变曲线

2.3. 实验驱替速度

实验过程中采用恒速法，驱替速度为 0.2 mL/min。

2.4. 实验步骤

- 1) 取芯，洗油，测定岩心基本参数(岩心质量、空气渗透率等)；
- 2) 岩心饱和和地层水后质量与岩心质量差，计算孔隙体积 PV；
- 3) 将地层水、注入水和模拟油分别装好，放入恒温箱保温，实验温度 45℃；
- 4) 地层水排空夹持器，注入水依次排空管线，饱和油，计算原始含油饱和度；
- 5) 驱替过程

地层水驱至含水 98%，恒速 0.2 ml/min，根据达西公式 $K = \frac{QuL}{A(p_1 - p_2)}$ ，计算水相渗透率，并

计量地层水水驱采收率；

三元复合驱采出污水驱替 50 PV 至不出油为止，计量三元污水驱替后最终采收率。实验过程中采用恒速法，驱替速度为 0.2 mL/min。

3. 三元复合驱采出污水水质情况

3.1. 三元复合驱采出污水特征成分含量

三元复合驱采出污水总外输水中有机物包括聚合物、表面活性剂、含油以及三项细菌(硫酸还原菌、铁细菌、腐生菌)，无机物为悬浮物(成分以二氧化硅为主的硅藻土，复杂的铁化合物和其他金属化合物)，其中一些悬浮物颗粒表面包裹着聚合物、表面活性剂、油等有机成分。表 1 为三元复合驱采出污水各项成分含量，可以看出聚合物含量较高，为 474.6 mg/L；悬浮物含量明显高于聚合物驱采出污水，说明三元复合驱过程中有更多的岩石、黏土颗粒产生脱落和运移，三元复合体系与原油间的乳化作用携带出大量油珠；油珠对悬浮物有较强的捕集和吸附作用，因此悬浮物含量和含油量均大大高于含聚污水。

Table 1. Statistical table of various ion contents in produced sewage by ASP flooding**表 1.** 三元复合驱采出污水特征成分含量统计表

检验项目	聚合物 mg/L	表面活性剂 mg/L	含油量 mg/L	悬浮物含量 mg/L	硫酸还原菌 个/mL	铁细菌 个/mL
结果	474.6	32.4	57.8	81.6	300.0	25.0

3.2. 三元复合驱采出污水各项离子成分含量

检测三元复合驱采出污水中各项离子成分,表 2 可以看出,三元复合驱采出水 PH 值大于 7,呈碱性;总矿化度含量较高,为 5687~7094 mg/L。三元复合驱采出污水中氢氧根(OH⁻)离子含量均为 0 mg/L,表明强碱 NaOH 已经在三元复合驱驱替过程中完全消耗,水型与模拟地层水或含聚污水水型一致,均为弱碱(NaHCO₃)型。三元复合驱采出污水中的 HCO₃⁻离子可与 Ca²⁺、Mg²⁺反应生成碳酸钙或碳酸镁沉淀,应减轻因地层水不配伍造成的地层、井筒结垢现象。

Table 2. Statistical table of various ion contents in produced sewage by ASP flooding**表 2.** 三元复合驱采出污水各项离子成分含量统计表

水样	PH 值	总矿化度 (mg/L)	阳离子浓度(mg/L)			阴离子浓度(mg/L)				
			Na ⁺ + K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	OH ⁻	HCO ₃ ⁻
三元污水 1 站	8.13	7094.5	2037.1	50.9	13.8	880.1	6.98	0.00	0.00	4105.5
三元污水 2 站	9.10	5687.5	1883.9	32.8	7.45	848.59	58.9	720	0.00	2135.7
模拟地层水	6.9	6778.0	2316.4	10.1	11.7	2464.7	62.9	0.00	0.00	1913.2
含聚污水	8.21	5224.5	1668.6	45.4	15.0	1170.2	9.9	289	0.00	2026.4

4. 三元复合驱采出污水驱油效率实验结果

4.1. 三元复合驱采出污水在水驱后驱油效率实验

随着大庆油田原油的不断产出,二次注水采油的长时间累积,致使油井产水和油层含水不断上升,三次采油需要化学剂深入到微观孔隙中,引起物理-化学变化来驱油。各种注入化学剂提高原油采收率机理主要由三方面因素决定:一是油层非均质性的影响,本文选取不同渗透率,均质性较好的天然岩心进行驱油实验,排除了地层正反韵律的影响;二是油水流量比,流量比的大小直接影响注入剂的波及系数,流量比越小,波及系数越大;三是油藏润湿性的影响,亲水油藏更有利于注入剂提高原油采收率。

实验注入水粘度越高,驱油时的油水流量比越小(即油水粘度比 μ_o/μ_w 越低),更有利于提高水驱采收率。三元复合体系中聚合物的含量虽然较高,但经地层剪切、吸附及滞留后,三元复合驱采出水的粘度降低为 2.4 mPa·s,油水粘度比较大约为 4,不能有效提高波及系数[6]。另外,经检测三元复合驱采出污水与原油间的界面张力为 5.8×10^{-1} mN/m,由于三元复合驱采出污水中弱碱(NaHCO₃)成分以及表面活性剂含量较低,降低油水界面张力及改变油层岩石润湿性的能力减弱,总体驱油效率比水驱平均提高采收率 2.3% (见表 3)。出现这种结果的原因是:三元复合驱采出污水流动阻力系数小,容易出现微观指进现象,面积波及系数降低,弱碱及表面活性剂浓度较低,剥离油膜、乳化油滴能力大大减弱,这 2 个因素作用,表现在水驱驱油效率结果上,并不显著[7]。

Table 3. Experimental results of oil displacement efficiency of produced sewage by ASP flooding
表 3. 三元复合驱采出污水驱油效率实验结果

样品号	水测渗透率 (mD)	原始含油饱和度 (%)	水驱采收率 (%)	最终采收率 (%)	提高采收率 (%)	备注
X16-2	34.7	48.7	41.2	42.6	1.4	
366-2	89.8	56.0	41.5	43.6	2.1	
372-4	149.1	58.1	47.1	50.9	3.8	三元污水驱比水驱平均提高采收率 2.3%。
222-4	241.4	64.6	46.2	48.3	2.1	
452-7	48.9	58.4	42.9	44.1	1.2	
452-4	66.8	49.8	45.7	48.6	2.9	

4.2. 三元复合驱采出污水可用于配制三元复合体系

油层中流体油层中流体的界面张力影响流体在岩石表面的分布，孔隙中毛细力的大小和方向，因而影响着流体的渗流通道，三元复合体系与原油间的界面张力大小，直接影响三元复合驱驱油效果。大量室内和现场试验表明，三元复合体系与原油间形成超低界面张力($\times 10^{-3}$ mN/m 数量级)时，能大大减少油水流动的阻力，促进乳化油滴产生，使粘附在岩石表面的残余油更容易被剥离随驱替相被采出。三元复合体系与原油间界面张力数量级的大小，决定着三元复合体系的洗油能力，而三元复合体系的洗油能力又决定着原油乳化的程度，进而影响三元复合驱波及系数。要使三元污水配制的三元复合体系能有效提高驱油效率，大幅度增加原油采收率，就要使复配的三元复合体系与原油间界面张力达到较低的数量级水平。

实验分别采用模拟地层水、三元复合驱采出污水配制三元体系，做界面活性图对比，如图 2、图 3 所示，结果表明三元复合驱采出污水配制的三元复合体系，在较宽的碱(0.8%~1.2%)和表面活性剂(0.05%~0.3%)浓度范围内，能够与原油间达到 $\times 10^{-3}$ mN/m 数量级界面张力。

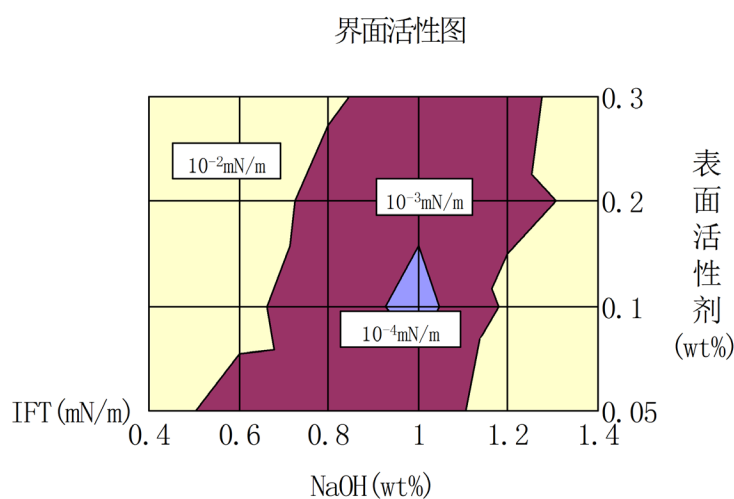


Figure 2. Ternary system interface activity diagram prepared by simulating formation water

图 2. 模拟地层水配制的三元体系界面活性图

界面活性图

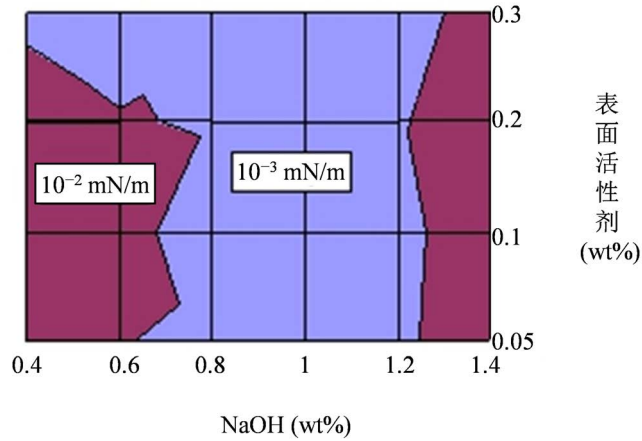


Figure 3. Ternary system interface activity diagram prepared by ternary compound flooding produced water

图 3. 三元复合驱采出污水配制三元体系界面活性图

将三元复合驱采出污水配制三元复合体系之后，再进行岩心注入能力实验。实验方法是采用大庆地区模拟地层水配制的三元复合体系进行岩心驱替实验，等待注入压力稳定后，再注入由不同悬浮物含量组成的三元复合驱采出污水配制的三元复合体系，共 25 倍孔隙体积，观察注入压力变化情况。利用三元复合驱采出污水配制三元复合体系时，必须严格控制三元复合驱采出污水中悬浮物含量、含油量等注水指标[8]。图 4 是不包含注入水中含油、在不同悬浮物含量条件下，三元复合驱采出污水配制三元复合体系的注入能力评价实验，实验结果可以看出，随着悬浮物含量的增大，注入压力也随之上升[9]。因此，在含油量、悬浮物含量达标的情况下，注入压力上升幅度不明显，渗透率下降率达到 50% 以下，三元复合驱采出污水可以配制三元复合体系[10]。

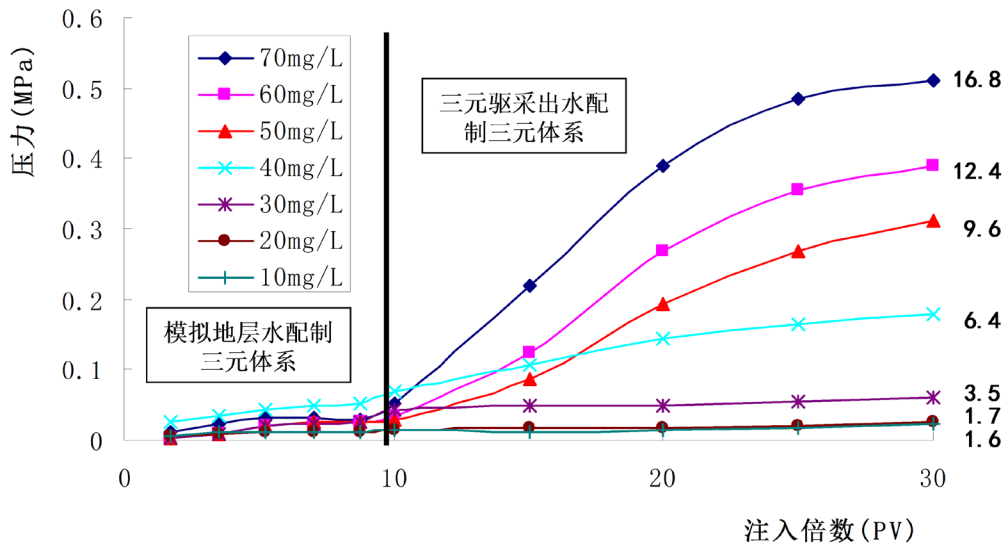


Figure 4. Experimental results of oil displacement of produced sewage by ASP flooding with effluent from ternary compound flooding system

图 4. 三元复合驱采出污水复配三元复合体系驱油实验结果

4.3. 三元复合驱采出污水复配三元体系后驱油效率实验

研究油田三次采油驱油机理, 就是研究注入化学剂在油层内部对原油所发生的变化。在三次采油过程中, 注入化学剂要不断克服阻力, 驱出原油, 从而引起油层内部油、水分布数量和分布形式的变化[11]。三次采油驱油效果主要由两方面因素决定: 一是注入水与原油间的界面张力, 通常情况下, 油水界面张力达到 10^{-3} mN/m 数量级时, 容易使原来连续相的油逐渐变成单个分散的油滴, 从而能易于被驱替排出; 二是注入体系的粘度, 注入水粘度越高, 驱油时的油水粘度比越小, 容易形成活塞式驱替, 使原油被整体连续驱替排出, 导致注入水水驱采收率越高。三元复合驱采出污水复配三元体系与原油间的界面张力能够达到 10^{-3} mN/m 数量级, 粘度为 54.2 mPa·s, 能够有效扩大波及系数和洗油效率, 提高采收率幅度达到 16.9% (见表 4)。

综上所述, 利用采用三元复合驱采出污水配制三元复合体系, 既解决了大庆油田污水排放污染环境的问题, 又实现了三元复合驱采出污水的重复利用, 为油田提高原油采收率, 节约污水处理方面的大量资金投入, 为油藏开发设计、地面工艺优化具有重要指导意义[12]。

Table 4. Experimental results of oil displacement efficiency of produced sewage by ASP flooding

表 4. 三元复合驱采出污水驱油效率实验结果

样品号	水测渗透率 (mD)	原始含油饱和度 (%)	水驱采收率 (%)	最终采收率 (%)	提高采收率 (%)	备注
1110-3	9.84	53.0	44.8	62.2	17.4	
371-8	39.94	57.7	46.6	62.7	16.2	三元污水驱平均比水驱提高采收率 16.9%。
22-8	40.18	60.4	33.5	50.0	16.5	
1116-4	118.68	58.4	46.8	64.4	17.6	

5. 结论

1) 三元复合驱采出污水中的弱碱(NaHCO_3)与表面活性剂之间达不到超低界面张力, 聚合物经地层剪切、吸附及滞留后粘度较低, 造成三元复合驱采出污水驱油效率较低为 2.3%。

2) 注入能力实验结果表明, 三元复合驱采出污水可以复配三元体系, 但污水中悬浮物含量、含油量必须控制在 20 mg/L 以下。

3) 三元复合驱采出污水复配的三元复合体系在驱油过程中, 与普通污水配制的三元体系一样能够大幅度提高原油采收率。

参考文献

- [1] 袁增, 王钰, 等. 川东地区气田水水质特征研究[J]. 油气田环境保护, 2021, 31(3): 11-14.
- [2] 刘国良, 马自俊, 蔡永生, 等. 三元复合驱采出污水悬浮固体组成和影响因素研究[J]. 石油与天然气化工, 2011, 40(2): 208-210.
- [3] 顾敏. 弱碱三元复合驱采出污水处理影响因素研究[J]. 内蒙古石油化工, 2018, 44(11): 18-21.
- [4] 王存英, 李小兵. 含油污水处理技术研究进展[J]. 广州化工, 2019, 47(19): 34-38+41.
- [5] 夏福军, 国胜娟, 徐德会, 等. 大庆油田三次采油采出水处理技术[J]. 油气田环境保护, 2017, 27(2): 34-37.
- [6] 张博, 郑玉飞. 桩西原油/化学驱体系油水界面扩张流变性影响因素研究[J]. 石油与天然气化工, 2017, 46(3): 78-82.
- [7] 刘文辉, 等. 海上油田注入水水质对储层伤害的模拟实验[J]. 化工科技, 2020, 28(2): 42-45.

- [8] 曲悦明. 三元复合体系驱油效果影响因素分析[J]. 中国石油石化, 2016(24): 65-66.
- [9] 张大伟, 陈忠喜, 任璐, 等. 三元复合驱采出水性质及稳定性机理研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(1): 104-111.
- [10] 娄迪. 不同见剂浓度对配制三元体系性能的影响[J]. 石化技术, 2017, 24(9): 50-53.
- [11] 刘国良, 马自俊, 赵振兴, 等. 三元复合驱采出污水处理技术的研究[J]. 工业用水与废水, 2013, 44(3): 1-5.
- [12] 白玉果. 弱碱三元采出污水再利用技术可行性研究[J]. 化学工程与装备, 2019(8): 179-180.