

三次采油驱油用表面活性剂的制备及性能研究

朱梅松¹, 范亚科¹, 莫文龙², 王林杰³, 杨 杨^{3*}, 王晓光¹

(1. 中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000; 2. 新疆大学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 3. 山东石油化工学院, 山东 东营 257000)

摘要:为有效提高低渗高温高矿化度油藏的开采效率,通过羧甲基化法以脂肪醇聚氧乙烯醚和氯乙酸为主要原料制备了一种驱油用表面活性剂 AEO-C,并对其进行了系统的性能评价。实验结果表明,AEO-C 具有优异的界面活性和强劲的润湿反转能力,当浓度为 0.005 mol/L 时油水界面张力能达到 10^{-3} mN/m 超低界面张力水平;浓度为 0.01 mol/L 时,模拟矿化水与改性石英片的接触角最低至 24.37°;其渗吸采油率达到 16.72%,但起泡高度仅为 20 mm,5 min 内稳泡高度为 0。在 80°C、 1.6×10^5 mg/L NaCl、 9×10^3 mg/L CaCl₂ 的高温高矿化度条件下静置 7 d 后均能达到超低界面张力水平;与模拟油几乎不发生乳化,60 min 内乳化效率为 0。

关键词:表面活性剂;高温高矿化度;界面张力;润湿反转

中图分类号:TE39

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0318-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.055

Study on preparation and properties of surfactant for tertiary oil recovery

ZHU Mei-song¹, FAN Ya-ke¹, MO Wen-long², WANG Lin-jie³, YANG Yang^{3*}, WANG Xiao-guang¹

(1. Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying 257000, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

3. Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, Dongying 257000, China)

Abstract: In order to effectively improve the exploitation efficiency of oil reservoirs with low permeability, high temperature and high salinity, AEO-C, a surfactant for oil displacement, is prepared through carboxymethylation with fatty alcohol polyoxyethylene ether and chloroacetic acid as main raw materials, and its performance is systematically evaluated. Experimental results show that AEO-C has excellent interfacial activity and strong wettability reversal ability. The oil-water interfacial tension can reach 10^{-3} mN/m, an ultra-low interfacial tension level, when the concentration of AEO-C is 0.005 mol/L. The contact angle between the simulated mineralized water and the modified quartz sheet is as low as 24.37° when the concentration of AEO-C is 0.01 mol/L. The imbibition oil recovery rate reaches 16.72%, but the foaming height is 20 mm only, and the stable foam height is 0 within 5 min. Under the conditions of 80°C, 1.6×10^5 mg/L NaCl and 9×10^3 mg/L CaCl₂, the ultra-low interfacial tension can be achieved after standing for 7 days. AEO-C hardly emulsifies with the simulated oil, and the emulsification efficiency is 0 within 60 min.

Key words: surfactant; high temperature and high salinity; interfacial tension; wetting reversal

随着我国油气资源勘探开发发展,油气资源开采的研究重心逐渐向低渗油气藏等非常规油气藏倾斜^[1-2]。低渗油气藏常具有低压、低孔渗等特点,开采难度大,油藏开发采收率低^[3-4]。当前,国内外学者对低渗油气藏等非常规油气藏多通过三次采油技术进行开采^[5-6],三次采油技术主要分为生物法、热力驱动和化学驱油法,驱油用表面活性剂是最常见的一种化学驱油药剂,表面活性剂通过降低油水界面张力、改变岩石层润湿性等方式大幅提升原油被采出的效率^[7-11]。目前,中石化胜利油田三次采油工作已全面铺展开,先后完成了注聚合物、醇醚类、石油磺酸盐等驱油用表面活性剂的开采工作^[12-14],

但在使用过程中造成了地层伤害以及产出液难破乳等问题,尤其是这 3 类表面活性剂在高温和高矿化度油藏经常失效^[15-17]。基于此,本文以脂肪醇聚氧乙烯醚和氯乙酸为主要原料,尝试通过羧甲基化法在阴离子表面活性剂的长烷基链中嵌入乙氧基团,形成阴离子-非离子复合型表面活性剂,以期其能够应用于高温、高矿化度的油藏^[18-19]。

1 实验部分

1.1 材料与试剂

脂肪醇聚氧乙烯醚、二氯化锰、二甲基硅烷均为工业纯,氢氧化钠、盐酸、无水乙醇、氯化钠、氯化钙

收稿日期:2025-01-24;修回日期:2025-08-07

作者简介:朱梅松(1990-),女,本科,副高级工程师,研究方向为油气田集输及油气化工,993757631@qq.com;杨杨(1988-),男,硕士,讲师,研究方向为油气田应用化学,通讯联系人,fyk981018@163.com。

均为分析纯,购自成都科龙试剂厂;氯乙酸、石油醚和二甲苯为分析纯,购自上海麦克林;实验用油取自胜利油田;模拟矿化水矿化度为 12 693.15 mg/L。

1.2 实验与测试

1.2.1 醇醚羧酸盐表面活性剂的制备

称取一定量的脂肪醇聚氧乙烯醚加入到固定的四口烧瓶中,开启搅拌器并通入氮气保护;搅拌升温至 60℃时再加入氢氧化钠,待溶解完全后,缓慢滴加氯乙酸。滴加结束后,在 80℃下继续反应 4 h 后可得黄色黏稠液体。最后将黄色黏稠液体趁热倒出,经无水乙醇沉淀、减压抽滤、50℃真空干燥可得微黄色粉末状聚合产物(AEO-C)。AEO-C 制备反应方程式如图 1。

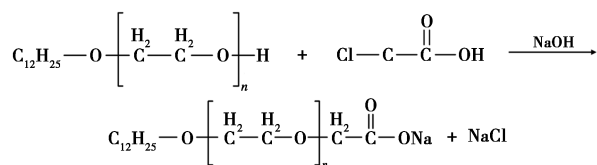


图 1 驱油用表面活性剂 AEO-C 合成反应方程式($n=3$)

1.2.2 醇醚羧酸盐表面活性剂的表征

取适量聚合产物与 KBr 研磨并压制成薄片,采用 Tensor 27 型傅里叶红外光谱仪(FT-IR)分析产物官能团结构,扫描范围:500~4 000 cm^{-1} 。取适量聚合产物 AEO-C 溶解于氘代氯仿中,溶解完全后利用 AVANCE AV-500 型核磁共振氢谱仪对氢的特征峰进行分析。

1.2.3 临界胶束浓度测试

采用模拟矿化水配制不同浓度的 AEO-C 溶液,平行测定溶液的表面张力 3 次并取平均值。绘制表面张力与浓度的关系曲线,曲线拐点即为表面活性剂的 CMC。

1.2.4 界面张力测试

采用模拟矿化水配制不同浓度的 AEO-C 溶液,利用北京哈科试验仪器的 SDT 旋转滴界面张力仪测量不同浓度 AEO-C 溶液与胜利原油间界面张力,测试温度为 80℃,设定转速为 5 000 r/min,连续测量 60 次,每次间隔 60 s。

1.2.5 润湿调节性能测试

将石英片放入 1.5% 盐酸溶液中浸泡 3 h,而后用大量的去离子水洗除残酸并真空干燥;将干燥后的石英片浸入体积比为 1:2 的二甲基硅烷与石油醚的混合溶液中 48 h,浸泡结束取出,用去离子水冲洗并真空干燥。

采用模拟矿化水配制不同浓度的 AEO-C 溶液,将处理完成的石英片放入不同浓度的 AEO-C 溶液中 48 h,而后将其取出烘干。利用 HARKE-SPCA 接触角测量仪测量石英片与模拟矿化水之间的接触角,根据接触角的大小判断其润湿调节性能。

1.2.6 渗吸驱油性能测试

采用体积法测试渗吸驱油效率,测试方法如下:

(1)用体积比 1:1 的二甲苯与无水乙醇混合液浸洗模拟岩心,浸洗 2 d 后取出,在 105℃下干燥 24 h。干燥后测定岩心的孔隙度和渗透率。

(2)将干燥后的岩心浸泡在原油中,再放入 80℃的 PC-3 型恒温真空干燥箱,连续饱和原油 7 d。饱和结束后,在 80℃下老化 12 h 并算出原油饱和度 N ,计算公式如式(1)所示。

$$N = [(m_2 - m_1)/(\rho_0 \varphi_0 V_0)] \times 100\% \quad (1)$$

式中, N 为原油饱和度,%; ρ_0 为模拟油的密度, g/cm^3 ; φ 为模拟岩心孔隙度,%; V_0 为模拟岩心体积, cm^3 ; m_1 为干燥岩心的质量,g; m_2 为老化后岩心质量,g。

(3)采用 12% 盐酸溶液浸洗渗吸瓶 2 d,使其具有一定程度的亲水性能;将饱和后的岩心放入渗吸瓶中,注入 40 000 mg/L 二氯化锰溶液配制的 AEO-C 溶液,并置于 80℃恒温箱中。待油滴体积不随时间增加时,渗吸结束,计算渗吸采收程度 μ ,计算公式如式(2)所示。

$$\mu = [(\rho_0 V_1)/(m_2 - m_1)] \times 100\% \quad (2)$$

式中, ρ_0 为模拟油的密度, g/cm^3 ; V_1 为上浮油滴体积,mL; m_1 为干燥岩心质量,g; m_2 为老化后岩心质量,g。

1.2.7 起泡稳泡性能测试

采用上海隆拓仪器设备有限公司的罗氏泡沫仪,参照标准《排水采气用起泡剂技术规范》(Q/SY 1815—2015)测定表面活性剂的起泡和稳泡性能。

1.2.8 耐温抗盐性能测试

以氯化钠为一价阳离子源和氯化钙为二价阳离子源,分别配制不同浓度的模拟矿化水;并测定 AEO-C 在不同温度和不同浓度的模拟矿化水中的界面张力。

1.2.9 乳化破乳性能测试

按体积比 1:1 向脱水瓶中注入 AEO-C 溶液和原油,将其置于 80℃恒温箱中保温 40 min,保温后取出,振荡摇晃均匀后读取不同时刻 AEO-C 溶液体积并计算乳化率 η ,计算公式如式(3)所示。

$$\eta = [(V_0 - V_1)/V_0] \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为乳化率,%; V_0 为初始驱油剂溶液体积, mL。

1.2.10 静态洗油性能测试

按 $m_{\text{原油}}:m_{\text{石英砂}}=2:7$ 制备模拟油砂,混合均匀后密封置于 80°C 干燥箱中老化 96 h。老化结束后,于 150 mL 具塞量筒中加入油砂和 AEO-C 溶液 ($m_{\text{油砂}}:V_{\text{AEO-C 溶液}}=2:5$),而后将其置于 80°C 恒温箱中,记录不同时刻分离出的原油体积,计算洗油效率,计算公式如式(4)所示。

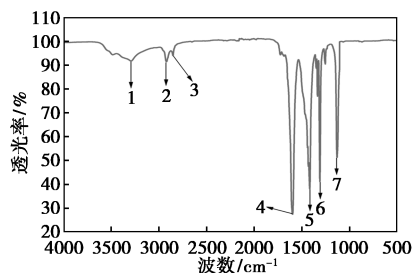
$$\theta = (\rho V / 0.14286m) \times 100\% \quad (4)$$

式中: θ 为洗油效率,%; ρ 为原油密度, g/cm^3 ; V 为剥离原油体积, mL; m 为油砂质量, g。

2 结果讨论

2.1 FT-IR 分析

将聚合产物 AEO-C 与 KBr 一起研磨制成薄片后,放入 FT-IR 中测试,扫描范围为 $500\sim 4000\text{ cm}^{-1}$,测试结果如图 2 所示。



1— 3295 cm^{-1} ; 2— 2917 cm^{-1} ; 3— 2851 cm^{-1} ; 4— 1593 cm^{-1} ;
5— 1418 cm^{-1} ; 6— 1310 cm^{-1} ; 7— 1132 cm^{-1}

图 2 AEO-C 红外光谱图

FT-IR 结果显示,在 3295 cm^{-1} 附近存在明显的 OH 伸缩振动峰。在 2917 cm^{-1} 和 2851 cm^{-1} 处的伸缩振动峰为醚类化合物的 C—O—C 特征峰。在 1593 cm^{-1} 和 1418 cm^{-1} 出现的特征峰分别为羧基的 C=O 伸缩振动峰和羧基 OH 的面内弯曲振动峰。此外,该范围内存在细微峰裂分,推测为长链烷基的 C—H 振动峰。而 1310 cm^{-1} 及 1132 cm^{-1} 为醚类化合物 C—O 的伸缩振动峰。以上结果进一步证明所得化合物化学结构中同时含有羧基、醚和长链烷基,与目标结构相一致^[20-21]。

2.2 核磁共振谱分析

为进一步考察聚合产物 AEO-C 是否成功制备,取少量 AEO-C 固体粉末溶解于氘代氯仿后,用核磁共振氢谱仪进行测试。测试结果如图 3 所示。

对聚合产物的氢谱进行归属分析,结果表明,核磁共振谱中主要为两组信号峰。0.9~1.7 ppm (1-2-3)

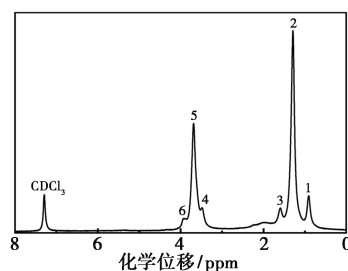


图 3 AEO-C 核磁共振氢谱

处的位移主要是烷基链上不连氧的氢的特征峰;在 3.46 ppm (4) 处的位移为与氧相邻的亚甲基上氢的特征峰, 3.68 ppm (5) 处的位移为乙氧基上的氢的特征峰, 3.95 ppm (6) 的位移为在氧邻位上的亚甲基的氢的特征峰。以上氢的位移特征峰可证明该合成产物为目标产物 AEO-C。

2.3 醇醚羧酸盐表面活性剂性能评价

2.3.1 临界胶束浓度

不同浓度的 AEO-C 溶液 (0.00001 、 0.00003 、 0.00005 、 0.0001 、 0.0005 、 0.001 、 0.002 、 0.004 、 0.006 、 0.008 、 0.01 、 0.015 、 0.02 mol/L) 与表面张力的关系曲线如图 4 所示。

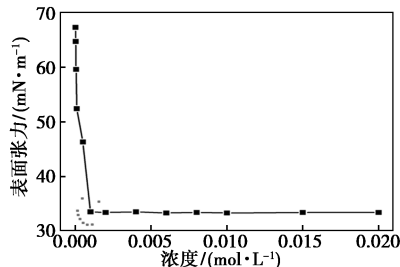


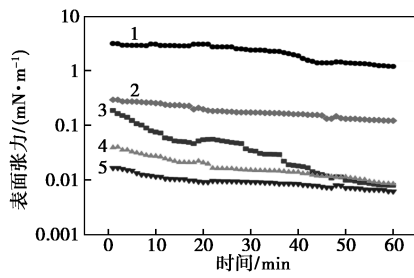
图 4 AEO-C 临界胶束浓度

AEO-C 溶液的表面张力随其浓度的增加而减小, AEO-C 溶液浓度为 0.001 mol/L 时表面张力基本平稳,此时 AEO-C 表面张力值为 33.5 mN/m ;而后继续增加溶液浓度表面张力基本不变。由图可知, AEO-C 的临界浓度 CMC 即为 0.001 mol/L 。

2.3.2 界面张力

不同浓度的 AEO-C 溶液 (0.001 、 0.002 、 0.003 、 0.004 、 0.005 mol/L) 在 60 min 内界面张力变化趋势如图 5 所示。

AEO-C 溶液与胜利原油的界面张力随着 AEO-C 浓度的增大逐渐变小。当 AEO-C 的浓度为 0.001 mol/L 时,界面张力平稳值为 1.199 mN/m 。继续增加 AEO-C 浓度至 0.005 mol/L 时,界面张力平稳值为 $6.09 \times 10^{-3}\text{ mN/m}$,油水界面张力降幅达 99.49%。数据表明, AEO-C 展现出了优异的界面



1—0.001 mol/L;2—0.002 mol/L;3—0.003 mol/L;
4—0.004 mol/L;5—0.005 mol/L

图 5 不同浓度 AEO-C 溶液界面张力

活性,能够大幅降低油水界面张力至超低界面张力范围。

2.3.3 润湿调节性能

图 6 为模拟矿化水与预处理后石英片的接触角图像。当 AEO-C 浓度为 0 mol/L 时,模拟矿化水与石英片的接触角为 97.26°,远大于 AEO-C 浓度为 0.01 mol/L 时的 24.37°。

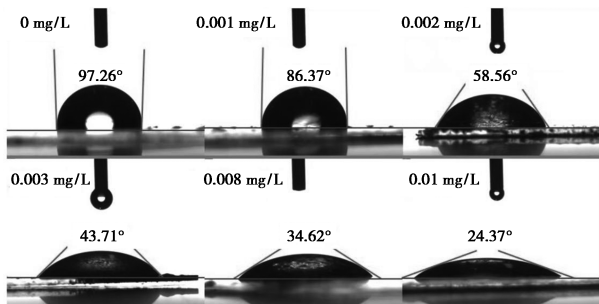


图 6 不同 AEO-C 浓度下的接触角

经 AEO-C 溶液浸泡后的石英片表面明显出现了由亲油界面向亲水界面的转变,说明 AEO-C 表面活性剂具有很强的润湿反转性能,3 次采油时 AEO-C 的存在有利于将低渗油藏中的原油驱出^[22-23]。

2.3.4 渗吸驱油性能

往老化后的模拟岩心中注入 0.015 mol/L 用二氯化锰溶液配制的 AEO-C 溶液,记录不同时刻岩心在 80℃ 恒温箱中渗出的油滴体积;模拟岩心孔隙度为 8.96%、渗透率为 2.37 mD。测试结果如图 7 所示。

实验结果表明,AEO-C 溶液对原油的渗吸效果随着时间的延长逐渐提升;渗吸进行到第 7 d 时,原油采出率为 16.72%,而后继续延长渗吸效果不明显。AEO-C 对原油前 5 d 的渗吸进展较快,这是因为初段渗吸毛细管力的作用很强,AEO-C 溶液能够较大程度的进入模拟岩心,而 AEO-C 本身具有的良好润湿反转能力和优异的表面活性能够将岩心

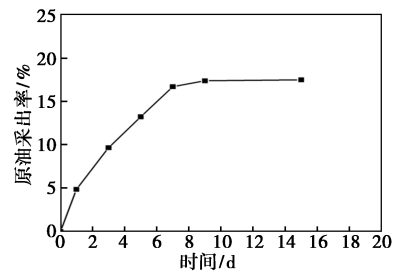


图 7 AEO-C 的渗吸驱油能力

渗孔中的原油快速顶替出来^[24-25]。

2.3.5 起泡稳泡性能

采用模拟矿化水配制 0.02 mol/L 的 AEO-C 溶液,在 80℃ 条件下测定其初始起泡高度和 5 min 稳泡高度,如表 1 所示。

表 1 AEO-C 溶液起泡稳泡高度

驱油用表面活性剂	起泡高度/mm	5 min 稳泡高度/mm
AEO-C	20	0

由表 1 可知,驱油用表面活性剂 AEO-C 的起泡高度仅为 20 mm,静置 5 min 后泡沫高度降为 0,表明 AEO-C 的起泡稳泡性能较差,远远小于标准中对起泡剂的要求,说明 AEO-C 在驱油过程中不易起泡,能够干净稳定的应用于油藏中^[26]。

2.3.6 耐温抗盐性能

为进一步考察 AEO-C 在高温和高矿化度条件下的性能变化,测试了 AEO-C 在不同矿化度和不同温度条件下界面张力的变化,AEO-C 溶液浓度为 0.005 mol/L,AEO-C 溶液静置时间为 7 d,测试结果如表 2。

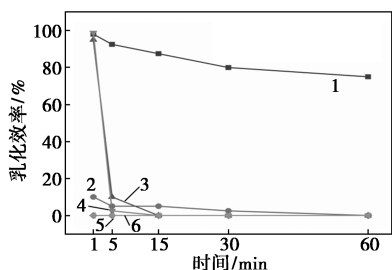
表 2 AEO-C 的耐温抗盐性能

浓度/(mg·L ⁻¹)	20℃时	50℃时	80℃时
	表面张力/ (mN·m ⁻¹)	表面张力/ (mN·m ⁻¹)	表面张力/ (mN·m ⁻¹)
模拟矿化水 1.3×10 ⁴	7.89×10 ⁻³	6.43×10 ⁻³	6.27×10 ⁻³
NaCl 1×10 ⁴	3.25×10 ⁻²	2.59×10 ⁻²	1.09×10 ⁻²
NaCl 4×10 ⁴	10.31×10 ⁻³	9.52×10 ⁻³	8.73×10 ⁻³
NaCl 8×10 ⁴	7.58×10 ⁻³	6.98×10 ⁻³	6.42×10 ⁻³
NaCl 1.2×10 ⁵	6.47×10 ⁻³	5.35×10 ⁻³	4.25×10 ⁻³
NaCl 1.6×10 ⁵	5.13×10 ⁻³	3.84×10 ⁻³	3.56×10 ⁻³
CaCl ₂ 1×10 ³	2.08×10 ⁻²	1.76×10 ⁻²	1.57×10 ⁻²
CaCl ₂ 3×10 ³	1.96×10 ⁻²	1.65×10 ⁻²	1.34×10 ⁻²
CaCl ₂ 5×10 ³	2.31×10 ⁻²	1.54×10 ⁻²	1.02×10 ⁻²
CaCl ₂ 7×10 ³	9.78×10 ⁻³	9.36×10 ⁻³	8.54×10 ⁻³
CaCl ₂ 9×10 ³	8.97×10 ⁻³	7.69×10 ⁻³	7.26×10 ⁻³

AEO-C 在高矿化度和高温环境下仍表现出了较好的界面活性。在以钠离子为一价阳离子源的模拟水中, AEO-C 的界面张力随着温度和矿化度的增加, 逐渐降至 10^{-3} mN/m 超低界面张力量级; 数据表明一价钠离子源对 AEO-C 的界面张力降低有促进作用, 在 NaCl 浓度为 1.6×10^5 mg/L 时, AEO-C 的界面张力可降至 3.56×10^{-3} mN/m 远小于模拟矿化水条件下的 6.27×10^{-3} mN/m。在以钙离子为二价阳离子源的模拟水中, 当 CaCl_2 浓度 9×10^3 mg/L 其界面张力仍能达到 7.26×10^{-3} mN/m。以上数据说明, 制备的 AEO-C 驱油用表面活性剂能够适用于高温高矿化度油藏。

2.3.7 乳化破乳性能

测定不同浓度的 AEO-C 溶液在不同时刻的乳化效果如图 8 所示。



1—0 ppm; 2—100 ppm; 3—300 ppm; 4—500 ppm; 5—800 ppm; 6—1 000 ppm

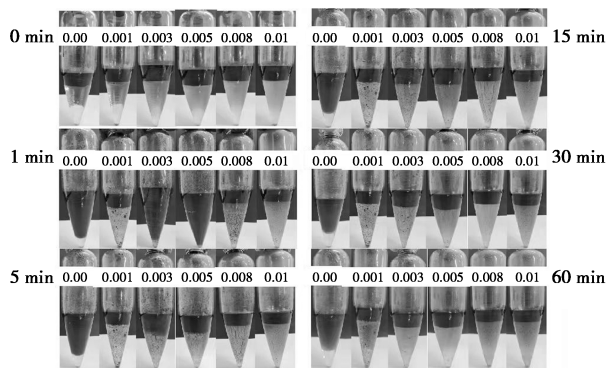
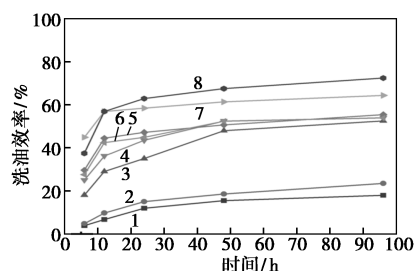


图 8 不同时刻 AEO-C 的乳化效果

随着振荡后静置时间的增加, 不同浓度的 AEO-C 溶液对原油的乳化率逐渐降低, 直至完全破乳。浓度为 0 mol/L, 时间为 60 min 时仍具有 75% 的乳化率; 当 AEO-C 浓度为 0.005 mol/L 以上可基本实现即刻破乳。表明驱油用表面活性剂 AEO-C 对原油几乎没有乳化作用, 有助于采出液的破乳。

2.3.8 静态洗油性能

选用粒径为 120~160 目的石英砂来制备模拟油砂, 往具塞量筒中注入一定量的 AEO-C 溶液, 不同时刻下 AEO-C 的静态洗油效果如图 9 所示。



1—0 ppm; 2—100 ppm; 3—300 ppm; 4—500 ppm; 5—700 ppm; 6—900 ppm; 7—1 500 ppm; 8—2 000 ppm

图 9 不同时刻 AEO-C 的静态洗油效率

当 AEO-C 的浓度为 0 mol/L 时, 具塞量筒中明显可见有少许原油洗出, 推测是原油并未完全附着于石英砂表面, 有部分原油滑落。随着 AEO-C 浓度的增加, 其洗油效果明显增强。当 AEO-C 浓度为 0.02 mol/L 时, 静态洗油效率达 72.53%, 这是因为 AEO-C 具有的润湿反转能力促使了石英砂由亲油界面向亲水界面转变, 从而使得原油不易于附着在其表面, 而 AEO-C 优异的界面活性又进一步有效降低了原油的黏附功, 使石英砂表面的原油更好的剥离脱落^[27]。

3 结论

驱油用表面活性剂 AEO-C 加注进低渗高温高矿化度油藏后, AEO-C 首先随着油藏流体进入到地下裂缝中, AEO-C 逐渐将油藏的岩石层亲油界面向亲水界面转变; 此时, 油藏中原油将很难再附着于裂缝岩石层表面上, 岩石层表面的原油将逐渐被顶替下来从而提高采收率。AEO-C 的主要作用机理如图 10 所示, 实验主要结论如下。

(1) AEO-C 凭借优异的界面活性大幅降低油水界面张力至 10^{-3} mN/m 量级的超低界面张力范围; 依靠强劲的润湿反转能力实现了亲油界面向亲水界面的有效转变。

(2) AEO-C 驱油能力良好, 静态渗吸驱油采收率可达 16.72%, 且 AEO-C 在驱油时基本不起泡, 能够较为平稳且清洁地应用于油藏驱油。

(3) AEO-C 具有较强的耐温抗盐性能, 其在

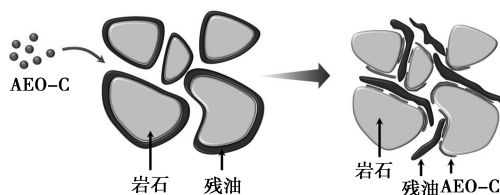


图 10 AEO-C 作用机理示意图

80℃、 1.6×10^5 mg/L NaCl、 9×10^3 mg/L CaCl₂ 的高温高矿化度条件下均能达到超低界面张力水平。同时,AEO-C 与原油基本不发生乳化行为,AEO-C 浓度为 0.005 mol/L 以上可实现即刻破乳。

参考文献

- [1] 康万利,赵晗,邵硕,等.表面活性剂复配提高超低渗油藏渗吸采收率[J].油田化学,2019,36(4):667-671.
 - [2] 雷群,翁定为,罗健辉,等.中国石油油气开采工程技术进展与发展方向[J].石油勘探与开发,2019,46(1):139-145.
 - [3] 吴雄军,林永学,金军斌,等.川西低渗气藏井壁修补强化钻井液技术[J].断块油气田,2021,28(2):269-273.
 - [4] 白佳佳,司双虎,陶磊,等.DES+CTAB 复配驱油剂体系提高低渗致密砂岩油藏采收率机理[J].岩性油气藏,2024,36(1):169-177.
 - [5] 蔡萌.大庆油田采油工程主体技术现状及展望[J].石油钻采工艺,2022,44(5):546-555.
 - [6] 李国欣,雷征东,董伟宏,等.中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J].中国石油勘探,2022,27(1):1-11.
 - [7] 赵方园,伊卓,吕红梅,等.表面活性聚合物性能评价及驱油机理[J].石油化工,2021,50(12):1310-1316.
 - [8] 王晓燕,蔡明俊,王贵江,等.油田化学驱用部分水解聚丙烯酰胺环境基准值研究[J].石油学报(石油加工),2022,38(2):425-435.
 - [9] 冉立君,陈琪,陈钊,等.高分子醇醚羧酸盐表面活性剂活性物含量的测定[J].日用化学工业,2022,52(4):345-354.
 - [10] 张玉,王凤,魏丽敏,等.国内外化学驱技术标准对比[J].油田化学,2021,38(4):727-731.
 - [11] 陈俊耀,田雨,郑皓轩,等.阳离子型疏水缔合聚合物的合成与性能评价[J].石油化工,2024,53(12):1766-1771.
 - [12] 曹功泽,胜利油田水驱与聚合物驱油藏微生物群落特征差异[J].大庆石油地质与开发,2023,42(3):115-121.
 - [13] 张海波.油田开发后期采油工程技术优化及经济效益评价研究[J].中国化工贸易,2024(29):64-66.
 - [14] 张娜,元福卿,魏翠华,等.普通稠油油藏聚合物驱提高采收率研究与实践——以孤岛油田 B21 单元为例[J].油气地质与采收率,2021,28(6):101-106.
 - [15] 郭先哲,杨超,陈武,等.非常规气田含油采出水反相破乳剂及絮凝剂研究进展[J].化工环保,2023,43(3):304-313.
 - [16] 渠慧敏,孙玉海,张广中,等.难破乳采出液的乳化影响因素及量化分析[J].油田化学,2024,41(3):516-521.
 - [17] 安丽媛,郭立伟,石响,等.复合表面活性剂驱油体系的合成及应用[J].当代化工,2022,51(11):2614-2617.
 - [18] 刘平,安文庆,寇燕如,等.耐温抗高钙镁油藏驱油表面活性剂复配体系的研究[J].石油化工,2023,52(12):1710-1715.
 - [19] 胡俊,金诚,施雷庭,等.用于中低渗油藏的表面活性聚合物驱油剂[J].精细化工,2023,40(9):2064-2072.
 - [20] 刘建益,钱飞,方银军,等.壬基环己醇聚氧乙烯醚硫酸钠的合成及性能[J].精细化工,2024,41(1):121-126.
 - [21] 王玲玲,刘巍洋,马秀君,等.脂肪醇嵌段聚醚硫酸盐的合成与性能[J].应用化工,2024,53(1):113-117.
 - [22] 王业飞,张楚晗,崔佳,等.表面活性剂对油湿性致密砂岩渗吸作用与界面协同效应[J].中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(5):129-137.
 - [23] Fu L, Ren Z, Chen W, et al. Polyetheramine enhanced biosurfactant/biopolymer flooding for enhanced oil recovery [J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 411: 125757.
 - [24] 侯向前,卢拥军,方波,等.渗吸驱油用改性纳米 SiO₂ 研究现状及展望[J].现代化工,2023,43(10):84-88.
 - [25] Arab D, Bryant S L, Torsæter O, et al. Water flooding of sandstone oil reservoirs; Underlying mechanisms in imbibition vs. drainage displacement [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2022, 213: 110379.
 - [26] 王秀民,崔健鹏,王志坤,等.耐温耐盐 CO₂ 响应型叔胺泡沫的性能及响应机理[J].石油与天然气化工,2024,53(4):73-78.
 - [27] 田浩睿,田雨,郑皓轩,等.含有 PO 基团的阴非离子表面活性剂的制备及其抗盐性能研究[J].应用化工,2023,52(11):2998-3002. ■
-
- (上接第 317 页)
- [8] 冯子卿,张萌,吴文帅,等.MGO 修饰的 SBC 复合材料的制备及其对水中 TC 的吸附研究[J].环境科学与技术,2024,47(12):88-100.
 - [9] 余亚兰,尹峰,唐仕波.基于微流控法单分散多孔微球的制备及其油吸附性能研究[J].现代化工,2018,38(6):136-139.
 - [10] Low W, Nouri A, Chua S F, et al. Immobilization of graphene oxide into microbead for fluidized-bed adsorption of methylene blue [J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 317: 100135.
 - [11] Yu Y L, Zhao M X, Cao X R, et al. Monodisperse microporous microspheres prepared by microfluidic methods and their oil adsorption performance [J]. Colloids & Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 579: 123617.
 - [12] Yu Y L, Zhou Z H, Yu W T, et al. Preparation of magnetic porous microspheres and their ability to remove oils [J]. Macromolecular Materials & Engineering, 2020, 305(1): 1900452.
 - [13] 孙青,罗威,张俭,等.海藻酸钙/埃洛石载药微球的制备与缓释盐酸二甲双胍性能[J].化工进展,2018,37(8):3138-3145.
 - [14] 王学宝,李晋庆,罗运军.干燥方式对高氯酸铵/石墨烯复合材料的结构和热分解行为的影响[J].物理化学学报,2013,29(10):2079-2086.
 - [15] 岳娟娟,孙红娟,彭同江,等.三维石墨烯材料的制备及在水处理中的应用研究进展[J].材料导报,2018,32(15):2601-2608,2617.
 - [16] 陈师响,宋畅,陈艺玲,等.基于复合凝聚法制备红曲色素微胶囊及其稳定性表征[J].食品科学,2024,45(23):221-231. ■