

油田化学品与油品添加剂

高含蜡、高凝点油藏用降凝驱油微乳液制备及性能

孟勇^{1,2}, 张卫东^{1,2}, 郭榕^{1,2}, 李应成^{1,2*}

[1. 中国石化三采用表面活性剂重点实验室, 上海 201208; 2. 中石化(上海)石油化工研究院有限公司, 上海 201208]

摘要: 将阴离子表面活性剂硬脂醇聚醚羧酸钠 (SEC) 和阳离子表面活性剂十八烷基三甲基溴化铵 (OTAB) 的混合表面活性剂、聚丙烯酸酯与乙烯-醋酸乙酯共聚物的混合物 (聚合物型降凝剂 RD 5120T) 和去离子水混合, 制备了降凝驱油微乳液。考察了 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})$ 对混合表面活性剂的增溶能力、 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC}+\text{OTAB})$ 对降凝驱油微乳液平均粒径的影响; 采用凝固点测试、相态实验、增溶组分分析、界面张力测试、物模实验测试了降凝驱油微乳液的性能, 并评价了其在东部某油田的现场应用。结果表明, 在 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})=7 : 3$ [$n(\text{SEC})+n(\text{OTAB})=1.0 \text{ mol}$]、 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC}+\text{OTAB})=1 : 10$ 、SEC (610.7 g, 0.7 mol)、RD 5120T+SEC+OTAB 质量浓度为 200 g/L 的条件下, 制备的降凝驱油微乳液(微乳液-1)的平均粒径为 83.64 nm, 其对 3 种高凝原油凝固点平均降低 34% 以上, 对原油中的长链脂肪烃 ($\text{C}_{18}\text{-C}_{30}$) 具有更强的增溶能力, 可将原油与水的界面张力降至 $6 \times 10^{-3} \text{ mN/m}$ 。物模实验中, 注入孔隙体积倍数 (PV) 0.2、质量浓度 5 g/L 的微乳液-1 可提高原油采收率 12.1%; 现场试验中, 微乳液-1 可对高含蜡、高凝点油藏起到降水增油的效果, 平均综合含水率 (质量分数) 从 94.8% 最低降至 89.1%, 平均日油从 4.5 t 最高提升至 7.7 t。

关键词: 高凝油; 降凝; 阴/阳离子表面活性剂; 微乳液; 提高采收率; 油田化学品

中图分类号: TE39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2025) 04-0903-06

Preparation and properties of pour point depression and oil displacement microemulsion for high waxy and high pour point oil reservoir

MENG Yong^{1,2}, ZHANG Weidong^{1,2}, GUO Rong^{1,2}, LI Yingcheng^{1,2*}

[1. Sinopec Key Laboratory of Surfactants for Enhanced Oil Recovery, Shanghai 201208, China; 2. Sinopec Shanghai Research Institute of Petrochemical Technology Company Limited, Shanghai 201208, China]

Abstract: Pour point depression and oil displacement microemulsion were prepared by mixing anionic surfactant sodium stearyl ether carboxylate (SEC), cationic surfactant octadecyl trimethyl ammonium bromide (OTAB), pour point depressant polyacrylates and ethylene-vinyl acetate copolymers mixture (RD 5120T) and deionized water. The effects of $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})$ on the solubilization capacity of mixed surfactants and $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC}+\text{OTAB})$ on the average particle size of microemulsions were investigated. The properties of the micro-emulsion were analyzed by freezing point test, phase state test, solubilizing components analysis, interfacial tension test and physical model test, with its field application in an eastern oilfield further evaluated. The results showed that, under the conditions of $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})=7 : 3$ [$n(\text{SEC})+n(\text{OTAB})=1.0 \text{ mol}$], $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC}+\text{OTAB})=1 : 10$, SEC (610.7 g, 0.7 mol) and mass concentration of RD 5120T+SEC+OTAB of 200 g/L, the microemulsion-1 obtained exhibited an average particle size of 83.64 nm, reduction on the freezing point of three kinds of high point crude oil by more than 34% on average, stronger solubility for long chain aliphatic hydrocarbons ($\text{C}_{18}\text{-C}_{30}$) in crude oil, and reduction of the interfacial tension between crude oil and water to $6 \times 10^{-3} \text{ mN/m}$. Physical simulation test indicated that injection of microemulsion-1 with pore volume ratio (PV) of 0.2 and mass concentration of 5 g/L could increase the oil recovery rate by 12.1%, while field experiment demonstrated

收稿日期: 2024-09-12; 定用日期: 2024-10-23; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240698

作者简介: 孟勇 (1990—), 男, 高级工程师, E-mail: mengy.sshy@sinopec.com。联系人: 李应成 (1972—), 男, 教授, E-mail: liyc.sshy@sinopec.com。

that injection of microemulsion-1 could reduce water and increase oil production in high wax and high pour point reservoirs, with the average comprehensive water content (mass fraction) of the wells decreased from 94.8% to 89.1%, and the maximum daily oil production increased from 4.5 t to 7.7 t.

Key words: high pour point oil; pour point depression; anionic/cationic surfactants; microemulsion; enhanced oil recovery; oil field chemicals

全球高凝油油藏储量丰富^[1-2], 其原油凝固点高、含蜡量高, 常规注水开发易发生蜡沉积、冷伤害等问题。因此, 开发困难较大, 采收率普遍低于类似地层条件普通油藏的 10%~15%。如何高效开发高凝油一直受到研究者关注^[3-7], 除不断优化水驱开发工艺、在井筒举升及集输过程中补充热能等方式外, 化学驱^[8-9]、微生物驱^[10-11]等开采方式也开展了不同程度的室内研究和现场试验, 这些都为高凝油的开发提供了技术储备。

解决高凝油开采难题的关键在于降低原油的凝固点, 提高原油的低温流动性。石油降凝剂是一种广泛应用于石油管输、储存领域的聚合物型化学剂^[12-14], 其通过吸附、成核、共晶、增溶等机理达到抑制蜡晶生成、生长, 降低石油凝固点的目的。代表性的降凝剂有乙烯-醋酸乙烯酯共聚物^[15-16]、乙烯-丙烯酸甲酯共聚物^[17]等。为提升降凝剂性能, 研究人员也不断开发新的降凝材料, 例如: 改性纳米 SiO₂^[18]、聚合物+微纳米材料^[19]等。但目前国内外对降凝体系的功能研究局限于集输过程, 未能在强化采油和提高采收率领域试验应用。微乳液是一种由水、油、表面活性剂等组合而成的热力学稳定体系, 与常规乳液相比, 其液滴粒径更小, 通常在 10~100 nm 之间, 具有高界面活性、高增溶能力、高润湿性能, 近年来在提高原油采收率领域受到广泛关注^[20-21]。

为提高高凝油油藏采收率, 本文拟采用脂肪醇聚醚羧酸盐阴离子表面活性剂和烷基铵盐阳离子表面活性剂复配体系, 与聚合物型降凝剂等来制备降凝驱油微乳液, 利用凝固点测试、相态实验、增溶组分分析、界面张力测试、物模实验等方法评价其性能, 并在油田现场进行试验。以期微乳液型降凝剂的开发提供参考。

1 实验部分

1.1 原料、试剂与仪器

原油取自东部某油田 WB 区块 C79 井、C313 井、C811 井脱水原油; 油田注入水(总矿化度 48500 mg/L, 钙镁离子质量浓度 2800 mg/L)取自 WB 区块配注站, 使用前过滤除去悬浮物。

硬脂醇聚醚羧酸钠 (SEC, 质量分数 ≥ 95%), 自制^[22]; 十八烷基三甲基溴化铵 (OTAB, 质量分

数 98%), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 降凝剂 RD 5120T(聚丙烯酸酯与乙烯醋酸乙烯共聚物的混合物, 质量分数 50%), 工业级, 德国 BASF 公司。

Zetasizer Nano ZS90 型纳米粒度及 Zeta 电位分析仪, 英国马尔文仪器有限公司; ST-1538 型全自动凝点倾点测定仪, 北京旭鑫仪器设备有限公司; 6890 型气相色谱-7895 型质谱联用仪 (GC-MS), 美国 Agilent 公司; SDT 型界面张力测量仪, 德国 KRÜSS 公司。

1.2 制备方法

按照 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB}) = 7 : 3$, 称取 SEC (610.7 g, 0.7 mol) 和 OTAB (117.8 g, 0.3 mol), 将其加入到适量去离子水中搅拌均匀并溶解, 配制质量浓度 5 g/L 的 SEC+OTAB 混合表面活性剂溶液, 记为溶液-1。

采用溶液-1 的制备方法, 控制两种表面活性剂物质的量之和为 1.0 mol, 调整 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB}) = 0 : 10, 1 : 9, 2 : 8, 3 : 7, 4 : 6, 5 : 5, 6 : 4, 8 : 2, 9 : 1, 10 : 0$, 分别制备不同物质的量比的质量浓度 5 g/L 的 SEC+OTAB 混合表面活性剂溶液。

按照 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB}) = 7 : 3$ 和 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB}) = 1 : 10$, 称量 SEC (610.7 g, 0.7 mol)、OTAB (117.8 g, 0.3 mol)、RD 5120T (72.9 g) 加入适量水中, 配制质量浓度 (RD 5120T+SEC+OTAB, 下同) 为 200 g/L 的降凝驱油微乳液, 记为微乳液-1。

采用微乳液-1 的制备方法和条件, 调整 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB}) = 1 : 40, 1 : 30, 1 : 20, 1 : 10, 1 : 8, 1 : 6, 1 : 4, 1 : 3, 1 : 2$, 分别制备质量浓度均为 200 g/L 的降凝驱油微乳液。

1.3 性能测试

1.3.1 粒径测定

量取 1 mL 微乳液样品, 置于纳米粒度及 Zeta 电位分析仪样品池中, 测定其在 25 °C 下的粒径分布。

1.3.2 乳化增溶性能测试

采用相平衡实验法测试表面活性剂及微乳液对原油的乳化增溶性能。以油田注入水分别配制质量浓度 5 g/L 的待测样品水溶液。取具塞螺口刻度试管分别加入 1 g 原油和 2 g 待测样品水溶液, 密封管口, 振荡混匀后置于恒温金属浴中, 于地层温度 (80 °C) 下静置, 定期观测油相和水相的界面变化,

至界面恒定不变后拍照记录结果。将单位体积表面活性剂增溶原油的体积记为增溶参数 (SP), 并根据式 (1) 计算:

$$SP=(V_0-V_1) \times \rho / (\rho_0 \times V_2) \quad (1)$$

式中: V_0 、 V_1 和 V_2 分别为初始加入原油、平衡后原油和初始表面活性剂溶液的体积, mL; ρ 为表面活性剂的密度, g/cm^3 ; ρ_0 为表面活性剂溶液的质量浓度, g/mL 。

1.3.3 界面性能测试

采用油水界面张力的测试数据衡量降凝驱油微乳液针对油田注入水和原油的界面性能。以油田注入水配制质量浓度 5 g/L 的降凝驱油微乳液水溶液, 用界面张力测量仪测定不同原油样品与降凝驱油微乳液水溶液界面张力随时间的变化, 转速 5000 r/min, 测量时间 2 h, 测试温度 80 °C。

1.3.4 原油增溶前后组分测定

采用 GC-MS 测定原油样品的脂肪烃组成。气相色谱仪使用 Agilent 19091S-933 型毛细管柱。测试样品为原油和相平衡实验后上相残余原油。将待测样品 0.5 g 先溶解在 10 mL 正己烷中, 然后加入 10 mL 去离子水提取水溶性无机盐。经去离子水洗涤 3 次, 离心分离后, 收集有机相, 进行 GC-MS 测试。仪器检测条件设置为: EI 离子源温度 230 °C, 电离能 70 eV, 载气 (氮气, 体积分数 99.999%) 流速 1.5 mL/min。进样温度 300 °C, 进样量 1.0 μL , 分流比为 20:1。程升温度: 初始 60 °C 保持 5 min, 然后以 10 °C/min 的升温速率升至 280 °C, 最后在 280 °C 保持 15 min。

1.3.5 降凝性能评价

以 500 mL 蓝盖瓶为容器, 分别加入 100 g 原油和 300 g 质量浓度 5 g/L 的微乳液水溶液, 振荡混匀后置于 80 °C 恒温烘箱中, 静置至界面恒定不变, 取上相残余原油测试凝固点。

按照 SY/T 0541—2009, 将经 60 °C 热处理的原油油样装入测试管中, 以 0.5 °C/min 的降温速率冷却原油样品, 每降低 2 °C 观测 1 次原油的流动性, 直至将测试管水平放置 5 s 原油不流动止。记录此时温度, 即为该原油的凝点, 每个样品平行测定 3 次取算数平均值。测试样品为原油和相平衡实验后上相残余原油。

1.3.6 物模驱油性能测试

采用均质条状人造岩心模型 (1#、2#、3#、4# 和空白) 开展物模驱油实验, 其中 4 块 (1#、2#、3#、4#) 在化学驱阶段分别注入微乳液溶液, 剩余 1 块 (空白) 以油田注入水代替微乳液溶液作为空白对照。岩心尺寸 2.5 cm×2.5 cm×30 cm, 渗透率 0.1 μm^2 。将岩心装入岩心夹持器, 以注入水饱和

岩心。于 80 °C 下饱和原油, 老化 10 d, 使岩心中油水分布均匀, 岩心饱和进原油的质量记为 m_0 。将饱和油后的岩心水驱至含水率 >98%, 此时驱替出原油质量记为 m_1 , 水驱采收率 /% = $m_1 / m_0 \times 100$ 。而后以 0.5 mL/min 流速注入孔隙体积倍数 (PV) 0.2 的不同质量浓度 (1、2、5、10 g/L) 降凝驱油微乳液。继续水驱直至出口端无油, 记录驱替全流程驱出原油质量为 m_2 , 根据 $m_2 / m_0 \times 100$ 计算累计采收率 (%)。

1.4 现场试验

选取东部某油田 WB 区块开展现场试验, 试验 3 口采出井分别 C79 井、C313 井、C811 井。目标区块油层深度 1983 m, 地层温度 80 °C, 平均孔隙度 24.1%, 平均渗透率 $84.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 原始含油饱和度 69.5%, 采出程度 44.8%。井组原油密度 0.86 g/cm^3 , 地层黏度 8.3 mPa·s, 凝固点平均 40.7 °C, 胶质沥青质量分数平均为 23.3%, 含蜡质量分数平均为 29.8%。井组日液水平平均为 86.5 m^3/d , 日油平均 4.5 t, 综合含水率 (质量分数) 平均为 94.8%。

实验井组注入微乳液-1 的质量浓度 5 g/L, 设计注入井配注量为 40 m^3/d 。2022 年 10 月 11 日开始注入, 2023 年 5 月 19 日结束注入。

2 结果与讨论

2.1 降凝驱油微乳液的制备

2.1.1 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})$ 的确定

表面活性剂对原油的有效增溶是其在提高采收率应用中的重要作用机理之一。图 1 为不同 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})$ 制备的混合表面活性剂溶液对 C79 井、C313 井、C811 井混合原油 (简称混合原油, 下同) 的增溶参数。

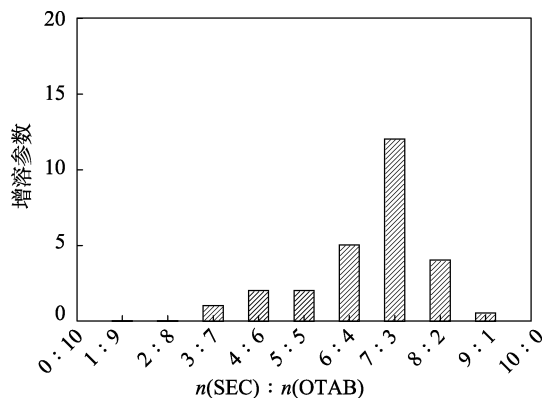


图 1 不同 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})$ 制备的混合表面活性剂溶液对混合原油的增溶参数

Fig. 1 Solubilization parameters of mixed surfactant solutions prepared with different $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})$ for mixed crude oil

从图 1 可以看出,单一阳离子表面活性剂 OTAB [$n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})=0 : 10$] 和单一阴离子表面活性剂 SEC [$n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})=10 : 0$] 对混合原油均没有增溶效果 ($\text{SP}=0$)。随着 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})$ 的增大,混合表面活性剂溶液对混合原油的增溶参数先增加后降低。当 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})=7 : 3$ 时,制备的混合表面活性剂溶液 (溶液-1) 对混合原油的增溶参数最大,为 12,表明其对混合原油的增溶能力最佳,因此,选定 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB})=7 : 3$ 作为制备降凝驱油微乳液时两种表面活性剂最佳物质的量比。

2.1.2 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB})$ 的确定

表 1 为不同 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB})$ 制备的降凝驱油微乳液的平均粒径。

表 1 不同 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB})$ 制备的微乳液的平均粒径

Table 1 Average particle size of microemulsions prepared with different $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB})$

$m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB})$	平均粒径/nm
1 : 40	43.67
1 : 30	54.21
1 : 20	66.42
1 : 10	83.64
1 : 8	138.83
1 : 6	189.15
1 : 4	331.17
1 : 3	—
1 : 2	—

注：“—”代表溶液分相,无法准确检测粒径分布。

从表 1 可以看出,当 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB}) \leq 1 : 10$ 时,制备的降凝驱油微乳液静置 48 h 后平均粒径 < 100 nm,溶液保持均一透明稳定;当 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB}) > 1 : 4$ 后,制备的降凝驱油微乳液静置 48 h 后出现油水相;当 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB})$ 在 1 : 8 和 1 : 6 时,制备的降凝驱油微乳液平均粒径 > 100 nm。因此,确定 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC+OTAB})=1 : 10$ 制备的降凝驱油微乳液 (微乳液-1) 进行后续研究。

图 2 为根据上述比例制备的微乳液-1 (质量浓度为 200 g/L) 在 25 °C 下的粒径测试结果。

从图 2 和表 1 和表 1 可以看出,微乳液平均粒径为 83.64 nm,且粒径分布相对较窄。

2.2 降凝驱油微乳液乳化增溶性能分析

图 3 为微乳液-1 对 C79 井、C313 井、C811 井脱水原油乳化增溶相态实验的实物图。

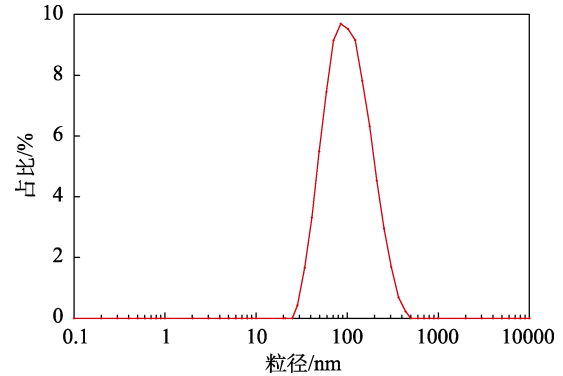


图 2 微乳液-1 的粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curve of microemulsion-1

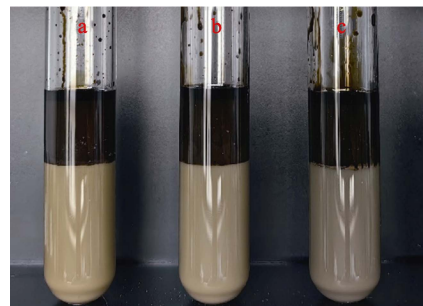


图 3 微乳液-1 对 C79 井 (a)、C313 井 (b)、C811 井 (c) 脱水原油乳化增溶相态实验的实物图

Fig. 3 Physical images of dehydrated crude oil from wells C79 (a), C313 (b) and C811 (c) after emulsifying and solubilizing with microemulsion-1

从图 3 可以看出,相平衡后,质量浓度 5 g/L 的微乳液-1 对三口井的脱水原油均有良好的乳化能力,能够形成稳定的乳液,从乳化后剩余原油的体积可以看出,微乳液对原油具有良好的增溶效果。

2.3 原油增溶前后的组分分析

图 4 为 C811 井的原油样品以及其被微乳液-1 增溶后残余油样品的部分脂肪烃相对含量测定结果。

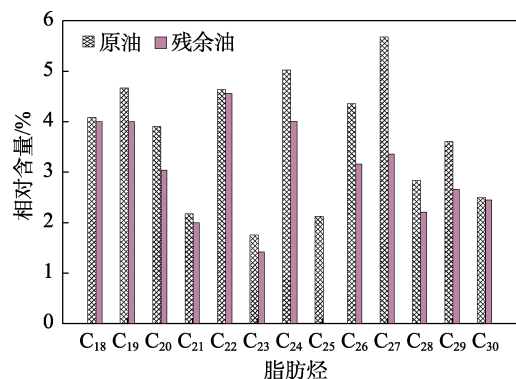


图 4 C811 井的原油以及其被微乳液-1 增溶后残余油的部分脂肪烃相对含量

Fig. 4 Relative content of some aliphatic hydrocarbons in crude oil from well C811 and residual oil after solubilizing with microemulsion-1

从图 4 可以看出,经微乳液-1 增溶后,残余油

中 $C_{18}\sim C_{30}$ 的脂肪烃的相对含量相较于初始原油有了明显降低,表明降凝驱油微乳液在增溶原油过程中,对长链烷烃($C_{18}\sim C_{30}$ 的脂肪烃)的增溶效果较短链烷烃更强,可以有效降低残余原油中的重质组分的相对含量。

2.4 微乳液的降凝性能分析

图5为C79井、C313井、C811井的原油及其被微乳液-1增溶后残余油的凝固点测试结果。

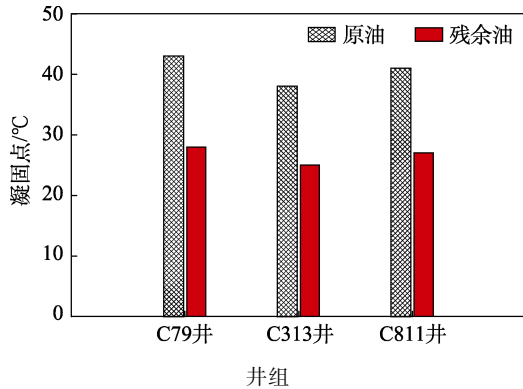


图5 C79井、C313井、C811井原油增溶前后的凝固点
Fig. 5 Freezing point of crude oil from wells C79, C313, C811 before and after solubilizing

从图5可以看出,经微乳液-1增溶后,残余油的凝固点均有一定程度的降低。其中,C79井原油的平均凝固点为43℃,增溶后残余油的平均凝固点为28℃,降凝率为34.88%;C313井原油的平均凝固点为38℃,增溶后残余油的平均凝固点为25℃,降凝率为34.21%;C811井原油的平均凝固点为41℃,增溶后残余油的平均凝固点为27℃,降凝率为34.15%,3种原油凝固点平均降低34%以上,表明微乳液-1对目标油藏区块三口油井原油均具有良好的降凝性能。这是因为,微乳液-1中的降凝剂能够抑制或延缓蜡晶的形成与生长,从而降低其凝固点。微乳液-1对原油的降凝性能也优于已发表文献报道的结果,例如:采用降凝剂、降黏剂、溶蜡剂、表面活性剂等制备的化学剂产品,对河南井楼油田的浅薄层高凝稠油油藏的最大降凝率为20.1%^[23];采用微生物与化学驱组合的方式,对辽河油田S84块高含蜡、高凝点油藏处理后的原油降凝率为10%~14%^[24]。

2.5 微乳液界面性能分析

图6为微乳液-1水溶液与C79井、C313井、C811井原油的界面张力随着时间的变化。

从图6可看出,微乳液-1与原油的界面张力均能在10min以内达到超低,即 1×10^{-3} mN/m数量级,并最终稳定在 6×10^{-3} mN/m左右,说明微乳液-1具备显著降低目标油水界面张力的能力,具有较高界面性能。

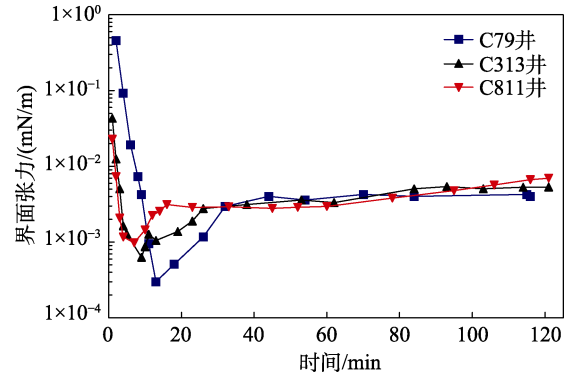


图6 微乳液-1水溶液与C79井、C313井、C811井原油的界面张力随着时间的变化

Fig. 6 Change of interfacial tension between microemulsion-1 aqueous solution and crude oil from wells C79, C313 and C811 with time

2.6 驱油性能分析

表2为人造岩心物模实验结果。

表2 人造岩心物模实验结果

Table 2 Results of core flood experiments in artificial cores

人造岩心	微乳液-1质量浓度/(g/L)	水驱采收率/%	累计采收率/%	采收率提高/%
空白	0	56.1	56.5	0.4
1#	1	55.0	60.1	5.1
2#	2	51.7	59.6	7.9
3#	5	50.3	62.4	12.1
4#	10	53.9	68.8	14.9

从表2可以看出,1#~4#人造岩心的一次水驱采收率平均为52.7%,低于空白样品的56.1%;1#~4#人造岩心的累计采收率平均为62.7%,高于空白样品的56.5%。1#~4#人造岩心的采收率提高平均为10.0%,远高于空白样品的0.4%。并呈现微乳液-1质量浓度(1、2、5、10 g/L)越大,采收率提升程度越高的趋势,其中注入0.2 PV质量浓度5 g/L的降凝驱油微乳液可提高原油采收率12.1%。这主要因为,降凝驱油微乳液具有降凝能力和增溶能力,特别是对原油中重质组分的增溶能力可有效动用岩心中难以被水驱启动的原油,同时其高界面性能进一步促进了在驱替过程中的原油采出。

2.7 现场试验

图7为现场试验期间日产油量和含水率结果。

从图7可以看出,随着微乳液-1的注入,井组平均日油产明显上升,从试验前的井组平均日油4.5 t,增加至最高,日油7.7 t(2023年6月1日);综合含水率(质量分数,下同)明显下降,从试验前井组平均综合含水率的94.8%,最低降至89.1%(2023年3月16日),表明微乳液-1在现场试验中,对高含蜡、高凝点油藏可以起到降水增油的效果。

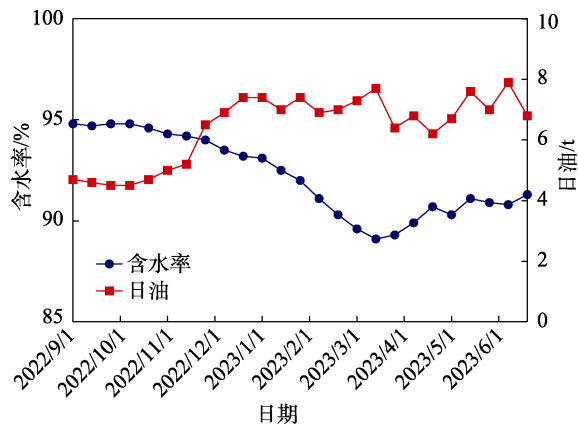


图 7 试验井组生产曲线
Fig. 7 Production curve of testing wells

3 结论

利用阴离子表面活性剂 (SEC) 和阳离子表面活性剂 (OTAB) 复配体系、降凝剂 RD 5120T 制备了一种可以提高高凝点油藏采收率的降凝驱油微乳液 (微乳液-1)。

(1) 微乳液-1 的最佳表面活性剂复配比例为 $n(\text{SEC}) : n(\text{OTAB}) = 7 : 3$, 最佳降凝剂加入比例为 $m(\text{RD 5120T}) : m(\text{SEC} + \text{OTAB}) = 1 : 10$ 。制备的微乳液-1 的平均粒径为 83.64 nm。

(2) 微乳液-1 对高凝原油展现出良好的降凝性能, 3 种原油凝固点平均降低 34% 以上; 具有良好的乳化增溶原油能力, 特别是对原油中的长链脂肪烃 ($\text{C}_{18} \sim \text{C}_{30}$) 增溶能力更强; 具有超高界面活性, 可将原油与水的界面张力稳定在 $6 \times 10^{-3} \text{ mN/m}$ 。

(3) 物模实验中, 注入 0.2 PV 质量浓度 5 g/L 的降凝驱油微乳液可提高原油采收率 12.1%; 现场试验中, 微乳液-1 可对高含蜡、高凝点油藏起到降水增油的效果, 平均综合含水率从 94.8% 最低降至 89.1%, 平均日油从 4.5 t 最高提升至 7.7 t。

本文以高增溶能力表面活性剂+降凝剂的组合方式制备了降凝驱油微乳液, 其对高含蜡、高凝点油藏可以起到降水增油的效果, 可以为高凝油化学驱用化学剂的设计提供新的思路。

参考文献:

- [1] MA Z F, ZHANG K, ZHAO M J, *et al.* Development and application of efficient oil displacement system for middle-low permeability and high pour-point heavy oil reservoirs[J]. Complexity, 2021, 2021(4): 1-10.
- [2] XIE W Y (谢文彦), LI X G (李晓光), CHEN Z Y (陈振岩), *et al.* Review of exploration and development technologies for heavy oil and high pour-point oil in Liaohe oil region[J]. Acta Petrolei Sinica (石油学报), 2007, 28(4): 145-150.
- [3] GAO M, SONG K P, WANG Q, *et al.* Waterflooding strategy for a reservoir containing a high pour point oil[J]. Petroleum Science and Technology, 2016, 34(13): 1157-1163.
- [4] CUI C Z (崔传智), LIU L J (刘力军), LI Z T (李志涛), *et al.* Impact of wax deposition on development of high pour-point reservoirs[J].

- Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) (中国石油大学学报: 自然科学版), 2017, 41(3): 98-104.
- [5] YAO K (姚凯), JIANG H Q (姜汉桥), DANG L M (党龙梅), *et al.* Mechanism of cooling damage to high pour-point oil reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) (中国石油大学学报: 自然科学版), 2009, 33(3): 95-98.
- [6] LIAO C L (廖长霖), WU X H (吴向红), WANG Y X (王喻雄), *et al.* Study on reservoir cold damage mechanism of high pour point oil reservoir in Southern Sultan[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition) (西安石油大学学报: 自然科学版), 2016, 31(4): 64-68.
- [7] LIU J L (刘家林), XUE Y (薛莹), QI X Y (齐先有), *et al.* Oil change characteristics in later stage of water injection development for high pour point oil in Shen84-An12 block[J]. Special Oil & Gas Reservoirs (特种油气藏), 2017, 24(4): 136-141.
- [8] SONG Y L (宋迎米), LI M H (李明辉). Chemicals for surface uses in Liaohe oil fields: Status and tendency[J]. Oilfield Chemistry (油田化学), 1995, 12(2): 185-187.
- [9] WEN J (温静), XIAO C M (肖传敏), GUO F (郭斐), *et al.* Laboratory test of microbial chemical compound flooding to enhance recovery efficiency of high condensate oil reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs (特种油气藏), 2023, 30(1): 87-92.
- [10] WEN J (温静), XIAO C M (肖传敏), GUO F (郭斐), *et al.* Experimental research on microbial flooding technology for enhancing oil recovery in high-pour-point reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs (特种油气藏), 2020, 27(6): 127-132.
- [11] WANG X T (王小通), XIANG L B (向龙斌), ZHANG Y X (张艺馨), *et al.* Microorganism preparation and application evaluation on microbial enhanced high-pour point oil recovery in Liaohe Oilfield[J]. Lithologic Reservoirs (岩性油气藏), 2017, 29(5): 162-168.
- [12] FANG L, ZHANG X D, MA J H, *et al.* Investigation into a pour point depressant for Shengli crude oil[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(36): 11605-11612.
- [13] WEI L X (魏立新), SONG Y (宋洋), GENG X H (耿孝恒), *et al.* Research progress and development trend of pour point depressant for crude oil[J]. Modern Chemical Industry (现代化工), 2021, 41(3): 26-30, 35.
- [14] ZHENG B R (郑斌茹), MAO G L (毛国梁), LIU Z H (刘振华), *et al.* Research progress in the mechanism and molecular design of pour point depressants[J]. Petrochemical Technology (石油化工), 2017, 46(6): 801-809.
- [15] SUN Z N (孙征楠), LI H J (李洪晶), JIN G L (荆国林), *et al.* Application of EVA and its modified polymer in crude oil pour point depressant field[J]. Chemical Industry and Engineering Progress (化工进展), 2023, 42(6): 2987-2998.
- [16] ZHENG Y C (郑延成), LI W C Z (李卫晨子), HOU L L (侯玲玲), *et al.* Study on synthesis and complexing properties of depressant for high pour point crude oil[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas (石油与天然气化工), 2012, 41(1): 70-73, 89, 122.
- [17] LIU J C (刘金成), WANG S H (王斯哈), CHEN Q (陈谦), *et al.* Research progress on ethylene-methyl acrylate copolymer[J]. Modern Chemical Industry (现代化工), 2021, 41(3): 79-82.
- [18] MAO J C, KANG Z, YANG X J, *et al.* Synthesis and performance evaluation of a nanocomposite pour-point depressant and viscosity reducer for high-pour-point heavy oil[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(7): 7965-7973.
- [19] XIA X (夏雪), YANG F (杨飞), LI C X (李传宪), *et al.* Research progress of polymer/micro-nano composite pour point depressant for waxy crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section) (石油学报: 石油加工), 2022, 38(2): 436-448.
- [20] BERA A, MANDAL A. Microemulsions: A novel approach to enhanced oil recovery: A review[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2015, 5(3): 255-268.
- [21] LI Y C (李应成), BAO X N (鲍新宁), ZHANG W D (张卫东), *et al.* Research progress of surfactants for enhanced oil recovery at home and abroad[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2020, 37(4): 649-656, 664.
- [22] SONG C L (宋春丽), XU H J (许虎君), LUO Q Z (罗强章). Synthesis and properties of long chain fatty alcohol polyoxyethylene ether propionate[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2013, 30(5): 505-509.
- [23] ZHANG Z H (张振华), SUN R Y (孙瑞云), YIN F S (殷付栓), *et al.* Research on the technology of reducing pour point and flooding shallow thin layer high pour point heavy oil[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering (油气田地面工程), 2009, 28(2): 5-7.
- [24] GUO F (郭斐). Study on combined EOR technology of microbial + chemical flooding in high pour-point oil reservoirs[J]. Contemporary Chemical Industry (当代化工), 2023, 52(4): 989-992.