

不同浓度烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系 界面及乳化规律

郭珂珂, 吴军政, 吴景春, 高 风, 余 欣, 赵 阳*

(东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163000)

摘要:为克服碱驱地层伤害与结垢, 构建了烷基苯磺酸盐无碱三元复合驱体系。研究发现, 其乳化稳定性由表面活性剂本征结构及界面吸附能力决定, 与界面张力无关。正交实验表明, 增黏能力影响主次为聚合物浓度>NaCl 浓度>表面活性剂浓度; 析水率影响为表面活性剂浓度>NaCl 浓度>聚合物浓度。当表面活性剂质量分数为 0.3%、NaCl 质量分数为 1.2%、聚合物质量浓度为 1 800 mg/L 时可实现超低界面张力、高乳化黏度及低析水率。岩心驱替证实, 化学驱阶段采收率增幅 30.14%, 总采收率 67.50%, 优于石油磺酸盐弱碱体系。

关键词:烷基苯磺酸盐; 无碱三元复合体系; 乳化特性; 界面张力; 析水率

中图分类号: TE357

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0226-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.037

Interfacial activity and emulsification behavior of alkylbenzene sulfonate-based alkali-free ternary composite systems at different concentrations

GUO Ke-ke, WU Jun-zheng, WU Jing-chun, GAO Feng, YU Xin, ZHAO Yang*

(Key Laboratory of Enhanced Oil & Gas Recovery (Ministry of Education), Northeast Petroleum University,
Daqing 163000, China)

Abstract: To overcome formation damage and scaling caused by alkali flooding, an alkali-free ternary composite flooding system based on alkylbenzene sulfonate was developed. It was found that the emulsion stability is governed by the intrinsic structure of the surfactant and its interfacial adsorption ability, rather than by interfacial tension. Orthogonal experiments indicated that the order of influence on viscosity-enhancing ability is polymer concentration > NaCl concentration > surfactant concentration, while for water separation rate the order is surfactant concentration > NaCl concentration > polymer concentration. Ultra-low interfacial tension, high emulsion viscosity, and low water separation rate were achieved at a surfactant mass fraction of 0.3%, a NaCl mass fraction of 1.2% and polymer mass concentration of 1800 mg/L. Core flooding tests confirmed that the chemical flooding stage yielded an incremental oil recovery of 30.14% and a total recovery of 67.50%, outperforming the petroleum sulfonate weak-alkali system.

Key words: alkylbenzene sulfonate; alkali-free ternary composite system; emulsification characteristics; interfacial tension; water separation rate

随着油田开发进入高含水后期, 以表面活性剂、碱和聚合物为核心的三元复合驱技术已成为提高原油采收率的关键手段^[1-3]。目前, 已实现规模化应用的三元复合驱油技术体系主要包括以下几类: 烷基苯磺酸盐强碱驱油技术^[4-5]、石油磺酸盐弱碱驱油技术^[6-8]、脂肽复配弱碱驱油技术^[9-12]以及组分可控烷基苯磺酸盐弱碱驱油技术^[13-14]。传统的强碱/弱碱三元体系虽能通过碱与原油酸性组分反应生成石油皂, 协同降低油水界面张力, 但也带来了聚合物化学降解、地层结垢伤害及采出液处理困难等一系列问题^[15]。因此, 发展高效、低伤害的无碱三元复合驱油体系成为该领域的重要研究方向^[16-17]。

无碱体系的核心挑战在于, 在缺乏碱的化学协

同作用下, 如何仅通过表面活性剂复配和调控实现超低界面张力与稳定的乳化携带能力。烷基苯磺酸盐作为一种结构可控的合成表面活性剂, 原料来源广泛、成本低廉^[18], 是我国化学驱油中最常用表面活性剂, 其界面活性与乳化行为对配方组成极为敏感。但是目前关于各化学药剂(表面活性剂、电解质、聚合物)浓度对无碱体系界面特性与乳化规律^[17]的协同影响机制, 尚缺乏系统深入的研究。

为此, 本研究以实验室合成的烷基苯磺酸盐为基础, 构建了烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系, 旨在达成以下目标: 系统评价其界面张力、乳化增黏及稳定性, 并传统石油磺酸盐弱碱体系对比, 明确其性能优势与特征; 通过正交实验设计, 明确表面活性

收稿日期: 2026-03-12; 修回日期: 2026-06-16

作者简介: 郭珂珂(2001-), 女, 硕士生, 3104473135@qq.com; 赵阳(1987-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为提高采收率原理与技术, 通讯联系人, dqzy0683@163.com。

剂、NaCl 及聚合物浓度对各项性能指标的影响主次顺序与内在机理,确定实现最佳驱油效果的综合优化配方;通过室内岩心驱替实验,明确烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系的驱油效率,并通过与传统石油磺酸盐弱碱体系对比,体现其驱油效率的优越性。

1 实验部分

1.1 实验试剂与测试设备

实验所用的十八烷基二甲苯磺酸盐为实验室室内合成,有效物含量 50%;烷基醇聚氧乙烯醚聚氧丙烯类表面活性剂(E 表面活性剂),实验室合成,有效物含量 20%;DS800 低分聚合物,有效物含量 90%,大庆炼化公司产品;石油磺酸盐,有效物含量 40%,大庆炼化公司;氯化钠,分析纯,天津市大茂化学试剂产品厂;碳酸钠,分析纯,天津市大茂化学试剂产品厂;实验用油为大庆油田某区块脱水脱气原油;实验用水:大庆油田某区块注入站处理污水,具体离子组成见表 1;三氯甲烷,分析纯,天津市科密欧试剂有限公司;混合指示剂,主要成分为溴化二磷酸二钠蓝色指示剂,英国 BDH 实验室;硫酸,分析纯,天津市大茂化学试剂厂;海明、氯化苈苏脲,天津市大茂化学试剂厂。岩心:贝雷砂岩,规格为 45 mm×45 mm×300 mm。

表 1 大庆油田某区块深度处理注入污水矿化度 (总矿化度 640.41 mg/L)

Na ₂ CO ₃ /	NaCl/	NaHCO ₃ /	CaCl ₂ /	MgCl ₂ ·6H ₂ O/	KCl/
(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)
56.94	173.5	460.3	5.594	32.98	3.35

实验设备:TX-500C 旋转滴界面张力仪,上海中晨数字技术科技有限公司;布氏黏度计,美国 Brookfield 公司;数显电子式搅拌机,海安石油机械有限公司;自制旋转混合仪,华宝石油科技有限公司;磁力搅拌器,南通中京机械有限公司;恒温箱,美国 CNG ENTERPRISE LIMITED 公司。

1.2 界面张力测定

首先将烷基苯磺酸盐表面活性剂、E 表面活性剂(复配比 1:1)、NaCl 与 DS800 按一定比例配制成烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系,将石油磺酸盐、碳酸钠与 DS800 按一定比例配制石油磺酸盐弱碱体系;之后采用 TX-500C 旋转滴界面张力仪,用旋转滴法分别测定系列烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系、石油磺酸盐弱碱体系与原油之间的界面张力。

1.3 原油乳状液的制备

实验在 62℃ 恒温条件下进行,首先将脱水脱气原油分别与烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系、石油磺酸盐弱碱体系按 1:1 体积比混合,随后使用均化仪在 700 r/min 的转速下搅拌 2 min 进行均质乳化,制备得到原油乳状液后即时测定所得乳状液的黏度。

1.4 乳状液黏度及乳化析水率分析

静置并监测体系的分层过程,定时测量下层析出液的体积,据此计算乳化析水率。分层稳定后,采集下层析出液进行黏度测定。乳状液黏度可以用于评估体系的乳化增黏能力,而析水率则直接表征驱油体系与原油之间形成乳状液的稳定性^[18]。析水率(φ ,%)为乳状液在某时刻累计析出水的体积与配制乳状液时所用总水相总体积之比,如式(1)所示。

$$\varphi = (V_t/V_0) \times 100\% \tag{1}$$

式中: V_t 为在 t 时刻乳状液累计析出水相的体积, mL; V_0 为配制乳状液所用总水相的总体积, mL。

1.5 岩心驱替实验

贝雷岩心经真空抽提后,首先饱和模拟地层水并测定水相渗透率,模拟水配方见表 2;随后饱和模拟油,在恒温条件下老化 72 h,据此计算岩心初始含油饱和度。接着进行水驱,直至出口端含水率达到 98.0% 以上;继而依次注入三元体系主段塞及聚合物保护段塞,后续继续水驱至含水率再次达到 98.0% 以上。整个驱替实验在 62℃ 条件下进行,驱替速度设定为 0.3 mL/min。

表 2 模拟地层水配方表 (12 085.37 mg/L)

Na ₂ CO ₃ /	NaCl/	NaHCO ₃ /	CaCl ₂ /	MgCl ₂ ·6H ₂ O/	Na ₂ SO ₄ /
(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)	(mg·L ⁻¹)
350.67	92370	2509	30.5	30.47	10.64

2 结果与讨论

2.1 不同驱油体系配方的影响

受地层吸附滞留影响,驱油体系在地层运移过程中各化学药剂浓度会按照一定的规律下降,发生色谱分离现象^[19-20]。为此,为烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系分别设计了 5 种驱油体系配方,具体数据见表 3。5 种驱油体系配方按照化学剂质量浓度进行设计后开展与原油之间的界面张力测定实验。为清晰评估烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系的性能,并为其界面与乳化特性提供参照基准,本研究同步开展了石油磺酸盐弱碱体系与原油的对比实验。石油磺酸盐弱碱体系对应的 5 种驱油体系配方见表 4。

表3 烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系的5种驱油体系配方

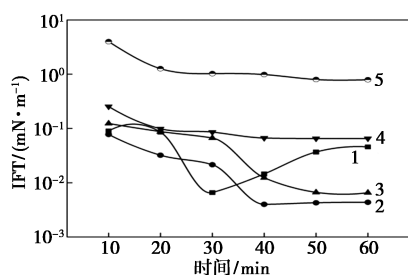
编号	表面活性剂 浓度 S/%	NaCl 浓度/ %	聚合物浓度 P/ (mg·L ⁻¹)
体系1	0.50	1.6	2100
体系2	0.30	1.2	1800
体系3	0.20	0.6	1200
体系4	0.10	0.4	1100
体系5	0.05	0.3	800

表4 石油磺酸盐弱碱三元复合体系的5种驱油体系配方

编号	表面活性剂 浓度 S/%	Na ₂ CO ₃ 浓度/%	聚合物浓度 P/ (mg·L ⁻¹)
体系6	0.50	1.6	2100
体系7	0.30	1.2	1800
体系8	0.20	0.6	1200
体系9	0.10	0.4	1100
体系10	0.05	0.3	800

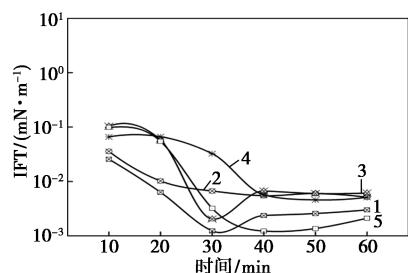
2.1.1 不同驱油体系配方对界面张力的影响

2个体系分别5种驱油体系配方配制好后分别与目标区块原油测定界面张力,分析不同驱油体系配方对界面张力的影响,结果见图1。



1—体系1;2—体系2;3—体系3;4—体系4;5—体系5

(a) 烷基苯磺酸盐无碱体系驱油配方界面张力



1—体系6;2—体系7;3—体系8;4—体系9;5—体系10

(b) 石油磺酸盐弱碱体系驱油配方界面张力

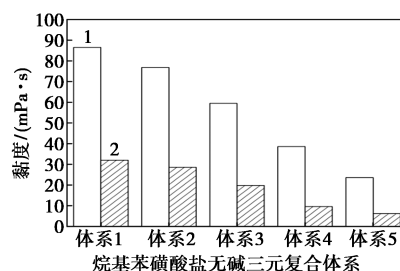
图1 不同配方驱油体系界面张力对比

从图1可以看出烷基苯磺酸盐无碱体系的5种驱油体系配方中,体系2、3可以达到超低界面张力,而体系1、4和体系5不能达到超低界面张力,而石油磺酸盐弱碱体系的5种驱油体系全部可以达到超低界面张力。这说明烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系的表面活性剂活性范围不如石油磺酸盐弱碱体

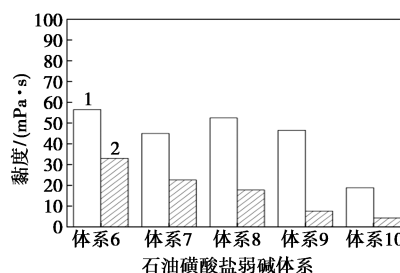
系,其主要原因在于烷基苯磺酸盐无碱体系由于缺乏碱的化学协同,其降低界面张力的能力高度依赖于表面活性剂分子结构与原油组分的精确匹配,因此仅在一个相对狭窄的浓度窗口内有效。而石油磺酸盐是由原油馏分油磺化制得的混合物,其中丰富的未磺化油作为内源性油相组分,依据“相似相溶”原理更易渗入并作用于原油界面,加之其宽馏分特性能够匹配原油中多样组分。碱与原油中的酸性组分反应生成石油皂,与外加表面活性剂产生协同,大幅提升了界面活性,因此能在较宽浓度范围实现超低界面张力。

2.1.2 不同驱油体系配方对乳状液黏度的影响

为分析不同配方对乳状液增黏效果的影响,实验测定了5种驱油体系与原油乳化后所得乳状液及其静置分层下层析出液的黏度。通过对比烷基苯磺酸盐无碱与石油磺酸盐弱碱2种三元体系的乳化黏度数据(图2),进一步明确了体系差异。



(a) 烷基苯磺酸盐无碱体系驱油配方乳状液及下层析出液黏度



(b) 石油磺酸盐弱碱体系驱油配方乳状液及下层析出液黏度

1—乳状液;2—下层析出液

图2 不同配方驱油体系乳状液及下层析出液黏度对比

由图2可以看出,在烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系下,5种配方的乳状液黏度和下层析出液黏度均随化学药剂浓度的下降而降低;同配方下乳状液黏度大幅高于下层析出液,且下层析出液黏度越低,乳状液黏度增幅倍数越大,表明该体系与原油乳化后具有较好的乳化增黏能力,且浓度依赖显著。相较于无碱体系,石油磺酸盐弱碱三元体系在相同配方下乳状液黏度增幅较小。其机理在于:无碱体

系能形成小尺寸且静电稳定的 O/W 型乳状液,其黏度主要受液滴相互作用产生的结构黏度主导。随着化学药剂浓度降低,界面膜强度与连续相黏度协同下降,导致体系整体流变性减弱。而石油磺酸盐弱碱体系因碱引发的复杂界面组成及电荷环境,其乳状液的结构黏度贡献相对较低,故增黏幅度较小。这揭示出无碱体系依靠表面活性剂本征界面性质构建结构黏度的独特机制。

2.1.3 不同驱油体系配方对乳状液析水率的影响

将 2 种体系各 5 种驱油体系与原油乳化形成的乳状液转入刻度量筒中,静置监测并记录其析水率,结果见图 3。

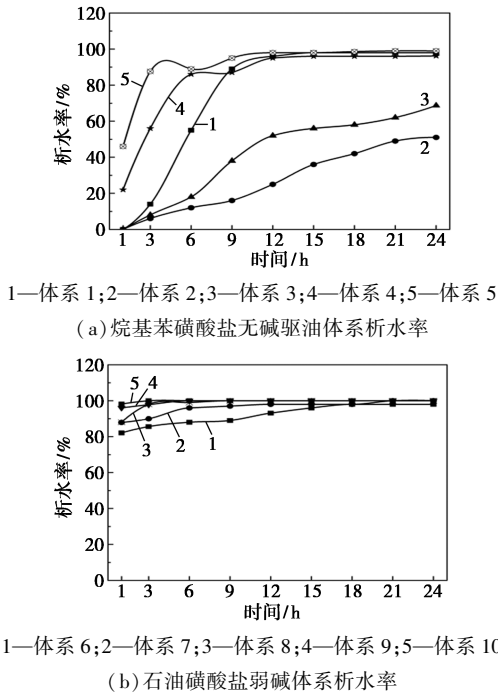


图 3 不同配方驱油体系析水率变化曲线

从图 3 中可以看出,烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系与原油形成的乳状液析水率随着时间的增加而增大,但表面活性剂浓度不同其变化幅度也不同。在表面活性剂浓度过低或过高时乳化析水率迅速增大,而另两种配方下乳化析水率较低,在表面活性剂浓度为 0.3% 时,达到最低。而石油磺酸盐弱碱三元复合体系析水率在 5 个驱油配方下都很高。由此可以得出,烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系只有在合适的表面活性剂浓度下,才能表现出较好的乳化特性,浓度过低或过高均会破坏乳液稳定性。

2.2 化学药剂浓度的影响

为探究关键组分浓度对烷基苯磺酸盐无碱三元体系的影响规律与机理,本研究采用正交实验设计法,以表面活性剂、氯化钠(NaCl)及聚合物的浓度

作为考察因素,各设置三个水平、三因素的 9 组正交实验^[21-22],旨在分析各因素及其交互作用对体系与原油间的界面张力、黏度及乳化析水率的影响。实验因素与水平设计见表 5。

表 5 正交试验因素水平表

因素	A(表面活性剂 浓度 S)/%	B(NaCl 浓度)/ %	C(聚合物浓度 P)/ (mg·L ⁻¹)
水平			
1	0.5	1.6	2100
2	0.3	1.2	1800
3	0.1	0.4	1100

2.2.1 化学药剂浓度对界面张力的影响

不同配方的烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系与原油之间的瞬时最低界面张力见表 6。

表 6 9 种试验配方下与原油的瞬时界面张力

编号	A	B	C	体系配方	瞬时最低界面 张力/(mN·m ⁻¹)
1 [#]	1	1	1	0.5% S+1.6% NaCl+2100P	0.01450
2 [#]	1	2	2	0.5% S+1.2% NaCl+1800P	0.06548
3 [#]	1	3	3	0.5% S+0.4% NaCl+1100P	0.89542
4 [#]	2	1	2	0.3% S+1.6% NaCl+1800P	0.00365
5 [#]	2	3	1	0.3% S+0.4% NaCl+2100P	0.98784
6 [#]	2	2	3	0.3% S+1.2% NaCl+1100P	0.00874
7 [#]	3	2	1	0.1% S+1.2% NaCl+2100P	0.03546
8 [#]	3	3	2	0.1% S+0.4% NaCl+1800P	0.06589
9 [#]	3	1	3	0.1% S+1.6% NaCl+1100P	0.03226

基于对烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系与原油间瞬时界面张力的正交实验分析(因素包括表面活性剂浓度 A、NaCl 浓度 B 及聚合物浓度 C),见表 7。结果表明,各因素对界面张力的影响程度存在显著差异,其主次顺序为 NaCl 浓度(B)>表面活性剂浓度(A)>聚合物浓度(C)。

表 7 正交实验中与原油的瞬时界面张力分析

平均值	瞬时界面张力/(mN·m ⁻¹)		
	A	B	C
$k_1(K_1/3)$	0.33	0.02	0.35
$k_2(K_2/3)$	0.33	0.04	0.05
$k_3(K_3/3)$	0.04	0.65	0.31
R	0.018	0.0855	0.0177

注:A 为表面活性剂浓度(%);B 为 NaCl 浓度(%);C 为聚合物浓度(mg/L); K_i 为因子下三水平数据的和; k_i 为在因子 $i(i=1,2,3)$ 下 3 水平数据的平均值;R 为极差。

极差分析表明,因素 B(NaCl 浓度)的极差最大,是调控界面行为的最关键因素,且存在最佳浓度窗口(水平 2)。适当的 Na⁺能有效压缩扩散双电层,促使表面活性剂分子在油水界面紧密排列,从而

显著降低界面张力。当盐度过低则界面膜因静电力而松散;过高时则会引发盐析效应^[23],导致表面活性剂脱附,界面张力急剧上升。因素 A(表面活性剂浓度)在相对较高水平的水平 2、3 表现较优,原因在于浓度较低时界面吸附未饱和,无法形成致密的单分子膜,只有达到一定的浓度时才能实现近饱和和吸附,形成致密的界面膜。因素 C(聚合物浓度)的影响相对较弱。综上,为实现超低瞬时界面张力,该体系的理论最优配方组合为 $A_2B_2C_2$,即较适中的表面活性剂、NaCl 与中等的聚合物浓度组合。

2.2.2 化学药剂浓度对乳化特性的影响

不同配方的烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系与原油之间的乳化特性见表 8。

表 8 9 种实验配方制备的乳状液黏度及析水率

编号	A	B	C	体系配方	乳状液黏度/ (mPa·s)	下层析出液黏度/ (mPa·s)	乳状液黏度/下层析出液黏度	24 h 析水率/%
1 [#]	1	1	1	0.5% S+1.6% NaCl+2100P	86.5	32.20	2.69	98
2 [#]	1	2	2	0.5% S+1.2% NaCl+1800P	35.7	12.50	2.86	93
3 [#]	1	3	3	0.5% S+0.4% NaCl+1100P	30.2	15.60	1.93	98
4 [#]	2	1	2	0.3% S+1.6% NaCl+1800P	25.3	12.10	2.09	53
5 [#]	2	3	1	0.3% S+0.4% NaCl+2100P	90.2	34.50	2.61	100
6 [#]	2	2	3	0.3% S+1.2% NaCl+1100P	10.8	1.23	8.78	60
7 [#]	3	2	1	0.1% S+1.2% NaCl+2100P	33.5	13.30	2.52	99
8 [#]	3	3	2	0.1% S+0.4% NaCl+1800P	70.1	30.40	2.31	100
9 [#]	3	1	3	0.1% S+1.6% NaCl+1100P	8.2	1.10	7.5	100

根据表 9 的正交实验结果分析,烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系的乳化性能受表面活性剂浓度(A)、NaCl 浓度(B)及聚合物浓度(C)三因素的差异调控,且不同指标的主导因素各异:影响乳状液增黏的因素主次顺序为:聚合物>NaCl>表面活性剂;影响乳状液乳化析水率的因素由大到小顺序为:表面活性剂>NaCl>聚合物。

表 9 正交实验中与原油的黏度及析水率分析

平均值	乳状液黏度/下层析出液黏度			24 h 时析水率/%		
	A	B	C	A	B	C
$k_1(K_1/3)$	2.49	4.09	2.61	96.3	83.7	99
$k_2(K_2/3)$	4.49	4.72	2.49	71.0	84.0	82
$k_3(K_3/3)$	4.11	2.28	6.07	99.7	99.3	86
R	0.75	1.07	2.76	164.93	53.06	52.66

注:A 为表面活性剂浓度(%);B 为 NaCl 浓度(%);C 为聚合物浓度(mg/L); K_i 为因子下三水平数据的和; k_i 为在因子 $i(i=1,2,3)$ 下 3 个水平数据的平均值;R 为极差。

表面活性剂浓度是影响 24 h 析水率的主要因素,对乳化稳定性具有决定性影响。其作用机理在于:当表面活性剂浓度处于最佳范围(本实验中为 0.3%)时,分子在油水界面达到近饱和吸附,可形成致密且具有较高机械强度的单分子膜。这层界面膜能有效降低界面能,并作为物理屏障阻止液滴聚并,从而显著延缓相分离,获得较低的析水率。

NaCl 作为电解质,其浓度主要通过调节体系离子强度影响乳化行为。它是影响黏度比和析水率的次要因素,具有双重效应。适中的离子强度可适度压缩双电层,削弱液滴间的静电排斥力,有助于液滴的紧密排布。但过高则会过度压缩双电层,严重削弱静电稳定机制,导致液滴易于聚并,析水率升高;因此,NaCl 浓度的优化实质是寻找一个平衡点,在不严重破坏静电稳定的前提下协同其他组分实现适宜的界面状态。

聚合物是体系结构黏度的主导者,对乳状液与下层析出液的黏度比影响最大。高浓度聚合物通过分子链的缠结与空间网络结构大幅增加水相黏度^[24],直接提升乳状液的宏观黏度。这种增黏作用是体系获得高黏度比、实现乳化增黏的核心,但其对最终平衡析水率的直接影响弱于表面活性剂。

2.3 复合体系驱油效果

正交实验结果确定该体系最佳配方为:表面活性剂质量分数为 0.3%,NaCl 质量分数为 1.6%,聚合物质量浓度为 1 800 mg/L。以此配方开展室内岩心驱替实验,同时以石油磺酸盐弱碱体系为对照组,驱替实验结果如表 10。

表 10 不同复合体系驱油实验结果

体系	含油饱和度/%	水驱采收率/%	化学驱采收率/%	总采收率/%
烷基苯磺酸盐无碱三元体系	63.52	37.36	30.14	67.50
石油磺酸盐弱碱体系	65.34	36.07	20.52	56.59

室内岩心驱替实验结果表明(图 4),在初始条件相近的情况下,烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系采收率更高,为 67.50%,在化学驱阶段采收率达到 30.14%,明显优于弱碱体系的 20.52%。这一差异主要源于两者作用机理的不同:烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系凭借其优异的乳化能力,能形成稳定且高黏度的乳状液,这种强乳化-增黏特性不仅有助于原油的剥离与携带,更能有效控制流度比、扩大波及体积,从而实现更高的驱替效率;而石油磺酸盐弱碱体系虽然能大幅度降低界面张力,但其乳状液

稳定性较差,限制了其在扩大波及体系与稳定携油方面的综合效果。实验结果证实,烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系通过乳化与流控协同,在提高原油采收率方面具有显著潜力。

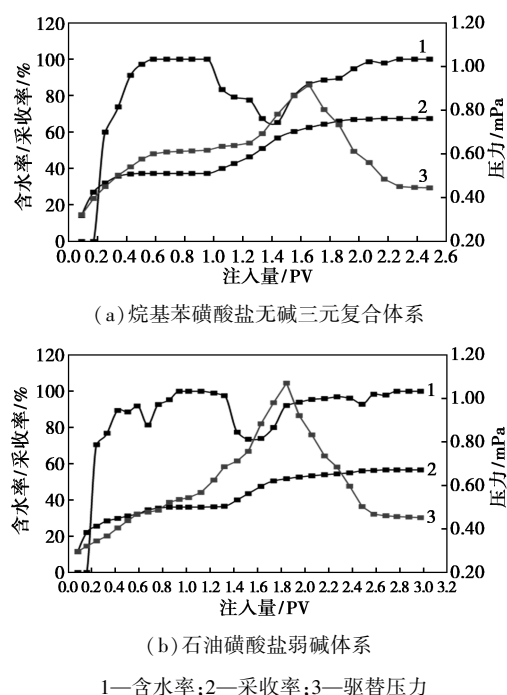


图4 两种复合体系岩心驱替动态曲线

3 结论

(1) 烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系乳化稳定性由表面活性剂本征结构主导。体系能与原油形成稳定乳状液,其乳化特性及较低析水率主要取决于表面活性剂分子在界面的吸附与成膜能力,与体系界面张力大小无直接关联。

(2) 各组分对乳化性能影响存在明确的主次关系与最优浓度。正交实验表明,对乳状液增黏的影响主次为:聚合物浓度>NaCl 浓度>表面活性剂浓度。对析水率的影响主次则为:表面活性剂浓度>NaCl 浓度>聚合物浓度。兼顾较低界面张力、高乳化黏度及低析水率的最优配方为:表面活性剂浓度为 0.3%、NaCl 浓度为 1.2%以及聚合物 1 800 mg/L。

(3) 烷基苯磺酸盐无碱三元复合体系在驱替过程中表现出了较强的提高采收率能力,在化学驱阶段获得了高达 30.14% 的采收率增幅,明显优于弱碱体系的 20.52%,较石油磺酸盐弱碱体系增加提高采收率达 9.62%。

参考文献

[1] 程杰成,张月先,包亚臣.烷基苯磺酸盐弱碱体系对油水界面张

- 力的影响[J].大庆石油学院学报,2004,(3):37-39,119-120.
- [2] 程杰成,吴军政,胡俊卿.三元复合驱提高原油采收率关键理论与技术[J].石油学报,2014,35(2):310-318.
- [3] 程杰成,王德民,李群等.大庆油田三元复合驱矿场试验动态特征[J].石油学报,2002,23(6):37-40.
- [4] 徐野.烷基苯磺酸盐配强碱三元注入体系监测方法的研究[J].石化技术,2018,25(5):66,69.
- [5] 程杰成,李伯林,包亚臣.烷基苯磺酸盐当量对强碱复合体系界面张力的影响[J].油气地面工程,2004,(5):6-7.
- [6] 李国桥,赵劲毅,朱光达,等.不同浓度组分可控烷基苯磺酸盐弱碱三元体系乳化规律[J].石油学报(石油加工),2022,38(4):929-938.
- [7] 曲奎奎,周桂英,朱友益,等.三次采油用烷基苯磺酸盐弱碱体系的研究[J].精细化工,2006,(1):82-85.
- [8] 杨勇,李晶.重烷基苯磺酸盐与石油磺酸盐复配弱碱体系性能研究[J].长江大学学报(自科版),2015,12(31):4,30-33.
- [9] 王俊杰.脂肽在复配体系中降低毛细管力及提高采收率作用研究[J].化学工程与装备,2025,(3):46-48,88.
- [10] 陈金凤.脂肽复配弱碱三元复合驱油体系性能及试验效果[J].大庆石油地质与开发,2020,39(5):91-97.
- [11] 邹爱华,邓雅晴,靳颖,等.十二烷基甜菜碱/脂肽复配体系与原油界面行为的研究[J].油田化学,2012,29(4):464-469.
- [12] 宋淑静.脂肽生物表面活性剂对三元体系粘度稳定性影响研究[J].化学工程与装备,2022,(1):17-18.
- [13] 张铭,李国桥.组分可控烷基苯磺酸盐弱碱三元复合体系性能[J].化学工程与装备,2024,(3):9-11,28.
- [14] 李国桥.组分可控烷基苯磺酸盐弱碱三元复合体系性能研究及现场试验[D].大庆:东北石油大学,2024.
- [15] 程杰成,王庆国,王俊,等.强碱三元复合驱钙、硅垢沉积模型及结垢预测[J].石油学报,2016,37(5):653-659.
- [16] Qing S, Li X. Research on key input and output points of ASP flooding and benefit outlook[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2015, 34(9):14-16.
- [17] 杨振宇,周浩,姜江,等.大庆油田复合驱用表面活性剂的性能及发展方向[J].精细化工,2005,(S1):22-23.
- [18] 丛娟,岳湘安,尤源,等.石油磺酸盐与原油乳化影响因素研究[J].油气地质与采收率,2010,17(5):46-49,114.
- [19] 孙远卓,孙琦,李国桥,等.组分可控烷基苯磺酸盐三元体系组分浓度对乳化影响研究:2019 油气田勘探与开发国际会议论文集[C].2019:3297-3304.
- [20] 隋希华,曹绪龙,王得顺,等.孤岛西区三元复合驱体系色谱分离效应研究[J].油气采收率技术,2000,(4):1-3.
- [21] Lin S, Zhao W, Li Y, et al. Synthesis of furan resin based on orthogonal design[J]. Foundry, 2011, 60(2):184-187.
- [22] Wang X, Zhang Y, Wu X, et al. Optimization of rosmarinic acid extraction from salvia pratti hems lby orthogonal test[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(11):7-10.
- [23] 刘雨鑫,田雨,钱致颖,等.一种新型多胺类甜菜碱表面活性剂的合成及二元复合驱性能评价[J].石油与天然气化工,2026,55(2):106-113.
- [24] 于斌,高胜旗,潘一,等.两亲聚合物驱油剂的作用机理及分类研究进展[J/OL].精细化工,1-18.[2026-06-16].https://link.cnki.net/urlid/21.1203.TQ.20250928.0947.002.■