

文章编号: 0253-2697(2006) 05-0096-03

界面张力特征对三元复合驱油效率影响的实验研究

李华斌¹ 陈中华²

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 四川成都 610500; 2. 西南油气田分公司勘探开发研究院 四川成都 610041)

摘要: 分别采用了油水平衡界面张力和瞬时动态界面张力为 1 mN/m、0.1 mN/m、0.01 mN/m 和 0.001 mN/m 的 4 种体系进行了岩心驱油试验。结果表明,在大庆油田三元复合驱中,油水动态界面张力最低值是影响驱油效果的重要因素,而不是平衡界面张力。动态界面张力最低值达到 0.01 mN/m 时,体系的驱油效果与界面张力平衡值达到 0.001 mN/m 时基本相同。因此,可以大幅度降低三元复合体系中碱的用量,甚至可以不用碱。此外,还可以降低对表面活性剂的苛刻要求,扩大表面活性剂的种类和范围。

关键词: 三元复合驱; 表面活性剂; 平衡界面张力; 动态界面张力; 岩心驱油实验; 驱油效率

中图分类号: T E 3 5 7 . 4 3

文献标识码: A

Characteristics of interfacial tension and oil displacement efficiency with alkaline-surfactant-polymer flooding technology

Li Huabin¹ Chen Zhonghua²

(1. State Key Laboratory for Oil-Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil-gas Field Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Four systems for dynamic and equilibrium interfacial tensions (IFT) with different IFT values of 1 mN/m, 0.1 mN/m, 0.01 mN/m and 0.001 mN/m in core oil displacement test were investigated. The results demonstrate that the dynamic interfacial tension is the key factor affecting oil recovery with alkaline-surfactant-polymer (ASP) flooding technology. The oil displacement efficiency for the minimum dynamic IFT value of 0.01 mN/m is almost equal to that for equilibrium IFT value of 0.001 mN/m. This conclusion implies that the alkalinity in ASP solutions could be decreased greatly or reduced to zero. Almost commercial surfactants could be used in ASP flooding technology.

Key words: alkaline-surfactant-polymer flooding technology; surfactant; equilibrium interfacial tension; dynamic interfacial tension; core oil displacement test; oil displacement efficiency

碱-表面活性剂-聚合物三元复合驱是一种可以提高波及效率和驱油效率的三次采油方法^[1-4]。已有的研究表明,复合驱的关键技术条件和指标是油水平衡界面张力必须达到 10^{-3} mN/m 超低值时^[1-3],才能提高采收率 20% 以上,而这一条件在实际应用中将出现两个问题:①表面活性剂的种类和来源受到了严格的限制;②为满足 10^{-3} mN/m 超低平衡界面张力而必须使用高浓度的化学碱,但高浓度碱剂的使用给复合驱技术带来了一系列的问题:①增加了聚合物的用量;②伤害储层孔隙结构,严重损害储层;③结垢严重,给采出工艺带来负担;④采出液乳化现象严重,地面集输及油水分离难度大^[2,5-6]。

1 界面张力特征与驱油效率实验

1.1 实验样品

聚合物为缔合聚合物 AP-P4, 表面活性剂 ORS-

41、TDY、MJ2、SDBS 以及 SAA-10 特性见表 1。实验中使用的油相为大庆模拟油,粘度(45℃)为 11.4 mPa·s。采用大庆石油学院提供的长度为 30 cm、直径

表 1 表面活性剂组成

Table 1 Compositions of surfactants used in laboratory

名 称	平均当量	活性物/ %	矿物油/ %	挥发份/ %	无机盐/ %
ORS-41	415	51.0	29.8	13.7	5.5
SAA-10	423	49.0	33.0	10.9	7.1
TDY	400	50.0	30.6	9.3	10.1
MJ2	434	49.8	30.7	10.9	8.6
SDBS	—	—	分析纯	—	—

为 3.8 cm 的人造岩心和油层天然岩心。所有实验均在 45℃(大庆油层温度)条件下进行,实验用水为实验室配制的大庆油田平均地层盐水,其组成分别为 NaCl、KCl、CaCl₂、MgCl₂·6H₂O、Na₂SO₄ 和 NaHCO₃。质量浓度分别为 2294 mg/L、13 mg/L、42 mg/L、172 mg/L、7

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB221302)“化学驱微生物驱提高采收率技术基础研究”部分成果。

作者简介: 李华斌,男,1964 年 10 月生,2005 年获西南石油学院应用化学博士学位,现在成都理工大学地质科学与工程博士后工作站从事提高采收率技术研究。E-mail: lihuab1111@163.com

mg/L 和 1 860 mg/L, 总矿化度为 4 456 mg/L。

1.2 实验仪器

由美国德州大学仪器公司生产的 500 型界面张力仪测定油水界面张力; 岩心驱替试验装置(岩心夹持器、中间容器、注入泵以及恒温箱) 由江苏海安石油仪器厂生产, 用美国 Brookfield-III⁺ 粘度计测定粘度。

1.3 实验方法

通过界面张力测定, 得到不同界面张力特征的表面活性剂驱油体系。利用这些不同的体系在相同的岩心上进行驱油效果评价。根据岩心驱替试验结果, 得出不同界面张力特征对应的采收率。

2 实验结果与分析

2.1 油水界面张力特征

研究结果表明, 随着时间的变化, 油水动态界面张力的变化特征大致分为 3 类。①油水界面张力始终低于 10^{-3} mN/m 的超低值; ②随着时间的延长, 油水界面张力一直保持在 10^{-3} mN/m; ③随着时间的变化, 界面张力先是逐渐降低到 10^{-3} mN/m 的超低值, 然后又逐渐上升到 10^{-2} mN/m 或 10^{-1} mN/m, 甚至更高。已有的研究表明^[1-2], 界面张力只有达到第 2 种情形, 体系才具有理想的驱油效果。

图 1 给出了上述几种表面活性剂的油水界面张力特征。可以看出, 6 个体系的瞬时动态界面张力特征有明显差异。对于 ORS-41/NaOH 体系来说, 在油水

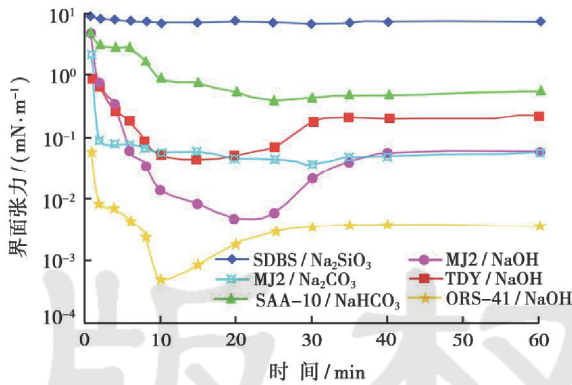


图 1 不同表面活性剂体系的油水界面张力
Fig. 1 Dynamic interfacial tension curves for different alkaline surfactant solutions

接触 4min 后, 界面张力就降低到了 7.8×10^{-3} mN/m; 10min 时降低到最低值 5.6×10^{-4} mN/m; 然后界面张力逐渐上升并达到平衡值为 3.7×10^{-3} mN/m。对于 MJ2/NaOH 体系来说, 变化趋势与前者相同, 最低界面张力值为 4.9×10^{-3} mN/m, 然后上升到 5.8×10^{-2} mN/m; 对于 MJ2/Na₂CO₃ 体系来说, 4 min 时界面张力达到了 9.7×10^{-2} mN/m, 然后缓慢下降到 $5.8 \times$

10^{-2} mN/m; 对于 TDY/NaOH 体系来说, 变化趋势与 MJ2/NaOH 体系基本相同, 只不过该体系的界面张力比 MJ2/NaOH 体系的高一个数量级; SAA-10/NaHCO₃ 和 SDBS/NaHCO₃ 体系的界面张力特征基本一致, 前者的界面张力平衡值和瞬时动态最低值均为 10^{-1} mN/m, 而后者为 10^0 mN/m。此外, 由实验数据还可以看出: 在相同条件下, NaOH 强碱体系的油水界面张力低于 Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 弱碱体系。对于低酸值的大庆原油, 碱降低界面张力的主要机理是进一步增强了原油中某些物质的极性, 增大了它们在溶液中的活性, 因而降低了油水界面张力。而强碱的加入, 物质极性增强的作用大于弱碱^[2], 因此, 降低油水界面张力的作用更大。6 个体系的油水界面张力特征见表 2, 其配方组成: 碱浓度为 1.2%; 表面活性剂浓度为 0.3%; 聚合物(AP-P3) 浓度为 1 000 mg/L。

表 2 岩心驱油实验体系参数及配方组成

Table 2 ASP solutions used in core oil-displacement test			
体系参数	体系粘度/ (mPa·s)	平衡界面张力/ (mN·m ⁻¹)	动态界面张力最低值/ (mN·m ⁻¹)
ORS-41/NaOH	58.9	3.8×10^{-3}	5.5×10^{-4}
MJ2/NaOH	54.6	5.6×10^{-2}	4.5×10^{-3}
MJ2/Na ₂ CO ₃	53.4	6.0×10^{-2}	4.3×10^{-2}
TDY/NaOH	57.7	2.3×10^{-1}	4.7×10^{-2}
SAA-10/NaHCO ₃	58.1	5.1×10^{-1}	4.0×10^{-1}
SDBS/NaHCO ₃	56.6	5.11	4.09

2.2 油水平衡界面张力和动态界面张力最低值对采收率的影响

从岩心实验结果(表 3) 可以看出: 体系与原油间的界面张力值, 包括平衡界面张力、瞬时动态界面张力最低值, 对驱油效果有明显的影 响。表现为: ①无论是平衡界面张力还是瞬时动态界面张力的最低值越小,

表 3 岩心驱替试验结果

Table 3 Results of core oil-displacement test				
体 系	平衡界面 张力/ (mN·m ⁻¹)	动态界面张 力最低值/ (mN·m ⁻¹)	人造岩心 采收率/ %	油层天然岩 心采收率/ %
ORS-41/NaOH	3.8×10^{-3}	5.5×10^{-4}	22.29	23.97
MJ2/NaOH	5.6×10^{-2}	4.5×10^{-3}	21.74	24.66
MJ2/Na ₂ CO ₃	6.0×10^{-2}	4.3×10^{-2}	20.53	20.56
TDY/NaOH	2.3×10^{-1}	4.7×10^{-2}	20.46	18.10
SAA-10/NaHCO ₃	5.1×10^{-1}	4.1×10^{-1}	9.53	10.49
SDBS/NaHCO ₃	5.11	4.09	4.70	4.65

驱油效果越好。随着界面张力的降低, 化学驱采收率提高值增加, 但界面张力在 10^{-2} mN/m 及以下时, 界面张力对驱油效果的影响不明显。②影响驱油效果的主要因素是油水瞬时动态界面张力的最低值, 而不是平衡界面张力值。

在大庆油田条件下,油水动态界面张力最低值为 10^{-2} mN/m, 尽管平衡界面张力只有 10^{-1} mN/m, 该体系的驱油效果与平衡界面张力为 10^{-3} mN/m 体系的基本相同, 提高采收率 20% 以上。如油水动态界面张力最低值为 4.7×10^{-2} mN/m 的 TDY/NaOH 体系, 其化学驱提高采收率为 20.46%, 仅比目前已在大庆油田成功开展矿场试验的 ORS-41/NaOH 体系采收率提高幅度低 1.83%, 即油水平衡界面张力不一定必须降低到 10^{-3} mN/m, 而瞬时动态界面张力最低值降到 10^{-2} mN/m 时的驱油效率与之基本相当。目前使瞬时动态界面张力最低值降到 10^{-2} mN/m 的表面活性剂的种类和范围非常广泛, 可以大大降低复合驱中表面活性剂的苛刻条件和成本。其原因是: 由于注入地层初期的驱油体系与原油形成(超)低界面张力, 因而可以活化残余油滴, 使它们运移和流动。在此过程中, 逐渐形成了可以运移的油墙。油墙形成后, 如果油水界面张力继续上升, 特别是上升到通常认为不能提高采收率的数量级时, 由于油墙在运移时对油滴产生互溶作用, 使得原来束缚的残余油滴可以运移和流动, 这非常类似于“滚雪球”的作用^[1]。因此, 残余油仍然可以被驱替出来。

2.3 在无碱条件下动态界面张力为 10^{-2} mN/m 表面活性剂体系的驱油效果

动态界面张力达到 10^{-2} mN/m 时的表面活性剂体系与平衡界面张力为 10^{-2} mN/m 的表面活性剂体系驱油效果基本相同。为此, 又进一步研究了无碱条件下, 动态界面张力也达到 10^{-2} mN/m 时, 表面活性剂体系的驱油效果。在不含碱剂的条件下, 目前国内外广泛应用的 3 种表面活性剂(美国 Witco 化学公司生产的 EOR2; 河北辛集化工厂生产的磺酸盐 XJ1; 胜利油田化工厂生产的石油磺酸盐 SL) 的油水界面张力及岩心驱油实验结果见表 4。从表 4 可以看出, 瞬时动态界面张力最低值达到 10^{-2} mN/m 时的无碱复合体系的驱油效果仍然非常理想, 比水驱提高采收率约 20%。显然, 该结果表明, 无碱复合体系不仅降低了体系的化学剂成本和费用, 同时为大庆油田进一步采用无碱的表面活性剂/聚合物二元复合驱提供了技术依据, 并且解决了由于使用强碱所带来的结垢和油层伤害等问题^[2,6]。

表 4 无碱条件下表面活性剂驱油实验结果

Table 4 Results of core oil-displacement test for commercial surfactants without alkaline

体 系	体系粘度/ (mPa·s)	平衡界面 张 力/ (mN·m ⁻¹)	动态界面张 力最低值/ (mN·m ⁻¹)	提 高 采收率/ %	最低含 水率/ %
EOR2/AP-P3	59.9	5.4×10^{-2}	2.8×10^{-2}	21.37	56.0
XJ1/AP-P3	55.1	3.1×10^{-2}	1.7×10^{-2}	22.51	55.1
SL/AP-P3	57.6	7.0×10^{-1}	4.2×10^{-2}	19.38	58.3

注: 表面活性剂浓度为 0.3%; 聚合物浓度为 1 000 mg/L; 段塞为 0.3 PV。

3 结 论

(1) 无论是平衡界面张力还是瞬时动态界面张力, 界面张力越低, 体系的驱油效果越好。随着界面张力的降低, 采收率提高值增加, 但当界面张力在 10^{-2} mN/m 及以下数量级时, 界面张力对驱油效果的影响不明显。

(2) 影响驱油效果的主要因素是油水瞬时动态界面张力的最低值, 而不是平衡界面张力值。在大庆油田条件下, 油水动态界面张力最低值达到 10^{-2} mN/m 时, 尽管平衡界面张力只有 10^{-1} mN/m, 但体系的驱油效果与平衡界面张力为 10^{-3} mN/m 体系时基本相同, 使采收率提高 20% 以上。

(3) 动态界面张力达到 10^{-2} mN/m 时, 即使体系中不含碱剂, 其驱油效果与含碱且平衡界面张力达到 10^{-3} mN/m 体系的基本相同。因此, 大庆油田复合驱可以采用无碱体系。

参 考 文 献

- [1] 卢祥国, 戚连庆, 牛金刚. 低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): 70-74.
- [2] 廖广志, 杨振宇, 刘奕. 三元复合驱中超低界面张力影响因素研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(1): 40-42.
- [3] 沈平平, 袁士义, 邓宝荣, 等. 非均质油藏化学驱波及效率及驱替效率的作用[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 54-59.
- [4] 唐钢, 李华斌, 苏敏. 复合驱界面张力与驱油效率的关系研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(3): 81-83.
- [5] 李十奎, 朱焱, 赵永胜, 等. 大庆油田三元复合驱效果评价研究[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 56-59.
- [6] 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.

(收稿日期 2005-11-01 改回日期 2005-12-11 编辑 孟伟铭)