

# 调驱一体化泡沫驱油体系配方优化研究

李睿博<sup>1,2</sup>, 郭东红<sup>1,2\*</sup>, 王源源<sup>1,2</sup>, 孙建峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院油田化学研究所, 北京 100083;  
2. 中国石油天然气集团公司油田化学重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**针对大港港东油藏条件,通过系列甜菜碱的泡沫性能、油水界面张力性能测试,筛选出芥酸酰胺丙基甜菜碱作为主剂,与十二烷基磺酸钠等复配研制出调驱一体化泡沫驱油体系。测试结果表明,对于大港港东原油和模拟矿化水,发泡体积可达溶液体积的5倍,油水界面张力可达 $10^{-2}$  mN/m数量级水平,能够满足调驱一体化泡沫驱油体系的要求。

**关键词:**甜菜碱表面活性剂;发泡性能;油水界面张力;调驱一体化泡沫驱油体系

中图分类号:TE34;TE39

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)02-0140-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.02.031

## Formulation optimization for foam flooding system with performances of profile control and oil displacement

LI Rui-bo<sup>1,2</sup>, GUO Dong-hong<sup>1,2\*</sup>, WANG Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, SUN Jian-feng<sup>1,2</sup>

(1. Oilfield Chemistry Department, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. CNPC Key Laboratory of Oilfield Chemistry, Beijing 100083, China)

**Abstract:** According to the eastern reservoir conditions of Dagang Oilfield, erucic acid amide propyl betaine is selected as the main agent by measuring foam properties and oil water interfacial tension of various betaines. Then a foam flooding system is developed by the combination of erucic acid amide propyl betaine and sodium dodecyl sulfonate, which possesses simultaneously performances of profile control and oil displacement. Test result shows that taking crude oil produced from the eastern reservoir in Dagang Oilfield and simulated mineralized water as objects, the foam flooding system can make foam volume reach five times the volume of the solution and bring oil water interfacial tension to reach  $10^{-2}$  mN·m<sup>-1</sup>, which can meet the requirements of foam flooding system with performances of profile control and oil displacement.

**Key words:** betaine-based surfactant; foaming properties; oil water interfacial tension; foam flooding system with performance of profile control and oil displacement

目前我国大部分老油田具有高含水、高采出程度的特点,经过聚合物驱之后仍存在大量的剩余油不能够有效开采,研究表明,聚合物驱后开展泡沫驱和表面活性剂驱可以进一步提高石油采收率<sup>[1-7]</sup>。泡沫驱是利用泡沫作为驱油剂的一种驱油方法, Holbrook 和 Fried 最早发现泡沫对提高石油采收率是有效的<sup>[8-9]</sup>。泡沫驱具有现场施工工艺简单、发泡气体可选择性大、调剖封堵性强等特点<sup>[10]</sup>,传统的泡沫驱技术注重提高波及系数,但在提高洗油效率方面效果不是很好,导致整体驱油效果不明显。表面活性剂驱具有增溶、乳化、改变岩石表面润湿性和降低油水界面张力等特点,但传统的表面活性剂驱注重提高洗油效率,在提高波及系数方面没有效果,导致整体驱油效果不明显。如果把泡沫驱和表面活性剂驱有机结合起来就可以达到即注重调剖封堵性能又注重洗油性能的双重效果<sup>[11-14]</sup>,从而显著

地提高石油采收率。

甜菜碱类表面活性剂属于既有阳离子基团又有阴离子基团的两性表面活性剂,可以在较大 pH 和矿化度的范围内保持良好的界面活性和发泡性能,与其他表面活性剂具有良好的协同效应等优点<sup>[15-17]</sup>。因此,针对大港港东油藏条件,以甜菜碱类表面活性剂为基础,开展了调驱一体化泡沫驱油体系配方优化研究。首先筛选出甜菜碱类表面活性剂作为调驱一体化泡沫驱油体系的主剂,通过协同效应复配以其他类型的表面活性剂,研制开发出调驱一体化泡沫驱油配方体系,也称为低张力泡沫驱油体系。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

油酸酰胺丙基甜菜碱(OAB40)、芥酸酰胺丙基

收稿日期:2018-05-21;修回日期:2018-12-10

基金项目:中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院资助项目(2012Y-050)

作者简介:李睿博(1991-),男,在读硕士,研究方向为驱油化学、化学剂检测等, liruibo01@petrochina.com.cn;郭东红(1965-),男,博士,高工,主要从事驱油化学研究,通讯联系人, gdh@petrochina.com.cn。

甜菜碱(EAB40),上海银聪新材料科技有限公司生产;月桂酰胺丙基羟磺基甜菜碱(LHS)、十四烷酰胺丙基羟丙基磺基甜菜碱(MHS)、十六烷基酰胺丙基羟丙基磺基甜菜碱(HAHS)、十六烷基羟丙基磺基甜菜碱(CHS)、椰油酰胺丙基羟磺基甜菜碱(CPHS),上海诺颂实业有限公司生产; $\alpha$ -烯烴磺酸钠(AOS),上海棋成实业有限公司生产;ZK-25120耐温耐盐型油田泡沫剂、ZK-05200耐温耐盐型油田泡沫剂、ZK-25100耐温耐盐型油田泡沫剂,青田中科植物科技有限公司生产;十二烷基硫酸钠(SDS)、十二烷基磺酸钠(SLS)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS),化学纯,国药集团化学试剂有限公司生产;大港港东2区原油,密度为0.8878 g/cm<sup>3</sup>,大港油田采油院生产。

TX-500C型旋转滴界面张力仪,美国CNG公司生产;WARING 34BL99型搅拌机,美国WARING公司生产;

### 1.2 模拟地层水配制

分别称量2.400、4.400、7.400、9.400 g氯化钠及总质量0.600 g的氯化镁和氯化钙(质量比为1:1)于烧杯中,加入适量蒸馏水溶解后转移至1 L的容量瓶中定容,配制成3 000、5 000、8 000、10 000 mg/L不同矿化度的模拟地层水。

### 1.3 油水界面张力的测试

用TX-500C型旋转滴界面张力仪测试调驱一体化泡沫驱油体系的油水界面张力指标,每个样品的测试时间是2 h,测试中油水界面张力随着时间的变化而变化,记录平衡时的油水界面张力值。针对大港港东的油藏条件,调驱一体化泡沫驱油体系界面张力的实验温度设定为65℃。

### 1.4 泡沫性能的评价方法

量取100 mL待测水溶液,常温下用WARING 34BL99型搅拌机于转速5 000 r/min的条件下搅拌1 min,然后将泡沫倒进1 L的量筒中,同时开始计时,读取调驱一体化泡沫驱油体系的发泡体积、泡沫半衰期(泡沫体积减少至起始发泡体积一半所用的时间)。

## 2 结果与讨论

调驱一体化泡沫驱油体系的油水界面张力达到10<sup>-2</sup> mN/m数量级水平,起始发泡体积达到待测溶液体积的4倍以上时,能够实现调剖封堵和驱油的双重效果,从而显著提高石油采收率<sup>[13,16]</sup>。

### 2.1 调驱一体化泡沫驱油体系主剂的筛选

用3 000~10 000 mg/L不同矿化度的模拟水将5种甜菜碱表面活性剂配制成0.3%水溶液,针对大港港东原油和模拟矿化水,油水界面张力和起始发泡性能测试结果如表1所示。为了综合考虑起始发泡体积、泡沫半衰期以及油水界面张力,利用如下关系式来筛选评判一种表面活性剂是否可以作为调驱一体化泡沫驱油体系的主剂,或者评判一种表面活性剂体系能否作为调驱一体化泡沫驱油体系:

$$Z = \sigma / (V_0 \times t_{1/2}) \quad (1)$$

其中: $Z$ 为低张力泡沫驱油体系综合评价指数; $\sigma$ 为油水界面张力; $V_0$ 为起始发泡体积, $t_{1/2}$ 为泡沫半衰期。

根据式(1),结合对低张力泡沫驱油体系的指标要求,综合指数 $Z$ 越小,表面活性剂越适合于作为调驱一体化泡沫驱油体系的主剂。

从表1中可以看出,酰胺丙基羟丙基磺基系列  
表1 不同甜菜碱类表面活性剂的油水界面张力和泡沫性能测试结果

甜菜碱类表面活性剂	模拟矿化度/(mg·L <sup>-1</sup> )	起始发泡体积/mL	泡沫半衰期/h	界面张力/(10 <sup>-2</sup> mN·m <sup>-1</sup> )	界面张力/(发泡体积×泡沫半衰期)/[mN·(m·mL·h) <sup>-1</sup> ]
OAB40	3000	260	1.5	47.01	0.1205
OAB40	5000	260	2.5	46.29	0.0712
OAB40	8000	270	2.0	34.38	0.0637
OAB40	10000	270	2.5	41.01	0.0608
EAB40	3000	240	1.5	5.106	0.0142
EAB40	5000	240	2.5	2.779	0.0046
EAB40	8000	240	2.0	1.708	0.0036
EAB40	10000	230	1.5	1.311	0.0038
LHS	3000	310	1.5	116.3	0.2501
LHS	5000	380	3.0	123.0	0.1079
LHS	8000	380	2.5	110.9	0.1167
LHS	10000	320	2.5	132.8	0.1660
MHS	3000	460	1.5	50.49	0.0732
MHS	5000	440	2.5	47.90	0.0435
MHS	8000	420	1.5	56.33	0.0894
MHS	10000	400	1.5	58.99	0.0983
HAHS	3000	310	1.5	99.36	0.2137
HAHS	5000	350	2.0	96.35	0.1376
HAHS	8000	310	1.5	91.25	0.1962
HAHS	10000	310	2.0	90.14	0.1454

甜菜碱比酰胺丙基系列甜菜碱表面活性剂的泡沫性能要好、油水界面张力要差。OAB40、EAB40、LHS、MHS、HAHS 在 3 000、5 000、8 000、10 000 mg/L 不同矿化度水下的泡沫性能和油水界面张力值变化不明显,证明甜菜碱表面活性剂有较好的起泡能力和耐矿化度能力。在酰胺丙基羟丙基磺基系列甜菜碱中 MHS 的发泡性能较好,可达到初始溶液体积的 4 倍,但油水界面张力未达到  $10^{-2}$  mN/m 数量级的水平;在酰胺丙基系列甜菜碱中 EAB40 的油水界面张力可达到较低的  $10^{-2}$  mN/m 数量级的水平,发泡体积可达到初始溶液体积的 2 倍多,综合考虑油水界面张力和泡沫性能,筛选出 EAB40 作为调驱一体化泡沫驱油体系的主剂。从表 1 中低张力泡沫驱油体系的综合指数可以看出,EAB40 体系的数值最低,是最适合的调驱一体化泡沫驱油体系的主剂。

## 2.2 调驱一体化泡沫驱油体系的制备

利用 5 000 mg/L 模拟矿化度水配制 0.3% 的 EAB40 溶液,加入 0.2% 不同表面活性剂 SDBS、SDS、SLS、CHS、AOS、CPHS、ZK-25120、ZK-05200、ZK-25100 溶液,针对大港港东原油,测试不同复配体系的泡沫性能和油水界面张力,实验数据如表 2 所示。

表 2 EAB40 与不同表面活性剂复配体系的油水界面张力和泡沫性能测试结果

复配表面活性剂体系	发泡体积/mL	泡沫半衰期/h	平衡界面张力/ ( $10^{-2}$ mN· $m^{-1}$ )	界面张力/ (发泡体积× 泡沫半衰期)/ [mN·(m·mL·h) $^{-1}$ ]
SDBS	170	0.5	20.13	0.2368
SDS	330	3.0	4.945	0.0050
SLS	440	10.0	2.725	0.0006
CHS	480	2.0	9.659	0.0101
AOS	320	2.5	6.794	0.0085
CPHS	440	3.5	11.44	0.0074
ZK-25120	410	3.0	25.77	0.0210
ZK-05200	300	2.5	4.408	0.0059
ZK-25100	280	2.0	7.374	0.0132

从表 2 可以看出,向 0.3% EAB40 溶液中加入 0.2% CPHS、ZK-25120 时,复配体系的发泡体积达到初始溶液体积的 4 倍以上,泡沫半衰期较短,油水界面张力未达到  $10^{-2}$  mN/m 数量级的水平;向 0.3% EAB40 溶液中加入 0.2% SDS、AOS、ZK-05200、ZK-25100 时,复配体系的油水界面张力达

到  $10^{-2}$  mN/m 数量级的水平,但发泡体积未达到初始溶液体积的 4 倍以上,泡沫半衰期较短;向 0.3% EAB40 溶液中加入 0.2% CHS 时,复配体系的发泡体积达到初始溶液体积的 4 倍以上,泡沫半衰期较短,油水界面张力达到  $10^{-2}$  mN/m 数量级的水平,但系数较大;向 0.3% EAB40 溶液中加入 0.2% SLS 时,复配体系的发泡体积达到 440 mL,泡沫半衰期达到 10.0 h,油水界面张力达到  $2.725 \times 10^{-2}$  mN/m,满足调驱一体化泡沫驱油体系油水界面张力要达到  $10^{-2}$  mN/m 数量级水平,同时发泡体积要达到待测溶液体积的 4 倍以上的指标要求,从表 2 中低张力泡沫驱油体系的综合指数可以看出,EAB40 与 SLS 复配时数值最低达到 0.0006,是最合适的调驱一体化泡沫驱油体系。所以,确定调驱一体化泡沫驱油体系为:芥酸酰胺丙基甜菜碱(EAB40)与十二烷基磺酸钠(SLS)的复配体系。

## 2.3 调驱一体化泡沫驱油体系的配方优化以及耐矿化度测试

在调驱一体化泡沫驱油体系制备的基础上,针对大港港东原油进一步优化体系配方。在 5 000 mg/L 模拟矿化度水的条件下测试了 0.3% 的 EAB40 溶液中添加不同质量分数的 SLS 后的油水界面张力和泡沫性能,实验结果如表 3 所示。

表 3 EAB40 与不同质量分数的 SLS 复配体系的油水界面张力和泡沫性能测试结果

SLS 质量分数/%	发泡体积/mL	泡沫半衰期/h	平衡界面张力/ ( $10^{-2}$ mN· $m^{-1}$ )	界面张力/ (发泡体积× 泡沫半衰期)/ [mN·(m·mL·h) $^{-1}$ ]
0.17	375	3.5	2.866	0.0403
0.18	390	7.0	3.067	0.0011
0.19	420	8.5	3.136	0.0009
0.20	440	10.0	2.725	0.0006
0.21	480	10.5	3.974	0.0008
0.22	520	11.0	4.389	0.0008
0.23	510	10.5	4.962	0.0009
0.24	500	10.0	5.014	0.0010
0.25	485	9.5	7.231	0.0016
0.26	470	8.0	8.465	0.0023
0.27	445	7.0	13.98	0.0045

从表 3 中可以看出,向 0.3% 的 EAB40 溶液中加入 SLS 的质量分数在 0.19%~0.24% 时,复配体系的发泡体积可达到待测溶液体积的 4 倍以上,油

水界面张力达到较低  $10^{-2}$  mN/m 数量级水平,可满足调驱一体化泡沫驱油体系的指标要求。从表 3 中的低张力泡沫驱油体系的综合指数可以看出,当 SLS 的质量分数在 0.19%~0.24% 时,综合指数数值均在 0.001 以下,是比较理想的调驱一体化泡沫驱油体系。

从表 3 中选出 0.3% EAB40+0.22% SLS 体系,在 3 000、5 000、8 000、10 000 mg/L 不同矿化度水下针对大港港东的原油测试泡沫性能和油水界面张力,考察调驱一体化泡沫驱油体系的耐矿化度测试,实验结果如表 4 所示。

表 4 EAB40 与 SLS 复配体系在不同矿化度的油水界面张力和泡沫性能测试结果

模拟矿化度水/ (mg·L <sup>-1</sup> )	发泡体积/ mL	泡沫半衰期/ h	平衡界面张力/ (10 <sup>-2</sup> mN·m <sup>-1</sup> )	界面张力/ (发泡体积× 泡沫半衰期)/ [mN·(m·mL·h) <sup>-1</sup> ]
3000	430	9.0	5.655	0.0015
5000	520	11.0	4.389	0.0008
8000	570	23.5	5.271	0.0004
10000	540	24.0	5.168	0.0004

从表 4 可以看出,0.3% EAB40+0.22% SLS 复配体系在 3 000~10 000 mg/L 矿化度下的发泡体积均达到待测溶液体积的 4 倍以上,其中在 5 000~10 000 mg/L 矿化度下的发泡体积均在待测溶液体积的 5 倍以上,泡沫半衰期达 10 h 以上。油水界面张力在 3 000~10 000 mg/L 矿化度下均能保持在较低的  $10^{-2}$  mN/m 数量级水平,因此,针对大港港东的原油,0.3% EAB40+0.22% SLS 调驱一体化泡沫驱油体系具有较好的耐盐性能。

### 3 结论

(1) 提出低张力泡沫驱油体系综合评价指数概念,综合指数  $Z$  越小,表面活性剂越适合于作为调驱一体化泡沫驱油体系的主剂,表面活性剂体系越适合作为调驱一体化泡沫驱油体系。

(2) 针对大港港东油藏条件,通过对酰胺丙基羟丙基磺基系列的甜菜碱和酰胺丙基系列的甜菜碱油水界面张力和泡沫性能的测试,筛选出的调驱一体化泡沫驱油体系的主剂为芥酸酰胺丙基甜菜碱表面活性剂。

(3) 通过主剂与其他表面活性剂的复配研制出调驱一体化泡沫驱油体系,发泡体积可达到待测溶液体积的 5 倍以上,油水界面张力可达到  $10^{-2}$  mN/m 数量级水平,能够满足调驱一体化泡沫驱油体系的要求。

### 参考文献

- [1] 郭东红,辛浩川,崔晓东,等.新型耐温耐盐表面活性剂驱油体系的研究[J].精细石油化工进展,2003,4(10):1-3.
- [2] 郭东红,杨晓鹏,郭家兴,等.脂肪醇聚氧乙烯醚磺酸盐系列表面活性剂的协同效应[J].石油学报,2012,28(2):323-328.
- [3] 王茂盛,张喜文,韩彬,等.AS 体系与泡沫交替注入提高采收率技术研究[J].特种油气藏,2006,13(1):90-91,98.
- [4] 郭东红,李森,袁建国.表面活性剂驱的驱油机理与应用[J].精细石油化工进展,2002,3(7):36-41.
- [5] 孙建峰,刘大锰,郭东红,等.三元复合驱中表面活性剂的应用与发展[J].石油钻采工艺,2010,32(2):113-117.
- [6] 乐建君,伍晓林,马亮亮,等.鼠李糖脂的复配驱油体系及现场试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(2):168-171.
- [7] Kumar K, Nikolov A D, Wasan D T. Effect of film curvature on drainage of thin liquid films[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 256(1), 194-200.
- [8] Bond D, Hollbrook O C, Lake C. Gas drive recovery process: US, 2866507[P]. 1956-12-24.
- [9] Fried A N. The foam-drive process for increasing the recovery of oil [R]. Report of Investigation 5866, USBM, Washington, 1961: 235-247.
- [10] 潘广明,侯健,郑家朋,等.冀东油田高浅北油藏天然气泡沫驱油体系优选[J].油田化学,2013,30(1):102-104.
- [11] 赵长久,麻翠杰,杨振宇,么世椿.超低界面张力泡沫体系驱先导性矿场试验研究[J].石油勘探与开发,2005,32(1):127-130.
- [12] 杜勇.低张力泡沫驱油体系提高采收率研究[J].科学技术与工程,2015,15(29):131-135.
- [13] 孙建峰,郭东红,崔晓东,等.甜菜碱类低界面张力泡沫驱油体系性能研究[J].石油钻采工艺,2014,36(3):92-95.
- [14] 余婷,杨旭,董雅杰,等.低界面张力泡沫驱油剂的制备及其性能[J].石油化工,2016,45(10):1243-1247.
- [15] 郭东红,张雅琴,崔晓东,等.三次采油用重烷基苯磺酸盐表面活性剂的协同效应[J].应用化学,2003,20(1):86-88.
- [16] 胡小东.低界面张力泡沫驱油体系研究与性能评价[D].荆州:长江大学,2012.
- [17] 郑自刚,侯吉瑞,赵凤兰,等.化学复合驱用甜菜碱型表面活性剂的研究进展[J].化学研究与应用,2011,23(1):30-34. ■