

稠油泡沫驱起泡剂体系的研究

马 迪¹, 潘 一¹, 张金辉², Rassadkina Regina¹, 廖松泽¹, 张 然¹

(1. 辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 辽宁石油化工大学 创新创业学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 稠油油田泡沫驱过程中, 单一起泡剂性能不稳定, 针对这一难点问题, 设计了一种新型泡沫驱起泡剂体系。采用 Waring-Blender 搅拌法, 以泡沫综合指数和耐温抗盐性能为评价指标, 对初步筛选得到的甜菜碱、十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和十二烷基硫酸钠(SDS)4种起泡剂进行优选, 最优起泡单剂为甜菜碱、CTAB。将两种起泡单剂进行不同比例的筛选, 最终优选出质量比2:1的CTAB与甜菜碱体系, 并对其洗油能力测试和填砂管模拟实验。结果表明, 该起泡剂体系耐温抗盐性好, 洗油能力强, 并且在填砂管模拟实验中对蒸汽驱加泡沫驱与蒸汽泡沫交替注入驱两种驱替方式进行对比, 发现将蒸汽和泡沫流体交替注入油藏的驱油方式得到的原油采收率可达60.7%, 具有一定的参考价值。

关键词: 稠油; 泡沫驱; 表面活性剂; 驱油技术; 提高采收率

中图分类号: TE357.46

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1672-6952.2020.02.003

Study on Foaming Agent System of Heavy Oil Foam Flooding

Ma Di¹, Pan Yi¹, Zhang Jinhui², Rassadkina Regina¹, Liao Songze¹, Zhang Ran¹

(1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, China;

2. School of Innovation and Entrepreneurship, Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: In the process of foam flooding in heavy oil fields, the performance of single foaming agent is unstable. In view of this difficult problem, a new foaming agent system for foam flooding is designed in this paper. The foam synthesis index and temperature and salt resistance are taken as the evaluation indexes by Waring-Blender agitation method four kinds of foaming agents such as betaine, CTAB, SDBS and SDS were selected. The best foaming agents were betaine and CTAB. Through the experimental selection of different proportion of foaming single agent, the oil washing ability test and sand filling tube simulation experiment of CTAB and betaine system with 2:1 ratio were carried out. The results show that the foaming agent system have good temperature and salt resistance and strong oil washing ability. In the sand-filled pipe simulation experiment, the two displacement modes of steam flooding plus foam flooding and steam foam alternating injection flooding are compared. The results show that the oil recovery can reach 60.7% by alternately injecting steam and foam fluid into the reservoir, which has certain reference value.

Keywords: Heavy oil; Foam flooding; Surfactant; Oil displacement technology; Enhanced oil recovery

稠油具有不易开发、采收成本高等特点, 一般稠油油藏在蒸汽驱开采后(采收率超过50%), 储层中仍有大量的石油资源难以采出^[1]。针对这一情况, 大庆油田、胜利油田、中原油田等开始采用泡沫驱油技术, 而影响该技术性能的关键指标是起泡剂的性能^[2-3]。相比于起泡单剂, 复配起泡剂体系具备

更加优异的耐温抗盐性能、抗遇油消泡性等特点^[4-5], 由于其特殊的协同增效作用而被国内外学者广泛研究^[6-7]。Y. Bian等^[8]研制了一种超临界CO₂泡沫驱起泡剂体系, 该体系由 α -烯基磺酸钠(AOS)与甜菜碱两性表面活性剂以质量比4:1复配组成, 耐温65.6℃, 耐盐20×10⁴ mg/L, 在高温高盐条件下

收稿日期: 2019-03-21 修回日期: 2019-04-22

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2017D-5007-0201); 辽宁省科技厅博士启动基金项目(20170520344); 辽宁省教育厅科技项目(L2017LFW012)。

作者简介: 马迪(1994-), 女, 硕士研究生, 从事油气田开发方面的研究; E-mail: 18341329437@163.com。

通信联系人: 潘一(1976-), 男, 博士, 教授, 从事油气田开发方面的研究; E-mail: panyi_bj@126.com。

稳定存在 48 h 以上。F. AttarHamed 等^[9]的研究表明, AOS 和 TX-100 以质量比 4:1 复配的混合物, 比单独表面活性剂或其他质量比混合物拥有更优异的泡沫性和稳定性。赵江玉等^[10]以吉林油田为例进行了泡沫体系的筛选与考察, 结果表明, 起泡剂 LW 与非离子起泡剂 NO 以质量比 3:7 进行复配后, 泡沫综合指数 F_y 达到 $1\ 900\ \text{min}\cdot\text{mL}$, 泡沫性能得到大幅度提高。张浩^[11]将 AG 与 FC-30 以质量比 1:1 复配, 以耐温抗盐性能和耐油性能为评价指标, 对复合体系进行评价, 结果表明, 该体系驱油效率提升 15.13%, 可以耐油 6%, 耐盐 $172\times 10^3\ \text{mg/L}$, 具有一定的应用价值。

本文针对多种常用起泡剂进行初步筛选, 得到甜菜碱、CTAB、SDBS 和 SDS 四种起泡剂, 优选两种起泡单剂进行配比, 研制了一种新型复配起泡剂体系, 并对该体系进行洗油能力测试和填砂管模拟实验, 考察了此复配起泡剂的洗油效果和最佳驱替方式下的原油采收率, 以期在实际生产提供参考数据和理论依据。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂: 甜菜碱、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB)、十二烷基苯磺酸钠 (SDBS)、十二烷基硫酸钠 (SDS)、部分水解聚丙烯酰胺 (HPAM), 扬州科技有限公司; 氯化钠, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 石英砂, 上海源叶生物科技有限公司。

仪器: BSA223S 型电子天平, 江苏兴化仪器有限公司; ZNN-D6B 型数显六速旋转黏度仪, 青岛宏祥石油机械制造有限公司; DK-98-IIA 型电热恒温水浴锅、AW3-Y 恒速搅拌器, 江苏珂地石油仪器设备有限公司。

1.2 稠油 μ - T 关系评价方法

稠油之所以不易流动, 是由于油中大量胶质、沥青质的存在, 使其黏度高, 密度大, 不易流动^[12]。稠油对温度非常敏感, 温度升高, 分子间的作用力减弱, 稠油的黏度明显下降, 易流动, 有利于稠油的开采^[13]。实验稠油选用某油田地区稠油, $35\ ^\circ\text{C}$ 时密度为 $996\ \text{kg/m}^3$, 蜡质量分数为 29.45%。在不同剪切速率条件下, 利用 RV2 型旋转黏度计, 测量 $40\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 时原油的黏度, 并通过稠油 μ - T 曲线对 μ - T 关系进行评价。

1.3 单一起泡剂性能测试方法

起泡剂的性能是通过表面活性剂产生泡沫的快慢和所形成的泡沫量的大小进行评价的, 能否形

成长期稳定的泡沫, 关键在于起泡剂^[14]。选择多种表面活性剂作为起泡剂进行初步筛选, 在室内温度和压力条件下, 通过考察泡沫的发泡性能、半衰期和制作起泡剂的原料来源、价格等因素进行筛选, 最终决定使用甜菜碱、CTAB、SDBS 和 SDS 表面活性剂进行优选实验的试剂。稳定剂部分水解聚丙烯酰胺耐温性好、产品繁多、性能稳定、增黏能力强, 可用于中高温油藏, 因此为了更好地比较起泡剂的作用效果, 在测试实验中均添加了质量分数 0.05% 的 HPAM 作为体系的稳定剂。

1.3.1 室温条件下起泡能力测试 室温下, 选择甜菜碱、CTAB、SDBS 和 SDS 4 种试剂, 分别测定发泡率, 将 4 种试剂按不同质量分数 (0.05%、0.10%、0.15%、0.20%) 各配置 100 mL, 利用 AW3-Y 恒速搅拌器搅拌 1 min, 使表面活性剂溶液发泡, 将产生的泡沫快速移至大量筒内, 测量并记录 4 种试剂各自生成的泡沫体积。

起泡剂所生成泡沫的稳定性同样是考察泡沫性能的主要因素, 将 4 种起泡剂各配置 100 mL, 试剂质量分数均为 0.20%, 在室温状态下, 使用 AW3-Y 恒速搅拌器搅拌 1 min, 将产生的泡沫迅速倒入量筒内, 测量并记录四种试剂各自生成的泡沫的半衰期。

1.3.2 高温盐水条件下起泡能力测试 赵国玺^[15]经研究认为泡沫综合指数可作为综合评价泡沫性能的参数之一。根据量筒内生成的泡沫高度随时间的改变来考察泡沫的寿命, 起泡高度与时间关系见图 1^[10], 泡沫综合指数的表达式见式 (1)~(2)。

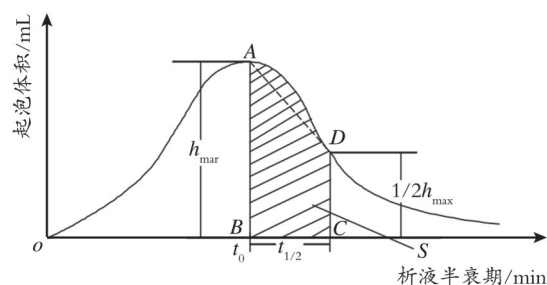


图 1 起泡高度与时间关系图

$$F_q = S = \int_0^{t_0+t_{1/2}} f(t) dt \quad (1)$$

式中, F_q 为泡沫综合指数, $\text{min}\cdot\text{mL}$; S 为阴影部分面积, 与 F_q 数值相等; $f(t)$ 为起泡体积曲线; t_0 为量筒内达到最大发泡高度所用时间, min ; $t_{1/2}$ 为泡沫析液半衰期, min 。

$$F_q = S = \frac{3}{4} h_{\max} t_{1/2} \quad (2)$$

式中, $h_{\max}$ 为发泡高度最大时泡沫体积, mL 。梯形面

积 S 近似等于 F_q , 通过此公式可计算泡沫综合指数。

测试高温盐水条件下起泡能力, 地层水根据 SYT 5358—2010 配置标准盐水, 选择试剂质量分数为 0.20%。该油田油藏温度为 65 ℃, 设置 5 个实验温度分别为 40、50、60、70、80 ℃。使用 Waring-Blender 法来评价泡沫性能, 考察 4 种试剂在不同温度盐水中的发泡率和生成泡沫的稳定性。

1.4 复配起泡剂性能测试方法

1.4.1 洗油能力测试 洗油能力是指化学剂从地层中剥离油膜, 降低不可动油的比例的能力。起泡剂属于表面活性剂的一种, 它能够降低油水界面张力和提高驱替液的洗油效率, 体系泡沫流体是否具有较好的洗油性能同样是考察和判断起泡剂性能的重要根据。

1.4.2 填砂管模拟实验

(1) 实验使用填砂管模型进行填砂。将填砂管置于上下两层挡板之间, 通过位于下层挡板下方的千斤顶和上层挡板与置入填砂管中的压实杆对填砂管中的石英砂进行加压, 对填砂管中油砂进行压实操作。

(2) 将实验装置进行正确连接, 操作时可握至手持部, 将连接部从护罩两端开口处伸入护罩内部并与护罩连接, 待装置连接完成, 以恒定速度向填砂管模型内注入 70 ℃ 热水, 在填砂管模型两端建立压差。

(3) 待实验进行时, 使用量筒读取并记录出口端的产液体积及油水分离界面高度。

此次实验油砂选用 400 g 石英砂 + 40 mL 稠油进行配置, 实验方式: ①先注蒸汽驱达到最大采收率, 再注入起泡剂进行泡沫驱; ②蒸汽 + 注入起泡剂泡沫驱交替注入(2 h 间隔交替注入)^[16]。

2 结果与讨论

2.1 稠油黏温曲线

稠油黏温曲线如图 2 所示。

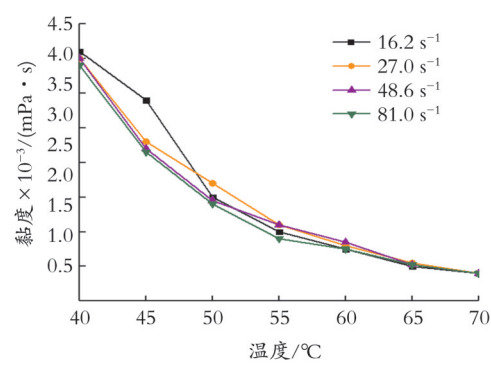


图2 稠油黏温曲线

从图 2 可以看出, 稠油黏度受温度的影响较大, 随着温度不断升高, 稠油黏度明显减小, 当温度增加至 70 ℃ 时, 稠油黏度由最初的 3 500 mPa·s 降低至 600 mPa·s, 稠油黏度越小, 稠油流动性越好, 因此也更有利于稠油的开采。

2.2 单一起泡剂性能

2.2.1 室温条件下起泡能力 使用 Waring-Blender 法测得 4 种试剂各自生成的泡沫体积, 结果见表 1。

试剂	泡沫体积/mL			
	$w(\text{试剂})$ =0.05%	$w(\text{试剂})$ =0.10%	$w(\text{试剂})$ =0.15%	$w(\text{试剂})$ =0.20%
CTAB	300	350	380	400
SDBS	600	620	650	720
SDS	620	650	700	720
甜菜碱	550	580	600	600

由表 1 可知, 随着试剂质量分数不断增加, 4 种起泡剂的泡沫体积也在逐渐增大。这是因为试剂质量分数较小时, 还没达到其 CMC, 随着试剂质量分数的增加, 更多的试剂分子参与泡沫的形成, 使起泡效果越来越好。但是, 在泡沫的表面吸附达到饱和值以后, “马拉高尼效应”随之减弱^[17], 所以当起泡剂用量增大到一定程度后, 其对应的发泡率就会开始降低。

在试剂质量分数均为 0.20% 时, 使用 Waring-Blender 法测得试剂生成泡沫的半衰期, 结果见表 2。

试剂	半衰期/min
CTAB	160
SDBS	150
SDS	80
甜菜碱	100

由表 1 和表 2 可知, 试剂质量分数较小时, CTAB 的发泡率较差, 但半衰期长, 泡沫稳定。SDBS 的发泡率较高且稳定, 而 SDS 和甜菜碱虽有较好的发泡率, 但半衰期相对较短。

2.2.2 高温盐水条件下起泡能力 表 3 和表 4 分别为不同温度盐水中的泡沫体积和泡沫半衰期。根据式 (2) 计算泡沫综合指数, 结果见图 3。

表 3 不同温度盐水下泡沫体积

试剂	泡沫体积/mL				
	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃
CTAB	350	380	390	360	350
SDBS	700	720	700	650	550
SDS	650	700	680	640	580
甜菜碱	600	620	650	600	580

表 4 不同温度盐水下泡沫半衰期

试剂	半衰期/min				
	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃
CTAB	95	85	75	70	65
SDBS	60	55	50	40	25
SDS	70	65	60	50	40
甜菜碱	95	90	80	75	65

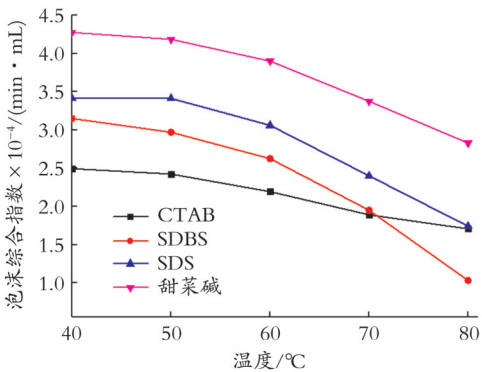


图 3 不同温度盐水中泡沫综合指数

由表 3、表 4 和图 3 可知,甜菜碱不仅发泡能力强,而且耐高温性能优异,其泡沫体系受温度影响不大,高温下仍能保持很强的稳定性,可作为复配体系的一种起泡单剂。SDBS 和 SDS 的发泡能力虽然较强,但其抗高温性能较差,高温下不稳定,随着温度的增加,半衰期明显减小,泡沫综合指数显著下滑,不适用于三次采油时地层内的复杂情况。CTAB 的发泡性虽然较弱,但相对 SDS 来说,具有很强的耐高温能力,高温下其半衰期较长,稳定性好,温度为 80 ℃时,半衰期可达 65 min,泡沫综合指数较高,且其具有极好的耐热、耐压、耐强酸强碱性,与甜菜碱有很好的配伍性^[18],具备优良的渗透性、生物降解性及杀菌等特点,所以将 CTAB 作为复配体系的另一起泡单剂。

由于单一的试剂都有自身缺陷,加上试剂来源和成本的限制,使其很难满足复杂油气藏的条件。针对某油田稠油开采现状,综合考虑起泡剂性能,在此基础上选定 CTAB 和甜菜碱两种起泡剂进行

复配,作为油藏新型泡沫驱复配体系。

2.3 复配起泡剂性能

以甜菜碱和 CTAB 两种试剂为基础进行复配。表面活性剂中,甜菜碱为两性型,CTAB 为阳离子型,该分子的碳氢链较长,其与甜菜碱相互间既有疏水作用,也存在静电作用,可产生混合胶束和吸附层,使分子之间联结得愈加紧凑。实验结果表明,随着两种起泡单剂含量的变化,复配起泡剂的性能也表现出较复杂的情况。

经过对实验结果的比较筛选,选择 CTAB 与甜菜碱质量比 2:1 进行此次测试,并对该复配起泡剂一些性能进行考察,以期为实际生产提供参考数据和理论依据。

2.3.1 洗油能力 将 CTAB 与甜菜碱以质量比 2:1 进行复配,取 500 mL 复配后质量分数为 0.20% 的泡沫溶液与辽河油田稠油进行泡沫耐油性测试。将 200 g 石英砂与稠油充分混合搅拌均匀,与 500 mL CTAB 与甜菜碱复配得到的起泡剂在室内温度条件下混合震荡一定时间,振动转速为 60 r/min;将混合后的溶液静置 1 h。实验结果发现,石英砂上的油几乎全部被洗掉,表明该复配试剂洗油效果较好,是一种综合性能较好的起泡剂。

2.3.2 填砂管模拟实验 填砂管模拟实验结果见图 4。

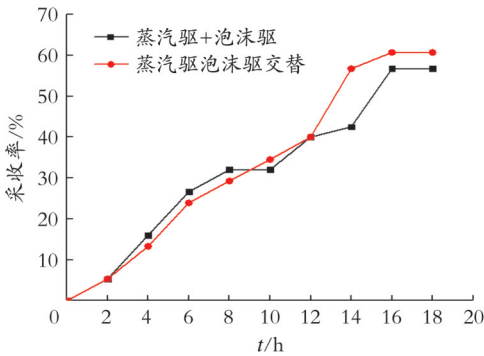


图 4 不同驱替方式下采收率

从图 4 可以看出,方案①中蒸汽驱在 8 h 左右采收率达到 32.0%,随后换成泡沫驱进行后续采油,最终采收率达到 56.7%;方案②中,蒸汽驱和泡沫驱交替使用,最终采收率可达到 60.7%,这说明新型起泡剂体系能够有效地提高辽河油田区块内稠油的采出量。该稠油对温度十分敏感,在注入泡沫流体驱油前先注入蒸汽进行蒸汽驱可以使稠油降黏,增大稠油流动性,通过先注入蒸汽方式提高填砂管内温度,方便泡沫驱能更好地采出稠油。因此,建议采用方案②蒸汽驱泡沫驱交替进行。

3 结 论

(1)通过实验初步选择一种适用于该稠油油藏开采的泡沫体系:CTAB与甜菜碱质量比为2:1,该体系耐高温,洗油效果好,在填砂管模拟实验中,采用蒸汽和泡沫交替注入的驱替方式,最终采收率可达60.7%,具有一定的参考价值。

(2)起泡剂优选实验是在一定矿化度条件下进

行的,但盐度并未导致耐温性测试时起泡剂性能差异的变化,可见它具有一定的耐盐能力,在耐温接近的情况下,它的耐盐能力是今后研究的方向。

(3)复合泡沫驱是一种三次采油新方法,对稠油油藏水驱开采及处于高含水时期油藏的开采有重大意义。该方法成本低,可通过对不同起泡剂进行复配或对新型起泡剂合成技术进行深入研究,使其得以推广和应用。

参 考 文 献

- [1] 唐亮.稠油油藏化学复合蒸汽驱技术室内研究[J].油田化学,2014,31(1):65-68.
- [2] 杨怀军,丁亚军,孙琳,等.驱油用抗温空气泡沫体系研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(5):93-98.
- [3] Clark J A, Santiso E E. Carbon sequestration through CO₂ foam-enhanced oil recovery: A green chemistry perspective[J]. Engineering, 2018, 4: 336-342.
- [4] Zhang C L, Wang P, Song G L, et al. Optimization and evaluation of binary composite foam system with low interfacial tension in low permeability fractured reservoir with high salinity[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 160: 247-257.
- [5] Sun L, Wang B, Pu W, et al. The effect of foam stability on foam flooding recovery [J]. Petroleum Science and Technology, 2015, 33:15-22.
- [6] 刘清栋,祝红爽,权莉.超深稠油泡沫驱泡沫体系优选[J].油田化学,2014,31(2):247-251.
- [7] Du Y. Research of low tension foam system in enhanced oil recovery[J]. Technol. Eng., 2015, 15(29): 131-135.
- [8] Bian Y, Penny U S, Sheppard N C. et al. Surfactant formulation evaluation for carbon dioxide foam flooding in heterogeneous sandstone reservoir[R]. SPE 154018, 2012.
- [9] AttarHamed F, Zoveidavianpoor M. The foaming behavior and synergistic effect in aqueous CO₂ foam by in situ physisorption of alpha olefin sulfonate and triton X-100 surfactants and their mixture[J]. Petrol. Sci. Technol., 2014, 32(19): 2376-86.
- [10] 赵江玉,蒲万芬,李一波,等.耐高温高盐泡沫体系筛选与性能评价[J].天然气与石油,2014,32(4):65-69.
- [11] 张浩.空气泡沫驱油复合体系研究[D].大庆:东北石油大学,2017.
- [12] 吕文怡,吴玉国,张梦轲,等.曲拉通与甜菜碱复配对稠油乳化降黏的影响[J].辽宁石油化工大学学报,2019,39(3):22-25.
- [13] 齐超,于欢,吴玉国,等.辽河油田稠油流变特性实验研究[J].辽宁石油化工大学学报,2016,36(5):29-32.
- [14] 刘丽,万雪,杨坤,等.低渗透储层CO₂泡沫体系的筛选与性能评价[J].石油化工高等学校学报,2016,29(4):62-65.
- [15] 赵国玺.表面活性剂物理化学[M].北京:北京大学出版社.
- [16] 杨戢,李相方,阎逸群,等.蒸汽-空气复合驱提高稠油采收率研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(2):111-117.
- [17] Varvara Y, Gordeeva A, Andrey V L. Dynamics of an evaporating thin film of polar liquid with solutocapillary Marangoni effect and capillary osmosis[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 320: 531-535.
- [18] 孙建锋,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.

(编辑 宋官龙)