文章编号:1000-4092(2019)02-301-05

耐油起泡剂的耐油耐盐性能评价*

栾和鑫[1,2],向湘兴[1],何 燕[3],关 丹[1],阙庭丽[1],任 豪[1],陈权生[1],徐崇军[1],杨 龙[2]

(1. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院,新疆 克拉玛依 834000; 2. 新疆砾岩油藏实验室, 新疆 克拉玛依 834000;3. 中国石油新疆油田分公司数据公司 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:以吴茵搅拌器法评价了由非离子表面活性剂、阴非离子表面活性剂和稳泡剂辛醇按一定比例配制的4种耐油起泡剂的耐油耐盐性能。研究结果表明:随着起泡剂质量分数的增大,起泡剂溶液的最大泡沫体积逐渐增大,在起泡剂质量分数为0.01%～0.5%范围内,起泡剂溶液的发泡体积是自身溶液体积的2～6倍,泡沫半衰期随着表面活性剂浓度增加而逐渐增大;随着原油比例增加,最大泡沫体积先增大后降低,油含量在10%～20%范围时起泡剂表现出了很好的起泡、稳泡性能,最大发泡体积是自身的5～9倍,泡沫半衰期随着油含量增加而明显增大;其中CFE149X(非离子表面活性剂、阴非离子表面活性剂和稳泡剂辛醇质量比为30:67:3)的起泡和稳泡性能最佳。在CFE149X质量分数为0.5%、含油量50%的条件下,最大泡沫体积和半衰期均随盐含量增加而先增大后减小;与无油存在时相比,有油存在时泡沫发泡体积略有降低,但泡沫稳定性却显著增强。耐油起泡剂CFE149X,在含油条件下表现出了较好的起泡性能和稳泡性能,能够作为耐油抗盐泡沫剂,为泡沫复合驱提供优良的起泡剂产品提供技术参考。表5参27

关键词:泡沫复合驱;发泡剂;起泡能力;半衰期;稳定性

中图分类号:TE357.46 **文献标识码**:A **DOI**:10.19346/j.cnki.1000-4092.2019.02.022

国内油田整体上步入“双高”阶段,为了维持陆上老油田稳产效益开发,各油田逐步开展三次采油技术,目前已经开展的主要技术有:聚合物驱、碱-表面活性剂-聚合物(ASP)三元复合驱、表面活性剂-聚合物(SP)二元驱、蒸汽驱、SAGD、火驱、气驱等,其中化学驱技术已在大庆、辽河、新疆等地成功应用。化学驱主要通过添加化学药剂来改变注入体系的性质,其中包括扩大波及体积作用的增加驱替液黏度的聚合物驱,在此基础上提高洗油效率的微乳液驱、表面活性剂驱、泡沫复合驱[1-10]、SP二元复合驱以及ASP三元复合驱技术等。化学驱技术虽然具有很多优点,但化学驱的强采强注会造成因岩石粒间微粒的运移而带来的储层伤害、化学剂对储层的伤害以及化学剂在采出端处理的环境问题。所以,基于保护环境,减少污染、提高驱油效率等因素考虑,泡沫复合驱技术逐渐得到了广泛的研究与应用[11-14]。泡沫驱具有既可大幅度提高驱油效率又可减轻对环境伤害的优点,但泡沫的不稳定性也是其最大的缺点。泡沫体系的驱油效果主要取决于它的稳定性和流动性[15-19],泡沫遇水后可以稳定存在,遇油后不能稳定存在,这决定了泡沫的选择封堵能力。泡沫经历变薄和聚并的过程,很大程度上影响了泡沫的稳定性[20-25]。随着技术发展,新型的耐油发泡剂在耐油抗盐领域取得了巨大突破[26-27],优良的泡沫剂具有较高的起泡能力,同时析出半衰期和泡沫半衰期都较长,在苛刻条件如含油饱和度

* **收稿日期**:2018-09-14;**修回日期**:2019-01-14。

基金项目:国家科技重大专项“化学驱提高采收率技术”(项目编号2016ZX05010-004),新疆砾岩油藏实验室开放课题“克拉玛依油田Ⅰ类砾岩油藏聚合物驱油机理的数字岩心实验研究”(项目编号2017D04023)。

作者简介:栾和鑫(1982–),男高级工程师,东北石油大学石油与天然气工程专业博士(2013),从事提高采收率技术研究,通讯地址:834000新疆克拉玛依市准格尔路29号新疆油田公司实验检测研究院1号楼313室,电话:0990–6880265;E-mail:luanhuoxin1982@163.com。

较高、高温、高盐等条件仍具有较高的起泡能力和较长的泡沫半衰期。近年来，泡沫遇油破裂不稳定的现象引起人们的关注，泡沫的耐油稳定性成为了泡沫驱提高采收率技术瓶颈。本文通过研究系列耐油抗盐泡沫体系的耐油抗盐性能为泡沫复合驱泡沫剂筛选提供借鉴和指导。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

耐油起泡剂 CFE149S、CFE149X、CFE1406、CFE1499，由旌浩公司提供，含量100%，由非离子表面活性剂、阴非离子表面活性剂和稳泡剂辛醇一定比例复配而成，具体如表1所示；氯化钠，氯化钙，均为分析纯；实验用油为新疆某区块井原油（油藏温度40℃，地面原油黏度16.5 mPa·s），实验用水为二级蒸馏水和采出水[矿化度9813.3 mg/L，主要离子组成（单位mg/L）为：CO_3^{2-} 257.51、HCO_3^- 3078.12、Cl^- 2919、SO_4^{2-} 226.7、Ca^{2+} 16.5、Mg^{2+} 16.92，K^++Na^+ 3300]。

VSA2000型吴茵搅拌器，北京尧顺电气科技有限公司。

表1 4种耐油起泡剂的组成

产品名称	非离子表面活性剂含量/%	阴非离子表面活性剂含量/%	稳泡剂含量/%
CFE149S	0	97	3
CFE149X	30	67	3
CFE1406	50	48	2
CFE1499	0	98	2

1.2 起泡剂的起泡性能测定

采用去离子水配制一定质量浓度的耐油起泡剂溶液，然后取100 mL溶液放入锥形瓶中，利用吴茵搅拌器搅拌60 s后，将泡沫液倾倒入在40℃水浴锅中的1000毫升的量筒里，泡沫全部留入量筒后读出泡沫体积，记录全部泡沫衰减1/2体积所需要的时间。

采用采出水配制一定浓度的耐油起泡剂溶液，按一定体积比分别取原油和起泡剂溶液（共计100 mL）放入锥形瓶中，利用吴茵搅拌器搅拌60 s后，将泡沫液倾倒入在40℃水浴锅中的1000 mL的量筒里，泡沫全部留入量筒后读出泡沫体积，记录全部泡沫衰减1/2体积所需要的时间。

2 结果与讨论

2.1 空白条件下起泡剂的泡沫性能

不同质量分数的起泡剂溶液的最大起泡体积和半衰期见表2。随着起泡剂质量分数的增加，最大泡沫体积逐渐增大，在质量分数为0.01%～0.50%范围内，起泡剂的最大泡沫体积是自身溶液体积的2～6倍，表现出很好的发泡性能；泡沫半衰期随着起泡剂质量分数的增加逐渐增大，但整体上看泡沫稳定性相对较差，行业认为泡沫半衰期在900 s以上的起泡剂具有较好的稳泡性能。四种表面活性剂中CFE149X在起泡和泡沫半衰期方面相对较好。

表2 4种起泡剂的泡沫性能

起泡剂	泡沫剂质量分数/%	最大泡沫体积/mL	半衰期/s
CFE1406	0.01	250	30
	0.05	350	300
	0.10	390	180
	0.30	590	420
	0.50	660	480
CFE149X	0.01	290	70
	0.05	440	240
	0.10	480	300
	0.30	580	480
	0.50	600	420
CFE149S	0.01	290	60
	0.05	390	150
	0.10	450	180
	0.30	590	240
	0.50	710	300
CFE1499	0.01	290	50
	0.05	400	300
	0.10	460	300
	0.30	550	300
	0.50	580	420

2.2 起泡剂的耐油性能

为了考察原油对起泡剂泡沫性能的影响，在质量分数0.5%的起泡剂溶液中添加不同量原油，考察原油加量对起泡液的最大发泡体积和泡沫半衰期

的影响，结果见表3。随着原油加量的增大，最大泡沫体积先增大后降低，4种起泡剂在油含量为10%～20%时表现出了很好的起泡性能，最大泡沫体积是自身的5～9倍，远远高于空白实验的2～6倍；泡沫半衰期随着原油加量的增大而逐渐增大，表现出了非常好的稳泡性能。质量分数0.5%的CFE1406、CFE149X、CFE149S溶液中加入10%的原油时的最大泡沫体积最大，而CFE1499溶液中加入20%时的最大泡沫体积最大；泡沫半衰期随着原油加量的增大逐渐增大，有油存在时的泡沫的半衰期是无油时的1～60倍。综合考虑，在含油条件下4种表面活性剂中CFE149X具有较好的起泡、稳泡性能。耐油起泡剂CFE149X是以非离子表面活性剂、阴非离子表面活性剂和稳泡剂辛醇按一定比例配制的复合型表面活性剂，其中直链烷醇作为稳泡剂，可有效增加液膜的弹性，防止液膜破裂造成的气泡合并变大，使其界面效能更高，原油中的活性组分很难完全侵占界面，降低了液膜排液速度。另外，在搅拌作用下，该耐油起泡剂与原油发生了乳化作用，改变了原油的性质，油在泡沫里形成乳化油，乳化油的假乳液膜也增强了泡沫的稳定性。

表3　原油加量对CFE1406起泡剂性能影响（起泡剂溶液质量分数0.5%）

起泡剂	原油加量/%	最大泡沫体积/mL	半衰期/s
CFE1406	0	660	480
	10	950	4800
	20	870	9600
	30	760	9600
	40	640	10800
	50	600	12000
CFE149X	0	600	420
	10	790	3000
	20	690	5400
	30	640	5400
	40	630	15600
	50	520	19200
CFE149S	0	710	300
	10	870	4200
	20	770	7800
	30	770	4800
	40	760	10800
	50	650	18000
CFE1499	0	580	420
	10	640	420
	20	680	1800
	30	560	4800
	40	560	8400
	50	500	8400

2.3　起泡剂的抗盐性能

2.3.1　氯化钠浓度对泡沫性能影响

用不同质量分数的（0.1%～3%）的氯化钠溶液配制质量分数0.5%的CFE149X溶液，分别考察氯化钠浓度对空白CFE149X溶液和原油+CFE149X溶液（体积1∶1）体系的最大泡沫体积和半衰期的影响，结果如表4所示。在CFE149X质量分数为0.5%、无油条件下，氯化钠含量在0.1%～3%范围内，CFE149X溶液的最大泡沫体积基本不受氯化钠含量的影响，均为600 mL；但泡沫半衰期随着盐含量的增加而逐渐降低。有油条件下（含油量50%），最大泡沫体积较无油条件下的略低，且随着盐含量增加先增大后减小，在500 mL以上，泡沫半衰期随着盐含量增加先增大后降低。与无油存在时对比发现，有油存在时最大泡沫体积略有降低，但泡沫稳定性却显著增强，泡沫稳定性增强了67～126倍。起泡剂CFE149X由30%的非离子表面活性剂、67%的阴非离子表面活性剂和3%的稳泡剂辛醇组成，泡沫的液膜存在双电层结构，电解质存在时会压缩双电层结构，迫使泡沫排液速度加快，泡沫变薄，加速破裂。由于原油的存在剪切过程中会存在乳化，乳化后液膜黏度增大，增强了液膜强度，稳泡性能增加。

表4　氯化钠浓度对CFE149X泡沫性能的影响（CFE149X质量分数0.5%）

氯化钠质量分数/%	最大泡沫体积/mL		半衰期/s	
	无油体系	有油体系	无油体系	有油体系
0.1	600	530	360	32400
0.5	600	530	285	36000
1.0	600	580	270	24000
2.0	600	510	260	21600
3.0	600	500	240	19200

2.3.2　氯化钙浓度对泡沫性能影响

用不同质量分数的（0.01%～0.30%）的氯化钙

溶液配制质量分数0.5%的CFE149X溶液，分别考察氯化钙浓度对空白CFE149X溶液和原油+CFE149X溶液（体积1∶1）体系的最大泡沫体积和半衰期的影响，结果如表5所示。在CFE149X质量分数为0.5%、无油条件下，氯化钙含量在0.01%～0.3%范围内，最大泡沫体积基本不受氯化钙含量的影响，基本维持在610 mL，但泡沫半衰期随着盐含量增加先降低后趋于平衡。氯化钙和氯化钠对CFE149X的稳泡性能影响均较小，泡沫半衰期在300 s左右。有油条件下（含油量50%），最大泡沫体积随着氯化钙含量增加而逐渐减小，但泡沫半衰期随着氯化钙含量增加先增大后显小，氯化钙含量为0.05%时泡沫半衰期最大，氯化钙含量继续增大时泡沫半衰期明显减小。与无油存在时对比发现，有油存在时泡沫发泡体积略有降低，但泡沫稳定性却显著增强，泡沫稳定性增强了23～60倍，界面稳定性增强机理与氯化钠存在的机理相同。

表5 氯化钙浓度对CFE149X泡沫性能的影响

氯化钙质量分数/%	最大泡沫体积/mL		半衰期/s	
	无油体系	有油体系	无油体系	有油体系
0.01	610	610	420	19200
0.05	610	570	360	25200
0.10	610	550	300	13200
0.20	610	510	300	10800
0.30	640	480	300	9600

耐油起泡剂CFE149X中的直链烷醇作为稳泡剂可有效增加液膜的弹性，防止液膜破裂造成的气泡合并变大；非离子表面活性剂可有效提升起泡剂的耐盐性，但是非离子泡沫剂在高温条件下的溶解度较差，需要阴离子组分的增溶，阴非离子表面活性剂具有很好的耐油、耐盐性能，但是合成步骤多，成本高，基于成本和和性能考虑，可根据油藏性质适当增加其含量。

3 结论

以非离子表面活性剂、阴非离子表面活性剂和稳泡剂辛醇按一定比例配制的耐油起泡剂，在含油条件下仍可表现出了较好的起泡性能和稳泡性能。油含量在10%～20%范围内时耐油起泡剂表现出了很好的起泡性能，最大发泡体积是自身的5～9倍，泡沫半衰期随着油含量增加逐渐增大。与无油存在时相比发现，有油存在时泡沫发泡体积略有降低，但泡沫稳定性却显著增强。该耐油起泡剂具有较好的抗盐性能，可根据油藏性质适当调配各组分含量，为泡沫复合驱提供优良的耐油抗盐起泡剂产品。

参考文献：

[1] 韩玉贵. 耐温抗盐驱油用化学剂研究进展[J]. 西南石油大学学报, 2011, 33(3):149-153.

[2] FARAJZADEH R, ANDRIANOV A, ZITHA P L J. Investigation of immiscible and miscible foam for enhancing oil recovery[J]. Ind Eng Chem Res, 2010, 49(4):1910-1919.

[3] CHEN Q, GERRITSEN M G, KOVSCEK A R. Modeling foam displacement with the local equilibrium approximation: theory and experiment verification[J]. SPE J, 2010, 15(1):171-183.

[4] ASHOORIA E, MARCHESINB D, ROSSENA W R. Dynamic foam behavior in the entrance region of a porous medium[J]. Colloids Surf A, 2011, 377(13):217-227.

[5] FARAJZADEH R, ANDRIANOV A, KRASTEV R, et al. Foam-oil interaction in porous media: implications for foam assisted enhanced oil recovery[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2012, 183/184(6):1-13.

[6] INGEBRET F, JOHN Z, INGRID H. Retention of CO_2-foaming agents onto chalk: effects of surfactant structure, temperature and residual oil saturation[C]. //Society of Petroleum Engineers. SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, 2008.

[7] YU B, GLEEN P, NELSON C S, et al. Surfactant formulation evaluation for carbon dioxide foam flooding in heterogeneous sandstone reservoirs[C]. //Society of Petroleum Engineers. The 18th SPE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, 2012.

[8] 郭东红, 关涛, 辛浩川, 等. 耐温抗盐驱油表面活性剂的现场应用[J]. 应用科技, 2009, 17(10):13-14.

[9] 刘文博, 张强. ZS-30 泡沫复合驱配方的研究[J]. 应用化工, 2014, 43(2): 382-383

[10] 刘竟成, 杨敏, 袁福锋. 新型气井泡排剂 SP 的起泡性能研究[J]. 油田化学, 2008, 25(2):111-114.

[11] 李豪浩. 起泡剂的筛选与性能评价[J]. 石油地质与工程, 2009, 23 (2):128-130.

[12] 吴信荣, 林伟民, 姜春河, 等. 空气泡沫调驱提高采收率技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.

[13] 王其伟. 泡沫驱油发展现状及前景展望[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35 (2):94-97.

[14] 林伟民, 史江恒, 肖良, 等. 中高渗油藏空气泡沫调驱技术[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31 (增刊1):115-118.

[15] 杨红斌, 蒲春生, 吴飞鹏, 等. 空气泡沫调驱技术在浅层特低渗透低温油藏的适应性研究[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 69-72.

[16] 徐云. 大港油田空气泡沫驱项目试投产[J]. 石油钻采工艺，2011，33（6）：36.
[17] 王杰祥，王腾飞，韩蕾，等. 特低渗油藏空气泡沫驱提高采收率实验研究[J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2013，35（5）：130–134.
[18] 段文标，康兴妹，熊维亮，等. 特低渗透油藏空气泡沫驱实践与认识[J]. 低渗透油气田，2012，31（1）：107–109.
[19] 张新春，杨兴利，师晓伟. “三低”油藏空气泡沫驱低温氧化可行性研究——以甘谷驿油田唐80区块为例[J]. 岩性油气藏，2013，25（2）：86–91.
[20] 闫凤平，杨兴利，张建成. 空气、泡沫驱提高特低渗透油田采收率效果分析[J]. 延安大学学报（自然科学版），2008，27（4）：58–60.
[21] 贺永洁，汤颖，张新春，等. 甘谷驿采油厂空气泡沫驱体系筛选与评价[J]. 石油化工应用，2015，34（2）：101–106.
[22] 张建成，刘晓娟，师亚栋. 空气泡沫驱室内实验研究[J]. 石化技术，2016，23（6）：150.
[23] 黄秋霞，郭东红，刘亚文，等. 起泡剂的起泡性能及使用浓度优选研究[J]. 精细与专用化学品，2014，22（6）：33–35.
[24] 夏雄燕，方灵丹，谭红川，等. Ross-Miles 法测定表面活性剂发泡力的影响因素分析[J]. 日用化学品科学，2009，32（3）：23–26.
[25] 江建林，岳湘安，高震. 聚合物在泡沫复合调驱中的作用[J]. 石油钻采工艺，2011，33（1）：61–64.
[26] 冯晗. 耐油起泡剂筛选及驱油性能评价[D]. 大庆：东北石油大学硕士论文，2012.
[27] 端祥刚，侯吉瑞，李实，等. 耐油起泡剂的研究现状与发展趋势[J]. 石油化工，2013，42（8）：935–940.

Research and Evaluation of Oil-resistance and Salt-resistance of Oil-resistant Foaming Surfactant

LUAN Huoxin[1,2], XIANG Xiangxing[1], HE Yan[3], GUAN Dan[1], QU Tingli[1], REN Hao[1], CHEN Quansheng[1], XU Chongjun[1], YANG Long[2]
(*1.Research Institute of Experiment and Detection, Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China; 2. Xinjiang Laboratory of Petroleum Reserve in Conglomerate, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China; 3. Data Company, Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, P R of China*)

Abstract: The performance of oil-resistance and salt-resistance of 4 kinds of foaming surfactants, composed of a non-ionic surfactant, a non-ionic surfactant and the stabilizer octanol, was evaluated by Wuyin agitator method. The results showed that with the surfactant concentration increased, the volume of foam increased gradually, and the foaming volume was 2—6 times the volume of its own solution at the surfactant concentration of 0.01%—0.5%. Foaming half-life increased with the surfactant concentration increased. With the proportion of crude oil increasing, the maximum foaming volume increased first and then decreased. 4 kinds of foaming surfactants showed good foam capacity when the oil content was of 10%—20%, the maximum foaming volume was 5—9 times volume of its own solution, and the half-life increased obviously with the increase of oil content. CFE149X, a mixture of non-ionic surfactant, non-ionic surfactant and the stabilizer octanol with mass ratio 30∶67∶3, had a good foaming stability and foaming performance in the presence of oil. When the surfactant concentration was 0.5% and the oil content was 50%, the foaming volume and the foaming half-life increased first and then decreased with the increase of salt content. Compared with the system without oil, it was showed that the maximum foaming volume was lower; however, the foam stability was significantly enhanced. The oil-resistant foaming surfactant CFE149X could be used as oil-resistant and salt-resistant foaming surfactant to provide foaming surfactant products of foaming flooding for the reservoir application.

Keywords: *foaming complex flooding*; *foaming surfactant*; *foaming capacity*; *foaming half-life*; *stability*