文章编号:1000-4092(2020)01-128-05

一种微生物采油功能性激活剂激活特性及驱油性能*

陈琼瑶[1],刘 涛[1],于 瑶[2],李彩凤[1],曹嫣镔[1],林军章[1]

(1.中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院,山东 东营 257000;2.中国石化胜利油田分公司东胜公司,山东 东营 257000)

摘要:为了解决常规激活剂在油藏深部的激活作用较弱的问题,胜利油田石油工程技术研究院研发了以长碳链高分子多糖为碳源的长效功能性激活剂,本文研究了该功能性激活剂的好氧激活、厌氧激活特性及该功能激活剂的驱油效果。研究结果表明,该功能性激活剂激活后菌数达到5×10^8个/mL以上,延长激活时间超过60 d,好氧激活微生物后乳化指数高达95%,厌氧激活微生物后产气压力达到0.058 MPa。经功能性激活剂激活后微生物代谢产物对原油的乳化分散及产气效果明显提高,功能性激活剂驱替岩心后在空白基础上提高驱替效率14.1%,比常规激活剂的提高4.5%,且岩心内剩余油明显向岩心出口端运移。功能性激活剂能够有效激活好氧及厌氧微生物生长代谢产生驱油作用,具有广阔的现场应用前景。图6表3参19

关键词:深部激活;功能性激活剂;长效;微生物;驱替效率

中图分类号:TE357.9 **文献标识码**:A **DOI**:10.19346/j.cnki.1000-4092.2020.01.022

0 前言

随着原油的长期开采,国内外大多数油藏进入高含水期,剩余油更加分散,开采难度加大,油田稳产、高产开发形势严峻。微生物采油技术是利用向油藏中注入激活剂或者补充微生物,通过激活油藏微生物的方式强化其生长代谢作用而达到提高原油采收率的技术[1-3]。近几年微生物采油技术在国内外都得到了广泛应用,且在现场取得了显著的效果[4-6]。目前在驱油现场微生物注入主要以常规微生物激活剂体系为主,虽然能够激活油藏微生物而产生驱油效果,但由于常规激活剂主要以低碳数的单糖为碳源,随着常规激活剂在油藏中的运移、消耗,常规激活剂在油藏深部的激活作用较弱[7-8],因此,需要研发新的高效、长效的激活剂体系,以实现微生物的深部激活代谢。本文报道了由胜利油田石油工程技术研究院研发的以长碳链高分子多糖为碳源的长效功能性激活剂的好氧激活、厌氧激活特性以及使用该功能激活剂的驱油效果。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

功能性激活剂体系,配方为0.5%长碳链高分子多糖+0.2%蛋白胨+0.05%磷酸氢二钾,为胜利油田石油工程技术研究院研发产品,具有完全自主知识产权;常规激活剂体系,配方为2%葡萄糖+0.5%酵母粉+0.2%磷酸氢二钾。配液用水为区块注入水,矿化度70000 mg/L,主要离子质量浓度(单位mg/L):Na^+ 18228 mg/L、K^+ 266 mg/L、Mg^{2+} 1146 mg/L、Ca^{2+} 3379 mg/L、HCO_3^- 921 mg/L、NO_3^- 160 mg/L、Cl^- 45900 mg/L;实验用油为胜利油田沾3区块原油,脱水脱气原油黏度为1160 mPa·s(50℃)。实验用岩心为填砂管岩心,岩心尺寸为ϕ38 mm×600 mm,用粒径0.075～0.428 mm的石英砂填制而成,充填后

* 收稿日期:2019-06-03;修回日期:2019-11-15。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)"中高温油藏微生物驱油关键技术研究"(项目编号2013AA064401)。

作者简介:陈琼瑶(1985-),女,工程师,中国地质大学(武汉)油气田开发专业硕士(2010),从事微生物采油工作。刘涛(1983-),男,工程师,中国海洋大学海洋化学专业硕士(2010),本文通讯联系人,主要从事微生物采油研究及现场应用研究,通讯地址:257000山东省东营市西三路306号胜利油田石油工程技术研究院,E-mail:greensky1123@163.com。

岩心渗透率范围为1300×10^{-3}～1400×10^{-3} μm^3。

BX53型显微镜，日本奥林巴斯公司；7890A型气相色谱仪，美国安捷伦公司；Vortex Genius 3型旋涡混合仪，德国艾卡公司。实验所用的物模装置如图1所示。

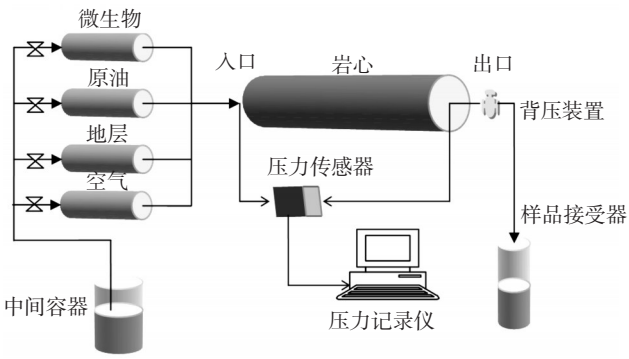

图1　岩心驱替模拟实验装置

1.2　功能性激活剂激活实验

1.2.1　功能性激活剂好氧激活

将功能性激活剂溶于注入水中进行摇瓶培养并分析菌数变化和作用效果，摇床转速为120 r/min，摇瓶体积为500 mL，装入液量为200 mL，激活培养温度为60℃。对照组是常规激活剂的好氧激活。乳化指数测定方法如下：在试管中加入加等体积的培养液和柴油，利用微型旋涡混合仪高速涡旋混匀震荡2 min，在避光、60℃下静置24 h，然后测量乳化液和油相体积，由乳化液与油相的体积之比计算乳化指数[9]。

1.2.2　功能性激活剂厌氧激活

采用亨盖特厌氧培养的方式[10]进行功能激活剂的厌氧培养并分析菌数变化和作用效果，厌氧瓶体积为300 mL，装入液量为100 mL，激活培养温度为60℃。对照组是常规激活剂的厌氧激活。产气压力通过连接厌氧瓶的压力表进行测定。

1.3　驱油实验

利用人工填砂管进行物理模拟驱油实验，具体步骤如下：(1)将填砂管岩心抽真空、饱和地层水，测定岩心孔隙体积、孔隙度；(2)饱和原油造束缚水，计算岩心的原始含水饱和度；(3)将岩心在60℃下老化7 d后，一次水驱驱替3 PV，记录驱替过程中产出油量、产出水量，驱替压力变化；(4)注入0.3 PV功能性激活剂，培养50 d；(5)二次水驱驱替3 PV，记录驱替过程中产出油量、产出水量，驱替压力变化，计算采收率、含水率的变化；(6)驱替结束后拆卸岩心内部石英砂，测定不同部位剩余油[12]。

2　结果与讨论

2.1　功能性激活剂的激活效果

常规激活剂和功能性激活剂好氧激活和厌氧激活后，菌数随时间变化见图2。由图2可知，常规激活剂和功能性激活剂均能激活油藏微生物，菌数达到10^{7}个/mL以上，且好氧激活后菌浓比厌氧激活后的高一个数量级以上[11-13]。好氧激活后，常规激活剂激活微生物菌数峰值出现在20 d，而功能性激活剂激活微生物峰值出现在40 d，且高菌数保持时间从30 d持续到60 d，菌数均在5×10^{8}个/mL以上。厌氧激活后，功能性激活剂激活微生物的菌数也比常规激活剂激活的高，功能性激活剂长时间激活效果也明显优于常规激活剂。这表明无论好氧激活还是厌氧激活，功能性激活剂的长碳链分子结构能够更加持久地提供微生物所需的营养物质，尤其是在高温、高压、高矿化度的油藏环境中，能够保持长时间的高效激活特性，提高微生物对原油的有效作用时间。

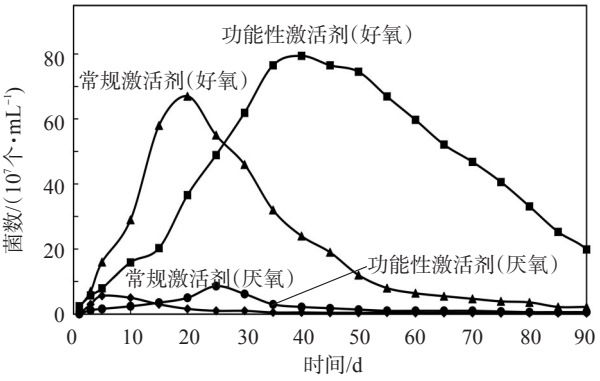

图2　常规激活剂和功能性激活剂好氧激活和厌氧激活后菌数随时间变化

好氧激活后原油乳化特性分析结果表明，功能性激活剂体系的乳化指数在95%以上[14-15]，优于常规激活剂体系的(86%)，具体见表1。这表明功能性激活剂激活后，微生物生长代谢产物累积量增加，能够更好地乳化分散原油。厌氧激活的微生物代谢产生的甲烷等生物气能够溶于原油，降低原油黏度，提高原油流动性[16-17]。功能性激活剂激活厌氧微生物后产生的生物气压力为0.058 MPa，高于常规激活剂体系厌氧微生物后产生的生物气压力

(0.046 MPa),具体见表1。表2给出了微生物厌氧激活后的产气组成,功能性激活剂激活厌氧微生物产甲烷量达到了35.43%,优于常规激活剂产甲烷量,而且根据厌氧瓶体积为100 mL,培养温度为60℃,利用理想气体状态方程[18]折算为标准气体体积为46.93 mL,产生气体量占到了厌氧瓶体积的46.93%,此结果对油藏条件下微生物产气量的计算具有参考价值。

表1 不同激活剂激活效果对比

激活剂体系	好氧激活		厌氧激活	
	峰值菌数/(10^8个·mL^{-1})	乳化指数/%	峰值菌数/(10^7个·mL^{-1})	产气压力/MPa
常规性激活剂	1.5	84	2.6	0.046
功能性激活剂	6.8	95	7.2	0.058

表2 常规激活剂、功能激活剂厌氧激活产气组成对比

激活剂体系	CH_4/%	CO_2/%	N_2/%	O_2/%
空白	0.43	1.82	97.75	–
常规激活剂	28.03	25.97	44.15	1.85
功能性激活剂	35.43	27.11	36.59	0.88

2.2 物模驱油实验结果及分析

2.2.1 功能性激活剂的驱油效果

为进一步研究功能性激活剂的驱油性能,分别采用功能性激活剂和常规激活剂进行驱替实验,实验对比了空白岩心、注入常规激活剂及功能性激活剂驱替过程中含水率、采出程度及压力的变化,结果见图3～5。空白岩心驱替过程中含水上升,驱替压力逐渐降低,呈现了典型的水驱过程的变化规律[19](图3),一次水驱3 PV后含水达到94.8%,继续后续水驱过程中含水率上升幅度变缓,驱替压力缓慢降低。注入功能性激活剂的岩心驱替过程中一次水驱与空白岩心相比没有明显变化,但是注入功能性激活剂培养后驱替压力明显升高,含水率最大降幅达到14.52%(图5),而常规激活剂驱替后含水率降幅只有4.28%(图4)。这表明功能性激活剂能够更加明显地产生驱油效果,这与有效激活的好氧微生物对原油产生乳化分散有关,微生物乳化、分散原油后随着后续驱替的进行,原油向前运移,在多孔介质中向前推移,同时激活后的厌氧微生物的产气作用强化了对原油的乳化分散效果。乳化原油不断推移过程中,整体驱替压力升高,产出液含水率逐渐降低,原油被采出。

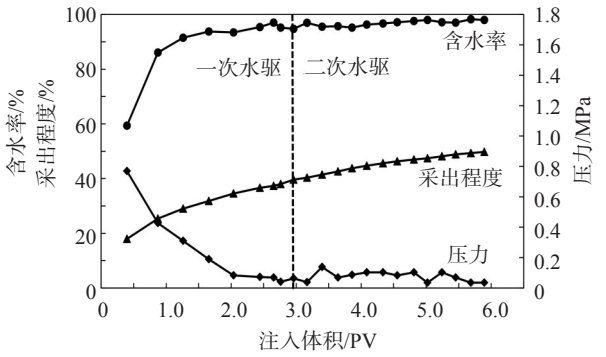

图3 空白岩心驱替过程中含水率、采出程度和压力的变化

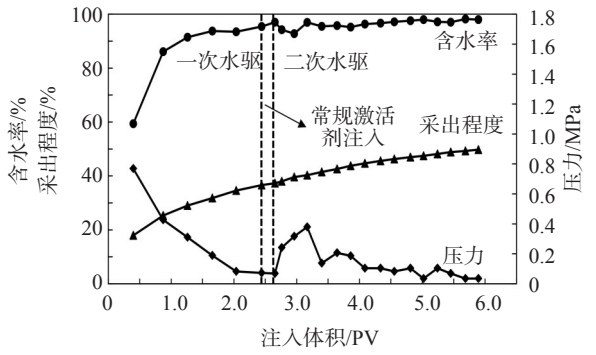

图4 常规激活剂驱替过程中含水率、采出程度和压力的变化

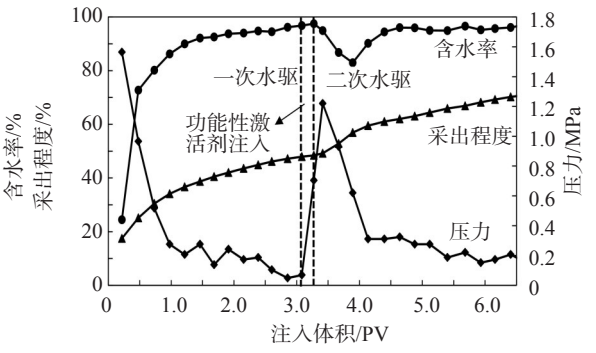

图5 功能性激活剂驱替过程中含水率、采出程度和压力的变化

空白岩心、注入常规激活剂及功能性激活剂驱替实验结果见表3。结果表明,功能性激活剂能够在空白水驱基础上提高驱替效率14.1%,与常规激活剂相比提高了4.5%,功能性激活剂表现了较好的驱油效果,而且实验结果具有很好的重现性。

2.2.2 岩心驱替后不同部位剩余油分布情况

岩心驱替结束以后,为明确岩心内部不同部位微生物作用后剩余油的分布规律,对岩心内不同部位的剩余油进行了分析,结果见图6。结果表明,空

表3　功能性激活剂提高采收率效果

岩心号	激活剂	孔隙体积/mL	孔隙度/%	渗透率/(10^{-3} μm²)	原始含油/mL	一次水驱驱替效率/%	提高驱替效率/%	平均提高驱替效率/%	微生物提高驱替效率/%
1	空白	241	35.4	1385	226	42.3	7.2	7.3	–
2		240	35.3	1365	228	42.6	7.4		
3	常规激活剂	240	35.5	1350	225	42.8	16.7	16.9	9.6
4		242	36.1	1380	224	42.6	17.1		
5	功能性激活剂	245	36.0	1394	230	42.0	21.9	21.4	14.1
6		241	35.4	1408	228	42.5	20.9		

白岩心驱替后，从岩心入口到岩心出口剩余油整体变化规律不明显，岩心出口剩余油浓度比入口和中部的略高。用功能性激活剂驱替后的岩心从入口到出口剩余油浓度逐渐升高，且入口浓度远低于出口浓度，这进一步证明了微生物作用后岩心内原油被驱动，逐步向出口运移的规律。用常规激活剂驱替后的岩心从入口到出口变化趋势与功能性激活剂激活驱替规律类似，但是剩余油浓度比功能性激活剂驱替后的高，这说明功能性激活剂激活驱替后驱替效果优于常规激活剂激活驱替效果。

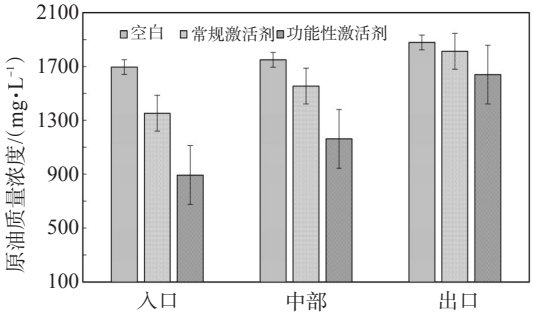

图6　岩心水驱后不同部位剩余油的分布

3　结论

以长碳链高分子多糖为碳源的功能性激活剂，可实现微生物在油藏深部的有效激活生长，在油藏中有效激活滞留激活时间延长到60 d以上。

经功能性激活剂激活后微生物代谢产物对原油的乳化分散及产气效果明显提高，证明了功能性激活剂能够有效激活好氧及厌氧微生物生长代谢产生驱油作用。

功能性激活剂具有较好的驱替效果，微生物作用后剩余油显著降低，能提高驱替效率14.1%，具备广阔的现场应用前景。

参考文献：

[1] MOKHTARI M. OZBAYOGLU M E. Laboratory investigation on gelation behavior of xanthan crosslinked with borate intended to combat lost circulation[C]. SPE 136094, 2010.

[2] 孙刚正，宋欣，吴晓玲，等. 不同长效激活剂组分对沾3区块内源功能微生物激活研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版)，2017，32(6)：112-118.

[3] 伍晓林，赵玲侠，马挺，等. 大庆油田聚驱后油藏内源微生物激活剂的筛选和效果评价[J]. 南开大学学报(自然科学版)，2012，45(4)：105-111.

[4] MCCOOL S, LI X, WILLHITE G P. Flow of a polyacrylamide/chromium acetate system in a long conduit[J]. Soc Pet Eng J, 2009, 14(1)：54-66.

[5] 胡婧，刘涛. 激活剂用量对油藏内源微生物群落的影响[J]. 生物加工过程，2016，14(3)：7-11.

[6] 乐建君，刘芳，张继元，等. 聚合物驱后油藏激活内源微生物驱油现场试验[J]. 石油学报，2014，35(1)：99-106.

[7] 郭辽原，张玉真，杨年文，等. 邵家油田沾3块内源微生物驱激活剂优化及现场试验[J]. 油气地质与采收率，2012，19(1)：79-81.

[8] 高学忠，魏明，宁荦. 利用微生物调剖技术提高原油采收率[J]. 石油学报，1999，20(5)：54-57 .

[9] 中华人民共和国石油天然气行业标准 SY/T 5523—2000 油气田水分析方法[S]，2000.

[10] 刘涛，赵凤敏，林军章，等. 胜利油田辛6 8区块内源微生物驱油现场试验[J]. 石油与天然气化工，2018，47(2)：71-74.

[11] POLLOCK T J, MIKOLAjCZAK M, YAMAZAKI M. Production of xanthan gum by sph ingomonas bacteria carrying genes from xan thomonas campestr is [J]. J Ind Microbiol Biotechnol, 1997, 19：92-97.

[12] 刘涛，宋智勇，曹功泽，等. 中一区Ng3区块微生物驱油物模实验研究[J]. 应用与环境生物学报，2013，19(2)：335-341.

[13] 刘涛，宋智勇，曹功泽，等. 微生物驱油过程中模拟地层条件对微生物生长的影响[J]. 油田化学，2013，30(1)：92-95.

[14] 齐义彬，曹美娜，黄立信，等. 微生物与弱凝胶复合驱油配伍性[J]. 石油学报，2015，36(4)：490-495.

[15] 宋永亭，李彩风，曹嫣镔，等. 内外源微生物复合吞吐技术在常规稠油低效井中的研究与应用[J]. 石油钻采工艺，2018，40(3)：400–403.
[16] 李彩风，李阳，吴昕宇，等. 胜利油田沾3区块油藏中 *Geobacillus* 菌的激活研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2016，40(1)：163–167.
[17] 杨振宇，石梅，王大威，等. 大庆油田本源微生物群落分布及采油机理研究[J]. 石油学报，2006，27(S1)：95–100.
[18] 姚军，赵建林，张敏，等. 基于格子Boltzmann方法的页岩气微观流动模拟[J]. 石油学报，2015，36(10)：1280–1289.
[19] ZHU H B，HAN K C，JOHN D. Coates applicability of anaerobic nitratedependent Fe (II) oxidation to microbial enhanced oil recovery (MEOR)[J]. Environ Sci Technol，2013，47：8970–8977.

Activation Characteristics and Oil Displacement Performance of a New Functional Activator

CHEN Qiongyao[1]，LIU Tao[1]，YU Yao[2]，LI Caifeng[1]，CAO Yanbin[1]，LIN Junzhang[1]

(*1. Research Institute of Petroleum Engineering，Shengli Oilfield Branch Company，Sinopec，Dongying 257000，P R of China*；*2. Dongsheng Group Co.，Ltd，Shengli Oilfield Branch Compamy，Sinopec，Dongying，Shandong 257000，P R of China*)

Abstract: In order to solve the problem of weak activation of conventional activators in deep reservoir，Shengli oilfield petroleum engineering technology research institute has developed a long-term functional activator with long carbon chain polymer polysaccharide as carbon source. The research on the aerobic activation，anaerobic activation and oil displacement effect of functional activator was carried out. The results showed that after the activation of functional activator，the number of bacteria was more than 5×10^8 cells/mL and the activation time was extended more than 60 days. The emulsification index of aerobic activated microorganism was as high as 95%. After anaerobic activation of microorganism，the gas production pressure reached 0.058 MPa. After activated by functional activator，the emulsification and gas production of crude oil by microbial metabolites were obviously improved. After the core was displaced by the functional activator，the displacement efficiency was increased by 14.1% on the basis of blank，which was 4.5% higher than that of conventional activator，the remaining oil in the core obviously migrated to the outlet end of the core. The functional activators could activate effectively the aerobic and anaerobic microorganisms to displace the crude oil with a broad field application prospect.

Keywords: *deep activation*；*functional activator*；*long-acting*；*microorganism*；*displacement efficiency*