

不同采出程度下微生物采油效果分析

刘保磊¹, 俞理², 黄立信², 郑齐义³

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007
3. 中国石油天然气股份有限公司大庆油田分公司采油工程研究院, 黑龙江大庆 163453

摘要 为研究采出程度对微生物采油效果的影响, 向不同采出程度的 4 组岩心中分别注入 0.2 倍岩心孔隙体积的接种有产表面活性剂菌、产聚合物菌的激活培养基。封闭岩心并置于油藏温度下对微生物进行培养。10d 后再次对岩心进行驱替, 用平板计数法检测水驱过程中产出液的菌体浓度变化。同时将采取微生物采油措施的岩心的驱油效率与不接种菌的岩心的驱油效率对照, 观察采收率的提高幅度, 发现采出程度不同时, 驱替压力、菌体浓度、最终的驱油效率均不同。实验表明, 采出程度导致的原油组分、油水体积比、油水渗流能力等参数的变化共同影响了微生物的生长繁殖及其代谢产物浓度和总量的积累, 导致采收率提高的幅度随采出程度的提高呈先增大后减小的趋势。

关键词 微生物采油; 采出程度; 原油组分; 驱替压力; 驱油效率

中图分类号 TE312

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)15-0067-04

Performance of Microbial Enhanced Oil Recovery Under Different Recovery Percentages of Reserves

LIU Baolei¹, YU Li², HUANG Lixin², ZHENG Qiyi³

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. Daqing Oil Production Engineering Research Institute, China National Petroleum Corporation, Daqing 163453, Heilongjiang Province, China

Abstract In order to study the performance of microbial enhanced oil recovery under different recovery percentages of reserves, four groups of cores with different oil saturation extents were injected into 0.2 pore of the culture medium inoculated with the bacteria producing biosurfactant and biopolymer. Then the core was closed to cultivate the bacteria, in the reservoir temperature, beneficial for oil production. After 10 days, the water-oil displacement experiment was carried out and the bacterial concentrations in the flooding water were detected by the plate count method. By comparing the oil displacement efficiency of the core inoculated with bacteria with that of the core without bacteria, it is shown that, in the process of the experiment, the displacement pressure, the bacterial concentrations and the final displacement efficiency all vary with the different recovery percentages of reserves. It is concluded that, with the different recovery percentages of reserves, the variations of oil components, oil-water phase ratio and the fluid ability affect the reproduction of microorganisms and the accumulation of its metabolite concentrations and the gross amount, as a result, the recovery efficiency increases firstly and then decreases with the continuous increase of the recovery percentage of reserves. The study provides some guidance in choosing the microbial strain and the time of the microbial enhanced oil recovery and the displacement rate.

Keywords microbial enhanced oil recovery; recovery percent; oil composition; displacement pressure; oil displacement efficiency

收稿日期: 2010-06-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005cb221308); 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2008A-1403)

作者简介: 刘保磊, 硕士研究生, 研究方向为微生物采油提高采收率, 电子信箱: liublei@hotmail.com; 俞理(通信作者), 高级工程师, 研究方向为油田提高采收率技术, 电子信箱: yuli3058@163.com

0 引言

微生物采油技术以其经济、环保、施工简单的优势,受到采油工作者的关注。随着科学技术的发展,对微生物采油提高采收率机制的阐述也逐渐深入。目前,从事微生物采油的工作者多从菌体生命活动的角度出发,通过分析微生物的代谢途径、代谢产物等方面来研究提高原油采收率的方式^[1-4]。而在油藏开发程度引起的油水动态变化方面,对微生物采油介入时机的研究尚有待深入。

油藏采出程度的不断提高,直接导致油层含油饱和度的降低,原油中的轻质组分在水洗作用下被优先采出,非烃、沥青质含量相对增加,原油平均分子量增大,原油黏度升高,密度增加;低分子量的正构烷烃逐渐减少,主峰碳逐渐后移,原油的轻/重比值呈现降低趋势,油层中芳烃含量相对增加^[5-7];如此,大大影响了微生物的生长特性和作用于原油的能力。

本文以不同采出程度的4组岩心模拟油藏开发程度的各个时期,再分别向岩心中注入接种有采油菌的培养基进行微生物采油实验,考查在不同开采程度下微生物提高原油采收率的效果。

1 实验材料与方法

实验用岩心为人造填砂模型,岩心直径2.5cm,长20cm,气测渗透率 $0.290\mu\text{m}^2$ 。原油黏度为 $117\text{mPa}\cdot\text{s}$,实验温度为实际地层温度 38°C 。检测菌体浓度的物品有LB固体培养基平板、生理盐水、试管、刮铲等。按照常规物理模拟驱油方法,将岩心抽真空,饱和地层水,饱和油,建立束缚水。对岩心进行水驱油,得到不同采出程度(20%,35%,50%,65%)的4组岩心,每组有3块岩心,其中2块分别注入 $0.2V$ (V 为岩心孔隙体积)的接种有产表面活性剂菌、产聚合物菌的激活培养基,另外1块不注菌岩心作为实验对照。将注菌岩心置于油藏温度下培养10d后进行后续水驱,每驱出 $0.4V$ 的液体时更换试管,检测其中的菌体浓度。检测菌体浓度的方法为从驱出液中吸取1mL注入到1号生理盐水试管中并充分振荡,然后从1号生理盐水试管中吸取1mL混合液注入到2号生理盐水试管中并充分振荡,依次稀释到所需浓度。吸取稀释后的混合液体 $100\mu\text{L}$ 置于LB固体培养基平板上,用刮铲涂布均匀,放入 38°C 恒温培养箱培养3d,检测菌体浓度。记录驱油过程中压力、产油量的变化,直到含水率为100%时停止驱替。将岩心的驱替结果与相应的不注菌液的岩心对照,考查不同采出程度下采用微生物采油的岩心采收率提高的幅度。

2 结果与分析

实验结果发现,采出程度为50%左右时注入菌液进行微生物采油,更利于微生物的生长繁殖和采收率幅度的提高。微生物作用于原油提高采收率的幅度与驱出 $1.2V$ 的液体中的菌体浓度平均值存在良好的对应关系。岩心中含油饱和度大于50%时,随采出程度的提高,菌体浓度平均值与微生物

作用于原油提高的采收率幅度均逐渐上升;岩心含油饱和度小于50%时,随采出程度的提高,菌体浓度平均值与微生物作用于原油提高采收率的幅度呈下降趋势(图1)。分析认为,岩心孔隙中原油组分和水相体积的变化影响了微生物的生长和相应的代谢产物的生成,而且油水两相渗流能力随油水体积比的不同而变化。以上因素共同造成采出程度不同时微生物驱油效率的不同。

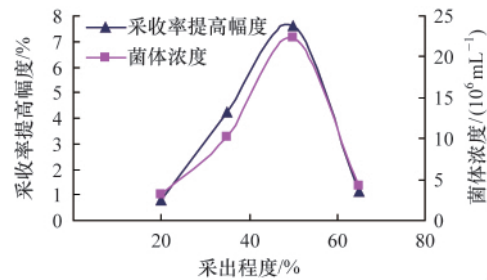


图1 采收率提高幅度与菌体浓度、采出程度的关系

Fig. 1 Relationship between increased range of recovery or cell concentration and recovery percentage

2.1 菌数与采出程度的关系

油藏水驱开发过程中,分子量低、黏度小、极性低的小分子烃比大分子长链烃更易于被驱出。随采出程度的不断提高,剩余油中轻质烃组分的相对含量逐渐降低,不利于微生物降解的大分子长链烃的相对含量增加^[8],孔隙中水相与油相的体积比逐渐增大。

油藏温度下,同时向采出程度不同的岩心中注入接种有采油菌的培养基,封闭岩心进行培养。后续水驱过程中检测注入不同孔隙体积倍数的液体时驱出液中的菌体浓度,关系曲线如图2所示。分析认为,采出程度较低时岩心孔隙中利于微生物生长繁殖的水相体积较小,微生物的代谢产物很快达到极限浓度,制约微生物生长繁殖的数量,造成采出程度为20%的岩心中菌体浓度随注入孔隙体积倍数的增大下降较快。随采出程度的提高,水相体积增大,微生物有足够的空间可以利用,岩心中菌数逐渐上升。采出程度达到一定值后原油中的轻烃组分大大降低,微生物消耗掉易于利用的碳源

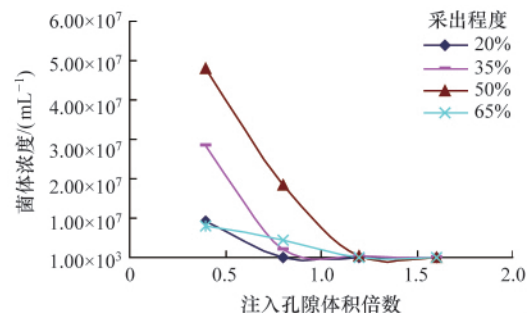


图2 不同岩心中菌体浓度与注入孔隙体积倍数的关系

Fig. 2 Relationship between cell concentration and injection pore volume multiple in different cores

后, 较难降解利用油相中的大分子长链烃, 使采出程度为 65% 的岩心中菌体浓度下降, 同时由于水相体积较大, 菌体浓度随注入孔隙体积倍数的增大下降缓慢。

2.2 渗透率与菌数的关系

岩心孔隙中的菌数达到一定程度后, 可使岩心的渗透率降低, 水驱过程中渗透率与注入孔隙体积倍数的关系曲线如图 3 所示。注入孔隙体积倍数为 0 时, 表示菌未激活时的渗透率值; 地层水中的内源菌被激活并培养后, 岩心的渗透率降低, 并随注入孔隙体积倍数的增加而变化。由于水驱过程岩心中菌群的存在引起的水相黏度变化不大, 而微生物代谢产生的有机酸的 pH 值在 4~9 之间^[9], 难以引起酸岩反应, 因此对渗透率的影响很小。

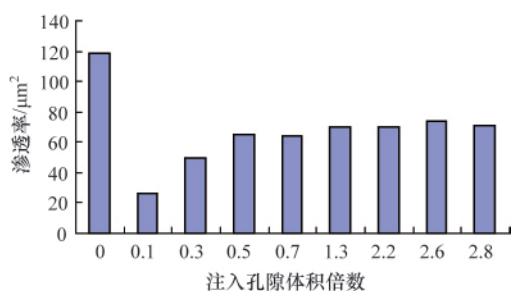


图 3 渗透率随注入孔隙体积倍数的变化

Fig. 3 Relationship between permeability and injection pore volume multiples

孔喉比、迂曲度、石英砂颗粒的粗糙度等会引起菌体在岩心中发生吸附和滞留现象^[10-11], 菌体浓度的升高会加大菌体随水流运移的难度^[12], 造成菌体在岩心的喉道和孔隙中发生堆积和堵塞, 导致岩心孔喉变小。由于岩心的渗透性主要受喉道的形状和大小所控制^[13], 喉道大小的改变会影响油水流动方向和渗透率的变化, 喉道变小将降低岩心的渗透率。随驱替程度的提高, 岩心中的一部分菌体被水流携带出, 使得岩心中的菌数减少, 孔隙和喉道的大小得到部分恢复, 使岩心渗透率有一定程度增大。

2.3 代谢产物与采出程度的关系

微生物采油与化学驱有相似之处, 化学驱在实现有效驱替剩余油时, 不仅要求驱油剂的化学性质要好, 也要求驱油剂的浓度及其在油藏中的体积分数达到一定的界限值。从微生物采油角度出发, 除微生物代谢产物的性质要好外, 其浓度、体积在油藏中均需达到一定值后才能有效提高采收率。采出程度低时, 岩心中水相体积较小, 微生物产生的代谢产物易达到极限浓度。同时孔隙中水相体积较小时, 造成最终的代谢产物的体积较小, 不能起到提高采收率的作用。孔隙中水相体积较大时, 对代谢产物的浓度起到一定的稀释作用, 利于微生物最终代谢产物的积累; 水相体积过大会造成代谢产物量达不到有效驱油浓度, 影响采油效果。从图 4 可得, 采出程度约 50% 时, 微生物代谢产生可以堵塞岩心的生

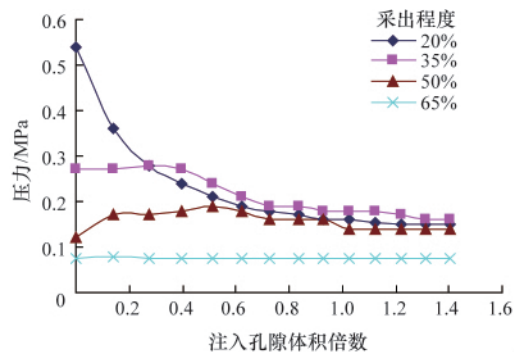


图 4 注菌后压力变化与注入孔隙体积倍数的关系

Fig. 4 Relationship between pressure and injection pore volume multiple after injecting bacteria

物聚合物, 能够起到提高并稳定驱替压力的作用。采出程度较低或较高时, 代谢产物的总量和浓度不能达到理想的比例, 造成岩心的封堵效果不好。

2.4 油相渗流能力与采出程度的关系

由油水两相渗流理论^[14]可知, 随采出程度的提高, 岩心中油相体积降低, 水相渗透率增大; 剩余油中高分子量烃类物质的质量分数上升, 而高分子量烃类黏度高、极性大, 容易吸附在岩心上, 边界层效应加剧了油相渗流的难度, 因此在驱替过程中若要实现剩余油有效驱替, 需要提高对微生物降解原油的能力、代谢产物浓度和总量的要求, 从而增大了微生物采油提高采收率的难度。

3 结论

- 1) 微生物采油过程中, 需要考虑油藏开发程度引起的原油组分的动态变化, 在不同的开采程度下, 及时激活 (或筛选) 适应不同原油组分的菌群 (菌种)。
- 2) 采出程度过高的油层利于菌群利用的烃类物质减少, 需要及时向油藏中的菌群补充营养。
- 3) 通过控制水相驱替速度降低代谢产物中对菌体有害的物质浓度, 可使得油藏中的菌体浓度和代谢产物浓度与总量保持在有利驱油的合理范围内。
- 4) 微生物采油需要考虑多孔介质中的油水相体积比, 水相体积过小不利于微生物采油。

参考文献 (References)

- [1] Leahy J G, Colwell R R. Microbial degradation of Hydrocarbons in environment[J]. *Microbiological Research*, 1990, 54: 305-315.
- [2] 张蔚文, 张灼. 细菌化学趋向性机理的研究进展 [J]. *微生物学通报*, 1993, 20(3): 175-179.
Zhang Weiwen, Zhang Zhuo. *Microbiology*, 1993, 20(3): 175-179.
- [3] 陈智宇, 冯庆贤, 刘如林. 嗜热采油微生物菌种的研究与应用[J]. *石油学报*, 2000, 22(6): 59-62.
Chen Zhiyu, Feng Qingxian, Liu Rulin. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 22(6): 59-62.
- [4] 乐建君, 陈星宏, 李茜秋. 提高原油采收率试验菌的筛选和评价方法

- [J]. 油田化学, 1996, 12(2): 157-160.
Le Jiangjun, Chen Xinghong, Li Qianqiu. *Oilfield Chemistry*, 1996, 12 (2): 157-160.
- [5] 刘晓艳, 李宜强, 冯子辉. 不同采出程度下石油组分变化特征[J]. 沉积学报, 2000, 18 (2): 324-326.
Liu Xiaoyan, Li Yiqiang, Feng Zihui. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (2): 324-326.
- [6] 陈祖林, 朱扬明, 陈奇. 油层不同开采时期原油组分变化特征[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 169-173.
Chen Zulin, Zhu Yangming, Chen Qi. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 169-173.
- [7] Li M W, Yao H X, Stasiuk L D, *et al.* Effect of maturity and petroleum expulsion on pyrrolic nitrogen compound yields and distribution in Duvernay Formation petroleum source rocks in central Alberta, Canada [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 28: 731-745.
- [8] Elmendorf D L, Haith C E, Douglas G S, *et al.* Relative rates of biodegradation of substituted polyaromatic hydrocarbons [C]// Bioremediation of chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons. New Jersey: Lewis Publishers, 1994.
- [9] 阿特拉斯 R M. 石油微生物学[M]. 黄第藩, 译. 北京: 石油工业出版社, 1991.
Atlas R M. *Petroleum microbiology* [M]. Huang Difan, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [10] 雷光伦, 陈希明, 陈月明, 等. 微生物在油层中的运移能力及规律[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 75-78.
Lei Guanglun, Chen Ximing, Chen Yueming, *et al.* *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(5): 75-78.
- [11] Chang M M, Chung F T, H, Brgant R S, *et al.* Modeling and laboratory investigation of microbial transport phenomena in porous media[C]//SPE/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 1991, 22845-MS.
- [12] 彭裕生, 季华生, 梁春秀. 微生物提高石油采收率的矿场研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
Peng Yusheng, Ji Huasheng, Liang Chunxiu. *The field study of microbial enhanced oil recovery* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [13] 罗蛰潭, 王允成. 油气储集层的孔隙结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
Luo Zhetan, Wang Yuncheng. *The pore structure of reservoir* [M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [14] 葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1982.
Ge Jiali. *Petrol-gas permeation fluid mechanics* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1982.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“2011 农业工程新技术国际学术会议”征文

中国农业工程学会主办的“2011 农业工程新技术国际会议”将于 2011 年 5 月 27 日在山东省淄博市召开。

征文内容:

1) 农业工程新技术、新进展;保护性耕作技术及机具研究;变量施肥及精确喷药技术;复式中耕作业及除草机械;联合收获机减振、优化、可靠性及智能化设计技术;经济类作物联合收获技术与机具;林果采集、秸秆收集及高效生态化利用技术;设施农业控制、高产新技术;种子清选、加工、干燥、贮藏新技术;生物系统虚拟建模与可视化仿真研究;农业装备虚拟样机、虚拟试验及可靠性设计方法;生物芯片、生物传感器和生物仪器的智能设计;精准农业技术、装备与仪器;大中型拖拉机及配套机具的设计、制造及运用;汽车、发动机和农业装备中的节能及智能计算。

2) 支撑低碳农业及可持续发展的农业工程新技术;土壤有机碳库组分、有机碳的稳定性与农田生产力;循环型农业工程技术;节水灌溉及农业节能减排新技术;提高农业装备作业效率的技术、措施及模式;生态农业、绿色农业、有机农业、观光农业等新模式。

3) 太阳能、风能、生物质能利用新技术;太阳能建筑、温室及光伏发电技术;风光互补发电系统及风能独立发电系统;大型风力发电机设计、控制及并网技术;生物质能利用新技术(秸秆、能源作物、林木、海藻等生物质能源转化应用原理与技术)。

4) 食品及农产品品质分析及质量安全检测控制新技术;色谱技术在食品、农产品检测分析中的应用;质谱技术在食品、农产品检测分析中的应用;光谱技术在食品、农产品检测分析中的应用;食品、农产品的生物检测方法;食品、农产品快速检测技术及可追溯系统研究与应用;食品、农产品加工新技术。

征文截止时间:2011 年 2 月 20 日。

联系方式: 山东淄博市张周路 12 号山东理工大学农业工程与食品科学学院 (255049); 传真: 0533-2786896; 电子邮箱: aent2011@gmail.com。

会议网址: <http://icae2011.sdut.edu.cn>。