

烃降解型微生物强化水驱提高原油采收率微观机制研究

郑承纲¹, 李洋¹, 胥洪成², 俞理², 黄立信²

1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007

2. 中石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要 借助微观透明模型建立微观模拟驱油试验系统。以烃降解菌株 *Rhodococcus ruber* Z25 和 *Bacillus cereus* Z31 为出发菌株, 通过物理模拟驱油实验考察了多孔介质中水驱原油的特点及残余油的分布形式: 残余油主要以油条和油珠的形式滞留于孔隙介质中; 以油膜形式附着在骨架表面; 在喉道转角处水流速度为零的“驻点”部位。通过静置培养观察了多孔介质中水驱后油藏微生物降解原油及微生物富集的状态, 微生物由单菌体形成油水界面处的菌胶团结构。通过研究后续水驱作用下残余油的驱替特征表明, 微生物菌胶团、松散的油相与驱替液水相彼此裹挟, 沿驱替压力方向运移。本研究揭示了烃降解微生物驱油的微观机制, 为微生物采油从实验室走向矿场实践奠定了理论基础。

关键词 微生物驱油; 烃降解菌株; 微观模型; 驱油机制

中图分类号 X172

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)23-0028-04

Study on Microcosmic Mechanism of Microbial Enhanced Oil Recovery by Hydrocarbon Oxidizing Bacteria

ZHENG Chenggang¹, LI Yang¹, XU Hongcheng², YU Li², HUANG Lixin²

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China

2. Research Institute of Petroleum Exploitation and Development, Langfang Branch, National Petroleum Corporation, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract In this paper, a microcosmic physical simulation system was established by transparent micro-model to study the mechanisms of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR). Two hydrocarbon oxidizing strains (*Rhodococcus ruber* Z25 and *Bacillus cereus* Z31) were employed. The rules of water-flooding process and distribution of residual crude oil were obtained by water-flooding

experiment. The main residual oil located in the surface and the blind zones of porous media in the form of constant oil phase. After the cultivation of the microorganisms, zoogloea was observed in the interface between aqueous and oil phase. The residual oil was incised into pieces and the structure of the oil was totally destroyed. Therefore, the post water-flooding had performed efficiently in displacing the residual oil due to the metabolic activities of the microorganisms. The main effects on EOR process and the oil-displacing mechanisms by hydrocarbon oxidizing bacteria were studied, which would contribute to the potential application of MEOR in the pilot test.

Keywords microbial enhanced oil recovery; hydrocarbon oxidizing bacteria; micro-model; oil-displacing mechanism

0 引言

1926 年 Beckman^[1]提出利用微生物采油的设想到现在已有 80 多年, 国内外许多专家学者在采油机制、现场试验及数值模拟方面做了大量的工作, 取得许多有价值的成果。但是大多数研究人员往往从微生物采油的物理、化学特性入手, 而忽略了微生物的生物特性, 未能充分考虑微生物的生物学特性, 无法从根本上揭示微生物提高采收率的特性。另外, 由于油藏微生物种群和代谢类型的多样性, 使得微生物驱油的

收稿日期: 2009-10-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005cb221308)

作者简介: 郑承纲, 博士研究生, 研究方向为渗流流体力学, 电子信箱: cg1982.zheng@gmail.com; 俞理(通信作者), 高级工程师, 研究方向为渗流流体力学, 电子信箱: yuli3058@163.com

微观机制变得更加复杂。

化学趋向性是细菌对营养物质浓度梯度所产生的反应,微生物通过化学物质的刺激以及自身的代谢调控,使细菌趋向营养源并聚集于高浓度区,这也是细菌的生物特性之一^[2]。Sharma 等^[3]研究了岩石孔隙中微生物生长速率、吸附滞留以及原位繁殖等对微生物运移的影响。牟伯中等^[4]分别测定用十二烷基苯磺酸钠溶液和微生物发酵液处理过的亲油玻璃片的润湿角变化,首次提出“在位繁殖”效应提高原油采收率的概念。景贵成等^[5]以烃降解型微生物为例,深入研究了微生物的化学趋向性和“在位繁殖”效应。本文从烃降解菌株出发,研究了典型的烃降解型微生物在多孔介质中的运移和吸附规律,通过静态培养观察微生物在原油表面的“在位繁殖”效应及菌体存在形式,通过后续水驱实验动态反应菌体与原油在后续水驱条件下的相互作用,定性描述了烃降解型微生物提高原油采收率的微观机制。

1 材料与方法

1.1 微观透明模型

运用光学原理将天然岩心的孔隙结构复制下来,然后对涂有感光材料(耐强酸腐蚀的铬)的光学玻璃模板进行曝光,再用氢氟酸处理曝光后的玻璃模板,制得亲水性微观驱油模型,如图 1 所示。模型的尺寸为 40 mm×40 mm×2.4 mm,模型孔隙直径范围为 20~200 μm。

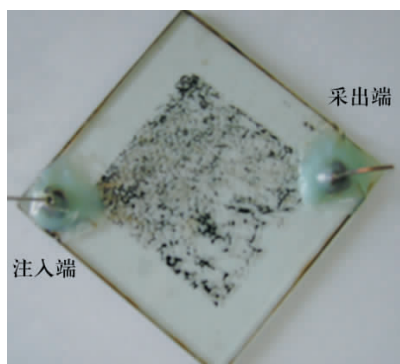


图 1 微观透明仿真模型

Fig. 1 Micro-transparent model

1.2 实验仪器设备

微观实验系统仪器设备:上海辉创 HL-5B 型恒流泵,微观透明模型,Zeiss Option 倒置显微镜,JVC ADS-II 型图像采集系统和 Adobe Premiere 型图像编辑系统,微观驱油实验系统如图 2 所示。

1.3 菌种和培养基

选用本实验室保存的两株高效烃降解菌 *Rhodococcus ruber* Z25 和 *Bacillus cereus* Z31,它们能够在兼性厌氧条件下降解原油,以此作为唯一碳源物质生长。用于富集和传代的 LB 培养基配方为 (g/L):酵母粉 10.0,蛋白胨 5.0,NaCl 10.0,pH 7.2。激活培养基配方为 (g/L):酵母粉 0.2,NH₄NO₃ 3.0,

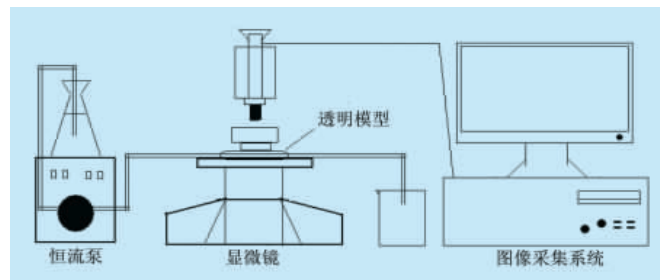


图 2 微观驱油实验系统图

Fig. 2 Microcosmic flooding system

(NH₄)₂SO₄ 0.5,K₂HPO₄ 2.5,pH 7.2。

1.4 实验流体

油样取自大庆油田,其各项参数:50℃时地面脱气粘度为 10.2 mPa·s,含蜡量 19.74%,胶质沥青质含量 24.68%。实验采用模拟地层水,其组成为 (g/L):CaCl₂ 0.03,MgSO₄ 0.2,KCl 0.75,NaCl 3.5,NaHCO₃ 0.2,pH 7.2。

1.5 实验步骤

微观模型驱替实验步骤:微观模型抽真空→饱和地层水→饱和原油(建立束缚水饱和度)→一次水驱(地层水 0.5 mL/min 驱替 3 min)→注入菌液(接种 *Rhodococcus ruber* Z25 和 *Bacillus cereus* Z31 菌株各 2%的激活培养基,0.5 mL/min 驱替 1 min)→37℃下静置 7 d→后续水驱(地层水 0.5 mL/min 驱替 5 min)。期间观察并记录实验现象。

2 结果与讨论

2.1 一次水驱后剩余油分布特征

首先,在微观模型进行水驱实验。一次水驱后,剩余油主要以连续或不连续的形式存在于中、小喉道中,如图 3 所示。位于主流线上喉道中的原油水洗程度较高,残余原油较少(图 3(a),(b)),而中、小喉道中,尚有较多的残余原油存在,水驱后残余原油的分布主要有以下几种形态存在:以油条的形式存在于较大喉道中(图 3(c),(d));油珠的形式滞留于多

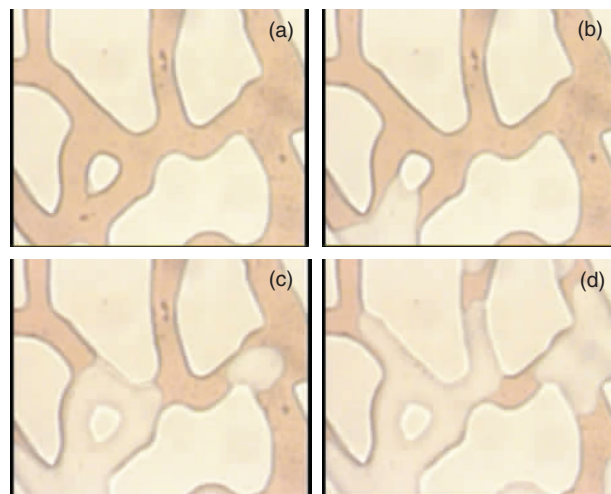


图 3 一次水驱 (20×10)

Fig. 3 Process of initial water flooding

个喉道交汇的孔隙中(图 3(c),(d)的局部);局部润湿性的改变以油膜形式附着在骨架表面;在喉道转角处水流速度为零的“驻点”部位。由于剩余原油与孔隙介质之间的相互作用,使得水驱已经无法有效驱替剩余原油,造成无效水驱循环。因而,如何启动剩余原油,增加后续水驱的驱油效率,成为提高原油采收率的一个关键因素^[6-7]。

2.2 烃降解微生物在油水界面处的富集

将接种有微生物菌液的激活培养基注入一次水驱后的微观模型中。在菌液的注入过程中,微生物菌体被注入液体携带而运移,这时,微生物菌体主要沿驱替压力梯度方向的流线方向运动,微生物菌体自身的主动运动现象不明显。当注入一定量的微生物菌液后,微生物菌体在沿流线方向的多孔介质空间内分布逐渐均匀并达到饱和,此时,微生物菌体分布在多孔介质空间的水相中,并未出现在原油表面的局部富集,如图 4 所示。同时,通过显微镜可以明显观察到注入微生物菌体的形态和分布形式,注入的微生物为典型的球状菌体(*Rhodococcus ruber* Z25)和杆状菌体(*Bacillus cereus* Z31),微生物菌体多以不连续的单菌形式存在。



图 4 注入菌液后的微生物菌体分布形态(20×32)

Fig. 4 Distribution of microorganisms after microbial broth flooding

微生物注入结束后,将微观透明模型进行恒温静置培养。由于驱替压力的消失,微生物菌体沿流线方向的运动停止,微生物的自由扩散和在鞭毛驱使下的运动成为主要的运动形式。静态培养 1~2 d 后,注入的激活培养基和微生物菌体自身贮存的碳源物质被逐渐耗尽,微生物会转而利用环境中的其他物质作为其碳源和能源物质生长,此时,多孔介质中的原油被烃降解型微生物作为碳源物质,微生物菌体表现会表现出较强的趋化性^[8-11]。实验过程中,微生物菌体首先在原油与水相界面处少量富集继而开始生长,由于微生物的生长需要同时摄取油相中的烃类物质和水相中的氮、磷、硫等元素,因而,微生物菌体在油水界面处的存在是营养利用的最佳形式。随着油水界面处的微生物利用原油为碳源进行生长,油水界面处的部分原油被微生物所降解,油水界面变得模糊,残余原油的结构变得松散,而在油水界面上微生物菌体大量增殖,形成较大成片的菌胶团结构,许多菌胶团通过物理的吸附、锚定作用,化学的增溶、乳化作用较稳定地存在于油水界面处,如图 5 所示。微生物“原位富集”并与原油相互作用后,残余原油的存在形式发生了改变:① 部分油丝末

端被分散成微小的油珠进入水相(图 5(a));② 在大的油膜表面遍布成片的菌胶团(图 5(b));③ 细长的油膜经微生物的降解作用被切割,彼此分离(图 5(c));④ 较小的油珠直接被微生物降解形成“原油-菌胶团”结构(图 5(d))。微生物对于原油的降解需要多种酶体系的共同参与,同时,微生物也需要代谢多种界面活性物质,如糖脂、脂肽等来协助菌体附着于油水界面处。

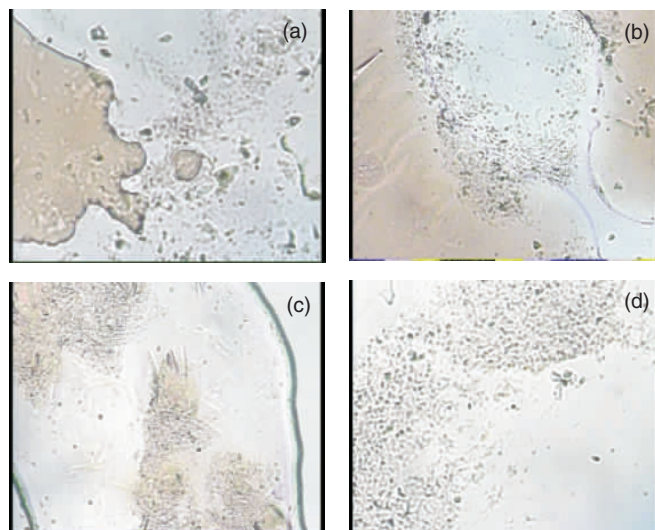


图 5 静态培养后的微生物菌体分布形态(20×32)

Fig. 5 Distribution of microorganisms during the static cultivation

2.3 微生物强化的后续水驱特征

静置培养结束后,继续进行后续水驱。此时,由于原油经历了微生物的降解作用,原油以油珠或油膜形式存在的结构被破坏,原油之间和原油与多孔介质间的结合作用松散,原油轻易被后续驱替水剪切从孔隙介质表面剥离下来进入多孔介质的孔喉空间,继而被后续水驱驱替,以不连续的层片状或油珠状分散形式沿流线方向的多孔介质空间运移,同时,油水界面处的微生物菌胶团也被后续水驱所剪切破坏,进一步破坏了残余原油的结构,使得原油更易为后续水驱驱替。在后续水驱作用下,微生物菌胶团,松散的油相与驱替液水相彼此裹挟,充斥于多孔介质空间内,沿驱替压力方向运移,使更多的残余油被采出,提高了原油的采收率,如图 6 所示。

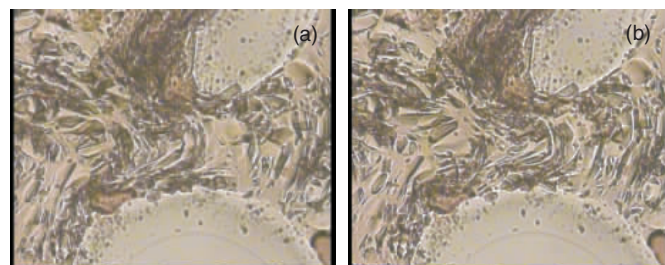


图 6 后续水驱(20×20)

Fig. 6 Proecess of post water flooding

2.4 微生物菌胶团的形态

后续水驱驱替结束后,观察微观模型中被后续水驱驱替的微生物菌胶团形态。微生物在摇瓶培养中,主要表现出单菌体形式(少量会出现双球菌),而当微生物在微观模型中利用原油生长时,微生物呈现菌胶团状分布,这可能与其底物(原油)类型和油水界面存在形式等性质有关。如图7所示,*Rhodococcus ruber* Z25 单菌体为典型球菌,培养后呈现絮状的菌胶团结构(图7(a));而*Bacillus cereus* Z31 单菌体为典型的杆菌,培养后呈现多个菌体首尾相连的长杆状,彼此扦插形成菌胶团结构(图7(b))。

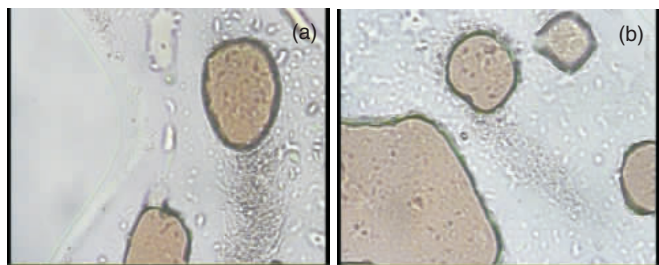


图7 菌胶团形态(20×32)

Fig. 7 Structure of microbial consortia

3 结论

微生物提高原油采收率技术经过多年的发展,目前已进入从室内研究向现场实施的过渡阶段,但微生物提高原油采收率的机制尚有待深入研究。本实验以微观透明模型模拟油藏孔隙介质,通过驱替实验定性研究了烃降解型微生物提高原油采收率的微观机制,为微生物提高原油采收率技术的应用奠定了基础。

1) 微生物能够在孔隙介质中运移生长,并能够在兼性厌氧条件下利用原油作为碳源物质生长。

2) 微生物利用石油为碳源物质生长时,表现出较强的趋化性,微生物通过“原位富集”效应大量增殖并分布于油水界面处。

3) 原油的分布形态会由于微生物的作用而改变,微生物作用前,原油主要以油珠或油膜存在,经微生物降解作用后,原油的原有结构遭到破坏,原油的结合形式趋于松散,易被后续水驱替,微生物的降解作用发生有利于提高原油的采收率。

4) 在多孔介质中利用原油为底物生长的菌体,呈现出于摇瓶培养不同的菌体结构(菌胶团),这可能与底物类型和油水界面分布性质等因素有关。

参考文献 (References)

- [1] 赵寿增. 微生物提高采收率技术 [J]. 国外石油地质, 1995, 49 (4): 32-401.
Zhao Shouzheng. *Foreign Petroleum Geology*, 1995, 49(4): 32-401.
- [2] 张蔚文, 张灼. 细菌化学趋向性机制的研究进展 [J]. 微生物学通报,

1993, 20(3): 175-179.

Zhang Weiwen, Zhang Zhuo. *Microbiology*, 1993, 20(3): 175-179.

- [3] Sharma P K, McInerney M J. Effect of grain size on bacterial penetration, reproduction and metabolic activity in subsurface porous materials [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1994, 60: 1481-1485.
- [4] 牟伯中. 微生物驱油机制及数值模拟研究 [R]. 上海: 中国石油天然气股份有限公司, 2000: 30-38.
Mou Bozhong. Study on microcosmic mechanism of microbial oil recovery and numerical simulation [R]. Shanghai: China National Petroleum Corporation, 2000: 30-38.
- [5] 景贵成, 郭尚平, 俞理. 一株以原油为碳源的 *Pseudomonas* sp. 菌化学趋向性研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, 22(2):187-191.
Jing Guicheng, Guo Shangping, Yu Li. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2005, 22(2): 187-191.
- [6] Jang L K, Sharma M M, Yen T F. The transport of bacteria in porous media and its significance in microbial enhanced oil recovery [C]. SPE California Regional Meeting, 11-13 April 1984, Long Beach, California, 1984: 11-13.
- [7] Bryant R S, Jonell D. Evaluation of microbial systems in porous medium for EOR[J]. *SPE Reservoir Engineering*, 1998, 3(2): 489-495.
- [8] 李习武, 刘志培. 石油烃类的微生物降解[J]. 微生物学报, 2002, 42(6): 764-767.
Li Xiwu, Liu Zhipei. *Microbiology*, 2002, 42(6): 764-767.
- [9] 雷光伦. 微生物采油技术的研究与应用 [J]. 石油学报, 2001, 22 (2): 56-61.
Lei Guanglun. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22 (2): 56-61.
- [10] 张廷山, 兰光志, 邓莉. 微生物降解稠油及提高采收率实验研究[J]. 石油学报, 2001, 22(1): 54-57.
Zhang Tingshan, Lan Zhiguang, Deng Li. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22 (1): 54-57.
- [11] 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): 54-59.
Chen Zhiyu, Feng Qingxian, Liu Rulin. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 22 (6): 54-59.

(责任编辑 王芷)

《科技导报》“科技人才招聘”栏目征稿

自2007年第9期起,《科技导报》开辟“科技人才招聘”栏目,每期刊登自然科学、工程技术领域博士研究生以上学历的人才招聘启事,并向在读博士生和一线科技工作者提供科研院所、高等院校最新高层次人才岗位/奖学金信息,为其求职、应聘或申请奖学金提供参考信息。自2007年第15期起,本刊还增加了“全球招聘新闻”栏目,报道海外研究机构、高等院校需求高学历人才的信息。欢迎有关单位投稿。栏目责任编辑:岳臣;投稿邮箱:zpgg@cast.org.cn。