

国内外源微生物驱矿场试验状况分析

郭英

大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712

摘要 为降低微生物采油矿场试验的风险, 制定科学合理的实施方案, 对目前国内外源微生物驱的现场实施情况进行了调研, 从注入量、注入浓度、注入方式及增油量对驱油效果的影响等方面分析发现, 目前外源微生物驱矿场应用正处于发展和完善阶段, 注入量多在 0.002—0.007 倍孔隙体积(PV)之间, 微生物浓度在 1%—3%之间, 注入方式主要为周期注入和段塞注入, 取得了良好的效果, 但在菌种和工艺方面仍存在一些亟待突破的技术。根据国内外源微生物矿场试验的现状, 建议通过引进先进的微生物学技术, 培养出更多能够以廉价且丰富的营养物为基础生长的菌种。针对具体目标油藏选取调驱结合、吞吐与驱替结合或内源与外源微生物驱相结合的方式, 通过改变注入水的水质及采用生物抑制的方法保持微生物驱油的连续性, 进一步改善外源微生物驱油的应用前景。

关键词 外源微生物驱; 矿场试验; 注入量; 注入浓度; 注入方式

中图分类号 TE355

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.22.006

Exogenous Microbial Enhanced Water-Flooding Pilot Tests in China

GUO Ying

Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712,
Heilongjiang Province, China

Abstract In order to reduce the risk of the pilot tests in microbial enhanced oil recovery and to develop scientific procedures, the parameters of *in-situ* microbial enhanced oil recovery projects should be investigated, including injection volume, injection concentration, injection patterns and enhanced oil production. The current field application of exogenous microbial enhanced water-flooding is in a developing stage. The injection volume ranges from 0.002 to 0.007PV (Pore Volume). The average microbial concentration is between 1% and 3%. The main injection patterns are of multi-cycle injection and slug injection, with good performance. However, there are still some issues that require further explorations. In view of the present domestic situation about exogenous microbial enhanced water-flooding pilot tests, the active bacteria are advised to be selected by using advanced microbial technologies and by developing cost-effective nutrient package. Moreover, for specific reservoirs to choose profile modification and water-flooding, throughput and water-flooding in combination, it is necessary to combine indigenous and exogenous microorganisms. The application of exogenous microbial enhanced water-flooding should be improved further by changing injection water and biological inhibition to keep the continuity of microbial enhanced oil recovery.

Keywords exogenous microbial enhanced water flooding; pilot test; injection volume; injection concentration; injection patterns

0 引言

根据微生物采油菌液的不同来源可将其分为外源微生物采油和内源微生物采油。目前最具代表性的是美国的外源微生物采油技术和俄罗斯的内源微生物采油技术^[1]。外源微生物采油主要是从油层以外的各类环境(土壤、污水、海洋)

中分离筛选出合适的细菌, 将其注入地下, 利用其繁殖效应和代谢产物增加原油产量^[2]。根据不同的工艺过程可将外源微生物采油分为单井处理(包括井筒清洗、微生物封堵及微生物吞吐)和外源微生物驱^[3]。

微生物采油不仅具有工艺简单、实施方便、无腐蚀、无污

收稿日期: 2011-06-22; 修回日期: 2011-07-19

作者简介: 郭英, 助理工程师, 研究方向为三次采油, 电子信箱: gy2009@petrochina.com.cn

染、不影响油水分离和原油质量等优点,而且具有有效期长、成本低、效益高等特点^[4]。随着现代生物学技术的发展,微生物采油技术正以其独特的优点与广阔的发展前景,在国内外引起广泛重视,并且获得了许多成功应用的实例^[5]。由于室内物理模拟实验和矿场试验存在较大差异,且微生物驱油数值模拟软件发展不够完善,因此,在制定矿场试验方案过程中,需借鉴和全面了解其他油藏的矿场试验方案,并结合本油藏的室内实验结果制定科学合理的方案。

1 国内外源微生物驱油应用现状

通过对国内外源微生物现场实施情况分析发现,无论是菌液注入量还是矿场应用规模均较小,目前国内外源微生物驱矿场试验正在不断地完善和快速发展。大庆、胜利、大港、

华北、中原、河南、青海等油田均开展了外源微生物驱油矿场试验,取得了良好的效果。在矿场试验过程中,微生物菌种多为兼性厌氧或厌氧菌,微生物和营养液初始浓度、注入量及注入方式等方面均存在较大差异,但注入量多在 0.002—0.007 倍孔隙体积(PV)之间,微生物注入浓度在 1%—3%之间,其注入方式主要有两种:周期式注入(或循环注入),各轮次注入的微生物浓度和用量基本一致,一般各轮次都需要关井;连续注入,具有多种形式,它们的主要区别在于微生物段塞的浓度设置以及是否添加营养物保护段塞和营养物补充段塞。同时,根据各个区块的地质特征和室内菌种评价结果,部分区块采取了调驱连作、微生物吞吐和驱替联合作业(其中包括先吞吐后驱替和吞吐与驱替同时进行作业),具体矿场试验情况如表 1 所示。

表 1 目前国内外源微生物驱现场应用情况

Table 1 In-situ pilot tests of exogenous microbial enhanced water-flooding in China

试验区块	注入方式	菌液及营养物浓度	段塞尺寸	(水井+油井)/口	增油效果
华北油田 间 12 断块 ^[6]	不同菌种 分批注入	1.5%	0.003PV	3+8	1000t
华北油田 巴 19 断块	段塞注入	2%+1% (微弱连作)	0.003PV	29+69	—
河间东营油藏 ^[7]	段塞注入	4%+2%	0.0017PV	5+20	5177t
华北哈 22 断块-TI 油组	段塞注入	1% (驱替+吞吐)	0.007PV	4+7	10957t
中原沙二上 ²⁺³ 油藏 ^[8]	周期注入(两个周期)	2%	0.002PV	2+8	2448t
中原文明寨油田明一东断块 明 42 井组 ^[9]	段塞注入 (每段注入不同菌种)	3%	0.003PV	1+2	820t
中原文明寨油田 ^[10]	段塞注入	约 1.5%	5220 m ³	2+7	2902t
中原胡状油田胡 5-15 井区 ^[11]	段塞注入	1%	0.06PV	3+7	1570.6t*
大港油田港西四区 ^[12]	段塞注入	100%(关井 3d)+1%+1.5% +顶替段塞(关井 7d)	0.0052PV	3+10	7709t
大港油田港 东七断块 ^[13]	段塞注入	营养液段塞+4%+1.5%+2% +营养液段塞	0.002PV	4+9	10589t $\Delta R=0.55\%^*$
大港官 69 ^[14]	段塞注入	营养物+微生物+营养物 (1.8-2.4) $\times 10^7$ /mL	9122m ³	4+7	8700t*
大庆朝 50 区块 ^[15]	段塞注入	5%+2%	0.005PV	2+10	13600t $\Delta R=3\%^*$
大庆宋芳屯 油田 ^[16]	段塞注入	8%+6%+8%+营养液段塞	0.007PV	5+7	1092t
河南王集油田柴 19 井组 ^[17]	段塞注入	1.5%+1.1%+1.1%	495m ³	1+4	790t*
胜利油田 营 6 断块 ^[18]	周期注入	0.4%—0.8%	—	4+12	2709t
胜利盘 2-33 ^[19]	周期注入	6.7%	7460m ³	—	9300t*
罗 801 ^[20]	周期注入	10%/mL	0.25PV	5+11	$\Delta R=11.3\%^*$
罗 801 ^[21]	周期注入(补充空气)	气液比=10:1	—	2+11	31000t
青海花土沟油田 ^[22]	段塞注入(补充空气)	—	—	—	3200t

注:*表示计算递减率; ΔR 表示采收率提高值。

Notes: * is the calculated degressive rate, and ΔR is the enhanced oil recovery.

2 注入量及注入浓度分析

与化学驱相比微生物驱所使用的药剂用量少,但是微生物驱的注入浓度较高,相当于化学驱注入液中化学剂浓度的 10 倍左右。对于长期注水开发的油田,尤其是在油田开发中后期,尽管注入浓度较高,但由于注入量太少,注入的部分菌

种及营养液在地层中受到对流、扩散、吸附等因素影响多集中分布于近井地带^[23],且近井地带剩余油丰度较低,采收率提高幅度不大,这可能也是矿场试验未取得明显增油效果的原因之一。

微生物驱油主要是通过微生物及其代谢产物对原油及

油藏的作用提高采收率,以微生物的主要代谢产物生物表面活性剂为例,若油藏中微生物浓度过低,产生的生物表面活性剂浓度也很低,无法达到乳化降黏及启动残余油的目的。若能通过生物学技术提高菌体活性或降低菌液成本、增加菌液注入量,外源微生物驱能够在矿场得到较好的应用。

在现场中注入的液体均为发酵液,发酵液中含有细菌、代谢产物和残余的营养物。注入菌液浓度多以发酵液稀释倍数作为衡量参数,极少数使用菌的个数(CUF)作为衡量参数。由于前者所使用的浓度多为1%—3%,其中细菌浓度差异不大,而产物浓度差异较大。因此,两者区别在于前者强调更多的是代谢产物,而后者侧重于细菌浓度。若再通过补充一定量的营养物使细菌在油藏内生长繁殖,应以细菌浓度作为方案设计指标。

3 注入方式分析

目前,国内进行的微生物驱替多采用周期注入方式,与连续注入相比,其应用较广泛,但两种注入方式的机制研究较少,结合微生物驱油特点对两种注入方式的对比分析如下。

(1) 周期注入一般要进行多个轮次,每轮次的注入量较少,轮次之间的时间间隔及注入量的设计是该类注入方式的难点。在多数情况下,连续注入是一种采用不同浓度段塞组合的注入方式,即高浓度-低浓度-高浓度的组合方式注入,前置段塞和后置段塞均具有保护作用,能够减少主体段塞的损耗和前后水驱段塞对微生物主体段塞的稀释作用,而后续补充的营养物能够防止菌浓度随营养物匮乏而逐渐减少,延长微生物驱油的有效期。

(2) 常规的连续注入容易在注采井之间形成主流线和相对高渗带突进^[24]。在周期注入中,地层中的微生物能在停注期间繁殖、富集,微生物可以堵塞部分孔道,从而有效地控制注入水向高渗部位突进,扩大波及面积,对低渗带进行有效地开采,菌液的波及范围增大,菌液前缘均匀地推进,从而提高微生物的驱油效率。

(3) 由于层间和层内存在非均质性,高渗透带动用程度高,水洗严重,中、低渗透带动用程度低,甚至未动用,水洗较轻。若采用连续注入,需采用调驱连作或选择具有一定封堵作用的菌种。

(4) 由于微生物在地层中的界面吸附、黏附、架桥堵塞、聚集堵塞等滞留机制的作用,无论是周期注入还是连续注入的高浓度段塞,若微生物浓度太高,易使每次注入的微生物吸附在近井地带形成菌滤饼,不利于微生物向油层深部的推进^[25]。因此,无论哪种注入方式,初始注入的微生物浓度并不是越高越好,具有一定的合理范围。

4 目前存在问题

4.1 菌种、营养剂及产物方面

(1) 菌种性能。应尽量筛选能以油层中的原油作为碳源进行繁殖的微生物,并筛选水溶性较好的其他营养剂,使其

能够产生大量具有驱油作用的代谢产物。

(2) 菌群结构。外源菌与内源菌的配伍性及协同作用方面的研究不够,目前主要围绕单一菌种进行研究,而对注入外源菌与内源菌形成的群落中优势菌与功能菌的研究较少。

(3) 微生物生长及代谢活性。微生物在油藏中生长及代谢活性除受环境因素(如压力、温度、矿化度、有毒物质等)影响外,还受到营养物及电子受体影响,在矿场应用过程中,应综合考虑各种因素对微生物生长及代谢活性的影响,加强复配菌种研究,完善室内评价和矿场监测。

(4) 细菌渗流机制。微生物在地层中的生物行为较复杂,目前考虑最多的行为主要有对流、扩散、吸附、生长、死亡和趋化性。针对单一生物行为的研究较多,而对各个因素对微生物在地层中运移的敏感性分析较少。因此,微生物在地层中渗流规律有待于进一步研究。

(5) 提高采收率原理。在注入发酵液中菌种及其代谢产物分别对提高采收率的贡献不清楚,需对微生物本身的剥离油膜、封堵及降解作用进行研究,同时通过定性和定量分析研究代谢产物在不同油藏中的增产机制。

4.2 增油效果方面

(1) 通过分析国内已实施的外源微生物驱油矿场试验可以发现,该驱油方法的增油效果不明显,可能存在两方面的原因:注入的微生物及营养物较少,吸附的影响较大;油藏是一个较大的生物反应器,它对微生物及营养物的稀释度较高,注入的微生物在油藏中的代谢活性较弱,无法满足乳化、降黏或启动残余油的要求。

(2) 研究油藏措施效果,必须以可靠的措施统计资料和统计方法为基础^[26]。结合微生物采油特点,需要在矿场监测方案的基础上,建立一套适合微生物驱油的效果评价方法,增强效果评价的可靠性。

(3) 利用微生物驱数值模拟技术能够建立一套科学合理的微生物驱开发方案,对矿场实施微生物驱进行效果预测^[27]。目前缺少一套能够综合反映微生物反应动力学、各组分渗流力学及微生物驱提高采收率原理的完备的微生物驱油数值模拟软件。

4.3 工艺方面

(1) 注入水处理。注入水中各种化学剂对外源微生物驱油效果具有重要影响,其中杀菌剂对外源微生物的代谢活性影响最大,在外源微生物驱作业前后的一段时间内不能向注入水中加入杀菌剂,但可以通过生物学抑制的方法控制有害菌的生长。

(2) 注入空气。注入的部分微生物在生长过程中需要一定量的氧气,若通过注入空气补充氧气,需要使微生物与氧气充分接触,并保障施工安全,同时还需要建立一套严格的设计和检测方法。

5 结论及建议

(1) 在外源微生物驱矿场应用过程中,注入量多在

0.002—0.007PV 之间,微生物浓度在 1%—3%之间,注入方式主要为周期注入和段塞注入,并取得了良好的效果,但在菌种和工艺方面仍存在一些亟待突破的技术,建议结合先进的微生物学技术,培养出能够适应油藏条件且代谢活性高的高效菌种或菌群。

(2) 针对油藏的注水及微生物分布情况,可以通过地面发酵外源菌的方法,先向油藏内注入外源菌来增加油藏内的微生物浓度,待油藏中形成稳定的微生物群落并达到一定数量级后,通过注入激活剂将内源菌激活,实现内源与外源微生物驱油的有效结合,可以有效降低成本。

(3) 若油藏条件适宜微生物生长,可以先通过改变注入水水质,不加入杀菌剂,生物抑制的方法抑制有害菌生长,为油藏内形成一定浓度的微生物群落奠定基础;之后针对适应了油藏环境的一些功能菌进行激活或地面发酵。该方法能保持微生物驱油的连续性且成本较低,具有较好的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 彭裕生. 微生物采油基础及进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 239-245.
- Peng Yusheng. Elements and advances for microbial enhanced oil recovery [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 239-245.
- [2] Nazina T N, Xue Y F, Wang X Y, et al. Microorganisms of the high-temperature Liaohe Oilfield of China and their potential for MEOR [J]. *Resource Environ Biotechnology*, 2000, 3(1): 109-120.
- [3] 汪卫东, 汪竹, 耿雪莉, 等. 美国微生物采油技术现场应用效果分析 [J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(6): 75-76.
- Wang Weidong, Wang Zhu, Geng Xueli, et al. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(6): 75-76.
- [4] 闫存章, 李阳. 三次采油技术文集 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 129-137.
- Yan Cunzhang, Li Yang. Technical album for tertiary oil recovery [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 129-137.
- [5] 罗跃, 余跃惠. 微生物采油技术研究的国内外动态及本源微生物采油技术 [J]. 国外油田工程, 1999(8): 1-2.
- Luo Yue, Yu Yuehui. *Foreign Oil Field Engineering*, 1999(8): 1-2.
- [6] 苏俊, 李东, 刘超群, 等. 间 12 断块微生物驱油工艺技术的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2002, 22(2): 72-74.
- Su Jun, Li Dong, Liu Chaoqun, et al. *Oil Drilling and Production Technology*, 2002, 22(2): 72-74.
- [7] 刘淑敏, 周晓俊, 郝明圆, 等. 河间东营油藏微生物驱替现场试验 [J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(2): 64-66.
- Liu Shumin, Zhou Xiaojun, Hao Mingquan, et al. *Oil Drilling and Production Technology*, 2002, 24(2): 64-66.
- [8] 马香丽, 高翔, 郑卫宏, 等. MF 微生物驱油先导试验 [J]. 海洋石油, 2007(9): 98-101.
- Ma Xiangli, Gao Xiang, Zheng Weihong, et al. *Offshore Oil*, 2007(9): 98-101.
- [9] 崔峰, 叶瑛, 廖译文, 等. 文明寨复杂断块油田微生物驱油试验研究 [J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(2): 99-100.
- Cui Feng, Ye Ying, Liao Zewen, et al. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2003, 25(2): 99-100.
- [10] 高政华, 刘永明, 高庆桐, 等. 微生物驱油技术研究及应用 [J]. 内蒙古石油化工, 2006(9): 93-94.
- Gao Zhenghua, Liu Yongming, Gao Qingtong, et al. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2006(9): 93-94.
- [11] 郭东方, 张兵涛, 邓德亭, 等. 胡 5 块微生物调驱的吸水剖面变化 [J]. 油田化学, 2009, 26(1): 94-97.
- Guo Dongfang, Zhang Bingtao, Deng Deting, et al. *Oilfield Chemistry*, 2009, 26(1): 94-97.
- [12] 马世煜, 陈智宇, 刘金峰, 等. 大港油田港西四区微生物驱先导试验 [J]. 油气采收率技术, 1997, 4(3): 7-12.
- Ma Shiyu, Chen Zhiyu, Liu Jinfeng, et al. *Technology for Petroleum Recovery Efficiency*, 1997, 4(3): 7-12.
- [13] 冯庆贤, 陈智宇. 港东二区七断块微生物驱油试验研究 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(6): 68-71.
- Feng Qingxian, Chen Zhiyu. *Petroleum Exploitation and Development*, 1999, 26(6): 68-71.
- [14] Liu J F, Ma L J, Mu B Z, et al. The field pilot of microbial enhanced oil recovery in a high temperature petroleum reservoir [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2005, 48(3-4): 265-271.
- [15] 王凤兰, 王志瑶, 王晓冬. 朝 50 区块微生物驱先导性试验效果及认识 [J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 102-106.
- Wang Fenglan, Wang Zhiyao, Wang Xiaodong. *Daqing Petroleum Geology and Exploitation*, 2008, 27(3): 102-106.
- [16] 王广均, 刘永建. 宋芳屯油田微生物驱油矿场试验 [J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(1): 43-45.
- Wang Guangyun, Liu Yongjian. *Journal of Daqing Petroleum College*, 2005, 29(1): 43-45.
- [17] 刘晓军, 李科, 鲁来宾, 等. 微生物驱油技术在河南油田的应用 [J]. 河南石油, 2002, 16(1): 35-37.
- Liu Xiaojun, Li Ke, Lu Laibin, et al. *Henan Petroleum*, 2002, 16(1): 35-37.
- [18] 杨峰, 高进锋, 赵明宸, 等. 微生物采油技术在营 6 断块的研究与应用 [C]//2003 年三次采油技术论文集. 北京: 中国石化出版社, 2003.
- Yang Feng, Gao Jinfeng, Zhao Mingchen, et al. The research and application of microbial enhanced oil recovery in Ying 6 Fault [C]// *Tertiary Oil Recovery*, 2003. Beijing: China Petrochemical Press, 2003.
- [19] 孙德宽, 王勤田, 王海峰, 等. 微生物驱油技术在盘 2-33 断块常规稠油油藏的应用 [J]. 断块油气田, 2004, 11(4): 52-54.
- Sun Dekuan, Wang Qintian, Wang Haifeng, et al. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2004, 11(4): 52-54.
- [20] 李吉昌, 李真, 赵凤敏. 罗 801 块注水早期微生物驱油效果评价 [J]. 内江科技, 2004, 25(4): 69-72.
- Li Jichang, Li Zhen, Zhao Fengmin. *Neijiang Keji*, 2004, 25(4): 69-72.
- [21] 魏斌, 赵凤敏, 李基昌, 等. 空气辅助微生物驱油技术 [J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(5): 46-49.
- Wei Bin, Zhao Fengmin, Li Jichang, et al. *Oil Drilling and Production Technology*, 2006, 28(5): 46-49.
- [22] 李向前, 余跃惠, 张忠智. 微生物强化水驱在高矿化度油藏的应用 [J]. 化学与生物工程, 2007, 24(1): 68-70.
- Li Xiangqian, Yu Yuehui, Zhang Zhongzhi. *Chemistry and Bioengineering*, 2007, 24(1): 68-70.
- [23] Cunningham A B, Sharp R R, Caccavo Jr F, et al. Effects of starvation on bacterial transport through porous media [J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(6-7): 1583-1592.
- [24] 张爱香, 刘利安. 段塞驱技术的探索与研究 [J]. 科技咨询导报, 2007(5): 115-117.
- Zhang Aixiang, Liu Lian. *Science and Technology Consulting Herald*, 2007(5): 115-117.
- [25] Jang L K, Chang P W, Findley G E, et al. Selection of bacteria with favorable transport properties through porous rock for the application of microbial-enhanced oil recovery [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1983, 46(5): 1066-1072.
- [26] 黄盛波, 何东, 单玲, 等. 一种计算油井措施效果的新方法 [J]. 河南石油, 2004, 18(3): 38-39.
- Huang Shengbo, He Dong, Shan Ling, et al. *Henan Petroleum*, 2004, 18(3): 38-39.
- [27] 修建龙, 董汉平, 俞理, 等. 微生物提高采收率数值模拟研究现状 [J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(4): 86-89.
- Xiu Jianlong, Dong Hanping, Yu Li, et al. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(4): 86-89.

(责任编辑 刘志远)