文章编号:1673-5005(2009)03-0108-06

微生物提高采收率微观机制

雷光伦¹, 马继业¹, 汪卫东², 郭省学², 郭辽原², 宋 硕¹

(1. 中国石油大学 石油工程学院,山东 东营 257061; 2. 中石化胜利油田 采油工艺研究院,山东 东营 257000)

摘要:在模拟油藏条件下,利用微观仿真平板模型和分支盲孔模型,对水驱、微生物驱油过程中剩余油形态及流动现 象进行显微观察和分析,研究微生物驱油和置换盲孔内剩余油的微观机制;利用动态扩张黏弹性流变试验,定量考 察菌体本身及生物表面活性物质对油水界面膜的作用及对原油流动能力的改善作用。结果表明:微生物通过降解 原油和代谢产生生物气体、生物表面活性物质等改变剩余油形态及分布;微生物驱具有气驱、气液界面滑动和刺离 油膜等微观驱油方式;生物气能够在生物活性物质的辅助作用下,进入水驱、聚驱、气驱都无法波及的盲孔,置换出 其中的剩余油;微生物菌体本身具有界面活性,能与代谢活性产物共同降低油水界面膜强度,提高原油流动能力。 关键词:微生物;驱油试验;微观机制;扩张流变特性

中图分类号:TE 357.9 文献标识码:A

Micromechanism of microbial enhanced oil recovery

LEI Guang-lun¹, MA Ji-ye¹, WANG Wei-dong², GUO Sheng-xue², GUO Liao-yuan², SONG Shuo¹

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Oil Production Technology Research Institute, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Under simulated reservoir conditions, the forms and flow phenomena of remaining oil during water flooding and microbial flooding were observed and analyzed by using microvisual simulation plane models and microvisual models with blind holes. The micromechanism of microbial flooding and remaining oil displacement in blind holes was researched. By rheological experiment of dynamic dilatational viscoelasticity, the effects of bacterias and surfactants on oil-water interfacial film and oil flow ability were also quantitatively studied. The results show that the microbe changes the forms and distribution of remaining oil by degradation oil and its catabolites including biogas and biosurfactants. Microbial flooding has several oil displacement styles including gas drive, sliding rapidly on the gas-liquid interface and peeling oil film. The biogas associated by biosurfactants can enter blind holes where water flooding, polymer flooding and gas drive could not sweep, and replace remaining oil. Microbe itself has interfacial activity. The tension of oil-water interface film could be decreased by microbe and' its catabolites, and the oil flow ability is improved.

Key words: microbe; oil displacement experiment; micromechanism; dilatational rheology property

微生物采油是指利用微生物本身及其代谢产物 提高油田采收率的方法。关于微生物驱油机制国内 外已有很多的研究报道^[1,9],但由于微生物种类、生 命活性及代谢产物的多样性以及影响因子的多样 性,使得不少驱油机制还未被认识和量化,且研究大 都处于常温常压条件下的宏观定性描述^[1,6],与油藏 高温高压的实际情况存在一定差距。笔者利用试验 模拟油藏条件,立足于微观层面,探讨微生物作用后 剩余油在多孔介质中的特殊流动形态、聚合物驱后 微生物驱所具备的独特优势以及微生物菌体本身对 提高采收率的贡献,从不同角度揭示微生物提高采 收率微观机制。

1 试 验

1.1 微观仿真模型及微观分支盲孔模型驱油试验

1.1.1 试验仪器与设备

微观试验系统主要仪器设备有 TSZ-60 型微量 注入泵、显微镜、图像采集设备、数码相机及其他容

基金项目:中石化胜利油田科技攻关项目(N0802036)

作者简介:雷光伦(1963~),男(汉族),重庆人,教授,博士,博士生导师,从事提高采收率技术、徵生物采油、油藏工程理论与方法研究。

收稿日期:2008-10-30

器罐和加压设备等。试验是将微观模型置于高温高 压设备中作用后,再进行微观观察和驱替,由于微观 观察设备不能加高温高压,故高温高压设备在图示 中没有画出。微观驱油试验装置见图1。



Fig.1 Schematic diagram of experiment device 1.1.2 微观模型

微观仿真平板模型是把胜利油田孤岛油藏天然 岩心的孔隙结构复制下来,利用光化学刻蚀技术精 密地将其刻在平板玻璃上制得的亲水性模型,孔隙 结构存在非均质性但连通性较好,孔隙直径 10 ~ 400 μm,模型尺寸 50 mm × 40 mm × 3 mm,模型上有 效面积 30 mm × 18 mm。在微观模型的两对角处, 分别打一个小孔,模拟注入井和采出井。

为研究多孔介质盲孔中水驱、聚合物驱后剩余 油形态和微生物驱对盲孔内剩余油的作用,利用集 成电路板制作技术设计并溶蚀制作了微观分支盲孔 模型,如图2所示,中间部分模拟渗流大孔道,宽度 500 μm,两侧分别打一小孔,模拟注人井和采出井。 分支部分为盲孔,用字母进行标记,其孔径分别为 30,20 和 10 μm,设地层孔隙度为 0.165,则相当于 渗透率分别为 4.64,2.06 和 0.52 μm² 的平均孔喉 和盲孔直径。



of branch blind holes

1.1.3 试验菌种及流体

试验驱替水采用自来水;试验用油为脱水脱气 原油添加适当比例煤油配制成的模拟油,65℃时黏 度6.8 mPa・s;试验用菌种为好氧菌 W18,DM-2、 SH-1 和厌氧菌 L1,4F,这5 株菌的基本特征见表1。 聚合物驱用的部分水解聚丙烯酰胺相对分子质量为 1.5×10⁷,质量浓度1.5 g/L。

表1 菌株基本特征

Table 1 Basic characteristics of bacterial strains

菌株	基本特征
W 18	高温好氣菌,最适生长温度70℃,菌落形态圆形,淡黄 色,菌体杆状,能够降解原油,主要代谢产生海藥糖脂类 生物表面活性物质,产少量甲烷
DM-2	高温好氧菌,最适生长温度55~60℃,菌落圆形,湿润, 菌体长杆状,能够以液体石蜡为唯一碳源生长
SH-1	高温好氧菌,最适生长温度70℃,最适生长 pH 值为 7.0,杆菌,革兰氏阳性,耐3% NaCl,能利用甘露糖、半乳 糖,能分解酪蛋白,不能分解淀粉,能降解烷烃和萘
LI	高温厌氧菌,最适生长温度60℃,主要产甲烷
4F	高温厌氧菌,最适生长温度60℃,高产甲烷及二氧化碳
N5	常温好氧菌,最适生长温度37℃,圆形,光滑凸起,湿润, 短杆状,革兰氏阴性,高产鼠李糖脂类表面活性剂

1.1.4 试验步骤与方法

微观仿真模型试验步骤:模型抽真空饱和水→ 油驱水造束缚水→~次水驱直至驱不出油→注入 2V_p(孔隙体积)微生物 W18→在 65 ℃高温、10 MPa 高压下作用 7 d→二次水驱→试验结束。用菌种 DM-2,SH-1,L1 和 4F 重复上述试验过程,观察记录 试验现象,并用同样方法进行一组空白对照试验。

微观分支盲孔模型试验步骤:模型抽真空饱和 油(如果微观模型抽真空饱和水,则油驱水时油无 法驱走盲孔中的水)→一次水驱直至驱不出油→空 白气驱(对比常规气驱和生物气体对盲孔中剩余油 作用的区别)→聚合物驱→注入2V_p产气量较大的 厌氧微生物4F→模型垂直放置(生物气是依靠良好 的流动性和密度差异在浮力的作用下进入到分支盲 孔中),常温常压(微观分支盲孔模型无法承受高温 高压)作用→试验结束。记录试验过程中盲孔中的 剩余油量变化。

1.2 微生物菌液物质在油水界面扩张黏弹性试验
 1.2.1 试验样品及试剂

试验用水为蒸馏水,由于试验要求介质透光性 良好,故试验用油为煤油,为对比常温菌和高温菌的 差异,所用菌种为常温菌 N5 与高温菌 W18。试验 时将培养的 10⁸ 个/mL 菌液分为两部分,其中一部 分用高速离心法去除菌体,得不含菌体的菌液。

1.2.2 试验装置

试验仪器为法国 I. T. CONCEPT 公司生产的 TRACKER 全自动液滴界面张力仪,利用悬滴法测 量界面张力,精度可达 10⁻⁶ mN/m。菌液物质动态 界面张力测定示意图见图3。



图 3 菌液物质动态界面张力测定示意图 Fig. 3 Schematic diagram of dynamic interfacial tension measurement of microbial material

1.2.3 试验步骤及方法

动态界面张力的测定:将含菌菌液装入仪器样 品注射器中,通过针头在针尖打一滴菌液于用煤油 形成的外相中,在菌液液滴静止状态测定不同温度

下菌液与油相界面张力随时间的变化,直到界面张 力基本不变为止,绘制变化曲线。

扩张流变参数的测定:用同样方法,对形成的含 菌菌液液滴以固定频率进行连续振荡,使其界面面 积按正弦规律周期变化,在不同温度下分别对其界 面张力及界面面积进行测量,进而求得界面膜的黏 弹模量,绘制变化曲线。

对高速离心去除菌体的菌液,采用同样方法测 定动态界面张力和扩张黏弹模量,并绘制相应曲线。

2 试验结果分析

2.1 微生物对剩余油形态和分布的影响

一次水驱后,微观模型内剩余油分布的典型图 像见图4。微生物与模型内剩余油作用后的典型图 像见图5。



图4 一次水驱后剩余油形态

Fig. 4 Remaining oil forms after primary water flooding



(c) W18

图 5 微生物作用后剩余油形态 Fig. 5 Remaining oil forms after microbe action

微生物作用后,代谢产生大量生物气体(图5 (a),(c)中白色透光部分),并且出现了成片分散的 乳化油滴(图5(b),(c)中分散的乳化小油滴),由 此可知微生物代谢产生了生物表面活性物质。气体 在孔隙内聚集,以气泡形式占据孔道中心部位,挤压 剩余油,使剩余油拉伸、延展、运移,从而在气泡表面 形成很薄的连续油膜,在气泡间形成柱状剩余油,这 些剩余油相互联系,在更大范围内形成连续相,二次 驱替时可受到更大驱动力;同时,气体还可提高体系 压力,降低原油黏度;生物表面活性物质能够乳化剩 余油,使剩余油分散在孔隙中央;微生物本身可降解 剩余油,使剩余油颜色变浅。

2.2 微生物驱油微观机制

微生物作用后,由于生物气体的存在和生物活 性物质的作用,二次水驱时原油流动形态见图 6。 ①气驱:水驱赶气泡,气泡驱赶剩余油,呈活塞式驱 动方式:②气液界面滑动:剩余油滴流经气泡时,沿 气泡表面滑动,超越气泡移动速度,加快了剩余油流 动和聚并过程;③剥离油膜:生物表面活性物质使油 水界面张力降低,残余油膜流动能力增强,加之生物 气的作用,油膜可被生物气带动;④生物表面活性物 质能够提高剩余油的启动、变形和运移能力,流动过 程中被拉成丝状、蝌蚪状。



图6 二次水驱时原油流动形态



2.3 微生物对微观盲孔剩余油的作用

图 7 为微观分支盲孔中剩余油在气驱、水驱、聚 合物驱、微生物驱后的形态,每组3 张图片从左到右 依次是 B,C,E 盲孔,孔径分别为 30,20 和 10 μm。 由图 7(a),(b)可见,一次气驱和水驱后盲孔中剩 余油均未发生变化。由图 7(c)可见,聚合物驱后, 在盲孔孔径为 30 μm 的 A,B 两个盲孔的人口处,部 分剩余油被带出。这是由于聚合物是高分子,具有 黏弹效应,聚合物溶液流动时,其长链分子的一端能 进入盲孔,在分子另一端的拉伸下,卷带出盲孔内的 剩余油,但这种能力有限,只能带走盲孔口端很少一 部分剩余油,且仅限于孔径较大的盲孔。由图7(d) 可见,微生物作用过程中,盲孔中的剩余油逐渐被置 换出来,且微生物进入了孔径较小的盲孔。



(c) 聚合物驱

(d) 微生物作用

图 7 试验各阶段盲孔中剩余油形态



各盲孔进入生物气高度变化见图8。



图8 生物气进入各盲孔高度变化



微生物作用的前5d, 盲孔内剩余油未变化, 这 是由于厌氧微生物的生长速度较慢, 有一个滞后过 程。从第6d起, 可观察到盲孔内剩余油被气体置 换, 盲孔内剩余油减少, 且盲孔内气体随时间的增加 而增加, 剩余油随时间的增加而减少。在微生物作 用过程中, 首先生物气进入尺寸较大的盲孔 A, C, 直 到第3 d 才进入直径为 10 μm 的盲孔 E。随着微生 物作用时间延长, 生物气进入盲孔越来越多, 其中的 剩余油越来越少。朝下放置的 6 个盲孔中剩余油没 有变化。

2.4 微生物对油水界面膜的微观作用

在菌液与油形成的两相体系中,菌液表面活性物质在界面上发生吸附,形成具有一定黏弹性的单分子可溶膜,界面膜的强度即界面膜恢复形变及阻滞形变的能力,是界面膜重要的动态性质^[10-13]。菌液物质界面膜的黏弹模量能够从界面微观角度反映

菌液物质对原油流动能力和油水界面性能的影 响^[14-15]。

菌液物质在油水两相界面上的动态吸附过程表 现为界面张力随时间的变化。50 ℃时,常温菌 N5、 高温菌 W18 动态界面张力曲线如图9 所示。界面 张力的初始值较大,初期吸附速度很快,界面张力迅 速降低,随时间延长吸附变缓,最终达到动态平衡, 界面张力趋于稳定。无论是初始值还是稳态值,含 菌菌液的值都要低于不含菌菌液的,表明菌体本身 具有界面活性,能够降低油水界面张力。

对菌液液滴以固定频率连续振荡时,其黏弹模 量响应界面张力也随时间增加而降低,存在初始值 与平衡值。当频率为0.1 Hz时,在各个温度下,菌 液物质黏弹模量初始值及平衡值曲线如图10所示。



图9 菌种动态界面张力曲线



图 10 菌种黏粘弹模量曲线



由图 10 可以看出,随着温度升高,黏弹模量降低,界面膜抵抗变形和恢复变形的能力减弱。含菌 菌液的油水界面黏弹模量初值和平衡值均比不含菌 体时低,表明含菌菌液的油水界面膜的流动和变形 能力强,菌体能够增加原油的流动性。

随温度升高,常温菌 N5 含菌体与不含菌体菌 液的油水界面黏弹模量初值和平衡值差别越来越 小,这是由于温度越高,微生物菌体的活性越弱,对 界面的流动变形能力贡献越小。对于高温菌 W18, 随温度升高含菌体与不含菌体菌液油水界面黏弹模 量初始值与平衡值的差别先增加后减小,在40 和 50 ℃时,二者差别最大,说明此时菌体活性最好,改 善原油流动能力最强。

微生物菌体本身及生物活性物质分子向油水两 相界面的扩散吸附过程,正是微生物提高采收率的 微观动态过程,油水两相界面张力及界面膜的流动 能力随吸附呈动态变化,当吸附达到平衡后,油水界 面的流动性能达到最佳。

3 结 论

(1)微生物提高采收率微观机制主要与微生物 对原油的降解、产生生物气和表面活性物质等有关。 生物气能够降低原油黏度,使剩余油膨胀形成连续 相,并在二次水驱时呈气驱、气液界面滑动、剥离油 膜等微观驱油形态。

(2)聚合物高分子对盲孔中的剩余油有一定的 卷带作用,但仅限于孔径较大的盲孔;生物气体在生 物活性物质的辅助作用下可较顺利地进入盲孔,并 置换出其中的剩余油,这是微生物驱独有的提高采 收率微观机制。

(3) 微生物菌体和生物表面活性物质在油水界 面的吸附,使界面膜的界面张力及黏弹模量减小,界 面膜的强度降低,原油的变形和流动能力增强。

(4)微生物菌体本身具有活性,微生物菌液驱

油比单独用代谢产物驱油有更好的提高采收率效 果。

参考文献:

- (1) 窦启龙,陈践发,王杰,等. 微生物采油技术的研究进展及展望[J]. 天然气地球科学,2004,15(5):559-563.
 DOU Qi-long, CHEN Jian-fa, WANG Jie, et al. Advances in researches and outlook for microbial enhanced oil recovery[J]. Natural Gas Geoscience, 2004,15(5): 559-563.
- [2] 王岚. 微生物采油及其作用机理[J]. 世界地质,2002, 21(2):138-140.
 WANG Lan. The mechanism of microbial enhanced oil recovery[J]. World Geology, 2002,21(2):138-140.
- [3] 何正国,向廷生,梅博文. 微生物采油机理研究[J]. 钻采工艺,1999,22(1):19-21.
 HE Zheng-guo, XIANG Ting-sheng, MEI Bo-wen. Mechanism research on microbial enhanced oil recovery[J].
 Drilling and Production Technology, 1999,22(1):19-21.
- [4] 伍晓林,石梅,侯兆伟,等.以烃为碳源的微生物驱油 微观机理探索研究[J].大庆石油地质与开发,2003, 22(4):56-57,60.

WU Xiao-lin, SHI Mei, HOU Zhao-wei, et al. Microscopic mechanisms in MEOR researching studies on the micro-organisms using petroleum hydrocarbon as a sole carbon source[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(4):56-57,60.

- [5] 韩培慧,石梅,孙凤荣. 以烃类为碳源的微生物驱油探索研究[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(2):41-43. HAN Pei-hui, SHI Mei, SUN Feng-rong. Study on microbial flooding with hydrocarbon as carbon source[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001,20(2):41-43.
- [6] 王凤琴,曲志浩,孔令荣.利用微观模型研究乳状液驱油机理[J].石油勘探与开发,2006,33(2);221-224.
 WAGN Feng-qin, QU Zhi-hao, KONG Ling-rong. Experimental study on the mechanism of emulsion flooding with micromodels[J]. Petroleum Expoloration and Development,2006,33(2);221-224.
- [7] 郭尚平,田根林,王芳,等.聚合物驱后进一步提高采收率的四次采油问题[J].石油学报,1997,18(4):49-53.

GUO Shang-ping, TIAN Gen-lin, WANG Fang, et al. The problem of quaternary oil recovery succeeding a polymer flooding[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(4):49-53.

[8] FENG Qing-xian, ZHOU Jia-xi, CHEN Zhi-yu, et al. Study on EOR mechanisms by microbial flooding [R]. SPE 79176,2002.

- [9] 黄延章,于大森. 微观渗流实验力学及其应用[M]. 北 京:石油工业出版社,2001:12-95.
- [10] 程栋,丁洪流,陆维昌,等.十二烷基苯磺酸钠表面膜的扩张黏弹性质研究[J]. 华东师范大学学报,2005, 11(4):37-42.
 CHENG Dong, DING Hong-liu, LU Wei-chang, et al. Dilatationai viscoelasticity of surface film of SDBS at gaswater interface[J]. Journal of East China Normal University, 2005,11(4):37-42.
- [11] LAKATOS, LAKATOS-Szabá J. Effect of IOR/EOR chemicals on interfacial rheological properties of crude oil/water [R]. SPE 65391,2001.
- [12] 孙涛垒,彭勃,许志明,等. 原油活性组分油水界面膜 扩张粘弹性研究[J]. 物理化学学报,2002,18(2): 161-165.
 SUN Tao-lei, PENG Bo, XU Zhi-ming, et al. Dilational viscoelasticity of interfacial film formed by active components of crude oil at oil/water interface[J]. Acta Physico-Chemica Sinica, 2002,18(2):161-165.
- [13] 彭勃,李明远,赵锁奇,等. 原油减压渣油馏分的油-水界面性质 I:伊朗重质减渣馏分的油-水界面张力
 [J].石油学报:石油加工,2003,19(4):64-69.
 PENG Bo, LI Ming-yuan, ZHAO Suo-qi, et al. Oil-water interfacial properties of vacuum residue fractions from crude oil I: dilational viscoelasticity of oil-water interface film formed by vacuum residue fractions from Iranian heavy crude oil[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section),2003,19(4):64-69.
- [14] 孙涛垒,张路,王宜阳,等.界面张力驰豫法研究不同 分子量原油活性组分界面扩张粘弹性[J].高等学校 化学学报,2003,24(12):2243-2247.
 SUN Tao-lei, ZHANG Lu, WANG Yi-yang, et al. Studies on interfacial dilational visoelasticity of active constituents in crude oil with different molecular weights by interfacial tension relaxation methods [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2003,24(12):2243-2247.
- [15] 王宜阳,张路,孙涛垒,等.酸性模拟油的油水界面扩 张粘弹性研究[J]. 高等学校化学学报,2003,24 (11):2044-2047.

WANG Yi-yang, ZHANG Lu, SUN Tao-lei, et al. Studies on interfacial dilational viscoelasticity properties of acidic simulated oil/alkali-surfactant system [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2003, 24 (11):2044-2047.

(编辑 李志芬)