

文章编号: 0253-2697(2016)01-0097-09 DOI:10.7623/syxb201601009

多孔介质微生物提高原油采收率模型

王天源¹ 修建龙^{2,3} 黄立信^{2,3} 毕永强¹ 齐义彬⁴ 从拯民⁵ 俞理^{2,3}

(1. 中国科学院大学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. 中国石油天然气集团公司三次采油重点实验室 河北廊坊 065007; 4. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院 北京 100083;
5. 北京师范大学生命科学学院 北京 100875)

摘要:通过分析微生物在多孔介质中的运移规律,建立了能反映微生物驱油过程的三维三相(油、气、水)四组分数学模型,模型中的组分有微生物、营养物、溶解氧以及代谢产物(生物表面活性剂)。模型分析了对流、扩散、微生物生长和死亡、趋化性、营养物消耗、代谢产物生成、各组分吸附和微生物解吸附等特性,并考虑了微生物吸附造成渗透率下降、代谢产物降低原油黏度和油-水界面张力等性质。进一步根据数学模型研制了对应的模拟器,在给定参数条件下,对微生物驱油效果进行了预测,分析了最大比生长速率、微生物吸附常数、趋化性系数以及代谢产物得率对微生物驱油的影响,进一步揭示了微生物提高采收率的作用机理。

关键词:多孔介质;微生物提高采收率;数学模型;模拟器;预测;敏感性分析

中图分类号:TE357.9 **文献标识码:**A

Microbial enhanced oil recovery model in porous media

Wang Tianyuan¹ Xiu Jianlong^{2,3} Huang Lixin^{2,3} Bi Yongqiang¹ Qi Yibin⁴ Cong Zhengmin⁵ Yu Li^{2,3}

(1. Institute of Porous Flow & Fluid Mechanics, University of Chinese Academy of Science, Hebei Langfang 065007, China;
2. Langfang Branch, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Hebei Langfang 065007, China;
3. CNPC Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Hebei Langfang 065007, China; 4. Sinopec Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China; 5. School of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Through analyzing the migration laws of microorganisms in porous media, a 3D three-phase (oil, gas and water) four-component mathematical model was established to reflect the process of MEOR (microbial enhanced oil recovery). The components of the model include microbe, nutrient, dissolved oxygen and metabolite (surfactant). The model is used to analyze the convection, dispersion, growth and decay of microbes, chemotaxis, nutrient consumption, metabolite production, adsorption of all components, microbe desorption and other properties. In the meantime, the MEOR model considers the permeability decline due to adsorption of microorganisms as well as the reductions in oil-viscosity and oil-water interfacial tension due to surfactant. Further, the corresponding simulator was developed according to the mathematical model. The microbial enhanced oil recovery effect was predicted under given parameter conditions, so as to analyze the influences of maximum growth rate, microbial adsorption constant, chemotaxis coefficient and metabolite yield coefficient on MEOR and further reveal the mechanism of MEOR.

Key words: porous media; microbial enhanced oil recovery; mathematical model; simulator; prediction; parameter sensitivity analysis

引用:王天源,修建龙,黄立信,毕永强,齐义彬,从拯民,俞理.多孔介质微生物提高原油采收率模型[J].石油学报,2016,37(1):97-105.

Cite: Wang Tianyuan, Xiu Jianlong, Huang Lixin, Bi Yongqiang, Qi Yibin, Cong Zhengmin, Yu Li. Microbial enhanced oil recovery model in porous media[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 97-105.

美国于 1991 年将微生物提高采收率技术(MEOR)列为热采、化学驱、气驱之后的第 4 类提高原油采收率(EOR)方法^[1]。和其他 EOR 技术一样,MEOR 技术也是为了降低油藏残余油以及扩大波及效率。MEOR 技术与化学驱技术的机理比较接近,但 MEOR 技术是将

微生物或营养物注入地下油层中,微生物局部富集、在位繁殖和代谢作用生成代谢产物,从而改变岩石和原油的物理化学性质^[2]。微生物采油机理大致可以分为 4 个方面^[3-9]:①生物表面活性剂可以降低油-水界面张力以及改变润湿性;②生物气降低黏度,改善流度比;③微

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA064402)和国家自然科学基金面上项目(No. 41573068)资助。

第一作者:王天源,男,1990 年 2 月生,2013 年获中国地质大学(武汉)学士学位,现为中国科学院大学渗流流体力学研究所硕士研究生,主要从事微生物渗流方面的研究工作。Email:wangtiany123@126.com

通信作者:俞理,男,1964 年 8 月生,1987 年获兰州大学学士学位,现为中国石油勘探开发研究院廊坊分院高级工程师,主要从事微生物提高采收率方面的工作。Email:yuli69@petrochina.com.cn

生物及其代谢产物选择性封堵油藏大孔道;④代谢产物中的有机酸腐蚀溶解岩石,增大有效渗透率。

Islam 等^[10]建立的微生物驱油模型考虑了微生物生长造成阻塞、黏度下降、界面张力降低以及微生物产生物气等特性。其中界面张力直接与微生物浓度相关,但是相关研究^[7]表明微生物产生的生物表面活性剂降低了油-水界面张力。Chang 等^[11]建立的数学模型则考虑了吸附作用、微生物生长与死亡、营养物消耗、趋化性以及一些其他物理性质。微生物吸附将造成孔隙度和渗透率的变化,文中也验证了微生物吸附对采收率的影响,但该模型并未对微生物的增产机理进行研究。由于 Chang 模型对微生物机理描述比较系统而具有较高的参考价值,国内外许多学者在该模型基础上进行改进和提高。谷建伟等^[12]建立了一个三维三相五组分数学模型,该模型主要描述了微生物、营养物、各种代谢产物的对流扩散、吸附、生长、死亡、消耗等行为,但对增产机理的考虑较少。朱维耀等^[13]提出了适合于两种微生物的多组分数学模型,该模型对微生物的生长特性及其增长机理进行阐述,但是忽略了微生物的吸附作用。Behesht 等^[2]建立的微生物驱油模型考虑表面活性剂的产出与吸附、微生物吸附、矿化度影响、界面张力降低、润湿性改变等特性,但模型对于限制性底物只给出了一种,且由于考虑因素较多模型参数也不易获取。

笔者通过综合考虑了对流、扩散、微生物繁殖和死亡、生物趋化性、营养物消耗、代谢产物生成、吸附和解吸附等特性,建立了微生物提高采收率数学模型,其中微生物消耗营养物产生代谢产物,该代谢产物不仅能降低油相黏度,还可以降低油-水界面张力。进一步根据建立的数学模型编制微生物驱油数值模拟软件,分析了微生物提高原油采收率机理。

1 数学模型

微生物提高采收率数学模型主要分为 2 个部分:

(1) 建立一个能够预估微生物、营养物及代谢产物在多孔介质中分布的运移模型。该运移模型考虑了对流、扩散、微生物生长和死亡、生物趋化性、营养物消耗、代谢产物生成、吸附和脱吸附等特性,这里代谢产物主要指生物表面活性剂。由于模型考虑了微生物的吸附阻塞作用,岩石的渗透率会发生变化。生物表面活性剂会使原油乳化降解,不仅能够降低油相的黏度,而且能够减低油-水的界面张力,而界面张力的改变会引起相对渗透率的改变,最终提高原油采收率。

(2) 将微生物、营养物及代谢产物的运移方程和三维三相(油、气、水)的黑油模型方程进行耦合,由于

传统的渗流方程没有考虑到黏度、绝对渗透率、相对渗透率及毛细管压力的变化,耦合渗流方程不但考虑了流体的流动,而且考虑了微生物及其代谢产物对渗流参数的影响(两者之间相互制约),渗流符合达西定律和质量守恒定律,三维三相渗流场模型控制方程参见文献^[14-17]。

1.1 模型基本假设

(1) 油藏流体为油、气、水三相,认为微生物、营养物及代谢产物均溶于水相中。

(2) 油藏是等温的,且推广的达西公式适用于多相系统。

(3) 体积可加,油、水是微可压缩流体。

(4) 油藏中微生物反应过程中微生物存在可逆吸附,营养物、代谢产物均为不可逆吸附。

(5) 忽略营养物、代谢产物的吸附对岩石孔隙度的影响。

1.2 运移方程

通过注水井向油层中注入适量的营养物和混气水,假定能够产生生物表面活性剂的微生物是好氧微生物,则微生物生长由氧气和营养物共同控制。

1.2.1 微生物运移方程

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} \nabla \left(\frac{\phi S_w C}{B_w} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_i C}{B_w} \right) - k_m \nabla \left(\frac{C}{B_w} \nabla \ln C_{Ni} \right) + \\ \frac{\phi S_w (\mu - k_c) C}{B_w} + \frac{QC}{V} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w C}{B_w} \right) + \\ \frac{\phi S_w k_c C}{B_w} - k_s \rho_b \varphi \left(\frac{\varphi}{\phi} \right)^k \end{aligned} \quad (1)$$

水相中微生物在岩石孔隙表面生长、死亡、吸附以及解吸附作用,使得孔隙表面有一定的沉积量:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = (\mu - k_d) \varphi + k_c \frac{\phi S_w C}{B_w \rho_b} - k_s \varphi \left(\frac{\varphi}{\phi} \right)^k \quad (2)$$

式(1)等号左边 5 项,从左到右依次是扩散项、对流项、微生物趋化性项、微生物繁殖和死亡项以及微生物的注入/采出,而等号右边依次是微生物单位时间内累积项、吸附项和解吸附项。式(2)则描述了微生物在岩石表面的生长、死亡、吸附以及解吸附等性质。

假定微生物生长符合 2 种底物成分限制生长的 Monod 模型^[16,18],则微生物生长速率为:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{C_{N1}}{K_{s1} + C_{N1}} \cdot \frac{C_{N2}}{K_{s2} + C_{N2}} \quad (3)$$

1.2.2 营养物运移方程

营养物在油层中的运移有对流和扩散作用,同时又会被液体中的细菌和吸附在岩石表面的菌体消耗,认为液体中的微生物可以正常新陈代谢,吸附在岩石表面的微生物仅能维持自身生长,营养物质的消耗快慢用消耗速率表示。

$$\gamma = \frac{\mu}{Y_{Ni}} + m_i \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

营养物质和代谢产物在水相中运移均会被岩石吸附,其吸附模型采用 Langmuir 等温吸附模型^[19],吸附质量浓度可以表述为:

$$C_{ks} = \frac{C_k}{a_k + b_k C_k} \quad (5)$$

根据物质平衡原理,营养物的运移方程为:

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \mathbf{D}_i \nabla \left(\frac{\phi S_w C_{Ni}}{B_w} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_i C_{Ni}}{B_w} \right) - \\ & \left[\left(\frac{\mu}{Y_{Ni}} + m_i \right) \frac{\phi S_w C}{B_w} + m_i \rho \varphi \right] + \frac{QC_{Ni}}{V_i} = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w C_{Ni}}{B_w} + \phi C_{Nis} \right) \quad (i = 1, 2) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)等号左边依次为营养物的扩散、对流、微生物消耗和注入/采出营养物的项,而等号右边为单位时间营养物的积累与吸附项。

1.2.3 代谢产物运移方程

微生物在消耗营养物质进行生命活动过程中,释放出有机酸、多元醇、糖、酮和气体等代谢产物,笔者所建立模型中的代谢产物以生物表面活性剂为主,从而改变油藏流体和岩石的性质。根据产物生产速率与菌体生成速率的关系,可以将其分成 3 种类型^[20]:①与生长相关型;②与生长部分相关型;③与生长不相关型。文中采用 3 种类型的通式来描述代谢产物质量浓度方程。

$$C'_p = Y_p \frac{dC}{dt} + X_p C \quad (7)$$

代谢产物由微生物菌体产生,认为其能够全部溶于水并可被岩石吸附,根据物质平衡方程,代谢产物运移方程为:

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \mathbf{D}_p \nabla \left(\frac{\phi S_w C_p}{B_w} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_p C_p}{B_w} \right) + \\ & \left(Y_p \frac{dC}{dt} + X_p C \right) + \frac{QC_p}{V_i} = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w C_p}{B_w} + \phi C_{ps} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)等号左侧从左到右依次为代谢产物扩散、对流、微生物代谢产生的代谢产物的量和注入/采出项,而等号右侧为单位时间代谢产物的积累与吸附项。

1.3 物性参数变化方程

随着微生物生长、繁殖,整个油藏的黏度、孔隙度、渗透率、相对渗透率不再是常数,同时这些参数的改变也反映了微生物提高原油采收率的机理。当渗流规律满足达西定律时,微生物对油藏渗透率影响较大,更容易提高原油采收率,故而,微生物驱提高采收率有其适用的范围。

1.3.1 孔隙度和渗透率变化

微生物菌体吸附在岩石表面后,会造成孔隙度的降低,同时也会对渗透率产生影响。Knapp 等的研究表明,渗透率的降低与孔隙度下降的三次方成正比。当多孔介质的孔喉被堵塞时,孔隙度的变化可能不显著,但渗透率会大大降低,因此引入一个流动效率系数 f 进行修正,其主要由孔喉直径分布双峰函数决定^[21,22]。

$$\phi = \phi_0 - \varphi \quad (9)$$

$$\frac{K}{K_0} = f \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 = f \left(\frac{\phi_0 - \varphi}{\phi_0} \right)^3 \quad (10)$$

1.3.2 黏度变化

在微生物采油过程中,微生物自身代谢降解、表面活性剂对原油的乳化作用及气体溶解对原油黏度影响较大,黏度变化规律可通过微生物与原油的发酵实验确定^[12,13,23]。变化关系可表示为:

$$\mu_o = \mu_{oi} f_1(C_p) \quad (11)$$

1.3.3 界面张力变化

微生物在油层中产生生物表面活性剂,可以降低油-水界面张力 σ ,使原油阻力减小,启动残余油从而提高洗油效率。一般水驱油藏系统下,油-水的界面张力约为 20~30 mN/m。为了能够显著提高洗油效率,效果显著的表面活性剂能够降低界面张力 2~3 个数量级。界面张力的变化规律可表示为:

$$\sigma = \sigma_0 f_2(C_p) \quad (12)$$

1.3.4 相对渗透率变化

生物表面活性剂通过降低界面张力来影响相对渗透率曲线的变化,在相对渗透率曲线上表现为端点值和指数值的改变。当界面张力 σ 到达 0 时,相对渗透率曲线基本上近似为一条直线,此时相对渗透率基本上等于相饱和度。在该模型中,采用了 Coats 模型^[24-27]定义了两套相对渗透率曲线,通过插值的方法形成一条新的相对渗透率曲线。Coats 模型是由于界面张力的下降来改变气、油两相相对渗透率曲线,这种模型也可用在油、水两相中。模型为:

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{base}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

$$S_{wc}^* = f(\sigma) S_{wc} \quad (14)$$

$$S_{or}^* = f(\sigma) S_{or} \quad (15)$$

$$K_{rw} = f(\sigma) K_{rw(base)} + [1 - f(\sigma)] K_{rw(misc)} \quad (16)$$

$$K_{ro} = f(\sigma) K_{ro(base)} + [1 - f(\sigma)] K_{ro(misc)} \quad (17)$$

2 模型数值解

2.1 初始和边界条件

数值模拟中所用参数如表 1 所示。考虑到油藏全

表1 物性参数^[11,19,21,22]

Table 1 Physical parameters

| 模型参数 | 参数值 | 模型参数 | 参数值 |
|-------------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|
| 油藏尺寸($N_x \times N_y \times N_z$) | 10×1×1 | 趋化性系数/($m^2 \cdot d^{-1}$) | 3.6×10^{-4} |
| 网格块大小($dx \times dy \times dz$)/m | 20×200×10 | 最大比生长速率/ d^{-1} | 8 |
| 渗透率/mD | 100 | 半饱和常数 1/($mg \cdot mL^{-1}$) | 0.5 |
| 孔隙度/% | 20 | 半饱和常数 2/($mg \cdot mL^{-1}$) | 6.25 |
| 油相密度/($kg \cdot m^{-3}$) | 849 | 比死亡速率/ d^{-1} | 0.1 |
| 水相密度/($kg \cdot m^{-3}$) | 1×10^3 | 菌体得率 1/($mg \cdot mg^{-1}$) | 3.8 |
| 微生物密度/($kg \cdot m^{-3}$) | 1×10^3 | 菌体得率 2/($mg \cdot mg^{-1}$) | 0.8 |
| 油相黏度/($mPa \cdot s$) | 20 | 维持因子 1/($d^{-1} \cdot mg \cdot mg^{-1}$) | 0.04 |
| 水相黏度/($mPa \cdot s$) | 0.9 | 维持因子 2/($d^{-1} \cdot mg \cdot mg^{-1}$) | 0.09 |
| 原始含油饱和度/% | 75 | 代谢产物得率/($mg \cdot mg^{-1}$) | 0.779 |
| 原始含水饱和度/% | 25 | 代谢产物维持因子/($d^{-1} \cdot mg \cdot mg^{-1}$) | 1.8×10^{-2} |
| 注入微生物质量浓度/($mg \cdot mL^{-1}$) | 1.275 | 微生物吸附常数/ d^{-1} | 3 |
| 注入营养物质质量浓度/($mg \cdot mL^{-1}$) | 2.495 | 微生物解吸附常数/ d^{-1} | 25 |
| 注入氧气质量浓度/($mg \cdot mL^{-1}$) | 0.008 | 营养物质吸附常数 1 | 2.35×10^{-4} |
| 注水井注入量/($m^3 \cdot d^{-1}$) | 47.67 | 营养物质吸附常数 2/($mL \cdot mg^{-1}$) | 2.62×10^{-4} |
| 微生物扩散系数/($m^2 \cdot d^{-1}$) | 5.1×10^{-4} | 氧气吸附常数 1 | 0 |
| 营养物质扩散系数/($m^2 \cdot d^{-1}$) | 7.7×10^{-4} | 氧气吸附常数 2/($mL \cdot mg^{-1}$) | 0 |
| 氧气扩散系数/($m^2 \cdot d^{-1}$) | 1.06×10^{-4} | 代谢产物吸附常数 1 | 6.57×10^{-3} |
| 代谢产物扩散系数/($m^2 \cdot d^{-1}$) | 7.7×10^{-4} | 代谢产物吸附常数 2/($mL \cdot mg^{-1}$) | 9.8×10^{-3} |
| 纵向弥散系数/m | 3.05×10^{-3} | 流动效率系数 | 1 |
| 横向弥散系数/m | 3.05×10^{-3} | 初始界面张力/($mN \cdot m^{-1}$) | 24.2 |
| 弯曲因子 | 1.4 | 插值指数 | 6 |

部的初始含油饱和度和含水饱和度的数据较难获取,假设油藏是均匀的,同样通过设置边界处的压力梯度为0来满足油藏边界的无流条件。该模型可通过设置不同条件来模拟外源和内源微生物驱油模型。外源微生物驱油模型条件:全场微生物、营养物质、代谢产物的浓度均为0,后续注入时,仅注入微生物和营养物质。内源微生物驱油模型条件:全场营养物质、代谢产物的浓度均为0,而油藏中存在一定的微生物含量,后续注入时,也仅注入营养物质。在本文中,采用的是外源微生物驱油模型,假定注入的微生物在油藏环境下仍能持续产生微生物表面活性剂,而该生物表面活性剂能降低界面张力2个数量级来启动残余油。

2.2 模型解法

模型采用有限差分方法来求解,其中三维三相渗流场模型控制方程可利用IMPES方法求解出油藏的压力、饱和度分布。同时,为了保证解的稳定性,利用Crank-Nicolson格式来差分离散式(1)、式(6)和式(8),从而求解出油藏中的微生物浓度分布、营养物质分布、氧气分布以及代谢产物质量浓度分布。

其次,将微生物、营养物质及代谢产物的运移方程和三维三相(油、气、水)的连续性方程进行耦合,可以求解出渗流场下的压力和各相的饱和度。由多孔介质中的压力梯度引起的渗流速度将会影响微生物、营养物质

及代谢产物的运移,对渗流场-微生物场耦合数学模型实行迭代求解,最终整个油藏的压力分布、饱和度分布以及微生物浓度分布均可以求解。

3 结果分析

3.1 代谢产物降低界面张力

微生物驱油数学模型主要依赖于生物表面活性剂来提高原油采收率,在某种程度上与表面活性剂驱类似。然而,该模型中的表面活性剂不是通过直接注入,而是靠微生物(不论是本源还是外源)以及注入的营养物质在油藏环境中产生的。为了模拟生物表面活性剂对原油的影响,需要通过微生物与原油的发酵实验来确定这些参数,由于实验数据有限,本文仅给出代谢产物质量浓度-界面张力曲线(图1)。当在没有代谢产物时,油-水界面张力为24.2 mN/m,而在代谢产物质量浓度为3.41 mg/mL时,油-水界面张力为0.07 mN/m,界面张力降低了2个数量级。

3.2 代谢产物浓度分布

为了模型求解方便,采用一维矩形网格来模拟油藏,该油藏被划分成 $10 \times 1 \times 1$ 大小相同的网格块。文中采用一注一采模型,注入井在第一个网格,而采出井在最后一个网格。为了保证注采平衡,注入井和采出井的产液量均控制为47.67 m^3/d 。在水驱2590 d后(含水率达到95%),注入0.232 PV营养液与菌液的

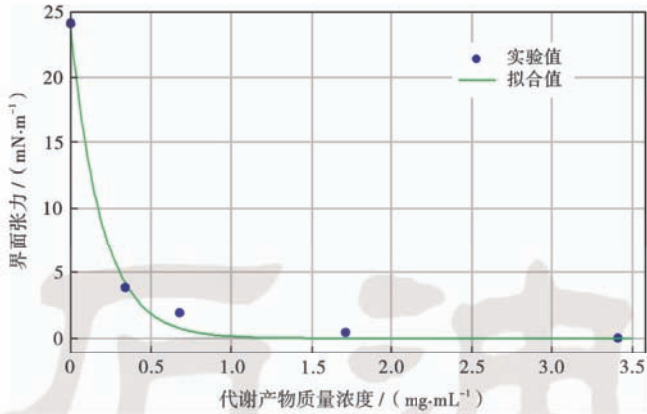


图 1 代谢产物质量浓度与界面张力关系

Fig. 1 Relationship between metabolite concentrations and interfacial tension

混合溶液,其中营养物的质量浓度为 2.495 mg/mL,而氧气的质量浓度为 0.008 mg/mL,菌液的浓度则为 3.18×10^8 个/mL。模型模拟铜绿假单胞菌^[28]驱油过程,铜绿菌体大小为(0.4~0.6 μm) × (1.4~1.8 μm),菌液的质量浓度则可等效为 1.275 mg/mL,为微生物初始浓度 C_0 。微生物在油藏中不断消耗底物生长、繁殖,并产生代谢产物。随着水驱进行,代谢产物在时间和空间上也将会呈现不同的分布(图 2)。

从图 2 中可以看出,当油藏中注入水含量达到 1.6 PV 和 1.78 PV 时,在空间上,代谢产物主要分布在油藏的注入井端;而在时间上,代谢产物峰值的大小不一样,注水量为 1.6 PV,代谢产物峰值为 0.6 mg/mL,而注水量为 1.78 PV,代谢产物质量浓度峰值为 1.26 mg/mL。随着注水量不断增多,代谢产物峰值逐

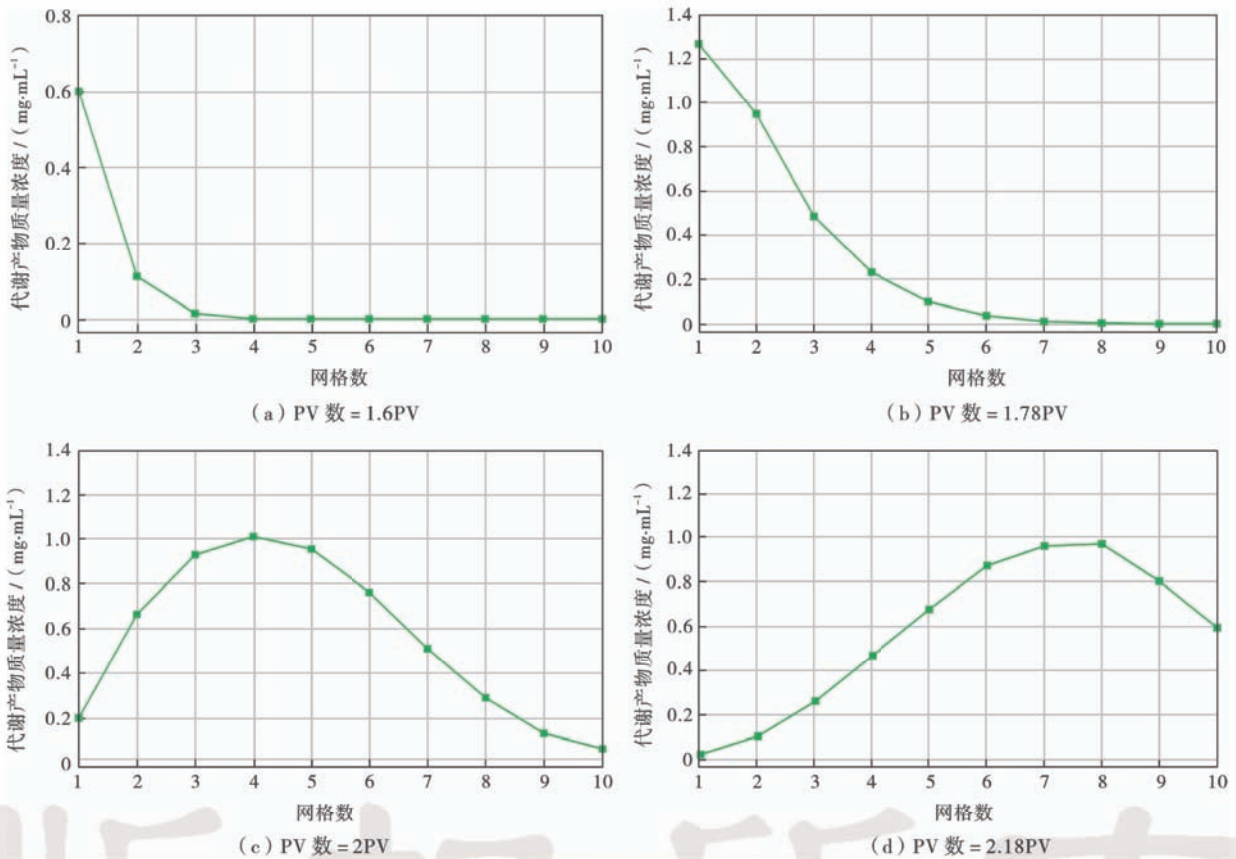


图 2 不同时刻代谢产物分布

Fig. 2 Metabolites distribution at different times

步向油藏采出井靠近。当注水量为 2 PV 时,代谢产物峰值出现在油藏中部;注水量为 2.18 PV 时,代谢产物峰值靠近油藏采出井部分。若继续增加注水量,代谢产物峰值会向采出井移动,至到最后整个油藏内的代谢产物浓度趋近于 0。

3.3 模型效果预测

根据微生物提高采收率数学模型,研制相对应的模拟器,对水驱和微生物驱(MEOR)进行模拟。对于水驱油藏,在给定的产液量为 47.67 m³/d 的条件下,

水驱至含水率 98%;而对于微生物驱油,一次水驱至 2590 d(含水率为 95%),后续注入 0.23 PV 的营养液与菌液的混合溶液,最终水驱至含水率 98%。根据模拟器所计算出来的数据,含水率、采收率与注入水孔隙体积数的关系如图 3 所示。

水驱油藏至含水率达到 98% 时,采收率达到 54%。而对于微生物驱油,含水率达到 98% 时,采收率为 60.77%,相对水驱油藏提高原油采收率 6.77%。从图 3 中可以看出,在油藏中加入微生物后并不能立

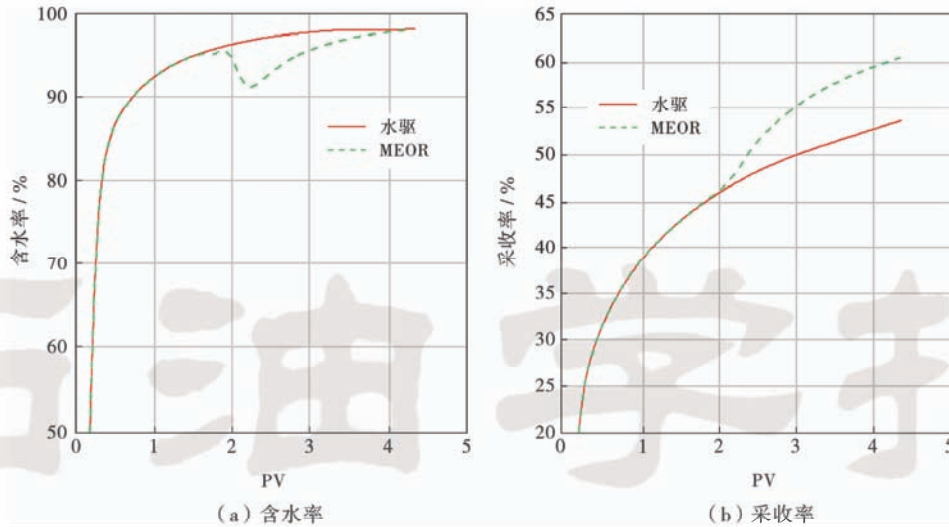


图3 含水率与采收率的变化关系

Fig. 3 Relationship between water cut and recovery

即降低含水率, MEOR降低含水率有一定的滞后效应。注入0.23 PV营养液与菌液的混合溶液后, 含水率没有立即恢复到水驱状态, 而是在注水量为1.78~2.18 PV时, 含水率急剧下降。这一阶段从代谢产物浓度分布可以看出, 主要是由于油藏中微生物代谢产生的表面活性剂降低了含水率。当注水量增长到2.18 PV之后, 表面活性剂不断被驱替出来, 含水率开始慢慢增长, 直至与水驱状态相吻合。

3.4 参数敏感性分析

3.4.1 最大比生长速率影响

随着油藏不断开采, 油藏内部环境会出现显著变化。对微生物而言, 在这种变化的环境下, 其生长速率很难维持一个定值。本文模型并没有将这个因素考虑在内, 但其对微生物驱油的影响还是值得探讨。图4

为最大比生长速率 μ_{\max} 分别在0.08、0.8、8 d⁻¹时对油藏含水率及采收率的影响。

从图4中可以看出, 相对最大比生长速率为0.8 d⁻¹, 当最大比生长速率为8 d⁻¹时, 油藏含水率最低值更早达到, 微生物驱油的采收率更大。由于最大比生长速率越大, 微生物生长越快, 导致代谢产物的产出速度也越快, 注入相同时间微生物同时产生的代谢产物也更多, 从而提高原油采收率也越多; 而当最大比生长速率为0.08 d⁻¹时, 微生物生长较慢, 导致代谢产物产出极少或者根本就没有产出, 最终在此种情况下微生物驱油与水驱油藏效果相差并不大。

3.4.2 吸附常数影响

微生物在岩石表面的吸附阻塞是微生物驱油的一个重要机理, 对于不同的吸附常数, 整个油藏的微生物

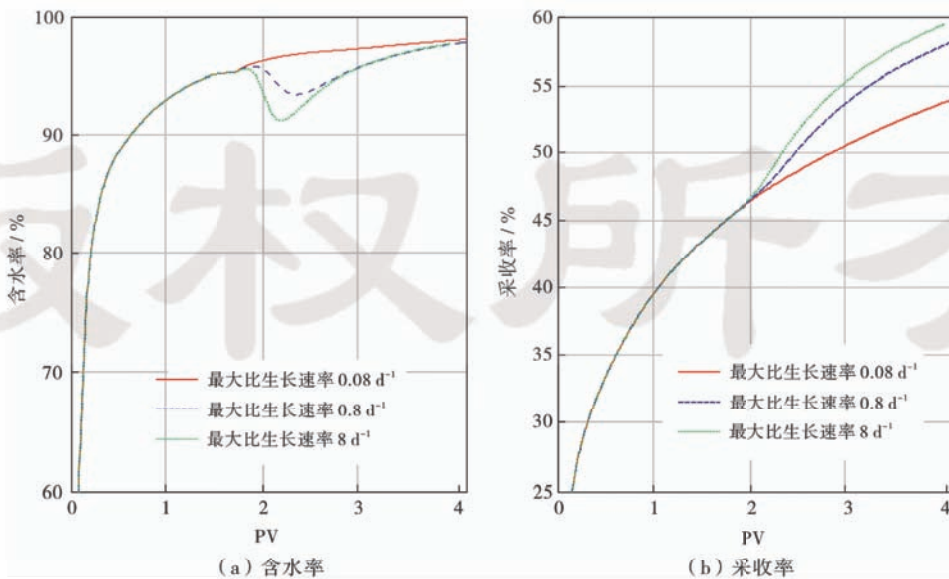


图4 不同最大比生长速率下的含水率和采收率变化关系

Fig. 4 Relationship between water cut and recovery under different maximum growth rate

分布也不一样。水驱 2590 d 后,注入 0.08 PV 的菌液和营养液的混合溶液,可以得出吸附常数分别为 0、3 和 10 下的微生物浓度分布(图 5)。

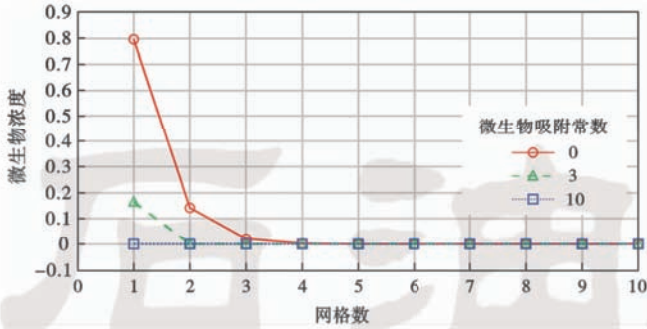


图 5 不同吸附常数下的微生物浓度

Fig. 5 Concentration of microorganisms under different adsorption constant

从图 5 可以看出,当微生物吸附常数为 0 时,注入井处微生物浓度 C/C_0 能达到 0.79,且微生物运移到第 4 块网格后浓度趋近于 0;当微生物吸附常数为 3 时,注入井处微生物浓度 C/C_0 能达到 0.17,而微生物只运移到第 2 块网格后浓度就趋近于 0;当微生物吸附常数为 10 时,由于吸附能力太强,导致微生物注入后就立即被吸附到岩石表面,最终整个油藏的微生物浓度都趋于 0。

3.4.3 趋化性系数影响

趋化性在微生物采油过程中是一个重要特征。由于微生物的趋化性,微生物将在油-水界面聚集,在位繁殖并产生大量的代谢产物,形成界面处微生物和代谢产物局部高浓度。微生物趋化性系数的确定需要实验支撑,本文仅模拟了不同趋化性系数将对微生物驱

油效果产生的影响。水驱 2590 d 后,注入 0.08 PV 的菌液和营养液的混合溶液,可以得出趋化性系数分别为 0、0.5 和 1.0 m^2/d 下的微生物浓度分布(图 6,此模型中的微生物吸附常数设置为 0)。

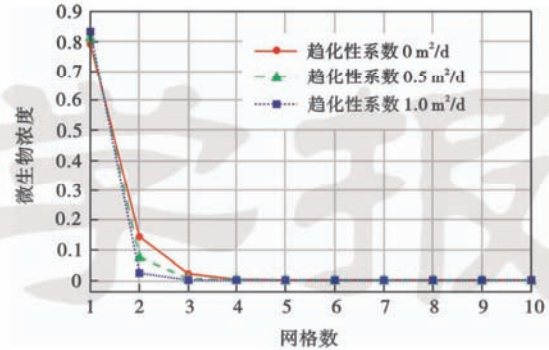


图 6 不同趋化性系数下的微生物浓度

Fig. 6 Concentration of microorganisms under different chemotaxis

从图 6 可以看出,当趋化性系数越大时,注入井端的微生物浓度越大。由于注入井端营养物浓度值最大,微生物的趋化性使微生物在注入井端聚集。从第 2 个网格开始,趋化性系数越小,微生物浓度反而越大(趋化性系数为 0 时的微生物浓度值是趋化性系数为 1 m^2/d 时微生物浓度值的 5 倍)。

3.4.4 代谢产物得率影响

微生物生长、繁殖产生代谢产物(生物表面活性剂),降低了油相黏度以及油-水界面张力,最终提高了采收率。在不同的代谢产物得率下,整个油藏的代谢产物浓度分布也不一样。图 7 为代谢产物得率分别为 0.08、0.8 和 2.0 mg/mg 时的代谢产物质量浓度分布。从图 7

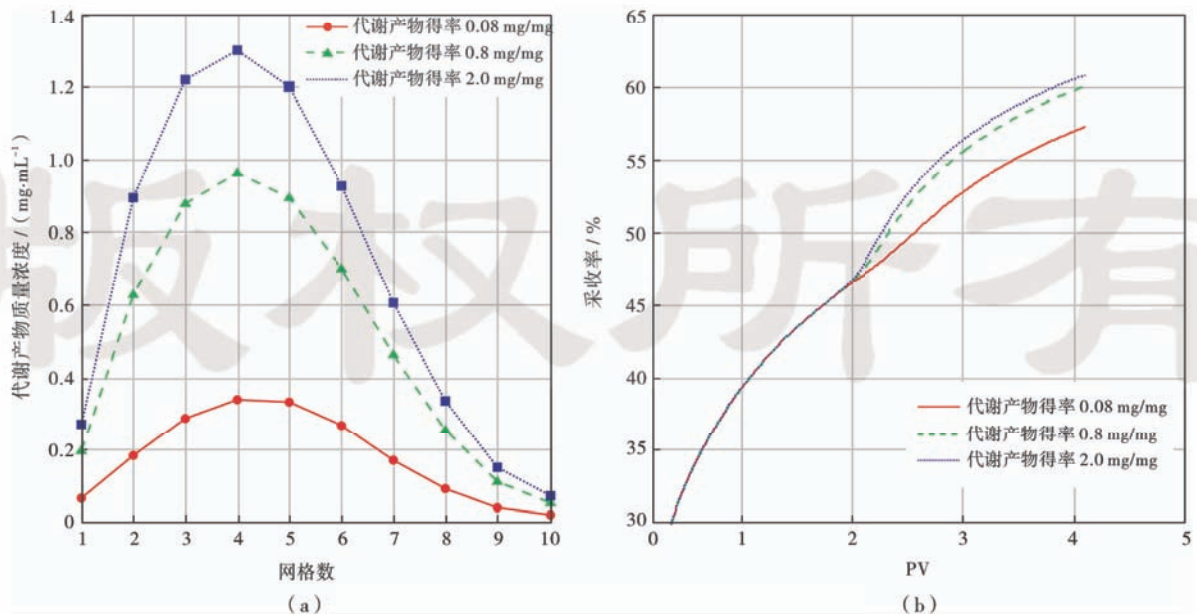


图 7 不同代谢产物得率下的代谢产物质量浓度和采收率关系

Fig. 7 Metabolite concentrations and recovery curves under different yield coefficient of metabolite

可以看出代谢产物得率越高,代谢产物质量浓度值也越大,相对应的采收率也越高。

4 结 论

(1) 微生物提高采收率数学模型中考虑了微生物的生化过程、岩石的特性及流体渗流等特性,是一个比较完整的微生物驱油数学模型,通过研制相对应的微生物驱油数值模拟软件,形成了微生物驱油数值模拟技术。

(2) 利用迭代求解的方法对渗流场-微生物场耦合数学模型进行求解,该求解方法把求解耦合场问题分成了两个场分别求解。利用 IMPES 方法求解渗流场压力饱和度方程,其计算结果作为已知参数参与微生物场浓度方程计算,通过迭代至收敛,保证了计算的稳定性及准确性。

(3) 微生物提高采收率数学模型中诠释了微生物提高原油采收率的机理,可应用于各种微生物提高采收率方案的优化、历史拟合和动态预测以及参数敏感性研究。

符号注释: D —微生物在水相中的有效分散系数张量, m^2/d ; ϕ —孔隙度; S_w —含水饱和度; C —微生物质量浓度, mg/mL ; B_w —地层水体积系数; u_i —流体速度, m/d ; k_m —微生物趋化性系数, m^2/d ; C_{Ni} —营养物质质量浓度和氧气质量浓度 ($i=1,2,1$ 为营养物, 2 为氧气), mg/mL ; μ —微生物的生长速率, $1/\text{d}$; k_d —死亡速率, $1/\text{d}$; Q —日注入/采出量, m^3/d ; V —井控制体积, m^3 ; t —时间, d ; k_c —吸附速率, $1/\text{d}$; k_y —解吸附速率, $1/\text{d}$; ρ_0 —微生物密度, kg/m^3 ; φ —沉积的微生物体积/孔隙介质体积; k —解吸附参数; μ_{\max} —受营养物和氧气限制的最大比生长速率, $1/\text{d}$; C_{N1} 、 C_{N2} —限制微生物生长的营养物和氧气的质量浓度, mg/mL ; K_{s1} 、 K_{s2} —营养物和氧气的半饱和常数, mg/mL ; γ —微生物消耗速率, $1/\text{d}$; Y_{Ni} —消耗单位营养物和氧气所产生的细菌量, mg/mg ; m_i —维持微生物生长消耗的营养物和氧气, $\text{mg}/(\text{mg}\cdot\text{d})$; C_{ks} —物质 k 的吸附速率; C_k —物质 k 的质量浓度, mg/mL ; a_k —物质 k 的吸附常数 1 (由实验确定); b_k —物质 k 的吸附常数 2 (由实验确定), mL/mg ; D_i —营养物 i 的扩散系数, m^2/d ; C_{Ni} —营养物 i 在岩石表面的吸附质量浓度, mg/mL ; V_i —井控制体积, m^3 ; C'_p —代谢产物浓度的生成速率, $\text{mg}/(\text{mL}\cdot\text{d})$; Y_p —代谢产物得率, 表示随微生物变化率的质量浓度变化量, mg/mg ; X_p —维持生命时代代谢产物的生成速率, $\text{mg}/(\text{mg}\cdot\text{d})$; D_p —代谢产物扩散系数 (由实验确定), m^2/d ; C_p —代谢产物的质量浓度, mg/mL ; C_{ps} —代谢产物吸附质量浓度, mg/mL ; ϕ_0 —初始孔隙度;

K —孔隙度降低后的渗透率, mD ; K_0 —初始渗透率, mD ; f —流动效率系数; μ_0 —微生物代谢产物作用后的原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_0 —微生物代谢产物作用前的原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; σ —微生物代谢产物作用后的界面张力, mN/m ; σ_0 —微生物代谢产物作用前的界面张力, mN/m ; σ —代谢产物质量浓度 C_p 下的界面张力, mN/m ; σ_{base} —高界面张力, mN/m ; $f(\sigma)$ —一个插值函数, 其取值范围为 0 (低界面张力) 到 1 (高界面张力); n —插值函数的指数值, 是实验参数值系数; S_{wc} —在界面张力 σ 下的束缚水饱和度; S_{wc} —初始束缚水饱和度; S_{or} —在界面张力 σ 下的残余油饱和度; S_{or} —初始残余油饱和度; $K_{rw(\text{base})}$ 、 $K_{ro(\text{base})}$ —高界面张力 σ_{base} 下的水相、油相相对渗透率, mD ; $K_{rw(\text{misc})}$ 、 $K_{ro(\text{misc})}$ —低界面张力下的水相、油相相对渗透率, mD 。

参 考 文 献

- [1] 李红. 微生物采油—第四类提高采收率方法[J]. 试采技术, 1992, 13(4): 59-66.
Li Hong. Microbial enhanced oil recovery—the fourth kind of method to enhance oil recovery[J]. Well Testing and Production Technology, 1992, 13(4): 59-66.
- [2] Behesht M, Roostaazad R, Farhadpour F, et al. Model development for MEOR process in conventional non-fractured reservoirs and investigation of physico-chemical parameter effects [J]. Chemical Engineering & Technology, 2008, 31(7): 953-963.
- [3] Afrapoli M S, Alipour S, Torsaeter O. Fundamental study of pore scale mechanisms in microbial improved oil recovery processes [J]. Transport Porous Media, 2011, 90(3): 949-964.
- [4] ZoBell C E. Bacterial release of oil from oil-bearing materials. [Gradual release of oil from tar sands][J]. World Oil, 1947, 126-7: 13-1.
- [5] Armstrong R T, Wildenschild D. Microbial enhanced oil recovery in fractional-wet systems: a pore-scale investigation [J]. Transport Porous Media, 2012, 92(3): 819-835.
- [6] Lazar I, Petrisor I G, Yen T F. Microbial enhanced oil recovery (MEOR)[J]. Petroleum Science and Technology, 2007, 25(11): 1353-1366.
- [7] Nielsen S M, Shapiro A, Michelsen M L, et al. Mathematical model for microbial enhanced oil recovery with surfactant distributed between phases; proceedings of the 30th IEA-EOR Conference [C]. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2009.
- [8] 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.
Le Jianjun, Liu Fang, Zhang Jiyuan, et al. A field test of activation indigenous microorganism for microbial enhanced oil recovery in reservoir after polymer flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 99-106.
- [9] 朱维耀, 夏小雪, 郭省学, 等. 高温高压条件下油藏内源微生物驱油机理[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 528-535.
Zhu Weiyao, Xia Xiaoxue, Guo Shengxue, et al. Microscopic oil displacement mechanism of indigenous microorganisms under

- high-temperature and high-pressure conditions in reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(3): 528-535.
- [10] Islam M R. Mathematical modeling of microbial enhanced oil recovery[R]. SPE 20480, 1990.
- [11] Chang M M, Chung F T H, Bryant R S. Modeling and laboratory investigation of microbial transport phenomena in porous media [R]. SPE 22845, 1991.
- [12] 谷建伟, 姜汉桥, 王增林, 等. 微生物采油数学模型发展现状[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(4): 5-7.
Gu Jianwei, Jiang Hanqiao, Wang Zenglin, et al. State of the arts on mathematical model of microbial oil recovery[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(4): 5-7.
- [13] 朱维耀, 杨正明, 迟砾, 等. 微生物水驱传输组分模型模拟器[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 44-46.
Zhu Weiyao, Yang Zhengming, Chi Li, et al. A microbial transport compositional model simulator [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(3): 44-46.
- [14] Kim S B. Numerical analysis of bacterial transport in saturated porous media[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(5): 1177-1186.
- [15] 哈利德·阿齐兹, 安东尼·塞特瑞. 油藏数值模拟[M]. 袁士义, 王家禄, 译. 北京: 石油工业出版社, 2004: 11-17.
Aziz K, Settari A. Reservoir numerical simulation [M]. Yuan Shiyi, Wang Jialu. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 11-17.
- [16] 山根恒夫. 生物反应工程[M]. 苏尔馥, 胡章助, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1989.
Yamane Koo. Bioreactor engineering [M]. Su Erfu, Hu Zhang-zhu. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989.
- [17] 王宝华, 吴淑红, 李巧云, 等. 油藏数值模拟中 BILU0-GMRES 方法的应用[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 954-958.
Wang Baohua, Wu Shuhong, Li Qiaoyun, et al. Applications of BILU0 GMRES in reservoir numerical simulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(5): 954-958.
- [18] 雷光伦, 陈月明. 微生物提高采收率理论模型[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 47-49.
Lei Guanglun, Chen Yueming. A mathematical model of microbial enhanced oil recovery [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(3): 47-49.
- [19] 王洪涛. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 北京: 北京高等教育出版社, 2008: 48-52.
Wang Hongtao. Dynamics of fluid flow and contaminant transport in porous media [M]. Beijing: Beijing Higher Education Press, 2008: 48-52.
- [20] 王岁楼, 熊卫东. 生化工程[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2002: 37-40.
Wang Suiyou, Xiong Weidong. Biochemical engineering [M]. Beijing: Chinese Medical Science and Technology Publishing House, 2002: 37-40.
- [21] Zhang Xu, Knapp R M, McInerney M J. A mathematical model for microbially enhanced oil recovery process [J]. *Developments in Petroleum Science*, 1993, 39: 171-186.
- [22] 修建龙. 内源微生物驱油数值模拟研究[D]. 廊坊: 中国科学院研究生院, 2011.
Xiu Jianlong. A study on the numerical simulation of indigenous microbes enhancing oil recovery [D]. Langfang: Graduate University of Chinese Academy of Science, 2011.
- [23] 毕永强, 伊丽娜, 齐义彬, 等. 龙虎泡油田微生物驱油评价实验 [J]. 科技导报, 2015, 33(9): 50-53.
Bi Yongqiang, Yi Li'na, Qi Yibin, et al. Experimental evaluation of the microbial oil displacement in Longhupao oilfield [J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(9): 50-53.
- [24] Coats K H. An equation of state compositional model [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1980, 20(5): 363-376.
- [25] Al-Wahaibi Y M, Grattoni C A, Muggeridge A H. Drainage and imbibition relative permeabilities at near miscible conditions [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, 53 (3/4): 239-253.
- [26] Hoteit H, Firoozabadi A. Numerical modeling of two-phase flow in heterogeneous permeable media with different capillarity pressures [J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(1): 56-73.
- [27] Nielsen S M, Shapiro A A, Michelsen M L, et al. 1D simulations for microbial enhanced oil recovery with metabolite partitioning [J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 85(3): 785-802.
- [28] 夏文杰, 董汉平, 俞理, 等. 铜绿假单胞菌 WJ-1 降解原油特性 [J]. 化工学报, 2011, 62(7): 2013-2019.
Xia Wenjie, Dong Hanping, Yu Li, et al. Oil-degradation characteristics of *Pseudomonas aeruginosa* WJ-1 [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(7): 2013-2019.

(收稿日期 2015-07-28 改回日期 2015-09-24 编辑 王培玺)

版权所有