

文章编号:1009-9603(2021)02-0034-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.005

考虑微生物运移特征的采油数学模型

毕永强¹,胡张明²,王国柱³,闫蕊¹,修建龙⁴

(1.西安航空学院机械工程学院,陕西西安710077;2.中国石油西部钻探工程有限公司地质研究院,新疆克拉玛依834000;3.中国石油长庆油田分公司第六采油厂,陕西榆林718600;4.中国石油勘探开发研究院,北京100083)

摘要:为了提高微生物采油数值模拟软件模拟计算的准确性和稳定性,基于前期对微生物迁移滞留的实验研究成果,引入全新的微生物运移模型方程,体现了不可及孔隙体积、吸附作用和筛分作用对微生物在油藏中分布状态的影响,构建了能够反映微生物采油过程的一维两相(油、水)三组分(微生物、营养物质以及代谢产物)数学模型。通过编制程序,模拟微生物采油过程,对不可及孔隙体积、吸附作用和筛分作用进行敏感性分析。结果表明:该模型可以模拟微生物采油过程,反映不可及孔隙体积、吸附作用和筛分作用对驱油过程的影响较为敏感,通过引入这些参数可以实现对微生物浓度分布、含水率和采收率的准确预测,为微生物采油施工方案的编制提供了一种数值模拟方法。

关键词:微生物采油;吸附作用;筛分作用;不可及孔隙体积;数值模拟

中图分类号:TE357.9

文献标识码:A

Mathematical model for oil recovery considering characteristics of microbial migration

BI Yongqiang¹, HU Zhangming², WANG Guozhu³, YAN Rui¹, XIU Jianlong⁴

(1.School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an City, Shaanxi Province, 710077, China; 2.CNPC XDEC Geological Research Institute, Karamay, Xinjiang, 834000, China; 3.No.6 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Yulin City, Shaanxi Province, 718600, China; 4.Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing City, 100083, China)

Abstract: To improve the accuracy and stability of the calculation of numerical simulation software for microbial enhanced oil recovery, we introduced a new model equation for microbial migration that reflects the influence of inaccessible pore volume, adsorption, and screening effect on the distribution of microorganisms in the reservoirs based on the previous experimental results on the migration and retention of microorganisms. Then, a one-dimensional, two-phase (oil and gas), and three-component (microorganisms, nutrients, and metabolites) mathematical model for microbial enhanced oil recovery was constructed. Through programming, the process of microbial enhanced oil recovery was simulated for the sensitivity analysis of inaccessible pore volume, adsorption, and screening effect. Consequently, the model could simulate the process of microbial enhanced oil recovery which is sensitive to inaccessible pore volume, adsorption, and screening effect. These parameters could be introduced for the accurate prediction of microbial concentration distribution, water cut, and recovery, offering a numerical simulation method to the preparation of construction schemes for microbial enhanced oil recovery.

Key words: microbial enhanced oil recovery; adsorption; screening effect; inaccessible pore volume; numerical simulation

当今能源日益紧缺、油田开发难度加大且环保要求趋于严格,微生物采油作为一种具有环境友好、施工工艺简单和开发成本低廉等诸多优点的战

略性接替采油技术,逐渐成为油田开发技术研究的热点^[1-2]。微生物采油技术经过90多年的发展,对微生物采油机理的认识日趋深入,归纳起来,主要

收稿日期:2020-11-05。

作者简介:毕永强(1983—),男,河北廊坊人,副教授,博士,从事多孔介质渗流力学方面的研究工作。E-mail:bicheng929@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目“考虑空气的弹性壳打击水面的光滑粒子法研究”(11802219),陕西省自然科学基金基础研究计划项目“产聚微生物调剖驱油机理及数学模型优化研究”(2019JM-396)。

体现在5个方面^[3-4]:①微生物降解原油和代谢产气有利于降低原油黏度。②代谢生成的有机酸可以溶蚀油藏基质,改善储层渗透性。③微生物菌体扩增聚集和随之代谢生成的水不溶性生物聚合物可以选择性封堵高渗透区域,提高波及体积。④生物表面活性剂可以降低油水界面张力,乳化原油,提高驱油效率。⑤水溶性生物聚合物可以提高水的黏度,提高水驱波及体积。

微生物采油物理模拟实验成本高且模拟尺度小,不能很好地反映油田开发实际生产状况。微生物采油数值模拟是联系实验研究与矿场试验的纽带,它以微生物采油机理的合理数学描述为基础,实现对微生物采油过程相对准确的模拟和预测,成本低,能够降低投资风险,提高微生物驱经济效益^[5]。国外经典的Chang模型^[6]详细描述了采油过程中的多种生化现象,如微生物的生长与死亡、营养物的消耗、化学驱向性和吸附作用等,该模型对微生物机理的描述比较系统,具有较高的参考价值,大多数微生物采油数学模型的建立是基于对该模型的改进^[7]。SUGAI等建立的微生物采油数学模型中考虑代谢产物为生物聚合物^[8],该模型将增加水相黏度作为主要的增产机理。NIELSEN等建立的微生物采油数学模型中考虑代谢产物为生物表面活性剂^[9],该模型体现了生物表面活性剂降低油水界面张力并引起相对渗透率的变化。中国的雷光伦、谷建伟、朱维耀等分别优化了微生物生长、营养物消耗和产物生成的数学模型^[10-12],考虑了黏度、孔隙度和渗透率等物性参数对采收率的影响。WANG等构建了3个微生物数学模型,分别考虑了双菌竞争抑制关系、水溶性生物聚合物的作用、环境因子和微生物因子对采油效果的影响^[13-15]。

在微生物采油过程中的各组分除了受到对流弥散作用外,还会受到筛分、架桥堵塞和界面吸附等作用的影响,然而在模型中很少反映筛分作用和架桥堵塞所形成不可及孔隙体积对采油过程的影响,并且吸附模型的适用性仍需进一步验证^[16]。为了探究采油微生物在油藏中的运移分布状态,基于前期实验研究成果,完善微生物采油数学模型,并通过数值模拟对不可及孔隙体积、吸附作用和筛分作用进行敏感性分析,验证模型构建的准确性。

1 微生物运移概念模型

由于微生物菌体大小不一,同时油藏多孔介质

具有孔隙尺寸大于喉道尺寸的连通特性^[17-18],描述微生物在多孔介质中的运移过程如图1所示:①具有不同大小分布的菌群在多孔介质中运移,当其通过喉道时受到喉道的筛分作用,一部分较大的菌体不能通过喉道,形成滞留,一部分较小的菌体通过喉道进入孔隙,会有一些菌体吸附在孔隙介质表面,其余分布于孔隙水相之中。②微生物菌体进入孔隙后又会通过生长繁殖形成一个新的菌群分布状态,当其随水流运动到下一个喉道时,又会受到喉道的筛分作用和孔隙介质表面的吸附作用。③采油微生物在多孔介质中的运移就是这样一个吸附、筛分、生长、繁殖和衰亡的动态过程。

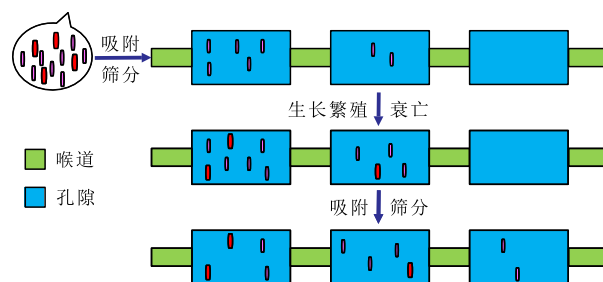


图1 微生物在多孔介质中的运移模型示意

Fig.1 Model for microbial migration in porous media

2 微生物采油数学模型的构建

2.1 假设条件

微生物采油数学模型假设条件包括:①油藏是一个等温环境^[19]。②热力学平衡瞬间建立。③油藏流体为油、水两相,认为微生物、营养物及代谢产物均存在于水相中。④油、水是微可压缩流体,体积可加。⑤微生物在油藏多孔介质运移过程中同时存在可逆吸附和不可逆的筛分滞留,且可逆吸附符合Freundlich吸附模型,营养物和代谢产物的吸附符合Langmiur吸附模型。

2.2 模型建立

微生物采油数学模型主要包括油水两相渗流方程以及微生物、营养物和代谢产物三组分的运移方程。其中,油水两相渗流场的控制方程参见文献^[20]。

2.2.1 微生物运移方程

通过前期实验研究,确定微生物在多孔介质中运移时存在不可及孔隙体积、Freundlich等温吸附和筛分滞留,在微生物运移方程中引入滤除系数 λ ,不可及孔隙体积百分数应当减去不可及孔隙体积百分数,微生物在多孔介质表面的吸附符合Freundlich等温吸附模型^[21],其表达式为:

$$R \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi_m S_w}{B_w} C \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\phi_m S_w}{B_w} \mathbf{D}_w C \right) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_t}{B_w} C \right) - \lambda R \frac{\phi_m S_w}{B_w} C + \frac{QC}{V} + \frac{\phi_m S_w}{B_w} (\mu_g - \mu_d) C \quad (1)$$

其中:

$$\phi_m = \phi_0 (1 - \phi_{ip}) \quad (2)$$

$$R = 1 + \frac{\rho K_{fre} N_{fre} C^{N_{fre}-1}}{\phi} \quad (3)$$

微生物的生长符合 Monod 模型,则微生物的比生长速率为:

$$\mu_g = \mu_{max} \frac{C_n}{K_s + C_n} \quad (4)$$

2.2.2 营养物运移方程

营养物在运移过程中除了受到对流和扩散作用外,还会被液相中的微生物和吸附在多孔介质表面的微生物消耗。其运移方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{D}_n \cdot \nabla \left(\frac{\phi S_w C_n}{B_w} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_t C_n}{B_w} \right) - \left[\left(\frac{\mu_1}{Y_{n1}} + m_1 \right) \frac{\phi S_w C_n}{B_w} + \left(\frac{\mu_2}{Y_{n2}} + m_2 \right) \rho \phi \right] + \frac{QC_n}{V} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w C_n}{B_w} + \phi C_{ns} \right) \quad (5)$$

2.2.3 代谢产物运移方程

代谢产物由微生物代谢生成,认为其能够全部溶于水,除了受到对流扩散作用,还可被岩石吸附。其运移方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{D}_p \cdot \nabla \left(\frac{\phi S_w C_p}{B_w} \right) - \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_t C_p}{B_w} \right) + Y_p \frac{dC}{dt} + X_p C + \frac{QC_p}{V} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w C_p}{B_w} + \phi C_{ps} \right) \quad (6)$$

2.2.4 物性参数变化方程

微生物在油藏中的生长代谢作用对油藏的孔隙度、渗透率、原油黏度、界面张力和相对渗透率产生影响,使其发生变化。

孔隙度和渗透率 微生物菌体在吸附和筛分作用下,部分菌体滞留在岩石孔隙中,会造成孔隙度减小,同时也会对渗透率产生影响。孔隙度和渗透率的计算式分别为:

$$\phi = \phi_0 - \phi \quad (7)$$

$$\frac{K}{K_0} = f \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^3 \quad (8)$$

原油黏度 在微生物采油过程中,原油在微生物的降解和生物表面活性剂的乳化等作用下,其黏

度会发生变化。黏度变化规律可通过实验测定,其变化可表示为:

$$\mu_o = \mu_{oi} f_1(C_p) \quad (9)$$

界面张力 在油藏开发过程中,当微生物代谢生成的生物表面活性剂达到一定浓度时,将有效降低油水界面张力,提高驱油效率。界面张力的变化可表示为:

$$\sigma = \sigma_0 f_2(C_p) \quad (10)$$

相对渗透率 在微生物采油数学模型中,采用 Coats 模型定义的相渗曲线。该相渗曲线模型最初描述的是气、油两相,也被应用于描述油、水两相^[22-23]。模型方程如下:

$$f(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_{base}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

$$S_{wc}^* = f(\sigma) S_{wc} \quad (12)$$

$$S_{or}^* = f(\sigma) S_{or} \quad (13)$$

$$K_{rw} = f(\sigma) K_{rw(base)} + [1 - f(\sigma)] K_{rw(misc)} \quad (14)$$

$$K_{ro} = f(\sigma) K_{ro(base)} + [1 - f(\sigma)] K_{ro(misc)} \quad (15)$$

2.2.5 初始及边界条件

微生物采油数学模型为外源微生物驱油模型,初始条件为:

$$C|_{t=0} = 0, C_n|_{t=0} = 0, C_p|_{t=0} = 0 \quad (16)$$

后续注入时,仅注入微生物和营养物,假定注入的微生物在油藏环境下仍能持续产生生物表面活性剂,其能降低界面张力2个数量级来启动残余油^[19]。

假设油藏是均匀的,通过设置边界处的压力梯度来满足油藏边界的无流条件,即为:

$$\frac{dp}{dn} = 0 \quad (17)$$

3 算例模拟结果与分析

3.1 模型及相关物性参数

算例模型通过一维矩形网格模拟油藏,从注入端到采出端方向划分为10个网格,单个网格尺寸为20 m×200 m×10 m,最终形成油藏尺寸为200 m×200 m×10 m的油藏模型。数值模拟过程中的相关物性参数如表1所示。井网采用一注一采模式,在数值模拟微生物采油过程中,首先进行水驱,当采出液含水率达到95%时,转注0.23 PV的微生物驱油体系(微生物和营养物的混合液),最后进行后续水驱,直至采出液的含水率达98%。

表1 模型及相关物性参数
Table1 Model and related physical parameters

参数名称及单位	数值	参数名称及单位	数值
渗透率 (mD)	100	微生物扩散系数(m ² /d)	5.1×10 ⁻⁴
孔隙度 (%)	20	营养物质扩散系数(m ² /d)	7.7×10 ⁻⁴
油相密度 (kg/m ³)	849	代谢产物扩散系数(m ² /d)	7.7×10 ⁻⁴
水相密度 (kg/m ³)	1 000	最大比生长速率(1/d)	8
微生物密度 (kg/m ³)	1 000	半饱和常数(mg/mL)	0.5
油相黏度 (mPa·s)	20	比死亡速率(1/d)	0.1
水相黏度 (mPa·s)	0.9	菌体得率(mg/mg)	3.8
原始含油饱和度 (%)	75	维持因子(mg/(mg·d))	0.04
原始含水饱和度 (%)	25	代谢产物得率(mg/mg)	0.779
注入微生物质量浓度(mg/mL)	1.275	代谢产物维持因子(mg/(mg·d))	1.8×10 ⁻²
注入营养物质质量浓度(mg/mL)	2.495	营养物质吸附参数1	2.35×10 ⁻⁴
注水井注入量(m ³ /d)	47.67	营养物质吸附参数2(mL/mg)	2.62×10 ⁻⁴
初始界面张力(mN/m)	24.2	代谢产物吸附参数1	6.57×10 ⁻³
插值指数	6	代谢产物吸附参数2(mL/mg)	9.8×10 ⁻³

3.2 参数敏感性分析

不可及孔隙体积 微生物在多孔介质运移过程中,由于菌体大小与喉道大小不匹配,导致菌体无法通过喉道进入孔隙,从而形成了不可及孔隙体积。微生物不能进入不可及孔隙,就无法作用于该区域的原油,提高该区域原油的采出程度,也就导致微生物的实际作用范围减小。由图2可以看出,当注入0.23 PV微生物驱油体系时,不可及孔隙体积越大,单位孔隙体积内的微生物质量浓度越低,则微生物对原油的作用越弱。由图3可见,不可及孔隙体积对采出液含水率和采收率的影响明显:不可及孔隙体积越小,含水率降幅越大,提高采收率越多。说明不可及孔隙体积越小,微生物的分布范围及质量浓度越大,微生物的降解、乳化和调剖作用随之越强,可以显著提高原油采收率。

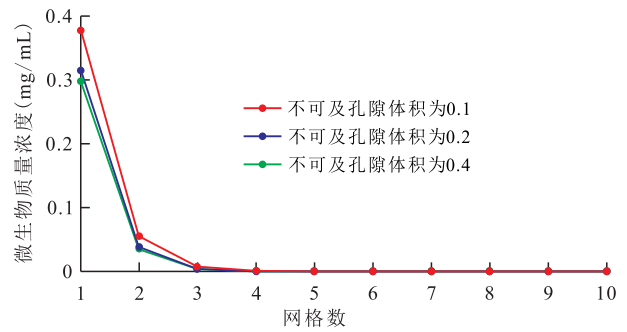


图2 不可及孔隙体积对微生物质量浓度分布的影响
Fig.2 Influence of inaccessible pore volume on microbial concentration distribution

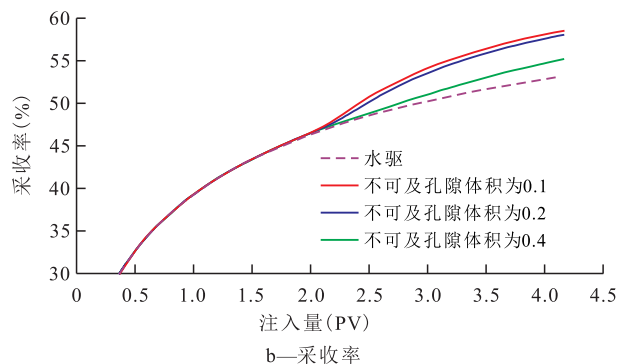
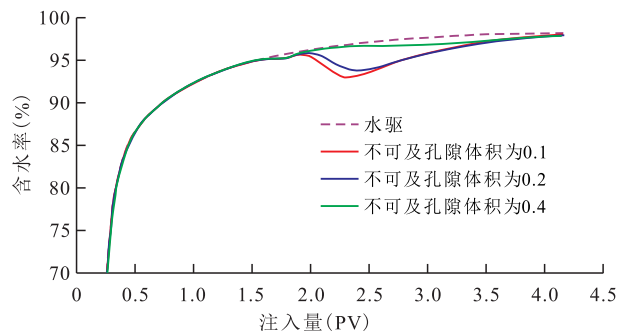


图3 不可及孔隙体积对含水率和采收率的影响
Fig.3 Influence of inaccessible pore volume on water cut and recovery

吸附作用 微生物在运移过程中会受到多孔介质表面的吸附,吸附常数不同,多孔介质中微生物的分布也不同,吸附常数越大,多孔介质中分布的微生物的质量浓度越低(图4)。说明微生物在多

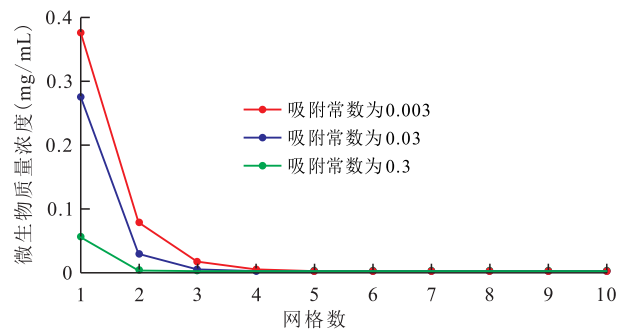


图4 吸附常数对微生物质量浓度分布的影响
Fig.4 Influence of adsorption constant on microbial concentration distribution

孔介质表面的吸附使微生物吸附滞留在多孔介质表面,无法进一步向油藏深部运移,多孔介质中分布的采油微生物数量较少,降低了采油效果。分析图5发现,吸附常数对采出液含水率和采收率影响明显。吸附常数越小,含水率降幅越大,提高采收率越多。这是由于吸附参数越小,多孔介质对微生物的吸附作用越小,则微生物在多孔介质中的吸附损失越小,相同注入量的驱油体系在多孔介质中的分布范围更广,且微生物质量浓度越高,驱油效果越好。

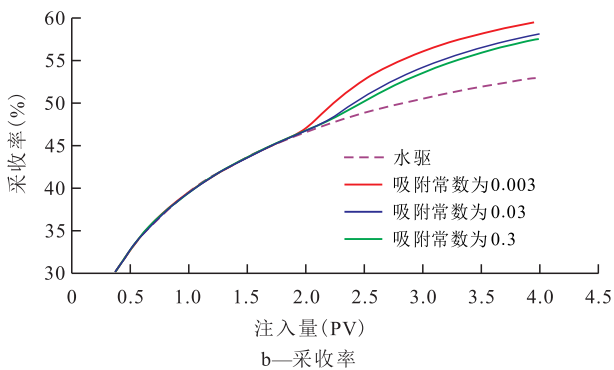
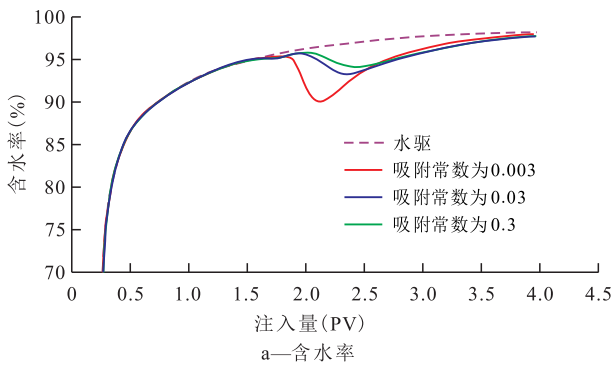


图5 吸附常数对含水率和采收率的影响
Fig.5 Influence of adsorption constant on water cut and recovery

筛分作用 筛分作用的存在造成相对较小的微生物菌体能够通过喉道进入孔隙并形成分布,而相对较大的微生物菌体经过喉道的筛分作用形成滞留。应用滤除系数描述微生物菌体经喉道筛分形成的滞留,滤除系数越大,多孔介质中分布的微生物的质量浓度越低(图6)。说明滤除系数越大,微生物菌体经筛分滞留的量越大,微生物菌体通过喉道的能力变弱,导致分布在多孔介质中微生物的质量浓度降低。由图7可以看出,筛分作用对于含水率和采收率影响明显:滤除系数越小,含水率降低越明显,采收率提高幅度越大。这是由于滤除系数越小,菌体在油藏多孔介质中的筛分滞留越少,注入的驱油微生物损失越少,微生物质量浓度越高,作用范围越大,因此可以获得较高的采收率。

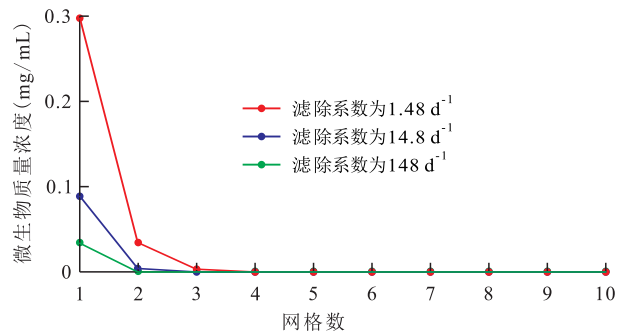


图6 滤除系数对微生物浓度分布的影响
Fig.6 Influence of filtration coefficient on microbial concentration distribution

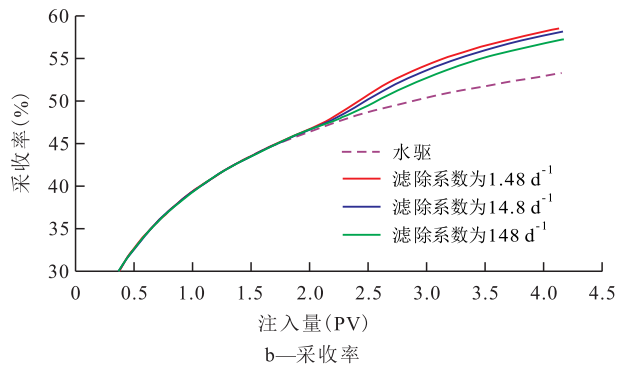
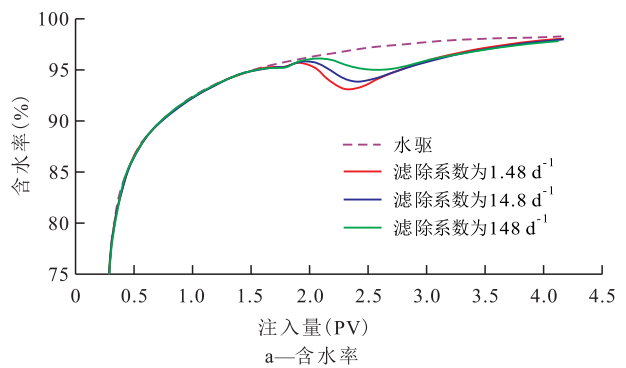


图7 滤除系数对含水率和采收率的影响
Fig.7 Influence of filtration coefficient on water cut and recovery

3.3 模型适应性和准确性

模型对于滞留、筛分和吸附的研究均基于前期基础实验研究^[17],模型渗透率为94~1 221 mD,因此该模型适用于该油藏渗透率范围内采油过程的模拟与预测。通过对不可及孔隙体积、吸附常数和滤除系数的敏感性分析发现,采油过程受到这些参数的影响,从而使开发过程曲线发生变化。因此,通过引入这些参数,对前期开发情况的拟合更为真实,从而达到对后期开发效果准确预测的目的。

4 结论

基于前期实验研究成果,阐述了微生物在多孔介质中运移的概念模型,优化了微生物运移数学模

型,引入不可及孔隙体积,采用 Freundlich 等温吸附模型,加入筛分系数,体现不可及孔隙体积、吸附和筛分作用对微生物在多孔介质中运移的影响。将优化的微生物运移数学方程嵌入微生物采油数学模型,形成了完善的渗流场和微生物场耦合的微生物采油数学模型,能够反映微生物采油过程中的物理化学渗流机理。基于构建的微生物采油数学模型编制程序并对不可及孔隙体积、吸附常数和滤除系数进行敏感性分析,发现这些参数对于模型模拟结果有显著影响。通过引入这些参数可以提高前期数据的拟合精度,对后期开发状况的预测更为准确,从而为微生物采油施工方案的编制提供有效的数值模拟手段。

符号解释

B_w ——地层水体积系数, f;
 C ——微生物质量浓度, mg/mL;
 C_n ——营养物质质量浓度, mg/mL;
 C_{ns} ——营养物质在多孔介质表面的吸附浓度, mg/mL;
 C_p ——代谢产物的质量浓度, mg/mL;
 C_{ps} ——代谢产物在多孔介质表面的吸附浓度, mg/mL;
 D_w ——微生物在水相中的有效分散系数, m^2/d ;
 D_n ——营养物质对流扩散系数, m^2/d ;
 D_p ——代谢产物对流扩散系数, m^2/d ;
 f ——流动效率系数, f;
 $f(\sigma)$ ——插值函数,其取值范围为0(低界面张力)到1(高界面张力);
 $f_1(C_p)$ ——黏度受代谢产物浓度影响的函数关系;
 $f_2(C_p)$ ——界面张力受代谢产物浓度影响的函数关系;
 K ——渗透率, mD;
 K_0 ——初始渗透率, mD;
 K_{fre} ——与多孔介质表面性质有关的吸附常数;
 K_{ro} ——油相相对渗透率, f;
 $K_{ro(base)}$ ——高界面张力下的油相相对渗透率, f;
 $K_{ro(misc)}$ ——低界面张力下的油相相对渗透率, f;
 K_{rw} ——水相相对渗透率, f;
 $K_{rw(base)}$ ——高界面张力下的水相相对渗透率, f;
 $K_{rw(misc)}$ ——低界面张力下的水相相对渗透率, f;
 K_s ——底物的半饱和常数, mg/mL;
 m_1 ——维持悬浮相微生物生长消耗的营养物和氧气, mg/(mg·d);
 m_2 ——维持吸附相微生物生长消耗的营养物和氧气, mg/(mg·d);
 n ——插值函数的指数值,为实验参数值;
 N_{fre} ——与温度有关的吸附常数;
 p ——油藏模型边界压力, MPa;
 Q ——源汇强度, m^3/d ;

R ——滞留因子;
 S_w ——含水饱和度, f;
 S_{wc} ——初始束缚水饱和度, f;
 S_{wc}^* ——在界面张力 σ 下的束缚水饱和度, f;
 S_{or} ——初始残余油饱和度, f;
 S_{or}^* ——在界面张力 σ 下的残余油饱和度, f;
 t ——时间, d;
 u_f ——流体速度, m/d;
 V ——井控制体积, m^3 ;
 Y_{n1} ——消耗单位营养物和氧气在液相中产生的细菌量, mg/mg;
 Y_{n2} ——消耗单位营养物和氧气在吸附相中产生的细菌量, mg/mg;
 Y_p ——代谢产物得率, mg/mg;
 X_p ——维持生命时代谢产物的生成速率, mg/(mg·d);
 λ ——滤除系数, 1/d;
 μ_1 ——液相中微生物的比生长速率, 1/d;
 μ_2 ——岩石表面微生物的比生长速率, 1/d;
 μ_g ——微生物的比生长速率, 1/d;
 μ_d ——微生物的比衰亡速率, 1/d;
 μ_o ——微生物作用后的原油黏度, mPa·s;
 μ_{oi} ——微生物作用前的原油黏度, mPa·s;
 ρ ——多孔介质密度, kg/m^3 ;
 σ ——微生物作用后的界面张力, mN/m;
 σ_0 ——微生物作用前的界面张力, mN/m;
 σ_{base} ——高界面张力, mN/m;
 ϕ ——孔隙度, f;
 ϕ_0 ——初始孔隙度, f;
 ϕ_{ip} ——不可及孔隙体积, f;
 ϕ_m ——微生物的可及孔隙体积, f;
 φ ——微生物滞留量所占孔隙的比值, f。

参考文献

- [1] 钟会影,李园园,尹洪军,等.盲端孔道内黏弹性聚合物驱油两相渗流规律[J].特种油气藏,2019,26(1):100-105.
ZHONG Huiying, LI Yuanyuan, YIN Hongjun, et al. Two-phase fluid flow of viscoelastic polymer flooding in dead end channels [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 100-105.
- [2] 徐婷,余跃惠,何延龙,等.微生物驱矿场采出液中生物代谢产物[J].大庆石油地质与开发,2020,39(2):107-113.
XU Ting, SHE Yuehui, HE Yanlong, et al. Microbial metabolites in the produced liquid for MEOR field [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 107-113.
- [3] 游靖,徐建昌,余吉良,等.华北宝力格油田水处理系统微生物群落结构及多样性分析[J].油气地质与采收率,2016,23(5):76-82.
YOU Jing, XU Jianchang, YU Jiliang, et al. Analysis of microbial community structure and diversity of the water treatment system in Huabei Baolige oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery

- Efficiency, 2016, 23(5): 76–82.
- [4] LAZAR I, PETRISOR I G, YEN T F. Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) [J]. *Petroleum Science & Technology*, 2007, 25(11): 1 353–1 366.
- [5] 刘皖露, 马德胜, 王强, 等. 化学驱数值模拟技术[J]. 大庆石油学院学报, 2012, 36(3): 72–78.
LIU Wanlu, MA Desheng, WANG Qiang, et al. Numerical simulation for chemical flooding [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2012, 36(3): 72–78.
- [6] CHANG M M, CHUNG F T H, BRYANT R S, et al. Modeling and laboratory investigation of microbial transport phenomena in porous media [C]. Dallas: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1991.
- [7] 王天源, 修建龙, 崔庆锋, 等. 微生物驱数值模拟研究进展[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50(6): 1 474–1 484.
WANG Tianyuan, XIU Jianlong, CUI Qingfeng, et al. Research advances in numerical simulation of microbial enhanced oil recovery [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2019, 50(6): 1 474–1 484.
- [8] SUGAI Y, HONG C, CHIDA T, et al. Simulation studies on the mechanisms and performances of MEOR using a polymer producing microorganism *Clostridium* sp. TU-15A [C]. Jakarta: Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 2007.
- [9] NIELSEN S M, SHAPIRO A, MICHELSEN M L, et al. Mathematical model for microbial enhanced oil recovery with surfactant distributed between phases [C]. Canberra: 30th IEA-EOR Conference, 2009.
- [10] 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.
- [11] 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. Status of the arts on mathematical model of microbial oil recovery [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(4): 5–7.
- [12] 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.
- [13] WANG Tianyuan, YU Li, XIU Jianlong, et al. A mathematical model for microbial enhanced oil recovery considering the double-bacterial competition mechanism [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 336–343.
- [14] WANG Tianyuan, YU Li, XIU Jianlong, et al. A mathematical model for microbial enhanced oil recovery using biopolymer-producing microorganism [J]. *Fuel*, 2018, 216: 589–595.
- [15] 王天源, 修建龙, 黄立信, 等. 考虑油藏环境因素和微生物因子的微生物采油数学模型[J]. 石油学报, 2019, 40(4): 448–456.
WANG Tianyuan, XIU Jianlong, HUANG Lixin, et al. A mathematical model for microbial enhanced oil recovery considering reservoir environment and microbial factor [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(4): 448–456.
- [16] 修建龙, 俞理, 郭英. 本源微生物驱油渗流场—微生物场耦合数学模型[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 989–992, 997.
XIU Jianlong, YU Li, GUO Ying. A mathematical coupling model of seepage field and microbial field in the indigenous microbe enhancing oil recovery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(6): 989–992, 997.
- [17] 卢川, 王亚青, 王帅, 等. 多孔介质内水包油型乳状液非等温流动表征及敏感因素[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(6): 81–90.
LU Chuan, WANG Yaqing, WANG Shuai, et al. Characterization and sensitive factors of non-isothermal flow of oil-in-water emulsion in porous media [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(6): 81–90.
- [18] 徐永强, 何永宏, 卜广平, 等. 基于微观孔喉结构及渗流特征建立致密储层分类评价标准——以鄂尔多斯盆地陇东地区长7储层为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 451–460.
XU Yongqiang, HE Yonghong, BU Guangping, et al. Establishment of classification and evaluation criteria for tight reservoirs based on characteristics of microscopic pore throat structure and percolation: a case study of Chang7 reservoir in Longdong area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 451–460.
- [19] 姜瑞忠, 崔永正, 胡勇, 等. 基于储层物性时变的聚合物驱数值模拟[J]. 断块油气田, 2019, 26(6): 751–755.
JIANG Ruizhong, CUI Yongzheng, HU Yong, et al. Numerical simulation of polymer flooding considering reservoir property time variation [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2019, 26(6): 751–755.
- [20] KIM S B. Numerical analysis of bacterial transport in saturated porous media [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(5): 1 177–1 186.
- [21] 毕永强, 俞理, 修建龙, 等. 采油微生物在多孔介质中的迁移滞留机制[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 91–98.
BI Yongqiang, YU Li, XIU Jianlong, et al. Migration and retention mechanism of microorganisms for oil recovery in porous media [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 91–98.
- [22] COATS K H. An equation of state compositional model [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1980, 20(5): 363–376.
- [23] 王天源, 修建龙, 黄立信, 等. 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.
WANG Tianyuan, XIU Jianlong, HUANG Lixin, et al. Microbial enhanced oil recovery model in porous media [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1): 97–105.