

Numerical Simulation of Oil and Water Two-Phase Seepage in Stress Sensitivity Reservoirs

Rui Shen, Zhiming Hu, Wei Xiong, Shusheng Gao, Hui Xue

Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang

Email: shenrui523@126.com

Received: Sep. 20th, 2011; revised: Oct. 29th, 2011; accepted: Nov. 5th, 2011.

Abstract: The mathematical model of oil and water two-phase seepage was derived and solved by numerical limited difference method in the paper. During the simulation, permeability values of every time step were calculated by relation curves between dimensionless permeability and effective stress obtained by experiment. Then the pressure distribution of next time step was calculated by the new permeability distribution. The situation of non-stress sensitivity and three different kinds of sensitive degree are studied respectively through numerical stimulation method. Figures of the dimensionless permeability space distribution, the daily oil production and the average reservoir pressure were drawn. Results show the stronger the stress sensitivity is, the variation range of the average reservoir pressure is small and the daily oil production is lower during the water free oil production period. While the weaker the stress sensitivity is, the variation range of the average reservoir pressure is large and the daily oil production is higher during the water free oil production period. Permeability distribution changes sharply around production and injection wells, while smoothly far from wells.

Keywords: Stress Sensitivity; Numerical Simulation; Mathematical Model of Seepage; Dimensionless Permeability

应力敏感性油藏油水两相渗流数值模拟

沈 瑞, 胡志明, 熊 伟, 高树生, 薛 惠

中国石油勘探开发研究院廊坊分院渗流流体力学研究所, 廊坊

Email: shenrui523@126.com

收稿日期: 2011年9月20日; 修回日期: 2011年10月29日; 录用日期: 2011年11月5日

摘 要: 本文给出了应力敏感性介质油水两相渗流的数学模型, 并采用有限差分方法进行求解。计算过程中, 每个时间步的渗透率根据实验测得的无因次渗透率与有效应力关系曲线求得, 根据新的渗透率分布求解下一时间步的压力分布。通过数值模拟方法分别研究了不存在应力敏感性、以及三种不同敏感程度的算例, 并给出无因次渗透率的空间分布图、日产油量以及平均地层压力的对比曲线图。结果表明: 应力敏感性越强, 平均地层压力的变化范围越小, 无水采油期内的日产油量越低; 应力敏感性越弱, 平均地层压力的变化范围越大, 无水采油期内的日产油量越高。在生产井和注水井附近, 渗透率分布变化较为急剧, 远离井的区域变化较为平缓。

关键词: 应力敏感性; 数值模拟; 渗流数学模型; 无因次渗透率

1. 引言

流体压力、岩石骨架应力与上覆岩层压力在油气藏开发之前处于平衡状态, 油气藏投入开发后, 地层压力下降从而引起有效应力增加, 导致渗透率减小,

这个现象就是储层的应力敏感性^[1-4]。目前关于应力敏感性油藏生产动态数值模拟方面的研究工作, 主要针对的是产量变化规律, 以及储层应力敏感性对原油采收率的影响^[5-8]。本文将实验测得的渗透率随有效应力变化关系应用到数值模拟中, 研究了储层存在应力敏

感性条件下, 渗透率的分布规律; 对比分析了不同应力敏感性程度对开发效果的影响。

2. 岩心应力敏感性实验

储层岩石在井内所承受的骨架应力有上覆岩石压力和周向应力(或称水平应力), 一般水平应力远小于上覆岩石压力。在研究储层岩石在井内所承受的有效压力时, 可近似地取上覆岩石压力与岩石内孔隙压力之差为净上覆岩石压力或有效压力^[9]。参考砂岩储层敏感性评价实验方法(SY/T 5358-2002)进行应力敏感性实验, 将岩心放入夹持器中, 入口和出口压力一定, 入口连接氮气瓶, 压力保持 0.5 MPa, 出口通向大气, 通过逐步改变围压的方法改变岩心的有效应力, 围压加载过程选取 5 MPa, 10 MPa, 15 MPa, 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa 六个压力点, 卸载过程按相同的围压点从 25 MPa 依次减小至 5 MPa, 详细的实验和数据处理方法可参照文献[10]和[11]。

图 1 展示了三块不同渗透率级别岩心的无因次渗透率变化曲线(围压加载过程), 表明相同静覆压下, 岩心的渗透率越低, 其渗透率的损失率越大。实际油藏开发过程中, 孔隙中流体压力不断降低, 相当于净油相:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_c K A_x \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} \frac{\partial P_o}{\partial x} \right) \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta_c K A_y \frac{K_{ro}}{\mu_o B_o} \frac{\partial P_o}{\partial y} \right) \Delta y + q_o = \frac{V_b}{\alpha_c} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right) \quad (2)$$

水相:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\beta_c K A_x \frac{K_{rw}}{\mu_w B_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta_c K A_y \frac{K_{rw}}{\mu_w B_w} \frac{\partial P_w}{\partial y} \right) \Delta y + q_w = \frac{V_b}{\alpha_c} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (3)$$

辅助方程:

$$P_c = P_o - P_w \quad (4)$$

$$S_o + S_w = 1 \quad (5)$$

渗透率修正方程:

$$K = K_0 \cdot b \cdot e^{a(\sigma - P)} \quad (6)$$

α_c, β_c ——体积转换因子, 传速率转换因子, 无因次; A_x, A_y ——y 方向, x 方向网格方向渗流面积, m^2 ;

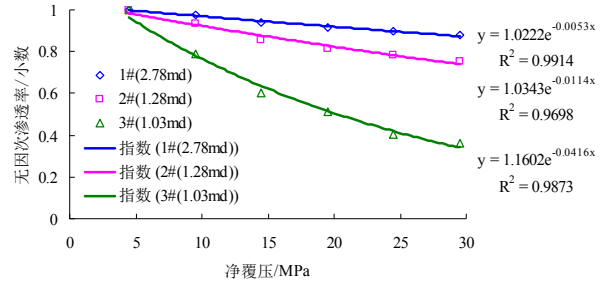


Figure 1. Change curve of dimensionless permeability in the process of confining pressure increasing
图 1. 围压加载过程无因次渗透率变化曲线

覆压逐渐增大的过程, 因此, 选取加载过程的无因次渗透率曲线用指数函数进行拟合^[12], 并应用于数值模拟计算之中^[13-15]:

$$\frac{K}{K_0} = b \cdot e^{a\sigma_{eff}} = b \cdot e^{a(\sigma - P)} \quad (1)$$

K_0, K ——初始渗透率, 渗透率, μm^2 ; σ, σ_{eff} ——外应力, 净覆压, MPa, P_1 ——孔隙中流体压力, MPa; a, b ——回归系数, 无因次。

3. 应力敏感性介质油水两相渗流数学模型

二维油水两相渗流控制方程^[16,17]:

B_o, B_w ——油体积系数, 水体积系数, 无因次; μ_o, μ_w ——油粘度, 水粘度, $mPa \cdot s$; C_f, C_o, C_w ——岩石、油和水的压缩系数, MPa^{-1} ; V_b ——网格总体积, m^3 ; P_o, P_w, P_c ——油相压力, 水相压力, 毛管力, MPa; Φ ——孔隙度, 无因次; q_o, q_w ——油流量, 水流量, m^3/d ; S_o, S_w ——含油饱和度, 含水饱和度, 无因次。

通过有限差分方法对式(2)、(3)离散化:

$$\begin{aligned} & T_{oxi-1/2,j} P_{oi-1,j}^{n+1} + T_{oyi,j-1/2} P_{oi,j-1}^{n+1} - \left(T_{oxi-1/2,j} + T_{oyi,j-1/2} + T_{oxi+1/2,j} + T_{oyi,j+1/2} + \frac{V_b \phi S_o (C_f + C_o)}{\alpha_c B_o} \right) P_{oi,j}^{n+1} \\ & + T_{oxi+1/2,j} P_{oi+1,j}^{n+1} + T_{oyi,j+1/2} P_{oi,j+1}^{n+1} = \frac{V_b \phi}{\alpha_c B_o} \frac{S_{oi,j}^{n+1} - S_{oi,j}^n}{\Delta t} - q_o - \frac{V_b \phi S_o (C_f + C_o)}{\alpha_c B_o \Delta t} P_{oi,j}^n \end{aligned} \quad (7)$$

$$T_{wxi-1/2,j}P_{wi-1,j}^{n+1} + T_{wyi,j-1/2}P_{wi,j-1}^{n+1} - \left(T_{wxi-1/2,j} + T_{wyi,j-1/2} + T_{wxi+1/2,j} + T_{wyi,j+1/2} + \frac{V_b\phi S_w(C_f + C_w)}{\alpha_c B_w} \right) P_{wi,j}^{n+1} + T_{wxi+1/2,j}P_{wi+1,j}^{n+1} + T_{wyi,j+1/2}P_{wi,j+1}^{n+1} = \frac{V_b\phi}{\alpha_c B_w} \frac{S_{wi,j}^{n+1} - S_{wi,j}^n}{\Delta t} - q_w - \frac{V_b\phi S_w(C_f + C_o)}{\alpha_c B_w \Delta t} P_{wi,j}^n \quad (8)$$

其中, $T_{ox} = \frac{\beta_c A_x K K_{ro}}{\mu_o B_o \Delta x}$, $T_{wx} = \frac{\beta_c A_x K K_{rw}}{\mu_w B_w \Delta x}$, $T_{oy} = \frac{\beta_c A_y K K_{ro}}{\mu_o B_o \Delta y}$, $T_{wy} = \frac{\beta_c A_y K K_{rw}}{\mu_w B_w \Delta y}$, 角标 o 和 w 分别表示油相和水相, 网格系统采用块中心网格, 第 i 个网格的边界分别记为 $i-1/2$ 和 $i+1/2$ 。

采用隐式压力显式饱和度(IMPES)法求解(7)、(8), 并在进行第 $n+1$ 时间步计算时, 每个网格的渗透率由第 n 时间步的压力代入式(6)得到, 然后用新的渗透率场隐式求解第 $n+1$ 时间步的压力。

4. 计算实例

模拟区域为 $210\text{ m} \times 210\text{ m} \times 10\text{ m}$, 孔隙度 0.15, 上覆岩石压力 40 MPa, 原始地层压力 25 MPa, 生产井以 10 MPa 定压生产, 注水井以 35 MPa 定压注入, 网格尺寸为 $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 网格数共 $21 \times 21 \times 1 = 441$, 注水井坐标(1,11,1), 生产井坐标(21,11,1), 水平方向的初始渗透率 $K_0 = 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 垂直方向渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (模拟中垂向渗透率不存在应力敏感性), 所模拟四种情况的渗透率应力敏感性程度如表 1 所示, 其中 Case1 为不存在渗透率应力敏感性的情况。

5. 结果分析

5.1. 渗透率场分布特征

从图 2 中可以看出, 应力敏感性油藏渗透率的分布与压力分布特征是相似的, 渗透率变化较急剧的区域主要集中在生产井和注水井附近, 远离井的区域变化较为平缓。

5.2. 日产油量对比分析

图 3 表明: 从投产到 $t \approx 2000$ 天, 这段时间内 $Q_o(\text{Case1}) > Q_o(\text{Case2}) > Q_o(\text{Case3}) > Q_o(\text{Case4})$, 即在水采油期内, 应力敏感性对日产油量有着比较明显的影响, 应力敏感性越弱, 日产油量越高; 反之越低。投产约 2000 天以后, 由于生产井见水导致了 Case1~Case3 的日产油量呈现出较剧烈的下滑趋势, 表 2 给出了 Case1~Case4 的见水时间。

Table 1. The degree of permeability stress sensitivity of 4 simulated case

表 1. 模拟四种情况的渗透率压敏程度

算例代号	系数 b	渗透率应力敏感系数 a
Case1	1	0
Case2	1.0222	-0.0053
Case3	1.0343	-0.0114
Case4	1.1602	-0.0416

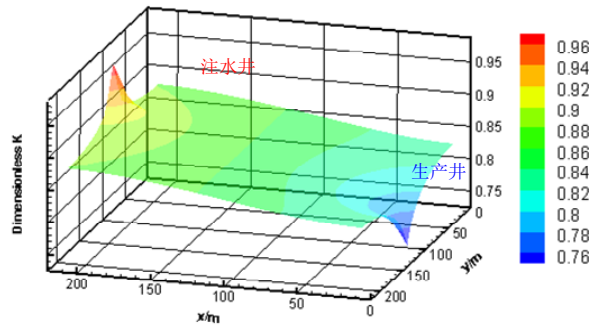


Figure 2. Pressure distribution of dimensionless permeability when $t = 30\text{ d}$ (Case 3)

图 2. Case3 在 $t = 30$ 天时的水平方向无因次渗透率分布

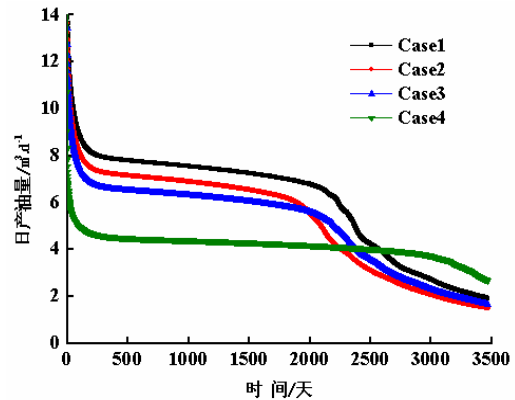


Figure 3. Correlation curve of daily oil production
图 3. 日产油量对比图

Table 2. Water breakthrough time of Case1 - Case4
表 2. Case1~Case4 的见水时间表

算例代号	Case1	Case2	Case3	Case4
见水时间/天	2200	1873	2050	2955

5.3. 平均地层压力对比分析

图 4 表明在无水采油期内, 由于初期产油量大, 平均地层压力均急剧下降; 在稳产期内, 平均地层压力微有上升, 当生产井见水后, 平均地层压力迅速升高; 并且应力敏感性越强, 平均地层压力变化区间越小, 反之则越大。从图 4 中还可看出 Case2 和 Case3 的平均地层压力值相差不超过 0.5 MPa, 而且平均地层压力绝大多数时间内在 19.5~25 MPa 之间变化, 上覆岩层压力为 40 MPa, 因此, 有效应力的范围为 15~20.5 MPa, 从图 1 可以看出, 相应的 Case2 渗透率损失率小于 10%, Case3 的小于 20%, 所以绝大多数时间内, Case2 和 Case3 的油藏平均渗透率是相近的, 因此日产量相差不多, 如表 3 所示, 最终的采收率二者仅相差 1.37%。四种算例中, 在 $t = 3500$ 天时, 应力敏感性最强的 Case4 与不存在压敏效应的 Case1 相比, 采收率低 12.2%。

6. 结论

1) 应力敏感性油藏的渗透率分布与压力分布特征较为相似, 渗透率分布变化较急剧的区域主要集中在生产井和注水井附近, 在远离井的区域变化较为平缓。

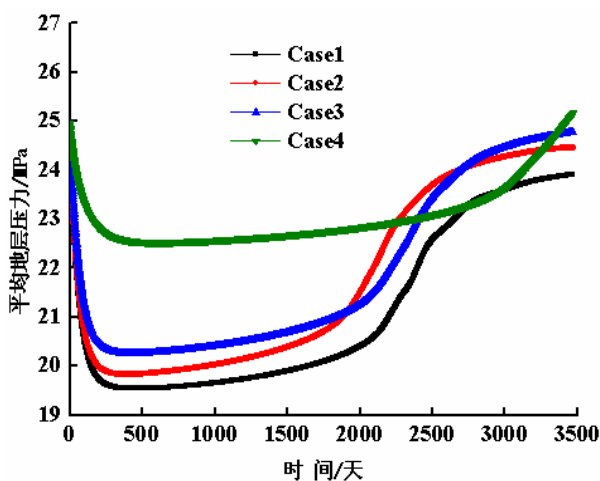


Figure 4. Correlation curve of average formation pressure
图 4. 平均地层压力对比图

Table 3. Oil recovery of Case 1 - Case 4 when $t = 3500$ d
表 3. Case1~Case4 在 $t = 3500$ 天时的采收率表

算例代号	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
采收率/%	47.39	44.04	42.67	35.19

2) 应力敏感性越强, 平均地层压力的变化范围越小, 在无水采油期内, 日产量越低; 应力敏感性越弱, 平均地层压力的变化范围越大, 无水采油期内, 日产量越高。应力敏感性对原油采收率存在影响。

参考文献 (References)

- [1] R. A. Farquhar, B. G. D. Smart, A. C. Todd, et al. Stress sensitivity of low-permeability sandstones from the Rotliegendes sandstone. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 3-6 October 1993: 851-861.
- [2] Y. T. Duan, Y. F. Meng, P. Y. Luo, et al. Stress sensitivity of naturally fractured-porous reservoir with dual-porosity. SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, 2-6 November 1998: 295-302.
- [3] 阮敏. 压敏效应对低渗透油田开发的影响[J]. 西安石油学院学报, 2001, 16(4): 40-45.
- [4] 于忠良, 熊伟, 高树生. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 95-98.
- [5] 程林松, 贺立湘, 李春兰等. 含天然裂缝变形介质油藏数值模拟方法[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(5): 50-52.
- [6] 杨蕾, 同登科, 林红. 变形双重介质油藏井筒耦合模型及数值模拟研究[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(6): 103-106.
- [7] 袁士义, 冉启全, 胡永乐等. 考虑裂缝变形的低渗透双重介质油藏数值模拟研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(1): 77-83.
- [8] 王新海, 张冬丽, 席长丰. 变形介质底层低渗非达西渗流的油藏数值模拟[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26(3): 13-15.
- [9] 李转红, 任晓娟, 张宁生等. 特低渗储层应力敏感性及对油井产量的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(4): 60-63.
- [10] 罗瑞兰, 程林松, 彭建春. 油气储层渗透率应力敏感性与启动压力梯度的关系[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(3): 20-22.
- [11] 阮敏, 王连刚. 低渗透油田开发与压敏效应[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 73-76.
- [12] 李闯, 乔国安, 陈昊. 低渗砂岩储层岩石应力敏感实验与理论研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(4): 91-93.
- [13] 王新海, 郭立波, 谢又新等. 数值模拟法研究压力敏感地层井底压力响应特征[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(5): 96-97.
- [14] 冯其红, 陈朝辉, 李春芹. 特低渗透压敏油藏产量递减规律数值模拟[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(4): 45-49.
- [15] 张先敏, 同登科. 变形介质分形气藏气-水两相流动分析[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(6): 107-110.
- [16] T. 厄特金, J. H. 阿布-卡森, G. R. 金. 实用油藏模拟技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 113-114.
- [17] 张烈辉. 油气藏数值模拟基本原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 34-35.