

考虑启动压力梯度的低渗透渗流模型改造

刘 刚 孙建博 尹锦涛 徐 杰

陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 陕西 西安 710075

摘 要:如何充分反映启动压力梯度的影响一直是低渗透油藏数值模拟研究领域的难点,以低渗透油藏渗流机理为研究起点,通过对低渗透油藏渗流模型的改造,得到了一种启动压力梯度在数值模拟方程中新的表现形式,并研发出相应的低渗透油藏数值模拟编辑器,通过与专业石油软件进行对比验证了该模型的高精确度,进一步结合实际油田资料完成了该模型的实际生产应用,结果表明改造后的模型很大程度上加强了启动压力梯度对低渗透数值模拟过程的影响程度,并且能够更加准确地反映出低渗透油藏的实际生产动态。

关键词:低渗透油藏;启动压力梯度;模型改造;油藏数值模拟

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.04.010

0 前言

作为低渗透油藏中最重要的渗流特征,启动压力梯度一直是低渗透油藏的研究重点。从20世纪90年代开始程林松、吴文瑞等广大学者通过理论分析和实验研究对启动压力梯度进行了深入研究,分析出启动压力梯度与储层、流体特征之间存在一定的相关关系,并总结出关于启动压力梯度的多种表达公式^[1-8]。然而我国低渗透油藏储层非均质极强,若精确反映整个油藏的启动压力梯度,对于网格数量级达到数十万级别的油藏数值模拟耗时繁琐,实效性较差。为求简便高效,应用拟启动压力梯度^[9-10]参与数值模拟成为广大学者的首选,但笔者通过研究发现该方法同样存在缺陷:处在微分项内的拟启动压力梯度值在前后网格数值差分过程中被相互抵消,极大地削弱了启动压力梯度的影响程度。

本文通过对低渗透油藏储层流体性质和渗流机理进行深入研究^[11-13],实现对低渗透油藏渗流模型的改造,力求使启动压力梯度对低渗透油藏的影响在数值模拟过程中得到较大程度的体现。

1 低渗透渗流模型建立

以低渗透油藏的质量守恒方程和流体运动方程为基础,建立了考虑启动压力梯度的低渗透油藏的渗流模型^[14-15]:

$$\nabla \left[\frac{\rho_m K K_{rm}}{\mu_m} (\nabla p - G_m) \right] + q_m = \frac{\partial}{\partial t} (\phi s_m \rho_m) \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, g/cm^3 ; K 为绝对渗透率, μm^2 ; K_r 为相对渗透率,量纲1; μ 为黏度, $mPa \cdot s$; p 为压力, MPa ; G 为启动压力梯度, MPa/cm ; t 为时间, s ; C 为流体压缩系数, MPa^{-1} ; q 为产量, cm^3/s ; ϕ 为储层孔隙度,%; s 为流体饱和度,%; m 为流体相态统一符号。

2 低渗透渗流模型改造

低渗透油藏微可压缩流体的密度一般表征为压力的函数,因此可将式(1)左端的第一项做微分展开:

$$\nabla \left\{ \frac{\rho_m K K_{rm}}{\mu_m} (\nabla p - G_m) \right\} = \left[\frac{K K_{rm}}{\mu_m} (\nabla p - G_m) \right] \nabla \rho_m + \rho_m \nabla \left(\frac{K K_{rm}}{\mu_m} (\nabla p - G_m) \right) \quad (2)$$

收稿日期:2016-05-05

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-006);国家“863”计划项目(SS2013AA061001)

作者简介:刘 刚(1985-),男,河北保定人,工程师,硕士,主要从事低渗透油藏数值模拟和非常规油气勘探开发领域的研究。

其中密度关于压力的函数通过流体压缩系数 C_m 的定义推导而得^[16]:

$$C_m = -\frac{1}{V_m} \left(\frac{\partial V_m}{\partial p} \right) = \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{\partial \rho_m}{\partial p} \right) \quad (3)$$

式中: V 为体积, cm^3 。

微可压缩流体的 C_m 作常量处理, 由式(3)得到:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial p} = \rho_m C_m \quad (4)$$

从而得到流体密度关于压力的函数表达式如下:

$$\nabla \rho_m = \frac{\partial \rho_m}{\partial p} \nabla p = \rho_m C_m \nabla p \quad (5)$$

将式(5)代入到微分展开式(2)中, 整理可得:

$$\nabla \left\{ \frac{\rho_m K K_{rm}}{\mu_m} (\nabla p - G_m) \right\} = \frac{K K_{rm}}{\mu_m} \rho_m C_m (\nabla p)^2 - \frac{K K_{rm}}{\mu_m} \rho_m C_m G_m \nabla p + \rho_m \nabla \left(\frac{K K_{rm}}{\mu_m} (\nabla p - G_m) \right) \quad (6)$$

由于在低渗透油藏数值模拟中渗流压力梯度往往较小, 式(6)中压力差分平方项 $\frac{K K_{rm}}{\mu_m} \rho_m C_m (\nabla p)^2$ 相对于其它项属于极小项, 因此将其忽略^[16], 联立式(1)、式(6), 最终完成了低渗透油藏渗流模型的改造。

$$\begin{aligned} & \rho_m \nabla \left(\frac{K K_{rm}}{\mu_m} (\nabla p - G_m) \right) - \frac{K K_{rm}}{\mu_m} \rho_m C_m G_m \nabla p + q_m \\ &= \frac{\partial}{\partial t} (\phi s_m \rho_m) \end{aligned} \quad (7)$$

与原始低渗透油藏渗流模型式(1)对比分析得到, 模型经过改造后增加了 $\frac{K K_{rm}}{\mu_m} \rho_m C_m G_m \nabla p$ 项, 应用拟启动压力梯度并不会因压力函数的空间微分被抵消, 从而加强了启动压力梯度在低渗透数值模拟过程中的影响程度, 此外在式(7)中密度项也已不再受微分影响, 在数值模拟中可考虑应用平均密度处理, 降低数值模拟过程的复杂性。

3 模型精确度验证

在改造后的低渗透油藏渗流模型原理基础上, 利用 Visual Basic 软件开发出了相应的低渗透油藏渗流数值模拟器^[16-22], 该模拟器可用于实际低渗透油藏数值模拟研究, 见图 1。

在储层、流体条件及工作制度相同的情况下, 应用商业软件 Eclipse 与所开发的低渗透油藏数值模拟器进行单井开发单元数值模拟对比分析, 完成模型器精确度验证, 具体的储层和流体数据见表 1~2。生产制度规定如下: 定产油量生产, 日产油量为 10 t/d , 当井底压力降到 2 MPa 时, 改变生产制度, 转为定井底压力生产。

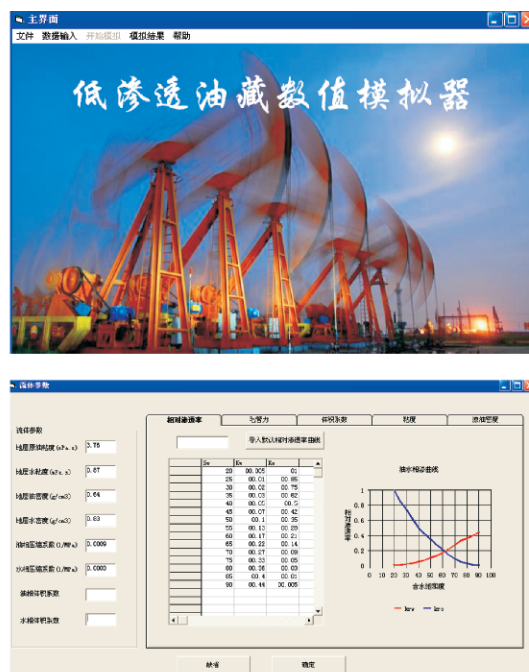


图 1 低渗透油藏数值模拟器

表 1 研究区储层数据

储层厚度 /m	孔隙度 / (%)	原始地层压 /MPa	初始含水饱和度 / (%)	平均渗透率 / μm^2
15	26	14.7	30	0.005

表 2 研究区流体数据

油密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	水密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	油黏度 / ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	水黏度 / ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	油压缩系 数 / MPa^{-1}	水压缩系 数 / MPa^{-1}
0.78	1	2.6	0.6	9.4×10^{-4}	2.3×10^{-4}

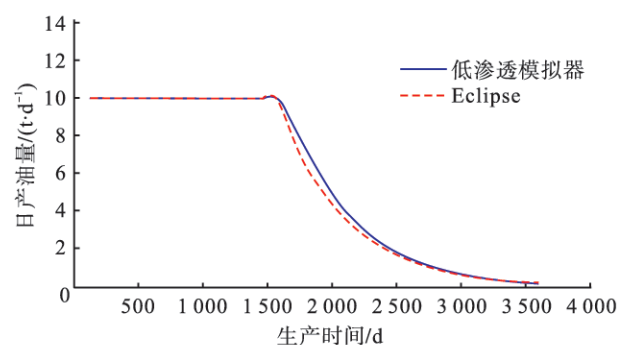


图 2 日产油量模拟对比图

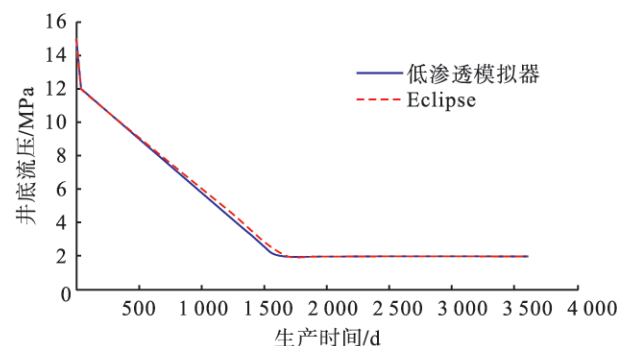


图 3 井底压力预测对比图

对比模拟结果表明,应用低渗透模拟器模拟出的单井井底压力、日产油量变化趋势和 Eclipse 软件模拟出的结果吻合度很高,表明应用该模拟器进行油藏数值模拟具有较高的精确度,见图 2~3。

4 模型应用

应用该数值模拟器对新疆吐哈温米油田米登区块年产油量进行历史拟合,米登区块在 1993 年对中侏罗统三间房组开始投产,储层物性以低孔低渗为主,目前尚未采取大规模注水措施,属于低渗透天然能量衰竭式开发模式。通过收集区块内几十口生产井的储层、流体参数,综合分析得出整个区块的拟启动压力梯度约为 0.053 MPa/m 。应用研发的低渗数值模拟器,采用外边界封闭,内边界定压的生产制度,完成温米区块 1995 年到 2010 年年产量的历史拟合。分析历史拟合结果表明,考虑启动压力梯度影响的拟合结果与实际生产历史吻合程度更高,能够更加准确地反映油田的实际生产情况,特别是油田生产中后期,误差达到万吨以上,见图 4。这主要是由于随着流体的不断采出,油田生产后期地层能量供给不足,对原油驱替能力下降,克服启动压力的难度更大,此外油田生产中后期孔隙水锁现象严重,也加大了原油驱替的难度,最终导致产量下降更加明显,因此油田后期生产阶段要重视启动压力梯度对油田生产的影响,及时调整油田生产工作制度,加大注水开采力度,补充地层能量,尽可能地消除启动压力梯度对油田生产的影响。

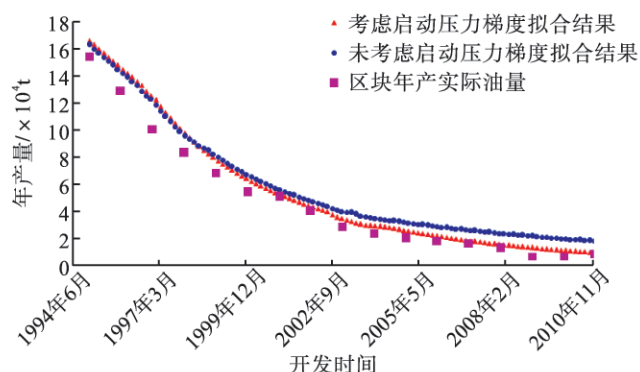


图4 米登区块年产量历史拟合

5 结论

1) 本文分析了低渗透油藏数值模拟中启动压力梯度的研究难点,以低渗透渗流机理为研究基础,实现了对低渗透油藏渗流模型的改造,使启动压力梯度的影响在数值模拟过程中得到更加充分的体现,在此基础上开发出相应的低渗透数值模拟器。

2) 通过对数值模拟器进行精确度验证和实际生产应用,表明启动压力梯度对低渗透油藏生产动态影响非

常显著,在油田生产中后期尤为明显。因此在进行生产动态方案预测时需充分考虑启动压力梯度的影响,并及时调整油田生产工作制度,加大注水开采力度,补充地层能量,尽可能地消除启动压力梯度对油田生产的影响。

参考文献:

- [1] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 76-80
Feng Wenguang. Research Status and Prospect of Non-Darcy Low-Velocity Percolation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(4): 76-80
- [2] 许建红, 程林松, 周颖, 等. 一种求解低渗透油藏启动压力梯度的新方法[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 594-597.
Xu Jianhong, Cheng Linsong, Zhou Ying, et al. A New Method for Calculating Kickoff Pressure Gradient in Low Permeability Reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 594-597.
- [3] 郝斐, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏启动压力梯度研究[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 29-32.
Hao Fei, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Study on Threshold Pressure Gradient in Ultra Low Permeability Reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(6): 29-32.
- [4] 侯秀林, 邓宏文, 谷丽冰. 一个新的描述低渗透油藏油水两相渗流启动压力梯度的公式[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(5): 342-344.
Hou Xiulin, Deng Hongwen, Guo Libing. A New Description of Low Permeability Reservoir Oil-Water Two Phase Flow of Start-Up Pressure Gradient Formula[J]. Journal of and Gas Technology, 2009, 31(5): 342-344.
- [5] 彭春洋, 欧阳云丽, 柯立文, 等. 低渗透油藏渗流启动压力梯度研究[J]. 油气地球物理, 28(6): 64-66.
Peng Chunyang, OuYang Yunli, Ke Liwen, et al. The Study of Actuating Pressure Gradient of the Fluid Flow in Low Permeable Reservoir[J]. Petroleum Geophysics, 28(6): 64-66.
- [6] 张代燕, 王子强, 王殿生, 等. 低渗透油藏最小启动压力梯度实验研究[J]. 新疆地质, 2011, 29(1): 106-109.
Zhang Daiyan, Wang Ziqiang, Wang Diansheng, et al. An Experiment Study on Measuring Minimum Starting Pressure for Low Permeability Reservoir[J]. Xinjiang Geology, 2011, 29(1): 106-109.
- [7] Li Lezhong, Li Xiangfang, He Dongbo, et al. The Establishment of a New Deliverability Equation Considering Threshold Pressure Gradient[J]. Engineering Sciences, 2009, 7(3):

84-87.

- [8] 田敏, 李楠, 吴文瑞. 考虑启动压力梯度的油水两相渗流压力分布[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(1): 51-54.
Tian Min, Li Nan, Wu Wenrui. Pressure Distribution of Oil-Water Seepage Considering Start-Up Pressure Gradient[J]. Complex Hydrocarbon Reservoir, 2012, 5(1): 51-54.
- [9] 熊伟, 雷群, 刘先贵, 等. 低渗透油藏拟启动压力梯度[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 232-235.
Xiong Wei, Lei Qun, Liu Xiangui, et al. Pseudo Threshold Pressure Gradient to Flow for Low Permeability Reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 232-235.
- [10] 徐德敏, 黄润秋, 邓英尔. 低渗透软弱岩非达西渗流拟启动压力梯度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 57-60.
Xu Demin, Huang Runqiu, Deng Yinger. Non-Darcy Flow Quasi-Threshold Pressure Gradient Experimental Study for Low Permeability Soft Rock[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 57-60.
- [11] 李中锋, 何顺利. 低渗透储层非达西渗流机理探讨[J]. 特种油气藏, 2005, 12(2): 35-38.
Li Zhongfeng, He Shunli. Non-Darcy Percolation Mechanism in Low Permeability Reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2005, 12(2): 35-38.
- [12] 窦宏恩, 杨旸. 低渗透油藏流体渗流再认识[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 633-640.
Dou Hongen, Yang Yang. Further Understanding on Fluid Flow Through Multi-Porous Media in Low Permeability Reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 633-640.
- [13] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 1999: 30-57.
Kong Xiangyan. Advanced Mechanics of Fluids in Porous Media[M]. Anhui: Press of University of Science and Technology of China, 1999: 30-57.
- [14] 郭永存, 卢德堂. 有启动压力梯度渗流的数学模型[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(4): 492-497.
Guo Yongcun, Lu Detang. Mathematical Model of Fluid Flow in Porous Media Related to Start-Up Pressure Gradients[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005, 35(4): 492-497.
- [15] 李松泉, 程林松, 李秀生, 等. 特低渗透油藏非线性渗流模型[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 606-612.
Li Songquan, Cheng Linsong, Li Xiusheng, et al. Non-Line-
- ar Seepage Flow Models of Ultra-Low Permeability Reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 606-612.
- [16] 韩大匡, 陈钦雷. 油藏数值模拟基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 37-40.
Han Dakuang, Chen Qinlei. Basic of Reservoir Numerical Simulation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 37-40.
- [17] 杨正明, 于荣泽, 苏致新, 等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 94-98.
Yang Zhengming, Yu Rongze, Su Zhixin, et al. Numerical Simulation of Nonlinear Seepage in Ultra-Low Permeability Reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 94-98.
- [18] 刘刚, 李治平, 冯彬, 等. 基于预处理 GMRES 算法的油藏数值模拟研究[J]. 天然气与石油, 2011, 29(5): 44-46.
Liu Gang, Li Zhiping, Feng Bin, et al. Reservoirs Numerical Simulation Basing on Preprocessing GMRES Algorithm[J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(5): 44-46.
- [19] 赵国忠. 变启动压力梯度三维三相渗流数值模拟方法[J]. 石油学报, 2006, 27(增刊1): 119-123.
Zhao Guozhong. Numerical Simulation of 3D and Three-Phase Flow with Variable Start-Up Pressure Gradient[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(Suppl 1): 119-123.
- [20] 张烈辉, 向祖平, 冯国庆. 低渗气藏考虑启动压力梯度的单井数值模拟[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 108-109.
Zhang Liehui, Xiang Zuping, Feng Guoqing. Single Well Numerical Simulation of Low-Permeability Gas Reservoir with Consideration of Starting Pressure Gradient[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 108-109.
- [21] 尹虎, 王新海, 刘洪, 等. 考虑启动压力梯度的页岩气藏数值模拟[J]. 天然气与石油, 2012, 30(4): 43-47.
Yin Hu, Wang Xinhai, Liu Hong, et al. Numerical Simulation of Shale Gas Reservoirs Under Consideration of Start-Up Pressure Gradient[J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(4): 43-47.
- [22] 许进进, 徐旭辉, 凡哲元, 等. 考虑启动压力梯度下的火山岩气藏数值模拟研究[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 240-243.
Xu Jinjin, Xu Xuhui, Fan Zheyuan, et al. A Numerical Simulation of Volcanic Gas Reservoirs Under Consideration of Start-Up Pressure Gradient[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 240-243.