

致密煤层气藏三维全隐式数值模拟

同登科, 张先敏

中国石油大学(华东), 山东东营, 257061

内容提要: 我国煤层普遍存在低渗、低储层压力和低含气饱和度等不利条件, 许多研究表明, 低渗透多孔介质中的气体运移存在启动压力梯度。为了让数值模拟模型能更加准确地描述致密煤储层中流体的运移特性, 基于前人的研究成果, 建立了考虑启动压力梯度的致密煤层气藏三维、非平衡吸附、拟稳态条件下气、水两相耦合流动数值模拟模型, 并给出了模型的全隐式有限差分格式和数值求解方法。最后利用沁水盆地某生产井的试井资料进行了模拟计算, 模拟结果表明, 在其他条件相同的情况下, 启动压力梯度的存在使得煤层的降压效果变差, 且延迟了产气高峰的到来。对比该井的开采资料, 模拟结果是合理的, 模型能正确反映致密煤层气藏中流体的运移特征。

关键词: 煤层气; 启动压力梯度; 全隐式; 数值模拟

煤层气藏不同于常规的天然气藏, 储层在原始状态下一般被水所饱和, 煤层气在压力作用下以吸附状态储集在基质微孔隙中, 而且煤层气的开采是通过排水降压实现的, 含水饱和度一直处于较高的水平。任晓娟等(1997)、吴凡等(2001)、周克明等(2003)通过对低渗透气藏气体渗流特征的研究表明: 当含水饱和度较高时, 低渗透气藏存在启动压力梯度。李允等(2004)分析启动压差、变形介质和滑脱效应对低渗气藏渗流规律的影响时, 也认识到束缚水饱和度对低渗气藏启动压力梯度存在影响, 并通过实验和机理研究建立了低渗气藏单相渗流的基本数学模型。张先敏等(2007)、张力等(2002)对煤层气运移规律方面进行了相应的研究; 刘曰武等(2005)、孙可明等(2007)研究了多井开采条件下煤层气渗流问题的数值模拟。我国煤层普遍存在低渗($<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、低储层压力(压力系数 <0.8)和低含气饱和度($<70\%$)的“三低”不利条件(朱杰等, 2006), 本文在以上基础上, 考虑低渗透煤层的压力敏感性以及启动压力梯度的影响, 建立了致密煤层气藏三维气、水两相耦合流动数学模型, 并采用正交极小化方法对全隐式数值模型进行了求解。

1 数学模型

1.1 基本假设

煤层是由基质系统和裂隙系统组成的特殊双重

介质; 煤层可压缩且裂隙系统非均质、各向异性; 煤层在原始状态下 100% 被水所饱和, 不含游离气及溶解气; 考虑重力、毛管压力的影响以及流体的可压缩性; 流体流动为等温过程, 自由气为真实气体。

1.2 裂隙系统中气水流动方程

考虑启动压力梯度影响的气、水相运动方程可用如下方程来描述:

$$v_l = \begin{cases} -\frac{k_{rl}k_f}{\mu_l}(\nabla\Phi_l - \lambda_{ul}), & |\nabla\Phi_l| \geq \lambda_{ul} \\ 0, & |\nabla\Phi_l| < \lambda_{ul} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\Phi_l = p_l - \gamma_l H$, $l = g, w$ 。

在煤层气藏排水降压开采过程中, 随着储层压力的下降, 储层煤体承受的有效应力大幅度增加。而随着有效应力的增加, 裂隙宽度变小, 导致渗透率降低。如果仅考虑有效应力的压缩效应, 采用如下煤储层孔隙度和渗透率关系式(Schwerer and Pavone, 1984):

$$\varphi_f = \varphi_{f0} e^{-c_f(p_0 - p)} \quad (2)$$

$$k_f = k_{f0} \left(\frac{\varphi_f}{\varphi_{f0}}\right)^3 \quad (3)$$

由运动方程、连续性方程以及状态方程得到描述致密煤层气藏裂隙系统中气、水相的流动方程分别为:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[\alpha \frac{k_{rg}k_f}{\mu_g B_g} (\nabla\Phi_g - \lambda_{bg}) + D_f \nabla \left(\frac{S_g}{B_g} \right) \right] \\ + q_{im} - q_{vg} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi_f S_g}{B_g} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

注: 本文为国家重点基础研究发展规划“973”项目(编号 2002CB211708)和国家“863”计划项目(编号 2006AA06Z236)资助成果。

收稿日期: 2008-05-07; 改回日期: 2008-08-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 同登科, 男, 1963年生。教授, 主要从事油气渗流理论及其应用研究。电话: 0546-8393487; Email: tongdengke@163.com。

$$\nabla \cdot \left[\alpha \frac{k_{rw} k_f}{\mu_w B_w} (\nabla \Phi_w - \lambda_{bw}) \right] - q_{vw} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi_f S_w}{B_w} \right) \quad (5)$$

饱和度方程和毛管压力方程为:

$$p_c = p_g - p_w \quad (6)$$

$$S_w + S_g = 1 \quad (7)$$

在煤层气藏数值模拟研究当中,通常给定井底流动压力(井中动液面位置)。考虑启动压力梯度的影响,气、水相的产量公式为:

$$q_{vg} = \alpha \frac{2\pi k_{rg} k_f \Delta z [p_g - p_{wf} - \lambda_{bg}(r_e - r_w)]}{\mu_g B_g \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right) \Delta V} \quad (8)$$

$$q_{vw} = \alpha \frac{2\pi k_{rw} k_f \Delta z [p_w - p_{wf} - \lambda_{bw}(r_e - r_w)]}{\mu_w B_w \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right) \Delta V} \quad (9)$$

其中等效供给半径 r_e 与网格步长以及储层的非均质性有关。

1.3 基质系统中气相解吸扩散方程

将煤层气从基质向裂隙系统的扩散过程视为非平衡拟稳态过程,服从 Fick 第一扩散定律,即:

$$\frac{\partial V_m}{\partial t} = -\frac{1}{\tau} [V_m - V_E(p_g)] \quad (10)$$

在浓度差的作用下,由煤基质块中扩散进入裂隙系统的煤层气量为:

$$q_{vm} = \rho_c \frac{1}{B_g \tau} [V_m - V_E(p_g)] \quad (11)$$

其中 V_E 可用 Langmuir 等温吸附方程描述:

$$V_E(p_g) = \frac{V_L p_g}{p_L + p_g} \quad (12)$$

1.4 定解条件

初始条件:

$$p_g|_{t=0} = p_0; S_w|_{t=0} = S_{w0}; V_m|_{t=0} = V_{m0}$$

内边界条件:

$$p_g|_{x=x_w, y=y_w, z=z_w} = p_{wf}(t)$$

外边界条件:

$$\text{定压外边界: } \Phi_g|_{\Gamma} = \text{const}$$

$$\text{封闭外边界: } \frac{\partial \Phi_g}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = 0$$

2 全隐式数值模型

在不均匀网格条件下,采用块中心差分格式,对气、水相偏微分方程进行有限差分(周涌沂等, 2002):

$$T_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} [\Phi_{i+1,j,k}^{n+1} - \Phi_{i,j,k}^{n+1} - \lambda_{bg} \Delta x_{i+\frac{1}{2},j,k}] -$$

$$T_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} [\Phi_{i,j+1,k}^{n+1} - \Phi_{i,j,k}^{n+1} - \lambda_{bg} \Delta x_{i,j+\frac{1}{2},k}] +$$

$$T_{D_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1}} \left[\left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i+1,j,k}^{n+1} - \left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^{n+1} \right] -$$

$$T_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \left[\left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^{n+1} - \left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i-1,j,k}^{n+1} \right] +$$

$$T_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} [\Phi_{i,j+1,k}^{n+1} - \Phi_{i,j,k}^{n+1} - \lambda_{bg} \Delta y_{i,j+\frac{1}{2},k}] -$$

$$T_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} [\Phi_{i,j,k}^{n+1} - \Phi_{i,j-1,k}^{n+1} - \lambda_{bg} \Delta y_{i,j-\frac{1}{2},k}] +$$

$$T_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} \left[\left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j+1,k}^{n+1} - \left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^{n+1} \right] -$$

$$T_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} \left[\left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^{n+1} - \left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j-1,k}^{n+1} \right] +$$

$$T_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} [\Phi_{i,j,k+1}^{n+1} - \Phi_{i,j,k}^{n+1} - \lambda_{bg} \Delta z_{i,j,k+\frac{1}{2}}] -$$

$$T_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} [\Phi_{i,j,k}^{n+1} - \Phi_{i,j,k-1}^{n+1} - \lambda_{bg} \Delta z_{i,j,k-\frac{1}{2}}] +$$

$$T_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} \left[\left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k+1}^{n+1} - \left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^{n+1} \right] -$$

$$T_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} \left[\left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^{n+1} - \left(\frac{S_g}{B_g} \right)_{i,j,k-1}^{n+1} \right] + (\Delta V q_{vm})_{i,j,k}^{n+1} -$$

$$(\Delta V q_{vg})_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\Delta V_{i,j,k}}{\Delta t} \left[\left(\frac{\varphi_f S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^{n+1} - \left(\frac{\varphi_f S_g}{B_g} \right)_{i,j,k}^n \right] +$$

$$T_{w_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1}} [\Phi_{w_{i+1,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \Phi_{w_{i,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \lambda_{bw} \Delta x_{i+\frac{1}{2},j,k}] -$$

$$T_{w_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1}} [\Phi_{w_{i,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \Phi_{w_{i-1,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \lambda_{bw} \Delta x_{i-\frac{1}{2},j,k}] +$$

$$T_{w_{i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1}} [\Phi_{w_{i,j+1,k}^{n+1}}^{n+1} - \Phi_{w_{i,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \lambda_{bw} \Delta y_{i,j+\frac{1}{2},k}] -$$

$$T_{w_{i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1}} [\Phi_{w_{i,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \Phi_{w_{i,j-1,k}^{n+1}}^{n+1} - \lambda_{bw} \Delta y_{i,j-\frac{1}{2},k}] +$$

$$T_{w_{i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1}} [\Phi_{w_{i,j,k+1}^{n+1}}^{n+1} - \Phi_{w_{i,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \lambda_{bw} \Delta z_{i,j,k+\frac{1}{2}}] -$$

$$T_{w_{i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1}} [\Phi_{w_{i,j,k}^{n+1}}^{n+1} - \Phi_{w_{i,j,k-1}^{n+1}}^{n+1} - \lambda_{bw} \Delta z_{i,j,k-\frac{1}{2}}] -$$

$$(\Delta V q_{vw})_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\Delta V_{i,j,k}}{\Delta t} \left[\left(\frac{\varphi_f S_w}{B_w} \right)_{i,j,k}^{n+1} - \left(\frac{\varphi_f S_w}{B_w} \right)_{i,j,k}^n \right]$$

$$\text{其中, } \Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z,$$

$$T_{i+\frac{1}{2},j,k} = \alpha \left(\frac{\Delta y \Delta z k_{rx} k_{fx}}{\Delta x \mu_l B_l} \right)_{i+\frac{1}{2},j,k},$$

$$T_{i,j+\frac{1}{2},k} = \alpha \left(\frac{\Delta x \Delta z k_{ry} k_{fy}}{\Delta y \mu_l B_l} \right)_{i,j+\frac{1}{2},k},$$

$$T_{i,j,k+\frac{1}{2}} = \alpha \left(\frac{\Delta x \Delta y k_{rz} k_{fz}}{\Delta z B_l \mu_l} \right)_{i,j,k+\frac{1}{2}},$$

$$T_{D_{i+\frac{1}{2},j,k}} = \left(\frac{\Delta y \Delta z D_{fx}}{\Delta x} \right)_{i+\frac{1}{2},j,k},$$

$$T_{D_{i,j+\frac{1}{2},k}} = \left(\frac{\Delta x \Delta z D_{fy}}{\Delta y} \right)_{i,j+\frac{1}{2},k},$$

$$T_{D_{i,j,k+\frac{1}{2}}} = \left(\frac{\Delta x \Delta y D_{fz}}{\Delta z} \right)_{i,j,k+\frac{1}{2}}$$

对有限差分方程中的空间流动项、解吸扩散项、产量项以及时间累积项均作隐式处理,且联立求解气、水相方程,同时求出压力和饱和度值(李允, 1999)。经差分离散和全隐式处理后得到的线性方程组的系数矩阵实际上是一个块系数带状稀疏矩阵,采用结合不完全 LU 分解的正交极小化方法求解。

3 实例分析

沁水盆地中南部主采煤层分布于石炭系上统的太原组和二叠系下统的山西组,自下而上分别为 15 号、9 号和 3 号煤层,其中山西组 3 号煤层全区稳定,

煤变质程度高,有大量甲烷生成,且煤层顶底板分别为泥岩和砂质泥岩,封闭性能较好,是模拟计算的目的层位。根据上述数学模型和数值解法编制了致密煤层气藏储层数值模拟程序,结合沁水盆地某生产井的试井资料预测了致密煤层气藏的开发动态。储层参数如下:煤层初始压力为 5.95 MPa;裂隙孔隙度为 0.03;裂隙渗透率 X、Y、Z 方向上分别为 $0.340 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.170 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;煤层厚度为 5.31 m;扩散系数为 $2.16 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{d}$;煤体压缩系数为 0.012MPa^{-1} ;Langmuir 压力常数为 3.58 MPa;Langmuir 体积常数为 $37.30 \text{m}^3/\text{t}$;吸附时间为 3.5 d;井筒半径为 0.10 m;井底流动压力为 0.35 MPa;井控面积为 $0.9 \times 10^5 \text{m}^2$ 。

下面对气水两相启动压力梯度值都分别取 0.00 MPa/m、0.10 MPa/m、0.15 MPa/m 和 0.20 MPa/m 进行模拟计算,图 1 和图 2 分别为该井连续生产 10000 d 时启动压力梯度值对日产气量和累积产气量的影响关系图。从图中可以看出,启动压力梯度值越大,日产气量和累积产气量越低;反之日产气量和累积产气量越高。此外启动压力值越大,见气时间越晚且达到产气高峰需要的时间越长。如图 1,当启动压力梯度值为 0.20 MPa/m 时,大约排采 2500 d 方开始产气,产气高峰大约在 4500 d 左右达到而且高峰产量大大低于不考虑启动压力梯度的情况。这也恰可以解释该井自 2002 年 6 月开井至今为何除个别天数外日产气量几乎为零。

为进一步说明启动压力梯度对煤层气开采的影响,图 3 分别给出了启动压力梯度值分别取 0.00 MPa/m、0.10 MPa/m 和 0.20 MPa/m 时气藏排采 3000 d 时形成的降压漏斗,非常直观地反映出了不同启动压力梯度值下的降压效果,同时也反映出了储层各向异性对降压效果的影响。启动压力梯度的

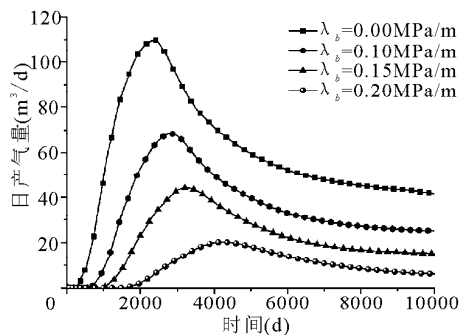


图 1 不同启动压力梯度下的日产气量
Fig. 1 Gas production rate at various starting pressure gradients

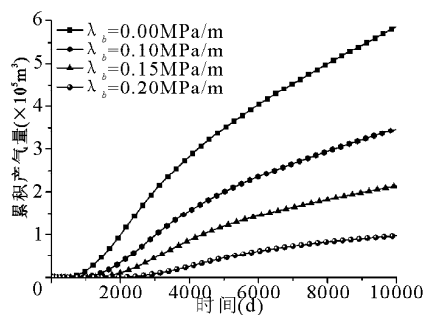


图 2 不同启动压力梯度下累积产气量
Fig. 2 Cumulative gas production at various starting pressure gradients

存在使得降压效果明显变差并使得煤层气井在较长时期内无法形成有效产能,因此启动压力梯度在致密煤层气储层数值模拟中是不容忽视的,建议今后在加强这方面实验研究的同时,对该类煤层气井应采取有效的强化增产措施以提高单井产量。

4 结语

考虑启动压力梯度的影响,建立了致密煤层气

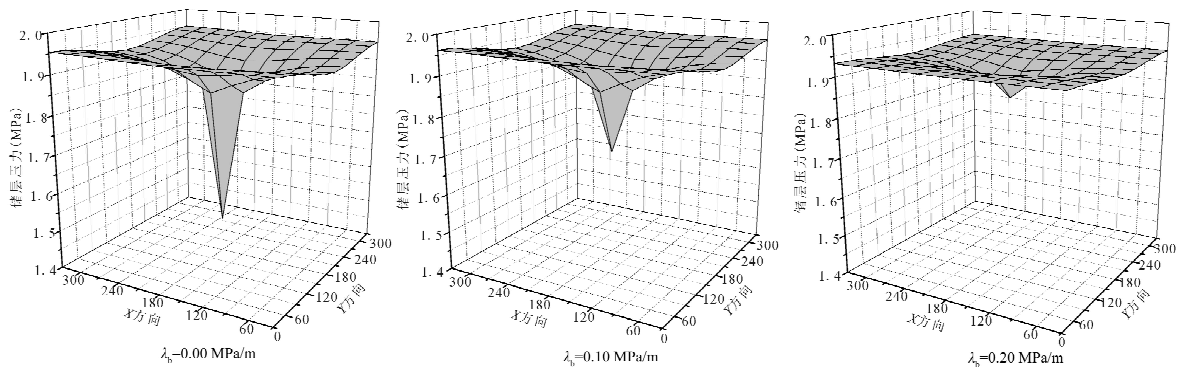


图 3 不同启动压力梯度下形成的储层降压漏斗
Fig. 3 Pressure drop funnels at various starting pressure gradients

藏三维气、水两相耦合流动数值模拟模型,并给出了全隐式数值模型和数值求解方法。最后采用上述数值模拟模型编制了致密煤层气藏储层数值模拟程序,并利用沁水盆地某试验井的试井资料进行了模拟计算。计算结果表明,在其他条件相同的情况下,启动压力梯度值越大,见气时间越晚且日产气量和累积产气量越低;此外,启动压力梯度的存在使得煤层的降压效果变差,并延迟了产气高峰的出现。对比该井的开采资料,算例的模拟结果是合理的。

符号注释: α —单位转换因子; $f; \mu_g, \mu_w$ —气、水的粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B_g, B_w —气、水相的体积系数; k_f —裂隙系统的绝对渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_{f0} —裂隙系统的初始渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_{rg}, k_{rw} —气、水相对渗透率; ρ_g, ρ_w —气、水的密度, t/m^3 ; H —标高, m ; D_f —裂隙系统的气体扩散系数, m^2/d ; φ_f —裂隙系统的孔隙度; φ_{f0} —裂隙系统的初始孔隙度; S_g, S_w —气、水相的饱和度; p_g, p_w —裂隙系统中气、水相的压力, MPa ; q_{vg} —井点所在网格单位体积储层的产气量, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; q_{vw} —井点所在网格单位体积储层的产水量, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; p_c —气水相毛管压力, MPa ; q_{cm} —煤基质单元中解吸气扩散进入裂隙系统的速率, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; s —表皮系数; ΔV —差分网格的体积, m^3 ; p_{wf} —井底流动压力, MPa ; r_w —井筒半径, m ; r_e —等效供给半径, m ; c_f —煤体压缩系数, $1/\text{MPa}$; p_0 —初始煤层压力, MPa ; t —时间, s ; p —平均孔隙压力, MPa ; Δz —煤层厚度, m ; γ_l — l 相重度; V_m —基质中气体浓度, m^3/t ;

v_l — l 相流动速度, m/s ; S_{w0} —初始含水饱和度; f ; V_{m0} —初始含气量, m^3/t ; ρ_c —煤体的密度, t/m^3 ; p_L —Langmuir 压力常数, MPa ; V_L —Langmuir 体积常数, m^3/t ; λ_{bg} —气相启动压力梯度, MPa/m ; λ_{bw} —水相启动压力梯度, MPa/m ; τ —吸附时间, d 。

参 考 文 献

- 李允. 1999. 油藏模拟. 东营:石油大学出版社, 87~97.
- 李允, 陈军, 等. 2004. 一个新的低渗气藏开发数值模拟模型. 天然气工业, 24(8): 65~68.
- 刘曰武, 张大为, 陈慧新, 等. 2005. 多井条件下煤层气不定常渗流问题的数值研究. 岩石力学与工程学报, 24(10): 1679~1686.
- 任晓娟, 闫庆来, 等. 1997. 低渗气层气体渗流特征实验研究. 西安石油学院学报, 12(3): 22~25.
- 孙可明, 潘一山, 梁冰. 2007. 流固耦合作用下深部煤层气井群开采数值模拟. 岩石力学与工程学报, 26(5): 994~1001.
- 吴凡, 孙黎娟, 等. 2001. 气体渗流特征及启动压力规律的研究. 天然气工业, 21(1): 82~84.
- 张力, 何学秋, 李侯全. 2002. 煤层气渗流方程及数值模拟. 天然气工业, 22(1): 23~26.
- 张先敏, 同登科. 2007. 沁水盆地产层组合对煤层气井的影响. 煤炭学报, 32(3): 272~275.
- 周克明, 李宁, 等. 2003. 残余水状态下低渗储层气体低速渗流机理. 天然气工业, 23(6): 103~106.
- 周涌沂, 彭仕宓, 等. 2002. 低速非达西渗流的全隐式模拟模型. 石油勘探与开发, 29(2): 90~93.
- 朱杰, 车长波, 等. 2006. 我国煤层气产业发展趋势预测. 中国矿业, 15(11): 5~8.
- Schwerer F C, Pavone A M. 1984. Effect of pressure-dependent permeability on well-test analyses and long-term production of methane from coal seams. SPE paper 12857.

Fully Implicit Numerical Simulation of Tight Coalbed Methane Reservoir

TONG Dengke, ZHANG Xianmin

China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061

Abstract

Disadvantages of coal seams in China are of low permeability, low reservoir pressure and low gas saturation, and many researches show that the gas flowing in low permeability media needs a starting pressure gradient. Based on previous researches, a three-dimensional, two phases coupled flow mathematical model was presented to describe the characteristic of fluid flow in tight coalbed methane reservoir. Besides, the fully implicit numerical model was given by the finite difference method and linear equations were solved by Orthomin method. Finally, the simulation was conducted by the well-test data of some production wells in Qinshui Basin. The results indicate that the existence of starting pressure gradient makes the depressurization effect worse and delays the coming of the gas production peak under the other conditions. Compared with the production data of this well, the simulation result is reasonable and the model could represent the characteristic of fluids flow in tight coalbed methane reservoirs.

Key words: coalbed methane; starting pressure gradient; fully implicit; numerical simulation