

文章编号: 0253-2697(2006) 04-0089-04

# 考虑启动压力梯度的煤层气羽状水平井开采数值模拟

张冬丽<sup>1</sup> 王新海<sup>2</sup> 宋 岩<sup>2</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院油藏所 北京 100083; 2. 长江大学地球科学学院 湖北荆州 434023)

**摘要:** 建立了对非均质各向异性双重介质煤层气进行定向羽状水平井开采的数学模型。模型中考虑了与气体吸附、解吸和扩散相耦合的三维气、水两相渗流以及储层的压力敏感性和煤层本身所具有的低渗透特性,即低渗透地层启动压力梯度的影响,同时还考虑了井筒内的压降损失。利用有限差分法对数学模型进行了数值求解,完成了煤层气定向羽状水平井开采的数值模拟,并着重分析了启动压力梯度对模拟产量的影响。计算结果表明,利用定向羽状水平井能够大幅度提高低渗透煤层气的开采效率。启动压力梯度的存在会使煤层中羽状水平井的降压效果变差,从而减少煤层气的产量。

**关键词:** 非均质各向异性; 煤层气; 羽状水平井; 启动压力梯度; 数学模型; 数值模拟

**中图分类号:** TE319

**文献标识码:** A

## Numerical simulation of pinnate horizontal multilateral well for coal-bed gas development in consideration of start-up pressure gradient

Zhang Dongli<sup>1</sup> Wang Xinhai<sup>2</sup> Song Yan<sup>2</sup>

(1. *Sinopet Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;*

2. *College of Geosciences, Yangtze University, Jingzhou 434023, China*)

**Abstract** A mathematical model for describing coal bed gas recovery in heterogeneous anisotropic dual medium of pinnate horizontal multilateral wells was established. The factors including heterogeneity and anisotropy of stratum, sensitivity of permeability to pressure, friction and acceleration loss in wellbore and start up pressure gradient in low permeability coal bed were considered in this model. The numerical simulation method was presented and used to simulate the production of coal bed gas in the pinnate horizontal multilateral wells. The effect of start up pressure gradient on the simulated gas production was analyzed. The result of simulation showed that the gas production in low permeability coal bed could increase greatly by drilling pinnate horizontal multilateral wells. The existence of start up pressure gradient can make depressurization effect of pinnate horizontal multilateral well get worse, which promotes gas production reduced.

**Key words:** heterogeneous anisotropy; coal bed gas; pinnate horizontal multilateral well; start up pressure gradient; mathematical model; numerical simulation

煤层属于低渗透储层,我国的煤层更是具有低压、低渗透、低吸附气饱和度的特性。因此,煤层中的渗流过程应该按照低渗透储层处理,而且需要考虑启动压力梯度的影响。国内外现有的描述煤层气在裂缝中渗流过程的数学模型,尚未考虑这个问题<sup>[1-4]</sup>。另一方面,定向羽状水平井是一种有效的煤层气增产技术,作为一种定量预测和分析的数值模拟手段,对煤层气定向羽状水平井开采可提供必要的理论指导。以前研究的煤层气定向羽状水平井的数学模型及数值模拟方法<sup>[5]</sup>也未考虑启动压力梯度。笔者建立的模型中则考虑了低渗透地层非达西渗流的影响。通过模拟计算研究了该因素对羽状水平井开采煤层气产量的影响,并

分析了导致产量降低的原因。

### 1 数学模型的建立

#### 1.1 双重介质下煤层气和水的流动方程

煤层视为孔隙-裂缝双重介质,原始状态裂缝中充满水,并含少量的游离气,大量气体以吸附形式存在于基质中。考虑到重力,忽略毛细管力,研究了低渗透煤层非达西渗流的特点。裂缝中气体满足真实气体状态方程,气体运动速度 $v_g$ 视为宏观渗流速度和气体扩散速度之和,即

$$v_g = - \left[ \frac{K_g}{\mu_g} \beta_{gs} \Delta \Phi_g + \frac{D_f}{C_f} \Delta C_f \right] \quad (1)$$

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB211700)资助。

作者简介: 张冬丽,女,1973年12月生,2004年获中国科学院渗流流体力学研究所渗流力学博士学位,现为中国石化石油勘探开发研究院油藏所工程师,主要从事油藏工程研究。E-mail: zhangdl@pepris.com

式中  $K_g$  为气相渗透率;  $\mu_g$  为气体粘度;  $\Phi_g$  为气相压力势;  $D_f$  为裂缝中气体扩散系数;  $C_f$  为裂缝中气体浓度。

裂缝中水相渗流速度  $v_w$  为

$$v_w = - \frac{K_w}{\mu_w} \beta_{ws} \Delta \Phi_w \quad (2)$$

式中  $\Phi_w$  为水相压力势,  $\beta_{gs}$  和  $\beta_{ws}$  为达西定律修正系数<sup>[6]</sup>, 当  $\left| \frac{\partial \Phi}{\partial s} \right| > \lambda$  时  $\beta_s = 1 - \lambda \left| \frac{\partial \Phi}{\partial s} \right|$ ,  $\left| \frac{\partial \Phi}{\partial s} \right| < \lambda$  时  $\beta_s = 0$

式中  $\lambda$  为临界压力梯度; 下标  $l$  表示气或水;  $s$  表示  $x, y, z$  方向。

将基质中气体解吸过程视为拟稳态扩散, 满足 Fick 第一定律, 即

$$\frac{dC_m(t)}{dt} = D_m F_G [V_E(p_g) - C_m(t)] \\ = 1/\tau [V_E(p_g) - C_m(t)] \quad (3)$$

式中  $C_m$  为基质中气体浓度;  $D_m$  为基质中气体扩散系数;  $F_G$  为基质几何因子;  $V_E(p_g)$  为与裂缝中气体压力相平衡的基质浓度;  $p_g$  为气相压力;  $t$  表示时间;  $\tau$  为吸附时间常数。

当  $p \geq p_d$  时,  $p_d$  为临界解吸压力, 有

$$V_E(p) = V_E(p_d) \quad (4)$$

当  $p < p_d$  时, 满足朗缪尔方程, 即

$$V_E(p) = V_L \frac{p}{p_L + p} \quad (5)$$

由基质块流到裂缝中的气体流量  $q_m$  作为裂缝中气相流动方程的源, 即

$$q_m = - F_G \frac{dC_m(t)}{dt} \quad (6)$$

把流入各主支和分支井段的产量作为气、水相流动方程的汇项, 则裂缝中气相流动方程和水相渗流方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\Phi_l S_g \Phi_g}{Z} \right) = \Delta \cdot \left[ \frac{p_g \beta_{gs}}{Z} \frac{K_g}{\mu_g} \Delta \Phi_g + \frac{D_f}{S_g} \Delta \left( \frac{S_g p_g}{Z} \right) \right] \\ + \frac{RT}{M} q_m - q'_g \frac{p_g}{Z} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\Phi_l S_w}{B_w} \right) = \Delta \cdot \left[ \frac{K_w}{B_w \mu_w} \beta_{ws} \Delta \Phi_w \right] - \frac{q'_w}{B_w} \quad (8)$$

式中  $\Phi_l$  为裂缝孔隙度;  $S_g$  和  $S_w$  分别为气和水饱和度;  $Z$  为气体偏差因子;  $R$  为气体常数;  $T$  为地层温度;  $M$  为气体摩尔质量;  $q'_g$  和  $q'_w$  分别为单位时间内单位体积地层产出流体的体积。表达式为

$$q'_g = \frac{q_g}{\Delta V}$$

$$q'_w = \frac{q_w}{\Delta V}$$

其中  $q_g$  和  $q_w$  为单位时间内  $\Delta V$  体积地层产出的气

体和水的体积,  $m^3/s$ , 在有限差分长方体网格中, 可以表示为

$$q_g = P_l \beta_{gs} \frac{k_{rg}(p_g - p_{wf})}{\mu_g} \quad (9)$$

$$q_w = P_l \beta_{ws} \frac{k_{rw}(p_w - p_{wf})}{\mu_w} \quad (10)$$

式中  $p_{wf}$  为各微井段井筒内流压;  $P_l$  为井指数, 其表达式为

$$P_l = 2\pi K_e L_p / \left[ \ln \frac{r_b}{r_w} + S \right] \quad (11)$$

式中  $K_e$  为各向异性介质等价的各向同性渗透率;  $L_p$  为变换的空间上网格内井段的长度;  $r_b$  为井格块等效半径;  $r_w$  为等效井径;  $S$  为表皮因子。

煤层气、水流动饱和度方程为

$$S_w + S_g = 1 \quad (12)$$

## 1.2 孔隙度和渗透率的压力敏感性模型

在煤层裂缝地层中, 煤孔隙的可压缩性比碎屑岩和碳酸盐岩大得多, 因而煤层孔隙度和渗透率有显著的压力敏感性。除了有效应力的影响外, 气体解吸会引起基质块的收缩, 即

$$\Phi = \Phi_l [1 + c_p(p - p_i)] - c_m(1 - \Phi_l) \cdot \\ \frac{p_d - p_{sc}}{c(p_d) - c(p_{sc})} [c(p) - c(p_d)] \quad (13)$$

式中  $\Phi_l$  为裂缝原始孔隙度;  $p_i$  煤层原始压力;  $p_{sc}$  标准状况压力;  $c_p$  为裂缝孔隙体积压缩系数;  $c_m$  为基质骨架收缩系数。

式(13)后一项反映了基质收缩的影响。

实验表明<sup>[7]</sup>, 在一般压力敏感性储层, 渗透率与压力变化近似呈指数关系

$$K = K_i \exp[-\alpha_{k1}(p_i - p)]$$

而在煤层, 有效应力和气体解吸分别导致渗透率降低和增加, 并在压力降低的前期和后期分别占主导地位, 故压差与渗透率的关系可近似表示为

$$K = \begin{cases} K_i \exp[-\alpha_{k1}(p_i - p)] & (p \geq p_k) \\ K_i \exp[-\alpha_{k1}(p_i - p_k)] \exp[\alpha_{k2}(p_k - p)] & (p < p_k) \end{cases} \quad (14)$$

式中  $K_i$  为裂缝原始渗透率;  $\alpha_{k1}$  和  $\alpha_{k2}$  为压力敏感系数;  $p_k$  为压力敏感曲线上渗透率最低点对应的压力, 均可由实验测得。

## 1.3 井筒压降模型

对于分支水平井, 地层流体可以先从分支流入主支, 再由主支流到直井段到达地面, 也可以直接从主支流入直井段到达地面。在井筒内部, 考虑到井筒的摩擦压降和由于流入导致的速度变化而产生的加速压降, 主支和分支的上下游相邻两井段的压力关系表示为<sup>[8-9]</sup>

$$p_{wf,i+1} = p_{wf,i} + 0.5(\Delta p_{wf,i+1} + \Delta p_{wf,i})$$

$$p_{wfi} = p_{wfc} + 0.5 \Delta p_{wfi} \tag{15}$$

式中  $p_{wfi}$  为井底压力,  $i$  表示井段标号,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 最上游井段为 1, 最下游(出口端)为  $n$ ;  $c$  表示出口端;  $\Delta p_{wfi}$  为相邻两井段摩擦压降和加速压降之和, 其表达式为

$$\Delta p_{wfi} = \Delta p_{fri,i} + \Delta p_{aci,i} \tag{16}$$

摩擦压降为

$$\Delta p_{fri,i} = \frac{1}{2} \frac{\rho_i f_i}{D} \bar{V}_i^2 \Delta x_i \tag{17}$$

式中  $\rho_i$  为该井段内流体密度;  $f_i$  为该井段摩擦系数;  $D$  为井直径;  $\bar{V}_i$  为该井段流体平均流速;  $\Delta x_i$  为该井段长度。

加速压降为

$$\Delta p_{aci,i} = \rho_i (V_i + V_{i-1})(V_i - V_{i-1}) \tag{18}$$

式中  $V_{i-1}$  和  $V_i$  分别为流体流入和流出该井段的速度。

式(16)可由流量表示为

$$\Delta p_{wfi} = \frac{2f_i \rho_i}{\pi^2 D^5} (2Q_i + q_i + Q_{Ri})^2 \Delta x_i + \frac{16 \rho_i (q_i + Q_{Ri})}{\pi^2 D^4} (2Q_i + q_i + Q_{Ri}) \tag{19}$$

式中  $Q_i$  为从主支或分支相邻上游段流入该段的流量, 即从地层流入该段上游所有主支和分支的流量之和;  $Q_{Ri}$  为由该主支井段的分支(若存在分支)流入主支的流量;  $q_i$  为从地层流入该段井筒的流量,  $q_i = q_{gi} + q_{wi}$ 。

2 模型的数值求解

将式(6)和式(7)差分离散, 等式左边压力及压力的函数取为隐式, 饱和度及其函数取为显式。两式合并消去饱和度, 得到关于地层压力的差分方程。式(19)中的流量均可由式(9)和式(10)表示为井底压力和地层压力的函数, 再代入式(14)和式(15), 离散后可得每个井段的井筒压降方程。两组方程的未知数均为每个网格处的地层压力和通过某些网格的井筒压力, 且相互耦合, 可通过相互迭代交替求解的办法解耦。

首先将整个非线性方程组用牛顿-拉夫松方法线性化, 线性化后方程组的系数为 7 对角镶边带状矩阵。将井筒压力设为任意合理值, 则地层压力方程组为 7 对角方程组, 可用预条件处理的共轭梯度法求解。迭代满足线性化收敛条件后, 将此地层压力值代入井筒压力方程组中, 用高斯消去法求解; 迭代满足线性化收敛条件后, 再代入地层压力方程。如此反复迭代, 直到所求未知数满足一定的收敛条件, 即得到该时刻地层压力及各段井筒压力值。最后将求得的压力值代入水相差分方程中, 显式求得该时刻的饱和度。

3 算例分析

用以上的数学模型和数值解法编制了数值模拟程序, 利用该程序模拟了煤层气定向羽状水平井的气、水生产动态。利用山西晋城樊庄区块晋试 1 井的煤层参数进行模拟, 地层孔隙度为 0.026; 地层渗透率为  $0.5144 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 煤层厚度为 5.8 m; 煤层温度为 304 K; 煤层原始压力为 4.76 MPa; 临界解吸压力为 4.4 MPa; 朗氏压力为 3.034 MPa; 朗氏体积为 41.3 kg/m<sup>3</sup>; 吸附时间为 42.6 h; 零含气饱和度为 95.11%; 扩散系数为  $2.16 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{d}$ ; 孔隙体积压缩系数为  $3.67 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ 。计算所用的羽状水平井井组如图1所示, 共 4 口羽状井呈发散状排列, 总长度为 26232 m。

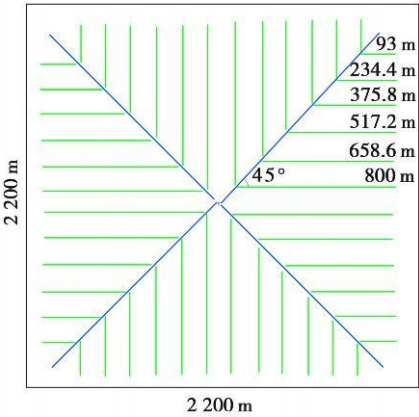


图 1 羽状水平井结构示意图

Fig. 1 The sketch map of pinnate horizontal multilateral well

图 2 和图 3 分别为晋试 1 井生产 13.7 a 的单井产量和累积产量变化, 对启动压力梯度分别为 0 MPa/m, 0.05 MPa/m 和 0.15 MPa/m 的 3 种情况作了对比。

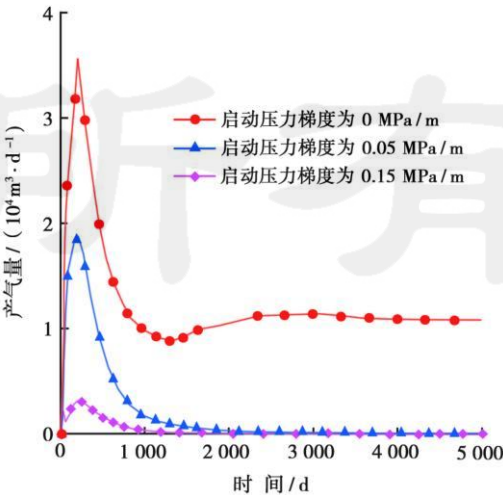


图 2 不同启动压力梯度下的煤层气产量

Fig. 2 The production of coal bed gas at different start up pressure gradient



计算结果表明,用定向羽状水平井开采煤层气,如果不考虑启动压力梯度,羽状水平井煤层气单井产量高峰期可达 $35\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,高峰过后平稳期产量约

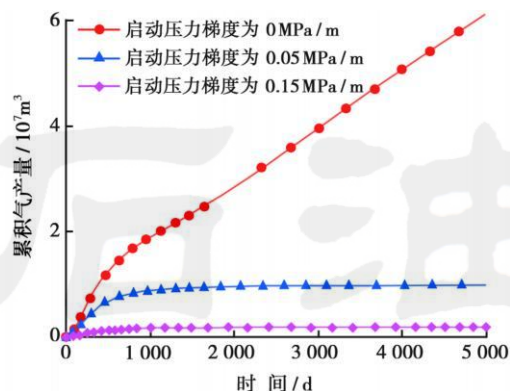


图 3 启动压力梯度对累积产量的影响

Fig. 3 Cumulative production of coal bed gas at different start up pressure gradient

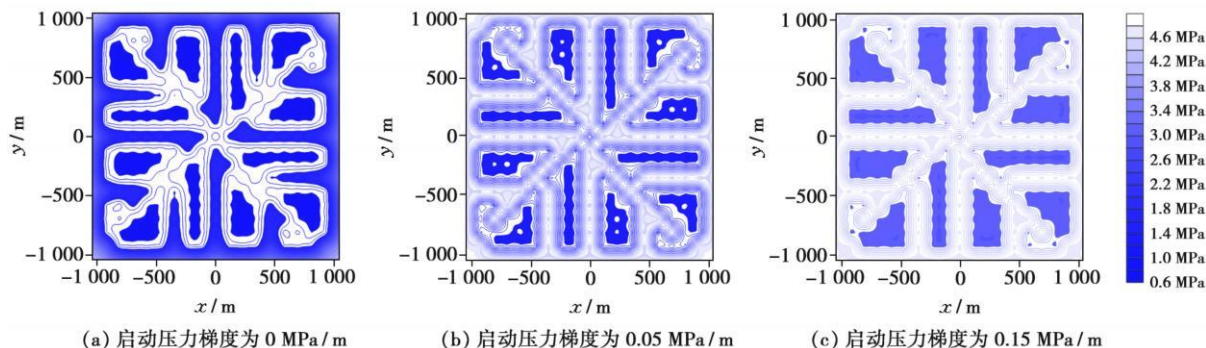


图 4 不同启动压力梯度下煤层气羽状水平井的降压效果

Fig. 4 The depressurization effect of pinnate horizontal multilateral well at different start up pressure gradient

气产量越低。

## 4 结 论

(1) 建立了煤层气定向羽状水平井开采的数学模型,给出了数值求解方法,实现了数值模拟计算。经实例验证,该模型正确有效;同时说明了利用定向羽状水平井能够大幅度提高低渗透煤层气的开采效率。

(2) 启动压力梯度会使羽状水平井开采煤层气时的降压效果变差,从而使其产量减少。启动压力梯度在煤层气数值模拟中是不能被忽略的因素。

### 参 考 文 献

[1] 李文阳,王慎言,赵庆波.中国煤层气勘探与开发[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003:203-228.  
[2] 杨陆武,孙茂远.中国煤层气藏的特殊性及其开发技术要求[J].天然气工业,2001,21(6):17-19.

$10\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 。生产 13 7 年后累积产量约为  $6 \times 10^7\text{ m}^3$ ,显示了羽状水平井显著的增产效果。但如果考虑启动压力梯度的影响,日产气量及累积产气量都会随启动压力梯度值的增加而减小。若启动压力梯度值较大,产气高峰期过后,日产量下降非常快,有效开采时间大大缩短。说明启动压力梯度是一个影响煤层气产量的重要因素,不可忽略。在实际应用中,煤层的启动压力梯度(如果存在)值应该通过实验获得,以使模拟所得的煤层气产量与实际情况更加相符。

图 4 给出了开采 13 7 年时不同启动压力梯度下的煤层气羽状水平井的压力等值线(原始地层压力为 4.76 MPa),反映了 3 种情况下不同的降压效果。说明启动压力梯度的存在使羽状水平井的降压效果变差,而吸附在煤基质表面的气体能否解吸并进一步渗流产出,主要看煤层能否有效降压,因而启动压力梯度的存在降低了煤层气的产量。启动压力值越大,煤层

[3] 张新民,解光新.我国煤层气开发面临的主要科学技术问题及对策[J].煤田地质与勘探,2002,30(2):19-22.  
[4] Kolesar J E, Turgay Ertekin, Obut S T. The unsteady-state nature of sorption and diffusion phenomena in the micropore structure of coal, Part1: Theory and mathematical formulation; part2: solution [J]. SPEFE, 1990, 5(3): 81-97.  
[5] 张冬丽,王新海.煤层气定向羽状水平井开采数值模拟研究[J].煤田地质与勘探,2005,33(4):47-51.  
[6] 王新海,张冬丽,席长风.变形介质地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.  
[7] 赵明跃,王新海,雷霆,等.储层参数压力敏感性研究[J].油气井测试,2001,10(4):3-4.  
[8] 程林松,兰俊成.考虑水平井筒压力损失的数值模拟方法[J].石油学报,2002,23(1):67-71.  
[9] 刘想平,郭呈柱,蒋志祥,等.油层中渗流与水平井内流动的耦合模型[J].石油学报,1999,20(3):82-86.