

文章编号: 0253-9993(2007)03-0272-04

沁水盆地产层组合对煤层气井产能的影响

张先敏, 同登科

(中国石油大学(华东)数学与计算科学学院, 山东 东营 257061)

摘要: 借鉴现有模型并结合沁水盆地现场实际, 建立了煤储层双重孔隙多孔介质三维气、水两相耦合流动数学模型, 研究了模型的全隐式解法, 根据沁水盆地煤层和含水层的不同组合方式以及流体流动方式编制了 7 种组合方案, 并利用自行编制的数值模拟程序对 7 种组合方案进行了单井产能数值模拟, 最终确定将 3 号和 15 号煤层、K₂ 灰岩层联合作为产层是最优的组合方案。

关键词: 沁水盆地; 煤层气; 临界解吸压力; 组合方案

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A

The effects of pay formation combination on productivity of coalbed methane well in Qinshui basin

ZHANG Xian-min, TONG Deng-ke

(School of Mathematics & Computational Sciences, China University of Petroleum (East China), Dongying 257061, China)

Abstract: A three-dimensional, two-phase, dual porosity, fully implicit coalbed methane simulator was developed by drawing on former models and considering the reality in Qinshui Basin. Then according to different combinations of coal seams and aquifers in Qinshui basin, seven schemes were presented and simulated respectively by this simulator. The result shows that the combination of No. 3 coal seam, No. 15 coal seam and K₂ limestone aquifer is the optimal schemes.

Key words: Qinshui basin; coalbed methane; critical desorption pressure; combination scheme

沁水盆地是我国煤层气富集的主要盆地之一, 二叠系山西组的 3 号煤层和石炭系太原组的 15 号煤层是该盆地的主要气源岩, 属高变质的无烟煤, 2 煤层之间有数十米厚的地层相分隔, 无动力联系。其中 3 号煤层的顶、底板分别为泥岩和砂质泥岩, 封闭性能较好。15 号煤层的顶板为盆地内稳定发育的石炭系 K₂ 灰岩, 其中岩溶、裂隙发育, 富含地下水, 是该井的主要水源, 同时也造成煤层气的逸散; 底板为黏土质泥岩及铝土质泥岩, 封闭性能较好。本文借鉴现有模型并结合沁水盆地现场实际, 建立煤储层双重孔隙多孔介质三维气、水两相耦合流动数学模型, 并根据沁水盆地煤层和含水层的不同组合方式, 编制程序进行数值模拟, 以确定最优的产层组合方案。

1 数学模型^[1,2]

假设: ① 煤层是由煤基质微孔系统和裂隙孔隙系统组成的双孔隙度单渗透率的特殊双重介质; ② 煤层可压缩, 裂隙系统均质各向异性; ③ 水是微可压缩流体, 煤层在原始状态下被水 100% 饱和, 不含游离气及溶解气, 气体均以吸附态储集在煤基质的内表面, 且由于煤基质的孔径小, 水不能进入; ④ 流体流动为等温流动, 自由气为真实气体; ⑤ 气体在裂隙系统中的流动服从渗流和扩散两种机理, 而水的流动

机理仅为渗流，渗流和扩散分别服从 Darcy 定律及 Fick 第一扩散定律，并考虑重力、毛管压力的影响；⑥ 气体在煤基质中的扩散过程为非平衡拟稳态过程，服从 Fick 第一扩散定律。

1.1 裂隙系统中气、水两相流动基本方程

对于裂隙系统，气体从基质块中不断扩散进入其中，可以看作连续性方程中的源项，于是由连续性方程与 Darcy 定律及真实气体定律，可得气、水相质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \left[\alpha \frac{k_{rg}k_f}{\mu_g B_g} \nabla \Phi_g + D_f \nabla \left(\frac{S_g}{B_g} \right) \right] + q_{vm} - q_{vg} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi_f S_g}{B_g} \right), \quad \nabla \cdot \left[\alpha \frac{k_{rw}k_f}{\mu_w B_w} \nabla \Phi_w \right] - q_{vw} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi_f S_w}{B_w} \right),$$

式中， α 为单位转换因子； k_{rg} ， k_{rw} 分别为气、水相的相对渗透率； k_f 为裂隙渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； μ_g ， μ_w 分别为气、水相的黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ； B_g ， B_w 分别为气、水相的体积系数； $\Phi_g = p_{ig} - \rho_g gH$ ， $\Phi_w = p_{iw} - \rho_w gH$ ， H 为标高， m ； p_{ig} ， p_{iw} 为裂隙系统中气、水相的压力， MPa ； ρ_g ， ρ_w 分别为气、水相的密度， kg/m^3 ； D_f 为裂隙系统中气体扩散系数， m^2/d ； S_g ， S_w 分别为裂隙系统中气、水饱和度； q_{vg} ， q_{vw} 分别为井点所在网格单位体积储层的气、水产量， $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ； ϕ_f 为裂隙孔隙度； q_{vm} 为单位体积储层的煤基质表面煤层气经解吸扩散进入裂隙系统中的速率， $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ； t 为时间， d 。

辅助方程为

$$p_c = p_{ig} - p_{iw}, \quad S_w + S_g = 1, \quad (1)$$

式中， p_c 为裂隙系统中水相和气相的毛管压力， MPa 。

1.2 基质系统中气相的解吸扩散方程

煤层气的吸附与解吸是一个可逆过程，解吸同样可用 Langmuir 等温吸附方程^[3]描述，即 $V_E(p_{ig}) = V_L b p_{ig} / (1 + b p_{ig})$ ， V_E 为基质 - 裂隙面上煤层气的平衡吸附量， m^3/t ； V_L 为 Langmuir 体积常数， m^3/t ； b 为 Langmuir 压力常数， MPa^{-1} 。煤层气从基质向割理的扩散遵循 Fick 第一定律，认为解吸速度与煤基质内表面气体浓度和煤基质中平均浓度的差成正比^[1]，即

$$\frac{\partial \bar{V}_m}{\partial t} = - \frac{1}{\tau} [\bar{V}_m - V_E(p_{ig})], \quad \text{且 } q_{vm} = - \frac{\rho_c}{B_g} \frac{\partial \bar{V}_m}{\partial t},$$

式中， \bar{V}_m 为基质中吸附气平均浓度， m^3/t ； τ 为吸附时间常数， $\tau = 1/D_m \sigma$ ， d ，其中， D_m 为煤基质中气体扩散系数， m^2/d ， σ 为 Warren - Root 形状因子。

1.3 定解条件

初始条件： $p_{ig} \Big|_{t=0} = p_1$ ， $S_w \Big|_{t=0} = S_{w1}$ ， $\bar{V}_m \Big|_{t=0} = \bar{V}_{m1}$ ，其中 p_1 为煤储层裂隙系统原始压力， MPa ； S_{w1} 为煤储层裂隙系统原始含水饱和度； \bar{V}_{m1} 为煤储层原始含气量， m^3/t 。煤层气藏数值模拟中一般取定压内边界，而外边界取定压或封闭。

1.4 数值模型

上述建立的数学模型是一个强非线性的偏微分方程组，解析求解非常困难，故进行数值求解。引入有限差分算符 $\Delta A \Delta B = \Delta_x A \Delta_x B + \Delta_y A \Delta_y B + \Delta_z A \Delta_z B$ ， $\Delta_d A \Delta_d B = A_{m+\frac{1}{2}}(B_{m+1} - B_m) - A_{m-\frac{1}{2}}(B_m - B_{m-1})$ ，其中， $d = x, y, z$ 与之相对应 $m = i, j, k$ 。对数学模型进行有限差分，最终得到描述煤储层中气、水两相流体运移规律的非线性差分方程组，即数值模型为

$$\Delta T_g \Delta \Phi_g + \Delta T_D \Delta \left(\frac{S_g}{B_g} \right) + Q_{vm} - Q_{vg} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[\left(\frac{\phi_f S_g}{B_g} \right)^{n+1} - \left(\frac{\phi_f S_g}{B_g} \right)^n \right],$$

$$\Delta T_w \Delta \Phi_w - Q_{vw} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[\left(\frac{\phi_f S_w}{B_w} \right)^{n+1} - \left(\frac{\phi_f S_w}{B_w} \right)^n \right],$$

式中， T_g ， T_w 分别为气、水相的传导系数； T_D 为扩散项系数； ΔV 为有限差分网格的体积， m^3 ， $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ ； $Q_{vl} = q_{vl} \Delta V$ ，其中 $l = m, g, w$ 。

为增加解的稳定性，采用上游权及调和平均处理物性参数。差分方程求解采用目前油气藏数值模拟中

广泛采用的全隐式方法^[3], 其优点是稳定性好, 收敛快, 时间步长大. 将方程的 Darcy 系数项, 解吸扩散项, 井点的气、水产量项均作隐式处理, 其核心是 Taylor 级数展开的一阶导数值不用上阶段值, 而用本阶段值, 且联立求解气、水相方程, 同时求出压力和饱和度值, 因此具有较高的精度. 基于数学上求解非线性方程的 Newton 法可推出全隐式差分方程组的最终形式为

$$\begin{bmatrix} a_g^1 & a_g^2 \\ a_w^1 & a_w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}p_{gi-1} \\ \bar{\delta}S_{wi-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_g^1 & b_g^2 \\ b_w^1 & b_w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}p_{gj-1} \\ \bar{\delta}S_{wj-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_g^1 & c_g^2 \\ c_w^1 & c_w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}p_{gk-1} \\ \bar{\delta}S_{wk-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_g^1 & d_g^2 \\ d_w^1 & d_w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}p_{gi,j,k} \\ \bar{\delta}S_{wi,j,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_g^1 & e_g^2 \\ e_w^1 & e_w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}p_{gi+1} \\ \bar{\delta}S_{wi+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_g^1 & f_g^2 \\ f_w^1 & f_w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}p_{gj+1} \\ \bar{\delta}S_{wj+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_g^1 & g_g^2 \\ g_w^1 & g_w^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\delta}p_{gk+1} \\ \bar{\delta}S_{wk+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{gi,j,k} \\ h_{wi,j,k} \end{bmatrix},$$

式中, 下标 $i-1, j-1, k-1$ 代表 $(i-1, j, k), (i, j-1, k), (i, j, k-1)$, 其它类似; 字母 a, b, c, d, e, f, g 分别表示节点 $(i-1, j, k), (i, j-1, k), (i, j, k-1), (i, j, k), (i, j, k), (i+1, j, k), (i, j+1, k), (i, j, k+1)$ 求解变量的系数.

1.5 数值解法

显然, 全隐式方法形成的系数矩阵是一个块系数带状稀疏矩阵, 即每个节点对应一个 2 阶子矩阵. 为此采用块系数预处理正交极小化方法^[4,5]求解. 设从 t^n 到 t^{n+1} 的 Δt 步长内, 在求得 $l+1$ 次的 $\bar{\delta}p_{ig}, \bar{\delta}S_w$ 的值后, p_{ig}^{l+1}, S_w^{l+1} 的值为 $p_{ig}^{l+1} = p_{ig}^l + \bar{\delta}p_{ig}, S_w^{l+1} = S_w^l + \bar{\delta}S_w$. 由方程 (1) 求出 p_{iw}^{l+1} 的值, 即 $p_{iw}^{l+1} = p_{ig}^{l+1} - p_c^{l+1}, S_g^{l+1} = 1 - S_w^{l+1}$. 重复上述计算过程, 直到 $\bar{\delta}p_{ig}, \bar{\delta}S_w$ 满足精度要求为止, 此时 p_{ig}^{l+1}, S_w^{l+1} 的值即为 p_{ig}^{n+1}, S_w^{n+1} 的值.

2 产层组合对气井产能影响实例分析

沁水盆地内的 TL003 井自上而下穿过了第四系, 二叠系上统的上石盒子组, 下统的下石盒子组、山西组, 石炭系上统的太原组, 中统的本溪组, 中奥陶统峰峰组. 其中 3 号和 15 号煤层是该井的主要产气层位, 厚度分别为 6.33 和 0.90 m, 埋深分别为 472.37 和 583.26 m, K_2 灰岩层厚 9.14 m.

根据沁水盆地煤层和含水层的不同组合方式以及流体流动方式编制了 7 种组合方案. 组合 1: 3 号煤层、15 号煤层、 K_2 灰岩层作为产层, K_2 灰岩层与 15 号煤层构成统一的水动力场, 与井筒连通; 组合 2: 3 号煤层、15 号煤层作为产层, K_2 灰岩层与 15 号煤层构成统一的水动力场, 与井筒不连通; 组合 3: 3 号煤层、15 号煤层作为产层, 不考虑 K_2 灰岩层的生产或补给作用; 组合 4: 3 号煤层单独排采; 组合 5: 15 号煤层单独排采; 组合 6: 15 号煤层作为产层, K_2 灰岩层与 15 号煤层构成统一的水动力场, 与井筒不连通; 组合 7: 15 号煤层、 K_2 灰岩层作为产层, K_2 灰岩层与 15 号煤层构成统一的水动力场, 与井筒连通.

利用数学模型自行编制数值模拟程序, 并对上述沁水盆地 TL003 井的不同产层组合方案进行数值模拟, 模拟所用参数见表 1.

由于 3 号煤层和 15 号煤层在平面上无限延伸, 在天然情况下被水所饱和, 计算取外边界定压、定饱和度并将动液面置于 15 号煤层底部进行模拟, 模拟的最短时间步长取为 1 d, 最长取为 30 d. 模拟结果如图 1 所示.

从图 1 可以看出: 3 号和 15 号煤层作为产层, 不考虑 K_2 灰岩层的生产或补给作用 (组合 3), 其

表 1 煤层的物性参数

Table 1 Property parameters of coal seams

物性参数	煤 层			
	3 号煤层	15 号煤层	K_2 灰岩	
原始压力/MPa	3.36	4.37	4.37	
临界解吸压力/MPa	2.53	1.61	-	
Langmuir 压力常数/MPa ⁻¹	0.32	0.44	-	
Langmuir 体积/m ³ ·t ⁻¹	44.27	48.92	-	
储层孔隙度	0.02	0.02	0.05	
原始含水饱和度	1.00	1.00	1.00	
k_x	3.40	1.20	21.00	
渗透率/10 ⁻³ μm ²	k_y	1.70	0.80	21.00
	k_z	0	0.01	2.10
煤的密度/t·m ⁻³	1.400	1.435	-	
压缩系数/MPa ⁻¹	0.062	0.062	0.003	
表皮系数	-3.20	-4.55	-3.05	

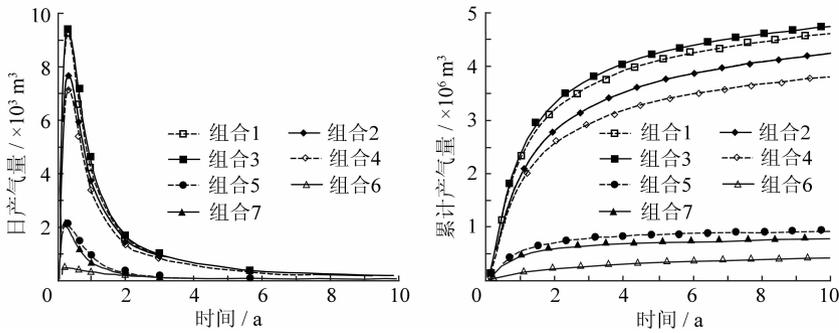


图1 不同组合方案的日产气量和累积产气量曲线
 Fig. 1 Gas production rate and gas cumulative production curves for different combination schemes

日气产量和累积气产量最高；若3号和15号煤层、K₂灰岩层联合作为产层（组合1），此方案仍具有较高的日产气量和累积产气量；如果K₂灰岩层不生产，但与15号煤层构成统一的水动力场（组合2），此方案的日产气量和累积产气量虽低于前两个方案，但明显高于3号煤层单独排采的方案（组合4）。若仅将15号煤层作为产层，K₂灰岩层不生产

但与15号煤层构成统一的水动力场（组合6），此方案的产量最低。由此表明，组合3无疑是最优的组合方案，但煤层气井经压裂增产改造后，不考虑K₂灰岩层的生产或补给作用是很不现实的。因此组合3并非实际生产中的最优组合方案。

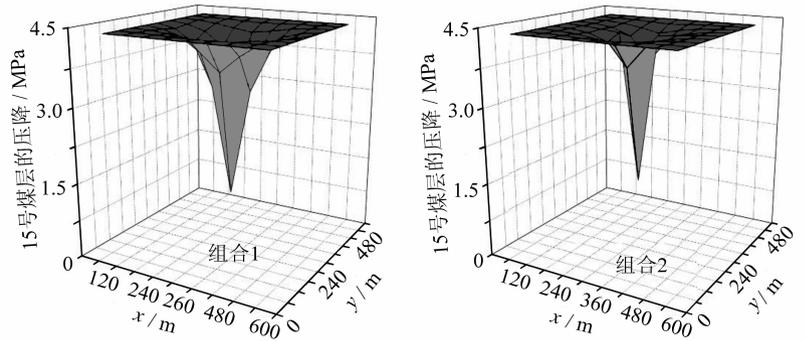


图2 15号煤层的压降漏斗
 Fig. 2 Pressure drop funnel of No. 15 coal seam

图2是组合1和组合2中气井开井生产106 d后15号煤层形成的压降漏斗，可以看出，组合1形成的压降漏斗范围明显大于组合2，因此组合1中将3号和15号煤层与K₂灰岩层联合作为产层方是提高煤层气井产能的最优组合方案。

3 结 语

借鉴现有模型并结合沁水盆地现场实际，建立了煤储层双重介质三维气、水两相耦合流动数学模型并研究了模型的全隐式解法。针对沁水盆地煤层气井，提出了7种产层组合方案，并自行编制程序对上述不同组合方案进行了数值模拟。模拟结果表明：将3号和15号煤层与K₂灰岩层联合作为产层是提高煤层气井产能的最优组合方案。

参考文献：

[1] King G R, Ertekin T, Schwerer F C. Numerical simulation of the transient behavior of coal-seam degasification wells [J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1 (2): 165 ~ 183.
 [2] Guo Xiao, Du Zhimin, Li Shilun. Computer modeling and simulation of coalbed methane reservoir [J]. SPE 84815, 2003, 9: 1 ~ 11.
 [3] 李 允. 油藏模拟 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1999. 87 ~ 98.
 [4] Behie A, Vinsome P K W. Block iterative methods for fully implicit reservoir simulation [J]. SPE Journal, 1982 (10): 658 ~ 668.
 [5] 张烈辉, 李 允, 代艳英. 块预处理正交极小化方法及其在水平井油藏模拟中的应用 [J]. 西南石油学院学报, 1997, 19 (1): 32 ~ 36.