

低渗透煤层气水两相非线性渗流数学模型及计算分析

朱维耀¹, 董焯¹, 宋洪庆¹, 杨焦生², 岳明¹

1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083
2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要 在考虑煤层气解吸和扩散效应及启动压力梯度的基础上, 对低渗透煤层气藏流体输运特性进行分析, 建立了低渗透煤层气水两相非线性渗流数学模型, 推导出非线性渗流阶段气水两相的控制方程组。通过实例计算表明, 液相拟启动压力梯度从 0.001MPa/m 增加至 0.007MPa/m, 煤层产气峰值下降约 15%; 不考虑启动压力梯度时的产气峰值量要比液相拟启动压力梯度为 0.001MPa/m 的产气峰值提升约 7%。因此启动压力梯度的存在阻碍了裂隙中流体的流动, 对煤层气开发影响较大。

关键词 煤层气; 非线性; 数学模型; 拟启动压力梯度

中图分类号 P618.11

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.22.005

A Mathematical Model for Gas-water Two-phase Nonlinear Flow in Low Permeability Coal Reservoirs and Calculation Analysis

ZHU Weiyao¹, DONG He¹, SONG Hongqing¹, YANG Jiaosheng², YUE Ming¹

1. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang Branch Institute, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract The transport behavior of fluids in low permeability coalbed methane reservoirs is analyzed with considerations of the desorption and diffusion effects of the coalbed methane and the threshold pressure gradient. A mathematical model for gas-water two-phase nonlinear flow is established for low permeability coal reservoirs. The governing equations for the gas-water two-phase nonlinear flow are derived. The case study shows that, when the liquid phase threshold pressure gradient is increased from 0.001MPa/m to 0.007MPa/m, the maximum gas production of coal reservoirs is reduced by nearly 15%; compared with the liquid phase threshold pressure gradient of 0.001MPa/m, the maximum gas production without the threshold pressure gradient is increased by nearly 7% and the cumulative gas production also has a certain extent of increase. Therefore the existence of the threshold pressure gradient makes the fluid in fractures more difficult to flow and leads to a low production rate. The case study shows that the mathematical model of the gas-water two-phase nonlinear flow could provide a theoretical basis for defining a reasonable gas-well deliverability of low permeability coal reservoirs.

Keywords coalbed methane; nonlinear; mathematical model; threshold pressure gradient

0 引言

中国煤层气地质储量丰富, 绝大部分分布在沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘^[1]。煤层气以其埋藏浅、开发成本低、且是优质能源和化工原料而日益受到人们重视。

煤层介质是孔隙-裂隙(煤层通常称为割理)双重介质^[2], 对于该类介质, 基质块表面和块内微孔是煤层气的主要存储

空间, 而割理提供主要的流动通道。煤层气的开采为是排水→降压→解吸→扩散→渗流→产出的过程^[3-6], 概括起来, 可分为煤基质孔隙的表面解吸过程, 通过基质和微孔隙扩散到裂隙过程, 通过裂隙向井筒运移产出过程 3 个过程。

对于煤层气通过裂隙向井筒运移这一阶段的渗流规律, 一直存在着争议。本文通过大量的调研统计发现, 对于低渗

收稿日期: 2013-03-08; 修回日期: 2013-05-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金项目(FRF-TP-12-003A); 中国石油科技创新基金项目(2010D50060201)

作者简介: 朱维耀, 教授, 研究方向为渗流力学、流体力学和油气田开发, 电子信箱: weiyao@sina.com

透煤层,这一阶段主要是非线性渗流方式为主。但传统的渗流理论研究多采用数值模拟技术^[7-10],没有建立起考虑煤层气低速非线性渗流特征的煤层气水两相的渗流模型。本文建立了存在启动压力梯度的低渗透煤层气水两相渗流模型^[12],并探讨了不同的拟启动压力梯度对煤层气水产能的影响^[13],对煤层气的开发具有一定的指导作用。

1 煤层气水两相非线性渗流数学模型建立

1.1 基本假设

本模型主要考虑煤层气藏裂隙中甲烷气和水的流动及孔隙中气体的输运,基质中解吸扩散出来的气体,进入孔隙是作为一个质量源流参与渗流。

根据实验基础,考虑工程实际,对问题作必要简化,提出如下假设条件:(1) 基质渗透率各向同性,且无夹层;(2) 气体和水在裂隙中为非达西渗流并考虑启动压力梯度;(3) 不考虑温度影响;(4) 水不能进入基质块中微小的孔隙,孔隙中只有单相气体扩散;(5) 裂隙中气体流动属于低速非达西流动,水相的渗流符合达西定律。

1.2 孔隙中流体的运输

煤层孔隙中只有气体的输运,该输运过程为遵从 Fick 第一扩散定律的拟稳态扩散,认为基质块中气体总浓度 c_m 对时间的变化率与基质块中气体总浓度和吸附浓度的差值成正比^[14],即

$$\frac{dc_m}{dt} = D_m F_s (c_m - c_2) \quad (1)$$

其中, c_2 为基质块中吸附浓度, kg/m^3 ; D_m 为质量扩散系数, m^2/s ; F_s 为基质块形状因子, $1/\text{m}^2$ 。

基质块的解吸量 q_m 等于浓度变化率乘几何因子 ω , 即

$$q_m = -\omega \frac{dc_m}{dt} \quad (2)$$

1.3 裂隙中流体的运输

随着储层压力的下降,气体从基质上解吸出来并通过扩散作用进入到裂隙中,在水中形成气泡并互相连接形成流线,这是气、水两相流阶段。在这个阶段中,气体的相对渗透率从零逐渐增大。裂隙网络中甲烷气和水的运输类型分别为低速非达西流动和达西流动,即压力梯度是渗流流动的驱动力,并认为流动是层流,然后是雾状流,少量水滴悬浮在甲烷气中。

1.3.1 裂隙中气体的输运

按照质量守恒方程的推导过程并用于组分 i 的热运动,有如下连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \phi) + \text{div}(\rho_i \mathbf{v}) + q_m = 0 \quad (3)$$

其中, ρ_i 为组分 i 的密度, kg/m^3 ; ϕ 为孔隙度, 无因次; \mathbf{v} 为速度矢量。

对于裂隙网络中气体的输运,由于基质块中不断有气体

扩散进入裂隙,在连续性方程中这是一个连续源分布。若煤层中某些点有生产井,产量为 Q_i ,则在连续方程中有点汇,于是裂隙中气相质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_i s_{ig} \rho_{ig}) = -\nabla \cdot (\rho_{ig} \mathbf{V}_{ig}) + q_m - \rho_{ig} \sum Q_i \delta(r-r_i) \quad (4)$$

其中, ρ_{ig} 为裂隙中气体的密度, kg/m^3 ; s_{ig} 为裂隙含气饱和度; q_m 是源项; $\rho_{ig} \sum Q_i \delta(r-r_i)$ 是汇项, $\delta(r-r_i)$ 为单位脉冲函数, 无因次。裂隙中气体的速度 \mathbf{V}_{ig} 由两部分组成: 一是宏观渗流速度,遵从达西定律或者低速非达西定律;二是裂隙中气体扩散速度,遵从 Fick 定律,即

$$\mathbf{V}_{ig} = - \left[\frac{K_g}{\mu_g} (\nabla p_{ig} - G_g) + \frac{D_f}{c_f} \nabla c_f \right] \quad (5)$$

其中, D_f 为裂隙中气体扩散系数; c_f 为裂隙中气体浓度; ∇p_{ig} 为裂隙中气体的压力梯度; G_g 为气体拟启动压力梯度; K_g 为裂隙的气测渗透率, m^2 ; μ_g 为气体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在等温情形将 ρ_{ig} 和式 $\nabla c_f / c_f$ 分别用压力 p_i 表示,可推导出裂隙中气相的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi_i s_{ig} p_{ig}}{Z} \right) = \nabla \cdot \left[\frac{p_{ig}}{Z} \frac{K_g}{\mu_g} (\nabla p_{ig} - G_g) + \frac{D_f}{s_{ig}} \nabla \left(\frac{s_{ig} p_{ig}}{Z} \right) \right] + \frac{RT}{M} q_m - \frac{p_{ig}}{Z} \sum Q_i \delta(r-r_i) \quad (6)$$

其中, M 为摩尔质量, g/mol ; R 为理想气体常数, 无因次; T 为气层温度, K ; Z 为地层平均压力下气体的压缩因子, 无因次。

1.3.2 裂隙中水相的输运

对于裂隙网络中水相的输运,水中溶解气忽略不计,水相控制方程可写成:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi_i s_{iw}}{B_w} \right) = \nabla \cdot \left[\frac{K_{fw}}{\mu_w} (\nabla p_{fw} - G_w) \right] - Q_w \sum \delta(r-r_i) \quad (7)$$

其中, B_w 为裂隙中水的体积系数; s_{iw} 为裂隙含水饱和度; p_{fw} 为裂隙中水的压力; $Q_w \sum \delta(r-r_i)$ 为汇项。

未知函数为 p_{ig} , p_{fw} , s_{ig} 和 s_{iw} , 共 4 个。需要补充两个方程,即饱和度方程和毛管力方程:

$$s_{ig} + s_{iw} = 1 \quad (8)$$

$$p_{cig} = p_{ig} - p_{fw} \quad (9)$$

其中,毛管力 p_{cig} 、液相拟启动压力梯度 G_w 和气相拟启动压力梯度 G_g 均为裂隙含水饱和度 s_{iw} 的函数, $G_g = G_w(k, s_{iw})$, 该公式由具体区块拟合所得。

对于单井情形,生产井汇项用内边界条件处理比较方便。裂隙网络中,气、水两相方程(6)和(7)可写成

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi_i s_{ig} p_{ig}}{Z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{p_{ig}}{Z} \frac{K_g}{\mu_g} r \left(\frac{\partial p_{ig}}{\partial r} - G_g \right) + \frac{D_f}{s_{ig}} r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{s_{ig} p_{ig}}{Z} \right) \right] + q_m \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi_i s_{iw}}{B_w} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{K_{fw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_{fw}}{\partial r} - G_w \right) \right] \quad (11)$$

利用有限差分法和外推法求解上述偏微分方程组,得到气相和水相的产能变化规律。

2 实例计算分析

已知国内某低渗透煤层气藏单井,气藏的基本参数如下:标态大气压 0.1MPa,裂隙渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度 0.05,地层压力 10MPa,气藏井底流压 2MPa,气藏小层厚度 5m,泄压半径 1000m,井筒半径 0.1m,气体标态下压缩因子为 1,气体压缩因子 0.89,标态下温度为 293K,地层温度为 396K,标态下气体密度 0.78kg/m^3 ,气体黏度 $0.027 \text{mPa}\cdot\text{s}$,水黏度 $1 \text{mPa}\cdot\text{s}$,气体等温压缩系数 0.01MPa^{-1} ,裂隙中的初始含气饱和度为 0.08,质量扩散系数为 $350 \mu\text{m}^2/\text{s}$,几何因子取 6,球半径 0.0014m。

图 1(a)为不同启动压力梯度下煤层日产气量随时间变化的关系曲线图。图 1(a)表明,初期为排水降压过程,在 90d 左右达到吸附平衡压力,开始有气体产出;随着液相拟启动压力梯度梯度的增加,日产气量增加,且日产气量达到峰值的时间变长,达到峰值后减小的速率也变快。当液相拟启动压力梯度为 0.001MPa/m 时,日产气量在 500d 左右到达峰值,约为 0.97万 m^3 ;当液相拟启动压力梯度为 0.007MPa/m 时,产气量在 750d 左右达到峰值,约为 0.82万 m^3 ,降幅达到 15%。因此,启动压力梯度对煤层气开采影响较大。

图 1(b)为不同启动压力梯度下煤层日产水量随时间变

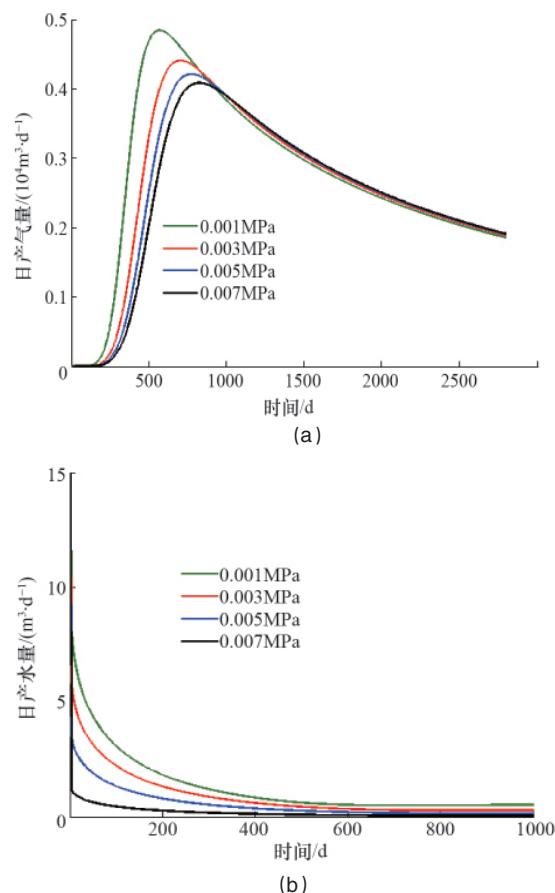
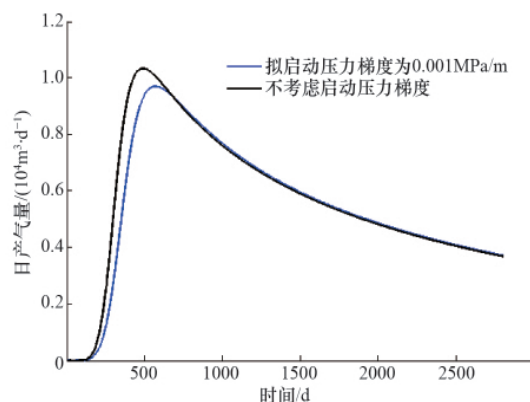


图 1 液相拟启动压力梯度不同时煤层日产气量(a)与日产水量(b)随时间的变化关系

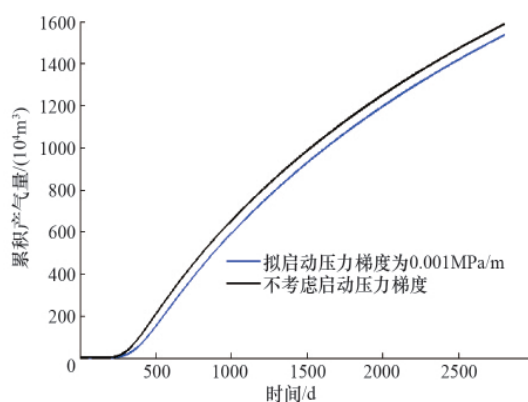
Fig. 1 Comparison of gas (a) and water (b) production under different liquid phase TPG and time

化的关系曲线图。图 1(b)表明,随着时间的增加,煤层日产水量初期降低较快,后期处于平稳阶段;当液相拟启动压力梯度为 0.001MPa/m 时,稳定期产水量约为 0.5m^3 ;当液相拟启动压力梯度为 0.007MPa/m 时,稳定期产水量约为 0.1m^3 ,降幅达到 80%。因此,启动压力梯度对煤层产水量影响很大。

图 2 表明,无论是否考虑启动压力梯度,煤层气的产气量随生产时间的变化趋势是相同的。图 2(a)显示,不考虑启动压力梯度时的日产气峰值约为 1.05万 m^3 ,比液相拟启动压力梯度为 0.001MPa/m 时的产气峰值提升了约 7%;图 2(b)为累积产气量曲线,到达稳产期后,不考虑启动压力梯度的累积产量要比液相拟启动压力梯度为 0.001MPa/m 时的累积产量提升 30万 m^3 左右。可见在低渗透煤藏中,启动压力梯度的存在与否对产能的影响显著。



(a) 日产气量曲线
(a) Curves of daily gas production

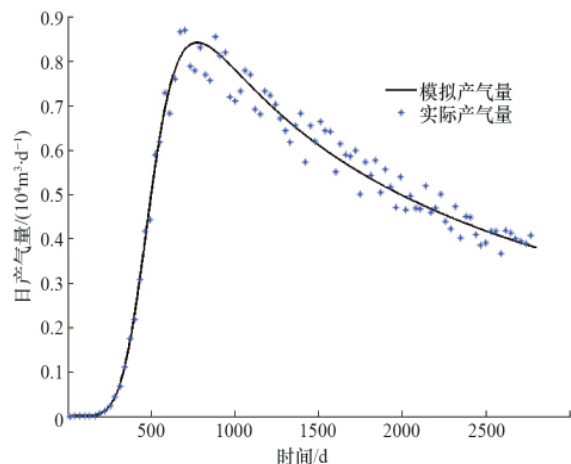


(b) 累积产气量曲线
(b) Curves of cumulative gas production

图 2 考虑启动压力梯度与否的日产气量(a)与累计产气量(b)随时间的变化关系

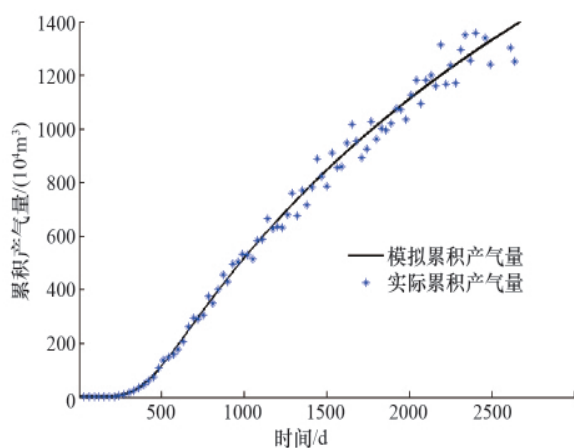
Fig. 2 Comparison of daily production (a) and cumulative production (b) considering TPG or not

图 3 为液相拟启动压力梯度为 0.007MPa/m 时单井模拟产气量与某区块单井实际产气量的拟合图。结果表明,本文的理论模型模拟的日产气量和累积产气量与实际结果较为



(a) 日产气量曲线

(a) Curves of daily gas production



(b) 累积产气量曲线

(b) Curves of cumulative gas production

图3 模拟产量与实际产量对比

Fig. 3 Comparison of simulation production and actual production

符合,满足工程应用精度要求。

3 结论

(1) 依据煤层气低速非线性渗流存在条件,考虑解吸效应,建立存在启动压力梯度的低渗透煤层气水两相渗流数学模型,推导出低渗透煤层气水两相非线性渗流控制方程,并对非线性模型求解方法进行研究。

(2) 对于煤层日产气量,由于初期排水,90d之前没有气产出;90d之后开始产气并出现峰值;峰值过后,随着开采的进行,日产气量逐渐降低,最终趋于稳定;煤层日产水量随着开采的进行逐渐降低并最终趋于稳定。

(3) 开采过程中,煤层气低速非线性渗流特征越明显即拟启动压力梯度越大,煤层气产量上升峰值越小,产量递减也较快。液相拟启动压力梯度从0.001MPa/m增加0.007MPa/m,每次增加0.002MPa/m,煤层产气峰值从 $9.7 \times 10^3 \text{ m}^3$ 降到 $8.2 \times$

10^3 m^3 ,降幅分别为10%,13%,15%,可见拟启动压力梯度增加越多,降幅越大。

参考文献 (References)

- [1] 秦勇,袁亮,程远平.中国煤层气产业战略效益影响因素分析[J].科技导报,2012,30(34):70-75.
Qin Yong, Yuan Liang, Cheng Yuanping, et al. Science & Technology Review, 2012, 30(34): 70-75.
- [2] 蔡强,牛丛丛,刘曰武,等.煤层中双重孔隙介质渗流理论的应用[J].科技导报,2012,30(24):17-22.
Cai Qiang, Niu Congcong, Liu Yuewu, et al. Science & Technology Review, 2012, 30(24): 17-22.
- [3] Li H Y, Ogawa Y, Shimada S. Mechanism of methane flow through sheared coals and its role on methane recovery [J]. Fuel, 2003, 82(10): 1271-1279.
- [4] 李斌.煤层气非平衡吸附的数学模型和数值模拟[J].石油学报,1996,17(4):42-49.
Li Bing. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(4): 42-49.
- [5] 孙平,王勃,孙粉锦,等.中国低煤阶煤层气成藏模式研究[J].石油学报,2009,30(5):648-653.
Sun Ping, Wang Bo, Sun Fengjing, et al. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 648-653.
- [6] 张小东,刘炎昊,桑树勋,等.高煤级煤储层条件下的气体扩散机制[J].中国矿业大学学报,2011,40(1):43-48.
Zhang Xiaodong, Liu Yanhao, Sang Shuxun, et al. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 43-48.
- [7] 王新海,张冬丽,宋岩.低渗非达西渗流煤层气羽状井开发机理研究[J].地质学报,2008,82(10):1437-1443.
Wang Xinhai, Zhang Dongli, Song Yan. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1437-1443.
- [8] 张力,何学秋,李侯全.煤层气渗流方程及数值模拟[J].天然气工业,2002,22(1):22-26.
Zhang Li, He Xueqiu, Li Houquan. Natural Gas Industry, 2002, 22(1): 22-26.
- [9] 王明,朱维耀,刘和,等.低渗透油层压裂五点井网两相流动理论分析[J].北京科技大学学报,2009,31(12):1511-1515.
Wang Ming, Zhu Weiyao, Liu He, et al. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(12): 1511-1515.
- [10] Wei Z J, Zhang D X. Coupled fluid-flow and geomechanics for triple-porosity/dual-permeability modeling [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(8): 1242-1253.
- [11] 韦重涛,姜波,傅雪海,等.宿南向斜煤层气地质演化史数值模拟研究[J].石油学报,2007,28(1):54-57.
Wei Chongtao, Jiang Bo, Fu Xuehai, et al. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 54-57.
- [12] 朱维耀,宋洪庆,何东博,等.含水低渗气藏低速非达西渗流数学模型及产能方程研究[J].天然气地球科学,2008,19(5):685-689.
Zhu Weiyao, Song Hongqing, He Dongbo, et al. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(5): 685-689.
- [13] 杜志敏,付玉,伍勇.低渗透煤层气产能影响因素评价[J].石油与天然气地质,2007,28(4):516-519.
Du Zhimin, Fu Yu, Wu Yong. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 516-519.
- [14] 孔祥言.高等渗流力学[M].2版.合肥:中国科学技术大学出版社,2010:511-513.
Kong Xiangyan. Advanced mechanic of fluids in porous media [M]. 2nd ed. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010: 511-513.

(责任编辑 刘志远)