

# Productivity Study of Non-Darcy Flow in Low-Permeability Coalbed Methane Reservoir

Hongqing Song<sup>1</sup>, Weiyao Zhu<sup>1</sup>, Xiaohe Huang<sup>1</sup>, Ming Yue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Civil & Environment Engineering School University of Science and Technology Beijing, Beijing, China

Email: songhongqing@yahoo.com.cn

**Abstract:** Due to tightness and high water saturation, flow in coalbed methane reservoir, quite different from Darcy flow, indicates characteristics of low-velocity non-Darcy flow, for which a model was established and corresponding productivity equation was derived. Numerical simulation shows that threshold pressure gradient (TPG) has a significant effect on methane recovery in high water saturated low-permeability reservoir. The greater the threshold pressure gradient, the fewer the methane production. Consequently, ignoring effect of threshold pressure gradient would result in deviation of prediction of single well production.

**Keywords:** low permeability; coalbed methane (CBM); low-velocity non-Darcy flow; threshold pressure gradient (TPG); productivity equation

## 低渗透煤层气井低速非达西渗流产能研究

宋洪庆<sup>1</sup>, 朱维耀<sup>1</sup>, 黄小荷<sup>1</sup>, 岳明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京科技大学土木与环境工程学院, 北京, 中国, 100083

Email: songhongqing@yahoo.com.cn

**摘要:** 煤层气储层普遍致密且含水饱和度较高, 降压解吸、扩散后, 渗流呈现低速非达西流动特征, 因此, 建立了低渗透煤层气井低速非达西渗流模型, 推导出该条件下的产能方程。计算分析表明: 启动压力梯度对高含水、低渗透储层内甲烷开采具有很大的影响, 启动压力梯度越大, 气井产量越小, 忽略启动压力梯度的影响, 将对单井产能预测产生较大偏差。

**关键词:** 低渗透; 煤层气; 低速非达西渗流; 启动压力梯度; 产能方程

### 1 引言

我国煤层气地质赋存条件复杂, 孔隙喉道狭窄, 普遍渗透率低甚至特低, 且含水饱和度较高, 孔隙表面水膜的运移和喉道处水膜水的堵塞变形, 使得煤层气经过降压解吸、扩散后, 要克服启动压力梯度才能流动, 即低速非达西渗流, 导致单井产量低, 同时再考虑气体流动滑脱效应的影响<sup>[1]</sup>, 因此传统的产能方程不能准确反映流体流动规律。虽然国内外一些学者对其进行了实验和理论探讨, 但都未考虑启动压力梯度的影响, 不能够简便、准确的指导工程实践<sup>[2-4]</sup>。

笔者通过煤层气开采流动特征分析, 建立了非达西基本渗流数学模型, 推导出这种情况下的产能方程, 对产能影响进行了分析, 从而为煤层气合理高效开发提供理论基础。

中国石油科技创新基金项目(2010D50060201), 国家科技重大专项课题(2008ZX05016-001)联合资助

### 2 低渗透煤层气井低速非达西渗流模型

#### 2.1 煤层气解吸、扩散机理描述

煤层气在含水条件下致密煤层的流动包括三个过程: 甲烷从煤表面解吸; 甲烷通过煤基质和微孔隙的扩散; 甲烷在割理系统的低速非达西渗流。

##### 2.1.1 解吸过程

煤层气从煤表面解吸过程利用兰格缪尔等温吸附方程描述, 表达式为<sup>[5]</sup>:

$$V = V_m \frac{bp}{1+bp}$$

式中:  $V$  为压力  $p$  下的单位质量固体吸附气体体积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $V_m$  为吸附常数, 即单位质量固体最大单层吸附量,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $b$  为兰格缪尔压力常数;  $p$  为气体压力,  $\text{MPa}$ 。

### 2.1.2 扩散过程

甲烷从煤基质和微孔隙中的扩散遵循 Fick 定律，表达式为<sup>[6]</sup>：

$$J = -D \frac{\partial X}{\partial n}$$

式中：J 为扩散速度， $m^3/(m^2 \cdot d)$ ；X 为煤层气含量， $m^3/m^3$ ；D 是煤层气扩散系数， $m^2/d$ ；n 为法线方向的扩散距离，m。

$$Q = \frac{V_m}{\tau} (V_e - V_i)$$

式中：Q 为从基质中流出的甲烷流量， $m^3/d$ ； $V_m$  为基质体积， $m^3$ ； $V_i$  为基质/割理面的甲烷体积浓度， $m^3/m^3$ ； $V_e$  为兰格缪尔公式计算的含气量， $m^3/m^3$ ； $\tau$  为吸附时间，d。

公式中： $\frac{dV_i}{dt} = -\frac{1}{\tau} (V_i - V_e)$

$$\tau = \frac{S^2}{8\pi D_i} = \frac{1}{D_i a}$$

式中：S 为割理间距，即煤块尺寸。

### 2.2 煤层气低速非达西渗流数学模型

考虑煤层气流动需要克服启动压力梯度，受滑脱效应影响，给出描述煤层气真实的低速非达西流动全过程的数学模型如下<sup>[7]</sup>：

(1) 连续性方程：

根据物质守恒定律，质量守恒方程为  
气相

$$-\nabla \cdot (\rho_g V_g) + q_g = \frac{\partial(\phi \rho_g S_g)}{\partial t}$$

水相

$$-\nabla \cdot (\rho_w V_w) + q_w = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w)}{\partial t}$$

(2) 运动方程：

在运动方程中，气相和液相只考虑启动压力梯度的影响即可，方程表示为：

气相

$$V_g = -\frac{K \left(1 + \frac{b}{\bar{p}}\right) K_{rg}}{\mu_g} (\nabla p_g - g \rho_g \nabla D - \lambda_g)$$

克氏系数表达式为  $b = \alpha \left(\frac{K}{1 - S_{wi}}\right)^{-\beta}$

水相

$$V_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w} (\nabla p_w - g \rho_w \nabla D - \lambda_w)$$

(3) 特殊辅助方程：

饱和度方程  $S_w + S_g = 1$

两相流动时液相启动压力梯度

$$\lambda_w = \lambda_w(K, S_w)$$

两相流动时气相启动压力梯度

$$\lambda_g = \lambda_w S_w^m$$

(4) 控制方程

将运动方程和辅助方程代入气体连续性方程得控制方程为：

$$\nabla \cdot \left[ \frac{K \left(1 + \frac{\alpha}{\bar{p}} \left(\frac{K}{1 - S_{wi}}\right)^{-\beta}\right)}{B_g \mu_g} (\nabla p_g - g \rho_g \nabla D - \lambda \cdot S_{nd}^m) \right] + \frac{q_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial(\phi(1 - S_{nd}))}{\partial t}$$

上式是低渗透砂岩气藏考虑滑脱效应和启动压力梯度的非达西数学模型的渗流微分控制方程。

### 2.3 煤层气低速非达西渗流产能方程

由气体状态方程  $PV = nZRT$  和方程  $V = M/\rho$  得到：

$$\frac{R}{M} = \frac{P_{sc}}{\rho_{gsc} T_{sc} Z_{sc}} \quad (\text{通常 } Z_{sc} = 1) \quad (1)$$

$$V_{sc} = \frac{Z_{sc} RT_{sc}}{P_{sc}} \quad (2)$$

则气体在气藏中流动的质量通量为：

$$F = \rho_{gsc} V_{sc} = ApV = -2\pi rh \frac{PM}{RTZ} \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (3)$$

令  $m(p) = \int_{p_m}^p \frac{2p}{\mu Z} dp$ ，其中  $p_m$  为任一参考压力

将该式两边同时对 r 微分得：

$$\frac{dm}{dr} = \frac{2p}{\mu Z} \frac{dp}{dr} \quad (4)$$

再将式(1)、(2)、(4)代入式(3)得到：

$$\frac{P_{sc} Q_{sc} T}{T_{sc}} \frac{dr}{r} = \pi Kh dm \quad (5)$$

将式(5)积分整理得：

$$Q_{sc} = \frac{T_{sc}}{P_{sc} T} \frac{\pi Kh (m_e - m_f)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} = \frac{T_{sc}}{P_{sc} TZ} \frac{\pi Kh (p_e^2 - p_f^2)}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (6)$$

已知既考虑启动压力梯度又考虑滑脱效应的运动方程

$$v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - \lambda_g\right) \left(1 + \frac{b}{\bar{p}}\right)$$

$v = -\frac{K}{\mu} \left( \frac{dp}{dr} - \lambda_g \right) \left( 1 + \frac{b}{p} \right)$ 。设函数

$\dot{p} = (p - \lambda_g r) \left( 1 + \frac{b}{p} \right)$ ，将该式两边微分得

$\left( \frac{dp}{dr} - \lambda_g \right) \left( 1 + \frac{b}{p} \right) = \frac{dp}{dr}$ ，则原非达西方程变为拟达

西流动方程，得到含启动压力梯度和滑脱效应的产能方程为：

$$Q_{sc} = \frac{T_{sc}}{P_{sc}TZ} \frac{\pi Kh \left[ (p_e - \lambda_g r_e)^2 - (p_f - \lambda_g r_w)^2 \right] \left( 1 + \frac{b}{p} \right)}{\mu \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right)} \quad (7)$$

### 3 产能影响分析

采用以下数据试算，进行理论分析：煤层孔隙度 0.01；煤层厚度 3m；绝对渗透率 0.2md；原始含水饱和度 0.92；兰格缪尔吸附常数 41cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>；兰格缪尔压力常数 0.5MPa；煤基质原始气体体积浓度 37 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>；气相粘度 0.027mPa·s；煤层温度 304K；泄压半径 400m；煤层原始压力 4MPa；生产井半径 0.1m。

#### 3.1 启动压力梯度影响

图 1 是启动压力梯度不同时气井产量和压差的变化关系，由图 1 可知，气井产量随压差的增大而增大。启动压力梯度越大，气井产量越小。在启动压力梯度为 0.001MPa/m 时，气井产量明显比无启动压力梯度时要小，说明启动压力梯度对气井产量影响很大。

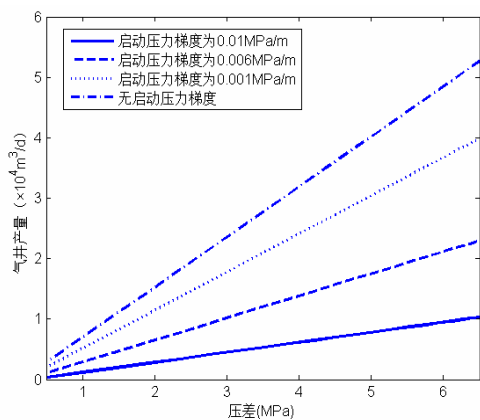


Figure 1. Curve: gas production rate versus pressure with different threshold pressure gradient

图 1. 启动压力梯度不同气井产量随压差的变化

#### 3.2 滑脱效应影响

图 2 是不同流态气井产量变化，由图 2 可以看出，考虑滑脱效应流动时气井产量比达西流动时要大，考虑启动压力梯度流动时气井产量比达西流动要小。考虑滑脱效应流动对气井产量的影响较小，考虑启动压力梯度对气井产量影响大。

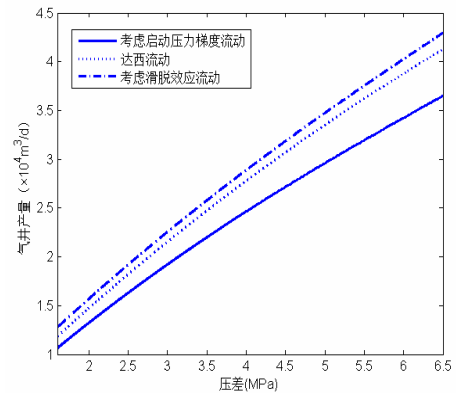


Figure 2. Curve: gas production rate versus pressure in different flow regime

图 2. 不同流态气井产量变化

### 4 结论

(1) 依据高含水、低渗透基质渗流特征，指出煤层气开采是降压解吸、扩散、低速非达西渗流的物理本质。

(2) 基于低速非达西渗流理论，建立了低渗透煤层气井微分渗流数学模型，推导出低速非达西渗流产能方程。

(3) 计算分析表明：启动压力梯度对高含水、低渗透储层内甲烷开采具有很大的影响，启动压力梯度越大，气井产量越小，这也能够解释为什么我国煤层气开采单井产量低的主要原因。

#### 符号说明：

$\rho_g$  为气相密度，kg / m<sup>3</sup>； $\rho_w$ ， $\rho_{gsc}$ ， $\rho_{wsc}$  分别为液相的密度，标准状态态下气相密度，标准状态态下液相密度，kg / m<sup>3</sup>； $V_g$ ， $V_w$ ， $V_{sc}$  分别为气相的渗流速度，液相的渗流速度，标准状态态下气相渗流速度，m / s； $q_g$ ， $q_w$ ， $Q_{sc}$  分别为标准状况下气体产量，标准状况下液相产量，标态渗流流量，m<sup>3</sup>； $S_g$ ， $S_w$ ， $S_{wi}$  分别为含气饱和度，含水饱和度，束缚

水饱和度, 小数;  $p_g$ ,  $p_w$ ,  $\bar{p}$ ,  $p_e$ ,  $p_f$  分别为气相压力, 液相压力, 储层平均压力, 边界压力, 井底流压,  $MPa$ ;  $P_{sc}$  为标准状态下气相压强,  $MPa / m^2$ ;  $K$  为绝对渗透率,  $md$ ;  $K_{rg}$ ,  $K_{rw}$  分别为气相相对渗透率, 液相相对渗透率, 小数;  $\mu_g$ ,  $\mu_w$ ,  $\mu$  分别为气相的粘度, 液相的粘度, 流体粘度  $mPa \cdot s$ ;  $\lambda_g$ ,  $\lambda_w$  分别为两相流动时气相启动压力梯度和液相启动压力梯度,  $MPa / m$ ;  $B_g$ ,  $B_w$  分别为气相体积系数和液相体积系数, 小数;  $T$ ,  $T_{sc}$  分别为储层温度和标准状态下温度,  $K$ ;  $Z_{sc}$  为标准状态下压缩因子, 无量纲;  $r_e$  为泄压半径,  $m$ ;  $r_w$  为井筒半径,  $m$ ;  $h$  为煤层气储层厚度,  $m$ ;  $D$  为海拔深度,  $m$ ;  $\lambda$  为气体分子平均自由程,  $m$ ;  $r$  为孔喉平均半径,  $m$ ;  $C$  为比例因子, 无量纲;  $b$  为气体滑脱因子,  $MPa$ ;  $m$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  为方程系数。

## References (参考文献)

- [1] Guo Hongyu, Su Xianbo, An experimental measurement of the threshold pressure gradient of coal reservoirs and its significance. [J], *Natural Gas Industry*, 2010, 30(6), P52-54. (Ch).  
郭红玉, 苏现波, 煤储层启动压力梯度的实验测定及意义[J], *天然气工业*, 2010, 30(6), P52-54.
- [2] Wang Zhi-ming, LI Xiaoyi, Zhang Jian, Numerical Simulation of Vertical Well for Low-permeability Coal Seam Gas Reservoirs [J], *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(3), P144-147. (Ch).  
汪志明, 李晓益, 张健, 低渗透煤层气藏直井开采数值模拟研究[J], *石油天然气学报*, 2009, 31(3), P144-147.
- [3] Zeng Qiming, Cui Hongqing, Establishment of coal seam gas reservoir model and application [J], *Journal of Liaoning Technical University*, 2007, (S2), P140-142. (Ch).  
郑启明, 崔洪庆, 煤层气储层模型的建立及其应用, *辽宁工程技术大学学报*, 2007, (S2), P140-142.
- [4] Xie Xiaojia, Zhang Yu, YI Jun Development status quo and trends of methane seepage model [J], *China Mining Magazine*, 2008, (10), P79-81. (Ch).  
谢晓佳, 张瑜, 易俊, 煤层气渗流模型发展现状及其趋势[J], *中国矿业*, 2008, (10), P79-81.
- [5] Wu Xiaodong, Wang Guoqiang, Li Anqi et al. PRODUCTIVITY PREDICTION OF COAL-BED GAS WELLS [J], *Natural Gas Industry*, 2004, (08), P82-84. (Ch).  
吴晓东, 王国强, 李安启, 王欣, 煤层气井产能预测研究[J], *天然气工业*, 2004, (08), P82-84.
- [6] Zhou Shiling, Lin Baiquan, The theory of gas flow and storage in coal seams [M], Beijing: China Industry Publishing House, 1999. 123. (Ch).  
周世宁, 林柏泉, 煤层瓦斯赋存与流动理论 [M], 北京: 煤炭工业出版社, 1999. 123.
- [7] Zhu Weiyao, Song Hongqing, He Dongbo et al, Low-velocity Non-Darcy Gas Seepage Model and Productivity Equations of Low-permeability Water-bearing Gas Reservoirs [J], *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(5), P685-689. (Ch).  
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), P685-689.