

# 一种孔隙裂隙网络模型及页岩气渗流模拟<sup>\*</sup>

邓世冠<sup>1</sup>, 鲁力<sup>2</sup>, 刘海娇<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1</sup>, 鲁晓兵<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国矿业大学 理学院 北京 100083)

**摘 要:** 致密油气藏的开采是我国未来能源的主要来源, 这种油气藏的低渗和特低渗特点是开采的关键问题之一。为了模拟含孔隙裂隙的致密油气藏中的低渗和特低渗问题, 本文首先建立了适于致密岩土介质中渗流模拟的准静态孔隙裂隙双重网络模型, 然后分析了一些渗流特性如滑脱效应, 并以页岩气开采为例进行了渗流及产量特征模拟。所建模型中较大的孔隙裂隙中的流动采用 Poiseuille 流, 小的孔隙裂隙中的流动采用 Forchheimer 方程描述。模型中建立了根据孔隙网络计算结果得到宏观渗流参数如含水饱和度、绝对渗透率等参数的方法。通过计算获得了页岩气开采过程中“剩余储量—压力曲线”、“流量—时间”曲线。结果表明, 游离气储量的下降和压力梯度有关, 以及在不吸附气快速解析时, 产量呈指数快速下降的结论。

**关键词:** 致密岩土; 孔隙裂隙网络; 页岩气

中图分类号: OTE327

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)增1-0076-04

## Pore-Fractal Network Model for Compacted Geomaterials and Simulation of Shale Gas Seepage

Deng Shiguan<sup>1</sup>, Lu Li<sup>2</sup>, Liu Haijiao<sup>1</sup>, Zhang Xuhui<sup>1</sup>, Lu Xiaobing<sup>1</sup>

(1. Institutes of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 P. R. China; 2. School of Science, P. R. China University of Mining & Technology, Beijing 100083 P. R. China)

**Abstract:** Tight oil/gas reservoir is the main resource of future energy in our country. One of the key problems of this kind of reservoir is its low or ultra-low permeability. To simulate the seepage characteristics of low or ultra-low permeable reservoir, quasi-static pore-fractal network which could be used in simulation of seepage in tight oil/gas reservoir was first presented in this paper. Then some seepage characteristics such as slippage effect were simulated and compared with those from theoretical formula. Meanwhile, the production of shale gas was simulated by the presented network. In this network, the seepage in large pores, throats and fractures was assumed to be described by Poiseuille flow. Forchheimer equation was used to describe the flow in small pores, throats and fractures. The method to obtain the macro-seepage parameters such as water saturation and absolute permeability by using the results of network simulation was given too. Through simulation, curves of remaining reserve-pressure and flow rate-time curves during product of shale gas was analyzed. It is shown that the decrease of free gas reserve is related with the gradient of pressure and the product decreases very fast if there is no fast resolution of absorbed gas.

**Key words:** compacted geomaterial; pore-fractal network; shale gas

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-01-01(修改稿)

作者简介: 邓世冠(1988-) 男, 重庆人, 硕士生, 主要从事岩土工程、油藏物理方面的科研工作。

E-mail: xblu@imech.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11272314); 中石油项目

## 1 引言

在常规油气藏供需紧张的客观背景下,非常规油气藏被视为能源界未来的主力军。2006 年 Holditch<sup>[1]</sup>“资源三角形”中对页岩气这类非常规能源做出了比较直观的描述:储量极大、开发难度高、需要先进的技术来支持勘探开发。

2010 年美国的天然气年总产量为  $6.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,其中非常规天然气总量达到  $3.616 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,占到了天然气年总产量的近 60%<sup>[2]</sup>。我国盆地众多,类型多样,同样拥有极为丰富的非常规油气资源<sup>[3]</sup>。我国页岩气可采资源量为  $1.5 \times 10^{13} \sim 1.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$ <sup>[4]</sup>。页岩气等非常规油气藏储层的孔隙结构尺度极低:Javadpour<sup>[5]</sup>认为页岩喉道大小在 0 ~ 1 000 nm 之间。Ambrose<sup>[6]</sup>也得出许多页岩都含有小于 3 nm 喉道的结论。这样微小尺度的孔隙喉道难以形成有效的页岩气渗流通道。页岩气的渗流主要依赖于储层中天然发育的微裂隙以及开采时的人工压裂裂隙。微裂隙是页岩气储层中天然发育裂隙的主要存在形式<sup>[7]</sup>。同时它们对页岩气的开采起到了至关重要的作用,主要体现在:首先微裂隙作为页岩的主要储集空间<sup>[8]</sup>,影响着气藏的富集程度,页岩孔隙与微裂隙越发育,气藏富集度越高;其次微裂隙能够在很大程度上提高泥页岩的渗流能力,为页岩气从基岩孔隙进入井孔提供必要的运移通道<sup>[9]</sup>。

孔隙网络模型是采用理想化的网络代替复杂的孔隙介质内的孔隙空间,基于统计物理中逾渗理论的基本思路以及孔隙介质中的微观渗流物理机制,通过微观水平的具有蒙特卡罗性质的随机模拟来研究孔隙介质中的渗流及驱替规律<sup>[10~13]</sup>。通过赋予孔隙网络模型不同统计微观结构参数,可以模拟不同实际孔隙结构的毛管压力和相对渗透率随饱和度的变化,并可以获得不同微观结构的相对渗透率曲线。

为了研究致密油气藏渗流特性,本文首先建立适于致密低渗油气藏的裂隙和孔隙网络模型;然后以页岩气藏为例,利用建立的网络模型进行渗流特性、滑脱效应等模拟,考察页岩气在孔隙裂隙双重介质中的渗流特点。

## 2 孔隙裂隙网络模型建立

### 2.1 微观渗流机制

假设油气在圆柱管道的流动符合 Poiseuille

流,这样单相流体流动公式如下:

$$q_{ij} = -\frac{r_{ij}^2}{8\mu_{ij}L_{ij}}(p_j - p_i) \quad (1)$$

两相单界面流动公式:

$$q_{ij} = -\frac{r_{ij}^2}{8\mu_{ij}L_{ij}}(p_j - p_i - p_c) \quad (2)$$

两相多界面流动公式:

$$q_{ij} = -\frac{r_{ij}^2}{8\mu_{ij}L_{ij}}(p_j - p_i - p_c) \times 10^{-5} \quad (3)$$

$$p_c = \pm \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (4)$$

式中: $q_{ij}$ 为流体通过截面单位面积的通量, $p_i$ 和 $p_j$ 分别为节点*i*和*j*的流体压力, $\mu_{ij}$ 为流体的动力粘滞系数, $r_{ij}$ 是喉道半径, $\rho_{ij}$ 为流体的密度, $L_{ij}$ 为单根管道内的不同流体间的界面, $L_{ij}$ 为管道的长度, $p_c$ 为毛管力, $\sigma$ 为表面张力, $\theta$ 为润湿角。引入多界面公式的目的是消除建立流量矩阵与压力矩阵运算时的奇异性,即避免了矩阵不能分解,又保证精度。

### 2.2 孔隙裂隙网络构架

准静态孔隙裂隙网络模型的网络由基本单元:孔隙-喉道单元和裂隙单元构成。用 4 个代表孔隙的小球体和 4 根代表喉道的圆柱形管道组成孔隙-喉道基本单元;裂隙单元由圆柱形管道(尺度大于喉道,至少有两个喉道单元长)构成(图 1)。

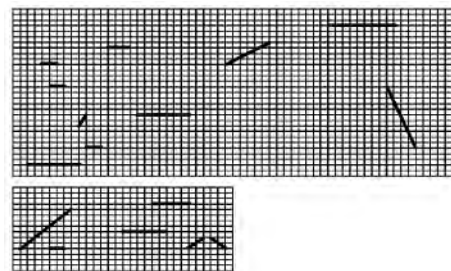


图 1 不同规模的网络模型

Fig. 1 Network model in different scale

### 2.3 宏观参数的计算方法

每一阶段的水饱和度  $S_{wk}$  为含水的喉道与孔穴体积之和除以孔隙总体积,即:

$$S_{wk} = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^{mk} \pi r_i^2 l + \sum_{j=1}^{nk} \frac{4}{3} \pi r_i^3}{\sum_{i=1}^m \pi r_i^2 l + \sum_{j=1}^n \frac{4}{3} \pi r_i^3} \right] \quad (5)$$

式中: $mk$ 为含水的喉道数, $nk$ 为含水的空穴数, $m$ 为喉道总数, $n$ 为空穴总数。

根据绝对渗透率  $K$  的定义可得:

$$K = \frac{Q\mu L}{\Delta P_i \cdot A} \quad (6)$$

式中:  $Q$  为流经网络的流量  $\mu$  为液体的粘度  $L$  为网络长度, 为网络两边压强差  $A$  为网络横截面积。

驱油效率是指驱替出的原油占驱替范围内原油含量的百分数。在该孔隙裂隙网络模型中, 使用下式来计算驱油效率  $E_d$ :

$$E_d = \frac{1 - S_{wi} - S_{or}}{1 - S_{wi}} \quad (7)$$

式中:  $S_{wi}$  为束缚水饱和度  $S_{or}$  为模型某时刻下的含油饱和度。

## 2.4 页岩中滑脱效应和渗流特性模拟

页岩气产出时在粒间孔隙和裂隙之间的为滑脱流动。页岩气藏的产出流动是一个多尺度的复杂流动过程。页岩气系统的孔隙结构由非有机质, 有机质, 天然裂隙和水力压裂裂隙四种孔隙介质组成。页岩气的流动机理则主要包括解吸、扩散、滑脱、达西流动。将渗流机制和孔隙结构对应起来具体为: 解吸发生于纳米级孔隙壁上; 而扩散发生于干酪根、粘土、纳米级孔隙中; 滑脱发生于颗粒间孔隙中; 达西流动发生于颗粒间孔隙、大孔隙、裂隙中; 本节主要针对滑脱效应这个问题进行分析。

高速下惯性项的作用, 使得流量与压降的关系出现非线性, 一般用 Forchheimer 方程描述。即:

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K}V + \rho\beta V^2 \quad (8)$$

式中:  $p$  为流体压力  $K$  为渗透系数  $V$  为流体流速。

在页岩中气体的低速渗流也表现为非达西渗流的特征。这是由于气体分子的运动以及致密岩石中孔隙喉道过于狭小所致。这种情况下气体的渗透率  $K_g$  不再为常数, 而与多孔介质中的平均压力有关, 可用 Klinkenberg 效应来描述:

$$K_g = K_0 \left( 1 + \frac{b}{P_a} \right) \quad (9)$$

式中:  $K_0$  为绝对渗透率  $b$  为滑脱系数, 与气体分子平均自由程, 平均孔隙半径和平均压力有关  $P_a$  为平均压力。

滑脱流动不完全为连续流动, 紧挨固体表面的一层气体不再静止不动, 而是具有一定的切向速度。把这一具有切向速度的一流动层称为滑脱层。

当气体分子运动的平均自由程和毛细管半径相当时, 气体的流动服从 Knudsen 公式, 流量表示为与平均压力  $p$  有关的函数, 即:

$$q_s = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{r^3}{l} \frac{\Delta p}{p} \quad (10)$$

式中:  $r$  为毛管半径  $l$  为毛管长度  $M$  为分子量  $R$  为气体常数。分子运动的平均自由程为:

$$\bar{\lambda} = \frac{2\eta}{p} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (11)$$

式中:  $\eta$  为气体粘度系数。

要使得网络模型能够适应低压力低流速低孔径的流动, 可用 Aduzmi 提出的理论, 即采用 Poiseuille 式和 Knudsen 式叠加的形式来计算流量, 即:

$$q = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu l} + \varepsilon \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{r^3 \Delta p}{lp} \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon$  为 Aduzmi 系数, 通过实验认为  $\varepsilon$  可取 0.9。

## 2.5 滑脱效应的验证

以某储层天然页岩的孔隙结构为参考, 本研究通过孔隙裂隙网络模型模拟得到了页岩中气体渗透率和平均压力倒数的关系如图 2 所示。渗透率和平均压力倒数符合线性关系, 与式 (9) 一致。因此孔隙裂隙网络模型很好地印证了气体渗流的滑脱效应。

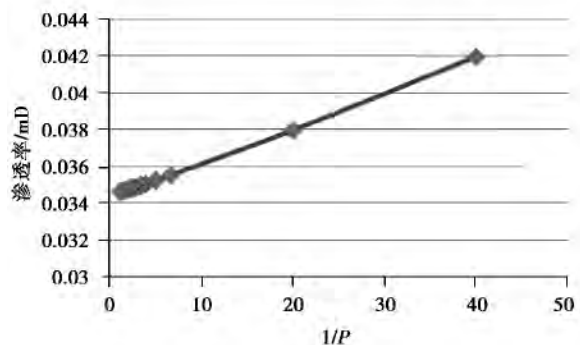


图 2 渗透率和压力倒数关系曲线

Fig. 2 Permeability vs reciprocal of pressure curve

## 2.6 页岩气开采过程模拟

页岩气开采过程可简单描述如下: 对页岩气藏进行钻井、人工压裂, 气藏中的游离气开始达西流动产出; 此时地层压力下降, 页岩气藏纳米级孔隙中的吸附气开始通过解吸、扩散、滑脱、达西流动而进入大孔隙、人工压裂隙、钻井中而采出。

若用孔隙裂隙网络模型来模拟页岩气的采出过程, 则应该固定三个边界, 放松一个边界作为主动压降边界 (也是产出边界)。同时把孔隙看成源, 当孔隙压力下降时, 孔隙中会有解吸附的页岩

气流出。即整个网络模型是一个有源流动。

模型模拟得到的  $V_r-P$  曲线经过无因次化后如图 3 所示。从图 3 中看到, 剩余游离气量随地层压力降低线性减小。剩余吸附气量随地层压力减小呈指数降低, 整个网络吸附气储量下降的规律符合 Langmuir 方程。结果说明利用孔隙裂隙网络模型计算得到的结果与王南等<sup>[14]</sup>得到的页岩气的开采过程结果吻合较好。

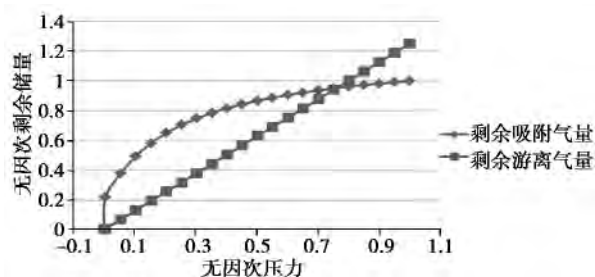


图3 模拟的压力-剩余吸附气、游离气储量

Fig.3 Pressure versus residual adsorbed and free gas

网络模型模拟得到的“流量、累积总产量和开采时间关系图”经无因次化后如图 4 所示。可以看到, 流量呈指数下降, 累计气量有开始快速增加到一个稳定的值。网络模型得到的  $Q-t$  曲线符合 ARPS 递减曲线趋势, 该结果在趋势上能够和实际相符合。

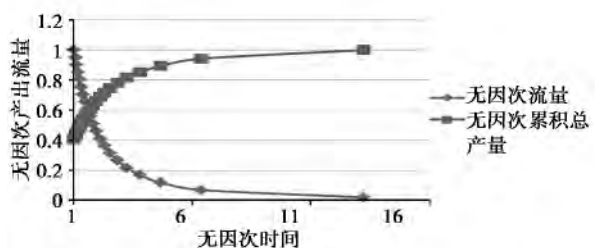


图4 产出流量和开采时间关系曲线

Fig.4 Product gas flow vs accumulated product gas curve

### 3 结 论

针对致密岩土介质微观渗流提出了孔隙裂隙网络模型并以也掩体为例进行了分析, 得到了如下的结论:

(1) 提出了适应致密介质低压力低速的网络模型, 利用 VC++ 语言编制了相应的软件。

(2) 利用编制的软件分析了致密岩石中气体渗流的滑脱效应。结果表明, 渗透率和平均压力倒

数符合线性关系。

(3) 利用编制的软件分析得到了页岩气开采过程中“剩余储量—压力曲线”、“流量—时间”曲线。得到了游离气储量的下降规律和下降压力梯度有关, 以及在无吸附气快速解析时, 产量呈指数快速下降的结论。

### 参考文献(References)

- [1] S. A. Holditch. Tight gas sands [J]. SPEJ, 2006(1): 86-93.
- [2] 邓世冠. 双重介质孔隙裂隙网络模型模拟及其渗流机理实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [3] 李玉喜, 张金川. 我国非常规油气资源类型和潜力 [J]. 国际石油经济, 2011(3): 61-67.
- [4] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-135.
- [5] F. Javadpour. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks [J]. Journal of Canadian Petrol, 2009, 48(8): 16-21.
- [6] R. J. Ambrose. Critical factors in shale gas performance and production [Z]. 2011.
- [7] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
- [8] 韩建斌. 页岩气藏中孔裂隙特征及其作用 [J]. 内蒙古石油化工, 2011(2): 147-148.
- [9] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述 [J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 308-317.
- [10] 张旭辉, 鲁晓兵. 基于孔隙网络模型的微小喉道对岩芯驱油特征的影响分析 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(论文集): 207-210.
- [11] 郑委, 鲁晓兵, 刘庆杰, 等. 基于双重逾渗模型的裂隙多孔介质连通性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1289-1296.
- [12] Fatt I. The network model of porous media II. Dynamic properties of a single size tube network [J]. Trans AIME 1956, 207: 160-163.
- [13] Fatt I. The network model of porous media III. Dynamic properties of networks with tube radius distribution [J]. Trans AIME 1956, 207: 164-181.
- [14] 王南, 钟太贤, 刘兴元, 等. 复杂条件下页岩气藏生产特征及规律 [J]. 断块油气田, 2012, 19(6): 767-770.