

# 基于双重介质模型的页岩气解吸附、渗流机理与数值模拟

冯雪磊

中科院地质与地球物理研究所，北京

页岩气的勘探开发对能源系统产生了重大的影响。页岩气的大规模开采得益于水力压裂产生网状裂缝技术的成功实施。页岩气在储层中流动机理表现为气体从基质微纳孔隙解吸附、滑移、扩散到裂缝中渗流过程，页岩藏产量和产气速率的重要表征是气体流动过程中基质和裂缝的渗透率和孔隙率的动态变化。本文研究水力压裂完成后储层基质气体解吸附到多级裂缝系统中流动机理，模拟分析基质和裂缝双重介质的渗透率、孔隙率的动态变化，对于页岩气产气速率的预测有借鉴意义。

页岩气在基质微纳空隙中出现滑移、扩散等流动时，相比于基质初始渗透率 ( $10^{-18}m^2$ ) 和孔隙率 (0.05) 升高。基质骨架颗粒收缩，孔隙通道连通性变好，渗透率和孔隙率增加。如图3、4所示，考虑基质收缩后模型的数值明显高于Kblinberg模型和Beskok模型。模型中渗透率和孔隙率变化对于基质中、小孔 (<50nm) 比较敏感。孔径增大使得渗透率和孔隙率降低。

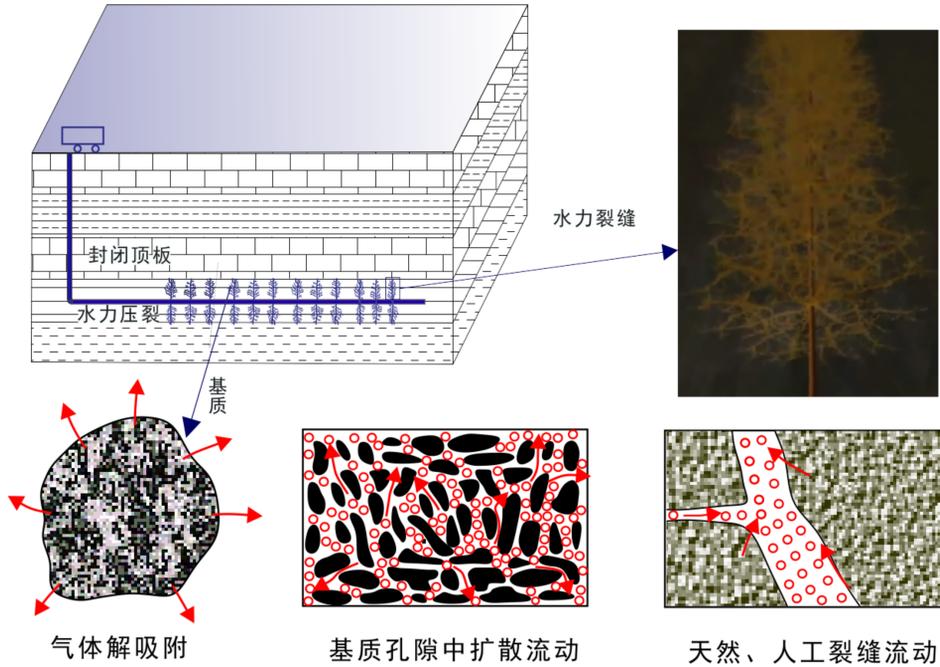


图 1. 水力压裂与双重介质中气体流动

利用多物理场耦合软件COMSOL来分析上述过程，利用固体力学和达西定律双向耦合接口，并且自定义模型中渗透率和孔隙率随空压等参数变化的方程。

基质：变形引起孔径变化： $\Delta\varepsilon = \frac{V_L \rho R T}{E V_0} \int_{P_L}^p \frac{V}{P} dp$

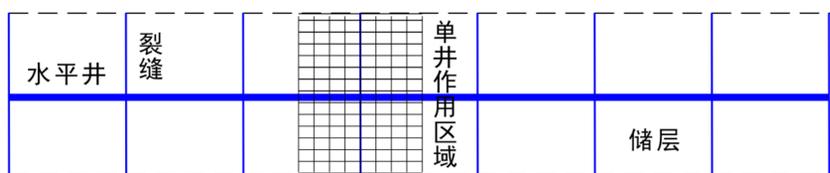
$$\left(\frac{D}{D_0}\right)^2 = 1 + \left(1 + \frac{2}{\varphi_0}\right) \Delta\varepsilon$$

Javadpour滑移扩散模型： $K_a = \frac{2DM}{3 \times 10^3 RT} \left(\frac{8RT}{\pi M}\right)^{0.5} + F \frac{r^2 \rho}{8\mu}$

裂缝： $\phi = \frac{3b}{s}$  ;  $K = \frac{b^3}{12s}$  ;  $\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3$

裂缝模型： $\frac{\phi}{\phi_0} = \exp\left[-\left(\frac{E}{3bK_n} + \frac{E}{3sK_n}\right)\left(\frac{\varepsilon_l p}{p+p_l} - \frac{\varepsilon_l p_0}{p_0+p_l}\right)\right]$

P-M模型： $\frac{\phi}{\phi_0} = 1 + \frac{1}{M\phi_0}(p - p_0) + \frac{\varepsilon_l}{\phi_0} \left(\frac{K}{M} - 1\right)\left(\frac{p}{p+p_l} - \frac{p_0}{p_0+p_l}\right)$



储层参数	数值
弹性模量GPa	30
泊松比	0.2
储层压力MPa	1-8
储层温度K	360
气体动力粘度kg/(m*s)	2e-5
Langmuir体积/m <sup>3</sup> /kg	0.003
Langmuir压力/MPa	4
最大吸附应变	0.0128
孔隙裂缝参数	数值
基质孔隙率	0.05
基质渗透率m <sup>2</sup>	1e-18
基质孔径范围nm	2-100
裂缝孔隙率	0.005
裂缝渗透率/m <sup>2</sup>	1e-15
裂缝开度/m	1e-5
裂缝间距/m	0.05

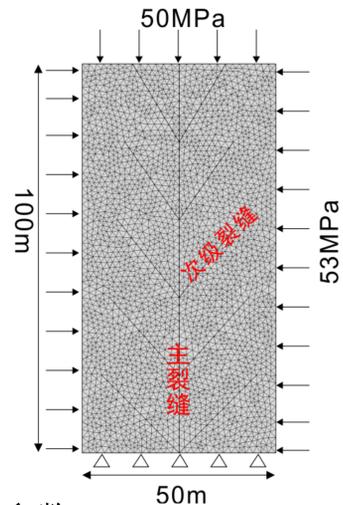


图 2. 模型建立与参数

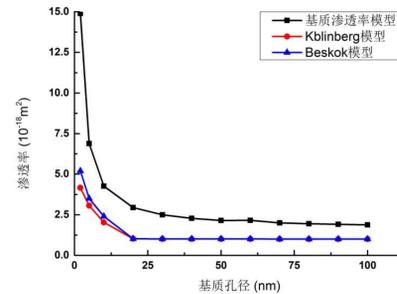


图 3. 基质渗透率

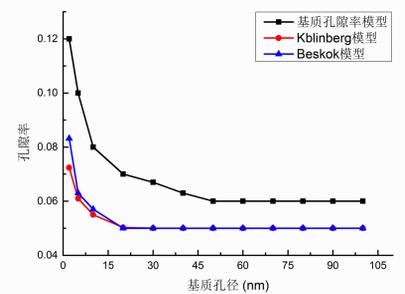


图 4. 基质孔隙率

裂缝在有效应力和气体解吸附引起的基质收缩共同作用下，裂缝渗透率和孔隙率相比初始值升高，如图5、6。模型中空隙压力升高使裂缝渗透率和孔隙率下降。

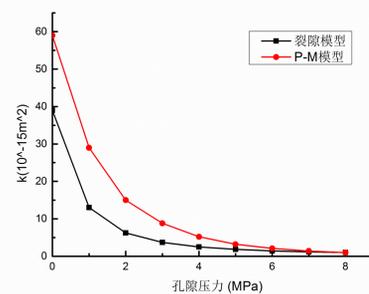


图 5. 裂缝渗透率

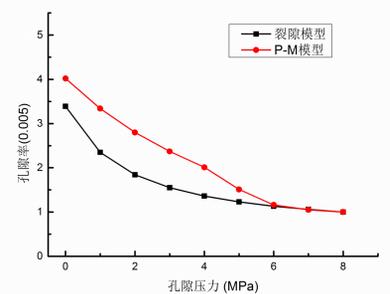


图 6. 裂缝孔隙率

储层大规模水力压裂形成页岩气渗流逸散的优势通道，随着开采时间的增加，储层空隙压力减小。大约在3000d后，储层内空隙压力降到水平井口临界压力值。

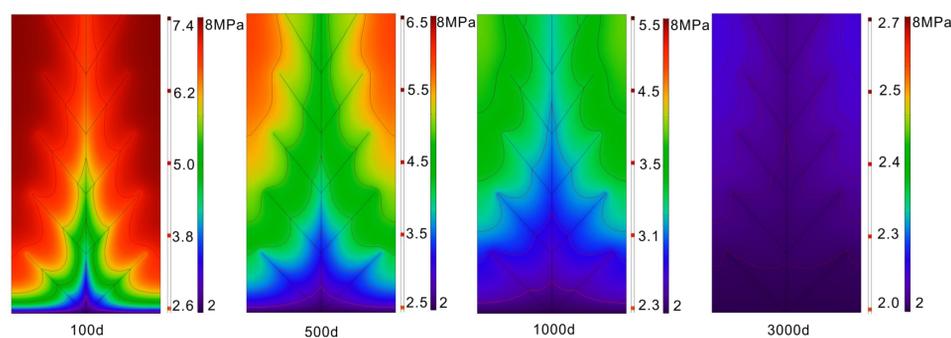


图 7. 模型空隙压力随开采时间变化

储层水力压裂形成气体在基质和裂缝流动的双重介质，气体在微纳孔隙中滑移、扩散流动引起基质孔隙率和渗透率升高。水力裂缝在有效应力和基质解吸附作用下，随着孔隙压力升高，渗透率和孔隙率降低。模型进一步的研究应该考虑温度和地层构造特性等对页岩气解吸附和流动的影响。

## 参考文献：

Klinkenberg L J. The Permeability of Porous Media To Liquids And Gases[J]. Socar Proceedings, 1941, 2(2):200-213.  
 Javadpour F. Nanopores and Apparent Permeability of Gas Flow in Mudrocks (Shales and Siltstone)[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8):16-21.  
 Beskok A, Karniadakis G E. Report: a model for flows in channels, pipes, and ducts at micro and nano scales. Microscale Thermophysical Engineering, 1999,3(1), 43-77.  
 Palmer I, Mansoori J. How Permeability Depends on Stress and Pore Pressure in Coalbeds: A New Model[J]. Spe Reservoir Evaluation & Engineering, 1996, 1(6):539-544.  
 移峰. 页岩气应力/解吸/滑脱联合作用规律和多级渗流模型[D]. 中国矿业大学, 2016.  
 张宏学. 页岩储层渗流—应力耦合模型及应用[D]. 中国矿业大学, 2015.