

文章编号: 1000-7598(2010)07-2317-08

考虑基质收缩效应的煤层气 应力场-渗流场耦合作用分析

周军平, 鲜学福, 姜永东, 李晓红, 姜德义

(重庆大学 西南资源开发与及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 在煤层气的初级生产过程中, 为了获取较高的生产率, 需要降低储层压力, 储层压力下降对于煤层气的渗透率具有两个相反的效应: (1) 储层压力下降, 有效应力增加, 煤层裂隙压缩闭合, 渗透率降低; (2) 煤层气解吸, 煤基质收缩, 煤层气流动路径张开, 渗透率升高。Shi和Durucan、Palmer-Mansoori以及Gray等都建立了包含了基质收缩效应以及有效应力的影响的渗透率模型, 其模型都基于以下两个关键假设: 煤岩体处于单轴应变状态以及竖向应力恒定。为了检验上述两个假设的合理性, 建立了一个考虑基质收缩效应以及渗流场-应力场耦合作用下的煤层气流动模型, 对煤层气初级生产过程中渗透率的变化进行了耦合分析。分析结果表明: 单轴应变的假设具有合理性, 而竖向应力是随指向生产井的应变梯度的变化而变化的, 其对于渗透率的变化具有重要影响, 因此, 竖向应力恒定的假设可能导致渗透率预测出现误差; 上述渗透率模型都可能低估煤层气初级生产过程中渗透率的变化。

关键词: 煤层气; 有效应力; 煤基质收缩; 渗透率; 渗流场; 应力场; 耦合模型

中图分类号: O 357.3

文献标识码: A

A permeability model including effective stress and coal matrix shrinking effect

ZHOU Jun-ping, XIAN Xue-fu, JIANG Yong-dong, LI Xiao-hong, JIANG De-yi

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To recover a large percentage of coalbed methane in coalbeds, reservoir pressure must be reduced significantly in the primary production. Two distinct effects are associated with the reduction of reservoir pressure during methane extraction: (1) the release of gas, and (2) an increase in effective stress. The increase in effective stress causes a decrease in the permeability of the coal owing to mechanical closure of flow paths. However, an opposing effect of coal-matrix shrinkage can occur, one that is attributed to a desorption phenomenon. This shrinkage widens the fractures that are primarily responsible for gas flow in coalbed reservoirs, and thus increases permeability. Some permeability models such as Shi-Durucan model, Palmer-Mansoori model and Gray model incorporating the effect of matrix shrink and effective stress influence were developed. These models were based on two key assumptions: coalbed is under uniaxial strain condition and constant vertical stress. According to this, a coupled seepage-stress coalbed methane flow model considering matrix shrinkage was used to examine the accuracy of these assumptions; then this model was used to analyze permeability change during primary production; the result suggested that the assumption of uniaxial strain appears valid, while constant vertical stress may introduce error; it varies as gradients in strain are induced towards the production well; and its contribution to permeability can be significant; then that existing coal permeability models could underestimate permeability change.

Key words: coalbed methane; effective stress; coal matrix shrink; permeability; seepage field; stress field; coupled model

1 引言

煤的渗透性是控制煤层气在煤储层中流动的

最关键因素之一, 孔隙压力、有效应力以及煤基质收缩/膨胀对煤的渗透性具有重要影响, 探讨它们与煤的渗透率之间的关系对于煤层气的储层模拟以及

收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目 (No.50621403); 教育部科学技术研究重点项目 (No.109130); 重庆市院士基金资助项目 (CSTS2005AB6007)。

第一作者简介: 周军平, 男, 1982年生, 博士研究生, 主要从事采矿工程以及渗流力学方面的研究工作。E-mail: zhoujp1982@sina.com

勘探开发具有重要的实际意义。

目前国内外学者在煤的渗透性影响因素方面做了一些试验工作。Enever和Henning^[1]研究了煤体有效应力对渗透率的影响。隆清明, 赵旭生等^[2]通过试验研究了吸附作用对煤的渗透率的影响, 得到吸附作用越强、吸附瓦斯量越多, 煤的渗透率越小的结论; 赵阳升、胡耀青等^[3]研究了吸附和变形对煤岩渗透率的影响, 认为渗透系数随孔隙压力的变化存在一临界值, 孔隙压力小于该临界值时, 渗透系数减小, 大于该临界值时, 渗透系数增加, 并得出了渗透系数随孔隙压力和体积应力变化的经验公式; 杨永杰等^[4]进行了煤岩应力-应变全过程中的渗透性试验, 揭示了煤岩在变形破坏过程中的渗透率变化规律; 唐巨鹏、潘一山等^[5]进行了有效应力对煤层气解吸渗流影响的试验研究。Gray^[6]认为, 由于煤层气解吸时, 煤基质会收缩使得裂隙扩张, 从而导致煤层渗透率的增大; Harpalani等^[7]通过室内试验发现, 气体压力减小时, 煤层气解吸, 煤基质体积减小, 且煤基质体应变与解吸的气体量呈线性关系。Harpalani和Chen^[8]通过室内试验研究了与解吸有关的煤岩体基质体积变化后得出, 解吸引起的煤基质收缩变化远大于基质的压缩率; Mavor等^[9]利用美国San Juan盆地的现场实测数据验证了“基质收缩理论”的正确性。

另外, 还有学者建立了综合考虑煤吸附应变、应力场以及孔隙压力作用下的渗透率理论模型。Shi和Durucan^[10]假设煤岩体为各向同性的孔弹性体, 将煤吸附作用引起的应变引入增量形式的应力-应变关系得到如下表达式:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma'_{xx} &= \left(\lambda + \frac{2}{3}G \right) \Delta\epsilon_s + 2G\Delta\epsilon_{xx} + \lambda\Delta\epsilon \\ \Delta\sigma'_{yy} &= \left(\lambda + \frac{2}{3}G \right) \Delta\epsilon_s + 2G\Delta\epsilon_{yy} + \lambda\Delta\epsilon \\ \Delta\sigma'_{zz} &= \left(\lambda + \frac{2}{3}G \right) \Delta\epsilon_s + 2G\Delta\epsilon_{zz} + \lambda\Delta\epsilon \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: Δ 表示增量; G 、 λ 为煤岩体拉梅常数; E 为煤岩体弹性模量; ϵ_s 为吸附作用引起的应变; ϵ 为应力引起的应变; σ'_{xx} 、 σ'_{yy} 、 σ'_{zz} 分别为 x 、 y 、 z 轴方向上煤岩体有效应力, (Pa)。

同时他们在 (Shi和Durucan) 假设吸附引起的应变各向同性、煤岩体处于单轴应变状态 ($\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = 0$)、且竖向应力恒定 ($\Delta\sigma_{zz} = 0$) 的条件下, 得到了增量形式应力-应变-吸附应变关系的简化式:

$$\Delta\sigma'_{xx} = \Delta\sigma'_{yy} = -\frac{\nu}{1-\nu}\alpha\Delta p + \frac{E}{3(1-\nu)}\Delta\epsilon_s \quad (2)$$

式中: ν 为泊松比。将渗透率视为有效应力的函数^[11]:

$$k = k_0 e^{-3c_\phi\Delta\sigma'} \quad (3)$$

式中: k 为煤岩体渗透率; k_0 为煤岩体初始渗透率;

c_ϕ 为孔隙压缩系数, $c_\phi = \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dp} \bigg|_{\sigma=\text{常数}}$; σ' 为有效应力,

$\sigma' = \sigma - \alpha p$, σ 为总应力, α 为Biot有效应力系数 ($0 \leq \alpha \leq 1$), p 为孔隙压力, (Pa)。

式 (1) ~ (3) 即构成了有效应力以及煤基质收缩效应共同作用下的渗透率模型 (Shi-Durucan模型)。

此时, 对于竖向应力有:

$$\Delta\sigma'_{zz} = -\alpha\Delta p \quad (4)$$

此外, Palmer和Mansoori^[12]采用孔隙率和渗透率的耦合模型, 得到了一个类似的以孔隙度为变量, 考虑有效应力以及基质收缩效应的渗透率模型。

Shi-Durucan模型以及Palmer-Mansoori模型与Gray^[6]模型本质上是一致的, 都包含了基质收缩效应以及有效应力的影响, 具有清晰的理论基础。但上述模型都基于以下两个关键假设: (1) 煤岩体处于单轴应变状态; (2) 竖向应力恒定。

本文首先建立一个考虑基质收缩效应以及渗流场-应力场耦合作用下的煤层气流动模型, 然后对煤层气初级生产过程中渗透率的变化进行耦合分析, 来检验上述两个假设的准确性以及合理性, 以便对煤层气初级生产以及注气增产时储层渗透率的预测提供指导。

2 控制方程

2.1 应力场计算

假设煤层为均质各向同性的弹性体, 同时满足等温条件, 则应变-位移关系为

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = x, y, z) \quad (5)$$

平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (6)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为总应力张量分量, (Pa); f_i 为煤岩体的体积力分量 $f_i = (0, 0, \rho_m g)^T$, ρ_m 为煤岩体的密度。

考虑吸附应变的各向异性, 对式(1)进行修正后可以得到煤岩体的应力-应变-吸附应变本构方程为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma'_{xx} &= 2G(\Delta\varepsilon_{xx} + \Delta\varepsilon_{xss}) + \lambda(\Delta\varepsilon + \Delta\varepsilon_s) \\ \Delta\sigma'_{yy} &= 2G(\Delta\varepsilon_{yy} + \Delta\varepsilon_{yys}) + \lambda(\Delta\varepsilon + \Delta\varepsilon_s) \\ \Delta\sigma'_{zz} &= 2G(\Delta\varepsilon_{zz} + \Delta\varepsilon_{zss}) + \lambda(\Delta\varepsilon + \Delta\varepsilon_s) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{xx} + \Delta\varepsilon_{yy} + \Delta\varepsilon_{zz}$ 。

另外, 已有研究表明, 解吸引起的煤基质体应变与解吸的气体呈线性关系, 吸附-解吸引起的应变 ε_s 可用一个类似于朗格缪尔方程的等式来进行计算^[13]:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_L \frac{p}{p_L + p} \quad (8)$$

ε_L 与朗格缪尔方程中朗格缪尔体积数据表达的含义类似, 代表理论最大吸附应变量, 即无限压力下的极限值; p_L 与朗格缪尔压力数据表达的含义相当, 代表煤样达到最大应变量的一半时的压力。

这里规定应力和应变在拉应力状态下是正值。相反, 流体孔隙压力 p 在受压的情况下是正值。

2.2 渗流场计算

煤层气流动的连续性方程为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g q_g) = Q_s \quad (9)$$

式中: ρ_g 为煤层气的密度, (kg/m^3); q_g 为煤层气通量, ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$); Q_s 为源汇项, m 为单位体积煤中煤层气的含量 (包含有自由气体以及被吸附的气体), (kg/m^3), 其表达式为^[14]

$$m = \rho_g \phi + \rho_{gs} \rho_c \frac{V_L p}{p + p_L} \quad (10)$$

式中: ρ_{gs} 为标准大气压下煤层气密度, (kg/m^3); ρ_c 为煤的密度, (kg/m^3); ϕ 为煤岩体孔隙度, 无量纲; V_L 为朗格缪尔体积常数, (m^3/t)。

根据理想气体定律, 煤层气密度可以表示为

$$\rho_g = \frac{M_g}{RT} p \quad (11)$$

式中: M_g 为煤层气的摩尔质量; R 为普适气体常数; T 为气体绝对温度。

根据试验和现场测试结果, 煤层气在煤层中的流动属于层流状态, 符合达西定律, 因此, 煤层气通量可以表示为^[15]

$$q_g = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (12)$$

式中: k 为煤的渗透率; μ 为煤层气的绝对黏度。

将式(10)~(12)代入式(9), 即可得到煤层气渗流的基本方程为

$$\left[\phi + \frac{\rho_c p_a V_L p_L}{(p + p_L)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} + p \frac{\partial \phi}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} p \nabla p \right) = Q_s \quad (13)$$

式中: p_a 为一标准大气压 (101.325 kPa)。

2.3 耦合模型

可以看出, 在式(13)中, k 是依赖于孔隙度的, 而 ϕ 依赖于煤岩体应变 ε 以及吸附引起的应变 ε_s , 因此式(7)与式(13)可以通过式(3)实现耦合。而渗流场对应力场的影响可利用有效应力原理得到:

$$\sigma' = \sigma - \alpha p \quad (14)$$

这样, 式(3)、(7)、(8)、(13)、(14)即构成了考虑基质收缩效应的应力场-渗流场作用下的煤层气流动的耦合模型。

3 耦合计算实现

渗流场和应力场间的耦合方法可以分为全耦合、迭代耦合、显式耦合和伪耦合^[16-17], 其中, 在迭代耦合中, 渗流场和应力场的计算是分别进行的。

考虑到求解和实用上的方便, 本文采用迭代耦合方法, 即在每一时步分别进行渗流场和应力场的计算, 然后交换相应的数据进行渗流场和应力场的更新。

这里采用一个自编的有限差分法程序 (FDMCBM) 计算渗流场, 用FLAC3D计算应力场^[18], 两个程序之间数据双向传递实现渗流场-应力场的迭代求解。求解过程如下:

(1) 计算初始应力场分布;

(2) 输入煤层初始渗透率 k_0 以及初始储层压力 p_0 等储层参数, 调用 FDMCBM 程序求解渗流场方程, 得到煤层含气量以及孔隙压力 p 的分布;

(3) 利用 FDMCBM 程序求解得到的煤层含气量求得煤层气吸附、解吸引起的应变, 将得到的应变数据以及孔隙压力数据传递给 FLAC3D, 进行应力场地求解, 可以得到新的有效应力, 然后利用式(3)进行渗透率 k 的更新;

(4) 将新得到的渗透率数据传递给 FDMCBM 程序, 进入新一轮的求解, FDMCBM 模拟计算是个瞬时过程, 在每个计算时步内煤层视为平衡状态, FLAC3D 在每个时步内执行一个稳态的应力计算。重复上述过程, 直到满足精度为止, 即实现了渗流

场-应力场的耦合求解。

耦合计算过程如图 1 所示。

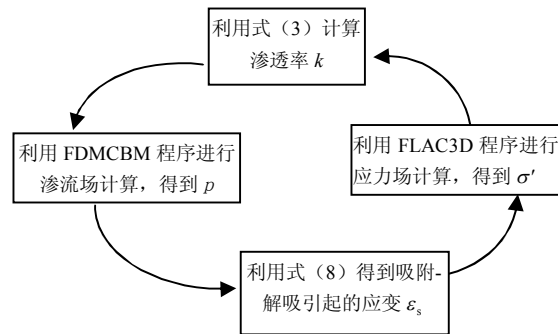


图 1 耦合过程示意图
Fig.1 Sketch of coupled simulation

4 算 例

这里通过耦合模拟来研究煤层气初级生产过程中渗透率的变化，模拟中所需参数采用已有文献中的 San Juan 盆地煤层气生产时的数据^[9-10, 19]，FDMCBM 计算网格覆盖煤层，FLAC3D 网格覆盖区域包含煤层以及顶、底板，煤层处于单轴应力状态。模拟所用参数值列于表 1，几何模型以及计算网格分别见图 2、3。

通过耦合模拟得到的生产 246 d 后煤层气运移变化、体应变、储层应力状态以及竖向应力时空分布结果分别见图 4~7。

从图 4 可以看出，孔隙压力、含气量、体应变以及有效应力变化朝生产井的方向具有不同的梯度，离生产井距离越近，梯度越大，且有效应力的变化梯度大于孔隙压力，说明吸附引起的应变对于有效应力的变化也有贡献。从图 5 也可以看出，离生产井距离越近，煤层体应变越大，这与图 4 中的

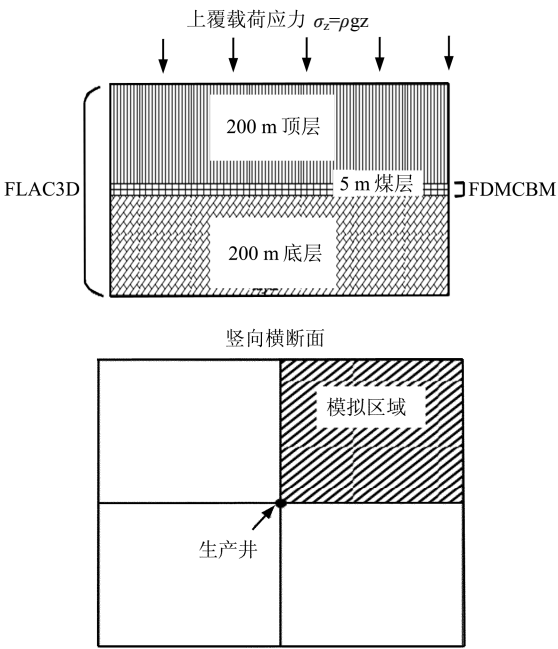


图 2 模拟煤层的几何模型
Fig.2 Geometric model of simulated coalbed

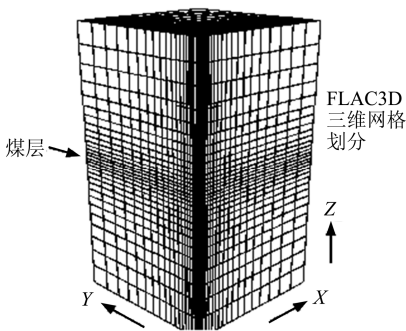
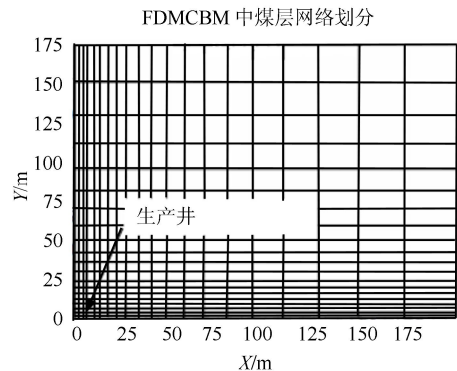
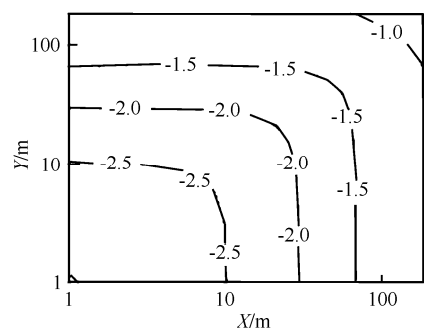


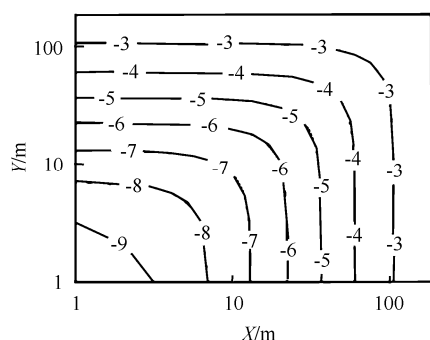
图 3 计算网格示意图
Fig.3 Sketch of calculation grids

表 1 数值模拟参数列表	
Table 1 Parameters for numerical simulation	
参数	值
煤岩体杨氏模量 E/GPa	1.96
煤岩体泊松比 ν	0.39
朗格缪尔压力常数 p_L/kPa	3 957
朗格缪尔体积常数, $V_L/(\text{m}^3/\text{t})$	32.8
孔隙压缩系数 c_ϕ	0.290
ε_L	0.012 66
初始产气率/ (m^3/t)	16.5
煤的密度 $\rho_c/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.65×10^3
标准大气压下煤层气密度 $\rho_g/(\text{kg}/\text{m}^3)$	0.717
煤层气绝对黏度 μ/Pas	1.84×10^{-5}
生产井操作条件	抽水 $2 \text{ m}^3/\text{t}$, 直到部压力达到 200 kPa
煤层初始渗透率 k_0/md	10

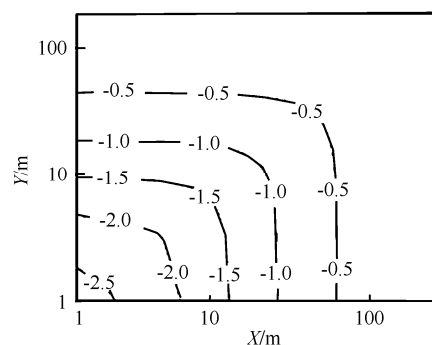
孔隙压力变化梯度以及含气量变化梯度是一致的。离生产井越近，吸附引起的应变也越大，有效应力引起的应变也越大。从图 6、7 看出，水平应力分布比较均一，而竖向应力随时间和空间的变化较大，水平位移相对竖向应变也很小。因此，Shi-Durucan



(a) 孔隙压力变化图/MPa



(b) 含气量变化/(m³/t)



(c) 有效应力变化图/MPa

图 4 生产 246 d 后气体运移变化
Fig.4 Coalbed methane migration change after 246 days of production

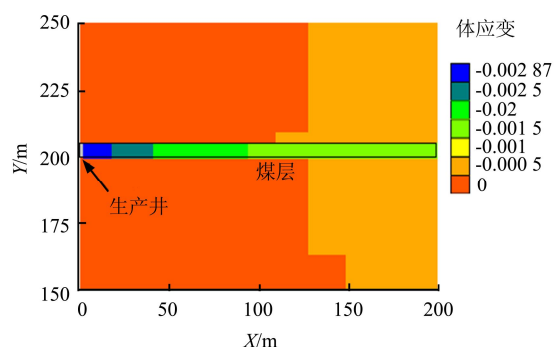


图 5 246 d 后煤层体应变
Fig.5 Volumetric strain after 246 days of production

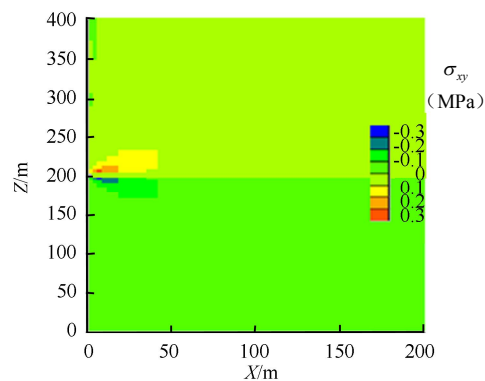


图 6 246 d 后与生产井垂直相交的竖向平面应力状态
Fig.6 Stress state of vertical plane intersecting the production well after 246 days of production

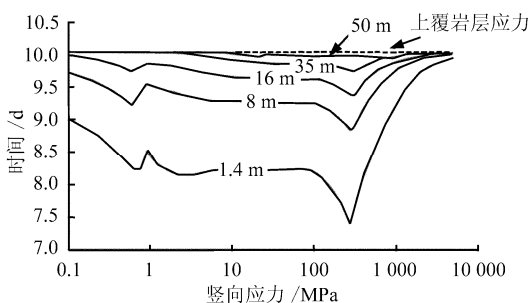
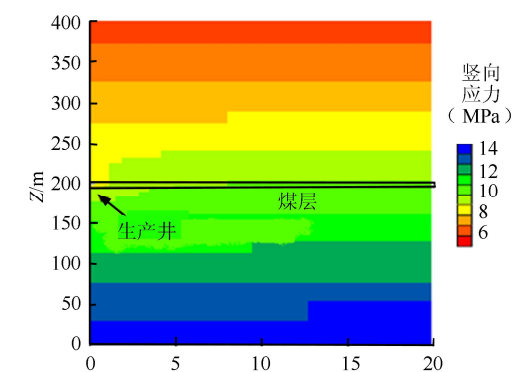


图 7 离生产井不同距离竖向应力的时空分布
Fig.7 Vertical stress with time and distance from production well

模型以及 Palmer-Mansoori 模型与 Gray 模型所做的单轴应变条件看起来是合理的, 但假定竖向应力恒定则可能会引入误差。

实际上, 当水平应力的变化较均一时, 可以认为, $\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy}$, 此时应力-应变-吸附应变本构关系可以表达为

$$\Delta\sigma'_{xx} = \frac{\nu}{1-\nu}\Delta\sigma_{zz} + \frac{E}{1-\nu}\Delta\epsilon_{xx} - \frac{\nu}{3(1-\nu)}\alpha p \quad (14)$$

与 Shi-Durucan 模型中的式 (2) 相比, 其差别在于:

$$\Delta\sigma'_{xxdiff} = \frac{\nu}{1-\nu}\Delta\sigma_{zz} + \frac{E}{1-\nu}\Delta\varepsilon_{xx} \quad (15)$$

由此可以看出, Shi-Durucan 模型引起误差的原因在于忽略了竖向应力以及水平应变。

讨论竖向应力对于渗透率的影响。首先模拟距生产井水平距离为 1.4、8、16、50 m 的有效应力各项的影响, 模拟结果见图 8。

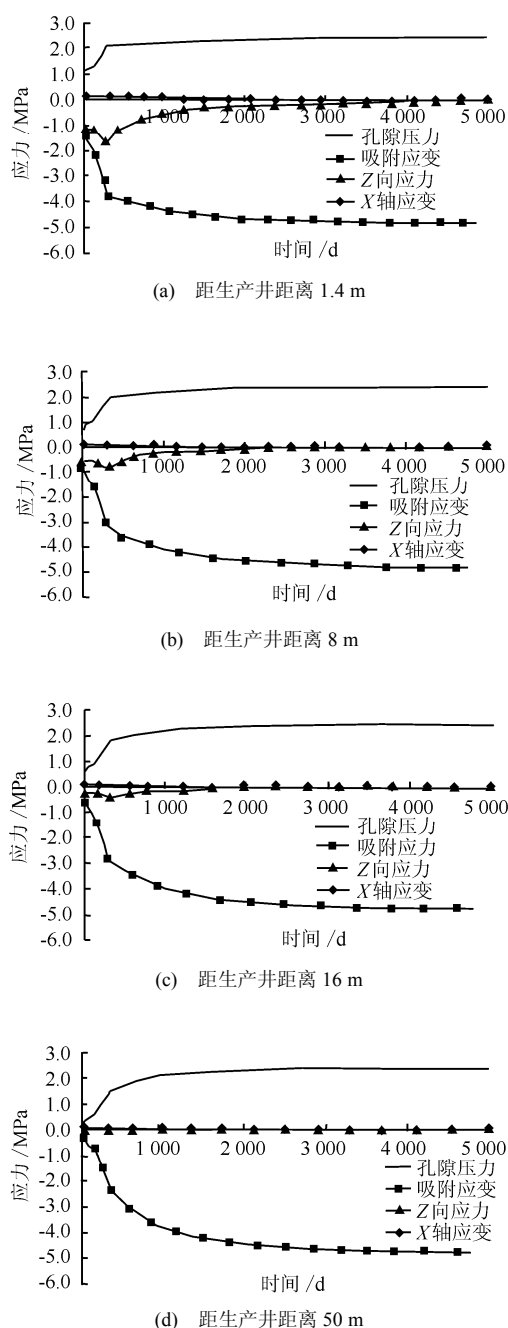


图 8 距生产井不同距离有效应力各部分的影响

Fig.8 Effective stress contributions with time and distance from production well

由模拟结果可以看出, 不同距离水平应变引起的应力变化基本可以忽略, 但距生产井距离越近,

竖向应力的影响越大, 然而到距离 50 m 时, 竖向应力的影响也基本上可以忽略。图 9 表示图 8 中各点渗透率随孔隙压力变化的规律。由图的结果可以看出, 竖向应力对于渗透率的影响是很重要的, 距生产井越近, 竖向应力对于渗透率的影响越大, Shi-Durucan 模型与距离生产井距离较远 (50 m) 时的模拟结果比较吻合, 而 50 m 时正好是竖向应力影响可以忽略的点, 这也说明已有的渗透率模型假设竖向应力恒定是不合理的, 只有在距离生产井距离较远时, 竖向应力对于有效应力的影响可以忽略时, 用 Shi-Durucan 模型预测渗透率的变化才是合理的。从图 9 可以看出, Shi-Durucan 模型低估了渗透率的变化。

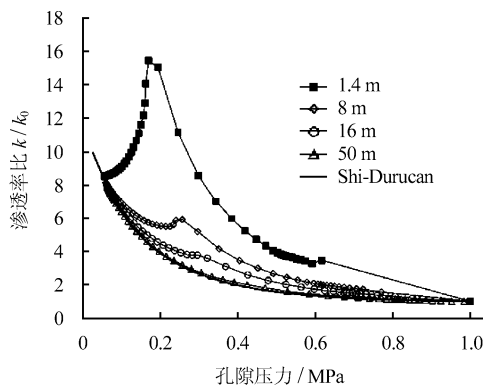


图 9 不同距离渗透率随孔隙压力的变化图

Fig.9 Permeability change with pressure in different distances from production well

5 结 论

(1) 基于上述耦合模型的分析, 可以得出已有的 Shi-Durucan 模型以及 Palmer-Mansoori 模型与 Gray 模型假设煤层处于单轴应变条件具有合理性, 而假设竖向应力恒定则会导致对渗透率预测的误差。

(2) 耦合分析结果表明, 竖向应力是随指向生产区域的应变梯度的变化而变化的, 竖向应力对于渗透率的影响作用显著, 采用 Shi-Durucan 模型以及 Palmer-Mansoori 模型与 Gray 模型会低估煤层渗透率的变化。

(3) 当采用注入二氧化碳措施来提高煤层气抽采率时, 由于煤层对于二氧化碳的吸附能力比甲烷更强, 因此, 吸附引起的应变梯度可能会更大, 因此, 对渗透率变化进行预测时不能忽略竖向应力的影响。

参 考 文 献

- [1] ENEVER J R E, HENNING A. The relationship between

- permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir model[C]//Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium. USA: University of Alabama, 1997: 13—22.
- [2] 隆清明, 赵旭生, 孙东玲, 等. 吸附作用对煤的渗透率影响规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(9): 1031—1035.
- LONG Qing-ming, ZHAO Xu-sheng, SUN Dong-ling et al. Experimental study on coal permeability by adsorption[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(9): 1031—1035.
- [3] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋, 等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651—653.
- ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing, YANG Dong, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3D stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 651—653.
- [4] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 煤岩全应力过程渗透性特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 381—385.
- YANG Yong-jie, SONG Yang, CHEN Shao-jie. Test study on permeability properties of coal specimen in complete stress-strain process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 381—385.
- [5] 唐巨鹏, 潘一山, 李成全, 等. 有效应力对煤层气解吸渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1563—1568.
- TANG Ju-peng, PAN Yi-shan, LI Cheng-quan, et al. Experimental study on effect of effective stress on desorption and seepage of coalbed methane[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(8): 1563—1568.
- [6] GRAY I. Reservoir engineering in coal seams: Part 1. The physical process of gas storage and movement in coal seams[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 1987, 2(1): 28—34.
- [7] HARPALANI S, CHEN G. Effect of gas production on porosity and permeability of coal[C]//Symposium on Coalbed Methane Research and Development in Australia, Australia: James Cook University of North Queensland, 1992: 67.
- [8] HARPALANI S, CHEN G. Estimation of changes in fracture porosity of coal with gas emission[J]. **Fuel**, 1995, 74(10): 1491—1498.
- [9] MAVOR M J, VAUGHN J E. Increasing coal absolute permeability in the San Juan Basin fruitland formation[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 1998, 1(3): 201—206.
- [10] SHI J Q, DURUCAN S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: A new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. **Transport in Porous Media**, 2004, 56(1): 1—16.
- [11] MCKEE C R, BUMB A C, KOENING R A. Stress dependent permeability and porosity of coal[C]//Proceedings of Coalbed Methane Symposium. Alabama: [s. n.], 1987: 183.
- [12] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 1998, 12, 539—44.
- [13] HARPALANI S, SHRAUFNAGEL R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. **Fuel**, 1990, 69(5): 551—556.
- [14] SAGHAFI A, FAIZ M, ROBERTS D. CO₂ storage and gas diffusivity properties of coals from Sydney Basin, Australia[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2007, 70(1-3): 240—254.
- [15] 余楚新, 鲜学福, 谭学术. 煤层瓦斯流动理论及渗流控制方程的研究[J]. 重庆大学学报, 1989, 12(5): 1-10.
- YU Chu-xin, XIAN Xue-fu, TAN Xue-shu. Study about flow theory and governing equation of gas seepage flow in coalbed[J]. **Journal of Chongqing University**, 1989, 12(5): 1—10.
- [16] TRAN D, SETTARIA A, NGHIEM L. New iterative coupling between a reservoir simulator and a geomechanics module[C]//Proceedings of 2002 Oil Rock SPE/ISRM Rock Mechanics Conference. Texas: [s. n.], 2002: 362—369.
- [17] SAMIER P, FONTAINE G. Coupled analysis of geomechanics and fluid flow in reservoir simulation[C]//Proceedings of the SPE Reservoir Simulation Symposium. Houston: [s. n.], 2003: 485—497.
- [18] 周军平, 鲜学福, 姜永东. 岩体THM耦合的模块化算法研究[C]//第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 甘肃: 核工业北京地质研究院, 2008: 275—282.
- [19] KAISER W R, AYER W B. Geologic and hydrologic characterization of coalbed-methane reservoirs in the San Juan Basin[J]. **SPE Formation Evaluation**, 1994, 9(3): 175—184.