

煤层处置CO₂的二元气-固耦合数值模拟

冯启言^{1,2}, 周来^{1,2}, 陈中伟^{3,4}, 刘继山^{3,4}

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221008;

3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(中国矿业大学), 江苏 徐州 2211163;

4. 澳大利亚 西澳大利亚大学燃料、石油与能源研究中心 珀斯 澳大利亚 6009)

摘要: 利用不可开采煤层处置二氧化碳可以有效控制温室气体的排放量并可驱动和增加煤层气资源的开采量。二氧化碳注入煤层处置后引入一个复杂的CH₄-CO₂二元气体与煤体的气固耦合问题, 耦合了二元气体竞争吸附、竞争扩散, 气体渗流以及煤体变形过程。基于COMSOL Multiphysics建立了二元气固耦合的有限元数值模型, 并应用数值模拟实验对二元气固耦合进行了机理分析。模拟结果表明, CO₂注入煤层后不断驱替CH₄, CH₄组分明显减少; 气体吸附引起的煤层膨胀量可以抵消部分有效应力引起的压缩变形, 由于CH₄-CO₂二元气体较单一CH₄引起的煤层吸附膨胀量大, 二氧化碳注入煤层后可以缓解煤层的压缩变形; 不同孔隙压力条件下, 吸附膨胀与孔隙压力两者竞争作用引起的煤层净变形不同, 而净变形也控制着煤层孔隙压力和渗流率的变化, 煤层渗透整体呈现先降后升, 模拟进行到 4.66×10^7 s时煤层渗透率发生反弹。

关键词: 二氧化碳; 甲烷; 二元气固耦合; 地质处置; 数值模拟

中图分类号: P618.11; X141

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2009)01-0063-06

Numerical Simulation of Coupled Binary Gas-Solid Interaction During Carbon Dioxide Sequestration in a Coal Bed

FENG Qi-yan^{1,2}, ZHOU Lai^{1,2}, CHEN Zhong-wei^{3,4}, LIU Ji-shan^{3,4}

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering,

University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Center for Fuel, Petroleum and Energy Research, University of Western Australia, Perth, WA 6009, Australia)

Abstract: The prospect of geological sequestration and storage of CO₂ as a means of reducing global emission of this greenhouse gas and enhancing coalbed methane recovery (ECBM) has recently attracted worldwide interest due to the global warming and the resource shortage. Complicated coupled binary gas-solid interaction arises during carbon dioxide sequestration in a coal seam, which combines effects of CO₂-CH₄ counter adsorption, CO₂-CH₄ counter diffusion, binary gas flow and coal bed deformation. Through solving a set of coupled field governing equations, a novel full coupled Finite Element (FE) model was established by COMSOL Multiphysics. The new FE model was applied to the quantification of coal porous pressure, coal permeability, gas composition fraction and coal displacement when CO₂ was injected in a CH₄ saturated coal bed. Numerical results demonstrate that CH₄ is swept by the injected CO₂ accompanied by coal volumetric deformation. Compared to the single CH₄ in situ, CH₄-CO₂ counter-diffusion induced coal swelling can make more compensation for coal shrinkage due to effective stress. Competing influences between the effective stress and the CH₄-CO₂ counter-diffusion induced volume change governs the evolution of porous pressure and permeability, which is controlled by the porous pressure correspondingly. Initially, the coal permeability keeps

收稿日期: 2008-11-03; 修回日期: 2008-12-09

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2007034); 江苏省研究生培养创新工程项目(2006); 中国矿业大学青年科研基金项目(2006)

作者简介: 冯启言, 1964年生, 男, 博士, 1984年毕业于南京大学水文地质与工程地质专业, 现任教授, 博士生导师, 主要从事环境地质、水文地质方面的教学与研究工作; E-mail: fqycumt@126.com

descending due to the coal swelling. Afterwards, it behaves rising when the porous pressure dominates the coal deformation. In this simulation, coal permeability rebounded at the 4.66×10^7 s. This achievement extends our ability to understand the coupled multi-physics of the CO_2 geological sequestration and CO_2 enhanced coal bed methane recovery under field conditions.

Key words: carbon dioxide; methane; coupled binary gas-solid interaction; geological sequestration; numerical simulation

1 引言

在煤系地层中因技术原因或经济原因而弃采的煤层,可用于进行 CO_2 的地质处置,这是控制全球变暖的一项新途径。目前,认识和理解不可开采煤层对 CO_2 的封存机制已经成为 CO_2 捕集和封存技术的研究热点(Beecy et al, 2001; Bradshaw et al, 2001; Gale et al, 2001)。成煤作用以及地质运动使煤变成一种典型的双重孔隙结构介质,包含原生的微孔结构和次生的大孔隙、裂隙结构。二氧化碳注入煤层中主要以吸附形式储存在煤的微孔中,并且其吸附能力较煤层气甲烷强,可以通过竞争吸附和扩散作用促进甲烷的解吸,达到增产煤层气的效果(Harplani et al, 2006)。实验表明煤体吸附二氧化碳会发生膨胀变形(Karacan, 2007),并且吸附二氧化碳引起的膨胀量大于吸附甲烷的膨胀量,因此 CO_2 注入煤层后,煤因为吸附膨胀变形会降低其孔隙率,从而影响气体在煤层中的渗流。此外,孔隙率还与煤层受到的有效应力密切相关(Mazumder et al, 2008)。随着气体的注入以及煤层孔隙压力的增加,煤的变形作用将会受吸附膨胀和有效应力的耦合作用控制,并最终反馈于二氧化碳在煤中渗流、扩散以及吸附过程。因此,二氧化碳的煤层地质处置技术是个耦合 CO_2 - CH_4 二元气体与煤固的复杂多物理问题,其内含三方面竞争机制:(1)二氧化碳与甲烷的竞争吸附、竞争扩散机制;(2)二氧化碳与甲烷的竞争吸附变形机制;(3)气体吸附变形与压力或有效应力变形的竞争机制。目前这是二氧化碳地质处置研究领域的世界性难题,由于上述过程涉及众多不确定因素,因而采用模型化的手段对上述耦合过程进行机理性的分析是十分必要的。

2 数学模型

2.1 基本假设

在对模型进行解析的过程中主要引入如下7点假设:(1)煤层为各向均质介质;(2)煤层

为等温和气体饱和状态;(3)气体为理想气体;(4)气体流动符合Darcy定律;(5)气体扩散服从Fick第一定律;(6)多元气体在煤层孔隙中的运移过程是相互独立的(有各自的扩散方程),且又是相互重叠的,共同影响气体的渗流规律;(7)煤固体骨架和孔隙引起的变形远小于煤层自身尺度。

2.2 控制方程

2.2.1 煤层变形方程

由于假设煤层为各相均质、同性的弹性连续多孔介质,其应变-位移方程以及应力平衡方程为:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (1)$$

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (2)$$

式中: ε_{ij} 为应变分量; $u_{i,j}$ 和 $u_{j,i}$ 为位移分量对坐标的偏微分。 $\sigma_{ij,j}$ 和 f_i 分别为全应力和体积力分量。

气体吸附引起的煤体变形是煤层变形的重要元素,研究发现煤体吸附 CO_2 引起的变形与 CO_2 吸附量的关系符合等温吸附Langmuir曲线,可运用Langmuir形式方程来描述(Day et al, 2008; Robertson et al, 2005; Cui et al, 2005),当二氧化碳注入煤层处置后出现的是二氧化碳和甲烷为主的二元气体情况,其吸附变形方程可用扩展Langmuir形式的变形方程表示(Lu et al, 2007),即:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\infty i} \frac{\frac{RT \cdot C_i}{p_{\varepsilon i}}}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{RT \cdot C_j}{p_{\varepsilon j}}}, \quad \varepsilon_s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (3)$$

式(3)中: ε_s 为总的吸附变形体积; $p_{\varepsilon i}$ 和 $p_{\varepsilon j}$ 分别为气体i, j的Langmuir压力; $\varepsilon_{\infty i}$ 为气体i的Langmuir体积变形量; C_i 为气体i的浓度; R 和 T 分别代表气体常数和温度。运用多孔介质的本构关系,并代入气体吸附引起的煤体变形关系式,可得到煤层总的变形方程(Detournay et al, 1993):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \sigma_{ij} - \left(\frac{1}{6G} - \frac{1}{9K} \right) \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} p \delta_{ij} + \frac{\varepsilon_s}{3} \delta_{ij} \quad (4)$$

式(4)中: α 为Biot系数, $\alpha = 1 - \frac{K}{K_s}$; K 和 K_s 分别

为煤和煤骨架颗粒的体积模量; G 为煤的剪切模量;
 δ_{ij} 为 Kronecker 符号 (当 $i=j$ 时为 1, $i \neq j$ 时为 0), p 为孔隙气体压力。将 (1), (2), (4) 合并变换后得到煤层变形的 Navier 形式方程:

$$Gu_{i,kk} + \frac{G}{1-2\nu} u_{k,ki} - \alpha p_{,i} - K \varepsilon_{s,i} + f_i = 0 \quad (5)$$

其中:

$$\varepsilon_{s,i} = \left[\frac{RT\varepsilon_{\infty 1}}{Np_{\varepsilon 1}} - \frac{\varepsilon_{\infty 1}C_1(RT)^2}{N^2p_{\varepsilon 1}^2} - \frac{\varepsilon_{\infty 2}C_2(RT)^2}{N^2p_{\varepsilon 2}^2} \right] C_{1,i} + \left[\frac{RT\varepsilon_{\infty 2}}{Np_{\varepsilon 2}} - \frac{\varepsilon_{\infty 2}C_2(RT)^2}{N^2p_{\varepsilon 2}^2} - \frac{\varepsilon_{\infty 1}C_1(RT)^2}{N^2p_{\varepsilon 1}p_{\varepsilon 2}} \right] C_{2,i} \quad (6)$$

式 (6) 中: $N=1+\sum_{j=1}^2 \frac{C_j RT}{p_{\varepsilon j}}$, 本文假设 1 和 2 分别代表 CH₄ 和 CO₂ 气体。变形方程中的孔隙压力 p 受气体连续性方程控制。

2.2.2 气体连续性方程

由质量守恒原理可得气体流动的连续性方程:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g q_g) = Q_s \quad (7)$$

式 (7) 中: ρ_g 为二元气体的密度; q_g 为气体的渗流速度, 符合 Darcy 定律, 即, $q_g = -\frac{k}{\mu} \nabla p$, Q_s 为气体源汇项, m 为气体质量, 为吸附和游离两种形式气体的总和。利用扩展 Langmuir 的方程来表示二元气体的吸附质量为:

$$m_s = \rho_c \cdot \sum_{i=1}^2 \rho_{gai} V_{Li} \frac{\frac{RT C_i}{p_{\varepsilon i}}}{1 + \sum_{j=1}^2 \frac{RT C_j}{p_{\varepsilon j}}} \quad (8)$$

对于煤层的渗透性, 目前数值计算领域广泛采用的模型广泛采用 Palmer-Mansoori 模型 (Palmer et al, 1998), 该模型考虑了气体吸附引起的煤基块孔隙变形与孔隙气体压力的耦合作用, Zhang 等 (2008) 考虑变上外加荷载条件下对上述模型进行了改进, 推导了更为普遍的煤层渗透性方程, 然而, 上述两种模型主要用于单一气体研究, 含二元气体的煤层渗透率模型可在 Zhang 的模型基础上继续推导得出:

$$k = k_0 \left\{ \frac{1}{1+S} \left[(1+S_0) + \frac{\alpha}{\phi_0} (S-S_0) \right] \right\}^3 \quad (9)$$

其中:

$$S = \varepsilon_v + \frac{p}{K_s} - \varepsilon_s, \quad S_0 = \frac{p_0}{K_s} - \varepsilon_{s0} = \frac{p_0}{K_s} - \sum_{m=1}^2 \varepsilon_{\infty m} \frac{\frac{RT \cdot C_{m0}}{p_{\varepsilon m}}}{1 + \sum_{n=1}^2 \frac{RT \cdot C_{n0}}{p_{\varepsilon n}}}$$

将 (8), (9) 代入 (7) 式可得:

$$\rho_g \frac{\alpha - \phi}{1+S} \frac{1}{K_s} \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(-\frac{k}{\mu} \cdot \rho_g \cdot \nabla p \right) = Q_s - \rho_g \frac{\alpha - \phi}{1+S} \cdot \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} - (\phi \cdot M_1 - \rho_g \frac{\alpha - \phi}{1+S} \cdot A_1 + W_1) \frac{\partial C_1}{\partial t} - (\phi \cdot M_2 - \rho_g \frac{\alpha - \phi}{1+S} \cdot A_2 + W_2) \frac{\partial C_2}{\partial t} \quad (10)$$

其中:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = A_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} + A_2 \frac{\partial C_2}{\partial t}, \quad \frac{\partial m_s}{\partial t} = W_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} + W_2 \frac{\partial C_2}{\partial t},$$

$$E_i = \frac{V_{Li} RT}{p_{\varepsilon i}}, \quad A_i = \frac{RT \varepsilon_{\infty i}}{N p_{\varepsilon i}} - \frac{\varepsilon_{\infty i} C_i (RT)^2}{N^2 p_{\varepsilon i}^2} - \frac{\varepsilon_{\infty j} C_j (RT)^2}{N^2 p_{\varepsilon i} p_{\varepsilon j}},$$

$$W_i = \rho_c \cdot \left(\frac{\rho_{gai} E_i}{N p_{\varepsilon i}} - \frac{\rho_{gai} E_i C_i RT}{N^2 p_{\varepsilon i}^2} - \frac{\rho_{gai} E_j C_j RT}{N^2 p_{\varepsilon i} p_{\varepsilon j}} \right),$$

$i, j=1, 2$ 且 $i \neq j$

上式 (9) 和 (10) 中, k 为渗透率, μ 气体的粘滞系数, M_i 为气体 i 的摩尔质量, ρ_{gai} 为气体 i 的密度, ρ_c 为煤的密度, ϕ 为孔隙率, ε_v 为煤基块的体积应变。

2.2.3 气体对流扩散方程

应用气体扩散的 Fick 定律, 分别得出 CH₄ 和 CO₂ 在煤层中对流扩散方程为:

$$[\phi + \rho_c \cdot \left(\frac{E_1}{N p_{\varepsilon 1}} - \frac{E_1 C_1 RT}{N^2 p_{\varepsilon 1}^2} \right)] \frac{\partial C_1}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C_1 = \nabla \cdot (D_1 \nabla C_1) + \rho_c \cdot \frac{E_1 C_1 RT}{N^2 p_{\varepsilon 1} p_{\varepsilon 2}} \cdot \frac{\partial C_2}{\partial t} \quad (11)$$

$$[\phi + \rho_c \cdot \left(\frac{E_2}{N p_{\varepsilon 2}} - \frac{E_2 C_2 RT}{N^2 p_{\varepsilon 2}^2} \right)] \frac{\partial C_2}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C_2 = \nabla \cdot (D_2 \nabla C_2) + \rho_c \cdot \frac{E_2 C_2 RT}{N^2 p_{\varepsilon 1} p_{\varepsilon 2}} \cdot \frac{\partial C_1}{\partial t} \quad (12)$$

2.3 边界和初始条件

$$\text{变形方程: 边界条件 } \partial \Omega \begin{cases} u_i = \tilde{u}_i(t) \\ \sigma_{ij} n_j = \tilde{F}_i(t) \end{cases};$$

$$\text{初始条件 } \Omega \begin{cases} u_i(0) = u_0 \\ \sigma_{ij}(0) = \sigma_0 \end{cases}.$$

$$\text{流动方程: 边界条件 } \partial \Omega \begin{cases} p = \tilde{p}(t) \\ n \cdot \frac{k}{\mu} \nabla p = \tilde{Q}_s(t) \end{cases};$$

$$\text{初始条件 } \Omega: p(0) = p_0.$$

$$\text{扩散方程: 边界条件 } \partial \Omega: C = \tilde{C}_i(t);$$

$$\text{初始条件: } \Omega: C(0) = C_0.$$

由式 (5), (10), (11), (12) 以及边界和初始条件即构成了二氧化碳注入煤层后的二元气-固耦合多物理模型。

3 数值模拟结果与讨论

同时求解多物理耦合问题异常复杂,本次研究选用先进的多物理场耦合有限元软件COMSOL Multiphysics进行求解,分析CO₂注入煤层后的气体流动、CO₂-CH₄竞争扩散以及煤体变形的耦合特征。

3.1 建模

假设处置煤层水平长度为100 m,高10 m。如图1所示,顶端受均布荷载作用,大小为5.0 MPa,左右两边界为水平约束,底边界为垂直约束,顶端自由。模型初始饱和5.0 MPa的甲烷气体,二氧化碳从左端注入,压力为5.0 MPa,模型右端模拟甲烷抽放孔,压力为0。模型中变形场、流动场以及气体扩散场的其它参数从相关实验和数值模拟研究文献中获得(Robertson et al, 2006; Wei et al, 2007, 表1)。为了揭示气体吸附作用对多物理过程的影响,本文设计了CH₄-CO₂二元气体竞争吸附、CH₄单一气体吸附以及无气体吸附作用三种模拟方案,并进行比较分析。

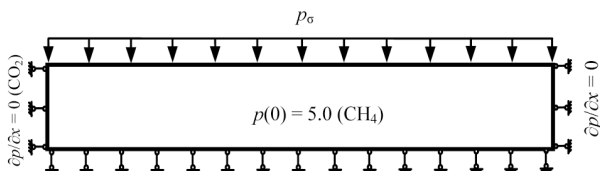


图1 多物理耦合数值模型

Fig. 1 Simulation model of the coupled coal matrix deformation, gas flow and diffusion

表1 模型输入参数

Table 1 Input parameters for the numerical simulation

模拟参数	参数值
煤体的弹性模量 (E , MPa)	2713
煤骨架颗粒的弹性模量 (E_s , MPa)	8139
煤的泊松比 (ν)	0.339
煤的密度 (ρ_c , kg/m ³)	1.25×10^3
气体的动力粘滞系数 (μ , Pa·s)	1.84×10^{-5}
CH ₄ Langmuir 压力常数 (p_{e1} , MPa)	6.109
CO ₂ Langmuir 压力常数 (p_{e2} , MPa)	3.829
CH ₄ Langmuir 体积常数 (V_{L1} , m ³ /kg)	0.015
CO ₂ Langmuir 体积常数 (V_{L2} , m ³ /kg)	0.030
CH ₄ Langmuir 体积变形常数 ($\varepsilon_{\infty 1}$)	0.02295
CO ₂ Langmuir 体积变形常数 ($\varepsilon_{\infty 2}$)	0.02595
煤的初始孔隙率 (ϕ_0)	0.00804
煤的初始渗透率 (k_0 , m ²)	3.7996×10^{-17}
CH ₄ 的扩散系数	1.5×10^{-12}
CO ₂ 的扩散系数	1.2×10^{-11}

3.2 结果与讨论

3.2.1 气体竞争吸附与扩散规律

气体的组分动态变化规律反映了CO₂注入煤层后与CH₄竞争扩散、竞争吸附机制,这也是CO₂驱替CH₄促进煤层气开采的最直接描述。图2分别显示了10⁶ s和10¹⁰ s时刻煤层二元气体组分的分配特征。比较前后时间气体组分,可以发现随着CO₂注入,CO₂组分不断升高,CH₄组分降低,Mazumder等(2008)通过CO₂注气驱替实验研究也得到了类似的趋势曲线。值得说明的是,CH₄的组分尤其是起初状态主要受气体渗流场的影响,在压力梯度控制下,其气相浓度呈快速降低趋势,CO₂进入煤层后进行吸附、扩散和对流,需要一段时间来达到平衡,导致其浓度增长相对CH₄的减少滞缓,随着吸附、扩散和对流的不断稳定,二元气体系统的浓度变化将趋向于同步。

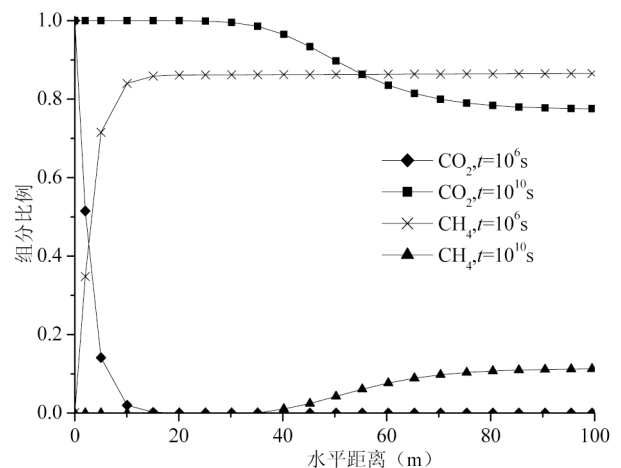


图2 煤层中气体组分变化曲线

Fig. 2 Gas composition evolution of CH₄ and CO₂

3.2.2 孔隙压力与煤层变形变化规律

三种模拟方案下煤层孔隙压力变化情况如图3所示($t=10^8$ s)。由图可知,考虑气体吸附情况下煤层孔隙压力呈明显非线性分布,越靠近抽放孔孔隙压力越低。气体吸附会引起煤基块的膨胀变形,注气孔附近气体压力较煤层其它位置大,吸附膨胀越明显,孔隙呈闭合趋势,减缓了孔隙压力的变化,使得煤层孔隙压力的递减趋势不是很明显,并且由于CH₄-CO₂二元气体竞争吸附以及CO₂较CH₄吸附引起的煤层膨胀量大等因素(Mazumder et al, 2008),CH₄-CO₂二元气体条件

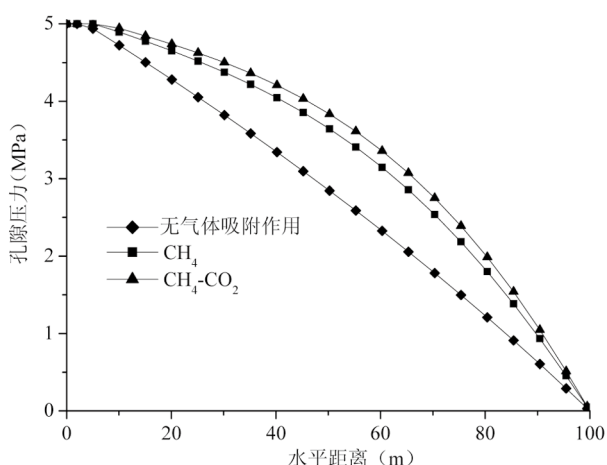
图3 孔隙压力分布曲线 ($t=10^8$ s)

Fig. 3 Distribution of porous pressure under three different conditions

下的煤层压降更不明显。相比而言，没有气体吸附作用的煤层压力近似线性分布。同样从 10^8 s时煤层变形量曲线（图4）可以看出，煤层变形量与气体的吸附性能有密切关系，CH₄-CO₂二元气体竞争吸附条件下的煤层变形量最小，是无气体吸附作用条件下煤层变形量的70%，究其原因，气体吸附作用引起的煤层胀变形，降低了煤层有效应力，减小了煤层变形量，其中CH₄-CO₂二元气体吸附膨胀量最高，其煤层变形量也是最小。

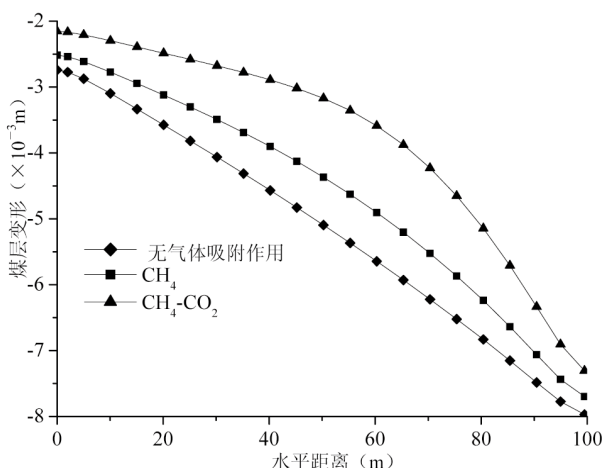
图4 煤层变形量曲线 ($t=10^8$ s)

Fig. 4 Coal bed displacement under three different conditions

3.2.3 煤层渗透率变化规律

渗透率是煤层孔隙压力和吸附变形耦合作用的结果。由图5可知，初始情况下，右边卸压，孔隙压力明显减小，对于假设的弹性多孔煤介质，孔隙趋

于闭合，渗透率明显减小。当煤层不断注入CO₂后，吸附膨胀作用发生，或即使出现甲烷解吸使煤块收缩，但CO₂吸附作用引起的煤膨胀量大于甲烷，从而导致煤层基块膨胀，进而造成煤层整体渗透率下降。但是右端不断放气导致孔隙压力作用不如注气孔附近，使得渗透率较左边低。在经历一段注气后，煤层的压力会不断上升，此时，吸附变形对渗透率的影响不断被孔隙压力压缩作用所抵消，当注入气体为 $10^7 \sim 10^8$ s (4.66×10^7 s) 阶段时，气体压力作用占据主导地位控制煤层渗透率的变化，渗透率发生反弹。如图5中时间在 10^8 s后煤层整体的渗透率整体增加超过 10^7 s时的渗透率。最终煤层形成稳定的压力场，煤层的渗透率也随煤层气体压力趋向稳定，从左到右不断降低。

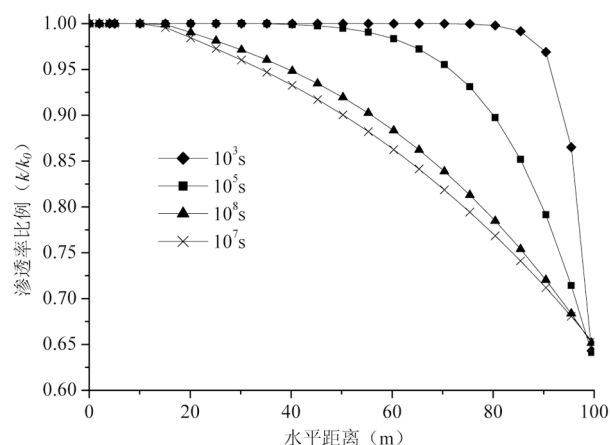


图5 煤层渗透率变化曲线

Fig. 5 The evolution of coal permeability

4 结论

应用模型化的方法分析了CO₂注入煤层处置后的CH₄-CO₂二元气体与煤体的气固耦合特征，基于COMSOL Multiphysics建立了有限元数值实验平台，通过数值模拟实验研究得到如下主要结论：

1) 将CO₂注入煤层后，CO₂不断驱替CH₄，即前者组分浓度不断升高，而后者呈下降趋势，但煤层CO₂组分的增加滞后于CH₄的减少，这与二元气体吸附、扩散与对流作用发生不同步有关。

2) 吸附作用引起的煤层膨胀变形会缓解煤的有效应力变形，并且CO₂吸附变形量大于CH₄，含CH₄-CO₂的煤层变形量小于单一CH₄的煤层变形量；

3) 煤层的孔隙压力和渗流率受煤层吸附膨胀

变形与孔隙压力变形耦合作用影响,在低压条件下吸附变形占主导控制地位,而高压条件下吸附膨胀变形被气体压力变形抵消,后者控制煤层的渗透率。

References:

- Beecy D J and Kuuskraa V A. 2001. Status of U.S. geological carbon sequestration research and technology [J]. *Environmental Geosciences*, 8 (3): 152–159.
- Bradshaw J and Rigg A. 2001. The GEODISC Program: research into geological sequestration of CO₂ in Australia [J]. *Environmental Geosciences*, 8 (3): 166–176.
- Cui X and Bustin R M. 2005. Volumetric strain associated with methane desorption and its impact on coalbed gas production from deep coal seams [J]. *The American Association of Petroleum Geologists*, 89: 1181–1202.
- Day S, Fry R, Sakurovs R. 2008. Swelling of Australian coals in supercritical CO₂ [J]. *International Journal of Coal Geology*, 74: 41–52.
- Detournay E and Cheng A H D. 1993. *Fundamental of poroelasticity* [C] // Fairhurst C. *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. II. Oxford: Pergamon, 113–171.
- Gale J, Christensen N P, Gutler A, et al. 2001. Demonstrating the potential for geological storage of CO₂: The Sleipner and GESTCO Projects [J]. *Environmental Geosciences*, 8 (3): 160–165.
- Harplani S, Prusty B K, Dutta P. 2006. Methane/CO₂ sorption modeling for coalbed methane production and CO₂ sequestration [J]. *Energy Fuel*, 20: 1591–1599.
- Karacan C O. 2007. Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO₂ sorption [J]. *Coal Geology*, 6: 209–220.
- Lu M and Connel L D. 2007. A model for the flow of gas mixtures in adsorption dominated dual porosity reservoirs incorporating multi-component matrix diffusion Part I. Theoretical development [J]. *Petroleum Science & Engineering*, 59: 17–26.
- Mazumder S and Wolf K H. 2008. Differential swelling and permeability change of coal in response to CO₂ injection for ECBM [J]. *International Journal of Coal Geology*, 74: 123–138.
- Palmer I and Mansoori J. 1998. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: A new model [J]. *Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering*, SPE Paper 52607: 539–544.
- Robertson E P and Christiansen R L. 2006. A permeability model for coal and other fractured, sorption-elastic media [J]. *Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering*, SPE Paper 104380: 1–12.
- Robertson E P and Christiansen R L. 2005. Modeling permeability in coal using sorption-induced strain data [J]. *Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation and Engineering*, SPE Paper 97068: 1–10.
- Wei X R, Wang G X, Massarotto P, et al. 2007. Numerical simulation of multicomponent gas diffusion and flow in coals for CO₂ enhanced coalbed methane recovery [J]. *Chemical Engineering Science*, 62: 4193–4203.
- Zhang H, Liu J, Elsworth D. 2008. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: A new FE model [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45: 1226–1236.