

文章编号: 1000-7598 (2009) 03-0582-05

# CO<sub>2</sub> 注入岩体的热-气-应力耦合 二维弹塑性有限元分析

张 玉 军

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 目前国内关于 CO<sub>2</sub> 地质埋存课题的研究已经起步, 其中与岩石力学有关的工作急需加强。为此, 考虑到向含气地层中注入 CO<sub>2</sub> 时岩石、气体和温度的相互作用, 将 CO<sub>2</sub> 视为理想气体, 使用 Drucker-Prager 屈服准则和‘无拉应力’判据, 建立了一个热-气-应力耦合模型并研制了相应的二维有限元程序。假定了一个由下部注入层和上覆冠石层组成的 CO<sub>2</sub> 埋存地质系统, 以此为数值模拟的对象, 分析了 CO<sub>2</sub> 在不同的注入速率和注入时间条件下岩体中的位移、应力、受拉与塑性破坏区的变化和分布情况, 结果显示, 为保证 CO<sub>2</sub> 注入岩体的稳定, 应优择最佳的注入速率和注入时间。

**关 键 词:** CO<sub>2</sub> 地质埋存; 热-气-应力耦合模型; 有限元方法; 弹塑性分析

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

## 2D elastoplastic finite element analysis of coupled thermo-gas-mechanical process in CO<sub>2</sub> injection in strata

ZHANG Yu-jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In China, the researches on geological sequestration of CO<sub>2</sub> are started, and the researches concerned with rock mechanics should be strengthened. For this reason, considering the reaction between gas, temperature and rock during CO<sub>2</sub> injection in gas-bearing strata, a coupled thermo-gas-mechanical model is established in which CO<sub>2</sub> is regard as a perfect gas, and Drucker-Prager yield criterion and non-tensile criterion are used; a relative two-dimensional FEM code is developed. A geological sequestration system which consists of an under-part reservoir and an upper-part caprock is assumed. Taking the system as the objective of numerical simulation, the changes and distributions of displacements, stresses, tensile and shear failure zones in the rock masses are analyzed under the conditions of different injection rates and different injection times. The results show that the optimal injection rate and injection time should be selected in order to ensure the stability of rock mass injected by CO<sub>2</sub>.

**Key words:** CO<sub>2</sub> geological sequestration; coupled thermo-gas-mechanical model; finite element method; elastoplastic analysis

### 1 引 言

世界进入工业化时代以来, 伴随着人类生产规模的扩大和生活水平的提高, 煤炭、石油、天然气等化石燃料的消耗越来越大, 导致各种废物、废气的生成量快速增长, 但由于大自然的吸收和净化能力有限, 使得大气中的 CO<sub>2</sub> 的含量持续升高, 形成了明显的温室效应, 从而给地球生态环境带来了灾难性的影响。如何有效地减少 CO<sub>2</sub> 的排放, 是人类面临的严峻课题。近十几年来, 西方发达国家已经

在控制 CO<sub>2</sub> 的外泄方面进行了许多探索, 其中一项主要的技术就是将 CO<sub>2</sub> 注入各种地质构造如油气田、深部含盐水岩体和煤层等之中<sup>[1-2]</sup>, 相关的岩石力学研究也在积极地开展着。如在进行数值模拟方面, Farajzadeh 等<sup>[3]</sup>考察了 CO<sub>2</sub> 注入液体饱和的均匀孔隙地层中的物质运输, 发现随着瑞利数的增长物质运输变快、浓度前锋移动加速。Sasaki 等<sup>[4]</sup>分析了在包括 CO<sub>2</sub> 的气、液和超临界态的几种地质情况下 CO<sub>2</sub> 的最佳注入条件, 显示 CO<sub>2</sub> 的渗透性受到贮存场地状况的强烈影响, 以及随着贮存场地温

收稿日期: 2008-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50578171) 资助。

作者简介: 张玉军, 男, 1956 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: yjzhang@whrsm.ac.cn

度的增加 CO<sub>2</sub> 的饱和度升高。J. Rutqvist 等<sup>[5]</sup>研究了在多层的地质系统中 CO<sub>2</sub> 注入所引起的沿岩体已有裂隙张拉与剪切破坏的潜势, 其中特别关注导致 CO<sub>2</sub> 向上迁移的地应力改变以及初始应力状态是如何影响破坏潜势的。在我国, 专门的 CO<sub>2</sub> 地质埋存的研究尚起步不久, 张洪涛等<sup>[6]</sup>在总结国际 CO<sub>2</sub> 地质埋存研究成果的基础上, 全面分析了中国适宜 CO<sub>2</sub> 埋存的地质条件和潜在的埋存区域, 初步估算中国 CO<sub>2</sub> 地下贮存总容量约为 14 548×10<sup>8</sup> t。李小春等<sup>[7]</sup>在收集大量地质、水文地质、石油勘探等资料的基础上, 将中国大陆地区 24 个主要沉积盆地分为 70 个储存分区, 利用溶解度法计算了各储存分区地下 1~3 km 深度内咸水含水层的 CO<sub>2</sub> 储存容量。周来等<sup>[8]</sup>认为, 煤介质对 CO<sub>2</sub> 具有很强的吸附能力, 因此, 可将 CO<sub>2</sub> 注入深部不可开采煤层储存, 在长久处置 CO<sub>2</sub> 的同时亦可促进深部煤层气的开采。白冰等<sup>[9-10]</sup>给出了煤体吸附 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 后的热弹性模型的一般形式和膨胀应力的计算公式, 为评估 CO<sub>2</sub> 注入煤层后吸附引起的膨胀对煤层力学稳定性的影响提供了理论依据。总的说来, 目前国内在 CO<sub>2</sub> 地质埋存研究方面的成果还很少, 特别是与岩石力学有关的工作急需加强。

为此, 笔者针对存在着向含气地层中处置 CO<sub>2</sub> 的可能性, 考虑到岩石、气体和温度的相互作用, 建立了一个热-气-应力耦合模型并研制了相应的二维有限元程序。假定一个 CO<sub>2</sub> 埋存地质系统, 其由下部注入层和上覆冠石层组成。以此为数值模拟的对象, 分析了 CO<sub>2</sub> 在不同的注入速率和注入时间条件下岩体的中的位移、应力、受拉区及塑性区的变化和分布情况, 得出了若干认识。

## 2 弹塑性热-气-应力耦合方程

这里认为 CO<sub>2</sub> 埋存地质介质是气-固二相体, 从而笔者建立了相应的热-气-应力耦合模型。

### 2.1 应力平衡方程

根据有效应力原理, 同时计入温度、孔隙气压力和体力对应力平衡的贡献, 可得

$$\left\{ \frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{i,k} + u_{k,i}) - [\beta T + \alpha S_g p_g] \delta_{ij} \right\}_{,j} + b_i = 0 \quad (1)$$

式中:  $\beta = \frac{E\beta_s}{1-2\mu}$ ;  $b_i$  为体力;  $C_{ijkl}$  为弹性刚度张量;

$u_i$ 、 $u_k$  为位移分量;  $\beta_s$  为固相的热膨胀系数;  $E$ 、 $\mu$  分别为弹性模量和泊松系数;  $T$  为温度;  $\delta_{ij}$  为克罗内克符号;  $\alpha$  为比奥系数;  $S_g$  为气体的饱和度;

$p_g$  为孔隙气体压力。

### 2.2 气体连续性方程

在含气的岩土体中, 总应变、孔隙气压力、气体的饱和度和密度、温度、有效应力的变化都会影响到介质中储气量的增减, 由此根据质量守恒原理可得出:

$$\begin{aligned} & -\nabla^T \left\{ \frac{K r_g}{\mu_g} \nabla p_g \right\} + s_g \left( m^T - \frac{m^T D_T}{3k_s} \right) \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} + \\ & \left\{ D_s \phi + \frac{\phi s_g}{k_g} + s_g \left( \frac{1-\phi}{k_s} - \frac{1}{(3k_s)^2} m^T D_T m \right) \right\} \cdot \\ & [s_g + p_g D_s] \frac{\partial p_g}{\partial t} - \{ \phi s_g \beta_g + s_g [(1-\phi) \beta_s - \\ & \frac{m^T D_T m}{3k_s} \beta_s] \} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $K$  为固有渗透系数矩阵;  $r_g$  为比渗透系数矩阵, 是  $s_g$  的函数;  $\mu_g$  为气体的黏滞系数;  $D_T$  为弹塑性模量矩阵;  $k_s$  为固相的体积模量;  $m$  为法向应力单位列阵;  $D_s = \partial s_g / \partial p_g$  为气体容量;  $\phi$  为孔隙度;  $k_g$  为气体的压缩模量;  $\beta_g$  为气体的热膨胀系数。

假定气体是理想气体, 其状态方程为

$$p_g = \rho_g R T / M_g \quad (3)$$

式中:  $R$  为气体常数;  $M_g$  为气体的摩尔质量。

### 2.3 能量守恒方程

假定气体和固体具有相同的温度, 根据能量守恒原理, 在某一时间内流入物体的热量等于其内能的增加, 并考虑形变产生的热效应, 可得

$$\begin{aligned} & (1-\phi) \beta T \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} - \nabla^T \lambda \nabla T + \phi s_g \rho_g C_g (\nabla^T T) V^a + \\ & [(1-\phi) \rho_s C_s + \phi \rho_g C_g] \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $C_g$ 、 $C_s$  分别为气体及固体介质的比热;  $\rho_g$ 、 $\rho_s$  分别为气体、固体介质的密度;  $\lambda$  为含气岩土体的等效导热系数矩阵;  $V^a$  为气流的表观速度。

### 2.4 弹塑性分析

在进行弹塑性计算时, 针对岩体的有效应力  $\sigma' = \sigma - m p_g$ , 使用了 Drucker-Prager 屈服准则和‘无拉应力’判据。

## 3 数值分析模型

一个 CO<sub>2</sub> 埋存地质构造往往由注入层和冠石层组成<sup>[5]</sup>。笔者假定了这样的一个分析模型: 计算域的中心位于地表下 1 550 m 处, 尺寸为水平向×垂直向 = 100 m×100 m, 其中冠石层和注入层的厚度分别为 30 m 和 70 m, 从地面通过管道向地下深部输入 CO<sub>2</sub>, 见图 1。对此当平面问题考虑, 共离散为

10 000 个四边形单元和 10 201 个节点。取边界条件为：垂直与底部边界的法向位移约束，顶部边界位移自由，但其上作用有上覆岩体转化来的自重荷载；作为初始条件，以  $z$  表示地层深度，其 0 点在地表，向下为负，则地层中温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) 梯度为  $T=10.0-0.025z$ ，气体压力 (Pa) 梯度为  $P=1.01\times 10^5\cdot 0-10.0z$ 。

岩体的物理力学参数见表 1。虽然  $\text{CO}_2$  的物理力学参数是温度和压力的函数，但本计算中岩层的温度基本是常量，压力变化也不是太大，作为简化，参考了有关  $\text{CO}_2$  的物性资料，取其若干物理力学参数为常数：密度  $\rho_g=1.524\text{ kg/m}^3$ ，压缩模量  $k_g=2.5\text{ MPa}$ ，比热  $C_g=0.8\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ ，热膨胀系数  $\beta_g=0.00375\text{ 1/K}$ ，摩尔质量  $M_g=44\text{ g/mol}$ ，气体常数  $R=8.314\text{ J/K}\cdot\text{mol}$ 。

分析了 3 种工况： $\text{CO}_2$  为气相物质，其注入速率依次为 0.04，0.2 和 0.4  $\text{kg/m}\cdot\text{s}$  ( $m$  为计算域的单位厚度)，但注入时间均为 567 d。

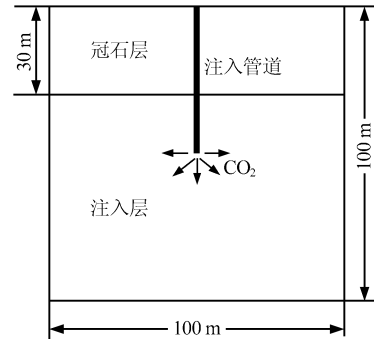


图 1 计算剖面  
Fig.1 Calculation section

表 1 岩石的计算参数  
Table 1 Calculation parameters of rocks

介质	重度 $\rho/(\text{kN/m}^3)$	孔隙率 $\phi$	渗透系数 $k/\text{m}^2$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松系数 $\mu$	比热 $C/(\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	热膨胀系数 $\beta/^{\circ}\text{C}^{-1}$	导热系数 $\lambda/(\text{W/m}^1\cdot^{\circ}\text{C})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\phi/^{\circ}$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
注入层	21.5	0.1	$1.0\times 10^{-14}$	4 500	0.25	900	$1.0\times 10^{-6}$	1.0	2.0	45	0.05
冠石层	22.6	0.01	$1.0\times 10^{-19}$	5 000	0.23	800	$8.0\times 10^{-5}$	1.2	2.5	50	0.1

注：该表中部分参数取自文献[5]

### 4 有限元计算结果

图 2 为  $\text{CO}_2$  注入点之上 0.2 m 处岩体的垂直位移随时间的变化曲线。计算终了时 3 种工况对应的位移值依次为 0.6 mm、19.8 mm 和 60.2 mm，且方向均为向上。这说明在相同时间内随着注入速率的提高，地层中孔隙气体压力上升，使得岩体膨胀变形增大。由于计算域的垂直边界在水平方向受到约束，而顶部边界是位移自由的，故岩体有向上隆起的趋势。以工况 3 为例，计算终了时  $\text{CO}_2$  注入点周围  $20\text{ m}\times 20\text{ m}$  范围内地层因孔隙气体压力产生的位移矢量见图 3。从图 2 也看出，3 种工况下岩体的垂直位移的发展并不与注入速率成正比，这是由于在高注入速率时岩体较大范围进入受拉破坏和塑性状态的缘故（在后面将看到）。

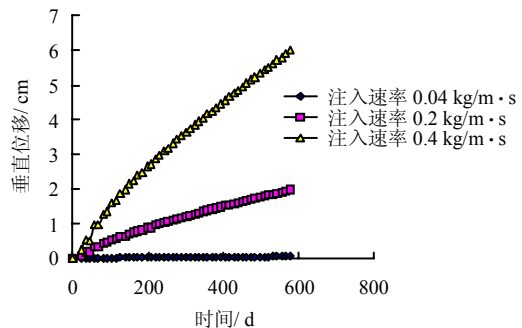


图 2 岩体的垂直位移随时间的变化  
( $\text{CO}_2$  注入点之上 0.2 m 处)  
Fig.2 Vertical displacements versus time  
(with 0.2 m above  $\text{CO}_2$  injection point)

图 4 为  $\text{CO}_2$  注入点之上 0.5 m 处岩体单元中心的垂直正应力  $\sigma_y$  随时间的变化曲线。从中看到：对于工况 1， $\sigma_y$  随时间的推移而减少，并且始终保持着这一趋势，其初值和终值分别是  $-33.7\text{ MPa}$  和  $-23.7\text{ MPa}$ ；对于工况 2， $\sigma_y$  先是随时间而减少，到约 130 d 时降为最小值，之后又随时间而增大，其初值和终值分别是  $-31.5\text{ MPa}$  和  $-18.6\text{ MPa}$ ，最小值为  $-0.3\text{ MPa}$ ；对于工况 3， $\sigma_y$  一开始就随时间

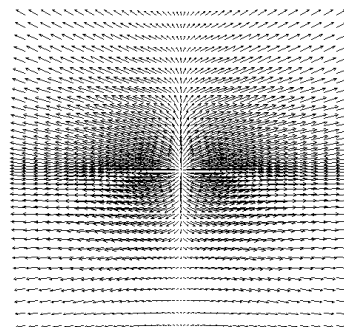


图 3 计算终了时  $\text{CO}_2$  注入点附近位移矢量(工况 3)  
Fig.3 Displacement vectors around  $\text{CO}_2$  injection point at calculation end (case 3)

快速减少, 到约 30 d 时接近 0, 之后再无明显变化, 其初值和终值分别是 -28.9 MPa 和 0.1 MPa。其原因在于: 在相同的时间内, 当注入速率较小时, 岩层中孔隙气体压力也较低, 对初始地应力场影响不大, 注入点附近岩体受拉及塑性破坏的范围也较小, 而当注入速率相当大时, 很高的孔隙气体压力对初始地应力场扰动严重, 使得注入点周围大面积岩体处于受拉及塑性破坏状态, 并产生应力重分布。对于图 4 对应的岩体单元, 在工况 1 时为压剪破坏, 在工况 2 时为拉剪破坏, 在工况 3 时则为双拉破坏。以工况 3 为例, 计算终了时地层中的主应力等值线见图 5。

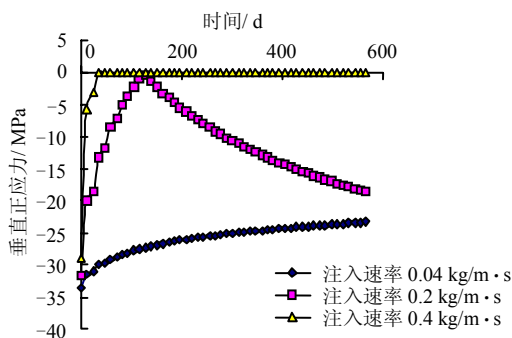


图 4 岩体的垂直正应力随时间的变化(CO<sub>2</sub>注入点之上 0.5 m 处)  
Fig.4 Vertical normal stresses versus time (with 0.5 m above CO<sub>2</sub> injection point)

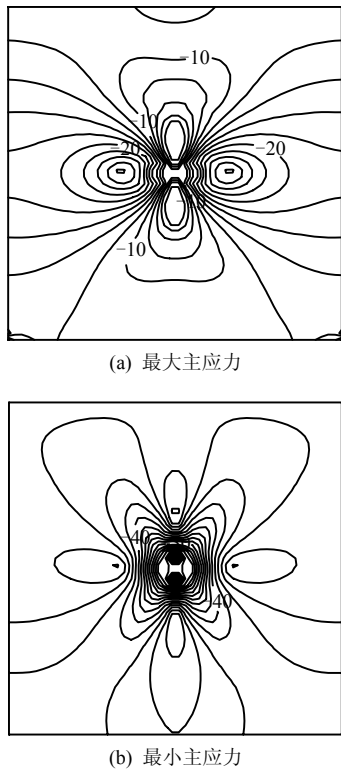


图 5 工况 3 计算终了时地层中的主应力等值线(MPa)  
Fig .5 Contours of principal stresses in rock masses at calculation end for case 3 (MPa)

图 6 和图 7 分别为工况 3 在 1, 105, 567 d 时 CO<sub>2</sub> 注入点周围受拉破坏区和塑性区的分布。受拉破坏区的形状为上下两端尖而中间粗, 象竖立的“枣核”, 而塑性区大致呈现“X”形状, 并且在时间 ≤105 d 塑性区尚未进入冠石层, 而在计算终了时冠石层中已出现了部分塑性区。在相同的时间内, 随着注入速率的增加, 地层中受拉破坏区和塑性区的面积变大。3 种工况不同时间的受拉破坏单元和塑性单元的数目见表 2。

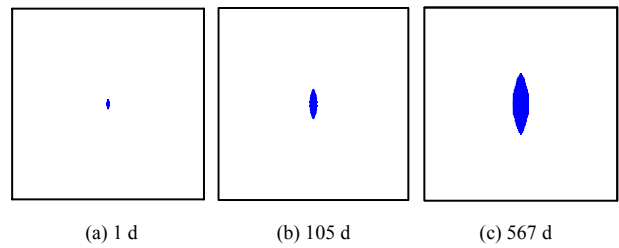


图 6 工况 3 计算终了时地层受拉破坏区  
Fig.6 Tensile failure zones in rock masses at calculation end for case 3

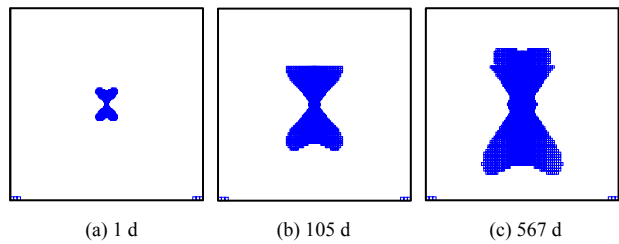


图 7 工况 3 计算终了时地层塑性破坏区  
Fig.7 Plastic failure zones in rock masses at calculation end for case 3

表 2 3 种工况不同时间的受拉及塑性单元数  
Table 2 Numbers of failure elements at different times in three cases

工况	1 d		105 d		567 d	
	受拉单元	塑性单元	受拉单元	塑性单元	受拉单元	塑性单元
1	0	42	8	220	32	638
2	32	250	184	1 086	536	2 132
3	64	602	352	1 956	968	3 176

图 8 为工况 3 在计算终了时 CO<sub>2</sub> 注入点周围 10 m×10 m 范围内孔隙气体压力等值线, 其分布基本为同心的圆环。图中孔隙气体压力的最大值在注入点处 (圆心位置), 达到 3.47 MPa。工况 1 和工况 2 的情况与此类似, 计算终了时注入点处的孔隙气体压力分别为 0.35 MPa 和 1.73 MPa。由此可见, 在时间相同时, 注入点处的孔隙气体压力大致与注入速率成正比。

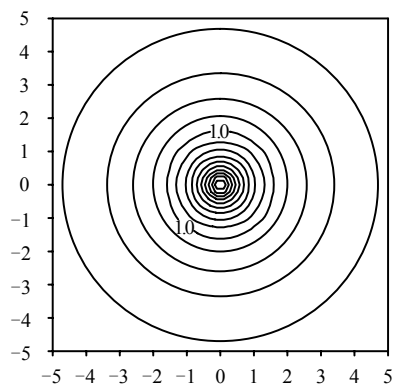


图8 工况3计算终了时CO<sub>2</sub>注入点附近孔隙气体压力等值线(单位:MPa)

Fig.8 Contours of pore gas pressure around CO<sub>2</sub> injection point at calculation end for case 3 (unit: MPa)

## 5 结论

通过上述研究,可得出以下结论:

(1) 针对在含气地层中CO<sub>2</sub>注入埋存的问题,将CO<sub>2</sub>视为理想气体,使用Drucker-Prager屈服准则和‘无拉应力’判据,建立了一种热-气-应力耦合弹塑性模型,并研制了相应的二维有限元计算程序。

(2) 以一个假定的由注入层和冠石层组成的地质结构为考察对象,对CO<sub>2</sub>注入过程中岩体中的热-气-应力耦合现象进行了数值模拟。其结果显示:在相同的时间内,随着注入速率的增加,地层中孔隙气体压力升高,岩体的向上位移和其中的受拉及剪切破坏范围均变大,应力产生重新分配。这说明在特定的地质条件下,为保证CO<sub>2</sub>注入岩体的稳定,应优择最佳的注入速率和注入时间。

(3) 在所建模型中,尚未考虑地层中水与气共存以及岩体受拉及剪切破坏后其孔隙率明显增加等因素。在下一步的工作中,将着重研究CO<sub>2</sub>注入岩体中气液二相流与温度和固体的耦合作用以及岩体渗透性与受拉及剪切破坏的关系等问题。

## 参考文献

[1] LAW DHS, BACHU S. Hydrogeological and numerical analysis of CO<sub>2</sub> disposal in deep aquifers in the Alberta sedimentary basin[J]. *Energy Convers Manage*, 1996, 13(37): 1167—1174.

[2] GAUS I, AZAROUAL M, CZERNICHOWSKI-LAURIOL I. Reactive transport modeling of the impact of CO<sub>2</sub> injection on the clayey cap rock at Sleipner (North Sea)[J]. *Chemical Geology*, 2005, 217(3-4): 319—337. 2000, 40(1): 654—666.

[3] FARAJZADEH R, SALIMI H, ZITHA P L J, et al.

Numerical simulation of density-driven natural convection in porous media with application for CO<sub>2</sub> injection projects[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(25-26): 5054—5064.

- [4] SASAKI K, FUJII T, NIIBORI Y, et al. Numerical simulation of supercritical CO<sub>2</sub> injection into subsurface rock masses[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(1): 54—61.
- [5] RUTQVIST J, BIRKHOZLER J, CAPP A F, et al. Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO<sub>2</sub> using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(6): 1798—1807.
- [6] 张洪涛, 文冬光, 李义连, 等. 中国CO<sub>2</sub>地质埋存条件分析及有关建议[J]. *地质通报*, 2005, 24(12): 1107—1110.  
ZHANG Hong-tao, WEN Dong-guang, LI Yi-lian, et al. Conditions for CO<sub>2</sub> geological sequestration in China and some suggestions[J]. *Regional Geology of China*, 2005, 24(12): 1107—1110.
- [7] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层CO<sub>2</sub>储存优先区域选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 963—968.  
LI Xiao-chun, LIU Yan-feng, BAI Bing, et al. Ranking and screening of CO<sub>2</sub> saline aquifer storage zones in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 963—968.
- [8] 周来, 冯启言, 李向东, 等. 深部煤层对CO<sub>2</sub>地质处置机制及应用前景[J]. *地球与环境*, 2007, 35(1): 9—14.  
ZHOU Lai, FENG Qi-yan, LI Xiang-dong; et al. Mechanism and application potential of geological sequestration of carbon dioxide in deep coal seams[J]. *Earth and Environment*, 2007, 35(1): 9—14.
- [9] 白冰, 李小春, 刘延锋, 等. CO<sub>2</sub>吸附对煤岩热弹性模型影响的理论解释[J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 1974—1977.  
BAI Bing, LI Xiao-chun, LIU Yan-feng, et al. A theoretical explanation for influence of CO<sub>2</sub> adsorption on thermoelastic model of coal-rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 1974—1977.
- [10] 白冰, 李小春, 刘延锋, 等. CO<sub>2</sub>-ECBM中气固作用对煤体应力和强度的影响分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(4): 823—826.  
BAI Bing, LI Xiao-chun, LIU Yan-feng, et al. Preliminary theoretical study on impact on coal caused by interactions between CO<sub>2</sub> and coal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 823—826.