

文章编号: 1000 - 7598 (2014) 09 - 2549 - 06

# CO<sub>2</sub> 注入下岩层变形和流体运移分析 (I): 两相流-岩层耦合模型

张 帆<sup>1,2</sup>, 周 辉<sup>2</sup>, 吕 涛<sup>3</sup>, 胡大伟<sup>2</sup>, 盛 谦<sup>2</sup>, 胡其志<sup>1</sup>

(1. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430068; 2. 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; 3. 中国核电工程有限公司, 北京 100840)

**摘 要:** 目前国内关于 CO<sub>2</sub> 咸水层封存尚处于先导性和试验性研究阶段, 对超临界 CO<sub>2</sub> 注入过程中岩层力学响应和流体运移的理论和技术方面的认识还不完善。为研究 CO<sub>2</sub> 注入下岩层变形和流体运移, 基于两相流动数学模型, 给出了超临界 CO<sub>2</sub> 和咸水质量守恒方程; 采用毛细压力和有效饱和度的关系式, 将质量守恒方程变换成以毛细压力为变量的表达式, 以便于考虑流体压力对岩层的影响。提出了无流体压力影响下的岩层力学本构模型, 该模型能够同时考虑岩层的塑性变形和损伤。分析了两相流体-岩层相互作用机制: 一方面, 采用有效应力原理, 考虑流体压力对岩层的力学影响; 另一方面, 通过岩层固有渗透率变化考虑岩层变形对流体运移的影响。

**关 键 词:** CO<sub>2</sub> 咸水层封存; 两相流; 弹塑性; 损伤; 有效应力; 渗透率; 流-固耦合

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

## Analysis of reservoir deformation and fluid transportation induced by injection of CO<sub>2</sub> into saline aquifer: (I) Two-phase flow-reservoir coupling model

ZHANG Fan<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui<sup>2</sup>, LÜ Tao<sup>3</sup>, HU Da-wei<sup>2</sup>, SHENG Qian<sup>2</sup>, HU Qi-zhi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

**Abstract:** Deep underground injection of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) into saline reservoir in China is in the stage of pilot project and field validation. The mechanical response of reservoir and fluid transportation induced by injection of supercritical CO<sub>2</sub> are imperfect in theory and technology. In order to study the reservoir deformation and fluid transportation, the mass balance equations for both supercritical CO<sub>2</sub> and saline are firstly presented based on two-phase flow model. The capillary pressure is introduced and served as the argument in the mass balance equations after some equation manipulations, with the help of relation between capillary pressure and saturation degree, which can facilitate consideration of the influence of fluid pressure on the reservoir formation. Secondly, a constitutive model is proposed to describe the mechanical behavior of dry rock of reservoir formation without fluid pressure, both the plastic deformation and damage mechanism can be considered. The coupling mechanism of fluid and reservoir formation is analyzed; the effective stress concept is used to consider the effect of fluid pressure on the reservoir formation, while the influence of reservoir deformation on fluid transportation is described by the variation of permeability of reservoir formation.

**Key words:** CO<sub>2</sub> storage in saline aquifer; two-phase flow; elastoplastic; damage; effective stress; permeability; hydro-mechanical coupling

### 1 引 言

工业革命以来, 全球平均气温已经比工业革命

前增加了 0.6 °C, 全球气温的急剧升高 (相对于地球正常的变化规律) 已经影响到多数人的生活以及少数人的生存。CO<sub>2</sub> 是最主要的温室气体, 在导致

收稿日期: 2013-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51009132, No. 51209085); 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题 (No. Z013007)

第一作者简介: 张帆, 女, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学、岩土材料多场耦合方面的研究工作。E-mail: fanzhang@aliyun.com

通讯作者: 周辉, 男, 1972 年生, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

气候变化的各种温室气体中, CO<sub>2</sub>对温室效应的贡献率达 63%。为了达到 CO<sub>2</sub>减排目标,人们提出了 CO<sub>2</sub>捕获和封存(CCS)的大规模减排方案。

我国关于 CCS 的研究刚刚起步。曾荣树等<sup>[1]</sup>阐述了 CO<sub>2</sub>地下储存的基本原理与可行性,同时论述可能产生的风险与有关地质环境问题,并建议我国应该开展对 CO<sub>2</sub>隔离储存原理、技术的研究。孙枢<sup>[2]</sup>对 CO<sub>2</sub>地下封存的地质学问题进行了系统的阐述,并指出了当前我国应妥善安排科研和试验工作,确定封存 CO<sub>2</sub>及可能利用的方案,同时开展广泛的国际合作,逐步建立适合中国国情的碳隔离技术体系。张洪涛等<sup>[3]</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>[4]</sup>介绍了 CO<sub>2</sub>地中隔离的概念及国际动态,并基于隔离容量、机制、安全性及成本分析,论述其可行性,并对优先利用的储存分区进行了详细研究。

咸水层由于具有分布面积广、厚度大、储存容量巨大和存储成本低等优点,已成为地质封存首选场地。在对咸水层注入超临界 CO<sub>2</sub>的过程中,由于注入压力的影响,将会破坏岩层地应力场的平衡,影响到盖层的密闭性,增加 CO<sub>2</sub>泄露的风险。为了评估 CO<sub>2</sub>注入过程中岩层的稳定性和 CO<sub>2</sub>运移规律,国外的学者提出了相应的数值分析方法,包括: Tough2-Flac<sup>3D</sup><sup>[5]</sup>、Bright<sup>[6]</sup>、Tough2-Aster<sup>[7]</sup>和 Open-GeoSys<sup>[8]</sup>等方法。近年来,我国学者开始了此方面的相关研究。张玉军<sup>[9]</sup>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,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。刘小燕<sup>[10]</sup>建立了考虑热效应的非等温两相渗流耦合模型,开发了有限元模拟程序,研究了 CO<sub>2</sub>封存中的黏性指进现象,并通过正演模拟提出了挪威 Sleipner 地区碳封存地震监测资料异常的新解释。刘永忠等<sup>[11]</sup>建立了一个描述超临界 CO<sub>2</sub>-盐水体中两相流驱替过程的数学模型,通过数值模拟研究了孔隙度随机分布的孔隙介质中超临界 CO<sub>2</sub>的注入压力和饱和度的分布特性,考察了 CO<sub>2</sub>注入的过程参数以及咸水层特性的影响。罗庶等<sup>[12]</sup>通过数值模拟研究了超临界 CO<sub>2</sub>注入孔隙介质时突破压力梯度和 CO<sub>2</sub>饱和度以及流动时间的关系。崔振东等<sup>[13]</sup>基于币形裂纹模型和水力致裂原理,从岩石断裂力学角度分析和评价了砂岩透镜体封存箱盖层岩石抗断裂性能。成建梅等<sup>[14]</sup>运用 Tough-MP 并行计算代

码,建立了覆盖整个松辽盆地的三维地质模型,在中央凹陷区开展大尺度 CO<sub>2</sub>注入模拟研究,包括 CO<sub>2</sub>运移、储存、地层压力提升以及储存安全性等问题。

上述研究表明,CO<sub>2</sub>的注入将引起超孔隙压力,改变岩层有效应力场,受压状态的岩层骨架因有效应力的减小而产生膨胀变形。然而,反过来,岩层的变形又将引起岩层渗透性和孔隙力学参数发生变化,进而对 CO<sub>2</sub>的运移、流体压力对岩层的作用规律产生影响。因此,本文基于 CO<sub>2</sub>注入阶段两相流体-岩层相互作用机制,建立了两相流体-岩层流固耦合模型。

## 2 两相流体质量守恒方程

在咸水层中注入超临界 CO<sub>2</sub>的过程中,多孔岩层孔隙中的咸水可被视为湿润相,而注入的 CO<sub>2</sub>则为非湿润相,它们的质量守恒方程可表示为

$$\rho_w \phi \frac{\partial (Se_w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}_w) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{nw} \phi \frac{\partial (Se_{nw})}{\partial t} + \nabla \cdot (-\rho_{nw} \mathbf{u}_{nw}) = 0 \quad (2)$$

式中:  $\rho_i$ 、 $Se_i$ 和 $\mathbf{u}_i$ ( $i$ 为 $w$ 或 $nw$ )分别为咸水和 CO<sub>2</sub>的密度、有效饱和度和渗流速度;  $\phi$ 为岩层的孔隙率。根据达西定律,多孔岩层中咸水和 CO<sub>2</sub>的流动满足:

$$\mathbf{u}_w = -\frac{k\kappa_{r,w}}{\mu_w}(\nabla p_w - \rho_w \mathbf{g}) \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{nw} = -\frac{k\kappa_{r,nw}}{\mu_{nw}}(\nabla p_{nw} - \rho_{nw} \mathbf{g}) \quad (4)$$

式中:  $\kappa_{r,i}$ 、 $p_i$ 和 $\mu_i$ 分别为咸水(下标 $i$ 为 $w$ )和 CO<sub>2</sub>(下标 $i$ 为 $nw$ )在岩层中的相对渗透率、压力和动力黏滞系数;  $k$ 为岩层的固有渗透率,这里假设岩层的渗透率表现为各向同性,可采用一个标量表示;  $\mathbf{g}$ 为重力加速度。

假设咸水层的孔隙完全被咸水和 CO<sub>2</sub>所占据,则咸水和 CO<sub>2</sub>的有效饱和度需满足:

$$Se_w + Se_{nw} = 1 \quad (5)$$

咸水层中的毛细压力  $p_c$  为

$$p_c = p_{nw} - p_w \quad (6)$$

根据试验数据,前人提出了许多毛细压力和有效饱和度的关系式。其中, Brooks-Corey 和 van Genuchten 关系式<sup>[15]</sup>由于具有连续性好的特点而被

人们广泛采用。其表达式为

$$Se_w = \frac{1}{[1 + |\alpha H_c|^n]^m}, H_c = \frac{P_c}{\rho_{water} g} \quad (7)$$

式中： $\alpha$ 、 $m$ 和 $n$ 均为 van Genuchten 参数，它们与材料的孔隙结构相关，可通过拟合保水试验 (retention test) 数据确定； $H_c$ 为对  $p_c$  进行量纲转化后的变量。

为了考虑流体压力对岩层的影响，将质量守恒方程变换成以压力为变量的方程。联合式(1)~(7)，采用毛细压力  $p_c$  作为质量守恒方程的变量，并进行一系列变换，可得如下的质量守恒方程：

$$\phi C_w \frac{\partial p_c}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\frac{k\kappa_{r,w}}{\mu_w} (\nabla p_w - \rho_w g) \right) = 0 \quad (8)$$

$$\phi C_{nw} \frac{\partial p_c}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\frac{k\kappa_{r,nw}}{\mu_{nw}} (\nabla p_{nw} - \rho_{nw} g) \right) = 0 \quad (9)$$

式中： $C_w$ 和 $C_{nw}$ 分别为咸水和 CO<sub>2</sub>的比容量，它们可通过将有效饱和度对毛细压力求偏导得到，表示为

$$C_{p,w} = -C_{p,nw} = \frac{\partial Se_w}{\partial p_c} \quad (10)$$

下面将讨论式(8) \ (9) 各参数的具体表达式。假设咸水层初始完全被咸水所占据，CO<sub>2</sub>注入后，对于咸水质量守恒方程式(8)，可分为完全饱和 ( $H_c = 0$ ) 和部分饱和 ( $H_c > 0$ ) 两种情况，这两种情况下各参数表示如下：

$$Se_w = \begin{cases} \frac{1}{[1 + |\alpha H_c|^n]^m}, & (H_c > 0) \\ 1, & (H_c = 0) \end{cases} \quad (11)$$

$$C_w = \begin{cases} \frac{\alpha m}{1-m} Se_w^{\frac{1}{m}} \left( 1 - Se_w^{\frac{1}{m}} \right)^m, & (H_c > 0) \\ 0, & (H_c = 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$\kappa_{r,w} = \begin{cases} Se_w^l \left[ 1 - \left( 1 - Se_w^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2, & (H_c > 0) \\ 1, & (H_c = 0) \end{cases} \quad (13)$$

式中：参数  $l$  也为 van Genuchten 参数。

相应地，CO<sub>2</sub>质量守恒方程中的参数可表示为

$$Se_{nw} = 1 - Se_w \quad (14)$$

$$C_{nw} = -C_w \quad (15)$$

$$\kappa_{r,nw} = (1 - Se_w)^l \left( 1 - Se_w^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (16)$$

### 3 岩层力学模型

上节给出了两相流质量守恒方程，为了建立两相流-岩层流固耦合模型，还需要描述岩层的力学行为的本构模型。为了方便，本节暂且不考虑流体压力对岩层力学行为的影响，将首先给出无流体压力条件下的岩层力学模型，关于流体和岩层的相互作用将在下节中考虑。

在等温假设条件下，岩层力学模型中状态变量由应变张量  $\epsilon$ 、损伤变量  $d$ 、塑性应变张量  $\epsilon^p$  和刻画塑性硬化的内部变量  $\gamma_p$  构成。按照一般形式，把应变张量分解成弹性部分  $\epsilon^e$  和塑性部分  $\epsilon^p$  [16]：

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p, d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^p \quad (17)$$

假定存在一个热力学势  $\psi$ ，且损伤过程是与塑性变形、塑性硬化耦合在一起的。其具体表达式为

$$\psi = \frac{1}{2}(\epsilon - \epsilon^p) : C(d) : (\epsilon - \epsilon^p) + \psi_p(\gamma_p, d) \quad (18)$$

式中：方程右边第一部分为弹性势；函数  $\psi_p$  为描述岩层塑性硬化的热力学势； $C(d)$  为四阶的有效弹性刚度张量。

由式(17) \ (18)，将热力学势对弹性应变张量求导得到本构方程：

$$\sigma = \frac{\partial \psi}{\partial \epsilon^e} = C(d) : (\epsilon - \epsilon^p) \quad (19)$$

#### 3.1 塑性模型

对于岩石材料，人们经常采用 Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 塑性屈服准则。但这两种塑性屈服准则均为线性函数形式。而以往的试验结果表明 [17-18]，大部分岩石的塑性屈服面往往为非线性，需要采用曲线型的塑性屈服函数。因此，本文的模型中，采用如下形式的塑性屈服函数：

$$f_p(\sigma_{ij}, \gamma_p, d) = q - \eta_p(\gamma_p, d) \sqrt{c_s + p} = 0 \quad (20)$$

式中： $p = \frac{\sigma_{kk}}{3}$ ， $q = \sqrt{3J_2}$ ， $J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}$ ， $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{\sigma_{kk}}{3} \delta_{ij}$ ， $\delta_{ij}$  为二阶单位张量； $p$  和  $q$  分别为平均应力 (以压为正) 和偏应力；参数  $c_s$  为材料的黏聚力。这里采用塑性硬化函数  $\eta_p(\gamma_p, d)$  描述岩石的塑性演化。根据应力-应变曲线，当岩石进入塑性变形阶段，继续加载将引起材料强化效应，塑性演化定律

应该包含一个内部硬化变量  $\gamma_p$  的递增函数；此外，考虑到岩石破坏过程细观裂纹扩展引起的材料损伤，塑性演化定律还应该包含一个损伤变量  $d$  的递减函数。在以上分析的基础上，提出下述函数：

$$\eta_p(\gamma_p, d) = (1-d) \left[ \eta_0 + (\eta_m - \eta_0) \frac{\gamma_p}{b_1 + \gamma_p} \right] \quad (21)$$

式中：参数  $b_1$  控制硬化速度； $\eta_0$  和  $\eta_m$  分别为塑性屈服门槛值和塑性硬化终值。注意到，在式 (21) 中屈服面的演化速率同时受到两个相反演化趋势的控制：第 1 部分为随着塑性变形增加而递增的趋势；第 2 部分为随着损伤演化增加而递减的趋势。

采用广义的塑性剪应变作为塑性硬化内变量  $\gamma_p$ ，其计算公式为

$$d\gamma_p = \sqrt{\frac{2}{3} de_{ij}^p de_{ij}^p}, \quad de_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^p - \frac{d\varepsilon_{kk}^p}{3} \delta_{ij} \quad (22)$$

基于热力学理论，对式 (21) 中的变量  $\gamma_p$  进行积分，可以得到塑性耗散势的表达式为

$$\psi_p(\gamma_p, d) = (1-d) \left[ \eta_m \gamma_p - (\eta_m - \eta_0) b_1 \ln \frac{b_1 + \gamma_p}{b_1} \right] \quad (23)$$

对于岩石材料，随着轴向应力的增加，裂纹逐步发展，体积变形经历着从压缩到膨胀的转变。此外，随着围压的增加，体积变形的膨胀趋势越来越不明显。为了更好地描述塑性流动过程中体积变形的演化，基于试验数据，提出了下述的非关联流动法则作为塑性势函数：

$$g_p = q + (\eta_p - \beta_p)(p + C_s) \quad (24)$$

式中：参数  $\beta_p$  为体积变形由压缩到膨胀的转折点。当  $\eta_p < \beta_p$  时，表现为体积压缩；而当  $\eta_p > \beta_p$  时表现为体积膨胀。

### 3.2 损伤模型

对于岩石材料，其损伤主要由微裂纹扩展引起，而这种破坏主要是塑性剪切机制控制的。为了简化，将损伤变量与塑性硬化内变量联系起来，将损伤演化定律表示如下：

$$f_d(\gamma_p, d) = d_c (1 - e^{-B_d \gamma_p}) - d = 0 \quad (25)$$

式中：参数  $B_d$  为控制损伤演化的模型参数； $d_c$  为损伤终值，它决定材料的残余强度，可通过将残余强度与峰值强度相比较确定。通过塑性模型可得到塑性硬化内变量，进而通过上式，计算得到损伤变量。

对各向同性材料，通常采用两个独立的弹性参数，即体积模量  $K(d)$  和剪切模量  $G(d)$ 。根据相关

的细观力学分析<sup>[19]</sup>，体积模量和剪切模量是独立的，均可以写成损伤变量的函数：

$$K(d) = (1-d)K_0, \quad G(d) = (1-d)G_0 \quad (26)$$

式中： $K_0$ 、 $G_0$  分别为材料未产生损伤时的体积模量和剪切模量，即材料的初始体积模量和初始剪切模量。在三轴压缩试验中应力-应变曲线中选取直线段，通过计算轴向和侧向的斜率，分别确定初始弹性模量和初始泊松比，进而通过弹性参数的对应关系，计算初始体积模量和初始剪切模量。

## 4 流-固耦合关系式

以上两节分别给出了描述流体输运和岩层变形的理论模型。但如前所述，CO<sub>2</sub> 的注入会引起流体和岩层之间的相互作用。因此，流体和岩层之间的流-固耦合关系需要从两方面进行描述：流体压力对岩层力学行为的影响，主要通过有效应力系数和有效应力原理来描述；岩层变形对流体运移的影响，主要通过岩层的固有渗透率来描述。

### 4.1 有效应力系数

根据 Thompson<sup>[20]</sup>、Cheng<sup>[21]</sup> 等的细观力学分析，对于初始各向异性的多孔岩石，其宏观的弹性孔隙力学参数可以通过分析多孔介质组成结构的细观性质得到。在分析岩石微观结构的基础上，采用从细观到宏观的多尺度方法，对于某个给定损伤水平的各向异性损伤岩石进行研究。考虑到饱和多孔介质的细观变形机制，可以得到如下公式<sup>[20-23]</sup>：

$$b(d) = \delta - C(d) : S^s : \delta \quad (27)$$

式中： $b(d)$  为各向异性有效应力系数的二阶张量； $\delta$  为二阶单位张量； $C(d)$  为排水条件下损伤岩石的四阶有效弹性刚度张量； $S^s = (C^s)^{-1}$  为固体基质的四阶弹性柔度张量，其值一般为常数。

为了简便起见，采用两个基本假设：第 1 个为细观均匀 (micro-homogeneity)，认为孔隙材料的骨架在颗粒和孔隙尺寸的尺度 (细观尺度) 上可视为均匀。材料在宏观尺度上表现出的不均匀性由这些细观均匀的材料在空间分布上的不均匀性造成；第 2 个为细观各向同性 (micro-isotropy)，认为孔隙材料的骨架在颗粒和孔隙尺寸的尺度 (细观尺度) 上可视为各向同性，材料在宏观尺度上表现出初始结构的各向异性由孔隙和裂纹在空间上的倾向性排列造成。采用上面两个假设，可以将式 (27) 简化为

$$b(d) = \delta - \frac{1}{3k^s} C(d) : \delta \quad (28)$$

式中:  $k^s$  为孔隙材料固体骨架的体积压缩模量。

如前所述, 当前研究中, 笔者认为, 岩层表现为各向同性, 上式可以简化为标量表达式:

$$b(d) = 1 - \frac{1}{3k^s} K(d) \quad (29)$$

为了考虑流体压力对岩层变形的影响, 需要在前面岩层本构关系中引入流体压力。一般地, 人们采用应变或者应力等效原理, 通过有效应力代替材料外部受到的总应力。这里, 采用有效应力原理, 在存在流体压力的情况下, 式(19)可表示为

$$\sigma = C(d) : (\varepsilon - \varepsilon^p) - b(d) P_p \delta \quad (30)$$

式中:  $P_p$  为岩层孔隙中的流体压力。因为岩层孔隙同时被咸水和超临界 CO<sub>2</sub> 所占据, 那么孔隙压力可认为由咸水和超临界 CO<sub>2</sub> 压力所组成:

$$P_p = p_w S_{e_w} + p_{nw} S_{e_{nw}} \quad (31)$$

#### 4.2 岩层固有渗透率

以往试验结果表明<sup>[18]</sup>, 饱和砂岩三轴压缩试验过程中的渗透率表现出先减小、后增加的演化规律。在岩样变形的两个阶段, 即初始沉积层面和微裂纹闭合以及线性弹性变化阶段, 其轴向渗透率迅速减小。随后, 应力诱发的微裂纹开始萌生, 轴向渗透率减小的速率开始减缓。最后, 随着微裂纹密度的增加, 轴向渗透率开始增大。分别考虑由于固体基质体积压缩(由平均应力引起)和微裂纹发展引起的体积膨胀两种因素, 将渗透率分成两部分: 固体基质部分的渗透率和微裂纹系统部分的渗透率, 并且认为总体渗透率为两部分之和, 表示为

$$k = k^m + k^c \quad (32)$$

式中:  $k^m$  为固体基质部分的渗透率;  $k^c$  为微裂纹系统部分的渗透率。这里, 根据静水压力下的渗透系数演化规律的试验结果<sup>[17]</sup>, 采用  $k^m$  和平均应力  $p$  之间经验关系式描述平均应力对固体基质部分的渗透率的影响:

$$k^m = e^{-a_1 p} k^0 \quad (33)$$

式中:  $k^0$  为饱和砂岩在初始状态下(无应力)的渗透率;  $a_1$  为模型参数, 控制  $k^m$  的演化速率。通过对饱和砂岩在静水压力加载下的渗透率演化曲线进行拟合, 可确定  $k^0$  和  $a_1$ 。

进入损伤阶段后, 随着新生裂隙的扩展、贯通, 岩石的损伤逐渐增加, 渗透率也逐渐开始增加; 在峰值前后, 由于微裂纹的急剧增加和扩展, 岩石的损伤急剧增加, 渗透率也随之急剧增大。本文中, 根据前人研究结果<sup>[17, 24]</sup>, 采用如下的函数表达式描

述损伤对渗透率的影响:

$$k^c = a_2 d k^0 \quad (34)$$

式中:  $a_2$  为模型参数, 用于反映损伤  $d$  对岩石渗透率的影响程度。

因此, 综合式(32)-(34), 岩层的固有渗透率可表示为

$$k = (e^{-a_1 p} + a_2 d) k^0 \quad (35)$$

## 5 结论

咸水层由于具有分布面积广、厚度大、储存容量巨大和存储成本低等优点成为 CO<sub>2</sub> 地质封存首选场地, 为了对超临界 CO<sub>2</sub> 注入过程中岩层力学响应和流体运移进行评估, 本文提出了两相流-岩层耦合模型。该模型具有以下特点:

(1) 采用毛细压力作为超临界 CO<sub>2</sub> 和咸水质量守恒方程的变量, 便于考虑流体压力对岩层的影响。

(2) 提出的无流体压力影响下的岩层力学本构模型能够同时考虑岩层的塑性变形和损伤两种机制, 并且模型参数物理意义清楚, 方便确定。

(3) 通过有效应力原理和岩层固有渗透率来反映岩层和流体之间的相互作用, 不仅能考虑流体压力对岩层的力学影响, 也能考虑岩层变形对流体运移的影响。

限于篇幅, 关于此理论模型在 CO<sub>2</sub> 咸水层存储工程的实例分析, 笔者将另文详述。

## 参考文献

- [1] 曾荣树, 孙枢, 陈代钊, 等. 减少 CO<sub>2</sub> 向大气层的排放——CO<sub>2</sub> 地下储存研究[J]. 中国科学基金, 2004, (4): 196 - 200.  
ZENG Rong-shu, SUN Shu, CHEN Dai-zhao, et al. Decrease carbon dioxide emission into the atmosphere—underground disposal of carbon dioxide[J]. **China Science Fund**, 2004, (4): 196 - 200.
- [2] 孙枢. CO<sub>2</sub> 地下封存的地质学问题及其对减缓气候变化的意义[J]. 中国基础科学, 2006, 8(3): 17 - 22.  
SUN Shu. Geological problems of CO<sub>2</sub> underground storage and its significance on mitigating climate change[J]. **China Basic Science**, 2006, 8(3): 17 - 22.
- [3] 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.

- [4] 李小春, 方志明. 中国 CO<sub>2</sub>地质埋存关联技术的现状[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2229 - 2233.  
LI Xiao-chun, FANG Zhi-ming. Status of connection technologies of CO<sub>2</sub> geological storage in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2229 - 2233.
- [5] RUTQVIST J, WU Y S, TSANG C F, et al. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 429 - 442.
- [6] VICTOR VILARRASA, DIOGO BOLSTER, SEBASTIA OLIVELLA, et al. Coupled hydromechanical modeling of CO<sub>2</sub> sequestration in deep saline aquifers[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2010, 4(6): 910 - 919.
- [7] ROHMER J, SEYEDI D M. Coupled large scale hydromechanical modelling for caprock failure risk assessment of CO<sub>2</sub> storage in deep saline aquifers[J]. **Oil & Gas Science and Technology**, 2010, 65(3): 503 - 517.
- [8] THOMAS KALBACHER, RALPH METTIER, CHRIS MCDERMOTT, et al. Geometric modelling and object-oriented software concepts applied to a heterogeneous fractured network from the Grimsel rock laboratory[J]. **Computers & Geosciences**, 2007, 11(1): 9 - 26.
- [9] 张玉军. 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[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 582 - 586.  
ZHANG Yu-jun. 2D elastoplastic finite element analysis of coupled process in CO<sub>2</sub> injection in strata[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 582 - 586.
- [10] 刘小燕. 二氧化碳深含水层隔离的二相渗流模拟与岩石物理学研究[博士学位论文 D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [11] 刘永忠, 黄必武, 王乐. 非均质多孔盐水中超临界 CO<sub>2</sub>的注入压力与饱和度分布特性[J]. 化工学报, 2010, 61(1): 32 - 42.  
LIU Yong-zhong, HUANG Bi-wu, WANG Le. Characteristics of injection pressure and saturation distributions of supercritical CO<sub>2</sub> injecting into heterogeneous saline aquifer[J]. **Journal of Chemical Industry and Engineering Society of China**, 2010, 61(1): 32 - 42.
- [12] 罗庶, 胥蕊娜, 姜培学. CO<sub>2</sub>地质封存中突破压力梯度的孔隙尺度数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 819 - 823.  
LUO Shu, XU Rui-na, JIANG Pei-xue. Pore scale numerical simulation on breakthrough pressure gradient during CO<sub>2</sub> geological storage[J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2011, 32(5): 819 - 823.
- [13] 崔振东, 刘大安, 曾荣树, 等. 二氧化碳在砂岩透镜体中充注封存的盖层岩石抗断裂性能分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(2): 204 - 207.  
CUI Zhen-dong, LIU Da-an, ZENG Rong-shu, et al. A fracture resistance analysis on the caprock of the sand lens reservoir due to carbon dioxide injection and storage[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(2): 204 - 207.
- [14] 成建梅, 赵静, 张可霓, 等. 深部咸含水层 CO<sub>2</sub>注入下压力抬升与流体迁移的大尺度模拟研究: 以松辽盆地为例[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 162 - 170.  
CHENG Jian-mei, ZHAO Jing, ZHANG Ke-ni, et al. Large-scale modeling of CO<sub>2</sub> storage in deep saline aquifer of Songliao basin: Pressure buildup and CO<sub>2</sub> plume migration[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2012, 31(5): 162 - 170.
- [15] VAN GENUCHTEN M T H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [16] ZHOU H, HU D, ZHANG F, et al. A thermo-plastic/viscoplastic damage model for geomaterials[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 2011, 24(3): 195 - 208.
- [17] HU D W, ZHOU H, ZHANG F, et al. Evolution of poroelastic properties and permeability in damaged sandstone[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(6): 962 - 973.
- [18] 胡大伟, 周辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2749 - 2754.  
HU Da-wei, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2749 - 2754.
- [19] BUDIANSKY B, O'CONNELL R. Elastic modules of a cracked solid[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1976, 12(2): 81 - 97.
- [20] THOMPSON M, WILLIS J R. A reformulation of the equations of anisotropic poroelasticity[J]. **Journal of Applied Mechanics**, ASME, 1991, 58: 612 - 616.
- [21] CHENG A H D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1997, 34(2): 199 - 205.
- [22] SHAO J F. Poroelastic behaviour of brittle rock materials with anisotropic damage[J]. **Mechanics of Materials**, 1997, 30(1): 41 - 53.
- [23] HU D W, ZHOU H, SHAO J F. Anisotropic damage-plasticity model for saturated quasi brittle materials[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2012, doi: 10.1002/nag.2103.
- [24] 彭苏萍, 孟召平, 王虎, 等. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 742 - 746.  
PENG Su-ping, MENG Zhao-ping, WANG Hu, et al. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(5): 742 - 746.