

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.06.029

CO₂ 地质封存力学问题的数值模拟方法综述

李小春¹, 袁 维², 白 冰¹

(1. 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, 湖北 武汉 430071;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 随着社会的发展, 人类对化石能源的依赖导致大量的 CO₂ 排入大气层, 从而引起全球变暖、海平面上升等一系列全球性气候问题。CO₂ 地质封存是当前 CO₂ 减排最有前景的技术, 但大量的 CO₂ 注入地层易诱发相应的力学问题: 地表隆起变形、盖层完整性受损、断层活化等。因此, 为了降低 CO₂ 地质封存带来的安全风险, 理论分析、数值模拟和响应面方法等手段被应用于此类力学问题的分析中。由于数值模拟方法能够解决大尺度范围内复杂几何模型的多场耦合问题, 数值模拟成为当前在 CO₂ 地质封存力学领域中应用最广泛的方法。因此, 对 CO₂ 地质封存若干力学问题的数值模拟方法进行了全面的综述。首先, 简要介绍了多孔介质的温度-渗流-力学-化学 (THMC) 多场耦合原理, 并对数值模拟解决多场耦合问题的方法进行了归类。然后, 详细总结了数值模拟在解决 CO₂ 地质封存力学问题方面的国内研究进展。最后, 讨论了数值模拟方法在此类力学问题方面的应用缺陷, 并提出了若干建议。

关键词: CO₂ 地质封存; 力学问题; 数值模拟; 多场耦合; 地表变形; 盖层完整性; 断层活化

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 06 - 1762 - 11

A review of numerical simulation methods for geomechanical problems induced by CO₂ geological storage

LI Xiao-chun¹, YUAN Wei², BAI Bing¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Due to the continuing consumption of fossil fuels, a large amount of CO₂ is emitted into the atmosphere, leading to global warming, sea level rising and other global climate problems. CO₂ geological storage is one of the most promising techniques for reducing CO₂ emission. However, this approach may induce a series of geomechanical issues, such as ground surface deformation, damage of the cap-rock integrity and existing fault activation. In order to reduce the safety risk from the CO₂ geological storage, theoretical analysis, numerical simulation and response surface method are all applied to solve these geomechanical issues. At present, numerical simulation is the most widely used option on account of its exceptional performances in solving multi-field coupling problems associated with large-scale and complex geometry model. The aim of this paper is to provide a comprehensive review of numerical analysis approaches for analyzing the geomechanical issues induced by CO₂ geological storage. First, a brief introduction is given about the thermo-hydro-mechano-chemical (THMC) coupling theory of porous media, and the classifications of the numerical simulation methods for settling the multi-field coupling problems are discussed; then, a review of research status about settling geomechanical issues based on numerical modeling is presented in detail; finally, the difficulties of the numerical simulation in solving these geomechanical issues are discussed, from which several suggestions for improvement are offered.

Keywords: CO₂ geological storage; geomechanical issues; numerical simulation; multi-field coupling; ground surface deformation; cap-rock integrity; fault activation

1 引 言

随着人类活动的增加, 对化石能源的需求越来

越大, 导致大量的 CO₂ 碳被排放到大气中, 从而带来一系列全球性气候问题: 全球变暖、海平面上升等。CO₂ 地质封存 (GCS) 是当前减小 CO₂ 直接排

收稿日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41172285)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41172285).

第一作者简介: 李小春, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程安全性监测与评价、二氧化碳地质埋存地层稳定性评价与工程设计理论方面的研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

通讯作者: 袁维, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事强度折减法方面的研究工作。E-mail: yuanweisuper001@126.com

放最有效的一种手段，即通过一定的技术把 CO₂ 气体转变为超临界体，并将其注入到深部地层中长期封存起来^[1]。CO₂ 地质封存通常具备以下几个特征：

封存的规模大，工业上 CO₂ 的单井注入量通常在百万吨量级上；封存的时间跨度长，封存年限设计通常考虑数百年；涉及到温度、渗流、力学和化学反应多场耦合问题（HTMC）。

大量的 CO₂ 注入地层容易引起若干力学问题：地表隆起变形、降低盖层力学完整性、断层活化和诱发地震等^[2]。例如，在 In Salah 的 CO₂ 地质封存项目中，地表以平均每年 5 mm 的速率向上隆起^[3]；在 Weyburn 项目中，自 2004 年以来已累计监测到 1 至 3 级的微小地震活动^[4]。目前虽然尚未出现因 CO₂ 注入诱发大的工程事故，但在 Basel 地热工程中，大量的水注入地层诱发 3.4 级可感地震，最终导致该项目关闭。鉴于往地层注入 CO₂ 与水的过程与机制极为类似，不可排除大量 CO₂ 注入地层会带来类似的工程事故，因此，对 CO₂ 地质封存场地进行全面的力学问题分析与评价是非常有必要的。

针对 CO₂ 地质封存温度-渗流-力学-化学（HTMC）耦合过程的分析方法可归结为 3 类：理论分析、数值模拟和响应面方法，其中数值模拟方法应用范围最广泛^[5]。鉴于笔者曾对 CO₂ 地质封存力学问题的数值模拟进展做了全面的综述^[6]，因此，本文在此基础上首先探讨耦合分析方法、力学本构模型以及力学问题三者之间的对应关系，同时着重分析各类力学问题的产生机制以及相互之间的联系，最后探讨了当前模拟方法的不足与缺陷，并对将来的发展趋势进行了展望。

2 THMC 多场耦合问题数值解法与力学本构模型在应用方面的对应关系

2.1 THMC 多场耦合原理简介

图 1 描述了 CO₂ 地质封存温度-渗流-力学-化学反应相互作用的过程。超临界 CO₂ 注入地层引起注入区域孔隙压力增大，根据有效应力原理，注入区域岩体的有效应力降低，从而导致该区域一定范围内应力场的改变（见过程(6)）；反之，应力场的改变会对岩体孔隙率、渗透率以及毛管压力产生影响，进而影响 CO₂ 的注入和运移（见过程(7)）。另外，注入 CO₂ 的温度与周围地层温度并不一致，二者的温度差异导致注入区域温度场的改变（见过程(2)），由 CO₂ 注入和运移导致温度场的改变会产生两方面的影响：改变流体的密度、黏度，影响

CO₂ 的注入和运移（见过程(1)）；作为一种温度荷载直接改变岩体的应力状态（见过程(3)）。由于 CO₂ 地质封存的时间跨度大，CO₂、水和岩石三者之间的化学作用对地质封存系统的影响不可忽略：CO₂-水-岩石之间的水岩作用导致岩石中相应的矿物发生溶解或沉淀，从而改变流体的渗透路径以及岩体的物理性质，间接地对渗流场和应力场产生影响（见过程(8)、(10)）；同时，化学反应过程亦涉及到吸热和放热过程，因而水岩作用亦会对温度场产生影响（见过程(4)）。反过来，温度场和渗流场的改变亦会对化学反应的速率和方向产生影响，改变 CO₂-水-岩石之间水岩作用的进程（见过程(5)、(9)）。由此可见，CO₂ 地质封存是一个复杂的温度-渗流-力学-化学多场相互作用的过程，这一过程包含了热量的转移、多相流体的渗流、力学响应、化学物质的反应和运输等^[7]。

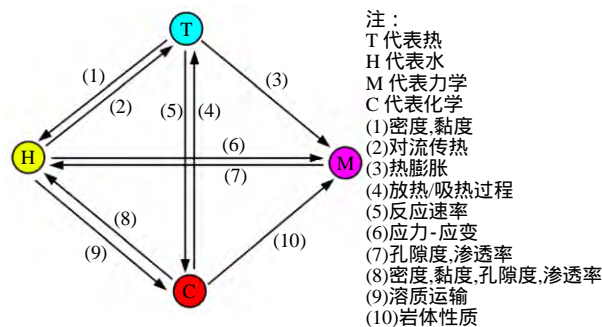


图 1 HTMC 耦合流程图

Fig.1 Flowchart of coupled THMC processes

2.2 CO₂ 地质封存多场耦合中的力学本构模型

当前国内外关于岩体应力-应变关系的研究文献可谓浩如烟海、汗牛充栋，任何综述都很难做到面面俱到。通过对涉及到 CO₂ 地质封存的力学模拟文献进行全面调研，发现用于模拟 CO₂ 地质封存的岩体本构模型主要可归结为 3 类：弹性本构模型；

塑性本构模型；非连续介质模型^[8-14]。CO₂ 地质封存力学模拟所用 3 类本构模型的不同年份统计结果如图 2 所示。由图可知，2006 年之前对 CO₂ 地质封存的力学模拟成果较少，此后的力学模拟成果呈爆发式增长，表明 CO₂ 地质封存引起的力学问题越来越受到人们的关注；其次，力学模拟所用本构模型的发展趋势是由简单到复杂，即弹性本构模型→塑性本构模型→非连续本构模型；另外，弹性本构模型虽然不能描述复杂应力条件下的塑性变形状态，但它简单快捷、计算结果亦收敛，且易于进行高耦合程度的多场耦合计算，因此，利用弹性本

构进行 CO₂ 地质封存力学模拟仍占据较大比例^[15]；CO₂ 地质封存的储、盖层岩体大多为多孔介质软岩（砂岩、页岩、泥岩），在复杂应力条件下，其力学特征并不遵循弹性介质的应力-应变曲线，而选用合适的弹塑性本构模型却能更好地刻画其变形屈服过程^[10]，特别地，当考虑储、盖层岩体的长期蠕变特征时，可考虑采用黏塑性本构模型进行相应的力学模拟^[13]；储、盖层岩体在 CO₂ 注入前往往已有原生裂隙存在，同时 CO₂ 的注入扰动了初始应力场，亦会导致新的裂隙产生，非连续介质模型比连续介质模型更能准确刻画储、盖层岩体这一特征，因此，利用该模型进行力学模拟所占的比例最大。当前所用的非连续介质模型主要有双孔隙度模型^[14]、黏结单元模型（cohesive element model）^[16-17]和等效介质模型^[18]。

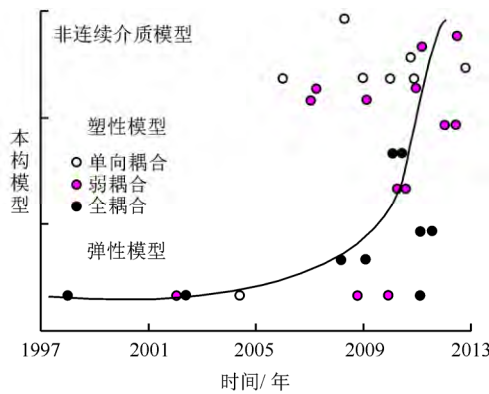


图2 本构模型与耦合分析方法之间的关系
Fig.2 Relationship between constitutive models and coupling methods

2.3 CO₂ 地质封存的耦合分析方法及分析软件

CO₂-水-岩石的相互作用过程由以下4个偏微分方程组控制：质量守恒方程、能量守恒方程、动量方程和反应流通方程。位移(\bar{u})、温度(T)、气体压力(P_g)和液体压力(P_l)是偏微分方程组的独立变量，数值分析的目的就是求解各个独立变量的解^[7, 19]。目前存在许多种求解偏微分方程组的数值分析方法和软件^[6]，根据求解过程耦合程度的不同，可把这些数值分析方法归结为3类：全耦合(full coupling)、弱耦合(partial coupling)和单向耦合(one-way coupling)。

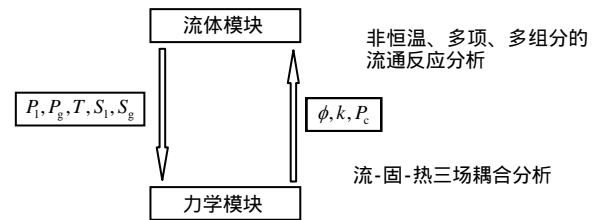
(1) 全耦合

全耦合是指所有的控制性偏微分方程同时求解，所有的参数变量在每个迭代步计算完成后同时更新，并且直接代入整体刚度矩阵用于下一个迭代步的计算^[15, 20]。全耦合为耦合程度最高的计算方

法，与其他两种耦合方法相比，其计算精度是最高的，但其计算量最大，往往需要用更长的时间才能达到计算收敛要求，因此，在利用全耦合方法进行 CO₂ 地质封存的力学模拟时，常采用简单的本构模型（弹性介质）和尺度较小的几何模型（二维空间）进行分析，其应用的本构模型主要为弹性模型和塑性模型^[21-25]，见图2。

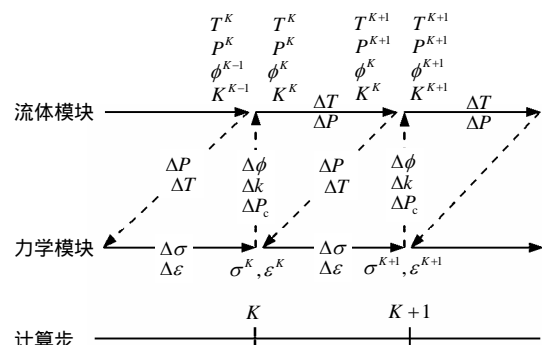
(2) 弱耦合

如图3所示，在弱耦合中，把偏微分方程组拆解为流体模块(fluid module)和力学模块(mechanics module)，两者独立运行，各自的计算结果用于对方下一步计算输入参数的修正，如此反复循环迭代。比如，在第 K 个计算步上，根据力学计算成果修正第 K 步的流体模块参数（孔隙率、渗透率和毛管压力）用于第 $K+1$ 步的渗流计算，然后，根据第 $K+1$ 步的渗流计算成果，修正第 K 步的力学模块输入参数（孔压、温度和饱和度），用于第 $K+1$ 步的力学计算。以此类推，直至达到指定的计算时间点^[25]。弱耦合方法适用于大尺度、形态复杂的几何模型，可以考虑复杂的岩体本构模型（弹塑性、黏塑性、非连续介质等），同时还可用于复杂地质条件的 CO₂



注： P_l 为液体压力， P_g 为气体压力， P_c 为毛管压力， T 为温度， k 为渗透率， ϕ 为孔隙率， S_l 为液体饱和度， S_g 为气体饱和度。

(a) 弱耦合数据交换框图^[26]



注： σ 为应力， ϵ 为应变。

(b) 弱耦合数据交换流程^[26]

图3 弱耦合原理图

Fig.3 Principle diagram of partial coupling

地质封存力学模拟(含断层、裂隙等),收敛性较好,计算速度较快,适用范围广泛,因而是当前应用最为广泛的耦合方法,3类本构模型皆能应用于弱耦合方法分析中^[25-32],见图2。另外,弱耦合方法最大的特点就是能够耦合不同用途的软件,充分利用各自的长处,取长补短,实现弱耦合过程^[20]。

(3) 单向耦合

如图4所示,在单向耦合中,流体模块与力学模块亦是独立运行,其与弱耦合方法相比不同之处在于力学模块的计算结果不会反馈给流体模块,即流体模块的计算不受力学模块的任何影响,第n步的流体模块计算结果(孔压、温度和饱和度)当做第n步力学模块的外部荷载输入。显然,单向耦合是耦合程度最低的方法,同样适用于大尺度、复杂地质条件、复杂岩体本构模型的力学模拟,与其他两种耦合方法相比,单向耦合方法的计算效率最高,收敛性最好,但该方法通常应用于只关注力学过程而不注重渗流过程的模拟,且通常应用于非连续介质模型的分析中^[33-35],见图2。

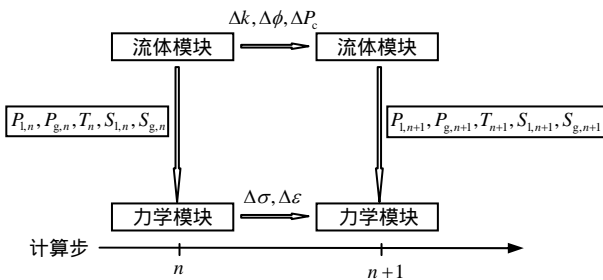


图 4 单向耦合原理图

Fig.4 Principle diagram of one-way coupling

3 CO₂ 注入诱发力学问题的机制及其影响因素

如图5所示,从力学角度来看,CO₂的注入和运移改变了初始的应力场和孔压场,可能导致地表

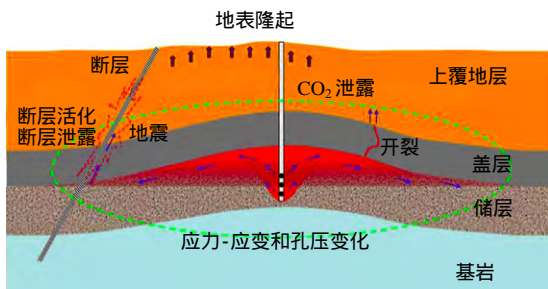


图 5 CO₂ 注入和运移引起的力学问题

Fig.5 Geomechanical issues induced by CO₂ injection and migration

隆起变形,亦可能引起盖层产生新的裂隙或者导致已有裂隙张开、错位,影响盖层的力学完整性。另外,应力场受到扰动后可能引起断层的活化,甚至导致地震活动。因此,下面对以上力学问题的数值模拟研究情况进行介绍。

3.1 应力-应变与孔压变化规律

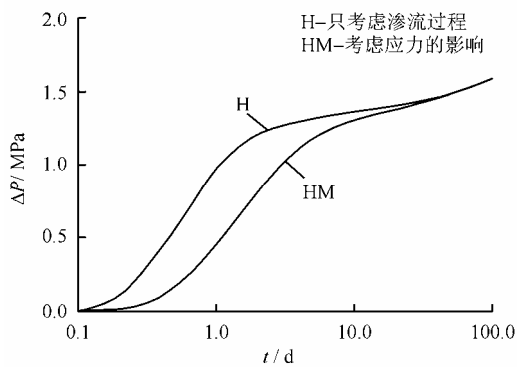
CO₂的注入引起注入区域孔压的增大,根据有效应力原理,在总应力保持不变的情况下,岩体的有效应力降低,从而导致孔隙体积的增大,反而有利于CO₂运移和扩散,进而影响更广区域的应力场和孔压场。进行应力-应变与孔压变化规律分析有两个重要作用: 为其他力学问题分析提供前提条件; 为储、盖层系统的各种特征变化提供基础性理解。

一般而言,CO₂的注入对岩体竖向总应力影响不大,竖向总应力的大小约等于上覆岩体的重力,然而,横向总应力却会发生显著的变化;横向有效应力和竖向有效应力均会因为孔压的增大而降低,竖向有效应力降低得更为显著。从力学的观点来看,总应力和有效应力呈现上述规律是因为模型的顶部为自由地面,岩体可沿竖直方向自由膨胀,而模型两边通常会有横向位移约束,限制了岩体往水平方向的扩展^[8, 33]。对于简化的几何模型,即均质薄层且侧向无限延伸的模型,可建立横向总应力与孔压变化之间的理论关系^[36-37]如下:

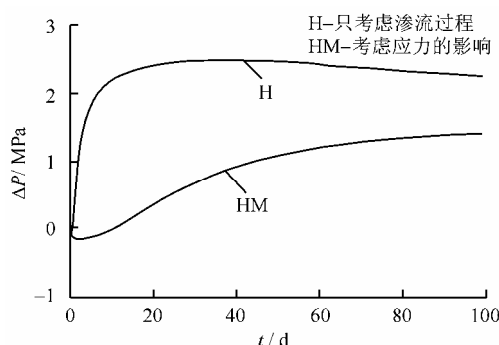
$$\Delta\sigma_h = (b_1 \frac{1-2\nu}{1-\nu})\Delta p \tag{1}$$

式中: $\Delta\sigma_h$ 与 Δp 分别为横向总应力和孔压的变化值; b_1 为比奥系数; ν 为泊松比。显然, $\Delta\sigma_h$ 是关于 Δp 的线性函数。然而,对于复杂模型而言, $\Delta\sigma_h$ 与 Δp 之间的关系较复杂,很难建立两者之间的理论关系,需要采用数值模拟的方法近似求得两者的变化规律^[33]。

应力变化对孔压的影响是显著的, Vilarrasa 等^[12]通过对比分析发现,考虑力学影响的储层、盖层的孔压增长速率比只考虑渗流过程的孔压增长速率要小,如图6所示。显然,孔压增大后,孔隙体积增大,有利于CO₂向侧向运移,孔压扩散较快,从而导致考虑力学过程的孔压曲线较为平缓。另外,储层的两条孔压变化曲线在形态上基本保持一致,随着时间的推移,最后两者重合,表明考虑力学过程对储层的孔压影响不大;盖层的两条孔压曲线存在明显的差异,表明盖层区域的孔压受应力的影响较大,在研究盖层的孔压分布时,建议要充分考虑应力对孔压的影响过程^[10, 12]。



(a) 储层



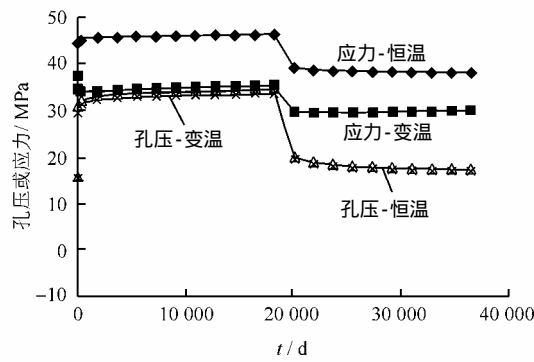
(b) 盖层

图 6 储层、盖层孔压变化规律^[10]

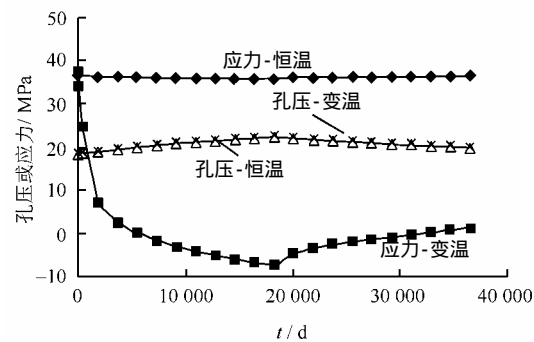
Fig.6 Pore changes of aquifer and cap-rock^[10]

温度对应力场的影响较大而对孔压分布的影响较小。通常注入 CO₂ 的温度比目标地层的温度要低，从而在注入孔周围一定范围内形成冷却效应，显著降低岩体的压应力状态，当两者的温差超过一定的限值时，甚至在注入区域出现张拉应力或张拉裂缝^[7, 20, 38]。Gooarzi 等^[38]通过对某 CO₂ 地质封存场地进行 50 a 的注入分析（注入速率为 10⁶ 吨/年），发现储层、盖层系统的应力分布受温度影响较大，而温度对孔压的影响几乎可以忽略，如图 7 所示。

化学作用对应力场和孔压场的影响主要体现在以下 3 个方面：CO₂-水-岩石三者之间的相互反应导致岩石中矿物的溶解和沉淀，改变流体的密度、黏度等物理性质，同时亦对流体的渗流路径、孔隙率、渗透率等产生影响，直接影响孔压的分布，从而间接影响应力场的分布^[2, 7, 32]；长期的化学作用改变了岩体的密度、强度等物理性质，进而影响应力场的分布^[39-41]；对于已有裂隙而言，长期的化学作用可增大裂隙的宽度，相当于在岩体内部施加了附加作用力^[14]。因此，长期的化学作用有利于 CO₂ 的横向运移，使应力扰动区域不断增大，其对 CO₂ 地质封存系统的影响不容忽视。



(a) 储层



(b) 盖层

图 7 温度对应力和孔压的影响^[38]

Fig.7 Influences of temperature and stress on pore pressure^[38]

当然，除了以上因素以外，岩体的本构模型、边界条件、储盖层的几何尺寸^[10-11]等皆会对应力-应变和孔压分布产生影响，在此不一一累赘介绍。

3.2 地表隆起变形

CO₂ 注入导致的地表隆起变形主要来自两方面的驱动力：注入区域有效应力的降低，引起孔隙体积膨胀；盖层底部 CO₂ 聚集，导致此处孔压增大最为明显，对盖层产生浮托作用，使盖层发生向上弯曲拱起的变形。这两者共同作用，对上覆岩体产生挤压作用，从而引起地表一定范围内发生变形。位移分布呈现以下规律：纵向上，位移往深度方向逐渐增大，地表处向上隆起位移最小，注入横井顶部的隆起位移最大；横向上，注入井正上方的地表位移最大，越往两侧延伸，地表位移越小，且两侧影响范围达几千米到几十千米^[32, 42-43]。

从当前的研究成果来看，影响地表隆起变形的因素主要有以下几个：上覆岩体的刚度、泊松比以及厚度，盖层的渗透率、温度。概括起来，上覆岩体的泊松比和厚度对地表位移的影响较小，甚至可以忽略，而刚度越大，隆起位移越大^[38]；盖层的渗透率越大，则 CO₂ 进入盖层的深度越大，盖层弯曲

变形和体积膨胀的范围越大，因此，隆起位移越大^[12, 42]；注入 CO₂ 与地层的温差越大，周围岩体的冷缩效应越明显，压应力降低越显著，因此，地表隆起位移越小^[38]。

3.3 盖层的力学完整性

CO₂ 沿着盖层中的裂隙网络从储层中逃逸出来是其主要的潜在泄露方式。盖层中的裂隙由两部分组成：CO₂ 注入前原有裂隙和 CO₂ 注入引起的新裂隙，连通的裂隙为 CO₂ 的逃逸提供了潜在的通道，因此，从保守的观点来看，一旦原生裂隙活化或者产生了新的裂缝，即盖层的力学完整性受到了影响。当前的数值模拟方法主要按照以下判据来分析盖层的力学完整性：对于弹塑性本构模型而言，盖层底部出现塑性屈服单元^[9, 35]；对于弹性本构模型而言，盖层单元的应力状态满足剪切或张拉破坏准则^[7]；对于黏塑性本构模型而言，盖层单元的塑性应变达到某个设定的临界值^[13]；对于非连续介质模型而言，盖层单元节点断开^[16-17]、等效裂隙单元的渗透系数发生突变^[31]或已有裂隙发生了张开或滑移^[18]。

地层的初始地应力状态是影响盖层破坏形式的最主要因素。初始地应力状态有两种情况：压缩应力状态(compressive stress regime)，即水平应力大于竖向应力($\sigma_x > \sigma_z$)；拉伸应力状态(extensional stress regime)，即竖向应力大于水平应力($\sigma_x > \sigma_z$)。当采用弹性本构模型分析时，无论是何种地应力状态，发生剪切破坏的可能性比发生张拉破坏的可能性要大；另外，当 $\sigma_z > \sigma_x$ 时，剪切破坏面通常会贯穿整个盖层区域，且此时剪切破坏面的角度比 $\sigma_x > \sigma_z$ 时产生的破坏面角度更陡峭；同时，当 $\sigma_z > \sigma_x$ 时，盖层底部发生张拉破坏的可能性比 $\sigma_x > \sigma_z$ 时要大得多^[28, 44]。当采用弹塑性模型分析时，拉伸应力状态比压缩应力状态更容易发生盖层单元屈服^[11]。当采用黏塑性模型分析时，压缩应力状态时的塑性应变分布主要集中在盖层的底部和储层的顶部区域，然而拉伸应力状态时的塑性应变则贯穿整个盖层区域^[12]。综上所述，当采用弹塑性和黏塑性模型分析时，地层初始呈拉伸应力状态不利于盖层的力学完整性，而当采用弹性模型分析时，此结论却恰好相反。

在工程实践中，CO₂ 的泄露路径往往很难从盖层的力学失效区域精确确定，盖层中已有裂隙活化或者产生新的裂缝并非 CO₂ 泄露的充分条件，因此，

以上基于数值模拟的盖层力学完整性判据仅仅提供一种定性参考。如图 8 所示，当垂直裂缝法线方向的应力较低时，裂缝会出现剪胀效应，活化或新产生的裂缝的孔隙率大、渗透性高，成为 CO₂ 的泄露通道；反之，当法向应力较高时，裂缝出现剪缩效应，裂缝反而成为渗流的屏障^[2, 11, 45]。

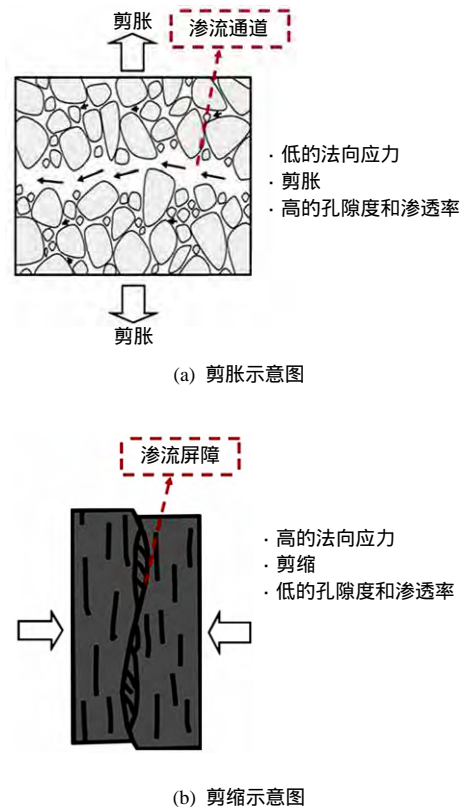
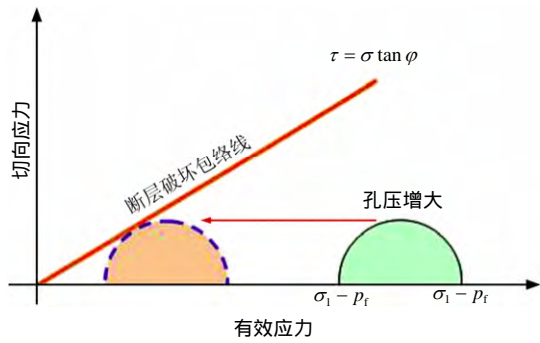


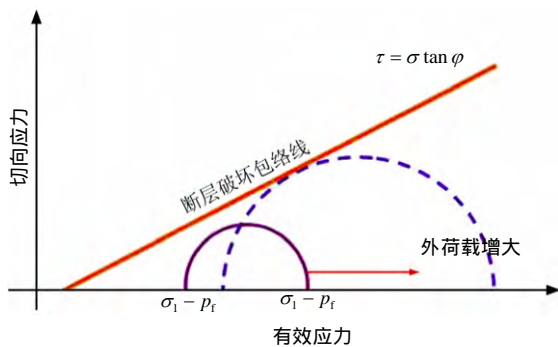
图 8 CO₂ 泄露与裂缝应力状态之间的关系^[2, 11]
Fig.8 Relationship between CO₂ leakage and stress state of fractures^[2, 11]

3.4 断层稳定性

断层对 CO₂ 地质封存系统的影响往往是负面的，因此，对断层的风险性评估尤其值得人们关注。CO₂ 注入地层诱发断层失稳的机制主要有以下两个：若断层穿越储层或毗邻储层，CO₂ 持续注入驱使流体渗入断层，导致断层内部孔压增大，断层两盘之间的有效应力降低，最终导致断层失稳；若断层处于封存场地的下方，CO₂ 的持续注入相当于在断层两盘上不断增加外荷载，改变了断层的边界条件，亦有可能导致断层失稳^[46]。以上两种情况可在 σ - τ 坐标轴中用摩尔应力圆来说明：如图 9(a) 所示，孔压增大导致应力圆向左移动，直至与断层破坏包络线相切；如图 9(b) 所示，外荷载的持续增大使应力圆直径不断扩大，最终与断层破坏包络线相切。



(a) 孔压增大改变诱发失稳



(b) 外荷载改变诱发断层失稳

图 9 断层失稳机制

Fig.9 Mechanisms for inducing fault instability

在数值分析方法中，通常采用以下 3 种方法来模拟断层的力学行为：

(1) 如图 10(a)所示，断层被简化为无厚度的接触面单元或节理单元(interface or joint element)^[33]。该方法适合于模拟单条断层，能够模拟断层张开、闭合和错位等力学行为。在考虑多场耦合问题时，较适用于单向耦合方法，应力-应变与渗流的关系可根据下式计算^[23, 47]：

$$Q = \frac{W_d^3}{12\eta_\mu} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (2)$$

式中： Q 表示流体的流量； W_d 为断层张开的宽度，是应力与刚度的函数； η_μ 为流体的动力黏度； $\Delta P/\Delta L$ 为孔隙压力梯度。

(2) 如图 10(b)所示，断层简化为具有厚度的薄夹层，在地质建模时用各向同性的实体单元表征，其刚度与强度比周围岩体单元要低^[44, 47]。该方法适用于多条断层的模拟，能够模拟断层屈服破坏过程以及渗流和力学相互影响的过程，多用于弱耦合和全耦合方法求解多场耦合问题，此时，断层的渗透系数可当做是应力-应变的函数^[14, 47]：

$$\left. \begin{aligned} \phi &= 1 - (1 - \phi_i) \exp(-\varepsilon_v) \\ \phi &= (\phi_i - \phi_r) \exp(a\sigma'_M) + \phi_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} k &= k_i \left(\frac{\phi}{\phi_i} \right)^n \\ k &= k_i \left(\frac{1 - \phi_i}{1 - \phi} \right)^2 \left(\frac{\phi}{\phi_i} \right)^3 \\ k &= k_i \exp \left[b \left(\frac{\phi}{\phi_i} - 1 \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： ϕ_i 和 k_i 分别为初始状态的孔隙率和渗透率； ε_v 为体积应变； σ'_M 为平均有效应力； ϕ_r 表示参与孔隙度； a 、 b 和 n 为经验系数。

如图 10(c)所示，断层亦被简化为薄夹层实体单元，但此时断层单元采用遍布节理模型模拟^[48]。与图 10(b)中方法相比，该方法能表征断层的倾向、倾角，亦能通过应变云图刻画断层的剪切滑移和张开闭合特征。在考虑多场耦合问题时，较多用于弱耦合解决多场耦合问题，不适用于全耦合分析方法。此时，断层的渗透率变化特征可由下式确定^[47]：

$$\frac{k}{k_i} = \left[\frac{a}{c(c\sigma'_n + 1)} \frac{1}{b_{hi}} + \frac{e_{tip} + e_{fsp} \tan \psi}{f_d b_{hi}} \right]^3 \quad (5)$$

式中： ψ 为剪胀角； e_{tip} 、 e_{fsp} 分别为张拉塑性应变和剪切塑性应变； b_{hi} 为初始裂缝宽度； f_d 为裂缝间距； σ'_n 为法向有效应力。

在评价 CO₂ 地质封存场地的断层稳定性时，断层大多被当做理想弹塑性体，其破坏准则常采用 Mohr-Coulomb 准则，且不考虑断层本身的黏聚力，并假定断层两盘之间的摩擦系数取值范围为 0.6 f_μ 0.85^[49]。另外，其他的本构模型亦被应用到断层稳定性评价中：Baisch 等^[50]利用考虑剪胀效应的应变软化模型模拟了流体注入诱发地震的过程；Beeler 等^[51]采用黏滑和蠕滑模型研究了多次地震的发生机制以及应力释放规律。从以上研究成果来看，Mohr-Coulomb 准则模拟断层失稳所需的计算参数较少，计算收敛性较好，且易于应用评价指标来判断层稳定性，适用于结果性评价；应变软化模型、黏滑和蠕滑模型所需计算参数较多，计算过程较繁琐，能够模拟断层的失稳破坏规律，适用于过程性评价。

断层稳定性的评价指标主要有两个：滑动趋势 (slip tendency T_s)^[49]和安全系数(factor of safety

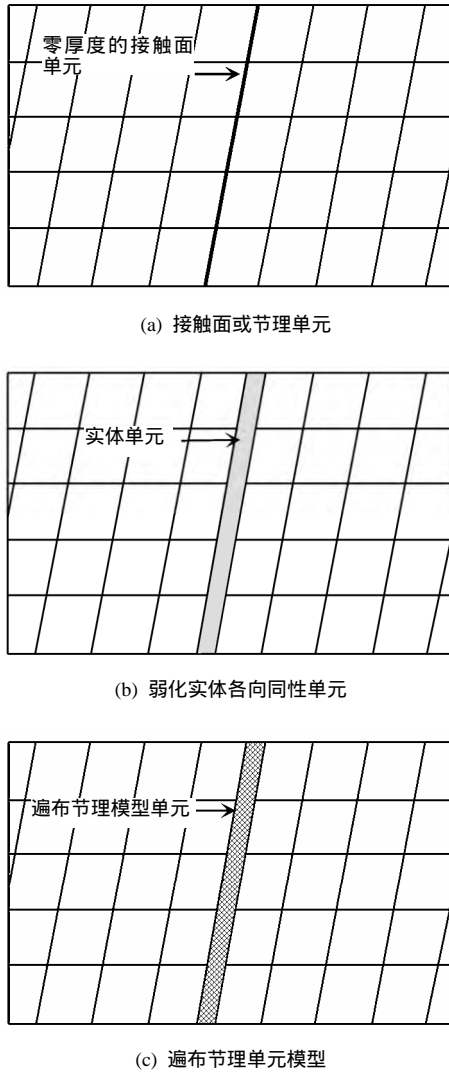


图 10 断层的模拟方法^[46]
Fig.10 Approaches for fault modeling^[46]

FOS)^[12, 52]，其定义方法分别为

$$\left. \begin{aligned} T_s &= \frac{\tau}{\sigma_n - p_f} \\ FOS &= \frac{(\sigma_n - p_f) \tan \varphi}{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： τ 、 σ_n 和 p_f 分别为实际切向应力、法向应力和孔隙压力； $\tan \varphi$ 为断层摩擦系数。从实质上看，两个评价指标皆是基于不考虑黏聚力的 Mohr-Coulomb 准则而建立的。在评价断层稳定性时，首先计算断层区域的应力场和孔压场分布，然后按式(6)计算断层各个点的稳定性评价指标，若指标值超出了规定的范围，则可判定断层该点处于失稳状态。一旦确定整个断层处于失稳状态，则有必要估算断层失稳诱发地震的等级，可采用如下公式进行估算^[53]：

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= \mu Ad \\ M &= (\lg M_0 / 1.5) - 6.1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： M_0 表示断层活化释放的能量； M 为震级； μ 为断层的剪切模量； A 为断层失稳面积； d 为错动位移大小。

影响断层稳定性的因素较多：断层与封存场地的位置关系、断层的构造历史、断层自身的几何特征和物理性质、注入压力和速率等。要准确获取以上数据信息尚存在困难，因此，数值模拟方法只能对断层的稳定性给出初步判断。

4 结论与讨论

(1) 当前模拟 CO₂ 地质封存力学问题的方法可归结为 3 类：全耦合、弱耦合和单向耦合。全耦合是耦合程度最高的方法，较适用于相对简单的物理几何模型和岩体本构模型，其计算精度相对最高，但计算量最大；单向耦合是最低层级的耦合方法，计算效率最高，适用于只关注力学响应的问题分析；弱耦合方法是当前应用最为广泛的方法，可用于对 CO₂ 地质封存系统进行全面的力学问题分析。

(2) 应用于 CO₂ 地质封存力学模拟的本构模型主要有 3 种：弹性模型、塑性模型、非连续介质模型。弹性模型和塑性模型在 3 种耦合方法中皆有应用，非连续介质模型主要在单向耦合方法中应用，但非连续介质模型更适合刻画储、盖层系统的裂隙的特征，未来的发展趋势应该是应用该模型模拟储、盖层裂隙的张开闭合以及扩展过程。

(3) CO₂ 地质封存过程涉及到复杂的 HTMC 多场耦合问题，CO₂ 的注入对注入区域一定范围内的初始应力场和孔压场产生扰动，可能带来一系列力学问题：地表隆起变形、盖层力学完整性受损、断层活化等。

(4) 地表变形是 CO₂ 注入引起地下部分力学响应过程的直接反映，3 种耦合方法和 3 类本构模型皆可应用于地表隆起变形的分析。从当前的研究成果来看，上覆岩体的刚度、泊松比、厚度皆可影响影响地表变形的分布，另外，盖层的渗透系数、注入 CO₂ 与周围地层的温差亦可对地表变形产生影响。

(5) 盖层中贯通的裂隙网络为 CO₂ 的泄露提供了潜在的通道，但已有裂隙的活化和新裂隙的产生并非 CO₂ 沿盖层泄露的充分条件，主要还需考虑裂隙本身所处的应力状态。一般而言，在低地应力条件下，剪胀裂隙可能成为 CO₂ 的泄露通道，而在高

地应力条件下,剪缩裂隙反而却是 CO₂ 渗透的屏障。当前弹性模型和塑性模型被广泛应用于盖层的力学完整性评价,当盖层某处的应力状态满足张拉、剪切破坏准则时,则假设该处出现了裂隙,裂缝并未真实存在于计算模型中,因此,这两类模型主要采用弱耦合和全耦合方法进行模拟。黏结单元模型可以真实表征裂缝的位置和扩展过程,但裂缝的渗流规律不能模拟,因此,这类模型主要采用单向耦合的方法进行模拟。

(6) 在模拟断层时,常把断层简化为接触面或节理单元、弱化的各向同性实体单元和遍布节理实体单元,常采用无黏聚力的 Mohr-Coulomb 准则作为其失稳破坏准则,基于该破坏准则,提出用滑动趋势或安全系数指标来评价断层的稳定性。

虽然当前的研究成果已经能够在一定程度上模拟 CO₂ 地质封存的力学问题,但从以上综述来看,以下方面仍值得继续探讨:

(1) 沉积岩往往孔隙率大,裂隙连通性好,因此,沉积岩盆地常被选择为 CO₂ 地质封存的目标储层。沉积岩其中一个最显著的力学特征则是横观各向同性,但当前的数值模拟中,大多采用各向同性模型来分析储层的变形特征,尚未发现考虑沉积岩横观各向同性的特征,因此,亟需研究 CO₂ 注入过程中储层岩体的横观各向同性的变形机制,并与各向同性模型进行对比,探讨两者的差异性。

(2) 基于不同的本构模型,可能存在不一致的力学分析结果。例如,基于弹性本构模型,盖层在初始张拉地应力状态下($\sigma_z > \sigma_x$)的力学完整性比初始压缩应力状态下($\sigma_x > \sigma_z$)的力学完整性要好,然而,基于塑性本构模型的分析结果却是截然相反的。因此,亟需开展含 CO₂ 岩体的本构模型研究来弥补当前岩体本构模型在模拟 CO₂ 地质封存方面的不足。

(3) 当前对盖层力学完整性的模拟主要存在以下两点不足: 关注 CO₂ 注入诱发裂缝的产生,而较少关注裂缝产生后其对渗流场的影响; 关注裂缝本身对渗流场的影响,而较少同时关注裂缝对应力场的影响。显然,以上的分析方法只能定性评价盖层的力学完整性,不能真实反映裂缝扩展和 CO₂ 泄露同时进行的演化过程。因此,亟需开展考虑多场耦合的真实裂缝网络扩展的数值模拟研究。

(4) 当前分析断层稳定性的方法主要是基于理想弹性本构模型和 Mohr-Coulomb 破坏准则,只能对断层稳定进行结果性评价。鉴于断层活化过程的复杂性,亟需更多开展 CO₂ 诱发断层活化过程的

机制研究。另外,当前对断层失稳的评价主要采用确定性分析方法,但断层的物理性质、初始地应力场等存在极大的不确定性,因此,建议同时采用不确定性分析方法进行断层稳定性分析。

(5) 当前的力学分析对象主要集中于单一盖层系统,而对多盖层和复合盖层系统研究较少。因此,亟需开展多盖层和复合盖层系统的力学问题分析。

(6) 当前的数值分析主要针对力学问题本身进行研究,即对各个力学问题的机制进行规律性探索,但较少对场地尺度的整体稳定性进行评价,亦即对整个封存系统的评价框架和评价指标的研究较少。因此,亟需综合各种力学问题,开展对封存场地整体稳定性分析的研究。

参 考 文 献

- [1] 吴秀章. 中国二氧化碳捕集与地质封存首次规模化探索[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
WU Xiu-zhang. Carbon dioxide capture and geological storage the first massive exploration in China[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [2] RUTQVIST J. The geomechanics of CO₂ storage in deep sedimentary formations[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2012, 30(3): 525 - 551.
- [3] MATHIESON A, WRIGHT I, ROBERTS D, et al. Satellite imaging to monitor CO₂ movement at Krecbba, Algeria[J]. **Energy Procedia**, 2009, 1(1): 2201 - 2209.
- [4] VERDON J P, KENDALL J M, WHITE D J, et al. Linking microseismic event observations with geomechanical models to minimize the risks of storing CO₂ in geological formations[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2011, 305(1-2): 143 - 152.
- [5] SONG J, ZHANG D. Comprehensive review of caprock-sealing mechanisms for geologic carbon sequestration[J]. **Environmental Science & Technology**, 2013, 47(1): 9 - 22.
- [6] LI X, YUAN W, BAI B, et al. Geomechanical modeling of CO₂ storage in deep saline aquifers-A review[C]// Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment. Proceeding of EUROCK. London: Taylor & Francis Group, 2013: 79 - 89.
- [7] YIN S, DUSSEAUULT M B, ROTHENBURG L. Coupled THMC modeling of CO₂ injection by finite element methods[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2012, 80(1): 53 - 60.
- [8] RUTQVIST J, BIRKHOLZER J T, TSANG C F. Coupled reservoir-geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO₂ injection in multilayered reservoir-caprock systems[J]. **International**

- Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2008, 45(2): 132 - 143.
- [9] YUAN W, LI X, BAI B. The application of the strength reduction method in site stability analysis of CCS[C]// *Clean Energy Systems in the Subsurface: Production, Storage and Conversion Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 265 - 280.
- [10] ALONSO J, NAVARRO V, CALVO B, et al. Hydro-mechanical analysis of CO₂ storage in porous rocks using a critical state model[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2012, 54(22): 19 - 26.
- [11] ALONSO J, NAVARRO V, CALVO B. Flow path development in different CO₂ storage reservoir scenarios: A critical state approach[J]. **Engineering Geology**, 2012, 127: 54 - 64.
- [12] VILARRASA V, BOLSTER D, OLIVELLA S, et al. Coupled hydromechanical modeling of CO₂ sequestration in deep saline aquifers[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2010, 4(6): 910 - 919.
- [13] VILARRASA V, OLIVELLA S, CARRERA J. Geomechanical stability of the caprock during CO₂ sequestration in deep saline aquifers[J]. **Energy Procedia**, 2011, (4): 5306 - 5313.
- [14] TARON J, ELSWORTH D, MIN K B. Numerical simulation of thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in deformable, fractured porous media[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46(5): 842 - 854.
- [15] RUTQVIST J. Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations[J]. **Computers & Geosciences**, 2011, 37(6): 739 - 750.
- [16] JOHNSON J W, NITAO J J, MORRIS J P. Reactive transport modeling of cap rock integrity during natural and engineered CO₂ storage[J]. **Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations**, 2004, 2(5): doi: 10.1016/B978-008044570-0/50134-3.
- [17] MORRIS J, JOHNSON S, FRIEDMANN S J. Geomechanical simulations of caprock integrity using the Livermore distinct element method[C]// *Seventh Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration*. Pittsburgh, United States: ASCE, 2008.
- [18] SMITH J, DURUCAN S, KORRE A, et al. Carbon dioxide storage risk assessment: Analysis of caprock fracture network connectivity[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2011, 5(2): 226 - 240.
- [19] KVAMME B, LIU S. Reactive transport of CO₂ in saline aquifers with implicit geomechanical analysis[J]. **Energy Procedia**, 2009, 1(1): 3267 - 3274.
- [20] PREISIG M, PREVOST J H. Coupled multi-phase thermo-poromechanical effects. Case study: CO₂ injection at In Salah, Algeria[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2011, 5(4): 1055 - 1064.
- [21] OLIVELLA S, GENS A, CARRERA J, et al. Numerical Formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media[J]. **Engineering Computations**, 13(7): 87 - 112.
- [22] KOLDITZ O, BAUER S, BILKE L, et al. OpenGeoSys: An open-source initiative for numerical simulation of thermo-hydro-mechanical/chemical (THM/C) processes in porous media[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2012, 67(2): 589 - 599.
- [23] BOWER K M, ZYVOLOSKI G. A numerical model for thermo-hydro-mechanical coupling in fractured rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 34(8): 1201 - 1211.
- [24] PREVOST J H. DYNALFLOW: A nonlinear transient finite element analysis program[R]. New Jersey: Department of Civil and Environmental Engineering, Princeton University, 2002.
- [25] SETTARI A, MOURITS F M. A coupled reservoir and geomechanical simulation system[J]. **SPE Journal**, 1998, 3(2): 219 - 226.
- [26] RUTQVIST J, TSANG C. Tough-Flac: A numerical simulator for analysis of coupled thermal-hydrologic-mechanical processes in fractured and porous geological media under multi-phase flow condition[C]// *Proceedings of TOUGH Symposium 2003*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [27] 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 & Mining Sciences**, 2002, 39(4): 429 - 442.
- [28] SEYEDI D, DUCCELLIER A, FOERSTER E, et al. Coupled hydromechanical modeling to study the integrity and safety of geological storage of CO₂[J]. **Energy Procedia**, 2009, 1(1): 2541 - 2548.
- [29] CONNELL L D, DETOURNAY C. Coupled flow and geomechanical processes during enhanced coal seam methane recovery through CO₂ sequestration[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2009, (77): 222 - 233.
- [30] JOSEPH P M, RUSSELL L D, SAMUEL J F, et al. The large-scale geomechanical and hydrogeological effects of multiple CO₂ injection sites on formation stability[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2011, 5(1): 69 - 74.

- [31] LONGUEMARE P, MAINGUY M, LEMONNIER P, et al. Geomechanics in reservoir simulation: overview of coupling methods and field case study[J]. **Oil & Gas Science & Technology**, 2002, 57(5): 471 - 483.
- [32] LIU S, KVAMME B. Improved Newton Raphson method—An effective tool in solving flow-mechanical-chemistry equations of CO₂ storage in saline aquifers[C]//American Conference on Applied Mathematics(MATH 08). Harvard, Massachusetts: ASCE, 2008.
- [33] VIDAL-GILBERT S, NAUROY J F, BROSSE E. 3D geomechanical modeling for CO₂ geologic storage in the Dogger carbonates of the Paris Basin[J]. **International Journal of Green Gas Control**, 2009, 3(3): 288 - 299.
- [34] ROHMER J, SEYEDI D M. Coupled large scale hydromechanical modeling for cap-rock failure risk assessment of CO₂ storage in deep saline aquifers[J]. **Oil & Gas Science & Technology**, 2010, 65(3): 503 - 517.
- [35] OLDEN P, PICKUP G, JIN M, et al. Use of rock mechanics laboratory data in geomechanical modelling to increase confidence in CO₂ geological storage[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2012, 11(6): 304 - 315.
- [36] HETTEMA M H H, SCHUTJENS P M T M, VERBOOM B J M, et al. Production-induced compaction of a sandstone reservoir: The strong influence of stress path[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 2000, 3(4): 342 - 347.
- [37] HAWKES C D, MCLELLAN P J, BACHU S. Geomechanical factors affecting geological storage of CO₂ in depleted oil and gas reservoirs: Risks and mechanisms[J]. **Journal of Canadian Petroleum Technology**, 2005, 44(10): 52 - 61.
- [38] GOODARZI S, SETTARI A, KEITH D. Geomechanical modeling for CO₂ storage in Nisku aquifer in Wabamun Lake area in Canada[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2012, 10(10): 113 - 122.
- [39] ORLIC B, HEEGE J T, WASSING B. Assessing the integrity of fault-and top seals at CO₂ storage sites[J]. **Energy Procedia**, 2011, 4(1): 4798 - 4805.
- [40] NGUYEN M T, BEMER E, DORMIEUX L. Micromechanical modeling of carbonate geomechanical properties evolution during acid gas injection[C]//Proceedings of 45th US Rock Mech/Geomech Symp. San Francisco, California: ASCE, 2011.
- [41] ESPINOZA D N, KIM S H, SANTAMARINA J C. CO₂ geological storage—Geotechnical implications[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2005, 32(3): 221 - 237.
- [42] RUTQVIST J, DONALD W V, LARRY M. Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection and ground deformations at In Salah, Algeria[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2010, 4(2): 225 - 230.
- [43] CAPP A F, RUTQVIST J, YAMAMOTO K. Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep CO₂-rich fluids during the 1965–1967 Matsushiro earthquake swarm in Japan[J]. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 2009, 114(B10): 357 - 369.
- [44] RUTQVIST J, BIRKHO L ZER J, CAPP A F, et al. Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO₂ using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis[J]. **Energy Conversion and Management**, 2007, 48(6): 1798 - 1807.
- [45] GUTIERREZA M, ØINOB L E, NYGARD R. Stress-dependent permeability of a de-mineralised fracture in shale[J]. **Marine & Petroleum Geology**, 2000, 17(8): 895 - 907.
- [46] ELLSWORTH W L. Injection-induced earthquakes[J]. **Science**, 2013, 341(6142): 140 - 149.
- [47] CAPP A F, RUTQVIST J. Modeling of coupled deformation and permeability evolution during fault reactivation induced by deep underground injection of CO₂[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2011, 5(2): 336 - 346.
- [48] OUELLET A, BÉRARD T, DESROCHES J, et al. Reservoir geomechanics for assessing containment in CO₂ storage: A case study at Ketzin, Germany[J]. **Energy Procedia**, 2011, (4): 3298 - 3305.
- [49] STREIT J E, HILLIS R R. Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO₂ in porous rock[J]. **Energy**, 2004, 29(9 - 10): 1445 - 1456.
- [50] BAISCH S, VOROS R, ROTHER E, et al. A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forets[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2010, 47(3): 405 - 413.
- [51] BEELER N M, LOCKNER D L, HICKMAN S H. A simple stick-slip and creep-slip model for repeating earthquakes and its implication for microearthquakes at Parkfield[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2001, 91(6): 1797–1804.
- [52] LI Q, WU Z, LI X, et al. Site geomechanics analysis of CO₂ geological sequestration[C]//IAEG 2006. London: The Geological Society of London, 2006: No.129.
- [53] CAPP A F, RUTAVIST J. Impact of CO₂ geological sequestration on the nucleation of earthquakes[J]. **Geophysical Research Letters**, 2011, 38(17): 184 - 195.