

组合盖层中垂向贯穿断层对储层内 CO₂ 密封效果的影响

孔维钟^{1,2}, 白 冰¹, 李小春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. 四川省地质工程勘察院, 四川 成都 610072)

摘要: 为研究组合盖层中垂向贯穿断层对储层中 CO₂ 的密封效果, 利用 TOUGH2 数值模拟软件模拟研究了存在贯穿断层时组合盖层和单一盖层对 CO₂ 密封效果的差异。结果表明, 当存在贯穿断层时, 组合盖层的密封效果弱于单一盖层, 但组合盖层在压力积聚方面仍具有一定优势, 盖层岩石更难致裂; 存在贯穿断层时, 注入压力越大, 组合盖层比单一盖层的密封效果更差, 而断层带的突破压力基本不影响组合盖层的密封效果。

关键词: 组合盖层; 单一盖层; 断层; 密封效果; TOUGH2 软件

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

1 引言

CO₂ 地质封存可有效降低 CO₂ 排放量。CO₂ 地质封存是指通过捕集、压缩、运输和封存环节将 CO₂ 尾气封存于深部地质构造中, 以达到 CO₂ 减排和减缓温室效应的目的^[1]。其中咸水层封存被认为是 CO₂ 地质封存的理想储层。咸水层通常是指至少在 800 m 以下、经过严格筛选的适宜地层^[2]。在 CO₂ 地质封存中, 储层的上部往往并非单一的盖层, 还存在着由多个薄储层所间隔的多个盖层, 通常将这些薄储层和间隔盖层的整体称为组合盖层。在实际工程中, 常将组合盖层视为单一盖层进行评价, 而组合盖层中薄储层的密封效果和单一盖层相差较大, 薄储层的存在降低了盖层的压力积聚, 同时提升了 CO₂ 注入速率和总注入量。若组合盖层中存在断层裂隙等构造, 薄储层的存在可能使 CO₂ 沿断层泄漏。为此, 本文采用数值模拟 TOUGH2 软件研究了存在贯穿断层时组合盖层和单一盖层密封效果的差异, 以便为节能减排中 CO₂ 的排放提供新途径。

2 模型构建

2.1 地质条件

某 CO₂ 地质封存处储层厚度 30 m, 上覆地层厚 1 387 m, 盖层厚度 123 m, 组合盖层(图 1)中的薄储层距底部 65 m, 单层厚度 8 m。断层位

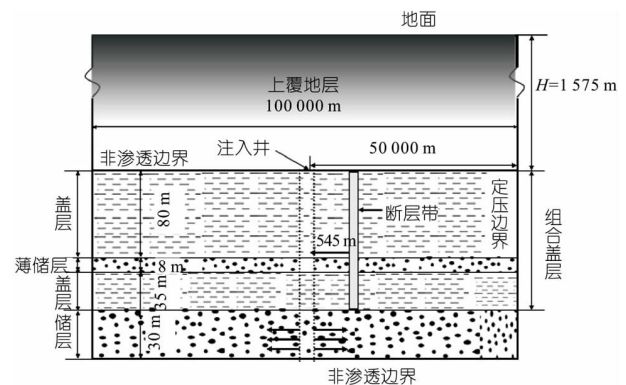


图 1 组合盖层模型示意图

Fig. 1 Sketch map of combined caprock

置距注入井 545 m, 断层概化为贯穿断层, 断层内填充物各向同性。

2.2 计算工况

为研究存在贯穿断层时组合盖层和单一盖层密封效果的差异, 本文设计了两种工况: ① 工况 1。组合盖层, 组合盖层模型示意图见图 1。② 工况 2。单一盖层。两种工况下储层厚度、盖层总厚度、断层位置及物性均一致, 以保证结果不受其他因素影响。

2.3 模型构建及模型参数

本文相对渗透率(k_{ri})方程采用 Van Genuchten-Mualem 模型^[3], 气体相对渗透率(k_{rg})方程采用 Corey 模型^[4], 分别为:

$$k_{ri} = \begin{cases} \sqrt{S^*} \{1 - (1 - [S^*]^{1/m})^m\}^2 & S_1 < S_{1s} \\ 1 & S_1 \geq S_{1s} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2014-01-17, 修回日期: 2014-02-13

基金项目: 中美二氧化碳捕集与封存技术的联合研究(S2013GR0686)

作者简介: 孔维钟(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为岩土力学与工程, E-mail: wavesingsing@163.com

$$k_{rg} = \begin{cases} 1 - k_{rl} & S_{gr} = 0 \\ (1 - \hat{S})^2 (1 - \hat{S}^2) & S_{gr} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $0 \leq k_{rl}, k_{rg} \leq 1; S^* = (S_1 - S_{lr}) / (1 - S_{lr})$

$$\hat{S} = (S_1 - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$$

式中, m 为拟合参数,与孔隙分布有关, $m = 0.457$; S_1 为液体饱和度; S_{lr} 为液体残余饱和度, $S_{lr} = 0.30$; S_{gr} 为气体残余饱和度, $S_{gr} = 0.05$ 。

毛细压力(p_{cl})方程采用 VG 模型^[5],即:

$$p_{cl} = -p_0 ([S^{*'}]^{-1/m} - 1)^{1-m} \quad (3)$$

其中 $S^{*'} = (S_1 - S'_{lr}) / (S_{ls} - S'_{lr})$

$$-p_{max} \leq p_{cl} \leq 0$$

式中, p_0 为进气压力值, $p_0 = 4$ kPa; p_{max} 为最大毛细压力值, $p_{max} = 20$ MPa; p_{cl} 为液体毛细压力, Pa; S_{ls} 为液体饱和状态下的饱和度,不考虑毛细作用,即毛细压力值为零时,取值为 1; S_{lr} 为液体残余饱和度, $S_{lr} = 0.0$ 。

储层、盖层及断层具体参数取值见表 1。

表 1 储层、盖层和断层的相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of saline, caprock and fault

参数	储层	盖层	断层
厚度/m	65	88	
渗透率/m ²	3×10^{-14}	8×10^{-18}	1×10^{-13}
孔隙度	0.2	0.08	0.3
水平与垂向渗透率比值	10	10	10
岩石孔隙压缩系数/Pa ⁻¹	4×10^{-10}	4×10^{-9}	4×10^{-12}
密度/(kg · m ⁻³)	2 400	2 600	2 200
热传导系数/(W · (m · °C) ⁻¹)	2.51	2.51	2.51
比热/(J · (kg · °C) ⁻¹)	920	920	920

TOUGH2 软件能精确地刻画钻孔、断层、复杂边界及各种非均匀的地质体,在裂隙模拟方面具有绝对优势。本文利用 TOUGH2 软件进行模拟计算组合盖层工况下 CO₂ 穿透组合盖层的时间及压力积聚情况,通过与单一盖层工况的对比来研究组合盖层的密封效果并分析其原因,通过改变注入压力及断层带填充物突破压力对比研究影响含贯穿断层组合盖层密封效果的因素。

2.4 模型初始条件

顶部和底部边界为非渗透边界,侧边界为定压边界^[6]。计算中初始压力 $p = 16$ MPa,压力梯度按照 $\Delta P = \rho g \Delta h$ 计算(ρ 为地下水密度; g 为重力梯度; Δh 为高差),温度 $t = 50$ °C,在此温压条件下 CO₂ 处于超临界状态,计算采用两相流进行模拟,初始气体饱和度 $S_{gas} = 0$,盐质量分数 $X_{NaCl} = 6\%$,采用恒压注入方式,井底注入压力 $P_w = 28$ MPa,模拟时间为 1 000 年。

2.5 网格剖分

根据工况设计建立二维径向模型,径向距离 50 000 m,垂向 153 m,使用 R-Z 网格剖分,Z 方

向(垂直方向)20 个网格,其中储层平均划分为 5 层,共 30 m,底部盖层平均划分为 5 层,共 35 m,薄夹层平均划分为 2 层,共 8 m,顶部盖层平均划分为 8 层,共 80 m;R 方向(水平方向)58 个网格,在注入井附近采用小尺寸网格,由密至疏到远处采用大尺寸网格,共 1 160 个网格。

3 结果与分析

3.1 CO₂ 迁移过程

3.1.1 组合盖层工况(工况 1)

在组合盖层工况模拟时,发现气态 CO₂ 在开始注入后迅速在盖层底部积聚,然后向远处迁移,9.6 年后有少量 CO₂ 沿着断层进入上部盖层,9.7 年后穿透第一层盖层进入薄砂岩层,穿透第一层盖层的气态 CO₂ 有少量沿薄砂岩层向远处迁移,大部分沿着断层继续进入上部盖层,10 年后气态 CO₂ 到达盖层顶部,由于模型上部设置为不可流动边界,所以气态 CO₂ 在到达盖层顶部以后开始积聚,当积聚较多以后气态 CO₂ 开始沿着薄砂岩层向远处迁移。

组合盖层工况时模拟溶解态 CO₂ 迁移过程,发现溶解态 CO₂ 由于溶质迁移作用,在 9.2 年后进入盖层,9.6 年后突破第一层盖层进入薄砂岩层,由于断层填充物的渗透率远大于薄砂岩层,所以大部分溶解态 CO₂ 沿着断层向上运移,只有少量沿着薄砂岩层运移,到 9.9 年时溶解态 CO₂ 沿着断层到达盖层顶部,到 10 年时盖层顶部的溶解态 CO₂ 质量分数达到 0.041,溶解态 CO₂ 浓度较大,虽然上覆地层仍有部分封闭效果,但已经存在泄漏风险。由于模型顶部边界设置为非渗透边界,所以当 CO₂ 完全突破盖层后模拟结果已不可信,故不再考虑后续时间的 CO₂ 迁移。

3.1.2 单一盖层工况(工况 2)

在单一盖层工况模拟时,发现气态 CO₂ 在 10.6 年后有一部分进入上部盖层,大部分仍在储层内,11.1 年后气态 CO₂ 到达距离盖层顶部 88 m 处,此处即组合盖层中薄砂岩层的位置,12.1 年后气态 CO₂ 到达盖层顶部,此时的气体饱和度在 0.2 以下。

单一盖层工况时模拟溶解态 CO₂ 迁移过程,发现溶解态 CO₂ 随着地下水运动在 10.5 年后进入盖层,11.8 年后达到盖层顶部,此时溶解态 CO₂ 质量分数在 0.011 以下。

通过分析两种工况中气态和溶解态 CO₂ 模拟迁移过程,发现溶解态 CO₂ 比气态 CO₂ 运移要快,单一盖层比组合盖层工况下 CO₂ 到达盖层

顶部的时间要晚,即当存在贯穿断层时,组合盖层反而比单一盖层的封闭效果差。这是因为组合盖层中的断层、薄砂岩层渗透率比盖层要小,相当于在断层中形成了新的“泄漏通道”。

本文选取位于薄砂岩层底部断层中的#545网格作为监测网格,监测网格位置见图2。

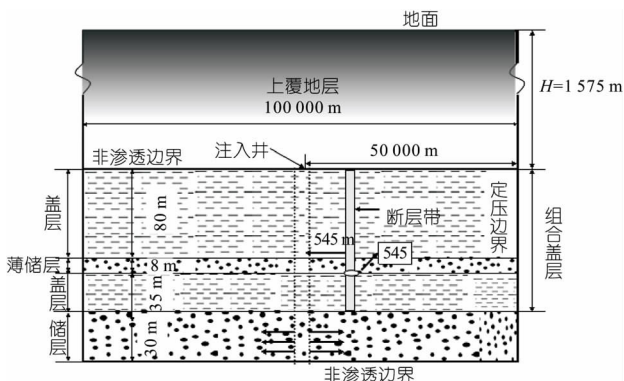


图2 监测网格#545位置示意图
Fig. 2 Position of monitoring mesh #545

本文仅研究监测网格中CO₂垂向运移速率,两种工况下#545网格中CO₂垂向运移速率历史曲线见图3。由图3可看出,组合盖层工况下CO₂的运移速率远大于单一盖层工况,CO₂沿着断层进入盖层的速率要远大于单一盖层工况,因此当存在贯穿断层时组合盖层的密封效果比单一盖层差。

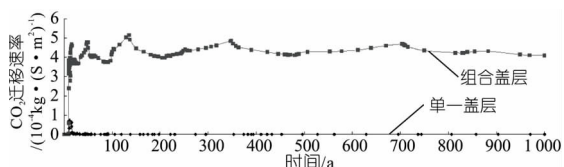


图3 #545网格两种工况下CO₂垂向运移速率历史曲线
Fig. 3 CO₂ vertical migration rate history curve of monitoring mesh #545 of two cases

3.2 盖层中的压力积聚

由于CO₂主要是通过贯穿断层泄漏,因此选取断层位于盖层内的网格作为监测网格,本文选取盖层中#313、#719、#1125三个网格作为监测网格,具体位置见图4。

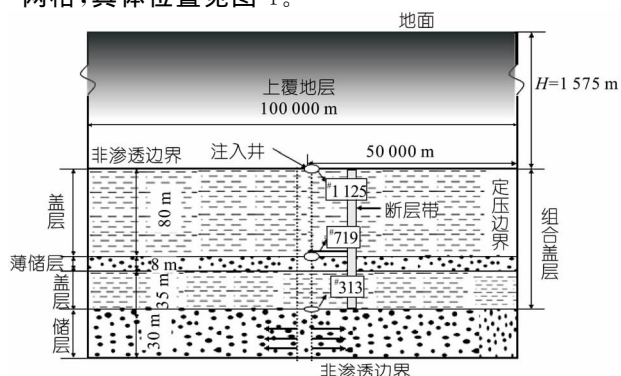


图4 压力监测网格位置示意图
Fig. 4 Position of pressure monitoring meshes

图5为两种工况中监测网格#313、#719和#1125的历史压力曲线。由图5可看出:①组

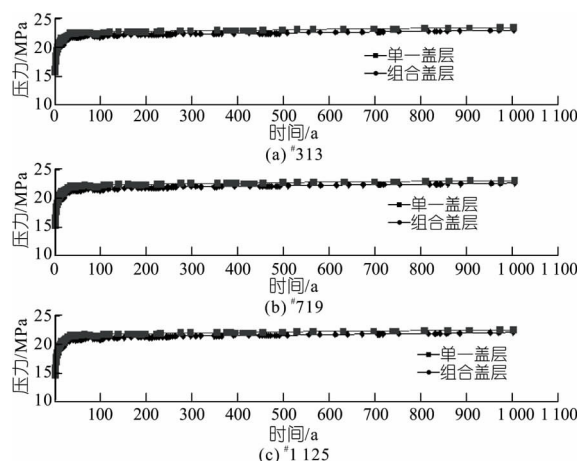


图5 不同工况时#313、#719、#1125网格的压力曲线
Fig. 5 History pressure curve of monitoring mesh #313, #719 and #1125 of two cases

合盖层工况中,在开始注入CO₂后,#313网格中的地层压力由16 MPa逐步上升至23.07 MPa,#719网格中的地层压力由15.6 MPa逐步上升至22.73 MPa,#1125网格中的地层压力由14.86 MPa逐步上升至22.19 MPa。②单一盖层工况中,开始注入后,#313网格中的地层压力由15.88 MPa逐步上升至23.53 MPa,#719网格中的地层压力由15.43 MPa逐步上升至23.18 MPa;#1125网格中的地层压力由14.72 MPa逐步上升到22.64 MPa。综上可看出,组合盖层工况中盖层底部和顶部的地层压力均比单一盖层工况时小。这是因为组合盖层中存在薄砂岩层,因此气态和溶解态CO₂均会在突破第一层盖层以后沿着薄砂岩层向上部迁移,从而减少了监测网格附近的CO₂浓度。由此可见,即使存在贯穿断层,薄砂岩层也起到了压力削减的作用。因此单纯从压力积聚方面来看,组合盖层比单一盖层更难致裂,因而并不能保证良好的密封效果。

3.3 注入压力、断层带突破压力对密封效果的影响

对比计算了注入压力(24、28、32 MPa)与CO₂完全穿透盖层所需时间的关系,计算结果见表2。由表2可看出,注入压力越大,CO₂穿透盖层的时间越短,同时组合盖层和单一盖层工况下的时间差也越小,在密封效果上组合盖层更差。

表2 不同注入压力下CO₂穿透盖层时间对比
Tab. 2 Correlation of CO₂ breakthrough time under different injection pressure

注入压力/MPa	组合盖层/a	单一盖层/a	时间差/a
24	13.3	15.5	2.2
28	10.0	12.0	2.0
32	8.2	10.0	1.8

对比分析了断层带的突破压力(4、8、12 MPa)与 CO₂ 完全穿透盖层所需时间的关系,计算结果见表 3。由表 3 可看出,断层带的突破压力并不影响 CO₂ 穿透盖层的时间,即不影响组合盖层的密封效果。

表 3 不同断层突破压力下 CO₂ 穿透盖层时间对比
Tab. 3 Correlation of CO₂ breakthrough time under different breakthrough pressure

突破压力/MPa	组合盖层/a	单一盖层/a	时间差/a
4	10	15.5	5.5
8	10	15.5	5.5
12	10	15.5	5.5

4 结论

a. 当存在贯穿断层时,组合盖层中的 CO₂ 密封效果比单一盖层差,但组合盖层在压力积聚方面仍具有一定的优势,盖层岩石更难致裂;存在贯穿断层时,CO₂ 注入压力越大,组合盖层比单一盖层的密封效果更差,而断层带的突破压力基本不会影响组合盖层的密封效果。

b. 本研究对 CO₂ 地质封存选址标准的细化

及注入压力控制有一定指导意义。

参考文献:

[1] 许志刚,陈代钊,曾荣树. CO₂ 地质埋存渗漏风险及补救对策[J]. 地质论评,2008,54(3):373-386.

[2] Bachu S. Sequestration of CO₂ in Geological Media Inresponse to Climate Change: Road Map for Site Selection Using the Transform of the Geological Space into the CO₂ Phase Space[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(1):87-102.

[3] Mualem Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.

[4] Corey A T. The Interrelation between Gas and Oil Relative Permeabilities [J]. Producers Monthly, 1954,19(1):38-41.

[5] Pruess K. ECO2N: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO₂ [M]. USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, 2005.

[6] 万玉玉. 鄂尔多斯盆地石干峰组咸水层 CO₂ 地质封存中 CO₂ 的迁移转化特征[D]. 吉林:吉林大学, 2012.

Sealing Effect of Combined Caprock with Vertical Fault on Sequestered CO₂

KONG Weizhong^{1,2}, BAI Bing¹, LI Xiaochun¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to study the sealing effect of combined caprock with vertical fault on sequestered CO₂, the authors researched the different sealing effects of combined caprock and single caprock with vertical fault by TOUGH2 software. The results show that when there exists vertical fault, the sealing effect of combined caprock is worse than that of single caprock; however, combined caprock has superiority in pressure accumulation and it is hard to be spit; when there exists penetrating fault, the sealing effect of combined caprock is more worse than that of single caprock under the larger injection pressure while breakthrough pressure of fault zone has no impact on the sealing effect of combined caprock.

Key words: combined caprock; single caprock; fault; sealing effect; TOUGH2 software

(上接第 114 页)

[4] ASCE. Seismic Analysis and Design: Chapter 5, Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities [M]. New York: ASCE, 1980.

[5] American Society of Civil Engineers. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary(ASCE4-98)[S]. USA: ASCE, 1998.

[6] 王家翀,许川,姚栋. 蒙特卡罗算法并行计算研究[J]. 核动力工程,2007,28(4):20-24.

[7] 谷晓忱. 并行蒙特卡罗计算硬件加速器的关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.

[8] 张林波,迟学斌,莫则尧,等. 并行计算导论[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[9] 黄海燕,黄胜伟,王德信. Matlab 软件优化工具箱的应用[J]. 计算机与现代化,2002(6):55-57.

Parallel Calculation Method of Uncertainty Analysis of Nuclear Power Floor Response Spectra

QIN Fan¹, LI Jianbo¹, LIN Gao¹, ZHU Xiuyun^{1,2}

(1. Earthquake Engineering Research Division, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Plant Site and Civil Engineering Department, Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China)

Abstract: Generally, uncertainty analysis is carried out by applying Monte Carlo method, but it is time-consuming by employing the thread of serial programming and make deterministic seismic analysis on a large quantity of random samples. This paper analyzes the reasons for low computational efficiency of conventional methods based on parameter uncertainty of nuclear power plant structures. Program was made by MATLAB to achieve parallel computing ability. Therefore, the operation time of Monte Carlo process was sharply shortened. Numerical examples indicate that not only adequate sample space for accurate calculation is guaranteed, but also computing efficiency is greatly improved as well as the statistical precision of floor response spectra is ensured.

Key words: nuclear power floor response spectra; parameter uncertainty; Monte Carlo simulation; parallel calculation