

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.06.007

深部咸水层 CO₂ 地质封存对地层压力环境的影响

胡叶军^{1,2}, 王蔚³, 任杰^{1,4}, 王媛^{1,4}

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 嘉兴市世纪交通设计有限公司, 浙江 嘉兴 314001;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对深部咸水层 CO₂ 地质封存过程中流体的运移和压力的传递现象, 利用美国 Frio 地区的 CO₂ 咸水层封存试验实测数据, 建立二维多岩相结构模型, 模拟分析 CO₂ 地质封存中 CO₂ 注入阶段岩石孔渗性能的变化特征、岩层压力增加的变化特征以及 CO₂ 羽流的演化规律。结果表明, 超临界 CO₂ 在驱替咸水溶液的过程中形成类似漏斗状的扩散晕, 蒸发作用产生的盐沉淀主要位于井附近的单气相区, 随着盐沉淀的增加, 井周围的渗透率降低、压力积聚; 盖层渗透性提高避免了储层内部出现过大的压力, 但却增加了泄漏的可能性。

关键词: 深部咸水层; 多岩相模型; 固体饱和度; CO₂ 羽流; 盖层压力

中图分类号: TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)06-0512-07

Effect of CO₂ geological sequestration in deep saline aquifer on formation pressure environment

HU Yejun^{1,2}, WANG Wei³, REN Jie^{1,4}, WANG Yuan^{1,4}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Shiji Design & Research Institute of Communications, Jiaxing 314001, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: The process of CO₂ sequestration in deep saline aquifers involves fluid migration and pressure transmission. Based on the field data of CO₂ sequestration in saline aquifers in the Frio region of the United States, a two-dimensional multi-lithofacies model was established. The variation characteristics of the rock permeability during CO₂ injection, the variation characteristics of the rock pressure, and the evolution of the CO₂ plume were simulated and analyzed. The results show that the formation of a funnel-shaped diffusion halo was observed when supercritical CO₂ displaced the salt water, and salt precipitation due to evapotranspiration mainly occurred in the single gas phase region near the well. As salt precipitation increased, the permeability near the well decreased and the pressure increased. If the permeability of the cap rock is improved, the pressure in the reservoir will decrease, but the possibility of leakage will increase.

Key words: deep saline aquifer; multi-lithofacies model; solid saturation; CO₂ plume; caprock pressure

CO₂ 地质封存的适宜场所主要包括不可开采的煤层、枯竭油气藏和深部咸水层, 其中深部咸水层因其分布面积广、厚度大、储存容量巨大且不能作为饮用水被开采使用, 所以被认为是最具潜力的封存场所^[1-4]。大量的 CO₂ 注入深部咸水层中会引起一系列多尺度现象, 包括大尺度空间范围的压力传播、封存区域内的流体运移以及局部范围的盐析现象。这些现象会对盖层的力学稳定性产生重大影响, 从而影响整个封存系

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51179060); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110094130002)

作者简介: 胡叶军(1988—), 男, 浙江嘉兴人, 硕士, 主要从事二氧化碳地质储存研究。E-mail: bigjun7732@163.com

通信作者: 王媛, 教授。E-mail: wangyuanhhu@163.com

统的安全性^[5]。

CO₂ 注入深部咸水层后主要以超临界态存在^[6]。而超临界 CO₂ 在咸水层中的运移又是一个极其复杂的物理化学过程,该过程包括超临界 CO₂ 和咸水层中原有咸水在多孔介质中流动、矿物溶解和沉淀等缓慢地球化学反应过程^[7],并且还涉及多组分多相态的非等温渗流、对流和扩散过程^[8]。超临界状态 CO₂ 注入深部咸水层后,一方面会在压力梯度和质量浓度梯度的驱动下随地下咸水在岩石孔隙中扩散;另一方面由于超临界 CO₂ 的密度小于咸水,因此会因浮力作用而向上运动^[9]。除此之外,CO₂ 在岩石孔隙中流动时,会因为毛细压力的作用而滞留在孔隙空间中^[10]。这3种作用形式往往会同时存在,构成非常复杂的运移行为。同时,CO₂ 在咸水层中的运移行为还会受到多种地下环境因素的影响,比如地层温度和压力的变化会影响超临界 CO₂ 的黏度,进而改变其在岩层孔隙中的渗透性能。

随着 CO₂ 地质封存技术的发展,国际上对 CO₂ 在深部咸水层中的运移规律有了较深入的研究,分别在现场试验与观测、室内试验和数值模拟方面取得了重大进展^[11-13]。1996年,在挪威的 Sleipner 天然气田上开始了世界上第一项 CCS(Carbon Capture and Storage)工程。在项目实施的同时,国际能源署(IEA)开展了 SACA(Sleipner Aquifer CO₂ Storage)国际合作研究计划,运用地震波法进行 CO₂ 迁移状态的跟踪监测^[11]。监测结果表明,CO₂ 注入后大部分 CO₂ 会逐渐上浮,达到上覆盖层的底部并沿底部轮廓向四周扩散。由此可以看出浮力在超临界 CO₂ 运移过程中起到极为重要的驱动作用。美国能源局于2004年在德克萨斯州的 Frio 地区开展了 CO₂ 咸水层封存的试验性计划^[12],利用观测井对各个阶段的 CO₂(包括注入前、注入过程中及注入后3个阶段)进行水文和地球物理化学监测。2004年,在阿尔及利亚的 In Salah 地区也开始咸水层的 CCS 项目,除了采用钻孔和地震波法观测 CO₂ 的运移过程外,还首次运用了卫星影像技术进行注入井附近地表位移的观测^[13]。

CO₂ 的注入过程涉及流体的运移和压力的传递。本文将基于 Frio 场地的地层特征,通过分析注入阶段岩石孔渗性能的变化特征、压力增加的时间和空间变化特征以及 CO₂ 羽流的演化规律,研究 CO₂ 地质封存对地层稳定性的影响。

1 Frio 场地区域地质概况

1.1 Frio 场地简介

Frio 咸水示范试验是德克萨斯美国资源公司在德克萨斯州南部油田开展的一项关于咸水层地质封存的试验项目。试验过程中,每10d内注入1600t CO₂ 到达1500m深的饱和咸水砂层中。该示范区采用一个注入井和一个观测井,在注入前开展的活动主要为传统场地特征描述技术,例如区域地质背景回顾、详细区域地质模型开发、岩心样品实验室分析、咸水样品收集与化学分析等。在注入期间和注入后,通过观测井对整个过程中 CO₂ 在地下的活动进行监测,获得有关 CO₂ 在多个不同规模空间分布的信息,用以评估 CO₂ 地质封存的长期稳定性以及带来的环境效应。选择 Frio 作为 CO₂ 地质封存场所的优势在于:(a)该区域具有高渗透砂岩含水层,同时具有阻碍 CO₂ 向上部外渗的低渗透页岩隔水层;(b)该场地位于已知的油田开采区,具有较全面的地质资料,而且现有的钻井可在 CO₂ 地质封存过程中重复使用;(c)CO₂ 的排放源临近该封存场所。

1.2 水文地质特征

Frio 咸水示范区位于高盐地区的西南部,地层岩性在埋深方向呈现砂岩和页岩分层结构。砂岩层位于地表以下1500m,上部覆盖有大范围的低渗透性页岩层。砂岩层由 A、B 和 C 这3类砂岩组成,并通过局部的页岩层相互隔离。用于封存 CO₂ 的咸水饱和 C 类砂岩层,邻近深度1500m的 Frio 岩层顶板。根据钻孔资料获得 Frio 示范区埋深方向的水文地质参数。Frio 咸水层埋深方向分层结构的总厚度为60m,自上而下分别为厚度8m的 A 类砂岩、厚度6m的页岩、厚度12m的 B 类砂岩、厚度10m的页岩以及厚度24m的 C 类砂岩。其中页岩层的渗透率为0.001D,孔隙率为0.14;砂岩层的渗透率为0.2~3.7D不等,孔隙率为0.23~0.35不等。

2 模型建立及参数概化

根据场地的钻孔信息和水文地质参数资料,建立以注入井为中心的二维多岩相物理模型,间距1200m,

纵向埋深1 500~1 560 m。注入井处于C类砂岩层中心,埋深1 550~1 556 m,如图 1 所示。作为 CO₂ 储存层的 C 类砂岩层上部覆盖有 A、B 类砂岩,分别有页岩层隔离。对该二维模型进行网格剖分,深度方向根据厚度进行等距离剖分,分为 30 层,每层 2 m;水平方向采用关键区域加密方案进行剖分,以注入井为中心逐步疏松,共分 140 层。整个模型共剖分为4 200个单元。

基于上述物理模型,通过 TOUGH/ECO2N 对咸水层 CO₂ 注入问题进行计算和分析^[14],采用的模型参数参考场地水文地质资料。模型参数设置见表 1,其中, λ 为孔隙分布指数; S_{lr} 为残余液体饱和度; S_{gr} 为残余气体饱和度; S_{ls} 为液体饱和状态下饱和度; p_0 为进气压力值; p_{max} 为最大毛细压力值; S_g 为气体饱和度; X_{NaCl} 为盐度。将 CO₂ 以恒定速度注入埋深 1.5 km 的深部咸水层中,咸水层为均质的各向同性砂岩层,厚度为24 m,注入井半径为 0.5 m。咸水层上部是由砂岩和页岩组成的互层结构,可以形成多道屏障,阻碍 CO₂ 向上运移。整个储存体系上下边界为隔水边界,即不允许流体从该边界处流出;另外,当模拟进行到一定时间时,CO₂ 将运移至左右边界,而系统中所有网格的初始体积是一定的,这将导致 CO₂ 不能继续向周围扩散而集聚于边界上。模拟时将左右边界设为第一类边界,压力不变,达到流体流出的效果。

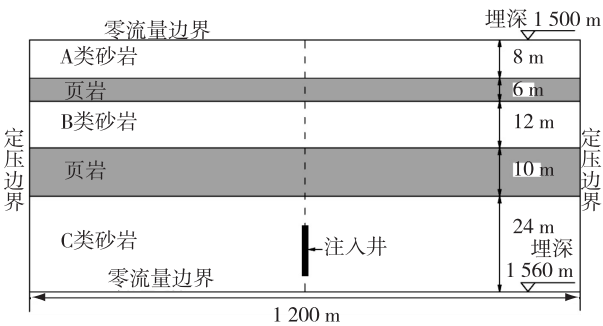


图 1 多岩相模型示意图
Fig. 1 Sketch of multi-lithofacies model

表 1 模型参数设置
Table 1 Parameters of model

地层岩性	渗透率/D	孔隙率	相对渗透率参数		毛细压力参数
A 类砂岩	0. 310	0. 26	$\lambda = 0. 457, S_{lr} = 0. 20, S_{gr} = 0. 20, S_{ls} = 1$	$\lambda = 0. 457, S_{lr} = 0. 15, S_{ls} = 0. 999, p_0 = 50 \text{ Pa}, p_{max} = 100 \text{ kPa}$	
B 类砂岩	0. 346	0. 26	$\lambda = 0. 457, S_{lr} = 0. 20, S_{gr} = 0. 20, S_{ls} = 1$	$\lambda = 0. 457, S_{lr} = 0. 15, S_{ls} = 0. 999, p_0 = 50 \text{ Pa}, p_{max} = 100 \text{ kPa}$	
C 类砂岩	2. 740	0. 32	$\lambda = 0. 4, S_{lr} = 0. 06, S_{gr} = 0. 05, S_{ls} = 1$	$\lambda = 0. 4, S_{lr} = 0. 05, S_{ls} = 0. 999, p_0 = 7 \text{ Pa}, p_{max} = 10 \text{ kPa}$	
页岩	0. 001	0. 14	$\lambda = 0. 557, S_{lr} = 0. 40, S_{gr} = 0. 05, S_{ls} = 1$	$\lambda = 0. 557, S_{lr} = 0. 35, S_{ls} = 0. 999, p_0 = 3\,500 \text{ Pa}, p_{max} = 100 \text{ kPa}$	

注:(a)初始条件:静水压力分布,地温梯度 30℃/km,地表温度 10℃, $S_g = 0\%$, $X_{NaCl} = 3.2\%$ 。(b)边界条件:左边界和右边界为第一类边界(定压边界),其他为零流量边界。

其他相同参数设置如下:岩石颗粒密度2 600 kg/m³,岩层热传导率2. 51 W/(m·℃),岩石颗粒特殊焓 920 J/(kg·℃),CO₂ 扩散系数 10⁻⁷ m²/s,CO₂ 注入速率 1. 85 kg/s。

本文在模拟过程中考虑了孔隙率的变化,即岩石孔隙率会随着多相流运移发生改变。采用 Verma 等^[15]的管道模型(tubes-in-series)(图 2)描述孔隙通道并计算渗透率的变化, R, r 分别为不同管道的孔隙半径。CO₂ 驱替咸水溶液的过程中,一方面会有部分 CO₂ 通过溶解作用进入咸水溶液中;另一方面咸水中的水分会不断进入气相 CO₂ 中。在注入井附近咸水溶液会出现超饱和状态而发生盐析现象。随着盐沉淀的不断积累,孔隙空间会被堵塞,进而改变岩层的孔渗性能。本文不考虑盐沉淀运动的影响,只考虑固相饱和度。盐析的产生对岩层孔隙率的影响可以通过下式来表示:

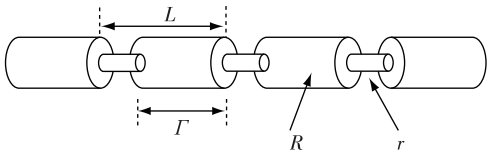


图 2 管道模型示意图
Fig. 2 Sketch of tube model

$$\varphi = (1 - S_s) \varphi_0 \tag{1}$$

式中: φ ——岩层孔隙率; φ_0 ——岩层的初始孔隙率; S_s ——固体饱和度。

式(1)中,渗透率随固体饱和度值而变化,多孔介质渗透率的值可通过式(2)计算:

$$\frac{k}{k_0} = \theta^2 \frac{1 - \Gamma + \frac{\Gamma}{\omega^2}}{1 - \Gamma + \Gamma \left(\frac{\theta}{\theta + \omega - 1} \right)^2} \quad (2)$$

其中

$$\theta = \frac{1 - S_s - \varphi_r}{1 - \varphi_r} \quad \omega = 1 + \frac{\frac{1}{\Gamma}}{\frac{1}{\varphi_r} - 1}$$

式中: k ——岩层渗透率; k_0 ——岩层初始渗透率; Γ ——大孔径管道长度与小孔径管道长度的比值; φ_r ——渗透率降为零时的孔隙率占初始孔隙率的百分比(本文中这2个参数均取值0.8)。

根据式(1)和式(2),计算得到盐析对渗透率的影响,如图3所示。从图3可知,当固相饱和度为0.2时(即孔隙率降为初始孔隙率的0.8),渗透率降为0。

3 固相饱和度分布及渗透率变化

早期注入阶段,CO₂ 驱替咸水的过程会伴随气-液相之间组分的转移。在蒸发作用下,咸水溶液中的水分不断进入气相中,咸水的盐度不断升高。当咸水达到饱和状态时,再注入 CO₂ 便会有盐沉淀形成。这个阶段对应着固相饱和度的迅速上升,如图4所示。在沉淀形成处,咸水被排干,固相饱和度保持不变。

从图5可以看出,产生盐沉淀的位置处于注入井附近的单气相区。初始注入的 CO₂ 蒸发了注入井附近咸水中的水分,导致该位置盐沉淀的积累。如果盐沉淀的量达到一定的值,会大幅度降低注入井周围的渗透率,从而使流体的流动受阻。

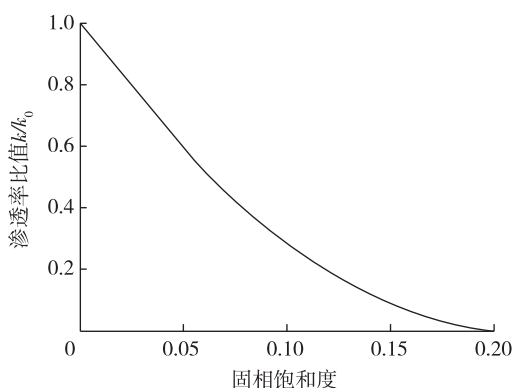


图3 岩心渗透率比值与固相饱和度关系

Fig. 3 Relationship between rock permeability ratio and solid saturation

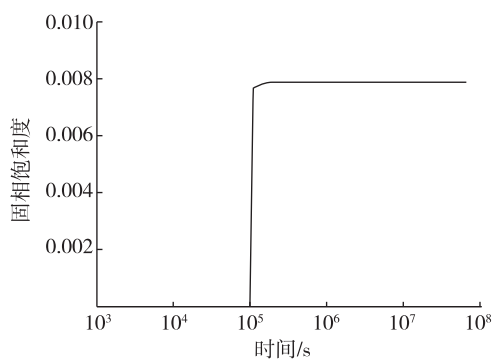


图4 注入井附近 S_s 随时间变化的曲线

Fig. 4 Variation of solid saturation S_s near well with time

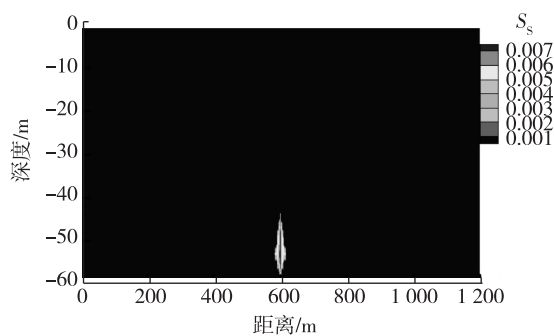


图5 固相饱和度分布云图(注入100 d)

Fig. 5 Distribution of solid saturation (100 days later)

4 CO₂ 羽流的演变

超临界态的 CO₂ 注入埋深达 1.5 km 的深部咸水层中时,会出现气相 CO₂ 驱替液相咸水的过程。图6为不同注入时刻气相饱和度的分布特征,由于气相中水分含量很少,该饱和度云图可以看成是超临界 CO₂ 的分布图。

从图6中可以看出,气相驱替液相的过程如下:前期注入的 CO₂ 将注入井附近孔隙中的咸水排出,并占据孔隙空间;由于密度差的存在,CO₂ 会在浮力作用下积聚于盖岩层下,盖岩层能有效地阻挡 CO₂ 继续向上运移;当盖层下方 CO₂ 积聚到一定量时,会在浓度梯度和压力梯度的作用下在咸水中扩散,并进一步溶解于咸水中。

大量 CO_2 注入咸水层后会形成 3 个明显的区域: 单气相区(超临界态)、气-液两相区和单液相区。气相区主要分布在注入井附近, 气-液两相区的分布与气相饱和度的分布一致, 两相区外为原咸水构成的单液相区域。

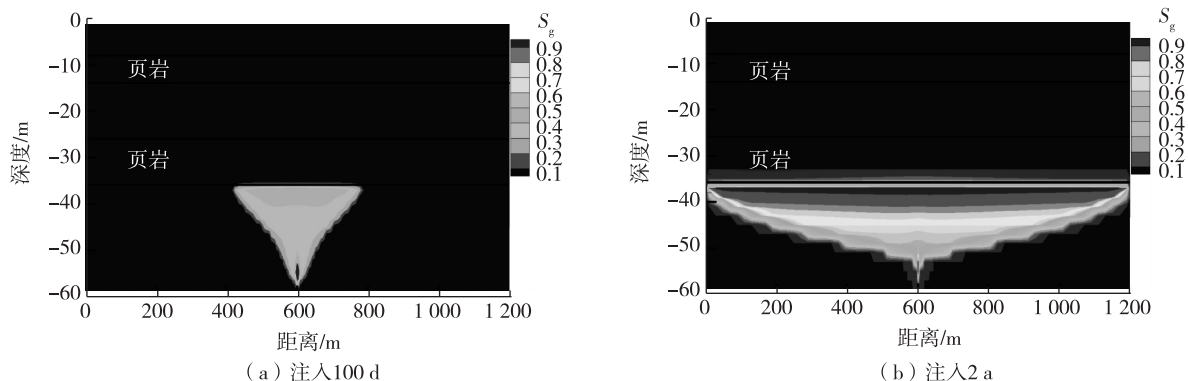


图 6 气相饱和度分布云图

Fig. 6 Distribution of gas saturation

5 压力变化的时空分布特征

CO_2 在储层内驱替咸水的同时会伴随压力的传播, 且压力传播的影响范围远大于 CO_2 驱替范围。盖层的水文参数会对压力的传播产生重要的影响。图 7 为注入 CO_2 1 a 后, 不同盖层渗透率 k_g 下压力增加 (ΔP) 的空间分布云图。从图 7 可以看出, 盖层渗透率较大时 (10^{-1}D), 垂向压力影响范围扩大至顶部岩层。在该种情况下, 由于较多的咸水从储层中运移出去为 CO_2 提供了空间, 注入井附近压力增加幅度相对较小。盖层渗透率较小时 (10^{-4}D), 阻挡了咸水的运动, 压力集中在储层内, 对上覆岩层的扰动较小。其他两种情况下, 压力传播的影响范围介于上述两者之间。随着盖层渗透性能的增加, 储层中的咸水进入上部砂岩层中的量也会增加, 这样可以避免储层内出现过大的压力。

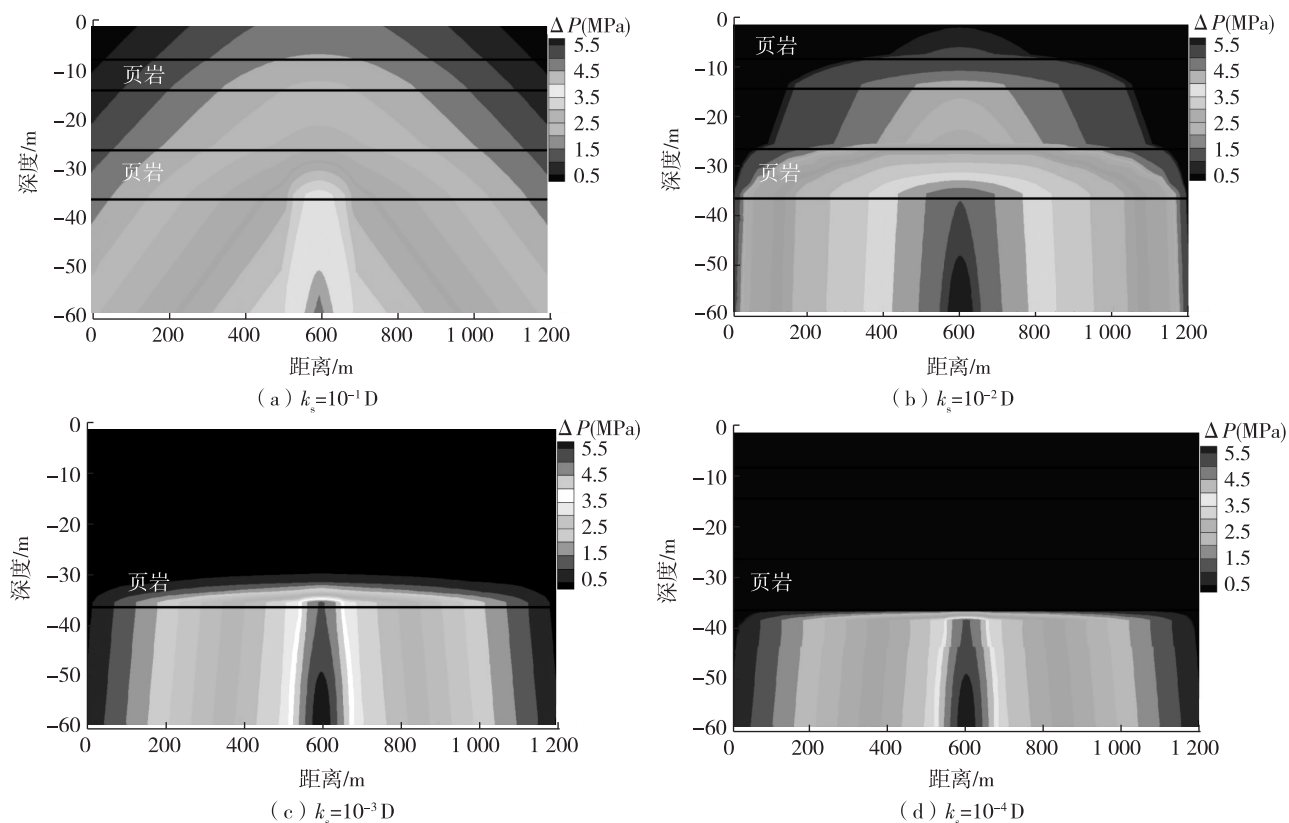


图 7 压力增加空间分布云图(注入 1 a)

Fig. 7 Distribution of space with increasing pressure (one year later)

图8为不同盖层渗透率下压力增加随时间的变化特征曲线。在注入井附近的位置,早期压力会快速的增加,用于驱替注入井周围的咸水;当注入井附近咸水被排出后 CO₂ 有足够的运移空间时,再注入 CO₂ 就会相对容易很多,压力就会慢慢下降。从图8中可以看出,盖层渗透率对注入井附近压力增加的幅度具有很大影响,压力增加的峰值随着盖层渗透率的增加而减小。此外,根据前文的分析可知,随着 CO₂ 不断驱替咸水,在注入井附近会伴随盐沉淀的形成。如果盐沉淀的量达到一定的值,会大幅度降低注入井周围的渗透率,使流体的流动受阻,从而导致压力积聚。如果大量 CO₂ 注入盖层渗透率极低的咸水层中,注入井附近及盖层下部过大的压力抬升可能会导致岩石的开裂,进而引发泄漏,影响封存的有效性和安全性。

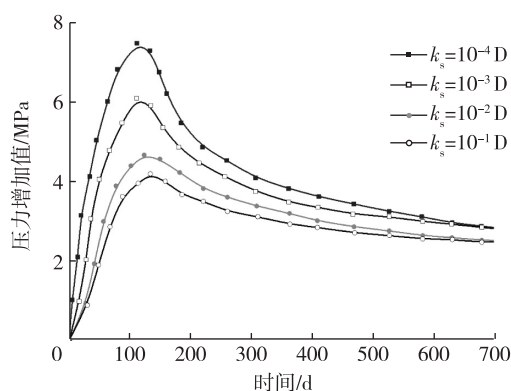


图8 注入井附近压力增加随时间的变化

Fig. 8 Variation of pressure near well with time

6 结 论

依托 Frio CO₂ 封存场地的水文地质特征,通过数值模拟研究了 CO₂ 在咸水层中的封存过程。分析注入阶段 CO₂ 羽流的运移规律和压力增加在时间和空间上的分布特征,以及盐析现象对岩层孔渗性能的影响。

a. 超临界 CO₂ 在驱替咸水溶液的过程中,受密度差、浓度差和压力差的共同作用,因此在整个储存区域会形成类似漏斗状的扩散晕。此外,以注入井为中心存在着3个明显的区域:单气相区、气-液两相区和单液相区。

b. 驱替过程中的蒸发作用会形成盐沉淀,而且沉淀主要位于注入井附近的单气相区。根据 VP 模型的固体饱和度和渗透率之间的关系可知,当固体饱和度达到 0.2 时,渗透率降为 0,从而使气相的流动受阻,压力积聚。

c. 盖层渗透率对压力的传播会产生重要影响。随着盖层渗透性能的增加,储层中的咸水进入上部砂岩层中的量也会增加。从空间角度来看,渗透率为 10⁻¹D 的盖层,注入井附近的压力积聚不明显,压力可以很好传递到上部岩层;渗透率为 10⁻⁴D 的低渗透盖层,注入井附近压力积聚明显,压力无法穿越盖层传递到上部岩层。从时间角度来看,低渗透盖岩层压力积聚的速度要比高渗透盖岩层快,短时间内无法消散。

d. 封存场地盖层的性能至关重要,一方面盖层的低渗透性决定了 CO₂ 封存的有效性;另一方面过低的渗透性会导致储层内出现过大的压力,引起岩石开裂,从而影响 CO₂ 封存的安全性。

参考文献:

- [1] 许志刚, 陈代钊, 曾荣树, 等. CO₂ 地下地质埋存原理和条件[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 91-97. (XU Zhigang, CHEN Dai-zhao, ZENG Rongshu, et al. The theory and conditions of geological storage of CO₂ [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2009, 31(1): 91-97. (in Chinese))
- [2] 臧雅琼, 高振记, 钟伟. CO₂ 地质封存国内外研究概况与应用[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(6): 503-507. (ZANG Yaqiong, GAO Zhenji, ZHONG Wei. Overview of research and application of CO₂ geological sequestration at home and abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(6): 503-507. (in Chinese))
- [3] 李小春, 方志明. 中国 CO₂ 地质埋存关联技术的现状[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2229-2233. (LI Xiaochun, FANG Zhiming. Status quo of connection technologies of CO₂ geological storage in China [J]. Rock and soil Mechanics, 2007, 28(10): 2229-2233. (in Chinese))
- [4] 朱炎铭, 赵雯, 赵文永, 等. 苏南地区温室气体 CO₂ 地质处置的探讨[J]. 现代地质, 2009, 23(2): 359-364. (ZHU Yanming, ZHAO Wen, ZHAO Wenyong, et al. Research of geologic storage of carbon dioxide underground disposal in the south of Jiangsu province [J]. Geoscience, 2009, 23(2): 359-364. (in Chinese))
- [5] 柯怡兵, 李义连, 张炜, 等. 岩盐沉淀对咸水层二氧化碳地质封存注入过程的影响: 以江汉盆地为例[J]. 地质科技情报, 2012, 31(3): 109-115. (KE Yibing, LI Yilian, ZHANG Wei, et al. Impact of halite precipitation on CO₂ injection into saline aquifers: a case study of Jianghan basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(3): 109-115. (in Chinese))

- Chinese))
- [6] 许志刚, 陈代钊, 曾荣树. CO₂的地质埋存与资源化利用进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(7): 698-707.(XU Zhigang, CHEN Daizhao, ZHEN Rongshu. Geological storage of CO₂ and commercial utilization[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(7): 698-707.(in Chinese))
- [7] JIANG X. A review of physical modelling and numerical simulation of long-term geological storage of CO₂[J]. Applied Energy, 2011, 88(11): 3557-3566.
- [8] ZHANG Y, OLDENBURG C M, FINSTERLE S, et al. System-level modeling for economic evaluation of geological CO₂ storage in gas reservoirs[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(6): 1827-1833.
- [9] 马瑾, 胥蕊娜, 罗庶, 等. 超临界压力 CO₂在深部咸水层中运移规律研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(11): 1971-1975.(MA Jin, XU RuiNa, LUO Shu, et al. Core-scale experimental study on supercritical-pressure CO₂ migration mechanism during CO₂ geological storage in deep saline aquifers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(11): 1971-1975.(in Chinese))
- [10] JUANES R, SPITERI E J, ORR F M, et al. Impact of relative permeability hysteresis on geological CO₂ storage[J]. Water Resources Research, 2006, 42(12): 395-397.
- [11] GRUDE S, LANDRØ M, DVORKIN J. Pressure effects caused by CO₂, injection in the Tubåen Fm. the Snøhvit field[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 27(27): 178-187.
- [12] OTT H, KLOE K D, BAKEL M V, et al. Core-flood experiment for transport of reactive fluids in rocks[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(8): 084501-084501-16.
- [13] LIU H H, ZHANG G, YI Z L, et al. A permeability-change relationship in the dryout zone for CO₂, injection into saline aquifers [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 15: 42-47.
- [14] TORE A, JOHN G. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: the sleipner and SACS projects [J]. Energy, 2004, 29(9-10): 1361-1369.
- [15] VERMA A, PRUESS K. Thermohydrological conditions and silica redistribution near high-level nuclear wastes emplaced in saturated geological formations[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1988, 93(B2): 1159-1173.

· 简讯 ·

中奥可持续水电运行与开发研讨会在北京召开

2016年11月10日,中奥可持续水电运行与开发研讨会在北京召开。水利部部长陈雷,奥地利农业、林业、环境和水利部部长安德烈·鲁佩莱希特,奥地利驻华大使艾琳娜出席研讨会并致辞。

陈雷指出,能源是人类社会生存发展的重要物质基础。当前,全球资源危机、环境恶化、气候变化影响等问题日益突出,推动能源革命、促进绿色发展已经成为全球共识。中国政府高度重视并致力于推动能源转型变革,把推动能源生产消费革命作为中国能源发展的基本国策,确立了“节约、清洁、安全”的战略方针和“节约优先、立足国内、绿色低碳、创新驱动”的发展战略,明确了到2020年、2030年发展非化石能源和节能减排方面的目标,向世界作出了郑重承诺。

研讨会期间,陈雷与鲁佩莱希特举行了会谈。双方高度评价两国在水资源管理和小水电领域开展的务实合作,深入交流了两国在供水保障、污水处理、河湖保护、防洪减灾和应对气候变化等领域的成功经验,并就进一步加强两部交流合作、推动中欧水资源交流平台建设达成了广泛共识。

研讨会上,13位中奥政府官员和水利专家围绕绿色生态水电、提高能源效率、水电多双边合作等议题作了交流发言。中奥两国水利部门、流域机构、科研院所和企业的近150名代表参加研讨会。

(本刊编辑部供稿)