

CO₂驱油封存过程中断层滑移与泄漏风险的数值模拟研究

万里, 刘肖航, 姜伟*

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年1月13日; 录用日期: 2026年2月6日; 发布日期: 2026年2月25日

摘要

针对致密油藏CCUS-EOR开发过程中CO₂高压注入可能诱发断层滑移与泄漏的问题, 本文构建了流体流动-固体力学多场耦合数值模型, 系统研究了不同注入距离与注入流量条件下断层稳定性及CO₂封存安全性。通过引入断层滑移系数与渗透系数, 对断层临界滑移行为及CO₂泄漏风险进行了定量评价。结果表明: 注入点距断层距离是控制断层稳定性与封存安全性的关键因素, 当注入距离小于100 m时, 孔隙压力扰动易诱发断层再激活并形成CO₂泄漏通道; 当注入距离大于400 m时, 断层基本保持稳定, 封存安全性显著提高。降低注入流量可有效缓解孔隙压力累积与应力集中, 明显减小断层滑移幅度, 并延缓或抑制CO₂沿断层的非线性泄漏过程。断层滑移主要发生于注入初期, 整体呈对数型增长特征, 而CO₂泄漏量随时间表现为先加速后趋缓的演化规律。研究表明, 协同优化注入距离与注入流量是保障CCUS-EOR工程安全运行与实现CO₂长期稳定封存的关键技术途径。

关键词

断层滑移, 断层渗透, CO₂驱油, CO₂封存

Numerical Simulation Study on Fault Slip and Leakage Risk during CO₂ Enhanced Oil Recovery and CO₂ Storage

Li Wan, Xiaohang Liu, Wei Jiang*

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: January 13, 2026; accepted: February 6, 2026; published: February 25, 2026

*通讯作者。

文章引用: 万里, 刘肖航, 姜伟. CO₂ 驱油封存过程中断层滑移与泄漏风险的数值模拟研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(2): 200-211. DOI: 10.12677/ag.2026.162020

Abstract

To address the potential risks of fault slippage and leakage induced by high-pressure CO₂ injection during CCUS-EOR development in tight oil reservoirs, this study establishes a multi-field coupled numerical model integrating fluid flow, solid mechanics, and rock damage. The stability of faults and the security of CO₂ storage were systematically investigated under varying injection distances and flow rates. By introducing fault slip and leakage coefficients, the critical slip behavior and leakage risks were quantitatively evaluated. The results indicate that the injection distance is the primary factor controlling fault stability and storage integrity. When the injection distance is less than 100 m, pore pressure perturbations readily trigger fault reactivation, creating pathways for CO₂ leakage. Conversely, fault stability is maintained and storage security is significantly enhanced when the distance exceeds 400 m. Furthermore, reducing the injection flow rate effectively mitigates pore pressure buildup and stress concentration, thereby decreasing the magnitude of fault slip and inhibiting nonlinear leakage processes. Observations show that fault slippage primarily occurs during the initial injection stage, following a logarithmic growth pattern, while the CO₂ leakage rate evolves from an initial acceleration to a subsequent deceleration over time. This research suggests that the synergistic optimization of injection distance and flow rate is a critical technical strategy for ensuring the safe operation of CCUS-EOR projects and achieving long-term CO₂ sequestration.

Keywords

Fault Sliding, Fault Leakage, CO₂-EOR, CO₂ Geological Storage

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前我国油田开采已步入中后期, 开采难度极大提升, 生产能耗大幅度增加, 同时面临着生态环境问题的压力, 亟需一种技术解决这一矛盾问题。碳捕集、利用与封存(CCUS)是应对全球气候变化的关键技术之一, 该技术与油田开发过程相结合形成的 CCUS-EOR (二氧化碳捕集、利用与封存 - 提高采收率) 技术, 不仅能够有效提高油田采收率, 还可实现二氧化碳的大规模地质封存, 从而降低温室气体排放水平, 因此, CCUS-EOR 技术被普遍认为是油田企业实现碳达峰与碳中和目标的现实可行路径[1]-[4]。受低渗透特性的制约, 致密油藏需依托大规模水力压裂技术形成人工裂缝网络, 以保障 CO₂ 的有效注入[5], 然而, 注入过程中产生的流体压力扰动不仅会改变深部地层的应力状态, 还可能诱发天然断层或裂缝的再激活, 从而导致断层滑移, 形成二氧化碳泄漏通道[6][7]。基于地质与生产资料建立地质力学模型, 可深入分析 CO₂ 注入过程中地下储层的应力演化特征及地层响应规律, 从而优化注入速率与注入压力, 并实现对储层变形与破裂行为的监测, 进而预测注入与采收过程对地层稳定性的长期影响[8]。在实际气驱油开发过程中, 随着注气量及注气压力的升高, 一方面断裂相关圈内能量将不断累积, 另一方面注气压力也将通过地下流体传导至断裂带处, 均会导致断层的滑移和 CO₂ 渗漏。

本文旨在定量评价气驱油开发过程中不同注入距离条件下断层临界滑移和渗漏条件, 防止高压注入条件下由于断层发生滑移和渗漏而引起的注采风险甚至漏油事故, 可为油田安全生产提供保障。

2. 研究方法

2.1. 多场耦合理论

图 1 展示了 CO₂ 地质封存过程中流体流动和固体力学之间的耦合作用。在 CO₂ 注入过程中, 注入流体导致地层孔隙压力的增加, 从而引发应力场扰动, 进而影响岩体的孔隙度和渗透率。这些变化直接影响 CO₂ 的注入过程和流体在储层中的运移路径。与此同时, 岩体的孔隙度和渗透率变化也会反过来改变流体的流动速度和分布, 形成一个相互反馈的动态过程。

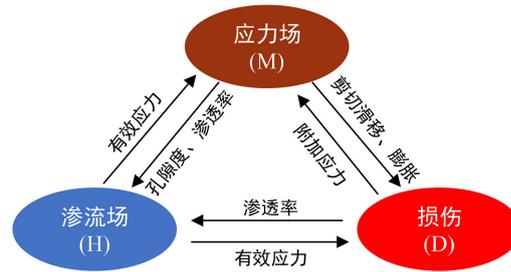


Figure 1. Fluid-solid-damage coupling relationship
图 1. 流 - 固耦合关系

在油气储层开发过程中, 注入流体改变储层内部的应力场, 导致裂缝和孔隙形态发生变化。有效应力的变化主要由孔隙中的流体压力引起的压应力所致, 这导致裂缝和孔隙的孔径和渗透率增加。渗透率的变化直接影响着油气的流动和系统的生产性能[9]。

2.2. 数学模型构建

流固(HM)多场耦合控制方程

CO₂ 驱油开发模型中通用的数学方程[10]包括: 质量守恒方程、动量方程、能量守恒方程、输运扩散方程、应力应变方程。储层可看作低渗透储层基质内的多孔介质或渗透导流裂缝。在后者的情况下, 对裂缝和岩石基质中的各种物理过程进行建模需要分别求解偏微分方程。

(1) 流体流动

基于达西定律, 裂化多孔介质中单相稳态不可压缩流体的流动受质量守恒方程控制。在基体中, 质量守恒方程表达为:

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_m = -\frac{k_m}{\mu} \nabla p \quad (2)$$

在裂隙中, 质量守恒方程表达为:

$$\nabla_{\tau} \cdot (b_f \mathbf{u}_f) = f_{up} + f_{bottom} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_f = -\frac{k_f}{\mu} \nabla_{\tau} p \quad (4)$$

其中 \mathbf{u} 是速度矢量, k 是渗透率, 下标 “ m ” 和 “ f ” 分别代表基体和裂隙。 μ 是流体动力粘度, p 是压力, ∇_{τ} 代表限制在裂隙切向平面的梯度算子, b_f 是裂隙开度。 $f_i = -\frac{k_s}{\mu} \frac{\partial p_i}{\partial n_i}$ 是基体和裂隙之间的流体交

换项, 下标表示裂隙两侧的基体, n_i 表示基体的法向方向。裂隙的渗透性 $\kappa_f = \frac{b_f^2}{12f_f}$ 是根据立方定律[11]

计算的, 其中 f_f 代表粗糙系数, 值设为 1。

(2) 固体力学

岩石基体在孔隙压力下的变形, 遵循线弹性原理[10]:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha_B p \delta_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_{ki} \delta_{ij} + \frac{E}{1+\nu} \epsilon_{ij} \quad (5)$$

其中, σ'_{ij} 是有效应力, σ_{ij} 是应变, E 是杨氏模量, ν 是泊松比, α_B 是比奥系数, p 是流体压力, δ_{ij} 是克罗内克 δ 函数。

裂隙在正常压缩下的变形可以用一个双曲线模型[12] [13]来描述:

$$v_n = \frac{\sigma_n v_m}{K_{n0} v_m + \sigma_n} \quad (6)$$

其中 v_n 是法向闭合量, σ_n 是有效法向压缩应力, v_m 是最大允许闭合量, K_{n0} 是初始法向刚度。

岩石裂隙的剪切变形基于超额剪切应力概念计算。对于剪切应力超过莫尔 - 库仑准则的裂隙, 剪切位移 u_s 可通过将超额剪切应力除以剪切刚度 K_s 来近似计算[14] [15]。

$$u_s = \frac{\Delta\tau}{K_s} \quad (7)$$

超额剪切应力 $\Delta\tau = \tau - \sigma_n \tan \phi$ 定义为裂隙上的剪切应力与剪切强度之差, 其中 τ 是剪切应力, ϕ 是摩擦角。

剪切膨胀 v_s 与剪切位移 u_s 呈增量形式相关[16]:

$$v_s = -u_s \tan \phi_i \quad (8)$$

其中 ϕ_i 是膨胀角。在法向和剪切应力耦合下的裂隙开度 b 由以下公式给出[17]:

$$b = \begin{cases} b_0 + w, & \sigma_n < 0 \\ b_0 - v_n - v_s, & \sigma_n \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 b_0 是初始开度, w 是如果裂隙处于张力状态时对立裂隙壁的距离。

引入转移系数 χ_s 来表征断层的稳定性:

$$\chi_s = \frac{|\tau_n|}{\sigma'_n \tan \phi_f + c_f} \quad (10)$$

式中: χ_s 为转移系数; τ_n 为断层切应力; σ'_n 为断层有效正应力; ϕ_f 为断层摩擦角; c_f 为断层粘聚力。当 $\chi_s < 1$ 时, 断层保持稳定; 随着 χ_s 接近 1, 断层滑移的可能性增加。

引入渗漏系数 χ_f 评估 CO_2 的泄漏风险[18]:

$$\chi_f = \frac{1000 * \text{CO}_2 \text{ 泄漏量}}{\text{CO}_2 \text{ 注入量}} \quad (11)$$

当 $\chi_f < 1$ 时, CO_2 封存处于安全状态; 随着 χ_f 接近 1, CO_2 泄漏的可能性增加。

2.3. 数值模型构建

(1) 几何模型

几何模型如图 2 所示, 水平长度为 4050 米, 垂直深度为 2600 米。图中红线表示断层, 断层呈倾斜

分布, 穿过多层地层结构。注入点位于断层下方, 标注为红色五角星, 模拟 CO₂ 在该点的注入过程。D 代表注入点与断层之间的水平距离, L 代表断层滑移距离, 随断层尺度改变。

(2) 初始及边界条件

渗流边界条件: 四周的侧面边界均设置为无流动边界(即无渗透边界), 以限制流体从模型区域流出。

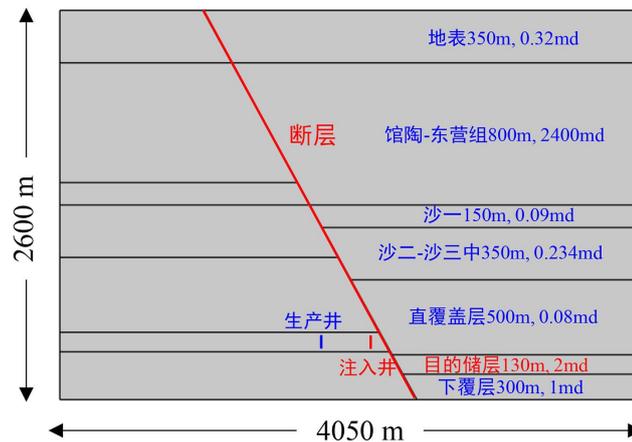


Figure 2. Geometric model
图 2. 几何模型

力学边界条件: 顶部边界设置为 0.1 MPa, 模拟浅部低压环境, 接近大气压力, 以符合地表条件; 底部边界施加 69 MPa 的垂直应力, 用于模拟地层深部的高压环境, 反映较大深度下的真实应力状态。左右边界条件考虑了应力梯度的影响, 由浅至深, 左右边界的应力从 0.1 MPa 逐渐增加到 41 MPa, 以模拟地层深度随之增大的真实地应力环境。

初始条件: CO₂ 注入的流量分别设定为 20、30、40 和 50 吨/天(t/d), 以模拟不同注入速率对断层和储层的影响。注入过程的模拟时间设定为 45 年, 用于长期评估 CO₂ 注入对储层压力、应力状态和断层滑移的影响。

(3) 模型参数设置

不同储层地层具有显著的物性差异, 包括渗透率、孔隙度和厚度等关键参数。在本次 CO₂ 封存项目中, 目标储层为沙河街组四段的下部和孔店组的上部, 平均渗透率为 25.7 mD, 孔隙度为 17.2%; 馆陶 - 东营组平均渗透率为 2400 mD, 孔隙度为 32.3%; 沙河街组一段平均渗透率为 0.09 mD, 孔隙度为 5.7%; 沙河街组二段 - 沙河街组三段中部平均渗透率为 0.234 mD, 孔隙度为 23.4% [19]。其他层系的物性参数见表 1, 其中不同层系的渗透率和孔隙度差异显著, 这将影响不同层位的流体运移特征和封存效率。

Table 1. Other parameters used in the simulation

表 1. 模拟采用的其他参数

参数	符号	单位	值
岩石基质			
密度	ρ_s	kg/m ³	2700
泊松比	ν	-	0.25
杨氏模量	E	GPa	30
Biot 系数	α_B	-	1

续表

断层			
初始开度	b_0	m	0.1
最大闭合量	ν_m	m	$0.8b_0$
初始法向刚度	K_{n0}	GPa/m	50
初始切向刚度	K_s	GPa/m	10
膨胀角	ϕ_i	°	10
摩擦角	ϕ	°	31
Sc-CO ₂			
可压缩系数	χ_f	1/Pa	5×10^{-10}
密度	ρ_f	kg/m ³	600
粘度	μ	Pa·s	5×10^{-5}

本次模拟中所采用的岩石和断层力学参数以及超临界 CO₂ 的物性参数, 均为文献中的典型值, 具体取值参照下表。这些参数包括岩石的密度、泊松比、杨氏模量、Biot 系数, 断层的开度、刚度、摩擦角等, 以及超临界 CO₂ 的可压缩系数、密度和粘度等, 以确保模型的科学性和适用性。

2.4. 模型验证

为了验证流-固耦合数学模型的可靠性, 本研究在完成数学模型构建后开展验证工作, 选用土壤柱体固结模型(图 3)的解析解来验证数学模型的正确性, 其中, 土壤柱体固结模型的压力和位移的解析解的计算公式为[20]:

$$p(z,t) = \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\xi} \left(\phi_{12} e^{-\gamma_{11}\xi^2 t} + \phi_{11} e^{-\gamma_{22}\xi^2 t} \right) \sin[\xi(h-z)] \right\} \quad (12)$$

$$v(z,t) = -\frac{FZ}{M} + \frac{2}{hM} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\xi^2} \left(\psi_1 e^{-\gamma_{11}\xi^2 t} + \psi_2 e^{-\gamma_{22}\xi^2 t} \right) \cos[\xi(h-z)] \right\} \quad (13)$$

式中, h 为土壤柱体厚度, m ; z 为位置, m ; t 为时间, s ; F 为顶部法向载荷, Pa ; M 为杨氏模量, Pa ; 其余参数由 Biot-Willis 系数、综合压缩系数、渗透系数等计算而来。

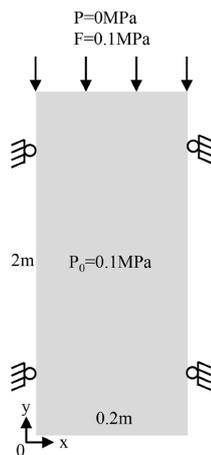


Figure 3. Geometry of the soil column consolidation model
图 3. 土壤柱体固结模型几何形态

基于本研究模型参数设置, 建立了土壤柱体热固结模型的数值模型并求解, 并将模型的数值解与解析解进行对比, 结果如图 4 所示。图中展示了不同高度($z = 0.5$ 、 1 、 1.8 m)处的压力和位移随时间的演化过程, 结果表明, 数值解与解析解吻合良好, 验证了本研究的流-固耦合数学模型的可靠性。

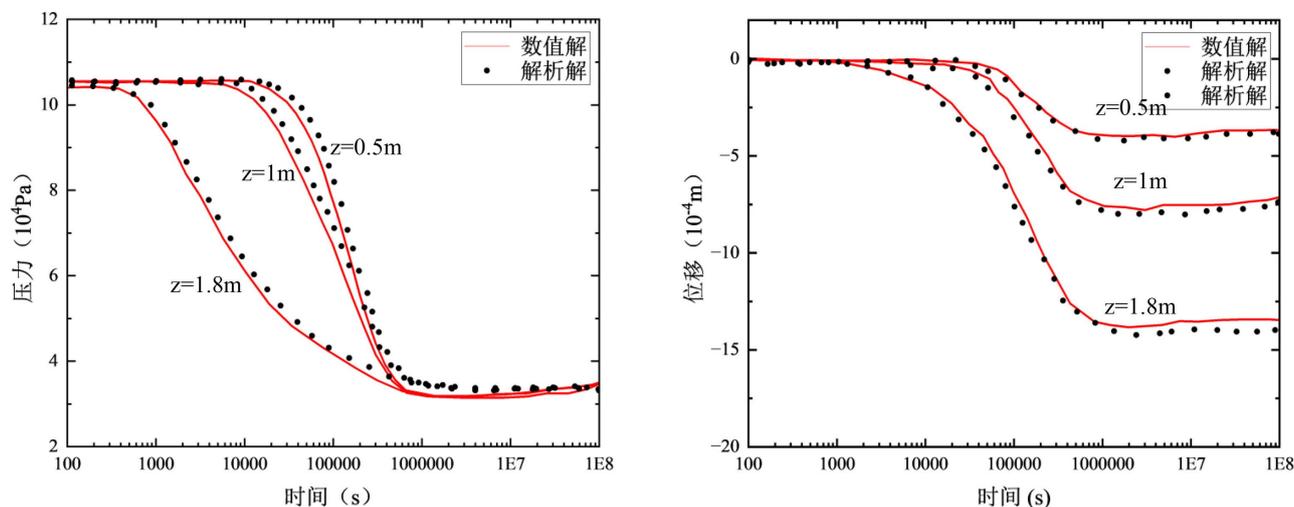


Figure 4. Comparison between numerical and analytical solutions of the soil column consolidation model

图 4. 土壤柱体固结模型数值解与解析解对比

3. 结果和讨论

3.1. 断层滑移风险

模拟结果表明, CO_2 注入速率和注入点与断层的距离对断层滑移风险具有显著影响。注入速率为 50 吨/天时(图 5), 当注入点距离断层较近(如 20 米、50 米)时, 断层的滑移量显著增大, 局部滑移量可达到 70 毫米以上, 说明 CO_2 注入引起的孔隙压力对断层稳定性造成较大影响。随着注入点与断层的距离增大(200 米及以上), 断层滑移量明显减少, 500 米处几乎无滑移, 表明增大注入点距断层的距离可有效降低滑移风险。进一步分析显示, 当注入流量降低至 20 吨/天时(图 6), 断层滑移风险显著减弱, 尤其在注入点距离断层较远时(如 200 米及 500 米), 断层几乎没有滑移现象。综合来看, 减少注入流量并增加注入点与断层的距离, 能够有效降低断层滑移和渗漏的风险, 从而增强封存过程的稳定性。

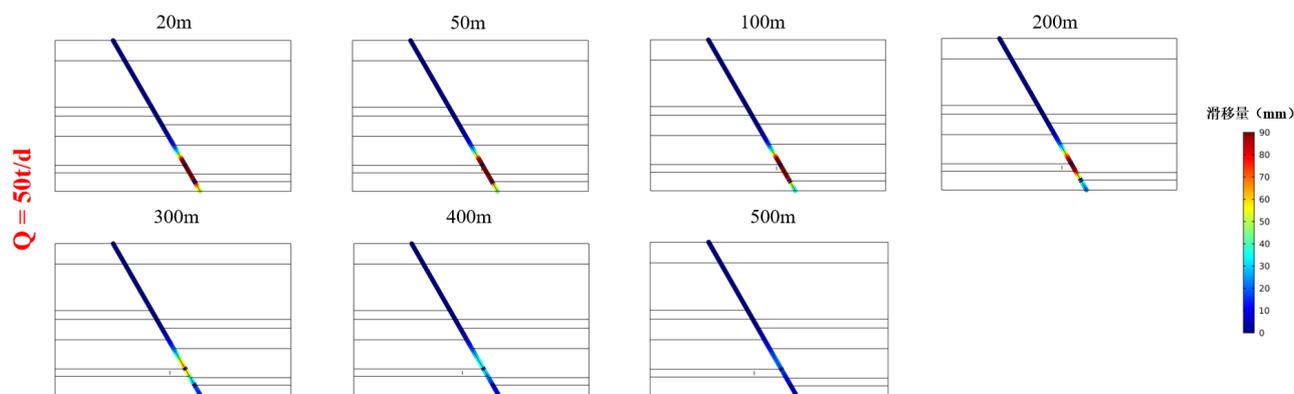


Figure 5. Fault slip conditions after 45 years of CO_2 injection at different injection distances (50 t/d)

图 5. 不同注入距离下, CO_2 注入 45 年后断层滑移情况(50 t/d)

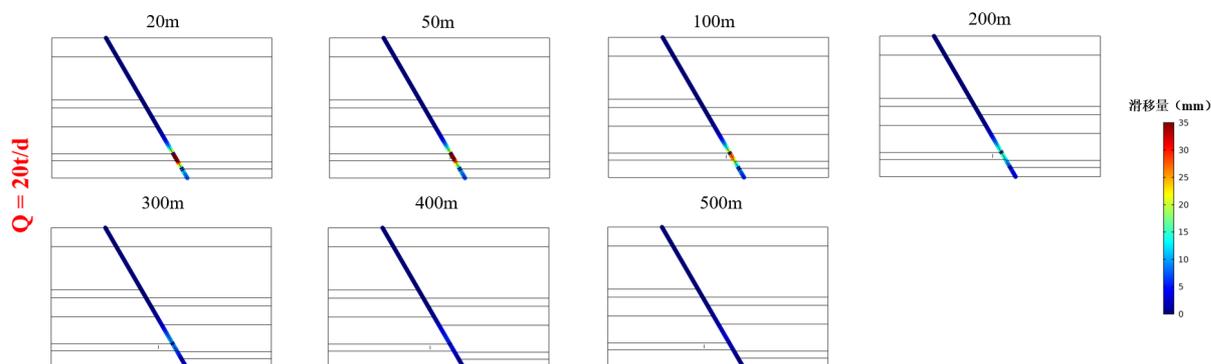


Figure 6. Fault slip conditions after 45 years of CO₂ injection at different injection distances (20 t/d)

图 6. 不同注入距离下, CO₂ 注入 45 年后断层滑移情况(20 t/d)

3.2. CO₂ 泄漏风险

通过对 CO₂ 浓度分布、流体压力和 Mises 应力的综合分析, 研究揭示了断层滑移对 CO₂ 封存安全性的影响机制。研究发现, 在渗透率较高的地层中, CO₂ 呈现明显的横向扩散特征, 倾向于进入这些高渗透率区域; 而在渗透率较低的地层中, CO₂ 主要沿断层通道迁移, 表现出选择性迁移特征, 这直接影响了 CO₂ 的封存效果和泄漏风险(图 7)。当注入距离小于 100 米时(图 6), 断层滑移导致的开度增加为 CO₂ 提供了泄漏通道, CO₂ 沿断层向上渗透至东营 - 馆陶组储层。流体压力场在注入点及断层周边呈现明显的局部集中现象, Mises 应力分布则显示出断层周边的应力集中, 这与断层滑移引起的应力再分布特征相一致。

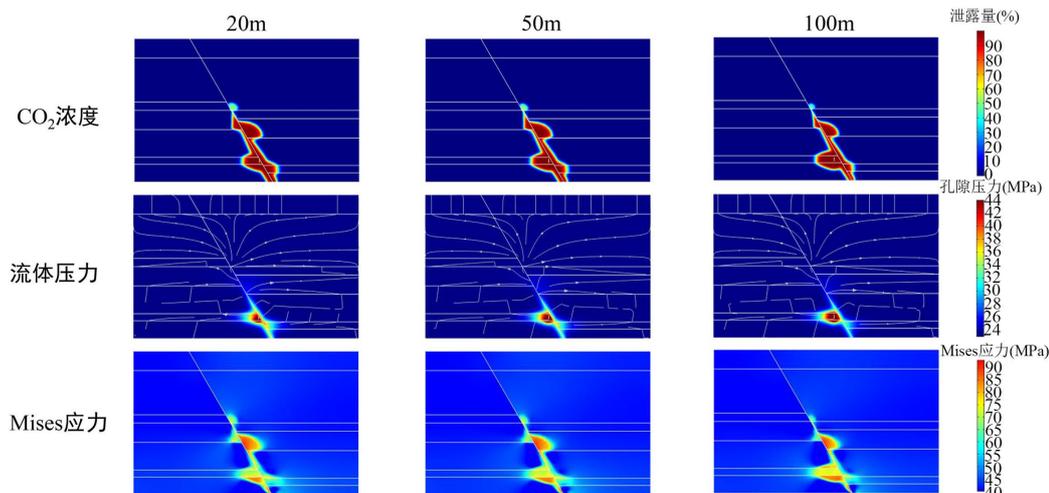


Figure 7. CO₂ concentration, fluid pressure, and Mises stress distribution 45 years later at an injection distance of 20~100 m (Q = 50 t/d)

图 7. 20~100 m 注入距离下 45 年后, CO₂ 浓度、流体压力和 Mises 应力分布(Q = 50 t/d)

随着注入距离增加, CO₂ 浓度分布逐渐局限于储层内, 流体运移更加稳定。当注入距离超过 400 米时, CO₂ 几乎未到达断层, 储层封存效果显著提升, 流体压力场趋于平缓, 压力等值线更加均匀, 应力集中程度降低, 系统处于更稳定的力学状态(图 8)。基于张志雄等[18]提出的突破界限判据(CO₂ 泄漏量/CO₂ 注入量 $\geq 0.1\%$), 研究表明, 注入距离小于 100 米时, CO₂ 发生泄漏, 无法满足安全封存要求, 泄漏主要发生在断层带附近的高渗透率地层中。而当注入距离超过 400 米时, CO₂ 基本未到达断层, 封存安全性

得到显著提高(图 9)。

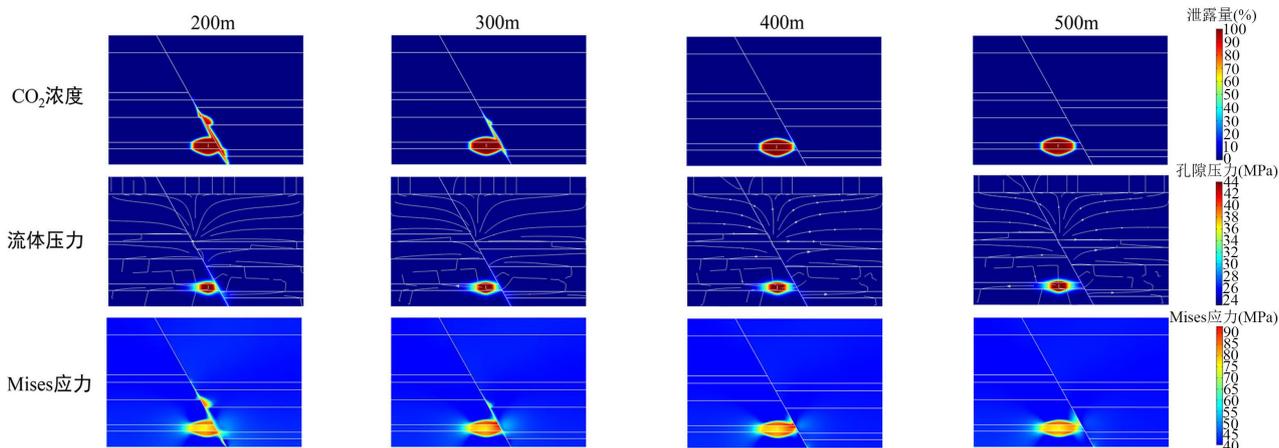


Figure 8. CO₂ concentration, fluid pressure, and Mises stress distribution 45 years later at an injection distance of 200~500 m (Q = 50 t/d)

图 8. 200~500 m 注入距离下 45 年后, CO₂ 浓度、流体压力和 Mises 应力分布(Q = 50 t/d)

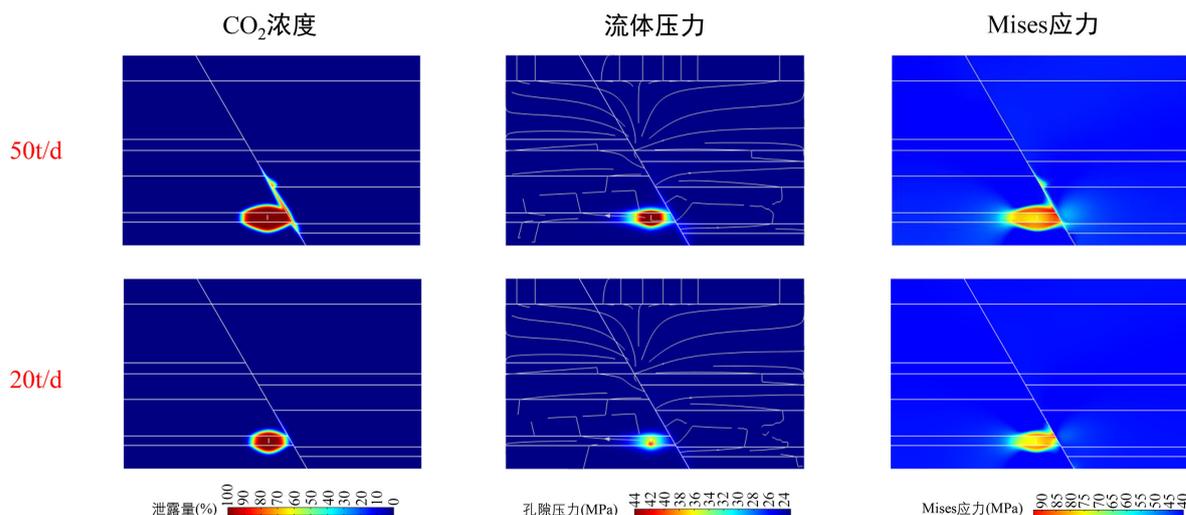


Figure 9. Comparison of different injection rates at a 300 m injection distance

图 9. 300 m 注入距离下 300 m, 不同注入流量对比

研究表明,注入流量对 CO₂ 泄漏风险具有重要影响(图 10)。在 50 t/d 的高注入流量工况下,尽管注入距离为 300 m,CO₂ 仍突破盖层,显示出较大范围的横向扩散和沿断层向上的运移。这是由于较高的孔隙压力和 Mises 应力为 CO₂ 运移提供了有利条件,表明仅增加注入距离无法完全避免泄漏风险。相比之下,当注入流量降低至 20 t/d 时,CO₂ 主要局限在储层内,未到达断层位置,运移速率显著减缓,流体压力和 Mises 应力也显著降低,减少了 CO₂ 运移驱动力及断层失稳风险。尽管高渗透率地层中的 CO₂ 分布较广,但由于较低的压力,CO₂ 未能突破盖层,表明合理控制注入流量能够在保证注入效率的同时有效降低泄漏风险,并改善压力场,增强盖层的密封性。

研究表明,CO₂ 泄漏量 - 时间曲线在所有注入工况下均呈现非线性增长特征。在近场注入区域(20~100 m)内,泄漏曲线迅速上升,最终泄漏量较大。以 50 t/d 注入流量为例(表 2),当注入距离为 20 m 时,CO₂ 在 7.3 年内即突破盖层,泄漏量占注入量的 35%以上;随着注入距离增加,泄漏速率明显减缓,突破时

间显著延迟, 400 m 时突破时间延长至 39.1 年, 而 500 m 时未观察到突破现象。注入流量的变化对泄漏速率和最终泄漏量有显著影响。当注入流量从 50 t/d 降至 20 t/d 时, 在相同注入距离下泄漏量明显减少。例如, 在 20 m 注入距离下, 突破时间从 7.3 年延长至 12.1 年; 在 300 m 注入距离下, 50 t/d 工况在 26.2 年发生突破, 而 20 t/d 工况在 45 年内未观察到突破现象。这表明, 通过降低注入流量可以有效延缓 CO₂ 泄漏过程。

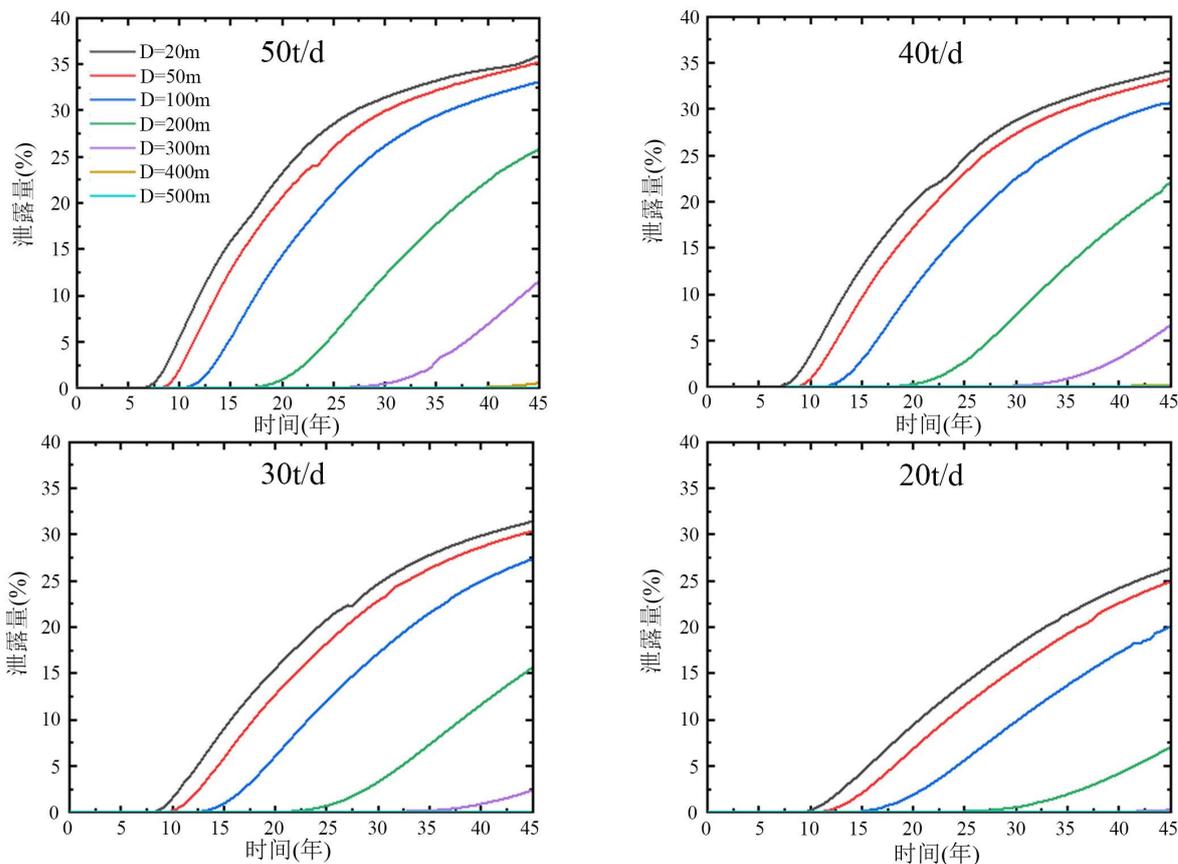


Figure 10. Fault leakage rate-injection time chart

图 10. 断层泄漏量 - 注入时间图版

Table 2. Leakage time under different injection conditions of the fault

表 2. 断层不同注入条件下的泄漏时间

注入流量(t/d)	注入距离(m)	突破时间(a)	注入流量(t/d)	注入距离(m)	突破时间(a)
50 t/d	20	7.3	30 t/d	20	8.3
	50	8.2		50	9.6
	100	10.6		100	12.8
	200	17.1		200	21.2
	300	26.2		300	31.7
	400	39.1		400	-
	500	-	500	-	

续表

注入流量(t/d)	注入距离(m)	突破时间(a)	注入流量(t/d)	注入距离(m)	突破时间(a)
40 t/d	20	7.6	20 t/d	20	12.1
	50	8.7		50	13.7
	100	11.5		100	17.6
	200	18.3		200	30.2
	300	29.2		300	-
	400	39.8		400	-
	500	-		500	-

本研究的模型目前侧重于流-固耦合效应, 未对复杂的地球化学反应进行显式模拟。然而, 从长期来看, 二氧化碳-水-岩石的相互作用对断层的封闭性及稳定性具有深远影响。具体而言, 二氧化碳注入后溶解于地层水形成的酸性环境会导致矿物(如碳酸盐和部分硅酸盐)的溶解, 这可能会增加断层带及其盖层的孔隙度与渗透率, 从而在一定程度上削弱其封闭性能[21]。与此同时, 地层矿物溶解释放出的阳离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})可能与溶解的二氧化碳结合产生次生碳酸盐沉淀(即矿物圈闭), 这种沉淀作用能够填充孔隙和微裂隙, 产生“自密封”效应, 有助于增强断层的长期封闭性[22]。其在短期注入过程中的影响相对有限, 但在百年至千年的地质封存评价中是不容忽视的因素。因此, 未来的研究应进一步引入化学场耦合(THMC), 以更全面地评估超长时期内断层封闭性的动态演化规律。

4. 结论

(1) 注入点距断层距离是控制断层滑移和封存安全性的关键因素。随着注入点距断层距离的增大, 断层滑移量显著减小。近断层注入(≤ 100 m)条件下, 孔隙压力扰动易诱发断层再激活, 滑移风险和 CO_2 泄漏风险较高; 当注入距离超过 400 m 时, 断层基本保持稳定, 封存安全性显著提高。

(2) 注入流量对断层稳定性和 CO_2 运移具有显著影响。在相同注入距离下, 降低注入流量可有效减小孔隙压力累积和应力集中程度, 从而显著降低断层滑移幅度, 并延缓或抑制 CO_2 沿断层泄漏过程。

(3) 断层滑移及 CO_2 泄漏过程具有明显的时序演化特征。断层滑移主要发生于注入初期, 受孔隙压力快速升高控制, 随后随压力扩散逐渐趋于稳定, 整体呈非线性增长特征; 相应地, CO_2 泄漏量随时间呈现加速-缓增的演化规律。

(4) 注入距离与注入流量的协同优化是保障 CO_2 安全封存的有效工程途径。研究表明, 通过合理增大注入点距断层距离并控制注入速率, 可显著改善储层压力与应力场分布, 降低断层再激活及 CO_2 泄漏风险, 为 CCUS-EOR 工程注入方案优化提供了重要依据。

参考文献

- [1] 廖广志, 何东博, 王高峰, 等. 终极埋存情景下二氧化碳驱油极限采收率探讨[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1262-1268.
- [2] Lan, Y., Yang, Z., Wang, P., Yan, Y., Zhang, L. and Ran, J. (2019) A Review of Microscopic Seepage Mechanism for Shale Gas Extracted by Supercritical CO_2 Flooding. *Fuel*, **238**, 412-424. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.130>
- [3] Seyyedsar, S.M., Farzaneh, S.A. and Sohrabi, M. (2016) Experimental Investigation of Tertiary CO_2 Injection for Enhanced Heavy Oil Recovery. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **34**, 1205-1214. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.020>
- [4] 王峰, 黎政权, 张德平. 吉林油田 CCUS-EOR 技术攻关与实践新进展[J]. 天然气工业, 2024, 44(4): 76-82.
- [5] 张志超, 李红雷, 于春勇, 等. CO_2 开发页岩油藏研究进展[J]. 油田化学, 2023, 40(3): 543-549.

- [6] 邸士莹, 程时清, 白文鹏, 等. 致密油藏动态裂缝扩展机制及应用[J]. 力学学报, 2021, 53(8): 2141-2155.
- [7] Rui, Z., Zeng, L. and Dindoruk, B. (2025) Challenges in the Large-Scale Deployment of CCUs. *Engineering*, **44**, 17-20. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.11.031>
- [8] Cheng, Y., Liu, W., Xu, T., Zhang, Y., Zhang, X., Xing, Y., *et al.* (2023) Seismicity Induced by Geological CO₂ Storage: A Review. *Earth-Science Reviews*, **239**, Article ID: 104369. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104369>
- [9] 董平川. 油气储层流固耦合理论、数值模拟及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(4): 123.
- [10] Jaeger, J.C., Cook, N.G. and Zimmerman, R. (2009) *Fundamentals of Rock Mechanics*. Wiley.
- [11] 王福刚, 郭兵, 杨永智, 等. 中高渗透斜地层与水平地层中 CO₂ 地质封存的差异性对比[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(2): 246-255.
- [12] Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.R. (1983) Fundamentals of Rock Joint Deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **20**, 249-268. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(83\)90595-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(83)90595-8)
- [13] Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K. (1985) Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **22**, 121-140. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93227-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)93227-9)
- [14] Rahman, M.K., Hossain, M.M. and Rahman, S.S. (2002) A Shear-Dilation-Based Model for Evaluation of Hydraulically Stimulated Naturally Fractured Reservoirs. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **26**, 469-497. <https://doi.org/10.1002/nag.208>
- [15] Ucar, E., Berre, I. and Keilegavlen, E. (2017) Postinjection Normal Closure of Fractures as a Mechanism for Induced Seismicity. *Geophysical Research Letters*, **44**, 9598-9606. <https://doi.org/10.1002/2017gl074282>
- [16] Saeb, S. and Amadei, B. (1992) Modelling Rock Joints under Shear and Normal Loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **29**, 267-278. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)93660-c](https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)93660-c)
- [17] Lei, Q., Latham, J. and Xiang, J. (2016) Implementation of an Empirical Joint Constitutive Model into Finite-Discrete Element Analysis of the Geomechanical Behaviour of Fractured Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **49**, 4799-4816. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1064-3>
- [18] 张志雄, 谢健, 戚继红, 等. 地质封存二氧化碳沿断层泄漏数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 109-116.
- [19] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 济阳坳陷东营凹陷不同岩相页岩储层微观结构定量特征[J]. 油气地质与采收率, 2025, 32(4): 1-16.
- [20] 白冰. 岩土颗粒介质非等温一维热固结特性研究[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 186-191.
- [21] Chen, L., Elsworth, D., Chen, J. and Gan, Q. (2024) Evaluation of CO₂ Leakage Potential through Fault Instability in CO₂ Geological Sequestration by Coupled THMC Modelling. *Gas Science and Engineering*, **132**, Article ID: 205486. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205486>
- [22] Rohmer, J., Allanic, C., Bourguin, B., Sulem, J., Suhett-Helmer, G., Ghabezloo, S., *et al.* (2014) Improving Our Knowledge on the Hydro-Chemo-Mechanical Behaviour of Fault Zones in the Context of CO₂ Geological Storage. *Energy Procedia*, **63**, 3371-3378. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.366>