

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.019

深部咸水层 CO₂ 地质封存过程中干化效应的影响

任杰¹,高志鹏¹,王媛^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室)

摘要: 针对深部咸水层 CO₂ 地质封存注入井附近干化结晶可能增大工程运行成本和近井区安全风险且盐结晶对 CO₂-咸水两相流的影响机制不清的问题,通过室内 CO₂ 岩心驱替试验研究了不同盐度咸水饱和岩心条件下 CO₂ 的注入性变化规律。结果表明:无论咸水盐度高低,干化效应过程总会产生不均匀盐结晶,去离子水和低盐度咸水内干化效应过程提升了气体有效渗透率,但随着咸水盐度提高,岩心残余水饱和度、干化速率、盐结晶量均显著增加,且气体注入性降低明显;岩心驱替试验可表征为推动驱替、携带驱替和溶解驱替 3 个阶段,干化效应发生在携带驱替阶段和溶解驱替阶段,开始于孔隙毛细水形成之后;孔隙内盐结晶界面演化包括收缩结晶和结晶扩展两个过程,结晶对气体注入性的影响取决于岩心孔隙内溶液收缩与结晶扩张的竞争,咸水盐度越高,结晶扩展的优势越大,可能造成更严重的气体注入性损失。

关键词: 深部咸水层; CO₂ 地质封存; 干化效应; 气体注入性

Influence of drying effect on CO₂ geological sequestration in deep saline aquifers

Ren Jie¹, Gao Zhipeng¹, Wang Yuan^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;

2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University)

Abstract: Salt crystallization near the injection well of deep saline aquifers for CO₂ geological storage may increase engineering operation costs and pose safety risks in the near-wellbore region, and the mechanisms by which salt crystallization affects CO₂-brine two-phase flow remain unclear. To address these issues, the variation patterns of CO₂ injectivity under different salinity conditions in brine-saturated cores were investigated through laboratory CO₂ core displacement experiments. Results demonstrate that non-uniform salt crystallization occurs during the drying process regardless of salinity. In deionized water and low-salinity brine, the drying effect enhances effective gas permeability. However, higher salinity significantly increases residual water saturation, drying rates, and salt accumulation, leading to a marked reduction in gas injectivity. The core displacement process is characterized by three stages, namely displacement, entrainment, and dissolution flooding, with drying occurring during the displacement and entrainment stages after pore capillary water forms. Furthermore, the pore-scale salt crystallization interface involves a shrinkage and expansion process. The influence of crystallization on gas injectivity depends on the competition between solution shrinkage and crystal expansion; higher salinity promotes crystal expansion, causing more severe gas injectivity loss.

Key words: deep saline aquifer; CO₂ geological sequestration; drying effect; gas injectivity

二氧化碳(CO₂)等温室气体排放量的增加是导致全球气候变暖现象日益严重的主要因素,2022 年我国 CO₂ 排放量已达到 1.21×10¹⁰ t,实现“双碳”目标任务难度大。CO₂ 地质封存是未来缓解温室效应的有效手段和实现“碳中和”的托底技术。潜在的地质封存场所主要包括枯竭的煤层、含油层和深部咸水层等。深部咸水层是指赋存有高矿化度地层水的深部储层,其分布范围广,封存潜力大,远离地表饮用水层,是最适宜进行 CO₂ 地质封存的场地^[1]。在场地 CO₂ 地质封存项目实施的过程中有两点值得注意:一是 CO₂ 在液化之前经过了降温吸附的脱水过程,注入地层的 CO₂ 极干燥;二是 CO₂ 注入是一个长期的过程。深部咸水层含盐量高,在长期干燥 CO₂ 注入的地质封存项目实施过程中,CO₂-咸水相互溶解流动过程常因咸水中水分的流失导致注入井附近产生盐结晶(干化效应),可能降低气体注入效率,增大运行成本和安全风险^[2-5]。因此,研究深部咸水层地质封存过程中盐结晶对 CO₂-咸水两相流的影响规律是保障地质封存项目高效实施的前提。

岩心尺度的驱替试验(以下简称“岩心驱替试验”)是常用的研究 CO₂ 地质封存过程中流体运移规律的手段。研究 CO₂ 地质封存效率和封存方式等的室内试验常采用低盐度咸水(或去离子水),以弱化盐析出可能产生的影响^[6]。而关于 CO₂ 地质封存注入过程盐析出的研究大都采用高盐度(20%~26%,为质量分数,下同)咸水来放大盐结晶的影响^[7-10]。Bacci 等^[10]利用 Berea 砂岩进行了干燥的超临界 CO₂ 驱替试验,岩心在初始状态下被盐度为 26.4%的 NaCl 溶液饱和,试验发现岩心的入口横截面出现明显的盐结晶且随驱替时间而累积,到最后盐结晶覆盖了整个岩心的横截面。Muller 等^[7]利用完全干燥的超临界 CO₂ 驱替 Berea 砂岩岩心,岩心内咸水盐度为 25%,驱替 32 h 后利用 SEM 技术顺着流体运动方向进行断层扫描,证实了岩心内部存在各种形态的盐结晶,分布于孔喉和颗粒表面。

CO₂ 注入深部咸水层的盐析出现象影响岩层的孔隙度,进而影响岩层的渗透率与岩层气体注入性。Muller 等^[7]的试验结果表明,在 Berea 岩心完全干燥后,盐析出导致 CO₂ 的有效渗透率降低了 60%,严重影响了 CO₂ 的注入性。Peysson 等^[11]利用干燥的 N₂ 驱替饱和了咸水的岩心,在试验结束后也发现气体的有效渗透率降低了 60%~70%。但 Ott 等^[8-9]利用 Berea 砂岩进行的盐析出试验却得到相反的结论,在试验结束后 CO₂ 的有效渗透率升高了 5 倍;Roels 等^[12]针对 Bentheimer 砂岩的相应研究也得到 CO₂ 有效渗透率升高的结论。此外,Tang 等^[13]的研究发现岩心中咸水蒸发后渗透率提高了 39%~68%,储层中的盐结晶主要沉积在大孔隙中。对于盐沉积对岩石物理性质和孔隙结构的影响,盐结晶是否会阻塞气体流通通道以及降低注入性,不同学者得出了不同的结论。因此,在不考虑试验误差的条件下,有必要探寻统一的机理来解释盐析出现象对 CO₂ 注入性的影响规律。

本文针对工程场地注入井盐结晶防治工作需求,通过岩心在不同盐度咸水饱和条件下的 CO₂-咸水两相流驱替试验,研究通过岩心的 CO₂ 流动特性及其在不同盐度咸水饱和作用下的气体注入性变化规律,以期揭示盐结晶对 CO₂-咸水两相流的影响机制,为保障咸水层地质封存场地的工程安全提供技术支持。

1 试验方案

1.1 试验材料

本文通过不同初始含盐量的饱和岩心进行驱替试验探索室内岩心尺度模型中盐析出规律。表 1 给出了近年来部分深部咸水层 CO₂ 地质封存项目场地的水文地质参数。

表 1 部分深部咸水层 CO₂ 地质封存项目的储层特征与初始环境参数

Table 1 Reservoir characteristics and initial environmental parameters for some CO₂ geological sequestration projects in deep saline aquifers

项目名称	孔隙度	渗透率/mD	温度/℃	压强/MPa	盐度/%
Sleipner Project ^[14]	0.37	5000	37	10.3	3.5
Nagaoka Pilot ^[15]	0.12	6	46	11.9	0.7
In Salah Project ^[16]	0.17	10	90	17.9	5.0
Ketzin Pilot ^[17]	0.23	750	34	7.3	25.0
Snøhvit Project ^[18]	0.13	450	92	28.5	14.0
神华示范项目 ^[19]	0.10	5	55	16.0	5.6
Aquistore Project ^[20]	0.20	250	75	32.5	20.1
Gorgon Project ^[14]	0.20	25	100	22.0	0.7

注:1 mD=10⁻¹⁵ m²。

从表 1 可知,项目的咸水盐度范围从超低的 0.7%到接近溶解度极限的 25.0%,因此本文以去离子水配制盐度分别为 0.0%、5.6%、15.0%、25.0%的 NaCl 溶液开展试验,分别表征去离子水和低、中、高盐度咸水,对应岩心中的无盐(对照组)和低、中、高初始含盐量。咸水的离子组成主要是 Cl⁻与 Na⁺,以及少量 NO²⁻。试验气体为干燥的液态罐装 CO₂,纯度 99.999%,通过恒温、回压和环压系统施加与深部地层一致的温度与压强,保证 CO₂ 为超临界态(scCO₂)。恒温箱温度统一设置为 40℃,回压设置为 7.5 MPa,超过 CO₂ 的临界点 31.1℃和 7.38 MPa^[21]。试验岩心为砂岩,长度为 7.06 cm,直径为 5.00 cm。

1.2 试验设备与试验方法

岩心驱替试验采用如图 1 所示的试验装置,该装置可在模拟深部地层压强和温度条件下,开展 scCO₂ 驱

替咸水饱和岩心试验,常规夹持器中的岩心模型出口配备回压控制系统,通过调压装置将压力维持在目标地层压力,以确保流体平稳流出、防止 CO₂ 蒸发现过冷冷凝现象,提高计量精度。CO₂ 注入泵注入流量范围为 0.01~35 mL/min,注入压力范围为 0~40 MPa;液体注入泵最大工作压力为 42 MPa,注入流量范围为 0.01~20 mL/min;常规夹持器最大工作压力为 40 MPa,通过环压泵将水压施加到胶套上,再通过胶套传递到岩心,对岩心施加环压,密封岩心;恒温箱工作温度范围为 150℃±0.5℃,恒温箱内有温度传感器监测温度;进出口的压力传感器量程为 0~40 MPa,精度为 0.1%满量程;气液分离器用于分离岩心模型中气液混合体,气体从顶端排出,液体从分离器下端流进储液罐,出口的液体采用电子天平称重测量,天平量程 0~2200 g,精度 0.01 g,气体流量采用湿式气体流量计测量,精度为 0.1 L/min。岩心驱替试验严格遵循 GB/T 29172—2012《岩心分析方法》规定。

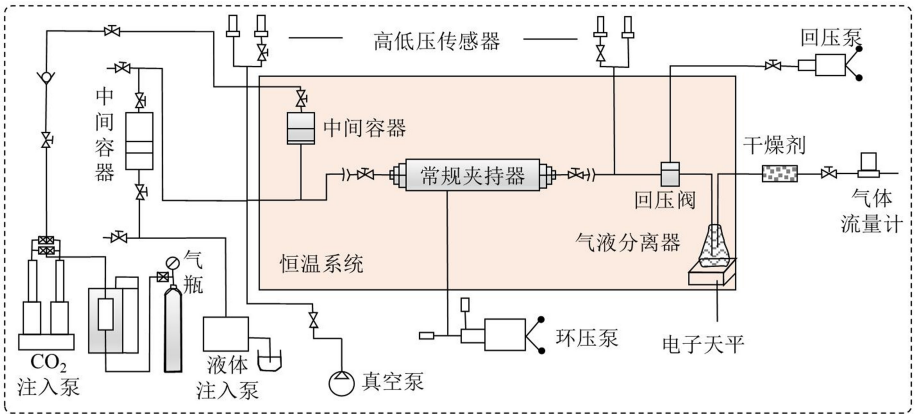


图 1 岩心驱替试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of core displacement experiment apparatus

首先配制不同盐度的咸水溶液,随后在模拟地层温压条件下对岩心进行饱和处理,饱和岩心的关键步骤如下:将干燥后的岩心置于常规夹持器内,抽真空到 0.1 Pa 后以恒定流量 0.5 mL/min 向岩心中注入不同盐度咸水溶液,当每 10 min 分离器中流体的质量增加和注入流体质量一致时认为岩心达到饱和状态。逐级将回压和环压分别升至 7.5 MPa 和 20 MPa,保持环压比回压大,回压系统控制岩心中的初始压力,流体只有在压力超过预设的回压时才能流出岩心,待常规夹持器出口端压力达到 7.5 MPa 时停止注水。

中间容器中 CO₂ 保持超临界态以恒定压力 8.0 MPa 注入饱和岩心中,开展去离子水和低、中、高盐度咸水 4 种工况饱和岩心驱替试验。

2 结果与分析

2.1 驱替产物定量分析

试验装置采用高精度电子天平记录从岩心中驱替出的液体量,通过气体流量计测量出口气体流速,利用高低压传感器获取岩心进出口两端压强,采用电子天平记录干燥剂质量变化,进而推算水分蒸发量。4 种工况饱和和岩心驱替试验条件下,试验过程中岩心被驱替出的溶液质量变化如图 2 所示,岩心驱替过程中被蒸发带走的水量如图 3 所示。

图 2 为不同盐度下从岩心中驱替出的溶液累计质量随时间的变化关系,最终驱替出的溶液质量由大到小依次为去离子水、低盐度咸水、中盐度咸水和高盐度咸水。假设溶液的盐度对驱替试验无影响,则从岩心中驱替出的溶液体积应一致,不同盐度下从岩心中驱替出的溶液质量只和咸水的密度有关,理论上最终驱替出的溶液累计质量从大到小排列顺序应是高盐度咸水、中盐度咸水、低盐度咸水和去离子水,然而实际结果与推测结果完全相反,说明盐度越高,岩心中驱替出的咸水体积越小,岩心内部残余水饱和度越高。

图 3 为不同盐度咸水饱和和岩心驱替试验干燥剂吸水量随时间的变化关系。总体上,干燥剂含水量在初始阶段增加较快,而后缓慢进入稳定状态,最后趋于恒定,且咸水盐度的提高明显加速了干化速率。最终根据恒定状态的干燥剂吸水量可计算得到不同盐度咸水饱和岩心内部盐结晶约为 0.66 g(低盐度咸水)、2.06 g(中盐度咸水)和 4.01 g(高盐度咸水),这与驱替过程中不同盐度岩心内的残余水饱和度排列顺序一

致。图 2 结果表明,盐度越高,岩心内残余水饱和度越高,此时,岩心内部可参与进一步干化效应的含盐量也越大,导致干化效应生成更多的盐结晶。

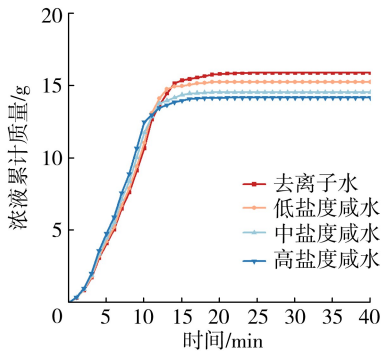


图 2 从岩心中驱替出的溶液质量随时间的变化

Fig. 2 Variation of weight of solution displaced from core with time

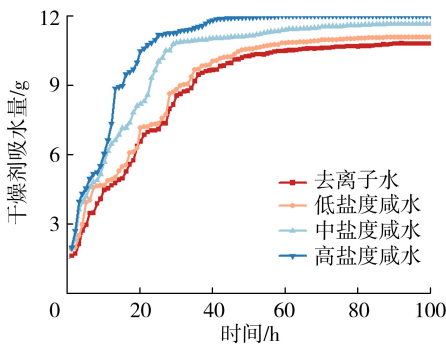


图 3 干燥剂吸水量随时间的变化

Fig. 3 Variation of desiccant water absorption over time

2.2 干化效应对气体注入性的影响

盐结晶的产生会导致岩心孔隙度和渗透率发生改变,在 CO₂ 的注入过程中,CO₂ 有效渗透率 k_e 是注入的关键因素,依据达西定律可由下式表达:

$$k_e = \frac{2p_a Q_{CO_2} \mu_g L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \times 10^2 \tag{1}$$

式中: Q_{CO_2} 为 CO₂ 流量, mL/s; μ_g 为测定温度下 CO₂ 的黏度, mPa · s (40℃、7.5 MPa 超临界态状态下 CO₂ 黏度约为 0.0404 mPa · s); L 为岩心长度, cm; A 为岩心横截面积, cm²; p_a 为大气压, MPa; p_1 、 p_2 分别为岩心进口和出口的压强, MPa。试验过程中测得的是 20℃、大气压条件下 CO₂ 的流量,此时 CO₂ 的密度为 1.815 × 10⁻³ g/mL,在有效渗透率计算时应转换为 40℃、7.5 MPa 条件下的 scCO₂ 流量,此时 CO₂ 的密度为 0.278 g/mL^[22],岩心出口 scCO₂ 流量随时间的变化关系如图 4 所示。

由图 4 可知,去离子水饱和岩心驱替试验结束时 scCO₂ 流速比气体突破岩心后的流速提升了 17.46%,此时岩心进出口压差恒定,依据式(1),CO₂ 的有效渗透率增大。低盐度咸水饱和岩心驱替试验中 scCO₂ 流速随时间的变化关系和去离子水饱和岩心驱替试验结果相似。但在中盐度和高盐度咸水饱和岩心驱替试验中,出口处 scCO₂ 流速都有明显下降的趋势,表明盐结晶导致 CO₂ 的有效渗透率降低。有效渗透率降低归因于岩心内部干化效应导致咸水蒸发后生成盐结晶,且咸水盐度越高阻塞越严重。

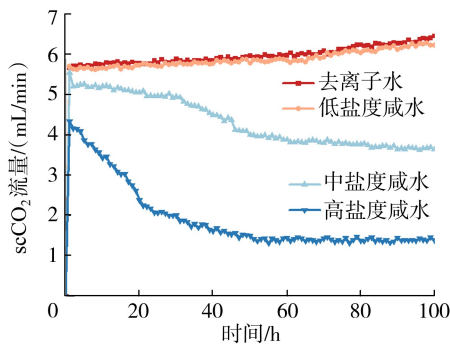


图 4 岩心出口 scCO₂ 流量随时间的变化

Fig. 4 Variation of scCO₂ velocity at core outlet with time

Chang 等^[23]在去离子水饱和岩心驱替试验研究中也发现 CO₂ 有效渗透率提升的现象。此外,Ott 等^[8]的咸水饱和岩心驱替试验结果也表明盐结晶的产生使 CO₂ 的有效渗透率升高,并认为 CO₂ 注入使岩心快速失水达到残余水状态,持续注入干燥 CO₂ 使残余咸水内水分蒸发,咸水体积收缩导致气体有效渗透率升高,盐结晶只在残余咸水中生成。但这无法解释中盐度和高盐度咸水饱和岩心驱替试验中 CO₂ 有效渗透率降低的现象。

2.3 不同盐度咸水饱和岩心干化效应规律

低盐度咸水饱和岩心驱替试验结果和去离子水饱和岩心驱替试验结果相似,盐结晶的产生并未阻塞气体的流路。试验结束后从常规夹持器中取出岩心,去离子水饱和岩心驱替试验后岩心表面没有盐结晶,可作为对比参考(图 5(a))。低盐度咸水饱和岩心驱替试验后岩心表面只有少量的盐结晶形成,如图 5(b)中绿色虚线区域所示。中盐度和高盐度咸水饱和岩心驱替试验结束后岩心表面均附着大范围的盐结晶(图 5(c)(d)),从结晶的范围来看,图 5(d)中盐结晶的范围比图 5(c)中盐结晶的范围大;从盐结晶的形态

来看,图 5(c)中盐结晶颗粒要比图 5(d)中的颗粒小,图 5(d)中盐结晶形成了很多结晶聚集体;从盐结晶的位置来看,图 5 中岩心下半部分的盐结晶明显比上半部分多,体现了盐析出现在岩心表面发生过程的不均匀性,相似的试验现象在多孔介质的蒸发试验中也有发现,岩心表面盐结晶的不均匀分布归因于岩心表面颗粒的不均匀,使得部分区域发生优先结晶的现象^[24-25]。结合图 4 可知,咸水盐度越高,scCO₂ 流速降低得越严重,且在高盐度驱替试验中,scCO₂ 流速更快趋于稳定,表明高盐度咸水饱和岩心内的干化效应速率要高于中盐度咸水饱和岩心。

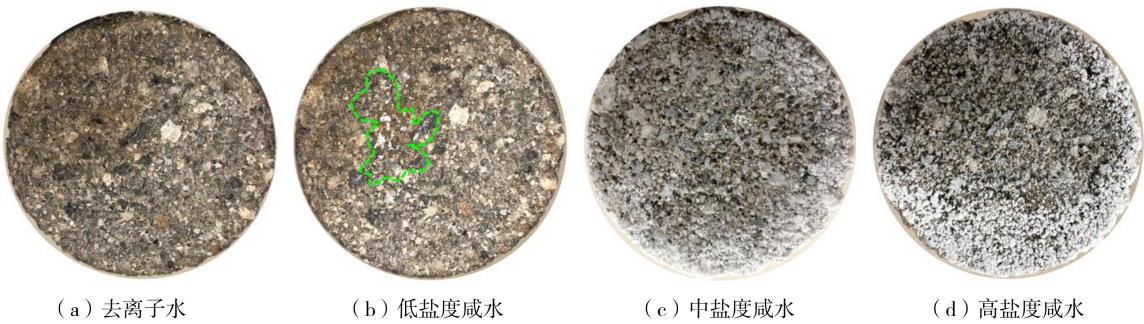


图 5 岩心驱替试验后岩心表面的盐结晶分布

Fig. 5 Distribution of salt crystals on core surface after core displacement experiment

2.4 孔隙空间盐结晶界面演化及影响注入性机理

李铨等^[26-27]提出了一个如图 6(a)所示的毛细管模型解释 scCO₂ 驱替过程中残余水的形成,在此基础上,本文增加盐析出过程,提出图 7 所示的模型用于解释考虑干化效应的岩心驱替全过程演化特征。

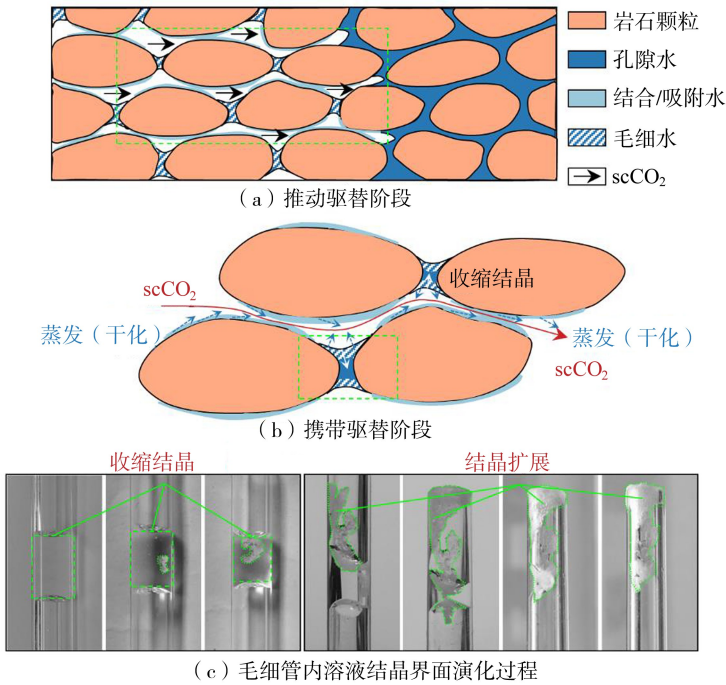


图 6 考虑干化效应 scCO₂ 驱替咸水过程中的毛细管模型

Fig. 6 A capillary model considering drying effect in process of brine displacement by scCO₂

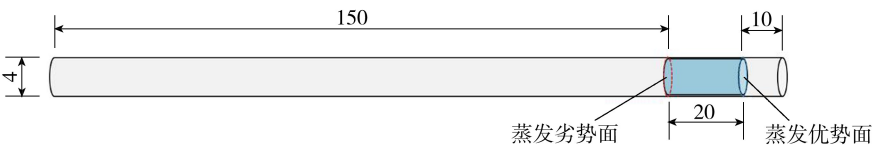


图 7 毛细管蒸发模型示意图(单位:mm)

Fig. 7 Schematic diagram of capillary evaporation model (unit: mm)

考虑干化效应的岩心驱替全过程分为 3 个阶段:①第一阶段大部分孔隙水被 scCO₂ 驱替出岩心,少量以吸附水的形式附着在颗粒表面,或以毛细水的形式残留在岩石颗粒孔隙之间,称为推动驱替阶段(图 6(a)),此阶段发生时间较短(如图 2 所示,本文试验中 15 min 后此阶段结束),不发生干化效应;②第二阶段毛细水夹杂或溶解在注入的 scCO₂ 中被带出岩心,部分难以被带出的毛细水形成残余水并逐渐收缩最终析出结晶,干化效应开始,称为携带驱替阶段(图 7(b)),如图 3 所示,本试验此阶段约在 60 h 后结束;③第三阶段残余咸水通过蒸发作用溶解在 scCO₂ 中被带出岩心孔隙,直至蒸发结束,结晶完全,称为溶解驱替阶段,如图 4 所示,此阶段持续到 100 h 后。

干化效应发生在携带驱替阶段和溶解驱替阶段,开始于孔隙毛细水形成之后。为观察孔隙水内盐结晶动态形成过程,本文构造了一个简单的毛细管蒸发试验,毛细管长 180 mm,内径 4 mm,壁厚 1 mm,内部毛细水距离右端口 10 mm、左端口 150 mm,分别用于模拟靠近气体流通通道的优势蒸发面和劣势蒸发面,如图 7 所示。试验结果如图 6(c) 所示。

毛细管内溶液结晶界面演化主要包括收缩结晶和结晶扩展两个过程(图 6(c))。收缩结晶阶段,毛细管内水分蒸发,咸水体积收缩,大块盐结晶在咸水内生成,若咸水盐度较低,则溶液体积需收缩很大后才能达到溶解度极限状态。结晶扩展阶段,盐结晶在溶液内部生长,而后突破至气液界面,突破后盐结晶迅速向外扩张,扩张的方向受蒸发条件的控制,优先向蒸发条件好的方向扩张。

由此可见,盐结晶对孔隙内气体注入性的影响取决于溶液收缩的体积与结晶扩张的体积之差。如图 8(a) 所示,在低盐度咸水饱和岩心的干化效应过程中,咸水收缩至饱和状态时提供了大量有效气体流通通道,盐结晶的形成对气体注入性影响不大;对于中高盐度,咸水收缩至饱和状态时未失去较多水分,盐结晶的形成大量侵入原气体流通通道,导致气体注入性显著降低(图 8(b))。这有效揭示了盐结晶对 CO₂-咸水两相流的影响机制,同时解释了不同学者对盐结晶是否会阻塞 CO₂ 流通通道得出的不同结论。

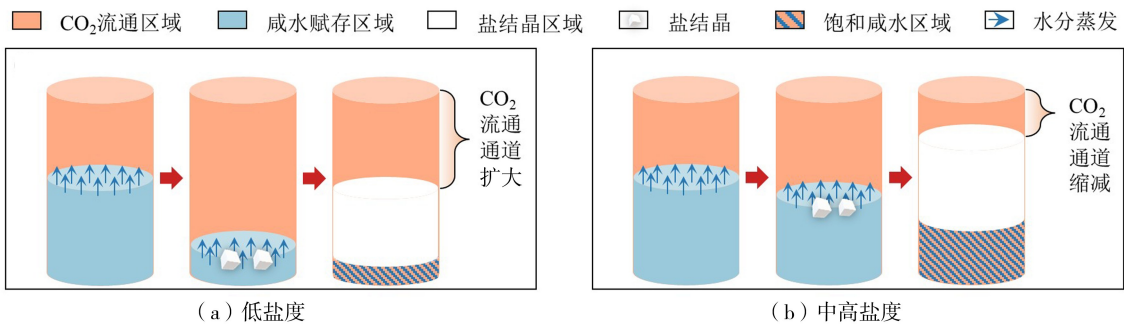


图 8 盐结晶对孔隙内气体注入性的影响示意图
Fig. 8 Schematic diagram of influence of salt crystallization on gas injectivity in pores

3 结 论

- a. 岩心进出口压差增加表明岩心内部气体渗流阻塞,且咸水盐度越高阻塞越严重,主要归因于驱替过程的干化效应。试验数据表明,咸水盐度越高,岩心内部残余水饱和度越高,干化过程进行得越快,干化效应生成的盐结晶越多。
- b. 无论饱和岩心的咸水盐度高低,干化效应过程总会产生盐结晶,但分布不均匀。去离子水和较低盐度咸水饱和岩心驱替试验中,气体有效渗透率增大,表明气体有效流通通道扩大,但随着盐度提升,气体有效渗透率大幅下降。
- c. 对比多相渗透仪采集数据的变化规律,考虑干化效应的岩心驱替全过程参考毛细管模型可描述为推动驱替、携带驱替和溶解驱替 3 个阶段。干化效应发生在携带驱替阶段和溶解驱替阶段,开始于孔隙毛细水形成之后。
- d. 毛细管蒸发试验表明孔隙空间盐结晶界面演化包括收缩结晶和结晶扩展两个过程。盐结晶对气体注入性的影响取决于溶液收缩与结晶扩张的体积之差。盐度越高,溶液收缩体积越小,结晶扩张体积越大;反之溶液收缩体积远大于结晶扩张体积,导致气体有效渗透率提高。

参考文献:

- [1] Ren Jie, Wang Yuan, Feng Di, et al. CO₂ migration and distribution in multiscale-heterogeneous deep saline aquifers[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2021, 5(3): 333-346.
- [2] Patil V V, Mcpherson B J. Identifying hydrogeochemical conditions for fault self-sealing in geological CO₂ storage[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(3): e2018WR024436.
- [3] Lopez O, Youssef S, Estublier A, et al. Permeability alteration by salt precipitation: numerical and experimental investigation using X-Ray Radiography[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 146: 03001.
- [4] Kumar R, Campbell S, Sonnenthal E, et al. Effect of brine salinity on the geological sequestration of CO₂ in a deep saline carbonate formation[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2020, 10(2): 296-312.
- [5] 王媛, 刘阳. 深部咸水层二氧化碳封存的干化效应及选址启示[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1711-1717. (Wang Yuan, Liu Yang. Dry-out effect and site selection for CO₂ storage in deep saline aquifers[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1711-1717. (in Chinese))
- [6] Li Yi, Suo Ruiting, Li Xufeng, et al. Quantitative experimental investigation of multiple P-T effects on primary drainage process during scCO₂ storage in deep saline aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 126143.
- [7] Muller N, Qi Ran, Mackie E, et al. CO₂ injection impairment due to halite precipitation[J]. *Energy procedia*, 2009, 1(1): 3507-3514.
- [8] Ott H, de Kloe K, Marcelis F, et al. Injection of supercritical CO₂ in brine saturated sandstone: pattern formation during salt precipitation[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 4425-4432.
- [9] Ott H, Roels S M, de Kloe K. Salt precipitation due to supercritical gas injection: I. capillary-driven flow in unimodal sandstone [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 43: 247-255.
- [10] Bacci G, Korre A, Durucan S. Experimental investigation into salt precipitation during CO₂ injection in saline aquifers[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 4450-4456.
- [11] Peysson Y, André L, Azaroual M. Well injectivity during CO₂ storage operations in deep saline aquifers: Part 1. experimental investigation of drying effects, salt precipitation and capillary forces[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 22: 291-300.
- [12] Roels S M, Ott H, Zitha P L J. μ -CT analysis and numerical simulation of drying effects of CO₂ injection into brine-saturated porous media[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 27: 146-154.
- [13] Tang Yong, Wang Ning, He Youwei, et al. Impact of salt deposition induced by water evaporation on petrophysical properties and pore structure in underground gas storage through dynamic and static experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 129033.
- [14] Michael K, Golab A, Shulakova V, et al. Geological storage of CO₂ in saline aquifers: a review of the experience from existing storage operations[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(4): 659-667.
- [15] Kikuta K, Hongo S, Tanase D, et al. Field test of CO₂ injection in Nagaoka, Japan [C]//*Proceedings of Seventh International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. Vancourver: Elsevier, 2005: 1367-1372.
- [16] Morris J P, Hao Yue, Foxall W, et al. A study of injection-induced mechanical deformation at the In Salah CO₂ storage project [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(2): 270-280.
- [17] Lengler U, de Lucia M, Kühn M. The impact of heterogeneity on the distribution of CO₂: numerical simulation of CO₂ storage at Ketzin[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(6): 1016-1025.
- [18] 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.
- [19] 雷宏武, 李佳琦, 许天福, 等. 鄂尔多斯盆地深部咸水层二氧化碳地质储存热-水动力-力学 (THM) 耦合过程数值模拟[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(2): 552-563. (Lei Hongwu, Li Jiaqi, Xu Tianfu, et al. Numerical simulation of coupled thermal-hydrodynamic-mechanical (THM) processes for CO₂ geological sequestration in deep saline aquifers at Ordos Basin, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(2): 552-563. (in Chinese))
- [20] Jiang Tao, Pekot L J, Jin Lu, et al. Numerical modeling of the aquistore CO₂ storage project[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 4886-4895.
- [21] Suekane T, Nobuso T, Hirai S, et al. Geological storage of carbon dioxide by residual gas and solubility trapping[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(1): 58-64.
- [22] Ely J F, Magee J W, Haynes W M. Thermophysical properties for special high CO₂ content mixtures: GPA Research Report RR-

110[R]. Tulsa: Gas Processors Association, 1987.

[23] Chang Chun, Zhou Quanlin, Xia Lu, et al. Dynamic displacement and non-equilibrium dissolution of supercritical CO₂ in low-permeability sandstone: An experimental study[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 14: 1-14.

[24] Borgman O, Fantinel P, Lühder W, et al. Impact of spatially correlated pore-scale heterogeneity on drying porous media[J]. Water Resources Research, 2017, 53(7): 5645-5658.

[25] Rad M N, Shokri N, Keshmiri A, et al. Effects of grain and pore size on salt precipitation during evaporation from porous media [J]. Transport in Porous Media, 2015, 110(2): 281-294.

[26] 李铤. CO₂-盐水-岩石系统中残余水形成机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.

[27] Li Yi, Hu Lisha, Shen Zhaoli, et al. The effects of brine concentration on the formation of residual water[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7: 496-499.

(收稿日期: 2024-08-28 编辑: 熊水斌)

(上接第 142 页)

[21] 马朝阳, 任杰, 南胜豪, 等. 土石堤坝渗漏病险试验装置的研制及初步应用[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2268-2277. (Ma Zhaoyang, Ren Jie, Nan Shenghao, et al. Development and initial application of test devices for leakage of earth-rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2268-2277. (in Chinese))

[22] Zhang B, Gu K, Bayer P, et al. Estimation of groundwater flow rate by an actively heated fiber optics based thermal response test in a grouted borehole[J]. Water Resources Research, 2023, 59(1): e2022WR032672.

[23] 刘胜, 王媛, 冯迪. 堤防管涌渗流场响应特征的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 10-16. (Liu Sheng, Wang Yuan, Feng Di. Numerical simulation of response characteristics of seepage field during embankment piping[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 10-16. (in Chinese))

[24] 张旭苹, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11-73. (Zhang Xuping, Zhang Yixin, Wang Liang, et al. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 11-73. (in Chinese))

[25] 吴涵, 朱鸿鹄, 周谷宇, 等. 考虑变形协调的土体剪切位移分布式测试研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 716-724. (Wu Han, Zhu Honghu, Zhou Guyu, et al. 2020. Experimental study on distributed monitoring of soil shear displacement considering deformation compatibility[J]. Journal of Engineering Geology, 28(4): 716-724. (in Chinese))

[26] Liang C, Bai Q, Yan M, et al. A comprehensive study of optical frequency domain reflectometry[J]. IEEE Access, 2021, 9: 41647-41668.

[27] 吴静红, 刘浩, 杨鹏, 等. 基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 140-147. (Wu Jinghong, Liu Hao, Yang Peng, et al. Identification and monitoring of concrete cracks based on optical frequency domain reflectometry technique[J]. Laser Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 140-147. (in Chinese))

[28] 河海大学土力学教材编写组. 土力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.

[29] Wilson G V, Nieber J L, Sidle R C, et al. Internal erosion during soil pipeflow: state of the science for experimental and numerical analysis[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(2): 465-478.

[30] 李家星, 赵振星. 水力学[M]. 2 版. 南京: 河海大学出版社, 2001.

[31] 范钦珊, 唐静静, 刘荣梅. 工程力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[32] Qu S, Qin Z, Xu Y, et al. High spatial resolution investigation of OFDR based on image denoising methods[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18871-18876.

(收稿日期: 2025-02-19 编辑: 彭桃英)