

深部互层咸水层二氧化碳分布特征探究

张明玉^{1,2}, 王媛^{1,2}, 任杰^{1,2}

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:通过构造砂页岩互层结构,并根据渗透率对砂岩层岩性进行分类,建立了多岩相非均质模型,利用多组分多相流数值模拟软件 TOUGH2/ECO2N 探究二氧化碳注入深部互层咸水层后的分布特征,结果显示二氧化碳聚集在低渗透性的页岩层底部,呈分层结构,砂岩层中优先在渗透率较高的岩相中运移并呈分散分布;超临界二氧化碳不断溶于地层水,含饱和二氧化碳的咸水密度增加并缓慢下沉,无明显分层现象。

关键词:深部咸水层;互层结构;多岩相;二氧化碳;地质封存;分布特征

中图分类号:TE122 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)01-0084-06

Distribution of CO₂ in deep saline aquifers composed of alternating layers//ZHANG Mingyu^{1,2}, WANG Yuan^{1,2}, REN Jie^{1,2}(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology Water Resource and Hydrulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: Alternating layers of sandstone and shale were established. According to the permeability values, the lithology of the sandstone layer was classified, and a multiple lithofacies model was built to investigate the heterogeneity. The distribution of CO₂ injected into deep saline aquifers composed of alternating layers was simulated using TOUGH2/ECO2N software, which was often used to simulate multi-component and multi-phase flow. The results show that CO₂ accumulated in the bottom of the low-permeability shale layer and showed a layered structure. CO₂ preferred to migrate in highly permeable rocks and was distributed dispersedly in the sandstone layer. The supercritical CO₂ dissolved in the formation water continuously, and the density of the salt water consisting of saturated CO₂ increased, leading to the gradual subsidence of the salt water. No significant stratification was found.

Key words: deep saline aquifer; alternating layer; multiple lithofacies; CO₂; geological storage; distribution characteristics

温室气体以二氧化碳为主,因而二氧化碳减排成为全球一个的研究热点。二氧化碳地质封存被认为是当前减排的优选方案之一。碳捕集与埋存技术(carbon capture and storage, CCS)捕集工业生产过程中产生的二氧化碳并压缩至超临界状态,通过管道运输到封存场地,使其长期安全地存储于特定的地质构造中^[1],主要的封存场地有废弃的油气田、枯竭的煤层及深部咸水层^[2]。深部咸水层广泛存在,且规模较大,被认为是最具发展前景的封存场地^[3]。

国际上,二氧化碳深部咸水层地质封存技术研究始于 20 世纪 90 年代初期,主要研究方向有二氧化碳封存量估算、封存机理、二氧化碳-咸水-岩石的多相物理化学过程等,其中对二氧化碳在均质咸水层中运移规律的研究较为深入,在室内试验、现场试验与监测、计算机模拟等方面均取得了重大进展^[4-5]。实际岩体形成过程中受到沉积环境、成岩作用及构造

作用等的影响^[6],在自然条件下深部咸水层空间分布一般呈分层结构,岩性参数存在不均匀的变化,表现出强烈非均质性。目前对二氧化碳运移规律的研究成果主要基于均质咸水层,其模拟结果与实际非均质影响下的二氧化碳的分布必然会出现偏差,因此部分学者开展了非均质性影响的研究,如 Flett 等^[7]应用标准地球物理方法生成孔隙率的随机分布,基于该分布通过确定性模型得到渗透率分布,并对不同砂泥比的模拟结果进行比较,探讨非均质性对二氧化碳封存和运移的影响;Han 等^[8]分别采用两种统计方法生成 50 种渗透率随机分布,研究了二氧化碳注入后的分布及泄漏通道等。除通过数值模拟手段表征岩体的非均质性,并研究二氧化碳的运移规律外,还可通过现场地震波成像技术,室内 X 光成像技术等监测到直观的二氧化碳分布特征,如 Pini 等^[9]提出了一种新的毛细压力曲线测量方法,通过试验方法结合 X 光成像

技术获得岩芯渗透率随孔隙率的变化规律,指出非均质性在多相流流动过程中起到重要作用;Oh 等^[10]切开岩芯表征裂缝,分别用试验和数值模拟研究二氧化碳运移、毛细压力及封存量,采用 X 光成像技术观测二氧化碳注入过程中的盐沉淀。

中国大多数盆地是陆相沉积盆地,众多的储层和薄的隔层相互间隔,储层薄而多,非均质性强。因此,研究非均质性的影响,对于二氧化碳地质封存在中国的开展具有重要意义。描述非均质地层、考虑非均质对二氧化碳分布等的影响是重要的研究方向。当现场实测资料较少,所测水文地质参数在水平方向近似不变,但随埋深方向有一定的变化时,可将咸水含水层视为分层结构。较为典型的分层结构为砂岩-页岩互层结构,包含两类岩性,一类为渗透率较高的砂岩,另一类为渗透率较低的页岩。本文根据水文地质参数对砂岩层的岩性进行分类,具有相同水文地质特征的岩体归为同一类岩相,建立砂页岩互层嵌套多岩相非均质结构模型,探究二氧化碳注入互层非均质咸水层后的分布特征,并与均质结构及未考虑非均质性的深部互层结构进行对比,探究考虑非均质性的必要性及非均质性对二氧化碳分布的具体影响。

1 理论基础

1.1 质量守恒定律

深部咸水层二氧化碳地质封存应具备一定的地质、温度、压力条件:深部咸水层的埋深大于 800 m,有足够的孔隙度,渗透性较好^[11],目标储层之上有良好的盖层,以保证注入的二氧化碳不发生泄漏。当地层深度大于 800 m 时,咸水层的压力和温度超过临界值(7.38 MPa,31.1℃),二氧化碳达到超临界状态。

深部咸水层中超临界二氧化碳以单一的非润湿形式存在,与咸水层中的盐溶液组成一个多组分多相流系统。在这个系统中,各组分的流动满足质量守恒定律。该系统不考虑温度变化,其质量守恒方程由质量变化项、流动项及源汇项组成。体积中的流体质量变化等于由体表流入的流体质量与源汇项流体质量之和^[12]:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M_{\kappa} dV_n = \int_{\Gamma_n} \mathbf{F}_{\kappa} \cdot \mathbf{n} d\Gamma_n + \int_{V_n} q_{\kappa} dV_n \quad (1)$$

其中 $M_{\kappa} = \sum_{\beta} M_{\kappa,\beta} = \sum_{\beta} M_{\beta} X_{\kappa,\beta} = \varphi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\kappa,\beta}$

$$\mathbf{F}_{\kappa} = \sum_{\beta} \mathbf{F}_{\beta} X_{\kappa,\beta} = -k \sum_{\beta} \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla p_{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g}) X_{\kappa,\beta}$$

式中: M_{κ} 为 κ 组分的体积质量, kg/m^3 ; $M_{\kappa,\beta}$ 为 κ 组分 β 相态的体积质量, kg/m^3 ; M_{β} 为 β 相态的体积质量, kg/m^3 ; $X_{\kappa,\beta}$ 为 κ 组分 β 相态的质量分数; φ 为岩层

孔隙率; S_{β} 为 β 相态的饱和度; ρ_{β} 为 β 相态的密度, kg/m^3 ; $\mathbf{F}_{\kappa}$ 为 κ 组分的质量流速矢量, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; $\mathbf{F}_{\beta}$ 为 β 相态的质量流速矢量, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; k 为绝对渗透率, m^2 ; $k_{r\beta}$ 为 β 相态的相对渗透率; μ_{β} 为 β 相态的动力黏滞系数, Pa/s ; p_{β} 为 β 相态的压力, Pa ; $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量, m/s^2 ; $\mathbf{n}$ 为微元体表面的方向向量; q_{κ} 为 κ 组分流体流出或流入微元体的体积质量, kg/m^3 。

1.2 达西定律

二氧化碳驱替咸水的过程中,认为储层中的气水两相流动均服从多相达西定律^[12]:

$$\mathbf{F}_{\beta} = \rho_{\beta} \mathbf{u}_{\beta} = -k \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla p_{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g}) \quad (2)$$

其中

$$p_{\beta} = p + p_{c\beta}$$

式中: $\mathbf{u}_{\beta}$ 为 β 相态的体积流速矢量, m/s ; p 为参考压力, Pa , 通常当 β 相态为液相时, p 为气体压力; $p_{c\beta}$ 为毛细压力, Pa 。

$k_{r\beta}$ 的计算中,液体相对渗透率 k_{rl} 的计算采用 van Genuchten-Mualem 模型^[13-14],气体相对渗透率 k_{rg} 的计算方程采用 Corey 模型^[13]:

$$k_{rl} = \sqrt{S^*} \{1 - [1 - (S^*)^{1/m}]^m\}^2 \quad (3)$$

$$k_{rg} = \begin{cases} 1 - k_{rl} & S_{gr} = 0 \\ (1 - \hat{S})^2 (1 - \hat{S}^2) & S_{gr} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$S^* = \frac{S_l - S_{lr}}{S_{ls} - S_{lr}}$$

$$\hat{S} = \frac{S_l - S_{lr}}{S_{ls} - S_{lr} - S_{gr}}$$

式中: m 为经验参数,与孔隙分布有关; S_l 为液体饱和度和; S_{lr} 为残余液体饱和度; S_{ls} 为液体饱和状态下的饱和度,对于相对渗透率方程,通常 $S_{ls} = 1$; S_{gr} 为残余气体饱和度。

毛细压力 $p_{c\beta}$ 通常考虑的毛细压力为液态毛细压力 p_{cl} , 液态毛细压力的计算广泛采用 VG 模型^[13]:

$$p_{cl} = -p_0 [(S^*)^{-1/m} - 1]^{1-m} \quad (5)$$

式中: p_0 为进气压力值, Pa ; S_{ls} 为液体饱和状态下的饱和度,对于毛细压力方程,取 $S_{ls} = 0.999$; $p_{\max}$ 为最大毛细压力值, Pa 。

2 数值模拟

2.1 数值模拟软件

采用美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)研发的模拟多孔介质或裂隙介质中多组分、多相流动的数值模拟程序 TOUGH2 (Transport of Unsaturated Groundwater and Heat) 进行数值计算。TOUGH2 应用

范围广泛,在地热工程、核废料处置及饱和-非饱和带水文学等研究领域均有成功的应用范例^[16]。

ECO2N 是 TOUGH2 中的一个流体特征模块,专门为二氧化碳在咸水含水层中的地质封存的数值模拟应用而开发,能对 H₂O-NaCl-CO₂ 体系的多相流体流动过程进行综合分析^[17]。模块中热力学特征包括温度、压力和盐度,覆盖温度范围 10 ~ 100℃,最高压力 60 MPa,最高盐度为岩盐的饱和盐度。ECO2N 能够模拟简化的流体相状态:单相气相(可能含少量水分的超临界二氧化碳)、单相水相(可能包含溶解的 CO₂ 的盐溶液)及两相混合。在模拟过程中可能出现固相,即盐沉淀,盐的溶解或沉淀由系统的平衡溶解度控制,咸水层的孔隙度和渗透率的变化也被考虑在内^[18]。ECO2N 没有考虑流体与矿物的相互作用对模拟的影响。

2.2 模型建立

为研究二氧化碳在互层非均质结构中的运移规律,建立了二维互层结构模型,水平方向的模拟总长度为 2 km,埋深 1.1 km 的咸水层。咸水层呈砂岩-页岩的互层结构,岩层面水平,近下边界的砂岩层厚度为 54 m,其余砂岩层均为 30 m,页岩层厚度3 m,咸水层总厚度为 153 m。封闭咸水层上下边界为隔水边界;左边界除注入井外其他位置为隔水边界,注入井距离下边界 24 m,以水平井方式注入二氧化碳,注入速率为 0.25 kg/s;右边界为第一类边界,压力不变。初始条件: $p = 11\text{ MPa}$, $T = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{\text{gas}} = 0$, $X_{\text{NaCl}} = 3.2\%$,模型中砂岩、页岩的分布如图 1 所示。

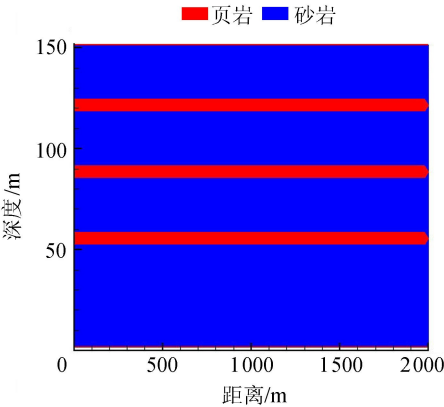


图 1 互层结构

根据水文地质参数对砂岩层的岩性进行分类,具有相同水文地质特征的岩体归为同一类岩相,建立多岩相非均质结构模型。砂岩层根据渗透率的大小分为 4 组,较大的前 30% 的渗透率称为岩相 1,其次 40% 的渗透率对应的砂岩层称为岩相 2,再其次 20% 的渗透率对应的砂岩层称为岩相 3,最小的 10% 的渗透率称为岩相 4。模型参数见表 1。

砂岩层根据渗透率特征分为 4 类岩相的非均质结构,薄页岩层为均质结构,模型中各岩相的分布如图 2 所示。

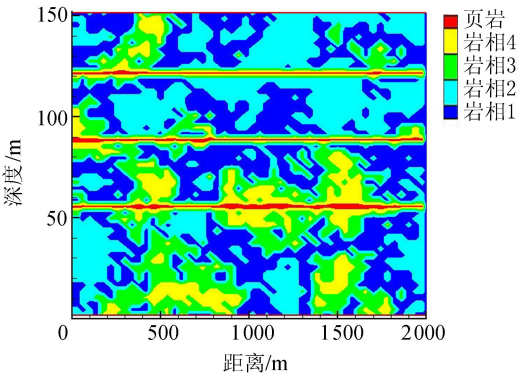


图 2 嵌套多岩相结构

3 数值模拟结果分析

采用 TOUGH2 程序中 ECO2N 模块对咸水层中二氧化碳的分布特征进行数值模拟,模拟时间为 1 a。分别绘制了互层嵌套多岩相非均质结构、互层结构、均质结构中水平井注入二氧化碳 1 a 后的气体饱和度分布云图、咸水中溶解二氧化碳的质量分数分布云图,以及互层嵌套多岩相非均质结构、均质结构、互层结构注入二氧化碳 100 d、1 a 后气体压力等值线图。

3.1 气体饱和度

图 3 为互层嵌套多岩相非均质地层中二氧化碳注入 1 a 后的气体饱和度分布,气体是含少量水分的超临界二氧化碳非润湿相,因此气体饱和度的分布云图可视为超临界二氧化碳的分布云图。模拟地温地压条件下,二氧化碳处于超临界状态,其密度小于咸水密度,二氧化碳注入咸水层后,受浮力作用逐渐上移,上移至渗透率较低的页岩层时,大部分二氧化碳聚集在页岩层底部,一部分渗透过页岩继续上

表 1 多岩相非均质结构模型参数

岩相	岩层属性		相对渗透率				毛细压力				
	k/d	$\varphi/\%$	m	S_{lr}	S_{gr}	S_{ls}	m	S_{lr}	p_0/kPa	$p_{\text{max}}/\text{MPa}$	S_{ls}
岩相 1	4	30	0.40	0.20	0.05	1	0.40	0.15	4	10	0.999
岩相 2	1.5	20	0.40	0.20	0.05	1	0.40	0.15	10	10	0.999
岩相 3	0.5	15	0.40	0.20	0.05	1	0.40	0.15	20	10	0.999
岩相 4	0.25	12	0.40	0.20	0.05	1	0.40	0.15	80	10	0.999
页岩	0.01	10	0.40	0.20	0.05	1	0.40	0.2	60	10	0.999

移聚集到上部的页岩层底部,整体呈分层漏斗形态分布。层间的二氧化碳由于压力及浓度差的作用驱使向外扩散,而由于砂岩层的非均质性,二氧化碳在运移的过程中,优先选择流向渗透率较高的岩体,绕开渗透率低的岩体,在砂岩层间呈分散分布。

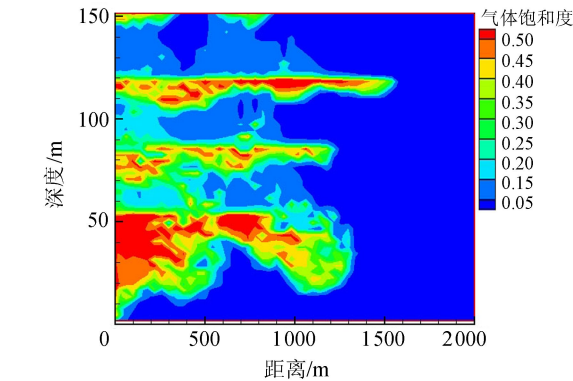


图3 互层嵌套多岩相非均质结构中注入二氧化碳1 a后的气体饱和度分布

图4(a)为均质结构水平井注入二氧化碳1 a后的气体饱和度分布。超临界态二氧化碳聚集在顶部,呈漏斗形态分布。由于注入井不断有二氧化碳注入,使其附近的气体饱和度较高。图4(b)为互层结构注入二氧化碳1 a后气体饱和度分布,二氧化碳呈分层分布。由于互层结构各层均质,每一砂岩层气体饱和度的分布呈漏斗形态分布,二氧化碳聚集在各页岩层底部。

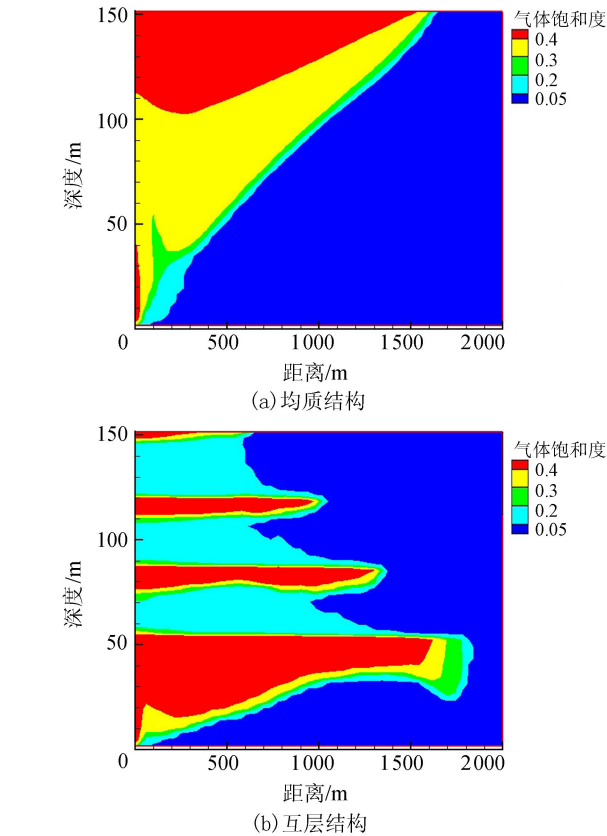


图4 注入二氧化碳1 a后的气体饱和度分布

对比图3与图4(a),互层嵌套多岩相结构最为接近真实水文地质条件,由于地层的非均质性,二氧化碳注入之后优先在渗透率较高的岩体中聚集,气体饱和度整体呈分层分布,各砂岩层内呈分散分布。若把地层条件概化为均质结构,注入二氧化碳1 a后气体饱和度分布主要集中在上部盖层底部,呈漏斗状,各点的气体饱和度、各埋深的横向运移范围与互层嵌套非均质结构中对应值相差较大。对比图3及图4(b),若把地层条件概化为简单的互层结构,互层结构中注入井所在的最底层砂岩层横向运移范围最广,接近右侧边界,而互层嵌套多岩相非均质结构中渗透率较低的岩相阻碍了二氧化碳的横向运移,二氧化碳运移到距右侧边界600 m处。互层结构中注入井所在砂岩层的上一层二氧化碳运移距离较上两层远,而互层嵌套多岩相非均质结构中则相反。虽然二氧化碳层层渗透,上两层的二氧化碳总量小于上一层,但是互层嵌套多岩相非均质结构中,二氧化碳在各砂岩层中的渗流通道各异,注入井上两层近页岩层底部渗透率较高,二氧化碳运移范围较广。对比图3、图4,由于互层结构、互层嵌套多岩相非均质结构中的页岩层渗透率较低,阻碍了二氧化碳向上的运移,因此这两种结构中二氧化碳主要聚集在下部岩层,而均质结构没有页岩层阻碍,二氧化碳聚集在顶部隔水边界下方。

3.2 咸水中溶解二氧化碳的质量分数

图5显示了互层嵌套多岩相非均质地层中二氧化碳注入1 a后,咸水中溶解二氧化碳的质量分数的分布特征。超临界二氧化碳注入咸水层后,与咸水接触不断溶解于咸水。二氧化碳注入咸水层1 a后,溶解的二氧化碳的质量分数主要集中在4.5%~4.9%。注入的二氧化碳溶解到咸水中,咸水密度增加并向下流动,而未溶解或少量溶解二氧化碳的较轻的咸水向上流动,形成对流现象,加快二氧化碳在咸水中的溶解。各岩层中二氧化碳浓度相同,无明显分层,呈三

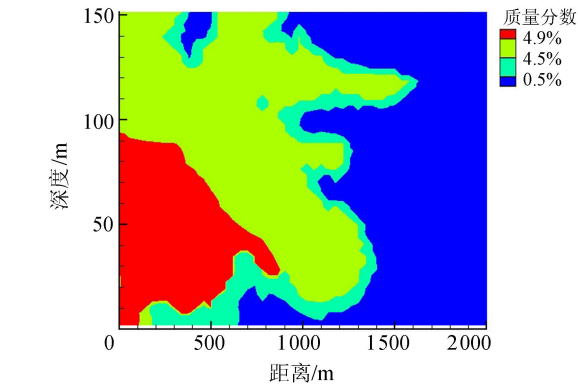


图5 互层嵌套多岩相非均质结构中注入二氧化碳1 a后咸水中溶解二氧化碳的质量分数分布

角形分布。含饱和二氧化碳的咸水下沉,二氧化碳不可能运移到地表,从而实现了安全封存。

图 6(a) 显示了均质结构中注入二氧化碳 1 a 后咸水中溶解二氧化碳的质量分数分布,其分布轮廓与该模型气体饱和度分布图 4(a) 形似。图 6(b) 显示了互层结构注入二氧化碳 1 a 后咸水中溶解二氧化碳的质量分数分布,其分布轮廓与该模型气体饱和度分布图 4(b) 形似,这是由于沿着超临界二氧化碳的运移路径,部分二氧化碳溶解于咸水。溶解态二氧化碳质量分数高的区域均呈三角形分布,以相对稳定的状态封存于地层。

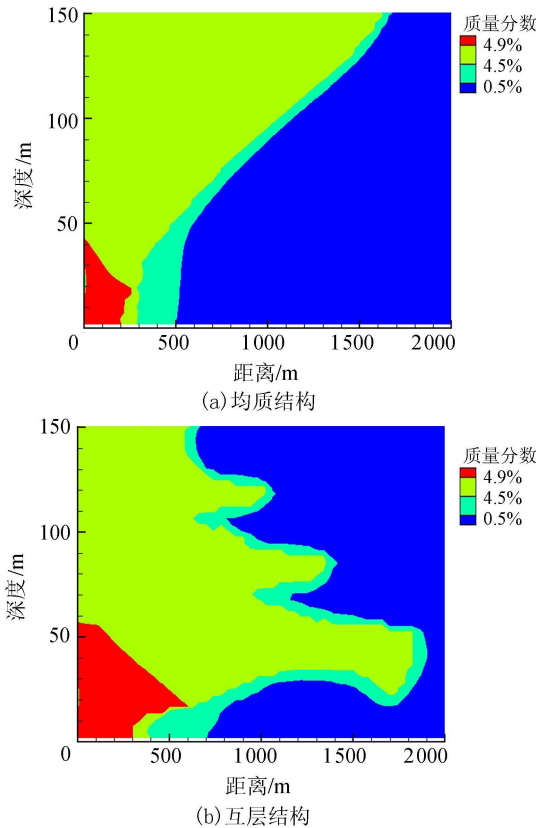


图 6 注入二氧化碳 1 a 后咸水中溶解二氧化碳的质量分数分布

对比各模型气体饱和度分布图和咸水中溶解的质量分数分布图(如对比图 3、图 5),与超临界二氧化碳相比,液相二氧化碳的横向运移距离较远。由于水动力弥散、毛细压力作用等,加之溶于咸水的二氧化碳随咸水流动,且咸水对超临界二氧化碳有阻滞作用^[19],液相二氧化碳运移速率略大于超临界二氧化碳,故液相二氧化碳横向运移距离大于超临界二氧化碳。

3.3 气体压力

根据超临界二氧化碳气体的分布,可得到模拟区域气体压力的等值线,图 7(a)(b) 分别为互层嵌套多岩相非均质结构中注入二氧化碳 100 d 及 1 a 后的气体压力等值线。注入二氧化碳 100 d 后注入

井附近气体压力等值线密集且压力值较高,这是由于岩层的非均质特性导致气体积聚、传输速度较慢。注入二氧化碳 1 a 后等值线的坡度较缓,这是由于流体的流动会引起压力传递,气体压力随着二氧化碳的缓慢运移传递到更远的地方。

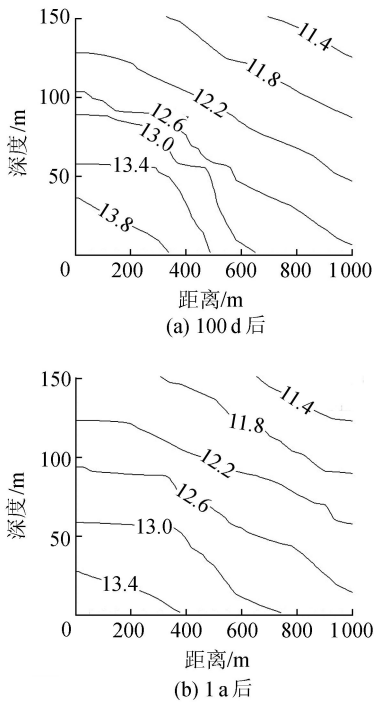


图 7 互层嵌套多岩相非均质结构中注入二氧化碳后的气体压力等值线(单位:MPa)

图 8、图 9 分别为均质结构和互层结构中注入二氧化碳 100 d 和 1 a 后的气体压力等值线。对比图 7(b)、图 8(b)、图 9(b),互层结构及互层嵌套多

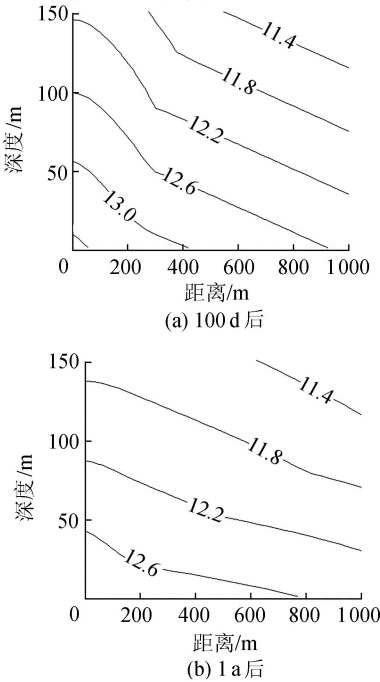


图 8 均质结构中注入二氧化碳后的气体压力等值线(单位:MPa)

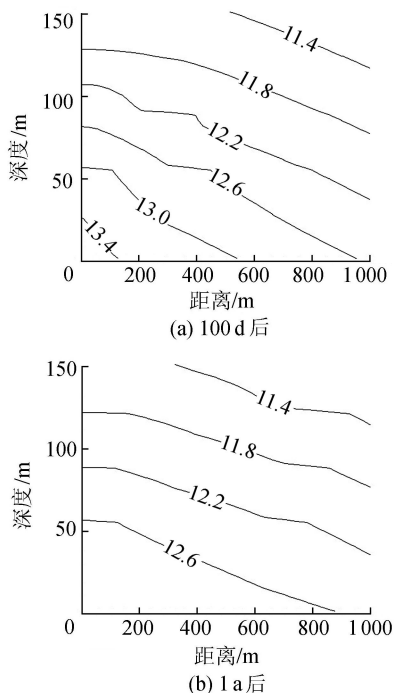


图9 互层结构中注入二氧化碳后的
气体压力等值线(单位:MPa)

岩相非均质结构在靠近注入井的左边界,压力等值线呈水平分布,而均质结构中不存在此现象。注入井附近,压力变化大,垂向的压力传递受注入压力等的影响传递速度较快,互层结构及互层嵌套多岩相非均质结构中存在相对致密的页岩层,页岩层对压力的传递存在一定的阻碍作用,且二氧化碳积聚在页岩层底部,造成了注入井附近页岩层底部压力近似相等的现象。对比图7(a)、图8(a)、图9(a),注入100 d后,互层嵌套多岩相非均质结构中注入井附近压力最大,均质结构注入井附近压力最小。考虑非均质性,注入二氧化碳造成注入井附近压力急剧增加,符合场地现场注入井处压力积聚甚至超压的现象。

4 结 语

a. 二氧化碳处于超临界状态时,因受到向上的浮力,加上页岩具有低渗透性,二氧化碳将聚集在页岩底部,整体呈分层分布。由于地层的非均质性,二氧化碳注入之后优先在渗透率较高的岩体中运移,超临界二氧化碳在各砂岩层内分散分布。含饱和二氧化碳的咸水密度增加,随时间的推移缓慢下沉,从而实现二氧化碳安全稳定的封存。

b. 均质结构中超临界二氧化碳受浮力作用聚集在咸水层顶部,呈漏斗形态,与互层嵌套多岩相非均质结构模型得到的分层分布差异较大,二氧化碳在均质咸水层中的分布及运移规律有一定的局限性。简单的互层结构中,砂岩层中二氧化碳呈漏斗形分布,与互层嵌套多岩相非均质结构模型得到的

分散分布差异较大,因此有必要考虑非均质性,划分不同的岩相建立多岩相非均质模型。

参考文献:

- [1] JOHN G, JOHN D. Transmission of CO₂—safety and economic considerations, IEA Greenhouse Gas R&D Programme[J]. Energy, 2004, 29(9): 1319-1328.
- [2] 刘阳,王媛. 深部咸水层 CO₂地质封存研究现状[J]. 水利水电科技进展, 2012, 31(6): 74-79. (LIU Yang, WANG Yuan. State-of-the-art researches on CO₂ geologic storage in deep saline aquifer[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 31(6): 74-79. (in Chinese))
- [3] 国际能源署(IEA). 二氧化碳捕集与封存—碳减排的关键选择[M]. 能源与环境政策研究中心(CEEP), 译. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [4] CHANG C, ZHOU Q, XIA L, 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(5): 1-14.
- [5] CELIA M A, BACHU S, NORDBOTTEN J M, et al. Status of CO₂ storage in deep saline aquifers with emphasis on modeling approaches and practical simulations[J]. Water Resources Research, 2015, 51(9): 6846-6892.
- [6] 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2009.
- [7] FLETT M, GURTON R, WEIR G. Heterogeneous saline formations for carbon dioxide disposal: impact of varying heterogeneity on containment and trapping[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2007, 57(sup1/2): 106-118.
- [8] HAN W S, KIM K Y, CHOUNG S, et al. Non-parametric simulations-based conditional stochastic predictions of geologic heterogeneities and leakage potentials for hypothetical CO₂ sequestration sites[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(6): 2739-2752.
- [9] PINI R, KREVOR S, KRAUSE M, et al. Capillary heterogeneity in sandstone rocks during CO₂/water core-flooding experiments [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 5473-5479.
- [10] OH J, KIM K Y, HAN W S, et al. Experimental and numerical study on supercritical CO₂/brine transport in a fractured rock: Implications of mass transfer, capillary pressure and storage capacity [J]. Advances in Water Resources, 2013, 62(12): 442-453.
- [11] 刘侃. 塔里木盆地二氧化碳地质储存潜力评估[D]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [12] PRUESS K, OLDENBURG C M, MORIDIS G J. TOUGH2 user's guide [D]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.

(下转第94页)

d. 锡澄运河三级航道整治工程应用实践表明, 将废弃构造物混凝土就地加工成再生骨料, 配制再生混凝土应用于水利工程中具有良好的经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] 黄蒙, 肖林源. 建筑垃圾循环利用现状的研究[J]. 资源节约与环保, 2016(6): 100-101. (HUANG meng, XIAO Linyuan. Research on the current situation of recycling utilization of construction waste[J]. Resource Saving and Environmental Protection, 2016 (6): 100-101. (in Chinese))

[2] KOU S C, POON C S, ETXEBERRIA M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2011, 33(2): 286-291.

[3] TOMOSAWA F, NOGUCHI T, TAMURA M. The way concrete recycling should be [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005, 3(1): 3-16.

[4] 张昌波. 美国再生混凝土骨料的应用[J]. 建筑机械, 2008(8): 52-53. (ZHANG Changbo. The application of recycled concrete aggregate in the United States [J]. Construction Machinery, 2008(8): 52-53. (in Chinese))

[5] 张金兰. 地震灾区废弃混凝土用于建筑和道路重建的探讨[J]. 施工技术, 2008(增刊1): 55-57. (ZHANG Jinlan. Discussion on waste concrete for reconstruction of building and road in seismic disastrous area [J]. Construction Technology, 2008(Sup1): 55-57. (in Chinese))

[6] MANDAL S, CHAKARBORTY S, GUPTA A. Some studies on durability of recycled aggregate concrete [J]. The Indian Concrete Journal, 2002(7): 385-388.

[7] SALEM R M. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(3): 216-221.

[8] AHMAD S H. Properties of concrete made with North Carolina recycled coarse and fine aggregates[R]. Raleigh: North Carolina State University, 2004.

[9] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 1445-1449. (XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(11): 1445-1449. (in Chinese))

[10] 陈宗平, 占东辉, 徐金俊. 再生粗骨料含量对再生混凝土力学性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 130-135. (CHENG Zhanping, ZHAN Donghui, XU Jinjun. Research on mechanical properties of recycled concrete using different recycled coarse aggregate replacement [J]. Industrial Construction, 2015, 45 (1): 130-135. (in Chinese))

[11] 吴瑾, 丁东方, 张闻. 再生骨料混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 83-86. (WU Jin, DING Dongfang, ZHANG Wen. Experimental study on shear behavior of recycled aggregate concrete beams [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(1): 83-86. (in Chinese))

[12] 丁国庆, 蒋林华, 储洪强, 等. 膨润土种类及掺量对塑性混凝土性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 34-37. (DING Guoqing, JIANG Linhua, CHU Hongqiang, et al. Influence of types and dosage of bentonite on properties of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 34-37. (in Chinese))

[13] 季天剑, 肖鹏, 高玉峰. 掺粉煤灰再生混凝土疲劳性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 274-277. (JI Tianjian, XIAO Peng, GAO Yufeng. Fatigue performance of recycling concrete with fly ash [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(3): 274-277. (in Chinese))

[14] KONG D Y, LEI T, ZHENG J J, et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 701-708.

(收稿日期: 2015-11-16 编辑: 熊水斌)

(上接第 89 页)

[13] GENUCHTEN M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.

[14] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513-522.

[15] COREY A T. The interrelation between gas and oil relative permeability [J]. Producers Monthly, 1954, 19(1): 38-41.

[16] PRUESS K. The TOUGH codes—a family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media [J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3(3): 738-746.

[17] PRUESS K, SPYCHER N. ECO₂-N—a fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO₂ storage in saline aquifers [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(6): 1761-1767.

[18] 李志伟. 咸水层 CO₂ 地质封存的长期稳定性分析及控制[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

[19] 李亚美, 成建梅, 李敏敏, 等. 咸水在黏性土中迁移转化的试验研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 88-93. (LI Yamei, CHENG Janmei, LI Minmin, et al. Experimental study on migration and transformation in cohesive soil of salt water [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 88-99. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-11-26 编辑: 郑孝宇)