文章编号:1673-0062(2016)04-0016-05

砂泥岩互层模型对 CO₂ 地质储存 影响的数值模拟

房 琦1,吕俊文1,彭国建2*

(1.南华大学环境保护与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学 计算机科学与技术学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:以江陵凹陷深部咸水层钻孔数据为例,通过构建不同砂泥岩互层概化模型, 采用数值模拟的方法定量评价了砂泥岩互层对深部咸水层中 CO₂ 地质储存过程中 注入性、迁移性和封闭性的影响,结果表明不同砂泥岩互层模型对 CO₂ 的注入性、迁 移性和封闭性产生显著影响.CO₂ 的注入量随着砂泥岩互层的增多变薄而降低,然而 多而薄的砂泥岩互层可有效阻止 CO₂ 羽的上浮运动和横向迁移,从而提高空间利用 率;CO₂ 的封闭性随着砂泥岩互层的增多变薄而降低,对于多而薄的砂泥岩互层,较 薄的泥岩隔层难以担当独立的封闭盖层,需要上覆有较厚的泥岩盖层以保证 CO₂ 地 质储存的长期安全性.从注入性、迁移性和封闭性各方面来看,采用多级砂泥岩互层 概化模型近似代表真实地层模型开展前期 CO₂ 地质储存的适宜性研究是可取的. 关键词:砂泥岩互层;CO₂ 地质储存;注入性;迁移性;封闭性 中图分类号:P595 文献标志码:B

Numerical Simulation on the Effect of Generalized Model of Sandstone and Mudstone Interlayers on CO₂ Geological Storage

FANG Qi¹, LÜ Jun-wen¹, PENG Guo-jian^{2*}

(1.School of Environmental Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2.School of Computer Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Multiple generalized models of different sandstone and mudstone interlayers were built and numerical simulations were carried out to estimate CO_2 injectivity, migration and containment in deep saline formations under different sandstone and mudstone interlayers

收稿日期:2016-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(11545016);南华大学博士科研启动基金资助项目(2014XQD12)

作者简介:房 琦(1985-),女,山东枣庄人,南华大学环境保护与安全工程学院讲师,博士.主要研究方向:地下水反 应运移与数值模拟.*通讯作者.

by taking the borehole data from Jiangling Depression for instance. Simulations results show that the sandstone and mudstone interlayers significantly influences CO_2 injectivity, migration and containment. CO_2 injection amount decreases with more and thinner sandstone and mudstone interlayers; however, more and thinner sandstone and mudstone interlayers could effectively prevent the upward and horizontal migration of CO_2 plume and improve space use efficiency. CO_2 containment decreases with more and thinner sandstone and mudstone interlayers. Since the thinner mudstone interlayer is difficult to be an independent caprock, a thick mudstone caprock is needed to ensure the long-term security of CO_2 geological storage. What's more, from the aspects of injectivity, migration and containment, it is advisable to adopt the generalized model of multiple sandstone and mudstone interlayers to approximately represent the actual stratigraphy model to carry out the early suitability assessment of CO_2 geological storage.

key words: sandstone and mudstone interlayers; CO_2 geological storage; injectivity; migration; containment

0 引 言

碳捕集利用与封存技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS) 是一项新兴的有望在短 时期内大规模减少温室气体排放、减缓全球气候变 暖的经济、可行的方法[14],也是目前唯一一项能够 在火力发电厂进行并且联合其他烟气净化技术可近 乎实现燃煤电厂零排放的技术.大力推广 CCUS 示范 工程作为节能减排的重要措施纳入国家"十三五"发 展规划.为了降低运输成本和增加储存容量,CO,最 好以致密的超临界流体形式注入,CO,进入超临界 状态的临界点是 31.1 ℃和 7.38 MPa,对应于的临界 地层深度接近 800 m^[5].数值模拟方法是目前应用最 为广泛的开展 CO, 地质储存场地评价和封存机理研 究的手段,但由于目前关于深部地质勘探的数据资 料有限,所以很难建立起逼真的地质模型,往往通过 建立厚度较大的均质概化模型开展前期的适宜性和 机理研究[68].然而,我国主要以陆相沉积盆地为主, 由于陆相沉积环境的复杂性,除了具有普遍较低的 孔隙度和渗透率外,沉积地层多以砂泥岩不等厚互 层为主,呈现出砂岩储层薄而多的特点^[9].因此,将实 际沉积地层概化成较厚的均质模型会对深部咸水层 CO, 地质储存过程中的注入性、迁移性和封闭性的 模拟结果产生怎样的影响,本文将通过建立不同的 砂泥岩互层概化模型开展研究.

1 研究方法

以位于江汉盆地江陵凹陷中心的鄂深 4 井钻

孔数据为原型,通过构建多组砂泥岩互层模型对 比研究深部咸水层中 CO₂ 地质储存过程中的注 入性、迁移性与封闭性问题,地层原型取自于鄂深 4 井 2 000~2 200 m深度的荆沙组,总厚度为 200 m,由 7 组不等厚砂泥岩互层组成,砂岩层最 大厚度为 19 m,最小厚度为 7 m,平均 14.3 m,泥 岩层最大厚度为 35 m,最小厚度为 5 m,平均 14.3 m.

为了定量评价地层概化模型的粗细程度相对 于真实地层模型对 CO₂地质储存数值模拟结果 的影响,构建了五种不同的砂泥岩互层概化模型, 如图 1 所示:A [(S100+M100)×1]由 1 组 100 m 砂岩和 100 m 泥岩组成,B [(S50+M50)×2]由 2 组 50 m 砂岩和 50 m 泥岩组成,C [(S20+M20)× 5]由 5 组 20 m 砂岩和 20 m 泥岩组成,D [(S10+ M10)×10]由 10 组 10 m 砂岩和 10 m 泥岩组成, E[(Es-4 钻孔)×7]由 7 组不等厚的砂泥岩互层 组成.采用二维径向均质模型进行网格剖分,每 1 m一层,共剖分 200 层,径向为 10 km,剖分为 200 个网格,总共剖分 40 000 个网格.模型中水文 地质参数来自于鄂深 4 井钻孔资料,具体见表 1. 采用完整井方式以高于 40%的原始地层压力定 压注入 20 a,观测 500 a.

本数值模拟主要侧重于 CO₂ 在深部咸含水 层中的流体动力学方面的结果比较,选用美国劳 伦斯伯克利国家实验室开发的 TOUGH2 软件 ECO₂N 模块实现^[10].由于剖分的网格数目较多, 采用 TOUGH2-MP^[11]并行计算代码进行计算.



A:(S100+M100)×1;B:(S50+M50)×2;C:(S20+M20)×5; D:(S10+M10)×10;E:(Es-4钻孔)×7;S代表砂岩,M代表泥岩

图 1 砂泥岩互层概化模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of generalized stratigraphy models of sandstone and mudstone interlayers

表 1	水文地	盾 参数	和执力	学参数	设置
K I	ハス心	IJ: 9 90	1 H KK / J	T 2 XX	

Table 1 Hydrogeological and thermo dynamical properties used in the simulations

岩性	孔隙度 /%	渗透率 /10 ⁻¹⁴ m ²	岩石颗 粒密度 /(g・cm ⁻³)	岩石热 传导率 /(W・m ⁻¹ ・℃ ⁻¹)/(J	岩石颗 粒特焓 ・kg ⁻¹ ・℃ ⁻¹	压缩系数 ¹) /Pa ⁻¹	盐度 /%	残余水 饱和度 $S_{\rm hr}$	残余气 饱和度 S _{gr}	Van Genuchten 参数λ	压强 系数 /MPa
砂岩	12	3.81	2.6	2.51	920	4.5e-10	28	0.30	0.05	0.46	0.02
泥岩	3	0.01	2.6	2.51	920	4.5e-10	28	0.30	0.05	0.46	6.25

2 结果与讨论

2.1 砂泥岩互层对 CO, 注入性的影响

首先对比分析了五种不同的砂泥岩互层模型 A [(S100+M100)×1]、B[(S50+M50)×2]、 C[(S20+M20)×5]、D[(S10+M10)×10]、E[(Es-4 钻孔)×7]对 CO₂ 注入性的影响.如图 2 所示, 以高出 40%的原始地层压力持续注入 20 a 后,砂 泥岩互层模型 A、B、C、D、E 中的总注入量分别为 2.58 Mt、2.53 Mt、2.41 Mt、2.38 Mt、2.40 Mt.与鄂 深 4 井荆沙组真实地层(E)的注入量相比,其概 化模型 A、B、C、D分别相差 7.5%、5.42%、0.42%、 0.83%,概化地层 C和 D 与真实地层 E 的模拟结 果最为接近.通过对 CO₂ 赋存形态的比较发现,砂 泥岩互层对 CO₂ 总注入量的影响主要体现在气 态 CO₂ 的量上,对溶解态 CO₂ 的量影响并不大.



图 2 不同砂泥岩互层中 CO₂ 的总注入量及气态与 溶解态 CO₂ 质量比随时间的演化

Fig.2 Total injection amount of CO₂ and the mass ratio of gas and dissolved CO₂ varying with time in different sandstone and mudstone interlayers

2.2 砂泥岩互层对 CO₂ 迁移性的影响

不同砂泥岩互层对气态和溶解态 CO₂ 羽的 空间迁移具有重要影响.由图 3 可见,注入期间 CO₂ 羽迁移至距离注入井 600 m 处,而且不同砂 泥岩互层的迁移距离相差并不大.然而,经过 500 a的迁移与扩散后,不同砂泥岩互层中 CO₂ 羽 在横向和垂向上的迁移均产生了显著的差异.A 组合中 CO₂ 羽迁移至 1 200 m,B 组合中迁移至 960 m, 而 C、D、E 组合中的迁移距离相差不大, 在 800 ~ 850 m 之间, 说明较厚的砂岩储层中 CO₂ 羽受浮力作用明显, 容易发生迁移扩散, 然而多而 薄的砂泥岩互层可有效阻止 CO₂ 羽的上浮运动 和横向迁移, 提高空间利用率.



图 3 20 a 及 200 a 后气态和溶解态 CO₂ 在不同砂泥岩互层中的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of gas and dissolved CO₂ in different sandstone and mudstone interlayers after 20 a and 200 a

2.3 砂泥岩互层对 CO₂ 封闭性的影响

不同砂泥岩互层对 CO₂ 的封闭能力也有显 著影响.如图 4 所示,尽管泥岩盖层的总厚度是相 同的,但不同的砂泥岩互层模型对 CO₂ 的封闭能 力却相差很大.随着砂泥岩互层的增多变薄,进入 泥岩盖层中的 CO₂ 的量也就越多,泄漏风险也就 越大.500 a 后,A、B、C、D、E 各组合中进入盖层的 CO₂ 的量占总注入量的比率分别为 1.87%。 3.03%。、7.47%。、15.63%。、10.48%。,基本上与砂泥 岩组合的数目成正比,对于荆沙组真实地层 E 组 合,其泥岩封闭能力同样介于组合 C 与 D 之间.因 此,对于多而薄的砂泥岩互层,厚度较薄的泥岩隔 层不能担当独立的封闭盖层,需要上覆有较厚的 泥岩以保证 CO₂ 的长期封闭安全.



图 4 不同砂泥岩互层中进入泥岩的 CO₂ 的量 占总注入量的比率随时间的演化

Fig.4 Ratio of CO₂ amount into mudstone to the total injection amount varying with time of different sandstone and mudstone interlayers

2.4 砂泥岩互层对盐沉淀的影响

对于高盐度卤水层中超临界 CO₂ 的地质储 存,注入井周围的岩盐沉淀现象也是一个不容忽 视的问题.如图 5 所示,在高盐度咸水层中持续注 入 20 a CO₂,使得注入井周围 30 m 范围内产生了 大量的盐沉淀,然而最大的盐固体饱和度不是发 生在砂岩储层中,而是发生在砂岩与泥岩的交界 面上,原因在于泥岩低毛细压力作用下交界面发 生持续咸水回流蒸发造成固态盐持续积累直至完 全填充孔隙^[12-14].



Fig.5 Distribution of salt solid saturation around the injection well of different sandstone and mudstone interlayers

3 结 论

通过建立五组不同的砂泥岩互层模型, 赋以 江陵凹陷松滋地区低渗砂岩储层特征, 采用数值 模拟的方法定量评价了不同砂泥岩互层对深部咸 水层中 CO₂ 地质封存过程中注入性、迁移性和封 闭性的影响, 得到结论如下:

1)不同砂泥岩互层中 CO₂ 的注入性不同,其 注入量随着砂泥岩互层的增多变薄而降低,然而 多而薄的砂泥岩互层可有效阻止 CO₂ 羽的上浮 运动和横向迁移,提高空间利用率.

2) CO₂ 的封闭性能明显受到砂泥岩互层的影响,随着砂泥岩互层的增多变薄而降低.对于多而薄的砂泥岩互层,较薄的泥隔层难以担当独立的封闭盖层,需要上覆有较厚的泥岩以保证 CO₂ 的长期封闭安全.

3)从注入性、迁移性和封闭性各方面分析,

在缺乏地质资料的情况下采用多级砂泥岩互层的 概化模型近似代表真实地层模型开展前期 CO₂ 地质储存的适宜性和封闭机理研究是可行的.

参考文献:

- [1] 张二勇,李旭峰,何锦,等.地下咸水层封存 CO₂ 的关 键技术研究[J].地下水,2009,31(3):15-19.
- [2] 张超宇,李胜涛,杨丰田,等.开展二氧化碳地质储存, 实现深度减排[J].中国国土资源经济,2010,23(4): 24-26.
- [3] 任妹娟, 刁玉杰, 李旭峰. 二氧化碳地质储存环境影响 研究[J]. 中国西部科技, 2014, 13(10): 49-51.
- [4] 李义连,房琦,柯怡兵,等.高盐度卤水对 CO₂ 地质封 存的影响:以江汉盆地潜江凹陷为例[J].地球科 学——中国地质大学学报,2012,37(2):283-288.
- [5] 刁玉杰,张森琦,郭建强,等.深部咸水层二氧化碳地 质储存场地选址储盖层评价[J].岩土力学,2012,33 (8):2422-2428.
- [6] FANG Q, LI Y. Exhaustive brine production and complete CO₂ storage in Jianghan Basin of China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(5):1541-1553.
- [7] 李松,李义连,喻英,等.咸水层中二氧化碳地质封存 有效系数的探究——以江汉盆地为例[J].安全与环 境工程,2015,22(1):82-89.
- [8] 雷宏武,李佳琦,许天福,等.二氧化碳地质储存数值 模拟中边界的影响分析和范围确定[J].重庆大学学 报,2014,37(3):77-86.
- [9] 房琦,李义连,程鹏,等.低渗卤水盆地提高 CO₂ 注入 性的技术方法:以江汉盆地为例[J].地球科学——中 国地质大学学报,2014,39(11):1575-1583.
- [10] PRUESS K, SPYCHER N. ECO₂N—A fluid property module for the TOUGH2 code for studies for CO₂ storage in saline aquifers [J]. Energey Conversion and Managenent, 2007, 48(6):1761-1767.
- [11] ZHANG K, WU YS, PRUESS K. User's guide for TOUGH2-MP—a massively parallel version of the TOUGH2 code[M].New York: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- [12] PRUESS K, MÜLLER N. Formation dry-out from CO₂ injection into saline aquifers: 1. Effects of solids precipitation and their mitigation [J]. Water Resources Research, 2009, 45(45):450-455.
- [13] 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[J].地质科技情报, 2012,31(3):109-115.
- [14] 房琦,李义连,喻英,等.深部咸水层超临界 CO₂ 灌注 毛细压力对盐沉淀的影响[J].安全与环境工程, 2015,22(3):61-65.