

盐水层中 CO₂ 扩散半径的计算方法

王涛

中海油田服务股份有限公司,北京 101149

摘要 CO₂ 地质埋存是温室气体资源化利用及减少大气温室气体排放的有效途径之一。在深部咸水层中实施 CO₂ 地质埋存的减排处理,是减缓温室效应最有效的现实选择。针对 CO₂ 在地下盐水层的埋存过程中,其超覆盐水层后存在渗漏和逃逸的风险,基于 Buckley-Leverett 驱油理论,研究并推导出 CO₂ 对盐水层非活塞式驱替半径的计算公式,准确计算 CO₂ 的扩散半径。计算结果表明,该计算式不仅可为 CO₂ 盐水层封存工程实践提供必要的理论依据,还为获得封存后存储介质中 CO₂ 逸散风险的控制提供长期预测和数据的支持。

关键词 CO₂; 盐水层; 地下埋存; 驱替半径

中图分类号 TE319

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.009

Establish a Formula to Calculate the Displace Radius of CO₂ in Saline Aquifer

WANG Tao

China Oilfield Services Limited, Beijing 101149, China

Abstract Storage of carbon dioxide is one of the effective methods for utilizing greenhouse gas and reducing greenhouse gas discharge. The storage of CO₂ into saline aquifers is the best way to mitigate the green house effect. However, there is a risk of leaking during the injecting of CO₂ into saline aquifers. So it is necessary to calculate the displace radius of CO₂ in saline aquifer. Based on the Buckley-Leverett equation, a new formula is derived to calculate the displace radius of CO₂ in saline aquifer. The research results can provide a theoretic support and a field guide for calculating CO₂ storage volume and risk control in saline aquifer.

Keywords CO₂; saline aquifer; CO₂ storage; displace radius

0 引言

CO₂ 作为大气中最主要的温室气体,过量排放则给地球生态环境和人类生存空间带来了严重的危害,现引起的全球气候变暖问题引起了世界各国政府和科学界的广泛关注。在此背景下,CO₂ 的地质封存逐渐成为研究热点。在 CO₂ 的诸多封存途径中,地下盐水层因具有巨大的封存容量而被认为是最有前景的封存途径^[1-3]。适合 CO₂ 地质埋存的盐水层一般是指在一定深度下被微咸或半咸水充填的具有较高孔渗特性的岩层。

此盐水层不适合工业及农业应用,更不适于人类饮用。世界大部分沉积盆地都发现此类盐水层,其中约有 2%~3% 的有效空间可用于 CO₂ 埋存^[3]。据国际能源署(IEA)和联合国

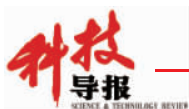
政府间气候变化专门委员会(IPCC)评价的世界储层 CO₂ 埋存量,其中以盐水层埋存潜力最大,为 400~10000Gt^[4]。深部盐水层一般含盐度较高,不能作为水资源加以利用;盐水层圈闭构造发育更普遍;盐水层中存在着适于 CO₂ 储存的大型圈闭构造。

CO₂ 注入地下盐水层后,在实际地下的温度和压力条件下,CO₂ 的密度小于盐水,因此 CO₂ 会有一个向上运移的趋势,从而大量的 CO₂ 聚集在盖层下部,CO₂ 在三维空间呈漏斗状向四周扩散,这样在远离注入井的位置,如果 CO₂ 完全超覆在盐水层之上时,CO₂ 就存在渗漏和逃逸的风险。为保证注入和埋存安全,验证物质平衡,了解和评估 CO₂ 状态和迁移规律,确保 CO₂ 不发生渗漏,还需做大量的工作,包括矿场实

收稿日期:2013-03-28;修回日期:2013-10-24

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05024)

作者简介:王涛,工程师,研究方向为油藏工程、数值模拟,电子邮箱:water1983220@yahoo.com.cn



验、动态模拟及监测以求得 CO₂ 的扩散半径等重要参数^[9]。

本文在 Buckley-Leverett 驱油理论的基础上,推导出 CO₂ 对盐水层非活塞式驱动半径的计算式。

1 径向扩散半径计算模型的建立

实际工程中, 盐水层埋存 CO₂ 是一个气水两相的系统, 为减缓 CO₂ 的超覆, 一般是在盐水层的底部开始注入, 注入的 CO₂ 由于密度较轻, 会上浮至盖层下部, 并沿盖层下部向高部位流动, 其流动前缘按照轴对称形态推进, 见图 1。

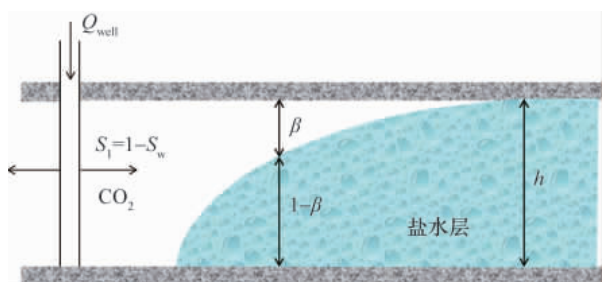


图 1 CO₂ 在盐水层中的驱替示意

Fig. 1 Schematic diagram for CO₂ displacement in saline layer

由于盐水层岩石颗粒表面的吸附作用和毛管力, CO₂ 运移过后的地层中将圈闭大部分残余的 CO₂ 气体。当 CO₂ 遇到圈闭构造时, 就在里面不断聚集, 填满后发生溢流并向更高部位流动直至稳定。

整个运移过程中, 将有部分 CO₂ 溶解在流动区域的残余水中, CO₂ 分布稳定后, 通过对流和扩散不断向地层水中溶解, 并最终分布到盐水层的其他区域。此外, 溶解的 CO₂ 可与地层水中及岩石颗粒表面的矿物成分发生化学反应, 生成固态的碳酸盐沉淀和可溶解的盐^[6-9]。

因此, CO₂ 在盐水层中的圈闭机制可分为: 构造圈闭、残余饱和度圈闭、溶解圈闭、矿物圈闭 4 种类型。其中, 构造圈闭是埋存 CO₂ 最重要的方式, 溶解圈闭则需要漫长的时间过程, 矿物圈闭虽能到达永久封存 CO₂ 的目的, 但需要较长的时间跨度。

模拟研究表明, 大部分的 CO₂ 是以分子状态(自由气)储存在岩石孔隙中^[10]。因此在深部盐水层的超临界 CO₂ 与盐水的气液两相流驱替过程中, 认为 CO₂ 与盐水均不可压缩, 且 CO₂ 在盐水中的溶解, 短时间内忽略不计, 不发生任何化学反应, 可任取一微元体对气液两相写出质量守恒方程。

设微小六面体的边长分别是 dx、dy、dz, 对于注入的 CO₂ 气体而言, 在 dt 时间内从单元六面体流入流出的质量差 dm 为

$$dm = - \left[\frac{\partial(\rho_1 q_{1x})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 q_{1y})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_1 q_{1z})}{\partial z} \right] dx dy dz \quad (1)$$

式中, q₁ 为 CO₂ 流速, m/s; ρ₁ 为 CO₂ 密度, kg/m³; t 为时间, s。

CO₂ 与盐水两相渗流中, CO₂ 相经过六面体质量发生变化是因为 CO₂ 对盐水的驱替, t 时刻六面体内 CO₂ 相饱和度为 \bar{S}_1 , t+dt 时刻六面体内 CO₂ 相饱和度为 $\bar{S}_1 + \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial t} dt$, dt 时间内饱和度的变化为 $\frac{\partial \bar{S}_1}{\partial t} dt$, dt 时间内整个六面体内由于 \bar{S}_1 变化引起的 CO₂ 相质量变化总量 dm 为

$$dm = R \rho_1 \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial t} dx dy dz dt \quad (2)$$

式中, \bar{S}_1 为 CO₂ 平均饱和度, R 为盐水层孔隙度。

根据质量守恒定律, 式(1)、(2)应相等, 于是有

$$- \left[\frac{\partial(q_{1x})}{\partial x} + \frac{\partial(q_{1y})}{\partial y} + \frac{\partial(q_{1z})}{\partial z} \right] = R \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)转化成直角坐标可以写成

$$R \frac{\partial \bar{S}_1(r, t)}{\partial t} + \nabla q_1(r, t) = 0 \quad (4)$$

式中, r 为 CO₂ 驱替半径, m。即为 CO₂ 与盐水两相的连续性方程。CO₂ 平均饱和度 \bar{S}_1 可以定义为

$$\bar{S}_1 = \beta(1 - S_w) \quad (5)$$

引用达西定律可以得到, CO₂ 和盐水的流量表达式分别为

$$q_1 = -K\beta\lambda_1 \nabla p_1 \quad (6)$$

$$q_2 = -K\beta\lambda_2 \nabla p_2 \quad (7)$$

式中, S_w 为残余盐水饱和度; K 为盐水层的渗透率, 10⁻³ μm²; β 为 CO₂ 驱替厚度所占盐水层厚度的比例; λ₁, λ₂ 分别为 CO₂ 和盐水的流度 (k_r/μ); ∇p 为压力梯度, MPa/m。

假设流体是不可压缩的, 则 ∇q = 0, 流体的总流量 q_t 为

$$q_t = \frac{Q_{well}}{A} = q_1 + q_2 \quad (8)$$

式中, Q_{well} 为 CO₂ 注入速度, m³/s; A 为渗流截面积, m²。

假设毛管力忽略不计, 则 ∇p₁ = ∇p₂ = ∇p, 联立方程(6)、(7)可以得到:

$$\frac{Q_{well}}{A} = -K[\beta\lambda_1 + (1-\beta)\lambda_2] \nabla p \quad (9)$$

则压力梯度为

$$\nabla p = - \frac{Q_{well}}{KA[\beta\lambda_1 + (1-\beta)\lambda_2]} \quad (10)$$

代入方程(6)则

$$q_1 = \frac{\beta\lambda_1}{\beta\lambda_1 + (1-\beta)\lambda_2} \left(\frac{Q_{well}}{A} \right) = \varphi \frac{Q_{well}}{A} \quad (11)$$

式中, φ 为流体中的 CO₂ 体积分数, 代入方程(4)得到:

$$R \frac{\partial \bar{S}_1(r, t)}{\partial t} + \nabla \left(\varphi \frac{Q_{well}}{A} \right) = 0 \quad (12)$$

在圆柱坐标系下, 式(12)为

$$R \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varphi \frac{Q_{well}}{2\pi r h} \right) = 0 \quad (13)$$

式(13)可简化为

$$R \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial t} + \frac{Q_{well}}{2\pi rh} \frac{\partial \varphi}{dr} = 0 \quad (14)$$

运用链式法则, $\frac{\partial \varphi}{dr}$ 可以写为

$$\frac{\partial \varphi}{dr} = \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{S}_1} \times \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial r} = \varphi' \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial r} \quad (15)$$

将式(15)代入方程(14)中, 则得到气水两相 Buckley-Leverett 公式^[1]的圆柱坐标表达式为

$$\frac{\partial \bar{S}_1}{\partial t} + \frac{Q_{well} \varphi'}{2\pi rh R} \frac{\partial \bar{S}_1}{\partial r} = 0 \quad (16)$$

解方程^[12], 边界条件为 $r=r_w, t=0$ 时:

$$r(\bar{S}_1) = \sqrt{\frac{\varphi' Q_{well} t}{\pi h R} + r_w^2} \quad (17)$$

φ' 运用链式法, 则可以表示为

$$\varphi' = \frac{d\varphi}{d\beta} \times \frac{d\beta}{d\bar{S}_1} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{[\lambda_2 + \beta(\lambda_1 - \lambda_2)]^2} \left(\frac{1}{1 - S_w} \right) \quad (18)$$

将式(18)代入式(17), 即可得到以 CO_2 驱替厚度所占盐层厚度的比例 β 为变量的驱替半径表达式为

$$r(\beta) = \sqrt{\frac{\lambda_2 \lambda_1 Q_{well} t}{\pi h R (1 - S_w) [\lambda_2 + \beta(\lambda_1 - \lambda_2)]^2} + r_w^2} \quad (19)$$

一般注入井筒半径 $r_w \ll r$, 则上式简化为

$$r(\beta) = \sqrt{\frac{\lambda_2 \lambda_1 Q_{well} t}{\pi h R (1 - S_w) [\lambda_2 + \beta(\lambda_1 - \lambda_2)]^2}} \quad (20)$$

这样 CO_2 的最大驱替半径, 即 $\beta=0$ 时:

$$r_{max} = \sqrt{\frac{\lambda_1 Q_{well} t}{\pi h R \lambda_2 (1 - S_w)}} \quad (21)$$

式中, $Q_{well} t$ 为 CO_2 气体的注入总量, 可用 V_{inj} 表示, 单位为 m^3 。

则式(21)为

$$r_{max} = \sqrt{\frac{\lambda_1 V_{inj}}{\pi h R \lambda_2 (1 - S_w)}} \quad (22)$$

即为 CO_2 的最大驱替半径计算公式。

2 结论

(1) CO_2 在盐水层中的圈闭机制可分为构造圈闭、残余饱和度圈闭、溶解圈闭和矿物圈闭 4 种类型。其中, 构造圈闭是埋存 CO_2 最重要的方式。

(2) CO_2 注入地下盐水层后, CO_2 在三维空间呈漏斗状向四周扩散, 这样在远离注入井的位置, 如果 CO_2 完全超覆在盐水层之上时, CO_2 就会存在渗漏和逃逸的风险。因此, CO_2 的扩散半径就成为一个非常重要的工程参数。

(3) 在 Buckley-Leverett 驱油理论的基础上, 推导出 CO_2 对盐水层非活塞式驱动半径的计算公式, 计算结果不仅可为 CO_2 盐水层封存的工程实践提供必要的理论依据, 而且也获得封存后存储介质中 CO_2 的演化特性提供长期预测和数据分析的支持。

参考文献 (References)

- [1] 谷丽冰, 李治平, 侯秀林. 二氧化碳地质埋存研究进展[J]. 地质科技情报, 2008, 27(4): 80-84.
Gu Libing, Li Zhiping, Hou xiulin. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(4): 80-84.
- [2] 李小春, 方志明, 魏宁, 等. 我国 CO_2 捕集与封存的技术路线探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 674-678.
Li Xiaochun, Fang Zhiming, Wei Ning, et al. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 674-678.
- [3] 李海燕, 彭仕宓, 许明阳, 等. CO_2 在深部咸水层的埋存机制研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(2): 72-73.
Li Haiyan, Peng Shimi, Xu Mingyang, et al. Science & Technology Review, 2013, 31(2): 72-73.
- [4] Bentham M, Kirby G. CO_2 storage in saline aquifers [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2005, 60(3): 559-567.
- [5] 任韶然, 张莉, 张亮. CO_2 地质埋存: 国外示范工程及其对中国的启示[J]. 中国石油大学学报, 2010, 34(1): 93-98.
Ren Shaoran, Zhang Li, Zhang Liang. Journal of China University of Petroleum, 2010, 34 (1): 93-98.
- [6] Noh M, Lake L W, Bryant S L, et al. Implications of coupling fractional flow and geochemistry for CO_2 injection in aquifers [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10(4): 406-414.
- [7] Chadwick A, Arts R, Bernstone C, et al. Best practice for the storage of CO_2 in saline aquifers: Observations and guidelines from the SACS and CO_2 STORE projects [M]. Nottingham: British Geological Survey Occasional Publication, 2008: 15-30.
- [8] Ennis-King J, Paterson L. Role of convectivemixing in the long-term storage of carbon dioxide in deep saline formations [J]. SPE Journal, 2005, 10(3): 349-356.
- [9] Lindeberg E, Bergmo P. The long-term fate of CO_2 injected into an aquifer [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Amsterdam: Pergamon Press, 2003: 489-494.
- [10] Gale J. Geological storage of CO_2 : What do we know, where are the gaps and what more needs to be done?[J]. Energy, 2004, 29: 1329-1338.
- [11] 张建国. 油气层渗流力学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 1998.
Zhang Jianguo. Oil and gas percolation mechanics[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 1998.
- [12] Woods E G, Comer A G. Saturation distribution and Injection pressure for a radial gas-storage reservoir [J]. Journal of Petroleum Technology, 1962(12): 1389-1393.

(责任编辑 赵业玲)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上, 全面、深入、系统地论述该领域的问题, 并对所综述的内容进行归纳、分析、评价, 以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。