

高温高压下 CO₂ 在地层水中溶解性能实验研究

王苗¹ 严国平¹ 童凡涛¹ 刘怀珠² 董利飞^{1*}

1. 重庆三峡科技大学; 2. 中国石油冀东油田分公司

摘要: CO₂ 在地层水中的溶解性能对评估 CO₂ 在咸水层中的储存能力具有直接影响。利用自行研制的试验设备测定温度、压力和矿化度各自对 CO₂ 在地层水中溶解性能的影响, 实验结果表明: 随着温度的升高 (80 ~ 120 °C), CO₂ 的溶解度仅略微减小, 整体上温度的影响不显著; 随着压力的升高 (12 ~ 30 MPa), CO₂ 的溶解度明显增大, 压力的影响较为显著; 随着矿化度的升高 (0 ~ 30 882 mg/L), CO₂ 的溶解度略微减小, 影响不显著。研究可以为二氧化碳封存提供一定借鉴和依据。

关键词: CO₂; 溶解度; 温度; 压力; 矿化度

DOI: 10.65976/3078-8145.2026.03.018

引言

随着全球气候变化的日益严峻, 减少温室气体排放, 特别是二氧化碳 (CO₂) 的排放, 已成为国际社会普遍关注的重大课题^[1]。地质封存作为一种有效的碳减排技术, 通过将捕获的 CO₂ 注入地下咸水层等地质结构中, 实现长期储存, 对于缓解全球变暖具有重要意义^[2-7]。在这一过程中, CO₂ 在地层水中的溶解特性是决定其封存效率和安全性的重要因素之一。地层水的温度、压力和矿化度等参数直接影响 CO₂ 的溶解度, 进而影响其在咸水层中的迁移、扩散和封存效果^[8-10]。因此, 深入探究这些参数对 CO₂ 溶解度的影响, 并建立准确的预测模型, 对于评估和优化 CO₂ 地质封存技术至关重要。

CO₂ 溶解度在咸水层埋存 CO₂ 的理论研究与实际工程中都有着重要意义^[11-13], 近年来, 国内外学者围绕 CO₂ 在地层水中的溶解特性开展了大量研究。通过实验模拟和理论分析, 揭示了温度、压力和矿化度等环境因素对 CO₂ 溶解度的影响规律。Poriter 和 Rochelle^[14] 研究了 tsira 地层水在 273~573 K, 0.1~30 MPa 下的溶解度, 其研究成果被世界上规模最大的地下咸水封存 CO₂ (Spleipher) 项目所采纳并应用于实际工程; 龙震宇等^[15] 实验测得了不同温度、压力、矿化度下 CO₂ 在水中的溶解度, 基于实验测量结果, 利用遗传算法优化核岭回归算法 (KRR) 参数, 建立了基于核岭回归算法的溶解度预测模型。以上这些研究主要侧重于单一因素的分析, 缺乏综合考虑多因素交互作用的系统性研究。此外, 实际工程中数据收集复杂, 现有的预测模型虽然在一定程度上能够反映 CO₂ 的溶

解特性, 但计算过程中所需要的优化参数较多, 导致其预测精度不足。

基于此, 本文通过自行研制的试验设备, 系统地探究温度、压力和矿化度对 CO₂ 在地层水中溶解度的影响, 并基于实验数据, 提出一种所需参数少、计算简易、平均相对误差小、温压以及矿化度范围广泛的 CO₂ 溶解性能预测模型。以期 CO₂ 地质封存技术的评估和优化提供参考。

1 实验

1.1 试验样品及装置

测试 CO₂ 在不同温度、压力和矿化度条件下在地层水中的溶解度变化情况。其中实验所用 CO₂ 均为纯度为 99%; 实验所用地层水均为实验室配备。实验材料及实验条件如表 1 所示, 实验装置如图 1 所示。

表 1 实验材料及实验条件

CO ₂ 气体浓度	温度	压力	矿化度
99%	80~120 °C	12~30 MPa	0~30 882 mg/L

1.2 实验步骤

将高压反应釜与真空泵连接并抽真空; 将装有 CO₂ 和地层水的容器及反应釜置于恒温箱中, 向反应釜注入 200 mL 模拟地层水, 注入 CO₂ 至预设压力, 保持上方 200 mL 游离 CO₂ 体积以促进溶解和相平衡。启动搅拌装置, 使地层水与 CO₂ 充分对流接触并溶解。通过持续注入 CO₂ 维持预设压力, 直至压力在 2 小时内保持稳定, 达到溶解平衡。关闭进气阀, 打出口阀, 调整回压至实验所需值, 利用自动计量泵排出多余 CO₂。收集饱和 CO₂ 的地层水及对应分离的 CO₂ 气体, 记录体积。重复收集步骤, 计算 CO₂ 在地层水中溶解

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目“三峡库区地下承压咸水层 CO₂ 地质封存潜力评价研究——以万州地区为例”(KJQN202301249); 万州区社科重点项目“重庆页岩油气资源优势产业赋能县域乡村振兴路径研究”(WZKT2026246)。

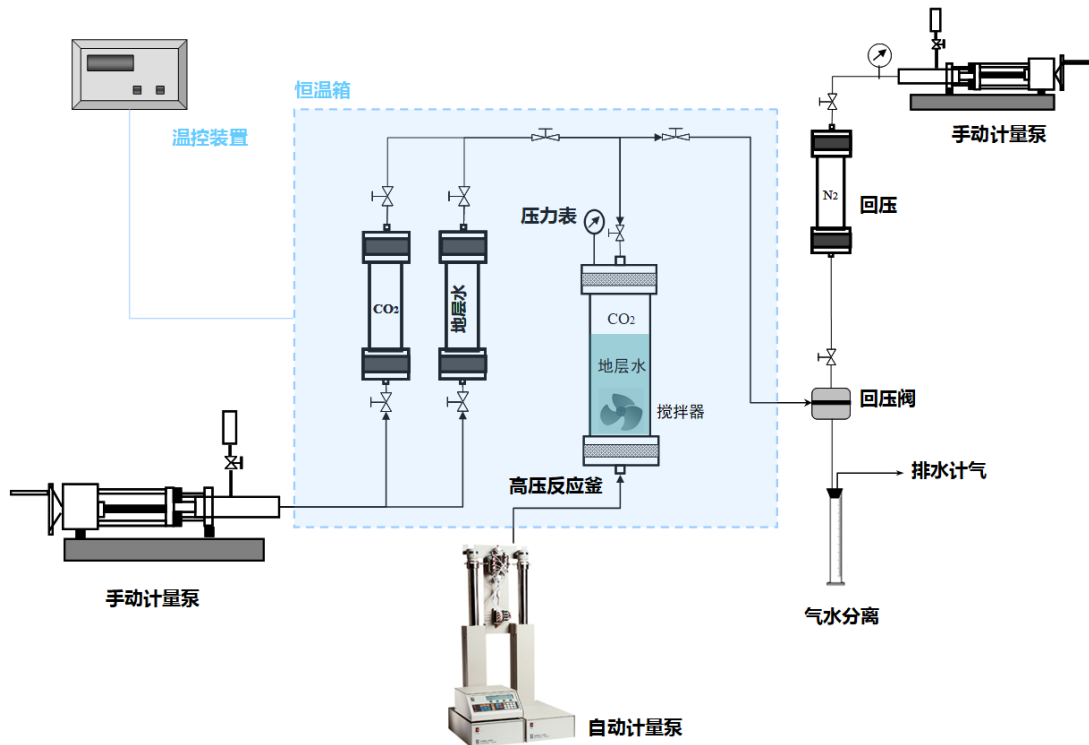


图 1 CO₂ 在地层水中溶解度测试装置及流程图

度的平均值。

1.3 实验方案

采用 5 组不同矿化度的地层水样品，设定条件如下：温度 80 ~ 120℃，压力 12 ~ 30 MPa，矿化度 0 ~ 30 882 mg/L。测量饱和 CO₂ 地层水的分离气体体积；计算不同温度、压力以及矿化度下 CO₂ 在地层水中的溶解度。具体测试方案见表 2。

1.4 实验结果及分析

实验结果如图 2-a、2-b、2-c 所示。在恒定压

力、矿化度的条件下，CO₂ 的溶解度由 0.9588 mol/L 变化到 0.9336 mol/L；同时，CO₂ 溶解度随温度升高非线性下降，且低于 100℃ 时下降速率更显著，表明高温 (> 100℃) 抑制其溶解。

在温度、矿化度恒定条件下，压力于 12~20 MPa 范围内，CO₂ 的溶解性能由 0.6780 mol/L 变化到 1.0519 mol/L；此外，CO₂ 溶解度与压力呈近似线性正相关，增长迅速；而压力超过 20 MPa 后，增长趋势放缓。对比 12 ~ 20 MPa 与 20 ~ 25 MPa 区间斜率，发现前

表 2 实验测试方案

实验方案	温度 /℃	压力 /MPa	矿化度 / (mg/L)
方案 1	80、90、97、100、110、120	23	2574
方案 2	97	12、16、20、23、26	2574
方案 3	97	23	0、2574、5147、10294、20588

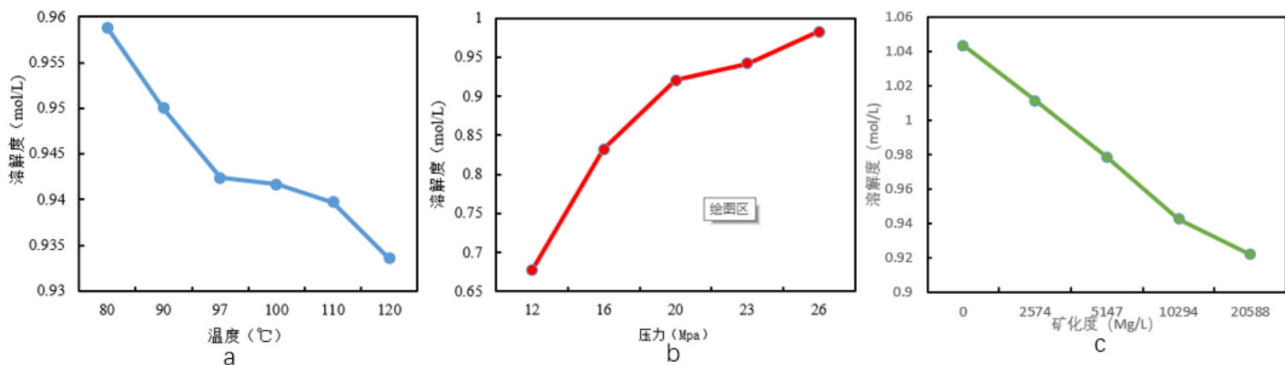


图 2 CO₂ 在水中的溶解性能变化

者斜率更大,表明相同矿化度地层水中,随温度升高,达到相同溶解度所需压力增大。

在温度、压力恒定的条件下,CO₂的溶解度由1.0435 mol/L变化到0.9036 mol/L;矿化度的增加导致CO₂溶解度下降,归因于NaCl含量增加引发的“盐析效应”,包括降低水活度系数及离子盐溶解形成的化合物吸收水分子(“溶剂效应”),在恒定的温度和压力下,高矿化度对CO₂溶解度的影响更为显著。

2 结论

(1)在相同压力、相同矿化度下,随着温度的升高(80~120℃),CO₂的溶解性能由0.9588 mol/L略微减小到0.9336 mol/L,温度对CO₂的溶解性能影响不显著。

(2)在相同温度、相同矿化度下,随着压力的升高(12~30 MPa),CO₂的溶解性能由0.6780 mol/L明显增大到1.0519 mol/L,压力对CO₂的溶解性能影响较为显著。

(3)在相同温度、相同压力、下。随着矿化度的升高(0~30 882 mg/L),CO₂的溶解性能由1.0435 mol/L变化到0.9036 mol/L,矿化度对CO₂的溶解性能影响不显著。

参考文献:

- [1] 赵震宇,姚舜,杨朔鹏,等. “双碳”目标下: 中国CCUS发展现状、存在问题及建议[J]. 环境科学,2022,44(2):1128-1129.
- [2] 孙焕泉,王海涛,吴光焕,等. 稠油油藏注CO₂提高采收率影响因素研究[J]. 石油实验地质,2020,42(6):1009-1013+1023.
- [3] 王锐,李阳,吕成远,等. 鄂尔多斯盆地深部咸水层CO₂驱水与埋存潜力评价方法研究[J]. 非常规油气,2021,8(5):50-55+69.
- [4] 侯大力,罗平亚,王长权,等. 高温高压下CO₂在水中溶解度实验及理论模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2015,45(2):564-572.
- [5] 林元华,邓宽海,宁华中,等. 二氧化碳在地层水中的溶解度测定及预测模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(1):117-126.
- [6] 段敬东,凌世河,肖玲娟,等. “双碳”目标下我国大型水电可持续发展经济性研究[J]. 水利水电技术(中英文),2023,54(S2):344-348.
- [7] 甘满光,缪秀秀,张力为,等. CT扫描技术在二氧化碳地质利用与封存领域的应用研究综述[J]. 水利水电技术,2019,50(8):174-184.
- [8] 董利飞,钟品志,张旗,等. 基于马尔科夫理论优化的地下咸水层CO₂溶解性能灰色预测模型[J]. 大庆石油地质与开发,2024,43(1):95-101.
- [9] 桑树勋,刘世奇,陆诗建,等. 工程化CCUS全流程技术及其进展[J]. 油气藏评价与开发,2022,12(5):711-725+733.
- [10] 杨木刚,蔡明玉,张坤峰,等. CO₂-水-岩相互作用对CO₂地质封存体物性影响研究进展及展望[J]. 油气地质与采收率,2023,30(6):80-91.
- [11] 刘思楠,张力为,苏学斌,等. 二氧化碳咸水层封存条件矿物溶解与沉淀化学反应建模与参数取值综述[J]. 水利水电技术,2020,51(11):13-22.
- [12] 李银,李旭峰,沈照理,等. CO₂地质封存室内实验中盐水种类对残余水形成的影响[J]. 地学前缘,2015,22(4):312-319.
- [13] 董利飞,董文卓,张旗,等. 咸水层中CO₂溶解性能预测方法优选[J]. 油气藏评价与开发,2024,14(1):35-41.
- [14] Portier S,Rochelle C. Modelling CO₂ solubility in pure water and NaCl-type waters from 0 to 300 °C and from 1 to 300 bar[J]. Chemical Geology, 2005,217(3-4):187-199.
- [15] 龙震宇,王长权,石立红,等. 基于核岭回归算法的地层水中CO₂溶解度模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2023,38(1):95-101.