

CO₂ 地质封存泄露环境监测技术研究进展

李有刚（中石化华东石油局江苏华扬液碳有限责任公司，江苏 泰州 225300）

摘要：在国家“双碳”战略目标背景下，碳捕集、利用和封存（CCUS）技术被认为是实现CO₂大规模减排的有效途径之一。由于在CO₂地质封存过程中，CO₂泄露途径多且杂，且CO₂一旦泄露将会对生态环境造成一定的伤害，CO₂封存泄露环境监测就显得尤为重要。本文在广泛调研国内外CO₂封存泄露相关文献的基础上，从CO₂封存类型及机理出发，开展CO₂封存泄露途径及危害分析，并对现有CO₂封存泄露环境监测技术进行总结。在以上研究的基础上，根据CO₂封存泄露技术研究现状，给出技术发展建议，对实现CO₂的安全高效地质封存具有重要意义。

关键词：CCUS；CO₂地质封存；封存泄露；封存泄露环境监测

据国际能源署（IEA）报告显示^[1]，截至2021年4月底，已有44个国家及欧盟宣布了净零排放目标，这也表明了保护气候变化的大方针已经在全球得到普遍认可，行之有效的减排技术将受到越来越广泛的关注。作为能实现低成本净零排放的关键技术之一，CCUS技术发展势头将更加强劲。随着CCUS技术在国内外的广泛应用，CO₂封存技术的安全性和泄露风险研究也逐渐受到重视。

1 CO₂地质封存类型及机理

CO₂地质封存即通过工程技术手段将CO₂储存在地下储层中，从而避免其排放到大气中的过程，该技术也是目前最经济有效的CO₂封存技术。在多种多样的CO₂地质封存场所中，枯竭油气藏、深部咸水层和深部不可采煤层是最具潜力的三个封存场所^[2]。而不同类型的CO₂地质封存，其封存机理也不尽相同。

1.1 CO₂地质封存类型

1.1.1 枯竭油气藏封存

枯竭油气藏是指在一定的经济技术条件下，油气藏中的剩余油气不能被采出，从而丢失了开采价值的油气藏。利用枯竭油气藏开展CO₂地质封存，可以充分利用已有的油气藏勘探开发资料，减少前期调研评价成本，是适合CO₂封存的早期地质场所。枯竭油气藏的封存量计算主要是基于物质平衡法，其基本假设条件为油气开采所让出的空间均可用于CO₂封存。2006年，刘延峰等^[3]计算结果表明我国主要含油气盆地的CO₂地质封存量约为305亿t。

1.1.2 深部咸水层封存

张森琦等^[4]研究表明，适宜的大规模CO₂封存场所需具备埋深大于800m，地层水矿化度介于10~50g/L，顶、底板隔水性好等特征。据统计，深

部咸水层封存在所有封存场所中占比约98%，是理想的CO₂封存场所。

《中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）》中研究结果显示^[5]，我国深部咸水层的CO₂封存容量约为24200亿t，其分布与含油气盆地分布基本相同。其中，松辽盆地、塔里木盆地和渤海湾盆地分别以6945亿t、5528亿t和4906亿t的深部咸水层封存潜力位列全国前三位。此外，苏北盆地咸水层封存量约为4357亿t，鄂尔多斯地区咸水层封存量约为3356亿t，也具有较大的封存潜力。

1.1.3 深部不可采煤层封存

煤层表面对CO₂的吸附能力约为对甲烷的2倍^[6]，当CO₂注入煤层中封存后，CO₂可有效替换其中的甲烷，实现CO₂有效封存和煤层气产量提升双赢。

我国深部煤层广泛发育，是实施煤层CO₂-ECBM（CO₂驱替煤层气）的良好地质体。LI等人^[7]采用公式法对我国多个深部不可采煤层CO₂封存潜力进行评估，评估结果显示我国45个主要含煤盆地的CO₂地质封存量约为120亿t，封存潜力巨大。

1.2 CO₂地质封存机理

CO₂的有效封存是在物理和化学机理共同作用下实现的，其中CO₂物理封存机理主要包含构造地质封存、束缚封存和水动力封存，化学封存机理主要包含溶解封存、矿化封存和煤层气吸附封存^[8]。

1.2.1 物理封存机理

1.2.1.1 构造地质封存

当注入地层中的CO₂因遇到不渗透层而无法流动时将会形成一种构造圈闭，将CO₂永久封存在地下，该封存机理即为构造地质封存。构造地质封

存又称静态封存,是CO₂封存中最为重要的机制。

1.2.1.2 束缚封存

当CO₂在地层中运移时,由于毛细管力、表面张力的作用,CO₂被永久地圈闭在岩石颗粒的孔隙中,该封存机理为束缚封存。在地质封存的过程中,束缚气封存机理的作用持续时间最久,是主要的封存机理。

1.2.1.3 水动力封存

如果深部咸水层的储层没有完全封闭且流体流速较低时,将CO₂注入深部咸水层,CO₂将在浮力的作用下上升至含水层顶部,而极低的地下水运移速率则可确保CO₂在储层中长期(地质时间尺度)储存。

1.2.2 化学封存机理

1.2.2.1 溶解封存

CO₂会溶解在地下流体中,且其溶解程度随环境温度、压力、盐度及CO₂的饱和度而变化。溶解作用的发生主要取决于封存地层的垂向渗透能力和厚度。溶解封存会减少游离态CO₂数量,降低CO₂的运移漏失风险,是较为安全稳定的封存状态。

1.2.2.2 矿化封存

在CO₂封存过程中,受岩石矿物组成和流体类型等因素的影响,CO₂会和岩石及地下水中的某些组分发生化学反应,进而生成碳酸盐矿化物。矿化封存是一种稳定长久封存CO₂的作用机理,其作用的时间尺度非常漫长,通常需要几百至上千年才可完成。

1.2.2.3 煤层吸附封存

煤层对CO₂的吸附能力远远高于甲烷,因此将CO₂注入煤层封存可成功置换其中的甲烷,实现CO₂封存。CO₂的地质封存往往是多机理相互作用的结果。结合CO₂物理化学特征及各地质封存体特征可知,枯竭油气藏封存机理主要为构造地质封存、束缚封存、溶解封存和矿化封存;深部咸水层封存机理主要为构造地质封存、束缚封存、水动力封存、溶解封存和矿化封存;深部不可采煤层封存机理主要为束缚封存和煤层吸附封存。

2 CO₂封存泄露途径及其危害

实现CO₂的安全、高效封存是CCUS技术永恒的目标,一旦CO₂泄露将会对生态环境造成一定的伤害,所以有必要对CO₂的泄露途径进行分析,以便更好的开展CO₂封存泄露监测技术研究。根据第一节中对CO₂主要地质封存类型和封存机理

的研究,明确了CO₂封存泄露途径主要包含井筒体系、断层/裂缝体系以及盖层体系三类^[9]。

2.1 CO₂封存泄露途径

CO₂沿井筒体系泄露主要是指由于井筒的腐蚀或者形变而导致的CO₂泄露。CO₂沿断层/裂缝体系的泄露主要是指注入的CO₂沿着由于CO₂的大量注入所产生的地层裂缝或者所激活的原有闭合裂缝的泄露。CO₂沿盖层体系的泄露则是指CO₂注入后,由于CO₂与盖层岩石之间所发生的物理、化学作用而导致的CO₂泄露。

2.2 CO₂封存泄露危害

在CO₂封存过程中,CO₂一旦发生泄露,将会对地下水、土壤和大气产生一定的影响。

泄露的CO₂在地下水中不断运移,并且与地下水发生溶解反应,导致地下水的pH值、HCO₃⁻浓度、温度、压力、电导率等参数发生一定的变化,影响地下水水质。当泄露的CO₂通过水力圈闭到达土壤时,泄露的CO₂会与土壤中的水分相互作用,导致土壤的pH值、湿度、电导率等参数发生变化,在使土壤酸化的同时还会对埋地设备产生腐蚀。当泄露的CO₂扩散至大气时,气温、气压和大气湿度等参数会发生一定的变化。此外,由于CO₂密度大于空气,CO₂将会集蓄在低洼或者空气流通性差的地方,对人和动植物产生一定的危害。

3 CO₂封存泄露环境监测技术

随着CO₂封存项目的大规模开展,CO₂封存的安全性、有效性受到越来越广泛的关注,如何有效开展CO₂封存泄露环境监测成为国内外学者的研究热点。研究表明,地下监测、近地表监测和地上监测是CO₂地质封存环境监测的核心,其完整监测周期涉及背景期、运营期、闭场期和闭场后4个阶段^[10]。其中,地下监测主要是地下水监测,近地表监测主要是土壤和植被的监测,地上监测则主要是大气监测。

3.1 地下水监测

目前CO₂封存过程中地层水的监测技术较为成熟,常用技术主要有基于压力变化、热导性能、pH变化监测方法和地球化学效应监测方法等。按照技术监测原理可分为间接监测技术和直接监测技术两类。间接监测技术是指通过测定地层水样本中相关参数变化来分析CO₂在地层中的泄露情况。直接监测技术则是通过原位监测技术直接对地层水进行监测,该技术是最直接、最经济的地层水环境监测手段。

3.2 土壤监测

CO₂ 封存过程中土壤的监测主要是通过累积室测量法对土壤相关参数进行分析测量来实现。累积室测量法又可分为封闭式动态测量 (CDC)、开放式动态测量 (ODC) 和封闭式静态测量 (CSC) 3 类, 其中 ODC 法主要是通过测量入口和出口之间的 CO₂ 浓度差来判断 CO₂ 封存泄露情况。虽然 ODC 法测量方式复杂, 技术成本高, 但其测量结果最为可靠, 被广泛应用于 In Salah、Gorgon、RECOPOL、Weyburn 等 CO₂ 封存监测项目。

此外 CO₂ 封存过程中土壤的监测还可通过基于热导性能的监测方法和示踪剂监测等技术实现。

3.3 大气监测

CO₂ 封存过程中大气监测的主要手段有红外线气体监测、大气 CO₂ 示踪监测和大气 CO₂ 通量监测 3 种, 这三种技术手段均是国内外封存监测项目的常用技术手段, 应用广泛而普遍。

红外线气体监测技术研究是基于 CO₂ 近红外吸收光谱的相关特点展开的, 主要包含 IRGA (红外气体分析仪) 和 LOIR (长程开放路径红外探测和调制激光) 两种。其中, IRGA 法可以实现点式监测, 监测精度高且响应较快, 但是较难开展区域测量。而 LOIR 法虽然可以实现区域监测, 但是目前该技术并不成熟, 有待进一步研发。大气 CO₂ 示踪监测则是在封存的 CO₂ 中添加示踪剂, 并通过监测示踪剂浓度来实现 CO₂ 封存泄露监测。该技术虽然灵敏度较高, 但是也存在成本高、示踪剂选型困难等问题。大气 CO₂ 通量监测主要通过涡度相关法来实现, 该技术具备监测范围广、受周围环境影响小等优点, 同时也存在需长期监测才能得出泄露量等关键参数的缺点。

4 技术发展建议

为了实现 CO₂ 的安全高效封存, 建议在 CO₂ 封存注入前, 结合区域地质特征, 开展封存适应性分析, 从源头上避免封存泄露情况的发生; 在 CO₂ 封存前期, 通过示踪剂监测或者数值模拟手段, 开展 CO₂ 运移方向研究; 在 CO₂ 封存中后期, 持续开展立体环境监测, 实现 CO₂ 封存泄露的实时连续监测; 在 CO₂ 封存结束后, 结合 CO₂ 封存机理和运移规律, 定期开展环境关键指标监测, 保障 CO₂ 封存的有效性。

5 结论

本文通过对 CO₂ 封存类型、封存机理、泄露途径及危害和环境监测技术的分析, 给出了 CO₂ 地

质封存泄露环境监测技术发展建议。

① CO₂ 地质封存类型主要有枯竭油气藏、深部咸水层和深部不可采煤层三类, 主要封存机理有构造地质封存、束缚封存等; ② CO₂ 封存泄露途径主要有沿井筒体系、断层 / 裂缝体系以及盖层体系泄露三类, CO₂ 一旦泄露将会对地下水、土壤和大气产生一定的影响; ③ 地下水、土壤和大气的监测是 CO₂ 地质封存泄露环境监测技术的核心; ④ CO₂ 地质封存项目应在 CO₂ 封存前、封存过程中、封存结束后应采取相应的技术手段全方位保障技术的安全性、有效性和持久性。

参考文献:

- [1] 国际能源署 .International Energy Agency (IEA) - World Energy Outlook 2021[EB/OL].2021.
- [2] 孙腾民, 刘世奇, 汪涛. 中国二氧化碳地质封存潜力评价研究进展 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49 (11):10-20.
- [3] 刘延锋, 李小春, 方志明, 等. 中国天然气田 CO₂ 储存容量初步评估 [J]. 岩土力学, 2006, 27(12):2277-2281.
- [4] 张森琦, 郭建强, 刁玉杰, 等. 规模化深部咸水含水层 CO₂ 地质储存选址方法研究 [J]. 中国地质, 2011, 38(06):1640-1651.
- [5] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)-- 中国 CCUS 路径研究 [R]. 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [6] 刘洋. CO₂ 驱替煤层 CH₄ 影响因素研究及现场应用分析 [D]. 西安科技大学, 2021.
- [7] Li X, Wei N, Liu Y, et al. CO₂ point emission and geological storage capacity in China[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1):2793-2800.
- [8] 路萍, 白勇, 刘伟刚, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组二氧化碳地质封存有利区优选 [J]. 地质论评, 2021, 67(03):816-827.
- [9] 白云云, 师洋阳, 卢美娟, 等. 双碳目标下 CO₂ 地质封存泄露途径及监测方法研究进展 [J]. 榆林学院学报, 2021, 31(06):43-46.
- [10] 蔡博峰. 二氧化碳地质封存及其环境监测 [J]. 环境经济, 2012(08):44-49.

作者简介:

李有刚 (1973-), 男, 江苏南京人, 工程师, 主要从事的工作为 CCUS 技术研究。