

废弃矿井封存超临界二氧化碳：安全挑战与对策

郝美雅, 竹耀元, 何志华

华北理工大学应急管理与安全工程学院, 河北 唐山

收稿日期: 2024年10月21日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年1月17日

摘要

在致力于达成“碳中和”与“碳达峰”宏伟目标的背景下, 探索废弃矿井作为二氧化碳地质封存的有效载体, 对于提升资源循环利用效率及减缓全球气候变化具有显著价值。本文系统性地探究了将废弃矿井应用于CO₂封存的可行性, 多维度地涵盖了地质构造特征、埋藏深度适宜性, 以及地温条件等关键要素。同时, 本文深入剖析了CO₂对封存设施潜在的腐蚀影响机制, 并对废弃矿井内实施CO₂封存所涉及的安全隐患进行了详细的阐述, 旨在全面评估该技术的环境适应性与风险控制能力, 进一步讨论了安全监测技术在CO₂封存领域的适用性和CO₂封存的风险分析。对于推动废弃资源再利用、实现低碳可持续发展目标具有深远的理论与实践意义。

关键词

废弃矿井, 二氧化碳封存, 超临界CO₂, 安全评价

Supercritical CO₂ Storage in Abandoned Mines: Safety Challenges and Countermeasures

Meiya Hao, Yaoyuan Zhu, Zhihua He

School of Emergency Management and Safety Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

Received: Oct. 21st, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Jan. 17th, 2025

Abstract

In the context of striving to achieve the grand goals of “carbon neutrality” and “carbon peaking”,

文章引用: 郝美雅, 竹耀元, 何志华. 废弃矿井封存超临界二氧化碳: 安全挑战与对策[J]. 矿山工程, 2025, 13(1): 122-131.
DOI: 10.12677/me.2025.131015

exploring abandoned mines as an effective carrier of geological storage of carbon dioxide is of significant value for improving the efficiency of resource recycling and mitigating global climate change. This paper systematically explores the feasibility of applying abandoned mines to CO₂ storage, covering key factors such as geological structure characteristics, suitability of burial depth, and geothermal conditions in multiple dimensions. At the same time, this paper deeply analyzes the potential corrosion mechanism of CO₂ in storage facilities and elaborates on the potential safety hazards involved in the implementation of CO₂ storage in abandoned mines, aiming to comprehensively evaluate the environmental adaptability and risk control ability of the technology and further discuss the applicability of safety monitoring technology in the field of CO₂ storage and the risk analysis of CO₂ storage. It has far-reaching theoretical and practical significance for promoting the reuse of waste resources and achieving low-carbon sustainable development goals.

Keywords

Abandoned Mines, CO₂ Sequestration, Supercritical CO₂, Safety Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2020 年我国提出了“碳达峰”和“碳中和”两个重要目标。因此，在碳约束条件下，如何实现煤炭的清洁高效利用和确保能源安全成为能源转型的立足点和首要任务[1]。在 2021 年 10 月中共中央、国务院印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》文件中，为实现预定目标制定了“时间表”和“路线图”，就确保碳达峰、碳中和两个重要目标的如期实现作出了全面部署。

目前我国实现“碳中和”的主要路径包括：产业结构调整升级、能源供给侧结构调整、能源消费侧节能增效与电气化、负碳手段和技术四方面[2]。应用较多的负碳技术包括 CO₂ 捕集、封存和利用(CCUS)，直接空气捕集(DAC)，生态碳汇等[3]。其中，地质封存技术是一项经典的负碳释放技术，这项技术利用导管把超临界 CO₂ 气体引入到石油、咸水地层以及不可采煤地层之间的密闭地质结构中，并长期和永久地封存二氧化碳，这项技术也因而被看作是二氧化碳封存的首要选择[4]。煤炭是 CO₂ 的天然吸附剂，其对 CO₂ 的吸附能力约为 CH₄ 的 2 倍[5][6]。因此，相较于咸水地层封存，废弃矿井进行煤层 CO₂ 封存的过程中可以实现煤层气的高效采集，具有明显的经济优势，并且提高了废弃矿井的资源利用效率。据统计，“十一五”期间，我国关闭/废弃小煤矿 1.7 万处，“十二五”期间，废弃矿井增加了 7100 处，预计 2030 年废弃矿井将达到 1.5 万处[7]。废弃矿井中仍储存大量资源未被利用，如果只是简单地将其关闭，将造成巨大的资源浪费，并将引发安全、环境及社会问题。废弃矿井能源资源的开发利用过程在政治、经济及社会方面都有着十分重要的现实意义及深远的历史意义。

从 20 世纪 90 年代开始，全球各地逐步进行了关于废弃煤矿 CO₂ 埋储技术的有关研究[8]，美国、加拿大分别于一九九五年、一九九七年实施了煤层注入 CO₂ 试验，验证了煤层大量储存 CO₂ 的可行性[9][10]。中国已于二零零二年和加拿大联合，对中国山西省沁水盆地的 TL 负三矿井，开展了注 CO₂ 方法进行煤层气采收的微型先导性实验[11]。但目前国内煤层的开采 CO₂ 方法仍在探索阶段。本文通过从废弃矿井地质条件对 CO₂ 封存的影响、超临界 CO₂ 对封存设备的腐蚀作用以及 CO₂ 封存的安全问题三方面进行讨论，对目前的研究成果进行总结分析，并讨论地质封存与监测相关技术的未来发展方向，对于推动废弃矿井进行二氧化碳封存的发展具有积极意义。

2. 地质条件对 CO₂ 封存主控因素的研究

2.1. 埋藏深度对 CO₂ 封存主控因素的影响

我国如今的煤矿主要埋藏深度分布在 100~1000 米之间, 部分深井煤矿深度可达 1500 米, 随着技术的发展, 废弃矿井的埋藏深度会进一步增加。CO₂ 地质封存过程中为了将 CO₂ 保持在高密度的液态或超临界状态, 满足充分的温度和压力条件, 封存深度通常要在 800 米以上。CO₂ 进入废弃矿井后一部分会渗入煤层的孔隙中, 影响 CO₂ 的封存效率, 因此需要探究埋藏深度与煤的孔隙体积和煤层结构之间的关系。

刘长江等人对 CO₂ 地质埋藏深度与高阶煤孔隙结构的关系进行模拟实验并发现[12], 随着模拟埋藏深度的增加, 煤样的孔隙体积与结构发生变化, 煤样的总孔容先增加后降低, 在 1000~2000 m 的区间内, 曲线在 1500 m 处达到峰值 $2.63 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ 。在另一项对煤层裂缝结构的研究中, 刘长江将分形理论与不光滑不规则的几何形体相联系, 利用分形维数对不同埋藏深度的样品进行了研究, 构建了不同埋藏深度下煤体孔裂隙参数变化的模型。模型显示, 随着埋藏深度的增加, 煤层破坏程度同样呈现为先增加后减少的曲线, 1500 m 处的孔裂隙结构发育最好, 样品孔裂隙结构破坏程度达到最高。

实验证明, 煤的孔隙体积与煤层结构中的裂缝体积越大, 数量越多, 对于 CO₂ 在煤层中的活动就越有利, 更利于 CO₂ 封存。因此, 当废弃矿井埋藏深度位于 1500 m 处附近时, 煤层裂隙的发育程度最适合进行 CO₂ 的封存。

2.2. 温度对 CO₂ 封存主控因素的影响

温度是影响分子热运动的一个重要因素, 温度越高, 分子热运动越剧烈。温度升高时, 煤层中 CO₂ 分子间的热运动会加剧, CO₂ 与煤层间的接触增多, CO₂ 分子会吸附在煤的表面, CO₂ 的封存效率会加快; 相反, 温度降低时, CO₂ 分子间的热运动减弱, 造成 CO₂ 在煤层间的长时间滞留, CO₂ 与煤层以及甲烷等气体的混合速度减慢, 从而影响 CO₂ 的封存效率。通过模拟不同储层温度下 CO₂ 矿物封存的速率发现[13], 随着温度的升高, CO₂ 矿物捕获速率增大, 捕获量也进一步提高。对煤岩进行加热实验后观察发现[14], 煤样裂缝结构的松散程度随温度的变化呈波形, 0~80℃内下降, 80~150℃时上升, 最后 150~200℃再次下降, 150℃处煤样裂缝结构最为松散。废弃矿井多为高温高压环境, 在该环境温度下能够满足煤层裂缝结构松散的条件。

煤岩在 CO₂ 环境中会产生裂缝结构改变, 引起煤岩的裂缝孔隙度和渗透率增加, 对于煤层 CO₂ 封存具有积极影响; 煤岩在 150℃时裂缝结构最佳, 是最适宜流体在煤层中活动的温度。

2.3. 含水量对 CO₂ 封存主控因素的影响

废弃矿井深度往往较大, 所处地层附近可能存在地下水资源, 从而影响 CO₂ 封存位置的含水量。当废弃矿井及周边岩层含水量较高时, 岩石孔隙中的水分子渗透加速, 使得周围岩石变得开始湿润并且具有亲水特征, 从而增加 CO₂ 与岩石中水分子的接触并促进 CO₂ 进一步发生反应, 极大程度地降低废弃矿井煤层区域 CO₂ 的封存程度以及可封存时间。一定程度上可能会造成封存的 CO₂ 及其他混合气体泄漏, 不仅会造成对周边环境的影响, 也违背了 CO₂ 封存的目的, 造成经济损失、环境污染等影响。

CO₂-水-岩相互作用导致岩石孔隙度和渗透率的变化与其初始孔渗特征和矿物组成密切相关, 岩石孔渗特征的改变直接影响储层的注入能力与封存潜力和盖层的封闭能力。润湿性的变化与初始亲水亲油特征有关, CO₂-水-岩相互作用通常会减弱亲水岩石而增强亲油岩石的水润湿性, 进而影响多相流体在岩石孔隙中的微观分布与渗流特征。由于胶结物溶蚀以及溶蚀孔的形成, CO₂-水-岩相互作用会引起岩石损伤, 抗压强度、抗拉强度、弹性模量等力学参数减小, 一定程度上影响封存安全性。碳中和背景下,

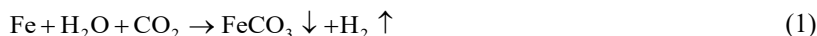
微纳米尺度孔隙、深地微生物介导、非纯 CO₂ 或工业尾气注入、封存全周期等情景下的 CO₂-水-岩相互作用及岩石物性响应仍有待深入研究[15]。

3. 超临界状态的 CO₂ 对封存设备的腐蚀作用

在碳封存过程中, 存在的超临界状态 CO₂ 对封存设备腐蚀的形式以钢材腐蚀为主。其中, 钢材腐蚀可能发生在 CO₂ 输送、咸水层封存等多个环节中, 主要涉及金属管道腐蚀、井筒油管和套管腐蚀等方式。同时, CO₂ 腐蚀速率受到设备及管道所处的温度、压力等环境因素不同程度的影响。

超临界二氧化碳对封存设备的腐蚀作用主要取决于以下几个方面: 材料兼容性, 超临界二氧化碳与封存设备的材料相互作用, 可能会引起材料的腐蚀或退化。例如, 某些金属在超临界二氧化碳的作用下可能会发生应力腐蚀开裂; 化学反应, 超临界二氧化碳可能会与地层中的矿物质发生化学反应, 导致矿物质溶解或沉淀, 可能会改变岩石的孔隙结构, 进而影响封存设备的完整性; 流体动力学, 超临界二氧化碳在地下的流动可能会引起地层压力的变化, 这种压力变化可能会对封存设备造成机械应力, 增加破裂或泄漏的风险; 温度和压力条件, 超临界二氧化碳的腐蚀作用还受到地下的温度和压力条件的影响。在不同的温度和压力下, 二氧化碳的化学活性和物理性质会有所不同, 从而影响其对封存设备的腐蚀作用; 混合流体效应, 在封存过程中, 超临界二氧化碳可能会与地层水或其他流体混合, 形成具有不同化学性质的混合流体, 这可能会加剧对封存设备的腐蚀。

CO₂ 腐蚀钢材的反应生成的产物主要为 FeCO₃ (式(1)), 其在特定条件下可以对材料表面起到一定的保护作用。



CO₂ 溶解于水中, 会改变水溶液中的化学物质, H⁺、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 等离子存在会因为 CO₂ 的增加而浓度升高, 从而影响钢材腐蚀的电化学反应(对于阴极和阳极反应均有影响) [16]。

CO₂ 输送管道及封存设备的温度在受到摩擦阻力、热交换、地形变化等因素的多方面的影响下, 不同部位产生的额外热量不同, 导致输送过程中的管道及封存设备受到 CO₂ 的腐蚀速率存在差异。

3.1. 温度对 CO₂ 腐蚀作用的影响

对 X70 碳钢在 10MPa, 系统含有 2% SO₂、0.02 mol O₂ 的超临界 CO₂ 环境中的腐蚀速率进行实验研究发现[17], 当温度处于 298.15 K 到 366.15 K 的区间内时, 腐蚀速率逐步增高至最大值, 随后逐渐降低。其中温度分别位于 323.15 K 和 348.15 K 时, CO₂ 输送管道材料表面尽管生成了大量的腐蚀产物沉淀, 但是其容易脱落, 不能在整体面积形成持续隔离, 对材料表面的保护性差; 当温度提高至 366.15 K 时, 材料表面则生成了大量的腐蚀产物, 其较低的孔隙率对材料表面起到了强有力的隔离保护作用。与此同时, 伴随着温度的升高, SO₂ 和 O₂ 在整个腐蚀体系中的溶解度也逐渐降低, 从而抑制了 CO₂ 输送管道及封存设备受到进一步的腐蚀。

在 S-CO₂ 环境下, 金属材料主要以氧化和渗碳反应为主, 在这两种常见的反应影响下, 金属材料会形成双层结构的腐蚀产物, 其中内层为致密的铁铬尖晶石层 FeCr₂O₄, 而外层仅为金属氧化物, 温度升高会加速其化学反应和传质过程, 同时使腐蚀产物层的组成发生变化, 产生孔洞等更多缺陷, 导致腐蚀产物容易脱落, 从而加速材料的 S-CO₂ 腐蚀。

具体来说, 温度升高会加速试样的 S-CO₂ 腐蚀, 增加腐蚀速率。例如, 在 550~600℃ 的 S-CO₂ 环境中, 铁素体钢和铁素体-马氏体钢的腐蚀速率随温度升高而增加。此外, 在温度升高的情况下, 金属材料的表面会产生由腐蚀产物转化而来的保护膜, 这种保护膜质地致密、连续, 具有均匀的特性。随着腐蚀时间的进一步增加, 产生的氧化层会进一步变厚从而脱落, 反过来会加剧腐蚀现象的发生。

3.2. 压力对 CO₂ 腐蚀作用的影响

封存过程所遇的地层条件十分复杂,不同位置的 CO₂ 浓度也会产生差异。但二氧化碳高分压在气体环境中的存在,对储运管线和封存设施的破坏都有明显的促进作用。由于井下的气压不断变化,CO₂ 的相态也将发生一定的变化。因此,不同相态的超临界二氧化碳对材料的腐蚀性也存在一定差别。

在温度确定的情况下,矿井中压力的增加会使二氧化碳分压明显增加,在溶解到水中时,由于化学平衡使溶液中酸性侵蚀性粒子,如氢离子、碳酸等物质浓度增加,促进了在金属材料表面的电化学反应,使腐蚀更快地进行。例如,在 80℃ 时, X65 钢在 S-CO₂ (9.5 MPa) 条件下的腐蚀速率远大于其在低压 CO₂ (1.0 MPa) 条件下的腐蚀速率。在 550~650℃、0.1~20.0 MPa 的条件下,随着 CO₂ 压力的增加,腐蚀增重和氧化层厚度有所增加,但变化幅度并不显著,这可以解释为高压下的扩散增强。

CO₂ 分压的变化会影响水与 CO₂ 的互溶度,从而使 CO₂ (aq)、H₂CO₃ 和 HCO₃⁻ 的浓度都随着压力的增加而增加,改变 CO₂ 的相态,进而影响腐蚀发生过程。同一温度条件下,CO₂ 超临界条件下产生的腐蚀产物膜的厚度远大于低压条件下形成的腐蚀产物膜厚度。同时,管道设备材料在 CO₂ 超临界条件下的腐蚀速率也会明显高于低压条件下的腐蚀速率。这是由于处在超临界状态下时,CO₂ 在水中的溶解度会迅速增大,引起水溶液中 H₂CO₃、HCO₃⁻、CO₃²⁻ 等具有腐蚀性的物质浓度增加,与此对应的电化学阴极反应速率加快,从而加快 CO₂ 对管道设备材料的腐蚀速率[18]。

3.3. 流速对 CO₂ 腐蚀作用的影响

流速对超临界二氧化碳(S-CO₂)腐蚀的影响相对较小,但仍然存在一定的影响。在超临界环境中,流速的增加可能会影响腐蚀产物膜的形成和稳定性。流动会增强阴极去极化过程和加速反应产物从基体表面转移的速率,流速增加通常会使得局部腐蚀加剧,增大腐蚀速率。但当腐蚀产物层形成后,流速对腐蚀速率的影响就会减弱。

CO₂ 在管道中的流速变化会改变设备材料表面腐蚀产物膜的结构性能,如致密程度、对钢材的保护作用等,从而影响 CO₂ 对管道设备材料的腐蚀速率。高纯良等人对流速对 N80 钢的 CO₂ 腐蚀行为的影响进行了实验研究[19],研究结果表明,随着流速的增大,腐蚀产物膜受到的破坏加强,对钢材表面的保护性降低,腐蚀速率呈指数形式迅速增长。研究发现[20],在 CO₂ 超临界条件下,流体的运动加快了化学反应形成的腐蚀产物在钢铁的传质过程,但流体运动会使对钢铁表层形成剪切应力,损害了 FeCO₃ 层的整体性和致密度,因此提高了侵蚀速度。除此之外,流速变化还可能造成钢材的局部腐蚀。有研究表示[21],当流体的流速或强度达到一定程度时,会抑制具有保护作用的腐蚀产物膜的再生,从而导致腐蚀产物膜剥落的部位产生局部腐蚀。

4. CO₂ 封存的安全问题研究

4.1. 废弃矿井的安全问题

煤矿直接关闭或废弃过程中将会引起一系列地质灾害威胁,如坍塌、地表塌陷、火灾等[22]。因此,废弃矿井进行 CO₂ 封存的过程中要着重对其安全问题进行分析。

在对废弃矿井进行 CO₂ 封存的过程中仍有许多问题需要解决,目前我国在废弃矿井的资源开发利用过程中,主要关注的是土地复垦和生态修复两方面,而对于 CO₂ 封存这一方案重视程度不足[23]。因此,对废弃矿井进行 CO₂ 封存面对着许多安全问题:1) 地质安全保障不成熟,废弃矿井地质结构复杂,地质断层、陷落柱、破碎岩柱等隐蔽地质结构遍布矿区,地质灾害,如煤层气串流、坍塌、矿井水突涌等资源开发残留灾害显著,提升了矿区二次开发难度[24];2) 对于废弃矿井矿区多场耦合灾变机理尚待研究,

涉及的研究内容如图 1 所示；3) 针对废弃矿山实际的 CO₂ 封存理论体系仍需完善，目前对废弃矿山进行 CO₂ 封存的研究仍处于理论层面，缺乏深层次的研究作为支撑。因此，对废弃矿山 CO₂ 封存系统的基础体系及理论研究需要进一步深入，将传统的 CO₂ 封存方法改良后运用到废弃矿山中，完成废弃矿山资源的再次利用。

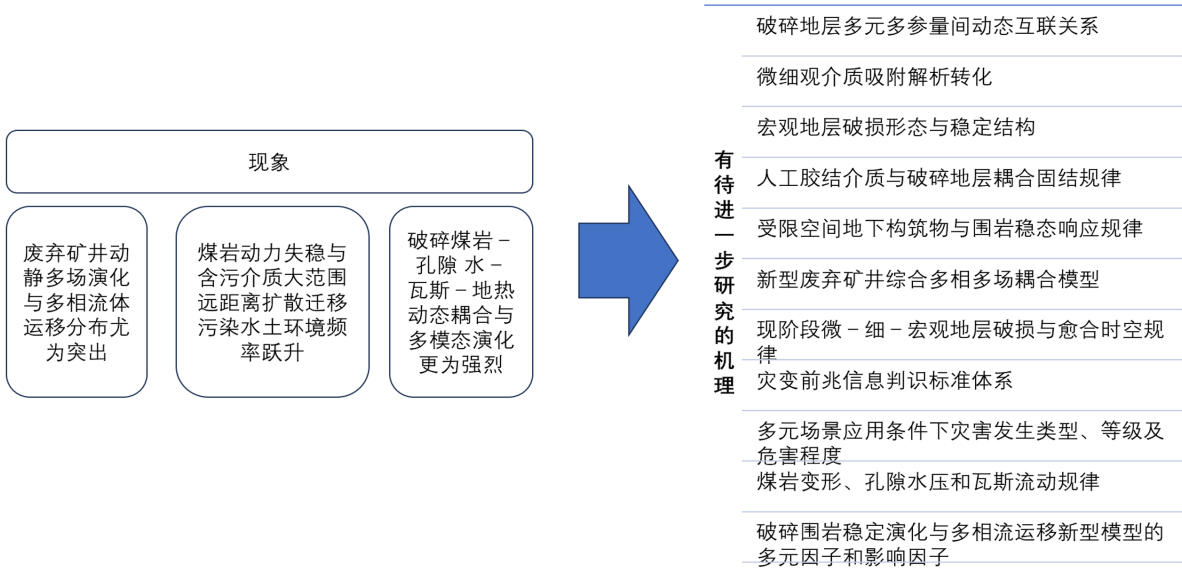


Figure 1. Overview of the catastrophic mechanism of abandoned mines
图 1. 废弃矿井灾变机制机理概述

4.2. CO₂ 封存的安全监测

废弃矿井 CO₂ 封存的安全性主要受地质体结构、地质灾害和工程扰动等多种因素的共同影响。由于矿井环境的特殊性，目前主要监测方法包括物理监测的压力监测、电磁性能监测、热导性能监测以及化学监测的 CO₂ 剩余饱和度监测等。何学秋等对目前主流的 CO₂ 封存监测装置与方法依据监测位置的不同进行了分类整理[25]，在其基础上，如下表 1 所示，将上述方法根据监测因素性质重新进行分类，可以分为物理监测、化学监测两大类，并对各方法的优缺点进行了阐述。这些方法被广泛系统地综合应用到实际监测过程中，以确保矿井煤层封存 CO₂ 的安全性与可靠性。

Table 1. Main methods for detecting CO₂ and their advantages and disadvantages [25] [26]
表 1. CO₂ 主要检测方法及其优缺点[25] [26]

监测因素	检测方法	检测内容	优缺点
物理监测	压力检测	封存蓄积层压力/上层渗透层压力	全流程监测、技术成熟
	电磁性能检测	地下水电导率/断层扫描	简便，但受穿透深度影响
	热导性能检测	水平测井温度分布	较好的稳定性、可靠性
	声学传感器	偶极声纳成像	适用少量的 CO ₂ 泄漏监测
	电动力势能检测	CO ₂ 剩余饱和度变化引起的自电位变化	技术未成熟
	长程开放路径红外探测和调制激光	给定长度路径上的 CO ₂ 的累积浓度	覆盖范围广，可自动连续测量，但技术不成熟

续表

	涡量相关监测	环境 CO ₂ 通量	自动操作、监测范围广，但受环境影响大、数据处理复杂
	集聚气室检测	土壤气体中 CO ₂ 的集聚速率	方法简单，对较小泄漏量精确，但易受环境影响、成本高
	激光雷达	激光探测大气，扫描封存区域	精度较高，但设备昂贵，仅能测量平均浓度
	示踪剂追踪监测	环境示踪气体泄漏	部分示踪剂存在潜在的环境风险，且经济性差
	测井微震	封存地质层扫描	直观输出图像，精度较高，但成本较高，无法实时监测
	超光谱成像检测	植被种群生长健康	可监测大范围的 CO ₂ 泄漏，但成本较昂贵，且技术尚不成熟
化学监测	CO ₂ 剩余饱和度	地质层 CO ₂ 剩余饱和度	可探测 CO ₂ 迁移变化情况
	pH 测量传感器	地下水 pH	稳定性较差，受温度压力影响
	生态系统/生物学监测	植被/微生物变化	具有时间滞后性
	地球化学效应监测	地下矿物质溶解，迁移和沉降变化	具有时间滞后性
	红外气体分析仪	大气 CO ₂ 浓度	检测精度高、响应速度快，不适用于大范围监测
	碳稳定同位素监测	大气碳光谱中同位素含量的变化	精度较高，但耗时长、成本较高，不适用大规模及实时监测
	氧气/二氧化碳	封存前后大气 O ₂ 、CO ₂ 浓度及 O ₂ /CO ₂	无法实时检测和测定泄漏量，受环境影响大
	无线传感器监测	大气表层 CO ₂ 浓度	技术不成熟

对上述多种方法的监测内容进行整理后发现，现有 CO₂ 封存安全监测方法以监测 CO₂ 泄漏及其环境影响为主，缺乏对地质体结构安全性的监测方法。当设备监测到 CO₂ 泄漏时，说明其封存的地质体结构已经发生了破坏，在时效性上明显滞后于监测地质体结构的方法。目前以废弃矿井进行 CO₂ 封存后地质体结构安全问题为方向的研究仍较少，为实现废弃矿井 CO₂ 封存全生命周期的安全监测预警，需要探究超临界 CO₂ 封存的安全监测原理，构建相关安全监测指标，针对进行封存的废弃矿井地质体结构进行监测。

煤矿 CO₂ 封存的安全技术主要有：煤层安全储碳机制及主控因素、煤层碳封存危害监测及安全评估技术、煤层碳封存全寿命安全检测及预警技术、煤层碳封存危机处理及紧急应对规范等四个领域。通过模拟还原超临界 CO₂、煤层气、煤体共同作用的多耦合过程[27]，阐明了超临界 CO₂ 高压下的煤储层以及盖面流变性损伤规律与突变失稳机制。运用先进地质雷达技术、三维断层扫描、电法勘探等现代信息技术，形成了具体的三维模式，对矿井煤体的安全性进行了监测评价。同时，运用现有煤矿动力灾害监测手段[28]，对煤层 CO₂ 进行监测预警，对矿井煤层可能发生的封存风险与危害进行数值模拟等手段，针对模拟结果做好应急处理。四方面相互依存、层层递进，共同构成全方位科学可靠的矿井 CO₂ 封存安全监测方法，提高国内现有的 CO₂ 封存效率，为废弃矿井碳封存的绿色化、商业化，实现碳中和目标保驾护航。

4.3. CO₂ 安全封存的风险分析

矿井 CO₂ 封存由超临界 CO₂、煤层气、煤体三者共同决定体系的安全状态。其安全性受多种地质因

素的影响,如地应力变化、地层水酸碱度变化。封存的 CO_2 其主要的存在形式为超临界流体,密度类似于液体,能大量保存,且具有能够迅速运移扩散的特性。由于其物理性质所具有的特殊性,容易导致泄漏发生的原因主要有:断层、裂隙泄漏、盖层泄漏、井泄漏、地层裂缝泄漏、地震等[29]。通过研究超临界 CO_2 作用下煤储层及盖层流变损伤规律和突变失稳机理,对可能发生的泄漏与地质构造、断层滑动、工程扰动、地震等对储存场地结构稳定性扰动风险进行分析模拟[30]。以期达到提前预测风险作出及时正确应对,降低风险所带来的损失。通过对国内外实例进行解剖、分析和对比之后,提出关于 CO_2 封存的评价指标和相对应的指标内涵,根据矿井 CO_2 安全封存工程的特点和要求,提出了分阶段、分层次的盖层封闭性能评价的建议,以此为基础建立风险识别标准、完善风险控制体系。

现阶段主流的 CO_2 地质封存安全风险评价技术及监测技术[31],封存监测重点以 CO_2 泄漏风险评价为主,分别在 CO_2 注入前、注入中和注入后三阶段进行监测。再利用定性、半定量和定量的风险评价方法对 CO_2 泄漏风险进行评价[32]。但在实际的应用中,这些评价方法的应用效果并不理想,仍需发现验证封存过程多元物理效应规律,采用更为准确具体的安全状态指标,据此建立多维具体的风险探测与分析体系。

5. 展望

将 CO_2 在废弃矿山中进行地质封存,目前的研究仍处于理论阶段,在理论层面上,废弃煤矿的地质条件、埋藏深度、温度、含水量等条件都能满足 CO_2 地质封存的需要。但由于长时间废弃,其内部的地质环境与各项指标都变得更为复杂,这在一定程度上可能会加快 CO_2 封存设备在封存环境中的腐蚀与损坏。同时,由于进行封存的 CO_2 处于超临界状态,这在一定程度上增加了封存过程中的不稳定性。温度、流速、压力等因素的变化,都有可能进一步加大其对封存设备的腐蚀作用,降低封存设备的使用寿命。需要增加监测设备保证设备的整体安全。

在废弃煤矿的安全问题上,由于废弃年限不等,废弃煤矿地质安全保障尚不成熟。对于废弃煤矿的安全问题并不能有统一的解决方案,因此在进行地质封存前需要对安全因素进行重新考量。多场耦合的灾变机理也有待进一步研究。

在对废弃矿山的 CO_2 封存的安全监测技术上,目前缺少对地质封存结构体稳定性的有效监测方法,目前主流的 CO_2 封存监测方法往往只能在 CO_2 泄漏后进行预警,无法从根源上对 CO_2 泄漏进行监测,在技术层面没有实现本质安全。

在风险评价方面,虽然很多学者对此进行了研究,但是在实际应用过程中,效果并不理想。需要采用更为准确具体的安全状态指标,据此建立多维具体的风险探测与分析体系。

6. 结论

本文详细探讨了废弃矿井的地质条件对 CO_2 封存的主控因素,包括埋藏深度、温度和含水量对 CO_2 封存效率的影响。研究表明,埋藏深度在 1500 米附近时,煤层裂隙的发育程度最适合 CO_2 封存;温度升高有助于提高封存效率,而含水量增加则会降低封存效果。此外,文章分析了超临界 CO_2 对封存设备的腐蚀作用,指出温度和压力是影响腐蚀速率的关键因素。

在安全问题方面,文章强调了废弃矿井在 CO_2 封存过程中面临的地质灾害威胁,如坍塌和地表塌陷,并提出了多种监测方法以确保 CO_2 封存的完好性,包括物理监测、化学监测两大类方法。同时,文章指出当前监测方法的局限性,特别是在地质体结构安全性监测方面的不足。

最后,文章展望了未来在废弃矿井 CO_2 封存研究的发展方向,包括设备腐蚀、地质结构安全保障和多场耦合灾变机理的研究。文章强调,需要采用更为准确具体的安全状态指标,建立多维具体的风险探测与分析体系,以提高 CO_2 封存的效率和安全性。

基金项目

华北理工大学大学生创新训练计划项目“废弃矿井 CO₂ 封存的全周期安全理论与技术方法研究”(X2023276)。

参考文献

- [1] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [2] 郑喜鹏, 马晨. 实现碳达峰、碳中和的措施建议——顶层设计[J]. 起重运输机械, 2024(21): 22-23.
- [3] 郭二果, 李长青. 我国低碳技术发展背景现状与趋势[J]. 北方经济, 2023(8): 39-43.
- [4] 薛博, 刘勇, 王沉, 等. 碳捕获、封存与利用技术及煤层封存 CO₂ 研究进展[J]. 化学世界, 2020, 61(4): 294-297.
- [5] 张洪涛, 文冬光, 李义连, 等. 中国 CO₂ 地质埋存条件分析及有关建议[J]. 地质通报, 2005, 24(12): 1107-1110.
- [6] 叶建平, 张 军, 韩学婷, 等. 深煤层井组 CO₂ 注入提高采收率关键参数模拟和实验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 149-155.
- [7] 袁亮. 推动我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用研究[J]. 煤炭经济研究, 2019, 39(5): 1.
- [8] Pan, Z., Ye, J., Zhou, F., Tan, Y., Connell, L.D. and Fan, J. (2017) CO₂ Storage in Coal to Enhance Coalbed Methane Recovery: A Review of Field Experiments in China. *International Geology Review*, **60**, 754-776. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1373607>
- [9] Gale, J. and Freund, P. (2001) Coal-Bed Methane Enhancement with CO₂ Sequestration Worldwide Potential. *Environmental Geosciences*, **8**, 210-217. <https://doi.org/10.1046/j.1526-0984.2001.008003210.x>
- [10] Mavor, M., Gunter, W. and Robinson, J. (2004) Alberta Multiwell Micro-Pilot Testing for CBM Properties, Enhanced Methane Recovery and CO₂ Storage Potential. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, 26-29 September 2004, SPE-90256-MS. <https://doi.org/10.2523/90256-ms>
- [11] 叶建平, 冯三利, 范志强, 等. 沁水盆地南部注二氧化碳提高煤层气采收率微型先导性试验研究[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 77-80.
- [12] 刘长江, 宋璠, 张琨. CO₂ 地质埋藏深度对高阶煤孔隙结构的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5): 32-36
- [13] 卜繁婷, 许天福, 王福刚, 等. 储层温度对 CO₂ 矿物封存的影响[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(1): 101-105.
- [14] 李晓龙. 深部煤层裂缝特征变化模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2023.
- [15] 杨术刚, 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.
- [16] 王翰文, 张力为, 梅开元, 等. CO₂ 地质利用与封存环境下钢材腐蚀行为与腐蚀控制措施研究进展[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 37-47.
- [17] Xiang, Y., Wang, Z., Li, Z. and Ni, W.D. (2013) Effect of Temperature on Corrosion Behaviour of X70 Steel in High Pressure CO₂/SO₂/O₂/H₂O Environments. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **48**, 121-129. <https://doi.org/10.1179/1743278212y.0000000050>
- [18] Zhang, Y., Pang, X., Qu, S., Li, X. and Gao, K. (2012) Discussion of the CO₂ Corrosion Mechanism between Low Partial Pressure and Supercritical Condition. *Corrosion Science*, **59**, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.006>
- [19] 高纯良, 李大朋, 张雷, 等. 流速对油管用 N80 钢 CO₂ 腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(12): 1090-1092, 1097.
- [20] 李岩岩, 刘丹, 朱光宇, 等. 超临界 CO₂ 环境中温度和流速对 N80 碳钢腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 35-41.
- [21] Schmitt, G.A. and Mueller, M. (1999) Critical Wall Shear Stresses in CO₂ Corrosion of Carbon Steel. *CORROSION* 99, San Antonio, 25-30 April 1999, NACE-99044.
- [22] 戴家生. 浙江废弃矿井现状调查及影响分析[J]. 现代矿业, 2020, 36(6): 216-219.
- [23] 袁亮, 姜耀东, 王凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 14-20.
- [24] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.
- [25] 何学秋, 田向辉, 宋大钊. 煤层 CO₂ 安全封存研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 212-219.
- [26] 王晓桥, 马登龙, 夏锋社, 等. 封储二氧化碳泄漏监测技术的研究进展[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 23-34.

-
- [27] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 不可采煤层 CO₂ 封存的数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(7): 83-90.
- [28] 何学秋, 窦林名, 牟宗龙, 等. 煤岩冲击动力灾害连续监测预警理论与技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1485-1491.
- [29] 丁洋, 陈文彬, 林海飞, 等. 煤矿采空区碳封存 CO₂ 泄漏地表扩散规律研究[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(4): 705-714.
- [30] 于恩毅, 邸元, 吴辉, 等. CO₂ 地质封存风险分析的多场耦合数值模拟技术综述[J]. 力学学报, 2023, 55(9): 2075-2090.
- [31] 李士伦, 汤勇, 段胜才, 等. CO₂ 地质封存源汇匹配及安全性评价进展[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(3): 269-279.
- [32] 王展鹏, 刘琦, 叶航, 等. CO₂ 地质封存泄漏监测技术研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(10): 69-81.