

煤层地下气化腔粉煤灰矿化封存CO₂研究

李鑫^{1,2}, 陈晨^{1,2*}, 马英瑞^{3,4}, 张山岭^{1,2}, 姜升^{1,2}, 程腾飞^{1,2}, 李宏达^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学深部探测与成像全国重点实验室, 吉林 长春 130026; 3. 中国石化胜利油田分公司技术检测中心, 山东 东营 257000; 4. 胜利石油管理局博士后科研工作站, 山东 东营 257000)

摘要:为应对全球碳排放与工业固废处理的双重挑战,本文提出一种基于煤层地下气化(UCG)废弃空腔与粉煤灰矿化封存相结合的“碳封存-固废处置-废弃空腔利用”三位一体工程方案。采用CMG-STARS软件构建三维三相五组分耦合模型,模拟粉煤灰浆体注入与CO₂注入过程中的热力学与矿化反应行为,重点分析不同CO₂注入速率对温度场演化及封存效率的影响。研究结果表明:提高CO₂注入速率可显著增强矿化反应强度与空间均匀性,将速率从20000 m³/d提升至60000 m³/d,相同总注入量的矿化封存效率提高约15%;注入的低温CO₂引起初期降温,但矿化放热效应逐步逆转该趋势,使温度最终稳定在250℃左右。本研究为发展“碳封存-固废处置-废弃空腔利用”三位一体的工程技术提供了理论依据与参数优化策略。

关键词:CO₂矿化封存;粉煤灰;碳封存;煤层地下气化腔;注入速率;固废利用;数值模拟

中图分类号:P634;X701 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)01-0031-06

Study on CO₂ sequestration via fly ash mineralization in underground coal gasification cavities

LI Xin^{1,2}, CHEN Chen^{1,2*}, MA Yingrui^{3,4}, ZHANG Shanling^{1,2}, JIANG Sheng^{1,2}, CHENG Tengfei^{1,2}, LI Hongda^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 3. Technical Inspection Center of Shengli Oilfield Branch, Sinopec, Dongying Shandong 257000, China; 4. Postdoctoral Scientific Research Station of Shengli Petroleum Administrative Bureau, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: To address the dual challenges of global carbon emissions and industrial solid waste disposal, this study proposes an integrated "carbon sequestration-solid waste disposal-abandoned cavity utilization" three-in-one engineering scheme. This scheme combines abandoned cavities from Underground Coal Gasification (UCG) with fly ash mineralization for CO₂ sequestration. Using CMG-STARS software, a 3D, three-phase, five-component coupled model was developed to simulate the thermodynamic and mineralization behaviors during the injection of fly ash slurry and CO₂. The study focused on the effects of different CO₂ injection rates on temperature field evolution and sequestration efficiency. The results indicate that increasing the CO₂ injection rate significantly enhances the intensity and spatial uniformity of the mineralization reaction. For the same total injection volume, increasing the rate from 20000 m³/d to 60000 m³/d improves the sequestration efficiency by approximately 15%. While the injection of low-temperature CO₂ initially causes a cooling effect, the exothermic nature of the mineralization reaction gradually reverses this trend, stabilizing the temperature at approximately 250 °C. This study provides a theoretical basis and parameter optimization strategies for the development of this integrated engineering technology.

Key words: CO₂ mineralization sequestration; fly ash; carbon sequestration; underground coal gasification cavity; injection rate; solid waste utilization; numerical simulation

收稿日期:2025-06-27; 修回日期:2025-09-12 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.01.005

基金项目:国家自然科学基金面上项目“热岩裸眼水平井采热周期内井壁力学行为及其对取热的影响”(编号:42272364)

第一作者:李鑫,男,汉族,2001年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为CO₂矿化封存,吉林省长春市西民主大街938号, xin_li23@mails.jlu.edu.cn。

通信作者:陈晨,男,汉族,1965年生,教授,博士生导师,地质工程专业,博士,从事岩土工程钻凿技术、基础工程设计、施工与计算机模拟研究及教学工作,吉林省长春市西民主大街938号, chenchen@jlu.edu.cn。

引用格式:李鑫,陈晨,马英瑞,等.煤层地下气化腔粉煤灰矿化封存CO₂研究[J].钻探工程,2026,53(1):31-36.

LI Xin, CHEN Chen, MA Yingrui, et al. Study on CO₂ sequestration via fly ash mineralization in underground coal gasification cavities [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1):31-36.

0 引言

工业革命以来,以化石能源为核心的能源体系推动了社会经济发展,但化石能源的燃烧导致了CO₂排放量急剧升高,带来一系列严峻挑战^[1]。化石能源燃烧产生的CO₂占温室气体总排放量的70%以上,由此引发的温室效应推动全球平均温度升高,导致极端气候事件频发、冰川加速消融及海洋酸化等环境危机^[2]。为应对这一全球性问题,我国出台《2030年前碳达峰行动方案》,将碳捕集、利用和封存(Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS)技术列为碳中和的关键路径^[3-4]。

CCUS技术通过捕集并封存CO₂,在碳中和过程中发挥关键作用。目前CO₂封存技术主要包括地质封存、海洋封存和矿化封存3种方式^[5]。海洋封存技术受限于深海高压环境,不仅实施成本高昂,且存在泄漏引发生态环境破坏的风险,工程应用范围受限;地质封存技术虽具备封存容量优势,但也面临着盖层完整性破坏或诱发微震活动等地质隐患^[6]。相比之下,矿化封存技术通过碱性固废与CO₂反应生成稳定的碳酸盐矿物,实现CO₂的永久封存,展现出显著优势。该技术由Seifritz^[7]首次提出,通过不断发展,其封存潜力已被广泛认可。这种基于化学反应的封存方式,生成的产物稳定、空间灵活、对封存空间要求低^[8],现已成为我国“双碳”战略目标的核心技术选择^[9]。

燃煤电厂排放的粉煤灰作为典型的工业固废,全球年产量超50亿t,相当大一部分被废弃,造成环境污染^[10-11]。粉煤灰中含有CaO、MgO等碱土金属氧化物^[12-13],可通过矿化封存技术实现CO₂永久封存。当前全球电力结构中仍以化石能源发电为主^[12],粉煤灰的持续产出在短期内难以缓解。与此同时,煤层地下气化(Underground Coal Gasification, UCG)作为煤炭资源的革新性原位转化工艺,通过化学反应将煤炭转化为合成气^[14-15],可减少传统开采带来的固废排放^[16]。然而,UCG技术形成的地下空间若未妥善处置,可能诱发地表沉降等地质灾害。相关研究表明,UCG在深部煤层能源开采中环境足迹低,其产生的巨大地下空腔是CO₂封存的有效载体。部分研究通过构建商业化尺度三维多空腔模型,利用专用模拟器模拟深部CO₂长期运移,为UCG空腔封存CO₂提供了数值模拟与理论支撑^[17]。另有研究通过耦合模型分析空腔形成过程中的热场与应力场变

化,明确停炉后空腔留存的残余热能对后续矿化反应的促进作用,同时结合不同地质条件下的模拟验证,证实注浆填充后的空腔可满足CO₂注入过程中的稳定性要求^[18]。这些成果共同为UCG空腔封存CO₂提供了数值模拟与理论支撑。基于此,本研究提出协同解决方案:将UCG技术产生的气化腔与CO₂封存技术相结合^[19-21],将粉煤灰制备的浆体注入气化腔,利用其空间与残余热能促进矿化反应,同时实现固废资源化利用与废弃空间处置,形成“碳封存-固废处置-废弃空腔利用”三位一体工程。其封存模式如图1所示^[22]。

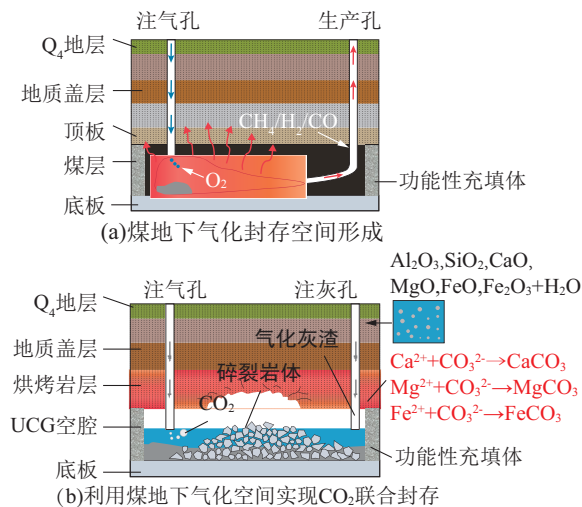


图1 煤地下气化空间CO₂封存模式示意^[22]

Fig.1 Schematic diagram of CO₂ sequestration model in post-UCG cavity

本研究基于多场耦合数值模拟技术,构建煤层地下气化腔的粉煤灰-CO₂协同封存动态模型。通过模拟CO₂不同注入速率下与粉煤灰浆体的相互作用,重点研究粉煤灰在气化腔内封存的可行性,和注气速率对矿化效率的调控效果。依托数值模拟技术,实现矿化反应进程的三维动态可视化。研究成果可为“碳封存-固废处置-废弃空腔利用”三位一体工程的场地选择及参数优化提供理论依据。

1 粉煤灰矿化封存CO₂模型

本文利用CMG-STARs软件,结合具体的地质条件,精准建立所需组分,并根据需要添加化学反应,以确保模型能够真实地反映粉煤灰封存CO₂的过程。经过前人研究,该软件模拟的有效性得到

了验证^[23]。

1.1 数学模型

1.1.1 质量守恒方程

对于三相多组分的煤层地下气化腔封存模型,各相的质量守恒:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \varphi S_w) = -\nabla(\rho_w V_w) + m_w + q_w \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varphi S_g) = -\nabla(\rho_g V_g) + m_g + q_g \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varphi S_s) = -m_s \quad (3)$$

式中: ρ_w 、 ρ_g 、 ρ_s ——水、气、粉煤灰的密度; φ ——介质孔隙度; S_w 、 S_g 、 S_s ——水、气、粉煤灰的饱和度; V_w 、 V_g ——水、气的体积流速; m_w 、 m_g 、 m_s ——单位时间单位体积内粉煤灰矿化转化成固体后气体和水降低的质量和粉煤灰增加的质量; q_w 、 q_g ——单位时间单位体积内注入的水、气质量。

1.1.2 能量守恒方程

模拟地层在不同的工况下储层的温度变化,其中能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_{\text{eff}}T) = \nabla(\lambda_{\text{eff}}\nabla T) + \nabla \cdot [V_w \rho_w V_w + V_g \rho_g V_g]T - n_s \Delta H_s + q_w C_w T + q_g C_g T \quad (4)$$

其中:

$$C_{\text{eff}} = (1 - \varphi) \rho_R C_R + \rho_w \varphi S_w C_w + \rho_g \varphi S_g C_g + \rho_s \varphi S_s C_s \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = (1 - \varphi) \lambda_R + \varphi S_w \lambda_w + \varphi S_g \lambda_g + \varphi S_s \lambda_s \quad (6)$$

式中: C_{eff} ——系统的比热容; λ_{eff} ——系统的导热系数; T ——流体温度; ρ_R ——岩石密度; C_R 、 C_w 、 C_g 、 C_s ——岩石、水、气、粉煤灰的比热容; λ_R 、 λ_w 、 λ_g 、 λ_s ——岩石、水、气、粉煤灰的导热系数; n_s ——单位时间单位体积内粉煤灰转化物质的量; ΔH_s ——每摩尔粉煤灰转化吸收的热量。

1.1.3 动力学方程

粉煤灰矿化封存CO₂的动力学方程涉及气-液-固多相反应,通常基于缩核模型或化学反应控制模型构建:

$$\frac{dX}{dt} = k_s(1 - X)^n C_{\text{CO}_2}^m \quad (7)$$

式中: X ——转化率; k_s ——表面反应速率常数; n ——反应级数; m ——CO₂温度依赖指数; C_{CO_2} ——

液相中CO₂浓度。

基础化学反应方程为:



式中:FA——初始粉煤灰;CFA——矿化后的粉煤灰。

1.2 模型构造和储层物性参数

在UCG过程中,煤层的持续燃烧导致空间扩展,最终形成规模巨大的地下空腔结构。基于以上过程,本研究聚焦气化腔内的粉煤灰-CO₂矿化封存研究,将复杂空腔简化为顶-底盖层约束的封闭地质模型,将复杂的地下空腔简化为一个位于上下盖层之间的规则的长方体。上下盖层均为实心岩层,整个模型四周均为封闭边界,与外界不存在质量和能量的交换,气化腔内初始压力设置为常压0.1 MPa。空腔区域初始为气体饱和。参考贵州某煤田UCG工程,建立三维笛卡尔网格储层模型,气化腔的长度和宽度均为250 m(x , y 坐标),厚度为10 m(z 坐标),上下盖层厚度为10 m,开展数值模拟研究。模型主要参数见表1。

表1 储层物性参数

Table 1 Petrophysical parameters of the reservoir

参 数	数 值
地层压力/MPa	0.1
储层深度/m	500
岩石导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	3
岩石比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	1000
储层初始温度/°C	900
初始含气饱和度	1
初始含水饱和度	0
岩石密度/(kg·m ⁻³)	3000

2 模拟结果和讨论

模拟过程分为2个部分,分别是注浆阶段和注气封存阶段,注浆阶段通过注入粉煤灰和水的混合物,研究注入过程中气化腔的温度变化。注气过程注入CO₂,通过改变注入速率,研究粉煤灰在气化腔内对CO₂封存的可行性和封存效果。

2.1 注浆过程动态规律分析

对于煤层地下气化腔的降温过程,本文通过上述模型,研究注入粉煤灰和水混合物的温度变化过程。煤层地下气化后的储层初始温度设为900 °C,通过注入液固比为10 mL/g的水和粉煤灰混合物,

注入浆体温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 注入速率为 $10000\text{ m}^3/\text{d}$, 注入时间为 60 d 。

2.1.1 储层物性空间分布规律

图2揭示了粉煤灰浆体注入过程中储层温度场的动态演化特征。在注浆初始阶段, 气化腔内介质以空气为主, 由于空气的比热容较低, 未接触浆体区域呈现降温趋势。随着浆体持续注入, 低温浆体与高温腔体环境发生热交换, 从而使气化腔内的温度逐渐下降。盖层因自身导热性能较弱, 热量从边界向高温区传递速度较慢, 导致盖层仍能维持较高温度, 而边界处直接与低温浆体接触, 温度下降显著。这种温度分布的差异性表明: 气化腔内的热量传递以浆体接触主导的换热为主, 而盖层受到热量传递和接触的耦合作用, 二者协同形成温度过渡带。

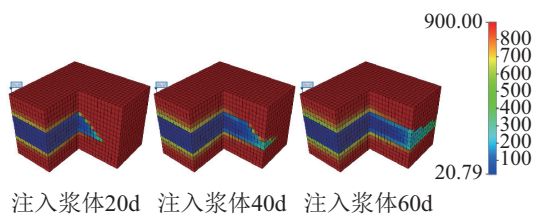


图2 温度变化示意

Fig.2 Temperature variation profile

2.1.2 注入动态分析

图3展示了注入粉煤灰和水形成的浆体的注入量, 每天的注入量为 10000 m^3 , 持续注入 60 d , 总计注入浆体 $6 \times 10^5\text{ m}^3$ 。模型的气化腔尺寸为 $250\text{ m} \times 250\text{ m} \times 10\text{ m}$, 总体积为 $6.25 \times 10^5\text{ m}^3$ 。根据计算, 浆体注入量与气化腔的体积较为匹配, 能够较好地满足模拟的初步要求。为了节约模型的计算资源, 后续假设整个气化腔被粉煤灰浆体所替代。

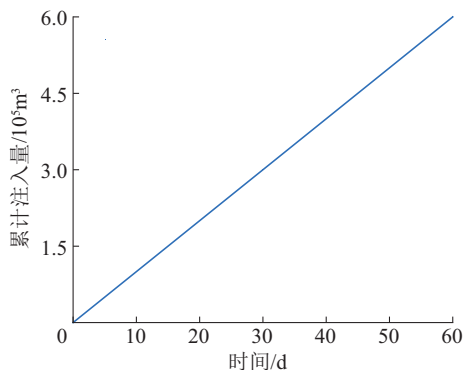


图3 浆体注入量示意

Fig.3 Slurry injection volume distribution schematic

2.2 注气封存过程动态规律分析

在注入浆体后, 接着在充满粉煤灰浆体的空间内部开始注入 CO_2 , 达到封存目的。通过模拟 CO_2 不同注入速率, 探究 CO_2 不同注入速率下粉煤灰在气化腔内的封存效果。为保证气化腔的稳定性、探究更快的封存效率和模拟研究的可行性, 模拟设置 CO_2 注入速率分别为 20000 、 40000 和 $60000\text{ m}^3/\text{d}$, 注入时间为 180 d 。

2.2.1 储层物性空间分布规律

图4揭示了 CO_2 不同注入速率对储层温度演化的调控机制。注气初期, 由于注入的 CO_2 温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 远低于气化腔温度, 气体在腔体内扩散过程中吸收大量热量, 导致储层局部区域温度迅速降至接近 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 CO_2 注入速率越高, 单位时间内进入腔体的低温气体越多, 热传导效应越强, 降温幅度更大, 影响范围也相应扩大。随着注气持续进行, CO_2 与粉煤灰浆体中的碱性氧化物发生矿化反应, 该过程为放热反应, 逐渐抵消并逆转初期的冷却效应, 使储层温度上升至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。注入速率越高, 单位时间内参与反应的 CO_2 量越大, 反应释放热量越多, 高温区域从反应锋面向周围逐步扩展。整个温度场演化过程揭示出气化腔内存在“低温 CO_2 注入引起的冷却效应”与“矿化放热引起的加热效应”两种机制, 为实际工程中通过优化注入策略实现热管理、维持反应稳定性及提升封存效率提供重要理论依据。

图5揭示了 CO_2 不同注入速率的封存效果。注气初期, CO_2 进入气化腔后迅速与注入点附近的粉煤灰发生矿化反应, 生成碳酸盐矿物并实现初步封存。随着 CO_2 向腔体内部扩散, 促使更多区域的粉煤灰参与矿化封存过程。然而, 受气化腔内浆体和气体运移路径的限制, 腔内部分区域的粉煤灰浆体未与 CO_2 充分接触, 从而降低了整体封存效率。随着注入速率提高, CO_2 的渗透能力和波及范围显著扩大, 有效减少了未反应区域的比例, 显著改善反应的空间均匀性。综上所述, 提高 CO_2 注入速率可增强气体在粉煤灰浆体中的运移能力, 扩大有效反应范围, 进而提升封存效率。该研究结果为优化现场注入工艺、实现高效矿化封存提供重要依据。

2.2.2 封存效果分析

对于粉煤灰矿化封存过程, 建立模型并进行数值模拟计算, 注入浆体后开始注入 CO_2 , 研究了不同 CO_2 注入速率的封存效果。

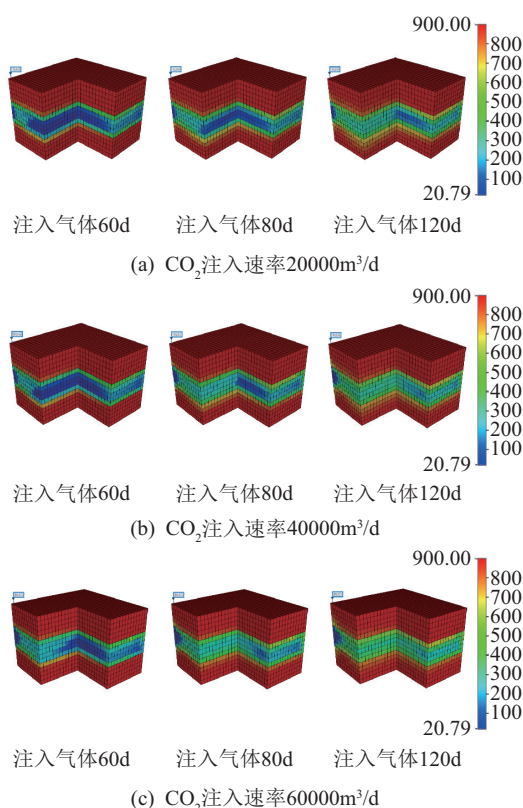


图4 温度变化示意

Fig.4 Temperature variation profile

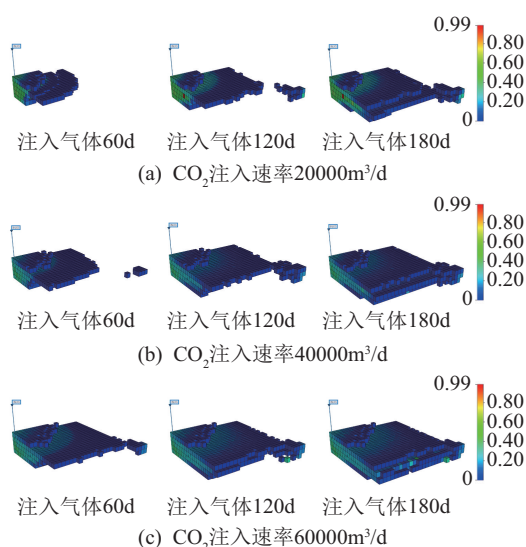


图5 封存生成固体示意

Fig.5 Spatial distribution diagram of mineralized solids formation

图6展示了不同CO₂注入速率对矿化封存效果的影响。设置60000、40000和20000 m³/d三种注入速率,模拟结果表明,随着时间增加,不同注入速率下的

累计矿化量均呈稳定上升趋势,但增速随注入速率提高表现出边际递减特征。在注入气体总量相同的条件下,将注入速率从20000 m³/d提升至60000 m³/d,矿化封存效率可提高约15%,说明注入速率对矿化效率具有积极影响。上述现象主要源于高注入速率对反应条件的优化作用:一方面,腔内压力升高增强了CO₂在粉煤灰浆体中的渗透与扩散能力;另一方面,高速流动的CO₂扩大了气-固接触面,增加了反应面积。模拟结果说明,在保证系统安全的前提下,适当提高CO₂注入速率可有效提升封存效率,为规模化碳封存工程的参数优化提供重要依据。

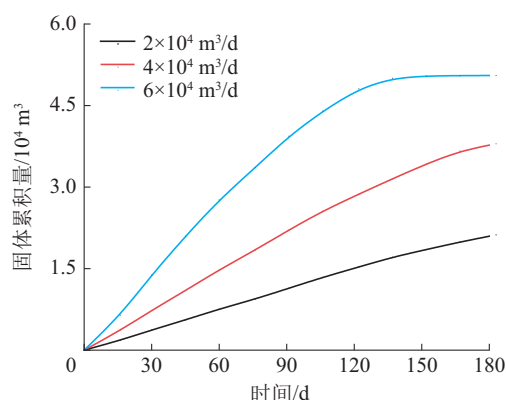


图6 固体累积量示意

Fig.6 Temporal evolution profile of mineralized solids volume

3 结论

本研究通过数值模拟软件,建立了三维三相五组分数值模型,先注入粉煤灰浆体填充煤层气化腔,再注入CO₂气体与粉煤灰进行反应,进而实现封存的目的,同时研究了不同的CO₂注入速率的影响,得到了如下结论。

(1)在气化腔中,粉煤灰可通过碳酸盐化反应固定CO₂,提高注气速率可扩大有效反应面积,促进CO₂在浆体中的渗透。在CO₂注入总量相同的条件下,较高注入速率可显著提升矿化反应强度,将注入速率从20000 m³/d提升至60000 m³/d,矿化封存效率提高约15%,且固定CO₂的量也随之提高。

(2)CO₂注入速率是调控封存过程中温度场演化的关键因素。20℃低温CO₂注入导致气化腔降温,而矿化放热随后主导温度场演化,使腔体趋于250℃左右。优化注入速率可有效平衡吸热与放热过程,为地下气化腔粉煤灰封存CO₂工程的热管理

设计提供重要依据。

(3)粉煤灰矿化封存CO₂过程受气化腔内多物理场协同调控,通过优化注入速率与利用残余热能可显著提升矿化反应效率及空间均匀性,为废弃地下空间的资源化利用提供关键技术路径。

参考文献(References):

- [1] 王利兵,张赞,郑伟,等.化石能源非能利用需求和碳排放研究[J].全球能源互联网,2023,6(6):577-587.
WANG Libing, ZHANG Yun, ZHENG Wei, et al. Research on demand and carbon emissions of non-energy use of fossil energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 577-587.
- [2] Li J J, Hitch M. Mechanical activation of magnesium silicates for mineral carbonation, a review [J]. Minerals Engineering, 2018, 128: 69-83.
- [3] Ho H J, Iizuka A, Shibata E, et al. Circular indirect carbonation of coal fly ash for carbon dioxide capture and utilization[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10(5): 108269.
- [4] 刘贵洲,方瑞瑞,窦立荣,等.中国CCS/CCUS发展瓶颈与应对策略[J].天然气与石油,2024,42(5):8-14.
LIU Guizhou, FANG Ruirui, DOU Lirong, et al. Bottlenecks and response strategies for the development of CCS/CCUS in China[J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(5): 8-14.
- [5] Orr F M Jr. Carbon capture, utilization, and storage: an update [J]. SPE Journal, 2018, 23(6): 2444-2455.
- [6] 李琦,蔡博峰,陈帆,等.二氧化碳地质封存的环境风险评估方法研究综述[J].环境工程,2019,37(2):13-21.
LI Qi, CAI Bofeng, CHEN Fan, et al. Review of environmental risk assessment methods for carbon dioxide geological storage [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(2): 13-21.
- [7] Seifritz W. CO₂ disposal by means of silicates[J]. Nature, 1990, 345(6275): 486-486.
- [8] 钟秀平,陈晨,郭威,等.“以废治废”的CO₂封存新思路-碱性固废固化于地下废弃空间[J].钻探工程,2023,50(S1):492-497.
ZHONG Xiuping, CHEN Chen, GUO Wei, et al. A new approach to CO₂ storage by "treating waste with waste": solidified in underground waste spaces using alkaline solid waste[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 492-497.
- [9] 周新媛,唐国强,赵连增,等.二氧化碳封存现状及经济性初探[J].油气与新能源,2022,34(6):20-28,49.
ZHOU Xinyuan, TANG Guoqiang, ZHAO Lianzeng, et al. Reality and economical analysis of carbon dioxide storage[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(6): 20-28, 49.
- [10] Xu G, Shi X M. Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: a state-of-the-art review [J]. Resources Conservation and Recycling, 2018, 136: 95-109.
- [11] Mohapatra R, Rao J R. Some aspects of characterisation, utilisation and environmental effects of fly ash [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2001, 76(1): 9-26.
- [12] Erdem H H, Akkaya A V, Cetin B, et al. Comparative energetic and exergetic performance analyses for coal-fired thermal power plants in Turkey [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(11): 2179-2186.
- [13] Xu M H, Yu D X, Yao H, et al. Coal combustion-generated aerosols: formation and properties [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1681-1697.
- [14] Burton E, Upadhye R, Friedmann S J. Best practices in underground coal gasification [R]. Oak Ridge: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2019.
- [15] 张明,王世鹏.国内外煤炭地下气化技术现状及新奥攻关进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):14-16.
ZHANG Ming, WANG Shipeng. Technical situation of underground coal gasification in China and abroad and the study progress of ENN [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(10): 14-16.
- [16] Mandal R, Kumar R, Ansari M S, et al. Underground coal gasification techniques for different geo-mining conditions [J]. International Journal of Oil Gas and Coal Technology, 2020, 23(2): 199-217.
- [17] Li L L, Fang H J, Ge T Z, et al. CO₂ sequestration in ucg cavities: research progress and future development trends [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(3): 732-743.
- [18] Jiang L L, Chen S S, Chen Y P, et al. Underground coal gasification modelling in deep coal seams and its implications to carbon storage in a climate-conscious world [J]. Fuel, 2023, 332(Part 2): 126016.
- [19] Sheng Y, Benderev A, Bukolska D, et al. Interdisciplinary studies on the technical and economic feasibility of deep underground coal gasification with CO₂ storage in bulgaria [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2016, 21(4): 595-627.
- [20] Klimenko A Y. Early ideas in underground coal gasification and their evolution [J]. Energies, 2009, 2(2): 456-476.
- [21] Friedmann S J, Upadhye R, Kong F M. Prospects for underground coal gasification in carbon-constrained world [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 4551-4557.
- [22] 王双明,申艳军,孙强,等.“双碳”目标下煤炭开采扰动空间CO₂地下封存途径与技术难题探索[J].煤炭学报,2022,47(1):45-60.
WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the "dual carbon" target [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 45-60.
- [23] 马英瑞,陈晨,刘祥,等.CO₂封存数值模拟研究——以西部某油田驱油为例[J].钻探工程,2023,50(S1):498-501.
MA Yingrui, CHEN Chen, LIU Xiang, et al. Numerical simulation study of CO₂ Sequestration: taking a western oil field as an example [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 498-501.

(编辑 王跃伟)