

中文引用格式:郝建峰,张家豪,孙维吉,等. CO₂-水-岩作用后储层力学损伤演化特征研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 141-150.

英文引用格式:HAO Jianfeng, ZHANG Jiahao, SUN Weiji, et al. Research progress on evolution characteristics of mechanical damage of reservoirs after CO₂-water-rock interaction [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 141-150.

CO₂-水-岩作用后储层力学损伤演化特征研究进展^{*}

郝建峰^{1,2}讲师, 张家豪^{**1}, 孙维吉³教授, 梁冰³教授, 秦冰³副教授, 郭春雨¹

(1 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123099; 2 矿山重大灾害防治与环境修复协同创新中心, 辽宁 阜新 123099; 3 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123099)

中图分类号:X936 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1636

基金项目:内蒙古自治区科技重大项目(2021ZD0034-2);国家自然科学基金资助(52074143);辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212410147066);矿山重大灾害防治与环境修复协同创新中心开放课题(CXZX-2024-13)。

【摘要】 为揭示 CO₂ 地质封存水-岩耦合作用机制,采用文献调研和理论分析方法介绍 CO₂-水-岩反应试验条件和方法、CO₂ 作用后储层物化特性、微观结构演化和力学性质劣化特征等,提出 CO₂-水-岩石多场耦合作用方面的关键问题,并总结分析每个关键问题的研究进展。结果表明:CO₂ 浸泡试验缺乏对不同相态及长期动态溶蚀作用的系统性研究,试验装置难以模拟 CO₂ 在真实储层内的运移特征;CO₂-水-岩反应沉淀生成-运移-粘附机制尚未明确,导致储层孔隙结构演化与力学性质劣化的关联性研究比较薄弱;储层微观结构与宏观力学参数的实质关系尚未建立,制约了多尺度损伤演化模型的构建;储层力学性质劣化模型未充分考虑热-流-固-化-损伤多场耦合作用。

【关键词】 CO₂ 地质封存; CO₂-水-岩; 力学性质; 损伤演化; 微观结构

Research progress on evolution characteristics of mechanical damage of reservoirs after CO₂-water-rock interaction

HAO Jianfeng^{1,2}, ZHANG Jiahao¹, SUN Weiji³, LIANG Bing³, QIN Bing³, GUO Chunyu¹

(1 College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123099, China; 2 Collaborative Innovation Center of Mine Major Disaster Prevention and Environmental Restoration, Fuxin Liaoning 123099, China; 3 School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123099, China)

Abstract: In order to reveal the water-rock coupling mechanism of CO₂ geological storage. This study employed literature research and theoretical analysis to introduce the experimental conditions and methods for CO₂-water-rock reactions, the physicochemical property changes of reservoirs after CO₂ action, the evolution of microstructure, and the deterioration characteristics of mechanical properties. Key issues regarding the multi-field coupling effects of CO₂-water-rock interactions were proposed, and the research progress on each key issue was summarized and analyzed. The results indicate that systematic research on the dissolution effects of CO₂ in different phases and under long-term dynamic conditions is lacking in CO₂ immersion tests. The experimental setups fail to accurately simulate the migration characteristics of CO₂ in

* 文章编号:1003-3033(2025)07-0141-10; 收稿日期:2025-03-14; 修稿日期:2025-05-18

** 通信作者:张家豪(2002—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为 CO₂ 地质封存。E-mail:15237939832@163.com。

real reservoirs. The mechanism governing the generation, transport, and adhesion of precipitates in CO_2 -water-rock reactions remains unclear. This leads to limited research on the correlation between pore structure evolution and mechanical property degradation in reservoirs. Furthermore, the substantive relationship between reservoir microstructure and macroscopic mechanical parameters has not yet been established, which hinders the development of multi-scale damage evolution models. Additionally, current models for reservoir mechanical property degradation do not fully account for the multi-field coupling effects of thermal-hydrological-mechanical-chemical-damage interactions.

Keywords: CO_2 geological storage; CO_2 -water-rock; mechanical properties; damage evolution; microstructure

0 引言

目前, CO_2 地质封存是减少温室气体排放、应对气候变化问题的关键技术。 CO_2 注入含水地层后与储层岩石作用,会经历非常复杂的流-固-热-化耦合作用过程,改变储层矿物组分、孔隙度、渗透率,引起储层微观结构损伤,进而导致力学性质劣化,破坏储层和盖层的稳定性^[1]。 CO_2 地质封存在理论研究和工程应用面临很多关键科学和技术问题,如 CO_2 地质封存多相流体与地质体的长期作用机制、储层微观结构损伤表征技术、多物理场耦合数值模拟系统构建以及长期封存力学稳定性评价等。研究 CO_2 -水-岩作用后储层力学性质劣化和损伤演化特征,对于揭示 CO_2 地质封存多场耦合作用机制,评价 CO_2 地质封存力学稳定性具有重要的意义。

针对 CO_2 -水-岩相互作用引起的储层力学性质劣化和损伤演化特征,国内外学者开展了大量的研究,尤其是关于不同相态 CO_2 浸泡试验和力学性质劣化规律的研究,取得了丰硕的研究成果。 CO_2 的温度和压力在 $31.1\text{ }^\circ\text{C}$ 、 7.38 MPa 下,物理性质介于气体和液体之间,既具有类似气体的扩散性和穿透性,又具有类似液体的溶解性和密度,简称超临界 CO_2 ^[2]。 CO_2 注入储层后主要涉及传质、溶解、溶蚀、沉淀生成、沉淀运移等过程,其中,溶蚀、沉淀作用改变岩石的孔隙结构,使得储层力学性质发生劣化^[3]。 CO_2 浸泡煤岩试样的一般方法是将试样放入高压反应釜中,加浸泡溶液,在特定温压下反应后取出,再测试溶液物化特性及试样力学参数,以表征其微观结构损伤。通过控制试验温度、压力、作用时间、煤岩试样类型及初始力学参数等模拟真实的封存环境。 CO_2 作用后通过单轴压缩试验、巴西劈裂试验、变角剪切试验、渗透率试验等多种手段,测试不同浸泡条件下岩石的抗压强度、泊松比、抗拉强度、弹性模量等力学参数,分析岩石主要力学性质变

化及破坏模式^[4]。再采用X射线衍射试验、拉曼光谱试验和傅里叶红外光谱试验等方法,分析 CO_2 作用后岩石矿物组分、微晶结构、官能团等有机质结构的变化特征;利用核磁共振技术、原子力显微镜和纳米压痕技术等先进表征技术,研究浸泡前后岩石孔隙结构、渗透率、分形维数的变化,探讨 CO_2 作用对岩石力学性质劣化的影响机制^[5]。然而,现有 CO_2 -水-岩反应试验多为常规浸泡,与 CO_2 地质封存环境差异大,仅简单分析储层参数和力学性质变化及微观结构演化,不足以准确揭示 CO_2 注入含水地层后的多物理场耦合机制。

鉴于此,笔者拟着重阐述 CO_2 浸泡试验方法、储层物性参数变化特征、储层力学性质劣化特征、储层损伤演化特征等方面的研究进展,深入分析目前研究存在的问题,提出在 CO_2 浸泡试验方法、沉淀生成表征、微观结构表征、力学性质劣化和损伤模型构建、多场耦合作用关系分析等方面亟需深入研究的关键科学问题。以期为 CO_2 地质封存体力学稳定性评价提供理论依据。

1 CO_2 -水-岩石反应试验研究

1.1 CO_2 -水-岩石反应试验方法

CO_2 浸泡煤岩试样的一般方法是将试样放入高压反应釜中,加入浸泡溶液,再注入 CO_2 直至其压力达到预定值,在特定温压下反应一段时间后取出。通过控制试验时间和 CO_2 相态,模拟实际储层条件,目前开展了各类岩石在不同浸泡溶液作用下的 CO_2 -水-岩石反应试验,测试浸泡后的物性和力学参数^[6-7],如图1所示。

现有试验研究大多是静态浸泡岩石试样,无法准确量化储层岩石在实际环境中的物理力学参数动态演变过程。在动态浸泡试验方面,安祺祎^[8]研制了一套超临界 CO_2 动态溶蚀试验系统,能够在 $400\text{ }^\circ\text{C}$

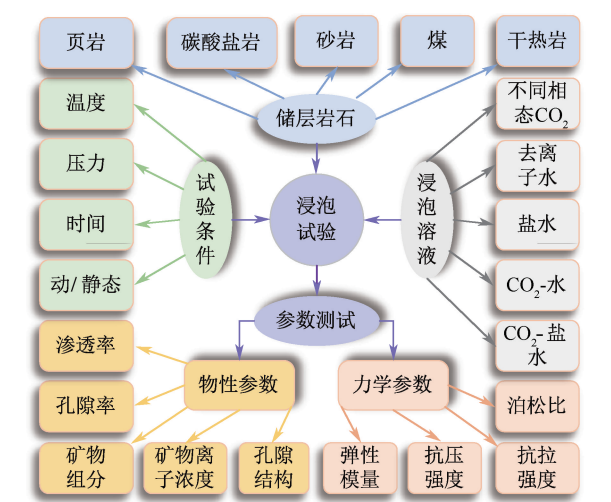


图 1 CO₂-水-岩石相互作用试验

Fig. 1 CO₂-water-rock interaction experiments

下保证搅拌功能,并提出超临界 CO₂ 对岩石溶蚀作用的加速试验方法。实际情况下超临界 CO₂ 在储层中是流动状态,然而关于超临界 CO₂ 动态溶蚀试验研究的成果非常少,也缺乏相应的试验设备。

不同相态 CO₂ 浸泡储层岩石后,通过单轴、三轴压缩试验和巴西劈裂试验测试岩石的脆性特征,采用先进技术表征宏观和微观参数。普遍使用的宏观和微观参数表征技术见表 1。

表 1 CO₂-水-岩石相互作用试验宏观和微观参数表征技术

Table 1 CO ₂ -water-rock interaction experiments for macroscopic and microscopic parameter characterization		
测试内容	表征技术	关键参数
微观结构和力学性质 ^[9-10]	纳米 CT 技术	孔隙结构
	原子力显微镜	有机质的黏附力 黏土的黏附力
	聚焦离子束显微镜	岩石层理定位
	超声波	弹性参数
	纳米压痕技术	微观力学性质
	核磁共振技术	微观结构
	表面物性测试技术	矿物元素及氧化物
	扫描电镜	矿物组分
	X 射线荧光光谱仪	
宏观力学性质 ^[11-12]	X 射线衍射仪	
	单轴压缩试验	弹性模量、泊松比、
	三轴压缩试验	抗压强度
宏观渗流特性 ^[13]	巴西劈裂试验	抗拉强度
	压汞试验	孔隙率
溶液物性参数 ^[14]	多场耦合渗流试验	渗透率
	离子检测盒	矿物离子浓度
	pH 计	溶液 pH 值

1.2 CO₂-水-岩石反应试验结果

1.2.1 反应溶液 pH 值的变化

注入到储层中的 CO₂ 溶于地层水,会形成液相 CO₂,再生成碳酸,部分碳酸分解成碳酸氢根(HCO₃⁻)和氢离子(H⁺),一部分分解成氢离子(H⁺)和碳酸根(CO₃²⁻)。可见:CO₂ 注入储层会使地层水 pH 值降低。影响 CO₂ 在地层水中溶解度的因素主要有含水层盐度、地层温度、孔隙压力等^[15]。PAN Yi^[16]、ILGEN^[17] 等研究了不同温压条件下,CO₂ 在不同溶液中的溶解度,发现 CO₂ 溶解度随温度和盐水浓度增大而减小,随压力的增大而增大,CO₂ 在纯水中的溶解度大于盐水;BANDO 等^[18] 得到了不同温度、压力和盐水浓度影响下 CO₂ 的溶解度方程;DARWISH 等^[19] 在上述模型的基础上推导出 CO₂ 在盐水中的溶解度模型。超临界 CO₂ 注入后,地层水的 pH 值一般变化特征是快速减小后缓慢上升。

1.2.2 储层物化特性

储层的物理特性是指储层岩石和流体的宏观和微观结构特征,以及与流体流动和储存相关的力学性质,主要包括孔隙度、渗透率、饱和度、力学性质等;储层的化学特性是指储层岩石和流体的化学成分及其在化学反应中的行为,主要包括矿物组成、化学反应性等。注入到储层中的 CO₂ 溶于地层水,溶解后的 CO₂ 在酸性条件下会与储层矿物发生反应,导致矿物溶解改变岩石的物化特性和力学性质,并将 CO₂ 储存在含水层中,这一过程可能会持续上千年,注入到储层中的 CO₂ 大约 90% 以固体沉淀物的形式被捕集。肖娜等^[20]、魏国^[21]、刘漪雯^[22] 等发现,CO₂-水溶液对岩石具有溶蚀作用,溶蚀作用使得优势渗流通道变大,提高了流体的渗流能力,CO₂-水交替注入有助于提高储层渗流能力。安祺祎^[8] 通过试验揭示了不同矿物组成与含量的岩石在超临界 CO₂ 作用下的动态溶蚀机制。总体上,反应压力越高,溶蚀现象越明显,反应溶液中的矿物离子和 HCO₃⁻ 浓度越高;反应温度越高,溶蚀作用越容易达到平衡状态,矿物离子浓度先增大后减小。李曜轩等^[23] 研究了超临界 CO₂ 浸泡后页岩的力学特征和孔隙度变化,得到了孔隙度和页岩力学特性的关系。

在溶蚀作用的初期,CO₂-水-岩相互作用会通过矿物溶蚀作用增大岩石的渗透率和孔隙度^[24],但随后次生矿物逐渐沉淀迁移也可能堵塞孔喉,导致渗透率和孔隙度下降,这一变化主要受到岩石的物

化特性、地层条件以及注入压力^[25-26]等因素的影响。

1.2.3 储层微观结构及力学性能演化特征

储层微观结构是指储层岩石在微观尺度上的组成、形态和分布特征,包括矿物颗粒、孔隙、裂缝、胶结物和流体等,是储层物理性质和力学性质的基础,直接影响流体的储存和运移能力。YIN Hong 等^[27]发现页岩-超临界 CO₂ 反应对孔隙形态和介孔的影响有限,但对微孔隙的影响非常显著,比表面积和微孔数量急剧减少,而平均孔径增大,孔隙结构的形态逐渐由复杂向规则转变。超临界 CO₂ 会溶解页岩中的有机质和部分无机矿物质,但不会改变页岩表面官能团的化学性质,也不会显著影响其微观孔隙的形态结构。

储层的微观结构还影响 CO₂ 的溶解和矿化过程。矿物溶解增加孔隙度和渗透率,削弱岩石骨架强度;碳酸腐蚀颗粒表面,削弱颗粒间黏结力,也会降低岩石强度从而导致微裂缝产生和扩展。长期矿化作用下储层微观结构产生损伤,进而导致力学性能劣化。李曜轩^[23]、LI Ning^[28]、白冰^[29]、李一波^[30]等采用不同试验方法,系统研究了超临界 CO₂ 作用对页岩微观结构和力学性质的影响。纳米尺度下,超临界 CO₂ 浸泡后的页岩硬度、弹性模量和断裂韧性降低,孔隙度显著提高且最高增幅将近 4 倍,孔隙度与弹性模量、泊松比、抗压强度呈二次多项式关系;随着浸泡压力、温度、时间的增加,页岩表面微观力学性的劣化程度加剧。鄢嘉琳等^[31]根据 X-射线衍射试验,揭示了 CO₂ 作用对砂岩微观成分的影响特征,浸泡后长石类、方解石矿物发生溶解,改变砂岩的主要矿物成分结构。根据核磁共振试验,揭示了 CO₂ 作用对砂岩孔隙结构的影响特征,浸泡后砂岩微孔体积显著降低,介孔体积略微增加,大孔体积显著增大后略微减小。曾梦茹^[32]认为,超临界 CO₂ 对煤体的作用整体上表现为增孔扩孔,随着温度升高,其对煤中矿物溶蚀能力先增强再减弱,其萃取作用导致变质程度高的煤芳香环缩聚程度整体降低,溶蚀反应很大程度上决定了煤样的过渡孔和微孔的发育程度。

2 CO₂-水-岩石作用后储层力学性质劣化特征

2.1 储层力学性质劣化特征

2.1.1 抗压强度劣化特征

在物理化学作用过程中,岩石的抗压强度会显

著降低。GUO Xing 等^[33]进行了超临界 CO₂ 浸泡页岩试验,发现浸泡开始时页岩轻微膨胀,浸泡后收缩,单轴抗压强度随着浸泡压力的增大而减小,弹性模量和泊松比增大,并建立了不同载荷和浸泡压力下的单轴抗压强度模型。CO₂ 达到超临界状态前后性质的变化导致其对页岩力学性质的影响与浸泡压力不成正比,而是达到超临界状态后保持稳定。

白冰^[29]发现,超临界 CO₂ 浸泡前后,页岩抗压强度随层理倾角增加呈现先降低后增加的趋势,整体而言抗压强度降低。ZHOU Zhe 等^[34]通过单轴压缩试验得出在超临界 CO₂ 的影响下,煤岩的强度和弹性模量的平均降低率为 25.27% 和 16.57%。杨术刚等^[24]揭示了 CO₂-水-岩相互作用会对岩石力学性能产生弱化效应,归因于以下几个方面:①矿物溶解与再沉淀过程削弱了岩石的胶结强度;②溶蚀孔隙的形成造成岩石内部结构损伤;③伴生裂纹的发育加剧力学性质劣化;④黏土矿物遇水后的膨胀或收缩行为改变岩石的力学响应特征。除了超临界 CO₂ 本身与岩石反应导致岩石强度劣化外,岩石强度的劣化还可能受到温度、孔隙度等多种条件的影响。温度升高会降低岩石的脆性,增加其黏性,从而导致抗压强度降低;岩石孔隙度越大,抗压强度通常越低;孔隙中的水分会改变岩石的物理状态,削弱颗粒间的连结力,降低岩石的强度。

2.1.2 弹性模量劣化特征

弹性模量越大,表示材料抵抗弹性变形的能力越强,弹性模量和抗压强度之间存在正相关关系。黄应华^[35]研究表明:经超临界 CO₂ 饱和处理后,页岩抗拉强度降低 25.93%;在含水饱和条件下,页岩强度进一步弱化,损伤作用更加明显;与常规认识不同的是,超临界 CO₂ 作用会提高 LMX 页岩的弹性模量。王奇生^[36]利用原子力显微镜与纳米压痕技术,探究了超临界 CO₂ 对页岩各组分力学特性的影响。在超临界 CO₂ 的作用下,有机质、黏土矿物和石英的弹性模量显著提升,方解石和黄铁矿则降低。总体上研究区域弹性模量增大 4.90%,且弹性模量和硬度正相关性增强。白冰^[29]发现未经超临界 CO₂ 浸泡时,页岩弹性模量随层理倾角增大而增大;浸泡后页岩弹性模量增大,但随着倾角增加弹性模量呈现降低趋势。LI Ning 等^[28]采用高温高压均热装置进行了浸泡试验,分析了浸泡时间、压力和温度对页岩微观力学参数的影响。结果表明:水/超临界 CO₂-岩石相互作用对页岩的破坏主要表现为在重黏土层系中小孔径诱导裂缝的产生,导致弹性模量

和抗压强度的平均值下降。温度对页岩的力学性质也有一定影响,当浸泡温度从 60 ℃ 提高到 100 ℃,页岩的弹性模量从 60.55 GPa 降低到 49.57 GPa,分别比原始页岩低 8.7% 和 25.2%。

2.1.3 泊松比劣化特征

泊松比的变化反映了岩石在化学反应后的体积变化,例如:在溶蚀作用下,岩石的体积可能会减小,从而导致泊松比的变化。丁璐等^[37]进行了超临界 CO₂ 浸泡试验,发现在超临界 CO₂ 浸泡条件下,随着时间增加,页岩的泊松比降低。左罗^[38]、鄢嘉琳^[31]等开展了三轴压缩试验,深入研究了 CO₂ 作用对砂岩力学性质的影响机制,发现滑溜水、超临界 CO₂ 和液态 CO₂ 浸泡基本不会改变页岩的矿物组成。随着 CO₂ 浸泡时间的延长,砂岩的杨氏模量和泊松比呈现下降趋势,其中,泊松比和杨氏模量与浸泡温度展现出最好的相关性;随着 CO₂ 浸泡温度的升高,砂岩杨氏模量和抗压强度降低,而泊松比相对稳定。GUO Xing^[33]、白冰^[29]等研究了超临界 CO₂ 浸泡压力对页岩力学性质影响,结果显示:随着浸泡压力的升高,泊松比增加;达到超临界压力时,页岩的力学性质急剧波动;未经浸泡时,页岩泊松比随层理倾角增加而增大;浸泡后泊松比增大,并随着倾角增加呈现增大趋势。

储层岩石泊松比劣化受浸泡溶液、时间、压力、温度、岩石物理性质和层理等多种条件因素的影响,甚至不同的加载方式也会影响岩石的泊松比。在三轴压缩试验中,围压限制岩石的侧向变形,可能导致其泊松比相对于单轴压缩时有所降低。

2.1.4 抗拉强度劣化特征

抗拉强度是评估 CO₂ 注入后岩石破裂压力和裂纹扩展的重要参数。田时锋等^[39]研究了不同时间超临界 CO₂ 作用下干湿页岩的抗拉强度、劈裂模量和破坏特征的变化。超临界 CO₂ 作用会显著降低页岩的抗拉强度和破裂模量,页岩抗拉强度和劈裂模量的变化与其微孔孔隙度的演变呈正相关关系。汤积仁^[40]、白冰^[29]等发现页岩抗拉强度在超临界 CO₂ 作用过程中呈现明显的劣化趋势。随着浸泡压力、温度和作用时间的增加,抗拉强度逐渐降低。经过长期浸泡后,巴西劈裂试验显示,垂直层理页岩的破裂形貌从最初复杂网状裂纹逐渐演化为单一的竖直径向裂纹。左罗等^[38]发现不同溶液浸泡后很可能会增大矿物颗粒之间的孔隙。页岩整体上表现出脆性增强特征,其中,滑溜水对抗拉强度的弱化程度最大,液态 CO₂ 次之,超临界 CO₂ 弱化程度

最小。

2.2 储层力学性质劣化机制

CO₂ 注入到含水岩层中,会先与水发生相互作用,形成碳酸(H₂CO₃)。这个反应降低了水的 pH 值,使其变为微酸性环境,在这种微酸性环境中,CO₂ 更容易溶解到水中,并随着水在岩石孔隙中的流动而扩散^[41]。这些反应将岩石中不同类别的部分矿物转化为碳酸盐矿物,某些矿物可能会因为溶解度的降低而析出沉淀,形成新的矿物相,这些新形成的矿物相可能会影响岩石的孔隙结构和渗透性^[42],进而改变储层的力学性质。此外,不同相态的 CO₂ 注入后,储层吸附 CO₂ 产生膨胀应变,孔隙压力直接作用于储层,反应过程中释放的热量也会影响储层的应力环境,从而改变有效应力。不同相态 CO₂ 浸泡页岩试验研究结果表明:次临界 CO₂ 浸泡后页岩力学性质劣化主要是页岩吸附 CO₂ 产生的差异性膨胀引起次生微裂纹扩展导致的^[43],同时,页岩对 CO₂ 的吸附作用引发内部膨胀应力和页岩中有机质及部分矿物产生溶解效应,进而导致页岩力学性质劣化^[44]。经超临界 CO₂ 浸泡处理后,岩石强度降低,说明超临界 CO₂ 具有较强的渗透能力,进入岩石内部造成岩石膨胀,促进原有裂纹延伸,导致岩石力学性能弱化^[45]。这种性质为将超临界 CO₂ 用于钻完井技术、水力压裂技术等奠定了基础,可在利用超临界 CO₂ 的同时实现 CO₂ 地质封存。

不同相态 CO₂ 注入储层后,溶解/溶蚀现象、微观结构变化、物性参数变化、力学性质劣化等引起了储层损伤演化。HAO Jianfeng 等^[46]进行了超临界 CO₂ 浸泡粉砂岩试验,发现超临界 CO₂ 能与粉砂岩石中的矿物质发生化学反应,生成可溶性碳酸盐,引起粉砂岩结构中的矿物溶解,岩层内孔隙压力增大,进而使岩石内部产生新裂纹或拓展原有微裂纹。结合单轴抗压强度随反应时间的变化特征,得到超临界 CO₂ 作用后粉砂岩的单轴抗压强度预测模型。根据 Lemaitre 的应变等效性假说,建立了考虑超临界 CO₂ 浸泡时间效应的岩石损伤演化模型:

$$E_t = E_0 \times \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{\alpha} \right)^m \right] \quad (1)$$

$$E_t = E_0 \times \exp \left[- (0.1497 \exp(0.013t))^{0.16 \exp \left(\frac{-0.79}{t+18} \right)} \right] \quad (2)$$

式中: E_t 为浸泡后岩石的弹性模量,MPa; E_0 为浸泡前岩石的弹性模量,MPa; ε 为应变; α 为适用于岩石

损伤的 Weibull 分布函数尺度参数,代表了岩石在损伤过程中失效应力的集中趋势, α 越大,岩石抵抗损伤的能力越强; m 为适用于岩石损伤的 Weibull 分布函数形状参数,反映了岩石的强度, m 越小,岩石越容易发生损伤; t 为超临界 CO_2 浸泡天数。

3 CO_2 -水-岩石作用后储层岩石的损伤演化特征

在 CO_2 的作用下,岩石内部结构与孔隙会发生损伤,一般表现为比表面积和微孔数量急剧下降,而平均孔径增大。 CO_2 作用后,储层岩石损伤演化特征还体现在其力学性质与变形指标改变,主要表现为抗压强度和弹性模量损伤。其中,抗压强度显著降低,弹性模量则逐渐降低。刘力源等^[47]发现, CO_2 由亚临界向超临界状态相变过程中煤样力学性质劣化程度更显著,煤样的单轴抗压强度和弹性模量服从双重损伤演化准则,弹性模量劣化幅度大于单轴抗压强度的劣化幅度,煤样力学性质由脆性向塑性或延性转变。

肖畅等^[48]认为,超临界 CO_2 作用后煤体微观结构会发生变化,结合声发射试验得到了不同浸泡时间下煤样声发射累计数,根据损伤变量与声发射累计数的关系,建立基于超临界 CO_2 浸泡不同时间下煤体的损伤模型:

$$v_t = - \frac{\sigma_y \varepsilon_x N_m}{E_0 A \exp(-Bt + C)} \tag{3}$$

式中: v_t 为泊松比; σ_y 为轴向应力,Pa; ε_x 为径向应变; N_m 为初始试样完全破坏时的声发射累计数; A 、 B 、 C 为拟合参数,其中, B 的单位为 $1/d$ 。

贾毅超等^[49]研究了超临界 CO_2 对无烟煤力学强度和微观结构的影响,建立了超临界 CO_2 浸泡条件下无烟煤宏观强度损伤的数学模型:

$$\tau = c + \sigma_i^e \tan \varphi = c + \left[\sigma_i - \phi p - \frac{2apRT(1 - 2\mu) \ln(1 + bp)}{3V_0} \right] \tan \varphi \tag{4}$$

式中: τ 为抗剪强度,MPa; c 为黏聚力,MPa; σ_i^e 为有效应力,Pa; φ 为内摩擦角, $(^\circ)$; σ_i 为外部应力,Pa; ϕ 为触点孔隙度,取值 $0 \sim 1$; p 为孔隙压力,Pa; a 为在参考压力下的极限吸附量, m^3/t ; ρ 为煤体视密度, t/m^3 ; R 为通用气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度,K; μ 为煤体泊松比; b 为煤的吸附平衡常数, Pa^{-1} ; V_0 为摩尔容积, $V_0 = 22.4$

m^3/mol 。

学者们针对 CO_2 -水-岩石相互作用机制及其引起的力学性质劣化和损伤特征开展了深入研究;现有成果仅得到力学参数的变化特征,未建立普遍适用的 CO_2 作用后储层力学性质劣化和损伤演化模型;仍需完善储层微观结构和力学参数表征方法,建立微观力学参数和宏观力学参数的量化关系,准确描述 CO_2 地质封存多场耦合作用关系。因此,关于 CO_2 -水-岩多场耦合作用机制亟需解决的关键科学问题,如图 2 所示。

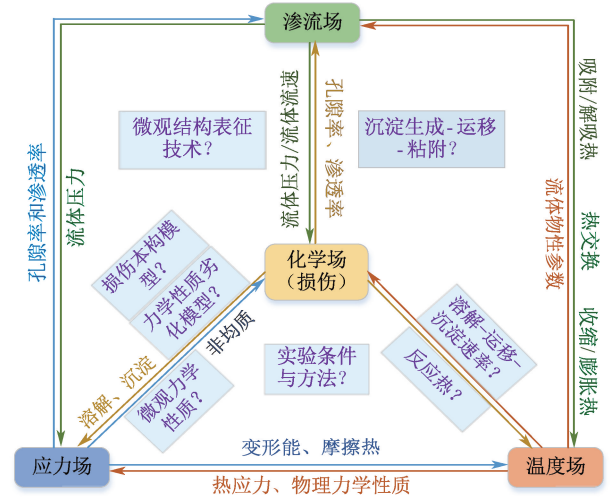


图 2 CO_2 -水-岩多场耦合作用关键科学问题

Fig. 2 Key scientific issues of CO_2 -water-rock multi-field coupling

4 研究不足和展望

目前, CO_2 -水-岩作用后储层力学损伤演化特征研究已经在储层物化特性、力学性质劣化特性及损伤模型构建等方面给取得了一定的成果,研究中存在的不足分析如下:

1) CO_2 浸泡储层岩石试验条件和方法。在参数设置上,浸泡时间较短,难以反映长期矿化效应; CO_2 和试样是相对静止状态,忽略了动态溶蚀引起的损伤效应。在试验装置方面,温度控制系统精度不足,反应釜结构简单,难以模拟动态溶蚀过程。在样品选择上,试验多采用均质岩心,未从倾角、各向异性参数、孔渗特性、地层构造等方面考虑储层发育特征。 CO_2 地质封存过程中矿化作用长期存在,当前浸泡试验与实际工程偏差大,无法精准描述超临界 CO_2 对岩石的作用机制。

2) 沉淀生成-运移-黏附机制。目前研究未明确沉淀物在溶液中的运移-黏附特征对储层微观结

构的影响,在沉淀生成机制、运移-黏附特征及其对储层微观结构演化特征的影响机制等方面存在不足。

3) 储层微观结构和力学表征。关于 CO₂ 作用后储层岩石微观力学表征的研究成果较少,各种方法的表征结果没有统一起来形成系统的表征技术。微观力学参数表征是研究宏观机制的基础,期待能够建立微观力学参数和宏观力学参数的实质关系。

4) 储层力学性质劣化和损伤模型。目前仅分析了各力学参数的变化,并未建立具有普适性的储层力学性质劣化和损伤模型。

5) CO₂ 地质封存多物理场耦合作用关系。现阶段重点研究了应力场、渗流场和化学场的耦合作用,忽略了反应过程中引起的温度变化对溶解-溶蚀-沉淀过程、微观结构演化和有效应力的影响,尚未揭示 CO₂ 地质封存过程应力场、渗流场、化学场和温度场耦合作用机制。

综上所述,未来的研究中,在试验方法方面,应开发高温高压大尺寸动态溶蚀试验装置,突破现有静态浸泡试验的局限,深入研究动态溶蚀作用机制,同时应开展不同相态 CO₂ 长时间作用储层岩石的试验研究,并充分考虑含水层厚度、倾角及各向异性等关键参数的影响;作用机理研究方面,需深入探究沉淀物生成机理及其在岩石表面的粘附规律,阐明其对储层孔隙度和渗透率演化的影响机制,同时需整合多种微观结构和力学性质表征手段,建立系统的表征方法体系,构建微观力学参数与宏观力学参

数的定量关系;数值模拟方面,应基于大量试验数据,结合理论分析方法,建立具有普适性的储层力学性质劣化和损伤演化模型,揭示 CO₂ 地质封存过程热-流-固-化耦合作用机制,构建多场耦合模型,并开发能够求解 CO₂ 地质封存热-流-固-化-损伤全耦合模型的大型数值模拟软件。这些研究将为深入理解 CO₂-水-岩相互作用机理,评估 CO₂ 地质封存工程的长期安全性提供重要科学依据。

5 结 论

1) CO₂ 注入储层后会引发复杂的热-流-固-化-损伤耦合作用,显著改变了储层岩石的矿物组成和孔隙结构,导致其力学性能劣化。

2) 储层岩石力学性质劣化程度与 CO₂ 相态、浸泡压力、温度及时间呈非线性关系。超临界 CO₂ 因其高扩散性与强渗透性,对岩石力学性质的劣化效应更为显著,导致矿物胶结强度削弱、孔隙内部结构损伤、伴生裂纹扩展及黏土矿物膨胀等。

3) 微观尺度上,矿物溶解和沉淀改变了岩石孔隙结构和界面特性;细观尺度上,微裂纹萌生和扩展降低了岩石结构完整性;宏观尺度上,弹性模量、泊松比、抗压强度及抗拉强度等力学参数显著劣化;多尺度损伤机制共同影响储层和盖层的稳定性。

4) CO₂ 地质封存水-岩耦合作用机制中 CO₂ 浸泡试验方法、沉淀生成和运移表征、微观结构表征、力学性质劣化和损伤模型构建、多场耦合作用关系分析等方面是未来重要的研究方向。

参 考 文 献

- [1] EYITAYO S, ARBAD N, OKERRE C, et al. Advancing geological storage of carbon dioxide (CO₂) with emerging technologies for climate change mitigation[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 22(6): 1-34.
- [2] 罗凡, 蒋岳峰, 甘蓉, 等. 超临界二氧化碳流量测量方法研究[J]. 中国测试, 2024, 50(1): 62-68.
LUO Fan, JANG Yuefeng, GAN Rong, et al. Study on supercritical carbon dioxide flux measurement method[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(1): 62-68.
- [3] 张烈辉, 张涛, 赵玉龙, 等. 二氧化碳-水-岩作用机理及微观模拟方法研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(1): 199-211.
ZHANG Liehui, ZHANG Tao, ZHAO Yulong, et al. Research progress on the mechanism of carbon dioxide-water-rock interaction and microscopic simulation methods[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 199-211.
- [4] 李秋和. 超临界 CO₂ 作用下砂岩力学特性与渗透性试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
LI Qiuhe. Experimental study on mechanical properties and permeability of sandstone under supercritical CO₂ action[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [5] 苏二磊. 超临界 CO₂ 作用下烟煤结构响应及对力学和渗透特性的影响机理[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.

- SU Erlei. Structural response of bituminous coal under supercritical CO₂ and its influence mechanism on mechanical and permeability characteristics[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [6] LYU Qiao, LONG Xinping, RANJITH G P, et al. Unconventional gas: experimental study of the influence of subcritical carbon dioxide on the mechanical properties of black shale[J]. *Energies*, 2016, 9(7): DOI:10.3390/en9070516.
- [7] LYU Qiao, LONG Xinping, RANJITH P G, et al. Experimental investigation on the mechanical properties of a low-clay shale with different adsorption times in sub-/super-critical CO₂[J]. *Energy*, 2018, 147: 1 288–1 298.
- [8] 安祺祎. 超临界二氧化碳对干热岩储层岩石动态溶蚀机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- AN Qiyi. Study on the dynamic dissolution mechanism of supercritical carbon dioxide on hot dry rock reservoirs[D]. Ji'nan: Shandong University, 2022.
- [9] YIN Hong, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, et al. Experimental study of the effects of sub- and super-critical CO₂ saturation on the mechanical characteristics of organic-rich shales[J]. *Energy*, 2017, 132: 84–95.
- [10] AMERI W A, ABDULRAHEEM A, MAHMOUD M, et al. Long-term effects of CO₂ sequestration on rock mechanical properties[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2016, 138(1): DOI:10.1115/1.4032011.
- [11] FENG Gan, KANG Yong, SUN Zedong, et al. Effects of supercritical CO₂ adsorption on the mechanical characteristics and failure mechanisms of shale[J]. *Energy*, 2019, 173: 870–882.
- [12] SOON C C, JOON J S. Swelling and mechanical property change of shale and sandstone in supercritical CO₂[J]. *Journal of Korean Society For Rock Mechanics*, 2012, 22(4): 266–275.
- [13] ZOU Yushi, LI Sihai, MA Xinfang, et al. Effects of CO₂-brine-rock interaction on porosity/permeability and mechanical properties during supercritical-CO₂ fracturing in shale reservoirs[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 49: 157–168.
- [14] ZHANG Shuwen, XIAN Xuefu, ZHANG Junping, et al. Mechanical behaviour of Longmaxi black shale saturated with different fluids: an experimental study[J]. *RSC Advances*, 2017, 7: 42 946–42 955.
- [15] 陈逸云, 冯涛, 喻红艳, 等. CO₂-水-页岩相互作用的研究现状及展望[J]. *广州化学*, 2020, 45(2): 53–63.
- CHEN Yiyun, FENG Tao, YU Hongyan, et al. Research status and prospect of CO₂-water-shale interaction[J]. *Guangzhou Chemical*, 2020, 45(2): 53–63.
- [16] PAN Yi, HUI Dong, LUO Pingya, et al. Experimental investigation of the geochemical interactions between supercritical CO₂ and shale: implications for CO₂ storage in gas-bearing shale formations[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(2): 1 963–1 978.
- [17] ILGEN A, AMAN M, ESPINOZA D, et al. Shale-brine-CO₂ interactions and the long-term stability of carbonate-rich shale caprock[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 78: 244–253.
- [18] BANDO S, TAKEMURA F, NISHIO M, et al. Dissolution process of a spherical rising supercritical or liquid CO₂ droplet in water[J]. *Greenhouse Gas Control Technologies*, 2003, 2(1): 1 511–1 516.
- [19] DARWISH N, HILAL N. A simple model for the prediction of CO₂ solubility in H₂O-NaCl system at geological sequestration conditions[J]. *Desalination*, 2010, 260(1): 114–118.
- [20] 肖娜, 李实, 林梅钦. CO₂-水-方解石相互作用后岩石表面观形貌及渗透率变化特征[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(24): 38–44.
- XIAO Na, LI Shi, LIN Meiqin. Characteristics of apparent morphology and permeability of rocks after CO₂-water-calcite interaction[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(24): 38–44.
- [21] 魏国. CO₂-水-岩反应对储层矿物转化及孔隙度的影响[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- WEI Guo. Effect of CO₂-water-rock reaction on mineral transformation and porosity of reservoir[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [22] 刘漪雯, 付美龙, 王长权, 等. CO₂ 驱不同注入方式对低渗透储层渗流能力的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(2): 79–85.
- LIU Yiwenn, FU Meilong, WANG Changquan, et al. Effect of different injection modes of CO₂ flooding on the seepage capacity of low permeability reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(2): 79–85.
- [23] 李曜轩, 张艳, 王兴义, 等. 超临界二氧化碳压裂作用下页岩的力学特征与孔隙度变化规律研究[J]. *当代化工*, 2020, 49(4): 572–576.
- LI Yaoyuan, ZHANG Yan, WANG Xingyi, et al. Study on the mechanical characteristics and porosity variation of shale

- under supercritical carbon dioxide fracturing[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(4): 572-576.
- [24] 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.
- YANG Shugang, CAI Mingyu, ZHANG Kunfeng, et al. Research progress and prospect of CO₂-water-rock interaction on petrophysical properties of CO₂ geological sequestration[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(6): 80-91.
- [25] PLUYMAKERS A, LIU J, KOHLER F, et al. A high resolution interferometric method to measure local swelling due to CO₂ exposure in coal and shale[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 187: 131-142.
- [26] AO Xiang, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Investigation on the physics structure and chemical properties of the shale treated by supercritical CO₂[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2017, 20: 274-281.
- [27] YIN Hong, ZHOU Junping, JIANG Yongdong, et al. Physical and structural changes in shale associated with supercritical CO₂ exposure[J]. Fuel, 2016, 184: 289-303.
- [28] LI Ning, JIN Zhijun, ZHANG Shicheng, et al. Micro-mechanical properties of shale due to water/supercritical carbon dioxide-rock interaction[J]. Petroleum Exploration and Development Online, 2023, 50(4): 1 001-1 012.
- [29] 白冰. 超临界二氧化碳对页岩力学性质影响的实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- BAI Bing. Experimental study of the effect of supercritical carbon dioxide on the mechanical properties of shale[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2019.
- [30] 李一波, 陈耀旺, 赵金洲, 等. 超临界二氧化碳与页岩相互作用机制[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1 180-1 194.
- LI Yibo, CHEN Yaowang, ZHAO Jinzhou, et al. Interaction mechanism between supercritical carbon dioxide and shale[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1 180-1 194.
- [31] 郎嘉琳. 二氧化碳作用后致密砂岩力学性质变化特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- YUN Jialin. Study on the change characteristics of mechanical properties of tight sandstone after carbon dioxide action[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.
- [32] 曾梦茹. 不同温度超临界 CO₂ 条件下煤微观结构特征及改造机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- ZENG Mengru. Study on the microstructure characteristics and transformation mechanism of coal under supercritical CO₂ conditions at different temperatures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [33] GUO Xing, NI Hongjian, LI Mukun, et al. Experimental study on the influence of supercritical carbon dioxide soaking pressure on the mechanical properties of shale[J]. Indian Geotechnical Journal, 2018, 48(2): 384-391.
- [34] ZHOU Zhe, SHENG Meiyu, GE Zhaolong, et al. Mechanical properties and failure characteristics of supercritical carbon dioxide soak in water-bearing coal rocks[J]. Energy, 2024, 286: DOI:10.1016/J.ENERGY.2023.129599.
- [35] 黄应华. 超临界 CO₂ 作用对页岩动静态力学性质影响研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- HUANG Yinghua. Study on the influence of supercritical CO₂ on dynamic and static mechanical properties of shale[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [36] 王奇生. 超临界二氧化碳对页岩物性影响的微观实验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- WANG Qisheng. Microscopic experimental study of the effect of supercritical carbon dioxide on the physical properties of shale[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [37] 丁璐, 倪红坚. 超临界二氧化碳浸泡对页岩力学性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(30): 122-127.
- DING Lu, NI Hongjian. Effect of supercritical carbon dioxide immersion on mechanical properties of shale[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 122-127.
- [38] 左罗, 仲冠宇, 蒋廷学, 等. 页岩微观结构及力学特征变化规律研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版, 2022, 44(5): 125-134.
- ZUO Luo, ZHONG Guanyu, JIANG Tingxue, et al. Study on the change law of shale microstructure and mechanical characteristics[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition, 2022, 44(5): 125-134.
- [39] 田时锋, 周军平, 鲜学福, 等. 超临界 CO₂ 作用下页岩抗拉强度的变化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2 728-2 736.
- TIAN Shifeng, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, et al. Variation of tensile strength of shale under supercritical CO₂[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2 728-2 736.

- [40] 汤积仁, 卢义玉, 陈钰婷, 等. 超临界 CO_2 作用下页岩力学特性损伤的试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 797–802.
- TANG Jiren, LU Yiyu, CHEN Yuting, et al. Experimental study on the damage of mechanical properties of shale under supercritical CO_2 [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(3): 797–802.
- [41] 吴潇, 刘润昌. CO_2 作用下碳酸盐岩物性及孔喉结构变化特征[J]. 油气藏评价与开发: 1–10. [2024–09–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1825.TE.20240911.2055.002.html>.
- WU Xiao, LIU Runchang. Characteristics of carbonate rock physical properties and pore throat structure under CO_2 action[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development: 1–10. [2024–09–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1825.TE.20240911.2055.002.html>.
- [42] HOSSEIN S, REZA A K, MOHSEN M. Experimental investigation of the effects of oil asphaltene content on CO_2 foam stability in the presence of nanoparticles and sodium dodecyl sulfate[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(1): 239–250.
- [43] 王开喜. 静/动态压力的超临界 CO_2 及相关流体作用下页岩的力学特性研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
- WANG Kaixi. Study on the mechanical properties of shale under supercritical CO_2 and related fluids under static/dynamic pressure[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [44] CHAE-SOON C, JINEON K, JAE-JOON S. Analysis of shale property changes after geochemical interaction under CO_2 sequestration conditions[J]. Energy, 2021, 214: DOI:10.1016/j.energy.2020.118933.
- [45] 王海涛, 左罗, 郭印同, 等. 二氧化碳对页岩力学性质劣化规律的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12 536–12 542.
- WANG Haitao, ZUO Luo, GUO Yintong, et al. Effect of carbon dioxide on the deterioration of shale mechanical properties[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12 536–12 542.
- [46] HAO Jianfeng, GUO Chunyu, SUN Weiji, et al. Study on the deterioration and damage evolution characteristics of mechanical properties of siltstone after supercritical CO_2 treatment[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2024, 89: DOI: 10.1016/J.JCOU.2024.102972.
- [47] 刘力源, 马文成, 王卫东. 超临界 CO_2 吸附诱发煤力学性质劣化的双重损伤效应分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2020, 39(4): 79–86.
- LIU Liyuan, MA Wencheng, WANG Weidong. Analysis of the double damage effect of supercritical CO_2 adsorption induced deterioration of coal mechanical properties[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2020, 39(4): 79–86.
- [48] 肖畅, 王开, 张小强, 等. 超临界 CO_2 作用后无烟煤力学损伤演化特性及机理[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2 340–2 351.
- XIAO Chang, WANG Kai, ZHANG Xiaoqiang, et al. Mechanical damage evolution characteristics and mechanism of anthracite after supercritical CO_2 action[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2 340–2 351.
- [49] 贾毅超, 杨栋, 黄旭东, 等. 超临界 CO_2 对无烟煤力学强度劣化机制及其微观结构演变特征[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 323–336.
- JIA Yichao, YANG Dong, HUANG Xudong, et al. Mechanism of mechanical strength deterioration of anthracite by supercritical CO_2 and its microstructure evolution characteristics[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 323–336.



作者简介: 郝建峰 (1991—),男,陕西神木人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事瓦斯灾害防治、 CO_2 地质封存理论与技术方面的研究。E-mail:haojf0417@163.com。