

废弃采空区边界煤柱浸水结构演化与损伤劣化机理的模拟试验

徐智敏^{1,2}, 熊世杰¹, 袁慧卿¹, 孙亚军^{1,2}, 韩宇航¹, 陈天赐¹, 卢伟宁^{1,3}

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 矿山水害防治技术基础研究国家级专业中心实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 在煤矿生产过程中, 为防止老空水害而留设的各类防隔水煤柱在废弃采空区蓄积的具有侵蚀性的矿井水长期带压浸水作用下, 其宏观、细观结构不断发生变化并出现损伤劣化现象, 导致煤柱的物理力学强度减小、稳定性降低, 进而诱发煤柱失稳和突水事故的发生。论文通过自主设计的高压矿井水-煤耦合作用试验装置, 开展了煤柱试样在不同水压、模拟矿井水、原样矿井水等条件下的长期浸泡模拟试验, 并采用计算机断层扫描(CT)、X射线衍射(XRD)以及高压伺服压缩试验加载系统等手段, 分析并研究了煤样长期浸水条件下的结构演化与力学损伤劣化过程和作用机理。研究结果表明: 煤样结构在侵蚀性矿井水长期浸泡条件下表现为不规则孔隙-裂隙显著发育、孔隙率由0.25%增大到1.2%、孔隙发育的离散性随浸泡时间逐步降低; 煤样在侵蚀溶液长期浸泡条件下的力学损伤劣化效应明显, 受浸泡时间和浸泡液的pH值影响最为明显; 煤样与矿井水在浸泡过程中产生相互作用, 具体体现为初期的吸水膨胀作用与后期的溶解消耗作用。根据上述研究成果, 论文阐明了废弃矿井及采空区各类边界煤柱在高渗透压、侵蚀性矿井水长期作用下结构演化与损伤劣化的物理-化学耦合作用机理, 揭示了废弃采空区边界煤柱带压浸水作用下的动态响应过程与关键阶段: 第一阶段以物理吸水膨胀作用为主, 表现为抗压强度整体减小而抗拉强度先降低后回升再降低的现象; 第二阶段以物理-化学联合作用为主, 表现为粘土类矿物部分溶解、消耗导致孔隙率增大, 进而诱发物理力学损伤劣化; 最后, 论文在“软化系数”的基础上提出了浸水煤柱“损伤系数”的定义和计算公式, 并确定了浸水煤柱“损伤系数”的经验值。论文的研究结果对各类废弃矿井或采空区边界煤柱的稳定性评价和水害的防控具有重要的理论意义和工程实践价值。

关键词: 废弃矿井; 煤柱浸水损伤; CT扫描; 结构演化; 损伤机理; 模拟试验

中图分类号: TD745 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)02-1094-15

Simulation experiment on the structural evolution and damage-deterioration mechanism of boundary coal pillars under immersion in abandoned mines

XU Zhimin^{1,2}, XIONG Shijie¹, YUAN Huiqing¹, SUN Yajun^{1,2}, HAN Yuhang¹, CHEN Tianci¹, LU Weineng^{1,3}

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Fundamental Research Laboratory for Mine Water Hazards Prevention and Controlling Technology, Xuzhou 221116, China; 3. China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: In coal mine production, water-proof coal pillars are reserved to prevent water hazards from old goaf areas.

收稿日期: 2024-11-30 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 黄小雨 DOI: [10.13225/j.cnki.jecs.XH24.1496](https://doi.org/10.13225/j.cnki.jecs.XH24.1496)

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(42172272)资助。

作者简介: 徐智敏(1981—), 男, 四川简阳人, 博士/教授、博士生导师。E-mail: xuzhimin@cumt.edu.cn

引用格式: 徐智敏, 熊世杰, 袁慧卿, 等. 废弃采空区边界煤柱浸水结构演化与损伤劣化机理的模拟试验[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1094-1108.

XU Zhimin, XIONG Shijie, YUAN Huiqing, et al. Simulation experiment on the structural evolution and damage-deterioration mechanism of boundary coal pillars under immersion in abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1094-1108.



移动阅读

However, under long-term pressurized immersion of aggressive mine water accumulated in abandoned goaf areas, both macroscopic and mesoscopic structures of these coal pillars undergo continuous changes, leading to damage and deterioration. This results in reduced physical and mechanical strength, decreased stability, and ultimately instability and water inrush accidents. A self-designed high-pressure mine water-coal coupling test apparatus is used to simulate long-term immersion of coal pillar samples under different water pressures, simulated mine water, and original mine water conditions. Techniques such as computerized tomography (CT), X-ray diffraction (XRD), and a high-pressure servo-controlled compression testing system are employed to analyze structural evolution and mechanical damage degradation processes and mechanisms of coal samples under prolonged immersion. Results indicate that, under long-term immersion in aggressive mine water, coal sample structures exhibit significant irregular pore-fracture development, with porosity increasing from 0.25% to 1.2%, and the dispersion of pore development gradually decreases over time. Mechanical damage degradation effects are pronounced under long-term immersion in aggressive solutions, with immersion time and solution pH identified as the most influential factors. Mutual interaction occurs between coal samples and mine water during immersion, characterized by initial water absorption and swelling followed by dissolution and consumption in later stages. The physical-chemical coupling mechanism of structural evolution and damage degradation in boundary coal pillars of abandoned mines and goaf areas under high permeation pressure and long-term exposure to aggressive mine water is elucidated. The dynamic response process and key stages of coal pillars under pressurized immersion are revealed: the first stage is dominated by physical water absorption and swelling, resulting in an overall decrease in compressive strength and a fluctuating trend in tensile strength (initial decrease, followed by recovery and subsequent decline); the second stage is characterized by combined physical-chemical effects, where partial dissolution and depletion of clay minerals lead to increased porosity, thereby inducing physical and mechanical damage degradation. Based on the concept of the softening coefficient, the definition and calculation formula for the damage coefficient of immersed coal pillars are proposed, and empirical values for this coefficient are determined. Significant theoretical insights and practical engineering value are provided for evaluating the stability of boundary coal pillars in abandoned mines or goaf areas and for preventing and controlling water-related hazards.

Key words: abandoned mines; coal pillar immersion damage; CT scan; structural evolution; damage mechanism; simulation test

0 引言

煤炭作为我国主体能源,在经济和社会的高速发展过程中发挥了不可替代的保障作用^[1, 2]。然而,随着资源逐渐枯竭以及国家去产能政策的实施,大量煤矿关闭,形成了数量庞大的废弃矿井^[3]。截至2023年底^[4],全国煤矿数量已减少至约4300处,而根据《煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见》,到“十四五”末,全国煤矿数量将进一步控制在4000处以内^[5]。通常,在煤矿关闭过程中或废弃矿井周边仍存有大量生产中的煤矿。这些废弃矿井不仅对区域地下水系统造成重大影响,还对邻近生产的煤矿构成了潜在的突水威胁^[6-7]。在煤矿生产过程中,为防止废弃矿井水患事故发生而留设的各类防隔水煤柱,在采空区积水后,长期受到具有侵蚀性矿井水的带压浸水作用,其宏观和微观结构不断发生变化并出现损伤劣化现象^[8-9]。这种劣化过程导致煤柱的物理力学强度显著降低、稳定性下降,进而诱发煤柱失稳和突水事故的发生。

近年来,水-煤(岩)相互作用的研究在煤炭、岩土工程、地质灾害等领域受到广泛关注。相关研究涉及煤岩浸泡条件下的孔隙结构变化^[10-11]、细微观形态演化^[12, 13]、力学性能劣化^[14-17]以及多场耦合效应^[18-20]等多个方面。在地下水领域,围绕矿井水侵蚀作用下煤岩体的物理化学性质演化与力学性能劣化机制开展了大量研究。这些研究主要聚焦于废弃采空区积水对边界煤柱的侵蚀效应^[11, 21]、长期浸泡条件下煤样结构损伤劣化过程^[22-23],以及酸性矿井水与煤中矿物反应引发的力学强度变化等问题^[24-25]。

废弃采空区形成的垮落带和裂隙带构成了重要的地下水连通通道,这些通道在宏观上表现为采空区的垮落带和裂隙带,而在细观上则体现为煤岩体内部的微裂隙和孔隙。这些介质条件决定了矿井水或地下水的赋存空间和运移路径,是影响煤柱稳定性的关键因素之一^[26-30]。水力环境的改变使得具有侵蚀性的矿井水在高渗透压作用下逐渐侵入煤柱,进一步加剧了煤柱的结构损伤和力学性能劣化,最终可能导致

突水致灾事故的发生。目前针对矿井废弃空间的介质条件、水流状态以及积水水位抬升后对边界煤岩柱侵蚀性破坏的定量研究成果是面临的众多挑战之一。

基于上述背景,依托笔者承担的国家自然科学基金面上项目,选取位于华北型石炭-二叠系煤田较为典型的徐州矿区 A 煤矿主采煤层的煤样和矿井水样,开展带压浸水模拟试验。通过室内试验、分析测试和理论分析等方法,全面解析煤样在长期浸水条件下的结构演化与力学损伤劣化过程,并阐明其物理、化学作用机理。同时,本文定义并提出了煤柱“损伤系数”,用于定量表征煤样抗拉强度的损伤劣化程度,为各类边界防隔水煤柱浸水“损伤”的定量评价提供理论支持和参数计算依据。研究成果可为煤矿防治水工作留设边界煤柱提供参考,同时也为进一步优化试验方案和尺度转换奠定基础。

1 样品制备与模拟试验

1.1 样品采集与制备

本文试验所需的煤样与矿井水样均取自 A 煤矿(图 1a)。为减小试验煤样的原始离散性,所有煤块均采自主采的 9#煤层。采样过程中,选取没有明显裂隙或节理等构造的大块煤样,按照 ISRM 标准^[31],使用取芯机和切割机将块状煤样加工成圆柱体标准煤样,



(a) 水样、煤样采集

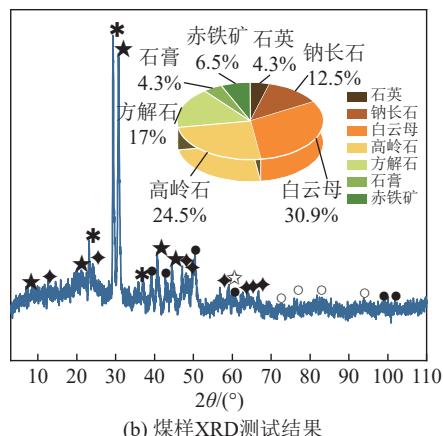


图 1 样品采集制备与测试

Fig.1 Samples collection, preparation and testing

用打磨机将煤样两端磨平,端面不平行度小于 0.02 mm。获得的 $\phi 50 \times 100$ mm 的标准柱状煤样用于单轴压缩破坏试验,获得的 $\phi 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的标准柱状煤样用于巴西劈裂试验。

为获取样品中的矿物分布情况,对煤样进行了 X 射线衍射测试(XRD)。XRD 测得低温灰样品中的主要矿物成分为石英、钠长石、方解石。初始煤样中的矿物组成为石英 4.3%、钠长石 12.5%、白云母 30.9%、高岭石 24.5%、方解石 17%、石膏 4.3%、赤铁矿 6.5% 等(图 1b)。

1.2 浸泡试验方案

通过 A 煤矿井下东翼某废弃采空区积水取样分析,该矿废弃采空区矿井水(以下简称“原样矿井水”)的 pH 值=5.8。同时,为了对照研究酸性矿井水对煤样的侵蚀性影响,本次浸泡试验在上述原样矿井水的基础上模拟配置了 pH=3.0 的“模拟矿井水”作为极端样本,并选取 pH=7.0 的去离子水作为参照样本。

分别采用原样矿井水、去离子水以及模拟矿井水在未加压与加压 0.8 MPa 两种条件下按 1:10 的水岩比对煤样进行为期 150d 的浸泡试验,以模拟不同侵蚀性的水溶液长时间对防隔水煤柱造成的损伤效应。试验共制备了 6 组试样,其中包括原始干燥煤样,以及浸泡 5、10、20、45、90 d 以及 150 d 时的煤样,每个试验组包含 3 个平行样品,模拟试验方案详见表 1。为了全面评估浸水作用对煤样性能的影响程度,对每组煤样分别进行了单轴压缩试验和巴西劈裂试验,以测试浸水煤样的力学性能变化,对不同浸水时长的煤样进行了矿物组成测定,并且分析了浸泡水样的水化学变化特征。

表 1 煤样浸水模拟试验方案设计表

Table 1 Coal samples soaking simulation test scheme table

组别	浸泡压力/MPa	浸泡溶液	pH值
1		原样矿井水	pH=5.8
2	0	去离子水	pH=7.0
3		模拟矿井水	pH=3.0
4		原样矿井水	pH=5.8
5	0.8	去离子水	pH=7.0
6		模拟矿井水	pH=3.0

1.3 模拟试验装置

为满足煤样多因素浸水渗流破坏试验的需求,本课题组设计并构建了一种高压矿井水-煤(岩)耦合试验装置(图 2b),该装置能够模拟煤岩样本在酸蚀和带压条件下的渗流破坏过程。通过引入不同化学成分

和 pH 值的矿井水，并控制施加的压力及浸没时间，装置能够复现不同地质条件下煤岩柱的渗流破坏特性。该装置的核心组成部分包括压力监测系统、承压罐体和压力加载装置，其中压力监测系统负责整个试验过

程的控制。该装置可通过增压系统和压力监测系统实时调整和监控罐体内的压力变化，实现良好的密封效果，确保罐内能够模拟长期的恒压条件，以实现煤样处于稳定水压力的浸泡环境下。



图 2 试验测试仪器设备

Fig.2 Test and equipment

采用高压伺服压缩实验加载系统(图 2e)进行煤岩单轴压缩试验以及巴西劈裂试验。该试验装置主要有实验加载系统、应变测试系统、主控制电脑和压力控制系统四部分组成。单轴压缩试验以 0.2 MPa/s 的速度进行轴向加载，直至煤样破坏。巴西劈裂试验以 0.05 MPa/s 的速度在煤样直径方向上施加线性载荷，直至煤样受到水平拉伸断裂。

$$\sigma_c = \frac{P_c}{A} = \frac{4P_c}{\pi d^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{2P_t}{\pi dh} \quad (2)$$

式中： σ_c 为煤样单轴抗压强度； σ_t 为抗压强度； P_c 为煤样轴向受到的峰值荷载，N； A 为煤样的横截面积， mm^2 ； d 为煤样直径，mm； P_t 为煤样受拉伸破坏时的峰值荷载，N； h 为煤样高度，mm。

在进行 X 射线衍射测试前，需利用等离子低温灰化仪(LTAs, Quorum K1050X)对测试煤样粉末进行灰化、刻蚀等前期处理，使煤样中有机质氧化^[32](图 2c)。该仪器射频电源功率为 150W，真空测量范围 0.4~1.0 mbar。利用 X 射线衍射(XRD, ThermoFisher ARL EQUINOX 3 000)测试低温灰样品中的

矿物组成(图 2f)。主要技术指标：X 射线光管为 Cu 靶辐射；角分辨率 < 0.08°；测试角度范围 0~120°；入射光源为 Cu-Ka 射线，采用连续扫描模式对样品进行测试。采用 Jade 6.0 软件对 XRD 衍射图谱进行矿物定性分析，Rietveld 技术对不同矿物成分进行定量分析。

在整个浸泡过程中，持续测试了浸泡溶液中的常规离子质量浓度，测试项目及方法见表 2。采用“pH30”型 pH 计(图 2d)监测浸泡溶液的 pH 值。

2 浸水煤样细观结构与力学损伤的物理演化过程

2.1 细观结构演化过程

利用 CT 扫描技术，获取了一组高分辨率的二维切片图像，如图 3 所示。图 3a 分别展示了初始煤样以及在模拟矿井水中浸泡 45 d 和 150 d 后的煤样典型二维切片图像。这些图像的处理精度对于煤样孔隙和裂隙的三维重构效果具有决定性影响。采用 VGSTUDIO MAX 软件对 CT 扫描得到的二维切片进行三维重构，如图 3b 所示。为了进一步的可视化分析和数据提取，使用了 AVIZO 软件对重构结果进行了深化处理，构建了煤样的三维模型，包括孔隙和裂

表 2 浸泡溶液测试项目及标准

Table 2 Testing procedures and standards for immersion solution

测试离子	测试标准	测试方法	测试精度	
			离子浓度	重复性限
K^+, Na^+	MT/T252-2000 ^[33]		$\leq 10 \text{ mg/L}$	0.5 mg/L
			$> 10 \text{ mg/L}$	5%
Ca^{2+}		原子吸收	$\leq 100 \text{ mg/L}$	1 mg/L
		分光光度计	$> 100 \text{ mg/L}$	1%
Mg^{2+}	MT/T202-2008 ^[34]		$\leq 20 \text{ mg/L}$	0.5 mg/L
			$> 20 \text{ mg/L}$	2.5%
Cl^-	MT/T201-2008 ^[35]	滴定法	$\leq 150 \text{ mg/L}$	3 mg/L
			$> 150 \text{ mg/L}$	2%
SO_4^{2-}	MT/T205-2011 ^[36]	沉淀转化法	$\leq 200 \text{ mg/L}$	4 mg/L
			$> 200 \text{ mg/L}$	2%
HCO_3^-	DZ/T0064.49-2021 ^[37]	滴定法		1.2%

隙的详细模型,如图 3c 所示。这些三维模型在外观上与实际原煤样极为相似,从而验证了 CT 扫描数据的准确性。尽管三维重构模型能够展示煤样的外部特征和部分孔隙裂隙的特征,但对于煤样内部的完整孔隙裂隙分布仍然难以直接观察。因此,对图像进行了进一步的分离处理,提取出孔隙裂隙模型,如图 3d 所示。

图 3d 展示了煤样在模拟矿井水中浸泡 0、45 d 和 150 d 后的孔裂隙结构分布情况。从左至右,可以观察到以下现象:在浸泡前,煤样的孔裂隙分布显示出明显的离散性,且分布范围广泛,裂隙主要沿着接近 45° 的方位角分布在煤样高度的 1/4 到 1/3 位置。酸性环境中浸泡 45 d 后,孔裂隙数量显著增加,离散性降低,主要集中在试样中心区域,原有裂隙在此基础上进一步扩展。浸泡 150 d 后,孔裂隙数量倍增,密集程度更加明显,裂隙几乎沿着 45° 方位角斜穿过整个煤样横断面。

煤样三维孔隙裂隙的特征参数如图 4 所示。由图 4a~图 4d 可知,在模拟矿井水中,尽管随着浸泡时间的增加,煤样的孔裂隙数量呈增加趋势,但是单个孔裂隙的面积与体积甚至平均孔径却呈现出先增大后减小的趋势。这表明酸性浸泡环境中,煤样的孔裂隙结构演化过程复杂,且并非线性发展。分析其原因可能包括:

1) 物质的溶解:在酸性环境中,由于酸性溶液与煤样中钠长石、方解石和赤铁矿等矿物成分发生反应,煤样中的矿物质或有机质被反应溶解,使得单个孔裂隙面积或体积逐渐增大;

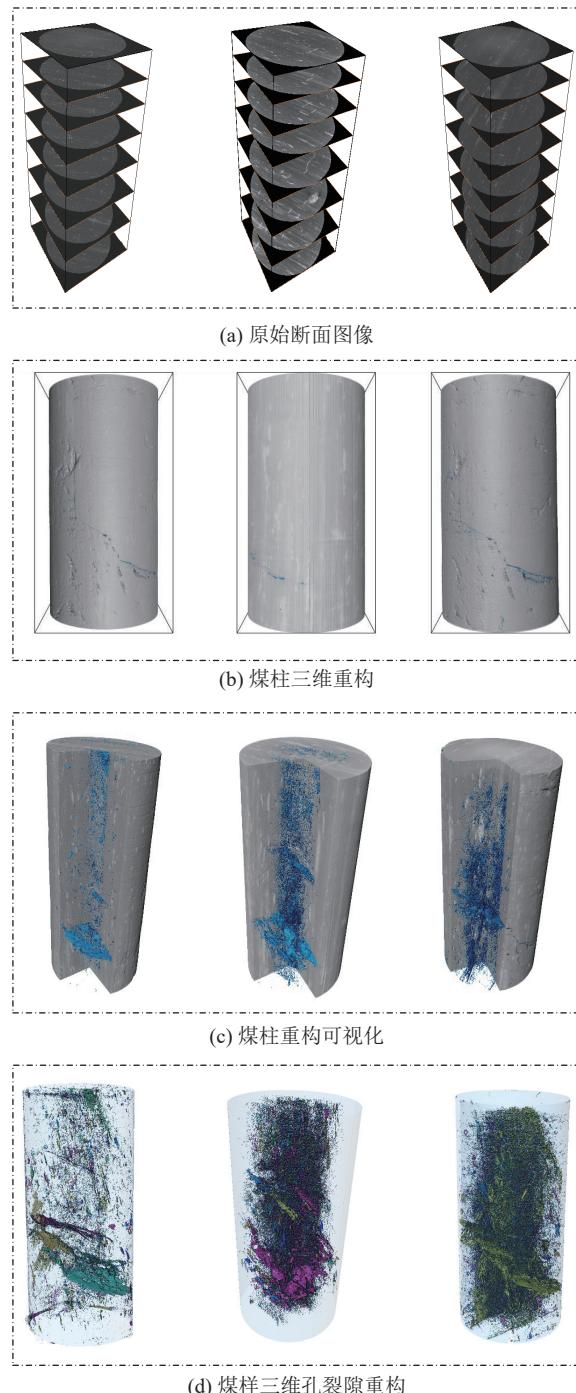


图 3 CT 三维孔裂隙重构流程图

Fig.3 Flowchart of 3D pore reconstruction using CT

2) 孔隙的填充与重新排列:在酸性环境中,矿物成分与溶液中的 H^+ 反应新生成的石英等物质会沉淀和填充至煤的孔裂隙空间中,导致单个孔裂隙面积缩小。随着浸水时间推移,水-煤反应进一步发展,煤中孔隙和裂隙发生重新排列和重构,导致单个孔裂隙体积减小。这种重新排列可能是由物质移动、孔隙壁溶解或矿物重结晶等多重因素引起。

根据图 4e 可知,与初始煤样相比,煤样在模拟矿井水中浸泡 45 d 和 150 d 时的孔隙率显著增加,由

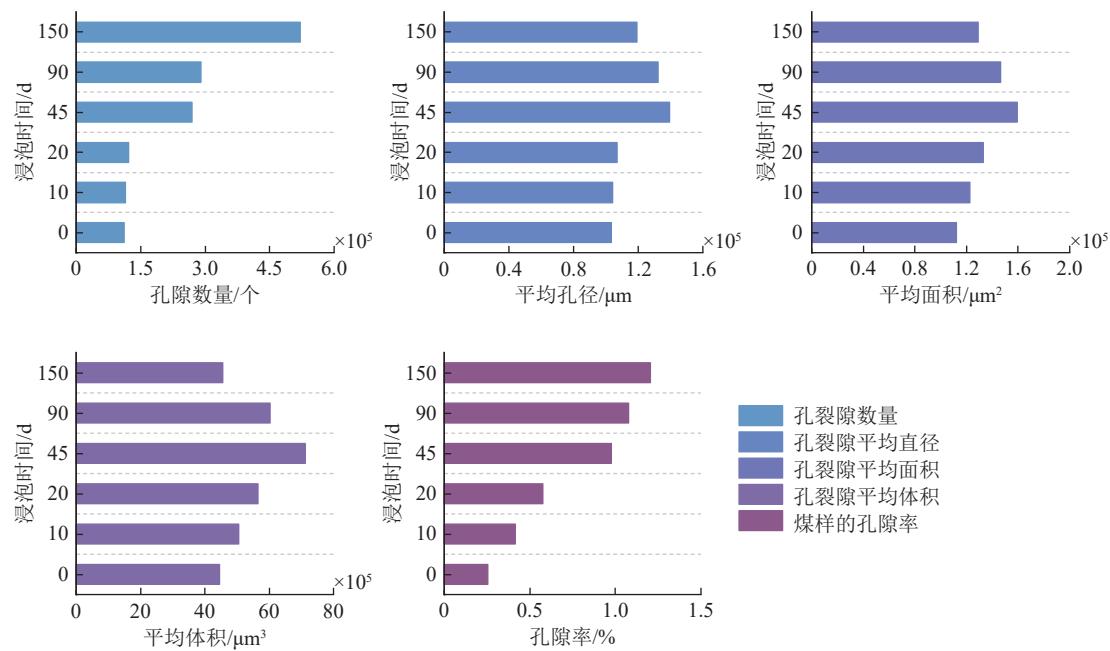


图4 不同浸泡时间下煤样孔裂隙参数数据统计

Fig.4 Statistical data of pore fracture parameters of coal sample under different soaking duration

0.25% 增加到 1.2%。这表明,在酸性环境条件下,随着水-煤反应的持续进行,煤样内部的孔隙由数量少、体积大逐渐转变为数量多、体积小的特征。并且,煤样的孔隙率虽然保持持续增长,但孔隙率的增加速率却随着浸泡时间出下降趋势,水-煤反应逐渐放缓。

本文在图5中重点展示煤样在模拟矿井水中浸泡0、45 d和150 d等关键转折节点孔裂隙结构的三维分布情况,为孔隙和裂隙结构的演变提供了直观证据。本次试验将煤样的孔裂隙从小于100 μm至大于5 000 μm分为14个尺寸级别,其孔裂隙统计参数分布见表3。表3中列出了不同浸泡时间段煤样内部不同孔径的孔裂隙分布数量,整体而言,煤样中以小于400 μm孔径的微小孔隙为主,超过95%,同时大于3 000 μm的孔裂隙分布极少。

在浸泡0天的煤样中(图5a),孔裂隙分布稀疏,主要集中于煤样边缘,中心区域相对致密。这表明初始状态下,煤样孔隙结构均匀,孔隙率较低,小于400 μm的孔体积占比仅为21.66%。浸泡45天后(图5b),孔裂隙数量显著增加,尤其是在小于400 μm的范围内,这一范围孔隙数量增加2.397倍,体积占比上升至60.17%。大于400 μm的孔裂隙开始出现,表明酸性环境对煤样结构的影响开始显现。进一步浸泡至150 d后(图5c),小于400 μm的孔隙数量再次增加1.944倍,而这一范围内的孔裂隙体积占比降至33.02%。这一阶段,孔隙结构的复杂性显著增加,表现为孔隙的融合和裂隙的扩展。

此外,在模拟矿井水环境下,随着浸泡时间的增

加,煤样中孔隙率在原本较低的区域有所提高,而原致密的区域,尤其是煤样中心位置,孔隙率变化不显著。这一现象归因于酸性环境与煤样中的矿物质或有机质发生化学反应,导致煤样表面孔裂隙中的成分发生溶解或转化。该化学反应促进了原本疏松区域新孔隙的产生和原有小孔隙的扩展,从而提高了原本的孔隙率。相比之下,致密区域对酸性环境的距离较远,该区域新的孔裂隙形成需在更强酸性或更长时间浸泡条件下才会进一步发生。煤样孔裂隙的扩展与演化过程表明,酸性溶的浸泡作用对煤样的孔裂隙分级产生明显影响,这种变化通常表现为:1) 新孔裂隙的形成,可能是由于矿物质溶解或有机物质分解,导致孔隙率增加;2) 孔裂隙形状由规则变为不规则,尤其是在酸性溶液侵蚀不均匀的区域;3) 孔隙分布的不均匀性增加,不同区域孔隙参与反应的程度不同;4) 孔裂隙结构变得更加复杂,包括更多层次和类型的孔裂隙;5) 孔裂隙的增加导致煤样比表面积增大,增强了煤样的表面活性。

2.2 力学损伤演化过程

基于单轴压缩试验和巴西劈裂试验获得的峰值荷载,利用式(1)式(2)计算并绘制了图6。图6a—图6c分别展示了煤样在原样矿井水、去离子水以及模拟矿井水三种浸泡溶液中的浸泡时间与,煤样单轴抗压强度的关系曲线。其中未浸泡的干燥煤样表现出最高的单轴抗压强度,为27.21 MPa。

当煤样在原样矿井水中浸泡至150 d时,煤样在无压条件下的抗压强度下降至8.48 MPa,相较于初始

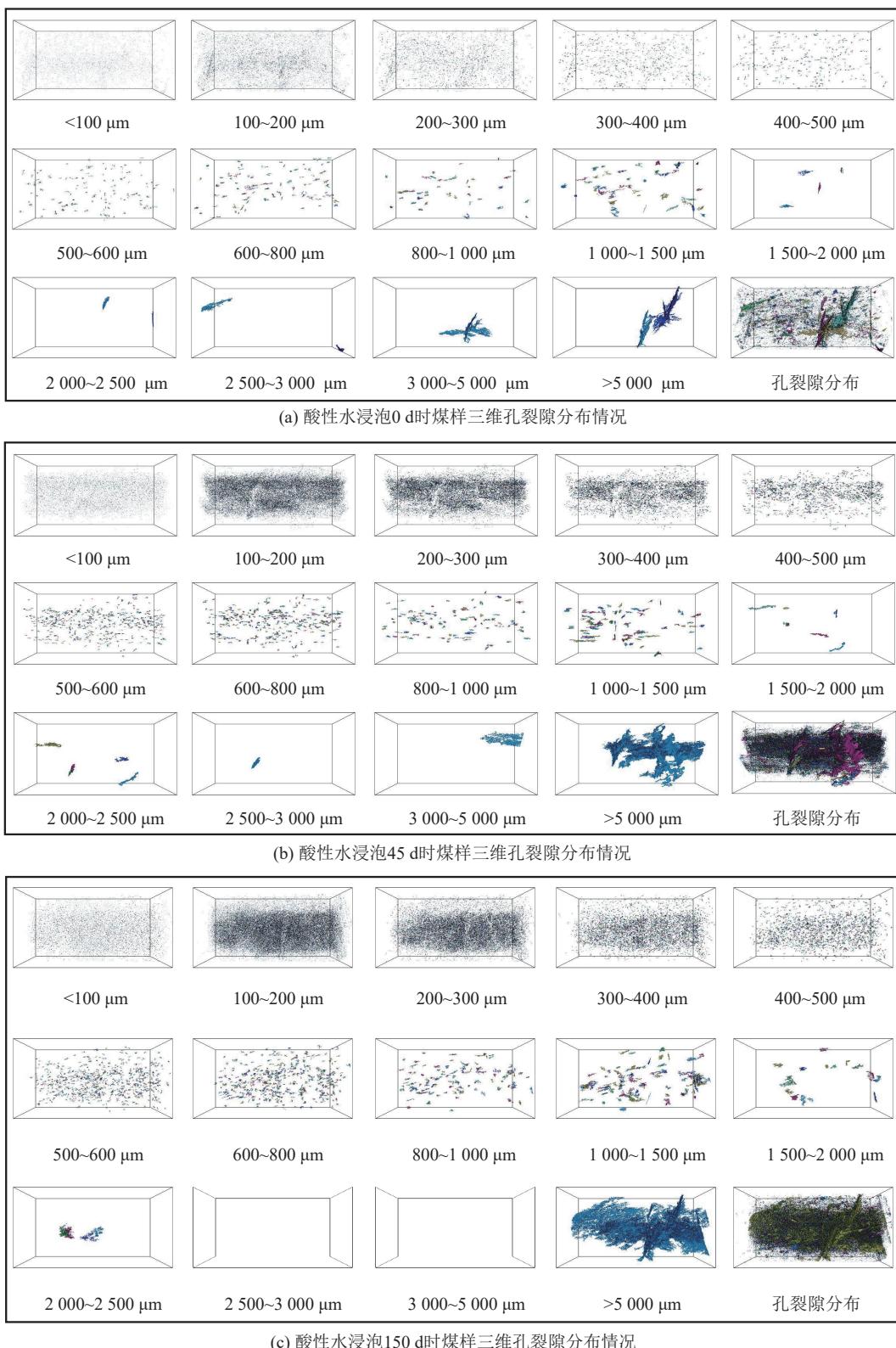


图5 酸性溶液浸泡煤样三维孔裂隙分级分布情况

Fig.5 The distribution of 3D pore-fracture grading in coal sample after being soaked in acidic solution.

干燥煤样抗压强度降低了 68.7%，而在 0.8 MPa 带压条件下的抗压强度下降至 7.62 MPa，相较于初始干燥煤样抗压强度降低了 71.9%。

而煤样去离子水溶液中浸泡至 150d 时，煤样在

无压条件下的抗压强度下降至 11.38 MPa，相较于初始干燥煤样抗压强度降低了 58%，而在 0.8 MPa 带压条件下的抗压强度下降至 9.64 MPa，相较于初始干燥煤样抗压强度降低了 64.5%。

表3 不同浸泡时间下煤样孔裂隙参数分布统计

Table 3 Distribution of pore fracture parameters in coal samples under different soaking duration

孔裂隙分布/ μm	浸泡0 d	浸泡45 d	浸泡150 d
	数量/个	数量/个	数量/个
< 400	106 158	263 718	500 441
400~3 000	5 584	5 380	20 850
> 3 000	3	2	2

同样地,煤样在模拟矿井水中浸泡至150 d时,煤样在无压条件下的抗压强度下降至8.16 MPa,相较于初始干燥煤样抗压强度降低了69.9%,而在0.8 MPa

带压条件下的抗压强度下降至7.35 MPa,相较于初始干燥煤样抗压强度降低了72.9%。

在相同浸泡时间下,酸性的模拟矿井水中浸泡的煤样抗压强度明显小于矿井水溶液和去离子水中浸泡的煤样的抗压强度。并且,当煤样的浸泡溶液相同时,带压浸泡对煤样抗压强度的损伤劣化效果更明显,在单轴压缩试验中煤样也更早被完全破坏。

如图6d—图6f分别展示了煤样在原样矿井水、去离子水以及模拟矿井水中抗拉强度随浸泡时间的变化趋势。其中,经过烘干处理的未浸泡煤样具有最高的抗拉强度,为1.42 MPa。

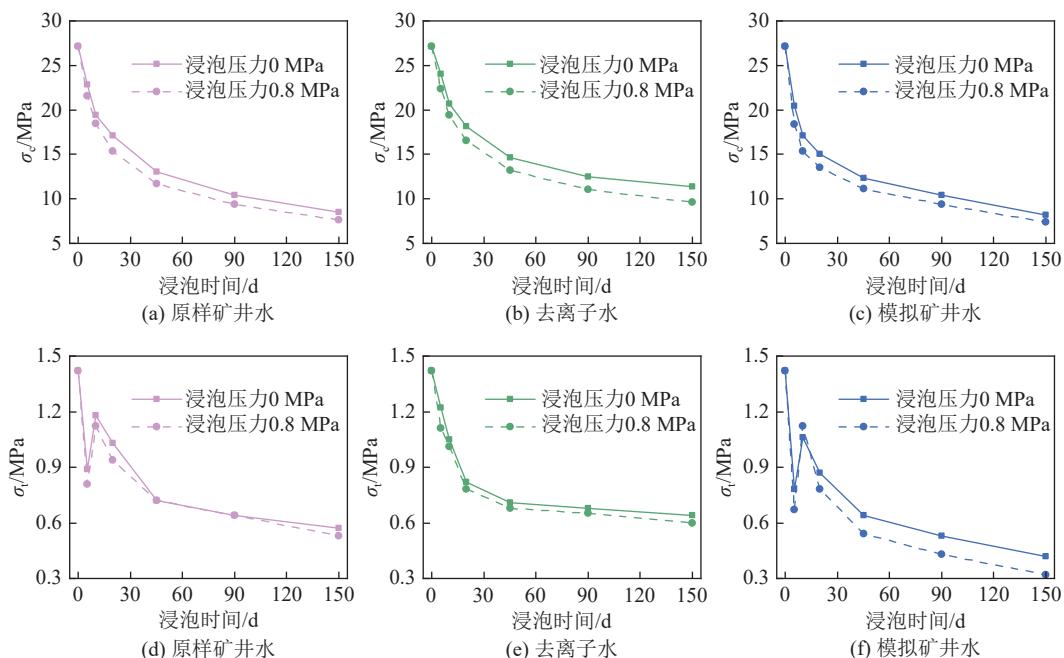


图6 各浸泡条件下煤样力学强度测试结果

Fig.6 Mechanical strength test results of coal samples under various soaking conditions

根据计算结果发现,煤样在原样矿井水与模拟矿井水中浸泡的初期,抗拉强度会经历先快速下降后明显抬升再逐渐下降的阶段。

当煤样浸泡至150 d时,在无压条件下,煤样在原样矿井水、去离子水和模拟矿井水中浸泡后的抗拉强度值分别下降至0.57 MPa、0.64 MPa、0.42 MPa,相比于初始干燥煤样的抗拉强度下降了59.9%、54.9%、70.4%。同样地,在0.8 MPa的带压浸泡环境下,三种浸泡溶液中煤样的抗拉强度分别下降至0.53 MPa、0.6 MPa、0.32 MPa,相较于初始干燥煤样的抗拉强度分别下降了62.7%、57.7%、77.5%。

在模拟矿井水中浸泡的煤样抗拉强度下降的幅度也明显高于与另外两种浸泡溶液中的煤样,最终趋势与单轴抗压结果一致。并且,煤样物理力学强度的演化趋势进一步验证了前文CT扫描中对于孔裂隙演

化结果导致的宏观力学强度变化的猜想。

3 浸水煤样矿物组分与浸泡溶液的化学演化过程

3.1 浸水煤样矿物组成演化过程

经过XRD测试定量分析发现,煤样中的矿物组成随着水-煤反应的进行发生不断的变化,结果如图7所示。煤样从0 d至150 d的浸泡过程中,煤中的矿物组成保持相对稳定,主要由石英、钠长石、白云母、高岭石、方解石、石膏和赤铁矿七种矿物组成。在未浸泡的煤样中,白云母、高岭石和方解石作为主要矿物,其总含量占到了72.4%。然而,随着浸泡时间的延长,这些矿物的相对含量显著下降至53.7%。在浸泡150 d时,煤样中的钠长石、方解石和赤铁矿的占比分别由最初的12.5%、17%和6.5%减少至9.6%、10.9%

和 4.9%，而石英占比由 4.3% 增加至 29.1%。

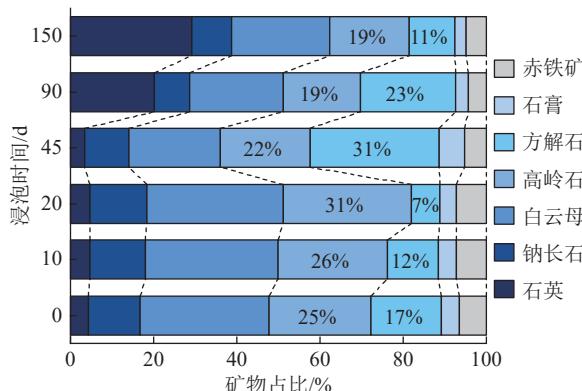
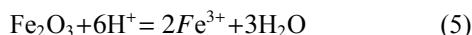
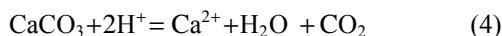
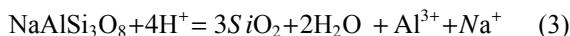


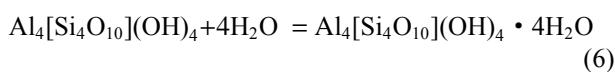
图 7 不同浸泡时间下煤样矿物占比

Fig.7 Mineral composition ratios of coal samples at different soaking duration

煤样在酸性溶液中的水-煤相互作用是导致多数矿物成分含量在浸泡初期出现不同程度增加的关键因素。随着煤样在酸性溶液中的浸泡时间的延长，钠长石 ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、方解石 (CaCO_3) 和赤铁矿 (Fe_2O_3) 的含量表现出显著的下降趋势，而石英 (SiO_2) 的含量则相反，呈现出上升趋势。这种矿物含量的变化趋势归因于煤样中的钠长石、方解石和赤铁矿与溶液中的 H^+ 离子之间的化学反应，这些反应导致新物质的形成，从而降低了上述矿物的含量。与此相对，石英因其较高的化学稳定性，不易与酸发生反应，并且在钠长石与酸性溶液中的 H^+ 离子反应过程中，会生成额外的 SiO_2 ，因此石英的含量总体上呈现增加趋势。相关的化学反应方程式如下所示。



此外，相较于其他矿物成分，粘土矿物在与水溶液相互作用时表现出更为显著的吸水膨胀特性^[38]。在本次浸泡试验中，特别观察到煤样中的高岭石 ($\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_4$) 展现出明显的吸水膨胀行为。在模拟矿井水环境中，与新物质生成相比，粘土矿物的水膨胀作用更为迅速，这导致在浸泡初期，煤裂隙内的黏土矿物影响显著，并且其矿物含量显著增加。浸泡 10 d 和 20 d 后，煤样中高岭石的含量相比未浸泡前分别增加了 7.76% 和 25.31%。其粘土矿物高岭石的吸水膨胀化学反应方程式如下。



浸水煤岩展现出显著的水-煤作用效应。当煤样与水溶液相互作用时，无论是在酸性还是中性条件下，都会引发一系列物理和化学反应，而在模拟矿井水中这些反应尤为剧烈。浸泡试验中，参与水-煤作用的矿物含量超过了 60%，其物理和化学特性，对其孔隙结构具有显著影响。在水-煤作用的影响下，煤样的孔隙结构会在不同程度上发生扩张，对煤样的力学性能产生一定的负面影响。

3.2 浸泡溶液水化学演化过程

通过使用 pH30 型酸度计，记录了原样矿井水溶液、去离子水以及模拟矿井水在浸泡 5 d 至 150 d 过程中的 pH 值变化。各溶液的 pH 值随时间的变化趋势如图 8 所示。

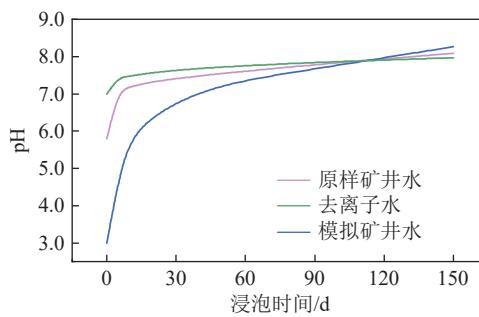


图 8 不同浸泡时间浸泡溶液的 pH 值变化

Fig.8 The pH value of soaking solution changed with different soaking duration

煤样置于三种不同溶液中进行浸泡时，每种溶液的 pH 值随时间展现出不同的变化趋势。在浸泡初期，矿井水溶液、去离子水溶液以及模拟矿井水的 pH 值均经历了显著的变化，分别上升到 7.19、5.77、7.47。推断该现象可能是在浸泡试验的初始阶段，煤样内部的矿物成分与溶液中的 H^+ 离子发生了化学反应。此外，煤样中的特定矿物组分可能与溶液中的 H^+ 离子进行离子交换或水解反应，从而导致水溶液的 pH 值迅速上升。

随着浸泡时间的延长，经过一定时间的反应后，溶液的 pH 值变化幅度逐渐减小，并最终趋于稳定。至 150 d 时，各溶液的 pH 值分别稳定在 8.08、8.26、7.97。这表明随着浸泡时间的推移，溶液与煤岩之间的物理和化学作用逐渐减弱，溶液中的 H^+ 离子被大量消耗。在相同的浸泡时间内，溶液的浓度显著影响浸泡过程中 pH 值的变化程度。溶液中 H^+ 离子浓度越高，pH 值的变化幅度越大，并且溶液对煤岩样本产生的“损伤”效果更为显著。

煤样在原样矿井水、去离子水以及模拟矿井水中浸泡 5d 至 150d 时，浸泡溶液常规离子浓度变化见

图9。在原样矿井水溶液浸泡初期,溶液中大部分离子并未表现出明显的浓度变化趋势,推测这种现象是由于煤样试件吸附了溶液中的离子,表明煤样试件具

备一定的离子交换能力。在模拟矿井水中,由于其初始 H^+ 浓度较高,煤中矿物与 H^+ 发生频繁的化学反应,使得各金属阳离子浓度迅速上升。

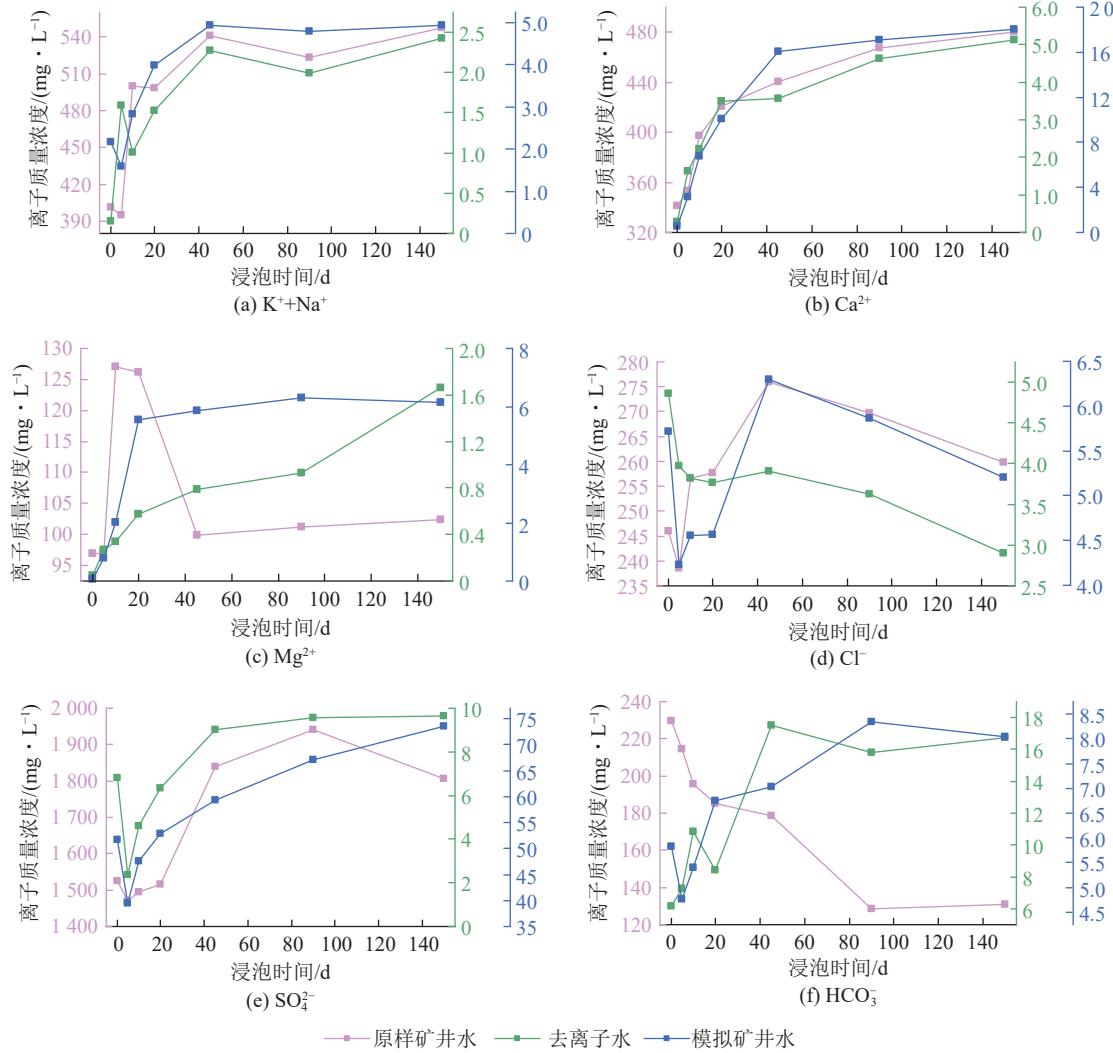


图9 不同浸泡溶液离子浓度随浸泡时间变化

Fig.9 The ion concentrations in different soaking solutions change with different duration

三种浸泡溶液中, K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度均在浸泡前期出现了先下降后上升的趋势,而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度一直随浸泡时间上升。结合前文全岩分析结果可知,煤样中含有大量的钠长石、方解石,在原样矿井水溶液和模拟矿井水中会与 H^+ 发生大量化学反应,使得溶液中的 Ca^{2+} 、 Na^+ 含量持续升高。

由于去离子水溶液中 H^+ 初始含量较低,无法满足与煤样反应所需的浓度条件,煤样仅与 H^+ 发生微量反应, Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度的增加更多是由于煤样表面成分溶解所致。同时,煤样中的黄铁矿在酸性条件下会发生氧化还原反应,并且煤中的硫元素转化为 SO_2 并溶解于溶液中,导致溶液中 SO_4^{2-} 浓度不断升高。随着浸泡时间的延长,浸泡溶液的水化学类型表现出明显的

变化,原样矿井水溶液的阴离子以 SO_4^{2-} 为主,其次为 HCO_3^- ,阳离子以 Na^+ 为主,其次为 Ca^{2+} 。去离子水和模拟矿井水中的离子经过不同浸泡时间,主导阴离子为 SO_4^{2-} ,其次是 HCO_3^- ,而阳离子以 Ca^{2+} 为主,其次为 Na^+ 。并且,去离子水溶液和模拟矿井水属于 $Ca-SO_4$ 型水,而原样矿井水溶液属于 $Na-SO_4$ 型水。此外,相同水环境浸泡的水样点在图中分布较为集中,这表明在矿井水和去离子水浸泡不同时间后,水化学性质保持相对稳定。

4 浸水煤柱的损伤劣化机理

4.1 影响因素与关键阶段

在岩石力学领域,煤岩体的“软化系数”的定义为

岩石在水饱和状态下的无侧限抗压强度与其在干燥状态下的无侧限抗压强度的比值,这一数值反映了煤岩体在不同饱水条件下的耐水性,如式(7)所示。

$$K = \frac{f}{F} \times 100\% \quad (7)$$

式中: K 代表煤岩体的“软化系数”; f 代表煤岩样在水饱和状态下的无侧限抗压强度,MPa; F 代表煤岩样在干燥状态下的无侧限抗压强度,MPa。

然而,在《煤矿防治水细则》中,针对边界煤岩柱的留设厚度计算参考了煤柱的抗拉强度,而“软化系数”并未考虑到抗拉强度变化对煤柱耐水性所带来的影响。鉴于此,本文以“软化系数”为参考,提出煤柱“损伤系数”的定义:在侵蚀性地下水(含矿井水)的长期浸泡作用下,岩石(含废弃矿井、采空区的各类边

界煤柱)被浸泡后的抗拉强度与干燥状态下(或未经侵蚀性地下水浸泡条件下)煤柱的抗拉强度的比值,如式(8)所示。

$$d_t = \frac{\sigma_i}{\sigma_{dry}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: d_t 表示浸水煤柱“损伤系数”,其取值范围为0至1; σ_i 为浸泡后煤样的抗拉强度,MPa; σ_{dry} 为干燥煤样的抗拉强度,MPa。

这一定义可以更全面地评估废弃矿井或采空区积水条件下各类煤岩柱在不同浸泡环境下的物理力学强度的演化、损伤劣化结果。依据式(7)和式(8)计算得到不同浸泡时间和浸泡条件下的煤柱“软化系数” K 和“损伤系数” d_t 的理论经验值,计算结果如图10所示。

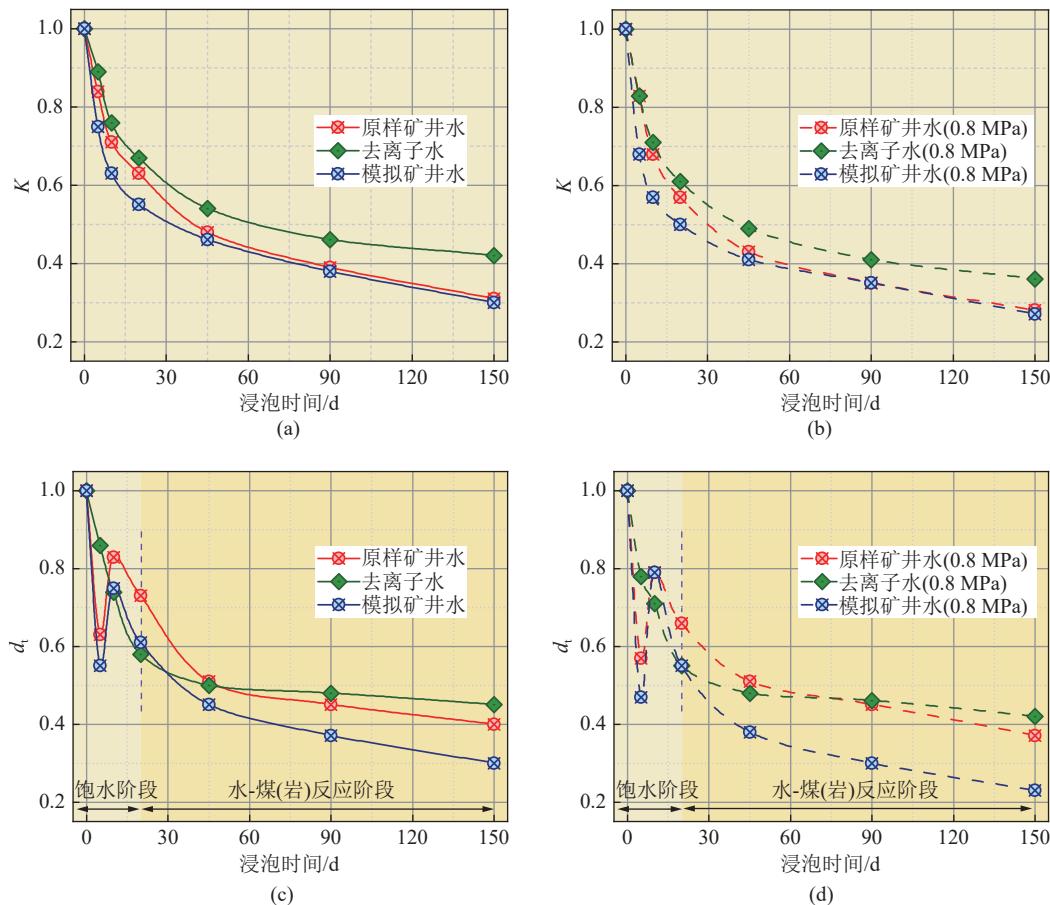


图 10 不同浸泡条件下煤柱力学损伤变化

Fig.10 The change of mechanical damage of coal pillar under different soaking conditions

由图10a可知,煤样的“软化系数” K 在浸泡20 d前表现为快速下降的趋势,当浸泡时间达到45 d后,煤样的单轴抗压强度仅有初始煤样的50%左右,并且 K 的下降速率逐渐变缓。相同浸泡时间下,模拟矿井水中煤样的 K 值皆小于相同原样矿井水和去离子水中的煤样,抗压强度下降明显。在无压条件下,煤

样在原样矿井水、去离子水以及模拟矿井水中浸泡150 d时,其 K 值分别为0.31、0.42和0.30。而在0.8 MPa带压浸泡条件下,煤样在原样矿井水、去离子水以及模拟矿井水中浸泡150 d时的 K 值分别为0.28、0.36和0.27,皆低于无压浸泡。

由图10b可知,浸泡煤样的煤柱“损伤系数” d_t 在

浸泡时间达到20 d后的变化趋势与“软化系数” K 一致。而在浸泡20 d之前,煤样在原样矿井水与模拟矿井水中的 d_t 值表现为先快速下降后快速上升再快速下降的趋势。不同pH值的浸泡环境下,煤样含水率会随浸泡时间的增加呈快速上升(0~6 d)–缓慢增加(7~9 d)–平缓稳定(10~12 d)的变化趋势,即煤样在浸泡10 d左右时,其内部的含水率趋于饱和^[24]。因此,推测本次浸泡试验中,煤样在浸泡0~10 d时处于饱水阶段,该阶段煤样内部含水率逐渐上升。同时,伴随着高岭石等粘土矿物的吸水膨胀作用,煤样内部孔隙骨架被填充,煤样的抗拉强度相较于浸泡初期出现回升,损伤系数减小。在煤样含水率趋于饱和后,浸泡作用则进入了下一阶段即水–煤耦合反应阶段,侵蚀性浸泡溶液开始与煤样中的矿物成分发生物理–化学联合作用,煤样中的粘土类矿物部分溶解、消耗导致孔隙率增大,进而诱发力学损伤劣化。

对比不同浸泡条件下煤样的 K 值与 d_t 值发现,除初期饱水阶段,水–煤耦合反应阶段会进一步对煤样的力学性能进行侵蚀劣化,伴随 K 值与 d_t 值进一步降低。并且,模拟矿井水组在带压浸泡条件下的饱水阶段对煤样的 d_t 值较无压条件下煤样的 d_t 值稍高,推断带压浸泡对煤样的饱水作用也具有促进效果。结合前文的CT扫描结果,煤样的孔隙主要沿45°方位角分布,表现出明显的离散性。随着浸泡时间的延长,这种离散程度减弱,孔隙在原有基础上沿45°方位角成倍增加,特别是在酸性环境中,孔隙的分级特征变得明显。侵蚀性水溶液的浸泡作用促进了煤样孔隙结构的密集化,产生了明显的分级特征,最终导致煤体力学强度的下降。

在长期浸水环境下,采空区中的防隔水煤柱会遭受矿井水持续的侵蚀作用。随着矿井水位的持续抬升,煤柱的浸水压力也随之增加,煤体内部持续发生水–煤反应,孔隙与裂隙结构经历着不断的扩展与演化。这些微观结构的演化在宏观上的表现为煤柱的力学性能大幅下降。因此,边界煤柱浸水损伤劣化过程可以归纳为以下几个方面:

1) 浸泡水溶液的水化学特征:通过分析煤样在浸水试验中的力学性能,发现煤样在不同水化学特征的溶液中浸泡后,其 K 值与 d_t 值呈现不同程度的变化。在模拟矿井水中的煤样 K 值与 d_t 值最小,分别为0.27和0.23,其次是原样矿井水溶液,分别为0.28和0.37,而去离子水溶液对煤样的“损伤”程度最低,分别为0.36和0.42。

2) 煤样浸泡时间:随着浸泡时间的增加,煤样力学性能整体来说出现了显著的下降趋势。在浸泡过

程中,浸泡时间对煤样的饱水阶段与水–煤反应阶段的发生提供了前提条件,煤样的孔隙、裂隙结构扩展演化更充分。

3) 煤样所处浸泡压力:在带压浸泡的环境中,模拟矿井水和原样矿井水对煤样的“劣化”程度都明显大于无压浸泡的煤样。在这些条件下,水–煤反应更积极。

4.2 损伤劣化机理分析与讨论

煤柱浸水“损伤劣化”效应是水–煤耦合反应过程中多因素相互作用的直接结果。结合以往关于水–煤(岩)反应的相关研究,总结了废弃矿井边界煤柱的浸水损伤劣化机理,如图11所示。

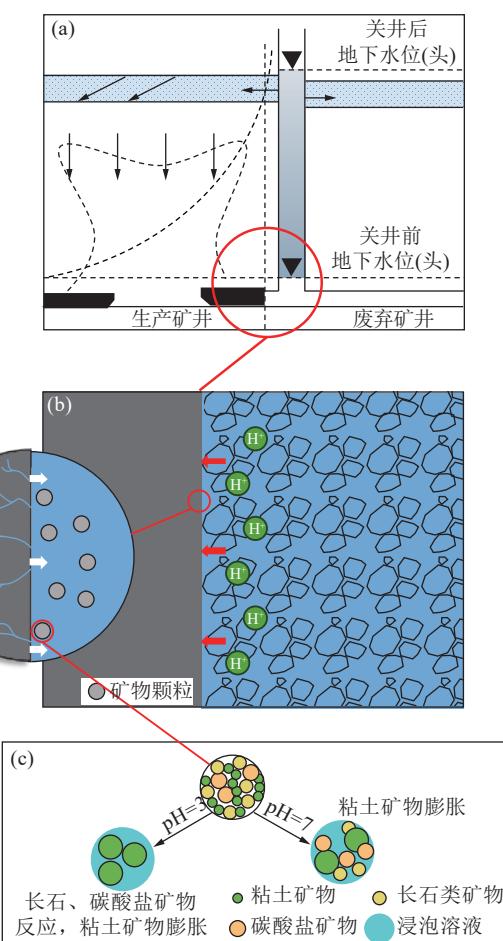


图11 废弃矿井边界煤柱浸水损伤机理示意图

Fig.11 Water damage mechanism diagram of coal pillars at the boundary of abandoned mine

废弃矿井空间的介质条件极其复杂,既包括巷道、井筒等过水大管道,又包括工作面顶板垮落带中的管道–裂隙介质、顶板裂隙带及底板采动破坏带中以采动裂隙为主的裂隙介质,以及原生含水层中以构造裂隙为主的裂隙介质。当废弃空间中积水水位抬升到一定高度,废弃矿井与相邻生产矿井间的各类边界煤柱、防隔水墙体在侵蚀性矿井水长期浸泡、构造及重

复采动等综合影响下的稳定性与抗破坏能力发生变化(图11a)。

在酸性水环境中,浸泡溶液中的H⁺与碳酸盐矿物(方解石等)和长石类矿物(钠长石等)发生化学反应,导致煤样孔隙矿物溶解,具体反应见前文式(3)和式(4)。水-煤反应过程中,煤样内部的孔隙和裂隙结构经历了显著变化。经历了饱水阶段后,水分子及其中的H⁺与煤样中的矿物颗粒开始发生化学反应,矿物颗粒在溶解和析出过程中进入浸泡溶液,消耗溶液中的H⁺,使浸泡溶液pH值逐渐趋于中性或碱性。由于可反应的矿物成分随着时间的推移逐渐减少,孔隙结构的变化趋于稳定(图11b)。这也导致了不同pH值的溶液对煤样损伤劣化的影响存在差异,酸性条件(pH=3模拟矿井水)的反应最为显著,中性条件(pH=7去离子水)的影响最小。在煤样的三类主要矿物成分中,与酸反应的矿物较多,而中性条件下主要表现为矿物的物理状态变化。不同pH值水溶液的浸润导致煤样裂隙内部结构复杂化,但均导致裂隙不同程度的扩展,其中酸性影响最大,中性影响最小(图11c)。这些矿物成分特征的改变进而影响了煤样的强度与变形特征。

5 结 论

1)采取了位于华北型煤田较为典型的徐州矿区A煤矿主采煤层煤样,开展了煤柱试样在不同水压、模拟矿井水、原样矿井水等条件下的长期浸泡试验,通过CT扫描厘清了煤样在侵蚀性矿井水长期浸泡条件下的不规则孔隙-裂隙显著发育、孔隙率由0.25%增大到1.2%、孔隙发育的离散性随浸泡时间逐步降低的结构演化过程。

2)高压伺服试验结果表明,煤样的单轴抗压强度从0 d到150 d降低了58%~72.9%、抗拉强度降低了54.9%~77.5%。煤样的物理力学强度受浸泡时间、浸泡压力以及浸泡溶液的pH值影响,其中浸泡时间影响较大;在同样的浸泡压力条件下,酸性环境对煤样的力学强度亦存在影响。具体表现为:煤样在原样矿井水、去离子水和模拟矿井水无压浸泡150 d后单轴抗压强度分别降低了68.7%、58%、69.89%,而带压浸泡150 d后单轴抗压强度分别降低了71.9%、64.5%、72.9%。同样地,煤样无压浸泡150 d后抗拉强度分别下降了59.9%、54.9%、70.4%,而在带压浸泡条件下,煤样抗拉强度分别下降了62.7%、57.7%、77.5%。

3)XRD测试结果显示,煤样中的矿物组分在具有侵蚀性的模拟矿井水浸泡过程中发生了相对显著的变化:由于高岭石的吸水膨胀现象,煤样在饱水阶

段的煤柱“损伤系数” d_t 值发生显著上升,煤样的抗拉强度在10 d时上升0.31 MPa;随着水-煤作用的进行,煤中的矿物成分不断与浸泡溶液中的H⁺进行交换与反应,其中钠长石、方解石和赤铁矿的占比分别由12.5%、17%和6.5%减少至9.6%、10.9%和4.9%,石英占比由4.3%增加至29.1%。

4)浸泡溶液的水化学测试结果显示,浸泡溶液中的K⁺、Na⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻的浓度随浸泡时间不断变化最终趋于上升,并且浸泡溶液的pH值随着浸泡时间的增加在初始变动后迅速达到稳态,表现出弱碱性特征,进一步验证了煤样在浸泡过程中由饱水阶段向水-煤反应阶段的发生。煤样在细观结构上的结构演化与损伤劣化积累最终表现在煤样宏观力学性能的下降。

5)阐明了废弃采空区边界煤柱在高渗透压、侵蚀性矿井水长期作用下结构演化与损伤劣化的物理-化学耦合作用机理,揭示了废弃采空区边界煤柱带压浸水作用下的动态响应过程与关键阶段:第一阶段为初期饱水阶段,本阶段主要以物理吸水膨胀作用为主,表现为抗压强度整体减小而抗拉强度先降低后回升的现象;第二阶段为水-煤耦合反应阶段,本阶段主要以物理-化学联合作用为主,表现为粘土类矿物部分溶解、消耗导致煤样孔隙率增大,进而诱发力学损伤劣化。

6)本文在“软化系数”的基础上定义在侵蚀性地下水(含矿井水)的长期浸泡作用下岩石(含废弃矿井、采空区的各类边界煤柱)被浸泡后的抗拉强度值与干燥状态下(或未经侵蚀性地下水浸泡条件下)抗拉强度的比值为煤柱“损伤系数” d_t ,并提出了废弃矿井或采空区煤岩柱“损伤系数”的计算公式,确定了浸水煤柱“损伤系数”的经验值。

6 讨论与展望

废弃矿井及采空区的几何空间及其积水水质的形成作用与过程极为复杂,废弃空间积水的带压条件、侵蚀性以及长期作用下边界煤岩柱的物理化学响应过程也极为特殊、机理复杂,本文针对上述复杂作用过程进行了初步探索,有关关键问题的讨论和下一步工作展望如下:

1)本研究的初步试验结果表明,煤样在侵蚀溶液长期浸泡条件下的结构与力学损伤劣化效应明显,浸泡时间、带压条件以及浸泡液的pH值等影响明显。然而,由于受样品制备、测试以及煤样本身的微细观结构差异等因素的影响,不可避免地会对测试结果产生误差,因此,需要通过增加更多的平行试验样品数

量来消除,以更进一步修正煤样“损伤系数”的定量确定。

2)本试验采用的煤样仅采自同一煤矿的同一煤层,因此模拟的煤样条件也存在局限性。在后续试验中,可以进一步补充不同矿区、不同赋存条件、不同积水环境的煤样,以更全面的厘清浸水煤柱结构与力学损伤劣化的影响因素,建立更准确的定量评价模型和计算公式。

3)本研究对煤样矿物成分变化也进行了初步分析,发现煤样中无机矿物的含量在长期浸泡后亦发生了变化。然而,由于煤样中无机物含量所占比例较小,且煤样标本存在个体差异,这种变化的具体规律尚未完全揭示,需要在后续研究中继续补充。

4)本次模拟试验中,采用了CT技术对浸泡煤样的细观结构演化过程进行了定量描述,针对煤样表面和微孔隙结构上的新增裂纹网络、结构损伤范围的精确表征等问题,考虑到模拟试验研究到尺度效应问题,下一步还可以通过数值模拟和必要的现场监测,进行深入的对比研究,进一步验证和完善实际工况条件下煤柱的破坏机理和效应。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴.2002(总第21期)[M].北京:中国统计出版社,2002.
- [2] 孙亚军,陈歌,徐智敏,等.我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J].煤炭学报,2020,45(1):304-316.
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316.
- [3] 袁亮,杨科.再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J].煤炭学报,2021,46(1):16-24.
YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 16-24.
- [4] 中国煤炭工业协会.2023煤炭行业发展年度报告[R].北京:中国煤炭工业协会,2024.
- [5] 中国煤炭工业协会.煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见[R].北京:中国煤炭工业协会,2021.
- [6] 董书宁.对中国煤矿水害频发的几个关键科学问题的探讨[J].煤炭学报,2010,35(1):66-71.
DONG Shuning. Some key scientific problems on water hazards frequently happened in China's coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 66-71.
- [7] 张海涛,许光泉,陈晓晴,等.我国闭坑煤矿矿井水质演化研究进展与展望[J].煤炭学报,2024,49(9):3944-3959.
ZHANG Haitao, XU Guangquan, CHEN Xiaoqing, et al. Research progress and prospects on the water quality evolution of closed coal mine water in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3944-3959.
- [8] 武强,李松营.闭坑矿山的正负生态环境效应与对策[J].煤炭学报,2018,43(1):21-32.
WU Qiang, LI Songying. Positive and negative environmental effects of closed mines and its countermeasures[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 21-32.
- [9] 武强,张小燕,赵颖旺,等.矿井巷道系统突(涌)水蔓延过程物理仿真试验模拟与应用[J].中国矿业大学学报,2024,53(3):421-434.
WU Qiang, ZHANG Xiaoyan, ZHAO Yingwang, et al. Simulation and application of physical simulation test of water inrush spread process in mine roadway system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 421-434.
- [10] 伍坤宇,熊鹰,谭秀成,等.储层孔隙系统“水—岩”反应结晶动力学研究进展[J].沉积学报,2022,40(4):996-1009.
WU Kunyu, XIONG Ying, TAN Xiucheng, et al. Study of the crystallization kinetics for “water-rock” interactions in the reservoir pore-system: An overview[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(4): 996-1009.
- [11] 朱传奇,谢广祥,王磊.基于CT扫描的煤体裂隙演化与破坏状态表征[J].中国矿业大学学报,2024,53(1):93-195.
ZHU Chuanqi, XIE Guangxiang, WANG Lei. Evolution of fracture and failure state characterization of coal based on CT scanning[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(1): 93-195.
- [12] 段宏飞,姜振泉,朱术云,等.深部矿井岩石水稳定性微观机理及强度软化特性研究[J].岩土工程学报,2012,34(9):1636-1645.
DUAN Hongfei, JIANG Zhenquan, ZHU Shuyun, et al. Micro-mechanism of water stability and characteristics of strength softening of rock in deep mines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1636-1645.
- [13] 卢伟宁.西铭煤矿采空区积水对防隔水煤岩柱稳定性影响的试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2021:68-70.
LU Weining. Experimental study on the influence of water accumulation in the mined-out space on the stability of water proof coal and rock pillar in Ximing Coal Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [14] 骆韬,郭保华,焦峰,等.水化学作用对砂岩力学性质影响试验研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(5):1316-1322.
LUO Tao, GUO Baohua, JIAO Feng, et al. The influence of hydro-chemical erosion on the mechanical characteristics of sandstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1316-1322.
- [15] CHEN C, WANG W, CAO Y J, et al. Effect of hydro-chemical corrosion on mechanical properties of red sandstone under uniaxial and triaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 185: 105967.
- [16] 曹廷,何刘,王维,等.水岩循环对变质砂岩微观结构损伤与宏观力学劣化影响机理研究[J].工程地质学报,2024,32(1):96-107.
CAO Ting, HE Liu, WANG Wei, et al. Study on the influence mechanism of wetting-drying cycles on metamorphic sandstones microstructure damage and macroscopic mechanical deterioration[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(1): 96-107.

- [17] 李伟华,付泉铭,黄俊玮,等.水工混凝土多元侵蚀破坏机制与提升技术研究进展[J].复合材料学报:1-18
自助核对 LI Weihua, FU Quanming, HUANG Junwei, et al. Research progress on multiple erosion and damage mechanisms and improvement techniques of hydraulic concrete [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*: 1-18.
- [18] 孙亚军,赵先鸣,徐智敏,等.煤矿矿井水水质形成及演化的水动力场驱动作用及数学模型构建[J].煤炭学报,2023,48(11): 4157-4170.
SUN Yajun, ZHAO Xianming, XU Zhimin, et al. Hydrodynamic field driving effect and mathematical model construction of water quality formation and evolution in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4157-4170.
- [19] 孙亚军,熊小锋,陈歌,等.煤矿矿井水水质形成及演化的水动力场-水化学场-微生物场耦合作用与数值模拟[J].煤炭学报,2024,49(2): 941-957.
SUN Yajun, XIONG Xiaofeng, CHEN Ge, et al. Numerical modeling of coupled hydrodynamic-chemical-biodegradation processes in coal mine water quality formation and evolution[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 941-957.
- [20] 张莉,徐智敏,孙亚军,等.煤矿矿井水水质形成及演化的水化学-微生物场作用及数学模型构建[J].中国矿业大学学报,2024,53(5): 943-959.
ZHANG Li, XU Zhimin, SUN Yajun, et al. Hydrochemical-microbial field interaction and mathematical model construction of the water quality formation and evolution in coal mine[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(5): 943-959.
- [21] 孙亚军,赵先鸣,徐智敏,等.煤矿采空区水?岩作用模拟试验研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(1): 237-246.
SUN Yajun, ZHAO Xianming, XU Zhimin, et al. Simulation test on water-rock interaction in coal mine goaf[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 237-246.
- [22] XIA H J, ZHANG H M, ZHANG J F. Research on damage mechanism and mechanical characteristics of coal rock under water immersion[J]. *Sustainability*, 2023, 15(17): 13095.
- [23] 何峰,王来贵,赵娜,等.煤岩蠕变破裂判定准则及应用[J].煤炭学报,2011,36(1): 39-42.
HE Feng, WANG Laigui, ZHAO Na, et al. Criteria for coal creep rupture and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(1): 39-42.
- [24] 姬红英,褚尉荃,张东营,等.不同pH浸润煤样三维分形力学特征与失稳机制[J].采矿与安全工程学报,2023,40(6): 1301-1314.
JI Hongying, CHU (WeiQuan), ZHANG Dongying, et al. Three-dimensional fractal mechanical characteristics and instability mechanism of different pH wetting coal specimens[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(6): 1301-1314.
- [25] 辛亚军,杨俊鹏,褚尉荃,等.不同pH值水溶液浸润煤样强度-分形模型与抗拉试验解析[J].中国矿业大学学报,2024,53(1): 79-92.
XIN Yajun, YANG Junpeng, CHU Weiquan, et al. Tensile test analysis and strength-fractal model on different pH water infiltrate coal specimens[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(1): 79-92.
- [26] 李竹,樊建宇,冯国瑞,等.隔水煤柱采动渗流耦合失效特征及其合理宽度[J].煤炭学报,2023,48(11): 4011-4023.
LI Zhu, FAN Jianyu, FENG Guorui, et al. Failure characteristics and reasonable width of water-resisting pillar under the coupling effect of mining and seepage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4011-4023.
- [27] 张村,贾胜,王方田,等.水岩作用下煤体孔隙演化特征及驱动机制实验研究[J].应用基础与工程科学学报,2023,31(1): 185-196.
ZHANG Cun, JIA Sheng, WANG Fangtian, et al. An experimental research on the pore and fracture evolution characteristics and its driving mechanism for coal samples under water-rock interaction[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(1): 185-196.
- [28] 尹大伟,孙鹏翔,胡浩,等.循环加载作用下压力水浸煤岩损伤劣化特征研究[J].煤炭学报:1-17
自助核对 YING Dawei, SUN Pengxiang, HU Hao, et al. Characterization of damage deterioration of pressure waterlogged coal rock under cyclic loading and unloading effects[J]. *Journal of China Coal Society*: 1-17.
- [29] 王方田,张村,汤天阔,等.循环水浸作用下煤体孔隙与损伤演化机制实验研究[J].矿业科学学报,2024,9(4): 608-618.
WANG Fangtian, ZHANG Cun, TANG Tiankuo, et al. Pore and strength damage evolution mechanism of coal induced by the circulating water immersion effect[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(4): 608-618.
- [30] 陈光波,李元,李潭,等.循环水岩作用下煤岩组合体力学响应及劣化机制[J].工程地质学报,2024,32(1): 108-119.
CHEN Guangbo, LI Yuan, LI Tan, et al. Mechanical response and deterioration mechanism of coal-rock combined body under the action of circulating water-rock[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(1): 108-119.
- [31] ULUSAY R. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014[M]. Cham: Springer, 2015.
- [32] 国家能源局.沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法: SY/T 5163—2018[S].北京:石油工业出版社,2018.
- [33] MT/T252-2000 煤矿水中钾离子和钠离子的测定方法[S].国家煤炭工业局,2000.
- [34] 煤矿水中钙离子和镁离子的测定: MT/T 202—2008[S].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [35] 煤矿水中氯离子的测定: MT/T 201—2008[S].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [36] 国家安全生产监督管理总局.煤矿水中硫酸根离子的测定: MT/T 205—2011[S].北京:煤炭工业出版社,2012.
- [37] DZ/T0064.49-2021 地下水质分析方法第49部分:碳酸根、重碳酸根和氢氧根离子的测定 滴定法[S].中华人民共和国自然资源部,2021.
- [38] 鞠金峰,李全生,许家林,等.采动岩体裂隙自修复的水-CO₂-岩相互作用试验研究[J].煤炭学报,2019,44(12): 3700-3709.
JU Jinfeng, LI Quansheng, XU Jialin, et al. Water-CO₂-rock interaction experiments to reveal the self-healing effect of fractured mining damaged rock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3700-3709.