

特约论文



平琦 博士,教授,博士生导师。安徽理工大学土木工程学科方向带头人,中青年学术骨干、优秀教师,入选安徽省高校学科(专业)带头人培育项目。中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会常务委员、岩石破碎工程专业委员会委员。主要从事岩石动力学、巷道围岩控制、地下空间科学与工程等领域研究,承担国家自然科学基金、安徽省自然科学基金和产学研合作项目等 20 余项,在《岩石力学与工程学报》《岩土力学》《爆炸与冲击》《采矿与安全工程学报》等期刊发表学术论文 60 余篇,其中 SCI/EI 收录近 50 篇,授权国家专利 10 余项,副主编或参编《岩石力学》等教材 3 部。

盐水作用对砂岩动态力学性能影响的试验研究

平琦^{a,b,c},谷金豆^{a,b},尹程^{a,b},焦悦^{a,b},付帮战^{a,b}

(安徽理工大学 a. 土木建筑学院; b. 矿山地下工程教育部工程研究中心; c. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽淮南 232001)

摘要:通过配制 5 种不同浓度的 NaCl 溶液模拟深部盐水层环境,将砂岩试件置于其中浸泡处理 28 d 后,测试其物理参数、矿物组成与微观形貌,研究其在盐水环境下的物理化学损伤规律。在此基础上,利用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置进行冲击压缩试验,进一步分析盐水浸泡作用与砂岩动态力学行为之间的耦合机制。结果表明:随 NaCl 浓度的增加,试件质量增加率缓慢上升,而体积膨胀率与密度增长率呈小幅波动,波动幅度分别低于 0.041% 和 0.089%。NaCl 溶液主要促使 Na⁺和试件表面 Ca²⁺发生离子交换,并引发部分矿物溶蚀脱落。在 NaCl 质量分数小于 10% 时,试件的动抗压强度、动峰值应变、应变率及破碎平均粒径均逐渐下降;当质量分数大于 10% 后,动抗压强度、动应变和应变率则按幂函数关系上升,而平均粒径服从指数函数增长规律。与天然状态试件相比,经 NaCl 处理的砂岩动抗压强度、动应变、应变率和平均粒径均有所降低,且破坏程度更为显著。本研究揭示了深部盐水环境下砂岩试件力学性能的演化规律与损伤机制,可为该类地层中围岩长期稳定性评估提供理论依据。

关键词:岩石动力学;砂岩;盐水作用;冲击压缩;动态力学特性;应变率效应;SHPB 试验装置;深部工程

中图分类号:TD 322 **文献标志码:**A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.25088



收稿日期: 2025-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52074005, 52074006);安徽省自然科学基金项目(1808085ME134);安徽省博士后基金项目(2015B058)

作者简介: 平琦(1975—),男,安徽淮南人,博士(后),教授,博士生导师,主要研究方向为岩石动力学和地下空间科学与工程等。

引文格式: 平琦,谷金豆,尹程,等. 盐水作用对砂岩动态力学性能影响的试验研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2025, 42(6):660-668.

Experimental Study on the Effect of Salt Water on the Dynamic Mechanical Properties of Sandstone

PING Qi^{a,b,c}, GU Jindou^{a,b}, YIN Cheng^{a,b}, JIAO Yue^{a,b}, FU Bangzhan^{a,b}

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education; c. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Through the preparation of five NaCl solutions with varying concentrations to simulate a deep saline aquifer environment, sandstone specimens were immersed in these solutions for 28 days. Basic physical parameters, mineral composition, and micromorphology were then tested to investigate the physicochemical damage behavior of sandstone under deep saline conditions. Subsequently, impact compression tests were conducted using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) apparatus to explore the coupling relationship between saline immersion and the damage mechanisms as well as the dynamic mechanical behavior of sandstone. The results indicate that as the NaCl concentration increases, the mass increase rate of the specimens rises gradually, while the volume expansion rate and density growth rate exhibit fluctuating trends, with fluctuation amplitudes remaining below 0.041% and 0.089%, respectively. It is observed that ion exchange between Na^+ and Ca^{2+} on the specimen surface is primarily induced by the NaCl solution, accompanied by partial mineral dissolution. When the mass fraction of NaCl is less than 10%, the dynamic compressive strength, dynamic peak strain, strain rate, and average fragment size are all found to decrease gradually; when the mass fraction exceeds 10%, the dynamic compressive strength, dynamic strain, and strain rate are shown to increase according to a power function relationship, while the average fragment size follows an exponential growth pattern. Compared with specimens in their natural state, the dynamic compressive strength, dynamic strain, strain rate, and average fragment size of sandstone treated with NaCl are all reduced, and the degree of damage is observed to be more severe. This study reveals the evolution patterns of mechanical properties and the damage mechanisms of sandstone specimens in saline environments, and provides a theoretical basis for the long-term stability evaluation of surrounding rock in deep saline aquifer-related engineering.

Keywords: rock dynamics; sandstone; salt water effect; impact compression; dynamic characteristic; strain rate effect; SHPB test apparatus; deep engineering

实现“双碳”目标是我国一项重大战略决策,在众多碳中和路径中,CO₂封存技术具有关键地位。深部盐水层因分布广泛、封存潜力巨大,被视为规模化封存CO₂的理想场所,其预估封存容量可达0.16~2.42万亿t^[1]。为确保CO₂以超临界状态被长期稳定封存,通常需将其注入距地表800 m乃至1 000 m以下的深层地质体中^[2]。这类地层普遍处于高矿化度盐水环境中,其对围岩力学性质的影响不可忽视。此外,在实际封存工程的钻井、注入及运营过程中,岩体常受到来自机械掘进和冲击地压等动荷载扰动作用^[3]。因此,研究NaCl溶液环境下砂岩的动态力学性能,对深入理解深部咸水层CO₂封存工程中岩体的力学响应及长期安全稳定性具有重要的理论意义与研究价值。

国内外学者围绕不同水溶液对岩石静动态力学性能的影响开展了大量研究。Lin等^[4]发现化学腐蚀会导致岩石静动态力学性能下降;Chen等^[5]、马记等^[6]、王伟等^[7]及李漪等^[8]通过三轴压缩试验验证了水化学溶液对岩石静态力学特性具有一定影响;韩铁林等^[9]基于单轴压缩试验发现,水化学溶液对钙质砂岩力学特性影响显著,促使砂岩由脆性向延性转化;谢妮等^[10]通过三点弯曲试验也证实水化学作用对砂岩的强度及脆韧性特征具有明显影响;李铭等^[11]结合离子浓度测定与单轴压缩试验,发现经尾矿水浸泡试件的强度和弹性模量下降幅度大于自来水浸泡组。然而,静态试验难以真实反映实际工程中遇到的动态荷载特征。近年来,平琦等^[12]采用分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar,

SHPB) 试验发现,酸性和碱性溶液对砂岩动态力学特性的影响大于中性溶液;Zhou 等^[13]、Huang 等^[14]及张晨等^[15]的试验表明酸溶液对砂岩具有腐蚀和软化效应;Ping 等^[16]的 SHPB 试验证实,强碱溶液腐蚀后的砂岩动抗压强度较天然状态发生明显变化。考虑到深部盐水层中地下水的主要化学成分为钠离子和氯离子构成的 NaCl 溶液,仅研究其他类型水化学溶液难以真实反映该地质环境对岩石力学行为的影响。刘振^[17]研究发现,NaCl 溶液饱和砂岩的峰值应力与裂纹损伤应力随盐水浓度增加呈先升后降趋势;洪王星^[18]、Yang 等^[19]与 Huang 等^[20]的研究进一步表明,不同浓度的 NaCl 溶液对岩石力学性能影响存在差异,低浓度条件下产生劣化效应,而高浓度条件下力学特性反而出现一定程度的恢复;Sun 等^[21]通过对比发现,盐水对煤岩力学性质的弱化作用比蒸馏水更显著;Li 等^[22]研究也证实了中性 NaCl 溶液对砂岩力学性质具有影响。此外,Shukla 等^[23]和 Rathnaweera 等^[24]通过单轴压缩试验证明,中性 NaCl 溶液对砂岩的抗压强度及裂纹扩展等力学行为具有显著作用。

在现有研究中,尽管众多学者对不同化学溶液环境下岩石的静动态力学特性已开展广泛探讨,但针对 NaCl 溶液腐蚀后砂岩动态力学行为的研究仍相对有限,特别是基于 SHPB 装置开展冲击压缩试验的系统分析尚显不足。据此,本文通过模拟深部盐水层工程环境,采用不同浓度 NaCl 溶液对砂岩试件进行腐蚀处理,并利用 SHPB 装置开展动态压缩试验,研究 NaCl 溶液对试件动态力学性能及破坏特征的演化规律,以期对深部咸水层能源储库施工及其他类似动载环境下岩体工程的稳定性设计与安全控制提供理论依据与实践参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验岩样采自安徽省淮南市张集煤矿巷道砂岩,依据《岩石动力特性试验规程》^[25],将其加工为高径比 0.5 的圆柱体试件,通过取芯、切割与打磨等工序,最终制成直径 50 mm、高度 25 mm 的标准试件。

1.2 试验过程

1.2.1 盐水浸泡试验

为模拟深部盐水层环境,将砂岩试件置于不同浓度的 NaCl 溶液中,采用分析纯级 NaCl 晶体和纯净水配制质量分数为 5%、10%、15%、20%、25% 的 NaCl 溶液。试件在溶液中自然浸泡 28 d 以达到饱

和状态,随后采用吸水性布料擦干表面水分,测量其质量与尺寸变化,最后用密封袋封存保存,以备后续试验使用。试件浸泡情况如图 1 所示。



图1 试件浸泡实况

Fig. 1 Immersion test specimen live

1.2.2 冲击压缩试验

在 0.25 MPa 的冲击气压条件下,采用如图 2 所示的 SHPB 装置对经不同浓度(质量分数为 0%~25%)NaCl 溶液浸泡 28 d 后的砂岩试件进行动态冲击压缩试验。该 SHPB 系统主要由撞击杆、入射杆和透射杆组成,各杆体均为直径 50 mm 的弹性钢杆,长度分别为 800, 2 500, 2 000 mm,系统材料的纵波波速 $5\ 113\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、弹性模量 206 GPa。



图2 SHPB 装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SHPB device

试验前先将入射杆与透射杆调整至严格对中并保持同轴;安装试件时在其两端接触面均匀涂抹适量凡士林以减小端部摩擦效应,安装完成后加设护挡板以防试件破碎时碎片飞溅。采用压缩气体作为加载源,通过智能控制系统精确调节驱动气压以控制冲击速度,使撞击杆撞击入射杆产生应力波。依据一维应力波理论与应力均匀性假设,采用三波法^[26]处理采集数据,进而获得动抗压强度、动应力及动应变等动力学参数。

1.2.3 微观特性测试与筛分试验

为分析盐水作用对砂岩矿物组成与微观结构的影响,采用 Smartlab SE 型 X 射线衍射仪(X ray diffractometer, XRD)和 S-3400N 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分别对天然状态及经盐水浸泡后的试件进行物相分析与微观形貌观测。SEM 测试前,将选取的碎块切割为规整片状并固定于观测点,随后进行观测。XRD 测试则需

将碎块研磨成粉末状并置于测试板上, 再将测试板放入衍射仪中静待直至测试完成。

为分析盐水作用对砂岩冲击后平均粒径的影响, 采用 STSJ-4 型数显高频振筛机对冲击试验后的试件碎块进行筛分, 所选筛网孔径依次为 0, 0.15, 0.30, 0.60, 1.18, 2.23, 4.75, 9.50, 13.20 mm。试验时将碎块置于最上层筛网, 启动振筛机持续筛分 1 min 后停止, 随后逐层称量上述不同孔径筛网中残留碎块的质量, 据此计算试件的平均粒径。

2 结果与分析

2.1 盐水作用对砂岩物理性能的影响

2.1.1 基本物性参数

NaCl 溶液作用前后砂岩的基本物性参数变化如图 3 所示。

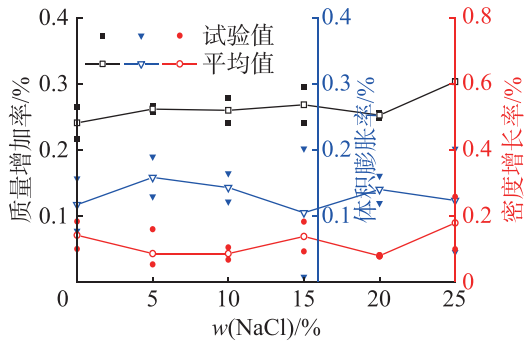


图3 砂岩试件基本物理性能随 NaCl 含量的变化规律

Fig. 3 Variation of basic physical properties of sandstone with NaCl content

从图 3 可看出: 随着 NaCl 含量 (质量分数为 0%~25%) 的逐渐增加, 砂岩试件的质量增加率呈现缓慢上升趋势, 而体积膨胀率和密度增长率则在一定范围内波动, 波动幅度分别不超过 0.041% 和 0.089%。这主要是由于随着 NaCl 含量增加, 填充于试件内部孔隙的溶液密度相应增大, 从而引起试件质量持续增加; 同时, 水分子侵入导致矿物颗粒发生膨胀, 且溶液中 Na⁺与试件表面 Ca²⁺发生离子交换并伴随颗粒脱落, 这些共同作用致使试件体积膨胀率产生波动, 进而使得密度增长率也呈现相应的波动特征。

2.1.2 表观形态变化特征

经 NaCl 溶液作用砂岩试件的表观形态如图 4 所示。

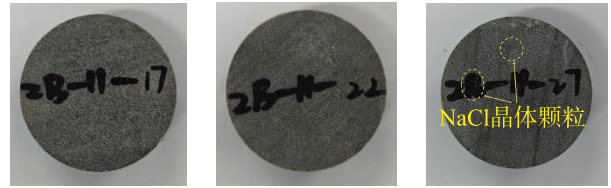
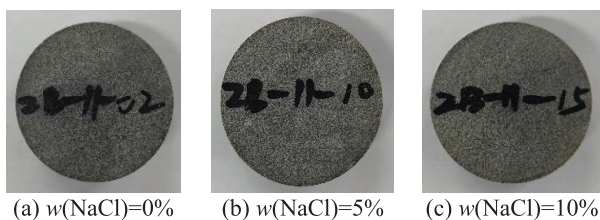


图4 NaCl 溶液作用试件的表观形态

Fig. 4 Apparent morphology of specimens treated with NaCl solution

从图 4 可看出: 随着 NaCl 含量的增加, 砂岩试件的颜色逐渐加深, 颗粒感明显, 表面更为粗糙, 这主要是由于溶液长期作用导致试件表面结构软化、矿物脱落所致; 当 NaCl 质量分数达到 25% 时, 试件表面有白色 NaCl 晶体颗粒析出并积聚。

2.2 盐水作用对砂岩动力学特性的影响

2.2.1 动应力-动应变曲线

经不同浓度 NaCl 溶液处理后的砂岩试件, 其在 SHPB 冲击压缩试验中的动应力-动应变曲线如图 5 所示。

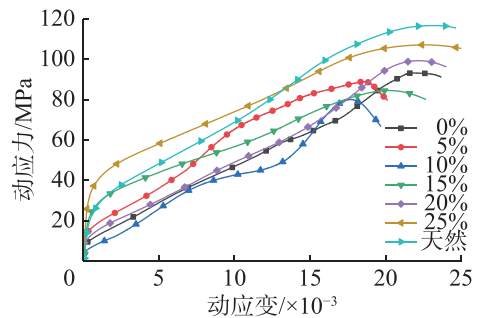


图5 NaCl 作用砂岩的动应力-动应变曲线

Fig. 5 Dynamic stress-strain curve of sandstone under NaCl action

从图 5 可看出: 经 NaCl 溶液作用后, 砂岩试件的动应力-动应变曲线整体向右上方偏移, 所有曲线均呈现出相似的三阶段特征: 弹性阶段, 随应变增大试件应力上升, 曲线斜率近似直线; 塑性阶段, 由于冲击作用, 试件内部裂纹发生扩展, 到达弹性应力极限后试件产生塑性变形, 曲线逐渐凹陷; 破坏阶段, 试件动应力达到峰值, 破坏发展也相应达到顶峰, 曲线呈下降趋势。

2.2.2 动抗压强度

经 NaCl 溶液处理后砂岩试件的动抗压强度 (σ) 变化情况如图 6 所示。从图 6 可看出: 随着 NaCl 含量的增加, 试件的动抗压强度呈现先减小后增加的趋势, 并在 NaCl 质量分数为 10% 时达到最小值, 为该曲线的拐点; 在 NaCl 质量分数 0%~10% 范围内, 动抗压强度持续下降, 与天然状态试件相比, 在质量

分数 0%, 5%, 10% 的溶液环境中分别降低了 25%, 28%, 36%; 当 NaCl 质量分数增至 15%~25% 时, 动抗压强度转为上升趋势, 在质量分数 15%, 20%, 25% 的 NaCl 溶液环境中, 其值较最低点分别提高了 23%, 32%, 43%; 在质量分数 10%~25% 区间, 动抗压强度随 NaCl 含量增加呈幂函数关系增长, 拟合相关系数为 0.974 8, 具体关系式如下:

$$\sigma = 29.674(1+w)^{0.393} \quad (1)$$

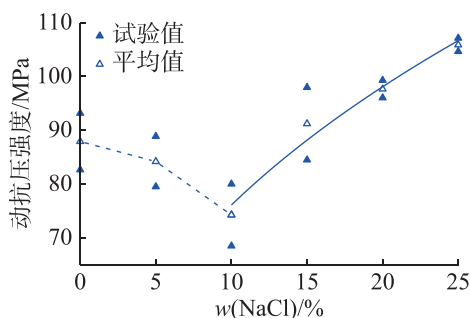


图6 动抗压强度随 NaCl 含量的变化规律

Fig. 6 Variation of dynamic compressive strength with NaCl content

这是由于当 NaCl 质量分数低于 10% 时, 水化反应、润滑及离子交换共同作用弱化了岩石内部结构, 导致砂岩中微裂隙与微孔洞增多; 同时溶液中离子或 NaCl 分子吸附在试件表面, 降低了岩石表面能和断裂能, 从而引起强度下降。当质量分数达到 10% 时, 盐水的侵蚀劣化效应与后续可能产生的强化效应达到平衡。质量分数超过 10% 后, 随着时间推移, 溶液中析出的 NaCl 晶体逐渐填充于岩石内部的微裂隙与微孔洞, 起到胶结与密实作用, 促使岩石强度转而逐步上升。

2.2.3 动应变

经 NaCl 溶液处理后砂岩试件的动应变 (ε) 变化情况如图 7 所示。

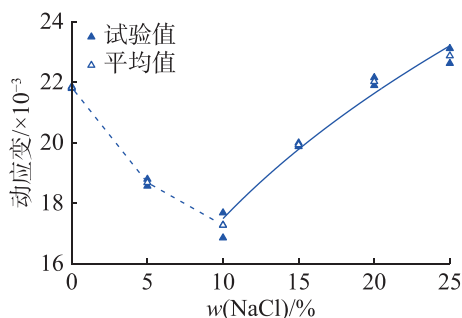


图7 动应变随 NaCl 含量的变化规律

Fig. 7 Variation of peak strain with NaCl content

根据图 7 可看出: 随着 NaCl 含量的增加, 试

件的动应变呈现先减小后增加的趋势, 并当 NaCl 质量分数为 10% 时动应变出现拐点, 达到最小值; 在 NaCl 质量分数为 0%~10% 范围内, 试件动应变呈下降趋势, 且质量分数 5% 的 NaCl 溶液比纯净水更显著地降低试件的动应变; 当 NaCl 质量分数在 10%~25% 范围内, 动应变随含量增加呈幂函数关系增大, 相关系数为 0.982 2, 具体拟合关系如下:

$$\varepsilon = 7.959(1+w)^{0.329} \quad (2)$$

这是由于低含量(质量分数小于 10%) NaCl 溶液中的盐离子能够抑制黏土矿物的水化膨胀反应, 避免因局部过度膨胀引起应力集中, 从而降低整体应变; 而当 NaCl 质量分数增至 10%~25% 时, 溶液中析出的盐分结晶使试件脆性增强, 从而导致动应变显著增大。

2.2.4 应变率

经 NaCl 溶液处理后砂岩试件的应变率 ($\dot{\varepsilon}$) 变化情况如图 8 所示。

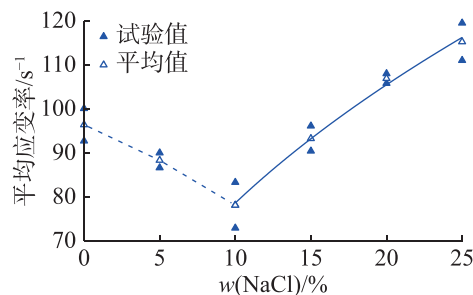


图8 应变率随 NaCl 含量的变化规律

Fig. 8 Variation of strain rate with NaCl content

由图 8 可看出: 随着 NaCl 含量的增加, 试件的应变率呈现先减小后增大的趋势; 当 NaCl 质量分数在 0%~10% 范围内时, 试件应变率持续下降, 其中在质量分数为 10% 的 NaCl 溶液处理后, 其应变率较天然状态及质量分数 5% 条件分别降低了 8%, 19%; 当质量分数增至 15%~25% 时, 应变率转为上升, 在质量分数为 15%, 20%, 25% 的 NaCl 溶液作用下, 应变率依次较质量分数 10% 时提高了 19%, 37%, 48%。在质量分数 10%~25% 区间内, 应变率随 NaCl 含量增加呈幂函数关系增长, 相关系数为 0.995 9, 具体拟合关系如下:

$$\dot{\varepsilon} = 26.413(1+w)^{0.4548} \quad (3)$$

2.3 盐水作用对砂岩矿物成分与微观结构影响

根据力学特性测试结果, 当 NaCl 溶液质量分数达到 10% 时, 砂岩的力学性能出现明显转变, 且在

10%~25% 范围内表现出与低浓度阶段 (质量分数 10% 以下) 不同的力学行为。为探究盐水作用对砂岩力学性能影响的内在机理, 对经质量分数 10% 与 25%NaCl 溶液处理前后试件的矿物组成与微观结构进行分析。

2.3.1 矿物成分变化特征

经质量分数 10% 与 25%NaCl 溶液处理前后试件的 XRD 谱图如图 9。由图 9 可看出: 天然砂岩的主要矿物组分为石英 [SiO₂]、钙长石 [CaAl₂Si₂O₈·4H₂O]; 随着 NaCl 含量增加, 石英的衍射强度逐渐减弱, 但未检测到新矿物生成, 表明 NaCl 溶液与砂岩之间的水化学反应较弱, 二者相互作用主要体现为水的物理化学软化及 Na⁺与矿物中 Ca²⁺等阳离子的交换过程。

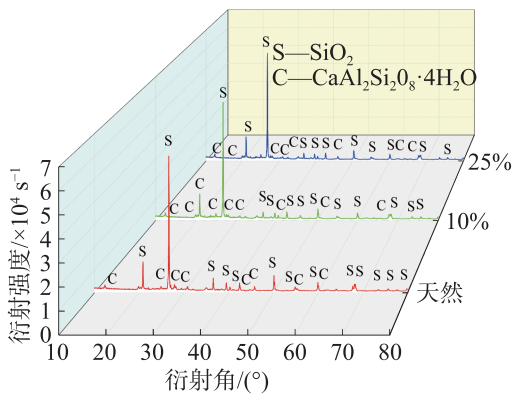
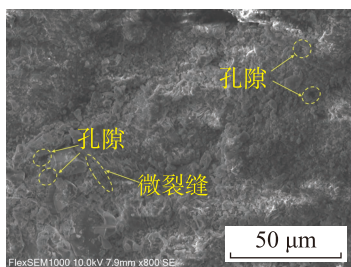


图9 NaCl 作用砂岩的 XRD 谱图

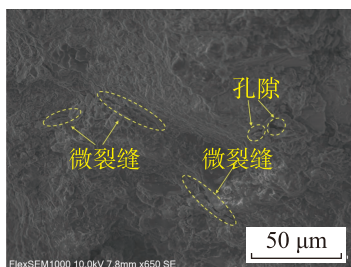
Fig. 9 XRD spectrum of NaCl-affected sandstone

2.3.2 微观结构特征

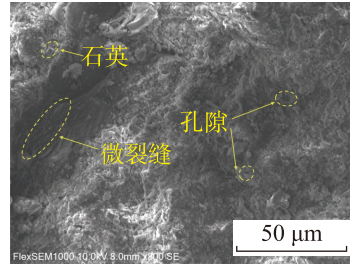
天然砂岩及经质量分数为 10% 与 25%NaCl 溶液作用后砂岩试件的 SEM 形貌如图 10 所示。



(a) 天然砂岩



(b) w(NaCl)=10%



(c) w(NaCl)=25%

图10 天然砂岩以及盐水作用砂岩试件的 SEM 形貌

Fig. 10 SEM morphology of natural sandstone and saline sandstone specimens

由图 10 可看出: 随着 NaCl 含量的增加, 试件内部发生溶蚀劣化, 结构逐渐粗糙, 微裂隙与孔隙数量明显增多; 与天然砂岩相比, 经质量分数 10%NaCl 溶液浸泡后的砂岩矿物颗粒间连接明显减弱, 而当 NaCl 质量分数增至 25% 时, 其微裂隙及孔隙中有 NaCl 颗粒填充。

2.4 盐水作用对砂岩破坏形态的影响

为分析 NaCl 含量对砂岩破碎程度与破坏模式的影响, 图 11 给出了经不同质量分数 NaCl 处理后的试件在 SHPB 冲击下的破坏形态。

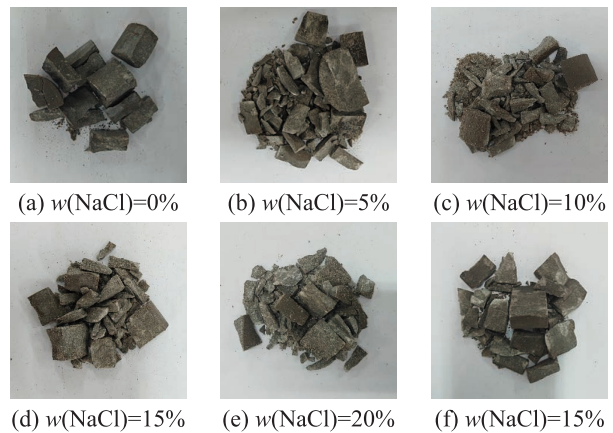


图11 经 NaCl 溶液作用砂岩的冲击破裂形态

Fig. 11 Fracture morphology of sandstone under impact loading after NaCl solution

由图 11 可见: 经 NaCl 溶液处理后, 砂岩在冲击压缩作用下的破碎程度随 NaCl 含量增加呈先增大后减小的趋势。天然砂岩内部仅存在少量天然微孔隙和微裂缝, 故破碎后块度较大; 在低含量 (质量分数 < 10%) NaCl 溶液处理阶段, 水化反应及 Na⁺与 Ca²⁺的置换作用占据主导, 导致次生微裂隙和孔隙发育, 结构趋于松散, 更易破碎, 表现为破碎程度增大; 而当 NaCl 含量升高 (质量分数 > 10%) 后, 溶液中析出的晶体逐渐填充并胶结原有及新生的微裂隙与孔隙, 从而增强结构的整体性与连续性, 抗破碎能力相应

提升,破碎程度随之减小。

为定量比较经 28 d NaCl 溶液处理与天然状态试件在 SHPB 冲击后的破碎程度,采用碎块平均粒径 (d_s) 作为评价指标进行评估,其计算公式如下:

$$d_s = \frac{\sum w_i d_i}{\sum w_i} \quad (4)$$

表 1 经 NaCl 溶液处理后砂岩的冲击破碎粒组分布

Tab. 1 Particle size distribution of impact-induced fragments for sandstone treated with NaCl solution

w(NaCl)/%	试件编号	筛孔尺寸/mm									总质量/g	平均粒径/mm
		0	0.15	0.30	0.60	1.18	2.23	4.75	9.50	13.20		
0	ZB1103	0.106	0.195	0.683	0.921	1.905	5.932	21.210	19.892	77.985	128.829	18.258
5	ZB1106	0.138	0.207	0.693	0.828	1.664	5.465	18.772	32.185	67.233	127.185	17.324
10	ZB1111	0.249	0.262	0.905	1.327	2.552	7.596	20.337	31.242	62.250	126.720	16.485
15	ZB1119	0.041	0.121	0.383	0.605	0.983	3.637	15.503	21.879	85.330	128.482	19.516
20	ZB1122	0.069	0.135	0.391	0.580	0.849	2.059	5.168	20.323	97.679	127.251	21.367
25	ZB1126	0.028	0.045	0.140	0.240	0.372	1.568	5.749	15.793	101.911	125.848	22.046
天然	ZB1138	0.055	0.041	0.097	0.179	0.704	0.793	1.636	7.465	114.885	125.855	23.621

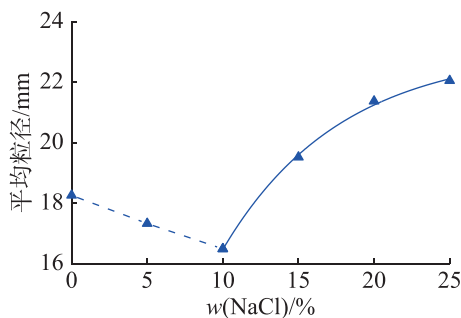


图12 砂岩平均粒径与 NaCl 含量的关系曲线

Fig. 12 Relationship between mean particle size of sandstone and NaCl content

由表 1 可看出:天然状态下碎块平均粒径为 23.621 mm;经质量分数为 0%, 10%, 10% 的 NaCl 溶液作用后,平均粒径依次降至 18.258, 17.324, 16.485 mm,较天然状态分别下降 22.7%, 26.7%, 30.2%;而经质量分数 15%, 20%, 25% NaCl 溶液作用后,平均粒径则回升至 19.516, 21.367, 22.046 mm,较最低值(质量分数 10% 下的 16.485 mm)分别提升了 18.4%, 29.6%, 33.7%。

由图 12 可看出:随 NaCl 含量的增加,经 SHPB 装置冲击后试件的平均粒径呈先减后增的趋势。当 NaCl 质量分数在 0%~10% 范围内时,试件的平均粒径逐渐下降,其中经质量分数为 0%, 10% NaCl 的溶液处理后的试件平均粒径分别较天然状态降低了 5% 与 10%;而当质量分数升至 15%~25% 时,平均粒径转为上升,经 15%, 20%, 25% 溶液处理后的试件平均粒径较最低点(10% 时)分别提高了 18%,

式中: d_i 为各孔径筛对应的粒径; w_i 为对应的碎块质量分数。

对冲击破碎后的碎块进行筛分并称量记录筛余质量,结果如表 1。基于该数据进一步绘制冲击后砂岩平均粒径随 NaCl 含量变化的关系曲线,如图 12 所示。

30%, 34%。在质量分数 10%~25% 范围内,平均粒径随 NaCl 含量增加呈指数型增长,拟合相关系数达 0.998 6,具体关系式如下:

$$d_s = 23.067 - 23.866e^{-0.129w} \quad (5)$$

3 结论

配制质量分数为 5% 至 25% 的 5 种 NaCl 溶液,模拟深部盐水层环境,对砂岩试件进行 28 d 浸泡试验,测定其物理参数变化;进一步利用 SHPB 装置在相同冲击气压下进行动态冲击压缩试验,研究盐水环境对砂岩性能的影响,得到如下主要结论:

1) 随着 NaCl 含量的增加,试件表面颜色逐渐加深,表面粗糙度增大,质量增加率总体呈上升趋势,而体积膨胀率的波动幅度保持在 0.041% 以内。

2) 不同浓度 NaCl 溶液处理后,砂岩试件的动应力-应变曲线形态相似,整体向右上方偏移,均可划分为 3 个典型阶段;随 NaCl 含量增加,试件的动抗压强度、峰值应变和应变率在溶液质量分数低于 10% 时逐渐下降,在质量分数超过 10% 后则按幂函数关系显著上升,各项参数均在 10% 质量分数时达到最低值。

3) 随着 NaCl 含量增加,砂岩中石英的衍射峰强度逐渐减弱,但 XRD 图谱中并未检测到新物相生成,表明 NaCl 溶液与砂岩之间的水化学反应较弱,其作用机制以水的物理化学软化和离子交换为主。微观结构观察显示,经 NaCl 溶液浸泡后,砂岩断面中裂隙与孔隙数量明显增多。

4) 砂岩的动力学性能、破坏程度及碎块平均粒径随 NaCl 含量的增加均表现为先降低(或减小)后提高(或增大)的变化规律,在质量分数为 10% 时发生性能转折,此时试件破坏程度与平均粒径均达到最小值。

参考文献:

- [1] 张贤,杨晓亮,鲁玺,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[R].中国21世纪议程管理中心,全球碳捕集与封存研究院,清华大学,2023.
ZHANG X, YANG X L, LU X, et al. China Carbon, Utilization and Storage Annual Report (2023) [R]. ACCA21, Global CCS Institute, Tsinghua University, 2023.
- [2] 李果,陈军涛,傅子群,等.含水层空间定向封存二氧化碳治理水害技术探讨[J].矿业研究与开发,2024,44(12):177-185.
LI G, CHEN J T, FU Z Q, et al. Discussion on water disaster control technology of directional storage of carbon dioxide in aquifer space[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(12):177-185.
- [3] 袁亮,王恩元,马衍坤,等.我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J].煤炭学报,2023,48(5):1825-1845.
YUAN L, WANG E Y, MA Y K, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5):1825-1845.
- [4] LIN Y, ZHOU K P, LI J L, et al. Weakening laws of mechanical properties of sandstone under the effect of chemical corrosion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(4):1857-1877.
- [5] CHEN L, JIA B X, ZHANG S G. Study on mechanical behavior and energy mechanism of sandstone under chemical corrosion[J]. Materials, 2022, 15(4):1613.
- [6] 马记,万文,田洪义,等.低速水流作用下砂岩力学特性与参数损伤特性[J].矿业研究与开发,2022,42(12):113-119.
MA J, WAN W, TIAN H Y, et al. Mechanical properties and parametric damage characteristics of sandstone under the action of low-velocity water flow[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(12):113-119.
- [7] 王伟,刘桃根,吕军,等.水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3607-3617.
WANG W, LIU T G, LYU J, et al. Experimental study on the influence of water-rock chemical action on mechanical properties of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2):3607-3617.
- [8] 李漪,王红伟,彭斌,等.重庆红层砂岩水化学损伤特性研究[J].安全与环境工程,2025,32(3):112-120.
LI Y, WANG H W, PENG B, et al. Damage of red sandstone in Chongqing caused by hydro-chemical processes[J]. Safety and Environmental Engineering, 2025, 32(3):112-120.
- [9] 韩铁林,师俊平,陈蕴生,等.水化学作用下钙质砂岩力学特性的劣化及能量机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3793-3804.
HAN T L, SHI J P, CHEN Y S, et al. Experimental study on deterioration of mechanical properties and energy mechanism of calcareous sandstone under hydrochemical action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2):3793-3804.
- [10] 谢妮,孙晨光,李鹏程.水化学作用下砂岩力学特性劣化试验研究[J].科学技术与工程,2021,21(23):9805-9813.
XIE N, SUN C G, LI P C. Experimental study on mechanical properties degradation of sandstone under hydrochemical action[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23):9805-9813.
- [11] 李铭,杨斌,胡军,等.尾矿水浸泡对砂岩结构及力学特性影响研究[J].金属矿山,2024(6):31-37.
LI M, YANG B, HU J, et al. Study on the effect of tailings water immersion on the structure and mechanical properties of sandstone[J]. Metal Mine, 2024(6):31-37.
- [12] 平琦,胡薇,后健民.酸碱腐蚀作用下含孔砂岩试件动力学性能试验研究[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2025,42(4):424-432,444.
PING Q, HU W, HOU J M. Experimental study on dynamic mechanical properties of porous sandstone specimens subjected to acid-alkali corrosion[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2025, 42(4):424-432,444.
- [13] ZHOU X P, YU T Y. Experimental study on the dynamic failure behaviors of granite after chemical corrosion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(11):7923-7937.
- [14] HUANG X, PANG J Y, ZOU J Q. Study on the effect of dry-wet cycles on dynamic mechanical properties of sandstone under sulfuric acid solution[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(3):1253-1269.
- [15] 张晨,康志强,辛东夫.基于DIC技术的不同化学腐蚀后黄砂岩裂纹演化规律研究[J].采矿技术,2022,22(4):142-149.
ZHANG C, KANG Z Q, XIN D F. Study on crack evolution law of yellow sandstone after different chemical corrosion based on DIC technology[J]. Mining Technology, 2022, 22(4):142-149.
- [16] PING Q, WANG C, GAO Q, et al. Experimental study on dynamic mechanical properties of sandstone corroded by strong alkali[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15):7635.
- [17] 刘振.不同浓度盐水环境下砂岩流变力学特性试验及本构模型研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
LIU Z. Experimental and Constitutive Model Study of sandstone rheological properties indifferent concentrations of Brine[D].Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2022.
- [18] 洪王星.不同盐水环境下页岩力学行为及破坏机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
HONG W X. Study on Mechanical Behavior and Damage Mechanism of Shale in Different Saline Environments[D]. Xuzhou:China University of Mining & Technology, 2023.
- [19] YANG S Q, HONG W X, WANG J G, et al. Experimental investigation on the influence of NaCl concentration on triaxial mechanical behaviors of a low-clay shale[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 176:105716.

- [20] HUANG Y H, YANG S Q, HALL M, et al. The effects of NaCl concentration and confining pressure on mechanical and acoustic behaviors of brine-saturated sandstone[J]. *Energies*, 2018, 11(2):385.
- [21] SUN X Y, LIU K, JIN T X, et al. Dynamic mechanical response and failure characteristics of coal and rock under saltwater immersion conditions[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14:11869.
- [22] LI X P, QU D X, LUO Y, et al. Damage evolution model of sandstone under coupled chemical solution and freeze-thaw process[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 162:88–95.
- [23] SHUKLA R, RANJITH P G, CHOI S K, et al. Mechanical behaviour of reservoir rock under brine saturation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(1):83–93.
- [24] RATHNAWEERA T D, RANJITH P G, PERERA M S A. Salinity-dependent strength and stress–strain characteristics of reservoir rocks in deep saline aquifers: an experimental study[J]. *Fuel*, 2014, 122:1–11.
- [25] 中国岩石力学与工程学会. 岩石动力特性试验规程: T/CSRME 001—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering. Technical Specification for Testing Method of Rock Dynamic Properties: T/CSRME 001—2019 [S]. Beijing: China Standards Press, 2019.
- [26] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014. LI X B. Fundamentals and Applications of Rock Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2014.

责任编辑: 丁吉海

(上接第 642 页)

- [6] XING Y, HE X Y, LI X D. Lyapunov conditions for finite-time stability of disturbed nonlinear impulsive systems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2023, 440:127668.
- [7] LI C X. Stability of delay differential systems under impulsive control suffered by logic choice[J]. *International Journal of Systems Science*, 2023, 54(12):2442–2451.
- [8] LI J, ZHANG Y. Input-to-state stability of discrete-time time-varying impulsive delay systems[J]. *International Journal of Systems Science*, 2022, 53(14):2860–2875.
- [9] ZHANG X M, HAN Q L. Time-delay systems and their applications[J]. *International Journal of Systems Science*, 2022, 53(12):2477–2479.
- [10] LI W J, ZHANG Z Q. Output feedback neural adaptive control design for nonlinear time-delay systems[J]. *International Journal of Control*, 2024, 97(3):495–510.
- [11] LI L N, ZHANG J E. Input-to-state stability of stochastic nonlinear system with delayed impulses[J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2024, 21(2):2233–2253.
- [12] XU H F, ZHU Q X. New criteria on p -th moment exponential stability of stochastic delayed differential systems subject to average-delay impulses[J]. *Systems & Control Letters*, 2022, 164:105234.
- [13] LIU Y, XU J Y, LU J Q, et al. Stability of stochastic time-delay systems involving delayed impulses[J]. *Automatica*, 2023, 152:110955.
- [14] LI Q F, LI J L. p th moment exponential stability of stochastic delayed differential systems with impulsive control involving delays[J]. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 2024, 70(2):1633–1645.
- [15] XU H F, ZHU Q X. New criteria on exponential stability of impulsive stochastic delayed differential systems with infinite delays[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2022, 111:106460.
- [16] ABDELMALEK Z, SOFIANE B, MOHAMMED C, et al. Dynamic sensorless control approach for Markovian switching systems applied to PWM DC–DC converters with time-delay and partial input saturation[J]. *Sensors*, 2023, 23(15):6936
- [17] SHI J M. Optimal control of multiple Markov-switching stochastic systems with numerical applications[J]. *Results in Control and Optimization*, 2022, 7:100113.
- [18] MOUSSA K, NATHAN J D. Linear quadratic gaussian homing for Markov processes with regime switching and applications to controlled population growth/decay[J]. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 2020, 23(3):1–18.
- [19] KI Y P, SOOHYON K. Detecting currency manipulation: an application of a state-space model with Markov switching[J]. *Japan and the World Economy*, 2019, 49: 50–60.
- [20] WANG M X, LI W X. Stability of random impulsive coupled systems on networks with Markovian switching[J]. *Stochastic Analysis and Applications*, 2019, 37(6): 1107–1132.
- [21] XU J, SUN J T, YUE D. Stochastic finite-time stability of nonlinear Markovian switching systems with impulsive effects[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2012, 134(1):011011.
- [22] YAO F Q, CAO J D, CHENG P, et al. Generalized average dwell time approach to stability and input-to-state stability of hybrid impulsive stochastic differential systems[J]. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2016, 22:147–160.
- [23] CHEN F, CHEN Y M, ZHU Q X, et al. Stability of stochastic systems with semi-Markovian switching and impulses[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2023, 177: 114247.
- [24] HU W, ZHU Q X. Stability analysis of impulsive stochastic delayed differential systems with unbounded delays[J]. *Systems & Control Letters*, 2020, 136:104606.
- [25] LU J Q, DANIEL W C H, CAO J D. A unified synchronization criterion for impulsive dynamical networks[J]. *Automatica*, 2010, 46(7):1215–1221.
- [26] XU H F, ZHU Q X. Stability analysis of impulsive stochastic delayed differential systems with infinite delay or finite delay and average-delay impulses[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(16):8593–8608.

责任编辑: 何莉