

DOI:

水岩作用下变粒岩力学特性与局部损伤演化规律研究

王鲁男^{1,2}, 庞一博¹, 尹晓萌^{*3}, 张家豪¹, 白洪瑜¹

(1. 辽宁石油化工大学土木工程学院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 辽宁省石油化工特种建筑材料重点实验室, 辽宁 抚顺 113001;
3. 湖北文理学院土木工程与建筑学院, 湖北 襄阳 441053)

摘要: 水岩作用是深部地下工程围岩损伤失稳的重要诱发因素。采用单轴压缩试验、数字图像相关技术及微观结构测试, 研究在不同溶液长期浸泡下变粒岩力学性质、局部损伤及微观结构的变化规律, 探讨水岩作用对力学特性与损伤演化规律的影响机制。结果表明: 随着浸泡时间的增长, 变粒岩的弹性模量和单轴抗压强度非线性降低, 相应的劣化度非线性增加; 矿井水条件下力学性质的劣化程度高于蒸馏水条件, 但浸泡 150 d 后两者差距可以忽略。随着轴向加载的进行, 应变场经历从均匀化到局部化再到破裂的过程, 局部损伤发育水平逐渐升高, 表现为损伤强度因子非线性增大、峰值应力后剧增, 而损伤局部化因子波动性减小、峰值应力后持续下降。同时, 水岩作用对局部损伤发育具有促进作用, 峰值应力处的损伤发育水平随浸泡时间的增长而升高, 矿井水的促进作用更明显。此外, 变粒岩内水敏性物质与溶液发生水岩反应, 造成孔隙发育, 孔径增大, 微观结构趋于破碎, 且矿井水对微观结构的劣化更显著。

关键词: 变粒岩; 水岩作用; 力学特性; 局部损伤; 微观结构

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号:

作者简介: 王鲁男(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩体力学方面的研究工作。E-mail: wln6338@163.com。

Mechanical properties and local damage evolution of granulite under water-rock interaction

WANG Lunan^{1, 2}, PANG Yibo¹, YIN Xiaomeng³, ZHANG Jiahao¹, BAI Hongyu¹

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China; 2. Liaoning Key Laboratory of Petrochemical Special Building Materials, Fushun 113001, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

Abstract: Water-rock interaction is a crucial inducing factor for the damage and instability of surrounding rocks in deep underground engineering. Using the uniaxial compression test, digital image correlation technology, and microstructure test, this study investigated the changes in the mechanical properties, local damage, and microstructures of granulite subjected to long-term immersion in different solutions. The influence mechanisms of water-rock interaction on the mechanical properties and damage evolution were discussed. The results indicate that with increasing immersion time, both the elastic modulus and uniaxial compressive strength decrease nonlinearly, while the corresponding deterioration degrees increase nonlinearly. The deterioration of mechanical properties in mine water is more serious than that in distilled water; however, the difference can be neglected after soaking for 150 d. With the progress of axial loading, the strain field undergoes a process from homogenization to localization and to fracture. The development level of local damage rises gradually accompanied by a nonlinear increase in the damage severity factor and a rapid increase after the peak stress, and a fluctuant decrease in the damage localization factor and a constant decrease after the peak stress. Meanwhile, the water-rock interaction exerts a promoting effect on the development of local damage. The development level at the peak stress rises with the increase of immersion time, and the effect of mine water is more obvious. In addition, the water-sensitivity substances in granulite react with the solutions, resulting in the development of pores, the increase of pore sizes, and the fragmentation of microstructures. The microstructures in mine water are more visibly deteriorated.

Key words: granulite; water-rock interaction; mechanical property; local damage; microstructure

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41807240); 辽宁省教育厅基本科研项目 (LJ212410148050)

收稿日期:

*通信作者 (E-mail: xiaomengyin123@163.com)

0 引言

随着地下工程逐步向深部发展,大水矿山、富水隧道等具有复杂水文地质条件的工程项目日益增多^[1]。这类工程的围岩长期赋存于富水环境中,不可避免地发生水岩相互作用,出现软化、泥化、膨胀等损伤问题^[2];同时,围岩力学性质渐趋劣化,自稳能力变差,可能引发垮塌、冒顶、突水等工程地质问题,严重制约着地下工程的安全使用和服役寿命^[3]。因此,研究水岩作用下岩石力学特性与损伤演化规律,对富水环境下围岩变形控制和长期稳定具有重要的意义。

水通过与岩石发生复杂的物理、化学及力学作用而对其造成损伤,导致力学性质劣化,其作用效果除受控于岩石性质外,还与含水率、干湿循环、浸泡时间等有关^[4-6]。其中,含水率对岩石力学性质具有显著的影响,弹性模量、抗压强度、抗拉强度、特征强度等均随含水率升高而降低^[7-8]。在干湿循环方面,邓华锋等^[9]对节理砂岩进行了浸泡-风干循环试验,发现其力学性质参数在前3次循环中衰减快,之后趋于平缓;柴少波等^[10]对比了酸性和中性干湿环境对岩石的影响,提出酸性环境下强度衰减更加显著。在浸泡时间方面,任松等^[11]对石膏岩软化特性进行了研究,发现浸泡时间对力学性质参数的劣化最明显;王伟等^[12]根据力学试验结果,认为酸性和长期浸泡加剧岩石腐蚀软化;YIN等^[13]测定了不同浸泡时间下石膏岩力学性质参数,发现围压增加有助于缓解浸泡对强度的劣化。此外,李二强等^[14]观测了水岩作用下板岩的微观结构,提出其力学性质劣化是由溶解、溶蚀等引起。

在此基础上,学者们逐渐关注水岩作用下岩石损伤演化规律。耿殿栋等^[15]对比了泥页岩在两种钻井液浸泡下的力学损伤特性。刘保国等^[16]将渗透作用引入岩石损伤变量,构建了相应的损伤本构模型。张慧梅等^[17]研究了长期浸润下煤岩多尺度损伤演化规律。刘刚等^[18]基于声发射能量推导了孔隙水作用下砂岩损伤演化方程,以此分析其损伤演化阶段及特征。数字图像相关(DIC)技术具有非接触、全场测量等优点,广泛用于观测岩石的渐进损伤演化过程。例如,MUNOZ等^[19]采用DIC技术研究了循环荷载下砂岩渐进局部化特征;王天佐等^[20]通过分析表观变形场,探讨了不同循环加卸载路径下红砂岩损伤演化规律。

虽然学者们对水岩作用下岩石力学损伤演化进行了大量探索,但多数研究中水岩作用的持续时间较短,一般不超过半年,这与工程实际相差较大;对损伤演化研究多集中于宏观尺度的“平均损伤”或微观尺度的“孔隙损伤”,而受载岩石变形破坏过程实际上是从均匀变形-集中变形-宏观破裂的渐进损伤演化过

程,属于宏观尺度尺度的“局部损伤”。因此,本文利用单轴压缩试验和DIC技术,对不同溶液长期浸泡下变粒岩力学特性与损伤演化规律进行研究;结合卷积分理论和表观应变场,着重探讨水岩作用对局部损伤特性的影响;最后采用微观结构试验揭示水岩作用下变粒岩微观损伤机制。研究成果为探究富水环境下围岩力学损伤特性、评价地下工程稳定性提供重要的支撑。

1 试验方法

1.1 试样制备

试验所需岩石取自辽宁省新宾县某铁矿山。该矿山含水岩系发育、涌水量大,是典型的大水矿山;其巷道围岩以鞍山群变粒岩为主,在剧烈水岩作用下已发生多次局部垮塌、突水等工程事故。现场采用钻机进行取芯,选取埋深在350~370 m的岩芯制备标准圆柱体试样,直径50 mm,高100 mm,如图1所示。此外,测定试样的纵波速度和密度,剔除离散性较大试样,以降低非均质性对试验结果的影响。



图1 变粒岩试样

Fig. 1 Granulite samples

经测试,变粒岩密度在2.47~2.54 g/cm³之间;纵波速度介于5102~5757 m/s;由石英(27.94%)、伊利石(26.00%)、钠长石(18.88%)、绿泥石(12.41%)、白云母(7.01%)及其他矿物(7.76%)组成。其中,钠长石的水解性、伊利石和绿泥石的强吸水性导致变粒岩具有一定的水敏性^[21]。对典型试样进行抽真空饱和试验,绘制含水率随浸泡时间变化曲线,如图2所示。含水率呈快速增长-缓慢增长-逐渐稳定的变化趋势,整个过程可分为吸水阶段和饱水阶段。在吸水阶段,试样含水率非线性增长,直至浸泡17 h后含水率基本稳定在1.3%,试样进入饱水阶段。因此,可认为变粒岩在强制饱和17 h后达到完全饱和状态。

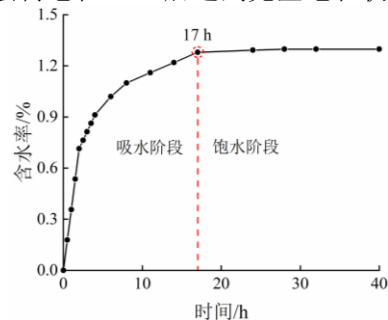


图2 典型试样含水率与浸泡时间关系

Fig. 2 Relationship between the moisture content of typical samples and immersion time

1.2 试验设备与试验方案

试验系统主要由加载设备和图像采集设备组成,如图3所示。加载设备为YAW-2000型单轴压力机,最大轴向力达2000 kN,测量精度 $\pm 1\%$ 。VIC-3D型全场应变测量系统负责图像采集,其硬件部分包括两台CCD相机(分辨率为 2448×2048 像素)、两台LED灯、标定装置及主控机等,负责采集单轴压缩试验中的散斑图像;其软件部分包括VIC-Snap软件和VIC-3D软件,分别负责散斑图像的采集控制和处理分析。该系统基于DIC技术,图像采集频率最高可达75张/s,应变测量范围在0.005%~2000%之间,测量精度为 $50 \mu\epsilon$ 。此外,试验设备还包括扫描电镜和全自动物理吸附仪,用于分析水岩作用下试样微观结构特征。

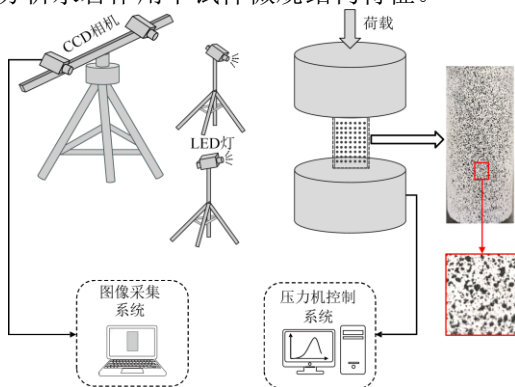


图3 试验系统示意图
Fig. 3 Test system diagram

结合工程实际与研究目标,制定试验方案如下:

(1) 浸泡试验:试样置于 105°C 的烘箱中干燥24 h,冷却后移入饱和缸中抽真空6 h;然后,将溶液导入饱和缸中进行浸泡,浸泡时间为3 d、15 d、30 d、150 d、360 d,溶液分别为蒸馏水和矿井水;蒸馏水为实验室自制,矿井水取自-360 m回采巷道的涌水点,与取芯位置相近,两种溶液主要离子质量浓度见表1;蒸馏水浸泡试样依次命名为D-3、D-15、D-30、D-150、D-360,矿井水浸泡试样依次命名为M-3、M-15、M-30、M-150、M-360,每组浸泡溶液的体积统一为5 L;此外,保留一组干燥样作为对照。

表1 浸泡溶液中离子质量浓度(mg/L)

Table 1 Ion mass concentration of immersion solutions (mg/L)

溶液类型	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
蒸馏水	0.0	2.2	3.4	1.6	12.1	7.3	2.5
矿井水	2.6	19.2	52.1	10.4	153.4	18.9	67.8

(2) 安装调试:将浸泡后的试样表面擦干,喷一层薄薄的均匀白色哑光底漆,待晾干后随机喷洒黑色哑光漆,形成可对比识别的散斑图案;再将带有散斑的试样放入单轴压力机中,利用VIC-Snap软件开展系统标定评估和散斑质量评估,通过后即可获取试样

初始散斑图像作为基准图像。

(3) 单轴压缩试验:对试样进行轴向加载,加载速率为 0.05 mm/min ;VIC-3D系统同步启动,以10张/s的频率采集试样在单轴压缩试验中的散斑图像;试验结束后,单轴压力机可自动导出应力-应变关系曲线及相应的力学性质参数;同时,所有的散斑图像(包括基准图像)全部导入VIC-3D软件中,经计算分析即可绘制加载过程中试样表现应变场。

(4) 微观结构试验:选取浸泡前后的典型试样进行微观结构试验,以扫描电镜观测表面的微观结构特征,以氮气吸附试验定量分析内部的孔径分布特征;结合溶液中离子质量浓度的变化规律,共同揭示水岩作用下变粒岩微观损伤机制。

2 水岩作用下变粒岩宏观力学损伤特性

为定量刻画变粒岩力学损伤程度,利用浸泡前后变粒岩试样的力学性质参数计算劣化度,公式如下:

$$Q_t = \frac{E_0 - E_t}{E_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_t = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_t 为浸泡 t 天时弹性模量的劣化度, E_0 为干燥状态下的弹性模量, E_t 为浸泡 t 天时的弹性模量; S_t 为浸泡 t 天时单轴抗压强度的劣化度, σ_0 为干燥状态下的单轴抗压强度, σ_t 为浸泡 t 天时的单轴抗压强度。

经计算,可得水岩作用下变粒岩试样弹性模量和单轴抗压强度的劣化度,如图4所示。当浸泡3 d、15 d、30 d、150 d、360 d时,蒸馏水条件下试样的弹性模量劣化度分别为24.62%、52.44%、62.35%、66.46%、67.85%,单轴抗压强度劣化度分别为24.24%、58.79%、65.05%、70.30%、73.74%;而矿井水条件下试样的弹性模量劣化度分别为37.25%、62.78%、66.41%、67.71%、68.36%,单轴抗压强度劣化度分别为36.57%、63.23%、68.69%、72.12%、74.75%。可见,随着浸泡时间的增长,两个力学性质参数非线性降低,而对应的劣化度非线性增加,即前期增加较快、后期增加较慢,在150 d后趋于稳定。这说明水岩作用逐渐放缓,对变粒岩力学性质的影响降低。其中,前3 d浸泡尤为特殊,试样不但承受着水岩作用,还面临着含水率升高的影响,故此阶段力学性质参数的劣化速率远超其他阶段。韩鹏华等^[21]将煤样浸泡在矿井水中360 d,得到弹性模量和单轴抗压强度的劣化度分别为73.54%和80.79%,其劣化规律与本文结果相似,但劣化程度更高,这主要是由于煤样中含有更丰富的水敏

性矿物（高岭石含量达 71.7%），对浸泡溶液的响应更加显著。此外，弹性模量的劣化度普遍低于单轴抗压强度的劣化度，这意味着水岩作用对变粒岩极限承载能力的劣化更强烈。水浸煤岩组合体也展现出同样的规律^[2]，但在浸泡中组合体试样含水率是持续上升的，两个力学性质参数的劣化程度差异更大。

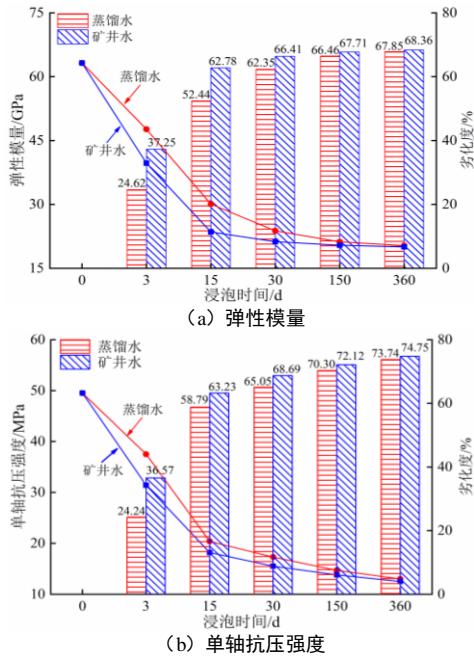


图 4 试样力学性质参数及其劣化度

Fig. 4 Mechanical property parameters and deterioration degrees of samples

整体看来，矿井水条件下试样力学性质的劣化程度要高于蒸馏水条件。当浸泡 3 d 时，两种条件下试样力学性质参数的劣化度相差最大；随着浸泡时间的增长，两者差距逐渐缩小；在浸泡达到 150 d 后，两种条件下的劣化度极为接近，差距可以忽略。这说明溶液类型对变粒岩力学性质的影响主要体现在前期；随着水岩作用的进行，溶液中部分离子质量浓度过高，水敏性物质减少，导致溶液侵蚀能力下降；当达到一定的浸泡时间时，水岩作用几乎不再发生，而溶液类型所带来的劣化差异被逐渐抹平。因此，若浸泡时间足够长，溶液类型对变粒岩力学性质的影响主要体现在劣化过程上，而对最终劣化程度影响不大。需要注意的是，该结论以室内试验结果为基础；而在实际岩石工程中地下水往往是流动的，其侵蚀能力不会出现大幅下滑，水岩作用可长期地进行，那么溶液类型对岩石力学损伤特性的影响将显著增强。

3 水岩作用下变粒岩局部损伤特性

3.1 应变场演化规律

结合单轴压缩试验和 VIC-3D 系统，观测水岩作用前后变粒岩在轴向荷载下的表观应变场演化规律。以浸泡 3 d、30 d、360 d 的典型试样为例，选取 4 个

时刻的应变场云图来反映应变场演化过程，如图 5 所示。其中，应变场为最大主应变场，其时空演化特征更加符合加载过程中试样表面裂纹的扩展规律和分布状况； σ_p 为峰值应力；最后一张图片为试样破裂图像。

可以看出，试样的应变场演化规律具有一定的共性，均经历从均匀化到局部化再到破裂的过程：在加载初期，应变场无明显变化；应力状态达到较高水平时，出现稳定的应变局部化带；随着应力水平超过 σ_p ，局部化带内产生宏观裂纹，试样发生破裂。例如，D-3 即便应力水平已达 $0.75\sigma_p$ ，但应变整体上依然较小，无应变集中现象，试样处于均匀变形阶段；随着加载达到 $0.85\sigma_p$ ，在云图的右侧和底端出现应变集中现象，试样进入应变局部化阶段；之后，局部化带随着加载的进行稳定扩展，表现为范围和应变值进一步增加；峰值应力后，局部化带快速发展，最终产生宏观裂纹，D-3 沿着应变局部化带发生张拉破坏。作为对比，D-360 加载至 $0.70\sigma_p$ 时，其两端已发育出应变局部化带；峰值应力后，底端的局部化带快速发展，形成一条倾斜的、近乎贯穿试样的宏观裂纹，而顶端的局部化带出现退化，未形成肉眼可见的宏观裂纹。最终，D-360 沿着倾斜应变局部化带发生剪切破坏。由此可见，随着浸泡时间的增长，试样应变场的演化过程大体相似，但局部化带的几何特征、启动条件、集中程度、分布范围等有所差异。对比蒸馏水，矿井水条件下试样破坏时的最大应变值更大，除此以外，溶液类型对试样应变场演化规律的影响并不显著。

随着加载的进行，变粒岩从均匀变形过渡到应变局部化再到宏观破裂，是典型的渐进性破坏过程。该过程不但是应变局部累积的结果，也是岩石材料局部损伤的结果。即便是部分应变局部化带由于“竞争失败”未形成宏观裂纹，但带内过大的应变引起材料刚度劣化，使得带内的岩石材料发生力学损伤^[19]；而带外的岩石材料因较小的累计变形基本保持完整，未出现力学损伤（或损伤极小，可忽略不计）。这符合学者们对岩石失稳的理解，即岩石失稳并不是岩石材料的整体性破坏，而是结构性失效。因此，受载岩石力学损伤是一种局部损伤，而非均匀损伤或平均损伤，通过 VIC-3D 系统获取的应变场演化过程及其局部化特征可用来探讨水岩作用下变粒岩局部损伤特性。

3.2 局部损伤识别与评价

岩石在荷载作用下发生变形破裂，伴有各种关键信息的异常变化，可用来表征岩石损伤演化规律。学者们已提出以弹性参数、超声波速等表征岩石损伤特性的方法，但大多为平均损伤，鲜有将应变场与局部损伤结合进行研究。本文基于 VIC-3D 系统获取的最大主应变场，探讨水岩作用下变粒岩局部损伤特性。

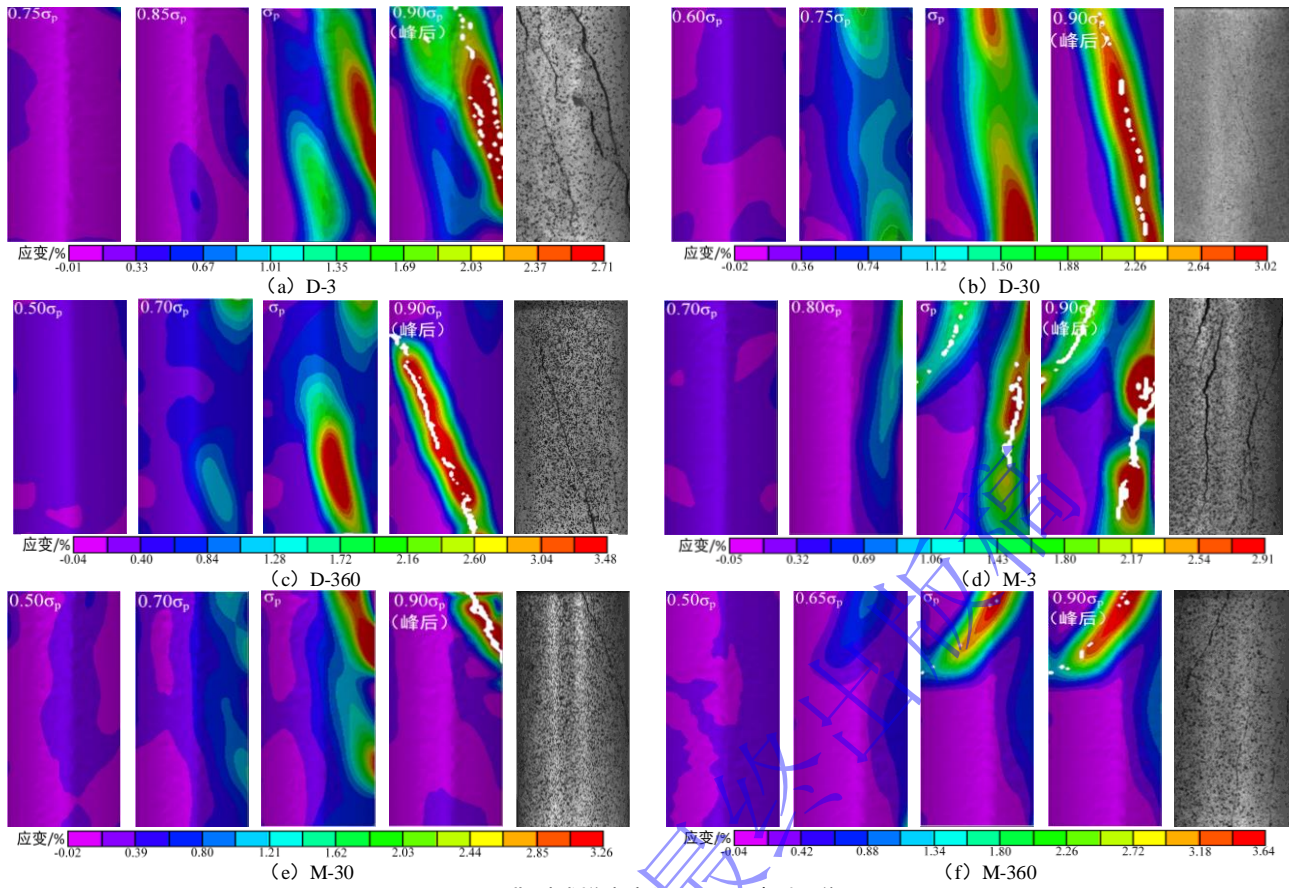


图5 典型试样应变场云图及破裂图像

Fig. 5 Strain field cloud charts and fracture images of typical samples

由上述可知,岩石的渐进性破坏过程是均匀变形-应变局部化-宏观破裂的过程,也是局部损伤区从无到有、逐渐发展、最终贯穿为宏观裂纹的过程。局部损伤区的形成与应变集中息息相关,一旦某处局部应变过大,就可能造成材料刚度劣化,从而达到损伤状态。SONG等^[22]通过对全场应变分布特征的统计分析,提出两个损伤参数(损伤强度因子 D_f 和损伤局部化因子 L_f)用于评估岩石局部损伤特性。 D_f 计算公式如下:

$$D_f = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_{\max}}, \quad (3)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\varepsilon_1)_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\varepsilon_1)_k \quad (4)$$

式中: ε_1 为最大主应变, $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\varepsilon_1)_k$ 为应变场中前 n 个数值较大应变点的平均值, $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\varepsilon_1)_k$ 为应变场中所有应变点的平均值, ε_{\max} 为 $\bar{\varepsilon}$ 的最大值,即临近破坏时 $\bar{\varepsilon}$ 值。 D_f 反映岩石局部损伤严重程度,取值范围为 0~1。荷载较小时,岩石处于无损伤状态, D_f 为 0; 随着加载, $\bar{\varepsilon}$ 逐渐增加, D_f 增大,岩石破坏时 D_f 达到 1。

此外,岩石在荷载作用下局部损伤越来越集中,表现为较大应变点由初始的无序分布逐渐向线性集中分布转变,最终发展为线性宏观裂纹。这种岩石局部损伤线性程度(或集中程度)由 L_f 来表征,公式如下:

$$L_f = 1 - \frac{\left| \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}} \right|}{1} \quad (5)$$

式中: x_k 和 y_k 为应变点 k 的坐标, \bar{x} 和 \bar{y} 为 $\{x_k\}$ 和 $\{y_k\}$ 的平均值。 L_f 取值范围为 0~1。荷载较小时,应变场中较大应变点呈随机分散状态, L_f 为 1; 随着加载,较大应变点逐渐线性集中, L_f 减小,向 0 趋近。

计算损伤参数的关键在于精确定应变场中较大应变点的数量 n 。SONG等^[22]将应变场中前 7% 的最大应变作为较大应变点;而王天佐等^[20]选取应变场中前 10% 的最大应变作为较大应变点。可见,较大应变点的确定还缺乏统一标准;且以固定百分比最大应变作为较大应变点的方法存在一定局限性。首先,在加载初期,试样表面变形相对均匀,损伤尚未形成,故 D_f 为 0,但利用该方法可计算出大于 0 的 D_f ,表明存在局部损伤,这与实际不符;其次,局部损伤区大小是动态变化的,在萌生初期范围很小,随着荷载的增大损伤区逐渐扩张,故以某一固定百分比最大应变作为较大应变点不甚合理。因此,利用卷积理论对应变场云图中局部损伤区边缘信息进行精准识别,确定较大应变点,并计算 D_f 和 L_f 以评估变粒岩局部损伤特性。

卷积运算能够显著增强目标(损伤区)与背景(非

损伤区)的对比度,从而达到精准识别局部损伤的目的。所用卷积算子应与目标具有相近的几何形状,根据应变场演化规律可知,损伤区形状大致呈中心对称状。本文选用一高斯-拉普拉斯算子^[23],表达如下:

$$g = \begin{bmatrix} -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -4 & 8 & 24 & 8 & -4 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设应变场云图中有 $x \times y$ 个应变点,每个点的应变值为 $F(x, y)$ 。卷积运算方法是将卷积算子从云图左上角开始以步长 1 进行滑动,对于每个应变点,卷积算子与对应区域的应变值元素级相乘,再将这些结果相加,即可得到应变点的近似梯度值 G ,表达如下:

$$G = F(x, y) * g \quad (7)$$

式中: * 为卷积运算符号。利用卷积后的近似梯度值 G 绘制新的云图,其中 0 线为损伤区边界,0 线围成的区域为局部损伤区,外围区域为非损伤区,如图 6 所示。可见,将高斯-拉普拉斯算子与应变场云图进行卷积运算,能够精准识别局部损伤区的边界;同时,随着加载的进行,应变场发生变化,局部损伤区范围也随之改变,即获取的局部损伤区内应变点数量是动态变化的。采用该方法,识别加载过程中应变场云图的局部损伤区,确定区内应变点,求取变粒岩损伤参数。

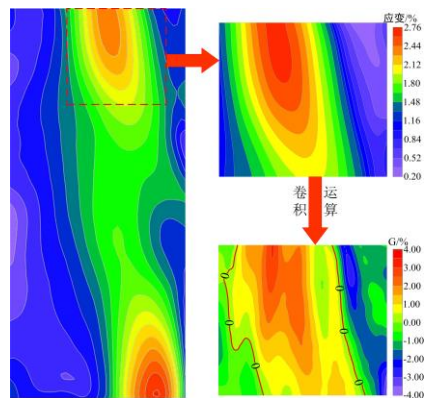


图 6 卷积运算识别局部损伤

Fig. 6 Convolution operation for identifying local damage

图 7 为典型试样损伤参数-轴向应力-轴向应变关系曲线。横轴起始点对应试样局部损伤区的萌生时刻,此时 D_f 为 0, L_f 为 1。损伤出现后,随着加载的进行, D_f 曲线逐渐上升,而 L_f 曲线不规则地波动,整体呈下降趋势。具体来说,在峰值应力前, D_f 随轴向应力的增长非线性地增大。起始时, D_f 呈跳跃增大,这与卷积理论确定局部损伤区边界有关,当识别到边界时局部损伤区往往已有一定的规模;在中期, D_f 呈稳定增大,曲线斜率基本保持不变;之后, D_f 呈阶跃增大,阶跃次数和大小不尽相同。在峰值应力处, D_f 发生突变,开始高速增大,直至试样破坏, D_f 达到 1。 L_f 的减小相对不规则,尤其是峰值应力前上下反复波动;但峰值应力后, L_f 的下降趋势基本稳定,开始持续减小,直至试样破坏, L_f 降低到某一大于 0 的数值。

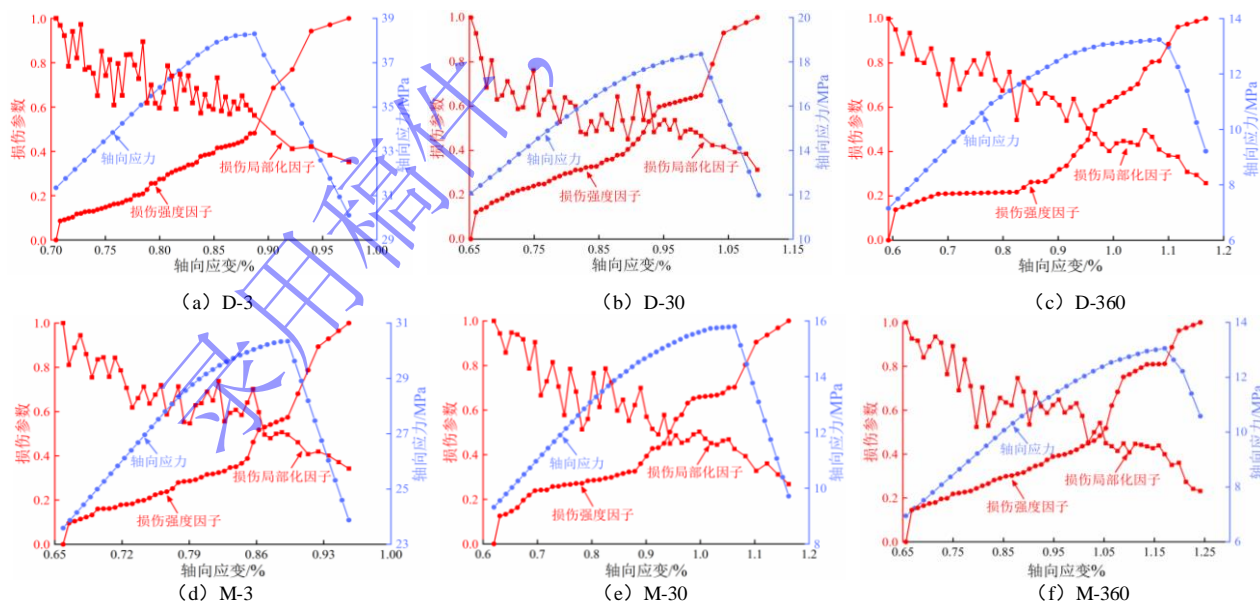


图 7 典型试样损伤参数-轴向应力-轴向应变关系曲线

Fig. 7 Damage parameters-axial stress-axial strain relationship curves of typical samples

水岩作用对试样局部损伤特性具有重要的影响,但这种影响更多地反映在损伤参数值上,对损伤参数的变化规律影响不明显。这主要表现为不同溶液类型与浸泡时间下 D_f 和 L_f 的变化曲线较为相似,仅在细微处有所差异,如 D_f 的阶跃次数、 L_f 的下降趋势等。为

更好地分析水岩作用对损伤参数值的影响,以峰值应力处 D_f 和 L_f 为例,绘制水岩作用下试样损伤参数柱状图,如图 8 所示。试样存储的弹性能在峰值应力处达到最大,分析此时的损伤参数可掌握试样储能极限下的局部损伤特性及其水岩作用效应。由图可知,在峰

值应力处,干燥样的 D_f 最小,仅0.21;而 L_f 最大,达0.60。随着浸泡时间的增长, D_f 非线性增大,最大值达0.81,是干燥样的近4倍;而 L_f 非线性减小,最小值仅0.39,是干燥样的0.65倍。受水岩作用和饱和效应的双重影响,前3 d浸泡对试样损伤参数的影响最大,之后浸泡时间的影响逐渐降低,这种非线性响应特征与上述宏观力学性质参数劣化度的变化规律相一致。此外,当浸泡时间相同时,矿井水条件下 D_f 普遍大于蒸馏水条件,但随着浸泡时间的增长,两者之间差距被逐渐抹平; L_f 在矿井水条件下更小,但同样地,较长的浸泡时间(不少于150 d)使得差距不明显。

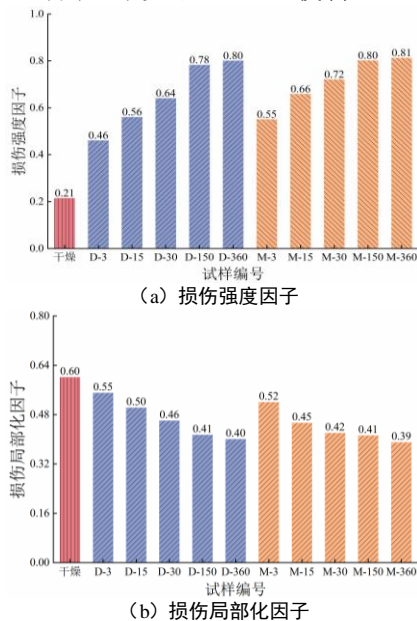


图8 试样峰值应力处损伤参数

Fig. 8 Damage parameters at the peak stress of samples

综上所述,变粒岩损伤参数的演化是轴向荷载驱动的结果。在荷载作用下,变粒岩局部损伤区渐进性发育,表现为损伤强度因子的持续增大,损伤局部化因子的不规则减小,这意味着受载岩石的局部损伤程度趋于严重,且线性程度增强,发育水平逐渐提高。以峰值应力为界,损伤参数的演化过程可分为两个阶段:峰值前,局部损伤区从萌生到发展,区内应变持续增长,损伤程度趋于严重,表现为损伤强度因子呈现跳跃-稳定-阶跃的增大趋势,而损伤区范围不稳定,导致其线性程度的反复变化,表现为损伤局部化因子呈现波动性的减小趋势,两者变化反映变粒岩经历着不稳定的损伤过程;峰值后,局部损伤区高速发展,区内应变快速增长,损伤剧烈,表现为损伤强度因子突变剧增,而稳定的损伤区向宏观裂纹演变,线性程度增强,表现为损伤局部化因子持续减小,两者变化反映变粒岩经历着剧烈的损伤过程。这说明受载岩石的渐进破坏是一个不均匀、非线性的损伤过程。

水岩作用对变粒岩局部损伤特性的影响主要反映

在损伤参数值上。从峰值应力处的数值来看,随着浸泡时间的增长,变粒岩的局部损伤程度趋于严重,线性程度增强,表现为损伤强度因子增大、损伤局部化因子减小,说明局部损伤区的发育水平升高;对比蒸馏水,矿井水条件下变粒岩的局部损伤程度更为严重,线性程度更强,表现为损伤强度因子更大、损伤局部化因子更小,说明局部损伤区的发育水平更高。因此,水岩作用对变粒岩局部损伤发育具有促进作用,尤其是矿井水更加显著。究其原因,水岩作用导致变粒岩内孔隙、裂隙发育,材料力学性能降低,受载后更易产生局部损伤区,同时伴随更大的应变差和更集中的分布,故其局部损伤发育水平更高。若浸泡时间过长,变粒岩局部损伤的发育水平趋于稳定,且溶液类型的影响也被抹平,这与上述宏观力学损伤特性是一致的,主要受制于溶液侵蚀能力的下降。

对比变粒岩宏观与局部损伤特性,力学性质参数的劣化度表征试样的平均损伤,而损伤强度因子的变化率表征试样的局部损伤,两者均以干燥状态下的试样为对照。不难发现,峰值应力处后者在数值上远大于前者,如M-360力学性质参数的劣化度分别为68.36%和74.75%,但其峰值应力处损伤强度因子的变化率高达285.71%。这说明损伤强度因子在一定程度上克服了非损伤区占比更高所带来的影响,避免“被平均化”,而损伤局部化因子从空间上表征试样局部损伤的集中程度,两者相辅相成更能体现水岩作用下变粒岩损伤演化规律。鉴于水岩作用对岩石局部损伤发育水平的影响,实际工程中应重点关注浸泡时间长的岩石,其高水平的局部损伤仅需较小的应力增量即可过渡到宏观裂纹,因此需要在峰值应力前强化加固措施;而浸泡时间短的岩石,即便濒临峰值应力其局部损伤的发育水平依然较低,抗变形、抗荷载能力强,但超过峰值应力后,低水平的局部损伤直接向宏观裂纹演变,两者间巨大的能量差可能导致岩爆的发生,在实际工程中可采用循环注水浸泡的方式来适当地提升岩石的局部损伤发育水平,以降低岩爆的可能性。

4 水岩作用下变粒岩微观损伤机制

利用扫描电镜试验、氮气吸附试验及离子质量浓度测试,揭示水岩作用下变粒岩微观损伤机制。以浸泡3 d、30 d、360 d的典型试样为例,选取放大2000倍的显微图片进行对比分析,如图9所示。在蒸馏水条件下,浸泡3 d时试样的水敏性物质(矿物颗粒和胶结物)初步溶解,局部孔隙发育,但表面较为光滑,具有一定的完整性;随着浸泡时间的增长,孔隙逐渐发育;浸泡360 d时,试样的微观结构发生本质变化,

孔隙高度发育, 表面呈疏松状, 极为破碎, 且粗糙不平。微观结构在矿井水浸泡下的变化趋势与蒸馏水类似, 但损伤程度更严重。矿井水浸泡 3 d 时, 试样的表面较为粗糙, 颗粒破碎, 完整性已破坏; 浸泡 360 d 时, 孔隙高度发育, 表面呈蜂窝状, 从孔隙密度和颗粒破碎度来看, 微观结构损伤劣化要比蒸馏水浸泡更严重。可见, 水岩作用下试样发生微观结构损伤, 主要表现为孔隙发育、表面粗糙破碎、整体结构松散等, 且浸泡时间越长, 损伤程度越严重; 当浸泡时间相同时, 矿井水对试样微观结构具有更显著的损伤作用。

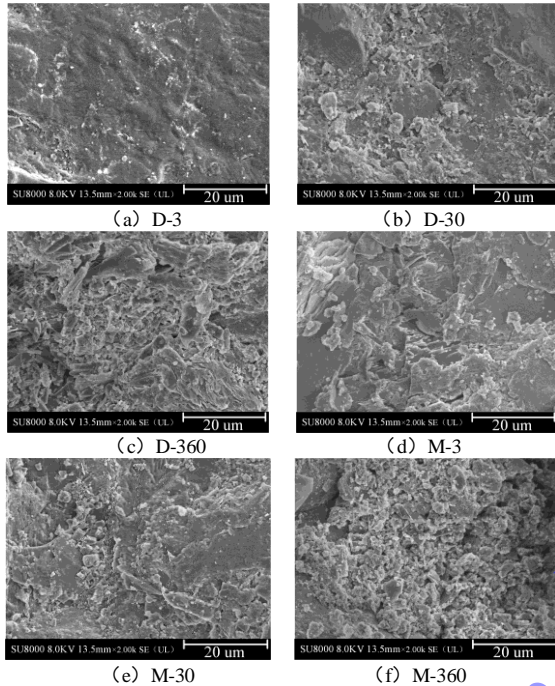


图 9 典型试样微观形貌图

Fig. 9 Micro-morphology images of typical samples

通过氮气吸附试验获取试样内部孔径分布特征。

利用 BJH 理论模型对等温吸附曲线进行处理, 得到水岩作用下典型试样的孔隙体积占比, 如图 10 所示。浸泡前, 孔隙主要为介孔 (2~50 nm) 和微孔 (<2 nm), 无宏孔 (>50 nm); 浸泡后, 微孔消失, 以介孔为主, 辅以少量的宏孔, 孔隙直径整体上增大。具体来说, 当浸泡 3 d 时, 微孔扩张为介孔, 宏孔尚未形成, 孔隙均为介孔; 当浸泡 30 d 时, 部分孔隙发育为宏孔, 且小于 5 nm 的孔隙全部消失, 孔隙直径整体上增大; 当浸泡 360 d 时, 宏孔体积占比继续增加, 而小于 10 nm 的孔隙开始减少, 依然表现为孔隙直径增大的趋势。当浸泡时间相同时, 矿井水和蒸馏水条件下试样孔径分布特征存在一定的差异。矿井水条件下孔隙直径整体上大于蒸馏水条件, 尤其是浸泡 3 d 时, 矿井水条件下 2~5 nm 孔隙体积占比为 14.5%, 30~50 nm 孔隙体积占比为 47.1%; 而蒸馏水条件下, 前者占比达 38.5%, 后者占比仅 19.2%。浸泡 30 d 和 360 d 时, 两种条件下孔径分布差异有所减小, 但依然遵循一定

的规律, 即矿井水条件下试样的孔隙直径整体上更大, 表现为大孔体积占比更高、小孔体积占比更低。

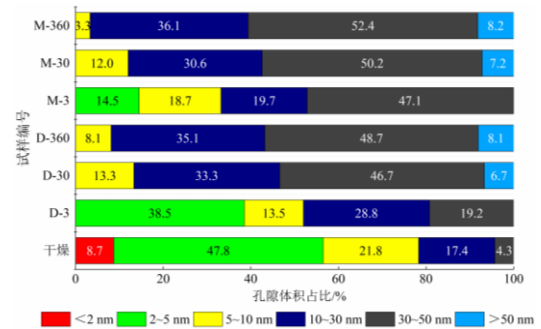


图 10 典型试样孔隙体积占比

Fig. 10 Pore volume proportions of typical samples

选取浸泡前后的溶液各 150 mL, 利用等离子体质谱仪检测主要离子质量浓度, 结果如图 11 所示。浸泡前, 溶液离子质量浓度见表 1; 浸泡后, 离子质量浓度呈不同的增加趋势。在蒸馏水条件下, HCO_3^- 增加最多, 达 116.4 mg/L; Mg^{2+} 增加最少, 为 9.7 mg/L。在矿井水条件下, SO_4^{2-} 增加最多, 达 122.1 mg/L; 而 K^+ 增加最少, 为 14.1 mg/L。经过 360 d 浸泡后, 矿井水中主要离子质量浓度均大于蒸馏水, 且离子质量浓度的增加量也大体符合该规律 (原矿井水中富含 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 故两种离子质量浓度的增加量相对较少)。此外, 根据离子质量浓度的变化可推断变粒岩物质成分的改变: Na^+ 浓度的增加反映钠长石发生水解反应, K^+ 和 Mg^{2+} 浓度的增加反映伊利石和绿泥石发生离子交换, 而其他离子浓度的增加可归因于矿物颗粒和胶结物发生的溶解、水解、离子交换等反应。对比可知, 矿井水条件下水岩作用更剧烈, 对变粒岩的损伤劣化更严重, 这与微观结构特征的演化规律相符。

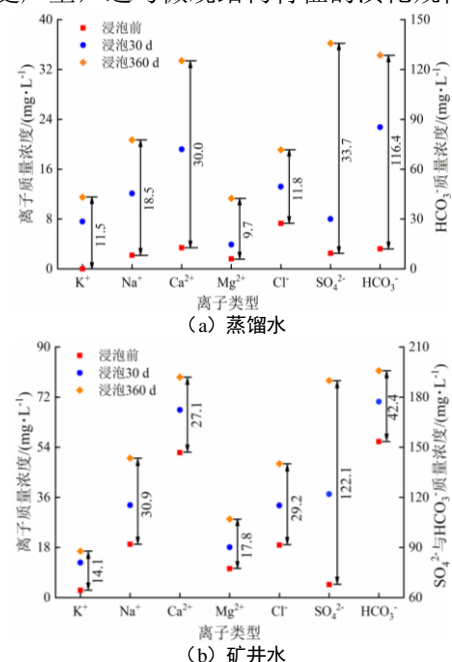


图 11 离子质量浓度随浸泡时间的变化

Fig. 11 Variations in ion mass concentration with immersion time

总之,水岩作用下变粒岩微观结构发生渐进的损伤劣化。随着浸泡的进行,变粒岩内钠长石、伊利石等水敏性物质出现水解、离子交换等现象,造成孔隙发育,孔径增大,微观结构变得松散粗糙。这种微观损伤在板岩、煤岩的浸泡试验中也得以观测^[14, 17]。溶液类型对变粒岩微观结构损伤劣化具有重要的影响。对比蒸馏水,矿井水与变粒岩的化学反应更剧烈,表现为离子质量浓度及其增加量更大,使得矿井水条件下变粒岩的孔隙发育水平更高、孔径整体上更大,微观结构更加松散破碎。这种渐进发展揭示了水岩作用下变粒岩力学特性与损伤演化规律的微观机制。

5 结 论

利用单轴压缩试验、数字图像相关技术及微观结构测试,研究不同溶液类型和浸泡时间下变粒岩力学特性劣化规律,探讨水岩作用对局部损伤特性的影响,揭示水岩作用下变粒岩微观损伤机制,主要结论如下:

(1)随着浸泡时间的增长,变粒岩的弹性模量和单轴抗压强度非线性降低,相应的劣化度则非线性增加;矿井水条件下力学性质的劣化程度高于蒸馏水条件,但两者差距随浸泡时间的增长逐渐缩小,在浸泡150 d后可以忽略溶液类型的影响。

(2)随着轴向加载的进行,变粒岩表观应变场经历从均匀化到局部化再到破裂的过程。峰值应力前,损伤强度因子非线性增大,损伤局部化因子波动性减小;峰值应力后,损伤强度因子剧增,损伤局部化因子持续下降,说明受载岩石局部损伤程度趋于严重,线性程度增强,发育水平逐渐提高。

(3)水岩作用对变粒岩局部损伤发育具有促进作用。随着浸泡时间的增长,峰值应力处的损伤发育水平升高,表现为损伤强度因子增大、损伤局部化因子减小;对比蒸馏水,矿井水对损伤发育的促进作用更显著,表现为损伤强度因子更大、损伤局部化因子更小,但浸泡150 d后溶液类型的影响不明显。

(4)随着浸泡时间的增长,变粒岩内水敏性物质发生水岩反应,造成孔隙发育,孔径增大,微观结构变得松散粗糙;对比蒸馏水,矿井水对微观结构的劣化更显著,表现为孔隙发育水平更高、孔径整体上更大、微观结构更加松散破碎。这是水岩作用下变粒岩力学特性与损伤演化规律存在差异的根本原因。

参考文献:

[1] 王海,董书宁,孙亚军,等.我国大水矿山侧向帷幕截水技术及水资源保护效果研究[J].煤炭科学技术,2023,51(7):207-223. (WANG Hai, DONG Shuning, SUN Yajun, et

al. Lateral curtain interception technology and water conservation effect in groundwater abundant mines of China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 207-223. (in Chinese))

[2] 陈光波,李谭,杨磊,等.水岩作用下煤岩组合体力学特性与损伤特征[J].煤炭科学技术,2023,51(4):37-46. (CHEN Guangbo, LI Tan, YANG Lei, et al. Mechanical properties and damage characteristics of coal-rock combined samples under water-rock interaction[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 37-46. (in Chinese))

[3] 刘世奇,张村,曾一凡,等.蓄水采空区区段煤柱采动水浸弱化机制与失稳特征[J].采矿与安全工程学报,2022,39(6):1084-1094. (LIU Shiqi, ZHANG Cun, ZENG Yifan, et al. Weakening mechanism and instability characteristics of coal pillar under mining disturbance and water immersion in water storage goaf[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(6): 1084-1094. (in Chinese))

[4] 蒋景东,陈生水,徐婕,等.不同含水状态下泥岩的力学性质及能量特征[J].煤炭学报,2018,43(8):2217-2224. (JIANG Jingdong, CHEN Shengshui, XU Jie, et al. Mechanical properties and energy characteristics of mudstone under different containing moisture states[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2217-2224. (in Chinese))

[5] ZHANG G, WANG L, LIU Z, et al. Experimental study on mechanical properties and deterioration mechanism of red sandstone from the Panjiatuo landslide under action of acidic drying-wetting cycles[J]. Applied Sciences, 2023, 13: 5955.

[6] ZHANG C, BAI Q, HAN P, et al. Strength weakening and its micromechanism in water-rock interaction, a short review in laboratory tests[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2023, 10: 10.

[7] 赵奎,冉珊瑚,曾鹏,等.含水率对红砂岩特征应力及声发射特性的影响[J].岩土力学,2021,42(4):899-908. (ZHAO Kui, RAN Shanhu, ZENG Peng, et al. Effect of moisture content on characteristic stress and acoustic emission characteristics of red sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 899-908. (in Chinese))

[8] 张闯,任松,张平,等.水、孔洞及层理耦合作用下的千枚岩巴西劈裂试验研究[J].岩土力学,2021,42(6):1612-1624. (ZHANG Chuang, REN Song, ZHANG Ping, et al. Experimental study on Brazilian splitting of phyllite under the coupling effects of water, pore and bedding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1612-1624. (in Chinese))

[9] 邓华锋,齐豫,李建林,等.水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理[J].岩土工程学报,2021,43(4):634-643. (DENG Huafeng, QI Yu, LI Jianlin, et al.

- Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 634-643. (in Chinese))
- [10] 柴少波, 宋浪, 刘欢, 等. 酸性干湿循环下充填节理岩石劣化性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, **43**(11): 2993-3002. (CHAI Shaobo, SONG Lang, LIU Huan, et al. Experimental study on deterioration characteristics of filled jointed rock under dry-wet cycles in acidic environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(11): 2993-3002. (in Chinese))
- [11] 任松, 李振元, 邓高岭, 等. 多因素作用下石膏岩软化特性[J]. 岩土力学, 2018, **39**(3): 789-796. (REN Song, LI Zhenyuan, DENG Gaoling, et al. Softening characteristic of gypsum rock under the action of multi-factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(3): 789-796. (in Chinese))
- [12] 王伟, 李雪浩, 朱其志, 等. 水化学腐蚀对砂板岩力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(9): 2559-2566. (WANG Wei, LI Xuehao, ZHU Qizhi, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandy slate under chemical corrosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(9): 2559-2566. (in Chinese))
- [13] YIN X, HUANG Y, LEI Y, et al. Response of the mechanical properties of impurity-bearing gypsum rocks with a porphyritic structure to long-term water immersion and softening mechanisms[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, **83**: 148.
- [14] 李二强, 冯吉利, 张龙飞, 等. 水-岩及风化作用下层状炭质板岩巴西劈裂试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(2): 329-337. (LI Erqiang, FENG Jili, ZHANG Longfei, et al. Brazilian tests on layered carbonaceous slate under water-rock interaction and weathering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(2): 329-337. (in Chinese))
- [15] 耿殿栋, 亓宪寅, 付鹏, 等. 不同钻井液浸泡下泥页岩力学特性及损伤本构模型[J]. 煤炭科学技术, 2023, **51**(10): 109-118. (GENG Diandong, QI Xianyin, FU Peng, et al. Mechanical properties and damage constitutive model of mud shale under different drilling fluids immersion[J]. Coal Science and Technology, 2023, **51**(10): 109-118. (in Chinese))
- [16] 刘保国, 于明圆, 孙景来, 等. 水-力耦合作用下页岩力学特性及其损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(5): 1041-1054. (LIU Baoguo, YU Mingyuan, SUN Jinglai, et al. Study on mechanical properties and damage constitutive model of shale under hydro-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(5): 1041-1054. (in Chinese))
- [17] 张慧梅, 夏浩峻, 张嘉凡, 等. 长期浸润状态下煤岩损伤机制研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(6): 1206-1214. (ZHANG Huimei, XIA Haojun, ZHANG Jiafan, et al. Damage evolution mechanism of coal rock under long-term soaking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(6): 1206-1214. (in Chinese))
- [18] 刘刚, 李英明, 肖福坤, 等. 单、三轴及孔隙水作用下黄砂岩破坏力学行为及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3532-3544. (LIU Gang, LI Yingming, XIAO Fukun, et al. Study on failure mechanics behavior and damage evolution law of yellow sandstone under uniaxial triaxial and pore water action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3532-3544. (in Chinese))
- [19] MUNOZ H, TAHERI A. Local damage and progressive localisation in porous sandstone during cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**: 3253-3259.
- [20] 王天佐, 王春力, 薛飞, 等. 不同循环加卸载路径下红砂岩声发射与应变场演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(增刊 1): 2881-2891. (WANG Tianzuo, WANG Chunli, XUE Fei, et al. Study on acoustic emission and strain field evolution of red sandstone under different loading and unloading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(S1): 2881-2891. (in Chinese))
- [21] 韩鹏华, 赵毅鑫, 高森, 等. 长期水浸作用下煤样渐进破坏特征及损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, **43**(4): 918-933. (HAN Penghua, ZHAO Yixin, GAO Sen, et al. Progressive damage characteristics and damage constitutive model of coal samples under long-term immersion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, **43**(4): 918-933. (in Chinese))
- [22] SONG H, ZHANG H, FU D, et al. Experimental analysis and characterization of damage evolution in rock under cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, **88**: 157-164.
- [23] 代文征, 杨勇. 基于改进高斯-拉普拉斯算子的噪声图像边缘检测方法[J]. 计算机应用研究, 2019, **36**(8): 2544-2547. (DAI Wenzheng, YANG Yong. Noise image edge detection based on improved Gauss-Laplace operator[J]. Application Research of Computers, 2019, **36**(8): 2544-2547. (in Chinese))