

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.036



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



饱水单孔红砂岩裂纹扩展及能量演化规律

张向向^{a,b,c,d}, 彭冲^a, 刘成禹^{a,d}

(福州大学 a. 紫金地质与矿业学院; b. 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室; c. 福建省地质灾害重点实验室; d. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福州 350108)

摘要: 利用 TAW-2000 试验机、摄像装置和 PCI-2 型声发射仪, 对干燥和饱水状态下的含孔洞红砂岩开展单轴压缩试验, 探究干燥和饱水状态下含孔洞红砂岩的受力变形特征、裂纹扩展机制、声发射特性及能量演化规律。结果表明: 饱水单孔岩样力学参数显著降低, 脆性跌落系数大幅提高; 单孔岩样裂纹扩展过程可分为初始变形、裂纹萌生、裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展 4 个阶段, 其中饱水单孔岩样萌生的初始裂纹和次生裂纹更多、更长, 且在初始裂纹萌生时和裂纹失稳扩展时均产生了显著的荷载跌落现象; 饱水和干燥单孔岩样声发射信号均主要集中在初始裂纹萌生时和裂纹失稳扩展时, 且饱水单孔岩样声发射信号相对较弱, 初始裂纹萌生时声发射信号多于裂纹失稳扩展时; 与干燥单孔岩样相比, 外部输入的能量在饱水单孔岩样中更易耗散, 饱水单孔岩样达到储能速率峰值更慢, 能够储存的弹性能更少, 更有利于降低岩样破坏时能量释放的剧烈程度。

关键词: 红砂岩; 饱水状态; 孔洞; 声发射; 裂纹扩展; 能量演化

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)03-0136-08

Crack propagation and energy evolution characteristics of water-saturated red sandstone containing a single hole

ZHANG Xiangxiang^{a,b,c,d}, PENG Chong^a, LIU Chengyu^{a,d}

(a. Zijin School of Geology and Mining; b. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources; c. Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention; d. Fujian Provincial Universities Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China)

Abstract: Uniaxial compression tests are conducted on dry and water-saturated red sandstone specimens containing a single hole. The objective of these experiments is to examine the characteristics of stress and deformation, crack propagation mechanisms, acoustic emission characteristics and energy evolution based on the TAW-2000 test equipment, camera system and PCI-2 acoustic emission detector. The results show that the mechanical parameters of water-saturated rock samples are significantly lower than those of dry rock samples while the brittleness drop coefficients significantly increase. The crack propagation process is comprised of four

收稿日期: 2024-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(42202301); 福建省自然科学基金(2020J05133); 自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室(福建省地质灾害重点实验室)开放基金(FJKLGH2023K007)

作者简介: 张向向(1991-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩土与地质工程研究, E-mail: xxzhang@fzu.edu.cn.

Received: 2024-02-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42202301); Natural Science Foundation of Fujian Province of China (No. 2020J05133); Opening Fund of Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources (Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention) (No. FJKLGH2023K007)

Author brief: ZHANG Xiangxiang (1991-), PhD, associate researcher, main research interests: geotechnical and geological engineering, E-mail: xxzhang@fzu.edu.cn.

distinct stages: the initial deformation stage, crack initiation stage, crack stable propagation stage and crack unstable propagation stage. The initial fissures and secondary fissures of water-saturated rock samples are more numerous and longer, and significant stress drop appears when initial cracks generate and cracks propagate unsteadily. The ring counts of rock samples focus on the crack initiation and crack unstable propagation stages. In numerous water-saturated rock samples, AE signals are fewer than those in dry rock samples. The AE signals during the crack initiation stage are more than those during the crack unstable propagation stage. Compared with dry rock samples, the external energy is easier to dissipate in the water-saturated rock samples and the energy storage rate is slower to reach the peak. Consequently, the stored elastic energy is reduced in the water-saturated rock sample, which is more conducive to reducing the intensity of energy release during rock failure.

Keywords: red sandstone; water-saturated state; hole; acoustic emission (AE); crack propagation; energy evolution

在自然界中经历了长期的成岩过程和各种构造运动以及风化、荷载作用后,岩石内部大多存在不同尺度的孔洞、裂隙等缺陷^[1],这些缺陷不仅影响岩石的理化性质^[2],而且在外部荷载作用下还会继续扩展,从而影响岩石本身的强度、稳定性和变形破坏特征^[3]。在地下工程中,由于地下水的长期浸泡,部分岩石会达到饱和状态,导致其物理力学性质发生劣化^[4],使得含缺陷岩石更易发生岩溶、岩崩、地层塌陷等地质灾害,严重影响地下工程的稳定性。因此,开展对饱水作用下含缺陷岩石的变形破坏过程研究十分必要。

郑蕾等^[5]通过双孔洞凝灰岩单轴压缩试验探究了岩桥长度对凝灰岩变形特性、声发射特征的影响机制。韩观胜等^[6]对不同倾斜角度双孔红砂岩进行了单轴压缩试验研究,结果表明,主孔与小孔的位置分布对裂纹扩展贯通规律影响显著。赵国彦等^[7]采用数字散斑相关量测方法和数字照相量测软件系统对含有不同形状孔洞的岩石试件在单轴压缩下的变形破裂演变规律进行了试验研究。李皋等^[8]应用试验与数值模拟相结合的方法分析了声发射与裂纹衍生以及强度的相互影响作用,并得到了岩石破裂演化规律。

韩铁林等^[9]对不同化学性质水化学溶液作用下的砂岩进行了单轴抗压强度试验,分析了水-岩反应特点及其岩石水化学损伤的力学效应。蒋成等^[10]基于不同含水砂岩的蠕变试验结果揭示了含水状态对岩石蠕变特征的影响机制。杨科等^[11]研究了含水率对岩石裂纹扩展以及破坏模式的影响机制。此外,含水状态对于岩石的声发射特征也有显著影响。蒋利松等^[12]进行了不同含水率页岩单轴压缩试验,结果表明,含水率对页岩的力学特性和声发射特征具有显著影响。姚强岭等^[13]利用不同含水状态下砂质泥岩剪切试验揭示了声发射信号随加载时

间及裂纹扩展的演化规律。

岩石变形与破坏往往伴随着能量释放,当能量释放过于剧烈时,往往会影响工程活动,如岩爆等事故^[14],因此,研究岩石变形破坏中的能量演化具有十分重要的意义。赵光明等^[15]对不同尺寸的砂岩进行了单轴压缩试验,研究了不同高径比对砂岩能量演化规律的影响。党亚倩等^[16]研究了不同含水率的岩石在单轴破坏中的能量演化规律,结果表明,岩石能量耗散能力随着含水率的增加而增强。李天斌等^[17]对不同饱水度砂岩进行三轴压缩试验发现,随着岩石含水量的增加,岩石吸收能量的能力逐渐减弱。

上述研究往往只考虑单缺陷或水对岩石裂纹扩展以及能量演化规律的影响,而对于饱水状态下含缺陷岩样裂纹扩展及能量演化规律的研究相对较少。笔者以单孔红砂岩为研究对象,通过开展干燥和饱水状态下单孔红砂岩的单轴压缩与声发射试验,探究饱水状态下单孔红砂岩变形破坏、裂纹扩展和声发射特性的影响机制,揭示饱水单孔红砂岩受载过程中的能量演化规律,为岩体工程稳定性分析提供科学依据。

1 试验方法

1.1 试样制备

为了确保试验的一致性和准确性,试验所需岩石试样均取自于同一块新鲜且无风化大岩石的相邻部分,按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013),采用水钻法将所采集的红砂岩加工成直径50 mm、高度100 mm的圆柱体标准岩样,并通过非金属超声检测分析仪测量岩样波速,选取纵波波速接近的试样,利用钻孔机在完整岩样中间预制贯穿孔洞,孔洞直径为6 mm。将制备好的单孔岩样一部分在烘箱中放置24 h,另一部分进行抽气

饱和 24 h, 分别得到干燥单孔岩样#1、#2、#3, 饱水单孔岩样#4、#5、#6。

1.2 试验加载

采用 TAW-2000 型微机伺服岩石三轴、剪切试验机进行加载, 如图 1 所示。采用位移控制方式对筛选出的单孔岩样进行单轴准静态加载, 直至破坏, 加载速率为 0.05 mm/min。

同时, 利用 PCI-2 型声发射仪对加载过程中的声发射特征进行同步检测, 如图 2 所示。为便于观察, 将声发射探头安装在单孔岩样背面, 试验进行时, 同步开启声发射系统和摄像装置, 分别记录试验过程中的声发射信号和裂纹扩展情况。



图 1 TAW-2000 型试验机
Fig. 1 TAW-2000 test equipment



图 2 PCI-2 型声发射仪
Fig. 2 PCI-2 acoustic emission detector

2 试验结果及分析

2.1 单孔红砂岩受力变形特征

图 3 为单轴压缩下干燥和饱水单孔岩样的荷载-位移曲线。可以看出, 加载至峰值点后, 单孔岩样承载能力均在较短时间内迅速降低, 发生典型的脆性破坏, 表明试验岩样的脆性较强。同时, 在加载开始阶段, 单孔岩样荷载增加缓慢, 这主要是单孔岩样自身的微孔洞和微裂纹压密闭合所致, 具有明显的压密阶段特征。与干燥单孔岩样相比, 饱水单孔岩样的压密阶段更长。

表 1 为干燥和饱水单孔岩样的峰值荷载、弹性刚度及其平均值。由表 1 可见, 饱水情况下, 单孔岩样的峰值荷载平均值降低了 36.6%, 弹性刚度平均值降低了 25.0%。这主要是由于水-岩作用下连接

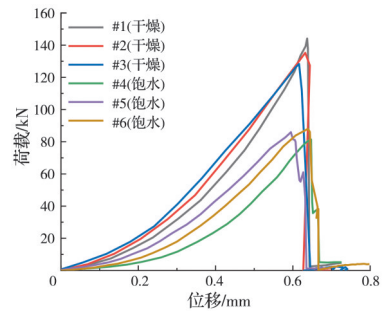


图 3 单轴压缩下单孔岩样的荷载-位移曲线

Fig. 3 Force-displacement curves of single-hole rock samples under uniaxial compression

红砂岩颗粒的胶结物失去胶结能力, 颗粒发生软化, 从而导致岩石承载能力和弹性刚度等力学特性发生劣化。

表 1 单孔岩样的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of single-hole rock samples

编号	饱和度	峰值荷载/kN	峰值荷载平均值/kN	弹性刚度/(GN/m)	弹性刚度平均值/(GN/m)
#1		144.11		0.40	
#2	干燥	135.26	135.90	0.32	0.33
#3		128.33		0.28	
#4		84.45		0.27	
#5	饱水	85.94	86.13	0.22	0.25
#6		88.00		0.25	

加载破坏后的脆性跌落系数反映了岩石的能量释放特征, 对预测岩爆倾向性具有重要意义。实际上, 岩石材料的荷载跌落并非绝对垂直, 如图 4 所示。因此, 基于非理想脆塑性模型^[18], 可将岩石应力脆性跌落系数 R 定义为

$$R = \frac{S_B - S_P}{S_P - S_M} \quad (1)$$

式中: S_P 为峰值位移; S_B 为残余位移; S_M 为峰前特征位移。

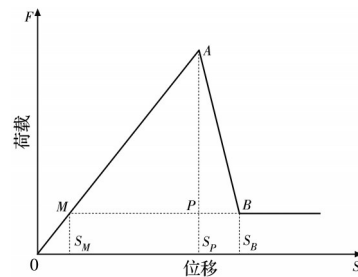


图 4 非理想脆塑性模型

Fig. 4 Non-ideal brittle-plastic model

根据式(1)计算出脆性跌落系数 R 及其平均值 R_{ave} , 如表 2 所示。可以发现, 与干燥单孔岩样相比, 饱水单孔岩样的脆性跌落系数平均值增大了 1.6 倍, 且图 3 中饱水单孔岩样在峰后跌落阶段出现显著

的分级现象。上述分析表明,饱水状态下红砂岩脆性降低,失稳破坏时能量释放的剧烈程度减弱。

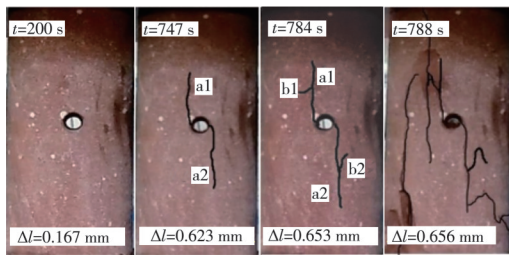
表2 单孔岩样脆性跌落系数

Table 2 Brittleness drop coefficients of single-hole rock samples

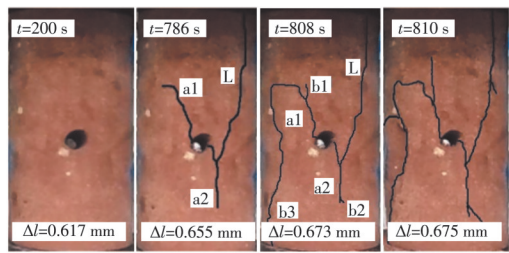
编号	饱和度	s_M/mm	s_P/mm	s_B/mm	$R/\%$	$R_{ave}/\%$
#1		0.029	0.635	0.645	1.65	
#2	干燥	0.001	0.632	0.654	3.48	3.38
#3		0.036	0.616	0.645	5.00	
#4		0.209	0.649	0.669	4.55	
#5	饱水	0.025	0.595	0.635	7.01	5.32
#6		0.025	0.639	0.666	4.39	

2.2 单孔红砂岩裂纹扩展演化规律

为分析孔洞对岩石破坏过程中裂纹扩展的影响机制,通过提取不同加载时间下的裂纹扩展图像,对单孔岩样的裂纹扩展路径及机制进行分析。分别以试样#1和#4为例,探究干燥单孔岩样和饱水单孔岩样在单轴压缩下的裂纹扩展过程,如图5所示。图中黑线为裂纹, t 为加载时间, Δl 为加载位移,a、b、L均代表不同类型的裂纹。



(a) 干燥单孔岩样



(b) 饱水单孔岩样

图5 岩样裂纹扩展过程

Fig. 5 Crack propagation process of rock samples

根据不同时刻的裂纹图像特征,可将单孔岩样的裂纹扩展过程分为4个阶段:初始变形阶段、裂纹萌生阶段、裂纹稳定扩展阶段及裂纹失稳扩展阶段。

1) I初始变形阶段:单孔岩样变形较大,但并无宏观裂纹产生。由于岩样轴向荷载不断增大,孔洞形状逐渐由圆形变形为椭圆形。表明该阶段由于荷载水平较低,孔洞附近可能有微观裂纹萌生和扩展,但并不足以产生宏观裂纹。

2) II裂纹萌生阶段:加载至某一时刻,裂纹突然从孔洞长轴边缘处萌生,并迅速扩展至一定长度,同时发出轻微声响,如图5中a1和a2所示。这主要是由于岩石脆性较强,导致初始裂纹萌生后立刻扩展了一段长度。

3) III裂纹稳定扩展阶段:随着加载的继续进行,初始裂纹稳定扩展,扩展速度相对缓慢,并萌生出与初始裂纹扩展方向不同的次生裂纹,该过程中基本听不到声响,如图5(a)中b1、b2和图5(b)中b1、b2、b3所示。表明该过程荷载逐渐增大,裂纹继续扩展,但速率相对稳定。

4) IV裂纹失稳扩展阶段:继续加载至某一荷载水平,单孔岩样中的初始裂纹和次生裂纹扩展速率突然加快,裂纹长度和宽度均大幅增加,发生失稳扩展。同时,岩样表面出现剥落现象,并发出巨大声响。表明岩石中能量急剧释放,裂纹发生快速扩展,导致岩石完全失去承载能力,发生破坏。

上述4个阶段的加载时长及占比如表3所示。可以看出,I阶段时长及占比最大,占总加载时间的95%左右;III阶段次之,II、IV阶段最小,均不足1s。表明干燥和饱水单孔岩样的裂纹萌生和失稳扩展速率相对较快,而稳定扩展阶段裂纹发育缓慢。

表3 各阶段的加载时长(占比)

Table 3 Loading time and percentage of each stage

裂纹扩展阶段	干燥	饱水
I 阶段	747 s(94.8%)	786 s(97.0%)
II 阶段	<1 s(<0.1%)	<1 s(<0.1%)
III 阶段	41 s(5.2%)	24 s(3.0%)
IV 阶段	<1 s(<0.1%)	<1 s(<0.1%)

此外,对比干燥单孔岩样与饱水单孔岩样的裂纹扩展过程,可以发现:

1) I、IV阶段饱水单孔岩样的变形特性和裂纹扩展情况与干燥单孔岩样相似。

2)与干燥单孔岩样相比,II阶段饱水单孔岩样除了在孔洞长轴两端附近萌生出两条初始裂纹a1和a2外,还在岩样的上端萌生出一条与初始裂纹相连的宏观裂纹L。

3)与干燥单孔岩样相比,III阶段饱水单孔岩样萌生的次生裂纹更多也更长,其中一条次生裂纹扩展至岩样下端,如图5(b)所示。

4)饱水单孔岩样裂纹萌生阶段的持续时间仅为干燥单孔岩样的58.5%。

上述分析表明,饱水单孔岩样产生的初始裂纹及次生裂纹均多于干燥单孔岩样,且从初始裂纹萌生到裂纹失稳扩展所需的加载时间更短,更易发生破坏。

2.3 单孔红砂岩样受力变形、裂纹扩展及声发射特征关系

对单孔岩样受力变形、裂纹扩展及声发射特征关系进行分析,如图6所示。图中A、B₁、B₂、C、D、E为单孔岩样裂纹扩展过程中各阶段的分界点。其中,A点开始加载,B₁点初始裂纹突然萌生,B₂点裂纹开始稳定扩展,C点裂纹开始失稳扩展,D点岩样失稳破坏,E点加载结束。由图6可见:

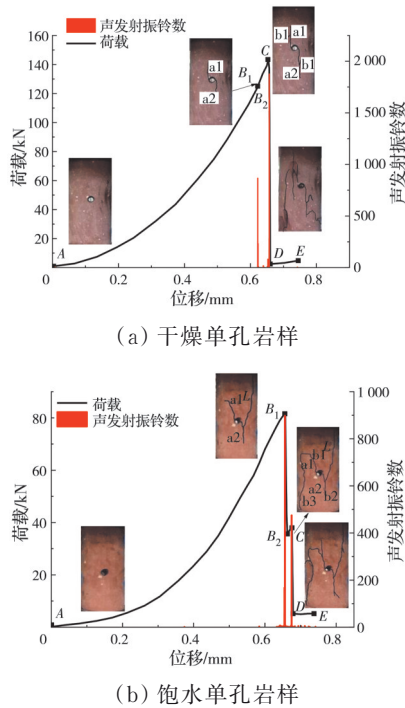


图6 裂纹扩展过程与荷载-位移-声发射振铃数曲线图

Fig. 6 Crack propagation process and load-displacement-AE ring number curves

1) 干燥单孔岩样的裂纹扩展 I 阶段对应应力-应变曲线的压密阶段和弹性阶段, II、III 阶段对应塑性变形阶段, IV 阶段对应峰后阶段; 而饱水单孔岩样的裂纹扩展 I 阶段对应应力-应变曲线的压密阶段、弹性阶段和塑性变形阶段, II、III 和 IV 阶段对应峰后阶段。

2) 对于干燥单孔岩样, 当加载至峰值荷载的 86.9% 时, 初始裂纹开始萌生, 继续加载至峰值荷载, 初始裂纹缓慢扩展并萌生出次生裂纹, 在此过程中, 并无显著跌落现象产生; 峰值后不久, 岩样迅速发生失稳破坏, 破坏时荷载为峰值荷载的 95.8%。

3) 对于饱水单孔岩样, 加载至峰值点时, 初始裂纹开始萌生, 导致岩样所受荷载急剧减小 61.4%; 继续加载, 岩样所受荷载重新增大, 但由于初始裂纹的扩展和次生裂纹的萌生, 增大速率不断减小; 此后, 裂纹失稳扩展, 岩样发生破坏。

4) 振铃计数在裂纹萌生和失稳扩展时均急剧

增大。干燥单孔岩样的振铃计数在 C 点(即裂纹失稳扩展时)达到最大值, 而饱水单孔岩样在 B₁ 点(即初始裂纹萌生时)达到最大值, 且由于饱水单孔岩样在该处额外萌生了一条宏观裂纹 L, 导致该处振铃计数有两个明显的峰值点。

5) 裂纹失稳扩展时, 饱水单孔岩样振铃计数仅为干燥单孔岩样的 1/4, 且整个加载过程中饱水单孔岩样的振铃计数最大值仅为干燥单孔岩样的 1/2。

上述分析表明, 单孔岩样裂纹演化、荷载-位移及声发射特征之间密切相关; 干燥单孔岩样仅在裂纹失稳扩展时发生荷载跌落现象, 而饱水单孔岩样在初始裂纹萌生和裂纹失稳扩展时均会产生荷载跌落现象, 且初始裂纹的扩展和次生裂纹的萌生导致饱水单孔岩样所受荷载难以持续上升; 裂纹萌生与失稳扩展阶段均有强烈的声发射信号, 饱水作用下单孔岩样的声发射信号有所减弱, 初始裂纹萌生时声发射信号多于裂纹失稳扩展时。

2.4 单轴压缩下单孔岩样的能量演化规律

若忽略热交换与声发射能量释放, 在岩体变形破坏过程中, 由外荷载所做功 U 可全部转化为弹性能与耗散能^[19]。在单轴加载过程中, 各能量的计算式为

$$U = \int_0^s F ds \quad (2)$$

$$U_e = \frac{F^2}{2f} \quad (3)$$

$$U_f = U - U_e \quad (4)$$

式中: f 为岩石荷载-位移曲线弹性段斜率; U_e 为岩石中储存的弹性应变能; U_f 为耗散能。

表 4 为饱水状态和干燥状态下的总能量 U_m 、总能量平均值 U_{mp} 、弹性能 U_{em} 、弹性能平均值 U_{emp} 、耗散能最大值 U_{fm} 以及耗散能平均值 U_{fmp} 。由表 4 可以看出, 水对单孔岩样在加载变形破坏中的能量转化有显著影响。干燥单孔岩样的总输入能约为饱水单孔试样的 1.63 倍, 其能够储存的弹性能约为饱水单孔试样的 1.87 倍, 岩石破坏后, 能量均全部释放。

上述分析表明, 与干燥单孔岩样相比, 饱水单

表 4 单轴加载中各能量最大值和平均值

Table 4 Maximum and average values of various energies under uniaxial loading

编号	U_m/J	U_{mp}/J	U_{em}/J	U_{emp}/J	U_{fm}/J	U_{fmp}/J
#1	0.030		0.026		0.030	
#2	0.033	0.032	0.029	0.028	0.032	0.032
#3	0.034		0.029		0.034	
#4	0.017		0.013		0.017	
#5	0.021	0.020	0.016	0.015	0.021	0.020
#6	0.021		0.015		0.021	

孔岩样的总耗散能及能够储存的弹性能均大幅减小。因此,在地下隧道开挖中,可通过适当增加掌子面围岩的含水率来减小岩爆发生概率。

图 7 为干燥和饱水单孔岩样的能量演化曲线。

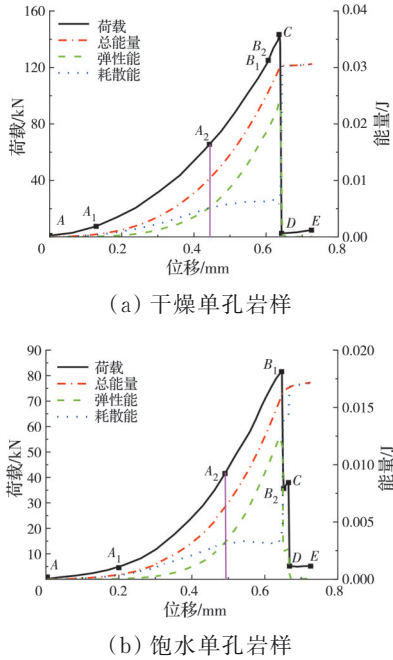


图 7 岩样能量演化曲线

Fig. 7 Energy evolution curves of rock samples

由图 7 可以看出,两种单孔岩样的能量曲线均具有显著的非线性特征,能实时反映单孔岩样破坏和裂纹扩展过程中的能量释放规律。根据荷载-位移曲线及裂纹扩展过程的阶段划分方法,可将能量演化曲线分为以下几个阶段:

1) AA_1 段:此时岩石处于压密阶段,其内部微孔隙裂隙逐渐压密,外部输入的能量较小,岩石能量储存以及损耗均较小,其总能量、弹性能、耗散能曲线为上凹曲线。

2) A_1A_2 段: A_2 点为弹性能与耗散能交点,该阶段岩石总能量、弹性能曲线为上凹曲线,而耗散能为下凸曲线,耗散能仍大于弹性能,此时外力做功除了用于压密外,还用于孔洞变形。

3) A_2B_1 段:能量主要转化为弹性应变能,弹性应变能快速增加,耗散能几乎不变。

4) B_1B_2 段:对应裂纹萌生阶段,由于干燥单孔岩样无荷载跌落现象,因此能量演化规律与 A_2B_1 段类似;而饱水单孔岩样发生了荷载跌落现象,导致弹性能急剧减小,耗散能急剧增加。

5) B_2C 段:对应裂纹稳定扩展阶段,干燥单孔岩样的能量演化规律仍与前一阶段类似,而饱水单孔岩样的弹性能与耗散能均小幅度增加。

6) CD 段:对应裂纹失稳扩展阶段,干燥和饱水

单孔岩样的弹性能均发生急剧释放,耗散能急剧增加。

7) DE 段:岩石耗散能基本不变,岩石处于破坏后的残余强度阶段。

为了定量分析能量累积与能量耗散特征,将弹性能与输入的总能量的比值定义为储存比,耗散能与输入的总能量的比值定义为耗散比,并将实际位移与峰值荷载对应位移的比值定义为位移比。干燥与饱和单孔岩样储存比随位移比的变化规律如图 8 所示,其拟合函数如式(5)、式(6)所示。岩样储存比随位移比变化的速度和加速度如图 9 所示。

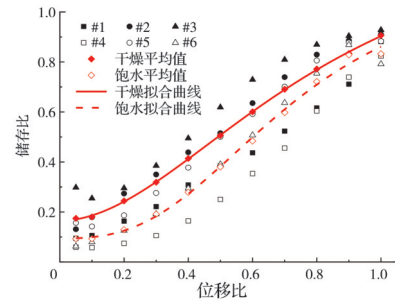


图 8 岩样储存比随位移比的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of stored energy percentage with displacement percentage of rock samples

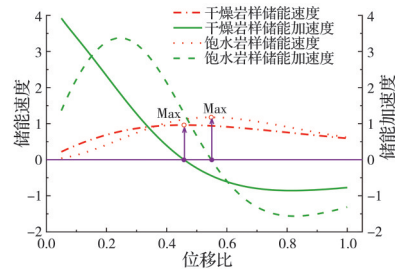


图 9 岩样能量演化速度与加速度变化规律

Fig. 9 Variation law of energy evolution velocity and acceleration

$$\lambda_1^{\circ} = 1.438 - \frac{1.274}{1 + \left(\frac{x}{0.844}\right)^{1.905}} \quad (5)$$

$$\lambda_2^{\circ} = 1.179 - \frac{1.085}{1 + \left(\frac{x}{0.725}\right)^{2.737}} \quad (6)$$

从图 8、图 9 可以看出:

1) 干燥和饱水单孔岩样的储存比和耗散比均呈非线性变化特征,在达到峰值荷载前,储存比不断增大,耗散比不断减小。

2) 压密阶段储存比最小,临近峰值荷载时,储存比最大;随着位移的增大,储存能量速率先增大后减小;饱水单孔岩样的压密阶段更长,储能速率峰值对应的位移比更大。

3) 任一阶段饱水单孔岩样的储存比均小于干

干燥单孔岩样;当位移比 <0.36 时,饱水单孔岩样的储存能量速率小于干燥单孔岩样,当位移比 >0.36 时,饱水单孔岩样的储存能量速率大于干燥单孔岩样。

上述分析表明,外部输入的能量更容易在干燥岩样中储存,在饱水岩样中耗散,饱水单孔岩样达到储能速率峰值更慢,因此,饱水作用下单孔岩样储存的弹性能更少,更有利于降低岩样破坏时的能量释放剧烈程度。

3 结论

通过干燥和饱水两种状态下含孔洞红砂岩的单轴压缩试验,探究饱水对孔洞红砂岩受力变形、裂纹扩展、声发射特性及能量演化等方面的影响机制,主要结论如下:

1)饱水作用下,单孔岩样承载力和弹性模量显著降低,岩石声发射振铃计数显著减小,岩石储存外部能量的能力减弱,脆性跌落系数大幅提高,峰后荷载跌落出现显著分级现象,岩样脆性降低,能量释放剧烈程度减弱。

2)单孔岩样的裂纹扩展过程可划分为初始变形、裂纹萌生、稳定扩展和失稳扩展4个阶段。其中初始变形阶段加载时间最长,裂纹萌生与失稳扩展阶段加载时间最短。饱水单孔岩样产生的初始裂纹及次生裂纹均多于干燥单孔岩样,且从初始裂纹萌生到裂纹失稳扩展所需的加载时间更短,更易发生破坏。

3)干燥单孔岩样仅在裂纹失稳扩展时发生荷载跌落现象,而饱水单孔岩样在初始裂纹萌生和裂纹失稳扩展时均会产生荷载跌落现象及大量声发射信号。与干燥单孔岩样相比,饱水单孔岩样的声发射信号相对较弱,初始裂纹萌生时声发射信号多于裂纹失稳扩展时。

4)与干燥单孔岩样相比,饱水单孔岩样的总耗散能及总弹性能均大幅减小,能量耗散更快,达到储能速率峰值更慢,能够储存的弹性能更少,更有利于降低岩样破坏时的能量释放剧烈程度。

参考文献

- [1] 王扬淋,王侯,刘思佳,等.基于相场法的水-力耦合作用下裂隙岩体变形破坏机理[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(5):211-220.
Wang Y L, Wang H, Liu S J, et al. Phase field modeling of the hydro-mechanical coupling failure mechanisms of fissured rock masses[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(5): 211-220. (in Chinese)
- [2] Zhang X X, Gu K, Liu C Y, et al. Study on fluid front motion of water, nitrogen, and CO₂ during anisotropic flow in shale reservoirs[J]. Geofluids, 2022, 2022: 7202972.
- [3] 乐慧琳,孙少锐.注浆材料和预制裂纹缺陷角度对类岩石试件单轴抗压强度及破坏模式的影响[J].岩土力学,2018,39(增刊1):211-219.
Le H L, Sun S R. Influence of grouting materials and prefabricated crack angle on uniaxial compressive strength and failure mode of rock-like specimens[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup 1): 211-219. (in Chinese)
- [4] 魏财.应力路径和含水率对页岩变形及能量演化机制研究[D].重庆:重庆大学,2020.
Wei C. Effect of stress path and water content on shale deformation and energy evolution mechanism[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (in Chinese)
- [5] 郑蕾,许晓静,许王亮,等.预制孔洞凝灰岩破坏声发射响应特性及预警[J].土木与环境工程学报(中英文),2025,47(5):135-144.
Zheng L, Xu X J, Xu W L, et al. Acoustic emission response characteristics and early warning of prefabricated hole tuff failure[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(5): 135-144. (in Chinese)
- [6] 韩观胜,靖洪文,苏海健,等.预制双圆形孔洞砂岩强度与变形破坏特征[J].煤炭学报,2017,42(4):871-878.
Han G S, Jing H W, Su H J, et al. Experimental study on compressive strength and fracture characteristics of sandstone containing double circular cavities[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 871-878. (in Chinese)
- [7] 赵国彦,王恩杰,吴浩,等.单轴压缩下孔洞砂岩细观破裂演化规律[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(8):1891-1900.
Zhao G Y, Wang E J, Wu H, et al. Micro-fracture evolution rule of sandstone specimens with a single hole under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(8): 1891-1900. (in Chinese)
- [8] 李皋,吴雪峰,杨旭,等.基于声发射的致密砂岩细观破裂模拟研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2025,47(5):125-134.
Li G, Wu X F, Yang X, et al. Mesoscopic fracture simulation of dense sandstone based on acoustic emission[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025, 47(5): 125-134. (in Chinese)
- [9] 韩铁林,师俊平,陈蕴生,等.不同化学溶液下砂岩I型断裂韧度及其强度参数相关性的试验研究[J].固体力学学报,2017,38(5):451-464.
Han T L, Shi J P, Chen H C, et al. Laboratory investigation on the mode-I fracture toughness and its

- correlation with the strength characteristic of sandstone immersed in different chemical solutions[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(5): 451-464. (in Chinese)
- [10] 蒋成, 张树光, 刘新民, 等. 不同含水率砂岩蠕变试验及损伤模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(9): 65-69, 82.
Jiang C, Zhang S G, Liu X M, et al. Creep test and damage model of sandstone with different water content [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(9): 65-69, 82. (in Chinese)
- [11] 杨科, 张寨男, 池小楼, 等. 循环荷载下含水砂岩裂纹演化与损伤特征试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 1791-1802.
Yang K, Zhang Z N, Chi X L, et al. Experimental study on crack evolution and damage characteristics of water bearing sandstone under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 1791-1802. (in Chinese)
- [12] 蒋利松, 赵登科, 周军平, 等. 单轴压缩试验下不同含水率页岩声发射特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊2): 696-702.
Jiang L S, Zhao D K, Zhou J P, et al. Study on acoustic emission characteristics of shale with different water content under uniaxial compression test[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(Sup 2): 696-702. (in Chinese)
- [13] 姚强岭, 王伟男, 杨书懿, 等. 含水率影响下砂质泥岩直剪特性及声发射特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2910-2922.
Yao Q L, Wang W N, Yang S Y, et al. Direct shear and acoustic emission characteristics of sandy mudstone under the effect of moisture content[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2910-2922. (in Chinese)
- [14] 刘成禹, 罗洪林, 李红军, 等. 岩脉型岩爆的形成机制及控制技术: 以乌兹别克斯坦卡姆奇克隧道为例[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1413-1423, 1433.
Liu C Y, Luo H L, Li H J, et al. Formation mechanism and control technology of vein rockburst: a case study of Uzbekistan Kamchik tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(5): 1413-1423, 1433. (in Chinese)
- [15] 赵光明, 刘之喜, 孟祥瑞, 等. 高径比对砂岩能量积聚与耗散试验及分析方法[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1110-1121.
Zhao G M, Liu Z X, Meng X R, et al. Energy accumulation and dissipation test and analysis method of height-diameter ratio sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1110-1121. (in Chinese)
- [16] 党亚倩, 吴亚敏, 王团结, 等. 不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征[J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 62-71.
Dang Y Q, Wu Y M, Wang T J, et al. Energy and damage evolution characteristics of rock materials under different water contents[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(3): 62-71. (in Chinese)
- [17] 李天斌, 陈子全, 陈国庆, 等. 不同含水率作用下砂岩的能量机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 229-236.
Li T B, Chen Z Q, Chen G Q, et al. Study on energy mechanism of sandstone under different water content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 2): 229-236. (in Chinese)
- [18] 李邵军, 匡智浩, 邱士利, 等. 岩石脆性评价方法研究进展及适应性探讨[J]. 工程地质学报, 2022, 30(1): 59-70.
Li S J, Kuang Z H, Qiu S L, et al. Review of rock brittleness evaluation methods and discussion on their adaptabilities [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 59-70. (in Chinese)
- [19] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 岩石单轴压缩下能量与损伤演化规律研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 94-100.
Zhang G K, Li H B, Xia X, et al. Study on evolution law of energy and damage of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(Sup 1): 94-100. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)