

文章编号:1674-2869(2020)04-0439-05

# 压力水-岩耦合作用下砂岩断口微观破坏机理

刘德峰<sup>1,2</sup>, 颜肃<sup>1</sup>

1. 武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北省化学工业设计研究院, 湖北 武汉 430070

**摘要:** 为了研究流固耦合作用下岩石的损伤劣化机理, 以砂岩岩样为研究对象, 采用流固耦合力学实验系统开展轴压水压耦合作用下单轴压缩、三轴压缩及三轴蠕变实验, 借助扫描电子显微镜对岩样破裂断口的微观结构特征进行分析。结果表明: 单轴饱水岩样破裂断口表面比干燥岩样出现更多的裂纹核, 且断口形貌以沿晶断裂为主, 穿晶断裂为辅; 随着水压增大, 三轴压缩岩样破裂断口表面裂纹核逐渐变少, 剪切平行裂纹逐渐增多, 岩样的宏观破坏形式从以张拉破坏为主逐渐向以剪切破坏为主转变; 与三轴压缩岩样断口相比, 三轴蠕变岩样破裂断口表面平整度和光滑度较差, 晶体间联结更加紧密, 剪切裂纹密度和深度增加。

**关键词:** 砂岩; 水压; 蠕变; 断口; 剪切裂纹; 损伤劣化机理

中图分类号: TD853

文献标识码: A

DOI: 10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.201911020

## Micro-Damage Mechanism of Sandstone Fracture Under Coupling of Hydraulic Pressure and Rock

LIU Defeng<sup>1,2</sup>, YAN Su<sup>1</sup>

1. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Research and Design Institute of Chemical Industry, Wuhan 430070, China

**Abstract:** The sandstone samples were taken as research objects to study the damage and degradation mechanism of rock under fluid-solid coupling. The fluid-solid coupling experimental system was used to perform uniaxial compression, triaxial compression and triaxial creep experiments under the coupling action of axial pressure and hydraulic pressure. The microstructure characteristics of fractured rock were analyzed by scanning electron microscopy. The results show that there are more crack cores in the fractured surface of the uniaxial saturated rock samples under uniaxial compression compared with the dry rock samples. The fractured surfaces consisted mainly of intergranular ruptures with some transgranular ruptures. With the hydraulic pressure increasing, the crack cores in the fractured surface of the rock samples decrease, and the shear parallel cracks increase gradually under triaxial compression. The macroscopic failure mode of rock samples changes from tensile failure to shear failure. Compared with the rock samples under triaxial compression, the flatness and smoothness of the fractured surface of the rock samples are poorer, the intercrystal connections are more compact and the shear crack density and depth increase under triaxial creep.

**Keywords:** sandstone; water pressure; creep; fracture; shear crack; damage and degradation mechanism

据统计, 90%以上的边坡事故、60%的矿井事故及30%~40%的水利水电工程均与水有关<sup>[1]</sup>。这是由于在水利水电、隧道及采矿等岩土工程建设

过程中, 短期或长期与水接触, 岩体工程材料的力学特性产生损伤劣化现象, 尤其在压力水作用下, 更容易诱发工程破坏问题<sup>[2-4]</sup>。因此, 研究水对岩

收稿日期: 2019-11-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2019M662577); 湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20191502); 武汉工程大学博士启动基金(18QD50)

作者简介: 刘德峰, 博士, 讲师。E-mail: liudefengoop@126.com

引文格式: 刘德峰, 颜肃. 压力水-岩耦合作用下砂岩断口微观破坏机理[J]. 武汉工程大学学报, 2020, 42(4): 439-443.

石材料的损伤劣化机理,对于评估与预防相关岩土工程灾害具有重要的理论指导意义。

关于水对岩石的损伤劣化机理,主要从微观角度,借助先进的仪器设备研究不同实验条件下岩石的微观结构变化特征,许多学者取得了一些有意义的研究成果。Bieniawski<sup>[5]</sup>从微观角度论述了岩石破裂机制,开启了岩石微观研究。Sprunt等<sup>[6]</sup>引进扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)技术,研究岩石破裂机理。随后该技术被用于分析水-岩耦合作用损伤劣化机理,张安斌等<sup>[7]</sup>采用SEM设备分析了水对泥质粉砂岩微观结构的影响,研究发现岩样吸水引起颗粒晶体结构排列紊乱和胶结物溶解,从而影响泥质粉砂岩的物理力学性质。邓华峰等<sup>[8]</sup>分析了水-岩耦合次数对层状砂岩微观结构的影响,指出水-岩物理和化学作用加速了颗粒间胶结物的溶解,增加了裂隙扩展率。朱珍德等<sup>[9]</sup>通过SEM对锦屏二级水电站引水隧洞大理岩破坏后的断裂断口进行观察,分析断口微观形貌特征。刘长武等<sup>[10]</sup>通过SEM、X射线衍射仪、9310型微孔结构分析仪等先进设备,从微观角度分析泥岩遇水后物理力学性质的变化规律;周翠英等<sup>[11]</sup>探讨了不同种类软岩在不同饱水时间后微观结构基本特征,研究发现软岩在饱水条件下,随着浸泡时间的延长,孔隙率增加,颗粒间连接变松散,结构变疏松多孔。刘兴华等<sup>[12]</sup>通过电子计算机断层扫描岩石的损伤过程进行观察,并对岩石微裂纹的损伤规律进行定量分析,研究表明岩石细观损伤满足分形特征。汪丽等<sup>[13]</sup>研究发现板岩随着浸泡时间的增加,岩石内部的微裂隙扩展及贯通,岩石颗粒结构变得越来越松散。唐小琳等<sup>[14]</sup>通过SEM仪器对3种不同饱水-失水循环次数的泥岩破坏断面进行分析,指出随着循环次数的增加,颗粒胶结程度变差,颗粒排列比较紊乱,微裂纹数量增加。闻名等<sup>[15]</sup>研究了不同含水率下红砂岩的劈裂微裂纹扩展机理,阐述了岩样颗粒内部沿晶断裂和穿晶断裂的耦合作用导致了最终的宏观破裂特征。

从上述的研究成果中可以看出,许多学者已从微观角度分析了岩石在流固耦合环境下的损伤劣化机理,使人们对水对岩石材料的作用机理有了更深层次认识。然而,关于轴压水压耦合作用对岩石材料的微观结构特征的影响研究鲜见报道。鉴于此,本文以砂岩为研究对象,通过流固耦合力学实验系统,开展单轴压缩、三轴压缩和三轴蠕变实验,借助SEM设备,研究轴压水压耦合作用对岩

样微观结构特征的影响,揭示压力水在短时间和长时间内对砂岩的损伤破坏机理,为评估和预防与水相关的岩土工程稳定性问题提供理论依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验设备

流固耦合力学实验系统(YSL-200型,四川大学),该系统由静油压加载系统、静水压加载系统和位移变形测量系统组成。该系统的工作原理是试样被水包围,与水真实接触,通过静水压加载系统控制水压力,进而实施压力水环境下的单轴、三轴压缩及三轴蠕变实验,相应的岩样受力示意图如图1所示。

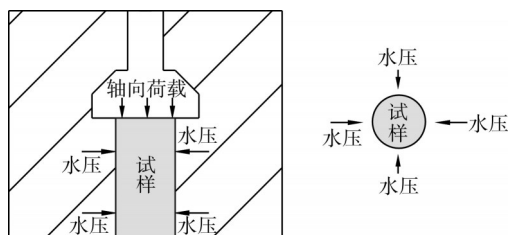


图1 流固耦合系统中岩样受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stress on rock sample in fluid-solid coupling system

SEM(JSM-7500F型,四川大学),主要由真空系统、电子束系统及成像系统等部分组成,用于测定岩样断口形貌特征。

### 1.2 实验方案

实验选用的砂岩,完整性较好,主要由石英和长石等构成。圆柱形岩样尺寸为50 mm×100 mm(直径×高),在开展轴压水压耦合实验前要对砂岩岩样饱水处理48 h,设计三类力学实验方案,分别为单轴压缩实验:干燥岩样、零水压饱水岩样;三轴压缩实验:水围压分别为1,3,5,7 MPa;三轴蠕变分级加载实验:保持轴压20 MPa恒定,调整水围压分别为1,3,5,7 MPa。

分别取干燥和饱水环境下单轴压缩试验、三轴压缩、三轴蠕变分级加载实验后的破裂岩样断面,制作成30 mm×30 mm×5 mm(长×宽×高)的薄片样,其中在制作岩样的过程中不得污染破裂断口的上表面(观察面)。利用SEM设备,通过对岩样破裂断口放大50、200、500和1 000倍,分析不同实验条件下砂岩岩样破裂断口的微观结构特征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单轴压缩下砂岩破坏断口微观结构

#### 2.1.1 干燥砂岩破坏断口微观特征 干燥岩样在

单轴压缩破坏后,砂岩断口表面光滑,断口表面中出现一些裂纹核[图2(a,b)],这是由于微孔隙、微裂纹扩展与汇合的结果。岩样断口形貌主要以穿晶断裂为主,裂纹发生在一些结晶面上,沿着主应力轴的方向扩展[图2(c,d)]。岩样在以穿晶断裂形式为主的同时,伴随着沿晶断裂[图2(b)]。其中裂纹核是岩样发生脆性断裂的一种微观断裂形式。因此,在微孔隙、微裂隙、穿晶断裂和沿晶断裂的综合作用下,砂岩岩样产生了以张拉破坏形式为主的宏观破裂。

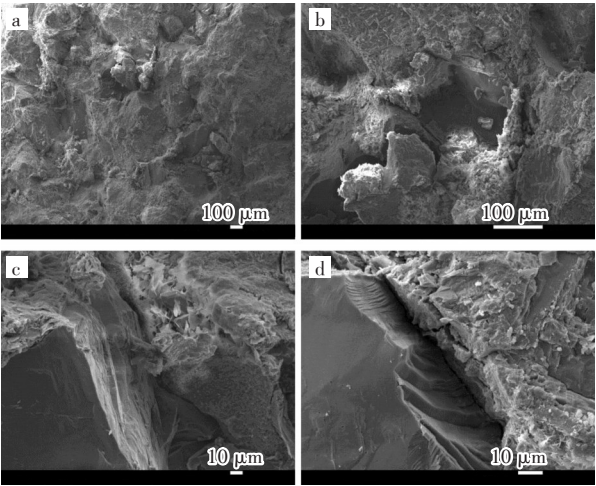


图2 干燥砂岩破坏断口不同放大倍数下的SEM图  
Fig. 2 SEM images of dry sandstone fracture with different magnifications

2.1.2 饱水砂岩破坏断口微观特征 单轴压缩破坏后的饱水砂岩岩样断口表面不平整,呈现锯齿状,岩样断口表面不光滑。在水的软化作用下,微孔隙、微裂纹扩展与汇合后在岩样断口表面中出现较多的裂纹核[图3(a,b,c,d)]。岩样断口形貌

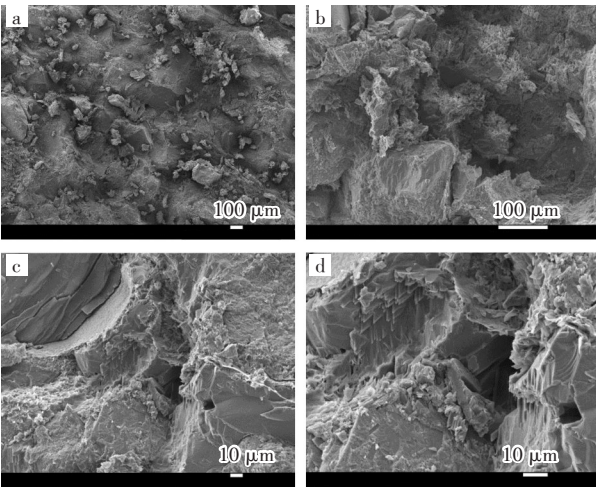


图3 饱水砂岩破坏断口不同放大倍数下的SEM图  
Fig. 3 SEM images of saturated sandstone fractures with different magnifications

主要以沿晶断裂[图3(b,c)]形式为主,以穿晶断裂为辅,这是由于在水的楔合作用下,岩样晶体间的黏结力会降低,再加上晶粒间的黏结强度低于晶粒自身的强度。饱水岩样断口形貌的微观结构中出现的沿晶断裂、穿晶断裂与裂纹核是岩样在单轴压缩作用下的结果,在宏观方面的破裂形式表现为张拉破坏。

2.2 轴压水压耦合作用下砂岩破坏断口微观结构

分别在1,3,5,7 MPa水围压条件下进行三轴压缩试验,其中1,3 MPa水压下岩样宏观破裂形态以张拉破坏为主,5,7 MPa水压下以剪切破坏为主。本文以1,7 MPa水压下岩样破坏断口为例,分析水压对其微观结构的影响。

2.2.1 1 MPa 水压下砂岩破坏断口微观特征

在1 MPa水压作用下,砂岩断口表面凹凸不平,多呈锯齿状,岩样内部微孔隙发育,在岩样被压缩后,这些微孔隙、微裂纹会扩展和汇合,产生许多裂纹核[图4(a)],其中裂纹核是岩石张拉破裂的一种微观断裂形式。岩样断口的形貌主要以穿晶断裂为主,裂纹发生在一些结晶面上,沿着主应力轴的方向扩展[图4(c)]。岩样在以穿晶断裂形式为主的同时,伴随着沿晶断裂[图4(d)]。在微孔隙、穿晶断裂和沿晶断裂的综合作用下,岩样产生了以张拉破坏为主的宏观破裂。

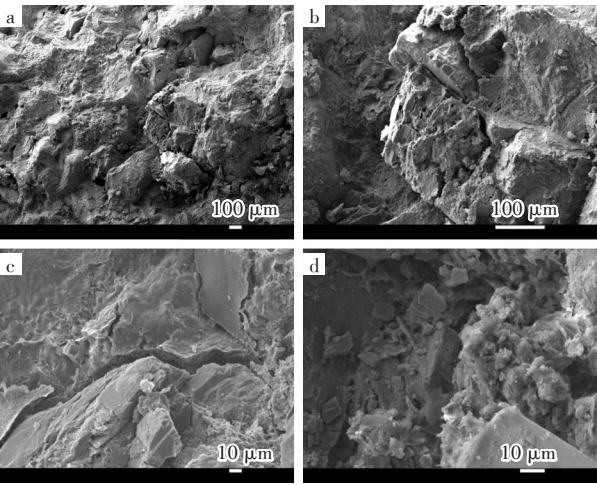


图4 在1 MPa水压下砂岩破坏断口不同放大倍数SEM图  
Fig. 4 SEM images of sandstone fractures under 1 MPa hydraulic pressure with different magnifications

2.2.2 7 MPa 水压下砂岩破坏断口微观特征

对比图5与图4可知,7 MPa水压压缩作用下的岩样断口表面较平整,裂纹核的个数减少。岩样断口表面出现较少的穿晶裂纹和沿晶裂纹,以及较多的剪切裂纹[图5(b)]。矿物颗粒表面出现了不同深度的剪切裂纹[图5(d)],并且裂纹表面比较光



滑,这可能是由于岩样在轴力和较大水压的联合作用下,矿物颗粒之间产生了较大的摩擦力,矿物晶体产生了较深层次的接触、挤压,宏观方面表现出了剪切破坏现象。

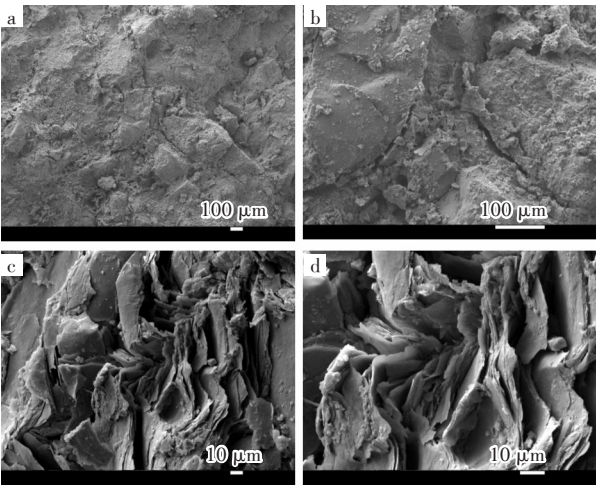


图5 在 7 MPa 水压下砂岩破坏断口不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of sandstone fractures under 7 MPa hydraulic pressure with different magnifications

2.3 轴压水压耦合作用下砂岩蠕变破坏断口微观结构

在轴应力为 20 MPa,水压为 1,3,5,7 MPa 条件下进行三轴蠕变试验,其中 1,3 MPa 水压下岩样蠕变宏观破裂形态以张拉破坏为主,5,7 MPa 水压下以剪切破坏为主。以 1,7 MPa 水压下岩样蠕变破裂断口为例,分析水压对其微观结构的影响。

2.3.1 1 MPa 水压下岩样蠕变破坏断口微观特征 在水压 1 MPa 作用下进行分级加载蠕变试验后,砂岩断口表面凸凹不平,多呈锯齿状,岩样内部微孔隙不发育,这是由于在轴压水压耦合作用下进行蠕变试验后,一部分微孔隙被压密,另一部分微孔隙与微裂纹扩展、汇合,产生许多裂纹核[图 6(a)]。蠕变岩样断口的形貌主要以岩晶断裂裂纹[图 6(b)]为主,这是由于在轴压水压耦合作用下,晶间的黏结强度降低,更低于晶粒本身的强度。岩样的蠕变破裂形式中伴随着穿晶断裂裂纹[图 6(c,d)]。以岩样出现的主要微观破裂特征,初步判断岩样蠕变以张拉破坏为主。

2.3.2 7 MPa 水压下岩样断口微观特征 对比图 6 和图 7,7 MPa 水压作用下岩样蠕变破坏断口表面较平整,裂纹核较少且较浅。岩样断口表面出现较少的穿晶裂纹和沿晶裂纹,以及较多的剪切裂纹[图 7(a)]。另外,岩样断口表面出现不同深度的剪切裂纹[图 7(d)],与 7 MPa 水压下压缩破坏

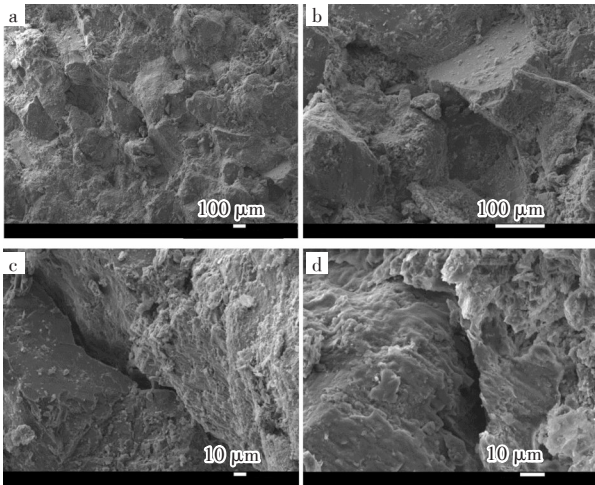


图6 在 1 MPa 水压下砂岩蠕变破坏断口不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of sandstone creep failure fractures under hydraulic pressure of 1 MPa with different magnifications

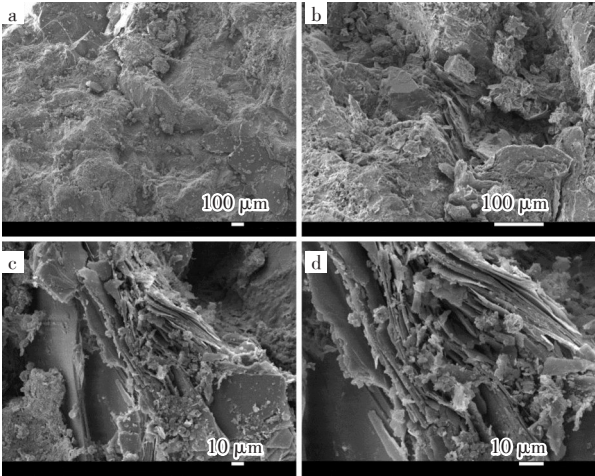


图7 在 7 MPa 水压下砂岩蠕变破坏断口不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 7 SEM images of sandstone creep failure fractures under hydraulic pressure of 7 MPa with different magnifications

产生的剪切裂纹相比,剪切裂纹深度较浅,并且裂纹表面比较粗糙,这可能是由于岩样轴压水压耦合作用下发生蠕变破坏的过程中,岩样破坏的应变率比较低;与 1 MPa 水压下岩样断口微观结构特征相比,剪切裂纹较多且较深,这是由于随着水围压的增大,矿物颗粒之间产生了较大的摩擦力,矿物晶体产生了较深层次的接触、挤压。由岩样断口微观特征可推断,7 MPa 水压下岩样的蠕变破坏形式主要以剪切破坏为主,伴随着少量的张拉破坏。

2.4 讨论

由砂岩破坏断口微观结构分析可知,砂岩岩样在单轴压缩条件下的宏观破裂形式为张拉破坏,而在轴压水压耦合作用下,从低水围压到高水围压,砂岩岩样的宏观破裂形态由张拉破坏逐渐

向剪切破坏形态转变。对于剪切破坏,由剪切破坏公式(1)<sup>[16]</sup>可知,三轴压缩下的岩样破坏强度与黏聚力、内摩擦角和围压相关,与抗拉强度无关。

$$\sigma_1=2C\cdot\frac{\cos\varphi}{1-\sin\varphi}+\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\sigma_3\tag{1}$$

式中： $\sigma_1$  为岩样破坏强度,MPa; $C$  为黏聚力,MPa; $\varphi$  为内摩擦角,°; $\sigma_3$  为围压,MPa。

但是,由轴压水压耦合作用下砂岩断口微观结构分析可知,随着水围压逐渐增大,三轴压缩岩样破裂断口表面越来越平整,裂纹核逐渐变少,沿晶和穿晶断裂越来越少,剪切平行裂纹逐渐增多,且裂纹深度逐渐增加,破裂面光滑度增大。在宏观破裂形式方面,随着水压增大,岩样破坏形态为张拉破坏—张剪破坏—纯剪切破坏。因此,公式(1)对于张剪破坏形态的岩样已不能满足要求,需要对其进行完善,在新构建的公式中不仅需要考虑黏聚力、内摩擦角及水围压,还应当考虑岩样破裂角与抗拉强度,如公式(2)所示,即可从宏观角度解释砂岩岩样在水围压增加的过程中出现张剪破坏形态的原因。

$$\sigma_1'=k\cdot(\varphi,\beta)\cdot C+j\cdot(\varphi,\beta)\cdot\sigma_3+m\cdot(\varphi,\beta)\cdot\sigma_t\tag{2}$$

式中： $\beta$  为岩样破裂角,°; $k,j,m$  为内摩擦角和破裂角的函数表达式。

### 3 结 论

1)单轴饱水岩样破裂断口表面不平整,呈锯齿状,裂纹核较多,断口形貌以沿晶断裂为主,穿晶断裂为辅,岩样的宏观破裂形式表现为张拉破坏。

2)随着水压的增大,三轴压缩岩样破裂断口表面由凸凹不平逐渐变的较为平整,裂纹核逐渐变少,且核深度变小,沿晶断裂和穿晶断裂形式变少,剪切裂纹增多。在低水压环境下,随着水压逐渐增加,岩样的宏观破坏形式由以张拉破坏为主逐渐向以剪切破坏为主转变。

3)随着水压的升高,三轴蠕变岩样破裂断口表面变得更加平整,裂纹核逐渐变少,剪切裂纹逐渐增多,岩样的宏观破坏特征由以张拉破坏为主逐渐向以剪切破坏为主转变。与三轴压缩岩样破坏断面相比,三轴蠕变岩样破裂断口表面平整度和光滑度较差,晶体间联结更加紧密,剪切裂纹密度和深度增加。

#### 参考文献

[1] 夏冬. 浸水岩石损伤演化过程试验研究及在大水矿

山中的应用[D]. 沈阳:东北大学,2014.

[2] 念红芬,张春华. 乌东德水电站库区板岩遇水软化微观机理及强度模型研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2018,40(6):10-14.

[3] 吴金刚,毛俊睿,曾珠,等. 煤矿重特大水灾事故风险耦合研究[J]. 矿业安全与环保,2019,46(5):104-108,113.

[4] 李会锋. 基坑降水开挖对邻近建筑物沉降的影响分析[D]. 邯郸:河北工程大学,2015.

[5] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock: part II-experimental studies [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1967,4(4):407-408.

[6] SPRUNT E S,BRACE W F. Direct observation of micro-cavities in crystalline rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1974,11(4):139-150.

[7] 张安斌,张艳博,刘祥鑫,等. 水对泥质粉砂岩物理力学性能影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术,2015,43(8):67-71.

[8] 邓华锋,张恒宾,李建林,等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学,2018,39(7):2344-2351.

[9] 朱珍德,张勇,徐卫亚,等. 高围压高压条件下大理岩断口微观机理分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):44-51.

[10] 刘长武,陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学,2000,21(1):28-31.

[11] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩土力学与工程学报,2005,24(3):394-400.

[12] 刘兴华,郑颖人. 岩石损伤的CT实验观测[J]. 贵州工业大学学报,1997,26(增刊1):120-122.

[13] 汪丽,李同录,张建杰. 地下水对板岩微观结构变化的影响研究[J]. 水力发电,2019,45(4):49-52.

[14] 唐小琳,顾正洪,夏微微,等. 饱水-失水循环作用下岩石劣化特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):208-213,219.

[15] 闻名,陈震,许金余,等. 不同含水率红砂岩静态劈拉试验及细观分析[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(1):86-92.

[16] LIU D F, LIU C W, KANG Y M, et al. Mechanical behavior of Benxi Formation limestone under triaxial compression: a new post-peak constitutive model and experimental validation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77 (4) : 1701-1715.