

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.010

# 岩石吸水特性及水岩耦合力学特性试验

陈峰<sup>1,2</sup>, 孙晓明<sup>3</sup>, 杜世鹤<sup>3</sup>

(1. 南阳理工学院土木工程学院, 河南 南阳 474150;

2. 南阳理工学院河南省冲击与工程结构灾害动力学实验室, 河南 南阳 474150;

3. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了研究凝灰岩、泥炭质砂岩和泥质砂岩的吸水特性以及吸水引起的力学性能变化, 利用 X-射线衍射试验、SEM 试验和压汞试验对 3 种岩样的矿物成分、微观结构和孔径分布特征进行了测试分析, 在此基础上利用软岩水理作用试验系统对岩样的吸水特性进行了研究, 并对吸水前后岩样的强度进行了测试。试验结果表明, 3 种岩石的吸水过程都可分为非线性吸水和线性吸水两个阶段, 吸水特征曲线函数均为负指数函数, 岩石的吸水量与其黏土矿物含量和其有效空隙数量之间为正相关; 吸水后岩石强度的减小量与其吸水量与黏土矿物含量之间为负相关, 较小的吸水量也会对岩石的力学特性产生较大的影响。

**关键词:** 吸水特性; 水岩耦合; 孔径分布; 力学特性

**中图分类号:** O319.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)01-0077-05

## Experimental study on water absorption characteristics and water-rock coupling mechanical properties of rock

CHEN Feng<sup>1,2</sup>, SUN Xiaoming<sup>3</sup>, DU Shihe<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 474150, China;

2. Henan International Joint Laboratory of Dynamics of Impact and Disaster of Engineering Structures, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 474150, China;

3. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** To better understand the water absorption (WA) characteristics and changes in mechanical properties caused by water absorption of tuff, carboniferous sandstone and argillaceous sandstone, this paper conducted the X-ray diffraction, Scanning Electron Microscope (SEM) and Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) tests to obtain their mineralogical composition, micro-structure feature and pore size distribution features. A soft-rock hydrophilic experiment system was used to study the WA characteristics of rock samples, and the strengths of rock samples before and after absorbing water were tested. The results show that the WA process of three rocks includes the non-linear stage and linear stage, and the functions of the WA characteristic curves are all negative exponential function. The WA value has positive correlation with the clay mineral content and the amount of the effective holes. The reduced strength of the rocks shows negative correlation with WA value and clay mineral content, moreover the little WA value can contribute bigger effect on the mechanical properties of rocks.

**Key words:** water absorption characteristics; water-rock coupling; pore size distribution; mechanical properties

水作为一种影响井巷、隧洞、水利等工程的重要因素, 长期受到工程界的广泛关注。岩石吸水后其力学特性会发生变化, 这对各类工程会有较大的影响, 因此针对岩石的吸水特性以及吸水后力学特性的研究具有重要的意义。

国内外有关学者围绕着岩石和水开展了大量的研究<sup>[1-2]</sup>, 取得了一系列的研究成果。何满潮等<sup>[3]</sup>对深

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51904306); 南阳市科技攻关项目(JCQY002); 南阳理工学院博士基金(510089)

**作者简介:** 陈峰(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程和软岩工程力学等研究。E-mail: chenfenghpu@126.com

**引用本文:** 陈峰, 孙晓明, 杜世鹤. 岩石吸水特性及水岩耦合力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 77-81.

CHEN Feng, SUN Xiaoming, DU Shihe. Experimental study on water absorption characteristics and water-rock coupling mechanical properties of rock[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 77-81.

部泥岩的吸水特性进行了研究,得到了泥岩的吸水特征曲线和泥岩吸水的主要影响因素;周莉等<sup>[4]</sup>研究了砂岩的吸水特性,建立了砂岩过程函数,并分析了影响砂岩吸水速率的影响因素;周翠英等<sup>[5]</sup>对特殊软岩遇水软化的微观机制进行了研究;丁梧秀等<sup>[6]</sup>研究了灰岩在水化学溶液和冻融耦合作用下的力学特性,结果表明灰岩的强度在水化学溶液和冻融的作用下明显降低;Feng等<sup>[7]</sup>对水化学环境侵蚀下的岩石破裂特性进行了研究;Celik等<sup>[8]</sup>对凝灰岩在纯净水和盐水条件下的静态和动态的毛细吸水进行了研究,认为岩石的吸水量是随时间变化的函数;Shukla等<sup>[9]</sup>探讨了水和岩石矿物中的盐类物质对岩石强度和弹性模量的影响;Ozcelik等<sup>[10]</sup>分析了天然石材吸水和烘干后的特征,发现岩石的空隙率和吸水率密切相关;Erguler等<sup>[11]</sup>研究了黏土矿物含量较高的岩石在遇水后力学性能的变化,结果表明随着含水量的增加,岩石的强度明显减小;Ciantia等<sup>[12]</sup>发现水岩相互作用可引起灰屑岩强度的降低;Majid等<sup>[13]</sup>探讨了水压力对破裂岩石强度和变形的影响;Vásárhelyi等<sup>[14]</sup>通过研究发现,无论是岩体还是岩石,含水量对其力学特性都会产生显著的影响;Li等<sup>[15]</sup>提出了不同饱和度下岩石单轴抗压强度的解析解公式,为理解水对岩石强度的削弱作用提供了新的见解;Zhang等<sup>[16]</sup>通过试验发现,含水量对煤的力学参数(弹性模量、强度、黏聚力、内摩擦)产生了较为显著的影响;Geng等<sup>[17]</sup>认为,含水量影响岩石的破坏模式,随着含水量的增加,砂岩变形破坏模式由脆性破坏逐步变为延性破坏;Zhao等<sup>[18]</sup>认为,含水量对岩石的力学参数和变形破坏产生了较大的影响;Jiang等<sup>[19]</sup>通过试验发现岩石的单轴抗压强度和三轴抗压强度随着含水率的增加而减小。

已有的研究成果表明,岩石与水相互作用后岩石的物理力学性能将发生改变,因此岩石的吸水特性对岩石的力学性能起着至关重要的影响<sup>[20]</sup>。本文首先对不同岩性岩样的矿物成分和微观结构进行了测试分析,利用压汞试验获取了岩样空隙的孔径分布特征;在此基础上探讨了不同岩石的吸水特性,得出岩石吸水特征曲线函数为负指数函数的结论,认为岩石的矿物含量和空隙分布对吸水有较大的影响;最后对岩石吸水损伤后力学性能的变化进行了研究,发现即便是较小的吸水量也会对岩石的力学性能产生较大的影响。

## 1 岩样介绍

本次试验所取岩样的岩性为凝灰岩、泥炭质砂岩、泥质砂岩。其中凝灰岩的地质年代为泥盆系中统,取样深度为270~290 m;泥炭质砂岩的地质年代为志留系库布苏群,取样深度为740~755 m,取样范围内有断层;泥质砂岩的地质年代为二叠系,取样深度为70~100 m,利用所取岩芯制作的岩样尺寸为 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体。岩芯及岩石样品如图1所示。凝灰岩表面结构致密,颗粒细小,表面光滑;泥炭质砂岩表面呈暗灰色,结构致密,层理明显;泥质砂岩表面灰白色且粗糙,覆盖少量颗粒,有白色块状填充物。

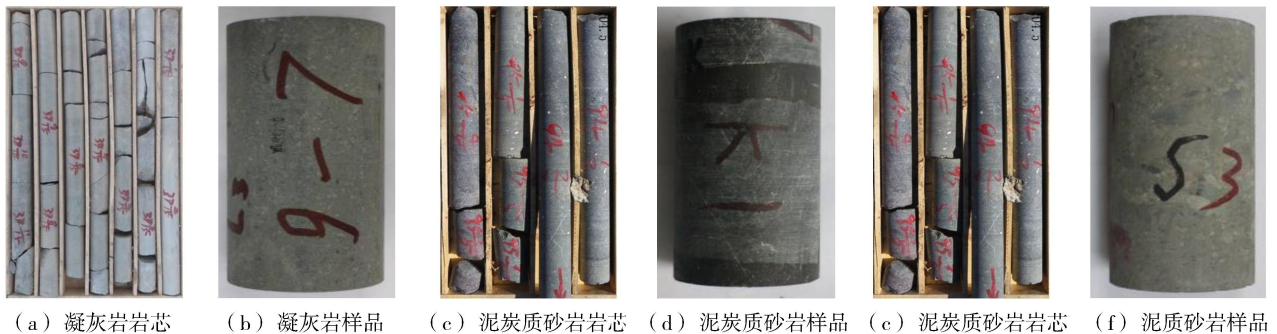


图1 岩芯及岩石样品

Fig.1 Rock core and rock samples

## 2 试验方法

### 2.1 岩样物化成分测试分析

对所选岩样进行X-射线衍射试验,试验结果见表1。从试验结果可以看出:①凝灰岩岩样的主要矿物成分为石英、钠长石和少量钾长石。黏土矿物主要成分为绿泥石,其含量为88%,并含有少量的

表1 全岩矿物种类及质量比

Table 1 Rock mineral type and mass fraction

岩样	矿物质量比/%					黏土矿物 质量分数/%
	石英	钾长石	钠长石	方解石	角闪石	
凝灰岩	23.8	3.7	48.4		2	22.1
泥炭质砂岩	19.1	2.4	38.3	1.8		38.4
泥质砂岩	37.7		10.9	8.5		42.9

蒙脱石(7%)和伊利石(5%)。②泥炭质砂岩岩样的主要矿物成分为石英、钾长石、钠长石。相对来说,方解石的含量较少。黏土矿物中主要成分为伊利石和绿泥石,其中伊利石含量达 61%,绿泥石含量为 39%。③泥质砂岩岩样的主要矿物成分为石英、钠长石,方解石的含量较少。黏土矿物中含有伊利石、高岭石、绿泥石,分别占 38%、33%和 29%。

### 2.2 岩样微观结构特征测试

为了得到岩样的微观结构特征,对所选取的岩样进行 SEM 试验。图 2 为不同放大倍数的凝灰岩电镜扫描结果,可以看出,当放大 1 000 倍时,岩样呈絮状,岩样中有 3~5 μm 的微孔隙;当放大 10 000 倍时,可明显观察到叠片支架状微结构,微孔隙和裂隙较为发育。

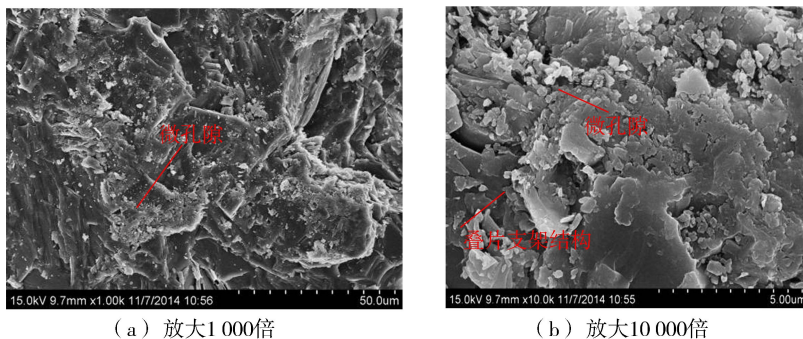


图 2 凝灰岩岩样电镜扫描结果  
Fig.2 SEM results of tuff

图 3 为不同放大倍数的泥炭质砂岩电镜扫描结果。当放大 1 000 倍时,能明显看出岩样上分布有很多微小的孔洞;当放大 10 000 倍时,可明显观察到蜂窝状结构,孔隙之间有一定的连通性,微孔隙和裂隙较为发育。

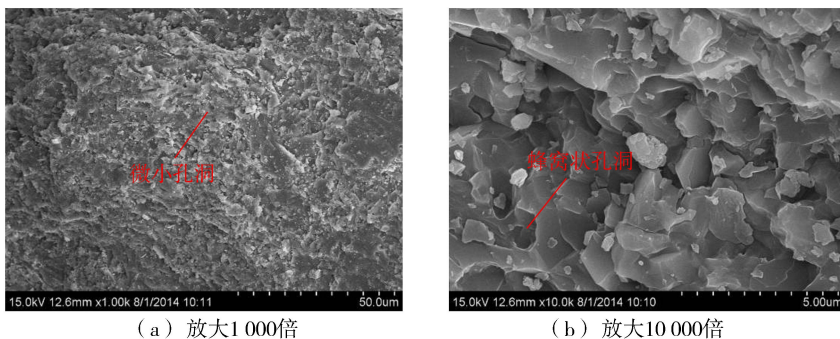


图 3 泥炭质砂岩样电镜扫描结果  
Fig.3 SEM results of carboniferous sandstone

图 4 为不同放大倍数的泥质砂岩电镜扫描结果,可以看出,当放大 1 000 倍时,岩样呈现棉麻状,岩样上分布很多的微小孔洞;当放大 10 000 倍时,岩样呈现片麻状结构,微孔隙较为发育。

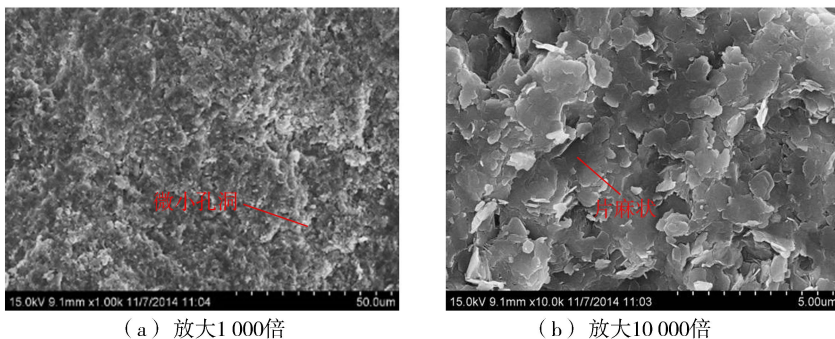


图 4 泥质砂岩样电镜扫描结果  
Fig.4 SEM results of argillaceous sandstone

### 2.3 压汞试验

为了得到岩样的孔径分布特征,对岩样进行压汞试验,试验结果见图5。当孔隙直径小于 $0.2\ \mu\text{m}$ 时,孔隙类型为微毛细管孔隙,其特点为在正常的地层条件下流体不易在其中流动,因此大于 $0.2\ \mu\text{m}$ 的孔径为有效吸水孔径。将孔径 $0.2\ \mu\text{m}$ 作为吸水孔径的界限点,为了更细致地研究岩样的孔径分布特征,将大于 $0.2\ \mu\text{m}$ 的孔径又分为 $0.2\sim 2\ \mu\text{m}$ 、 $2\sim 20\ \mu\text{m}$ 、 $20\sim 200\ \mu\text{m}$ 和大于 $200\ \mu\text{m}$ 4个区间。试验结果表明,泥质砂岩的无效吸水孔径所占比率最小,为30.91%,泥炭质砂岩和凝灰岩的无效孔径较大,分别为63.02%和67.69%。岩样各个有效吸水孔径在区间上的分布按照从大到小的排序依次为泥质砂岩、泥炭质砂岩、凝灰岩。

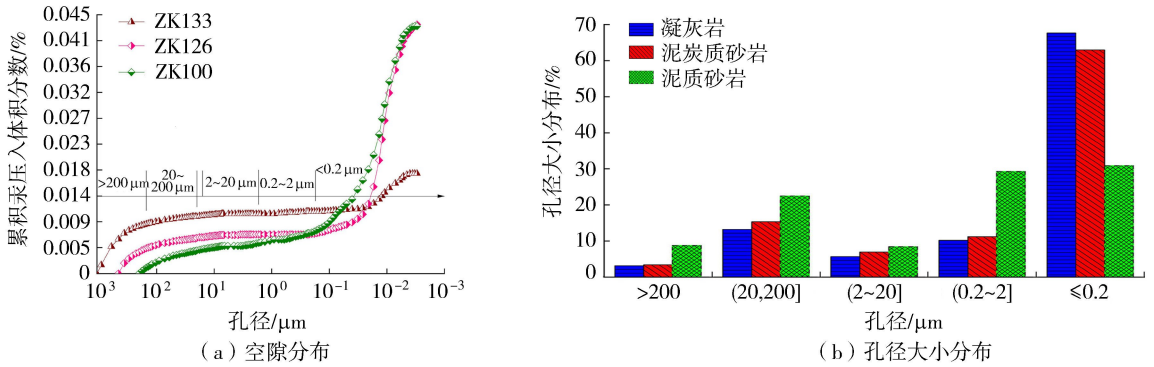


图5 岩样孔隙和孔径大小分布

Fig. 5 Pore distribution and pore size distribution of rock samples

### 2.4 吸水试验

利用中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室自主研发的软岩水理作用试验系统,对岩样进行了550 h的吸水试验。进行吸水试验过程中,实验室的环境相对是密闭和稳定的,室内的温度为 $20^\circ$ ,室内的相对湿度为55%,试验结果见表2和图6。

对岩样的吸水过程进行了曲线拟合,泥质砂岩、泥炭质砂岩、凝灰岩的吸水拟合曲线函数分别为

$$y_1 = -14.51\exp(-x/509.76) - 1.17\exp(-x/31.33) + 15.68 \quad (1)$$

$$y_2 = -8.06\exp(-x/1887) - 1.46\exp(-x/31.33) + 9.52 \quad (2)$$

$$y_3 = -0.32\exp(-x/5.9) - 2.18\exp(-x/334.89) + 2.50 \quad (3)$$

可以看出3种岩样的吸水特征曲线函数为负指数函数。

对岩样的吸水特征曲线函数进行求导,得到岩样吸水速率随时间变化曲线,如图7所示。3种岩样的吸水过程都可以分为两个阶段:第一个阶段为随着时间的增加吸水速率逐渐减小的非线性阶段;第二个阶段为随着时间的增加吸水速率基本保持不变的线性阶段。但是3种岩样吸水过程线性与非线性的界点位置却

表2 岩样吸水结果

Table 2 Results of water absorption of rock samples

编号	岩性	干燥岩样质量/g	吸水量/g	吸水率/%
ZK100	凝灰岩	502.951	2.03	0.41
ZK126	泥炭质砂岩	522.565	3.37	0.64
ZK133	泥质砂岩	442.616	9.55	2.16

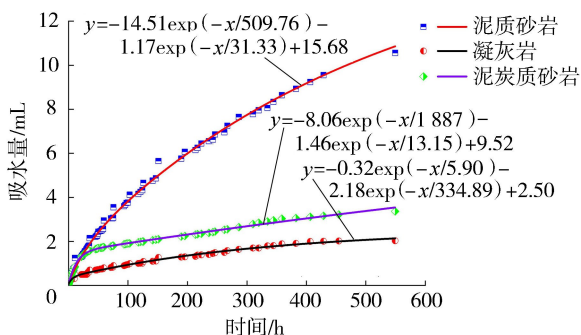


图6 时间-吸水量变化曲线

Fig. 6 Time-water absorption variation curve

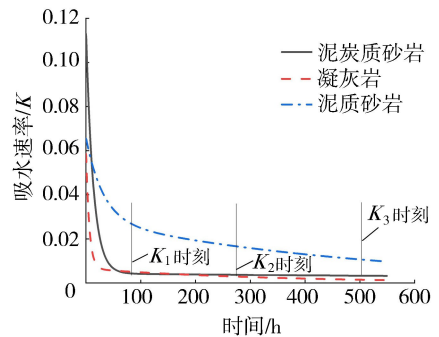


图7 时间-吸水速率变化曲线

Fig. 7 Time-water absorption velocity curve

不同,泥炭质砂岩在  $K_1$  时刻,即吸水 92 h 后最早进入线性阶段;凝灰岩在  $K_2$  时刻,即吸水 275 h 后进入线性阶段;泥质砂岩在  $K_3$  时刻即吸水 502 h 最后进入线性阶段。

## 2.5 力学特性试验

对同一批次加工的岩样在吸水前后进行单轴抗压强度试验,压力试验机的加载速率为 0.2 mm/min,试验结果如图 8 所示。凝灰岩的强度在吸水前为 171.6 MPa,吸水后为 116.8 MPa,减小了 31.9%;泥炭质砂岩的强度在吸水前为 108.3 MPa,吸水后为 72.4 MPa,减小了 33.1%;泥质砂岩的强度在吸水前为 29.7 MPa,吸水后为 6.8 MPa,减小了 76.7%。试验结果表明岩样在吸水饱和后强度明显降低。

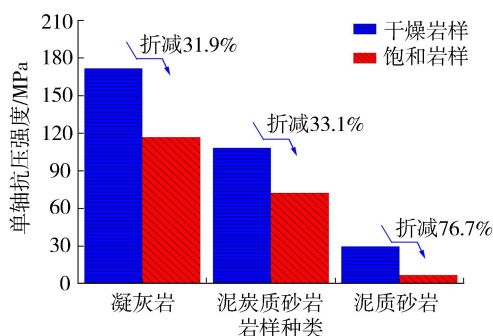


图 8 岩样干燥和饱和状态的单轴抗压强度  
Fig. 8 Uniaxial compressive strengths of sampling rock under dry and saturated state

## 3 试验结果对比分析

由试验结果可知,3 种岩样的吸水量,泥质砂岩最大,泥炭质砂岩次之,凝灰岩最小,泥质砂岩中大于有效吸水孔径的孔隙占整个孔隙的比例最高,泥炭质砂岩次之,凝灰岩最小。由此可以认为岩样的吸水量和大于有效吸水孔径的孔隙占整个孔隙的比例之间存在一定的正相关关系。岩样吸水饱和后,强度明显降低,其中泥质砂岩减小最多,泥炭质砂岩次之,凝灰岩最小。比较岩样的吸水量、黏土矿物的含量以及岩样吸水后的强度三者之间的关系,发现岩样吸水后强度的减小量和岩样的吸水量以及黏土矿物含量之间均存在一定的负相关关系,岩样的黏土矿物含量越大、吸水量越大,岩石的强度减小得越多。

## 4 结论

- 凝灰岩、泥炭质砂岩、泥质砂岩 3 种岩样的吸水特征曲线函数均为负指数函数,岩样的吸水过程分为两个阶段,吸水速率逐渐减小的非线性阶段和吸水速率基本保持不变的线性阶段。
- 岩样的吸水量和大于有效吸水孔径的孔隙占整个孔隙的比例之间存在着正相关关系。
- 岩石吸水达到饱和后,岩石的强度明显降低,岩石强度的减小量和岩样的吸水量以及黏土矿物含量之间均存在一定的负相关的关系。

## 参考文献:

- [1] 徐卫亚,黄威,张涛,等.含软弱夹层的层状岩体流变力学特性试验[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):7. (XU Weiya, HUANG Wei, ZHANG Tao, et al. Experimental study on rheological properties of layered rock mass with soft interlayers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(4):7. (in Chinese))
- [2] 李浩,徐卫亚,王苏生.致密砂岩循环加载试验及能量演化分析[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):6. (LI Hao, XU Weiya, WANG Susheng. Experimental study on rheological properties of layered rock mass with soft interlayers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(2):6. (in Chinese))
- [3] 何满潮,周莉,李德建,等.深井泥岩吸水特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1113-1120. (HE Manchao, ZHOU Li, LI Dejian, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of mudstone in deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(6):1113-1120. (in Chinese))
- [4] 周莉,何满潮,李京阳,等.砂岩吸水特性试验[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2009,10(6):580-585. (ZHOU Li, HE Manchao, LI Jingyan, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of sandstone in deep mine[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition),2009,10(6):580-585. (in Chinese))
- [5] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等.特殊软岩软化的微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):394-400. (ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(3):394-400. (in Chinese))
- [6] 丁梧秀,徐桃,王鸿毅,等.水化学溶液及冻融耦合作用下灰岩力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(5):979-985. (DING Wuxiu, XU Tao, WANG Hongyi, et al. Experimental study of mechanical property of limestone under coupled chemical solution and freezing-thawing process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(5):979-985. (in Chinese))

- [19] OpenFOAM Foundation. Openfoam v5 user guide[EB/OL]. [2021-08-16]. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v5/>. 2016-07-29/2021-08-16.
- [20] MEHL M,UEKERMANN B,BIJL H,et al. Parallel coupling numerics for partitioned fluid-structure interaction simulations[J]. Computers & Mathematics with Applications,2016,71(4):869-891.
- [21] LIU Y ,XIAO Q ,INCECIK A. A coupled cfd/multibody dynamics analysis tool for offshore wind turbines with aeroelastic blades [C]//ASME. 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim: American Society of Mechanical Engineers,2017;V010T09A038.
- [22] HABCHI C,RUSSEIL S,BOUGEARD D,et al. Partitioned solver for strongly coupled fluid-structure interaction[J]. Computers & Fluids,2013,71:306-319.
- [23] WOOD C,GIL A J,HASSAN O,et al. Partitioned block-Gauss-Seidel coupling for dynamic fluid-structure interaction[J]. Computers & Structures,2010,88(23/24):1367-1382.
- [24] OLIVIER M,MORISSETTE J F,DUMAS G. A fluid-structure interaction solver for nano-air-vehicle flapping wings[C]//AIAA. Aiaa Computational Fluid Dynamics. San Antonio:American Institute for Aeronautics and Astronautics,2009:3676.
- [25] MATTHIES H G, STEINDORF J. Partitioned strong coupling algorithms for fluid-structure interaction [J]. Computers & Structures,2003,81(8/11):805-812.

(收稿日期:2022-01-12 编辑:刘晓艳)

.....  
(上接第 81 页)

- [7] FENG Xiating,LI Shaojun,CHEN Sihli. Effect of water chemical corrosion on strength and cracking characteristics of rocks;a review[J]. Key Engineering Materials,2004,261-263:1355-1360.
- [8] ÇELIK M Y,KACMAZ A U. The investigation of static and dynamic capillary by water absorption in porous building stones under normal and salty water conditions[J]. Environ Earth Sci,2016,75:307.
- [9] SHUKLA R,RANJITH P G ,CHOI S K ,et al. Mechanical behaviour of reservoir rock under brine saturation[J]. Rock Mech Rock Eng,2013,46:83-93.
- [10] OZCELIK Y,OZGUVEN A. Water absorption and drying features of different natural building stones [J]. Construction and Building Materials,2014,63:257-270.
- [11] ERGULER Z A,ERGULER G K. The effect of particle size on acid mine drainage generation;Kinetic column tests[J]. Minerals Engineering,2015,76:154-167.
- [12] CIANTIA M O,CASTELLANZA R,PRISCO C D. Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48:441-446.
- [13] MAJID N B,JING Lanru[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48:971-985
- [14] VÁSÁRHELYI B,DAVARPANA S M. Influence of water content on the mechanical parameters of the intact rock and rock mass [J]. Periodica Polytechnica,2018,62(4):1060-1066.
- [15] LI Diyuan,WANG Wenjian. Quantitative analysis of the influence of saturation on rock strength reduction considering the distribution of water[J]. Geomech Geophys Geo-energy Geo-resour. 2019,5:197-207.
- [16] ZHANG Meichang,NIE Rongshan. Experimental investigation on the influence of water content on the mechanical properties of coal under conventional triaxial compression[J]. Shock and Vibration,2020,2020:1-11.
- [17] GENG Jishi,CAO Liwen. Failure analysis of water-bearing sandstone using acoustic emission and energy dissipation [J]. Engineering Fracture Mechanics 2020,231:107021.
- [18] ZHAO Kui,YANG Daoxue,ZENG Peng,et al. Effect of water content on the failure pattern and acoustic emission characteristics of red sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,142(7):104709.
- [19] JIANG Liyuan,XU Ying,CHEN Bingqi,et al. Effect of water content on the mechanical properties of an artificial porous rock[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2021,80:7669-7681.
- [20] 王伟,张宽,梅胜尧,等. 不排气条件下低渗透岩石力学特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):110-117. (WANG Wei, ZHANG Kuan, MEI Shengyao, et al. Experimental study on mechanical characteristics of low permeability rock under gas undrained condition[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(3):110-117. (in Chinese))

(收稿日期:2022-01-19 编辑:胡新宇)