

不同饱水度下红砂岩动静态力学试验

郑广辉¹, 许金余^{1,2}, 王 鹏¹, 方新宇¹, 王浩宇¹

(1. 空军工程大学机场建筑工程系,西安,710038;2. 西北工业大学力学与土木建筑学院,西安,710072)

摘要 基于 $\phi 100$ mm SHPB 试验平台和液压伺服试验机,对 4 种饱水度下红砂岩进行动、静态压缩试验,探究了饱水度对岩石强度、峰值应变、峰值模量及应变率效应的影响规律,并从细观角度对实验结论进行分析,得出:饱水度对岩石强度的影响存在临界值 S_l ,饱水度小于临界值 S_l 时,强度随饱水度的增加而线性降低,当饱水度达到 S_l 后,随着饱水度的增大,岩石强度的变化幅度非常小;峰值应变在饱水度为 0.42 时出现极小值,动态试验条件下的峰值应变对饱水度更为敏感;峰值模量随饱水度的增大而线性减小;从细观角度探究饱水度对峰值模量的影响,应主要把握 3 个关键参数:矿物颗粒和粒间胶结物的受力能力、协调变形能力以及孔隙发育程度;随着饱水度的增大,岩石力学性质的应变率效应越来越明显。其中,饱水度对岩石强度应变率效应因子影响最大,对峰值应变应变率效应因子影响次之,对峰值模量应变率效应因子影响最小。

关键词 岩石力学;饱水度;强度特性;变形特性;应变率效应

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.01.017

中图分类号 TU45 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)01-0099-06

A Dynamic / Static Experiment Research on the Red-Sandstone Mechanical Property under Different Saturated Degree

ZHENG Guanghui¹, XU Jinyu^{1,2}, WANG Peng¹, FANG Xinyu¹, WANG Haoyu¹

(1. Department of Airfield and Building Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the hydraulic servo testing machine and the split Hopkinson pressure bar (SHPB) with a diameter of 100 mm, the dynamic / static experiment compression tests of red-sandstone with different saturated degree of water are tested, the mechanical properties of the rock is studied, and the experimental conclusion from the perspective is analyzed. The conclusion is that there is a critical saturated degree S_l for the impact on rock strength. when the saturated degree is less than S_l , the intensity linearly decreases with the increase of saturated degree. when the saturated degree is larger than S_l , the change range of rock strength is very small along with the rising of the satisfied degree. The minimal peak strain appears at the saturated degree of 0.42 and the peak strain under the condition of dynamic test is more sensitive to the saturated degree. The Peak modulus linearly decreases with the increase of saturated degree. From a judgment upon the influence of the saturated degree on the peak modulus from the Microcosmic view, three key parameters should be seized, i. e. loading ability of mineral grains and cement between them, coordinate a-

收稿日期: 2016-09-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51378497)

作者简介: 郑广辉(1992—),男,山西运城人,硕士生,主要从事结构工程和防护工程研究. E-mail: justzgh@126.com

通讯作者: 许金余(1963—),男,吉林靖宇人,教授,博士生导师,主要从事结构工程和防护工程研究. E-mail: jyx369@yeah.net

引用格式: 郑广辉,许金余,王鹏,等. 不同饱水度下红砂岩动静态力学试验[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(1):99-104. ZHENG Guanghui, XU Jinyu, WANG Peng, et al. A Dynamic / Static Experiment Research on the Red-Sandstone Mechanical Property under Different Saturated Degree[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(1): 99-104.

bility to deformation of them and degree of pore development. Along with the rising of the saturated degree of water, the strain rate effect of rock mechanics properties have become more and more obvious. Among them, the saturated degree of water has the greatest influence on the strain rate effect of rock strength and the smallest effect on the strain rate effect of rock modulus.

Key words: rock mechanics; saturated degree; strength characteristics; deformation characteristics; strain rate effect

岩石作为开放的物质系统与富水环境之间复杂的物理、化学以及力学作用会对岩石产生不可忽视的影响。尤其是近年来,以地下水侵蚀为显著地质特点的岩土工程日益增多,与水相关的岩石问题也随之大量出现,研究岩石在不同饱水度下的力学性质是一项极具理论研究和实际工程价值的^[1-2]。

对岩石在富水环境中力学性质的研究是岩土工程研究的热门课题之一,张春会等^[3]对不同饱水度、围压下砂岩开展三轴试验,分析了饱水度和围压对砂岩力学性质的影响规律;王伟等^[4]对水化学溶液处理后的红砂岩强度变形特性进行了三轴压缩试验研究,分析了水化学溶液对砂岩强度、变形特性的影响规律;傅晏等^[5]研究了干湿循环作用引起的岩石强度和变形规律;王鹏等^[6]研究了冻融循环及热冲击对岩石力学性质的影响;周翠英等^[7]通过对泥质砂岩开展显微观察试验,建立了软岩骨架颗粒在水作用下的摩擦接触关系;陈瑜等^[8]基于三维表面激光形貌仪开展了水岩作用对岩石表面微观形貌影响的试验研究。可以看出,目前关于富水环境下岩石特性的研究主要从细观矿物学作用机制^[9-10]和宏观力学性质^[11-12]方面进行,但对宏细观结合的研究思路应用还比较少,另一方面,大多试验研究仅对静态或者动态中的单一状态下岩石力学性质进行分析,对客观全面地探究水作用下的岩石特性具有一定局限性。

1 试验概况

饱水度表征了岩样吸水饱和的程度,不仅可以反映含水量多少,还在一定程度上包含了岩样孔隙信息,是介于0~1之间的参数,这样的性质使其具有更适合于工程应用的特点,基于此,本文选用饱水度作为试验的主要控制变量。其计算式为:

$$S = \frac{m - m_d}{m_s - m_d} \quad (1)$$

式中: S 为饱水度; m 为岩样质量; m_s 为饱水质量; m_d 为干燥质量。

1.1 试样制备

经检验,试样制备所用红砂岩的矿物成分包括

81%石英、13%长石、3%方解石,少量伊利石、绿泥石和赤铁矿;根据岩石力学性能测试要求,动态压缩试样加工为 $\phi 96 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ 的圆柱体,静态压缩试样加工为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体,加工完成后试样的外形、尺寸精度符合国际岩石力学学会(ISRM)建议方法中关于试件制备的要求。

试样分为干燥、自然、吸水 and 饱水 4 种状态,经测量,自然状态下试样的平均饱水度为 0.42;参考《DLT/5368-2007 水电水利工程岩石试验规程》,在 $107 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 电热鼓风箱中将部分自然试样烘干 48 h 制得干燥试样;将部分干燥处理后的试样放入水槽,注水至试样高度的 1/4 处,以后每隔 2 h 加入试样高度 1/4 的水量,直到试样完全浸没,然后让试样自由吸水 48 h,最终制得平均饱水度为 0.7 的吸水试样;将部分吸水试样置于水面始终高于试样的煮沸容器内煮沸 6 h,制得饱水度约为 1 的饱水试样。为了获得真实客观的试验规律,在试样制备过程中对岩样进行基本的物理、水理参数测量和原始损伤的超声波检测,淘汰原始参数离散性较大的试样。表 1 为试样基本物理水理参数的平均值。

表 1 试样的物理水理参数平均值

Tab. 1 Mean of physical parameters of samples

试样状态	饱水度	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
干燥	0.00	2.21	2 672.83
自然	0.42	2.26	2 640.70
吸水	0.70	2.33	2 591.64
饱水	1.00	2.39	2 967.98

1.2 试验设备及方案

为了能够客观全面地分析饱水度对岩石力学性质的影响,分别在动、静态试验条件下进行饱水度为 0、0.42、0.7 和 1 的抗压试验,每组试验条件下设置 5 个试样。

基于细观测试技术研究材料内部变化对宏观力学效应产生的影响是一种有效的研究手段。在抗压试验前,首先对不同饱水度下完整砂岩试样进行微观结构 SEM 电镜扫描。

动态抗压试验在 $\phi 100 \text{ mm}$ SHPB 试验平台上进行,见图 1。该装置工作时主要分为高压蓄能、试样冲击、数据采集 3 个环节。在本实验平台中,压杆

的弹性模量为 210 Gpa,泊松比为 0.25~0.3,密度为 7 850 kg/m³,打击杆长 0.5 m,入射杆长 4.5 m,透射杆长 2.5 m。为了减弱应力波弥散效应^[13],保证试验过程中的应力均匀性要求,选取 T2 紫铜片作为波形整形材料对实验系统加装波形整形装置^[14]。在入射杆和透射杆端面均匀涂抹润滑剂薄层,以减小冲击过程中压杆与试样之间的端面效应^[15]。通过调整装置气压实现 8 m/s 弹速下的动态压缩试验;静态抗压试验在液压伺服试验机上进行,以 20 kN/min 进行加载,直到试样破坏。

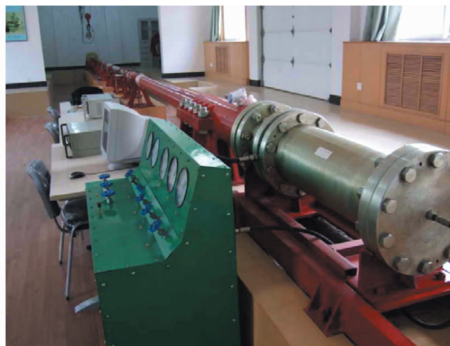


图 1 $\phi 100$ mm SHPB 装置

Fig. 1 Apparatus of 100 mm diameter SHPB

2 试验结果与分析

图 2 为 4 种饱水度下完整砂岩试样放大 300 倍后的 SEM 图像,从中可以看出,在饱水度为 0 时,矿物颗粒轮廓明显,颗粒之间胶结密实;随着饱水度的增大,矿物颗粒边缘表现出钝化现象,颗粒之间胶结物发生明显泥化,内部空隙逐渐扩展、贯通,整体结构趋于疏松。

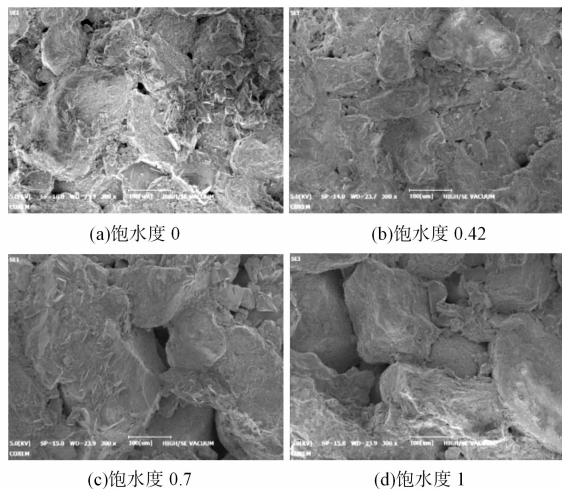


图 2 4 种饱水度下红砂岩细观形貌

Fig. 2 Microcosmic-morphology of red-sandstone under 4 kinds of water saturation

2.1 饱水度对强度的影响

从图 3 可以得到,无论是动压试验还是静压试验,在饱水度小于 0.7 时,岩石强度均随着饱水度的增加而线性降低,当饱水度达到 0.7 后,饱水度-强度曲线趋于水平。由此可以推测出,饱水度对岩石强度的影响存在临界值 S_l ,即饱水度达到 S_l 后,随着饱水度的增大,岩石强度的变化幅度非常小。

因此,在动、静态加载条件下,饱水度与强度的关系可以用分段函数进行很好地描述:

$$\begin{cases} \sigma = aS + b & S \leq S_l \\ \sigma = C & S > S_l \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_l 为饱水度界限值; a 、 b 为拟合参数; C 为常数。

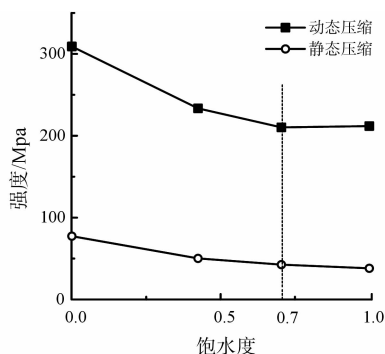


图 3 饱水度-强度关系曲线

Fig. 3 Relationship curves of water saturation and strength

岩石在不同饱水度下的宏观力学响应受到水-岩化学反应速率和时间尺度控制^[16],在本试验中,岩样经过 48 h 吸水处理后马上进行力学试验,结合试验结论从细观角度分析可知,在 48 h 吸水处理条件下,当岩样的饱水度达到 0.7 时,水和岩石之间发生的矿物溶解、沉淀生成、矿物结晶以及孔隙结构形态的演化对强度的影响达到了一种动态平衡,此后随着饱水度的增大,岩石强度起伏很小,在饱水度-强度关系曲线中出现水平段。

2.2 饱水度对峰值应变的影响

从图 4 可以看出,饱水度对两种加载状态下岩石峰值应变的影响规律相似:随着饱水度的增加,峰值应变先减小后增大,在饱水度为 0.42 时出现极小值。

结合图 2 中 4 种饱水度下红砂岩细观形貌的变化可知,这是由于在饱水度为 0 时,岩石自身的矿物颗粒以及胶结物都较为稳定,能够在抵抗一定程度的变形之后才发生整体破坏;在饱水度较小时(0.42 附近),矿物颗粒并未发生明显的软化,而矿物颗粒间的胶结物则已经发生部分溶解^[17],因此,由矿物颗粒胶结而成的岩块在小变形时就会发生整体破坏,峰值应变减小;随着饱水度的增大,矿物颗粒与

粒间胶结物均发生软化,岩样在受力时两者的变形更加协调,宏观表现为塑性增强,峰值应变增大。

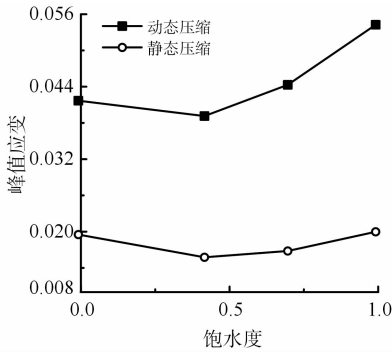


图4 饱和度-峰值应变关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of water saturation and peak strain

在静态加载条件下,饱和度为0时的峰值应变 ϵ_0^S 与饱和度为1时的峰值应变 ϵ_1^D 基本一致,两者的数量比 $\epsilon_1^D/\epsilon_0^S$ 为102.4%,而在冲击作用下,这一比值增大为130.2%,即饱和度对动态试验条件下峰值应变的影响更为明显。试样的冲击压缩破坏是在极短的时间内完成的,而静态压缩破坏则是一个缓慢的过程,结合本实验结论进一步分析可以得到,水软化后的矿物颗粒和粒间胶结物的协调变形能力具有应变速率相关性,即试样的变形速率越快,协调变形程度越高,宏观表现为峰值应变越大。

2.3 饱和度对峰值模量的影响

峰值模量在数值上等于峰值应力与峰值应变的比值,是材料在裂隙压密、弹性变形、微裂纹稳定发展、非稳定破裂发展4个阶段变形难易程度的综合表征^[18],科学地描述岩石的峰值模量与饱和度的相关关系对岩土工程建设具有重要的实践意义。

从图5可以得到,2种加载状态下饱和度对峰值模量的影响曲线形状相近,峰值模量均随饱和度的增大而线性减小,按照线性关系可以进行很好的拟合:

$$\begin{aligned} E_d &= -3.58S + 7.41, & R &= 0.99 \\ E_s &= -2.07S + 4.00, & R &= 0.99 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: E_d 、 E_s 分别为动态峰值模量、静态峰值模量。

从微观角度分析岩石的模量,应主要把握3种关系:矿物颗粒和粒间胶结物的受力能力、协调变形能力以及孔隙的发育程度,这种相关关系可以用代数表达式进行直观地描述:

$$E = f(a, t, h) \quad (4)$$

式中: a 为矿物颗粒和粒间胶结物的受力能力; t 为试验后岩样细观结构中穿晶破坏和沿晶破坏的矿物颗粒数量比例来表征的协调变形能力,比例越大,协调能力越强; h 为实验前岩样细观结构孔隙面积表

征的孔隙发育程度。

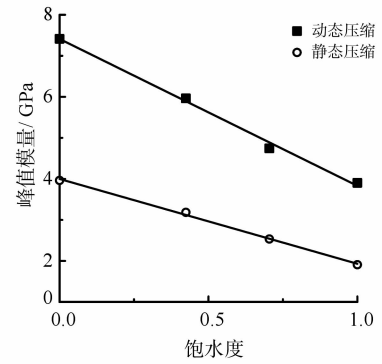


图5 饱和度-峰值模量关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of water saturation and peak modulus

通过以上分析思路可以对试验结果进行合理的解释:随着饱和度的增大,矿物颗粒和粒间胶结物的受力能力逐渐减小,而两者的变形协调能力总体表现为增强趋势,加之孔隙发育程度随着饱和度的增大而不断提高,宏观表现为峰值模量下降。

2.4 饱和度对应变率效应的影响

岩石力学性质的应变率效应是指岩石在不同应变率下表现出的力学性质随着应变率的变化而变化的现象。岩石力学参数的应变率效应与岩石本身的矿物构成、节理分布以及密度等基本物理性质有直接关系^[19],而孔隙水则会与岩石发生一些列复杂的化学反应和应力耦合,使其基本物理力学性质产生明显变化^[4]。为了探究饱和度对岩石力学参数应变率效应的影响,本文定义应变率效应因子 f 来表征岩石力学参数应变率效应的明显程度:

$$f = \frac{p_d - p_s}{p_s} \quad (5)$$

式中: p_d 为动态实验条件下力学参数; p_s 为静态实验条件下力学参数。

从图6可以看出,岩石强度和峰值应变的应变率效应因子 f 均随着饱和度的增大而增大,即随着岩样饱和度的增大,应变率效应越来越明显。这是由于在冲击作用下,裂隙水产生的粘结力 F ^[20]抑制了损伤的发育,增强了岩石的力学性质,从式(6)可以得到,这种粘结力随着裂隙水体积的增大而增强,即随着饱和度的增大而增大,从而导致以上试验现象。

$$F = \frac{V\gamma}{2\rho^2 \cos\theta} \quad (6)$$

式中: V 为裂隙液体体积; γ 为表面能; ρ 为水的弯月面半径; θ 为湿润角。

其中,饱和度对强度的应变率效应因子 f_σ 影响

最大,对峰值应变的应变率效应因子 f_ϵ 影响次之,对峰值模量的应变率效应因子 f_e 影响最小,在饱水度从 0 增长到 1 期间, f_σ 、 f_ϵ 和 f_e 分别增长了 50%、50%和 20%。值得注意的是,在饱水度为 0.7 之前,对 f_e 基本没有影响,在饱水度为 0.7~1 之间才对 f_e 产生了较小影响。

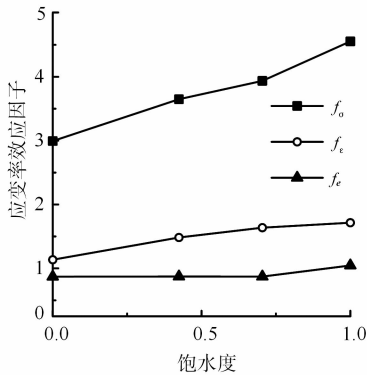


图6 饱水度-应变率效应因子关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of water saturation and parameter of strain rate

3 结论

基于 $\phi 100$ mm 分离式霍普金森压杆和液压伺服试验机分别对 4 种饱水度(0、0.42、0.7、1)岩样进行动、静态压缩试验,探究了不同饱水度下岩石的强度、峰值应变、峰值模量以及应变率效应的变化规律,并对其机理进行了讨论分析,对岩石在工程中的强度设计和安全评估有一定的参考价值。主要结论如下:

1) 饱水度对岩石强度的影响存在临界值 S_l , 在小于 S_l 时,岩石强度随饱水度的增加而线性降低,当饱水度达到 S_l 后,随着饱水度的增大,岩石强度的变化幅度非常小。

2) 随着饱水度的增加,峰值应变先减小后增大,饱水度为 0.42 时出现极小值,动态试验条件下的峰值应变对饱水度更为敏感。

3) 峰值模量随饱水度的增大而线性减小;从微观角度探究饱水度对峰值模量的影响,应主要把握 3 个关键参数:矿物颗粒和粒间胶结物的受力能力、协调变形能力以及孔隙的发育程度。

4) 随着饱水度的增大,岩石力学性质的应变率效应越来越明显。其中,饱水度对 f_σ 影响最大,对 f_ϵ 影响次之,对 f_e 影响最小。

参考文献 (References):

[1] 李根,唐春安,李连崇. 水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 593-619.

LI G, TANG C A, LI L C. Advances in Rock Deformation and Failure Process under Water-rock Coupling[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 593-619. (in Chinese)

[2] 沈照理,王焰新,郭华明. 水-岩相互作用研究的机遇与挑战[J]. 地球科学, 2012, 37(2): 207-219.

SHEN Z L, WANG Y X, GUO H M. Opportunities and Challenges of Water-Rock Interaction Studies[J]. Earth Science, 2012, 37(2): 207-219. (in Chinese)

[3] 张春会,赵全胜. 饱水度对砂岩模量及强度影响的三轴试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 951-958.

ZHANG C H, ZHAO Q S. Triaxial Tests of Effects of Varied Saturations on Strength and Modulus for Sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 951-958. (in Chinese)

[4] 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(2): 3607-3617.

WANG W, LIU T G, LYU J, et al. Experimental Study of Influence of Water-rock Chemical Interaction on Mechanical Characteristics of Sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 3607-3617. (in Chinese)

[5] 傅晏,刘新荣,张永兴,等. 水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 54-58.

FU Y, LIU X R, ZHANG Y X, et al. Study on the Influence of Water-rock Interaction to the Strength of Sandstone[J]. 2009, 36(6): 54-58. (in Chinese)

[6] WANG P, XU J Y, LIU S, et al. Static and Dynamic Mechanical Properties of Sedimentary Rock after Freeze-thaw or Thermal Shock Weathering[J]. Engineering Geology, 2016, 210: 148-157.

[7] 周翠英,李伟科,向中明,等. 水-应力作用下软岩微观结构摩擦接触分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2458-2466.

ZHOU C Y, LI W K, XIANG Z M, et al. Analysis of Mesoscopic Frictional Contacts in Soft Rocks under Water-stress Interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2458-2466 (in Chinese)

[8] 陈瑜,曹平,蒲成志,等. 水-岩作用对岩石表面微观形貌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3452-3458.

CHEN Y, CAO P, PU C Z, et al. Experimental Study of Effect of Water-rock Interaction on Micro-topography of Rock Surface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3452-3458 (in Chinese)

[9] RISNES R, HAGHIGHI H, KORSNES R I, et al. Chalkfluid Interactions with Glycol and Brines[J]. Tectonophysics, 2003, 370(1-4): 213-226.

[10] MARCEL A. Discontinuity Networks in Mudstones;

- A Geological Approach[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(4): 413-422.
- [11] BIDGOLI M N, JING L. Water Pressure Effects on Strength and Deformability of Fractured Rocks Under Low Confining Pressures[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2015, 48: 971-985.
- [12] SHAO J F, LU Y F, DARIUSZ L. Damage Modelling of Saturated Rocks in Drained and Undrained Condition[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(6): 733-740.
- [13] 刘孝敏, 胡时胜, 陈智, 等. 粘弹性 Hopkinson 压杆中波的衰减和弥散[J]. *固体力学学报*, 2002, 23(1): 81-86.
LIU X M, HU S S, CHEN Z, et al. The Wave Propagation Attenuation and Dispersion in a Viscoelastic Hopkinson Pressure Bar[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2002, 23(1): 81-86. (in Chinese)
- [14] 许金余, 刘石. 加载速率对高温后大理岩动态力学性能的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 879-883.
XU J Y, LIU S. Effect of Impact Velocity on Dynamic Mechanical Behaviors of Marble after High Temperatures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 879-883. (in Chinese)
- [15] 王晓燕, 卢芳云, 林玉亮, 等. SHPB 实验中端面摩擦效应研究[J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(2): 134-139.
WANG X Y, LU F Y, LIN Y L, et al. Study on Interfacial Friction Effect in the SHPB Tests[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(2): 134-139. (in Chinese)
- [16] 王周锋, 郝瑞娟, 杨红斌, 等. 水岩相互作用的研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(3): 210-216.
WANG Z F, HAO R J, YANG H B, et al. Research Progress on Water-Rock Interaction[J]. *Journal of Water & Water Engineering*, 2015, 26(3): 210-216. (in Chinese)
- [17] 吴恩江, 韩宝平, 王桂梁. 红层中水-岩作用微观信息特征及对孔隙演化的影响——以兖州矿区为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2005, 34(1): 123-128.
WU E J, HAN B P, WANG G L. Micro-Information of Water-Rock Interaction and Its Influence on Pore Evolution of Red-Bed in Yanzhou Mining Area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(1): 123-128. (in Chinese)
- [18] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
LIUY R, TANG H M, YAN TI LI XUE[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [19] 刘新荣, 傅晏, 郑颖人, 等. 水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(1): 77-82, 88.
LIU X R, FU Y, ZHENG Y R, et al. A Review Deterioration of Rock caused by Water-rock Interaction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(1): 77-82, 88. (in Chinese)
- [20] 王海龙, 李庆斌. 饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机制[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 958-962.
WANG H L, LI Q B. Micro-Mechanism of Static and Dynamic Strengths for Saturated Concrete[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(8): 958-962. (in Chinese)

(编辑: 姚树峰)