

## 含水岩石动态抗压强度与微观机制

王浩宇<sup>1</sup>, 许金余<sup>1,2</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 刘 石<sup>1</sup>, 刘少赫<sup>1</sup>

(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** 通过选取云南迪庆某地区红砂岩进行不同含水状态和不同脉冲强度下的 SHPB 试验和 SEM 试验,分别从宏观和微观角度研究含水岩石的动态强度特性及其破坏机制。结果表明:静态或动态单轴压缩时,随着含水率的升高,岩石的强度均降低;根据 SHPB 试验中的应力-应变全过程曲线,含水试样体积压缩变形明显,具有较高的峰值应变,峰后有应变软化特征,而干燥试样具有较高的峰值强度,峰后应力迅速跌落;根据各试样的动态抗压强度变化曲线,相同脉冲强度下试样的抗压强度随含水率的增加而降低,而相同含水状态时的抗压强度随脉冲强度的增加而增大;根据 SEM 图像,饱水试样颗粒结构疏松而干燥试样颗粒结构致密,冲击破坏机制饱水试样以初始微裂纹破裂和矿物边界或物相边界破裂为主,破坏时的动态抗压强度较低,而干燥试样还包括矿物颗粒直接剪断破裂,因此破坏强度较高。

**关键词** 含水岩石; 动态抗压强度; 水-动力耦合作用; SHPB 试验; SEM 试验; 破坏机制

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.020

**中图分类号** TU458 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-0107-05

## A Study of Dynamic Compressive Strength and Microscopic Mechanism on Water-Bearing Rock

WANG Haoyu<sup>1</sup>, XU Jinyu<sup>1,2</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, LIU Shi<sup>1</sup>, LIU Shaohe<sup>1</sup>

(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:** Selecting the red sandstone from a project of the Yunnan Diqing region to do the split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment and the scanning electronic microscopy (SEM) experiment under different moisture state and different pulse intensity, the paper studies the dynamic strength characteristics and the failure mechanism of water-bearing rock from macroscopic and microscopic point of view. The results show that: The strength of rock decreases with the increase of the moisture content in the static or dynamic uniaxial compression; According to the stress-strain whole process curves of the SHPB experiment, the water-bearing specimen has obvious volume compression deformation, higher peak strain and strain softening characteristics after peak, while dry specimen has higher peak intensity and its post peak stress drop rapidly. The compressive strength decreases with the increase of water content when pulse strength is the same, but increases with the increase of pulse intensity under the same water condition based on the dy-

**收稿日期:** 2015-12-31

**基金项目:** 国家自然科学基金(51378497)

**作者简介:** 王浩宇(1991-),男,四川南充人,硕士生,主要从事结构工程和防护工程研究, E-mail: whydyx513@163.com

**引用格式:** 王浩宇,许金余,王鹏,等. 含水岩石动态抗压强度与微观机制研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):107-111. WANG Haoyu, XU Jinyu, WANG Peng, et al. A Study of Dynamic Compressive Strength and Microscopic Mechanism on Water-Bearing Rock[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 107-111.

dynamic compressive strength curve for each specimen. The SEM images show that the particle structure of water-saturated rock is loose and swelling, and the impact failure mechanism is dominated by the fracture of initial micro-cracks and mineral particle or phase boundary, performance as dynamic compressive strength reduction, while the particle structure of dry rock is compact and the impact failure mechanism also include the fracture of mineral particles cut directly, and this shows that the strength increases.

**Key words:** water-bearing rock; dynamic compressive strength; hydro-dynamic coupling; split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment; scanning electronic microscopy (SEM) experiment; failure mechanism

当前从力学试验的宏观层面研究水对岩石力学性能的影响,主要以砂岩、砾岩、板岩等吸水性较好的软岩为主,大多局限于室内不同含水状态下的静态或准静态实验,并辅以超声试验分析岩石声波传播规律<sup>[1-6]</sup>。部分学者从微观角度对水软化作用机理进行了探讨。周翠英等<sup>[7]</sup>探讨了几种典型软岩在不同饱水状态和饱水时间后微观结构的基本特征;Risnes等<sup>[8]</sup>研究了水的弱化作用以及水的活动性对岩石微结构的影响;Komine<sup>[9]</sup>通过SEM来观察软岩的孔隙结构,并研究其膨胀性;Arnoulet<sup>[10]</sup>对泥岩的微观结构和矿物成分进行了研究,分析了其易崩解的原因,并认为泥岩中存在不连续网络。

实际中的岩体工程往往要承受开挖爆破、地震扰动、爆炸冲击等动力作用,许金余等<sup>[11]</sup>对黑云母花岗岩进行动态压缩与动态劈裂抗拉试验;刘石等<sup>[12]</sup>研究了绢云母石英片岩和砂岩的静动力学性能;王斌等<sup>[13-14]</sup>对饱水砂岩进行冲击压缩试验。

可见,对于水动力耦合作用下岩石的强度特性以及破坏的微观作用机制研究较少,因此本文对不同含水状态的红砂岩开展单轴压缩和霍普金森压杆(SHPB)单轴冲击力学试验,从宏观分析含水岩石动态抗压强度,从微观分析水-动力耦合作用机制。

## 1 试验过程

### 1.1 试验岩样

岩样取自云南迪庆地区横断山脉某处的红砂岩。经X射线衍射仪进行半定量物相分析可知,红砂岩由碎屑和填隙物组成,颗粒较细,其主要矿物成分中含石英81%,长石13%(斜长石、钾长石),方解石3%,其余还有伊利石、绿泥石和磁铁矿等。岩样加工成 $\Phi 96\text{ mm} \times 48\text{ mm}$ 的标准圆柱体,控制其端面平行度在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 以内,表面平整度在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 以内。试样分为干燥组、自然组、吸水组和饱水组,每组试样有9块,每3块试样同一个实验,结果取均值。其中干燥组试样由电热鼓风干燥箱在 $107 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下烘48h;自然组试样不做处理;吸水组试样分步浸水至淹没,然后在水中自由吸水48h;饱水试样经过干燥、自由吸水48h后放入沸腾箱中

煮沸6h。试样的具体制备步骤参见《DLT 5368-2007 水电水利工程岩石试验规程》。各组试样经过测定,得到自然组、吸水组和饱水组的平均含水率为3.58%、5.51%和6.91%,其中可认为干燥组试样的含水率为零。

### 1.2 试验设备及方法

冲击力学试验采用的 $\Phi 100\text{ mm}$  SHPB试验系统主要由发射装置、吸能装置、数据采集系统以及杆件等组成。压杆直径为100mm,弹性模量为210GPa,泊松比为0.25~0.3,密度为 $7.85\text{ g/cm}^3$ 。其中的入射杆长4500mm,透射杆长2500mm,应变片贴在入射杆和透射杆上适当位置且与动态应变测试系统相连接,以获取入射、反射和透射波形;打击杆长500mm,利用空气加压给打击杆加速,以一定的速度等级撞击入射杆形成的冲击脉冲作用于试样上,达到对试样动态压缩的目的。

在冲击前后对干燥试样和饱水试样进行电镜扫描(SEM),采用的扫描电镜型号为COXEM EM-30,由真空系统、电子束系统和成像系统组成,以研究岩样表面微观结构。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 含水岩石静态压缩强度特性

田象燕等<sup>[15]</sup>对比了应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-2}/\text{s}$ 的饱水大理岩和砂岩的单轴压缩试验,发现随应变率的增加强度增大,饱和液体起到了促进应变率效应的作用。因此,在冲击试验前,利用电液伺服压力机对红砂岩试样进行单轴压缩试验,其结果见表1。

表1 单轴压缩试验结果

Tab.1 Uniaxial compression test results

含水状态	峰值强度/MPa	临界应变	弹性模量/GPa
干燥试样	77.37	0.0195	6.42
自然试样	50.21	0.0158	4.76
吸水试样	42.59	0.0168	4.22
饱水试样	38.13	0.0200	3.38

自然试样在烘干后的强度有很大提高,增加了约54.1%,而在吸水后或者饱水后的强度有所弱化,

分别降低了约 15.2%和 24.1%，自然试样在干燥、吸水或者饱水处理后的变形都有提高，分别为 23.4%、6.3%和 26.6%。可见，含水率的不同对岩石的力学性质有显著影响，随着含水率的增加，峰值强度和弹性模量等力学参数均降低。

### 2.2 水-动力耦合作用对动态抗压强度的影响

脉冲强度为 600~650 MPa 的冲击作用下，红砂岩试样的破坏形态见图 1。然后由三波法<sup>[16]</sup>得到试样冲击作用下的应力-应变全过程曲线图 2。

对比图 1 可知：随着含水率的增加，试样的破碎程度越来越严重，碎粒尺寸越来越小，结合图 2 分析，吸水试样和饱水试样峰值点附近的应力平台较为明显，峰后失稳破坏后的破碎程度较大。对比图 2(a)~(c)，各试样的动态压缩应力-应变曲线具有显著的阶段性特征<sup>[17]</sup>。在加载初期，饱水试样随着应力的增加，应变发展最快，体积压缩变形特别明显，这是由于岩石内部微裂隙微孔洞受力闭合，以及吸水膨胀导致孔隙结构变大，受力后的应变发展迅速，因此，试样的峰值应变基本上随着含水率升高而不断增大。动荷载作用下，峰前微裂纹由稳定扩展变为不稳定扩展，峰后微裂纹失稳扩展，形成宏观裂缝，岩石发生破坏<sup>[14,18]</sup>。而含水试样峰值处出现应力平台，即微裂纹在这个应力平台期不断发育扩展（未失稳），试样应变增加但所受的应力变化不大，当微裂纹发育汇聚到一定程度，试样便失稳破坏，干燥试样峰后应力迅速跌落，而含水岩石的含水率越高，峰后应变软化越明显。

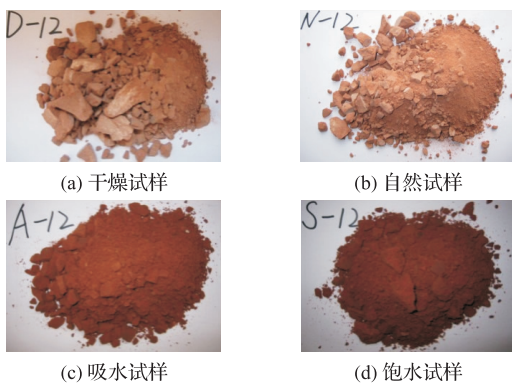


图 1 试样冲击破坏形态  
Fig.1 Impact failure patterns of specimens

图 3 为各含水状态下红砂岩试样动态抗压强度的变化曲线。当同一含水状态时，随着脉冲强度的增加，试样动态抗压强度线性增大，其中饱水试样强度增加最快，说明含水试样同干燥试样一样，在动荷载作用下存在应变率效应，即岩石的力学性质随应变率增大而增强，只是饱水试样中饱和液体的存在能够促进应变率效应。另外，含水试样的动态抗压强度均比干燥试样的小，说明水对岩石的力学性质

有弱化作用，这是由于自由水对颗粒结构的损伤引起的，包括自然条件或浸水处理时水对颗粒结构溶蚀导致的损伤<sup>[7]</sup>，低应变率时孔隙自由水在裂纹尖端形成“水楔”进而促使裂隙发育导致的损伤<sup>[15]</sup>。

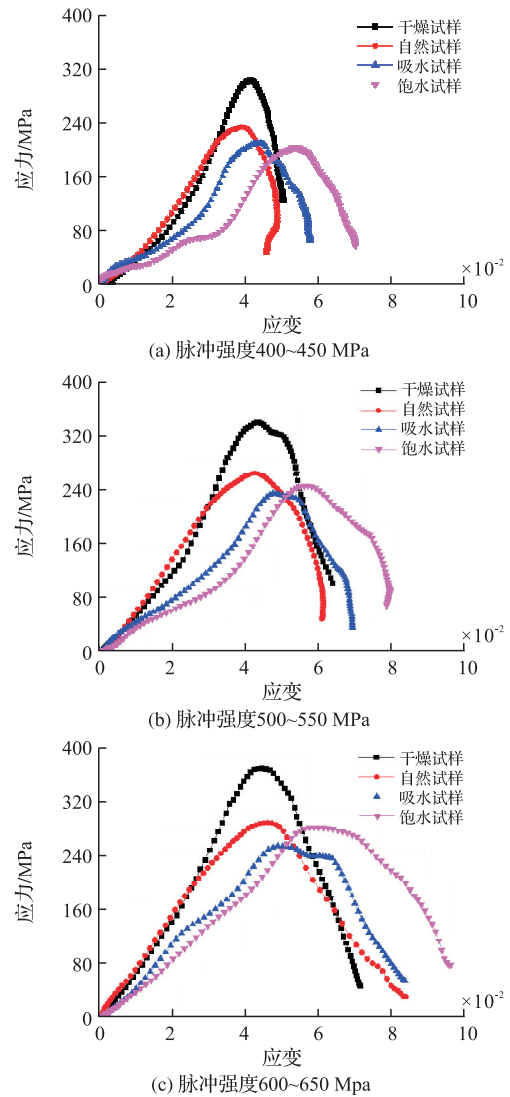


图 2 不同脉冲强度下各试样动态应力-应变曲线  
Fig.2 Dynamic stress-strain curves of specimens under different pulse intensity

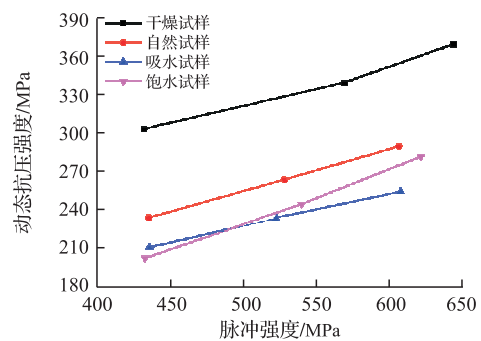


图 3 动态抗压强度随脉冲等级变化情况  
Fig.3 Dynamic compressive strength changes with different pulse grades

相较于干燥试样，含水试样在冲击下的动态抗

压强度降幅百分比(降比)见表2,当脉冲强度较低时,试样动态强度随含水率的增加而降低,而脉冲强度较高时,动态强度随含水率的增加先降低而后至饱水时又增加,说明水对岩石的弱化效果受岩石含水状态和冲击荷载大小耦合影响,同时也说明了饱和液体对应变率效应的促进作用。

表2 含水试样动态抗压强度降比

Tab.2 Dynamic compressive strength decline percentage of water-bearing samples %

脉冲等级/MPa	自然试样	吸水试样	饱水试样
400~450	22.95	30.61	33.42
500~550	22.37	31.23	28.05
600~650	21.64	31.27	23.84

注:“强度降比”指含水试样的动态抗压强度相对于干燥试样的动态抗压强度的降幅百分比。

快速加载时,岩石微裂纹扩展速度比静态扩展速度快,孔隙自由水来不及扩散到裂隙尖端,可视为处于不排水状态<sup>[15]</sup>。文献[19]研究了动载条件下饱和混凝土自由水表面张力形成的粘结力 $F_1$ 以及由于 Stefan 效应产生的阻碍裂纹扩展的阻力 $F_2$ :

$$F_1 = \frac{V\gamma}{2\rho^2 \cos\psi} \quad (1) \quad F_2 = \frac{3\eta V^2}{2\pi h^5} \frac{du}{dt} \quad (2)$$

式中: $V$ 为液体体积; $\gamma$ 为表面能; $\psi$ 为湿润角; $\rho$ 为水的弯月面半径; $\eta$ 为液体黏度; $h$ 为平板间距; $u$ 为平板分离的相对速度。

试样的含水率或者应变率越大,粘结力 $F_1$ 和阻力 $F_2$ 也就越大,对微裂纹扩展的阻碍作用也就越大,即试样将在高应力下扩展发育,当低加载速率时,Stefan 效应引起的阻力 $F_2$ 可不予考虑。

### 2.3 水-动力耦合作用下岩石破坏的微观机制分析

本节对冲击前后的干燥、饱水试样进行电镜扫描,冲击脉冲等级取600~650 MPa,其中饱水试样需干燥后才能进行扫描。在5.0 kV电压和300倍放大倍数下的SEM图像见图4,分析发现:

1)冲击前后,干燥试样的微观结构均较为致密,颗粒间填充物胶结紧密,而饱水试样微观结构疏松,颗粒间填充物被溶蚀而形成孔洞,胶结作用弱化,孔隙率增大。相较于冲击前,冲击后的干燥试样颗粒表面更加粗糙,颗粒间的孔隙增大,部分颗粒有阶梯状条纹,而饱水试样颗粒间的细小碎粒增多,颗粒更加杂乱,孔隙变得小且多。

2)根据冲击前后干燥试样的微观结构特征,可得到其在冲击作用下的破坏机制有:①沿初始微裂纹破裂,直至宏观破坏;②沿矿物或物相的边界破裂,矿物晶体边界和物相边界属于软弱结构面,特别是物相边界充斥有碎小颗粒与胶结物质,强度低;③

直接剪断矿物颗粒,断面呈阶梯条纹状,由于矿物颗粒强度一般大于胶结物质,因此破坏应力较高。

3)相较于干燥试样,饱水试样在冲击作用下的破坏机制以初始微裂纹破裂和矿物或物相的边界破裂为主。水的弱化作用降低了矿物颗粒之间的胶结作用,裂纹扩展将直接破坏孔隙结构,而不会剪断强度较高的矿物颗粒。

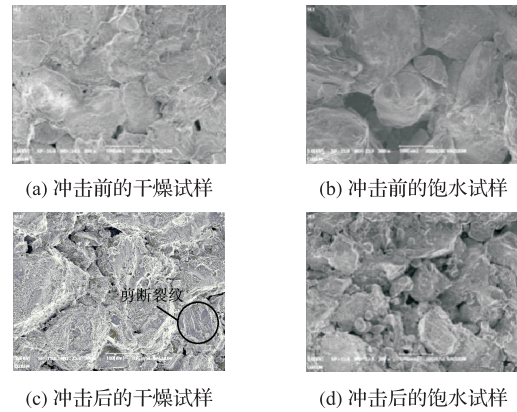


图4 试样SEM图像

Fig.4 SEM images of samples

## 3 结论

本文对干燥、自然、吸水和饱水状态红砂岩进行静动态单轴压缩试验和电镜扫描试验,分别从宏观和微观角度分析含水岩石强度特性,探究水-动力耦合作用下的破坏机制,主要得到如下结论:

1)静态单轴压缩下,岩石的静态力学性质受含水率的影响显著,随着含水率的增加,峰值强度和弹性模量等力学参数均降低。动态单轴冲击下,加载初期,含水试样内部微裂隙微孔洞闭合以及孔隙结构吸水膨胀变大,其体积压缩变形特别明显,应变发展迅速;含水试样峰值附近出现应力平台,由于微裂纹不断扩展发育导致应变增加但应力变化不大,峰后有应变软化特征,而干燥试样峰后应力跌落迅速,破坏较为突然。

2)动态强度变化情况显示,水对红砂岩试样具有损伤弱化作用,弱化效果的强弱受含水率和动力大小耦合影响;含水岩石也存在应变率效应,且饱和试样中的饱和液体具有促进作用;水-动力耦合作用下,孔隙水会产生阻碍裂缝扩展的粘结力和阻力,影响岩石破坏时的动态强度。

3)根据冲击前后干燥试样和饱水试样的SEM图像,干燥试样颗粒结构致密且胶结紧密,而饱水试样疏松多孔且胶结作用弱化;相较于冲击前,冲击后的干燥试样颗粒表面粗糙孔隙增大且有剪切条纹,而饱水试样颗粒间的细小碎粒增多孔隙变得小而密。干燥试样冲击作用下的破坏机制包括初始微裂

纹破裂、矿物或物相边界破裂和矿物颗粒直接剪断破裂三类,其中矿物颗粒强度一般较高,剪断时表现为高强度特征;饱水试样以初始微裂纹破裂和矿物或物相的边界破裂为主,由于水弱化作用降低了胶结物质强度,破裂时表现为低强度特征。

#### 参考文献(References):

- [1] JANSEN D P, CARLSON S R, YOUNG R P, et al. Ultrasonic Imaging and Acoustic Emission Monitoring of Thermally Induced Microcracks in Lacdu Bonnet Granite[J]. *J Geophys Res*, 1993, 98(12): 2231-2243.
- [2] PRASAD M, MANGHNANI M H. Effects of Pore and Differential Pressure on Compressional Wave Velocity and Quality Factor in Berea and Michigan Sandstones[J]. *Geophysics*, 1997, 62(4): 1163-1176.
- [3] HEGGHEIM T, MADI M V. A Chemical Induced Enhanced Weakening of Chalk by Seawater[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 46(3): 171-184.
- [4] 李克钢, 侯克鹏, 张成良. 饱和状态下岩体抗剪切特性试验研究[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2009, 40(2): 528-542. LI Kegang, HOU Kepeng, ZHANG Chengliang. Experiment Study on Shear Characteristics of Saturated Rock Mass[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2009, 40(2): 528-542. (in Chinese)
- [5] OKUBO S, FUKUI K, HASHIBA K. Long-term Creep of Water-saturated Tuff under Uniaxial Compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(5): 839-844.
- [6] 陈旭, 俞缙, 李宏, 等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(9): 2527-2533. CHEN Xu, YU Jin, LI Hong, et al. Experimental Study of Propagation Characteristics of Acoustic wave in Rocks With Different Lithologies and Water Contents[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(9): 2527-2533. (in Chinese)
- [7] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 软岩在饱水过程中微观结构变化规律研究[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2003, 42(4): 98-102. ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Research on the Variation Regularities of Microstructures in the Testing of Interaction between Soft Rocks and Water[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2003, 42(4): 98-102. (in Chinese)
- [8] RISNES R, HAGHIGHI H, KORSNES R I, et al. Chalk-fluid Interactions with Glycol and Brines[J]. *Tectonophysics*, 2003, 370(1-4): 213-226.
- [9] KOMINE H. Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites[J]. *Engineering Geology*, 2004, 71(3/4): 265-279.
- [10] Marcel A. Discontinuity Networks in Mudstones: A Geological Approach[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, 65(4): 413-422.
- [11] 许金余, 刘石, 吴菲, 等. 黑云母花岗岩对冲击荷载的动力学响应[J]. *空军工程大学学报:自然科学版*, 2013, 14(6): 77-80. XU Jinyu, LIU Shi, WU Fei, et al. Dynamic Mechanical Response of Biotite Granite under Shock Loading[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2013, 14(6): 77-80. (in Chinese)
- [12] 刘石, 许金余, 刘军忠, 等. 绢云母石英片岩和砂岩的 SHPB 试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(9): 1864-1871. LIU Shi, XU Jinyu, LIU Junzhong, et al. SHPB Experimental Study of Sericite-Quartz Schist and Sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(9): 1864-1871. (in Chinese)
- [13] 王斌, 李夕兵, 尹土兵等. 饱水砂岩动态强度的 SHPB 试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 1003-1009. WANG Bin, LI Xibing, YIN Tubing, et al. Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Experiment on Dynamic Strength of Water-Saturated Sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 1003-1009. (in Chinese)
- [14] 王斌, 李夕兵. 单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度的细观力学分析[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 423-431. WANG Bin, LI Xibing. Mesomechanics Analysis of Static Compressive Strength and Dynamic Compressive Strength of Water-Saturated Rock under Uniaxial Load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(4): 423-431. (in Chinese)
- [15] 田象燕, 高尔根, 白石羽. 饱和岩石的应变率效应和各向异性的机制探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1789-1792. TIAN Xianyan, GAO Ergen, BAI Shiyu. Discussion on Mechanism of Strain-Rate Effect and Anisotropy of Saturated Rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1789-1792. (in Chinese)
- [16] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 368-373. SONG Li, HU Shisheng. Two-Wave and Three-Wave Method in SHPB Data Processing[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 368-373. (in Chinese)
- [17] WANG Peng, XU Jinyu, LIU Shi. Staged Moduli: A Quantitative Method to Analyze the Complete Compressive Stress-Strain Response for Thermally Damaged Rock [J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2015, 48: 1505-1514.
- [18] 李夕兵. 岩石动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014. LI Xibing. *Rock Dynamics Fundamentals and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [19] ZHENG Dan, LI Qingbin. An Explanation for Rate Effect of Concrete Strength Based on Fracture Toughness Including Free Water Viscosity[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71: 2319-2327.

(编辑:徐敏)