

# 水-动力耦合作用下红砂岩动态强度及破坏机理

王浩宇<sup>1</sup>, 许金余<sup>2,3</sup>, 刘石<sup>2</sup>

(1. 中央军委机关事务管理总局工程代建管理办公室, 北京 100082; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 3. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安, 710072)

**摘要** 为探究水化学损伤下红砂岩的动态强度和破坏机理,通过自然、干燥和饱水红砂岩试样的静态单轴压缩和动态单轴冲击试验,结合岩石碎块的电镜扫描(SEM)图像,分析了不同含水状态和应变率荷载等级下岩石的强度特性,并基于损伤断裂理论分析了含水岩石微裂纹起裂和扩展机理。试验结果表明:红砂岩试样动态抗压强度随含水率的增加而降低,随应变率的增加而增大,饱水试样具有显著的应变率效应;冲击荷载下,饱水试样应力-应变曲线具有显著的体积压缩现象,峰值应变最大,塑性变形明显,而干燥试样弹性变形最大,峰前塑性变形最小;受孔隙水影响,饱水试样颗粒结构疏松多孔,胶结物质被溶蚀而使胶结作用弱化。根据最大周向正应力理论,对含水岩石的微裂纹起裂条件和扩展方向进行了讨论,并对裂尖的动态应力强度因子进行了修正。

**关键词** 岩石力学;抗压强度;微观结构;破坏机理;应力强度因子

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.04.015

**中图分类号** TU458 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)04-0099-05

## Study of Dynamic Strength and Failure Mechanism of Red Sandstone under Condition of Hydrodynamic Coupling Effect

WANG Haoyu<sup>1</sup>, XU Jinyu<sup>2,3</sup>, LIU Shi<sup>2</sup>

(1. Engineering Agency Management Office, General Administration for Government Offices of CMC, Beijing 100082, China; 2. Aeronautical Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 3. College of Mechanics and Civil Architecture, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract** In order to explore the dynamic strength and failure mechanism of red sandstone under condition of hydro-chemical damage, the static uniaxial compression and dynamic uniaxial impact tests of natural, dry and water saturated red sandstone samples are carried out. Combined with the SEM images of rock fragments, the strength characteristics of rocks under condition of different water bearing and strain rate loading levels are analysed, and based on the damage fracture theory, the initiation and propagation mechanism of micro cracks in water bearing rock are analysed as well. The test results show that the dynamic compressive strength of red sandstone decreases with the increase of water content and increases with the increase of strain rate, and the saturated sample has significant strain rate effect; under condition of impact

**收稿日期:** 2020-07-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(51378497)

**作者简介:** 王浩宇(1991—),男,四川西充人,硕士生,研究方向:结构工程和防护工程。E-mail:whydyx513@163.com

**引用格式:** 王浩宇,许金余,刘石.水-动力耦合作用下红砂岩动态强度及破坏机理[J].空军工程大学学报(自然科学版),2021,22(4):99-103. WANG Haoyu, XU Jinyu, LIU Shi. Study on Dynamic Strength and Failure Mechanism of Red Sandstone under Hydrodynamic Coupling Effect[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(4): 99-103.

load, the stress-strain curve of saturated sample has significant volume compression phenomenon, with the maximum peak strain and obvious plastic deformation, while the dry sample has the largest elastic deformation and the smallest plastic deformation before the peak; under the influence of pore water, the grain structure of saturated sample is loose and porous, and the cementation is weakened by dissolution of cementation material. According to the theory of maximum circumferential normal stress, the conditions of initiation and propagation direction of micro cracks in water bearing rock are discussed, and a modification to the dynamic stress intensity factor at crack tip is made.

**Key words** rock mechanics; compressive strength; micro structure; failure mechanism; stress intensity factor

岩石作为一种天然损伤材料,岩体中存在大量的微裂纹、微孔洞等缺陷,而自然界中水的存在将加剧这些缺陷的劣化趋势,导致岩体破坏失稳。工程中诸如修建隧道、水库堤坝和地下洞库以及地下采矿等,岩体在水作用下的变形、破坏及其稳定性一直是许多工程学科面临的共同课题。基于损伤断裂理论,国内外对岩石的损伤断裂过程已作了大量的理论分析和实验研究<sup>[1-5]</sup>,Wong R. H. C.等<sup>[1]</sup>和 Robert A.等<sup>[2]</sup>研究了岩石类材料内部的多裂纹相互作用以及聚合形态,李银平等<sup>[3]</sup>系统地对比分析了滑动裂纹模型的6种翼裂纹应力强度因子计算模型,李杰等<sup>[4]</sup>探讨了不均匀加卸载过程中岩体内部裂纹的动态扩展过程并建立了微观断裂与宏观扩容之间的联系。同时,水对岩石的损伤演化、裂纹扩展以及力学性质的影响作用机制也有重要进展<sup>[6-10]</sup>,朱珍德等<sup>[6]</sup>推导了含裂隙水压力岩体的初始开裂强度公式,汤连生等<sup>[7]</sup>推导了考虑水压力和水化学损伤作用影响的裂隙岩体断裂强度新准则,赵延林等<sup>[8]</sup>、刘涛影等<sup>[9]</sup>研究了渗透压作用下压剪岩石裂纹的损伤断裂机制与演化规律。可见,相关研究主要侧重于静力实验以及相关的理论分析,而对于动载条件下的岩石损伤断裂研究也多为不含水的岩石。

实际中的工程岩体将承受开挖爆破、地震扰动以及爆炸冲击等动载影响,再加之地下水、裂隙水和工程用水等水环境的作用,岩体的损伤发育、断裂破坏过程将更加复杂。王斌等<sup>[11]</sup>根据岩石受压全应力应变曲线的细观机制,分析了静态及动态单轴荷载条件下孔隙水影响饱水岩石裂纹扩展的情况,静载时的自由水对翼裂纹有向外挤压的应力而促进裂纹扩展,动载时自由水产生黏结力而抑制裂纹扩展,并推导出了饱水单轴条件下的静动态抗压强度计算式。通过文献<sup>[11]</sup>可知饱水岩石静动态强度特性和破坏机制具有明显差异,但未考虑水化学损伤对微观结构的破坏以及裂纹起裂和扩展的受力模式差异。因此,本文对自然、干燥和饱水状态下的红砂岩试样进行静态单轴压缩和动态单轴冲击试验,对比

不同含水状态和受力模式下岩石的强度特性,并根据干燥和饱水试样冲击破坏碎块的SEM图像分析了孔隙水对岩石微观结构的影响,基于损伤断裂理论探讨了微裂纹起裂和扩展机理,分析了孔隙水对岩石动态破坏的影响。

## 1 含水岩石动态强度分析

### 1.1 冲击试验

对取自云南迪庆地区横断山脉某工程的红砂岩进行X射线衍射半定量物相分析,得到红砂岩矿物组成中含有石英81%、长石13%(斜长石、钾长石)、方解石3%、伊利石、绿泥石和赤铁矿各含1%,其中的伊利石与绿泥石属于亲水性黏土类矿物,能吸收水分,导致体积膨胀。将红砂岩加工成 $\Phi 96\text{ mm} \times 48\text{ mm}$ 的标准圆柱体,端面平行度和表面平整度均满足岩石力学试验要求。根据《水电水利工程岩石试验规程》(DLT 5368—2007)制备试样,分为干燥试样、自然试样和饱水试样3类,其中试样饱水方式采用煮沸法,并测得自然试样的平均天然含水率为3.19%,饱和吸水率为7.26%。另外在进行冲击试验前,在电液伺服压力机上对试样进行单轴压缩静力学试验,获得岩石的静态强度,结果见表1。

表1 单轴压缩试验结果

含水状态	峰值强度/MPa	临界应变	弹性模量/GPa
干燥试样	77.37	0.019 5	6.42
自然试样	50.21	0.015 8	4.76
饱水试样	38.13	0.020 0	3.38

冲击力学试验采用 $\Phi 100\text{ mm}$  SHPB试验装置,利用空气加压给打击杆加速,以一定的速度撞入射杆形成冲击脉冲并作用于试样上;脉冲波形由相应尺寸的紫铜圆片进行整形,以实现恒应变率加载;入射杆和透射杆均粘贴应变片用于获取入射、反射和透射波形。试验中,冲击荷载以试样的平均应变率来衡量,受环境、仪器、人为等误差影响,冲击荷载难以精准控制,因此分为200~250、250~300和

300~350 s<sup>-1</sup> 3 个荷载等级。

如图 1 所示,为各试样在不同荷载等级下的动态抗压强度。相较于静态单轴压缩试验,试样在冲击作用下的动态抗压强度大得多,在同一含水状态时,试样的动态抗压强度随着荷载等级的增加而增大,而在同一荷载等级时,随着含水率的增加而减小。可见试样含水与否对动态抗压强度具有显著影响,相同荷载等级下试样在自然状态和饱水状态下的动态抗压强度相较于干燥状态时,分别平均下降了 22.3% 和 47.0%。各试样中,饱水试样动态强度增加相对较快,即应变率效应显著,说明饱和液体的存在起到促进岩石应变率效应的作用。

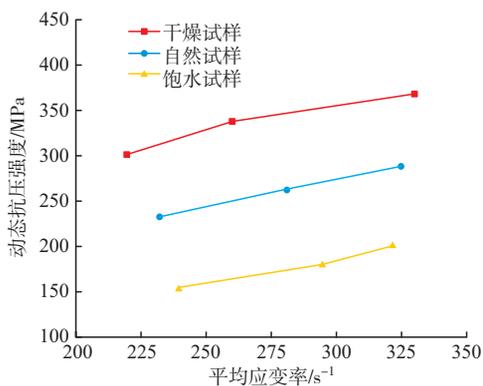


图 1 动态抗压强度随应变率变化情况

### 1.2 孔隙水对岩石微观结构的影响

岩石是一种天然损伤材料,岩体中的微裂隙、微孔洞等缺陷对岩体的力学性能具有显著影响,而自然界中水的存在将加剧岩体中缺陷的劣化破坏趋势。图 2 给出了 300~350 s<sup>-1</sup> 荷载等级下各试样的应力-应变曲线,可见干燥试样和饱水试样曲线的差异性最大:不含水的干燥试样峰值应力最高,而饱水试样的峰值应力最低;在冲击作用初期,岩石处于压缩阶段,原生裂隙压密闭合,出现体积压缩现象<sup>[11]</sup>,其中饱水试样具有显著的体积压缩现象并且峰值应变最大,峰前有明显的塑性变形阶段,而干燥试样的弹性变形阶段最长且塑性变形阶段最短。

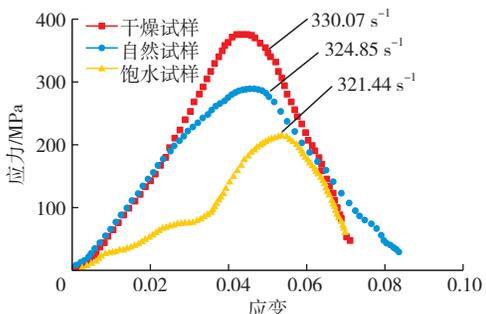
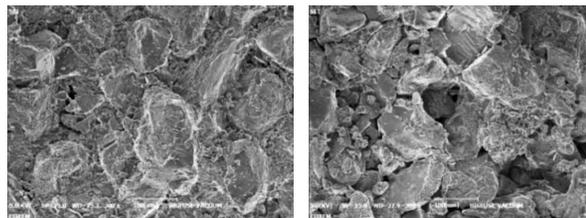


图 2 300~350 s<sup>-1</sup> 应变率下各试样应力-应变曲线

同一荷载等级不同含水状态(干燥、自然和饱水)的岩石,其应力-应变曲线具有显著差别,其原因

主要在于孔隙水对岩石微观结构产生了影响。因此,对干燥试样和饱水试样的冲击破坏碎块进行电镜扫描分析,在 5.0 kV 电压和 300 倍放大倍数下,获得图 3 所示的 SEM 图像,对比图 3(a)与图 3(b),可以发现:干燥试样微观结构致密,颗粒间充满填充物且胶结紧密,一些矿物颗粒有明显的条纹状断面,说明存在剪切破坏;而试样在饱水后,颗粒间的胶结物质被溶蚀形成溶蚀孔,胶结作用弱化,岩石的强度降低而孔隙率增大,颗粒间的连接由紧密变得疏松多孔,表现出体积膨胀。



(a) 干燥试样 (b) 饱水试样

图 3 冲击破坏碎块 SEM 图像

## 2 含水岩石破坏机理分析

### 2.1 微裂纹起裂

含水岩石的动态破坏是微裂纹起裂、扩展、汇聚和最终形成宏观断裂的过程。如图 4,含水岩石在冲击作用初期进行体积压缩,微裂纹中的自由水来不及排出而呈饱和状态并产生孔隙水压力  $p_{wd}$ ,随着冲击作用增强,孔隙水压力也随之增大,而冲击荷载将在裂纹面上产生压剪复合应力,致使裂纹压紧并有滑动摩擦趋势,裂纹尖端应力集中加剧。大量试验结果和理论分析<sup>[8]</sup>表明裂纹在压剪复合应力下沿着最大拉应力方向起裂,按 I 型扩展的。

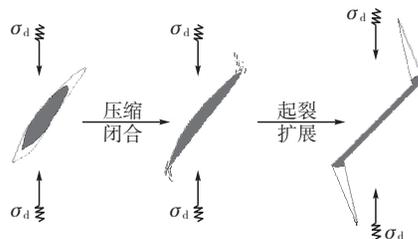


图 4 冲击作用下初始微孔隙起裂扩展

设试样某一处的单一微孔隙形式如图 5,孔隙长度  $2a$ ,与冲击方向夹角  $\Psi$ ,断裂角为  $\theta$ 。设试样处于平面应力状态,孔隙部分闭合并处于饱水状态,因此以系数  $\beta$  表示孔隙连通面积与总面积之比,则微孔隙承受孔隙水压力为  $\beta p_{wd}$ (随动应力  $\sigma_d$  变化)。另外由于自由水致使岩石颗粒结构弱化,因此引入动态传压系数  $C_{nd}$  与动态传剪系数  $C_{vd}$  来反映孔隙的实际受力情况<sup>[12]</sup>。根据岩石断裂力学原理,考虑

水的弱化作用和孔隙水压力影响,可得孔隙面受到的有效法向应力和有效切向应力为:

$$\sigma_{nd} = C_{nd}\sigma_d \sin^2 \psi - \beta p_{wd} \quad (1)$$

$$\tau_{vd} = C_{vd}\sigma_d \sin \psi \cos \psi - f_{wd}\sigma_{nd} - C \quad (2)$$

式中:  $f_{wd}$  为含水条件下孔隙动摩擦因数;  $C$  为孔隙面黏结力。

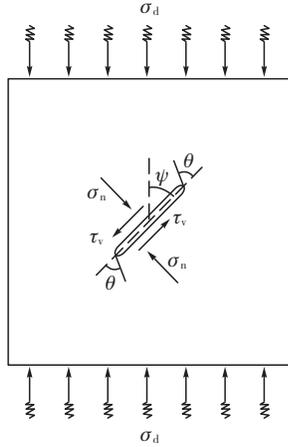


图5 冲击作用下的单一微裂隙受力模式

系数  $C_{nd}$ 、 $C_{vd}$  用于表征裂纹面间传递法向压应力和切向剪应力的能力,其大小与岩石材料、孔隙尺寸、冲击速度以及水作用时间等因素有关。参照相关文献<sup>[12-13]</sup>,同时引入动态调整系数  $\mu$  (值大于 1,随冲击作用的增强而增大),则  $C_{nd}$ 、 $C_{vd}$  可根据岩体泊松比  $\nu_0$ 、弹性模量  $E_0$ 、法向刚度  $K_n$  和剪切刚度  $K_v$  确定为:

$$C_{nd} = \mu \frac{\pi a}{\pi a + \frac{E_0}{(1-\nu_0^2)K_n}} \quad (3)$$

$$C_{vd} = \mu \frac{\pi a}{\pi a + \frac{E_0}{(1-\nu_0^2)K_v}} \quad (4)$$

微孔隙处于压-剪复合应力状态,根据最大周向正应力理论<sup>[14]</sup>,以裂纹尖端为坐标原点建立极坐标系  $(r, \theta)$ ,周向正应力  $\sigma_\theta$  可表示为:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I(1 + \cos \theta) - 3K_{II} \sin \theta] \quad (5)$$

式中:  $K_I$  和  $K_{II}$  为应力强度因子。

最大周向正应力理论是基于如下两个假设:

- ① 裂纹初始扩展沿着周向正应力  $\sigma_\theta$  达到最大的方向;
- ② 当周向正应力  $\sigma_\theta$  的最大值达到临界时,发生 I 型裂纹扩展。据此,可得到如下两个基本方程:

$$[K_I \sin \theta + K_{II}(3 \cos \theta - 1)] = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} [K_I(1 + \cos \theta) - 3K_{II} \sin \theta] \cos \frac{\theta}{2} = K_{Ic} \quad (7)$$

式中:  $K_{Ic}$  为材料断裂韧度。

由式(6)可以确定裂纹扩展方向  $\theta_0$ ,当满足式(7)时,即发生裂纹扩展。式中岩石的动态应力强度

因子为:

$$K_I = \sigma_{nd} \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

$$K_{II} = \tau_{vd} \sqrt{\pi a}$$

孔隙水压力、岩石的应力强度因子和裂纹扩展方向(起裂角  $\theta_0$ )均随着冲击作用引起的动应力  $\sigma_d$  变化而变化。将式(8)代入式(6)可以定出不同时刻的动应力  $\sigma_{dt}$  下的起裂角  $\theta_{0t}$ ,再根据式(7)可以得到起裂角为  $\theta_{0t}$  时的临界应力  $\sigma_c$ ,只有当  $\sigma_{dt} \geq \sigma_c$  时,裂纹才会起裂扩展。

### 2.2 微裂纹扩展

裂纹起裂后在冲击作用下快速扩展,孔隙水压力由于孔隙体积的增大而迅速减小,由于自由水的迁移速度远低于裂纹的扩展速度,因此在高应变率时可以视为不排水状态。自由水弯月面上的表面力将形成阻碍裂纹扩展的黏结力  $F_1$ ,以及由于物理学中的 Stefan 效应而产生的阻力  $F_2$ <sup>[15]</sup>:

$$F_1 = \frac{V\gamma}{2\rho^2 \cos \varphi} \quad (9)$$

$$F_2 = \frac{3\eta V^2}{2\pi h^5} \frac{du}{dt} \quad (10)$$

式中:  $V$  为液体体积;  $\gamma$  为表面能;  $\varphi$  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。

裂纹尖端张开扩展,致使孔隙水与自由面连通,在裂纹起裂后便可以忽略孔隙水压力对裂纹扩展的影响,考虑到式(9)~(10)对裂纹扩展的阻碍作用,得到支裂纹面上的法向应力和初始裂纹面上的修正有效切向应力:

$$\sigma'_{nd} = C_{nd}\sigma_d \sin^2(\theta - \psi) + F_{wd} \quad (11)$$

$$\tau'_{vd} = C_{vd}\sigma_d \sin \psi \cos \psi -$$

$$f_{wd}(C_{nd}\sigma_d \sin^2 \psi + F_{wd}) - C \quad (12)$$

式中:  $F_{wd}$  为阻碍裂纹扩展应力,  $F_{wd} = (F_1 + F_2)/A_w$ ,  $A_w$  为裂隙含水面积。

在冲击荷载下,考虑裂纹扩展速度  $v$  对裂纹尖端应力强度因子的影响,将扩展时的应力强度因子定义为<sup>[16]</sup>:

$$K_{Id} = k(v)K'_I \quad (13)$$

式中:  $k(v)$  为扩展速度影响因数,与岩石的瑞利波速  $c_R$  和纵波波速  $c_P$  有关:

$$k(v) = \frac{1 - v/c_R}{(1 - v/c_P)^{1/2}} \quad (14)$$

根据 H. Horri 和 S. Nemat-Nasser 提出的一种计算应力强度因子的近似公式<sup>[17]</sup>,可将静载下的支裂纹应力强度因子  $K'_I$  表示为:

$$K'_I = \frac{2a\tau'_{vd} \sin \theta}{\sqrt{\pi(l+l^*)}} - \sigma'_{nd} \sqrt{\pi l} \quad (15)$$

式中: $l$ 为支裂纹长度; $l^*$ 为当量裂纹长度,约为 $0.27a$ 。将式(14)~(15)代入式(13)即得到支裂纹扩展时的应力强度因子 $K_{I_d}$ :

$$K_{I_d} = \frac{(1-\nu/c_R)}{\sqrt{(1-\nu/c_P)}} \left[ \frac{2a\tau'_{vd}\sin\theta}{\sqrt{\pi(l+l^*)}} - \sigma'_{nd}\sqrt{\pi l} \right] \quad (16)$$

随着载荷的增加,裂尖应力强度因子随之增大,当达到或超过临界值 $K_{I_{cd}}$ (材料的动态断裂韧度)时,裂纹继续生长并趋于主压应力方向<sup>[3]</sup>。

### 3 结论

1)根据自然、干燥和饱水3种不同含水率的红砂岩试样静态单轴压缩和动态单轴冲击试验结果,试样的抗压强度随含水率的增加而降低,随应变率的增加而增大,其中饱水试样具有显著的应变率效应,说明饱和液体的存在起到促进岩石应变率效应的作用。

2)分析 $300\sim 350\text{ s}^{-1}$ 应变率荷载等级下各试样的应力-应变曲线,发现饱水试样体积压缩现象明显,峰值应变最大,峰前的塑性变形最大,而干燥试样弹性变形最大,峰前塑性变形最小。根据干燥、饱水试样碎块的SEM图像得知,孔隙水对岩石微观结构具有显著影响:干燥试样颗粒结构致密,颗粒间充满填充物且胶结紧密,饱水试样颗粒结构疏松多孔,胶结物质被溶蚀导致胶结作用弱化。

3)基于断裂损伤理论,对试样的动态破坏过程进行细观力学分析。冲击作用导致微裂纹处于压剪复合应力状态,并使含水岩石产生孔隙水压力;根据最大周向正应力理论,对微裂纹的起裂条件和扩展方向进行了讨论;微裂纹扩展后,其孔隙水压力减小,但自由水会对支裂纹扩展产生阻碍作用,抑制裂纹扩展,据此对冲击作用下裂尖的动态应力强度因子进行了修正。

### 参考文献

[1] WONG R H C, CHAU K T. Crack Coalescence in a Rock-Like Material Containing Two Cracks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 147-164.

[2] ROBERT A, EINSTEIN H H. Fracture Coalescence in Rock-Type Material under Uniaxial and Biaxial Compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 863-888.

[3] 李银平,伍佑伦,杨春和. 岩石类材料滑动裂纹模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 278-284.

[4] 李杰,王明洋,张宁,等. 裂隙岩体动态损伤演化与体积扩容方程[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1532-1541.

[5] 许金余,刘石,王菲,等. 黑云母花岗岩对冲击荷载的动态力学响应[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(6): 77-80.

[6] 朱珍德,胡定. 裂隙水压力对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64-67.

[7] 汤连生,张鹏程,王洋. 水作用下岩体断裂强度探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3337-3341.

[8] 赵延林,曹平,文有道,等. 渗透压作用下压剪岩石裂纹损伤断裂机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(4): 838-844.

[9] 刘涛影,曹平,章立峰,等. 高渗压条件下压剪岩石裂纹断裂损伤演化机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1801-1808.

[10] 高赛红,曹平,汪胜莲. 水压力作用下岩石中I和II型裂纹断裂准则[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(3): 1087-1091.

[11] 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.

[12] 易顺民,朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论[M]. 北京:科学出版社, 2005: 10-28.

[13] 徐靖南,朱维申,白世伟. 压剪应力作用下多裂隙岩体的力学特性:本构模型[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 1-14.

[14] 尹双增. 断裂损伤理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1992: 141-144.

[15] ZHENG D, LI Q B. An Explanation for Rate Effect of Concrete Strength Based on Fracture Toughness Including Free Water Viscosity[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71: 2319-2327.

[16] XIE H P, SANDERSON D J. Fractal Effect of Rapidly Propagation Cracks[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Nonlinear Mechanics. Beijing: [s. n.], 1995: 341-344.

[17] HORRI H, NEMAT-NASSER S. Brittle Failure in Compression: Splitting, Faulting and Brittle-Ductile Transition[J]. Phil Trans R Soc Lond, 1986, 139(A): 337-374.

(编辑:姚树峰)