

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0335

# 考虑裂隙粗糙度的岩体单轴压缩动态损伤模型\*

刘红岩<sup>1</sup>, 薛雷<sup>2</sup>, 张光雄<sup>3</sup>, 王光兵<sup>3</sup>, 王基禹<sup>3</sup>, 和铁柱<sup>3</sup>, 邹宗山<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;

3. 保利民爆哈密有限公司, 新疆 哈密 839000)

**摘要:** 为了在裂隙岩体动态损伤模型中考虑裂隙粗糙度的影响: 首先, 基于前人提出的能够同时考虑裂隙几何参数、强度参数及变形参数的岩体宏观损伤变量计算模型, 通过引入 Barton 建立的粗糙裂隙 JRC-JCS 抗剪强度模型, 提出了能够考虑裂隙粗糙度的岩体宏观损伤变量计算模型; 其次, 将该计算模型引入到前人提出的考虑宏观缺陷耦合的非贯通裂隙岩体单轴压缩动态损伤模型中, 建立了能够考虑裂隙粗糙度的非贯通裂隙岩体单轴压缩动态损伤模型; 最后, 通过参数敏感性分析研究了裂隙粗糙度(JRC)、裂隙面基本摩擦角 $\phi_b$ 、裂隙长度 $2a$ 对岩体动态力学特性的影响。结果显示, 当 JRC 由 0 分别增加到 10 和 20 时, 岩体动态峰值强度由 26.42 MPa 分别增加到 27.28 和 28.37 MPa; 当 $\phi_b$ 由 $0^\circ$ 分别增加到 $15^\circ$ 和 $30^\circ$ 时, 岩体动态峰值强度由 26.24 MPa 分别增加到 27.28 和 28.80 MPa; 当 $2a$ 由 1 cm 分别增加到 2 和 3 cm 时, 岩体动态峰值强度由 31.37 MPa 分别降低至 27.28 和 23.90 MPa。同时为了更精确地刻画裂隙面粗糙度的影响, 将裂隙面分形维数引入到岩体动态损伤模型中, 不但提高了模型计算精度, 而且拓宽了其应用范围, 更便于实际工程应用。

**关键词:** 非贯通裂隙岩体; 裂隙粗糙度系数; 应力强度因子; JRC-JCS 抗剪强度模型; 单轴压缩动态损伤模型

中图分类号: O346

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

## A uniaxial compressive dynamic damage model for rockmass considering the crack roughness

LIU Hongyan<sup>1</sup>, XUE Lei<sup>2</sup>, ZHANG Guangxiong<sup>3</sup>, WANG Guangbing<sup>3</sup>,

WANG Jiyu<sup>3</sup>, HE Tiezhu<sup>3</sup>, ZOU Zongshan<sup>3</sup>

(1. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Shale Gas and Geoenvironment, Institute of Geology and Geophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839000, Xinjiang, China)

**Abstract:** In order to take into account the influence of the crack roughness, first of all, on basis of the calculation model for the rockmass macroscopic damage variable which can take into account the crack geometry parameter, strength parameter and deformation parameter, a calculation model for the rockmass macroscopic damage variable is proposed by introducing the JRC-JCS shear strength model for the rough crack established by Barton, which can consider the crack roughness. Secondly, the proposed calculation model is introduced into the uniaxial compressive dynamic damage model for the rock mass with the non-persistent crack, which both considers the coupling of the macroscopic and microscopic defects, and then a uniaxial compressive dynamic damage model for the rock mass with the non-persistent crack is established which can consider the crack roughness at the same time. Finally, the effect of crack roughness JRC and crack basic friction angle $\phi_b$  and crack length

\* 收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-11-13

基金项目: 北京市自然科学基金(8222031); 2024 年河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(242103220059); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2024GGJS200); 新疆维吾尔自治区“天池英才”领军人才计划(2023)

第一作者: 刘红岩(1975—), 男, 博士, 教授, Lhyan1204@126.com

$2a$  on rockmass dynamic mechanical property is studied with the parametric sensitivity analysis. The result shows that the rockmass dynamic climax strength increases from 26.42 MPa to 27.28 and 28.37 MPa with JRC increasing from 0 to 10 and 20 respectively. The rockmass dynamic climax strength increases from 26.24 MPa to 27.28 and 28.80 MPa with  $\phi_b$  increasing from  $0^\circ$  to  $15^\circ$  and  $30^\circ$  respectively. The rockmass dynamic climax strength decreases from 31.37 MPa to 27.28 and 23.90 MPa with  $2a$  increasing from 1cm to 2 and 3cm respectively. At the same time, in order to describe the influence of the crack roughness more accurately, the crack fractal dimension is introduced into the dynamic damage model for the rock mass, which not only improves the calculation accuracy of the model, but also broadens its application range, which is more convenient for practical engineering application.

**Keywords:** the rockmass with the non-persistent crack; crack roughness coefficient; stress intensity factor; JRC-JCS shear strength model; a uniaxial compressive dynamic damage model

岩体在爆炸、冲击等荷载作用下的动态力学响应研究在岩石爆破、冲击与防护等工程领域均有着广泛应用,而天然岩体中均含有大量的节理、裂隙(这里统称为裂隙)等天然缺陷,因此裂隙对岩体动态力学特性的影响机理亟待深入研究。目前众多学者已分别采用理论模型<sup>[1-2]</sup>、模型试验<sup>[3-4]</sup>及数值模拟<sup>[5-6]</sup>等方法研究了裂隙对岩体动态力学特性(如动态强度、刚度及破坏模式等)的影响,结果均表明裂隙的影响极为重要,不容忽视。同时,为定量描述裂隙对岩体动态力学特性的影响,裂隙的几何参数(如裂隙长度、倾角和条数等)、强度参数(如裂隙面摩擦角)及变形参数(对于非填充裂隙,为其法向及切向刚度;对于充填裂隙,为充填物的弹性模量及泊松比)等 3 类参数被引入来定量刻画裂隙对岩体动态力学特性的影响。由于岩体中的裂隙多属于三、四级结构面,具有数量多、规模小等特点,因而无法逐一考虑其对岩体力学特性的影响。为此, Kyoya 等<sup>[7]</sup>最早借助损伤力学的方法进行研究,并建立了相应的损伤模型。根据考虑裂隙参数的不同,目前的裂隙岩体损伤模型主要分为如下 3 类: (1) 仅考虑裂隙几何参数的损伤模型; (2) 考虑裂隙几何及强度参数的损伤模型; (3) 同时考虑裂隙几何、强度及变形参数的损伤模型。第 1 类模型最有代表性的是 Kawamoto 等<sup>[8]</sup>和 Swoboda 等<sup>[9]</sup>提出的损伤模型,其仅采用裂隙几何参数(如裂隙表面积及方位等)来考虑裂隙对岩体造成的损伤,而未考虑裂隙摩擦角等强度参数的影响,其假设条件是裂隙无法传递应力,这对承受拉应力的裂隙来说是合理的,而当裂隙受压闭合时,其可以传递部分压应力及剪应力。为此, Swoboda 等<sup>[9]</sup>又引入裂隙传压及传剪系数对其进行修正。第 2 类模型最具有代表性的是 Li 等<sup>[10]</sup>和 Liu 等<sup>[11]</sup>针对受压闭合裂隙的受力特点,基于损伤及断裂理论的能量原理,提出的能够同时考虑裂隙几何及强度参数的岩体损伤模型。而后,刘红岩等<sup>[12]</sup>又在此基础上引入裂隙变形参数,提出了同时考虑裂隙几何、强度及变形参数的岩体损伤模型,即第 3 类模型。至此,裂隙岩体损伤模型的研究也日趋完善。

虽然裂隙岩体损伤模型的研究已取得了丰硕成果,但是上述研究仅局限于平直裂隙,即认为裂隙为平直的,而未考虑裂隙粗糙度等几何参数对岩体力学特性的影响。然而,由于天然岩体中的裂隙是由地质构造作用产生,因而均是粗糙起伏的,其粗糙程度可用裂隙或节理粗糙度系数(joint roughness coefficient, JRC)来表征。目前大量研究表明裂隙粗糙度对岩体力学特性有着重要影响,如杨圣奇等<sup>[13]</sup>通过 3D 打印制作了含不同粗糙度裂隙的岩石试样,三轴压缩试验结果表明 JRC 严重影响破坏裂纹的形态、数量和空间分布特征,且随着 JRC 的增大,裂隙面抗剪强度及尖端起裂强度均随之增加。王本鑫等<sup>[14]</sup>的研究也表明裂隙粗糙度将导致岩体强度的各向异性更为显著。Kim 等<sup>[15]</sup>亦发现岩质边坡稳定性也随着 JRC 的增加而提高。而最早对裂隙粗糙度展开系统研究的是 Barton<sup>[16]</sup>,首次提出了裂隙粗糙度系数 JRC 的概念,而后又提出了 0~20 的 JRC 标准轮廓曲线以定量刻画裂隙面的粗糙度,但是这种方法误差较大。近年来,很多学者采用分形维数<sup>[17-18]</sup>来描述裂隙面的粗糙度,为研究提供了极大便利。Barton<sup>[16]</sup>还提出了著名的粗糙裂隙抗剪强度计算公式,即 JRC-JCS(joint wall compressive strength)模型,这为岩体力学特性研究奠定了基础。

然而目前关于裂隙粗糙度对岩体动态力学特性影响的理论研究甚少, 更未提出考虑裂隙粗糙度的岩体动态损伤模型。为此, 本文在刘红岩等<sup>[12]</sup>研究基础上, 以单轴动态压缩为例, 重点讨论裂隙粗糙度对岩体动态力学特性的影响, 并建立相应的非贯通裂隙岩体动态损伤模型, 以丰富和深化裂隙岩体动力学理论。

### 1 经典的岩石动态损伤模型——TCK 模型

为了应对油页岩爆破的实际需求, Taylor 等<sup>[19]</sup>提出了著名的岩石动态损伤模型——TCK 模型。对于单轴动态压缩, 其本构方程可表示为<sup>[20]</sup>:

$$\sigma(t) = E(1 - \omega)\varepsilon = E(1 - \xi\dot{\varepsilon}^{-3}\varepsilon^{m+3})\varepsilon \tag{1}$$

式中:  $\sigma$ 、 $\varepsilon$  分别为轴向动应力和动应变;  $\dot{\varepsilon}$  为应变率, 本文研究的为恒定载荷应变率, 即有  $\varepsilon = \dot{\varepsilon}t$ ,  $t$  为时间;  $E$  为岩石弹性模量;  $\omega(0 < \omega < 1)$  为岩石细观损伤变量;  $\xi = 8\pi c_g^3 k / [(m+1)(m+2)(m+3)]$ ,  $c_g$  为微裂纹扩展速度, 其大小一般为  $(0.33 \sim 0.66)c_R$  ( $c_R$  为 Rayleigh 波波速)<sup>[21]</sup>, 本文取  $0.5c_R$ 。而  $c_R \approx 0.58c_1$  ( $c_1$  为弹性纵波速度), 进而有  $c_g \approx 0.5c_R \approx 0.29c_1$ ; 参数  $k$ 、 $m$  可由实验测得。

### 2 非贯通裂隙岩体单轴压缩动态损伤模型

#### 2.1 单轴压缩下非贯通裂隙尖端应力强度因子

图 1 显示了单轴压缩下含单条非贯通裂隙的岩体,  $V$ 、 $w$ 、 $h$ 、 $\delta$  分别为岩石试件体积、宽度、高度和厚度, 其中  $V = wh\delta$ 。本文裂隙在垂直纸面方向是贯通的, 因此岩石试件厚度  $\delta$  即为裂隙厚度;  $a$  和  $\alpha$  为裂隙半长和倾角;  $A$  为裂隙表面积 ( $A = 2a\delta$ );  $\theta$ 、 $l$  分别为翼裂纹起裂角和长度。

根据图 1 的裂隙受力特征, 单轴压缩下考虑裂隙几何、强度及变形等 3 类参数的平直裂隙面上的正应力  $\sigma_\alpha$  及切应力  $\tau_\alpha$  分别为<sup>[12]</sup>:

$$\sigma_\alpha = (1 - C_n)\sigma\cos^2\alpha \tag{2}$$

$$\tau_\alpha = (1 - C_s)\sigma\sin\alpha\cos\alpha \tag{3}$$

式中:  $C_n = \pi a / \{\pi a + E / [(1 - \nu^2)k_n]\}$ 、 $C_s = \pi a / \{\pi a + E / [(1 - \nu^2)k_s]\}$ , 分别为裂隙传压及传剪系数<sup>[22]</sup>;  $k_n$ 、 $k_s$  分别为裂隙法向及切向刚度;  $\nu$  为岩石的泊松比。

对于粗糙裂隙, 裂隙面上的粘聚力一般较小, 可忽略不计。为此, Barton<sup>[16]</sup>提出了粗糙裂隙抗剪强度准则, 即:

$$\tau_s = \sigma_n \tan [f_{JRC} \lg(\sigma_{JCS} / \sigma_n) + \varphi_b] \tag{4}$$

式中:  $\tau_s$ 、 $\sigma_n$  分别为裂隙面抗剪强度及裂隙面法向正应力;  $f_{JRC}$  为裂隙面粗糙度系数;  $\sigma_{JCS}$  为裂隙面未风化时壁岩的无侧限抗压强度, 即可近似取为完整岩石的抗压强度;  $\varphi_b$  为裂隙面基本摩擦角。

由于式 (4) 中的  $\sigma_n$  与式 (2) 中的  $\sigma_\alpha$  意义相同, 将式 (2) 代入式 (4) 可得:

$$\tau_s = (1 - C_n)\sigma\cos^2\alpha \tan \{f_{JRC} \lg [\sigma_{JCS} / ((1 - C_n)\sigma\cos^2\alpha)] + \varphi_b\} \tag{5}$$

在图 1 所示荷载作用下, 裂隙面上的有效下滑力  $\tau_{eff}$  为:

$$\tau_{eff} = \begin{cases} 0 & \tau_\alpha < \tau_s \\ \tau_\alpha - \tau_s & \tau_\alpha \geq \tau_s \end{cases} \tag{6}$$

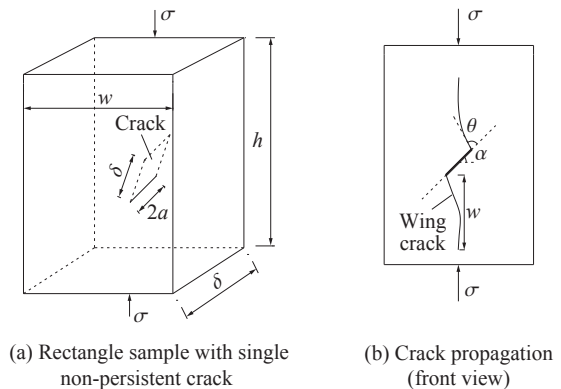


图 1 单轴压缩下含单条非贯通裂隙的岩体  
Fig. 1 Rockmass with single non-persistent crack under uniaxial compression

根据 Lee 等<sup>[23]</sup> 的研究, 可得裂隙尖端第一、二应力强度因子  $K_I$ 、 $K_{II}$  分别为:

$$\begin{cases} K_I = -2a\tau_{\text{eff}}\sin\theta / \sqrt{\pi(l+l^*)} + p(\sigma, \alpha + \theta) \sqrt{\pi l} \\ K_{II} = -2a\tau_{\text{eff}}\cos\theta / \sqrt{\pi(l+l^*)} + \tau(\sigma, \alpha + \theta) \sqrt{\pi l} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $p$  和  $\tau$  分别为与以裂纹起裂角等有关的裂隙面上的法向及切向应力;  $l$  为翼裂纹长度, 引入  $l^* = 0.27a$ , 以保证  $l = 0$  时,  $K_I$ 、 $K_{II}$  不存在奇异性<sup>[24-25]</sup>。

当裂隙未扩展时,  $l=0$ , 此时有:

$$K_I = -2a\tau_{\text{eff}}\sin\theta / \sqrt{\pi l^*}, \quad K_{II} = -2a\tau_{\text{eff}}\cos\theta / \sqrt{\pi l^*} \quad (8)$$

而当岩体含有如图 2 所示的单组非贯通平行裂隙时, 根据文献 [26], 可得到考虑裂隙间相互作用时的裂隙尖端应力强度因子  $K_I^c$ 、 $K_{II}^c$  为:

$$K_I^c = f(a, b, d)K_I, \quad K_{II}^c = f(a, b, d)K_{II} \quad (9)$$

式中:  $b$ 、 $d$  分别为相邻两裂隙的中心距及排间距;  $f(a, b, d)$  为裂隙间相互影响系数。

### 2.2 含非贯通裂隙的岩体损伤变量

针对如图 1 所示含单条非贯通裂隙的岩体模型, Li 等<sup>[10]</sup> 基于损伤及断裂理论的能量原理得到平面应力条件下岩体在加载方向上的损伤变量  $D$ :

$$D = 1 - \frac{1}{1 + (2/V)(1/\sigma^2) \int_0^A (K_I^2 + K_{II}^2) dA} \quad (10)$$

把式 (8) 代入式 (10) 即可得到初始裂隙在加载方向上对岩体造成损伤  $D$ :

$$D = \begin{cases} 0 & \tau_\alpha < \tau_s \\ 1 - \frac{1}{1 + \frac{9.43}{wh} \int_0^{2a\delta} a \cos^2 \alpha \left[ (1-C_s) \sin \alpha - (1-C_n) \cos \alpha \tan \left( f_{\text{JRC}} \lg \frac{\sigma_{\text{JCS}}}{(1-C_n) \sigma \cos^2 \alpha} + \phi_b \right) \right] d(2a\delta)} & \tau_\alpha \geq \tau_s \end{cases} \quad (11)$$

对其张量化即可得到相应的损伤张量, 可以看出由本研究提出的裂隙岩体损伤变量计算方法不但与刘红岩等<sup>[12]</sup> 的方法一样, 同时考虑了裂隙的几何、强度及变形参数, 而且还对其进行了拓展, 即同时考虑了裂隙粗糙度, 因而是对目前研究的进一步深化。当  $f_{\text{JRC}} = 0$  时, 裂隙退化为平直裂隙, 该方法即为刘红岩等<sup>[12]</sup> 的方法。因此, 该方法不但适用于平直裂隙, 亦适用于粗糙裂隙, 因而更具有普适性。

上述研究仅讨论了单条裂隙的情况, 而对于如图 2 所示的单组裂隙的情况, 采用类似方法可得出其损伤计算公式为:

$$D = \begin{cases} 0 & \tau_\alpha < \tau_s \\ 1 - \frac{1}{1 + \frac{9.43}{wh} f^2(a, b, d) \int_0^{2na\delta} a \cos^2 \alpha \left[ (1-C_s) \sin \alpha - (1-C_n) \cos \alpha \tan \left( f_{\text{JRC}} \lg \frac{\sigma_{\text{JCS}}}{(1-C_n) \sigma \cos^2 \alpha} + \phi_b \right) \right] d(2na\delta)} & \tau_\alpha \geq \tau_s \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $n$  为裂隙条数。

### 2.3 考虑宏细观缺陷耦合的非贯通裂隙岩体单轴压缩动态损伤模型

Liu 等<sup>[1]</sup> 提出了单轴压缩下考虑宏细观缺陷耦合的岩体总损伤变量的计算公式:

$$D_{12} = 1 - \frac{(1-D)(1-\omega)}{1-\omega D} \quad (13)$$

基于连续介质损伤理论, 用式 (13) 得到的宏细观缺陷耦合损伤变量  $D_{12}$  替换式 (1) 中的完整岩石损

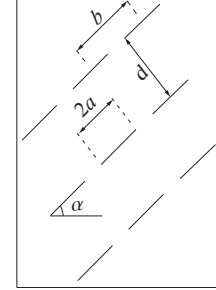


图 2 含单组断续裂隙的岩体模型  
Fig. 2 Rockmass model with one set of intermittent cracks

伤变量  $\omega(t)$ , 即可得到相应的单轴压缩下非贯通裂隙岩体动态损伤模型为:

$$\sigma(t) = E \frac{(1-D)(1-\xi\dot{\varepsilon}^{-3}\varepsilon^{m+3})}{1-D\xi\dot{\varepsilon}^{-3}\varepsilon^{m+3}} \varepsilon = E \frac{(1-D)(1-\xi\dot{\varepsilon}^m t^{m+3})}{1-D\xi\dot{\varepsilon}^m t^{m+3}} \dot{\varepsilon} t \quad (14)$$

将式 (12) 代入式 (14), 即可得到一个两边同时含有轴向动应力  $\sigma$  的隐式方程, 因而需采用迭代法求解。总体思路是先给定一个轴向动应力  $\sigma$ , 求其对应的动应变  $\varepsilon$ 。具体求解流程如图 3 所示。

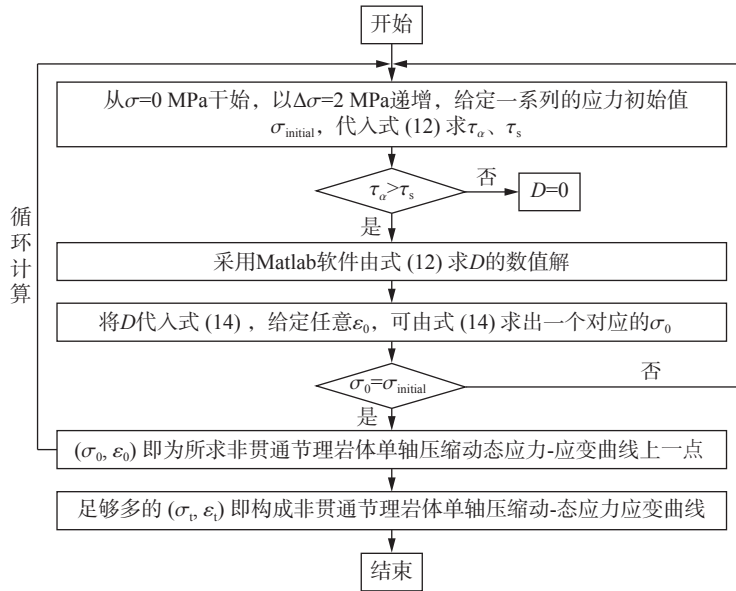


图 3 求解流程示意图

Fig. 3 Scheme of the solution flow

### 3 算例分析

#### 3.1 计算模型

重点研究裂隙粗糙度对岩体动态力学特性的影响, 取计算模型如图 4(a) 所示, 模型顶部受动荷载作用, 底部受垂直方向约束, 岩块计算参数(表 1)和动载荷  $p_d$ (图 4(b))参考 Taylor 等<sup>[19]</sup>的试验结果, 裂隙参数选取刘红岩等<sup>[12]</sup>给出的结果(表 2)。

根据上述参数可得到如图 5 所示的计算结果, 可以看出: (1) 在峰前阶段, 本文计算结果与文献 [19] 的试验结果基本吻合, 峰值强度也基本相同, 而在峰值强度以后计算曲线迅速跌落, 而文献 [19] 中的曲线则仍保持较高的峰后强度, 分析认为是本文模型对原模型进行了一定的简化, 如未考虑岩石断裂韧性等参数对岩石破坏过程所致; (2) 与完整岩石的动态应力-应变曲线类似, 基于 TCK 模型建立的非贯通裂隙岩体动态损伤模型应力-应变曲线也包含线性阶段(损伤不变阶段)、损伤阶段(损伤开始增加阶段)、峰值点及破坏软化段(峰值点以后的阶段), 很好地反映了其变形破坏全过程; (3) 完整岩石的动态峰值强度及弹性模量则分别为 33.30 MPa 和 10.8 GPa, 而相应非贯通裂隙岩体的峰值强度及弹性模量分别为 27.28 MPa 和 8.62 GPa, 约为对应完整岩石的 81.92% 和 79.81%, 即非贯通裂隙的存在降低了岩体动态强度及弹性模量; (4) 当应力较小时, 裂隙岩体损伤为裂隙造成的初始损伤, 而随着应力的

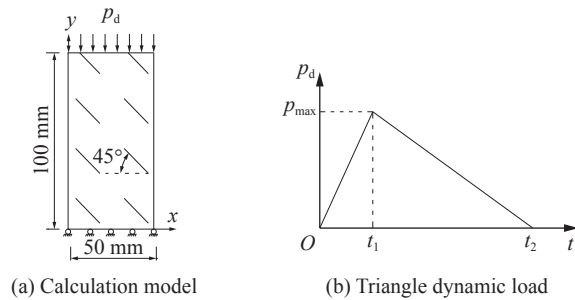


图 4 计算模型及施加的动荷载

Fig. 4 Calculation model and applied dynamic load

逐渐增加, 损伤开始缓慢增加, 到应力增加到峰值强度附近时, 损伤开始快速增加, 直到趋近于 1, 即试件发生完全破坏。

表 1 岩块参数

Table 1 Parameters of the intact rock

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	E/GPa	$\nu$	$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	$k$	$m$	$h/mm$	$w/mm$
2270	10.8	0.2	100	$5.115 \times 10^{22}$	7	100	50

表 2 裂隙参数

Table 2 Crack parameters

$n$	$2a/mm$	$d/mm$	$b/mm$	$\delta/mm$	$\alpha/(^\circ)$	$\phi_b/(^\circ)$	$k_u/(GPa \cdot cm^{-1})$	$k_d/(GPa \cdot cm^{-1})$	$f_{JRC}$	$\sigma_{JCS}/MPa$
8	20	20	40	10	45	15	20	8	10	30

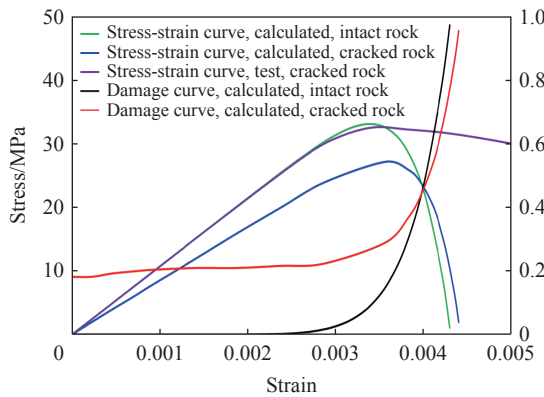


图 5 岩体单轴压缩动态应力-应变计算曲线

Fig. 5 Calculation curve of rock axial compression dynamic stress-strain

该方法在刘红岩等<sup>[12]</sup>提出的考虑裂隙几何、强度及变形参数的岩体动态损伤模型的基础上, 很好地考虑了裂隙粗糙度的影响, 因而将其由平直裂隙推广应用到了粗糙裂隙, 拓宽了该模型的应用领域, 也更符合实际情况。

### 3.2 参数敏感性分析

本研究的重要创新点是引入裂隙粗糙度系数  $f_{JRC}$  到裂隙岩体的动态损伤模型中, 进而可以定量刻画其对岩体动态力学特性的影响。以图 4 所示计算模型为例, 采用参数敏感性分析(即每次仅改变表 1 中的某一个参数)重点讨论裂隙粗糙度对岩体动态力学特性的影响, 并在此基础上讨论裂隙其他参数(如裂隙面基本摩擦角和裂隙长度)的影响。

#### 3.2.1 裂隙粗糙度对岩体动态力学特性的影响

Barton<sup>[16]</sup> 最早给出了 10 条典型的粗糙裂隙剖面, 并按其粗糙程度由低到高分别取粗糙度系数为 0~2 至 18~20。下面首先按照这种方法, 取粗糙度系数  $f_{JRC}$  分别为 0、10 和 20 等 3 种工况探讨其对岩体动态力学特性的影响, 计算结果如图 6 所示, 可以看出, 当  $f_{JRC}$  由 0 分别增加到 10 和 20 时, 岩体动态应力应变曲线的斜率及峰值强度均呈增加趋势: 岩体动态峰值强度则由 26.42 MPa 分别增加到 27.28 和 28.37 MPa, 增加幅度分别为 3.26% 和 7.38%; 弹性模量由 8.15 GPa 分别增加到 8.62 和 9.46 GPa, 增加幅度分别为 5.77% 和 16.07%。这说明裂隙粗糙度对岩体动态力学特性有较大影响, 且随着  $f_{JRC}$  的增加, 其影响程度也呈现出逐渐增加的趋势。这主要是因为随着  $f_{JRC}$  的增加, 裂隙面抗剪强度随之增加, 进而岩体单轴动态抗压强度及弹性模量亦随之增加。

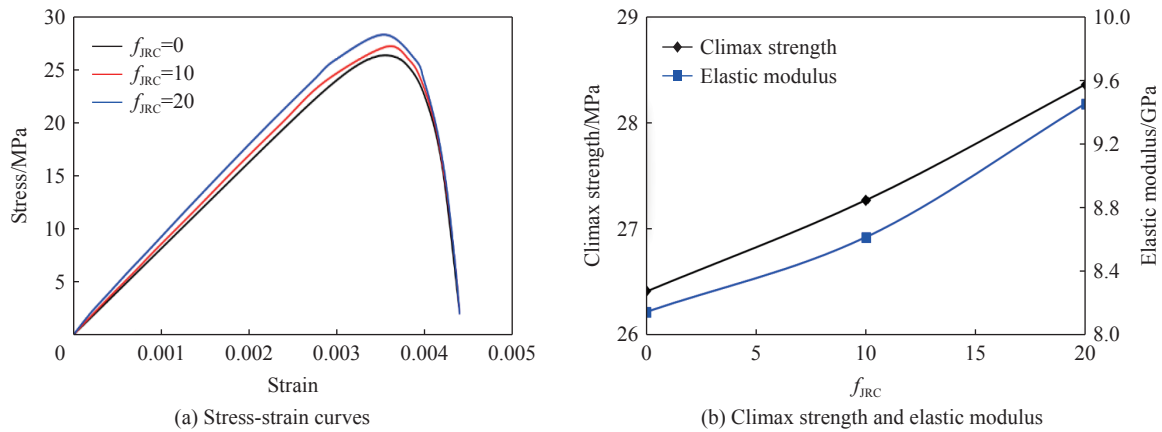


图 6 裂隙粗糙度  $f_{JRC}$  对岩体动态力学特性的影响

Fig. 6 Effect of the crack roughness  $f_{JRC}$  on the rockmass dynamic mechanical behavior

虽然 Barton<sup>[16]</sup> 提出的裂隙粗糙系数对定量刻画裂隙的粗糙度起到了很好的开创作用, 但仍存在 2 方面的不足: 首先, 由于实际裂隙面复杂多样, 其粗糙程度往往难以用表 3 中给出的 10 条典型剖面来描述, 如谢和平等<sup>[17]</sup> 等的研究中就出现了  $f_{JRC} > 20$  的情况; 其次, 用粗糙度系数  $f_{JRC}$  描述裂隙的粗糙程度存在较大的人为性, 如对于表 3 中的第一条剖面, 其  $f_{JRC}$  处于 0~2 范围, 一方面用实际裂隙剖面与典型裂隙剖面对比时会存在较大的人为误差, 同时对  $f_{JRC}$  在 0~2 之间取值时, 同样也会存在较大的人为性。为此, 谢和平等<sup>[17]</sup> 引入了分形维数  $\eta$  来定量刻画裂隙粗糙度, 建立了二维裂隙面的  $\eta$  与  $f_{JRC}$  之间的函数关系式, 并计算出了表 3 中 10 条典型裂隙剖面的分形维数, 即:

$$f_{JRC} = 85.2671(\eta - 1)^{0.5679} \quad (15)$$

为此, 下面采用分形维数  $\eta$  表征裂隙面的粗糙度, 并讨论  $\eta$  对非贯通裂隙岩体动态力学特性的影响规律。将式 (15) 代入式 (12) 即可得到用  $\eta$  表示的裂隙对岩体造成的宏观损伤。

表 3 典型粗糙裂隙剖面及其粗糙度系数  $f_{JRC}$  与分形维数  $\eta$

Table 3 The typical rough crack profile and its JRC ( $f_{JRC}$ ) and fractal dimension ( $\eta$ )

编号	典型裂隙剖面	$f_{JRC}$	$\eta$	编号	典型裂隙剖面	$f_{JRC}$	$\eta$
1		0~2	1.002	6		10~12	1.036
2		2~4	1.005	7		12~14	1.043
3		4~6	1.011	8		14~16	1.051
4		6~8	1.018	9		16~18	1.062
5		8~10	1.025	10		18~20	1.069

取分形维数  $\eta$  分别为 1、1.05 和 1.1 等 3 种工况探讨裂隙分形维数对岩体动力学特性的影响, 计算结果如图 7 所示。可以看出, 与图 6 曲线类似, 当分形维数  $\eta$  由 1 分别增加到 1.05 和 1.1 时, 应力-应变曲线的斜率及峰值强度点均呈现增加趋势: 岩体动态峰值强度由 26.42 MPa 分别增加到 27.84 和 28.77 MPa, 增加幅度分别为 5.37% 和 8.89%; 弹性模量由 8.15 GPa 分别增加到 8.88 和 9.60 GPa, 增加幅度分别为 8.96% 和 17.79%。该计算结果也同样说明裂隙粗糙度对岩体动态力学特性有较大影响, 且随着分形维数  $\eta$  的增加, 其影响程度也呈现出逐渐增加的趋势。需要说明的是虽然该结论与采用粗糙度系数  $f_{JRC}$  时得出的结论类似, 但是该方法的优点是一方面拓展其应用领域, 即裂隙粗糙程度的取值没有限制, 不像  $f_{JRC}$  最大值只能取为 20; 另一方面是对裂隙粗糙度的刻画也更为精确, 提高了计算精度。

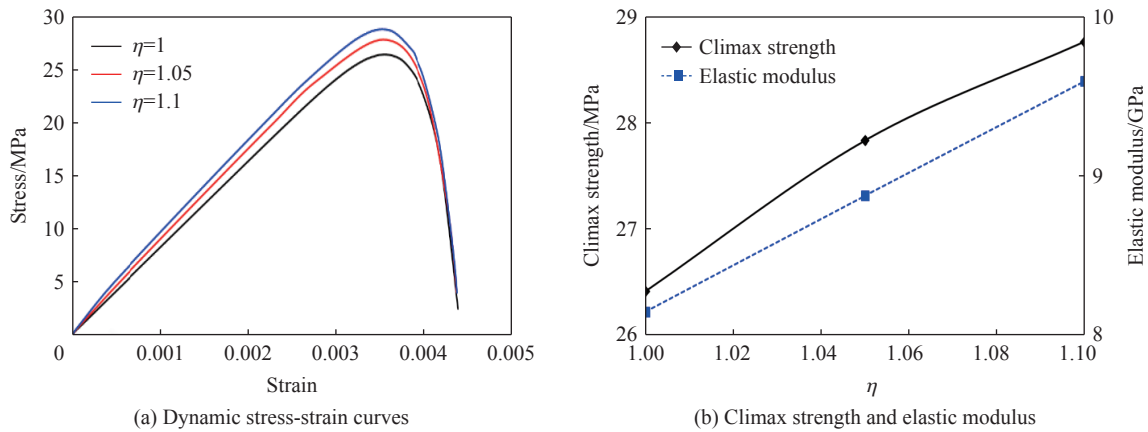


图 7 裂隙面分形维数  $\eta$  对岩体动态力学特性的影响

Fig. 7 Effect of the crack fractal dimension  $\eta$  on the rockmass dynamic mechanical behavior

### 3.2.2 裂隙面基本摩擦角 $\varphi_b$ 对岩体动态力学特性的影响

取裂隙面基本摩擦角  $\varphi_b$  分别为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  等 3 种工况探讨其对岩体动态力学特性的影响, 计算结果如图 8 所示, 可以看出, 当  $\varphi_b$  由  $0^\circ$  分别增加到  $15^\circ$  和  $30^\circ$  时, 岩体动态应力-应变曲线的斜率及峰值强度点均呈现增加趋势: 岩体动态峰值强度由 26.24 MPa 分别增加到 27.28 和 28.80 MPa, 增加幅度分别为 3.96% 和 9.76%; 而弹性模量也由 8.16 GPa 分别增加到 8.62 和 9.16 GPa, 增加幅度分别为 5.64% 和 12.25%。这说明  $\varphi_b$  对岩体动态力学特性有较大影响, 影响程度也随  $\varphi_b$  的增加而增加。类似地, 随着  $\varphi_b$  的增加, 裂隙面抗剪强度增大, 进而岩体单轴动态抗压强度及弹性模量亦随之增加。

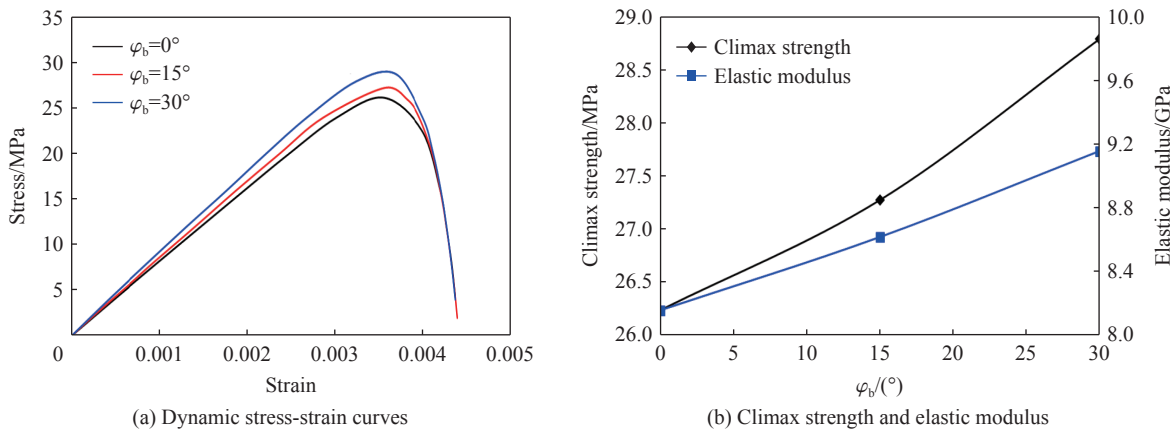
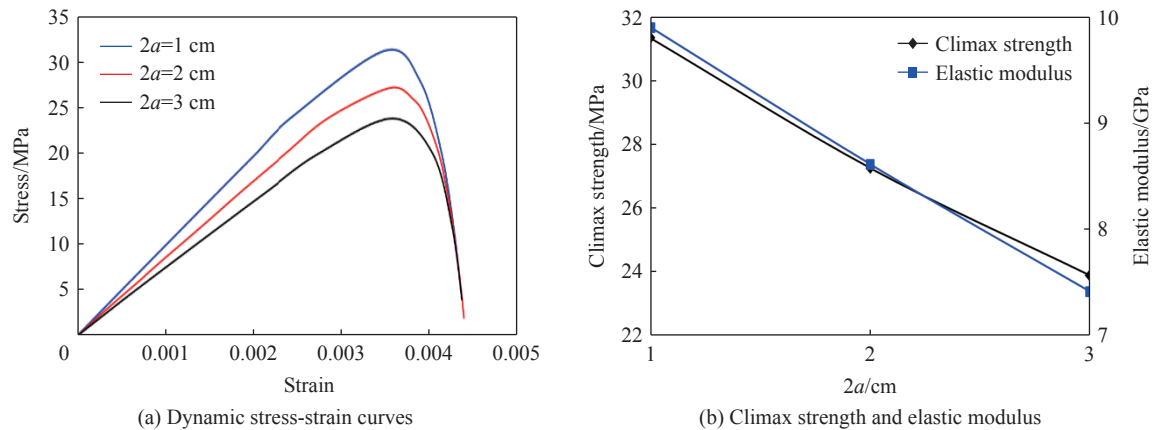


图 8 裂隙面基本摩擦角  $\varphi_b$  对岩体动态力学特性的影响

Fig. 8 Effect of the crack face basic friction angle  $\varphi_b$  on the rockmass dynamic mechanical behavior

### 3.2.3 裂隙长度 $2a$ 对岩体动态力学特性的影响

取裂隙长度  $2a$  分别为 1、2、3 cm 等 3 种工况探讨其对岩体动态力学特性的影响, 计算结果如图 9 所示, 可以看出, 当  $2a$  由 1 cm 分别增加到 2 和 3 cm 时, 岩体动态应力-应变曲线的斜率及峰值强度点均呈现降低趋势, 且其降低幅度较大: 岩体动态峰值强度由 31.37 MPa 逐渐降低至 27.28 和 23.90 MPa, 降低幅度分别为 13.04% 和 23.81%; 而弹性模量也由 9.91 GPa 逐渐降低至 8.62 和 7.42 GPa, 降低幅度分别为 13.02% 和 25.13%。这说明随着  $2a$  的增加, 岩体动态峰值强度和弹性模量均明显受到影响, 其影响程度也随裂隙长度的增加而增加趋势。这是由于随着  $2a$  的增加, 由式 (11) 或 (12) 可知, 岩体损伤增加, 相应地, 岩体单轴动态抗压强度及弹性模量均减小。

图 9 裂隙长度  $2a$  对岩体动态力学特性的影响Fig. 9 Effect of the crack length  $2a$  on the rockmass dynamic mechanical behavior

## 4 结 论

(1) 针对目前岩体动态损伤模型未考虑裂隙粗糙度的不足, 基于前人提出的能够同时考虑裂隙几何参数、强度参数及变形参数的岩体宏观损伤变量计算模型, 通过引入 Barton<sup>[16]</sup> 提出的粗糙裂隙抗剪强度准则, 提出了能够同时考虑裂隙粗糙度的岩体宏观损伤变量计算模型。

(2) 将本文提出的考虑裂隙粗糙度的岩体宏观损伤变量计算模型引入到前人提出的考虑宏细观缺陷耦合的非贯通裂隙岩体单轴压缩动态损伤模型中, 建立了能够同时考虑裂隙粗糙度的非贯通裂隙岩体单轴压缩动态损伤模型。参数敏感性分析表明, 当裂隙粗糙度系数  $f_{RC}$  由 0 分别增加到 10 和 20 时, 岩体动态峰值强度由 26.42 MPa 分别增加到 27.28 和 28.37 MPa, 弹性模量也由 8.15 GPa 分别增加到 8.62 和 9.46 GPa。当裂隙面基本摩擦角  $\varphi_b$  由  $0^\circ$  分别增加到  $15^\circ$  和  $30^\circ$  时, 岩体动态峰值强度由 26.24 MPa 分别增加到 27.28 和 28.80 MPa, 弹性模量也由 8.16 GPa 分别增加到 8.62 和 9.16 GPa。当裂隙长度  $2a$  由 1 cm 分别增加到 2 和 3 cm 时, 岩体动态峰值强度由 31.37 MPa 分别降低至 27.28 和 23.90 MPa, 弹性模量也由 9.91 GPa 逐渐降低至 8.62 和 7.42 GPa。这与目前的研究结论一致, 说明了该模型的合理性。

(3) 将裂隙面分形维数引入到本文建立的非贯通裂隙岩体单轴压缩动态损伤模型中, 不但提高了裂隙面粗糙度的计算精度, 而且拓宽了取值范围, 因而更便于工程应用。

(4) 虽然该研究很好地考虑了裂隙粗糙度的影响, 但是粗糙裂隙一般都是非完全闭合的, 因而在压缩过程中将出现裂隙凸起点的啃断等复杂力学行为, 导致其力学响应更难以刻画, 而本模型未能全面考虑上述情况, 因而仍需要进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] LIU H Y, LV S R, ZHANG L M, et al. A dynamic damage constitutive model for a rock mass with persistent joints [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 75: 132–139. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.01.013.
- [2] 刘红岩, 杨艳, 李俊峰, 等. 基于 TCK 模型的非贯通节理岩体动态损伤本构模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 319–325. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0319-07.  
LIU H Y, YANG Y, LI J F, et al. Dynamic damage constitutive model for rock mass with non-persistent joints based on the TCK model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 319–325. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0319-07.
- [3] YAN Z L, DAI F, LIU Y, et al. Experimental investigations of the dynamic mechanical properties and fracturing behavior of cracked rocks under dynamic loading [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(10): 5535–5552. DOI: 10.1007/s10064-020-01914-8.
- [4] 闻磊, 冯文杰, 李明焯, 等. 应变率对含裂隙红砂岩裂纹扩展模式及破碎特征的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(11):

113103. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0061.
- WEN L, FENG W J, LI M Y, et al. Strain rate effect on crack propagation and fragmentation characteristics of red sandstone containing pre-cracks [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(11): 113103. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0061.
- [5] YUAN G T, ZHANG M W, ZHANG K, et al. Dynamic mechanical response characteristics and cracking behavior of randomly distributed cracked sandstone [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2024, 11(1): 119–139. DOI: 10.1007/s40571-023-00612-y.
- [6] JIA Z M, ZHOU X P. Modelling fracture of rock masses around tunnels and slopes by field-enriched finite element method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 163: 105756. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105756.
- [7] KYOYA T, ICHIKAWA Y, KAWAMOTO T. Damage mechanics theory for discontinuous rock mass [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Nagoya, 1985: 469–480.
- [8] KAWAMOTO T, ICHIKAWA Y, KYOYA T. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1988, 12(1): 1–30. DOI: 10.1002/nag.1610120102.
- [9] SWOBODA G, SHEN X P, ROSAS L. Damage model for jointed rock mass and its application to tunnelling [J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 22(3/4): 183–203. DOI: 10.1016/S0266-352X(98)00009-3.
- [10] LI N, CHEN W, ZHANG P, et al. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclical loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(7): 1071–1079. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00058-2.
- [11] LIU H Y, ZHANG L M. A damage constitutive model for rock mass with nonpersistently closed joints under uniaxial compression [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2015, 40(11): 3107–3117. DOI: 10.1007/s13369-015-1777-8.
- [12] 刘红岩, 李俊峰, 裴小龙. 单轴压缩下断续节理岩体动态损伤本构模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 316–323. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0261.
- LIU H Y, LI J F, PEI X L. A dynamic damage constitutive model for rockmass with intermittent joints under uniaxial compression [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 316–323. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0261.
- [13] 杨圣奇, 陆家炜, 田文岭, 等. 不同节理粗糙度类岩石材料三轴压缩力学特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(S1): 21–32. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2293.
- YANG S Q, LU J W, TIAN W L, et al. Experimental study of mechanical behavior of rock specimens with different joint roughness coefficient under conventional triaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S1): 21–32. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2293.
- [14] 王本鑫, 金爱兵, 赵怡晴, 等. 基于 DIC 的含 3D 打印起伏节理试样破裂特性及损伤本构 [J]. *工程科学学报*, 2022, 44(12): 2029–2039. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.04.11.001.
- WANG B X, JIN A B, ZHAO Y Q, et al. Fracture characteristics and the damage constitutive model of 3D printing undulating joint samples based on DIC [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(12): 2029–2039. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2021.04.11.001.
- [15] KIM D H, GRATCHEV I, BALASUBRAMANIAM A. Determination of joint roughness coefficient (JRC) for slope stability analysis: a case study from the Gold Coast area, Australia [J]. *Landslides*, 2013, 10(5): 657–664. DOI: 10.1007/s10346-013-0410-8.
- [16] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints [J]. *Engineering Geology*, 1973, 7(4): 287–332. DOI: 10.1016/0013-7952(73)90013-6.
- [17] 谢和平, PARISEAU W G. 岩石节理粗糙系数 (JRC) 的分形估计 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 1994, 24(5): 524–530.
- XIE H P, PARISEAU W G. The fractal estimation of rock joint roughness coefficient [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(5): 524–530.
- [18] 陈世江, 朱万成, 王创业, 等. 岩体结构面粗糙度系数定量表征研究进展 [J]. *力学学报*, 2017, 49(2): 239–256. DOI: 10.6052/0459-1879-16-255.
- CHEN S J, ZHU W C, WANG C Y, et al. Review of research progresses of the quantifying joint roughness coefficient [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(2): 239–256. DOI: 10.6052/0459-1879-16-255.
- [19] TAYLOR L M, CHEN E P, KUSZMAUL J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1986, 55(3): 301–320. DOI: 10.1016/0045-7825(86)

- 90057-5.
- [20] GRADY D E, KIPP M E. Continuum modelling of explosive fracture in oil shale [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(3): 147–157. DOI: 10.1016/0148-9062(80)91361-3.
- [21] 贺红亮. 冲击波极端条件下脆性介质的力学响应特性及其微观结构破坏特征 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 1999.  
HE H L. Mechanical response and microstructure failure characteristics of brittle medium under extreme shock wave conditions [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 1999.
- [22] LIU T Y, CAO P, LIN H. Damage and fracture evolution of hydraulic fracturing in compression-shear rock cracks [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, 74: 55–63. DOI: 10.1016/j.tafmec.2014.06.013.
- [23] LEE S, RAVICHANDRAN G. Crack initiation in brittle solids under multiaxial compression [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(13): 1645–1658. DOI: 10.1016/S0013-7944(02)00203-5.
- [24] HUANG C Y, SUBHASH G, VITTON S J. A dynamic damage growth model for uniaxial compressive response of rock aggregates [J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34(5): 267–277. DOI: 10.1016/S0167-6636(02)00112-6.
- [25] HUANG C Y, SUBHASH G. Influence of lateral confinement on dynamic damage evolution during uniaxial compressive response of brittle solids [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51(6): 1089–1105. DOI: 10.1016/S0022-5096(03)00002-4.
- [26] 范景伟, 何江达. 含定向闭合断续节理岩体的强度特性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1992, 11(2): 190–199.  
FAN J W, HE J D. The strength behavior of rockmasses containing oriented and closed intermittent joints [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1992, 11(2): 190–199.

(责任编辑 王小飞)