水文地质工程地质
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

考虑微裂纹力学行为的岩石单轴压缩损伤模型

刘　翠，李　忠，徐飞亚，张　陌，曹晓伟，雷　恒

A compressive damage model for a rock considering the microcrack mechanical behavior

LIU Cui, LI Zhong, XU Feiya, ZHANG Mo, CAO Xiaowei, and LEI Heng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311040

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

高应力区岩石统计损伤本构模型研究
A study of the statistical damage constitutive model of rock in high stress areas
贾逸, 魏良帅, 黄安邦, 和铭, 黄细超, 蓝康文　水文地质工程地质. 2019, 46(2): 118-118

基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究
A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage
李修磊, 李起伟, 李倩　水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46-56

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型
A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate
刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光　水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95

考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型
The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction
谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 高敬轩　水文地质工程地质. 2022, 49(1): 84-91

单轴压缩下红色砒砂岩水泥土的能量演化机制研究
Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression
耿凯强, 李晓丽　水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134-141

水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型
Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions
李安润, 邓辉, 王红娟, 郑瀚, 苟晓峰, 潘远阳　水文地质工程地质. 2021, 48(2): 106-113

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311040

刘翠, 李忠, 徐飞亚, 等. 考虑微裂纹力学行为的岩石单轴压缩损伤模型 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 104-112.
LIU Cui, LI Zhong, XU Feiya, et al. A compressive damage model for a rock considering the microcrack mechanical behavior[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 104-112.

考虑微裂纹力学行为的岩石单轴压缩损伤模型

刘　翠[1], 李　忠[1], 徐飞亚[1], 张　陌[2], 曹晓伟[3], 雷　恒[1,4]
（1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封　475004; 2. 江河安澜工程咨询有限公司, 河南 郑州　450000; 3. 昊鼎地基基础工程有限公司, 河南 郑州　450000; 4. 河南省巨型水网灾害防御工程技术研究中心, 河南 开封　475004）

摘要：针对目前岩石压缩损伤模型未能很好地同时考虑微裂纹滑移与扩展对岩石总变形的贡献、微裂纹复合扩展准则及岩石损伤程度对被激活裂纹数量影响等不足, 基于细观力学对微裂纹在单轴压缩荷载下的滑移及扩展机理展开研究。首先根据微裂纹滑移模型及能量平衡原理, 建立了岩石单轴压缩应力应变关系, 并认为微裂纹服从 Weibull 分布模型; 进而以应变能密度准则作为微裂隙扩展判据, 采用迭代法求解复合型断裂的翼裂纹扩展长度, 并获得用翼裂纹扩展长度表示的岩石损伤变量演化方程, 由此提出了一个新的岩石单轴压缩损伤模型, 并验证了其合理性; 最后, 采用参数敏感性分析研究了微裂纹长度及摩擦系数和岩石断裂韧度对岩石力学特性的影响。结果表明: 由本模型预测得到的岩石单轴压缩峰值强度与试验结果吻合较好, 说明了其合理性。同时发现随着微裂纹长度增加及其摩擦系数减小、岩石断裂韧度增加, 岩石单轴抗压峰值强度及峰值应变均随之减小。当微裂纹长度由 60 μm 增加到 120 μm 时, 岩石单轴抗压峰值强度近似线性降低; 而当微裂纹摩擦系数由 0.5 增加到 0.8 及岩石断裂韧度由 0.3 MPa·m$^{1/2}$ 增加到 0.6 MPa·m$^{1/2}$ 时, 岩石单轴抗压峰值强度均是先缓慢增加, 而后迅速增加。本研究为岩石压缩损伤本构模型的建立提供了一条新的思路, 具有重要的理论意义。

关键词：微裂纹; 滑移模型; 最小应变能密度准则; 单轴压缩; 损伤模型
中图分类号：TU443　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-3665(2024)06-0104-09

A compressive damage model for a rock considering the microcrack mechanical behavior

LIU Cui[1], LI Zhong[1], XU Feiya[1], ZHANG Mo[2], CAO Xiaowei[3], LEI Heng[1,4]
（1. *Yellow River Conservancy Technical Institute*, *Kaifeng*, *Henan*　475004, *China*; 2. *River Anlan Engineering Consultant Co. Ltd.*, *Zhengzhou*, *Henan*　450003, *China*; 3. *Haoding Foundation Engineering Co. Ltd.*, *Zhengzhou*, *Henan*　450008, *China*; 4. *Research Center of Disaster Prevention Engineering of Giant Water Network in Henan Province*, *Kaifeng*, *Henan*　475004, *China*）

Abstract: The contributions of the microcrack sliding and propagation to the rock total deformation, the mixed propagation criterion of the microcrack, and the influence of the rock damage degree on the number of the activated microcracks are not completely considered in the existing rock compressive damage model. Thus, the microcrack sliding and propagation mechanism under uniaxial compression was studied with the mesoscopic

收稿日期：2023-11-23；**修订日期：**2024-02-05　　**投稿网址：**www.swdzgcdz.com
基金项目：河南省自然科学基金项目(232300420337); 河南省 2023 年重大科技专项项目(231100320100); 河南省 2023 年水利科技攻关项目(GG202337)
第一作者：刘翠(1983—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事水文地质与工程地质方面的研究工作。E-mail: menghuan06111029@163.com

mechanics. Firstly, the uniaxial compression stress-strain relationship was developed according to the microcrack sliding model and energy balance which assumed the microcracks being Weibull distribution. Then the mixed fracture propagation length of the wing-crack was solved with the strain energy density criterion as the microcrack propagation criterion and iteration method. The damage evolution equation was obtained with the wing-crack propagation length. A new damage model for the rock under uniaxial compression was proposed and verified. Finally, the parametric sensitivity analysis was adopted to study the effects of the microcrack length, friction coefficient, and rock fracture toughness on the rock mechanical properties. The results show that the rock climax strength from the proposed model is consistent with the corresponding test result, indicating that the proposed model is reasonable. The uniaxial compression climax strength and strain both decrease with the increase of the microcrack length and the decrease of the microcrack friction coefficient. When the microcrack length increases from 60 μm to 120 μm, the uniaxial compression climax strength almost decreases linearly. When the microcrack friction coefficient increases from 0.5 to 0.8 and the rock fracture toughness increases from 0.3 MPa·m$^{1/2}$ to 0.6 MPa·m$^{1/2}$, the uniaxial compression climax strength increases slowly and then rapidly. This study provides new insight into the establishment of the rock damage constitutive model under compression.

Keywords: microcrack; the sliding model; the maximum strain energy density criterion; uniaxial compression; a damage model

微裂纹在外载下的起裂、扩展是导致岩石产生渐进损伤直至破坏的根本力学机制[1－2]。刘冬桥等[3]、封陈晨等[4]分别研究了单轴压缩下岩石的损伤演化规律及微结构演化; 孙钱程等[5]采用剪切试验研究了红砂岩的细观损伤特性; Meng 等[6]基于实时 CT 扫描试验研究了石灰岩的细观损伤特性。而彭志雄等[7]、李晓照等[8]分别从理论角度探究了基于微裂隙扩展的岩石损伤力学模型及损伤突变机理。尽管基于连续介质力学的宏观损伤力学已在岩石损伤模型研究中取得了显著进展, 但其主要是在热力学框架内, 通过引入关联及非关联的塑性流动法则, 从而建立相应的宏观唯象损伤本构方程[9－10]; 未能很好地反映微裂纹的闭合、摩擦滑移、扩展及相互作用等力学行为对岩石变形及破坏特征影响的细观现象, 因而难以揭示岩石破坏的内在力学机制[11－12]。

以细观基元(如微裂隙、微孔洞等)为研究对象的细观力学的出现、发展及应用为岩石损伤理论研究提供了有力工具并由此发展出了多种岩石细观损伤模型[7, 13－14]。Zhou 等[15]假定微裂纹服从随机分布, 并结合微裂纹在压缩荷载下的起裂及扩展准则, 提出了相应的岩石单轴压缩损伤模型; 但并未考虑压缩荷载下由于微裂纹起裂、扩展及摩擦滑动而产生的位移对岩石总变形的贡献。刘海峰等[13]基于滑移裂纹模型研究了微裂纹对混凝土弹性模量的影响规律, 进而建立了相应的混凝土冲击损伤细观本构模型; 但是该研究存在一个重要不足, 即: 其假定岩石在某一应变条件下被激活的微裂纹数目服从 Grady 等[16]提出的双参数 Weibull 分布模型, 即认为在某一条件下被激活的微裂纹数目仅与相应的应变有关, 而与此时的岩石损伤程度无关。

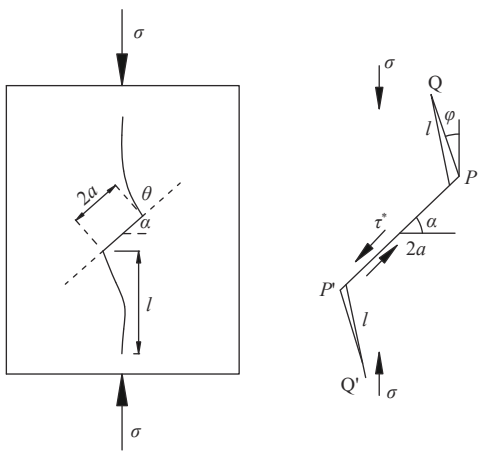
然而大量试验及数值模拟研究[17－19]均表明, 随着加载的进行, 岩石变形及破坏将出现局部化特征, 即其损伤和破坏将由最初的随机分布状态逐渐集中到某些局部区域, 与之相伴的是一些区域的裂纹将停止扩展, 而另一部分区域的裂纹将出现集中扩展, 此即为损伤局部化现象。由此可知随着加载进行, 当岩石变形达到一定程度时, 参与扩展的微裂纹数目将会受到岩石损伤程度的影响而逐渐减少。Rostásy 等[20]通过对循环冻融作用下岩石破坏特征的研究也发现了该规律, 即随着加载进行, 岩石微裂纹数目基本没有变化, 只是长度较长的微裂纹进一步扩展, 而长度较短的微裂纹则停止扩展, 呈现出明显的损伤局部化现象。刘红岩等[21]基于该方法对冻融循环下的隧道围岩冻胀力进行了计算, 并取得了很好的结果。周小平等[22]较早地研究了岩石损伤的局部化现象, 认为岩石压缩应力应变曲线产生应力降和应变软化是岩石产生损伤局部化的宏观表现。而损伤局部化的另一个结果就是导致损伤局部化区域以外的微裂纹基本停止扩展, 降低了微裂纹的扩展数量。Zhang 等[23]通过波速可视化监测技术研究了单轴压缩下岩石损伤的

局部化效应，从而研究了微裂纹的活动性，研究结果同样表明损伤局部化是岩石破坏的必经阶段。许江等[24]通过三维数字图像相关技术研究了三轴压缩下岩石的损伤演化特征，认为损伤局部化是产生宏观裂纹的必经阶段。由此可以看出，非常有必要考虑岩石在加载过程中，被激活的微裂纹数目变化对其压缩力学特性的影响。

综上，前人已从细观力学角度对岩石损伤本构模型展开了深入研究，但是其未能很好地考虑岩石在加载过程，微裂纹间的相互作用尤其是相互之间的抑制作用对其力学特性的影响，导致对受荷岩石中被激活的微裂纹数量的计算有误，使得理论模型计算结果与实测结果存在一定的误差。为此，本文重点针对这一问题，基于细观损伤断裂力学及微裂纹滑移模型，建立相应的岩石单轴压缩损伤模型，而后基于相关试验结果对该模型的合理性进行验证，最后采用参数敏感性分析对微裂纹长度、微裂纹面摩擦系数及岩石断裂韧度等对岩石力学特性的影响进行深入研究。

1 微裂纹滑移模型

图 1(a)为含一条微裂纹的岩石单元，针对该模型，Brace 等[25]首先提出了微裂纹滑移模型，而后又有不少学者对此进行了大量的研究工作[26－27]，压缩荷载下微裂纹起裂扩展的力学行为如图 1(b)所示。在压缩荷载下，微裂纹面首先闭合，而后在其上、下表面产生剪应力，并在微裂纹表面出现滑动趋势。由于微裂纹面闭合，作用在其上的摩擦力将阻止岩块滑移。当微裂纹面上的剪应力分量超过其摩擦力时，试件将沿微裂纹面发生摩擦滑移，进而将在微裂纹尖端产生应力集中。随着压缩荷载的持续增加，当微裂纹尖端 P、P'处的应力强度因子满足微裂纹起裂扩展准则时，则将在微裂纹尖端产生拉伸翼裂纹 Q、Q'，如图 1(b)所示。随着微裂纹的持续扩展，拉伸翼裂纹将逐渐趋于压缩荷载方向扩展，并最终导致岩石试件发生轴向劈裂破坏。



（a）含微裂纹的试件　　（b）微裂纹滑移模型

图 1　单轴压缩下含微裂纹的岩石试件

Fig. 1　Rock sample with the microcrack under uniaxial compression

注：$2a$、α、θ 分别为微裂纹长度、倾角和翼裂纹起裂角；φ 为拉伸翼裂纹的初始成核方向与最大压缩应力的夹角；l 为翼裂纹长度；τ*为微裂纹面上的有效剪应力；σ 为试件受到的正应力。

在单轴压缩下，微裂纹面上的正应力 σ_α 和剪应力 τ_α 分别为：

$$\sigma_\alpha = \sigma\cos^2\alpha \tag{1}$$

$$\tau_\alpha = \sigma\sin\alpha\cos\alpha \tag{2}$$

设微裂纹面摩擦角为 φ，相应的摩擦系数 f=tanφ。在单轴压缩下，微裂纹面上的切应力将使微裂纹产生滑移趋势，而相应地作用在微裂纹面上的正应力将产生阻止微裂纹发生滑移的摩擦力。由此可知当试件沿微裂纹面发生滑动时，相应地，微裂纹面上的有效剪应力 τ^* 应大于 0。因此由式(1)(2)可得微裂纹面上的滑移驱动力为：

$$\tau^* = \begin{cases} 0 & \tan\alpha \leqslant \tan\varphi \\ \tau_\alpha - f\sigma_\alpha & \tan\alpha > \tan\varphi \end{cases} \tag{3}$$

在单轴压缩荷载下，如图 1 所示的微裂纹尖端应力强度因子为[28]：

$$\begin{cases} K_{\mathrm{I}} = 2a\tau^*\cos\theta/\sqrt{\pi(l+l^*)} \\ K_{\mathrm{II}} = -2a\tau^*\sin\theta/\sqrt{\pi(l+l^*)} \end{cases} \tag{4}$$

式中：K_{I}——裂隙尖端Ⅰ型应力强度因子/(MPa·m$^{1/2}$)；

K_{II}——裂隙尖端Ⅱ型应力强度因子/(MPa·m$^{1/2}$)；

l——翼裂纹扩展长度/m；这里引入翼裂纹扩展虚拟长度 l^*(=0.27a)，使得 l=0 时，K_{I}、K_{II}非奇异。

2 应力应变关系

由能量平衡原理可知，荷载对弹性体所做的功(W_{I})等于裂纹扩展而释放的弹性应变能(U_{e})与由于裂纹面间的摩擦滑动而耗散的能量(W_{f})之和，即：

$$W_{\mathrm{I}} = U_{\mathrm{e}} + W_{\mathrm{f}} \tag{5}$$

如图 1(a)所示，设压应力作用下微裂纹产生的应变为 $\Delta\varepsilon_1$，那么由于泊松比效应，则微裂纹在垂直于压应力方向上也将出现微小应变值，设为 $\Delta\varepsilon_2$，则 σ 所做

的功为:

$$W_1 = 4bh\sigma\Delta\varepsilon_1 \tag{6}$$

式中: $2b$——含一个微裂纹的细观单元体宽度/m;

$2h$——含一个微裂纹的细观单元体高度/m;

$4bh$——细观单元体的面积/m^2。

在弹性范围内$\Delta\varepsilon_1$、$\Delta\varepsilon_2$与外加应力的线性关系可以写为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中: $[S_{ij}]$——单个微裂纹引起的柔度矩阵, $i(j)$=1,2。

根据对称性, S_{ij}=S_{ji}, 由式(6)(7)可得:

$$W_1 = 4bhS_{11}\sigma^2 \tag{8}$$

根据断裂力学, 由于微裂纹扩展而释放的弹性应变能为(对于平面应力问题)[29]:

$$U_e(l) = 2\int_0^l [(K_I^2 + K_{II}^2)/E]\,\mathrm{d}l \tag{9}$$

式中: E——岩石弹性模量/Pa。

将式(4)代入式(9)可得:

$$U_e(l) = \frac{8a^2}{\pi E}\left[(\tau^*)^2 \ln\left(1+\frac{l}{l^*}\right)\right] \tag{10}$$

在剪应力作用下, 若试件沿微裂纹面滑动距离为δ, 则由于摩擦滑移而消耗的能量为:

$$W_f = 2a\delta \cdot f\sigma_\theta \tag{11}$$

式中: σ_θ——翼裂纹面上的正应力/Pa。

假设不考虑微裂纹间距, 则滑动距离 δ 为[16]:

$$\delta = \frac{4\sqrt{2}a\tau^*}{E}\sqrt{\frac{l+l^{**}}{l+l^*}} \tag{12}$$

式中: l^{**}——虚拟长度/m, $l^{**} = 0.083a$。

将式(12)代入式(11)得:

$$W_f = \frac{4\sqrt{2}a^2 f}{E}\left(2\tau^*\sigma\cos^2\theta\sqrt{\frac{l+l^{**}}{l+l^*}}\right) \tag{13}$$

由式(5)(10)(13), 通过系数对比可得由单个裂纹引起的柔度张量分量 S_{11} 为:

$$S_{11} = \frac{A_1B_1 + A_2B_2}{E} \tag{14}$$

$$A_1 = \frac{4a^2}{\pi bh}(\sin\theta - f\cos\theta)^2\cos^2\theta \tag{15}$$

$$A_2 = \frac{2\sqrt{2}a^2 f}{bh}(\sin\theta - \mu\cos\theta)\cos^3\theta \tag{16}$$

式中: B_1、B_2——与拉伸型翼裂纹 l 有关的参量, $B_1 = \ln\left(1+\frac{l}{l^*}\right)$、$B_2 = \sqrt{\frac{l+l^{**}}{l+l^*}}$。

若假设岩石内的微裂纹密度为 N, 且所有微裂纹尺寸相等、平行均匀分布, 并忽略其相互作用, 则由于微裂纹扩展而引起的应变($\boldsymbol{\varepsilon}^d$)为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^d = N\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \end{bmatrix} \tag{17}$$

假设岩体应变为小应变, 那么总应变($\boldsymbol{\varepsilon}$)应为弹性应变($\boldsymbol{\varepsilon}^e$)(裂纹未扩展前)和由于微裂纹扩展引起的应变($\boldsymbol{\varepsilon}^d$)之和, 即:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^d \tag{18}$$

根据胡克定律, 应力$\boldsymbol{\sigma}$、弹性应变$\boldsymbol{\varepsilon}^e$应满足:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = \boldsymbol{D} : \boldsymbol{\sigma} \tag{19}$$

式中: $\boldsymbol{D}$——柔度张量。

对于平面应力问题, $\boldsymbol{D} = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \end{bmatrix}$, 其中$\nu$为岩石的泊松比。利用式(17)—(19), 则总应变为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1^e + \varepsilon_2^d \\ \varepsilon_2^e + \varepsilon_2^d \end{bmatrix} = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \end{bmatrix} + N\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \sigma \\ 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

式(20)是基于平面应力问题得到的, 对于平面应变问题, 只需将 E 换成 $E/(1-\nu^2)$, ν 换成 $\nu/(1-\nu^2)$即可。那么在单轴压缩荷载下, 并结合图 1(b), 设在压缩荷载作用方向上的应力、应变分别为σ和ε, 那么由式(20)可以得到其相应的应力应变关系为:

$$\varepsilon = \sigma/E + NS_{11}\sigma \tag{21}$$

把 S_{11} 代入式(21), 并通过转化可得:

$$\sigma = \frac{E}{\left[1 + NA_1\ln\left(1+\frac{l}{l^*}\right) + NA_2\sqrt{\frac{l+l^{**}}{l+l^*}}\right]}\varepsilon \tag{22}$$

引入岩石损伤变量 D 以描述微裂纹密度增加和微裂纹扩展对岩石弹性模量的弱化, 记弱化后的弹性模量为$\bar{E}$, 则:

$$\bar{E} = E(1-D) \tag{23}$$

$$D = \frac{NA_1\ln\left(1+\frac{l}{l^*}\right) + NA_2\sqrt{\frac{l+l^{**}}{l+l^*}}}{1 + NA_1\ln\left(1+\frac{l}{l^*}\right) + NA_2\sqrt{\frac{l+l^{**}}{l+l^*}}} \tag{24}$$

3　微裂纹扩展与成核

3.1　微裂纹扩展判据

在 Ashby 等[30]研究的基础上, Huang 等[31]、Rashidi 等[32]采用翼裂纹尖端的 K_I求解翼裂纹动态扩展长度, 并建立相应的岩石动态损伤模型。而研究表明翼

裂纹扩展为Ⅰ-Ⅱ复合型扩展[33]，为此这里采用应变能密度准则[32]计算翼裂纹扩展长度，即当翼裂纹应变能密度 S 大于最小应变能密度 S_c 时，微裂纹开始起裂扩展。

S 可用下式求解[32]：

$$S = a_{11}K_{\mathrm{I}}^2 + 2a_{12}K_{\mathrm{I}}K_{\mathrm{II}} + a_{22}K_{\mathrm{II}}^2 \tag{25}$$

其中，

$$a_{11} = \frac{1+\nu}{8\pi E}[(3-4\nu-\cos\theta_3)(1+\cos\theta_3)],$$

$$a_{12} = \frac{1+\nu}{8\pi E}(2\sin\theta_3)[\cos\theta_3-(1-2\nu)],$$

$$a_{22} = \frac{1+\nu}{8\pi E}\left[\begin{array}{l}4(1-\cos\theta_3)(1-\nu)+\\(1+\cos\theta_3)(3\cos\theta_3-1)\end{array}\right]。$$

当 $\theta_3=0$ 时，S 为翼裂纹方向的应变能密度。

S_c（也称断裂阈值）的计算公式为[33]：

$$S_c = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{2\pi E}K_{\mathrm{Ic}}^2 \tag{26}$$

式中：K_{Ic}——岩石静态断裂韧度。

某一时刻 t 下的翼裂纹长度 l_t 由下式计算：

$$\begin{cases} l_t = 0, & 当(S)_t \leqslant S_c \\ 令(S)_t=S_c，计算 l_t, & 当(S)_t > S_c \end{cases} \tag{27}$$

3.2 微裂纹的成核

Grady 等[16]在研究油页岩爆破问题时提出了一个微裂纹演化模型，其采用 Weibull 分布模型来描述被激活的微裂纹数目，即：

$$N_0 = k\varepsilon^m \tag{28}$$

式中：N_0——给定应变 ε 下单位体积内被激活的微裂纹数目；

k、m——描述材料破坏特性的参数。

在某一时步 n 时，设岩石损伤为 D_n，则考虑损伤时被激活的微裂纹数目 N 可表示为[16]：

$$N = (1-D_n)N_0 = (1-D_n)k\varepsilon^m \tag{29}$$

4 单轴压缩损伤模型及其验证

根据 Lemaitre 等效原理，岩石单轴压缩损伤模型可表示为：

$$\sigma = E(1-D)\varepsilon \tag{30}$$

模型计算流程为：

①首先取初始应力为 0，然后给定一个应力增量 $\Delta\sigma$，并由式(4)计算微裂纹尖端的应力强度因子，然后根据式(24)—(27)判断微裂纹是否扩展，如果不满足微裂纹扩展条件，则 N=0 及 l=0，然后由式(30)计算该应力增量 $\Delta\sigma$ 下相应的应变增量 $\Delta\varepsilon$。然后应力逐渐增加直至微裂纹开始扩展，设该时刻为 t_n，此时的应力、应变分别为 σ_n 和 ε_n。此阶段对应的是岩石中微裂纹未发生扩展前的线弹性阶段。

②设 t_{n+1} 时刻的应变增量为 $\Delta\varepsilon_{n+1}$、并由式(29)计算被激活的微裂纹数 N_n（此时取 D_n=0）并取微裂纹扩展长度 l_n=0，然后代入式(24)计算相应的损伤增量 ΔD_{n+1}，并由式(22)计算相应的应力增量 $\Delta\sigma_{n+1}$。

③把 t_{n+1} 时刻的损伤增量 ΔD_{n+1} 代入式(29)计算被激活的微裂纹数增量 ΔN_{n+1}，代入式(24)求得与损伤增量 ΔD_{n+1} 相对应的微裂纹扩展长度增量 Δl_{n+1}。

对②、③进行循环迭代求解，即可求得岩石在损伤阶段的应力应变曲线，然后再与由①求出的弹性阶段的应力应变曲线进行组合，即可得到完整的岩石压缩应力应变曲线。

下面采用 Zhou 等[15]的试验结果对该模型进行验证。试验所用岩石为取自四川省向家坝水电站建设场地的砂岩，岩石参数为：密度 2 600 kg/m^3、E=34 GPa、ν=0.3、K_{IC}=1.1 MPa·m$^{1/2}$。试件为高 100 mm、直径 50 mm 的标准圆柱形，单轴压缩试验曲线如图 2。利用该试验结果验证本文提出的岩石单轴压缩损伤模型，取相关参数为 k=5×10^{22} m^{-3}、m=7.1、2a=2×10^{-4} m、f=0.26、θ=45°。理论计算曲线如图 2，可以看出：

(1)理论曲线与试验结果十分吻合，尤其是在线弹性阶段。二者在峰值阶段附近有一定误差，理论及试验峰值强度分别为 131.03 MPa 和 137.68 MPa，后者约为前者的 95.17%，即误差很小。在峰值强度以后，二者曲线形状基本一致。

(2)根据本文提出的本构模型，岩石的弹性极限强度为 79.3 MPa，即当大于该抗压强度时，试件开始出现损伤；其峰值抗压强度为 131.03 MPa，即前者约为后者的 60.5%，许多学者通过研究认为试件的弹性极限强度约为其峰值强度的 30% ~ 70%[34]，这与前人的研究成果是一致的。

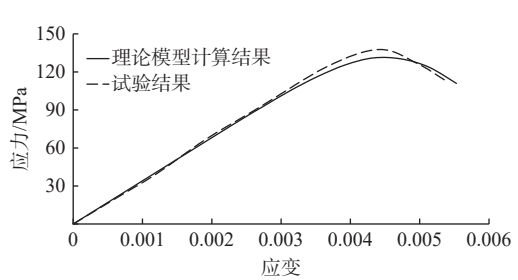


图 2 单轴压缩荷载下砂岩试验与计算曲线比较

Fig. 2 Comparison of experimental and simulated data for sandstone under uniaxial compression

5　损伤模型的参数敏感性分析

取岩石计算参数为: 密度 2 500 kg/m^3、E=40 GPa、ν=0.2, 计算模型如图 1(b), 试件形状及尺寸同前, 按照平面应力问题计算。关于微裂隙参数的取值, Huang 等[31]、杨艳等[35]、袁小平等[36]均给出了微裂隙长度、摩擦系数及岩石断裂韧度的取值范围, 参考上述研究成果, 取微裂隙参数为: θ=45°, 2a=60 μm, f=0.7, 微裂纹的 Weibull 函数特征参数 k=4×10^{23} m^{-3}、m=6.5, K_{IC}=0.4 MPa·m$^{1/2}$。那么在单轴压缩下岩石轴向应力、损伤与轴向应变曲线如图 3。可以看出, 当外力较小时, 微裂纹不会发生扩展, 此时应力应变曲线为线性, 试件损伤为 0, 即没有新损伤产生。而当外力超过岩石弹性极限后, 微裂纹开始扩展, 试件开始产生新的损伤, 但此时微裂纹属于稳定扩展, 即若使微裂纹持续扩展, 仍需要施加外力, 应力应变曲线仍呈上升趋势。当试件达到峰值强度时, 对应的损伤约为 0.2, 当达到应力峰值后, 试件应力开始下降, 损伤随应变快速增加, 微裂纹将汇聚形成宏观裂纹, 最终导致岩石破坏, 这与相应的试验结果是一致的[3−4, 19, 31]。

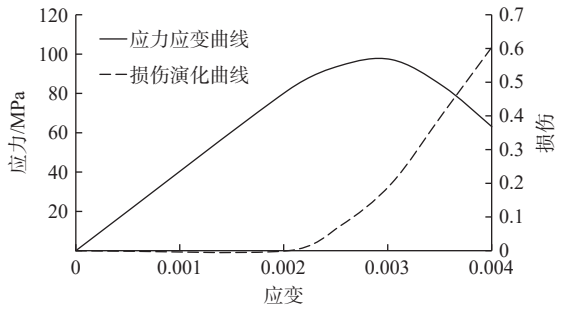


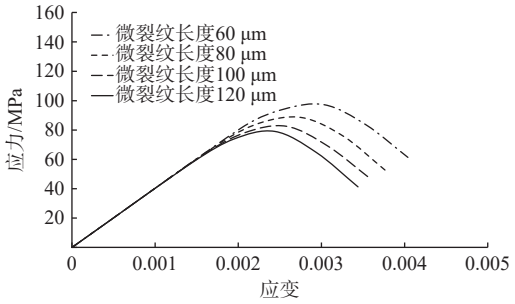
图 3　单轴压缩下轴向应力、损伤与轴向应变曲线

Fig. 3　Relationship between the axial stress, damage, and axial strain under uniaxial compression

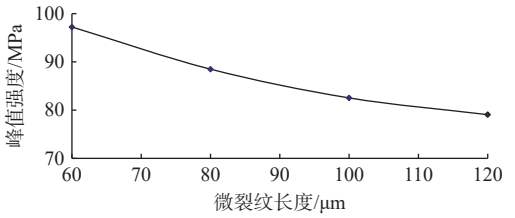
下面就以该模型为例, 研究微裂纹长度和摩擦系数及岩石断裂韧度等对岩石单轴压缩力学特性的影响。

(1)微裂纹长度的影响

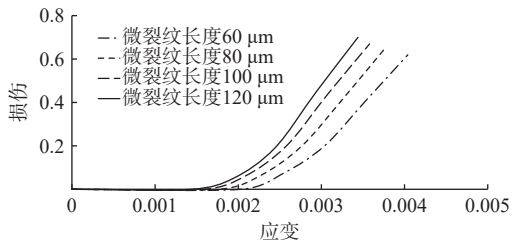
取微裂纹长度(2a)分别为 60, 80, 100, 120 μm, 其他参数同上, 那么岩石单轴压缩应力应变曲线随微裂纹长度变化曲线如图 4。总体来看, 随着微裂纹长度增加, 试件单轴抗压峰值强度近似线性降低, 同时试件峰值应变也逐渐减小。这是因为在同样的外荷载下, 随着微裂纹长度增加, 裂纹尖端应力强度因子逐渐增加, 而在断裂韧度不变的条件下, 微裂纹扩展所需外力则应有所降低。因此试件峰值强度和损伤变量随着微裂纹长度增加分别呈现降低和增加的趋势。



(a) 不同微裂纹长度时试件应力应变曲线



(b) 峰值强度随微裂纹长度变化



(c) 损伤演化随微裂纹长度变化

图 4　不同微裂纹长度时试件力学特性

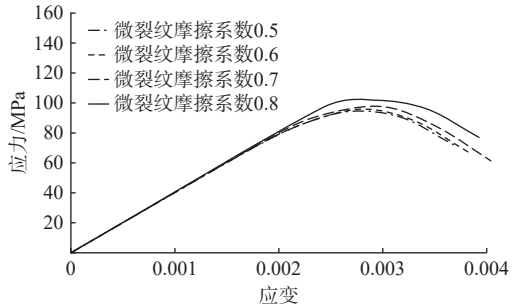
Fig. 4　Mechanical property of samples with different microcrack length

(2)微裂纹摩擦系数的影响

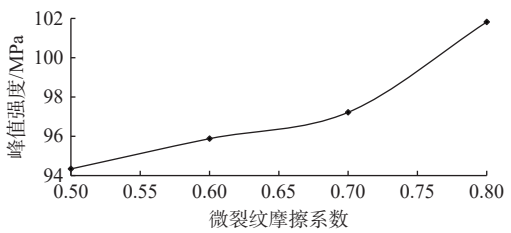
取微裂纹摩擦系数(f)分别为 0.5、0.6、0.7 和 0.8, 其他参数同上, 那么岩石单轴压缩应力应变曲线随微裂纹摩擦系数变化曲线如图 5。总体来看, 随着微裂纹摩擦系数增加, 试件单轴抗压峰值强度增加, 但其增加幅度有所不同。当微裂纹摩擦系数为 0.5 ~ 0.7 时, 试件峰值强度增加较少, 近似线性增加; 而当微裂纹摩擦系数为 0.7 ~ 0.8 时, 试件峰值强度迅速增加。这是因为随着微裂纹摩擦系数增加, 微裂纹抵抗滑移的能力增加, 进而试件抵抗破坏的能力也随之增加, 并最终导致试件峰值抗压强度的提高。同时由图 5(c)还可以看出, 随着微裂纹摩擦系数增加, 损伤开始出现时对应的应变也有明显增加, 这说明随着微裂纹摩擦系数增加, 试件抵抗破坏的能力呈现非线性增加。

(3)岩石断裂韧度的影响

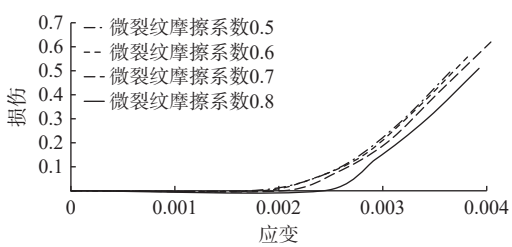
取微岩石断裂韧度(K_{IC})分别为 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa·m$^{1/2}$, 其他参数同上, 那么岩石单轴压缩应力应变曲线随岩石断裂韧度的变化曲线如图 6。总体来



（a）微裂纹摩擦系数不同时试件应力应变曲线



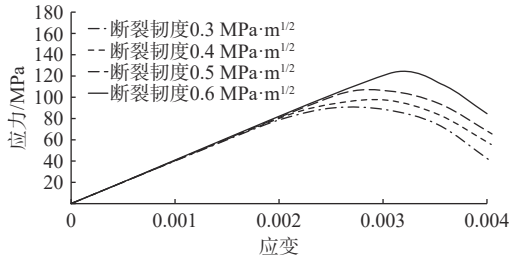
（b）峰值强度随微裂纹摩擦系数变化



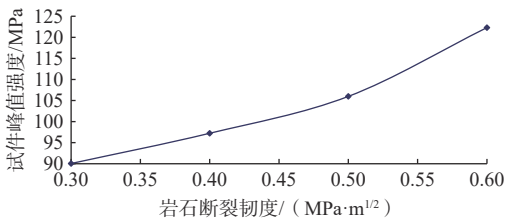
（c）损伤演化随微裂纹摩擦系数变化

图 5　不同微裂纹摩擦系数时试件力学特性

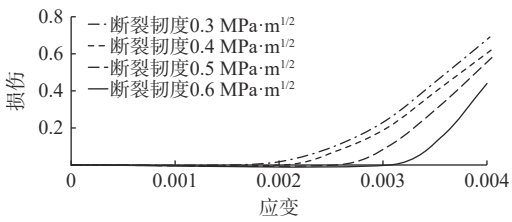
Fig. 5　Mechanical property of samples with different microcrack friction coefficient



（a）不同岩石断裂韧度时试件应力应变曲线



（b）峰值强度随微岩石断裂韧度变化



（c）损伤演化随岩石断裂韧度变化

图 6　不同岩石断裂韧度时试件力学特性

Fig. 6　Mechanical property of samples with different rock fracture toughness

看，随着岩石断裂韧度增加，试件单轴抗压峰值强度增加，但是其增加幅度有所不同。当岩石断裂韧度为 0.3 ~ 0.5 时，试件峰值强度增加较少，近似线性增加；而当微裂纹摩擦系数为 0.6 时，试件峰值强度迅速增加。这是因为随着岩石断裂韧度增加，微裂纹抵抗起裂的能力增加，进而试件抗压强度也随之提高，并最终导致试件峰值抗压强度提高。同时由图 6(c)还可以看出，随着岩石断裂韧度增加，损伤开始出现时对应的应变也有明显增加，这说明随着岩石断裂韧度增加，试件抵抗破坏的能力呈现非线性增加。

6　结论

（1）通过综合考虑微裂纹滑移及扩展对岩石总变形的贡献、微裂纹复合扩展准则及岩石损伤程度对被激活裂纹数目的影响等关键问题，提出了一个新的岩石损伤本构模型，其能更好地反映岩石破坏是由于微裂纹的滑移与扩展而引起。

（2）参数敏感性分析结果表明随着微裂纹长度增加及摩擦系数减小，岩石单轴抗压强度及峰值应变均随之减小。当微裂纹长度为 60 ~ 120 μm 时，单轴抗压强度近似线性降低；而当微裂纹摩擦系数由 0.5 逐渐增加到 0.8 及岩石断裂韧性由 0.3 MPa·m$^{1/2}$ 增加到 0.6 MPa·m$^{1/2}$ 时，岩石单轴抗压峰值强度均先缓慢增加，而后迅速增加，这说明微裂纹摩擦系数及岩石断裂韧性对试件峰值强度均有较大影响，且其影响程度呈现非线性特征。

（3）研究结果表明岩石宏观力学特性是其细观力学参数的宏观体现，因此从细观角度建立的岩石损伤本构模型则更能揭示其变形破坏机理，具有很好的应用前景。

参考文献（References）：

[1] 邓志颖，范祥，何忠明，等. L 形边裂隙单圆孔砂岩单轴压缩力学特性 [J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2023, 53(2)：541 − 554. [DENG Zhiying, FAN Xiang, HE Zhongming, et al. Uniaxial compressive mechanical properties of sandstone with single circular hole and L-shaped side fissures[J]. Journal of Jilin University (Earth

Science Edition), 2023, 53(2): 541 − 554. (in Chinese with English abstract)]

[2] 裂隙岩体循环冻融变形特征及影响因素分析[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 205 − 215. [CUI Shenghua, YANG Qingwen, RUI Xuelian, et al. Effect factors analysis and characteristic of freeze-thaw deformation of fracture rock[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(6): 205 − 215. (in Chinese with English abstract)]

[3] 刘冬桥, 郭允朋, 李杰宇, 等. 单轴压缩下脆性岩石损伤破坏能量演化规律试验研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 843 − 853. [LIU Dongqiao, GUO Yunpeng, LI Jieyu, et al. Experimental study on damage and failure energy evolution of brittle rocks under uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3): 843 − 853. (in Chinese with English abstract)]

[4] 封陈晨, 李傲, 王志亮, 等. 锦屏大理岩单轴压缩过程中的微结构演化[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 90 − 96. [FENG Chenchen, LI Ao, WANG Zhiliang, et al. A study of mineral compositions and micro-structure characteristics for the Jinping marble[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 90 − 96. (in Chinese with English abstract)]

[5] 孙钱程, 徐晓, 丰光亮, 等. 长时浸泡红砂岩加/卸荷条件下的剪切特性及细观损伤机理[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 77 − 89. [SUN Qiancheng, XU Xiao, FENG Guangliang, et al. Shear characteristics and mesoscopic damage mechanism of long time soaking red sandstone under loading and unloading conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 77 − 89.(in Chinese with English abstract)]

[6] MENG Qingshan, WU Kai, ZHOU Haoran, et al. Mesoscopic damage evolution of coral reef limestone based on real-time CT scanning[J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106781.

[7] 彭志雄, 曾亚武. 基于裂纹扩展作用下的岩石损伤力学模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(12): 1784 − 1791. [PENG Zhixiong, ZENG Yawu. Microcrack propagation-based damage mechanics model of rock[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(12): 1784 − 1791. (in Chinese with English abstract)]

[8] 李晓照, 戚承志, 邵珠山. 脆性岩石局部细观裂纹成核损伤突变机理研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(4): 480 − 492. [LI Xiaozhao, QI Chengzhi, SHAO Zhushan. Research on mechanisms of the damage catastrophe from localized microcrack nucleation in brittle rocks[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(4): 480 − 492. (in Chinese with English abstract)]

[9] HUANG Shuling, ZHANG Chuanqing, DING Xiuli. Hardening–softening constitutive model of hard brittle rocks considering dilatant effects and safety evaluation index[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2020, 33(1): 121 − 140.

[10] 赵越, 司运航, 张译丹, 等. 水化-冻融耦合条件下大理岩蠕变损伤本构模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 231 − 241. [ZHAO Yue, SI Yunhang, ZHANG Yidan, et al. Creep damage constitutive model of marble under hydration freeze-thaw coupling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1): 231 − 241. (in Chinese with English abstract)]

[11] HUANG Jingqi, ZHAO Mi, DU Xiuli, et al. An elasto-plastic damage model for rocks based on a new nonlinear strength criterion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(5): 1413 − 1429.

[12] BARYAKH A A, TSAYUKOV A A, EVSEEV A V, et al. Mathematical modeling of deformation and failure of salt rock samples[J]. Journal of Mining Science, 2021, 57(3): 370 − 379.

[13] 刘海峰, 宁建国. 冲击荷载作用下混凝土材料的细观本构模型[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(3): 261 − 267. [LIU Haifeng, NING Jianguo. A meso-mechanical constitutive model of concrete subjected to impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(3): 261 − 267. (in Chinese with English abstract)]

[14] 张向东, 王浩, 敬鹏飞. 基于岩石“等效损伤”探究宏观断裂规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 117 − 125. [ZHANG Xiangdong, WANG Hao, JING Pengfei. Studying the macroscopic fracture rule based on rock “equivalent damage”[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 117 − 125. (in Chinese with English abstract)]

[15] ZHOU H, JIA Y, SHAO J F. A unified elastic–plastic and viscoplastic damage model for quasi-brittle rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1237 − 1251.

[16] 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.

[17] PEI Xiangjun, CUI Shenghua, ZHU Ling, et al. Quantitative investigation on localized deformation process of rocks by uniaxial test and digital image correlation[J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(11): 267.

[18] WANG Susheng, ZHAO Lunyang, ZHANG Wanlu. An enhanced constitutive model for quasi-brittle rocks with localized damage[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(11): 5223 − 5238.

[19] 赵程, 鲍冲, 田加深, 等. 基于应变局部化的双裂纹岩样贯通模式及强度试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2309 − 2318. [ZHAO Cheng, BAO Chong, TIAN Jiashen, et al. Experimental study of coalescence mode of cracks and strength of rock with double flaws based on strain localization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2309 − 2318. (in Chinese with English abstract)]

[20] ROSTÁSY F S, WEIB R, WIEDEMANN G. Changes of pore structure of cement mortars due to temperature[J]. Cement and Concrete Research, 1980, 10(2): 157 − 164.

[21] 刘红岩, 赵雨霞. 冻融循环下隧道围岩冻胀力理论计算 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 1049 − 1058. [LIU Hongyan, ZHAO Yuxia. Theoretical calculation of frost heaving pressure in tunnel surrounding rock during freeze-thaw cycles[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(4): 1049 − 1058. (in Chinese with English abstract)]

[22] 周小平, 张永兴, 哈秋聆, 等. 压应力状态下细观非均匀性岩石的损伤局部化和应力应变关系分析 [J]. 应用数学和力学, 2004, 25(9): 951 − 957. [ZHOU Xiaoping, ZHANG Yongxing, HA Qiuling, et al. Analysis of the localization of damage and the complete stress-strain relation for mesoscopic heterogeneous rock under uniaxial tensile loading[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2004, 25(9): 951 − 957. (in Chinese with English abstract)]

[23] ZHANG Yanbo, YAO Xulong, LIANG Peng, et al. Fracture evolution and localization effect of damage in rock based on wave velocity imaging technology[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(9): 2752 − 2769.

[24] 许江, 王晓震, 张倩文, 等. 不同含水状态凝灰岩损伤演化试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(6): 1189 − 1197. [XU Jiang, WANG Xiaozhen, ZHANG Qianwen, et al. Experimental study on damage evolution of tuff under different moisture states[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(6): 1189 − 1197. (in Chinese with English abstract)]

[25] BRACE W F, BOMBOLAKIS E G. A note on brittle crack growth in compression[J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(12): 3709 − 3713.

[26] LIU Taoying, CAO Ping, LIN Hang. Damage and fracture evolution of hydraulic fracturing in compression-shear rock cracks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2014, 74: 55 − 63.

[27] LI Zhihao, XIONG Ziming, CHEN Haoxiang, et al. Analysis of stress-strain relationship of brittle rock containing microcracks under water pressure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 1909 − 1918.

[28] NEMAT-NASSER S, OBATA M. A microcrack model of dilatancy in brittle materials[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55(1): 24.

[29] LIU H Y, SU T M. A dynamic damage constitutive model for a rock mass with non-persistent joints under uniaxial compression[J]. Mechanics Research Communications, 2016, 77: 12 − 20.

[30] ASHBY M F, HALLAM (NÉE COOKSLEY) S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. Acta Metallurgica, 1986, 34(3): 497 − 510.

[31] HUANG Chengyi, 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.

[32] RASHIDI M M, AYATOLLAHI M R, BERTO F. Mixed mode fracture analysis using generalized averaged strain energy density criterion for linear elastic materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 120: 137 − 145.

[33] SIH G C. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems[J]. International Journal of Fracture, 1974, 10(3): 305 − 321.

[34] 李文洲, 司林坡, 卢志国, 等. 煤单轴压缩起裂强度确定及其关键因素影响分析 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊 2): 670 − 680. [LI Wenzhou, SI Linpo, LU Zhiguo, et al. Determination of coal cracking initiation strength under uniaxial compression and analysis of its key factors[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Sup 2): 670 − 680. (in Chinese with English abstract)]

[35] 杨艳, 赵莹, 刘红岩. 单轴压缩下岩石动态细观损伤本构模型 [J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(4): 72 − 79. [YANG Yan, ZHAO Ying, LIU Hongyan. A dynamic microscopic damage constitutive model for rocks under uniaxial compression[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(4): 72 − 79. (in Chinese with English abstract)]

[36] 袁小平, 刘红岩, 王志乔. 考虑微裂纹相互作用的岩石细观力学弹塑性损伤模型研究 [J]. 固体力学学报, 2012, 33(6): 592 − 602. [YUAN Xiaoping, LIU Hongyan, WANG Zhiqiao. An interacting crack-mechanics based model for elastoplastic damage model of brittle materials under compression[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2012, 33(6): 592 − 602. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 刘真真