

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0078

基于裂纹扩展脆性岩石动力压缩力学特性研究*

李晓照^{1,2}, 戚承志^{1,2}

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044;

2. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要: 动态压缩荷载作用下, 脆性岩石内部动态细观裂纹扩展特性, 对岩石宏观动态力学特性有着重要的影响。然而, 对岩石内部动态细观裂纹扩展与宏观动态力学特性的关系研究较少。基于准静态裂纹扩展作用下的应力-应变本构模型、准静态与动态裂纹扩展断裂韧度关系、裂纹速率与应变率关系模型及应变率与动态断裂韧度关系, 提出了一种基于细观力学的动态应力-应变本构模型。其中裂纹速率与应变率关系, 是根据裂纹长度与应变率的时间导数推出; 应变率与动态断裂韧度关系, 是根据推出的裂纹速率及应变率关系, 与裂纹速率及断裂韧度关系相结合而得到。研究了应变率对应力-应变本构关系及动态压缩强度影响。并通过试验结果验证了模型的合理性。讨论了岩石初始损伤、围压、模型中参数 m 、 ε_0 和 R 对应力-应变关系、动态压缩强度和动态弹性模量的影响。研究结果可为动态压缩荷载作用下深部地下工程脆性围岩稳定性分析提供了一定的理论支持。

关键词: 脆性岩石; 宏-细观模型; 应变率; 动态本构关系; 动态弹性模量

中图分类号: O383; TU452

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

动力压缩荷载作用脆性岩石力学特性的研究, 对于深部地下工程围岩受到地震、冲击及爆炸荷载作用下的稳定性分析有着重要的意义。关于应变率对岩石力学特性影响的研究, 对于岩石动态力学性能分析有着重要价值。众多学者, 通过开展霍布金森杆动力试验, 研究了不同应变率下岩石的应力-应变本构曲线、岩石动态强度、动态破坏形态等特性^[1-4]。也有学者研究了在恒定轴压与围压作用下, 岩石承受循环重复冲击荷载作用下的力学性能^[5-7]。

在这些试验研究的基础上, 许多理论模型被提出。曹文贵等^[8]通过将非线性动态强度准则与统计损伤理论相结合, 建立岩石动态统计损伤本构模型, 并根据试验结果确定模型参数, 计算分析了高应变率对岩石动态本构关系的影响。李夕兵等^[9-10]将统计损伤模型和黏弹性模型相结合, 提出了中应变率作用下岩石动载本构模型, 并分析了重复冲击荷载作用下岩石的动力特性。谢理想等^[11]基于岩石动态强度理论模型、连续损伤理论及 Bingham 模型, 蔡灿等^[12]基于 Maxwell 模型、Bingham 模型及孔隙度损伤模型分别建立了不同组合模型, 研究了岩石应变率相关的应力应变本构关系。戚承志等^[13-14]基于热活化机制与宏观黏性机制, 研究了应变率与岩石强度之间关系, 并分析了动态荷载作用下岩石破坏块度分布物理机理。赵坚等^[15]、马林建等^[16]基于动态试验结果并结合摩尔库伦及霍克布朗强度准则, 提出了应变率相关的动态强度准则。宫凤强等^[17]基于岩石从低到高应变率范围内的率效应试验结果, 建立了一种基于率效应动态增强因子统一模型, 探讨了应变率对压缩强度、切线模量和峰值应变的影响。以上均是通过宏观现象研究了岩石动态变化特性, 无法解释动态荷载作用下, 岩石内部细观裂纹机理变化特性。

岑夺丰等^[18]通过细观颗粒平行黏结模型的模拟, 研究了高应变率压缩作用, 单裂隙岩样的损伤演化及细观位移场, 结果表明不同高应变率对岩样最终破裂形态影响不大, 但随应变率的增大, 细观裂纹越多且局部化程度越强。潘红宇等^[19]通过用数字图像处理技术, 分析了不同应变率下单轴压缩下岩石表

* 收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51708016, 51774018); 国家重点基础研究发展计划(2015CB0578005);
北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项(X19006, X19013)

第一作者: 李晓照(1987—), 男, 博士, 讲师, lixiaozhao@bucea.edu.cn。

面裂隙扩展下的应变场变化特征,然而该研究只是分析准静态压缩荷载作用下的裂纹特性,没有研究动态荷载下岩石裂纹扩展特性。刘红岩等^[20]将基于岩石动态损伤 TCK 模型与基于断裂损伤理论推出的节理岩体损伤本构模型相结合,提出了一个考虑裂纹节理几何特性的岩体动态损伤本构模型。

然而对能够建立脆性岩石内部细观动态裂纹扩展与宏观动态应力-应变本构关系的理论模型研究较少。本文中,将准静态压缩荷载作用下裂纹扩展诱发的应力应变本构关系模型、基于裂纹与应变关系得到的裂纹速率与应变率关系及裂纹速率与断裂韧度关系相结合,提出了一个基于细观裂纹扩展作用下的动态应力应变本构关系模型,并讨论岩石应变率、初始损伤、围压及模型参数对应力应变关系曲线的影响。

1 理论模型

1.1 准静态裂纹扩展应力-应变关系

本文中提出了一个动态压缩荷载作用下,基于岩石内部裂纹扩展诱发的应力-应变本构关系模型(见图 1),模型中各项参数详见下面关于模型理论公式的叙述。该模型是由准静态作用下裂纹扩展模型,与动态裂纹扩展与准静态裂纹扩展关系,及新建立的裂纹扩展速率与应变率关系相结合而提出的。在该模型中,当不考虑动态裂纹扩展作用时,模型内部准静态裂纹扩展与承受应力状态(轴向应力 σ_1 、围压 σ_3)之间的关系可以表示为^[21]:

$$\sigma_1(l) = \frac{\sigma_3(c_3 + A_2(c_1 + c_2)) - K_{IC}^{(0)} / \sqrt{\pi a}}{A_1(c_1 + c_2)} \quad (1)$$

$$c_1 = \pi^{-2}(l/a + \beta)^{-3/2} \quad (2)$$

$$c_2 = 2(\pi\gamma)^{-2}(l/a)^{1/2} \left[D_0^{-2/3} - (1 + l/(\gamma a))^2 \right] \quad (3)$$

$$c_3 = 2\pi^{-1}(l/a)^{1/2} \quad (4)$$

$$A_1 = \pi \sqrt{\frac{\beta}{3}} (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \quad (5)$$

$$A_2 = A_1 (\sqrt{1 + \mu^2} + \mu) / (\sqrt{1 + \mu^2} - \mu) \quad (6)$$

式中: $K_{IC}^{(0)}$ 为准静态断裂韧度, β 为修正因子, a 为初始微裂纹的半径, l 为翼型裂纹长度, μ 为初始微裂纹间的摩擦因数; $\gamma = \cos\phi$, ϕ 为初始裂纹与最大主应力 σ_1 方向的夹角。初始损伤 $D_0 = 4\pi N_v(\gamma a)^3/3$, N_v 为岩石单位体积的微裂纹数量。相邻翼型裂纹贯通时极限裂纹长度 $l_{lim} = \gamma a (D_0^{-1/3} - 1)$ 。此外,图 1 中 F_w 与 $\sigma_3^{(0)}$ 分别为作用在初始裂纹与翼型裂纹之间的楔力与内应力,这两个参数对于分析裂纹间相互作用有重要意义;参数 σ_n 与 τ 分别为作用于初始裂纹面上的法向应力与剪切应力。

此外,低围压脆性岩石宏观轴向应变 ε_1 与细观裂纹扩展长度 l 间的关系可表示为^[22]:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \left[-\ln(1 - (l/(\gamma a) + 1)^3 D_0) \right]^{1/m} \quad (7)$$

式中: m 、 ε_0 分别为材料常数。

将式 (7) 代入式 (1), 裂纹扩展下(即 $l > 0$), 岩石准静态应力-应变本构关系可表示为^[22]:

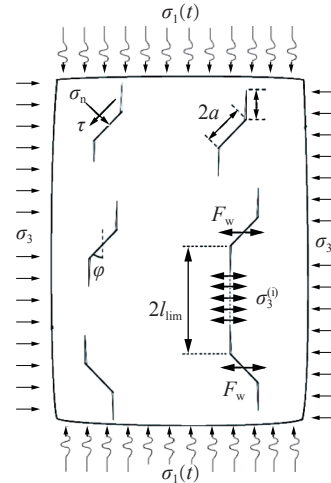


图 1 动态压缩荷载作用下的裂纹扩展模型
Fig. 1 Crack growth model under dynamic compressive loadings

$$\sigma_1(\varepsilon_1) = \frac{\sigma_3[J_3 + A_2(J_1 + J_2)] - K_{IC}^{(q)} / \sqrt{\pi a}}{A_1(J_1 + J_2)} \quad (8)$$

式中:

$$J_1 = \pi^{-2}(\gamma J_4 + \beta)^{-3/2} \quad (9)$$

$$J_2 = 2\pi^{-2}\gamma^{-3/2}J_4^{1/2}/[D_0^{-2/3} - (J_4 + 1)^2] \quad (10)$$

$$J_3 = 2(\gamma J_4)^{1/2}/\pi \quad (11)$$

$$J_4 = D_0^{-1/3}(1 - 1/e^{\varepsilon_1 m})^{1/3} - 1 \quad (12)$$

此外, 当裂纹长度 $l=0$ 时, 基于式(1)和(7), 岩石轴向起裂应力 σ_{1c} 和裂纹起裂应变 ε_{1c} 可以分别表示为:

$$\sigma_{1c} = A_1^{-1}[\sigma_3 A_2 - K_{IC}^{(q)} a^{-1/2}(\pi\beta)^{3/2}] \quad (13)$$

$$\varepsilon_{1c} = \varepsilon_0[-\ln(1-D_0)]^{1/m} \quad (14)$$

假设岩石内部裂纹扩展前(即 $0 < \varepsilon_1 < \varepsilon_{1c}$), 岩石服从线弹性变形, 则应力-应变关系可表示为:

$$\sigma_1(\varepsilon_1) = \frac{\sigma_{1c}}{\varepsilon_{1c}} \varepsilon_1 = \left[\frac{\sigma_3 A_2 - K_{IC}^{(q)} a^{-1/2}(\pi\beta)^{3/2}}{\varepsilon_0(-\ln(1-D_0))^{1/m} A_1} \right] \varepsilon_1 \quad (15)$$

因此, 综上所述, 准静态荷载作用下, 岩石完整的应力-应变本构关系可以表示为:

$$\sigma_1(\varepsilon_1) = \begin{cases} \left[\frac{\sigma_3 A_2 - K_{IC}^{(q)} a^{-1/2}(\pi\beta)^{3/2}}{\varepsilon_0(-\ln(1-D_0))^{1/m} A_1} \right] \varepsilon_1 & 0 < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1c} \\ \frac{\sigma_3[J_3 + A_2(J_1 + J_2)] - K_{IC}^{(q)} / \sqrt{\pi a}}{A_1(J_1 + J_2)} & \varepsilon_1 > \varepsilon_{1c} \end{cases} \quad (16)$$

将裂纹极限长度 l_{lim} 代入式(7), 岩石极限轴向应变 ε_{1f} 可以表示为:

$$\varepsilon_{1f} = \varepsilon_0[-\ln(1 - (l_{lim}/(\gamma a) + 1)^3 D_0)]^{1/m} \quad (17)$$

该极限应变对岩石失效应变提供一定参考。

1.2 准静态裂纹扩展与动态裂纹扩展的关系

此外, 岩石动态断裂韧度 $K_{IC}^{(d)}$ 与准静态断裂韧度 $K_{IC}^{(q)}$ 之间关系可以表示为^[24]:

$$K_{IC}^{(d)} = K_{IC}^{(q)} \frac{1 + (v_l/v_m)^5}{\sqrt{1 - v_l/c_p}} \quad (18)$$

式中: v_l 为裂纹速度(即 dl/dt), v_m 为裂纹分叉速度, $v_m = R c_R$, 该速度随着材料柔度增加而减小, 瑞利波速 $c_R = [E/(2\rho(1+\nu))]^{1/2}(0.87+1.12\nu)/(1+\nu)$, c_p 为 P 波速度, $c_p = [(1-\nu)E/((1+\nu)(1-2\nu)\rho)]^{1/2}$, 式中 ν 为泊松比, ρ 为材料密度, E 为弹性模量, R 是材料常数($0 < R < 1$)。

基于式(7)可以解出裂纹扩展长度表达式为:

$$l = \gamma a \left[D_0^{-1/3} \left(1 - e^{-(\varepsilon_1/\varepsilon_0)^m} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (19)$$

对式(19)裂纹长度求时间导数, 则可以推出岩石内部细观裂纹速率 v_l 为:

$$v_l(\varepsilon_1) = \frac{\dot{\varepsilon}_1 a m \gamma (\varepsilon_1/\varepsilon_0)^m}{3\varepsilon_1 D_0^{1/3} e^{(\varepsilon_1/\varepsilon_0)^m/3} [(e^{(\varepsilon_1/\varepsilon_0)^m} - 1)]^{2/3}} \quad \varepsilon_1 > \varepsilon_{1c} \quad (20)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_1$ 为轴向应变率。

将式(20)代入式(18), 则可以建立动态断裂韧度与宏观轴向应变率之间关系:

$$K_{IC}^{(d)} = K_{IC}^{(q)} \frac{1 + (P_1/(v_m P_2))^5}{\sqrt{1 - P_1/(c_p P_2)}} \quad (21)$$

式中:

$$P_1 = \dot{\varepsilon}_1 \gamma a m (\varepsilon_1 / \varepsilon_0)^m \tag{22}$$

$$P_2 = 3 \varepsilon_1 D_0^{1/3} e^{(\varepsilon_1 / \varepsilon_0)^m / 3} \left[\left(e^{(\varepsilon_1 / \varepsilon_0)^m} - 1 \right) \right]^{2/3} \tag{23}$$

1.3 动态裂纹扩展下的应力-应变关系

将式(21)得到的动态断裂韧性 $K_{IC}^{(d)}$ 替换式(16)中准静态断裂韧性 $K_{IC}^{(q)}$, 则动态荷载作用下, 岩石的完整应力-应变本构关系可以表示为:

$$\sigma_1(\varepsilon_1, \dot{\varepsilon}_1) = \begin{cases} E^{(d)} \varepsilon_1 = \left[\frac{\sigma_3 A_2 - Q K_{IC}^{(q)} a^{-1/2} (\pi \beta)^{3/2}}{\varepsilon_0 (-\ln(1-D_0))^{1/m} A_1} \right] \varepsilon_1 & 0 < \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1c} \\ \frac{\sigma_3 [J_3 + A_2 (J_1 + J_2)] - Q K_{IC}^{(q)} / \sqrt{\pi a}}{A_1 (J_1 + J_2)} & \varepsilon_1 > \varepsilon_{1c} \end{cases} \tag{24}$$

$$Q = \frac{1 + [P_1 / (v_m P_2)]^5}{\sqrt{1 - P_1 / (c_p P_2)}} \tag{25}$$

式(24)中 $E^{(d)}$ 为动弹性模量, 下面将对模型参数对动弹性模量影响进行详细讨论。此外, 值得注意的是在动弹性模量 $E^{(d)}$ 的方程计算中, 参数 Q 中的轴向应变 ε_1 应取值为 ε_{1c} 。

2 结果与讨论

2.1 动态应力-应变关系理论结果合理性验证

根据以上提出的基于细观力学的动态应力-应变本构模型, 下面将对模型合理性通过试验结果进行验证。模型中参数准静态断裂韧性 $K_{IC}^{(q)}$ 、弹性模量 E 、泊松比 ν 、密度 ρ 均可通过常规物理或力学试验获取; 参数摩擦系数 μ 、初始裂纹尺寸 a 可通过参考裂纹初始应力与围压关系获得, 具体方法可参考文献 [21-22]; 参数 β 为常数; 初始损伤 D_0 可基于电镜扫描或 CT 扫描试验结果近似确定; 参数 m 、 ε_0 、 R 可通过动态应力应变试验曲线形态与失效应变值近似确定; 裂纹角度 ϕ 一般假设为 45° , 此时为岩石失效时起主导作用的裂纹角度, 也可根据理论与试验结果进行对比分析, 进行适当调整。下面对于大理岩和花岗岩具体参数选取分别为: (1) 大理岩: $\mu=0.51$, $a=3.3$ mm, $\phi=53^\circ$, $\beta=0.32$, $E=30$ GPa, $D_0=0.053$, $\nu=0.25$, $\rho=2\ 500$ kg/m³, $R=0.06$, $\varepsilon_0=0.012$, $m=2$, $K_{IC}^{(q)}=1.51$ MPa·m^{1/2}; (2) 花岗岩: $\mu=0.61$, $a=2.8$ mm, $\phi=45^\circ$, $\beta=0.32$, $E=50$ GPa, $D_0=0.033$, $\nu=0.2$, $\rho=2\ 700$ kg/m³, $R=0.04$, $\varepsilon_0=0.005\ 8$, $m=2$, $K_{IC}^{(q)}=1.61$ MPa·m^{1/2}。

图 2 中分别给出基于大理岩与花岗岩材料属性, 得到的动态应力应变本构关系的理论与试验结果 [3, 23]

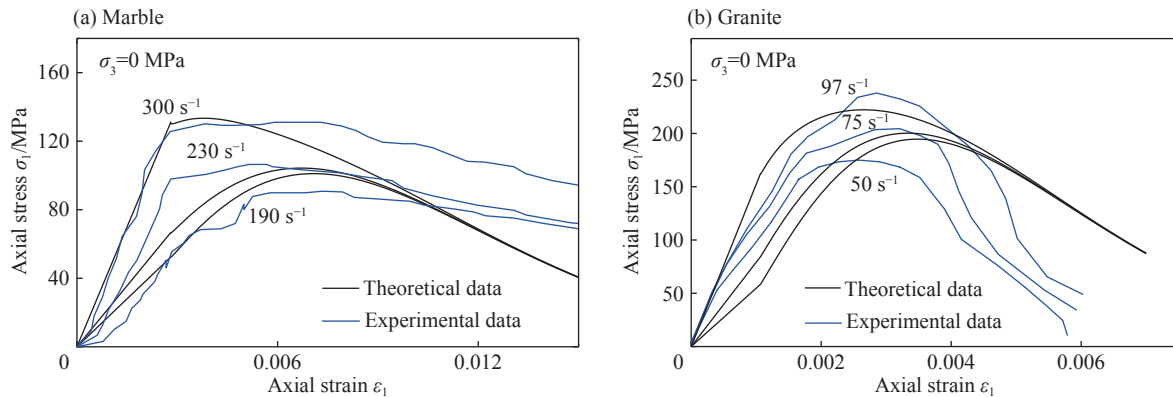


图 2 大理岩与花岗岩动态应力-应变曲线的理论与试验结果 [3, 23] 对比

Fig. 2 Comparisons between theoretical and experimental [3, 23] dynamic stress-strain curves in marble and granite

曲线对比结果。可以看到, 理论结果与试验结果在变化趋势上具有较好的相似性, 在数值上具有一定的可比性, 但是仍然存在一定的差异性。其中导致这些差异的原因可以分析为以下几点: (1) 本文中提出的理论模型是一个基于各向同性的均匀弹性体得到的; (2) 岩石内部随机分布裂纹无法真实呈现, 而是通过假设裂纹尺寸、角度相同的均布化思路进行计算分析的。

2.2 应变率对应力-应变关系、动态压缩强度和动态弹性模量的影响

以上通过试验结果验证了本文基于细观力学的动态本构模型合理性。下面将详细讨论应变率对岩石力学特性(动态压缩强度和动态弹性模量)的影响。其中模型参数选取参考花岗岩参数。图 3 中给出了不同应变率下, 应力-应变本构关系的变化趋势。可以看到, 随着应变率的增加, 应力应变曲线峰值应力, 即压缩强度, 也在不断增大, 而且是加速增加, 该现象也可以通过图 4 给出的轴向动态压缩强度与轴向应变率关系清楚地看到, 该结果已经被众多研究动态强度理论的学者验证^[1, 3, 13, 15, 23]。还可看到, 随着应变率的增大, 岩石动态强度对应峰值轴向应变不断减小。图 4 中, 研究了不同岩石内部初始损伤、模型参数 m 、 ϵ_0 、 R 下, 岩石轴向动态压缩强度与轴向应变率的联系。随着初始损伤 D_0 或参数 ϵ_0 、 R 的减小、参数 m 的增大, 在一定轴向应变率下轴向动压缩强度增大。

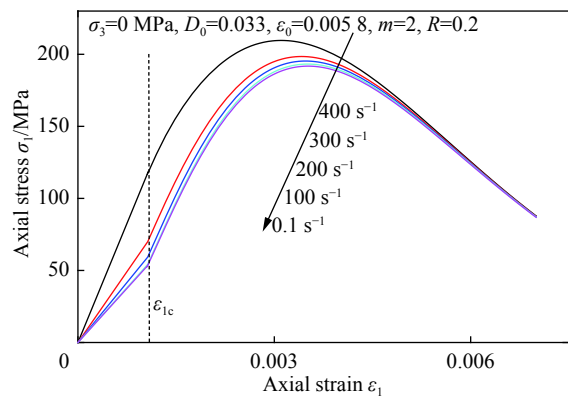


图 3 应变率影响下的应力应变本构关系
Fig. 3 Effect of strain rate on stress-strain curve

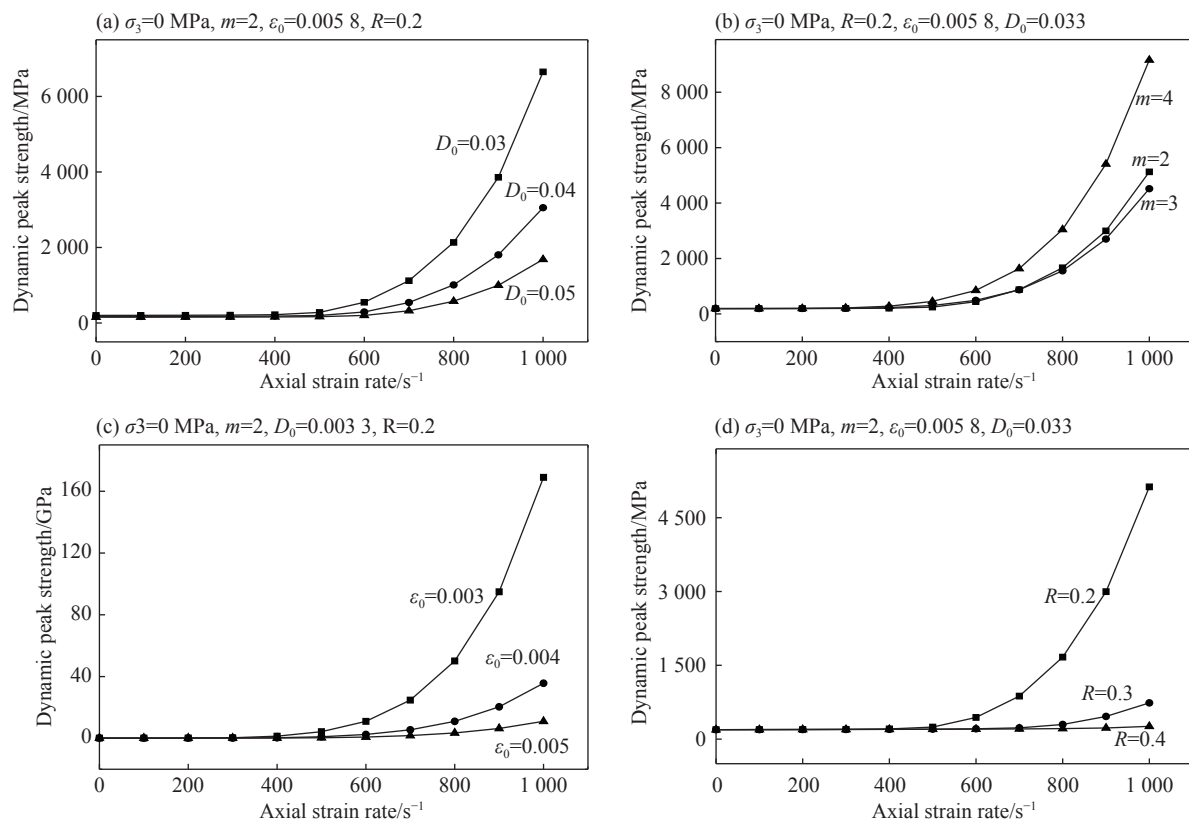


图 4 不同模型参数的应变率与岩石动态压缩强度关系
Fig. 4 Relations between strain rate and dynamic compressive strength under different model parameters

此外, 还可以看到, 岩石裂纹初始应变值 ε_{1c} 随着应变率增加为一个恒定值, 而裂纹初始应变对应的裂纹初始轴向应力则是随着应变率的增加也在增大。本文中假设裂纹初始应变前的变形为线弹性变形。随着应变率增加, 岩石弹性变形阶段曲线的切线模量, 即动态弹性模量, 在不断加速增大, 该现象也可以在图 5 中动态弹性模量与应变率之间关系看到, 并且与众多学者的试验结果^[1-3, 23] 相一致。图 5 研究了不同围压、岩石内部初始损伤及模型参数 m 、 ε_0 、 R 下, 岩石动态弹性模量与轴向应变率之间的联系。随着初始损伤 D_0 或参数 m 、 ε_0 、 R 减小、围压增大, 在一定轴向应变率下动态弹性模量不断增大。

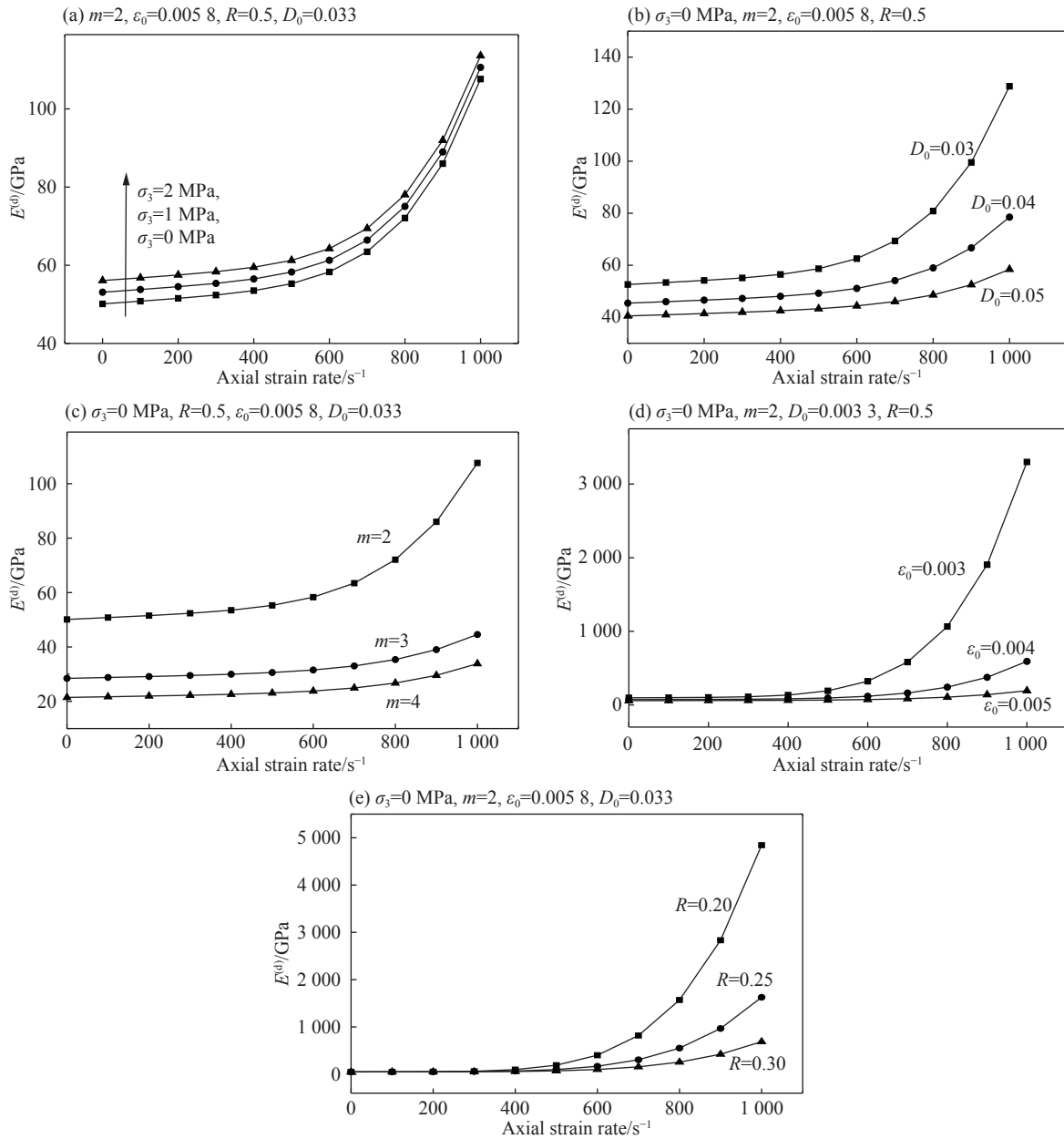


图 5 不同模型参数的应变率与动态弹性模量关系

Fig. 5 Relations between strain rate and dynamic elastic module under different model parameters

2.3 模型参数敏感性分析

岩石内部初始损伤对岩石力学性能有着重要的影响。图 6 中给出了不同初始损伤对于高应变率 300 s^{-1} 下动态应力-应变本构关系曲线的影响。可以看到, 随着损伤的增大, 岩石的动态压缩强度不断减

小, 而且随着损伤的减小, 峰值强度对应的峰值应变在不断减小。图 7 给出了不同围压状态下, 岩石动态应力-应变关系曲线结果。可以看到, 随着围压增大, 动态压缩强度也在不断增大。此外, 图 8、9 分别给出了模型中参数 m 和 ε_0 对动态应力-应变关系曲线的影响, 可以看到, 随着参数 m 和 ε_0 减小, 峰值强度对应的峰值应变值在不断减小。图 10 中给出了参数 R 对应力-应变曲线的影响, 随着 R 的减小, 峰值应力对应的峰值应变值都在不断减小。

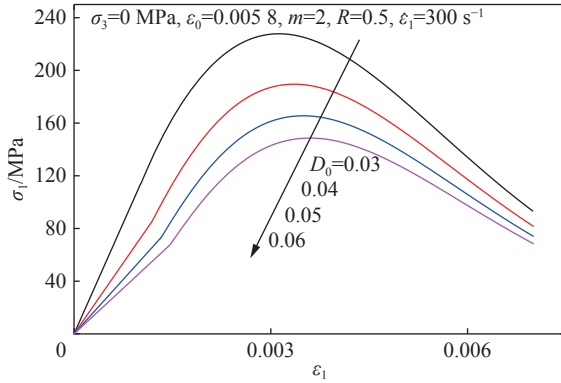


图 6 初始损伤 D_0 对动态应力应变本构关系影响
Fig. 6 Effect of initial damage on dynamic stress-strain constitutive relation

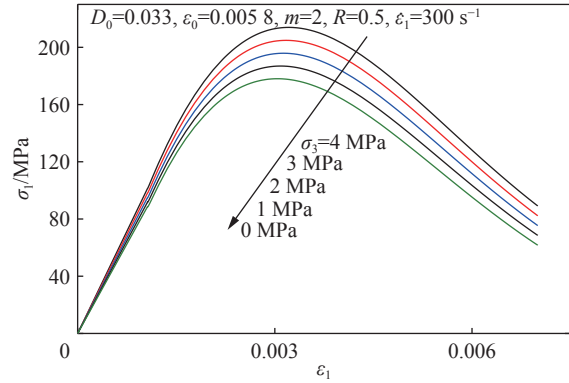


图 7 围压对动态应力应变本构关系影响
Fig. 7 Effect of confining pressure on dynamic stress-strain constitutive relation

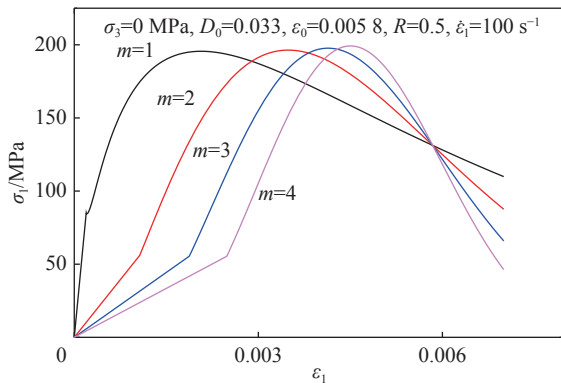


图 8 参数 m 对动态应力应变本构关系影响
Fig. 8 Effect of parameter m on dynamic stress-strain constitutive relation

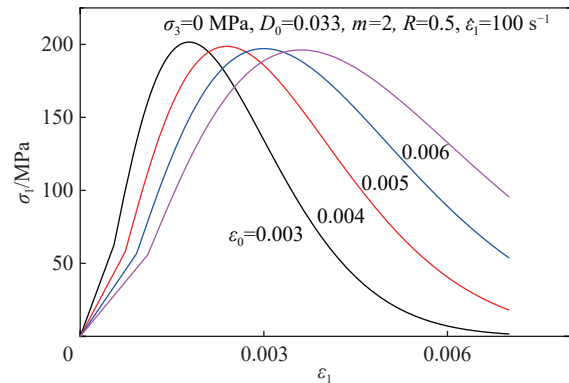


图 9 参数 ε_0 对动态应力应变本构关系影响
Fig. 9 Effect of parameter ε_0 on dynamic stress-strain constitutive relation

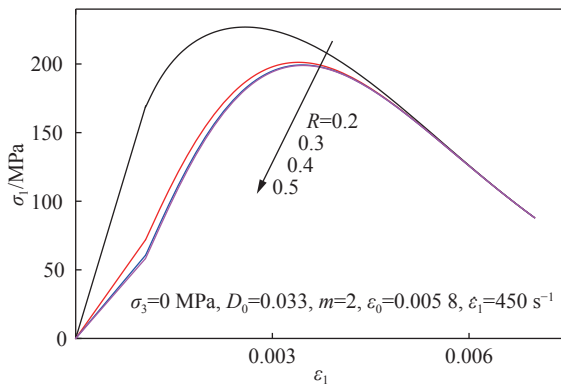


图 10 参数 R 对动态应力应变本构关系影响
Fig. 10 Effect of parameter R on dynamic stress-strain constitutive relation

图 11 中, 给出了不同应变率下, 动态弹性模量与围压、初始损伤和参数 m 、 ε_0 、 R 的关系。可以看到, 随着围压的增大, 动态弹性模量线性增大; 随着初始损伤和模型参数 m 、 ε_0 、 R 的增大, 动态弹性模量在减速降低。以上关于模型参数影响研究, 更加清楚详细地分析了本文提出的宏细观力学模型中参数敏感性。进而为更加精确地建立真实岩石与模型关系之间联系提供了一定的参考。

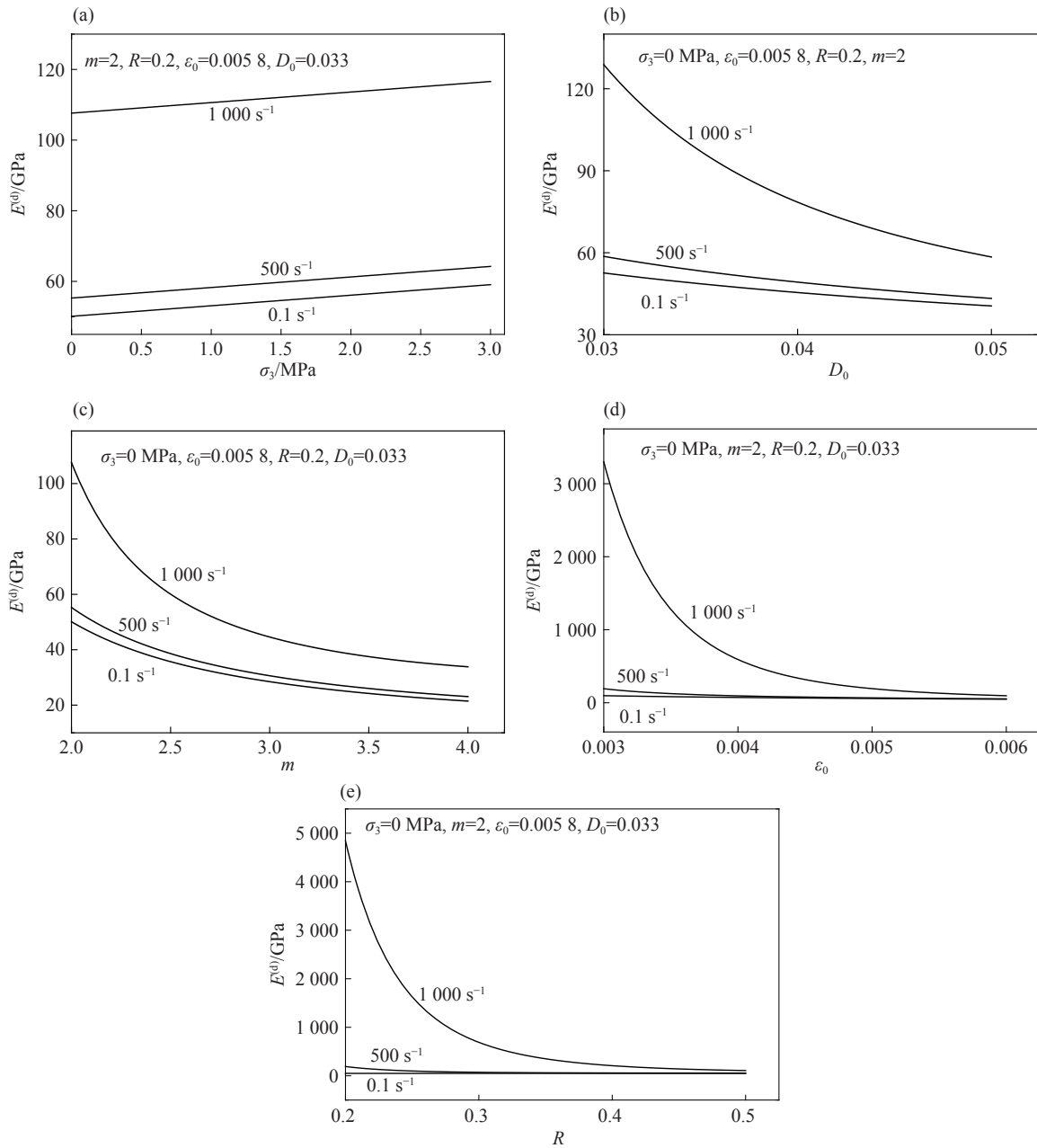


图 11 应变率对不同模型参数与动态弹性模量关系影响

Fig. 11 Effects of strain rate on the relationships between model parameters and dynamic elastic modules

3 结 论

基于脆性岩石准静态裂纹扩展作用下的应力-应变本构关系、裂纹速率与应变率的变化关系及裂纹速率与断裂韧度的关系,建立了基于细观力学的动态应力-应变本构关系模型。通过试验结果验证了模型的合理性,并讨论了模型参数对岩石动态压缩力学特性的影响。具体结果如下:

(1) 随着应变率的增大,岩石动态压缩强度不断增大,岩石裂纹初始应力不断加速增大,峰值轴向应力对应的峰值轴向应变值不断减小,岩石动态弹性模量不断加速增大。

(2) 随着围压,初始损伤 D_0 , 参数 m 、 R 和 ϵ_0 的减小,应力-应变曲线中峰值强度对应的峰值应变不断减小。

(3) 随着初始损伤 D_0 或参数 ϵ_0 、 R 的减小,围压或参数 m 的增大,在一定的轴向应变率下,轴向动态

压缩强度在增大。

(4) 随着初始损伤 D_0 或参数 m 、 ε_0 、 R 的减小, 围压的增大, 在一定轴向应变率下, 动弹性模量不断增大。

参考文献:

- [1] 李晓锋, 李海波, 刘凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2393–2405.
LI Xiaofeng, LI Haibo, LIU Kai, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rocks subject to impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2393–2405.
- [2] 李刚, 陈正汉, 谢云, 等. 高应变率条件下三峡工程花岗岩动力特性的试验研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1833–1840.
LI Gang, CHEN Zhenghan, XIE Yun, et al. Test research on dynamic characteristics of three gorges granite under high strain rate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1833–1840.
- [3] 翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩和混凝土在单轴冲击压缩荷载下的动态性能比较 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 762–768.
ZHAI Yue, MA Guowei, ZHAO Junhai, et al. Comparison of dynamic capabilities of granite and concrete under uniaxial impact compressive loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 762–768.
- [4] 卢志堂, 王志亮. 中高应变率下花岗岩动力特性三轴试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1087–1094.
LU Zhitang, WANG Zhiliang. Triaxial tests on dynamic properties of granite under intermediate and high strain rates [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1087–1094.
- [5] 金解放, 李夕兵, 钟海兵. 三维静载与循环冲击组合作用下砂岩动态力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1358–1372.
JIN Jiefang, LI Xibing, ZHONG Haibing. Study of dynamic mechanical characteristic of sandstone subjected to three-dimensional coupled static-cyclic impact loadings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1358–1372.
- [6] 唐礼忠, 程露萍, 王春, 等. 高静载条件下受频繁动力扰动时蛇纹岩动力学特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2737–2745.
TANG Lizhong, CHENG Luping, WANG Chun, et al. Dynamic characteristics of serpentinite under condition of high static load and frequent dynamic disturbance [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2737–2745.
- [7] 李帅, 朱万成, 牛雷雷, 等. 动态扰动对应力松弛岩石变形行为影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2018, 29(8): 2795–2803.
LI Shuai, ZHU Wancheng, NIU Leilei, et al. Experimental study on influence of dynamic disturbance on deformation behavior of rock under stress relaxation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 29(8): 2795–2803.
- [8] 曹文贵, 林星涛, 张超, 等. 基于非线性动态强度准则的岩石动态变形过程统计损伤模拟方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 794–802.
CAO Wengui, LIN Xingtao, ZHANG Chao, et al. A statistical damage simulation method of dynamic deformation process for rocks based on nonlinear dynamic strength criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 794–802.
- [9] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 中应变率下动静组合加载岩石的本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 865–874.
LI Xibing, ZUO Yujun, MA Chunde. Constitutive model of rock under coupled static-dynamic loading with intermediate strain rate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 865–874.
- [10] 王春, 唐礼忠, 程露萍, 等. 一维高应力及重复冲击共同作用下岩石的本构模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2868–2878.
WANG Chun, TANG Lizhong, CHENG Luping, et al. Constitutive model of rock under one-dimensional high stress and

- repeated impact loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 2868–2878.
- [11] 谢理想, 赵光明, 孟祥瑞. 岩石在冲击载荷下的过应力本构模型研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(1): 2772–2781.
XIE Lixiang, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui. Research on excess stress constitutive model of rock under impact load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 2772–2781.
- [12] 蔡灿, 袁晓红, 程少杰. 中低应变率下的岩石损伤本构模型研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 795–802.
CAI Can, YUAN Xiaohong, CHENG Shaojie, et al. Damage constitutive model of rock under medium and low strain rates [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 795–802.
- [13] 戚承志, 钱七虎. 岩石等脆性材料动力强度依赖应变率的物理机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 177–181.
QI Chengzhi, QIAN Qihu. Physical mechanism of dependence of material strength on strain rate for rock-like material [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 177–181.
- [14] 戚承志, 王明洋, 钱七虎, 等. 爆炸作用下岩石破裂块度分布特点及其物理机理 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(S1): 1–4.
QI Chengzhi, WANG Mingyang, QIAN Qihu, et al. Features and physical mechanism of fragmentation distribution of rock under explosion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(S1): 1–4.
- [15] 赵坚, 李海波. 莫尔-库仑和霍克-布朗强度准则用于评估脆性岩石动态强度的适用性 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 171–176.
ZHAO Jian, LI Haibo. Estimating the dynamic strength of rock using Mohr-Coulomb and Hoek-Brown criteria [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 171–176.
- [16] 马林建, 阳发, 王明洋, 等. 考虑应变率效应的广义 Hoek-Brown 动态强度准则 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(s2): 27–32.
MA Linjian, YANG Fa, WANG Mingyang, et al. Generalized Hoek-Brown dynamic strength criterion incorporating strain rate effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(s2): 27–32.
- [17] 宫凤强, 王进, 李夕兵. 岩石压缩特性的率效应与动态增强因子统一模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(7): 1586–1595.
GONG Fengqiang, WANG Jin, LI Xibing. The rate effect of compression characteristics and a unified model of dynamic increasing factor for rock materials [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(7): 1586–1595.
- [18] 岑夺丰, 黄达. 高应变率单轴压缩下岩体裂隙扩展的细观位移模式 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(3): 436–444.
CEN Duofeng, HUANG Da. Mesoscopic displacement modes of crack propagation of rock mass under uniaxial compression with high strain rate [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(3): 436–444.
- [19] 潘红宇, 葛迪, 张天军, 等. 应变率对岩石裂隙扩展规律的影响 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(3): 675–683.
PAN Hongyu, GE Di, ZHANG Tianjun, et al. Influence of strain rate on the rock fracture propagation law [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(3): 675–683.
- [20] 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 Hongyan, LI Junfeng, PEI Xiaolong. 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.
- [21] 邵珠山, 李晓照. 基于细观力学的脆性岩石长期蠕变失效研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(s1): 2644–2652.
SHAO Zhushan, LI Xiaozhao. Research on long-term creep failure of brittle rock based on micromechanics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(s1): 2644–2652.
- [22] LI X Z, SHAO Z S. Investigation of macroscopic brittle creep failure caused by microcrack growth under step loading and unloading in rocks [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(7): 2581–2593.
- [23] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1771–1776.
SHAN Renliang, XUE Yousong, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1771–1776.
- [24] BHAT H S, ROSAKIS A J, SAMMIS C G. A micromechanics based constitutive model for brittle failure at high strain rates [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2012, 79(3): 031016.

Study on microcrack growth-based dynamic compressive mechanical properties in brittle rocks

LI Xiaozhao^{1,2}, QI Chengzhi^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: The dynamic microcrack growth has a great influence on the macroscopic dynamic mechanical properties of brittle rocks under dynamic compressive loadings. However, the relationships between dynamic microcrack growth and macroscopic dynamic mechanical properties are rarely studied. Based on the microcrack growth-induced stress-strain constitutive relationship, the relationship between quasi-static and dynamic fracture toughness, the relationship between crack velocity and strain rate, the relationship between strain rate and dynamic fracture toughness, a micromechanics-based stress-strain constitutive model is proposed. Furthermore, the relationship between crack velocity and strain rate is derived by the time derivative of equation describing the relationship between crack length and axial strain. The relationship between strain rate and dynamic fracture toughness is obtained by coupling the suggested relationship between crack velocity and strain rate, and the crack velocity and fracture toughness. Effects of strain rate on stress-strain relation and dynamic compressive strength are studied. The reasonability of the proposed dynamic constitutive model is verified by the experimental results. Sensitivities of initial damage, confining pressure, parameters m , ε_0 and R on stress-strain relation, dynamic compressive strength and dynamic elastic modulus are discussed. These studies will provide a certain theoretical help for analyzing the stability of brittle surrounding rocks in deep underground engineering.

Keywords: brittle rocks; micro-macro model; strain rate; dynamic constitutive relation; dynamic elastic modulus

(责任编辑 王易难)