



论 文



脆性岩石局部细观裂纹成核损伤突变机理研究

李晓照^{1,2,3}, 戚承志^{1,2*}, 邵珠山³

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;
3. 西安建筑科技大学陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055

* E-mail: qichengzhi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2020-05-06; 接受日期: 2020-06-22; 网络版发表日期: 2020-11-27

国家自然科学基金(批准号: 51708016, 51774018)、北京建筑大学金字塔人才培养工程(编号: JDYC20200307)和陕西省岩土与地下空间工程重点实验室开放基金(编号: YT201902)资助项目

摘要 脆性岩石内部局部细观裂纹成核导致了岩石局部损伤, 弱化了岩石局部强度, 进而影响了岩石的应力-变形本构曲线形状。然而, 目前关于在脆性岩石局部细观裂纹成核损伤影响下, 应力-变形本构曲线的宏细观力学机理研究非常少。本文提出了一种能够解释在脆性岩石局部裂纹成核损伤突变作用下, 轴向应力-应变关系、剪切应力-位移关系非光滑曲线的宏细观力学模型。该模型是基于岩石裂纹扩展与应力关系模型、岩石宏细观损伤联系、轴向力学与剪切力学行为之间关系及一种定性描述局部细观裂纹成核损伤突变随变形演化路径函数建立的。局部细观裂纹成核损伤随变形演化路径函数是通过参数 ε_{ini} , $\Delta\varepsilon_i$ 及 ΔD , 或参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 进行定义。研究了以上参数对岩石轴向应力-应变关系及剪切应力-位移关系的非光滑曲线影响, 着重分析了参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 对岩石剪切应力-位移关系非光滑曲线的上、下剪切应力及剪切应力降的影响。在该模型基础上, 结合岩石压缩声发射试验得到的岩石内部裂纹损伤随变形演化路径数据, 提出了一种将理论模型应用于真实岩石力学性能分析的方法, 为深部地下工程(深地工程)微震及岩爆事件预测与评价提供了重要理论支持。

关键词 脆性岩石, 局部裂纹成核, 应力降, 微震, 岩爆

1 引言

随着我国经济不断发展, 综合国力不断提升, 深部地下工程(深地工程)建设(例如, 川藏铁路隧道、深部能源开采、城市深部地下空间)的需求不断增大, 然而, 深地工程施工过程中, 由于高地应力环境, 围岩往往伴随着微震、岩爆等灾害, 严重危害了深地工程施工人员及财产安全。脆性岩石(例如花岗岩、大理岩

等)是深地工程围岩的主要组成部分, 其应力-应变力学行为的研究对于深地工程微震、岩爆等安全性评价有着重要意义。众多学者通过压缩试验, 并结合声发射监测技术, 获取脆性岩石应力-应变关系曲线, 同时测取岩石变形过程中内部微裂纹变化诱发的声发射信号数据, 分析了岩石内部微裂纹启裂、扩展、成核及贯通等不同阶段的微裂纹损伤大小及位置, 进而研究了压缩岩石变形过程中的微震规律及危害性更大的岩爆

引用格式: 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. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 480~492
Li X Z, Qi C Z, Shao Z S. Research on mechanisms of the damage catastrophe from localized microcrack nucleation in brittle rocks (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 480~492, doi: 10.1360/SST-2020-0185

事件规律^[1~5]。渗透水压力及温度对脆性岩石微震及岩爆事件也有着重要影响^[6~8]。也有学者通过引入微裂纹损伤突变理论, 即岩石内部微裂纹由随机的无序逐渐向局域化的有序转化, 也就是对应着岩石的微裂纹局部成核行为, 不论微破裂如何演化, 最终都导致岩石局部发生一个突然破裂现象, 该理论解释了脆性岩石内部微震事件机理, 并通过数值模拟分析了脆性岩石微震行为^[9~12]。压缩岩石由变形到失效过程可以分为稳定破坏与失稳破坏, 岩石突变理论解释了岩石的失稳破坏行为, 对脆性岩石微震及岩爆特性评价有着重要意义。此外, 也有学者利用脆性岩石应力-应变本构曲线不同阶段的力学参数(例如, 峰值应力与残余应力比或峰值应变与残余应变比等), 定义脆性岩石的脆性指标, 定性地研究了脆性岩石的脆性行为, 进而为岩石发生微震及岩爆事件的可能性评价提供依据^[13]。基于声发射监测及定位技术, 将其应用于深地工程施工过程中的围岩微震事件的监测分析中, 进而对深地工程岩爆事件的预测评价提供依据^[14~16]。

压缩脆性岩石内部局部微裂纹演化过程中, 可能

存在多次局部微裂纹成核的现象(即图1(a)中箭头指向的局部断裂带), 通过图1(a)可以直观地看到每次微裂纹成核现象对岩石宏观行为的影响, 但是每次局部成核现象对岩石宏观应力应变本构曲线关系有何影响? 通过图1(b)~(d)可以看到, 每一次局部成核作用都会导致一个微小的损伤突变, 进而导致一个微小的应力降产生, 引起一次微震事件的发生。整个的岩石最终失效是由多个局部成核现象诱发的局部断裂带贯通所导致的, 该整体失稳破坏导致了脆性岩石的岩爆行为^[17~24]。此外, 图1(b)中岩石损伤是基于岩石声发射数据与岩石微裂纹导致的损伤关系推出, 即^[19]

$$D = D_U \frac{C_d}{C_0}, \quad (1)$$

$$D_U = 1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_p}, \quad (2)$$

式中, D_U 为损伤临界值, C_d 为岩石某一阶段的累计声发射数, C_0 为岩石压缩破坏全过程中累计声发射数, σ_r 为残余强度, σ_p 为峰值强度。岩石损伤与岩石阶段累计声发射数量成正比。

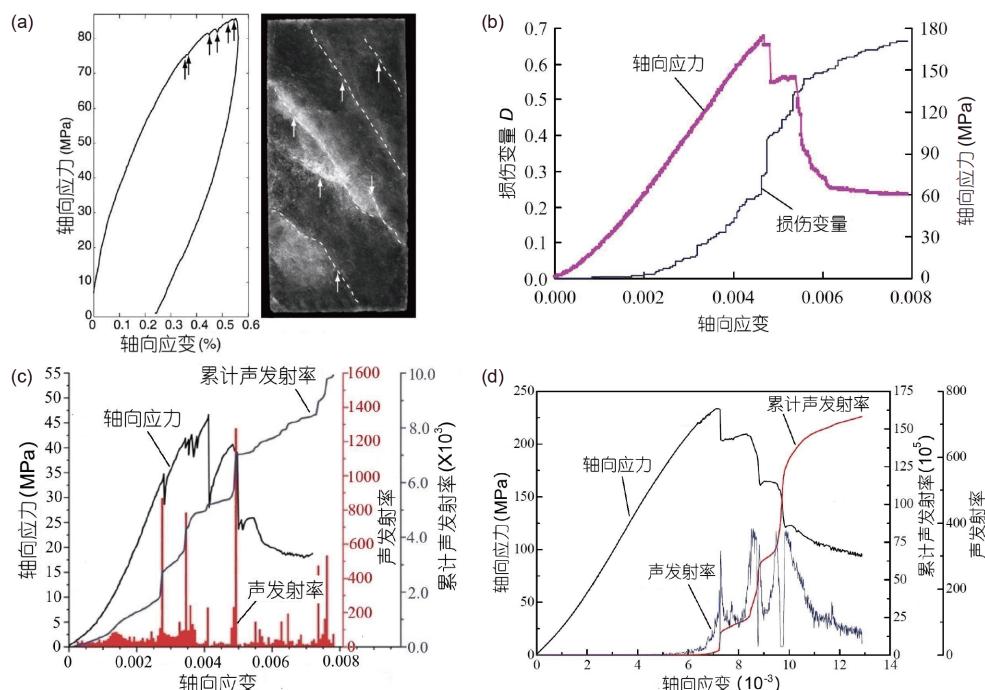


图 1 (网络版彩图)不同脆性岩石局部裂纹成核影响下的岩石应力、声发射率、累计声发射率及损伤与应变关系曲线. (a) 石膏^[17]; (b) 灰岩^[19]; (c) 砂岩^[23]; (d) 花岗岩^[24]

Figure 1 (Color online) Correlations of axial stress, automatic emission rate, accumulated automatic emissions, damage and axial strain influenced by localized microcrack nucleation. (a) Gypsum [17]; (b) limestone [19]; (c) sandstone [23]; (d) granite [24].

此外, 岩石的震动力矩对岩石微震及岩爆行为评价有着重要意义, 脆性岩石断裂产生的震动力矩为^[25,26]

$$M = GD_{sp}A, \quad (3)$$

式中, A 是断裂面面积, D_{sp} 是断裂面剪切位移, G 是实验系统与岩石断裂的一个耦合刚度。岩石的震动力矩与岩石的剪切断裂位移有着重要关系, 因此压缩岩石剪切应力与剪切位移关系的研究对岩石震动力矩的获取有着更加重要的意义。

然而, 由于自然岩石内部微裂纹随机分布特性, 很难精确地分析岩石内部微裂纹成核对岩石应力-应变本构关系的影响。而且, 目前关于能够解释多个局部细观裂纹成核现象, 以及其对应力-应变关系曲线及剪切应力-剪切位移关系非光滑曲线影响的宏细观理论模型研究极少。因此, 本研究将基于细观裂纹扩展模型、轴向力学与剪切力学行为关系, 并结合损伤、裂纹及变形关系, 建立一种脆性岩石宏细观力学模型, 解释

在真实岩石内部随机分布细观裂纹成核损伤突变影响下, 岩石宏观应力-应变关系及剪切应力-剪切位移关系非光滑曲线的力学机理。进而为深地工程微震及岩爆灾害预测及评价提供一定的理论依据。

2 理论模型

本文基于细观裂纹扩展力学模型, 并结合岩石裂纹与变形损伤关系模型, 提出一个三轴压缩荷载(轴向应力 σ_1 , 围压 $\sigma_3=\sigma_2$)作用的脆性岩石剪切应力与剪切位移关系模型(见图2), 解释了完整岩石变形硬化、软化及失效过程, 重点分析了局部细观裂纹成核损伤对岩石应力与变形关系的影响机理。图2(b)中描述了一种三轴压缩岩石宏观剪切断裂带的形成过程, 即2, 3, 4, 6, 7局部细观裂纹成核剪切带的形成及相互贯通, 导致了岩石最终的剪切断裂破坏。图2(e)中给出了岩石内部局部裂纹成核损伤突变随变形演化路径, 该路径定性地描述了图1中基于声发射监测试验数据得到的真

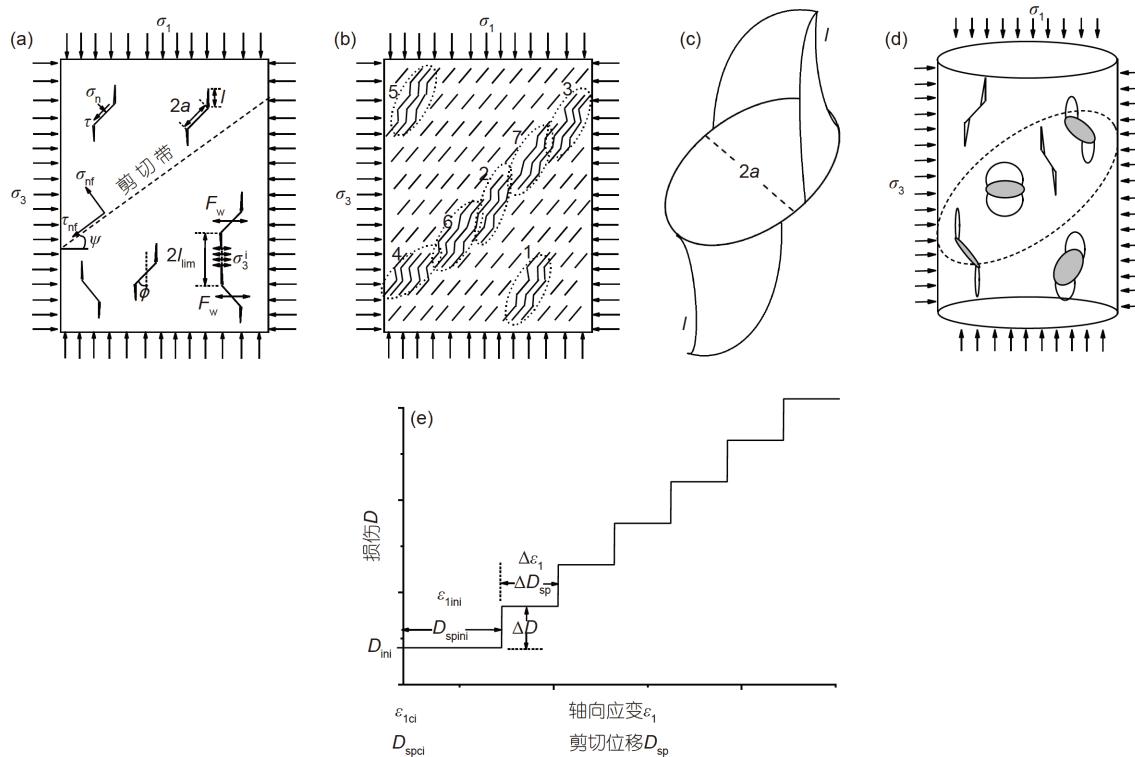


图 2 (a) 岩石压缩剪切断裂力学模型; (b) 岩石局部裂纹成核原理; (c) 单个完整三维裂纹; (d) 岩石三维模型; (e) 裂纹成核损伤与变形关系

Figure 2 (a) Model of shear fracture under compression; (b) schematic of localized microcrack nucleation; (c) 3D model of single total microcrack; (d) 3D rock model; (e) relations between deformation and damage from crack nucleation.

实岩石损伤突变随变形演化路径, 将该损伤路径函数引入下面推出的岩石应力-变形关系模型中, 进而研究局部细观裂纹成核影响的力学机理。模型计算中定义压应力为负, 图示结果分析中, 为了便于观测压应力取正。

模型中 F_w 为作用于初始裂纹面的楔力, 其作用可以平衡岩石翼型扩展裂纹之间内应力 σ_3^i 。 l_{lim} 为翼型裂纹扩展极限长度, $l_{\text{lim}}=aa(D_o^{-1/3}-1)$ ^[27], 式中参数 $a=\cos\phi$, ϕ 为初始裂纹角度, a 为初始裂纹尺寸, 岩石初始损伤 $D_o=4\pi N_V(\alpha a)^3/3$, N_V 为岩石单位体积的微裂纹数量。具体模型理论推导见下文。

2.1 裂纹扩展与轴向应力关系

基于翼型裂纹尖端应力强度因子模型^[28], 脆性岩石的应力与裂纹扩展关系可表示为^[27,29]

$$\sigma_1(l) = \frac{\sigma_3[J_3+A_2(c_1+c_2)]-K_{IC}/\sqrt{\pi a}}{A_1(c_1+c_2)}, \quad (4)$$

式中,

$$c_1 = \pi^{-2}(l/a+\beta)^{-3/2}, \quad (5)$$

$$c_2 = \frac{2(\pi a)^{-2}\sqrt{l/a}}{D_o^{-2/3} - [1 + l/(\alpha a)]^2}, \quad (6)$$

$$c_3 = 2\sqrt{l/a}/\pi, \quad (7)$$

$$A_1 = \pi\sqrt{\beta/3}\left(\sqrt{1+\mu^2}-\mu\right), \quad (8)$$

$$A_2 = A_1\left(\sqrt{1+\mu^2}+\mu\right)/\left(\sqrt{1+\mu^2}-\mu\right), \quad (9)$$

式中, l 为翼型裂纹长度, β 为常数, μ 为初始裂纹摩擦系数。

2.2 轴向应变与轴向应力关系

宏观轴向应变相关的岩石损伤可定义为^[30]

$$D = 1 - \exp[-\varepsilon_o^{-1}(\varepsilon_1 - 2\gamma E^{-1}|\sigma_3|)]^m, \quad (10)$$

式中, D 为损伤因子, m 和 ε_o 为材料常数, ε_1 为轴向应变, γ 为泊松比, E 为弹性模量, $|\cdot|$ 为取绝对值。

细观微裂纹扩展相关的损伤可定义为^[28]

$$D = \frac{4\pi}{3}N_V(l+\alpha a)^3. \quad (11)$$

联立上述细观裂纹与宏观应变相关的损伤, 宏观

应变与细观裂纹长度关系可推出为

$$\varepsilon_1 = 2E^{-1}\gamma \left| \sigma_3 \right| + \varepsilon_o \left(-\ln \left[1 - D_o \left(\frac{l}{\alpha a} + 1 \right)^3 \right] \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (12)$$

图3中给出了公式(12)中裂纹长度与轴向应变的关系曲线。翼型裂纹极限长度 l_{lim} 对应着一个轴向应变 ε_{1f} , 该值为岩石失效应变提供一定参考。

将(12)式带入(4)式, 轴向应力与应变关系

$$\sigma_1(\varepsilon_1) = \frac{\sigma_3[J_3+A_2(J_1+J_2)]-K_{IC}/\sqrt{\pi a}}{A_1(J_1+J_2)}, \quad (13)$$

式中,

$$J_1 = (J_4/a + \beta)^{-3/2}/\pi^2, \quad (14)$$

$$J_2 = 2\pi^{-2}\sqrt{J_4/a}/\left[\alpha^2 D_o^{-2/3} - (\alpha + J_4/a)^2\right], \quad (15)$$

$$J_3 = 2\sqrt{J_4/a}/\pi, \quad (16)$$

$$J_4 = \alpha a \left[\left(1 - \exp \left[- \left((\varepsilon_1 - 2E^{-1}\gamma |\sigma_3|)/\varepsilon_o \right)^m \right] \right)^{1/3} D_o^{-1/3} - 1 \right]. \quad (17)$$

基于公式(4), 岩石裂纹启裂应力可表示为

$$\sigma_{1ci} = \sigma_1(l=0) = \frac{\sigma_3(A_2\beta^{-3/2}/\pi^2)-K_{IC}/\sqrt{\pi a}}{A_1\beta^{-3/2}/\pi^2}, \quad (18)$$

基于公式(12), 裂纹启裂时轴向应变为

$$\varepsilon_{1ci} = 2E^{-1}\gamma |\sigma_3| + \varepsilon_o (-\ln[1 - D_o])^{\frac{1}{m}}. \quad (19)$$

假设裂纹启裂前应力应变为线弹性关系, 岩石应

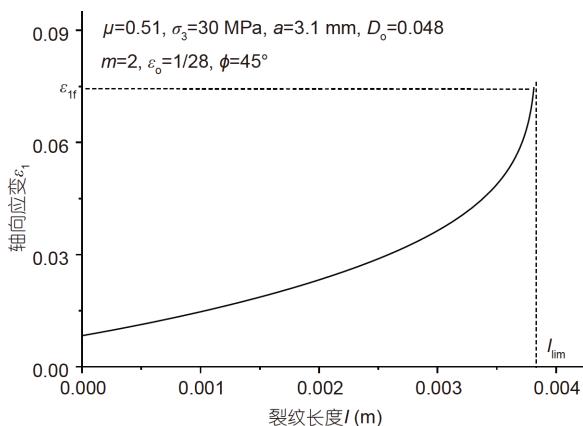


图 3 裂纹长度与轴向应变关系

Figure 3 Relation between wing crack length and axial strain.

力-应变关系为

$$\begin{aligned}\sigma_1(\varepsilon_1) &= \frac{\sigma_{1ci}}{\varepsilon_{1ci}} \varepsilon_1 \\ &= \frac{\sigma_3 A_2 \beta^{-3/2} - K_{IC} \pi^{3/2} / \sqrt{a}}{A_1 \beta^{-3/2} \left[2E^{-1} \gamma |\sigma_3| + \varepsilon_o (-\ln[1 - D_o])^{\frac{1}{m}} \right]} \varepsilon_1.\end{aligned}\quad (20)$$

联合公式(13)和(20), 可得到脆性岩石完整的应力-应变本构关系为

$$\sigma_1(\varepsilon_1) = \begin{cases} \frac{\sigma_3 A_2 \beta^{-3/2} - K_{IC} \pi^{3/2} / \sqrt{a}}{A_1 \beta^{-3/2} \left[2E^{-1} \gamma |\sigma_3| + \varepsilon_o (-\ln[1 - D_o])^{\frac{1}{m}} \right]} \varepsilon_1, & (0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{1ci}), \\ \frac{\sigma_3 [J_3 + A_2(J_1 + J_2)] - K_{IC} / \sqrt{\pi a}}{A_1(J_1 + J_2)}, & (\varepsilon_{1ci} < \varepsilon_1). \end{cases}\quad (21)$$

2.3 剪切位移与剪切应力关系

作用于剪切断裂面上的剪切应力可表示为

$$\tau_{sf} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\psi,\quad (22)$$

式中, ψ 为剪切断裂面, $\psi = 45^\circ + \phi/2$, ϕ 为岩石内摩擦角。结合公式(21)与(22), 可以得到剪切应力与轴向应变关系

$$\tau_{sf} = \frac{\sigma(\varepsilon_1) - \sigma_3}{2} \sin 2\psi.\quad (23)$$

此外, 岩石剪切断裂面位移 D_{sp} 可表示为

$$D_{sp} = \frac{\Delta L}{\sin \psi} = \frac{\varepsilon_1 L}{\sin \psi},\quad (24)$$

式中, ΔL 是岩样轴向位移, L 是岩样轴向长度。

联合公式(19)和(24), 岩石裂纹启裂剪切位移

$$D_{spci} = \frac{\Delta L}{\sin \psi} = \frac{\varepsilon_{1ci} L}{\sin \psi}.\quad (25)$$

此外, 岩石内部初始裂纹尺寸、角度、摩擦系数及岩石围压严重影响着岩石内摩擦角 ϕ 及断裂面角度 ψ , 脆性岩石内摩擦角可以表示为^[27]

$$\phi(\varepsilon_{1peak}) = 90^\circ - 2 \arctan \sqrt{\frac{A_1(J_1 + J_2)}{J_3 + A_2(J_1 + J_2)}},\quad (26)$$

式中, ε_{1peak} 为岩石应力应变关系曲线中峰值应力对应的峰值应变值, 参数 J_1 , J_2 , J_3 同公式(14)–(16), 此时公

式中的应变 ε_1 取值为 ε_{1peak} 。

联合公式(21)–(26), 三轴压缩荷载下脆性岩石剪切断裂面的剪切应力与剪切位移本构关系为

$$\begin{aligned}\tau_{sf}(D_{sp}) &= \\ &\begin{cases} \frac{D_{sp} \sin \psi [\sigma_3 A_2 \beta^{-3/2} - K_{IC} \pi^{3/2} / \sqrt{a}]}{2LA_1 \beta^{-3/2} \left[2E^{-1} \gamma |\sigma_3| + \varepsilon_o (-\ln[1 - D_o])^{\frac{1}{m}} \right]} - \frac{\sigma_3}{2} \sin 2\psi, \\ (0 \leq D_{sp} \leq D_{spci}), \\ \frac{\sigma_3 [X_3 + A_2(X_1 + X_2)] - K_{IC} / \sqrt{\pi a}}{2A_1(X_1 + X_2)} - \frac{\sigma_3}{2} \sin 2\psi, \\ (D_{sp} > D_{spci}), \end{cases} \end{aligned}\quad (27)$$

式中,

$$X_1 = (X_4 / a + \beta)^{-3/2} / \pi^2,\quad (28)$$

$$X_2 = 2\pi^{-2} \sqrt{X_4/a} / \left[\alpha^2 D_o^{-2/3} - (\alpha + X_4/a)^2 \right],\quad (29)$$

$$X_3 = 2\sqrt{X_4/a} / \pi,\quad (30)$$

$$X_4 = \alpha a \left[\left(1 - \exp[-(X_5 / \varepsilon_o)^m] \right)^{1/3} D_o^{-1/3} - 1 \right],\quad (31)$$

$$X_5 = (D_{sp} \sin \psi) / L - 2E^{-1} \gamma |\sigma_3|,\quad (32)$$

$$\psi = 45^\circ + (\phi(\varepsilon_{1peak})) / 2.\quad (33)$$

将裂纹极限长度 l_{lim} 代入公式(12)和(24), 分别对岩石最终失效轴向应变 ε_{1f} 及剪切位移 D_{spf} 的判断提供一定参考。岩石裂纹成核损伤突变可以通过控制本构方程中损伤变量相关的初始损伤变化实现。

3 模型结果分析

模型参数中, 初始损伤 $D_o = 0.048$, 初始裂纹摩擦系数、尺寸及角度分别为 $\mu = 0.51$, $a = 3.1$ mm, $\phi = 45^\circ$ 。材料常数 $m = 2$, $\varepsilon_o = 1/28$, $\beta = 0.32$, 断裂韧度 $K_{IC} = 1.61$ MPa m^{1/2}, 弹性模量 $E = 30$ GPa, 泊松比 $\gamma = 0.2$, 试样长度 $L = 0.2$ m。具体参数选取方法可参考文献[27,29]。

3.1 不考虑局部裂纹成核影响的岩石应力与变形光滑曲线

图4中给出了轴向应力作用诱发的裂纹长度变化曲线, 以及轴向应力作用下的应变曲线, 并给出了初始

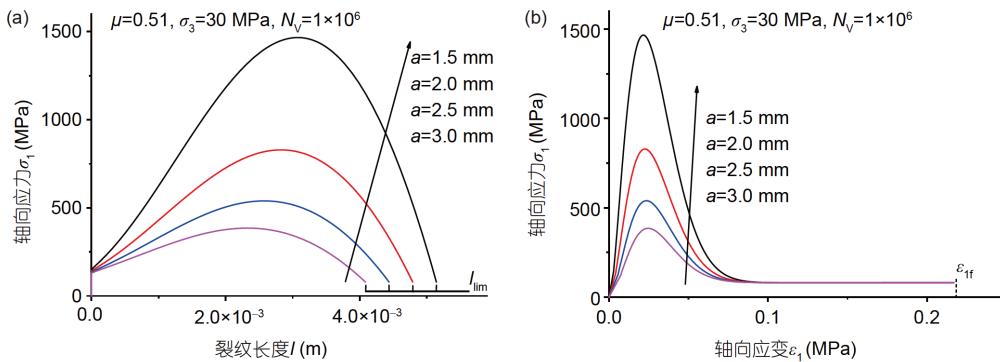


图 4 (网络版彩图)不同初始裂纹尺寸的岩石. (a) 轴向应力与应变关系; (b) 轴向应力与裂纹长度关系

Figure 4 (Color online) (a) Relation between axial stress and strain, and (b) relation between axial stress and crack length under different initial crack sizes in rocks.

裂纹尺寸对岩石轴向应力与裂纹长度关系、轴向应力与应变关系的影响。随着初始裂纹尺寸的增大，达到特定裂纹长度或轴向应变的轴向应力降低。**图4(b)**很好地描述了岩石的应变硬化及应变软化阶段，并解释了岩石的峰值强度与残余强度。**图4(a)**也解释了岩石裂纹硬化及裂纹软化阶段，然而与**图4(b)**曲线形状不同，无法清楚地解释岩石的残余强度状态，导致这个差异存在的原因是模型中随着岩石内部细观裂纹扩展长度的增大，轴向应变加速增大，尤其是接近岩石裂纹贯通长度时，岩石的轴向应变急速增大直至岩石失效(见**图3**)。

此外值得注意的是，**图4**中给出的最终裂纹长度及轴向应变都分别对应理论模型中的裂纹极限长度 l_{lim} 与最终失效应变 ε_{1f} ，但是自然岩石往往在内部裂纹长度没有达到极限长度时就发生断裂破坏，也就是岩石轴向应变并未达到应变 ε_{1B} ，岩石就已经破坏。因此，**图4**给出的是一种理想状态曲线。文献[27,29]已经给出了**图4**应力-应变光滑曲线结果的相关研究，并验证了其合理性，因此本文不再详细分析。本文将重点研究岩石局部裂纹成核损伤影响下的应力与变形非光滑曲线力学行为。此外，**图4**中箭头描述了不同参数的选取顺序(下同)。

图5中分别给出了不同初始裂纹尺寸、裂纹摩擦系数及围压对岩石剪切应力与剪切位移关系曲线的影响。剪切应力与剪切位移关系曲线与**图4**中的轴向应力与应变关系曲线相似，经历了剪切位移强化与剪切位移软化阶段，解释了岩石的峰值剪切强度与残余剪切强度。随着摩擦系数及围压的增大，岩石剪切峰值强

度及残余强度均增大；随着初始裂纹尺寸的减小，岩石剪切峰值强度增大，残余强度降低。以上关于岩石应力-应变关系曲线及剪切应力-剪切位移关系曲线均是光滑曲线，描述了岩石压缩变形过程的完整曲线，这些光滑曲线已经被广泛研究。然而，在自然岩石压缩变形过程中，由于岩石内部微裂纹随机分布特性，其内部往往出现多个局部细观裂纹成核导致的微小断裂带，表现在宏观轴向应力与应变关系曲线上，就是该曲线并不是光滑的，而是存在多个微小的应变硬化与应变软化阶段，即导致了多个微小应力降现象(如**图2**)。微小断裂带的出现导致了脆性岩石的微震现象，进而通过声发射监测仪器可以监测到幅度较大的应力波信号，多个微小剪切断裂带的相互贯通，导致了岩石的最终宏观剪切断裂及岩爆现象的出现。因此，下面将对脆性岩石内部局部细观裂纹成核对岩石宏观应力与变形关系曲线影响进行深入研究。

3.2 考虑恒定局部裂纹成核损伤影响的岩石轴向应力与应变非光滑曲线

图6中给出了考虑了局部裂纹成核损伤影响下的应力-应变曲线。可以看到，每一条应力应变曲线都存在着多个较小的应变强化及应变软化阶段，出现多次应力降现象，该现象源于理论模型中考虑了岩石局部细观裂纹成核损伤影响，也就是对应着**图2(e)**中描述的岩石损伤随变形演化过程。此外，**图2(e)**提出的岩石损伤与变形关系是通过 ε_{1ini} ， $\Delta\varepsilon_1$ ， ΔD 几个参数定义的。因此，这几个参数对应力与应变关系非光滑曲线有着重要影响。**图6(a)~(c)**中，分别讨论了这三个参数对岩

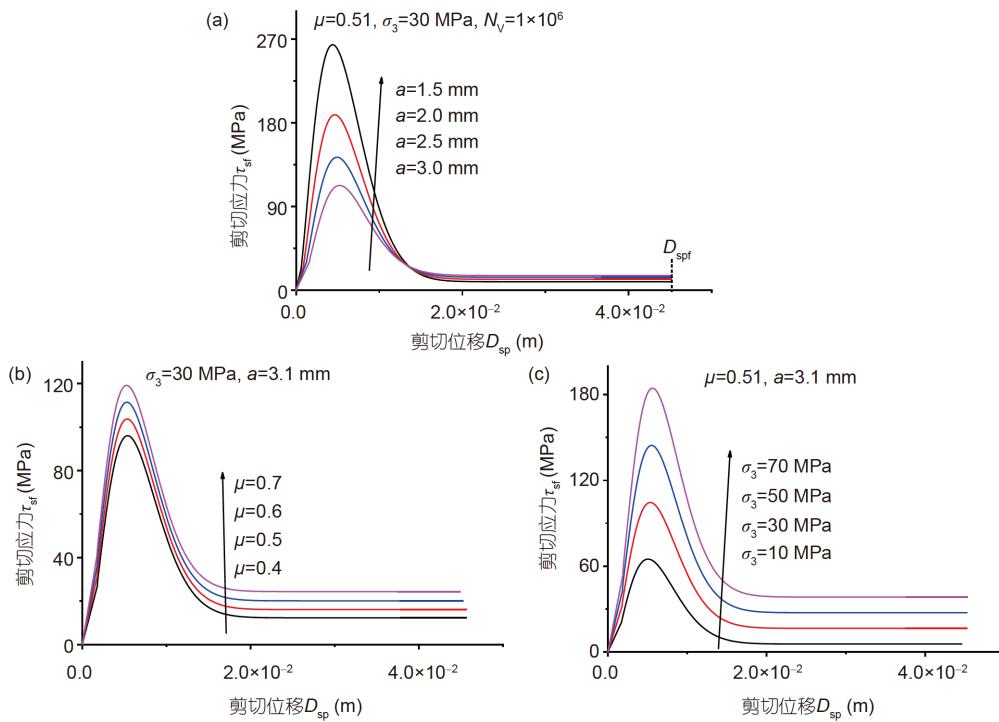


图 5 (网络版彩图)岩石剪切应力与剪切位移关系. (a) 初始裂纹尺寸影响; (b) 初始裂纹摩擦系数影响; (c) 围压影响

Figure 5 (Color online) Relationship between shear stress and displacement in rocks. (a) Effect of initial crack size; (b) effect of initial crack friction coefficient; (c) effect of confining pressure.

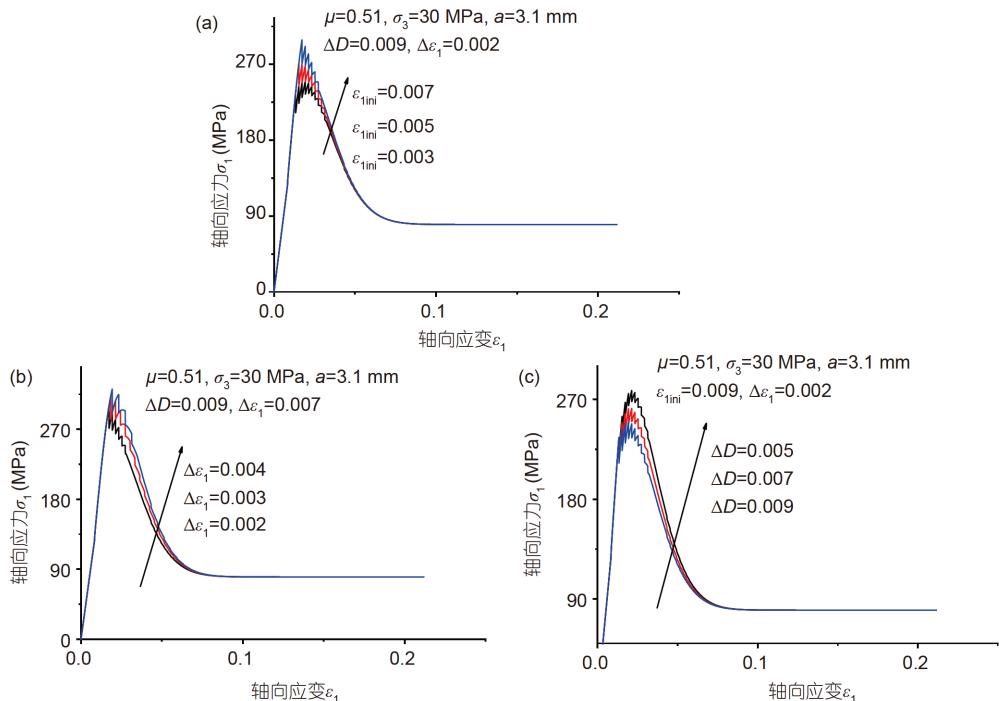


图 6 (网络版彩图)考虑局部裂纹成核损伤影响的轴向应力与应变关系. (a) ε_{1ini} 参数影响; (b) $\Delta \varepsilon_1$ 参数影响; (c) ΔD 参数影响

Figure 6 (Color online) Relationship between axial stress and strain influenced by localized damage from microcrack nucleation. (a) Effect of parameter ε_{1ini} ; (b) effect of parameter $\Delta \varepsilon_1$; (c) effect of parameter ΔD .

石轴向应力-应变本构曲线的影响。随着参数 ε_{ini} 与 $\Delta\varepsilon_1$ 的增大, 或 ΔD 的减小, 在轴向应力-应变曲线非光滑阶段的轴向应力越大。

3.3 考虑恒定局部裂纹成核损伤影响的岩石剪切应力与剪切位移关系

图7中给出了用参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 描述的局部细观裂纹成核损伤随剪切位移演化路径, 对岩石剪切应力与剪切位移关系曲线的影响, 随着参数 D_{spini} 与 ΔD_{sp} 的增大, 或 ΔD 的减小, 在剪切应力与剪切位移曲线的非光滑阶段的剪切应力不断增大, 该结果与图6中轴向应变相关的局部细观裂纹成核损伤演化路径下的轴向应力应变曲线结果是一致的。

图7(c)中放大区域给出了单个应力降阶段的剪切应力与剪切位移关系, 定义了上剪切应力 τ_{sftop} 、下剪切应力 τ_{sfbottom} 及应力降 $\Delta\tau_{\text{sf}}$ 参数。图8中研究了不同参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 对剪切位移相关的上剪切应力 τ_{sftop} 、下剪切应力 τ_{sfbottom} 及应力降 $\Delta\tau_{\text{sf}}$ 参数的影响。图8(a)第一个和第二个分图中, 随着剪切位移增大,

上、下剪切应力均先增大后减小; 随着参数 D_{spini} 的增大, 上、下剪切应力逐渐增大, 而且上、下剪切应力随着剪切位移先增大的趋势逐渐消失, 这也说明了岩石内部第一个局部裂纹成核阶段对应的剪切位移越大, 岩石上、下剪切应力的剪切位移强化行为(即剪切应力随剪切位移增大的行为)就越小。参数 D_{spini} 的大小决定了岩石内部上、下剪切应力随剪切位移增加而增大阶段的是否存在。图8(a)第三个分图中, 随着剪切位移增大, 岩石剪切应力降不断减小; 参数 D_{spini} 越大, 剪切应力降越大。

图8(b)与(c)中, 分别给出了参数 ΔD_{sp} 及 ΔD 对上、下剪切应力及剪切应力降的影响。参数 ΔD_{sp} 越大, 上、下剪切应力及剪切应力降越大。参数 ΔD 越大, 上、下剪切应力越小, 但是剪切应力降越大。

以上结果通过 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 三个参数的定义, 定性地研究了与岩石局部细观裂纹成核损伤大小、及损伤产生的阶段对岩石应力与变形关系曲线的影响, 这三个参数均是分别被假定为一个恒定常数。然而, 对于真实岩石内部随机分布裂纹导致的岩石非均匀各向

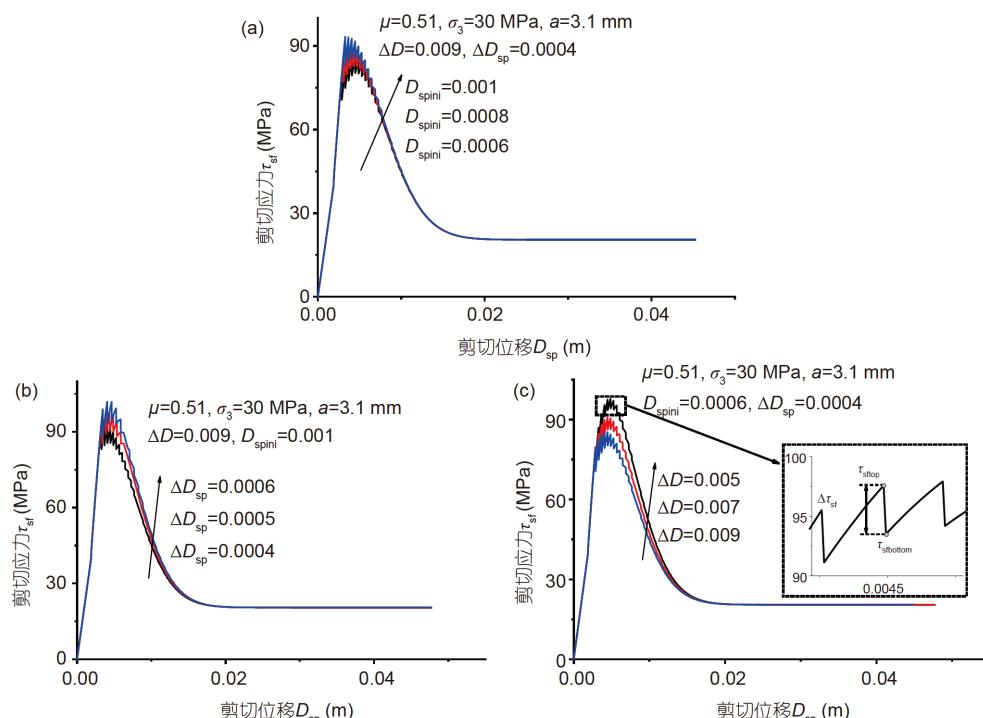
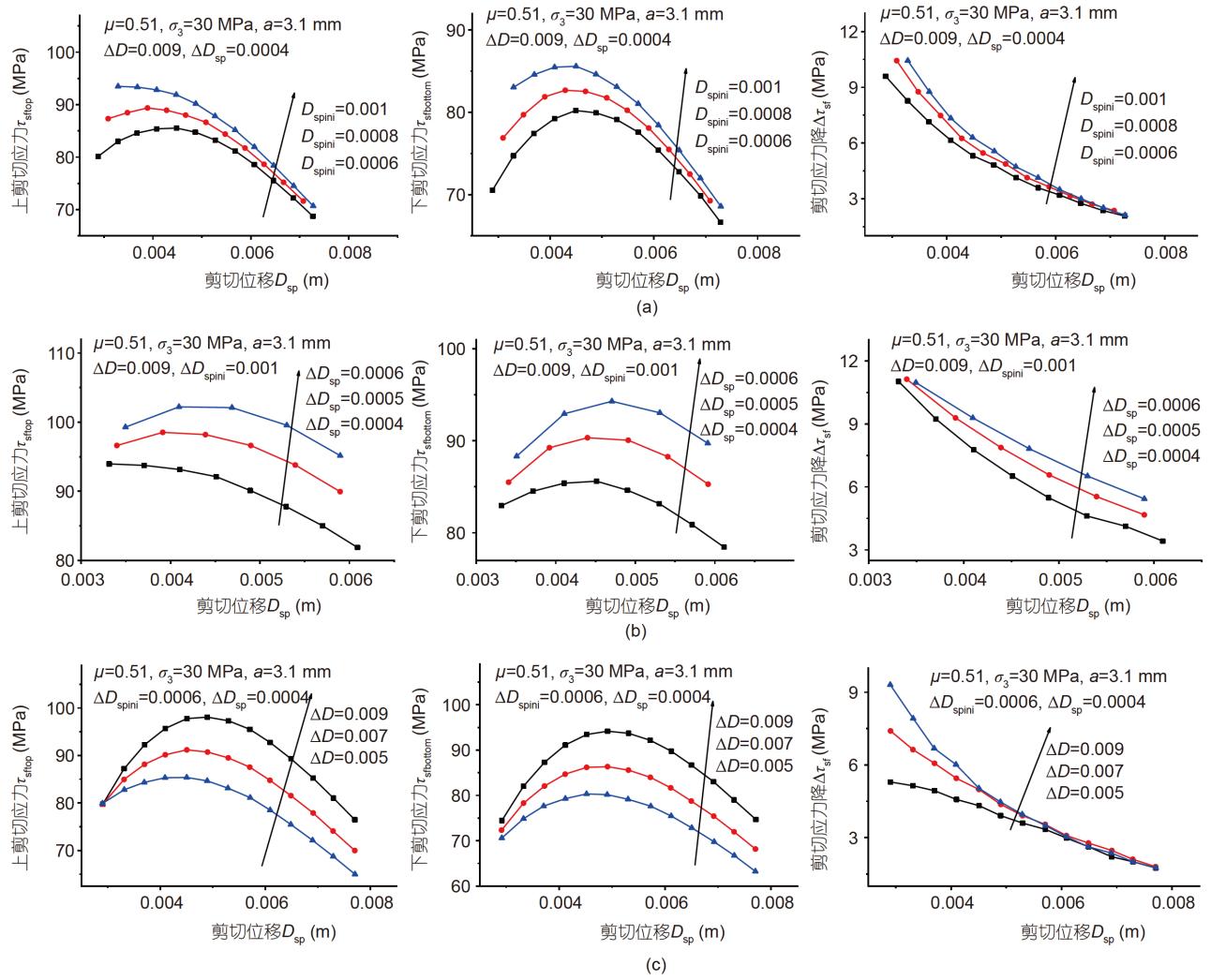


图 7 (网络版彩图)考虑局部裂纹成核损伤影响的剪切应力与位移关系。(a) D_{spini} 参数影响; (b) ΔD_{sp} 参数影响; (c) ΔD 参数影响
Figure 7 (Color online) Relationship between shear stress and displacement influenced by localized damage from microcrack nucleation. (a) Effect of parameter D_{spini} ; (b) effect of parameter ΔD_{sp} ; (c) effect of parameter ΔD .

图 8 (网络版彩图)参数 D_{spini} (a), ΔD_{sp} (b)和 ΔD (c)对剪切应力状态值与位移关系的影响Figure 8 (Color online) Effects of parameters D_{spini} (a), ΔD_{sp} (b) and ΔD (c) on states of shear stress with shear displacement.

异性力学行为, 其局部裂纹成核损伤大小及损伤发生的变形阶段应该都是随机的, 因此对应的参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 应该是随着变形增大而不断随机变化的, 不可能为一个恒定值。因此, 下面针对参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 随变形变化的情况, 进行讨论研究。

3.4 考虑变化的局部裂纹成核损伤影响的岩石剪切应力与剪切位移关系

图9给出了一种含有六个参数 $D_{\text{spini}1}$, $\Delta D_{\text{sp}1}$, ΔD_1 , $D_{\text{spini}2}$, $\Delta D_{\text{sp}2}$ 及 ΔD_2 定义的岩石局部细观裂纹成核损伤随剪切位移演化路径, 该路径存在两个不同阶段, 第一个阶段通过 $D_{\text{spini}1}$, $\Delta D_{\text{sp}1}$ 及 ΔD_1 参数定义, 第二个阶段

通过 $D_{\text{spini}2}$, $\Delta D_{\text{sp}2}$ 及 ΔD_2 定义。图10中的竖直虚线分割了两个损伤阶段, 分割线左右两侧剪切应力与位移关系曲线分别对应图9中损伤演化路径影响结果。

图10(a)给出了裂纹成核损伤演化第一阶段参数 ΔD_1 变化, 对剪切应力与剪切位移关系曲线的影响: 随着 ΔD_1 增大, 在剪切应力与剪切位移非光滑曲线阶段的剪切应力越小。图10(b)给出了裂纹成核损伤演化第二阶段参数 ΔD_2 变化, 对剪切应力与剪切位移关系曲线的影响: 随着 ΔD_2 增大, 在剪切应力与剪切位移非光滑曲线阶段的剪切应力越小。对比图10(a)与(b), 在 $\Delta D_2 > \Delta D_1$ 时, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现快速下降趋势(例如图10(a)中

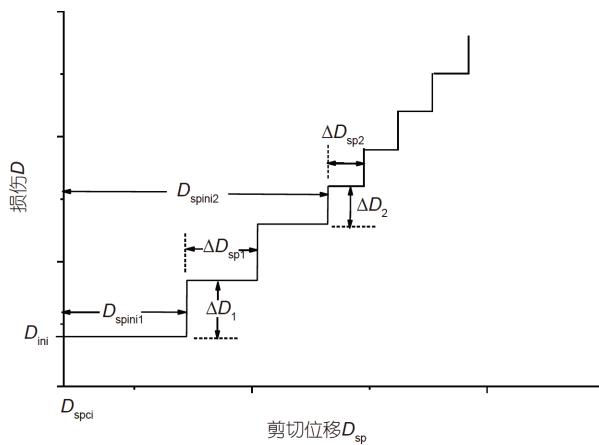


图 9 损伤随剪切位移变化路径

Figure 9 Damage path with increasing shear displacement.

$\Delta D_1=0.001$ 或 0.005 曲线); 在 $\Delta D_2 < \Delta D_1$ 时, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现上升趋势 (例如图10(b)中 $\Delta D_2=0.001$ 曲线). 这个理论结果现象与图2中岩石压缩声发射监测试验结果中损伤演化对应力变形关系影响结果是一致的.

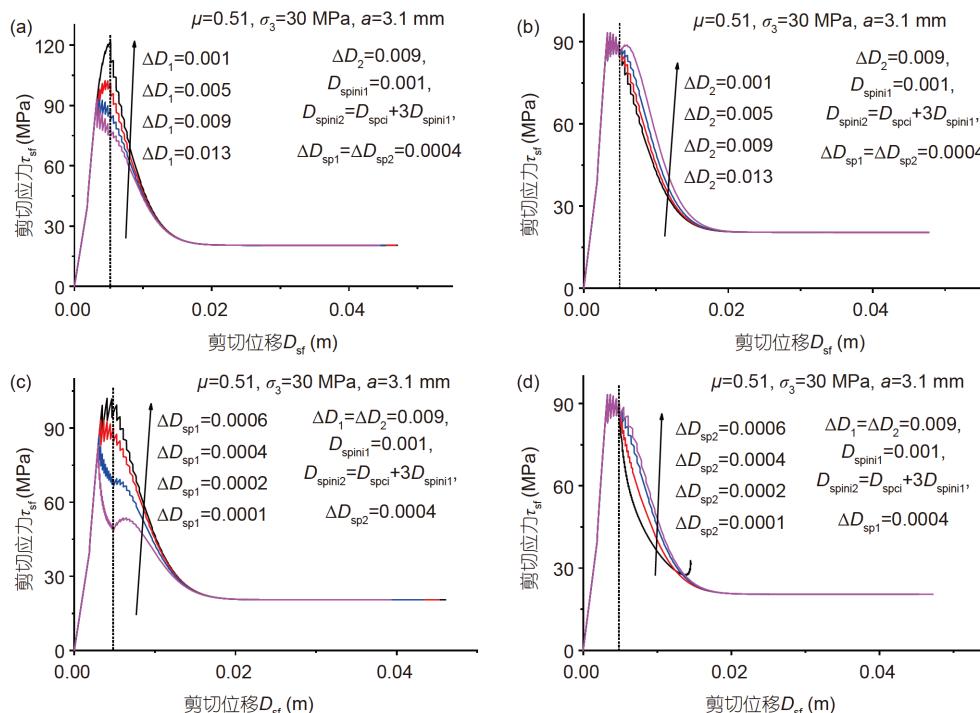
图 10 (网络版彩图) 连续变化的参数 ΔD 和 ΔD_{sp} 对剪切应力与位移关系影响. (a) ΔD_1 参数影响, $\Delta D_2=0.009$; (b) ΔD_2 参数影响, $\Delta D_1=0.009$; (c) ΔD_{sp1} 参数影响, $\Delta D_{sp2}=0.004$; (d) ΔD_{sp2} 参数影响, $\Delta D_{sp1}=0.004$ Figure 10 (Color online) Effects of changing parameter ΔD and ΔD_{sp} on relationship between shear stress and displacement. (a) Effect of parameter ΔD_1 , $\Delta D_2=0.009$; (b) effect of parameter ΔD_2 , $\Delta D_1=0.009$; (c) effect of parameter ΔD_{sp1} , $\Delta D_{sp2}=0.004$; (d) effect of parameter ΔD_{sp2} , $\Delta D_{sp1}=0.004$.

图10(c)给出裂纹成核损伤演化第一阶段参数 ΔD_{sp1} 变化, 对剪切应力与剪切位移关系曲线的影响: 随着 ΔD_{sp1} 增大, 在剪切应力与剪切位移非光滑曲线阶段的剪切应力越大. 图10(d)给出了裂纹成核损伤演化第二阶段参数 ΔD_{sp2} 变化, 对剪切应力与剪切位移关系曲线的影响: 随着 ΔD_{sp2} 增大, 在剪切应力与剪切位移非光滑曲线阶段的剪切应力越大. 对比图10(c)与(b), 在 $\Delta D_{sp2} > \Delta D_{sp1}$ 时, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现快速上升趋势(例如图10(c)中 $\Delta D_{sp1}=0.0001$ 或 0.0002 曲线); 在 $\Delta D_{sp2} < \Delta D_{sp1}$ 时, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现快速下降趋势(例如图10(d)中 $\Delta D_{sp2}=0.0001$ 或 0.0002 曲线).

本节给出了两种局部裂纹成核损伤随剪切位移演化路径下的剪切应力与剪切位移非光滑曲线研究结果, 定性地解释了脆性岩石局部裂纹成核对岩石力学行为的影响. 但是为了能够清楚地解释局部裂纹成核损伤对岩石应力与变形关系的影响, 本文着重分析了裂纹成核损伤演化路径参数的敏感性, 没有真正的研

究岩石随机局部裂纹成核损伤随变形演化路径的影响。但是, 脆性岩石局部裂纹成核损伤演化路径模型的提出, 为今后随机局部裂纹成核损伤影响下的岩石力学行为研究提供了重要的理论基础。

4 结论

基于岩石断裂损伤理论, 提出了一种能够解释三轴压缩荷载作用下, 脆性岩石局部裂纹成核损伤影响下的轴向应力与轴向应变关系非光滑曲线的宏细观力学模型, 并在此基础上重点研究了局部裂纹成核损伤行为对岩石剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线的影响, 具体结论如下。

(1) 真实岩石局部裂纹成核损伤演化路径可以通过岩石累计声发射事件数量与变形关系建立。本文理论模型中, 脆性岩石内部局部裂纹成核损伤随变形演化路径可以通过参数 ε_{ini} , $\Delta\varepsilon_1$ 及 ΔD , 或参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 来进行定性描述。通过结合以上试验与理论结果, 建立了一种连接自然岩石内部局部细观裂纹成核损伤与宏观应力-变形本构关系的方法, 为今后更加真实地数值模拟分析深地工程脆性围岩微震及岩爆等灾害事件提供了重要的理论依据。

(2) 当局部裂纹成核损伤随变形演化路径参数 ε_{ini} , $\Delta\varepsilon_1$ 及 ΔD , 或参数 D_{spini} , ΔD_{sp} 及 ΔD 均被假设为固定值时, 随着脆性岩石内部第一次局部裂纹成核损伤出现的越早(即 ε_{ini} 或 D_{spini} 越小), 或随着相邻裂纹成核之间的变形差值越小(即 $\Delta\varepsilon_1$ 或 ΔD_{sp} 越小), 或随着局部裂纹成核损伤值越大(即 ΔD 越大), 岩石轴向应力-应变关系或剪切应力-位移关系的非光滑曲线阶段达到一定变形的应力值越小。随着剪切位移增大, 上、下剪切应力均先增大后减小; 随着参数 D_{spini} 的增大, 上、下剪切应力逐渐增大, 而且上、下剪切应力随着剪切位移先增大的趋势逐渐消失, 并且剪切应力降越大。参数 ΔD_{sp} 越大, 上、下剪切应力及剪切应力降越大。参数 ΔD 越大, 上、下剪切应力越小, 但是剪切应力降越大。

(3) 当局部裂纹成核损伤随变形演化路径被假设为两个阶段时(即通过参数 $D_{\text{spini}1}$, $D_{\text{spini}2}$, $\Delta D_{\text{sp}1}$, $\Delta D_{\text{sp}2}$, ΔD_1 , ΔD_2 定义损伤演化路径), 在 $\Delta D_2 > \Delta D_1$, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现快速下降趋势; 在 $\Delta D_2 < \Delta D_1$, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现上升趋势。在 $\Delta D_{\text{sp}2} > \Delta D_{\text{sp}1}$ 时, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现快速上升趋势; 在 $\Delta D_{\text{sp}2} < \Delta D_{\text{sp}1}$ 时, 第二阶段剪切应力与剪切位移关系非光滑曲线整体呈现快速下降趋势。

参考文献

- Zhao Y F, Liu L Q, Pan Y S, et al. An experimental study on microseismic, self-potential, charge induction and acoustic emission during fracture process of rocks (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2017, 53: 107–123 [赵扬锋, 刘力强, 潘一山, 等. 岩石变形破裂微震、电荷感应、自电位和声发射实验研究. 岩石力学与工程学报, 2017, 36: 107–123]
- Cheng G, Li L, Zhu W, et al. Microseismic investigation of mining-induced brittle fault activation in a Chinese coal mine. Int J Rock Mech Min Sci, 2019, 123: 104096
- Lu C P, Dou L M, Wu X R, et al. Experimental and empirical research on frequency-spectrum evolvement rule of rockburst precursory microseismic signals of coal-rock (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2008, 27: 519–525 [陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27: 519–525]
- Colombero C, Comina C, Vinciguerra S, et al. Microseismicity of an unstable rock mass: From field monitoring to laboratory testing. J Geophys Res Solid Earth, 2018, 123: 1673–1693
- Zhao X D, Li Y H, Liu J P, et al. Study on rock failure process based on acoustic emission and its location technique (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2008, 27: 990–995 [赵兴东, 李元辉, 刘建坡, 等. 基于声发射及其定位技术的岩石破裂过程研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27: 990–995]
- Zhao Q, Lisjak A, Mahabadi O, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing and associated microseismicity using finite-discrete element method. J Rock Mech Geotechnical Eng, 2014, 6: 574–581
- Pearson C. The relationship between microseismicity and high pore pressures during hydraulic stimulation experiments in low permeability granitic rocks. J Geophys Res, 1981, 86: 7855–7864
- Zhai S T, Wu G, Zhang Y, et al. Research on acoustic emission characteristics of granite under high temperature (in Chinese). Chin J Rock Mech

- Eng, 2013, 32: 126–134 [翟松韬, 吴刚, 张渊, 等. 高温作用下花岗岩的声发射特征研究. 岩石力学与工程学报, 2013, 32: 126–134]
- 9 Xia M F, Han W S, Ke F J, et al. Statistical mesoscopic damage mechanics and damage evolution induced mutation (in Chinese). Adv Mech, 1995, 25: 145–159 [夏蒙棼, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(II). 力学进展, 1995, 25: 145–159]
- 10 Chen Z H, Tang C A, Fu Y F. Infinite element simulation of catastrophe induced by evolution of rock microfracturing damage (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 1998, 20: 9–15 [陈忠辉, 唐春安, 傅宇方. 岩石微破裂损伤演化诱致突变的数值模拟. 岩土工程学报, 1998, 20: 9–15]
- 11 Fei H L, Xu X H, Tang C A. Research on theory of catastrophe of rockburst in underground chamber (in Chinese). J China Coal Soc, 1995, 20: 29–33 [费鸿禄, 徐小荷, 唐春安. 地下硐室岩爆的突变理论研究. 煤炭学报, 1995, 20: 29–33]
- 12 Wang L, Mao Y C, Ye J S, et al. Models for microcracks extension and damage evolution based on number series of microdefects nucleation (in Chinese). Eng Mech, 2013, 30: 278–286 [王利, 毛原春, 叶金生, 等. 基于微缺陷成核序列的岩石微裂纹生长和损伤演化模型. 工程力学, 2013, 30: 278–286]
- 13 Zhou H, Meng F Z, Zhang C Q, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness based on stress-strain curve (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2014, 33: 1114–1122 [周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 基于应力–应变曲线的岩石脆性特征定量评价方法. 岩石力学与工程学报, 2014, 33: 1114–1122]
- 14 Yu Q, Tang C A, Li L C, et al. Nucleation process of rockbursts based on microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station (in Chinese). Chinese J Geotech Eng, 2014, 36: 2315–2322 [于群, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析. 岩土工程学报, 2014, 36: 2315–2322]
- 15 Xu N W, Li T B, Dai F, et al. Microseismic monitoring and stability evaluation for the large scale underground caverns at the Houziyan hydropower station in Southwest China. Eng Geol, 2015, 188: 48–67
- 16 Li P X, Feng X T, Feng G L, et al. Rockburst and microseismic characteristics around lithological interfaces under different excavation directions in deep tunnels. Eng Geol, 2019, 260: 105209
- 17 Brantut N, Schubnel A, Guéguen Y. Damage and rupture dynamics at the brittle-ductile transition: the case of gypsum. J Geophys Res, 2011, 116: B01404
- 18 Liu B, Liu Q S. Space evolution regularity of microseism during the development of rockburst (in Chinese). J Mining Safety Eng, 2011, 28: 174–180 [刘滨, 刘泉声. 岩爆孕育发生过程中的微震活动规律研究. 采矿与安全工程学报, 2011, 28: 174–180]
- 19 Yang Y J, Wang D C, Guo M F, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 2014, 33: 98–104 [杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究. 岩石力学与工程学报, 2014, 33: 98–104]
- 20 Xia Y J, Li L C, Tang C A, et al. A new method to evaluate rock mass brittleness based on stress-strain curves of class I. Rock Mech Rock Eng, 2017, 50: 1123–1139
- 21 Li H, Li H, Gao B, et al. Study of acoustic emission and mechanical characteristics of coal samples under different loading rates. Shock Vib, 2015, 2015: 1–11
- 22 Li A Q, Zhang R, Ai T, et al. Acoustic emission space-time evolution rules and failure precursors of granite under uniaxial compression (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2016, 38: 306–311 [李安强, 张茹, 艾婷, 等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究. 岩土工程学报, 2016, 38: 306–311]
- 23 Wang Z, Wang J, Yang S, et al. Failure behaviour and acoustic emission characteristics of different rocks under uniaxial compression. J Geophys Eng, 2020, 17: 76–88
- 24 Peng J, Yang S Q. Comparison of mechanical behavior and acoustic emission characteristics of three thermally-damaged rocks. Energies, 2018, 11: 2350
- 25 Aki K. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, 2, estimation of earthquake moment, release energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. Bull Earthquake Res Inst Tokyo Univ, 1966, 44: 73–78
- 26 Ji Y, Wu W, Zhao Z. Unloading-induced rock fracture activation and maximum seismic moment prediction. Eng Geol, 2019, 262: 105352
- 27 Li X Z, Qi C Z, Shao Z S, et al. Micromechanics-based model study of shear properties of brittle rocks (in Chinese). Rock Soil Mech, 2019, 40: 1358–1367 [李晓照, 戚承志, 邵珠山, 等. 基于细观力学脆性岩石剪切特性演化模型研究. 岩土力学, 2019, 40: 1358–1367]
- 28 Ashby M F, Sammis C G. The damage mechanics of brittle solids in compression. Pure Appl Geophys, 1990, 133: 489–521
- 29 Li X Z, Shao Z S. Macro-micro mechanical model for progressive and creep failure of brittle rock (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2016, 38: 1391–1398 [李晓照, 邵珠山. 脆性岩石渐进及蠕变失效特性宏细观力学模型研究. 岩土工程学报, 2016, 38: 1391–1398]

- 30 Chen Z H, Fu Y F, Tang C A. Confining pressure effect on acoustic emissions during rock failure (in Chinese). Chin J Rock Mech Eng, 1997, 16: 65–70 [陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 岩石破裂声发射过程的围压效应. 岩石力学与工程学报, 1997, 16: 65–70]

Research on mechanisms of the damage catastrophe from localized microcrack nucleation in brittle rocks

LI XiaoZhao^{1,2,3}, QI ChengZhi^{1,2} & SHAO ZhuShan³

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;

³ Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

The localized microcrack nucleation causes localized damage and weakens localized strength, which greatly influences the shape of the constitutive curve in the relationship between stress and deformation of brittle rocks. However, the micro-macro mechanisms of the constitutive relationship between stress and deformation influenced by the damage from the localized microcrack nucleation are rarely studied. In this study, we propose a micro-macro model influenced by the damage catastrophe from the localized microcrack nucleation to explain the unsmooth curves of axial stress-strain relation or shear stress-displacement relation. We established the model by incorporating the suggested microcrack-stress relation, micro-macro damage relation, axial and shear mechanical relation, and proposed function of microcrack nucleation-induced damage catastrophe path with deformation. We defined the damage catastrophe path in terms of the parameters $\varepsilon_{\text{limi}}$, $\Delta\varepsilon_1$, and ΔD , or D_{spini} , ΔD_{sp} , and ΔD . We discussed the effects of these parameters on the unsmooth curves of axial stress-strain relation and shear stress-displacement relation and emphatically analyzed the sensitivities of parameters— D_{spini} , ΔD_{sp} , and ΔD —on the top shear stress, bottom shear stress, and shear stress drop in the unsmooth curve of shear stress and displacement. Inserting the experimental data of damage evolution path monitored by the acoustic emission technique into the proposed model, we further propose a method to apply the proposed model to analyze mechanics in natural rocks, which provides vital aid for prediction and evaluation of the disasters of microseismicity and rockburst in deep underground engineering.

brittle rocks, localized microcrack nucleation, stress drops, microseismicity, rockbursts

doi: [10.1360/SST-2020-0185](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0185)