

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0453

高渗透压脆性岩石蠕变宏-细观力学模型研究

李晓照^{1,2}, 班力壬^{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. 北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘 要: 高渗透压对深部地下工程脆性岩石蠕变力学特性有着重要影响。然而, 能够解释高渗透压作用脆性岩石完整减速、稳态及加速三级蠕变过程中, 细观裂纹扩展与宏观变形关系的宏细观力学模型研究很少。基于考虑含有初始裂纹与新生成翼型裂纹影响的裂纹尖端应力强度模型, 引入渗透水压与初始裂纹及新生成翼型裂纹之间的力学关系, 建立了考虑渗透水压作用的裂纹尖端应力强度模型; 然后结合亚临界裂纹扩展法则, 与裂纹及应变损伤关系模型, 推出了考虑渗透水压影响的脆性岩石蠕变裂纹扩展与宏观变形关系的宏细观力学模型。当施加轴向应力小于岩石裂纹启裂应力时, 岩石近似表现为线弹性变形; 当施加轴向应力大于裂纹启裂应力且小于岩石峰值强度, 岩石表现为塑性蠕变变形。研究了不同渗透压作用下, 分级轴向应力加载岩石蠕变应变时间演化曲线, 并通过试验结果验证了模型的合理性。分别讨论了恒定渗透压与分级渗透压, 对脆性岩石蠕变过程中裂纹长度、裂纹扩展速率、轴向应变及轴向应变率的影响。该模型为高渗透压深部地下工程围岩稳定性评价提供了重要理论依据。

关 键 词: 脆性岩石; 蠕变; 高渗透水压; 裂纹扩展; 宏细观模型

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)12-3987-09

Study on the mechanical model of macro-micro creep under high seepage pressure in brittle rocks

LI Xiao-zhao^{1,2}, BAN Li-ren^{1,2}, QI Cheng-zhi^{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 University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: High seepage pressure has a great significance on creep behaviors of brittle rocks under deep underground engineering. However, the macro-micro relationship between microcrack growth and macroscopic deformation under high seepage pressure during the decelerated, steady-state, accelerated creep has been rarely studied. In this study, based on the stress intensity model of crack tips with the influence of initial cracks and new wing cracks, the mechanical relationship between seepage pressure and initial cracks and new wing cracks is introduced, and the stress intensity model model of crack tips considering seepage pressure is established. Then combined with the subcritical crack law and crack-strain damage model, a macro-micro mechanical model is proposed to explain the relationship between creep crack growth and macroscopic deformation of brittle rock considering the influence of seepage pressure. The rock behaves elasticity when the applied axial stress is smaller than the crack initiation stress, while behaves plasticity when the axial stress exceeds the crack initiation stress but is less than the rock peak strength. The theoretical creep curves subjected to step axial loading are studied under different seepage pressures, and the rationality of the proposed model is verified by experimental results. Furthermore, the creep evolution of crack length, crack growth velocity, axial strain, and axial strain rate under constant or step loading seepage pressure are discussed. The new model provides a significant theoretical basis for the evaluation of the stability of surrounding rocks in deep underground engineering under high seepage pressure.

Keywords: brittle rocks; creep; high seepage pressure; crack propagation; macro-micro model

1 引 言

深部地下工程脆性围岩蠕变力学行为对于评

价深部工程施工及长期运营阶段围岩稳定性有着重要意义。此外, 深部地下工程围岩往往伴随着地下水环境影响, 高渗透水压环境对于深部地下脆性岩

收稿日期: 2020-04-17

修回日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(No.51708016, No.51774018); 北京市教委科研项目(No.KM202110016014); 北京建筑大学金字塔人才培养工程(No.JDYC20200307)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51708016, 51774018), the Research Project of Beijing Municipal Education Commission(KM202110016014) and the Pyramid Talent Training Project of Beijing University of Civil Engineering and Architecture(JDYC20200307).

第一作者简介: 李晓照, 男, 1987 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学与地下工程方面研究。E-mail: lixiaozhao@bucea.edu.cn

石蠕变力学特性有着重要影响。众多学者通过渗透压蠕变试验研究了不同恒定渗透压对岩石蠕变力学行为影响,随着渗透压增大,加速了岩石蠕变失效时间^[1-2]。然而,在自然条件下,特定位置岩石周围渗透压环境往往是连续变化的,也有学者试验分析了分级渗透压作用下,恒定荷载岩石蠕变应变演化特性^[3-4]。基于上述试验结果,也有学者通过结合弹、黏及塑性蠕变模块模型,提出了众多蠕变理论模型,分析了渗透水压对岩石蠕变应变演化影响^[5-7]。以上研究均是宏观渗透压作用蠕变力学特性研究,并不能解释渗透压对岩石内部蠕变裂纹变化机制影响。

Liu等^[8]通过电镜扫描技术分析了渗透压作用蠕变岩石内部微裂隙变化特性。Grgic等^[9]利用声发射监测技术分析了渗透压作用蠕变岩石内部裂纹扩展诱发的声发射信号,间接反映了岩石内部裂纹演化过程。Xu等^[10]提出了一种考虑了水-力耦合作用的岩石应力-应变本构模型,数值模拟分析了不同渗透压作用岩石完整蠕变应变演化曲线及岩石内部蠕变裂纹变化情况。Zhao等^[11]通过将孔隙水压引入岩石裂纹扩展应力强度因子模型,研究了渗透水压对岩石减速及稳态蠕变裂纹扩展行为的影响,并通过提出的考虑渗透压的Burgers蠕变模型验证了岩石蠕变裂纹模型的合理性。韦立德等^[12]基于自洽理论和线黏弹性断裂力学理论研究了张开裂纹、闭合裂纹和裂纹水压影响的节理岩体蠕变柔量公式,并讨论了渗透压、裂隙密度参数和摩擦系数对裂隙岩体蠕变柔量的影响。李晓照等^[13]基于翼型裂纹扩展模型、亚临界裂纹扩展法则及裂纹变形宏观损伤模型,研究了不考虑渗透压影响的岩石蠕变宏观力学模型。然而,以上研究对脆性岩石完整减速、稳态及加速蠕变过程中渗透水压作用岩石细观裂纹与宏观变形关系的力学机制仍然无法给出解释。

本文将提出一种有效渗透水压导致的裂纹扩展机制模型,并结合基于翼型裂纹扩展模型、亚临界裂纹扩展模型及裂纹应变损伤关系模型提出的脆性岩石宏观蠕变力学模型,建立考虑渗透水压影响的脆性岩石蠕变宏观力学模型,进而为渗透水压影响下的深部地下工程短期施工及长期运营阶段围岩稳定性评价提供理论支持。

2 理论模型

2.1 高渗透压裂纹扩展与应力状态(σ_1 , σ_3)关系

基于脆性岩石细观裂纹扩展模型,提出了一个考虑渗透水压作用下,脆性岩石蠕变宏观力学模型。具体模型理论推导过程如下。图1给出了基于

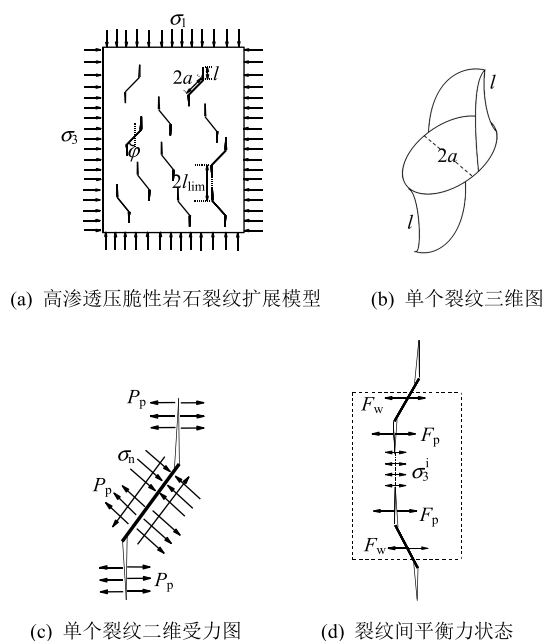


图1 基于翼型裂纹模型
Fig.1 Model based on wing cracks

翼型裂纹模型^[14],考虑轴压 σ_1 、围压 $\sigma_3 = \sigma_2$ 与渗透水压 P_p 共同作用下,裂纹扩展力学特性。假设模型为各向同性弹性体。脆性岩石初始损伤 $D_0 = N_V a^3$ ^[15], a 为初始裂纹尺寸, N_V 为单位体积内岩石初始裂纹数量。翼型裂纹扩展长度 l 的平均极限长度为 $l_{lim} = a[(3/(4\pi D_0))^{1/3} - \alpha]$ ^[16], $\alpha = \cos\varphi$, φ 为初始裂纹与轴压方向的夹角,即初始裂纹角度。考虑渗透压作用,压缩岩石内部初始裂纹面剪切应力 τ 与法向应力 σ_n 为(见图1(c))

$$\tau = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \sin 2\varphi \quad (1)$$

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \cos 2\varphi - P_p \quad (2)$$

本文理论计算中,压力取负,反之为正,结果分析中为了便于观察,选取压力为正。式(2)解释了高渗透水压导致了岩石初始裂纹面方向应力弱化,促进了初始裂纹面的滑动,进而导致了沿着最大主应力 σ_1 方向的翼型裂纹扩展生成。此时高渗透水压的存在对新生成翼型裂纹扩展有一个强化作用。下面通过将翼型裂纹面有效渗透水压 F_p 参数引入细观裂纹扩展模型中,来解释这个强化作用机制。

基于翼型裂纹尖端应力强度因子^[14],引入渗透压参数 P_p (见图1(c)和1(d)),则改进的考虑渗透压作用的翼型裂纹尖端张开型裂纹应力强度因子为

$$K_I = \frac{F_w}{[\pi(l + \beta a)]^{3/2}} + \frac{2}{\pi}(\sigma_3 + \sigma_3^i)\sqrt{\pi l} \quad (3)$$

式中：

$$\sigma_3^i = \frac{F_w + F_p}{S - \pi(l + \alpha a)^2} \quad (4)$$

$$S = \pi^{1/3} [3/(4N_v)]^{2/3} \quad (5)$$

$$F_w = (\tau + \mu\sigma_n)\pi a^2 \sin \varphi \quad (6)$$

$$F_p = |P_p| [\pi(l + \alpha a)^2 - \pi(\alpha a)^2] \quad (7)$$

式中： μ 为初始裂纹摩擦系数； β 为常数； $||$ 为取绝对值； S 为含有 N_v 个初始裂纹的单位体积岩石内部单个裂纹面所占平均面积（ $S = \pi r^2$ ， r 为单位体积内单个裂纹所分配的球体半径， $4\pi r^3/3 = 1/N_v$ ）。图1(d)中， F_w 为初始裂纹面张力，其为外部荷载及渗透水压引起翼型裂纹开裂的张力； F_p 为有效渗透水压参数，其为本文引入的关键变量，为渗透压导致的翼型裂纹开裂的张力； σ_3^i 为作用于两个翼型裂纹尖端间的内应力，模型中假设初始裂纹面及翼型裂纹面在 σ_3 方向投影近似为一个圆平面，则 $\pi(l + \alpha a)^2$ 表示初始裂纹面与翼型裂纹面在 σ_3 方向的投影面积， $\pi(\alpha a)^2$ 表示初始裂纹面在 σ_3 方向的投影面积， $\pi(l + \alpha a)^2 - \pi(\alpha a)^2$ 代表渗透压作用在翼型裂纹面上的面积。图2中给出了渗透压与初始裂纹面法向应力 σ_n ，初始裂纹面张力 F_w 及翼型裂纹面有效渗透压力 F_p 的关系。

岩石裂纹应力强度因子 K_I 达到断裂韧度 K_{IC} 时开裂。根据式（3），渗透水压作用脆性岩石的施加应力与裂纹长度关系为

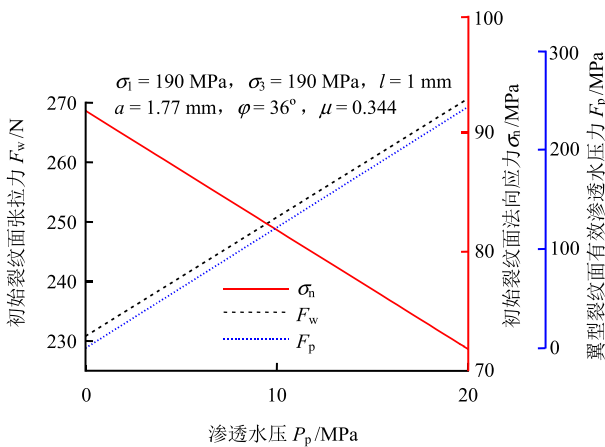


图 2 渗透水压与初始裂纹面法向应力、张力及翼型裂纹面有效渗透水压力的关系

Fig.2 Relationships between seepage pressure and normal, tensile stress on initial crack surface and effective seepage pressure on wing crack surface

$$\sigma_1(l) = \frac{K_{IC} - \sigma_3 (A_1 \pi a^2 \chi + 2\sqrt{l/\pi}) + A_3 - A_4}{A_2 \pi a^2 \chi} \quad (8)$$

式中：

$$A_1 = [(\sin 2\varphi + \mu + \mu \cos 2\varphi) \sin \varphi] / 2 \quad (9)$$

$$A_2 = [(\mu - \mu \cos 2\varphi - \sin 2\varphi) \sin \varphi] / 2 \quad (10)$$

$$A_3 = a^2 \mu \pi \chi P_p \sin \varphi \quad (11)$$

$$A_4 = 2F_p \sqrt{l/\pi} [S - \pi(l + \alpha a)^2] \quad (12)$$

$$\chi = [\pi(l + \beta a)]^{-3/2} + 2\sqrt{l/\pi} [S - \pi(l + \alpha a)^2]^{-1} \quad (13)$$

函数 $\sigma_1(l)$ 中的应力-裂纹长度关系与应力-应变关系相对应，并存在一个峰值强度值 σ_{1peak} ^[16]。岩石裂纹启裂时（即， $l = 0$ ）的轴向应力为

$$\sigma_{lc} = [(\beta^{3/2} K_{IC}) / \sqrt{a/\pi} - \sigma_3 A_1 + \mu P_p \sin \varphi] / A_2 \quad (14)$$

式（13）和式（14）给出了岩石的不同围压作用下的峰值应力与裂纹启裂应力的判断方程，这两个应力临界值为下面岩石蠕变过程外界恒定施加应力状态值的选取提供了重要帮助。

2.2 高渗透压亚临界裂纹扩展诱发的蠕变方程

将式（3）代入单个张开型岩石亚临界裂纹扩展速率与裂纹强度因子方程 $dl/dt = v(K_I/K_{IC})^n$ ^[17]，可推出应力-裂纹长度-裂纹扩展速率-时间关系式：

$$l' = \frac{dl}{dt} = v \left[\frac{\sigma_1 A_2 \pi a^2 \chi + \sigma_3 (A_1 \pi a^2 \chi + 2\sqrt{l/\pi}) - A_3 + A_4}{K_{IC}} \right]^n \quad (15)$$

式中： v 为特征裂纹扩展速率； n 为应力侵蚀参数，这两个参数可采用亚临界裂纹扩展试验获得^[17]。裂纹长度微分方程式（15）的初始裂纹长度值 l_0 通过给定应力状态（ $\sigma_{lc} < \sigma < \sigma_{1peak}$ ）下的式（8）求得。

利用轴向应变，岩石损伤可定义为^[18]

$$D = 1 - \exp[-\varepsilon_0^{-1} (\varepsilon_1 - 2\gamma E^{-1} |\sigma_3|)]^m \quad (16)$$

式中： D 为损伤； m 和 ε_0 为材料常数； ε_1 为轴向应变； γ 为泊松比； E 为弹性模量。

利用细观裂纹特性，损伤可定义为^[15]

$$D = N_v (l + a)^3 \quad (17)$$

联立上述基于裂纹与应变定义的损伤，宏观应变与细观裂纹长度间的关系为

$$\varepsilon_1 = 2E^{-1}\gamma|\sigma_3| + \varepsilon_0 \left(-\ln \left[1 - D_0 (l/a + 1)^3 \right] \right)^{\frac{1}{m}} \quad (18)$$

将裂纹极限长度 l_{lim} 代入到式(18),可近似评价岩石最终失效应变。将式(15)计算得到的时间相关的裂纹扩展结果 $l(t)$ 代入式(18),当施加应力大于裂纹启裂应力 σ_{lc} 且小于岩石强度 σ_{lpeak} ,裂纹扩展诱发的岩石轴向蠕变应变为

$$\varepsilon_1(t) = 2E^{-1}\gamma|\sigma_3| + \varepsilon_0 \left(-\ln \left[1 - D_0 (l(t)/a + 1)^3 \right] \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (\sigma_{lc} < \sigma_1 < \sigma_{lpeak}) \quad (19)$$

当岩石施加轴向应力小于裂纹启裂应力 σ_{lc} 时,岩石蠕变近似为线弹性力学行为。此外,通过岩石压缩试验结果^[6, 19]可以看到,渗透水压对岩石塑性变形阶段的力学特性影响较大,对岩石弹性阶段的力学特性影响较小。因此,当岩石施加轴向应力小于裂纹启裂应力 σ_{lc} ,忽略渗透水压对岩石弹性模量及泊松比影响,则岩石弹性变形为

$$\varepsilon_1 = |\sigma_1 - 2\gamma\sigma_3|/E, \quad (0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_{lc}) \quad (20)$$

因此,综合关于岩石裂纹扩展前近似的线弹性方程(19)与裂纹扩展后岩石的非线性蠕变方程(20),岩石完整的蠕变演化方程为

$$\varepsilon_1(t) = \begin{cases} |\sigma_1 - 2\gamma\sigma_3|/E, & (0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_{lc}) \\ 2E^{-1}\gamma|\sigma_3| + \varepsilon_0 \left(-\ln \left[1 - D_0 (l(t)/a + 1)^3 \right] \right)^{\frac{1}{m}}, & (\sigma_{lc} < \sigma_1 < \sigma_{lpeak}) \end{cases} \quad (21)$$

此外,值得注意的是本文主要关注裂纹启裂后($\sigma_{lc} < \sigma_1 < \sigma_{lpeak}$),渗透压对脆性岩石蠕变行为影响。

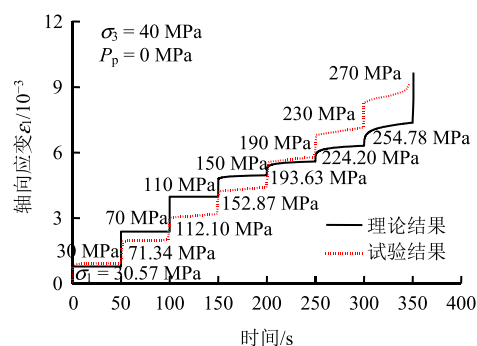
3 结果与讨论

3.1 理论模型合理性验证

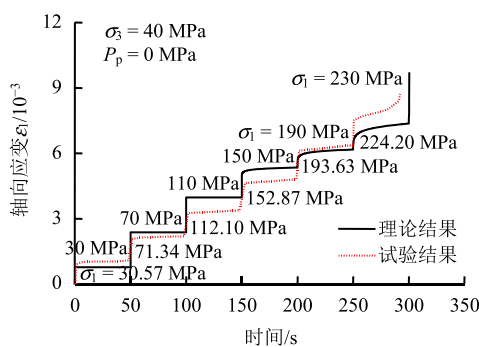
本文参考选取深部砂岩参数^[6, 20-22]。通过常规三轴压缩试验可以确定弹性模量为 25.03 GPa,泊松比为 0.13;通过岩石三点弯曲试验可以确定断裂韧性 $K_{IC} = 0.69 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;通过电镜扫描试验可以确定岩石初始损伤 $D_0 = 0.059$;通过岩石亚临界裂纹扩展试验可以确定干燥无渗透压岩石应力侵蚀指数 $n = 20$,特征裂纹扩展速率 $v = 8 \times 10^{-18}$,有渗透压饱和和状态 $n = 16$, $v = 1.7 \times 10^{-13}$ 。岩石的初始裂纹摩擦系数、初始裂纹尺寸及初始裂纹角度很难通过试验精确定,本文通过对比理论与试验得到的岩石蠕

变应变与时间演化曲线,反复校正,进而通过试算的方法确定岩石的初始裂纹摩擦系数 $\mu = 0.344$ 、初始微裂纹尺寸 $a = 1.77 \text{ mm}$,初始裂纹角度 $\varphi = 36^\circ$ 。岩石材料常数 $m = 2$, $\varepsilon_0 = 1/58$, $\beta = 0.29$,这些参数可通过以往研究经验确定,具体模型参数选取方法可参考文献^[16]。

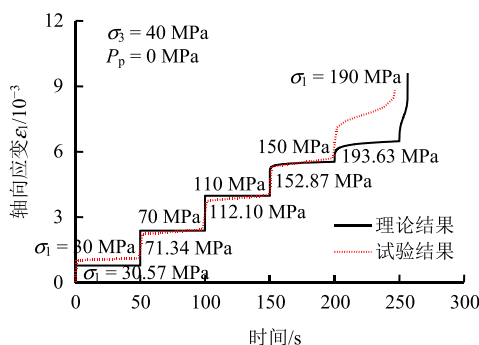
基于方程(14),可计算得到围压 $\sigma_3 = 40 \text{ MPa}$ 时,无渗透压岩石裂纹启裂应力 $\sigma_{lc} = 100 \text{ MPa}$,因此,图3中分级轴压为 30、70 MPa 时,岩石蠕变应变表现为弹性应变,其对应蠕变时间演化公式(21)的第1阶段(即 $0 < \sigma_1 < \sigma_{lc}$)变形;轴压大于等于 110 MPa 的分级加载阶段为非线性岩石蠕变阶段,其对应着公式(21)第2阶段(即 $\sigma_{lc} < \sigma_1 < \sigma_{lpeak}$)变形。



(a) 无渗透压



(b) 渗透压 1 MPa



(c) 渗透压 10 MPa

图3 岩石分级轴向加载蠕变理论与试验曲线对比
Fig.3 Comparison of theoretical and experimental creep curves under step axial loading

图 3 中分别给出了渗透压 0、1 及 10 MPa 时, 轴向应力分级加载下砂岩蠕变理论结果与试验结果对比曲线。

理论结果与试验结果^[6]具有一定的可比性, 变化趋势相似, 验证了渗透压作用岩石蠕变宏细观力学模型的合理性。此外, 理论与试验结果数值上的差异, 原因可能是: ①本文模型中无法真实模拟随机分布细观裂纹, 而是通过平均化方法将特定种类岩石内部初始裂纹尺寸及角度假设为一个定值; ②模型忽略了水岩化学作用对脆性岩石部分力学参数的影响; ③理论结果中分级轴压取值与试验结果中分级轴压台阶取值之间无法完全一致, 存在一定差异; ④模型参数选取误差。

3.2 恒定渗透压脆性岩石蠕变特性

图 4 给出了恒定轴压、围压及渗透水压作用下, 完整蠕变过程中, 岩石裂纹长度、裂纹扩展速率、轴向应变及轴向应变率随时间演化曲线。裂纹长度及轴向应变均是经历了减速增大、稳态增大及加速增大 3 个阶段。裂纹扩展速率及轴向应变率分别解释了裂纹长度及轴向应变随时间变化率趋势。可以看到, 裂纹长度与应变随时间演化趋势是相似的, 这也源于式 (18) 中裂纹长度与应变之间的正比例关系。图 5 中给出了不同渗透水压作用下, 脆性岩石蠕变过程中新生成翼型裂纹面受到的有效渗透水压演化趋势。可以看到, 有效渗透水压随着时间不断增大, 而且在后期阶段产生加速增大的趋势。这个有效渗透压演化现象也说明了岩石加速蠕变阶段, 内部裂纹损伤程度加速增大, 导致渗透水与岩石内部裂纹面接触面积加速增大, 进而导致岩石的加速破坏。由于不同渗透水压岩石蠕变失效时间相

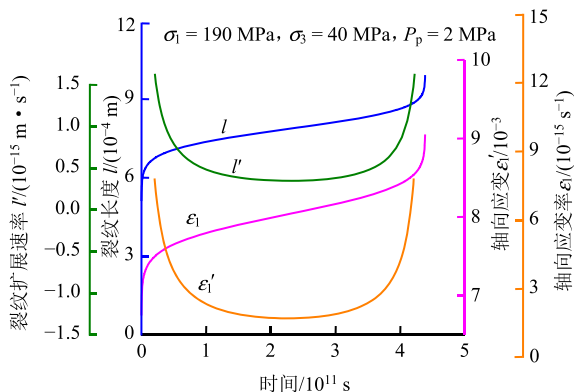


图 4 恒定荷载及渗透压作用下, 岩石完整蠕变过程中裂纹长度、裂纹扩展速率、轴向应变及轴向应变率时间演化曲线
Fig.4 Evolution of crack length, crack growth velocity, axial strain, and axial strain rate under constant loading and seepage pressure during complete creep

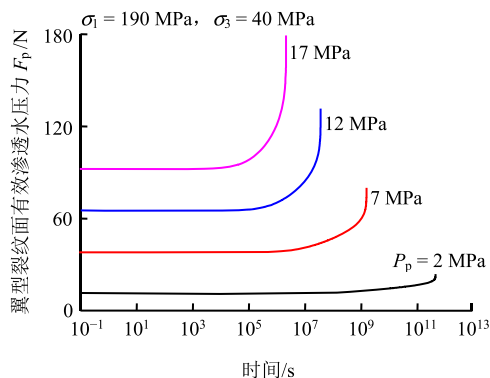


图 5 蠕变过程中翼型裂纹面有效渗透水压演化曲线
Fig.5 Evolution of effective seepage pressure on wing crack surface during rock creep

差很大, 为了将不同渗透压下的有效渗透压演化曲线呈现在一个图中, 时间横坐标选取对数坐标形式。

图 6 分别研究了不同渗透压对岩石完整蠕变中裂纹长度、裂纹扩展速率、轴向应变及轴向应变率演化趋势的影响。随着渗透压增大岩石蠕变失效时间不断减小。随着渗透压的增大, 岩石稳态蠕变裂纹扩展速率及轴向应变率不断增大。图 6(c)不同渗透压之间的变量为 5 MPa, 其对岩石蠕变失效时间量级影响很大, 导致不同渗透压对同一时刻岩石蠕变应变的影响无法准确辨别。因此, 图 7 给出了变量为 1 MPa 的渗透压对岩石完整蠕变失效曲线的影响, 随着渗透压增大或有效围压 P_p 的减小, 相同时间的轴向应变不断增大, 这与文献[10]研究结果相一致。

图 8 给出了不同围压及轴压下, 渗透压与岩石蠕变失效时间的关系曲线。可以看到, 随着渗透压增大, 岩石蠕变失效时间减速降低; 相同渗透压下, 随着围压增大或轴压的减小, 蠕变失效时间增大。此外, 围压或轴压产生相同的应力变量 5 MPa 时, 围压对岩石蠕变失效时间量级的影响要大于轴压对岩石蠕变失效时间的量级, 即围压对岩石蠕变失效影响敏感性要大于轴压。从图 8(a)中可以看到, 围压 45 MPa, 渗透压 0 MPa 时, 岩石蠕变失效时间不存在数据点, 原因是此时的受力状态下, 岩石蠕变失效时间为无穷大, 也就是说此时岩石不会发生失效。

3.3 分级渗透压路径脆性岩石蠕变特性

上一节给出了恒定渗透压对岩石蠕变行为影响, 然而在深部地下环境中, 随着施工等外界因素干扰, 岩石内部渗透水压可能会出现不断变化的趋

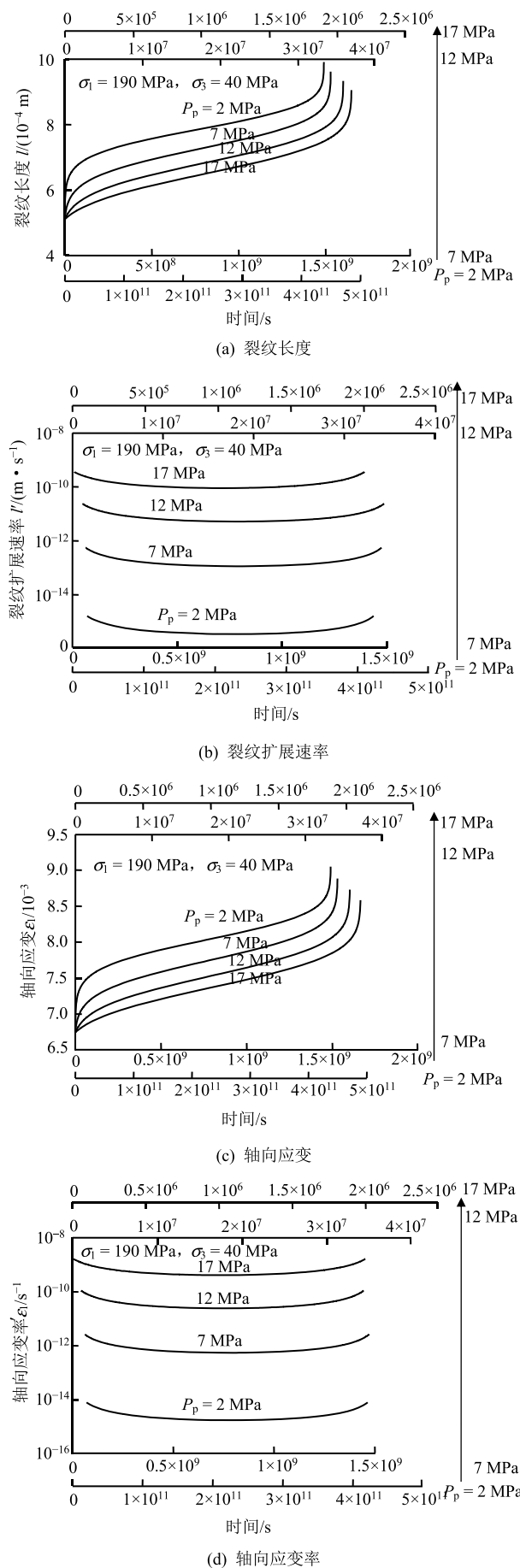


图6 渗透压对完整蠕变演化影响
Fig.6 Effects of seepage pressure on complete creep evolution

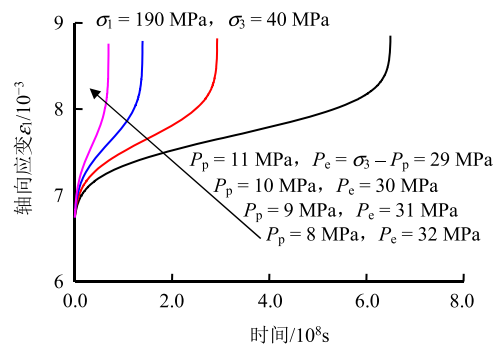
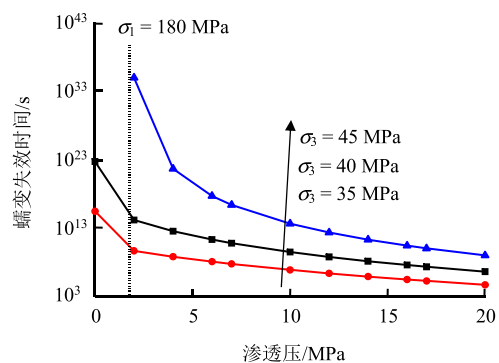
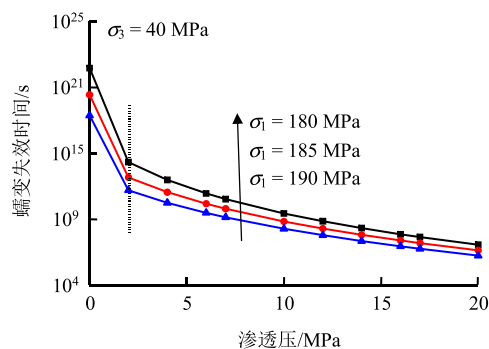


图7 渗透水压 P_p 或有效围压 P_c 对脆性岩石完整蠕变影响
Fig.7 Effects of seepage pressure P_p or effective confining pressure P_c on creep behaviors of brittle rocks



(a) 围压影响



(b) 轴向应力影响

图8 不同围压或轴向应力下渗透压与蠕变失效时间关系曲线

Fig.8 Relationship between seepage pressure and creep failure time under different confining pressures or axial stresses

势, 因此, 本节将研究随时间分级增大的渗透压路径对岩石蠕变演化趋势影响。

图9中给出了恒定轴压、围压荷载与分级渗透压作用下, 岩石裂纹长度、裂纹扩展速率、轴向应变及轴向应变率随时间演化趋势。分级渗透压路径的初始渗透压 P_{p1} 为2 MPa, 每一级渗透压增量 ΔP_p 为2 MPa, 每一级持续时间为50 h。裂纹长度及轴向应变经历多次减速增大变化阶段, 直至最后一级

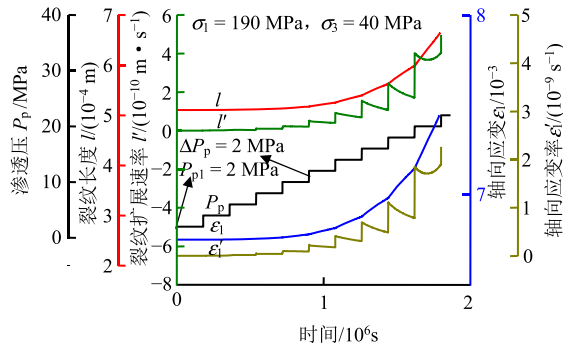


图 9 恒定荷载与分级渗透压作用下, 岩石蠕变过程中裂纹长度、裂纹扩展速率、轴向应变及轴向应变率时间演化曲线

Fig.9 Evolution of crack length, crack growth velocity, axial strain, and axial strain rate under constant loading and step seepage pressure during rock creep

渗透压阶段, 发生加速增大, 此时岩石破坏。裂纹扩展速率及轴向应变率随时间演化曲线, 更清楚地解释了岩石裂纹长度及轴向应变分级变化率的演化趋势。随着分级渗透压台阶数的增大, 岩石最小裂纹扩展速率或轴向应变率不断增大。该研究结果的变化趋势与文献[3-4]中试验结果相一致。

图10分别给出了不同渗透压增量 ΔP_p 的分级渗透压下, 岩石蠕变裂纹长度、裂纹扩展速率、轴向应变及轴向应变率演化曲线。随着渗透压增量的增大, 岩石发生蠕变失效的分级台阶数降低, 岩石蠕变失效时间不断减小, 给定时刻的岩石裂纹长度、轴向应变、裂纹扩展速率及轴向应变率均不断增大。

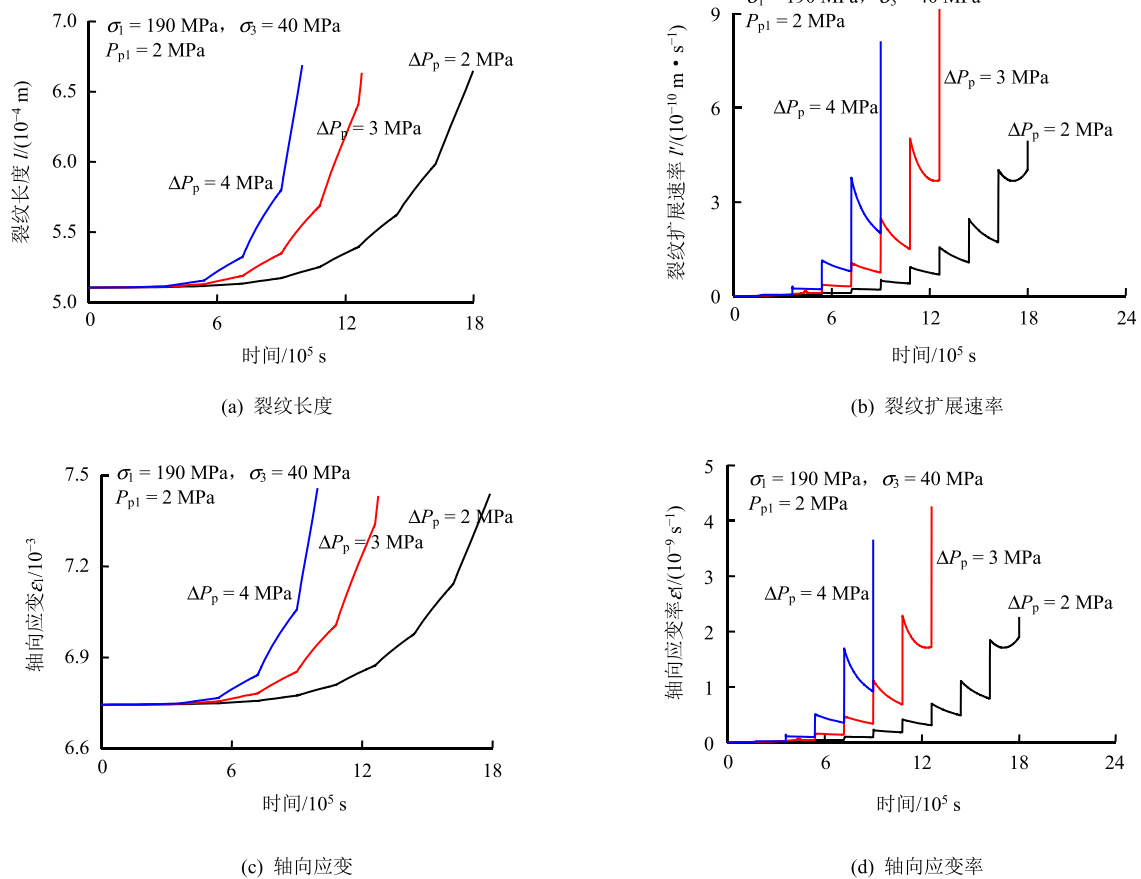


图 10 分级渗透压对蠕变演化影响

Fig.10 Effects of step loading seepage pressure on creep evolution

4 结 论

基于断裂损伤力学理论, 建立了一个考虑渗透水压影响的脆性岩石蠕变宏细观力学模型, 解释了渗透压对脆性岩石蠕变细观裂纹扩展长度、裂纹扩展速率、有效渗透水压力、应变及应变率的影响。具体结果如下:

(1) 随着渗透水压增大, 岩石内部初始裂纹面法向应力线性降低, 初始裂纹面张力线性增大, 新生成翼型裂纹面有效渗透水压力线性增大。

(2) 恒定渗透压作用下, 随渗透压增大, 岩石蠕变失效时间不断减小, 岩石稳态蠕变裂纹扩展速率及轴向应变率不断增大, 相同时间的轴向应变不断增大。相同渗透压下, 随围压增大或轴压的

减小,蠕变失效时间增大。围压对岩石蠕变失效时间量级的影响要大于轴压对岩石蠕变失效时间的量级,也就是说围压对岩石蠕变失效影响敏感性要大于轴压。有效渗透水压力随蠕变时间演化不断增大,且在蠕变加速阶段,有效渗透水压力也加速增大。

(3) 分级渗透压作用下,裂纹长度及轴向应变经历多次减速增大变化阶段,直至最后一级渗透压阶段,发生加速增大,直至岩石破坏。随着分级渗透压台阶数的增大,岩石最小裂纹扩展速率或轴向应变率不断增大。随着分级渗透压增量的增大,岩石发生蠕变失效的分级台阶数降低,岩石蠕变失效时间不断减小,给定时刻的岩石裂纹长度、轴向应变、裂纹扩展速率及轴向应变率均不断增大。

参 考 文 献

- [1] 曹亚军, 王伟, 徐卫亚, 等. 低渗透岩石流变过程渗透演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 3822-3829.
CAO Ya-jun, WANG Wei, XU Wei-ya, et al. Permeability evolution of low-permeability rocks in triaxial creep tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl.2): 3822-3829.
- [2] 余成学, 崔旋. 高孔隙水压力对岩石蠕变特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1603-1609.
SHE Cheng-xue, CUI Xuan. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(8): 1603-1609.
- [3] 阎岩, 王恩志, 王思敬, 等. 岩石渗流-流变耦合的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2095-2103.
YAN Yan, WANG En-zhi, WANG Si-jing, et al. Study of seepage-rheology coupling experiment of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2095-2103.
- [4] 杨红伟, 许江, 聂闻, 等. 渗流水压力分级加载岩石蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1613-1619.
YANG Hong-wei, XU Jiang, NIE Wen, et al. Experimental study on creep of rocks under step loading of seepage pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(9): 1613-1619.
- [5] 沈荣喜, 刘长武, 刘晓斐. 压力水作用下碳质页岩三轴流变特征及模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1031-1034.
SHEN Rong-xi, LIU Chang-wu, LIU Xiao-fei. Triaxial rheology characteristics and model of carbonaceous shale in pressure water[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(7): 1031-1034.
- [6] 蒋海飞, 刘东燕, 黄伟, 等. 高围压下高孔隙水压对岩石蠕变特性的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1248-1256.
JIANG Hai-fei, LIU Dong-yan, HUANG Wei, et al. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock under high confining pressure[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(7): 1248-1256.
- [7] YI H Y, ZHOU H W, WANG R, et al. On the relationship between creep strain and permeability of granite: experiment and model investigation[J]. **Energies**, 2018, 11: 2859.
- [8] LIU L, XU W Y, WANG H L, et al. Permeability evolution of granite gneiss during triaxial creep tests[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(9): 3455-3462.
- [9] GRGIC D, AMITRANO D. Creep of a porous rock and associated acoustic emission under different hydrous conditions[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2009, 114: B10201.
- [10] XU T, ZHOU G, HEAP M J, et al. The modeling of time-dependent deformation and fracturing of brittle rocks under varying confining and pore pressures[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51: 3241-3263.
- [11] ZHAO Y L, WANG Y X, WANG W J, et al. Modeling of rheological fracture behavior of rock cracks subjected to hydraulic pressure and far field stresses[J]. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 2019, 101: 59-66.
- [12] 韦立德, 徐卫亚, 杨松林, 等. 考虑裂纹内水压的节理岩体蠕变柔量分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 564-568.
WEI Li-de, XU Wei-ya, YANG Song-lin, et al. Analysis of creep compliance of jointed rocks with consideration of the influence of water pressure in saturated cracks[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2003, 31(5): 564-568.
- [13] 李晓照, 邵珠山. 脆性岩石渐进及蠕变失效特性宏观细观力学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1391-1398.
LI Xiao-zhao, SHAO Zhu-shan. Macro-micro mechanical model for progressive and creep failure of brittle rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(8): 1391-1398.
- [14] ASHBY M F, SAMMIS C G. The damage mechanics of

- brittle solids in compression[J]. **Pure and Applied Geophysics**, 1990, 133(3): 489-521.
- [15] BUDIANSKY B, O'CONNEL R J. Elastic moduli of a cracked solid[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1976, 12: 81-97.
- [16] 李晓照, 邵珠山, 戚承志. 岩石裂纹损伤及围压对剪切破坏影响研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(11): 4249-4258.
LI Xiao-zhao, SHAO Zhu-shan, QI Cheng-zhi. Study on effects of crack damage and confining pressure on shear fracture band in rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4249-4258.
- [17] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1984, 89(6): 4077-4114.
- [18] 陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 岩石破裂声发射过程的围压效应[J]. **岩石力学与工程学报**, 1997, 16(1): 65-70.
CHEN Zhong-hui, FU Yu-fang, TANG Chun-an. Confining pressure effect on acoustic emissions in rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(1): 65-70.
- [19] 彭俊, 荣冠, 周创兵, 等. 水压影响岩石渐进破裂过程的试验研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(4): 941-946.
PENG Jun, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing, et al. Experimental study of effect of water pressure on progressive failure process of rocks under compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 941-946.
- [20] 王军保, 刘新荣, 刘俊, 等. 砂岩力学特性及其改进 Duncan-Chang 模型[J]. **岩石力学与工程学报**, 2016, 35(12): 2388-2397.
WANG Jun-bao, LIU Xin-rong, LIU Jun, et al. Mechanical properties of sandstone and an improved Duncan-Chang constitutive model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(12): 2388-2397.
- [21] 李斌, 黄达, 马文著. 层理面特性对砂岩断裂力学行为的影响研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(3): 858-868.
LI Bin, HUANG Da, MA Wen-zhu. Study on the fracturing behavior of sandstone influenced by bedding plane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(3): 858-868.
- [22] 刘新荣, 刘俊, 李栋梁, 等. 不同水压与初始卸荷水平下砂岩的力学特性及卸荷本构模型[J]. **煤炭学报**, 2017, 42(10): 2592-2600.
LIU Xin-rong, LIU Jun, LI Dong-liang, et al. Unloading mechanical properties and constitutive model of sandstone under different pore pressures and initial unloading levels[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(10): 2592-2600.
-
- 上接第 3978 页
- [16] 王根龙, 伍法权, 祁生文. 悬臂-拉裂式崩塌破坏机制研究[J]. **岩土力学**, 2012, 33(增刊 2): 269-274.
WANG Gen-long, WU Fa-quan, QI Sheng-wen. Research on failure mechanisms for cantilever and tension crack-type collapse[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Suppl.2): 269-274.
- [17] 崔剑锋. 采煤沉陷区岩质边坡悬臂—断裂失稳破坏模式研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 43-63.
CUI Jian-feng. Study on cantilever-fracture instability failure mode of rock slope in coal mining subsided area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 43-63.
- [18] MELIN SOLVEIG. When does a crack grow under mode II conditions?[J]. **International Journal of Fracture**, 1986, 30: 103-114.
- [19] 李世愚, 和泰名, 尹祥础, 等. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010: 260-271.
LI Shi-yu, HE Tai-ming, YIN Xiang-chu, et al. Introduction to rock fracture mechanics[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2010: 260-271.
- [20] 王延平. 崩塌灾害变形破坏机理与监测预警研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
WANG Yan-ping. Study on deformation and failure mechanism of rockfall hazards and monitoring and early warning[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [21] 熊良宵, 虞利军. 三种 Mohr 强度准则的对比分析[J]. **长江科学院院报**, 2016(4): 81-85.
XIONG Liang-xiao, YU Li-jun. Comparative study of three Mohr strength criteria[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2016(4): 81-85.