

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.092



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于相场法的水-力耦合作用下裂隙岩体变形破坏机理

王扬淋^{1,2}, 王侯¹, 刘思佳¹, 寇苗苗¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266525; 2. 中建八局第二建设有限公司, 济南 250014)

摘要:探究水-力耦合作用下裂隙岩体的力学响应和破坏机制,对解决水-力耦合工况下岩体工程安全与稳定问题具有重要意义。基于 Biot 多孔介质理论及弹性理论,提出一种水-力耦合相场数值模拟方法,提出交错时间积分方案来获得流体压力和固体变形的稳定解,得到的控制方程式采用全饱和多孔介质弹性理论的体积应变分离和偏应变分离。通过模拟水力压裂与天然裂隙相互作用等数值算例验证了数值模型的有效性和正确性。此外,为探究实际工程开挖过程中的卸载破坏机理,结合钻孔注液试验数值实例,建立一个裂隙岩体水-力耦合卸载破坏模型,模拟水-力耦合条件下裂隙岩体卸荷破坏全过程。结果表明:在水-力耦合卸载破坏过程中,混合拉-剪裂纹的扩展和连接主导了最终破坏模式;初始围压、初始卸荷应力状态对剪切裂纹的发育具有促进作用,水压则反之。

关键词:裂隙岩体;水-力耦合作用;卸载破坏机理;相场法;数值模拟

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)05-0211-10

Phase field modelling of the hydro-mechanical coupling failure mechanisms of fissured rock masses

WANG Yanglin^{1,2}, WANG Yu¹, LIU Sijia¹, KOU Miaomiao¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, Shandong, P. R. China; 2. The Second Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan 250014, P. R. China)

Abstract: Exploring the mechanical response and damage mechanism of fractured rocks under hydro-mechanical coupling is one of the important ways to solve the safety and stability problems of rock engineering under hydro-mechanical coupling conditions. Based on Biot porous media theory and elastic theory, a numerical simulation method of hydro-mechanical coupled phase field is developed, and a staggered time integration scheme is proposed to obtain stable solutions of fluid pressure and solid deformation, in which the obtained control equations adopt the volume strain separation and partial strain separation of elasticity theory of fully saturated

收稿日期: 2023-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(42107178);山东省自然科学基金(ZR2021QE162)

作者简介: 王扬淋(1998-),男,主要从事岩石力学及数值模拟研究, E-mail: 1377367664@qq.com。

寇苗苗(通信作者),女,副教授, E-mail: koumiaomiao@qut.edu.cn。

Received: 2023-05-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 42107178); Natural Science Foundation of Shandong (No. ZR2021QE162)

Author brief: WANG Yanglin (1998-), main research interest: rock mechanics and numerical simulations, E-mail: 1377367664@qq.com.

KOU Miaomiao (corresponding author), associate professor, E-mail: koumiaomiao@qut.edu.cn.

porous media. Two different numerical examples of fluid permeability tests and hydraulic fracturing with natural fracture interaction are used for validation. By the comparing of the numerical model with the analytical solution, the numerical results and the previous data are in better agreement, which verifies the validity and correctness of the model method. In addition, in order to investigate the unloading damage mechanism in the actual engineering excavation process, a hydro-mechanical coupled unloading damage model was established by combining numerical examples of borehole injection tests to simulate the whole process of fracture rock propagation damage under the dual conditions of hydro-mechanical coupling and surrounding pressure unloading. The study shows that mixed tensile-shear crack expansion and connection dominate the final damage mode during coupled hydro-mechanical unloading damage. Confining pressure and initial unloading stress states have a promoting effect on the development of shear cracks, while water pressure is reversed.

Keywords: fissure rock masses; hydro-mechanical coupling process; unloading failure mechanisms; phase-field approach; numerical simulations

随着现代化综合立体交通运输体系建设的迅速推进,地铁工程、隧道工程的建设规模逐渐扩大,岩土工程事业蓬勃发展。然而,与此同时,边坡失稳、隧道突涌水等工程事故频繁发生,造成了严重的财产损失和安全隐患,引起了越来越多的关注^[1]。从大量工程事故数据中可以明显看出,近半数工程事故与水-力耦合作用有关^[2-6]。因此,深入探究水-力耦合作用下裂隙岩体的力学响应和破坏机理,对解决岩土工程的安全与稳定问题具有重要意义。

关于裂隙岩体水-力耦合破坏问题,学者们通过室内试验与数值模拟方法开展了一系列研究:在室内试验中,通过控制变量,探究岩石的物理力学特性及渗透演化特性;而数值模拟方法则主要通过模拟裂纹扩展过程探究裂纹发展规律。由于水-力耦合问题的复杂性以及岩石的各向异性,数值模拟方法较室内试验具有一定的优势。目前数值模拟方法主要分为两大类:一类以连续介质力学理论为基础,包括有限元法^[7]、扩展有限元法^[8]、相场法^[9-10]等;另一类以非连续介质力学理论为基础,如离散元法^[11]等。此外,目前还有一些研究致力于连续-非连续介质方法,如数值流形法^[12]。相对而言,以连续介质力学理论为基础的模拟方法由于其位移场连续,省去了位移跳跃的处理步骤,在数值实现上更为便捷^[13],因此在研究连续对象发生小变形和断裂破坏时具有较大优势。

近年来,相场法逐渐引起广泛关注,尤其是在水-力耦合问题领域。相场法裂纹扩展规律遵循能量最小准则,裂纹总是朝着最易破坏的方向扩展,无须追踪界面,也无须在界面破坏前后更改网格,从而显著提高了工作效率。此外,目前已经开发出多种流固耦合相场模型,通过引入多孔介质理论、Biot理论等,建立流体连续性偏微分方程,从而实现水-力耦合作用下的相场演化方程的求解^[14]。学者

们利用相场法在水-力耦合领域取得了不错的进展。Ehlers等^[15-16]通过有限元分析对水力压裂过程进行数值研究,将相场方法与多孔介质理论相结合,为动态水力压裂问题的研究和计算提供新的思路。Heider等^[17-18]研究了致密低渗透脆性岩体水力破裂的数值模拟框架,基于多孔介质的连续介质理论,通过扩散相场建模方法进行扩展,描述了固相变形和孔隙流体流动等力学行为。刘国威等^[19]利用相场模拟和显式有限元求解框架实现了动态水力压裂模拟,研究了裂纹在动态水力压裂作用下的扩展,并计算了水力压裂中复杂裂纹扩展形态。易良平等^[20-21]利用渗流力学、Biot孔弹性理论和相场法理论,建立了多孔介质水力裂纹扩展计算非线性方程组,并使用有限元法进行离散。

水-力耦合问题不仅仅是力学关系的简单组合,岩石的物理力学特性也会受到水的影响,例如,孔隙率、Biot系数会随损伤的加深呈现增大的趋势。因此,开发一种准确预测水-力耦合作用下裂纹扩展断裂的数值模型方法十分关键。近年来,相场法已经在解决水-力耦合问题方面取得了一定的成功。本文中,笔者结合可随相场值变化的孔隙率、Biot系数等参数,建立了一种能同时考虑拉伸破坏和剪切破坏的应变区分方法。相对于仅考虑拉伸破坏的方法,该方法能够更准确地获得水-力耦合裂纹扩展和断裂的结果。此外,笔者基于相场法开发了多孔介质水-力耦合裂纹破坏模型,在验证模型的基础上对裂隙岩体水-力耦合卸载破坏现象进行研究,并系统研究了裂隙岩体水-力耦合破坏机理。

1 水-力耦合相场模型

1.1 裂纹拓扑表征

在计算域 $\Omega = \Gamma \times L$ 内,具有一个无限长度区域 $L = [-\infty, +\infty]$,假设在轴向位置 $x = 0$ 处出现

裂纹,截面 Γ 表示完全断裂的裂纹表面。基于计算均匀化原理及考虑微裂纹及微孔洞的影响,在相场数值模型中,计算域内相场变量 $d(x) \in [0, 1]$ 可将“尖锐型”裂纹拓扑描述为“弥散型”裂纹拓扑,如图 1 所示。“弥散型”裂纹拓扑可以将岩土体材料从完整到完全破坏的过程平滑过渡。在相场数值模型中, $d=0$ 表示岩土体材料处于完整(即未破坏)状态,而 $d=1$ 表示岩土材料处于完全破坏状态。

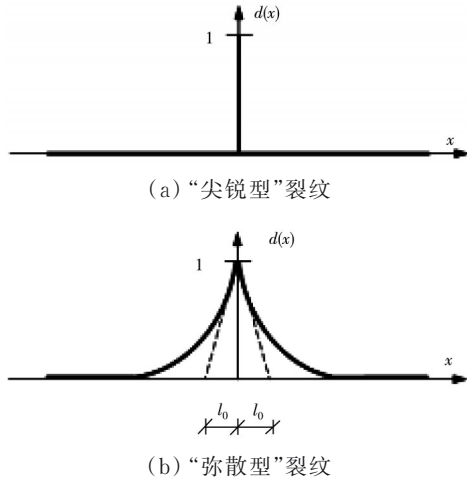


图 1 尖锐裂纹和弥散裂纹拓扑描述
Fig. 1 Sharp and diffuse crack topology

在满足狄利克雷边界的条件下,可以利用齐次微分方程的解,对一维相场进行表征,见式(1)。

$$d = \exp\left(-\frac{x}{l_0}\right) \quad (1)$$

式中: l_0 为特征长度,用于描述相场模型中“弥散型”裂纹宽度。^[22]

根据 Miehe 等^[22]用于描述正则化的裂纹拓扑,裂纹表面密度函数定义为经典形式

$$\gamma(d, \nabla d) = \frac{1}{2l_0} d^2 + \frac{l_0}{2} |\nabla d|^2 \quad (2)$$

式中: ∇d 为相场变量 d 的空间梯度。

通过正则化,相场模型中裂纹拓扑可定义为

$$\Gamma(d) = \int \gamma(d, \nabla d) dV \quad (3)$$

同时,用于断裂面的萌生扩张能量供给的断裂能 Ψ_{frac} 利用式(2)可以定义为

$$\Psi_{\text{frac}} = \int_{\Omega} \mathcal{G}_c \gamma(d, \nabla d) dV \quad (4)$$

式中: \mathcal{G}_c 为岩土体临界断裂能量释放率。

1.2 弹性应变能

Miehe 等^[22]认为岩石损伤只会导致拉伸应力退化,将应变张量划分为拉应变和压应变

$$\epsilon_{\pm} = \sum_{i=1}^3 \langle \epsilon_i \rangle_{\pm} + n_i \otimes n_i \quad (5)$$

式中: ϵ_i 为主应变; n_i 为主应变方向,其中方括号运

算符定义为 $\langle x \rangle_{\pm} = (x \pm |x|)/2$ 。

但是这种方法对于剪切应变引起的 II 型裂纹不能模拟出有效的结果,基于此,对比当前可计算 II 型裂纹的方法,本文选择采取将应变张量划分为体积部分和偏差部分的方法^[23-28]。

$$\epsilon = \epsilon_{\text{sph}}^{\pm} + \epsilon_{\text{dev}} \quad (6a)$$

$$\epsilon_{\text{dev}} = \epsilon - \frac{1}{3} \text{tr}(\epsilon) I \quad (6b)$$

式中: ϵ 为应变张量; $\epsilon_{\text{sph}}^{\pm}$ 为体应变张量; ϵ_{dev} 为偏应变张量; I 为二阶单位张量。

从而,材料体应变能密度可划分为

$$\psi_s(\epsilon) = \psi_n^{\pm}(\epsilon) + \psi_t(\epsilon) \quad (7a)$$

$$\psi_n^{\pm}(\epsilon) = \frac{1}{2} \epsilon_{\text{sph}}^{\pm} : C : \epsilon_{\text{sph}}^{\pm} \quad (7b)$$

$$\psi_t(\epsilon) = \frac{1}{2} \epsilon_{\text{dev}} : C : \epsilon_{\text{dev}} \quad (7c)$$

式中: C 为四阶弹性刚度张量; ψ_n^+ 为张拉变形的应变能密度; ψ_n^- 为压缩变形的应变能密度; ψ_t 为剪切变形的应变能密度。

在相场演化过程,本模型考虑应变能在拉伸和剪切部分变形引起的能量退化现象。

$$\psi_s(\epsilon, d) = g(d) [\psi_n^+(\epsilon) + \psi_t(\epsilon)] + \psi_n^-(\epsilon) \quad (8)$$

式中: $g(d) = (1-d)^2$ 为应变能退化函数。

1.3 水-力耦合相场模型

1.3.1 流体连续性方程

固体计算域内自由能密度主要由两项组成

$$\phi(\epsilon, d) = \psi_s(\epsilon, d) + \psi_{\text{frac}}(d) \quad (9)$$

式中: ϕ 为计算域内总体自由能密度; ψ_s 为应变能密度; ψ_{frac} 为断裂能密度。

基于多孔介质力学原理,假设多孔介质岩土体计算域处于饱和状态,在模拟水压致裂过程中需考虑流体势能项,即多孔介质流体变形能密度 ψ_{fluid} ,则多孔介质岩土体自由能密度可表示为

$$\psi = \psi_s + \psi_{\text{frac}} + \psi_{\text{fluid}} \quad (10)$$

多孔介质流体变形能密度 ψ_{fluid} 为^[29]

$$\psi_{\text{fluid}} = \frac{M(d)}{2} [\zeta - \alpha(d) \epsilon_{ii}]^2 = \frac{p^2}{2M(d)} \quad (11)$$

式中: p 为流体压力; ζ 为流体体积增量。

室内试验研究表明, Biot 系数 α 、Biot 模量 $M(d)$ 以及孔隙率 φ 随着岩石材料的损伤破坏而变化,即其可视为岩石材料损伤演化的函数。因此,在本模型中使用相场变量 d 对 Biot 系数 α 和 Biot 模量 $M(d)$ 进行描述^[21]。

$$\alpha(d) = 1 - \frac{g(d)K}{K_s} \quad (12)$$

式中: K 为多孔岩石材料体积模量; K_s 为多孔介质

材料固体颗粒体积模量。

$$\frac{1}{M} = \frac{\varphi(d)}{K_f} + \frac{\alpha(d) - \varphi(d)}{K_s} \quad (13)$$

式中: K_s 为多孔介质材料固体颗粒体积模量; K_f 为流体体积模量。

$$\varphi(d) = \varphi_0 + (1 - \varphi_0) [1 - (1 - d)^2] \quad (14)$$

式中: φ_0 为初始孔隙率。

另外, 岩土体多孔介质体积模量可表示为^[30]

$$K = \frac{1 - \varphi}{1 - m\varphi} K_m \quad (15a)$$

$$m = \frac{1 + \nu}{2(1 - 2\nu)} \quad (15b)$$

基于达西渗流定律及式(11), 可以推导出多孔弹性介质中流体连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{p}{M(d)} + \alpha(d) \epsilon_{ii} \right] - \nabla \cdot \left(\frac{k(\epsilon_{ii})}{\mu} \nabla p \right) = 0 \quad (16)$$

式中: p 为多孔介质内流体压力; μ 是流体黏滞度; $k(\epsilon_{ii})$ 为多孔岩土体渗透系数, 假设渗透率是大主应变的函数 $k(\epsilon_{ii}) = (1 + b \langle \epsilon_{ii} \rangle_+) k_0$, b 为倍化系数。

1.3.2 多孔岩土体应力平衡方程

在水-力耦合条件下, 多孔岩土体有效应力可表示为

$$\sigma = \frac{\partial \psi_s(\epsilon, d)}{\partial \epsilon} + \frac{\partial \psi_{\text{fluid}}(\epsilon, d)}{\partial \epsilon} \quad (17)$$

将式(8)及式(11)代入式(17)后对应变求偏导可得

$$\sigma = g(d) \mathbb{C} : (\epsilon_{\text{sph}}^+ + \epsilon_{\text{dev}}) + \mathbb{C} : \epsilon_{\text{sph}}^- - \alpha(d) p I \quad (18)$$

因此, 多孔岩土体介质的应力平衡方程可写为

$$\nabla \cdot [g(d) \mathbb{C} : (\epsilon_{\text{sph}}^+ + \epsilon_{\text{dev}}) + \mathbb{C} : \epsilon_{\text{sph}}^- - \alpha(d) p I] = 0 \quad (19)$$

1.3.3 饱和多孔岩土体相场演化方程

固体中的断裂是一个不可逆的过程, 为保证数值模型在模拟裂纹扩展过程中具有该不可逆特性, 建立了局部历史变量 $\mathcal{H}(\epsilon, d)$ 来驱动相场演化过程, 即

$$\mathcal{H}_n(\epsilon, d) = \max \{ \psi_n^+(\epsilon, d) \}, \text{tr}(\epsilon) \geq 0 \quad (20a)$$

$$\mathcal{H}_n(\epsilon, d) = 0, \text{tr}(\epsilon) < 0 \quad (20b)$$

$$\mathcal{H}_i(\epsilon, d) = \max \{ \psi_i(\epsilon, d) \} \quad (20c)$$

从而可获得多孔介质岩土体的相场演化方程

$$\frac{\mathcal{G}_c}{l_0} [d - l_0 \nabla^2 d] = 2(1 - d) [\mathcal{H}_n(\epsilon, d) + \mathcal{H}_i(\epsilon, d)] \quad (21)$$

1.3.4 边界条件

基于以上饱和多孔岩土体控制方程, 即式(16)、式(19)和式(21), 与相应的水-力耦合边界条件共同描述了饱和多孔岩土体水-力耦合破坏过程

的力学响应。相关边界条件表达式如下

1) 相场边界条件

$$\begin{cases} d = 1, \Gamma \\ \nabla d \cdot \mathbf{n}, \partial \Omega \end{cases} \quad (22)$$

2) 应力、位移边界条件

$$\begin{cases} \sigma \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}}, \partial \Omega^t \\ \mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}}, \partial \Omega^u \end{cases} \quad (23)$$

3) 渗流边界条件

$$\begin{cases} p = \bar{p}, \partial \Omega^p \\ \left(-\frac{k}{\mu} \nabla p \right) \cdot \mathbf{n} = \bar{q}, \partial \Omega^q \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\partial \Omega^u$ 和 $\partial \Omega^p$ 为 Dirichlet 边界条件; $\partial \Omega^t$ 和 $\partial \Omega^q$ 为 Neumann 边界条件, 如图 2 所示。Dirichlet 边界与 Neumann 边界具有式(25)所示关系

$$\begin{cases} \partial \Omega = \partial \Omega^u \cup \partial \Omega^t \\ \partial \Omega^u \cap \partial \Omega^t = \emptyset \end{cases} \quad (25a)$$

$$\begin{cases} \partial \Omega = \partial \Omega^p \cup \partial \Omega^q \\ \partial \Omega^p \cap \partial \Omega^q = \emptyset \end{cases} \quad (25b)$$

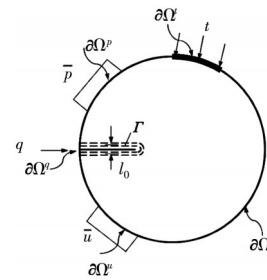


图 2 饱和多孔岩土体水-力耦合相场数值模型概念图

Fig. 2 Hydro-mechanical coupling phase-field model for saturated porous geological media

1.4 基于有限元的数值实现

基于有限元方法离散上述水-力耦合相场控制方程。

1) 流体连续性的计算残差表达式

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_p = \int_{\Omega} \mathcal{N}_p^T \left\{ \frac{\mathcal{N}_p}{M(d)} (2p^h - p_n^h) - \frac{\mathcal{N}_p p^h}{M(d_n)} + \right. \\ \left. \alpha(d_n) \mathcal{B}_u^{\text{vol}} (2u^h - u_n^h) - \mathcal{B}_u^{\text{vol}} u^h \alpha(d_n) \right\} d\Omega + \\ \int_{\Omega} \mathcal{B}_p^T \frac{k(\epsilon)}{\mu} \mathcal{B}_p p^h \Delta t d\Omega - \int_{\partial \Omega^q} \mathcal{N}_p^T q \Delta t d\Gamma \quad (26) \end{aligned}$$

2) 应力平衡的计算残差表达式

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_u = \int_{\Omega} \mathcal{B}_u^T \left[(1 - \mathcal{N}_d d^h)^2 \mathbb{C} : (\epsilon_{\text{sph}}^+ + \epsilon_{\text{dev}}) + \right. \\ \left. \mathbb{C} : \epsilon_{\text{sph}}^- \right] d\Omega - \int_{\Omega} \mathcal{B}_u^T \alpha(d) \mathcal{N}_p p^h I d\Omega - \\ \int_{\partial \Omega^t} \mathcal{N}_u^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (27) \end{aligned}$$

3) 多孔岩土体相场演化计算残差表达式

$$\mathcal{R}_d = \int_{\Omega} \left[\mathcal{N}_d^T \left(\frac{\mathcal{G}_c}{l_0} + \mathcal{H}_n + \mathcal{H}_t \right) \mathcal{N}_d d^h + \mathcal{G}_c l_0 \mathcal{B}_d^T \mathcal{B}_d d^h \right] d\Omega - \int_{\Omega} \mathcal{N}_d^T (\mathcal{H}_n + \mathcal{H}_t) d\Omega \quad (28)$$

式中: q 为注水渗流量;上标 h 为有限单元节点处的离散值; \mathcal{N}_u 、 \mathcal{N}_p 和 \mathcal{N}_d 分别为有限单元离散后的位移、水压及相场变量的形函数矩阵; \mathcal{B}_u 、 \mathcal{B}_u^{vol} 、 \mathcal{B}_p 和 \mathcal{B}_d 分别为位移、体积变形、水压及相场变量的导数运算矩阵。

基于变分原理,位移及相场变量的近似解可写为

$$\mathbf{u}_{i+1}^h = \mathbf{u}_i^h + \delta \mathbf{u}^h \quad (29a)$$

$$d_{i+1}^h = d_i^h + \delta d^h \quad (29b)$$

为获得稳定的数值解,采用交错求解方案。其中,第 $i+1$ 步的孔隙水压力可根据式(26)获得,即

$$\mathcal{K}^p p_{i+1}^h = f_p \quad (30)$$

式中: \mathcal{K}^p 和 f_p 可表示为

$$\mathcal{K}^p = \int_{\Omega} \mathcal{N}_p^T \left\{ -\frac{\mathcal{N}_p}{M(d)} p_n^h + \alpha(d_n) \mathcal{B}_u^{vol} (2u^h - u_n^h) - \mathcal{B}_u^{vol} u^h \alpha(d_n) \right\} d\Omega + \int_{\Omega} \mathcal{B}_p^T \frac{k(\epsilon)}{\mu} \mathcal{B}_p p^h \Delta t d\Omega - \int_{\partial\Omega^v} \mathcal{N}_p^T q \Delta t d\Gamma \quad (31)$$

$$f_p = \int_{\Omega} \left[-\frac{2\mathcal{N}_p}{M(d)} + \frac{\mathcal{N}_p}{M(d_n)} \right] d\Omega \quad (32)$$

2 模型验证

2.1 材料参数及边界条件

如图3(a)所示,试样的边长为 $A=4.0\text{ m}$,试样内预制裂纹长度为 $2a=1.0\text{ m}$,两条预制裂纹基于 x 轴对称且相互垂直。数值模型计算域的边界设置为固定边界(即 $\bar{\mathbf{u}}=0$)和排水边界条件(即 $\bar{p}=0.0\text{ MPa}$),不考虑地应力影响(即围压为0)。在两条预制裂纹内注水实现水压致裂(使用10 MPa水压边界控制)。计算域内多孔介质岩石材料计算参数见表1,相场数值模型中的特征长度 $l_0=0.06\text{ m}$,时间步长 $\Delta t=1.0 \times 10^{-7}\text{ s}$ 。数值模型计算域被离散为45 846个三角形单元,三角形单元最小尺寸为 $h_{\min}=0.024\text{ m}$,如图3(b)所示。

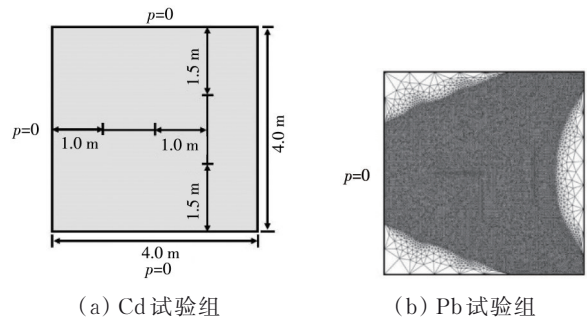


图3 数值模型几何、边界条件及有限元网格离散化
Fig. 3 Geometric and boundary conditions, and FE mesh discretization

表1 计算过程所需要的模拟参数

Table 1 Simulate parameters required for the calculation process

拉梅常数/ GPa	剪切模量/ GPa	密度/ (kg/m ³)	临界能量释放 率/(J/m ²)	孔隙率	岩体初始渗 透率/m ²	流体黏滞度/ (Pa·s)	流体体积模 量/GPa	岩石骨架晶晶体 积模量/GPa	倍化系数
16	16	2 600	25	0.2	1×10^{-11}	1×10^{-3}	2.2	28.5	1×10^4

2.2 裂纹破坏演化过程

图4~图6分别为裂隙多孔岩土体在水-力耦合条件下变形破坏过程中的裂纹扩展(即相场变量 d)、最大主应力(即 σ_1)和孔隙水压力(即 p)的演化过程。在注水压裂破坏初期(即1 000~5 000步)注水流体压驱动两裂纹从尖端起裂,并沿着裂纹走向扩展;在注水压裂破坏中期(即10 000~20 000步),水压裂纹继续扩展,但裂纹尖端最大主应力集中且相互影响。当10 000步时,可以观察到右侧裂纹有向右偏转的趋势,这是由于左侧裂纹内水压变化的影响;然而,当20 000步时,可以观察到随着裂纹扩展长度的增加,裂纹扩展路径的偏转程度更为明显。在此时间步可以发现,水平裂纹在左侧的扩展速度相较于右侧要快一些,这是因为两裂纹相互影

响,使得中间区域受到一定压力作用,不利于裂纹的扩展。在注水破坏后期(即40 000~60 000步),两条裂纹贯通,此时裂纹主要的扩展趋势在纵向裂纹处发生。由于此时水平裂纹的扩张基本完成,两裂纹之间的相互作用力提升速度减缓,纵向裂纹受

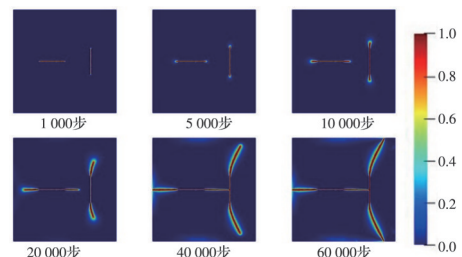


图4 水-力耦合裂纹演化过程
Fig. 4 Crack evolution process under the hydro-mechanical coupling process

到的偏转作用逐渐减弱,其方向逐渐偏向切向方向直到接触到模型边界,此时两条垂直裂纹的裂隙破坏基本完成(60 000步)。

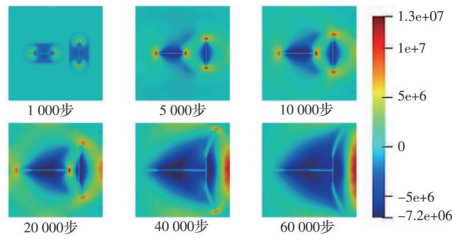


图 5 水压裂纹扩展时的最大主应力演化

Fig. 5 The evolution of maximum principal stress during hydraulic fracturing process

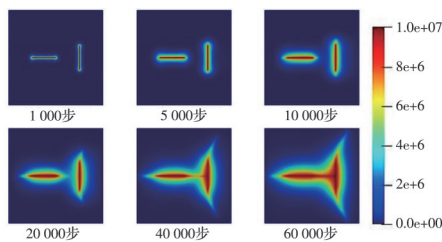


图 6 孔隙水压的演化过程

Fig. 6 The evolution of pore water pressure

算例为水-力压裂破坏,主要破坏模式为张拉破坏,可以观察到大主应力始终在裂纹尖端处主导裂纹的扩展,而水压的弥散则有着一定的滞后性,计算过程保持裂纹延伸与水压弥散的循环,直到裂纹贯通。总体来看,数值模拟结果良好,对比相似算例的数值方法^[31],虽然采用的参数不尽相同,但是能观察到相似的规律,如图 7 所示,数值模拟方法的可靠性得到一定程度的验证。

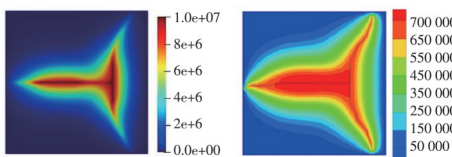


图 7 与同类算例的水压扩散对比

Fig. 7 Compared with the water pressure diffusion of similar examples

2.3 收敛性控制

为了进一步研究相场法的数值稳定性,在垂直裂纹模型中,采用 4 种细化程度不同的网格对模型进行离散,此时相场长度尺度依旧设置为 0.06 m,通过控制非局部比 l_0/h_{\min} ,来测试模型是否收敛,非局部比的值依次设置为 1.25、1.5、2、2.5,如图 8 所示。

针对垂直裂纹模型中的水平裂纹左侧数据进行记录,提取各时间步裂纹延伸长度与尖端水压值,如图 9 与图 10 所示。

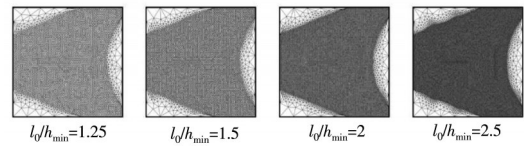


图 8 不同离散化网格的数值模型

Fig. 8 Numerical model with different discretized meshes

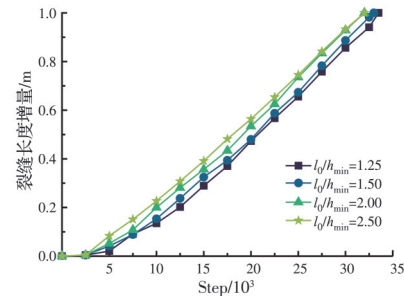


图 9 不同网格细化水平裂纹向左延伸长度增量

Fig. 9 Different meshes refine the left extension length

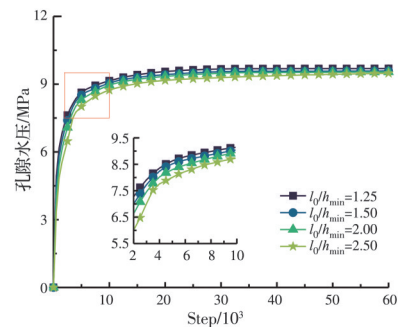


图 10 不同网格细化水平裂纹左尖端孔隙水压趋势

Fig. 10 Trend of pore water pressure at left tip of horizontal crack refined by different meshes

图 9 和图 10 中各曲线间紧密贴合,裂纹长度延伸相差无几,尖端水压曲线贴合上升,在大小接近初始裂纹内水压时,逐渐稳定,表现出较好的收敛性,仿真结果之间非常相似。由图 9、图 10 可以看出,在一定范围内随着网格细化精度的提升,模型计算出的裂纹尖端孔隙水压力对裂纹的驱动效果越显著。

3 裂隙岩体水-力耦合卸载算例与分析

目前,水-力耦合问题的研究大多限于加载试验,而对于卸荷条件下水-力耦合问题的研究相对较少。由于岩石材料在加载和卸载条件下有着显著的力学差异,为了深入探究水-力耦合问题中的卸载破坏机理、变化规律以及渗透行为,笔者对水-力耦合卸载破坏过程进行了研究。

针对水-力耦合条件下单裂纹岩样的围压卸载试验^[32]进行数值模拟,图 11 为物理试验结果及裂纹示意图。

以初始围压大小为 8 MPa、初始卸荷应力水平

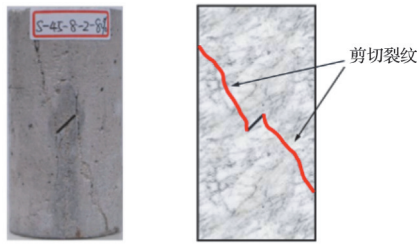


图 11 试验结果图和剪切裂纹示意图

Fig. 11 Graph of test results and schematic diagram of shear cracking

表 2 计算过程所需要的模拟参数

Table 2 Simulate parameters required for the calculation process

拉梅常数/GPa	剪切模量/GPa	密度/(kg/m ³)	临界能量释放率/(J/m ²)	孔隙率	岩体初始渗透率/m ²	流体黏滞度/(Pa·s)	流体体积模量/GPa	岩石骨架晶体体积模量/GPa	初始卸荷应力/MPa	倍化系数
3.84	6.64	2 150	1 704	0.2	1×10 ⁻¹⁵	1×10 ⁻³	2.2	36.8	53	1×10 ⁷

3.1 裂隙破坏演化过程

图 12~图 15 分别为水-力耦合下两垂直裂纹破坏过程的相场、最大主应力、剪应力以及水压的演化过程。从图中可以看出,水-力耦合卸载模型计算的裂纹发展规律与相同加、卸载边界条件下的试验结果基本一致:在围压加载阶段(0~10 000 步),轴压与围压相等,偏应力基本为零,此阶段的剪应力较小,其应变能不足以产生裂纹,模型整体处于挤

为 80%(53 MPa),水压大小为 2 MPa 的模型为例,进行全过程模拟。首先需控制围压与轴压等值升至 8 MPa;然后增加下边界水压至 2 MPa,上边界水压为零并保持恒定;随后保持围压不变,加载轴压至初始卸荷应力状态;最后进行围压卸载,直至破坏。本模型岩石材料及水力耦合所需要的参数,如表 2 所示。

压状态;随后(10 000~26 000 步),向模型注入渗透水压,初始卸荷应力水平为 80%,由于轴向应力远大于围压,此阶段模型发生轴向压缩,偏应力逐步增大,预制裂纹中间出现亮点;在围压卸载阶段(26 000~64 425 步),随着围压卸载,裂纹尖端的损伤程度不断加深,在偏应力达到最大(56 500 步)时,裂纹出现较为明显的损伤,模型出现了 4 条可能发展裂纹的方向,随着损伤加深和应力退化循环的发生,损伤值持续上升,模型逐渐以 Z 形生长,直到完全损坏(64 425 步),至此整个卸载破坏模拟过程结束。

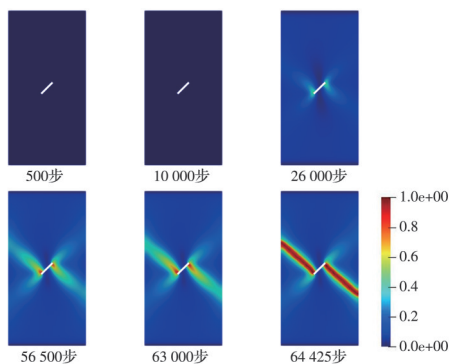


图 12 水-力耦合卸载过程中裂纹演化

Fig. 12 The evolution of crack growth paths in the rocks under the coupled hydro-mechanical unloading conditions

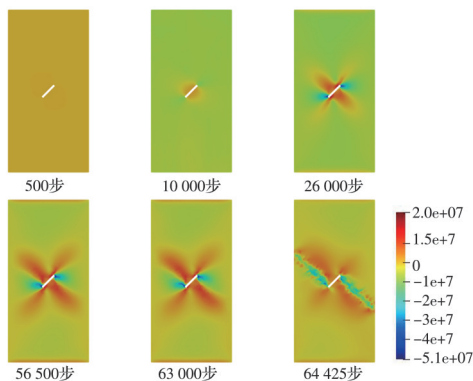


图 13 最大主应力演化过程

Fig. 13 The evolution of principal stress

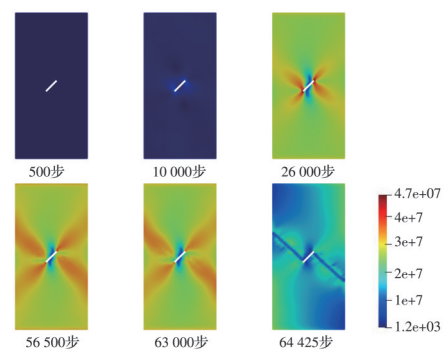


图 14 最大剪应力的演化过程

Fig. 14 The evolution of shear stress

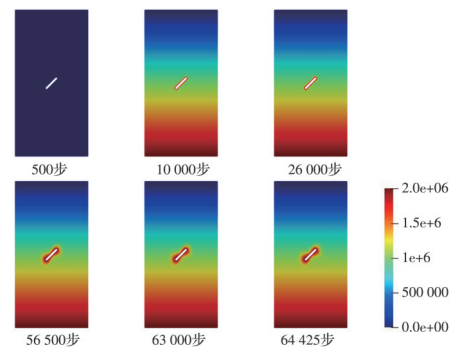


图 15 孔隙水压的演化过程

Fig. 15 The evolution of pore water pressure

算例为水-力耦合卸载破坏,由于整个模拟过程中围压始终高于水压,且模型渗透率较低,因此混合拉-剪裂纹扩展和连接主导了最终破坏模式,剪应力在裂纹破坏的过程中提供了主要能量。在模型破坏的最终阶段,随着损伤的大幅增加,剪应力表现出大面积的退化现象。

3.2 试验与模型对照

试验与数值模拟的对照曲线如图 16 所示。由图 16 可知,数值模拟结果与试验中的力学规律呈现一致性。在卸载前,模型曲线近乎直线,表现为弹性变形,在相同偏应力点(即对应的初始卸荷应力状态)开始卸载后,曲线上升开始变缓,直到达到最高偏应力点后,试样开始逐步失效,相场损伤逐渐加剧,出现应力退化现象,曲线开始逐步下降。

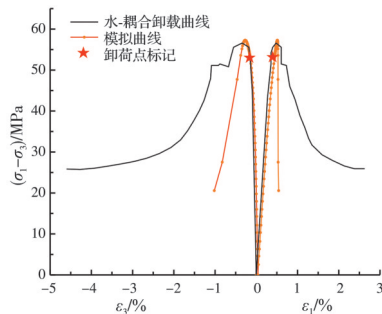


图 16 试验与模拟对比

Fig. 16 Comparison of test and simulation

3.3 裂纹破坏影响因素探究

为了进一步探究裂隙岩体在水-力耦合作用下的卸载破坏机理,以及裂纹扩展规律,针对不同水压、初始围压、初始卸荷应力状态进行了一系列数值模拟。以初始围压 8 MPa、初始卸荷应力水平 80%、水压 2 MPa 的模型为基准,依次调整各项参数后根据试验调整初始卸荷应力。1)不同水压水平:1 MPa 水压对应 55.4 MPa、3 MPa 水压对应 50 MPa;2)不同围压水平:6 MPa 围压对应 49.7 MPa、10 MPa 围压对应 59 MPa;3)不同初始卸荷应力水平:70% 对应 45.4 MPa、90% 对应 59.7 MPa。读取并记录数值模拟中各个影响因素不同水平下的偏应力,其应力-应变曲线见图 17~图 19。

由图 17~图 19 可以发现,随着水压的增大,模型的峰值偏应力呈下降趋势,这表明水对于岩石具有一定的劣化作用。围压越大张拉作用受到的抑制越强,同时,剪应变为断裂能提供的能量比例也越高。从某种角度上来说,围压促进了剪切裂纹的发育。此外,初始卸荷应力状态也对剪切裂纹的发育有一定的促进作用。在边界的设定中,初始卸荷应力水平越高,越接近破坏时的偏应力大小,此时需要的围压卸载量也越少。

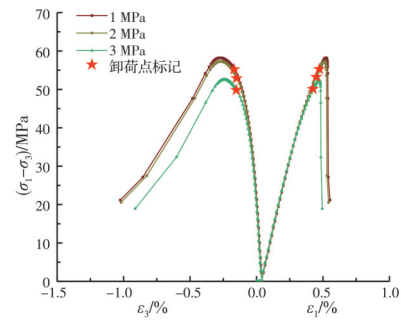


图 17 不同水压下的应力-应变曲线

Fig. 17 Stress-strain curves under different water pressures

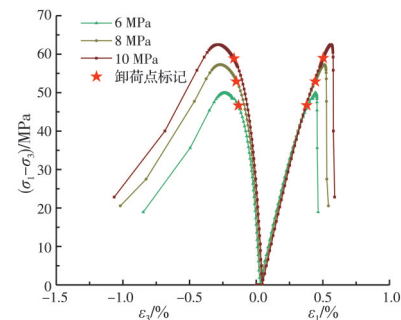


图 18 不同围压的应力-应变曲线

Fig. 18 Stress-strain curves for different surrounding pressures

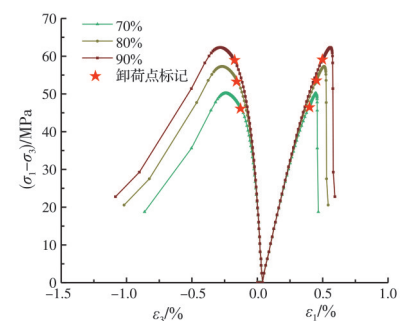


图 19 不同初始卸荷应力下的应力-应变曲线

Fig. 19 Stress-strain curves at different initial unloading stresses

4 结论

提出了一种水-力耦合相场数值模拟方法,建立了裂隙岩体水-力耦合卸荷模型,并得出以下主要结论:

1)水-力压裂过程中,裂纹扩张主要由张拉作用控制,而在水-力耦合卸载破坏过程中,混合拉-剪裂纹主导了最终破坏模式。

2)水对于岩石具有一定的劣化作用,导致岩体裂隙破坏所需要的峰值偏应力降低。

3)初始围压和初始卸荷应力状态对试样破坏过程中的张拉作用均有一定的抑制作用。随着初始围压和初始卸荷应力状态的增加,所需的峰值偏应力也随之增加。

参考文献

- [1] 陆银龙. 渗流-应力耦合作用下岩石损伤破裂演化模型与煤层底板突水机理研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2013.
LU Y L. Study on the evolution model of rock damage and fracture under the coupling effect of seepage and stress and the mechanism of water inrush from coal seam floor [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 尹乾. 复杂受力状态下裂隙岩体渗透特性试验研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2013.
YIN Q. Experimental study on permeability characteristics of fractured rock mass under complex stress state [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese)
- [3] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
ZHANG J C. Pock mass permeability and coal mine water inrush [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. (in Chinese)
- [4] 何峰, 王来贵, 王振伟, 等. 煤岩蠕变-渗流耦合规律实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(6): 930-933.
HE F, WANG L G, WANG Z W, et al. Experimental study on creep-seepage coupling law of coal(rock) [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 930-933. (in Chinese)
- [5] 王华俊. 锦屏二级水电站闸基深厚覆盖层渗流分析与控制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
WANG H J. Study on seepage analysis and control of deep overburden in the sluice foundation of Jinping II hydropower station [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [6] 刘泉声, 吴月秀, 刘滨. 应力对裂隙岩体等效渗透系数影响的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 176-183.
LIU Q S, WU Y X, LIU B. Discrete element analysis of effect of stress on equivalent permeability of fractured rockmass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 176-183. (in Chinese)
- [7] 赵延林. 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
ZHAO Y L. Study on coupling theory of seepage-damage-fracture in fractured rock mass and its application [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [8] DEHGHAN A N, GOSHTASBI K, AHANGARI K, et al. 3D numerical modeling of the propagation of hydraulic fracture at its intersection with natural (pre-existing) fracture [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(2): 367-386.
- [9] ZHOU S W, ZHUANG X Y, RABCZUK T. A phase-field modeling approach of fracture propagation in poroelastic media [J]. Engineering Geology, 2018, 240: 189-203.
- [10] ZHOU S W, ZHUANG X Y, RABCZUK T. Phase-field modeling of fluid-driven dynamic cracking in porous media [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019, 350: 169-198.
- [11] GHADERI A, TAHERI-SHAKIB J, SHARIF NIK M A. The distinct element method (DEM) and the extended finite element method (XFEM) application for analysis of interaction between hydraulic and natural fractures [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 171: 422-430.
- [12] YANG Y T, TANG X H, ZHENG H, et al. Hydraulic fracturing modeling using the enriched numerical manifold method [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 53: 462-486.
- [13] 刘嘉, 薛熠, 高峰, 等. 层理页岩水力裂缝扩展规律的相场法研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 464-473.
LIU J, XUE Y, GAO F, et al. Propagation of hydraulic fractures in bedded shale based on phase-field method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 464-473. (in Chinese)
- [14] 吴建营. 固体结构损伤破坏统一相场理论、算法和应用[J]. 力学学报, 2021, 53(2): 301-329.
WU J Y. On the unified phase-field theory for damage and failure in solids and structures: Theoretical and numerical aspects [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(2): 301-329. (in Chinese)
- [15] EHLERS W, LUO C Y. A phase-field approach embedded in the Theory of Porous Media for the description of dynamic hydraulic fracturing [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 315: 348-368.
- [16] EHLERS W, LUO C Y. A phase-field approach embedded in the Theory of Porous Media for the description of dynamic hydraulic fracturing, Part II: The crack-opening indicator [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 341: 429-442.
- [17] HEIDER Y, MARKERT B. A phase-field modeling approach of hydraulic fracture in saturated porous media [J]. Mechanics Research Communications, 2017, 80: 38-46.
- [18] HEIDER Y, REICHE S, SIEBERT P, et al. Modeling of hydraulic fracturing using a porous-media phase-field approach with reference to experimental data [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 202: 116-134.
- [19] 刘国威, 李庆斌, 梁国贺. 动力水力压裂的相场模拟方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1400-1412.
LIU G W, LI Q B, LIANG G H. A phase-field

- description of dynamic hydraulic fracturing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1400-1412. (in Chinese)
- [20] 易良平, 胡滨, 李小刚, 等. 基于相场法的煤砂互层水力裂缝纵向延伸计算模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(Sup2): 706-716.
YI L P, HU B, LI X G, et al. Calculation model of hydraulic crack vertical propagation in coal-sand interbedded formation based on the phase field method [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Sup2): 706-716. (in Chinese)
- [21] YI L P, WAISMAN H, YANG Z Z, et al. A consistent phase field model for hydraulic fracture propagation in poroelastic media [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 372: 113396.
- [22] MIEHE C, HOFACKER M, WELSCHINGER F. A phase field model for rate-independent crack propagation: Robust algorithmic implementation based on operator splits [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(45-48): 2765-2778.
- [23] 赵晨臣, 饶秋华, 易威, 等. 脆性岩石多裂纹扩展的复合型相场模型研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 565-575.
ZHAO C C, RAO Q H, YI W, et al. A study on multiple-crack propagation of brittle rock based on mixed-mode phase field model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 565-575. (in Chinese)
- [24] 林治平. 静水应力、球应力和偏应力张量[J]. 南昌大学学报(工科版), 1982, 4(2): 24-29.
LIN Z P. Tensor of hydrostatic stress, spherical stress and deviatoric stress [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 1982, 4(2): 24-29. (in Chinese)
- [25] AMOR H, MARIGO J J, MAURINI C. Regularized formulation of the variational brittle fracture with unilateral contact: Numerical experiments [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2009, 57(8): 1209-1229.
- [26] ZHANG X, SLOAN S W, VIGNES C, et al. A modification of the phase-field model for mixed mode crack propagation in rock-like materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 322: 123-136.
- [27] LIU S J, WANG Y T, PENG C, et al. A thermodynamically consistent phase field model for mixed-mode fracture in rock-like materials [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2022, 392: 114642.
- [28] LIU S J, WANG Z Q, ZHANG Y J, et al. The phase-field simulations of blasting failure in granites [J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 167: 104274.
- [29] MIKELIĆ A, WHEELER M F, WICK T. Phase-field modeling of a fluid-driven fracture in a poroelastic medium [J]. Computational Geosciences, 2015, 19(6): 1171-1195.
- [30] 李春光, 王水林, 郑宏, 等. 多孔介质孔隙率与体积模量的关系[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 293-296.
LI C G, WANG S L, ZHENG H, et al. Relationship between bulk modulus and porosity of porous medium [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 293-296. (in Chinese)
- [31] YAN C Z, FAN H W, HUANG D R, et al. A 2D mixed fracture-pore seepage model and hydromechanical coupling for fractured porous media [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(10): 3061-3086.
- [32] 寇苗苗. 卸荷渗流耦合作用下裂隙岩体破坏机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
KOU M M. Study on failure mechanism of fractured rock mass under unloading seepage coupling [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)