

DOI: 10.11779/CJGE202203008

层理页岩水力裂缝扩展规律的相场法研究

刘 嘉¹, 薛 熠^{*1}, 高 峰², 滕 腾³, 梁 鑫¹

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要: 准确预测层理页岩水力裂缝扩展路径对于页岩压裂方案优化与压裂效果评价至关重要。基于多孔弹性理论和能量最小化原理建立水力耦合的相场模型, 采用交错策略的分离式耦合方法进行求解。通过压裂试验数据对比验证模型的可靠性, 同时基于页岩三维水力压裂模拟分析, 验证该方法对于模拟不同地应力条件下的水力裂缝扩展问题的适用性。基于该模型, 利用插值函数表征页岩层理与基质的力学和渗流参数, 研究不同层理角度与地应力差工况下, 水力裂缝、天然裂隙以及层理面三者之间的交互作用。研究表明: 页岩的层理面改变了水力裂缝预期的扩展路径, 该作用效果取决于层理角度。随着地应力差的增大, 水力裂缝的扩展路径以及与天然裂隙、层理面交互模式逐渐由地应力差所控制。相场法模拟多场耦合环境下的复杂裂纹扩展与交互等现象相对于其它数值方法具有显著优势。

关键词: 相场法; 层理页岩; 水力压裂; 天然裂隙; 地应力

中图分类号: TE319; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)03-0464-10

作者简介: 刘 嘉(1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩体多场耦合方面研究。E-mail: jliu@xaut.edu.cn。

Propagation of hydraulic fractures in bedded shale based on phase-field method

LIU Jia¹, XUE Yi¹, GAO Feng², TENG Teng³, LIANG Xin¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurate prediction of the propagation path of hydraulic fractures in shale plays an important role in optimizing fracturing schemes and evaluating fracturing effects. Based on the theory of poroelasticity and the energy minimization principle, a hydro-mechanical coupling phase-field model is established. The segregated coupling method based on the staggered scheme is adopted to solve it numerically. The reliability of the model is verified by the existing experimental results. The simulation analysis of 3D hydraulic fracturing confirms the feasibility of the proposed method in capturing the propagation path of hydraulic fractures under different in-situ stress configurations. Based on the model, the mechanical and seepage parameters of bedding planes and matrix are characterized by the interpolation function. The interactions among hydraulic fractures, natural fractures and bedding planes are investigated under different bedding angles and in-situ stress configurations. The results show that the bedding planes of shale alter the expected propagation path of hydraulic fractures, which depends on the bedding angle. With the increase of in-situ stress difference, the propagation path of hydraulic fractures and the interaction mode are gradually controlled by the in-situ stress difference. Compared with other numerical methods, the phase-field method has a significant advantage in simulating complex crack propagation and interaction in coupled multiphysics environment.

Key words: phase-field method; bedded shale; hydraulic fracture; natural fracture; in-situ stress

0 引 言

非常规油气开采、增强型地热系统等都需要采用水力压裂技术来有效增加地下能源的开采效率^[1]。然而, 由于岩石结构及其所处工程地质环境的复杂性, 有关水力裂缝扩展规律的研究一直是一项极具挑战的课题^[2]。此外, 水力压裂过程中压裂液的泄露极易造

成地下水污染。因此, 需要采用数值模拟或试验研究准确预测水力裂缝的扩展路径, 以便为压裂方案优化与压裂效果评估等提供必要的理论指导。

基金项目: 国家自然科学基金项目(12002270, 52004285); 中国博士后科学基金项目(2020M683686XB)

收稿日期: 2021-03-07

***通信作者** (E-mail: xueyi@xaut.edu.cn)

当前对于岩石裂纹扩展问题的数值模拟方法,特别是岩石水力压裂裂缝扩展研究方面,主要分为两类:一类是离散法,如离散单元法(DEM)、位移不连续法(DDM)等;另一类则为连续方法,如连续损伤模型(CDM)、相场法(PFM)等。前者一般以显式或隐式的方式在建模中设置裂纹面位移不连续,而后者位移场皆为连续的。因此,连续方法在模拟裂纹扩展时节省了处理复杂裂纹面位移跳跃的工作,更易于数值实现。

相场法起源于 Francfort 等^[3]基于经典的 Griffith 能量理论提出的断裂变分模型。Bourdin 等^[4]通过引入区分材料完整和断裂的标量相场,将尖锐的裂纹拓扑通过扩散损伤带正则化,给出了断裂变分模型的数值实现。随后针对相场断裂方法的研究应运而生。其中, Miehe 等^[5]提出了脆性断裂热力学一致的相场模型,该模型被视为可替代 Francfort-Marigo^[3]和 Bourdin 等^[4]的理论框架^[6]。基于总弹性能驱动的相场模型,可能导致不符合实际的裂纹扩展模式。为了避免这种情况, Amor 等^[7]和 Miehe 等^[5]分别提出了不同的应变张量分解方法,从而驱动更加符合实际的裂纹扩展。

由于相场法采用标量场表征离散裂纹几何,并未将裂纹描述为物理不连续,只是将完整的材料平滑地过渡到完全断裂区域。裂纹的起裂和扩展取决于相场演化方程(即光滑相场扩散方程)。因此,相场法的实现并不需要额外地追踪复杂裂纹表面^[8-9]。该优点使得相场法可以处理任意脆性岩石中二维或三维几何的多裂纹扩展、交汇、分叉与合并。与此同时,由于相场法本身属于多场问题,可进一步将相场扩散方程与描述其它物理场的偏微分方程耦合,即可实现对多物理场耦合条件下的裂纹扩展问题的求解^[10]。对于能源的深部地下开采而言,将相场模型扩展应用到涉及高温、高压以及高地应力的深部多场耦合环境下岩石断裂领域,对于准确预测裂纹扩展路径及有效控制深部资源的安全与高效开采,有着至关重要的作用。

近几年,国内外学者将相场法发展应用于各个领域材料的断裂问题,如岩土工程材料的断裂^[11-12]、层状结构的交界面断裂^[13]、纤维增强型复合材料断裂等^[14]。其中 Miehe 等^[15]通过三篇文章系统介绍了利用相场法模拟多场耦合条件下材料的断裂问题,其中包括了相场法在多孔介质水力压裂中的应用。Santillán 等^[16]发展了水力耦合的相场模型,假设流体在多孔介质中满足达西渗流定律,而裂缝区渗流采用雷诺润滑方程描述。易良平等^[17]利用相场方法模拟分析了煤砂互层中水力裂缝纵向延伸的影响因素。张飞^[18]采用了移动网格方法动态跟踪裂缝的扩展,实现了复杂

水力裂缝延伸的相场法模拟。Yi 等^[19]考虑了比奥参数(比奥系数、比奥模量和孔隙度)随损伤场的演化、基质各向异性渗透率以及新的相场驱动力,建立了一致的相场模型。

对于页岩而言,弱层理结构使得其力学、渗流性质具有显著各向异性特征^[20-21]。而横观各向同性假设在一定程度上弱化了层状结构在岩石断裂过程中扮演的角色。此外,天然裂隙也是影响水力裂缝扩展路径的主要因素^[22]。因此,准确预测页岩水力裂缝、天然裂隙以及层理面三者之间的交互作用需要建立单独考虑页岩层理结构的水力压裂模型。而相场法提供了一种非常有效且易于实施的数值模拟手段。

1 控制方程

1.1 断裂的相场近似

相场法通过引入标量场 ϕ 来表征裂纹形态。如图1所示,当 $\phi=0$ 时,表示材料未破坏,而当 $\phi=1$ 时,此处材料发生断裂。显然,这种方法与连续损伤理论相似,其中标量相场 ϕ 在均匀宏观意义上描述了裂纹的扩展。基于此观点,采用指数函数来近似一维断裂问题的标量相场(图1(a))^[23],即

$$\phi(x) = e^{-|x|/l_0}, \quad (1)$$

式中, l_0 为长度尺度参数,表征裂纹的宽度。当 l_0 趋向于零,则裂纹趋向于真实的尖锐状态。

如图1(b)所示,从一维相场近似扩展到二维或三维,得到单位体积的裂纹表面密度函数^[23]:

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

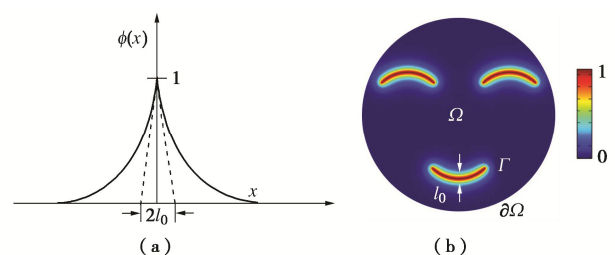


图1 相场表征裂纹方法

Fig. 1 Crack characterized by phase field

根据式(2),裂纹扩展所需要的能量,即断裂耗散能可表示为^[23]

$$\int_{\Gamma} G_c dS \approx \int_{\Omega} G_c \left(\frac{\phi^2}{2l_0} + \frac{l_0}{2} |\nabla \phi|^2 \right) d\Omega, \quad (3)$$

式中, G_c 是临界能量释放率。

1.2 水力耦合的相场模型

考虑流体饱和的多孔弹性体,构造总的拉格朗日

能量泛函, 可表示为

$$\Pi = E^k - E^e - E^f + E^p + E^{\text{ext}} \quad (4)$$

式中 E^k 为弹性体的动能, 由于本文是准静态加载, 所以动能项为零; E^e 为弹性势能; E^f 为断裂能; E^p 为与多孔介质流体压力相关的势能项; E^{ext} 为外力所做功。

为了表征拉伸导致材料断裂, 上式中弹性能可分为拉、压两部分, 弹性能的分解从弹性应变的分解开始, 即应变张量分解为拉、压两部分^[23]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\pm} = \sum_{a=1}^d \langle \boldsymbol{\varepsilon}_a \rangle_{\pm} \mathbf{n}_a \otimes \mathbf{n}_a \quad (5)$$

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_a$ 为主应变, \mathbf{n}_a 和 \mathbf{n}_b 表示主应变的方向, 其中 $\langle \boldsymbol{\varepsilon}_a \rangle_{\pm} = (\boldsymbol{\varepsilon}_a \pm |\boldsymbol{\varepsilon}_a|)/2$ 。

因此, 拉、压弹性应变能密度可表示为^[23]

$$\varphi_{\varepsilon}^{\pm}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{\lambda}{2} \langle \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \rangle_{\pm}^2 + \mu \text{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\pm}^2) \quad (6)$$

式中, λ 和 μ 为拉梅常数。

考虑刚度弱化, 弹性体在断裂过程中总的弹性能密度可表示为

$$\varphi_{\varepsilon}(\boldsymbol{\varepsilon}) = g(\phi) \varphi_{\varepsilon}^+(\boldsymbol{\varepsilon}) + \varphi_{\varepsilon}^-(\boldsymbol{\varepsilon}) \quad (7)$$

式中, $g(\phi) = (1-\delta)(1-\phi)^2 + \delta$ 为刚度退化函数, 表示当材料发生断裂时, 即 ϕ 趋向于 1, 此时拉伸弹性能逐渐消失, δ 是为了避免数值奇异的模型参数。

将式 (7) 和 (3) 代入式 (4), 同时考虑外力、初始地应力场 $\boldsymbol{\sigma}_0$ 和多孔介质孔隙压力 p 的作用, 可构造拉格朗日能量泛函为

$$\begin{aligned} \Pi = & - \int_{\Omega} [g(\phi) \varphi_{\varepsilon}^+(\boldsymbol{\varepsilon}) + \varphi_{\varepsilon}^-(\boldsymbol{\varepsilon})] \text{d}\Omega + \int_{\Omega} \alpha p \nabla \mathbf{u} \text{d}\Omega + \\ & \int_{\Omega} g(\phi) \boldsymbol{\sigma}_0 : \boldsymbol{\varepsilon} \text{d}\Omega - \int_{\Omega} G_c \left(\frac{\phi^2}{2l_0} + \frac{l_0}{2} |\nabla \phi|^2 \right) \text{d}\Omega + \\ & \int_{\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{u} \text{d}\Omega + \int_{\partial\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} \text{d}S \quad (8) \end{aligned}$$

令式 (8) 的一阶变分等于零, 即可得到下面的控制方程, 即水力耦合的相场模型:

$$\left. \begin{aligned} & \nabla \left[\mathbf{D} : \left(\frac{\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u}}{2} \right) \right] - \alpha \mathbf{I} \nabla p + \mathbf{b} = 0, \\ & \left[\frac{2l_0(1-\delta)(\varphi_{\varepsilon}^+ + \boldsymbol{\sigma}_0 : \boldsymbol{\varepsilon})}{G_c} + 1 \right] \phi - l_0^2 \nabla^2 \phi = \frac{2l_0(1-\delta)(\varphi_{\varepsilon}^+ + \boldsymbol{\sigma}_0 : \boldsymbol{\varepsilon})}{G_c} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 α 为比奥系数; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{b} 为体力项; \mathbf{f} 为面力项; \mathbf{u} 为位移矢量; \mathbf{D} 为弹性矩阵。

1.3 渗流控制方程

为表征整个模拟区域 Ω 的渗流方程, 定义 3 个子区域 Ω_m , Ω_f 和 Ω ^[24-25]。如图 2 (a) 所示, Ω_m 表示

基质区域, Ω_f 为裂隙区域, Ω 为基质和裂隙过渡区域。通过引入线性插值函数 (图 2 (b)), 3 个流动区域被两个阈值 c_1 和 c_2 所定义, 这里 Ω_f 对应于 $\phi \geq c_2$, Ω_m 对应 $\phi \leq c_1$, 而当 $c_1 < \phi < c_2$ 表示过渡区域 Ω 。

流体在多孔介质的渗流采用达西定律来描述。因此, 基质中流体的质量守恒方程表示如下:

$$\rho_m S_m \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\rho_m \frac{K_m}{\mu_m} \nabla p \right) = q_m - \rho_m \alpha_m \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (10)$$

裂隙中流体的质量守恒方程为

$$\rho_f S_f \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\rho_f \frac{K_f}{\mu_f} \nabla p \right) = q_f \quad (11)$$

式中 下标 m 表示基质; f 表示裂隙; ρ 为流体的密度; ε_v 为体积应变; K 为渗透率; μ 为流体的动力黏度; S 为储存系数。

结合上述方程, 考虑基质和裂隙区域, 在整个域 Ω 上流体的质量守恒方程可表示为

$$\rho S \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\rho \frac{K}{\mu} \nabla p \right) = q - \rho \alpha \chi_m \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (12)$$

式中 储存系数 $S = \theta c + (\alpha - \theta)(1 - \alpha)/K_v$, 其中 K_v 为体积模量; θ 为孔隙度; c 为流体压缩系数; 比奥系数 $\alpha = \chi_m \alpha_m + \chi_f \alpha_f$; 渗透率 $K = \chi_m K_m + \chi_f K_f$, 其中 χ_m 和 χ_f 分别为

$$\chi_m = \begin{cases} 1 & \phi \leq c_1 \\ \frac{c_2 - \phi}{c_2 - c_1} & c_1 < \phi \leq c_2 \\ 0 & \phi > c_2 \end{cases}, \quad \chi_f = \begin{cases} 0 & \phi \leq c_1 \\ \frac{\phi - c_1}{c_2 - c_1} & c_1 < \phi \leq c_2 \\ 1 & \phi > c_2 \end{cases} \quad (13)$$

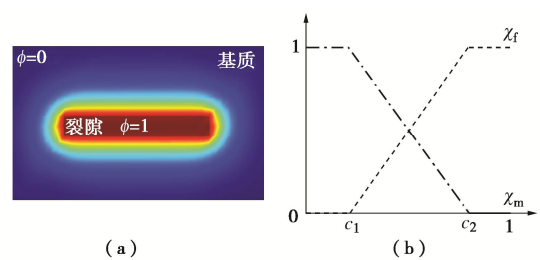


图 2 基质和裂隙渗透率的线性插值函数

Fig. 2 Linear interpolation functions for matrix and fracture permeability

1.4 局部历史应变能

裂纹的扩展是不可逆的, 即相场是单调递增的。然而, 当循环加载、压缩或卸载发生时, 相场 ϕ 可能会减小。因此, 为了保证材料断裂的不可逆性, 需要建立局部历史应变能场^[8, 23]:

$$H(\mathbf{x}, t) = \max_{\tau \in [0, t]} [\varphi_{\varepsilon}^+(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, \tau)) + \boldsymbol{\sigma}_0 : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, \tau)] \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (9) 可得

$$\begin{cases} \nabla \left[\mathbf{D} : \left(\frac{\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u}}{2} \right) \right] - \alpha_B \mathbf{I} \nabla p + \mathbf{b} = 0 \\ \left[\frac{2l_0(1-\delta)H}{G_c} + 1 \right] \phi - l_0^2 \nabla^2 \phi = \frac{2l_0(1-\delta)H}{G_c} \end{cases} \quad (15)$$

2 模型实施与验证

2.1 模型实施

采用基于 COMSOL Multiphysics 的有限元方法求解水力耦合的相场模型。岩石变形方程、流体渗流方程、历史应变方程以及相场扩散方程的求解分别采用 4 个指定模块。在每个时间步之后,对材料的弹性矩阵 \mathbf{D} (式(15)) 进行刚度退化修正,修正公式如下^[8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon}) &= \frac{\partial^2 \psi_\varepsilon}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^2} = [(1-\delta)(1-\phi)^2 + \delta] \frac{\partial^2 \psi_\varepsilon^+}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^2} + \frac{\partial^2 \psi_\varepsilon^-}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^2} \\ &= \lambda \{ [(1-\delta)(1-\phi)^2 + \delta] H_\varepsilon[tr(\boldsymbol{\varepsilon})] + H_\varepsilon[-tr(\boldsymbol{\varepsilon})] \} \mathbf{J} + \\ &\quad 2\mu \{ [(1-\delta)(1-\phi)^2 + \delta] \mathbf{P}^+ + \mathbf{P}^- \}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $H_\varepsilon(x)$ 为 Heaviside 函数, \mathbf{J} 为四阶张量, \mathbf{P}^+ 和 \mathbf{P}^- 为应变相关的非线性项^[8]。

历史应变场 (Eq. (14)) 可以通过下式求解:

$$\begin{cases} H = \varphi_\varepsilon^+, & \text{if } \varphi_\varepsilon^+ > H \\ H = H, & \text{if } \varphi_\varepsilon^+ \leq H \end{cases} \quad (17)$$

历史应变场的初始值通常为 $H_0(x)=0$, 而当存在预制裂隙时, 可以通过指定下列初始条件来表征^[26]:

$$H_0(x) = \begin{cases} \frac{BG_c}{2l_0} \left[1 - \frac{2d(x,l)}{l_0} \right] & d(x,l) \leq \frac{l_0}{2} \\ 0 & d(x,l) > \frac{l_0}{2} \end{cases}, \quad (18)$$

式中, B 为一标量参数; $d(x,l)$ 为模型任一点到离散裂隙的最短距离。

综上所述, 首先通过求解岩石变形方程得到应变张量, 由式(6) 计算拉伸弹性能量密度; 用岩石变形方程的解来求解渗流方程; 求解历史应变能方程, 用拉伸弹性能量密度来更新 H ; 最后, 相场方程需要借助不断更新的 H 来驱动相场 ϕ 的演化。在每个时间步长中, 基于更新的弹性应变和相场对弹性矩阵 \mathbf{D} 进行修正。这样各个耦合场变量可以通过交错策略的分离式耦合方法依次求解。隐式广义 α 方法被采用以确保求解的稳定性。

2.2 模型验证

为了验证相场法模拟水力裂缝扩展的可靠性, 本文首先采用试验结果进行对比验证。根据含圆孔和两条预制裂隙的石膏试件水力压裂试验, 通过相场法建

立相同的压裂模型模拟水力裂缝的扩展路径, 并与试验结果进行比较。两种模型如图 3 所示, 模型 I 预制裂缝水平设置, 模型 II 中预制裂隙与水平方向夹角为 60° 。两条预制裂隙的初始长度均为 20 mm, 圆孔的直径也为 20 mm。预制裂隙的宽度为 1 mm。相关输入参数可见文献[27, 28]。采用自由三角形网格对模型进行离散, 沿预期裂缝扩展路径区域对网格进行细化, 最大单元尺寸为 1 mm。此外, 在钻孔与预制裂隙中施加 10 kPa/s 的内压。如图 3 所示, 通过相场模拟得到的水力裂缝形态与试验结果一致, 从而验证了相场模型模拟水力裂缝扩展的可靠性。

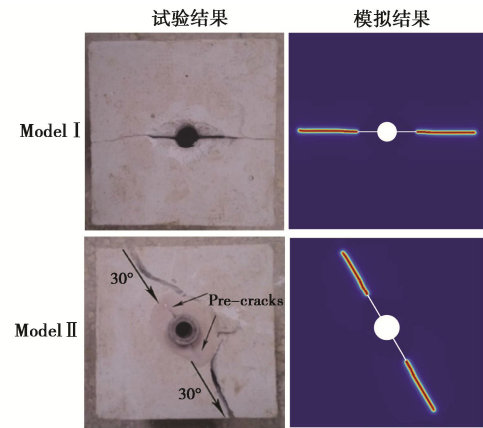


图 3 相场模拟与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of results from experiments and phase field modeling

此外还测试了该方法模拟三维水力裂缝扩展的适用性。计算域为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的立方体。如图 4 (a) 所示, 平板裂隙位于 x - y 平面内, 长和宽均为 30 mm, 开度为 5 mm。给定中间预制平板裂隙的流体源为 $100 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 长度尺度参数 $l_0=5 \text{ mm}$, 其余计算参数见表 1。采用八节点六面体单元对三维域进行离散, 将单元的最大尺寸设为 5 mm, 以降低计算成本。另外, 时间步长设置为 0.05 s。在这个三维例子中, 给定两个方向的最小地应力为 3 MPa, x , y 和 z 方向依次设置最大地应力 13 MPa。三维各向同性介质中的水力裂缝扩展规律如图 4 (b) ~ (d) 所示。由图 4 可以看出, 当 $\sigma_H=13 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_h=13 \text{ MPa}$ 时, 裂缝仅在 x - y 平面内萌生和扩展。裂缝面形状为椭圆形, 椭圆长轴垂直于最大主应力方向。图 4 (d) 表明, 当 $\sigma_v=13 \text{ MPa}$ 时, 裂缝开始沿着 z 轴方向扩展。图 5 为三维水力裂缝损伤面积和流体压力演化特征。裂缝萌生后流体压力呈下降趋势, 当 $\sigma_v=13 \text{ MPa}$ 时, 起裂速度显著低于 $\sigma_H=13 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_h=13 \text{ MPa}$ 的工况。其最大流体压力明显高于其它两个模型, 这与水力裂

缝的扩展速率相关。总而言之，该模拟表明相场法可有效捕捉不同地应力作用下的三维页岩水力裂纹扩展路径。

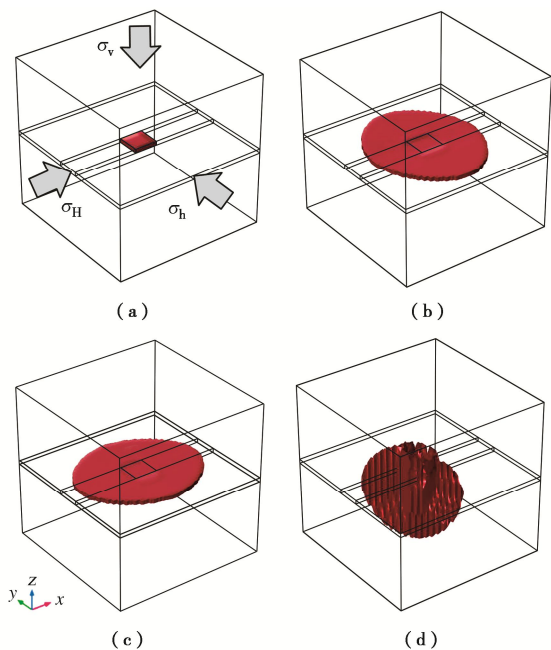


图4 三维水力压裂裂缝形态
Fig. 4 Crack patterns of 3D hydraulic fracturing

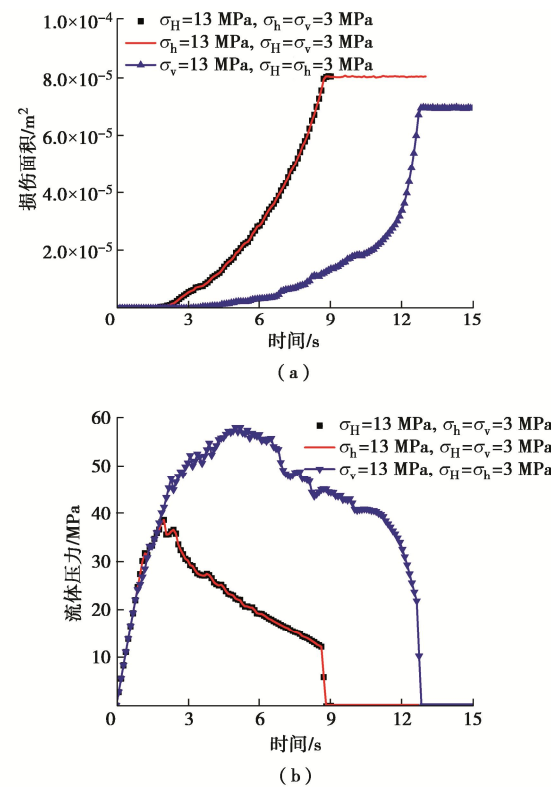


图5 三维水力压裂损伤面积和流体压力演化
Fig. 5 Evolutions of damage area and fluid pressure during 3D hydraulic fracturing

3 数值模拟与分析

本文为简化计算，在二维假设下仅对试验尺度下页岩试样进行数值模拟研究。如图6所示，模型尺寸为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ ，模型包含3条预制裂隙，其中位于模型中心处的裂隙为流体注入区，流体注入速率为 $50\text{ kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ ，其余两条为与水力裂缝交汇的预制天然裂隙，在相场法中为模拟预制裂隙，对于局部历史应变场方程(式(17))的变量 H 初始值采用了公式(18)设置，即预先给定较大的拉应变能，使得该预制裂隙区域在初始时刻相场 $\phi=1$ ，表明天然裂隙一开始即处于完全损伤状态(无胶结)。采用自由三角形网格离散求解域，最大单元尺寸不超过 1 mm 。模型外边界为零压力，水平和竖直方向分别施加最大和最小水平应力，同时施加对应的初始应力场。模拟相关参数见表1。为了模拟层理面，采用了插值函数，赋予层理和基质各自的力学和渗流参数。基质弹性模量、临界能量释放率以及渗透率均服从韦伯分布，对应参数分布的均值见表1，均质度系数为6；层理的杨氏模量和临界能量释放率均弱化为基质的 $1/5$ ，层理渗透率强化为基质渗透率的10倍。以层理角度等于 60° 为例，得到的具体参数分布见图7。

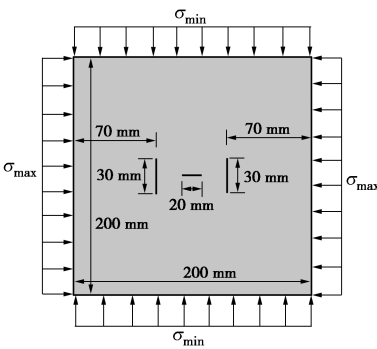


图6 数值模型与边界条件
Fig. 6 Numerical model and its boundary conditions

表1 相关模拟参数
Table 1 Parameters used in simulations

参数	E	ν	α_{Bm}	α_{Bf}	G_c	l_0
值	30	0.3	0.1	1	200	2
单位	GPa	—	—	—	N/m	mm
参数	c_1	c_2	ϕ_{m}	ϕ_{f}	c_{mf}	K_{m}
值	0.4	1	0.04	1	10^{-8}	10^{-19}
单位	—	—	—	—	1/Pa	m^2
参数	$\rho_{\text{m/f}}$	$\mu_{\text{m/f}}$	K_{f}	δ	B	
值	1000	0.001	10^{-8}	10^{-9}	1000	
单位	kg/m^3	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	m^2	—	—	

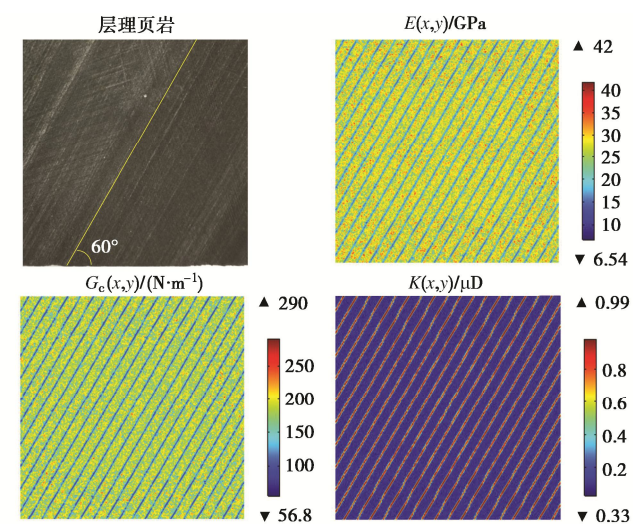


图 7 层理页岩力学渗流参数设置

Fig. 7 Mechanical and seepage parameters setting for bedded shale

3.1 水力裂缝与天然裂隙交互

这里首先研究了不含层理的页岩水力裂缝扩展特征。水平地应力的设置如表 2 所示,与文献[29]一致,地应力差逐渐增加,同时最大和最小水平应力依次变化。图 8 为注射流体 10 s 后,不同地应力条件下水力裂缝的形态。模拟结果显示,随着地应力差的增加,裂纹形态和起裂速度差异显著。当地应力差最小,即 $\Delta\sigma=3$ MPa 时,水力裂缝在与天然裂隙交汇后,沿着两条天然裂隙尖端开始扩展,随后由于应力屏蔽与放大效应,裂纹仅延其中两对角尖端扩展。随着地应力差逐渐增大,当 $\Delta\sigma=5$ MPa 时,扩展后的水力裂缝倾角稍微减小,即水力裂缝转向最大水平地应力方向。当 $\Delta\sigma=7$ MPa 时,水力裂缝转向显著,同时沿着最大水平应力方向扩展更为迅速,次生裂纹明显缩短。当 $\Delta\sigma=10$ MPa,水力裂缝遭遇天然裂隙时,扩展路径发生小角度偏转,此后直接横穿天然裂隙,此时,裂缝的扩展速度却低于 $\Delta\sigma=7$ MPa 时的情况。图 9 给出了 $\Delta\sigma=3$ MPa 时,不同时间下页岩试样的第一主应力分布。可以看出即将发生扩展的裂缝尖端区域的第一主应力最大。

表 2 数值模拟方案

Table 2 Schemes of numerical simulation

模拟方案	σ_{\max} /MPa	σ_{\min} /MPa	$\Delta\sigma$ /MPa
1	8	5	3
2	10	5	5
3	10	3	7
4	13	3	10

3.2 水力裂缝与天然裂隙、层理交互

页岩作为一种沉积岩,具有层状弱界面,分布于整个岩体中。试验研究发现页岩的层状结构(即层理面)对页岩的力学特性、裂纹萌生、扩展和破坏形态有显著影响[30]。本节考虑了页岩的层理面,研究了层理面、天然裂隙和水力裂缝的交互。设置包含不同层理角度的页岩(0° , 30° , 60° 和 90°)。为了清

晰的显示裂纹的形态,通过逻辑变量,将相场 $\phi>0.95$ 的裂缝区域统一设置为如图 10 所示的红色区域,与蓝色区域的基质部分(未开裂部分)加以区别。

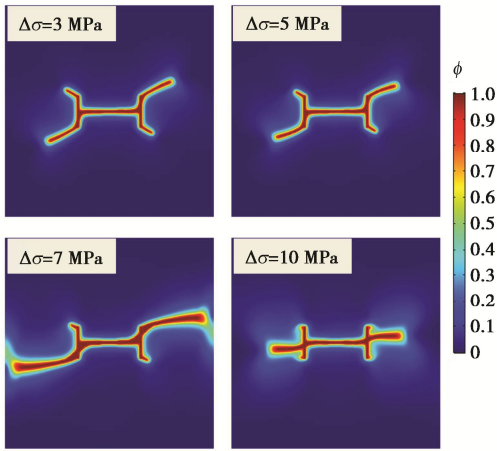


图 8 相同时刻不同应力差下的裂纹形态

Fig. 8 Crack patterns under different stresses at same time

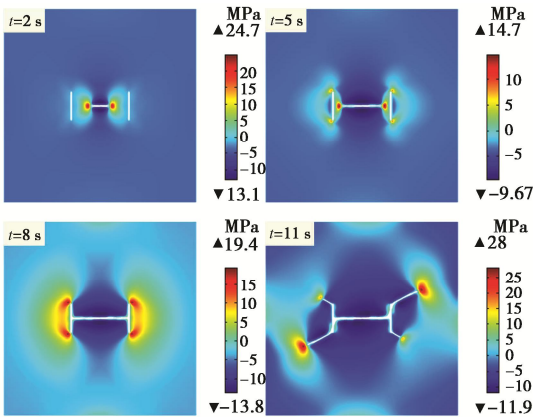


图 9 第一主应力 ($\Delta\sigma=3$ MPa)

Fig. 9 First principle stress ($\Delta\sigma=3$ MPa)

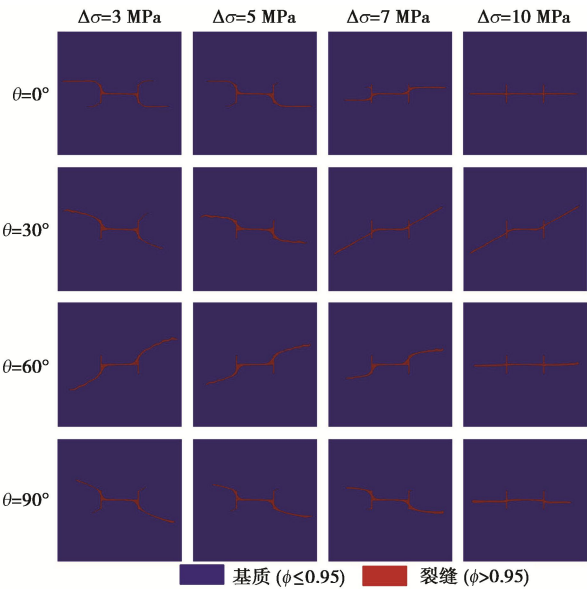


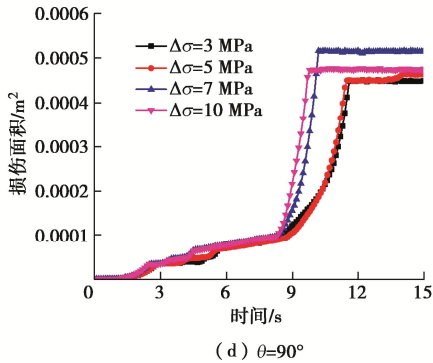
图 10 不同层理角度和地应力差下最终水力裂缝形态

Fig. 10 Final crack patterns under various bedding angles and stress differences

从图 10 可看出,最终裂缝随着层理角度和地应力差的不同呈现出不同的形态。当层理角度等于 0° , 60° 和 90° 时,随着地应力差逐渐增大,水力裂缝与天然裂隙合并后的裂缝起裂角度逐渐减小,直至当地应力差增加到 10 MPa,水力裂缝可直接横穿天然裂隙。而当层理角度为 30° 时,随着地应力差的增大,水力裂缝与天然裂隙交汇点发生微小改变,交汇后裂缝整体扩展方向发生扭转,只沿层理面方向扩展,而不能横穿层理面。

图 11 绘制了损伤面积随时间的演化曲线。这里同样选择 $\phi > 0.95$ 的区域积分得到。可以清晰地看到损伤面积近似呈指数形式增长。在水力裂缝、层理面以及天然裂隙交互的同时发生部分抖动,这是由于水力裂缝、天然裂隙与层理面交互前存在能量的积聚。

图 12 为注射裂隙内的平均流体压力演化规律。几乎都呈现出给出类似“驼峰”的特征。在水力加载初



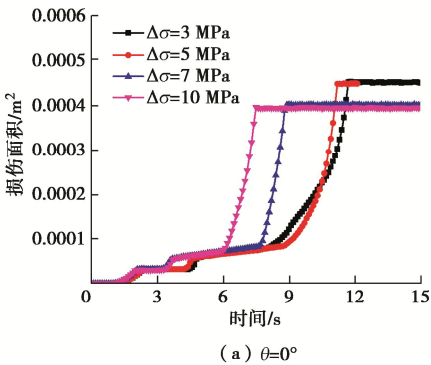
(d) $\theta=90^\circ$

图 11 不同层理角度和应力差下损伤面积演化

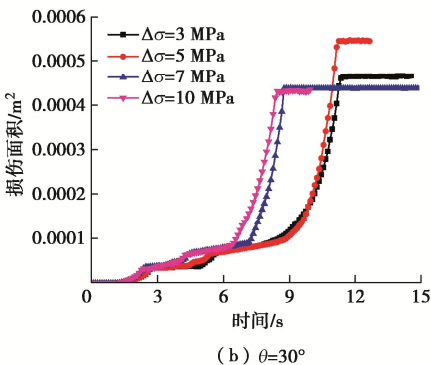
Fig. 11 Evolution of damage area under varying bedding angles and stress differences

始阶段,压力曲线近乎直线增加。随着水力裂缝扩展,压力缓慢下降,当水力裂缝与天然裂隙汇合时,压力迅速下降到最小。此后,页岩逐渐开始积聚能量,因此压力曲线又逐渐呈现上升的趋势。当水力裂缝横穿天然裂隙或者裂隙沿着天然裂隙一端扩展后,压力又开始下降,直至降到零为止。

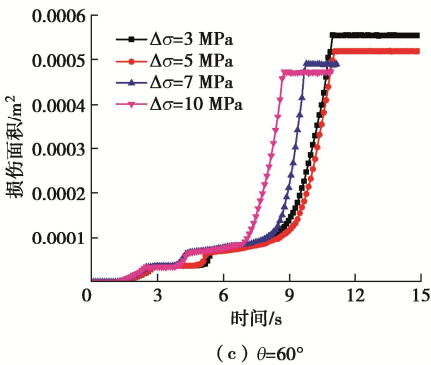
图 13 给出了不同时间下层理角度为 30° , $\Delta\sigma=7$ MPa 的层理页岩总的位移分布图。可以看出裂纹两侧位移的强间断特征。在计算迭代过程中可通过垂直于裂纹面两侧的位移分量实时计算更新裂纹的真实开度,根据修正的立方定律可进一步计算裂隙的渗透性。然而,在本文中并未按照此方法进行水力耦合,而是采用基质与模糊的损伤区线性插值得到的渗透率演化模型。这样无形中高估或低估了裂纹的渗透能力,可能会影响裂纹的起裂压力和扩展路径,这将是后期研究的重点。



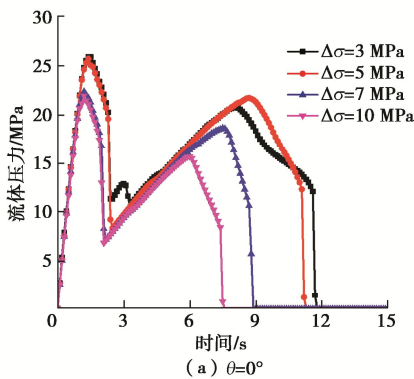
(a) $\theta=0^\circ$



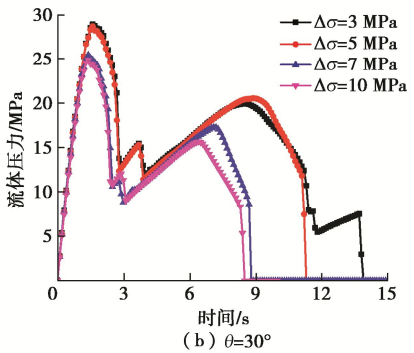
(b) $\theta=30^\circ$



(c) $\theta=60^\circ$



(a) $\theta=0^\circ$



(b) $\theta=30^\circ$

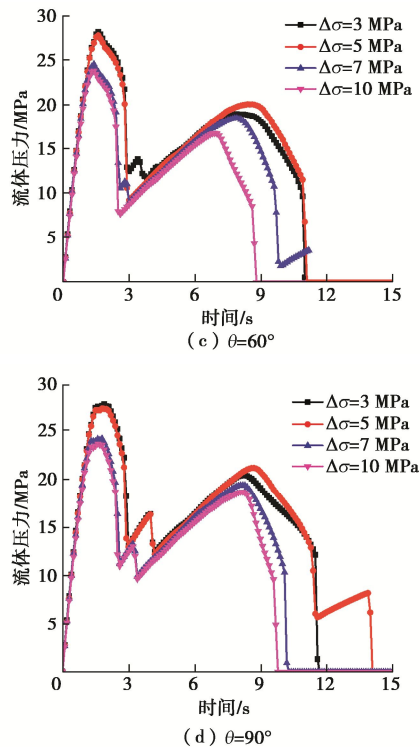


图 12 不同层理角度和应力差下的流体压力演化

Fig. 12 Evolution of fluid pressure under various bedding angles and stress differences

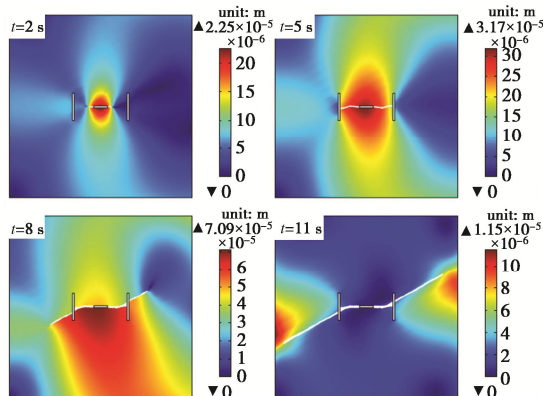


图 13 总位移分布图

Fig. 13 Distribution of total displacement

4 结 语

建立了水力耦合的相场模型, 该模型在模拟应力边界下复杂水力裂缝扩展、交互与合并过程中呈现出显著的优势。在三维模型中同样适用, 且不需要裂纹面追踪和额外的数值操作。

层理角度改变了水力裂缝的扩展路径。随着地应力差的增大, 水力裂缝可沿着最大水平应力方向横穿天然裂隙和层理面, 而当层理角度为 30° , 地应力差增大后, 水力裂缝在与天然裂隙交互后沿着层理面扩展。

对相同层理角度而言, 地应力差越大, 裂缝起裂

越快, 裂缝形态越单一, 损伤面积越小。注射裂缝的流体压力随注射时间和裂缝扩展情况演化。裂缝交互前, 存在能量聚集阶段, 而在裂纹交互后, 流体压力迅速减小, 直至最终达到边界压力。

在层理角度相同的情况下, 层理对水力裂缝扩展路径的改变主要取决于层理面的力学参数, 层理面的渗流参数必然会影响到水力裂缝的起裂速度, 而本文尚未细致考察这一情况。此外, 由于其变分结构, 该模型更容易被扩展用于研究多场耦合环境下岩石裂纹的扩展问题。

参考文献:

- [1] 赵凯凯, 张 镇, 李文洲, 等. 基于 XSite 的钻孔起裂水力裂缝三维扩展研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(8): 1483 - 1491. (ZHAO Kai-kai, ZHANG Zhen, LI Wen-zhou, et al. Three-dimensional simulation of hydraulic fracture from a borehole using XSite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(8): 1483 - 1491. (in Chinese))
- [2] 刘 武, 过申磊, 陆 倩, 等. 基于 TOUGHREACT 的岩石水力损伤耦合数值模型研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1306 - 1314, 1380. (LIU Wu, GUO Shen-lei, LU Qian, et al. Numerical model for hydro-mechanical- damage coupling of rocks based on TOUGHREACT[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(7): 1306 - 1314, 1380. (in Chinese))
- [3] FRANCFORT G A, MARIGO J J. Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1998, **46**(8): 1319 - 1342.
- [4] BOURDIN B, FRANCFORT G A, MARIGO J J. Numerical experiments in revisited brittle fracture[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2000, **48**(4): 797 - 826.
- [5] MIEHE C, WELSCHINGER F, HOFACKER M. Thermodynamically consistent phase-field models of fracture: Variational principles and multi-field FE implementations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, **83**(10): 1273 - 1311.
- [6] AMBATI M, GERASIMOV T, LORENZIS L. A review on phase-field models of brittle fracture and a new fast hybrid formulation[J]. Computational Mechanics, 2015, **55**(2): 383 - 405.
- [7] AMOR H, MARIGO J J, MAURINI C. Regularized formulation of the variational brittle fracture with unilateral contact: numerical experiments[J]. J Mech Phys Solids, 2009, **57**: 1209 - 1229.
- [8] ZHOU S W, ZHUANG X Y, ZHU H H, et al. Phase field

- modelling of crack propagation, branching and coalescence in rocks[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2018, **96**: 174 – 192.
- [9] 张 豪, 于继东, 裴晓阳, 等. 相场断裂方法发展概况[J]. 高压物理学报, 2019, **33**(3): 128 – 139. (ZHANG Hao, YU Ji-dong, PEI Xiao-yang, et al. An overview of phase field approach to fracture[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, **33**(3): 128 – 139. (in Chinese))
- [10] 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 Jian-ying. On the theoretical and numerical aspects of the unified phase-field theory for damage and failure in solids and structures[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, **53**(2): 301 – 329. (in Chinese))
- [11] NGUYEN T T, WALDMANN D, BUI T Q. Computational chemo-thermo-mechanical coupling phase-field model for complex fracture induced by early-age shrinkage and hydration heat in cement-based materials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, **348**: 1 – 28.
- [12] ZHUANG X Y, ZHOU S W. An experimental and numerical study on the influence of filling materials on double-crack propagation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, **53**(12): 5571 – 5591.
- [13] LIU J, XUE Y, CHEN W, et al. Variational phase-field model based on lower-dimensional interfacial element in FEM framework for investigating fracture behavior in layered rocks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, **255**: 107962.
- [14] ZHANG P, YAO W, HU X, et al. 3D micromechanical progressive failure simulation for fiber-reinforced composites[J]. *Composite Structures*, 2020, **249**: 112534.
- [15] MIEHE C, MAUTHE S. Phase field modeling of fracture in multi-physics problems: part III crack driving forces in hydro-poro-elasticity and hydraulic fracturing of fluid-saturated porous media[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016, **304**: 619 – 655.
- [16] SANTILLÁN D, JUANES R, CUETO-FELGUEROSO L. Phase field model of hydraulic fracturing in poroelastic media: fracture propagation, arrest, and branching under fluid injection and extraction[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, **123**(3): 2127 – 2155.
- [17] 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**(增刊 2): 706 – 716. (YI Liang-ping, HU Bin, LI Xiao-gang, 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**(S2): 706 – 716. (in Chinese))
- [18] 张 飞. 基于自适应移动网格及相场逼近的水力裂缝延伸模拟[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018. (ZHANG Fei. A Study on Adaptive Finite Element Solution of Phase-Field Models for Hydraulic Fracturing[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018. (in Chinese))
- [19] YI L, WAISMAN H, YANG 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.
- [20] 班宇鑫, 傅 翔, 谢 强, 等. 页岩巴西劈裂裂缝形态评价及功率谱特征分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2307 – 2315. (BAN Yu-xin, FU Xiang, XIE Qiang, et al. Evaluation of fracture morphology of shale in Brazilian tests and analysis of power spectral characteristics[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(12): 2307 – 2315. (in Chinese))
- [21] 侯 冰, 陈 勉, 张保卫, 等. 裂缝性页岩储层多级水力裂缝扩展规律研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1041 – 1046. (HOU Bing, CHEN Mian, ZHANG Bao-wei, et al. Propagation of multiple hydraulic fractures in fractured shale reservoir[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(6): 1041 – 1046. (in Chinese))
- [22] 侯 冰, 武安安, 常 智, 等. 页岩油储层多甜点压裂裂缝垂向扩展试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1322 – 1330. (HOU Bing, WU An-an, CHANG Zhi, et al. Experimental study on vertical propagation of fractures of multi-sweet of spots shale oil reservoir[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(7): 1322 – 1330. (in Chinese))
- [23] 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.
- [24] ZHOU S W, ZHUANG X Y, RABCUZUK T. A phase-field modeling approach of fracture propagation in poroelastic media[J]. *Engineering Geology*, 2018, **240**: 189 – 203.
- [25] LEE S, WHEELER M F, WICK T. Pressure and fluid-driven fracture propagation in porous media using an adaptive finite element phase field model[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2016, **305**: 111 – 132.
- [26] BORDEN M J, VERHOOSSEL C V, SCOTT M A, et al. A phase-field description of dynamic brittle fracture[J].

- Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, **217**: 77 - 95.
- [27] JIAO Y Y, ZHANG H Q, ZHANG X L, et al. A two-dimensional coupled hydromechanical discontinuum model for simulating rock hydraulic fracturing[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2015, **39**(5): 457 - 481.
- [28] LI K C, ZHOU S W. Numerical investigation of multizone hydraulic fracture propagation in porous media: new insights from a phase field method[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, **66**: 42 - 59.
- [29] ZHANG Q, ZHANG X, JI P. Numerical study of interaction between a hydraulic fracture and a weak plane using the bonded-particle model based on moment tensors[J]. Computers and Geotechnics, 2019, **105**: 79 - 93.
- [30] 侯鹏, 高峰, 杨玉贵, 等. 黑色页岩巴西劈裂破坏的层理效应研究及能量分析[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 930 - 937. (HOU Peng, GAO Feng, YANG Yu-gui, et al. Effect of bedding orientation on failure of black shale under Brazilian tests and energy analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(5): 930 - 937. (in Chinese))

《岩土工程学报》青年论坛学术活动进展报告

为了更好地活跃学术气氛、扩大学术交流和促进学科发展,并进一步加强《岩土工程学报》与岩土界青年学者的联系,利用《岩土工程学报》各媒介平台,特别是利用学报微信公众号平台(岩土学术CJGE)——它具有学术传播快捷、形式多样的特点——开展《岩土工程学报》青年论坛。分专题推出岩土界青年学者学术成果报道和学术演讲报告,学报编辑部邀请学报青年编委和岩土界青年学术骨干担任论坛各专题的召集人,组织广大岩土界青年学者参加本论坛的学术交流。

《岩土工程学报》青年论坛自2021年9月7日开讲以来已历经半年,半年来论坛组织发布了五个专题方向的38个学术报告,国内外著名高校、科研院所和公司等33家单位的青年学者代表在论坛上作了学术演讲,学术报告的阅读量总计达到68176人次,其中单个报告的最大阅读量达到9260人次,阅读量达6000人次以上的报告有2个,阅读量达2000人次以上的报告有8个,阅读量达1000人次以上的报告有19个。

《岩土工程学报》青年论坛第一专题:土工测试与勘察技术(第一期:土工测试技术),于2021年9月7日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,共包括6个学术报告,各学术报告的题目见附录1。第一专题召集人为东南大学、安徽建筑大学教授蔡国军编委。

附录1:《岩土工程学报》青年论坛第一专题:土工测试与勘察技术(第一期:土工测试技术)报告列表

1. 非饱和土热-水-力耦合试验系统研制及应用(北京交通大学蔡国庆教授)
2. 上海软土的小应变特性、HSS模型参数取值及深基坑变形分析(同济大学顾晓强教授)
3. 季冻区渠道灾变离心模拟技术(南京水利科学研究院黄英豪教授级高工)
4. 基于地震成像的近地表波速测试技术及应用(华中科技大学苗雨教授)
5. 液化场地桩-土-结构体系相互作用振动台试验与相关研究(哈尔滨工业大学唐亮教授)
6. 软土路基压电特性测试(温州大学王军教授)

《岩土工程学报》青年论坛第二专题:桩基理论与实践新进展,于2021年10月8日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,共包括7个学术报告,各学术报告的题目见附录2。第二专题召集人为同济大学教授梁发云编委。

《岩土工程学报》青年论坛第三专题:极端环境下的岩土工程,于2021年11月24日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,本专题共包括8个学术报告,各学术报告的题目见附录3。第三专题召集人为北京工业大学教授路德春编委。

《岩土工程学报》青年论坛第四专题:岩石动力学及分析方法,于2021年12月24日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,本专题共包括10个学术报告,各学术报告的题目见附录4。第四专题召集人为华侨大学教授俞缙编委。

《岩土工程学报》青年论坛第五专题:软土地基排水固结理论与工程实践,于2022年2月9日在《岩土工程学报》微信公众号平台上开讲,本专题共包括7个学术报告,各学术报告的题目见附录5。第五专题召集人为南京水利科学研究院教授级高工何宁编委。

(本刊编辑部 2022年3月)

附录2:《岩土工程学报》青年论坛第二专题:桩基理论与实践新进展报告列表

1. 桩基动力学理论新进展(重庆大学丁选明教授)
2. 砂土液化大变形本构模型在桩基础地震响应研究中的应用(清华大学王睿教授)
3. 砂性土中桩打入过程多尺度模拟(浙江大学郭宁教授)
4. 光纤传感技术在桩基监测中的应用(大连理工大学裴华富教授)
5. 桩-土系统中的应力波传播机制及应用新进展(中国地质大学(武汉)吴文兵教授)
6. 地下工程开挖诱发被动桩响应分析理论的研究(同济大学木林隆教授)
7. 超高层建筑超长桩基础设计与实践(华东建筑设计研究院有限公司吴江斌研究员)

(下转 559 页)