

基于刚体弹簧 - 等效离散裂隙网络耦合方法的水压致裂数值模型

姚池¹, 赵明¹, 杨建华¹, 蒋水华¹, 姜清辉^{1,2}, 周创兵¹

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330033; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出一种模拟二维非稳定渗流过程的等效离散裂隙网络模型。在此基础上, 结合改进刚体弹簧方法, 通过引入考虑断裂能的渐进拉裂破坏准则, 建立一种新的水压致裂过程数值计算模型。应力、变形、裂隙扩展过程计算采用改进刚体弹簧方法, 非稳定渗流计算采用等效离散裂隙网络模型。为模拟等效的宏观渗透特性, 给出微观渗流参数的确定方法, 通过与一维非稳定渗流解析解的对比, 验证等效离散裂隙网络模型的适用性。给出改进弹簧方法和等效离散裂隙网络水力耦合模型的计算流程, 通过与弹性稳定流条件下厚壁圆筒的解析解对比, 验证弹性稳定流条件下水力耦合计算格式的正确性。通过厚壁圆筒水压致裂算例验证所给模型模拟水压致裂过程的能力。与同类格子模型的对比, 证明该模型的优越性。

关键词: 岩石力学; 水压致裂; 刚体弹簧方法; 裂隙扩展; 水力耦合

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)06 - 1438 - 08

A coupled RBSM-DFN model for simulating hydraulic fracturing

YAO Chi¹, ZHAO Ming¹, YANG Jianhua¹, JIANG Shuihua¹, JIANG Qinghui^{1,2}, ZHOU Chuangbing¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330033, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education,

Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: An equivalent discrete fracture network model to simulate two-dimensional unsteady seepage process is proposed. On this basis, a new numerical model of hydraulic fracturing process is established by introducing the progressive failure criterion of fracturing energy and the extended rigid-body spring method. The processes of stress, deformation and crack propagation are simulated with the extended rigid body spring method, while the unsteady seepage problem is solved with the equivalent discrete fracture network model. To obtain the equivalent macroscopic permeability characteristics, a method is used to determine the mesoscopic seepage parameters. The applicability of the equivalent discrete fracture network model is verified through comparison with the analytical solution of a one-dimensional unsteady seepage problem. The hydro-mechanical coupling procedure is deduced through combination of the extended rigid spring method with the equivalent discrete fracture network model. The coupling method is verified by comparing with the elastic analytical solutions of thick wall cylinder under the condition of steady flow. An example is given to demonstrate the capability of the model to simulate the hydraulic fracturing process. The comparison with similar lattice model proves the superiority of the proposed model.

Key words: rock mechanics; hydraulic fracturing; RBSM; crack propagation; hydro-mechanical coupling

收稿日期: 2017 - 09 - 25; **修回日期:** 2018 - 01 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41762020, 51509104); 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室开放基金(RMHSE1605)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41762020 and 51509104) and Wuhan University Ministry of Education Key Laboratory of Hydraulic Rock Mechanics Open Fund(Grant No. RMHSE1605)

作者简介: 姚池(1986 -), 男, 博士, 2008年毕业于武汉大学水利水电工程专业, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事裂隙岩体水力耦合数值模型方面的研究工作。E-mail: chi.yao@ncu.edu.cn。通讯作者: 杨建华(1986 -), 博士, 现任副教授。E-mail: yangjianhua86@ncu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1231

1 引言

水压致裂技术作为储层增产的关键技术，已被广泛应用于石油、天然气、地热开采等工程。水压致裂法通过注入流体在储层中形成工裂缝网络，以提高储层的渗透性。由于其重要性，近年来学者们对水压致裂过程进行了广泛的研究。

严成增等^[1-2]基于 FEM/DEM 耦合分析方法，提出了一种新的流 - 固耦合模型，并利用该模型计算了流体驱动作用下的岩体破裂算例。潘鹏志等^[3]利用弹塑性细胞自动机模型，建立了非均质岩石水压致裂过程模拟方法，研究了不同均质度和井筒内径对水压致裂行为的影响。李根等^[4]基于 RFPA 数值分析方法和并行计算技术，建立了反映岩石细观损伤演化过程的三维渗流 - 应力 - 损伤耦合模型，并探讨了围压对水压致裂过程的影响。李连崇等^[5]在经典 Biot 渗流力学基本方程的基础上，基于弹性损伤理论，建立了岩石损伤演化过程的渗流 - 应力耦合模型，运用岩石损伤破裂过程渗流 - 应力耦合分析系统 F-RFPA(2D)，对水压致裂过程中裂纹的萌生、扩展、渗透率演化规律及渗流 - 应力耦合机制进行模拟分析。T. Wang 等^[6]利用二维颗粒流程序 (PFC^{2D}) 模拟了煤层气开采过程中的水压致裂过程，并推导了破裂压力和开裂半径的经验公式。L. Q. Choo 等^[7]以不连续变形分析方法(discontinuous deformation analysis, DDA)和有限元的耦合模型为基础，提出了一种新的水压致裂计算模型，通过一些算例验证了模型的计算能力。Y. Y. Jiao 等^[8]在不连续变形分析方法(DDA)的理论框架内，引入渗流计算模型，提出了一个二维水压致裂计算模型。P. Grassl 等^[9]基于格子模型提出了一个二维的水力耦合模型，并对厚壁圆筒的水压致裂过程进行了计算，指出 Biot 系数对开裂压力、开裂模式具有明显影响。A. Lisjak 等^[10]也基于 FDEM 耦合模型提出了一种岩石水力耦合计算方法。

刚体弹簧方法最初由 T. Kawai^[11]提出，后经 J. E. Bolander 等^[12-14]的发展，被广泛用于混凝土的开裂模拟。L. X. Qian 等^[15-18]也对该方法进行了深入的研究，将其用于边坡的极限分析中，取得了良好的效果。通过改进该方法，笔者提出了各向同性岩石和各向异性岩石的渐进损伤破坏模型，并将该方法成功用于模拟下岩石的渗透性演化过程和开挖损伤区演化过程^[19-25]，并开发了稳定渗流状态下的水压致裂模型^[26]。

本文在稳定渗流状态下的水压致裂模型^[26]的基础上，通过引入等效离散裂隙网络模型描述非稳定渗流过程，推导水力耦合计算公式，提出了一种新的二维水压致裂数值计算方法。然后，利用一维非稳定渗流问题的解析解、二维弹性稳定流条件下的厚壁圆筒水力耦合解析解验证了本文模型在渗流计算及水力耦合计算方面的正确性。最后，对水压作用下裂隙扩展最终形成裂隙网络的过程进行了初步研究，研究成果对于指导水压致裂的工程实践具有一定的借鉴作用。

2 应力变形计算：改进刚体弹簧方法

改进刚体弹簧方法(rigid body spring method, RBSM)的原理在姚池等^[19, 22]的研究工作中已有详细介绍，因此这里只对其基本理论作简要回顾。改进刚体弹簧法方法将岩石视作由细小多边形刚性块体胶结而成的集合，相邻块体通过均匀分布在其共同边界上的法向和切向弹簧传递力的作用。弹性性质由法向刚度 k_n 和切向刚度 k_s 表示，界面上的应力可由界面相对位移表示为

$$\left. \begin{aligned} \{\sigma\} &= \{\sigma_n \quad \sigma_s\}^T = [D]\{\Delta u\} \\ [D] &= \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： σ_n 和 σ_s 分别为界面上的法向应力和切向应力， $\{\Delta u\}$ 为界面两边的相对位移向量。基于虚功原理并对所有界面和边界进行积分，可以得到总体平衡方程：

$$[K]\{U\} = \{Q\} \quad (2)$$

式中： $[K]$ 为总体刚度矩阵， $[U]$ 为总体位移矩阵， $[Q]$ 为总体力矩阵。三者的具体表达式可参见 C. Yao 等^[22]。

在改进刚体弹簧方法中，界面弹性参数可以和宏观弹性参数建立显式联系，对于各向同性材料^[22]有

$$\left. \begin{aligned} k_n &= \frac{E_0}{h_1 + h_2} \\ k_s &= rk_n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} r = k_s / k_n &= 4.025\mu^4 - 6.087\mu^3 + \\ &6.022\mu^2 - 3.966\mu + 1 \\ E / E_0 &= -0.629r^4 + 1.617r^3 - 1.678r^2 + \\ &1.174r + 0.5162 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： E 和 μ 分别为宏观弹性参数杨氏模量和泊松比， h_1 和 h_2 分别表示相邻块体各自形心到两者交界面的距离， E_0 和 r 为中间变量。

在开裂判断上，采用二次非线性的剪切破坏准

则^[25]。对于各向同性材料，界面的破坏准则表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n + B|\sigma_s|^2 - C \leq 0 \\ \sigma_n - T \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： B 和 C 为表征界面剪切强度的细观强度参数， T 为界面的抗拉强度。图1给出了界面破坏准则的示意图。

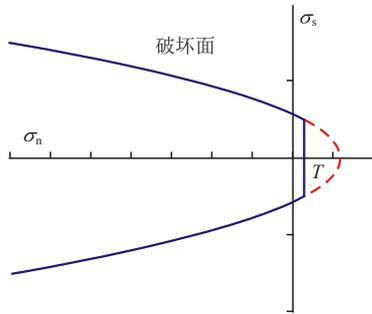


图1 界面破坏准则

Fig.1 Failure criterion of interface

在界面法向受拉条件下，抗拉强度 T 由下式定义：

$$T = \begin{cases} T_0 & (u_n < u_{n0}) \\ T_0 \exp[-\gamma(u_n - u_{n0})] & (u_n \geq u_{n0}) \end{cases} \quad (6a)$$

其中，

$$u_{n0} = T_0 / k_n \quad (6b)$$

式中： T_0 为初始抗拉强度； u_n 为界面法向相对位移； γ 为确定软化发生后抗拉强度的参数，并与细观断裂能 G_I 相关， $G_I = T_0 / \gamma$ 。

3 基于等效离散裂隙网络模型的非稳定渗流计算方法

3.1 基本原理

假设块体不透水，渗流只发生在块体之间的界面上，界面相互连接而成的网络形成了流体的渗透通道，不妨称这个网络为等效离散裂隙网络。界面上的渗流采用平板模型假设，其导水系数可利用立方定理求解，即

$$T_i = \frac{gb_e^3}{12\nu} \quad (7)$$

式中： T_i 为界面的导水系数， g 为重力加速度， ν 为流体运动黏滞系数， b_e 为界面的等效开度。

等效离散裂隙网络非稳定渗流的基本方程可写为

$$T_i \frac{\partial^2 p}{\partial l^2} = sb_e \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8)$$

式中： p 为水压， l 为界面的沿程坐标， t 为时间， s 为等效单位存储量。结合边界条件，利用有限元方法对式(8)进行离散，可得总体迭代方程：

$$\left(\alpha[K] + \frac{[S]}{\Delta t} \right) \{p\}_{t+\Delta t} = \left(\frac{[S]}{\Delta t} - (1-\alpha)[K] \right) \{p\}_t + \{F\} \quad (9a)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} [K] &= \sum_{\Omega} [K]_e \\ [K]_e &= \frac{T_i}{L_0} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \\ [S] &= \sum_{\Omega} [S]_e \\ [S]_e &= sb_e L_0 \begin{bmatrix} 1/3 & 1/6 \\ 1/6 & 1/3 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (9b)$$

式中： $\{F\}$ 为由已知水头的结点形成的常数列向量， α 为积分常数， L_0 为界面长度， Ω 为全域。

3.2 等效离散裂隙网络模型细观参数的选取

为保证等效离散裂隙网络与岩石基质具有相同的宏观渗透特性，需要选取合适的界面等效开度。本文模型计算网格采用在点饱和条件下生成的随机均布 Voronoi 图，如图2所示，对于 $a \times a$ 的方形区域，假设其内部共包含 N 个块体，在单位水力梯度条件下，从上到下发生渗流，各界面的导水系数相同，均为 T_i (单位为 m^2/s)。根据前期研究，下游流量 Q_0 ， T_i 和 N 可以建立如下经验关系式^[24]：

$$Q_0 / T_i = 0.947 3\sqrt{N} - 1.044 8 \quad (10)$$

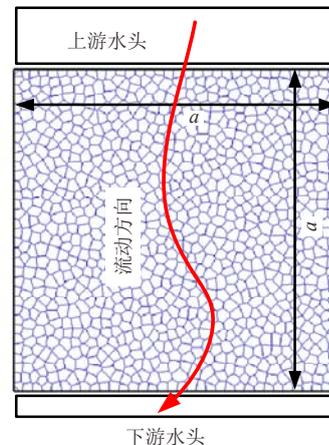


图2 渗流计算网格示意图

Fig.2 Numerical mesh for seepage simulation

下游流量还可以写成宏观渗透系数 k 的表达式：

$$Q_0 = kJa = ka \quad (11)$$

式中： J 为水力梯度，此处为 $1 m/m$ ； k 为宏观渗透系数。根据式(10)和(11)联立可以得出界面等效导水系数和宏观渗透系数的关系为

$$T_i = \frac{ka}{0.947 3\sqrt{N} - 1.044 8} \quad (12)$$

将式(12)代入式(7)可得界面的等效开度为

$$b_e = \frac{12\nu}{g} \sqrt[3]{\frac{ka}{0.947 3\sqrt{N} - 1.044 8}} \quad (13)$$

为保证非稳定渗流计算的等效性, 还需要选取合适的等效单位存储量 s 。假设对于图 2 所示 $a \times a$ 的方形区域, 左右两侧为不透水边界, 初始在上下两侧边界施加相同的水压 p_0 , 然后上侧边界水压瞬时上升至 p_1 , 考察经时间 t 全域孔压的变化情况。这个问题可以看作一维非稳定渗流问题, 根据王媛和颜青青^[27]的研究, 存在着如下解析解:

$$p(x, t) = p_0 + (p_1 - p_0) \cdot \left[1 - \frac{x}{a} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) e^{-\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 \frac{kt}{S_s}} \right] \quad (14)$$

式中: x 为以上侧边界为起始面的坐标。假设细观参数和宏观参数线性相关, 存在如下关系:

$$\beta \frac{T_i}{sb_e} = \frac{k}{S_s} \quad (15)$$

式中: β 为宏细观参数的转换系数, S_s 为宏观单位存储量。

参照王媛和颜青青^[27]的研究, 取: $p_0 = 2 \text{ MPa}$, $p_1 = 3.22 \text{ MPa}$, $k = 10^{-7} \text{ m/s}$, $S_s = 0.001 \text{ m}^{-1}$, $a = 1 \text{ m}$ 。利用本文所给数值模型对该问题进行计算, 首先, 生成 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的网格, 在本例中, 块体总数 $N = 13\,532$ 。为了获得 β 的合理取值, 在 $(0, 1)$ 范围, 以 0.01 为间隔, 总共取 100 个数分别作为 β 的取值, 然后利用式(8)~(10)确定等效离散裂隙网络的相应等效裂隙开度 b 和等效单位存储量 s 。利用本文模型计算不同 β 取值条件下不同时刻的水压分布, 并与王媛给出的解析解对比。为方便显示, 选取几个典型的 β 值, 分别为 $0.1, 0.3, 0.5, 0.7$ 和 0.9 , 将它们在 $t = 1\,500 \text{ s}$ 时的数值计算结果和解析解的对比, 如图 3 所示。对比显示, 在 $\beta = 0.5$ 时, 数值计

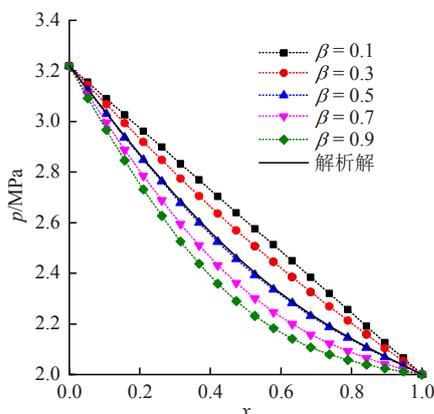


图 3 不同 β 值计算得到的 $t = 1\,500 \text{ s}$ 时刻的水压分布与解析解的对比

Fig.3 Comparison of water pressure distribution and analytical solution at time $t = 1\,500 \text{ s}$ calculated by different β values

算结果和解析解差异性最小, 因此, 取 $\beta = 0.5$ 。

为验证 $\beta = 0.5$ 的取值是否恰当, 将 $\beta = 0.5$, $N = 13\,532$ 条件下其他时刻(选取 $t = 200$ 和 $3\,000 \text{ s}$ 两个时刻作为代表)的计算结果与解析解也进行了对比, 结果如图 4 所示, 可知, 不同时刻的数值结果与解析解均吻合良好。为考察这种取值方式的网格依赖性, 还对比了不同块体数($N = 6\,562$ 和 $N = 26\,721$)条件下 $t = 1\,500 \text{ s}$ 时的水压分布, 结果如图 5 所示, 由图 5 可知, 不同网格数计算得到的数值结果基本一致, 且与解析解吻合良好。当 $\beta = 0.5$ 时, 不同时刻、不同块体数条件下的数值解和解析解均吻合良好, 从而证明了细观参数取值方式的合理性, 且这种取值方式没有网格依赖性。

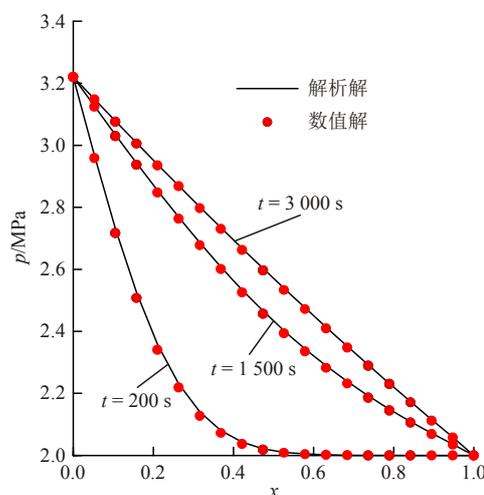


图 4 $\beta = 0.5$ 时计算得到的不同时刻的水压分布与解析解的对比

Fig.4 Comparison of the hydraulic pressure distribution and the analytical solution at different moments calculated when $\beta = 0.5$

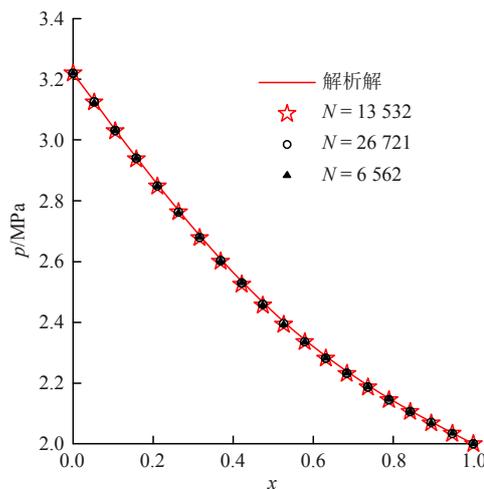


图 5 $\beta = 0.5$, $t = 1\,500 \text{ s}$ 时不同块体数网格计算得到的水压分布与解析解的对比

Fig.5 Comparison of water pressure distribution and analytic solution calculated with grids of different block numbers when $\beta = 0.5$ at $t = 1\,500 \text{ s}$

4 水力耦合

水力耦合计算过程如图 6 所示，应力变形计算采用刚体弹簧方法，渗流计算采用本文提出的等效离散裂隙网络模型，在一个时间步里，二者依次进行。应力变形计算完成后，通过式(5)判断各个界面是否发生破坏，如果发生拉裂破坏，利用式(6a)确定残余拉应力强度及相应的力学开度，此时，若力学开度大于式(13)定义的等效裂隙开度，则在下一步渗流计算的时候，将该界面的水力学开度设置为与其力学开度相等，以表现拉裂破坏对局部渗透性的增大作用。更新水力开度后，计算该时间步的渗流场，得到新的水压分布场，并作为荷载更新到力学计算的应力边界条件中，水压形成的力学边界计算过程参考姚池等^[26]。

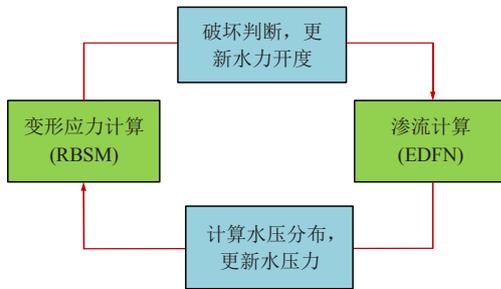


图 6 水力耦合过程示意图

Fig.6 Calculation process of hydraulic fracturing

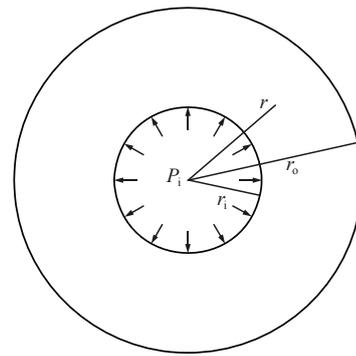
5 算例

5.1 水力耦合计算方法的验证

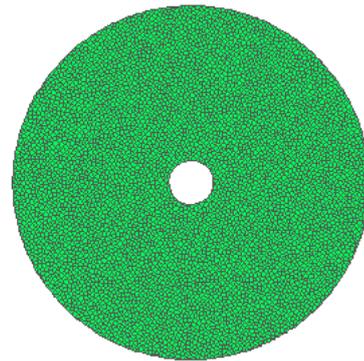
假设对于如图 7(a)所示的厚壁圆筒，其内径 $r_i = 5\text{ m}$ ，外径 $r_o = 36.25\text{ m}$ ，内水压强 $P_i = 10\text{ MPa}$ ，渗透系数 $k = 1 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ ，弹性模量 $E = 50\text{ GPa}$ ，试求在弹性和稳定流条件下，泊松比 μ 分别等于 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, Biot 系数 b 分别等于 0, 0.5, 1 时的径向位移分布。对于这个问题，P. Grassl 等^[9]给出了径向位移 u 的解析解：

$$\bar{u} = -b\bar{p}_i \frac{1-\mu^2}{2} \left[\frac{\bar{r}_o^2}{\bar{r}_o^2-1} \left(\frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{1}{\bar{r}} + \bar{r} \right) + \bar{r} \frac{1}{\ln \bar{r}_o} - \frac{1}{\ln \bar{r}} \right] - (1-b)\bar{p}_i \frac{\bar{r}_o^2}{\bar{r}_o^2-1} \left[\frac{1+\mu}{\bar{r}} + \frac{\bar{r}(1-\mu)}{\bar{r}_o^2} \right] \quad (16)$$

式中： \bar{u} ， \bar{r}_o ， \bar{r} 和 \bar{p}_i 为量纲一的量， $\bar{u} = u/r_i$ ， $\bar{r} = r/r_i$ ， $\bar{r}_o = r_o/r_i$ ， $\bar{p}_i = p_i/E$ ， u 为距离圆心为 r 的点的径向位移， E 为弹性模量； μ 为泊松比； b 为 Biot 系数。



(a) 厚壁圆筒问题示意图

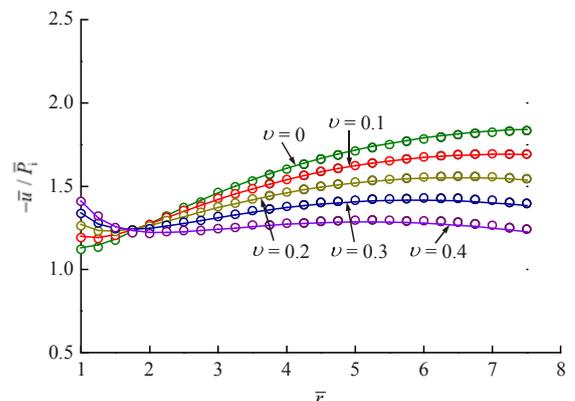


(b) 计算网格

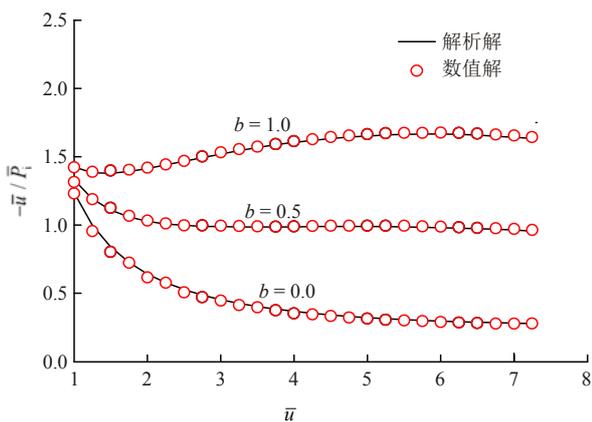
图 7 厚壁圆筒问题示意图及计算网格

Fig.7 Diagram of the thick-walled cylinder and the calculation grid

利用本文提出的数值模型在不同泊松比和不同 Biot 系数条件下求解内水压作用下厚壁圆筒的径向位移分布，计算网格如图 7(b)所示，共包含 5 765 个块体。分别在条件(1)： $b = 1$ ，不同泊松比条件下；及条件(2)： $\mu = 0.2$ ，不同 Biot 系数 b 条件下将数值计算的结果与式(16)给出的解析解进行对比，结果如图 8 所示。实线为解析公式求解的结果，空心圆点为本文数值模型计算出来的结果，可以看出，数值模拟结果与解析解在不同的泊松比和 Biot 系数组合条件下都吻合良好，从而证明本文水力耦合计算模型的正确性。此外，由图 8(a)还可以看出，泊松比



(a) $b = 1$ ，不同泊松比条件下数值解与解析解对比



(b) $\mu = 0.2$, 不同 Biot 系数条件下数值解与解析解对比
图 8 数值解和解析解的对比

Fig.8 Comparison of numerical solutions and analytical solutions

对径向位移分布有着显著的影响，随着泊松比的增大，圆筒内壁径向位移明显增大、外壁位移则显著降低；由图 8(b)可知，在同一泊松比条件下，随着 Biot 系数的增大，内壁和外壁径向位移均显著增大。值得指出的是，P. Grassl 等^[9]也对该算例进行了计算，而他们的计算结果只在 $\mu = 0.2$ 以下才和解析解吻合良好，而本文模型适合于 $0 \sim 0.5$ 范围所有泊松比条件。由此可见，本文模型在水力耦合条件下的弹性响应计算方面优于 P. Grassl 等^[9]的格子模型。

5.2 水压致裂过程模拟

对节 5.1 所给出的厚壁圆筒进行水压致裂模拟，同时考虑 Biot 系数对水压致裂过程的影响。岩石细观力学参数如表 1 所示，该套参数是从法国核废料填埋中心 Bure 地下实验室的 Cox 黏土岩的室内三轴实验标定而来^[25]，图 9 给出了计算得到的应力 - 应变曲线与室内 2 和 12 MPa 围压三轴实验的对比^[24]。可以看出，本文模型可以较为精确地描述岩石不同围压下的抗压强度变化，数值结果与实验结果吻合较好。渗流计算细观参数与节 5.1 相同。

考虑 2 种工况：(1) 厚壁圆筒仅受内水压力的作用，考虑渗流为稳定流动，Biot 系数分别为 0, 0.5 和 1，逐渐增大内水压力，使得圆筒被水压裂；(2) 考虑 Biot 系数为 1，厚壁圆筒内水压力恒定，随时间增长，水逐渐渗入圆筒内，导致其逐渐压裂。

表 1 力学参数

Table 1 Mechanical parameters

E/GPa	μ	B/MPa^{-1}	c/MPa	T_0/MPa	$G_I/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
4	0.3	0.19	22	5	10 000

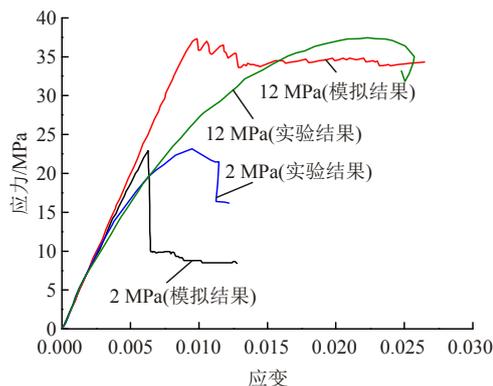


图 9 Cox 黏土岩数值与室内三轴实验结果对比^[24]

Fig.9 Comparison between numerical and experimental results of Cox argillite^[24]

对于工况(1)，内水压力从 0 开始，以 0.1 MPa 每步逐渐增加，直到裂缝贯穿整个筒壁。图 10 给出了不同 Biot 系数条件下内径位移和内水压力的关系曲线。图 11 给出了不同 Biot 系数在最大内水压情况下的破坏模式(图中，红色表示较大的拉裂纹、蓝色表示较小的拉裂纹、绿色表示剪切裂纹)。可以看出，Biot 系数对厚壁圆筒的位移响应及最终的水压破裂方式具有明显的影响。当 $b = 0, 0.5$ 和 1，最大的内水压力分别为 4.7, 6.3 和 17 MPa。对于 $b = 0$ ，多条裂隙同时向筒外延伸，而对于 $b = 0.5$ 和 1 时，只有对称的 2 条主要裂隙形成。这些结果和 P. Grassl 等^[9]的结果是一致的。

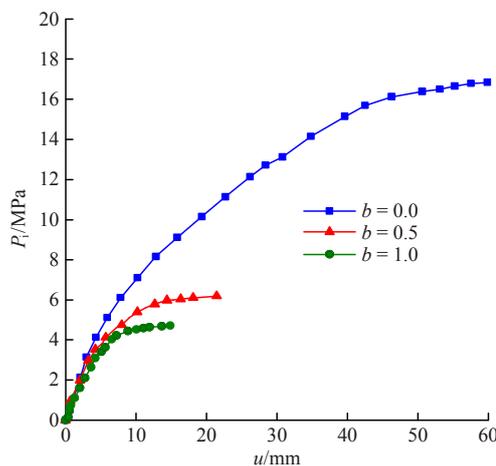


图 10 不同 b 值内水压力与内壁位移关系曲线

Fig.10 Relationships between inner pressure and radial displacement with different values of b

对于工况(2)， $b = 1$ ，在初始条件下，筒壁内部的孔隙水压力为 0.001 MPa，内壁水压力突然上升至 4 MPa。图 12 给出了 $t = 1 445, 1 468, 1 470 \text{ s}$ 三个时刻的裂隙分布。在 $t = 1 470 \text{ s}$ 之后，厚壁圆筒被水压裂缝完全贯穿。值得注意的是，此时贯穿

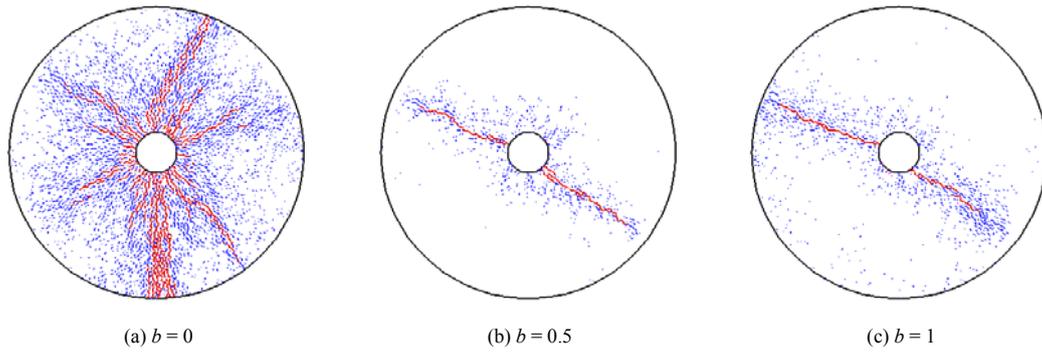


图 11 稳定渗流不同 Biot 系数条件下水压裂缝形态

Fig.11 Fracture patterns under steady state flow for different values of Biot's coefficient

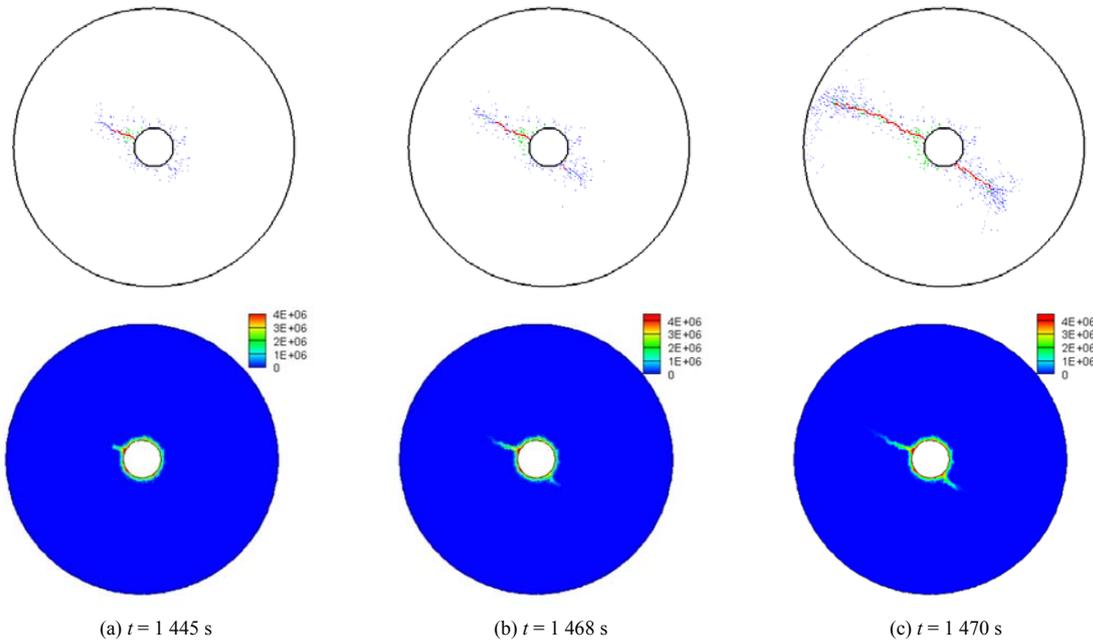


图 12 非稳定渗流条件下不同时刻的裂隙形态和水压分布图

Fig.12 Fracture patterns and pressure distributions at different times under transient flow condition

厚壁圆筒的 4 MPa 内水压力远小于工况(1)中稳定渗流条件下破坏压力 4.7 MPa。在非稳定渗流计算框架下，一旦裂隙产生，局部渗透系数将急剧增大，下一个计算时步，渗透压将显著增大并增强裂隙继续发展的可能性。而在工况(1)中稳定渗流的计算框架下，裂隙周边的水压力场接近并相互抵消，因而不能很好的促进裂隙继续增长。由此可见，考虑非稳定渗流效应具有重要意义。这也是本文模型相比 Grassl 格子模型^[9]的又一个优点。

6 结 论

本文提出了一种新型刚体弹簧 - 等效离散裂隙网络耦合方法，用于研究黏性多孔材料中的水力压裂问题。建立了新的等效离散裂隙网络模型，以描述多孔连续介质中的非稳定流体运动过程。通过不

同 Biot 系数及泊松比条件下，数值计算结果与厚壁圆筒在稳态流动条件下受到均匀内流体压力的弹性响应的解析解比较，验证了所提出的耦合模型的有效性。所提出的耦合模型改进了其他数值模型(如格子模型^[9])获得的结果。此外，该模型已被应用于在稳态渗流和非稳态渗流条件下研究厚壁圆筒的水力压裂。在稳态渗流框架下，对于不同的 Biot 系数，所提出的模型得到的压裂模式和位移响应都与来自格子模型的结果匹配得很好。当 Biot 系数增大时，峰值内水压力显著下降。在非稳定渗流框架下，瞬态流动的影响是突出的。非稳定流动状态下的内部流体峰值压力明显小于稳定渗流状态下的峰值内水压力。这主要是由于水力传导率随着裂缝张开而显著增加，这增强了裂缝的扩展。目前，该模型还只是计算一些简单的厚壁圆筒算例，所得结果主要以定性分析为主，定量上尚需要和水压致裂经典解如 PKN

等进行对比, 以促进其进一步发展并走向实用。水压裂缝与天然裂缝之间的交互关系也是需要进一步探讨的问题。此外, 该模型目前还只适用于二维情况, 将其推广到三维也是今后研究的重要方向。

参考文献(References):

- [1] 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等. 模拟水压致裂的二维 FDEM-flow 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 67 - 75.(YAN Chengzeng, ZHENG Hong, SUN Guanhua, et al. A 2D FDEM-Flow method for simulation hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 67 - 75.(in Chinese))
- [2] YAN C, ZHENG H. A two-dimensional coupled hydro-mechanical finite-discrete model considering porous media flow for simulating hydraulic fracturing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 88(10): 115 - 128.
- [3] 潘鹏志, 冯夏庭, 吴红晓, 等. 水压致裂过程的弹塑性细胞自动机模拟[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5): 722 - 727.(PAN Pengzhi, FENG Xiating, WU Hongxiao, et al. Simulation of elastoplastic cellular automata in hydraulic fracturing process[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(5): 722 - 727.(in Chinese))
- [4] 李根, 唐春安, 李连崇, 等. 水压致裂过程的三维数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1 875 - 1 881.(LI Gen, TANG Chun'an, LI Liancong, et al. Research on three-dimensional numerical simulation of hydraulic fracturing process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1 875 - 1 881.(in Chinese))
- [5] 李连崇, 杨天鸿, 唐春安, 等. 岩石水压致裂过程的耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 060 - 1 066.(LI Lianchong, YANG Tianhong, TANG Chun'an, et al. Coupling analysis of rock hydraulic fracturing process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 060 - 1 066.(in Chinese))
- [6] WANG T, ZHOU W, CHEN J, et al. Simulation of hydraulic fracturing using particle flow method and application in a coal mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 121: 1 - 13.
- [7] CHOO L Q, ZHAO Z, CHEN H, et al. Hydraulic fracturing modeling using the discontinuous deformation analysis(DDA) method[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76: 12 - 22.
- [8] 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.
- [9] GRASSL P, FAHY C, GALLIPOLI D, et al. On a 2D hydro-mechanical lattice approach for modelling hydraulic fracture[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 75(2): 104 - 118.
- [10] LISJAK A, KAIFOSH P, HE L, et al. A 2D, fully-coupled, hydro-mechanical, FDEM formulation for modelling fracturing processes in discontinuous, porous rock masses[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 81(1): 1 - 18.
- [11] KAWAI T. New element models in discrete structural analysis[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1977, 1977(141): 174 - 180.
- [12] BOLANDER J E, BERTON S. Simulation of shrinkage induced cracking in cement composite overlays[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(7): 861 - 871.
- [13] NAGAI K, SATO Y, UEDA T. Mesoscopic simulation of failure of mortar and concrete by 2D RBSPM[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2(3): 359 - 374.
- [14] UEDA T, HASAN M, NAGAI K, et al. Mesoscale simulation of influence of frost damage on mechanical properties of concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(6): 244 - 252.
- [15] QIAN L X, XHANG X. Rigid finite element and its applications in engineering[J]. Acta Mechanica Sinica, 1995, 11(1): 44 - 50.
- [16] ZHANG X. Slope stability analysis based on the rigid finite element method[J]. Geotechnique, 1999, 49(5): 585 - 593.
- [17] 陈胜宏. 岩体的广义弹黏塑性块体理论[J]. 水利学报, 1996, (1): 78 - 84.(CHEN Shenghong. A general formulation of elastic-viscoplastic block theory of rock masses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (1): 78 - 84.(in Chinese))
- [18] 卓家寿, 赵宁. 不连续介质静, 动力分析的刚体-弹簧元法[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1993, 21(5): 34 - 43.(ZHUO Jiashou, ZHAO Ning. Piecewise rigid body-interface spring method for problems of medium[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 1993, 21(5): 34 - 43.(in Chinese))
- [19] 姚池, 姜清辉, 邵建富, 等. 一种模拟岩石破裂的细观数值计算模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增 2): 3 146 - 3 153.(YAO Chi, JIANG Qinghui, SHAO Jianfu, et al. A mesoscopic numerical model for simulation of rock fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3 146 - 3 153.(in Chinese))
- [20] 姚池, 李瑶, 姜清辉, 等. 应力作用下软硬互层岩石破裂过程的细观模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(8): 1 542 - 1 551.(YAO Chi, LI Yao, JIANG Qinghui, et al. Mesoscopic model of failure process of interlayered rock under compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1 542 - 1 551.(in Chinese))
- [21] 姚池, 李瑶, 姜清辉, 等. 基于改进刚体弹簧方法的开挖损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 1 959 - 1 966.(YAO Chi, LI Yao, JIANG Qinghui, et al. Numerical simulation of excavation damaged zone using the modified rigid body spring method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 1 959 - 1 966.(in Chinese))
- [22] YAO C, JIANG Q H, SHAO J F. Numerical simulation of damage and failure in brittle rocks using a modified rigid block spring method[J]. Computers and Geotechnics, 2015, 64: 48 - 60.
- [23] YAO C, JIANG Q H, SHAO J F, et al. A discrete approach for modeling damage and failure in anisotropic cohesive brittle materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 155: 102 - 118.
- [24] YAO C, JIANG Q H, SHAO J F. A numerical analysis of permeability evolution in rocks with multiple fractures[J]. Transport in Porous Media, 2015, 108(2): 289 - 311.
- [25] YAO C, SHAO J F, JIANG Q H, et al. Numerical study of excavation induced fractures using an extended rigid block spring method[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 85: 368 - 393.
- [26] 姚池, 赵明, 杨建华, 等. 基于改进刚体弹簧方法的二维水压致裂模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2 169 - 2 176.(YAO Chi, ZHAO Ming, YANG Jianhua, et al. Improved method of rigid body spring for 2D hydraulic fracturing simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2 169 - 2 176.(in Chinese))
- [27] 王媛, 颜青青. 岩体水力劈裂非稳定渗流影响机制初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2 016 - 2 021.(WANG Yuan, YAN Qingqing. Primary research of influence of unsteady seepage processes on hydraulic fracturing in rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10), 2 016 - 2 021.(in Chinese))