

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.029

模拟水压致裂的另一种二维 FDEM-flow 方法

严成增

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 可考虑岩石本身渗透性的 FDEM-flow 方法充分利用原 FEMDEM 中节理单元和三角形单元独特的拓扑连接关系, 将节理单元作为流体流动的天然通道, 基于立方定律来表征流体在岩石本身及裂隙中的流动, 而岩石本身渗透性则通过标定合适节理单元张开度来表征。用一个含解析解自由面稳态渗流算例初步验证了本文渗流算法及标定岩石本身渗透率方法的正确性。最后计算了一个水力压裂算例, 验证了该 FDEM-flow 方法可同时考虑岩石本身的渗透性和裂隙的渗透性, 用简单的纯裂隙渗流完成了对复杂问题的处理。研究结果表明: 修改后的 FDEM-flow 方法能够很好地再现压裂过程中流体压力的分布及裂隙的扩展, 可简洁地求解水力压裂这一复杂力学的问题, 适用范围更广。为模拟页岩气开采、干热岩地热获取中的水力压裂问题提供新的求解工具。

关 键 词: FEMDEM; FDEM-flow; 流固耦合; 水力压裂; 流体黏性; 裂隙渗流

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 06-1789-08

A new two-dimensional FDEM-flow method for simulating hydraulic fracturing

YAN Cheng-zeng

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In this study, a new FDEM-flow method is developed by considering the permeability of rock matrix, and it fully utilises the unique topological connection between joint elements and triangular elements in the original combined finite-discrete element method (FDEM). First, the joint elements were used as a natural channel for fluid flow, and the fluid flow in rock matrix and fissures were characterized by fluid flow in joint elements based on the cubic law. While the permeability of rock matrix was determined by calibrating the appropriate aperture of the joint element. Then, a numerical example of the free surface steady flow with the analytical solution was employed to validate the proposed seepage algorithm and the calibration method for rock matrix permeability. Finally, a hydraulic fracturing example was conducted to demonstrate that the permeability of rock matrix and fracture was considered simultaneously in the modified FDEM-flow method. Moreover, by using simple pure fracture seepage this method solved the complex issues of hydraulic fracturing. Therefore, the application scope of the new FDEM-flow method is broader than that of the original FDEM-flow method. This method provides a new solve tool for simulating hydraulic fracturing in shale gas exploration and geothermal exploration in hot dry rock.

Keywords: FEMDEM; FDEM-flow; fluid-solid coupling; hydraulic fracturing; fluid viscosity; seepage

1 引 言

流-固耦合驱动下的岩体破裂问题涵盖的范围较广, 例如含水裂隙高陡岩质边坡的破坏问题、大坝坝基渗流破坏、海浪作用下的防波堤破坏问题均可划归为流-固耦合驱动下的岩体破裂问题。因此, 对这类问题进行研究具有广泛的应用价值。

水力压裂是一种典型的流-固耦合驱动下的岩

体破裂问题。目前有不少学者从数值模拟的角度对这一问题进行研究。例如, 杨天鸿等^[1]、唐春安等^[2]、李连崇等^[3]、李根等^[4]建立了一个描述非均匀岩石渗流-应力-损伤耦合数学模型 (FSD Model), 开发出岩石破裂过程渗流-应力-损伤耦合分析计算系统 (F-RFPA2D/3D)。潘鹏志等^[5]建立了渗流-应力耦合的弹塑性细胞岩石非连续细胞自动机, 可以实现对固体变形和裂隙内流体流动的耦合分析。还有不

收稿日期: 2015-09-28

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No.11602006); 北京市自然科学基金青年项目 (No.1174012); 朝阳区博士后科研活动经费资助 (No.2016ZZ-01-08)。

This work has been supported by the Natural Basic Research Program of China (11602006), the Beijing Natural Science Foundation (1174012) and Chaoyang District Postdoctoral Science Foundation funded project (2016ZZ-01-08).

第一作者简介: 严成增, 男, 1986 年生, 博士, 特任教授, 主要从事有限元-离散元耦合及多物理场耦合的相关研究。E-mail: yanchengzheng86@gmail.com

少研究者利用扩展有限元方法模拟裂隙扩展,但所有的裂隙的扩展路径必须预先设定,无法模拟水力压裂过程中多裂纹的交汇和分叉^[6-7]。

传统的块体离散元方法以对节理裂隙进行很好的建模,也可考虑多物理场耦合的问题^[8-9],但仍较难处理流-固耦合驱动下的岩体破裂问题,尽管其可以通过 voronoi 单元间接模拟开裂^[10]。为了方便处理岩石本身的破裂,Cundall 等^[11]提出了颗粒流方法(PFC)模拟水力压裂的一种很好的工具。例如,文献[12-14]用颗粒流方法对水力压力及声发射问题进行了研究,取得了较好的效果。该方法存在的问题是:初始建模时,采用相互黏结的圆颗粒来模拟连续体,无论颗粒怎么排列,模型初始都是存在孔隙的,因而其对裂纹扩展以及流体流动路径的表征并不十分直观;另外,圆球是刚性的,因而无法直接表达连续介质力学中应力、应变的概念,而是借助测量圆,通过统计平均来间接表达应力、应变,应力、应变的值与测量圆的半径等有关,物理意义不够明确。一些研究者^[15-18]基于非连续变形方法(DDA)裂隙岩体的水力耦合问题进行了研究,但这些方法无法对岩石本身的破裂进行模拟。不过,若该方法在考虑渗流-应力耦合的基础上,又引入虚拟节理考虑了岩石本身的破裂,则可以用来模拟水压致裂^[19-20]。一些研究者结合数值流形法和渗流-应力耦合使得其可以对水力压裂问题进行模拟^[21],尽管数值流形法前处理较为复杂。除此以外,Grasselli 等^[22]基于 FEMDEM 方法研究了非连续面及层面对水力压裂的影响,不过其没有考虑流体在裂隙中的渗流过程。

严成增等^[23-25]提出了模拟水压致裂的 FDEM-flow 方法,该方法结合贯通裂隙网络形成的递归搜索算法,为在二维情形下考虑流-固耦合驱动下的岩体破裂问题提供了完整的解决方案。该方法的一个基本假定是:只有破裂的节理单元才有流体的流入或者流出,即仅考虑裂隙渗流。本文在该 FDEM-flow 方法的基础上,既考虑裂隙渗流,又考虑岩石本身渗透性。岩石本身的渗透性通过标定合适的节理单元初始张开度来表征,修改后的 FDEM-flow 方法适用面更广。本文首先对该方法的基本理论进行了介绍,最后给出了两个算例初步验证方法的正确性。

2 考虑孔隙渗流的 FDEM-flow 方法

如图 1 所示,FEMDEM 方法^[26-31]中三角单元和节理单元形成了独特的拓扑连接关系。本文的

FDEM-flow 方法,认为三角形单元仍然是不透水的,与原 FDEM-flow 方法假定不同的是,本文 FDEM-flow 方法中的所有节理单元都允许流体的流入或者流出,以便考虑岩石本身具备的较低渗透性。当节理单元断裂时,节理单元张开度增大,渗透率增大,较未破裂的节理单元具有更大的渗透性。

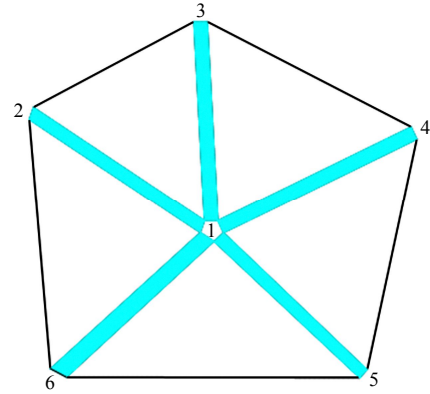


图 1 三角形单元和节理单元的连接以及流体在节理单元网络中的流动

Fig.1 Connection of triangular element sand joints elements and flowing of fluid in the joint network

基于以上论述可知,岩体渗流这一混合了多孔介质渗流和裂隙渗流的问题在 FDEM-flow 方法中被转化为纯裂隙渗流问题。因此,渗流-应力耦合仍然是流体在裂隙中流动会对裂隙施加相应的流体压力,裂隙在力的作用下发生张开或者闭合,而裂隙的张开或者闭合又会影响到流体在裂隙中的流动,改变流体压力的大小。

图 1 中的标号节点是节理单元和三角形单元的交汇节点,即网络中流动流体的交汇节点。任意 2 个相邻的节点之间的线段都构成了一条流体流动的路径。交汇节点 1 和 2 就构成了流体流动的一条路径。以节点 1 为例,其与节点 2 与 1 之间的总水头差为

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g(y_2 - y_1) \quad (1)$$

式中: p_1 、 p_2 分别为节点 1、2 的压力水头; y_1 、 y_2 分别为节点 1, 2 的纵坐标值; ρ_w 为水的密度。

根据立方定律,从节点 2 流入节点 1 的流量为

$$q_{21} = \frac{1}{12\mu} a^3 \frac{\Delta p}{L} \quad (2)$$

式中: a 为节理单元的平均张开度; μ 为流体的动力黏滞系数; L 为两个节点的距离。

此处,节理的平均张开度 a 是节理的平均法向位移 u_n 的线性函数,可表示为:

$$a = a_0 + u_n \quad (3)$$

式中: a_0 为节理单元的初始张开度; u_n 为节理单元的平均法向位移, 张开时为正。由于渗流计算时, 张开度不能取小于或者等于 0 的值, 为此, 设置一个最小张开度 a_{\min} , 当式 (3) 算得的张开度小于 a_{\min} , 则将 a 值设为 a_{\min} 。而节理的平均法向位移 u_n 可取为节理单元两端点的法向位移的平均值。

式 (2) 中的流量是一条流动路径的微观流量, 而整个岩样中流体的流量是由许多的流动路径组成。因此, 整个岩样的渗透性不能直接由式 (2) 计算出来。而是, 通过对实际岩样进行渗透性测试模拟, 使得模拟的渗透性与实际岩样的一致, 这时便可确定节理单元的初始张开度 a_0 , 可以通过调整节理单元的初始张开度 a_0 来更新岩石模型的渗透性和孔隙率。

需要指出的是, 据式 (2), 当两节点的流体压力值均为 0 时, 在重力的作用下, 两节点之间的流量并不为 0。这是不合理的, 节点之间的流量应随着饱和度的降低而降低, 当饱和度为 0 时, 流量也为 0。为此, 将式 (2) 乘以一个系数 f_s , 该系数是饱和度 s 的函数

$$f_s = s^2(3 - 2s) \quad (4)$$

当 $s = 0$ 时, $f_s = 0$; 当 $s = 1$ 时, $f_s = 1$ 。当 $s = 0$ 时, 两个节点流量为 0; 当完全饱和时, 两个节点间的流量不折减。

由于节点 1 还与其他节点连通, 同理可求得节点 1 与其他节点之间的流量, 这样便求得节点 1 的总流量 Q 。

然后可据下式求得节点 1 的当前压力为^[8]

$$p = p_0 + K_w Q \frac{\Delta t}{V} - K_w \frac{\Delta V}{V_m} \quad (5)$$

式中: p_0 为前一时步节点的压力值; K_w 为流体的体积模量; Q 为节点的总流量; Δt 为时间步长, $\Delta V = V - V_0$, $V_m = (V + V_0)/2$, 其中 V 和 V_0 分别为当前时步和前一时步域的体积。

如果式 (5) 计算出的节点压力是负值, 则将节点压力值设为 0, 且该域内的饱和度将降低, 根据下式更新节点的饱和度为

$$s = s_0 + Q \frac{\Delta t}{V} - \frac{\Delta V}{V_m} \quad (6)$$

式中: s_0 为前一时步节点的饱和度, 只要节点当前

时步的饱和度 $s < 0$, 则节点的流体压力值就保持 0 不变。当饱和度 $s > 1$, 则将饱和度设为 $s = 1$ 。通过这种策略, 确保流体质量守恒。当由式 (5) 计算出的流体压力值大于 0 时, 节点体积的改变使节点的压力改变; 反之, 当由式 (6) 计算出的压力值小于 0 时, 节点体积的改变使节点的饱和度改变。

3 数值岩样渗透率的测试模拟

设有一个岩样模型, 长度为 L , 高度为 H , 用来进行渗透测试。初始时, 岩样是完全饱和的。模型的左侧流体压力始终保持恒定值 P_{in} , 模型右侧的流体压力保持恒定值 P_{out} ($P_{\text{in}} > P_{\text{out}}$), 模型的上、下侧边界为不透水边界。这样流体在压力差的作用下通过所有的流动路径。当流入量 Q_{in} 等于流出量 Q_{out} 时, 即 $Q = Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}}$ 时, 岩样内的流体流动成为稳态流, 此时渗透性测试的模拟终止。

假定整个岩样模型为各向同性介质, 根据达西定律, 岩样的渗透率可通过下式计算^[14]

$$k = \frac{Q\mu L}{H(P_{\text{in}} - P_{\text{out}})} \quad (7)$$

式中: k 为岩样的宏观渗透率。

通过试算, 当根据式 (7) 算得 k 恰好等于实验测得的渗透率时, 节理单元的 a_0 恰好表征了岩石本身的渗透性。本文就是通过这一方法来考虑岩石本身的渗透性。当岩石中有裂隙生成时 (即有节理单元断裂), 节理的张开度会显著增大, 据式 (2) 可知, 节理的渗透性会显著增大, 据此又可表征岩石中的裂隙渗流。因此, 该方法可以用简单的纯裂隙渗流同时表征岩石的孔隙渗流和裂隙渗流。

4 流体作用力

在 FDEM-flow 方法中, 根据渗流计算出的节理单元两端节点的流体压力, 然后通过线性插值即可获得三角形单元边上的流体压力分布, 最后将该线性分布荷载沿着边界的内法线方向施加在三角形单元边界上。

除了引入流体压力以外, 本文在 FDEM-flow 方法中还考虑了流体流动的切向黏性力, 并在程序上实现。

5 渗流-应力-断裂耦合过程

以上各节主要阐述如何进行渗流计算、如何施加流体作用力。本节介绍 FDEM-flow 方法渗流-应力-断裂耦合过程。如图 2 所示, FDEM-flow 方法

的渗流-应力-断裂耦合过程为：先根据上一时步的节点位移信息，求出当前时间步三角形单元和节理单元变形引起的节点力并确定是否有节理单元断裂；与此同时，进行接触判断，计算接触力引起的节点力；然后，进行渗流计算，更新节点的流体压力、饱和度以及节理单元内流体的切向黏性力；将流体作用力按分布荷载施加于节理单元连接的 2 个实体三角形单元的边上，并分配到三角形单元的节点上；最后由节点的不平衡力，根据牛顿第二定律更新节点的速度和位移。这样一个时间步内，渗流和力学的耦合计算便完成了。按照上述步骤继续计算直至达到设定的计算步数，计算结束。



图 2 修改后的 FDEM-flow 方法的求解流程图
Fig.2 Flow chart of the modified fluid-solid coupled FDEM-flow method

6 算例

6.1 多孔介质渗流验证-自由面稳态渗流

如图 3 所示，该模型为均匀含水层的含自由面稳态渗流，左、右边的水头固定^[8]。根据达西定律

$$v = Ki \quad (8)$$

式中： v 为流速； K 为渗透系数； i 为水力梯度。

根据 Dupuit 公式，给出该算例单宽流量为

$$Q = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{2B} \quad (9)$$

式中： h_1 、 h_2 分别为左、右侧边界的水头高度； B 为坝体的宽度。

取均匀含水层的宽度 $B = 8 \text{ m}$ ，含水层的高度为 4 m ，左侧水头 $h_1 = 4 \text{ m}$ ，右侧水头 $h_2 = 1 \text{ m}$ ，含水层的渗透系数 $K = 1.210 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ，也即该含水层的渗透率 $k = \mu \frac{K}{\rho_w g} = 1.210 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。整个坝体均

采用非结构化网格，建立如图 3 所示的计算模型。由于只验证渗流部分的计算是否正确，三角形单元的位置固定，无需考虑力学变形，模拟计算也无需输入力学参数。由于所有节理单元均可有流体流过，因此，可通过本文的 FDEM-flow 方法来模拟多孔介质渗流。

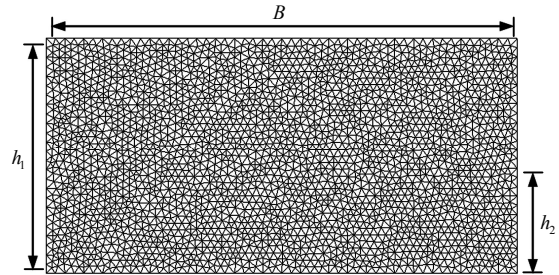


图 3 非结构化网格模型(所有节理单元均允许流体流过)
Fig.3 Unstructured grid model (All internal joint elements are permeable)

为了验证本文的 FDEM-flow 处理多孔介质渗流的有效性，本文从流量和自由面这两个角度将模拟结果和解析解进行比较。

首先，本文计算该算例的流量。模拟计算的输入参数为 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ， $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。由于前面已经提到，完整岩样的渗透性与张开度 a_0 密切相关，为使得该计算模型的宏观渗透率与实际含水层的渗透率一致，需要进行渗透性模拟测试来标定节理单元的张开度。本文按第 3 节的方法进行渗透性测试模拟，不断调整节理单元的 a_0 ，使得模型的宏观渗透率与含水层的渗透率一致。渗透性模拟测试表明：当节理单元 $a_0 = 3 \times 10^{-5} \text{ m}$ 时，模型的宏观渗透率恰等于含水层的实际渗透率。

将标定的初始 a_0 作为模拟计算含水层自由面渗流流量的输入参数，将图 3 所示的网格模型的左侧边界施加 $h_1 = 4 \text{ m}$ 的固定水头，网格模型的右侧边界施加 $h_2 = 1 \text{ m}$ 的固定水头，底部为不透水边界。用本文的 FDEM-flow 方法计算出该稳态渗流问题的流量 $Q = 1.1264 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ，而依据式 (9) 计算的流量 $Q = 1.1345 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。两者的误差为 0.71% 可见本文的 FDEM-flow 方法处理多孔介质渗流问题的有效性。

6.2 水力压裂算例

这里仍然采用文献[23]的算例，以便于对比考虑孔隙渗流的 FDEM-flow 方法与原 FDEM-flow 方法的不同之处。如图 4 所示，为一半径为 5 m 的圆盘，在其中心有一个半径为 0.5 m 的圆孔，圆孔内注水，水压固定为 3.0 MPa ，圆盘外边界自由，无其他外荷载的作用。整个模型被划分为含 4 572 个

三角单元的有限元网格, 网格尺寸为 0.25 m, 三角单元的公共边上插入了起粘结作用的节理单元。需要指出的是, 由于裂纹扩展是沿着单元边界进行的, 网格疏密对计算结果是有影响的, 因此, 需要采用较密的网格, 可参见文献[31]。

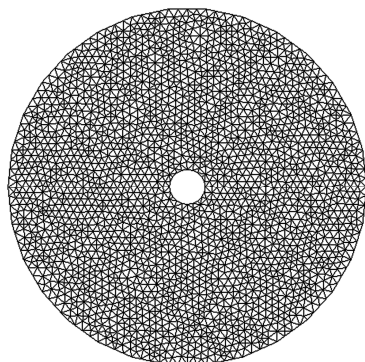


图4 岩样模型网格

Fig.4 Mesh model of rock sample

岩样在水压的作用下, 会有裂隙的产生, 亦即节理单元断裂, 有关节理单元何时断裂及节理单元黏结应力和位移的关系, 可参见文献[32-33]。

6.2.1 参数标定

水力压裂模拟的微观输入参数通过巴西劈裂试

验 (BD) 和单轴压缩试验 (UCS) 标定。本文模拟计算所采用的微观输入参数: 密度 $\rho = 2\,600\text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 55\text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.25$, 抗拉强度 $f_t = 6\text{ MPa}$, 凝聚力 $c = 20\text{ MPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, I 型裂纹能量释放率 $Gf_I = 2.0\text{ J/m}^2$, II 型裂纹能量释放率 $Gf_{II} = 10\text{ J/m}^2$, 法向罚参数 $p_n = 55\text{ GPa}$, 切向罚参数 $p_t = 5.5\text{ GPa/m}$, 流体体积模量 $K_w = 2.2\text{ GPa}$, 黏滞系数 $\mu = 1\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 流体密度 $= 1\,000\text{ kg/m}^3$ 。此处仍然采用第3节的方法 (采用的三角形单元的尺寸与图4的一致) 进行渗透性测试模拟, 使得模拟的渗透率与实际岩石的渗透率一致, 从而获得初始 a_0 的取值, 已知岩样的宏观渗透率为 $8.4 \times 10^{-14}\text{ m}^2$, 通过渗透性测试, 当 $a_0 = 5.0 \times 10^{-5}\text{ m}$ 时, 岩样模拟计算得到渗透率恰与实验测得的宏观渗透率相同。

6.2.2 模拟结果

在这一部分, 给出圆孔注水后的模拟结果, 如图5所示, 为流体注入过程中裂纹的萌生、扩展及水压的变化。

如图5所示, 在圆孔内注水, 开始时, 岩样内并未产生裂隙, 但由于岩石本身的渗透性, 圆孔附近的岩石中仍有水压的分布。如图中步 1 000~

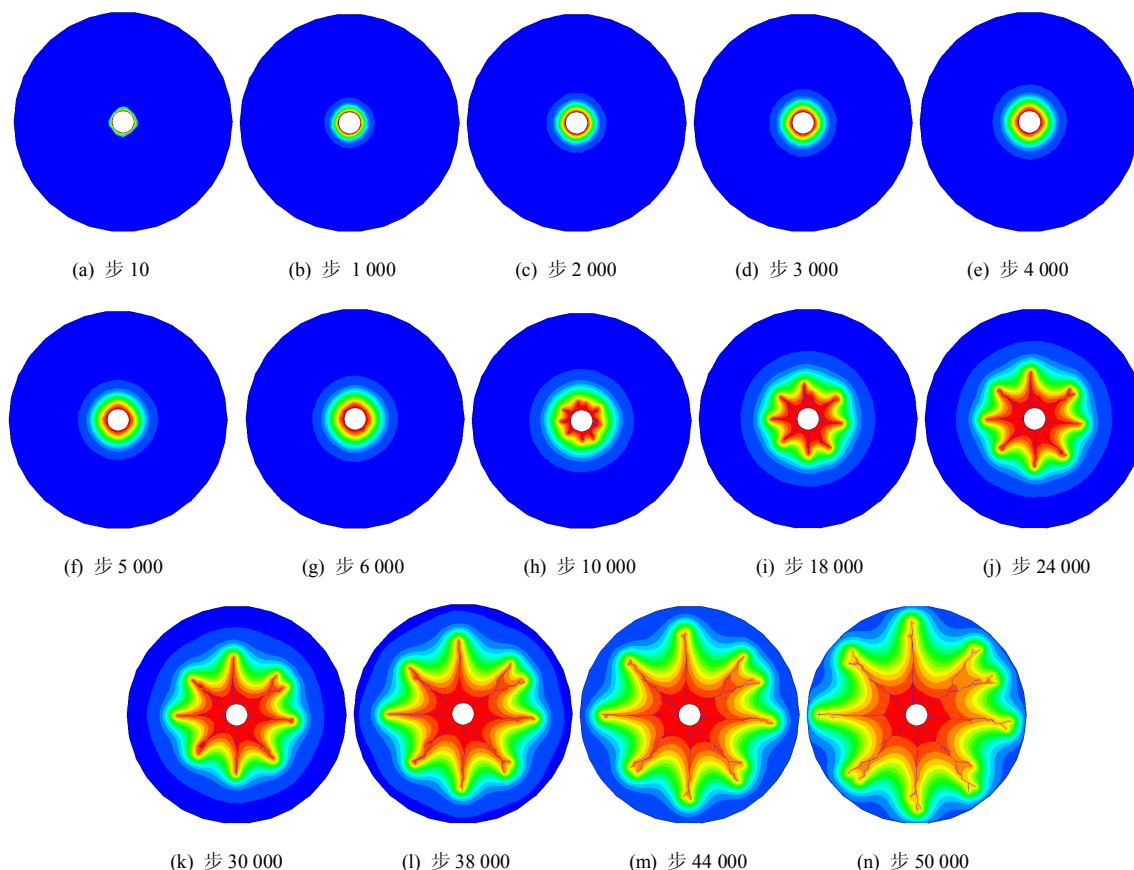


图5 水力压裂过程中水压力分布和裂缝扩展时间步的变化

Fig.5 The change of pressure distribution of water and the crack propagation with time step in hydraulic fracturing process

5 000 所示,随着时间步的增大,水不断渗入圆孔周围的岩石中,水压分布呈圆形且分布范围不断增大。这与原 FDEM-flow 方法的结果不一样:原 FDEM-flow 方法在产生裂隙之前,只在圆孔边界上有水压的分布,内部的完整岩石没有水压的分布,且水压的分布范围保持不变。从以上结果可以看出,本文提出的方法很好地考虑了岩石本身的渗透性。随着时间步的继续增大,圆孔周围开始产生裂隙,如图 5 中步 6 000 和步 10 000 所示。随着裂隙的产生,水压的分布形态开始发生变化,水压分布由起裂前的圆形分布变为沿着裂隙呈狭长分布,裂隙周围及其附近的水压明显增大,如图 5 中步 18 000 到步 50 000 所示。这是由于裂隙的产生使得节理单元的张开度明显增大,根据立方定律可知,该节理单元的渗透性明显增大,较岩石本身而言,水更易于沿着裂隙流动,故沿着裂隙周边的水压明显增大。可见本文的 FDEM-flow 方法既考虑了岩石本身的渗透性又很好地考虑了裂隙的渗透性。

为了定量分析水压的变化,在圆盘上离圆心距离为 1、2、3 m 的圆周上取一系列的监测点,观察水力压裂过程中各个监测点的水压变化,如图 6 所示。A1-A3 位于新生成裂隙的边界上,B1-B3 始终位于完整岩样上。其中 A1 和 B1 位于半径为 1 m 的圆周上、A2 和 B2 位于半径为 2 m 的圆周上、A3 和 B3 位于半径为 3 m 的圆周上。

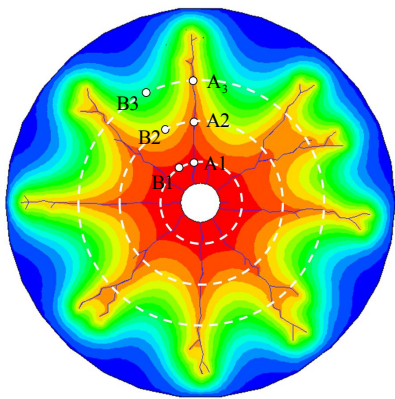


图 6 监测点的位置

Fig.6 Location of monitoring points

如图 7 所示,先比较 A1、A2 和 A3 可以发现,同一时刻,距离圆孔越近的点水压越大。类似地,比较 B1、B2 和 B3 也可发现距离圆孔越近的监测点水压越大。由图 7 可知,当位于步 5 000 及之前时,圆盘内尚没有裂隙产生,但据图 7 显示,监测

点 A1、B1 的水压并不等于 0。这说明在水压的作用下,由于岩石本身的渗透性,水渗入圆孔周围的岩石中去。比较 A、B 组的 3 个监测点,以 A2、B2 为例,在裂隙扩展 A2 之前(步 18 000),监测点 A2 和 B2 的水压相差很小。这是由于 A2、B2 距离圆孔中心的距离相等,且初始时圆盘各处的渗透性相同,使得水压分布几乎呈圆形,于是 A2 和 B2 的水压相差很小。当裂隙扩展至 A2 时,有裂隙产生使得该处的节理单元张开度增大,导致渗透性增强,流体更易于沿着裂隙流入 A2 监测点所在的位置,使得 A2 的水压显著增大。而 B2 仍未位于完整岩样上,渗透性相对较小,流体较难渗入,B2 的水压仍较小。这也是 A2、A3 的压力曲线有一个明显地陡升阶段的原因(裂隙扩展,导致渗透性增大,流体更易于进入),而 B2、B3 则没有这样一个阶段。类似的 A1 和 B1、A3 和 B3 也呈现出类似的规律。通过该算例,说明本文的 FDEM-flow 方法很好地考虑裂隙渗流和岩石本身的多孔介质渗流。

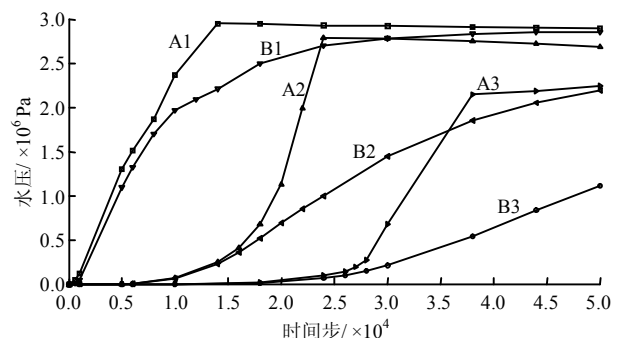


图 7 监测点的水压变化

Fig.7 Water pressure at monitoring points

7 结 论

(1) 通过一个含有解析的自由面稳态渗流问题初步验证了本文提出的渗透率标定方法和渗流算法的正确性。

(2) 水力压裂算例显示,在裂隙产生之前,水已经渗入进岩石,裂隙产生之后,水优先沿着裂隙流动。该算例,初步验证修改后的 FDEM-flow 方法可用简单的纯裂隙渗流,既可考虑岩石本身的渗透性也可考虑裂隙的渗透性。

(3) 修改的 FDEM-flow 方法较原有 FDEM-flow 方法适用面更广,是求解水力压裂及水力耦合作用下岩体破裂问题的有力工具。

参 考 文 献

- [1] 杨天鸿, 唐春安, 朱万成, 等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 489—493.
YANG Tian-hong, TANG Chun-an, ZHU Wan-cheng, et al. Coupling analysis of seepage and stresses in rock failure process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 489—493.
- [2] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(4): 477—489.
- [3] 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, 2004, 22(7): 1060—1066.
LI Lian-chong, YANG Tian-hong, TANG Chun-an, et al. Coupling analysis hydraulic fracturing process of rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 22(7): 1060—1066.
- [4] 李根, 唐春安, 梁正召, 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): 1875—1881.
LI Gen, TANG Chun-an, LIANG Zheng-zhao, et al. Numerical simulation of 3D hydraulic fracturing process[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(12): 1875—1881.
- [5] 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 Peng-zhi, FENG Xia-ting, WU Hong-xiao, et al. Modeling hydraulic failure process using elasto-plastic cellular automation[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2011, 45(5): 722—727.
- [6] KESHAVERZI R, MOHAMMADI S. A new approach for numerical modeling of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs[C]//SPE/EAGE European unconventional resources conference & exhibition-from potential to production. Vienna, Austria: Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [7] REN Q W, DONG Y W, YU T T. Numerical modeling of concrete hydraulic fracturing with extended finite element method[J]. **Society of Petroleum Engineers**, 2009, 52(3): 559—565.
- [8] Itasca. User manual of UDEC code[M]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Ltd, 2001.
- [9] Itasca. User manual of 3DEC code[M]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Ltd, 2001.
- [10] NASEHI M J, MORTAZAVI A. Effects of in-situ stress regime and intact rock strength parameters on the hydraulic fracturing[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2013, 108: 211—221.
- [11] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(1): 47—65.
- [12] AL-BUSAIDI A, HAZZARD J F, YOUNG R P. Distinct element modeling of hydraulically fractured Lac du Bonnet granite[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2005, 110: 1—14.
- [13] ZHAO X, PAUL YOUNG R. Numerical modeling of seismicity induced by fluid injection in naturally fractured reservoirs[J]. **Geophysics**, 2011, 76(6): 167—180.
- [14] SHIMIZU H, MURATA S, ISHIDA T. The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2011, 48(5): 712—727.
- [15] JING L, MA Y, FANG Z. Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(3): 343—355.
- [16] COUPLES G D, LEWIS H, REYNOLDS M A, et al. Upscaling fluid-flow and geomechanical properties in coupled matrix-fractures-fluids systems[C]//SPE Reservoir Simulation Symposium. Houston, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [17] KOYAMA T, NISHIYAMA S, YANG M, et al. Modeling the interaction between fluid flow and particle movement with discontinuous deformation analysis (DDA) method[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2011, 35(1): 1—20.
- [18] 虞松, 朱维申, 张云鹏. 基于 DDA 方法一种流-固耦合模型的建立及裂隙体渗流场分析和应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 555—560.
YU Song, ZHU Wei-shen, ZHANG Yun-Peng. Coupled hydro-mechanical model based DDA method for seepage

- analysis of fractured rock mass and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 555—560.
- [19] BEN Y X, WANG Y, SHI G H. Development of a model for simulating hydraulic fracturing with DDA[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation. [S. l.]: [s. n.], 2013: 169—175.
- [20] JIAO Y Y, ZHANG H Q, TANG H M, et al. Simulating the process of reservoir-impoundment-induced landslide using the extended DDA method[J]. **Engineering Geology**, 2014, 182: 37—48.
- [21] WU Z, WONG L N Y. Extension of numerical manifold method for coupled fluid flow and fracturing problems[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2014, 38(18): 1990—2008.
- [22] GRASSELLI G, LISJAK A, MAHABADI OK, et al. Influence of pre-existing discontinuities and bedding planes on hydraulic fracturing initiation[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2015, 19(5): 580—597.
- [23] 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 Cheng-zeng, ZHENG Hong, SUN Guan-hua, et al. A 2D FDEM-flow method for simulating hydraulic fracturing [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(1): 67—75.
- [24] 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等. 基于 FDEM-Flow 研究地应力对水力压裂的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 237—246.
YAN Cheng-zeng, ZHENG Hong, SUN Guan-hua, et al. Effect of in-situ stress on hydraulic fracturing based on FDEM-Flow[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 34 (1): 67—75.
- [25] 严成增, 郑宏. 基于 FDEM-flow 的多孔水力压裂模拟[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(7): 63—67.
YAN Cheng-zeng, ZHENG Hong. Simulation of multi-hole hydraulic fracturing using FDEM-flow method[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2016, 33(7): 63—67.
- [26] MUNJIZA A, OWEN D R J, BICANIC N. A combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids[J]. **Engineering Computations**, 1995, 12: 145—174.
- [27] MUNJIZA A. The Combined Finite-discrete Element Method[M]. London: John Wiley & Sons Ltd., 2004: 29—32.
- [28] MAHABADI OK, LISJAK A, MUNJIZA A, et al. Y-Geo: A new combined finite-discrete element numerical code for geomechanical applications[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2012, 12(6): 676—688.
- [29] MAHABADI OK, GRASSELLI G, MUNJIZA A. Y-GUI: A graphical user interface and pre-processor for the combined finite-discrete element code, Y2D, incorporating material heterogeneity[J]. **Computers & Geosciences**, 2010, 36(2): 241—252.
- [30] LISJAK A, LIU Q, ZHAO Q, et al. Numerical simulation of acoustic emission in brittle rocks by two-dimensional finite-discrete element analysis[J]. **Geophysical Journal International**, 2013, 195(1): 423—443.
- [31] MUNJIZA A, JOHN N W M. Mesh size sensitivity of the combined FEM/DEM fracture and fragmentation algorithms[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2002, 69(2): 281—295.
- [32] MUNJIZA A, ANDREWS K R F, WHITE J K. Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element analysis[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1999, 44(1): 41—57.
- [33] 严成增, 孙冠华, 郑宏, 等. 基于局部单元劈裂的 FEM/DEM 自适应分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2064—2070.
YAN Cheng-zeng, SUN Guan-hua, ZHENG Hong, et al. Adaptive FEM/DEM analysis method based on the local splitting elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35 (7): 2064—2070.