

DOI: 10.7511/jslx201605016

水力压裂中裂纹扩展的数值模拟

刘传奇¹, 薛世峰², 孙其诚^{*1}

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
2. 中国石油大学(华东)工程力学系, 青岛 266580)

摘要:水力压裂是在高压粘滞流体或清水作用下地层内裂缝起裂与扩展的过程。由于包含岩石断裂和流-固耦合等复杂问题,对该过程的数值模拟具有相当大的挑战性。本文建立基于有限元与离散元混合方法的裂纹模型,模拟岩石裂纹扩展,实现了连续向非连续的转化;建立双重介质流动模型,裂隙流作为孔隙渗流的压力边界,孔隙渗流反作用裂隙的压力求解,处理了流体在基岩与人工裂缝中的协调流动;将裂纹模型与流体流动模式进行结合,建立断裂-应力-渗流耦合形式的力学模型,进一步分析了水力压裂的基本过程,综合多种数值计算方法,编写程序,在验证岩体裂纹模型与双重介质流动模型有效性的基础上,对压裂过程进行复现,将模拟结果与文献结果进行了对比,并讨论了所构建模型的优缺点。

关键词:水力压裂;双重介质;断裂-应力-渗流耦合

中图分类号: O352; O346.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2016)05-0760-07

1 引言

水力压裂是石油工程中常用的增产工艺,其基本过程是向地层中注入压裂液,利用液体压力在地层中形成人工裂缝,随着压裂液的持续注入,裂缝扩展形成高流通能力的油气通道。该过程中,裂缝的产生改变岩体的渗透特性与流体压力,流体压力影响岩体应力,应力改变促使岩体产生变形,影响裂缝的导流能力,进而影响作用于固体上的渗透压力,反之,固体裂缝形态也产生变化。因而,水力压裂是涉及断裂力学、流体力学、渗流力学和固体力学等多学科的典型断裂-应力-渗流耦合问题。

Wu^[1]分别采用试验、数模和理论分析对水力压裂进行了研究,其中数值模拟采用的是颗粒流。Adachi等^[2]总结了水力压裂数值模型,对裂隙前沿追踪、耦合方程处理及时间步长选择进行了讨论。Damjanac等^[3]将离散裂隙网络叠加到完整的颗粒模型中,建立合成岩体,模拟流体注入产生裂纹的过程,并对原生裂纹的影响进行了研究。Shimizu等^[4]将流体作用引入到离散颗粒程序中,讨论了流体粘度及颗粒级配等因素对模拟结果的

影响。Zhou等^[5]基于连续介质力学对岩体变形进行了计算,采用拉伸准则描述裂隙的扩张与闭合,通过 N-S 方程与达西定律对流体流动进行描述,将耦合机理集成到 FLAC 中,对压裂过程进行了模拟。连志龙等^[6]推导了裂隙面内的压降公式,编写用户子程序嵌入到 ABAQUS 中,模拟了水力压裂过程。张广明等^[7]基于多孔介质流-固耦合的控制方程,推导了相应的非线性增量有限元格式,采用以节点位移和孔隙压力为自由度的黏结单元来模拟水力损伤造成的预设裂纹的起裂和扩展。

若对水力压裂过程进行准确描述,需解决三个力学问题。(1) 纯固体裂纹扩展;(2) 流体在人工裂缝与基岩中的协调流动;(3) 固体与流体的耦合作用。本文针对问题(1),采用有限元与离散元混合方法构建裂纹模型,模拟基岩的裂纹扩展过程;针对问题(2),建立双重介质流动模型,孔隙渗流采用有限体积法,裂隙流采用有限元法,裂隙作为孔隙的压力边界,孔隙所求流量反作用于裂隙压力的求解,以此来描述流体在双重介质中的流动;针对问题(3),将前两部分内容进行结合,构建裂隙流体与固体基岩的耦合模型,综合多种数值方法,编写程序,对水力压裂过程进行模拟。

2 水力压裂数值模型

2.1 岩体裂纹模型

采用有限元与离散元混合方法构建裂纹模型

收稿日期:2015-03-24;修改稿收到日期:2015-08-22.

基金项目:国家自然科学基金(11272048,51239006);

欧盟国际合作(IRSES-294976)资助项目.

作者简介:刘传奇(1988-),男,博士生;

孙其诚*(1971-),男,副研究员,博士生导师

(E-mail: qcsun@tsinghua.edu.cn).

模拟裂纹扩展过程的基本思路为,采用网格剖分对结构进行离散,单元内部采用有限元计算,单元边界采用离散元计算,以带拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 准则作为断裂判据,通过弹簧连接的断裂产生单元分离,采用半弹簧法进行接触处理,通过显示迭代求解运动方程,不断更新单元坐标,模拟裂纹扩展过程。文献[8]对该方法进行了详细讨论,并通过若干算例验证了其有效性,在此,仅将基本理论简述如下。

单元之间通过法向与切向弹簧相联,如图 1 所示,计算需满足运动方程与本构方程。其中,运动方程为核心方程,本构方程在单元内部满足,通过增大弹簧刚度来保证位移协调。图 1 中, i 单元 1 号节点的运动方程为

$$m_{i1} \ddot{u} = F_e + F_c + F_d + F_j \quad (1)$$

式中 m_{i1} 为 i 单元 1 号节点的集中质量, F_e 为外力, F_c 为阻尼力,是由于采用动态松弛求解引入的, F_d 为单元变形力,根据单元刚度,由节点位移求得, F_j 为界面作用力,其求解是问题的关键,需进行详细描述。

弹簧未发生断裂时,界面作用力为弹簧力,有

$$\begin{cases} F_n^j = -K_n^j \times \Delta d_n^j \\ F_s^j = -K_s^j \times \Delta d_s^j \end{cases} \quad (2)$$

式中 F 为弹簧作用力, K 为弹簧刚度, Δd 为弹簧变形量,上标 j 表示第 j 根弹簧,下标 n 和 s 分别为法向与切向。

弹簧发生断裂后,界面作用力变为裂隙水压力,此时

$$F_j = \rho g h \cdot (l/2) \quad (3)$$

式中 h 为裂隙水头值, l 为单元边界长度。

弹簧的断裂判据是带拉伸破坏的 Mohr-Coulomb 准则^[7],记 T 为抗拉强度, ϕ 为内摩擦角, c 为粘聚力。

当 $F_n^j > T$ 时,发生拉伸破坏。

当 $F_s^j > F_n^j \cdot \tan \phi + c$ 时,发生剪切破坏。

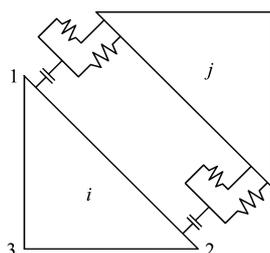


图 1 三角形单元与界面弹簧联接

Fig. 1 Triangular element and spring connections

基于上述理论,采用动态松弛法进行求解。通过单元间弹簧的连接,进行单元的顺序分析,无需形成总刚,便于对结构局部进行描述,通过弹簧断裂,单元产生分离,以此描述连续到非连续的过程。

2.2 双重介质流动模型

如图 2 所示,流体在基岩中的流动符合孔隙渗流的特点,但若出现人工裂缝后,其流动更符合裂隙流。因而,需建立孔隙-裂隙双重介质流动模型。

2.2.1 双重介质流动控制方程

基本假定为,孔隙度保持恒定,不考虑毛细管力和温度的影响,流体全饱和微可压,孔隙渗流发生在二维水平面内,服从 Darcy 定律,裂隙流符合一维平板流,满足三次定律。

控制方程均为连续方程与达西定律:

$$v_{i,i} + S(\partial h / \partial t) = 0 \quad (4)$$

$$v_i = -k_{ij} (\partial h / \partial x_j) \quad (5)$$

式中 v_i 为速度分量, S 为储水度,表示每下降单位水头,单位体积介质中释放出水的体积, h 为水头, k_{ij} 为渗透系数。

2.2.2 求解方法

孔隙渗流采用有限体积法进行求解^[9],如图 3 所示,图 3(a)为整体网格剖分,图 3(b)为单个网格, M 为整体节点, m 为局部节点。

在单个网格中,由高斯定理:

$$\partial h / \partial x_j = - (1/2A) \sum_{i=1}^3 h_i \cdot \mathbf{n}_j^{(i)} \cdot \Delta s^{(i)} \quad (6)$$

式中 h 为压力水头, A 为单元面积, \mathbf{n} 为单元边界外法向矢量, Δs 为单元边界长度。

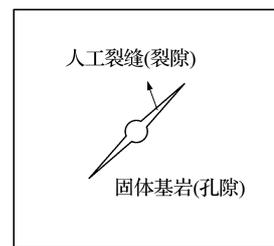


图 2 孔隙-裂隙流动模式

Fig. 2 Flow media

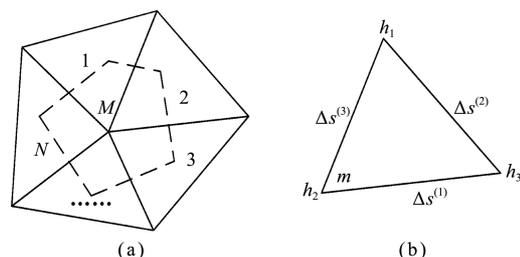


图 3 有限体积法中单元表示

Fig. 3 Elements in finite volume method

通过局部节点 m 的水量为

$$\Delta q^m = \frac{1}{2} \left[- \sum_{i=1, i \neq m}^3 v_j \cdot n_j^{(i)} \cdot \Delta s^{(i)} \right] = \frac{1}{2} v_j \cdot n_j^{(m)} \cdot \Delta s^{(m)} \quad (7)$$

注入整体节点 M 的水量为

$$\Delta Q^M = \sum_{i=1}^N \Delta q^i \quad (8)$$

因而,整体节点水头增量表达式为

$$h_{(t+\Delta t)}^M = h_{(t)}^M + (\Delta Q^M / SA^M) \Delta t \quad (9)$$

式中 A^M 为整体节点 M 所占面积(图3中虚线所示), Δt 为时间步长。

对于裂隙流,其渗透系数为

$$k = ge^2/12\nu \quad (10)$$

式中 e 为裂隙开度, ν 为运动粘度。

裂隙流的求解采用一维有限元,根据 Galerkin 法,可推得其有限元格式为

$$[K^{(e)}]\{h(t)\} + [S^{(e)}]\{\partial h(t)/\partial t\} = \{q^{(e)}\} \quad (11)$$

式中 $[K^{(e)}] = [k/l, -k/l; -k/l, k/l]$ 为渗透矩阵, $[S^{(e)}] = [lS/3, lS/6; lS/6, lS/3]$ 为储水矩阵,对应的集中储水矩阵为 $[S^{(e)}] = [lS/2, 0; 0, lS/2]$, $q^{(e)}$ 为流量列阵。

采用显示迭代进行求解,无需形成整体刚度,对于裂隙节点,其水头增量表达式为

$$h_{(t+\Delta t)} = h_{(t)} + (\Delta q / Sl) \times \Delta t \quad (12)$$

式中, l 为裂隙单元长度, Δq 为不平衡流量列阵中节点对应的流量增量,不平衡流量的表达式为

$$\{\Delta q\} = 2 \times (\{q^{(e)}\} - [K^{(e)}]\{h^{(e)}\}) \quad (13)$$

2.2.3 水力裂缝-孔隙流动协调处理

求解流体压力的关键是如何协调流体在水力裂缝与岩体基质孔隙之间的流动。如图4所示,对于孔隙介质与水力裂缝耦合的节点,其水头迭代式为

$$h_{(t+\Delta t)} = h_{(t)} + \Delta h^f(h^n) + \Delta h^p(h^n) \quad (14)$$

式中,上标 n 表示迭代步, Δh^f 为裂隙流引起的水头变化, Δh^p 为孔隙渗流引起的水头变化。由于求解模式并不相同,需进行统一,若按照裂隙模型求解,则

$$h_{(t+\Delta t)} = h_{(t)} + [\Delta q + (\Delta Q/A)l]/Sl \cdot \Delta t = h^n + (\Delta q'/Sl) \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中 $\Delta q'$ 为修正的裂隙流量。

采用上述处理的物理意义为,裂隙作为孔隙的压力边界,孔隙所求流量反作用于裂隙的压力求解。

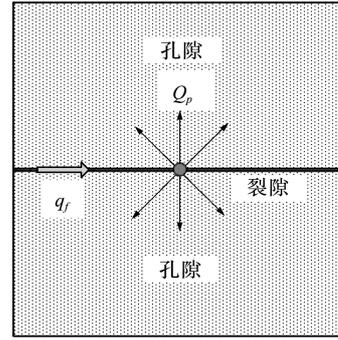


图4 双重介质耦合机理

Fig. 4 Coupling mechanism between hydraulic fracture and porosity

2.3 断裂-应力-渗流耦合模型

由于裂隙流相对孔隙渗流较为迅速,本文只考虑裂隙水流与固体基质的相互作用,不考虑孔隙渗流引起体积力的变化,但孔隙渗流会影响裂隙压力,因而对渗流而言,仍为双重介质渗流模式。

2.3.1 裂隙的产生与扩展

假定岩体起初为均匀连续体(不考虑初始裂隙的影响),划分块体单元后,由于作用力的影响,当单元间两组连接弹簧均发生断裂时,此单元界面即变为裂隙单元,单元弹簧断裂的过程即为裂隙单元增加过程。地质体的实际演化过程可通过单元界面断裂进行模拟^[10]。

2.3.2 裂隙渗流对应力场的影响

岩体中裂隙水流对裂隙壁面不仅具有法向静水压力作用而且具有切向拖拽力(渗透动水压力)作用^[11],由于对裂纹产生扩张作用的为渗透静水压力,因此忽略切向拖拽力对裂纹的影响,静水压力的表达式如式(3)。

2.3.3 应力变化与界面断裂对裂隙流的影响

应力改变影响裂隙开度,对裂隙流的影响主要体现在渗透性的改变上。当裂隙开度发生变化时,裂隙渗透系数变为 $k = k_0(e/e_0)^2$, 其中, k_0 为初始的裂隙渗透系数, e 为该时刻裂隙的等效开度, e_0 为初始时刻的等效开度。

连接弹簧断裂增加裂隙单元,影响裂隙节点水头,使其产生波动,该过程由传统非断裂-渗流耦合模式是无法模拟的,本文采用动态迭代法进行裂隙压力求解,是可以考虑的。

3 裂纹与流动模型的验证

对水力压裂过程进行模拟前,需对上述岩体裂纹模型与双重介质流动模型的有效性进行验证,以此为基础,便于对水力压裂过程展开讨论。

3.1 岩体裂纹模型的验证

文献[8]已有若干算例对岩体裂纹模型进行了验证,本文对文献[8]未出现的单轴压缩条件下,单裂纹复合模式的破坏进行了模拟,以其裂纹扩展结果与试验结果的对比作为补充,验证岩体裂纹模型的有效性。模型尺寸如图5所示。

岩石介质参数列入表1。

表1 模型参数

Tab.1 Parameters of model

材料参数				弹簧刚度	
E/Pa	μ	C/Pa	T/Pa	$K_n/(N \cdot m^{-1})$	$K_s/(N \cdot m^{-1})$
2×10^{10}	0.2	1×10^4	2×10^4	1×10^{11}	1×10^{11}

载荷为垂直方向上,以0.001 cm/s施加的对向位移载荷。通过计算,发现裂纹端部首先出现由拉伸产生的翼裂纹,而后,翼裂纹发展缓慢,在其反方向上,出现由剪切破坏产生的次生裂纹。

局部放大的次生裂缝的模拟结果与实验结果[12]对比如图6所示。可以看出,岩体裂纹模型可以有效地模拟包括拉伸破坏与剪切破坏在内的裂纹扩展过程,因而可对断裂机理进行有效地反分析。

3.2 双重介质流动模型的验证

在断裂-应力-渗流耦合模型中,裂隙的产生与

扩展是通过岩体裂纹模型计算得到,在单独验证流动模型的有效性时,裂隙是预先设定的。图7给出了带有预设裂隙的双重介质流动模型,A点为裂隙端部测点。内圆水头压力固定为1000 m,裂隙开度保持在3 mm,流体运动粘度为 $1 \times 10^{-6} m^2/s$,储水度为 $1 \times 10^{-8} m^{-1}$ 。研究孔隙系数变化时,裂隙测点的水头值是否会发生变化,以验证孔隙渗流与裂隙流耦合机理的有效性。三种不同孔隙渗透系数k分别为 $1 \times 10^{-5} m/s, 1 \times 10^{-4} m/s, 1 \times 10^{-3} m/s$ 。

迭代时步设定为0.001 s,迭代进行2000步时,不同渗透系数下,压力水头云图对比如图8所示,图9为测点A的水头迭代曲线。通过图8和图9可以看出,孔隙渗透系数的改变对裂隙节点水头产生影响,且孔隙渗透系数越大,裂隙端部节点水头越小,符合基本物理规律。

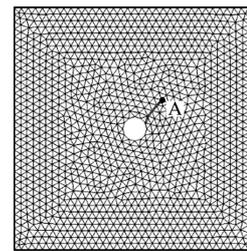


图7 双重介质流动模型
Fig. 7 Dual-media flow model

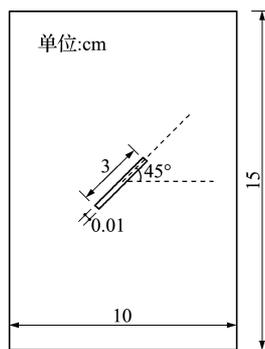


图5 裂纹扩展模型
Fig. 5 Crack model

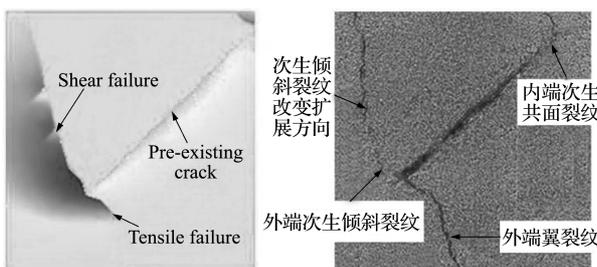


图6 数模结果与实验结果[12]对比
Fig. 6 Result comparison of simulation and experiment[12]

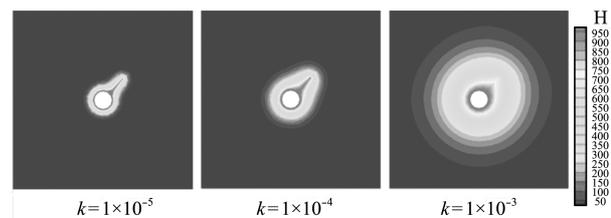


图8 不同渗透系数水头云图对比
Fig. 8 Comparison of hydraulic head in various permeability coefficient

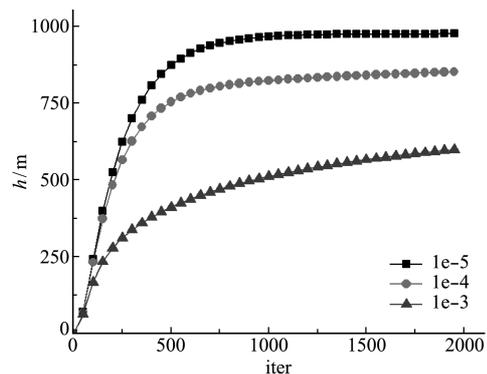


图9 测点水头曲线
Fig. 9 Hydraulic head in monitoring point

4 水力压裂力学模型

基于岩体裂纹模型与双重介质流动模型的架构,建立断裂-渗流-应力耦合模型,按照下述计算流程,完成水力裂缝起裂与扩展过程的模拟,并对流体压力场和渗流速度场等物理场进行求解。

4.1 模拟基本流程

(1) 初始地应力场的构建

模型施加力学边界条件(力、位移),迭代求解稳定后,将位移清零,保留应力。

(2) 井筒内壁施加孔隙水压

流体边界条件为井筒内壁的流量边界,采用有限

体积法计算孔隙压力场,在井筒内壁施加对应压力,出现裂纹后,继续计算少量迭代步,避免数值上少量误差引起计算结果的偏差,主要表现在对称性上。

(3) 裂隙流体与固体耦合

将流量逐步施加到裂隙端部,孔隙渗流与裂隙流耦合计算,求解流体压力场。在裂隙两侧施加法向水压,进行固体计算,修改缝宽,增加裂隙单元。流体计算与固体计算交替迭代,直至计算结束。模拟过程的基本思路列入表 2。

4.2 计算模型与材料参数

水力压裂计算模型如图 10 所示,图中圆形表示井筒,研究区块为 10 dm×10 dm 的矩形。

表 2 水力压裂模拟阶段

Tab.2 Stages of hydraulic fracturing simulation

阶段	示意图	水压类型及作用面	作用	基本思路
压裂阶段		孔隙水压 井筒内壁	与地应力场配合-起裂	
过渡阶段		孔隙水压 井筒内壁	减弱误差影响-对称性	起裂:流量加到井筒内壁 扩展:流量逐步加到裂隙端部
扩展阶段		裂隙水压 裂隙两侧	固液耦合-裂纹扩展	

针对边界条件,假定:矩形区块固定围压($\sigma_1 = -30$ MPa, $\sigma_3 = -70$ MPa);构建初始应力场阶段无流体边界;压裂阶段保持 6 m³/min 的流量边界;未起裂时,全部为孔隙渗流边界;起裂后,逐步施加到裂隙端部。假定压裂液为单相水,忽略压裂液中支撑剂的作用,计算模型基本参数列入表 3。

表 3 材料参数

Tab.3 Material parameters

弹性模量/(N·m ⁻²)	3×10 ¹⁰	泊松比	0.3
抗拉强度/MPa	1	内聚力/kPa	2×10 ⁻³
储水度/m	9.8×10 ⁻⁷	渗透率/ μm^2	2×10 ⁻³
内摩擦角/(°)	30	孔隙度	0.3
运动粘度/(m ² ·s ⁻¹)	1×10 ⁻⁴	密度/(kg·m ⁻³)	1×10 ³

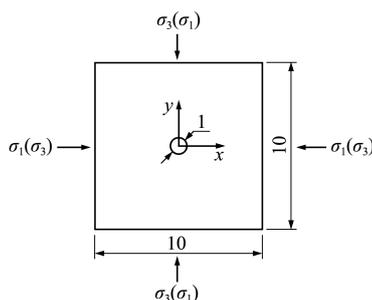


图 10 水力压裂模型(单位:dm)

Fig.10 Hydraulic fracturing model(unit:dm)

5 模拟结果与讨论

5.1 模拟结果

鉴于篇幅限制,初始应力场的模拟结果不再进行讨论,不同时步下,以压力水头表示的水力裂缝扩展过程如图 11 所示。截取迭代 8000 步后压力水头云图进行放大,如图 12 所示,图 12(a)中黑色矢量为孔隙渗流速度,图 12(b)为上支裂纹的局部放大图。图 13 为 Shimizu 等^[4]采用颗粒流模拟的结果。

通过图 11 和图 12 可以看出,裂纹总是沿着最大主压应力方向扩展,采用断裂-渗流-应力耦合模型可以直观表示裂纹长度与宽度,同时可进行渗流速度场和压力场的求解。将模拟结果与图 13 进行对比,可以看出,压裂的模拟结果基本相同。

5.2 结果讨论

通过算例可见,本文数值方法耦合处理水力压裂这一复杂的力学问题是基本可行的,在将该方法向工程应用推进的过程中,需要进一步对其进行评价,以期对神似而非形似的核心有所把握。

该模型在计算过程中,裂纹扩展的方向和破坏类型、水头计算和流量分布等仅由控制方程计算得到,未受任何假定影响。通过计算可获取更多物理

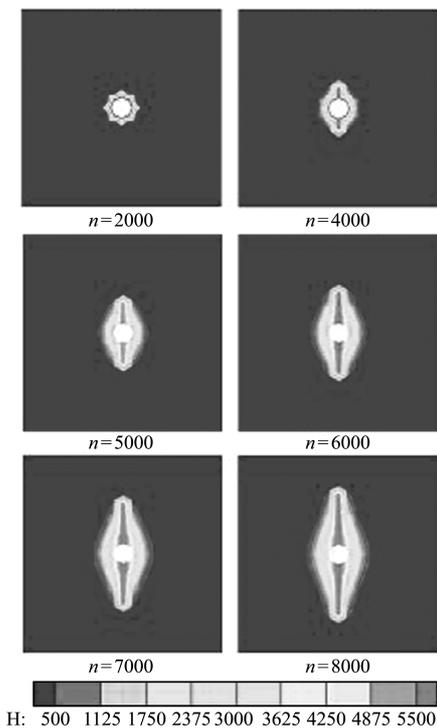


图 11 水力压裂过程
Fig. 11 Process of hydraulic fracturing

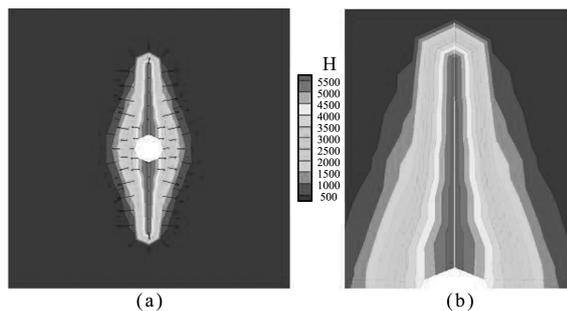


图 12 压力水头局部放大
Fig. 12 Enlargement of one crack

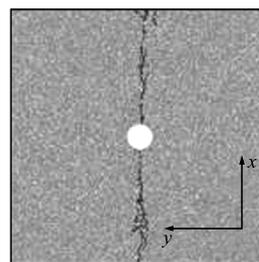


图 13 颗粒流模拟结果
Fig. 13 Simulation result by distinct elements

量的时间历程与空间分布,为更好地理解各因素间的相互关系,对压裂过程主控因素的分析都提供了有力证据。由于本构方程是建立在单元内部,而断裂破坏是受初始单元连接的影响,因而可方便实现空间材料非均匀模型的构建,而这为将模型应用于实际压裂作业提供了可能,这部分工作已经展开。

现有模型的不足。可变形离散单元法模拟裂纹扩展是以单元尺寸为扩展特征长度,且断裂准则是以复现现象为目标的简化处理,并非严格意义上断裂力学通过计算应力强度因子和能量释放率等客观断裂判据。网格依赖性的缺陷可通过单元破坏等拓扑处理实现,但这种处理过于细化,而对现象的描述益处不大,实际模拟过程中,通过细化网格即可弥补网格依赖的问题。岩体本构是另一复杂的科学问题,如孔隙水压力会影响有效应力,进而影响岩体强度,这就需要从多孔介质流固耦合的角度进行描述,亦是模型未来发展的方向。数值方法模拟水力压裂过程中最为困难又无向可寻的问题是模拟时间与真实物理时间的匹配问题。任何断裂判据均瞬间引入非连续,而实际压裂作业中,压裂时间以小时或天为时间尺度,动态松弛显式求解无法处理这一问题,但不选用显式迭代解又会引入其他困难。通过类比罚函数处理接触,将非连续判据扩展至连续作用可能是解决时间匹配问题的一个途径,但需要更多更具有创造性的工作。

6 结 论

针对水力压裂这一复杂问题,建立了断裂-渗流-应力耦合模型,综合了多种数值模拟方法,对压裂过程模拟提供了新的思路。主要结论如下。

- (1) 基于有限元与离散元混合方法建立的裂纹模型可以无需假定扩展路径,自动实现扩展方向的选择,有效地实现连续到非连续的过度。
- (2) 裂隙作为孔隙的压力边界,孔隙所求流量反作用于裂隙压力的求解可有效处理流体在基岩与人工裂缝中的协调流动问题。
- (3) 建立断裂-渗流-应力耦合模型可对压裂过程进行模拟,并可实时获取压力水头和渗流速度等信息,为了更好地指导工程,需考虑诸如材料非均匀等工程实际。

参考文献(References):

[1] Wu R. Some Fundamental Mechanisms of Hydraulic Fracturing [D]. Georgia Institute of Technology, 2006.

[2] Adachi J, Siebrits E, Peirce A, et al. Computer simulation of hydraulic fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, **44** (5):739-757.

[3] Damjanac B, Gil I, Pierce M, et al. A new approach to hydraulic fracturing modeling in naturally fractured reservoirs[A]. 44th US Rock Mechanics Symposium

- and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium[C]. 2010.
- [4] 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.
- [5] Zhou L, Hou M Z. A new numerical 3D-model for simulation of hydraulic fracturing in consideration of hydro-mechanical coupling effects [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, **60**: 370-380.
- [6] 连志龙, 张 劲, 吴恒安, 等. 水力压裂扩展的流固耦合数值模拟研究 [J]. *岩土力学*, 2008, **29**(11): 3021-3026. (LIAN Zhi-long, ZHANG Jin, WU Heng-an, et al. A simulation study of hydraulic fracturing propagation with a solid-fluid coupling model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29**(11): 3021-3026. (in Chinese))
- [7] 张广明, 刘 合, 张 劲, 等. 油井水力压裂流-固耦合非线性有限元数值模拟 [J]. *石油学报*, 2009, **30**(1): 113-116. (ZHANG Guang-ming, LIU He, ZHANG Jin, et al. Simulation of hydraulic fracturing of oil well based on fluid-soil coupling equation and non-linear finite element [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, **30**(1): 113-116. (in Chinese))
- [8] 孙 翔, 刘传奇, 薛世峰. 有限元与离散元混合法在裂纹扩展中的应用 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, **37**(3): 126-130. (SUN Xiang, LIU Chuan-qi, XUE Shi-feng. Application of combined finite-discrete element method for crack propagation [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2013, **37**(3): 126-130. (in Chinese))
- [9] Itasca F. Fast Lagrangian analysis of continua [J]. *User's Manual*. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2005.
- [10] 刘 洋, 李世海, 刘晓宇. 基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(5): 951-959. (LIU Yang, LI Shi-hai, LIU Xiao-yu. Coupled fluid flow and stress computation model of dual media based on continuum-medium distinct element method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(5): 951-959. (in Chinese))
- [11] 柴军瑞, 仵彦卿, 袁继国. 岩体中裂隙水流对裂隙壁的双重力学效应 [J]. *岩土力学*, 2003, **24**(4): 514-517. (CHAI Jun-rui, WU Yan-qing, YUAN Ji-guo. Double mechanical effects of fissure flow on fissure walls [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(4): 514-517. (in Chinese))
- [12] 张 平. 裂隙介质静动应力条件下的破坏模式与局部化渐进破损模型研究 [D]. 西安理工大学, 2004. (ZHANG Ping. Research on Failure Modes and Localized Progressive Failure Model of the Cracked Media under Static and Dynamics Stress Conditions [D]. Xi'an University of Technology, 2004. (in Chinese))

Numerical simulation of hydraulic fracturing

LIU Chuan-qi¹, XUE Shi-feng², SUN Qi-cheng^{*1}

(1. State Key Laboratory for Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Engineering Mechanics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Hydraulic fracturing is a process which fractures initiate and propagate due to hydraulic loading applied by fluid inside the fractures. To simulate the process is a great challenge because of the strong nonlinear coupling between the viscous flow of fluid and fracture propagation. In this work, a crack model based on the combined finite-discrete element method is built. The transition from continuum to discontinuum can be efficiently simulated. In order to simulate fluid flow in the porous media and fracture, a dual-media model is created. In the model, fracture flow works as the pressure boundary condition of pore flow, while, pore discharge counteracts hydraulic head calculation. A fracture-stress-seepage coupling mechanical model is created based on the crack model and flow model mentioned above which are validated in some cases. The process of hydraulic fracturing is analyzed. Using a variety of numerical methods, a computer program is coded to simulate the process. The result is compared with another one simulated by distinct element method. The advantages and drawbacks of the proposed numerical model is discussed in details.

Key words: hydraulic fracturing; dual-media; fracture-stress-seepage coupling