

水压致裂过程的三维数值模拟研究

李根, 唐春安, 李连崇, 梁正召

(大连理工大学岩石破裂与失稳研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 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。对具有 120 万单元的方形岩石材料模型, 进行了 4 组不同应力状态下水压致裂过程的三维大规模科学计算分析。计算结果分析表明: 起裂压力与失稳压力并不重合, 起始裂纹均为张性, 裂纹扩展形式、表面平整度、走向、扩展失稳过程以及裂纹的空间分布形态受应力状态影响。当竖直方向为最大主应力方向时裂纹呈空间整片分布, 当水平应力差较大时裂纹表面形态平整, 失稳到来较快; 当竖直方向为最小主应力方向时裂纹的空间分布呈水平片状; 不等的主应力情况下裂纹总是分布在最小主应力面内; 当三向主应力相等时, 裂纹起裂位置和扩展方向具有竞争趋势, 空间分布不具规律, 裂缝分支较多。数值模拟结果与物理实验结果有着较好的吻合, 该研究对水压致裂工程设计有一定参考价值。

关键词: 流固耦合; 并行有限元计算; 三维水压致裂; 数值模拟

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2010)12 - 1875 - 07

作者简介: 李根(1982 -), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟与分析研究。E-mail: badboy955@163.com。

Numerical simulation of 3D hydraulic fracturing process

LI Gen, TANG Chun-an, LI Lian-chong, LIANG Zheng-zhao

(Centre For Rock Instability and Seismicity Research, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the RFPa numerical method and the parallel technology, a microscopic hydro-mechanical coupling model to reflect the process of rock damage is established. For a square rock model with 1200000 elements, 3D scientific computation is performed during the process of hydraulic fracturing under 4 different stress states. The results show that the initial pressure doesn't coincide with the buckling pressure, and that the extension form, surface planeness, tendency, extension instability process which is tensional and spatial distribution shape of cracks are influenced by the stress states. Cracks are distributed in the form of shaft film when the maximum principal stress direction is vertical, if the horizontal stress difference is bigger, instability is faster, and the crack surface is plane. Cracks are distributed in the form of shaft film when the minimum principal stress direction is horizontal. Cracks are always distributed in the minimum stress direction plane under different principal stress situations. There is competition trend between initiation location and propagation direction when the 3D principal stresses are equal, and there is no laws in space distribution and cracks are branched. Numerical simulation results are in accordance with physical experimental ones. The study is valuable to the engineering design of hydraulic fracturing.

Key words: fluid-solid coupling; parallel FEM computation; 3D hydraulic fracturing; numerical simulation

0 引言

水压致裂(水力压力、水力劈裂)是岩体渗流 - 应力耦合研究的一个重要方向, 是石油、岩盐及煤层开采、地应力测量、水库诱发地震机理分析、矿井突水防治等工程的理论基础^[1-2]。有关水压致裂不仅涉及破裂过程分析而且也是复杂的三维问题, 因此较多的研究依赖于物理试验。随着计算机技术的发展, 数值模拟已成为科学研究的重要手段之一, 有关渗流 - 应力耦合机理研究、水力致裂耦合模型的建立及相关应

用程序的开发都取得了一定的进展^[3-4]。目前的研究对耦合作用过程中岩体渗透率演化及应力诱发损伤演化的破裂与流体渗透机理尚缺乏深入认识^[1]。另外, 目前的大多数研究还只是停留在预置的单一裂缝扩展的分析。然而, 水压致裂是水与岩体耦合基础上的力学响应, 是以裂纹及其内部缺陷相互作用过程中的萌生、

基金项目: 国家自然科学基金项目(50820125405; 50909013; 50804006); 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB209404)
收稿日期: 2009 - 06 - 30

扩展和贯通为主要表现形式的。数值模拟程序方面，目前有代表性的处理开裂问题的方法之一是文献[5]介绍的方法。该研究采用裂隙流与固体骨架耦合的分析方法，裂隙网络的变化要靠网格的重新划分，使得计算工作量大，限制了计算规模，不适合计算大型区域的水力劈裂问题，这也是目前数值模拟分析中的一个瓶颈所在。谢兴华等^[1]也对目前的水压致裂数值模拟中的不足做了详细论述，并指出有关水压致裂的模拟尚需更加高效合理的计算手段。数学模型方面大量的工作仍采用二维平面应变模型，而实际水压致裂过程中封闭段的长度有限，这与模型的平面应变假设前提不符，很难保证结论的合理性。特别地，二维平面应变模型不能够真实地模拟出水平状裂纹的发生、发展、相互贯通以及空间分布，更难以体现三维应力状态对裂纹发展规律的重要影响。

高效的计算方法和数学物理模型的深入研究为能够更加真实地展现水压致裂过程，包括三维空间内的裂纹萌生和发展，特别是破裂扩展过程中的应力场和渗透场演化的动态图像以及帮助人们理解水压致裂过程的复杂机制等提供了有力的手段。本文从岩石细观渗流-应力-损伤耦合模型入手，将宏观与微观层面的缺陷表现为材料细观层面物理属性的非均匀性，采用高效并行有限元数值计算方法对三维大规模单元模型开展水压致裂过程研究，再现了复杂应力作用下损伤演化直至宏观破裂的失稳过程，展现了不同三维应力状态下裂纹的形成和扩展机制。

1 数值模型与求解方法

1.1 三维渗流-应力(应变)-损伤耦合模型

经典的Biot固结原理注重研究外荷载作用下孔隙水压力与有效应力或总应力及相应的变形之间的关系，所探讨的渗流场实质是孔隙水压力分布场^[6]。为了考虑有效应力对渗透性变化的影响，很多学者基于室内试验和工程实践，建立了多种岩石应力-应变-渗透系数关系方程，其中应用较为广泛的是Louis提出的负指数方程^[7]

$$k_e = k_0 \exp[-b(\frac{s_{ii}/3 - ap}{H})] \quad (1)$$

式中 k_0 为初始渗透系数， β 为耦合参数， H 为 Biot 系数， $s_{ii}/3$ 为平均有效应力， a 为孔隙水压力系数。

式(1)仅在单元体处于弹性状态时适用，在岩石(体)隙缝开始萌生、发展过程(损伤演化)中渗透系数将发生很大的改变，这是显而易见的，针对这一现象目前还没有统一的数学上的表征公式。杨天鸿等^[8]采用突跳系数 ξ (例如 $\xi=100$) 来表征单元由完好到损伤破坏的渗透系数增大的倍数，通过简单的代数

缩放用感性经验的方式去描述这种改变。Yuan 等^[9]认为在岩体渗流-破坏模型中采用应变-渗透率演化关系较为合适。为表征岩石损伤破坏后渗透性的变化特征，本文假设在三维空间上，岩石单元体损伤后，将出现3个方向等宽度的缝隙^[10]，如图1所示。

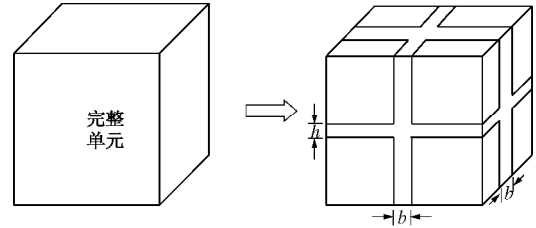


图1 完整岩体单元破坏后的缝隙分布

Fig. 1 Distribution of cracks of an intact rock element due to failure

$$b \approx \frac{\Delta V}{3l^2} \approx \frac{e_v V}{3\sqrt[3]{V^2}} = \frac{e_v \sqrt[3]{V}}{3} \quad (2)$$

式中 b 为缝隙宽度， ΔV 为单元体积膨胀量， l 为最初的单元体棱长。单缝隙中的流量可表示为

$$q = \frac{b^3 r_1 g}{12m_l} J_f = \frac{b^3 r_1 g}{12m_l} \frac{\Delta H}{l} \quad (3)$$

式中 ΔH 是单元相对两面的水头差， m_l 为液体黏滞系数， g 为重力加速度。于是损伤单元体的渗透系数即可表示为

$$k_d = b^2 r_1 g / 12m_l = (\sqrt[3]{V^2} r_1 g / 108m_l) e_v^2 \quad (4)$$

式中 V 为单元体体积， e_v 为单元体积应变。这样就直接建立了体应变-渗透系数的表征关系式。

对于岩石损伤的表征，在RFPA3D中，当单元的应力状态或者应变状态满足某个给定的损伤阈值时，表征单元开始损伤，损伤单元的弹性模量为

$$E = (1 - D)E_0 \quad (5)$$

式中 D 为损伤变量， E 和 E_0 分别是损伤单元和无损单元的弹性模量，这些参数假定都是标量。RFPA3D中采用带有残余强度的弹脆性模型^[2, 11]，按照岩石力学中的一般惯例，认为压应力(应变)为正，而拉应力(应变)为负。在单轴拉伸应力作用下的损伤演化方程为

$$D = \begin{cases} 0 & e_{t0} \leq \bar{e} < 0 \\ 1 - s_{rt} / \bar{e} E_0 & e_{tu} \leq \bar{e} < e_{t0} \\ 1 & \bar{e} \leq e_{tu} \end{cases} \quad (6)$$

式中 s_t 为抗拉强度； s_{rt} 为残余强度， $s_{rt} = I s_t$ ； e_{t0} 为初始损伤阈值，也就是弹性极限所对应的拉伸应变； e_{tu} 为极限拉伸应变， $e_{tu} = h e_{t0}$ ； h 为极限应变系数； I 为残余强度系数。

式(6)中的 \bar{e} 可定义为

$$\bar{e} = \sqrt{\langle -e_1 \rangle^2 + \langle -e_2 \rangle^2 + \langle -e_3 \rangle^2} \quad (7)$$

其中, e_1, e_2 和 e_3 为三个主应变。表达式 $\langle x \rangle$ 可以描述为

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其余参数见图 2。

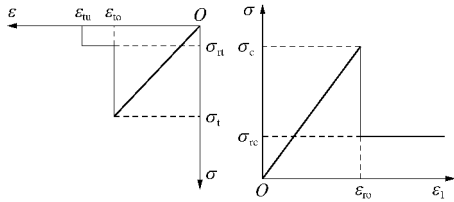


图 2 RFP3D 中单元拉剪本构关系

Fig. 2 RFP3D constitutive law for elements in tension and shear failure mode

类似的, 可以得到在剪切破坏下的损伤演化方程

$$D = \begin{cases} 0 & e_1 < e_{r0} \\ 1 - s_{rc} / E_0 e_1 & e_1 > e_{r0} \end{cases} \quad (9)$$

其余的参数见图 2。

单元损伤前, 渗透系数 k 是应力应变的函数, 式 (1); 单元损伤后, 渗透系数 k 应该是应力应变和损伤变量 D 的函数, 即式 (4)。渗透系数演化的描述为

$$k = \begin{cases} k_0 \exp[-b(s_3 - ap)] & D = 0 \\ (\sqrt[3]{V^2} r_1 g / 108 m_1) e_v^2 & 0 < D \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

1.2 求解原理及流程

本文的模型中, 假设岩石介质中的流体遵循经典达西渗流理论, 在有限元耦合分析求解中为了保证求解的稳定性按松散耦合模式计算, 即按渗流边界条件先计算出孔隙水压力分布场, 然后根据虚功原理将其等价作为节点载荷, 并以此作为应力场求解的载荷条件求出应力场分布, 如此反复将渗流场与应力场进行交替耦合迭代求解。

1.3 并行计算程序工作模式

如果希望较为精确地模拟出三维空间内裂纹扩展规律就必须要求有足够数量单元来捕捉, 从裂纹的萌生、扩展都要反应到细观单元上来, 因此要求单元规模较大。正如前文所讲, 这也是单PC机的瓶颈所在。本文基于大规模科学计算技术的并行流固耦合计算程序, 以服务器-客户端的工作模式突破了这一瓶颈。服务器端依托Linux操作系统运行本文提出的流固耦合计算模块, 其计算结构采用了主从(master/slave)模式, 由一个主进程(master)和若干个从进程(slave)组成。主进程是一个控制程序, 负责获取全局机器数, 进行区域划分和任务调度, 还包括接受任务、数据分发、回收结果、输出结果; 而每个slave 进程是一个

计算程序, 负责完成子任务计算, 包括局部初始化、并行计算和模块间的数据通信并把结果返回到 master 进程, 程序间的信息传递采用消息传递方式进行。客户端依托 Windows 系统运行 RFP3D 软件, 负责数据的前后处理结果提取及显示^[12]。

2 三维水压致裂模式的模拟分析

2.1 计算模型

复杂应力条件下的水压致裂模式研究对工程实践具有重要指导意义, 杨天鸿等^[8]、Li 等^[13]进行了不同围压作用下二维平面应变问题的实验研究, 然而三维应力条件下的水压致裂模式更具复杂性, 为了研究真三维条件下不同围压的水压致裂裂纹扩展路径和失稳压力的变化规律, 本文设置了如图 3 所示的计算模型, 模型的长宽高分别为 1000, 1000, 1200 mm, 钻孔位置与模型中轴线重合, 长度为 600 mm, 其中封闭加压段长度为 50 mm, 孔径为 40 mm, 计算单元采用 8 节点六面体等参元, 每单元边长为 10 mm, 整个模型单元数为 120 万。并行计算时将整个求解区域分解为 12 个子计算区, 分区如图 4 所示。整个模型中单元的弹性模量、抗压强度和渗透系数按照威布尔随机分布。模型物理力学材料参数列于表 1 中。

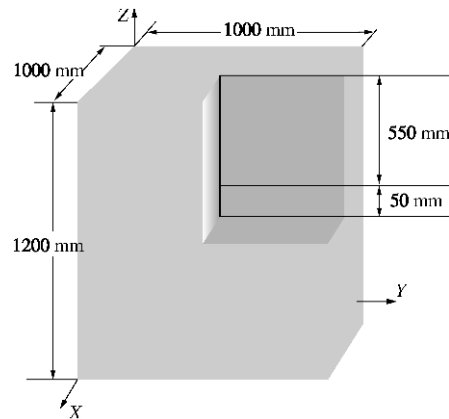


图 3 模型结构与尺寸示意图

Fig. 3 Model structure and size

表 1 模型材料力学参数

Table 1 Mechanical properties of input materials

均质度系数	弹性模量/GPa	泊松比 μ	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	极限压应变系数	极限拉应变系数
4	6	0.25	100	10	200	5
残余强度系数	摩擦角 $j / (^\circ)$	初始渗透系数 m/d	初始水压力/MPa	水压力增量/MPa	水压系数	耦合系数
0.1	30	0.1	8.5	0.05	0.6	0.01

模型的边界条件为底端竖向约束, 模型四周根据不同工况施加不同情况的 X 和 Y 向围压, 顶端 Z 向施加均布压力。这样按水压致裂一般性假设, 钻孔方向

与其中一主应力方向一致,水压作用于封闭加压段的圆孔内壁(裸眼),以每载荷步 0.05 MPa 增加,按准静态过程求解。各工况参见表 2。

表 2 围压作用情况

Table 2 Confining pressures

工况	S_x /MPa	S_y /MPa	S_z /MPa
情况 I	1.0	1.0	4.0
情况 II	4.0	4.0	1.0
情况 III	1.0	3.0	5.0
情况 IV	1.0	1.0	1.0

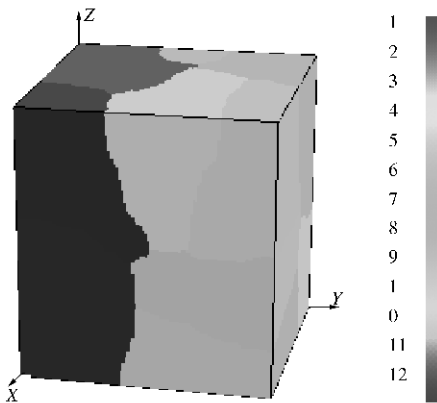


图 4 并行计算分区图

Fig. 4 Parallel computational area

2.2 计算结果与分析

对于情况 I: 当加压到 30 步, 即孔压力为 9.950 MPa 时, 封闭段筒壁周围有个别破坏单元出现(图 5)。考虑到材料抗拉强度的非均匀性此时拉裂会在筒壁的薄弱位置率先出现, 这种随机性是伴随材料性质的随机性和单元应力状态的影响所导致的, 而由于这种非均匀性起裂点可能并不与均质弹性力学导出的最大拉应力点处重合。随着筒壁水压力进一步增加, 这种随机性逐渐淡化, 破坏单元逐渐集中聚合为微裂纹, 并将沿着优势面延伸, 水压力前锋伴随裂纹的扩张而延伸跟进, 同时跟进的水力又驱动裂纹的进一步扩张, 沿着圆孔的轴线方向形成对称的两条主裂纹, 裂纹形态曲折, 逐渐扩展开来形成缝隙。这个过程中 (step=30~59) 裂纹的扩展是稳定的。当加载至 11.60 MPa, 这时不需要增加水压(进入步中步调整), 裂纹扩展延伸迅速, 不可遏止, 进入不稳定扩张增生阶段, 同时水压力分布不再跟进裂隙尖端, 梯度回落趋于均匀, 压力优势不与裂纹尖端一致, 呈现出缩回态势, 这种现象的发生是由于破裂面内损伤破坏单元较多, 水压致裂进入了失稳阶段, 单元峰后渗透系数趋于均匀(损伤或空单元)所致。

裂纹的空间分布俯视如图 6 (a)。图 7 (a) 为裂

纹分布剖面。图 6 (a), 7 (a) 中可以看到, 裂纹呈空间竖直片状分布, 与最小主应力面重合, 这与人们的理论认识和大量的试验结果一致。特别是图 7, 沿破坏面剖开发现其加压段的裂缝范围呈苹果状分布, 这与文献[13]中的物理试验记载一致。图 8 为空间裂纹声发射图。

对于情况 II: 当加压到 26 步, 即孔压力为 9.80 MPa, 封闭段井筒壁周围有少许破坏单元出现, 随着封闭段水压力的增加, 微裂纹很快演变成主裂纹, 并强势稳定扩展, 载荷步 44 时为加载临界值, 之后将发生裂纹的失稳性扩张, 出现与情况 I 中类似的现象。

裂纹的空间分布剖面如图 7 (b) 所示, 裂纹的空间分布俯视如图 6 (b) 所示。可以看到, 裂纹成空间水平片状分布, 与最小主应力面重合。图 8 为空间裂纹声发射图。声发射呈现出空间的饼状, 与空间裂纹分布规律一致。

对于情况 III: 当加压到 26 步, 即孔压力为 9.80 MPa 时, 封闭段井筒壁周围有少许破坏单元出现。随着封闭段水压增加到第 55 步时开始进入裂纹失稳性扩张阶段。从裂纹形态和空间分布(图 6 (c)) 可以看到, 裂纹依然集中分布在最小主应力面内, 照比情况 I 主裂纹断面形态平整, 扩展集中而明显, 延伸失稳到来迅速, 破坏单元在最小主应力平面内有着较为严格的聚集, 破坏单元较多。这种井壁单元的起裂随机性是其细观材料属性与最小主应力方向所主导的必然结果, 在裂纹的增生扩展阶段最小主应力始终与张拉破坏带垂直, 规律明显。裂缝分布集中在最小主应力面内, 这与大量物理试验结果相符。

对于情况 IV: 当加压到 27 步, 即孔压力为 9.85 MPa 时, 封闭段井筒壁周围有少量破坏单元出现。随着封闭段水压增加到第 59 步进入裂纹失稳性扩张阶段。从裂纹断面形态和空间分布可以看到并未聚合形成明显的优势破裂面, 主裂纹起初并不明显, 随着水压的增加, 不规则裂纹逐渐增多, 出现增生、杂交、贯通、分叉和次生, 裂纹的扩展也更加迂回曲折, 并伴有扭转, 形态多样, 带有一定的离散性与随机性, 与文献[13~14]得出的现象一致。

2.3 对结果的进一步分析讨论

从计算结果可以看出, 水压致裂的宏观裂缝是由微裂纹的汇聚扩展而渐进形成的, 无论哪种情况下起始裂纹都是张拉型的, 即存在张拉位移, 随着载荷的增加逐渐扩展形成微裂纹区, 根据外界应力状况不同而形态各异, 并在最小主应力面内蓄势出一个主方向, 这是未来的宏观主断裂方向, 而在各向主应力相等的情况下(情况 IV) 出现分岔局部化, 未来宏观主裂纹

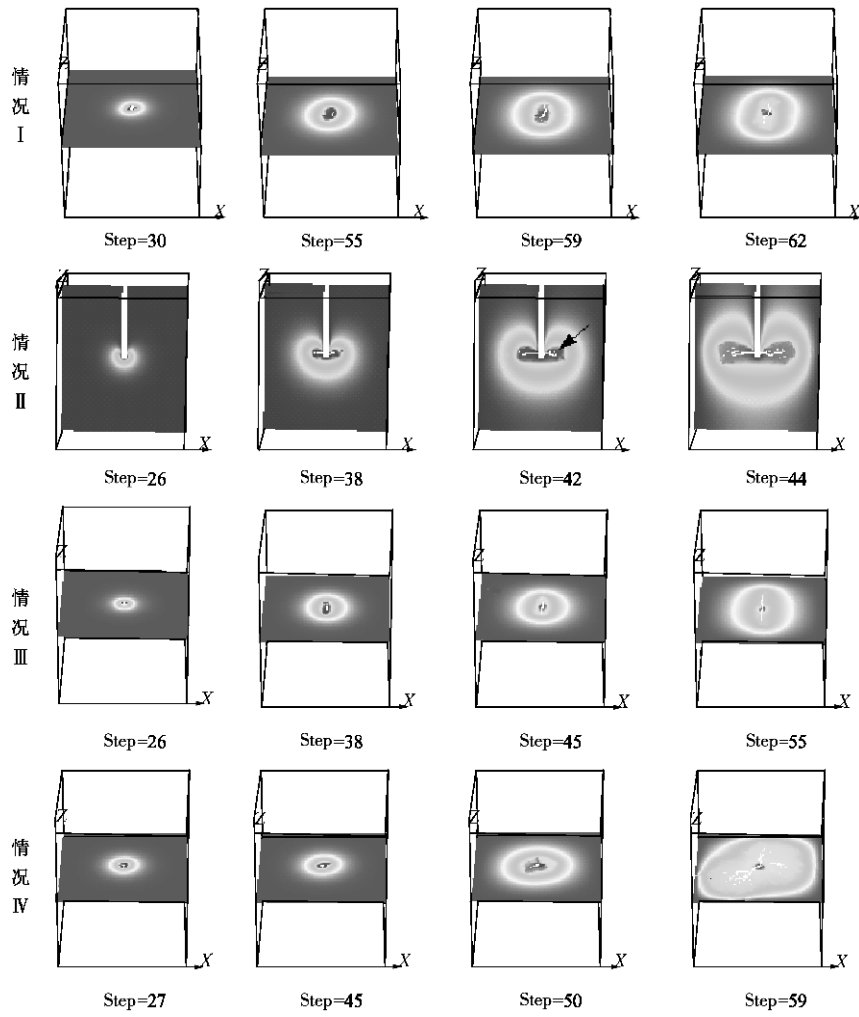


图 5 水压致裂过程中的水压力截面图

Fig. 5 Sections of pore pressure during hydraulic fracturing process

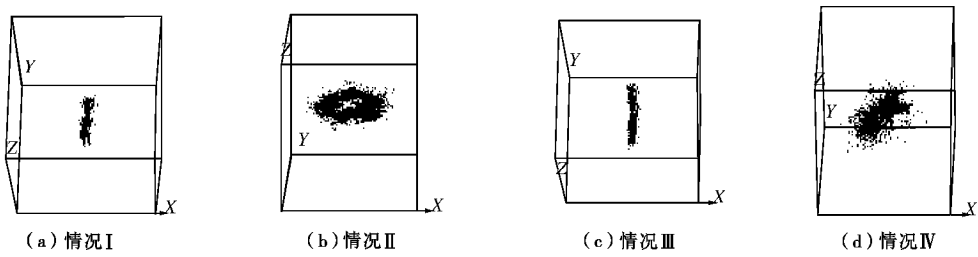


图 6 裂纹空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of cracks

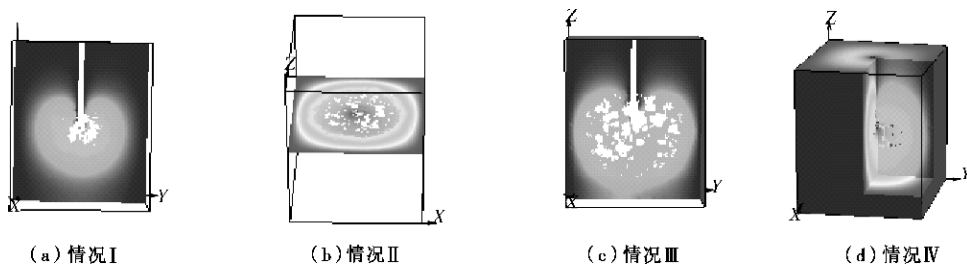


图 7 裂纹分布剖面

Fig. 7 Sections of crack distribution

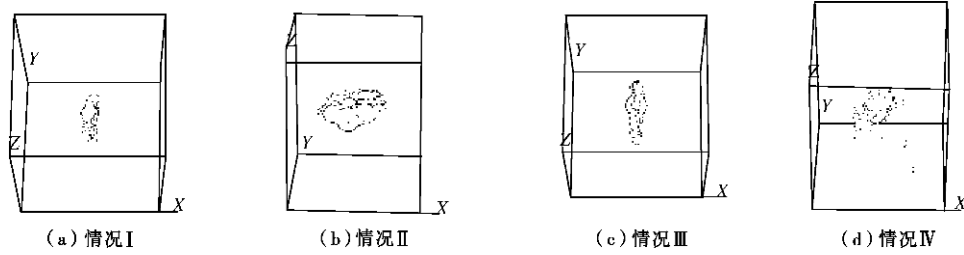


图8 空间裂纹声发射图

Fig. 8 AE distribution of cracks

方向具有一定的竞争性和不确定性；在水平主应力差较小或相等时，在微裂纹扩展过程中会出现伴有抑制的竞争，由于形成主裂纹的扩展，其附近区域卸载，与之竞争的微裂隙闭合，从而其附近微裂纹扩展受到抑制，扩展区凸显曲折延伸的主裂缝，而这种竞争抑制性会在水平主应力差较大时逐渐消失，如情况III。

传统的水压致裂理论认为，在孔隙水压力增加时出现裂纹的不稳定扩张压力为起裂压力。Detournay等^[15]对这个观点提出质疑，他们将水压致裂过程中的临界值划分为起裂压力与失稳压力。他们也推断出破裂开始扩展后不一定立刻导致失稳，在破裂后压力增加与否稳定意味着崩溃失稳，起裂压力也许比失稳压力要小。这在本文的模型中也均得到验证，说明材料的细观属性对起裂压力起着决定性的内因作用。

各情况下的起裂压力均在 10 MPa 左右，理想弹性力学计算的理论值的范围是 10~12 MPa，与理论值下限较为接近，这主要与材料的非均质性和理论值本身的理想条件有关。

从失稳来临的快慢可以看到，情况II在第44步失稳，而I在加载达到第62步失稳，与其相差最大，这是因为在情况I中按照均质弹性理论井壁单元最早达到起裂压力的是竖直向张裂，裂纹分布在圆心对称面上，而情况II中为水平向张裂，裂纹分布在整个封闭段井壁面上，裂纹示意图如图9。

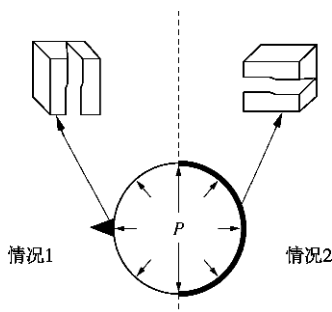


图9 水压致裂形式示意图

Fig. 9 Diagram of hydraulic fracturing cracks

情况I中由于单元破裂应力释放迁移到其周围单元，且破裂单元集中在竖直向封闭段内，水压力前锋跟随并驱动裂纹尖端扩展，而情况II中损伤或破坏将

沿着封闭段四周各薄弱处相继形成，压力前锋在整个水平裂纹尖端分布，驱动多裂纹分支同时扩展，单步破坏单元较多，应力迁移扰动过大，因此失稳较情况I提前到来，其它情况与其类似。

4种情况下的声发射特征曲线如图10所示。声发射(AE)与破坏单元的数量具有一致性。从图10中可以看到情况I中从起裂到失稳能量平稳释放；情况II中的曲线从起裂开始便一路飙升直致失稳，每步能量释放均有较大增加，能量释放曲线光滑，这与情况II本身的破裂面形状有关，呈现出同心圆式的放射推进，裂纹尖端单元被逐层击破，而其他3种情况下曲线均有几处小的突降段表明裂隙不稳定的持续发生，并不是随着水压增加平稳增长的，而是带有跳跃性的；情况III与情况IV破裂前曲线抖动较大，最后阶段曲线陡然上升，意味着破裂失稳的发生突然，声发射曲线可以为失稳预测提供依据。声发射次数的增长规律与声发射能量规律基本保持一致。

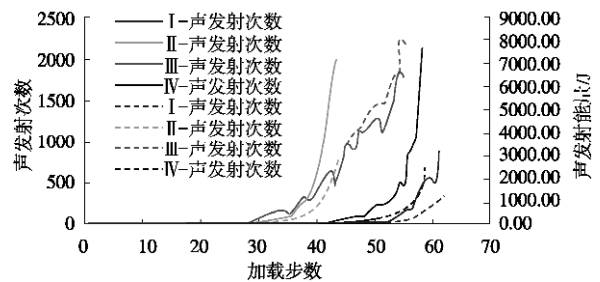


图10 声发射特征曲线

Fig. 10 AE curves with load step

3 结 论

水压致裂是岩体渗流-应力耦合研究的一个重要方向，也是众多领域关注的一项基础性研究课题。本文在 RFP3D 基础上，通过引入流固耦合并行算法，再现了三维条件下的水压致裂过程。本文对三维水压致裂模型进行了4种不同应力状下的模拟分析，得到以下几点结论。

(1)建立的反映岩石细观损伤演化过程的三维渗流-应力-损伤耦合模型在应用于水压致裂过程分析中工作良好，能够较好地反映实际。

(2) 对水压致裂过程中裂纹萌生和扩张演化的过程进行了模拟, 所得到的裂纹形态以及整体的裂纹空间分布有较为完整生动的捕捉效果, 较好地模拟出水压梯度场在失稳时的变化情况。与二维模型相比, 更加真实、全面地反应了三维水压致裂问题的本质。

(3) 水压致裂过程中存在一个失稳压力, 不同应力状态下起裂压力均比失稳压力要小, 两者并不重合, 当破裂面整体应力差较小时会较早出现裂纹的失稳扩展(情况 II)。失稳过程中水压力并不增加的情况下裂纹会很快地扩张发展。

(4) 不同应力状态作用下裂纹起裂形式均由张拉作用引起, 不同围压作用下裂纹演化挺进形式有所不同, 裂缝在最小主应力面内发展, 沿最大主应力方向分布, 当 3 个主应力大小相等时裂纹空间分布复杂, 会产生逐渐增多的裂缝分支出现分岔局部化, 并伴有较强的竞争扩展趋势。

参考文献:

- [1] 谢兴华, 速宝玉. 裂隙岩体水力劈裂研究综述[J]. 岩土力学, 2004, **25**(2): 330 - 336. (XIE Xing-hua, SU Bao-yu. A review of fracture rock hydraulic fracturing research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(2): 330 - 336. (in Chinese))
- [2] 李连崇, 唐春安, 杨天鸿, 等. FSD 耦合模型在多孔水压致裂实验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19): 3240 - 3244. (LI Lian-chong, TANG Chun-an, YANG Tian-hong, et al. Application of FSD coupling model to the test of multiple hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19): 3240 - 3244. (in Chinese))
- [3] LI L, HOLT R M. Simulation of flow in sandstone with fluid coupled particle model[C]. //In rock mechanics in the national interest; Proceedings, 38th U.S. rock mechanics symposium, Washington, DC, 2000: 165-72.
- [4] 陈 平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, **13**(4): 299 - 308. (CHEN Ping, ZHANG You-tian. Coupling analysis of seepage/stress for jointed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, **13**(4): 299 - 308. (in Chinese))
- [5] SOUSA J L. Three-dimensional simulation of near Wellbore phenomena related to hydraulic fracturing from a perforated wellbore[D]. N Y: Cornell University, 1992.
- [6] 陈晓平, 茜平一, 梁志松, 等. 非均质土坝稳定性的渗流场和应力场耦合分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(6): 860 - 865. (CHEN Xiao-ping, QIAN Ping-yi, LIANG Zhi-song, et al. Coupling analysis of heterogeneous earth dam stability of seepage field and stress field[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(6): 860 - 865. (in Chinese))
- [7] LOUIS C. Rock Hydraulics in rock mechanics[M]. New York: Springer-Verlag, 1974.
- [8] 杨天鸿, 唐春安, 芮勇勤, 等. 不同围压作用下非均匀岩石水压致裂过程的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2004, **21**(4): 419 - 424. (YANG Tian-hong, TANG Chun-an, RUI Yong-qin, et al. Numerical simulation of hydraulic fracturing process in heterogeneous rocks under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, **21**(4): 419 - 424. (in Chinese))
- [9] YUAN S C, HARRISON J P. Development of a hydro-mechanical local degradation approach and its application to modelling fluid flow during progressive fracturing of heterogeneous rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2005, **42**: 961 - 984.
- [10] LI L C, LI G, TANG C A, et al. Modeling of three-dimensional failure process and fluid flow in brittle and heterogeneous rocks[C]// SINOROCK2009 - ISRM International Symposium on Rock Mechanics "Rock Characterization, Modelling and Engineering Design Methods", Hong Kong, China. 2009.
- [11] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (TANG Chun-an, WANG Shu-hong, FU Yu-fang. Numerical tests in rock failure process[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [12] 张永彬, 唐春安, 张 怀, 等. 岩石破裂过程分析系统中的应力并行求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **24**(3): 479 - 483. (ZHANG Yong-bin, TANG Chun-an, ZHANG Huai, et al. Stress parallel computing in rock failure process analysis system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **24**(3): 479 - 483. (in Chinese))
- [13] 剑万禧. 水压致裂的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1988, **1**: 39 - 45. (JIAN Wan-xi. Laboratory experiments on hydraulic fracture[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1988, **1**: 39 - 45. (in Chinese))
- [14] DOE T W, BOYCE G. Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydro static stress[J]. Int J Rock Mech Sci and Geomech, 1989, **26**(6): 605 - 611.
- [15] DETOURNAY E, CARBONELL R. Fracture mechanics analysis of breakdown process in minifrac or leak-off tests [C]// Proceeding of Eurock'94. Rotterdam: Balkema, 1994: 399 - 407.