

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.01.028

基于 FDEM-Flow 研究地应力对水力压裂的影响

严成增^{1,2,3}, 郑 宏³, 孙冠华³, 葛修润³

(1. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 用提出的 FDEM-Flow (考虑流固耦合的离散元-有限元耦合方法) 方法作为工具, 研究了地应力对水力压裂的影响。通过一个注水圆孔的算例, 研究不同地应力状态对压裂裂隙的走向和形态的影响。研究表明, 起裂压力的大小和压裂裂隙的方位均与地应力有密切关系。在竖向地应力 σ_v 保持不变的情况下, 且侧压力系数 $\lambda > 1$ 时, 随着 λ 的增大, 起裂压力和失稳压力均减小; $\lambda > 1$ 且取值较小时, 主要产生水平向的裂隙, 并有斜向裂隙产生; $\lambda > 1$ 且取值较大时, 裂隙严格按照最大主压应力的方向扩展, 不再出现斜向裂隙; $\lambda < 1$ 时, 主要产生竖向的裂隙; $\lambda = 1$ 时, 水平地应力和竖向地应力相等, 裂隙的扩展不存在优势方向。不同侧压力系数条件下, 裂隙的扩展方向与最大主应力的方向一致, 水力压裂裂隙的起裂和扩展主要由最大主拉应力控制, 裂隙在拉应力集中的区域起裂。这些结果与已有的试验及理论认识是相符的, 进一步验证了 FDEM-Flow 方法用于模拟水力压裂问题的有效性。

关键词: 有限元-离散元法; FDEM-Flow; 水力压裂; 地应力

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016)01 - 0237 - 10

Effect of in-situ stress on hydraulic fracturing based on FDEM-Flow

YAN Cheng-zeng^{1,2,3}, ZHENG Hong³, SUN Guan-hua³, GE Xiu-run³

(1. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: With the proposed FDEM-Flow (combined finite-discrete element method considering fluid-solid coupling) method as a tool, we study the effects of in-situ stress on hydraulic fracturing. Through a numerical examples of an injection hole under the state of different in-situ stresses, the influence of in-situ stress on the direction and morphology of fracturing crack is studied. The results show that both the initiation pressure and direction of fracturing fractures are closely related to in-situ stress. When the vertical in-situ stress σ_v keeps constant and the lateral pressure coefficient $\lambda > 1$, the initiation pressure and breakdown pressure are decreased. When $\lambda > 1$ and its value is comparatively small, horizontal cracks are mainly produced with some oblique cracks generating. However, when $\lambda > 1$ and the value is larger, cracks are strictly extended along the direction of the maximum principal stress and oblique cracks no longer occur. When $\lambda < 1$, fracture pattern is dominated by vertical cracks. But when $\lambda = 1$, the horizontal in-situ stress and vertical in-situ stress are equal, there is no advantage direction for crack extension. Under the conditions of different lateral pressure coefficients, the direction of crack propagation always coincides with that of the maximum principal stress. The fracture initiation and propagation are mainly controlled by the maximum principal tensile stress, and fractures are initiated in the concentration zones of tensile stress. These results agree well with the available experimental results and theoretical analysis, which demonstrate the effectiveness of FDEM-Flow method to simulate hydraulic fracturing.

Keywords: finite-discrete element method (FDEM); FDEM-Flow; hydraulic fracturing; in-situ stress

收稿日期: 2014-06-08

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(No.2015M580953); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No.2011CB013505); 国家自然科学基金项目(No.11202223)

This work was supported by China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2015M580953), the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2011CB013505) and the National Natural Science of China (11202223).

第一作者简介: 严成增, 男, 1986 年生, 博士, 主要从事离散元有限元耦合、离散元、颗粒物物理与力学、多物理场耦合、DDA、大规模高性能并行计算以及软件工程方面的研究工作。E-mail: yanchengzheng86@gmail.com

1 引言

岩石水力压裂过程是水压驱动下微裂纹萌生、扩展、贯通,直至宏观裂纹产生并导致低渗透性岩石破裂的过程^[1]。水力压裂技术在石油、非常规天然气(如页岩气、煤层气)的开采及岩体地应力测量中被广泛应用。煤层气、页岩气等非常规天然气开采的核心技术之一是对低渗透储层岩石进行水力压裂,产生裂隙网络,属于典型的高应力作用下的流-固耦合问题。然而,实际工程中对水力压裂裂隙的扩展方式和分布规律缺乏足够地认识,地下压裂井网的设计和布置具有较强盲目性,难以预测岩层的实际压裂效果。因此,探明和掌握水力压裂裂隙的形成机制、展布模式和影响因素,对于水力压裂开采设计、储层的改造和提高油气资源的采收率具有十分重要的意义^[2]。

国内外众多学者分别从试验、理论分析和数值模拟的角度对水力压裂进行了研究。在试验、理论分析研究方面,郭印同等^[3]采用真三轴模型试验机、压裂泵伺服控制系统、声发射定位技术及工业CT技术,建立了一套页岩水力压裂物理模拟与压裂裂缝表征方法。郭天魁等^[4]针对所取的岩芯,采用裂隙结构面迹长分布的分维值和面密度进行定量表征,并评价其崩落碎块的大小和数量,用于判断页岩压裂后形成缝网的能力。姜浒等^[5]采用大尺寸真三轴水力压裂物理模拟试验系统,研究了定向射孔对水力裂缝起裂和延伸的影响,对射孔参数优化设计和水力压裂施工具有参考意义。赵金洲等^[6]基于弹性力学和岩石力学理论,考虑天然裂缝与射孔孔眼相交,结合张性起裂准则,建立了裂缝性地层水力裂缝沿天然裂缝张性起裂的起裂压力计算模型。闫铁等^[7]建立了清水压裂情况下局部裂缝张开、裂缝面错动和裂缝面抗剪能力的计算模型,揭示了清水压裂油井增产的机制和原因。周健等^[8]采用理论分析和试验验证研究了水力压裂过程中天然裂缝张开和剪切破坏机制。在数值模拟研究方面,最有代表性的是,杨天鸿等^[9-10]在原有RFPA基础上,基于Biot固结理论和修正Terzaghi的有效应力概念,同时考虑了应力(损伤前)和损伤变量(损伤后)对渗透率的影响,开发了岩石破裂过程损伤与渗流耦合分析系统(F-RFPA^{2D}),其在文献中同时指出,该模型更适合渗透性较好的饱和岩石材料。李根等^[11]基于RFPA数值分析方法和并行计算技术,建立了三维渗流-应力-损伤耦合模型。郭宝华^[12]采用F-RFPA^{2D}软件,对单孔岩样水压致裂过程裂缝扩展

形态及注水孔形状和大小、应力条件等因素进行了研究。潘鹏志等^[13]在弹塑性细胞自动机的基础上,考虑了岩石破裂过程中渗流与应力耦合的相互作用关系,建立了非均质岩石水压致裂过程的细胞自动机方法。Al-Busaidi^[14]和Wang等^[15]用颗粒流程序对水力压裂问题进行了研究,取得了较好的效果。

以上数值模拟方面的研究大多是基于连续介质力学框架进行的,值得指出的是,在非连续介质力学框架内,严成增等^[16]基于有限元-离散元法(FDEM),提出了解决流-固耦合驱动下的岩体破裂问题的FDEM-Flow方法,可实现含任意复杂裂隙网络^[17]的水力压裂模拟,并给出了实现流-固耦合的整个计算流程。限于篇幅,该文给出的算例主要是为了验证所提出的流-固耦合方案的正确性。本文则是以该文提出的流-固耦合方案为基础,将其作为研究问题的工具,来研究地应力对水力压裂的影响。

2 FDEM-Flow 的流固耦合简介

FDEM-Flow是在FDEM的框架下实现的。FDEM方法由Munjiza^[18]提出,其基本原理是,在完整岩块内部划分三角形单元的有限元网格,并在相邻三角形单元的公共边上插入起黏结作用的无厚度节理单元,通过节理单元的断裂来实现裂纹的萌生和扩展。三角形单元和节理单元连接的拓扑关系如图1所示。各三角形单元根据节点所受的不平衡力按牛顿第二定律更新节点的位移和速度。该方法较传统DEM方法的突出优点在于,采用了高效的NBS接触判断算法以及基于势的接触力计算方法^[19-20],NBS接触判断算法具有接触判断耗时与单元数呈线性关系的优良特性,而基于势的接触力计算方法,则无需像传统DEM那样需要对角点进行圆角化,接触力计算可以统一化、标准化,且计算出的接触力为分布力。正是FDEM方法的上述优点,使得该方法非常适合对岩体的破裂进行模拟,但该方法无法对流-固耦合驱动的岩体破裂问题进行模拟,在文献[16]提出了FDEM中考虑流-固耦合的基本理论框架,称之为FDEM-Flow方法,并给出相应的验证算例。其基本思想是,考虑到原有FDEM特有的三角形单元和节理单元的拓扑连接关系(如图1所示),提出一种贯通节理裂隙网络的递归搜索算法^[17],找出所有与流体流动通道联通的节理裂隙,只有这些联通的节理裂隙才可能有流体流过,也只有这些节理裂隙参与渗流部分的计算。然后依据立方定律,求解各渗流裂隙的水头,将求得的水压力作为荷载施加在裂隙两边的岩体上,流体

在裂隙中流动会对裂隙两边的岩体施加力的作用。同时岩体本身的变形和位移会导致裂隙的张开和闭合，这反过来也会影响流体在裂隙中的流动。这就是 FDEM 中实现流-固耦合的基本思路，具体内容可参考文献[16]。

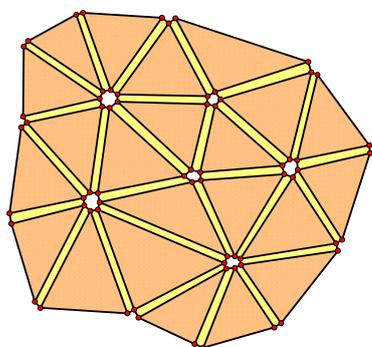


图 1 三角形单元和节理单元的连接
Fig.1 Connection of triangular elements and joint elements

3 数值模拟

3.1 数值模型及参数

文献[21]从试验角度研究了在静水压力和非静水压力条件下水力压裂裂缝的走向和形态。本文以该文献中的模型作为模拟计算算例，模型的几何尺寸如图 2 所示，在方板的中心挖出一个直径为 25 mm 的圆孔，模型受不同的水平和竖向地应力的作用。其中竖向地应力 $\sigma_v = 10.3$ MPa，水平地应力 σ_h 分别取不同的地应力值，分别取为竖向地应力的 1.0、1.2、1.5、2.0 倍（即侧压力系数 λ 分别取为 1.0、1.2、1.5、2.0）。除此以外，还将竖向地应力 σ_v 取为 20.6 MPa，水平地应力取为竖向地应力的 0.5 倍（即侧压力系数 $\lambda = 0.5$ ）。以此来研究不同地应力对水力压裂裂缝的走向和扩展形态的影响。模型所取的力学参数为：弹性模量 $E = 50$ GPa，泊

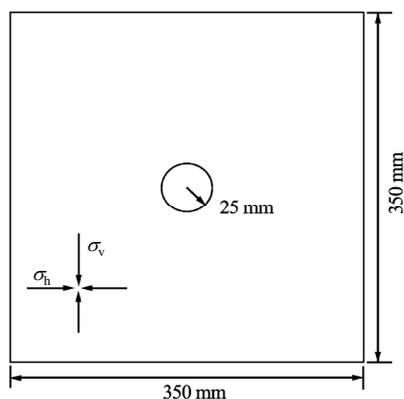


图 2 含圆孔试件示意图
Fig.2 Sketch of specimens containing hole

松比 $\nu = 0.25$ ，内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ ，抗拉强度为 6 MPa，黏聚力 $c = 30$ MPa，水的黏度 $\mu = 0.001$ Pa·s，水的体积模量 $K_w = 2\ 000 \times 10^3$ MPa，水的密度 $\rho = 1\ 000$ kg/m³。

3.2 模拟结果及分析

裂缝扩展数值模拟结果见图 3。

如图 3(a)所示，当侧压力系数 $\lambda = 1.0$ 时，也即水平地应力 $\sigma_h = 10.3$ MPa，竖向地应力 $\sigma_v = 10.3$ MPa 时，因为此时水平方向地应力和竖直方向地应力大小相等，因而裂隙起裂的位置是不确定的。但图 3(a)中 step 195 000 显示，是从钻孔的上、下端开始起裂的，原因在于 FDEM-Flow 方法是沿着单元边界开始扩展的，由于在划分网格时，不能完全保证网格各向同性，使得裂隙从某一特定位置起裂。另外，从图 3(a)中的 step 195 000 和 step 197 000 可以发现，钻孔上、下端的两条裂隙并非对称的扩展；而是先从钻孔上端起裂，上端裂隙扩展一定长度后，下端裂隙才开始扩展。另外，据图 3(a)中 step 200 000 和 step 205 000 可知，上、下端的裂隙均出现分叉，各自均由靠近孔口的一条裂隙分叉为 3 条裂隙，同时有部分分支裂隙也出现了小的分叉裂隙，以图 3(a)中 step 205 000 右侧分支裂隙最为明显。裂隙的分叉说明，尽管网格的非各向同性，会使得裂隙起裂时存在优势的起裂位置和方位，但这种优势作用相对较弱。由于地应力作用不存在优势方向，使得后续裂隙的扩展出现分叉，出现斜向裂隙，后续裂隙的分叉体现了在荷载、材料等均相同时，裂隙扩展方位的不确定性。当侧压力系数 λ 比 1 稍大，为 1.2 时，也即 $\sigma_h = 12.36$ MPa， $\sigma_v = 10.3$ MPa 时，在地应力的作用下，裂隙会优先沿着地应力中最大主压应力的方向扩展，即沿着水平方向扩展。如图 3(b)中 step 188 000 和 step 190 000 所示，裂隙先从钻孔的左侧起裂，裂隙扩展一定长度后，右侧开始起裂。但由于水平地应力只比竖向地应力大一些，因而地应力对裂隙扩展的影响有限，在地应力和网格依赖性的综合作用下，左侧的水平裂隙出现分叉，同时钻孔右侧还出现了两条斜向裂隙，如图 3(b)中 step 198 000 和 step 199 000 所示。当侧压力系数 λ 增大到 1.5 时，此时 $\sigma_h = 15.45$ MPa， $\sigma_v = 10.3$ MPa，因为水平地应力比竖向地应力大比较多，在地应力的作用下，裂隙最先从钻孔左侧起裂，左侧裂隙扩展一定长度后，右侧开始起裂，如图 3(c)中 step 163 000 和 step 165 000 所示。由于水平地应力比竖向地应力大比较多，后续的裂隙的扩展沿着地应力中最大主压应力的方向扩展，最终发展为通过钻孔中心的水

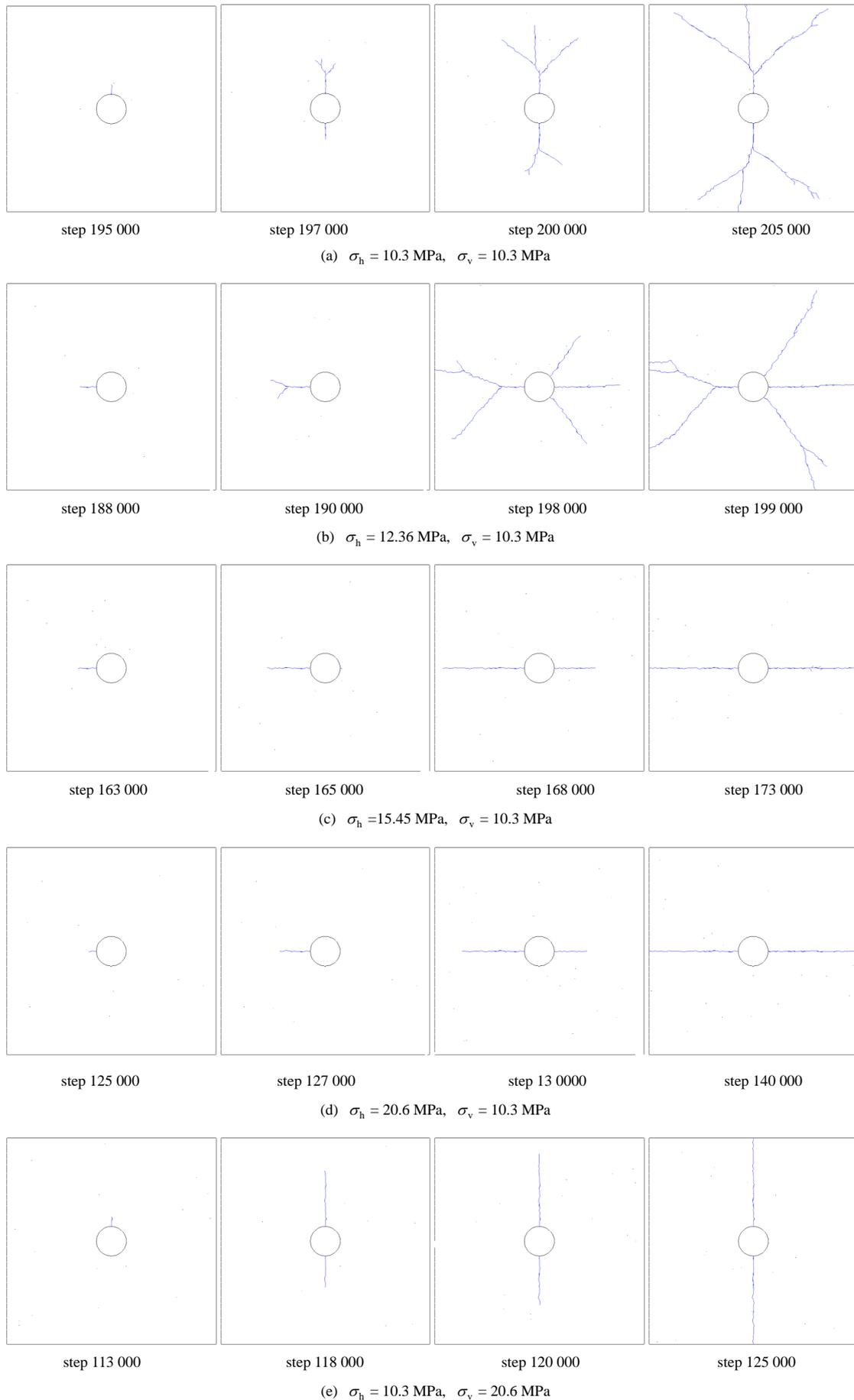


图 3 裂隙扩展过程图及破裂机制

Fig.3 Figure of crack propagation and fracture mechanism

平裂隙，不再出现斜向裂隙，裂隙面较平直光滑，如图 3(c)中 step 168 000 和 step 173 000 所示。不过需要指出的是，钻孔左侧的裂隙有很短的分叉裂隙。当侧压力系数增大到 2.0 时，也即 $\sigma_h = 20.6$ MPa, $\sigma_v = 10.3$ MPa 时，在地应力的作用下，裂隙最先从钻孔左侧起裂，左侧裂隙扩展一定长度后，右侧裂隙开始扩展，如图 3(d)中 step 125 000、step 127 000 以及 step 130 000 所示。由于水平地应力是竖直地应力的 2 倍，地应力作用的方向性更为明显，后续裂隙的扩展严格按照地应力中最大主压应力的方向扩展，最终发展为通过钻孔中心的水平裂隙，不出现斜向裂隙，裂隙面平直光滑，同时钻孔左侧的裂隙也不再出现短小的分叉裂隙，如图 3(d)中 step 140 000 所示。与侧压力系数为 2.0 的情形类似，当侧压力系数为 0.5 时，竖向地应力是水平地应力的 2 倍，此时裂隙沿地应力中最大主压应力的方向扩展，也即竖直方向扩展，形成通过钻孔中心的竖向裂隙，不出现斜向裂隙，裂隙面平直光滑，也不出现短小的分叉裂隙。另外，对比图 3(a)中的 step 195 000、3(b)中 step 188 000、3(c)中的 step 163 000 以及 3(d)中 step 125 000 可知，随着侧压力系数的增大，裂隙起裂更早，或者说侧压力系数越大，更易于产生裂隙，因为在起裂之前，钻孔内的水压随时间步数的增大而增大，起裂时时间步数较小，则说明在较低的水压就开始起裂。这一点，我们在后面的部分会作进一步的讨论。最后，图 3 中，我们用实线表示拉裂隙，虚线表示剪切裂隙，图 3 中，所有的裂隙均为实线，即均有拉破坏产生，即水力压裂过程中以拉破坏为主。

图 4 为不同侧压力系数时钻孔水压力和累计破坏节理单元数的关系。从图 4 可知，只有当水压达到一定值后，才有节理单元断裂，即裂隙的产生。随着侧压力系数的增大 (λ 从 1.0 增大到 2.0)，裂隙的起裂压力逐渐减小，例如当 $\lambda = 1.0$ 时，其起裂压力为 31.0 MPa，而当 $\lambda = 2.0$ 时，其起裂压力降低到 19.5 MPa。该结论可根据基于线弹性理论的起裂压力理论公式 $P_f = 3\sigma_3 - \sigma_1 + T_n$ 来解释（其中 σ_1 为地应力的最大主应力， σ_3 为地应力的最小主应力， T_n 为抗拉强度）。因为 $\sigma_3 = 10.3$ MPa 是不变的，当 λ 从 1.0 增大到 2.0 时，也即 σ_1 从 σ_3 增大到 $2\sigma_3$ ，这样起裂压力不断降低。另外，图 4 与图 3 是对应的，例如图 4 中裂隙扩展到边界时，侧压力系数 $\lambda = 1.0$ 和 1.2 时破裂节理数比 $\lambda = 1.5$ 和 2.0 时的破裂节理数要多。这是因为如图 3(a)、3(b)所示， $\lambda = 1.0$ 和 1.2 时产生了多条裂隙，而 $\lambda = 1.5$ 和 2.0 则仅有钻孔

左、右侧两条水平裂隙。另外，我们也发现 $\lambda = 2.0$ 和 $\lambda = 0.5$ 的起裂压力并不相同，尽管这两者地应力大小完全相同，只是地应力的方向旋转了 90° 。按照理论公式，两者的起裂压力应该是相等的，而图 4 显示，两者并不相等。这主要是由于划分的网格并非完全各向同性，而裂隙又是沿着网格边界进行扩展的。

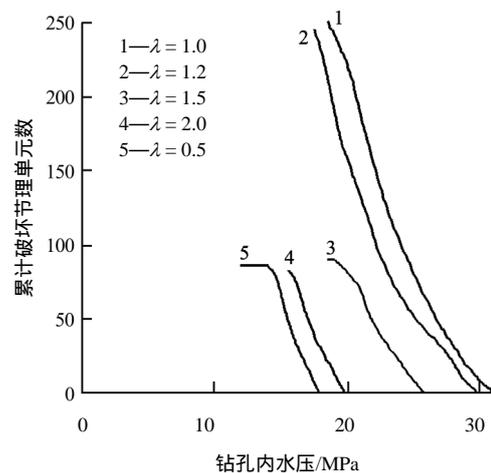


图 4 不同侧压力系数时，钻孔水压力与破坏节理单元数的关系

Fig.4 Relationship between pressure and broken joint element number under different lateral pressure coefficients

图 5 为不同侧压力系数时时间步与钻孔水压力的关系。在失稳之前，不同侧压力系数下的水压-时间步曲线是重合的，均随着时间步的增大而呈线性的增大。这是因为采用流量边界，流速恒定，在失稳之前，钻孔内累计的流体不断增大，故而水压线性增大。不过，侧压力系数不同，其失稳压力是不同的。与起裂压力类似，失稳压力随着侧压力系数的增大 (λ 从 1.0 增大到 2.0) 而增大。例如图 5 中， $\lambda = 1.0$ 时，其失稳水压力为 31.2 MPa， $\lambda = 2.0$ 时，其失稳水压力为 19.9 MPa。同时，与图 4 对比可知，不同侧压力系数下，其失稳压力和起裂压力相差很小，这是由于在该模型中，水能够快速进入生成的裂隙，并对裂隙施加流体压力，从而促使裂隙快速扩展至失效。

如图 6 所示，因为 FDEM-Flow 假定岩石本身是不透水的，水压分布只在裂隙内，且裂隙中离注水孔越远的点，水压越小，如图 6(a)中 step 220 000 所示，这与裂隙渗流的规律是吻合的。同时由图 6 可以发现，不同侧压力系数下，水均能够很快进入裂隙，裂隙一旦扩展，便有水的进入。这主要是因为水的黏滞系数相对较小所致。另外，从图 6(a)中各图的图例可以发现，从裂隙最开始起裂，到后续

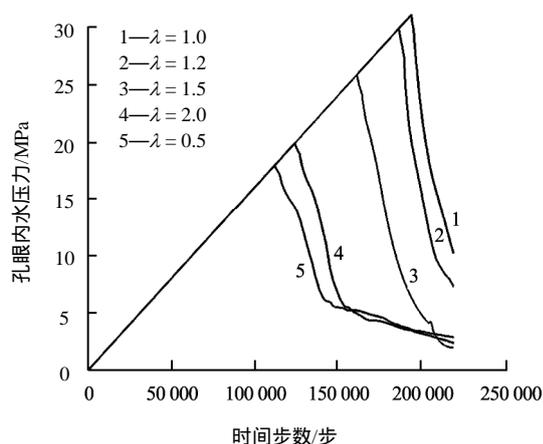


图5 不同侧压力系数时, 时间步与钻孔水压力的关系
Fig.5 Relationship between time step and pressure under different lateral pressure coefficients

扩展, 最大水压力(位于钻孔内)的值不断减小。这是因为随着裂隙的扩展, 流体可从钻孔内进入裂隙, 使得钻孔内累计的流体量减少, 最终导致钻孔内的压力降低, 也即最大水压力降低。图 6(b)~(e)也有类似的规律。另外, 据图 6(a)step 220 000 可知, 水力裂隙网络搜索算法可毫无困难的处理裂隙分叉、多裂隙交汇的情形, 可随着裂隙的扩展, 自动搜索出哪些裂隙与注水孔连通, 只有与注水孔连通的裂隙才参与渗流计算, 才有水压的分布。如图 6(a)中 step 220 000 分别给出了水压分布图和裂隙分布图, 从裂隙分布图中可发现, 试样上、下端边界向内扩展的部分裂隙(图 6(a)中 step 220 000 实心箭头标示的裂隙)因为尚没有与注水孔连通, 因而在水压分布图中的该位置没有水压的分布。而试样上端边界向内扩展的一条裂隙(图 6(a)中 step 220 000 空心箭头标示的裂隙)因与注水孔连通, 因而在水压分布图中的该位置又有水压的分布。这体现了水力裂隙网络搜索算法的自适应性, 可适用于二维情形下任意复杂裂隙网络的搜索。

如图 7 所示, 由裂隙扩展过程中的最大主应力分布图可看出, 裂隙起裂之前, 会在钻孔周围产生拉应力集中。当侧压力系数 $\lambda = 1.0$ 时, 因为水平地应力和竖直地应力相等, 因而在整个钻孔周界产生拉应力集中, 如图 7(a)中 step 194 000 所示。然后在钻孔上部产生裂隙, 裂隙产生之后, 钻孔上部的拉应力释放, 该钻孔上部附近的拉应力集中区消失, 但钻孔周边其余部位的拉应力集中区依然存在, 且拉应力集中区的厚度(径向距离)较起裂之前有所扩大, 裂隙的端部形成拉应力集中区, 如图 7(a)中 step 195 000 所示。随着时间步的增大, 裂隙进一步扩展, 且下部也产生裂隙, 同样导致拉应力释放, 拉

应力集中区(即圆周区域)的范围进一步缩小, 只在钻孔左、右侧有很小范围的拉应力集中区, 与此同时, 裂隙端部的拉应力集中区, 随着裂隙端部的移动而移动, 如图 7(a)中的 step 197 000 所示。随着钻孔上、下端裂隙的进一步扩展, 钻孔周界的拉应力集中区消失, 上、下端裂隙的扩展使得钻孔周界拉应力释放, 抑制了钻孔周界再产生新裂隙, 同时裂隙端部的拉应力集中随着裂隙的扩展而移动, 如图 7(a)中 200 000 所示。当侧压力系数 $\lambda = 1.2$ 时, 因为水平地应力比竖向地应力大, 使得钻孔周界上的拉应力集中区仅分布在钻孔的左、右侧, 但因为侧压力系数较小, 左、右侧的拉应力集中区的范围较大, 如图 7(b)中 step 187 000 所示。随着时间步的增大, 在钻孔左侧产生了裂隙, 使得左侧附近的拉应力释放, 左侧附近的拉应力集中区消失, 钻孔右侧的拉应力集中区依然存在, 且拉应力集中区的厚度(径向距离)较起裂之前有所扩大, 同时裂隙端部产生拉应力集中区, 拉应力集中区随着裂隙的扩展而移动, 如图 7(b)中 step 188 000 和 step 190 000 所示。然后钻孔右端在拉应力的作用下产生 3 条裂隙, 钻孔周界的拉应力释放, 原有的拉应力区消失, 裂隙端部的拉应力集中区随着裂隙的扩展而移动, 如图 7(b)中 step 195 000。当侧压力系数 $\lambda = 1.5$ 时, 因为水平地应力比竖向地应力大得多, 使得钻孔周界上的拉应力集中区仅分布在钻孔的左、右侧, 且因为侧压力系数较大, 左、右侧的拉应力集中区的范围较小, 如图 7(c)中 step 160 000 所示。随着时间步的增大, 在钻孔左侧产生了裂隙, 使得左侧附近的拉应力释放, 左侧附近的拉应力集中区消失, 钻孔右侧的拉应力集中区依然存在, 且拉应力集中区的厚度(径向距离)较起裂之前有所扩大, 同时裂隙端部产生拉应力集中区, 拉应力集中区随着裂隙的扩展而移动, 如图 7(b)中 step 163 000 和 step 165 000 所示。然后钻孔右端在拉应力的作用下, 产生 1 条裂隙, 钻孔周界的拉应力释放, 钻孔周界上原有的拉应力区消失, 裂隙端部的拉应力集中区随着裂隙的扩展而移动, 如图 7(c)中 step 168 000。当侧压力系数 $\lambda = 2.0$ 时, 因为水平地应力比竖向地应力大, 使得钻孔周界上的拉应力集中区仅分布在钻孔的左、右侧, 且因为侧压力系数很大, 左、右侧的拉应力集中区的范围进一步缩小, 如图 7(d)中 step 124 000 所示。随着时间步的增大, 在钻孔左侧产生了裂隙, 使得左侧附近的拉应力释放, 左侧附近的拉应力集中区消失, 钻孔右侧的拉应力集中区依然存在, 且拉应力集中区的厚度(径向距离)与

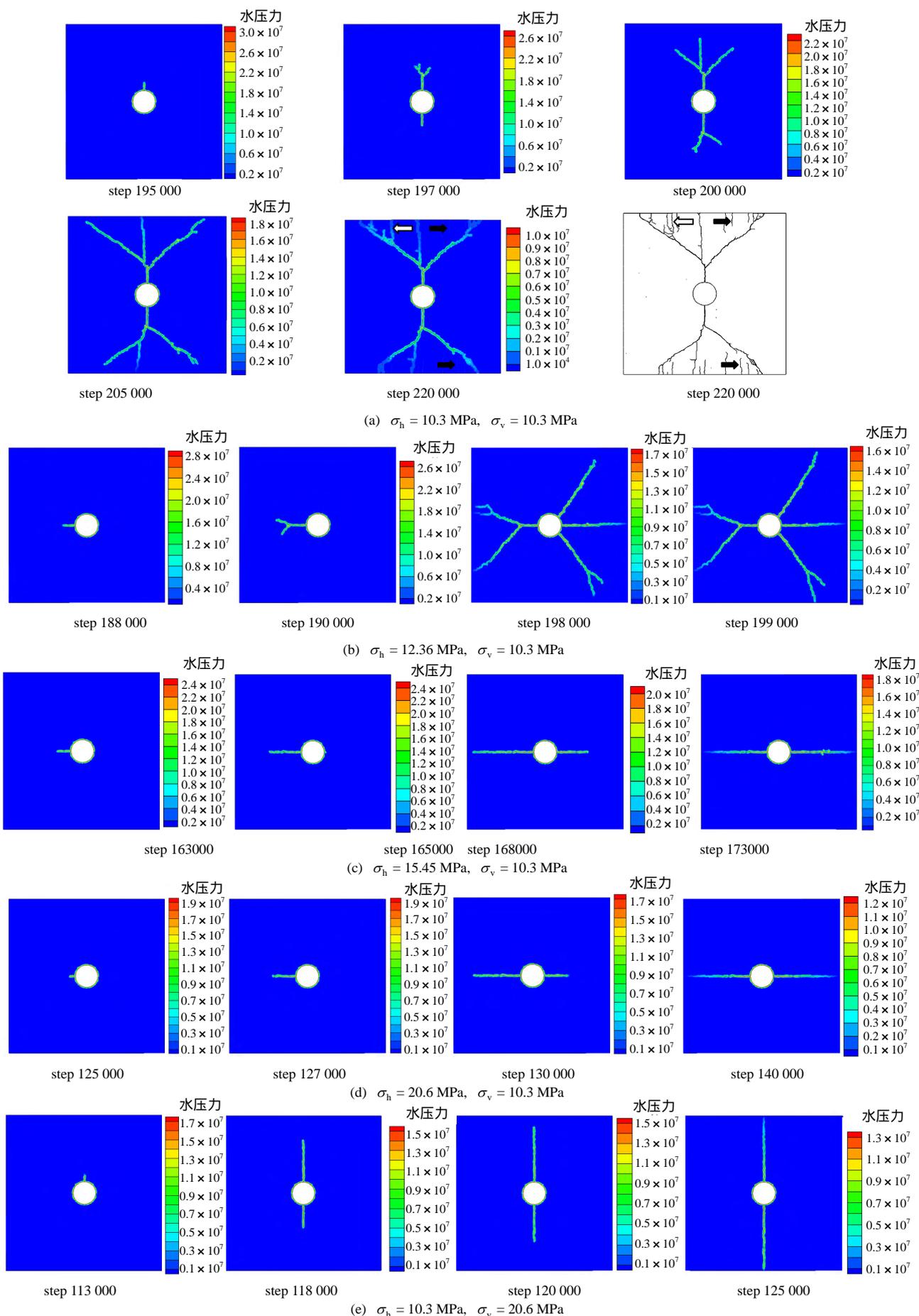


图 6 裂隙中水压分布图 (单位 : Pa)
Fig.6 Water pressure distribution in fracture (unit : Pa)

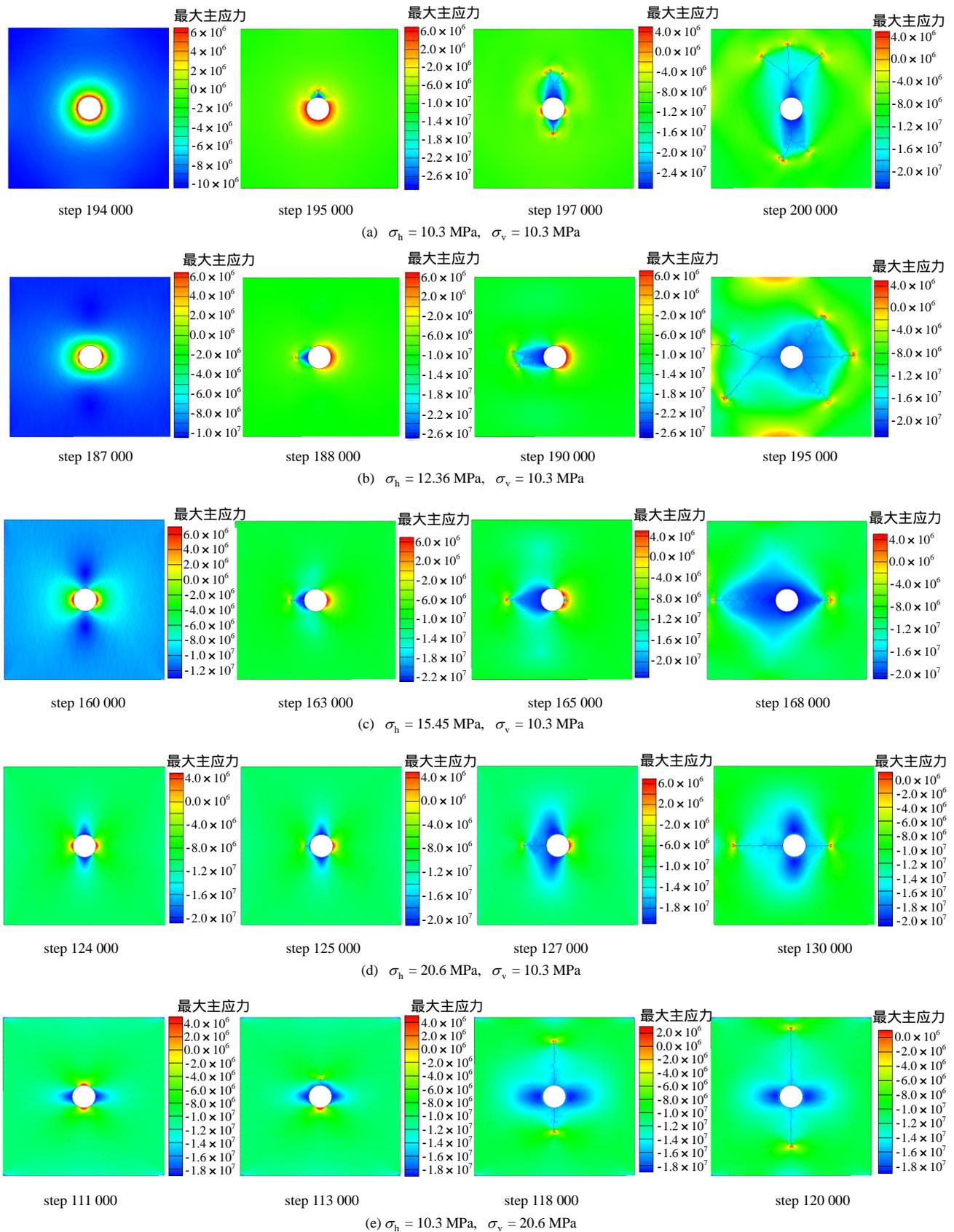


图 7 裂隙扩展过程中最大主应力的分布图 (拉为正)(单位: Pa)

Fig.7 Maximum principal stress distribution in crack propagation process (unit: Pa)

起裂之前相差不大, 未见明显扩大, 同时裂隙端部产生拉应力集中区, 该拉应力集中区随着裂隙的扩

展而移动, 如图 7(d)中 step 125 000 和 step 127 000 所示。然后钻孔右端在拉应力的作用下, 产生 1 条

裂隙，钻孔周界的拉应力释放，原有的拉应力区消失，裂隙端部的拉应力集中区随着裂隙的扩展而移动，如图 7(d)中 step 130 000。其中 $\lambda = 0.5$ 与 $\lambda = 2.0$ 的地应力大小相同，只是地应力方位旋转了 90° ，其拉应力集中区分布在钻孔上、下端，裂隙扩展过程中的最大主应力变化与 $\lambda = 2.0$ 类似，在此不再详述，如图 7(e)所示。由水力压裂过程中最大主应力的变化可知，压裂裂隙生成和扩展的力学机制为：在产生裂隙之前，在水压力的作用下钻孔的周界产生拉应力集中区，因为侧压力系数的不同，拉应力集中区的分布范围不同， $\lambda < 1.0$ 时拉应力集中分布在钻孔的上、下端， $\lambda = 1.0$ 时拉应力集中区分布在圆周上， $\lambda > 1.0$ 时拉应力集中区分布在钻孔的左、右侧，且其分布范围随着 λ 的增大而减小。然后，裂隙在拉应力集中的区域的产生，同时新生成裂隙的端部产生拉应力集中区，该拉应力集中区随着裂隙的扩展而移动。随着裂隙的扩展，起裂位置附近的拉应力释放，附近区域的拉应力集中区消失，抑制该裂隙附近再产生新的裂隙，随着裂隙的进一步扩展，钻孔周界上的拉应力集中区完全消失。可见裂隙的生成和扩展会抑制新的裂隙的产生。压裂过程中，裂隙破坏主要由拉破坏控制，或者说由最大主拉应力控制。

4 结 论

(1) 只在裂隙内有水压的分布且裂隙中离注水孔越远的点，水压越小，与注水孔没有联通的裂隙内无水压的分布。

(2) 侧压力系数 $\lambda > 1.0$ 且 λ 取值较小时，最大主应力集中区分布在钻孔左、右侧，分布范围较大，主要产生水平向的裂隙。但因为水平地应力和竖向地应力相差不大，还出现裂隙的分叉，产生斜向裂隙。

(3) 侧压力系数 $\lambda > 1.0$ 且 λ 取值较大时，最大主应力集中区分布在钻孔左、右侧，分布范围很小，裂隙严格按照地应力中最大主压应力的方向（即水平方向）扩展，不再出现斜向裂隙。

(4) $\lambda < 1.0$ 时，最大主应力集中区分布在钻孔上、下端，主要产生竖向的裂隙，裂隙的扩展方向与地应力中最大主压应力的方向（即垂直方向）一致。

(5) $\lambda = 1.0$ 时，最大主应力集中区均匀分布在钻孔周界上，裂隙的扩展不存在优势方向，尽管由于网格依赖性，起裂从钻孔上、下端部产生，但后续裂隙扩展出现明显分叉，产生斜向裂隙。

(6) 不同侧压力系数条件下，水力压裂过程中产生的裂隙均以拉破坏为主。裂隙的起裂和扩展主要由最大主拉应力控制，裂隙在拉应力集中的区域起裂，并在端部形成拉应力集中区，该拉应力集中区随着裂隙的移动而移动。 σ_v 保持不变，且侧压力系数 $\lambda > 1.0$ 时，随着 λ 的增大，起裂压力和失稳压力均减小。

这些结果与已有的试验及理论认识是相符的，进一步验证了 FDEM-Flow 用于模拟水力压裂问题的有效性。

参 考 文 献

- [1] 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 - 423.
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 - 423.
- [2] 马收, 陈佳亮, 杨勇, 等. 低渗透储层岩石水压致裂裂纹扩展的数值模拟研究[J]. 煤炭工程, 2013, (9): 94 - 97.
MA Shou, CHEN Jia-liang, YANG Yong, et al. Study on numerical simulation of crack expansion by hydraulic in low permeability reservoir rock strata[J]. *Coal Engineering*, 2013, (9): 94 - 97.
- [3] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 52 - 59.
GUO Yin-tong, YANG Chun-he, JIA Chang-gui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1): 52 - 59.
- [4] 郭天魁, 张士诚, 葛洪魁. 评价页岩压裂形成缝网能力的新方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 947 - 954.
GUO Tian-kui, ZHANG Shi-cheng, GE Hong-kui. A new method for evaluating ability of forming fracture network in shale reservoir[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 947 - 954.
- [5] 姜浒, 陈勉, 张广清, 等. 定向射孔对水力裂缝起裂与延伸的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1321 - 1326.
JIANG Hu, CHEN Mian, ZHANG Guang-qing, et al. Impact of oriented perforation on hydraulic fracture initiation and propagation[J]. *Chinese Journal of Rock*

- Mechanics and Engineering**, 2009, 28(7): 1321 - 1326.
- [6] 赵金洲, 任岚, 胡永全, 等. 裂缝性地层水力裂缝张性起裂压力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2855 - 2862.
ZHAO Jin-zhou, REN Lan, HU Yong-quan, et al. Hydraulic fracture tensile initiation pressure analysis for fractured formations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.1): 2855 - 2862.
- [7] 闫铁, 李玮, 毕雪亮. 清水压裂裂缝闭合形态的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3471 - 3476.
YAN Tie, LI Wei, BI Xue-liang. Mechanical analysis of closing shape of crack induced by waterfrac treatment[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3471 - 3476.
- [8] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2637 - 2637.
ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Mechanism study of shearing slippage damage of natural fracture in hydraulic fracturing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2637 - 2637.
- [9] 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.
- [10] 杨天鸿, 唐春安, 刘红元, 等. 水压致裂过程的数值试验方法[J]. 力学与实践, 2001, 23(5): 51 - 54.
YANG Tian-hong, TANG Chun-an, LIU Hong-yuan, et al. Numerical tests of progressive failure in hydraulic fracturing[J]. **Mechanics in Engineering**, 2001, 23(5): 51 - 54.
- [11] 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.
- [12] 郭宝华. 单孔岩样水压致裂的数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1965 - 1970.
GUO Bao-hua. Numerical analysis of hydraulic fracturing on single-holed rock specimens[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(6): 1965 - 1970.
- [13] 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 automaton[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2011, 45(5): 722 - 727.
- [14] AL-BUSAIDI A. Distinct element modeling of hydraulically fractured Lac du Bonnet granite[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2005, 110(B06302): 1 - 14.
- [15] WANG TAO, ZHOU WEIBO, CHEN JINHUA, 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): 1 - 13.
- [16] 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.
- [17] 严成增, 孙冠华, 郑宏, 等. 爆炸气体驱动下岩体破裂的有限元-离散元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2419 - 2425.
YAN Cheng-zeng, SUN Guan-hua, ZHENG Hong, et al. Simulation of explosive gas-driven rock fracture by FEM/DEM[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(8): 2419 - 2425.
- [18] MUNJIZA A. The Combined Finite-discrete Element Method[M]. London: John Wiley & Sons, Ltd., 2004: 29 - 32.
- [19] MUNJIZA A, ANDREWS K R F. Penalty function method for combined finite-discrete element systems comprising large number of separate bodies[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2000, 49: 1377 - 1369.
- [20] MUNJIZA A, ANDREWS K R F. NBS contact detection algorithm for bodies of similar size[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1998, 43(1): 131 - 149.
- [21] DOE T W, BOYCE G. Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stress[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1989, 26(6): 605 - 611.