

基于弥散式裂缝模型的水力压裂研究

赵 鹏^{1,2}, 谢凌志^{1,2}, 杨春和³, 郭印同³

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室, 四川 成都 610065;
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: 针对水力压裂数值模拟中传统分离式裂缝模型计算量大、需要预置裂缝及扩展路径等缺点, 提出采用弥散式裂缝模型模拟水力压裂过程的解决办法, 并根据流-固耦合理论, 导出基于弥散裂缝的应力-渗流耦合方程, 从而为实现在大尺度储层中模拟裂隙网络的演化提供参考。对混凝土试样进行水力压裂试验研究和基于弥散裂缝的数值分析, 由 2 种方法得到的起裂值基本一致; 试验和数值分析中, 裂缝扩展主要受地应力影响, 其方向垂直于水平最小地应力方向, 最后在试件内形成主裂缝并贯穿整个试件。

关键词: 岩石力学; 水力压裂; 弥散式裂缝; 流-固耦合; 起裂压力; 扩展方向

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)增 1-2593-08

RESEARCH ON HYDRAULIC FRACTURING BASED ON SMEARED CRACK MODEL

ZHAO Peng^{1,2}, XIE Lingzhi^{1,2}, YANG Chunhe³, GUO Yintong³

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. Key Laboratory of Engineering Safety and Disaster Mechanics, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;
3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Considering the disadvantage of huge calculation, preset cracks and the growth path for the traditional discrete crack model for hydraulic fracturing numerical simulation, this paper proposed a solution to simulate hydraulic fracturing using smeared crack model, and provided reference for realizing the simulation of the fracture network evolution on large scales. According to the theory of solid-fluid coupling, the stress and fluid flow control equations based on the smeared crack model were established. Hydraulic fracturing process of concrete was analyzed by both test method and numerical method based on smeared fracture model. The initiation fracture pressure in the two methods was almost the same. Both in experimental and numerical analysis, the propagation of fracture was mainly influenced by the in-situ stress, and the direction of propagation was perpendicular to the horizontal minimum in-situ stress direction. Finally, a major fracture was formed in the specimen, and ran through the whole specimen.

Key words: rock mechanics; hydraulic fracturing; smeared crack; solid-fluid coupling; initial crack pressure; direction of propagation

收稿日期: 2014-04-15; **修回日期:** 2014-07-07

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2012DFA60760); 四川省科技厅科技支撑项目(2012FZ0124)

作者简介: 赵 鹏(1988-), 男, 2000 年毕业于四川大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土方面的研究工作。E-mail: 676410806@qq.com.

通讯作者: 谢凌志(1976-), 男, 博士, 现任副教授。E-mail: xielingzhi@scu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0478

1 引言

作为增产增注的一种有效手段,水力压裂技术在石油领域中得到了广泛应用,尤其是非常规油气的开采,通过压裂对储层进行体积改造,从而在储层中形成裂隙网络体系,达到增强油气的渗流通道的目的。尽管北美在水力压裂技术现场运用较为成熟,在一些工程中也取得了令人满意的效果,但对其机制的掌握还远远不够,迄今仍然是能源领域的研究热点。水力压裂主要包括3个物理过程^[1]:流体作用在裂缝壁引起的岩石力学变形、流体在裂缝和岩体中的流动过程、岩石中裂缝的扩展过程。目前学者们对水力压裂中每个单一的物理过程都有很深的研究,但是当把这3个过程耦合在一起时,即使边界条件和储层性质很简单,也不能得到较好的解决办法^[2]。目前,国内外对水力压裂的研究手段主要有试验和数值2种方法。

水力压裂试验主要通过模拟现场地层条件,对裂缝扩展的实际物理过程进行监测,比如郭印同等^[3]采用真三轴岩土工程模型试验机、压裂泵伺服控制系统、Disp声发射三维空间定位技术、试验前后工业CT扫描水力压裂缝扩展形态的方法,建立一套页岩水力压裂物理模拟与压裂缝表征方法;陈勉等^[4]采用大尺寸真三轴模拟试验系统,对天然和人造岩样进行了水力压裂裂缝扩展机制模拟,讨论了地应力、断裂韧性、节理和天然裂缝等因素对压裂缝扩展的影响;C. Yashwanth等^[5]利用声发射研究砂岩在不同外部荷载作用下的水力压裂试验,分析了震源位置、事件频率及破坏机制。

水力压裂数值方法虽然在理论模型上存在一些假设和简化,但仍被工程界广泛应用。20世纪50年代,T. K. Perkins和L. R. Kern^[6]提出研究水力压裂的PK二维物理力学模型,随后R. P. Nordgren^[7]在PK模型上考虑了流体滤失的影响,形成了PKN模型。此外,还有KGD二维模型^[1]。水力压裂产生的裂缝通常会在高度和长度2个方向同时扩展,二维模型不再适合研究此类裂缝,一些学者们在二维模型基础上发展了拟三维模型。在拟三维模型中,主要有2种方法考虑水压裂缝高度的变化:一种是将PKN和KGD模型结合起来,前者模拟裂缝的横向扩展,后者模拟垂向扩展;另一种是通过裂缝延伸准则引入裂缝的高度参量^[8]。随着计算机技术的

成熟,平面三维模型快速发展。根据网格的处理方式,有移动的三角网格模型和固定的四边形网格模型。在平面三维模型中,可以计算裂缝的三维扩展以及裂缝中流体的二维流动^[2]。

本文根据应力场和渗流场之间的相互影响,基于弥散式裂缝模型得到应力渗流耦合方程,模拟裂缝在混凝土试样中的扩展过程,并通过与水力压裂试验的对比,初步验证该模拟方法的可行性,为今后在页岩中进行水力压裂提供参考。

2 采用弥散式裂缝模型的必要性

数值模拟作为研究水力压裂的一种有效方法,选择合适的裂缝模型是很重要的。Z. Lei等^[2, 8-13]在已有的理论模型上发展了多种裂缝技术来模拟水力压裂过程。这些数值方法中采用的裂缝模型可归纳为分离裂缝模型(见图1(a)),涉及到的裂缝技术有虚拟裂缝闭合技术、黏聚力技术、网格重划分技术、扩展有限元技术等。由于上述技术在计算过程中需要预设裂缝扩展路径并且计算量较大,该模型适合于储层情况相对简单,即储层岩石一致性较好,地应力方向变化不大,储层天然裂隙不发育等情况。在这种储层条件下,根据储层性质就能大致判断出井壁裂缝起裂位置和扩展路径,且压裂主要产生一条主裂缝。

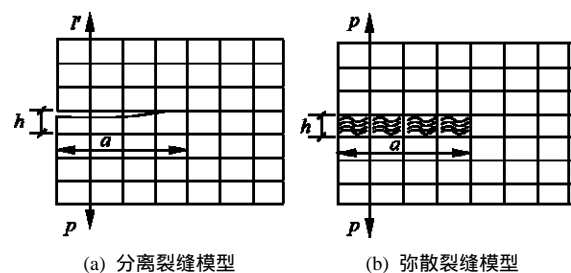


图1 2种裂缝模型

Fig.1 Two kinds of crack model

对于地质条件比较复杂的工程,水力压裂的目标是对储层进行体积改造,并尽可能在储层中获得大范围的裂隙网络,比如页岩气开采。如果采用分离裂缝进行水力压裂过程模拟,往往只能考虑少数裂缝的力学行为,并预设裂缝的开裂位置及扩展路径,导致计算量大,模拟得到的结果也不能用于指导工程。鉴于分离裂缝在上述工程应用中的不足,本文引进弥散裂缝(见图1(b))对水力压裂进行初步研究^[14]。弥散裂缝相比于分离裂缝最大的优势体现

在计算过程中避免网格重划分，不需要预设起裂位置和扩展路径来模拟裂缝的扩展过程；其次弥散裂缝可以模拟多裂缝并且计算效率高，实现了对水力压裂过程中裂隙网络的模拟，为评估页岩体积改造的效果提供参考。

最早有人提出弥散式裂缝^[15-16]，即假定裂缝均匀地分布在一定区域内，平行于拉应力方向上的材料弹性模量为 0，且不传递剪力，而垂直方向上的材料弹性模量保持不变。随后一些学者在此模型基础上以应变软化代替材料的脆性破坏，并引入折减后的剪切模量来反映裂缝开裂后的咬合作用。但是在直接应用基于强度理论和试验应变的软化曲线进行数值计算时，存在着结果对网格的敏感性。基于上述困难，又有人提出钝断裂带模型，将断裂能弥散于表征裂缝的断裂带宽度范围内，并将断裂能作为混凝土、岩石材料的一个基本力学参数，通过调整应力-应变软化曲线以适应不同的离散网格，使断裂能保持唯一不随网格而发生改变^[15-16]。弥散裂缝可以解决传统的岩石强度准则研究岩石的断裂行为时遇到尖端应力奇异性，产生离散网格敏感性问题的困扰，以及经典的线弹性断裂力学不能够很好地反映岩石的非线性损伤、应变软化等力学特征，并且需要预设裂缝来计算应力强度因子和断裂韧度的不足。目前在国内弥散裂缝多应用于研究混凝土的开裂^[17-19]。

在弥散式裂缝模型中，当某点在加载过程中满足失效准则时，开裂方向由该点的主应力方向所决定。根据裂缝在扩展过程中其方向是否保持不变可分为固定裂缝模型、旋转裂缝模型等。本文采用基于增量关系的固定裂缝模型。根据如图 2 所示的裂缝，本构关系^[16]表示为

$$\Delta\sigma = [D^{co} - D^{co}N(D^{cr} + N^T D^{co}N)^{-1}N^T D^{co}N]\Delta\varepsilon \quad (1)$$

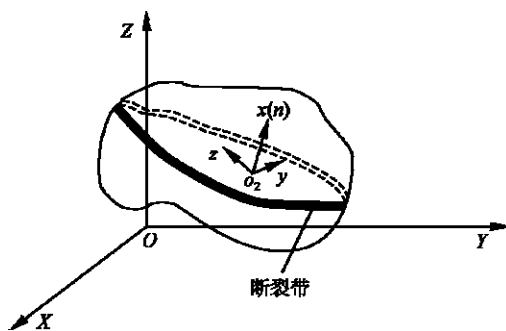


图 2 裂缝局部坐标系示意图

Fig.2 Sketch of crack in local coordinate system

式中： D^{co} 为弹性刚度矩阵， D^{cr} 为开裂刚度矩阵， N 为坐标转换矩阵。

由于弥散式裂缝模型假定裂缝均匀地分布在局部区域内，因此在图 3 中域 Ω_2 内带有弥散裂缝岩石的宽度 a 与裂隙实际宽度 b 存在以下关系：

$$b = e_i^{cr} a \quad (2)$$

式中： e_i^{cr} 为开裂应变。

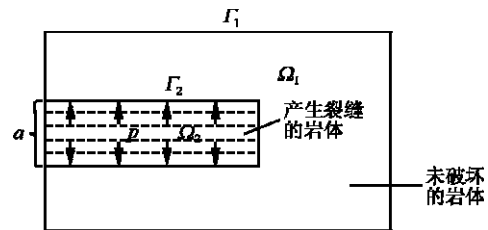


图 3 弥散裂缝模型边界的求解域

Fig.3 Solution domain of boundary of smeared crack model

3 水力压裂中的流固耦合过程

深部岩层中的水力压裂是一个涉及到应力场、渗流场、温度场、化学场等多场耦合的复杂过程，目前研究较多的是应力场和渗流场之间的流-固耦合。虽然国内外学者从 20 世纪 60 年代就开始研究流-固耦合问题，但由于这一问题的复杂性，目前所取得的成果仍难以很好地解决实际工程问题。

3.1 基于弥散式裂缝的应力渗流耦合方程

(1) 岩体中渗流场和应力场之间的相互作用

岩层中流体渗流对裂隙岩体的影响主要体现在 3 个方面：物理作用、化学作用、力学作用。这些作用都会对岩体的结构、力学性能造成影响^[20]。在力学作用中，静水压力垂直于裂隙壁，使裂隙壁产生垂向变形；动水压力平行于裂隙壁，使裂隙产生切向变形^[20-21]。

岩体中的应力使其产生变形，改变裂隙张开度、流体的流速以及压力在裂隙中的分布。这关系一般从 3 个方面入手^[22]：直接通过试验探求渗透性和应力的经验关系式；根据裂隙面的法向变形公式，推导渗流与应力之间的关系；提出某种理论概念模型解释渗流与应力的耦合关系。

基于弥散式裂缝研究流-固耦合问题时，裂隙岩体中的渗流和力学分析均基于等效连续介质力学理论，在分析过程中不需要弄清每条裂隙的准确位置和力学水力特性，这对解决不易获得单个裂隙数

据的工程问题是一个非常有效的方法。

(2) 等效连续介质岩体中流-固耦合模型

根据图3所示模型边界的求解域,在域 Ω_1 内,岩体系统的平衡微分方程为

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (i, j = x, y, z) \quad (3)$$

式中: f_i 为岩体的内质量力。

几何方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (i, j = x, y, z) \quad (4)$$

外边界 Γ_1 力学边界条件为

$$\sigma_{ij}l_j = F_i \quad (i, j = x, y, z) \quad (5)$$

式中: F_x, F_y, F_z 分别为边界上 x, y, z 方向上的面力; l_x, l_y, l_z 分别为边界上 x, y, z 方向法向矢量方向余弦。

对于渗流分析,把裂隙岩体中裂隙孔隙的渗透性平均到特定的岩体区域内,从而将裂隙岩体看作非均质各向异性的连续介质,得到渗透张量 k_{ij} ,根据立方定理,利用裂隙几何参数可确定 n 组无限延伸裂隙的等效渗透张量^[23]:

$$[K] = \sum_{m=1}^n \frac{ga_m^2}{12\nu b_m} \begin{bmatrix} 1-(n_x^m)^2 & -n_x^m n_y^m & -n_x^m n_z^m \\ -n_y^m n_x^m & 1-(n_y^m)^2 & -n_y^m n_z^m \\ -n_z^m n_x^m & -n_z^m n_y^m & 1-(n_z^m)^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: a_m 为裂隙宽度, b_m 为裂隙间距, g 为重力加速度, ν 为流体的运动黏滞系数, n_x, n_y, n_z 为裂隙面法向与 x 轴, y 轴, z 轴的余弦值。

采用经典的孔隙介质理论分析岩石的渗流特性,假设是饱和渗流,裂隙水流为恒定流,由渗流场的状态方程可得等效连续介质的渗流方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{dH}{dx} + k_{xy} \frac{dH}{dy} + k_{xz} \frac{dH}{dz} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yx} \frac{dH}{dx} + k_{yy} \frac{dH}{dy} + k_{yz} \frac{dH}{dz} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zx} \frac{dH}{dx} + k_{zy} \frac{dH}{dy} + k_{zz} \frac{dH}{dz} \right) = 0 \quad (7)$$

内边界 Γ_2 上力学边界上只考虑渗透静水压力 $p = \gamma H$ (γ 为水的容重, H 为裂隙中水头),方向与裂隙面的法向方向一致:

$$\sigma_{ij}l_j = P_i \quad (i, j = x, y, z) \quad (8)$$

渗流采用给定水头边界条件,即 Γ_2 上每点的水头是已知的,即

$$H(x, y, z, t) = H_1(x, y, z, t) \quad (9)$$

$H(x, y, z, t)$ 表示内边界 Γ_2 上点在 t 时刻的水头, $H_1(x, y, z, t)$ 为 t 时刻确定在 Γ_2 上的已知函数。

将式(1)~(9)联合起来,即可得基于弥散式裂缝的渗流场和应力场耦合的数学模型。

3.2 基于弥散式裂缝的应力渗流耦合的求解方法

本文的耦合模型是基于等效连续介质力学,通过岩体变形和流体渗透压力,利用间接耦合法对两场进行分析计算。对于泵施加的一个水压,求解方法如下:

- (1) 在地应力和水压作用下求得岩体应力场。
- (2) 利用五参数破坏准则^[24-25],当单元内的应力状态满足失效准则时,将在垂直于主应力方向上产生裂缝。

(3) 弥散裂缝是以应变软化替代开裂,宽度 b 由垂直于裂缝方向上单元的总变形减去弹性变形得到。

(4) 根据裂缝的宽度和渗透系数的关系 $k = \gamma b^2 / (12\mu)$,赋予破坏单元新的渗透系数。

(5) 在新的渗透系数下进行渗流分析,得出每个破坏单元的水头值 H ,从而计算出裂隙中流体对岩体的渗透压力 $p = \gamma H$ 。

(6) 在渗透压力条件下进行应力分析。若新的单元内出现裂缝,则重复第(3)~(6)步;若没有新的单元出现裂缝,进行第(7)步。

(7) 根据裂缝变形计算破坏单元新的渗透系数,进行渗流场分析得出水头值,在新的渗透压力作用下进行应力场分析。若有新的裂缝出现,则重复第(3)~(6)步,若没有新的裂缝出现,则认为裂缝在这个压力值下不再扩展,进行第(8)步。

(8) 根据裂隙变形计算出新的渗透系数 K_i ,进行渗流分析,得出新的水头再进行应力分析得出渗透系数 K_{i+1} ;若 $|K_{i+1} - K_i|$ 收敛,则计算结束;若不收敛重复步骤(8)直至 $|K_{i+1} - K_i|$ 收敛。

流-固耦合的计算流程如图4所示。在上述计算分析过程中,裂缝可以在高度、长度、宽度3个方向扩展,且不需要预设起裂位置和扩展路径。目前大部分的渗流分析中,连续介质模型一般采用一个渗透张量,即使考虑了岩石的非均质性,也只是把岩层简单的划分成几个渗透张量不同的区域,没有真正体现出非均质性。本文的数值方法中每个单元的渗透张量都是根据裂隙的张开度确定,真实反映了裂隙岩体渗流的各向异性和非均质性。

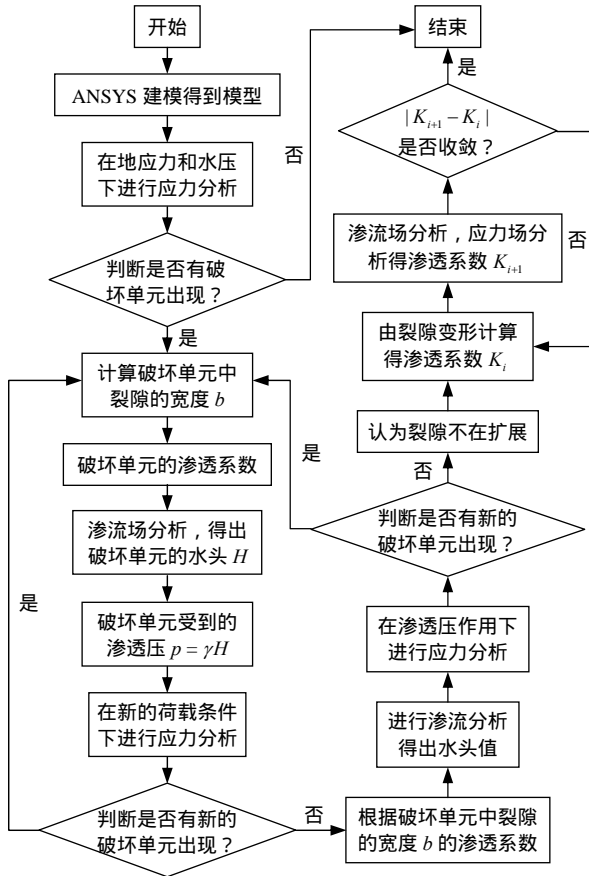


图 4 流固耦合的计算流程图

Fig.4 Calculation flow chart of solid-fluid coupling

4 水力压裂的试验研究和本文数值分析对比

4.1 水力压裂的试验研究

(1) 试验装置及试验步骤

水力压裂试验采用的压裂试验装置是中国科学院武汉岩土力学研究所设计组装的, 试验装置由大型真三轴物理模型试验系统、泵压系统、DISP 声发射测试系统组成。

制备试样中, 将混凝土试样切割加工成立方块试样(尺寸 30 cm×30 cm× 30 cm), 沿垂直层理方向钻孔, 孔眼直径为 24 mm, 孔深 17 cm, 将预制割缝钢管(内径 15 mm, 外径 20 mm, 长 17 cm, 割缝范围为 135 ~ 165 mm)可按一定角度埋入钻孔中, 割缝处用环氧树脂封堵(见图 5)。

将立方块试样放入真三轴加载室内, 6 个面通过加载板与传载板紧密接触, 在试样的上下左右 4 个面非对称地各安装 2 个探头, 共 8 个。在钢管入口处注入红色示踪剂, 然后与泵压系统连接起来, 如图 6 所示。



图 5 试样及钢管

Fig.5 Specimen and steel tube

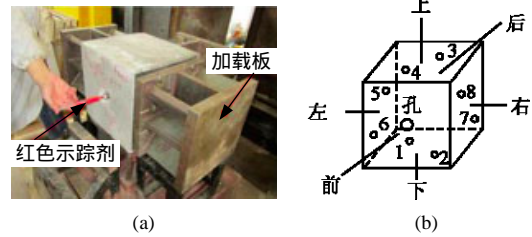


图 6 试样装载及声发射探头布置

Fig.6 Assembling specimen and the layout of acoustic emission sensor

在试件的前后方向施加竖向主应力 σ_v , 左右方向施加水平最小主应力 σ_h , 上下方向施加水平最大主应力 σ_H 。缓慢施加三向地应力, 直到施加到预设值, 维持稳定。利用泵压系统以恒定排量向试样钢管内注水, 泵压系统和声发射系统同步开始采集数据, 当试样承受的应力状态达到破坏强度时, 试样破裂。继续施加水压, 直至泵压迅速下降且试件表面有大量水溢出时, 试验结束。

(2) 试验结果和分析

利用上述方法, 混凝土试样进行压裂试验, 定性分析每块试件的压裂过程, 所采用的试验参数和得出的起裂压力如表 1 所示。

表 1 模拟压裂试验的参数和起裂压力

Table1 Parameters of simulation for fracturing and crack pressure

竖向应力/MPa	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa	泵注排量/(mL · s ⁻¹)	起裂压力/MPa
10	8	6	1	12.3

泵压 - 时间曲线

混凝土压裂试验过程中泵压 - 时间曲线如图 7 所示。混凝土在注水的前期阶段液体滤失较多, 井底积累的压力很小, 井壁上的混凝土没有破裂。随着高压泵将水注入井中, 液体的注入量渐渐大于滤失量, 液体在井中积累起的压力值超过一定值时, 即 12.7 MPa, 井壁上的混凝土破裂, 井筒中的部分

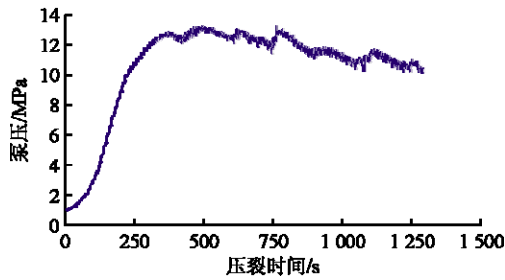


图 7 混凝土试样的泵压-时间曲线

Fig.7 Pump pressure-time curve for concrete specimen

液体快速充填到新产生的裂隙中，导致压力陡然下降到 12.2 MPa。此时由于压力的下降，裂缝停止继续向前扩展。随着继续向井中注入液体，井内的压力很快再次上升，当裂缝尖端处积累的压力达到一定值时，产生二次起裂，裂缝再次向前扩展，但压力又迅速下降，裂缝停止扩展。在这一过程混凝土表现出了明显的脆性性质。形成了“产生裂缝、压力下降、继续注水、压力上升、再次破裂”的循环过程，直至试样完全被压裂。试样破裂后，液体通过穿过试样界面的裂缝发生滤失，但由于地应力和流动阻力的存在，压力下降较缓慢。

压裂后试样的分析

压裂试验结束后，混凝土表面和内部的裂缝分布如图 8 所示。从试样压裂破裂后裂缝的形态可以看出，垂直于最小主应力方向的裂缝贯穿试件，而平行于最小主应力方向也会产生裂缝，但没有将试

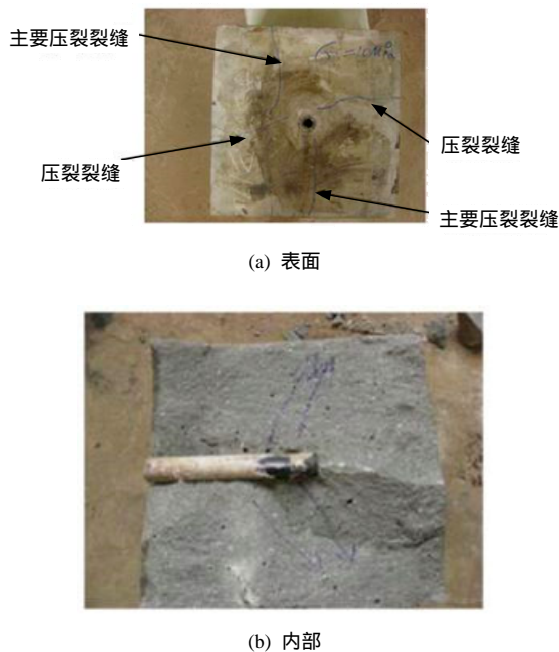


图 8 试验后混凝土裂缝分布

Fig.8 Fracture distribution of concrete specimen after text

件压开，这主要是因为主要裂缝贯穿试样后，流体就会沿着这条裂缝渗出，另一个方向上裂缝内的应力不再增加，裂缝停止扩展。

4.2 水力压裂的数值分析

基于弥散式裂缝模型，本文在 ANSYS 中分别建立应力场和渗流场，通过两场之间的相互影响更新物理参数条件，实现对水力压裂中流固耦合的模拟。为了能够比较数值和试验的结果，计算模型参照试样尺寸建立，如图 9 所示。计算中混凝土的物理力学参数如表 2 所示。

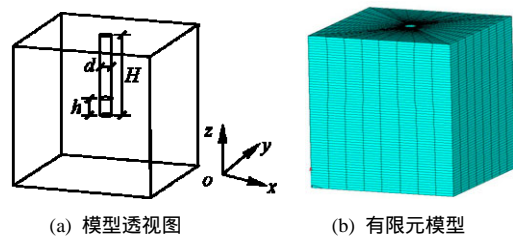


图 9 水力压裂数值分析的计算模型

Fig.9 Calculation model of hydraulic fracturing numerical analysis

表 2 计算模型混凝土的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical properties of concrete in numerical model

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg · m ⁻³)	抗拉强度/MPa	渗透系数/(m · s ⁻¹)
30	0.2	2 400	2	3×10 ⁻¹⁰

在水压作用下，井壁周围的混凝土出现应力集中情况。当施加的水压达到 14.4 MPa 时，井壁上混凝土内的应力超过其抗拉强度导致混凝土破裂产生裂缝(图 9 中圆圈表示该单元内产生裂缝)。

裂缝产生后，混凝土在渗透压的作用下，内部裂缝沿着水平方向和竖直方向上扩展。混凝土内部裂缝扩展的俯视图(沿着图 9 中 z 方向)和正视图(沿着图 9 中 y 方向)如图 10 和 11 所示(计算结果中单元内出现圆圈则表示这个单元中产生了裂缝)。

井壁处混凝土的初始起裂方向平行于 x 轴，即垂直于最小水平地应力方向，如图 10(a)所示。随着裂缝沿着 x 方向继续向前扩展，井底附近的混凝土破坏严重，岩石的受力比较复杂，不受地应力大小的控制，井壁周围各个方向上出现微裂缝，这些裂缝分叉明显，向不同的方向扩展，并渐渐连通在一起。但在远离井筒的位置，裂缝扩展方向主要受地应力影响，平行于最大水平地应力方向，这阶段主裂缝扩展地较快，如图 10(b)所示。在渗透压力的作

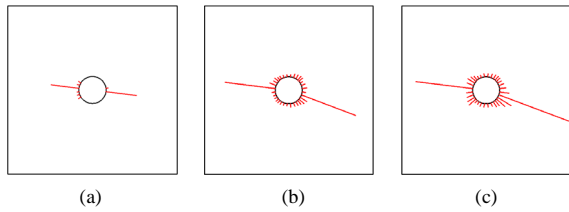


图 10 混凝土内部裂缝扩展俯视图

Fig.10 Top view of crack propagation within concrete

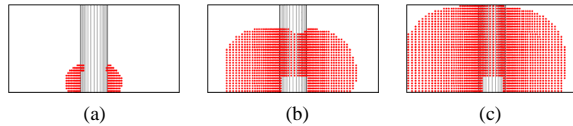


图 11 混凝土内部裂缝扩展正视图

Fig.11 Front view of crack propagation within concrete

用下，主裂缝扩展到了试样表面，如图 10(c)所示。结合图 10(c)和 11(c)可以看出在 x 方向上混凝土内部形成了一条贯穿型主裂缝。

4.3 水力压裂试验方法和数值分析的比较

(1) 起裂压力

将水力压裂模型简化为平面应力问题，可得破裂压力的理论解^[26]为

$$p_0 = 3\sigma_2 - \sigma_1 + T_0 \quad (10)$$

式中： p_0 为破裂压力， σ_2 为最小水平地应力， σ_1 为最大水平地应力， T_0 为岩石抗拉强度。

由表 1 和 2 可得，混凝土在水力压裂力学模型中的平面应变理论解分别为 31, 12 MPa，将 3 种解进行比较，可以得出水力压裂过程中，试验解、数值解和理论解得到的井壁起裂压力分别为 12.7, 14.4 和 12.0 MPa。

混凝土的数值解大于理论解，这是因为在实际水力压裂模型中，只有靠近井底的一小段范围内施加了水压，如图 12(a)所示，理论解是建立在平面应变的基础上求得的没有考虑 A 处的岩层对 B 处岩石

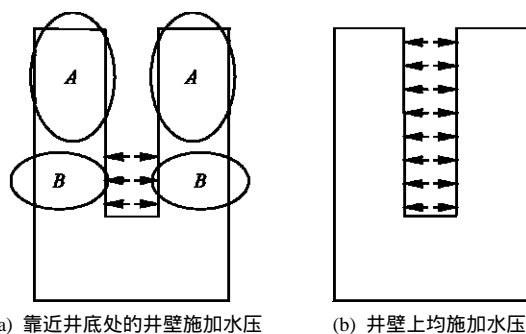


图 12 井壁上水压分布示意图

Fig.12 Pressure distribution on the wall

开裂的抑制作用，当把井壁均施加水压，如图 12(b)所示，此时数值模拟求得的起裂压力为 12.6 MPa，与理论解基本一致。相比较试验解，数值解没有考虑压裂液在井壁处的滤失，而流体滤失会导致破裂压力偏小^[27]，所以试验解小于数值解。

(2) 裂缝扩展过程

由试验和数值的结果可以得出，混凝土在水力压裂过程中，井壁的初始开裂方向均是垂直最小水平地应力方向。裂纹在扩展过程中，虽然在别的方向上也会产生裂缝，但主裂缝的总体扩展方向是不变的，最后形成贯穿型裂缝。

5 结 论

(1) 针对分离裂缝模拟水力压裂的缺陷，提出基于弥散型裂缝模拟水力压裂过程。在考虑裂隙岩体中渗流场和应力场相互影响的基础上，得到基于弥散裂缝的应力场和渗流场耦合的数学模型。

(2) 分别用试验方法和数值方法分析了混凝土的水力压裂过程。由 2 种方法得到的破裂起裂值基本一致，模拟裂缝扩展的过程基本吻合，即裂缝沿着水平最大地应力方向扩展，最后裂缝贯穿整个试件。因此，本文提出的基于弥散裂缝对水力压裂进行数值模拟是可行的，但还需进一步深化。当考虑在页岩中进行水力压裂时，需充分考虑页岩的物理力学特性及开采的特殊性。

(3) 水力压裂是个极其复杂的过程，文中基于弥散裂缝的耦合模拟方法也只是初步研究，考虑的影响因素较少，利用该方法模拟现场水力压裂还需进一步的研究。

参考文献(References)：

[1] 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.

[2] LEI Z, MICHAEL Z H. 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(2): 370-380.

[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 Yintong, YANG Chunhe, JIA Changgui, 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.(in Chinese))
- [4] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 868 – 872.(CHEN Mian, PANG Fei, JIN Yan. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 868 – 872.(in Chinese))
- [5] YASHWANTH C, CAMILO M, CARL S, et al. An experimental investigation into hydraulic fracture propagation under different applied stresses in tight sands using acoustic emissions[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 108(1) : 151 – 161.
- [6] PEKINS T K, KEN L R. Width of hydraulic fracture[J]. JPT, 1961, 13(9) : 937 – 949.
- [7] NORDGREN R P. Propagation of vertical hydraulic fracture[J]. Soc.Pet.Eng.J, 1972, 12(4) : 306 – 314.
- [8] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008 : 178 – 181.(CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. Petroleum engineering rock mechanics[M]. Beijing : Science Press, 2008 : 178 – 181.(in Chinese))
- [9] 张广明, 刘合, 张劲, 等. 水平井水力压裂的三维有限元数值模拟研究[J]. 工程力学, 2011, 28(2) : 101 – 106.(ZHANG Guangming, LIU He, ZHANG Jin, et al. Three-dimensional finite element numerical simulation of horizontal well hydraulic fracturing[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2) : 101 – 106.(in Chinese))
- [10] 张汝生, 王强, 张祖国, 等. 水力压裂裂缝三维扩展 ABAQUS 数值模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(6) : 69 – 72.(ZHANG Rusheng, WANG Qiang, ZHANG Zuguo, et al. Research of ABAQUS numerical simulation of 3D fracture propagation in hydraulic fracturing process[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2012, 34(6) : 69 – 72.(in Chinese))
- [11] 薛炳, 张广明, 吴恒安, 等. 油井水力压裂的三维数值模拟[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(11) : 1 322 – 1 326.(XUE Bing, ZHANG Guangming, WU Heng'an, et al. Three-dimensional numerical simulation of hydraulic fracture in oil wells[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(11) : 1 322 – 1 326.(in Chinese))
- [12] LECAMPION B, DETOURNAY E. An implicit algorithm for the propagation of a hydraulic fracture with a fluid lag[J]. Compute Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(49) : 4 863 – 4 880.
- [13] LECAMPION B. An extended finite element method for hydraulic fracture problems[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2009, 25(2) : 121 – 133.
- [14] HU Y J, CHEN G L, CHENG W P, et al. Simulation of hydraulic fracturing in rock mass using a smeared crack model[J]. Computers and Structures, 2014, 137(1) : 72 – 77.
- [15] 张楚汉. 论岩石、混凝土离散 – 接触 – 断裂分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2) : 217 – 235.(ZHANG Chuhan. Discrete-contact-fracture analysis of rock and concrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2) : 217 – 235.(in Chinese))
- [16] 张楚汉, 金峰. 岩石和混凝土离散 – 接触 – 断裂分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008 : 277 – 278.(ZHANG Chuhan, JIN Feng. Discrete contact fracture analysis of rock and concrete[M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2008 : 277 – 278.(in Chinese))
- [17] 姜庆远, 叶春燕, 刘宗仁. 弥散裂缝模型的应用探讨[J]. 土木工程学报, 2008, 41(2) : 81 – 85.(JIANG Qingyuan, YE Chunyan, LIU Zongren. Investigation on applying the smeared crack model[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(2) : 81 – 85.(in Chinese))
- [18] 周元德, 张楚汉, 金峰. 混凝土开裂的三维非线性数值模拟[J]. 清华大学学报, 2003, 43(11) : 1 542 – 1 545.(ZHOU Yuande, ZHANG Chuhan, JIN Feng. Three-dimensional nonlinear numerical model for concrete fracture analysis[J]. Journal of Tsinghua University, 2003, 43(11) : 1 542 – 1 545.(in Chinese))
- [19] 龙渝川, 张楚汉, 周元德. 基于弥散与分离裂缝模型的混凝土开裂研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3) : 80 – 84.(LONG Yuchuan, ZHANG Chuhan, ZHOU Yuande. A comparative study for concrete fracture analysis using smeared and discrete-crack model[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3) : 80 – 84.(in Chinese))
- [20] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002 : 47 – 49.(CAI Meifeng. Rock Mechanics and Engineering[M]. Beijing : Science Press, 2002 : 47 – 49.(in Chinese))
- [21] 易顺民, 朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2005 : 101 – 105.(YI Shunmin, ZHU Zhende. Introductory theory for damage mechanics of fractured rock mass[M]. Beijing : Science Press, 2005 : 101 – 105.(in Chinese))
- [22] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007 : 224 – 225.(ZHOU Zhifang. Theory on dynamics of fluids in fractured medium[M]. Beijing : Higher Education Press, 2007 : 224 – 225.(in Chinese))
- [23] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005 : 118 – 120.(ZHANG Youtian. Rock hydraulic and engineering[M]. Beijing : China Water Power Press, 2005 : 118 – 120.(in Chinese))
- [24] 陈惠发, 萨里普 A F. 混凝土和土的本构方程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004 : 33 – 39.(CHEN Huifa, SALEEB A F. Constitutive equations for materials of concrete and soil[M]. Beijing : China Architecture and Building Press, 2004 : 33 – 39.(in Chinese))
- [25] 赵鹏, 谢凌志, 熊伦. 无煤柱开采条件下煤岩体支承压力的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12) : 2 029 – 2 034.(ZHAO Peng, XIE Lingzhi, XIONG Lun. Numerical simulation of abutment pressure in coal for non-pillar mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12) : 2 029 – 2 034.(in Chinese))
- [26] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京: 科学出版社, 2010 : 252 – 254.(ZHAO Yangsheng. Multi-field coupling theory of porous media and engineering application[M]. Beijing : Science Press, 2010 : 252 – 254.(in Chinese))
- [27] 黄荣樽. 水力压裂裂缝的起裂和扩展[J]. 石油勘探与开发, 1998, (5) : 63 – 75.(HUANG Rongzun. Initial crack and propagation of hydraulic fracture[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, (5) : 63 – 75.(in Chinese))