

文章编号: 1673-9469(2019)03-0051-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.010

## 基于 PFC-FLUENT 联合开展岩体水力劈裂微观机理分析

徐 硕<sup>1,2</sup>, 陈 奇<sup>1,2</sup>, 张永进<sup>3</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 3. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 为研究岩体水力劈裂的致灾过程, 揭示水力劈裂微观机理, 采用 VB 编译平台, 实现 PFC、SURFER、GAMBIT、FLUENT 商业软件的调用, 并依托 FORTRAN 编译子程序实现软件间数据信息交换及特定功能, 完成岩体水力劈裂三维分析平台的构建。随后, 利用该平台建立与文献中相同的岩体水力劈裂圆筒模型, 并与试验结果比对, 验证了该平台研究岩体水力劈裂的可行性。最终, 以某一输水隧洞为例, 依托该平台开展输水隧洞裂纹扩展研究, 分析高内水压下围岩裂隙萌生、扩张、延伸、贯通的破坏过程。结果表明: 该平台能较精细地揭示隧洞衬砌水力劈裂过程并动态获取相应裂隙流场分布特征, 针对该隧洞模型, 衬砌外圍岩压力大于 0.6 MPa 时方能确保当前高压内水作用下隧洞衬砌安全。

**关键词:** PFC-FLUENT; 水力劈裂; 裂隙; 分析平台

**中图分类号:** TU45

**文献标识码:** A

## Microscopic Mechanism Analysis of Hydraulic Fracturing of Rock Mass Based on Coupled PFC-FLUENT Method

XU Shuo<sup>1,2</sup>, CHEN Qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongjin<sup>3</sup>

(1.Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2.College of Civil and Transportation Engineering, Hohai university, Nanjing, Jiangsu 210024; 3 Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou, Zhejiang 310000)

**Abstract:** In order to study the disaster-causing process of hydraulic fracturing of rock mass and reveal the microscopic mechanism of hydraulic fracturing, three-dimensional analysis platform for hydraulic fracturing of rock mass is performed, using VB compilation platform, which can finish the implementation of different business soft-wares including PFC, SURFER, GAMBIT and FLUENT, and achieving data information exchange and specific functions between different software based on FORTRAN. Subsequently, the reliability of the platform is verified by establishing the same hydraulic fracturing cylinder model of rock mass as in the literature and comparing with the test results. Finally, depending on the platform, a research on crack growth of outlet tunnel is carried out to analyze the failure process of crack initiation, expansion, extension and penetration in surrounding rock under high internal water pressure. The result shows that the platform can accurately reveal the hydraulic fracturing process of tunnel lining and dynamically obtain the distribution characteristics of corresponding fracture flow field. For this tunnel model, only when the pressure of the surrounding rock outside the lining is greater than 0.6MPa can the lining of the tunnel be safe under the action of the current high-pressure internal water and this conclusion has important guiding value for the design of outlet tunnel.

**Key words:** PFC-FLUENT; hydraulic fracturing; crack; analysis platform

收稿日期: 2019-04-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC1502602); 国家自然科学基金资助项目(51779083); 浙江省水利厅科技项目(RA1503)  
作者简介: 徐硕(1994-), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程渗流。

水力劈裂属于渗流应力耦合范畴<sup>[1]</sup>。当前,众多学者对渗流应力耦合下的岩体水力劈裂问题进行了研究,并取得了相关成果<sup>[2-9]</sup>。梳理岩体水力劈裂的研究现状,可知其趋势从宏观向细观,由单一方法向多方法、多理论联合方向发展。鉴于离散元法在非连续、大变形问题模拟上的独特优势,且有限元法对流场求解较为成熟,因此提出依托程序开发语言,构建宏-细观尺度三维渗流应力耦合分析平台,实现对渗流应力耦合下岩体水力劈裂宏、细观尺度力学行为相关问题的精确分析。

### 1 岩体水力劈裂三维耦合分析平台构建

#### 1.1 分析平台构建

PFC-FLUENT 联合开展岩体水力劈裂求解总体可分为下述两步,第一步为依托颗粒流软件建立岩体模型并构建裂隙数值模型以供流场分析研究,即 PFC 至 FLUENT;第二步是将裂隙渗流分析所得应力反馈

至岩体模型,也即 FLUENT 至 PFC。为实现上述过程,依托 Fortran 编辑接口实现 SURFER、GAMBIT、FLUENT、PFC 商用软件数据共享,搭建联合分析平台;通过 VB 语言调用 WINDOWS 系统中的 API 函数,编辑可视化页面,实现内部程序的自动运行,从而对三维岩体裂隙的水力劈裂问题进行描述(图 1)。

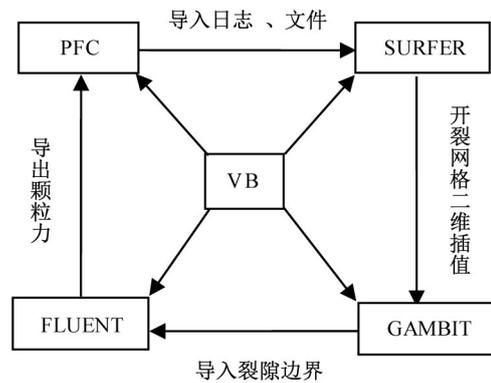


图 1 PFC-FLUENT 联合求解动态计算过程图  
Fig.1 PFC-CFD joint solution dynamic calculation process diagram

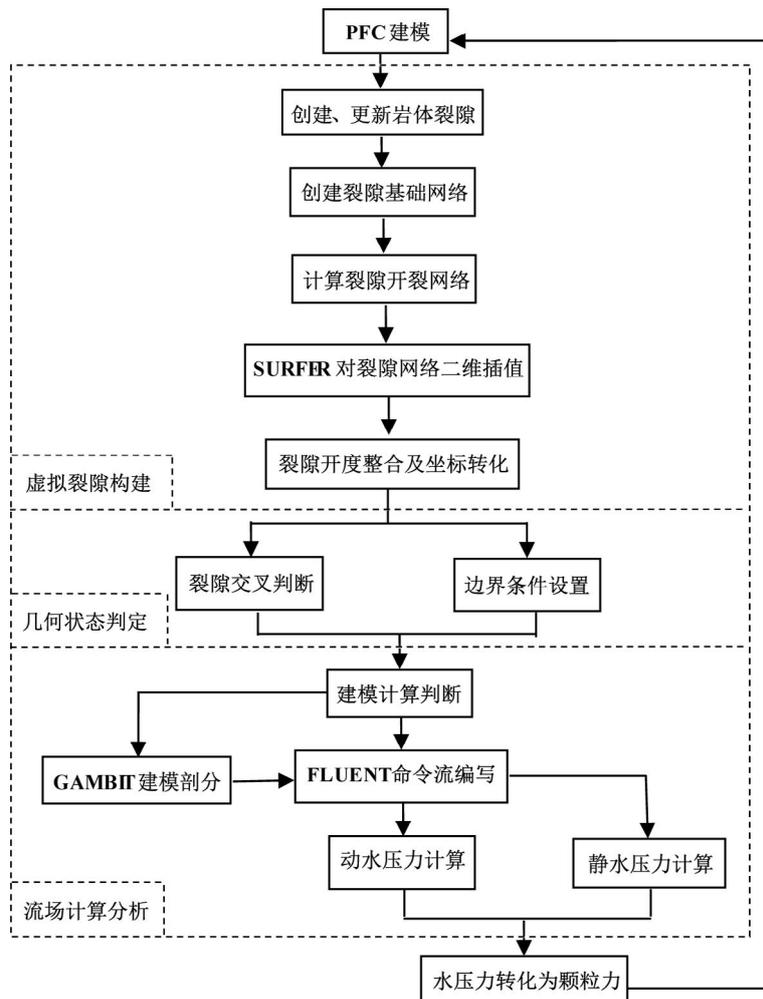


图 2 分析平台程序结构图  
Fig.2 Program structure diagram of analysis platform

图2表示分析平台的程序结构图，主要分为三个阶段：虚拟裂隙构建阶段、裂隙几何状态判定阶段、流场计算分析阶段。

### 1.2 岩体细观模型构建

离散元因其对非连续、大变形及裂纹扩展问题的适应性而在岩体开裂、隧洞围岩失稳等过程的分析中具有独到的优势。本文宏-细观耦合分析平台依托于 PFC 建立的类岩体模型，因此首先建立如图3所示隧洞模型。

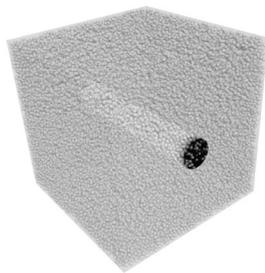


图3 隧洞细观颗粒模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of the microscopic particle model

### 1.3 虚拟裂隙设置

#### 1.3.1 初始虚拟裂隙设置

为调和裂隙长度、宽度及开度方向尺度差距，引入虚拟裂隙概念。虚拟裂隙为自定义的单条或若干条特定位置、形状、尺寸、偏转角度的裂隙，裂隙各项信息与 PFC 中颗粒无关。虚拟裂隙不实际存在于模型中，但依托分析平台可在相应位置对关联颗粒施加压差力及粘滞力。虚拟裂隙可实现开裂、延伸，裂隙的开度通过颗粒的位移值累加后进行二维插值实现，裂隙延伸通过判定相邻颗粒位移是否超过设定阈值，虚拟裂隙与颗粒的关系如图4所示。

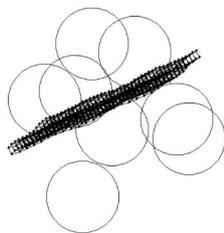


图4 虚拟裂隙与颗粒的关系图

Fig.4 Diagram of the relationship between virtual fractures and particles

#### 1.3.2 裂隙基础模型

为尽可能反映裂隙形态，基础裂隙生成选择 Barton 的 JRC 曲线。将文献 [10] 中所述的 JRC 曲线

由 10 cm 扩展为 1 m，裂隙最大波动值相应扩大 10 倍。目标裂隙是三维曲面，因此将 JRC 曲线在裂隙平面的两个法向方向上按照同一粗糙度铺开建模形成三维裂隙，JRC 取点与裂隙基础模型创建如图5所示。

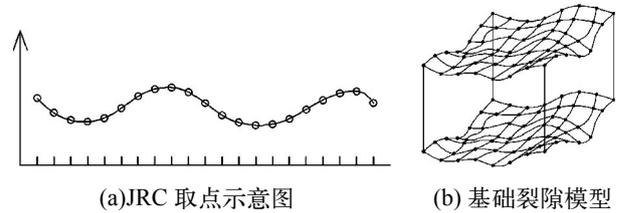


图5 JRC 取点与裂隙基础模型图

Fig.5 JRC pick point and fracture foundation model diagram

#### 1.3.3 裂隙开裂模型

平台运行中，单一分析循环结束后，渗流应力耦合作用下模型中颗粒位置均将发生调整，即每个循环裂纹形态均有可能发生变化。为获得裂隙扩张开度值，利用 SURFER 提取裂隙“上表面”和“下表面”上所有颗粒的位置并将其转换至裂隙平面进行单循环颗粒位置变化计算值的二维插值以获取裂隙的准确形态。

### 1.4 FLUENT 中流场分析

#### 1.4.1 GAMBIT 流场网格划分

非封闭裂隙导入 FLUENT 前，需完成裂隙的几何建模。GAMBIT 具有强大的建模剖分功能，支持命令流建模，通过编写程序生成 GAMBIT 建模命令流，可完成参数自动建模。模型建立后需要对模型的边界条件进行设置，最终导出 mesh 文件供 FLUENT 软件调用。

裂隙的建模、边界设置、剖分等步骤均在 GAMBIT 中完成，FLUENT 仅需设置相应水力条件即可。

#### 1.4.2 水压力的计算与控制

水压力在模型中区分为静水压力和动水压力。分析时，首先判定需施加静水压力的裂隙，通过对裂隙上下表面相邻颗粒施加压力即可。对于动水压力，由于 FLUENT 软件输出的孔隙压力和流速无法在 PFC 模型中直接转化颗粒所受渗透力，利用 FORTRAN 编写程序，读取 FLUENT 软件生成的孔压文件，提取裂隙上下表面网格节点孔压及近裂隙面流速，将其转化为垂直于裂隙边界的法向力及沿裂隙面的切向力，最终获得作用在颗粒上的渗透力<sup>[11]</sup>。采用 FISH 语言编译成可执行文件，导入 PFC

完成该时步分析即可实现单次渗流应力耦合分析。

### 2 岩体水力劈裂三维耦合分析平台的验证

为验证前文所提出的岩体水力劈裂三维耦合分析平台的正确性,对詹美礼和岑建<sup>[12]</sup>的室内试验进行重现,建模中涉及到的宏观参数如表1所示。

表1 室内试验宏观参数

Tab.1 Macroscopic parameters of laboratory test

抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	岩体密度 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
12.6	17.5	1.28	2 600	0.219

采用平行黏结单元模拟岩石,通过调试选取下表面观参数(表2)来进行PFC模型构建。

表2 PFC模型中细观参数

Tab.2 Macroscopic parameters of PFC model

粒径 /mm	颗粒相对密度	黏结刚度 /GPa	黏结强度 /GPa	颗粒刚度 /GPa	摩擦因数	黏结半径放大下倍数
1.6	2.6	3.2	0.5	3.2	0.6	1

参照文献中的试验模型,建立内径0.05 m,外径0.1 m,高度为0.3 m的PFC模型,如图6所示。模型的边界外侧施加3.0 MPa的围压,边界内部依次施加3.3、3.6、3.9和4.1 MPa的内水压力荷载。每级荷载平台循环10次,共2 000步,每步时间为0.000 01 s。

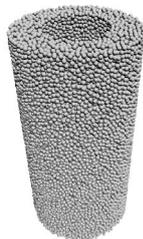


图6 PFC颗粒模型图

Fig.6 PFC particle model diagram

在各级压力状态下的结果如图7所示,由于模型是三维的,为了更好地显示裂隙,防止颗粒间相互遮盖,图中仅显示颗粒球心位置。前两级压力状态下由于内压力未突破模型的抗裂强度,裂隙扩张效果不明显,当水压力到达第三级时开始出现明显

的开裂。但随着时间推进,开裂状况趋于缓解。施加第四级应力后,裂隙发生开裂并贯通。

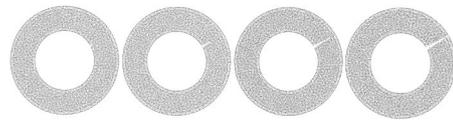
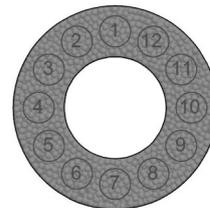


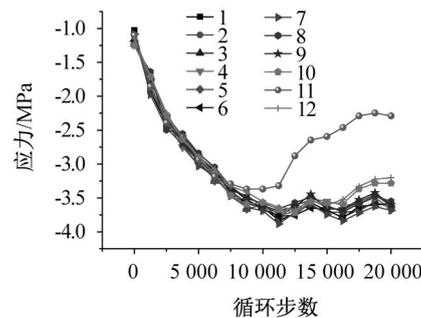
图7 各级压力状态下颗粒形心图

Fig.7 Particle centrogams at various pressures

为了更好地了解模型中的应力状态。在模型中设置应力监测区域以观察模型内的应力状态,图8为监测区域的布置及各区域应力状态。随着荷载逐级递增,模型内部应力状态逐渐提升,各条应力曲线整体呈现上升的趋势。当时间推进至6 000步时(第三级荷载施加结束),由于裂纹出现明显的扩张,模型整体出现应力状态的重分布,在第11监测区域应力水平出现下降。随着第四级荷载的施加,裂隙不断扩展贯通,该区域应力状态不断下滑。上图中应力状态的变化与PFC颗粒模型行为一致。



(a)



(b)

图8 各区域应力状态图

Fig.8 Regional stress state diagram

由图9可知,数值模拟状态下的裂隙最终扩展状况与试验结果相似,因此采用联合分析平台模拟的结果与试验裂纹产生、扩展、贯穿的趋势基本一致,表明本文分析平台研究岩体水力劈裂是可行的。

### 3 工程案例模拟

以某一输水隧洞为例,依托三维耦合分析平台,

针对高内水压作用下衬砌裂缝的扩展过程进行模拟。隧洞为圆形，衬砌内径 3 m，衬砌厚 1 m，最大内水头 115 m。

### 3.1 高压输水隧洞模型构建

本工程主要关注高内水条件下隧洞衬砌是否发生开裂，通过设定一条位于衬砌内缘初始裂隙以模拟衬砌中存在的缺陷。初始裂隙起点位于衬砌内壁，初始长度为 0.15 m，方向水平向右。如图 10 所示。

所建立模型的细观参数如表 3 所示，并假设模型整体受到 0.2 MPa 的围岩压力。

表 3 隧洞模型细观参数

Tab.3 Microscopic parameters of the tunnel model

颗粒密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	法向接触刚度 /MPa	法向 / 切向刚度比	粘结半径放大倍数	平行粘结刚度 /MPa	平行粘结强度 /kPa
2 918	981	1.5	1	981	1 485

### 3.2 裂纹扩展过程分析

本实例中首次循环对所有洞壁仅施加静水压力，静水压力转换为颗粒所受外力传至 PFC 中完成第一次循环，PFC 接收平台传来的第一次颗粒力后运行了 2 000 步，每步时间为 0.000 01 s。

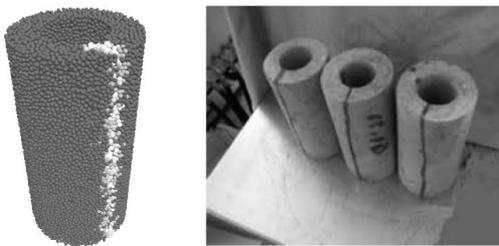


图 9 岩体试件劈裂破坏比较  
Fig.9 Comparison of hydraulic fracturing of rock mass specimens

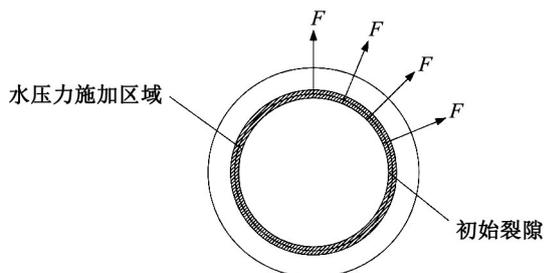


图 10 隧洞模型内壁水压力施加示意图  
Fig.10 Schematic diagram of water pressure applied on the inner wall of the tunnel model

PFC 颗粒受力分析结束后，导出全部颗粒信息，平台根据 PFC 中导出的颗粒位置与上次循环中的位移量进行比较，判断是否超过阈值（在裂隙平面 Z 方向，即开度方向）。若超过，则裂隙开裂，若没有，则进入下一次循环。结果显示前三次循环裂隙未出现贯通的情况，第四次循环中平台的数据显示裂隙已经与外界相联通，平台需要激活动水压力，但此时 PFC 仅进行了三次静水压力计算，还需要再进行一次静水计算以保证与实际问题相对应，图 11(d) 为第四次循环后高压输水隧洞颗粒加力、位移图。

按照上述分析步骤分别进行围岩压力为 0.4、0.6、0.8 MPa 下的隧洞衬砌模型模拟，结果发现，在 0.2、0.4 MPa 围压下会发生裂隙开裂贯通的行为，围压状态为 0.6 MPa 时，裂隙延伸量很小，无法完全使衬砌贯通。因此对于该工程，围压至少需要达到 0.6 MPa 隧洞才能安全运行。

### 3.3 流场分布特征

基于分析平台开展 0.2 MPa 围压下第五次循环，

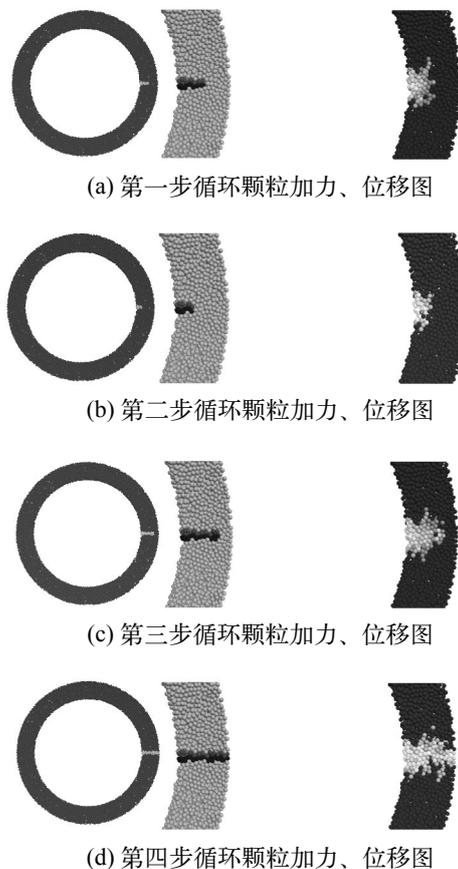


图 11 高压输水隧洞模型水力劈裂演化过程  
Fig.11 The hydraulic fracturing process of the high-pressure outlet tunnel

此时裂隙已贯通,对应于实际工程中的突涌现象,平台判断此时需进行动水压力分析,相应的裂隙流场分析结果如图12所示。

由图12(a)可知,孔压整体沿着水流方向降低,因此在裂隙的高压端压力仍然为较大值,流出端压力较小;裂隙贯通后形成的渗流通道实际是一个管道流的状态,在裂隙流场中,裂口中间区域受到壁面的阻力作用较小因此裂口中间区域的流速较大,如图12(b)。

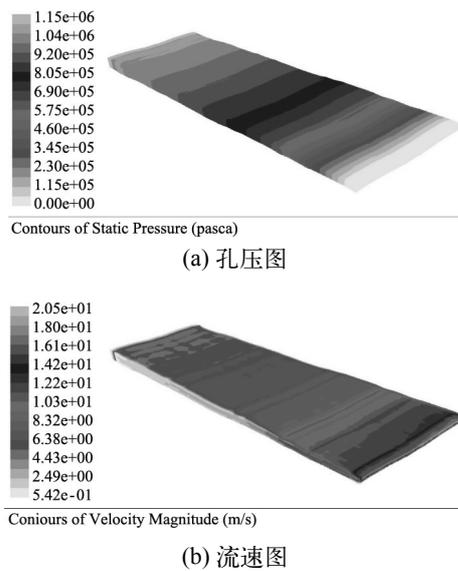


图12 裂隙流场计算图

Fig.12 Calculation diagram of fracture flow field

## 4 结论

1) 构建了基于 PFC-FLUENT 联合求解的岩体水力劈裂三维耦合分析平台,并对其实现过程及涉及的数据转换进行了详细介绍。

2) 对文献中室内厚壁圆筒水力劈裂试验进行了模拟,并开展对比分析,证明该平台研究岩体水力劈裂的可行性。

3) 平台能较精细地揭示隧洞衬砌水力劈裂过程,并动态获取相应裂隙流场分布特征,针对该隧洞模型,衬砌外围岩压力大于 0.6 MPa 时方能确保当前高压内水作用下隧洞衬砌安全,该结论对输水隧洞设计具有重要的指导价值。

## 参考文献:

- [1] ANDREE G. Brittle failure of rock materials test results and constitutive models[J]. Balkema A A/Rotterdam/Brookfield, 1995: 1-5.
- [2] 朱珍德, 胡定. 裂隙水压对岩体强度的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 64-67.
- [3] 朱俊高, 王俊杰, 张辉. 土石坝心墙水力劈裂机制研究[J]. 岩土力学, 2007(3): 487-492.
- [4] 刘得潭, 沈振中, 徐力群, 等. 岩体水力劈裂临界水压力影响因素及机理研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 30-37.
- [5] 沈振中, 张鑫, 孙粤琳. 岩体水力劈裂的应力-渗流-损伤耦合模型研究[J]. 计算力学学报, 2009, 26(4): 523-528.
- [6] 李东奇, 李宗利, 吕从聪. 考虑裂隙附加水压的岩体断裂强度分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3174-3180.
- [7] DVERSTORP B, ANDERSSON J. Application of the discrete fracture network concept with field data: possibilities of model calibration and validation[J]. Water Resources Research, 1989, 25(3): 540-550.
- [8] 倪小东, 王媛, 陆宇光. 隧洞开挖过程中渗透破坏微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 4194-4201.
- [9] 赵延林, 彭青阳, 万文, 等. 高水压下岩体裂纹扩展的渗流-断裂耦合机制与数值实现[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 556-564.
- [10] BARTON N, MAKURAT A, MONSEN K, et al. Rock mechanics characterization and modelling of the disturbed zone at Stripa[R]. Norway. Norwegian Geotechnical Institute, 1992: 1-20.
- [11] NI Xiaodong, ZHU Chunming, WANG Yuan. Hydro-mechanical analysis of Hydraulic Fracturing based on an improved DEM-CFD coupling model at micro-level[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2015, 12(9): 2691-2700.
- [12] 詹美礼, 岑建. 岩体水力劈裂机制圆筒模型试验及解析理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1173-1181.

(责任编辑 王利君)