

大开度裂隙网络内非线性两相渗流的数值研究

张 燕¹, 周 轩^{1,2}, 叶剑红²

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 裂隙渗流对矿产地下巷道开采、水电洞室开挖等工程具有重要的不利影响。当围岩扰动裂隙带内的裂隙开度较大, 且与中~高压含水地层发生水力连通, 就会形成高速非线性渗流导致的涌水、突水等灾害。前人对裂隙岩体渗流开展了卓有成效的研究工作, 但基本上都针对单裂隙或简单交叉裂隙, 以及采用简化的适用于低速层流的立方定律来描述渗流过程; 对复杂裂隙网络、裂隙粗糙度、高速非线性渗流、局部湍流等问题有待于进一步开展工作。本文采用两相流理论, 利用计算流体动力学开源软件平台 OpenFoam 为研究工具, 系统地研究包含大开度裂隙网络的岩体内部的高速非线性渗流的过程特征。计算结果精细地捕捉到了大开度裂隙网络高速渗流的进水、驱气、出水过程; 揭示了渗流速度的分布、变化特征。同时还确认裂隙渗流中边界层的存在, 给出边界层内的黏性剪应力、渗流雷诺数、渗流耗能以及等效渗透系数的量级。研究表明, 采用两相流理论精细求解米级尺度的裂隙岩体内的非线性渗流过程是可行的。

关键词: 岩石力学; 两相流; 裂隙网络; 大开度裂隙; 非线性渗流; N-S 方程; OpenFoam

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2018)04-0931-09

Numerical analysis of nonlinear two-phase flow within large opening fracture networks in rockmass

ZHANG Yan¹, ZHOU Xuan^{1,2}, YE Jianhong²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: It is well known the seepage flow in fractured rock has significant negative effect on the underground mining and cave excavation. While the opening of fractures in surrounding rock is wide and the fractures connect to the water rich stratum under the medium-high pressure, water-related disasters such as the water inrush could occur. A number of works on the seepage flow in fractures have been conducted by previous researchers. However, they were largely based on a single fracture or the simple fracture network, with the simplified cubic law (only suitable for low speed laminar flow) assumed. Therefore, further works need to be conducted on the seepage flow in fractured rocks to consider the effect of the complex fracture networks, the roughness of fractures, the high-speed nonlinear seepage flow and the local turbulent vortex. In this study, the characteristics of the high-speed nonlinear seepage flow through large opening fracture networks in rock is systematically investigated based on the two-phase flow theory using the open source platform OpenFoam (a package of computational fluids dynamics). Computational results precisely captured the process of water entry, air flow and water exit in the

收稿日期: 2017-06-19; **修回日期:** 2017-09-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41702308); 武汉理工大学自主创新基金

Supported by National Natural Science Foundation(Grant No. 41702308) and Independent Innovation Fund of Wuhan University of Technology

作者简介: 张 燕(1983-), 博士, 2006年毕业于内蒙古科技大学工程力学专业, 现任讲师, 主要从事采矿工程、采煤巷道突水方面的研究工作。E-mail: yanzhang2009@gmail.com. 通讯作者: 叶剑红(1981-), 博士, 现任教授。E-mail: yejianhongcas@gmail.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0771

fracture networks with large opening. The distribution and variation characteristics of flow velocity are also revealed. Meanwhile, the existence of boundary layer is confirmed. The magnitude of the viscous shear stress in the boundary layers, the Reynolds number of the seepage flow, and the equivalent permeability are all estimated. This study clearly demonstrates that it is feasible to characterize the nonlinear seepage flow in fractured rock at the meter scale adopting the two-phase flow theory.

Key words : rock mechanics ; two-phase flow ; fractures networks ; large opening fractures ; nonlinear seepage flow ; Navier-Stokes equation ; OpenFoam

1 引言

天然岩体包含各种尺度的结构面裂隙,大到区域性的断层,小到岩石矿物颗粒间的界面。结构面裂隙又包括原生裂隙和次生裂隙。无论哪种裂隙,其对岩体的力学属性和渗流特性都具有控制性作用。关于结构面裂隙对岩体力学属性的主控作用,前人已经开展了大量的研究工作,也取得了丰硕的成果^[1]。近些年来在深埋隧道的开挖^[2],水利工程中的大型发电厂房、变电洞室的开挖^[3-4]等实际工程中对保障工程安全起到了积极的作用。近十几年来,对裂隙岩体内渗流的研究越来越受到重视,主要原因是裂隙渗流常常给开挖工程,如富含水层下煤炭开采、矿产开采、水电工程地下洞室开挖、穿越含水层的隧道开挖等等,带来突水、涌水威胁;相关事故频发,危害极大。在实际的地下开挖工程中,由于开挖卸载,巷道、洞室围岩内都会出现扰动裂隙带;当扰动裂隙带内裂隙网络的张开度较大,并且与含水层发生水力连通后,就会发生非线性裂隙渗流(局部可能形成湍流)而形成水害,给开挖工程带来极大的安全威胁。所以研究和认识大开度裂隙网络的复杂非线性渗流特征具有重要的工程意义。

对于裂隙渗流这一科学问题,前人已经开展了卓有成效的研究工作。研究方法主要包括试验研究和开发数值计算模型。由于裂隙岩体渗流问题的复杂性,采用试验方法研究这一问题成为重要的研究手段。在早期一般针对单裂隙展开研究,如 G. H. Lomize^[5]通过单条光滑平行板裂隙动水流试验,提出了著名的立方定律;速宝玉等^[6-7]研究了单条裂隙的渗流-应力耦合特性。N. Patir 和 H. S. Cheng^[8]通过试验研究发现表面光滑裂隙和表面粗糙裂隙的水渗流规律有较大区别,表明裂隙的粗糙度对裂隙水渗流存在强烈影响。针对粗糙度影响这一问题, B. Amadei 等^[9-11]提出了对立方定律进行修正以考虑裂隙粗糙度的影响。由于含多组、复杂相交的裂隙

的试件难以制作,目前鲜有采用含多组、复杂相交的裂隙的人造试件开展岩体渗流规律的试验研究。采用含有原生复杂裂隙网络的天然试块研究多裂隙岩体的渗透规律是一种可行的办法;如郑少河等^[12]。针对裂隙岩体内的非线性渗流问题,近些年来也开展了一些有价值的工作,如 R. W. Zimmerman 等^[13-16];然而他们的试验研究工作都基于单裂隙或简单裂隙网络来开展的,对复杂多裂隙网络非线性渗流问题利用数值模型进行研究是一个较为可行的方案。

近十几年来,国内外学者在裂隙岩体渗流数值模型方面也开展了大量的研究工作。根据处理水渗流方式的不同,分析模型基本包括三大类:(1)等效连续介质渗流模型;(2)离散裂隙网络渗流模型;(3)双重介质渗流模型(该方法流行度不高)。等效连续介质渗流模型是借鉴土力学中达西渗透的概念,将裂隙岩体概化为连续的孔隙介质;采用流量相同的方式赋予裂隙岩体一个等效的渗透系数。该方法的优点是基础理论较为简单、成熟,可用的求解器较多;而且较容易应用到大尺度(千米级)的实际工程中^[17]。但其缺点是需要通过代表性单元体积 REV 内的裂隙网络分布来估算岩体的等效渗透张量^[18-19]。实际应用中本身就难于精确调查、刻画 REV 内的裂隙网络分布、连通性和几何特征,而且 REV 本身又存在着严重的尺寸效应^[20-21],导致确定的等效渗透系数存在可信度的问题。当裂隙分布比较均匀时,对渗流量的计算误差一般还是在可接受的范围内;当存在局部张开度大,分布不均匀的强导水裂隙时,对巷道、地下洞室的进水量估算可能与实际相差较大。国内外有不少这方面的研究工作和工程应用的案例^[22-23]。

离散裂隙网络渗流模型假定水只在裂隙网络内流动,岩块作为裂隙水流的边界。该方法体现了岩体渗流受裂隙网络控制的本质特征。但由于岩体裂隙网络发育复杂,计算量十分巨大。近 10 a 来,国内外学者在这方面开展了卓有成效的工作,如 A. Baghbanan 等^[24-26]就采用 DEM 和 DDA 方法研究了

应力对裂隙岩体的渗透性能的影响。刘泉声等^[27]采用 UDEC 程序包和渗流立方定律研究了含复杂随机分布裂隙网络岩体的等效渗透系统；张奇华和邬爱清^[28]给出了三维任意裂隙网络渗流模型以及求解方法。最近，严成增等^[29]基于单裂隙渗流立方定律开发了 FDEM-Flow 的流固耦合模型，并成功模拟了岩块水压致裂问题。

前人所用的裂隙渗流立方定律实际上仅适用于裂隙面平行的层流，对实际裂隙网络中的粗糙度、不规则张开度、非线性流、局部湍流难以有效处理。采用基于雷诺数平均的两相流 Navier-Stokes 方程来描述裂隙水的复杂渗流可以有效克服立方定律的不足；尤其是针对开度较大的裂隙网络，Navier-Stokes 方程具有明显优势，理论上计算结果更接近真实流动状态；然而这方面的研究工作尚较为缺乏，且多数研究主要针对单裂隙渗流采用 Navier-Stokes 方程进行求解，例如段慕白等^[30-33]。近 3 a 来，刘日成等^[16 34-35]也尝试了采用 Navier-Stokes 方程求解多条交叉裂隙内的渗流特征；但是这些研究主要针对开度极小的简单交叉裂隙，而且不能考虑裂隙内空气的存在；模型尺度也多在 10~20 cm 的级别。与此同时，陈国庆等^[36-37]采用求解 Navier-Stokes 方程的方法研究岩溶隧道、采煤巷道内突水过程，取得不错的效果。本文不关注岩体应力、裂隙扩展的耦合，采用两相流理论和 CFD 求解器专注于研究大开度裂隙网络内的高速非线性渗流的特征，进一步认识高速非线性裂隙渗流的规律。研究结果表明，两相流理论模型可以系统地精细刻画大开度裂隙网络内的高速非线性渗流的主要特征，为今后针对大开度裂隙岩体开展更加复杂的水-力耦合相互作用奠定基础。

2 两相裂隙流控制方程

两相流理论是描述 2 种性质不同的流体混合体复杂运动特征的一种理论，现今在工程各个领域被广泛使用。本文所涉及的裂隙岩体渗流一般是指水和空气这 2 种流体介质。两相流体的运动控制方程包括如下质量守恒方程和力平衡方程(其具体数学表达式形式为(RANS 方程))：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \rho \mathbf{g} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + C \kappa \nabla \alpha \quad (2)$$

$$\rho = \alpha \rho_{\text{水}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{空气}} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中： ρ 为两相流体的综合密度； \mathbf{U} 为两相流体平均速度矢量， $\mathbf{U} = (u_x, u_z)^T$ ； \mathbf{g} 为重力加速度矢量(0, g)^T； p 为两相流体压力； $\boldsymbol{\tau}$ 为两相流体的黏性剪应力； μ 为流体的动力黏滞系数(温度为 20 时 $\mu = 1.002 \times 10^{-3}$ Pa·s)， C 为水的表面张力系数(20 时 $C = 73 \times 10^{-3}$ N/m)， κ 为水-空气交界面处的曲率，计算公式为

$$\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

式中： \mathbf{n} 为水-空气交界面的法线方向，计算中可以表达为

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \alpha}{|\alpha|} \quad (6)$$

式(6)中 α 为两相流体的体积分数，用以跟踪计算中水-空气交界面位置；当 $\alpha = 1$ 表示网格内全部为水，当 $\alpha = 0$ 表示网格内全部为空气，当 $0 < \alpha < 1$ 表示网格内存在水-空气交界面。一般采用 VOF 方法计算 α 的值，其控制方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha \mathbf{U} = 0 \quad (7)$$

本文采用计算流体动力学开源代码 OpenFoam 为计算平台，求解在指定的边界条件和初始条件下岩体内包含水和空气的裂隙两相流的流动特征。开源的 OpenFoam 计算平台采用有限体积法对控制方程(式(1)、(2)和(7))进行空间离散，采用一阶或者二阶差分格式对时间导数项进行时域离散。计算求解过程可以采用 PISO, SIMPLE 或两者的混合方法 PIPLE 来迭代耦合求解控制方程(式(1)、(2))中的速度值和压力值。关于开源 CFD 平台 OpenFoam 的详细信息，可以在官方网站查阅相关的资料^[38]。

3 裂隙几何模型、网格及边界条件

含有大开度裂隙的裂隙岩体的几何概化模型如图 1 所示，该几何模型是根据某一处岩体的露头，大致描绘裂隙的形态后概化而成。一块边长为 1 m 的立方体岩体内包含有众多的大开度裂隙，最大的开度值可达 5 mm。裂隙的主导方向为竖向；同时拥有一系列的短裂隙对主导裂隙进行近横向的连通。

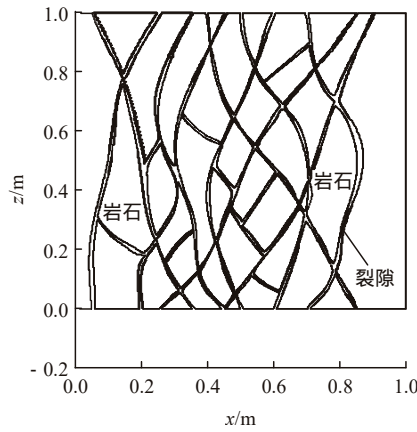


图1 含有大开度裂隙的裂隙岩体的几何概化模型

Fig.1 Geometric model of rock with large opening fractures

本文采用类似于裂隙岩体压水试验的方式对裂隙渗流过程进行精细化模拟。在裂隙内的空间里进行计算网格精细划分,如图2所示;所划分的网格尺寸最大为0.8 mm,最小为0.4 mm。由于岩石块体本身的渗透性非常小,可将其视为不透水的刚性体;裂隙面在计算中作为墙边界处理,在水渗流过程中,其附近存在边界层和黏性剪切应力,导致渗流流体的能量耗散。在裂隙岩体的上方设置一个水源区,在计算过程中该水源区时刻保持满水状态,并且在水源区顶面施加一个额外的压力10 kPa,使水的渗流速度进一步加快;同时在裂隙岩体的下方设置一个空气区,该空气区与外界无限空气完全连通,初始时刻的压力为大气压。水源区,裂隙和空气区内计算网格的总数量为100万个6面体单元。在计算的初始时刻,水源区为满水状态,并且之后时刻保持这种状态;初始裂隙内充满空气,没有水存在。

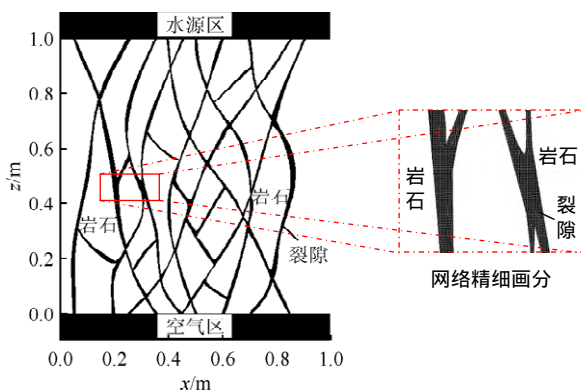


图2 裂隙岩体的几何概化模型的网格精细画分

Fig.2 Fine mesh for the geometric model of fractured rock

4 结果分析

4.1 渗流过程

$t = 0$ s 初始时刻,只有水源区充满水($\alpha = 1$),裂

隙内部全部为空气($\alpha = 0$)。 $t = 0.2$ s,水大量进入裂隙网络内,但还未到达出水口。各个单裂隙内进水速度不一致,还存在某些连通裂隙两端被水封闭的现象,空气排不出去,也不能进水;而且在已经充水的裂隙内,存在很多处 α 值在0.5~0.8范围内,表明此时充水裂隙内有很多气泡被水包围。从速度分布来看,一旦有水进入裂隙,整个裂隙网络内都存在速度分布,在有水的裂隙内这是水的流动速度,在无水的裂隙内,是空气被排出的速度。在出水口处下方的空气区域内,明显存在空气被排出而形成的速度场,且出现漩涡;然而在尚未充水的裂隙内也存在空气流动的极低速度区,表明这些裂隙处的空气排出不畅,此时已可看出渗透优势通道的雏形。

$t = 0.4$ s 时刻,裂隙水继续流向出口,在流速较快的单裂隙内,已经有水从出口处流入空气区。裂隙水的前缘一般在 $z = 0.1 \sim 0.4$ m范围。裂隙网络内的空气继续被排出;在出口下方接收区内因空气被排出而形成的涡流还继续存在。裂隙水在下流过程中,继续封闭了排气不畅通的裂隙部位。

到了 $t = 0.8$ s时刻,所有的出口处裂隙都已经喷出水柱,喷出的速度为1~2 m/s,局部可以达到2.5~3.0 m/s。接收区内存在明显的空气涡流;不过这种涡流不再是因为空气被排出裂隙而造成的,而是裂隙喷出的水柱高速进入接收区后和空气在界面上(实际是两相流体之间的边界层)发生黏性摩擦,带动接收区内的空气形成涡流。从 α 分布图($t = 0.8$ s)还可以明显看出,裂隙网络内明显存在多处未被水充填的裂隙(见图3(c)中蓝色区域),速度分布图(见图3(d))中这些未充填水的区域中速度也接近为0,表明被封闭的空气难以被畅通排出,整个裂隙渗流实际上是非饱和流。此时,裂隙水的渗流优势通道已经非常明显地形成。

$t = 1.5$ s时刻,未充填水的裂隙范围已经明显减少,表明裂隙网络内被封闭的空气还是随着水的快速移动不断地被带出裂隙,饱和度在不断地提高。到了 $t = 4.0$ s时刻,大部分被封闭的空气已经被排出,只有极少部分残留在裂隙内部,也就是说裂隙网络内的渗流短时间内不太可能达到完全饱和的状态,或者说需要较长时间裂隙流才能达到饱和状态。

计算结果发现在 $t = 0.8, 1.5, 4.0$ s时刻的速度分布基本一致,裂隙网络内的速度场分布基本达到稳定状态。对比 $t = 4.0$ s时刻的 α 分布场和速度场分布发现,空气被不断带走,饱和度接近100%(未完全达到)。观察还发现在之前空气被封闭的裂隙区

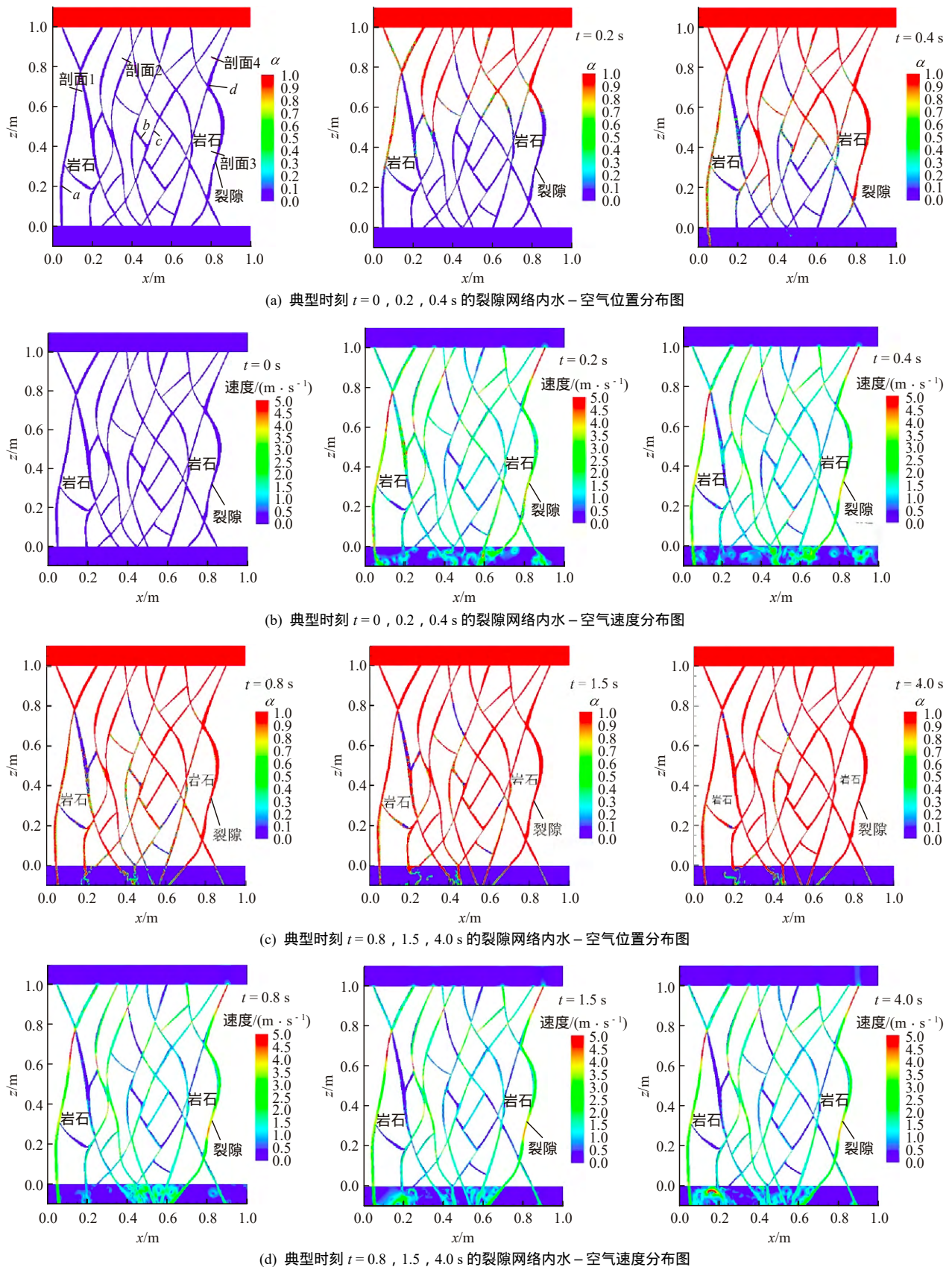


图 3 典型时刻裂隙网络内水 - 空气位置、速度分布图

Fig.3 Distribution of water-air position , velocity in fractured rock at different typical times

段, $t = 4.0\text{ s}$ 时大部分也被水充填, 但是流动速度还是极低; 表明这些裂隙区段内的水渗流速度极慢,

水主要是从优势通道内通过; 且优势通道内的空气不易被封闭, 非优势通道内的空气极易被水封闭。

被封闭的空气后期即使会被水缓慢带走，让出来的空间被水充填，但是这些裂隙区段的水渗流速度还是很低。优势通道与水是否充填无关，主要由裂隙网络的空间分布、连通条件决定。

4.2 速度特征及能量耗散

上文定性分析了裂隙网络内水渗流的特征，此处对渗流速度特征进行定量分析。图 4 列出了裂隙网络内 4 个典型位置处(点 *a*, *b*, *c* 和 *d*, 具体位置在图 3(a)中已给出)裂隙水渗流速度的时程曲线。可以清晰看到，在 $t = 1.0$ s 之前，各处的渗流速度变化很大，原因是这个时间段内水高速进入裂隙空间内，空气被快速排出，流体的流动状态不太稳定；一旦大部分空气已经被排出($t > 1.0$ s)，后续的流动状态就相对很稳定。4 个典型位置处的稳定渗流速度值完全不一致，如点 *a* 处的速度大于 3 m/s，而点 *b* 处的速度基本为 0(水基本不流动)，直接反应出整个裂隙网络内水渗流并不均匀，某些地方流体较快，有些地方较慢，甚至基本不流动；这就体现出裂隙渗流中存在优势渗透通道和非优势渗透通道的区别。由于裂隙网络内的水渗流速度整体上非常快，雷诺数 $Re = (\rho_w U W) / \mu$ (U 为流动速度, W 为裂隙的特征宽度, $\mu = 1.002 \times 10^{-3}$ Pa · s 为水的动力黏性) 在 $10^3 \sim 10^4$ 量级，并非传统上的低速达西层流，所以本文的研究强调了非线性渗流这一概念。

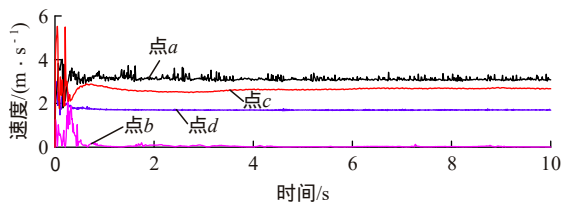


图 4 裂隙网络内 4 个典型位置处的水-气渗流速度的时程曲线

Fig.4 History of seepage speed of water-air at 4 typical positions in fracture networks

从微观上讲，裂隙面并不只是一个面，而是由 2 个边界壁面和它们之间空间所组成。在裂隙渗流过程中，2 个边界壁面可视为墙边界。流体力学领域中早就认识到在裂隙 2 个边界壁面附近一定会形成 2 个边界层，在边界层内由于水的黏性和速度梯度的存在，一定会形成与渗流方向相反的剪应力，阻碍水的渗流并耗散水的流动动能。图 5 列出了 $t = 2.0$ s 时刻裂隙网络内 4 个典型位置剖面(剖面 1, 2, 3, 4 位置已在图 3(a)中标识)上的速度分布图。图 5 展示出每个裂隙剖面上速度分布结构是相似的，两侧均存在边界层；流动速度在裂隙壁面处为 0，在

边界层内逐渐增大到正常值。图 5 显示裂隙网络内水渗流的边界层厚度为 0.5 ~ 1 mm，且边界层厚度与渗流速度成弱反相关的关系，渗流速度越大，边界层厚度反而轻微变薄。

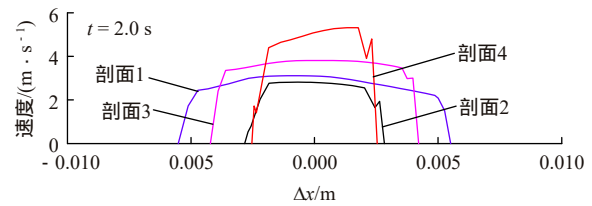


图 5 裂隙网络内 4 个典型位置剖面上的渗流速度分布
Fig.5 Distribution of water seepage speed along 4 typical profiles in fracture networks

根据图 5 显示的边界层内的速度梯度和水的动力黏性值($\mu = 1.002 \times 10^{-3}$ Pa · s)，边界层内的黏性剪应力 ($\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial x}$) 的量级可估算为 3 ~ 4 Pa。这个黏性剪应力与水的渗流方向反向，阻碍水渗流，消耗水的运动动能。采用如下公式计算能量耗散：

$$\Delta E = \sum_{i=1}^{N_{\Lambda\Omega}} \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \sum_{i=1}^{N_{\Lambda\Omega}} m_i g H_i - \sum_{i=1}^{N_{\Omega\Omega}} \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (8)$$

式中： $\sum_{i=1}^{N_{\Lambda\Omega}} \frac{1}{2} m_i v_i^2$, $\sum_{i=1}^{N_{\Lambda\Omega}} m_i g H_i$ 分别为入口处流体的总动能和总势能； $\sum_{i=1}^{N_{\Omega\Omega}} \frac{1}{2} m_i v_i^2$ 为出口处的流体的总动能。

计算势能时，以出口处为势能零点，那么 H_i 的值均为几何模型的高度 1 m。图 6 为整个渗流过程所需消耗的能量演化过程。可以清晰地看出，由于边界层的阻碍效应水渗流通过裂隙网络所需消耗的能量大约为 12 J($t > 1.0$ s 的相对稳定的渗流状态)。

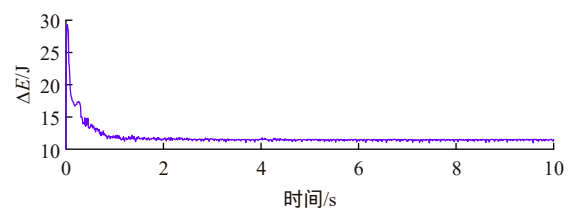


图 6 水渗流通过裂隙网络所消耗的能量演化过程
Fig.6 Variation of consumed energy for water seeping through the fracture networks

4.3 驱气饱和过程

从之前的分析已经定性知道水进入裂隙网络后，会驱动裂隙内部原有的空气被排出，裂隙网络内的水体饱和度相应地不断增加。图 7, 8 定量地表征了裂隙网络的这个驱气饱和过程。图 7 展示的是裂隙岩体的入水口、出水口的进水、出水的质量速

率(单位为 kg/s)。在起始阶段($t < 1.0$ s),裂隙网络进水速率要大于出水速率,因为这个阶段进入裂隙网络的水不包含空气,而排出裂隙网络的水包含大量空气;随着空气的排出,裂隙网络的出水量也就快速上升,饱和度快速增大;到 $t = 1.0$ s 时,裂隙网络的出水速率(115 kg/s)和排水速率(100 kg/s)基本很接近,饱和度基本接近 80%。后续随着裂隙渗流的继续,裂隙网络的出水速率和排水速率达到几乎完全一致(110 kg/s)。这个过程中裂隙网络的饱和度缓慢增加,表明裂隙网络内被封闭的空气还是被水缓慢地带出,到计算结束的时候也未到达完全饱和;如果按照这种趋势发展,需要较长的时间才能到达完全饱和的状态,甚至可能达不到饱和状态。

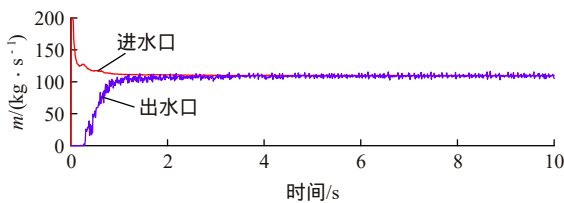


图 7 裂隙网络进水口和出水口处所通过水的质量速率时程曲线

Fig.7 History of water flux through the inlet and outlet of fracture networks

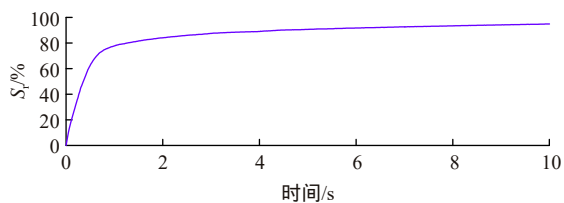


图 8 裂隙网络内水体饱和度的演化过程

Fig.8 Variation of the saturation degree of water in fractured rock

4.4 等效渗透系数估算

由于裂隙渗流计算的复杂性,目前基本不可能在大尺度实际工程中(计算尺度在千米级)采用求解 N-S 方程的方式来预测裂隙网络的渗流量。工程中一般基于连续介质理论来估算裂隙网络的等效渗流量,从而需要确定出裂隙岩体的等效渗透系数。本文采用以下公式估算所模拟裂隙岩体的水流等效渗透系数:

$$k = \frac{q}{Ai} = \frac{qL\rho_w g}{A\Delta p} \quad (9)$$

式中: q 为裂隙水出水量(m^3/s), A 为出水口的面积, L 为水的渗透距离, $g = 9.806 m/s^2$, Δp 为进水口和出水口的压力差。图 9 展示了本文所模拟裂隙岩体

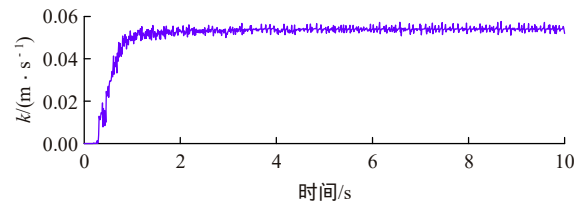


图 9 裂隙岩体的等效渗透系数的估算

Fig.9 Estimated equivalent permeability coefficient for fractured rock

的等效渗透系数的演化过程。可以看出裂隙网络的饱和度达到 80%以后,裂隙岩体的等效渗透系数基本就达到了其稳定值,为 0.055 m/s。

5 结 论

本文采用两相流理论,利用计算流体动力学开源软件平台 OpenFoam 为研究工具,系统地研究了包含大开度裂隙网络的岩体内部的高速非线性渗流的过程特征。计算结果精细地捕捉到了大开度裂隙网络高速渗流的进水、驱气、出水过程;揭示了渗流速度的分布、变化特征。同时还确认了裂隙渗流中边界层的存在,给出了边界层内的黏性剪应力、渗流雷诺数、渗流耗能以及等效渗透系数的量级。研究表明,采用两相流理论精细求解米级尺度的裂隙岩体内的非线性渗流过程是可行性的;但是对于普通的计算设备,网格数量不宜超过 1 000 万,否则难以在合理的时间内得到结果。

在未来的研究中,只要采用更加先进的立体三维扫描技术,如高能 CT 扫描,获得结构岩体的裂隙网络的三维空间分布,之后对空间分布进行数据化,并划分精细的网格,即可对结构岩体内的裂隙渗流过程进行仿真。该技术要想在大尺度岩体中应用,需要克服 3 个方面的瓶颈:(1) 出现新的三维扫描技术,穿透能力强能够扫描确定大尺度岩体内裂隙的分布;(2) 现有的并行计算技术、算法进一步优化,使并行效率大幅度提高,GPU 是一个有希望的方向;(3) 创新性的计算硬件设备的出现,克服现有计算设备的计算极限,如新近出现的量子计算机的发展可能给这方面数值仿真带来新的曙光。

参考文献(References):

[1] 孙广忠. 论“岩体结构控制论”[J]. 工程地质学报, 1993, (1): 14-18.(SUN Guangzhong. On the theory of structure-controlled rockmass[J]. Journal of Engineering Geology, 1993, (1): 14-18.(in Chinese))

- [2] 李树忱, 钱七虎, 张敦福, 等. 深埋隧道开挖过程动态及破裂形态分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2 104–2 112. (LI Shuchen, QIAN Qihu, ZHANG Dunfu, et al. Analysis of dynamic and fractured phenomena for excavation process of deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2 104–2 112. (in Chinese))
- [3] 江 权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 144–152. (JIANG Quan, FENG Xiating, CHEN Guoqing. Study on constitutive model of hard rock considering surrounding rock deterioration under high geostresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 144–152. (in Chinese))
- [4] 朱维申, 李晓静, 郭彦双, 等. 地下大型洞室群稳定性的系统性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 689–1 693. (ZHU Weishen, LI Xiaojing, GUO Yanshuang, et al. Systematical study on stability of large underground houses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 689–1 693. (in Chinese))
- [5] LOMIZE G M. Flow in fractured rocks[M]. Moscow: [s. n.], 1951: 200–207.
- [6] 速宝玉, 詹美礼, 王 媛. 裂隙渗流与应力耦合特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 73–77. (SU Baoyu, ZHAN Meili, WANG Yuan. Experimental study on the coupling characteristics between fractures seepage flow and stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 73–77. (in Chinese))
- [7] 王 媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 83–87. (WANG Yuan. Coupling characteristic of stress and fluid flow within a single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 83–87. (in Chinese))
- [8] PATIR N, CHENG H S. An average flow model for determining effect of three-dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication[J]. Journal of Lubrication Technology, 1978, 100(1): 12–17.
- [9] AMADEI B, ILLANNASEKARE T A. Mathematical model for flow and solute transport in nonhomogenous rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics, 1994, 18(6): 719–731.
- [10] 许光辉, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(3): 74–79. (XU Guanghui, ZHANG Yongxing, HA Qiuling. Super cubic and sub cubic law of rough fracture seepage and its experiments study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 74–79. (in Chinese))
- [11] 贺玉龙, 陶玉敬, 杨立中. 不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 3 235–3 241. (HE Yulong, TAO Yujing, YANG Lizhong. Experimental research on hydraulic behaviors in a single joint with various values of JRC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010: 29(Supp.1): 3 235–3 241. (in Chinese))
- [12] 郑少河, 赵阳升, 段康廉. 三维应力作用下天然裂隙渗流规律的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 133–136. (ZHENG Shaohao, ZHAO Yangsheng, DUAN Kanglian, An experimental study on the permeability law of natural fracture under 3-d stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 133–136. (in Chinese))
- [13] ZIMMERMAN R W, AL-YAARUBI A, PAIN C C, et al. Nonlinear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 163–169.
- [14] ZHANG Z, NEMCIK J. Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures[J]. Journal of Hydrology, 2013, 477: 139–151.
- [15] 刘日成, 李 博, 蒋宇静, 等. 等效水力隙宽和水力梯度对岩体裂隙网络非线性渗流特性的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3 165–3 174. (LIU Richeng, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Effects of equivalent hydraulic aperture and hydraulic gradient on nonlinear seepage properties of rock mass fracture networks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3 165–3 174. (in Chinese))
- [16] 刘日成, 蒋宇静, 李 博, 等. 岩体裂隙网络非线性渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2 817–2 824. (LIU Richeng, JIANG Yujing, LI Bo, et al. Nonlinear seepage behaviors of fluid in fracture networks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2 817–2 824. (in Chinese))
- [17] 陈益峰, 周创兵, 毛新莹, 等. 水布垭地下厂房围岩渗流控制数值模拟与评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 308–318. (CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing, MAO Xinying, et al. Numerical simulation and assessment of seepage control effects on surrounding rocks of underground powerhouse in Shuibuya hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 308–318. (in Chinese))
- [18] 刘日成, 蒋宇静, 李 博, 等. 岩体裂隙网络等效渗透系数方向性的数值计算[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2 394–2 400. (LIU Richeng, JIANG Yujing, LI Bo, et al. Numerical calculation of directivity of equivalent permeability of fractured rock masses network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2 394–2 400. (in Chinese))
- [19] 杨天鸿, 张永彬, 冷雪峰, 等. 岩体结构面网络渗透张量分析方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2003, 24(9): 911–914. (YANG Tianhong, ZHANG Yongbin, LENG Xuefeng, et al. Tensor analysis of seepage flow from structural plane network of rock mass[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2003, 24(9): 911–914. (in Chinese))
- [20] RONG G, PENG J, WANG X, et al. Permeability tensor and representative elementary volume of fractured rock masses[J]. Hydrogeology Journal, 2013, 21: 1 655–1 671.
- [21] BAGHBANAN A, JING L R. Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1 320–1 334.
- [22] 王 媛, 速宝玉, 徐志英. 等效连续裂隙岩体渗流与应力全耦合分析[J]. 河海大学学报, 1998, 26(2): 26–30. (WANG Yuan, SU Baoyu, XU Zhiying. Fully coupled analysis of seepage and stress in equivalent continuous fractured rock mass[J]. Journal of Hohai University:

- Natural Science, 1998, 26(2): 26–30.(in Chinese))
- [23] 崔皓东, 朱岳明. 二滩高拱坝坝基渗流场的反演分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3 194–3 199.(CUI Haodong, ZHU Yueming. Back analysis of seepage field of Ertan high arch dam foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3 194–3 199.(in Chinese))
- [24] BAGHBANAN A, JING L. Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1 320–1 334.
- [25] MIN K, RUTQVIST J, TSANG C, et al. Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(7): 1 191–1 210.
- [26] JING L R, MA Y, FANG Z L. Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis(DDA) method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 343–355.
- [27] 刘泉声, 吴月秀, 刘 滨. 应力对裂隙岩体等效渗透系数影响的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 176–183.(LIU Quansheng, WU Yuexiu, LIU Bin. Discrete element analysis of effect of stress on equivalent permeability of fractured rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 176–183.(in Chinese))
- [28] 张奇华, 邬爱清. 三维任意裂隙网络渗流模型及其解法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 720–730.(ZHANG Qihua, WU Aiqing. Three-dimensional arbitrary fracture network seepage model and its solution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 720–730. (in Chinese))
- [29] 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: 35(1): 67–75.(YAN Chengzeng, ZHENG Hong, SUN Guanhua, et al. A 2D FDEM-flow method for simulating hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015: 35(1): 67–75.(in Chinese))
- [30] 段慕白, 李 皋, 孟英峰, 等. 不同节理粗糙度系数的裂隙渗流规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 41–44.(DUAN Mubai, LI Gao, MENG Yingfeng, et al. Research on regulation of fracture seepage in different joint roughness coefficients[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5): 41–44.(in Chinese))
- [31] 赵 强, 李 皋, 肖贵林, 等. 单裂隙渗流有限元数值仿真研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(2): 195–199.(ZHAO Qiang, LI Gao, XIA Guilin, et al. Study on simulation of single fractures seepage based on finite element method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(2): 195–199.(in Chinese))
- [32] 熊祥斌, 李 博, 蒋宇静, 等. 剪切条件下单裂隙渗流机制试验及三维数值分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2 230–2 238.(XIONG Xiangbin, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Flow mechanism test on single rock fractures and its three-dimensional numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2 230–2 238.(in Chinese))
- [33] 刘 洋, 李世海, 刘继棠. 裂隙岩体非稳态渗流数值模型及其应用[J]. 力学与实践, 2011, 33(6): 23–29.(LIU Xiang, LI Shihai, LIU Jitang. Numerical model of unsteady fluid flow in fractured rock and its application[J]. Mechanics in Engineering, 2011, 33(6): 23–29.(in Chinese))
- [34] 刘日成, 蒋宇静, 李树忱, 等. 交叉裂隙水力学开度的计算及非线性水力特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1 581–1 590.(LIU Richeng, JIANG Yujing, LI Shuchen, et al. Study of nonlinear hydraulic characteristics and hydraulic aperture calculation of crossed fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1 581–1 590.(in Chinese))
- [35] 刘日成, 李 博, 蒋宇静, 等. 三维交叉裂隙渗流特性的实验和数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增 2): 3 813–3 821.(LIU Richeng, LI Bo, JIANG Yujing, et al. Experimental and numerical study of hydraulic properties of 3D crossed fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Supp.2): 3 813–3 821.(in Chinese))
- [36] 陈国庆, 李天斌, 范占锋, 等. 基于不同渗流方程的岩溶隧道涌突水过程模拟[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 8–13.(CHEN Guoqing, LI Tianbin, FAN Zhanfeng, et al. A study of the process simulation of water burst in a karst tunnel based on different seepage equations[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(4): 8–13.(in Chinese))
- [37] 师文豪, 杨天鸿, 刘洪磊, 等. 矿山岩体破坏突水非达西流模型及数值求解[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 446–455.(SHI Wenhao, YANG Tianhong, LIU Honglei, et al. Non-Darcy flow model and numerical simulation for water-inrush in fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 446–455.(in Chinese))
- [38] <https://openfoam.org/>