

# Summary of Crack Network Generation Technology and Its Application in Rock Mass

Liping Liu, Haifeng Lu, Hui Zhu, Ya Xu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui  
Email: 1916638512@qq.com

Received: Mar. 24<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

The deformation, strength and permeability of rock mass are mostly controlled by fractures. Therefore, it is of great significance to study the fracture distribution in rock mass to master the engineering properties of rock mass. The generation and simulation of fracture network is one of the main methods to grasp the fracture distribution in rock mass. The Monte-Carlo simulation technique, DEM, stereoscopic technique, Latin Hypercube Sampling and other fissure network generation techniques are expounded in detail. Finally, the concrete applications of these techniques are mainly discussed from the aspects of mechanical properties, seepage and grouting reinforcement according to the stability of dam foundation rock mass according to the fissure network. The research results can provide a good summary of the current fracture network generation technology and provide a direction reference for the future research.

## Keywords

Fracture of Rock Mass, Generation Technology, Fracture Network, Monte-Carlo

---

# 岩体裂隙网络生成技术及应用综述

刘丽平, 鲁海峰, 祝慧, 许亚

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南  
Email: 1916638512@qq.com

收稿日期: 2020年3月24日; 录用日期: 2020年4月21日; 发布日期: 2020年4月28日

---

## 摘要

岩体的变形、强度及渗透性多数是由裂隙控制, 故研究岩体中裂隙分布对掌握岩体的工程性质具有重要意义。裂隙网络的生成和模拟是目前掌握岩体中的裂隙分布的主要手段之一。详细阐述了Monte-Carlo

模拟技术、离散元方法(DEM)、体视学技术、拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sampling)等裂隙网络生成技术,最后依据裂隙网络,从力学性质、渗流、注浆加固依据坝基岩体稳定等方面重点论述了其具体应用。研究成果可对目前的裂隙网络生成技术提供了较好的总结,为后续的研究提供了方向参考。

## 关键词

岩体裂隙, 模拟技术, 裂隙网络, Monte-Carlo

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

裂隙岩体是地质历史产物,它存在于地质环境之中,是由断层、节理、片理及破碎带这样的宏观结构面分割岩块而形成的一种具有特定结构的地质体。正是因为这些宏观结构面的延伸、交错或交切,从而构成了岩体独特的裂隙网络结构,进而控制了裂隙岩体的各种力学行为以及水力学行为。

岩体裂隙的相关参数特征包括裂隙的长度、裂隙的方向、裂隙的密度以及裂隙之间的连通性,在这样一种地质体中,裂隙的特征也就决定了气体和液体在岩体中的运移特征。因而,研究岩体裂隙网络结构的特征,是研究裂隙岩体的水力学、热力学及其他力学特性的基础。考虑到岩体中裂隙的一些几何特性以及物理相关参数存在一些随机性和不可确定性,因此,利用条件很有限的普通地质测量方法,分析岩体裂隙的长度、裂隙的产状、裂隙宽度以及裂隙连通性等参数的统计分布规律,运用岩体裂隙网络生成技术形成岩体同分布的裂隙网络,是一种高效可行的方法[1]。运用岩体裂隙网络模拟方法不仅可以对岩体裂隙系统的不均匀性、水流的各向异性和非连续性进行呈现,还可以对岩体裂隙中水流的顺势变化特征进行描述,因此,在岩体工程中,一般可以通过对岩体裂隙网络进行模拟从而分析其力学性质、强度和渗透性,对于岩体稳定性、水电工程透水性和安全性和裂隙岩体的加固等研究都具有重要的指导意义。本文介绍了国内外学者常用的几种裂隙网络生成法并对其进行分析比较,以及裂隙网络模拟在边坡稳定性研究、水库渗漏、注浆加固等工程中的主要应用。

## 2. 岩体裂隙网络生成方法

### 2.1. Monte-Carlo 模拟方法

蒙特卡洛(Monte-Carlo)模拟方法[2]的原理是通过已编制的计算机程序进行统计试验,这些试验对象包括岩体本身强度和岩体裂隙相关参数,从而将最终得到的统计数字的特征值作为待求解问题的数值解[3]。蒙特卡洛方法要求一般要在现场对裂隙产状、迹长以及隙宽等参数调查基础上,再根据大量的数据,进一步统计得出它的概率分布函数形式,如吴顺川等[4]通过现场对岩体的节理进行调查,采用测线法对节理的各种地质几何参数进行统计,并且将节理按其产状分为4组,如图1显示的是其中两组节理倾角的概率密度拟合,显示其正态分布和威布尔分布拟合精度较好。赵德文等[5]运用 Monte-Carlo 模拟方法,其模拟结果真实再现了现场的岩体裂隙的各种地质几何特征,如裂隙方向、裂隙宽度以及裂隙连通性等,为边坡稳定分析提供基础地质资料。杨米加等[6]人应用 Monte-Carlo 模拟方法生成同分布裂隙网络,通过对裂隙岩体的渗透性统计规律的分析,从而对岩体渗透性进行可靠性评估,对于提高该类工程计算与预测的准确性具有重要意义。王肖珊[7]基于 Monte-Carlo 随机模拟方法,利用已知的岩体裂隙几何参数,

如裂隙的产状、间距、裂隙的宽度、裂隙的密度等,建立离散岩体裂隙网络,进而对岩体裂隙网络进行渗流计算及分形特性研究。王环玲[8]对裂隙的密度、裂隙产状、裂隙的宽度、裂隙的延伸情况以及裂隙的连通性等几何参数进行统计分析,利用这些几何参数,采用 Monte-Carlo 随机模拟方法进行岩体裂隙网络随机模拟。

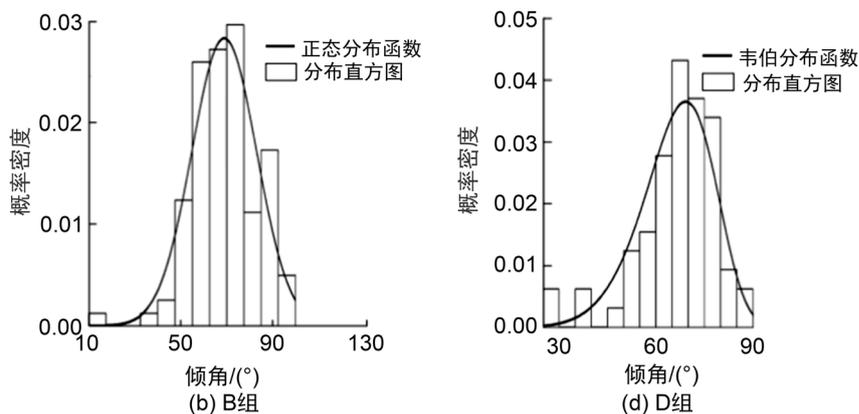


Figure 1. Histogram and probability density curve of joint inclination distribution

图 1. 节理倾角分布直方图及概率密度曲线[4]

## 2.2. 离散元方法(DEM)

国内外许多学者运用连续渗流模型研究岩体小单元的性质,但是对于这样极小范围的量测,这是不准确的,因为岩体透水性以及裂隙半径和裂隙的密度这些几何特征是无法视为均匀的,这便需要将各小单元视为研究体,在这种情况下便可利用离散元法进行研究分析。在小单元体中,利用离散元法可相对真实描述岩体裂隙的几何特性,这些特性包括倾向、倾角、裂隙间距、长度及开口度等,为了能更加精确的研究这些性质,刘日成等[9]应用二维离散元程序 UDEC 建立离散型模型,与此同时在此基础上对其进行二次开发,建立了 DFN 模型,该研究中多次操作改变流体的运动方向,从而得到岩体裂隙网络在不同流动方向下的等效渗透系数。砂岩中裂隙网络发育微小并且其延伸方向无明显规律,李玉成[10]采用三维颗粒流离散元方法来研究砂岩的裂隙力学特征。由于不同的地质条件以及不同程度的应力水平左右下,当岩体变形和岩体裂隙发育均达到一定程度时,煤矿采场底板的岩体可能会与底板承压水形成沟通,在这种情况下会形成宏观结构面,引起岩体裂隙的导水能力显著增强,甚至导致突水等地质灾害[11] [12],正是由于承压状态不是固定的,所以需要借助离散元方法进行微观分析,周冬磊等[13]研究不同的非承压状态下裂隙岩体的渗透性,为煤矿采场底板岩体的渗透特性研究提供重要参数,并借助离散元软件 UDEC,对煤矿采场底板裂隙演化及导水通道形成进行研究,为采场底板阻隔水能力进行评价,提出防止措施。

## 2.3. 体视学技术

岩体裂隙本身的力学行为及裂隙对岩体力学行为影响的研究一直是岩石力学理论界和工程界非常关注的研究课题[14] [15]。岩体内裂隙呈三维空间分布状态,其中包含裂隙的复杂程度、张开度、连通性以及粗糙程度等相关特征。CT 扫描技术可以清晰地检测出待测对象内部结构以及原始缺陷,目前为止,CT 扫描技术在岩体力学中的应用大部分用来分析岩体内部的结构特征以及在实验过程中岩石试件内部结构破坏发展过程[16] [17] [18]。彭瑞东等[19]利用 CT 扫描岩石试件,根据形成的图像的灰度分布规律,研究了岩石内部裂隙的分布规律。腾俊洋等[20]利用 CT 扫描技术研究复合岩体裂隙发展过程,得出了岩石组合方式对复合岩体的强度和破坏模式的影响规律,此外还应用 CT 扫描技术分析复合岩体的不同断面破

坏规律,分析其列席的分形特征。倪春中等[21]利用 CT 扫描技术,根据扫描出的岩石样本图像来提取裂隙的密度、裂隙长度和隙宽以及裂隙连通性等相关参数。

根据岩体裂隙网络分布服从幂分布这个规律,再应用体视学技术将 CT 扫描得到的二维图像中的裂隙延展并反演到三维空间,据此推断出三维空间中裂隙的长度和裂隙的密度,利用这种方法可以实现岩石裂隙属性在二维到三维空间之间的转换。所以,CT 扫描方法对于矿山计算裂隙网络参数具有很强的借鉴意义。

## 2.4. 拉丁超立方抽样(Latin Hypercube Sampling)方法

国内外大量学者对岩体裂隙网络模拟的研究中大部分是根据平面揭露裂隙数据,采用 Monte-Carlo 方法对岩体裂隙相关参数进行简单的随机抽样,但用这种方法会忽略了揭露面以下的岩体裂隙数据对模拟的最终结果的影响[22]。岳攀等[23]在平面揭露裂隙数据分析的基础上,结合钻孔及井下数据,对岩体裂隙的三维空间位置、裂隙的具体大小以及裂隙的产状进行统计分析,最后采用 LHS 方法对岩体裂隙相关参数进行模拟。该研究中的相关参数主要为裂隙的产状和裂隙的大小,其中裂隙大小主要为迹长特征,一般来说,迹长的分布形式通常为伽马分布,对数正态分布或负指数分布;裂隙产状的分布形式通常服从 Bingham 分布、Fisher 分布以及双变量正态分布等,其中相对而言,Fisher 分布拟合更好。而在该研究中,由图 2 可知,裂隙可以分为 3 组,并且分析得到 3 组裂隙的产状都服从 Fisher 分布,而裂隙的大小全都满足负指数分布。

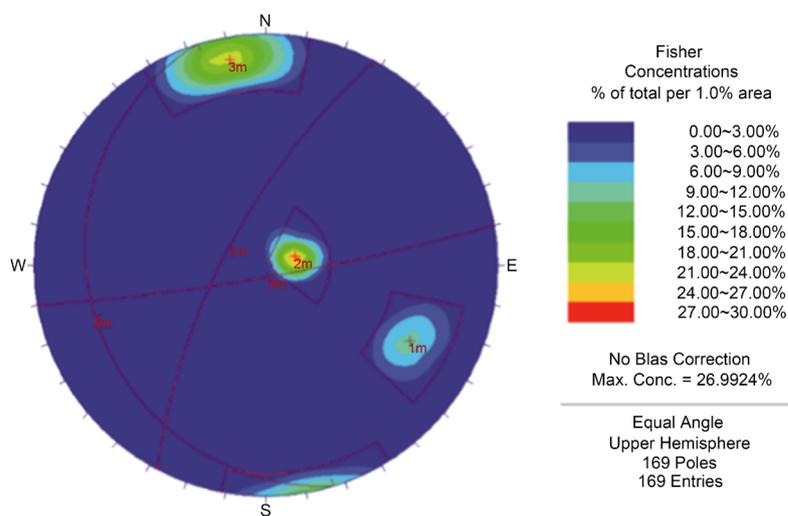


Figure 2. Equal density of crack poles  
图 2. 裂隙极点等密度[20]

## 3. 岩体裂隙网络生成的应用

### 3.1. 岩体力学性质的研究

岩体是一种不连续介质,在岩体中存在着许多规模不等、不同特征的裂隙,正是这些裂隙控制着岩体的各种特性,如力学特性、水理性质以及变形特性等等,岩体中的流体的流动规律也取决于岩体中裂隙的方向、密度及其连通性等地质几何特征,而这些几何特征同时也反映了岩体构造应力历史,工程中可采取许多方法对裂隙产状、裂隙宽度以及连通性进行确定。传统的确定性方法不能准确地反映块体特性[24],必须借助生成技术加以研究,从而得到裂隙网络的整体特征,利用一系列生成技术可更直观更全

面的了解裂隙分布规律和发育特征。陈卫忠等[25]通过 Monte-Carlo 随机模拟方法生成岩体裂隙网络,并据此可获得岩体力学相关参数,如图 3,图中岩体中裂隙无明显方向性,可分析岩体在这些无方向性结构面的切割作用下力学性质也具有各向异性。



Figure 3. Two sets of cracks generated by Monte-Carlo method  
图 3. Monte Carlo 法生成的两组裂隙[25]

### 3.2. 裂隙网络渗流特性研究

由于岩体中裂隙的存在,使得岩体的渗透性对岩体上部松散土体的负荷能力、边坡的稳定性以及地下工程的安全性都有非常重要的影响。因此,裂隙岩体渗流模型的研究对于分析裂隙岩体渗流特性具有重要意义,地壳浅表层的裂隙岩体是地下水渗透介质,而裂隙网络构成地下水及溶质在裂隙化岩体中运移的主要甚至唯一导水通道,通过对岩体裂隙网络的生成,进而研究裂隙中渗流特征。运用双重裂隙系统三维渗流模型能够比较全面地反映裂隙岩体中地下水的运移特征[26]。该研究表明,在研究岩溶区坝基岩体的渗流分析中,应用双重裂隙网络渗流模型效果是很好的,能够比较准确并且直观地反映出岩溶区岩体裂隙中的渗流分布特征,这对岩溶区水库的防渗具有非常重要的指导作用。

### 3.3. 指导注浆加固研究

岩体是由裂隙切割的岩石块体构成的实体,而不是像土体一般由散粒状堆砌组成。这意味着岩石块体渗透性很弱,因此岩体裂隙系统是气体及液体运移的主要骨架[27]。工程岩体的稳定性受结构面的相关性的影响十分显著,裂隙的发育程度、延伸特征、裂隙的组合特征以及各种地质几何特征对岩体的力学性能起到决定性的作用。由岩体裂隙诱发的渗漏水问题严重影响了地下工程建设施工与运营安全,所以地下工程突水大多与岩体裂隙有关,岩体注浆加固技术是突水灾害防治和预防的关键技术之一[28]。图 4 为通过裂隙网络二维图判断注浆加固点。而进行注浆的前提必须是要了解岩体裂隙分布特征,从而了解流体在裂隙中渗透机理,进而进行注浆加固。

### 3.4. 坝基岩体稳定研究

大部分水电工程建于高山或者大峡谷之中,在这种复杂的地质条件下,坝址区域岩体存在大量的裂隙,裂隙的存在不仅降低了岩体的完整程度,还降低了岩体的强度,影响了岩体的变形特性以及增强了岩体渗透性。换句话说,岩体中的裂隙发育程度是影响水电工程坝基岩体的稳定性的关键因素[29]。

如图 5,该裂隙网络中裂隙大多短小,且分布杂乱,与洞壁裂隙实际情况相符合。所以,建立准确的坝基岩体三维裂隙网络模型,对坝基岩体稳定性的研究是分析坝体安全的基础。

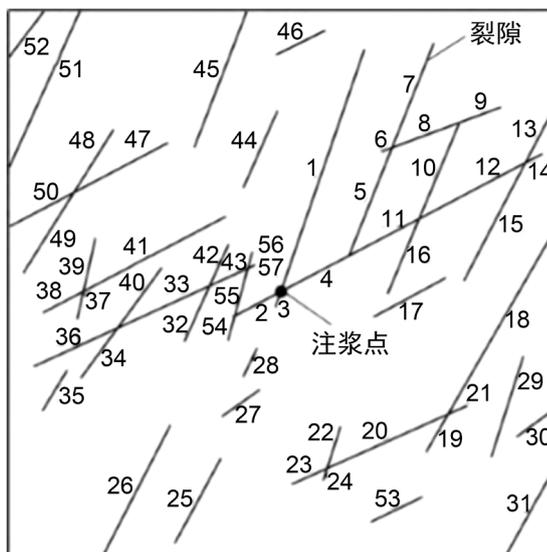


Figure 4. Fissure network and grouting reinforcement points

图 4. 裂隙网络及注浆加固点[28]

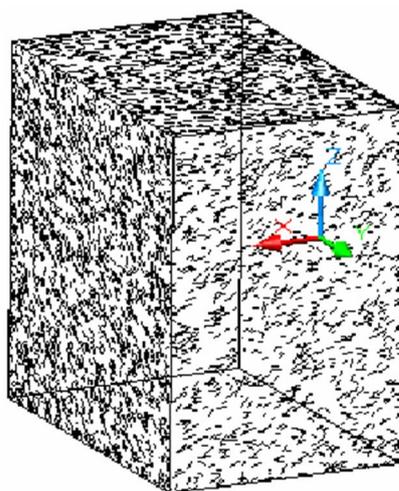


Figure 5. 3D crack network model of the cave wall

图 5. 洞壁三维裂隙网络模型[29]

#### 4. 结论

本文总结了岩体裂隙网络生成的几种主要技术。蒙特卡洛(Monte-Carlo)随机模拟方法是利用计算机程序对岩体裂隙网络的生成,可通过一系列统计试验对岩体裂隙相关参数如裂隙宽度、长度以及密度等进行统计分析,将统计分析得到的统计数字特征值作为该问题的最终解。离散元法是一种将岩石块体受力后的运动状态考虑在内的动态分析方法,研究单元体之间的相互作用是通过不连续体力学的方法,该方法是利用多种类型单元去适应不同的问题的需求。体视学技术方法(CT扫描技术)是将利用CT扫描得到的二维图像中的裂隙延展并且反演到三维空间,进而考虑到三维空间中存在的一些相关特征约束条件,推断出岩体裂隙在三维空间中的地质几何分布特征,最终实现应用二维裂隙数据模拟三维裂隙网络。拉丁超立方采样(Latin Hypercube Sampling)是一种从多元参数分布中近似随机采样的方法,属于分层采样技术,常用于计算机实验或蒙特卡洛积分等。

在裂隙网络模拟分析中,各方法一般都不是独立应用的,它们均可用于裂隙网络分析,但彼此之间存在差异。Monte-Carlo法可以在输入参数变量的范围内进行广泛抽样,与系统函数无关,只用输入及输出结果统计分析,但Monte-Carlo抽样完全随机,抽样结果会出现样本坍塌现象;LHS方法在地质条件复杂的水电工程中,样本空间填充性好,模拟结果更准确。体视学技术主要是将三维图像中裂隙反演到三维空间,需要推断出裂隙相关特征,此方法在一些仅露头观测或钻孔中难以获取三维资料中可应用。而离散元法多进行小模型的模拟,尺寸越小,其模拟结果越准确,常与Monte-Carlo法结合使用。

大部分条件下, Monte-Carlo法均可对裂隙网络进行模拟,但对于一些地质条件复杂的水电工程坝基中的裂隙岩体,采用LHS法结果更为准确,对于工程的渗水性及安全性指导意义更强;对于需要获取渗透性或变形相关参数时,离散元法结合其他方法可进行微观分析;另外,在三维空间相关特征获取困难的情况下,例如地质条件复杂的钻孔中,难以获取三维资料,以及一些矿山计算中,体视学技术具有很强的借鉴意义

## 基金项目

安徽省2019年大学生创新创业项目(S201970361016)。

## 参考文献

- [1] 王晋丽,陈喜,黄远洋,张志才. 岩体裂隙网络随机生成及连通性研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 30-35.
- [2] 徐钟济. 蒙特卡洛法[M]. 北京: 计算数学丛书, 1985.
- [3] 张学文. 断层带岩体裂隙网络蒙特卡罗模拟及应用[J]. 陕西煤炭, 2012, 31(1): 59-61.
- [4] 吴顺川,周喻,高永涛, MISRA, A. 等效岩体随机节理三维网络模型构建方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3082-3090.
- [5] 赵德文,王春雷,王华. 蒙特卡洛法网络模拟及其在岩体边坡稳定分析中的应用[J]. 四川建筑, 2004, 24(1): 55-56.
- [6] 杨米加,贺永年. 蒙特卡洛模拟的随机性及裂隙岩体渗透张量分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 492-494.
- [7] 王肖珊. 岩体裂隙网络的渗流计算及分形特性研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.
- [8] 王环玲. 裂隙岩体的多孔介质水力等效性研究[C]//中国力学学会岩土力学专业委员会. 第九届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集. 中国力学学会岩土力学专业委员会: 中国力学学会, 2007: 5.
- [9] 李玉成. 裂隙岩体力学特性的三维颗粒流离散元分析[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(4): 253-254.
- [10] 张金才,张玉卓,刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [11] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [12] 周冬磊,王连国,黄继辉,王占盛. 裂隙岩体应力渗流耦合规律及对底板隔水性能研究[J]. 金属矿山, 2011(11): 53-57.
- [13] 刘日成,蒋宇静,李博,王肖珊,徐帮树. 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): 2394-2400.
- [14] 谢和平,周宏伟. 基于分形理论的岩石节理力学行为研究[J]. 中国科学基金, 1998, 12(4): 247-252.
- [15] 赵小平. 裂隙煤岩体的力学行为研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2013.
- [16] Raynaud, S., Fabre, D., Mazerolle, F., et al. (1989) Analysis of the Internal Structure of Rocks and Characterization of Mechanical Deformation by a Non-Destructive Method: X-Ray Tomo-Densitometry. *Tectonophysics*, **159**, 149-159. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90176-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90176-5)
- [17] Kawakata, H., Cho, A., Yanagidani, T., et al. (1997) The Observations of Faulting in Westerly Granite under Triaxial Compression by X-Ray CT Scan. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **34**, 151-162. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00138-X)
- [18] Raynaud, S., Ngan-Tillard, D., Desrues, J., et al. (2008) Brittle-to-Ductile Transition in Beaucaire Marl from Triaxial Tests under the CT-Scanner. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **45**, 653-671.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.08.007>

- [19] Peng, R.D. and Yang, Y.C. (2011) Computation of Fractal Dimension of Rock Pores Based on Gray CT Image. *Chinese Science Bulletin*, **56**, 3346-3357. <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4683-9>
- [20] 腾俊洋, 唐建新, 王进博, 张宇宁. 层状复合岩体损伤演化规律及分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3263-3278.
- [21] 倪春中, 刘春学, 张世涛, 李爱敏, 李雨健, 苍宝海, 刘雷. 基于体视学技术的二维数据模拟三维裂隙网络[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 148-152.
- [22] Robinson, P.C. (1984) Numerical Calculations of Critical Densities for Lines and Planes. *Journal of Physics A-Mathematical And General*, **17**, 2823-2830. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/17/14/025>
- [23] 岳攀, 钟登华, 吴含, 张亦弛. 基于 LHS 的坝基岩体三维裂隙网络模拟[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 93-102.
- [24] 刘佐荣. 岩体力学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1999.
- [25] 陈卫忠, 杨建平, 邹喜德, 周春宏. 裂隙岩体宏观力学参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1569-1575.
- [26] 王恩志, 邓旭东, 王远亮, 魏寿松, 黄远智. 天生桥一级水电站岩体三维渗流初步分析[J]. 水力发电学报, 2000(4): 25-32.
- [27] 郝哲, 何修仁, 刘斌. 岩体注浆的随机模拟[J]. 冶金矿山设计与建设, 1998(1): 3-6.
- [28] 苏培莉. 煤岩体裂隙网络注浆的计算机模拟[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(10): 29-33.
- [29] 王晓明. 乌东德坝区岩体裂隙及块体研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.