

DOI: 10.11779/CJGE201703019

基于颗粒流程序的仿真节理岩体模型及其应用

金爱兵¹, 刘 刚¹, 杨振伟²

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘 要: 为实现采矿巷道周边节理网络的仿真模拟以及节理岩体中巷道的稳定性分析, 构建了包含颗粒流块体模型、原生节理网络和次生节理网络的仿真节理岩体模型。针对岩体内部次生节理产状和面积不可准确测量的难题, 提出了卸荷作用下次生节理产状和面积的计算方法: 根据开挖前后应力张量变化计算卸荷方向, 利用 Fisher 分布函数生成围绕在卸荷方向附近的随机节理产状; 监测卸荷前后颗粒中储存能量的变化, 计算节理面积和半径。通过布置测线方式获得巷道中原生节理密度和产状信息, 利用 Monte-Carlo 方法实现对原生节理的重建; 利用次生节理计算方法实现次生节理网络的建立, 从而建立仿真节理网络以及仿真节理岩体模型。计算结果显示: 无节理模型中顶板和底板先破坏, 以张拉破坏为主; 而在仿真节理岩体模型中节理部位最先破坏, 原生节理以剪切破坏为主, 次生节理以张拉破坏为主, 在高应力作用下巷道周边基本全部破坏, 需整体支护且重点在左右两帮。该计算方法可为节理岩体中巷道的稳定性计算提供参考及建议。

关键词: 仿真节理岩体; 颗粒流程序; 节理产状; 节理网络; 巷道破坏

中图分类号: TU 45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)03-0540-07

作者简介: 金爱兵(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn。

Numerical model for jointed rock mass in particle flow code and its application

JIN Ai-bing¹, LIU Gang¹, YANG Zhen-wei²

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. China Railway Fifth Survey and Design Institute Group, Beijing 102600, China)

Abstract: To simulate the joint network around mining tunnels and to conduct the stability analysis of tunnels in jointed rock mass, a numerical model for jointed rock mass containing particle flow block model, original joint network and secondary joint network is established. As the orientation and area of internal secondary joints are unmeasurable, a method for calculating the secondary joint orientation and area under unloading is put forward. The unloading direction is calculated according to the change of stress tensor before and after excavation, and the stochastic joint orientation is generated around the unloading direction through the Fisher distribution function. The area and radius of joints are calculated through the change of energy stored in particles. The density and orientations of the original joints in tunnels are measured through surveying lines, and the original joint network is rebuilt by using the Monte-Carlo method. The secondary joint network is rebuilt by using the secondary joint method. Finally, the realistic joint network and jointed rock mass model are established. The calculated result shows that the tensile failure firstly occurs at the top and bottom of the tunnel without joint network, while failure firstly occurs around the joints in the realistic jointed rock mass model. The original joints are mainly sheared to failure, and the failure mode around secondary joints is mainly tensile failure. Failure occurs mainly at the rim of the tunnel, which should be supported firstly. The two side walls of the tunnel should be also supported in particular. This study may provide reference and advice for tunnel calculation in jointed rock mass.

Key words: realistic jointed rock mass; particle flow code; joint orientation; joint network; tunnel failure

0 引 言

岩体在复杂地质作用下产生大量的节理裂隙, 其中包括原生节理和次生节理, 岩体中节理裂隙的存在对岩体变形特性和强度特性有显著的影响。而采矿巷

道往往具有埋深大、应力高、服役时间长、生产爆破

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674015); 中央直属高校基本科研业务费项目(FRF-TP-14-036A1)

收稿日期: 2015-12-28

扰动频繁等特点,其稳定性对矿山安全生产至关重要。建立巷道周边节理裂隙网络系统,对地下巷道变形计算和稳定性分析具有重要意义。

岩体是典型非连续体,颗粒流程序是求解非连续介质力学问题的有效方法。在颗粒流程序中,可利用黏结颗粒模拟岩体,用光滑节理模型表征节理,从而建立节理岩体模型,该方法已经获得应用^[1]。此外,Kulatilake等^[2]通过室内物理试验和PFC^{3D}数值试验,研究了节理块体在单轴加载时的力学特性;Xu等^[3]研究了岩体中裂隙位置的多种分布,并描述了在FracSim3D中重建三维节理网络的方法。

目前对节理网络的研究已经取得很多成果^[4-7],但仍存在不足:一般在建立节理网络时,并不区分原生节理和次生节理,而实际上原生节理是在成岩过程中由于长期地质作用产生的,分布广泛影响范围较大,而次生节理是由于采动卸荷所导致的,影响范围有限,二者形成机理和力学特性均有差异,因此在网络划分中应分别建立不同的单元和模型。

为真实地反映岩体中的节理状况,仿真节理岩体模型应由3部分构成:块体模型、原生节理和次生节理。块体模型可通过室内试验所得参数进行建立,原生节理可根据实地测量数据利用Monte-Carlo方法进行重建,但次生节理难以建立,尤其是岩体内部次生节理产状和大小不可测量,导致在节理网络研究中往往忽略该类节理。因此,次生节理网络的生成是构建仿真节理岩体模型的关键。

岩石中次生节理的产生可视为小裂隙扩展,在裂隙扩展方面的研究主要围绕应力与能量展开。黄达等^[8]通过裂隙岩体物理模型试验得出卸荷下裂隙扩展是卸荷差异回弹变形引起的拉应力和裂隙面剪切力增大而抗剪力减小的综合作用下破坏的结论;孙倩等^[9]基于应变能密度理论建立了细观单元岩石破坏的能量判别准则,并成功应用于巴西劈裂和中间裂隙拉伸试验的破裂模拟过程中。以上研究均为实验或理论研究,未建立系统的节理网络计算方法。

针对上述问题,本文从卸荷过程中应力张量变化与能量释放出发,提出了岩体内部次生节理产状和面积计算方法,在此基础上结合地下矿山回采巷道中节理调查数据,建立包含颗粒流块体模型、原生节理和次生节理的仿真节理岩体模型,可用于地下矿山节理岩体巷道稳定性计算。

1 卸荷作用下次生节理计算方法

地下矿山巷道开挖过程中,巷道围岩处于卸荷状态,应力状态发生变化同时伴随着能量的释放。因此卸荷作用下次生节理的产生和发展与应力状态变化和

能量释放过程密切相关,可根据卸荷方向计算节理产状,根据释放的能量计算节理面积。

1.1 节理产状计算

(1) 卸荷方向计算

在PFC模拟开采过程中,通过Fish语言编写命令流,监测各颗粒应力张量,记录下开挖前应力张量以及开挖稳定后的应力张量,并计算张量差,作为卸荷应力张量。

$$\mathbf{T}_u = \mathbf{T}_i - \mathbf{T}_e, \quad (1)$$

式中, \mathbf{T}_u 为卸荷应力张量, \mathbf{T}_i 为开挖前应力张量, \mathbf{T}_e 为开挖稳定后应力张量。

卸荷应力张量 \mathbf{T}_u 为实对称矩阵,对其进行对角化变换,得到3个主应力为 σ'_1 , σ'_2 和 σ'_3 :

$$\mathbf{T}_u = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{T}'_u = \begin{bmatrix} \sigma'_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma'_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, σ 为正应力, τ 为剪应力。

将变换所得的3个主应力 σ'_1 , σ'_2 和 σ'_3 按其绝对值大小重新排序,最大的记为 σ_1 ,对应方向余弦记为 l , m 和 n 。将 σ_1 代入下列方程组,可求出卸荷应力张量的最大主应力方向余弦^[10]:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_x - \sigma_1)l + \tau_{yx}m + \tau_{zx}n &= 0 \\ \tau_{xy}l + (\sigma_y - \sigma_1)m + \tau_{zy}n &= 0 \\ \tau_{xz}l + \tau_{yz}m + (\sigma_z - \sigma_1)n &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1. \quad (4)$$

式中,仅有两个为独立,取前两个组成方程组,由克莱姆法则可知:

$$\left. \begin{aligned} l &= \frac{nA}{C} \\ m &= \frac{nB}{C} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

$$\text{式中, } A = \begin{vmatrix} \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \sigma_y - \sigma_1 & \tau_{zy} \end{vmatrix}, \quad B = -\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_1 & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{zy} \end{vmatrix}, \quad C = \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_1 & \tau_{yx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_1 \end{vmatrix}.$$

将式(6)代入式(4),可得

$$n = \pm \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (6)$$

从而计算得到

$$\left. \begin{aligned} l &= \pm \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \\ m &= \pm \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \\ n &= \pm \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

式(7)为最大主应力方向余弦的显式计算结果,可方便进行编程计算求得 l 、 m 和 n 的值,即卸荷拉应力的最大主方向,亦即卸荷作用最明显的方向。

格里菲斯准则是岩石脆性断裂的判定准则,已经广泛应用于拉断破坏中。该准则认为在拉应力作用下,当拉应力大于试样抗拉强度时,开始产生裂隙^[11]。此外,黄达等^[8]、王明洋等^[12]研究表明,在卸荷情况下,岩石中将在缺陷处形成平行于卸荷方向的拉应力,而节理裂隙正是在此拉应力作用下形成的;在地下工程中观察亦可发现,开挖卸荷产生的拉裂缝往往平行于地下工程的边界^[13],即拉裂隙平面法向量与卸荷方向大致平行。

根据格里菲斯准则以及工程实际观察可得出:在脆性岩石中,当卸荷拉应力张量的最大主应力 σ_1 超过试样抗拉强度 σ_t 时,岩石微观裂隙便开始扩展产生次生节理,节理平面法向量与卸荷拉应力张量最大主应力方向近似平行,可用概率模型产生。

(2) 节理产状概率模型

节理的产生与卸荷方向密切相关,但也受诸多不确定性因素的影响,导致实际工程中节理产状不可准确预测,利用确定性数值方法来分析不确定性的结构面产状是不可行的。因此需要建立考虑不确定性因素的节理产状概率模型。

本文认为节理面的法向量将在以卸荷方向为中心的一定范围内变化,服从特定的统计规律。对此类问题一般用Fisher分布来描述^[14],将上述卸荷方向作为均值,Fisher分布参数 κ 可以用来表示节理面的离散性。

节理面的倾向和倾角为 (α, β) ,将其转化到球坐标系中,其法向矢量方向用 (ϕ, θ) 表示,其密度函数^[15]为

$$f(\phi, \theta) = \frac{\kappa \sin \theta \exp(\kappa \sin \theta \sin \bar{\phi} \cos(\phi - \bar{\phi}) + \cos \theta \cos \bar{\theta})}{4\pi \sinh \kappa} \quad (8)$$

式中, $(\bar{\phi}, \bar{\theta})$ 为平均矢量方向, κ 为反映数据集中程度的无量纲参数,由勘察数据得出。

设有 N_j 组节理,第 i 组节理法向量的方向余弦为 (l_i, m_i, n_i) ,则有

$$\left\{ \begin{aligned} |R| &= \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_j} l_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_j} m_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_j} n_i \right)^2} \\ \kappa &= \frac{(n-1)}{(n-|R|)} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

为简单计算,将坐标系 z 轴旋转至与 $(\bar{\phi}, \bar{\theta})$ 方向重合, x 轴保持在 xoy 平面上,此时向量 (ϕ, θ) 可用增量 $(\Delta\phi, \Delta\theta)$ 来表示:

$$f(\Delta\phi, \Delta\theta) = \frac{\kappa \sin \Delta\theta \exp(\kappa \cos \Delta\theta)}{4\pi \sinh \kappa} \quad (0 \leq \Delta\phi \leq 2\pi, 0 \leq \Delta\theta \leq \pi) \quad (10)$$

可求得 $\Delta\phi, \Delta\theta$ 的累积密度函数为

$$\left. \begin{aligned} F(\Delta\phi) &= \Delta\phi / 2\pi \quad (0 \leq \Delta\phi \leq 2\pi) \\ F(\Delta\theta) &= \frac{e^\kappa - e^{\kappa \cos \Delta\theta}}{e^\kappa - e^{-\kappa}} \quad (0 \leq \Delta\theta \leq \pi) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

产生符合Fisher分布的随机数为

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\phi &= 2\pi\eta \\ \Delta\theta &= \arccos \left\{ \ln \left[e^\kappa - (e^\kappa - e^{-\kappa})\eta \right] / \kappa \right\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, η 为 $(0, 1)$ 区间的均匀分布随机数。

利用此方法计算的节理产状将围绕在岩石卸荷方向附近一定范围内,既考虑了应力卸除方向影响,又考虑了不确定性因素的影响,具有统计随机性。

1.2 节理面积计算

赵忠虎等^[16]研究认为能量是材料破坏的原动力,岩石的破坏是能量耗散和能量释放共同作用的结果,新节理面的生成过程中,外界能量转化为表面能,并且当裂纹扩展所释放的应变能足够支付新表面所消耗的能量时,裂纹发生扩展。

颗粒流试样在加载过程中内部积聚一定的能量,微观能量的计算方式与宏观能量并不相同,颗粒流程序中微观能量包括:

(1) 外力功 E_b : 重力、外加力和外加力矩对颗粒集合所做的功。

$$E_b^{t+1} = E_b^t + \sum_{i=1}^{N_b} ((m_i^g g + F_i) \Delta U_i + M_i \Delta \theta_i) \quad (13)$$

式中 N_b 为颗粒数量; m_i^g 为颗粒重力质量; g 为重力加速度; F_i, M_i 为当前时步开始时边界上的合力和合力矩; $\Delta U_i, \Delta \theta_i$ 为当前时步所施加的位移和转角,上标 t 表示当前时步, $t+1$ 表示下一时步。

(2) 边界能 E_w : 模型边界加载过程对颗粒集合做的功。

$$E_w^{t+1} = E_w^t + \sum_{i=1}^{N_w} (F_i \Delta U_i + M_i \Delta \theta_i) \quad (14)$$

式中, N_w 为模型边界数量。

(3) 应变能 E_c : 颗粒间接触中存储的能量。在线弹性接触中:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_c} (|F_i^n|^2 / k^n + |F_i^s|^2 / k^s) \quad (15)$$

式中 N_c 为接触数量, $|F_i^n|, |F_i^s|$ 为法向和切向接触力; k^n, k^s 为法向和切向接触刚度。

(4) 黏结能 E_{pb} : 存储在平行黏结中的能量。

$$E_{pb} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_{pb}} \left(\frac{|\bar{F}_i^n|^2}{A_{pb} k^n} + \frac{|\bar{F}_i^s|^2}{A_{pb} k^s} + \frac{|\bar{M}_i^n|^2}{J_{pb} k^n} + \frac{|\bar{M}_i^s|^2}{J_{pb} k^s} \right) \quad (16)$$

式中 N_{pb} 为平行黏结数量; $\left| \bar{F}_i^n \right|$, $\left| \bar{F}_i^s \right|$ 为平行黏结法向和切向接触力; \bar{k}^n , \bar{k}^s 为平行黏结法向和切向接触刚度; $A_{pb} = \pi \bar{R}^2$ 为黏结圆盘面积, $J_{pb} = 0.5 \pi \bar{R}^4$ 为黏结圆盘截面的极惯性矩, $I_{pb} = 0.25 \pi \bar{R}^4$ 为黏结圆盘截面惯性矩; \bar{R} 为黏结圆盘半径。

(5) 动能 E_k : 所有颗粒运动的能量, 包括平动动能和转动动能。

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_k} (m_i^i V_i^2 + I_i \omega_i \cdot \omega_i) \quad (17)$$

式中 m_i^i 为颗粒惯性质量; V_i 为平动速度; I_i 为转动惯量; ω_i 为角速度。

(6) 摩擦能 E_f : 颗粒间滑动摩擦所消耗的能量。

$$E_f^{t+1} = E_f^t - \sum_{i=1}^{N_k} ((F_i^s)^{slip} (\Delta U_i^s)^{slip}) \quad (18)$$

式中 $(F_i^s)^{slip}$ 为平均剪应力; $(\Delta U_i^s)^{slip}$ 为滑动位移增量。

通过 PFC 中内置 fish 语言编写命令流, 监测卸荷前后微观颗粒中能量变化, 根据卸除能量的多少计算节理面积的大小。

$$\Delta E = 2S\lambda \quad (19)$$

式中 ΔE 为释放的能量; S 为节理面积; λ 为岩石类材料表面能, 可用于表示产生单位面积新表面所需要的能量, 需用接触角法等方法测得^[17-18], 本文取为 $50 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

前人研究认为, 将节理视为圆盘是合理的^[1]。因此可以求得节理半径 r :

$$r = \sqrt{S/\pi} \quad (20)$$

综上所述, 本文以格里菲斯准则为基础, 结合断裂过程中能量的释放, 对卸荷过程中次生节理产状进行计算。得到了次生节理倾向和倾角以及半径等参数, 可用于建立仿真节理网络。

2 仿真节理岩体模型建立与应用

山东省张家洼铁矿是国内著名的难采矿山之一, 地应力较高, 围岩破碎, 巷道破坏严重。以该矿区一号矿体-196 水平穿脉巷道为工程背景, 根据现场取样试验结果建立颗粒流块体模型, 通过实地测量信息分别建立原生和次生节理网络, 并将三者叠加产生仿真节理岩体模型进行工程计算。

2.1 颗粒流块体模型

对巷道现场进行勘察, 采集试样进行室内试验。通过单轴压缩试验获得试样的单轴抗压强度、弹性模量和泊松比; 通过三轴压缩试验获得内聚力与内摩擦角; 通过巴西劈裂试验获得试样的抗拉强度。岩石变形与强度参数如表 1 所示。

表 1 试样力学特性
Table 1 Mechanical properties of specimens

单轴抗压强度 σ_c/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比	内聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	抗拉强度 σ_t/MPa
21.35	8.73	0.25	6.5	27.6	3.17

为了获得与宏观参数相匹配的 PFC 细观参数, 在构建 PFC^{3D} 巷道模型前, 首先构建与室内试验大小相等的岩样数值模型, 赋予模型不同的细观参数, 利用 PFC 程序进行单轴和三轴压缩实验, 与真实试样获得的岩块变形特性和强度特性结果进行对比, 经过反复调试, 最终确定颗粒流模型的细观力学参数。同时根据工程地质勘查确定的节理粗糙度和张开度指标, 结合岩石节理力学试验, 获得光滑节理模型力学参数。数值模型中所取参数如表 2 所示。

根据调试参数建立地下巷道颗粒流模型, 并开挖出实际尺寸的巷道, 如图 1 所示。

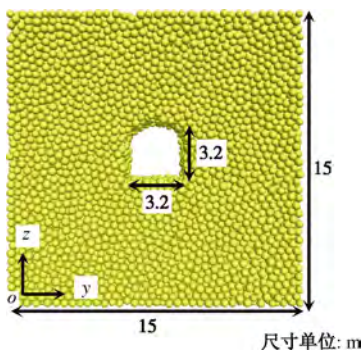


图 1 地下巷道颗粒流模型

Fig. 1 Particle flow model for underground tunnel

2.2 原生节理网络构建

对巷道中的节理进行实地测量, 沿巷道布置测线, 统计测量区间内原生节理与次生节理的数量和产状信息。巷道周边原生节理与次生节理区分方法是^[19]:

(1) 原生节理的充填物常属高温热液或气成产物, 较为陈旧, 而次生节理可为张开型节理或充填物、断口均较新。

(2) 原生节理常被后期脉岩所切断, 次生节理可被脉岩切断也可切断脉岩。

(3) 原生节理不切穿岩石中的矿物颗粒, 次生节理则有可能切穿矿物颗粒。

(4) 断层线附近有规律分布的节理, 一般为次生节理。

对原生节理数据进行整理分析, 发现区域内岩体在地质作用下, 原生节理面积较大, 常表现为贯穿整个巷道。在颗粒流块体中可视为贯通节理, 而其产状服从正态分布, 主要分为 2 组, 如表 3 所示。

表 2 数值试样细观力学参数
Table 2 Mesomechanical parameters of numerical samples

最小颗粒 半径/mm	最大 - 最小粒径比	颗粒体密度/(kg·m ⁻³)	粒间摩擦系数 μ		颗粒弹性模量/GPa	颗粒法向 - 切向刚度比
2.0	1.66	2630	0.5		67.0	1.5
平行黏结半径系数	平行黏结弹性模量		平行黏结法向-切向刚度比		平行黏结切向强度	
	/GPa		平均值/MPa	标准差/MPa	平均值/MPa	标准差/MPa
1.0	67.0	1.6	166.0	±38.0	166.0	±38.0
光滑节理法向刚度		光滑节理切向刚度/GPa		光滑节理内摩擦角		光滑节理膨胀角/(°)
/GPa				/(°)		光滑节理黏聚力/MPa
100		20		30		0
						2.18

表 3 原生节理产状参数

Table 3 Orientation parameters of original joints					
产状	倾角		倾向		体密度 /(条·m ⁻³)
	均值/(°)	标准差/(°)	均值/(°)	标准差/(°)	
A 组	73	5	25	3	0.006
B 组	21	5	10	3	0.0026

根据勘察数据，利用 Monte-Carlo 方法在 Matlab 中生成符合特定分布的随机数，建立原生节理网络如图 2 (a) 所示。

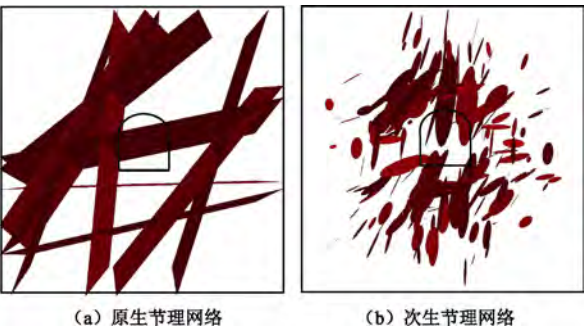


图 2 节理网络构建

Fig. 2 Construction of joint network

2.3 次生节理网络构建

巷道围岩在采动卸荷作用下，应力重新分布，并伴随能量释放，导致次生节理的产生，由于次生节理面积较小，多数未出露且产状不易测量，因此需要对深部节理产状进行推测。按照前文所述计算方法，根据应力变化计算产状，释放能量计算面积，建立采动次生节理网络如图 2 (b) 所示。

次生节理巷道周边较多，并随着到开挖面距离的增加而减少。巷道表面出露的次生节理面积较大，随着到开挖面距离的增加而逐渐减小。次生节理基本与卸荷方向垂直，符合实际观测结果。

2.4 仿真节理岩体模型构建

将原生节理网络与次生节理网络叠加，获得仿真节理网络如图 3 (a) 所示。再加入到颗粒流块体模型

中，建立仿真节理岩体模型如图 3 (b) 所示。

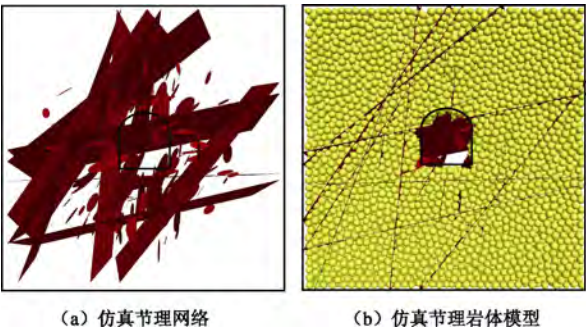


图 3 仿真节理网络与节理岩体模型

Fig. 3 Realistic joint network and jointed rock mass model

3 仿真节理岩体模型力学特性分析

在仿真节理岩体模型中，增加边界条件。此巷道埋深 400 m，垂直应力主要为上覆地层自重，根据地应力测量信息，该区域水平地应力大于垂直地应力，最大水平主应力与垂直应力有如下关系：

$$\sigma_H = (1.4 \sim 1.3)\gamma H \quad (21)$$

式中， σ_H 为最大水平主应力， γ 为岩体重度， H 为埋深。

3.1 变形特性分析

将无节理模型与仿真节理岩体模型，分别计算至整体平衡，获取巷道两帮及顶底板中心处的位移。并与现场监测结果进行比较分析，结果如表 4 所示。

表 4 巷道变形监测

Table 4 Deformation monitoring of tunnel (cm)				
数据来源	左帮	右帮	顶板	底板
现场监测	5.36	4.32	2.39	1.79
无节理模型	2.25	3.07	3.77	2.24
仿真节理岩体	5.93	4.84	3.12	2.07

采用 JSS30A-30 型数显收敛计进行巷道位移监测，每个观测断面设置 4 个监测点 (如图 4 所示)。监测结果显示，该巷道两帮位移较大，顶板和底板变形较小。这是由于该巷道水平应力大于竖直应力，且巷

道周边节理裂隙发育, 易发生片帮等现象。

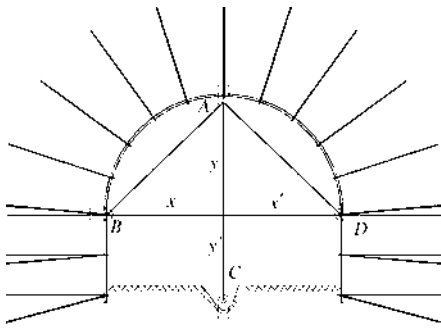


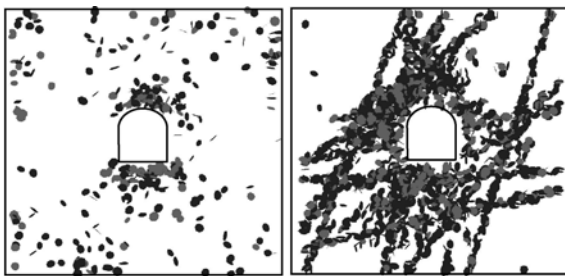
图4 测点布置图

Fig. 4 Layout of measuring points

利用无节理网络模型计算结果显示, 顶板和底板破坏较为严重, 而两帮破坏相对较小; 而在仿真节理岩体模型的计算结果中, 两帮及顶底板均存在破坏区, 其计算结果与巷道实际观测结果更为接近。

3.2 破坏模式分析

在 PFC 中分别采用无节理模型和仿真节理岩体模型进行计算, 破坏模式分别如图 5 (a)、(b) 所示。



黑色为剪切破坏, 灰色为张拉破坏
(a) 无节理模型 (b) 仿真节理模型
图5 数值模型破坏模式

Fig. 5 Failure mode of numerical model

在无节理网络模型中破坏区域较少, 且主要分布在巷道顶部和底部区域, 以灰色张拉破坏为主; 其他区域黏结破坏较少, 分布无规律, 以黑色剪切破坏为主。而在仿真节理岩体模型中, 节理面部位的黏结最先破坏, 原生节理以黑色剪切破坏为主, 次生节理以灰色张拉破坏为主, 而次生节理主要集中于巷道壁附近, 计算结果显示不仅巷道顶底板发生破坏, 巷道壁同样破坏严重, 呈现整体破坏趋势。



(a) 岩壁破坏图 (b) 巷道顶板破坏图
图6 巷道破坏现场照片

Fig. 6 Photo of tunnel failure

在对该采矿巷道进行实地观测过程中, 发现巷道破坏与节理面关联较大, 节理面发育部位破坏最为严重, 巷道周边破坏严重, 出现多处混凝土支护开裂剥落 (如图 6 (a))。巷道顶底板也均有破坏 (图 6 (b)), 这与仿真岩体模型计算结果较为一致, 证明利用该仿真模型进行巷道开挖数值模拟是可行的。

4 结 论

本文在颗粒流程序中, 利用光滑节理模型模拟地下巷道周围节理网络, 建立了仿真节理岩体模型, 并进行工程计算。主要结论有

(1) 提出了卸荷作用下岩体内部次生节理计算方法: 根据卸荷前后应力张量变化, 获得卸荷应力张量, 求得最大卸荷主应力方向, 考虑节理产生的不确定性, 引入概率模型计算节理产状; 通过对监测点能量的计算, 获得卸荷前后释放的能量, 根据岩石表面能, 可计算节理面积, 从而求得节理半径。

(2) 在实地勘察的基础上, 构建了巷道的原生节理网络, 在开挖过程中根据格里菲斯准则判断次生节理的产生, 根据岩体内部次生节理计算方法构建了巷道的次生节理网络。该节理网络构建方法可较为真实地反映巷道周边节理分布情况。

(3) 以实际工程为背景, 建立仿真节理岩体模型, 对巷道各帮变形以及破坏模式进行分析, 结果表明: 仿真节理岩体模型变形特征与实际工程更为接近; 原生节理以剪切破坏为主, 次生节理以张拉破坏为主, 均符合工程实际, 可为支护措施优化提供依据, 为节理岩体工程计算提供新方法。

参考文献:

- [1] 吴顺川, 周 喻, 高永涛, 等. 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(增刊 1): 3082 - 3090. (WU Shun-chuan, ZHOU Yu, GAO Yong-tao, et al. Research on construction method of stochastic joints 3D-network model of equivalent rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3082 - 3090. (in Chinese))
- [2] KULATILAKE P H S W, MALAMA B, WANG J. Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(5): 641 - 657.
- [3] XU C, DOWD P. A new computer code for discrete fracture network modeling[J]. Computers and Geosciences, 2010, 36(3): 292 - 301.
- [4] 张春会, 于永江, 岳宏亮, 等. 随机分布裂隙煤岩体模型及其应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 265 - 270. (ZHANG

- Chun-hui, YU Yong-jiang, YUE Hong-liang, et al. Model with random cleats distribution for coal seams and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 265 - 270. (in Chinese))
- [5] DI Sheng-jie, XU Wei-ya, NING Yu, et al. Macro-mechanical properties of columnar jointed basaltic rock masses[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, **18**(6): 2143 - 2149.
- [6] BEAR J U, KENT T F, ANDERSON S H. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks[J]. Geoderma, 2009, **154**: 153 - 163.
- [7] LI J H, ZHANG L M. Geometric parameters and REV of a crack network in soil[J]. Computers and Geotechnics, 2010, **37**: 466 - 475.
- [8] 黄 达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 502 - 512. (HUANG Da, HUANG Run-qiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 502 - 512. (in Chinese))
- [9] 孙 倩, 李树忱, 冯现大, 等. 基于应变能密度理论的岩石破裂数值模拟方法研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1575 - 1582. (SUN Qian, LI Shu-chen, FENG Xian-da, et al. Study of numerical simulation method of rock fracture based on strain energy density theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1575 - 1582. (in Chinese))
- [10] 王俊彪. 应力主方向的计算公式[J]. 力学与实践, 1992(4): 60 - 60. (WANG Jun-biao. Calculation formula of principal stress direction[J]. Mechanics and Engineering, 1992(4): 60 - 60. (in Chinese))
- [11] 赵 文, 曹 平, 章 光. 岩石力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006. (ZHAO Wen, CAO Ping, ZHANG Guang. Rock mechanics[M]. Changsha: Central South University Press, 2006. (in Chinese))
- [12] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 234 - 241. (WANG Ming-yang, FAN Peng-xian, LI Wen-pei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 234 - 241. (in Chinese))
- [13] 范鹏贤, 王明洋, 钱七虎. 深部非均匀岩体卸载拉裂的时间效应和主要影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(7): 1389 - 1396. (FAN Peng-xian, WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. Time effect and main influence factors of unloading splitting of deep-seated rock with nonuniformities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(7): 1389 - 1396. (in Chinese))
- [14] 倪春中, 刘春学, 张世涛. 从岩石露头裂隙迹线估算裂隙三维空间方向[J]. 石油与天然气地质, 2013, **34**(1): 102 - 106. (NI Chun-zhong, LIU Chun-xue, ZHANG Shi-tao. Estimation of three-dimensional distribution of fissures according to fissure traces on outcrops[J]. Oil Gas Geology, 2013, **34**(1): 102 - 106. (in Chinese))
- [15] 王 双, 陈征宙, 吴 强, 等. 基于节理产状不确定性的边坡稳定性及敏感度分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(2): 348 - 354. (WANG Shuang, CHEN Zheng-zhou, WU Qiang, et al. Stability and sensitivity analysis of slopes based on uncertainty of joint orientations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(2): 348 - 354. (in Chinese))
- [16] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2008, **40**(2): 26 - 31. (ZHAO Zhong-hu, XIE He-ping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture[J]. Journal of Si Chuan University (Engineering Science Edition), 2008, **40**(2): 26 - 31. (in Chinese))
- [17] 邓 锐, 李 敏, 张佐光, 等. 接触角法测玄武岩及玻璃纤维表面能实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, **33**(11): 1349 - 1352. (DENG Rui, LI Min, ZHANG Zuo-guang, et al. Surface free energy of basalt and glass fibers by contact angle method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, **33**(11): 1349 - 1352. (in Chinese))
- [18] ARSALAN N, PALAYANGODA S S, BURNETT D J, et al. Surface energy characterization of carbonate rocks[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, **35**(436): 139 - 147.
- [19] 王根厚, 王训练, 余心起. 综合地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2008. (WANG Gen-hou, WANG Xun-lian, YU Xin-qi. Comprehensive geology[M]. Beijing: Geology Press, 2008. (in Chinese))