

基于溶洞随机模型的岩质边坡稳定性评估研究^{*}

张科^{1,2}, 杨红宣¹, 范文臣³

(1.昆明理工大学 电力工程学院,昆明 650500;2.昆明理工大学 建筑工程学院,昆明 650500;
3.中南大学 资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘要:以城门山铜矿为例,提出了一种溶洞随机模型并将其应用于评估岩溶地区岩质边坡稳定性。钻孔数据统计表明溶洞长度分布服从负指数规律,而石灰岩长度分布是无规则的。基于钻孔数据,分别采用逆变换法和舍选法生成溶洞和石灰岩长度;同时,借鉴极限平衡法中竖直条分思路,将岩溶区域离散为有限数量的竖直条块;在此基础上,开发了溶洞随机模型生成软件。将溶洞随机模型导入极限平衡法,提出了一种岩溶地区岩质边坡稳定性评估方法。研究发现,溶洞随机模型模拟所得的溶洞特征参数与钻孔统计结果非常接近。考虑溶洞影响效应,城门山铜矿典型边坡的安全系数明显降低。该方法对于类似岩溶地区的溶洞分布模型构建以及岩质边坡稳定性评估具有重要的指导和推广意义。

关键词:溶洞;随机模型;蒙特卡罗模拟;岩质边坡;稳定性分析

中图分类号:P642.3

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1381-06

Rock Slope Stability Analysis Based on Karst Cave Stochastic Model

Zhang Ke^{1,2}, Yang Hongxuan¹, Fan Wenchen³

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P.R.China;
2. Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P.R.China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, P.R.China)

Abstract: Taking the Chengmenshan Copper Mine as a case study, a karst cave stochastic model was presented and it was applied to rock slope stability analysis in the karst area. The borehole investigations were performed in the study site. The statistical result shows that the length of karst cave fits to a negative exponential distribution model, and the length of limestone does not follow any distribution. The inverse transform method and acceptance-rejection method were used to reproduce the length of the karst cave and limestone based on the available drilling data, respectively. Using the concept of vertical slices from the limit equilibrium method as a reference, the karst area was divided into a finite number of vertical slices. A code for karst cave stochastic model generation was developed. The karst cave stochastic model was introduced into the limit equilibrium method. A methodology for rock slope stability analysis in the karst area was presented. The results show that the characteristic parameters of karst cave simulated by the karst cave stochastic model are close to these by borehole investigations. The factor of safety of typical slope in the Chengmenshan Copper Mine reduces due to the existence of karst cave. The proposed methodology will provide some guidelines for constructing karst cave distribution model and evaluating rock slope stability in similar karst area, and is deserved to be generalized.

Keywords: karst cave; stochastic model; Monte Carlo simulation; rock slope; stability analysis

^{*} 收稿日期:2018-04-10(修改稿)

作者简介:张科(1986-),男,浙江舟山人,博士,副教授,主要从事岩石力学与工程应用方面的教学与研究工作。

E-mail:zhangke_csu@163.com

通讯作者:杨红宣(1975-),男,云南大理人,硕士,讲师,主要从事水利水电工程方面的教学与研究工作。

E-mail:511043461@qq.com

基金项目:国家自然科学基金(41762021);中国博士后科学基金(2016M592717;2017T100715);中国岩石力学与工程学会青年人才托举工程项目(2016QT-6-6);云南省人培基金(KKSY201504049)

0 引言

我国岩溶地貌分布广泛,给工程建设带来不同程度的复杂性,引起了工程技术人员和学者的重视。目前,岩溶地质灾害研究主要涉及地面塌陷和沉陷,而对岩溶与滑坡的关系研究较少。杨先寿等^[1]将贵州岩溶边坡失稳归纳为两大类:具有连续性滑动面 and 没有连续性滑动面的失稳类型。Santo 等^[2]将影响边坡稳定的岩溶地貌分为3类:地下岩溶、地表岩溶以及岩溶与其他侵蚀营力的相互作用。刘海燕等^[3]研究溶蚀作用对三峡库区泥质灰岩工程性质的影响,总结了3种典型破坏类型:薄-中厚层块裂式破坏、中-厚层点裂式破坏以及厚-巨厚层层裂式破坏。但是上述研究主要集中于构建工程地质模型,难以定量评价岩溶对边坡稳定性的衰减作用。

目前,也有学者对含地下空区的边坡稳定性开展了一系列的研究工作。万文等^[4]采用改进的遗传算法自动搜索含地下空区边坡的最危险滑动面及最小安全系数。柴红保等^[5],Beck 等^[6],刘辉等^[7],Elmo 等^[8]以及 Vyazmensky 等^[9]数值模拟分析地下空区对边坡稳定性的影响效应。黄平路等^[10],尹光志等^[11]采用物理相似模型试验研究地下开采对边坡岩体变形破裂响应。这些地下空区属于人工开挖形成的空区,位置、大小和形状等空间特征参数可参考设计报告。

溶洞是石灰岩地区地下水长期溶蚀的产物,难以精确预测其空间特征。通常采用地球物理技术探测溶洞分布,主要分为重力勘探方法、电磁方法、地震勘探法、放射性勘探法以及综合物探方法等。但是地球物理方法存在着非唯一性以及难以探测小空区等缺陷^[12-13]。

空间特征未知以及尺寸小是探测溶洞的最大困难,难以通过地球物理方法准确得知。矿山初步设计前已有大量勘探钻孔,同样也提供了溶洞分布信息。本文从新的角度出发,基于钻孔数据,提出了一种溶洞随机模型模拟方法,在此基础上对生成的岩溶边坡模型进行稳定性评估,形成一套岩溶地区岩质边坡稳定性研究方法。

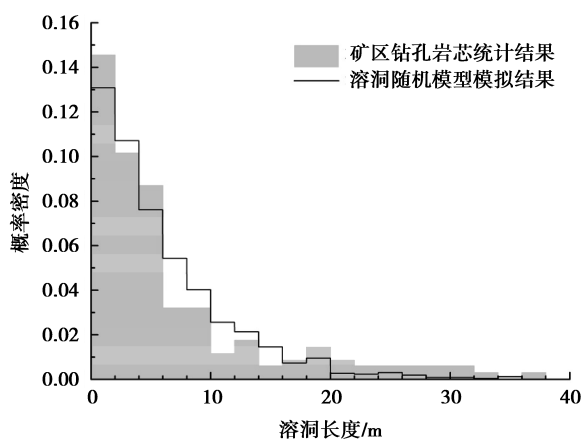
1 岩溶发育特征及其统计规律

石灰岩地层广泛分布于城门山铜矿,嘉陵江组、大冶组、长兴组、茅口组、栖霞组和黄龙组等石

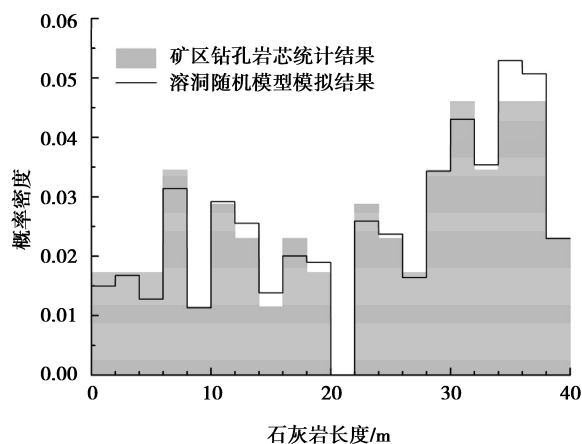
灰岩中广泛发育着岩溶。钻孔钻进过程中掉钻深度大于20 cm,即可视为遇到溶洞。在-200 m以上强岩溶带内溶洞甚多,溶洞规模大而且密集,如串珠状出现。-200 m以下,溶洞发育少而小,溶蚀现象也不普遍,所以可以认为矿区岩溶发育的下限约为-200 m标高。

对矿区现有地质钻孔中0 m至-200 m标高内的溶洞和石灰岩长度进行频度曲线统计分析,相应的频度直方图如图1所示。图1(a)表明溶洞长度与概率密度之间呈负指数分布关系,拟合函数关系见式(1);而图1(b)表明石灰岩长度分布是无规则的。定义钻孔遇溶洞率为遇溶洞的钻孔数与总钻孔数的比值,岩溶率为溶洞总长度与钻孔总长度的比值,经统计得矿区钻孔遇溶洞率为31.25%,岩溶率为6.40%。

$$f(x) = 0.178 3e^{-0.178 3x}, R^2 = 0.965 4 \quad (1)$$



(a) 溶洞长度



(b) 石灰岩长度

图1 溶洞和石灰岩长度的频度直方图

Fig. 1 Frequency histograms of lengths of karst cave and limestone

2 溶洞随机模型

2.1 理论原理

由于溶洞的复杂性,尤其是城门山铜矿溶洞的尺寸大部分较小,难以精确地描述溶洞的空间特征。Monte Carlo 模拟方法已成功应用于裂隙网络^[14-15]和地层^[16]的生成。本文将溶洞看作一种特殊岩层,基于 Monte Carlo 模拟方法,提出了一种溶洞随机模型生成方法。

为简化问题,将溶洞形状近似为矩形。溶洞高度可用含溶洞的钻孔长度表示,但是溶洞宽度难以通过钻孔获取。为解决这个问题,将岩溶区域离散为有限数量的竖直条块,类似于极限平衡法中的竖直条分思想。

定义条块遇溶洞率为含溶洞的条块数与总条块数的比值。如果条块含有溶洞,将溶洞和石灰岩长度视为 2 个随机变量 $X = \{x_1, x_2\}^T$,通过重复对 X 进行随机抽样(具体流程如下节所示),产生该条块上的随机模型,构建溶洞和石灰岩层序的分布函数及其相关的统计特征;否则,该条块全由石灰岩组成。采用 C 语言编写基于 Monte Carlo 模拟的溶洞随机模型生成软件。

溶洞随机模型中采用如下假设:

- (1) 溶洞形状为矩形。
- (2) 钻孔遇溶洞率等于模型中条块遇溶洞率。

2.2 溶洞长度随机模型

矿区钻孔数据统计分析表明,溶洞长度与概率密度之间服从指数分布,如图 1(a)所示,拟合得概率密度函数 $f(x_1)$ 为:

$$f(x_1) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x_1}, & x_1 \geq 0 \\ 0, & x_1 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: λ 为率参数,在城门山铜矿中 $\lambda = 0.1783$ 。

相应的累积分布函数 $F(x_1)$ 为:

$$F(x_1) = 1 - e^{-\lambda x_1} \quad (3)$$

根据逆变换法,生成溶洞长度:

$$x_1 = F^{-1}(u) = \frac{1}{\lambda} \ln(1 - u) \sim \frac{1}{\lambda} \ln u \quad (4)$$

式中: u 为服从 $(0,1)$ 均匀分布的随机变量。

2.3 石灰岩长度随机模型

许多随机变量的累积分布函数无法用解析函数给出,而有些累积分布函数的逆函数不存在或难

以求出。图 1(b)表明石灰岩长度分布无规则,所以无法求解其随机变量的逆函数。本节采用舍选法生成石灰岩长度。

设石灰岩长度随机变量 x_2 的取值区间为 $x_2 \in [a, b]$,其概率密度函数 $f(x_2)$ 有界。舍选法的基本思路是找到一种可以简单模拟的概率分布 G ,概率密度为 $g(x_2)$,本文取 $g(x_2) = 1$;抽取随机变量 x_2 的一个随机序列,舍选出一个子序列,使其满足图 1(b)中的概率分布。石灰岩长度的生成流程如下:

- (1) 产生 $[a, b]$ 区间内均匀分布的随机数 x_2 :

$$x_2 = (b - a)u + a \quad (5)$$

- (2) 产生服从 $(0,1)$ 均匀分布的随机变量 v 。

- (3) 判断式(6)是否成立:

$$vCg(x_2) \leq f(x_2) \quad (6)$$

式中: C 为比例常量, $C = \max \{f(x_2)/g(x_2)\}, x_2 \in [a, b]$ 。

如果式(6)成立,接受 x_2 。

- (4) 如果式(6)不成立,拒绝 x_2 ,返回步骤(1),继续抽样。

3 岩溶地区岩质边坡稳定性评估

3.1 计算流程

岩溶地区岩质边坡稳定性评估流程如图 2 所示。

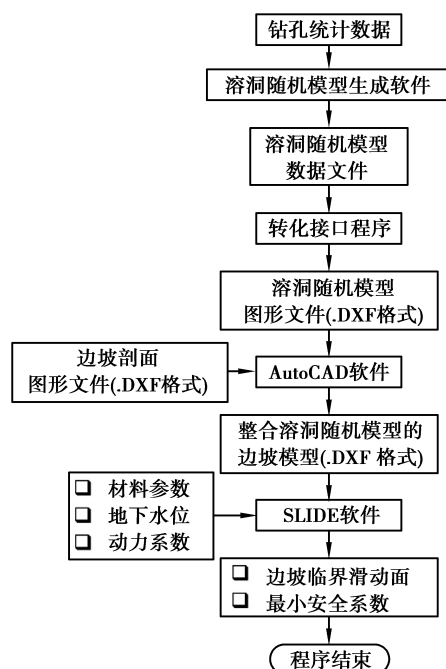


图 2 岩溶地区岩质边坡稳定性评估流程

Fig. 2 Stability analysis procedure of rock slope in karst area

(1)根据钻孔岩芯数据,统计溶洞和完整岩石长度。

(2)建立相应的概率分布模型,结合实测数据辨识模型参数。

(3)在特定区域,采用自编的溶洞随机模型生成软件自动生成溶洞随机模型,输出相应的数据文件。

(4)编写转化接口程序将溶洞随机模型数据文件,整合至边坡剖面图形文件,将整合溶洞随机模型的边坡模型保存为.DXF 格式文件。

(5)将边坡模型文件、材料参数、地下水位以及动力系数导入 SLIDE 软件(这是一款国际著名的边坡极限平衡法分析软件)。将溶洞作为一种特殊地质层,所有材料参数均赋为零:重度 $0 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 、黏聚力 0 kPa 以及内摩擦角 0° 。自动搜索岩溶边坡最小安全系数及其临界滑动面,实现岩溶地区岩质边坡稳定性评估。

3.2 溶洞随机模型生成结果

选取城门山铜矿的典型岩溶边坡剖面,边坡高度为 346 m ,如图 3 所示。边坡岩体主要由茅口组和栖霞组石灰岩构成,地质钻孔表明这两类灰岩在 0 m 至 -200 m 标高内广泛发育着溶洞。坡体上部存在风化层,坡体中下部有少量花岗闪长斑岩和硅化灰岩,区域内无断层。地下水位线如图 3 所示,动力系数取 $0.038 1$ 。

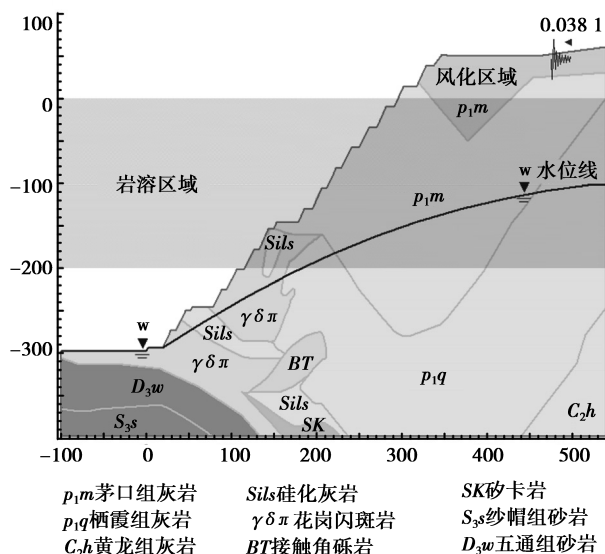
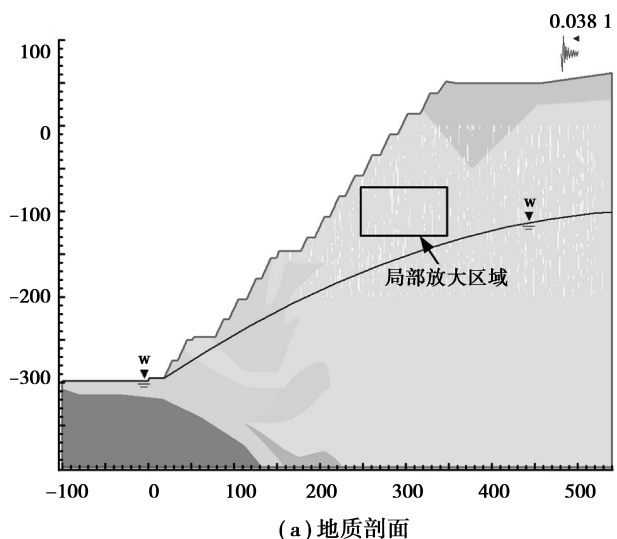


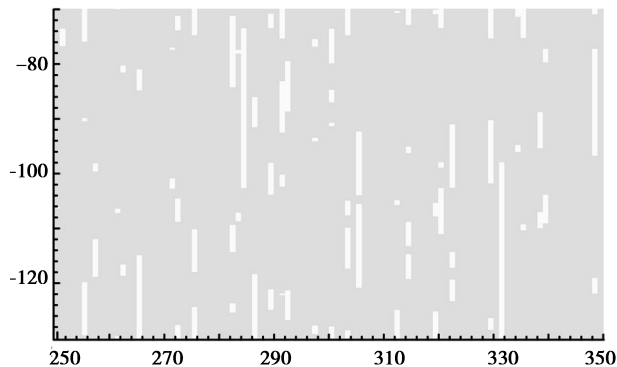
图 3 典型岩质边坡地质剖面

Fig. 3 Cross section geometry of typical rock slope

图 4(a)为溶洞随机模型和地质模型整合所得的岩溶边坡地质剖面,图 4(b)为溶洞随机模型的局部放大图。图 1 为溶洞随机模型模拟所得溶洞和石灰岩长度统计的频度直方图,与矿区钻孔岩芯数据统计结果非常接近。另外,溶洞随机模型模拟所得岩溶率和条块遇溶洞率分别为 6.29% 和 31.50% ,与钻孔统计值也都很接近。这些结果均表明,溶洞随机模型模拟结果的有效性。



(a) 地质剖面



(b) 局部放大区域

图 4 整合溶洞随机模型的地质剖面

Fig. 4 Cross section geometry integrated with karst cave stochastic model

3.3 计算结果

对于不含溶洞随机模型的岩质边坡,自动搜索得到最小安全系数为 1.176 ,相应的临界滑动面位置如图 5(a) 所示。而考虑溶洞的存在,边坡最小安全系数为 1.106 ,下降幅度达 6% ;相应的临界滑动面位置与不含溶洞随机模型的岩质边坡也有所不同,坡顶处滑动面位置略为前移,如图 5(b) 所示。对比上述两种工况的安全系数变化可知,溶洞的存在会导致边坡稳定性显著降低。

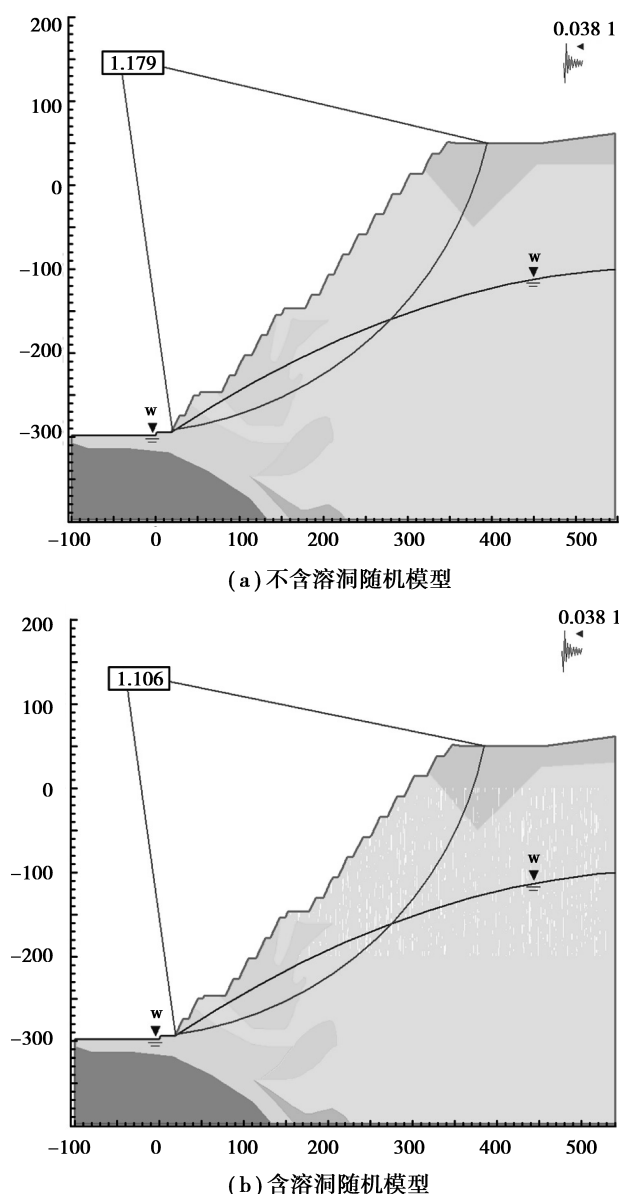


图5 岩质边坡临界滑动面位置及其最小安全系数

Fig. 5 Location of critical failure surfaces and the minimum factors of safety of rock slopes

本文提出的方法可以构建符合数理统计要求的溶洞分布模型,并能考虑溶洞对岩质边坡稳定性的衰减效应,对于科学评估岩溶地区岩质边坡稳定性、预防滑坡灾害具有重要的指导作用,在类似岩溶工程应用中具有重要的参考与推广意义。

4 结论

(1) 现场调研了城门山铜矿工程地质特征,钻孔数据统计表明,溶洞长度呈现负指数分布规律,而石灰岩的长度分布是无规则的。

(2) 提出了一种溶洞随机模型生成方法,分别采用逆变换法和舍选法随机产生溶洞和可溶岩长

度;借鉴极限平衡法中竖直条分思路,将岩溶区域离散为有限数量的竖直条块;在此基础上,开发了溶洞随机模型生成软件。研究表明,溶洞随机模型模拟所得的溶洞特征参数与钻孔统计值非常接近。

(3) 将溶洞随机模型与极限平衡法相融合,实现定量评估岩溶地区岩质边坡稳定性。研究结果表明,考虑溶洞的影响效应,城门山铜矿典型岩质边坡的安全系数明显降低。本文提出的方法对岩溶地质条件下岩质边坡工程具有重要的指导意义和推广价值。

参考文献 (References)

- [1] 杨先寿,蒋忠诚. 贵州表层岩溶边坡失稳的模式、机理及评价[J]. 中国岩溶, 1998, 17(4): 370-377. (Yang Xianshou, Jiang Zhongcheng. Model and mechanism of epikarst slope distabilization in Guizhou [J]. Carsologica Sinica, 1998, 17(4): 370-377. (in Chinese))
- [2] Santo A, Del Prete S, Crescenzo D G, et al. Karst processes and slope instability: some investigations in the carbonate Apennine of Campania (southern Italy) [J]. Geological Society of London Special Publication, 2007, 279(1): 59-72.
- [3] 刘海燕,伍法权,祁生文,等. 三峡库区泥质灰岩溶蚀作用与边坡岩体破坏[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 37-41. (Liu Haiyan, Wu Faquan, Qi Shengwen, et al. The dissolution process and the rock mass breakage of marlite slope in Three Gorges Reservoir Region [J]. Coal Geology and Exploration, 2006, 34(4): 37-41. (in Chinese))
- [4] 万文,曹平,冯涛. 基于改进遗传算法分析地下空区对边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 2015-2019. (Wan Wen, Cao Ping, Feng Tao, et al. Analysis of slope stability for underground vacant areas based on improved genetic algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 2015-2019. (in Chinese))
- [5] 柴红保,曹平,柴国武,等. 采空区对边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(4): 1528-1534. (Chai Hongbao, Cao Ping, Chai Guowu, et al. Influence of goaf on slope stability [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2010, 41(4): 1529-1531. (in Chinese))
- [6] Beck D, Pfitzner M. Interaction between deep block caves and existing, overlying caves or large open pits [A] // Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining [C]. Lulea: Lulea

- University of Technology Press, 2008: 381-391.
- [7] 刘辉, 陈文胜, 冯夏庭, 等. 大冶铁矿露天转地下开采的离散元数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1413-1417. (Liu Hui, Chen Wensheng, Feng Xiating, et al. Numerical modeling of daye iron open-pit-mine transferring to underground mining by discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1413-1417.(in Chinese))
- [8] Elmo D, Vyazmensky A, Stead D, et al. Numerical analysis of pit wall deformations induced by block-caving mining: a combined FEM/DEM-DFN synthetic rock mass approach[A]//Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining[C]. Lulea; Lulea University of Technology Press, 2008: 1073-1082.
- [9] Vyazmensky A, Stead D, Elmo D, et al. Numerical analysis of block caving-induced instability in large open pit slopes: a finite element/discrete element approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(1): 21-39.
- [10] 黄平路, 陈从新. 露天与地下联合开采引起岩层移动规律的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1310-1314. (Huang Pinglu, Chen Congxin. Model test study on rock movement caused by open-underground combined mining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1310-1314.(in Chinese))
- [11] 尹光志, 李小双, 李耀基. 底摩擦模型模拟露天转地下开挖采空区影响下边坡变形破裂响应特征及其稳定性[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(3): 231-238. (Yin Guangzhi, Li Xiaoshuang, Li Yaoji. Simulation of the deformation and failure response features and stability of a slope from open pit mining to underground mining under the effecting of excavation goaf by the floor friction model[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(3): 231-238.(in Chinese))
- [12] Munoz G, Rath V. Beyond smooth inversion: the use of nullspace projection for the exploration of non-uniqueness in MT [J]. Geophysical Journal International, 2006, 164(2): 301-311.
- [13] Moorkamp M, Heincke B, Jegen M, et al. A framework for 3-D joint inversion of MT, gravity and seismic refraction data[J]. Geophysical Journal International, 2011, 184(1): 477-493.
- [14] Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(3): 283-353.
- [15] Dowd P, Xu C, Mardia K, et al. A comparison of methods for the stochastic simulation of rock fractures [J]. Mathematical Geology, 2007, 39(7): 697-714.
- [16] Pan M Y. Uncertainty and sensitivity analysis in soil strata model generation for ground settlement risk evaluation[D]. Lund; Lund University, 2012.

(上接第 1371 页)

- [19] 张定邦. 高陡边坡与崩落法地下开采相互影响机理模型试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013. (Zhang Dingbang. Research of similarity model test on open pit to underground mining with super high-steep slope [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [20] 张亚民, 马凤山, 徐嘉谟, 等. 高应力区露天转地下开采岩体移动规律[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 590-595. (Zhang Yaming, Ma Fengshan, Xu Jiamo, et al. Deformation laws of rock mass due to transform from open-pit to underground mining in high stress area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 590-595. (in Chinese))
- [21] 贾太保. 露天转地下开采诱发环境破坏的动态预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(3): 99-104. (Jia Taibao. The dynamic prediction of environment damage induced by the excavation from open-pit into underground mine [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(3): 99-104. (in Chinese))
- [22] 曹家源. 露天转地下开采引起的采坑围岩变形特征及其发生机理[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015. (Cao Jiayuan. The deformation behavior occurrence mechanism of pit surrounding rock after the transition from open pit mining to underground mining [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese))
- [23] 邓清海, 曹家源, 张丽萍, 等. 转地下开采后龙首矿露天采坑底部隆起机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 677-682. (Deng Qinghai, Cao Jiayuan, Zhang Liping, et al. Uplift mechanism of the bottom of open pit after the transition from open-pit mining to underground mining in Longshou mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(4): 677-682. (in Chinese))