文章编号：1000－7598 (2009) 04－1186－05

基于蒙特卡罗随机模拟的矿岩崩落块度预测研究

李 响，贾明涛，王李管，白云飞

(中南大学 资源与安全工程学院，长沙 410083)

摘 要：基于实测节理面空间几何参数，采用蒙特卡罗方法对某大型镍矿 III 矿区节理空间进行了模拟。采用自主研发的三维矿岩块度预测软件 MAKEBLOCK 对其矿岩块度分布进行了预测和分析。结果表明，该矿区大多数矿岩块体体积小于 0.2 m^3，绝大多数块体形状为盘状和块状，块体等效尺寸大多在 0.2 m 到 1.5 m 之间。预测结果可以作为自然崩落法工程设计与实施的参考依据。

关 键 词：自然崩落法；蒙特卡罗方法；节理；块度预测

中图分类号：O 14；TD 32 **文献标识码：**A

Study of orefragment size prediction in block caving based on Monte Carlo stochastic simulation

LI Xiang，JIA Ming-tao，WANG Li-guan，BAI Yun-fei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A simulation of the joint network in mining area III of a nickel mine in China is made based on the Monte Carlo method and by using joint plane space geometrical data measured in-situ. According to the above theory, a 3D fragmentation size prediction software named MAKEBLOCK is developed and used in the forecast and analysis of ore fragmentation size distribution of the mining area. The result shows that the most of the ore body blocks are discoid and blocky, with block size less than 0.2 m^3 and equivalent dimension from 0.2m to 0.5m. The predicting results can be used as the basis for design and practice of block caving.

Key words: block caving method; Monte Carlo method; joint; fragmentation prediction

1 前 言

崩落采矿法具有结构简单、机械化程度高、安全性能好、采矿强度大等特点, 是唯一能与露天开采经济效益相媲美的高效率地下采矿方法。据统计，加拿大、瑞典、前苏联国家、澳大利亚应用崩落采矿法占各自国家金属矿床地下采矿方法的比重分别为 53 %、80 %、34 %和 49 %。崩落采矿法在我国矿山应用很广泛，有色金属地下矿山用崩落法采出的矿石占总产量的 44.4 %，黑色金属地下矿山占 94.1 %左右，且还有增大的趋势。

自然崩落法的采矿工艺过程是：在矿块底部进行拉底以引起矿块周边岩体内应力的变化，致使矿体发生破坏，并在重力作用下自行崩落。这种方法不需要进行大量的凿岩爆破工作以使矿石跨落。自然崩落法能否成功应用，取决于矿岩的可崩性、崩落规律、崩落速率和放矿控制等很多方面因素[1]，了解矿岩的崩落块度分布规律是其关键技术问题之一，因此采用一种有效的方法对矿岩块度分布进行较准确的预测，是尤为重要的。

2 矿石崩落块度预测原理与软件系统

矿石崩落块度的组成主要取决于矿体中构造面的空间切割作用以及岩石的力学性质，可以对矿体中节理面的倾角、倾向、间距及迹线持续长度等几何参数根据力学影响因素（原始地应力状态、拉底及崩落过程中产生的次应力场、完整岩石强度、节理面的力学性质等）进行修正，然后对修正的参数分布规律进行随机抽样和模拟，以分析崩落块度的分布规律。

收稿日期：2008-04-15

第一作者简介：李响，男，1983 年生，工学硕士，从事采矿与岩土工程研究与教学。E-mail: lixiang2006lixiang@hotmail.com

岩体中构造面的几何参数（节理面倾角、倾向、间距及迹线持续长度等）均具有一定的分布规律[2]，这些参数的组合可以用来描述节理面的空间状态及分布规律，因此可以通过蒙特卡罗(Monte Carlo)技术，按照统计学原理模拟节理面的空间分布情况，从而得到由这种节理面在岩体中的交接和切割所构成的岩块大小和形状的分布组成。根据上述理论，可以把岩体看作是由有限个岩块按照特定方式组成的集合体，在对岩块进行独立抽样的过程中，每次的抽样结果作为一个样本元素，如果抽样次数足够大，则可以认为所得样本为大样本[1-3]，其中岩块的分布规律信息可以用来近似表示原岩体中岩块的分布组成。

2.1　节理系统模拟-蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法也称为随机模拟方法、随机抽样技术或统计试验方法[1]，基本思想是：首先人为构造一个概率模型或随机过程，其某些参量正好是所求问题的解。然后，通过对模型或随机过程的概率观察或进行抽样试验得出参数的特征，由此求出所求参数的近似解。蒙特卡罗方法求解具体问题的过程可分为 3 个主要步骤[4]：构造或描述所求问题的概率过程，实现从已知概率分布的抽样和建立各种统计量的估计。

模拟岩体节理系统，首先应确定矿体节理系统各主要参数的分布规律，从而计算各样本估计值并作为样本参数，然后运用蒙特卡罗方法模拟原系统参数。

节理面空间几何参数通常具有均匀、正态和负指数分布规律，对应这些分布形式，采用下述不同的蒙特卡罗随机数生成方法[5-7]。

区间[a, b]上的均匀分布直接抽样方法：

$$x=a+r(b-a) \tag{1}$$

式中：r 为[0, 1]区间内服从均匀分布的随机数；x 为[a, b]区间内服从均匀分布的随机数。

负指数分布的直接抽样方法：

$$x=-a\ln r \tag{2}$$

式中：x 为服从负指数分布随机数；a 为负指数分布的参数。

正态分布复合抽样方法：

$$\left.\begin{aligned} x_1&=\sigma_x\sqrt{(-2\mathrm{Ln}r_1)}\cos 2\pi r_2+\mu_x\ ;\\ x_2&=\sigma_x\sqrt{(-2\mathrm{Ln}r_1)}\sin 2\pi r_2+\mu_x \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：x_1 和 x_2 服从正态分布的随机数；σ_x 为正态分布随机向量的均方差无偏估计量；μ_x 为正态分布随机向量的均值的无偏估计量；r_1 和 r_2 为[0, 1]区间均匀分布的随机数。

对数正态分布抽样方法：

$$x_1=\mathrm{e}^{x_1'}\ ;\ x_2=\mathrm{e}^{x_2'} \tag{4}$$

式中：x_1' 和 x_2' 为服从正态分布的随机数；x_1 和 x_2 为服从对数正态分布的随机数。

2.2　块度预测的三维模型

三维块体模拟就是反复从模拟的不连续面网络中抽取岩块样本，具体步骤如下：

①收集不连续面参数的统计数据；

②在第①步结果的基础上，执行蒙特卡罗模拟，产生不连续面综合数据库；

③确定构成岩块的节理面数量；

④计算从不连续面到坐标原点的垂直距离；

⑤确定构成岩块的节理面半空间类型；

⑥建立三维坐标系统中节理面方程；

⑦确定构成岩块的顶点和每个顶点的坐标；

⑧计算岩块的体积、最大尺寸、中间尺寸和最小尺寸，并判别岩块的形状特征；

⑨将全部有关岩块的信息保存到二进制格式的数据库中，为后续的工作如岩块修正、图形输出等工作打下基础；

重复以上步骤，达到一定的岩块数量之后就可以对岩块样本集合的尺寸和形状分布进行分析。

2.3　块度预测软件系统

本研究采用自主研发的三维矿岩块度预测软件 MAKEBLOCK 进行矿岩块度分布规律的预测。

本软件主要特点是：根据上述三维块体模拟的原理和具体步骤，通过选取合适的节理几何参数，并由各参数的分布规律得到相应的随机数，用蒙特卡罗法实现对节理网络分布的模拟，从而达到对岩块进行抽样的目的，最终对块体尺寸和形状分布进行预测和分析。MAKEBLOCK 软件系统程序原理如图 1 所示，系统的典型界面如图 2 所示。

3　某镍矿 III 矿区矿岩块度分布模拟

3.1　块度预测的参数选取

在采用 MAKEBLOCK 软件进行崩落块度预测时所输入的参数如下(进行原始块度预测时只须输入参数①～④)：①节理面倾角的分布规律及样本参数估计值；②节理面倾向分布规律及样本参数估计值；③节理面间距分布规律及样本参数估计值；④

节理面迹线长度的分布规律及样本参数的估计值；⑤节理面持续性系数；⑥完整岩石的强度指标c_r，ϕ_r值；⑦节理面强度指标c_j、ϕ_j值；⑧现场主应力的大小及方向。

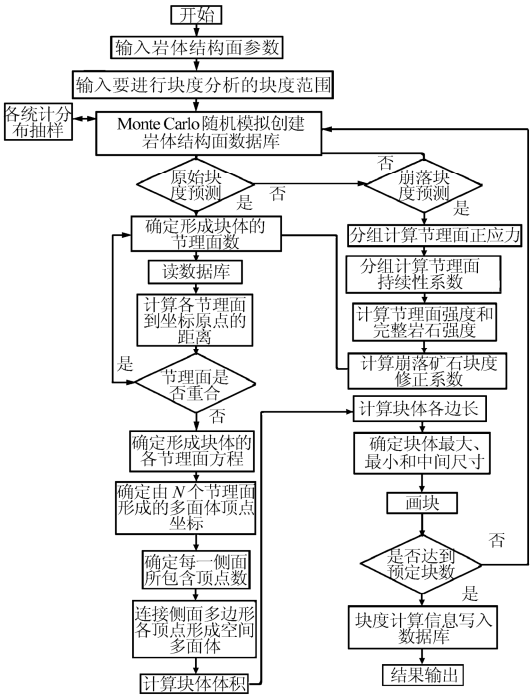


图 1 程序原理框图

Fig.1 Program principle flow chart

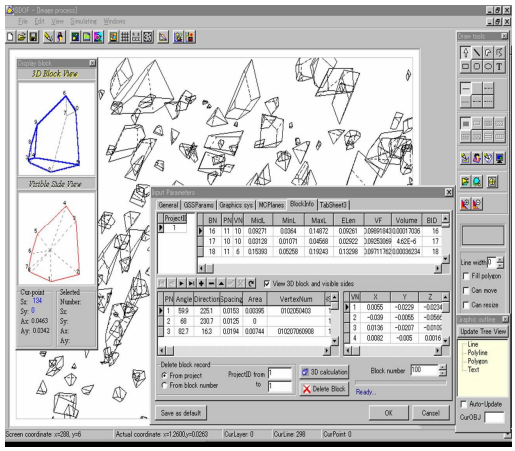


图 2 MAKEBLOCK 软件系统运行界面

Fig.2 Operation window of MAKEBLOCK system

3.2 矿区整体矿岩块度预测(高程 1 554 m 水平以上)

对某大型镍矿 III 矿区地质构造进行分组时，采用坑道调查方式记录节理面参数的数据，并利用 Schmidt 投影法则对节理产状分布进行了研究，划分为 4 个主节理组。结合节理玫瑰花图、节理极点等密图对各参数的统计研究可以发现，各主节理组的倾向、倾角均服从正态分布，节理间距服从指数分布，节理迹线长度服从对数正态分布。在矿石块度计算中也应考虑 15 %～20 %的零散节理。零散节理的倾向、倾角应服从主节理系统以外的均匀分布，视在间距服从指数分布，迹线长度服从对数正态分布[8]。

表 1 为各主节理组产状统计参数。对全部节理的迹线长度和间距进行统计分析，获得的参数见表 2。

表 1 某 III 矿区节理产状统计参数表

Table 1 Statistical parameter of joints

主节理组		参数				
		倾向 /(°)	倾角 /(°)	节理百分比 /%	倾向范围 /(°)	倾角范围 /(°)
I	均值	7.200	44.80	16.31	-22～42	0～90
	方差	19.52	18.40	26.00	54～138	5～90
II	均值	96.27	42.10			
	方差	22.70	20.50			
III	均值	186.2	47.10	29.37	145～228	0～90
	方差	23.06	18.90	15.61	262～315	5～90
IV	均值	289.5	46.50			
	方差	14.97	18.80			

表 2 某 III 矿区节理迹线长度统计参数表

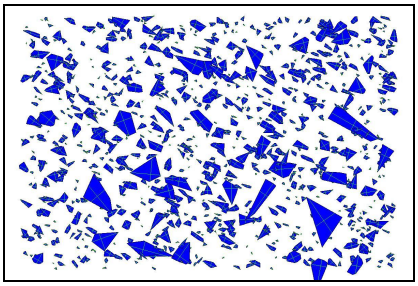
Table 2 Statistical parameters of joint trace length

参数	均值	方差
节理迹线长度 /m	1.180	1.350
节理间距 /m	0.104	0.100

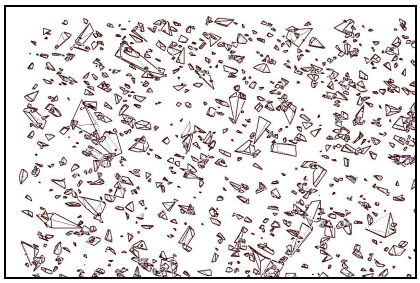
用 MAKEBLOCK 软件进行块度预测时，如果每次抽样的块体个数太少，其总体积就会很小，致使个别特大块占有过高的体积百分比，而特大块的产生是小概率事件，因此应控制抽样个数，以得到符合实际的结果。经多次抽样实验，发现当块体个数设定为 5 000 块时，抽样结果十分稳定，因此在本预测研究中，块体抽样的样本容量设定为 5 000。

整个矿区高程为 1 554 m 水平以上矿岩块度预测中，块体的二、三维示图如图 3 所示。

矿石的块度通常是用通过某一尺寸的格筛的可能性来衡量的。因此，在块度预测程序中引入等效尺寸的概念，以得到较准确的块度预测结果。对不同形状的岩块，其等效尺寸规定：球状和立方体状矿石的等效尺寸取其最大尺寸；对于块状、盘状和条状矿石来说，均匀分布随机抽样值大于 0.7 时，等效尺寸取其中间尺寸，均匀分布随机抽样值小于等于 0.7 时，等效尺寸取其最大尺寸。



（a）二维



（b）三维

图 3　矿区矿岩预测块度

Fig.3　Fragmentation size forecast simulation

从矿岩块度体积分布曲线（图 4）可以看出，当块体体积小于 0.2 m^3 时，体积分布曲线下降比较快，可以说明 Ⅲ 矿区体积小于 0.2 m^3 的矿岩块体所占体积百分比较大。从等效尺寸分布曲线（图 5）看出，当等效尺寸在 0.2～1.5 m 之间时，等效尺寸曲线下降比较快，说明等效尺寸在这个区间的块体数目较多。形状系数分布曲线（图 6）表明，矿石块体的形状系数分布主要集中在 0.02～0.2 之间，即绝大多数块体为盘状块体和块状块体。Ⅲ 矿区整体矿岩块度分布统计结果见表 3，从表中可见，矿区体积小于 0.2 m^3 矿岩块体所占体积百分比较大，约占 82.4 %，体积大于 0.3 m^3 的块体仅占 17.6 %。绝大多数块体形状为盘状和块状。等效尺寸小于 1.5 m 所占的百分比为 88.2 %，块体等效尺寸大多在 0.2～1.5 m 区间。

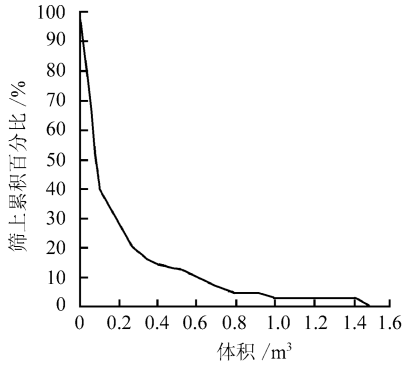


图 4　体积分布曲线

Fig.4　Fragment size distribution curve

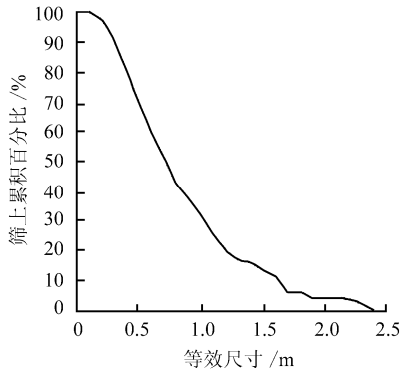


图 5　等效尺寸分布曲线

Fig.5　Equivalent fragment size distribution curve

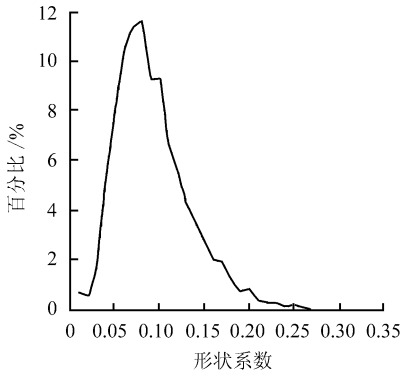


图 7　形状系数分布曲线

Fig.7　Shape factor distribution curve

表 3　某 Ⅲ 矿区整体块度预测结果综合统计表

Table 3　Statistical results of fragmentation prediction

体积 /m^3	累积百分比 /%	等效尺寸 /m	累积百分比 /%	形状系数	百分比 /%
0.0	100.0	0.0	100.0	0.01	0.7
0.1	39.9	0.1	99.9	0.02	0.6
0.2	26.7	0.2	97.8	0.03	1.7
0.3	17.6	0.3	91.4	0.04	5.4
0.4	14.5	0.4	81.2	0.05	8.1
0.5	12.7	0.5	70.4	0.06	10.6
0.6	9.7	0.6	60.2	0.07	11.4
0.7	7.3	0.7	52.0	0.08	11.6
0.8	4.6	0.8	43.1	0.09	9.3
0.9	4.6	0.9	38.2	0.10	9.3
1.0	2.8	1.0	32.4	0.11	6.7
1.1	2.8	1.1	25.6	0.12	5.6
1.2	2.8	1.2	20.4	0.13	4.2
1.3	2.8	1.3	17.2	0.14	3.5
1.4	2.8	1.4	16.6	0.15	2.8
1.5	0.0	1.5	13.6	0.16	2.0
		1.6	11.8	0.17	1.9
		1.7	6.5	0.18	1.2
		1.8	6.5	0.19	0.8
		1.9	4.7	0.20	0.9
		2.0	4.7	0.21	0.4
		2.1	4.7	0.22	0.3
		2.2	4.1	0.23	0.3
		2.3	2.8	0.24	0.2
		2.4	0.0	0.25	0.2
				0.26	0.1
				0.27	

4 结 语

矿石崩落块度的准确预测是自然崩落法成败的关键。根据节理空间状况对块度进行预测时，需要了解矿岩内部节理面空间状态，但由于技术条件限制，对于矿体内部节理面的展布情况无法直接观测，因此必须借助数学、空间几何知识、计算机模拟技术等进行研究。本文利用蒙特卡罗方法对节理面空间进行模拟，将软件 MAKEBLOCK 成功应用于某镍矿 III 矿区崩落矿岩块度分布预测的研究中。根据反复实验，确定了合适的节理面和块体抽样样本空间，得到了稳定的结果，可为今后的工程设计和相关研究提供了指导性参数。

参 考 文 献

[1] 贾明涛, 王李管, 冯兴隆, 等. 金川III矿区高应力破碎矿岩条件下自然崩落法前期研究之专题二研究报告[R]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2006.

[2] 向晓辉, 王俐, 葛修润, 等. 基于三维裂隙网络模拟的有限块体面积判断法[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1633－1636.
XIANG Xiao-hui, WANG Li, GE Xiu-run, et al. Area-judgment method for complex finite rock blocks based on three-dimensional network simulation of fissures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1633－1636.

[3] 陈征宙, 胡伏生, 方磊, 等. 岩体节理网络模拟技术研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 22－25.
CHEN Zheng-zhou, HU Fu-sheng, FANG Lei, et al. Technique for simulating joint network of rock masses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(1): 22－25.

[4] 朱本仁. 蒙特卡罗方法引论[M]. 山东: 山东大学出版社, 1987.

[5] 董卫军. 金川贫矿体三维节理网络的数值模拟[J]. 有色金属, 2002, 54(3): 93－96.
DONG Wei-jun. 3D joint network simulation of barren ore body in jinchuan nickel-copper mine[J]. **Nonferrous Metals**, 2002, 54(3): 93－96.

[6] 朱焕春, 陈文理. 生成节理随机数的直接法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2):10 – 12.
ZHU Huan-chun, CHENG Wen-li. Direct method forming joint random number[J]. **Journal of Wnhan University of Hydraulic and Electric Engineering**, 1997, 30(2):10－12.

[7] 王涛, 盛谦, 陈晓玲. 基于直接法节理网络模拟的三维离散单元法计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1649－1653.
WANG Tao, SHENG Qian, CHEN Xiao-ling. 3D discrete element method based on direct method of joint network simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(10): 1649－1653.

[8] 张贵科, 徐卫亚. 裂隙网络模拟与REV尺度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6):1675－1680.
ZHANG Gui-ke, XU Wei-ya. Analysis of joint network simulation method and REV scale[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(6):1675－1680.

[9] 荣冠, 周创兵, 朱焕春, 等. 三峡水库某库段岩体裂隙网络模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1122－1126.
RONG Guan, ZHOU Chuang-bing, ZHU Huan-chun, et al. Research on fissures network of jointed rock masses in one section of Three Gorges Reservoir[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1122－1126.

深基坑双排桩支护结构设计理论与应用

著 译 者： 聂庆科等 出版时间：2008 年 05 月 开本：16 开 页数：204 装帧：平装

出版单位：中国建筑工业出版社 标准书号：ISBN9787-112-10025-5 定价：30.00 元

【内容简介】本书通过对现场监测资料分析、室内试验、理论模型建立和数值模拟，研究了深基坑双排桩支护结构体系的变形和土压力分布规律，提出了考虑空间效应的双排桩支护结构体系设计计算理论。利用所建立的设计理，编制了便于工程设计的应用软件。同时，还研制了可用于深基坑工程监测信息分析的深基坑监测信息分析处理系统。

【目 录】第 1 章 深基坑工程和双排柱支护结构的研究现状；第 2 章 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究；第 3 章 开挖卸荷条件下粉质黏土变形性状研究；第 4 章 双排桩支护结构设计计算理论；第 5 章 双排桩支护结构设计软件研制；第 6 章 深基坑双排桩支护结构的三维数值分析；第 7 章 深基坑工程监测信息分析处理系统研制。参考文献。附录 双排桩支护结构设计软件源程序代码

【读者对象】本书适用于从事深基坑工程的设计、施工及科研人员和高等学校有关专业师生。

（信息来源：中国建筑书店）