

文章编号: 0253-9993(2008)06-0635-05

基于 Monte Carlo 模拟的矿岩块度预测

王李管, 尚晓明, 冯兴隆, 龚元翔, 宋明军

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 在确定矿岩可崩性的基础上, 根据岩体中节理面的空间分布规律, 采用 Monte Carlo 技术模拟节理系统, 对矿岩块度影响因素进行定量分析, 利用矿岩块度预测三维模型及软件系统 Makeblock, 对矿岩块度进行有效预测. 将上述方法应用到金川Ⅲ矿区矿岩块度预测中, 并对该矿区崩落矿石块度进行综合评价.

关键词: Monte Carlo 模拟; 块度预测; 自然崩落法; 节理

中图分类号: TD853.36 **文献标识码:** A

Prediction of ore-rock fragmentation based on Monte Carlo simulation

WANG Li-guan, SHANG Xiao-ming, FENG Xing-long, GONG Yuan-xiang, SONG Ming-jun

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

Abstract: Based on the determined cavability of ore-rock and spatial distribution rules of joints, the joint system was simulated by means of Monte Carlo technique and influential factors of ore-rock fragmentation were analysed, ore-rock fragmentation was predicted effectively by using 3D model of fragmentation prediction and software system Makeblock. This method was applied to ore-rock fragmentation prediction of No. 3 mining area in Jinchuan and ore fragmentation for block caving was evaluated comprehensively, these results can be used as theoretical basis for design and practice of block caving.

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

自然崩落法是一种依靠岩体内部的自然力来达到矿石的破碎, 并依靠重力来进行矿石运搬的大规模地下采矿方法, 其崩落特性主要取决于岩体构造及其分布规律、岩体强度及地应力状态等因素.

在自然崩落法的设计阶段, 矿石块度的分布决定了开采所采用的底部结构类型和尺寸及所使用的出矿方式和设备类型. 在生产过程中, 块度分布决定了二次破碎炸药消耗量、大块产出率及所采用的二次破碎方法. 因此, 崩落矿石块度的准确预测是自然崩落法成败的关键^[1,2].

1 块度预测的理论基础

崩落块度大小取决于矿体内的节理面分布、应力集中程度、岩体的强度等. 然而, 大量理论与实践研究表明, 在工程应力水平下, 岩体尤其是坚硬矿体的破坏主要是沿原有节理面发展贯通, 完整的岩块很难破裂, 因此, 节理面的分布往往决定了矿石崩落块度的分布^[3].

随着对自然崩落法崩落规律的研究, 人们已经比较清楚地认识到影响矿石块度的因素主要有:

收稿日期: 2007-06-06 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50490270)

作者简介: 王李管(1964—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师. Tel: 0731-8877665, E-mail: LiguanWang@163.com

(1) 节理的空间展布状态. 主要包括: 节理面倾向、倾角、间距及持续长度. 节理面在空间上的相互切割, 构成了矿体原始矿石块度的组成. 根据节理系统空间几何参数的规律研究, 可以得到崩落前原始矿石块度的分布曲线;

(2) 地应力状态. 包括原始地应力状态及拉底和崩落过程中产生的次应力场. 综合考虑节理系统的空间几何参数、地应力状态、完整岩石强度及节理面的力学性质, 可以确定拉底工作完成后崩落矿石的块度分布曲线;

(3) 研磨作用. 崩落矿石在放矿过程中由于速度场的不均匀性, 使矿石块体发生平动与转动, 矿石间发生摩擦与碰撞作用, 造成崩落矿石的再破碎. 考虑研磨作用获得的矿石块度分布曲线, 可以预测放出矿石的块度组成.

因此, 以构造面的空间展布规律及相互切割关系为基础, 采用 Monte Carlo 技术和三维空间解析几何知识, 按照统计学原理模拟构造面对岩体的切割作用及由此切割而形成的岩块大小和形状分布组成. 以每次独立的抽样结果为一样本元素, 用大量的抽样样本分布规律来表示母体的分布规律.

2 Monte Carlo 基本原理

2.1 Monte Carlo 方法

Monte Carlo 方法也称随机模拟方法, 约始于 19 世纪后半叶的蒲丰 (Buffon) 随机投针试验, 到 20 世纪 40 年代由于电子计算机的出现而得到了迅速的发展. 它的基本思想是: 为了求解数学、物理、工程技术及生产管理方面的问题, 首先建立一个概率模型或随机过程, 使它的参数等于问题的解, 然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的特征, 最后给出所求参数的近似值^[4,5].

据此, 可以采用 χ^2 优度拟合检验^[6,7] 的方法首先确定岩体构造系统各主要参数的分布规律, 计算各样本的参数估计值, 以此代替母体参数, 然后, 采用 Monte Carlo 技术模拟原系统参数.

2.2 模拟过程中的相似逼近

原始矿石块度组成主要取决于矿体中构造面的切割作用, 因此, 可以根据矿体中构造面、倾角、倾向、间距及迹线持续长度等几何参数的分布规律进行抽样模拟, 分析块度组成及分布规律. 崩落矿石块度除与构造面的几何参数有关外, 还与现场应力、构造面持续性、岩体中弱面及完整岩石的力学性质有关. 因此, 在模拟中, 还要根据上述力学影响因素, 对模型几何参数进行修正, 然后, 进行随机抽样, 分析块度组成.

3 块度预测的三维模型

3.1 节理面空间展布状态的 Monte Carlo 模拟

节理面空间展布状态分布规律的研究是采用 Monte Carlo 方法模拟的基础. 通过研究可以发现, 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.

通常, 有 15% ~ 20% 的不连续面不能够分类到不连续面主系统中, 这些节理称作零散节理, 并且应在矿石破碎块度计算中加以考虑. 对于零散节理, 其倾向、倾角应服从主节理系统以外的均匀分布. 此外, 视在间距服从指数分布, 迹线长度服从对数正态分布. 在研究中, 视在间距定义为沿测线方向两相邻不连续面间的距离, 用以描述不连续面的相交状态.

应用 Monte Carlo 技术从不连续面的系统中抽取不连续面样本可分为 3 步: ① 从均匀分布 $[0, 1]$ 中产生一个随机数 r , 判定抽取的节理样本是属于主节理还是零散节理; ② 计算节理面的几何参数以选择主节理或零散节理模型; ③ 保留抽取的节理样本, 继续从数据库中产生随机数, 直至产生达到要求的不连续面数量 (默认值为 20 000). 用这种方法, 可以建立一个不连续面的数据库.

3.2 三维块体模拟

三维块体模拟就是连续反复的从模拟的不连续面网络中抽取岩块样本. 每个岩块样本由 3 个链接表组

成, 它们分别是岩块标识列表、构成岩块多变形面的列表以及每一个面的 x, y, z 坐标列表。其步骤如下:

- (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 Monte Carlo 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, 这将为后续的工作打下基础;
- (10) 重复(3) ~ (9), 直至达到规定的岩块数量;
- (11) 分析岩块样本集合的尺寸和形状分布。

3.3 三维模型的主要特点

模型中考虑了影响崩落矿石块度的节理系统空间几何参数及力学参数, 不仅考虑了优势节理面对岩体的切割作用, 而且考虑了对岩体切割起一定作用的零散节理; 模型可以进行原始矿石块度的预测, 也可以进行崩落矿石块度的预测, 但不能考虑研磨作用对块度的影响; 采用三维模型及单块多次抽样方法, 解决了二维模型无法考虑零散节理的切割作用及了解块体真实形状与大小的缺点, 克服了 Dagama^[8] 模型受限于微机容量及节理因连续假设而带来的模拟上的偏差; 采用“-1”, “1”表示参加切割的节理面的半空间类型, 来确定指向块体内部的法向矢量, 方便地确定了由几条节理面所切割成的块体。

4 工程应用实例

4.1 工程地质特征

金川Ⅲ矿区主要有1号、12号、18号和58号矿体, 镍金属储量占金川矿区储量的3.97%。其中1号矿体规模最大, 主要赋存于岩体中上部到底部, 走向长463 m, 延深600多米, 矿体厚度东部为100~150 m, 中间28 m, 西部逐渐增大至86 m。走向N27°W, 矿体倾角上部较缓为50~60°, 1580 m以下逐渐变陡达70~80°。矿体埋藏较浅, 地表100 m以下见矿, 矿体上部为氧化矿, 厚度40~50 m。

4.2 矿区整体(1554水平以上)矿岩块度预测

本研究采用三维矿岩块度预测软件系统 Makeblock 对矿岩块度分布进行预测。Makeblock 系统是通过应用 Borland Delphi 7.0 软件开发工具实现对岩体不连续面网络的模拟, 从而达到对岩块抽样的目的。

在用 Makeblock 软件进行块度预测时, 每次节理面抽样的个数设定为32 000, 块体抽样的个数设定为5 000。若块体个数设定太少, 则每次抽样的总体积就会很小, 从而导致个别特大块所占的体积百分比过高, 而特大块的产生是小概率事件, 显然这样的抽样结果不符合实际情况。经多次抽样实验, 发现当块数设定为5 000时, 抽样结果十分稳定, 因此, 预测中各方案的块体抽样样本容量为5 000。

从整体上对金川Ⅲ矿区(1554水平以上)评价区域的矿岩作块度预测, 以便对该区域的矿岩块度有一个整体的认识。Ⅲ矿区1554水平以上矿岩的节理产状统计参数见表1; 节理

表1 节理产状统计参数

Table 1 Statistical parameters of joint occurrence

参 数		主节	主节	主节	主节
		理组 I	理组 II	理组 III	理组 IV
倾向/(°)	均值	7.20	96.27	186.20	289.50
	方差	19.52	22.70	23.06	14.97
倾角/(°)	均值	44.80	42.10	47.10	46.50
	方差	18.40	20.50	18.90	18.80
节理百分比/%		16.31	26.00	29.37	15.61
倾向范围/(°)		-22~42	54~138	145~228	262~315
倾角范围/(°)		0~90	5~90	0~90	5~90

迹线长度参数: 均值 1.18, 方差 1.35; 节理间距参数: 均值 0.104, 方差 0.100. 块体的三维和二维示图如图 1 所示.

金川Ⅲ矿区 1554 水平以上矿岩块度分布曲线分别如图 2 所示. 其中图 2 (a) 为矿岩块度体积分布曲线, 图 2 (b) 为矿岩块度等效尺寸分布曲线, 图 2 (c) 为矿岩块度形状系数分布曲线图. 矿岩块度分布统计结果见表 2.

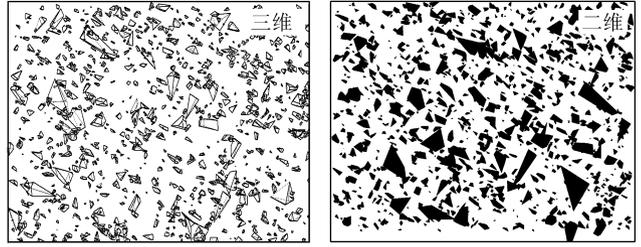


图 1 1554 水平以上预测块度三维与二维示图

Fig. 1 3D and 2D sketch of predicted fragmentation above level 1554

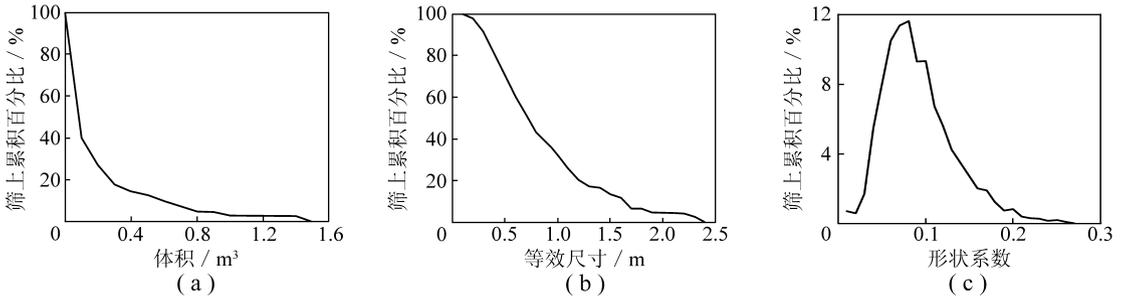


图 2 矿岩块度分布曲线

Fig. 2 Distribution curves of volume ore-rock fragmentation

表 2 整体块度预测结果综合统计

Table 2 Comprehensive statistical of results on whole fragmentation prediction

体积 /m ³	筛上累积 百分比/%	等效尺寸 /m	筛上累积 百分比/%	形状 系数	百分比 /%	体积 /m ³	筛上累积 百分比/%	等效尺寸 /m	筛上累积 百分比/%	形状 系数	百分比 /%
0	100.0	0	100.0	0.01	0.7	1.4	2.8	1.4	16.6	0.15	2.8
0.1	39.9	0.1	99.9	0.02	0.6	1.5	0	1.5	13.6	0.16	2.0
0.2	26.7	0.2	97.8	0.03	1.7			1.6	11.8	0.17	1.9
0.3	17.6	0.3	91.4	0.04	5.4			1.7	6.5	0.18	1.2
0.4	14.5	0.4	81.2	0.05	8.1			1.8	6.5	0.19	0.8
0.5	12.7	0.5	70.4	0.06	10.6			1.9	4.7	0.20	0.9
0.6	9.7	0.6	60.2	0.07	11.4			2.0	4.7	0.21	0.4
0.7	7.3	0.7	52.0	0.08	11.6			2.1	4.7	0.22	0.3
0.8	4.6	0.8	43.1	0.09	9.3			2.2	4.1	0.23	0.3
0.9	4.6	0.9	38.2	0.10	9.3			2.3	2.8	0.24	0.2
1.0	2.8	1.0	32.4	0.11	6.7			2.4	0	0.25	0.2
1.1	2.8	1.1	25.6	0.12	5.6					0.26	0.1
1.2	2.8	1.2	20.4	0.13	4.2					0.27	
1.3	2.8	1.3	17.2	0.14	3.5						

由图 2 (a) 可以看出, 当块体体积小于 0.2 m³ 时, 体积分布曲线下降比较快, 这说明金川Ⅲ矿区 1554 水平以上体积小于 0.2 m³ 的矿岩块体的体积百分比比较大. 由表 2 可以看出, 体积大于 0.3 m³ 的块体仅占 17.6%.

由图 2 (b) 可以看出, 当等效尺寸大于 0.2 m 而小于 1.5 m 时, 等效尺寸曲线下降比较快, 这说明块体等效尺寸落在这个区间的块体的体积百分比比较大. 块度预测结果综合统计表明, 等效尺寸大于

0.9 m 的块体筛上累积百分比为 38.2%, 大于 1.3 m 的块体筛上累积百分比为 17.2%。

图 2 (c) 形状系数分布曲线表明, 矿石块体的形状系数分布差别不大, 主要集中在 0.02 ~ 0.20 之间, 根据形状系数与块体形状的对照标准, 块体形状以盘状块体和块状块体占绝大多数。

5 结 论

基于 Monte Carlo 方法模拟, 从整体上对金川 III 矿区 1554 水平以上的矿岩进行块度预测, 可以得出 1554 水平以上矿岩块度的大块率 (大块按等效尺寸大于 0.9 m 计) 适度, 二次破碎工作量不大。从放矿实验结果来看, 放矿口堵塞几率不大。

参考文献:

- [1] 董卫军. 矿石崩落块度的三维模型与块度预测 [J]. 矿冶, 2002, 11 (2): 1~3.
Dong Weijun. Three-dimensional model and prediction of ore fragment size for block caving [J]. Mining & Metallurgy, 2002, 11 (2): 1~3.
- [2] 王家臣, 熊道慧, 方君实. 矿石自然崩落块度的拓扑研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (4): 443~447.
Wang Jiachen, Xiong Daohui, Fang Junshi. Topological study on natural caving blocks of ore body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20 (4): 443~447.
- [3] 王家臣, 陈忠辉, 熊道慧, 等. 金川镍矿二矿区矿石自然崩落规律研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (6): 596~600.
Wang Jiachen, Chen Zhonghui, Xiong Daohui, et al. Research on natural caving regularity of ore in No. 2 mining area in Jinchuan nickel mine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29 (6): 596~600.
- [4] 王 岩. MonteCarlo 方法应用研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2006, 28 (S1): 23~26.
Wang Yan. Monte Carlo method and its applications [J]. Journal of Yunnan University, 2006, 28 (S1): 23~26.
- [5] Mario A Morina, Francesco Ficarazzo. Monte Carlo simulation as a tool to predict blasting fragmentation based on the Kuz-Ram model [J]. Computers & Geosciences, 2006 (32): 352~359.
- [6] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验 [J]. 数理统计与管理, 2005, 24 (1): 112~115.
Cui Dangqun. Analysis and making good fitting degree test for logistic curve regression equation [J]. Application of Statistics and Management, 2005, 24 (1): 112~115.
- [7] 程维虎. 拟合优度检验的回归分析方法及其应用 [J]. 北京工业大学学报, 2000, 23 (2): 79~84.
Cheng Weihu. The regression method and its application for testing goodness-of-fit [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000, 23 (2): 79~84.
- [8] DaGama C D. Use of comminution theory to predict fragmentation of jointed rock masses subjecte to blasting [A]. In: Proc. 1st Int. Symp. Rock Fragmentation by Blasting [C]. Sweden: Lulea University Technology Press, 1983. 565~579.

重要启事

近几年,《煤炭学报》收到的论文越来越多,为了刊出更多的优秀论文,缩短出版周期,2007年,《煤炭学报》由双月刊改为月刊;《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版)由半年刊改为季刊,欢迎大家踊跃投稿。

本刊编辑部已安装远程稿件处理系统,该系统已于2007-01-01正式启用,可实现作者网上投稿、查稿、上传修改稿、专家网上审稿等。自2007-01-01编辑部不再接收邮寄和E-mail投稿,谢谢合作!

详情请登陆本刊网站: <http://www.mtxb.com.cn>