

自然崩落采矿法的颗粒流数值模拟

王连庆¹⁾ 高 谦²⁾ 王建国¹⁾ 方祖烈²⁾

1) 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

摘 要 以自然崩落采矿法为研究对象, 利用二维颗粒流数值模拟(PFC2D)的原理和方法, 研究了自然崩落法矿体崩落规律. 以某镍铜矿的地质条件及矿岩物理力学性质为依据, 采用数值模拟的方法分析了自然崩落法的崩落规律. 结果表明, PFC2D模型在分析自然崩落过程中力学机理的同时, 能有效地模拟自然崩落法采矿过程, 并且能直观地给出矿体在崩落过程中各种参数的具体形态变化. 利用 PFC2D 模型预测该镍铜矿自然崩落法初始崩落拉底半径为 10m, 连续崩落的拉底半径为 22m, 有效地指导该矿自然崩落法的放矿.

关键词 矿体; 自然崩落法; 颗粒流; 数值模拟

分类号 TD 853.364

自然崩落法在国内外采矿界正处于研究和发展之中, 因其生产能力大, 便于生产组织及管理, 开采成本低, 是唯一能与露天开采经济效益相媲美的采矿方法, 备受各国采矿工作者的青睐. 矿体的可崩性研究, 是自然崩落法成功的关键; 因为一旦失败, 可能给资源开采带来严重的后果. 矿体的可崩性预测从起初的经验性预测, 发展到后来的矿岩质量评价方法, 以及近期的数值和物理模拟方法^[1]. 数值研究方法预测矿岩的可崩性比经验方法具有显著的优点, 已被广泛地应用于复杂形状的地下结构, 以及含有断层、节理等不连续性和各向异性等工程问题^[2-3]. 岩土工程的数值分析方法主要分为两大类: 连续介质和非连续介质数值方法. 连续介质数值方法^[4-5]不能模拟破碎岩块的转动、滑移、脱落等不连续破坏特性, 在崩落法采矿中的可崩性研究有其局限性, 非连续介质数值分析方法^[5-6]在矿体崩落法分析具有相当的优势, 能够全面模拟矿体的拉底形状、拉底方向、拉底高度等对矿体崩落范围以及崩落高度的影响. 本文所用的颗粒流法 (particle flow code in two dimensions, 简称 PFC2D), 就是基于非连续介质数值分析理论 (离散单元) 的一种方法. PFC 方法的优势在于利用微小单元 (即颗粒) 的简单本构关系模拟宏观材料的线性和非线性特性^[7].

用 PFC 方法模拟矿体的崩落规律, 国外已经做过一些研究^[8-9]. 本文以某镍铜矿提供的技术资料

为基础, 利用 PFC2D 的方法和理论, 模拟自然崩落法的采矿过程, 在该矿地质条件下对矿体的崩落规律进行分析, 得出一些有益的结论, 为该矿自然崩落法的合理开采提供指导性的建议.

1 PFC2D 的基本原理和方法

PFC2D 程序在国内称之为颗粒流方法, 是通过离散单元方法来模拟圆形颗粒介质的运动及其颗粒间的相互作用, 允许离散的颗粒单元发生平移和旋转, 可以彼此分离并且在计算过程中重新构成新的接触. PFC2D 中颗粒单元的直径可以是一定的, 也可按高斯分布规律分布, 通过调整颗粒单元直径可以调节孔隙率. 颗粒流方法以牛顿第二定律和力一位移定律为基础, 对模型颗粒进行循环计算, 采用显式时步循环运算规则^[10]. 根据牛顿第二定律确定每个颗粒由于接触力或体积力引起的颗粒运动 (位置和速度), 力一位移定律是根据两个实体 (颗粒/颗粒或颗粒/墙体) 的相对运动, 计算彼此的接触力.

PFC2D 的颗粒流模型包含如下的假设:

- (1) 颗粒为刚形体;
- (2) 在很小的区域里 (例如点) 存在接触;
- (3) 用软接触的方法模拟接触行为 (刚性颗粒在接触点允许重叠);
- (4) 颗粒间的接触存在连接;
- (5) 所有的颗粒为圆形.

PFC2D 接触的本构模型包含接触刚度模型、库仑滑块模型和连接模型. 其中接触刚度模型分为线性弹性模型和非线性 Hertz Mindlin 模型; 连接模型分

收稿日期: 2006-02-12 修回日期: 2006-07-08

作者简介: 王连庆 (1967-), 男, 高级工程师, 博士研究生; 方祖烈 (1935-), 男, 教授, 博士生导师

为接触连接模型和并行连接模型,接触连接模型仅能传递作用力,而并行连接模型可以承受作用力和力矩. 本文利用 PFC2D 的本构模型中的接触刚度模型,连接模型为接触连接模型.

2 PFC2D 模型的建立

用 PFC2D 进行数值模拟的步骤为:定义模型分析目标;创建模型的概念构型;组建并运行简化模型;准备问题的数据资料;准备一系列具体模型的运行;完成模型的计算;分析并解释计算结果.

2.1 PFC2D 模型材料参数的选取

与其他连续介质模型所需要的宏观材料参数(如弹性模量、材料的强度)不同,PFC2D 模型需要输入的微观材料参数(如颗粒接触的法向刚度 K_n 和切向刚度 K_t)不是直接通过实验室测量得到的参数. 因此,正确选取 PFC2D 模型的材料参数,是 PFC2D 模型模拟自然崩落法采矿过程的关键. 本文利用 PFC2D 数值实验的方法(双轴压缩和巴西圆

盘压缩实验),建立了岩石材料的宏观和微观性质的关系. 表 1 是矿山提供的矿石的材料参数,通过数值模拟实验确定的 PFC2D 模型的材料参数见表 2.

表 1 矿山提供的岩石的材料参数

Table 1 Material parameters of rock offered by the mine

参数	弹性模量/GPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
数值	24	0.25	16	1.2	2 650

表 2 PFC2D 模型的材料参数

Table 2 Material parameters of rock in PFC2D

颗粒接触的法向刚度, $K_n/(\text{GN}\cdot\text{m}^{-1})$	颗粒接触的切向刚度 $K_t/(\text{GN}\cdot\text{m}^{-1})$	摩擦因数	法向接触粘接强度/MPa	切向接触粘接强度/MPa
60	15	0.5	1.5	12

根据矿区提供的矿块的地质勘探资料,矿岩体中分布有三组节理裂隙,其中第 1 组最发育,后两组次之,在 PFC2D 模型中节理参数的选取见表 3.

表 3 PFC2D 模型中节理参数

Table 3 Joint parameters in PFC2D

节理组	倾角/ ($^\circ$)	间距/ m	切割度/ %	摩擦因数	法向刚度/ ($\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$)	法向连接强度/MPa	切向连接强度/MPa
第 1 组	33	2	80	0	60	0	0	0
第 2 组	15	3	50	0	60	0	0.01	0.01
第 3 组	60	3	60	0	60	0	0.02	0.02

2.2 PFC2D 模型产生

PFC2D 模型箱体的大小选择 $200\text{ m}\times 200\text{ m}$,矿块的上边距地表为 60 m ,颗粒圆盘的半径为 $0.6\sim 0.9\text{ m}$,圆盘的厚度为单位厚度,孔隙率为 0.10 ,产生约为 $15\ 000$ 个颗粒,相应的边界条件如下.

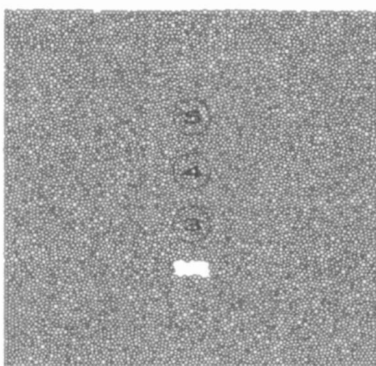
上边界应力: $\sigma_y = -\gamma gh = -1.558\text{ MPa}$,其中 σ_y 为垂直应力; γ 为岩体的密度(取 $2\ 650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

h 为距地表的距离(取 60 m).

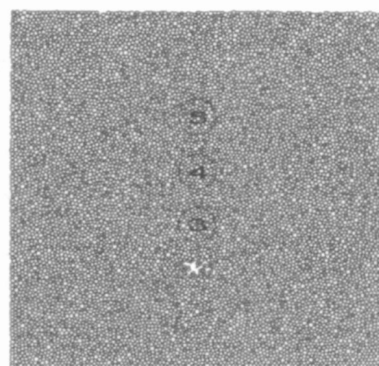
左右边界应力: $\sigma_x = (\text{干}7.431 \pm 0.026y)\text{ MPa}$,其中 σ_x 为水平应力, y 为纵坐标.

下边界:为位移边界条件,即固定下边界.

颗粒在重力的作用下趋于平衡,拉底的位置距模型底部 50 m ,如图 1 所示,为拉底半径 10 m 、高度 10 m 的拉底区域. 模型中的拉底可以通过以下两种



(a) 方法(1)的拉底模型



(b) 方法(2)的拉底模型

图 1 拉底半径 10 m 时 PFC2D 模型

Fig.1 PFC2D model as the undercut radius is 10 m

方法模拟：(1)直接删除法·如图 1(a)所示，直接删除拉底区域的颗粒，当拉底上方的颗粒崩落到拉底区域的底部时，通过删除这些颗粒，来模拟拉底放矿的过程。(2)减小拉底区域内颗粒直径法·如图 1(b)所示，逐渐缩小拉底区域内颗粒的大小，当颗粒的直径减小到一定的程度，删除这些小颗粒，随后拉底上方的颗粒会崩落到拉底区域内，再逐渐减小颗粒的直径，最后删除之。方法(2)可以降低由突然删除模型中材料引起的惯性影响，实际上它也是拉底过程和随后放矿合理的近似模拟^[8]。本文利用上述两种方法模拟拉底和放矿的过程。

3 计算结果和讨论

3.1 应力分析

为研究不同拉底条件下矿块的崩落规律，本文选取了不同的拉底半径(10 m 和 22 m)和不同的拉底高度(5 m 和 10 m)，用 PFC2D 模型来模拟块体的崩落情况。为了监测拉底上方区域的应力变化，在

拉底区域上方 30 m、60 m 和 90 m 布置了三个半径为 10 m 的测量圆(标号为 3、4 和 5)。拉底区域上方的应力分布如图 2 所示，x 轴为循环数，y 轴为应力。图 2(a)和(b)是利用方法(1)的拉底模型，分别在 10 m 和 22 m 拉底时测量圆三区域的应力变化情况。从图 2(a)可以看出，在较小的 10 m 拉底半径下，水平应力和垂直应力在拉底的初始阶段，都有一定的波动，随着循环数的增加逐渐趋于常数，既岩体趋于稳定状态；从图 2(b)可以看出，当拉底半径为 22 m 时，水平应力虽然有一定的波动，但随着循环数的增加急速降低，垂直应力也呈现同样的规律，这表明此处的矿体不足以为上方矿体提供支撑，随后会崩落。图 2(c)和(d)是利用方法(2)的拉底模型，分别在 10 m 和 22 m 拉底时测量圆三区域的应力变化情况。从图 2(c)和(d)可以看出，方法(2)的拉底模型的应力波动较为舒缓，因为它消除了突然删除颗粒的惯性影响，但利用两种方法最终得到的应力变化趋势是一致的。

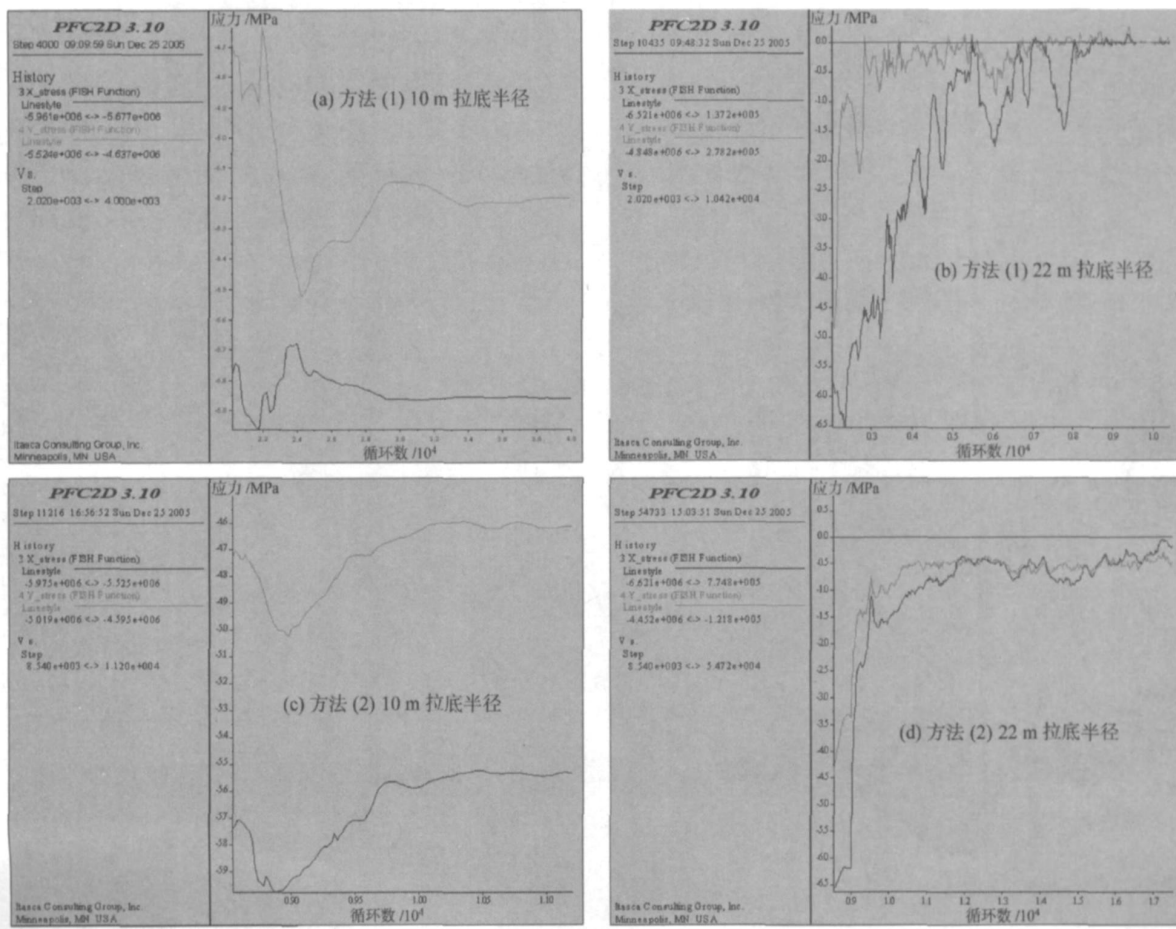


图 2 水平和垂直应力随循环数的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of horizontal and vertical stresses with cycle number

3.2 崩落规律分析

在 PFC2D 模型中,可以通过监测矿石的放出量(在拉底区域中被删除颗粒的体积之和)来研究不同拉底面积下的矿块崩落规律. 图 3(a)和(b) 是利用方法(1)的拉底模型,分别在拉底 10 m 和 22 m 时矿块放出量和计算循环数的关系曲线,图中 x 轴为循

环数, y 轴为矿石的放出量. 从图 3(a)可以看出,在 10 m 拉底时,放矿量随着循环数的增加逐渐趋于常数,即矿块逐渐趋于稳定;而图 3(b)中 22 m 拉底时的放矿量是一直递增的,此时,矿块是不稳定,即逐渐崩落至矿块的顶部.

PFC2D 模型模拟矿块崩落的同时,可以通过监

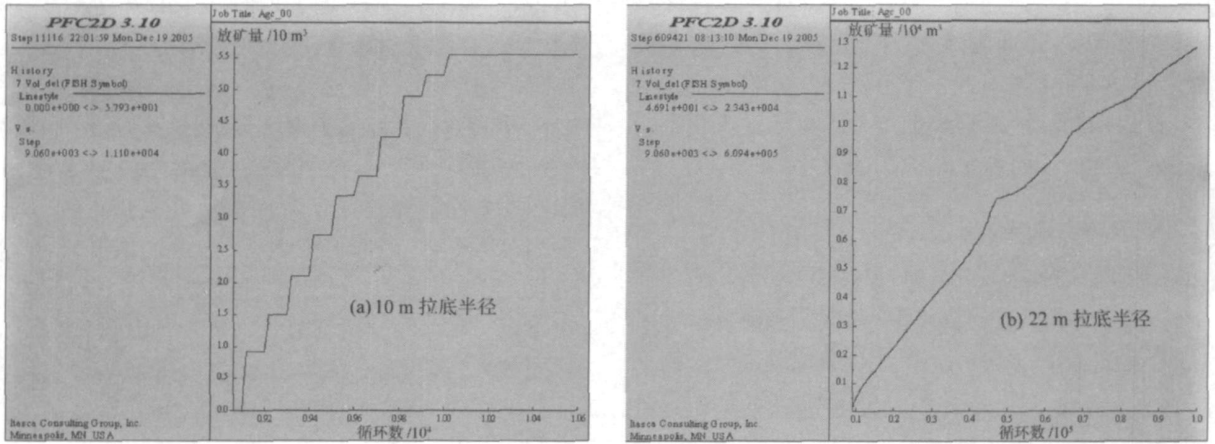


图 3 放矿量与循环数的关系

Fig.3 Relations of caved rock volume to cycle number

测模型中矿体产生的裂纹数目,来确定矿体是否处于稳定状态. 图 4(a)和(b)是利用方法(1)的拉底模型,分别在 10 m 拉底和 22 m 拉底时,模型中矿体产生的裂纹数目和循环数的关系,图中 x 轴为循环数, y 轴为产生的裂纹数量. 从图 4(a)可以看出,随着循环数的增长,矿体生成的裂纹数逐渐趋于常

数,这表明矿体在 10 m 拉底时,逐渐趋于稳定;从图 4(b)可以看出,当拉底半径大于 22 m 时,随着循环数的增长,生成的裂纹数是单调增加的,此时矿体一直处于不稳定状态,随时可能发生崩落. 利用方法(2)的拉底模型,也会得到矿块放出量、矿体产生的裂纹数目相同的变化曲线.

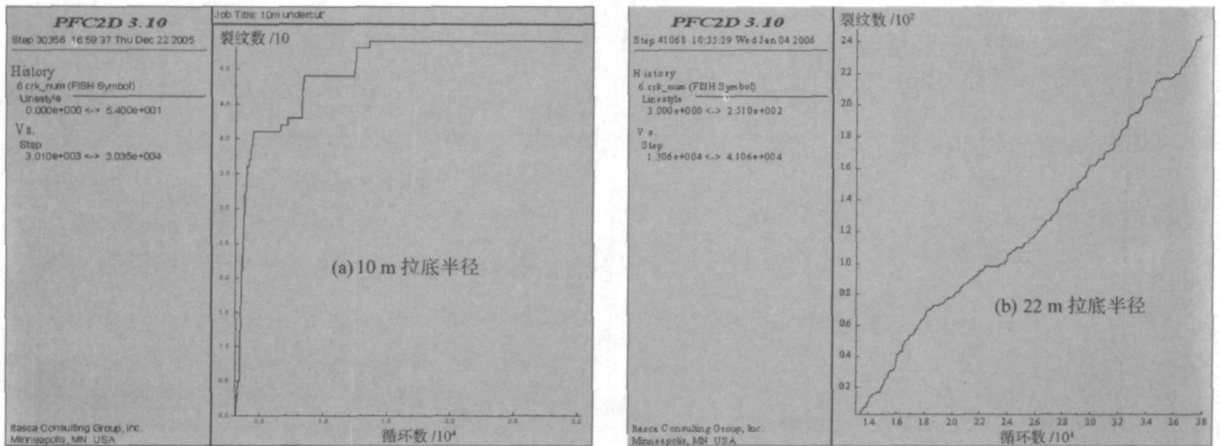


图 4 生成的裂纹数和循环数的关系

Fig.4 Relations of crack number to cycle number

4 结论

(1) 本文利用两种 PFC2D 拉底模型模拟自然崩落法的拉底过程. 通过计算表明,两种方法均是模拟拉底过程的有效方法.

(2) 利用 PFC2D 模型,预测该镍铜矿自然崩落法初始崩落拉底半径为 10 m,连续崩落的拉底半径为 22 m,随着拉底面积的不断增大,在矿体内部形成的应力平衡拱也不断扩大,直至无法形成新的应力平衡拱,此时矿体将一直崩落.

(3) PFC2D 模型在模拟自然崩落过程中力学机理的同时,能直观地用图形给出矿体在崩落过程中的具体参数和形态变化,能够有效指导该矿的放矿。

参 考 文 献

- [1] 陈清运,蔡嗣经,明世祥,等. 国内自然崩落法可崩性研究与应用现状. *矿业快报*, 2005(1):1
- [2] 张世雄,连岳泉,徐腊明. 岩体崩落机理的数值模拟研究. *金属矿山*, 1997(9):13
- [3] 来兴平,蔡美峰,伍永平. 混凝土结构软岩大巷断裂过程非线性数值模拟. *北京科技大学学报*, 2000, 22(5):396
- [4] 张世雄,童光照. 岩体削弱工程对矿体崩落进程影响的研究. *有色金属*, 1990, 42(1):17
- [5] 李爱兵,李庶林,陈际经,等. 柿竹园多金属矿床开采方案确定

- 的数值模拟研究. *岩土力学*, 2004, 25(Suppl 2):462
- [6] 钱志军,徐长佑. 自然崩落法矿体崩落过程的数值模拟. *化工矿山技术*, 1993, 22(1):21
 - [7] Potyondy D O, Cundall P A. A bonded-particle model for rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, 41(8):1329
 - [8] Pierce M E, Cundall P A. PFC3D modeling of caved rock under draw. numerical modeling in micromechanics via particle methods // *Proceedings of the 1st International PFC Symposium*. Gelsenkirchen, 2002: 211
 - [9] Pierce M E. PFC3D modeling of inter-particle percolation in caved rock under draw. in numerical modeling in micromechanics via particle methods—2004 // *Proceedings of the 2nd International PFC Symposium*. Kyoto, 2004: 149
 - [10] Itasca Consulting Group Inc. Theory and background of PFC2D. Minneapolis: ICG, 1999: 5

Numerical simulation of natural caving method based on particle flow code in two dimensions

WANG Lianqing¹⁾, GAO Qian²⁾, WANG Jianguo¹⁾, FANG Zulie²⁾

1) State Key Lab for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT According to the theory and method of particle flow code in two dimensions (PFC2D), the block caving law of natural caving mining method was investigated. Based on the geologic conditions and the physical and mechanical properties of rock in a nickel-copper mine, the caving law in natural caving mining method was simulated by numerical method. The results show that the mechanical mechanism of natural caving method can be analyzed by PFC2D modeling, and the mining process of natural caving method is simulated effectively. The parameter variation of rockbody during the process of mining can be demonstrated easily. The initial caving radius of undercut in the mine is 10 m, and the continuous caving radius of undercut is 22 m. The numerical modeling is effective to guide the mining process of natural caving mining method in the mine.

KEY WORDS orebody; natural caving mining method; particle flow; numerical simulation