# 金山店铁矿地下开采引起地表变形 规律的离散元模拟研究

**郑榕明<sup>1</sup> 陈文胜<sup>2</sup> 葛修润<sup>2</sup> 冯夏庭<sup>2</sup>** (<sup>1</sup>香港理工大学士木与结构工程系 香港) <sup>(°</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘要 用离散单元法对金山店矿山进行了二维模拟研究,得到了其围岩变形规律,且计算结果为圈定地表的移动 和陷落范围提供了可靠的依据;同时,对离散元方法的应用,特别是参数选取进行了有益的探讨。 关键词 离散单元法,地表变形,地下采矿

 分类号 TD 31, O 242
 文献标识码 A

#### 文章编号 1000-6915(2002)08-1130-06

# 1 前 言

因地下开挖而引起地表变形甚至塌陷是一个复杂的岩体大变形和大位移问题<sup>[1,2]</sup>。武钢金山店铁 矿是武钢的主要矿石基地之一,随着地下采矿深度 的不断增加和采空区的不断扩大,由此引起的对地 表的影响问题已成为矿山能否继续生存及生产经济 效益的关键问题。

对于该矿山出现的此类地表问题,用基于连续 性假设的有限元等方法研究已很难满足矿山生产和 设计的要求。由于离散单元法特别适合于因岩体塌 陷而出现的大位移这种岩石力学问题<sup>[3-5]</sup>,故本文 采用该方法对金山店矿山进行模拟计算。

离散单元法的计算原理虽然很简单,但在计算 机上实施起来却非常复杂,涉及到很多问题。离散 单元法可采用动态松弛法求解,其基本运动方程为

mu(xt) + cu(xt) + ku(t) = f(t) (1) 式中:m,c,k,f分别为质量、阻尼系数、弹性系 数及载荷函数;u为块体位移。

动态松弛法对上式用中心差分法求解,是一种 显式求解,缺点在于计算时步Δt要求很小,且需要 合理地确定计算系数等。在算法中,假定力在一个 时步内只能传递到一个单元,并按力和位移的循环 迭代计算。其求解过程及相应的公式可参见文[6]。

计算所用程序 2D-Block 是由日本软脑公司开

发出的最新的离散元分析程序,2D-Block 共包括前 处理器、求解器和后处理器3部分。用户只需将设 计图、材料常数、载荷、边界条件等参数以及填土、 挖掘等与施工工艺相关的数据直接输入给前处理 器,就可从后处理器获得块体接触关系图、块体情 况图等易于理解的直观结果。用户不必关心与离散 元理论相关的中间处理过程<sup>[6]</sup>。

# 2 计算模型和计算参数

#### 2.1 计算模型

本次研究工作选择了 3 个计算剖面, 计算剖面 所取的范围考虑到为了满足计算要求, 计算范围应 超出预估的开采影响范围。一般可按采矿设计的错 动角、陷落角预估影响范围<sup>[7]</sup>, 即从开采到的最低 高程按错动角延伸至地表, 再作适当扩延即可作为 横向的计算范围;纵向范围根据开采深度, 取从地 表至最低开采高程并略作延伸。最终水平方向长度 为1 200 m, 垂直方向为从地表至∇-600 m高程。 由于计算工作量大, 根据经验采用了下窄上宽的边 界。被减掉的块体是基本不发生位移的块体, 对最 终计算结果影响小。本文取其中的 34<sup>#</sup> 剖面为例, 其岩性分区及离散元块体模型见图 1。

表1详列了离散元计算中所需的各主要岩体力 学参数。

表2是2D-Block建模时各岩性分区根据地质调

<sup>2001</sup> 年 2 月 14 日收到初稿, 2001 年 12 月 8 日收到修改稿。

作者 郑榕明 简介:男,博士,香港理工大学土木与结构工程系副教授,主要从事岩土力学与工程的教学和研究工作。



图 1 34<sup>#</sup> 剖面岩性分区及离散元块体模型图 Fig.1 Analysis zone and its different rock type regions of section 34<sup>#</sup>

Table 1 Mitchanies parameters of fock in			asses				
岩性	分区	块体分割	容重r	j	с	Ε	m
名称	代号	节理编号	$/kN\cdotm^{\cdot3}$	/( )	/MPa	/GPa	ш
角页岩	$A_1$	1	27	5	2.00	20	0.5
岩浆岩	$C_1$	1	27	5	2.00	20	0.5
角页岩	$A_2$	2	26	45	1.00	6	0.3
大理岩	В	2	26	45	1.00	6	0.3
岩浆岩	$C_2$	3	27	50	1.50	20	0.25
矿体	D	4	34	38	0.70	4	0.35
断层	F <sub>1</sub> , F <sub>3</sub> , I	F <sub>4</sub> 5		26	0.18		

表 1 岩体的力学参数 Table 1 Machanics parameters of rock masses

表 2 离散块体分块节理参数 Table 2 The parameters of dominant joint sets

	-		0	
分区号	节理组 a 倾	节理组 b 倾	节理组 a	节理组 b
	向、倾角/( °)	向、倾角/( °)	间距 /m	间距 /m
$A_1$	190 70	40 60	21~16	21~16
$C_1$	5 80	190 70	26~17	26~17
$A_2$	190 70	40 60	18~13.5	18~13.5
В	190 70	40 60	21~13.5	21~13.5
C <sub>2</sub>	5 80	190 70	17~16	17~16

查节理统计结果<sup>[8]</sup>所选取的两组优势结构面(a 组和 b 组)的参数。

### 2.2 块体接触计算参数的确定

离散元计算时参数的选取是至关重要的,特别 是对于刚性块体模型(2D-Block 即为刚性块体模型),接触参数或 K<sub>n</sub>,K<sub>s</sub>的选取尤为重要,因为其

反应了岩块材料的物理力学性质。目前离散元计算 分析中,刚性块体模型仍受到一定的重视,主要原 因为:(1) 刚性块体模型计算量相对于变形块体模 型(以 UDEC 为代表)小得多, 求解速度相应快, 这 对于大位移和大变形的工程问题的模拟非常重要; (2) 刚性块体模型实质上忽略了块体的内部变形, 而对于离散块体系统这种大位移和大变形问题,块 体内部的变形相对于由于断层、节理等引起的位 移而言,往往只占很少的一部份或可以忽略,这样 在工程计算中,刚性块体模型仍能满足计算分析精 度的要求;(3)离散元计算时参数的选择是相互关 联的,且参数的选取一直是该方法应用中的一个难 点(以至有的学者极端地认为离散元计算结果只能 作定性分析,而不适宜作定量分析),使用刚性块体 模型使参数的选取变得相对简单,并使复杂的离散 元计算易于操作,等等。

根据经验,离散元计算中,对于某一确定的计 算区域,给定了岩块的物理参数和系统荷载情况 下,计算结果主要决定于岩石块体的切割方式和块 体间的接触刚度系数 K<sub>n</sub>, K<sub>s</sub>, 块体的切割方式主要 由其结构面或节理统计数据决定,而切割块体的尺 寸大小就象有限元中网格划分的疏密一样,须根据 具体的计算条件(如精度要求、程序计算速度和问 题求解规模等)来决定。显然,块体的划分方式是 不能随意变动的,切割块体的尺寸大小也只能根据 具体的计算条件选取一合适的尺寸大小进行划分块 体。从而可看到,在块体切割方式和其他计算条件 已确定的前提下,只有选取合适的 K<sub>n</sub>, K<sub>s</sub>, 才能够 获得合理的计算结果。也正因为 K<sub>n</sub>, K<sub>s</sub> 对计算结果 有直接的影响,本文为 K<sub>n</sub>,K<sub>s</sub>的确定提供了一条途 径,也就是通过正算拟合的方法来确定各类岩石块 体的接触刚度系数。在本文的工程计算中,确定  $K_n$ ,  $K_s$ 是按如下步骤进行:

(1) 以地表在未开挖前的自重引起的下沉量为 正算拟合的目标值,所选取参数组计算所得的下沉 量应与一些常规计算方法吻合(如有限元或弹性力 学解),在此采用未开挖前的下沉量,主要因为在此 条件下离散元结果与其他方法所得结果有可比性, 若有开挖后的监测数据,可以监测数据作为正算拟 合目标,本文选取弹性力学解为例;

(2)根据计算剖面模型,先简化成一单一均质
 介质的模型,估算出其单一均质的综合弹性模量为为5 GP<sup>[8]</sup>, *r*为2 700 N/m<sup>3</sup>;

(3)根据综合弹性模量 5 GP,假设计算模型是
 一在水平方向无限长的区域(即设左右边界对计算的影响可忽略),上、下界限为∇+50 m 和∇-600 m,则可根据弹性力学原理估算出在自重荷载下地
 表的下沉量,如图2所示,根据弹性力学有

$$\boldsymbol{e} = \frac{\boldsymbol{r}(650 - Y)}{E} \tag{2}$$

下沉量为

$$\ddot{A}y = \int_{650}^{0} \frac{\mathbf{r}}{E} (650 - y) dy = \frac{\mathbf{r}}{2E} \cdot 650^2 = 0.3169 \text{ m} \quad (3)$$

在式(3)中代入 E=18 GP, r=2 700 N/m<sup>3</sup>,则  $\Delta y = 0.316$  9 m;

(4)  $K_n$ ,  $K_s$ 之间的换算关系按常用公式  $K_n = aE$ ,  $K_s = K_n/(2(1+n))$ , 其中 *a* 为常数, *n* 为泊桑比;





Fig.2 Sketch map for estimating the subsidence under weight load

(5) 进行正算拟合, 拟合的目标值为计算剖面 地表模型中心的下沉量Δ*Y* 与Δ*y*=0.316 9 m 的误差 小于一允许值Δ(本次计算取 0.02 m), 即*D*=Δ*Y* - Δ*y* < 0.02 m。

根据如上步骤所得的参数如下表 3,表 3 中的 参数拟合时,只须先确定某一组节理的单个 K<sub>n</sub>值, 跟据步骤(4)便可确定其它组节理的所有参数。其中

表 3 计算时节理参数表 Table 3 Computing parameters of joint sets

节理 编号	对应岩 体弹模/GP	$K_{\rm n}$ /N · m <sup>-3</sup>	$K_{\rm s}$ /N · m <sup>-3</sup>	<b>j</b> /( )	c /N · m <sup>· 2</sup>
1	20	$1.8 \times 10^{9}$	$9.0 \times 10^{8}$	50	$1.0 \times 10^6$
2	6	$5.3 \times 10^{8}$	$2.7 \times 10^{8}$	45	$5.0 \times 10^{5}$
3	20	$1.8 \times 10^{9}$	$9.0 \times 10^{8}$	50	$7.5 \times 10^{5}$
4	4	$3.6 \times 10^{8}$	$1.8 \times 10^{8}$	38	$3.5 \times 10^{5}$
5		$3.6 \times 10^{8}$	$1.8 \times 10^{8}$	26	$9 \times 10^{4}$

**j**, c 按实验提供的值,断层参数取节理组中最小 值。

# 3 地应力、边界条件及开挖

根据 2D-Block 程序的特点和离散元计算方法 的一些特殊性,本次计算中,初始应力场(在此为接 触力场)按自重应力考虑。2D-Block 程序还提供 了即时监控计算收敛情况的功能,即通过时步-位 移曲线、时步-不平衡力曲线等,可以直观地知道 系统计算的收敛情况。边界条件采用了加大块体的 滑动边界。

当由初始状态求得初始自重应力场后,即可 进行开挖计算。

在有限元方法中,岩体的开挖一般是由初始应 力条件计算出开挖面上的作用荷载,并将此荷载反 向。将被开挖掉的那部分单元的全体记为 V<sub>E</sub>, S<sub>E</sub>是 开挖界面,作用于 V<sub>E</sub>上的外载除了 S<sub>E</sub>上的面力荷 载 P(开挖力)之外,还有体积力 b,它们与 V<sub>E</sub>的内 力s 相平衡,有

 $\sum_{S_{\rm E}} \int_{S_{\rm H}^{\circ}} [N]^{\rm T} \boldsymbol{r} \, \mathrm{d}\boldsymbol{s} + \sum_{V_{\rm E}} \int_{\dot{U}^{\circ}} [N]^{\rm T} \boldsymbol{b} \mathrm{d} \dot{\boldsymbol{U}} = \sum_{V_{\rm E}} \int_{\dot{U}^{\circ}} [B]^{\rm T} \boldsymbol{s} \, \mathrm{d} \dot{\boldsymbol{U}} \quad (4)$ 

式中第一项即为开挖力的等效节点力 ƒы

从以上公式,可以很直接地得到离散块体的开 挖力计算,根据开挖体单元 V<sub>E</sub>与开挖面 S<sub>E</sub>之间的 力相平衡的原则,有

$$\sum_{S_{\rm E}} F_{S_{\rm E}}^{\rm t} + \sum_{V_{\rm E}} b = \sum_{V_{\rm E}} F_{V_{\rm E}}^{\rm t}$$
<sup>(5)</sup>

式中:F<sup>1</sup><sub>s</sub>为被开挖块体与开挖边界的接触力,也就 是开挖力,F<sup>1</sup><sub>v</sub>为开挖内力,即为被开挖块体之间的 接触力。在此可直接由第一项得到开挖力,在力学 上解释可为直接去掉开挖块体与围岩之间的接触。 因为接触力是成对存在的,作用在围岩上的开挖力 刚好是反向的接触力。

## 4 计算分析结果

图 3~9 是所得的计算结果图,图中等值线 的单位为米。离散元分析主要偏重位移分析。通 过在剖面上绘制位移等值线,使计算平面上的位移 场及其松动、垮落区能通过等值线的疏密程度很清 楚地被表现出来,同时也反映了地表的位移变形情 况。为了分析的方便,下面还给出了块体变位图, 从变位图可直观地看到因采矿引起的围岩崩落和松







图 4 位移等值线图(Y, - 200~ - 340 m) Fig.4 Y displacement field at the excavation step from -200 m to -340 m

动的情况。图中图名括号内,如图 3 中(X, - 200~-340 m),表示为: X 方向位移等值线图,从 - 200 m 开采至-340 m。

从离散单元法分析出发,可对该矿地下采矿的 地表变形和规律得到如下初步结论: (1) 从位移等值线图可看到,由于地下采矿而 引起了采空区的松动。其松动区一般呈椭圆形,且 以从上向下的开采方向作为椭圆的长轴,在位移等 值线图上表现为椭圆形内等值线高度密集,即应变 大,区内有块体松动或崩落;



图 5 位移等值线图(X, - 200 ~ - 410 m) Fig.5 X displacement field at the excavation step from -200 m to -410 m



图 6 位移等值线图(Y, - 200~ - 410 m) Fig.6 Y displacement field at the excavation step from -200m to -410m

(2)由于采空区上有 250 m左右厚的上覆岩层, 地表仅出现较小范围塌陷坑,直径一般在 150 m左 右,且在采空区的正上方,这可以从等值线图中看 到;

(3) 矿体下盘稳定性好于上盘,且只出现很小的下沉量和水平移动量,这是由该矿矿体分布和节

理走向和分布而决定的;

(4) 矿体上盘位移主要表现为垂直沉降和水平 移动两种位移方式,水平位移方向是上盘岩体朝矿 体方向移动;

(5) 根据所计算的结果,结合其他研究成果, 可确定出该矿地表的塌陷区和移动区范围,具体见



图 7 块体变位图(-200 m~-340 m) Fig.7 Block state at the excavation step from -200 m to -340 m



图 9 块体变位图(-200~-550 m) Fig.9 Block state at the excavation step from -200 m to -550 m

文[8]。

# 5 结 语

本文结合实际的大型工程科研课题,用离散单 元法对武钢金山店铁矿地下开采进行了二维模拟研 究,得到了其围岩及地表的变形规律,计算结果为 确定该矿地表的移动和陷落范围提供了重要的依 据;同时,提出了一种用正算拟合确定离散元计算 参数的方法。所得到的研究成果已被矿山和设计部



图 8 块体变位图(-200~-410 m) Fig.8 Block state at the excavation step from -200 m to -410m

门采用,本文对该类型地表沉陷问题也提供了一条 可行有效的研究途径。

### 参考文献

- 于广明,孙洪泉,赵建锋.采矿引起地表点动态下沉的分形增长规 律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(1):34~37
- 李文秀.复杂地形工程开挖岩体失稳预测问题研究[J]. 岩石力学 与工程学报,2001,20(增):1645~1648
- 3 王泳嘉,邢纪波.离散单元法及其在岩土工程中的应用[M].沈阳: 东北工学院出版社,199
- 4 麻凤海,王泳嘉.地层沉降控制的可变形离散单元模拟[J].岩石力 学与工程学报,1999,18(2):176~179
- 5 刘斯宏,徐永福. 粒状体直剪试验的数值模拟与微观考察[J]. 岩石 力学与工程学报,2001,20(3):288~292
- 6 软脑软件(北京)有限公司. 2D-BLOCK 用户手册[R]. 北京: 软脑软件(北京)有限公司, 1998
- 7 中国科学院武汉岩土力学研究所.地下采矿陷落角、错动角研究[R].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,1998
- 8 中国科学院武汉岩土力学研究所.金山店铁矿东区地下开采的地 表变形问题及其控制对策研究[R].武汉:中国科学院武汉岩土力 学研究所,1999

# MODELLING OF GROUND SURFACE SUBSIDENCE AT JINSHANDIAN UNDERGROUND IRON MINE BY DISCRETE ELEMENT METHOD

Cheng Yungming<sup>1</sup>, Chen Wensheng<sup>2</sup>, Ge Xiurun<sup>2</sup>, Feng Xiating<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China) (<sup>2</sup>Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

**Abstract** By using discrete element method, the simulation on an underground excavation iron mine is carried out and the displacement characteristic of the surrounding rockmass is obtained. Meanwhile a new way to determine the contacting parameters for discrete element analysis is presented.

Key words discrete element method, ground surface deformation, underground mining