

文章编号: 1008-7524(2009)01-0028-04

# 露天采场边坡稳定性的离散元数值模拟<sup>\*</sup>

李一帆<sup>1,2</sup>, 李作良<sup>1</sup>, 王慧萍<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学建筑工程学院, 河南 洛阳 471003;  
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 介绍离散单元法的原理及常用离散单元法软件 UDEC 的特点及其控制参数选择的方法。结合黄麦岭磷矿露天开采边坡工程的实际工程地质情况, 利用 UDEC 软件计算了边坡开挖后的稳定性, 并根据分析结果对矿山的后续开采提出了建议。

**关键词:** 稳定性; 露天矿边坡; 离散元; 数值模拟

**中图分类号:** TD854.6; TP391.9 **文献标识码:** A

## 0 引言

黄麦岭磷矿山为一大型露天矿山, 开采规模为 100~200 万 t/a, 服务期 23 年。采场边坡岩层顺坡向发育且夹有软弱岩层, 节理裂隙较发育。在矿山生产过程中, 北坡曾多次发生边坡失稳事故, 并且不稳定的趋势有不断发展的倾向, 严重影响了矿山生产、安全和经济效益。因此对矿山边坡稳定性进行分析, 预测边坡在后续开采中的稳定性, 是采取经济合理的处理、预防和加固措施的基础和首要任务, 本文采用离散元法对黄麦岭磷矿 32~42 号勘探线之间失稳事故多发段的边坡进行数值模拟分析, 并提出了预防措施。

## 1 采场边坡工程地质概况

黄麦岭边坡岩层主要为绿片岩, 绿色片麻岩, 花岗片麻岩及含磷变粒岩。地层产状较为平缓, 采场边坡出露地层在总体上呈现单斜构造, 西部地层倾向 190~210°, 倾角为 22~34°, 东部地层倾向 200~225°, 倾角 25~42°。边坡工程岩层结构如图 1 所示。

黄麦岭磷矿露天边坡工程设计最大垂直高度为 240 m, 顺层台阶边坡角 65~70°, 台阶高度 10 m, 每级台阶设置一个安全平台, 宽度为 3 m, 每

两级台阶设置一个清扫平台, 宽度为 10 m。露天矿边坡工程设计最终边坡角为 33~40°, 最终开采高程为海拔 25 m, 属于高陡边坡。露天边坡工程台阶构成要素如图 2、图 3 所示。目前北帮边坡开采到高程为 120~140 m 高程, 南帮边坡还未形成。

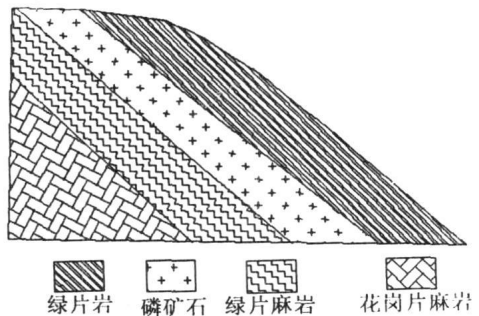


图 1 边坡工程岩层结构图

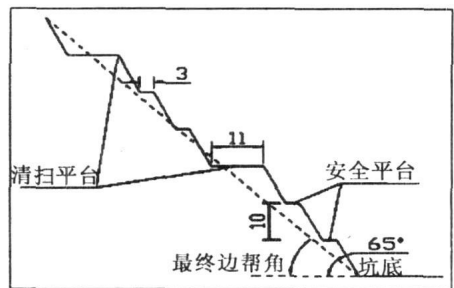


图 2 边坡工程台阶构成要素

\* 收稿日期: 2008-04-14

作者简介: 李一帆, 男, 1974 年生, 博士, 讲师, 主要从事采矿方法及岩土工程方面的研究, e-mail: lyf701@sina.com.

基金项目: 河南科技大学博士启动基金(2007);

河南科技大学青年基金资助项目(2008).

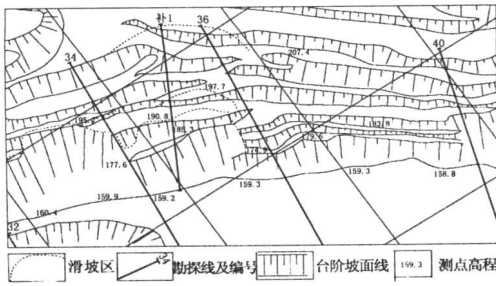


图 3 露天矿边坡平面图

## 2 离散单元法及其软件简介

### 2.1 离散元方法简介

离散单元法 DEM (Discrete Element Method) 是一种适用于不连续岩体稳定分析的数值方法, 其最大特点是允许单元之间的相对运动, 不需要满足位移连续和变形协调条件, 可以模拟系统的大变形及破坏过程。离散元法是 20 世纪 70 年代初由 Cundall 首先提出的, 经 Voelgel, Lorig 等人的发展, 已在岩土工程中得到了广泛的应用。由于离散元单元具有更真实地表达节理岩体的几何特点的能力, 便于处理所有非线性变形和破坏都集中在节理面上为特征的岩体破坏问题, 被广泛地应用于模拟边坡和节理岩体下的地下硐室、采场破坏等力学过程的分析 and 计算, 是分析和处理岩土工程问题的不可缺少的方法。

从露天矿山边坡工程滑坡失稳破坏的机理分析可知, 边坡失稳破坏过程是边坡岩体屈服、崩滑、失稳动态过程。离散单元方法能反映边坡岩层变形、崩滑现象, 因此本文采用离散单元法来分析露天矿山边坡失稳崩滑这一力学现象。

### 2.2 二维离散元分析程序 UDEC 简介

UDEC 是一种基于非连续体模拟的离散单元法二维数值计算软件。它主要模拟静载或动载条件下非连续介质(如节理块体)的力学行为特征, 非连续介质是通过离散块体的组合来反映的, 节理被当作块体间的边界条件来处理, 允许块体沿节理面运动及回转。单个块体可以表现为刚体, 也可以表现为可变形体。UDEC 提供了适合岩石的七种材料本构模型和五种节理本构模型, 能够较好地适应不同岩性和不同开挖状态条件下的岩层运动的需要, 是目前模拟岩层破断后移动过程

较为理想的数值模拟软件。UDEC 离散单元软件主要应用于岩体采动过程中节理、断层、沉积面等对岩体逐步破坏的影响评价。UDEC 能够理想地分析研究与不连续特征相关的岩体破坏方式及岩层开挖后边坡崩滑的过程。

### 3 边坡工程稳定性的离散元数值模拟

黄麦岭露天边坡工程 32~42 号勘探线之间在开采的过程中曾经发生过多次规模不等的滑坡, 严重影响了生产, 本文选取了典型的工程地质坡面, 利用原设计方案对 50 m 高程以上边坡的稳定性进行了计算。

#### 3.1 计算模型设计

在设计计算模型的时候考虑了以下条件:

- a. 根据原始山体剖面形成初始应力场, 计算时只考虑重力场作用;
- b. 开挖之前原始山体是稳定的;
- c. 计算模型考虑了岩层节理, 断层的影响。

考虑以上因素, 建立的模型水平方向为 230 m, 垂直方向为 165 m, 各层岩体的破坏采用莫尔-库仑准则判断, 节理和滑面采用库仑滑动模型。几何模型划分如图 4, 图 5 所示的网格, 共有单元 7200 多个, 阶段 4500 多个。

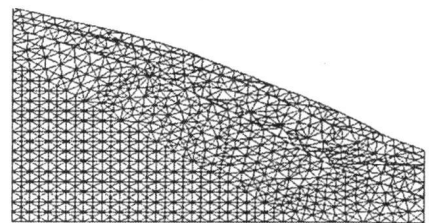


图 4 原始坡体剖面图

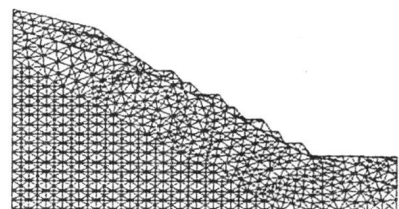


图 5 开挖后的边坡工程

#### 3.2 计算参数选择

为了选择参数, 对各层岩石和矿石进行了室内力学参数测试, 得到矿岩的弹性模量  $E$ 、内摩擦角  $\varphi$ 、内聚力  $C$ 、泊松比、抗拉强度  $\sigma_t$ , 如下表 1 所示:

表 1 矿岩力学参数表

名称	$E/\text{GPa}$	$\varphi/^\circ$	$C/\text{MPa}$	$\mu$	$\sigma_\tau/\text{MPa}$
绿片岩	0.8	30	0.8	0.25	0.6
绿色片麻岩	1.2	32	1.2	0.19	0.8
含磷变粒岩	1.0	32	1.5	0.24	1.0
花岗片麻岩	1.5	35	0.8	0.23	0.5

3.3 计算控制参数的选择

3.3.1 阻尼

工程中常用的粘性阻尼为瑞利(Rayleigh)线性比例阻尼,对于其他形式的阻尼可利用等效阻尼的概念近似地划为线性比例阻尼,对于弹性连续(没有滑移、分离或接触的)系统来说,瑞利线性比例阻尼可表示为

$$[C] = a[M] + \beta[K]$$

式中:[C] 为阻尼矩阵;[M] 为质量阻尼矩阵;[K] 为刚度阻尼矩阵;a 和  $\beta$  分别为质量阻尼比例系数和刚度阻尼比例系数。

阻尼系数一般取决于矩阵的特征值,对于线性问题,求特征值的时间几乎是整个动态松弛计算所需的时间;对于非线性问题,特征值根本求不出。

为了解决这一问题,Cundall 提出了一种自适应阻尼,自适应阻尼仍采用粘性阻尼,只是阻尼所吸收的能量与系统的动能变化率之比是定值,采用伺服机理对粘性阻尼系数进行自适应控制,具体方法是先计算能量比率 R:

$$R = \Sigma E_D / E_K$$

式中: $E_D$  为阻尼所吸收的能量; $E_K$  为系统动能的变化率,然后根据能量比率来调整阻尼系数。

由于岩块的运动是不可逆的过程,为了避免岩块在平衡位置震动,就要采用加阻尼的办法来耗散系统在振动过程中的动能。

3.3.2 时步

振动系统的最小固有振动周期总是大于其中任何一个单元的最小固有振动周期  $T_{\min}$ ,在离散元法计算中通常取时步为:

$$\Delta t = \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \zeta^2} - \zeta)$$

式中: $\zeta$  为系统振动圆频率取最大值  $\omega_{\max}$  时的阻尼比,最大圆频率为:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\lambda}$$

式中: $\lambda$  为系统的最大特征值。

3.4 计算结果分析

针对露天矿边坡工程建立的计算模型,通过计算原始坡体的应力场,来验证应力路径的正确性,通过对边坡工程开挖后在重力场作用下的位移及塑性区域的分析,来判断边坡工程的稳定性。图 6~图 8 是计算结果,图 6 为边坡工程开挖后在重力场的作用下,形成的塑性破坏区,图 7 为开挖后水平方向的位移图,图 8 为开挖后垂直方向的位移图。通过对数值计算图形的分析,可以得出如下计算结果:

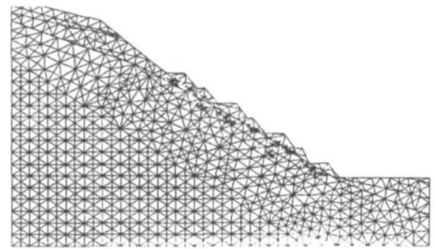


图 6 塑性破坏图

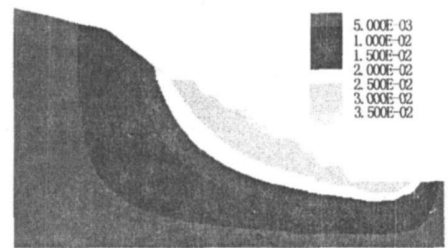


图 7 竖直方向位移图

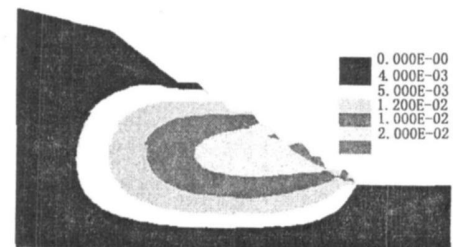


图 8 水平方向位移图

a. 塑性区: 从图 6 可以看出露天边坡工程中大部分台阶进入塑性极限,但主要表现在边坡

的表层岩体, 深层岩体也形成了少量破坏单元, 主要表现为拉伸破坏和剪切破坏。在开采的过程中, 爆破震动影响下可能会产生顺层滑坡。

b. 位移图: 从水平位移和垂直位移图形上可以看出, 在边坡工程的中部台阶不论水平位移和垂直位移都明显的高于其它部分台阶, 水平位移最大达到 2 cm, 垂直位移最大达到 3.5 cm, 随着开采深度的增大, 边坡可能产生更大的位移, 导致部分台阶失稳, 影响进一步的开采。

#### 4 结论及建议

通过计算结果的分析可以得出以下结论, 为露天矿的后续开采提供借鉴, 以利于采取的合理开采方案或者有效支护措施, 做到安全生产。

a. 该露天矿 32 ~ 42 号勘探线之间的边坡在现开采方案下开采, 表层会产生破坏失稳现象, 部分台阶会产生深层的破坏。建议生产过程中采取严格的控制爆破方法, 减小爆破振动对边坡稳定性的影响。

b. 边坡的上层为绿片岩及含磷变粒岩, 这种岩石遇水易软化, 导致岩体强度降低, 在爆破的作用下, 会产生小的裂缝, 水沿裂缝进入坡体将会影响边坡的长期稳定性。应完善采场边坡排截水系统, 减小水的入渗对边坡性的影响。

建议矿山生产单位注意监测采场边坡的稳定性, 确保采场作业安全, 对有失稳迹象的边坡区域, 坚决清除, 或采取有效工程措施加固, 严防开采过程中发生边坡失稳现。

d. 通过对层状露天矿边坡工程的数值模拟可以看出, 离散元法能够很好地模拟有节理、断层等

地质缺陷的边坡工程的稳定性。

#### 5 参考文献

- [1] 陈清运, 蔡嗣经. 地下开采地表变形数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2004, (7): 19-21.
- [2] 宋力, 解英艳. 矿柱弹塑性破裂过程数值模拟研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003(4).
- [3] 王泳嘉. 离散元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [4] 解世俊等主编. 金属矿山地下开采[M]. 北京: 冶金工业出版社 1979.
- [5] 熊传治, 徐诚. 富家坞露天矿边坡稳定性二维离散元分析[J]. 矿冶工程, 1999(1)
- [6] 张振华, 李金奎. 板裂结构顶板锚梁支护的离散元数值模拟[J]. 河北煤炭, 2004(1): 3-6.

### Discrete element numerical simulation of stability for open-pit slope

LI Yi-fan<sup>1, 2</sup>, LI Zuo-liang<sup>1</sup>

WANG Hui-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Architecture, Henan University of Science & Technology, Luoyan Henan, 471003, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Science, Wuhan Hubei, 430071, China)

**Abstract:** Theory of discrete element method, software UDEC and its control parameters were introduced in this paper. Base on engineering geology, stability of slope in Huang Mailing open-pit phosphate mine was analyzed with UDEC software. Effective advance was brought forward by results of analyse.

**Keywords:** stability; open-pit mine slope; discrete element; numerical simulation

## 国际化肥市场掀起了“减产停产潮”

在国际金融风暴席卷之际, 国际农产品也不可避免地受到波及, 化肥需求日益清淡, 迫使大多数化肥生产厂家停产减产。

尽管磷铵生产企业纷纷宣布减产以减轻库存压力, 但磷铵市场仍然没有任何起色。2008 年年底之前国际磷铵产量减少 200 万 t, 目前除了印度和埃塞俄比亚保持部

分需求之外, 其他市场需求极其清淡。目前国际磷肥市场的关注焦点是: 在现阶段硫磺价格相对稳定的基础上, 国际磷铵价格是否已探底? 由于对 2008 年 12 月 ~ 2009 年 1 月中国磷铵出口有较大期待, 目前市场购买主力印度的进口也显得谨慎起来, 并认为届时磷铵价格会进一步下跌。

国际钾肥巨头仍然坚定地执行减产保价的策略。据悉, 四季度国际钾肥减产产量达 140 万 t, 现货价格高达 900 美元/t, 但是在越来越清淡的钾肥需求状况下, 要保持如此高的价位, 不是一件易事。