

文章编号: 1000-7598-(2008) 05-1259-05

利用内排土提高露天矿端帮边坡角的研究

朱玉生^{1,2}, 贺永年¹

(1. 中国矿业大学 建工学院, 江苏 徐州 221008; 2. 徐州建筑职业技术学院 土木工程系, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 在有、无内排土条件下, 对 6 个均质边坡模型和伊敏—露天矿边坡模型的端帮边坡角进行了数值模拟计算与分析。结果表明, 在安全系数不变的前提下内排土可以提高露天矿端帮边坡的最大稳定边坡角, 从而减少了剥离量或增加采出矿石量, 降低剥采比, 提高矿山经济效益。

关 键 词: 内排土; 帮边坡角; FLAC3D; 数值模拟

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

Study of using internal dumping increase angle of end wall in open pits

ZHU Yu-sheng^{1,2}, HE Yong-nian¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Xuzhou Vocational Technical College of Architecture, Xuzhou 221008, China)

Abstract: At the conditions of internal dumping and non-internal dumping, six homogeneous slope models and the slope model of the 1st Yimin open pit are founded, and solved these model's angle of the end wall by FLAC3D program. The analyzed results demonstrated that the internal dumping can increase the maximum stable angle of the end wall in open pits at the same safety factor. So, using the internal dumping can decrease the waste volume or increase the ore's production, reduce the stripping ratio, improve the mine's economic benefit.

Key words: internal dumping; angle of end wall; FLAC3D; numerical simulation

1 引 言

世界各国露天开采工作者在同矿山地质灾害斗争过程中和长期的生产实践中, 发明创造了丰富多彩的滑坡防治方法, 包括削坡压坡角、增大或维持边坡岩体强度、人工建造支挡物(人工加固)以及各种工程、工艺措施等^[1]。这些方法、措施为露天开采工作的顺利进行和保证矿产资源与能源的供应起到了很大的作用。

目前我国对端帮边坡的处理方式一般有以下几种:

(1) 弃置不顾。只保证生产期间的安全, 闭坑后无人维护, 边坡变形破坏将会危及周边设施和环境, 如金川露天矿。

(2) 放缓边坡。为了确保生产的顺利进行及闭坑后边坡的安全, 采用较小的边坡角, 或滑坡发生后采取削坡压坡脚措施。但这样一来, 或是减少了

矿石产量, 或是增加了剥岩量, 降低了经济效益。

(3) 内移开采边界, 为保护边坡上的重要设施, 其结果不但缩短了矿山服务年限, 减少了矿石产量, 降低了经济效益, 而且给矿山转产带来了一定的压力, 如义马北露天矿, 为确保陇海铁路的安全, 将南帮开采边界内移 30~40 m。

(4) 人工加固。20 世纪 60 年代开始, 美国、加拿大、前苏联等国开始使用锚杆、锚索、钢轨桩等加固边坡。在 80 年代, 以大型锚杆(索)、水平横梁、钢丝网和喷浆为代表的加固系统已大规模使用, 并取得了良好的经济技术效果。据国外资料介绍, 用大型锚杆(索)加固边坡不但可以防止边坡滑落, 并且可以增大露天采场的最终边坡角达 10~15°。目前国内外综合防治措施多是以抗滑桩或大型预应力锚杆(索)为主, 并辅以其他防治方法的联合措施, 如抗滑桩与挡墙、注浆、浅锚杆、疏干排水、清帮减重等联合使用; 大型预应力锚杆(索)

收稿日期: 2006-08-15

作者简介: 朱玉生, 男, 1973 年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事岩石力学与工程的研究。E-mail: zhuyusheng888@163.com

与浅锚杆、钢轨桩、清帮减重、疏干排水等联合使用。我国大冶铁矿狮子山北帮西口 I 号滑坡体就是用预应力锚杆、钢轨抗滑桩、局部削坡减载、片石护坡、水平孔疏水、喷浆护面等综合防治措施进行治理的。但是人工加固费用相当高,只有在完全确认加固效益和证明加固合理的场合才能使用,因此,大型锚杆(索)、抗滑桩等人工加固措施由于受地质条件和经济因素限制,在我国露天矿也只是用来防治局部滑坡,以此作为全面增大露天矿边坡角、防止滑坡、提高经济效益的一种手段,在我国还远没有达到。另外,大型锚杆(索)会产生腐蚀及应力松弛问题,亦即具有长久稳定性问题,而且施工维护较复杂,一旦失效,后果严重。

(5) 内排土。在水平或近水平煤岩层条件下和倾斜煤岩层工作面沿走向推进的条件下,可以实现内排土,主要是考虑减少排土费用,外排土场少占农田等,但它实际上也起到了防治滑坡和保持端帮边坡的长久稳定性的作用。

上述露天矿滑坡防治方法的分析与计算都是建立在边坡开挖后长期裸露、存在的基础上,是发生滑坡迹象后被动地防治,一般将边坡简化为二维平面问题,没有或很少考虑边坡的三维问题。实际上,很多采场可实现内排土,利用内排土缩短边坡的暴露时间,改变边坡内应力分布及其随时间的变化,从而提高边坡的稳定性,可使其不发生滑坡或控制其变形程度。因此,可以考虑利用内排土提高端帮边坡的稳定性,增大边坡角。

利用内排土防治滑坡,与减重压坡脚不同。减重压坡脚是发生滑坡迹象后,在滑体上进行的一种局部防滑措施,而内排土防滑是整个边坡滞后工作帮一定距离进行内排土控制边坡变形,预防滑坡的发生,主要是“预防”,利用内排土控制边坡与现有内排土不同,虽然现在有许多露天矿实行内排土,但其主要是从减少外排土占用农田方面考虑的,设计时也没有进行过内排土对边坡应力分布和变形破坏程度的影响之类的分析,并且为保证工作线安全,其滞后工作线一般较远,对边坡变形破坏控制较差。

本文将研究在相同的安全系数下内排土能否提高端帮边坡的最大稳定边坡角?以期提供一种既能适当提高边坡角、又不过于增加加固支护费用的方法,以促进露天矿端帮边坡的稳定性设计和生产管理工作,不但保证露天矿生产期间的边坡稳定

性,而且要保证闭坑后露天矿边坡的安全,避免或尽量减少端帮边坡对露天生产的影响和闭坑后对其附近设施的威胁和破坏,降低露天边坡对国民生产和经济的影响以及对矿区环境与生态的破坏。

2 物理模型的建立

为研究内排土能否提高露天矿端帮边坡的边坡角,本研究共建立了 4 个不同高度、3 种不同岩体强度等级共 6 个基本均质模型。每个模型包括工作帮、端帮和内排土场三个部分,如图 1 所示。工作线以一定速度推进,内排土工作线滞后工作线一定距离 D (本文称为控坡距) 跟进。每个模型的工作帮边坡角 β 和内排土场边坡角 γ 保持不变,改变端帮边坡角 α ,以研究相同安全系数和其他条件下的最大端帮边坡角。

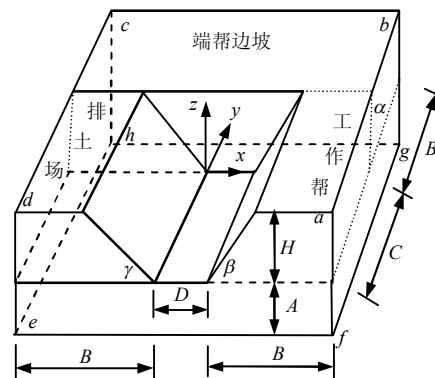


图 1 三维计算模型及其参数示意图

Fig.1 Sketch of 3-D's model and its parameters

6 个基本均质模型分别记为 1-2, 2-2, 3-2, 4-2, 3-1 和 3-3, 第 1 个数字表示边坡高度 (4 个边坡高度分别为 100, 200, 300, 400 m), 第 2 个数字表示岩体类别, 共 3 种不同岩体, 其物理力学参数见表 1。

表 1 采用的原岩岩体物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of rock masses

序号	凝聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	重度 / kN · m ⁻³	密度 / kg · m ⁻³	体积模量 / GPa	剪切模量 / GPa
1	100	20	20	2 038	1	0.22
2	200	24	22	2 242	1.45	0.482
3	300	28	24	2 446	2	0.923

边坡坡面均取平面形式, 即最上一个台阶的坡顶线和最下一个台阶的坡底线连成的平面。取端帮边坡坡底线与内排土场边坡坡底线的交点为坐标原点, 见图 1。

3 岩土力学参数的选取

根据《工程岩体分级标准》^[2]中的岩体物理力学参数表和我国某些露天矿实测岩体物理力学参数值及有关文献中的取值,选取3种不同质量等级的原岩岩体物理力学参数(表1)。

虽然由于岩土种类、爆破、排土方法以及排土台阶高度等的不同,排弃物的物理力学性质是不同的,而且排弃物随时间延长而逐渐沉降、压密,重度由顶向下逐渐变大,凝聚力随时间延长而逐渐增加,但为了研究问题的方便,排土场岩体物理力学参数也均取定值。3种不同原岩体相应的排弃物的物理力学参数取值见表2。

表2 3种原岩体相应排弃物的物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters of dumpings

序号	凝聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	重度 / kN · m ⁻³	密度 / kg · m ⁻³	体积模量 / GPa	剪切模量 / GPa
1	8	14	18.2	1 855	0.04	0.008 8
2	4	18	20	2 038	0.058	0.019 3
3	2	22	21.8	2 221	0.08	0.036 9

4 数值模拟计算

4.1 模型的边界条件

三维计算模型^[2-4]如图1所示,其中 H 为边坡高度; $abcd$ 为地表和排土场表面,自由边界。面 $abgf$ 、 $bchg$ 、 $cdhe$ 和 $efgh$ 是不受露天矿开挖和填土工作影响的边界,理论上讲应在无限远处,根据Goodman建议,可取 $B=6H$ 和 $A=H$ 。根据经验, $B=4H$ 和 $A=H$ 时开挖、填土工作引起的应力场扰动对相应边坡的影响可以忽略。本文中取 $B=6H$ 和 $A=H$ 为模型的边界, $abgf$ 和 $cdhe$ 均采用水平 x 方向连杆约束,即 x 方向位移固定为0; $bchg$ 采用水平 y 方向连杆约束,即 y 方向位移固定为0; $efgh$ 同时受水平方向和垂直方向连杆约束,即 x 、 y 、 z 方向位移均固定为0。面 $adef$ 为其水平 y 方向位移固定为0后,其应力变化不影响端帮边坡应力场的界面,理论上应为露天矿坑底部 x 方向的对称轴,基于上述 $B=4H$ 的建议,本文也取 $C=4H$ 。

4.2 网格划分及岩体本构模型^[2-4]

采用六面体单元(brick)进行网格划分,网格划分后的计算模型如图2所示。数值计算时,岩体均采用Mohr-Coulumb本构模型。

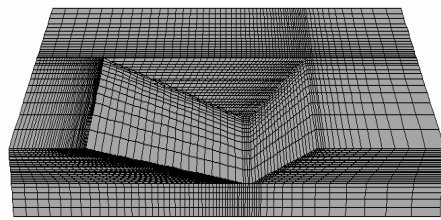


图2 3-2的计算模型($\alpha=27.5^\circ$)

Fig.2 3-D numerical model of 3-2 ($\alpha=27.5^\circ$)

4.3 无内排土时端帮最大稳定边坡角的确定^[5,6]

不同的采掘、排土设备和采掘工艺,要求不同的边坡台阶参数,从而确定了不同的生产允许边坡角。实际生产过程中,各边坡采用的最大边坡角不能大于生产允许边坡角,以保证生产的正常进行。因此,三维计算时所采用的工作帮边坡角 β 和内排土场边坡角 γ 的数值,均取生产允许最大边坡角和FLAC二维数值分析结果中的较小者,见表3。

表3 三维计算采用的工作帮和内排土场边坡角
Table 3 The angle of work slope and internal dumping

边坡位置	边坡角 / (°)					
	1-2	2-2	3-2	4-2	3-1	3-3
工作帮	34	31.5	27.5	26	20	30
排土场	12	12	12	12	11	12

以二维FLAC计算的端帮最大稳定边坡角为基础,逐步增加边坡角 α 进行计算分析,求取给定条件下的端帮边坡最大稳定边坡角,见表4。

表4 各模型在不同条件下的极限边坡角($F_s=1.3$)
Table 4 The maximum stable angle of each slope at different conditions($F_s=1.3$)

模型	极限边坡角 / (°)			无内排时边坡角 / (°)		$\frac{\alpha_{D=80}-\alpha_{3D}}{\alpha_{3D}}$ / %	$\frac{\alpha_{D=80}-\alpha_{2D}}{\alpha_{2D}}$ / %
	$D=0$	$D=80$	$D=160$	3D	2D		
1-2	54.5	52	50.5	46.5	46	11.8	13
2-2	37	36	35	32	31.5	12.5	14.2
3-2	31.5	30.5	30	27.5	27.5	10.9	10.9
4-2	28.5	28	27.5	26	25.5	7.7	9.8
3-1	21.5	21.5	21.5	20	20	7.5	7.5
3-3	-430.3*	-468.1*	-548.5*				
3-3	40.5	40	39	36	35.5	11	12.7

注: (1) α_{2D} 为二维计算所得的极限边坡角。(2) $\alpha_{D=80}$ 为有内排($D=80$ m)时的极限边坡角, α_{3D} 为无内排时的极限边坡角。(3)*为岩石强度降低1.3后,处于极限平衡状态的边坡上的点(-6.1297, 753.45, 285)的 y 位移(mm)。

4.4 有内排土时端帮边坡最大稳定坡角的确定

由无内排时计算所得端帮最大稳定边坡角为基础,保持工作帮边坡角 β 和内排土场边坡角 γ 等其

他条件不变,逐步加大端帮边坡角,得到各模型在有内排土时的端帮最大稳定边坡角;然后,再逐步增大控坡距,由控坡距为 0 时的最大稳定边坡角开始,逐渐减小端帮边坡角,得到 $D=0$, 80 m 和 $D=160$ 时的端帮最大稳定边坡角,见表 4。由表 4 可知,有内排土时的端帮最大稳定边坡角,比无内排土时的端帮最大稳定边坡角确实有较大提高,控坡距 D 越小,端帮最大稳定边坡角越大;在给定的边坡条件下, $D=80$ m 时的最大稳定边坡角与无内排土时的三维和二维计算结果相比,均提高 7.5 % 以上,效果较明显。模型 3-1 在所研究的 3 个控坡距 ($D=0$, 80 m 和 $D=160$ m) 条件下,虽然没有区分出最大稳定边坡角的变化,但其位移的变化还是比较明显的,即控坡距 D 越大,各模型相应节点的 $-y$ 方向的位移越大,端帮边坡越趋于不稳定。

为研究其中的规律,将表 4 中的数据,以控坡距 D 为横坐标,端帮最大稳定边坡角为纵坐标,绘制成图 3,从图可以更清晰地看出,(1)在相同岩体强度条件下,坡高越小,内排土对端帮的影响越大,即由于内排土的作用,端帮最大稳定边坡角提高得越大。(2)在相同边坡高度条件下,岩体强度越大,内排土对端帮的影响越大,即由于内排土的作用,端帮最大稳定边坡角提高得越大。

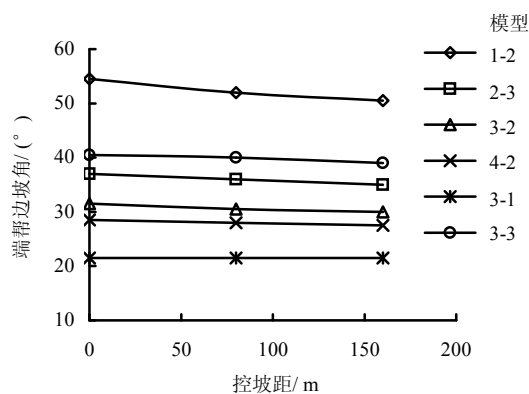


图 3 控坡距-端帮最大稳定边坡角曲线图
Fig.3 Curve between D and maximum stable angle in end wall

5 伊敏一露天矿上的应用

以上研究均是针对均质边坡进行的,为了说明其结论是否适用于水平、近水平成层岩层,现以伊敏一露天矿^[6,7]为例,进行分析。

5.1 工程概况

伊敏煤电公司一露天矿位于伊敏煤田向斜东南翼,境内地形平坦,西、南两侧略高,中部稍低。该区煤系地层走向为 NE,倾向为 NW,倾角平缓,

一般为 $3^{\circ} \sim 6^{\circ}$ 。一露天矿主要开采伊敏组的 15, 16 号煤层及大磨拐图河组的 20 号煤层。最大开采深度为 80 m 左右,属于低边坡类型。

构成边坡的主要岩性为泥岩、粉砂岩、细砂岩和煤。岩体强度极低,结构不密实,是介于岩石与土之间的过渡类型,称为软岩。该区构造简单,结构面很不发育,除煤层外其他岩层很少见到裂隙面。构造以断层为主,主要有 F8 和 F9 两条断层。但都对边坡的稳定性影响不大,稳定性分析中可将 F8 和 F9 作为两条大的夹有极薄软弱物质的节理考虑。

岩体结构类型主要是层状结构,岩层倾角又平缓,没有产生沿层面滑动的可能性,其破坏模式主要以弧形破坏为主。在未疏干前提下,极弱层有可能产生蠕变变形,但也只能是局部变形,不会引起整体滑动。

5.2 计算范围的选择及岩体物理力学参数的选取

以该矿北帮岩层条件为例,进行适当简化后,分析内排土对北帮边坡稳定性的影响。取边坡高度为 80 m,其剖面示意图如图 4 所示,①~③为最危险滑出位置。

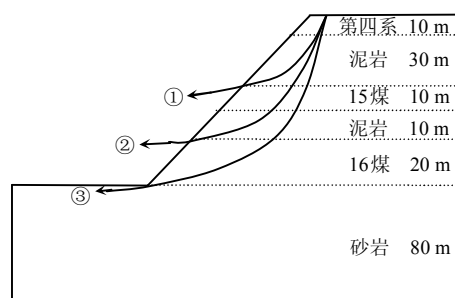


图 4 地质剖面及最危险滑出位置示意图
Fig.4 Sketch of geological section and the dangerest position of slip plane

按《伊敏矿区一号露天矿初步(扩大)设计》(500 万吨/年)和《伊敏矿区一露天矿边坡工程地质勘探报告》^[8],选取各岩体物理力学参数见表 5。数值计算时,岩体均采用 Mohr-Coulumb 本构模型。

表 5 岩体物理力学参数表

Table 5 Physico-mechanical parameters of rock masses

岩石名称	凝聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	重度 / kN · m ⁻³	体积模量 K / GPa	剪切模量 / GPa
第四系	5	16.0	18.5	0.010 8	0.005 0
泥岩	27.5	21.4	19.0	0.021 7	0.007 2
煤	67	25.4	12.8	0.167 0	0.035 7
砂岩	42	21.7	19.0	0.068 9	0.020 4
剥离物	4	21.0	18.5	0.021 7	0.007 2

5.3 数值模拟计算

经计算可知, 内排土场增加了北端帮边坡的稳定性; 在安全系数不变的前提下, 边坡角由 25° 增加到 26° , 提高了 4%; 边坡角提高程度较小, 是由于该边坡岩体是介于岩石与土之间的软岩, 强度较低 (按高度加权平均, 凝聚力为 40.8 kPa, 内摩擦角为 21.9°), 这也与前述内排土对端帮边坡角的影响随岩体强度的增加而增加的结论一致, 但提高边坡角后, 每米端帮边坡可减小剥离量为 301.45 m^3 , 占端帮剥离量的 4.4%, 节省的剥离、运输费用以及缩短的工期是相当可观的。而且, 每米端帮边坡可少占良田 7.54 m^2 , 增加了农业收入。

由此可以说明, 利用内排土可以提高水平、近水平煤岩层边坡的边坡角, 由均质岩土体得出的结论可以应用到水平、近水平煤岩层中。

6 结 语

综合上述分析可知, 内排土可以提高端帮最大稳定边坡角; 坡高越小, 岩体强度越大, 内排土对端帮的影响越大; 而且此结论同样适用于非均质的水平或近水平煤岩层边坡。因此, 有内排条件的露天矿 (包括现有生产露天矿) 应进行有内排土的三维边坡设计计算, 分析端帮边坡的稳定性, 确定端帮边坡的最大稳定边坡角, 在保持边坡稳定系数不变的前提下, 提高端帮边坡的边坡角, 减少剥离量, 或增加采出矿石量, 降低剥采比, 提高矿山经济效益, 保证开采期间及闭坑后边坡的安全。

笔者认为, 该结论可以改变人们只利用内排土减少排土费用、使外排土场少占良田的传统观念, 应对内排土对端帮边坡的稳定性影响进行更深入的一般性研究, 得出其普遍性规律, 以指导露天矿边坡设计和生产, 充分利用内排土提高矿山经济效益, 主要有如下结论:

(1) 各种边坡岩体强度下, 内排土能够提高端帮边坡角的程度。

(2) 内排土场边坡角 (包括工作帮坡角) 和高度对端帮边坡稳定性的影响。

(3) 内排土对露天矿端帮边坡稳定性影响的动态变化规律, 即边坡内单元应力和节点位移随工作帮和内排土场的推进而变化的规律。

(4) 内排土对露天矿端帮边坡稳定性影响的模型试验的研究。

(5) 内排土对露天矿端帮边坡稳定性影响的现场测试的研究。

参 考 文 献

- [1] 孙玉科, 杨志法, 丁恩宝, 等. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
- [2] 中华人民共和国水利部. GB50218—94 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
- [3] 寇晓东, 周维垣, 杨若琼. FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 6—10.
KOU Xiao-dong, ZHOU Wei-yuan, YANG Ruo-qiong. Stability analysis on the high slopes of Three-Gorges shiplock using FLAC-3D[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(1): 6—10.
- [4] 黄润秋, 许强. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 346—354.
HUANG Run-qiu, XU Qiang. Application of explicit Lagrangian finite-difference method in rock slope engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(4): 346—354.
- [5] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D Version 2.0 Online Manual[Z]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 1997.
- [6] 朱玉生, 曹守虎. 伊敏一露天矿内排土对端帮稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1 026—1 032.
ZHU Yu-sheng, CAO Shou-hu. Influence of internal dumping on stability of end wall in Yimin open pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(9): 1 026—1 032.
- [7] 朱玉生. 内排土对露天矿端帮边坡稳定性的影响[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.
- [8] 能源部东煤公司工程质量检测中心. 伊敏矿区一露天矿边坡工程地质勘探报告[R]. 哈尔滨: 东煤公司工程质量检测中心, 1990.