

基于 FLAC 3D 的黄土基底排土场边坡稳定性分析

曹兰柱, 杨 秀

辽宁工程技术大学资源与环境工程学院, 辽宁阜新 123000

摘要 元宝山露天矿 3[#] 线长胜排土场是典型的黄土基底排土场, 在启用前须对排土场边坡的稳定性进行评价。由于排土场的形成不是瞬间堆积起来的, 而是慢慢填筑, 综合排土机的作业过程采用刚体极限平衡法对不同排弃高度的边坡进行稳定性计算, 并采用 FLAC 3D 对排土场边坡的变形进行模拟; 数值模拟研究了排土场的基底以及地下水等因素对边坡稳定的影响, 揭示了边坡的岩体变形、移动规律及滑坡模式, 对边坡稳定性做出科学评价, 为矿山的安全生产提供依据。

关键词 黄土基底; FLAC 3D; 刚体极限平衡法; 边坡稳定

中图分类号 TD2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.14.006

The Slope Stability of Loess Base Dump Based on FLAC 3D

CAO Lanzhu, YANG Xiu

College of Resource and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

Abstract 3[#] line Changsheng dump of Yuanbaoshan is a typical loess base dump, before it is employed, the dump slope stability must be evaluated. The formation of the dump is not instantaneous, but is slowly filling up. For the operating process of comprehensive dumping machines, a rigid body limit equilibrium method of different high slope dump is used to calculation slope stability. And FLAC 3D is adopted to simulate the deformation of the dump slope. The numerical simulation studies the impact of the basement and groundwater unsteady factors on the slope stability, reveals the rock slope deformation and land slide displacement law model, conducts a scientific evaluation of slope stability, and provides a reliable basis for the safety of the mine production.

Keywords loess base; FLAC 3D; rigid limit equilibrium method; slope stability

0 引言

近 20 年来, 随着中国基础建设的大力发展, 边坡稳定性的研究显得越来越重要。而边坡稳定性研究的基础理论是建立在土力学和岩石力学之上的, 所以土力学和岩石力学的成就与发展决定了边坡研究的完善程度^[1-4]。随着数学方法的发展和计算机技术的进步, 边坡稳定性分析方法也取得了一系列成果。多年来, 国内外许多学者致力于这方面的工作, 边坡稳定性分析理论具有十分丰富的内容。人类对边坡稳定性有意识地进行研究是从 19 世纪末、20 世纪初开始的。这一时期, 以均质弹塑性理论和极限平衡理论的应用为主要特点的方法应运而生^[5]。本文在工程地质勘察基础上, 采用理论计算、数值模拟方法, 对排土场边坡稳定性进行客观评价, 同时

确定排土场最终边坡轮廓, 达到揭示排土场滑坡机制, 保证排弃作业 (特别是排土机作业) 安全, 确保排土场边坡形成过程中和形成后的稳定性, 保证排土场周边农田和村庄的安全之目标。

1 工程概况

元宝山露天矿 3[#] 线长胜排土场为黄土斜坡地形, 地形的坡度较大, 地层结构松散, 表层由粉土、粉质黏土倾斜赋存, 且山脚下土层厚, 越往上土层越薄, 地势为南北西三面高东北面低。区域内地形复杂, 主要由 4 条东西向冲沟汇流成一条较大的主冲沟, 在东面缺口处与另外一条由东南向西北方向走势的大型冲沟汇合而成。沟底最低标高 520m, 初始机道

收稿日期: 2010-12-24; 修回日期: 2011-04-11

作者简介: 曹兰柱, 教授, 研究方向为露天采矿边坡稳定性, 电子信箱: cao1962@126.com



标高为一次 600m、二次 663m,最大高差 143m。3#线长胜排土场基底地形、岩土层赋存特征与 2#排土场类似,2#排土场滑坡产生的地表隆起、裂缝和地鼓对排土场周边造成的危害对 3#线长胜排土场设计具有重要的借鉴、参考价值^[6]。

2 黄土基底排土场特征

2.1 基底工程地质条件

3#线长胜排土场基底为典型的黄土高原沟壑区,且冲沟发育,地形比较复杂。其基底主要为第四系松散层和第三系上新统玄武岩。第四系地层分布广泛,厚度一般 2.40—33.90m,第四系松散层主要为粉质黏土、粉土及细砂透镜体和碎石组成,厚度变化较大,呈松散堆积或压缩,抗剪强度不大;渗流下呈塑性,抗剪强度大为降低,属不稳定土体;第三系玄武岩,属喜马拉雅构造期产物,为喷出玄武岩熔岩流,因此各种节理裂隙面彼此交切,岩体支离破碎,岩心完整率极低。由于结构面大多由碎屑泥质组成,局部构成软弱破碎带,结构面的抗剪强度较低,岩体整体强度较低,稳定程度相对较差。

2.2 基底水文地质条件

由于黄土大多赋存于地表或近地表,没有经过埋藏压实作用,在自然状态下,黄土基底大多比较疏松、孔隙度较大。但在其上构筑排土场时,由于不断排弃导致压力不断增加,大多黄土层均经历明显的压实作用,其结构特征发生重大改变,导致土体含水性、透水性、孔隙性和饱和程度等一系列改变,造成土体结构发生演变,进而引发充水和蓄水条件的变化,这种变化会在基底内形成“演化弱层”或弱面,由此诱发黄土基底排土场在加载过程中的滑坡现象^[7]。

3#线长胜排土场水文地质条件简单,地下水赋存较单一,含水层主要表现为孔隙、裂隙水,局部有弱上层滞水存在。因此地下水类型为孔隙、裂隙水和局部弱上层滞水。孔隙、裂隙水主要为潜水,赋存于玄武岩的节理、裂隙中以及冲沟内的底部含砾粉土中(粉土富水性差但呈饱水状态)。由于 3#线长胜排土场地处玄武岩台地边缘,水力坡度较大,地下水由高向低冲沟内运移,并最终排弃于英金河谷。局部弱上层滞水主要赋存于粉质黏土内,为弱透水含水层,一般呈透镜体状分布,局部零星赋存。

3 排弃过程分析

由于排土场的形成是由排弃物料逐步填筑起来的,而不是瞬间填筑,其主要由排土工艺决定,即土岩在排弃过程中的分层作用和排土推进强度。分层作用包括按排弃物料块度自然分级的水平分层,和由于岩石强度不同、排土强度的不均衡性形成的倾斜分层^[8]。

根据现场调查,3#线长胜排土场排弃物主要由砂砾石、泥岩、砂岩、表土组成的混合物。其中排土场最底下一个台阶全部排弃砂砾石,以增强边坡的稳定性和透水性。排土场分布的基岩主要为白垩系下统元宝山组泥岩、砂岩,第三系玄武岩和第四系松散层。综合边坡实际,确定排土场变形、破坏模式为:上部排弃物沿圆弧滑面剪切滑移和下部粉土、粉质黏土组成组合滑面。因此,采用条分极限平衡理论进行稳定分析是可行、可靠的,也是符合实际的。其岩体物理力学指标如表 1 所示。

表 1 计算所需岩体物理力学综合指标

Table 1 Geotechnical physical mechanics composite index for calculation

地层特征	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗剪强度指标	
				c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$
排弃物料	5.125	0.886	1.63	0.06075	25.22
粉土	1.752	2.398	1.78	0.031	12.00
黏土	1.667	2.353	1.92	0.0213	10.75
基岩	0.6954	0.5	2.16	0.019	30.00

3.1 安全储备系数的确定

边坡安全储备系数是衡量边坡稳定性的最终定量指标,它与边坡稳定性研究各项工作内容的原理、方法、代表性、可靠性以及各项定量参数的取用、边坡的高陡程度和服务年限、工程的重要性等有关。元宝山露天煤矿 3#线长胜排土场服务年限超过 10 年,工程地质、水文地质资料比较齐全,安全系数可以取小值;但排土场周围是农田、村庄和建昌营镇林场,要求具备较高的安全储备系数。综上所述,确定排土场安全储备系数为 1.3。

3.2 分析过程及结果

应用刚体极限平衡法对排土场边坡分两部分进行稳定系数的计算:第一部分计算排土机作业过程边坡稳定性,即

当台阶坡面角为 35° ,第一个台阶排弃高度 H 为 30、50、70m 时,对其形成的边坡进行稳定系数计算;第二部分计算排土场整体边坡稳定性,以 1-1'剖面、2-2'剖面、3-3'剖面、4-4'剖面为计算剖面,剖面位置如图 1 所示,进行最危险滑面的搜索和边坡稳定系数计算。

(1) 排土机作业过程边坡稳定性计算

① 当台阶坡面角为 35° ,第一个台阶高度为 30m 时,不考虑其他因素,只考虑排弃物,潜在的滑移面主要是剪切排弃物的圆弧,计算的稳定系数 $F_s=1.982>1.3$,满足安全储备系数的要求。当基底存在粉土、粉质黏土时,潜在的滑移面主要是剪切排弃物的圆弧与基底粉土形成的组合滑面,最小的稳定系数 $F_s=1.254<1.3$,不满足安全储备系数的要求。当剪切圆

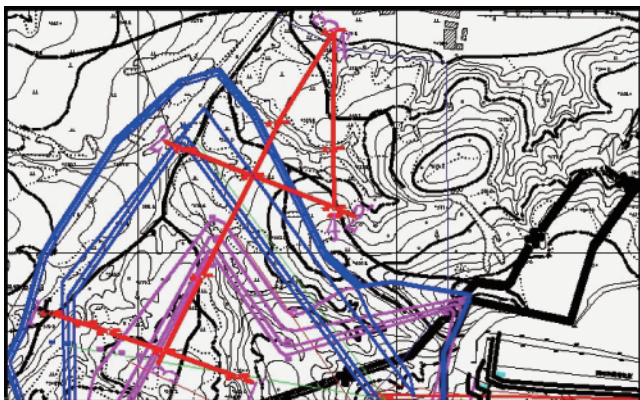


图 1 剖面位置图

Fig.1 Section location

弧与台阶坡顶的距离为 10m 时,圆弧与基底粉土形成的组合滑面的稳定系数为 1.3,满足安全储备系数的要求,见图 2。

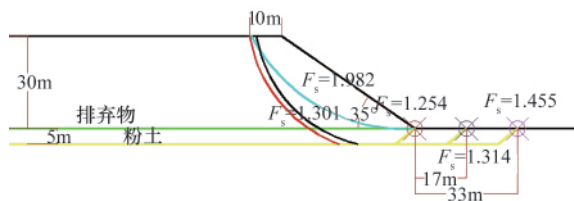


图 2 $\alpha=35^\circ, H=30\text{m}$ 的稳定系数

Fig. 2 Stability factor of graph with $\alpha=35^\circ, H=30\text{m}$

② 当台阶坡面角为 35° , 第一个台阶高度为 50m 时,不考虑其他因素,只考虑排弃物,潜在的滑移面主要是剪切排弃物的圆弧,计算的稳定系数 $F_s=1.553>1.3$,满足安全储备系数的要求。当考虑基底粉土的情况下,潜在的滑移面主要是剪切排弃物的圆弧与基底粉土形成的组合滑面,最小的稳定系数为 $F_s=1.134<1.3$,不满足安全储备系数的要求。当剪切圆弧与台阶坡顶的距离为 55m 时,圆弧与基底粉土形成的组合滑面的稳定系数为 1.31,满足安全储备系数的要求,见图 3。

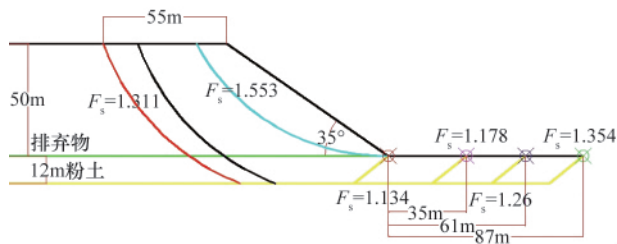


图 3 $\alpha=35^\circ, H=50\text{m}$ 的稳定系数

Fig.3 Stability factor of graph with $\alpha=35^\circ, H=50\text{m}$

③ 当台阶坡面角为 35° , 第一个台阶高度为 70m 时,不考虑其他因素,只考虑排弃物,潜在的滑移面主要是剪切排弃物的圆弧,计算的稳定系数 $F_s=1.35>1.3$,满足安全储备系数的要求。当基底粉土时,潜在的滑移面主要是剪切排弃物的圆弧与基底粉土形成的组合滑面,最小的稳定系数为 $F_s=1.064<1.3$,不满足安全储备系数的要求。当剪切圆弧与台阶

坡顶的距离为 88m 时,圆弧与基底粉土形成的组合滑面的稳定系数为 1.3,满足安全储备系数的要求,见图 4。

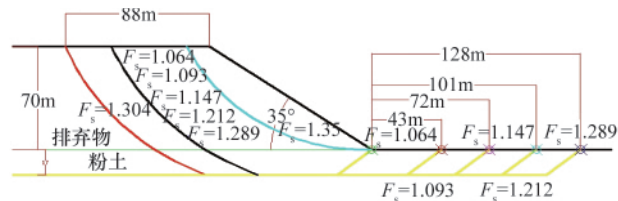


图 4 $\alpha=35^\circ, H=70\text{m}$ 的稳定系数

Fig. 4 Stability factor of graph with $\alpha=35^\circ, H=70\text{m}$

经过对排土机作业过程稳定性分析计算,说明整体边坡处于稳定状态;第一下排台阶高度小于 30m 时排土机作业安全;超过 30m 排土机作业存在安全隐患,需要采取相应预防措施。

(2) 第二部分计算排土场整体边坡稳定性,以 1-1'剖面、2-2'剖面、3-3'剖面、4-4'剖面为计算剖面,4 个计算剖面 F_s 基本满足稳定性要求,说明整体边坡处于稳定状态,结果见表 2。

表 2 各计算剖面稳定系数表

Table 2 Coefficient table for each profile stability calculation

计算剖面	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'
稳定系数 F_s	1.387	1.678	1.202	1.48
地表底鼓范围/m	80	80	160	80

4 排土场稳定性 FLAC 3D 数值模拟

4.1 排土场稳定性数值模拟模型的确定

为尽可能反映排土场的稳定性,选择有代表性的剖面作为本次数值模拟的基础,依据现场实际情况及对排土场的初步分析,本文数值模拟为一个模型,如图 5 所示。考虑到计算时应同时满足精度要求及速度要求,将数值模型共划分为 44808 个节点,35895 个单元。

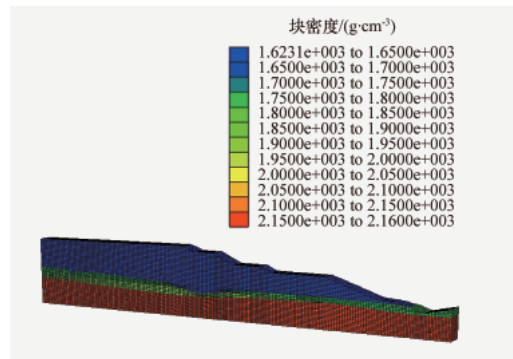


图 5 模型网格

Fig. 5 Model grid figure

4.2 数值模拟相关初始参数的确定

(1) 边界条件

根据建立的模型和实际条件确定边界条件如下。

① 模型左右及前后边界施加水平约束,即使模型的边界水平位移为 0。

② 模型底部边界固定,即使底部边界的水平和铅直位移为 0。

③ 模型顶部及坡面部位为自由边界。

(2) 排土场主要涉及到的材料为岩土等,均是块状和黏结状材料,因此在排土场模拟中常采用 Mohr-Coulumb 塑性模型进行模拟计算,故采用 Mohr-Coulumb 准则的应变模式。

(3) 岩土物理力学参数如表 1 所示。

4.3 数值模拟结果分析

通过 FLAC 3D 数值模拟,得到模型的应变、应力图,展现出排土场边坡稳定性动态演变概况,如图 6—图 10 所示。

图 6 为最大不平衡力收敛曲线图,可以看出,模型最大不平衡力发展趋势收敛,边坡内力达到平衡,即边坡处于稳定塑性流变状态。

图 7(a)为模型铅直方向应力分布图,可以看出铅直方向应力的分布主要受排土场自身重力的影响,竖直应力在坡体表面向下,均随着标高的降低而呈上升趋势,分布均匀,基本顺着坡面方向一直延伸到坡脚处;在铅直方向上,坡体受力均匀分布,未出现明显不规则变化。图 7(b)为模型水平方向(坡外方向)应力分布图。由于岩层面起伏,其附近应力有所

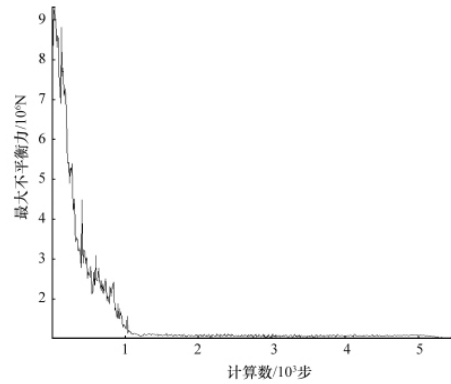


图 6 最大不平衡力收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve for the biggest unbalance force

变化,并在局部出现应力集中现象,使得坡体变形发生改变。同时从应力集中处至坡脚处,沿弱层应力发生明显规则变化,表明边坡体受力发生变化,即此区域内排弃物不但受到自身重力影响,同时也受到边坡后部排弃物的重力水平分量的影响,使水平方向应力增大,易在水平方向上产生变形,但在坡脚处应力分布较均匀,说明边坡不会在短时间内出现失稳现象。

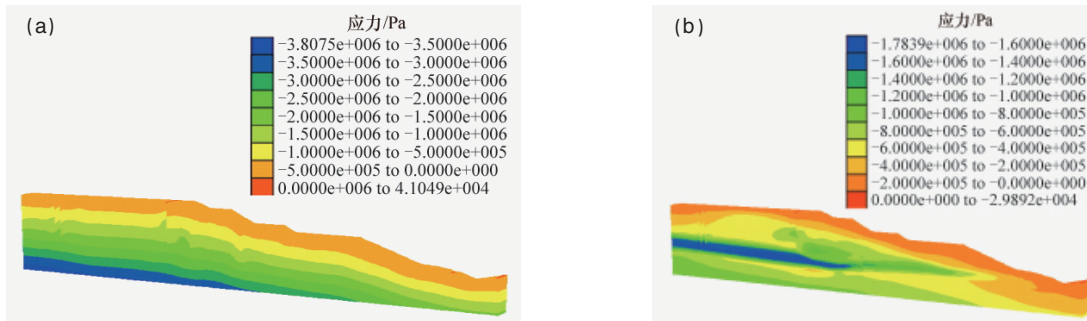


图 7 模型铅直方向(a)和水平方向(b)应力分布

Fig. 7 Stresses of model vertical direction (a) and horizontal direction (b)

图 8 为模型的最大位移和水平方向位移图,可以看出,排土场边坡体处于稳定流变状态,在排弃物坡面上表现为单台阶的圆弧滑移破坏;而对于边坡整体来说,变形模式为地基型的“坐落—滑移式”破坏,由于地表以上的排弃物在自身重力作用下不断趋于自然安息,在此过程中不断沉降变形,进而使黄土层及基岩表面风化层形成弱层,同时导致排弃物内部不断产生挤压、拉裂破坏。

同时,由图 9 可以清楚地看到排土场边坡的变形破坏形式和破坏面。该模型边坡整体的破坏只发生在局部区域,即排弃物为达稳定,沿其自然安息角形成的破坏面,以及软弱夹层在排弃物重力作用下形成的塑性流变区域,同时由于坡脚处在排弃物重力水平分量和塑性流动的弱层作用下发生剪切破坏,致使滑体沿“坐落—滑移—剪切”破坏面滑坡。

模型的边坡应力变化弹塑性区域分布如图 10 所示,其中

黄色区域为塑性区。从塑性状态图可以明显的看出剪切破坏机制,塑性状态图可以显示的状态有:(1) 某一区域内的应力进入屈服状态(如某区域正处于剪切破坏阶段时用 shear-n 表示);(2) 某一区域内的应力在模型运行过程中进入过屈服状态并产生塑性流动,后来由于应力重分布这一区域卸载而退出了屈服状态,用 shear-p 表示。随着排土场排弃量增加,边坡应力状态也随之产生改变,在塑性区内应力超过了屈服强度,并存在活动塑性域,表示破坏机制在起作用,说明在该区域内发生了塑性流变。其演变过程为由开始的弹性状态转变为塑性状态,随之达到塑性屈服,进而产生破坏。这也可以解释排土场边坡整体变形的递进性,即不断的变形—屈服—破坏的演变过程。

综合上述模型的模拟结果来看:排弃物在自身重力作用下,沿着其自然安息角形成的破坏面,与排弃物重力作用导致的黄土基底弱层相组合,向坡外方向移动,并在坡脚处剪切破坏

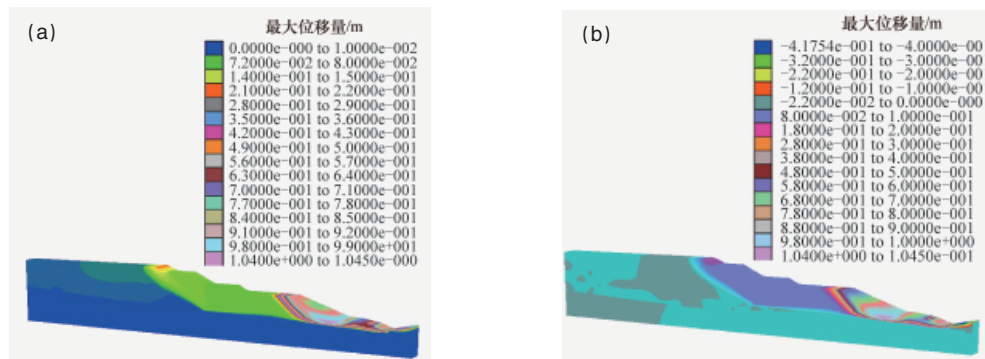


图 8 模型最大位移 (a) 和水平方向位移 (b)

Fig. 8 Model maximum displacement (a) and horizontal displacement (b)

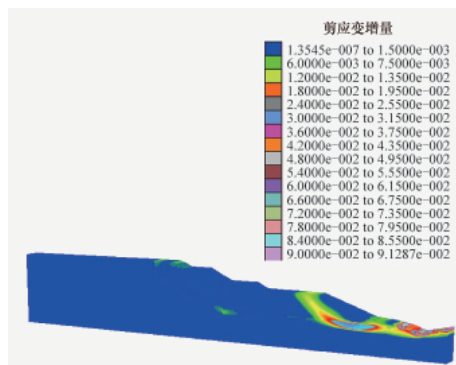


图 9 模型剪切应变增量图

Fig. 9 Model shear strain increment figure

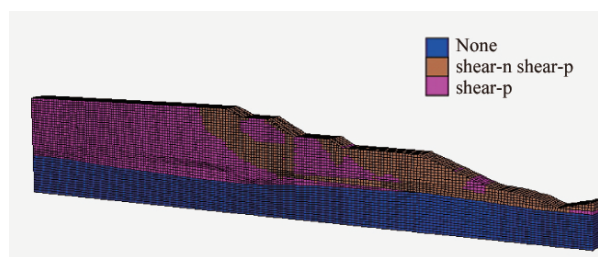


图 10 模型塑性区分布

Fig. 10 Model plastic distinguish layout

形成整体边坡失稳状态,其破坏表现形式为“坐落—滑移式”。

5 结论

基于强度折减理论,结合边坡工程实际,应用 FLAC 3D 对元宝山露天矿黄土基底排土场边坡稳定性进行了模拟分析,揭示了排土场边坡变形机制,并计算了边坡的稳定系数。结论如下。

(1) 经过对排土机作业过程、排土场整体稳定性进行分析计算,4 个计算剖面 F_s 基本满足稳定性要求,说明整体边坡处于稳定状态,第一下排台阶高度小于 30m 时排土机作业安全;超过 30m 排土机作业存在安全隐患,需要采取相应预防措施;整体边坡处于稳定状态。

(2) 排土场边坡变形包括两种形式,单台阶的圆弧滑移和整体的“坐落—滑移式”破坏。

(3) 排弃物在自身重力作用下产生剪应力作用,并在剪应力作用下沿其自然安息角产生塑性流变,形成排弃物自身的滑移破坏面。

(4) 排弃物重力作用导致黄土基底产生塑性屈服形成弱层,并与排弃物自身破坏面相组合,同时在坡脚处形成剪切破坏,使边坡沿弱层挤出。

参考文献 (References)

[1] 胡柳青,李夕兵,温世游. 边坡稳定性研究及其发展趋势[J]. 矿业研究

与开发, 2000, 20(5): 7-8.

Hu Liuqing, Li Xibing, Wen Shiyu. *Mining Research and Development*, 2000, 20(5): 7-8.

[2] 沈珠江. 关于土力学发展前景的设想 [J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 110-111.

Shen Zhujiang. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16 (1): 110-111.

[3] 冯夏庭,林韵梅. 岩石力学与工程专家系统研究新进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 85-91.

Feng Xiating, Lin Yunmei. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(1): 85-91.

[4] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.

Zhu Yuxue. *Slope reliability of analysis* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.

[5] 殷坤龙,韩再生,李志中. 国际滑坡研究的新进展[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(5): 1-4.

Yin Kunlong, Han Zaisheng, Li Zhizhong. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2000, 27(5): 1-4.

[6] 王功海,白润才,曹兰柱. 元宝山露天煤矿排土场边坡稳定性 FLAC 模拟[J]. 露天采矿技术, 2007(6): 27-28, 30.

Wang Gonghai, Bai Runcai, Cao Lanzhu. *Opencast Mining Technology*, 2007(6): 27-28, 30.

[7] 祖国林,王建国,陈敏,等. 承载黄土微结构演化规律研究 [J]. 煤炭科学技术, 1999, 27(11): 46-49.

Zu Guolin, Wang Jianguo, Chen Min, et al. *Coal Science and Technology*, 1999, 27(11): 46-49.

[8] 董慧明,曹平. 含地下硐室的露天矿边坡稳定性研究 [J]. 中国煤田地质, 2004, 16(6): 24-26.

Dong Huiming, Cao Ping. *Coal Geology of China*, 2004, 16(6): 24-26.

(责任编辑 代丽)