

文章编号: 0253-9993(2008)02-0148-05

平朔安家岭露天矿地下采动条件下的边坡稳定性

陈仕阔¹, 杨天鸿¹, 张华兴²

(1. 东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004; 2. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013)

摘 要: 根据平朔安家岭露天矿工程实践, 运用极限平衡理论的方法, 借助 Geo-Slope 软件, 进行了外部环境条件如地下水以及地下开采扰动条件下边坡稳定性影响的研究. 考虑浸水影响并研究了地下开采扰动条件下的边坡破坏模式, 最后进行了边坡稳定性的计算和评价, 提出了相应的防治措施. 结果表明: 水压和地下开采扰动是影响边坡稳定性的重要因素, 局部边坡受地下开采扰动十分剧烈, 存在滑坡可能.

关键词: 地下开采扰动; 边坡稳定性; 极限平衡理论; 反分析

中图分类号: TD824.7 **文献标识码:** A

The slope stability under underground mining of Anjialing open-pit mine in Pingshuo

CHEN Shi-kuo¹, YANG Tian-hong¹, ZHANG Hua-xing²

(1. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Chose the Anjialing open-pit mine in Pingshuo as research object, limit equilibrium theory and Geo-Slope software for slope stability analysis were utilized to consider the influence of external environment on slope stability, such as groundwater and underground mining. The contents of study included that studying water pressure and slope damage model under underground mining, and carrying out the slope stability calculations and evaluation, and providing with the corresponding prevention and control measures. Results show that the water pressure and underground mining are the important factors on affecting slope stability of the rock slope. Some upper slope are affected sharply, at the same time, the sliding of slope is possible.

Key words: mining disturbance; slope stability; limit equilibrium theory; back analysis

在露天矿境界外进行地下开采, 尤其是在露天矿边帮下方进行地下开采, 由于采空区周围的岩体应力分布发生变化, 采空区上方将出现垮落带、断裂带、弯曲带, 致使边坡岩体的完整性遭到破坏, 原岩整体强度降低. 地下开采将造成其上覆岩体应力的重新分布, 岩体间相互作用发生改变. 岩体完整性的破坏, 原岩整体强度降低, 岩体内部相互作用的改变与其它影响边坡稳定的因素如: 岩体结构、降雨、地下水以及爆破震动等的共同作用, 会直接影响边坡的稳定性, 在一些矿山可能导致边坡的失稳, 给露天矿的正常运营带来不利影响, 造成巨大的经济损失^[1-6]. 本文以平朔安家岭露天矿为工程实例, 就地下采动条件下的边坡稳定性进行研究. 首先确定了边坡稳定性分析的基本原则, 并据此选择了几个典型剖面, 然后运用

收稿日期: 2007-02-03 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50490270); 国家自然科学基金面上资助项目(50674025); 国家自然科学基金资助项目(50574022); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-05-0290)

作者简介: 陈仕阔(1982—), 男, 四川巴中人, 硕士研究生. Tel: 024-83688984, E-mail: shikuochen@sina.com

极限平衡理论的方法，借助 Geo - Slope 软件，进行边坡稳定性计算和评价，并对存在滑坡可能的边坡提出了相应的防治措施。

1 矿区概况

1.1 地质条件

平朔矿区位于山西省朔州市境内，安家岭露天矿田位于平朔矿区中南部。地下矿井田位于安家岭矿的南北两侧，由安家岭露天矿北侧的安太堡露天矿不采区、安家岭露天矿西排土场下的上窑采区和七里河西边的太西采区组成。安家岭露天矿边坡自上而下由第四系、新第三系上新统、二叠系石盒子组、下二叠系山西组、石炭统太原群、石炭统本溪群构成，按照土岩的不同性质分述如下*：① 第四系层为主要为黄土层，可分为上、下两层，上层黄土的黏性很低，下层黄土中含有砂砾。在安太堡的地质勘探报告中，将其定为 I 级非自重湿陷性黄土，此种土壤对工程建设极为不利，在正常压力下遇水则会产生较大的变形。② 第三系上新统为棕 - 深红色黏土和亚黏土互层，此层厚度不大，在矿区内零星分布，是遇水极易产生变形和强度降低的软弱层，如在排土场基底中赋存时，会影响排土场的稳定性。③ 煤系地层，其岩性均较坚固，胶结致密，除页岩外，硬度系数均在 4 以上。边坡岩层赋存平缓，4 号煤顶板为灰白色中粗砂岩，局部为含砾砂岩，岩石坚硬，胶结致密。9 号煤顶板为砂质泥岩，局部为泥岩和炭质泥岩，其中砂质泥岩较为坚固，泥岩和炭质泥岩强度稍低。

1.2 滑坡情况

露井联采北端帮露天不采区，于 2006 年 4 月雨后发生一次局部滑坡，以此滑坡位置断面建立模型，运用 Geo - Slope 软件进行反分析计算，设其处于极限状态下，将其滑坡破坏时的参数作为反分析的指标。运用该指标，对其它 4 个典型断面在不同条件下进行分析计算和评价。由于反分析断面受到降雨影响而导致了排土场端帮产生了滑坡，所以反分析时，考虑了水压作用，经计算其破坏结果如图 1 所示。

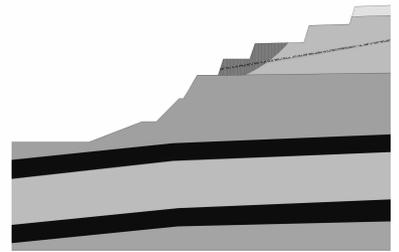


图 1 反分析结果

Fig. 1 Back-analysis results

2 露天矿边坡稳定性分析

安家岭露天矿端帮北面为安太堡露天不采区，南面为上窑排土场，这 2 个区域设计为地下开采方式，在地下开采作用下排土场边坡和端帮边坡是否稳定，是保证矿山露天、地下联采能否正常进行的前提条件。因此，通过稳定性分析，为确保矿山安全生产提供科学的依据。

2.1 边坡稳定性分析的基本原则

主要依据安家岭露天矿工程地质、水文地质、构造地质、岩石力学参数，以及边坡破坏模式等进行边坡稳定性分析。本文中边坡稳定性分析的基本原则：① 用 4 种（瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法和 Morgenstern - Price 法）极限平衡法进行边坡稳定系数的计算，根据边坡的滑坡模式，从计算结果中选取稳定性系数的最小值为安全系数；② 分析了水压对边坡稳定性的影响；③ 考虑地下采动影响下，地面沉降形成拉张裂隙，组成边坡滑动的后缘边界，所形成的失稳模式；④ 对需保证长期稳定的边坡（服务年限大于 20 a），其稳定性系数选取不小于 1.3；对有条件内排压脚的边坡，其稳定性系数选取不小于 1.2；外排土场边坡服务年限大于 20 a 时，稳定系数选取 1.2 ~ 1.5。稳定性系数选取主要参考“露天煤矿工程设计规范”（GB50197 - 2005）。

2.2 典型剖面的确定

典型剖面选择原则：① 通过现场勘查、调查、分析研究，选择现状边坡中动态稳定性较差、有代表

* 中国国际工程咨询公司。平朔安家岭露井矿之间岩体（边坡）稳定性技术咨询报告。

性的剖面；②分析判断受上窑外排土场与露天不采区地下开采及采煤沉陷影响可能最大的露天矿边坡中的有代表性的剖面；③地下开采及采煤沉陷可能影响和危及地面重要构筑物安全的对应剖面；④地下开采与露天开采复合作用下对边坡稳定性最不利的有代表性的剖面。

根据以上原则选定的典型剖面（图2）：①上窑外排土场西南部典型剖面（ $B-B'$ 剖面）②上窑外排土场东西区胶带运输线间边坡典型剖面（ $C-C'$ 剖面）③露井联合采北端帮露天不采区典型剖面（ $E-E'$ 剖面）④露井联合采南端帮上窑排土场典型剖面（ $F-F'$ 剖面）。

2.3 指标的确定

安家岭矿露井联合采边坡稳定分析指标，以实际边坡工程地质勘探与岩石物理力学性质试验而得的成果为主确定（表1）。

水是影响露天矿采场和排土场边坡岩土强度的一个最重要因素。在绝大多数情况下，岩体浸水后强度降低与孔隙水压力作用是分不开的。如果饱水岩体在荷载作用下难于排水或不能排水，那么将产生孔隙水压力，岩体中固体颗粒或骨架所承受的压力便相应减小，致使岩体强度随之降低^[7,8]。安家岭露天矿的土层主要是第四系黄土层及第三系上新统的红黏土层。对安家岭露天矿而言，影响边坡的弱层土是第三系的红黏土层，黏性土的特点是随含水率的增加，其内摩擦角及凝聚力都相应的降低。安太堡矿南排土场隔水的棕红色黏土上滑带及附近土由于地表水渗透，水富集，不易排泄而水浸饱和含水量增加时强度下降迅速：凝聚力 $C = 56 \text{ kPa}$ ，摩擦角 $\varphi = 12.29^\circ$ ，并随含水量增加形成过饱和的软塑层滑面。反分析与实际直剪试验结果： C 值降至 30 与 22.9 kPa， $\varphi = 7^\circ, 8.8^\circ$ 。因此安家岭矿边坡岩土强度应考虑水使岩土含水量增加时的弱化。

2.4 地下开采扰动条件下边坡破坏模式及指标

2.4.1 地下开采扰动条件下边坡破坏模式

上窑采区和不采区主要开采4号和9号煤层，其中4号煤层厚12 m，综采放顶煤开采，一次采全高。4号煤层直接顶板为砂质泥岩、粉砂岩。端帮边坡上部为黄土层，中部为砂岩层，下部为4号和9号煤层，近水平缓倾斜分布；排土场边坡由黄土夹杂少量岩石组成。该区边坡滑坡模式为“圆弧-顺层”。地下采动后，地表坡顶出现拉裂缝组，并不断向下发展；当边坡体内存在顺坡和反坡弱层时，弱层面上下贯通，形成下部沿弱层、上部近似圆弧的滑动面的整体贯通滑动面，边坡整体滑动破坏。受地下开采影响，边坡体内最先出现裂缝的地方并不一定是最终的破坏处，边坡体内出现裂缝后，内部应力状态需重新调整，最终形成整体滑动面。边坡潜在滑动面形成过程如图3所示。下面以 $B-B'$ 断面为

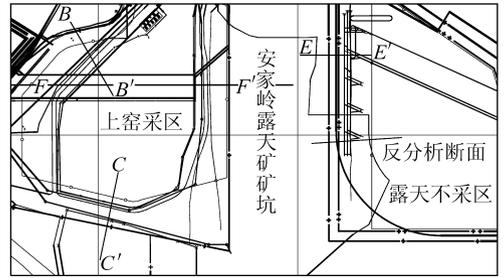


图2 露井联合采位置及典型剖面位置

Fig. 2 Open joint underground mining and typical sections position

表1 边坡稳定计算采用的指标

Table 1 Properties of slope stability calculation

岩土名称	天然密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	凝聚力 C / kPa	摩擦角 φ / ($^\circ$)
排土物料	1.87	15	25.0
黄土状亚黏土	1.87	11	21.0
黏土	2.03	36	12.0
砂质泥岩	2.54	350	31.0
泥岩	1.49	50	13.0
煤	1.49	149	26.5

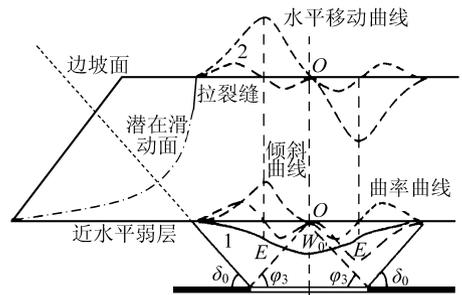


图3 近水平矿层充分采动地表移动盆地内变形分布规律

Fig. 3 Deformation distribution of horizontal seam

in surface-moving basin with full extraction

1——下沉曲线；2——水平变形

例,说明考虑井采扰动条件下边坡破坏模式.

如图4所示,地下采动后,在坡脚线处最大水平拉应变的位置将出现拉裂缝,该处是潜在滑坡剪出位置.拉裂缝的位置和采动影响线的位置将边坡体划分为3部分:扰动区、微弱扰动区和无扰动区.在扰动区内,岩土体破坏剧烈,成散体状态,强度降低明显,拉裂缝位置岩土体的凝聚力降为零;而在无扰动区,处于下沉变形范围之外的边坡体力学指标没有变化;微弱扰动区范围的岩土体,应力发生较大变化,由于没有破坏,力学强度降低不大,当沿扰动区的影响线发生整体垮落后,微弱扰动区应力恢复^[5,9].所以,该区边坡滑坡模式仍为“圆弧-顺层”模式,潜在滑动面在不同的扰动区内,岩土指标做相应的折减.整个边坡体全部处于井采扰动范围之内,稳定性较差.当9号煤层开采时,这种扰动强度更大.

2.4.2 折减依据

地下采动后,部分范围内的围岩扰动破坏,地下开采影响范围内的边坡岩土体(包括排弃土、黄土、黏土砂岩、风氧化煤)的物理力学指标需要进行折减.折减的依据:拉裂缝位置岩土体的凝聚力降为零,而下沉范围之外的边坡体力学指标没有变化,处于拉裂缝和地下开采影响线之间的岩土体由于进入塑性区,岩土强度从峰值强度减小到残余强度,凝聚力降低1/2,摩擦角从25°降低到21°;考虑到拉裂缝的出现,黏土弱层及风氧化煤层赋存将遭受水的侵蚀弱化,强度指标也将降低1/2.需要说明的是,由于地质条件的差异,岩土体物理力学性质指标存在离散性和变异性,在考虑地下开采扰动条件下边坡计算指标时,需要对关键层位岩土指标在波动范围内做调整,可以了解边坡安全系数的储备范围.

3 露天矿边坡稳定性计算与评价结果

3.1 B—B'断面稳定性分析

该断面为上窑排土场西南部典型剖面,走向NE60°,环形路轨位于坡底线,排土高度135 m,最大排土标高1 430 m,坡角只有10°,基地土层厚度5 m,顺倾,倾角5°左右,设定基岩顶部有2 m厚的黏土弱层,首采区位于1 375 m平盘上.

计算得到的危险滑动面位置如图5(a)所示,由于边坡高度不大,坡角缓,潜在的滑面会在1 375 m台阶上形成圆弧-顺层滑弧,安全系数完全满足储备要求.

3.2 E—E'段面稳定性分析

该断面露井联采北端帮露天不采区典型断面,走向NE0°,为北端帮坑下采场边坡,9号煤底板距地面高差180 m,坡角29°,土层厚41 m,岩层顺倾,倾角5°左右,设定的弱层包括基岩顶部5 m厚的黏土弱层、4号煤层上风氧化煤和9号煤层.当基岩顶部黏土弱层为危险滑动面控制边界时,计算得到的危险滑动面位置如图5(b)所示,潜在的滑面为圆弧-顺层滑弧,无水压、地下开采扰动时,安全系数为1.061,处于极限状态,要考虑对边坡进行削坡减重(将原来上部边坡坡角由25°降到20°,经计算,削坡减重后边坡稳定性系数可达1.2以上)来防治滑坡的可能;考虑水压时,安全系数为1.022;考虑地下开采扰动时,安全系数为1.038,也处于极限状态,地下开采范围较大,严重影响边坡稳定,要采取留设煤柱的措施;同时考虑水压、地下开采扰

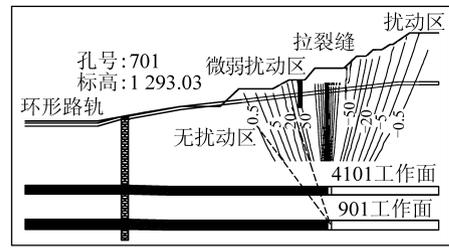


图4 B—B'断面水平变形曲线和破坏模式(4号、9号煤层开采)

Fig. 4 B—B' horizontal deformation curves and damage model

(Coal mining on the 4th and 9th)

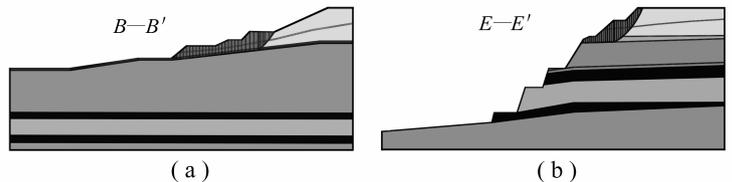


图5 2个断面模型计算结果

Fig. 5 Calculation results of two sections

动时,安全系数为 0.999,存在滑坡可能,要采取留设煤柱同时加强输干排水的措施.当 4 号煤顶面为危险滑动面控制边界时,潜在的滑面为沿 4 号煤顶板形成圆弧-顺层滑弧,在考虑了水压作用以及同时考虑水压和地下开采扰动情况下,完全满足储备要求.由于篇幅所限,这里只列出了 $B-B'$ 断面和 $E-E'$ 断面的计算结果,其它断面计算结果详见表 2.

表 2 安家岭露天矿边坡稳定计算结果
Table 2 Calculation results of Anjialing open-pit slope stability

断面位置	滑动面	不同情况的安全系数				采取防治措施
		无水压地下开采	水压	地下开采	水压、地下开采扰动	
$B-B'$	上部	1.533	1.484	-	1.434	
$C-C'$	上部	1.487	1.424	-	1.333	
$E-E'$	上部	1.061	1.022	1.038	0.999	留 40 m 煤柱、削坡排水
	中部	2.088	2.071	-	2.065	
$F-F'$	上部	1.513	1.427	1.428	1.357	
	下部	1.975	1.970	-	1.966	

注:每个断面采用了 4 种极限平衡方法,其中力矩平衡方法适用于圆弧形滑面,计算误差最小;力平衡方法适用于非圆弧形滑面,计算误差最小.所以表中列出的是每个断面计算误差最小的稳定系数.

4 结 论

安家岭露天煤矿边坡稳定性经分析计算表明,当考虑水压和地下采扰动影响下,当前整体边坡的稳定性明显下降,所有上部边坡均处在地下采动的影响范围之内,尤其是 $E-E'$ 断面上部边坡,边坡岩体受地下开采扰动十分剧烈.边坡稳定性敏感度分析表明,考虑到暴雨最不利水对岩土体侵蚀弱化的情况,考虑水压时, $E-E'$ 断面上部边坡,边坡稳定系数不能满足安全储备要求,需要进行防排水处理. $E-E'$ 断面上部边坡,在不考虑水压地下开采情况时,稳定性都只有 1.042,处于极限状态,需要采取削坡减重的防治措施;在考虑水压和地下开采扰动时,要采取留设煤柱同时进行输干排水.

由于地下开采扰动条件下稳定分析采用的岩土强度折减指标是由分析得到的,尚没有实际发生的沉陷区岩土体勘探取样试验成果.因此,今后生产中发生地下开采沉陷后,有必要进行重点部位边坡地质勘察、取样、试验,用实际实验指标分析成果进行校核与调整,进行边坡实际稳定性分析与评价.

参考文献:

- [1] 朱乃龙,张世雄.岩石深凹边坡稳定性分析[J].武汉理工大学学报,2002,24(11):57~58.
- [2] 张至刚.边坡稳定性分析技术在我国金属露天矿山中的应用[J].云南冶金,1999,28(3):8~11.
- [3] 卢世宗.我国露天矿山边坡研究概况与展望[A].第四届全国工程地质大会文集[C].北京:海洋出版社,1992.
- [4] 侯殿昆.某露天矿地下开采对边坡稳定性影响的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.
- [5] 孙世国,李积胜.地下和露天联合开采环境破坏作用的分析[J].露天采矿技术,1998(S1):66~68.
- [6] 孙世国.地下露天同期采动下边坡岩体变形机制的模拟试验研究[J].勘查科学技术,1997(4):38~42.
- [7] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2000.116~118.
- [8] 杨天鸿,唐春安,徐涛,等.岩石破裂过程的渗流特性[M].北京:科学出版社,2004.43~44.
- [9] Q Sheng, Z Q Yue, C F Leel, et al. Estimating the excavation disturbed zone in the permanent shiplock slopes of the Three Gorges Project, China [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39: 165~184.