

露天煤矿边坡稳定性实例分析及优化设计

宋国龙

(内蒙古自治区第三地质矿产勘查开发院, 内蒙古 呼和浩特 010050)

摘要:结合内蒙古某露天煤矿的边坡实例,综合运用现有的工程地质资料、理论分析以及计算等手段,对该露天矿边坡工程地质条件、稳定性进行了分析和评价,提出了优化设计方案和滑坡治理建议。最后,从技术和工程方面提出了露天矿边坡稳定性的防治措施。

关键词:露天矿;边坡稳定性;失稳边坡;滑面;边坡角;滑坡治理

中图分类号:P642.22;TD854.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)10-0030-06

Example Analysis and Optimal Design of Slope Stability in Open Pit Coal Mine/SONG Guo-long (Inner Mongolia Third Geological Mineral Exploration Institute, Hohhot Inner Mongolia 010050, China)

Abstract: Combined with an example of an open pit coal mine in Inner Mongolia, a comprehensive study is made on the slope stability of open pit mine. By the existing engineering geological data, theoretical analysis and calculation means, the analysis and evaluation are carried out on the geological conditions and stability with optimized design scheme and landslide treatment suggestions. Finally, the control measures for slope stability of open-pit mine are put forward from the aspects of technology and engineering.

Key words: open-pit mine; slope stability; instable slope; sliding surface; slope angle; landslide treatment

0 引言

露天矿边坡稳定问题一直是困扰露天矿安全生产、制约露天矿生产规模和经济效益的难点。对边坡稳定性的正确评价是保证露天矿边坡稳定的关键。边坡稳定性评价的主要任务就是对露天矿开采所形成的边坡的稳定性作出评价,为边坡的优化设计及边坡治理提供科学依据。

边坡稳定性分析评价一直以来都是岩土工程中一个重要的研究课题。评价的基本方法分为定性评价和定量评价 2 种。定性评价主要是通过综合考虑各种影响边坡稳定性的因素,并根据变形的时间效应规律,判断边坡的稳定状况和发展趋势。又可分为历史分析法和工程地质类比法 2 种。定量评价是在定性评价基础上,通过数值计算或图解方法赋予边坡稳定性以量的概念。目前使用最广泛的仍是极限平衡分析法与有限元计算法 2 种。除上述的评价方法外,尚有概率分析法、图解分析法、优势面分析法、系统工程分析法及物理模型试验等方法。

本文结合内蒙古某露天煤矿边坡工程地质勘察项目实际情况,对该露天煤矿北端帮边坡采用工程地质类比法和极限平衡法进行稳定性评价,并提出

防治的优化设计方案。

1 研究区概况

1.1 地理概况

该露天煤矿位于内蒙古锡林浩特市,地处剥蚀堆积与侵蚀堆积地形的过渡地带。矿区西北部为低缓的丘陵区,地形呈波状起伏;东南及东北部为河谷冲、洪积平原,开阔平坦。

近 20 年间平均降水量 294.74 mm,年平均蒸发量 1794.64 mm,每年的 6、7 和 8 三个月为雨季。冻结期为 10 月初~12 月上旬,最大冻土深度 2.89 m。

本地区地震烈度为 6 度,地震峰值加速度为 0.05g。根据规范,地震烈度 ≤ 6 度,因此可不考虑其对边坡稳定性的影响。

1.2 矿区概况

该煤矿地表东西平均长 6.84 km,南北平均宽 5.43 km,面积 37.14 km²。地势平坦,煤层倾角近水平,一般 3°~5°,剥离物多为软岩,主要可采煤层有 5 煤层和 6 煤层。前 20 年开采范围内 5 煤层顶板以上剥离物(岩石及表土)平均厚度 45.9 m,5 煤层平均厚度 15.6 m,5 煤层—6 煤层层间夹矸,平均厚

收稿日期:2016-06-15

作者简介:宋国龙,男,汉族,1966年生,高级工程师,从事岩土工程、钻探工程、矿产勘查等技术及管理工作,内蒙古呼和浩特市回民区车站西街兴旺家园小区7号楼,gl-song66@163.com。

度 59.7 m, 6 煤层平均厚度 31.4 m。露天矿在开采的过程中将形成帮边坡高度达 100 m 以上。

1.2.1 矿区地层

煤矿露天区被第四系全部覆盖, 根据钻探揭露, 地层有: 古生界志留系—泥盆系; 中生界白垩系下统巴彦花群锡林组、胜利组; 新生界第三系上新统和第四系。锡林组和胜利组为本区含煤地层。工作区内地层自上而下有第四系、第三系上统和白垩系胜利组, 共分为 10 个岩段, 17 大层, 83 个小层。主要岩组有: 新生界第四系和第三系粘土、白垩系胜利组泥岩段、5 煤、泥岩段、砂岩段、6 煤和砂岩段。

1.2.2 矿区构造

矿区为一宽缓的北东向复向斜构造, 以往地质资料中提到有 F_1 、 F_{25} 和 F_{29} 三条正断层, 本次工程地质调绘工作中查明的主要地质构造如下。

(1) 北东向 F_1 断层。该断层为一正断层, 位于现有采坑东南区。走向 $N62^\circ E$, 倾向 SE, 倾角 70° , 断层带宽 4.3 ~ 5.2 m, 地层断距 56.4 ~ 87.2 m, 为原来的 F_{25} 断层, 是本次勘察范围内最大的地质构造, 采坑内断层下盘为正在开采的 5 煤层, 断层上盘同一水平为 5 煤顶部的泥岩—砾岩。

(2) 北东向 F_2 、 F_3 断层。出露在采坑北区西侧一工作面上, 均为正断层, 2 条断层平行分布, 间距 36 m, 断层走向 $N50 \sim 70^\circ E$, 倾向 SE, 倾角 $65^\circ \sim 75^\circ$, 地层断距 0.2 ~ 1.5 m。

(3) 南北向 F_{10} 断层。位于现在采区的西北部, 分别在北端帮和西工作帮出露, 走向 $N0 \sim 10^\circ E$, 近乎南北向, 倾向 SE, 倾角 $45^\circ \sim 50^\circ$, 为该区沉积岩相形成过程的一条逆冲断层, 其西侧为灰—深灰色泥砾岩, 泥质胶结, 一般成岩较差, 东侧为深灰—灰黑色泥岩、粉砂岩。

(4) 北西向断层 $F_4 \sim F_9$ 。该组断层分布在采区北部, 在北端帮坡面明显出露, 由西至东依次分布, 形成一组阶梯式正断层, 间距 15 ~ 50 m, 走向 $N10 \sim 20^\circ S$, 倾向 NE, 倾角 $70^\circ \sim 85^\circ$, 地层断距 0.2 ~ 1.2 m。

(5) 中部采区背斜。首采区中部发育有一条短轴背斜, 走向 $N50 \sim 55^\circ W$, 主轴长约 0.9 km, 翼角 $2^\circ \sim 6^\circ$ 。

1.2.3 水文地质条件

矿区属锡林浩特盆地水文地质单元的一部分。对露天开采有影响的含水层有: 第四系孔隙潜水含

水层、煤系顶砾岩段裂隙、孔隙承压含水岩组、5 煤层裂隙承压含水岩组、6 煤层裂隙承压含水岩组。

2 边坡工程地质条件分析与评价

2.1 岩性组合及物理力学性质

由第四系松散层及煤系地层组成。第四系中、细砂坡顶全区分布, 厚度 7 ~ 32 m, 平均 20 m, 局部夹有粉质粘土、砂砾薄层; 煤系地层全区分布, 控制深度在 6 煤底板以下 30 m 范围内。

2.2 岩体构造

北端帮及其附近区域以小规模断层为主的地质构造比较发育, 在以往的地质资料中从没有过描述。本次查明的构造主要有 3 组断层: (1) 北东向断层 (F_2 、 F_3)、南北向断层 (F_{10})、北西向断层 ($F_4 \sim F_9$)。

2.3 地下水

前面所述的含水层在北端帮地层中均有存在, 从全区来看, 地下水径流方向由南向北, 由于南部采坑的截流及本区第四系厚度变薄, 所以第四系孔隙潜水含水层水较少, 对边坡的影响不大。

2.4 软弱层(面)

北端帮软弱层广泛分布于风化带深度范围以内及煤层的顶底板; 弱层岩性为泥岩、炭质泥岩或砂岩, 粘聚力 8 ~ 19 MPa, 内摩擦角 $6^\circ \sim 20^\circ$ 。

2.5 岩体结构类型的划分

北端帮 6 煤层底板以上岩石抗压强度为 6 ~ 15 MPa 的中硬岩, 只占岩石比例的 5.15% (不包括煤层), 平均厚度为 7.51 m, 大多数岩层为软岩, 其岩体类型应属于松散—半坚硬岩体。

2.6 工程地质条件评价

(1) 本区煤系地层的上覆第四系厚度约 13.32 m, 地质构造以断层为主, 比较发育, 地层走向为北西向, 倾角为 $5^\circ \sim 7^\circ$ 。

(2) 风化带地层均属较软弱地层, 主要分布在煤系地层强风化带深度以内。

(3) 区内有第四系孔隙潜水含水层, 煤系地层有 2 个层间承压含水层, 对边坡稳定有一定影响。

各项数据表明, 北端帮地质条件很差, 岩体类型应属于一类二型—二类一型。

3 边坡稳定性分析与评价

3.1 失稳边坡(BH1 滑坡)分析

3.1.1 BH1 滑坡形态与要素

该滑坡为矿区目前规模最大的一处失稳现象,滑坡体在平面上近似呈矩形展布,滑体长 277 m,宽度 418 m,滑动面积 47400 m²,底部隆起面积 11229 m²,滑坡主轴 338°。滑坡后缘标高为 982 m,滑坡体后缘形成圈椅形滑坡后壁,落差在 2~10 m,坡角 8°~47°。滑坡体中形成了 978、973 和 960 m 等多个台阶,滑体的中前部的东侧形成剪切裂隙,与滑动方向相交。滑坡体切穿 5 煤层在水平 942 m 形成滑坡前缘,地表抬高 0~0.5 m,滑体前缘在 5 煤层中部形成与滑动方向垂直的隆起带。

滑体地层从上到下依次为细砂、砂砾、泥岩和 5 煤。细砂层,稍湿,中密,天然休止角约为 26°,平均厚度 7 m。砂砾平均厚度 5.8 m,底部有一层 0.1 m 灰绿色的泥岩。泥岩,粘土矿物组成,泥质胶结,底部炭化程度高,遇水软化,厚度约为 20 m。5 煤,内生裂隙发育。5 煤层中间发育一薄层炭质泥岩,在煤系地层水的作用下,泥岩软化呈泥团状,强度极低。根据以上分析,滑带就位于 5 煤中薄层炭质泥岩上。

3.1.2 BH1 滑坡破坏机理及影响因素

随着采坑的逐步深入,北端帮顶部裂缝随之延长、加大,一场大雨后,地表沿主裂缝呈圆弧状滑面“下坐”,滑体中部被构造面切割成的块体在滑坡前缘的牵引下沿折线滑面向前滑动;滑坡前缘在滑体后推力的作用下,顺煤层形成隆起带。形成了“坐落-滑移式”破坏模型。滑坡形成原因及影响因素如下。

(1)地质构造因素是造成滑坡的根本因素。F₄~F₉这组断层几乎正交切割北端帮,同时地层总体倾向北西,与断层结构面在立面上形成“V”型结构,为滑坡的形成提供了良好的边界条件,再加上临空面形成,后坡顶形成的一组与边坡走向近平行的张裂缝,构成棋盘式块状构造体,对边坡稳定极为不利。

(2)水的作用是滑坡的催化剂。第四系底部砂砾石层大部分与下部白垩系泥砂岩直接接触,当有大气降水时,就会透过第四系渗入结构面,使其力学强度降低而形成滑面。

(3)采矿活动是滑坡的激发因素。随着开采的深入,边坡变高、变陡,边坡底部剪应力越来越大,另外顶部通道运输设备的振动影响,致使边坡失稳而导致滑坡形成。

3.1.3 BH1 滑坡反算与稳定性评价

结合地质调绘成果,经上述分析,北端帮滑坡破坏模式为“坐落-滑移式”(见图 1)。

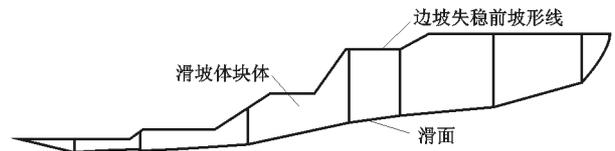


图 1 BH1 滑坡破坏模型

岩土体物理力学计算参数见表 1。

表 1 BH1 滑坡计算岩土体物理力学参数

岩石名称	重度/(kN·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
砂层	19.0	0	27
砂层(饱水)	19.5	0	27
砾岩(切层)	20.0	25	18
砾岩(顺层)	20.0	12	9
泥岩(切层)	20.0	35	22
泥岩(顺层)	20.0	15	10
煤层(切层)	12.6	30	45
煤层(顺层)	12.6	15	15
炭质泥岩(切层)	19.3	25	22
炭质泥岩(顺层)	19.3	9	8

根据本次勘察岩石试验数据、初步设计文件、边坡稳定性计算岩石试验数据以及煤田地质勘探报告,确定滑带炭质泥岩粘聚力为 9 MPa。采用通用计算方法、Sarma 法反算内摩擦角。

分别选取不同的内摩擦角 10°、9°和 8°,按照折线滑面计算(见表 2)。目前边坡已经处于失稳状态,比较选定的内摩擦角为 8°。

表 2 BH1 滑坡稳定性反演计算结果

内摩擦角/(°)	安全系数	
	通用方法	Sarma 法
10	1.041	1.041
9	0.933	0.933
8	0.925	0.925

将反算的炭质泥岩的内摩擦角 8°和粘聚力 9 MPa 代入计算目前滑坡体的稳定性。计算的安全系数,通用方法为 1.056,Sarma 法为 1.073,目前边坡仍然处于不稳定状态。大气降雨形成的地表水进入滑坡后壁和滑体中的裂缝,使得节理面和滑带上的岩土体的强度降低,从而使得北端帮滑坡继续扩大。

3.2 边坡稳定性计算

3.2.1 搜索最危险滑面

假定炭质泥岩以上的泥岩和砾岩为均质体,采用 3 种计算方法搜索最危险滑面(见图 2)。

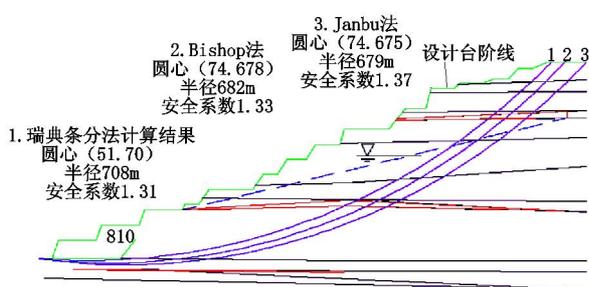


图 2 北端帮边坡搜索潜在最危险滑面

3.2.2 边坡稳定性计算模型建立

结合地质调绘资料和钻探所揭露地层情况,确定北端帮最危险滑面分别为直线滑面、折线滑面和上部圆弧下部顺层滑面,分别考虑开挖到 6 煤顶板和 6 煤底板 2 个阶段边坡的整体稳定性(见图 3、图 4)。

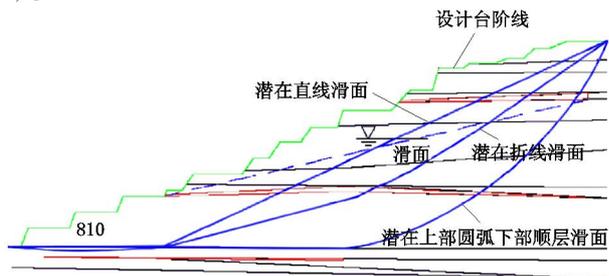


图 3 北端帮开挖到 6 煤底板破坏模式

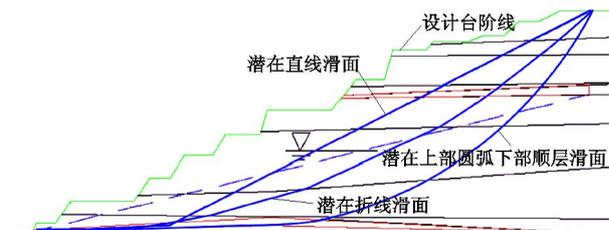


图 4 北端帮开挖到 6 煤顶板破坏模式

3.2.3 计算参数

北端帮边坡稳定性受构造控制,节理面和层面的强度很低。同时考虑地下水对岩石强度的降低,综合确定计算参数(见表 3)。

露天煤矿边坡地下水对边坡稳定性影响具有特殊性,随着煤层向深部开采,煤层中的承压水逐步消退为潜水。把滑面切过的最上一层煤的顶板记为裂隙水的最高点,6 煤最底面为裂隙水的最低点,中间结构面裂隙水的埋深在裂隙水的最高点和最低点之间。

3.2.4 计算结果

分别采用通用计算方法和 Sarma 法计算安全

表 3 BHI 滑坡稳定性计算岩土体物理力学参数

岩石名称	重度/(kN·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
排土	14.0	11	15
砂层	19.0	0	27
砾岩	20.0	25	11
泥岩	20.0	35	30
泥岩(顺层)	20.0	15	10
炭质泥岩	19.3	25	22
炭质泥岩(顺层)	19.3	9	8
煤层	12.6	30	45
粉砂岩	21.3	27	42
细砂岩	21.6	31	36
中砂岩	21.1	30	38
粗砂岩	21.7	30	31

系数。计算结果(表 4 和表 5)表明,北端帮边坡综合边坡角为 23°时,边坡整体稳定性系数 < 1.25,故应调整综合边坡角以满足边坡稳定要求。

表 4 6 煤顶板北端帮整体稳定性系数计算结果

计算方法	通用计算方法	Sarma 法	
直线滑面	考虑水的影响	1.243	1.243
	不考虑水的影响	1.887	1.887
折线滑面	考虑水的影响	1.196	1.197
	不考虑水的影响	2.031	2.054
上部圆弧下部顺层滑面	考虑水的影响	1.192	1.122
	不考虑水的影响	2.221	2.221

表 5 最终边坡整体稳定性安全系数计算

计算方法	通用计算方法	Sarma 法	
直线滑面	考虑水的影响	1.284	1.284
	不考虑水的影响	1.742	1.742
折线滑面	考虑水的影响	1.450	1.449
	不考虑水的影响	1.602	1.603
上部圆弧下部顺层滑面	考虑水的影响	1.186	1.086
	不考虑水的影响	2.753	2.752

4 边坡优化设计与滑坡治理方案

4.1 边坡优化设计

根据该露天矿初步设计,北端帮综合边坡角为 23°。根据以上的稳定性计算,安全系数均小于 1.25,故要减小边坡角,保持露天矿边坡的稳定性,为露天矿的正常开采提供安全保障。

4.1.1 煤层台阶优化

北端帮开采 5 煤层,分为 2 个台阶,高度均为 15 m,台面角度为 70°,宽度为 40 m。5 煤中有一层炭质泥岩夹矸,强度低。6 煤层为 3 个台阶开采,台阶高度分别为 15、15 和 18 m,台面坡度为 70°,台阶宽度为 40 m。计算数据表明,煤层台阶设计偏保

守。目前非工作帮5煤、6煤台阶坡面均在 $70^\circ \sim 74^\circ$,煤层台阶处于稳定状态。结合试验数据和钻探揭露煤层中的炭质泥岩夹矸,通过计算,可将5煤层的坡面角提高到 74° ,6煤层的坡面角提高到 73° 、分为2个台阶24 m和24 m,能满足边坡局部台阶稳定性(表6)。

表6 优化前后北端帮煤层台阶局部稳定性验算

煤层	坡面角度/ ($^\circ$)	圆弧滑面安全系数			直线滑面 安全系数
		瑞典条分法	Bishop法	Janbu法	
5煤	70(优化前)	1.758	1.724	1.720	1.922
	74(优化后)	1.360	1.322	1.323	1.768
6煤	70(优化前)	1.977	1.970	1.969	1.774
	73(优化后)	1.518	1.490	1.493	1.456

4.1.2 岩质台阶优化

据初步设计,5煤与6煤之间上剥离台阶坡面角 65° ,台阶高度为15 m,宽度40 m。计算数据表明,泥岩台阶能够满足局部稳定性,不需要优化。

4.1.3 优化最终帮坡角

北端帮受构造影响,构造面和节理面强度很低。另外,从北端帮计算断面图上可以看出6煤的顶板和底版,以及5煤中部夹有炭质泥岩夹层,弱层分布较广泛,所以北端帮边坡稳定性较差。

根据前面计算,将北端帮整体边坡角调整为 22° ,并验算其稳定性。计算表明,优化设计后的北端帮整体稳定性满足安全要求(见表7)。

表7 北端帮优化后边坡整体稳定性验算

计算方法		通用计算方法	Sarma法
直线滑面	考虑水的影响	1.252	1.288
	不考虑水的影响	1.701	1.791
折线滑面	考虑水的影响	1.367	1.381
	不考虑水的影响	1.661	1.703
上部圆弧下	考虑水的影响	2.221	2.533
部顺层滑面	不考虑水的影响	2.338	2.435

4.2 滑坡治理方案建议

北端帮BH1滑坡主要受控于地质构造特征,并受地下水及采矿活动影响,考虑其破坏原因及帮坡性质,提出以下治理方案建议。

4.2.1 防水疏干

(1)坡顶裂缝用粘土捣实、封填,防止地表水沿裂缝下渗。

(2)在坡顶覆盖一层厚50 cm粘土,铺平压实,防止降水渗入泥、砂岩地层或结构面,降低岩体强度,加速边坡变形而再次形成滑坡。

(3)修复或重建遭到破坏的沿帮疏干井。

4.2.2 卸荷放坡

由于北端帮为临时性边坡,不宜采用工程加固措施,要以控制合理边坡角来保持边坡稳定。

5 露天矿边坡防治措施与建议

露天矿边坡是露天开采这一特殊生产工艺形成的人工边坡,随着开采程度的深入,边坡规模不断扩大,边坡的局部坍塌、滑落、变形等不可避免,甚至还会出现不同程度的滑坡。露天矿边坡防治是一个复杂的系统工程,要遵循一定的防治原则,优化设计安全、经济、合理的治理方案。

5.1 露天矿边坡防治原则

露天矿边坡工程防治方案的设计,依然要遵循“动态设计”的边坡防治设计思想,在保持边坡整体稳定的前提下,采取必要的加固和防护措施,确保边坡在采矿期内的安全。

(1)贯彻“综合分析、预防为主、防治结合”的设计思想;

(2)对露天矿边坡形成中产生的边坡病害及早防范,作到变形可控;

(3)加固和防护工程与边坡的整体稳定性相结合,力求技术可行,经济合理;

(4)采用新技术、新工艺和新材料,力争技术先进。

5.2 露天矿边坡防治措施

5.2.1 技术措施

(1)控制合理的边坡角。对内排土场松散物料边坡,2个以上组合台阶和整体帮坡角不超过 $18^\circ \sim 20^\circ$ 。

(2)合理调整采区。

(3)留置安全煤壁。煤壁可在最后回采。

(4)统筹安排采区,使岩体回弹变形缓慢释放。

(5)采用控制爆破技术,减少爆破震动对岩体的破坏。

(6)对稳定性较差的局部地段采用限速的办法,减少设备运动对边坡产生动载荷。

5.2.2 工程措施

5.2.2.1 水的综合治理

(1)截导地表水。修筑地面沿帮固定水沟,尽量将地面水在顶部拦截。地面截水沟是防止地面水对边坡造成破坏的最重要屏障。

(2)覆盖防渗。沿帮坡顶松散砂层上覆盖一层粘土,铺平压实,防止地表水渗入。

(3)疏排、截堵地下水。包括水平放水孔工程;排水平硐与放水孔联合疏干;疏干井;帷幕截流等。

5.2.2.2 支挡和灌浆工程

(1)对于滑坡规模较小、有滑坡征兆的地段,在下部修筑刚性抗滑挡墙,对滑体进行支挡加固。

(2)对于规模较大的滑坡和变形体,在滑移段实施钢轨抗滑桩或工字钢混凝土抗滑桩,增加滑移段的抗滑移变形能力。

(3)对岩性软硬相间、岩层陡倾倒转而产生倾倒滑移的区段采用锚杆加固,增加复合抗弯刚度能力,减少倾倒滑移变形。

此外,还可结合采用双液灌浆工程、上部减重工程、回填压脚工程等,来改善岩体的受力状况。

5.2.2.3 监控措施

(1)地面位移监测。包括地面岩移监测、采场内平盘岩移监测、重点部位临时岩移监测。

(2)深部位移监测。实现对深部岩体变形动态的观测,并及时做出变形预测。

(3)人工监控。配合地面岩移监测,人工巡视查看地表裂隙或建筑物的变形状况,以便随时发现变形异常情况,并及时采取对策。

6 结论与建议

通过对北端帮失稳边坡(BH1 滑坡)形态与要素、破坏机理及影响因素进行分析,采用3种计算方法搜索最危险滑面,结合地质调绘资料和钻探所揭露地层情况,分别采用通用计算方法和 Sarma 法计算安全系数。计算结果表明,北端帮边坡综合边坡角为 23° 时,边坡整体稳定性系数 < 1.25 ,故应调整综合边坡角以满足边坡稳定要求。

将北端帮整体边坡角调整为 22° 。其中,5煤开采台阶的坡面角提高到 74° ,6煤开采台阶坡面角提高到 73° ,泥岩台阶坡面角不变。

在治理北端帮 BH1 滑坡时,应加强防水疏干并卸荷放坡;坡顶裂缝用粘土捣实、封填,防止地表水沿裂缝下渗;在北端帮坡顶覆盖一层厚 50 cm 粘土,

铺平压实,防止降水渗透加速边坡变形而形成滑坡;修复或重建遭到破坏的沿帮疏干井;控制合理边坡角以保持边坡稳定。

参考文献:

- [1] 陈泽松,夏元友.高陡路堑边坡开挖稳定性评价及应用[J].武汉理工大学学报,2010,32(5).
- [2] 陈瑞泽,王天一.边坡与滑坡工程治理新技术应用手册[M].北京:地质出版社,2009.
- [3] 编辑委员会.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [4] 高大钊.深基坑工程(第二版)[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [5] 何木,赵其华.基于方向角修正的改进传递系数法[J].地质灾害与环境,2010,(1).
- [6] 张鲁渝.一个用于边坡稳定分析的通用条分法[J].岩石力学与工程学报,2005,(3).
- [7] 刘小乐.四川木里金矿边坡稳定性仿真分析及防治对策研究[D].广东广州:华南理工大学,2010.
- [8] 张有安.卧牛山隧道进口滑坡稳定性分析及整治方案研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [9] 王者涛.青川县城桅杆梁不稳定斜坡稳定性评价及其防治措施研究[D].四川成都:成都理工大学,2010.
- [10] 刘涛.一种新的土坡稳定极限平衡分析方法[D].重庆:重庆交通大学,2010.
- [11] 徐青,陈士军,陈胜宏.滑坡稳定分析剩余推力的改进研究[J].岩土力学,2005,(3).
- [12] 李跃,杨永生.基于等效 M-C 准则的强度折减技术分析岩质边坡稳定性[J].金属矿山,2010,(3).
- [13] 刘树杰,徐贵娃,王勇,等.安太堡露天煤矿储煤场破碎站滑坡分析及治理设计[J].露天采矿技术,2010,(5).
- [14] 虞皓影,何建平.影响有限元法分析滑坡稳定性的因素研究[J].河南工程学院学报(自然科学版),2009,(1).
- [15] 杨社强.沁水侯村煤矿边坡稳定性评价与治理方案[J].山东煤炭科技,2008,(5).
- [16] 吴启红.矿山复杂多层采空区稳定性综合分析及安全治理研究[D].湖南长沙:中南大学,2010.
- [17] 王军.多重作用的边坡稳定性及分析方法的研究[D].湖南长沙:中南大学,2010.
- [18] 刘亚群.动荷载作用下层状结构岩体边坡变形破坏机理与安全研究[D].湖北武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2009.
- [19] 吴世佳.边坡稳定性分析的极限平衡法与 FLAC 模拟方法的对比研究[D].山西太原:太原理工大学,2011.
- [20] 杨斌.岩质边坡稳定分析及加固设计研究[D].浙江杭州:浙江大学,2010.