

白音华一号露天煤矿合理帮坡角的确定及边坡稳定性评价

范军富, 宋子岭, 王 东

辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000

摘要 为保证白英华一号露天煤矿开采过程的边坡安全, 确定了白音华煤田一号露天煤矿各帮合理帮坡角, 并对其边坡稳定性进行了分析与评价。根据白音华煤田一号露天煤矿边坡各剖面分层物料的物理力学性质, 应用 FLAC^{3D} 数值模拟软件计算模拟了白音华煤田一号露天煤矿各帮边坡的稳定性, 确定了各帮合理帮坡角。同时, 对东端帮实施内排提高帮坡角进行了研究, 模拟结果表明, 内排的实现提高了所压边坡的稳定性, 在保证内排跟踪距离的前提下适当提高帮坡角, 进而提高煤炭的回收率在露天煤矿中是可行的。

关键词 帮坡角; 露天煤矿; 边坡; 稳定性分析

中图分类号 TD824.7

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.28.009

Determination of Reasonable Slope Angle and the Evaluation of Slope Stability for the No.1 Open-pit Mine in Baiyinhua

FAN Junfu, SONG Ziling, WANG Dong

College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

Abstract In order to guarantee the slope safety of coal mining in Baiyinhua No.1 open-pit mine, a reasonable angle of slope has been determined and slope stability has been analyzed and evaluated. On the basis of careful analysis on engineering geology, hydrogeology, slope rock's physical and mechanical properties of materials actually exposed layer of each section, combining the past landslides for the No.1 open-pit in Baiyinhua, using slope numerical calculation software FLAC^{3D}, the slope stability of No.1 open-pit in Baiyinhua is analyzed and researched in detail, then the reasonable slope angles for the No.1 open-pit mine in Baiyinhua are identified. At the same time, the effects on slope stability for refuse dump inward open pit mines are researched to track in the mining process. The results show that a reasonable distance from the inner row of track might increase slope angle. It is feasible to improve coal recovery in the open-pit mine. A theoretical basis is provided for the open-pit mining in Baiyinhua.

Keywords slope angle; open-pit mine; slope; stability analysis

0 引言

目前, 国内外对边坡稳定性的分析评价方法主要包括极限平衡法和数值分析法。其中, 极限平衡法是使用最早的一种定量方法, 它的发展已经相当成熟, 也是工程上应用最多的一种方法。这种方法的理论基础——极限平衡理论较为简单, 其优点是在不能给出应力作用下结构变形图像的情况下, 仍能对结构的稳定性给出精确的结论。早期的极限平衡理论计算方法主要是基于各种假设的条分法^[1]。条分法最早由瑞典人 Petterson 提出, 后人对瑞典条分法做了各种各样的

改进, 出现了基于各种不同力学假定的条分法, 如 Fellenius 法、Janbu 法、Bishop 法、Morgenstern 法、Spencer 法和 Sarma 法等, 并且开发了相应的计算机程序^[2]。数值分析方法主要包括有限单元法 (FEM)^[3-5]、边界单元法 (BEM)、离散单元法 (DEM)、有限差分法 (FDM)^[6]、快速拉格朗日法 (FLAC)^[7-8]等, 它是通过分析边坡或滑坡结构体内部的应力、应变特征来分析给定断面的变形和稳定问题。

以往对边坡稳定性分析的研究多采用极限平衡法, 通过该方法得到的常是一个简单的计算结果, 并不能反映出边坡

收稿日期: 2011-06-10; 修回日期: 2011-09-19

作者简介: 范军富, 副教授, 研究方向为露天采矿、矿山环境工程, 电子邮箱: junfufan@163.com

应力和应变过程,也不能很好地体现边坡破坏位置和模式。因此,本研究应用三维有限差分数值模拟软件 FLAC^{3D}(下文简称 FLAC^{3D})作为研究工具,从边坡破坏机理上反映边坡破坏过程,以期露天矿边坡灾害的防治提供科学依据。

1 白音华煤田一号露天煤矿边坡破坏类型分析

白音华煤田一号露天煤矿位于西乌珠穆沁旗东北 78km 处,设计地表境界为南西至北东 4.65km、北西至南东 4.49km,面积约为 20km²。露天矿开采境界确定后,测得界内地质煤量为 686.995Mt,可采地质煤量为 655.669Mt,可采商品煤量为 735.247Mt,总剥离量为 3337.860Mm³,平均剥采比为 4.54m³/t。按产量规模 7.00Mt/a、储量备用系数 1.1 计算,其设计服务年限为 95a,其中首采区可采商品煤总量为 328.69Mt,服务年限为 42a。

根据白音华煤田一号露天矿现场调查资料,露天采场内曾发生过 2 次相对较大规模的地质灾害事件,分别为工作帮崩塌(BH1)和非工作帮滑坡(BH2)。

(1) BH1

BH1 分布在工作帮之第四系地层内,2004 年底对该崩塌区的调查显示,该崩塌区平面呈长条状分布,剖面近似三角形(图 1)。该崩塌体总体延展方向近似南北向,长约 580m,宽约 10—40m,厚度约 25m,崩塌物为第四系松散土层。该土体结构混乱,崩塌体后缘近似圆弧形,崩塌壁直立,可见张拉裂隙。崩塌引发因素是第四系松散层自稳能力差,当采掘台阶前缘临空面较大时,该台阶后缘形成的拉张裂缝处第四系土体突然脱离母体翻滚而下形成崩塌体。

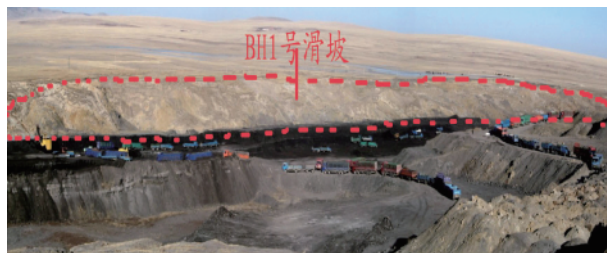


图 1 BH1 号滑坡分布

Fig. 1 Distribution of BH1 landslide

(2) BH2

BH2 滑坡体分布在露天采(掘)场内的非工作帮上,2004 年 12 月 6 日发生变形滑动。该滑坡体平面形态为月牙形,纵剖面形态为凹形或台阶形(图 2)。

滑坡总体延展方向近东西向,长约 420m,宽约 160m,滑坡物质组成为露天开采剥离的松散堆积物,土体结构凌乱。该滑坡体后壁见图 3,滑坡体呈台阶状,最大台阶高度约 2m,后缘形态近似圆弧形,可见张拉裂隙。张拉裂隙长约 200m,宽度约 0.2—0.5m,前缘见有滑坡鼓丘和鼓张裂隙(图 4)。

滑坡引发因素是滑坡体底板(开采完毕的)为 2 煤组底板泥岩层,该泥岩赋存 1 层厚约 2m 的富含高岭土(高岭土质



图 2 BH2 号滑坡分布

Fig. 2 Distribution of BH2 landslide

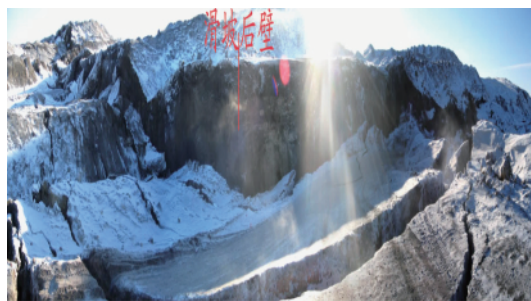


图 3 BH2 号滑坡后壁

Fig. 3 BH2 landslide back wall



图 4 BH2 号滑坡鼓丘分布

Fig. 4 Distribution of BH2 landslide bulge

量分数 53.2%—63.4%) 和其他黏土矿物成分的软弱结构层。该软弱结构层倾向为北东 2°,倾角为 5°—7°。由于上覆的剥离排弃物在边坡上超载堆积,在众多出水点渗流渗水的作用下,加之温度较低岩体冻胀,软弱结构层抗剪强度降低,从而引发了沿软弱结构层的倾向滑坡。从滑坡前舌可以看出,滑坡基底在非工作帮 2 煤组底板泥岩软弱结构层底板,剥离物形成坐落圆弧滑面,沿非工作帮底部软弱结构面剪出。

(3) 目前露天采场不良地质现象

从露天采场现有的地质灾害调查情况看,主要有崩塌、地裂缝和滑坡 3 种不良地质现象。① 崩塌体。一般多发生在采场边帮上部第四系松散地层中,是由于剥离强度较大、边帮临空面较陡、岩体松散所致。因一般规模小,危害性不大。② 地裂缝。发生在采场东北端帮处上部的第四系松散层中,该地裂缝断续出现,呈链状分布,一般延伸 5—10m,张开度为 0.1—0.2m,可见深度达 0.3—0.6m。引发因素为上部松散层孔隙水的入渗和下伏第三系黏土(岩)沿边帮胀缩的综合作用,在重力作用下底层沿边帮产生蠕动、变形,从而产生的表部

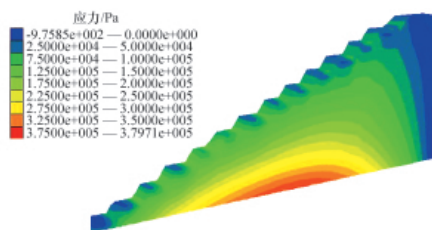


图9 剪切应力云图

Fig. 9 Image of shear stress

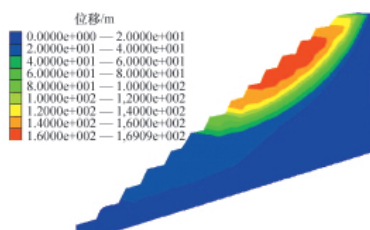


图10 水平位移云图

Fig. 10 Image of horizontal displacement

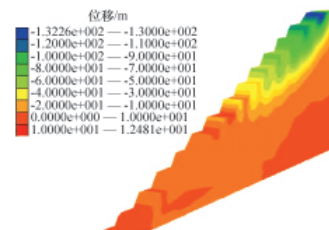


图11 竖向位移云图

Fig. 11 Image of vertical displacement

从图6可以看出,运用强度折减法计算稳定系数时,当模拟诸力达到平衡,模型模拟计算收敛,得到 $F_s=1.26$ 。同时,从图中可以看出滑面为圆弧与沿3-1煤顶板中弱层组合滑面。在坡顶出现剪切应力增量较大区,边坡沿圆弧和弱层组合滑面发生剪切破坏,圆弧滑面下方岩层发生塑性变形,弱层下方煤岩处于弹性状态。在3-1煤与3-2煤之间岩层为顺倾,3-2煤顶板局部存在炭质泥岩弱层,所以在3-1煤与3-2煤之间剪切应变增量较大,也存在较危险滑面。

由图7可以看出,横向应力在边坡下一定深度呈规律性变化,沿边坡面自坡顶至坡脚水平应力增大,3-1煤顶板处最大,即为应力集中,导致坡顶出现拉应力区,地表砂土层产生拉张裂隙。从图8可以看出,竖向应力沿埋藏厚度增大而呈规律性增加,符合地应力赋存规律,边坡表面出现拉应力。从图9可以看出,剪切应力沿边坡面自坡顶至坡脚增大,在3-1煤顶板最大,形成最大剪应力集中带,应力集中区不仅应力值较高而且变化梯度较大。

从图10可以看出,横向位移沿坡面自坡顶逐渐增大,3-1煤顶板水平位移最大,沿圆弧滑面水平位移几乎相等。从图11可以看出,竖向位移以下沉为主,下沉量沿坡面自坡顶逐渐减小,坡顶下沉量最大。

用同样的方法对非工作帮、西端帮、工作帮进行模拟分析,确定了各帮合理帮坡角。

2.3 提高端帮帮坡角可行性研究

随着采矿工程的发展逐步实现内排,内排的实现提高了所压边坡的稳定性,在保证内排跟踪距离的前提下,适当提高帮坡角,进而提高煤炭的回收率。

对东端帮剖面 24° 帮坡角边坡(无内排时边坡稳定系数为1.113)进行了初步模拟研究。根据剖面 24° 帮坡角边坡建立FLAC^{3D}模型,实施内排后,分别对东帮边坡跟踪距离50,100,120,150,180,200m进行了模拟计算,得到的内排跟踪距离与边坡稳定的关系见图12。

图12表明,内排跟踪距离对边坡稳定性影响较大,无内排时边坡稳定系数为1.131;实施内排后,内排跟踪距离为50m时的边坡稳定系数为1.32,100m时为1.20,120m时为1.18,150m时为1.16,180m时为1.15,200m时为1.14。从图12可以看出,内排跟踪距离在100m以内时对边坡稳定性起到了非常大的作用;当跟踪距离大于200m后,内排对边坡稳

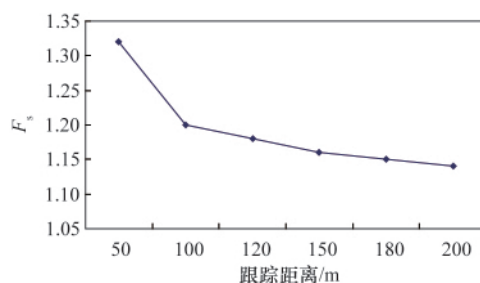


图12 内排跟踪距离与边坡稳定系数的关系

Fig. 12 Relation between dump tracking distance and slope stabilizing coefficient

定性几乎不起作用。可见,在有效的内排跟踪距离内适当提高帮坡角是可行的。

3 边坡稳定性分析评价

组成露天矿边坡的岩层主要为泥岩,其抗剪抗压强度较小。地下水使岩层强度弱化、弱层泥化等是造成露天矿滑坡的主要因素。对采场各帮边坡失稳机理、滑坡模式及稳定程度分述如下。

(1) 东端帮

组成东端帮的边坡岩体由第四系、第三系、白垩系煤系地层组成,该地层岩性以泥岩为主,夹煤层及砂岩层,砂岩泥质胶结,固结较好,该帮边坡工程地质条件比较简单。煤层倾角近水平,3-1煤以上岩层逆倾,有利于边坡稳定。

经FLAC^{3D}模拟显示,坡顶土岩受拉张破坏,岩体沿圆弧剪切变形,横向应力、剪应力在3-1煤顶板产生应力集中,速度矢量场表明土岩拉剪破坏,产生圆弧滑面,然后沿3-1煤顶板滑移,岩体位移主要表现为横向向采空区水平移动,纵向位移主要表现为下沉。在3-1煤与3-2煤之间岩层为顺倾,3-2煤顶板局部存在炭质泥岩弱层,所以在3-1煤与3-2煤之间剪切应变增量较大,也存在较危险滑面。

(2) 西端帮

组成西端帮的边坡由第四系、第三系和白垩系煤系地层组成。第四系层以细砂为主,中砂次之。第三系层主要由黏土(岩)组成,该黏土(岩)可塑性强,松软,局部夹5—15mm小砾石。煤系地层以泥岩为主,夹煤层及砂岩、砂砾岩层,岩石抗压强度、抗剪强度相对较高,岩层产状水平,软弱夹层不甚发

育,岩体稳定性相对较好。岩层倾角近水平或逆倾,有利于边坡稳定。

通过 FLAC^{3D} 模拟显示,坡顶土岩受拉张破坏,岩体沿圆弧剪切变形,横向应力、剪应力在 3-2 煤顶板产生应力集中,速度矢量场表明土岩拉剪破坏,产生圆弧滑面,然后沿 3-2 煤顶板滑移,岩体位移主要表现为横向向采空区水平移动,纵向位移主要表现为下沉。

(3) 工作帮

组成北帮的边坡岩体也是由第四系、第三系和白垩系地层组成,第四系层以细砂为主,粉砂、中砂为辅。第三系层以黏土(岩)为主,夹粉砂岩层,不整合于白垩系地层之上,煤系地层以砂砾岩为主,其次为泥岩层夹煤层、粉砂岩层。

北帮边坡由 2 段组成,上部以 3-1 煤底板为露天坑底,该段边坡高度约 230m,下部以 3-2 煤底板为露天坑底,该段边坡相对高度约 60m。首采区最终边坡形成时,3-2 煤尖灭,3-1 煤底板成为露天矿坑底,岩层向北倾,岩层倾角在 3°左右,为逆倾边坡,有利于边坡稳定。

FLAC^{3D} 模拟显示,坡顶土岩受拉张破坏,岩体沿圆弧剪切变形,横向应力、剪应力在 3-1 煤顶板产生应力集中,速度矢量场说明土岩拉剪破坏,产生圆弧滑面,然后沿 3-1 煤顶板滑移,岩体位移主要表现为横向向采空区水平移动,纵向位移主要表现为下沉。

(4) 非工作帮

该帮边坡岩体由第四系、第三系、白垩系煤系地层组成,第四系松散层埋藏较浅,亦呈不连续分布。第三系地层以膨胀性的黏土(岩)为主,岩石总体抗压强度、抗剪强度低,岩层间分布有软弱结构面,可塑性强,抗剪强度低。第三系与煤系地层间不整合处亦分布有风化作用形成的沉积结构面,孔隙率、含水率高,抗剪强度低。煤系地层中同样赋存粗颗粒的软弱层,这些弱层可能成为南帮边坡失稳的主要滑动面。煤系地层倾向与边坡倾向相同,倾向坑内,易形成顺层滑坡,对边坡稳定造成不利影响。

FLAC^{3D} 模拟显示,坡顶土岩受拉张破坏,岩体沿圆弧剪切变形,横向应力、剪应力在 3-2 煤顶板产生应力集中,速度矢量场说明土岩拉剪破坏,产生圆弧滑面,然后沿 3-2 煤顶板滑移,岩体位移主要表现为横向向采空区水平移动,纵向位移主要表现为下沉。

运用 FLAC^{3D} 对白音华煤田一号露天煤矿采场各帮边坡稳定性进行了全面计算与分析评价,确定了白音华煤田一号露天煤矿合理帮坡角,见表 2。

4 结论

通过对白音华煤田一号露天煤矿首采区工程地质、水文地质、边坡岩体物理力学性质,以及以往滑坡现象认真分析的基础上,采用数值模拟研究手段,确定了首采区各帮合理帮坡角,并对首采区边坡稳定性进行了分析评价,主要研究成果如下。

表 2 白音华煤田一号露天煤矿各帮边坡合理帮坡角

Table 2 Reasonable slope angle of the No. 1 open-pit mine in Baiyinhu

边坡名称	东端帮	西端帮	非工作帮	工作帮
帮坡角/(°)	23.5	22.5	22	25
安全系数	1.26	1.23	1.22	1.12

以三维有限差分数值模拟软件 FLAC^{3D} 为平台,模拟了采场边坡失稳变化应力、位移等变化过程,确定了东端帮合理帮坡角为 23.5°,西端帮合理帮坡角为 22.5°,非工作帮合理帮坡角为 22°,工作帮最终帮合理帮坡角为 25°。

采用 FLAC^{3D} 模拟了东端帮 24°开采,内排压脚跟踪距离对边坡稳定程度的影响,发现跟踪距离在 100m 以内时可以实现东端帮 24°帮坡角开采,稳定系数由压脚前的 1.131 提高到 1.20 以上,满足安全系数储备要求。当跟踪距离大于 200m 时,内排对边坡稳定性几乎不起作用。

参考文献 (References)

- [1] 周宏磊, 张在明. 关于边坡稳定性分析中几个问题的讨论 [J]. 工程勘察, 2006(12): 1-7.
Zhou Honglei, Zhang Zaiming. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006(12): 1-7.
- [2] 杨明成. 边坡稳定性分析的条分法及临界滑动面的确定 [D]. 重庆: 后勤工程学院, 2003.
Yang Mingcheng. *Methods of slices and determination of critical slip surface for slope stability analysis* [D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2003.
- [3] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [4] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨 [J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332-336.
Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Zhang Yufang. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(2): 332-336.
- [5] 郑宏, 李春光. 求解安全系数的有限元法 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 626-628.
Zheng Hong, Li Chunguang. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(5): 626-628.
- [6] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835-840.
- [7] 迟世春, 关立军. 基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定性 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 42-46.
Chi Shichun, Guan Lijun. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(1): 42-46.
- [8] 沈金瑞, 林杭. 多组节理边坡稳定性 FLAC^{3D} 数值分析[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 29-33.
Shen Jinrui, Lin Hang. *China Safety Science Journal*, 2007, 17 (1): 29-33.
- [9] 范军富, 宋子岭, 王东. 灵泉露天矿残煤回采边坡稳定性分析与评价 [J]. 安全与环境学报, 2011(2): 215-220.
Fan Junfu, Song Ziling, Wang Dong. *Journal of Safety and Environment*, 2011(2): 215-220.

(责任编辑 孙秀云)