

基于极限平衡的不同类型边坡稳定性分析计算方法探讨

董贺伟

(首钢集团有限公司矿业公司,河北唐山 064404)

摘要:针对不同类型的露天矿山边坡,其破坏方式和计算边坡稳定性的方法也有所不同。通过分析某铁矿的8处典型区域剖面的地质赋存条件,基于极限平衡理论,分别选用合适的计算方法对边坡稳定性进行校核。采用GeoStudio软件的SLOPE/W模块进行计算,分别模拟边坡在自重+地下水、自重+地下水+爆破振动力、自重+地下水+地震力三种荷载下的安全系数,结合边坡特点,比较瑞典条分法、Bishop法、精确Janbu法和Morgenstern-Price四种方法的适用性和优缺点。可为同行业在边坡稳定性分析选用合适的计算方法方面提供更多的参考。同时,结合矿山实际,对不同类型的边坡提出了针对性的治理建议。

关键词:边坡稳定性;极限平衡法;安全系数;数值模拟;边坡治理;方法比较

中图分类号:TD854⁺.6

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)03-0085-07

Stability analysis and calculation methods for different slope types based on limit equilibrium theory

DONG Hewei

(Shougang Mining Corporation, Tangshan Hebei 064404, China)

Abstract: According to different types of open-pit mine slope, its failure mode and calculation method of slope stability are different. This paper aims to check the slope stability by analyzing the geological occurrence conditions of 8 typical regional sections of an iron mine and selecting appropriate calculation methods respectively based on the limit equilibrium theory. SLOPE/W module using GeoStudio software is used in this paper to calculate the safety factor of slope under three loads: dead weight+groundwater, dead weight+groundwater+blasting vibration power, dead weight+groundwater+seismic force. Combined with the characteristics of slope, the applicability, advantages and disadvantages of the four methods, including Swedish strip division method, Bishop method, accurate Janbu method and Morgenstern-Price method, are compared. It can provide more reference for the same industry to choose the appropriate calculation method for slope stability analysis. At the same time, combined with the actual mine, the corresponding treatment suggestions for different types of slopes are put forward.

Key words: slope stability; limit equilibrium method; safety factor; numerical simulation; prevent and treat slope; comparison of methods

某铁矿随着多年开采,露天坑越来越深,露天边坡高度也越来越高,面临风险也随之增加,有必要对其稳定性进行评估。当前,对露天边坡稳定性分析的研究较多,何旭等^[1]运用3DMine与MidasGTS将模型导入FLAC^{3D},再将监测数据与实时数据进行比较,分析了边坡安全性;易露等^[2]采用极限平衡法和FLAC^{3D}数值模拟,计算出四种工况下的安全

系数;杨天宝^[3]利用GeoStudio软件中的SLOPE/W模块计算各分区边坡的稳定性系数,得出在正常工况下四个分区安全系数在正常范围内;刘志军等^[4]为判断某露天矿边坡设计是否合理,采用GeoSlope进行计算,模拟边坡潜在滑移面在不同条件下的破坏过程,并设计两种工况,计算出边坡稳定性安全系数。上述研究方法大多较为单一,针对几种工况的安全性分析,在方法应用方面不够全面。本文应用GeoStudio软件,以极限平衡理论为基础,分析瑞典条分法、简化Bishop法、精确Janbu法和

收稿日期:2022-04-07

作者简介:董贺伟(1983—),男,工程师,机械设计制造及自动化专业。

Morgenstern-Price 法的优缺点和适用范围,并分别对边坡不同区域的三种荷载稳定性进行计算,校核了该铁矿边坡稳定性并结合边坡特点分别给出相应的治理建议。

1 工程概况

该铁矿为大型深凹型露天采矿场,露天采场长为 3 600 m,宽为 1 600~1 800 m,由南、北两个采场构成,二者在+34 m 以上连通,向下延伸基本是两个独立的采场;其中:北采场边坡最高标高 310 m,最低开采标高-350 m,封闭圈标高 80 m,目前最低开采水平为-245 m;南采场边坡最高标高 140 m,最低开采标高-185 m,封闭圈标高 104 m,目前最低开采水平为-35 m。

2 边坡分区及建模

2.1 边坡分区

根据工程岩组特征、岩体结构特征、岩体不连续面特征、采矿设计及边坡方位特征,将该铁矿采场研究区划分为 I~Ⅷ共 8 个工程地质区。为确切反映各区段边坡的客观实际,根据采场边坡的实际特征,基于该铁矿现场边坡情况(2021 年 8 月

现状图),每个工程地质区分别选取 1 处采场边坡典型区域剖面。其中剖面 1 为北采场北侧工作帮边坡的最陡处,剖面 2 为北采场南侧非工作帮边坡且上部有办公楼设施,剖面 3 和剖面 4 为北采场南侧的边坡,剖面 5 为北采场目前开采至最深处的一个最陡边坡,剖面 6 为北采场西侧的边坡,剖面 7 为北采场原来发生过局部小滑坡现已完成治理的区域,剖面 8 为南采场西侧边坡。

针对该铁矿的具体条件,本次边坡稳定性分析的荷载组合如下:

荷载组合Ⅰ:自重+地下水

荷载组合Ⅱ:自重+地下水+爆破振动力

荷载组合Ⅲ:自重+地下水+地震力

2.2 稳定性参数

通过已有的相关资料可知,采场边坡的地层基本为第四系人工堆积物、砾岩、黑云混合片麻岩、矿体和混合花岗岩。根据本项目已有的试验数据、分析报告等相关资料,选取的矿岩和充填体物理力学参数计算值分别见表 1。

根据不同分区的岩性和边坡形态,本文选取的计算剖面位置示意图如图 1 所示。限于篇幅,仅就剖面 1 进行模型分析,如图 2 所示。

表 1 采场边坡岩体参数数值模拟取值表

Table 1 Numerical simulation value table of rock mass parameters of stope slope

岩土层	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
第四系人工堆积物	20.00	20	0.300	130	18.0	1.0×10^{-5}
砾岩	23.80	9 350	0.238	310	48.3	3.1×10^{-7}
黑云混合片麻岩	26.30	6 815	0.252	467	44.0	2.68×10^{-8}
矿体	28.50	12 500	0.230	833	40.0	3.5×10^{-7}
混合花岗岩	26.04	7 130	0.240	587	49.0	4.0×10^{-7}

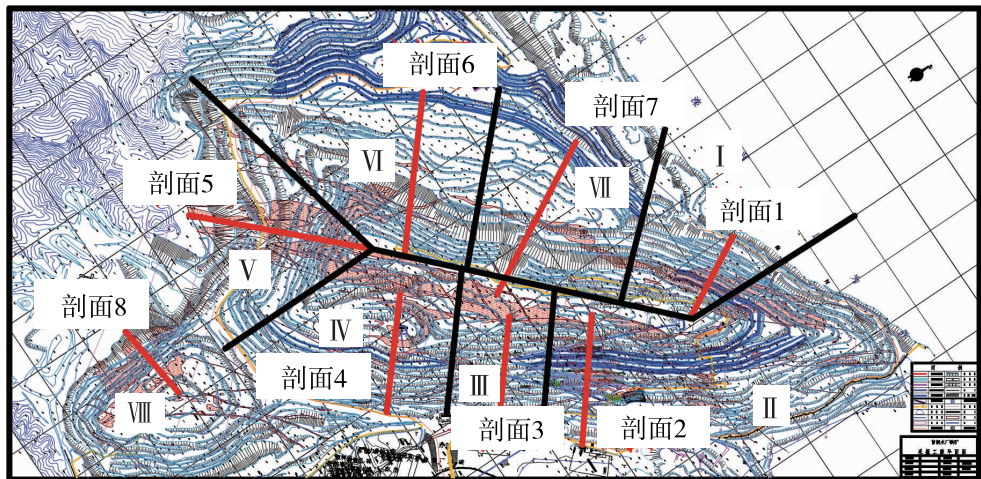


图 1 计算剖面分区位置

Fig. 1 Calculated section location

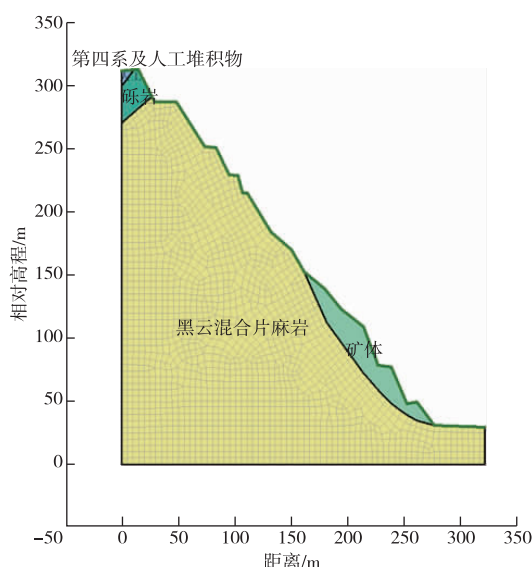


图2 剖面1分析模型

Fig. 2 Analysis model of profile 1

3 边坡稳定性分析

3.1 采场边坡稳定性计算方法

本文的边坡稳定性计算采用 SLOPE/W 模块进行。SLOPE/W 模块是计算岩土边坡安全系数的主流软件产品^[4],其对于综合问题公式化的特征使得它可以同时用 8 种方法分析计算简单或复杂的边坡稳定问题。分析采场边坡其理论基础具体可以表述为:对边坡体进行条分,并依据静力学平衡原理,计算已知滑裂面上的抗滑力和下滑力的比值,该值即为所求边坡的稳定安全系数^[5]。SLOPE/W 模块使用极限平衡理论对不同土体类型、复杂地层和滑移面形状的边坡中的孔隙水压力分布状况进行建模分析^[6]。

极限平衡法计算边坡稳定性安全系数流程:

1) 假定边坡内部存在一个确定的滑裂面作为初始滑裂面;

2) 根据静力平衡原理和莫尔-库伦破坏准则计算,计算结果得出沿预先设定的初始滑面滑动的可能性^[7];

3) 选取多个初始滑裂面,由上述过程求出与之对应的稳定性安全系数;

4) 计算出的所有稳定性安全系数中,找到最小的稳定性安全系数的值,该最小稳定性安全系数值对应的滑裂面就是我们寻找的最危险滑裂面。

本文以极限条分法为基础,分别选取瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法对 8

个剖面 3 种荷载(自重+地下水;自重+地下水+爆破振动力;自重+地下水+地震力)情况下分别分析计算边坡稳定性安全系数。

瑞典条分法不考虑滑动散体内部的相互作用力,只是整体平衡,因此求出来的安全系数偏低 10%~20%,这种误差随着滑裂面圆心角和孔隙压力的增大而增大;简化 Bishop 法计算结果比较准确,主要是因为其在计算过程中充分考虑了土体内部条块之间的相互作用力,有严格的分割要求,计算方式采用迭代法,此方法适用于均质黏性及破碎石堆土等斜坡形成的圆弧形或近似圆弧形滑动滑坡;Janbu 普遍条分法的剪切面是任意的,针对一般的土坡断面情况,土坡面也是任意的,Janbu 法适合于分析滑动面较浅时的任意形状滑动面;Morgenstern-Price 法用于任意形状的滑动面,该法假定条块间力的合力与上一条块底面相平行。

由于剖面 3 和剖面 4 为北采场南侧的普通边坡,剖面 8 为南采场西侧边坡,根据现场调研,矿床赋存于三屯营组二段含矿变质岩系中,矿石的矿物组成比较简单,以磁铁矿为主,假象赤铁矿次之,伴有极少量的褐铁矿等次生矿物,地质构造较发育,岩体结构以块状和层状结构为主,岩石强度较高,较坚硬,稳定性较好,但矿床主要矿体大部分位于当地侵蚀基准面以下,附近地表水体不构成矿床的主要充水因素,地形有利于自然排水,矿床主要充水含水层和构造破碎带富水性中等,属于圆弧滑动面的滑坡的稳定性分析^[8],可以假设两条间力方向相反且与土条底面圆弧的切线平行,大小相等,因此和假设条间力只有水平力的 Bishop 法相比,更适合选择瑞典条分法对三边坡进行分析。

剖面 1 为北采场北侧工作帮边坡最陡处,剖面 2 为北采场南侧非工作帮边坡且上部有办公楼设施,剖面 5 为北采场目前开采至最深处一个最陡边坡。由于这三个剖面位置较为特殊,受力情况较为复杂,不适合应用假设两条间力方向相反的瑞典条分法和假设条间力只有水平力的 Bishop 法,因此选择既能满足力平衡又满足力矩平衡条件的 Morgenstern-Price 法进行分析。

剖面 6 为北采场西侧的边坡,由于大气降水量较多,此边坡岩土体受到软化和泥化作用,岩土体抗剪强度大大降低,同时此剖面为所选剖面中管理情况较差的一个,对其重视程度不够导致危险性较大,

又因剖面 6 不包含坡顶条件,满足各条块上作用力和作用力矩的平衡条件,因此 Janbu 法对该剖面较为适用。

剖面 7 为北采场原来发生过局部小滑坡现已完成治理的区域,其结构并不复杂,然而针对出现过滑坡的剖面应更加关注其抗剪强度与实际剪应力的关系,Bishop 法中的安全系数正与此相呼应,同时此方法考虑了土条侧面的作用力,并假定各土条底部滑动面上的抗滑安全系数均相同,因此 Bishop 法对该剖面较为适用。

3.2 边坡稳定性判断依据

安全系数限值 F_s 的确定是评价边坡稳定性的主要指标,是较复杂的系统工程,且一般边坡安全系数的计算与边坡研究的深度和广度、研究方法、所选参数的代表性和可靠行、边坡高度与坡角堆及对边坡工程地质和水文地质条件等诸多因素的认识程度有关。安全系数限值的确定要综合考虑现场评估、工程类比及有关设计规范^[9]。

表 3 不同荷载组合下总体边坡的设计安全系数

Table 3 Design safety factor of overall slope under different load combinations

边坡工程安全等级	边坡工程设计安全系数		
	I	II	III
I	1.25~1.20	1.23~1.18	1.20~1.15
II	1.20~1.15	1.18~1.13	1.15~1.10
III	1.15~1.10	1.13~1.08	1.10~1.05

结合该铁矿实际情况,最终对八个分区选取以下安全系数。

1)该铁矿边坡在考虑边坡岩体自重和地下水条件下(荷载组合 I),I 区和 VIII 区设计安全系数取 1.20,II~VII 区设计安全系数取 1.25。

2)该铁矿边坡受到生产爆破的多次影响,取水平地震荷载系数为 0.01,考虑边坡岩体自重、地下水及爆破振动力作用(荷载组合 II),I 区和 VIII 区的设计安全系数取 1.18,II~VII 区设计安全系数取 1.23。

3)该铁矿所在区域地震烈度 7~8 度,地震动峰值加速度 $a=0.15\text{ g}$,取水平地震荷载系数为 0.15,考虑边坡岩体自重、地下水及地震荷载作用(荷载组合 III),I 区和 VIII 区的设计安全系数取 1.15,II~VII 区设计安全系数取 1.20。

3.3 边坡稳定性计算结果

如果把边坡岩体作为连续介质,由于岩体的材

根据该铁矿工程地质分区的边坡高度,结合边坡的危害等级,对照图 1 和表 2,得 I 区和 VIII 区的边坡高度大于 100 m 小于 300 m,边坡工程安全等级为 II 级,II、III、IV、V、VI、VII 区的边坡高度大于 300 m,边坡工程安全等级为 I 级。

表 2 边坡工程安全等级划分

Table 2 Classification of safety levels of slope

安全等级	边坡高度 H/m	边坡危害等级
I	$H>500$	I、II、III
	$300<H\leq 500$	I、II
	$100<H\leq 300$	I
II	$300<H\leq 500$	III
	$100<H\leq 300$	II、III
	$H\leq 100$	I
III	$100<H\leq 300$	III
	$H\leq 100$	II、III

综合《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012)和《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014),结合不同荷载组合下总体边坡的设计安全系数进行分析,如表 3。

料强度较高,利用极限平衡法得到的安全系数较高,因此地下采场影响情况下,以开挖后的应力场为基础,计算地下开采影响下边坡的安全系数。

根据现场考察,结合前述分析,剖面 6 和剖面 7 危险性相对较大。现以剖面 6、剖面 7 稳定性分析为例。

剖面 6 滑动面较浅且滑动面形状不固定,根据前述分析,应用 Bishop 法对剖面 6 的三种工况进行分析,如图 3 所示。三种荷载组合下的安全系数分别为 1.741,1.711 和 1.359,均符合设计安全系数。

剖面 7 一部分由破碎石堆土构成,危险性相对较高,安全系数求解准确性要求较高,且滑动面近似圆弧,根据前述分析,选取 Morgenstern-Price 法对剖面 7 三种工况进行分析,如图 4 所示。三种荷载组合下的安全系数分别为 1.759,1.726 和 1.353,均符合设计安全系数。

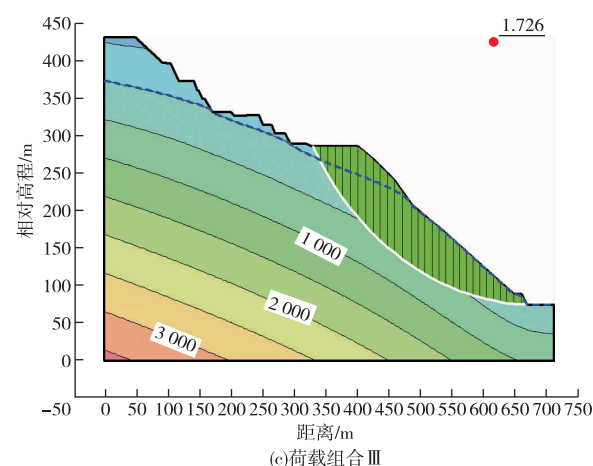
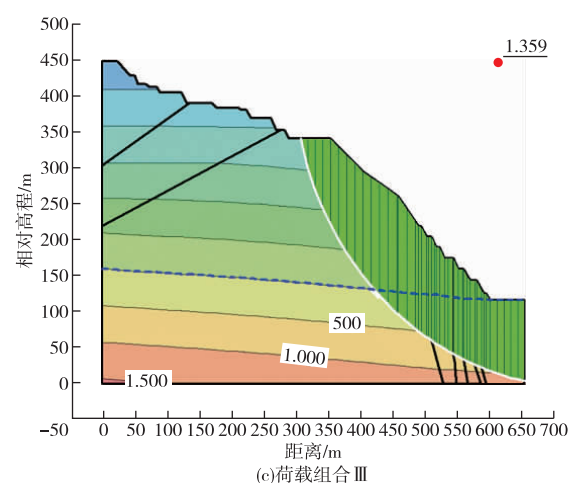
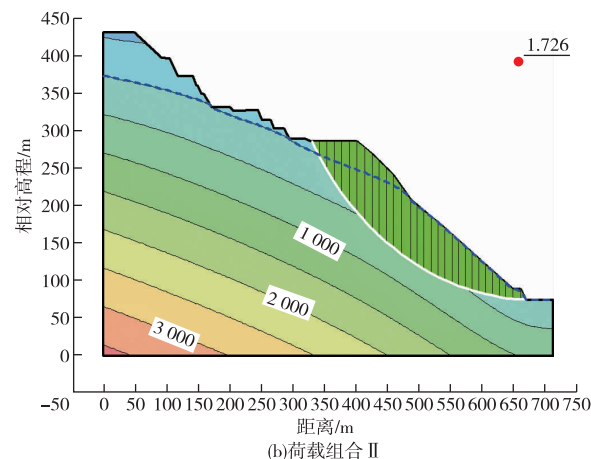
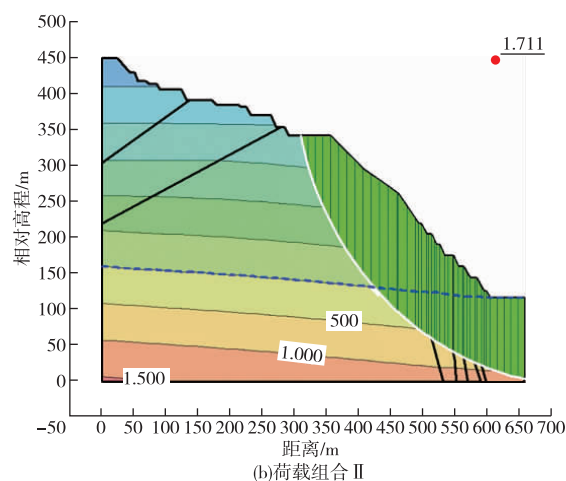
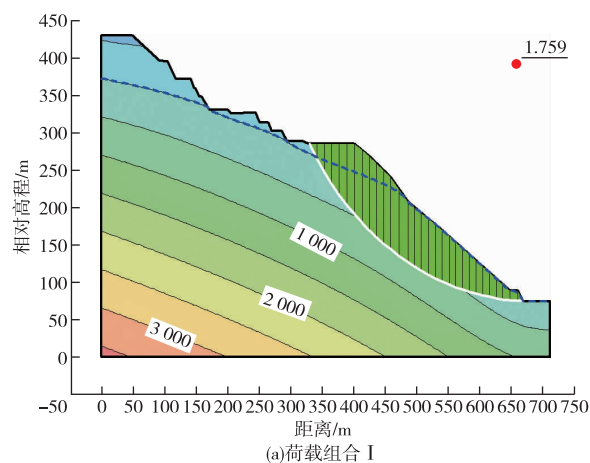
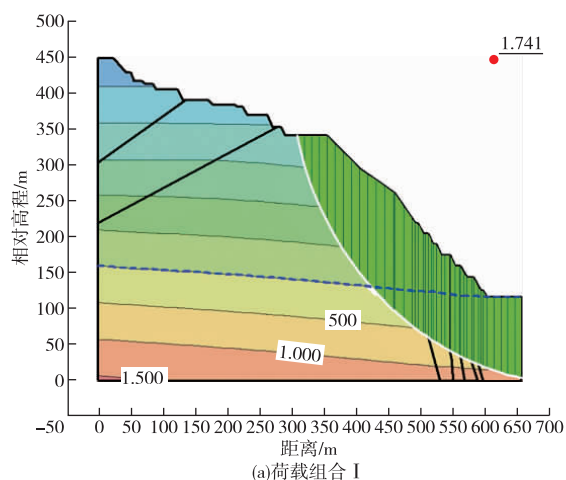


图3 采场边坡安全性分析(剖面6 Bishop法)

Fig. 3 Safety analysis of slope slope(section 6 Bishop method)

图4 采场边坡安全性分析(剖面7 Morgenstern-Price法)

Fig. 4 Safety analysis of slope slope
(section 7 Morgenstern-Price method)

3.4 边坡稳定性分析

采用极限平衡法对剖面1至剖面8的采场边坡进行稳定性计算,结果如表3和表4所示,剖面1在三种荷载组合下安全系数为1.477~1.871;剖面2在三种荷载组合下安全系数为1.476~1.904;剖面

3在三种荷载组合下安全系数为1.627~2.092;剖面4在三种荷载组合下安全系数为1.749~2.231;剖面5在三种荷载组合下安全系数为1.599~2.129;剖面6在三种荷载组合下安全系数为1.359~1.749;剖面7在三种荷载组合下安全系数

为 1.340~1.759;剖面 8 在三种荷载组合下安全系数为 1.500~2.012。

通过计算,剖面 6 危险性最大,经过实际调研,剖面 6 岩体中结构面力学强度相对较低,并

且缝隙中易风化次生矿物较多,地表水渗入和地下水流动较为频繁,岩石孔隙度相比其他剖面较大,因此危险性较大,综上所述,计算结果与客观事实相符。

表 3 剖面 1 和剖面 8 边坡稳定性系数计算值

Table 3 Slope stability coefficient calculation values for profile 1 and profile 8

计算剖面	Bishop			Morgenstern-Price		
	荷载组合 I	荷载组合 II	荷载组合 III	荷载组合 I	荷载组合 II	荷载组合 III
剖面 1	1.871	1.845	1.486	1.859	1.833	1.477
剖面 8	2.005	1.972	1.500	2.012	1.971	1.517
规范值	1.20	1.18	1.15	1.20	1.18	1.15

表 4 剖面 2~7 边坡稳定性系数计算值

Table 4 Calculated values of slope stability coefficient of profile 2 to 7

计算剖面	Bishop			Morgenstern-Price		
	荷载组合 I	荷载组合 II	荷载组合 III	荷载组合 I	荷载组合 II	荷载组合 III
剖面 2	1.904	1.875	1.476	1.897	1.868	1.476
剖面 3	2.092	2.060	1.627	2.080	2.047	1.651
剖面 4	2.231	2.198	1.758	2.218	2.185	1.749
剖面 5	2.129	2.091	1.599	2.123	2.085	1.601
剖面 6	1.741	1.711	1.359	1.749	1.721	1.384
剖面 7	1.758	1.724	1.340	1.759	1.726	1.353
规范值	1.25	1.23	1.20	1.25	1.23	1.20

4 边坡维护治理建议

基于上述结论,结合矿山实际提出以下边坡维护治理建议:

1)剖面 1、2、5、7 位置特殊,相对于其它剖面容易出现局部小滑坡事故,距离开挖面 10 m 范围内岩体破碎结构是剖体中最容易发生变形的部位,因此诸如此类剖面,应将防治重点放在防止碎裂岩体的变形上。基于变形破坏机制分析的治理思路认为必须在控制碎裂岩体变形的基础上,控制潜在滑动面的变形,因此可以选择抗滑桩加固、锚杆锚索加固、抗滑挡土加固、采用各种石灰混合料,灰浆,水泥浆等材料进行剖面防护。

2)剖面 6 不稳定主要因素是大气降水,针对此类边坡,暴雨和汇水是影响边坡稳定性的关键因素,也是治理的中心环节,应及时建立完善的截、疏、排水体系,防治雨水沿裂隙入渗坡体,将已进入坡体的地表水快速排出,尽量减少甚至消除地下水对边坡岩土体的影响,根据实际情况采取截水盲沟,支撑盲沟、排水廊道、集水沟和排水孔等方式。

3)剖面 3、4、8 整体结构较为稳定,未发生过滑坡事故,力学情况比较简单,针对此类安全性较高的边坡,进行定期检查,实时更新剖面数据,加强剖面管理监督。剖面 8 已停止开采,可采用生态治理的

理念,根据剖面的实际情况,以“草灌结合、灌木为主、草本为辅”的思想种植植被,达到降低剖体孔隙水压力、控制土粒流失的作用。

5 结论

1)以极限平衡法为基础,根据不同分区剖面的地质概况分别采用适宜的计算方法分析评价某铁矿开采现状的 8 个剖面在 3 种工况下的稳定性。结果表明:该铁矿现状边坡是稳定的。但针对边坡表层的局部岩体,在扰动过程中,可能发生小范围的破坏,如果边坡表层岩体局部破损,在雨水和爆破振动等情况的诱发下,可能发生局部坍塌或失稳,应进行及时处理,确保采场边坡的整体稳定。

2)GeoStudio 软件中的 SLOPE/W 模块计算各分区边坡的稳定系数安全可靠,但随着生产的不断进行,露天坑加深,边坡越来越高,边坡形态会发生变化,因此,矿山应根据实际情况更新绘制坡面,重新进行安全系数评估,便于指导安全生产。

参 考 文 献

- [1] 何旭,李克钢,秦庆词,等.某磷矿露天边坡稳定性分析[J].矿业研究与开发,2021,41(9):25-28.
HE Xu, LI Kegang, QIN Qingci, et al. Stability analysis of open-pit slope in a phosphate mine[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(9): 25-28.

(下转第 107 页)