

“山区道路地质灾害风险分析与防治技术专题”编者按:我国山区地质、地形条件复杂,地震、暴雨等极端天气频发,山区道路建设与运营中,自然灾害或工程扰动下边坡灾害发生的频度和总量不断增加,严重影响路网运营安全和运输效率发挥。为此,编辑部组织了“山区道路地质灾害风险分析与防治技术专题”,由徐峰研究员担任客座主编。本专题遴选6篇论文发表,内容涵盖边坡稳定性评价、失稳机理研究、变形研究、加固技术等。该专题的出版,有利于促进山区道路地质灾害预防与治理技术的发展。

基于赤平投影和萨尔玛法的西藏某露天矿山边坡稳定性评价

袁进科¹, 胡孝洪², 裴 钻¹, 李梦宇², 阳 晖¹

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队, 西藏 拉萨 850007)

摘要:本文以西藏某铜矿区露天矿山岩质边坡为例,基于矿山边坡现场调查及其工程地质特征,开展了矿山边坡工程地质分区研究,并采用赤平投影法和萨尔玛法相结合,定性分析和定量计算边坡稳定性。研究结果表明:边坡稳定性评价结果与当前边坡现状相一致,矿区边坡总体上稳定性较差,局部区域边坡稳定性差。通过定性和定量两种稳定性评价方法相互印证,对下一阶段边坡灾害防治设计、施工等提供了重要依据,对类似边坡工程有很好的参考和借鉴作用。

关键词:露天矿山边坡;岩质边坡;稳定性评价;赤平投影;萨尔玛法

中图分类号:TD854⁺.6;P642.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)04-0093-08

Slope stability evaluation of an open-pit mine in Xizang based on stereographic projection and Sarma method

YUAN Jinke¹, HU Xiaohong², PEI Zuan¹, LI Mengyu², YANG Hui¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;

2. The Second Geological Brigade of Xizang Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Lhasa Xizang 850007, China)

Abstract: In this paper, taking the rock slope of an open-pit mine in Xizang as an example, based on the site investigation and engineering geological characteristics of mine slope, the engineering geological zoning of mine slope is studied, and the slope stability is qualitatively analyzed and quantitatively calculated by combining the stereographic projection method and Sarma method. The research results show that the slope stability evaluation results were consistent with the current slope status. The slope stability of mining area was not good in general, and the slope in local area has poor stability. Both qualitative and quantitative stability evaluation methods confirm each other, which provides an important basis for slope disaster control design and construction in the next stage, and this has a good

收稿日期:2024-04-02; 修回日期:2024-06-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.04.012

基金项目:成都理工大学珠峰科学研究计划(编号:80000-2023ZF11411)

第一作者:袁进科,男,汉族,1982年生,副教授,博士,长期从事地质钻探及边坡灾害方面的研究工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,yuanjingke@163.com。

引用格式:袁进科,胡孝洪,裴钻,等.基于赤平投影和萨尔玛法的西藏某露天矿山边坡稳定性评价[J].钻探工程,2024,51(4):93-100.

YUAN Jinke, HU Xiaohong, PEI Zuan, et al. Slope stability evaluation of an open-pit mine in Xizang based on stereographic projection and Sarma method[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4):93-100.

reference for similar slope projects.

Key words: open-pit slope; rock slope; stability evaluation; stereographic projection; Sarma method

0 引言

我国西藏地区成矿地质环境优越,矿产资源丰富,是21世纪国家经济建设、社会发展的战略性矿产资源基地,在矿产资源开发中主要以露天矿山开采为主^[1-2]。矿山边坡稳定性问题一直是困扰露天矿山开采、制约矿山生产规模和经济效益的难点,而边坡稳定性评价是保证露天矿山安全开采的关键^[3-4]。如果能够合理判断与分析露天矿山边坡稳定性,对可能发生地质灾害的边坡进行科学的防治,就能够保证人们生命财产安全,因此对露天矿山边坡进行稳定性评价受到当前学者的广泛关注^[5-6]。露天矿山边坡稳定性评价方法可分为定性评价和定量评价两种,其中定性评价主要是通过考虑各种影响边坡稳定性的因素,综合判断边坡的稳定状况和发展趋势;定量评价是通过稳定性计算或图解方法赋予边坡稳定性以量的概念^[7]。目前土质边坡稳定性计算方法较为成熟,而岩质边坡尤其是露天矿山岩质边坡精确计算方法相对较少。施雄斌等^[8]、曹发跃等^[9]分析了露天采场边坡稳定性的控制因素,并通过赤平投影方法研究了节理裂隙走向和边坡坡面走向组合关系对边坡稳定性的影响。雷世平等^[10]提出基于克里金代理模型的子集模拟方法,并通过粘性土边坡稳定性分析验证了所提方法有效性。同时,当前基于极限平衡方法的定量评价在边坡稳定性计算中广泛使用,主要有圆弧法、条分法和萨尔玛法^[11]。露天矿山边坡的失稳与破坏属于重大工程灾害,边坡稳定性评价具有很重要现实意义,因此露天矿山边坡稳定性一般采用定性定量相结合的方法分析评价。

鉴于露天矿山边坡稳定性评价在矿山开采、生产中的重要地位,本文依托西藏某露天矿山边坡工程实例,采用定性与定量相结合的赤平投影和萨尔玛法对露天矿山边坡稳定性进行分析评价,为矿山开采提供参考依据,具有较强的工程示范意义。

1 工程概况

本工程为露天铜矿岩质边坡,位于西藏昂仁县,地势总体呈西高东低,北高南低。露天矿山边坡最低海拔4550 m,最高海拔5890 m,相对高差达

1340 m,整个矿区面积约17.92 km²。

1.1 地形地貌

矿区位于西藏昂仁县东部的高山峡谷区,地处冈底斯山脉中段,地势险峻,地形切割剧烈,如图1所示。矿区周围山脉以近东西向分布为主,边坡坡度集中在30°~60°,矿区地形相对高差600~1400 m,为典型的高山峡谷地貌。



图1 矿区地形地貌特征

Fig.1 Mining area topography characteristics

1.2 地层岩性

矿区出露地层分布有元古界前震旦系,古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏罗系、白垩系,新生界古近系、新近系。区内地层岩性主要以沉积岩为主,其次为火山喷出岩,以凝灰岩、安山岩为主,还包括古新统一始新统帕那组和第四系地层。

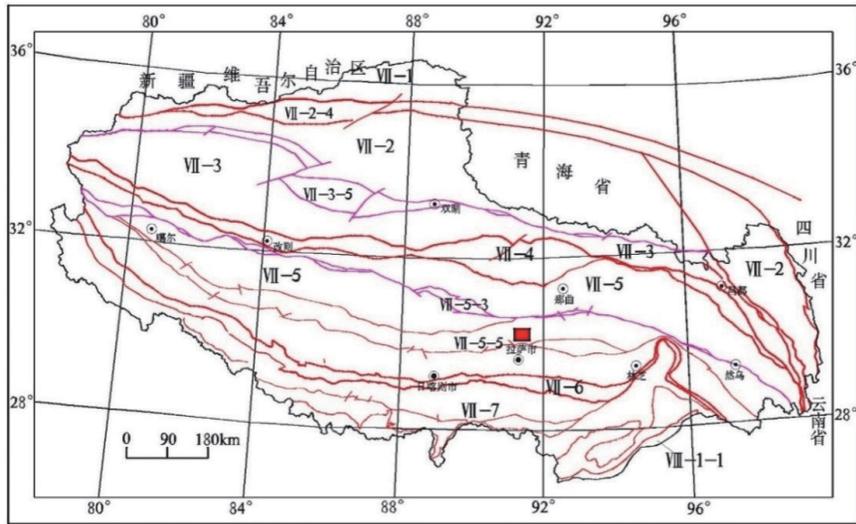
1.3 地质构造

矿区地处冈底斯构造带和北西玛拉雅构造带之间,隶属西藏缓慢抬升区^[12]。矿区内地质构造复杂,断裂构造主要包括近东西向断裂(朗拉断裂)、北东向断裂(弄桑断裂)、近南北向断裂(尾脏断裂),见图2。

矿区发育断层以北西向断层为主,次级为北东向断层。根据断层交切关系,北西向断层形成时间较早,而北东向断层形成时间较晚。矿区发育断层多属逆断裂,断层破碎带内发育断层角砾岩、断层泥等碎屑物质。

1.4 水文地质条件

矿区位于雅鲁藏布江支流的康沙普曲流域,标高4460 m,水系自西向东径流,从矿区东部汇入美曲藏布,而后向南汇入多雄藏布,最终水系汇进雅鲁藏布江干流。矿区地下水分为松散岩类孔隙水



VII: 西藏-三江造山系; VII-1: 巴颜喀拉地块; VII-2: 三江弧盆系; VII-2-4: 西金乌兰湖-金水江-哀牢山蛇绿混杂岩带 (C-T₂); VII-3: 羌塘弧盆系; VII-3-5: 龙木错-双湖俯冲增生杂岩带 (Pz-T₂); VII-4: 班公湖-怒江-昌宁-孟连结合带; VII-5: 拉达克-冈底斯弧盆系; VII-5-3: 狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂岩 (J-K); VII-5-5: 隆格尔-工布江达复合岛弧 (P、T、K); VII-6: 雅鲁藏布江结合带; VII-7: 喜马拉雅地块; VIII: 印度地块; VIII-1-1: 锡伐利克后碰撞压陷盆地 ■ 矿区位置

图2 区域构造纲要

Fig.2 Regional structure outline

和基岩裂隙水两类,其中松散岩类孔隙水主要分布于康沙普曲河谷缓坡地带,基岩裂隙水主要为块状岩类裂隙水。

1.5 地震特征

根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015),矿区抗震设防烈度为Ⅶ度,地震峰值加速度为0.15g,地震动反应谱特征周期0.40 s。

2 矿区边坡工程地质分区

2.1 分区原则

根据露天矿山边坡岩性、构造、地质条件和水文条件相似性原则,同时结合不同区域位置岩层倾向与边坡倾向空间关系,将矿区边坡划分为A、B、C、D共4个工程地质分区,如图3所示。

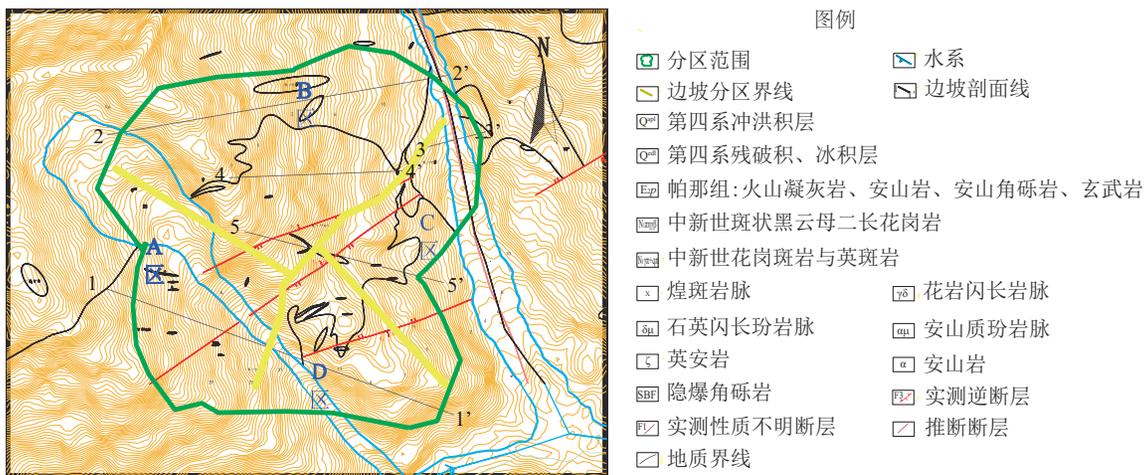


图3 工程地质分区

Fig.3 Engineering geological zoning map

2.2 A区边坡地质特征

A区边坡位于矿区西部,边坡高程在4990~

5540 m,平均坡度约25°,地形上陡下缓,横向宽约1080 m,纵向长约1690 m,面积为1.04 km²(见图

4)。边坡地层岩性主要为花岗岩、石英斑岩以及流纹岩。区内分布地质构造主要有F₅断层以及边坡揭露的片理面。F₅断层属于高角度逆冲断层,断层

破碎带宽约3~5 m,主要由挤压透镜体、断层泥等组成,为岩体侵入后活动断层。边坡片理面主要为陡倾角裂隙,属于硬性结构面,连续性较差。

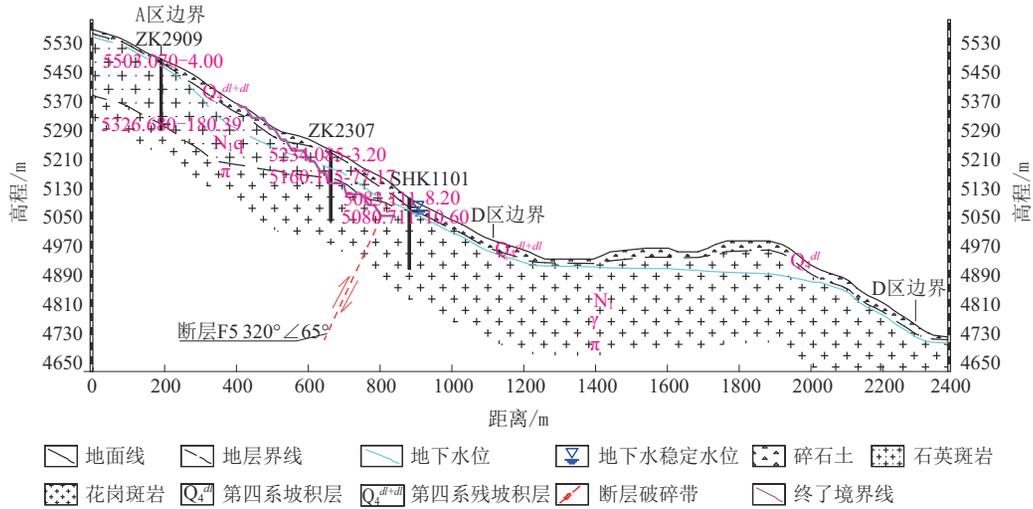


图4 1-1'地质剖面

Fig.4 Geological section map of 1-1'

2.3 B区边坡地质特征

B区边坡位于矿区北部,边坡高程在4867~5772 m,平均坡度约30°,地形上陡下缓,横向宽约1470 m,纵向长约2260 m,面积为1.88 km²(见图5)。地层岩性与A区类似,主要为花岗岩、石英斑

岩以及流纹岩。区内分布地质构造主要有F₁断层以及边坡揭露的片理面。F₁断层产状为335°/60°,断层破碎带宽约1.5~2 m,主要由挤压透镜体、断层泥等组成,为岩体侵入后活动断层。边坡片理面主要为陡倾角裂隙,属于硬性结构面,连续性较差。

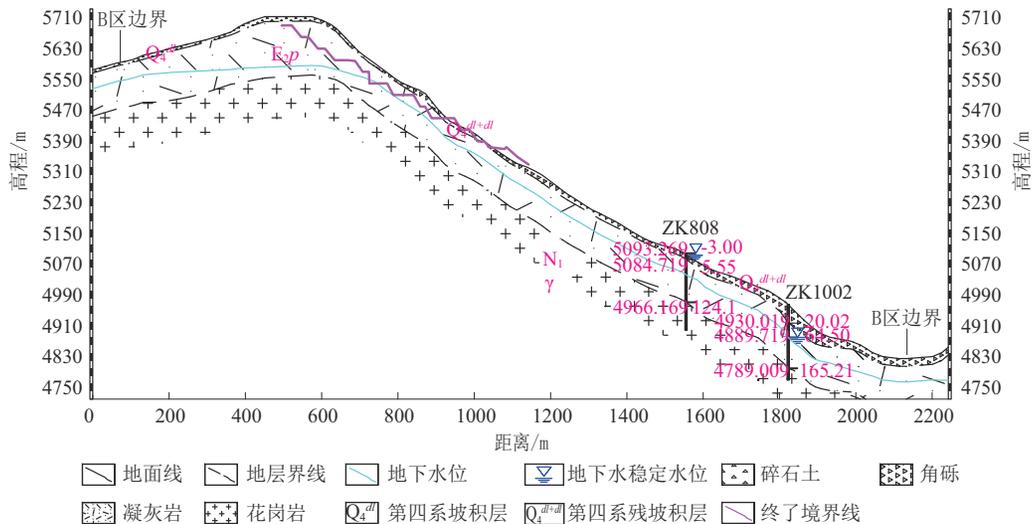


图5 2-2'地质剖面

Fig.5 Geological section map of 2-2'

2.4 C区边坡地质特征

C区边坡位于矿区东部,边坡高程在4800~

5120 m,平均坡度约30°,地形上陡下缓,横向宽约1000 m,纵向长约1800 m,面积为0.8 km²(见图6)。

边坡地层岩性主要为花岗岩。区内分布地质构造主要有 F_1 和 F_2 断层以及边坡揭露的片理面。其中 F_2 断层为逆断层,产状 $320^\circ \angle 65^\circ$,上下盘岩石均为花岗斑岩、石英斑岩。断层破碎带宽约 1.5~2 m,主

要由挤压透镜体、断层泥等组成,断层面起伏不平,局部可见断层擦痕。边坡片理面主要为陡倾角裂隙,属于硬性结构面,连续性较差。

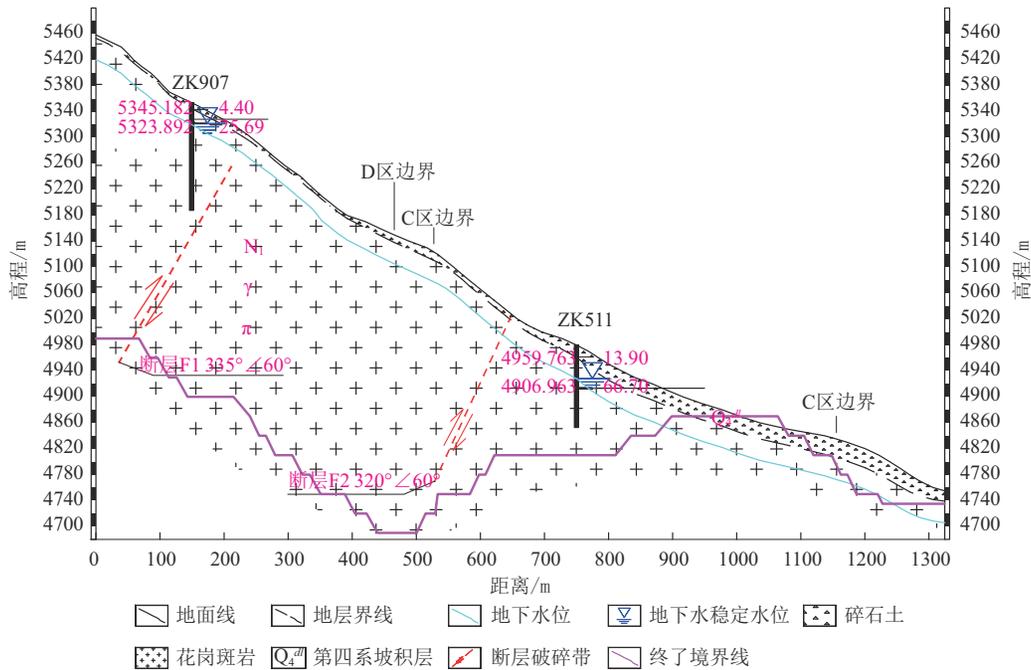


图6 5-5'地质剖面

Fig.6 Geological section map of 5-5'

2.5 D区边坡地质特征

D区边坡位于矿区南部,边坡高程在4800~5230 m,平均坡度约30°,地形上陡下缓,横向宽约1000 m,纵向长约1200 m,面积为0.83 km²(见图4)。地层岩性主要为花岗岩。区内分布地质构造主要有 F_3 断层以及边坡揭露的片理面。 F_3 断层产状为 $166^\circ \angle 70^\circ$,断层破碎带宽约2~3 m,由挤压透镜体、断层泥等组成,为岩体侵入后活动断层。边坡片理面主要为陡倾角裂隙,属于硬性结构面,连续性较差。

山边坡主要发育3~5组结构面,岩体结构比较复杂。边坡结构面在长时间累积效应作用下导致裂隙扩展和延伸,陡壁岩体将会沿裂隙开裂、变形、滑落^[13-15]。

3 矿区边坡稳定性评价

3.1 边坡稳定性初评

从露天矿山边坡地形地貌、地层岩性、地质构造等多方面综合分析,影响边坡稳定的主要因素是基岩风化破碎带、岩体结构面及其发育程度。矿区露天矿山边坡岩体受高山寒冻物理风化影响,岩体完整性较差,呈碎裂状或裂块状结构,充填泥质和钙质充填物(见图7)。根据现场调查,矿区露天矿



图7 边坡岩体裂隙发育

Fig.7 Fracture development of slope rock mass

3.2 赤平投影法稳定性评价

随着社会经济发展,赤平投影法在边坡稳定性分析中的应用愈加受到重视。这种方法基于结构

面与坡面组合关系,来评价边坡稳定性,方法简便、快捷,是一种定性-半定量的图解分析法^[16]。

(1)A区露天矿山边坡倾向为 290° ,倾角为 46° ,属于陡倾岩质边坡。其中主控结构面1产状为 $251^\circ \angle 55^\circ$,陡倾坡外;主控结构面2产状为 $350^\circ \angle 46^\circ$,陡倾坡外。底部结构面产状为 $25^\circ \angle 49^\circ$,陡倾坡内切割岩体,侧缘结构面产状为 $168^\circ \angle 70^\circ$ 。根据分析,边坡主控结构面1和主控结构面2的组合交线倾向为 308° ,与边坡的倾向相差不大,并且交线倾角约 38° (见图8),因此A区边坡岩体在组合结构面作用下易沿陡倾坡外的主控结构面发生滑动变形,稳定性较差。

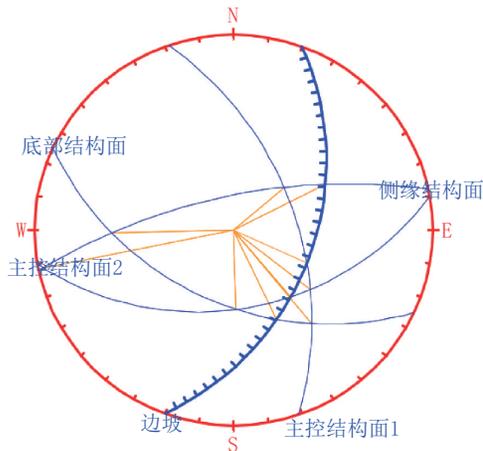


图8 A区边坡赤平投影分析
Fig.8 Stereographic projection analysis of A area slope

(2)B区露天矿山边坡倾向为 78° ,倾角为 35° ,属于陡倾岩质边坡。其中主控结构面1产状为 $200^\circ \angle 69^\circ$,陡倾坡外;主控结构面2产状为 $145^\circ \angle 67^\circ$,陡倾坡外。底部结构面产状为 $328^\circ \angle 42^\circ$,陡倾坡内切割岩体,侧缘结构面产状为 $267^\circ \angle 58^\circ$ 。根据分析,主控结构面1和主控结构面2的组合交线倾向为 167° ,交线与边坡的倾向相近,并且交线倾角约 65° (见图9),因此B区边坡岩体在组合结构面组合作用下易沿陡倾坡外的主控结构面发生滑动变形,稳定性较差。

(3)C区露天矿山边坡倾向为 112° ,倾角为 43° ,属于陡倾岩质边坡。其中主控结构面产状为 $98^\circ \angle 62^\circ$,陡倾坡外。底部结构面产状为 $251^\circ \angle 55^\circ$,陡倾坡内。侧缘结构面产状为 $350^\circ \angle 46^\circ$ 。根据分析,边坡坡向与主控结构面的组合交线倾向为 175° ,与

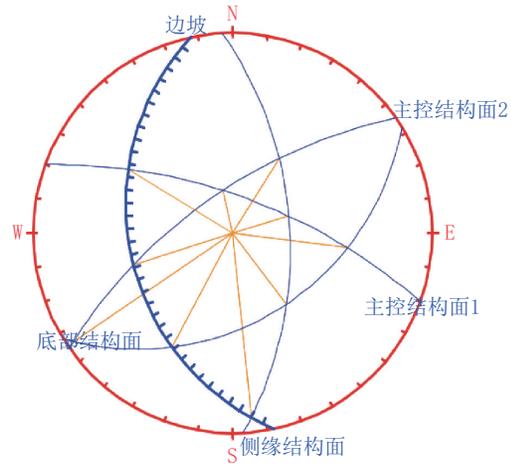


图9 B区边坡赤平投影分析

Fig.9 Stereographic projection analysis of B area slope

边坡的倾向相差较大,并且交线倾角约 23° (见图10)。该区域内还发育有 F_1 和 F_2 两条断层,并且发育规模较大,在断层的影响下降低边坡的稳定性,综合分析边坡稳定性差。

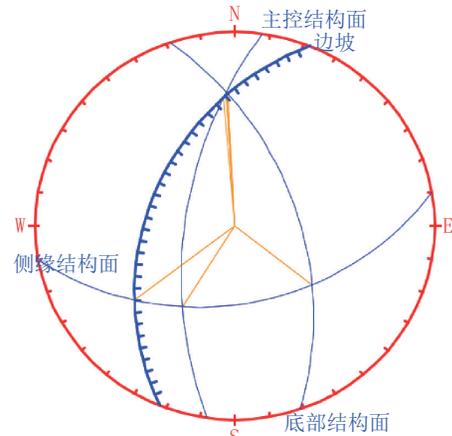


图10 C区边坡赤平投影分析

Fig.10 Stereographic projection analysis of C area slope

(4)D区边坡发育结构面特征与A区分布特征接近,综合分析D区边坡岩体在组合结构面作用下易沿陡倾坡外的主控结构面发生滑动变形,稳定性较差。

3.3 萨尔玛法稳定性评价

萨尔玛法可对形状滑动面各异的岩质边坡稳定性进行极限平衡分析,根据边坡岩体中赋存的节理和层面等结构面划分条块,使得极限平衡下计算结果更加准确^[17-18]。根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》(GB 51016—2014)^[19]规定,块状或层状岩

质边坡破坏模式为复合型或折线型破坏时,宜采用萨尔玛法进行计算,故本次边坡稳定性定性评价采用基于极限平衡的萨尔玛法。

根据前述工程地质分区,结合4个区代表性地质剖面,依据规范^[19]要求开展的荷载组合进行不同工况下露天矿山边坡稳定性评价。根据区域地震记录可知,矿区抗震设防烈度为Ⅷ度,设计地震加速度为0.15g,因此在矿区边坡稳定性计算中需考虑地震力对坡体的影响。同时边坡地下水位主要集中在4900~5050 m,地下水位年变幅在2.5~3.1 m,考虑到地下水位变化对边坡稳定性也有较大的影响,因此在计算中还需要考虑地下水的影响。综上所述,考虑到本矿的开采实际,本次露天矿山边坡稳定性计算主要考虑以下3种工况。工况I:自重+地下水;工况II:自重+地下水+爆破振动力;工况III:自重+地下水+地震力。依据经验参数法、强度折减法综合确定岩体物理力学参数,岩体重度为26.2 kN/m³,结构面内摩擦角为28°,粘聚力为8.7 kPa。利用极限平衡分析法对该露天矿山边坡的实际情况进行分析,采用萨尔玛法对3种工况条件下不同分区边坡的代表性剖面进行了稳定性分析。首先建立4个分区岩质边坡的工程地质模型,然后根据岩体内部结构面采用斜分条块的方法在地质模型内划分条块,最后采用萨尔玛法计算划分为条块的露天矿山边坡稳定性。各分区代表性露天矿山边坡稳定性计算结果见表1。

表1 边坡稳定性计算结果

Table 1 Analysis results of slope stability

边坡分区	稳定性安全系数		
	荷载组合I	荷载组合II	荷载组合III
A区	1.160	1.104	1.069
B区	1.143	1.091	1.015
C区	1.107	1.054	1.014
D区	1.169	1.126	1.025

综上所述,矿区A、B和D区边坡稳定性较差,C区稳定性差。矿区露天矿山边坡在自重、冻融、地震等诱发因素作用下,将导致边坡稳定性逐渐降低,其发展趋势为沿着主控结构面失稳发生崩塌、滑坡类地质灾害。

3.4 讨论

根据赤平投影法和萨尔玛法对露天矿山边坡稳定性的分析结果,两者稳定性结论基本一致。通过赤平投影图,可以直观看出来边坡、地层以及结构面的倾角和倾向以及相互对应关系,这对于评估边坡稳定性至关重要,而萨尔玛法在计算过程中不仅考虑了岩体结构面的分布特征,还考虑了岩土体力学参数、水压力、地震力等影响边坡稳定性的多种因素。对于岩质边坡稳定性评估,应采用赤平投影法和萨尔玛法相结合,定量地评价和计算边坡稳定性^[20]。因此在露天矿山边坡稳定性分析中,应该首先利用赤平投影法对边坡地质结构进行初步的定性分析,然后通过萨尔玛法进行定量的稳定性评估,两者相结合可以确保边坡稳定性评估的科学性和安全性。

4 结论

(1) 针对西藏某露天矿山边坡,采用赤平投影法和基于极限平衡的萨尔玛法进行了边坡稳定性研究,稳定性评价结果与当前边坡现状相一致。矿区A、B和D区边坡稳定性较差,C区稳定性差。

(2) 矿区露天矿山边坡在自重、冻融、地震等诱发因素作用下,将导致边坡稳定性逐渐降低,边坡易沿陡倾节理、裂隙等结构面发崩塌、滑坡等地质灾害。

(3) 对于高陡露天矿山边坡,采用赤平投影法和萨尔玛法相结合,评价边坡稳定性对下一阶段边坡地质灾害防治设计、施工等提供了重要依据,对类似边坡工程具有很好的借鉴作用。

参考文献(References):

- [1] 文义明,卢萍.露天矿开采技术[M].北京:冶金工业出版社,2023.
WEN Yiming, LU Ping. Open Pit Mining Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2023.
- [2] 刘大钧,赵伟.西藏自治区矿山开发建设存在的生态环境问题及保护措施[J].有色金属(矿山部分),2019,71(4):106-110.
LIU Dajun, ZHAO Wei. Ecological environmental problems and protections of mine construction in Tibet [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019,71(4):106-110.
- [3] 蒋正.露天矿山边坡稳定性的研究——以广德县青岭页岩矿为例[D].淮南:安徽理工大学,2018.
JIANG Zheng. Study on slope stability of open pit mine—Taking Qingling shale mine in Guangde as an example [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.

- [4] 张慧,胡子勤,姚苏红.大苏计钼矿露天矿地质环境恢复治理措施和方法[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(7):70-72. ZHANG Hui, HU Ziqin, YAO Suhong. Measures for restoration and treatment of geological environment in Dasuji open-pit molybdenum mine [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(7):70-72.
- [5] Obregon and Mitri. Probabilistic approach for open pit bench slope stability analysis—A mine case study [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29 (4) : 629-640.
- [6] 崔华丽, 谯鹏志, 王佃明. 库水位变动情况下库岸边坡稳定性研究——以白鹤滩水电站石圪垯滑坡为例[J]. 钻探工程, 2023, 50(5):36-42. CUI Huali, QIAO Pengzhi, WANG Dianming. Study on stability of reservoir bank slope under fluctuated water level: A case of Shigenao Landslide in Baihetan Hydropower Reservoir [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5):36-42.
- [7] 宋国龙. 露天煤矿边坡稳定性实例分析及优化设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10):30-35. SONG Guolong. Example analysis and optimal design of slope stability in open pit coal mine [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):30-35.
- [8] 施雄斌, 冯娟, 周晓超. 基于极射赤平投影和萨尔玛法确定露天矿边坡协同稳定的工程应用[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2023, 39(2):55-61. SHI Xiongbin, FENG Juan, ZHOU Xiaochao. Engineering application of confirming open-pit synergistic stability based on stereographic projection and sarma method [J]. Journal of Kunming Metallurgy college, 2023,39(2):55-61.
- [9] 曹发跃, 毛思羽. 紫金山露天采场边坡稳定性赤平投影法分析[J]. 现代矿业, 2023, 39(8):107-110. CAO Fayue, MAO Siyu. Analysis of slope stability in Zijinshan open pit by stereographic projection method [J]. Modern Mining, 2023,39(8):107-110.
- [10] 雷世平, 李京泽, 刘磊磊, 等. 基于克里金代理模型与子集模拟的边坡高效可靠度分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(12):107-113. LEI Shiping, LI Jingze, LIU Leilei, et al. Slope reliability analysis using Kriging based Subset simulation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(12):107-113.
- [11] 罗学东, 左昌群, 蒋楠. 寒区露天矿山高边坡稳定性分析及工程应用[M]. 北京:气象出版社, 2015. LUO Xuedong, ZUO Changqun, JIANG Nan. Stability analysis and engineering application of high slope in open-pit mine on cold area [M]. Beijing: Meteorological Press, 2015.
- [12] 谢富伟, 郎兴海, 唐菊兴, 等. 西藏冈底斯成矿带成矿规律[J]. 矿床地质, 2022, 41(5):952-974. XIE Fuwei, LANG Xinghai, TANG Juxing, et al. Metallogenic regularity of Gangdese metallogenic belt, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2022,41(5):952-974.
- [13] 陈晨, 沈国军, 张颖, 等. 汪清、农安和桦甸油页岩物理力学性质及裂缝起裂压力对比分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(3):1-6. CHEN Chen, SHEN Guojun, ZHANG Ying, et al. Comparative analysis of physical and mechanical properties and fracture initiation pressure of oil shale in Wangqing, Nong'an and Huadian [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(3):1-6.
- [14] Bolla and Paronuzzi. Geomechanical field survey to identify an unstable rock slope: the Passo della Morte case history (NE Italy) [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 1521-1544.
- [15] 马泽端. 秭归某滑坡稳定性及危险性评价[D]. 宜昌:三峡大学, 2023. MA Zeduan. Stability and risk assessment of a landslide in Zigui [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2023.
- [16] Fossen Haakon. 构造地质学(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社, 2021. Fossen Haakon. Structural Geology (Second Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [17] 李忠, 和新, 李艳丽, 等. 雄安新区工程地质勘察标准钻孔技术控制及施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(5):8-12. LI Zhong, HE Xin, LI Yanli, et al. Technical control and drilling of standard geo-technical investigation boreholes in the Xiongan New Area [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(5):8-12.
- [18] 胡卫东, 曾律弦, 刘晓红, 等. 放坡状态有限土体刚性挡土墙主动土压力研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6):63-70. HU Weidong, ZENG Luxian, LIU Xiaohong, et al. Active earth pressures against rigid retaining walls for finite soil under the grading condition [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018,45(6):63-70.
- [19] GB 51016—2014, 非煤露天矿边坡工程技术规范[S]. GB 51016—2014, Technical code for slope engineering of non-coal open pit [S].
- [20] 郑栋材, 张晗, 荣富强, 等. 赤平投影法与Sarma法相结合在高陡岩质边坡稳定性评价中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(5):72-78. ZHENG Dongcai, ZHANG Han, RONG Fuqiang, et al. Application of stereographic projection method and Sarma method in stability evaluation of high and steep rock slope [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(5):72-78.

(编辑 王文)