

[文章编号] 1003—4684(2019)01-0012-04

# 多组合结构下顺层岩质高边坡的稳定性分析

马 力<sup>1,2</sup>, 孙朝燊<sup>2</sup>, 郑 允<sup>2</sup>, 张 伟<sup>2</sup>

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**[摘 要]** 依托山西省浑源县某花岗岩露天矿, 经过现场地质调查和室内物理实验, 得到该矿区边坡的结构面参数和岩体力学参数。利用极限平衡法结合 slide 软件对矿区在施工过程中可能会形成边坡失稳的情况进行计算, 分析坡体破碎带和潜在滑体厚度对边坡稳定性的影响, 锁定边坡潜在滑动面, 计算出安全系数。结果表明, 矿区西边坡开采至最终高程时, 边坡不稳定, 易发生滑坡。得到边坡的安全系数随滑体厚度的增加而变小, 但在滑体厚度为 20 m 开始幅度趋于平缓, 潜在滑移区位于边坡坡面以内 25 m 附近, 同时发现破碎带的位置分布对边坡的稳定性起着决定性的作用。

**[关键词]** 岩质高边坡; 稳定性分析; slide; 安全系

**[中图分类号]** U213.1

**[文献标识码]** A

目前在岩土领域对边坡稳定性分析的方法基本都是基于土质边坡, 土质边坡的内在结构具有均匀性, 其破坏形式明确。相较于土质边坡而言, 岩质边坡更具有复杂性, 其内在结构复杂<sup>[1]</sup>。目前, 针对均质岩质边坡的破坏模式已经取得了一些重要的成果, 但是对含有软弱夹层的岩质边坡的研究很少。对岩质高边坡的稳定性分析, 首先要从影响因素分析, 如岩性, 岩体结构, 降雨作用, 地震, 人工开挖, 风化作用等<sup>[2-7]</sup>。对于这些影响因素对岩质边坡稳定性的影响程度的分析是核心问题。黄润秋等<sup>[8]</sup>研究分析了下伏软弱层的矿山边坡开挖的安全厚度对边坡的稳定性影响。卢敦华等<sup>[9]</sup>探讨了结构面参数对层状边坡稳定性及滑动模式的影响规律; 许宝田等<sup>[10]</sup>对九顶山顺层人工岩质边坡进行了稳定性分析, 并综合考虑了边坡开挖及加固的联合作用。本文主要分析岩质高边坡在矿山开采过程中的滑体潜在厚度和坡体破碎带分布位置对边坡的稳定性影响, 利用 slide 软件用极限平衡法分析在开采过程中边坡可能发生失稳的情况。以便矿山的安全开采, 为类似工程提供参考依据。

## 1 工程概况

某花岗岩矿位于大同市浑源县城 155°方位, 直距约 28 km 处。矿区地形条件较复杂, 总体地势北高南低, 西高东低, 山脉总体走向近北西向, 最高点位于矿区南部, 标高 2063 m, 最低点位于矿区北部一带, 约 1850 m, 相对高差 213 m(图 1)。



图 1 矿区整体照

目前总体上, 边坡整体呈南高北低, 南部最高位置与现开采平台高差约为 140 m, 北部最高位置与现开采平台高差约为 45 m, 矿区采场西边坡总长度约 360 m, 现矿区开采至 1850 高程。据矿方要求, 矿区最终开采至 1805 高程, 最终形成约 260 m 的高边坡, 坡体存在三条破碎带, 选取一个典型的剖面 I—I(图 2)对最终形成的边坡进行稳定性分析。目前坡体岩性基本上均为片麻岩, 岩石属于较好的

[收稿日期] 2018—06—25

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金资助项目(11602284, 41807280)

[第一作者] 马 力(1992—), 男, 湖北仙桃人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为建筑与土木工程

[通信作者] 孙朝燊(1992—), 男, 四川眉山人, 中国科学院武汉岩土力学研究所博士研究生, 研究方向为边坡工程

类型;岩体中结构面发育,岩体完整性为较破碎;地下水为深埋型。目前,西边坡中未见明显的宏观的变形,坡顶也未见贯通裂隙,现状总体稳定。

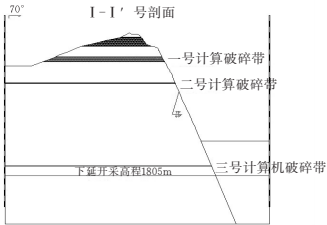


图 2 边坡地质剖面图

## 2 矿区岩体结构面信息及岩体力学参数的采集

### 2.1 结构面参数

现场对矿区西边坡开展了详细的踏勘,利用地质罗盘仪进行产状的测量,现选取其中的 2 个典型地调点作描述,具体位置如图 3 所示。



图 3 边坡局部岩体结构实物图

将边坡现场地表调查中所得到的结构面产状汇总(表 1)之后,可以得到优势结构面,优势结构面共 4 组,根据发育密度由高至低排列,产状依次为  $75^{\circ} \angle 70^{\circ}$ (顺坡面),  $173^{\circ} \angle 81^{\circ}$ (垂直坡面),  $211^{\circ} \angle 69^{\circ}$ (与坡面近垂直,略反倾),  $41^{\circ} \angle 38^{\circ}$ (倾向坡外)。产状为  $75^{\circ} \angle 70^{\circ}$ (顺向陡倾),  $173^{\circ} \angle 81^{\circ}$ (垂直坡面),

$41^{\circ} \angle 38^{\circ}$ (倾向坡外)的三组结构面组合对边坡稳定性起控制作用。为定性的评价以上三组结构面组合情况下边坡的稳定性,作结构面的赤平投影,如图 4 所示。可见,主要可能的破坏形式是块体 ABC 沿顺向缓倾结构面平面滑动(顺向滑动)。

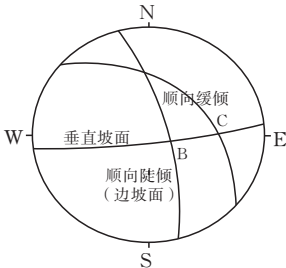


图 4 优势面的赤平投影图

表 1 结构面信息整理表

组别	倾向/(°)	倾角/(°)
结构面 J1	75	70
结构面 J2	173	81
结构面 J3	41	38
坡面	72	71

### 2.2 力学参数

通过岩块物理性质试验(包括密度、重度、含水率和吸水性等)、岩块力学性质试验(劈裂试验、单轴抗压、三轴抗压和结构面抗剪等),获得了岩块的物理力学性能指标,部分式样如图 5 所示。其次,以岩块的物理力学参数值为基础,根据岩体基本质量指标 BQ 值的计算、Hoek-Brown 经验方程估算和折减系数法等三种方法,综合确定了矿区边坡岩体的力学参数,给出采用的岩体力学参数(表 2~3)。

表 2 建议采用岩体力学参数

岩性	单轴抗压强度	抗拉强度	变形模量	泊松比/	岩体抗剪强度	
	$l_{cr}$ /MPa	$l_{cr}$ /MPa	$E$ /GPa	$l_{cr}$	$l_{cr}$ /MPa	$\varphi$ /(°)
辉绿岩矿体	85	4	22	0.24	1.6	51
片麻岩	55	3.17	14	0.25	1	46
破碎带	25	0.5	1.68	0.35	0.24	27.96

表 3 建议采用结构面的力学参数

岩性	结构面抗剪强度	
	$l_{cr}$ /MPa	$l_{cr}$ /(°)
中风化片麻岩	0.5	38

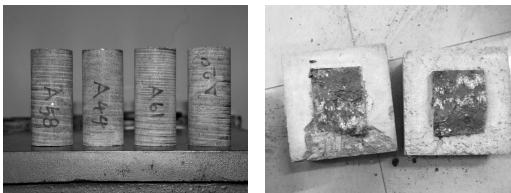


图 5 恒西矿岩体部分式样图

## 3 极限平衡计算

综合考虑诸多规范及矿区采场边坡的实际情况,可推荐矿区采场西边坡稳定性安全系数控制标准为:自重工况安全系数为 1.2,爆破工况为 1.15。

由于本工程边坡较高,坡脚很陡,结合实地地质调查的分析,将爆破工况等效为 7 级地震,即在 slide 软件里等效采用 0.12 g 的水平地震加速度作为爆破工况进行分析。考虑边坡的滑体厚度 D(滑体厚度是指坡肩到坡体的水平距离如图 6A 到 B)对边坡的

稳定性的影响,分别取滑体厚度  $D$  为 5 m,10 m,15 m,20 m,25 m,30 m。在矿区西边坡最可能发生两种形式的滑移型破坏(即多组合结构下的破坏模式:岩体结构面之间的组合破坏和岩体结构面与岩体破碎带之间的组合破坏):

1)以产状为  $75^{\circ}/70^{\circ}$  的结构面和产状为  $41^{\circ}/38^{\circ}$  的结构面的组合面为主要滑动面;产状为  $173^{\circ}/81^{\circ}$  结构面构成滑移体的侧缘边界。该类滑动主要可能有如 BGE、CDE 等破坏形式。

2)以产状为  $75^{\circ}/70^{\circ}$  的结构面和破碎带组合面为主要滑动面,产状为  $159^{\circ}/81^{\circ}$  结构面构成滑移体的侧缘边界。该类顺向滑动如图 6 中的 BHF 为边坡整体破坏的主要模式。

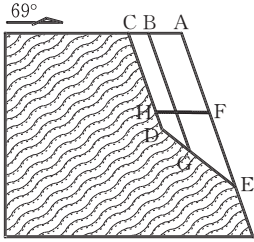


图 6 边坡地质概念模型

3.1 结构面组合的稳定性计算

采用 slide 极限平衡法分别计算出不同滑体厚度之对应的安全系数(表 4),其中剪切破坏滑动面为缓倾( $41^{\circ}/38^{\circ}$ )与陡倾结构面( $73^{\circ}/69^{\circ}$ )组合。

表 4 结构面组合情况下采矿矿区边坡剖面的安全系数

D/m	自重	爆破	D/m	自重	爆破
5	4.060	3.722	20	1.411	1.264
10	2.288	2.088	25	1.252	1.157
15	1.692	1.525	30	1.153	1.026

爆破工况图 8(两组结构面组合下最危险滑动面示意图)根据 slide 极限平衡对矿区西边坡两组结构面组合下的安全系数的计算,由图 7 可得,两种工况下其边坡的稳定性受到滑体厚度的影响大,如图 8a 所示,在自重下安全系数  $1.157 < 1.2$ ,如图 8b 所示,爆破下安全系数为  $1.026 < 1.15$ ,边坡不稳定。随着滑体厚度的增加,安全系数逐渐降低,但当滑体厚度达到 25 m 左右时,安全系数的降低幅度逐渐趋于平缓,这表明该矿西边坡的潜在滑体位置在距离坡面以内 25 m 左右处。

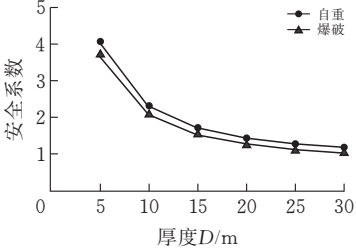
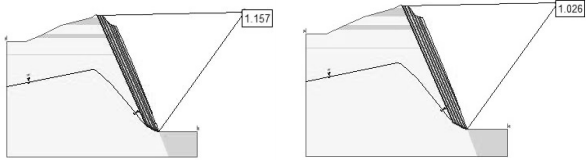


图 7 边坡安全系数与滑体厚度的关系

3.2 结构面与破碎带组合的稳定性计算

采用 slide 极限平衡法分别计算出不同滑体厚度对应的安全系数(表 5),其中剪切破坏滑动面为陡倾结构面( $75^{\circ}/70^{\circ}$ )与各种破碎带的组合。



(a)正常工况

(b)爆破工况

图 8 两组结构面组合下最危险滑动面示意图

表 5 结构面与破碎带组合情况下采矿矿区边坡剖面的安全系数

D/m	破碎 1 带		破碎 2 带		破碎 3 带	
	自重	爆破	自重	爆破	自重	爆破
5	5.225	4.858	3.908	3.639	—	—
10	4.056	3.65	2.509	2.3	2.737	2.534
15	4.153	3.609	2.206	1.996	1.794	1.634
20	4.153	3.566	2.163	1.933	1.451	1.307
25	3.548	3.038	2.137	1.891	1.29	1.153
30	3.273	2.787	2.191	1.919	1.199	1.066

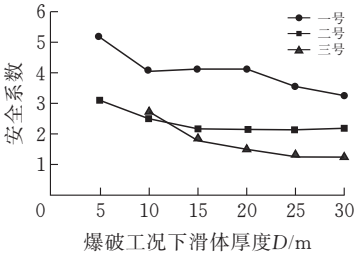


图 9 自重工况下边坡安全系数与滑体厚度的关系图

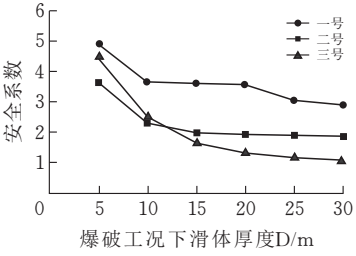
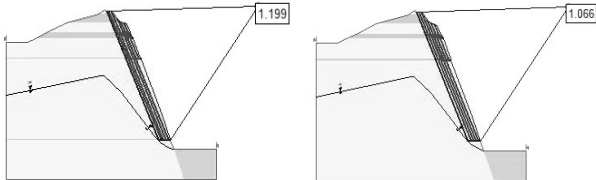


图 10 爆破工况下边坡安全系数与滑体厚度的关系



(a)正常工况

(b)爆破工况

图 11 结构面与破碎带组合下最危险滑动面示意图

利用 slide 极限平衡计算矿区西边坡结构面与破碎带组合下的安全系数,如图 11a 所示,在自重工况下安全系数 1.199 基本稳定,如图 11b 所示,在爆破工况下安全系数  $1.066 < 1.15$ ,不稳定。根据以上

图表,可知西边坡的稳定性受到三条破碎带的影响,由图 9 和图 10 可得到,无论在自重还是爆破下,其稳定性受破碎带所在位置影响很大,越靠近坡脚附近的破碎带其安全系数越小。

4 结束语

1)利用 slide 软件计算岩质高边坡的安全系数,可知边坡破碎带的分布影响着边坡的稳定性,其中越是靠近坡脚的破碎带对边坡的稳定性越大,边坡在坡脚处发生剪切破坏的可能性也最大,可以得到坡脚处的岩性及结构的分析对治理边坡至关重要。

2)通过 slide 软件分析边坡的稳定性,可以确定边坡潜在的滑体范围,在矿方施工治理边坡时具有针对性,重点加固潜在滑动面的区域,有效而又安全的提高边坡的稳定性,降低边坡治理的成本,对于类似的边坡治理非常具有参考价值。

3)岩质高边坡的稳定性受到多种因素的影响,但坡体结构和边坡的岩性对岩质边坡的稳定性起着决定性的作用。尽管岩质高边坡的稳定性分析目前相对成熟,但还有很多亟待解决的问题存在,需要去专研和解决。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 李宁,郭双枫,姚显春.再论岩质高边坡稳定性分析方法[J].岩土力学,2018(2):397-406.

[2] 林杭,曹平,李江腾,等.层状岩质边坡破坏模式及稳定性的数值分析[J].岩土力学,2010,31(10):3300-3304.

[3] 杨光华,张玉成,张有祥.变模量弹塑性强度折减法及其在边坡稳定分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1506-1512.

[4] 谢全敏,李道明,夏元友.顺层滑移型岩质边坡稳定性影响因素敏感性分析[J].华东公路,2006(5):95-96.

[5] Naghadehi M Z, Jimenez R, Khalokakaie R, et al. A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach.[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 61(61C):1-14.

[6] De Vita S, Sansivero F, Orsi G, et al. Cyclical slope instability and volcanism related to volcano-tectonism in resurgent calderas: The Ischia island (Italy) case study[J]. Engineering Geology, 2006, 86(2):148-165.

[7] Vandamme J, Zou Q. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method [J]. Computers & Geotechnics, 2013, 48(48):9-20

[8] 黄润秋,付静安,陈龙生.具有下伏软弱层的矿山边坡开挖安全厚度研究[J].中国地质灾害与防治学报,2000,11(1):6-10.

[9] 卢敦华,曲艳伟,何忠明,等.结构面强度参数对层状边坡稳定性影响的三维分析[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(1):147-151.

[10] 许宝田,钱七虎,阎长虹,等.多层软弱夹层边坡岩体稳定性及加固分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(a2):3959-3964.

Stability Analysis of Bedding Rock High Slope under Multi-combination Structure

MA Li, SUN Chaoyi, ZHENG Yun, ZHANG Wei

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China ;  
2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering ,  
Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sci., Wuhan 430071, China )

**Abstract:** Taking a granite open-pit mine in Hunyuan County of Shanxi Province as engineering background, based on site investigation results and indoor physics experiments, the structural surface parameters and rock mechanical parameters of the slope are obtained. The limit equilibrium method combined with the slide software is used to calculate the slope instability during the construction of the mining area, analyze the influence of slope fracture zone and potential sliding body thickness on slope stability, and lock the potential sliding surface of the slope to calculate the safety factor. The results show that when the west slope of the mining area is mined to the final elevation, the slope is unstable and landslides are prone to occur; the safety factor of the slope is smaller with the increase of the thickness of the sliding body, but the amplitude of the sliding body tends to be gentle at the thickness of 20m, and the potential slip region is located within 25m of the slope. Besides, the distribution of the fracture zone plays a decisive role in the stability of slope.

**Keywords:** rocky high slope; stability analysis; slide; safety factor