

露天矿岩体力学参数对终了边坡稳定性影响 敏感性数值模拟

马毓婷,陈俊智,任春芳,冯豪天,张梦原

(昆明理工大学 国土资源工程学院,昆明 650032)

摘要:为研究岩体力学参数对终了边坡稳定性的影响,以云南某露天矿边坡为研究对象,采集岩样展开室内岩石力学试验,通过 Hoek-Brown 强度准则折减计算岩体力学参数,运用 Midas GTS NX 建立三维边坡模型,通过 FLAC^{3D} 软件研究岩体的弹性模量、泊松比、凝聚力、内摩擦角以及抗拉强度等参数对露天矿终了边坡稳定性的影响,以此分析出岩体力学参数对露天矿终了边坡稳定性影响的敏感性。结果表明,岩体力学参数中凝聚力与内摩擦角在影响露天矿终了边坡稳定性中所占比重较大,弹性模量、泊松比和抗拉强度影响较小。研究结果为后续边坡稳定性研究提供了依据,同时对边坡灾害治理与预防有一定的指导意义。

关键词:边坡稳定性;岩石力学试验;岩体力学参数;敏感性分析;露天矿;FLAC^{3D}

中图分类号:TD804

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2022)04-0095-07

Numerical simulation on sensitivity of mechanical parameters of open-pit slope rock mass to final slope stability

MA Yuting, CHEN Junzhi, REN Chunfang, FENG Haotian, ZHANG Mengyuan

(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650032, China)

Abstract: To study the influence of mechanical parameters of slope rock mass on the stability of the final slope, an open-pit mine slope in Yunnan province was taken as the research object. Rock samples were collected to carry out indoor rock mechanics experiments. The mechanical parameters of rock mass were calculated by Hoek-Brown strength criterion reduction. The three-dimensional slope model was established by Midas GTS NX. The influence of elastic modulus, Poisson's ratio, cohesion, internal friction angle, and tensile strength of rock mass on the stability of the final slope of an open-pit mine was studied by FLAC^{3D} software, to analyze the sensitivity of mechanical parameters of rock mass on the stability of final slope of the open-pit mine. The results show that the cohesion and internal friction angle of rock mass mechanical parameters accounts for a large proportion of the stability of open pit end slope, and the elastic modulus, Poisson's ratio, and tensile strength of rock mass have little effect on the stability of open pit end slope. The research results provide a basis for subsequent slope stability research and have guiding significance for slope disaster management and prevention.

Key words: slope stability; rock mechanics experiment; rock mechanics parameters; sensitivity analysis; open-pit mine; FLAC^{3D}

在日常的矿山企业安全生产中,露天矿山的边坡稳定性作为一个关键的技术问题,长期以来一直

是矿山企业关注的重点之一,同时岩石力学相关领域的学者也将其作为一个研究重点。边坡的滑坡失稳破坏对矿山企业安全生产影响极大,同时也是三大地质灾害之一^[1]。得益于相关能力的提升,露天矿山企业开采高度与深度逐步加大,所形成的露天矿终了边坡高度越来越高,随之形成的就是高陡的露天矿终了边坡和深凹采场,所以对于矿山企业的

收稿日期:2022-03-08

基金项目:国家自然科学基金-云南联合重点资助项目(U1602232)

作者简介:马毓婷(1996—),女,硕士研究生,矿业工程专业,主要从事岩石力学及工程方向研究工作。

通信作者:陈俊智(1974—),男,副教授,采矿工程专业,主要从事矿山安全和矿山信息化方向研究工作。

安全性要更加重视。在边坡产生失稳破坏之前预先分析其安全性,将危险因素进行控制或者剔除,并评估危险的露天矿终了边坡,能够降低相应事故发生率,因此,矿山企业十分重视评估露天矿终了边坡稳定情况。对于掌握露天矿终了边坡稳定情况,现在已经有十分丰厚的成果。王旭春等^[2]对于岩体边坡稳定性的研究主要是分析影响边坡稳定性的因素,分别研究了同一岩体和不同岩体的情况。宛良朋等^[3]以四川省某水电站为工程实例分析了边坡稳定性评价受岩体参数的控制情况,得出该边坡的稳定评价主要依赖于凝聚力与内摩擦角共同作用。冯德润等^[4]利用强度折减法来对影响露天矿边坡稳定性的岩体参数进行了相关研究。黄高峰等^[5]利用有限差分法对 Hoek-Brown 强度准则里面不同的岩体力学参数影响边坡稳定情况的程度做了研究。周辉等^[6]分析总结了岩石强度的时间效应,发现了影响岩石强度损失的因素。弥宏亮等^[7]利用极限平衡法进行了边坡稳定性的三维分析,同时在工程中加以实践。翁其能等^[8]利用双折减系数法对楔体滑坡的稳定情况进行了研究。任红岗等^[9]利用 ODE-GRA 评价模型来研究采场岩体参数对采场稳定性影响的敏感性分析,其研究表明,在 Hoek-Brown 准则所考虑到的相关岩体参数中,对采场稳定性影响最大的因素是 GSI。张东旭等^[10]研究了岩体的抗剪强度参数如何作用于边坡稳定情况。蒲朝钦等^[11]对影响层状岩质边坡稳定情况的参数敏感性进行探究。高庆辉^[12]研究了不同岩体参数对露天矿安全隐患的影响。肖欢等^[13]运用极限平衡法及理正软件计算分析某露天矿边坡安全系数,确定其稳定情况。

为了探究岩体的力学参数如何影响露天矿终了边坡的安全情况,可利用敏感性手段来进行考察。在进行敏感性分析时,可以采用控制变量的方法来分析露天矿边坡稳定性受岩体不同力学参数的影响,即进行计算时每次仅改变其中一个参数,将露天矿终了边坡安全系数的变化程度作为对比项,从而找出影响程度最大的参数。

1 工程概况

云南某露天矿矿石以灰岩为主,石灰岩矿层赋存于中元古界昆阳群大龙口组,属浅海沉积的层状矿床,为露天开采矿山(图1)。矿区北部较高南部较低,为构造、剥蚀作用形成的低中山地形。矿区范围南北长 0.80 km,东西宽 0.20 ~ 0.80 km。矿

区露天开采规模大,加之区内地质构造影响,露天开采高陡边坡岩石力学问题较为突出。

某露天矿开采完毕后形成的终了边坡高度为 172 m,采场台阶数为 12 个,其中 1 750 m 平台的台阶高度为 10 m,1 910 m 平台的台阶高度为 12 m,其他平台均为 15 m,台阶坡面角为 60°,最终边坡角为 48°。



图1 云南某矿山现状全貌

Fig. 1 Present situation of a mine in Yunnan

2 室内岩石物理力学试验

2.1 试验过程

在岩土工程稳定性研究中,各种分析软件的广泛使用让数值模拟法发展迅速。数值模拟计算中赋予岩体不同的参数,得到结果并不一致,因此确定准确的计算所需数据是研究边坡安全与否最重要的依据。对于岩体力学参数的获取,采用原位试验这种方法无疑是最准确的,但是由于试验复杂、费用高、耗时长等因素限制,大型现场原位试验这一方法的使用并不广泛,发展受限^[14]。针对这一限制,可通过室内力学试验来确定相关岩石的力学参数,再将所得到的岩石力学参数通过一定的计算来获得岩体的力学参数,从而使其可以直接运用于工程实际中。

依据云南省某露天矿边坡的现场情况,采集拥有代表性的矿岩做物理力学参数的相关试验。按照现行《中华人民共和国地质矿产行业标准(DZ/T 0276.2015)》中所涉及岩石物理力学性质实验相关规范,根据不同的要求进行岩样的加工。加工试样的形状为圆柱体试件(图2),直径与试件高度之比为 1:2 和 1:1,其中直径为 50 mm,试件高为 100 mm 及 50 mm。待试样加工后分别对其进行抗压强度试验、变形试验、劈裂试验、变角度剪切试验。

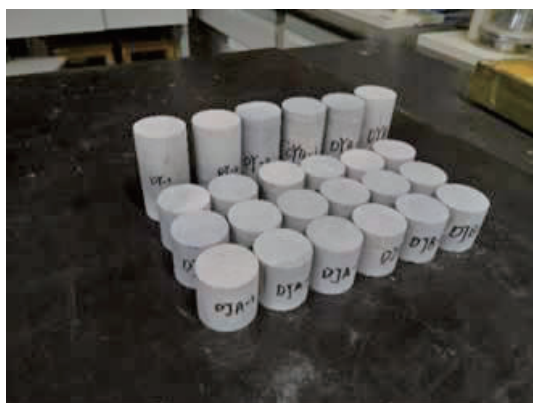


图2 制备试样

Fig. 2 Preparation of samples

抗压强度试验及变形试验,利用压力试验机测得岩石破坏时所承受的最大荷载,岩石抗压强度计算公式见式(1)。

$$R = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中, R 为岩石抗压强度,MPa; P 为破坏时最大荷载,kN; A 为垂直加荷方向的试样面积, mm^2 。

变形试验和抗压强度试验(图3)同时进行,变形试验能够获得岩石的弹性模量和泊松比。在变形试验过程中给试件施加轴向压力,连接电阻应变片可以得到横向和纵向应变。岩石弹性模量计算公式见式(2),泊松比计算公式见式(3)。

$$E = \frac{\sigma_c}{\epsilon_y} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \quad (3)$$

式中, E 为弹性模量,MPa; μ 为泊松比; σ_c 为岩石单轴抗压强度,MPa; ϵ_x 为 σ_c 对应的横向应变; ϵ_y 为 σ_c 对应的纵向应变。



图3 抗压试验

Fig. 3 Pressure test

劈裂试验(图4),岩石的抗拉强度是通过劈裂

试验得到的。试验中的试件破坏方向一般来说与径向方向一致。岩石抗拉强度由公式(4)计算可得。

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4)$$

式中, σ_t 为岩石抗拉强度,MPa; P 为试件破坏时的最大压力值,N; D 为试件的直径,mm; L 为试件的高度,mm。



图4 劈裂试验

Fig. 4 Splitting test

变角度剪切试验(图5),利用变角度剪切试验法可以得到岩石的凝聚力以及内摩擦角。变角度剪切试验中,会有正应力和剪应力施加在试件上,其中剪应力与剪切方向平行,正应力与剪切方向垂直。这两种力均由模具受到的试验机所施加的荷载 P 分解而来,这两种力可由式(5)和式(6)计算得到。

$$\sigma_a = \frac{P \cos \alpha}{A} \quad (5)$$

$$\tau_a = \frac{P \sin \alpha}{A} \quad (6)$$

式中, α 为模具倾角, $^\circ$; A 为试件受剪面面积, mm^2 。



图5 抗剪强度试验

Fig. 5 Shear strength test

模具的倾角分别选用 45° 、 50° 和 55° , 共三个角度, 每个角度 4 个试件。用线性回归公式将试验所获得的数据做相应计算, 可以得到岩石的凝聚力 c 以及内摩擦角 φ 。具体计算见式(7)。

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (7)$$

表 1 岩石力学试验结果

Table 1 Experimental results of rock mechanics

凝聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	抗压强度/MPa		软化系数	抗拉强度/MPa		弹性模量/ GPa	泊松比
		自然	饱水		自然	饱水		
4.63	35.5	46.02	39.434	0.90	4.28	3.73	14.2	0.31

3 数值模拟

3.1 终了边坡模型的选取与建立

为了解岩体力学参数对终了边坡稳定性的影响, 选取云南某露天矿中具有代表性的坡高最高的一条剖面来进行分析。

在建立终了边坡模型中, 根据郑颖人等^[15]的观点, 设置坡高为 172 m, 坡脚到左边界距离为 258 m, 坡顶到右边界距离 430 m, 模型高 344 m, 模型宽 810 m。此次模拟选用 Midas GTS NX 软件建立模型, 利用 FLAC^{3D} 进行数值模拟运算。Midas GTS NX 在前期建立模型过程中操作可行性高, 可以进行快速建模, 把露天矿终了边坡剖面图导入软件, 利用软件来完成露天矿终了边坡模型的设立, 得到的模型见图 6。对模型进行网格划分, 其中对终了边坡附近的网格划分更加细密, 模型共划分 152 230 个节点, 198 457 个单元体。FLAC^{3D} 对于分析露天矿终了边坡稳定性的模拟计算能力出众, 将建立的模型导入 FLAC^{3D} 进行后续数值模拟的计算, 见图 7。

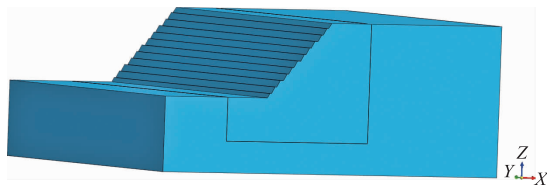


图 6 终了边坡模型图

Fig. 6 Final slope model

式中, τ 为剪应力, MPa; σ 为正应力, MPa; φ 为岩石内摩擦角, $(^\circ)$; c 为岩石凝聚力, MPa。

2.2 岩石力学试验结果

根据试验得出数据实验结果见表 1。

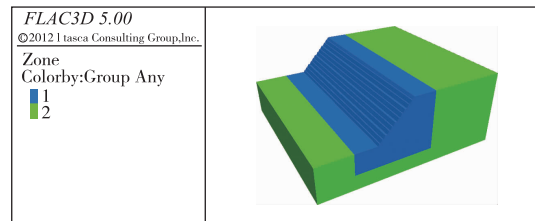


图 7 三维数值模拟计算模型图

Fig. 7 3D numerical simulation model diagram

同时对模型作出如下假设:

- 1) 假设模型里岩石结构是均质的、各向同性连续体。
- 2) 不考虑水、爆破、地表地形的影响。
- 3) 根据模型特点以及各类本构模型适用场景, 此次模拟选择 Drucker-Prager 模型进行计算。

3.2 边界条件

FLAC^{3D} 软件中, 一般来说有两种边界条件, 分别是位移边界条件和应力边界条件, 在讨论露天矿开采形成终了边坡这类静力学问题中可忽略水平应力影响, 选择位移边界条件。沿着模型 x 轴方向施加 x 方向的约束, y 轴方向施加 y 方向的约束, 模型底部施加 z 方向约束, 模型顶部和终了边坡为自由边界。

3.3 设置参数

取上述室内岩石物理力学试验所得到的结果, 运用 Hoek-Brown 强度准则折减计算得到相关岩体力学参数见表 2。将所得的岩体力学参数分别变化 -50% 、 -25% 、 25% 以及 50% , 所得数据见表 3。

表 2 折减后的岩体力学参数表

Table 2 The reduced rock mechanics parameter table

岩性	弹性模量/GPa	泊松比	凝聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	抗拉强度/MPa
灰岩	2.74	0.31	0.47	23.51	0.43

表 3 设置模拟参数表
Table 3 Set the simulation parameter table

影响因素	弹性模量/GPa	泊松比	凝聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	抗拉强度/MPa
弹性模量/GPa	1.37	0.31	0.47	23.51	0.43
	2.06				
	2.74				
	3.43				
	4.11				
泊松比	2.74	0.16	0.47	23.51	0.43
		0.23			
		0.31			
		0.39			
		0.47			
凝聚力 c /MPa	2.74	0.31	0.24	23.51	0.43
			0.35		
			0.47		
			0.59		
			0.71		
内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	2.74	0.31	0.47	11.76	0.43
				17.63	
				23.51	
				29.39	
				35.27	
抗拉强度/MPa	2.74	0.31	0.47	23.51	0.22
					0.32
					0.43
					0.54
					0.65

3.4 模拟结果

本次模拟采用 FLAC^{3D} 软件对终了边坡模型进行计算,得到不同影响因素参数在不同组合情况下终了边坡的稳定情况。根据表 2 岩体力学参数计算所得边坡安全系数如图 8 所示。在数据选择中利用控制变量法对上述参数表中的参数进行相关组合。将计算所得不同参数条件下的终了边坡安全系数制成折线图,其中, x 轴为所改变的参数, y 轴为利用 FLAC^{3D} 模拟计算所得安全系数,所得结果见图 9~13。

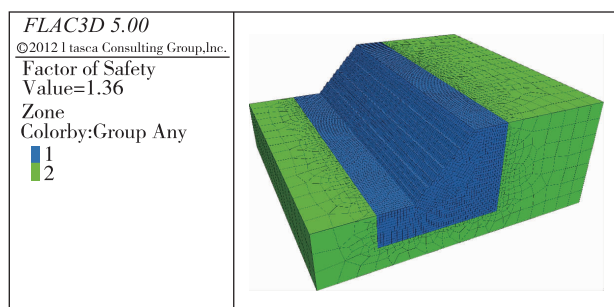


图 8 根据表 2 参数计算所得边坡安全系数

Fig. 8 Calculation of slope safety factor based on table 2 parameters

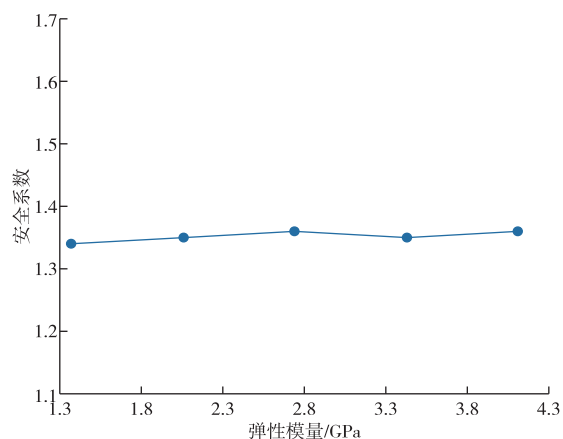


图 9 仅改变弹性模量时的安全系数

Fig. 9 Safety factor for elastic modulus only

由图 9 可知,控制其他影响因素,只改变弹性模量时,岩体终了边坡安全系数改变量很小,折线图与 x 轴近似平行状态。由图 10 可知,控制其他影响因素,仅对泊松比的参数作出改变时,折线图的变化率很小,图线与 x 轴几乎平行。由图 11 可知,控制其他影响因素,改变凝聚力的数值时,凝聚力数值越大,终了边坡安全系数越大,即边坡越稳定,且与上述两种影响因素相比,安全系数增加幅度明显增大。

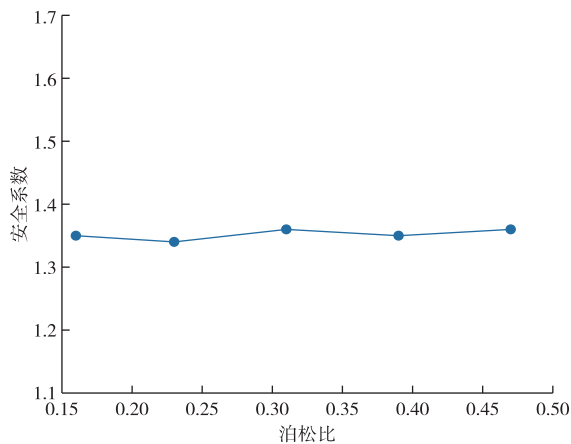


图 10 仅改变泊松比时的安全系数

Fig. 10 Safety factor for Poisson's ratio only

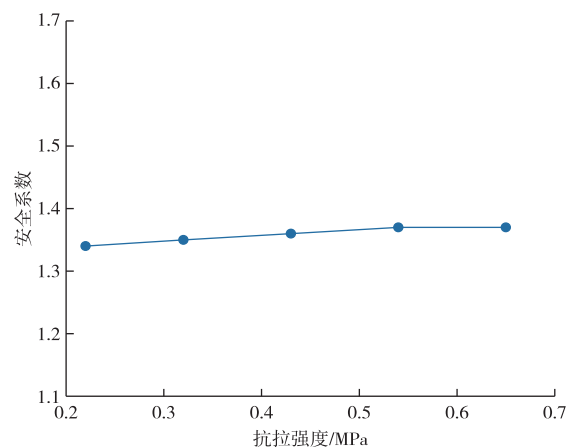


图 13 仅改变抗拉强度时的安全系数

Fig. 13 Safety factor for only changing tensile strength

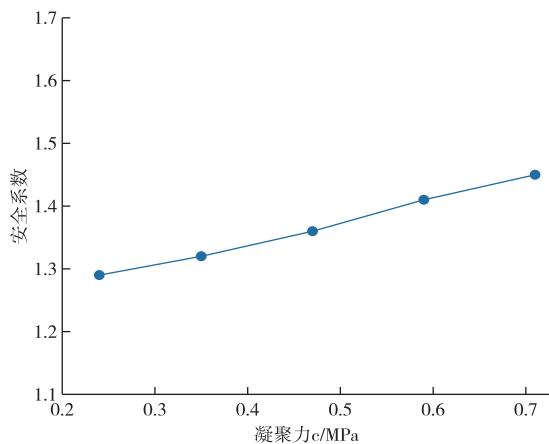


图 11 仅改变凝聚力时的安全系数

Fig. 11 Safety factors when only cohesion changes

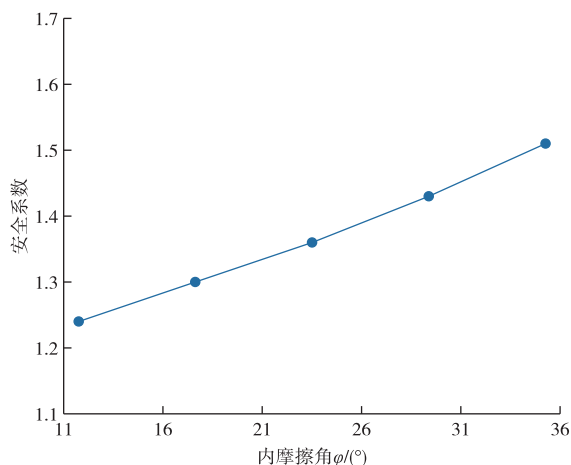


图 12 仅改变内摩擦角时的安全系数

Fig. 12 Safety factor for only changing internal friction angle

由图 12 可知,控制其他影响因素,对内摩擦角这一单一变量作出改变时,内摩擦角越大,边坡安全系数越大,折线图斜率与图 9、图 10 相比有较大改

变。由图 13 可知,仅改变抗拉强度这一单一变量,岩体终了边坡安全系数变化幅度较小。

4 结论

通过现场取石灰岩做室内岩石力学试验得到岩石相关物理力学性质,进而得到岩体力学参数。利用控制变量法研究岩体相关物理力学性质如何控制露天矿终了边坡稳定情况,得出结论如下:

1) 岩体的凝聚力和内摩擦角对终了边坡稳定性影响较大,若改变凝聚力或内摩擦角,终了边坡安全系数变化较大。

2) 岩体的弹性模量、泊松比以及抗拉强度影响露天矿终了边坡稳定性程度较小,仅改变弹性模量、泊松比或者抗拉强度,露天矿终了边坡安全系数改变程度比较微小。

3) 考察露天矿终了边坡稳定性时着重考虑岩体力学参数里凝聚力以及内摩擦角的影响。

参 考 文 献

- [1] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2013.
CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [2] 王旭春,管晓明,王晓磊,等. 露天矿边坡稳定性与岩体参数敏感性研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1806-1811.
WANG Xuchun, GUAN Xiaoming, WANG Xiaolei, et al. Study on stability of open-pit mine slope and sensitivity of rock mass parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1806-1811.
- [3] 宛良朋,许阳,李建林,等. 岩体参数敏感性分析对边坡稳定性评价影响研究——以大岗山坝肩边坡为例[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1737-1744.
WAN Liangpeng, XU Yang, LI Jianlin, et al. Sensitivity

- analysis of the effect of rock mass parameters on slope stability evaluation: A case study of abutment slope of Dagangshan[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1737-1744.
- [4] 冯德润, 黄今, 孙宇超, 等. 露天矿边坡岩体强度参数影响因子敏感性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 1017-1021, 1029.
- FENG Derun, HUANG Jin, SUN Yuchao, et al. Sensitivity analysis on influencing factors of rock strength parameters of open pit slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 1017-1021, 1029.
- [5] 黄高峰, 李宗利, 牟声远. Hoek-Brown 准则参数在边坡工程中的敏感性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2163-2167.
- HUANG Gaofeng, LI Zongli, MOU Shengyuan. Sensitivity analysis of Hoek-Brown failure criterion parameters on slope projects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2163-2167.
- [6] 周辉, 杨艳霜, 刘海涛. 岩石强度时效性演化模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1521-1527.
- ZHOU Hui, YANG Yanshuang, LIU Haitao. Time-dependent theoretical model of rock strength evolution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2163-2167.
- [7] 弥宏亮, 陈祖煜, 张发明, 等. 边坡稳定三维极限分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2002(5): 649-653.
- MI Hongliang, CHEN Zuyu, ZHANG Faming, et al. The 3D limit method for slope stability analysis and applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002(5): 649-653.
- [8] 翁其能, 曾彪, 王林峰, 等. 基于双折减系数法的楔形体稳定性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 885-892.
- WENG Qineng, ZENG Biao, WANG Linfeng, et al. Stability analysis of wedge based on double reduction factor method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 885-892.
- [9] 任红岗, 谭卓英, 王海军. 基于 OED-GRA 评价模型的采场岩体参数敏感性分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(1): 63-69.
- REN Honggang, TAN Zhuoying, WANG Haijun. Sensitivity analysis of rock mass parameters in stope based on the OED-GRA evaluation model[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2017, 69(1): 63-69.
- [10] 张东旭, 侯克鹏, 杨志全, 等. 岩体抗剪强度参数对边坡安全系数的敏感性分析[J]. 中国钨业, 2015, 30(4): 27-31.
- ZHANG Dongxu, HOU Kepeng, YANG Zhiquan, et al. Sensitivity analysis of rock shear strength parameters to the slope safety factor[J]. China Tungsten Industry, 2015, 30(4): 27-31.
- [11] 蒲朝钦, 余红兵, 李继业, 等. 层状岩质边坡安全系数敏感性分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(4): 14-18.
- PU Chaoqin, YU Hongbing, LI Jiye, et al. Sensitivity analysis of safety factor of layered rock slope[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(4): 14-18.
- [12] 高庆辉. 露天矿边坡稳定性与岩体参数敏感性研究[J]. 工程建设与设计, 2018(13): 101-102, 106.
- GAO Qinghui. Study on slope stability of open pit and parameter sensitivity of rock mass[J]. Construction & Design for Engineering, 2018(13): 101-102, 106.
- [13] 肖欢, 于永纯, 刘银, 等. 某露天矿山局部边坡稳定性分析[J]. 云南冶金, 2020, 49(2): 7-12.
- XIAO Huan, YU Yongchun, LIU Yin, et al. Analysis on local slope stability of one strip mine[J]. Yunnan Metallurgy, 2020, 49(2): 7-12.
- [14] 杨泽, 侯克鹏, 李克钢, 等. 云锡大屯锡矿岩体力学参数的确定[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1923-1928.
- YANG Ze, HOU Kepeng, LI Kegang, et al. Determination of mechanical parameters of rock mass from Yunxi Datun tin mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1923-1928.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(19): 3381-3388.
- ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(19): 3381-3388.

(编辑:郭文晶)