

基于渗流作用下含断层的露天矿边坡稳定性的数值模拟研究

何锋,刘春学

(云南财经大学物流与管理工程学院,昆明 650221)

摘要:为研究含断层露天边坡在渗流作用下的稳定性问题,采用FLAC^{3D}数值模拟技术构建断层作用下的滑体力学模型,获得顺倾层状边坡分条稳定系数表达式,进而对渗流作用下含断层边坡稳定性进行数值模拟分析。对岩体强度的弹性模量、内聚力、内摩擦角和岩体抗拉强度等4种影响因素进行敏感性分析,通过分析这4种因素在不同工况下边坡的位移、应力、应变和安全系数,得出了各参数的敏感性分析曲线。从敏感性分析曲线可知,岩体的内聚力对边坡稳定性的影响最大,弹性模量对边坡稳定性的影响最小。开挖不同阶段边坡稳定性的主要影响因素存在差别,其中,前期以断层为主,后期则逐渐转化为渗流作用。该研究为今后露天矿边坡稳定性分析提供了科学依据,对于边坡稳定性分析具有重大的工程实际意义。

关键词:露天矿;边坡稳定;渗流;数值模拟;安全系数

中图分类号:TU459⁺.2;TD854⁺.6

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2024)02-0070-06

Numerical simulation on the stability of open-pit mine slopes containing faults under seepage action

HE Feng, LIU Chunxue

(School of Logistics and Management Engineering, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China)

Abstract: To study the stability of open-air slope with fault under seepage, this paper uses FLAC3D numerical simulation technology to establish a mechanical model of the sliding body under fault action, and deduce the expression of the stability coefficient of the longitudinal slope, to simulate the stability of the slope with fault under seepage action. The results show that the sensitivity analysis is carried out on four influencing factors such as elastic modulus of rock mass strength, cohesion, internal friction Angle, and tensile strength of rock mass. By analyzing the displacement, stress, strain and safety factor of slope under different working conditions of these four factors, the sensitivity analysis curve of each parameter is obtained. It can be seen from the sensitivity analysis curve that the cohesion of rock mass has the greatest influence on the slope stability, and the elastic modulus has the least influence on the slope stability. The main influencing factors of slope stability are different at different excavation stages. In the early stage of excavation, the main factor affecting slope stability is fault, which gradually changes to seepage in the later stage. This study provides a scientific basis for the future analysis of open-pit slope stability.

Key words: open-pit mine; slope stability; seepage flow; numerical simulation; safety factor

近年来,伴随着社会经济的持续发展,我国对于资源方面的需求日益增长。煤炭是我国的基础能

源,是极其重要的工业原料,煤炭产业的可持续发展事关国家能源安全与国民经济发展。露天煤矿是我国煤炭工业的重要组成部分,为国内煤炭稳定供应发挥着关键促进作用^[1-5]。当前,国内草原地区有十余座大型露天煤矿受到软岩、地下水以及多断层构造等难题影响,由此带来的边坡稳定问题始终是露天煤矿开采中需要面临的难题,严重威胁到开采作

收稿日期:2023-09-24

基金项目:国家自然科学基金地区项目(42062020);云南省科技厅重点研发项目(202003AC100001);云南省科技厅面上项目(202101AT070562)

作者简介:何锋(1984—),男,教授级高工,博士,管理工程专业, E-mail:jay.duan@163.com。

业的安全性。

研究表明,露天矿边坡的变形、破坏受多种因素的影响,这一问题的解决非常复杂,需要综合运用理论分析、模型试验以及数值分析等多种技术,从而深入探索边坡变形破坏机理及其发展规律^[6]。现阶段,针对边坡稳定性问题,众多学者普遍选择离散元法^[7-8]、有限差分法^[9-10]以及有限元法^[11-12]等进行数值分析。尤其是有限元法,凭借着自身在边界及其条件组合相关问题处理方面的强大优势,现已在实践领域获得广泛的推广与运用。

相较其他类型的边坡来看,露天煤矿边坡的显著差别就是人们无法对其周边的地质条件进行改变。因此,在断层、构造以及弱层等破坏影响下,与此相关的边坡稳定性分析以及变形破坏机理研究工作难度较大。尤其是具有断层分布的露天矿边坡^[13],严重威胁到安全生产目标的达成。现有研究工作的重心放到断层及其边坡稳定性两者的关系层面,而工程实践中需要面临的情况往往更为复杂。例如,地下水在很大程度上会对边坡稳定性带来明显影响作用。通常来说,水会减弱边坡岩石的物理和力学特征,尤其是在受断层地质结构的影响时,这种弱化作用效果会变得更加明显。深入研究地下水的作用机制^[14-15],不仅可以为边坡的参数设计提供指导,还可以为疏干排水方案的制定提供依据,更可以为实现煤炭资源的可持续发展、水资源的可持续利用提供支撑,从而获得巨大的经济效益与环境效益。因此,对于露天矿山的滑坡变形以及渗流特性等相关的深层次研究工作,具有突出的实践意义与价值。

鉴于此类复杂条件下的边坡稳定问题,本文采用理论分析与数值模拟相结合的方法,深入研究地下水与走向正断层耦合作用下对露天矿边坡的变形破坏及其稳定性影响情况,明确边坡变形破坏机理,为类似工程活动的展开以及滑坡防治策略方案的制定提供参考。

1 工程地质状况

本文研究案例选择较为典型的露天矿岩体,其边坡某些局部位置已露出断层面与断层带,依据岩石类别划分、结构构造以及力学参数等原则,对该边坡进行岩石组成划分工作,自上而下其岩组对应的是第四系松散层、侏罗系泥岩组、砂岩组以及煤层组。其中,第四系松散层以黑褐色的腐殖土、黄色的砂质黏土、黏土以及黄褐色的砂砾石为主,且与下伏的第三系表现出不整合接触关系。

2 断层位置对边坡稳定性影响的力学分析

本质上,断层位置偏移会对其滑体形态带来影响,使得作用到滑体边界及其滑面位置的力学条件出现改变,故应构建基于断层影响的滑体力学及几何分析模型,对其边界位置的力学条件进行分析与研究,由理论层面阐释断层位置带给边坡稳定性方面的影响作用机制。

在图 1、2 中,边坡面的坡角设为 α ,弱层倾角设为 β ,断层倾角设为 δ 。根据刚体极限平衡理论^[16],滑面坡体对应区分是 5 个垂直分条,其编号情况是 1~5,其中, $OA = O^* A^*$, $AB = A^* B^*$, $CD = C^* D^*$, $DE = D^* E^*$ 。假定断层露头距坡肩初始水平距离是 x ,朝着边坡内侧进行偏移得到的距离是 $x + \Delta x$,经分析断层偏移前后的分条 1、2、4 与分条 5 并未存在形状方面的改变情况,且分条 3 对应着的水平宽度则从 BC 加大 Δx 而成为 $B^* C^*$,其底滑面倾角从 δ 转变为 β 。如果不将分条之间存在的相互作用影响考虑在内,则能够利用断层偏移期间分条 3 具有的稳定性变化规律情况,把握断层偏移带给滑体稳定性方面的影响作用情况。

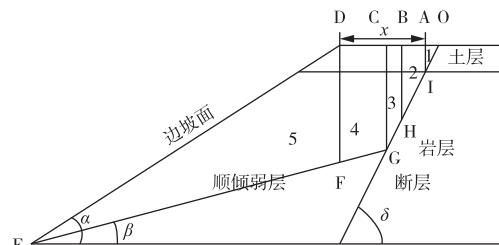


图 1 断层偏移(前)

Fig. 1 Fault migration(front)

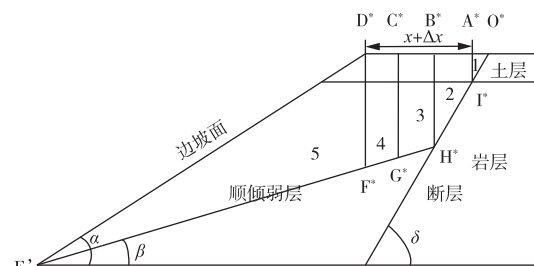


图 2 断层偏移(后)

Fig. 2 Fault migration(back)

在不考虑条块之间的相互影响的情况下,偏移前后分条 3 相关的稳定系数 k_{s3} , k_{s3}^* 对应是:

$$k_{s3} = \frac{\tan\varphi}{\tan\delta} + \frac{c \times BC}{\omega_3 \sin\delta \cos\delta} \quad (1)$$

$$k_{s3}^* = \frac{\tan\varphi}{\tan\delta} + \frac{c \times BC^*}{w_3^* \sin\delta \cos\delta} \quad (2)$$

$$w_3 = \frac{\gamma}{2}(CG + BH) \times BC \times L \quad (3)$$

$$w_3^* = \frac{\gamma}{2}(CG^* + BH^*) \times BC^* \times L \quad (4)$$

$$BC^* - BC = \Delta x \quad (5)$$

$$B^* C \tan\beta = BC \tan\delta \quad (6)$$

因此有:

$$B^* C^* = \frac{\Delta x \tan\delta}{\tan\delta - \tan\beta} \quad (7)$$

$$B^* C^* = \frac{\Delta x \tan\delta}{\tan\delta - \tan\beta} \quad (8)$$

将式(5)至式(8)代入式(1)和式(2)中,可计算出:

$$k_{s3} = \frac{\tan\varphi}{\tan\delta} + \frac{4c}{\gamma(CG + BH)\sin 2\delta} \quad (9)$$

$$k_{s3}^* = \frac{\tan\varphi}{\tan\beta} + \frac{4c}{\gamma(CG^* + BH^*)\sin 2\beta} \quad (10)$$

式中: w_i 为分条 i 重力; γ 为岩土体容重, kN/m^3 ; c 、 φ 为露天矿弱层与断层相互间的黏聚力, kPa 及其内摩擦角, ($^\circ$);

$$CG^* = C^* G^*; BH = B^* H^*, \text{且 } B^* H^* = C^* G^* -$$

$$B^* C^* \tan\beta = C^* G^* - \frac{\Delta x \tan\delta \tan\beta}{\tan\delta - \tan\beta}, \text{则有:}$$

$$k_{s3}^* - k_{s3} = \tan\varphi \left(\frac{1}{\tan\beta} - \frac{1}{\tan\delta} \right) + \frac{4c}{\gamma(2CG - \frac{\Delta x \tan\delta \tan\beta}{\tan\delta - \tan\beta})} \left(\frac{1}{\sin 2\beta} - \frac{1}{\sin 2\delta} \right) \quad (11)$$

基于上式分析, k_{s3} 、 k_{s3}^* 与黏聚力 c 、岩土体重量 γ 等参数有关。

3 边坡稳定性分析

为了深入探讨露天煤矿断层带给边坡变形规律以及变形机理方面的影响情况,本文选定 FLAC^{3D} 软件对露天煤矿边坡模型进行受力分析,并充分探讨煤矿断层对边坡形变的动态影响。

本文选取典型煤矿工程地质剖面为建模依据,模型左、右及底部边界对应选取水平 X 、竖直 Y 方向进行边界位移约束条件的构建,且选取理想弹塑性模型对其介质具备的弹塑性情况进行描述与分析,从而保证模型的受力平衡体系不被破坏^[17-18]。此外,除 Mohr-Coulomb 岩层本构模型因素外,利用岩体弹性模量 E 评价边坡稳定性的影响。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (12)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (13)$$

式中: K 为岩体体积模量; G 为剪切模量; E 为弹性模量; ν 为泊松比,取值 0.2。

4 案例分析

案例选取样本参照物为某地市正在运行的煤矿工程,目前正处于从二采区到三采区的有序转变的过渡期,在三采区的西北部的端帮处有一条断层构造发育带,其中包括 F_1 、 F_3 、 F_5 三条主要断层。3 条断层的走向与边坡的走向极为相似,而且倾向于与边坡形成反向的倾斜。经过研究, F_1 断层是影响边坡稳定性的主要因素,其存在会导致周围岩石的破坏,使得岩体力学强度大幅下降,特别是在边坡抗滑段,这将会严重影响边坡的稳定性。 F_1 断层特征: 倾向 NW, 倾角 $50^\circ \sim 69^\circ$, 落差 10~151 m, 主采煤层为 15 号、16 号煤层, 充水及含水层的单位涌水量是 2.35 mL/min, 其含水层整体的补给条件相对较差。

在进行类似的模拟边坡测试时,使用直径介于 0.12~0.20 mm 范围的纯净砂,并使用了水泥以及熟石膏充当其黏合剂。边坡模型对于类似岩石斜坡进行模拟,其材料由石膏、水泥、沙子以及水根据特定配比完成制备,且加工结束的情况下放到室温环境下进行 2~3 d 的风干处理操作,确保其能够满足试验所需要的强度值。岩层相关的力学性能及其参数情况参照表 1。本实验环节,弱面材料选定云母

表 1 岩层主要力学性能参数及分层厚度

Table 1 The main mechanical property parameters and stratified thickness of rock strata

岩层名称	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	密度/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	厚度/cm	累计厚度/cm
泥岩	3.65	0.110	2.10	17.5	17.5
砂砾岩	13.20	0.100	1.80	11.5	88.5
粉砂岩	8.40	0.264	1.80	2.5	76.8
15 煤	4.50	0.032	1.30	3.4	74.4
砂砾岩	13.20	0.140	1.80	6.8	71.2
砂泥互层	6.70	0.100	2.00	9.5	64.3
16 煤	4.50	0.032	1.30	9.1	54.7
泥岩	3.65	0.110	2.10	45.2	45.2

粉,将其均匀撒放到弱面位置,并且通过三维位移动态监测系统的支持对其位移情况完成监测。

基于模拟方案运算获得岩体参数,通过控制变量法的支持,对极大值条件下相应的模拟云图展开分析工作,见图 3~6。

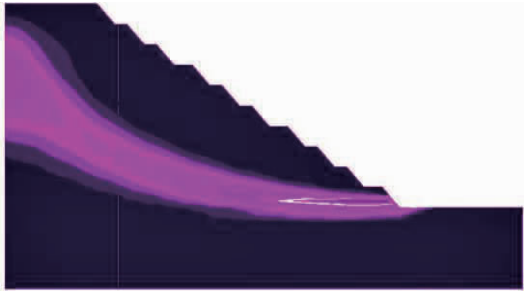


图 3 弹性模量极大值下的安全系数(1.65)模拟云图
Fig. 3 Safety factor simulation nephogram under maximum elastic modulus

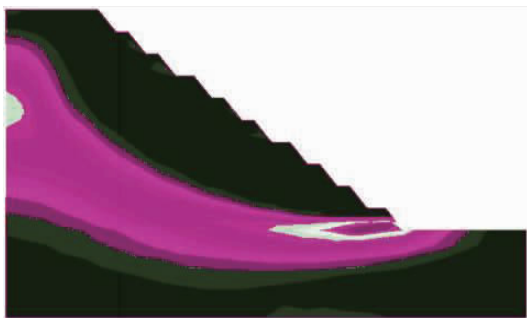


图 4 内聚力极值下的安全系数(5.8)模拟云图
Fig. 4 Safety factor simulation nephogram under cohesion extreme value

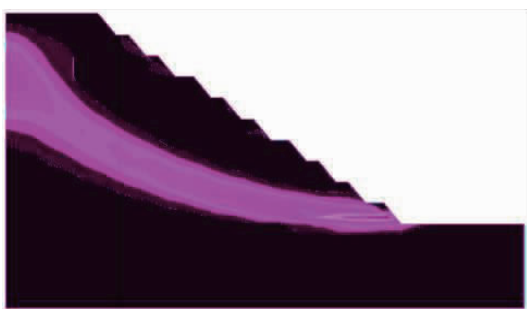


图 5 内摩擦角极值下的安全系数(2.5)模拟云图
Fig. 5 Safety factor simulation nephogram at extreme angle of internal friction

对 FLAC^{3D}数值模拟结果进行解析,得到边坡在受各岩体参数影响下的折线图,分别见图 7~10。

由图 7 可知,随着岩体弹性模量的增加,露天煤矿岩体的安全系数几乎没有改变,图形也显示出类似于水平的趋势,而在这种情况下,岩体的安全性从 1.63 到 1.65 的变化幅度很小,约 1%。

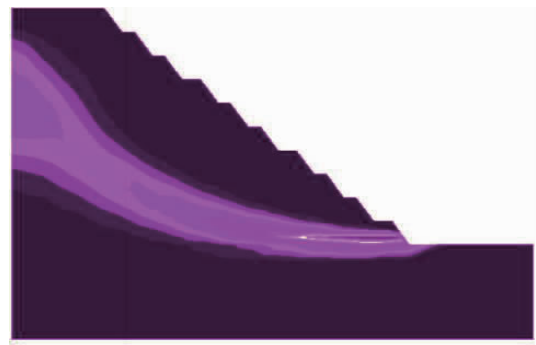


图 6 抗拉强度极值下的安全系数(1.65)模拟云图
Fig. 6 Safety factor simulation nephogram under extreme tensile strength

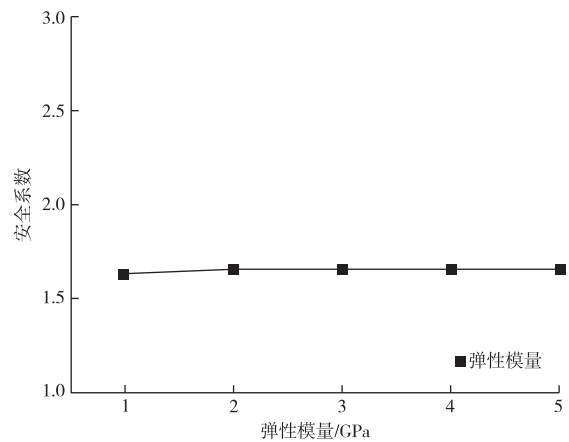


图 7 岩体弹性模量变化对边坡安全系数的影响
Fig. 7 Influence of elastic modulus of rock mass on slope safety factor

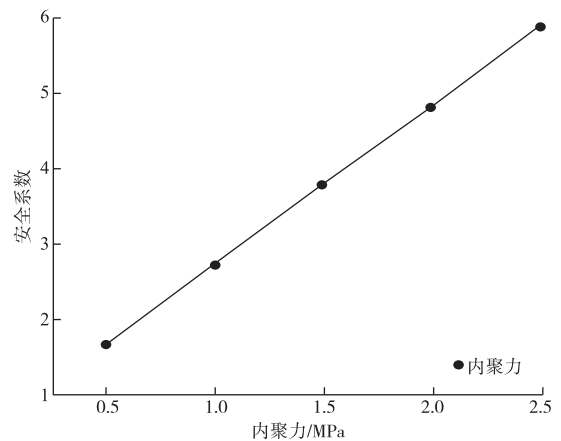


图 8 岩体内聚力变化对边坡安全系数的影响
Fig. 8 Influence of rock mass cohesion change on slope safety factor

由图 8 可知,当岩体内聚力增强时,岩体的边坡安全系数会迅速提高,并以一条斜率约为 1 的曲线形式上升,其中,边坡的安全系数从 1.6 提高到了 5.8。

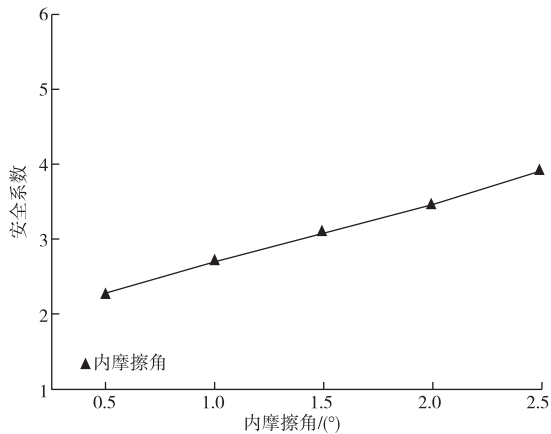


图9 内摩擦角变化对边坡安全系数的影响

Fig. 9 Influence of internal friction Angle variation on slope safety factor

由图9可知,当岩体内摩擦角增大时,岩体边坡的安全系数也会相应提升,安全系数变化趋势的斜率约为0.35,并呈近似直线型增加,而且最小边坡安全系数是2.4,最大则是3.8,其增幅达到58%。

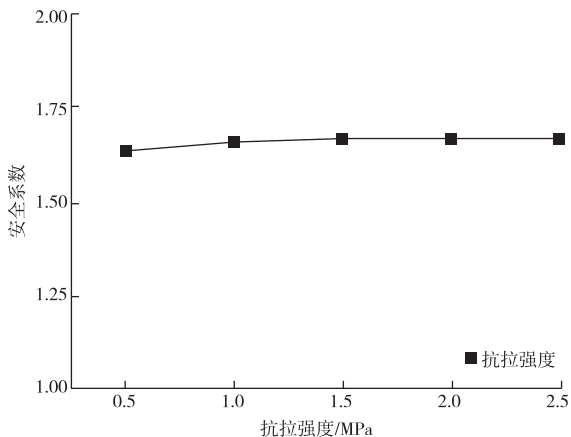


图10 抗拉强度变化对边坡安全系数的影响

Fig. 10 Influence of tensile strength variation on slope safety factor

由图10可知,当岩体抗拉强度增加时,岩体边坡的安全系数也会呈现出一种缓慢上升的趋势,而且这种上升的幅度约2%,而且在这种情况下,边坡的安全系数处于从1.6到1.65的变化范围内。

由图11可知,在岩体的内聚力增加时,边坡位移及其抗拉应力都明显下降,且岩体内摩擦角带给岩体的影响相对较大,弹性模量及抗拉强度带来的影响较弱。

由图12可知,测试点第1次开挖后的竖直方向以及水平方向存在着快速的位移改变(约0.73 mm),而第2次、第3次开挖后,虽然位移出现缓慢增大的

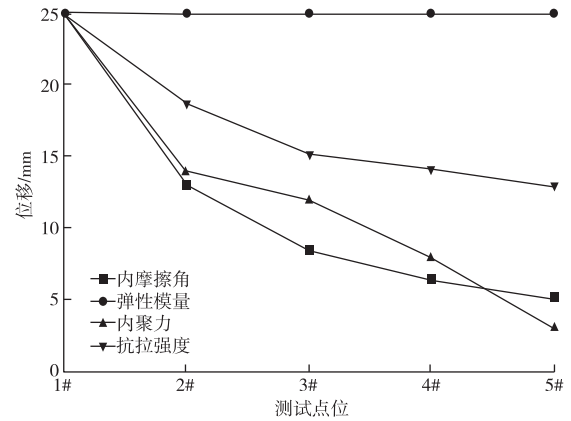


图11 不同测试点位下露天煤矿边坡的岩体位移变化

Fig. 11 Rock mass displacement change of open-pit coal mine slope at different test points

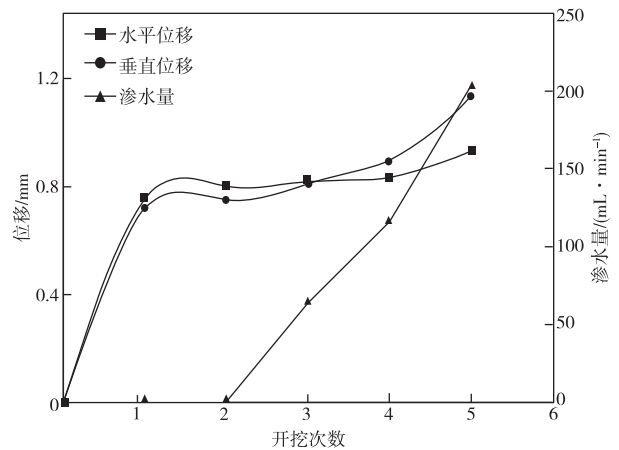


图12 测试点开挖次数下的位移和断层涌水量变化

Fig. 12 Change of displacement and fault water inflow under the number of excavation at the test point

情况,但断层均未发生涌水现象;同时,第3次开挖后,边坡断层部分出现涌水现象,接近63.7 mL/min;在第4次、第5次开挖后,边坡的水平、垂直位移增速在前2次开挖的基础上分别提高了0.25、0.43 mm。且断层涌水量持续增加,在第5次开挖结束时,最大涌水量约为202.3 mL/min。上述现象的主要原因在于:1)开挖卸荷引起露天煤矿边坡产生水平、竖直方向的位移。2)受露天煤矿断层应力的增加,提高了边坡变形速度,引起开挖后期断层出现涌水,从而促进边坡稳定性降低。

5 结论

通过对露天煤矿边坡地质条件进行详细分析后,本文采用FLAC^{3D}数值模拟技术构建断层作用下的滑体力学模型,得到顺倾层状边坡分条稳定系

数表达式,对渗流作用下含断层边坡稳定性进行模拟研究,并得出几点结论:

1)露天煤矿边坡稳定性影响最大的因素是边坡岩体的内聚力,伴随边坡岩体内聚力的持续增长,边坡安全系数也将明显增大;岩体的弹性模量对边坡的稳定性影响最小。因此,岩体的内聚力是决定边坡稳定性的关键因素。

2)开挖前期对边坡稳定性带来影响的主要是断层因素,开挖后期则是渗流作用。第 5 次边坡开挖的情况下,由于断流与断层的耦合作用影响,边坡出现沿弱面滑移失稳的现象。

参 考 文 献

- [1] 王珍,曹兰柱.斜交断层影响下露天煤矿顺倾层状边坡稳定性研究[J].煤炭科学技术,2020,48(5):69-74.
WANG Zhen, CAO Lanzhu. Study on dip bedded slope stability of open-pit coal mine under influence of oblique fault[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 69-74.
- [2] 杨勇,张忠政,胡军,等.基于随机权重法改进 PSO-ELM 的露天矿边坡稳定性分析[J].有色金属工程,2022,12(5):128-134.
YANG Yong, ZHANG Zhongzheng, HU Jun, et al. Slope stability analysis of open-pit mine based on improved PSO-ELM with random weight method [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(5): 128-134.
- [3] 曹兰柱,祁利民,王东,等.露天矿含断层复合边坡稳定性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(8):22-27.
CAO Lanzhu, QI Limin, WANG Dong. Stability research of combination slope with fault in open-pit mine[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2016, 35(8): 22-27.
- [4] 陈毓,周西华.黑山露天矿内排土场边坡稳定分析及治理措施[J].煤矿安全,2019,50(12):231-233,238.
CHEN Yu, ZHOU Xihua. Analysis and treatment of slope stability of inner dump in Heishan open-pit mine[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(12): 231-233, 238.
- [5] 张莹,王旭阳,林智勇.某露天矿山破碎岩体高陡岩质边坡稳定性的数值模拟研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(2):100-105.
ZHANG Ying, WANG Xuyang, LIN Zhiyong. Numerical simulation study on the stability of high and steep rock slope with broken rock mass in an open pit mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2023, 75(2): 100-105.
- [6] 付宏渊,曹硕鹏,张华麟,等.湿-热-力作用下软岩边坡破坏机理及其稳定性研究进展与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2081-2098.
FU Hongyuan, CAO Shuopeng, ZHANG Hualin, et al. Progress and prospect of failure mechanism and stability analysis of soft rock slope under wet-heat-force action [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(7): 2081-2098.
- [7] 马跃进,王安,赵建国,等.基于离散元法的凸圆刃式深松铲减阻效果仿真分析与试验[J].农业工程学报,2019,35(3):16-23.
MA Yuejin, WANG An, ZHAO Jianguo, et al. Simulation analysis and experiment of drag reduction effect of convex blade subsoiler based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 16-23.
- [8] 李秀茹,郭恩栋,张文静,等.基于离散元法的爆破荷载作用下深埋隧道失稳破坏模拟研究[J].灾害学,2019,34(1):87-93.
LI Xiuru, GUO Endong, ZHANG Wenjing, et al. Simulation study on the failure of deep tunnel under blasting load [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 87-93.
- [9] 李青阳,吴国忱,段沛然.准规则网格高阶有限差分法非均质弹性波波场模拟[J].石油地球物理勘探,2019(3):539-550.
LI Qingyang, WU Guochen, DUAN Peiran. Elastic wave field forward modeling in heterogeneous media based on the quasi-regular grid high-order finite difference [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019(3): 539-550.
- [10] 董建华,柳珂,董旭光,等.寒区格构梁与锚杆复合结构的冻胀效应计算方法[J].岩石力学与工程学报,2020,39(5):984-995.
DONG Jianhua, LIU Ke, DONG Xuguang, et al. A calculation method of frost heave effect of lattice beam and anchor composite structure in cold regions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(5): 984-995.
- [11] 易红卫,樊陵姣,湛涛.基于有限元分析的矿山边坡自动数值建模与分析研究[J].矿冶工程,2020,40(3):30-33.
YI Hongwei, FAN Lingjiao, ZHAN Tao, et al. Automatic numerical modeling and analysis of mine slopes based on finite element analysis [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(3): 30-33.
- [12] 景明,黄亚军,吕志强,等.基于有限元的上下盘开采对矿山边坡稳定性的影响研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(5):36-42.
JING Ming, HUANG Yajun, LYU Zhiqiang, et al. Study on the influence of mining on the stability of mine slope based on finite element [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(5): 36-42.
- [13] 曹兰柱,黄浩轩,王东,等.胜利东二露天矿南帮滑坡区压煤回采边坡稳定性研究[J].煤炭科学技术,2019,47(10):81-87.
CAO Lanzhu, HUANG Haoxuan, WANG Dong, et al. Research on slope stability of coal recovery on landslide area underlying southern slope in Shengli No. 2 East Open-pit Mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 81-87.
- [14] 代永新,赵武鹏.露天矿超高边坡灾变影响因素与防控关键技术研究综述[J].金属矿山,2016,45(11):1-9.
DAI Yongxin, ZHAO Wukun. Overview about disaster factors and critical control technique for super high slope of open-pit mine [J]. Metal Mine, 2016, 45(11): 1-9.

- and Metallurgy, 2023, 32(2):1-9.
- [5] 廖元欢, 邓涛, 张文涛, 等. 基于尖点突变理论的巷道开挖围岩稳定性及支护研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(4):116-123. LIAO Yuanhuan, DENG Tao, ZHANG Wentao, et al. Study on the stability and support of tunnel excavation surrounding rock based on cusp catastrophe theory [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4):116-123.
- [6] 陈才贤, 陈磊, 黄智强. 高海拔软破大断面巷道支护设计及参数优选研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(10):88-94. CHEN Caixian, CHEN Lei, HUANG Zhiqiang. Study on support design and parameter optimization of broken soft large-section roadway at high altitude [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(10):88-94.
- [7] 贾明魁, 贾立安, 刘银志. 高应力破碎带大断面巷道支护技术研究[J]. 矿冶工程, 2003(5):12-14. JIA Mingkui, JIA Li'an, LIU Yinzhi. Roadway lining technology of major section in high stress fracture zone—a study [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003(5):12-14.
- [8] 杨亚平, 杨有林, 穆玉生, 等. 金川矿区深部高应力破碎岩体巷道支护技术研究及应用[J]. 中国矿业, 2018, 27(11):99-103. YANG Yaping, YANG Youlin, MU Yusheng, et al. Research and application of supporting technology of fractured rock roadway with high stress of deep ground in Jinchuan mining area [J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11):99-103.
- [9] 夏辉, 侯克鹏, 孙华芬, 等. 某矿大断面运输巷道支护技术[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5):1835-1841. XIA Hui, HOU Kepeng, SUN Huafen, et al. Support technology of large section transportation roadway in a mine [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(5):1835-1841.
- [10] 郭延辉, 侯克鹏, 李克钢, 等. 深部高应力松散破碎软岩巷道支护技术研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(2):32-38. GUO Yanhui, HOU Kepeng, LI Kegang, et al. A research on supporting technology of deep loose fractured soft rock roadway under high stress [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 44(2):32-38.
- [11] 张延旭, 冷超, 王超, 等. 松软破碎围岩巷道支护技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(10):22-25. ZHANG Yanxu, LENG Chao, WANG Chao, et al. Research on support technology of roadway with soft and broken surrounding rock [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(10):22-25.
- [12] 戴俊, 杨凡, 武宇, 等. RSMSY5(N)声波仪在巷道围岩松动圈测试中的应用[J]. 煤炭技术, 2014(12):76-78. DAI Jun, YANG Fan, WU Yu, et al. Application of RSMSY5(N) acoustic-waves-monitor in releasing zone measuring and test [J]. Coal Technology, 2014(12):76-78.
- [13] 孟庆彬, 钱唯, 韩立军, 等. 软弱矿体中巷道围岩稳定控制技术的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2019(5):906-915. MENG Qingbin, QIAN Wei, HAN Lijun, et al. Stability control technology of roadway surrounding rock in soft ore body and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019(5):906-915.
- [14] 靖洪文, 孟庆彬, 朱俊福, 等. 深部巷道围岩松动圈稳定控制理论与技术进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2020(3):429-442. JING Hongwen, MENG Qingbin, ZHU Junfu, et al. Theoretical and technical progress of stability control of broken rock zone of deep roadway surrounding rock [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020(3):429-442.
- [15] 郭进平, 程相琛, 张雯, 等. 某铁矿充填采矿法协同支护充填体稳定性可视化分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2023, 75(3):109-121. GUO Jinping, CHENG Xiangchen, ZHANG Wen, et al. Visual analysis of the stability of the filling body in a certain iron mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(3):109-121.
- [16] 郭志宏, 董方庭. 围岩松动圈与巷道支护[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995(增刊1):111-114. GUO Zhihong, DONG Fangting. Broken rock zone and roadway support [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995 (Suppl. 1):111-114.

(上接第75页)

- [15] 刘玉凤, 曹芳智, 马明, 等. 地下水对伊敏露天矿内排土场边坡稳定的影响[J]. 煤矿安全, 2019(8):246-239. LIU Yufeng, CAO Fangzhi, MA Ming, et al. Influence of groundwater on slope stability of internal dump in Yimin open-pit coal mine and its countermeasures [J]. Safety in Coal Mines, 2019(8):246-239.
- [16] 连续峰, 罗强, 张文生, 等. 基于圆弧-平面组合滑动模式的路基土质边坡浅层稳定分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1):18-24. LIAN Xufeng, LUO Qiang, ZHANG Wensheng, et al. Stability analysis on subgrade soil-slope in accordance with arc-plane composite failure mode [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1):18-24.
- [17] 徐文刚, 余旭荣, 年廷凯, 等. 基于FLAC^{3D}的三维边坡稳定性强度折减法计算效率提高算法及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5):1347-1355. XU Wengang, YU Xurong, NIAN Tingkai, et al. Optimization and application of FLAC^{3D} strength-reduction computation in three-dimension slope stability analysis [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5):1347-1355.
- [18] 姚国强, 言志信, 龙哲, 等. 基于正交设计的锚杆支护参数对土质边坡稳定性影响的研究[J]. 公路, 2019, 64(1):37-45. YAO Guoqiang, YAN Zhixin, LONG Zhe, et al. Research on the influence of anchor support parameters on soil slope stability based on orthogonal design [J]. Highway, 2019, 64(1):37-45.