

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2021.10.015

## 露天矿滑坡应急治理的爆破排险研究

胡斌<sup>1,2</sup>, 杨为<sup>1,2</sup>, 李京<sup>1,2</sup>, 祝鑫<sup>1,2</sup>, 马利遥<sup>1,2</sup>, 崔阿能<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081;

2. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 武汉 430081)

**摘要:**某矿山磨环沟部位由于矿山开采以及降雨等原因发生滑坡,造成运输主干道毁坏,严重影响矿山的正常运营及安全生产。为了尽快恢复矿山生产需对其进行应急治理,而常规治理方案并不适用于此滑坡,因此提出定向抛掷爆破方案。对主滑方向上的典型剖面在五工况下进行稳定性计算,建立爆破方案数值模型并进行计算分析。结果表明:爆破清理后滑坡处于稳定状态,说明此应急爆破排险方案安全有效;当爆堆稳定堆积时,主要堆积于685 m平台上,最远冲击距离为184 m,最大爆堆高度为36 m。研究结果可为类似矿山滑坡提供一种新的应急治理思路和方案。

**关键词:**露天矿滑坡;应急治理;排险方案;数值模拟

中图分类号:TD854.6;TD235

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2021)10-0108-06

## Research on Blasting and Risk Elimination of Emergency Treatment of Open-Pit Landslide

HU Bin<sup>1,2</sup>, YANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Jing<sup>1,2</sup>, ZHU Xin<sup>1,2</sup>, MA Liyao<sup>1,2</sup>, CUI Aneng<sup>1,2</sup>

(1. Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** Due to the disturbance of mining and rainfall, the landslide occurred in a limestone mine in Sichuan province, which caused the destruction of the main road of transportation and seriously affected the normal operation and safe production of mining enterprises. In order to resume mine production as soon as possible, emergency treatment is needed, and the conventional treatment scheme is not suitable for this landslide, so the directional throwing blasting scheme is proposed innovatively to control this landslide. The stability calculation of the typical section in the main sliding direction is carried out under five working conditions, and the numerical model of this blasting scheme is established and calculated and analyzed. The results show that: the current landslide is in a critical state of instability, which is in urgent need of emergency treatment. The landslide is in a stable state after blasting, indicating that this emergency blasting plan is safe and effective. When the muckpile is stably piled up, it is mainly

收稿日期:2021-01-18

基金项目:国家自然科学基金(联合基金)重点项目(U1802243)和面上项目(41672317);湖北省技术创新专项(重大项目)(2017ACA184);武科大重大科技项目培育类创新团队(A类)(2018TDX01)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (Joint Fund) Key Program (U1802243) and General Program (41672317); Hubei Province Technological Innovation Project (Major Program) (2017ACA184); Innovative Team for Major Scientific and Technological Program of Wuhan University of Science and Technology (Type A) (2018TDX01)

作者简介:胡斌(1974—),男,博士,教授,博导,主要研究方向为边坡稳定性论证与动态调控研究。

通信作者:杨为(1995—),男,硕士研究生,研究方向为边坡稳定性论证与动态调控研究。

引用格式:胡斌,杨为,李京,等.露天矿滑坡应急治理的爆破排险研究[J].有色金属工程,2021,11(10):108-113.

HU Bin, YANG Wei, LI Jing, et al. Research on Blasting and Risk Elimination of Emergency Treatment of Open-Pit Landslide[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(10): 108-113.

piled on the 685 m platform, the farthest impact distance is 184 m, and the maximum blast pile height is 36 m. The research results can provide a new emergency treatment idea and plan for similar mine landslides.

**Key words:** open-pit mine landslide; emergency treatment; risk removal plan; numerical simulation

磨环凶新滑坡造成上山公路的毁坏,严重影响矿山的正常运营及安全生产,所以其治理刻不容缓。由于常规滑坡治理方案不适用于磨环凶西侧新滑坡的应急治理。本文通过借鉴建/构筑物定向爆破拆除的思想,提出一种创新方案来对此滑坡进行应急治理,即采用定向抛掷爆破的方案来治理该滑坡。

通过查阅大量文献,关于边坡稳定性、滑坡治理及台阶边坡爆破等前人已做了大量的研究。杜时贵<sup>[1]</sup>结合具体案例对大型露天矿山边坡岩体工程稳定性分级分析,为开展边坡岩体稳定性的精确计算创造了必要的条件;张忠传等<sup>[2]</sup>对降雨入渗及地震作用下边坡稳定性进行了研究;唐志强等<sup>[3]</sup>通过正交试验研究在不同节理参数组合形式下边坡稳定性系数的变化规律;宋子岭等<sup>[4]</sup>研究了露天矿采空区上覆岩石对台阶爆破的影响;谢建兵等<sup>[5]</sup>采用五极纵轴激电测深技术对滑坡进行探测并进行了参数反分析;尤春安等<sup>[6]</sup>研究了山东黄金归来庄金矿露天采场深凹边坡局部破坏的治理;周鹭<sup>[7]</sup>、贾住平等<sup>[8]</sup>

针对不同滑坡案例的治理措施和防治建议等方面进行了研究;余海兵等<sup>[9]</sup>、姚远等<sup>[10]</sup>在石灰石矿山的台阶爆破和爆破特征分析等方面也进行过相关研究。但尚未发现采用定向抛掷爆破拆除矿山滑坡的治理案例,因此采用该方法治理磨环凶新滑坡具有较强的工程实际意义和参考价值。

## 1 研究区工程地质概况

磨环凶新滑坡位于矿区中部罗沟高程 685 m 以上,目前开挖边坡最高高程约 810 m,底部主要为灰岩,且含有软弱夹层,对岩体稳定性有较大影响。由于宜宾地震,加之降雨作用,引起坡脚失稳,685~810 m 各个开挖平台均发生了滑坡,部分磨环凶老滑坡体复活和老滑坡体西侧原地形半个山梁产生了新的滑坡体。滑坡造成矿山上山公路开裂以及回头弯坍塌,如图 1 所示。磨环凶西侧新滑坡高 125 m,底宽约 100 m,顶宽 20 m 左右,厚度 20~50 m 不等,顶部与母岩脱离约 4 m。



图 1 磨环凶新滑坡路面开裂及坍塌情况

Fig. 1 Cracking and collapse of the landslide pavement

## 2 滑坡应急治理方案比选研究

常见的滑坡治理措施有:削坡减载、锚固支

护(锚杆、锚索支护)、支挡工程(挡墙、抗滑桩支护)、防御绕避等。滑坡治理措施优缺点见表 1。

表 1 磨环凶新滑坡应急治理方案比选

Table 1 Comparison and selection of emergency treatment for new landslide in Mohuandang

Governance plan	Suitability advantages and disadvantages
Cutting slope and reducing load	The landslide is in a critically stable state, and it is extremely unsafe and unsuitable to use slope cutting to reduce load. This solution is not suitable for the treatment of the landslide.
Anchor support	The landslide itself is also limestone ore, and the anchoring support cost is high, which is not conducive to subsequent mining, and the sliding body is relatively broken and the anchoring effect is poor. This solution is not suitable for the treatment of the landslide.
Support engineering	The use of supporting projects is costly, which is not conducive to subsequent mining, and the sliding belt is deep and difficult to support. This solution is not suitable for the treatment of the landslide.
Defense around to avoid	Treating the symptoms but not the root cause, the sliding body is located above the mine site, there are hidden safety hazards that are not dealt with, and the mine terrain is not conducive to the construction of the mountain road. This solution is not suitable for the treatment of the landslide.
Emergency blasting plan	The landslide is cleaned thoroughly, economically and quickly, which is conducive to mine operation and capital turnover, and is conducive to the secondary crushing and transportation of landslide ore. This solution is very suitable for the treatment of the landslide.

由表 1 可知,采用常见措施来应急治理该滑坡都存在明显的弊端,定向抛掷爆破排险方案应急治理该滑坡存在如下优点:1)滑坡清理彻底,直接清理至滑坡底滑面,并且清理速度较常规方案快捷迅速,有利于企业迅速恢复生产,减少损失。2)滑坡爆破后会产生大量矿石,有利于企业的资金流转。3)爆破的抛掷作用可以减少矿石的运输成本,也有利于采下矿石的破碎,减小矿石的二次破碎成本。所以此方案相较于传统滑坡治理方案优势明显。

### 3 滑坡稳定性分析论证

#### 3.1 极限平衡法的基本原理

极限平衡法通过分析岩土体在破坏时刻的力的平衡条件来求解安全系数。破坏准则使用莫尔-库仑破坏准则,即:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \varphi = c + (\sigma - u) \tan \varphi \quad (1)$$

式中, $\tau_f$ 为破坏面上的剪应力; $c$ 为岩土体的有效黏聚力; $\sigma$ 和 $\sigma'$ 为破坏面法向上的有效应力和总应力; $\varphi$ 为土的有效内摩擦角。边坡稳定性安全系数为滑动面上岩土体的抗剪强度 $\tau_f$ 与实际产生的剪应力 $\tau$ 之比,即

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (2)$$

#### 3.2 边坡稳定控制标准

采场边坡与人口稠密区或重要工程设施旁的岩石边坡相比,其破坏所造成的损失相对较轻,所以设计时采用的安全系数也应适当降低。依据《非

煤露天矿边坡工程技术规范》(GB51016—2014),边坡危害等级为Ⅱ级,边坡高度 $100 \text{ m} < H \leq 300 \text{ m}$ ,边坡工程安全等级为Ⅱ级。因此,磨环凶滑坡稳定性分析的安全系数取值分别为 1.15(自然工况)、1.13(暴雨工况)、1.08(爆破工况)、1.10(地震工况)、1.05(暴雨+地震工况)。

#### 3.3 模型建立及参数选择

为全面了解磨环凶西侧新滑坡的稳定性,本文着重研究磨环凶新滑坡中部轴面典型剖面的稳定性。根据工程地质资料和现场调查的裂缝分布区域,考虑磨环凶岩体对高压线塔稳定性的影响范围,为消除边界效应影响,建立计算模型见图 2。岩体力学参数见表 2。

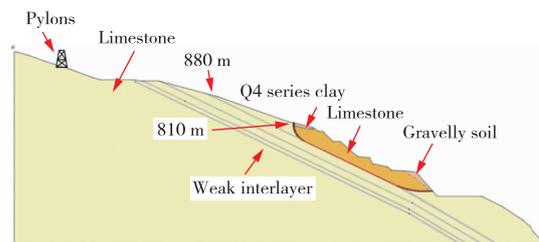


图 2 磨环凶新滑坡体典型剖面计算模型图

Fig. 2 Typical section calculation model diagram of the landslide

针对当前滑坡体,拟定了如下 4 种计算工况:

- 1) 正常工况,不考虑降雨影响。
- 2) 降雨工况,考虑降雨对岩土体力学参数的弱化作用。

表 2 磨环凶新滑坡岩体物理力学参数

Table 2 Physical mechanics parameters of the landslide

Rock property		C/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/GPa	$\sigma_r$ /MPa	$\mu$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
Weak interlayer	Saturated state	0.010	22.00	0.67	0.008	0.30	2.020
	Natural state	0.040	29.00	1.00	0.020	0.28	1.920
Limestone		1.030	31.01	1.50	1.200	0.24	2.680
Q4 series clay	Saturated state	0.015	16.00	0.04	0	0.37	1.85
	Natural state	0.017	18.00	0.05	0	0.35	1.28

3) 爆破工况, 计算中最大一段起爆药量为 338 kg, 爆破区至边坡平均距离取 125 m, 爆破振动频率取 30 Hz, 爆破水平向最大加速度计算值为 0.3 g, 爆破动力系数取 0.25。

4) 地震工况, 计算中水平向加速度取为 0.1 g, 地震分布系数取 0.25。

### 3.4 滑坡体稳定性计算及分析

磨环凶西侧新滑坡主要以灰岩层间软弱结构面为底滑面, 后缘剪断覆盖层碎石土产生滑动破坏, 属圆弧滑动破坏。前缘存在大量第四系黏土层, 也属圆弧滑动破坏。以滑坡堆积体前缘 685 m 平台作

为剪出口, 针对上述变形体的潜在失稳模式, 采用二维极限平衡分析方法中的不平衡推力法 Morgenstern-Price 法计算其稳定性安全系数, 计算结果如表 3、4 所示。

由计算结果可知, 正常工况、地震工况下, 安全系数大于标定值, 边坡处于稳定状态; 暴雨工况、暴雨+地震工况下, 安全系数小于标定值, 边坡处于失稳状态, 所以现状滑坡随时都有可能由于当地降雨量和地震等因素的变化而发生边坡的二次失稳。爆破清理后边坡在五种工况下安全系数均大于标定值, 处于稳定状态。因此, 此应急爆破治理方案安全有效。

表 3 不平衡推力法磨环凶西侧新滑坡各工况安全系数

Table 3 Safety factor of the landslide under various working conditions calculated by unbalanced thrust method

Landslide state	Normal condition	Working condition of rainfall	Working condition of blasting	Working condition of earthquake	Working condition of rainfall and earthquake
Landslide situation	1.503	1.001	/	1.410	0.938
Landslide after blasting and clearing	2.442	2.011	2.081	2.309	1.905

表 4 Morgenstern-Price 法磨环凶西侧新滑坡各工况安全系数

Table 4 Safety factor of each working condition of the landslide calculated by Morgenstern-Price method

Landslide state	Normal condition	Working condition of rainfall	Working condition of blasting	Working condition of earthquake	Working condition of rainfall and earthquake
Landslide situation	1.498	0.996	/	1.409	0.937
Landslide after blasting and clearing	2.376	1.931	2.025	2.248	1.830

## 4 滑坡应急爆破数值模拟

### 4.1 模型的建立

模型的建立主要是依据现场调查测绘磨环凶滑坡的地形地貌特征、地层岩性和结构特征等, 并根据工程地质平面图山脊走向将其恢复到原始地貌形态和相应的岩体结构特征, 以此进行三维动态数值模拟, 重现其变形—破坏—运动—堆积全过程。

在离散元程序的计算过程中, 在对斜坡体之类的半无限体进行模拟时, 天然静力状态分析采

用的固定边界或弹性边界, 在动力分析中将使向外传播的地震波反射回模型内部。因而在使用 3DEC 离散元模拟时, 必须采用非反射黏性边界和自由场边界加以约束, 模型底部入射地震波部位采用黏滞边界, 两侧非地震入射部位采用自由场边界约束。动力分析必须建立在静力分析的基础上, 只有在静力分析达到平衡后, 才能施加相应的动力分析边界条件进行动力分析。静力分析边界条件采用底部垂直方向约束, 两侧水平方向约束。此爆破方案爆破范围的最高标高为 810 m, 最低标高 740 m。模型如图 3、4 所示。

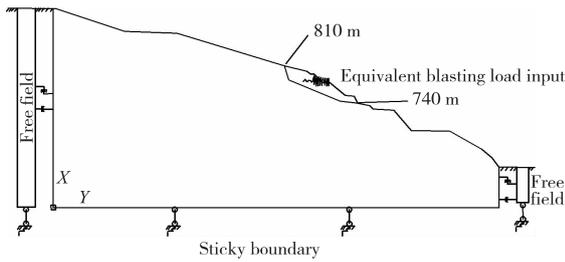


图 3 模型的边界条件

Fig. 3 Boundary conditions of the model

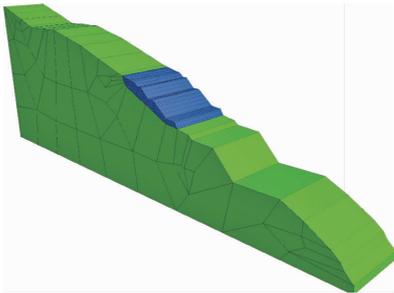


图 4 计算模型

Fig. 4 Calculation model

在数值模拟中,采用简化的爆破动力荷载,以应力波的形式输入到边坡模型中。在数值计算中,将爆破荷载分为法向应力荷载(压缩波) $\sigma_n$ 和切向应力荷载(剪切波) $\sigma_s$ 。

具体的形式为如下的正弦波:

$$\sigma_n = A \times \sin(2.0\pi \times F_{rep} \times t) \quad (3)$$

$$\sigma_s = B \times \sin(2.0\pi \times F_{rep} \times t) \quad (4)$$

式中,振幅系数  $A$  和  $B$  根据现阶段边坡的变形监测、锚索应力监测和前期工程经验积累进行反馈分析获得。此处  $A$  取 1.0,  $B$  取 2.0;  $F_{rep}$  代表地震波的脉冲重复频率,与波谱线的周期  $T$  成反比,即:  $F_{rep} = 1/T$ ;  $t$  为时间, s。

一般情况下,边坡爆破开挖的频率范围可根据现场实测波形确定或按如下数据选取:露天深孔爆破  $f = 10 \sim 60$  Hz,此处应力波的主频率取 50 Hz。对于爆破持续时间,结合相关经验并通过大量试算后将主波段的持续时间取 0.15 s。

在离散元数值模拟过程中,由于滑体单元本身的变形大小相对于运动距离而言可忽略不计,因此滑体采用刚体本构模型。岩体和结构面的物理力学参数很大程度上影响了岩质斜坡的变形破坏模式和各个物理量的变化,如位移、速度、加速度等。数值模拟岩体参数如表 2 所示。

#### 4.2 数值模拟结果分析

根据爆破滑体在不同时刻的运动特征,可以将其运动过程分为启动破坏阶段、剧烈加速启动阶段、整体溃屈、加速滑动阶段、滑体遇坡解体阶段、遇阻减速阶段、稳定堆积阶段,爆破滑坡全过程见图 5。

数值模拟结果如图 6、7 所示,当爆堆稳定堆积时,主要堆积于 685 m 平台上,最远冲击距离为 184 m,最大爆堆高度为 36 m。

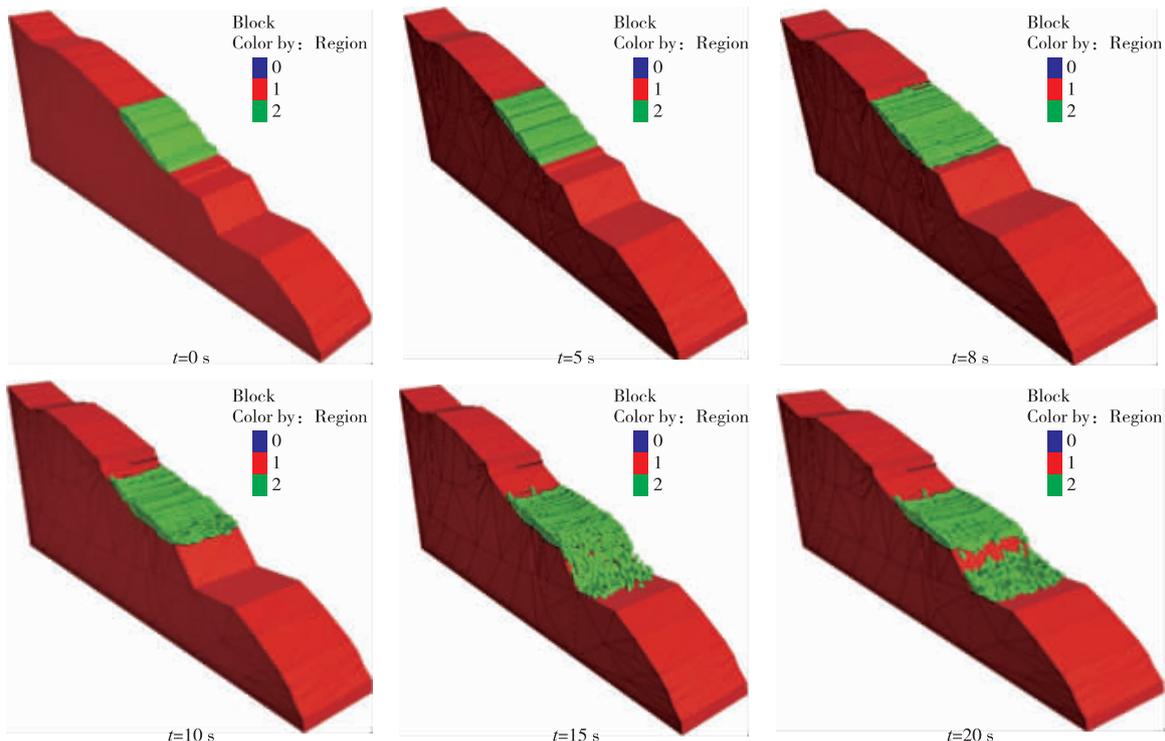


图 5 不同时刻滑坡爆破情况

Fig. 5 The landslide blasting situation at different times

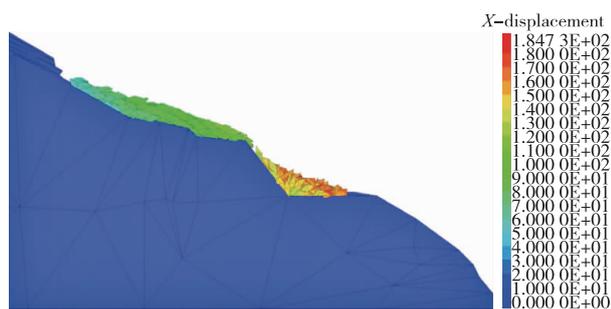


图 6 爆堆稳定堆积时水平方向的位移情况

Fig. 6 Displacement in the horizontal direction when the blasting accumulation is stably piled up

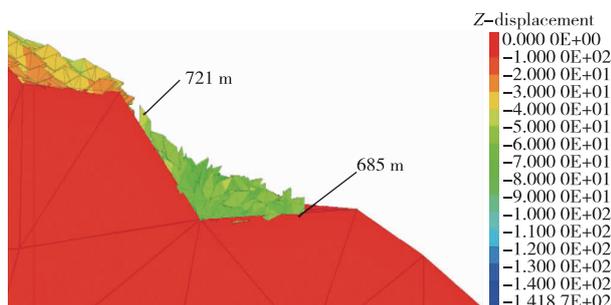


图 7 爆堆稳定堆积时竖直方向的位移情况

Fig. 7 Displacement in the vertical direction when the blasting accumulation is stably piled up

## 5 结论

1) 传统治理方法并不适用于磨环凶新滑坡的应急治理。因此提出一种对于矿山滑坡来说较为少见的抛掷爆破方案。

2) 由稳定性分析可知磨环凶新滑坡处于临界失稳状态, 因此急需应急治理; 爆破清理后边坡在五种工况下均处于稳定状态, 所以此应急爆破治理方案安全有效; 爆破清理后整体边坡也处于稳定状态, 不会影响矿山的后续开采。

3) 数值模拟结果显示, 当爆堆稳定堆积时, 主要堆积于 685 m 平台上, 最远冲击距离为 184 m, 最大爆堆高度为 36 m。

## 参考文献:

- [1] 杜时贵. 大型露天矿山边坡稳定性等精度评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1301-1331. DU Shigui. Method of equal accuracy assessment for the stability analysis of large open-pit mine slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1301-1331.
- [2] 张忠传, 何宇翔, 杨溢, 等. 降雨入渗及地震作用下边坡稳定性研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(12): 122-127. ZHANG Zhongchuan, HE Yuxiang, YANG Yi, et al. Study on slope stability under rainfall infiltration and earthquake[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(12): 122-127.
- [3] 康志强, 李蕾, 张亚男. 基于随机块体理论的矿山边坡稳定性数值分析[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(6): 30-34. KANG Zhiqiang, LI Lei, ZHANG Yanan. Numerical analysis of mine slope stability based on random block theory[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(6): 30-34.
- [4] 宋子岭, 杨星辰, 范军富, 等. 露天矿采空区爆破合理孔底堵塞长度与起爆位置确定[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5): 1828-1832. SONG Ziling, YANG Xingchen, FAN Junfu, et al. Determination of the rational stemming length under the blast-hole and the detonating points of the open-pit mining blasts over the goaf[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1828-1832.
- [5] 谢建兵, 邹平, 李爱兵, 等. 某露天矿滑坡探测及抗剪强度参数反分析[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(8): 47-50. XIE Jianbing, ZOU Ping, LI Aibing, et al. Landslide detection and back analysis of shear strength parameters in an open-pit mine[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(8): 47-50.
- [6] 尤春安, 杜文. 山东黄金归来庄金矿露天采场深凹边坡局部破坏的治理[J]. 有色金属工程, 2015, 5(3): 91-95. YOU Chun'an, DU Wen. Local failure treatment of deep open-pit rock slope in Guilaizhuang mine of Shandong Gold Group Co., Ltd. [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015, 5(3): 91-95.
- [7] 周鹭. 露天矿边坡大型滑坡地质的综合治理措施[J]. 世界有色金属, 2018(22): 110-112. ZHOU Lu. Comprehensive treatment measures for large-scale landslide geology of open pit slope [J]. World Nonferrous Metals, 2018(22): 110-112.
- [8] 贾任平, 郑禄璟, 郑禄林. 露天边坡大型滑坡稳定性分析与治理方案[J]. 金属矿山, 2014, 43(5): 27-31. JIA Zhuping, ZHENG Lujing, ZHENG Lulin. Stability analysis and treatment scheme of large-scale landslide of open pit slope[J]. Metal Mine, 2014, 43(5): 27-31.
- [9] 余海兵, 胡斌, 冉秀峰, 等. 峨眉黄山石灰石矿台阶边坡爆破振速安全阈值研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(14): 125-129. YU Haibing, HU Bin, RAN Xiufeng, et al. Safety threshold of blasting vibration velocity on the slope of Ermei mount Huangshan limestone stairs[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(14): 125-129.
- [10] 姚远, 简文星, 黄冠, 等. 石灰石矿山台阶边坡爆破振速安全阈值研究[J]. 矿冶, 2018, 27(4): 30-35. YAO Yuan, JIAN Wenxing, HUANG Guan, et al. Study on the safety threshold of blasting vibration velocity of bench slope[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(4): 30-35.