

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.12

基于非连续单元法的露天矿轮斗剥离台阶片帮灾害分析

马明¹, 李娟², 任鹏³, 刘玉凤³

(1. 北京中矿信实煤炭科学技术研究院, 北京 100083; 2. 61206 部队, 北京 100042;
3. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 针对某露天煤矿轮斗剥离台阶片帮情况, 对剥离台阶岩土体进行了物理力学试验, 基于有限差分方法, 从边坡内部应力应变特征及塑性区扩展情况开展了单台阶片落体失稳机理分析, 基于改进的结构面软化模型, 采用连续-非连续单元方法(CDEM)对片落体滑塌及堆积的全过程进行了数值模拟分析, 对片落体的运动轨迹及堆积情况进行了模拟分析, 结合现场地质环境特征, 分析了单台阶片帮的触发因素, 结论表明, 改进的结构面软化模型可作为地质体的渐进破坏的判据, 真实还原片落体垮塌全过程; 采用连续-非连续单元方法可模拟材料由连续体到非连续体的渐进破坏过程, 实现大变形滑坡的灾变全过程分析, 研究成果可为类似工况的边坡的评价及治理提供参考。

关键词: 连续-非连续单元方法; 片帮; 数值模拟; 结构面软化模型

中图分类号: U213.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0075-06

Analysis on the disasters of stripping step spalling by wheel bucket in open-pit mine based on non-continuous element method

MA Ming¹, LI Juan², REN Peng³, LIU Yufeng³

(1. Beijing Reliance Coal Research Institute, Beijing 100083, China; 2. Troops 61206, Beijing 100042, China;
3. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: A physico-mechanical test on stripping step rock and soil was carried out aiming at the stripping step spalling by wheel bucket in open-pit mine. Then, the instability mechanism of single step falling body was analyzed according to the stress-strain characteristics in slope and the expansion of plastic zone through a finite difference method. Based on an improved softening model of structural plane, the whole process of slip collapse and accumulation was simulated and analyzed by a continuous-discontinuous element method (CDEM). Moreover, the motion track and accumulation of the falling body were simulated and analyzed. Combining with the characteristics of geological environment in situ, the trigger factors of single step spalling were analyzed. The results show that the improved structural softening model can be used as a criterion of the progressive failure of the geological body, which can truly restore the whole collapse process of the falling body. The continuous-discontinuous element method can be used to simulate the progressive failure process of materials from continuum to discontinuity, and to realize the whole catastrophic process analysis of large deformation landslides. This study will provide reference for the evaluation and treatment of slopes under

收稿日期: 2018-10-28; 修订日期: 2019-01-15

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目; 露天矿边帮煤开采边坡岩体破坏的动力学过程与稳定控制方法研究(2018-TD-QN005)

第一作者: 马明(1985-), 男, 湖北荆州人, 地质环境与工程专业, 硕士, 副研究员, 主要从事露天采矿方面的研究工作。E-mail: maming1318@sina.com

similar working conditions.

Keywords: continuous-discontinuous element method; spalling; numerical simulation; structural softening model

0 引言

露天矿剥离工艺的选择是露天矿设计的核心任务之一,也是露天采矿最重要的决策^[1]。剥离工艺不但决定了开拓运输方式、开采程序、总体布局,而且决定了露天矿投资回收及经济效益。国内常用的剥离工艺有常规剥离和陡帮剥离^[2],剥离过程中整体及局部边坡的稳定是剥离工作安全高效开展的最主要制约因素^[3-4];国内大量学者对此开展了相关研究:赵志峰等^[5]提出了边坡的失稳风险应通过由整体安全系数和局部安全系数组成的区间来衡量;孙世国等^[6]采用基于临界滑移场的方法进行整体边坡稳定性分析;辛保泉等^[7]提出了边坡稳定分级标准,在此基础上预测了临界安全系数值对应的整体及局部边坡角。

然而,露天矿在开拓过程中单台阶的片帮情况却往往被工作人员所忽略^[8],从而引发事故。片帮的危害主要有以下三个方面:(1)威胁露天矿工作人员和设备的安全;(2)发生片帮之后,影响台阶下部的正常作业,进而影响生产进度;(3)影响台阶上部的爆破作业效率。

内蒙古某露天矿山采用轮斗进行剥离,在生产过程中,剥离台阶发生了片帮,片落体将下方作业的工作人员冲撞至轮斗维护工具房而造成了人员伤亡。针对该矿发生片帮的区域,采用现场勘测、实验与数值模拟相结合的方法探究坡体片落的原因,还原剥离台阶片落过程,合理制定轮斗剥离台阶下方安全距离,保障矿山安全、高效生产。

1 结构面软化模型

基于连续介质力学的离散元方法主要用于模拟地质体的渐进破坏过程。该方法将有限元及离散元进行耦合,在块体内部进行有限元计算,在块体边界进行离散元计算,通过边界处法向弹簧及切向弹簧的断裂,实现块体的破裂滑移。

传统的连续-非连续模型假定模型界面是脆断性的,当界面弹簧达到极限强度时,界面弹簧的内聚力和抗拉强度均被归零,如式(1)所示,式中, F_n^j 、 F_s^j 分别为弹簧 j 的法向力、切向力, C 为内聚力, T 为抗拉强度。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(1) 拉破坏:} \\ \text{若 } -F_n^j \geq T, (F_n^j - \text{拉为负}), \\ \text{则 } F_n^j = F_s^j = 0, C = 0, T = 0. \\ \text{(2) 剪破坏:} \\ \text{若 } F_s^j \geq F_n^j \times \tan \varphi + C \\ \text{则 } F_s^j = F_n^j \times \tan \varphi + C, C = 0, T = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

由于脆断模型假设断裂是瞬时发生的,因此采用该模型直接计算时,在某种程度上夸大了破坏效果。同时,因为内聚力和抗拉强度会强行置零,将导致计算的弹簧力存在数值上的跳跃,也导致了数值模拟存在一定的不合理性。

冯春等^[9]从材料的宏观力学响应出发,在界面上引入结构面软化模型,将结构面弹簧的内聚力及抗拉强度与结构面弹簧的塑性应变建立联系。假定当结构面拉伸塑性应变从0%变化到1%,剪切塑性应变从0%变化到3%,结构面弹簧的抗拉强度及黏聚力由初始强度线性衰减至0,具体如式(2)所示。其中, t_0 表示本时刻, t_1 表示下一时刻, T_0 、 C_0 分别表示初始时刻的抗拉强度及内聚力, ε_{tp} 为塑性拉伸应变, ε_{cp} 为塑性剪切应变。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(1) 拉破坏:} \\ \text{若 } -F_n^j \geq T_{t0}, (F_n^j - \text{拉为负}), \\ \text{则 } F_n^j = -T_{t1}, T_{t1} = -\frac{T_{t0}}{1\%} \times \varepsilon_{tp} + T_0 \\ \text{(2) 剪破坏:} \\ \text{若 } F_s^j \geq F_n^j \times \tan \varphi + C_{t0} \\ \text{则 } F_s^j = F_n^j \times \tan \varphi + C_{t1}, C_{t1} = -\frac{C_0}{3\%} \times \varepsilon_{cp} + C_0 \end{array} \right. \quad (2)$$

ε_{tp} 和 ε_{cp} 可由(3)、(4)式求得。

$$\varepsilon_{tp} = \frac{d_n^j - T_{t0}/K_n^j}{L^j}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cp} = \frac{d_s^j - (F_n^j \times \tan \varphi + C_{t0})/K_s^j}{L^j}, \quad (4)$$

式中: d_n^j 、 d_s^j ——弹簧 j 的法向总位移及切向总位移;
 K_n^j 、 K_s^j ——弹簧 j 的法向刚度及切向刚度;
 L^j ——弹簧 j 的特征长度,也即结构面的特征厚度。

2 工程地质条件

内蒙古某矿矿区地层从上到下可分为第四系、第三系上新统、白垩系下统、侏罗系上统。其中含煤系地层为侏罗系上统元宝山含煤组和杏园组上部含煤段。露天开采境界内共含有 12 个煤层,即 3、4、5~2、5、6~2、6、7、8、9、10、11、12 煤层,其中 5、6 两个煤层是本区的主要煤层,7 煤以上煤层为露天开采。

该矿轮斗剥离主要对象为第四系土层,主要为砂砾、亚砂土、亚黏土等,片落区位于 1#轮斗平盘端工作面与侧工作面链接位置,标高为 448 m,台阶坡底线距工具箱距离为 16.8 m。现场勘查写实滑落体长约 13.6 m,高约 6.7 m(图 1)。片帮台阶平盘粉砂、细砂、砂砾石全区发育,剥离单台阶边坡稳定性较好,但在事故发生位置有局部黏土出露,长度约 30~35 m,埋深约 3 m,黏土层厚度约 0.5~0.9 m,其含水率高,强度低,局部位置仍有水渗出,本次片落体积约 90.25 m^3 。

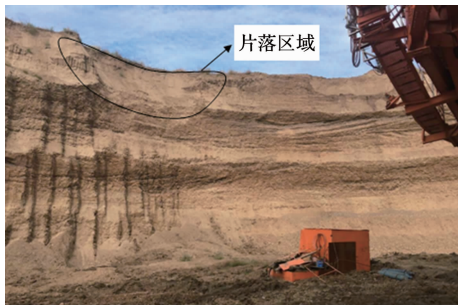


图 1 事故现场及片帮范围照片
Fig.1 Photo of the accident scene and spalling area

3 片落体破坏机理分析

根据 1#轮斗平盘端工作面工程地质模型,本次选取 0 线剖面进行数值分析;本次模型中各种材料均采用摩尔—库伦模型来描述。计算模型沿边坡坡面倾向长度为 32 m,边坡垂直最高高度为 19.5 m,所建模型如图 2 所示。计算所用参数如表 1 所示。

表 1 岩土物理力学参数值

Table 1 Geophysical and mechanical parameters

岩性	密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	内聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
粉土	1.57	27	28
黏土	1.768	3.9	4.25
砂砾	2.156	0	47.4

边坡的位移矢量分布见图 3,边坡的位移矢量几乎沿黏土层以上坡面发育,同时,黏土受持续降雨影

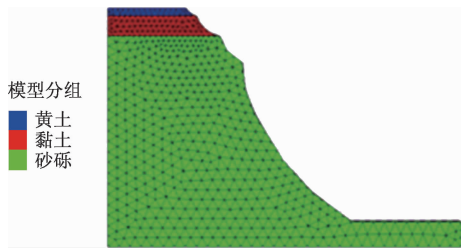


图 2 0 线剖面计算模型
Fig.2 Numerical model of Line0 profile

响,强度急剧弱化,计算模型达到平衡时,边坡变形量巨大,反应了坡体上方出现垮落的情况,结合剪应变率特征(图 4),边坡在坡体内部黏土层出现了明显的应力集中,说明坡体变形主要是黏土层受挤压破坏引发上部黄土整体片落。

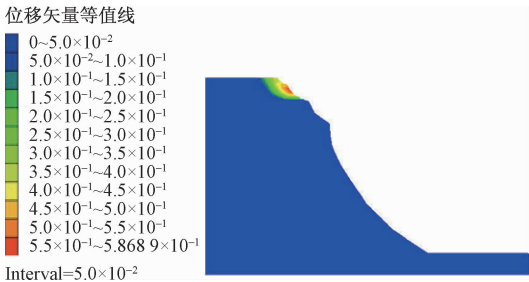


图 3 位移速率矢量图
Fig.3 Displacement rate vector diagram

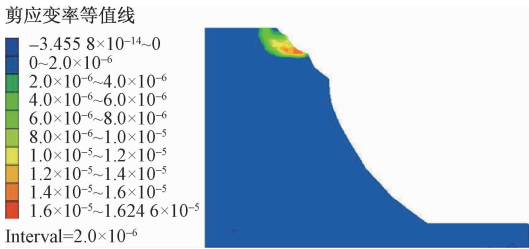


图 4 0 线剖面剪应变率云图
Fig.4 Cloud diagram of the shear strain rate of Line 0 profile

图 5 为 0 线剖面的屈服区域分布图。从剪切塑性屈服区域的分布可以看出,黏土弱层由于强度极低,该层呈剪破坏形式,上部黄土由于下部失去支撑,呈拉张

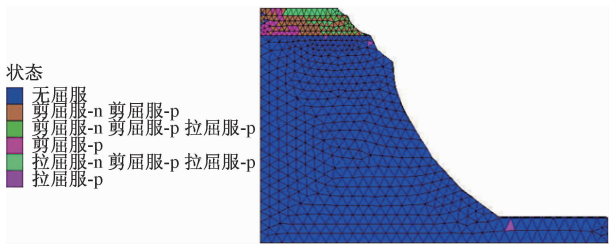


图 5 0 线剖面塑性区图
Fig.5 Section plastic zone diagram of Line 0 profile

破坏形式,其余位置坡体内几乎无塑性区,现状整体边坡处于稳定状态,黏土层上部区域发生了片落。

4 片落过程数值模拟

为了精确分析剥离台阶片落体的失稳、运动及堆积过程,本次采用连续-非连续数值模拟方法(CDEM)进行滑塌体下落过程及堆积过程的模拟^[10]。建立全三维数值模型,采用块体离散元模块定性模拟滑塌体的失稳、滑落及堆积过程;建立二维剖面模型,采用颗粒离散元模块定量分析滑塌体的下落速度、运移距离及堆积厚度等。该方法采用连续-非连续单元方法可以实现模拟材料由连续体到非连续体的渐进破坏过程,弥补了传统连续介质或非连续介质模拟单一计算原理的不足。

4.1 片落体下落堆积过程的三维模拟

以片落前工作帮的地形等高线及滑塌后滑床的外形轮廓线为基础,建立如图6所示的三维数值模型。

考虑到计算耗时,仅对滑塌体所在区域进行离散,该区域共剖分四面体单元7310个。数值模型中的其他区域采用刚性面单元提供支撑。

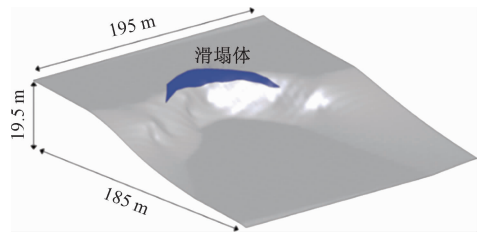


图6 数值模型

Fig.6 Numerical model

滑塌体采用 Mohr-Coulomb 模型及最大拉应力模型进行描述,并采用一组概化的材料参数表征滑塌体内包含的黄土、黏土及砂砾材料的等效性质。等效参数见表1。

不同时刻滑塌体的滑落过程如图7所示。由图7可得,当滑塌时间为0.94 s时,滑塌体已经从剪出口剪出,滑体呈抛物状向底部台阶运动。当滑塌时间为3.94 s时,滑塌体前缘已经运移至台阶边坡坡脚处,同时大量后续滑塌体倾泻而下。当滑塌时间为9.94 s时,滑塌体前缘基本停止向前运动,前缘处于稳定状态。当滑塌时间超过31.94 s后,整个滑塌体处于稳定状态。

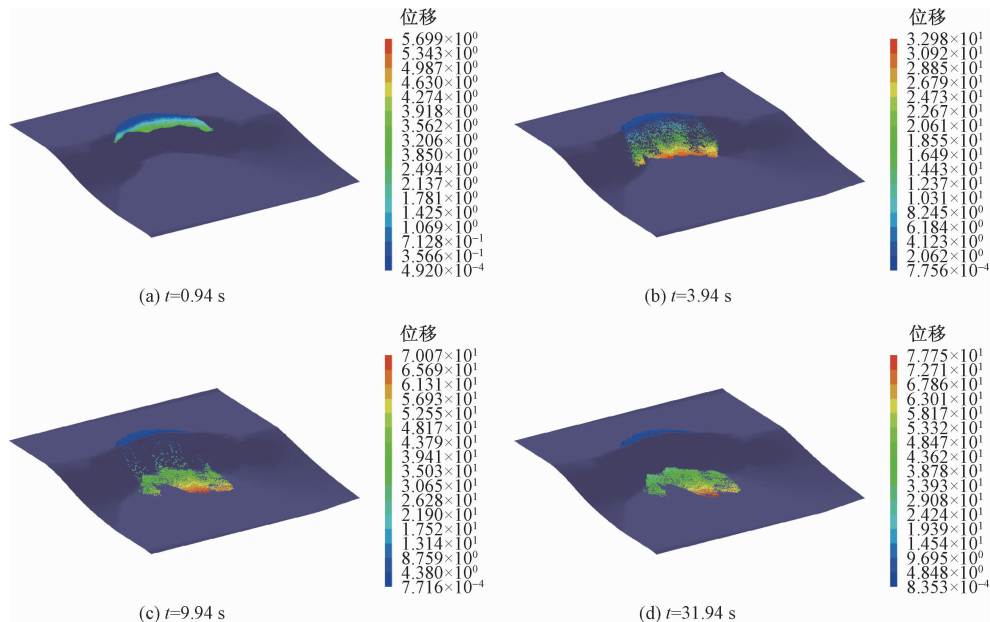


图7 不同时刻总位移云图

Fig.7 Total displacement cloud map at different times

4.2 滑塌体堆积厚度及滑移速度分析

基于0线剖面,建立如图8所示的二维数值模型。

考虑到计算耗时及台阶中下部处于稳定状态,仅对台阶中上部的黄土、黏土及砂砾局部区域进行颗粒离散,该区域共填充颗粒56952个,颗粒半径为1.2~

2.6 cm。台阶中下部区域及底部平台处,则采用刚性线单元提供支撑。颗粒之间、颗粒与刚性面之间的接触本构采用 Mohr-Coulomb 模型及最大拉应力模型。

数值计算共包含两个阶段,第一阶段为弹性应力场求解阶段,该阶段仅使用弹性参数进行分析,采用局

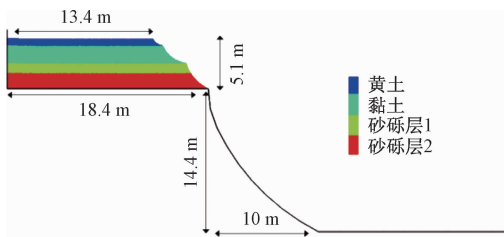


图 8 二维数值模型

Fig. 8 Two-dimensional numerical model

部阻尼进行弹性收敛,局部阻尼系数取值为 0.8;第二阶段为失稳堆积求解阶段,该阶段引入破坏准则,采用黏性阻尼进行能量耗散,临界阻尼比取值为 0.2。在上述两个计算阶段中,计算时步均取 0.2 ms。

数值计算完毕后,对底部平台的堆积体尺寸进行统计(图 9),可得堆积体呈左高右低的斜坡状。堆积体长度为 23.7 m,左侧高度为 0.9 m,斜坡角度为 2.2°,与现场实测结论十分吻合,说明了模型及计算方法的可靠性。

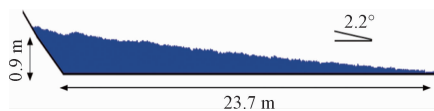


图 9 底部平台的堆积体形状

Fig. 9 Shape of the accumulation body on the bottom platform

在数值模型中的典型位置设置边长为 1 m 的 5 个矩形观察窗口(图 10),对进入观察窗口内颗粒的合速度平均值进行统计分析。矩形观察窗口的位置分别位于剪出口、倾泻口、坡底线附近、距坡底线 8.4 m 处、距坡底线 16.8 m 处(工具箱处),5 个观察窗的编号依次为 P1 ~ P5。

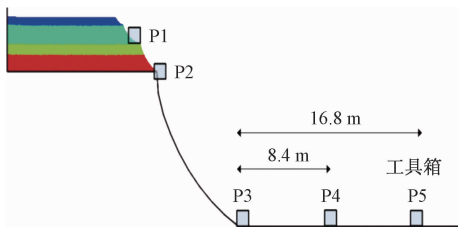


图 10 矩形观察窗的位置

Fig. 10 Position of the rectangular viewing window

由于工具箱距离坡脚距离为 16.8 m,片落体落下后泥石流状的浅层堆积体将工作人员冲击后撞上工具箱导致了事故的发生,结合数值模拟计算结果,建议将工具箱与坡脚的安全距离调整至 24 m。

5 个观察窗所获得的合速度时间曲线如图 11 所示。

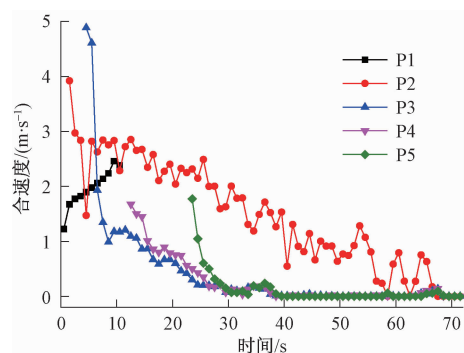


图 11 不同区域的速度时程曲线

Fig. 11 Velocity-history curves in different regions

P1 窗口(剪出口)的合速度随着时间的增加逐渐增大,当时间为 10 s 左右时,达到最大值,约为 2.46 m/s,之后再无滑体通过 P1 窗口;

P2 窗口(倾泻口)的合速度随着时间的增加基本呈震荡线性减小状态,1.5 s 时的合速度最大,约为 3.92 m/s;

P3 窗口(坡底线附近)的合速度呈指数衰减趋势,4.5 s 时首批颗粒进入该区域,此时的速度为 4.89 m/s;

P4 窗口及 P5 窗口(工具箱处)处观察到的最大合速度也基本呈指数减小趋势,两个窗口观察到的最大合速度基本一致,约为 1.6 ~ 1.8 m/s;其中,滑体首次进入 P4 窗口的时间为 12.5 s,滑体首次进入 P5 窗口的时间为 23.5 s。68.5 s 以后,5 个窗口中的颗粒均处于稳定状态。

不同区域中观察到的最大速度如表 2 所示。

表 2 不同区域中的最大合速度

Table 2 Maximum speed in different areas

区域	P1	P2	P3	P4	P5
最大合速度/(m·s ⁻¹)	2.46	3.92	4.89	1.67	1.77

由速度监测曲线可知,随着与坡脚距离的增加,片落体落下后速度逐步降低,但片落体下落过程中初始速度最小也可达 1.67 m/s,一旦下方有人员设备经过,片落体的瞬间冲击也可能造成人员及设备损伤,因此,生产过程中该区域应作为隔离区域,严禁人员设备进入。

5 片落灾害原因综合分析

(1)片落发生位置局部有黏土层发育,事故发生前半月,该区出现持续降雨,雨水通过第四系粉砂层浸入土层,因黏土层为相对隔水层,雨水在其上部汇集无法排出,同时黏土层在雨水长期浸泡下达到过饱和状

态,导致强度急剧降低,且降雨使弱层上覆的粉砂层亦呈过饱和状态,滑体重量增加,边坡开挖卸荷后,在应力调整作用下发生了沿弱层的片落;

(2)由于黏土层含水呈过饱和状态,导致片落的物料呈流动状,在惯性力作用下向临空面方向冲击流动,波及范围瞬间扩大,同时恰逢工人经过该处,最终导致了受伤事件的发生,具有一定的偶然性。

6 结论

(1)采用数值计算的手段对片落物料的破坏模式进行了分析,结论表明,由于黏土强度极低,发生了蠕变,黏土上覆黄土层由于下部支撑减弱,最终发生了片落事件;

(2)采用连续-非连续数值模拟方法对边坡片落物的波及范围进行了论证,结论表明,由于黏土层含水呈过饱和状态,导致片落的物料呈泥石流状,具有一定的冲击动能,片落物冲击至地面后,瞬间扩散,在地面摩擦力的反作用下,形成了一定范围的冲击覆盖层;

(3)片落发生原因为局部位置黏土发育加上持续降雨所致,事件发生具偶然性,属于局部不良地质条件在持续降水作用下引发的突发性地质灾害事件,建议在后续剥离过程中发现不良地层时,适当加大工具房与坡底位置之间的安全距离,安全距离宜不小于 24 m。

参考文献:

- [1] 安振华,罗科,崔文斌. 露天矿推土机剥离排土工艺与单斗一卡车工艺对比分析[J]. 煤炭工程, 2012,44(12):58-60.
AN Zhenhua, LUO Ke, CUI Wenbin. The comparison analysis of bulldozer stripping and discharging technology single bucket-truck process of open-pit mine[J]. Coal Engineering, 2012,44(12):58-60.
- [2] 常永刚,赵俊,姚国栋,等. 基于层次分析法的东露天矿剥离工艺选择及应用[J]. 煤炭工程,2013,45(11):4-6.
CHANG Yonggang, ZHAO Jun, YAO Guodong, et al. Stripping process selection and application based on analytic hierarchy of East open-pit mine[J]. Coal Engineering, 2013, 45 (11):4-6.
- [3] 左登兰,侯生贵. 露天矿台阶高度对边坡稳定及剥离费用的影响[J]. 中国矿业,2000,9(1):38-40.
ZUO Denglan, HOU Shenggui. Influence of open pit mine height on slope stability and stripping cost[J]. China Mining Magazine, 2000, 9 (1):38-40.
- [4] 周游. 两矿之间散体边坡二次剥离及角度优化研究[J]. 中国煤炭, 2018,44(6):56-59.
ZHOU You. Research on secondary stripping and angle optimization of bulk slope between mine[J]. China Coal, 2018,44(6):56-59.
- [5] 赵志峰,陈育民. 边坡整体和局部失稳的风险研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(2):121-124.
ZHAO Zhifeng, CHEN Yumin. Study on risk of entire and partial of slope failure[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2009, 33 (2):121-124.
- [6] 孙世国,王明月,缪静芳. 基于临界滑移场技术的露天矿边坡稳定性分析[J]. 中国矿业,2014,23(2):92-95.
SUN Shiguo, WANG Mingyue, MIU Jingfang. Slope stability of open-pit mine based on critical sliding field technology[J]. China Mining Magazine, 2014, 23 (2):92-95.
- [7] 辛保泉,谭钦文. 局部高陡边坡对排土场整体稳定性的响应规律[J]. 矿业研究与开发,2016,36(9):41-45.
XIN Baoquan, TAN Qinwen. Response of locally high and steep slope on overall stability of waste dump[J]. Mining Research and Development, 2016, 36 (9):41-45.
- [8] 杨宏,才庆祥,张天文,等. 布沼坝露天煤矿剥离工艺优化选择[J]. 中国矿业,2010,19(5):61-63.
YANG Hong, CAI Qingxiang, ZHANG Tianwen, et al. Study on optimization selection of the stripping technology in Buzhaoba surface coal mine[J]. China Mining Magazine, 2010, 19 (5):61-63.
- [9] 冯春,李世海,王杰. 基于 CDEM 的顺层边坡地震稳定性分析方法研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(4):717-724.
FENG Chun, LI Shihai, WANG Jie. Stability analysis method for bedding rock slopes under seismic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(4):717-724.
- [10] 李世海,周东,刘天苹. 基于破裂度的堆积层滑坡危险性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3909-3917.
LI Shihai, ZHOU Dong, LIU Tianping. Risk analysis method of accumulated landslide based on fracture degree[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(S2):3909-3917.