

某露天矿平硐溜井井壁初始碰撞位置理论计算

赵 昀¹ 叶海旺^{1,2} 雷 涛^{1,2} 李 宁^{1,2} 王其洲^{1,2} 龙 梅³

(1.武汉理工大学资源与环境工程学院 湖北 武汉 430070; 2.矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3.武汉理工大学图书馆 湖北 武汉 430070)

摘 要 露天矿山平硐溜井运输系统中,矿石在溜井壁上的初始碰撞破坏较大,确定矿石的初始碰撞位置对于井壁的防护具有重要意义。根据运动学理论,建立矿石运动模型,以某露天矿为例,分析碰撞恢复系数、滑移滚动摩擦系数和临界系数对初始碰撞位置的影响,基于伪随机算法,确定初始碰撞位置的范围。结果表明:随着法向恢复系数、滚动滑移摩擦系数增大,切向恢复系数、临界系数减小,初始碰撞位置距井口的距离变大,滚动滑移摩擦系数是影响初始碰撞位置的主要因素;运动状态的改变对于初始碰撞位置的影响较小;碰撞范围内初始碰撞位置的分布符合指数分布,距离井口6~9 m范围内的井壁需要重点防护。

关键词 初始碰撞位置 碰撞恢复系数 滑移滚动摩擦系数 临界系数

中图分类号 TD57 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2017)-05-019-05

Theoretical Calculation of Initial Collision Position on Shaft Wall of an Adit in Open-pit Mine

Zhao Yun¹ Ye Haiwang^{1,2} Lei Tao^{1,2} Li Ning^{1,2} Wang Qizhou^{1,2} Long Mei³

(1.School of Resources and Environment Engineering, Wuhan 430070, China; 2.Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, China; 3.Library of Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract In the adit chute transportation system of open-pit mine, the initial collision destruction of the ore on the wall of chute is large, it is of great significance to determine the initial collision position of ore for the protection of the chute wall. Based on the kinematic theory, the ore motion model is established, taking an open-pit mine as the study example, the influence of collision restitution coefficient, sliding-rolling friction coefficient and critical coefficient to the initial collision position are analyzed in detail, and the initial collision scope is determined based on the pseudo-random algorithm. The results show that: with the increasing of normal restitution coefficient and sliding-rolling friction coefficient, the tangential restitution coefficient and critical coefficient are lowered, the distance between the initial collision position and the wellhead is enlarged, the sliding-rolling friction coefficient is the main influence factor of initial collision position; the change of motion state has little effect on the initial collision position; the distribution of the initial collision position in the collision scope is distributed exponentially, the chute wall in the range of 6~9 m from the wellhead should be protected effectively.

Keywords Initial collision position, Collision restitution coefficient, Sliding-rolling friction coefficient, Critical coefficient

露天矿山采用平硐溜井系统可以缩短矿石运输距离,但溜井井壁长期受到矿石的冲击作用,会逐渐出现井壁破损的问题,影响井壁围岩的稳定性^[1],轻则需要矿方停工检修,浪费大量的经费,重则导致溜井报废,甚至造成人员的伤亡。已有研究发现矿石从溜槽滚入溜井时,矿石与溜井井壁的初始碰撞破坏最大^[2],确定井壁的初始碰撞位置对于碰撞防护具有重要意义。

溜槽中矿石与边坡滚石的运动形式相同,滚石灾害的研究为初始碰撞位置的确定提供了参考。矿石在溜槽上的运动状态主要分为弹跳和滑移滚动^[3],矿石的自转对于运动轨迹的影响可以忽略^[4],碰撞恢复系数、滑移滚动摩擦系数和临界系数是确定运动轨迹的关键参数。碰撞恢复系数、滑移滚动摩擦系数决定了矿石在2种运动形式下的运动轨迹^[5],临界系数则是矿石由弹跳进入滑移滚动状态的判断标

收稿日期 2017-02-26

基金项目 中央高校基本科研业务费专项(编号:2017IVA045,2017IVA046,2017-zy-071),湖北省自然科学基金青年基金项目(编号:2016CFB336)。

作者简介 赵 昀(1994—),男,硕士研究生。通讯作者 雷 涛(1983—),男,讲师,博士。

准^[6]，在计算矿石的运动轨迹时，应综合考虑碰撞恢复系数、滑移滚动摩擦系数和临界系数的影响。目前，碰撞恢复系数和滑移滚动摩擦系数多是由理论推导^[7-8]、相似试验^[9-10]和现场试验^[11-12]获得，临界系数只有相关的假设^[6]。在生产实践中，矿石的物理力学差异很大，不同位置溜槽面的岩性、起伏度一般不同，碰撞恢复系数、滚动摩擦系数和临界参数应为一定取值范围内的变量，可以使用伪随机算法确定井壁的初始碰撞位置的范围。

本研究根据运动学理论建立溜槽溜井中矿石的运动模型，以某露天矿山为例，分析碰撞恢复系数、滚动摩擦系数和临界参数对初始碰撞位置的影响，基于伪随机方法，求取初始碰撞位置的分布及碰撞速度的大小，确定溜井井壁的重点防护范围，为溜井井壁防护提供依据。

1 矿石运动理论分析

1.1 运动模型构建

在不影响矿石客观运动规律的前提下，构建矿石运动模型时，基于如下的假设条件：①溜槽面为刚性平面；②弹跳过程中不考虑矿石的破坏；③卸矿时，矿石坠落发生后首先进入弹跳运动状态，不考虑矿石的转动；④数次弹跳后，由于动能损失，矿石进入滑移滚动状态，只考虑接触面的摩擦，忽略其他能量损失。

溜槽溜井的结构如图 1 所示，车斗与水平面的夹角为 θ ，矿石物料离开车斗时的初始速度为 v_0 ，溜槽倾角为 θ' ，卸料点到溜槽口、溜井口的距离分别为 h_0 和 H ，溜井半径为 R 。定义垂直于溜槽或溜井壁方向的速度分量为法向速度，沿溜槽或溜井壁方向的速度分量为切向速度。

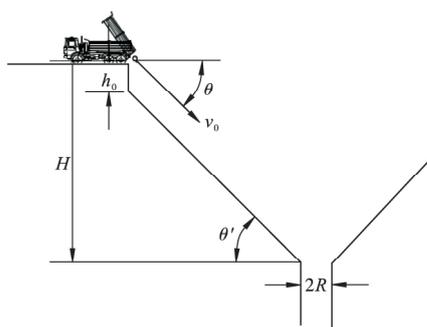


图 1 溜井结构简图
Fig.1 Chute structure

1.2 运动关键方程

矿石离开车斗后为弹跳状态，定义矿石与溜槽面发生碰撞前，矿石的法向速度和切向速度分别为 v_n^- 和 v_t^- ，矿石法向、切向速度恢复系数分别为 λ_n 和 λ_t 。

碰撞后，矿石法向、切向速度分别为

$$v_n^+ = v_n^- \lambda_n, \quad (1)$$

$$v_t^+ = v_t^- \lambda_t, \quad (2)$$

第 i 次碰撞后，矿石的碰撞反弹角为 $\gamma^{[6]}$ ，其正数

$$\tan \gamma = \frac{(v_i)_n^+}{(v_i)_t^+}. \quad (3)$$

定义临界系数为 M 。当 $\tan \gamma > M$ ，矿石还会发生 $i+1$ 次碰撞弹跳；当 $\tan \gamma \leq M$ ，矿石从弹跳状态进入滑移滚动状态，认为矿石法向速度为 0，切向速度为 $(v_i)_t^+$ 。

矿石在溜槽继续运动位移 s 后进入溜井，矿石的速度 v_s 为

$$v_s = \sqrt{[(v_i)_t^+]^2 + 2gs \cos \theta' (\tan \theta' - \mu)}, \quad (4)$$

式中 μ 为滑移滚动摩擦系数。

矿石随后与右侧溜井壁发生初始碰撞。矿石在溜井中的运动时间 t 、碰撞点距溜井顶部的垂直距离 h 和碰撞速度 v 分别为

$$t = \frac{2R}{v_s \cos \theta'}, \quad (5)$$

$$h = v_s \sin \theta' t + \frac{1}{2} g t^2, \quad (6)$$

$$v = \sqrt{(v_s \cos \theta')^2 + (v_s \sin \theta' + g t)^2}. \quad (7)$$

1.3 关键参数选取

碰撞恢复系数不仅与矿石、溜槽物理力学性质有关，还与碰撞速度、碰撞角度、碰撞接触面性质等有关^[13]。目前，不同的研究对于碰撞恢复系数的取值大多不同^[6,10,14-16]，但一般认为 $0 < \text{法向恢复系数} < 0.5$ ， $0.5 < \text{切向恢复系数} < 1$ 。临界系数 M 是判定矿石运动的参数，目前还没有公认的标准。滑移滚动摩擦系数的大小会直接影响矿石进入溜井的速度，进而影响井壁的初始碰撞位置。矿石在溜槽上的滑移滚动摩擦系数主要与矿石形状、溜槽表面光滑程度等相关^[9,15]，其值小于滑动摩擦系数，大于滚动摩擦系数。

计算矿石运动轨迹时，法向碰撞恢复系数 λ_n 、切向恢复系数 λ_t 、临界系数 M 和滑移滚动摩擦系数 μ 的取值范围分别为 $0 \sim 0.5$ ， $0.5 \sim 1$ ， $0.001 \sim 1$ ， $0.2 \sim 1$ ，此范围包含了目前大多滚石研究中关键参数的取值。

基于运动学理论，建立了卸矿过程中矿石运动轨迹的计算模型，根据已有研究确定碰撞恢复系数、滑移滚动摩擦系数和临界系数的取值范围，将针对具体工程分析关键参数对井壁初始碰撞位置的影响。

2 某露天矿井壁初始碰撞位置分析

2.1 工程概况

某露天矿山采用溜井加皮带方式运送矿石。由于对溜井中矿石的运动规律不清楚，加上施工过程中

对围岩的保护不够,导致在一段时间的运营之后,溜井的上半部分发生严重的坍塌现象,不得不花费大量的时间、精力和资金进行维修。由于破坏问题非常严重,矿山溜井已经成为限制该矿山正常生产和未来发展的关键问题。

该露天矿现已开采至 2 370 m 水平,矿石由矿用汽车运输至 2 385 m 卸料平台,然后经由溜井下放至 2 208 m 水平,经过初级破碎,最后由皮带运输至选厂。根据工程现场勘察和测量,给出相关初始计算参量,如表 1 所示。

表 1 运动模型初始参数

Table 1 Initial parameters of motion model

溜槽倾角 θ /($^{\circ}$)	卸矿点到溜 槽口垂直 距离 h_0 /m	溜井半径 R /m	卸矿角 θ /($^{\circ}$)	初始速度 v_0 /(m/s)	卸矿点到 溜井口垂直 距离 H /m
45	4.17	3	55	4	65.17

2.2 计算方案设计

矿石从溜槽进入溜井后,会与右侧溜井壁发生第一次碰撞,由于矿石在溜槽中运动中碰撞恢复系数、滑移滚动摩擦系数和临界系数取值的影响,矿石进入溜井的初速度是不同的,初始碰撞位置也是不同的。

参照正交试验设计方法,将每个关键因素分为 6 个水平,在取值范围内,法向碰撞恢复系数、切向碰撞恢复系数和滑移滚动摩擦系数的水平取值线性增加,临界系数采用量级分析法取值,见表 2。分析法向碰撞恢复系数、切向碰撞恢复系数、滑移滚动摩擦系数 μ 和临界系数 M 对初始碰撞位置的影响。

表 2 影响因素水平

Table 2 Level of influence factor

水 平	因素取值			
	λ_n	λ_t	μ	M
1	0	0.5	0.2	0.001
2	0.1	0.6	0.3	0.005
3	0.2	0.7	0.4	0.025
4	0.3	0.8	0.6	0.1
5	0.4	0.9	0.8	0.5
6	0.5	1	1	1

2.3 矿石运动特性分析

水平 3 与现有文献取值较为接近,计算时以水平 3 为例,分别改变法向碰撞恢复系数 λ_n 、切向碰撞恢复系数 λ_t 、滑移滚动摩擦系数 μ 和临界系数 M 的取值水平,弹跳次数、滑移滚动位移、初始碰撞速度和碰撞初始位置变化如图 2 所示。

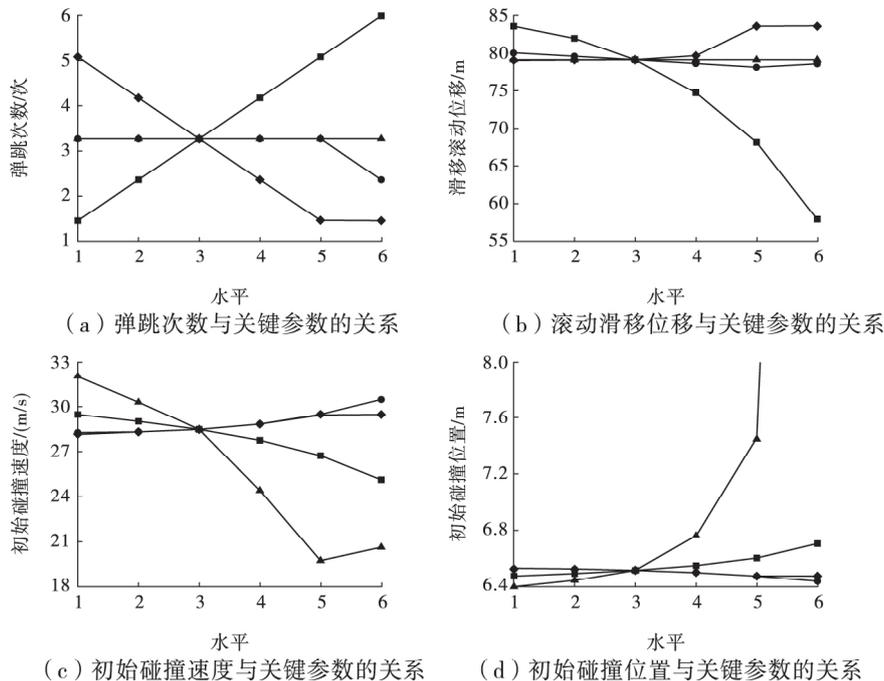


图 2 运动计算结果

Fig.2 Motion calculation results

■— λ_n ; ●— λ_t ; ▲— μ ; ◆— M

图 2 中,当法向恢复系数增大时,矿石的弹跳次数增加,弹跳运动距离增大,滑移滚动距离减小,初始碰撞速度减小,初始碰撞位置距溜井口的距离增大,碰撞范围为 6.476 2~6.706 7 m。当切向恢复系数增大时,矿石的弹跳次数先不变后减少,由于切向速度

变大,弹跳运动距离先减小后增大,初始碰撞速度增大,初始碰撞位置距溜井口的距离减小,碰撞范围为 6.439 2~6.526 7 m。当滑移滚动摩擦系数增大时,弹跳次数和滑移滚动位移不变,由于矿石在溜井中的运动时间变长,重力方向上速度变大,初始碰撞速度

先减小后增大,初始碰撞位置距溜井口的距离增大,碰撞范围为 6.391 4~20.462 9 m。当临界系数从 0.001 增大到 0.5 时,矿石弹跳次数减少,滑移滚动距离先变大,初始碰撞速度变大,初始碰撞位置距溜井口的距离减小,碰撞范围为 6.476 2~6.532 0 m;临界系数继续增大时,弹跳次数、滑移滚动位移、初始碰撞速度和碰撞初始位置不再变化。

综上所述,滑移滚动摩擦系数 μ 对初始碰撞位置的影响最大,法向恢复系数 v_n 次之,切向恢复系数 v_t 更小,临界系数 M 最小,说明运动状态的变化对于初始碰撞位置的影响很小。

3 基于伪随机算法的碰撞位置计算

根据现场调查,初始碰撞对溜井壁破坏较为严重,碰撞初始位置的确定对于井壁的防护有着重要意义。从前面的分析中可以知道,关键参数对于矿石运动轨迹的影响会最终反映到井壁的初始碰撞位置上,以往的研究中,计算矿石运动轨迹的关键参数一般为定值。受生产爆破效果影响,矿石的块度和形状差异很大,溜槽表面不同位置的平整度和物理力学性质不同,矿石每次与溜槽碰撞时的角度和速度也是不同的。矿石在弹跳状态下,每次碰撞时法向碰撞恢复系数 $(\lambda_i)_n$ 、切向碰撞恢复系数 $(\lambda_i)_t$ 和临界系数 M 的取值应该是不确定的,矿石由弹跳进入滑移滚动状态后,滑移滚动摩擦系数 μ 的取值也是不确定的。因此在计算矿石运动轨迹时,采用伪随机算法对初始碰撞位置进行分析是合理的。

图 3 为运动轨迹的计算在 MATLAB 中实现的流程图。弹跳状态时运动轨迹的计算参照式 (1) 和式 (2),滑移滚动时参照式 (4),初始碰撞位置的计算参照式 (5)、式 (6) 和式 (7)。为实现伪随机算法,图 3 中虚线范围内各步骤每次执行时都会在取值范围内随机生成法向碰撞恢复系数、切向碰撞恢复系数、临界系数和滑移滚动摩擦系数。

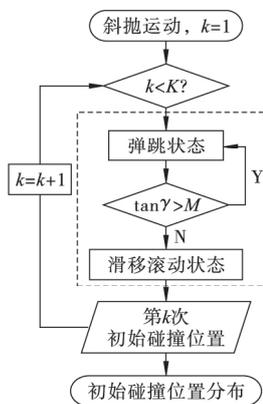


图 3 运动轨迹计算流程
Fig.3 Trajectory calculation flow

假设关键参数在前文的取值范围内服从均匀分布,在 MATLAB 中实现方式如下:

$$(\lambda_i)_n = \text{unifrnd}(0, 0.5), \quad (8)$$

$$(\lambda_i)_t = \text{unifrnd}(0.5, 1), \quad (9)$$

$$M = \text{unifrnd}(0.001, 1), \quad (10)$$

$$u = \text{unifrnd}(0.2, 1). \quad (11)$$

计算次数为 $K = 10^5$ 次,初始碰撞位置的分布范围如图 4 所示,碰撞速度随初始碰撞位置的变化曲线见图 5。

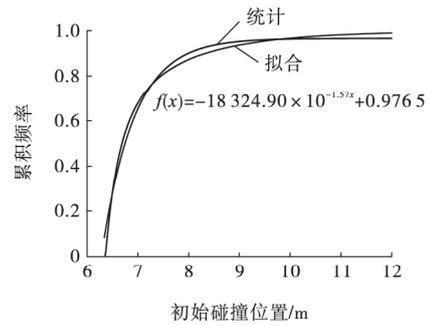


图 4 初始碰撞位置分布范围

Fig.4 Distribution scope of initial collision position

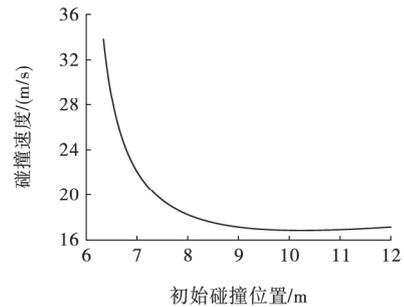


图 5 不同初始碰撞位置的碰撞速度

Fig.5 Collision speed of different initial collision positions

根据 105 次计算结果,初始碰撞位置分布范围的上、下限约为 6.3 m 和 29.1 m,初始碰撞位置大于 12 m 的频率仅为 1.05%,故图 4 和图 5 横坐标范围为 6~12 m。如图 4 所示,在 6.3~12 m 范围内,随着距离初始碰撞位置与井口的距离增大,矿石与井壁碰撞的概率越小,采用指数分布函数对初始碰撞位置的累积频率分布点进行拟合,方差为 0.985,初始碰撞位置的分布符合指数分布,初始碰撞位置发生在 6.3~9 m 范围内的频率接近 95%。如图 5 所示,碰撞速度在 6.3~10 m 范围从 33.81 m/s 急剧减小到 16.85 m/s,随后缓慢增加。由于碰撞速度大的位置井壁破坏严重,需要重点防护,综合考虑,井壁的重点防护位置为 6~9 m。

4 结 论

(1) 在水平 3 条件下,当法向恢复系数和滑移滚动摩擦系数增大时,初始碰撞位置距溜井口的距离增

大;当切向恢复系数增大时,初始碰撞位置距溜井口的距离减小;当临界系数从 0.001 增大到 0.5 时,初始碰撞位置距溜井口的距离减小,临界系数继续增大时,碰撞初始位置不再变化。

(2) 滑移滚动摩擦系数对初始碰撞位置的影响最大,法向恢复系数次之,切向恢复系数更小,临界系数最小,说明运动状态的变化对于初始碰撞位置的影响很小。

(3) 根据伪随机计算结果,关键参数在取值范围内服从均匀分布时,初始碰撞位置的分布符合指数分布函数,初始碰撞发生在 6~9 m 范围内的概率为 95%,井壁破坏最大,对于此位置应该重点防护。

参 考 文 献

- [1] 罗周全,陈杰,谢承煜,等.主溜井冲击损伤机制分析及实测验证[J].岩土力学,2015,36(6):1744-1751.
Luo Zhouquan, Chen Jie, Xie Chengyu, et al. Mechanism of impact-induced damage of main chute and its experimental validation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1744-1751.
- [2] 宋卫东,王洪永,王欣,等.采区溜井卸矿冲击载荷作用的理论与验证[J].岩土力学,2011,32(2):326-332.
Song Weidong, Wang Hongyong, Wang Xin, et al. Theoretical analysis and test of impact load due to ore dumping in chute [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 326-332.
- [3] 韩俊艳,陈红旗,杜修力.典型斜坡滚石运动的理论计算研究[J].水文地质工程地质,2010,37(4):92-96.
Han Junyan, Chen Hongqi, Du Xiuli. Theoretical studies of the movement of a typical slope rolling stone [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 92-96.
- [4] 陈宇龙.滚石运动过程中关键参数的影响分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):191-196.
Chen Yulong. Influence of key factors on trajectories of rockfalls [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 191-196.
- [5] 苏胜忠.边坡工程勘察中崩塌落石运动模式及轨迹分析[J].工程地质学报,2011,19(4):577-581.
Su Shengzhong. Motion mode calculation and analysis on rock falls in slope engineering investigation [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 577-581.
- [6] 吕庆,孙红月,翟三扣,等.边坡滚石运动的计算模型[J].自然灾害学报,2003,12(2):79-84.
Lu Qing, Sun Hongyue, Zhai Sankou, et al. Evaluation models of rockfall trajectory [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2): 79-84.
- [7] 何思明,吴永,李新坡.滚石冲击碰撞恢复系数研究[J].岩土力学,2009,30(3):623-627.
He Siming, Wu Yong, Li Xinpo. Research on restitution coefficient of rock fall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 623-627.
- [8] Thorton C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres [J]. Journal of Applied Mechanics, 1997, 64(2): 383.
- [9] 黄润秋,刘卫华.基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):882-891.
Huang Runqiu, Liu Weihua. In-situ test study of characteristic of rolling rock blocks based on orthogonal design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 882-891.
- [10] 崔圣华,裴向军,黄润秋.直线型斜坡滚石运动速度特征研究[J].工程地质学报,2013,21(6):912-919.
Cui Shenghua, Pei Xiangjun, Huang Runqiu. Analysis on velocity characteristics of rock-fall on slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(6): 912-919.
- [11] 章广成,向欣,唐辉明.落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1266-1273.
Zhang Guangcheng, Xiang Xin, Tang Huiming. Field test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1266-1273.
- [12] 黄润秋,刘卫华.滚石在平台上的运动特征分析[J].地球科学进展,2008,23(5):517-523.
Huang Runqiu, Liu Weihua. Study on the movement characteristics of rolling rock blocks on platform [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 517-523.
- [13] 姚文莉,岳嵘.有争议的碰撞恢复系数研究进展[J].振动与冲击,2015,34(19):43-48.
Yao Wenli, Yue Rong. Advance in controversial restitution coefficient study for impact problems [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(19): 43-48.
- [14] 叶四桥,巩尚卿.落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究[J].中国铁道科学,2015,36(4):13-19.
Ye Siqiao, Gong Shangqing. Research on normal restitution coefficient of rockfall collision by model tests [J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 13-19.
- [15] 赵武鹏,杨兵.边坡滚石运动分析及防护措施[J].现代矿业,2013,527(3):37-40.
Zhao Wukun, Yang Bing. Analysis on slope rockfall trajectory and its protective measures [J]. Modern Mining, 2013, 527(3): 37-40.
- [16] Guzzetti F, Crosta G, Detti R, et al. Stone: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls [J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(2): 1079-1093.

(责任编辑 徐志宏)