

平硐溜井系统矿石运动状态及井壁破坏数值模拟

叶海旺^{1,2} 赵 昀¹ 欧阳枫¹ 雷 涛^{1,2} 王 超¹ 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 在露天矿平硐溜井系统中, 矿车卸下的矿石落入溜槽, 运动一段时间后进入溜井, 并在井壁上产生严重的冲击破坏。以华新钻沟石灰岩露天矿山为例, 利用 PFC^{2D} 软件建立平硐溜井系统的数值模型, 分析矿石的运动状态, 以冲量为指标, 研究溜井井壁的冲击破坏特性。研究结果表明: 矿石从堆积形态逐渐发育成稳定矿石流后, 矿石沿着溜槽滚动。矿石进入溜井后, 初始碰撞位置比较固定, 由于矿石间相互作用的影响, 矿石后续运动状态比较复杂。初始碰撞位置距离井口 5~10 m, 破坏最大, 需要重点防护, 其他位置井壁的破坏相对较小。

关键词 PFC^{2D} 迟滞接触模型 运动状态 井壁破坏

中图分类号 TD57 文献标志码 A 文章编号 1001-1250(2017)-11-018-05

Numerical Simulation on the Motion of Ore and the Damage of Shaft Wall in Chute System of an Adit

Ye Haiwang^{1,2} Zhao Yun¹ Ouyang Jian¹ Lei Tao^{1,2} Wang Chao^{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 system of an open pit mine, the ore discharged from dump truck falls into the chute. After the ore is moving, the ore will flow into the shaft and severely damage the shaft wall. Taking the Huaxin limestone mine in Zuangou as an example, a numerical model of the adit is built to analyze the motion of ore by using PFC^{2D} software. Taking the momentum as an indicator, the damage characteristics on shaft wall are studied. The result shows: the ore with depositional shape are evolved into a steady ore stream at first, and move along with the chute. When the ore is finally rolled into the shaft, its initial collision position is relatively fixed. The later movement of the ore is complicated due to the interactions between the ore. The initial collision position is located at the right side of shaft wall in the range of 5~10 m from wellhead. This area needs to be well protected for its serious damage. The other parts of the shaft wall are relatively less damaged.

Keywords PFC^{2D}, Hysteretic contact model, Motion state, Wall damage

平硐溜井开拓方案在山坡露天矿中应用广泛, 在有利的地形条件下, 山坡改造后可用作明溜槽与溜井相连, 能充分利用矿石的自重, 缩短运输距离, 节省大量的运输成本。矿石在溜槽上运动时产生的磨损危害较小, 但进入溜井后会对井壁产生严重的冲击破坏^[1]。研究矿石的运动状态, 确定井壁的防护位置, 对于平硐溜井系统的长期运行具有重要意义。

边坡滚石的运动模式主要有坠落、碰撞弹跳、滑移和滚动^[2], 但溜槽和溜井中矿石的运动还需要考虑矿石间的相互作用^[3]。溜井井壁破坏的位置由矿

石的运动轨迹决定, 受矿石及井壁的物理力学性质、矿石的粒度分布、矿石的外形和溜槽—溜井系统结构等影响^[4]。目前对于矿石运动轨迹的研究方法主要有: 单个矿石运动轨迹的理论计算^[5], 不足的是没有考虑矿石间的相互作用; 而相似模型试验由于模型参数和相似材料的限制^[5-6], 试验结果往往不能定量分析矿石的运动参量; 现场试验由于成本太高, 在采矿工程领域还没有使用的先例。基于二维颗粒流软件 PFC^{2D} 的数值模拟已得到了广泛的应用^[3,7], 但没有深入分析矿石在溜槽—溜井系统中的运动状态。秦

收稿日期 2017-08-18

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), 贵州省科技计划项目(编号: 20172803)。

作者简介 叶海旺(1971—), 男, 副教授, 硕士研究生导师。通讯作者 雷涛(1983—), 男, 讲师, 博士。

宏楠^[9]采用 PFC^{3D} 对溜井中散体物料的运动规律和井壁破坏位置计算,却没有考虑矿石的粒度分布,而且矿石数量太少。迄今,这些数值模拟的研究对象都是地下溜井系统,在露天平硐溜井系统还没有先例。由于三维模型中矿石数量过多、空间运动计算量大,拟使用 PFC^{2D} 软件来进行计算。

本研究以华新钻沟石灰岩露天矿山为例,通过室内试验和现场调查获取相关的相关数据,利用 PFC^{2D} 建立平硐溜井的数值模型,分析矿石在溜槽、溜井中的运动状态,以冲量为指标,研究井壁的破坏特性,为溜井井壁的保护提供依据。

1 数值模型的建立

1.1 PFC^{2D} 软件

PFC^{2D} 是基于离散元建立的颗粒流程序,程序中的模型单元均为刚性,包括颗粒和墙体。单元在运动过程(服从牛顿运动方程)中允许重叠,以模拟单元之间的接触力(物理方程)。程序在进行计算时,先利用显式差分法将运动方程进行离散,然后在每一个计算时步内,更新单元的位置,根据单元间的重叠量对单元之间的接触力进行更新,然后根据计算得到的接触力求出单元在下一时步的位置,如此反复进行迭代,见图 1,直至模型内所有单元达到稳定状态。PFC^{2D} 程序使用颗粒代表矿石,墙体代表井壁,不仅能从运动学角度对矿石的运动状态进行实时呈现,而且还能从动力学角度对矿石—矿石、矿石—井壁的力学行为进行分析计算,能够有效的模拟平硐溜井系统中卸矿过程。

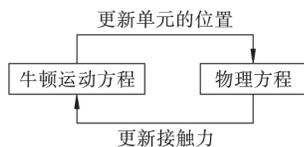


图 1 PFC^{2D} 计算循环

Fig.1 Cyclic of calculation in PFC^{2D}

1.2 接触模型的选择

矿石轨迹计算中的关键参数是碰撞恢复系数,以往的研究表明,碰撞恢复系数不仅与矿石、溜槽—溜井物理力学性质有关,还与碰撞速度、碰撞角度、碰撞接触面性质等有关^[9]。Thornton 和何思明分别以 Hertz 接触理论为基础确定了法向恢复系数和切向恢复系数的解析解^[10],但是该方法的适用对象为服从库伦屈服准则的弹塑性体,不适用于 PFC^{2D} 中的刚性颗粒。根据图 1,物理方程表征了矿石—矿石、矿石—井壁之间的相互作用关系。PFC^{2D} 程序中的物理方程是由特定的接触模型来实现的,以往的数值模拟试验中多采用线性接触模型和 Hertz 接触模型,但是

需要提前标定模型参数以获得特定的碰撞恢复系数,过程较复杂。本研究选取的迟滞接触模型是在 Hertz 接触模型基础上的一种改进,模型中使用黏性阻尼器来解决碰撞中的能量耗散问题,碰撞恢复系数可以直接作为模型的参数^[11],接触力 F_c 的表达式如下:

$$F_c = F_h + \chi \delta_n^{\alpha} \dot{\delta}_n, \quad (1)$$

式中 F_h 为 Hertz 接触力,具体表达式见文献 [15]; χ 为迟滞阻尼系数, δ_n 为接触变形量, α 为 Hertz 接触指数,一般为 1.5; $\dot{\delta}_n$ 为接触相对速度。

$$\chi = \frac{(1 - e_n^2) h_n}{e_n \dot{\delta}_n^{(-)}}, \quad (2)$$

式中, e_n 为碰撞恢复系数, $\dot{\delta}_n^{(-)}$ 为法向接触速度, h_n 为 Hertz 法向力接触系数 h_n 的表达式如下:

$$h_n = \frac{2 \langle G \rangle \sqrt{2R}}{3(1 - \langle \nu \rangle)}, \quad (3)$$

式中, $\langle G \rangle$ 为等效剪切模量, $\langle \nu \rangle$ 为等效泊松比, R 为等效半径。若 $G^{(1)}$ 和 $G^{(2)}$ 、 $\nu^{(1)}$ 和 $\nu^{(2)}$ 、 $R^{(1)}$ 和 $R^{(2)}$ 分别为 2 个接触物体的剪切模量、泊松比、半径,则

$$\langle G \rangle = \frac{1}{2} (G^{(1)} + G^{(2)}), \quad (4)$$

$$\langle \nu \rangle = \frac{1}{2} (\nu^{(1)} + \nu^{(2)}), \quad (5)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R^{(1)}} + \frac{1}{R^{(2)}} \right). \quad (6)$$

1.3 迟滞接触模型的参数

迟滞接触模型的参数包括剪切模量、泊松比、密度、摩擦系数和碰撞恢复系数,其中剪切模量、泊松比、密度、摩擦系数可以通过室内岩石力学试验获得,数据见表 1。目前,碰撞恢复系数多是由理论推导^[10]、相似试验^[12]和现场试验^[9,13]获得,在生产实践中,矿石和井壁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,碰撞恢复系数变化较大。Iverson 给出了溜井中矿石碰撞恢复系数的取值范围为 0.2~0.6^[7],结合 K Esmaili^[3]的研究,选取的碰撞恢复系数为 0.3。

表 1 溜井壁和矿石的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the shaft wall and the ore

材料	剪切模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 $/(\text{kg}/\text{m}^3)$	摩擦系数	碰撞恢复系数
井壁	0.007 8	0.28	2 225	0.35	-
矿石	18.96	0.22	2 670	-	0.3

1.4 溜槽—溜井模型

华新钻沟石灰岩矿山采用平硐溜井开拓,矿石由

矿用汽车运输至 2 385 m 卸料平台,然后经由溜槽、溜井下放至 2 208 m 水平,经过初级破碎,最后由皮带运输至矿石选厂,溜槽—溜井结构参数如图 2 所示,其中矿车车厢倾角为 55°,车厢大小为 5 m×2 m,车厢挡板离地高度为 1.17 m。考虑到矿仓内的贮矿高度,取溜井段实际高度为 60 m,计算过程中将落入矿仓的矿石删除。为了便于对溜井不同部位的溜井壁的冲击破坏情况进行监测,将井壁左右墙体分别划分为 12 段,每段长度为 5 m。

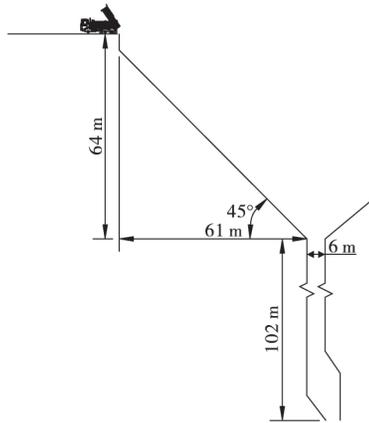


图 2 溜槽溜井结构

Fig.2 Structure of chute and shaft

1.5 矿石模型的建立

为了准确建立矿车车厢内的矿石模型,需要获取矿石爆破后矿石的粒度分布。采用 Split-Desktop 3.0 软件对现场采集的 11 次爆破的爆堆图像进行处理,对爆堆粒度分布信息进行统计。其中,每次爆破拍摄 2 张爆堆照片,取 2 张照片中的粒度分布的平均值,作为此次爆破的爆堆粒度分布形式。最后统计这 11 次爆破后的数据进行分析,获取的矿石粒度信息如表 2 所示。

表 2 矿石粒度分布

Table 2 Distribution of the ore particles

粒度大小 /cm	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	≥60
百分比 /%	38.91	21.65	15.44	9.95	6.01	3.27	4.77

在车厢内生成矿石时需要提前获取矿石散体的空隙度 n 根据空隙度计算公式^[19]:

$$n(\%) = 38.5 - 8 \log_{10} \left(\frac{d_{90}}{d_{10}} \right), \quad (7)$$

式中 d_{10} 和 d_{90} 分别为矿石的累计粒度分布百分数达到 10% 和 90% 所对应的粒径。根据表 2 d_{10} 和 d_{90} 分别取 2 cm 和 48 cm,得到矿石散体的空隙度为 27.46%。

在 PFC^{2D} 中利用 Fish 语言编制了粒子生成器函数,为了控制矿石的数量和计算时间,将 d_{10} 作为分布下限。根据矿车的体积、矿石粒度分布和孔隙度,生成的矿石模型如图 3 所示。

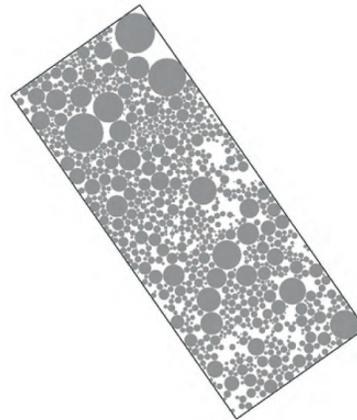


图 3 车厢内矿石

Fig.3 Ores in dump truck

2 模型计算及结果分析

2.1 时间步长的确定

由于粒子生成器的缺陷,在矿石生成过程中,矿石—矿石、矿石—车厢会产生重叠量,计算前需要使矿石达到静态平衡状态。考虑到矿石颗粒共有 1 004 个,为了减少平衡所需时间,平衡过程中暂时选用线性接触模型,对时间步长进行放大 (Time Scaling)。待粒子达到平衡状态后,打开车厢底板进行放矿,时间步长固定为 10^{-6} s。计算过程中,每隔 1 s (10^6 步) 输出矿石的图像,对井壁受到的冲击力进行记录。

2.2 矿石运动状态分析

删除车厢的挡板后,矿石从车厢流出到全部落入矿仓耗时 14 s。由于 6 s 后矿石的运动状态散乱,本研究只输出了前 6 s 矿石的图像,见图 4。在运动过程中,矿石的扩散效应明显,分布范围越来越大,为了记录所有的矿石,图 4 中比例尺随着运动时间的增加逐渐减小。从图 4 中可以看出,挡板打开后 1.3 s 矿石落入溜槽并形成一定厚度的堆积体(见图 4(a))。2 s 后矿石全部落入溜槽,堆积体前端开始扩散,厚度变小,开始形成矿石流(见图 4(b))。3 s 后,矿石流的密度大致成对称分布,矿石流中心厚度大,两侧厚度小(见图 4(c))。4 s 后,矿石流的密度越来越稀疏,矿石中心与两侧的厚度趋于一致(见图 4(d))。5 s 后,矿石流前端开始进入溜井(图 4(e))。矿石流与溜井壁发生初始碰撞前,轨迹线很平滑,状态较稳定,碰撞后比较散乱(见图 4(f))。

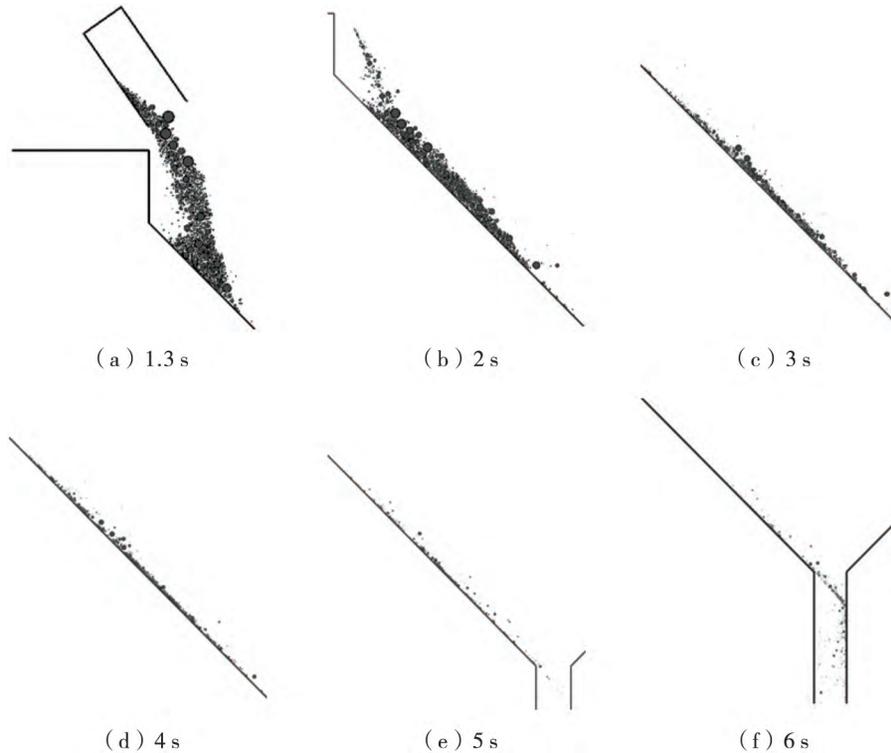


图4 溜槽上矿石运动状态

Fig.4 Motion of ore in chute

由于矿石之间的相互摩擦与“夹制”作用,矿石动能耗散较大,矿石未能与溜槽发生很明显的碰撞回弹作用,所有矿石在溜槽上运动迹线较平滑,几乎是直接沿着溜槽滚动。矿石进入溜井段后,矿石首先与右侧溜井壁发生初始碰撞,碰撞位置比较集中。在初始碰撞过程中,还有部分矿石未能直接与井壁接触,而是与前面的矿石产生了碰撞作用,导致这部分矿石的运动轨迹发生了变化。在后续的运动过程中,矿石之间还存在着相互碰撞作用,矿石运动状态比较杂乱。

综上,矿石间的相互作用导致矿石沿着溜槽滚动,形成了稳定的流动形态。矿石与溜井井壁的初始碰撞位置比较集中,矿石间的相互作用导致后续运动比较杂乱。

2.3 井壁破坏分析

以往的研究都比较关注矿石与溜井壁的初始碰撞位置,常采用溜井井壁的冲击力大小和冲击力持续时间来评价井壁的破坏特性^[3,7-8]。由于各个位置井壁的冲击力大小和持续时间都不同,单独采用冲击力大小或冲击持续时间无法比较各个位置井壁的破坏情况。本研究利用冲击力大小和冲击持续时间的积,即冲量来比较井壁的破坏情况:运算过程采用的固定时间步长 Δt , $\Delta t = 10^{-6}$ s,冲击力记录间隔为10步。假设计算过程中记录到冲击力的次数为 N ,第 i 次记录的冲击力大小为 f_i ,则井壁受到的法向冲量 P_n 和切向冲量 P_t 分别为

$$P_n = \sum_{i=1}^N (10 \times \Delta t \times f_i^n) \quad (8)$$

$$P_t = \sum_{i=1}^N (10 \times \Delta t \times f_i^t) \quad (9)$$

统计计算过程中冲击力记录,得到井壁受到的法向和切向冲量如表3所示。

表3 井壁不同位置的冲量

Table 3 Impact momentum in different

area of shaft

(10² N·s)

范围 /m	左侧井壁冲量		右侧井壁冲量	
	法向	切向	法向	切向
0~5	1.19	0.04	700.98	165.98
5~10	9.87	1.76	3 955.69	758.12
10~15	24.74	6.25	43.91	13.63
15~20	37.52	10.45	35.26	10.45
20~25	68.95	21.29	23.64	8.05
25~30	82.36	25.89	17.18	5.96
30~35	89.01	28.21	15.09	5.26
35~40	100.45	32.21	18.76	6.56
40~45	113.74	36.86	8.70	3.04
45~50	125.86	41.09	9.68	3.39
50~65	134.58	44.08	11.85	4.14
55~60	147.93	48.74	25.88	9.05

需要注意的是,通过数值计算获得的井壁各位置冲量大小可能与实际不符,但是可以用来比较各位置的破坏程度。由表3可知,右侧井壁(模型中左右方向)5~10 m范围的冲量(包括法向和切向,后叙中不

明确指出均为法向和切向冲量) 远远大于其他位置, 破坏最大, 说明 5~10 m 是矿石的集中初始碰撞位置。模拟结果与理论计算比较接近^[20]。右侧井壁 0~5 m 范围的冲量次之, 但也明显大于其他部位, 说明仍有少部分矿石发生了初始碰撞。左侧井壁的冲量从上到下依次增大, 造成这一现象的原因在于矿石与左侧井壁发生了第二次冲击, 矿石下落高度越大, 对井壁的冲量越大。右侧井壁 10~60 m 范围的冲量变化没有明显规律, 可能是受到矿石第三次碰撞和散乱冲击导致(见图 4(f))。从表 3 中可以发现, 井壁受到的法向冲量要大于切向冲量。

综上, 右侧 5~10 m 井壁是矿石的初始碰撞位置, 破坏最大, 是井壁防护的重点位置。随着与井口距离的增大, 左侧井壁的破坏相对增大, 右侧井壁的变化不明显。但是, 其他位置井壁的冲量大小相对于初始碰撞位置小的多, 因此井壁破坏相对而言比较小。

3 结 论

(1) 以华新钻沟石灰岩露天矿山为例, 利用 PFC^{2D} 建立平硐溜井模型, 分析矿石在溜槽、溜井中的运动特征: 矿车卸下的矿石落入溜槽后, 矿石会从堆积形态逐渐发育成稳定矿石流, 由于摩擦挤压作用, 矿石没有与溜槽发生明显的碰撞弹跳, 矿石沿着溜槽滚动。进入溜井后, 矿石对井壁初始碰撞位置比较固定, 由于矿石间相互碰撞的影响, 矿石后续运动比较散乱。

(2) 以冲量为指标, 研究了矿石冲击下井壁的破坏特性: 右侧 5~10 m 井壁是矿石的初始碰撞位置, 破坏最大, 是井壁防护的重点位置, 其他位置井壁的破坏较小。

参 考 文 献

- [1] Esmaili Kamran, Hadjigeorgiou John, Grenon Martin. Stability analysis of the 19a ore pass at Brunswick mine using a two-stage numerical modeling approach [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(6): 1323-1338.
- [2] 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.
- [3] Esmaili Kamran, Hadjigeorgiou John. Selecting ore pass-finger raise configurations in underground mines [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(3): 291-303.
- [4] Leine R I, Schweizer A, Christen M, et al. Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape [J]. *Multibody System Dynamics*, 2014, 32(2): 241-271.
- [5] 宋卫东, 王洪永, 王欣等. 采区溜井卸矿冲击载荷作用的理论分析与验证 [J]. *岩土力学*, 2011(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(2): 326-332.
- [6] 任智刚, 马海涛, 汪澍等. 溜井放矿破坏规律相似性模拟实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2016(9): 98-102.
Ren Zhigang, Ma Haitao, Wang Shu, et al. Experimental study on damage laws of ore pass based on similarity simulation [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016(9): 98-102.
- [7] Iverson S, Jung S J, Biswas K. Comparison of ore pass computer simulations for designs against dynamic load [C] // *Sme Annual Meeting*. Cincinnati [s.n.]: 2003: 24-26.
- [8] 秦宏楠, 李长洪, 马海涛等. 基于颗粒流的溜井冲击破坏规律研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2015(4): 20-26.
Qin Hongnan, Li Zhanghong, Ma Haitao, et al. Study on impact damage laws of ore pass based on particle flow [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015(4): 20-26.
- [9] 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.
- [10] Thorton C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1997, 64(2): 383-386.
- [11] Machado Margarida, Moreira Pedro, Flores Paulo, et al. Compliant contact force models in multibody dynamics: Evolution of the Hertz contact theory [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 53: 99-121.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Hadjigeorgiou J, Lessard J F. Numerical investigations of ore pass hang-up phenomena [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44(6): 820-834.
- [15] 赵昀, 叶海旺, 雷涛等. 某露天矿平硐溜井井壁初始碰撞位置理论计算 [J]. *金属矿山*, 2017(5): 19-23.
Zhao Yun, Ye Haiwang, Lei Tao, et al. Theoretical calculation of initial collision position on shaft wall of an adit in open-pit mine [J]. *Metal Mine*, 2017(5): 19-23.

(责任编辑 徐志宏)