

基于冲蚀磨损理论的溜井井壁破损特性理论研究

赵 昀¹, 叶海旺^{1,2}, 雷 涛^{1,2}, 王 超¹, 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. 武汉理工大学 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: 矿石从溜槽进入溜井后会对井壁产生冲击, 确定井壁冲击部位并选择合适的保护方法对于延长溜井的使用寿命有着重要作用。基于冲蚀磨损理论建立矿石冲击下井壁破损的计算模型, 结合 Hertz 接触理论确定体积损失的计算方法。根据溜槽溜井结构, 建立矿石的运动模型。以华新钻沟石灰岩矿山为例, 分析溜井壁的破损特性。研究结果表明: 矿石与井壁发生 3 次碰撞后落入矿仓, 溜井上部围岩的破坏范围小, 破损程度大, 溜井下部围岩的破坏范围大, 破损程度小。从安全性和经济性出发, 提出分类防护措施。研究结果与实际情况符合较好, 所提方法适用于形态平直的井壁, 有助于新建溜井的防护设计。

关键词: 采矿工程; 冲蚀磨损; 碰撞恢复系数; 体积损失; 破损特性

中图分类号: TD 57

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)增2-4002-06

Theoretical study of damage characteristics on ore pass wall based on the erosion-wearing theory

ZHAO Yun¹, YE Haiwang^{1,2}, LEI Tao^{1,2}, WANG Chao¹, WANG Qizhou^{1,2}, LONG Mei³

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

Abstract: The ore from chute will have negative impact on the wall of the ore pass and it is important to determine the collision position and choose the right protective method for the lifespan extension of ore pass. Based on the erosion-wearing theory, the calculation model of the damage caused by ore impact on ore pass wall is established and the method to calculate the volume loss is determined using Hertz contact theory. According to the structure of chute and ore pass, the motion model of ore is built. Taking the Huaxin limestone mine in Zuangou as an example, the damage characteristics are analyzed. The result shows: the ore will fall into the storage after three times collisions with ore pass wall. The impact area of the upper ore pass wall is small, but the damage is serious. On the contrary, the impact area of the lower ore pass wall is large, but the damage is insignificant. Considering the safety and economic reason, the classified protection measures are proposed. The results are consistent with the actual situation, which shows that the calculation method is suitable for the ore pass with flat wall and is helpful to the protection design of new ore pass.

Key words: mining engineering; erosion-wearing; coefficient of restitution; volume loss; damage characteristics

收稿日期: 2017-04-17; **修回日期:** 2017-07-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(2017IVA046, 2017-zy-071); 贵州省科技支撑计划项目(20172803)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant Nos. 2017IVA046 and 2017-zy-071) and Guizhou Science and Technology Planning Project(Grant No. 20172803)

作者简介: 赵 昀(1994-), 男, 2016年毕业于武汉理工大学采矿工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事露天矿平硐溜井系统优化方面的研究工作。E-mail: 82359401@qq.com。通讯作者: 叶海旺(1971-), 男, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事岩石动力学方面的教学与研究工作。E-mail: yehaiwang@sina.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0448

1 引言

露天矿常采用平硐溜井系统来运输矿石，矿石从溜槽进入溜井后会直接冲击到井壁上，在长期的冲蚀作用下，溜井井壁会逐渐破损、扩大，甚至发生垮塌事故^[1]。溜井承担着矿石的转运和集贮任务^[2]，一旦发生破坏，不仅影响矿山的正常生产，还有可能造成人员伤亡。目前常采用关键部位加固的方法来保护溜井井壁^[3]，但加固前必须对溜井壁的破损特性进行研究，确定关键部位的范围，进而设计合适的防护方法。

根据滚石灾害的研究，矿石在溜槽上的运动形式很复杂，不仅有弹跳、滑移、滚动^[4]，还有矿石间的相互碰撞。矿石间的相互作用及运动参数的不确定性使得溜槽中矿石运动轨迹的理论研究很难进行^[5]。在溜井直径一定的条件下，当矿石从溜槽进入溜井时，可以确定矿石对井壁的冲击速度和冲击位置^[6]。根据 Hertz 接触理论下碰撞法向、切向恢复系数的计算方法^[7-8]，矿石在井壁上的后续冲击位置也可以精确求解。候天兴等^[9-10]的研究表明了溜井壁的破损与矿石冲击速度大小直接相关，并给出了正冲击下矿石的冲击力和井壁围岩初始屈服冲击速度的计算公式。但矿石流在井壁上为斜冲击，接触面上会产生相应的切向力，因此冲击角度对井壁的破损也有着重要影响^[11]。目前，对于井壁的冲击破损暂没有合适的计算方法。井壁的防护多以破损后加固为主，为了防患于未然，应该在溜井建设初期进行防护设计。

根据冲蚀磨损理论，磨料冲击下，靶材的相对体积磨损可以通过计算获得^[12]。从物质形态考虑，矿石与磨料仅在粒径上有所区别，井壁围岩与金属靶材也只是在材料上存在差异，冲蚀磨损理论对于井壁破损的研究有一定的参考价值。本文基于冲蚀磨损理论建立了矿石冲击下井壁破损的计算模型，结合 Hertz 接触理论确定体积损失的计算方法。根据露天矿溜槽溜井系统结构，建立矿石在溜槽、溜井中的运动模型。以某露天矿山为例，分析矿山溜井井壁破损情况，验证计算模型的可行性，提出溜井井壁的分类保护方法。

2 矿石对井壁冲击分析

2.1 基于冲蚀磨损理论的井壁破损模型

矿石对井壁围岩的冲蚀磨损模型如图 1 所示。其中矿石的冲击速度大小为 v ，冲击角度为 α 。矿

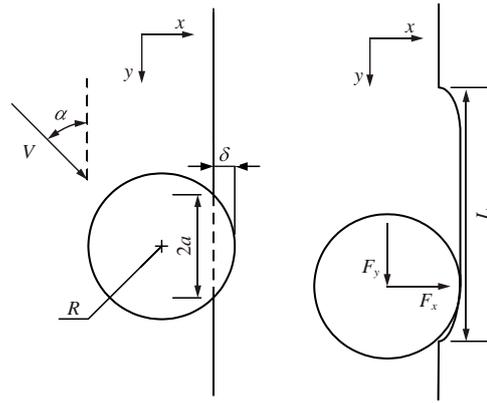


图 1 矿石冲击下井壁破损模型

Fig.1 Damage model of ore pass wall caused by ore impact

石与井壁围岩接触后会产生法向冲击力 F_x 和切向冲击力 F_y 。在法向冲击力 F_x 作用下，矿石与围岩接触位置会产生变形，井壁上会形成凹坑，同时，在切向力 F_y 的作用下，矿石在井壁上发生滑动，将凹坑刷大^[13]。假设矿石对井壁的切削破坏大小即为围岩的体积损失。值得注意的是，本文只是从溜井直径扩大(围岩体积损失)这一现场现象出发，分析矿石对井壁的破坏，并没有严格考虑围岩的硬化、压密等性质。

为了使围岩体积损失的计算表达式更为简洁，将体积损失 ΔQ 按长方体体积公式作如下简化：

$$\Delta Q = 2a\delta L \tag{1}$$

式中： a 为矿石与井壁围岩的接触面半径， δ 为凹坑的最大深度， L 为矿石在井壁上的滑动距离。根据 Hertz 接触理论， a 和 δ 可以直接求解(见图 2)。

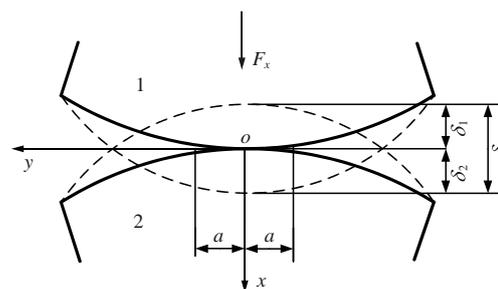


图 2 Hertz 接触理论的计算模型

Fig.2 Calculation model of the Hertz contact theory

图 2 中，球体 1 代表矿石，球体 2 代表溜井壁围岩体。 δ_1 和 δ_2 分别为矿石和围岩的变形量， δ 为凹坑的最大深度。根据 Hertz 接触理论^[14]，接触面半径 a 和凹坑的最大深度 δ 分别满足：

$$a^2 = R\delta \tag{2}$$

$$\delta = \left(\frac{15m_2v_x^2}{16R^{1/2}E} \right)^{2/5} \tag{3}$$

式中： R 为等效半径， $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ ， R_1 和 R_2 分别为2个接触球体1,2的半径，由于溜井壁可视为无穷大球体，故 $R=R_2$ ； E 为等效弹性模量， $\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ ， E_1, ν_1 和 E_2, ν_2 分别为2个接触球体1,2的弹性模量和泊松比； m_2 为矿石的质量； v_x 为矿石的法向速度， $v_x = v \sin \alpha$ 。

由式(2)和(3)可知，根据矿石的运动状态、矿石和围岩的物理力学性质可以确定 a 和 δ 的值，求解 ΔQ 的关键在于确定矿石在井壁上的滑动距离 L 。假定矿石与井壁接触过程中，法向接触力 F_x 和切向接触力 F_y 保持不变。由于矿石对井壁的冲击速度较小，可以视为准静态^[9]：

$$F_x = \frac{4}{3} ER^2 \delta^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

$$F_y = u F_x \quad (5)$$

式中： u 为矿石与井壁的摩擦因数。

根据能量守恒定理，有

$$-(F_y - m_2 g)L = \frac{1}{2} m_2 v_y^2 (\lambda_y^2 - 1) \quad (6)$$

式中： v_y 为矿石的切向速度， $v_y = v \cos \alpha$ ； λ_y 为矿石碰撞时的切向恢复系数。

何思明等^[7-8]以 Hertz 接触理论为基础，确定了法向恢复系数 λ_x 和切向恢复系数 λ_y 的解析解，有

$$\lambda_x = \left\{ \frac{6\sqrt{3}}{5} \left[1 - \frac{1}{6} \left(\frac{v_q}{v_x} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \cdot \left[\frac{v_q / v_x}{v_q / v_x + 2\sqrt{1.2 - 0.2(v_q / v_x)^2}} \right]^{1/4} \quad (7)$$

$$\lambda_y = 1 - u(1 + \lambda_x) \tan \alpha \quad (8)$$

式中： v_q 为井壁发生屈服时的最小法向冲击速度。假设溜井壁岩体服从莫尔-库仑屈服准则，根据何思明等^[10]的修正，有

$$v_q = 18.1 \frac{R^{3/2}}{E^2 m_2^{1/2}} \left(\frac{2c \cos \varphi}{C_{v1} - C_{v2} \sin \varphi} \right)^{5/2} \quad (9)$$

式中： c, φ 分别为井壁围岩的黏聚力和内摩擦角； C_{v1}, C_{v2} 和 ξ_0 为中间参量，计算方法如下：

$$C_{v1} = \frac{3}{2} (1 + \xi_0^2)^{-1} - (1 + \nu_1) (1 - \xi_0 \tan^{-1} \xi_0)$$

$$C_{v2} = \frac{1}{2} (1 + \xi_0^2)^{-1} + (1 + \nu_1) (1 - \xi_0 \tan^{-1} \xi_0)$$

$$\xi_0 = 0.0475 + (1 + \nu_1) \left(\frac{1 - \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} \right)$$

联合式(2)~(9)可得

$$\Delta Q = 2a\delta L = f\{(m_2, R, v, \alpha, u)(E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, c, \varphi)\} \quad (10)$$

经整理后， ΔQ 可以由 (m_2, R, v, α, u) 和 $(E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, c, \varphi)$ 构成的函数 f 表示。其中 (m_2, R, v, α, u) 为矿石的几何、运动参数， $(E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, c, \varphi)$ 为矿石和围岩的力学参数，这些参数可以通过几何测量和室内岩石力学试验确定。

2.2 溜井中矿石运动模型

矿石在溜井中的运动过程如图3所示，溜槽的倾角为 θ ，溜井直径和深度分别为 D 和 H 。矿石在溜槽上的运动状态复杂，很难确定矿石的运动轨迹。但实践表明，当溜槽足够长时，矿石在溜槽上发生一系列相互碰撞、弹跳后会形成稳定的矿石流。矿石流从溜槽进入溜井时，矿石流整体存在平均速度，不同的矿石的速度大小在一定范围内波动，但是矿石的速度角度都近似相同。定义矿石流进入溜井时的整体平均速度为 v_0 ，角度为 θ 。

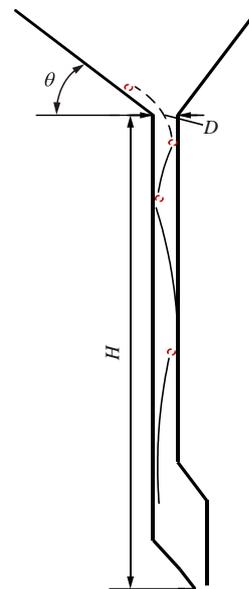


图3 溜井中矿石运动过程图

Fig.3 Motion of ore in ore pass

研究矿石在溜井中的运动时，作如下的假设：

- (1) 溜井壁为形态平整的直筒，且溜井壁岩性一致，满足莫尔-库仑强度准则；
- (2) 矿石简化为质量均匀分布的球体；
- (3) 矿石和井壁岩体均为各向同性理想弹塑性体，不考虑矿石的破坏；

(4) 矿石在运动过程中只考虑矿石平动，不考虑矿石的自身转动，且矿石平动时，可以将矿石简化为一个质点。

矿石进入溜井时的速度为 v_0 ，速度角度为 θ 。第一次碰撞前，矿石在溜井中的运动时间 t_1 为

$$t_1 = \frac{D}{v_0 \cos \theta} \quad (11)$$

矿石与溜槽发生第一次碰撞时，矿石的冲击速度 v_1 和下降高度 h_1 分别为

$$v_1 = \sqrt{(v_0 \cos \theta)^2 + (v_0 \sin \theta + gt_1)^2} \quad (12)$$

$$h_1 = v_0 \sin \theta t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \quad (13)$$

此时，矿石的法向速度 $(v_1)_x^-$ 和切向速度 $(v_1)_y^-$ 分别为

$$(v_1)_x^- = v_0 \cos \theta \quad (14)$$

$$(v_1)_y^- = v_0 \sin \theta + gt_1 \quad (15)$$

冲击角度 α 为

$$\alpha = \arctan \frac{v_0 \cos \theta}{v_0 \sin \theta + gt} \quad (16)$$

碰撞后，矿石的法向速度 $(v_1)_x^+$ 和切向速度 $(v_1)_y^+$ 分别为

$$(v_1)_x^+ = (\lambda_1)_x (v_1)_x^- \quad (17)$$

$$(v_1)_y^+ = (\lambda_1)_y (v_1)_y^- \quad (18)$$

式中： $(\lambda_1)_x$ 和 $(\lambda_1)_y$ 分别为矿石与井壁第一次碰撞时的法向速度恢复系数和切向速度恢复系数。矿石反弹后与井壁发生后续碰撞，运动轨迹计算公式与式(11)~(18)相同。

经过以上分析可知：矿石在溜井中运动时，井壁围岩在矿石冲击下的体积损失由式(10)确定，矿石的运动轨迹由式(11)~(18)确定。对于具体矿山而言，矿石的几何、运动参数、矿石与井壁围岩的物理力学性质、溜槽与溜井的结构参数是已知的，根据以上参数可以获得溜井壁的破损特征，下面将结合实例进行分析。

3 某露天矿工程概况

3.1 溜井结构特征

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 2385 卸料平台，然后经由溜槽、溜井下放至 2208 水平，经过初级破碎，最后由皮带运输至矿石选厂。矿石的运动参数及溜井的结构参数如表 1 所示。

表 1 矿石的运动参数及溜井的结构参数

Table 1 Motion parameters of ore and structure parameters of ore pass

溜槽倾角 $\theta / (^\circ)$	溜井直径 D/m	平均速度 $v_0 / (m \cdot s^{-1})$	速度分布范围 $(m \cdot s^{-1})$	溜井深度 H/m
45	4	28	25 ~ 31	102

3.2 矿石块度信息

考虑到矿石块度对溜井壁冲蚀破损特性的影响，对现场 11 次生产爆破的爆堆进行图像采集，见图 4。利用 Split-Desktop 块度分析软件处理信息，获取的矿石块度信息如图 5 所示。



图 4 现场爆堆

Fig.4 Muckpile on site

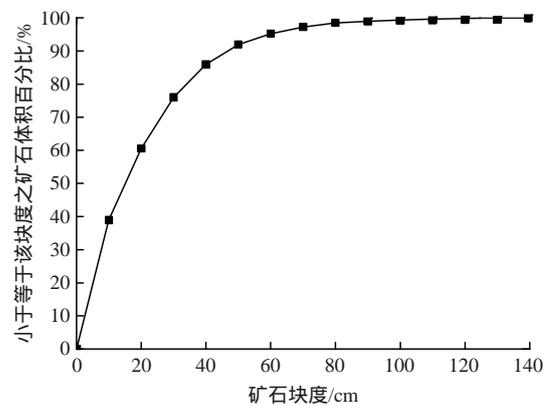


图 5 矿石块度分布

Fig.5 Distribution of the ore size

由图 5 可知，现场矿石块度大部分处在 50 cm 以下，块度小于 50, 40, 30, 20 和 10 cm 的矿石体积占所统计矿石体积的比例分别是 91.96%，85.95%，76%，60.56%和 38.91%，超过 100 cm 的大块只是零星出现。

3.3 井壁与矿石的物理力学性质

根据现场调查与岩石力学试验，井壁围岩与矿石的力学参数如表 2 所示。

表2 溜井壁和矿石的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of ore and ore pass wall

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	密度 $\rho /$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	摩擦系 数 u
井壁	0.02	0.28	380	28	2 225	0.35
矿石	46.26	0.22	-	-	2 670	

4 井壁破损特性分析

4.1 单个矿石冲击下井壁破损特性

由式(11)~(13)可知,具有相同初始条件的不同半径大小的矿石,与溜井壁发生第一次碰撞时的位置相同。此后由于不同大小、速度的矿石具有不同的碰撞速度恢复系数,矿石在溜井中的运动轨迹不同,对溜井壁冲击破坏的位置也将不同。为了不失一般性,本文根据现场矿石的级配分布规律,选取块度大小分布集中形式(半径 $R = 0.05 \text{ cm}$),矿石速度为平均速度 28 m/s ,代入矿石运动模型,进行溜井壁冲击破坏特征的理论计算。可以得到矿石在溜矿段的运动特性及井壁的破损信息,结果如表3和4所示。

表3 矿石在溜矿段的运动特性

Table 3 Motion characteristics of ore in ore pass

碰撞次数	垂直距离/ m	碰撞前速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		冲击角 $\text{度}/(\text{°})$	恢复系数		碰撞后速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
		法向	切向		法向	切向	法向	切向
1	4.20	19.80	21.78	42.27	0.29	0.59	5.76	12.83
2	15.48	5.76	19.64	16.35	0.40	0.86	2.28	16.83
3	60.09	2.28	34.02	3.83	0.50	0.96	1.13	32.83

表4 单个矿石冲击下井壁的破损特性

Table 4 Damage characteristics of ore pass wall caused by single ore

碰撞次数	接触面半径/ (10^{-2} m)	凹坑深度/ (10^{-2} m)	滑移距离/ (10^{-2} m)	体积损失/ (10^{-5} m^3)
1	3.58	2.57	2.32	4.28
2	2.19	0.96	3.41	1.43
3	1.51	0.46	8.17	1.13

由表3可知,矿石由溜槽进入溜井后,与井壁发生3次碰撞后落入矿仓。随着碰撞次数的增加,矿石的法向速度逐渐减小。由于溜井的直径不变,每次碰撞的时间间隔会增大。虽然碰撞前后矿石的切向速度会减小,但在重力的作用下,矿石的整体切向速度逐渐增大。随着碰撞次数的增加,冲击角度会减小,法向和切向恢复系数会变大。由表4可

知,法向速度的减小导致井壁上的凹坑深度和接触面半径会减小;切向速度的增大导致矿石在井壁上的滑移距离增大。随着矿石碰撞次数的增大,井壁的体积损失逐渐减小。综上,溜井上部围岩的破损程度大;溜井下部围岩的破损程度较小。图6为现场溜井轮廓素描图,1,2和3区分别对应溜井的3次碰撞位置,井壁的破损特性与实际符合较好,这在一定程度上证明计算模型的有效性。

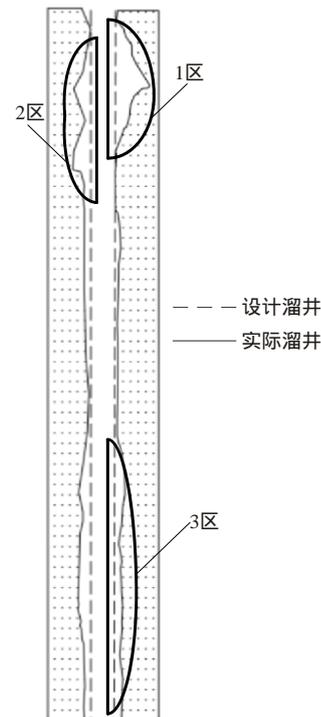


图6 现场溜井轮廓素描图

Fig.6 Sketch of ore pass in actual situation

4.2 矿石流冲击下井壁破损特性

由本文分析可知,单个矿石($R = 0.05 \text{ m}$, $v = 28 \text{ m/s}$)会与溜井发生3次碰撞。在单个矿石的分析中,没有考虑矿石块度和矿石从溜槽进入溜井时速度的影响。考虑到矿石块度的离散性和速度的波动性,矿石块度和速度的取值应具有随机性。而矿石块度和速度的取值的变化不仅会影响矿石的第一次碰撞的位置,还会导致运动过程中碰撞恢复系数等其他运动参数发生变化,影响矿石的后续运动。

伪随机算法内部包含伪随机数生成器,可以解决矿石流中矿石块度和速度取值不确定性的缺陷。通过大量生成伪随机数组来表示矿石的块度和速度,模拟矿石流在溜井中的运动,进而计算碰撞位置及分布范围。本文通过 MATLAB 软件编制矿石块度和速度的分布函数,其中矿石的块度信息如图5所示,速度在取值范围(见表1)内服从均匀分布。矿石流轨迹计算时,根据分布函数随机生成矿石块度

和速度，并代入前文中建立的计算模型，式(11)~(18)。计算中共生成 10^5 组块度和速度参数，代表 10^5 个矿石。

本文在矿石流的冲击范围时，不考虑矿石间的相互碰撞和井壁动态破损的影响。根据计算结果，各碰撞位置的分布范围及体积损失如表 5 所示，其中累积体积损失是在单次碰撞的基础上累加得到。

表 5 矿石流冲击下井壁的破损特性

Table 5 Damage characteristics of ore pass wall caused by ore flow

碰撞位置	碰撞范围/m	累积体积损失/m ³	每米长度体积损失/m ³
1 区	4.16 ~ 4.25	426.91	4 743.44
2 区	15.11 ~ 16.02	149.23	163.99
3 区	56.97 ~ 64.34	136.80	18.59

由表 5 可知，1 区的碰撞范围集中，说明矿石流从溜槽进入溜井后的第一次冲击点固定，每米长度体积损失最大，井壁破损最严重，从安全角度考虑，建议设置缓冲硐室、堆积粉矿来进行柔性防护；2 区的碰撞范围较小，井壁破损较严重，综合考虑安全、经济性，建议设置衬板保护井壁，并定期更换；3 区的碰撞范围较大，每米长度体积损失最小，井壁破坏以磨损为主，从经济角度考虑，适合采用钢纤维喷射混凝土进行防护，避免井壁的磨损^[15]。

5 结 论

(1) 以冲蚀磨损理论和 Hertz 接触理论为基础，建立了矿石冲击下井壁围岩体积损失的计算方法。

(2) 以华新钴沟石灰岩矿山为例，采用伪随机算法计算井壁的破损特性。矿石与井壁发生 3 次碰撞后落入矿仓，溜井上部井壁的破坏范围小，破损程度大，溜井下部井壁的破坏范围大，破损程度小。从安全性和经济性出发，提出分类防护措施。

(3) 本方法适用于形态平直的井壁，对于新建溜井的防护设计有重要意义。针对连续碰撞过程中井壁围岩动态体积损失的计算方法还有待进一步研究。

参考文献(References)：

[1] 罗周全, 陈 杰, 谢承煜, 等. 主溜井冲击损伤机制分析及实验验证[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1 744-1 751.(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): 1 744-1 751.(in Chinese))

[2] 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.(in Chinese))

[3] 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.(in Chinese))

[4] 黄 雨, 孙启登, 许 强. 滚石运动特性研究新进展[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 31-35.(HUANG Yu, SUN Qideng, XU Qiang. New development of rockfall kinematics study[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 31-35.(in Chinese))

[5] 王学良, 张路青, 杨志法. 滚石运动的计算方法及其研究中的不确定性[J]. 工程地质学报, 2015, 23(增1): 166-172.(WANG Xueliang, ZHANG Luqing, YANG Zhifa. Approaches for rockfall run-out calculation and uncertainty in rockfall study[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(Supp.1): 166-172.(in Chinese))

[6] 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, 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.(in Chinese))

[7] 何思明, 吴 永, 杨雪莲. 滚石坡面冲击回弹规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 2 793-2 798.(HE Siming, WU Yong, YANG Xuelian. Study of rock-fall motion on slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 793-2 798.(in Chinese))

[8] THORNTON C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic perfectly plastic spheres[J]. Journal of Applied Mechanics, 1997, 64(2): 383-386.

[9] 侯天兴, 杨兴国, 黄 成, 等. 基于冲量定理的滚石对构筑物冲击力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 1): 3 116-3 122.(HOU Tianxing, YANG Xingguo, HUANG Cheng, et al. A calculation method based on impulse theorem to determine impact force of rockfall on structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.1): 3 116-3 122.(in Chinese))

[10] 何思明, 李新坡, 吴 永. 滚石冲击荷载作用下土体屈服特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 1): 2 973-2 977.(HE Siming, LI Xinpo, WU Yong. Research on yield property of soil under rock-fall impact[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 2 973-2 977.(in Chinese))

[11] 袁进科, 黄润秋, 裴向军. 滚石冲击力测试研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 48-54.(YUAN Jinke, HUANG Runqiu, PEI Xiangjun. Test research on rockfall impact force[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 48-54.(in Chinese))

[12] BEN-AMI Y, UZI A, LEVY A. Modelling the particles impingement angle to produce maximum erosion[J]. Powder Technology, 2016, 301(7): 1 032-1 043.

[13] HUANG C, CHIOVELLI S, MINEV P, et al. A comprehensive phenomenological model for erosion of materials in jet flow[J]. Powder Technology, 2008, 187(3): 273-279.

[14] BRACCESI C, LANDI L. A general elastic-plastic approach to impact analysis for stress state limit evaluation in ball screw bearings return system[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(7): 1 272-1 285.

[15] 张富民. 采矿设计手册 3: 井巷工程卷[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989: 548-558.(ZHANG Fumin. Mining design manual.3, sinking and driving engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1989: 548-558.(in Chinese))