

# 基于 EDEM 的新型溜井落矿轨迹及受力特征分析研究

杨鑫康, 赖徐强

(长沙有色冶金设计研究院有限公司)

**摘要:**在矿山开采中,溜井作为关键的矿石输送设施,其性能对矿山的整体运营效率和安全性至关重要。然而,由于内部复杂的流体动力学行为及多因素交互影响,溜井设计与优化极具挑战性。深入探讨了溜井设计原则、工作原理及其相关影响因素,并提出优化方法以延长溜井使用寿命。通过理论推导确定了溜井中矿石的运动轨迹方程,计算了法向恢复系数与切向恢复系数,通过数值模拟发现矿石碰撞时法向力显著大于切向力,斜溜槽落矿产生的法向力与切向力均高于中心落矿。其中,法向力平均增幅约为 36%,切向力平均增幅约为 17%;同时,切向磨损比法向磨损严重,斜溜槽落矿磨损集中于矿石撞击点且整体磨损程度远超中心落矿。速度相同时,中心落矿形式下溜井井壁承受的内力较小,随着矿石初速度增加,井壁内力增长速率亦随之上升,2 种形式下 4 m/s 时的最大增长速率为 0 m/s 时的 2.3 倍、2.2 倍。建议采取如设置自动钢板导向门和缓冲硐室等措施降低矿石初始速度,从而减少溜井井壁所受内力。

**关键词:**溜井;中心放矿;落矿轨迹;受力分析;颗粒流模拟;理论推导

中图分类号:TD521<sup>+</sup>.1

文章编号:1001-1277(2025)11-0023-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20251104

## 引言

随着工业生产和资源开发的不断发展,溜井作为重要的地下开采结构,在矿山、隧道、地铁等领域得到了广泛应用。然而,传统的溜井结构存在一些问题<sup>[1-3]</sup>,如运行效率低、安全性差、维护成本高等,制约了其进一步发展和应用。本次研究提出了一种新型溜井结构,以期解决上述问题并为溜井设备的研发和改进提供新的思路和理论支持。

矿石在溜井中的运动轨迹直接影响溜井的工作效率和安全性。因此,不少学者对此进行了研究,这些研究可以分为随机介质放矿理论和连续介质放矿理论 2 种类型。随机介质放矿理论最初由波兰专家 LITWINISZYN<sup>[4]</sup>在 20 世纪 60 年代提出,将松散介质的运动视为一种随机现象,并运用概率论方法构建了描述矿岩散体运动的随机介质模型。1992 年,任凤玉<sup>[5]</sup>基于试验研究建立了一种描述散体移动概率密度的方程,进一步发展和完善了随机介质放矿理论。连续介质放矿理论可以被划分为 2 个主要分支,即椭球体放矿理论和类椭球体放矿理论。椭球体放矿理论最初由苏联学者马拉霍夫<sup>[6]</sup>提出,然而这一理论在实际应用中存在一些问题,如其预测的放出体与实际情况可能存在偏差。刘

兴国<sup>[7]</sup>对偏心率值的变化和放矿口的影响进行了简化处理,并据此构建了描述矿石散体运动规律的基本数学模型。李荣福<sup>[8]</sup>率先指出放出体是截头椭球体,并对大量试验数据进行回归分析,建立了计算偏心率的经验公式,形成了类椭球体放矿理论。THORNTON 等<sup>[9-10]</sup>通过弹塑性接触理论研究了碰撞回弹系数。秦宏楠等<sup>[11]</sup>采用运动学理论分析结合离散元程序模拟分析了溜放矿石在井筒内的运动规律及对溜井井筒的冲击破坏规律。殷越等<sup>[12]</sup>通过建立矿石运动模型,确定了矿石在溜井中的初始碰撞范围。

溜井受限于围岩地质条件,易发生碰撞磨损等问题,严重影响使用寿命和工作效率。因此,对溜井碰撞磨损特征的研究显得尤为重要。秦秀山等<sup>[13-14]</sup>通过对已垮塌的井壁进行三维激光扫描,结合工程地质条件、矿石碰撞磨损和放矿制度等,分析垮塌原因并确定各因素的影响规律。罗周全等<sup>[15-16]</sup>为了研究井壁受矿石碰撞的破坏情况,使用 MATLAB 软件计算了矿石流对井壁的冲量分布特征,并通过 Flac<sup>3D</sup> 软件建立溜井受矿石流碰撞损伤模型,得到溜井受矿石流碰撞破坏的分布规律。李江<sup>[17]</sup>经过现场调研和数值模拟,发现爆破振动、矿石流的冲刷及围岩的稳定性是引起井壁破坏的重

要原因。梁凯歌等<sup>[18]</sup>通过物理试验,对溜井倾角进行了研究,发现溜井倾角是影响矿岩与倾斜溜井底板首次碰撞位置的主要因素。路增祥等<sup>[19]</sup>推导了垂直溜井储矿段井壁和倾斜溜井底板的摩擦力计算公式,矿岩块与井壁材料间摩擦系数的大小及矿岩作用在井壁法向上力的大小决定了磨损破坏的程度。叶海旺等<sup>[20]</sup>通过PFC2D软件建立溜井模型,发现初始碰撞位置位于井壁右侧5~10 m处冲量最大。

当前对于溜井井壁的受力研究较少,溜井中矿石颗粒的运动轨迹研究也较少。本文基于连续介质放矿理论对矿石在溜井中的运动轨迹方程进行了推导,计算了中心落矿溜井和斜溜槽落矿溜井的井壁受力特征,对比了矿石初速度不同时溜井的内

力,为后续溜井设计提供了一定的参考依据。

1 工程概况

深圳市中金岭南有色金属股份有限公司凡口铅锌矿(下称“凡口铅锌矿”)位于广东省仁化县,铅锌矿石产量为100×10<sup>4</sup> t/a,采用地下开采,采矿方法主要为盘区机械化分层充填采矿法。

本文研究内容为矿区的5<sup>#</sup>溜井,溜井在6个中段设置了装载硐室,自2020年建成以来一直运行。溜井段地质条件主要为:中泥盆统东岗岭阶灰岩、上泥盆统天子岭组灰岩、帽子峰砂页岩、腊石坝段砂页岩,深部矿石属中等稳固到极稳固,围岩属中等稳固。凡口铅锌矿地层物理力学参数如表1所示。

表1 凡口铅锌矿地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of strata in Fangkou Lead-Zinc Mine

地层	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和抗压强度/MPa	饱和抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa
中泥盆统东岗岭阶灰岩	2.73	78.50	2.45	2.98	48.5	23.4
上泥盆统天子岭组灰岩	2.73	77.56	2.36	2.56	45.0	22.6
帽子峰砂页岩	2.74	85.60	3.56	4.67	50.5	25.4
腊石坝段砂页岩	2.74	88.50	3.76	4.98	50.3	25.6

传统溜井作为一种常见的矿石输送设施,在矿山工程中发挥着重要作用,但其设计和使用过程中存在一些显著的缺点。首先,传统溜井井壁结构通常采用钢筋混凝土或金属材料建造,由于长期受到矿石高冲击力和持续磨损的影响,井壁容易遭受严重破坏。在矿石下落撞击、摩擦及腐蚀等多重作用下,井壁的耐磨性与耐久性面临严峻考验,常出现裂缝、剥落甚至大面积破损的现象,这不仅导致井壁防护功能失效,还会增加维修成本,影响正常生产作业。其次,环保性能差,传统溜井在输送过程中,由于物料与井壁摩擦及自由落体撞击,易产生大量粉尘,不仅影响作业环境,也对周边环境造成污染。最后,运输能耗较高,相较于皮带运输、斜坡道运输等方式,溜井运输方式能耗相对较高,不符合现代矿山绿色、节能的发展趋势。

为了减小矿石对于井壁的冲击,本文提出一种新型中心落矿结构,通过上部缩口的形式将矿石集中,减少矿石对于井壁的冲击,从而减小井壁的磨损、增加耐久性,中心落矿与斜溜槽落矿形式的对比如图1所示。

2 矿石运动轨迹理论推导

为研究矿石在溜井中的运动轨迹,以矿石初始

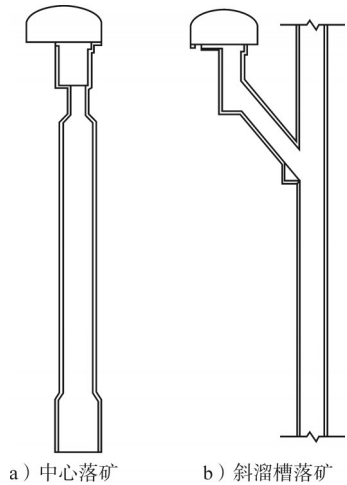


图1 不同落矿形式溜井示意图对比

Fig. 1 Comparison of different draw shaft designs

位置为原点,溜井中心线方向为y轴正向,矿石水平方向为x轴正向,建立坐标系。假设矿石进入溜井时速度为v<sub>0</sub>,与x轴正向的夹角为θ,则水平方向速度v<sub>n</sub>、竖直方向速度v<sub>i</sub>的表达式为:

$$v_n = v_0 \cos \theta \tag{1}$$

$$v_i = v_0 \sin \theta + gt \tag{2}$$

式中:g为重力加速度(m/s<sup>2</sup>);t为运动时间(s)。

由矿石在溜井内运动距离D可知,矿石第一次碰撞时间(t<sub>1</sub>)为:

$$t_1 = \frac{D}{v_0 \cos \theta} \quad (3)$$

取矿石与溜井碰撞的法向恢复系数为  $\xi_n$ , 切向恢复系数为  $\xi_t$ , 则第一次碰撞后的法向速度( $v'_n$ )和切向速度( $v'_t$ )为:

$$v'_n = v_0 \cos \theta \xi_n \quad (4)$$

$$v'_t = v_0 \sin \theta + \frac{gD}{v_0 \cos \theta} \xi_t \quad (5)$$

根据 Hertz 接触理论, 假设材料为弹塑性材料, 法向碰撞恢复系数可通过式(6)计算得出:

$$\xi_n = \left\{ \frac{6\sqrt{3}}{5} \left[ 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{v_y}{v_n} \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \left\{ \frac{v_y}{v_n} \left[ \frac{v_y}{v_n} + 2 \sqrt{\frac{6}{5} - \frac{1}{6} \left( \frac{v_y}{v_n} \right)^2} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

式中:  $v_y$  为矿石散体法向碰撞速度(m/s)。

何思明等<sup>[10]</sup>在假设被碰撞面满足摩尔-库仑准则的基础上, 推导了被碰撞面初始屈服满足法向冲击速度的计算公式:

$$v_y = 18.1 \frac{R^{\frac{3}{2}}}{E^2 m^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{2C \cos \phi}{C_{\mu_1} - C_{\mu_2} \sin \phi} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} C_{\mu_1} = \frac{3}{2} (1 + \xi_0^2)^{-1} - (1 - v_1)(1 - \xi_0 \tan^{-1} \xi_0) \\ C_{\mu_2} = \frac{1}{2} (1 + \xi_0^2)^{-1} - (1 + v_2)(1 - \xi_0 \tan^{-1} \xi_0) \\ \xi_0 = 0.00475 + (1 + v_1) \left( \frac{1 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \right) \\ \frac{1}{E} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $R$  为矿石散体的半径(m);  $E$  为等效弹性模量(MPa);  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为溜井井壁和矿石的弹性模量(MPa)和泊松比;  $m$  为矿石的质量(kg);  $C$ 、 $\phi$  分别为被冲击面的内聚力(MPa)和内摩擦角(°)。

由冲击力的关系公式推导得到法向恢复系数的计算公式为:

$$\xi_t = 1 - \eta(1 + \xi_n) \tan \alpha \quad (9)$$

式中:  $\eta$  为切向冲击力和法向冲击力的关系系数;  $\alpha$  为冲击倾角(°)。

根据运动学方程, 以及式(1)、式(2), 矿石与溜井第一次碰撞前的运动公式为:

$$x(t) = (v_0 \cos \theta) t \quad (10)$$

$$y(t) = (v_0 \sin \theta) t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (11)$$

$$0 \leq t \leq \frac{D}{v_0 \cos \theta} \quad (12)$$

根据运动学方程, 以及式(4)、式(5), 矿石与溜井第一次碰撞后第二次碰撞前的运动公式为:

$$x(t) = (v_0 \cos \theta) \xi_n (t - t_1) \quad (13)$$

$$y(t) = (v_0 \sin \theta + \frac{gD}{v_0 \cos \theta}) \xi_t (t - t_1) + \frac{1}{2} g (t - t_1)^2 \quad (14)$$

根据凡口铅锌矿工程的实际情况, 计算得出  $\xi_n = 0.3876$ ,  $\xi_t = 0.8255$ ; 根据式(10)~(14)进一步计算得到  $x$ 、 $y$  轴坐标随时间的变化关系, 如图2、图3所示。

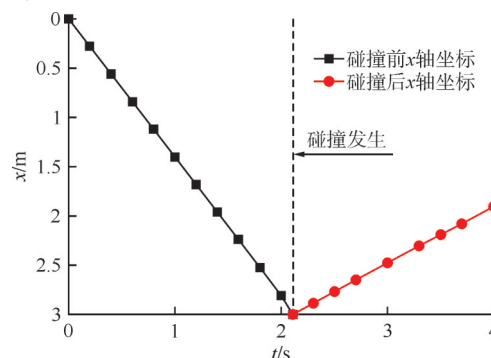


图2 碰撞前后  $x$  轴坐标变化图

Fig. 2 Change in  $x$ -axis coordinates before and after collision

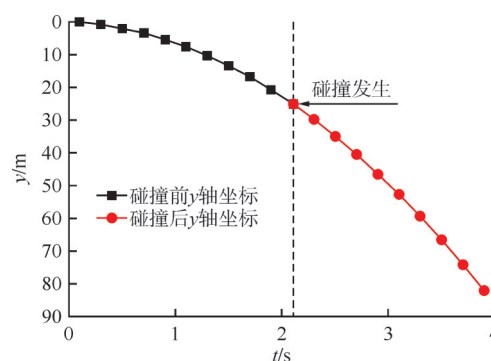


图3 碰撞前后  $y$  轴坐标变化图

Fig. 3 Change in  $y$ -axis coordinates before and after collision

### 3 数值模拟

#### 3.1 模型建立

为研究新型中心落矿溜井结构与传统溜井结构的区别, 使用数值软件 EDEM 进行数值模拟。EDEM 是一款基于高级离散元法 (Discrete Element Method, DEM) 的通用仿真分析软件, 由英国 EDEM 公司开发。它是全球首个多用途离散元建模软件, 主要用于工业生产中的颗粒处理及其制造设备生产过程的仿真和分析, 满足本文研究内容中矿石颗粒和溜井的仿真要求。中心落矿溜井数值模型的参数为: 主溜井直径 3.0 m, 长度 80 m, 溜井上部的中心落矿结构直径 2.4 m, 溜井、矿石的参数根据实际情



况选取。传统斜溜槽落矿数值模型的主溜井直径 3.0 m,斜溜槽直径 2.4 m,长度同样设为 80 m。2 种形式溜井、矿石的物理参数一致,2 种放矿模型落矿形式对比如图 4 所示。

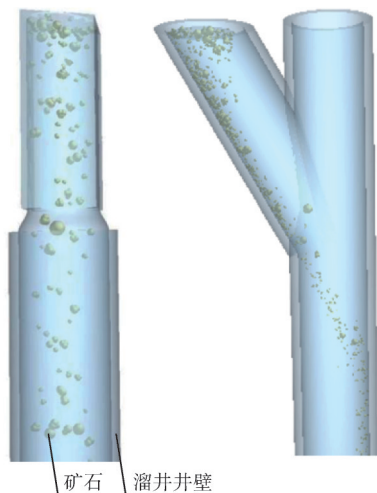


图4 2种放矿模型落矿形式对比示意图

Fig. 4 Comparison of two ore drawing models in terms of ore breakdown methods

3.2 数值模拟验证

为了验证数值模型的可行性,在数值模型中提取某一颗粒的运动轨迹,同时矿石运动轨迹还可以通过理论推导中式(10)、式(11)、式(13)、式(14)得到。理论计算与数值模拟碰撞前后的运动轨迹对比如图 5 所示。造成碰撞前差异的主要原因是中心放矿实际运动路径小于溜井直径;造成碰撞后差异的主要原因是数值模拟软件中设置回弹恢复系数时不区分法向与切向,设置统一的碰撞系数。通过图 5 对比发现,数值模拟与理论计算的差距在合理范围内,验证了数值模型的合理性。

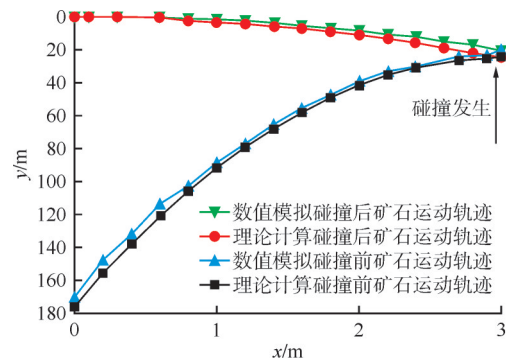


图5 理论计算与数值模拟运动轨迹对比

Fig. 5 Comparison of motion trajectories by theoretical calculations and numerical simulations

3.3 法向力、切向力对比

在验证数值模型可行性的基础上,为进一步对比中心落矿与斜溜槽落矿的区别,根据数值模拟软件的特点,从中提取井壁与矿石颗粒碰撞的法向力

与切向力,以时间步长为横坐标,中心落矿与斜溜槽落矿 2 种形式下井壁的法向力、切向力为纵坐标绘图,结果如图 6、图 7 所示。

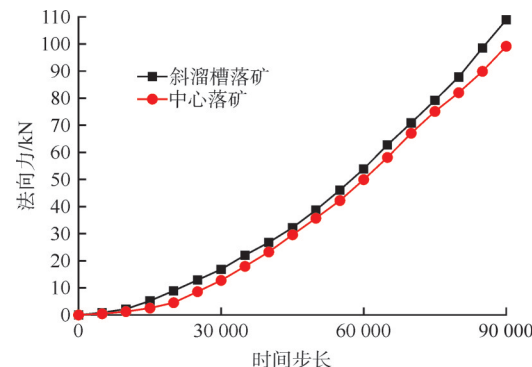


图6 2种落矿形式下井壁法向力对比示意图

Fig. 6 Comparison of normal force on well wall under two types of ore drawing methods

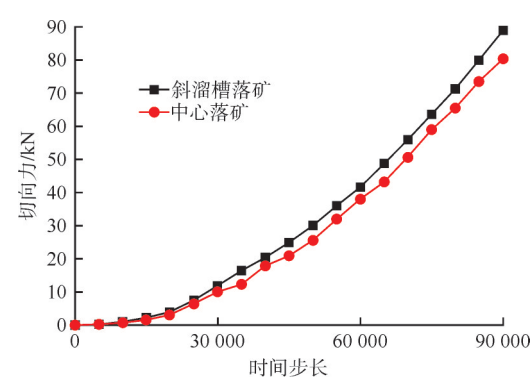


图7 2种落矿形式下井壁切向力对比示意图

Fig. 7 Comparison of tangential force on well wall under two types of ore drawing methods

由图 6、图 7 可知:矿石颗粒撞击井壁时,法向力大于切向力。对于法向力而言,斜溜槽落矿大于中心落矿;相较于中心落矿,斜溜槽落矿的法向力平均增幅约 36 %。对于切向力而言,斜溜槽落矿大于中心落矿;相较于中心落矿,斜溜槽落矿的切向力平均增幅约 17 %。

3.4 磨损对比

磨损是溜井研究的重点和难点问题,溜井内部的磨损状况直接决定了溜井的工作寿命和安全性能,严重磨损不仅会导致溜井容积减小、工作效率下降,还可能引发井壁破裂、垮塌等重大安全事故。2 种落矿形式下的井壁磨损如图 8 所示。

由图 8 可知:中心落矿形式下,切向磨损大于法向磨损。井壁的磨损较小,主要来自于卸矿产生的矿石初速度及矿石自由落体碰撞后轨迹改变造成的碰撞,整体磨损分布较为均匀。斜溜槽落矿形式下,切向磨损大于法向磨损,且受矿石冲击部位的井壁磨损较大,未受到矿石冲击部位的井壁磨损较小。整体而言,2 种落矿形式下切向磨损均大于法

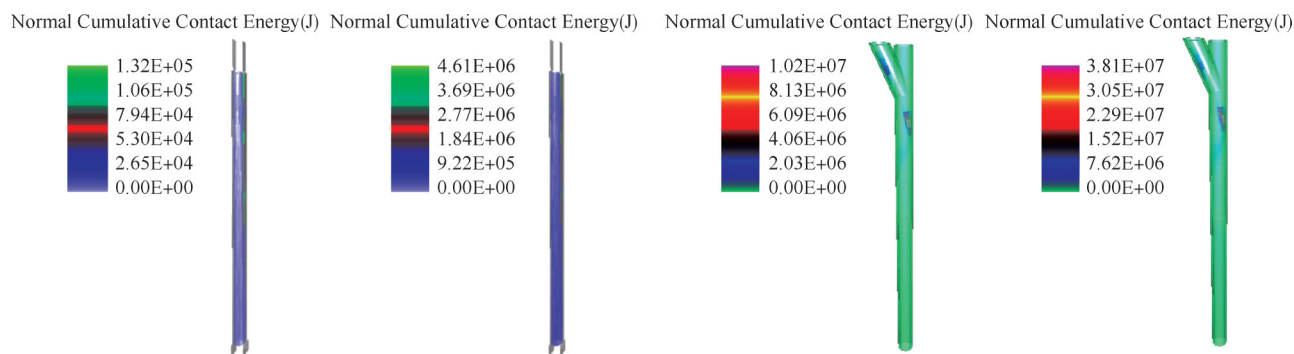


图 8 2 种落矿形式下的井壁磨损对比示意图

Fig. 8 Comparison of well wall wear under two types of ore drawing methods

向磨损,中心落矿磨损分布均匀,斜溜槽落矿磨损集中在矿石撞击位置,其最大磨损远大于中心落矿。

### 3.5 不同初速度对比

矿石的初速度是评估矿石冲击井壁影响的重要因素。为了评估不同初速度条件下井壁的受力特征,通过在数值软件中赋予矿石不同的初速度,研究不同初速度下井壁内力的大小。中心落矿和斜溜槽落矿条件下矿石初速度  $0 \sim 4$  m/s 时,井壁内力如图 9、图 10 所示。

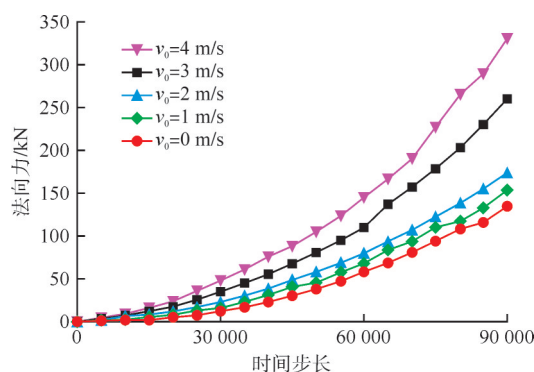


图 9 中心落矿不同初速度井壁内力对比

Fig. 9 Comparison of internal forces in well walls with different initial velocities during centered ore drawing

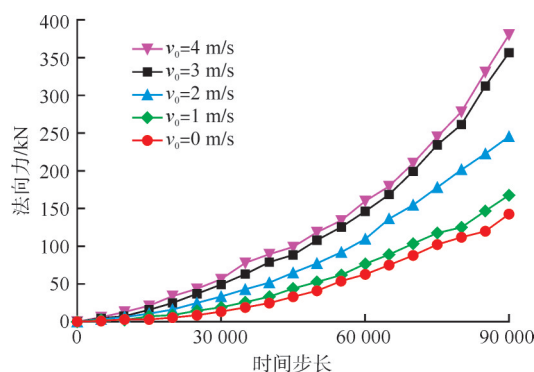


图 10 斜溜槽落矿不同初速度井壁内力对比

Fig. 10 Comparison of internal forces in well walls with different initial velocities during inclined chute ore drawing

由图 9、图 10 可知:同等初速度时,中心落矿溜

井井壁的内力小于斜溜槽落矿。矿石初速度 2 m/s 时,二者差别最大,此时斜溜槽落矿井壁内力相较于中心落矿增加了 42 %。对于中心落矿,随着矿石初速度从 0 m/s 增加至 4 m/s,溜井井壁的内力逐渐增大,且内力增加的速率随初速度增加而增加。4 m/s 时内力最大增加速率是 0 m/s 的 2.3 倍。对于斜溜槽落矿,随着矿石初速度增加,溜井井壁的内力逐渐增大,且内力增加速率随初速度增加而增加,4 m/s 时内力最大增加速率是 0 m/s 的 2.2 倍。总而言之,矿石初速度相同时,斜溜槽落矿井壁压力大于中心落矿。随着矿石初速度的增加,溜井井壁内力增加且内力增加速率也随之增加。因此,建议采取卸矿口设置自动钢板导向门、缓冲硐室等措施来减小矿石初速度,以减小溜井井壁内力。

## 4 结 论

本文基于理论推导结合数值模拟,对溜井中矿石颗粒的运动轨迹进行了推导,对比了中心落矿和斜溜槽落矿 2 种形式下井壁的法向力、切向力。分析了矿石不同初速度条件下溜井井壁的内力。得出以下结论:

1) 理论推导了矿石颗粒在溜井中的运动轨迹,计算了矿石碰撞溜井井壁的法向恢复系数与切向恢复系数。

2) 依托数值模拟,对比了中心落矿和斜溜槽落矿 2 种形式下井壁的法向力、切向力。发现矿石颗粒撞击井壁时法向力大于切向力,斜溜槽落矿的法向力、切向力均大于中心落矿,法向力平均增幅约 36 %,切向力平均增幅约 17 %。

3) 数值模拟结果表明,2 种落矿形式下切向磨损大于法向磨损,中心落矿磨损分布均匀,斜溜槽落矿磨损集中在矿石撞击位置,其最大磨损远大于中心落矿。

4) 通过对矿石初速度数值模拟发现,同等初速度条件下,中心落矿溜井井壁的内力小于斜溜槽落

矿。随着矿石初速度增加,溜井井壁内力的增加速率也随之增加,中心落矿和斜溜槽落矿2种形式下,4 m/s时的内力最大增加速率分别是0 m/s的2.3倍、2.2倍。建议采取卸矿口设置自动钢板导向门、缓冲硐室等措施来减小矿石初速度,以减小溜井井壁内力。

#### [参考文献]

- [1] 江鹏,李斌.紫金山金铜矿深部主溜井控制放矿技术及应用[J].黄金,2022,43(6):45-47,52.
- [2] REMENNIKOVA A M, MUTTONB V, NIMBALKARCS, et al. Experimental and numerical investigation of high-yield grout ore pass plugs to resist impact loads[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 70: 1-15.
- [3] 明世祥.地下金属矿山主溜井变形破坏机理分析[J].金属矿山, 2004(1): 5-8.
- [4] LITWINISZYN J. Application of the equation of stochastic processes to mechanics of loose bodies [J].Archiwum Mechaniki Stosowanej, 1956, 8(4): 393-411.
- [5] 任凤玉.随机介质放矿理论及其应用[M].北京:冶金工业出版社, 1994.
- [6] 马拉霍夫.崩落矿块的放矿[M].北京:冶金工业出版社, 1958.
- [7] 刘兴国.崩落采矿法放矿时矿石移动的基本规律(上)——关于椭圆体理论的研究[J].有色金属(矿山部分), 1979(4): 38-45, 26.
- [8] 李荣福.放矿基本规律的统一数学方程[J].有色金属(矿山部分), 1983(1): 1-8.
- [9] THORNTON C. Coefficient of restitution for collinear collisions of elastic-perfectly plastic spheres[J].Journal of Applied Mechanics, 1997, 64(4): 383-386.
- [10] 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(增刊1): 2 793-2 798.
- [11] 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, 11(4): 20-26.
- [12] 殷越,路增祥,马驰.矿岩三维运动对主溜井井壁碰撞范围的影响[J].金属矿山, 2020(11): 31-36.
- [13] 秦秀山.某矿山4#碎矿站主溜井垮塌破坏原因分析[J].中国矿业, 2018, 27(增刊2): 241-244.
- [14] 胡勇,冯福康,陈慧相,等.基于可视化探测建模的主溜井变形特征分析[J].黄金, 2019, 40(12): 20-26.
- [15] 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): 1 744-1 751.
- [16] 陈杰,罗周全,谢承煜,等.地下金属矿山主溜井损伤分析及修复研究[J].中国安全生产科学技术, 2014, 10(12): 10-16.
- [17] 李江.大尹格庄金矿采场溜井破坏原因分析及修复研究[J].采矿技术, 2019, 19(2): 30-32.
- [18] 梁凯歌,路增祥,赵星如,等.溜井倾角对矿岩与溜井首次碰撞位置的影响[J].矿业研究与开发, 2023, 43(7): 50-53.
- [19] 路增祥,马驰,殷越.冲击磨损作用下的溜井井壁变形破坏机理[J].金属矿山, 2018(11): 37-40.
- [20] 叶海旺,赵昀,欧阳枫,等.平硐溜井系统矿石运动状态及井壁破坏数值模拟[J].金属矿山, 2017(11): 18-22.

## Analysis of ore trajectory and force characteristics in new ore passes based on EDEM

Yang Xinkang, Lai Xuqiang

(CINF Engineering Co., Ltd.)

**Abstract:** In mining operations, the ore pass is a critical ore transportation facility, and its performance is crucial to the overall operational efficiency and safety of the mine. However, due to complex internal fluid dynamics behaviors and multi-factor interactions, the design and optimization of ore passes are highly challenging. The design principles, working mechanisms, and related influencing factors of ore passes were discussed, and optimization methods were proposed to extend their service life. The trajectory equation of ore within the ore pass was determined through theoretical derivation, and the normal and tangential restitution coefficients were calculated. Numerical simulations reveal that the normal force during ore impact is significantly greater than the tangential force. Furthermore, both normal and tangential forces generated by oblique chute ore discharge are higher than those from central ore discharge. Specifically, the average increase in normal force reaches 36 %, and the tangential force increases by approximately 17 %. Concurrently, tangential wear is more severe than normal wear. Wear from oblique chute ore discharge concentrates at the ore impact point, and the overall wear degree far exceeds that from central ore discharge. At the same velocity, the internal forces borne by the ore pass wall are smaller under the central ore discharge mode. As the initial ore velocity increases, the growth rate of wall pressure also rises. At 4 m/s, the growth rates under the two modes are 2.3 times and 2.2 times those at 0 m/s, respectively. Implementing measures such as automatic steel plate guide gates and buffer chambers is recommended to reduce the initial ore velocity, thereby decreasing the internal forces acting on the ore pass walls.

**Keywords:** ore pass; central ore discharge; ore trajectory; force analysis; particle flow simulation; theoretical derivation