倾斜溜井内的矿岩运动特征及其影响因素研究

马强英1,梁凯歌1,马驰2,路增祥1,秦然3

(1.辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山市 114051;2.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;3.海南矿业股份有限公司, 海南 昌江黎族自治县 572700)

摘要:溜井是矿岩运输的重要工程,因卸矿冲击造成的井壁 损伤是制约溜井使用年限的主要问题。为分析倾斜溜井内 矿岩的运动过程,通过 PFC2D 数值模拟试验,结合物理相似 试验验证,模拟倾斜溜井卸矿过程,分析倾斜溜井内矿岩运 动形式及速度变化特征,研究溜井倾斜角度对矿岩运动规律 及撞击井壁位置的影响,讨论垂直溜井与倾斜溜井中矿岩运 动方式的差异性。研究发现,(1)当溜井倾斜角度为 60°时, 两次撞击位置高度分别距离卸矿口 1.36 m、3.30 m,撞击速 度分别为 9.53 m/s、5.47 m/s, 矿岩到达溜井底板时速度达 到峰值16.17 m/s; 矿岩运动过程可简化为5个阶段, 在分支 溜槽内做匀加速的滑动或滚动,脱离溜槽以一定初速度作斜 抛运动,与井壁发生两次撞击,沿着井壁做匀加速的滑动或 滚动运动,最后到达溜井底板。(2)溜井倾斜角度对矿岩运 动过程的影响非常显著,随着溜井倾斜角度的增加,矿岩两 次撞击井壁位置距离卸矿口高度呈增加趋势;倾斜角度超过 60°后,第2次撞击位置距离卸矿口高度和撞击速度急剧增 大。(3)与垂直溜井相比,倾斜溜井中矿岩运动过程受井壁 边界限制作用更显著,落体运动时长较短,矿岩与井壁存在 较长距离的相对接触、滑动过程,对井壁造成摩擦损伤。 关键词:倾斜溜井;矿岩运动特征;溜井倾斜角度;数值模拟 中图分类号:TD521.1 文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2024)04-0062-07

0 引言

在金属矿床地下开采中,溜井是矿山矿岩运输 系统的重要工程。溜井稳定运行是矿山安全高效生 产的重要保障。目前,溜井井筒损伤是影响溜井使 用年限的突出问题^[1-2],大多地下矿山都存在不同程 度的溜井破坏问题,因溜井井筒破坏、坍塌造成的生 产停滞、高成本维修问题十分普遍^[3-4]。加拿大魁北 克和安大略省部分矿山多条斜溜井存在井壁破坏问 题,冲击破坏区主要位于溜井上部卸矿站以及分支 溜井与主溜井交叉处下方的溜井底板区域,而摩擦 破坏区主要分布在主溜井和分支溜井的底板^[5-6]。 国内金山店矿山^[7]、海南石碌铁矿^[8]、铜绿山^[9]、安 开铁矿^[10]都曾出现因卸矿冲击造成的井筒围岩垮 塌问题,不得不停产抢修加固。

针对溜井破坏问题,许多专家学者开展了较为 深入的研究工作,殷越、路增祥等^[11-12]先后基于运 动学理论推导出了矿岩初始运动轨迹数学模型,讨 论了矿岩质量、位置及初始运动角度等因素对矿岩 运动速度及其首次与井壁碰撞位置的影响,确定了 溜井井壁主要破坏范围。秦宏楠等^[13]采用 C-ALS 探测和井筒三维形态试验得出矿岩要经历三次冲击 的运动规律,发现冲击的水平分量对井筒损伤最大。 刘艳章等^[14]以金山店主溜井为研究对象,建立了溜 井溜放矿相似试验平台,分析了矿岩运动过程及井 壁破坏特征。上述研究均以垂直溜井为研究对象, 通过分析垂直溜井中矿岩的运动轨迹与运动规律, 阐述了垂直溜井井壁失稳破坏特征,研究成果颇丰。

倾斜溜井是溜井布置的另一种形式,在国外矿 山应用较为广泛,这种溜井底板较长,会减缓矿岩下 落时的冲击力,从而减少对溜井井壁的冲击破坏。 目前研究内容主要以倾斜溜井中矿岩运动规律、运 动方式及其对井壁损伤破坏产生的影响开展。如马 驰等^[15]认为倾斜溜井中矿岩运动形式表现为沿倾 斜溜井下落、下落后在溜井底部发生回弹、在重力作 用下的滚动和滑动等,矿岩运动轨迹受矿岩的物理 力学性质、矿岩块度、溜井倾角等因素影响,不同轨 迹引发的倾斜溜井破坏形式也不同。赵星如等^[16] 从理论上建立了倾斜溜井滑动运动过程的函数式,

基金项目:国家自然科学基金项目(51774176).

通信作者:路增祥(1965一),男,陕西富平人,博士,教授,主要从事金属矿床地下开采方面的教学与研究,E-mail:zengxiang_lu@sohu.com。

^{*} 收稿日期:2023-07-18

作者简介:马强英(1995一),男,甘肃武威人,硕士研究生,主要从事金属矿床开采方面的研究,E-mail:852265485@qq.com。

讨论了初次矿岩与井壁碰撞前倾斜溜井结构参数对 矿岩运动速度的影响,明确了溜井内矿岩运动过程 是确定井壁破坏范围、揭示了井壁损伤特征的主要 研究途径。以上研究为倾斜溜井中矿岩运动规律奠 定了一定理论基础,但针对矿岩在倾斜溜井内运动 的特征研究还不足。矿岩与倾斜溜井井壁碰撞后, 其运动具有较大随机性,难以通过数学建模方法建 立碰撞后矿岩运动矢量变化。

为进一步明确矿岩在倾斜溜井内的全过程运动 特征及其与井壁的撞击情况,采用离散元 PFC2D 数值模拟软件,建立倾斜溜井矿岩运动分析模型,模 拟倾斜溜井中矿岩运动过程并结合物理试验,研究 倾斜溜井内的矿岩移动特征,分析溜井倾斜角度对 矿岩的移动特征与其对井壁损伤的影响。重点分析 了溜井在不同倾斜角度下,矿岩与井壁的撞击位置、 撞击速度的变化特征,对倾斜溜井的设计、使用、维 护等方面提供了一定的参考。

1 溜井卸矿试验模型

数值模拟试验是研究倾斜溜井矿岩运动及影响 因素的有效手段。针对倾斜溜井的结构特点及卸矿 条件,建立离散元数值模型,模拟溜井放矿过程中矿 岩的运动过程,监测矿岩运动信息,分析矿岩运动。 此外,为进一步验证数值模拟结果,建立溜井卸矿物 理相似试验模型,将数值模拟结果试验结果进行对 比,确保数值模型的合理性与准确性。

1.1 倾斜溜井放矿试验数值模型

参考加拿大魁北克省与安大略省部分地下矿山 倾斜溜井结构参数^[17-18],结合离散元数值模拟软 件,建立了倾斜溜井放矿模型,如图1所示。







放矿数值模型由溜槽模型、溜井模型、单一矿岩 颗粒组成,矿岩所使用的接触类型为 Hertz 接触类 型,模型的尺寸和细观参数标定分别见表 1、表 2。 为简化计算过程,不考虑空气阻力、矿岩形状、矿岩 间相互作用及矿岩的磨损破裂与井壁的损伤。

表1 数值模型尺寸参数

Table 1 Size parameters of numerical model

溜井 窗	溜槽 倾角。/	溜井 三	卸矿溜槽 长度1/	溜井 価角 g/	矿岩 粒谷 d/	
见度 W / m	i (°)	同反 II/ m	K度L/ m	顾用 β/ (°)	型任 d / m	
2	45	20	5	60	0.15	

表 2 数值模型细观参数

 Table 2
 Mesoscopic parameters of numerical model

剪切 模量/ GPa	摩擦 因数	泊松比	密度/ (kg/m ³)	阻尼 系数
17	0.5	0.23	3500	0.44

采用 Fish 语言编程,结合 PFC 模拟平台,实时 监测矿岩位置坐标,绘制矿岩运动轨迹图,结合速度 公式计算不同时间下矿岩运动速度,绘制矿岩速度 与时间的关系图。

1.2 物理相似试验模型

为验证数值模拟试验的准确性,按比例为1:10, 建立物理相似试验模型,并通过摄像机记录了矿岩 与井壁的相对位置。倾斜溜井放矿物理试验模型由 溜槽、溜井井筒、固定装置组成。为方便记录测量数 据和观测矿岩块的运动轨迹,采用厚度为8 mm 的 透明亚克力板制作井筒,使用摄像机监控矿岩块运 动路径。

2 倾斜溜井内矿岩运动特征

依据试验的结果分析矿岩在倾斜溜井内的运动 轨迹、撞击位置以及速度变化情况,讨论矿岩颗粒的 运动特征。

2.1 运动轨迹

通过数值模拟试验,监测矿岩运动过程中各时间点下 x、y 坐标,以溜槽与倾斜溜井井壁交点为原 点,得到矿岩在倾斜溜井的运动轨迹,如图 2 所示。

多次试验后倾斜溜井中矿岩块的运动过程为: 首先,初速度为零的矿岩块在溜槽底板面开始运动; 其次,离开溜槽后,进入倾斜溜井内部,受力改变,以 溜槽角度为斜抛角度做斜下抛运动,直至首次撞击 井壁,撞击位置坐标为(1.34 m,-1.38 m);再次,矿 岩撞击井壁后弹起,最高点位置坐标为(1.31 m, -1.40 m),弹跳后下落在(0.26 m,-3.26 m)位置; 最后,矿岩块不再发生弹跳,依靠自重沿着倾斜溜井 井壁向溜井底部滑动或滚动,其运动的直线距离为 19.15 m。矿岩块到达溜井底部后,撞击溜井底板上 侧面,坐标位置为(-9.31 m,-19.85 m),撞击后落在 倾斜溜井底部,在溜井底部小幅度反弹运动后静止。



图 2 倾斜溜井矿岩运动轨迹

Fig.2 Moving trajectories of ore-rock in inclined orepass

根据倾斜溜井中矿岩运动轨迹可知,矿岩颗粒 首次与井壁发生碰撞,在溜槽以下 1.38 m;第 2 次 与井壁发生碰撞,在溜槽以下 3.26 m。

2.2 运动速度变化特征

矿岩在倾斜溜井中的运动速度变化如图 3 所 示。根据运动特征可分为 5 个阶段,阶段 I 中,矿岩 在溜槽内以初速度为零做匀加速运动,运动速度线 性增加;阶段 II 中,离开溜槽后做类抛物运动,矿岩 运动速度快速增大;阶段 III 中,矿岩与井壁共发生两 次明显撞击,首次撞击后速度急剧降低,经井壁反弹 后,在重力势能的作用下速度逐渐增加,两次撞击时 间间隔 0.82 s;阶段 Ⅳ,第 2 次撞击后,矿岩沿井壁 做匀加速运动,到达溜井底部时速度达到峰值 16.17 m/s,直至撞击溜井底部后,矿岩的速度急剧降低; 最后,在阶段 V 中矿岩块在溜井底部小范围反弹运 动,直至静止。

矿岩与井壁碰撞时的速度是影响井壁破坏的关键。矿岩下移过程中共与倾斜溜井侧壁发生两次撞击,第1次撞击的速度为9.53 m/s,第2次撞击时的速度为5.47 m/s,与溜井底板发生一次高速撞击,

速度达到了 16.17 m/s。







2.3 物理相似试验验证

物理相似试验中矿岩运动过程与数值模拟运动 过程基本一致。矿岩在溜槽内做加速直线运动,离 开溜槽后向右下方做类抛物运动,与井壁发生两次 撞击后沿倾斜溜井井壁滑动或滚动。通过比例换算 后,矿岩与井壁两次撞击的位置坐标分别为(1.35 m,-1.36 m)、(0.27 m,-3.30 m)。与数值模拟结 果相比,受空气阻力、矿岩形状、井壁与矿岩的损伤 等因素的影响,试验结果有一定的误差,误差在5% 以下,说明数值模拟结果准确度高,结论可靠。

3 溜井倾斜角度对矿岩运动的影响

在影响矿岩运动特征的诸多因素中,溜井倾角 对矿岩运动特征的影响最为显著。倾斜溜井井壁为 运动中的矿岩提供了改变其运动方向的边界条件, 其倾斜角度直接影响矿岩运动规律。因此,有必要 分析溜井倾斜角度对矿岩运动的影响。

3.1 试验方案设计

以倾斜角度 60°为基准角度,以 5°为单位,试验 倾角范围为 45°~75°,采用离散元数值模拟平台依 次建立 7个倾斜溜井溜矿模型,进行不同角度下倾 斜溜井溜放矿试验,分析溜井倾斜角度对矿岩运动 特征的影响。

3.2 倾斜角度对撞击位置的影响

矿岩与倾斜溜井的撞击对井壁造成冲击损伤, 将直接影响井筒的稳定性。撞击位置实际为井壁严 重受损区域。试验获得不同溜井倾斜角度(β)下矿 岩与井壁撞击位置(首次撞击标高 h₁ 和第 2 次撞击 标高 h₂)结果,如图 4 所示(以竖直向下为正方向, 也代表距离倾斜溜井卸矿口高度)。



由图 4 可知,随着溜井倾斜角度的增加,矿岩与 倾斜溜井井壁两次撞击位置标高均逐渐下移。其 中,首次撞击位置标高近似线性增加,45°时撞击位 置标高为 1.03 m,倾斜角度每增加 5°,撞击标高下 移0.137 m。倾斜角度由 45°向 60°变化,第 2 次撞击 位置标高由 0.76 m 向 3.26 m 近似线性变化,每降 低 5°,撞击标高平均下降 0.833 m;倾斜角度超过 60°后,第 2 次撞击位置标高急剧增加,当倾斜角度 为 75°时,撞击位置距离井口 17.56 m。

倾斜角度为 45°时,第 2 次撞击标高为 0.76 m, 小于第 1 次撞击位置标高,这说明 45°时矿岩与井壁 首次撞击后,矿岩向井口方向(首次撞击位置上方) 弹跳,随后撞击在井壁上。倾斜角度大于 45°时,矿 岩向首次撞击位置下方弹跳,第 2 次撞击位置在首 次撞击位置下方。

3.3 倾斜角度对撞击速度的影响

矿岩对倾斜溜井撞击的速度越大,对井壁的冲 击作用越大,进而影响倾斜溜井井筒的稳定性。探 究矿岩颗粒在不同溜井倾斜角度下撞击速度的变化 特征,可以得到矿岩在不同方向对井壁造成的冲击 作用情况,不同溜井倾斜角度下矿岩与井壁撞击速 度如图 5 所示。



图 5 不同溜井倾斜角度下矿岩与井壁撞击速度 Fig.5 Impact velocity between ore-rock and side wall at different inclined angles of orepass

由图 5 可知,在首次撞击过程前,当溜井倾斜角度一定时,矿岩离开溜槽做类抛物运动,只有重力影响垂直方向的速度(v_{1y})大小。因此,溜井倾斜角度变化对矿岩首次撞击时 x 方向的速度(v_{1x})没有影响,y 方向的速度和合速度(v_1)随着倾斜角度增加,具有增加趋势,其中撞击时矿岩合速度在 9.16~10.01 m·s⁻¹范围内。

第2次撞击时矿岩与井壁的相对速度随着溜井倾斜角度增加整体呈增大趋势,尤其在超过 60°后, y方向上的速度由 4.47 m • s⁻¹快速增加到 17.84 m • s⁻¹,其变化主要取决于竖直方向上的速度 分量。

为了进一步揭示溜井倾斜角度对撞击速度的影响原因,通过监测得到不同时刻下的矿岩位置,绘制 矿岩位置路径图,以 45°、60°、75°为例,如图 6 所示。



图 6 不同溜井倾斜角度时矿岩运动路径 Fig.6 Movement path of ore-rock under different inclined angles of orepass

由图 6 可知,倾斜角度对第 2 次撞击位置的影响显著大于对首次撞击位置的影响。在首次撞击 后,矿岩发生弹跳,到达最高点后下落,最终撞击在 井壁上。在该过程中,溜井倾角对下落距离影响较 大,假设溜井倾角为 45°、60°、75°时,其水平运动距 离较小,而下落距离分别为 h_3 、 h_4 、 h_5 ,其大小关系 为 $h_3 < h_4 < h_5$ 。因此,溜井倾斜角度对矿岩首次撞 击弹跳后水平方向上的速度(v_{2x})影响较小,而垂直 方向上,根据运动学原理,初速度为 0 的条件下,重 力加速度(g)作用下,速度大小(v_{2y})与运动距离(h) 的关系为:

$$2h\,\mathrm{g}=v_{2y}^2\tag{1}$$

此外,第2次撞击合速度 v2 与各分量矿岩速度

关系为:

$$v_2^2 = v_{2x}^2 + v_{2y}^2 \tag{2}$$

低倾角溜井井筒条件下,矿岩撞击后下落,下落 标高不到1m后与井壁边界发生第2次撞击;而高 倾角溜井井筒条件下,矿岩在井筒内下降高度明显 增大。由式(1)可知,y方向上速度随下降高度增加 而显著增大。同时由式(2)可知,矿岩在y方向上 的速度增加,x方向上速度变化较小,矿岩与井壁第 2次撞击的合速度随之增大。

3.4 倾斜角度对矿岩滑动距离的影响

不同溜井倾斜角度下矿岩颗粒与井壁滑动距离 见表 3。

表 3 不同溜井倾斜角度下矿岩颗粒与井壁滑动距离

Table 3The sliding distance between ore particles andthe well wall at different inclined angles of orepass

溜井倾角/(°)	滑动距离/m	溜井倾角/(°)	滑动距离/m	
45	27.29	65	12.25	
50	23.95	70	7.02	
55	22.10	75	2.40	
60	19.15			

随着倾斜角度的增加,矿岩颗粒与井壁滑动距 离呈减小趋势,溜井倾角从45°到75°,滑动距离缩 短了24.89m,尤其当倾斜角度大于60°时,滑动距 离缩短趋势十分明显。结合图6可知,滑动距离的 减小是因为溜井倾斜角度较大时,矿岩与井壁首次 碰撞后在井筒内发生了较长距离的落体运动,第2 次碰撞点距离溜井底板距离较小,矿岩与井壁的滑 动距离随之减小。

4 讨论

4.1 倾斜溜井与垂直溜井内矿岩运动差异性

放矿后矿岩颗粒沿倾斜溜槽方向滚动,主要受重力、溜槽支撑力及溜槽摩擦力的影响,以一定速度 在溜槽末端类似于抛物运动下落。矿岩颗粒在溜槽 中以及离开溜槽的下落运动过程,展现出的运动特 征与垂直溜井中的矿岩下落过程一致^[11]。与垂直 溜井不同的是,矿岩离开溜槽后的下落过程受倾斜 溜井边界限制,运动时长极短,在不同的溜槽倾角 下,矿岩颗粒下落碰撞的位置也存在显著差异。在 首次撞击后,倾斜溜井矿岩二次落体运动的时长及 间距也受倾斜角度影响,短则1~2m,长则15m以 上。这同时影响着矿岩与井壁的第2次撞击位置、 角度与速度。对比垂直溜井内矿岩运动过程^[11],倾 斜溜井矿岩在井壁上会发生较长距离的相对滑动或 滚动。该范围内,井壁损伤形式以长距离摩擦损伤 为主,与垂直溜井中短时间的撞击式摩擦损伤具有 显著差异。

4.2 倾斜溜井支护设计建议

倾斜溜井的设计及支护应注重考虑倾斜角度对 矿岩运动的影响,矿岩在下落后首次撞击井壁,对井 壁具有显著冲击破坏作用,与垂直溜井井壁破坏相 似, 应采用钢轨局部加强支护的形式。如果施工设 计采用低倾斜溜井(45°~60°)形式,适当延长局部 强支护范围即可,以预防第2次撞击损伤。如果设 计溜井倾斜角度在 65°以上,尤其是 75°左右时,应 在溜井口以下 10~20 m 范围内局部强支护。除了 支护方法外,也可以考虑增大贮矿高度的方法,通过 矿岩散体缓冲作用抵消二次冲击力。与落矿冲击损 伤相比,矿岩在井壁的滑动过程造成的井壁摩擦损 伤较小,但也是不能忽视的。对于这种井壁损伤,通 过单一支护方式即可,如混凝土中增加钢纤维的支 护。除上述方法外,减小矿岩大块率、设置缓冲装置 (钢衬板、橡胶衬板)等方法也可以作为倾斜溜井井 壁的保护措施。

5 结论

本文以倾斜溜井为研究对象,采用物理相似试 验与数值模拟相结合的方式,分析倾斜溜井内矿岩 运动过程,研究溜井倾斜角度对矿岩运动、撞击位置 及速度等的影响特征,取得结论如下。

(1)试验得到了矿岩在倾斜溜井的运动轨迹, 研究发现矿岩运动特征可分为5个阶段:在溜槽内 作匀加速直线运动;离开溜槽后,矿岩以一定初速度 向右下方做类抛物运动;与溜井井壁发生首次撞击, 位置为(1.35 m,-1.36 m),产生一次弹跳后下落与 井壁发生第2次撞击,位置为(0.27 m,-3.30 m); 沿着井壁作匀加速运动直到到达溜井底板;最后,矿 岩撞击溜井底板,运动逐渐停止。

(2) 溜井倾斜角度显著影响矿岩运动特征。溜 井倾角增大后,首次撞击位置与卸矿口距离近似线 性增加,每增加5°,首次撞击位置下移0.137 m,撞 击速度水平分量不受影响,垂直分量增大;第2次撞 击位置距离卸矿口高度线性增大,超过60°后急剧 增加;矿岩颗粒与井壁滑动距离呈降低趋势。

(3)与垂直溜井內矿岩运动相比,区别在于矿 岩离开溜槽后的下落过程受井壁边界限制作用更显 著, 矿岩落体运动时长较短, 第2次撞击后, 矿岩沿 着井壁作匀加速直线运动, 对井壁造成较长距离的 摩擦损伤。对于倾斜溜井支护设计, 应着重考虑倾 斜角度对矿岩运动的影响。

(4)本研究仅对单一矿块运动开展了研究工作,后续研究应考虑矿岩群整体运动趋势及对井壁的冲击与磨损作用。

参考文献(References):

[1] 路增祥,马驰,曹朋,等.金属矿山溜井问题研究现状及方向
 [J].金属矿山,2019(3):1-9.
 LU Zengxiang, MA Chi, CAO Peng, et al. Study status and

direction of orepass existing problems in metal mine[J]. Metal Mine,2019(3):1-9.

- [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分析与验证[J].岩土力学,2011,32(2):326-332+340.
 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+340.
- [3] 王其飞,刘艳章,赵卫,等.溜井全景扫描成像装置在金山店 铁矿中的应用[J].矿业研究与开发,2014,34(5):77-79+86.
 WANG Qifei, LIU Yanzhang, ZHAO Wei, et al. Application of ore-pass panoramic scanning imaging device in jinshandian iron mine [J]. Mining Research and Development,2014,34(5):77-79+86.
- [4] 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.

- [5] HADJIGEORGIOU J, LESSARD J F. Numerical investigations of ore pass hang-up phenomena [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007,44:820-834.
- [6] LESSARD J F, HADJIGEORGIOU J. Ore pass systems in Quebec underground mines [J]. Mine Planning and Equipment Selection, 2003(4): 509-521.
- [7] 刘艳章,王其飞,叶义成,等.溜井全景扫描成像装置及其井 壁检测试验[J].岩土力学,2013,34(11):3329-3334.
 LIU Yanzhang, WANG Qifei, YE Yicheng, et al. Ore-pass panoramic scanning imaging device and its experiment to monitor ore-pass wall[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34 (11):3329-3334.
- [8] 范庆霞,孙红专.石碌铁矿 2[#] 主溜井大面积垮帮的修复[J].
 现代矿业,2021,37(9):84-87.

FAN Qingxia, SUN Hongzhuan. Repair of large-area collapse of No.2 main chute in shilu iron mine[J]. Modern Mining,2021,37(9):84-87.

[9] 马杰.铜绿山铜铁矿主溜井技术改造研究[J].中国矿山工程,2016,45(1):1-4.
MA Jie. Technical innovation of the main chute of Tonglushan Copper-Iron Mine[J]. China Mine Engineering,

2016,45(1):1-4.
[10] 张生,马海涛,王虎.安徽开发矿业有限公司3*主溜井治理方案 研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(增刊1):276-281.
ZHANG Sheng, MA Haitao, WANG Hu. Study on treatment scheme of 3* main chute in Anhui Development Mining Co., Ltd [J]. Journal of Safety Science and Technology,2014,10(S1):276-281.

- [11] 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.
 YIN Yue, LU Zengxiang, MA Chi. Mechanism of deformation and failure on orepass wall under impact and wear[J]. Metal Mine,2020(11):31-36.
- [12] 路增祥,吴晓旭,马驰,等.矿岩初始运动对其冲击溜井井壁 规律的影响[J].金属矿山,2020(9):60-64.
 LU Zengxiang, WU Xiaoxu, MA Chi, et al. Influences of initial movement of ore or rock block on the rule of impacting on orepass wall[J]. Metal Mine,2020(9):60-64.
- [13] 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.
 QIN Hongnan, LI Changhong, MA Haitao, et al. Study on impact damage laws of ore pass based on particle flow[J].
 Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(4): 20-26.
- [14] 刘艳章,张丙涛,叶义成,等.主溜井矿岩运移及井壁破坏特 征的相似试验研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3): 545-552.

LIU Yanzhang, ZHANG Bingtao, YE Yicheng, et al. Similarity testing study on characteristics of ore motion and wall damage in mine shaft[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3):545-552.

- [15] 马驰,吴晓旭,路增祥.倾斜溜井中的矿岩运动特征及其对井壁的损伤与破坏[J].金属矿山,2020(9):65-71.
 MA Chi, WU Xiaoxu, LU Zengxiang. Characteristics of ore or rock movement in inclined orepass and its damage and failure to orepass wall[J]. Metal Mine,2020(9):65-71.
- [16] 赵星如,余斌,路增祥,等.倾斜溜井结构参数对矿岩运动特征的影响[J].矿业研究与开发,2022,42(6):29-33.
 ZHAO Xingru, YU Bin, LU Zengxiang, et al. Influence of structure parameters of inclined orepass on the movement characteristics of ore-rock [J]. Mining Research and Development,2022,42(6):29-33.
- [17] HADJIGEORGIOU J, LESSARD J F, MERCIER-LANGEVIN F. Ore pass practice in Canadian mines [J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105(11): 809-816.
- [18] KAMRAN ESMAIELI, JOHN HADJIGEORGIOU. Selecting ore pass-finger raise configurations in underground mines [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(3): 291-303.

Movement Characteristics of Ore-Rock in Inclined Orepass and its Influencing Factors

MA Qiangying¹, LIANG Kaige¹, MA Chi², LU Zengxiang¹, QIN Ran³

(1.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China;

2. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. Hainan Mining Co., Ltd., Changjiang, Hainan 572700, China)

Abstract: The orepass is an important project for ore-rock transportation. The damage of the sidewall caused by the unloading impact is the main problem that restricts the age limit of the orepass. In order to analyze the movement process of ore-rock in inclined orepass, PFC numerical simulation experiment and physical similarity experiment were used to simulate the unloading process of inclined orepass, analyze the movement form and velocity variation characteristics of ore-rock in inclined orepass, study the influence of inclined angle of orepass on the movement law of ore-rock and the position of impact sidewall, and discuss the difference of movement mode of ore-rock in vertical orepass and inclined orepass. The study findings are as follows. Firstly, when the inclined angle of orepass is 60°, the two impact heights of the ore-rock are 1.36 m and 3.30 m away from the unloading port, the impact velocity is 9.53 m/s and 5.47 m/s, respectively, and the peak speed of the ore-rock reaches 16.17 m/s when it reaches the orepass floor. The process of ore-rock movement can be simplified into five stages: uniform accelerated sliding or rolling in the branch orepass, oblique throwing movement at a certain initial speed away from the orepass, two impacts with the sidewall, uniform accelerated sliding or rolling movement along the sidewall, and finally reaching the bottom of the orepass. Secondly, the influence of the inclined angle of the orepass on the movement process of the ore-rock is very significant. As the inclined angle of orepass increases, the distance between the two impact positions of the ore-rock and the height of the unloading port increases. After the inclined angle exceeds 60°, the distance between the position of the second impact and the height of the unloading port and the impact velocity increase sharply. Thirdly, compared with the vertical orepass, the movement process of the ore-rock in the inclined orepass is more significantly restricted by the boundary of the sidewall, and the falling body movement time is shorter. There is a relatively long-distance contact and sliding process between the ore-rock and the sidewall, which causes friction damage to the sidewall.

Key words: Inclined orepass, Movement characteristics of ore-rock, The inclined angle of orepass, Numerical simulation