

采矿与选矿

无底柱分段崩落法开采崩落矿岩散体 流动特性试验研究

董秋平¹, 李 翠¹, 张良兵¹, 杨承业², 马志伟², 徐继业¹, 李杰林^{2*}

(1. 攀钢集团矿业有限公司, 四川 攀枝花 617000; 2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 崩落矿岩散体流动规律是影响无底柱分段崩落法中矿石损失率和贫化率的关键因素之一。基于攀西地区某地下矿崩落法开采特征, 采用达孔量法开展了矿岩散体放出体形态测定试验, 并结合 Particle flow code in 2 dimension (PFC2D) 颗粒流软件进行了数值模拟, 分析散体流动特征及其对贫化损失率的影响。结果表明: 数值模拟与室内试验得到的放出体形态基本吻合, 均呈现良好的椭球体发育特征; 贫化损失率较高的主要原因是放出体的顶部、前方和两侧的废石混入。基于此, 提出了优化放矿口布置形式的改进建议, 为矿山提高回收率提供了理论依据。

关键词: 崩落法; 放矿规律; 离散元; 相似试验; 贫化率

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)05-0190-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.05.021

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Research on the flow characteristics of fragmented ore and rock in the non-pillar sublevel caving method

DONG Qiuping¹, LI Cui¹, ZHANG Liangbing¹, YANG Chengye², MA Zhiwei², XU Jiye¹, LI Jielin^{2*}

(1. Pangang Group Mining Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The flow behavior of rock and ore debris is one of the critical factors affecting the ore loss rate and dilution rate in the sublevel caving method. Based on the mining characteristics of an underground mine in the Panxi region, the shape of drawn-out body of rock and ore debris was determined using the hole volume measurement method, and numerical simulations were conducted with the "Particle flow code in 2 dimension (PFC2D)" software. The flow characteristics of the debris and their impact on the dilution and loss rates were analyzed. Results indicate that the drawn-out body of ore obtained from both numerical simulation and laboratory testing are largely consistent, exhibiting well-defined ellipsoidal development features. The primary cause of high dilution and loss rates is the incorporation of waste rock at the top, front, and sides of the drawn-out body of ore. Based on these findings, recommendations for optimizing the layout of the ore drawing openings were proposed, providing a theoretical foundation to enhance recovery rates at the mine.

Key words: caving method, ore drawing law, discrete element method, similarity test, dilution rate

0 引言

无底柱分段崩落采矿法具有采场结构简洁规整,

高度机械化的开采和运输工艺^[1], 产能大和成本低等优点, 在国内外金属矿山广泛应用^[2-4]。在地下铁矿床开采领域, 超 80% 的矿山采用这一方法, 特别

收稿日期: 2025-01-21; 修回日期: 2025-02-22; 接受日期: 2025-02-28

作者简介: 董秋平, 1987 年出生, 男, 云南宾川人, 工程师, 主要从事地质与采矿技术工作, E-mail: 471150874@qq.com;

* 通讯作者: 李杰林, 1982 年出生, 男, 湖南宁远人, 副教授, 主要从事金属矿山开采技术研究, E-mail: lijielin@163.com。

是在低、贫、杂矿床的开采中,其优势尤为突出^[5]。

覆岩下放矿是无底柱分段崩落法的典型特征^[6]。在放矿过程中,各放出体相互交织,彼此影响,极易导致矿石贫化与损失,这不仅影响了矿产资源的有效利用,也给矿山的经济效益带来挑战^[7]。从散体矿岩运移机制来看,在重力与出矿扰动的共同作用下,矿岩颗粒持续改变位置,向出矿口流动迁移^[8-10]。因此,精准掌握放矿过程中的矿岩流动特性,对降低贫化损失至关重要^[10-12]。

针对矿岩散体流动特性的研究,早期研究人员主要采用室内相似试验方法来观测散体流动规律特性。PETERS^[13]构建了二维放矿物理模型,研究了放矿口尺寸与放出体形态之间的关联性,明晰了放矿口尺寸变化对放出体形态影响的内在机制;POWER^[14]选取砾石作为试验介质,剖析了三维条件下放出体形态的动态变化规律以及矿岩流动的基本法则;CASTRO等^[15]针对瑞典基律纳矿山开展了相似材料放矿试验,量化分析了不同变量对散体流动特性所产生的影响。在国内,孙浩等人^[16]运用物理试验手段深入研究了崩落矿岩块度级配对放出体形态变化的影响作用,获取了不同块度级配以及堆积形态条件下的崩落矿岩流动特性的量化表征数据。

近年来,随着颗粒流数值分析方法的完善和商业软件的成熟,数值模拟成为研究放矿规律的重要手段^[17]。颗粒流数值分析软件能从细观层面研究散体颗粒的运动规律,具有试验便捷、重复性好等优点。陈庆发等^[18]基于PFC2D程序,研究了柔性隔离层下散体介质力链的演化特征;吴爱祥^[19]运用PFC3D程序,探讨了无底柱分段崩落法的结构参数

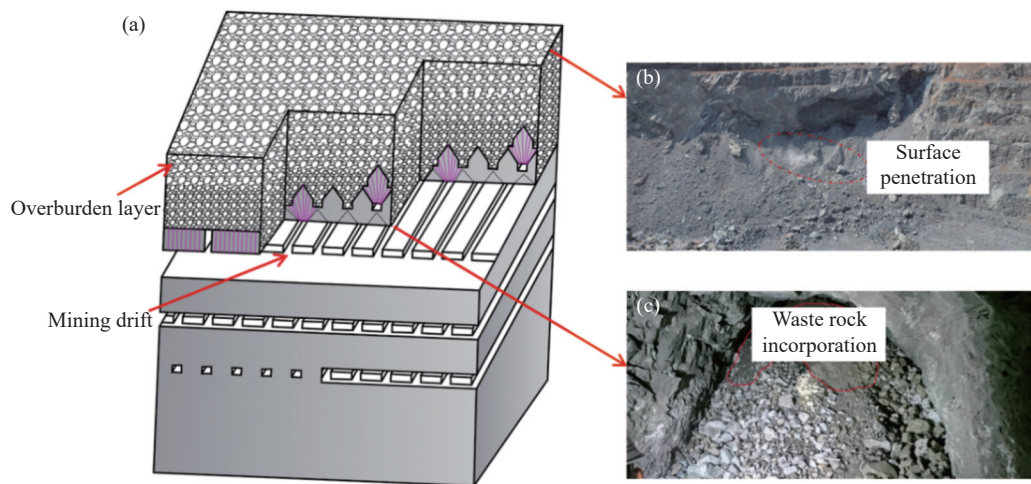
优化及放出体形态;孙浩^[20]利用PFC软件模拟不规则刚性块体,研究矿岩颗粒块度级配和空间分布不均时的矿岩流动特性。

总之,相似模型与数值分析的结合可以更好地了解崩落矿岩的流动性规律,进而优化矿石放出体参数,降低贫化损失。但是,当前研究多侧重单一方法或特定因素,缺乏系统性。笔者以攀西地区某地下铁矿为研究对象,将相似模型试验与颗粒流数值模拟相结合,采用达孔量法测定放出体形态,从细观层面解析散体颗粒的移动规律,探讨该地下矿的损失贫化与崩落散体流动特性,以期降低放矿贫化损失提供新的思路与方法。

1 工程概况

攀西某地下矿赋存于层状辉长岩体中,属晚期岩浆分异矿床,矿带内矿体与夹层呈互层状产出。矿体走向近东西,倾向北,倾角 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$,矿体呈单斜层状、似层状及透镜状产出。采矿方法为无底柱分段崩落法,分段高度为20 m,回采巷道间距为18 m,落顶巷道间距为36 m。

在矿山生产实践中,已出现覆盖层废石提前混入的情况,同时部分区域回采爆破后的覆盖层废石被提前放出,甚至已冒通地表,从而导致矿石贫化损失率较高,如图1所示。据生产统计,近两年矿石回采率约75%,贫化率达18%以上,这不仅造成矿产资源浪费,而且影响企业经济效益。因此,掌握散体矿岩流动规律,找出矿山损失贫化率较大的影响因素,进而制定出科学而有效的贫损控制方法,提高矿产资源回收,是当前矿山需要解决的重要问题。



(a) 无底柱分段崩落法示意; (b) 地表冒落区域; (c) 废石混入

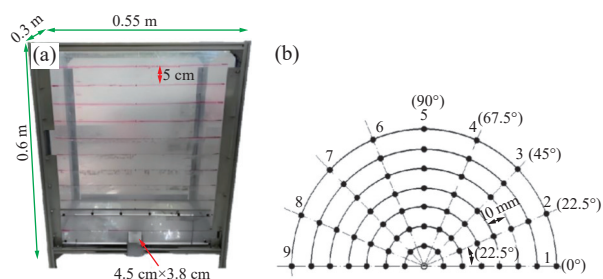
图1 矿山无底柱分段崩落法开采

Fig. 1 Non-pillar sublevel caving method in the mine

2 矿岩散体流动特性试验

2.1 试验模型设计

采用达孔量法来测定放出体形态^[21]。依据相似原理,放矿相似物理模型(图2(a))选用比例为1:100。模型内部尺寸为:长×宽×高=0.55 m×0.3 m×0.6 m。在模型底部一侧壁的中心位置设置一个出矿口,其尺寸为:宽×高=4.5 cm×3.8 cm,用于模拟实际中宽4.5 m×高3.8 m的出矿进路,出矿过程采用宽4 cm的铁铲进行均匀出矿。在箱体的玻璃侧壁上,每间隔5 cm划一条水平刻度线,以确保标志颗粒位置和所装矿岩高度的精确定位。



(a) 相似模型; (b) 标志物颗粒定位
图2 相似模型试验装置制作

Fig. 2 Fabrication of similar model test equipment

同时,制作定位板(图2(b))用于放置标志颗粒,使其放置在每一层的位置固定,从而可以减少因为标志颗粒摆放不规则而影响达孔量数值的误差。

表1 试验散体颗粒级配表

Table 1 Gradation table of fragmented particles in the experiment

%

0 ~ 50 mm	0 ~ 100 mm	100 ~ 200 mm	200 ~ 300 mm	300 ~ 400 mm	400 ~ 500 mm	>500 mm
9.97	28.37	32.67	10.74	6.44	3.05	8.76

2.3 试验结果分析

根据每次出矿时记录的矿石放出量以及标记物颗粒的放出情况,按照达孔量计算公式(1)计算出每个标记物颗粒的达孔量。通过分析0°~180°剖面达孔量数据(图3(a)~(i)),发现随着分层高度的增加,颗粒物所需达孔量呈现出明显的增加趋势,说明在较高分层位置的颗粒需要更大的累积放出量才能到达放矿口。由图3可知,在0°剖面,当分层高度从5 cm增加到20 cm时,达孔量从34 000 cm³增加到170 000 cm³,增长幅度显著。进一步观察发现,在相同的标志颗粒距中轴线的距离R(cm)与放矿高度H(cm)条件下,0°与180°剖面以及靠近这两个角度区域的达孔量相对较大,而两侧靠近90°区域的达孔量则相对减少。这一现象说明矿岩散体在放

标志颗粒间隔为2 cm,坐标采用极坐标:分别设计了0°、22.5°、45°、67.5°、90°、112.5°、135°、157.5°、180°共9个剖面。

2.2 放矿材料制备及试验过程

在矿山现场选取崩落后的矿岩作为放矿材料,根据照相频率法测量现场崩落矿岩块度确定的矿岩颗粒块度级配(如表1所示),获取矿石散体颗粒和覆盖层散体颗粒,作为相似试验的放矿材料。选用尺寸为5~7 mm的矿石颗粒作为标志颗粒,并进行染色、标号和分类。

放矿试验过程具体步骤如下:

1)采用分层装填的方式,依据箱体内部每隔5 cm所设置的标线来开展装填工作。

2)将标志定位板放置于已装填的分层矿石散体上,确保定位板刻度线与箱体刻度线对齐,中心和端壁放出口中轴线重合。然后,按坐标逐一放置标志性颗粒。

3)从模型底部的放矿口使用小铲进行出矿作业,且保证左右出矿均匀。

4)在放矿的整个过程中,记录每一个标志颗粒在当次放出时的放出量以及其对应的坐标信息。同时,标志颗粒达孔量(cm³)可依据公式(1)来进行计算^[22]。

$$Q = \frac{Q_f}{\rho} \quad (1)$$

其中, Q_f 为该标志颗粒放出时的累积放出量, ρ 表示装填密度。

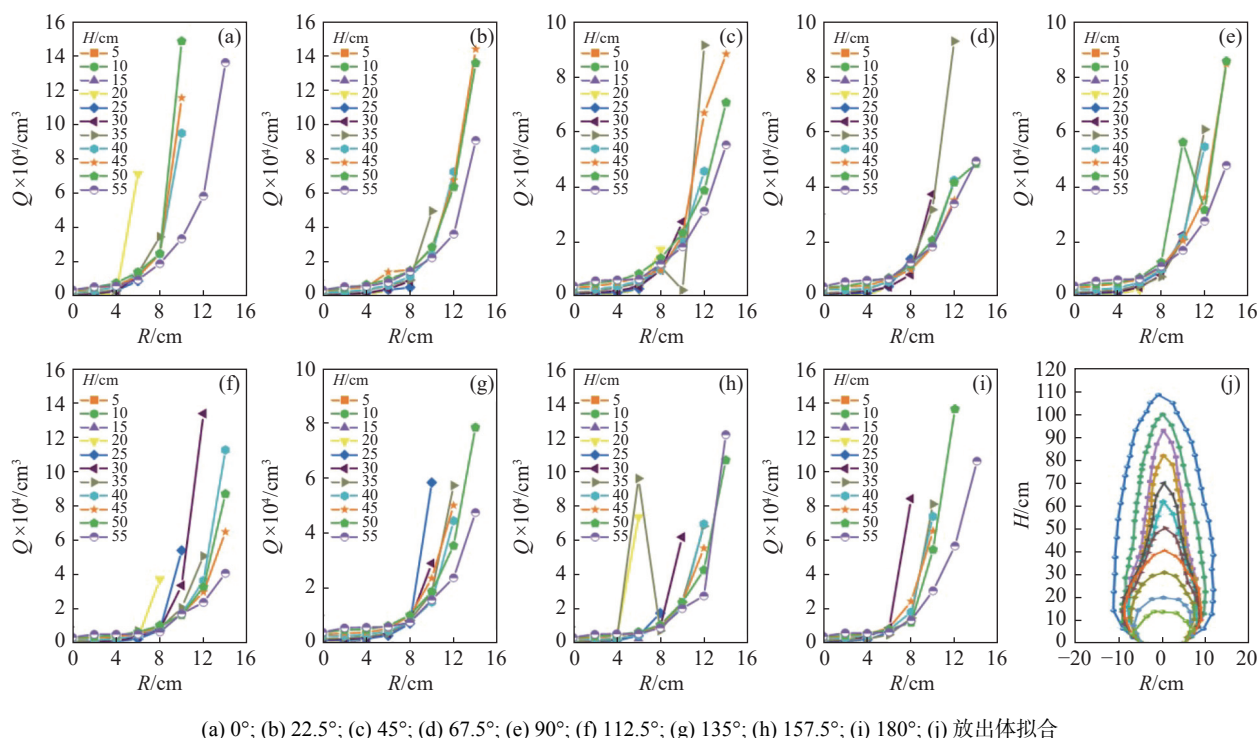
矿过程中,其流动趋势在水平方向上呈现出一定的对称性,但并非完全对称,在靠近端壁区域(0°和180°附近)的颗粒流动更为活跃,产生该现象的原因可能是由于端壁对颗粒运动的限制作用,导致颗粒在该区域的堆积和流动特性发生了变化。

运用数学拟合方法,对各分层内达孔量一致的点进行有序连接,得出放出体形态的纵剖面图(图3(j))。结果表明,放出体形态基本呈现为左右对称的椭球状,证明从放矿口放出的矿岩散体在采场的三维空间内,其形态近似于椭球体。

图4为试验完成后的放出漏斗形态,发现最终放矿漏斗呈现出典型的“V”形。无底柱分段崩落法的重要特点是覆岩下放矿,在放矿初期,随着放矿口附近的散体矿石被逐渐放出,顶部的废石漏斗开

始缓慢下降, 此时放出体主要由矿石颗粒组成, 其形状逐渐向上扩展。在矿岩接触面处的下降漏斗未到达放矿口之前, 整个放出体全部处于矿石层内, 这一阶段为纯矿石放出阶段。当下降漏斗的最低点到达放矿口上方时, 放出体的顶点到达初始时矿岩接触面处, 此时若继续放矿, 下降漏斗随之破裂, 顶部废

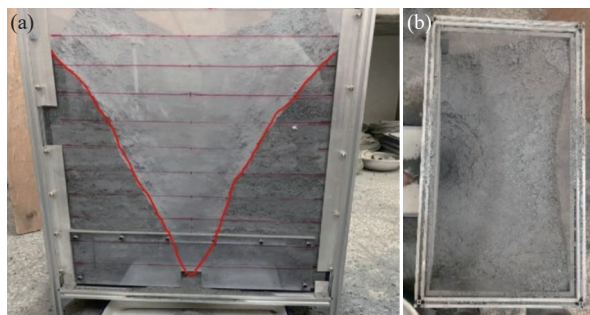
石会随着矿石从放矿口被放出, 放矿进入贫化放矿阶段。随着放矿的继续, 更多的废石被放出, 放出漏斗会随着下部矿石的放出而不断下移, 破裂漏斗口逐渐扩大, 导致放出品位逐渐降低, 直至达到截止品位后放矿结束。



(a) 0°; (b) 22.5°; (c) 45°; (d) 67.5°; (e) 90°; (f) 112.5°; (g) 135°; (h) 157.5°; (i) 180°; (j) 放出体拟合

图 3 达孔量统计与放出体拟合

Fig. 3 Statistics of the amount of reaching holes and fitting of the drawn-out body of ore



(a) 正面视图; (b) 顶部俯视图

图 4 放出漏斗形态

Fig. 4 Shape of the drawing funnel

3 散体矿岩流动特性数值分析

3.1 数值分析模型构建

为进一步分析散体流动的规律特征, 采用 Particle flow code in 2 dimension (PFC2D) 颗粒流程序构建放矿数值分析模型, 开展放矿过程数值分析研究。所构建的单口底部放矿数值模型如图 5 所示,

模型构建尺寸与相似试验模型尺寸一致。在软件中, 通过设置墙体构建散体堆积区域以及散体出矿区域, 散体堆积区域底部设置放矿口, 散体颗粒可通过放矿口从散体堆积区域流动至散体出矿区域。

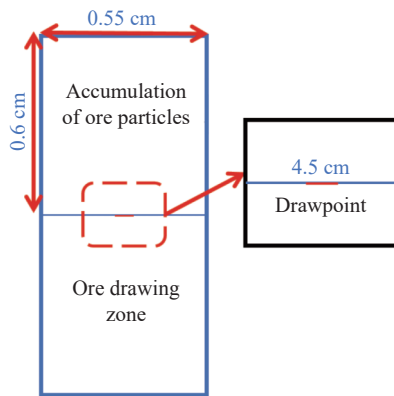


图 5 散体出矿区域

Fig. 5 Fragmented ore drawing area

3.2 分析颗粒参数标定

PFC 模型中的离散球体参数采取自然安息角标

定方法确定。根据矿山的矿石自然安息角为 $45^\circ \sim 50^\circ$, 通过不断调试参数, 最终确定散体自然安息角为 48.3° 。通过反复调整参数进行调试, 确定出合理的微观参数取值后(如表2所示), 进而开展放矿过程模拟, 如图6所示。

3.3 数值分析方案设计

基于室内物理放矿试验过程, 数值模拟过程如图7所示, 使用滚动阻抗接触模型和“雨落法”生成

放矿数值模型; 按高度每隔 5 cm 划分一层矿层, 并设置成不同颜色(图7(a))。受重力作用影响, 开启放出矿石的运动过程(图7(b))。当矿岩颗粒放出高度达 0.55 m 时, 停止出矿。然后记录矿体颗粒的位移距离, 并根据位移数值标记出椭球体, 通过记录矿体内部颗粒之间接触力情况, 利用 fish 自定义函数分析矿体内部颗粒之间的接触力情况, 最后标记出松动区。

表2 数值分析参数
Table 2 Numerical analysis parameters

Normal stiffness $\times 10^{-8}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$		Tangential stiffness $\times 10^{-8}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$		Friction coefficient		Rolling resistance coefficient of sphere	Density of sphere/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Wall	Sphere	wall	Sphere				
1	1	1	1	0.5	0.15	0.5	3 782

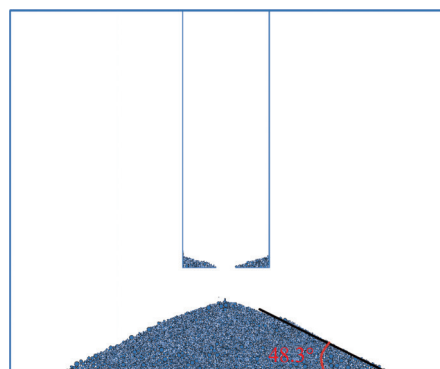
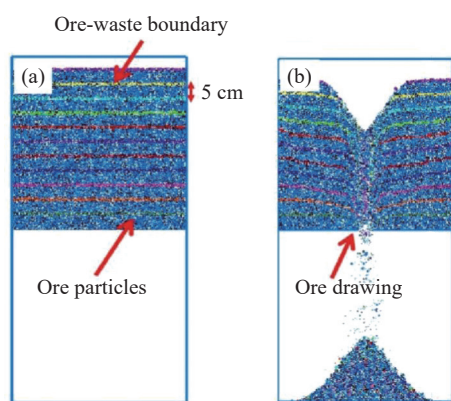


图6 自然安息角参数标定
Fig. 6 Calibration of the parameter of the angle of repose



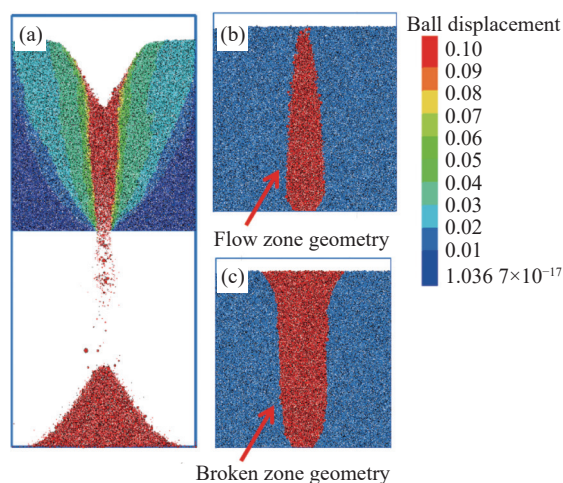
(a) 放矿模型; (b) 矿石放出
图7 放矿数值模拟过程

Fig. 7 Numerical analysis model of ore drawing

3.4 结果分析

从数值模拟结果可以看出(图8(a)), 在水平方向上, 由于颗粒间的挤压和摩擦力, 颗粒呈现出均匀的向下流动趋势, 同时伴随着向放矿口中心的横向移动, 形成了一种类似于“向心流”的运动模式。

这种运动模式使得放矿口上方的颗粒逐渐形成一个类似圆锥体的流动区域, 其锥顶指向放矿口, 锥底不断向上扩展, 与实际放矿过程中观察到的现象基本相符。



(a) 散体位移; (b) 放出体形态; (c) 松动体形态

图8 放矿数值分析结果

Fig. 8 Results of numerical analysis on ore drawing

结合数值模拟中颗粒的位移和分布情况, 确定出了放出体与松动体形态, 如图8(b)(c)所示。在数值模拟中, 通过记录每个颗粒的位移矢量, 确定了放出体的边界范围。结果显示, 放出体高度为 55 cm, 最大宽度为 9.3 cm, 其形态呈现出与室内试验相似的近椭球形状。在放矿过程中, 随着矿石颗粒的不断放出, 放出体内部颗粒的位移逐渐增大, 从放矿口向外呈辐射状分布, 且位移量在放矿口附近最大, 远离放矿口逐渐减小, 这与实际放矿过程中矿石颗粒的流动规律一致。对于松动体, 其最大宽度达到

23.1 cm, 涵盖了放出体及其周边一定范围内受放矿影响而发生位移的颗粒区域。松动体的形成是由于放矿过程中矿石颗粒的移动带动了周围颗粒的松动, 其边界形状不规则, 反映了颗粒间相互作用和力的传递的复杂性。在松动体内, 颗粒间的接触力发生了显著变化, 部分力链断裂, 新的力链重新形成, 导致颗粒的运动状态变得更加复杂多样。

数值模拟得到的放出体同样呈现出左右对称的近规则类椭球状, 且其高度、宽度等关键尺寸参数与室内试验结果相近, 表明数值模拟能够较为准确地再现室内试验中的放矿过程和矿岩流动特性。

4 矿石流动规律分析

4.1 放出体形态特征拟合

根据随机介质放矿理论^[23], 对放出体形态进行拟合, 垂直端壁边界条件下放矿时, 放出体曲面公式见式(2)。

$$\frac{y^2}{\beta_1 z^{\alpha_1}} + \frac{\left(x - kz^{\frac{\alpha}{2}}\right)^2}{\beta_1 z^{\alpha}} = \left(\frac{\alpha + \alpha_1}{2} + 1\right) \ln\left(\frac{h_f}{z}\right) \quad (2)$$

式中, 设定 x 、 y 、 z 分别表示三维空间坐标系下的坐标值, 用于精准定位研究对象所处的空间位置。 α 、 β 为沿进路方向散体流动的特定参数值, 其中 α 着重主导放出体上部与下部呈现出的相对形态差异, 不同取值会致使放出体纵向轮廓产生多种变化样式; β 则主要对放出体在沿进路方向的总体宽度扩张或收缩态势施加影响, 关乎其水平尺度特征。 α_1 、 β_1 对应为垂直进路方向的散体流动参数值, 从另一维度刻画散体流动特性, 与沿进路方向参数协同作用, 完整呈现散体在平面内的运动趋向及分布规律。 k 作为壁面影响系数, 用于量化周边壁面对散体流动的干扰程度, 反映出边界条件对散体动态过程的约束或促进效应。 h 代表放出体高度, 单位为 cm。综合这些参数, 能更为精准地描述散体流动复杂行为及其所形成的放出体几何特征。

根据室内相似模型试验得出的放出体, 获得 H 、 R 值, 对放出体进行回归拟合, 进而得到矿石散体流动参数值, 如表 3 所示。可以看出, 室内试验放出体参数与数值分析得到的放出体参数基本吻合, 误差均在 5% 之内。可以认为, 室内试验与数值分析得到的放出体形态基本吻合, 进一步验证了室内相似模型试验及数值分析所得放出体的合理性。

观察放出体形态可知, 其外观与椭球缺体相近, 却并非呈现严格的上下对称结构。参照随机介质理

论的相关研究结果: 当参数 α 的取值满足 $\alpha < 1/\ln 2 = 1.442 7$ 时, 放出体形态表现为下部相对粗壮, 上部趋于纤细, 即呈现出下粗上细的特征; 若 $\alpha > 1/\ln 2$, 则放出体形态转变为上部宽大, 下部窄小, 形成上粗下细的样式; 当 α 等于 $1/\ln 2$, 放出体的最宽位置处于其中部区域。

表 3 放出体形态特征拟合参数

Table 3 Fitting parameters of morphological characteristics of the drawn-out body of ore

Parameter	Laboratory test	Numerical analysis	Percentage error/%
k	0.297	0.283	4.71
α	1.347	1.408	4.53
β	0.131	0.137	4.58
α_1	1.462	1.489	1.85
β_1	0.289	0.296	2.42

室内试验和数值分析方法所获取的 α 值均小于 1.442 7, 说明无论是室内相似模型试验结果还是数值分析结果, 均一致表明此放出体呈现出上部较窄、下部较宽的形态特征, 这与基于随机介质理论所预判的放出体形态吻合。

4.2 矿石流动规律对出矿贫化率、损失率的影响分析

从室内相似模型试验及数值分析结果中可以看出, 在端部放矿过程中是处于半无限边界条件, 产生贫化现象的关键原因在于放出体的顶部、前方以及两侧多个方位的废石混入情况。

在初始放矿阶段, 放出体萌生于纯矿石爆堆环境, 此时放出的皆为纯矿石, 矿石品位处于理想状态。伴随放矿过程持续进行, 放出体不断扩张, 尺寸渐趋增大。一旦放出体的顶部触及上分段留存的脊部位置处矿石与废石的交界平面时, 若放矿作业未及时终止, 上部废石将顺势混入持续放出的矿石流之中, 致使矿石品位骤降, 贫化问题随即产生。

同样地, 当放出体沿进路走向的尺寸拓展延伸, 直至抵达前方呈垂直向分布的矿石与废石分界面时, 倘若依旧维持放矿操作, 那么前方废石必然会裹挟进放出矿石中, 加剧了贫化程度, 影响矿石质量与资源回收率, 故精准把控放矿进程、合理界定放矿节点, 对于控制贫化损失意义重大^[24]。

从室内相似模型试验获取的达孔量及放出体形态可知, 随着矿体倾角的逐渐减小, 相同放矿高度下的总矿石放出量呈逐渐减少的趋势; 这说明当矿体倾角减小时, 顶部废石会更早地到达放矿口, 造成矿石贫化。特别是当矿体倾角较小时, 当放出体高度扩展到了上盘边界后, 放出体会沿着上盘壁向上扩展, 上覆围岩沿上盘斜壁迅速流动, 下盘附近矿

石无法流动,造成矿石损失及废石混入量过大。此时应采取较小的分段高度,从而控制放出体的放出高度,使放出范围尽可能为椭球状,从而提高矿石回收率。

为了提高矿石回收率,建议对放矿口的布置形式进行改进,将上下两分段的放矿口交错布置,如图9所示。

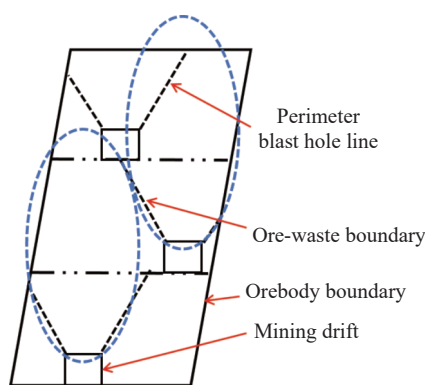


图9 放矿口交错布置

Fig. 9 Staggered arrangement of ore drawing openings

可以保证靠上盘一侧的脊部残留矿石得到有效回收,显著降低矿石损失率与贫化率。总的来说,通过优化采场结构、合理布置回采进路以及控制废石漏斗的破裂,可以有效地降低无底柱分段崩落法的损失和贫化率。

参考文献

- [1] SONG D L, WANG C W, LI S P, *et al.* Physical simulation experiment research on ore residual bodies in non-pillar sublevel caving method[J]. *Metal Mine*, 2024(4): 1-6.
(宋德林, 王春旺, 李少普, 等. 无底柱分段崩落法矿石残留体物理模拟实验研究[J]. *金属矿山*, 2024(4): 1-6.)
- [2] TAN B H, LONG W H, GONG Z, *et al.* Research on the combined ore drawing scheme and experiment of non-pillar sublevel caving method in restricted space[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(2): 10-15.
(谭宝会, 龙卫国, 龚臻, 等. 限制性空间内无底柱分段崩落法组合式放矿方案及实验研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(2): 10-15.)
- [3] ZHANG J, YE Y C, YAO N, *et al.* Study on the stope structure parameters of non-pillar sublevel caving method for steeply inclined medium-thick ore bodies[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(3): 13-21.
(张杰, 叶义成, 姚国, 等. 急倾斜中厚矿体无底柱分段崩落法采场结构参数研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(3): 13-21.)
- [4] LIU X L, ZHANG Z Q, LIN H Y, *et al.* Influence of compaction degree on the ore drawing effect of non-pillar sublevel caving method[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(2): 19-23.
(刘秀良, 张治强, 林洪叶, 等. 压实度对无底柱分段崩落法放矿效果的影响[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(2): 19-23.)
- [5] YANG Y, ZHANG Z Q, SHI Y B, *et al.* Influence of different mining sequences on the ore drawing effect in non-pillar sublevel caving method[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(1): 1-7.
(杨彧, 张治强, 石勇宾, 等. 无底柱分段崩落法不同回采顺序对放矿效果的影响[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(1): 1-7.)
- [6] XU L F. Numerical simulation analysis of the ore drawing scheme of non-pillar sublevel caving method[J]. *Mining Technology*, 2022, 22(2): 29-32.
(许力峰. 无底柱分段崩落法放矿方案数值模拟分析[J]. *采矿技术*, 2022, 22(2): 29-32.)
- [7] REN F Y, MING XU, LI H Y, *et al.* Optimization research on the mining scheme for inclined medium-thick ore bodies in Hainan iron mine[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(11): 1-4.
(任凤玉, 明旭, 李海英, 等. 海南铁矿倾斜中厚矿体开采方案优化研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(11): 1-4.)
- [8] GAO Z. Optimization of the mining technology of non-pillar sublevel caving method in Heishan iron mine[J]. *Hebei Metallurgy*, 2021(10): 46-49.

5 结论

1)利用达孔量法开展了无底柱分段崩落法开采的单孔端部放矿相似模型试验,绘制出了不同角度剖面的达孔量图,圈定了放出体形态。在垂直边界条件下,放出体基本呈现出左右对称的近规则类椭球状。在半无限边界条件下,矿岩散体移动未受上下盘边壁影响,散体矿岩表现为均匀连续流动,该结果与放矿理论假设基本一致,散体矿石均匀地朝着放矿口运动。

2)利用 PFC2D 软件开展了散体移动规律的数值分析,获取了散体移动的规律特征,数值分析结果得到的放出体形态与室内放矿试验结果基本吻合,椭球体形态发育良好,散体具有很好的流动性。

3)根据随机介质放矿理论,拟合得到了室内试验与数值试验的矿石散体流动参数值,验证了室内相似模型试验及数值分析所得到的放出体形态基本吻合。

4)根据达孔量及放出体形态,认为随着矿体倾角的逐渐减小,相同放矿高度下的总矿石放出量呈逐渐减少的趋势;提出了对放矿口的布置形式进行改进的建议措施,从而提高矿石回收率,减少废石混入,提高矿石的经济效益。

- (高展. 黑山铁矿无底柱分段崩落法开采工艺优化[J]. 河北冶金, 2021(10): 46-49.)
- [9] LUO C Y, WANG Z. Numerical analysis of the formation of uncovered rock layer and low dilution ore drawing scheme in non-pillar sublevel caving method for a gold mine[J]. *Modern Mining*, 2021, 37(10): 69-73.
(罗才严, 汪朝. 某金矿无底柱分段崩落法无岩覆盖层形成及低贫化放矿方案数值分析[J]. 现代矿业, 2021, 37(10): 69-73.)
- [10] CHEN L, CHEN X G, YUAN Q K, *et al.* Ore drawing tests with different structure parameters of non-pillar sublevel caving method for a mine[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(8): 1-5.
(陈烈, 陈星明, 袁侨坤, 等. 某矿无底柱分段崩落法不同结构参数放矿试验[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(8): 1-5.)
- [11] ZHAO Y L, CHEN Y M, LI C, *et al.* Optimization research on the structure parameters of non-pillar sublevel caving method[J]. *Chemical Minerals & Processing*, 2019, 48(7): 16-21.
(赵颖龙, 陈玉明, 李超, 等. 无底柱分段崩落法结构参数优化研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(7): 16-21.)
- [12] LI N, CHANG S, CHANG G F, *et al.* Optimization of mining parameters of non-pillar sublevel caving method[J]. *Mining Research and Development*, 2019, 39(5): 1-5.
(李楠, 常帅, 常贯峰, 等. 无底柱分段崩落法回采参数优化[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(5): 1-5.)
- [13] PETERS D C. Physical modeling of the draw behavior of broken rock in caving[J]. *Colorado School of Mines Quarterly*, 1984, 79(1): 1-71.
- [14] POWER G R. Modelling granular flow in caving mines: Large scale physical modelling and full scale experiments[D]. Brisbane: University of Queensland, 2004: 45-73.
- [15] CASTRO R, GÓMEZ R, PIERCE M, *et al.* Experimental quantification of vertical stresses during gravity flow in block caving[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 127: 104237.
- [16] SUN H, JIN A B, GAO Y T, *et al.* Study on the shape of the discharged body under different end wall inclination angles and determination of the optimal blasting step distance[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2016, 38(2): 159-166.
(孙浩, 金爱兵, 高永涛, 等. 不同端壁倾角条件下放出体形态研究及最优崩矿步距的确定[J]. 工程科学学报, 2016, 38(2): 159-166.)
- [17] WANG H J, YIN S H, WU A X, *et al.* Experimental study on the flow characteristics and influencing factors of caved ore and rock[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(5): 693-698, 715.
(王洪江, 尹升华, 吴爱祥, 等. 崩落矿岩流动特性及影响因素实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 693-698, 715.)
- [18] CHEN Q F, WANG S P, QIN S K, *et al.* Discrete element simulation on the evolution characteristics of force chains of fragmented ore and rock in multiple funnels under flexible isolation layers[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(9): 1119-1129.
(陈庆发, 王少平, 秦世康, 等. 柔性隔离层下多漏斗散体矿岩力链演化特征的离散元模拟[J]. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1119-1129.)
- [19] WU A X, WU L C, LIU X H *et al.* Study on the structural parameters of non-pillar sublevel caving method[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(5): 1845-1850.
(吴爱祥, 武力聪, 刘晓辉, 等. 无底柱分段崩落法结构参数研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1845-1850.)
- [20] SUN H, ZHU D F, JIN A B, *et al.* Flow characteristics of caved ore and rock based on uneven block size distribution[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 8(32): 2435-2444.
(孙浩, 朱东风, 金爱兵, 等. 基于不均匀块度分布的崩落矿岩流动特性[J]. 中国有色金属学报, 2022, 8(32): 2435-2444.)
- [21] WANG Y X, ZHOU Z H, YANG A G, *et al.* Study on the stope structure parameters of non-pillar sublevel caving mining method[J]. *Gold*, 2015, 36(6): 29-32.
(王友新, 周宗红, 杨安国, 等. 无底柱分段崩落采矿法采场结构参数研究[J]. 黄金, 2015, 36(6): 29-32.)
- [22] HAN Z Y. Research on the mining technology of sublevel caving method for broken inclined medium-thick ore bodies[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
(韩智勇. 破碎倾斜中厚矿体分段崩落法开采技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.)
- [23] YANG G Y, CHEN Y M. Theoretical research and exploration on non-dilution ore drawing of non-pillar sublevel caving method[J]. *Nonferrous Mining and Metallurgy*, 2015, 31(5): 15-17.
(杨宫印, 陈玉明. 无底柱分段崩落法无贫化放矿理论研究与探索[J]. 有色矿冶, 2015, 31(5): 15-17.)
- [24] TAO G Q, YANG S J, REN F Y. Experimental study on the flow performance of fragmented caved ore and rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 10(30): 2950-2954.
(陶干强, 杨仕教, 任凤玉. 崩落矿岩散粒体流动性能试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 10(30): 2950-2954.)