

# 陡倾斜中厚矿体沿走向进路的位置优化

Optimization of the position of the drift along the strike in steeply inclined medium-thick ore bodies

郭鹏杰<sup>1</sup>, 孟帆<sup>1</sup>, 姚团<sup>2</sup>, 遆晋梁<sup>1</sup>, 许奇恒<sup>2</sup>

(1. 太钢集团代县矿业有限公司, 山西 忻州 034207; 2. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**针对某铁矿陡倾斜中厚矿体采用无底柱分段崩落法开采时的进路位置合理确定问题, 结合相似模拟与数值模拟(PFC3D)方法, 开展矿体沿走向布置进路的位置优化研究。以矿体倾角 $85^\circ$ 、平均厚度20 m为研究对象, 常规正对布置进路存在脊部矿石残留回收难题, 为此对比分析上下分段正对布置(错开距离0 m)与交错布置(错开距离3 m、6 m)的回采指标及散体运移规律。研究结果表明, 上下分段进路水平错开距离6 m时回采效果更优, 数值模拟中矿石回收率达86.34%、矿石贫化率降至17.07%, 相似试验中矿石回收率为84.79%、矿石贫化率为15.55%, 两者结果趋势一致。该研究有效解决了上分段进路出矿脊部残留矿石难以在下分段回收的问题。

**关键词:**陡倾斜中厚矿体; 无底柱分段崩落法; 相似模拟; 数值模拟; 回采指标

中图分类号: TD853

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2025)06-0008-07

**Abstract:** In response to the problem of determining the reasonable position of the access route during the mining of a steeply inclined medium thick ore body in a certain iron mine using the Sublevel caving method, combined with the similarity simulation and numerical simulation (PFC3D) method, a study was conducted on the optimization of the position of the access route along the strike of the ore body. Taking the dip angle of the ore body as  $85^\circ$  and the average thickness of 20 m as the research object, there is a problem of residual ore recovery in the ridge area of the conventional straight layout approach. Therefore, a comparative analysis is conducted on the mining indicators and loose material transportation rules of the upper and lower segmented straight layout (staggered distance of 0 m) and staggered layout (staggered distance of 3 m, 6 m). The research results show that the mining effect is better when the upper and lower segmented access roads are horizontally staggered by a distance of 6 m: in numerical simulations, the ore recovery rate reaches 86.34% and the ore impoverishment rate drops to 17.07%, while in similar experiments, the ore recovery rate is 84.79% and the ore impoverishment rate is 15.55%, and the trend of the two results is consistent. This study effectively solved the problem of difficulty in recovering residual ore from the ridge of the upper segmented mining route in the lower segmented mining.

**Key words:** steeply inclined medium-thick ore body; sublevel caving method; similar simulation; numerical simulation; mining indicators

## 1 前言

某铁矿经历露天转地下开采后, 矿体赋存条件愈发复杂, 矿体厚度变化范围为1~230 m, 倾角波动于 $12^\circ \sim 80^\circ$ , 且局部产状突变显著。目前矿山采用无底柱分段崩落法开采, 但在陡倾斜中厚矿体开采中暴露出诸多问题: 一是若保持垂直矿体走向布置凿岩进路方式, 则各进路长度短, 每条进路内可布中深孔排数有限, 采切比高, 施工工期长, 采矿成本高<sup>[1-3]</sup>; 二是沿走向布置进路脊部残留矿

石出现了难以回收的现象, 从而降低了矿石回收率<sup>[4-6]</sup>。

国内外学者针对进路的布置优化已展开深入研究, 李示波等<sup>[7]</sup>通过相似试验发现, 急倾斜矿体中进路错开布置可提升回收率3%~5%; 高明忠等<sup>[8]</sup>利用PFC3D模拟得出, 进路错开距离与分段高度的比值为0.3时, 散体流动协同性最佳。但这些研究多针对单一产状的矿体, 对某铁矿这类产状复杂的矿体适应性不足, 且缺乏系统性的相似模拟与数值模拟验证<sup>[9]</sup>。

对于倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$ 的矿体, 沿走向正对布置进路是合适的布置方式, 但对于 $80^\circ$ 以上的陡倾斜矿体, 沿走向正对布置进路会导致上分段脊部残留矿石难以回收<sup>[10-11]</sup>。为解决这一问题, 本研究在“矿体厚度允许的错开范围”内(未超出矿体边界导致

[作者简介] 郭鹏杰(1989—), 男, 工程师, 主要从事采矿工艺方面研究。

[引用格式] 郭鹏杰, 孟帆, 姚团, 等. 陡倾斜中厚矿体沿走向进路的位置优化[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(6): 8-14+40.

废石提前混入)选择错开距离0 m、3 m、6 m作为合理梯度,通过对比回采指标确定更优的进路布置位置。

本文以某铁矿矿体倾角85°、平均厚度20 m为例,通过PFC<sup>3D</sup>数值模拟分析了上下分段不同进路错开距离下的散体运移规律和回采指标,并结合相似模拟验证,完成了进路位置的优化。

## 2 沿矿体走向进路布置方案的数值模拟

### 2.1 放矿数值模拟方案

放矿截止条件确定:经查阅资料,某铁矿地下开采平均矿石品位为27.5%,设定截止放矿品位为10%,根据公式(1)<sup>[12-13]</sup>计算出矿区截止放矿时的岩石矿石质量比为:

$$\frac{W_r}{W_m} = \frac{C_m - C_a}{C_a - C_r} = 1.75 \quad (1)$$

式中: $C_a$ 为截止品位,取10%; $C_m$ 为矿石品位,取27.5%; $C_r$ 为围岩品位,取0; $W_m$ 为当次采出矿石质量,g; $W_r$ 为当次采出围岩质量,g。

#### 1) 沿进路走向不同错开距离

如图1所示,以矿体倾角为85°、厚度为20 m的典型中厚矿体为研究对象,采用无底柱分段崩落法回采。其中分段高度为18 m,进路断面尺寸为4.7 m×4.4 m,崩矿步距为2.0 m。为对比沿进路走向不同错开距离对放矿损失贫化的影响,本研究设置了0 m、3 m和6 m三种错开距离工况,以确定更优布置形式。

#### 2) 数值模型构建

首先,生成矿体边界单元 wall,建立矿体空间,在矿体空间内生成指定半径的矿石单元 ball,在自重应力条件下平衡;然后,生成回采进路的边界单元 wall,删除回采进路范围内的颗粒单元,继续在自重

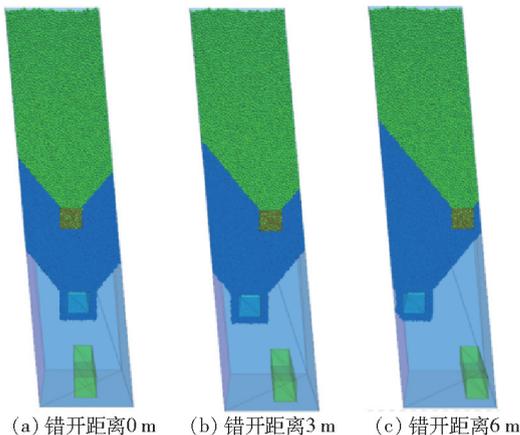


图1 沿走向进路不同错开距离布置的数值三维模型

应力条件下平衡;最后,在矿体上部生成矿体上部的废石覆盖层,在重应力条件下平衡,删除超出覆盖层高度的单元,完成装矿过程。根据矿体回采的分段及进路内崩矿步距的划分,对矿石单元进行分组,统计各分段及步距的装矿量。

#### 3) 模型颗粒单元参数确定

PFC<sup>3D</sup>软件数值模型中颗粒单元的基本参数的选取直接决定着数值模型的正确性和有效性。无底柱分段崩落法放矿模拟具有其独特性,用PFC<sup>3D</sup>中球体单元模拟矿岩空间中崩落的矿岩散体,属于将基本单元作为宏观介质单元,目前为止并没有相关理论或实验说明微观参数与宏观力学参数存在一一对应的关系。放矿过程中矿石与废石属于散体自由流动问题,因此,数值模型中单元间的接触采用线性接触模型,数值模型中需要设定的微观参数有:接触摩擦系数(fric)、接触法向和切向接触刚度(kn, ks)、接触法向刚度与切向刚度之比(kratio)、接触法向临界阻尼比(dp\_nratio)、颗粒密度(density)、颗粒阻尼系数(damp),取矿石单元和废石单元颗粒密度分别为3 300 kg/m<sup>3</sup>和2 800 kg/m<sup>3</sup>,根据其他学者的研究确定参数dp\_nratio和damp取值为0.2,设计其余参数的预估合理取值见表1,利用建立好的模型分别进行计算,以获取合理的模型细观参数。

表1 微观接触参数预估取值

水平	接触摩擦系数	接触法向刚度/ N·m <sup>-1</sup>	接触法切刚度比
1	0.05	1e <sup>8</sup>	1
2	0.2	1e <sup>7</sup>	2
3	0.3	1e <sup>6</sup>	5

由表1参数取值进行参数取值的正交模拟试验,模拟结果表明,当摩擦系数为0.3时,摩擦系数偏大,颗粒单元间产生较大的作用力,颗粒不能在重力作用下正常出矿;当接触刚度较大时,每次出矿后模型需要很长的时间达到再次平衡状态,模拟试验不能高效的进行,当接触刚度较小时,颗粒单元放出后极易在进路内自由运动,不能在放矿口附近形成正常的矿石堆。

#### 4) 数值模型放矿步骤

在实际工程中,铲运机的铲取方式对矿岩流动有一定影响<sup>[14]</sup>,本研究根据实验过程中崩落矿石堆体崩落距离确定数值模型中的铲取方式,具体为:

①用range命令模拟铲运机,range范围为1.5

m × 1.6 m (长 × 宽);

②进路内崩落矿石堆散落距离达到 2.0 m 时开始出矿;

③模型中进路铲取方式为:正常进路按放矿进路宽度(4.7 m)从左、中到右共铲取三次为一个铲取周期(即进路内左侧 1.6 m、中间 1.6 m、右侧 1.6 m 各铲取一次)。半个进路(2.35 m)铲取方式为:左侧铲取一次后,右侧铲取一次,以此为一个铲取周期。每次铲取后,用 solve 命令自重平衡后再进行下次铲取;

④每次出矿后统计铲出的矿石和废石质量,判断是否达到截止放矿条件,如达到即停止该步距进行下一步距放矿,本分段放矿结束后进行下分段的放矿。

### 2.2 试验结果与分析

#### 2.2.1 回采指标分析

图 2、图 3、图 4 和图 5 分别为不同步距时矿石贫化率及回收率随放矿步距的变化示意图,表 2 为此次数值模拟试验的回采指标对比。结果显示,当水平进路错开距离由 0 m 增大至 6 m 时,矿石贫化率降低了 3.105%,采出矿石品位变化不大,矿石回收率增加了 4.765%,表明上下水平错开距离为 6 m 时回采参数较优。

表 2 回采指标对比

错开距离/ m	采出矿石 品位/%	矿石贫化 率/%	矿石回收 率/%
0	24.160	20.176	81.575
3	24.350	19.732	84.235
6	25.495	17.071	86.340

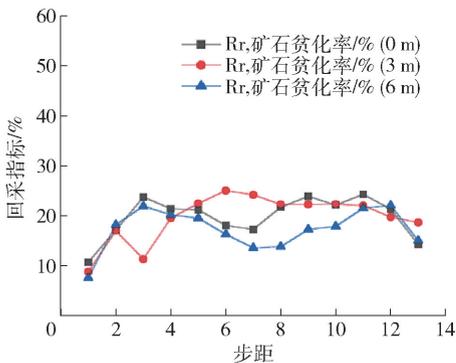


图 2 上分段错开距离为 0 m、3 m、6 m 时矿石贫化率随步距变化规律

#### 2.2.2 散体运移规律分析

图 6 和图 7 所示分别为上下分段进路水平错开

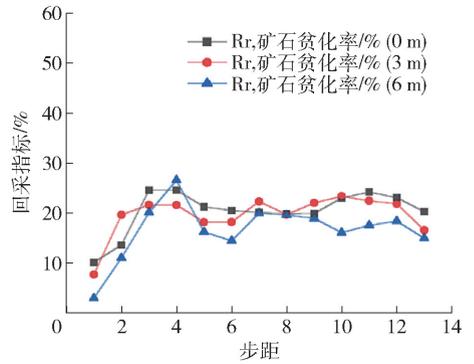


图 3 下分段错开距离为 0 m、3 m、6 m 时矿石贫化率随步距变化规律

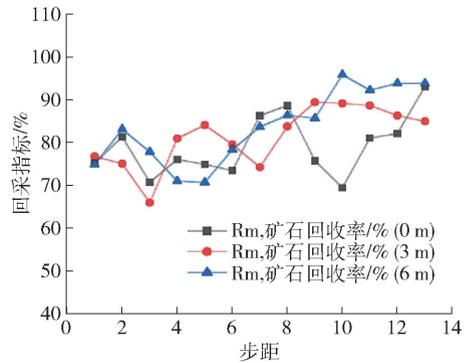


图 4 上分段错开距离为 0 m、3 m、6 m 时矿石回收率随步距变化规律

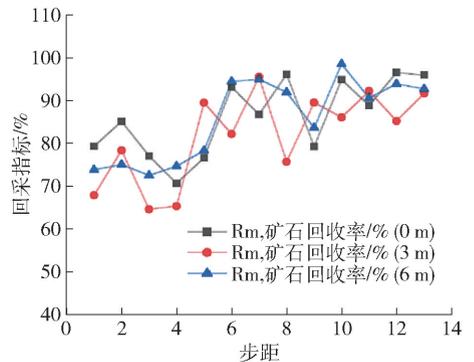


图 5 下分段错开距离为 0 m、3 m、6 m 时矿石回收率随步距变化规律

距离分别为 0 m、3 m、6 m 时散体运移规律。从图中可以看出,错开距离为 0 m 时,上分段和下分段进路位置上下盘矿岩边界一致,矿岩散体运移呈现对称的“V”型漏斗特征。放矿过程中,矿岩以进路为中心均匀向下流动,上下分段的放出体相互重叠,脊部矿石残留较多。

错开距离为 3 m 时,进路呈一定程度错开,上分段放出体与下分段放出体部分重叠。矿岩流动方向随进路错开产生偏移,下分段进路可回收上分段残

留的部分矿石,但由于错开距离较小,回收效果并不明显,散体运移的均衡性较0 m布置有所改善但不显著。

错开距离为6 m时,进路错开程度最大,上分段放矿后,下分段矿岩散体向下运移更顺畅,下分段进路能充分回收上分段脊部残留的矿石,散体流动范围更广,减少了滞留区,矿石回收率显著提升。

图8所示为错开距离分别为0 m、3 m、6 m时散体形态变化。从图中可以看出,错开距离为0 m时,放出矿石椭球体呈对称“V”型漏斗形态,椭球体边界清晰且对称,矿石主要从进路正上方区域放出,椭球体两侧边缘存在明显的矿石残留,未被椭球体覆盖。

错开距离为3 m时,放出矿石椭球体的“V”型漏斗出现轻微偏移,下分段椭球体轴线相对上分段向一侧偏移3 m,椭球体与上分段脊部残留区域有部分交集,但重叠范围较小。椭球体边缘仅覆盖上分段脊部残留矿石的少量区域,大部分残留仍处于椭球体之外。下分段虽能回收少量上分段脊部残留矿石,但因椭球体覆盖范围有限,脊部仍存在较多残留矿石。

错开距离为6 m时,放出矿石椭球体形态发生显著变化,“V”型漏斗偏移幅度最大,下分段椭球体轴线与上分段轴线错开6 m,椭球体范围大幅扩展,椭球体边界延伸至上分段脊部,原脊部残留的矿石被椭球体包裹并逐步放出,且椭球体内部矿石分布均匀,无明显残留死角。该形态体现矿岩流动更顺畅,下分段椭球体可充分回收上分段脊部残留矿石。

综上所述,进路错开距离为6 m时放矿效果最好。

### 3 沿矿体走向进路布置方案的放矿相似试验

#### 3.1 相似模拟试验方案

##### 3.1.1 相似材料与模型制备

根据作业面块度分析结果中崩落矿岩粒径分布特征,将矿石直径按4个等级段划分(见表3)。

表3 矿石散体粒径分布

直径/mm	≤100	100~400	400~600	>600
百分比/%	30.21	18.28	42.46	9.05

根据相似准则及相似指标,结合实际情况,试验采用1:50的相似比,根据相似准则,将实际矿岩块

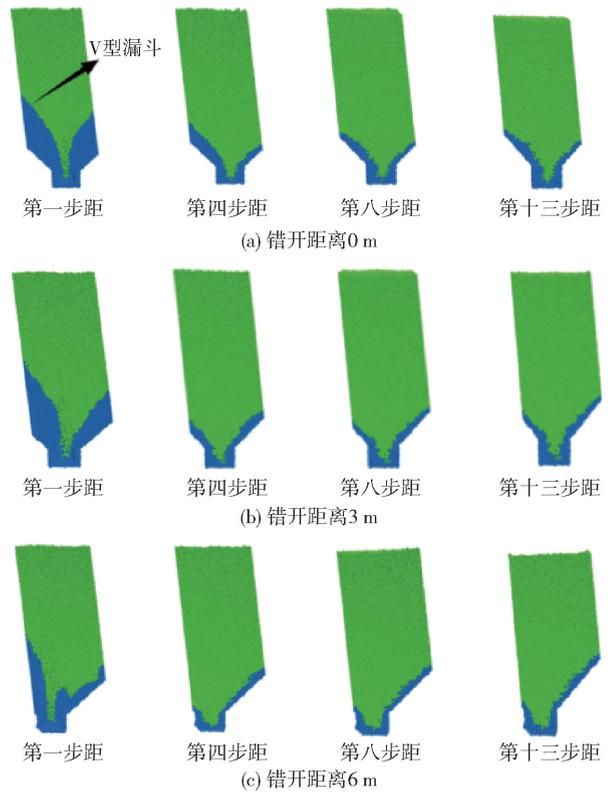


图6 上分段进路水平错开距离分别为0 m、3 m、6 m时散体运移结果

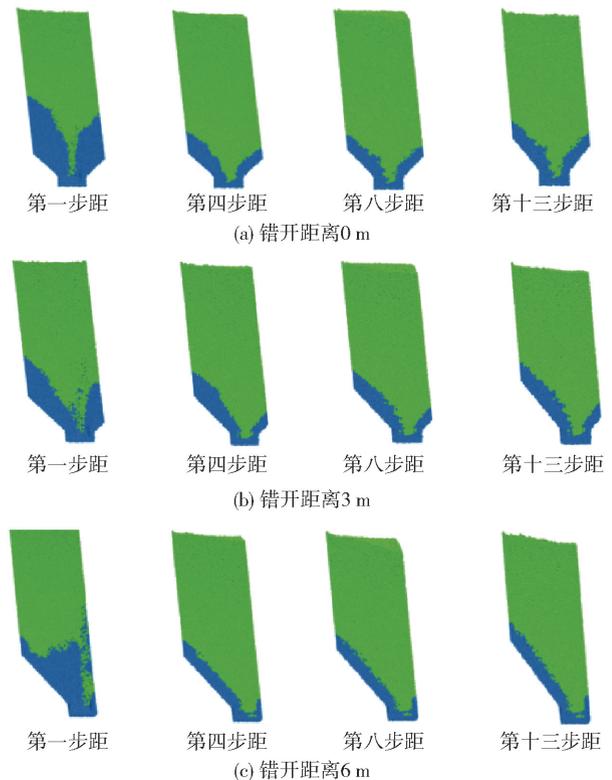


图7 下分段进路水平错开距离分别为0 m、3 m、6 m时散体运移结果

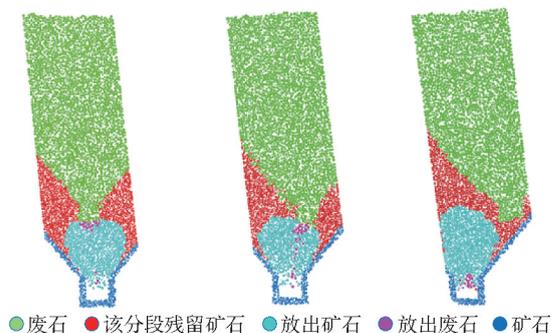


图8 进路水平错开距离分别为0 m、3 m、6 m时散体形态变化

度按比例缩小:矿石分为 $\leq 2$  mm、2~8 mm、8~12 mm和 $\geq 12$  mm四种,废石分为8~12 mm、12~16 mm以及大于16 mm三种,并用蓝色油漆标记废石以区分矿岩边界。

为满足试验要求,本研究采用可调节尺寸放矿相似模拟试验箱进行试验,试验箱的安装尺寸为(长×宽×高)500 mm×400 mm×1 100 mm。试验箱的四个侧面采用8 mm厚透明有机玻璃板,便于观测散体颗粒运移;在放矿侧的有机玻璃上加工一定形状便于预埋构件和实施放矿。在角钢上钻孔并用螺丝固定形成试验箱框架,角钢内部焊接L型槽固定有机玻璃,模型如图9所示。

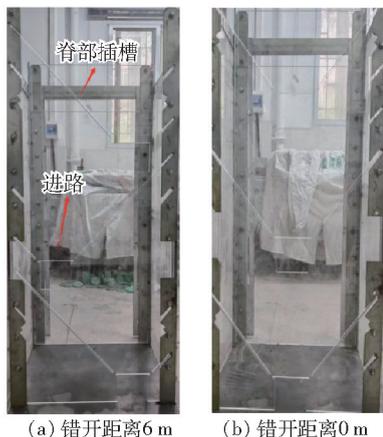


图9 上下分段布置进路模型的正面

### 3.1.2 试验方案

为研究该矿体沿走向布置进路的更优位置,选择错开距离0 m和6 m作为试验变量,未设置3 m错开距离工况,主要有两种原因:(1)数值模拟通过0 m、3 m、6 m三档梯度,已明确错开距离增大与回采指标优化的正相关趋势,且6 m时综合效果最优。相似模型试验核心目的是验证数值模拟结论的可靠性,而非重复梯度探索,因此选取“常规正对布置(0

m)”与“数值模拟最优方案(6 m)”进行重点对比,可精准验证最优方案的实际可行性。

(2)相似模型试验采用1:50缩尺比例,矿岩散体颗粒的级配模拟、放矿口铲取精度等均存在物理尺度限制。若增设3 m错开距离工况,需额外搭建对应模型并重复完整放矿、分选、数据统计流程,不仅会增加试验周期与操作复杂度,还可能因多次试验的系统误差影响结果可信度。而聚焦0 m与6 m两个关键工况,既能简化试验流程、保障数据精度,又能充分验证数值模拟得出的“6 m错开距离最优”这一核心结论。

试验中进路断面尺寸为4.7 m×4.4 m,崩矿步距为2 m,具体试验流程如下:

(1)将配制好的矿石装填到试验模型中,每装填一定高度对矿石进行简单捣实和平整,装填到70 cm后再装填30 cm蓝色废石颗粒,矿岩装填效果如图10所示。

(2)装矿完毕后开始放矿工作。匀速抽出位于放矿口上方的铁板,最开始出纯矿石时,每隔500~700 g称取一次当次出矿重量;当见到废石时,减少每次称重的铲数,大约200~300 g称取一次当次出矿重量。当废石与矿石的质量比为1.75时,停止放矿,开始下一分段的放矿。

(3)待放矿结束后,将不同颜色的矿石和废石进行分选,记录各步距的矿石量和废石量,对不同放矿阶段时的放出体形态进行还原,根据统计结果分别计算出回收率和废石混入率等回采指标。

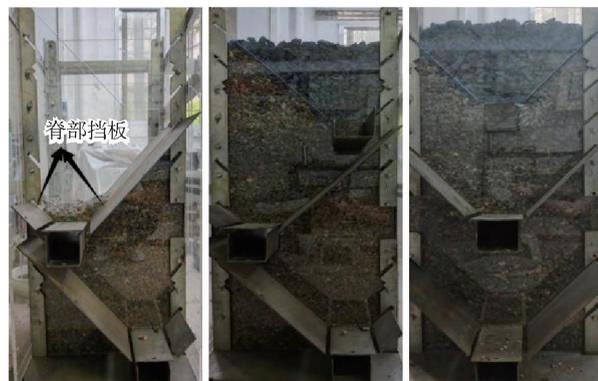


图10 矿岩装填

## 3.2 试验结果与分析

### 3.2.1 回采指标分析

此次试验的回采指标对比见表4,结果显示,上下水平错开距离为6 m的贫化率相比于错开距离为0 m降低了3.33%,采出矿石品位增加了1.579%,

矿石回收率增加了 3.765%,表明上下水平错开距离为 6 m 时回采参数较优。

表 4 回采指标对比

错开距离/ m	采出矿石 品位/%	矿石贫化 率/%	矿石回收率/ %
0 m	25.059	18.875	81.020
6 m	26.638	15.545	84.785

### 3.2.2 散体运移规律分析

#### 1) 第一分段回采

由图 11 可知,当上下分段进路水平错开距离为 6 m 时,第一分段回采过程中,由于放矿口靠右,矿

岩集中于右边放出。随放矿持续,矿石向下运移排出,废石因颗粒间支撑力变化,从矿石堆顶部、侧边逐步向下沉降,从集中区域向矿石层扩散,即废石随矿石放出,逐步填充矿石原占据的空间。

当上下分段进路水平错开距离为 0 m 时,第一分段回采过程中,放矿口位于正中央,矿岩从中央向下均匀放出。第一步距放矿时,中央矿岩开始下沉,形成初始的“V”型散体边界。随着放矿步距增加,“V”型底部逐渐向下移动,矿岩以放矿口为中心,呈对称状向下运移。“V”型边界缓慢下移 11.2 cm,每一步距的下移幅度相对均匀,但脊部存在较多未放出的矿石。

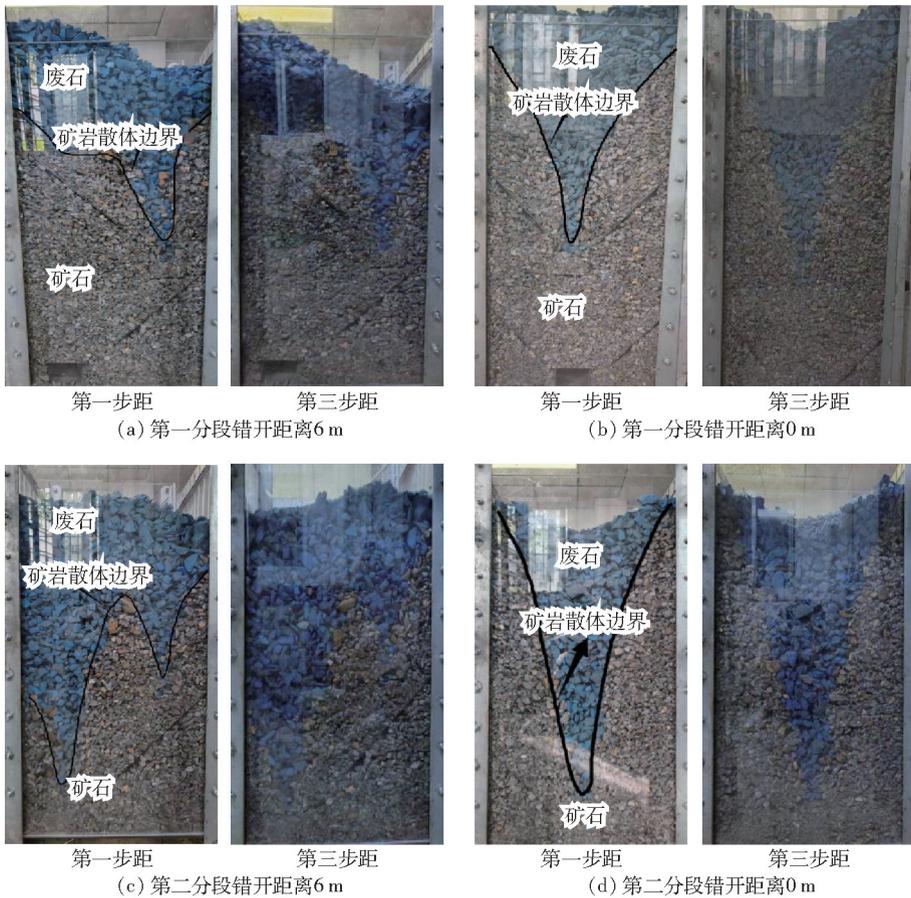


图 11 上下分段回采时矿岩运移边界变化特征

#### 2) 第二分段回采

当上下分段进路错开距离为 6 m 时,第二分段回采过程中,放矿口靠左,矿岩集中于左侧放出。上分段放矿形成的散体流动场影响下分段矿岩运移,左侧矿岩在放矿口吸引力作用下快速向下移动,右侧矿岩受左侧流动牵引,缓慢向左侧移动。靠右矿岩散体边界因左侧流动的拉扯,呈现“W”型,右侧上部脊部残留矿石在下分段左侧进路放矿过程中逐

渐被放出,残留矿石量减少。

当上下分段进路错开距离为 0 m 时,第二分段回采过程中,放矿口位于正中央,承接上分段的“V”型散体边界,矿岩继续以中央为中心向下运移。散体边界在第一分段的基础上继续向下移动,总共下移 35.8 cm,移动幅度较大,表明下分段放矿对矿岩流动的影响显著。矿岩以放矿口为中心,呈对称状快速下沉,形成稳定的“V”型流动漏斗,导致进路两

侧脊部残留难以有效回收。

由图 12 可知,错开距离为 0 m 时,第一分段和第二分段放矿过程中,由于矿岩以放矿口为中心呈对称状向下运移,脊部存在较多未放出的矿石,导致

贫化率增加;而错开距离为 6 m 时,上一分段脊部残留的矿石能在下一分段放出,显著地降低了矿石贫化率,因此综合对比可知,错开距离为 6 m 时回采效果更好。

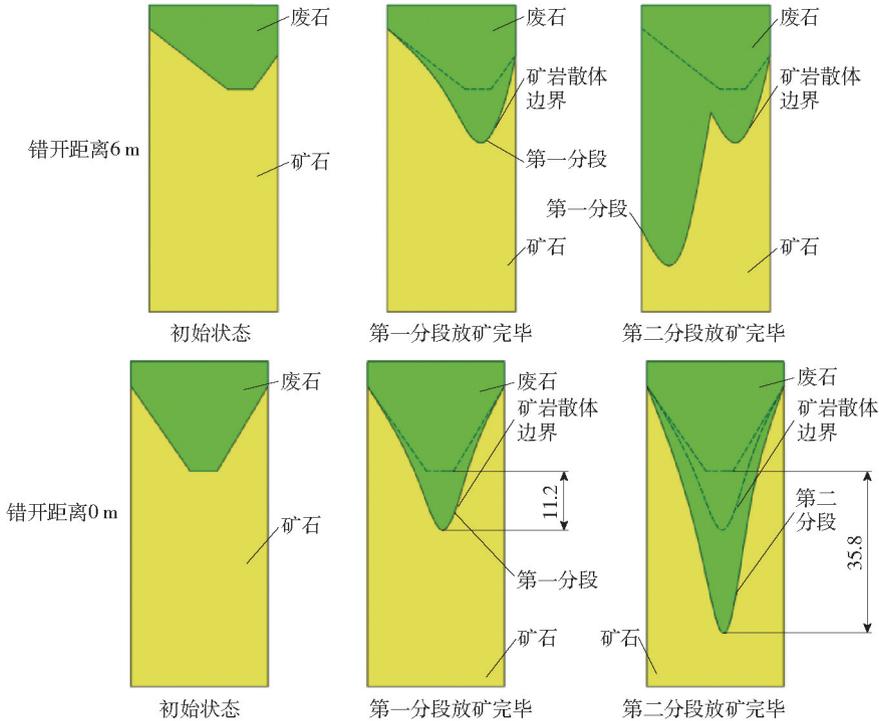


图 12 上下分段不同错开距离回采时矿岩运移边界变化特征

### 3.3 试验和模拟结果对比

表 5 是上下水平错开距离分别为 0 m 和 6 m 时的回采指标对比。将相似模拟试验的回采指标与数值模拟结果进行对比分析发现,数值模拟中,错开距离由 0 m 增大至 6 m 时,矿石贫化率降低了 3.105%,矿石回收率增加了 4.765%;相似模拟中,错开距离为 6 m 的贫化率相比于错开距离为 0 m 降低了 3.33%,矿石回收率增加了 3.765%。两种结果数值相差不大,具有良好的一致性,均表明上下水平错开距离为 6 m 时回采参数更优。

表 5 回采指标对比分析

方法	采出矿石 品位/%	矿石贫化 率/%	矿石回收 率/%
错开距离为 0 m (相似模拟)	25.059	18.875	81.020
错开距离为 6 m (相似模拟)	26.638	15.545	84.785
错开距离为 0 m (数值模拟)	24.160	20.175	81.575
错开距离为 6 m (数值模拟)	24.668	17.071	86.340

## 4 结论

本次研究围绕产状复杂变化的中厚矿体,针对

沿矿体走向布置单进路的最优位置展开研究,通过数值模拟与相似模型试验相结合的方式,以矿体倾角 85°、厚度 20 m 为例,数值模拟对比分析上下分段进路正对布置(错开距离 0 m)与交错布置(错开距离 3 m、6 m)的回采指标及散体运移规律,相似模型试验聚焦错开距离 0 m 与 6 m 两种布置形式开展验证。主要结论如下:

(1)随着上下分段进路水平错开距离的增大,矿石贫化率逐渐降低,采出矿石品位和矿石回收率逐步提升。当水平错开距离为 6 m 时,综合回采指标最优。数值模拟中,错开距离由 0 m 增大至 6 m 时,矿石贫化率降低了 3.105%,矿石回收率增加了 4.765%;相似模型试验中,错开距离为 6 m 的贫化率相比于错开距离为 0 m 降低了 3.33%,矿石回收率增加了 3.765%,两者结果趋势一致,验证了方案的可靠性。

(2)综合数值模拟与相似试验结果,当矿体倾角 85°、厚度 20 m 时,上下分段进路采用交错布置且水平错开距离为 6 m 时,上一分段脊部残留的矿石

(下转第 40 页)