

考虑含水率对放出体影响的金山店铁矿东区采场 合理进路间距研究^①

武忠英¹, 梅林芳², 曾云川³, 王文杰¹

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2. 武钢资源集团有限公司, 湖北 武汉 430080; 3. 武钢资源集团金山店矿业有限公司, 湖北 黄石 435116)

摘要: 针对金山店铁矿东区采场受含水率影响导致矿岩黏性大、流动性差及矿石损失贫化高的问题, 采用物理试验和数值模拟方法, 分析东区采场2种矿体在不同含水率条件下的散体流动性能、放出体形态特征和损失贫化指标的变化规律, 得到东区采场合理进路间距范围, 并基于改进 CRITIC-TOPSIS 评价方法, 从安全、技术及经济角度对合理进路间距进行优选。结果表明: 含水率0~8%时, 东区采场放出体形态呈“倒水滴”特征, 放出体宽度随着含水率增大而减小; 含水率4%~8%时, 矿石自然安息角随着含水率增大而递增, 2种矿体的回收率与含水率呈负相关, 并随着进路间距增加呈现先增大后减小的趋势, 贫化率则相反; 平均含水率6%条件下, 金山店铁矿东区采场最优进路间距为15 m。

关键词: 金山店铁矿; 无底柱分段; 崩落法; 采场结构; 含水率; 放矿试验; 自然安息角; 进路间距

中图分类号: TD853

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.006

文章编号: 0253-6099(2025)04-0033-08

Reasonable Drift Spacing for Eastern Stopes of Jinshandian Iron Mine Considering Influence of Moisture Content on Drawn Ore Blocks

WU Zhongying¹, MEI Linfang², ZENG Yunchuan³, WANG Wenjie¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Wuhan Iron & Steel Group Corporation, Wuhan 430080, Hubei, China; 3. WISCO Resources Group Jinshandian Mining Co., Ltd., Huangshi 435116, Hubei, China)

Abstract: To address the problems of poor fluidity and high viscosity, ore rocks and higher ore losses and dilution due to the influence of moisture content on eastern stopes of Jinshandian Iron Mine, the variation laws of fluidity of ore blocks, shape characteristics of drawn ore blocks, as well as loss and dilution indices of two types of ore bodies in the eastern stopes under influence of different moisture content were analyzed by performing physical tests and numerical simulation. A reasonable range of drift spacing for the eastern stopes was determined, which was then optimized from the perspectives of safety, technology and economy, based on the improved CRITIC-TOPSIS evaluation method. The results show that with the moisture content in a range of 0~8%, the drawn ore blocks in the eastern stopes are in a shape of an “inverted water drop”, and become shallow as the moisture content increases; with the moisture content in a range of 4%~8%, the natural angle of repose of ore rocks increases with the increase of moisture content, the recovery rates of those two ore bodies are negatively correlated with moisture content, and present an upward trend followed by a decline as the drift spacing becomes wider, while the dilution rate follows the opposite trend. With the moisture content at 6% on average, the optimal drift spacing in the eastern stopes of Jinshandian Iron Mine should be set at 15 m.

Key words: Jinshandian Iron Mine; pillarless sublevel; caving method; stope structure; moisture content; ore drawing test; natural angle of repose; drift spacing

① 收稿日期: 2025-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51974206)

作者简介: 武忠英(1998—), 男, 辽宁葫芦岛人, 硕士研究生, 主要从事金属矿床地下开采方面的研究。E-mail: wuzhongying@wust.edu.cn

通信作者: 王文杰(1978—), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事金属矿床地下开采工艺、地下开采地压灾害监测与防治、井巷工程支护理论与技术等方面研究。E-mail: wangwenjie@wust.edu.cn

无底柱分段崩落法采矿效率高、安全性好、工艺简单,广泛应用于金属矿山^[1]。但其在覆岩下放矿,导致生产中损失贫化大^[2]。近些年,针对无底柱分段崩落法采场结构参数优化和损失贫化控制问题,相关学者进行了大量物理相似试验及数值模拟研究,有效控制了无底柱分段崩落法采场损失贫化^[3-6]。本文在前人研究的基础上,通过相似试验和数值模拟方法,探究不同含水率条件下宝武集团金山店铁矿东区采场进路间距参数合理范围,同时基于改进的 CRITIC-TOPSIS 方法选取最优进路间距,在综合考虑采矿安全性以及技术实施难易程度前提下,最大程度提高矿山经济效益。

1 散体流动性试验

宝武集团金山店铁矿主要采用无底柱分段崩落采矿法采矿,矿区-500 m 中段粉状磁铁矿较为发育,粉矿及矿体顶底板砂卡岩较破碎,粉矿较多。东区采场开采对象为 I、II 号矿体,受复杂构造、岩性及形态影响,两种矿体崩落矿石粒度分布存在差异。东区采场在不同开采时期含水量动态变化明显,采场平均含水率较高。受矿岩性质及采场含水率动态变化影响,金山店铁矿东区采场崩落矿岩黏性大,散体流动性差,矿石贫化严重,同时易出现结拱、堵塞等问题。合理调整进路间距,可以改变矿岩散体流动性,进而减少矿石损失及贫化。

为揭示东区采场散体流动性能,进行东区采场两种矿体粒径和含水率试验测定,开展不同含水率条件下的自然安息角及放出体测定试验,分析东区采场在不同含水率条件下的散体流动性能及放出体形态特征,为后续进路间距优化提供理论基础。

1.1 粒径及含水率测定

采用 Image J 软件对金山店铁矿东区采场 I、II 号矿体进行粒径统计,结果如表 1 所示。通过烘干法测定东区采场不同时期进路含水率,结果见表 2。

表 1 东区采场矿石粒径级配统计结果

Table 1 Particle size distribution of ore rocks in eastern stopes

矿体名称	粒径级配占比/%				
	0~100 mm	100~200 mm	200~300 mm	300~400 mm	400~500 mm
I 号	15	20	30	25	10
II 号	20	28	25	20	7

1.2 自然安息角测定

自然安息角反映了矿石流动特性,采用无底圆筒法测定 I、II 号矿体崩落矿石的自然安息角。按照实际粒径级配,依据相似比 1:100 破碎及烘干,并依据含

表 2 采场不同时期进路含水率测定结果

Table 2 Moisture content testing results of stope drift at different periods

矿体名称	含水率/%				采场平均值
	3 月	7 月	12 月	矿体平均值	
I 号	6.56	7.84	5.13	6.51	6.23
II 号	5.90	7.38	4.57	5.95	

水率加水保湿。含水率设置为 4%、6%、8%,试验过程中测量 3 个方向的自然安息角(如图 1 所示),取平均值,测定结果见表 3。由表 3 可知:随着含水率增加,矿石自然安息角逐渐增大,且增量呈递增趋势,含水率增加使矿石颗粒间摩擦力和黏结力增加,降低了矿石流动性能;II 号矿体崩落散体小粒径颗粒含量较高,粒度减小增加了颗粒间滑动摩擦和滚动摩擦,使得 II 号矿体散体自然安息角大于 I 号矿体,即 II 号矿体散体流动性比 I 号矿体差。

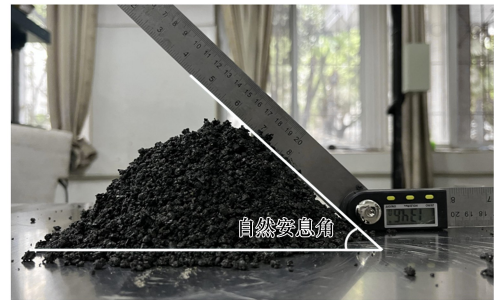


图 1 自然安息角测定示意图

Fig. 1 Sketch map of measuring natural response angle

表 3 不同含水率条件下自然安息角测定结果

Table 3 Measurements of natural response angle under different moisture content conditions

含水率/%	自然安息角/(°)		
	I 号矿体	II 号矿体	平均值
4	35.12	36.13	35.62
6	36.59	38.89	37.74
8	42.78	43.27	43.03

2 放出体形态测定

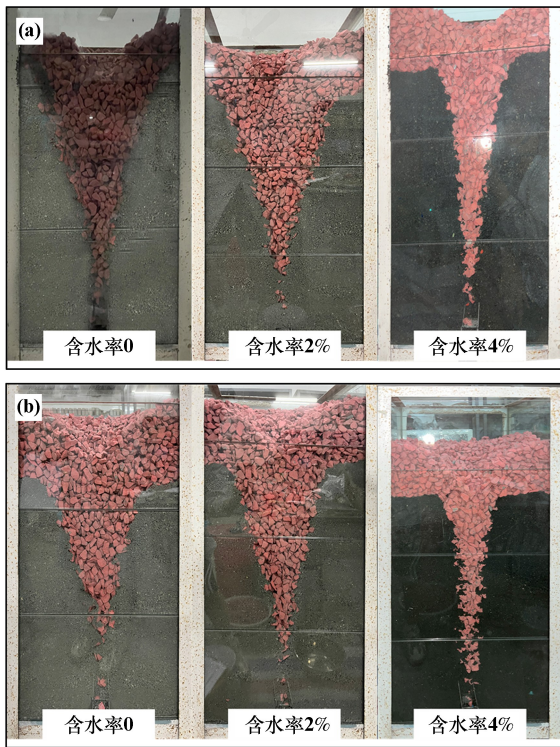
2.1 模型试验

采用端部放矿模型测定放出体形态,模型尺寸为 40 cm×40 cm×80 cm,模型放矿口尺寸为 3.4 cm×3.6 cm。试验相似比为 1:100,按照东区采场矿石实际粒径级配制备试验矿样。试验前烘干矿石及废石,废石染色,依据含水率加水并用保鲜膜密封养护 24 h,待水分完全渗入矿石内部后开展试验。含水率设置为 0、2%、4%、6%、8%,每组试验重复 3 次。试验前将端部放矿

模型水平置于地面,按照 8 cm 一层装填含水矿石散体,每一层散体表面铺设标记颗粒,标记颗粒间距 1 cm,共铺设 0°、45°、90°、135°、180° 共 5 个角度的标记颗粒。

试验开始后打开放矿口,用按照相似比制作的铲子出矿,依据无贫化放矿方式进行放矿。当废石出现至放矿口时结束放矿,过程中记录每次废石、矿石质量。

部分放矿试验结果如图 2 所示。放矿试验中含水率 0、2%、4% 的矿石流动性正常,含水率 6%、8% 的矿石发生堵塞现象,未能流动。随着含水率增加,正面废石暴露时间较早,矿岩交界面角度变化幅度较大。含水率 0~4% 时,矿石具有流动性,随着含水率增加,流动性逐渐变差。含水率 6% 时,矿石内部出现结块,小范围发生堵塞现象,矿石上方黏结成拱,依靠外力敲击才能流动;含水率 8% 时,大范围发生堵塞现象,矿石完全失去流动性,通过外力振动和对放矿口黏结拱进行破除,才能使矿石流出。



(a) I号矿体; (b) II号矿体

图2 部分放矿试验结果

Fig.2 Some ore-drawing test results

2.2 理论分析

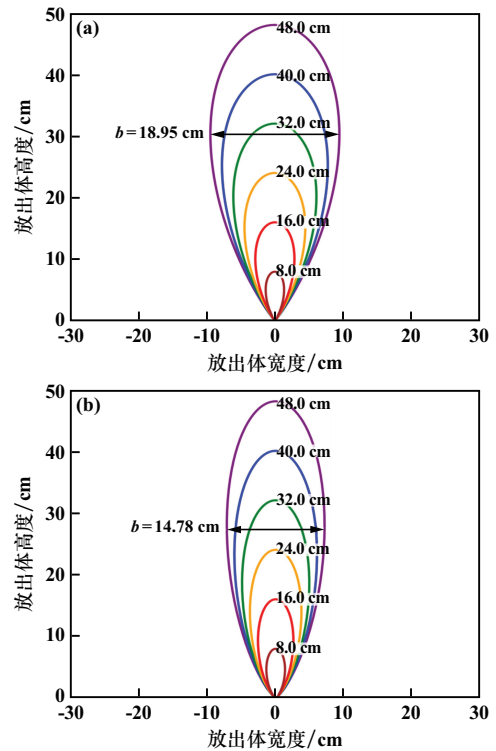
2.2.1 含水率对放出体形态的影响

根据随机介质理论,放出体曲面方程为:

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

$$\omega = \frac{\alpha + \alpha_1}{2} \quad (2)$$

式中: α 、 β 均为沿进路方向散体流动参数; α_1 、 β_1 均为垂直进路方向散体流动参数; k 为壁面影响系数; H 为放出体垂直高度; ω 为放出体偏心率。拟合得到不同含水率条件下 I 号矿体放出体形态(以含水率 0 和 6% 为例)如图 3 所示,其中 b 为放出体短轴。随着含水率增加,放出体宽度有变窄的趋势,拟合得到含水率 0、6% 时的流动参数 α_1 分别为 2.17、1.846, β_1 分别为 0.053、0.098,拟合优度 R^2 均大于 0.98。由于放出体短轴位置取决于 α_1 ,经对比,所有含水率条件下矿石流动参数 α_1 均大于 $1/\ln 2$,说明放出体上部宽下部窄,金山店铁矿东区采场放出体形态整体呈“倒水滴”特征。



(a) 含水率 0; (b) 含水率 6%

图3 I号矿体放出体形态

Fig.3 Shape of drawn ore blocks from ore body I

放出体高度为 48 cm 时,含水率对放出体宽度的影响如图 4 所示。随着含水率增加,2 种矿体放出体宽度均减小,原因是含水率增加导致矿石内部颗粒间黏结力、抗剪强度和摩擦力增加,降低了矿石流动性;含水率相同条件下, I 号矿体放出体宽度大于 II 号矿体, II 号矿体崩落的小粒径颗粒占比较多,小粒径颗粒充填到大粒径颗粒空隙中,矿石内部空间被填实,增大了颗粒间接触面积,颗粒间摩擦力随之增加,流动性能变差。

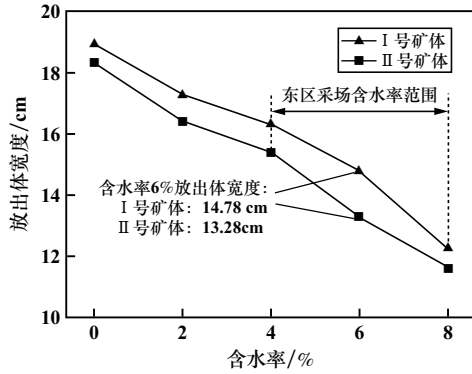


图4 含水率对放出体宽度的影响

Fig.4 Effect of moisture content on drawn block width

偏心率是表征放出体形态发育的重要参数,放出体偏心率 e 计算公式为:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{(H/2)^2}} \quad (3)$$

式中 H 为放出体高度。

含水率对放出体偏心率的影响如图5所示。含水率增加,放出体偏心率呈线性增长,表明含水率对矿石流动性和放出体形变特性有显著影响。含水率增加时,偏心率增大,放出体逐渐转变成“瘦长”形态。

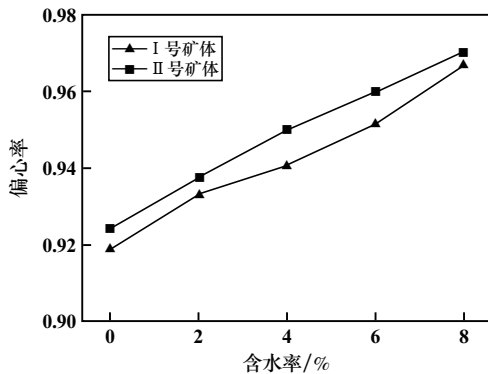


图5 含水率对放出体偏心率的影响

Fig.5 Effect of moisture content on eccentricity of drawn ore blocks

2.2.2 含水率对放出量的影响

将不同含水率端部放矿试验放出的全部矿石进行称重,分析含水率对放出量的影响,结果如图6所示。随着含水率增加,2种矿体的放出量呈下降趋势,含水率0~6%时,放出量下降幅度较大,此时颗粒间摩擦力增幅较大,放矿口中心轴线处颗粒流动速度远大于边缘颗粒,散体颗粒间速度差增加,放矿口中轴线的颗粒快速流出发矿口,放出量下降较快;含水率6%~8%时,矿石放出量下降幅度趋于平缓,颗粒间含水量趋于饱

和状态,颗粒间相互作用力及摩擦力接近峰值,进一步增加含水率对散体流动性的影响较小。

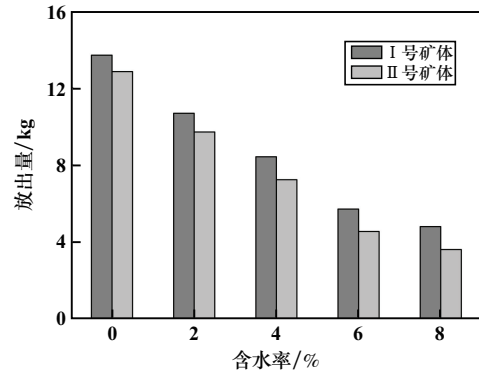


图6 含水率对放出量的影响

Fig.6 Effect of moisture content on drawn ore mass

3 放矿数值模拟

3.1 模型构建

采用离散元数值模拟软件构建二维平面放矿数值模型,不考虑放矿步距的影响,分析含水率对放矿损失贫化指标的影响,以及在不同采场进路间距下矿石损失贫化指标的变化规律。矿石颗粒依据采场实际级配生成,废石颗粒半径范围为0.25~0.30 m,矿石密度为3300 kg/m³,废石密度为2500 kg/m³,覆盖层高度取1.5倍分段高度。模型设置1个中段、6个分段,每个分段设置5~6条进路。进路尺寸为3.6 m×3.4 m,边孔角为51°,分段高度为15 m。为了提高计算速度,前一分段放矿结束后再进行下一分段颗粒生成及放矿,放矿模型如图7所示,采用截止品位放矿,截止品位为18%。

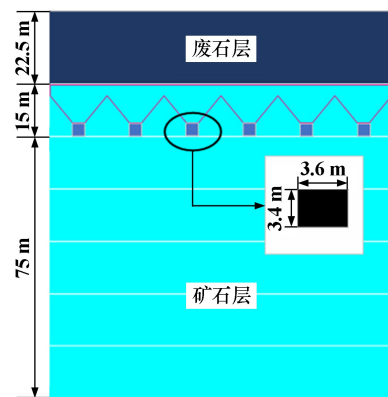


图7 放矿模型

Fig.7 Ore drawing model

接触模型选取抗转动线性接触模型。该模型在线性模型基础上加入滚动阻力机制,接触点处的抗转动力矩随着相对旋转角度增加而线性增加,降低颗粒转动能力。通过自然安息角数值模拟与物理试验,模拟

测量值与实际测量值近似相等时,即可将数值模型中细观参数与矿岩散体物理力学性质相匹配^[7]。

建立与自然安息角测定试验一致的数值模型,通

过试错法多次改变细观参数直至与试验所测定的2种矿体散体的平均自然安息角相匹配,最终确定的颗粒及墙体细观力学参数见表4。

表4 颗粒及墙体细观力学参数

Table 4 Micro-mechanical parameters of particles and wall

含水率/%	墙体			颗粒			
	法向刚度/(N·m ⁻¹)	切向刚度/(N·m ⁻¹)	摩擦因数	法向刚度/(N·m ⁻¹)	切向刚度/(N·m ⁻¹)	摩擦因数	抗转动系数
4	5×10 ⁸	5×10 ⁸	0.7	1×10 ⁸	1×10 ⁸	0.5	0.25
6	5×10 ⁸	5×10 ⁸	0.7	1×10 ⁸	1×10 ⁸	0.7	0.40
8	5×10 ⁸	5×10 ⁸	0.7	1×10 ⁸	1×10 ⁸	0.7	0.60

3.2 模拟方案

合理进路间距 B 计算公式为:

$$B = 6 \sqrt{\frac{1}{2} \beta H^{\alpha} + \mu W} \quad (4)$$

式中: W 为进路宽度; μ 与废石漏斗在进路顶板的出露宽度有关,无贫化放矿时 $\mu \approx 0$,低贫化放矿时 $\mu \approx 0.1 \sim 0.6$,截止品位放矿时 $\mu \approx 0.75$ 。

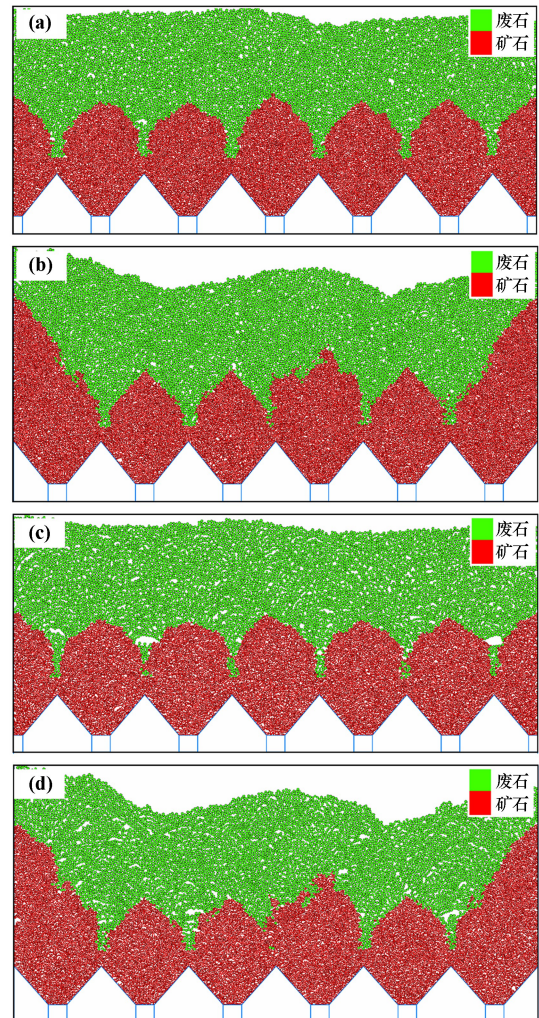
根据式(4) 计算得出东区采场 I、II 号矿体在实际含水率条件下采场合理进路间距范围为 14.43 ~ 18.41 m。考虑现场技术条件与施工难易程度,设置进路间距 14、15、16、17、18 m 共 5 种模拟方案,每种方案设置 4%、6%、8% 共 3 种含水率模拟条件。模拟出矿顺序采用 3 条进路同时出矿,在放矿过程中通过编写 fish 程序统计放出矿石与废石颗粒数目,当废石与矿石比例达到截止品位时停止计算,计算整个中段损失贫化指标,包括回收率、贫化率及回贫差。

3.3 模拟结果分析

为了便于对比采场矿岩散体流动性受含水率的影响情况,以含水率 6%、8% 条件下 I 号矿体进路间距 16 m 第一、二分阶段放矿过程为例,放矿结束图如图 8 所示。由图 8 可知,矿岩在重力作用下发生运移,矿岩交界面相互混合掺杂,废石颗粒不断侵入以及小粒径矿石发生穿流,导致矿石掺杂程度加剧。同时含水率增加,矿石颗粒间黏结力及分子间作用力增加,颗粒间形成的动态拱数量增多,直至接触力链断裂或重组前,严重影响周围散体流动速度,降低流动性能,对矿石损失贫化指标产生显著影响。

不同进路间距的损失贫化指标如图 9 所示。含水率 4%、6%、8% 情况下,矿石平均回收率在 76% ~ 83% 之间波动,矿石回收率随着含水率增加而逐渐减小,矿石散体间黏结力增加,在同一水平面上的矿石颗粒间流动阻力差变大,放矿口中轴线小范围的矿石颗粒被

放出,部分矿石没有被回收;矿石贫化率随着含水率增加而增大,含水率升高加速了废石混入,大量废石放出。回贫差变化规律与回收率一致,随着含水率增加而逐渐减小。



(a) 含水率 6%, 第一分段; (b) 含水率 6%, 第二分段; (c) 含水率 8%, 第一分段; (d) 含水率 8%, 第二分段

图8 I 号矿体进路间距 16 m 两分段放矿结束图

Fig.8 Ore drawing for two sublevels of ore body I with drift spacing of 16 m

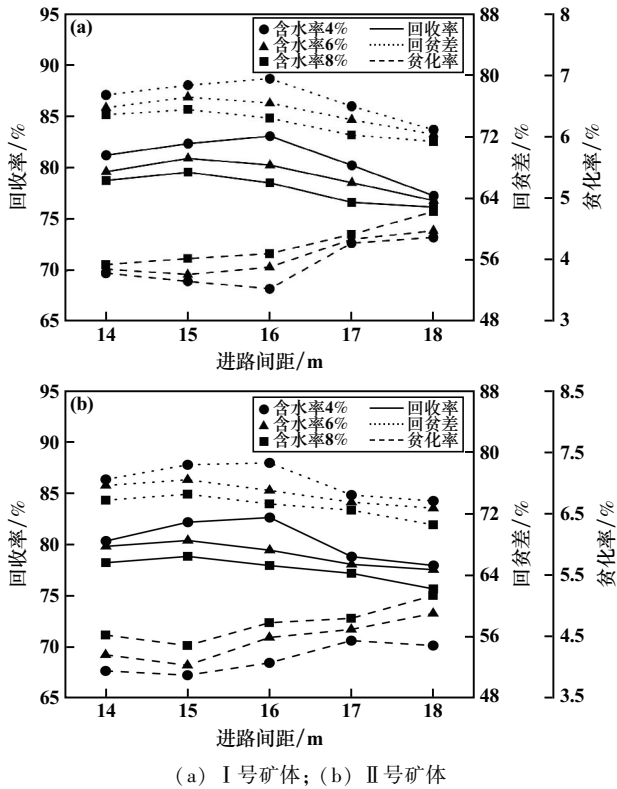


图9 不同进路间距的损失贫化指标

Fig.9 Ore loss and dilution indicators for different drift spacing

在损失贫化指标与进路间距关系中,矿石回收率均随着进路间距增大呈现出先增大后减小趋势,矿石贫化率呈反向趋势。含水率4%时,2种矿体在进路间距16 m时的回收率最高,此时I号矿体的贫化率最低;含水率分别为6%、8%时,2种矿体均在进路间距15 m时的回收率最高,此时II号矿体的贫化率最低。含水率由4%增加到8%时,放矿效果最优参数由16 m变为15 m,与放矿试验中含水率增加导致放出体形态变窄相对应,表明含水率4%时满足放出体形态的采场结构参数为16 m的进路间距;含水率6%、8%时满足放出体形态的采场结构参数为15 m的进路间距。

4 进路间距优化

4.1 评价指标建立与量化

本文基于改进CRITIC-TOPSIS评价方法对进路间距合理参数进行多指标优化。从安全、经济和技术实施难度出发,构建多指标综合评价体系,选取采矿成本 C_1 、矿石回收率 C_2 、矿石贫化率 C_3 、爆破效果 C_4 、顶板暴露面积 C_5 共5个影响指标作为进路间距综合评价指标。其中,采矿成本参照矿山实际生产成本,并结合当地材料价格进行估算;矿石回收率及贫化率选取金山店铁矿东区采场平均含水率6%条件下的值;爆破

效果按照表5取值;顶板暴露面积根据每一分段平均有效进路数目和进路平均长度计算。指标量化数值见表6~7。

表5 爆破效果分级标准

等级	描述	大块率 $N/\%$	中深孔深度 L/m	炸药单耗 $M/(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$	分值
I	效果好,块度均匀	<10	<270	$0.3 < M < 0.4$	1~4
II	效果较差,大块率较高	$10 < N < 15$	$270 < L < 285$	$0.2 < M < 0.3$	4~7
III	效果差,大块率高	>15	>285	<0.2	7~10

表6 I号矿体指标量化数据

进路间距/m	$C_1/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	$C_2/\%$	$C_3/\%$	C_4	C_5/m^2
14	93.80	79.66	3.85	2	8 751
15	88.70	80.96	3.76	3	8 177
16	86.20	80.30	3.88	6	7 675
17	81.40	78.59	4.33	7	7 232
18	72.00	76.85	4.47	9	6 839

表7 II号矿体指标量化数据

进路间距/m	$C_1/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	$C_2/\%$	$C_3/\%$	C_4	C_5/m^2
14	93.80	79.83	4.20	2	8 751
15	88.70	80.40	4.03	3	8 177
16	86.20	79.46	4.48	5	7 675
17	81.40	78.08	4.61	7	7 232
18	72.00	77.56	4.87	9	6 839

4.2 改进CRITIC权重计算

CRITIC法是基于评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来综合衡量指标的客观权重。针对CRITIC法中对于矛盾性指标权重偏大、影响TOPSIS评估结果的问题,采用改进的CRITIC法求取客观权重。

4.2.1 指标归一化

针对正向指标和逆向指标的区别,进行归一化处理。

指标正向化:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (5)$$

指标逆向化:

$$x_{ij}^* = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (6)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,m;j=1,2,3,\dots,n$ 。

4.2.2 权重计算

相关系数是用来反映变量之间相关关系密切程度

的统计指标,是研究变量之间线性相关程度的量。本文通过引入基尼系数来衡量指标的对比强度。基尼系数是根据劳伦茨曲线定义的、用来表征社会财富在各成员之间的分配差异性,基尼系数越大,表明社会财富在各社会成员之间分配越不均匀^[8]。基尼系数计算公式为:

$$\xi_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |x_{ij} - x_{kj}|}{2m \sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (7)$$

式中: ξ_j 为指标 u_j 的基尼系数, $\xi_j \in [0,1]$,1 表示该强度指标的对比强度最大,0 表示该指标的对比强度最小。针对皮尔逊相关系数缺点,引入肯德尔相关系数计算各指标间的冲突性。肯德尔相关系数是用来衡量多列等级变量相关程度的一种相关系数^[9],用于衡量元素排列间的相似程度。对于都具有若干元素的两列变量,指标间的肯德尔相关系数 η 计算公式为:

$$\eta = \frac{U - V}{\sqrt{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)}} \quad (8)$$

式中: U 和 V 分别为变量关系等级排序值相同的变量对数目与不相同变量对数目; T_1 为列变量总的逆序对数量, $T_1 = n(n-1)/2$; T_2 和 T_3 分别表示两列元素中的逆序对数量的值。为了避免相关系数的正负性对指标相关性的影响,对肯德尔相关系数取绝对值。

综上,基尼系数和肯德尔相关系数分别用于衡量评价指标的对比强度和指标间的冲突性,综合基尼系数与肯德尔相关系数,可更加准确地确定各个指标的客观权重。因此可以得到改进的 CRITIC 权重计算公式为:

$$G_j = \xi_j \sum_{j=1}^n (1 - |\eta|) \quad (9)$$

式中: G_j 为指标的信息量, G_j 越大,指标所含的信息量越大。第 j 个评价指标的客观权重可以表示为:

$$W_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (10)$$

根据以上改进的 CRITIC 方法权重计算步骤,计算得到的东区采场 I、II 号矿体客观权重见表 8。

表 8 2 种矿体 CRITIC 客观权重

矿体名称	指标权重/%				
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
I 号	17.60	31.02	19.94	16.22	15.22
II 号	18.23	24.85	24.37	16.79	15.76

4.3 TOPSIS 综合评价

TOPSIS 是一种多目标、多维度决策分析的综合评价方法,通过计算评价指标与正、负理想解的距离对指标评估排序。

4.3.1 构建决策矩阵

将所有的进路间距方案和多种影响进路间距优化的指标值表示为矩阵形式,并进行归一化处理,以消除各指标量纲不同的影响。加权矩阵如下:

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & & \\ v_{m1} & \cdots & v_{mn} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中 $v_{ij} = x_{ij} * w_j$, w_j 为第 j 项指标的权重。

4.3.2 计算正、负理想解距离

确定正理想解和负理想解:

$$V^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = \{\max v_{ij} | j \in J_1, \min v_{ij} | j \in J_2\} \quad (12)$$

$$V^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = \{\min v_{ij} | j \in J_1, \max v_{ij} | j \in J_2\} \quad (13)$$

式中: J_1 为效益型指标集合; J_2 为成本型指标集合。

计算各指标到正、负理想解的距离:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (14)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (15)$$

计算第 i 个评价对象与理想解的相对贴近度:

$$\delta_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (16)$$

相对贴近度的取值越接近 1,表明评价对象在靠近正理想解的同时远离负理想解,评价结果越优。同时,依据相对贴近度取值大小可以对评价对象进行优劣排序。

经以上计算步骤计算得到的东区采场 2 种矿体 TOPSIS 评价结果见表 9。

表 9 2 种矿体 TOPSIS 评价结果

Table 9 TOPSIS evaluation results of two ore bodies

进路间距/m	I 号矿体		II 号矿体	
	评分	排序	评分	排序
14	74.56	3	77.25	2
15	100.00	1	100.00	1
16	87.37	2	69.36	3
17	59.55	4	54.78	4
18	44.62	5	46.80	5

由表 9 可知,分段高度 15 m 时 I、II 号矿体在平

均含水率6%条件下最优的进路间距为15 m,与数值模拟结果一致。因此,最终确定进路间距15 m为金山店铁矿东区采场平均含水率6%条件下的最优参数。

5 结论

1) 散体流动性试验结果表明,含水率对矿石散体流动性和放出体形态发育影响显著。含水率4%~8%,矿石散体自然安息角随着含水率增大而增大,且增量呈递增趋势;含水率0~8%,放出体宽度随着含水率增大而减小;放出体形态呈“倒水滴”特征。

2) 放矿数值模拟结果表明,含水率4%~8%范围内,含水率增加,2种矿体回收率减少、贫化率增加;2种矿体回收率均随着进路间距增加呈现先增大后减小的趋势,贫化率则相反。

3) 基于改进CRITIC-TOPSIS方法从安全、技术和经济角度对合理进路间距进行了优选,得到金山店铁矿东区采场平均含水率6%条件下最优进路间距为15 m。

参考文献(References):

- [1] 吴宇轩,陶干强,张淦. 改流体放矿技术实验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):141-144.
WU Yuxuan, TAO Ganqiang, ZHANG Gan. Experimental study on inserts drawing technique[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):141-144.
- [2] 金爱兵,孙浩,孟新秋,等. 无底柱分段崩落法不同放矿方式下崩矿步距研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017,48(11):3037-3043.
JIN Aibing, SUN Hao, MENG Xinqiu, et al. Study of best caving steps under different ore methods of sublevel caving[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017,48(11):3037-3043.
- [3] 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.

- TAN Baohui, LONG Weiguo, GONG Zhen, et al. Experimental research of combined ore-drawing scheme for orebody in confined space during sublevel caving without sill pillar[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):10-15.
- [4] 杨官印,陈玉明,王小勇. 马鞍山2#矿体无底柱分段崩落法结构参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2017,37(2):24-27.
YANG Gongyin, CHEN Yuming, WANG Xiaoyong. Structure parameters optimization for non-pillar sublevel caving in Maanshan 2# ore body[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017,37(2):24-27.
- [5] 李涛,吴爱祥,王洪江,等. 含水率对放矿松动物体形态的细观影响[J]. 工程科学学报, 2018,40(6):665-672.
LI Tao, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Influence of moisture content on the shape of isolated movement zone in mesoscale[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018,40(6):665-672.
- [6] 时磊,汪龙,黄滚,等. 某铁矿矿岩中含水量对放出体形态影响的试验研究[J]. 金属矿山, 2019,48(5):32-36.
SHI Lei, WANG Long, HUANG Gun, et al. Experimental study on the effect of water content in ore-rock on the shape of drawn-out orebody in an iron ore[J]. Metal Mine, 2019,48(5):32-36.
- [7] 刘欢,任凤玉,何荣兴,等. 模拟矿岩散体的PFC细观参数标定方法[J]. 金属矿山, 2018,47(1):37-41.
LIU Huan, REN Fengyu, HE Rongxing, et al. Calibration methods of the PFC microscopic parameters for simulating the loose ore rock[J]. Metal Mine, 2018,47(1):37-41.
- [8] FAN W L, HU P, LIU Z G. Multi-attribute node importance evaluation method based on Gini-coefficient in complex power grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016,10(9):2027-2034.
- [9] DAS S, MEHER P K, PRADHAN U K, et al. Inferring gene regulatory networks using Kendall's Tau correlation coefficient and identification of salinity stress responsive genes in rice[J]. Current Science, 2017,112:1257-1262.

- 引用本文:武忠英,梅林芳,曾云川,等. 考虑含水率对放出体影响的金山店铁矿东区采场合理进路间距研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):33-40.
WU Zhongying, MEI Linfang, ZENG Yunchuan, et al. Reasonable drift spacing for eastern stopes of Jinshandian iron mine considering influence of moisture content on drawn ore blocks [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):33-40.

(上接第32页)

- [10] 刘璨,姜安民,董彦辰,等. 下伏复杂空区山体斜坡滑塌形成机理与数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):35-38.
LIU Can, JIANG Anmin, DONG Yanchen, et al. Mechanism analysis and numerical simulation for landslide of mountain slope with underground complex goaf[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):35-38.
- [11] 崔铁军,李莎莎. 长期渗水所致水位升高对露天矿边坡岩体状态的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2023,23(6):1817-1824.
CUI Tiejun, LI Shasha. Influence of water level rise caused by long-

- term seepage on rock mass state of open pit slope[J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(6):1817-1824.

- 引用本文:贾亮,姜安民,王飞飞,等. 近地表层矿体开采对覆岩与山坡危岩体稳定性影响规律研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):28-32.
JIA Liang, JIANG Anmin, WANG Feifei, et al. Impact of near-surface ore body mining on stability of overburden and dangerous rock masses on slopes[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):28-32.