某铁矿床充填采矿方案优选及采场结构参数优化*

梅林芳[1]，邓朋[2]，何志义[1]，毛少波[1]，宋卫东[2]

（1.武钢资源集团有限公司， 湖北 黄石市 435006；
2.北京科技大学 土木与资源工程学院， 北京 100083）

摘要：为优选某高价值铁矿床的充填采矿方案及优化采场结构参数，结合该矿床－120～－180 m阶段的开采技术条件，将采矿方案优选视作一个典型模糊决策问题。采用层次分析法得到的11个指标权重，结合模糊数学进行综合评价，优选出某铁矿采矿方案为分段凿岩阶段空场嗣后充填法。基于数值模拟对优选的采矿方案的4种采场结构参数进行优化，模拟结果表明：在矿房回采过程中，各方案拉伸破坏明显，矿柱与顶板汇合处均出现应力集中现象，方案Ⅱ的采场两帮中心监测点最大水平位移和顶板中心监测点最大垂直位移分别为9.4 mm、9.6 mm；在矿柱回采过程中，各方案剪切破坏明显，方案Ⅱ的采场顶板中心最大垂直位移为28.0 mm。从安全、经济角度比较出某铁矿最优采场结构参数为矿房宽度15 m、矿柱宽度15 m。该方案与优化的采场结构参数在矿山生产中取得了良好的经济效益。

关键词：高价值铁矿；模糊综合评价；数值模拟；采场结构参数优化

中图分类号：TD853.34 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)02-0025-08

Selection of Filling Mining Scheme and Optimization of Stope Structure Parameters of an Iron Deposit

MEI Linfang[1], *DENG Peng*[2], *HE Zhiyi*[1], *MAO Shaobo*[1], *SONG Weidong*[2]

(1.Wisco Resources Group Co., Ltd., Huangshi, Hubei 435006, China;
2.School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to select the best filling mining scheme and to optimize stope structure parameters of a high-value iron deposit, combined with the mining technical conditions of the deposit in the stage of －120 m to －180 m, the selection of mining scheme was regarded as a typical fuzzy decision problem. The analytic hierarchy process was used to obtain the weights of 11 indexes, and the fuzzy mathematics was used for comprehensive evaluation. The mining scheme of this iron deposit was selected as the sublevel drilling stage open stoping with subsequent filling method. Based on numerical simulation, four groups of stope structural parameters of the preferred mining scheme were optimized. The simulation results are concluded as follows. Firstly, in the process of mining, the tensile failure of each scheme is obvious, and the stress concentration occurs at the junction of the pillar and the roof. The maximum horizontal displacement of the central monitoring point at two sides of the stope and the maximum vertical displacement of the central monitoring point at the roof are 9.4 mm and 9.6 mm, respectively. Secondly, in the process of pillar mining, the shear failure of each scheme is obvious, and the maximum vertical displacement of the stope roof center in scheme Ⅱ is 28.0 mm. From the perspective of safety and economy, the optimal stope structure parameters of an iron mine are 15 m room width and 15 m pillar width. The scheme and the optimized stope structure parameters have achieved good economic benefits in mine production.

Key words: High-value iron deposit, Fuzzy comprehensive evaluation, Numerical simulation, Optimization of stope structure parameters

0 引言

随着国家产业政策的调整，高价值铁矿山推广应用充填采矿法是采矿行业发展的必然趋势，充填采矿方法的选择及采场结构参数优化是高价值铁矿床开采的核心内容。传统的地下矿山采矿方法选择主要是通过简单的技术经济指标比较来确定的，带有较大的工程经验成分，选择结果往往不能与实际生产相适

* **收稿日期**：2024-03-08
作者简介：梅林芳(1970—)，男，湖北黄梅人，高级工程师，主要研究方向为金属矿山绿色低碳开采。E-mail:1872028902@qq.com
通信作者：宋卫东(1966—)，男，河北廊坊人，博士，教授，主要研究方向为金属矿绿色高效开采。E-mail:songwd@ustb.edu.cn

应。采矿方法的选择涉及到安全、技术、经济等多个因素,这些因素对矿山整体生产影响程度具有不确定性。因此,采矿方法的选择是一个模糊性的工程问题。

将层次分析法和模糊数学应用到高价值铁矿床采矿方法优选中,既能赋予指标体系中的损失、贫化等经济指标更为合适的主观权重,又能将安全程度、通风条件等定性描述的指标进行无量纲转化为具体数据从而参与计算。薛田喜等[1]将层次分析法和模糊数学结合,系统层次化地确定了最优采矿方法。陈翔[2]将传统采矿方法比选与模糊数学理论结合起来应用于深井矿山采矿方案优选。苗胜军等[3]将层次分析法和模糊数学理论结合得到的采矿方法评估结果与专家调查法评估结果进行对比,论证出模糊数学理论和层次分析法在采矿方法优选决策中的可行性。谭玉叶等[4]将模糊聚类法和层次分析法结合,解决了采矿方法优选中评判指标出现优越性交叉时的赋权问题。

本文以某铁矿-120～-180 m 阶段高价值铁矿体开采为研究背景。该矿体价值、品位较高,矿山原采矿方法是无底柱分段崩落法,居高不下的损失贫化率对矿山经济效益造成很大影响,现需对该矿山采矿方法和采场结构参数进行优化。将层次分析法、模糊数学理论运用到采矿方案优选中,并采用 FLAC3D 数值模拟软件对优选的采矿方案进行采场结构参数优化,为高价值铁矿床采矿方案选择和采场结构参数优化提供一定借鉴意义。

1 工程概况

某铁矿位于湖北省东南部,其-120～-180 m 阶段矿体倾角为 70°～90°,平均水平厚度约为 26 m,中部矿体较厚,可达 40～50 m。矿石中除了铁金属之外,还含有 Cu、S、Co 及 Au 等,其每吨矿石的经济效益相当于单一铁矿石的 2～3 倍,为典型的急倾斜中厚至厚高价值铁矿体。针对这种高价值铁矿体采用充填法开采可以有效降低矿石的损失贫化,提高矿石回采率和资源的回收利用率,并能大幅度提高采场稳定性。因此,拟在-120～-180 m 阶段采用胶结充填采矿法回采。参考国内外相似矿山开采资料及采矿方法选择原则,结合该矿山实际生产水平,初选出 3 种采矿方案:阶段空场嗣后充填法(方案 1)、分层充填采矿法(方案 2)、分段凿岩阶段空场嗣后充填法(方案 3)。

2 AHP 主观赋权

2.1 构建层次结构模型

对某铁矿-120～-180 m 阶段采矿方案的技术、经济、安全层面中的指标进行分类归集,得到 11 个指标,基于 11 个指标建立的某铁矿采矿方案综合评价指标体系如图 1 所示。

2.2 构建判断矩阵

在建立层次结构模型后构造判断矩阵[5],判断矩阵元素 a_{ij} 通过两两相互比较进行标度(见表 1)。

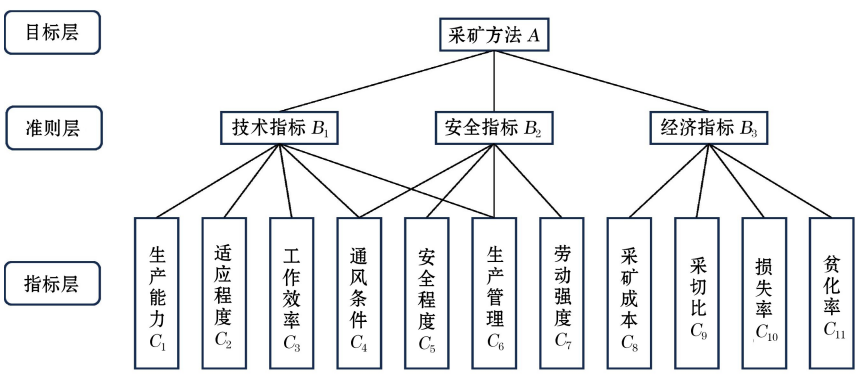


图 1 采矿方法优选综合评判指标体系

Fig.1 Comprehensive evaluation index system of mining methods optimization

表 1 判断矩阵元素标定

Table 1 Calibration of judgment matrix elements

量化标度	含义	量化标度	含义
1	指标 a 比 b 同等重要	9	指标 a 比 b 极端重要
3	指标 a 比 b 稍微重要	2,4,6,8	相邻判断中间值
5	指标 a 比 b 明显重要	m	指标 a 与 b 比较的判断标度
7	指标 a 比 b 强烈重要	$1/m$	则 b 与 a 比较的判断标度为 $1/m$

一共构造出 4 个判断矩阵 ***A*-*B***、$\boldsymbol{B}_1$-***C***、$\boldsymbol{B}_2$-***C***、$\boldsymbol{B}_3$-***C*** 分别见表 2 至表 5,对矩阵进行一致性检验[6]来观察矩阵的相容性。采用一致性系数 CR 检验构造的判断矩阵中各元素重要性是否存在自相矛盾的情况,一致性检验公式为:

$$CR=\frac{\lambda_{\max}-n}{RI(n-1)}$$

式中:$\lambda_{\max}$ 为矩阵的最大特征值;n 为矩阵的阶数;RI 为随机一致性指标。若 $CR<0.1$,则认为判断矩阵的相容性可以接受,否则,需要对判断矩阵进行修改。

2.3 求解权重

层次分析法常用 3 种方法求解权重。不同的计算方法可能对结果有影响,为保证结果的可信度,分别按照 3 种方法得出权重再取平均值作为主观赋权的权重[7]。权重结果见表 2 至表 5(表中 CI 为一致性指标)。

表 2 判断矩阵 *A*-*B*

Table 2 Judgment matrix ***A*-*B***

元素	B_1	B_2	B_3	算数平均法	几何平均法	特征值法	权重	CI	CR
B_1	1	1/3	1/2	0.163 8	0.163 4	0.163 4	0.163 5	0.004 6	0.007 9
B_2	3	1	2	0.539 0	0.539 6	0.539 6	0.539 4		
B_3	2	1/2	1	0.297 3	0.297 0	0.297 0	0.297 1		

表 3 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_1$-*C*

Table 3 Judgment matrix $\boldsymbol{B}_1$-***C***

元素	C_1	C_2	C_3	C_4	C_6	算数平均法	几何平均法	特征值法	权重	CI	CR
C_1	1	5	3	3	3	0.435 4	0.445 9	0.439 0	0.440 1	0.074 0	0.066 1
C_2	1/5	1	1	1/2	1	0.100 9	0.105 5	0.101 4	0.102 6		
C_3	1/3	1	1	1/2	1/3	0.097 1	0.093 8	0.094 7	0.095 2		
C_4	1/3	2	2	1	3	0.219 8	0.220 6	0.223 9	0.221 4		
C_6	1/3	1	3	1/3	1	0.146 8	0.134 2	0.141 1	0.140 7		

表 4 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_2$-*C*

Table 4 Judgment matrix $\boldsymbol{B}_2$-***C***

元素	C_4	C_5	C_6	C_7	算数平均法	几何平均法	特征值法	权重	CI	CR
C_4	1	1/7	3	1	0.138 5	0.134 8	0.133 8	0.135 7	0.040 4	0.044 9
C_5	7	1	7	5	0.651 2	0.659 3	0.663 4	0.657 9		
C_6	1/3	1/7	1	1/3	0.062 2	0.059 2	0.059 9	0.060 4		
C_7	1	1/5	3	1	0.148 1	0.146 7	0.143 0	0.145 9		

表 5 判断矩阵 $\boldsymbol{B}_3$-*C*

Table 5 Judgment matrix $\boldsymbol{B}_3$-***C***

元素	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	算数平均法	几何平均法	特征值法	权重	CI	CR
C_8	1	5	7	7	0.647 4	0.654 1	0.657 0	0.652 8	0.024 5	0.027 2
C_9	1/5	1	3	3	0.196 2	0.191 5	0.191 1	0.192 9		
C_{10}	1/7	1/3	1	1	0.078 2	0.077 2	0.076 0	0.077 1		
C_{11}	1/7	1/3	1	1	0.078 2	0.077 2	0.076 0	0.077 1		

以上判断矩阵均通过一致性检验。按照各单层权向量结果,指标层对目标层的总排序权重值为:

$\boldsymbol{w}_{AHP}$=[0.072 0 0.016 8 0.015 6 0.036 2 0.354 9 0.055 6 0.078 7 0.193 9 0.057 3 0.022 9 0.022 9]

3 采矿方法综合评价分析

3.1 采矿方案

3.1.1 阶段空场嗣后充填法

(1) 采切工程布置:采场沿着矿体走向布置,划分为矿房和矿柱,两步骤回采,先矿房后矿柱。矿房宽为 20 m,矿柱宽为 30 m,阶段高度为 60 m,顶柱、底柱各 5 m。采准工程主要包括出矿进路、凿岩硐室、溜矿井、凿岩巷联络道、辅助斜坡道等。切割工程主要是切割天井和切割槽。

(2) 回采工艺:在底部拉底巷和顶部凿岩硐室分别施工上向扇形孔和下向扇形孔,孔深 20 m,孔底距为 2.0 m,排距为 1.5 m,以靠近上盘的切割槽为自由面,由上盘向下盘后退回采,矿石由铲运机经

底部出矿进路运输至溜矿井集中出矿。一步骤矿房回采完毕后采用尾砂胶结充填矿房空区,二步骤矿柱回采完毕后采用废石或尾砂非胶结充填矿柱采空区。

3.1.2 分层充填采矿法

(1) 采切工程布置:矿房沿矿体走向布置,长为30～50 m,宽为矿体厚度,矿房高度为中段高度,底柱高 5 m,不留顶柱和间柱。每个矿房内布置 1 个溜矿井,1 个人行通风充填井和 2 个顺路人行通风天井(兼做滤水井)。溜矿井采用 6 mm 厚钢板制作并顺路架设而成,直径为 1.0 m;人行滤水井断面尺寸为 2.0 m×1.5 m;人行通风充填井内设充填管路和人行梯子,作为矿房的安全出口。矿房底柱上按要求设人工假底。

(2) 回采工艺:回采从切割水平开始,逐层向上回采,分层高度为 1.8 m,崩矿后采场用电耙出矿将崩落矿石耙至溜井内,在溜井底部通过漏斗将矿石装入矿车。分层采出完毕后及时封闭采场,对架高溜矿井及滤水井进行采场分层充填,分层充填高度为 3 m,充填完毕后整个采场进入下一个采、充循环。

3.1.3 分段凿岩阶段空场嗣后充填法

(1) 采切工程布置:采场沿矿体走向布置,划分矿房与矿柱。矿房、矿柱宽约为 15 m,阶段高度为 60 m,顶柱、底柱各 6 m,分段高度约为 12 m,采准工程主要包括凿岩平巷、分段平巷、出矿平巷、溜矿井等。切割工程主要为切割天井和切割槽。

(2) 回采工艺:在分段巷中打上向扇形孔,孔深10～12 m,孔底距为 2.0 m,排距为 1.5 m,以矿房、矿柱端部切割天井及切割槽为自由面,由上盘向下盘后退回采,矿石由铲运机经底部出矿进路运输至溜矿井集中出矿。矿房回采完毕后随即采用尾砂胶结充填,待充填体达到一定强度后回采矿柱,矿柱回采完毕后随即充填采空区。

3.2 模糊综合评价

模糊综合评价的 4 个关键因素[8]是:方案集 E、指标集 F、隶属矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和权重集 $\boldsymbol{w}$。

(1) 构建方案集。根据初选出的 3 种采矿方法构建方案集:

E={阶段空场嗣后充填法,分层充填采矿法,分段凿岩阶段空场嗣后充填法}

(2) 建立因素集。选择各采矿方法的生产能力、适应程度、工作效率、通风条件、安全程度、生产管理难度、劳动强度、采矿成本、采切比、损失率、贫化率共 11 个指标确定指标集 F。各采矿方法评价指标见表 6。

表 6 采矿方法评价指标

Table 6 Evaluation indexes of mining methods

方案	生产能力/(万 t/a)	适应程度	工作效率	通风条件	安全程度	生产管理难度	劳动强度	采矿成本/(元/t)	采切比/(m/万 t)	损失率/%	贫化率/%
方案 1	24.02	好	较低	好	较好	较复杂	中等	24.77	25.82	7.96	8.02
方案 2	21.38	较好	较低	好	较好	复杂	强	29.06	23.09	8.0	8.0
方案 3	46.55	好	较好	较好	好	较复杂	较低	22.75	47.49	9.4	10

(3) 构建隶属度矩阵。将无量纲化处理后的定量定性指标数据依序组合,得到隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.147\,6 & 0.000\,0 & 0.217\,1\\ 0.456\,3 & 0.513\,8 & 0.000\,0\\ 0.153\,2 & 0.148\,9 & 0.000\,0\\ 0.198\,0 & 0.200\,0 & 0.000\,0\\ 0.516\,0 & 0.459\,3 & 1.000\,0\\ 0.857\,1 & 0.625\,0 & 0.892\,9\\ 0.553\,3 & 0.686\,7 & 0.410\,0\\ 0.393\,3 & 0.393\,3 & 0.436\,7\\ 0.606\,7 & 0.373\,3 & 0.820\,0\\ 0.333\,3 & 0.313\,3 & 0.820\,0\\ 0.613\,3 & 0.713\,3 & 0.680\,0\end{bmatrix}$$

(4) 模糊综合评价向量。将层次分析法得到的指标权重向量与模糊评价矩阵相结合,得出模糊综合评价向量:

$$\boldsymbol{D}=\boldsymbol{w}_{\mathrm{AHP}}\cdot\boldsymbol{R}$$

评判结果见表 7。

表 7 模糊综合评判结果

Table 7 Results of fuzzy comprehensive evaluation

方案	$\boldsymbol{D}$	排序
方案 1	0.434 9	2
方案 2	0.391 2	3
方案 3	0.618 5	1

由表 7 可知,某铁矿－120～－180 m 阶段矿体采矿方法从优到劣排序为:分段凿岩阶段空场嗣后充填法、阶段空场嗣后充填法、分层充填采矿法。因此,某铁矿－120～－180 m 阶段高价值铁矿体最优采矿方法为分段凿岩阶段空场嗣后充填法,该铁矿优化采矿方法如图 2 所示。

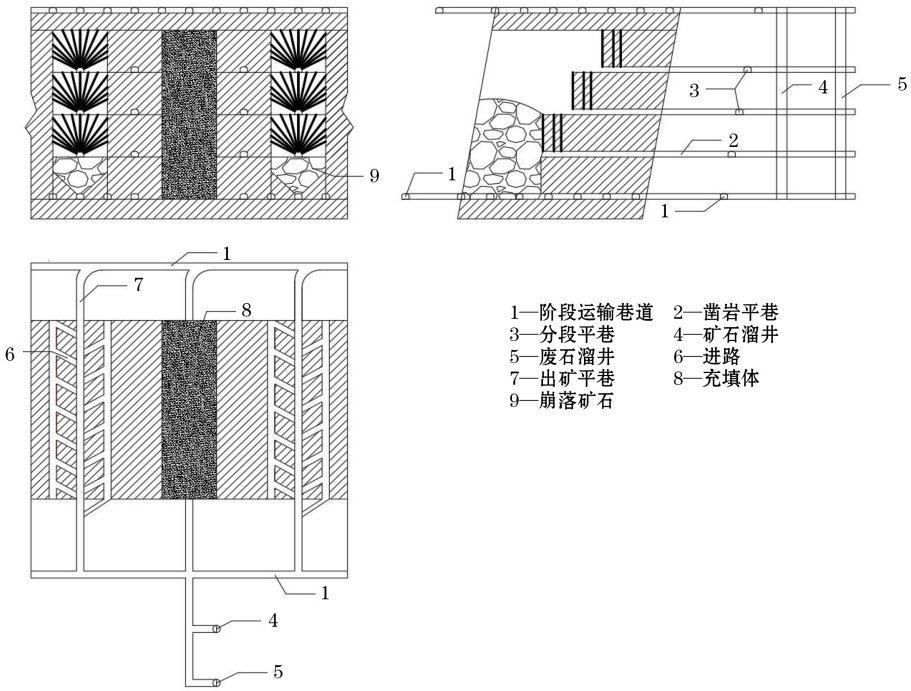


图 2　分段凿岩阶段空场嗣后充填法

Fig.2　Open stope subsequent filling method in segmented drilling stage

4　采场结构参数优化

4.1　模型构建

本文采用 FLAC3D 数值模拟软件优化某铁矿－120～－180 m 阶段的分段凿岩阶段空场嗣后充填法采场结构参数。按照先采矿房后采矿柱、隔一采一[9]的方法，每个矿房自上而下划分 4 个分段，矿房回采结束后进行胶结充填，充填体达到足够强度再进一步回采矿柱。采场稳定性主要由顶板和两帮的受力状态决定，比较矿岩位移、应力分布和各塑性变形区，并结合矿山实际生产活动，以获得最佳开采参数[10]。采场结构参数初选 4 个方案，见表 8。

表 8　采场结构参数

Table 8　Stope structure parameters

方案	矿房宽度/m	矿柱宽度/m
方案Ⅰ	20	20
方案Ⅱ	15	15
方案Ⅲ	12	12
方案Ⅳ	20	15

基于 FLAC3D 软件构造的模型长 234 m、宽 195 m、高 122 m，矿体倾角为 72°，共有 191 880 个单元体，202 398 个节点，构造的三维数值计算模型如图 3 所示。

基于 Hoek-Brown 强度准则对室内岩石力学试验获得的力学参数结果进行折减[11]，得到的数值模拟力学参数见表 9。

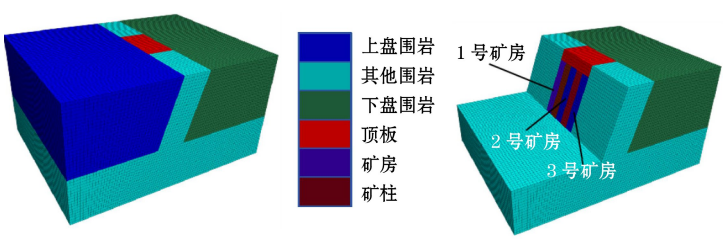


图 3　数值计算模型

Fig.3　Numerical calculation model

4.2　数值模拟结果及分析

4.2.1　监测点的数值模拟结果

选取回采过程中采空区的顶板中心、左右两帮中心点作为监测点，顶板中心点的最大主应力及垂直方向位移、两帮中心点的最大主应力及水平方向位移模拟结果见表 10。

表 9 材料物理力学性质参数

Table 9 Physical and mechanical property parameters of materials

岩体类型	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m^{-3})
矿体	3.30	6.00	2.40	45	0.60	4 040
上盘围岩	2.80	4.20	2.10	34	0.38	2 700
下盘围岩	2.60	3.90	2.00	36	0.36	2 520
其他围岩	2.80	4.20	2.10	40	0.38	2 700
充填体(1∶8)	0.25	0.31	0.13	37	0.03	2 000

表 10 各监测点最大主应力、位移模拟结果

Table 10 Simulation results of maximum principal stress and displacement at each monitoring point

回采方案	回采顺序	最大主应力/MPa			两帮水平位移/mm		顶板垂直位移/mm
		顶板	左帮	右帮	左帮	右帮	
方案Ⅰ	1号矿房	0.23	1.63	2.04	26.1	24.2	13.2
	2号矿房	0.22	1.56	2.21	18.9	18.7	14.0
	3号矿房	0.25	1.57	2.18	19.0	21.5	15.8
	1号矿柱	0.75	0.21	0.23	4.2	3.8	39.8
	2号矿柱	0.64	0.28	0.26	7.9	12.8	43.0
方案Ⅱ	1号矿房	0.21	1.99	1.88	8.2	9.4	8.4
	2号矿房	0.17	1.94	2.05	9.2	4.4	9.1
	3号矿房	0.17	1.99	2.11	9.4	3.7	9.6
	1号矿柱	0.65	0.26	0.20	1.2	1.7	28.0
	2号矿柱	0.63	0.29	0.22	1.1	1.8	27.6
方案Ⅲ	1号矿房	0.48	1.25	1.24	7.8	8.8	6.0
	2号矿房	0.33	2.01	1.53	9.1	3.2	6.8
	3号矿房	0.34	2.06	1.52	9.2	2.6	7.3
	1号矿柱	0.08	0.03	0.02	1.2	1.5	28.5
	2号矿柱	0.24	0.05	0.04	1.0	1.6	33.8
方案Ⅳ	1号矿房	0.17	1.57	1.56	8.5	9.8	13.0
	2号矿房	0.15	2.18	1.73	9.6	5.2	13.8
	3号矿房	0.15	2.19	1.61	9.9	4.4	14.3
	1号矿柱	0.27	0.04	0.05	1.3	1.3	32.8
	2号矿柱	0.29	0.06	0.05	1.0	1.7	36.9

由表 10 可知,方案Ⅰ、方案Ⅳ在整个矿块回采过程中顶板下沉量较大,说明矿房跨度越大,回采过程中顶板下沉量也就越大。各方案在回采矿柱时顶板下沉量明显高于回采矿房时的顶板下沉量,这是因为充填体强度低于矿体强度,导致回采过程中充填体对顶板的承载作用弱于矿柱对顶板的承载作用。在回采矿房过程中,采空区两帮观测点的最大主应力要大于采空区顶板观测点的最大主应力,回采矿柱过程中则相反。

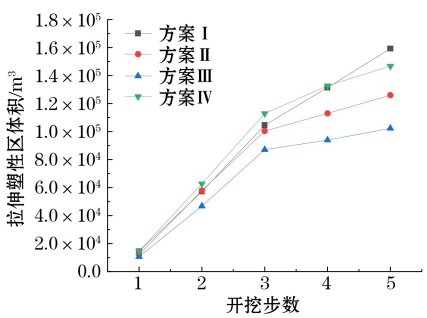
4.2.2 应力集中现象分析

在各方案开挖 3 号矿房结束后发现顶板与矿柱汇合处压应力集中现象明显。方案Ⅰ顶板压应力集中时,最大主应力为 4.4 MPa;方案Ⅱ顶板压应力集中时,最大主应力为 4.1 MPa;方案Ⅲ顶板压应力集中时,最大主应力为 4.0 MPa;方案Ⅳ顶板压应力集中时,最大主应力为 4.5 MPa。对比 4 个方案可以看出,矿房跨度越大,顶板压应力集中越明显。

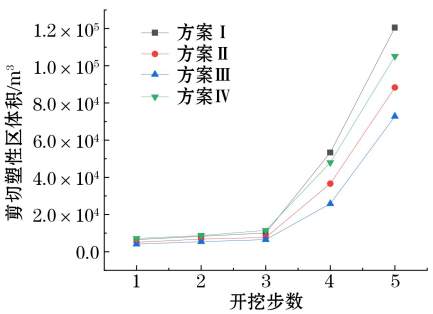
4.2.3 塑性区分析

采场塑性区分布是表征采场稳定性的途径之一[14],各方案塑性区体积变化如图 4 所示。各方案回采矿房过程中采场顶板和两帮出现较多的拉伸破坏,同时顶板出现零星的剪切破坏,回采矿柱过程中,充填体产生大量剪切破坏。由图 4 可知,在开挖步数前三步回采矿房过程中,各方案拉伸塑性区体积增长率较大,后两步回采矿柱过程中,各方案剪切塑性区体积增长率较大。

塑性区范围越小,引起采空区失稳的可能性越小[15],由此,从回采过程中塑性区范围得出的方案合理性排序为:方案Ⅲ>方案Ⅱ>方案Ⅳ>方案Ⅰ。



(a) 拉伸塑性区体积



(b) 剪切塑性区体积

图 4 各方案采场塑性区体积变化

Fig.4 Volume change of plastic zone in stope of each scheme

4.2.4 方案比较

对 4 个方案的数值模拟结果进行对比,从塑性区和顶板应力集中的角度看,方案Ⅲ在矿房回采安全性上最优,但根据表 10 中采空区观测点最大主应力、位移模拟结果来看,后续回采矿柱方案Ⅲ顶板下沉量大于方案Ⅱ顶板下沉量,方案Ⅲ不利于后续矿

柱回采。对－120～－180 m阶段高价值铁矿而言,损失率至关重要,综合回采安全性、损失率及回采效率,方案Ⅱ(矿房宽度为15 m、矿柱宽度为15 m)的采场结构参数最优。

5 工程应用

开采方案自2019年设计,2020年正式施工,统计该设计方案2021年至2022年的主要技术经济指标,与某铁矿原无底柱分段崩落法生产技术经济指标对比(见表11)。

某铁矿－120～－180 m阶段采用分段凿岩阶段空场嗣后充填法,矿房矿柱宽度尺寸按照15 m设计,有效降低了矿体的损失贫化。对于高价值铁矿体,以牺牲部分生产能力为代价换取高品位矿产资源的回采是合理的。且采用充填法于矿山整体安全性而言,能够为矿山带来更大的价值。

表11 技术经济指标对比

Table 11 Comparison of technical and economic indicators

采矿方法	生产能力/(t/d)	损失率/%	贫化率/%	采矿成本/元	出矿平均品位/%
无底柱分段崩落法	553.5	21.2	38	243.61	31.7
分段凿岩阶段空场嗣后充填法	472.1	8.3	11	250.06	43.9

6 结论

(1) 从技术、经济、安全3个层面选取11个评价指标,采用AHP法确定采矿方法综合评价指标权重,将主观权重与模糊数学法结合,得到3种采矿方案模糊综合评价结果分别为0.434 9,0.391 2和0.618 5,相对优越性排序为:方案3＞方案1＞方案2,优选出某铁矿－120～－180 m阶段采矿方法为分段凿岩阶段空场嗣后充填法。

(2) 用FLAC3D软件对优选采矿方法的4种不同采场结构参数进行数值模拟。模拟结果表明:矿房回采过程中4个方案的拉伸塑性区体积增长率较大,方案Ⅱ的两帮中心监测点最大水平位移为9.4 mm,顶板中心监测点最大垂直位移为9.6 mm;矿柱回采过程中4个方案的剪切塑性区体积增长率较大,方案Ⅱ的两帮中心监测点最大水平位移为1.8 mm,顶板中心监测点最大垂直位移为28.0 mm,顶板压应力集中时最大主应力为4.1 MPa,相比其余3种采场结构参数方案,方案Ⅱ(矿房宽度为15 m,矿柱宽度为15 m)的采场稳定性最优。

参考文献(References):

[1] 薛田喜,解联库,袁阳.改进的模糊层次分析法在缓倾斜厚大矿体开采方案优选中的应用[J].有色金属工程,2024,14(2):85-91.
XUE Tianxi, XIE Lianku, YUAN Yang. Application of improved fuzzy analytic hierarchy process in mining scheme optimization of slowly inclined thick ore body [J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(2):85-91.

[2] 陈翔.模糊数学在陈台沟铁矿采矿方法优选中的应用[J].南华大学学报(自然科学版),2017,31(2):25-29＋35.
CHEN Xiang. Application of fuzzy mathematics to optinal choice of mining method in Chentaigou Iron Mine [J]. Journal of University of South China (Science and Technology),2017,31(2):25-29＋35.

[3] 苗胜军,王子木,刘亚运,等.基于层次分析法的采矿方法模糊评价模型及应用[J].矿业研究与开发,2017,37(6):66-69.
MIAO Shengjun, WANG Zimu, LIU Yayun, et al. Fuzzy evaluation model of mining methods and its application based on AHP[J]. Mining Research and Development,2017,37(6):66-69.

[4] 谭玉叶,宋卫东,雷远坤,等.基于模糊聚类及层次分析法的采矿方法综合评判优选[J].北京科技大学学报,2012,34(5):489-494.
TAN Yuye, SONG Weidong, LEI Yuankun, et al. Synthetic judgment for mining method optimization based on fuzzy cluster analysis and analytic hierarchy process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2012,34(5):489-494.

[5] 肖明正,罗超,金林清,等.模糊层次分析法在磷矿水害危险性评价的应用研究[J].采矿技术,2024,24(2):179-182.
XIAO Mingzheng, LUO Chao, JIN Linqing, et al. Application of fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) in water damage risk assessment of phosphate rock[J]. Mining Technology,2024,24(2):179-182.

[6] 王文才,赵婧雯,付鹏,等.露天矿生态环境的AHP与模糊数学评价法[J].金属矿山,2016(1):142-146.
WANG Wencai, ZHAO Jingwen, FU Peng, et al. AHP and fuzzy mathematics assessment of open-pit mine ecological environment[J]. Metal Mine,2016(1):142-146.

[7] 时培涛,张吉雄,张强,等.综合赋权的TOPSIS充填采煤液压支架评价方法研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(3):543-553.
SHI Peitao, ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, et al. Comprehensive weighted TOPSIS method for evaluating the structure design of backfilling hydraulic support[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2023,40(3):543-553.

[8] 柯丽华,张莹,李全明,等.基于EAHP的尾矿库溃坝风险多级模糊综合评价研究[J].金属矿山,2020(11):37-43.

KE Lihua, ZHANG Ying, LI Quanming, et al. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation model based on eahp for dam break risk of tailings pond[J]. Metal Mine,2020(11):37-43.

[9] 刘溪鸽,孙星,朱万成,等.新城金矿 V# 矿体－680 m 中段踏步式回采研究[J].金属矿山,2014(10):5-8.
LIU Xige, SUN Xing, ZHU Wancheng, et al. Stepped excavation sequence for the －680 m section of V# ore body in Xincheng gold mine[J]. Metal Mine,2014(10):5-8.

[10] 玉勇,李磊,王大为,等.望儿山分矿不稳固岩体进路法开采参数分析[J].现代矿业,2013,29(6):13-14.
YU Yong, LI Lei, WANG Dawei, et al. Parameters research of approach mining method of unstable rock mass of Wangershan branch mine[J]. Modern Mining,2013,29(6):13-14.

[11] 杨灵,韩立军,蔚立元,等.基于强度折减法的巷道整体安全系数探讨分析[J].中国安全科学学报,2012,22(5):133-139.
YANG Ling, HAN Lijun, WEI Liyuan, et al. Exploration of general safety factor of roadway based on strength reduction FEM[J]. China Safety Science Journal,2012,22(5):133-139.

[12] 刘冬,邵安林,金长宇,等.地下破碎矿体数值计算模型的构建及采场结构参数优化[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(2):437-444.
LIU Dong, SHAO Anlin, JIN Changyu, et al. Numerical model building for broken ore body and optimization of stope structural parameters [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2019,50(2):437-444.

[13] 贺建强.爆破振动对白马铁矿露天边坡稳定性影响研究[J].工程建设,2023,55(7):24-30.
HE Jianqiang. Impact research of blast vibration on stability of open pit slope in Baima iron mine [J]. Engineering Construction,2023,55(7):24-30.

[14] 罗来和,夏国进,王沉,等.基于 FLAC3D 的采矿方法优选及采场结构参数优化[J].矿冶工程,2021,41(6):129-133.
LUO Laihe, XIA Guojin, WANG Chen, et al. Optimization of mining method and stope structural parameters based on FLAC3D[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2021,41(6):129-133

[15] 路燕泽,郭斌,杨志强,等.复杂采场结构参数数值模拟及采矿方法优化[J].金属矿山,2022(8):69-74.
LU Yanze, GUO Bin, YANG Zhiqiang, et al. Numerical simulation on complex stope structure parameters and optimization on mining method[J]. Metal Mine,2022(8):69-74.