

棉花坑矿井破碎矿体回采方案研究

秦旭忠¹, 孙刚友¹, 侯志永², 谢国森¹, 杨帆², 李秦¹, 宋丽霞¹, 张德全¹, 张煜晖¹

(1. 中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149;
2. 中核韶关锦原铀业有限公司, 广东 韶关 512329)

摘要: 针对棉花坑矿井的急倾斜破碎薄矿体, 提出了无间柱分段深孔爆破连续采矿法。根据该方法的工艺特点提出了“倒台阶形”+上下向布孔分段连续回采、“正台阶形”+上向布孔分段连续回采和“正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采方案。通过 GRA-AHP 和云模型相结合的方式对 3 种回采方案进行了评价优选, 得出“正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采方案相对安全、高效。研究结果为棉花坑矿井破碎矿体的回采提供了可行的技术方案。

关键词: 深孔爆破; 急倾斜; 破碎薄矿体; GRA-AHP; 云模型; 回采方案

中图分类号: TD868; TL212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)03-0025-10

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.02.03

急倾斜破碎薄矿体在金属矿山中占比较大, 主要采用浅孔留矿法、上下向进路充填法和削壁充填法等进行开采。上述方法在控制矿石损失和贫化方面较理想; 但存在生产成本低、生产效率低、工艺复杂等问题, 已不能满足资源高效开采的需求^[1]。针对急倾斜破碎薄矿体开采方法的研究较多, 对平均厚度 1.0 m、倾角 60~70°的澳大利亚 Daisy Milano 金矿体采用中深孔分段采矿法, 分段高度为 15 m, 采用 Simba 采矿凿岩台车进行凿岩, 孔径为 64 mm, 排距约为 2 m^[2]; 对采用浅孔留矿法开采上盘破碎的急倾斜薄矿体时存在的问题, 开展了中深孔阶段矿房采矿法试验研究, 并对矿体上盘进行了预加固处理, 取得了较好的技术经济效益^[3]; 并对急倾斜破碎薄矿体提出了新型崩落采矿法, 用深孔取代浅孔落矿, 并将采场作业面设置在脉外的凿岩巷道内, 保证了施工人员和设备的安全, 通过崩落一定量的围岩来维持采空区的应力平衡, 该方法在某金矿的应用效果良好^[4]。

中国对急倾斜破碎薄矿体的高效开采研究相对较少。棉花坑矿井是在产硬岩铀矿山, 其破碎薄矿体中的资源储量约占总储量的 21%, 用上向

水平分层充填法和浅孔留矿法已无法实现该类矿体的高效开采。因此, 急需根据矿体的赋存条件和矿井现状开展回采方案研究, 以为矿山的可持续发展提供技术支撑。

1 地质概况及现状分析

1.1 矿区构造

棉花坑铀矿床主要控矿构造有棉花坑断裂和油洞断裂。矿床内的矿带总体按 320~350°的方向展布, 含矿规模由大到小依次为 9 号、7 号、8-1 号、8 号。矿区内主要矿体有 9-0、7-0、8-1-1、9-7 和 E9-21 号矿体, 本研究针对 7-0 号矿体。

1.2 矿体特征

7-0 号矿体赋存于 7 号主含矿构造带中, 主要分布于 13~10 号勘探线范围内。矿体呈脉状, 产状 249~270°∠72~90°, 走向长 600 m, 赋存标高为 200~-326 m, 控制垂深为 526 m。矿体平均厚度为 2.94 m, 厚度变化范围为 0.43~10.09 m, 厚度变化系数为 68.8%, 属均匀变化。矿体平均品位为 0.110%, 品位变化范围为 0.050%~0.652%, 品位变化系数为 85.1%, 属较均匀变化。

收稿日期: 2024-02-26

第一作者简介: 秦旭忠(1995—), 男, 青海民和人, 硕士, 工程师, 主要从事采矿工艺和地压控制研究。

通信作者简介: 孙刚友(1986—), 男, 黑龙江鹤岗人, 学士, 正高级工程师, 主要从事铀矿开采技术科研与设计工作。

1.3 矿井开采现状分析

矿井现有的采矿方法有上向水平分层干式充填法和浅孔留矿法,生产中以上向水平分层干式充填法为主。在-50 m中段以上主要采用自然底柱上向水平分层干式充填法,在-50 m中段以下主要采用人工底柱上向水平分层干式充填法。目前已开拓至-250 m水平,生产采场主要布置在-150 m和-200 m中段,其上部除南部的7-0号矿体外,均已开采完毕。

7-0号矿体节理裂隙发育,矿体破碎严重,开采时极易发生顶板冒落、片帮等事故。该矿体矿石品位较低,采用上向水平分层干式充填法进行回采,生产安全性差、生产效率低、经济效益差。鉴于上述原因,棉花坑矿井的南部破碎矿体一直遗留至今。随着深部资源的不断消耗和深部开拓

工程的滞后,矿井生产能力大幅下降。

2 回采方案研究

2.1 试验采场选取

矿山地质资料显示,7-0号矿体在-150 m~+150 m中段平面上均见矿,且在0~50 m水平的矿体蚀变和节理发育比较明显,破碎程度更具代表性。此外,目前南部7号矿带在0~50 m水平的开拓工程已施工完毕,可进行回采工艺的相关研究。

因此,选取0~50 m水平、2~8号勘探线之间的矿体作为试验采场(图1)。采场走向长度约为180 m,垂直高度为50 m,0 m水平为试验采场出矿平面,即在0 m水平集中出矿。

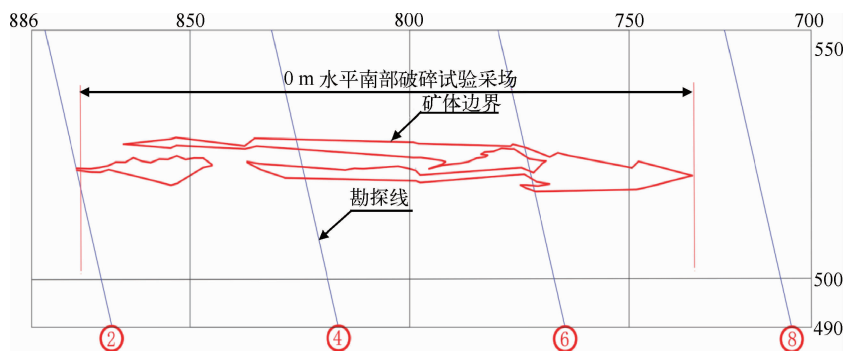


图1 0 m中段试验采场位置

Fig. 1 0 m test stope position

2.2 试验采场三维模型

为了根据矿体具体形态制定合理的回采方案,运用3DMine建模软件对试验采场矿体构建三维模型,并借助该模型预测试验采场的资源量。将若干能反映矿体形态的剖面通过三角网相连,从而形成封闭的实体模型,构建3DMine矿体三维模型;剖面数量越多,所建模型越接近实际矿体^[5]。通过南部破碎矿体在0、15、30、50 m水平的矿体边界构建三维模型(图2),运用3DMine预测资源量(表1)。

2.3 采矿方法确定

7-0号矿体属于急倾斜破碎薄矿体,针对该类矿体国内外众多学者进行了大量研究,其总体思路主要是运用深孔爆破技术实现大规模出矿,进

而实现矿体的高效开采^[6-8]。

表1 各水平的矿石量
Table 1 Ore amount between levels

位置	矿体体积/m ³	矿石量/t
0~15 m	8 987	23 097
15~30 m	9 190	23 618
30~50 m	11 784	30 285
总计	29 961	77 000

除文献查阅外,工程类比也是在采矿工程设计中较为经济有效的一种手段。国内外针对急倾斜破碎薄矿体的开采方法和相关参数见表2,通过类比可为本次研究提供重要思路。

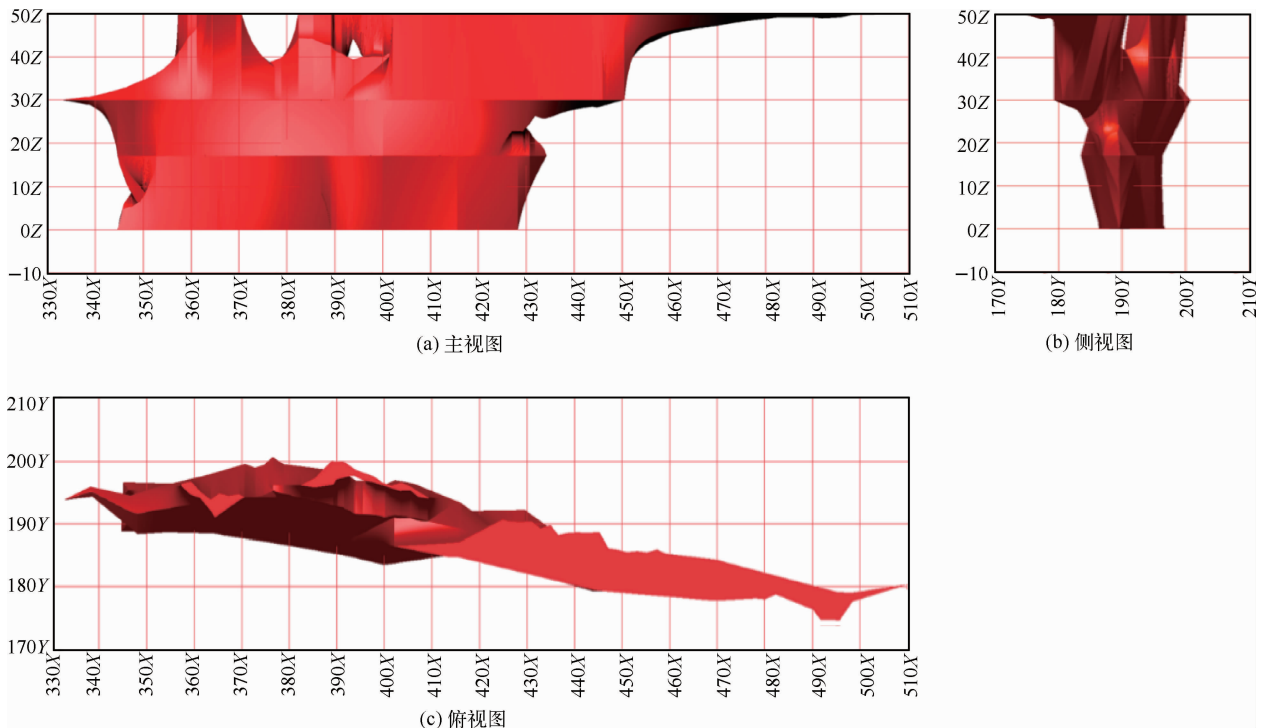


图 2 试验采场矿体三维模型
Fig. 2 3D model of orebody in test stope

表 2 国内外矿山针对急倾斜破碎薄矿体的开采方法及主要技术参数

Table 2 Mining methods and related parameters for steeply sloping broken thin orebody at home and abroad

矿山	矿体特征	采矿方法	主要技术参数
澳大利亚 Daisy Milano 金矿	矿体倾角 60 ~ 70°, 平均厚度 1.0 m, 矿石品位高, 围岩稳固	中深孔分段采矿法	采用 Simba 157 采矿凿岩台车进行凿岩, 孔径为 64 mm, 排距约为 2 m, 采场分段高度为 15 m
弓上岭铁矿	矿体倾角 65 ~ 85°, 平均厚度 3.0 m, 矿石品位高, 围岩稳定性差	中深孔分段空场-崩落联合采矿法	采用 YGZ-90 型凿岩机进行凿岩, 孔径为 60 mm 的扇形炮孔, 排距为 1.5 m, 抵抗线为 1.5 m, 采场分段高度为 15 m
包头鑫达公司西柏树矿区	矿体平均倾角 68°, 平均厚度 2.02 m, 矿体和上盘破碎, 稳定性差	中深孔阶段矿房采矿法	采用 YGZ-90 型凿岩机进行凿岩, 孔径为 60 mm, 孔深为 13 m, 最小抵抗线为 2 m, 排距为 1.4 m, 采场分段高度为 11.5 m
金厂沟梁金矿	矿体平均倾角 65°, 平均厚度 3 m, 矿体及围岩稳定性均较差	中深孔分段崩落-留矿联合采矿法	分段高度为 13 m, 多分段间同时回采时, 上分段应比下分段超前 20 ~ 30 m。采用 YGZ-90 型凿岩机进行凿岩, 排距为 1.2 m, 孔距为 1 m

针对棉花坑矿井 7-0 号矿体, 依据以深孔爆破为主要技术手段、高效安全开采为目标的总体思路, 结合矿体赋存条件和矿井实际情况, 提出无间柱分段深孔爆破连续采矿法, 采用深孔爆破落矿实现对破碎矿体的安全高效开采。

2.4 采切工程优选

2.4.1 采场底部结构

采场底部结构的主要作用为出矿, 依据是否

留底柱设置 2 种方案。方案 1: 为保证 0 m 中段以下矿体回采的工程布置, 在 0 m 中段留 6 m 底柱; 在底柱内的出矿穿脉巷内按垂直矿体走向布置出矿漏斗, 倾角为 65 ~ 70°。方案 2: 在 0 m 中段不留底柱, 按矿体走向每隔 12 m 左右布置出矿穿脉巷, 根据矿井铲运机尺寸将出矿穿脉巷断面设为 2.8 m × 2.6 m。

底部结构方案对比见表 3。由于试验采场矿

体破碎,且采用深孔爆破进行落矿,在生产中易产生大块矿石;若采用漏斗出矿,则易出现堵塞。因

此试验采场选用方案2,爆下的矿石由铲运机直接从出矿穿脉运至溜井处。

表3 采场底部结构方案对比

Table 3 Comparison of stope bottom structure schemes

方案	优点	缺点
方案1	下中段回采的充填料可以由0 m中段穿脉直接输送到采场,充填工程量小,施工简单	当爆破产生大块矿石时,容易出现堵塞;且二次爆破疏通难度大,安全性差,可能造成矿石损失
方案2	施工简单,便于生产管理,出矿安全性好,不存在大块矿石堵塞问题	需要在下中段采场顶柱中布置充填井,充填工程量较大

2.4.2 分段凿岩巷道

分段凿岩巷道分为脉内和脉外布置。当矿体稳定性较好时,可将凿岩巷道布置在矿体内部,便于扇形深孔的施工布置,同时提高采准落矿量;当矿体稳定性较差时,需将凿岩巷道布置在较为稳定的围岩中,从而提高采场作业面的安全性。鉴于试验采场矿体破碎,且各中段的主运输巷已布置在矿体下盘,因此将分段凿岩巷布置在矿体上盘中,断面规格为2.5 m×2.5 m。

2.5 回采方案初选

根据现有的开拓工程,拟定试验采场按矿体走向从南至北逐段回采。在对试验采场矿体空间形态、矿体赋存条件、岩体稳定性等综合分析的基础上,根据分段采矿的工艺特点提出3种回采方案。

2.5.1 “倒台阶形”+上下向布孔分段连续回采

设计一次起爆高度为20 m,分段凿岩巷道布置在爆破垂直高度的中部,即在10、30、50 m水

平布置凿岩巷道,在凿岩巷道内向上、向下布置垂直扇形深孔(50 m水平只布置下向孔)。采用自下而上的分段爆破方式。切割槽以切割天井为自由面,在多个分段布置垂直平行深孔一次爆破形成。首先回采10 m分段,采用深孔爆破逐渐向北推进,当推进至15 m左右时开始回采30 m分段,以上分段以此类推,最终形成“倒台阶”形的回采工作面(图3)。每次爆破落矿后的出矿量为总落矿量的30%~35%;其余矿石存留采场内,以预防空区因应力失衡而造成大范围变形,待整个采场落矿结束后再集中出矿。

该方案上下向同时布孔爆破,采场生产效率高,大部分矿石存留采场内,基本维持了空区的稳定性。但由于下分段的回采超前于上分段,因此采场分段顶板暴露面积大,导致作业面的安全隐患较大。此外,下向孔施工难度较大,排渣、排水、装药困难。

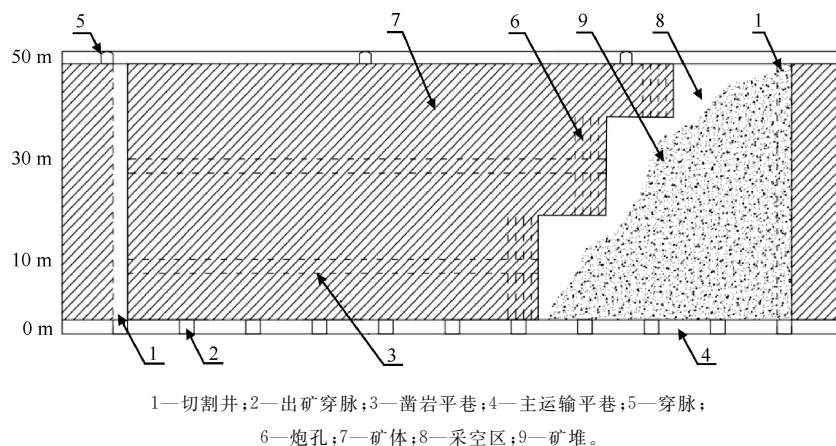


图3 “倒台阶形”+上下向布孔分段连续回采示意图

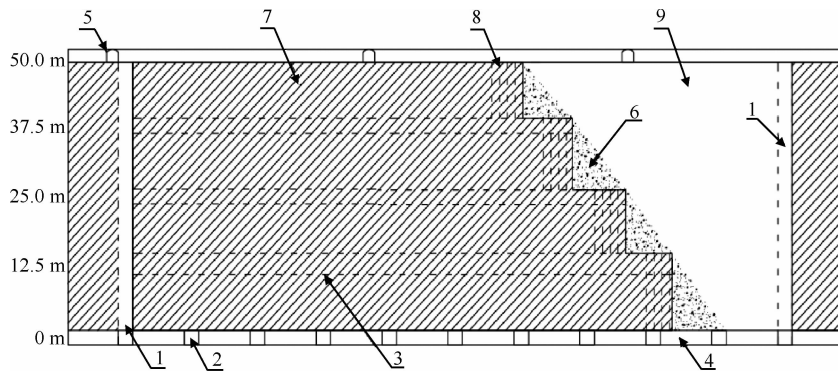
Fig. 3 Section continuous stoping diagram of "inverted step shape" + up and down hole layout

2.5.2 “正台阶形”+上向布孔分段连续回采

设计分段高度为 12.5 m,在 0、12.5、25.0、37.5 m 水平布置凿岩巷道,在凿岩巷道内向上布置垂直扇形深孔。采用自上而下的分段爆破方式。切割槽以切割天井为自由面,在多个分段布置垂直平行深孔一次爆破形成。首先回采 37.5 m 分段,从靠近切割槽开始自南向北爆破矿石,当推进至 12 m 左右时开始回采 25.0 m 分段,以下分段以此类推,最终形成“正台阶”形的回

采工作面(图 4)。每次爆破除落在台阶上的矿石外,其余矿石及时运出采场。

该方案采用“正台阶形”回采工作面,一定程度上保证了回采工作面作业的安全性。但随着回采工作面矿体沿走向的不断推进,暴露的采空区也随之增大;为提高整个采场的稳定性,需要及时对采空区进行充填,极易造成出矿的贫化。此外,由于是将矿块分为 4 个中段,导致采准工程量相对较大。



1—切割井;2—出矿穿脉;3—凿岩平巷;4—主运输平巷;5—穿脉;
6—矿堆;7—矿体;8—炮孔;9—采空区。

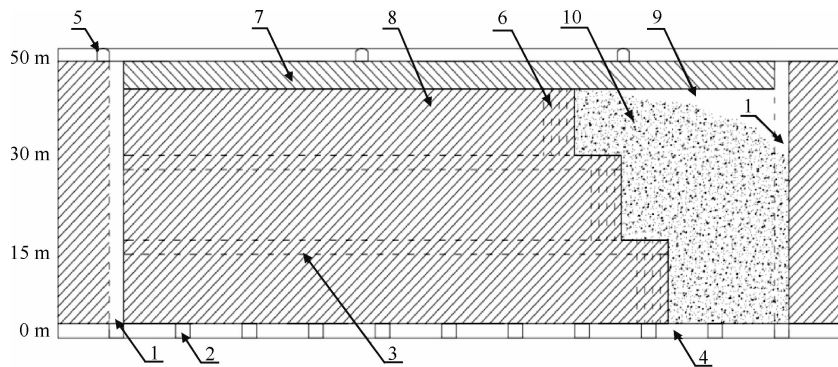
图 4 “正台阶形”+上向布孔分段连续回采示意图

Fig. 4 Section continuous stoping diagram of "positive step shape" + upward hole layout

2.5.3 “正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采

在试验采场上部设厚度为 6 m 的顶柱,设计分段高度为 15 m(其中 30 m 水平的分段高度为 14 m),在凿岩巷道内向上布置垂直扇形深孔。采用自上而下的分段爆破方式。切割槽以切割天井为自由面,在多个分段布置垂直平行深孔一次

爆破形成。首先回采 30 m 分段,从靠近切割槽开始自南向北爆破矿石。当推进至 10 m 左右时开始回采 15 m 分段,以下分段以此类推,最终形成“正台阶”形的回采工作面(图 5)。随着回采工作面矿体沿走向的推进,在采场内留存每次爆破矿石量的 70%左右以支撑围岩,待矿体回采结束后再集中出矿。



1—切割井;2—出矿穿脉;3—凿岩平巷;4—主运输平巷;5—穿脉;
6—炮孔;7—顶柱;8—矿体;9—采空区;10—矿堆。

图 5 “正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采示意图

Fig. 5 Section continuous stoping diagram of "positive step shape" + top column + upward hole layout

该方案通过设顶柱和预留矿石,提高了回采作业面的安全性和空区的稳定性,同时也便于后续充填穿脉的布置,但可能因无法回收矿柱而造成资源损失。

3 基于 GRA-AHP 和云模型优选采矿方案

采矿方案的评价涉及安全、经济、环保等因素,是典型的多属性决策问题^[9]。灰色关联度分析(GRA)是一种多因素统计分析方法,运用该方法比较各方案评价指标的实际值与最优值之间的关联度,从而实现最优方案的选取^[10]。为综合考虑各评价指标对采矿方案的影响程度,引入层次分析法

(AHP)相关理论对各评价指标的权重进行赋值,进而使得评价结果更具科学性和合理性。

3.1 评价体系的构建

评价指标选取的合理性直接影响优选结果的可靠性^[11]。因此,从采矿工艺、生产现状等方面综合考虑,制定正确的评价体系是实现方案优选的重要前提。上述3种方案的差异性主要体现在矿石的贫化损失、生产能力、采切工程量、中深孔施工难度、采场工作面安全程度,及对爆破工艺的要求等方面。为能充分体现各方案的特有性,建立评价指标体系(图6),其中 B_{11} 、 B_{12} 、 B_{21} 、 B_{22} 、 B_{24} 、 B_{31} 和 B_{32} 为定性指标, B_{23} 为定量指标。

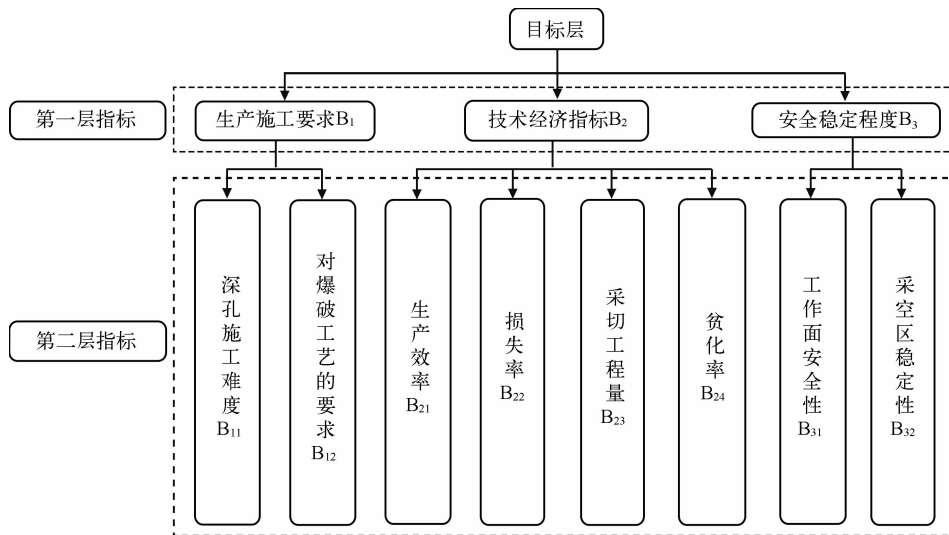


图6 采矿方案优选多属性决策评价指标体系

Fig. 6 Multi-attribute decision evaluation index system for mining scheme optimization

3.2 定性评价指标的云模型量化

3.2.1 云模型理论及数值特征

云模型是一种在模糊数学和随机理论基础上实现定性概念与定量表示间相互转换的数学模型,该模型充分考虑了定性概念的模糊性和随机性,从而提高了数据转换的科学性和合理性^[12]。

云模型可分为对称云、半云、组合云、一维云 and 正态云等。在本次评价优选中,根据实际情况和不同云模型的特点,采用正态云模型实现定性指标的量化处理;定性指标的评分范围为0~10分,且根据模糊评价的等级数目将得分划分为5个区间,同时运用具有双边约束条件 $[C_{\min}, C_{\max}]$

的计算方法^[13](式(1))得出云数字特征参数 $C(E_x, E_n, H_e)$,结果见表4。

$$\begin{cases} E_x = (C_{\max} + C_{\min})/2 \\ E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6, \\ H_e = k \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_{\max} —取值范围的最大界限值; C_{\min} —取值范围的最小界限值; k —根据变量模糊程度适当调整的常数,与描述定性指标的语言类模糊数的离散性、模糊性有关,取0.02^[14]。

3.2.2 云模型计算

云的生成算法称为云发生器,包括正向云、逆向云、X条件云、Y条件云发生器。其中,正向云

发生器可实现指标从定性到定量的转换,其计算步骤:1)确定云模型的 3 个数字特征(E_x, E_n, H_e)生成云滴的个数(N);2)利用正态分布原理,产生一个期望为 E_n 、方差为 H_e^2 的正态随机数

$E_r, 3)$ 以 E_x 为期望、 E_r^2 为方差,继续利用正态分布原理,生成一个随机数 x_i ;4)根据 $u_i = \exp[-(x_i - E_x)^2 / 2 E_r^2]$,计算确定度 u_i ,则 (x_i, u_i) 为数域中的 1 个云滴。

表 4 定性指标评分与云模型描述间的转换

Table 4 Conversion between qualitative index scores and cloud model descriptions

定性评价指标				评分区间	云模型描述
B_{11}	$B_{12} + B_{22} + B_{24}$	B_{21}	$B_{31} + B_{32}$		
很大	很高	很低	很差	[0,2]	(1,0.333 3,0.02)
较大	较高	较低	较差	[2,4]	(3,0.333 3,0.02)
一般	一般	一般	一般	[4,6]	(5,0.333 3,0.02)
较小	较低	较高	较好	[6,8]	(7,0.333 3,0.02)
很小	很低	很高	很好	[8,10]	(9,0.333 3,0.02)

重复上述步骤,直至计算得出 N 个云滴。将 N 取 2 000^[15],即可得到所有云滴 x_i 的均值 x_0 。随后以 $x=x_0$ 作为特定条件,将 x_0 和定性指标得分的云模型数代入到 X 条件云发生器,得到相应的确定度(u_i)。同理以 $u=u_i$ 作为特定条件,将 u_i 和定性评语的云模型数代入到 Y 条件云发生器,得到的云滴 (y_0, u_i) 为该定性指标的精确取值^[16]。

3.3 评价指标权重的求解

3.3.1 判断矩阵构建

在层次分析法(AHP)中,一般通过 1~9 阶梯度标度法确定评价指标的判断矩阵。比较标准度(表 5),通过各指标之间的两两比对,最终得出合理的权重参数。

表 5 层次分析法指标权重赋值标准

Table 5 AHP index weight evaluation criteria

标准度	定义	含义
1	同样重要	指标 x_i 和 x_j 同样重要
3	稍微重要	指标 x_i 的重要性稍微高于 x_j
5	明显重要	指标 x_i 的重要性明显高于 x_j
7	强烈重要	指标 x_i 的重要性强烈高于 x_j
9	绝对重要	指标 x_i 的重要性绝对高于 x_j
2,4,6,8	上述两相邻判断的中值	
倒数	指标 x_i 与 x_j 比较得标度 x_{ij} , 则指标 x_j 与 x_i 比较的标度 $x_{ji} = x_{ij}^{-1}$	

记第一层指标 $B_1 \sim B_3$ 的判断矩阵为 A_0 。记第二层指标 $B_{11} \sim B_{12}$ 的判断矩阵为 $A_1, B_{21} \sim B_{24}$ 的判断矩阵为 $A_2, B_{31} \sim B_{32}$ 的判断矩阵为 A_3 。根据表 5 所示的标度法得:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/4 \\ 3 & 1 & 1/2 \\ 4 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 2 & 1/3 \\ 3 & 1 & 3 & 1 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 3 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

3.3.2 判断矩阵一致性检验

为了判断上述判断矩阵中权重分配是否合理,需根据式(3)对判断矩阵进行一致性检验^[17]。

$$C_R = C_1 / R_1, \tag{3}$$

式中: C_1 ——一致性检验指标, $C_1 = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, λ_{\max} 为判断矩阵最大特征值, n 为判断矩阵阶数; R_1 为平均随机一致性指标,当判断矩阵的阶数为 2、3 和 4 时,其值分别取 0、0.58 和 0.90^[18]。

采用“方根法”计算判断矩阵的最大特征值及其所对应的特征向量,进而得出判断矩阵的一致性检验结果(表 6), C_R 值全部小于 0.1,即各判断

矩阵均通过一致性检验^[19]。

表 6 判断矩阵一致性检验结果
Table 6 Judge the matrix consistency test result

判断矩阵	C_R
A_0	0.024 6
A_1	0
A_2	0.095 6
A_3	0

3.3.3 指标权重确定

整理采用“方根法”所求的特征向量,得出第一层指标 $B_1 \sim B_3$ 的权重向量 $W_0 = (0.12, 0.32, 0.56)$ 。第二层指标 $B_{11} \sim B_{12}$ 的权重向量为 $W_1 = (0.33, 0.67)$; $B_{21} \sim B_{24}$ 的权重向量为 $W_2 =$

$(0.15, 0.36, 0.13, 0.36)$; $B_{31} \sim B_{32}$ 的权重向量为 $W_3 = (0.67, 0.33)$ 。

综上,整理可得各评价指标的权重向量为 $W = (0.040, 0.080, 0.048, 0.115, 0.042, 0.115, 0.375, 0.185)$ 。

3.4 关联系数矩阵的求解

3.4.1 建立评价矩阵

在灰色关联度分析法(GRA)中,反映系统行为特征的数据序列称为参考数列,影响系统行为的因素组成的数据序列称为比较数列。对于本研究,需对初选方案的每个指标进行评价赋值,进而形成优选的指标集^[20]。上述 3 种采矿方案的评价见表 7。根据云模型计算方法和表 4 的转换规则,将表 7 中对定性指标的模糊评价进行量化处理,结果见表 8,从而得出评价矩阵 S 。

表 7 备选采矿方案评价
Table 7 Evaluation of alternative mining schemes

评价指标	备选采矿方案		
	“倒台阶形”+上下向布孔 分段连续回采(I)	“正台阶形”+上向布孔 分段连续回采(II)	“正台阶形”+顶柱+上向布孔 分段连续回采(III)
中深孔施工难度	较大	较小	较小
对爆破工艺的要求	较高	较低	较低
生产效率	很高	较高	一般
损失率	较低	较低	一般
采切工程量/m	610	790	610
贫化率	较低	一般	较低
工作面安全性	较差	较好	很好
采空区稳定性	一般	较好	很好

表 8 定性指标的云模型量化
Table 8 Cloud model quantification of qualitative indicators

定性指标	方案 I		方案 II		方案 III	
	云模型描述	取值	云模型描述	取值	云模型描述	取值
中深孔施工难度	(3,0.333 3,0.02)	3.11	(7,0.333 3,0.02)	6.97	(7,0.333 3,0.02)	7.06
对爆破工艺的要求	(3,0.333 3,0.02)	2.89	(7,0.333 3,0.02)	7.02	(7,0.333 3,0.02)	7.26
生产效率	(9,0.333 3,0.02)	9.11	(7,0.333 3,0.02)	7.08	(5,0.333 3,0.02)	4.99
损失率	(7,0.333 3,0.02)	7.17	(7,0.333 3,0.02)	7.05	(5,0.333 3,0.02)	5.13
贫化率	(7,0.333 3,0.02)	7.31	(5,0.333 3,0.02)	5.04	(7,0.333 3,0.02)	6.89
工作面安全性	(3,0.333 3,0.02)	3.33	(7,0.333 3,0.02)	7.26	(9,0.333 3,0.02)	9.77
采空区稳定性	(5,0.333 3,0.02)	6.01	(7,0.333 3,0.02)	6.78	(9,0.333 3,0.02)	9.89

$$S = \begin{bmatrix} 7.06 & 7.26 & 9.11 & 7.17 & 610 & 7.31 & 9.77 & 9.89 \\ 3.11 & 2.89 & 9.11 & 7.17 & 610 & 7.31 & 3.33 & 6.01 \\ 6.97 & 7.02 & 7.08 & 7.05 & 790 & 5.04 & 7.26 & 6.78 \\ 7.06 & 7.26 & 4.99 & 5.13 & 610 & 6.89 & 9.77 & 9.89 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.4.2 原始数据的无量纲化

由于上述各因素指标原始数据的量纲不一致,可能会影响优选结果的正确性,因此在计算灰色关联系数之前,需要对原始数据做无量纲化处理。无量纲化常用的方法有初值化和均值化。初值化是用每一列的所有数据和第一个数据的商值组成新的数列,即不同数据相对于第一个数据的百分比;而均值化则是用每一列的所有数据和平均值的商组成新的数列^[21]。本次研究采用均值化对原始数据做无量纲化处理得到矩阵 S' :

$$S' = \begin{bmatrix} 1.17 & 1.20 & 1.20 & 1.08 & 0.93 & 1.10 & 1.30 & 1.21 \\ 0.51 & 0.48 & 1.20 & 1.08 & 0.93 & 1.10 & 0.44 & 0.74 \\ 1.15 & 1.16 & 0.93 & 1.06 & 1.21 & 0.76 & 0.96 & 0.83 \\ 1.17 & 1.20 & 0.64 & 0.85 & 0.93 & 1.04 & 1.30 & 1.21 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.4.3 计算关联系数矩阵

根据式(6)计算比较数列和参考数列的绝对差值 $\Delta_i(k)$,结果见表 9。

$$\Delta_i(k) = |X'_0(k) - X'_i(k)|, \quad (6)$$

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

表 9 比较数列和参考数列的绝对差值

Table 9 Absolute difference between the sequence and the reference sequence

$\Delta_i(k)$	数值							
Δ_1	0.66	0.72	0	0	0	0	0.86	0.47
Δ_2	0.02	0.04	0.27	0.02	0.28	0.34	0.34	0.38
Δ_3	0	0	0.56	0.23	0	0.06	0	0

由表 9 可以得出: $\max_i \max_k \Delta_i(k) = 0.72$, $\min_i \min_k \Delta_i(k) = 0$ 。因此,根据式(7)计算得出关联系数矩阵 γ 。

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_i(k)}, \quad (7)$$

式中: ξ —分辨系数,一般取 0.5; $i=1, 2, \dots, m$;
 $k=1, 2, \dots, n$ 。

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.33 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.30 & 0.43 \\ 0.95 & 0.90 & 0.57 & 0.95 & 0.56 & 0.51 & 0.51 & 0.49 \\ 1.00 & 1.00 & 0.39 & 0.61 & 1.00 & 0.86 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.5 综合关联度的计算

为了在优选过程中体现指标权重,根据式(9)计算各回采方案的综合关联度。

$$R = \gamma(x_0(k), x_i(k)) \times W, \quad (9)$$

计算得出 $R = (0.55, 0.61, 0.91)$,即“倒台阶形”+上下向布孔分段连续回采、“正台阶形”+上向布孔分段连续回采和“正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采的综合关联度分别为 0.55、0.61 和 0.91。综合关联度越高,代表在对应权重下该回采方案的优势更为突出^[22]。因此,对于棉花坑矿井的破碎矿体,采用“正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采的方案更为合理。

4 结论

1) 针对棉花坑矿井的深部破碎矿体,根据赋存条件和矿井现状,提出无间柱分段连续采矿法,采用深孔爆破落矿实现破碎矿体的安全高效开采。

2) 经过对试验采场矿体的综合分析,根据分段采矿的工艺特点,提出了“倒台阶形”+上下向布孔分段连续回采、“正台阶形”+上向布孔分段连续回采和“正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采方案。

3) 采用 GRA-AHP 和云模型相结合的方式,对提出的 3 种回采方案进行了评价优选,得出“正台阶形”+顶柱+上向布孔分段连续回采方案更适用于试验采场矿体的高效开采。

参考文献:

[1] 杨学武,王煜鑫. 急倾斜薄矿体中深孔爆破试验研究[J]. 采矿技术,2023,23(5):108-111.
 [2] 戚伟. 高海拔急倾斜薄矿体精细开采关键技术研究与应用[D]. 北京:北京科技大学,2021.
 [3] 孟庆学,宋德林,李朝民. 中深孔阶段矿房采矿法在急倾斜薄矿体中的应用[J]. 黄金,2022,43(3):36-39.
 [4] 安龙,王日东,侯朋远,等. 急倾斜薄矿脉崩落法开

- 采及崩落散体的承载机理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 278-283.
- [5] 彭寿星. 3DMine 软件在尖山铁矿地采穿孔爆破设计中的应用[J]. 现代矿业, 2020, 36(10): 121-126.
- [6] 邓良. 凤凰山银矿急倾斜破碎不稳固薄矿体开采技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [7] 任美霖. 弓长岭井下矿急倾斜薄矿体分段空场-崩落组合采矿法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [8] 徐贞社, 冯帆, 吴业聃, 等. 破碎围岩急倾斜薄矿体下向分层充填法研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(3): 1-5.
- [9] 唐晓灵, 林敏, 刘雷磊. 基于博弈论组合赋权-TOPSIS 法的采矿方案优选模型及应用[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(5): 5-10.
- [10] 张许英龙, 张显权, 程子廉. AHP-TOPSIS-GRA 法在办公座椅设计方案评价中的应用[J]. 林业工程学报, 2022, 7(4): 181-186.
- [11] 王腾, 鄂玉强. 基于 AHP-FUZZY 的倾斜中厚矿体采矿方法优选[J]. 现代矿业, 2022, 38(2): 96-100.
- [12] 薛黎明, 李长明, 郑志学, 等. 基于二维云模型和 Apriori 算法的围岩稳定性分级研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(6): 121-128.
- [13] XINTONG WANG, SHUCAI LI, ZHENHAO XU, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels excavation based on normal cloud model[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3783-3798.
- [14] 冶运涛, 梁犁丽, 曹引, 等. 基于可变集和云模型的河湖水系连通方案优选决策方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 211-225+313.
- [15] 莫俊文, 滕仓国, 李甲, 等. 基于熵权-二维云模型的高铁建设工程系统韧性评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(1): 26-33.
- [16] 高玉祥, 董晓峰, 程建军. 基于云模型和改进 TOPSIS 的风沙地区线路方案优选方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 526-536.
- [17] 查道欢, 钟文, 罗建林, 等. 基于 AHP-FUZZY 的某锌金多金属矿采矿方法优选[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(9): 6-11.
- [18] 姚高辉, 胡凯建. 基于 AHP-FUZZY 模型的巴鲁巴缓倾斜矿体采矿方法优选[J]. 矿冶, 2019, 28(2): 11-16.
- [19] 聂凡, 邓飞. 基于 AHP 与模糊数学的采矿方法选择[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(6): 1-3.
- [20] 鲁浩男, 赵永满, 闵玉, 等. 混合指标条件下基于熵权 GRA-TOPSIS 的采棉机选型研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(7): 222-229.
- [21] 金丽丽. 基于 GRA-SSA-BP 神经网络的电力负荷预测方法[J]. 红水河, 2022, 41(3): 92-96.
- [22] 刘育林, 周爱红, 袁颖. 基于 GRA-PCA-BP 神经网络模型的单沟泥石流危险性预测[J]. 河北地质大学学报, 2022, 45(4): 44-51.

Research on Stopping Scheme of Broken Orebody in Mianhuakeng Mine

QIN Xuzhong¹, SUN Gangyou¹, HOU Zhiyong², XIE Guosen¹, YANG Fan², LI Qin¹,
SONG Lixia¹, ZHANG Dequan¹, ZHANG Yuhui¹

(1. China Nuclear Minging Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China;

2. Shaoguan Jinyuan Uranium Co., Ltd., CNNC, Shaoguan 512329, China)

Abstract: Aiming at the steeply sloping broken thin orebody in the Mianhuakeng mine, the continuous mining method of deep hole blasting without inter-pillar was proposed. According to the technological characteristics of the method, the "inverted step shape" + up and down hole layout continuous mining, "positive step shape" + upward hole layout continuous mining and "positive step shape" + top pillar + upward hole layout continuous mining were proposed. The GRA-AHP and cloud model were combined to evaluate and optimize the three mining schemes, and it was concluded that the scheme of "positive step shape" + top pillar + upward hole layout is relatively safe and efficient, which provides a feasible technical scheme for the mining of broken orebody in Mianhuakeng mine.

Key words: deep hole blasting; steeply sloping; broken thin orebody; GRA-AHP; cloud model; stopping scheme