

复杂应力环境下胶结充填采矿法进路开采顺序优化^①

李彦龙¹, 余龙哲², 陈仲杰^{1,3}, 郁标², 王文杰²

(1.金川集团股份有限公司二矿区,甘肃 金昌 737100; 2.武汉科技大学 资源与环境工程学院,湖北 武汉 430081; 3.中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083)

摘要: 针对复杂应力环境下胶结充填采矿法进路开采顺序合理性问题,以金川二矿区为例,借助数值仿真软件构建三维数值模型,对不同进路开采顺序下应力场、位移场及塑性破坏区进行分析;在此基础上,采用组合赋权与模糊综合评价相结合的方法对进路开采顺序优化,并开展现场工业试验。结果表明:不同走向进路开采顺序和进路开采空间顺序均对开采区域最大主应力、最大拉应力、垂直位移、塑性破坏区以及临近下一采场最大主应力、垂直位移有一定程度影响;采用下盘至上盘、先开采垂直矿体走向进路的开采顺序时,采场整体开采安全性高,且现场试验效果良好。研究结果可为复杂应力环境下胶结充填采矿法进路开采顺序设计与优化提供理论依据。

关键词: 复杂应力环境; 胶结充填采矿法; 下向分层水平进路采矿法; 进路开采顺序; 采场应力; 数值分析

中图分类号: TD853

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.04.027

文章编号: 0253-6099(2024)04-0144-06

Optimization of Sequence of Drift Stopping by Cemented Backfilling Under Complex Stress Conditions

LI Yanlong¹, YU Longzhe², CHEN Zhongjie^{1,3}, YU Biao², WANG Wenjie²

(1.No.2 Mine of Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China; 2.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 3.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: For discussing rational sequence of drift stopping by cemented backfilling under complex stress conditions, with No.2 mine of Jinchuan Group as an example, a three-dimensional numerical model was constructed with a numerical simulation software, and was then used to analyze the stress field, displacement field and plastic failure zone in drift stopping with different sequences. On this basis, the drift stopping sequence, after optimization by adopting a combined weighting and fuzzy comprehensive evaluation, was then adopted in an on-site industrial experiment. The results show that both mining sequence by overhand or underhand stopping and drift stopping with different spatial sequence can bring a certain influence to the maximum principal stress, maximum tensile stress, vertical displacement, plastic failure zone, as well as the maximum principal stress and vertical displacement in the next stope nearby; mining sequence of underhand stopping followed by overhand stopping, or firstly drift stopping of vertical ore mass, can make the overall mining with higher safety. The on-site experiment with such mining sequence presents better effect. It is concluded that this research can provide some reference in the design and optimization of mining sequence for drift stopping by cemented backfilling under complex stress conditions.

Key words: complex stress conditions; cemented backfilling; underhand sublevel drift stopping; drift stopping sequence; stress on stope; numerical analysis

目前,胶结充填采矿法由于其安全性、普适性及环保性,已作为国内外多数矿山绿色高效安全生产的重

要方法之一^[1]。部分矿山随着优势矿产资源逐渐开采完毕,逐步向复杂地质结构、深部区域等难采资源推

① 收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(51974206)

作者简介: 李彦龙(1971—),男,甘肃天水人,工程师,主要从事矿山技术和管理等方面工作。E-mail: 1282327372@qq.com

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,主要从事金属矿山地下开采工艺、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

进,矿床开采步入复杂应力环境中,原生地质结构和次生充填体引发的构造应力成为采场失稳和致灾的主要因素^[2]。同时,进路开采顺序变化可导致开采扰动强度差异,从而有效控制采场所处应力场、位移场及塑性破坏区,改变采场稳定性及灾变概率。因此,研究合理的胶结充填采矿法进路开采顺序是保障复杂应力环境下采场安全生产的关键。

针对上述相关问题,诸多学者^[3-7]进行了广泛研究,借助数值仿真技术及综合评价方法,阐明充填开采进路开采顺序、断面参数、布置长度及间隔距离和采场失稳破坏间部分关联性,给出了充填进路开采顺序的部分优化结果与方法,为复杂应力环境下胶结充填采矿法进路开采顺序优化研究提供了理论基础和可靠手段。但已有研究成果并未独立涉及充填进路开采顺序,且研究对象所处应力环境单一,导致复杂应力下不同进路开采顺序对开采安全性影响尚不清晰,更缺乏对采场进路开采顺序的进一步研究和优化。

为此,本文以金川二矿区 1 018 m 分段Ⅳ盘区四分层采场为例,构建胶结充填采矿法进路开采三维数值计算模型,揭示不同进路开采顺序对采场应力场、位移场及塑性破坏区影响趋势,采用组合赋权与模糊综合评价相结合的方法对不同进路开采顺序进行优化,并开展现场工业试验,研究结果可为复杂应力下胶结充填进路开采顺序设计与优化提供理论指导。

1 工程背景

金川二矿区以开采铜镍矿为主,采用下向分层水平进路胶结充填采矿法,矿体上下盘主要为大理岩,上盘掺杂部分超基性岩,倾角 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$,平均厚度 98 m。采场空间上下共布置 5 个分层,上下分层中开采进路以垂直交叉式分布,各分层顶板均为胶结充填体。各分层内垂直矿体走向布置穿脉道,沿矿体走向布置沿脉道,以穿脉道、沿脉道为轴向向采场边缘以分散式布置不同走向进路(沿矿体走向进路、垂直矿体走向进路)。穿脉道、沿脉道横向宽度为 4 m,开采进路横向宽度为 5 m,各分层竖向高度均为 4 m。采场内进路采用隔二采一开采模式,随采随充,3 条进路同时开采。

此外,随着二矿区开采强度不断加大,开采深度已达到 1 000 m,属于典型深部开采矿山,且由于充填开采导致矿体上部已形成厚度超过 300 m 的巨大充填体,使得采场开采期间所受垂直应力过大。同时,二矿区矿床附近地质构造发育且活跃,且岩浆岩的长期渗入导致水平应力发育充分。金川二矿区开采现状如图 1^[3]所示。因此,开采活动长期处于由高垂直应力

和水平应力共同构成的复杂应力场中,给采场带来了一系列地压灾害,例如采场顶板下沉、进路片帮等^[8]。

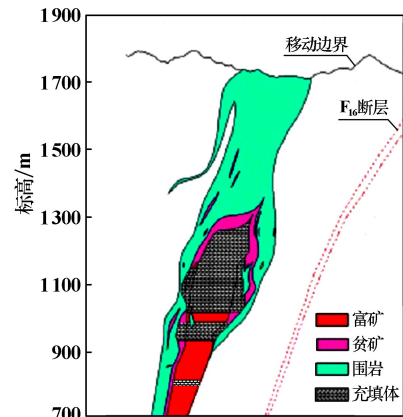


图1 金川二矿区开采现状

2 开采方案设计

在水平进路胶结充填采矿法中,进路开采顺序主要包括不同走向进路开采顺序、进路开采空间顺序 2 个构成因子。不同走向进路开采顺序主要包含先开采沿矿体走向进路、先开采垂直于矿体走向进路两种开采方式;进路开采空间顺序主要包含下盘至上盘开采、上盘至下盘开采两种开采方式。为研究采场开采安全性与进路开采顺序之间的关联性,根据单一变量原则,设计 4 组开采方案,见表 1。

表1 开采方案

方案	不同走向进路开采顺序	进路开采空间顺序
1	先开采沿矿体走向进路	下盘至上盘开采
2	先开采垂直于矿体走向进路	下盘至上盘开采
3	先开采沿矿体走向进路	上盘至下盘开采
4	先开采垂直于矿体走向进路	上盘至下盘开采

3 不同开采方案数值计算

3.1 计算方案

3.1.1 数值模型

根据金川二矿区工程地质条件与 1 018 m 分段Ⅳ盘区开采技术条件,运用 FLAC^{3D} 构建采场三维数值模型,如图 2 所示。为准确体现研究采场顶板与底板,数值模型中共构建三分层与四分层 2 个分层,同时考虑模型边界尺寸效应,设采场模块与整体模型外围边界的横向尺寸比例为 1:3^[4]。模型总尺寸为 300 m×300 m×150 m (长×宽×高),采场模块横向宽度均为 100 m,竖向长度均为 180 m,总计 1 477 278 个单元、851 896 个节点,采用 Mohr-Coulomb 弹塑性准则,数值计算中 X 方向为沿

矿体走向方向。由于本次研究对象与文献[4]一致,数值模型采取文献[4]相同的力学参数。数值计算采用不同材料物理及力学参数见表2^[4]。

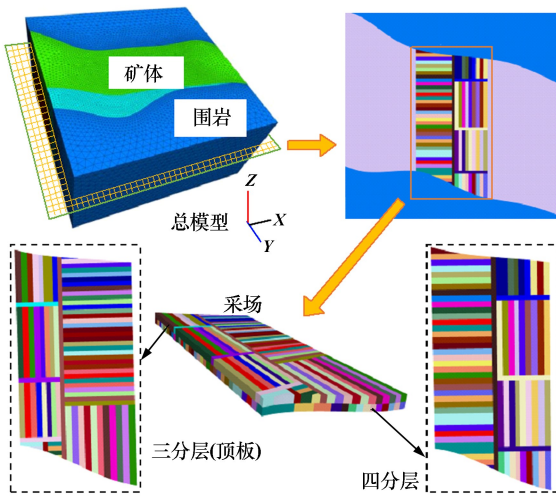


图2 数值模型

表2 数值模型物理及力学参数

类别	弹性模量/ GPa	泊松 比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)
超基性围岩	15.25	0.18	2.88	37.0	26.2	0.7	2 930
大理岩	16.00	0.22	1.85	39.6	39.1	1.1	2 860
矿体	14.25	0.30	1.80	38.4	18.2	0.7	3 052
充填体	7.28	0.21	0.76	36.6	6.8	0.6	1 716

3.1.2 初始应力与边界条件

根据金川二矿区地应力分布规律有关研究资料^[4],数值计算中选取地应力条件为:

$$\begin{cases} \sigma_x = 0.020\ 00H - 0.015 \\ \sigma_y = 0.050\ 68H + 0.098 \\ \sigma_z = 0.025\ 42H - 0.208 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_x 为X方向主应力,MPa; σ_y 为Y方向主应力,MPa; σ_z 为Z方向主应力,MPa; H 为距地表标高,m。

边界条件为:约束模型底部Z方向位移、左右边界X方向位移、前后边界Y方向位移,上边界为自由边界^[9]。

3.1.3 计算步骤

数值计算时先进行三分层开采,待三分层全部采充完毕后进行下方四分层开采。其中三分层按照金川二矿区采场实际开采顺序进行,四分层按照表1中的设计开采方案进行。计算时先进行所有穿脉道、沿脉道开挖,不进行充填,随后进行进路开采,直至采场内全部进路采充完毕。数值计算中各开采方案进路开采顺序如图3所示,图中序号①~⑦为采场内开采顺序。

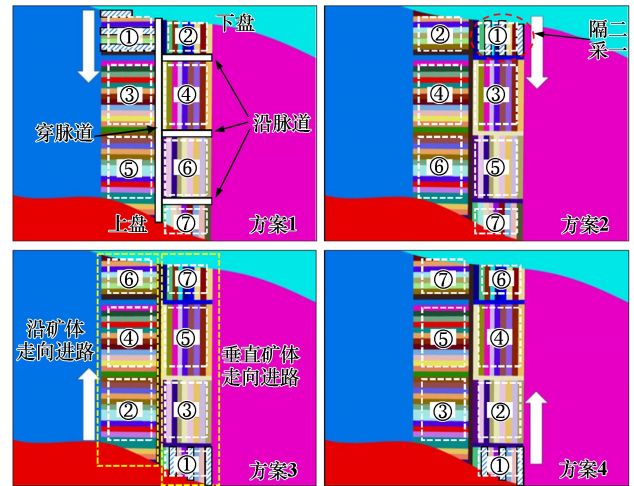


图3 不同开采方案进路开采顺序示意图

3.2 计算结果分析

应力是造成矿岩体破坏的根本诱因,位移和塑性破坏是矿岩体破坏的主要表现形式,故数值计算时对不同方案下四分层的大小主应力、垂直位移、平均屈服率(开采区域周围塑性区体积与开采体积之比)以及下一分层(五分层)的最大主应力、垂直位移进行分析。

3.2.1 最大主应力与最小主应力分布特征

图4为不同开采方案四分层最大主应力分布云图。由图4可知,进路开采完毕后,方案1~4采场四周矿岩交界处均出现压应力集中现象,4个方案最大主应力峰值分别为42.58 MPa、35.23 MPa、45.17 MPa及37.67 MPa。对比控制变量可知,当进路开采空间顺序一定、先开采沿矿体走向进路时,最大主应力峰值增大;当不同走向进路开采顺序一定、下盘至上盘开采时,最大主应力峰值减小。

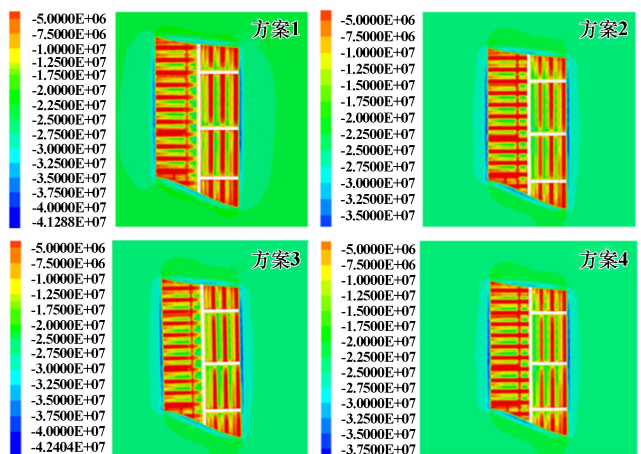


图4 不同开采方案四分层最大主应力分布云图

图5为不同开采方案四分层最小主应力分布云

图。由图5可知,进路开采完毕后,方案1~4采场进路充填体内部均出现拉应力,最大拉应力值分别为0.51 MPa、0.44 MPa、0.53 MPa、0.45 MPa。对比控制变量可知,当进路开采空间顺序一定、先开采沿矿体走向进路时,最大拉应力值增大;当不同走向进路开采顺序一定、下盘至上盘开采时,最大拉应力值减小。

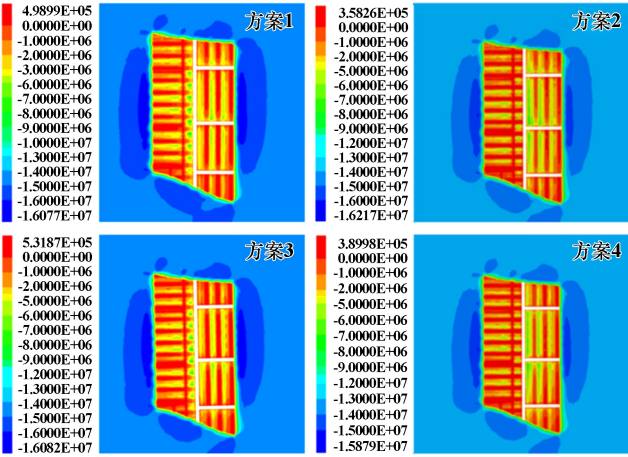


图5 不同开采方案四分层最小主应力分布云图

3.2.2 垂直位移分布特征

图6为不同开采方案四分层垂直位移分布云图。由图6可知,胶结充填进路开采会导致采场顶板下沉和底板底鼓,且顶板下沉最大值位于上一分层充填体顶板位置,方案1、方案2、方案3及方案4顶板最大位移量分别为106.32 mm、98.87 mm、115.08 mm及104.36 mm,底板最大位移量分别为32.22 mm、28.75 mm、36.12 mm及30.87 mm。对比控制变量可知,当进路开采空间顺序一定、先开采沿矿体走向进路时,顶板最大位移量、底板最大位移量增大;当不同走向进路开采顺序一定、下盘至上盘开采时,顶板最大位移量、底板最大位移量减小。

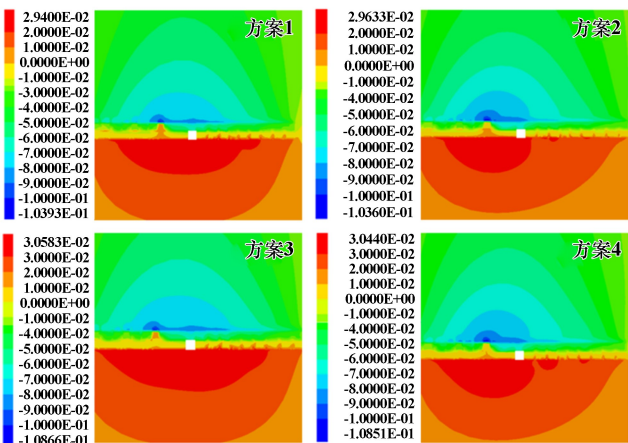


图6 不同开采方案四分层垂直位移分布云图

3.2.3 平均屈服率

根据各开采方案数值计算结果,计算方案1、方案2、方案3及方案4平均屈服率分别为1.37、1.81、1.59及1.94,因此采场周围矿岩破坏程度大小顺序为:方案4>方案2>方案3>方案1。对比控制变量可知,当进路开采空间顺序一定、先开采沿矿体走向进路时,平均屈服率减小;当不同走向进路开采顺序一定、下盘至上盘开采时,平均屈服率减小。

3.2.4 下一分层最大主应力

图7为不同开采方案下一分层最大主应力分布云图。由图7可知,方案1、方案2、方案3及方案4采场及其四周矿岩区域最大主应力均值分别为27.83 MPa、25.26 MPa、26.17 MPa及24.28 MPa。对比控制变量可知,当进路开采空间顺序一定、先开采沿矿体走向进路时,下一分层最大主应力均值增大;当不同走向进路开采顺序一定、下盘至上盘开采时,下一分层最大主应力均值增大。

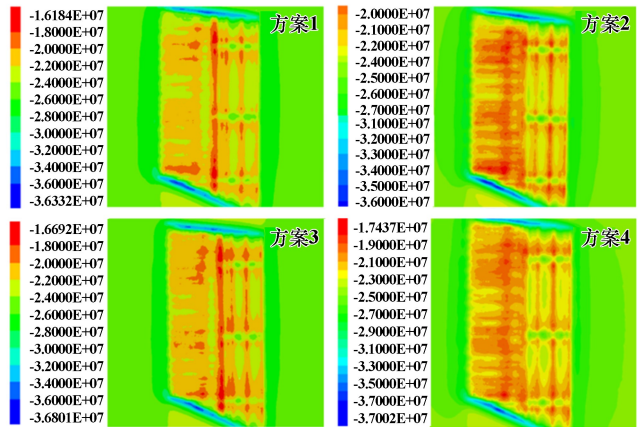


图7 不同开采方案下一分层最大主应力云图

3.2.5 下一分层垂直位移

图8为不同开采方案下一分层垂直位移分布云图。由图8可知,采场外围矿体及围岩位移下沉,其内部矿体位移整体上升,且最大上升位置位于采场中心区域。方案1、方案2、方案3及方案4采场矿体位移平均上升值分别为28.15 mm、23.52 mm、26.59 mm及22.84 mm。对比控制变量可知,当进路开采空间顺序一定、先开采沿矿体走向进路时,下一分层采场矿体上升均值增大;当不同走向进路开采顺序一定、下盘至上盘开采时,下一分层采场矿体上升均值增大。

4 开采方案优选

鉴于采场进路开采顺序改变对采充总成本、采场生产能力、采切比等经济技术指标影响较小^[4,10],从开

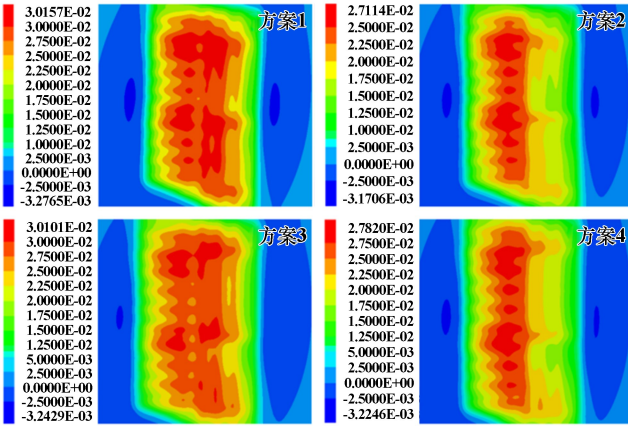


图8 不同开采方案下一分层垂直位移云图

采安全角度采用组合赋权与模糊综合评价相结合的方法对不同开采方案进行优选。

4.1 评价指标体系

由数值计算结果可知,四分层进路开采完毕后,将改变下一分层开采矿体所处应力场和位移场,对其开采造成一定影响。故综合考虑四分层开采安全性 B_1

和下一分层开采安全性 B_2 ,基于最大主应力 C_1 、最大拉应力 C_2 、顶板最大位移量 C_3 、底板最大位移量 C_4 、平均屈服率 C_5 、下一分层最大主应力均值 C_6 及下一分层垂直位移均值 C_7 等评价指标,构建不同进路开采顺序下开采安全性评价指标体系,安全系数为 A ,评价指标体系如图9所示,各开采方案评价指标具体数值见表3。

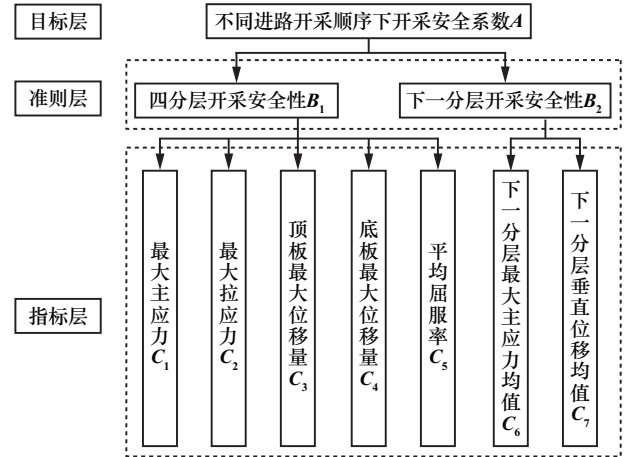


图9 评价指标体系

表3 不同开采方案评价指标

方案	最大主应力/ MPa	最大拉应力/ MPa	顶板最大位移量/ mm	底板最大位移量/ mm	平均 屈服率	下一分层最大主应力均值/ MPa	下一分层垂直位移均值/ mm
1	42.58	0.51	106.32	32.22	1.37	27.83	28.15
2	35.23	0.44	98.87	28.75	1.81	25.26	23.52
3	45.17	0.53	115.08	36.12	1.59	26.17	26.59
4	37.67	0.45	104.36	30.87	1.94	24.28	22.84

4.2 评价指标权重

4.2.1 层次分析法确定主观权重

1) 建立判断矩阵。通过层次分析法获得 $A \sim B$ 、 $B_1 \sim C$ 、 $B_2 \sim C$ 的判断矩阵分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 ,最大特征值 λ_{1max} 、 λ_{2max} 、 λ_{3max} 分别为2.00、6.00、2.00。

$$D_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2) 一致性检验。对 D_1 、 D_2 、 D_3 实行一致性检验,计算得到 C_{R1} 、 C_{R2} 、 C_{R3} 分别为0、0、0,结果均小于0.1,满足检验要求,根据 D_1 、 D_2 、 D_3 计算出各指标主观权重 w_{j1} ,结果见表4。主观权重矩阵为 $W_{j1} = [0.095 \ 0.095 \ 0.191 \ 0.191 \ 0.095 \ 0.111 \ 0.222]^T$ 。

表4 各评价指标主观权重

C	A		w_{j1}
	B_1 0.667	B_2 0.333	
C_1	0.143		0.095
C_2	0.143		0.095
C_3	0.285		0.191
C_4	0.286		0.191
C_5	0.143		0.095
C_6		0.333	0.111
C_7		0.667	0.222

4.2.2 熵权法确定客观权重

基于各指标离散度,利用熵权法对各指标客观赋权,指标离散度愈大,其所占权重亦愈大。各指标因量纲不统一不能对比,故先利用式(2)对其进行无量纲处理。

$$Y_{ij} = \frac{X_{jmax} - X_{ij}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (3)$$

式中: Y_{ij} 为标准值; X_{ij} 为原始值; X_{jmax} 为第 j 项最大值; X_{jmin} 为第 j 项最小值。

将标准值代入式(3)计算出各指标客观权重 w_{j2} 。

$$\begin{cases} p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \\ E_j = -\frac{1}{\ln f} \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) \\ w_{j2} = \frac{1 - E_j}{\sum_{i=1}^m (1 - E_j)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_{ij} 为指标比重值; f 为方案数; E_j 为熵值; n 为评价指标数。若 $p_{ij}=0$, 则 $\ln p_{ij}$ 无意义, $p_{ij} \ln p_{ij}$ 为 0。

根据表 3 及式(2)、式(3)计算得到 $C_1 \sim C_7$ 的客观权重矩阵为:

$$W_{j2} = [0.174 \quad 0.115 \quad 0.061 \quad 0.159 \quad 0.310 \quad 0.046 \quad 0.135]^T$$

4.2.3 组合赋权法确定权重

基于层次分析法与熵权法对各指标组合赋权, 组合权重矩阵公式为^[11]:

$$W_j = (1 - \beta) W_{j1} + \beta W_{j2} \quad (5)$$

式中 β 为 0.5。

根据式(4)以及 W_{j1} 、 W_{j2} 计算得到 $C_1 \sim C_7$ 的组合权重矩阵为:

$$W_j = [0.135 \quad 0.105 \quad 0.126 \quad 0.175 \quad 0.202 \quad 0.079 \quad 0.178]^T$$

4.3 模糊综合评价确定最优解

基于模糊综合评价原理, 建立各指标与方案间隶属度矩阵, 并根据指标组合权重矩阵与隶属度矩阵乘积获得各开采方案综合评价值。综合评价值越高, 方案开采安全性越高, 采取进路开采顺序越合理。隶属度矩阵由各指标隶属度函数得出, 隶属度函数^[12]为:

$$r_{ij} = 0.1 + \frac{b_{ij} - b_{j\min}}{d} \quad (6)$$

式中: r_{ij} 为量化值; b_{ij} 为原始值; $d = (b_{j\max} + b_{j\min}) / (1 - 0.1)$, $b_{j\max}$ 为第 j 项最大值; $b_{j\min}$ 为第 j 项最小值。

将表 3 数据代入式(5), 获得方案集的隶属度矩阵 E 。得到综合评判矩阵为:

$$I = E \times W_j = [0.154 \quad 0.179 \quad 0.128 \quad 0.144]^T$$

方案 2 综合评价值最高, 开采安全系数最高, 因此在保持其他开采技术条件不变的基础上, 进路采用方案 2(下盘至上盘开采、先开采垂直矿体走向进路)进行开采, 采场开采安全性较高。

5 工业试验

选择二矿区 1 000 m 中段 1 018 m 分段 V 盘区为现场工业试验地点, V 盘区已开采部分进路, 故将剩余未开采进路按照优化后开采顺序(下盘至上盘开采、

先开采垂直矿体走向进路)进行开采。其中, 穿脉道、沿脉道支护方式、充填步骤、起爆药量等开采技术条件均不变。采场进路全部开采完毕后, 穿脉道、沿脉道两帮及支护体未出现明显变形破坏现象, 顶板未出现显著沉降破坏。综上所述, 当进路采用优化后的开采顺序进行开采时, 采场整体稳定性较高, 能为安全生产提供有效保障。

6 结 论

1) 不同进路开采顺序数值分析结果表明, 复杂应力环境下采用下向水平分层进路胶结充填采矿法时, 走向进路开采顺序和进路开采空间顺序均对开采区域最大主应力、最大拉应力、垂直位移、塑性破坏区以及临近下一采场最大主应力、垂直位移有一定程度影响。

2) 根据金川二矿区开采条件, 采用组合赋权与模糊综合评价相结合方法对进路开采顺序优化, 采用下盘至上盘开采、先开采垂直矿体走向进路进行开采时, 采场开采安全性较高。现场工业试验结果表明, 采用优化后的开采顺序进行开采时, 采场整体稳定性较高, 能为安全生产提供有效保障。

参考文献:

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 张飞, 杨天鸿, 胡高建. 复杂应力扰动下围岩稳定性评价与采场参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 699-704.
- [3] 卢西洲, 王文杰, 贾稳宏, 等. 大体积充填体下胶结充填法回采进路参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(5): 20-25.
- [4] 卢西洲, 王文杰, 邹龙, 等. 基于组合赋权的大体积充填体下回采进路参数优化[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(3): 15-21.
- [5] 邹平, 贺超, 李爱兵, 等. 某缓倾斜铁矿采场结构参数与开采顺序优化研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(2): 37-42.
- [6] 侯杰. 基于块体价值的金属地下矿山开采规划优化模型研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [7] 韩斌, 吴爱祥, 刘同有, 等. 金川二矿区多中段机械化盘区回采顺序的数值模拟优化研究[J]. 矿冶工程, 2004, 24(2): 4-7.
- [8] 李光, 马凤山, 郭捷, 等. 金川二矿区地应力特征及其对巷道变形破坏的影响研究[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(6): 817-825.
- [9] 贾稳宏, 余龙哲, 黄永祥, 等. 金川三矿区多中段协同开采下分段巷道变形破坏特征研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(11): 67-73.
- [10] 张驰, 张亚南, 周彦龙. 基于协同测度模型的深部金属矿体回采顺序优化研究[J]. 有色金属工程, 2018, 8(2): 118-123.
- [11] 王刚, 高萃真, 刘学麟, 等. 采用 AHP-熵权法的巷道启封中毒窒息致因研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(7): 187-192.
- [12] 易善华, 廖九波. 基于模糊评价的某金矿采场结构参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(12): 73-78.

引用本文: 李彦龙, 余龙哲, 陈仲杰, 等. 复杂应力环境下胶结充填采矿法进路开采顺序优化[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4): 144-149.