

基于多元信息数据融合的金属矿山顶板稳定性分析

辛明禹¹, 刘振振^{2*}, 王炳文², 姜 维¹, 杜晓东¹, 贾彦州¹

(1. 山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司; 2. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院)

摘要:矿产资源是人类发展中不可或缺的一部分,同时也是现代化经济体系中不可替代的产业。在复杂的工程地质条件下,顶板稳定性问题较为突出且依然是金属矿山开采亟须解决的安全问题。通过构建Flac^{3D}数值模拟计算模型对鑫泰金矿顶板稳定性进行分析,利用层次分析法获得稳定性影响因素权重,结合D-S证据理论对影响较大的因素进行综合评价。研究表明:减小矿柱间距和使用充填采矿法可降低矿柱应力大小、使采场顶板发生塑性破坏的范围得到有效减小,从而维持顶板稳定性;矿区勘查和顶板力学信息对顶板稳定性评价影响最大,因子层中,支护状况对顶板稳定性影响最大,地下水特征及结构面特征影响最小;通过D-S证据理论证明矿区顶板处于稳定状态。

关键词:金属矿山;顶板稳定性;数值模拟;层次分析法;D-S证据理论;多元信息;数据融合

中图分类号:TD325

文章编号:1001-1277(2025)11-0040-07

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20251107

引 言

矿山资源的开发利用处于重要地位,在进行采矿作业时,最常见的事故之一就是顶板事故,顶板事故发生数量和死亡人数,占采矿作业事故的40%以上,对矿山的生产造成了非常严重的影响^[1-3]。矿山顶板冒落时一方面导致生产停滞,给企业带来直接和间接的经济损失;另一方面,冒落的碎石会困住矿井工作人员,威胁井下作业人员生命安全,造成恶劣的影响。为此,诸多学者对顶板稳定性评价做了大量研究工作^[4-7]。

胡雪雯等^[8]针对常权层次分析法在评价桩基下岩溶顶板稳定性中存在准确性较低的问题,基于变权理论对评价指标的结构模型进行改进,构建了一种有效判定稳定性的数学评价方法。金珠鹏等^[9]以贵州某矿11701工作面开采易造成地表塌陷、山体滑坡等问题为研究背景,提出条带式结构充填开采技术,通过室内试验、数值模拟、工程监测等手段对其开采技术体系进行研究。宋高峰等^[10]为了解决综放工作面支架-围岩耦合关系及端面冒顶问题,运用有限元极限分析和模型试验,研究了支架俯仰角、端面距、割煤高度及覆岩破断对端面顶板稳定性和支架-围岩耦合关系的影响,获得了顶煤位移、支架偏载及端面冒顶演化规律。董俊亮等^[11]为精细化研究某矿体顶板岩

层稳定性并提出针对性的支护方案,采用理论分析、现场探测、数值模拟等方法对该矿体范围内岩层顶板稳定性进行了分析与计算。王佳慧等^[12]以山西省四台矿为例,将影响矿体稳定性的主要因素进行分类,并且在分类的基础上建立了递阶层次模型,构建了三级对比矩阵,据此构建了研究区顶板稳定性分区图,为矿山安全生产提供了理论支撑。王晓军等^[13]利用多元非线性回归的方法建立了多因素组合影响下顶板稳定性评价模型。该模型应用到某铜矿试验采场的实际生产,具有较好的指导作用。李怀宾等^[14]通过改进的Mathews稳定性图解法和厚板理论相结合的方法,对红透山铜矿深部大跨度采场顶板进行稳定性分析,并为类似矿山提供参考。李胜辉等^[15]针对某铁矿复杂破碎地质条件,进行采场稳定性分析和结构参数优化研究,结果表明,现场试验效果较好,可为下一步采矿工艺的确定奠定基础。陈卫东等^[16]针对凡口铅锌矿采场,采用理论模型、Mathews稳定性图解法、数值模拟技术研究了采场顶板围岩的稳定性,研究成果对保证凡口铅锌矿安全生产有重要理论和实践指导意义。

通过研究大量文献发现,顶板稳定性研究对保证矿山安全生产具有重要意义,由于山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司(下称“鑫泰金矿”)地质情况复杂,并且单纯从某个因素角度来分析矿区顶板稳定性无

收稿日期:2025-06-30; 修回日期:2025-07-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0808403);中央高校基本科研业务费资助项目(BBJ2024004)

作者简介:辛明禹(1982—),男,高级工程师,从事矿山安全管理和采矿技术研究工作;E-mail:13686382228@189.cn

*通信作者:刘振振(2000—),男,硕士研究生,从事采矿技术研究工作;E-mail:2426839100@qq.com

法进行准确的稳定性评价。本研究以鑫泰金矿工程实例为背景,利用Flac^{3D}软件进行数值模拟分析,基于层次分析法和D-S证据理论相结合的方法对矿区顶板稳定性进行综合评价分析。

1 模型建立与顶板稳定性分析

1.1 模型建立与计算

根据现场地质资料,基于模型具有针对性、适应性、网格划分科学性等设计要求,利用Flac^{3D}软件对矿区采场建立三维计算模型,在确保模型能真实反映实际情况的基础上,尽量减小模型,以保证模型计算的稳定性和准确性。最终决定建立尺寸为 $x \times y \times z = 150 \text{ m} \times 400 \text{ m} \times 55 \text{ m}$ 的数值模型;将模型下边界设置为固定位移边界,约束 y 方向位移。为了真实反映顶板情况,将模型沿矿脉方向划分网格,以保证数值模拟的真实性,底部和两帮固支,即左、右边界横向位移及速度为零,底部边界竖向位移及速度为零。三维计算模型和采场工作面布置情况如图1和图2所示。

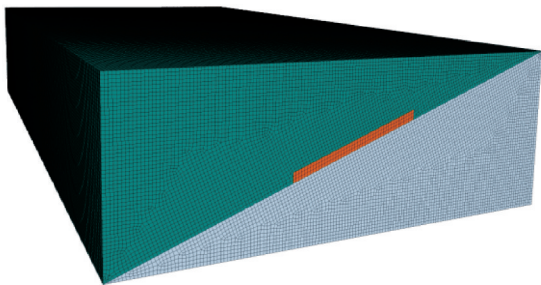


图1 三维计算模型

Fig. 1 3D computational model

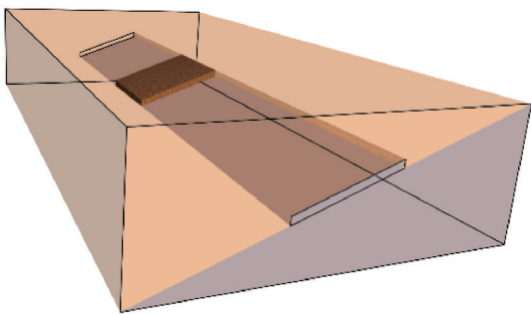


图2 采场工作面布置示意图

Fig. 2 Stope working face layout

为得到采空区充填材料模型的参数,采用Flac^{3D}软件模拟单轴压缩试验,建立1个半径1 m、高4 m的圆柱体(如图3所示),通过试错反演法,不断调整材料参数赋值,将数值计算模型输出的块体应力-应变曲线与理论模型的应力-应变曲线进行比较,结果如图4所示。通过采空区内一个单元的应力-应变关系理论公式与数值模拟的比较可以看出,数值模拟结果和理论计算结果符合情况较好,进而得到充填模型参

数,如表1所示。

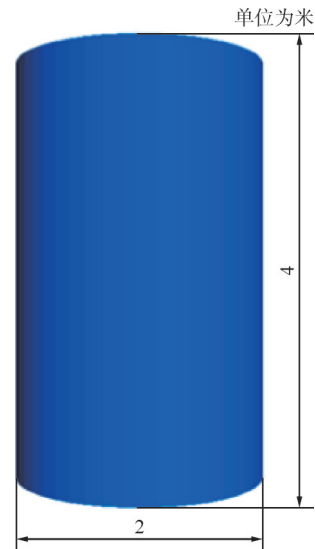


图3 数值模拟反演模型

Fig. 3 Numerical simulation inversion model

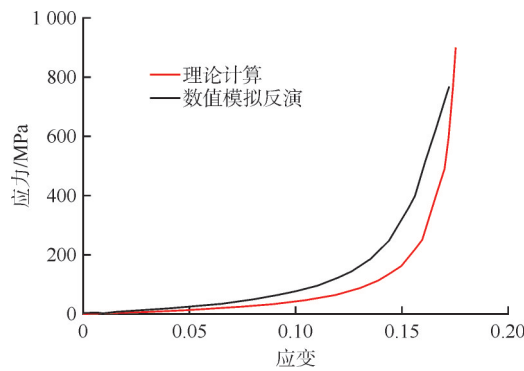


图4 材料应力-应变关系

Fig. 4 Stress-strain relationship of materials

表1 充填模型参数

Table 1 Parameters of filling model

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	剪胀角/ ($^{\circ}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	内聚力/ MPa
2 174	45.56	20.33	11	25	0.001

1.2 顶板稳定性分析

基于不同的采矿方法及留设矿柱间距的差异,研究分析采场顶板塑性区特征、最大和最小主应力分布及垂直、水平应力分布情况,对采空区顶板稳定性进行分析。其中,顶板塑性区特征如图5所示,最大主应力分布云图如图6所示,最小主应力分布云图如图7所示,水平应力分布云图如图8所示,垂直应力分布云图如图9所示。

根据数值模拟结果分析:当矿柱间距留设6 m时,采场顶板受工作面开采扰动,在矿柱支撑顶板附近产生一定范围的塑性破坏,塑性破坏深度小于1 m;在采场中部矿柱附近顶板发生塑性破坏的范围最大,且矿柱左帮顶板角部塑性区范围大于矿柱右帮顶板

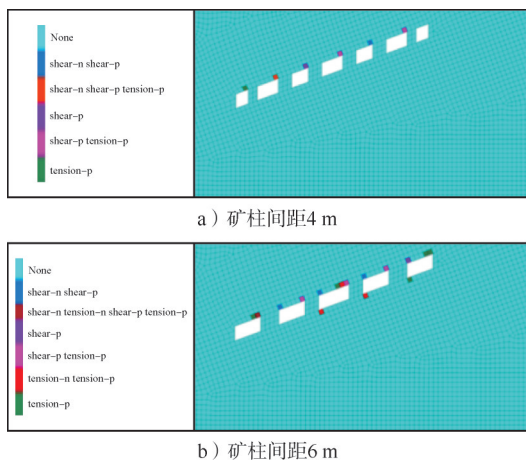


图5 顶板塑性区特征云图

Fig. 5 Characteristic cloud map of plastic zone of roof

角部;随着远离采场顶板中部塑性区范围逐渐减少,矿柱右帮底板角部发生小范围塑性区破坏,破坏深度小于1 m;随着靠近采场左帮,底板塑性区逐渐消失,矿柱无明显塑性破坏,整体结构较稳定。当矿柱间距留设4 m时,采场顶板塑性破坏主要发生在矿柱左帮顶板角部,破坏深度皆小于1 m,破坏范围较小,采场底板与矿柱无明显塑性破坏,整体结构较稳定。

采场顶板采用房柱采矿法回采后,最大主应力呈现“两侧大,中间小”的分布特征,最大主应力主要集中在留设矿柱中部,应力最大值出现在距离采场两帮最近的矿柱;最小主应力呈现“四周大,中间小,应力集中在矿柱”的分布特征,最小主应力主要集中在留设矿柱中部,应力最大值出现在采场中部的矿柱;水

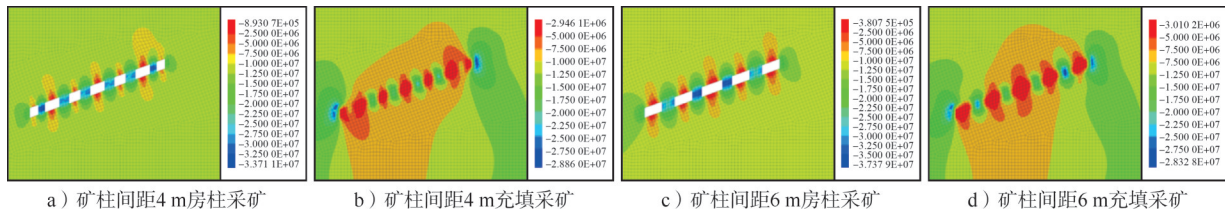


图6 最大主应力分布云图

Fig. 6 Cloud map of maximum principal stress distribution

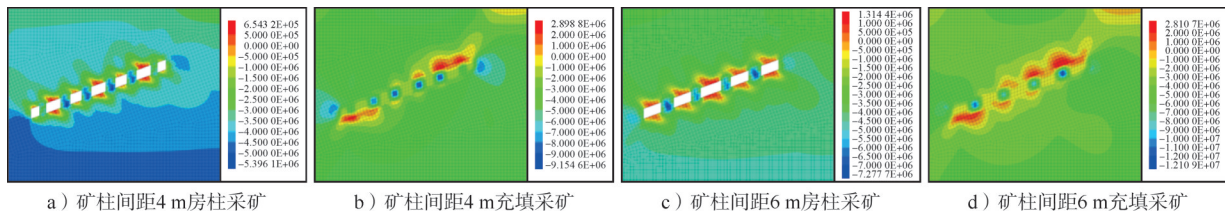


图7 最小主应力分布云图

Fig. 7 Cloud map of minimum principal stress distribution

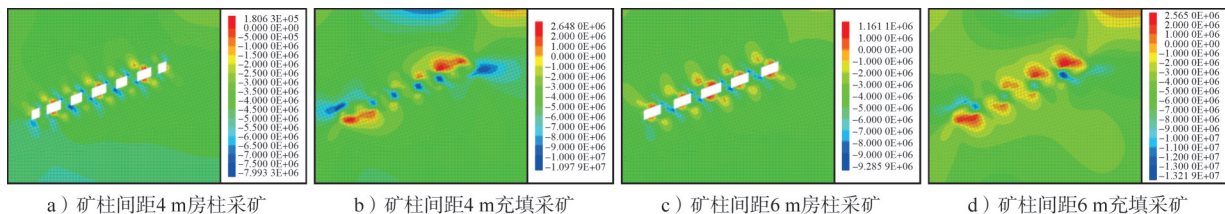


图8 水平应力分布云图

Fig. 8 Cloud map of horizontal stress distribution

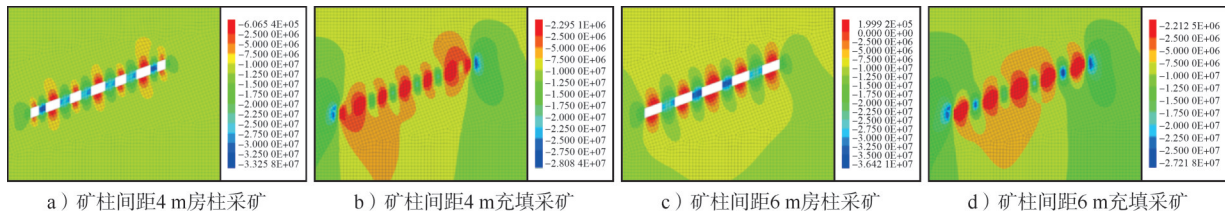


图9 垂直应力分布云图

Fig. 9 Cloud map of vertical stress distribution

平应力主要集中在留设矿柱底部,应力最大值出现在采场中部矿柱底部;垂直应力主要集中在留设矿柱中部,应力最大值出现在距离采场两帮中部的矿柱。

采场顶板采用充填采矿法回采后,在充填体作用下,采场围岩最大主应力整体减小,主要集中在采场两帮,在矿柱间分布较均匀。根据顶板支护标准,当

留设矿柱间距从 6 m 减少至 4 m, 采场顶板与底板发生塑性破坏的范围有效减小, 矿柱间距 4 m 支护可有效控制采场顶板与底板稳定。

2 顶板稳定性影响因素权重分析

2.1 顶板稳定性影响因素指标获取

影响分级顶板稳定性的因素有很多, 考虑到影响顶板稳定性因素的可行性、代表性和独立性, 选择指标时, 应遵循以较少指标尽可能地反映最重要、最全面信息的原则^[17], 选取 4 个中间因素: 地质因素、矿区勘查、顶板力学信息和采矿设计。而这 4 个中间因素又由其他因子决定。根据这些因素的相互作用分成 13 个指标, 利用层次分析法建立模型图^[18], 具体关系如图 10 所示。

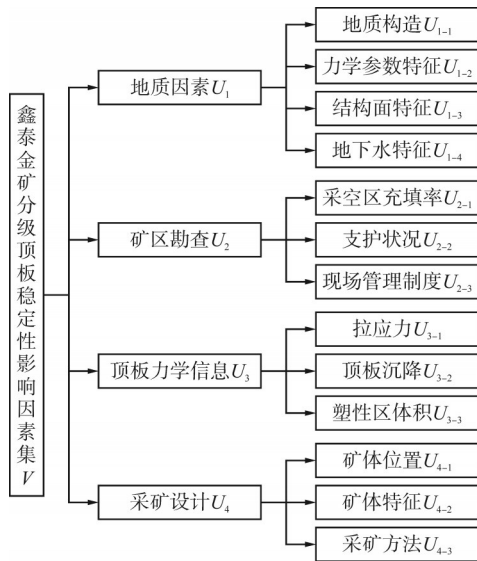


图 10 顶板稳定性影响因素

Fig. 10 Atlas of influencing factors of roof stability

2.2 顶板稳定性影响因素权重分析

2.2.1 层次分析法概念及原理

层次分析法具有定量分析和定性分析相结合的特点, 是美国运筹学专家提出的一种多准则决策方法^[19-21], 大致分成以下几个步骤^[22]:

1) 确定顶板稳定性影响因素。根据图 10, 选取地质因素、矿区勘查、顶板力学信息、采矿设计等因素。

2) 构造判断矩阵。构造各层判断矩阵均是建立在本层对上一层次中某一因素相关因素之间的相对重要性程度的矩阵 A (如式(1)所示)。矩阵元素是本层次各因素之间重要性的量化数值, 由主观判断给出, 以 A 为目标, $u_i, u_j (i, j=1, 2, \dots, n)$ 表示元素, u_j 表示 u_i 对 u_j 的相对重要性。矩阵各要素的重要性判断标度^[23]如表 2 所示。

$$A = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 2 矩阵各要素重要性判断标度

Table 2 Scale for judging importance of each element in matrix

标度	含义
1	表示两个因素相比, 具有相同重要性
3	表示两个因素相比, 前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比, 前者比后者极端重要

3) 层次单排序及一致性检验。判断矩阵 A 对应于最大特征值 λ_{\max} 的特征向量 W , 经归一化后即为同一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值, 这一过程称为层次单排序。 λ_{\max} 由式(2)得出:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (2)$$

式中: W 为特征向量; W_i 为特征向量 W 的第 i 个元素; n 为因素层的因素个数。

计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

查找相应的平均随机一致性指标 RI 。对 $n=1, 2, \dots, 9$, 给出了 RI 值, 如表 3 所示。

表 3 标准 RI 值

Table 3 Standard RI values

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

计算一致性比例 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

4) 层次总排序及一致性检验。对层次总排序也需作一致性检验, 由高层到低层逐层进行。总排序随机一致性比例计算如式(5)所示:

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^n CI_i a_i}{\sum_{i=1}^n RI_i a_i} \quad (5)$$

式中: CI_i 为第 i 个判断矩阵的一致性指标; RI_i 为第 i 个判断矩阵的随机一致性指标; a_i 为第 i 个判断矩阵的总排序权重。

2.2.2 基于层次分析法的权重分析

通过层次分析法对各个因素及因子进行评价, 由

判断矩阵进行各个因素及因子的权重及全局权重,当 $CR < 0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。因子层权重分析结果如图 11 所示,一致性检验随机性指标如表 4 所示。根据层次分析法原理,一致性符合要求;结果表明:矿区勘查和顶板力学信息对顶板稳定性评价影响最大,因子层中,支护状况对顶板稳定性影响最大,拉应力和塑性区体积次之,然后是现场管理制度,地下水特征及结构面特征影响最小。

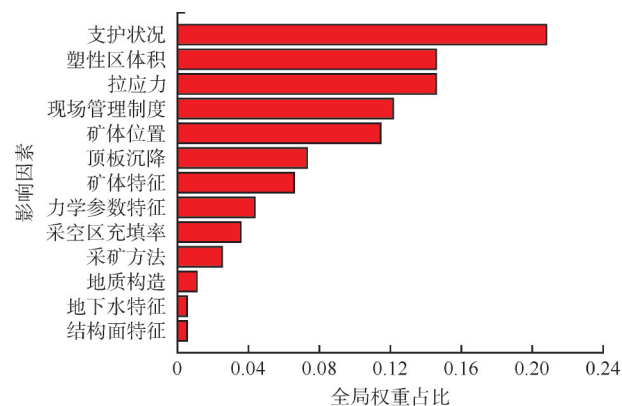


图 11 因子层权重分析结果

Fig. 11 Factor layer weight analysis results

表 4 一致性检验随机性指标

Table 4 Randomness index for consistency test

判断矩阵	λ_{\max}	CI	RI	CR
V	4.027 7	0.009 2	0.89	0.010 4
U_1	4.0	0	0.89	0
U_2	3.024 6	0.012 3	0.52	0.023 6
U_3	3.0	0	0.52	0
U_4	3.018 3	0.009 1	0.52	0.017 6
层次总排序一致性检验				0.011 7

3 基于 D-S 证据理论的顶板稳定性综合评价

3.1 D-S 证据理论概念及原理

登普斯特-谢弗(D-S)证据理论又称证据理论或信任函数,D-S 证据理论基础严谨,组合规则简单,被广泛应用于决策、目标识别等信息融合领域^[24]。这种系统的信息融合,首先根据每个传感器获得的信息计算各个证据的基本概率分配函数、置信度和似然度;然后根据 D-S 证据理论的组合规则计算所有证据联合作用下的基本概率分配函数、置信度和似然度;最后根据给定的判决准则选择置信度和似然度最大的假设作为系统最终融合结果。

1)识别框架 Θ ,表示基本事件的集合, R 表示任何可能的命题集,命题空间为 (Θ, R) 。

2)mass 函数,基本概率分配函数。满足如下条件

的幂集 $m: \Omega(\Theta) \rightarrow [0, 1]$ 的映射:

$$m(\emptyset) = 0, \sum_{A \subseteq \Omega(\Theta)} m(p) = 1 \quad (6)$$

式中: $m(p)$ 为对命题 p 的精确信任度,称 m 为识别框架 Θ 上的 mass 函数。

$$\begin{cases} m_{i-j} = \alpha \frac{w_{i-j}}{w_{\max}} \beta_{i-j} \\ m_{i-j}^0 = 1 - \sum_{j=1}^n \alpha \frac{w_{i-j}}{w_{\max}} \beta_{i-j} \end{cases} \quad (7)$$

式中: α 为似真度; w_{i-j} 为各影响因子的同级权重; w_{\max} 为同级最大权重; m_{i-j}^0 为未被分配到的概率。

3)信任函数(Bel),定义为:

$$Bel: \Omega(\Theta) \rightarrow [0, 1], Bel(p) = \sum_{B \subseteq p} m(B) \quad (8)$$

4)似然函数(PI),定义为:

$$\begin{aligned} PI: \Omega(\Theta) \rightarrow [0, 1], PI(p) &= 1 - Bel(-p) \\ &= \sum_{B \cap A \subseteq \emptyset} m(B) p \subseteq \Omega \end{aligned} \quad (9)$$

p 的不确定性由 $[Bel(p), PI(p)]$ 确定,此区间也被称为信任区间。

5)整合规则,多个 mass 函数的正交和 $m = m_1 \otimes m_2 \otimes \dots \otimes m_n$ 定义为:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ m(p) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{I \\ A_j^{-1} = p}} \prod_{1 \leq i \leq n} M_i(p_i) p \neq \emptyset \end{cases} \quad (10)$$

$$N = 1 - \sum_{\substack{A_i \\ A_i \neq \emptyset}} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(A_i) = \sum_{\substack{A_i \\ A_i \neq \emptyset}} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(pA_i) \quad (11)$$

3.2 顶板多源信息融合稳定性评价

本文的主要研究思路是,将鑫泰金矿地质探测及搜集到的各种矿山信息,利用计算机技术对按时序获得的若干多类别、同异质传感器观测的信息,在一定准则下加以自动分析、综合,以完成对重要顶板稳定性状况所需的决策和估计任务而进行的信息处理过程。进行顶板稳定性辨识,主要包括以下步骤:

1)确立识别框架。将顶板的稳定性状态分为稳定、较稳定、存在隐患、危险性较高 4 种状态。确定识别框架: $\Theta = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 。其中, A_1 表示稳定, A_2 表示较稳定, A_3 表示存在隐患, A_4 表示危险性很高。

2)证据体获取。在对顶板稳定性进行评价时,不能只考虑其中某一种因素,而应综合考虑;反过来讲,影响某一分层稳定性的因素很多,如果将所有的影响因素全部考虑不现实,因此根据前述影响因素及权重分析,选取其中影响较大的因素作为评判指标,证据体名称:支护状况 m_1 、拉应力 m_2 、塑性区体积 m_3 、现场管理制度 m_4 、矿体位置 m_5 、顶板沉降 m_6 、矿体特征 m_7 、力学参数特征 m_8 。根据计算得出各重要因素

影响指标的 *mass* 函数,结果如表 5 所示。

表 5 各重要因素影响指标的 *mass* 函数
Table 5 *mass* functions of influencing indicators
for important factors

因子	A_1	A_2	A_3	A_4
支护状况 m_1	0.30	0.25	0.25	0.20
拉应力 m_2	0.40	0.25	0.20	0.15
塑性区体积 m_3	0.30	0.25	0.25	0.20
现场管理制度 m_4	0.40	0.25	0.20	0.15
矿体位置 m_5	0.50	0.30	0.15	0.05
顶板沉降 m_6	0.45	0.25	0.20	0.10
矿体特征 m_7	0.40	0.30	0.20	0.10
力学参数特征 m_8	0.50	0.20	0.20	0.10

将多项 *mass* 函数进行融合,最终得到的融合函数为: $M\{A_1, A_2, A_3, A_4\}=\{0.74, 0.18, 0.05, 0.03\}$ 。根据公式计算融合后 *M* 的信任函数 *Bel* 和似然函数 *PI*,结果如表 6 所示。

表 6 可信度列表
Table 6 Confidence levels

函数	命题 A_1	命题 A_2	命题 A_3	命题 A_4
<i>Bel</i>	0.70	0.10	0.10	0
<i>PI</i>	0.84	0.88	0.88	0.90

由表 6 可知:命题 A_1 的信任区间为 $[0.70, 0.84]$,表明在多源影响因素的共同作用下,随着证据源的不断融合,其对目标命题的识别更加准确。综上所述,矿区顶板稳定的可信度为 0.74,顶板处于稳定状态。

4 结 论

1)构建 Flac^{3D}数值模拟计算模型对鑫泰金矿顶板稳定性进行研究分析,采场顶板围岩塑性破坏主要发生在采场中部矿柱左帮顶角位置与矿柱右帮底角位置,使用房柱采矿法时应力主要集中在采矿中部矿柱的中部,模拟结果证明减小矿柱间距和使用充填采矿法皆可有效降低矿柱应力,维持顶板稳定。

2)利用层次分析法的基本原理,对顶板稳定性评价指标体系进行优化,对非量化事件进行量化,确定判断矩阵。通过内部计算,得到对应的权重向量,通过一致性检验,为后续的综合评价奠定理论基础。结果表明:矿区勘查和顶板力学信息对顶板稳定性评价影响最大,采矿设计次之,最后是地质因素。因子层中,支护状况影响最大,塑性区体积和拉应力次之,地下水特征及结构面特征影响最小。

3)将层次分析法与 D-S 证据理论相结合对顶板稳定性进行综合评价,选取 8 个主要影响因素,经过

多元信息融合后得到顶板的稳定性评估结果,其处于稳定状态。

[参 考 文 献]

[1] 孙继平,钱晓红.2004—2015 年全国煤矿事故分析[J].工矿自动化,2016,42(11):1-5.

[2] 于健浩,毛德兵.我国煤矿顶板管理现状及防治对策[J].煤炭科学技术,2017,45(5):65-70.

[3] 王文才,岑旺,巴蕾.矿山冒顶片帮灾害事故树分析[J].金属矿山,2010(3):142-144.

[4] 王义海,李强,袁路成,等.小东沟金矿巷道全断面锚网支护参数优化研究与应用[J].黄金,2024,45(12)43-46.

[5] 翟会超,孙长坤,于永纯,等.基于板壳理论的采空区顶板稳定性分析及应用[J].金属矿山,2023(11):136-141.

[6] 吕凯,何富连,许旭辉,等.异形载荷-弹性基础基本顶板结构破坏特征及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2023,42(4):930-947.

[7] 田银素,李军,韦晟杰,等.石圪台矿顶板稳定性分析与支护方案研究[J].煤炭技术,2023,42(2):102-106.

[8] 胡雪雯,李云安,范志高.基于变权模糊综合评判理论的桩基下岩溶顶板稳定性评价研究[J].水文地质工程地质,2024,51(6):149-159.

[9] 金珠鹏,范贤顺,陈维新.峰丛地貌下局部充填开采顶板运移与采场稳定性研究[J].煤炭技术,2024,43(2):6-11.

[10] 宋高峰,咎明惠,孔德中,等.综放工作面支架与围岩耦合关系及端面顶板稳定性研究[J].煤炭工程,2023,55(11):95-101.

[11] 董俊亮,王庆雄,李晓龙,等.活鸡兔煤矿顶板稳定性分析与支护方案设计[J].科学技术与工程,2023,23(1):123-128.

[12] 王佳慧,高迪,陈江峰.基于层次分析法的煤层顶板稳定性评价[J].煤炭技术,2022,41(8):20-23.

[13] 王晓军,郭鹏,黄惟盛,等.多因素组合影响下向进路充填顶板稳定性计算[J].岩土力学,2022,43(12):3453-3462.

[14] 李怀宾,代碧波,赵一凡,等.红透山铜矿深部大跨度采场顶板稳定性分析[J].安全与环境学报,2022,22(5):2468-2473.

[15] 李胜辉,王立杰,刘志义,等.复杂破碎矿体试验采场稳定性分析及结构参数优化[J].金属矿山,2021(8):41-45.

[16] 陈卫东,石勇,史秀志.凡口铅锌矿大结构参数采场围岩稳定性分析[J].黄金,2023,44(4):5-9.

[17] 程爱宝,王新民,刘洪强.灰色层次分析法在地下采空区稳定性评价中的应用[J].金属矿山,2011(2):17-21.

[18] 张海波,宋卫东.基于模糊-层次分析理论的复杂采空区危险性分析[J].黄金,2013,34(12):28-31.

[19] 李旭,于庆磊,杨天鸿,等.基于加权信息法的大孤山露天矿滑坡风险分析[J].金属矿山,2021(2):186-193.

[20] 王佩,陈鹏飞,周盼,等.基于层次分析法的废弃矿山生态修复模式评价模型构建[J].中国非金属矿工业导刊,2024(2):76-79.

[21] 程文文,侯俊,张小瑞.基于多因素层次分析法的金山金矿采场结构参数优化及应用[J].黄金,2018,39(6):31-34.

[22] 方永超.基于层次分析法和模糊综合评判法的金属矿山爆破安全管理分析[J].劳动保护,2024(4):98-101.

[23] 李官兵,李正灿,于向波,等.基于层次分析法的鑫汇金矿深部采矿方法优选及应用[J].黄金,2023,44(7):90-95,100.

[24] 黄智勇,林仁明,刘宏,等.基于DS证据理论的多源网络安全数

据融合模型[J].现代电子技术,2024,47(7):115-121.

Roof stability analysis of metal mines based on multi-source information data fusion

Xin Mingyu¹, Liu Zhenzhen², Wang Bingwen², Jiang Wei¹, Du Xiaodong¹, Jia Yanzhou¹

(1. *Shandong Yantai Xintai Gold Mining Co., Ltd.*;

2. *School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing*)

Abstract: Mineral resources are an indispensable part of human development and also an irreplaceable industry in the modern economic system. Under complex engineering geological conditions, roof stability issues are prominent and remain critical safety problems requiring solutions in metal mine mining. A Flac^{3D} numerical simulation model was established to analyze the roof stability of the Xintai Gold Mine. The analytic hierarchy process was used to determine the weights of factors affecting stability, and the D-S evidence theory was employed for a comprehensive evaluation of the most significant factors. The research results show that reducing pillar spacing and using the backfill mining method can decrease pillar stress and effectively reduce the extent of plastic failure in the stope roof, thereby maintaining roof stability. Mining area exploration and roof's mechanical information have the greatest impact on roof stability evaluation. Among the factor layer, the support condition has the most significant influence on roof stability, while groundwater characteristics and structural plane features have the least impact. The D-S evidence theory demonstrates that the mine roof is in a stable state.

Keywords: metal mine; roof stability; numerical simulation; analytic hierarchy process; D-S evidence theory; multi-source information; data fusion