金川二矿区深部三中段协同开采期巷道稳定性评价*

康超凡[1],陈仲杰[2],赵学科[3,4],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.金川集团镍钴有限公司二矿区, 甘肃 金昌市 737100;
3.镍钴资源综合利用国家重点实验室, 甘肃 金昌市 737100;
4.金川镍钴研究设计院, 甘肃 金昌市 737100)

摘要:针对金川二矿区三中段协同开采期巷道稳定性问题,选取最大主应力、巷道收敛速率、岩体完整性(K_v)、岩体质量(RQD)和支护效果作为评价指标,基于组合赋权-边界云模型算法,对深部三中段协同开采期巷道稳定性进行综合评价,并与现场工况对比。结果表明:不同开采期1 018 m、934 m及814 m分段巷道的稳定性等级整体上均以Ⅱ~Ⅲ级为主,但各中段主要巷道稳定性存在差异。现行开采阶段,1 018 m分段巷道稳定性整体上优于934 m分段和814 m分段巷道,1 018 m分段西部和东部区域巷道的稳定性优于中部区域巷道的稳定性,934 m分段和814 m分段中部和东部区域巷道的稳定性优于西部区域巷道的稳定性。开采后期阶段,各中段主要巷道的稳定性等级由较稳定逐渐变为一般稳定,稳定性有所降低。评价结果与工程实际相吻合,可为金川二矿区三中段协同开采后期的巷道支护提供参考依据。

关键词:金川二矿;三中段协同开采;巷道稳定性评价;云模型;组合赋权

中图分类号:TD322.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0075-10

Stability Evaluation of Roadway During Collaborative Mining Period of Three Middle Sections in Deep Section of Jinchuan No.2 Mining Area

KANG Chaofan[1], *CHEN Zhongjie*[2], *ZHAO Xueke*[3,4], *WANG Wenjie*[1]

(1.School of Resources and Environmental Engineering,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;
2.No.2 Mining Area, Jinchuan Group Nickel Cobalt Co., Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China;
3.State Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization, Jinchang, Gansu 737100, China;
4.Jinchuan Nickel and Cobalt Research and Engineering Institute Co., Ltd., Jinchang, Gansu 737100, China)

Abstract: Aiming at the problem of roadway stability during the collaborative mining of three middle sections of Jinchuan No.2 mining area, the maximum principal stress, roadway convergence rate, rock body integrity (K_v), rock quality (RQD), and support effectiveness were selected as evaluation indexes. Based on the combined weighting-boundary cloud modeling algorithm, the stability of the roadways during the collaborative mining of three middle sections in deep section was comprehensively evaluated and predicted, then compared with on-site working conditions. The results indicate that the stability grades of the roadways in the 1 018 m, 934 m, and 814 m sublevels across different mining phases primarily fall within grades Ⅱ to Ⅲ, but there are differences in the stability of the main roadways in each middle section. In current mining stage, the stability of the roadway in the 1 018 m sublevel is superior to that in the 934 m and 814 m sublevels, with the western and eastern areas of the 1 018 m sublevel exhibiting better stability than the central area. Conversely, the central and eastern areas of the 934 m and 814 m sublevels show greater stability than the western area. In the later stages of mining, the stability of the main roadway in each middle section gradually shifts from more stable to generally stable, resulting in a decrease in stability. The evaluation results align with the actual project, providing a reference for roadway support in the late stages of the collaborative mining of the three middle sections in Jinchuan No.2 mining area.

Key words: Jinchuan No.2 Mine, Collaborative mining of three middle sections, Roadway stability evaluation, Cloud modeling, Combination weighting

---

* **收稿日期**:2024-10-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974206)
作者简介:康超凡(2000—),男,河南焦作人,硕士研究生,主要从事巷道稳定性评价方面的研究。E-mail:2086270992@qq.com
通信作者:王文杰(1978—),男,甘肃庆阳人,博士,教授,主要从事井巷支护及地压控制方面的研究。E-mail:wangwenjie@wust.edu.cn

0 引言

金川铜镍矿是典型的深埋硬岩金属矿山。该矿区的工程地质条件较为复杂,矿岩呈现出显著的破碎特征,同时地应力较高,导致岩体的稳定性差。为了提高生产效率,金川二矿区采用了三中段协同开采的方式进行作业。伴随着二矿区逐步向深部开采,巷道变形、垮塌和围岩稳定性差等问题变得十分突出,不仅严重影响矿石运输和井下通风,也给矿山安全生产带来了严峻挑战。因此,对金川二矿区的巷道稳定性进行客观准确的评价,对确保该矿区的安全高效生产至关重要。

近年来,关于地下矿山巷道及巷道围岩稳定性的问题,学者们采用理论分析、现场监测及数值模拟等多种手段进行了大量的研究。鲍家亮[1]通过对老厂矿区巷道围岩的野外地质调查和室内试验分析,识别了影响巷道稳定性的主要因素,并结合实际情况,利用工程岩体分级标准及水利水电规范对巷道围岩进行定性和半定量的评估。邵良杉等[2]基于改进网格搜索法和随机森林算法构建了一种回采巷道围岩稳定性分级模型,从而提高了围岩分级的精确性。严雅静等[3]选取岩石质量指标、单轴抗压强度等作为评价指标,依据不确定性测度理论建立了某地下钽铌矿山的巷道围岩稳定性评价模型,并取得了较为准确的评估结果。张涛等[4]为研究巷道围岩的稳定性分类及支护参数的合理选择,以巷道围岩的力学特性参数作为分析对象,运用模糊聚类综合评估方法,并借助 Matlab 对围岩稳定性进行分类。黄楠等[5]利用主成分分析、模糊评价、粒子群算法和支持向量机算法,建立了巷道围岩稳定性综合评价模型,取得了较好的预测精度。任家苇等[6]结合组合赋权法、不确知测度理论和集对分析理论,构建了评价含软弱夹层巷道围岩稳定性的耦合分析模型。

上述研究在实际工程中得到了一定应用,但未考虑巷道稳定性评价的时效性。金川二矿区采用三中段协同开采方式,与单中段和双中段开采相比,三中段协同开采的复杂性在于多个中段之间的相互干扰,更易导致巷道不稳定现象。为解决此问题,对巷道不稳定性的致灾因素进行分析,确定金川二矿区三中段协同开采对巷道稳定性的主要影响因素,引入组合赋权-边界云模型方法建立巷道稳定性评价模型,对金川二矿区三中段协同开采期各主要分段巷道稳定性进行评价,可为金川二矿区三中段协同开采后期巷道支护提供参考依据。

1 工程概况

金川二矿区矿体的埋深为 700 m 至 1 000 m,是典型的深埋硬岩金属矿山,以镍矿为主。二矿区采用“竖井+斜坡道”的方式开拓,采用机械化分层胶结充填采矿法开采。矿区上盘为中薄层至薄层的大理岩组,在局部与大理岩接触的区域存在超基性岩脉,且延伸至硫化铜镍贫矿体内。下盘主要由大理岩和片麻岩组成,岩体相对较为破碎。目前,二矿区采用三中段协同开采的方式对 1 000 m 中段、850 m 中段以及 700 m 中段进行开采,主要的开采分段分别为 1 018 m、934 m 和 814 m 分段。为了更有效地进行开采,现场将 3 个中段的开采分为 3 个时期,如图 1 所示。3 个主要分段巷道和联络道均为直墙半圆拱,且主要以双层喷锚网为主,长期承担运输、通风等任务,其围岩稳定性对整个开采阶段至关重要。三中段协同开采方式虽极大地提高了开采效率,但引发的扰动影响也为巷道稳定性带来了严重隐患。

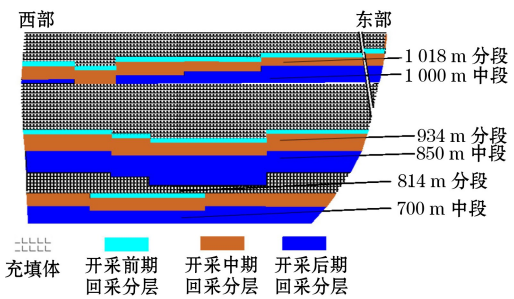


图 1 三中段协同开采的 3 个时期划分

Fig.1 Three periods for synergistic mining of three levels

2 巷道稳定性评价指标确定

在系统总结相关研究资料[7]的基础上,结合巷道工程实际,通过综合分析确定影响巷道稳定性的主要因素。巷道开挖后,岩体应力变化可能导致围岩失稳和巷道变形,围岩收敛速率直接影响巷道变形[8],因此选取最大主应力(X_1)和巷道收敛速率(X_2)作为主要影响因素。围岩破碎程度和岩体质量对巷道稳定性也至关重要[9],故选取岩体完整性(X_3)和岩体质量(X_4)作为自然因素指标。合理的巷道支护可有效防止围岩移动,保障其稳定性[10],因此选取支护效果(X_5)作为影响因素之一。其中,最大主应力(X_1)、巷道收敛速率(X_2)、岩体完整性

(X_3)和岩体质量(X_4)为定量指标,可以直接量化计算;而巷道支护效果(X_5)为定性指标,需参考工程实际及相关文献[11]来进行量化评分,分值越高表明支护效果越好。

巷道稳定性是指巷道在一定条件下保持完整性和稳定性的能力。鉴于当前矿山领域缺乏明确的分类标准,巷道稳定性分级及具体评价指标的制定依据相关标准[11],并结合金川二矿区的实际工况进行调整。在现场支护条件下,巷道的稳定性可划分为5个等级:Ⅰ级为稳定,Ⅱ级为较稳定,Ⅲ级为一般稳定,Ⅳ级为不稳定,Ⅴ级为极不稳定。巷道稳定性分类及分类标准分别见表1和表2。

表1 巷道稳定性分类

Table 1 Classification of roadway stability

稳定性级别	稳定性程度	稳定性特征
Ⅰ	稳定	巷道非常稳固,围岩岩体成型好,支护体完整,可长期保持稳定。
Ⅱ	较稳定	巷道整体稳固,无明显变形,局部可能会有喷浆层开裂。
Ⅲ	一般稳定	巷道较稳固,巷道围岩会有局部变形,偶尔会有喷浆层开裂、掉块和脱落。
Ⅳ	不稳定	巷道稳固性较差,顶板可能冒落,可能产生较大的变形破坏,影响巷道安全。
Ⅴ	极不稳定	巷道稳固性很差,可能出现冒顶现象,变形严重,支护体破坏严重,严重影响巷道安全。

表2 巷道稳定性指标分类标准

Table 2 Classification criteria of roadway stability

评价指标	稳定性分类标准				
	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
最大主应力(X_1)/MPa	0～10	10～20	20～30	30～40	＞40
巷道收敛速率(X_2)/(mm/d)	0～0.2	0.2～0.3	0.3～0.5	0.5～0.7	＞0.7
岩体完整性 K_v(X_3)	0.75～1	0.55～0.75	0.30～0.55	0.15～0.35	0～0.15
岩体质量 RQD 值(X_4)/%	90～100	75～90	50～75	25～50	0～25
巷道支护效果(X_5)	90～100	75～90	60～75	40～60	0～40

3 各评价指标值的确定

3.1 最大主应力与巷道收敛速率

3.1.1 数值模型构建

鉴于最大主应力数据不易获取,且开采后期巷道收敛情况无法预测,因此,采用数值计算的方式间接获取到不同时期的最大主应力和巷道收敛相关数据。根据金川二矿区工程现状,利用数值计算软件,构建二矿区三中段协同开采的三维数值计算模型,如图2所示。

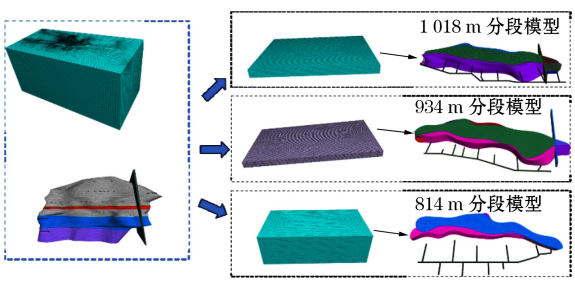


图2 三维数值模型

Fig.2 Three-dimensional numerical model

结合二矿区现行阶段和后期阶段开采情况进行模拟试验。第一步,进行初始应力平衡;第二步,按序开挖1 018 m、934 m及814 m的水平巷道;第三步,开采初期分层矿体并进行充填;第四步,开采中期分层矿体并进行充填;第五步,开采后期分层矿体并进行充填。数值模拟的材料物理力学参数见表3[12]。

表3 数值模拟的材料物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of materials for numerical simulation

岩体类别	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
围岩	15.25	0.18	2.875	37.00	26.0	0.700
大理岩	16.00	0.22	1.848	39.62	39.0	1.100
断层	3.60	0.25	0.240	35.00	7.2	0.090
矿石	14.25	0.30	1.800	38.40	18.0	0.685
充填体	7.28	0.21	0.760	36.60	6.8	0.600

3.1.2 初始应力和边界条件

金川二矿区的地应力场复杂,研究表明,浅层区域的最大主应力呈现出水平方向,且水平主应力明显高于垂直主应力。然而,随着深度的增加,水平应力的主导作用逐渐减弱。因此根据式(1)对计算模型施加初始应力[12]。

$$\begin{cases}\sigma_H=-0.002\ 6-0.024\ 68H\\ \sigma_h=-0.080\ 74-0.046H\\ \sigma_v=0.040\ 6+0.011\ 02H\end{cases}\tag{1}$$

式中:σ_H为X方向上的主应力,MPa;σ_h为Y方向

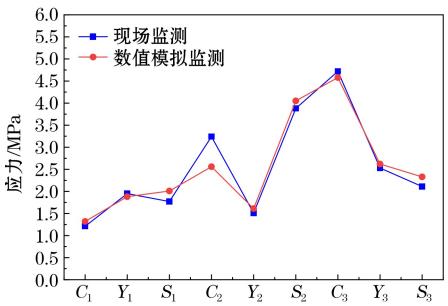
上的主应力,MPa;σ_v 为 Z 方向上的主应力,MPa;H 为埋深,m。

3.1.3 监测点布置

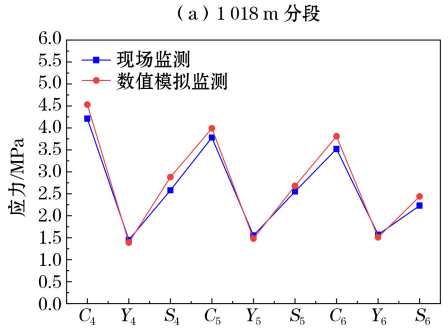
为分析不同开采时期主要巷道围岩应力分布特征及巷道稳定性,在 1 018 m、934 m、814 m 3 个分段巷道自西向东布置与现场试验位置相同的应力监测点和位移监测点,分别对不同开采时期巷道两帮的应力与位移进行监测。其中,C 为垂直矿体走向方向应力监测点,Y 为矿体走向方向应力监测点,S 为竖向应力监测点,B 为位移监测点。

3.1.4 数值模拟与现场监测结果对比

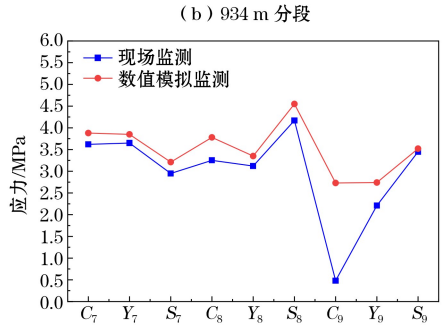
(1) 巷道应力分布现场监测与数值模拟的结果对比。在开采前期 3 个分段巷道的应力分布数值计算结果与实际监测数据的对比如图 3 所示。



(a) 1 018 m 分段



(b) 934 m 分段



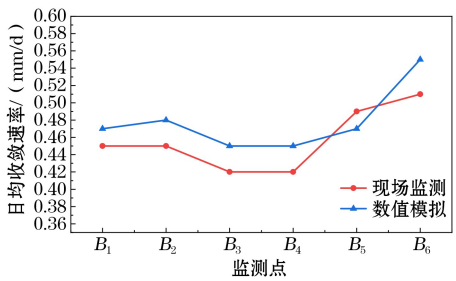
(c) 814 m 分段

图 3 巷道应力数值模拟结果与实测值的对比

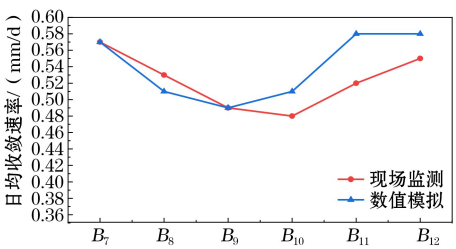
Fig.3 Comparison between numerical simulation results and measured values of roadway stress

由图 3 可知,各监测点的实际监测应力与数值模拟结果存在一定差异,平均差值约为 0.2 MPa,误差在可允许范围内。误差可能是未考虑开采扰动及监测时矿体未完全开采和充填所致。尽管数值模拟结果略高于实测值,但变化规律一致,表明模拟结果能有效反映不同开采时期的巷道应力变化。

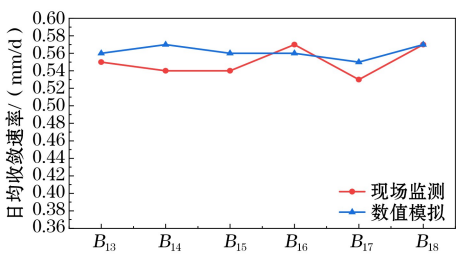
(2) 巷道收敛速率现场监测与数值模拟的结果对比。将 3 个分段巷道在开采前期的日均位移收敛速率的数值计算结果与实际监测数据进行对比,如图 4 所示。由图 4 可以看出,各监测点的实际日均收敛速率与数值模拟结果存在差异,最大误差为 0.05 mm/d,平均差值约 5%~9%。误差可能由于未考虑开采扰动及监测时矿体未完全开采和充填所致。尽管数值模拟结果略高于实测值,但变化规律一致,表明模拟结果能有效反映在不同开采时期的巷道位移变化。



(a) 1 018 m 分段



(b) 934 m 分段



(c) 814 m 分段

图 4 巷道收敛速率监测值和数值模拟结果的对比

Fig.4 Comparison between monitoring values and numerical simulation results of roadway convergence rate

3.1.5 最大主应力与巷道收敛速率模拟结果

不同分段巷道不同位置的最大主应力和巷道收敛速率模拟计算结果见表 4。

表 4 1 018 m、934 m 和 814 m 分段巷道最大主应力和收敛速率模拟结果

Table 4 Simulation results of maximum principal stress and convergence rate of sublevel roadways at 1 018 m, 934 m and 814 m

分段	位置	最大主应力/MPa		巷道收敛速率/(mm/d)	
		现行开采阶段	开采后期	现行开采阶段	开采后期
1 018 m 分段	东部区域(Fc、Ⅰ、Ⅱ盘)	20～27.5	20～27.5	0.43～0.56	0.43～0.47
	中部区域(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ盘)	12.5～22.5	17.5～22.5	0.42～0.57	0.45～0.47
	西部区域(Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ盘)	15～22.5	20～26	0.43～0.57	0.47～0.60
934 m 分段	东部区域(Ⅰ、Ⅱ盘)	20～22	27.5～36	0.55～0.58	0.46～0.60
	中部区域(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ盘)	22.5	27.5	0.42～0.55	0.45～0.48
	西部区域(Ⅵ、Ⅶ盘)	22.5	26～35	0.43～0.57	0.46～0.57
814 m 分段	东部区域(0、Ⅰ盘)	22.5～26	27.5～30	0.44～0.56	0.51～0.54
	中部区域(Ⅱ盘)	22.5	27.5	0.47～0.48	0.52～0.54
	西部区域(Ⅲ、Ⅳ盘)	25	35～36	0.45～0.49	0.49～0.53

3.2 岩体完整性、岩体质量与支护效果

巷道支护效果由巷道支护类型和巷道变形破坏程度共同决定,两项分别占 0.5 的权重[10],根据金川二矿区现有支护类型和相关标准[11],划分不同支护类型和巷道变形破坏程度的评分标准,分别见表 5 和表 6。

表 5 巷道支护类型及评分

Table 5 Support types and ratings of roadway

巷道支护类型	分值
素喷	0～20
单层喷锚网	20～40
双层喷锚网	40～60
双层喷锚网+锚杆注浆	60～80
双层喷锚网+锚杆注浆+钢拱架	80～100

表 6 巷道变形破坏程度及评分

Table 6 Degree of deformation and damage of the roadway and its ratings

巷道变形破坏程度	分值
巷道变形严重,支护体结构破坏严重,有较大塌方	0～20
巷道局部有较大变形,局部支护体发生破坏	20～40
巷道有局部变形,偶尔会有喷浆层开裂和脱落	40～60
巷道整体较好,无塑性变形,局部偶尔有喷浆层开裂	60～80
巷道完好无任何变形破坏	80～100

根据专家对现场不同支护类型和巷道变形破坏程度的打分,同时参考相关文献[13-15],确定1 018 m、934 m 和 814 m 分段巷道岩体质量和岩体完整性指标数据,见表 7。

表 7 分段巷道的稳定性评价指标值

Table 7 Values of stability evaluation indicators of sulevel roadway

分段	位置	岩体完整性(X_3)	岩体质量(X_4)/%	支护效果(X_5)
1 018 m 分段	东部区域(Fc、Ⅰ、Ⅱ盘)	0.50～0.59	80～85	82～95
	中部区域(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ盘)	0.55～0.57	80～85	85～90
	西部区域(Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ盘)	0.50～0.58	80～85	80～90
934 m 分段	东部区域(Ⅰ、Ⅱ盘)	0.48～0.66	83～85	88～90
	中部区域(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ盘)	0.55～0.57	80～85	80～88
	西部区域(Ⅵ、Ⅶ盘)	0.50～0.58	81～88	70～85
814 m 分段	东部区域(0、Ⅰ盘)	0.50～0.56	80～85	80～85
	中部区域(Ⅱ盘)	0.55～0.57	85	85～90
	西部区域(Ⅲ、Ⅳ盘)	0.50～0.58	80～85	80～90

4 基于组合赋权-边界云模型的巷道稳定性评价方法

4.1 云模型算法及其数字特征

云模型[9]是一种有效的工具,用于处理定性概念与定量描述之间转换的不确定性理论。设 $X=\{x\}$是一个特定的论域,论域内每个元素 x 均对应模糊集合 $\widetilde{A}$,具有隶属度 $\mu\widetilde{A}(x)$,且 $\widetilde{A}(x)\in[0,1]$。隶属度在 X 上的分布称为云,云由许多云滴组成,每个云滴则是定性概念的量化表现。云的形状反映定性概念的特征,数字特征分别为期望(Ex)、熵(En)和超熵(He)。Ex 象征论域中的中心值,表示定性概念的最佳隶属关系;En 用于衡量概念的不确定性,反映云滴的离散程度及范围;He 作为熵的熵,测量熵本身的不确定性,反映云滴聚集程度的稳定性。根据云模型理论,某一等级的全云数字特征

计算式如下：

$$\begin{cases} Ex=\dfrac{(G_{\min}+G_{\max})}{2} \\ En=\dfrac{(G_{\max}-G_{\min})}{6} \\ He=k \end{cases} \tag{2}$$

半降云数字特征计算式为：

$$\begin{cases} Ex=G_{\max} \\ En=\dfrac{(G_{\max}-G_{\min})}{3} \\ He=k \end{cases} \tag{3}$$

半升云数字特征计算式为：

$$\begin{cases} Ex=G_{\min} \\ En=\dfrac{(G_{\max}-G_{\min})}{3} \\ He=k \end{cases} \tag{4}$$

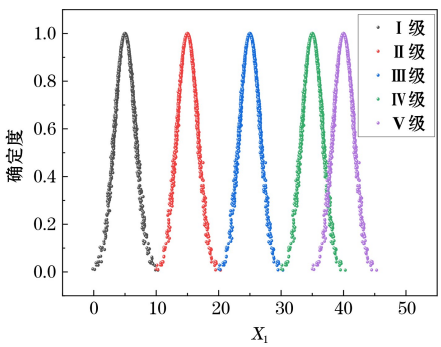
式中：$G_{\max}$ 和 $G_{\min}$ 分别为等级标准的最大和最小边界；k 为常数，表征熵离散程度，取 0.01。

根据表 7、式(2)至式(4)计算，得到巷道稳定性评价的云模型数字特征，具体结果见表 8。根据数字特征生成各评价指标在不同围岩稳定性等级下的标准云，每朵云包含 2 000 个云滴，如图 5 所示。

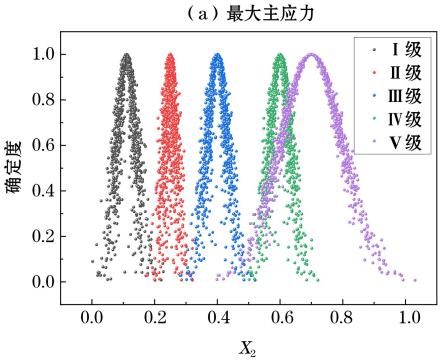
表 8 云模型的数字特征

Table 8 Numerical characterization of cloud models

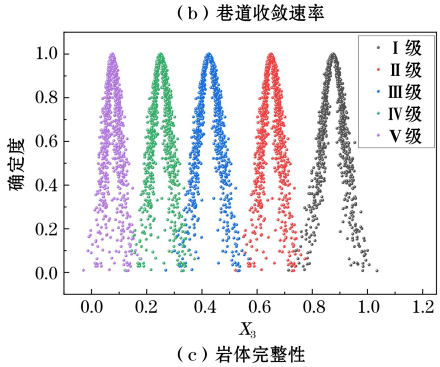
评价指标	巷道稳定性等级				
	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
X_1	(5,1.67,0.01)	(15,1.67,0.01)	(25,1.67,0.01)	(35,1.67,0.01)	(40,6.67,0.01)
X_2	(0.11,0.030,0.01)	(0.25,0.017,0.01)	(0.40,0.033,0.01)	(0.60,0.033,0.01)	(0.70,0.100,0.01)
X_3	(0.875,0.042,0.01)	(0.650,0.033,0.01)	(0.425,0.042,0.01)	(0.250,0.033,0.01)	(0.075,0.025,0.01)
X_4	(0.950,1.670,0.01)	(0.825,2.500,0.01)	(0.625,4.170,0.01)	(0.375,4.170,0.01)	(0.125,4.170,0.01)
X_5	(95,1.67,0.01)	(82.5,2.50,0.01)	(67.5,2.50,0.01)	(50,3.33,0.01)	(20,3.33,0.01)



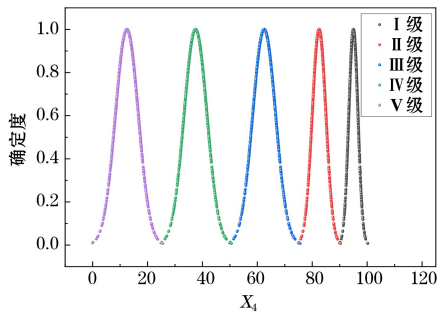
(a) 最大主应力



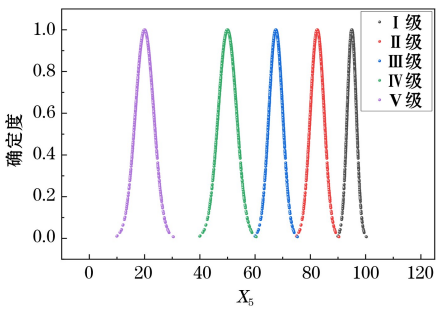
(b) 巷道收敛速率



(c) 岩体完整性



(d) 岩体质量



(e) 巷道支护效果

图 5 各评价指标隶属于岩爆等级的标准

Fig.5 Criteria for the affiliation of evaluation indicators to the rockburst level

云模型能够充分考虑数据的模糊性和随机性，可以更好地解决巷道稳定性评价问题，而且具有结构简单、训练速度快、无需复杂的参数优化和迭代训练等优点。然而，普通云模型难以准确表示定性概念的隶属关系，也缺乏对指标权重的考虑。因此，有必要对云模型做出合理优化。

4.2 单边约束优化

根据云模型理论可知,评价指标属于某一巷道稳定性等级的隶属度计算公式为:

$$\lambda_i(x_j)=\exp\left[-\frac{(x_j-Ex_j^i)^2}{2(En_j^i)^2}\right] \tag{5}$$

式中:$\lambda_i(x_j)$表示评价样本的第 j 个指标隶属于 i 级稳定性的隶属度;Ex_j^i 和 En_j^i 分别为隶属于 i 级稳定性的第 j 个指标的期望和熵。

基于正态分布的云模型评价指标在水平区间具有双边约束条件。然而在巷道稳定性评价方面,巷道稳定性等级划分必然存在单边约束条件。在这种情况下,评价指标并不完全服从正态分布,云模型的形状也会存在一定差异。具体表现为:当评价指标处于非边界云(即非最大和最小等级云)时,评价指标在有限区间内服从正态分布,隶属度计算可以用高斯隶属函数求解。当预测指标处于边界云(即最大和最小等级云)时,处于边界(期望)之内的评价指标服从正态分布,隶属度计算可以用高斯隶属函数求解。但处于边界(期望)之外的评价指标不再服从正态分布,应该服从隶属度为 1 的均匀分布,可以将其形象地称为半升云或半降云。因此,实际上评价指标属于某一围岩稳定性等级的隶属度计算公式应为:

$$\lambda_i(x_j)=\begin{cases}\exp\left[-\dfrac{(x_j-Ex_j^i)^2}{2(En_j^i)^2}\right],\text{其他}\\ 1,i=1\text{ 且 }x_j\leqslant Ex_j^1,i=4\text{ 且 }x_j\leqslant Ex_j^4\end{cases} \tag{6}$$

显然,优化后的隶属度计算公式能够更加准确地描述评价指标与巷道稳定性等级之间的隶属关系。结合 AHP-EM 法确定的指标综合权重和优化后的隶属度计算公式,可以得到具有单边约束条件的综合隶属度计算公式:

$$\mu_i=\sum_{j=1}^{n}w_j\times\lambda_i(x_j) \tag{7}$$

式中:μ_i 为评价样本隶属于第 i 级巷道稳定性的综合隶属度;w_j 为第 j 个评价指标的权重。

4.3 组合赋权计算

在巷道稳定性评价中,不同评价指标应具有不同的权重,合理的指标权重能够有效提高评价结果的准确率。结合层次分析法(AHP)和熵值法(EM)优化云模型的指标权重可以更好的避免主观和客观赋权法各自的弊端。

AHP 是一种通过构建多层次结构模型计算出层次权值与总排序,进而实现多目标决策的主观赋权法。EM 是通过指标数值变化对整体的影响程度来计算指标熵值,进而确定权重的客观赋权法。结合 AHP 和 EM 能够有效地降低计算结果的差异性,使得指标权重更贴近真实情况。组合权重的计算公式如式(8)所示。

$$\boldsymbol{w}_i=\alpha\boldsymbol{w}_j^a+\beta\boldsymbol{w}_j^b \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{w}_j$ 为综合权重;$\boldsymbol{w}_j^a$ 为AHP法计算得到的主观权重;$\boldsymbol{w}_j^b$ 为EM法计算得到的客观权重;α、β 为分配系数,二者可根据式(9) 计算得到。

$$\begin{cases}D(\boldsymbol{w}_j^a,\boldsymbol{w}_j^b)^2=(\alpha-\beta)^2\\ \alpha+\beta=1\end{cases} \tag{9}$$

式中,$D(\boldsymbol{w}_j^a,\boldsymbol{w}_j^b)^2$ 为两个权重向量之间的距离,具体计算公式见式(10)。

$$D(\boldsymbol{w}_j^a,\boldsymbol{w}_j^b)=\left[\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n}(\boldsymbol{w}_j^a-\boldsymbol{w}_j^b)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

5 金川二矿区深部巷道稳定性评价

5.1 确定评价指标权重

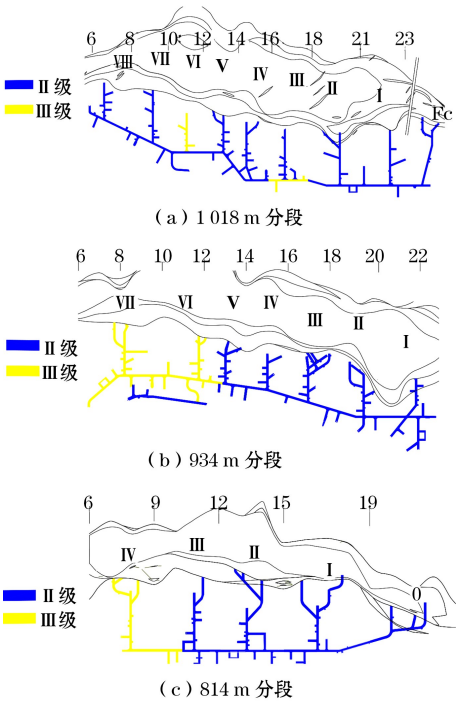
运用层次分析法计算,得到各指标主观权重向量为:$\boldsymbol{w}^a=(0.450,0.303,0.052,0.036,0.159)$;运用熵值法计算,得到各指标客观权重向量为:$\boldsymbol{w}^b=(0.263,0.192,0.128,0.205,0.212)$;运用距离函数计算 AHP-EM 法所得到的权重分配系数为:$\alpha=0.5,\beta=0.5$。

运用 AHP-EM 组合赋权法,计算得到的综合权重向量 $\boldsymbol{w}=(0.356\ 5,0.247\ 5,0.090\ 0,0.120\ 5,0.185\ 5)$。

5.2 模型评价结果与分析

基于组合赋权-边界云模型对金川二矿区三中段的 1 018 m、934 m 和 814 m 3 个分段巷道在现行开采阶段及开采后期的稳定性进行评价,评价结果如图 6 和图 7 所示(颜色标识见电子版)。

(1) 现行开采阶段。由图 6 可知,在现行开采阶段 1 018 m 分段巷道的整体稳定性为Ⅱ级,处于较稳定状态;Ⅲ盘区分段道和Ⅳ盘区联络道的稳定性为Ⅲ级,处于一般稳定状态。934 m 分段中、东部区域巷道的稳定性为Ⅱ级,西部区域巷道的稳定性为Ⅲ级,中、东部区域巷道的稳定性明显好于西部区域的巷道。814 m 分段与 934 m 相似,自东向西,巷道稳定性逐渐降低,中、东部区域为Ⅱ级,西部为Ⅲ级。



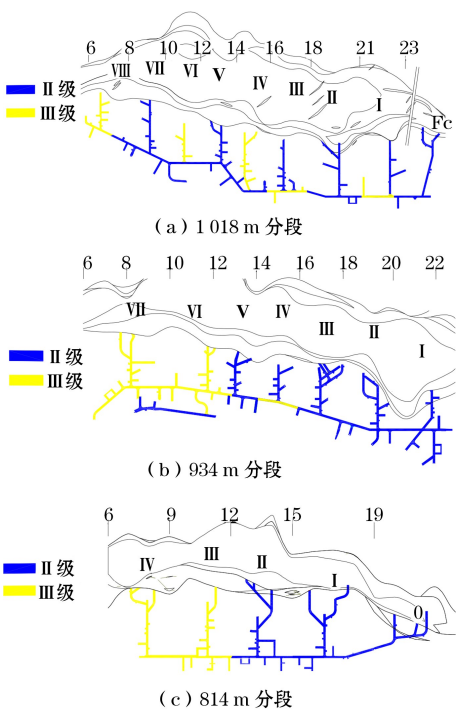
(a) 1 018 m 分段

(b) 934 m 分段

(c) 814 m 分段

图 6 现行开采阶段主要巷道稳定性分级

Fig.6 Stability classification of major roadways in the current mining phase



(a) 1 018 m 分段

(b) 934 m 分段

(c) 814 m 分段

图 7 开采后期主要巷道稳定性分级

Fig.7 Stability classification of major roadways in the late stages of mining

(2) 开采后期。从图 7 可知,在开采后期,1018 m 分段巷道的整体稳定性仍为Ⅱ级,但相较于开采前期有所降低,原Ⅱ级区域(Ⅰ盘区分段道、Ⅵ盘区联络道和Ⅷ盘区分段道、联络道)降为Ⅲ级,变为一般稳定;934 m 分段中部区域稳定性降低,整体由Ⅱ级变为Ⅲ级,稳定性由较稳定变为一般稳定。814 m 分段除中、东部区域稳定性保持在Ⅱ级,西部区域为Ⅲ级。

从图 6 和图 7 可知,3 个主要分段的巷道在现行开采阶段和开采后期的稳定性评价等级整体以Ⅱ～Ⅲ级为主,巷道整体上比较稳定,能够满足井下开采、运输的安全要求。其中,1 018 m 分段的巷道稳定性最好,934 m 和 814 m 分段的巷道稳定性相对较差。3 个主要分段的巷道稳定性随开采进度推进逐渐由稳定向不稳定发展,巷道稳定性仍保持在Ⅱ～Ⅲ级,但可能导致后期的巷道维护成本要更高。

5.3 现场工况对比

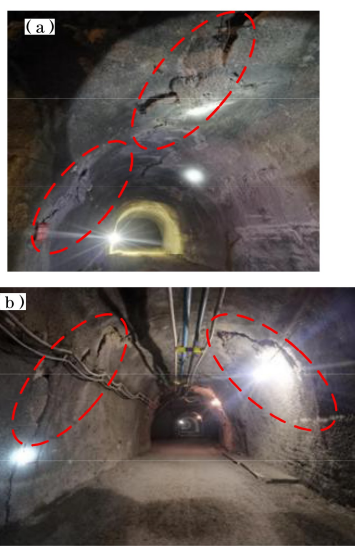
根据现场调查可知,3 个分段巷道和盘区联络巷道局部有不同程度变形破坏情况。现场巷道破坏类型主要以巷道局部收敛变形、两帮开裂、局部喷浆层脱落、局部拱角开裂变形破坏等为主,如图 8 所示。现场破坏点统计见表 9。

表 9 现场巷道破坏点统计结果

Table 9 Statistical results of damage points of on-site roadway

个

位置	西部区域	中部区域	东部区域	总计
1 018 m 分段巷道	8	10	8	26
934 m 分段巷道	15	11	6	32
814 m 分段巷道	13	8	7	28



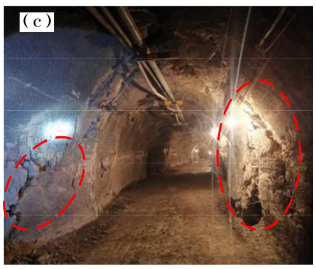


图 8 现场巷道主要破坏类型

Fig.8 The main types of damage of on-sit roadway

现场破坏点调查显示,在深部三中段协同开采下,各分段巷道变形破坏存在明显差异:934 m 分段破坏点最多,1 018 m 分段最少,表明 1 018 m 和 814 m 分段的巷道稳定性优于 934 m 段,实际情况与评价结果吻合。

工况调查发现,1 018 m 分段东西部及 934 m 和 814 m 分段东部区域的巷道整体上稳定,局部存在喷浆层开裂;而 1 018 m 中部及 934 m、814 m 西部区域巷道的稳定性较好,存在局部变形和喷浆层脱落。评估结果显示 934 m 和 814 m 分段东部区域巷道的稳定性高于中部和西部区域的巷道,而 1 018 m 中部区域的巷道稳定性较差,这也与实际工况相吻合。

统计与分析进一步验证了组合赋权-边界云模型在地下金属矿山巷道稳定性评估中的可靠性,该结果为金川二矿区三中段后期巷道支护提供了参考依据。

6 结论

(1) 本文基于组合赋权-边界云模型对金川二矿区深部三中段的协同开采时期的巷道稳定性进行了评估与预测,通过现场工况调查和分析,验证了该模型用于地下金属矿山巷道稳定性评估的可靠性。

(2) 金川二矿区三中段协同开采现行阶段,各中段主要巷道的稳定性存在差异,1 018 m、934 m 及 814 m 分段的巷道稳定性主要为Ⅱ~Ⅲ级。1 018 m 分段巷道的稳定性优于 934 m 与 814 m 分段的巷道,且其西部与东部区域优于中部;934 m 与 814 m 分段的中部及东部区域的巷道稳定性优于西部区域的巷道。

(3) 金川二矿区三中段协同开采后期阶段,各中段巷道稳定性逐渐从较稳定变为一般稳定。1 018 m 西部区域与 934 m、814 m 中东部区域的巷道稳定性均有所下降。开采后期,巷道稳定性仍保持在Ⅱ~Ⅲ级,但Ⅲ级稳定性的巷道有所增多,巷道支护维护成本更高。

参考文献(References):

[1] 鲍家亮.云南澜沧老厂铅锌矿巷道围岩稳定性分析[D].昆明:昆明理工大学,2009.
BAO Jialiang. Stability analysis of surrounding rock of roadway in Lancang Laochang lead-zinc mine, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2009.

[2] 邵良杉,周玉.改进 GSM-RFC 模型在回采巷道围岩稳定性分级的预测[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(3):449-455.
SHAO Liangshan, ZHOU Yu. Prediction on improved GSM-RFC model for cast surrounding rock stability classification of gateway[J]. Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition),2018,37(3):449-455.

[3] 严雅静,顾水杰,于祥,等.基于未确知测度理论的巷道围岩稳定性研究[J].金属矿山,2019(11):20-26.
YAN Yajing, GU Shuijie, YU Xiang, et al. Study on surrounding rock stability of roadway based on unascertained measurement theory[J].Metal Mine,2019(11):20-26.

[4] 张涛,郝兵元,钱翰飞.基于模糊聚类综合分析的煤巷围岩稳定性分类研究[J].中国矿业,2020,29(4):116-119+125.
ZHANG Tao, HAO Bingyuan, QIAN Hanfei. Classification of surrounding rock stability of coal roadway based on fuzzy clustering comprehensive analysis[J]. 中国矿业,2020,29(4):116-119+125.

[5] 黄楠,郑禄林,左宇军,等.基于 PCA-Fuzzy-PSO-SVM 的巷道围岩稳定性评价[J].矿业研究与开发,2020,40(12):75-80.
HUANG Nan, ZHENG Lulin, ZUO Yujun, et al. Stability evaluation of roadway surrounding rock based on PCA-Fuzzy-PSO-SVM[J]. Mining Research and Development,2020,40(12):75-80.

[6] 任家苇,左宇军,林健云,等.基于改进未确知测度的含软弱夹层巷道围岩稳定性评价[J].矿冶工程,2023,43(4):39-43.
REN Jiawei, ZUO Yujun, LIN Jianyun, et al. Stability evaluation for surrounding rock of roadway with weak intercalation based on improved unascertained measure theory[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(4):39-43.

[7] 李德贤,王文杰,黄永祥,等.复杂破碎巷道支护难度分级方法研究与应用[J].金属矿山,2024(9):51-57.
LI Dexian, WANG Wenjie, HUANG Yongxiang, et al. Research and application of support difficulty grading method for roadway in Jinchuan Ⅲ Mine Area[J]. Metal Mine,2024(9):51-57.

[8] 王政,朱彬,康虔.基于多维联系云的巷道围岩稳定性评价模型[J].有色金属工程,2024,14(3):156-167.

WANG Zheng, ZHU Bin, KANG Qian. Stability evaluation model of tunnel surrounding rock based on multidimensional connection cloud[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(3):156-167.

[9] 马浩,曹君林,彭斌,等.基于组合赋权-云模型巷道围岩稳定性预测评价研究[J].煤炭技术,2017,36(11):84-87.
MA Hao, CAO Junlin, PENG Bin, et al. Study for stability evaluation prediction of roadway surrounding rock based on combination weighting and cloud mode[J]. Coal Technology, 2017,36(11):84-87.

[10] 刘晓云,叶义成,王其虎,等.基于未确知测度的大冶铁矿接触带巷道稳定性评价[J].金属矿山,2018(8):13-18.
LIU Xiaoyun, YE Yicheng, WANG Qihu, et al. Stability evaluation of roadway in contact zone of daye iron mine based on unascertained measure theory[J]. Metal Mine, 2018(8):13-18.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Engineering rock mass classification standard: GB/T 50218—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[12] 郁标,杨金维,寇永渊,等.金川二矿区3个中段协同开采巷道变形破坏特征研究[J].金属矿山,2024(6):23-30.
YU Biao, YANG Jinwei, KOU Yongyuan, et al. Study on the deformation and damage characteristics of the three middle sections of coordinated mining roadway in Jinchuan No.2 Mining Area[J]. Metal Mine, 2024(6):23-30.

[13] 张皓.金川二矿区深部沿脉巷道围岩及其支护结构的力学稳定性研究[D].兰州:兰州大学,2022.
ZHANG Hao. Mechanical stability of the surrounding rock and supporting structure of deep roadway along veins in Jinchuan No. 2 mining area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.

[14] 贺耀文.金川二矿区深部工程地质及开采稳定性技术研究[D].兰州:兰州大学,2020.
HE Yaowen. Study on deep engineering geology and mining stability technology of Jinchuan No. 2 mining area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.

[15] YU Xiaojun, YANG Yaping, LI Xifan, et al. Cracking formation and evolution in surrounding rock of a deep fractured rock mass roadway: a study of the 790 m level segment engineering at the Jinchuan Mine, China [J]. Engineering Geology, 2024, 331:107431.