

基于多维云模型的深井岩爆倾向综合评价

王道林¹, 田明华², 朱德彬^{2,3}, 文斌², 刘中正², 戴永力², 陈秋松¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院; 2. 贵州路发实业有限公司; 3. 贵州省地矿局区域地质调查研究院)

摘要:研究岩爆倾向性对深井矿山的安全开采具有十分重要的意义。以某矿山为研究对象,采用一维云模型与多维云模型结合的手段,选取岩石应力系数、岩石脆性系数及岩石弹性应变能指数构建指标体系,对不同开采中段的3种矿岩进行岩爆倾向性评价。结果表明:该矿山设计开采范围(50 m ~ -450 m 中段)内,顶板围岩整体为弱岩爆倾向,矿体整体为中岩爆倾向,底板围岩整体为弱岩爆倾向。

关键词:岩爆倾向性;云模型;深部开采;应力系数;脆性系数;弹性应变能

中图分类号:TD313

文章编号:1001-1277(2024)02-0001-07

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20240201

引言

岩爆是指地下开采的深部或高构造应力区域,在临空岩体中发生突发式破坏的现象。在金属矿山领域,随着开采深度的不断增加,岩爆现象发生的概率也随之增加,给生产作业安全带来一定的压力^[1-2]。

在岩爆倾向性评价方面,很多学者对其机理、判据及预测监测进行了研究。例如:殷志强等^[3]对动静组合加载条件下的岩爆特征及指标进行了研究;梁伟章等^[4]综述了深部硬岩的长期及短期岩爆风险评估方法,并对各方法的适用范围进行了研究阐述;宫凤强等^[5]通过大量试验,提出了一种基于线性储能规律和剩余弹性能指数的岩爆倾向性新判据,丰富了岩爆评估方法;胡建华等^[6]通过改进云模型,对岩爆倾向性进行了工程应用评价。

某矿山于2020年取得300万t/a采矿权,设计开采最深接近1500m,属于典型的深井矿山。由于开采深度较大,为保证工程作业安全,有必要对其岩爆倾向性进行评价并据此制定相应的防护措施。鉴于此,本次研究采用一维云模型与多维云模型结合的手段,选取岩石应力系数、岩石脆性系数及岩石弹性应变能指数构建指标体系,对不同开采中段的3种矿岩进行岩爆倾向性评价。

1 云模型简介

云模型主要用于反映人类知识或事物中概念的2种不确定性:模糊性(即边界亦此亦彼性)与随机性(即发生概率)。目前在各种模糊问题中得到了较为

广泛的应用。

1.1 云模型定义及数字特征

云模型用3个数字特征(期望 E_x 、熵 En 、超熵 He)来表述定性概念。对于一维云模型,其定义为:设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 是一个用精确数值表示的定量集合, U 为论域, Q 为对应于 U 上的定性概念。对于任意变量 x 都存在一个有稳定倾向的随机数 $\mu(x)$,则称 x 对 Q 的确定度。其中, $\mu(x) \in [0, 1]$,若存在:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1] \quad x \in U \quad x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

则 x 在 U 上的分布为云,每一个 x 为一个云滴。进一步的,若服从 $x \sim N(E_x, En')$ 及 $En \sim N(En, He)$ 时, x 对 Q 的确定度满足:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2En^2}\right) \quad (2)$$

则该分布被称为一维正态云模型。

多维正态云模型是以一维正态云模型为基础、以多个预测指标为一维变量建立的正态云模型。其定义为:假设存在 n 维定量论域 $U\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, C 是 $U\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 上的定性概念。若定量值 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ($x \in U$)是定性概念 C 的一次随机实现,且服从正态分布 $x(x_1, x_2, \dots, x_n) \sim N[E_x(E_{x_1}, E_{x_2}, \dots, E_{x_n}), En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n)]$ 。其中, $En'(En'_1, En'_2, \dots, En'_n) \sim N[En(En_1, En_2, \dots, En_n), He(He_1, He_2, \dots, He_n)]$ 。同时, $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 对 C 的确定度 $\mu[x(x_1, x_2, \dots, x_n)]$ 满足:

$$\mu[x(x_1, x_2, \dots, x_n)] = \exp\left(-\sum_{j=1}^n \frac{(x_j - E_{x_j})^2}{2En_j'^2}\right) \quad (3)$$

则 $x(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 在论域 $U\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 上的分布被称为 n 维正态云模型。

其中,期望 Ex 反映了定性概念的云滴群重心;熵 En 是定性概念的不确定性度量,由概念的随机性和模糊性共同决定,反映了概念外延的离散程度和模糊程度;超熵 He 是对熵不确定性的再描述,其示意图分别如图 1,图 2(以二维云为例)所示。

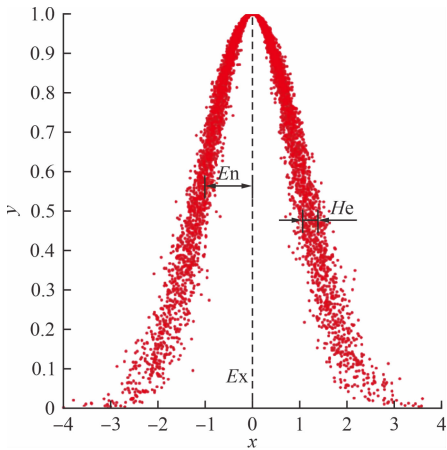


图 1 一维云模型示意图

Fig. 1 Chart of one-dimensional cloud model

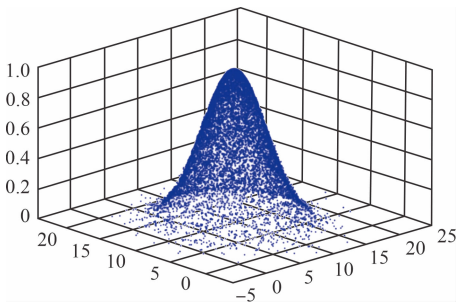


图 2 二维云模型示意图

Fig. 2 Chart of two-dimensional cloud model

1.2 云发生器

云发生器分为正向云发生器和逆向云发生器。正向云发生器在已知 3 个特征数字的情况下用来生成所需数量的云滴,逆向云发生器则与之相反。

1.2.1 一维云发生器

本文所用一维云发生器主要实现步骤^[6]如下:

1) 输入确定的数字特征,即期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 和云滴个数 N 。

2) 输出以 En 为期望、 He 为标准差的正态随机数 y_i 及以 Ex 为期望、 y_i 为标准差的正态随机数 x_i 。

3) 根据式(2)计算确定度。

1.2.2 多维云发生器

多维云发生器主要实现步骤如下:

1) 输入。多维云模型数字特征 $(Ex_1, Ex_2, \cdots, Ex_n; En_1, En_2, \cdots, En_n; He_1, He_2, \cdots, He_n)$ 及生成云滴的个数 N 。

2) 输出。产生期望值为 $En(En_1, En_2, \cdots, En_n)$ 、标准差为 $He(He_1, He_2, \cdots, He_n)$ 的 n 维正态随机数 $En'(En'_1, En'_2, \cdots, En'_n)$; 产生一个期望值为 $Ex(Ex_1, Ex_2, \cdots, Ex_n)$ 、标准差为 $En'(En'_1, En'_2, \cdots, En'_n)$ 的 n 维正态随机数 $x(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 。

3) 根据式(3)计算确定度。

4) 令 $(x_{1i}, x_{2i}, \cdots, x_{ni}; \mu_i)$ 为一个云滴,它是该云表示的语言值在数量上的一次具体实现。其中, $(x_{1i}, x_{2i}, \cdots, x_{ni})$ 为定性概念在论域中这一次对应的数值, μ_i 为 $(x_{1i}, x_{2i}, \cdots, x_{ni})$ 属于这个语言值程度的量度。

1.3 消除云雾化

在云数字特征中,超熵用于表示云滴的集中趋势,超熵较小时,云滴呈现泛正态分布;当超熵较大时,云滴的分布较为离散,发生雾化现象。

在多指标融合的过程中,消除云雾化就是提高各种指标的统一程度。生成指标权重云可以将专家对影响指标的权重分析进行量化、可视化。权重云的离散程度越小,各权重之间的冲突就越小。

2 一维云岩爆评价模型应用

2.1 评价体系的构建

岩爆的主要影响因素有岩性、围岩应力和能量。基于岩爆发生机理判定准则,并通过文献调研,最终选取岩石应力系数 σ_θ/σ_c (开挖洞室最大切应力与抗压强度比值)、岩石脆性系数 σ_c/σ_t (抗压强度与抗拉强度比值)与岩石弹性应变能指数 W_e 作为指标。根据王元汉等^[7]已有研究成果,各评价指标的判断区间如表 1 所示。

表 1 岩爆评价指标等级区间

指标	岩爆倾向性			
	无岩爆(Ⅰ)	弱岩爆(Ⅱ)	中岩爆(Ⅲ)	强岩爆(Ⅳ)
σ_θ/σ_c	<0.3	[0.3,0.5)	[0.5,0.7)	≥ 0.7
σ_c/σ_t	>40	[26.7,40)	[14.5,26.7)	<14.5
W_e	<0.2	[0.2,0.5)	[0.5,0.75)	≥ 0.75

为保证所有指标统一度量范围,对脆性系数进行归一化处理:

$$b_i = \frac{\max(r_i) - r_i}{\max(r_i) - \min(r_i)} \tag{4}$$

式中: b_i 为归一化后的因素指标值; r_i 为因素原始的指标值; $\max(r_i)$ 、 $\min(r_i)$ 为上、下限,分别取 50,0。

因此,得出归一化后的岩爆倾向性评价指标等级区间,结果如表 2 所示。

表2 归一化后的岩爆评价指标等级区间

Table 2 Normalized grade ranges of rockburst evaluation indicators

岩爆等级	岩爆倾向性评价指标		
	σ_{θ}/σ_c	σ_c/σ_t	W_e
I	0~0.30	0~0.20	0~0.20
II	0.30~0.50	0.20~0.47	0.20~0.50
III	0.50~0.70	0.47~0.71	0.50~0.75
IV	0.70~1.00	0.71~1.00	0.75~1.00

在多指标融合的过程中,为提高各指标的统一程度,应消除云雾化现象。通过调研大量文献与工程实例,得到基于岩石应力系数 σ_{θ}/σ_c 、岩石脆性系数 σ_c/σ_t 与岩石弹性应变能指数 W_e 的指标体系权重系数,统计结果如表3所示。

只有当 $He < En/3$ 时,才能保证生成的权重云不会产生云雾化现象,通过式(5)对表3中的指标权重进行融合,得出权重云参数(如表4所示)与各指标融合后的权重云图(如图3所示)。

由表4和图3可知:将搜集到的所有指标权重进行融合后,均未出现权重云雾化现象,因此可确定岩石应力系数 σ_{θ}/σ_c 、岩石脆性系数 σ_c/σ_t 与岩石弹性应变能指数 W_e 3个指标的权重因子分别为0.3523, 0.2877与0.3600。

表3 岩爆评价指标权重统计结果

权重	指标权重			文献或工程实例来源
	σ_{θ}/σ_c	σ_c/σ_t	W_e	
W_1	0.400	0.300	0.300	文献[7]
W_2	0.365	0.313	0.322	文献[8]
W_3	0.361	0.325	0.314	文献[9]
W_4	0.427	0.302	0.271	文献[10]
W_5	0.428	0.229	0.343	文献[11]
W_6	0.250	0.250	0.500	文献[12]
W_7	0.235	0.295	0.470	文献[13]

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |W_i - E_x| \\ He = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - E_x)^2 - E_n^2} \end{cases} \quad (5)$$

表4 权重云数字特征

云数字特征	σ_{θ}/σ_c	σ_c/σ_t	W_e
E_x	0.3523	0.2877	0.3600
E_n	0.0786	0.0345	0.0895
He	0.0126	0.0051	0.0130

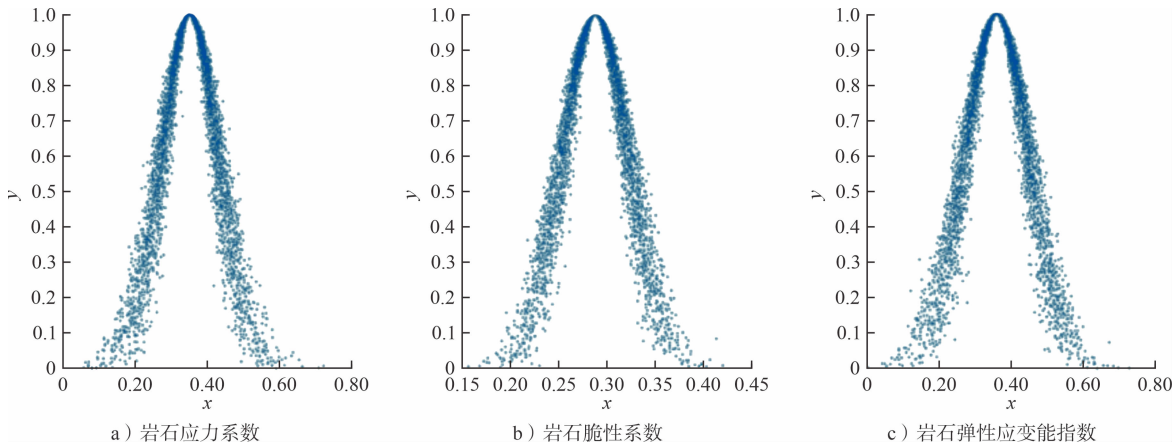


图3 各指标融合权重云图

Fig. 3 Cloud chart of fusion weights of various indicators

2.2 一维云模型构建

对于不同等级的期望、熵与超熵,可根据式(6)计算得出。其中,根据相似工程经验,确定超熵 $He = k = 0.01$,根据实际数据确定的边界条件为0,1。

$$\begin{cases} E_x = 0.5(C_{\max} + C_{\min}) \\ E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6 \\ He = k \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$ 分别为对应等级标准的上、下限边界值。对于单边界限的情况,如 $(-\infty, C_{\max}]$ 或 $[C_{\min},$

$+\infty)$,依据指标实测值的上、下限确定缺省边界。据此可得出基于不同评价指标的岩爆倾向性评价云数字特征,如表5所示。指标权重因子分别为0.3523,0.2877与0.3600,结合各指标的烈度等级边界条件,可应用式(7)对岩石应力系数、岩石脆性系数与岩石弹性应变能指数3个指标进行融合,得出岩爆倾向性评价等级综合云图(如图4所示)及岩爆倾向性的综合评价云数字特征(如表6所示)。

表 5 岩爆评价指标各等级云数字特征

Table 5 Cloud-based numerical characteristics of various grades of rockburst evaluation indicators

岩爆等级	σ_{θ}/σ_c			σ_c/σ_t			W_e		
	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e
I	0.15	0.050	0.01	0.100	0.033	0.01	0.100	0.033	0.01
II	0.40	0.033	0.01	0.335	0.045	0.01	0.350	0.050	0.01
III	0.60	0.033	0.01	0.585	0.038	0.01	0.625	0.042	0.01
IV	0.85	0.050	0.01	0.855	0.048	0.01	0.875	0.042	0.01

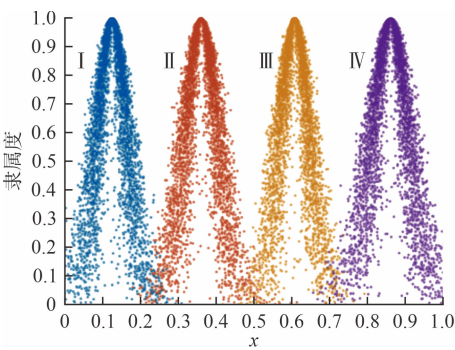


图 4 岩爆倾向性综合评价云图

Fig. 4 Cloud chart of comprehensive evaluation of rockburst proneness

表 6 岩爆倾向性综合评价云数字特征

Table 6 Cloud-based numerical characteristics of comprehensive evaluation of rockburst proneness

云数字特征	I	II	III	IV
E_x	0.123	0.359	0.606	0.860
E_n	0.039	0.043	0.038	0.047
H_e		0.01		

$$\left\{ \begin{aligned} E_x(j) &= \frac{\sum_{i=1}^n E_x(i,j) E_n(i,j) W(i)}{\sum_{i=1}^n E_n(i,j) W(i)} \\ E_n(j) &= \sum_{i=1}^n E_n(i,j) W(i) \\ H_e(j) &= \frac{\sum_{i=1}^n H_e(i,j) E_n(i,j) W(i)}{\sum_{i=1}^n E_n(i,j) W(i)} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中： $W(i)$ 为第*i*个指标的权重； j 为等级的个数； $E_x(i,j)$ 、 $E_n(i,j)$ 、 $H_e(i,j)$ 分别为第*i*个指标隶属于第*j*个等级云的期望、熵、超熵。

计算岩爆数据的加权期望，用浮动云算法合成该对象所有指标：

$$E_{x_b} = \sum_{i=1}^n W(i) E_x(i) \quad (8)$$

式中： E_{x_b} 为岩爆数据的加权期望。
得出加权期望后，可根据最大隶属度原则判定岩石的岩爆倾向性，计算隶属度的公式为：

$$\mu(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - E_{x_i})^2}{2E_{n_i}^2}\right) \quad (9)$$

各等级各指标参数与他们所对应的权重相乘，可得出加权期望值 E_{x_b} 。将式中的 x_i 用式(8)的 E_{x_b} 替换，便可得出各等级的隶属度。

2.3 参数确定

该矿山矿体走向北西—南东，延伸长约 4 000 m；控制标高最低 -426.86 m，最高 146.63 m，埋深最浅 850.53 m，最深 1 468.97 m，埋深变化较大。各岩体基本物理力学参数如表 7 所示。初步按 50 m、0 m、-50 m、-100 m、-150 m、-200 m、-250 m、-300 m、-350 m、-400 m 与 -450 m 中段开展分析。

表 7 各岩体基本物理力学参数

Table 7 Basic physical and mechanical parameters

岩性	C/MPa	$\varphi/(^\circ)$	E/GPa	ν	σ_c/MPa	σ_t/MPa
顶板围岩	5.75	43	76.37	0.14	65.4	5.12
矿体	4.40	37	8.90	0.25	30.21	3.28
底板围岩	6.02	40	34.18	0.19	47.6	4.16

注： C 为内聚力； φ 为内摩擦角； E 为弹性模量； ν 为泊松比。

由于岩爆发生位置不可预测，针对不同开采水平的各种岩石，均需进行岩爆倾向性评价。其中，岩石弹性应变能指数 W_e 计算公式为：

$$W_e = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (10)$$

硐室最大切向应力，可根据地应力实测数据结合数值模拟(如图 5 所示)获得。

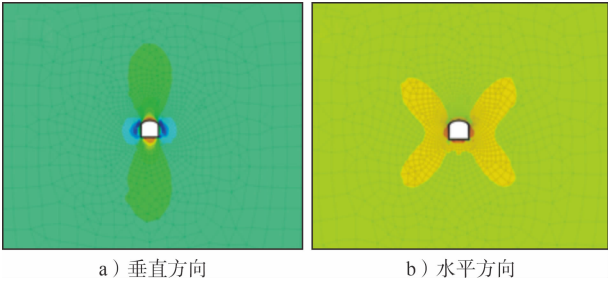


图 5 巷道垂直及水平方向正应力云图

Fig. 5 Cloud chart of vertical and horizontal principal stresses in roadway

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_v &= 0.026\ 4h - 0.185\ 8 \\ \sigma_H &= 0.024\ 4h + 6.437\ 6 \\ \sigma_h &= 0.015\ 6h - 0.110\ 24 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中： σ_v 为垂直主应力(MPa)； σ_H 为最大水平主应力(MPa)； σ_h 为最小水平主应力(MPa)； h 为埋深(m)。

综上，可得出各开采中段不同岩石的岩爆评价指

标参数,如表 8 所示。

表 8 岩爆评价指标参数

Table 8 Parameters for rockburst evaluation indicators					
评价对象	中段	埋深/m	σ_{θ}/σ_c	σ_c/σ_t	W_e
顶板围岩	50 m	1 050	0.330	0.745	0.028
	0 m	1 100	0.348		
	-50 m	1 150	0.373		
	-100 m	1 200	0.392		
	-150 m	1 250	0.422		
	-200 m	1 300	0.439		
	-250 m	1 350	0.467		
	-300 m	1 400	0.486		
	-350 m	1 450	0.511		
	-400 m	1 500	0.531		
矿体	-450 m	1 550	0.543	0.815	0.051
	50 m	1 050	0.747		
	0 m	1 100	0.788		
	-50 m	1 150	0.843		
	-100 m	1 200	0.888		
	-150 m	1 250	0.956		
	-200 m	1 300	0.993		
	-250 m	1 350	1.057		
	-300 m	1 400	1.101		
	-350 m	1 450	1.156		
底板围岩	-400 m	1 500	1.201	0.771	0.033
	-450 m	1 550	1.229		
	50 m	1 050	0.474		
	0 m	1 100	0.500		
	-50 m	1 150	0.535		
	-100 m	1 200	0.564		
	-150 m	1 250	0.606		
	-200 m	1 300	0.630		
	-250 m	1 350	0.671		
	-300 m	1 400	0.699		
	-350 m	1 450	0.734		
	-400 m	1 500	0.762		
	-450 m	1 550	0.780		

2.4 评价结果分析

利用浮动云算法公式(见式(8)),可对所有指标参数进行加权合成,进一步应用式(9)得出各开采水平加权指标对岩爆评价综合云的隶属度,如表 9 所示。

分析表 9,根据最大隶属度原则,在一维云模型下可得出以下结论。

1)顶板围岩在 50 m ~ -450 m 中段岩爆等级隶属度排序为:弱岩爆(0.487 0 ~ 0.999 4) >> 中岩爆(1.03 × 10⁻¹¹ ~ 1.81 × 10⁻⁶) > 无岩爆 >> 强岩爆,且

表 9 一维云模型下各岩爆等级隶属度
Table 9 Subordination degrees of rockburst levels under one-dimensional cloud model

评价对象	中段	隶属度 μ_i				岩爆等级
		无岩爆	弱岩爆	中岩爆	强岩爆	
顶板围岩	50 m	3.49 × 10 ⁻⁷	0.863 2	1.03 × 10 ⁻¹¹	9.46 × 10 ⁻²⁸	Ⅱ
	0 m	1.43 × 10 ⁻⁷	0.924 6	3.29 × 10 ⁻¹¹	4.17 × 10 ⁻²⁷	Ⅱ
	-50 m	4.01 × 10 ⁻⁸	0.981 2	1.56 × 10 ⁻¹⁰	3.12 × 10 ⁻²⁶	Ⅱ
	-100 m	1.40 × 10 ⁻⁸	0.999 4	5.22 × 10 ⁻¹⁰	1.53 × 10 ⁻²⁵	Ⅱ
	-150 m	2.66 × 10 ⁻⁹	0.978 0	3.07 × 10 ⁻⁹	1.63 × 10 ⁻²⁴	Ⅱ
	-200 m	1.02 × 10 ⁻⁹	0.941 5	7.97 × 10 ⁻⁹	5.96 × 10 ⁻²⁴	Ⅱ
	-250 m	1.96 × 10 ⁻¹⁰	0.847 1	3.75 × 10 ⁻⁸	5.08 × 10 ⁻²³	Ⅱ
	-300 m	5.80 × 10 ⁻¹¹	0.761 2	1.08 × 10 ⁻⁷	2.27 × 10 ⁻²²	Ⅱ
	-350 m	1.27 × 10 ⁻¹¹	0.645 3	3.73 × 10 ⁻⁷	1.35 × 10 ⁻²¹	Ⅱ
	-400 m	3.49 × 10 ⁻¹²	0.546 3	1.00 × 10 ⁻⁶	5.80 × 10 ⁻²¹	Ⅱ
矿体	-450 m	1.56 × 10 ⁻¹²	0.487 0	1.81 × 10 ⁻⁶	1.40 × 10 ⁻²⁰	Ⅱ
	50 m	8.57 × 10 ⁻²³	1.26 × 10 ⁻³	0.061 1	2.39 × 10 ⁻¹²	Ⅲ
	0 m	2.02 × 10 ⁻²⁴	3.55 × 10 ⁻⁴	0.138 2	2.09 × 10 ⁻¹¹	Ⅲ
	-50 m	9.34 × 10 ⁻²⁷	5.20 × 10 ⁻⁵	0.337 5	3.57 × 10 ⁻¹⁰	Ⅲ
	-100 m	1.06 × 10 ⁻²⁸	9.63 × 10 ⁻⁶	0.569 4	3.05 × 10 ⁻⁹	Ⅲ
	-150 m	8.55 × 10 ⁻³²	5.77 × 10 ⁻⁷	0.909 9	6.41 × 10 ⁻⁸	Ⅲ
	-200 m	1.38 × 10 ⁻³³	1.05 × 10 ⁻⁷	0.996 4	3.13 × 10 ⁻⁷	Ⅲ
	-250 m	1.04 × 10 ⁻³⁶	4.87 × 10 ⁻⁹	0.882 0	3.74 × 10 ⁻⁶	Ⅲ
	-300 m	5.13 × 10 ⁻³⁹	4.66 × 10 ⁻¹⁰	0.656 2	1.91 × 10 ⁻⁵	Ⅲ
	-350 m	6.60 × 10 ⁻⁴²	2.26 × 10 ⁻¹¹	0.363 3	1.18 × 10 ⁻⁴	Ⅲ
底板围岩	-400 m	2.19 × 10 ⁻⁴⁴	1.58 × 10 ⁻¹²	0.183 3	4.70 × 10 ⁻⁴	Ⅲ
	-450 m	6.15 × 10 ⁻⁴⁶	2.90 × 10 ⁻¹³	0.110 6	1.04 × 10 ⁻³	Ⅲ
	50 m	9.41 × 10 ⁻¹²	0.621 9	4.73 × 10 ⁻⁷	1.91 × 10 ⁻²¹	Ⅱ
	0 m	1.76 × 10 ⁻¹²	0.495 6	1.66 × 10 ⁻⁶	1.23 × 10 ⁻²⁰	Ⅱ
	-50 m	1.60 × 10 ⁻¹³	0.337 4	8.52 × 10 ⁻⁶	1.50 × 10 ⁻¹⁹	Ⅱ
	-100 m	2.18 × 10 ⁻¹⁴	0.233 5	2.92 × 10 ⁻⁵	1.05 × 10 ⁻¹⁸	Ⅱ
	-150 m	9.35 × 10 ⁻¹⁶	0.120 5	1.66 × 10 ⁻⁴	1.86 × 10 ⁻¹⁷	Ⅱ
	-200 m	1.52 × 10 ⁻¹⁶	0.079 0	4.08 × 10 ⁻⁴	8.83 × 10 ⁻¹⁷	Ⅱ
	-250 m	6.42 × 10 ⁻¹⁸	0.035 7	1.66 × 10 ⁻³	1.12 × 10 ⁻¹⁵	Ⅱ
	-300 m	6.27 × 10 ⁻¹⁹	0.019 0	4.12 × 10 ⁻³	6.47 × 10 ⁻¹⁵	Ⅱ
	-350 m	3.42 × 10 ⁻²⁰	0.008 2	0.011 3	5.08 × 10 ⁻¹⁴	Ⅲ
	-400 m	2.84 × 10 ⁻²¹	0.003 9	0.024 3	2.67 × 10 ⁻¹³	Ⅲ
	-450 m	6.01 × 10 ⁻²²	0.002 4	0.037 3	7.21 × 10 ⁻¹³	Ⅲ

随深度增加,岩爆倾向变化不大。

2)矿体在 50 m ~ -450 m 中段岩爆等级隶属度排序为:中岩爆(0.061 1 ~ 0.996 4) >> 弱岩爆 > 强岩爆 >> 无岩爆,即当前开采范围的矿体属于中岩爆倾向。

3)底板围岩在 50 m ~ -300 m 中段岩爆等级隶属度排序为:弱岩爆(0.019 0 ~ 0.621 9) > 中岩爆(4.73 × 10⁻⁷ ~ 4.12 × 10⁻³) >> 无岩爆 >> 强岩爆; -350 m ~ -450 m 中段岩爆等级隶属度则为中岩爆(0.011 3 ~ 0.037 3) > 弱岩爆(0.002 4 ~ 0.008 2)。

3 多维云岩爆评价模型应用

一维云模型需要独立建立各指标的云模型,采用加权融合的方式考虑指标间耦合关系,人为进行参数“降维”,在一定程度上造成部分信息丢失。因此,为了更客观反映岩爆的复杂性,引入多维云模型分析,充分利用各维度信息,同时减弱一维云模型对指标区间均值的敏感程度,以提高评价结果的准确度。

3.1 多维云模型构建

多维云模型的数字特征可根据一维云模型确定^[14]:

$$E_x = \frac{C_{min} + C_{max}}{2} \tag{12}$$

由于多维云模型综合考虑各个预测指标的等级标准,所以要依据各个预测指标取值的最大范围确定数字特征 E_n ,并且各个指标各个等级标准的熵不变,根据正态云的“ $3E_n$ 规则”有:

$$E_n = \frac{E_{x_{max}}}{3} \tag{13}$$

式中: $E_{x_{max}}$ 为某指标对应各个等级标准期望中的最大值。

评价指标与一维云模型相同,根据式(13)得出多维云模型各指标云数字特征,如表 10 所示。其中, H_e 根据 $E_n/3$ 计算,统一取值 0.09。

表 10 多维云模型各指标云数字特征

Table 10 Cloud numerical characteristics of various indicators under multi-dimensional cloud model

岩爆等级	σ_{θ}/σ_c			σ_c/σ_t			W_e		
	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e
I	0.15	0.283	0.09	0.100	0.285	0.09	0.100	0.291	0.09
II	0.40	0.283	0.09	0.335	0.285	0.09	0.350	0.291	0.09
III	0.60	0.283	0.09	0.585	0.285	0.09	0.625	0.291	0.09
IV	0.85	0.283	0.09	0.855	0.285	0.09	0.875	0.291	0.09

由于二维以上云模型的不可视化,为了直观地说明多维云模型的情况,以 2 个评价因子的二维综合正态云模型图(如图 5 所示)进行示意。 σ_{θ}/σ_c 与 σ_c/σ_t 评价体系下 4 个岩爆等级的综合云模型。

3.2 评价结果及分析

将多维云模型的数字特征代入式(13),可建立 4 个岩爆等级的多维云模型生成器,并得到所属等级的隶属度,如表 11 所示。

根据最大隶属度原则分析多维云模型计算结果,得到以下结论。

1) 顶板围岩在 50 m ~ -450 m 中段岩爆等级隶属度排序为:弱岩爆(0.170 0 ~ 0.193 0) > 中岩爆(0.066 2 ~ 0.102 1) > 无岩爆 > 强岩爆。

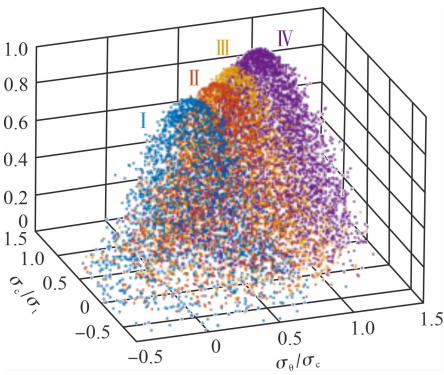


图 5 二维评价指标下综合云模型示意图

Fig. 5 Chart of comprehensive cloud model under two-dimensional evaluation indicators

表 11 多维云模型下各岩爆等级隶属度汇总

Table 11 Summary of subordination degrees of rockburst levels under multi-dimensional cloud model

评价对象	中段	隶属度 μ_i				岩爆等级
		无岩爆	弱岩爆	中岩爆	强岩爆	
顶板围岩	50 m	0.061 4	0.187 3	0.066 2	0.002 5	II
	0 m	0.058 9	0.189 9	0.070 1	0.002 8	II
	-50 m	0.055 2	0.192 2	0.075 5	0.003 2	II
	-100 m	0.052 1	0.193 0	0.079 6	0.003 6	II
	-150 m	0.047 4	0.192 5	0.085 5	0.004 3	II
	-200 m	0.044 7	0.191 3	0.088 6	0.004 7	II
	-250 m	0.040 2	0.187 8	0.093 3	0.005 4	II
	-300 m	0.037 1	0.184 3	0.096 2	0.005 9	II
	-350 m	0.033 4	0.178 9	0.099 2	0.006 5	II
	-400 m	0.030 4	0.173 6	0.101 1	0.007 1	II
矿体	-450 m	0.028 7	0.170 0	0.102 1	0.007 4	II
	50 m	0.004 5	0.067 0	0.090 1	0.016 9	III
	0 m	0.003 3	0.055 6	0.082 8	0.017 6	III
	-50 m	0.002 1	0.041 7	0.071 3	0.018 0	III
	-100 m	0.001 4	0.032 2	0.061 5	0.017 9	III
	-150 m	0.000 7	0.020 7	0.046 8	0.016 8	III
	-200 m	0.000 5	0.015 8	0.039 3	0.015 9	III
	-250 m	0.000 2	0.009 7	0.028 1	0.013 8	III
	-300 m	0.000 1	0.006 6	0.021 5	0.012 1	III
	-350 m	0.000 1	0.004 0	0.015 0	0.010 0	III
底板围岩	-400 m	0	0.002 6	0.010 8	0.008 3	III
	-450 m	0	0.002 0	0.008 7	0.007 4	III
	50 m	0.031 6	0.165 6	0.092 5	0.006 0	II
	0 m	0.028 3	0.161 0	0.095 9	0.006 8	II
	-50 m	0.024 1	0.152 9	0.099 5	0.007 9	II
	-100 m	0.020 9	0.145 0	0.101 3	0.008 7	II
	-150 m	0.016 6	0.131 3	0.102 1	0.010 1	II
	-200 m	0.014 4	0.123 1	0.101 5	0.010 8	II
	-250 m	0.011 2	0.108 5	0.099 0	0.011 9	II
	-300 m	0.009 3	0.098 1	0.096 0	0.012 6	II
	-350 m	0.007 3	0.085 5	0.091 3	0.013 4	III
	-400 m	0.005 9	0.075 5	0.086 6	0.013 9	III
	-450 m	0.005 1	0.069 6	0.083 4	0.014 1	III

2)矿体在50 m ~ -450 m中段岩爆等级隶属度排序为:中岩爆(0.008 7 ~ 0.090 1) > 弱岩爆(0.002 0 ~ 0.067 0) > 强岩爆 > 无岩爆。

3)底板围岩在50 m ~ -300 m中段岩爆等级隶属度排序为:弱岩爆(0.098 1 ~ 0.165 6) > 中岩爆(0.092 5 ~ 0.102 1) > 无岩爆 > 强岩爆。在-350 m ~ -450 m中段岩爆等级隶属度排序为:中岩爆(0.083 4 ~ 0.091 3) > 弱岩爆(0.069 6 ~ 0.085 5) > 强岩爆 > 无岩爆。

4 结 论

1)通过文献调研,选取了多个相似工况的岩爆评价指标权重,基于消除云雾化的云模型,对权重因子进行融合,最终确定岩石应力系数 σ_0/σ_c 、岩石脆性系数 σ_c/σ_t 与岩石弹性应变能指数 W_e 权重因子分别为0.352 3,0.287 7与0.360 0,并以此构建了该矿山矿岩岩爆倾向性评价体系。

2)通过建立一维云评价模型,对该矿山设计开采水平顶板围岩、矿体、底板围岩进行分析,结果表明,在开采水平开采范围内,顶板围岩整体为弱岩爆倾向,矿体整体为中岩爆倾向,底板围岩整体为弱岩爆倾向。

3)通过建立多维云评价模型,对该矿山设计开采水平顶板围岩、矿体、底板围岩进行分析,结果与一维云评价模型一致,即在设计开采水平,顶板围岩整体为弱岩爆倾向,矿体整体为中岩爆倾向,底板围岩整体为弱岩爆倾向。

[参 考 文 献]

[1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2 803 - 2 813.

[2] 张镜剑,傅冰骏.岩爆及其判据和防治[J].岩石力学与工程学报,2008,27(10):2 034 - 2 042.

[3] 殷志强,李夕兵,董陇军,等.动静组合加载条件岩爆特性及倾向性指标[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3 249 - 3 256.

[4] 梁伟章,赵国彦.深部硬岩长短期岩爆风险评估研究综述[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):19 - 39.

[5] 宫凤强,闫景一,李夕兵.基于线性储能规律和剩余弹性能指数的岩爆倾向性判据[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):1 993 - 2 014.

[6] 胡建华,黄鹏莅,周坦,等.岩爆倾向性的改进有限云评价模型与工程应用[J].中国安全科学学报,2022,32(2):90 - 98.

[7] 王元汉,李卧东,李启光,等.岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J].岩石力学与工程学报,1998,17(5):15 - 23.

[8] 王迎超,靖洪文,张强,等.基于正态云模型的深埋地下工程岩爆烈度分级预测研究[J].岩土力学,2015,36(4):1 189 - 1 194.

[9] 裴启涛,李海波,刘亚群,等.基于组合赋权的岩爆倾向性预测灰评估模型及应用[J].岩土力学,2014,35(增刊1):49 - 56.

[10] 陈鹏宇,余宏明,师华鹏.基于权重反分析和标准化模糊综合评价的岩爆预测模型[J].岩石力学与工程学报,2014,33(10):2 154 - 2 160.

[11] 贾义鹏.岩爆预测方法与理论模型研究[D].杭州:浙江大学,2014.

[12] 周科平,林允,胡建华,等.基于熵权-正态云模型的岩爆烈度分级预测研究[J].岩土力学,2016,37(增刊1):596 - 602.

[13] 邱道宏,李术才,张乐文,等.基于模型可靠性检查的QGA-SVM岩爆倾向性分类研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(5):981 - 991.

[14] 过江,张为星,赵岩.岩爆预测的多维云模型综合评判方法[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1 199 - 1 206.

Comprehensive evaluation of deep mine rockburst proneness based on a multi-dimensional cloud model

Wang Daolin¹, Tian Minghua², Zhu Debin^{2,3}, Wen Bin², Liu Zhongzheng², Dai Yongli², Chen Qiusong¹
(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University; 2. Guizhou Lufa Industry Co., Ltd.; 3. Regional Geological Survey Institute, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development Guizhou Province)

Abstract: The rockburst proneness study is of great significance for safe operation in deep mines. Taking a mine as the research subject, a combination of one-dimensional and multi-dimensional cloud models was used to construct an index system using the rock stress coefficient, rock brittleness coefficient, and rock elastic strain energy index, for evaluating the rock burst proneness of ore rocks with 3 types of lithology in different mining levels. The results showed that within the designed mining range of the mine (levels from 50 m to -450 m), the roof dolomite exhibited an overall lesser rockburst proneness, the ore body showed a moderate rockburst proneness, and the surrounding rock of the floor exhibited an overall lesser rockburst proneness.

Keywords: rockburst proneness; cloud model; deep mining; stress coefficient; brittleness coefficient; elastic strain energy