

基于熵权-正态云模型的岩爆烈度分级预测研究

周科平^{1,2}, 林 允^{1,2}, 胡建华^{1,2}, 周彦龙^{1,2}

(1. 中南大学 湖南省深部金属矿开发与灾害控制重点实验室, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 岩爆是深埋地下工程主要的工程地质灾害之一, 其烈度分级预测是必须解决的岩石工程重大问题。针对岩爆烈度分级的不确定性, 选取岩石单轴抗压强度与抗拉强度比 σ_c/σ_t 、切向应力与岩石单轴抗压强度比 σ_θ/σ_c 、弹性变形能指数 W_{et} 和岩石完整性系数 K_v 等定量化指标建立评价指标体系, 应用熵权法确定各评价指标权重, 结合云理论建立了岩爆烈度分级预测的熵权-正态云模型。以国内外 12 组典型岩爆工程实例对所建模型进行检验, 并与逼近理想解法、高斯径向基函数法的判别结果及实际情况进行对比。为进一步考察该模型的有效性和实用性, 利用该模型对终南山公路隧道工程竖井的岩爆实例进行分析。研究结果显示, 基于熵权-正态云模型的岩爆判别预测结果与实际岩爆情况较吻合, 表明熵权-正态云模型在研究岩爆烈度分级预测中具有良好的实用性和可靠性, 可为深部地下工程岩爆烈度分级预测提供一种新思路。

关 键 词: 岩爆预测; 岩爆分级; 熵权; 云模型

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 增 1-0596-07

Grading Prediction of rockburst intensity based on entropy and normal cloud model

ZHOU Ke-ping^{1,2}, LIN Yun^{1,2}, HU Jian-hua^{1,2}, ZHOU Yan-long^{1,2}

(1. Hunan Key Laboratory of Mineral Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Rockburst is one of the main engineering geological hazards occurring in the deep underground engineering construction. The classification of rockburst is an important issue which must be resolved in many underground engineering. Four quantitative indices including the ratio of rock's compressive-tensile strength σ_c/σ_t , the stress coefficient of rock σ_θ/σ_c , the elastic energy index of rock W_{et} and integrality coefficient K_v are chosen as the predictor variables of rockburst, according to the unascertained factors of classification prediction of rockburst. The entropy method is adopted to determine the weighting coefficient for each evaluation index. Based on entropy method and the unascertained measurement theory, with 12 groups of typical engineering examples, rockbursts at home and abroad, an entropy and the normal cloud model to predict the possibility and classification of rockburst is established. Then the proposed model is validated with twelve typical rock projects and compared with the results of the technique for order preference by similarity to ideal solution method, the radial basis function-auto-regression method and the actual records. And then the model has applied to rockburst predicting calculation of Zhongnanshan tunnel ventilation shaft to study the effectiveness and feasibility of the model. The obtained results show a good agreement with practical rockburst classification. The results show the normal cloud model effective and available, and can be applied to the prediction for the possibility and classification of rockburst intensity in deep underground engineering.

Keywords: rockburst forecast; rockburst classification; entropy; cloud model

1 引 言

岩爆是深部岩体工程开挖或开采过程常见的

一种地质灾害, 在高地应力条件下由于岩体工程开挖卸荷引起围岩内应力场重分布, 导致硬脆性围岩中储存的弹性应变能突然释放而产生爆裂、松脱、

收稿日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51274253, No.51474252); “十二五” 国家科技支撑计划 (No. 2013BAB02B05); 山东黄金资源综合利用示范基地(2014年)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51274253, 51474252), the National Key Technology R&D Program during the 12th Five-year Plan Period of China (2013BAB02B05) and the Demonstration Base for Comprehensive Utilization of Gold Resource in Shandong(2014).

第一作者简介: 周科平, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事矿山岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: kpzhou@vip.163.com

通讯作者: 胡建华, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 从事高效安全采矿技术与岩土工程稳定性分析研究。E-mail: hujh21@csu.edu.cn

剥离、弹射甚至抛掷等破坏现象的一种动力失稳地质灾害^[1]。岩爆的发生直接威胁作业人员和设备的安全, 影响工程进度, 甚至摧毁整个工程。随着埋深的增加或应力水平的提高, 我国地下工程的岩爆呈频发趋势^[2]。

国内外专家、学者已经从不同角度对岩爆的发生机制进行了理论研究, 并提出了相应的岩爆烈度预测方法。早期主要是从单一因素出发进行岩爆的预测研究, 在强度、刚度、能量、突变等方面进行了理论研究, 并提出的 Russenes 判据^[3]、王元汉判据^[4]、陆家佑判据^[5]。随研究的深入, 逐渐认识到岩爆是非常复杂的非线性动力学现象, 受多种因素的共同作用, 因此开始采用智能方法综合预测研究岩爆的多因素。周科平等^[6]利用 GIS 的空间数据分析技术和模糊自组织神经网络, 建立了基于 GIS 技术的岩爆倾向性模糊自组织神经网络模型。王元汉等^[4]采用模糊数学综合评判方法, 选取影响岩爆的一些主要因素预测研究岩爆的发生与否及烈度的大小。董陇军等^[7]将随机森林分类方法应用于岩爆等级判定问题中建立了岩爆预测的随机森林模型, 并进行了工程实例预测。宫凤强等^[8]基于距离判别分析理论, 建立了岩爆发生和烈度分级预测的距离判别分析模型对岩爆发生和烈度分级进行了预测。赵洪波等^[9-10]建立支持向量机岩爆分类预测模型, 并有效地进行了岩爆的预报。周科平等^[11]运用粗糙集理论和逼近理想解排序法, 选取相关指标体系, 建立了岩爆预测的 RS-TOPSIS 模型并进行了工程实例预测, 取得了良好效果。胡建华等^[12]基于物元可拓理论, 建立了岩爆预测的改进物元可拓模型, 并进行了工程实例应用。史秀志等^[13]运用未确知测度理论建立了岩爆烈度预测的未确知测度模型, 取得了良好的岩爆预测效果。以上预测岩爆的理论方法均从不同的角度对岩爆进行预测, 并取得了一定的预测效果, 由于岩爆是一种非常复杂的非线性动力学现象, 需要多种方法结合和途径的互补才能达到准确地预测岩爆烈度的目的, 引入新的智能方法开展岩爆发生及烈度分级预测的研究仍十分必要。

本文以不确定性人工智能^[14]的理论和思想为基础, 将云理论运用到岩爆发生和烈度分级预测中。采用熵权法^[15]确定各指标的权重, 建立了岩爆预测的熵权法-正态云模型, 借助于国内外相关文献中的现场实测资料和岩爆判别结果检验模型的可行性和有效性, 利用正态云模型对岩爆实例进行分析, 为岩爆预测问题的研究提供了一条新思路。

2 熵权-正态云岩爆预测模型

2.1 云模型理论

云模型是李德毅等^[16]在随机数学和模糊数学的基础上提出的处理不确定性知识定性定量转换的数学模型, 已成功运用到数据挖掘、决策分析、图像处理、围岩等级评价等领域。

(1) 云的定义

设 X 是一个用精确数值表示的定量集合, $X = \{x\}$, 称为论域, A 是 X 上的定性概念 (模糊集合)。对于任意元素 x 都存在一个有稳定倾向的随机数 $\mu(x) \in [0, 1]$, 叫做 x 对 A 的确定度, 确定度在 X 上的分布叫做云^[17]。从云的基本定义可知, x 与它对概念 A 的确定度之间的映射是一对多的转换, 而不是传统的模糊隶属函数中的一对一的映射关系^[18]。

如果云分布满足: $x \sim N(E_x, E_n'^2)$, 其中, $E_n' \sim N(E_n, H_e^2)$, 且对 A 的确定度满足:

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2E_n'^2}} \quad (1)$$

式中: $\mu(x)$ 为确定度; x 为变量值; E_x 为期望; E_n' 为熵。云称在论域 X 上的分布为正态云^[19], 正态云模型是最基本的云模型, 具有普适性, 相关研究表明, 大量的自然科学中定性知识的云模型的期望曲线都近似服从正态或半正态分布。本文采用正态云模型进行岩爆烈度分级研究。

(2) 云的数字特征

云的数字特征主要用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 表征, 期望 E_x 表示概念在论域空间的中心值; 熵 E_n 表示论域空间中可被定性概念接受的云滴的取值范围; 超熵 H_e 是熵 E_n 的熵, 反映了云滴的离散程度。按云模型概念可知, 岩爆烈度评价指标对某一等级标准的云数字特征可按式 (2) 计算^[19]:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \frac{C_{\max} + C_{\min}}{2} \\ E_n &= \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \\ H_e &= K \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$ 分别为对应等级标准的最大、最小边界值; k 为常数, 根据变量的模糊阈值进行调整, 本文统一取 0.01。对于单边界限的变量, 如 $[C_{\min}, +\infty)$ 或 $(-\infty, C_{\max}]$, 可先依据变量的上、下限确定缺省的边界参数, 如某一指标的下限最小为 0, 那么 $(-\infty, C_{\max}]$ 类型的变量的下限可以取值为 0, 再根据上述公式计算云模型的数字特征。

(3) 云发生器

云发生器是云模型应用到实际的关键, 包括正向云发生器和逆向云发生器。正向云发生器是从定性到定量的映射, 根据云的数字特征 (E_x 、 E_n 、 H_e) 产生云滴, 而逆向云发生器是实现定量值到定性概念的转换模型^[20]。由于岩爆预测是从定性到定量的研究, 本文采用正向云发生器, 具体算法为

① 根据指标分级标准计算熵 E_n 和超熵 H_e , 生成正态分布的随机数 $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$ 。

② 根据特定输入值 x 和期望值 E_x , 利用式 (1) 计算确定度。

2.2 岩爆预测评价指标的选取

岩爆的影响因素多, 发生机制复杂, 本文根据岩爆的特点及成因, 综合岩爆发生的内外因条件, 选取岩石单轴抗压强度与抗拉强度比 σ_c / σ_t 、切向应力与岩石单轴抗压强度比 σ_θ / σ_c 、弹性变形能指数 W_{et} 和岩体完整性系数 K_v 作为岩爆倾向性预测的评价指标。参照王元汉^[4]及周科平^[11]的研究成果, 建立岩爆烈度和各评价指标的关系, 见表 1。

表 1 岩爆预测指标及分级标准
Table 1 Rockburst prediction indexes and classification standard

指标	岩爆等级			
	无岩爆 I 级	弱岩爆 II 级	中等岩爆 III 级	强烈岩爆 IV 级
σ_c / σ_t	>40.00	26.70~40.00	14.50~26.70	<14.50
σ_θ / σ_c	<0.30	0.30~0.50	0.50~0.70	>0.70
W_{et}	<2.00	2.00~4.00	4.00~6.00	>6.00
K_v	<0.55	0.55~0.65	0.65~0.75	>0.75

2.3 基于熵权法的指标权重确定

权重是表明岩爆评价指标重要性的权数, 表示各评价指标在总体评价中所起的作用, 为减少人为主观因素的影响, 采用熵权法确定各评价指标的权重。熵权法的基本思路是根据指标变异性的确定客观权重, 若某个指标的信息熵 E_j 越小, 表明指标值的变异程度越大, 提供的信息量越多, 其权重也就越大。相反, 若某个指标的信息熵 E_j 越大, 其权重就越小^[21]。具体步骤为

① 设 m 个评价对象和 n 个评价指标中的第 i 个对象的第 j 个指标取值为 x_{ij} , 构造原始评价指标数据矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

② 对矩阵 $\mathbf{X}$ 进行数据归一化处理。对越大越优的指标有

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (3)$$

对越小越优的指标有

$$y_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (4)$$

③ 求各指标的信息熵。一组数据的信息熵:

$$E_j = -\ln(m)^{-1} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

式中: $P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}$, 如果 $P_{ij} = 0$, 则定义 $\ln P_{ij} = 0$ 。

④ 确定各指标权重。通过信息熵计算各指标的权重:

$$\omega_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum E_j} \quad (6)$$

2.4 综合确定度

根据正向云发生器的算法, 计算得到某评价指标数据 x 隶属于某云的确定度 $\mu(x)$, 结合各评价指标的权重, 根据式 (1)、(6) 计算得到综合确定度 U :

$$U = \sum_{j=1}^m \mu(x) \omega_j \quad (7)$$

式中: $\mu(x)$ 为各指标确定度; ω_j 为评价指标的权重。

2.5 具体实现过程

把每一定性的岩爆烈度作为一个自然语言的表达, 并假设待预测样本的实测数据隶属于某岩爆烈度的隶属度服从正态分布, 则基于熵权-正态云岩爆预测模型的基本思想是: 首先根据岩爆烈度指标及其分级标准计算相应等级的云数字特征; 其次由云发生器生成各预测指标隶属于某岩爆烈度的云模型, 并根据样本的实测数据计算各指标对应于各级别的确定度; 然后采用熵权法计算各指标的权重, 计算综合确定度; 最后根据最大隶属度原则判定岩爆级别。具体流程如图 1 所示。

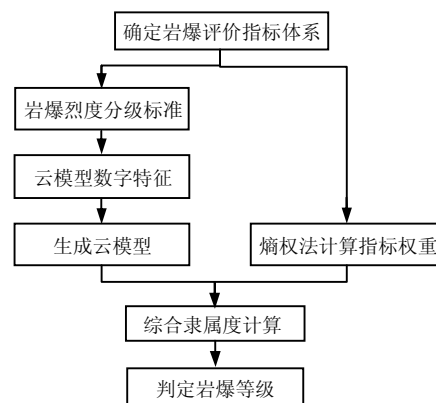


图 1 岩爆烈度预测的云模型计算过程
Fig.1 Computation process of classifying the rockburst intensity based on cloud model

3 岩爆预测云模型的生成与检验

3.1 模型生成

基于正态云模型理论和式(2)确定云模型参数 E_x 、 E_n 和 H_e , 采用正向云发生器分别对评价指标即岩石单轴抗压强度与抗拉强度比 σ_c/σ_t 、切向应力与岩石单轴抗压强度比 σ_θ/σ_c 、岩石完整性系数 K_v 及弹性变形能指数 W_{et} 生成相对应的云模型如图 2 所示。

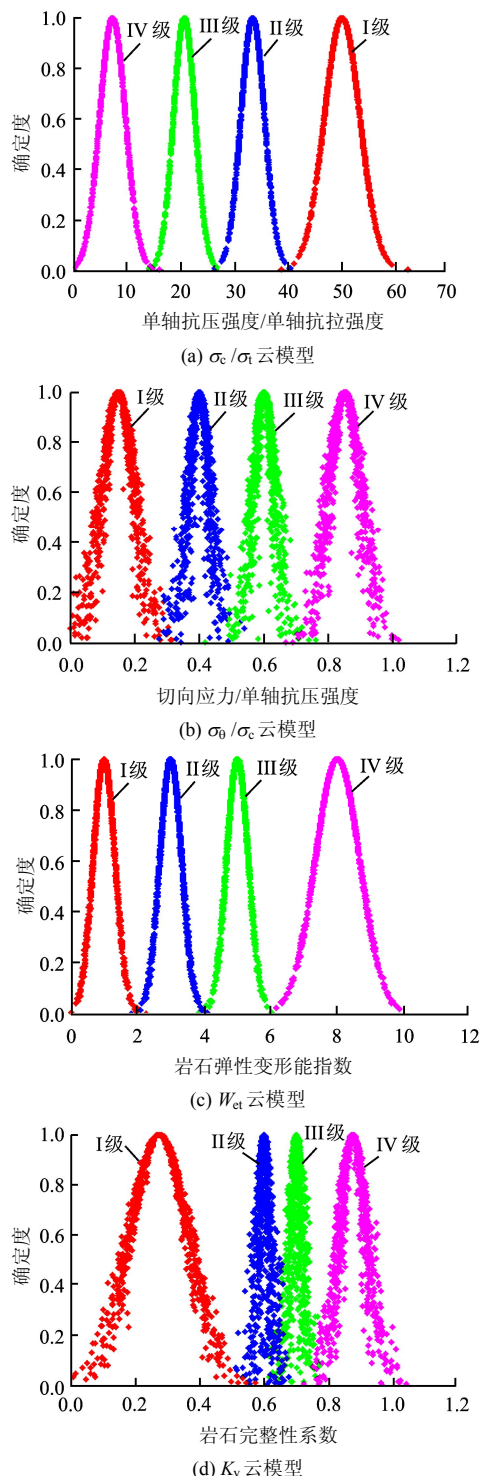


图 2 各评价因子隶属于岩爆级别的云模型
Fig.2 Cloud model for each evaluation index

图 2(a)中, 从左至右分别代表岩爆烈度分级指标 IV 级至 I 级对应的云。图 2(b)~2(d)中, 从左至右分别代表岩爆烈度分级指标 I 级至 IV 级对应的云。

3.2 模型检验

为检验本文所采用的熵权-正态云模型的可行性和有效性, 结合国内外 12 组典型岩爆实例^[4, 11-13] (见表 2) 进行岩爆烈度分级预测, 并将评价结果与 RS-TOPSIS 法评价结果以及实际情况进行对比检验模型的可行性。

表 2 国内外若干地下工程岩爆分析数据

Table 2 Data analyst of rockburst at some underground engineering sites

样本	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v
1	13.2	0.65	6.7	0.81
2	17.5	0.45	5.1	0.68
3	20.9	0.39	4.6	0.65
4	13.2	0.66	6.8	0.82
5	28.4	0.38	5.3	0.58
6	41.0	0.20	1.7	0.50
7	15.0	0.53	6.5	0.70
8	28.2	0.14	4.0	0.51
9	21.7	0.42	4.5	0.67
10	21.7	0.39	5.0	0.73
11	29.4	0.41	7.3	0.64
12	17.5	0.54	6.6	0.61

按照的信息熵的基本原理, 根据熵权法求权重的基本步骤求取样本中各评价指标的权重, 其中在归一化数据时, σ_c/σ_t 为越大越好, 采用式(3)计算, 其他 3 个因子为越小越好型, 采用式(4)归一化计算。计算得到各评价指标的熵值和熵权见表 3。

表 3 各评价指标熵权

Table 3 Entropy of evaluation indices

评价指标	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v
熵值	0.838 8	0.896 0	0.874 7	0.906 6
熵权	0.333 0	0.215 0	0.259 0	0.193 0

以样本 12 为例来说明确定度计算过程。首先, 根据云模型和样本的 4 个指标数据生成每个指标值隶属于每个岩爆等级的确定度, 见表 4。由式(7)和表 3 中的各评价指标的熵权值计算得到综合确定度 $U = [0.000\ 4, 0.134\ 7, 0.147\ 8, 0.029\ 4]$, $U_{III} > U_{II} > U_{IV} > U_I$, 表明样本 12 的岩爆烈度隶属于 III 级的确定度最大, 隶属于 II 级有一定的可能性, 隶属于 I 级和 IV 的可能性较小, 由于 U_{III} 、 U_{II} 非常接近, 最后根据最大综合确定度值判别样本的岩爆级

别为 II、III、偏 III 级。

表 4 样本 12 的各指标确定度

Table 4 Certainty grade of evaluation indices of sample 12

确定度	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v
$\mu(I)$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.001 8
$\mu(II)$	0.000 0	0.003 2	0.000 0	0.694 5
$\mu(III)$	0.311 6	0.200 1	0.000 0	0.005 0
$\mu(IV)$	0.000 1	0.000 0	0.113 2	0.000 0

按照上述过程得到 12 组工程实例的岩爆烈度判定结果,并与 RS-TOPSIS 方法的判别结果及实际岩爆等级进行对比,见表 5。结果显示本文模型判别结果全部正确,表明熵权-正态云模型用于岩爆烈度分级预测是可行的,同时可知岩爆烈度是一个定性概念,在分级过程中受不确定因素影响,应用云数字特征表示岩爆烈度的不确定性具有优越性,利用以正态分布和正态隶属函数为基础的正态云发生器,可将岩爆烈度的模糊性和随机性转化为确定度这个定量值,结果便于工程应用,同时此方法具有很好的继承性,即只要获得深部地下工程的 4 个预测指标值,就可迅速、准确地对岩爆等级进行判定

预测,在实际工程中具有一定的应用意义。

4 工程应用

秦岭终南山公路隧道是国家高速公路网包头至茂名线控制性工程,采用 3 座竖井进行通风,其中 2[#]竖井是通风系统的主体工程。2[#]竖井中心地面高程为 1 703 m,竖井内径为 11.2 m,最大开挖外径为 13.32 m,井深为 661 m。竖井通过的地层为上部 30 m 为第四系全新统坡洪积层,II 类围岩,下部为混合片麻岩,部分地段夹黑云母斜长角闪片岩残留体,岩体受构造影响轻微,岩体完整,VI 类围岩。在竖井埋深大的地段,最大水平主应力测试值为 21.04 MPa,方向 NW28°,属高地应力水平,可能会产生岩爆,因此,有必要对其进行岩爆预测,以采取相应的措施保障安全。

结合王羽等^[22]给出的秦岭终南山公路隧道工程岩爆实测数据,利用本文方法预测的岩爆预测结果见表 6。与 RBF-AR 法的预测结果及实际岩爆情况对比分析结果表明,本文预测结果完全符合实际,且与 RBF-AR 法的判别结果一致,表明熵权-正态云模型在岩爆烈度分级预测中的有效性与可行性。

表 5 岩爆烈度判别结果

Table 5 Results of rockburst intensity prediction

样本	综合确定度				判别结果	RS-TOPSIS	实际级别
	$U(I)$	$U(II)$	$U(III)$	$U(IV)$			
1	0.000 00	0.000 00	0.069 850	0.113 73	III-IV	IV	IV
2	0.000 00	0.070 02	0.438 010	0.000 20	III	III	III
3	0.000 15	0.214 97	0.467 730	0.000 00	III	III	III
4	0.000 00	0.000 00	0.045 400	0.146 98	IV	IV	IV
5	0.001 09	0.281 65	0.171 630	0.000 08	II	II	II
6	0.171 38	0.001 44	0.000 000	0.000 00	I	I	I
7	0.000 02	0.001 70	0.228 900	0.024 87	III	III	III
8	0.217 62	0.026 29	0.002 954	0.000 00	I	I	I
9	0.000 05	0.173 18	0.418 120	0.000 07	III	III	III
10	0.000 07	0.201 04	0.595 100	0.002 12	III	III	III
11	0.000 16	0.295 08	0.007 400	0.150 12	II	II	II
12	0.000 35	0.134 73	0.147 770	0.029 37	II-III	III	III

表 6 终南山隧道竖井工程岩爆实测数据与判别结果

Table 6 Measured data for rockburst and prediction of Zhongnanshan tunnel ventilation shaft

竖井深度/m	σ_c/σ_t	σ_θ/σ_c	W_{et}	K_v	本文结果	RBF-AR	实际级别
-119	22.7	0.35	3.31	0.63	II	II	弱岩爆
-283	13.9	0.72	9.05	0.91	IV	IV	强烈岩爆
-316	14.4	0.64	7.74	0.96	IV	IV	强烈岩爆
-467	16.5	0.47	5.52	0.84	III	III	中等岩爆
-659	18.6	0.52	4.16	0.87	III	III	中等岩爆

5 结 论

(1) 以国内外 12 组典型岩爆工程实例为样本, 选取岩石的应力系数 σ_θ/σ_c 、岩石脆性系数 σ_c/σ_t 、弹性能量指数 W_{et} 及岩石完整性系数 K_v 作为岩爆烈度分级的评价指标, 采用熵权法对评价指标进行数据挖掘, 得到了各评价指标的权重。

(2) 基于熵权法数据处理结果, 结合不确定性人工智能思想中的云理论建立了岩爆烈度分级预测的熵权-正态云模型。通过国内外 12 组典型的岩爆工程实例对本文模型进行检验, 判别结果与实际情况吻合, 表明熵权-正态云模型在岩爆烈度分级预测上具有较高的准确性和可靠性。

(3) 运用岩爆预测的熵权-正态云模型对秦岭终南山公路隧道工程的 2[#]竖井进行了岩爆预测, 预测结果符合实际岩爆等级, 表明基于熵权-正态云模型的岩爆烈度分级预测方法具有一定的实际应用价值, 为岩爆预测问题提供了一个可行的定量方法。

云理论用于岩爆预测还只是初步尝试, 有一些问题仍需要进一步研究, 如影响岩爆的指标的分级标准的划分以及指标如何选取等, 应进一步研究使得岩爆预测的云模型更加完善, 预测结果更加符合实际。

参 考 文 献

- [1] 许迎年, 徐文胜, 王元汉, 等. 岩爆模拟试验及岩爆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1462—1466.
XU Ying-nian, XU Wen-sheng, WANG Yuan-han, et al. Simulation testing and mechanism studies on rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1462—1466.
- [2] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 等. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, ZHANG Chuan-qing, et al. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [3] 蔡嗣经, 张禄华, 周文略. 深井硬岩矿山岩爆灾害预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(5): 17—20.
CAI Si-jing, ZHANG Lu-hua, ZHOU Wen-lue. Research on prediction of rock burst in deep hard-rock mines[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2005, 1(5): 17—20.
- [4] 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): 493—501.
WANG Yuan-han, LI Wo-dong, LI Qi-guang, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(5): 493—501.
- [5] PACK K H, LEE J G, ADISORN O. Seepage force in a drained circular tunnel: an analytical approach[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2008, 45(3): 432—436.
- [6] 周科平, 古德生. 基于 GIS 的岩爆倾向性模糊自组织神经网络分析模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3093—3097.
ZHOU Ke-ping, GU De-sheng. Application of GIS-based neural network with FUZZY self-organization to assessment of rockburst tendency[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(18): 3093—3097.
- [7] DONG Long-jun, LI Xi-bing, PENG Kang. Prediction of rockburst classification using random forest[J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2013, 23(2): 472—477.
- [8] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1013—1017.
GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. A distance discriminate analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 1013—1017.
- [9] 赵洪波. 岩爆分类的支持向量机方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 642—644.
ZHAO Hong-bo. Classification of rockburst using support vector machine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 642—644.
- [10] 祝云华, 刘新荣, 周军平. 基于 V-SVR 算法的岩爆预测分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(3): 277—281.
ZHU Yun-hua, LIU Xin-rong, ZHOU Jun-ping. Rockburst prediction analysis based on V-SVR algorithm[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(3): 277—281.
- [11] 周科平, 雷涛, 胡建华. 深部金属矿山 RS-TOPSIS 岩爆预测模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,

- 32(增刊 2): 3706—3710.
- ZHOU Ke-ping, LEI Tao, HU Jian-hua. RS-TOPSIS Model of rockburst prediction in deep metal mines and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 3706—3710.
- [12] 胡建华, 尚俊龙, 周科平. 岩爆烈度预测的改进物元可拓模型与实例分析[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(2): 496—501.
- HU Jian-hua, SHANG Jun-long, ZHOU Ke-ping. Improved matter-element extension model and its application to prediction of rockburst intensity[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2013, 23(2): 496—501.
- [13] 史秀志, 周健, 董蕾, 等. 未确知测度模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2721—2725.
- SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, DONG Lei, et al. Application of unascertained measurement model to prediction of classification of rockburst intensity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.1): 2720—2726.
- [14] 李德毅, 杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- LI De-yi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [15] 王迎超, 尚岳全, 孙红月, 等. 基于熵权—理想点法的岩爆烈度预测模型及其应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 218—221.
- WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, et al. Research and application of rockburst intensity prediction model based on entropy coefficient and ideal point method[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(2): 218—221.
- [16] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15—20.
- LI De-yi, MENG Hai-jun, SHI Xue-mei. Membership cloud and membership generators[J]. **Journal of Computer Research and Development**, 1995, 32(6): 15—20.
- [17] 李健, 汪明武, 徐鹏, 等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 84—86.
- LI Jian, WANG Ming-wu, XU Peng, et al. The cloud model for classification of stability of surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 36(1): 83—87.
- [18] 龚艳冰. 基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 169—173.
- GONG Yan-bing. Comprehensive assessment on ecological risk of Hexi Corridor urbanization based on normal cloud model and entropy weight[J]. **Journal of Arid Land Resources and Environment**, 2012, 26(5): 169—173.
- [19] 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): 1190—1193.
- WANG Ying-chao, JING Hong-wen, ZHANG Qiang, et al. A normal cloud model-based study of grading prediction of rockburst intensity in deep underground engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 1190—1193.
- [20] 田玉刚, 杜渊会, 覃东华, 等. 基于数据场和云模型的洪水灾害风险等级评估[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(8): 158—162.
- TIAN Yu-gang, DU Yuan-hui, QIN Dong-hua, et al. Flood risk evaluation methods based on data field and cloud model[J]. **China Safety Science Journal**, 2011, 21(8): 158—162.
- [21] 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): 51—55.
- PEI Qi-tao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. A grey evaluation model for predicting rockburst proneness based on combination weight and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.1): 51—55.
- [22] 王羽, 许强, 柴贺军, 等. 工程岩爆灾害判别的RBF-AR 耦合模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1944—1949.
- WANG Yu, XU Qiang, CHAI He-jun, et al. Rock burst prediction in deep shaft based on RBF-AR model[J]. **Journal of Jilin University(Earth Science Edition)**, 2013, 43(6): 1944—1949.