

地下工程岩爆灾害预测的属性综合评价模型

王李管, 裴安磊, 彭平安

中南大学资源与安全工程学院; 中南大学数字矿山研究中心; 长沙迪迈数码科技股份有限公司, 长沙 410083

摘要 针对地下工程岩爆灾害预测各种方法的局限性以及预报准确率低的现状, 基于属性数学理论与方法, 选取围岩最大切向应力与岩石单轴抗压强度之比、脆性系数和弹性能量指数作为岩爆灾害预测的主要评价指标, 建立了岩爆灾害预测的属性综合评价模型, 对岩爆的发生与否及其烈度进行了预测。应用属性数学理论, 构造了各评价指标的属性测度函数, 并利用相似数定义相似权的方法确定各指标的权重以计算综合属性测度, 最后应用置信度准则进行属性识别, 给出评价结果。以10组典型地下工程为例, 对该模型进行了验证, 结果表明, 该模型评价结果与实际情况有较好的一致性, 验证了属性综合评价在岩爆灾害预测中的可行性和适用性, 为地下工程岩爆灾害的预测提供了一种新途径。

关键词 地质灾害; 岩爆预测; 属性数学; 属性综合评价; 相似权

中图分类号 TU 45

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.08.002

Attribute Synthetic Evaluation Model for Rockburst Disaster Prediction in Underground Engineering

WANG Liguan, PEI Anlei, PENG Ping'an

School of Resources and Safety Engineering, Central South University; Research Center of Digital Mine, Central South University; Changsha Digital Mine Co., Ltd, Changsha 410083, China

Abstract According to the present situation of the limitation and low accuracy of rockburst disaster prediction in underground engineering, based on the attribute mathematics theory, the ratio of maximum tangential stress to uniaxial compressive strength of rock, brittleness coefficient and elastic energy index are chosen as the discriminant indexes to build an attribute synthetic evaluation model for predicting the rockburst probability and intensity. The attribute measurement functions of each index are constructed based on the attribute mathematics theory, while the synthetic attributive measurement is calculated by the similar weight. Finally, the probability and intensity of rockburst samples are recognized by the confidence criterion. Taking 10 groups of underground engineering projects at home and abroad for example, the model is validated. Results show that the evaluation by this attribute synthetic model has a good consistency with the actual situation, which validates the feasibility and effectiveness of the proposed model for rockburst prediction. The methodology presented in the paper provides a reference for some similar engineering involving rockburst.

Keywords geologic hazard; rockburst prediction; attribute mathematics; attribute synthetic evaluation; similarity weight

岩爆作为“六大工程灾害”之一, 是指在具有高地应力的地下环境中, 完整岩体在开挖卸荷等因素诱导下, 导致内部存储的应变能瞬间释放从而产生的动力失稳地质灾害, 其发

生包含复杂的自然和人为地质作用^[1,2]。由于岩爆极大的破坏性, 常严重影响岩体稳定性及施工人员安全, 轻则破坏地下工程断面和作业装备, 重则造成重大人员伤亡, 因此岩

收稿日期: 2013-11-15; 修回日期: 2014-01-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA060407)

作者简介: 王李管, 教授, 研究方向为数字矿山, 电子邮箱: liguan_wang@163.com

引用格式: 王李管, 裴安磊, 彭平安. 地下工程岩爆灾害预测的属性综合评价模型[J]. 科技导报, 2014, 32(8): 22-26.

爆已经成为岩石力学与地下工程领域内的世界性难题^[3]。

截至目前,学界尚未对岩爆灾害理论与方法形成统一认识^[4],但在岩爆预测方面取得一定成果,并提出一系列预测方法,如可拓工程法^[5]、人工神经网络法^[6]、集对分析法^[7]、模糊数学评判法^[8]、粒子群投影寻踪法^[9]、灰色归类模型法^[10]等。以上方法在岩爆预测中都起到了一定作用,但普遍存在设计参数难以确定、预测结果受人为因素影响较大、适用性不强的缺点,同时由于岩体本身和环境因素的多变性以及各种方法自身的局限性,使得岩爆预测还难以满足工程建设的要求。

岩爆等级预测具有明显的不确定性和非线性,且受到多种因素制约,需要综合多种方法和途径才能达到准确预测岩爆并对其烈度进行分级的目的。基于此,本文选择围岩最大切向应力与岩石单轴抗压强度之比(σ_θ/σ_c)、脆性系数(σ_c/σ_t)和弹性能量指数(W_{el})作为评价指标^[11],构建岩爆综合评价体系,基于属性数学研究方法,将属性综合评价系统运用到岩爆预测中,并采用相似数定义相似权的方法对各项评价指标客观赋权重,最终实现对岩爆等级的评判。

1 属性综合评价模型

属性综合评价方法(attribute synthetic evaluation method, ASAM)是把多个量纲不同的表征待评判事物不同面的统计指标,转换为量纲一的相对评价价值,并加权统计该值从而得到对该事物的整体评判的一种方法。岩爆属性数学综合评价模型主要由3部分组成,即单指标属性测度分析,多指标综合属性测度分析和属性识别。设 X 为评价对象空间,其评价对象 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)有 m 个被评价指标 I_j ($j=1, 2, \dots, m$)。对于 x 的每个评价指标 I_j 的测量值 t_j ,都有 K 个评价等级 C_k ($k=1, 2, \dots, K$),这样就可以确定 t_j 的等级,并对 x 进行综合评价,以确定其等级^[12]。

1.1 单指标属性测度

设被评价对象 x 的第 j 个指标 I_j 的测量值为 t_j ,因此, x 可以表示为一个 m 维向量 $x=(t_1, t_2, \dots, t_m)$ 。对于单指标 I_j 的测量值 t_j ,假设其具有属性 C_k ,则可以通过建立属性测度函数的方式来计算其属性测度 $\mu_{sjk}=\mu(t_j \in C_k, k=1, 2, \dots, K)$ 。属性测度函数的建立如表1所示。

表1中, a_{jk} 满足 $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jk}$,或 $a_{j0} > a_{j1} > \dots > a_{jk}$ 。令

$$b_{jk} = (a_{j(k-1)} + a_{jk})/2, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (1)$$

$$d_j = \min\left\{ \left| b_{jk} - a_{jk} \right|, \left| b_{j(k+1)} - a_{jk} \right| \right\}$$

$$= \min\left\{ \left| \frac{a_{j(k-1)} - a_{jk}}{2} \right|, \left| \frac{a_{jk} - a_{j(k+1)}}{2} \right| \right\}, \quad k=1, 2, \dots, K-1 \quad (2)$$

设 x 的第 j 个指标为 t ,当 $a_{j0} < a_{j1} < \dots < a_{jk}$ 时,单指标测度函数 $\mu_{sjk}(t)$ 表达式为

$$\mu_{sj1}(t) = \begin{cases} 1 & t < a_{j1} - d_{j1} \\ \frac{|t - a_{j1} - d_{j1}|}{2d_{j1}} & a_{j1} - d_{j1} \leq t \leq a_{j1} + d_{j1} \\ 0 & a_{j1} + d_{j1} < t \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{sjk}(t) = \begin{cases} 1 & a_{j(k-1)} + d_{j(k-1)} < t \\ \frac{|t - a_{j(k-1)} + d_{j(k-1)}|}{2d_{j(k-1)}} & a_{j(k-1)} - d_{j(k-1)} \leq t \leq a_{j(k-1)} + d_{j(k-1)} \\ 0 & t < a_{j(k-1)} - d_{j(k-1)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{sjk}(t) = \begin{cases} 0 & t < a_{jk-1} - d_{jk-1} \\ \frac{|t - a_{jk-1} + d_{jk-1}|}{2d_{jk-1}} & a_{jk-1} - d_{jk-1} \leq t \leq a_{jk-1} + d_{jk-1} \\ 1 & a_{jk-1} + d_{jk-1} \leq t \leq a_{jk} - d_{jk} \\ \frac{|t - a_{jk} - d_{jk}|}{2d_{jk}} & a_{jk} - d_{jk} \leq t \leq a_{jk} + d_{jk} \\ 0 & t > a_{jk} + d_{jk} \end{cases} \quad (5)$$

当 $a_{j0} > a_{j1} > \dots > a_{jk}$ 时,单指标测度函数 $\mu_{sjk}(t)$ 表达式为

$$\mu_{sj1}(t) = \begin{cases} 1 & t > a_{j1} + d_{j1} \\ \frac{|t - a_{j1} - d_{j1}|}{2d_{j1}} & a_{j1} - d_{j1} \leq t \leq a_{j1} + d_{j1} \\ 0 & a_{j1} - d_{j1} > t \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{sjk}(t) = \begin{cases} 1 & a_{j(k-1)} - d_{j(k-1)} > t \\ \frac{|t - a_{j(k-1)} - d_{j(k-1)}|}{2d_{j(k-1)}} & a_{j(k-1)} - d_{j(k-1)} \leq t \leq a_{j(k-1)} + d_{j(k-1)} \\ 0 & t > a_{j(k-1)} + d_{j(k-1)} \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{sjk}(t) = \begin{cases} 0 & t > a_{jk-1} + d_{jk-1} \\ \frac{|t - a_{jk-1} - d_{jk-1}|}{2d_{jk-1}} & a_{jk-1} - d_{jk-1} \leq t \leq a_{jk-1} + d_{jk-1} \\ 1 & a_{jk-1} + d_{jk-1} < t < a_{jk} - d_{jk} \\ \frac{|t - a_{jk} + d_{jk}|}{2d_{jk}} & a_{jk} - d_{jk} \leq t \leq a_{jk} + d_{jk} \\ 0 & t < a_{jk} - d_{jk} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, K-1$ 。

表1 单个指标测度的等级划分

Table 1 Grade subdivision of single index

指标	等级				
	C_1	C_2	...	C_{K-1}	C_K
I_1	$a_{10} \sim a_{11}$	$a_{11} \sim a_{12}$...	$a_{1(K-2)} \sim a_{1(K-1)}$	$> \text{或} < a_{1K-1}$
I_2	$a_{20} \sim a_{21}$	$a_{21} \sim a_{22}$...	$a_{2(K-2)} \sim a_{2(K-1)}$	$> \text{或} < a_{2K-1}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
I_m	$a_{m0} \sim a_{m1}$	$a_{m1} \sim a_{m2}$...	$a_{m(K-2)} \sim a_{m(K-1)}$	$> \text{或} < a_{mK-1}$

1.2 多指标综合属性测度

综合属性测度 μ_{sk} 等于各指标的权重 ω_j 与单指标属性测度 $\mu_{sjk}(t)$ 的乘积和, 计算式为

$$\mu_{sk} = \sum_{j=1}^m \omega_j \mu_{sjk} \quad (9)$$

式中, ω_j 为第 j 个指标 I_j 的权重, $\omega_j \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ 。

一般地, 可以通过均值法或专家赋权法确定各指标的权重。然而均值法简单地认为各指标所占权重一致, 该方法过于片面; 专家赋权法则无法避免人为操作所产生的主观偏好性。因此, 提出利用相似数定义相似权的方法来确定各指标的权重, 即首先假定各项指标的权重相同, 即每一项指标的权重均为 $\omega_j = 1/m$ 。此时, 可根据式(10)计算得到属性测度评价矩阵 $(\mu_{ijk})_{n \times p}$, 并根据式(11)和(12)分别计算可得到相似系数 r_j 及相似权 ω_j 。

$$\mu_{sk} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mu_{sjk} \quad (10)$$

$$r_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_{ij1}, \mu_{ij2}, \dots, \mu_{ijk}) (\mu_{i11}, \mu_{i12}, \dots, \mu_{ik1})^T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K \mu_{ijk} \mu_{ik} \quad (11)$$

$$\omega_j = r_j / \sum_{j=1}^m r_j \quad (12)$$

显然, $0 \leq \omega_j \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$, 称 r_j 为相似数, ω_j 为相似权。此处的 ω_j 可作为指标 I_j 的权重^[13]。

1.3 属性识别

求出综合属性测度 μ_{sk} 后, 如何科学地判断 X 隶属于哪

一个级别 C_k 即是属性识别需要解决的问题。在属性综合评价中, 评价集 (C_1, C_2, \dots, C_k) 通常是一个有序集, 对有序评价类 (C_1, C_2, \dots, C_k) 要识别 X 隶属于哪一个评价级别 C_k , 可采用置信度准则。

置信度准则表述: 在有序评价集 (C_1, C_2, \dots, C_k) 中, 满足 $C_1 > C_2 > \dots > C_k$ 或 $C_1 < C_2 < \dots < C_k$, λ 为置信度, 可取 $0.5 \leq \lambda \leq 1$, 若

$$K = \min \left\{ k: \sum_{l=1}^k \mu_{xl} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p \right\} \quad (13)$$

或

$$K = n - \min \left\{ k: \sum_{l=1}^k \mu_{xn-l} \geq \lambda, 0 \leq k \leq p-1 \right\} \quad (14)$$

则认为 x 属于 C_k 级别或 C_k 类^[14]。

2 岩爆评价指标体系

在长期以来对岩爆发生机理的研究中, 人们提出了不同的岩爆判别准则, 如应力判据、能量判据、岩性判据、临界深度判据等, 这些方法均以单因素作为判据衡量岩爆是否发生及其烈度的大小。岩爆的发生是多种因素综合作用的结果, 单因素预测往往过于简单, 所以要从工程实际出发, 考虑多个岩爆影响因素, 建立一种多判据的岩爆综合预测方法, 提高岩爆预测的准确性。因此, 在上述岩爆判别准则研究的基础上, 以 σ_θ/σ_c 、 σ_c/σ_t 、 W_{et} 作为岩爆灾害预测的主要评判指标^[15], 将岩爆烈度从弱至强分为 C_1 (无岩爆)、 C_2 (弱岩爆)、 C_3 (中岩爆)、 C_4 (强岩爆) 4 个等级。根据文献[8]对岩爆烈度与各主控因子关系的研究, 选取各指标的分类标准如表 2 所示。

表 2 岩爆评价指标及分级标准

Table 2 Risk assessment indexes of rock burst

指标	岩爆烈度与各主控因子的关系			
	C_1	C_2	C_3	C_4
σ_θ/σ_c	<0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	>0.7
σ_c/σ_t	>40.0	40.0~26.7	26.7~14.5	<14.5
W_{et}	<2.0	2.0~3.5	3.5~5.0	>5.0

3 工程实例应用

以 10 组国内外典型的地下工程实例进行分析。有关数据, 如 σ_θ 、 σ_c 、 σ_t 、 W_{et} 等均来自文献[8], 如表 3 所示。

3.1 单指标属性测度

根据式(3)、(4)和(5), 以表 2 的分级标准为基础, 构造单指标属性测度函数。建立的属性测度函数表达式为

$$\mu_{x11}(t) = \begin{cases} 1 & t < 0.2 \\ \frac{0.4-t}{0.2} & 0.2 \leq t \leq 0.4 \\ 0 & t > 0.4 \end{cases} \quad \mu_{x21}(t) = \begin{cases} 1 & t > 46.65 \\ \frac{t-33.35}{13.3} & 33.35 \leq t \leq 46.65 \\ 0 & t < 33.35 \end{cases} \quad \mu_{x31}(t) = \begin{cases} 1 & t < 1.25 \\ \frac{2.75-t}{1.5} & 1.25 \leq t \leq 2.75 \\ 0 & t > 2.75 \end{cases}$$

$$\mu_{x12}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0.2 \\ \frac{t-0.2}{0.2} & 0.2 \leq t \leq 0.4 \\ \frac{0.6-t}{0.2} & 0.4 < t \leq 0.6 \\ 0 & t > 0.6 \end{cases} \quad \mu_{x22}(t) = \begin{cases} 0 & t > 46.65 \\ \frac{46.65-t}{13.3} & 33.35 \leq t \leq 46.65 \\ 1 & 32.8 \leq t \leq 33.35 \\ \frac{t-20.6}{12.2} & 20.6 \leq t \leq 32.8 \\ 0 & t < 20.6 \end{cases} \quad \mu_{x32}(t) = \begin{cases} 0 & t < 1.25 \\ \frac{t-1.25}{1.5} & 1.25 \leq t \leq 2.75 \\ \frac{4.25-t}{1.5} & 2.75 < t \leq 4.25 \\ 0 & t > 4.25 \end{cases}$$

$$\mu_{s13}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0.4 \\ \frac{t-0.4}{0.2} & 0.4 \leq t \leq 0.6 \\ \frac{0.8-t}{0.2} & 0.6 < t \leq 0.8 \\ 0 & t > 0.8 \end{cases}$$

$$\mu_{s23}(t) = \begin{cases} 0 & t > 32.8 \\ \frac{32.8-t}{12.2} & 20.6 \leq t \leq 32.8 \\ \frac{t-8.4}{12.2} & 8.4 \leq t < 20.6 \\ 0 & t < 8.4 \end{cases}$$

$$\mu_{s33}(t) = \begin{cases} 0 & t < 2.75 \\ \frac{t-2.75}{1.5} & 2.75 \leq t \leq 4.25 \\ \frac{5.75-t}{1.5} & 4.25 < t \leq 5.75 \\ 0 & t > 5.75 \end{cases}$$

$$\mu_{s14}(t) = \begin{cases} 0 & t < 0.6 \\ \frac{t-0.6}{0.2} & 0.6 \leq t \leq 0.8 \\ 1 & t > 0.8 \end{cases}$$

$$\mu_{s24}(t) = \begin{cases} 0 & t > 20.6 \\ \frac{t-8.4}{12.2} & 8.4 \leq t \leq 20.6 \\ 1 & t < 8.4 \end{cases}$$

$$\mu_{s34}(t) = \begin{cases} 0 & t < 4.25 \\ \frac{t-4.25}{1.5} & 4.25 \leq t \leq 5.75 \\ 1 & t > 5.75 \end{cases}$$

表3 样本实测数据

Table 3 Test data of example samples

序号	工程名称	岩石种类	σ_a /MPa	σ_c /MPa	σ_t /MPa	W_{et}
1	中国天生桥二级水电站引水隧洞	白云质灰岩	30.0	89	3.7	6.6
2	中国二滩水电站2号支洞	正长岩	90.0	220	7.4	7.3
3	中国渔子溪水电站引水隧洞	花岗闪长岩	90.0	170	11.3	9.0
4	中国太平驿水电站地下洞室	花岗闪长岩	62.6	165	9.4	9.0
5	中国瀑布沟水电站地下洞室	闪长花岗岩	43.4	123	6.0	5.0
6	中国锦平二级水电站引水隧道	大理岩	98.6	120	6.5	3.8
7	挪威Sima水电站地下厂房	花岗岩	48.75	180	8.3	5.0
8	挪威Heggura公路隧道	花岗片麻岩	62.5	175	7.3	5.0
9	瑞典Vietas水电站引水隧洞	变质花岗岩石英岩	80.0	180	6.7	5.5
10	意大利Raibl铅硫化锌矿井巷	铅锌矿石	108.4	140	8.0	5.5

根据表3实测数据及已构建的单指标属性测度函数,可求得各评价指标的属性测度。以天生桥二级水电站引水隧洞为例,计算结果如表4所示。

表4 样本1的属性测度

Table 4 Attribute measurements of sample No.1

指标	测量值	单指标属性测度			
		C_1	C_2	C_3	C_4
σ_a/σ_c	0.34	0.3	0.7	0	0
σ_c/σ_t	23.97	0	0.2787	0.7213	1
W_{et}	6.6	0	0	0	1
属性测度		0.1	0.3262	0.2404	0.6667

3.2 多指标属性测度评价矩阵

首先假设各项指标的权重相等,即各指标的权重 $W_j=1/3$,

根据式(10)~(12)计算可得到相似数: $r_j=(1.2453, 0.9067, 0.5716)$ 。将各个指标的相似数进行归一化处理,得到各指标的相似权,相似权即为各指标的权重,可得 $\omega_j=(0.4572, 0.3329, 0.2099)$ 。

根据天生桥二级水电站引水隧洞的单指标属性测度和式(9),计算求得天生桥二级水电站引水隧洞多指标属性测度的评价向量为[0.1372 0.4128 0.2401 0.5428]。

3.3 置信度识别与结果分析

取置信度 $\lambda=0.6$,由天生桥二级水电站引水隧洞的多指标属性测度评价向量可以判定其危险性等级为 C_3 级,即中级岩爆,该评价结果符合相关文献^[8]中对该处岩爆实际情况的报道。用同样的方法对其余项目进行评价,结果如表5所示。

表5 10组地下工程属性综合评价结果

Table 5 Attribute synthetic evaluation results of ten underground engineering projects

序号	综合属性测度				属性识别结果	实际情况
	C_1	C_2	C_3	C_4		
1	0.1372	0.4128	0.2401	0.5428	中	岩爆发生在2号支洞和1号主洞,频繁发生,中等强度
2	0.0000	0.6827	0.9762	0.5428	弱	开挖初期即出现轻微壁面爆裂,并日趋明显,轻微岩爆
3	0.0000	0.1600	0.4718	0.3845	中	片状剥落,岩片弹射崩落,顶板有爆裂声,属中—强岩爆
4	0.0457	0.4115	0.2511	0.4609	中	岩爆破坏规模不等,记录到400多例岩爆
5	0.0914	0.4749	0.3287	0.4378	中	发生岩爆
6	0.0000	0.0630	0.8797	0.7328	中	产生的岩爆以中、弱级烈度为主,局部洞段产生强岩爆
7	0.2972	0.1900	0.4079	0.4378	中	随开挖深度的增加岩爆变得突出,有时非常剧烈
8	0.0686	0.4842	0.3423	0.4378	中	洞室岩石剥落与弹射,中级岩爆
9	0.0000	0.5322	0.2929	0.5078	中	劈裂,咬合的层面断开,有开裂声响,弱岩爆
10	0.0000	0.0000	0.3427	0.8073	强	岩石崩落,持续不断,伴有破裂声,中—强级岩爆

从表5可以看出,这10组工程主要集中在水利、矿业、交通行业,它们均发生了不同程度的岩爆,如二滩水电站由于岩爆的发生导致无法成功制备岩石力学实验试件,挪威Sima水电站在施工过程中广泛遇到岩爆,甚至发生过2 m见方、0.5 m厚的大块从一侧边墙弹射出现象。从其原始数据分析,这些地下工程围岩切向应力都较大,除锦平二级水电站引水隧道外其余均为硬质岩石,结构致密,满足发生岩爆的岩性条件。根据属性综合评价结果,在这些工程中会发生不同程度的岩爆,将结果与实际情况进行对比,两者之间有很好的 consistency。这表明该模型应用于岩爆灾害预测评价是行之有效的,从而为地下工程岩爆灾害预测提供了一种新的途径。

4 结论

1) 基于属性数学理论,构建了岩爆预测的属性综合评价模型,为地下工程岩爆灾害的预测提供了一种新途径。通过应用属性数学方法构建各评价指标的属性测度函数,利用相似数定义相似权计算各指标的权重,最后依据置信度准则进行等级判定,得出地下工程岩爆预测结果。

2) 利用所建属性综合评价模对国内外10组地下工程岩爆灾害发生与否及烈度大小进行了评价,结果表明该模型科学合理,评价结果符合实际情况,从而验证了此模型的可行性和适用性。

参考文献 (References)

- [1] 吕庆,孙红月,尚岳全,等.深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2982-2988.
Lü Qing, Sun Hongyue, Shang Yuequan, et al. Comprehensive study on prediction of rock burst in deep and over-length highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (16): 2982-2988.
- [2] 李果,周承京,张勇,等.地下工程岩爆研究现状综述[J].水利水电科技进展,2013,33(3):77-83,94.
Li Guo, Zhou Chengjing, Zhang Yong, et al. Review of rockburst in underground engineering[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3): 77-83, 94.
- [3] 徐则民,吴培关,王苏达,等.岩爆过程释放的能量分析[J].自然灾害学报,2003,12(3):104-110.
Xu Zemin, Wu Peiguan, Wang Suda, et al. Analysis of energy released in process of rock burst[J]. Journal of Natural Disasters. 2003, 12(3): 104-110.
- [4] 刘思好,徐则民.基于动-静应力耦合的深埋隧道岩爆灾害控制[J].自然灾害学报,2010,19(1):177-184.
Liu Siyu, Xu Zemin. Rock burst control of deeply buried tunnels based on coupling of dynamic and static stresses[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(1): 177-184.
- [5] 熊孝波,桂国庆,许建聪,等.可拓工程方法在地下工程岩爆预测中的应用[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2007,8(6):695-701.
Xiong Xiaobo, Gui Guoqing, Xu Jiancong, et al. Application of extension method to prediction of rockburst of underground engineering [J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(6): 695-701.
- [6] 陈海军,邴能惠,聂德新,等.岩爆预测的人工神经网络模型[J].岩土工程学报,2002,24(2):229-232.
Chen Haijun, Li Nenghui, Nie Dexin, et al. A model for prediction of rock burst by artificial neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 229-232.
- [7] 汪明武,李丽,金菊良.岩爆预测的改进集对分析模型[J].岩土力学,2008,28(S1):511-514,518.
Wang Mingwu, Li Li, Jin Juliang. An improved set pair analysis model for the prediction of rock burst[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28 (S1): 511-514, 518.
- [8] 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.
Wang Yuanhan, Li Wodong, Li Qiguang, et al. A fuzzy comprehensive evaluation method for rock burst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 15-23.
- [9] 周宣赤,白春华,王仲琦,等.粒子群投影寻踪算法在岩爆预测中的应用[J].上海交通大学学报,2012,46(12):1956-1961.
Zhou Xuanchi, Bai Chunhua, Wang Zhongqi, et al. Application of projection pursuit model and practice swarm optimization in rock burst prediction[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(12): 1956-1961.
- [10] 刘金海,冯涛,袁坚.基于非线性灰色归类模型的岩爆预测方法[J].地下空间与工程学报,2005,1(6):821-824.
Liu Jinghai, Feng Tao, Yuan Jian. Rock burst prediction method based on the nonlinear grey model of classification[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 821-824.
- [11] 徐则民,黄润秋,范柱国,等.长大隧道岩爆灾害研究进展[J].自然灾害学报,2004,13(02):16-24.
Xu Zemin, Huang Runqiu, Fan Zhuguo, et al. Progress in research on rock burst hazard of long tunnel with large section[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(02): 16-24.
- [12] 程乾生.属性数学-属性测度和属性统计[J].数学的实践与认识,1998,28(2):97-107.
Cheng Qiansheng. Attribute mathematics-attribute measure and attribute statistics[J]. Mathematics in Practice and Theory, 1998, 28(2): 97-107.
- [13] 马衍坤,王恩元,刘贞堂,等.煤层突出危险性的属性综合评价模型研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(3):416-420.
Ma Yankun, Wang Enyun, Liu Zhentang, et al. Attribute synthetic evaluation model for predicting risk of coal and gas outburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 416-420.
- [14] 周宗青,李术才,李利平,等.围岩超前优化分级的属性识别模型及其工程应用[J].中南大学:自然科学版,2013,44(4):1611-1619.
Zhou Zongqing, Li Shucai, Li Liping, et al. Attribute recognition model of surrounding rock optimized classification and its engineering application[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(4): 1611-1619.
- [15] 王斌,李夕兵,马春德,等.基于三维地应力测量的岩爆预测问题研究[J].岩土力学,2011,32(3):849-854.
Wang Bin, Li Xibing, Ma Chunde, et al. Study of forecast of rock burst based on three dimensional in-situ stress measurement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 849-854.

(责任编辑 吴晓丽)