

文章编号: 1000-7598 (2010) 02-0529-06

基于功效系数法的岩爆烈度分级预测研究

王迎超, 尚岳全, 孙红月, 严细水

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘 要: 岩爆是高地应力区岩质隧道施工过程中经常发生的工程地质灾害, 对其发生的可能性及其烈度分级预测一直是隧道工程世界性难题之一。基于功效系数法的基本原理, 在综合考虑岩爆的关键影响因素基础上, 选取 σ_θ / σ_c 、 σ_c / σ_t 、 W_{et} 和 I_s 作为评价因子, 建立了一种新的岩爆烈度分级预测模型。利用国内外典型岩爆工程实例对所建模型进行检验, 判别结果与实际岩爆等级相符, 且与集对分析法和可拓方法判别结果基本一致, 表明运用功效系数法对岩爆烈度进行预测是合理的、可行的。再运用功效系数法对苍岭隧道岩爆危险性进行判别, 预测结果与实际情况一致, 说明基于功效系数原理的岩爆预测新方法具有较高的准确性和可靠性, 且简单、易懂、可操作性强, 具有良好的工程应用前景。

关 键 词: 隧道工程; 岩爆; 功效系数法; 分级预测; 影响因素

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Study of prediction of rockburst intensity based on efficacy coefficient method

WANG Ying-chao, SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, YAN Xi-shui

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Rockburst is one of the main geological hazards during tunnel construction in high geostress zone. The prediction of possibility and classification of rockburst is one of global problems of tunneling engineering. Based on efficacy coefficient method, a new model for predicting the classification of rockburst is established. Considering the key influential factors of rockburst comprehensively, four factors including σ_θ / σ_c , σ_c / σ_t , W_{et} and I_s are selected as evaluation indices. The model is tested by a series of rock projects at home and abroad. The obtained results are consistent with practical classification of rockburst and the results of set pair analysis method and extensional method; so it is shown that the efficacy coefficient method used to classify the rockburst intensity is reasonable and effective. Then, the model is applied to Cangling tunnel. The results are in good agreement with practical situation of rockburst. It is proved that the efficacy coefficient method used to classify rockburst intensity is exact and reliable. The efficacy coefficient method is simple and has very strong operability, which possesses a good prospect of engineering application.

Key words: tunneling engineering; rockburst; efficacy coefficient method; classification prediction; influential factors

1 引 言

岩爆是高地应力区地下工程在开挖过程中或开挖完毕后, 围岩因开挖卸荷发生脆性破坏而导致储存于岩体中的弹性应变能突然释放且产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种动力失稳地质灾害^[1]。岩爆属于突发性灾害, 强烈岩爆往往严重损坏施工设备, 对现场施工人员造成人身伤害。因此, 开展岩爆的烈度分级预测研究意义重大。

对于岩爆问题的研究由来已久, 国内外学者已从强度、刚度、能量、稳定、断裂、损伤等方面对

岩爆现象进行分析, 提出各种假设和判据, 如 Russenes 判据、陶振宇判据、 R_b / σ_1 判据等, 并采用各种理论和科学方法对岩爆烈度等级进行预测, 如数值分析方法^[2]、模糊数学理论^[3-4]、灰色理论^[5-6]、人工神经网络^[7-9]、支持向量机^[10-11]、可拓学^[12-14]、集对分析法^[15-16]、距离判别法^[17]、数据挖掘方法 AdaBoost^[18]、AE 时间序列^[19]、属性数学理论^[20]等, 取得一定的研究成果。以上各种理论和方法有其自身的特点和优势, 但同时在岩爆预测中也存在一定的局限性。到目前为止, 还没有哪一种理论或方法能非常准确地预测岩爆, 很好地满足工程建设的需

收稿日期: 2009-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40672185); 浙江省重大科技专项社会发展重点项目 (No. 2006C13027)。

第一作者简介: 王迎超, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事隧道工程及防灾减灾方面的研究。E-mail: wych12345678@126.com

求。因此,探讨新的有效预测方法是很有必要的。

功效系数法是国际上常用的一种反映多指标、综合分析的定量评价方法,能够根据评价对象的特点,制订不同侧面的多个评价目标,对多个变量进行分析判断。该方法具有规范、节约和不受各种主观因素干扰等特征,能够通过精确的计量模型,客观、公正地判断出评价对象的状况,同时具有很强的可操作性,不失为一种简便、易行、有效的评价方法。目前主要应用于医疗质量评价^[21-22]、经营者业绩评价^[23]、财务分析评价和预警^[24-25]等商业领域,已取得良好效果。

本文首次将功效系数法这一新方法应用到岩爆的烈度分级预测中,并引用相关文献中的实测资料进行检验,验证其可行性和有效性。然后,将功效系数法岩爆烈度分级预测模型应用于苍岭隧道具体工程中,得出各洞段较符合实际的岩爆烈度分级结果,为该隧道的设计和施工提供依据。

2 功效系数法的原理

功效系数法是综合评价及多目标决策的一种有效方法^[21],其主要内容是在对多个指标进行同度量化的基础上确定其功效系数值,再将各功效系数值加以综合,确定出综合评价值,从而评价被研究对象的综合状况。其评价过程如下:

(1) 确定评价指标体系

功效系数法评价指标体系的确定要求为:选取的指标要有代表性,既要相互补充,又不能重复,应尽可能综合反映评价目标的状况。

(2) 确定各项指标的满意值和不允许值

满意值即评价指标标准中可能达到的最高水平;不允许值一般取各评价指标标准的最差水平。

(3) 计算出各项指标的单项功效系数值

在功效系数法的评价指标体系中,共有4种变量^[23],指标数值(实际值)越大、单项功效系数越高的,为极大型变量;指标数值越小、单项功效系数越高的,为极小型变量;指标数值在某一点单项功效系数最高的,为稳定型变量;若在某一区间内单项功效系数最高的,为区间型变量。

上述4种变量的单项功效系数计算公式分别为

① 极大型变量单项功效系数

$$d1_i = \begin{cases} \frac{X_i - X_{si}}{X_{hi} - X_{si}} \times 40 + 60, & X_i < X_{hi} \\ 100, & X_i \geq X_{hi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d1_i$ 为第*i*个极大型评价指标的单项功效系数值; X_i 为第*i*($i=1, 2, \dots, m$)个评价指标的实

际值; X_{hi} 为第*i*个指标的满意值; X_{si} 为第*i*个指标的不允许值。

② 极小型变量单项功效系数

$$d2_i = \begin{cases} \frac{X_i - X_{si}}{X_{hi} - X_{si}} \times 40 + 60, & X_i > X_{si} \\ 100, & X_i \leq X_{si} \end{cases} \quad (2)$$

③ 稳定型变量单项功效系数

$$d3_i = (1 - |X_i - X_{hi}| / |X_{si} - X_{hi}|) \times 40 + 60 \quad (3)$$

④ 区间型变量单项功效系数

$$d4_i = \begin{cases} \left(1 - \frac{X_{\min} - X_i}{X_{\min} - X_{s\min}}\right) \times 40 + 60, & X_i < X_{\min} \\ 100, & X_{\min} \leq X_i \leq X_{\max} \\ \left(1 - \frac{X_i - X_{\max}}{X_{h\max} - X_{\max}}\right) \times 40 + 60, & X_i > X_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $X_{\max}$ 为区间型变量的上限值; $X_{\min}$ 为区间型变量的下限值; $X_{h\max}$ 为上限的不允许值,一般取所有区间评价指标均值的1倍; $X_{s\min}$ 为下限的不允许值,一般取所有区间评价指标均值的1/2; $d4_i$ 为第*i*个区间型评价指标的单项功效系数值。

(4) 确定各评价指标的权重系数,计算评价对象的总功效系数值:

$$D = \prod_{i=1}^m d_i \omega_i \quad (5)$$

式中: D 为评价对象的总功效系数值; d_i 为第*i*个评价指标的单项功效系数值; ω_i 为第*i*个评价指标的归一化权重系数。

3 岩爆烈度分级预测模型

3.1 岩爆烈度的影响因素分析和评价指标体系的确立

国内外的研究表明,诱发岩爆的原因很多,其影响因素有岩性、隧道初始应力状态、埋深、地表地形、开挖断面型式及开挖方式等^[2]。这些因素可以归为外因和内因两方面,其外因在于:在岩体中开挖洞室,改变了岩体赋存的空间环境,引起洞室周围的岩体应力重新分布和应力集中;其内因在于:岩体在变形破坏过程中所储存的弹性变形能不仅能满足岩体变形和破裂所消耗的能量,还有足够的剩余能量转换为动能,使逐渐被剥离的岩块弹射出去,从而形成岩爆^[3]。

在综合岩爆的关键影响因素基础上,参考前人

的相关研究成果^[13, 15, 17]，以 σ_θ/σ_c 、 σ_c/σ_t 、 W_{et} 和 I_s 作为功效系数法岩爆烈度分级预测模型的评价指标。这些参数既考虑了洞室应力因素（洞室的最大切向应力 σ_θ ）的影响，又考虑了围岩（岩石单轴抗压强度 σ_c 、岩石单轴抗拉强度 σ_t 、弹性能量指数 W_{et} 、岩石脆性指数 I_s ）的影响。岩爆烈度与各评价指标的关系如表1所示。

表1 隧道岩爆烈度与各评价指标的关系^[13, 15]

Table 1 Relation between rockburst and the evaluation indices^[13, 15]

岩爆等级	稳定情况	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	I_s
I	无岩爆	<0.3	>40.0	<2.0	<3.5
II	轻微岩爆	$0.3\sim0.5$	$26.7\sim40.0$	$2.0\sim3.5$	$3.5\sim5.5$
III	中级岩爆	$0.5\sim0.7$	$14.5\sim26.7$	$3.5\sim5.0$	$5.5\sim7.0$
IV	强级岩爆	>0.7	<14.5	>5.0	>7.0

3.2 各评价指标的满意值和不允许值

表1给出了各等级岩爆评价指标的取值范围，这里分别取I级（无岩爆）和IV级（强级岩爆）标准的指标限值作为各指标的满意值和不允许值，如表2所示。

表2 岩爆烈度评价指标的满意值和不允许值

Table 2 The satisfied values and not allowed values of evaluation indices of rockburst intensity

特征值	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	I_s
满意值	0.7	40.0	5.0	7.0
不允许值	0.3	14.5	2.0	3.5

3.3 单项功效系数的计算

在所建立的岩爆等级预测评价指标体系中， σ_θ/σ_c 、 W_{et} 和 I_s 属于极大值变量，其单项功效系数值按式（1）进行计算。 σ_c/σ_t 属于极小型变量，其单项功效系数值按式（2）进行计算。

3.4 指标权重的确定

权重是一个相对概念，是针对某一指标而言的。某一指标的权重 ω_i 是指该指标在整体评价中的相对重要程度。权重因人而异，可根据工程经验和个人对岩爆烈度影响因素大小的主观认识确定，但在计算时应注意满足归一化条件，即

$$\sum_{i=1}^m \omega_i = 1 \quad (6)$$

在本文总功效系数值的求解过程中，取平均权重进行计算，即各个评价指标的权重系数均为0.25。

3.5 岩爆等级确定

根据式（5）计算出总功效系数后，按照总功效系数的数值大小划分岩爆烈度等级，如表3所示。

表3 岩爆等级判别表

Table 3 Discriminant analysis of rockburst level

岩爆等级	总功效系数	说明
I	60~70	无岩爆，灾害风险很小
II	70~80	轻微岩爆，灾害风险较低
III	80~90	中级岩爆，灾害风险一般
IV	≥ 90	强级岩爆，灾害风险很高

3.6 具体实现过程

首先，通过现场资料收集和室内岩石力学试验，得到各评价指标的具体数值；然后，通过计算机编程，运用功效系数法基本原理进行岩爆烈度等级判定。具体实现过程如图1。

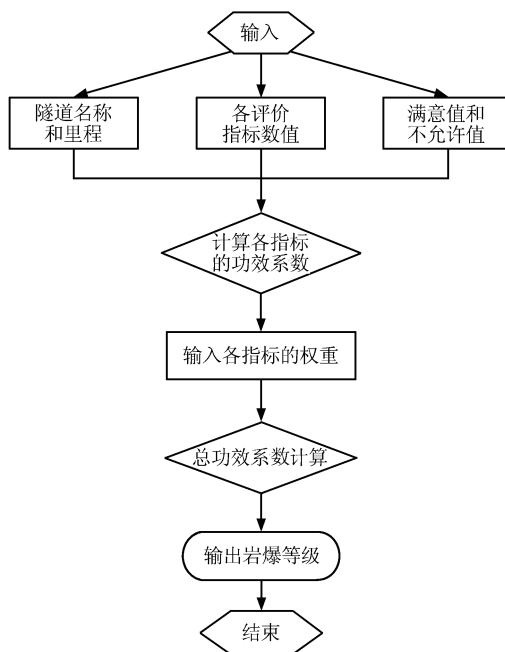


图1 功效系数法计算流程图

Fig.1 Flow chart of the efficacy coefficient method

3.7 模型检验

为了检验功效系数法岩爆烈度分级预测模型的有效性，选取13个国内外大型岩石地下工程实例进行岩爆烈度分析，有关数据主要取自文献[13]。按照本文方法进行岩爆烈度分级综合评判，计算结果如表4所示。

为了更好地验证所建模型的有效性，同时将岩爆的实际类别、集对分析法和可拓方法判别结果列在表4中。从表中可以看出，除了样本2（二滩水电站2号支洞）误判为III级（实际为II级）外，其他判别结果与实际岩爆级别相符，准确率达92.3%，且与可拓方法^[13]和集对分析法^[15]判别结果基本一致。发生误判的原因可能是：把介于两级烈度之间的岩爆确定为某一级，判别结果偏安全，从工程安

全角度考虑是允许的。别是完全可行并且高效的，可以很好地满足工程的应用需要。

由此可见，功效系数法用于岩爆烈度等级的判

表 4 国内外若干工程岩爆的分析资料及计算结果
Table 4 Data of the engineering rockburst around the world and the analysis results

样本 序号	工程名称	评价指标				总功效 系数值	本文判 别结果	集对分析法 结果	可拓法判别 结果	实际岩 爆级别
		$\sigma_{\theta} / \sigma_c$	σ_c / σ_1	W_{et}	I_s					
1	天生桥二级水电站引水隧洞	0.30	24.0	6.6	5.73	80.097	III	III	III	III
2	二滩水电站 2 号支洞	0.41	29.7	7.3	7.26	88.711	III	II	II	II
3	鲁布革水电站地下隧洞	0.23	27.8	7.8	3.26	73.466	II	II	I	I 或 II
4	鱼子溪水电站引水隧洞	0.53	14.8	9.0	7.00	85.868	III	III或IV	III	III
5	太平驿水电站引水隧洞	0.38	12.6	9.0	5.30	76.398	II	规模不定	规模不定	规模不定
6	锦屏二级水电站引水隧洞	0.82	18.5	3.8	11.20	90.569	IV	IV	III或IV	III或IV
7	二郎山隧道平导 K261+939	0.52	21.2	5.5	6.80	87.556	III	III	III	III
8	秦岭终南山特长公路隧道	0.65	28.6	6.8	8.40	94.279	IV	IV	IV	IV
9	福建福宁高速西段九华山隧道	0.52	24.6	7.3	6.30	87.556	III	III或IV	III或IV	III或IV
10	挪威 Heggura 公路隧道	0.37	24.1	5.0	9.60	85.515	III	IV	III	III
11	瑞典 Vietas 水电站引水隧洞	0.44	26.7	5.5	3.60	78.570	II	II	II	II
12	日本关越隧道	0.39	22.3	5.0	10.70	85.309	III	IV	III	III或IV
13	太平驿水电站引水隧洞	0.38	17.3	7.6	7.50	83.098	III	IV	III	III

4 工程应用

4.1 工程概况

苍岭隧道位于浙江省仙居县与缙云县交界的括苍山脉中低山区。隧道为左右线设置，单个隧道长度约为 7.6 km，隧道最大埋深约为 768.2 m。苍岭隧道穿越的地区，地质环境复杂。工程区位于北北东向丽水—余姚深断裂、北东向鹤溪—奉化大断裂，近东西向衢州—天台大断裂以及北西向淳安—温州大断裂构成的四边形区域内。据现场地质调查和区域地质资料分析，隧道洞身主要穿过微风化和新鲜熔结凝灰岩、角砾凝灰岩和钾长花岗斑岩，局部穿

过断裂带及岩相接触带。现场调查和钻探资料表明，在断层及其影响带内岩体裂隙发育，岩体破碎；在远离断层地段，岩体较为完整，岩质坚硬，强度较高。

4.2 功效系数法岩爆等级预测

本文选取苍岭隧道 K97+702~K98+152、K98+152~K98+637、K98+637~K99+638、K99+638~K100+892 进行岩爆烈度等级预测，结合该隧道岩石力学试验和地应力现场试验数据，得到了各评价指标的具体数值，然后运用建立的功效系数法岩爆烈度等级预测模型进行计算分析，判别结果如表 5 所示。

表 5 苍岭隧道岩爆预测结果
Table 5 Rockburst prediction results of Cangling tunnel

隧道里程	评价指标				总功效系数值	本文判别结果	实际岩爆级别
	$\sigma_{\theta} / \sigma_c$	σ_c / σ_1	W_{et}	I_s			
K97+702~K98+152	0.21	24.3	4.6	6.2	77.974	II	II
K98+152~K98+637	0.28	23.6	4.9	5.8	79.307	II	II
K98+637~K99+638	0.32	21.3	5.3	7.2	83.167	III	III
K99+638~K100+892	0.28	23.8	4.8	6.1	79.909	II	II

从表 5 中可以看出，根据总功效系数值大小判断岩爆烈度等级，得到苍岭隧道 K97+702~K98+152、K98+152~K98+637、K99+638~K100+892 岩爆等级为 II 级，属于轻微岩爆；而 K98+637~K99+638 岩爆等级为 III 级，属于中级岩爆状态，与实际岩爆级别相吻合。K98+637~

K99+638 段隧道开挖后，进入掌子面附近观察，可以听到外露面岩体爆裂的声音，紧接着垂直于岩体节理面的方向发生弹射的岩片，伴随着可听到类似打枪“啪…啪…啪”的响声。实例证明，运用功效系数法判断岩爆烈度等级具有很好的准确性和实用性，可以在类似隧道工程中推广使用。

5 结 论

(1)首次将功效系数法引入到岩爆等级预测中,为岩爆烈度分级研究提供了一个全新的思路。该方法具有原理简单、可操作性强、结果精确直观的优点,以总功效系数的值作为评价标准,数值越大,代表岩爆危险性越高,与人们习惯的百分制评分方法十分类似,易于理解。

(2)以 σ_θ/σ_c 、 σ_c/σ_t 、 W_{et} 和 I_s 作为评价因子,建立了岩爆烈度分级预测的功效系数分析模型。利用国内外典型工程实例进行验证,并与可拓法和集对分析法的判别结果进行对比,表明运用该模型对岩爆进行预测是合理的、可行的。

(3)运用功效系数法对苍岭隧道进行岩爆风险性评估,预测结果与实际情况一致,说明本文提出的基于功效系数法的岩爆预测新方法具有较高的准确性和可靠性,具有良好的工程应用前景。

(4)功效系数法用于岩爆烈度分级预测还只是初步尝试,有些问题还有待于进一步研究,例如如何建立更加完备的岩爆评价指标体系,如何采用更科学的方法使指标权重系数的确定更为符合实际等。

参 考 文 献

- [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 Hong-yue, SHANG Yue-quan, et al. Comprehensive study on prediction of rockburst in deep and over-length highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(16): 2982—2988.
- [2] 邱道宏, 陈剑平, 肖云华, 等. 分离式隧道非同步开挖岩爆预测研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 515—520.
QIU Dao-hong, CHEN Jian-ping, XIAO Yun-hua, et al. Study of rockburst prediction of separated tunnel excavated asynchronously[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 515—520.
- [3] 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.
- [4] 赵延喜, 徐卫亚. 基于模糊概率的深埋隧道岩爆风险分析[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(6): 82—85.
ZHAO Yan-xi, XU Wei-ya. Risk analysis of rockburst in deep-buried tunnels based on fuzzy probability[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2008, 25(6): 82—85.
- [5] 刘春, 易俊, 姜德义, 等. 基于灰色关联分析理论的岩爆烈度预测研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(12): 100—103.
LIU Chun, YI Jun, JIANG De-yi, et al. Study on rockburst intensity prediction method based on gray relational analysis theory[J]. **China Mining Magazine**, 2007, 16(12): 100—103.
- [6] 姜彤, 黄志全, 赵彦彦, 等. 灰色系统最优归类模型在岩爆预测中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2003, 24(2): 37—40.
JIANG Tong, HUANG Zhi-quan, ZHAO Yan-yan, et al. Application of grey system optimal theory model in forecasting rockburst[J]. **Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power**, 2003, 24(2): 37—40.
- [7] 何正, 李晓红, 卢义玉, 等. BP神经网络模型在深埋隧道岩爆预测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 494—498.
HE Zheng, LI Xiao-hong, LU Yi-yu, et al. Application of BP neural network to the prediction of rockburst in Tongyu tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(3): 494—498.
- [8] FENG X T, WANG L N. Rock-burst prediction based on neural networks[J]. **Trans. Non-ferrous Met. Soc. China**, 1994, 4(1): 7—14.
- [9] 陈海军, 酃能惠, 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 Hai-jun, LI Neng-hui, NIE De-xin, et al. A model for prediction of rockburst by artificial neural network[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(2): 229—232.
- [10] 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.
- [11] 冯夏庭, 赵洪波. 岩爆预测的支持向量机[J]. 东北大学学报, 2002, 23(1): 57—59.
FENG Xia-ting, ZHAO Hao-bo. Prediction of rockburst

- using support vector machine[J]. **Journal of North-eastern University**, 2002, 23(1): 57—59.
- [12] 陈祥, 祁小博, 蔡新滨, 等. 可拓综合评价方法在岩爆判别中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 99—108.
- CHEN Xiang, QI Xiao-bo, CAI Xin-bin, et al. Extensional evaluation method and its application to the judgments of rockburst[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2009, 33(1): 99—108.
- [13] 熊孝波, 桂国庆, 郑明新, 等. 基于可拓方法的深埋长大隧道岩爆预测研究[C]//第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 403—411.
- [14] 王彦武. 地下采矿工程岩体质量可拓模糊评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 18—22.
- WANG Yan-wu. Extension and fuzzy method for evaluating engineering quality of rock masses in underground mining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(1): 18—22.
- [15] 陈红红, 李夕兵, 张毅. 基于集对分析法的岩爆烈度分级预测研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2008, 22(4): 10—14.
- CHEN Hong-hong, LI Xi-bing, ZHANG Yi. Study on application of set pair analysis method to prediction of rockburst[J]. **Journal of University of South China (Science and Technology)**, 2008, 22(4): 10—14.
- [16] 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(增刊): 511—518.
- WANG Ming-wu, LI Li, JIN Ju-liang. An improved set pair analysis model for the prediction of rockburst[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 28(Supp.): 511—518.
- [17] 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): 1012—1018.
- GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 1012—1018.
- [18] 葛启发, 冯夏庭. 基于 AdaBoost 组合学习方法的岩爆分类预测研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 943—948.
- GE Qi-fa, FENG Xia-ting. Classification and prediction of rockburst using AdaBoost combination learning method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 943—948.
- [19] 彭琦, 张茹, 谢和平, 等. 基于 AE 时间序列的岩爆预测模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1436—1440.
- PENG Qi, ZHANG Ru, XIE He-ping, et al. Prediction model for rockburst based on acoustic emission time series[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1436—1440.
- [20] 文畅平. 岩爆预测和烈度分级的属性数学模型及其应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(4): 114—120.
- WEN Chang-ping. An attribute mathematical model and its application in predicting and classifying rockburst[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2008, 30(4): 114—120.
- [21] 刘恒, 巢健茜. 基于功效系数法的医疗质量综合评价[J]. 中国医院管理, 2008, 28(2): 25—26.
- LIU Heng, CHAO Jian-xi. Comprehensive evaluation based on efficacy coefficient method quality[J]. **Chinese Hospital Management**, 2008, 28(2): 25—26.
- [22] 刘保华, 吴小凡. 功效系数法在医疗质量综合评价中的应用[J]. 医院管理, 2008, 9(4): 23—24.
- LIU Bao-hua, WU Xiao-fan. Application of efficient method to comprehensive evaluation quality[J]. **Hospital Management**, 2008, 9(4): 23—24.
- [23] 周莉, 黄河清, 蒲勇健. 基于功效系数法的经营业绩评价研究[J]. 软科学, 2006, 20(1): 40—44.
- ZHOU Li, HUANG He-qing, PU Yong-jian. Relative performance evaluation of executives based on efficacy coefficient method[J]. **Soft Scientists**, 2006, 20(1): 40—44.
- [24] 高雷, 王升. 财务风险预警的功效系数法实例研究[J]. 南京财经大学学报, 2005, (1): 93—97.
- GAO Lei, WANG Sheng. An empirical research on the effect coefficient method of financial risk pre-warning[J]. **Journal of Nanjing University of Finance and Economics**, 2005, (1): 93—97.
- [25] 翁晓颖, 黄继鸿. 基于功效系数法的企业财务预警系统研究[J]. 杭州电子科技大学学报, 2005, 25(4): 82—85.
- WENG Xiao-ying, HUANG Ji-hong. Research on enterprise financial early warning system based on method of efficiency coefficient[J]. **Journal of Hangzhou Dianzi University**, 2005, 25(4): 82—85.