

基于改进的灰评估模型在岩爆中的预测研究

裴启涛, 李海波, 刘亚群, 牛京涛

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 岩爆是深部高地应力区岩体开挖过程中常见的一种复杂的动力失稳现象。由于影响因素众多, 且各因素在岩爆的孕育过程中所起的作用尚不十分明确, 可以将岩爆与其影响因素间的复杂关系当作灰色系统, 利用灰色聚类方法进行研究。根据岩爆的成因及特点, 选取洞壁围岩的最大切应力 σ_θ 、单轴抗压强度 σ_c 、单轴抗拉强度 σ_t 及岩石弹性能量指数 W_{et} 作为影响岩爆的主要因素, 并以应力系数 σ_θ/σ_c 、脆性系数 σ_c/σ_t 及弹性能量指数 W_{et} 作为评价指标, 通过对灰色白化权函数进行优化, 建立改进的岩爆预测灰评估模型。该模型解决了传统模型存在的灰类多重交叉性及不满足规范性等问题, 理论上更完备。采用改进模型对国内外若干深部岩石工程岩爆初始数据进行研究, 并与传统模型的预测结果进行对比, 发现改进模型的结果与实际情况吻合更好, 预测精度更高, 从而验证了改进模型的有效性及其实用性。研究方法为岩爆的准确预测提供一种切实可行的途径。

关键词: 岩石力学; 岩爆; 高地应力; 灰色系统; 灰色聚类法; 预测

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)10-2088-06

ROCKBURST PREDICTION BASED ON A MODIFIED GREY EVALUATION MODEL

PEI Qitao, LI Haibo, LIU Yaqun, NIU Jingtao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Rockburst is a complicated dynamic instability phenomenon during the rock excavation of deep rock masses in high in-situ stress zone. It is affected by many factors, and the roles of various factors in the formation process of rockburst are not yet clear. Then, the complex relationship between rockburst and its influencing factors is considered as a grey system, which can be studied by the grey clustering method. According to the causes of rockburst and its characteristics, the main factors of rockburst, which are the maximum tangential stress of the cavern wall σ_θ , uniaxial compressive strength σ_c , uniaxial tensile strength σ_t and the elastic energy index of rock W_{et} , are chosen in the analysis. Moreover, the evaluation indexes including the stress coefficient of rock σ_θ/σ_c , the brittleness coefficient of rock σ_c/σ_t , and the elastic energy index of rock W_{et} are used to establish the modified grey evaluation model for rockburst prediction through the optimization of grey whitenization weight function. Compared with the traditional grey evaluation model, the modified model doesn't have the crossing properties of grey cluster and meets the normality well, which is more reasonable in theory. Based on the rockburst data of some deep rock projects at home and abroad, the modified model is adopted to predict the possibility and classification of rockburst. Compared with the traditional model, the prediction error of the modified model is smaller. In addition, the prediction results of the modified model are close to the practical

收稿日期: 2013-06-03; **修回日期:** 2013-07-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732001); 国家杰出青年基金项目(51025935); 国家自然科学基金面上项目(51174190)

作者简介: 裴启涛(1986-), 男, 2009年毕业于中南大学资安学院采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程与地质灾害方面的研究工作。
E-mail: pq01@163.com

records, which proves that the model is effective and available. Therefore, the proposed method provides a practical way to accurately predict the possibility and classification of rockburst in deep underground engineering.

Key words: rock mechanics; rockburst; high in-situ stress; grey system; grey clustering method; prediction

1 引言

岩爆是高地应力条件下地下工程开挖过程中, 硬脆性围岩因开挖卸荷导致储存于岩体中的弹性应变能突然释放, 因而产生的爆裂松脱、剥离、弹射甚至抛掷性等破坏现象的一种动力失稳地质灾害^[1-2]。历史上有资料记载的、最早发生的岩爆位于 1738 年英国的锡矿坑道, 而我国有历史记录的煤爆发生在 1933 年抚顺的胜利煤矿。据不完全统计, 在 1949~1997 年间, 我国 33 个煤矿发生了 2 000 多次煤爆事件, 造成严重危害, 共伤亡几百人, 停产 1 300 多天^[3]。岩爆的形成机制较为复杂, 且危害性极大, 随着地下资源的开采及地下设施逐步向深推进, 岩爆现象也越来越突出。因此, 如何实现对岩爆的准确预测, 对于岩爆灾害的防治及确保地下工程的安全建设具有重大意义和较高的工程应用价值。

大量工程实例表明, 岩爆是一种非常复杂的动力地质现象, 其涉及到的影响因素众多, 不仅包括岩体的结构、强度及力学性质等内因, 还有开挖围岩引起的应力和能量变化等外因。目前, 国内外大部分学者倾向于采用多指标综合评价法来对岩爆进行预测和评价, 如专家系统法^[4]、模糊数学综合评判方法^[5]、人工神经网络法^[6-9]、距离判别分析法^[10]、支持向量机法^[11]、未确知测度评价法^[12]等。这些评价方法在岩爆预测中发挥了积极作用, 但有些仍存在一定的不足。如: 专家系统法主观性较强, 且实现比较困难; 模糊数学综合评判法过度强调极值作用, 容易丢失有效信息; 人工神经网络法依赖于学习样本的容量, 样本较少时预测精度往往不高。

灰色系统理论是我国学者邓聚龙教授在 20 世纪 80 年代初创建的关于系统工程的理论, 后来, 刘思峰等^[13]对其进行了深入的研究, 并取得了一系列新的进展。该理论以不确定系统为研究对象, 通过对部分已知信息的生成和开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行规律的准确分析、预测、决策和控制。迄今为止, 该理论已广泛应用于众多领域, 并取得了丰富的研究成果。由于岩爆是内、外多因素综合作用的结果, 这些因素在岩爆的孕育过程中所起的作用有些比较确定, 有些尚不十分清楚。因此,

可将岩爆与其影响因素间的复杂关系当作灰色系统, 利用灰色聚类法进行研究。姜彤等^[14]在对权重分析及灰色理论研究的基础上, 建立了岩爆预测数学模型, 结合综合评判指数方法对南水北调西线工程长恰线引水线路某典型洞段进行了合理的预测。谢学斌和潘长良^[15]采用灰色聚类法对国内外若干岩爆案例进行分析, 发现该方法预测的准确率较高。然而, 传统的岩爆预测灰评估模型存在多重交叉性及不满足规范性等缺陷, 对预测结果会产生负面影响。

鉴于此, 本文借鉴三角白化权函数中心点构造法^[13]的思想, 对传统模型进行优化, 并选取影响岩爆的主要因素, 建立了改进的岩爆预测灰评估模型。该模型解决了传统模型存在的灰类多重交叉性及不满足规范性等问题, 理论上更完备。利用改进模型对国内外若干深部岩石工程岩爆初始数据进行预测分析, 进一步检验改进模型的有效性及其实用性, 为岩爆的准确预测提供了一种切实可行的途径。

2 灰色聚类法基本原理及实施方案

灰色聚类属于灰评估理论, 是灰色系统理论的重要组成部分, 它依据不同聚类指标所拥有的白化数将聚类对象(或观测对象)按事先划分的灰类进行归纳, 以判定该聚类对象所属的类别^[13, 16]。

设有 n 个聚类对象, m 个聚类指标, s 个不同的灰类, 记 x_{ij} 为对象 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 对于聚类指标 $j(j=1, 2, \dots, m)$ 的样本; $f_j^k(\cdot)$ 为 j 指标 $k(k=1, 2, \dots, s)$ 灰类对应的白化权函数; η_j^k 为 j 指标 k 灰类的权, 则样本的矩阵 L 满足:

$$L = (x_{ij})_{nm} \quad (1)$$

依据 x_{ij} 的值将对象 i 进行归类, 主要步骤如下:

(1) 根据所要区分的灰类数目, 将指标 j 的取值范围相应地划分为 s 个灰类。

(2) 构造各指标白化权函数 $f_j^k(\cdot)$ 及权系数 η_j^k 。

(3) 赋予各指标权重并计算综合聚类系数 σ_i^k , 即对象 i 关于灰类 k 的综合聚类系数表达式为

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \eta_j^k \quad (2)$$

(4) 由 $\sigma_i^{k^*} = \max_{1 < k < s} \{\sigma_i^k\}$ 判断对象 i 属于灰类 k^* 。

3 岩爆预测的灰评估模型

参考关于岩爆烈度评判指标体系方面的研究成果^[1,3,5,10,17],根据岩爆的成因及特点,选取洞壁围岩的最大切应力 σ_θ 、单轴抗压强度 σ_c 、单轴抗拉强度 σ_t 及岩石弹性能量指数 W_{et} 作为影响岩爆的主要因素,并以应力系数 σ_θ/σ_c 、脆性系数 σ_c/σ_t 及弹性能量指数 W_{et} 作为判定岩爆发生与否及烈度等级的评价指标。这些指标涵盖了岩爆发生的内、外多因素下的综合条件,具有较好的代表性,且可以通过室内试验或现场测试获取。王元汉等^[5]给出了岩爆烈度与上述3个指标之间的关系,如表1所示。

表1 岩爆烈度与评价指标之间的关系^[5]

Fig.1 Relationship between rockburst classification and evaluation indexes^[5]

岩爆烈度	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
无岩爆	< 0.3	> 40.0	< 2.0
弱岩爆	0.3 ~ 0.5	26.7 ~ 40.0	2.0 ~ 3.5
中等岩爆	0.5 ~ 0.7	14.5 ~ 26.7	3.5 ~ 5.0
强烈岩爆	> 0.7	< 14.5	> 5.0

结合节2可知,预测岩爆的聚类指标数目 $m = 3$,可能发生的岩爆灰类数 $s = 4$,各灰类对应的岩爆情况依次分为无岩爆($k = 1$)、弱岩爆($k = 2$)、中等岩爆($k = 3$)及强烈岩爆($k = 4$)。

3.1 传统的岩爆预测灰评估模型

依据岩爆烈度与评价指标之间的关系(见表1^[5]),谢学斌和潘长良^[15]给出了传统模型的白化权函数灰类交叉形式,如图1所示。图1中, $a_1 \sim a_3$ 对应于表1^[5]中各聚类指标的3个分类界限值, $\lambda_1 = (a_1 + a_2)/2$, $\lambda_2 = (a_2 + a_3)/2$, a_4 和0为各聚类指标取数域的延拓值。

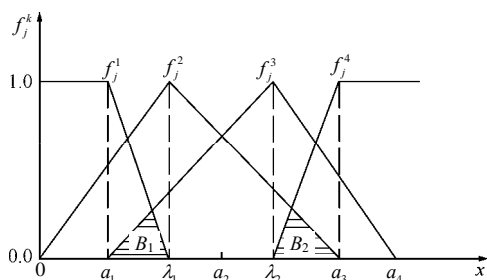


图1 传统模型的白化权函数灰类交叉示意图^[15]

Fig.1 Crossing sketch of whitenization weight function for traditional model^[15]

结合图1^[15]可知,传统的岩爆预测灰评估模型存在以下问题:

(1) 白化权函数含有3个及3个以上灰类的,出现多重交叉现象,如图1^[15]中的阴影部分。

证明:令传统的岩爆预测灰评估模型中灰类1与灰类2的交叉域为 A_1 ,灰类2与灰类3的交叉域为 A_2 ,灰类3与灰类4的交叉域为 A_3 , $B_1 = A_1 \cap A_2$, $B_2 = A_2 \cap A_3$ 。由图1可知,灰类1~3取值范围分别为 $[0, \lambda_1)$, $[0, a_3)$ 及 $[a_1, a_4]$ 。则: $A_1 = [0, \lambda_1)$, $A_2 = [0, a_3) \cap [a_1, a_4] = [a_1, a_3)$; $B_1 = A_1 \cap A_2 = [0, \lambda_1) \cap [a_1, a_3) = [a_1, \lambda_1) \neq \emptyset$ 。

同理可证,灰类2,3及4的共同交叉域 $B_2 = [a_2, a_3) \neq \emptyset$ 。证毕。

(2) 不满足规范性,即当指标 j 的观测值 $x \in [a_1, \lambda_1)$ (或 $x \in [\lambda_1, \lambda_2]$ 及 $x \in [\lambda_2, a_3)$)时,有

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^4 f_j^k(x) &\neq 1 \\ \sum_{k=1}^4 \sigma_i^k &\neq 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

证明:令 $x \in [a_1, \lambda_1)$,根据端点白化权函数的构造方法,可得

$$\sum_{k=1}^4 f_j^k(x) = \frac{\lambda_1 - x}{\lambda_1 - a_1} + \frac{x}{\lambda_1} + \frac{x - a_1}{\lambda_2 - a_1} > \frac{\lambda_1 - x}{\lambda_1 - a_1} + \frac{x}{\lambda_1} > \frac{\lambda_1 - x}{\lambda_1 - a_1} + \frac{x - a_1}{\lambda_1 - a_1} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^4 \sigma_i^k = \sum_{j=1}^3 [f_j^1(x) + f_j^2(x) + f_j^3(x) + f_j^4(x)] \eta_j > \sum_{j=1}^3 \eta_j = 1 \quad (5)$$

同理,当 $x \in [\lambda_1, \lambda_2]$ 或 $[\lambda_2, a_3)$ 时,也有上述结果。证毕。

可见,传统的岩爆预测灰评估模型采用端点白化权函数构造方法,其构建的灰评估模型存在灰类多重交叉性及不满足规范性等缺陷,对岩爆的预测结果会产生一定的负面影响,需要对其进行改进。

3.2 改进的岩爆预测灰评估模型

中心点白化权函数构造法在划分灰类时,将属于某灰类程度最大的点设为中心点,并将灰类向不同方向进行延拓。与端点白化权函数构造方法相比,中心点构造法在划分灰类时有效避免了灰类间多重交叉性的缺陷。

基于此,本文采用中心点白化权函数构造法对传统模型进行优化,建立了改进的岩爆预测灰评估

模型，改进模型的白化权函数灰类交叉形式如图 2 所示。图 2 中， λ'_1, λ'_2 分别对应灰类 2 和灰类 3 聚类指标分界线的中心点， λ'_0, λ'_3 分别为灰类 1 和 4 的白化权函数转折点。依据岩爆评价指标绘制的白化权函数如图 3 所示。

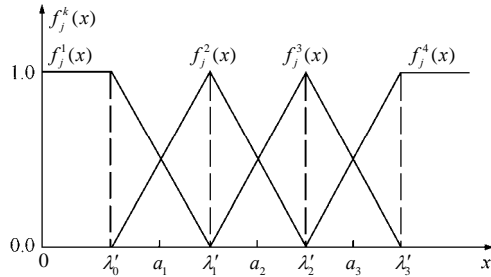
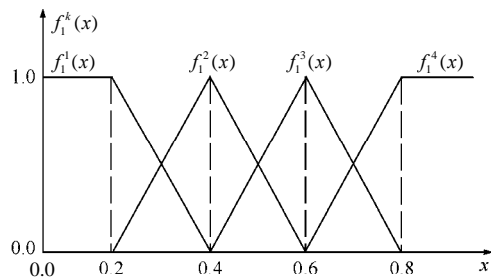
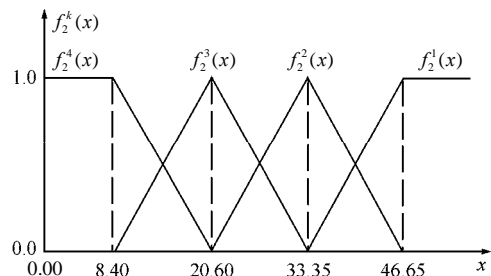


图 2 改进模型的白化权函数灰类交叉示意图

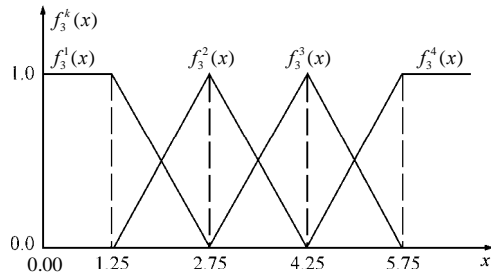
Fig.2 Crossing sketch of whitenization weight function for modified model



(a) 应力系数 σ_θ / σ_c 的白化权函数



(b) 脆性系数 σ_c / σ_t 的白化权函数



(c) 弹性能量指数 W_α 的白化权函数

图 3 岩爆不同评价指标下改进模型的白化权函数交叉图

Fig.3 Crossing sketches of whitenization weight function for modified model under different evaluation indexes

根据几何关系可知， $\lambda'_0 = 2a_1 - \lambda'_1$ ， $\lambda'_3 = 2a_3 - \lambda'_2$ 。不同类型的白化权函数如下：

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0 & (x \notin [0, \lambda_1]) \\ \frac{\lambda_1 - x}{\lambda_1 - \lambda_0} & (x \in [\lambda_0, \lambda_1]) \\ 1 & (x \in [0, \lambda_0]) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_j^2(x) = \begin{cases} \frac{x - \lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_0} & (x \in [\lambda_0, \lambda_1]) \\ 0 & (x \notin [\lambda_0, \lambda_2]) \\ \frac{\lambda_2 - x}{\lambda_2 - \lambda_1} & (x \in [\lambda_1, \lambda_2]) \end{cases} \quad (7)$$

$$f_j^3(x) = \begin{cases} \frac{x - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} & (x \in [\lambda_1, \lambda_2]) \\ 0 & (x \notin [\lambda_1, \lambda_3]) \\ \frac{\lambda_3 - x}{\lambda_3 - \lambda_2} & (x \in [\lambda_2, \lambda_3]) \end{cases} \quad (8)$$

$$f_j^4(x) = \begin{cases} 0 & (x < \lambda_2) \\ \frac{x - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} & (x \in [\lambda_2, \lambda_3]) \\ 1 & (x > \lambda_3) \end{cases} \quad (9)$$

与传统的岩爆预测灰评估模型相比，改进模型的白化权函数不存在灰类多重交叉现象，且满足规范性要求。

(1) 白化权函数不存在多重交叉现象。

证明：令改进的岩爆预测灰评估模型中灰类 1 与灰类 2 的交叉域为 C_1 ，灰类 2 与灰类 3 的交叉域为 C_2 ，灰类 3 与灰类 4 的交叉域为 C_3 ， $D_1 = C_1 \cap C_2$ ， $D_2 = C_2 \cap C_3$ 。由图 2 可知，灰类 1~3 的取值范围分别为 $[0, \lambda_1)$ ， $[\lambda_0, \lambda_2]$ 及 $[\lambda_1, \lambda_3]$ 。则有： $C_1 = [0, \lambda_1) \cap [\lambda_0, \lambda_2) = [\lambda_0, \lambda_1)$ ； $C_2 = [\lambda_0, \lambda_2) \cap [\lambda_1, \lambda_3) = [\lambda_1, \lambda_2)$ ； $D_1 = C_1 \cap C_2 = [\lambda_0, \lambda_1) \cap [\lambda_1, \lambda_2) = \emptyset$ 。

同理可证，改进的岩爆预测灰评估模型中灰类 2, 3, 4 的共同交叉域 $D_2 = \emptyset$ 。证毕。

(2) 改进的岩爆预测灰评估模型满足规范性，即当指标 j 的观测值 $x \in [\lambda_0, \lambda_1]$ (或 $x \in [\lambda_1, \lambda_2]$ ， $x \in [\lambda_2, \lambda_3]$) 时，有

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^4 f_j^k(x) &= 1 \\ \sum_{k=1}^4 \sigma_i^k &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

证明：令 $x \in [\lambda_0, \lambda_1]$ ，根据式(6)~(9)可得

$$\sum_{k=1}^4 f_j^k(x) = \frac{\lambda_1 - x}{\lambda_1 - \lambda_0} + \frac{x - \lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_0} = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^4 \sigma_i^k = \sum_{j=1}^3 [f_j^1(x) + f_j^2(x) + f_j^3(x) + f_j^4(x)] \eta_j = \sum_{j=1}^3 \eta_j = 1 \quad (12)$$

同理，当 $x \in [\lambda_1, \lambda_2]$ 或 $[\lambda_2, \lambda_3]$ 时也有上述结果。证毕。

考虑到岩爆聚类指标的意义、量纲不同，且在数量上悬殊较大，为了避免某些指标参与聚类的作用减小，采用灰色定权聚类进行计算。结合专家经验法以及对岩爆初始资料的研究分析^[15]，岩爆各聚类指标的权值依次取 $\eta_1 = 0.4$ ， $\eta_2 = 0.3$ ， $\eta_3 = 0.3$ 。依据节 2 中步骤(3)~(4)进行操作，即可对岩爆灾害进行较合理地分类。

4 工程应用

为了检验改进的灰评估模型在岩爆预测中的有效性及可行性，以王元汉等^[5]统计的国内外若干深部岩石地下工程岩爆初始数据(见表 2)进行分析，并与传统模型预测结果进行比较(见表 3)。由表 3 可知，改进模型预测精度较高，除个别工程实例与实际情况有一定的差异外，总体上二者吻合较好。由此可见，采用改进的灰评估模型进行岩爆灾害预测是合理、可行的，具有较高的工程应用价值。

表 2 国内外若干工程岩爆分析初始数据资料

Table 2 Basic data for rockburst analysis of some projects at home and abroad

编号	工程名称	σ_θ /MPa	σ_c /MPa	σ_1 /MPa	W_{ei}	实际情况
1	二滩水电站 2#支洞	90.00	220	7.4	7.3	轻微岩爆
2	龙羊峡水电站 地下洞室	18.80	178	5.7	7.4	无岩爆
3	鲁布革水电站 地下隧洞	34.00	150	5.4	7.8	无岩爆
4	渔子溪水电站 引水隧洞	90.00	170	11.3	9.0	中~强级岩爆
5	李家峡水电站 地下洞室	11.00	115	5.0	5.7	无岩爆
6	瀑布沟水电站 地下洞室	43.40	123	6.0	5.0	发生岩爆
7	锦平二级水电站 引水隧洞	98.60	120	6.5	3.8	中~弱级岩爆
8	挪威 Sima 水电站 地下厂房	48.75	180	8.3	5.0	发生岩爆
9	挪威 Sewage 隧道	75.00	180	8.3	5.0	中级岩爆
10	瑞典 Vietas 水电站 引水隧道	80.00	180	6.7	5.5	弱岩爆
11	前苏联 Rasvum chorr 矿井巷	57.00	180	8.3	5.0	中级岩爆
12	意大利 Raibi 铅硫化锌矿井巷	108.40	140	8.0	5.5	中级岩爆
13	瑞典 Forsmark 核电站 冷却水隧洞	50.00	130	6.0	5.0	中级岩爆
14	日本关越隧道	89.00	236	8.3	5.0	中级或强岩爆
15	太平驿水电站 引水隧洞	62.60	165	9.4	9.0	400 多例岩爆，破坏规模不等

表 3 改进的灰评估模型与传统模型预测结果对比表

Table 3 Comparison of prediction results between modified and traditional grey evaluation models

序号	岩爆主要影响因子			传统的灰评估模型综合聚类系数					改进的灰评估模型综合聚类系数					岩爆判定结果		实际情况
	σ_θ / σ_c	σ_c / σ_1	W_{ei}	σ_i^1	σ_i^2	σ_i^3	σ_i^4	$\sum_{k=1}^4 \sigma_i^k$	σ_i^{1*}	σ_i^{2*}	σ_i^{3*}	σ_i^{4*}	$\sum_{k=1}^4 \sigma_i^{k*}$	改进模型	传统模型	
1	0.410	29.7	7.3	0.000	0.629	0.447	0.300	1.376	0.000	0.594	0.106	0.300	1.000	弱	弱(+)	轻微(+)
2	0.106	31.2	7.4	0.400	0.372	0.272	0.300	1.344	0.400	0.249	0.051	0.300	1.000	无	无(+)	无(+)
3	0.227	27.8	7.8	0.400	0.439	0.304	0.300	1.443	0.346	0.223	0.131	0.300	1.000	无	弱	无(+)
4	0.530	14.8	9.0	0.000	0.232	0.574	0.585	1.391	0.000	0.140	0.418	0.442	1.000	中~强	中~强(+)	中~强(+)
5	0.096	23.0	5.7	0.400	0.231	0.487	0.300	1.418	0.400	0.056	0.254	0.290	1.000	无	中	无(+)
6	0.360	24.6	5.0	0.160	0.519	0.581	0.300	1.56	0.080	0.415	0.355	0.150	1.000	弱	弱~中	发生岩爆(+)
7	0.820	18.5	3.8	0.000	0.224	0.557	0.503	1.284	0.000	0.090	0.458	0.452	1.000	中~强	中~强	中~弱
8	0.270	21.7	5.0	0.400	0.385	0.549	0.300	1.634	0.260	0.166	0.424	0.150	1.000	中	中(+)	发生岩爆(+)
9	0.420	21.7	5.0	0.000	0.488	0.704	0.300	1.492	0.000	0.385	0.465	0.150	1.000	中	中(+)	中(+)
10	0.440	26.7	5.5	0.000	0.541	0.627	0.300	1.468	0.000	0.464	0.286	0.250	1.000	弱	中	弱(+)
11	0.317	21.7	5.0	0.332	0.432	0.567	0.300	1.631	0.166	0.260	0.424	0.150	1.000	中	中(+)	中(+)
12	0.774	17.5	5.5	0.000	0.048	0.611	0.853	1.512	0.000	0.000	0.326	0.674	1.000	强	强	中
13	0.380	21.7	5.0	0.080	0.494	0.650	0.300	1.524	0.040	0.386	0.424	0.150	1.000	中	中(+)	中(+)
14	0.377	22.1	5.0	0.092	0.498	0.640	0.300	1.530	0.046	0.389	0.415	0.150	1.000	中	中	中~强
15	0.380	17.6	9.0	0.080	0.429	0.415	0.447	1.371	0.040	0.361	0.226	0.373	1.000	发生岩爆，等级不定	有岩爆，等级不定(+)	发生岩爆，规模不等(+)

注：“(+)”表示该样本与改进模型的判别结果一致。

5 结 论

(1) 岩爆的发生与否及烈度等级的判定受岩体内、外因多种因素的影响，将其与影响因素之间的关系作为一个灰色系统进行研究。通过选取 $\sigma_{\theta} / \sigma_c$ ， σ_c / σ_1 及 W_{et} 作为岩爆评价指标，并对传统的灰评估模型进行优化，建立了改进的岩爆预测灰评估模型。该模型解决了传统模型存在的灰类多重交叉性及不满足规范性等问题，理论上更完备，且还具有形式简洁、未知数少、编程方便等特点。

(2) 采用改进模型对国内外若干深部岩石工程岩爆初始数据进行研究分析，并与传统模型的计算结果进行对比，发现改进模型的预测结果与实际情况吻合较好，预测精度更高，从而验证了改进模型的有效性及其实用性，为岩爆的准确预测提供一种切实可行的途径。

(3) 基于灰色聚类理论建立的改进模型，其预测的精度及可靠性取决于岩爆主要影响因素的选取和白化权函数的构建方法，若能较合理地解决这些问题势必会进一步提高岩爆的预测精度。因此，本文建立的改进模型只是初步尝试，有些问题仍有待进一步研究。

参考文献(References)：

- [1] 徐桂生,王兰生,李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3):300-303.(XU Guisheng, WANG Lansheng, LI Yonglin. Study on mechanism and judgment of rockbursts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 300-303.(in Chinese))
- [2] 齐庆新,陈尚本,王怀新,等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11):1 852-1 858. (QI Qingxin, CHEN Shangben, WANG Huaixin, et al. Study on the relations among coal bump, rockburst and mining tremor with numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 852-1 858.(in Chinese))
- [3] 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.(ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 034-2 042.(in Chinese))
- [4] FENG X T, WEBBER S, OZBAY M U, et al. An expert system on assessing rockburst risks for South African deep gold mines[J]. Journal of Coal Science and Engineering(China), 1996, (2): 23-32.
- [5] 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 Yuanhan, LI Wodong, LI Qiguang, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493-501.(in Chinese))
- [6] FENG X T, WEBBER S, OZBAY M U, et al. Neural network assessment of rockburst risks for deep gold mines in South Africa[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1998, 8(2): 335-341.
- [7] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社, 2000: 290-294.(FENG Xiating. Introduction to intelligent rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2000: 290-294.(in Chinese))
- [8] 丁向东,吴继敏,李健,等. 岩爆分类的人工神经网络预测方法[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(4): 424-427.(DING Xiangdong, WU Jimin, LI Jian, et al. Artificial neural network for forecasting and classification of rockbursts[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2003, 31(4): 424-427.(in Chinese))
- [9] CHEN H J, LI N H, NIE D X, et al. Prediction of rockburst by artificial neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 762-768.
- [10] 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): 1 012-1 018.(GONG Fengqiang, LI Xibing. 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): 1 012-1 018.(in Chinese))
- [11] 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 Hongbo. Classification of rockburst using support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 642-644.(in Chinese))
- [12] 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1): 2 720-2 726. (SHI Xiuzhi, 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): 2 720-2 726.(in Chinese))
- [13] 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 5版. 北京:科学出版社, 2010: 1-8.(LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng, et al. Grey system theory and its application[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2010: 1-8.(in Chinese))
- [14] 姜彤,黄志全,赵彦彦. 动态权重灰色归类模型在南北水北调西线工程岩爆风险评估中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 104-1 108.(JIANG Tong, HUANG Zhiquan, ZHAO Yanyan. Dynamically weighted grey optimization model for rockburst risk forecasting and its application to western route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 104-1 108.(in Chinese))
- [15] 谢学斌,潘长良. 岩爆灾害的灰类白化权函数聚类预测方法[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2007, 34(8): 16-20.(XIE Xuebin, PAN Changliang. Rockburst prediction method based on grey whitenization weight function cluster theory[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(8): 16-20.(in Chinese))
- [16] 赵继印,郑蕊蕊,刘宇. 基于梯形灰色聚类分析的电力变压器故障诊断[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, (3): 726-730.(ZHAO Jiying, ZHENG Ruirui, LIU Yu. Power transformer fault diagnosis based on trapezium gray clustering analysis[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2008, (3): 726-730.(in Chinese))
- [17] 谷明成,何发亮,陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 324-1 329.(GU Mingcheng, HE Faliang, CHEN Chengzong. Study on rockburst in Qinling Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 324-1 329.(in Chinese))