

岩爆预测的改进集对分析模型

汪明武¹, 李 丽², 金菊良¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 正确预测岩爆是灾害治理和工程措施的基础。应用集对分析理论探讨了岩爆预测新方法, 建立了基于接近度概念的模糊差异度系数的改进计算模型, 实例及同其他方法的对比应用表明: 基于改进的集对分析方法来预测岩爆是有效可行的, 且取得了较好的结果。

关 键 词: 岩爆; 集对分析; 模糊联系度

中图分类号: TU457; O159

文献标识码: A

An improved set pair analysis model for the prediction of rockburst

WANG Ming-wu¹, LI Li², JIN Ju-liang¹

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China)

Abstract: The exact predication of rockburst is a foundation for the disaster harness of rockburst and engineering measures. An improved calculation model for the predication of rockburst using the theory of set pair analysis (SPA) based on data mining is discussed. A model for data mining in fuzzy difference coefficient using the concept of the approach degree is investigated during the procedure of SPA. The results from the application to practical example and comparisons with other methods are fairly good. And they also show that the improved method of SPA used to forecast intensity of rockburst is feasible and effective.

Key words: rockburst; set pair analysis; fuzzy degree of connection.

1 引 言

岩爆是一种高地应力环境下的极为复杂的岩石动力失稳现象, 常造成地下工程的灾害性破坏, 并严重威胁施工人员的生命安全, 故岩爆预测具有重要的现实意义^[1,2]。然而, 岩爆的发生和发展受诸多不确定因素的影响和控制, 至今人们对其形成机制还没有形成统一的认识。显然, 岩爆预测是一个复杂难题。岩爆预测主要的方法有地质分析方法、原地测试方法、数值分析和模糊数学综合评判方法等, 地质分析方法只能初步预测, 不能量化预报烈度; 声发射法和应力测量法等方法则多为基于单个或少数指标来预报, 它们无法整体反映岩爆发生的复杂性, 也很难预测岩爆的滞后性; 数值分析法(如有限单元法)的结果则无法体现影响岩爆发展的一些重要因素(如围岩的致密程度、微裂隙的尺度和产

状等)。为此, 人们引入了模糊数学方法、灰色系统理论来预测岩爆, 如模糊综合评判法和灰色系统评判法等^[3,4], 并取得了一定的效果, 但对各影响因素之间的相互关系很少深入探讨, 且预报需人为设定主要因子及各判别因子的权值, 但岩爆是一种突发性的复杂灾变过程, 专家确定的重要性权值或基于指标值确定的客观权值, 很难全面反映影响因素间的相互依赖或相互关联的程度, 也限制了它们的应用。神经网络方法、支持向量机方法和距离判别方法等虽然解决了此难题^[5-10], 但它们受知识获取“瓶颈”问题的限制, 存在应用局限性; 近期出现的物元分析方法虽能全面地反映岩爆发生的实际特征^[11], 但也存在遗漏重要约束条件问题, 而集对分析理论则可避免这些缺陷, 也为岩爆预测的提供了新途径。本文以集对分析理论为基础, 引入模糊联系度的思想对集对差异度系数充分进行数据挖掘, 以建

收稿日期: 2008-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 70771035, 40702049), 安徽省优秀青年科技基金项目(No. 08040106830)

作者简介: 汪明武, 男, 1972年生, 博士, 教授, 主要从事地震岩土工程和防灾工程研究方面的工作。

立可避免知识获取和平均因子权重确定等难题的、岩爆预测的集对分析新模型,以对岩爆进行合理、及时的预报,尝试从新的角度探索基于多因素的、更具客观性、通用性的定量岩爆预测方法。

2 岩爆预测的改进集对分析模型

2.1 集对分析基本原理及评价流程

岩爆预测集对分析基本原理是通过数据挖掘计算待估样本的评价指标实测值集合与岩爆烈度标准集合之间的集对联系度,进而定量预测岩爆。待估样本的集对联系度同异反判别标准设计为:若评价指标值处于讨论岩爆烈度内则为同一,处于讨论烈度的相邻烈度内则为异,处于相隔烈度内则为对立。

基于改进集对分析方法的岩爆预测具体步骤如下:(1)首先基于样本实测值、岩爆烈度标准和同异反判别标准构建集对联系度表达式;(2)基于构建的表达式,计算样本中落入相邻烈度评价指标与讨论岩爆烈度的接近程度,并应用模糊联系度进行差异度的数据挖掘,以求得最佳集对联系度;(3)计算样本对讨论岩爆烈度的隶属度,再量化预报样本的岩爆烈度。

2.2 集对联系度

集对分析方法是 由我国学者赵克勤于 1989 年提出的一种关于确定-不确定系统同异反定量分析的系统分析方法,该法能完整、有效地刻画确定-不确定系统的对立统一关系,并在工程界得到应用^[12]。它是将被研究客观事物的确定-不确定性视为一个确定-不确定系统,从同异反三方面研究客观事物之间的联系与转化,即以联系度来描述系统的各种不确定性。集对分析理论最基本的概念是集对和联系度。集对是指具有一定联系的两个集合组成的整体^[12]。对给定集合 A 和 B ,则两个集合组成的集对为 $H=(A, B)$ 。设集对有 N 个特性,其中共同具有的特性数为 S ,相互对立的特性数为 P ,既不共同也不相互对立的特性数为 F ,则相应的集对联系度表达式可构建如下:

$$\mu_{(A,B)} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (1)$$

式中: j 为对立度系数,常取 $j=-1$; i 为差异度系数, $i \in [-1, 1]$,是宏观与微观两个层次相互结合的参量,它是集对分析的关键。

2.3 模糊联系度及计算

为确保岩爆预测评价结果的准确性和可靠性,且能体现对不确定性程度的刻画,在集对分析过程中,不仅仅是简单确定被评价样本的指标集合与讨

论岩爆烈度标准集合间的同异反联系度,还必须对差异度系数信息进行深入挖掘,以挖掘处于相邻烈度中的评价指标与所讨论岩爆烈度间的联系度。本文应用模糊联系度来对差异度系数进行数据信息的充分挖掘和定量分析,而实现集对能完整描述客观对象和主观认识的确定-不确定性。对某一特性上的同异反模糊刻画,式(1)应该定义为信息意义上的确定性与不确定性模糊结构表达式。设模糊子集 \tilde{A} 、 \tilde{A}^c 为论域 X 中确定性信息和不确定性信息,则它们是一种对立描述,相应定义信息 x 关于 \tilde{A} 、 \tilde{A}^c 的确定度和差异度分别为 $\mu_{\tilde{A}}(x) = a + c$, $\mu_{\tilde{A}^c}(x) = b$,且 $\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{A}^c}(x) = 1$,其中 a , c 为 x 对确定信息的同一度和对立度。若令 $a = S/N$, $b = F/N$, $c = P/N$, $a + b + c = 1$,则待评样本 p 的岩爆属于 k 级($k = 1, 2, \dots, K$)烈度的模糊联系度定义为

$$\mu_{(p,k)} = a_{p,k} + b_{p,k}i + c_{p,k}j \quad (2)$$

式中: $a_{p,k}$ 、 $b_{p,k}$ 、 $c_{p,k}$ 分别是待估样本 p 对岩爆烈度 k 的同一度、差异度和对立度。

由上分析可知,差异度的合理确定是基于信息意义集对分析的关键,而差异度的数据挖掘过程实质是 $b_{p,k}$ 的分解过程。当样本评价指标值随岩爆烈度增加而增大时,设样本 p 实测的评价指标 x_{pm} 落在相邻烈度 n 的指标标准内,共有 M 个,以接近程度来描述 x_{pm} 与烈度 k 的模糊联系度。当 x_{pm} 落在相邻烈度 $k+1$ 内时, x_{pm} 与烈度 k 的接近程度为 $S_{k+1,m}/x_{pm} + x_{pm}/S_{k+2,m}$,并将它们归一化后的数值作为接近程度的肯定和否定,即作为集对 (x_{pm}, B_k) 的同一度与对立度,则相应的差异度为

$$b = 1 - \frac{S_{k+1,m}S_{k+2,m}}{(S_{k+1,m} + S_{k+2,m})x_{pm}} - \frac{x_{pm}}{S_{k+1,m} + S_{k+2,m}} = \frac{(x_{pm} - S_{k+1,m})(S_{k+2,m} - x_{pm})}{(S_{k+1,m} + S_{k+2,m})x_{pm}} \quad (3)$$

式中: $S_{k+1,m}$ 、 $S_{k+2,m}$ 为相邻烈度 m 指标的界限值。则落在相邻烈度内的评价指标 m 对烈度 k 相应指标标准的模糊联系度表达式如下:

$$\mu_{pm,k} = \frac{S_{k+1,m}S_{k+2,m}}{(S_{k+1,m} + S_{k+2,m})x_{pm}} + \frac{(x_{pm} - S_{k+1,m})(S_{k+2,m} - x_{pm})}{(S_{k+1,m} + S_{k+2,m})x_{pm}}i + \frac{x_{pm}}{S_{k+1,m} + S_{k+2,m}}j \quad (4)$$

而当 x_{pm} 落在相邻烈度 $k-1$ ($k-1 \neq 0$) 时,相应的模糊联系度表达式则为

$$\mu_{pm,k} = \frac{x_{pm}}{S_{k-1,m} + S_{k,m}} + \frac{(x_{pm} - S_{k-1,m})(S_{k,m} - x_{pm})}{(S_{k-1,m} + S_{k,m})x_{pm}}i +$$

$$\frac{S_{k-1,m}S_{k,m}}{(S_{k-1,m} + S_{k,m})x_{pm}} j \quad (5)$$

对 M 个指标对烈度 k 分别进行信息深层次的挖掘分析，并取平均值作为相应的综合模糊联系度，即

$$\bar{a}_{p,k} = \frac{1}{M} \sum_m a_{pm,k}, \quad \bar{b}_{p,k} = \frac{1}{M} \sum_m b_{pm,k}, \quad \bar{c}_{p,k} = \frac{1}{M} \sum_m c_{pm,k} \quad (6)$$

式中： $a_{pm,k}$ 、 $b_{pm,k}$ 、 $c_{pm,k}$ 分别为样本 p 落在相邻烈度内的指标对烈度 k 的同一度、差异度和对立度。将上分解值叠加入式 (2)，即可得数据充分分析后的集对联系度：

$$\mu_{(p,k)} = (a_{p,k} + \bar{a}_{p,k}b_{p,k}) + \bar{b}_{p,k}b_{p,k}i + (c_{p,k} + \bar{c}_{p,k}b_{p,k})j \quad (7)$$

可见，模糊联系度的深层次同异反定量分析过程是对不确定性的进一步分析过程，它是在对不确定性系统深入认识过程中获到的有效信息，从而可提高评价结果的准确性和可靠性。

2.4 模糊联系度及计算

基于信息深层次分析后的集对联系度，计算样本对讨论烈度 k 的隶属度 μ_{pk} 。对于岩爆预测问题，经深层次信息挖掘后，构成的集对联系度已能满足实际工程的准确度要求，即取 $i=0$ ， $j=-1$ 来计算样本对讨论烈度的隶属度，再按最大隶属度对应的烈度作为预测结果的准则来判定岩爆烈度。为避免应用最大隶属度原则造成判定失真，以及实现定量描述集对分析结果，本文采用特征值 k^* 来定量化评定结果，计算公式如下：

$$k^* = \frac{\sum_{k=1}^K k \bar{\mu}_{pk}}{\sum_{k=1}^K \bar{\mu}_{pk}} \quad (8)$$

$$\bar{\mu}_{pk} = \frac{\mu_{pk} - \text{Min}_k(\mu_{pk})}{\text{Max}_k(\mu_{pk}) - \text{Min}_k(\mu_{pk})} \quad (9)$$

式中： k^* 为待评样本的岩爆烈度特征值； μ_{pk} 为样本对岩爆烈度 k 的隶属度。

3 实例及讨论

3.1 实例数据及评判指标选取

为验证构建模型的正确性和有效性，选用了文献[3,11]数据作为实例。岩爆的发生和控制受诸多因素影响和控制，且不同学者提出的评判方法的评价指标选择也不尽相同。从已有文献报导可知，当今岩爆预测方法中的岩爆判据主要有 Russenes、Turchaninov、Hoek 等^[13,14]提出的围岩切向应力与围岩抗压强度比值的综合判据、Kidybinski 等^[15]提出围岩内部弹性应变能判据、陆家佑等^[13-15]提出岩性判据、侯发亮^[16]提出的临界深度判据、潘一山等^[17,18]提出的考虑岩体损伤判据等新判据。可见，影响岩爆的主要因素为围岩的特性和应力状态及能量等。本文选取了工程中易于获取和对比，且工程应用较好的评价指标来作评判依据，即选用了围岩最大切向应力与岩石抗压强度的比值 σ_θ/σ_c 、岩石抗压强度与抗拉强度的比值 σ_c/σ_t 和岩石冲击倾向指数 W_{et} 等 3 个指标作为评价岩爆烈度因子，它既考虑了围岩的特性，又反映了围岩中的应力水平，并将岩爆情况分为无岩爆、弱岩爆、中岩爆和强岩爆 4 个等级。

3.2 岩爆等级的改进集对分析过程

对岩爆预测问题的集对 $H(P, B_k)$ 中的集合 P ，可由待评样本 p 的评价指标 m ($m=1,2,\dots,3$) 实测值构成，集合 B_k ($k=1,2,\dots,4$) 为各岩爆烈度对应的指标值构成。样本指标实测值和岩爆烈度指标划分标准见表 1 和表 2。现以样本 1 为例来说明岩爆预测的集对分析过程。基于样本 1 指标实测值和烈度岩爆标准构建的联系度表达式如下：

$$\left. \begin{aligned} \mu_{(p_1, B_1)} &= \frac{0}{3} + \frac{1}{3}i + \frac{2}{3}j, \mu_{(p_1, B_2)} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}i + \frac{1}{3}j \\ \mu_{(p_1, B_3)} &= \frac{1}{3} + \frac{2}{3}i + \frac{0}{3}j, \mu_{(p_1, B_4)} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}i + \frac{1}{3}j \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

样本 1 中 $m_{(p_1, B_1)}$ 集对差异度的进一步数据挖掘过程为下：由 $m_{(p_1, B_1)}$ 集对联系度表达式可知，指标实测值落在弱岩爆内的判别因子存在围岩最大切向应力与岩石抗压强度的比值指标 ($m=1$)，据弱岩爆相

表 1 样本评价指标实测值

Table 1 Measured values of evaluation indexes of samples

样本 p	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\sigma_\theta/\sigma_c (m=1)$	0.3	0.41	0.106	0.227	0.53	0.38	0.096	0.36	0.82	0.315	0.27	0.37	0.42	0.38	0.44	0.317	0.377	0.774
$\sigma_c/\sigma_t (m=2)$	24.0	29.7	31.2	27.8	14.8	12.6	23.0	24.5	18.5	24.1	21.7	24.1	21.7	21.7	26.7	21.7	22.1	17.5
$W_{et} (m=3)$	6.6	7.3	7.4	7.8	9.0	9.0	5.7	5.0	3.8	9.3	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0

表 2 岩爆分级标准
Table 2 Classification standard of rockburst intensities

级别 k	σ_0/σ_c ($m=1$)	σ_c/σ_t ($m=2$)	W_{ct} ($m=3$)
无岩爆 ($k=1$)	0~0.3	40~50	1.0~2.0
弱岩爆 ($k=2$)	0.3~0.5	26.7~40	2.0~3.5
中岩爆 ($k=3$)	0.5~0.7	14.5~26.7	3.5~5.0
强岩爆 ($k=4$)	0.7~1.0	10~14.5	5.0~10.0

应的因子界限值为 $S_2 = 0.3$, $S_3 = 0.5$, 将实测值和界限值代入式 (4), 即可求得 $\mu_{11,1} = 0.625 + 0.000i +$

$0.375j$, 再按式 (6) 和式 (7) 可计算得数据挖掘后的最终模糊联系数, $\mu_{(1,1)} = 0.2083 + 0.0000i + 0.7917j$, 取 $i=0$, $j=-1$, 可计算得样本 4 对无岩爆的隶属度 μ_{11} 为 -0.5833。同理, 可求得样本 1 对弱岩爆、中岩爆和强岩爆的隶属度分别为 $\mu_{12} = 0.0637$, $\mu_{13} = 0.2717$, $\mu_{14} = 0.0637$, 代入式 (8) 和式 (9) 可求得烈度特征值为 3.00, 按烈度判定准则可判定样本 1 的岩爆烈度为中等。基于改进集对分析方法的岩爆预测结果见表 3。

表 3 预测结果及对比
Table 3 Results from SPA and comparisons

样本 p	μ_{p1}	μ_{p2}	μ_{p3}	μ_{p4}	本文方法		可拓方法 ^[11]	模糊数学 ^[1]
					k	k^*		
1	-0.5833	0.0637	0.2717	0.0637	3	3.00	中岩爆	强岩爆
2	-0.3462	0.3333	0.0229	-0.3333	2	2.37	弱岩爆	弱岩爆
3	-0.0151	-0.1178	-0.3039	-0.3333	1	1.49	无岩爆	无岩爆
4	-0.0531	-0.2522	-0.2494	-0.3333	1	1.56	无岩爆	无岩爆
5	-1.0000	-0.4614	0.7432	0.2052	3	3.19	中岩爆	中岩爆
6	-0.6728	-0.3333	0.0975	0.3333	4	3.32	强岩爆	弱岩爆
7	0.3333	-0.0897	-0.3333	-0.6168	1	1.62	无岩爆	无岩爆
8	-0.6903	0.4625	0.6903	-0.2041	3	2.78	中岩爆	中岩爆
9	-1.0000	-0.3845	0.6601	0.2821	3	3.19	强岩爆	中岩爆
10	-0.7338	0.0650	0.4877	0.0650	3	3.00	中岩爆	中岩爆
11	-0.3333	-0.2100	0.3333	-0.2433	3	2.96	中岩爆	中岩爆
12	-0.6814	0.4572	0.6814	-0.2095	3	2.78	中岩爆	中岩爆
13	-0.6405	0.4234	0.6405	-0.2433	3	2.76	中岩爆	中岩爆
14	-0.6728	0.4234	0.6728	-0.2433	3	2.77	中岩爆	中岩爆
15	-0.3585	0.3333	-0.0546	-0.3333	2	2.35	弱岩爆	弱岩爆
16	-0.7317	0.4234	0.7317	-0.2433	3	2.79	中岩爆	中岩爆
17	-0.6754	0.4292	0.6754	-0.2374	3	2.77	中岩爆	中岩爆
18	-1.0000	-0.7041	0.2280	0.6293	4	3.42	强岩爆	强岩爆

3.3 讨论

改进集对分析结果与其他方法的结果对比分析见表 3。从表 3 可知, 基于改进集对分析的预测结果与文献[3,11]方法的结果基本吻合, 而且基于改进集对分析方法的预测过程不需进行确定权值和基于样本训练获取评判知识的过程, 定量结果也接近样本的实际情况, 故应用集对分析方法来定量预测岩爆是有效可行的, 操作过程相对简单。

4 结 语

岩爆预测是地下采矿和水利等地下工程中一个重要难题。本文应用集对分析理论和接近度概念, 建立了基于改进集对分析方法的岩爆预测新模型, 实例应用及与其他方法对比结果表明, 应用集对分析方法来预测岩爆是有效可行的, 且可深入挖掘样本的评价信息, 避免了复杂的权值确定或知识获取的难题, 该方法具有简便、定量严密的特点, 也为

其他不确定工程问题评价提供了新的参考。岩爆预测是一个极其复杂的课题, 对方法在具体工程问题应用时, 还应对其适用性进行评价。

参 考 文 献

- [1] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 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.
- [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.
- [4] 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.

下转第 518

化为设计值并不能反映坝体建基面的实际情况,根据岩体力学参数的随机性,利用区域化变量和变异函数,通过克里格方程得到各试验点对建基面抗剪强度的贡献,根据统计的方法得到建基面的抗剪强度更能反映工程实际。

参 考 文 献

- [1] 蔡耀军,徐福兴. 大坝建基岩体抗剪强度取值[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 040—1 044.
- [2] 周火明. 三峡大坝混凝土与弱风化带下部建基面抗剪强度研究[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(3): 52—57.
- [3] 彭明亮. 武都水库坝址区岩体力学特性试验研究[J]. 四川水力发电, 2003, 22(2): 45—47.
- [4] 长江水利委员会长江科学院. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [5] 任自民, 马代馨, 沈泰, 等. 三峡工程坝基岩体工程研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
- [6] 严时仁, 王昆. 大朝山水电站工程地质条件及建基面优化选择[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 230—234.
- [7] 李仲春. 论坝基岩体抗剪强度计算值决断[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(1): 30—32.
- [8] 侯景儒, 黄竟先. 地矿统计学及其在矿产统计学中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1982.
- [9] 杨令强, 张社荣, 郭怀志, 等. 破损拱坝的安全评价[J]. 水电能源科学, 2002, 20(4): 11—13.
- [5] FENG X T, WANG L N. Rockburst prediction based on neural networks[J]. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 1994, 4(1): 7—14.
- [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.
- [7] 白明洲, 王连俊, 许兆义. 岩爆危险性预测的神经网络模型及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(4): 65—69.
- [8] 冯夏庭, 赵洪波. 岩爆预测的支持向量机[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(1): 57—59.
- [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.
- [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.
- [11] 杨莹春, 诸静. 一种新的岩爆分级预报模型及其应用[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 169—172.
- [12] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [13] 陶振宇. 高地应力区的岩爆及其判别[J]. 人民长江, 1987 (5): 25—32.
- [14] HOEK E, BROWN E T. *Underground Exavation in Rock*[M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [15] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1981, 18(4): 295—304.
- [16] 侯发亮, 刘小明, 王敏强. 岩爆成因再分析及烈度划分探讨[C]//第三届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992: 448—457.
- [17] 潘一山, 徐秉业. 考虑损伤的圆形洞室岩爆分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 152—156.
- [18] 唐礼忠, 王文星. 一种新的岩爆倾向性指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 874—878.

上接第 514 页