

DOI: 10.11779/CJGE201406013

基于证据理论的岩爆预测

贾义鹏, 吕 庆*, 尚岳全, 支墨墨, 杜丽丽

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 岩爆是高地应力地区岩石开挖中的一种动力破坏现象, 其机理复杂、影响因素众多, 单一的评价指标无法准确描述岩爆发生的可能性。基于信息融合思想, 提出一种能够综合考虑多指标共同作用的岩爆预测方法。该方法以证据理论为基础, 以岩爆等级为识别框架, 根据岩爆发生所需条件, 选取最大切向应力与岩石单轴抗压强度比值、岩石单轴抗压强度与抗拉强度比值、岩石弹性能量指数为证据体, 采用粗糙集理论客观确定了各证据体的确定信度, 建立了基于证据理论的岩爆烈度预测模型。12组工程实例的预测结果表明该模型具有较好的预测精度。将该模型应用于苍岭隧道和锦屏二级水电站探硐岩爆预测, 预测结果与实际情况完全吻合, 说明该模型具有较好的实用性。

关键词: 岩爆预测; 信息融合; 证据理论; 粗糙集

中图分类号: TU456 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)06-1079-08

作者简介: 贾义鹏(1981-), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事地下工程防灾减灾研究。E-mail: 870239264@qq.com。

Rockburst prediction based on evidence theory

JIA Yi-peng, LÜ Qing, SHANG Yue-quan, ZHI Mo-mo, DU Li-li

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

Abstract: Rockburst is a dynamic breakage phenomenon existing in rock excavation in high in-situ stress zone, and its mechanism is complicated and the occurrence is influenced by many factors. It is almost impossible to make the prediction of its intensity through any single evaluating factor. Based on the idea of information fusion, a methodology is proposed for predicting the rockburst using the evidence theory, which can reflect the comprehensive influences of different factors. Three indices related to the occurrence condition of rockburst are taken into account as evidences in the proposed method, including the ratio of the maximum tangential stresses on cavern boundaries to the uniaxial compressive strength of rock, the ratio of the uniaxial compressive strength to the uniaxial tensile strength of rock and the elastic energy index of rock. The basic probability assignment functions are objectively constructed using the rough set theory. The predicted results of 12 practical cases show that the evidence theory method has relatively high accuracy. Finally, the model is applied to Cangling tunnel and the exploratory tunnel of Jinping II Hydropower Station. The results agree well with the field situations, which again illustrates the practicability of the proposed method.

Key words: rockburst prediction; information fusion; evidence theory; rough set

0 引言

岩爆是高地应力地区的一种工程地质灾害, 具有较强的破坏性。强烈的岩爆严重威胁着施工人员的生命安全, 锦屏二级水电站、拉西瓦水电站、小官庄铁矿等项目都发生过岩爆造成人员伤亡的事故。随着中国经济的发展, 越来越多的采矿、交通、水利水电等工程将在深部岩体中开展, 高地应力环境下的岩爆防控问题将越来越突出^[1]。岩爆预测是岩爆防控工作的基础, 对岩爆的准确预测有助于进行合理的设计和施工, 从而避免或减少事故的发生。国内外学者对此进

行了大量的研究工作^[2-6], 提出了多种岩爆判据与测试方法, 如 Russenes 判据、临界埋深判据、微震监测、红外检测方法等等。由于单一的评价指标无法准确描述岩爆发生的可能性, 近年来人工神经网络、投影寻踪、聚类算法、模糊数学、距离判别等^[7-13]综合预测方法被引入岩爆预测, 并有一些成功的应用, 但受岩爆复杂性和各种方法自身缺陷的影响, 各类方法在实

基金项目: 浙江省重大科技专项和优先主题资助项目(2010C13029); 国家自然科学基金项目(41202216); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014QNA4020); 浙江省教育厅科研项目(Y200909163)

收稿日期: 2013-06-06

*通讯作者

际应用中均有一定的局限性，因此探索新的岩爆预测方法仍有必要。

证据理论^[14-15]是一种信息融合技术，该方法采用 Dempster 合成法则对不同信息源的证据体产生的信度进行融合，根据融合后得到的合成信度进行决策。目前，证据理论在矿井突水预测、遥感图像分类、结构损伤识别、水体质量评价等受多因素影响的模式识别问题上已有成功应用^[16-17]。采用证据理论进行决策的关键在于准确地确定各证据体的确定信度和不确定信度。针对岩爆数据具有模糊性及证据理论中的确定信度与粗糙集理论^[18-19]中的近似精度具有一定相似性的特点，考虑采用粗糙集理论计算各证据体的确定信度。粗糙集理论是一种研究具有模糊性和不确定性知识的数学方法，可描述不能精确定义的集合的特性，在根据先验知识对数据进行离散化后，剩余分析过程完全依赖数据自身信息，最大限度地减少了人为因素对结果的影响。

基于证据理论，本文以岩爆烈度等级为识别框架，综合岩爆发生所需条件，选取以最大切向应力与岩石单轴抗压强度比值、岩石单轴抗压强度与抗拉强度比值、岩石弹性能量指数 3 项指标作为证据体，采用粗糙集理论确定了各证据体的确定信度，建立了基于证据理论的岩爆烈度预测模型，采用国内外 12 组工程实例对模型进行了初步验证，最后通过对苍岭隧道和锦屏二级水电站探硐两个工程实例的岩爆预测进一步验证了该模型的实用性。

1 证据理论基本原理

1.1 基本理论

证据理论最初由 Dempster 提出，Shafer 等对其进行了进一步完善和发展，其基本理论如下：

(1) 识别框架

将待判定问题 q 所有可能的结果的集合以 Θ 表示， $\Theta = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ ， Θ 称为识别框架。

(2) 证据体

所有对问题 q 判断结果有影响的因素的集合以 E 表示， $E = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_d\}$ ， E_i 称为证据体。

(3) 信度

设集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 满足

$$m(\emptyset) = 0 \quad , \quad (1)$$

$$\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \quad , \quad (2)$$

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad , \quad (3)$$

式中， m 为框架 Θ 上的基本信度分配， $m(A)$ 称为 A 的基本信度； Bel 为识别框架 Θ 上的信度函数， $Bel(A)$

为命题 A 的信度。

(4) Dempster 合成法则

在所有证据体共同作用下命题 A 的信度为

$$m(A) = m_1(A) \oplus m_2(A) \oplus \dots \oplus m_n(A)$$

$$= \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdots m_n(A_n) \quad , \quad (4)$$

式中，

$$\left. \begin{aligned} k &= \sum_{A_1 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdots m_n(A_n), \\ k &= 1 - \sum_{A_1 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdots m_n(A_n), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， \oplus 表示直和， k 为归一化系数。

证据理论根据最终合成信度进行决策。由证据理论基本理论可知，在 Dempster 合成法则的前提下，采用证据理论进行决策的关键在于构造合理的基本信度分配函数。

1.2 基本信度分配函数构造

证据体产生的信度受两方面因素影响：一方面是其信息源的可靠性，信息源越可靠，信度越高；另一方面是证据体自身量值。前者通过信息源的确定信度 s_i 与不确定信度 $m_i(\delta)$ 体现，确定信度表示在证据体作用下对象可被辨识的信度，信息源越可靠，确定信度越大；后者通过证据体量值与基础值之间的相对距离体现，证据体分为两类：一类是“正指标”，指标值较基础值越大，事件发生的可能性越强，信度越高；一类是“逆指标”，指标值较基础值越大，事件发生的可能性越小，信度越低。

设某归类问题共有 n 种分类，影响其归类的证据共有 d 种，各分类对应的评价指标区间上限值组成的矩阵为 $R(+)$ ，评价标准指标区间下限组成的矩阵为 $R(-)$ ，其中，

$$R(+) = \begin{bmatrix} x_1^{1+} & x_2^{1+} & x_3^{1+} & \dots & x_d^{1+} \\ x_1^{2+} & x_2^{2+} & x_3^{2+} & \dots & x_d^{2+} \\ x_1^{3+} & x_2^{3+} & x_3^{3+} & \dots & x_d^{3+} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{n+} & x_2^{n+} & x_3^{n+} & \dots & x_d^{n+} \end{bmatrix}, \quad (6a)$$

$$R(-) = \begin{bmatrix} x_1^{1-} & x_2^{1-} & x_3^{1-} & \dots & x_d^{1-} \\ x_1^{2-} & x_2^{2-} & x_3^{2-} & \dots & x_d^{2-} \\ x_1^{3-} & x_2^{3-} & x_3^{3-} & \dots & x_d^{3-} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{n-} & x_2^{n-} & x_3^{n-} & \dots & x_d^{n-} \end{bmatrix}. \quad (6b)$$

设证据体 x_i 产生的信度为 p_i ，其基本信度分配如下：

$$\begin{cases} m_i(A_i) = s_i p_i \\ m_i(\delta) = 1 - s_i \end{cases} \quad . \quad (7)$$

对于式 (7) 中正指标，有

$$p_i = \begin{cases} 0 & (p_i \leq 0) \\ 0.5 + \frac{x_i - x_i^{1+}}{2(x_i^{n+} - x_i^{1+})} & (0 < p_i < 1) \\ 1 & (p_i \geq 1) \end{cases}$$

对于逆指标, 有

$$p_i = \begin{cases} 0 & (p_i \leq 0) \\ 0.5 + \frac{x_i^{1-} - x_i}{2(x_i^{1-} - x_i^{n-})} & (0 < p_i < 1) \\ 1 & (p_i \geq 1) \end{cases}$$

1.3 评价体系确立

将式(6)中各分级界限处各指标值代入式(7), 得到各指标分级临界信度 \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_1(A_1) & m_2(A_1) & m_3(A_1) & \cdots & m_d(A_1) \\ m_1(A_2) & m_2(A_2) & m_3(A_2) & \cdots & m_d(A_2) \\ m_1(A_3) & m_2(A_3) & m_3(A_3) & \cdots & m_d(A_3) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ m_1(A_{n-1}) & m_2(A_{n-1}) & m_3(A_{n-1}) & \cdots & m_d(A_{n-1}) \end{pmatrix}.$$

将不确定信度向量 $\{m_1(\delta), m_2(\delta), m_3(\delta), \dots, m_d(\delta)\}$ 与矩阵 \mathbf{M} 中各行向量代入式(4)进行合成, 得到指标综合后各分级的临界信度为

$$p = \{p^1, p^2, p^3, \dots, p^{n-1}\}'.$$

根据评价对象 q 合成信度所落入区间对其进行分级。

1.4 基于粗糙集理论的确定信度计算

由基本信度分配函数结构可见, 进行正确基本信度分配的关键在于确定各证据体的确定信度 s_i , 为客观确定 s_i , 采用粗糙集理论对其进行求解。

粗糙集采用决策表表达知识, 决策表 $DT=(U, C \cup D, V, f)$, 其中: $C=\{\alpha \mid \alpha \in C\}$ 为条件属性集, $D=\{d \mid d \in D\}$ 为决策属性集, $C \cap D=\emptyset$, $C \cup D \neq \emptyset$; $V=\bigcup V_\alpha \{ \forall \alpha \in C \cup D \}$ 为属性的值域; $f=\{f_\alpha: U \rightarrow V_\alpha, \forall \alpha \in C \cup D\}$ 信息函数。粗糙集采用近似精度和粗糙度定量描述集合与其子集间的关系。

1.5 近似精度和粗糙度

在给定有限非空集合 U 上有等价关系 R , X 为 U 上的一个集合, 若有 $\underline{R}X \subseteq X \subseteq \overline{R}X$, 定义近似精度和粗糙度如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_R(X) &= \frac{|\underline{R}X|}{|X|}, \\ \rho_R(X) &= 1 - \alpha_R(X). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $\alpha_R(X)$ 为近似精度, $\rho_R(X)$ 为粗糙度。

对比式(7)、(8)发现, 粗糙集理论中的近似精度与证据理论中的确定信度间具有较强的相似性, 考虑在两者间建立相关关系。将决策表记为集合 X 。删除指标 i , 决策表中部分信息将不能相容, 说明该部分信息对指标 i 具有较高的依赖度, 将该部分信息记为集合 X_{Ci} , 认为集合 X_{Ci} 对集合 X 的近似精度反映了指标 i 在进行基本信度分配时的确定信度, 以 s_i 代替 $\alpha_R(X)$, 令 $\underline{R}X=X_{Ci}$, $\overline{R}X=X$, 有

$$\left. \begin{aligned} s_i &= \frac{|X_{Ci}|}{|X|}, \\ m_i(\delta) &= 1 - \frac{|X_{Ci}|}{|X|}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

采用粗糙集理论构建决策表和获取各证据体确定信度的具体过程如下: ①样本数据离散化; ②检测并删除与体系不相容的样本; ③检测并合并重复样本; ④检测并删除相容性较差的样本; ⑤检测对各证据体依赖度较高的样本; ⑥计算各证据体对应确定信度。本文采用 Matlab 软件编程实现上述过程, 主要代码见附录。

基于证据理论的岩爆预测流程图见图 1。

2 基于证据理论的岩爆预测模型

2.1 岩爆机理分析与指标选取

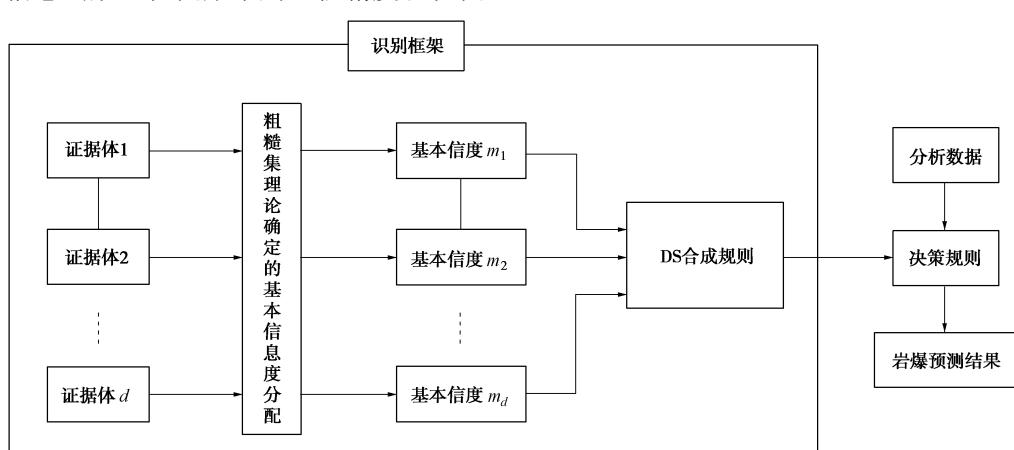


图 1 基于证据理论的岩爆预测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rockburst prediction based on evidence theory

岩爆是一种机理复杂的动力破坏现象，其影响因素众多，如应力水平、开挖断面形式、隧道（巷道）埋深、岩性、岩石储能状况等等。能量理论认为岩爆发生需满足两个条件：一是强度条件，岩石所处的应力水平较高，能够使岩石发生破坏；二是能量条件，岩石破坏时释放的能量除满足破坏需要外，有剩余的能量使岩石发生剥离或弹射。能量理论对岩爆发生所需的条件进行了简洁的概括，但其对岩性条件描述并不充分，工程实践表明岩爆通常发生在完整的脆性岩石中。综合能量理论和工程实践，选用最大切向应力与岩石单轴抗压强度比值 σ_0/σ_c 、岩石能量指数 W_{et} 、岩石单轴抗压强度与抗拉强度比值 σ_c/σ_t 三项指标作为证据体，其中 σ_0/σ_c 反映强度条件， W_{et} 反映能量条件， σ_c/σ_t 反映岩性条件，这 3 项指标相互独立、互为补充，综合三者可对岩爆发生的可能性进行较为全面的描述。

将岩爆烈度从弱至强分为无岩爆（I 级）、轻微岩爆（II 级）、中等岩爆（III 级）和强烈岩爆（IV 级）。在证据理论下，岩爆预测的识别框架为 $\Theta=\{I, II, III, IV\}$ ，证据体为 $\{\sigma_0/\sigma_c, \sigma_c/\sigma_t, W_{et}\}$ 。王元汉等^[11]经过大量统计，确立了岩爆烈度与三类证据体的对应关系，见表 1。

表 1 岩爆烈度与证据体对应关系

Table 1 Relation between evidence bodies and rockburst intensities

岩爆等级	σ_0/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
I	<0.3	>40.0	<2.0
II	0.3~0.5	26.7~40.0	2.0~3.5
III	0.5~0.7	14.5~26.7	3.5~5.0
IV	>0.7	<14.5	>5.0

由表 1 可见，岩爆烈度随 σ_0/σ_c 和 W_{et} 两项指标增大而增大，随 σ_c/σ_t 增大而减小， σ_0/σ_c 和 W_{et} 属于正指标， σ_c/σ_t 属于逆指标，根据表 1 构造岩爆评价标准分级矩阵为

$$R(+)=\begin{bmatrix} 0.3 & 53.3 & 2.0 \\ 0.5 & 40.0 & 3.5 \\ 0.7 & 26.7 & 5.0 \\ 0.9 & 14.5 & 6.5 \end{bmatrix}, \quad R(-)=\begin{bmatrix} 0.1 & 40.0 & 0.5 \\ 0.3 & 26.7 & 2.0 \\ 0.5 & 14.5 & 3.5 \\ 0.7 & 2.3 & 5.0 \end{bmatrix}.$$

2.2 确定信度计算

采用文献[12]中的 36 组岩爆实例数据和补充的 2 组岩爆数据构建样本数据空间，通过粗糙集理论获取各证据体确定信度，离散化处理后的具体样本数据见表 2。

按照粗糙集理论（2）~（4）过程处理后，表 2 中剩余 20 条信息，采用其构建岩爆指标评价决策表。岩爆分为 4 个级别，证据体分为 3 类，在极限状态下决策表中最多可容纳 64 条信息，20 条信息占其 31.3%，对于随机抽样分布认为其已经具有一定代表性，可以用于对岩爆各证据体进行分析。在此次构建的决策表中，对 σ_0/σ_c ， σ_c/σ_t ， W_{et} 三项证据体依赖度较高的信息条数分别为 17，10，14，将其代入式（9）

得到各证据体确定信度与不确定信度，具体结果见表 3。

表 2 岩爆样本数据

Table 2 Data of rockburst samples

编号	σ_0/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	岩爆等级
1	I	III	III	III
2	II	III	III	III
3	II	III	III	III
4	II	III	III	III
5	II	II	IV	II
6	II	III	III	III
7	I	III	III	II
8	II	II	III	IV
9	IV	III	IV	IV
10	II	II	IV	II
11	II	III	IV	III
12	I	II	IV	I
13	III	III	IV	III
14	II	III	IV	II
15	I	III	IV	I
16	II	III	III	II
17	II	III	IV	III
18	IV	III	III	III
19	I	II	IV	I
20	II	I	IV	III
21	II	I	IV	III
22	III	I	IV	III
23	II	IV	IV	III
24	III	IV	IV	IV
25	II	III	IV	III
26	III	III	IV	III
27	II	III	III	II
28	I	III	III	I
29	I	III	III	I
30	I	IV	I	I
31	I	IV	I	I
32	III	IV	I	I
33	IV	IV	IV	IV
34	III	III	III	IV
35	III	III	III	III
36	II	III	II	III
37	II	II	II	II
38	I	I	I	I

注：表中 1~36 号样本编号与文献中编号一致，37，38 号样本根据证据体与岩爆等级对应关系补充。

表 3 证据体信度分配

Table 3 Probability assignment of evidence bodies

证据体	σ_0/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
s_i	0.850	0.500	0.700
$m_i(\delta)$	0.150	0.500	0.300

2.3 识别框架构建

将表 3 数据代入式（7）建立基本信度分配函数，将岩爆分级界限处指标代入式（7）进行计算，再根据式（4）进行合成后得到各级岩爆对应信度区间，信度区间具体分布见表 4。

表 4 岩爆烈度对应信度区间

Table 4 Relation between probabilities and rockburst intensities

岩爆等级	对应信度区间
I	<0.479
II	0.479~0.741
III	0.741~0.905
IV	>0.905

表5 国内外岩爆工程实例分析数据与预测结果

Table 5 Analysis data and predicted results of some rockbursts

编号	σ_0/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}	信度	本文预测 岩爆等级	模糊数学预测 岩爆等级 ^[11]	实际发生 岩爆等级	实际情况描述
t1	0.300	24	6.6	0.809	III	III~IV	III	中等岩爆
t2	0.410	29.7	7.3	0.834	III	II	II	轻微岩爆
t3	0.820	18.5	3.8	0.909	IV	III	II~IV	轻微—强烈岩爆
t4	0.315	24.1	9.3	0.814	III	III	—	试验洞中观察到发生岩爆
t5	0.270	21.7	5.0	0.721	II	III	—	岩爆烈度随深度增加而加剧
t6	0.370	24.1	5.0	0.761	III	III	III	中等岩爆
t7	0.420	21.7	5.0	0.791	III	III	III	中等岩爆
t8	0.380	21.7	5.0	0.774	III	III	III	中等岩爆
t9	0.440	26.7	5.5	0.807	III	II	II	轻微岩爆
t10	0.317	21.7	5.0	0.744	III	III	III	中等岩爆
t11	0.377	22.7	5.0	0.769	III	III	III~IV	中等—强烈岩爆
t12	0.774	17.5	5.5	0.931	IV	IV	III	中等岩爆

2.4 模型评价

采用文献[11]中12组岩爆工程实例对模型进行验证和评价, 具体参数、本文方法预测结果、模糊数学预测预测结果及实际情况见表5。

由表5可见, 证据理论方法对t1, t3, t6, t7, t8, t10, t11这7个实例预测结果与岩爆实际发生情况相同, t2, t9, t12这3个实例预测结果比岩爆实际等级高一级, 从工程安全方面考虑可以接受。t4, t5两个实例工程未进行定级, t4与模糊数学预测结果相同, 认为预测结果可以接受; t5实际情况是岩爆烈度随深度增加而加剧, 地下工程开挖中变化最为显著的证据体是 σ_0/σ_c , 采用本文模型, 保持 σ_c/σ_t 和 W_{et} 不变, 增大 σ_0/σ_c , 当其增加至0.311时, 岩爆烈度为中等, 当其增大至0.739时, 岩爆烈度为强烈, 可见本文模型能够正确反映t5的岩爆发展趋势, 可以用于对t5的预测。由以上分析可见, 本文模型在上述12个实例中正确率是75%, 可接受率是100%, 可以应用于实际工程的岩爆预测。

与模糊数学预测方法^[11]相比, 本文方法与其对t4, t6, t7, t8, t10, t11, t12这7个实例上预测结果相同; 对t1、t3预测结果优于模糊数学; t5预测结果与模糊数学相当; t2, t9预测结果劣于模糊数学。对比t2, t9, t10三个实例, 根据3项证据体指标大致分布区间, 将t2、t9、t10的证据体指标值分别在[0, 1], [0, 60], [0, 10]上进行归一化处理, t9的3项指标分别比t10高12.3%, -8.3%, 5.0%, 文献[11]在采用模糊数学进行预测时3项指标的权重分别为0.4, 0.3, 0.3, 由此初步判断t9的岩爆烈度应高于t10, 同理也可推断出t2的岩爆烈度也应高于t10, 本文方法预测结果反映了这一趋势。以上对比分析表明本文方法总体预测水平与模糊数学相当, 但更能反映岩爆的发展趋势, 并且偏于安全。

3 工程应用

为进一步验证本文模型的实用性, 采用本文模型对苍岭隧道和锦屏二级水电站探洞2个项目发生岩爆的可能性进行预测。

3.1 苍岭隧道岩爆预测

苍岭隧道位于浙江省括苍山脉中低山区, 处于余姚—丽水大断裂与鹤溪—奉化大断裂之间的断块内, 地应力场分布复杂, 隧道最大埋深约768 m, 主要穿越微风化凝灰岩和钾长花岗斑岩, 地应力测试结果显示隧道所处工程区最大主应力为17.9~27.3 MPa, 岩石单轴抗压强度160 MPa, 具有发生岩爆的可能性。选取苍岭隧道4个路段进行岩爆预测, 各路段岩爆评价指标见表6。

表6 苍岭隧道岩爆评价指标表

Table 6 Evaluation indices of Cangling tunnel

隧道里程	σ_0/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
K97+702—K98+080	0.21	24.3	4.6
K98+225—K98+425	0.28	23.6	4.9
K98+637—K99+638	0.32	21.3	5.3
K99+638—K100+892	0.28	23.8	4.8

以K97+702—K98+080路段为算例, 将其评价指标代入式(7), 得到岩爆预测的基本信度分配, 具体数据见表7。

表7 算例基本信度分配

Table 7 Basic probability assignment of example

基本信度分配	岩爆	无岩爆	未知
$m_1()$	0.361	0.489	0.150
$m_2()$	0.354	0.146	0.500
$m_3()$	0.552	0.148	0.300

注: 下标1, 2, 3分别表示 σ_0/σ_c , σ_c/σ_t , W_{et}

采用式(4)对基本信度分配进行合成, 合成过程见表8。

表 8 算例信度合成过程

Table 8 Process of building probability of example

合成信度	岩爆	无岩爆	未知
$m_{12}(0)$	0.467	0.436	0.097
$m_{123}(0)$	0.654	0.304	0.042

各路段的最终的岩爆预测结果见表 9。

表 9 苍岭隧道岩爆预测结果

Table 9 Predicated results of rockburst of Cangling tunnel

隧道里程	岩爆信度	预测等级	实际等级
K97+702—K98+080	0.654	II	II
K98+225—K98+425	0.713	II	II
K98+637—K99+638	0.763	III	III
K99+638—K100+892	0.707	II	II

在 K97+702—K98+080、K98+225—K98+425、K99+638—K100+892 三个路段隧道开挖过程中, 岩体表面有爆裂松动和剥落现象, 可听到轻微的撕裂声, 剥落岩体大多呈片状、薄透镜状, 主要发生在开挖后 12 h 内, 属于轻微岩爆。

在 K98+637—K99+638 路段隧道开挖过程中, 岩体表面有爆裂脱落和弹射现象, 可听到“啪-啪-啪”的爆裂声, 爆裂下来的岩块呈中部厚、边缘较薄的片状或贝壳状, 持续影响在 7 d 左右, 喷射的混凝土局部有剥落现象, 属于中等岩爆。

3.2 锦屏二级水电站岩爆预测

锦屏二级水电站区位于四川省木里、盐源、冕宁三县交界处, 地处中国西南部高地应力地区, 其引水隧洞长约 17.23 km, 一般埋深 1000~2000 m, 最大埋深约 2525 m, 地应力实测最大值为 42.11 MPa, 反演最大值为 54 MPa, 完整岩石的单轴抗压强度为 85~120 MPa, 具备岩爆发生的条件。选取前期工程中的探硐工作断面^[13]岩爆资料对本文方法进行验证, 各断面岩爆评价指标见表 10。

表 10 锦屏二级水电站探硐岩爆评价指标表

Table 10 Evaluation indices of exploratory tunnel of Jinping II Hydropower Station

桩号	σ_θ/σ_c	σ_c/σ_t	W_{et}
1+640	0.436	19.7	2.3
1+731	0.464	20.4	2.0
3+000	0.846	27.3	3.1
3+390	0.842	19.7	2.3

锦屏二级水电站探硐各断面段岩爆的预测结果见表 11。

表 11 锦屏二级水电站探硐岩爆预测结果

Table 11 Predicated results of rockburst of exploratory tunnel of Jinping II Hydropower Station

桩号	岩爆信度	预测等级	实际等级 ^[13]
1+640	0.672	II	II
1+731	0.668	II	II
3+000	0.889	III	III
3+390	0.882	III	III

由表 11 结果可见, 证据理论岩爆预测模型对锦屏二级水电站探硐各断面段岩爆的预测结果与实际情况一致。

苍岭隧道与锦屏二级水电站探硐 2 个工程实例预测结果表明证据理论岩爆预测模型具有较好的实用性, 能够准确地对岩爆烈度进行预测。

4 结 论

(1) 采用证据理论对不同信息源的证据体进行融合, 可以综合反映多种影响因素的共同作用, 提高了岩爆预测的准确性。

(2) 粗糙集理论可以准确地确定各证据体的确定信度, 科学、客观地体现了证据体重要性的差异。

(3) 综合考虑岩爆的主要影响因素, 选取 σ_θ/σ_c , σ_c/σ_t , W_{et} 三种判据作为证据体, 较全面地反映了岩爆发生所需的强度条件、岩性条件和能量条件。

(4) 采用证据理论构建的岩爆预测模型对苍岭隧道和锦屏二级水电站探硐岩爆的预测结果与实际情况相吻合, 说明该方法切实可行, 具有较好的工程应用前景。

(5) 本文构建的证据理论岩爆预测模型参数是由大量的工程实例确定的, 具有一定的普遍意义, 其不足在于针对性不强, 在有些地区可能不适用, 此时可采用粗糙集理论对当地工程实例进行分析以对模型参数进行调整, 而后加以应用。

参 考 文 献:

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945~1956. (QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945~1956. (in Chinese))
- [2] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 963~969. (CHEN Wei-zhong, LÜ Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 963~969. (in Chinese))
- [3] 王斌, 赵伏军, 尹士兵. 基于饱水岩石静动力学试验的水防治屈曲型岩爆分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1863~1869. (WANG Bin, ZHAO Fu-jun, YIN Tu-bing. Prevention of buckling rockburst with water based on statics and dynamics experiments on water-saturated rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1863~1869. (in Chinese))

- [4] 陈智强, 张永兴, 周检英. 开挖诱发隧道围岩变形的红外热像试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1271 - 1277. (CHEN Zhi-qiang, ZHANG Yong-xing, ZHOU Jian-ying. Experimental study on infrared photographs of deformation and failure of surrounding rock of tunnels procession induced by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1271 - 1277. (in Chinese))
- [5] 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): 2034 - 2042. (ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034 - 2042. (in Chinese))
- [6] 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. (in Chinese))
- [7] 陈海军, 郦能惠, 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. (in Chinese))
- [8] 徐 飞, 徐卫亚. 岩爆预测的粒子群优化投影寻踪模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 718 - 723. (XU Fei, XU Wei-Ya. Projection pursuit model based on particle swarm optimization for rock burst prediction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 718 - 723. (in Chinese))
- [9] 高 珮. 基于蚁群聚类算法的岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 874 - 880. (GAO Wei. Prediction of rock burst based on ant colony clustering algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 874 - 880. (in Chinese))
- [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): 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. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 梁志勇. 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆预测及防治对策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004. (LIANG Zhi-yong. Study on the prediction and prevention of rockburst in the diversion tunnel of Jinping II Hydropower[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [14] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Annals of Mathematical Statistics. 1964, 38(2): 325 - 339.
- [15] SHAFER G. A Mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [16] 韩 进, 施龙青, 翟培合, 等. 多属性决策及 D-S 证据理论在底板突水决策中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3727 - 3732. (HAN Jin, SHI Long-qing, ZHAI Pei-he, et al. Application of multi-attribute decision and d-s evidence theory to water-inrush decision of floor in mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3727 - 3732. (in Chinese))
- [17] 张清华, 李 乔, 唐 亮, 等. 基于证据理论的结构损伤识别研究[J]. 振动工程学报, 2007, 20(2): 200 - 205. (ZHANG Qing-hua, LI Qiao, TANG Liang. Study of structural damage identification based on evidence theory[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(2): 200 - 205. (in Chinese))
- [18] PAWLAK Z. Rough set theory and its applications to data analysis[J]. Cybernetics and Systems, 1998, 29: 661 - 688.
- [19] 王国胤, 姚一豫, 于 洪. 粗糙集理论与应用研究综述[J]. 计算机学报, 2009, 32(7): 1229 - 1246. (WANG Guo-ying, YAO Yi-yu, YU Hong. A Survey on rough set theory and applications[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(7): 1229 - 1246. (in Chinese))

附录:

※(1) 输入样本

```
x=[R] %离散样本数据空间
[sr sc]=size(x)
```

※(2) 检测并删除与体系不相容的样本

```
o0l=[]
for i=1:sr
    yy=x(i,:)
    if (yy(1:3)>yy(4)) %具体矛盾
        o0l=[o0l;i]
    end
end
g1=o0l(:)
x(g1,:)=0 %不相容样本归零
```

※(3) 检测并合并重复样本

```
cf=[]
for i=1:sr
    yy=x(i,:)
    for j=i+1:sr
        cc=yy-x(j,:)
        if (cc(1:3)==0 & cc(4)==0)
            cf=[cf;i,j]
        end
    end
end
g3=cf(:,2)
x(g3,:)=0 %重复样本归零
```

※(4) 检测并删除相容性较差的样本

```
mda=[]
for i=1:sr
    yy=x(i,:)
    for j=i+1:sr
        cc=yy-x(j,:)
        if (cc(1:3)>=0 & cc(4)<0)
            mda=[mda;i,j]
        end
    end
end
x(k,:)=0 %相容性较差样本归零
```

※(5) 检测对证据体 1 依赖度较高的样本

```
x_1=x
md1a=[] %对证据体 1 依赖度较高的样本集合
```

```
for i=1:sr
    yy=x_1(i,:)
    for j=i+1:sr
        cc=yy-x_1(j,:)
        if (cc(2)>=0 & cc(3)>=0 & cc(4)<0)
            md1a=[md1a;i,j]
```

※(6) 计算确定信度

```
nxn = unique(x,'rows')
num1=length(n1)'
numx=length(nxn)'-1
disp('确定信度')
```

```
rd1=num1/numx 证据体 1 的确定信度
```