

文章编号: 1006 - 2106( 2014) 07 - 0089 - 06

## 深埋长大隧道岩爆倾向性多指标评价\*

黄玉仁<sup>1\*\*</sup> 毛建喜<sup>1</sup> 林朝阳<sup>1</sup> 李庶林<sup>1</sup> 胡静云<sup>2</sup>

(1. 厦门大学, 福建 厦门 361005; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012)

**摘要:** 研究目的: 高铁北武夷山隧道是一座单洞双线隧道, 隧道最大埋深达 1 100 m, 属于高应力区, 开挖过程中可能会出现岩爆现象。通过对隧道高应力地区采集的岩样进行室内岩爆倾向性实验, 并结合声发射监测技术, 得到岩石单轴抗压强度等性能参数, 先采用强度脆性系数法、变形脆性系数法、弹性应变能指标法、切向应力准则四种单指标评价方法进行岩爆倾向性评价, 然后运用四指标模糊数学综合评价法进行评价。

**研究结论:** (1) 结合声发射监测技术进行岩石力学实验, 获得的变形脆性系数、弹性应变能指标系数相比常规实验更加精确; (2) 根据岩体性质和围岩的应力情况, 在传统综合评价方法基础上增加了变形脆性系数法评判指标, 结果表明采用模糊数学综合评价方法得到的评价结果与单指标评价相比, 更加符合隧道岩爆的实际情况; (3) 本研究成果为隧道岩爆预测提供了可行方法, 对于类似工程提前防治岩爆有借鉴意义。

**关键词:** 岩爆倾向性; 声发射; 模糊数学综合评价; 隧道

**中图分类号:** O319.56 **文献标识码:** A

## The Multi - criteria Evaluation of Rockburst Proneness on Deep Buried Large Tunnel

HUANG Yu - ren<sup>1,2</sup>, MAO Jian - xi<sup>1</sup>, LIN Chao - yang<sup>1</sup>, LI Shu - lin<sup>1</sup>, HU Jing - yun<sup>2</sup>

(1. Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 2. Changsha Institute of Mining Research Co. Ltd, Changsha, Hunan 410012, China)

**Abstract: Research purposes:** North Wuyi Mountain of high - speed railway is a single hole bidirectional tunnel, and the maximum depth of the tunnel is as deep as 1100 meters, so it belongs to high stress area that may cause rockburst in the process of excavation. The indoor experiments about rockburst proneness of rock samples which were collected in high stress area of the tunnel are recorded in this paper, and some property parameters of rock like the uniaxial compressive strength were got combining acoustic emission testing. Four kinds of single index evaluation method were used to evaluate rockburst proneness firstly, including the intensity of brittleness coefficient method, the deformation brittleness coefficient method, the elastic strain energy method and the tangential stress criterion. Then the comprehensive evaluation method of fuzzy mathematical was used to evaluate.

**Research conclusions:** (1) Combined with acoustic emission monitoring technology, we can get two indexes more accurately than conventional experiment. (2) According to rock properties and surrounding rock stress, we increase the evaluation indicator of deformation brittleness coefficient method. It showed that the results from the comprehensive evaluation method of fuzzy mathematical are more in line with the actual situation of the rock burst of tunnel compared with the single index evaluation. (3) The research result provides a feasible method to predict rockburst and it is significant to prevent and control of rockburst in advance for similar engineering.

**Key words:** rockburst proneness; acoustic emission; the comprehensive evaluation of fuzzy mathematical; tunnel

\* 收稿日期: 2013 - 12 - 11

\*\* 作者简介: 黄玉仁, 1966 年出生, 男, 教授级高级工程师。

# 1 研究背景

二十一世纪是地下工程的世纪,隧道作为地下工程的一个重要分支,正朝着长、大、深、群四个方向发展。深埋特长隧道一般经过地形崎岖的丘陵和山川,地质条件复杂,由于埋深和高温的影响,地应力很高,因此极易产生岩爆<sup>[1-2]</sup>。

研究表明,岩爆是地下开挖活动诱发的岩石强烈破坏现象,岩石中储存的能量突然释放并转变为功而强烈地冲击开挖或采掘工作面。产生岩爆的原因有外部因素和内部因素两方面。外部因素是指施工过程中改变了岩体周围的空间环境,导致应力重分布和应力集中。内部因素是岩石脆性较大时,储存在岩石内的弹性应变能足够大以至在破坏岩石后还有足够能量转化为动能使得岩块弹射出去<sup>[3]</sup>。

由于岩爆机理复杂,影响因素很多,要定性判别岩爆是否发生,并且定量估计岩爆剧烈程度很困难。经过科研人员的多年研究,提出了最大主应力准则、强度脆性系数法、变形脆性系数法、切向应力准则、弹性应变能指标法等一系列评价岩爆倾向性的方法<sup>[4]</sup>,但是由于指标单一,不能全面反映岩性和围岩应力,效果不理想。在这种情况下,又有学者提出了人工神经网络法<sup>[5-6]</sup>和综合评价法<sup>[7-10]</sup>,对岩爆进行多指标综合评价,取得了较好效果。对隧道施工防治岩爆具有指导作用,有助于降低安全风险,节省资源。

本文武夷山高铁隧道工程为背景,进行隧道岩爆倾向性试验时,同时采用先进的声发射监测系统对岩石加卸载过程进行监测,得到了符合工程实际的岩爆倾向性评价,为隧道施工岩爆预测提供了指导建议。

# 2 岩爆倾向性评价方法

## 2.1 强度脆性系数法

根据岩石的单轴抗压强度  $R_c$  和抗拉强度  $R_t$  之比,来评价岩石的岩爆倾向性,表达式如式(1)所示。

$$R = R_c / R_t \tag{1}$$

一般来说,  $R$  越大表明岩石的脆性越大,则发生岩爆的可能性越大。

## 2.2 变形脆性系数法

根据岩石峰值荷载前的应力-应变曲线,通过加卸载来求得岩石峰值荷载前的总变形  $u$  和永久变形  $u_1$  来评价岩爆倾向性,如图1所示。表达式如式(2)所示。

$$K_u = u / u_1 = (\varepsilon_p + \varepsilon_e) / \varepsilon_p \tag{2}$$

式中  $\varepsilon_p$  —— 塑性应变;  
 $\varepsilon_e$  —— 弹性应变。

$K_u$  越大,说明岩石的脆性越大,则发生岩爆的可能性越大。

## 2.3 弹性应变能储存指数法<sup>[11]</sup>

该方法是在单轴加卸载条件下,初次加载到岩石峰值强度的90%以上,然后卸载到峰值强度的5%左右。将卸载所释放的弹性应变能  $\varphi_{sp}$  与损耗的塑性应变能  $\varphi_{st}$  相比,得到弹性能量指数  $W_{et}$ 。加卸载曲线如图1所示,表达式如式(3)所示。

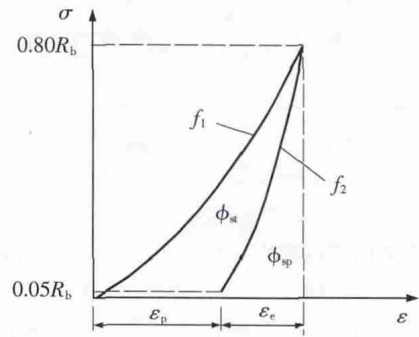


图1 单轴加卸载曲线

$$W_{et} = \varphi_{sp} / \varphi_{st} \tag{3}$$

弹性能量指数  $W_{et}$  值越大,说明岩石破坏时弹性应变能占的比重越大,岩石脆性越大,从而发生不稳定性破坏的可能性也越大,岩爆倾向性就越高<sup>[3]</sup>。

## 2.4 切向应力准则法

切向应力准则同时考虑了岩体的应力状态和岩石的力学性质。将围岩中的切向应力  $\sigma_\theta$  和岩石的抗压强度  $\sigma_c$  之比定义为  $T$ ,表达式如式(4)所示。

$$T = \sigma_\theta / \sigma_c \tag{4}$$

$T$  越大,说明岩石所处的应力环境越差,则岩爆发生的倾向性亦越大。

## 2.5 模糊数学综合评判法

### 2.5.1 建立因素集矩阵 $U$

一般包括岩石脆性系数、变形系数、岩爆弹性应变能指数、岩体质量 RQD 指标、围岩切应力指数等。即

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\}$$

### 2.5.2 建立岩爆烈度评价集矩阵 $V$

$$V = \{ \text{无岩爆、弱岩爆、中等岩爆、强烈岩爆} \\ = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$$

### 2.5.3 建立模糊关系矩阵 $R$

根据隶属函数确定隶属度及模糊关系矩阵  $R$ ,表达式如式(5)~(8)所示。

$$r_i(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \leq a_i \\ \left( \frac{b_i - x_i}{b_i - a_i} \right)^k, & a_i < x_i < b_i \\ 0, & x_i \geq b_i \end{cases} \tag{5}$$

$$r_2(x_i) = \begin{cases} \left(\frac{b_i - a_i}{b_i - x_i}\right)^k, & x_i < a_i \\ 1, & a_i \leq x_i \leq b_i \\ \left(\frac{b_i - a_i}{x_i - a_i}\right)^k, & x_i > b_i \end{cases} \quad (6)$$

$$r_3(x_i) = \begin{cases} \left(\frac{c_i - b_i}{c_i - x_i}\right)^k, & x_i < b_i \\ 1, & b_i \leq x_i \leq c_i \\ \left(\frac{c_i - b_i}{x_i - b_i}\right)^k, & x_i > c_i \end{cases} \quad (7)$$

$$r_4(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i \leq b_i \\ \left(\frac{x_i - b_i}{c_i - b_i}\right)^k, & b_i < x_i < c_i \\ 1, & x_i \geq c_i \end{cases} \quad (8)$$

式中  $r_1(x_i)$ 、 $r_2(x_i)$ 、 $r_3(x_i)$ 、 $r_4(x_i)$  —— 指标  $x_i$  对岩爆烈度的隶属值;  
 $x_i$  —— 第  $i$  个因素的指标值;  
 $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  —— 第  $i$  个因素指标的分界值;  
 $k$  —— 依据经验确定。

由此可的模糊关系矩阵  $R$  表达式如式(9)所示。

$$R = \begin{bmatrix} r_1(x_1) & r_2(x_1) & r_3(x_1) & r_4(x_1) \\ r_1(x_2) & r_2(x_2) & r_3(x_2) & r_4(x_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_1(x_n) & r_2(x_n) & r_3(x_n) & r_4(x_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 2.5.4 确定影响因素的权重矩阵 $\omega$

根据影响因素对岩爆发生的重要性赋予各个因素权重值。权重值一般由专家及丰富工程经验的工程师给出。表达式如式(10)、(11)所示。

$$\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n] \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (11)$$

### 2.5.5 岩爆烈度综合评价

根据给出的岩爆影响因素权重  $\omega$  及求得的模糊关系矩阵  $R$  用加权平均模型做出岩爆烈度倾向的模糊综合评价  $B$  表达式如式(12)所示。

$$B = \omega \cdot R \cdot [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4] \quad (12)$$

式中  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  —— 分别对应无岩爆、弱岩爆、中等岩爆、强烈岩爆的倾向性。

$B$  值越大,说明发生该值所处位置对应的岩爆烈度倾向性越强。所以取矩阵  $B$  中的最大值,作为岩爆模糊综合评价结果。

## 3 试验设备及方法

### 3.1 试验设备

试验设备包括加载系统和监测系统。加载系统是 MTS815 型液压伺服岩石力学试验机,该设备是全数

字计算机自动控制系统,可记录荷载、位移、应力、应变值,并绘制荷载-位移、应力-应变曲线等。监测系统为智能声发射测试仪,可对声发射事件数、能量、撞击数、幅值、波形等进行实时监测和记录。实验设备示意图如图 2 所示。

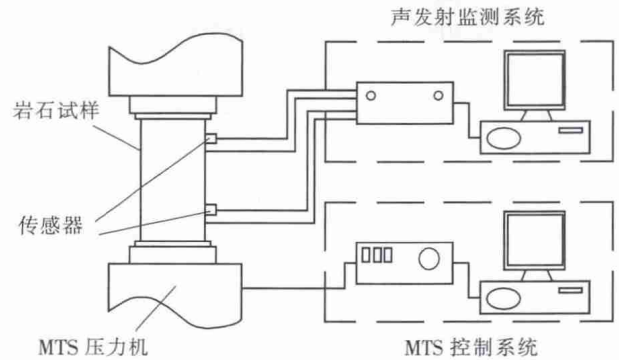


图 2 实验设备示意图

### 3.2 试验方法

本次实验采集的岩石样品为隧道的两种主要围岩体,一种是凝灰岩,一种是花岗岩,埋深均为 1 100 m,取样时在同一点钻取两块岩样,分别做抗压、抗拉实验,然后将岩样制作成 100 mm × 50 mm × 50 mm 的长方体和 50 mm × 50 mm × 50 mm 的圆柱体。

抗压强度试验采用纵向应变控制的单轴卸载方式对样品施加荷载,加载速率为 0.15 mm/min。实验分两种方式加载。一种是直接加载直至试样破坏,得到试样的单轴抗压强度,一种是加载设备结合声发射监测设备,在岩样四个侧面上贴上六个传感器。通过监测声发射数量的变化趋势,结合岩样破坏前声发射数突增的特性以及之前测得的岩石抗压强度,来判定岩样是否接近峰值强度而采取卸载措施。较好地控制压力加到试样强度的 90% 左右时,然后卸载至试样强度的 5% 左右,再次加载直至试样破坏。

抗拉强度在试验机上采用巴西劈裂实验得到。

然后对深埋隧道采用有限元软件建模,模拟隧道开挖过程,得到隧道开挖处地应力和围岩切应力。

## 4 实验结果分析与评价

### 4.1 单轴抗压强度

试样单轴抗压强度结果如表 1 所示。凝灰岩抗压强度离散性比较大,最大值接近 300 MPa,最小值 172 MPa,平均强度为 221.11 MPa。花岗岩抗压强度集中在 100 MPa 到 160 MPa 之间,平均强度为 130.66 MPa。

表1 试样单轴抗压强度

岩性	埋深/m	地应力/MPa	单轴抗压强度/MPa	平均抗压强度/MPa
N-1	1 100	30.8	297.02	221.11
N-2	1 100	30.8	172.01	
N-3	1 100	30.8	194.32	
Hg-1	1 100	30.8	153.15	130.66
Hg-2	1 100	30.8	112.05	
Hg-3	1 100	30.8	127.54	
Hg-11	1100	30.8	105.33	
Hg-18	1 100	30.8	155.25	

4.2 强度脆性系数法

凝灰岩强度脆性系数法实验结果如表2所示。凝灰岩评价结果为强烈岩爆的有1块,中等岩爆的有7块岩石,将所有岩块R值相加求得均值R为16.88,得到综合评价结果为中等岩爆。

表2 凝灰岩强度脆性系数法实验结果

编号	$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_c$ /MPa	R	岩爆倾向	均值R	岩爆倾向
N-1	14.1	297.02	21.07	强烈岩爆	16.86	中等岩爆
N-2	10.2	172.01	16.86	中等岩爆		
N-3	12.7	194.32	15.30	中等岩爆		
N-6	11.3	176.50	15.62	中等岩爆		
N-7	12.5	203.74	16.3	中等岩爆		
N-9	13.3	217.37	16.34	中等岩爆		
N-10	10.3	172.71	16.77	中等岩爆		
N-11	13.8	229.08	16.60	中等岩爆		

花岗岩强度脆性系数法实验结果如表3所示。花岗岩评价结果为强烈岩爆的有7块,中等岩爆的有6块岩石,将所有岩块R值相加求得均值R为19.56,得到综合评价结果为强烈岩爆。

表3 花岗岩强度脆性系数法实验结果

编号	$\sigma_1$ /MPa	$\sigma_c$ /MPa	R	岩爆倾向	均值R	岩爆倾向
Hg-1	7.5	153.15	20.42	强烈岩爆	19.56	强烈岩爆
Hg-2	7	112.05	16.01	中等岩爆		
Hg-3	7.3	127.54	17.47	中等岩爆		
Hg-4	8.6	160.10	18.62	强烈岩爆		
Hg-6	9	189.25	21.03	强烈岩爆		
Hg-9	11.2	302.35	26.99	强烈岩爆		
Hg-10	9.9	172.75	17.45	中等岩爆		
Hg-11	7.1	105.33	14.84	中等岩爆		
Hg-12	9	213.15	23.68	强烈岩爆		
Hg-15	9.5	206.59	21.75	强烈岩爆		
Hg-16	10.2	178.86	17.54	中等岩爆		
Hg-18	8.7	155.25	17.84	中等岩爆		
Hg-19	9.4	194.53	20.69	强烈岩爆		

4.3 变形脆性系数法

凝灰岩变形脆性系数法实验结果如表4所示。凝灰岩评价结果为中等岩爆的有1块,弱岩爆的有6块岩石,将所有岩块 $K_u$ 值相加求得均值 $K_u$ 为5.10,得到综合评价结果为弱岩爆。

表4 凝灰岩变形脆性系数法实验结果

编号	u	$u_1$	$K_u$	岩爆倾向	均值 $K_u$	岩爆倾向
N-4	1.083	0.266	4.07	弱岩爆	5.10	弱岩爆
N-5	1.10	0.252	4.36	弱岩爆		
N-6	1.01	0.198	5.10	弱岩爆		
N-7	1.16	0.198	5.85	弱岩爆		
N-9	1.179	0.188	6.28	中等岩爆		
N-10	1.137	0.240	4.74	弱岩爆		
N-11	1.209	0.228	5.31	弱岩爆		

花岗岩变形脆性系数法实验结果如表5所示。花岗岩评价结果为强烈岩爆的有2块,中等岩爆的有5块,弱岩爆的有1块岩石,将所有岩块 $K_u$ 值相加求得均值 $K_u$ 为8.09,得到综合评价结果为中等岩爆。

表5 花岗岩变形脆性系数法实验结果

编号	u	$u_1$	$K_u$	岩爆倾向	均值 $K_u$	岩爆倾向
Hg-4	0.942	0.122	7.72	中等岩爆	8.09	中等岩爆
Hg-6	0.977	0.103	9.48	强烈岩爆		
Hg-9	0.946	0.114	8.27	中等岩爆		
Hg-10	1.034	0.134	7.74	中等岩爆		
Hg-12	0.977	0.259	3.76	弱岩爆		
Hg-15	1.152	0.134	8.63	中等岩爆		
Hg-16	0.914	0.137	6.58	中等岩爆		
Hg-19	1.152	0.092	12.6	强烈岩爆		

4.4 弹性应变能指标法

凝灰岩弹性应变能指标法实验结果如表6所示。凝灰岩评价结果为中等岩爆的有5块,将所有岩块 $W_{et}$ 值相加求得均值 $W_{et}$ 为3.95,得到综合评价结果为中等岩爆。

表6 凝灰岩弹性应变能指标法实验结果

编号	$\Phi_{sp}$	$\Phi_{st}$	$W_{et}$	岩爆倾向	均值 $W_{et}$	岩爆倾向
N-5	52.68	12.51	4.21	中等岩爆	3.95	中等岩爆
N-7	72.21	16.47	4.38	中等岩爆		
N-9	82.52	20.71	3.89	中等岩爆		
N-10	56.82	21.85	2.60	中等岩爆		
N-11	86.37	18.39	4.69	中等岩爆		

花岗岩弹性应变能指标法实验结果如表7所示。花岗岩评价结果为强烈岩爆的有3块,中等岩爆的有

3 块,将所有岩块  $W_{et}$  值相加求得均值  $W_{et}$  为 5.54,得到综合评价结果为强烈岩爆。

表 7 花岗岩弹性应变能指标法实验结果

编号	$\Phi_{sp}$	$\Phi_{st}$	$W_{et}$	岩爆倾向	均值 $W_{et}$	岩爆倾向
Hg-4	52.66	11.55	4.56	中等岩爆	5.54	强烈岩爆
Hg-6	55.23	12.97	4.26	中等岩爆		
Hg-10	59.42	6.33	9.39	强烈岩爆		
Hg-15	83.27	11.87	7.01	强烈岩爆		
Hg-16	45.57	9.11	5.0	强烈岩爆		
Hg-19	71.55	23.59	3.03	中等岩爆		

4.5 切向应力判别法

凝灰岩切向应力判别法实验结果如表 8 所示。凝灰岩评价结果为弱岩爆的有 6 块,无岩爆的有 2 块岩石,将所有岩块  $T$  值相加求得均值  $T$  为 0.33,得到综合评价结果为弱岩爆。

表 8 凝灰岩切向应力判别法实验结果

编号	$\sigma_0$ /MPa	$\sigma_c$ /MPa	$T$	岩爆倾向	均值 $T$	岩爆倾向
N-1	67.4	297.02	0.23	无岩爆	0.33	弱岩爆
N-2	67.4	172.01	0.39	弱岩爆		
N-3	67.4	194.32	0.35	弱岩爆		
N-6	67.4	176.50	0.38	弱岩爆		
N-7	67.4	203.74	0.33	弱岩爆		
N-9	67.4	217.37	0.31	弱岩爆		
N-10	67.4	172.71	0.39	弱岩爆		
N-11	67.4	229.08	0.29	无岩爆		

花岗岩切应力判别法实验结果如表 9 所示。花岗岩评价结果为中等岩爆的有 2 块岩石,弱岩爆的有 8 块,无岩爆的有 1 块,将所有岩块  $T$  值相加求得均值  $T$  为 0.42,得到综合评价结果为弱岩爆。

表 9 花岗岩切应力判别法实验结果

编号	$\sigma_0$ /MPa	$\sigma_c$ /MPa	$T$	岩爆倾向	均值 $T$	岩爆倾向
Hg-1	67.4	153.15	0.44	弱岩爆	0.42	弱岩爆
Hg-2	67.4	112.05	0.6	中等岩爆		
Hg-3	67.4	127.54	0.53	弱岩爆		
Hg-4	67.4	160.10	0.42	弱岩爆		
Hg-6	67.4	189.25	0.36	弱岩爆		
Hg-9	67.4	302.35	0.22	无岩爆		
Hg-10	67.4	172.75	0.39	弱岩爆		
Hg-11	67.4	105.33	0.64	中等岩爆		
Hg-12	67.4	213.15	0.32	弱岩爆		
Hg-15	67.4	206.59	0.33	弱岩爆		
Hg-16	67.4	178.86	0.38	弱岩爆		

4.6 模糊数学综合判别法

4.6.1 建立评价因素集  $U$

目前模糊数学综合评价主要采用岩石强度脆性系数、弹性应变能指数和最大切应力指标三项评价指标。鉴于本文所研究隧道段属于二级围岩,岩性良好,为体现岩性对岩爆倾向性的影响,增加岩石变形脆性系数一项。由此得到评价因素集如下:

$$U = \{R_c, K_u, W_{et}, T\}$$

4.6.2 建立岩爆烈度评价集  $V$

$$V = \{\text{无岩爆, 弱岩爆, 中等岩爆, 强烈岩爆}\}$$

4.6.3 因素在  $V$  上的隶属度及模糊关系矩阵  $R$  的确定

评价因素与岩爆烈度关系如表 10 所示。

表 10 评价因素与岩爆烈度关系表

评价因素 $U$	岩爆烈度等级 $V$			
	无岩爆	弱岩爆	中等岩爆	强烈岩爆
$R_c$	$\leq 10$	10~14	14~18	$\geq 18$
$K_u$	$\leq 2.0$	2~6	6~9	$\geq 9$
$W_{et}$	$\leq 2$	2~3.5	3.5~5	$\geq 5$
$T$	$\leq 0.3$	0.3~0.5	0.5~0.7	$\geq 0.7$

本文中隶属函数式(5)~(8)的  $k$  值取 2,将上面四种方法得到的平均因素指标值及各个因素对应的烈度分界值带入隶属函数,得到模糊关系矩阵。

凝灰岩模糊关系矩阵:

$$R_N = \begin{bmatrix} 0 & 0.34 & 1 & 0.51 \\ 0.05 & 1 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0.59 & 1 & 0.09 \\ 0.72 & 1 & 0.29 & 0 \end{bmatrix}$$

花岗岩模糊关系矩阵:

$$R_H = \begin{bmatrix} 0 & 0.18 & 0.52 & 1 \\ 0 & 0.43 & 1 & 0.49 \\ 0 & 0.18 & 0.54 & 1 \\ 0.16 & 1 & 0.51 & 0 \end{bmatrix}$$

4.6.4 确定权重

由于隧道埋深很大,地质条件较好,属于高地应力区,再参考王元汉岩爆权重取值,本文适当提高围岩切应力权重值,然后将剩余权重均分给反映岩石自身性质的三个指标。岩石强度脆性系数、岩石变形脆性系数、弹性应变能指数、最大切应力指标权重如下:

$$\omega = [0.2 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.4]$$

4.6.5 岩爆烈度综合评判

凝灰岩:

$$B_N = \omega \cdot R_N = [0.3 \quad 0.79 \quad 0.64 \quad 0.12]$$

所以综合评价结果为弱岩爆。

花岗岩:

$$B_H = \omega \cdot R_H \cdot [0.06 \quad 0.56 \quad 0.62 \quad 0.50]$$

所以综合评价结果为中等岩爆。

## 5 结论

(1) 本次模糊数学综合评价结果为: 高铁武夷山隧道埋深 1 100 m 处岩爆倾向性介于弱岩爆和中等岩爆之间。

(2) 相比单指标岩爆倾向性评价, 采用模糊数学综合评价法, 考虑了多个因素的综合影响, 更加客观合理地体现了岩爆倾向性。

(3) 本次研究在常规岩石力学实验的基础上, 结合先进的多通道声发射监测技术, 较好地判断出满足脆性系数法和弹性应变能指标法卸载条件的卸载点, 提高了判断指标的准确性。

## 参考文献:

- [1] 万姜林, 周世祥, 南琛, 等. 岩爆特征及机理[J]. 铁道工程学报, 1998(2): 99-106.  
Wan Jianglin, Zhou Shixiang, Nan Chen, etc. Characteristics and Mechanical Analysis of Rock Burst. [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1998(2): 99-106.
- [2] 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(2): 16-24.  
Xu Zemin, Huang Runqiu, Fan Zhuguo, etc. Progress in Research on Rockburst Hazard of Long Tunnel with Large Section [J]. Journal of Natural Disasters, 2004(2): 16-24.
- [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(5): 15-23.  
Wang Yuanhan, Li Wodong, Li Qiguang, etc. Method of Fuzzy Comprehensive Evaluations for Rockburst Prediction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998(5): 15-23.
- [4] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价[J]. 东北大学学报, 2001(1): 60-63.  
Li Shulin, Feng Xiating, Wang Yongjia, etc. Evaluation of Rockburst Liability in a Deep Hard Rock Mine [J]. Journal of Northeastern University 2001(1): 60-63.
- [5] 陈海军, 酆能惠, 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(2): 229-232.  
Chen Haijun, Li Nenghui, Nie Dexin, etc. A Model for Prediction of Rockburst by Artificial Neural Network [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002(2): 229-232.
- [6] 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(4): 943-948.  
Ge Qifa, Feng Xiating. Classification and Prediction of Rockburst Using Adaboost Combination Learning Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(4): 943-948.
- [7] 汪波, 何川, 吴德兴. 深埋特长隧道岩爆预测研究[J]. 铁道工程学报, 2009(11): 45-49.  
Wang Bo, He Chuan, Wu Dexing. Research on the Prediction of Rock Outburst for Deep-burying Long Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(11): 45-49.
- [8] 杨健, 武雄. 岩爆综合预测评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(3): 411-416.  
Yang Jian, Wu Xiong. Comprehensive Forecasting Method for Estimating Rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(3): 411-416.
- [9] 刘章军, 袁秋平, 李建林. 模糊概率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, 2008(S1): 3095-3103.  
Liu Zhangjun, Yuan Qiuping, Li Jianlin. Application of Fuzzy Probability Model to Prediction of Rockburst Intensity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S1): 3095-3103.
- [10] 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(S1): 2720-2726.  
Shi XiuZhi, Zhou Jian, Dong Lei, etc. Application of Unascertained Measurement Model to Prediction of Classification of Rockburst Intensity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2010(S1): 2720-2726.
- [11] 李庶林, 唐海燕. 岩爆倾向性评价的弹性应变能指标法[J]. 矿业研究与开发, 2005(5): 20-22.  
Li Shulin, Tang Haiyan. Evaluation of Rockburst Proneness by Elastic Strain Energy Indices [J]. Mining Research and Development 2005(5): 20-22.