

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.06.005

# 雅鲁藏布江峡谷段某深埋隧道岩爆特征分析

王喜华

(西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 拉萨至日喀则铁路以隧道形式穿越雅鲁藏布江峡谷段。受区域地质环境的影响, 区段内盆因拉围岩内构造应力集中, 施工过程中岩爆问题突出。在对现场地应力数据和隧道围岩物理力学特性参数的实验测试的基础上, 分析了盆因拉深埋隧道花岗岩、片麻岩和闪长岩围岩体的弹性应变能、强度和变形脆性系数以及弹性应变能等指标, 进而分析了围岩体岩爆倾向。利用 MIDAS 有限元软件计算了隧道洞壁最大切向应力, 应用 Russeness 和 Barton 判据对围岩岩爆强度进行了评判。其中花岗岩具有轻微一中等岩爆倾向; 片麻岩具有中一强岩爆倾向, 局部具有轻微岩爆倾向; 闪长岩具有强岩爆倾向, 局部具有轻微一中等岩爆倾向。计算结果和施工监测结果一致, 研究结论为该区域类似工程施工提供了参考。

**关键词:** 拉日铁路; 高地应力; 岩爆; 岩爆预测

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)06-0025-05

## Rock Burst Problems in the Tunnel of Yarlung Zangbo River Section of Lasa to Rikaze Railway

WANG Xihua

(School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** The Lasa to Rikaze railway run across yarlung zangbo river by tunnels. The geologic environment causes high ground stress on surrounding rock in the tunnel. The rock burst became the main problem during the construction. Based on the field investigation, in-situ stress test and the laboratory rock physical and mechanical tests, the indices for the tendency for rock burst of granite, gneiss and diorite rock mass in the tunnel, such as the elastic energy of deformation index, the rock brittle coefficient of strength, the rock brittle coefficient of deformation and the biggest storage elastic strain energy were analyzed. The maximum tunnel wall stress was calculated by using the finite element method (MIDAS) then the Russeness and Barton criterions were adopted to predicate the rock burst. The results are as follows: the granite is mainly the weak-medium rock burst proneness; gneiss is mainly the medium-intense rock burst proneness, and some sections of weak rock burst proneness; diorite is mainly the intense rock burst proneness, some sections of weak-medium rock burst proneness.

**Keywords:** Lasa to Rikaze railway; high ground stress; rock burst; rock burst prediction

岩爆是高地应力环境中, 坚硬脆性围岩隧道施工过程中岩体弹性应变能突然释放产生的一种动力失稳现象<sup>[1-5]</sup>。隧道中的岩爆往往给隧道施工中的人员和设备的安全造成严重影响。对隧道围岩岩爆产生特点、监测及预测方法<sup>[6-9]</sup>进行研究, 对隧道工程设计施工具有重要意义。

拉日铁路盆因拉隧道地处雅鲁藏布江峡谷区高地应力环境中, 在隧道施工过程中不同区段出现不

同程度的岩爆, 给施工安全带来不同程度的影响。结合现场地应力实测数据, 采用室内岩石物理力学实验研究和数值模拟方法, 结合国内外已有的多种岩爆判据, 对盆因拉深埋隧道岩爆问题进行总结研究, 为今后类似工程设计和施工提供参考。

### 1 隧址区工程地质概况

拉日铁路以隧道群形式穿越长度近 90 km 的雅

鲁藏布江峡谷区段,其中盆因拉深埋隧道为拉日铁路的关键性控制工程,隧道处于雅鲁藏布江左侧中高山区,地形地貌简单,地层、岩性较单一,隧道全长 10 410 m,最大埋深 1 080 m,全隧道共设一个斜井,三个横洞。拉日铁路走向与盆因拉深埋隧道位置示意图见图 1。

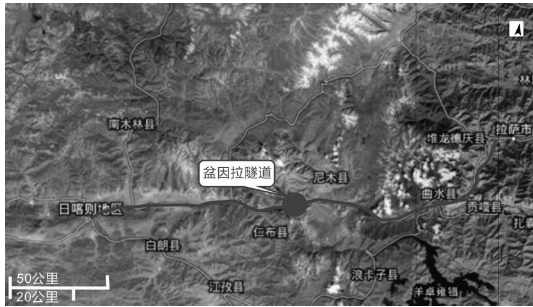


图 1 拉日铁路走向图及盆因拉深埋隧道位置示意图

受峡谷地貌的影响,谷坡处产生应力释放,地应力发生重新分布。盆因拉深埋隧道在雅鲁藏布江河谷呈近东西向展布。为了验证地应力大小和方向,在盆因拉深埋隧道(H5+550)钻孔,采用水压致裂法测试地应力,实验中共成功获得 3 个测段压裂资料,1 个测段印模资料,可以代表该处岩体应力值状态。水压致裂法地应力测试结果见表 1, $\sigma_H$ 、 $\sigma_h$ 、 $\sigma_z$  分别为最大和最小水平主应力以及上覆岩石的自重。

地应力测量时,钻孔充满水,钻孔处上覆岩层厚

度为 550 m,重度为 27.0 kN/m<sup>3</sup>。由现场实验数据可知,最大主应力方向为 N35°E。

表 1 盆因拉深埋隧道地应力实测值

| 序号 | 孔深/m  | $\sigma_z$ /MPa | $\sigma_H$ /MPa | $\sigma_h$ /MPa |
|----|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | 21.93 | 15.4            | 27.4            | 15.4            |
| 2  | 25.18 | 15.5            | 24.9            | 14.7            |
| 3  | 27.13 | 15.6            | 24.7            | 14.6            |

## 2 隧址区围岩物理力学性质研究

研究表明具备岩爆倾向性的岩体、岩体的完整性以及高地应力环境是岩爆形成的必备条件<sup>[4]</sup>。表征此三方面因素的指标可分为岩性、岩体结构、强度和地应力等。

因此,为了更好的分析盆因拉深埋隧道围岩的储能条件,对隧址区主要岩性花岗岩、片麻岩和闪长岩进行岩性、强度和变形特征等方面的实验研究。

### 2.1 基本物理力学指标

经野外调查,在隧道中取了花岗岩、片麻岩和闪长岩岩样。采用静态三轴岩石力学伺服测试系统测试了其力学强度参数。另外,岩石抗拉测试实验设备是 600 kN 服实验机。

为了全面了解岩石物理力学特性,通过实验,获得了三种岩性的密度、单轴抗压强度、弹性模量、泊松比、抗拉强度(见表 2)加卸载曲线和全应力-应变曲线等基本数据。

表 2 隧址区围岩物理力学参数表

| 岩性  | 密度 $\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> ) | 单轴抗压强度 $R_b$ /MPa | 抗拉强度 $R_t$ /MPa | 泊松比 $\mu$ | 弹性模量 $E$ /GPa |
|-----|----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------|---------------|
| 花岗岩 | 2.71~2.76                        | 73.6~98.5         | 6.4~15.2        | 0.03~0.18 | 13.6~27.3     |
| 片麻岩 | 2.69~2.73                        | 51.9~92.3         | 8.2~15.3        | 0.08~0.23 | 11.2~25.5     |
| 闪长岩 | 2.81~2.86                        | 70.6~107.3        | 7.6~11.7        | 0.02~0.18 | 11.9~22.7     |

### 2.2 岩石单轴循环加卸载实验

岩爆的发生与岩体的储能条件有很大关系<sup>[9-11]</sup>,以应用能量理论对岩爆等级进行预测预报,目前岩爆倾向性指标应用较为广泛的则是弹性应变能指数( $W_{ET}$ )<sup>[11]</sup>,该方法最先有波兰学者 Kidybinski(1981 年)提出,通过岩石加卸载全程曲线分析岩石储存弹性应变能的性能。

如图 2 所示,理论上,计算弹性应变能  $W_{ET}$  指标时,应从岩石的峰值强度点卸荷。但是,岩石在峰值强度应力时,岩石内部已经产生不同程度的塑性变形,而且由于岩石的非均质性,很难精确控制岩石的峰值强度点。本次测试中基于岩石单轴压缩实验获得岩石峰值强度值,卸载强度点选择单轴抗压强度

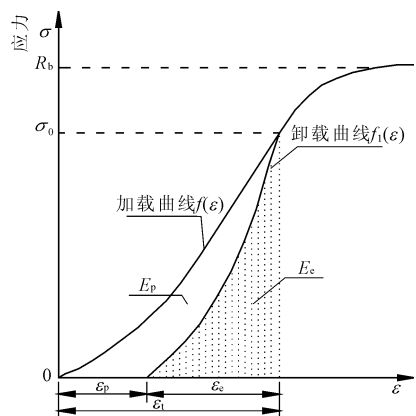


图 2 岩石试样弹性应变能( $W_{ET}$ )计算示意图<sup>[10]</sup>

的 70% ~ 90%, 此加载过程中, 岩石将聚积变形并产生弹性变形和塑性变形, 然后再卸载到单轴抗压强度的 5%, 在卸载过程中, 弹性变形将得到恢复, 而塑性变形则永久性保存下来。

因此, 采用  $W_{ET}$  指标表示岩石加载卸载岩石释放的弹性变形能量与耗散的能量, 计算表达式为:

$$W_{ET} = \frac{E_p}{E_e} = \frac{\int_{\epsilon_p}^{\epsilon_1} f_1(\epsilon) d\epsilon}{\int_0^{\epsilon_1} f(\epsilon) d\epsilon - \int_{\epsilon_p}^{\epsilon_1} f_1(\epsilon) d\epsilon} \quad (1)$$

式中:  $E_e$  为卸载荷前的弹性变形储能;  $E_p$  为损耗的应变能;  $f(\epsilon)$  为加载曲线;  $f_1(\epsilon)$  为卸载曲线;  $\epsilon_1$  为总应变;  $\epsilon_e$  为弹性应变;  $\epsilon_p$  为塑性应变。

文献[10-11]表明,  $W_{ET}$  值越大, 岩石聚积和释放的弹性应变能量越多, 破坏时的强度越大, 岩石产生岩爆的倾向也就越大。因此  $W_{ET}$  可以反映岩爆的倾向性等级, 其标准为:

$$\begin{cases} W_{ET} \geq 5.0 & \text{强烈岩爆} \\ 3.5 \leq W_{ET} < 5.0 & \text{中等岩爆} \\ 2.0 \leq W_{ET} < 3.5 & \text{弱岩爆} \\ W_{ET} < 2.0 & \text{无岩爆} \end{cases} \quad (2)$$

盆因拉深埋隧道三种岩石单轴循环加卸载实验所用岩样按照高径比 2:1 的比例切取, 实验过程通过轴向压力控制, 加卸载速率设定在 3 kN/min, 卸载点为岩石单轴抗压强度 80%, 三种岩石的单轴循环加卸载曲线, 见图 3 ~ 图 5 所示。

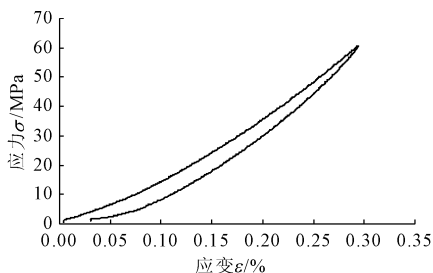


图 3 盆因拉深埋隧道花岗岩单轴循环加卸载曲线

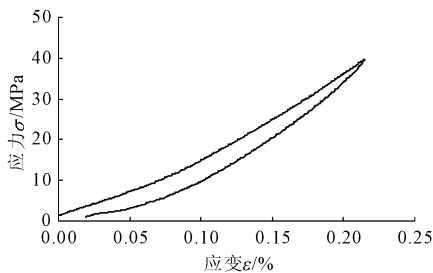


图 4 盆因拉深埋隧道片麻岩单轴循环加卸载曲线

应变能  $W_{ET}$  指数进行计算, 得到表 3 结果。根据表 3 可以判定该隧道中花岗岩和片麻岩具有中等 - 强烈岩爆倾向, 而闪长岩具有强烈岩爆倾向。

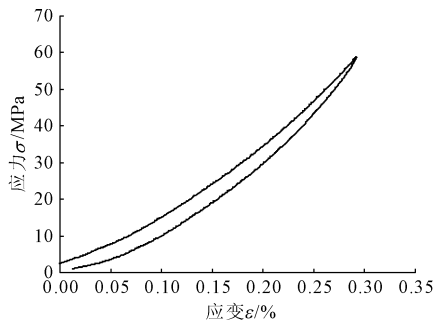


图 5 盆因拉深埋隧道闪长岩单轴循环加卸载曲线

表 3 三种岩石弹性应变能计算结果

| 岩性  | 释放能量 $E_e$ | 消耗能量 $E_p$ | 弹性能指数 $W_{ET}(E_e/E_p)$ | 岩爆倾向性 |
|-----|------------|------------|-------------------------|-------|
| 花岗岩 | 6.24       | 1.37       | 4.56                    | 中等岩爆  |
| 片麻岩 | 3.00       | 0.82       | 3.65                    | 中等岩爆  |
| 闪长岩 | 6.28       | 1.21       | 5.18                    | 强烈岩爆  |

### 3 盆因拉隧道围岩岩爆倾向性分析

影响岩爆的因素是多方面的, 采用单一指标对岩爆的倾向性进行判别, 易受人为和外界因素的影响。

为了全面分析预测盆因拉深埋隧道在开挖过程中围岩体发生岩爆的倾向性和强度等级, 根据室内岩石物理力学实验、有限元数值模拟及现场地应力测试结果, 采用多种岩爆倾向性指标对岩爆进行分析和评价。

#### 3.1 脆性系数法

岩爆与岩石的脆性有很大的关系, 在实际工程中常用脆性系数来表示。脆性系数法主要有强度脆性系数  $B$  和变形脆性系数  $K_U$  两种。

##### 3.1.1 强度脆性系数 ( $B$ )

岩石的单轴抗压 ( $R_b$ ) 和抗拉 ( $R_t$ ) 强度之比, 它反映岩石的脆性程度, 常用来衡量岩爆的倾向性。强度脆性系数 ( $B$ ) 可表达为:

$$B = \frac{R_b}{R_t} \quad (3)$$

式中:  $R_b$  为岩石单轴抗压强度, MPa;  $R_t$  为岩石单轴抗拉强度, MPa。

强度脆性系数  $B$  的判别标准为<sup>[3-7]</sup>

根据  $W_{ET}$  岩爆倾向性标准, 对三种岩石的弹性

$$\left\{ \begin{array}{ll} B \geq 40 & \text{无岩爆} \\ 26.7 \leq B < 40 & \text{微弱岩爆} \\ 14.5 \leq B < 26.7 & \text{中等岩爆} \\ B < 14.5 & \text{强烈岩爆} \end{array} \right. \quad (4)$$

因此,根据实验测得的岩石的单轴抗压强度和抗拉强度,脆性系数( $B$ )的计算结果见表 4。

表 4 岩石脆性系数计算结果

| 岩性  | 抗压强度 /MPa  | 抗拉强度 /MPa | 强度脆性系数 $B$ | 岩爆倾向性   |
|-----|------------|-----------|------------|---------|
| 花岗岩 | 73.6~98.5  | 6.4~15.2  | 4.8~15.4   | 中等—强烈岩爆 |
| 片麻岩 | 51.9~92.3  | 8.2~15.3  | 3.4~11.3   | 强烈岩爆    |
| 闪长岩 | 70.6~107.3 | 7.6~11.7  | 6.0~14.1   | 强烈岩爆    |

根据表 4 中的  $B$  值计算结果,花岗岩的岩爆倾向性为中等—强烈岩爆;片麻岩和闪长岩均为强烈岩爆倾向。

### 3.1.2 变形脆性系数法( $K_U$ )

根据实验确定岩石峰值强度前的总变形与永久变形(塑性变形)之比称为变形脆性系数  $K_U$ <sup>[13]</sup>,用变形脆性系数( $K_U$ )来评价岩爆倾向性。具体实验方法见岩石单轴循环加卸载实验。变形脆性系数( $K_U$ )的计算表达式为:

$$K_U = U/U_l \quad (5)$$

式中: $U$  为总变形; $U_l$  为永久变形(塑性变形)。

变形脆性系数  $K_U$  的判别标准<sup>[13]</sup>为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} K_U < 2.0 & \text{无岩爆} \\ 2.0 \leq K_U < 6.0 & \text{弱岩爆} \\ 6.0 \leq K_U < 9.0 & \text{中等岩爆} \\ K_U \geq 9.0 & \text{强烈岩爆} \end{array} \right. \quad (6)$$

根据表 5 变形脆性系数  $K_U$  的计算结果,花岗岩具有中等岩爆倾向,片麻岩和闪长岩分别具有中等岩爆倾向和强烈岩爆倾向。

表 5 岩石试样变形脆性系数计算结果

| 岩性  | 总变形 $U$ | 永久变形 $U_l$ | 脆性系数 $K_U$ | 岩爆倾向性 |
|-----|---------|------------|------------|-------|
| 花岗岩 | 0.29    | 0.04       | 7.3        | 中等    |
| 片麻岩 | 0.22    | 0.03       | 7.3        | 中等    |
| 闪长岩 | 0.30    | 0.03       | 10.0       | 强烈    |

### 3.2 最大储存弹性应变能指标( $E_s$ )

$E_s$  的计算公式为:

$$E_s = \frac{R_b^2}{2E} \quad (7)$$

式中: $R_b$  为岩石试块单轴抗压强度,MPa; $E$  为岩石

的弹性模量,MPa; $E_s$  为试块储存的最大应变能, MJ/m<sup>3</sup>。

最大储存弹性应变能指标  $E_s$  判别岩爆倾向性强烈程度的标准为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} E_s < 0.20 \text{MJ/m}^3 & \text{无岩爆} \\ 0.20 \leq E_s < 0.50 \text{MJ/m}^3 & \text{微弱岩爆} \\ 0.50 \leq E_s < 0.75 \text{MJ/m}^3 & \text{中等岩爆} \\ E_s \geq 0.75 \text{MJ/m}^3 & \text{强烈岩爆} \end{array} \right. \quad (8)$$

由表 6 知,花岗岩、片麻岩和闪长岩均具有微弱岩爆倾向。

表 6 岩石试样最大储存弹性应变能计算结果

| 岩性  | 单轴抗压强度 /MPa | 弹性模量 /GPa | 最大储存弹性应变能指标 $E_s$ /(MJ·m <sup>-3</sup> ) | 岩爆倾向性 |
|-----|-------------|-----------|--|-------|
| 花岗岩 | 73.6~98.5   | 13.6~27.3 | 0.10~0.36                                | 微弱岩爆  |
| 片麻岩 | 51.9~92.3   | 11.2~25.5 | 0.05~0.38                                | 微弱岩爆  |
| 闪长岩 | 70.6~107.3  | 11.9~22.7 | 0.11~0.48                                | 微弱岩爆  |

## 4 岩爆预测评价

国内外学者在关于岩爆的预测研究,提出了许多岩爆的判据准则<sup>[12-16]</sup>,但目前常用的主要为拉森斯(Russeness)判据和巴顿(Barton)判据,本文应用这三种判据对盆因拉深埋隧道岩爆进行预测评价。

### 4.1 拉森斯(Russeness)判据

Russeness(挪威学者)提出应用有限元法计算的洞壁最大切向应力  $\sigma_{\theta_{\max}}$  与  $R_b$  的比值预测和判定岩爆等级的方法,判别标准为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_{\theta_{\max}}/R_b < 0.20 & \text{无岩爆} \\ 0.20 \leq \sigma_{\theta_{\max}}/R_b < 0.30 & \text{弱岩爆} \\ 0.30 \leq \sigma_{\theta_{\max}}/R_b < 0.55 & \text{中岩爆} \\ \sigma_{\theta_{\max}}/R_b \geq 0.55 & \text{强岩爆} \end{array} \right. \quad (9)$$

#### 4.1.1 隧道洞壁切向应力计算

采用有限单元法计算隧道洞壁切向应力值,数值模拟模型见图 6。

模型计算条件为:模型底部垂向位移约束,水平方向施加现场实测水平地应力,上部施加根据隧道埋深计算的岩体自重应力。

#### 4.1.2 岩爆预测结果

根据 Russeness 判据的盆因拉隧道岩爆倾向性预测结果见表 7。

表 7 的预测结果表明:花岗岩发生中等岩爆外,片麻岩和闪长岩均有发生强岩爆的倾向。

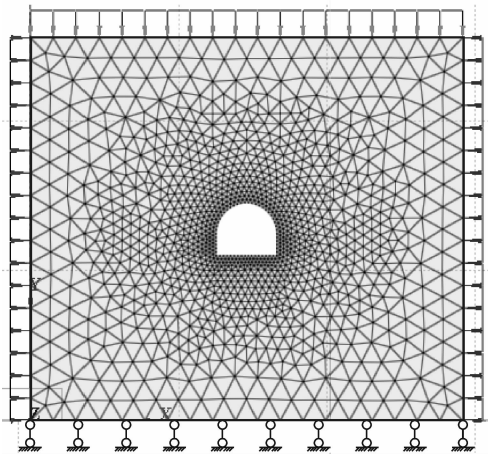


图 6 隧道开挖数值模拟模型图

表 7 Russeness 判据岩爆预测结果

| 岩性  | $R_b$ 均值 /MPa | $\sigma_{\max}$ /MPa | Russeness 判据 | 岩爆倾向性 |
|-----|---------------|----------------------|--------------|-------|
| 花岗岩 | 82.8          | 35.3                 | 0.4          | 中岩爆   |
| 片麻岩 | 68.5          | 104.1                | 1.5          | 强岩爆   |
| 闪长岩 | 98.9          | 96.2                 | 1.0          | 强岩爆   |

#### 4.2 Barton 判据

Barton 提出将岩石的单轴抗压强度与最大地应力的比值  $R_b/\sigma_H$  作为预测岩爆的判据,其判据式为:

$$\begin{cases} R_b/\sigma_H > 5 & \text{无岩爆} \\ 5 > R_b/\sigma_H > 2.5 & \text{轻微-中等岩爆} \\ R_b/\sigma_H < 2.5 & \text{严重岩爆} \end{cases}$$

采用 Barton 判据对隧道围岩岩爆进行预测,预测结果见表 8 所示。

表 8 Barton 判据 ( $R_b/\sigma_H$ ) 岩爆预测结果

| 岩性  | 最大地应力 $\sigma_H$ /MPa | 抗压强度 $R_b$ /MPa | Barton 判据 $R_b/\sigma_H$ | 岩爆倾向性           |
|-----|-----------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| 花岗岩 | 24.7 ~ 27.4           | 73.6 ~ 98.5     | 2.81 ~ 3.53              | 轻微-中等岩爆         |
| 闪长岩 | 24.7 ~ 27.4           | 70.6 ~ 107.3    | 2.58 ~ 3.77              | 轻微-中等岩爆         |
| 片麻岩 | 24.7 ~ 27.4           | 51.9 ~ 92.3     | 2.64 ~ 3.74              | 轻微-中等岩爆,有时有严重岩爆 |

表 8 的预测结果表明:3 种岩性在隧道埋深处均有轻微-中等岩爆的可能性,甚至局部会有严重岩爆的可能性。

## 5 结 论

针对拉日铁路盆因拉深埋隧道现场调查、地应力测量及岩爆综合分析得出:花岗岩具有轻微-中等岩爆倾向;片麻岩具有中-强岩爆倾向,局部具有

轻微岩爆倾向;闪长岩具有强岩爆倾向,局部具有轻微-中等岩爆倾向。同时,当前岩爆预测的标准大部分基于某一因素进行预测,但是影响岩爆的因素众多,且岩爆发生具有很强的随机性,对于高应力区,岩体完整干燥地段,应加强监测,积极防护,降低岩爆危害。

#### 参考文献:

- [1] 许梦国,杜子健,姚高辉,等.程潮铁矿深部开采岩爆预测[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2921-2928.
- [2] 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.
- [3] 郭长宝,张永双,邓宏科,等.基于岩爆倾向性的高黎贡山深埋隧道岩爆预测研究[J].工程勘察,2011,39(10):8-13.
- [4] 徐林生,王兰生,李天斌.国内外岩爆研究现状综述[J].长江科学院院报,1999,16(4):24-27.
- [5] 陈云,阮怀宁,朱珍德.深埋隧洞岩爆成因机理分析与防治研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):209-212.
- [6] 张传庆,俞缙,陈珺,卢景景,等.地下工程围岩潜在岩爆问题评估方法[J].岩土力学,2016,37(S1):341-349.
- [7] 马天辉,唐春安,唐烈先,等.基于微震监测技术的岩爆预测机制研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):470-483.
- [8] 赵周能,冯夏庭,肖亚勋,等.不同开挖方式下深埋隧洞微震特性与岩爆风险分析[J].岩土工程学报,2016,38(5):867-876.
- [9] 林金洪.地下洞室岩爆的预测及处理研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(3):159-163,184.
- [10] 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,2005,25(5):16-19.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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(自然科学版),2001,22(1):60-63.
- [14] 杨健,武雄.岩爆综合预测评价方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):411-416.
- [15] 吴德兴,杨健.苍岭特长公路隧道岩爆预测和工程对策[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3965-3971.
- [16] Wang J A, Park H D. Comprehensive prediction of rock burst based on analysis of strain energy in rocks[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(1): 49-57.