

西藏扎墨公路嘎隆拉隧道岩爆倾向性实验研究

靳晓光^{1 2} 王 艳^{1 2} 林 志³ 孙建国³

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;

3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

摘 要: 岩爆是高地应力山区硬岩隧道施工主要地质灾害之一, 岩爆倾向性分析是研究、预测岩爆的主要方法。西藏扎(木)墨(脱)公路嘎隆拉隧道埋深大, 地应力高, 岩性主要为花岗岩, 发生岩爆的可能性大。结合嘎隆拉隧道工程实践, 在隧道钻取了岩芯试样, 进行了岩石单轴压缩实验、单轴压缩加载和卸载实验以及 Kaiser 效应声发射实验, 开展了岩爆倾向性研究。实验结果表明, 岩石冲击性能指标 W_{CF} (峰值荷载以前的能量积累与峰后的能量耗散之间的比值) 皆 > 3.0 , 大多数试样的弹性变形能指数 W_{ET} (全应力—应变曲线峰值前区卸载曲线下面的面积与加卸载曲线之间的面积之比) > 2.5 , 岩石具有强岩爆倾向; 岩石声发射(AE) 撞击数累计数—时间曲线特征属于第 III 类, 当应力接近峰值时声发射突然迅速增大, 岩石很快发生突然而猛烈的破坏, 其岩爆倾向性强。隧道施工实践表明, 在研究区段有岩爆现象发生, 但由于地下水较发育, 定为弱岩爆现象。岩爆倾向性研究为嘎隆拉隧道安全施工和支护设计优化提供了信息, 也为西藏复杂地质条件下类似工程建设提供一定的借鉴。

关键词: 隧道; 冲击能指标; 弹性变形能指标; 声发射特征; 岩爆倾向性

中图分类号: TU9 ,U45

文献标志码: A

岩爆倾向性是指岩石在所受的应力达到极限应力状态时发生岩爆的可能性, 岩石(岩体)的岩爆倾向性和极限应力状态是岩爆发生的两个基本条件。

1 岩爆倾向性预测方法

现有的岩爆倾向性预测方法主要有以下三类:

1. 基于岩爆机理模型的预测方法

该类预测方法主要有^[1-5]:

1) 最大主应力判据。利用完整岩石单轴抗压强度 σ_c 与工程岩体未开挖前的原岩最大主应力 $\sigma_{1原}$ 之间的关系式来作为岩爆倾向性的判据。

2) 最大剪应力判据。以滑动或剪切破坏前后滑移面上的剪切应力差 τ_{ss} 为判据, 判断岩爆的倾向性。

3) 能量判据。当采用爆破方法开挖隧道时, 在开挖面上形成释放能, 并以 p 波和 s 波的形式通过围岩

介质向外传播。当弹性应变能 $100 \text{ kJ/m}^3 < U \leq 150 \text{ kJ/m}^3$ 时发生弱岩爆, 当 $150 \text{ kJ/m}^3 < U \leq 200 \text{ kJ/m}^3$ 时发生中等岩爆, 当 $U > 200 \text{ kJ/m}^3$ 发生强烈岩爆。

4) 冲击倾向性判据。目前国内应用最广泛的岩爆倾向性预测方法是冲击倾向性判据, 主要由以下几种: 弹性能指标 W_{et} 、冲击能指标 W_{ef} 、弹性变形指标 K_e 、刚度比指标 K_{cf} 、矿岩动态破坏时间 DT 以及损伤能量指数 W_{ed} 。

2. 基于模糊数学的综合评述^[6-9]

谭以安提出了基于模糊数学理论的多级模糊综合评判方法构成的模糊数学方法。在此基础上, 尹光志又对该理论做了深化和发展, 使其既可以综合评判矿岩倾向性指标, 又可以考虑矿岩性质、地质构造、生产技术因素对地下矿山岩爆倾向性的影响, 并成功应用于硐石台煤矿采掘工作面的岩爆倾向性预测。

3. 基于先验知识的智能预测方法^[10-11]

杨涛等提出了基于先验知识的人工神经网络岩

收稿日期(Received date): 2012 - 09 - 22; 改回日期(Accepted): 2012 - 12 - 29。

基金项目(Foundation item): 西部交通建设科技项目(2007 318 740 04) 资助。[Supported by the Western Science and Technology Construction project (2007 318 740 04) .]

作者简介(Biography): 靳晓光(1967 -) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道与地下工程、岩土工程等方面的研究。[Jin Xiaoguang(1967 -) , M , professor , Ph D supervisor , major in tunnel and underground engineering , geotechnical engineering and so on.] E - mail: Jxgcqu@ 163. com

爆预测模型,利用神经网络的自学习功能来获取岩爆与其各个影响因素之间的非线性关系,不需监理解析判据,从而大大地减小了人为因素的干扰。白明洲等采用岩石抗压强度 σ_c 、岩石抗拉强度 σ_t 、岩石弹性能指数 W_{et} 作为评判指标对西秦岭隧道两个岩爆实录进行了岩爆危险性预测检验,结果与实际基本一致。

西藏扎(木)墨(脱)公路嘎隆拉隧道位于青藏高原南部,海拔3 500~4 500 m,地形陡峭、险要、沟谷发育,构造运动和冰蚀作用都很强烈。隧道穿越的岩性主要为黑云母花岗岩、混合花岗岩和花岗闪长岩等。地质构造发育,隧道处在两条区域断裂(通麦-嘎隆寺断裂和马尼翁断裂)的影响范围内,洞身及其附近还发育有7条小断层,片理、节理及裂隙发育。隧道位置属于藏中地震带和喜马拉雅地震带,地震活动强烈(图1)。隧道施工阶段,在隧道洞壁采用三钻孔交汇应力解除法测得的岩体最大主应力28.5 MPa,方向N43.9°W,倾角-34.1°;中间主应力26.6 MPa,最小主应力5.4 MPa,属于高地应力水平。

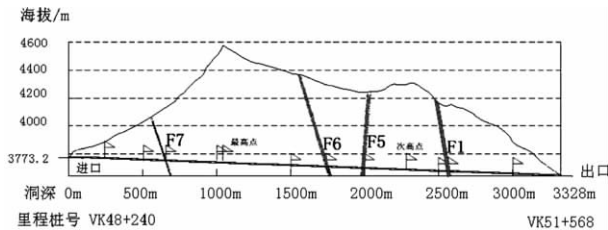


图1 西藏扎墨公路嘎隆拉隧道地质纵断面示意图

Fig.1 Geological section diagram of Galongla Tunnel of Zhamo Highway in Tibet

本文结合西藏扎墨公路嘎隆拉隧道工程实践,通过岩石单轴压缩加载和卸载实验以及Kaiser效应声发射实验,采用冲击能指标 W_{CF} 、弹性变形能指数 W_{ET} 和声发射特征研究嘎隆拉隧道的岩爆倾向性,为本隧道和类似工程区隧道建设岩爆预测、防治及支护设计优化提供资料。

2 冲击能指标实验测试

岩石在极限荷载以前是一个贮存弹性变形能的过程,在极限荷载以后是一个消耗能量的过程。通过贮能与耗能的比较,人们提出了一个衡量岩石的岩爆倾向性的指标,即冲击能指标,它是应变曲线的峰值前区下面的面积 E_1 与峰值后区下面的面积 E_2

之比,即

$$W_{CF} = \frac{E_1}{E_2} \quad (1)$$

式中 W_{CF} :冲击能指标; E_1 :峰值荷载前区面积; E_2 :峰值荷载后区面积。

W_{CF} 比值越大,岩石发生猛烈破坏的可能性应越大,有岩爆倾向性的岩石,其峰值荷载后区的曲线短,甚至测不到峰值荷载后区曲线,前后两部分面积之比就越大。据此有人提出的判别标准为:

$W_{CF} > 3.0$ 有强岩爆倾向

$2.0 < W_{CF} < 3.0$ 有中等(或弱)岩爆倾向

$W_{CF} < 2.0$ 无岩爆倾向

课题组在嘎隆拉隧道采取了岩芯试样,进行了岩石单轴压缩实验。具体采样情况和实验结果如表1和图1所示。

根据图1分析结果,按式(1)和图1进行分析计算, W_{CF} 皆 > 3.0 ,取样地段隧道围岩具有强岩爆倾向。

表1 岩石采样及加工情况

Table 1 Rock sampling and processing

编号	采样位置	岩性描述	加工的试件情况	
			直径/mm	长度/mm
D1(W1,K1)	K49+150		49	100
D2(W2,K2)	K49+150左		49.08	100
D3(W3,K3)	K49+150右		49.14	100
D4(W4,K4)	K49+250	灰白色花岗岩	49.08	99.58
D5(W5,K5)	K49+250左		49.56	100.6
D6(W6,K6)	K49+250右		49.42	100.4
K7	K49+240		50	100
K8	K48+900	深灰色花岗岩	50	100

3 弹性变形能指数

S P Singh(1988)提出一种岩爆倾向性指标,即岩爆倾向指数(Burst-proneness index)。

该指标定义为全应力-应变曲线峰值前区卸载曲线下面的面积与加卸载曲线之间的面积之比为弹性变形能指数(如图3所示)。

$$W_{ET} = \frac{E_e}{E_p} = \frac{\int_{\varepsilon_p}^{\varepsilon_e} f_1(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_e} f(\varepsilon) d\varepsilon - \int_{\varepsilon_p}^{\varepsilon_e} f_1(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (2)$$

式中 E_e :弹性变形能, MJ; E_p :塑性变形能, MJ; ε_e :弹性应变; ε_p :塑性应变; ε_t :总应变; $f(\varepsilon)$:加载时应力应变曲线; $f_1(\varepsilon)$:卸载时应力应变曲线。

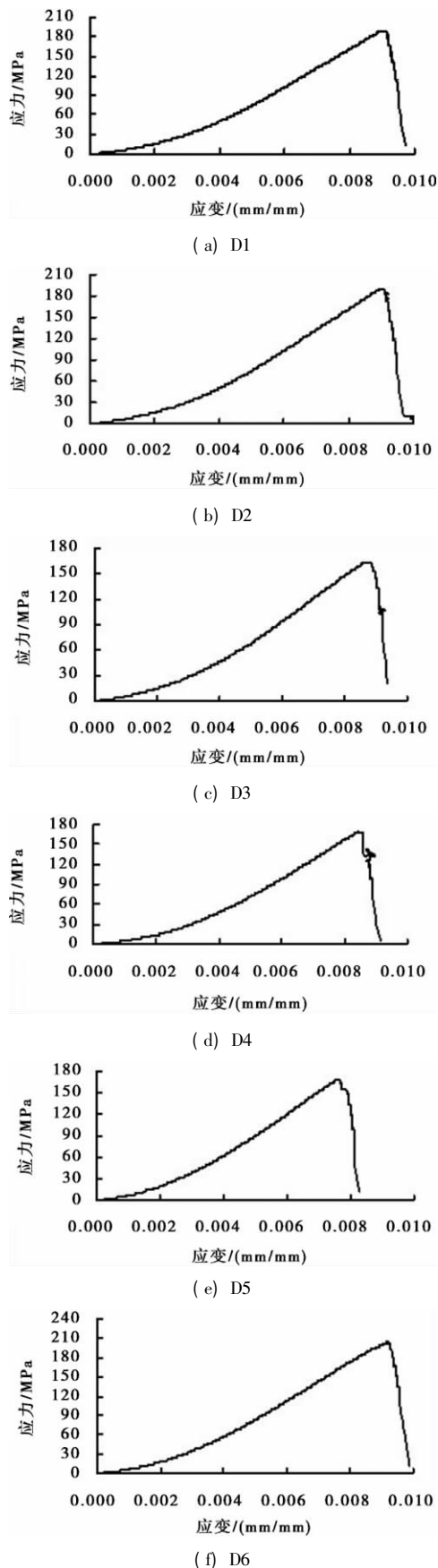
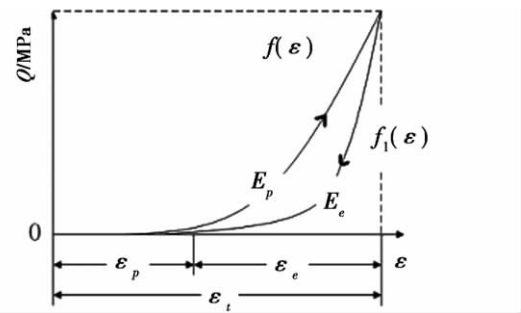


图2 岩石应力-应变实验曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for rocks

图3 W_{ET} 计算示意图Fig. 3 Schematic diagram for calculation of W_{ET}

弹性变形能指数可通过对岩石试件进行单轴压缩加载和卸载实验确定。在实验室对岩样进行单轴压缩实验,取应力为岩石强度的80%~90%时记录的应力-应变曲线,用图形积分法求出弹性变形能量储存与塑性变形能之比,即为弹性变形能量指数 W_{ET} 。

波兰规定,按下列弹性变形能指数范围划分岩爆倾向性:

$W_{ET} \geq 2.5$	强岩爆倾向
$2.0 < W_{ET} < 2.5$	中等岩爆倾向
$W_{ET} < 2.0$	无岩爆倾向

在嘎隆拉隧道采取了岩芯试样,进行了岩石单轴压缩加载和卸载实验。具体采样情况参见表1,实验分析结果如图4所示。

根据 W_{ET} 计算公式,得到 W1~W6 的弹性变形能指数分别为 2.59、13.45、1.59、10.0、5.29、1.40。可以看出,根据波兰的规定,除 W3、W6 弹性变形能指数 $W_{ET} < 2.0$ 外,其他 W_{ET} 值 > 2.5 ,具有强岩爆倾向,与 W_{CF} 分析推测结果比较一致。

4 岩爆倾向性的声发射特征

一些学者根据声发射事件率-时间序列曲线与全应力应变曲线特征把岩石的声发射时间序列归纳为3种类型,如图5所示。

第I类:岩石在受载过程中不断有声发射发生,声发射事件逐渐增多,没有突然增强的现象,而且在峰值后区仍然保持较高的声发射。由于这类岩石在峰值后区仍然没有完全解体,宏观破裂面产生相对滑移,因而峰值后区声发射可以理解为由岩石宏观破裂面产生相对滑移产生的。由于能量的持续释放,岩石发生突然断裂的可能性小,因而无岩爆倾向性。

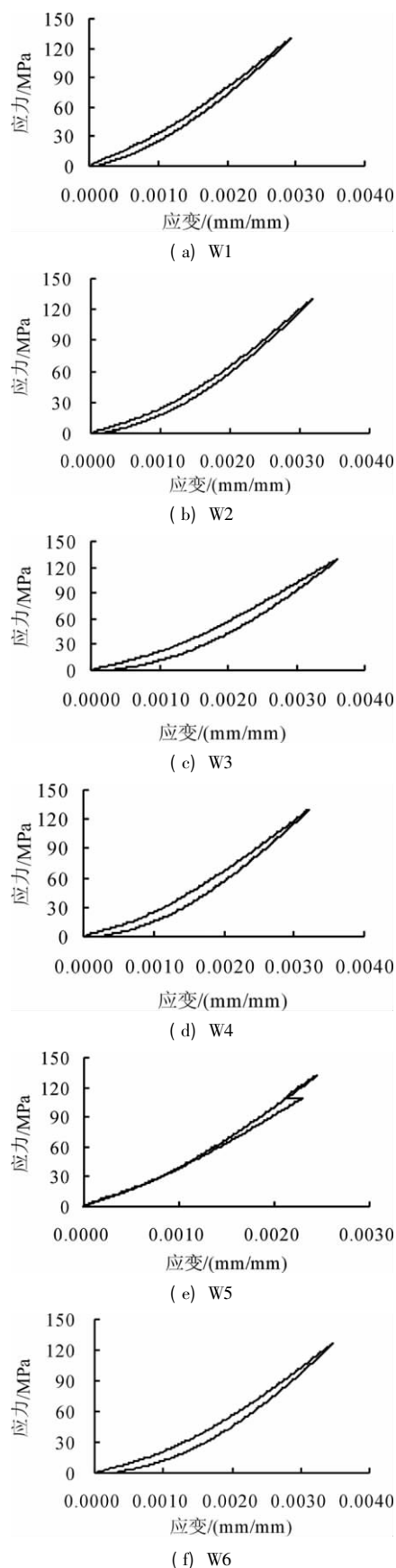


图4 岩石全应力-应变曲线

Fig. 4 All stress-strain curves for rocks

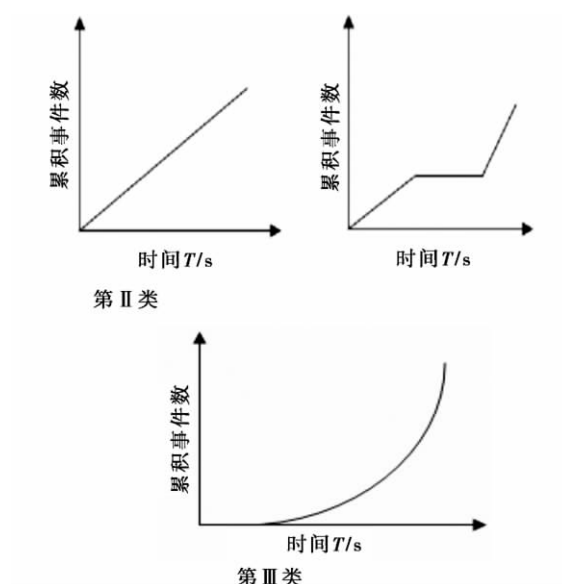


图5 声发射类型(声发射数累积)

Fig. 5 Type of acoustic emission (accumulation quantity of acoustic emission)

第 II 类: 在加载初期, 就有声发射发生, 在峰值后的一定范围内, 声发射出现沉寂现象, 而在峰值过后一定时间后声发射又明显增强。由于峰值后岩石并未解体, 其承载能力的丧失时渐进的过程, 不会发生突然而猛烈的破坏, 其岩爆倾向性弱。

第 III 类: 在荷载较小时声发射很少甚至无声发射现象, 当应力接近峰值时声发射突然迅速增大, 岩石很快发生突然而猛烈的破坏, 其岩爆倾向性强。

利用现场初始地应力测试取出的岩芯和在现场取回的岩石试样加工制作成试件 (K1 ~ K8), 采用 MTS815Testsar 程控伺服控制加载系统和 AE-400B21C 声发射测试与定位仪和传感器 (频率为 120KHz) 检测系统进行测试。K1 ~ K8 Kaiser 效应测试结果如图 6 所示。

从测试的声发射类型结果来看, 测试试样的 AE 撞击数累计数-时间曲线特征属于第 III 类, 在荷载较小时声发射很少甚至无声发射现象, 当应力接近峰值时声发射突然迅速增大, 岩石很快发生突然而猛烈的破坏, 具有较强的岩爆倾向性。

5 结语

1. 嘎隆拉隧道岩体最大主应力为 28.5 MPa, 方向 N43.9°W, 倾角 -34.1°, 属于高地应力水平。隧道开挖卸荷引起周边应力分异, 造成岩石内部破裂和弹性应变能的释放, 引起岩石突然脆性破裂, 发生岩爆。

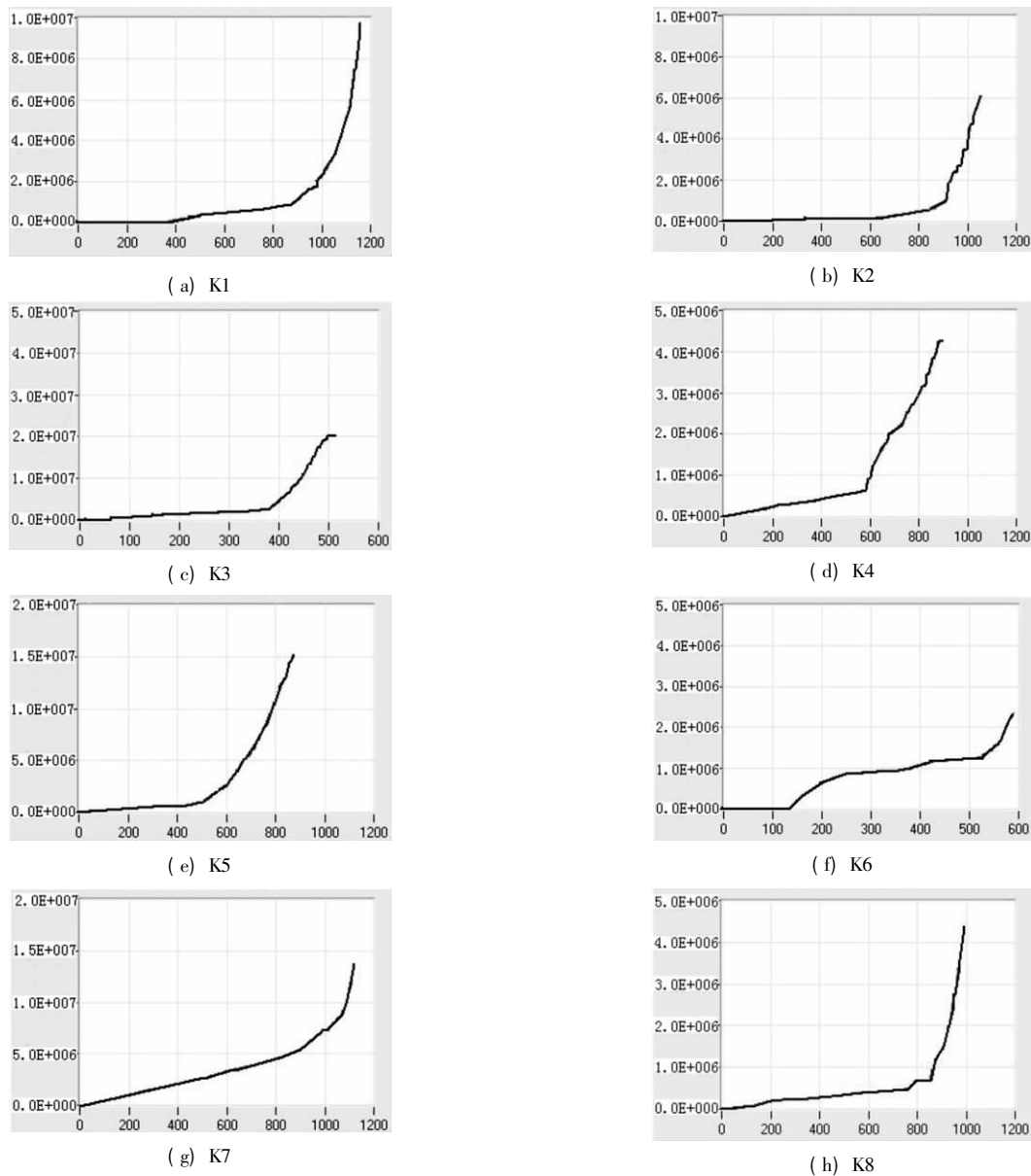


图6 Kaiser 效应测试结果(AE 撞击数累计数-时间关系)

Fig.6 Kaiser effect testing results (AE accumulation of hit number-time relationship)

2. 声发射是由于岩石微损伤释放能量而产生向周围介质辐射的弹性波,声发射活动代表着岩石微损伤程度。岩石声发射能量累积时间序列突然迅速增大,岩石很快发生突然而猛烈的破坏,发生岩爆。

3. 采取冲击性能指标 W_{CF} 、弹性变形能指数 W_{ET} 和声发射特征分析岩爆发生的倾向性,简单、明确,可操作性强。三者分析结果比较一致,研究区段具有较强的岩爆倾向性。

参考文献(Reference)

- [1]Guo Li. Deep hard rock burst proneness dynamic forecasting model and its application [D]. Changsha: Central South University ,2004
- [2] Xie Xuebin. Study on theory , technology and application of rock-burst prediction and control for hard rock deposit [D]. Changsha: Zhongnan University of Technology ,1999 [谢学斌. 硬岩矿床岩爆预测与控制的理论和技术及其应用研究[D]. 长沙:中南工业大学 ,1999]
- [3] Tang Baoqing ,Cao Ping. Diocusion on forecasting and prevention of rockburst [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology ,2001 20(1) : 71 - 73 [唐宝庆,曹平. 预测预防岩爆的探讨 [J]. 山东科技大学学报 2001 20(1) : 71 - 73]
- [4] Xu Dongjun ,Zhang Guang ,Li Tingjie ,et al. On the stress state in rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2000 ,19(2) : 169 - 172 [许东俊,章光,李廷芥,等. 岩爆应力状

[郭立. 深部硬岩岩爆倾向性动态预测模型及其应用[D]. 长沙:中南大学 2004]

- 态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 169-172]
- [5] Tan Yian. The application of fuzzy comprehensive evaluations in forecasting rockburst of Underground Chamber[G]//The Second National Rock Mechanics and Engineering Symposium, 1989 [谭以安. 模糊数学综合评判在地下洞室岩爆预测中的应用[G]//第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集, 1989]
- [6] Yin Guangzhi. Research on Nonlinear Theory in rock mechanics and prediction of rockburst [D]. Chongqing: Chongqing University, 1994 [尹光志. 岩石力学的非线性理论与冲击地压预测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1994]
- [7] Wang Hanyuan, 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): 493-495 [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): 493-495]
- [8] Ma Yongzheng, Li Shumin, Zhou Aimin. Fuzzy identification of rock burst proneness in deep level[J]. Mining Research and Development, 2001, 21(2): 8-10 [马永政, 李庶林, 周爱民. 深部矿岩岩爆倾向性的模糊识别[J]. 矿业研究与开发, 2001, 21(2): 8-10]
- [9] Yang Tao, Li Guowei. Study on rockburst prediction method based on the Prior Knowledge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 429-431 [杨涛, 李国维. 基于先验知识的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 429-431]
- [10] Bai Mingzhou, Wang Lianjun, Xu Zhaoyi. Study on a Neural Network Model and its application in predicting the risk of rock blast[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(4): 65-69 [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]
- [11] Chen Haijun, Li Nenghui, Nie Dexin. A model for prediction of rockburst by artificial neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 229-232 [陈海军, 酆能惠, 聂德新. 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]

Test Study of Rockburst Proneness on Galongla Tunnel of Zhamo Highway in Tibet, China

JIN Xiaoguang^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, LIN Zhi³, SUN Jianguo³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China);

3. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: Rockburst proneness is one of main geologic disasters in the mountain construction of hard rock tunnel with high geostress, rockburst proneness analysis is the main method of studying and predicting rockburst. Galongla Tunnel of Zhamo Highway (from Zhamu to Motuo) in Tibet, which buried deeply with high geostress and whose main lithology is granite, has the high possibility of rockburst. Based on the Tibet Zhamo Road Galongla Tunnel Engineering, drilling the core specimens from Galongla tunnel, rock uniaxial compress experiments, rock uniaxial compress loading and unloading experiments and Kaiser effect acoustic emission experiments were done, carrying out the studying of rockburst proneness. The test results shows that the impact performance indicators W_{CF} (the ratio between energy accumulating before peak load and energy dissipation after it) are more than 3.0 all, most elastic deformation energy index W_{ET} (the proportion of the area under the unloading curve to the area between the loading and unloading curve in the pre-peak of the complete stress-strain curve) are more than 2.5, the rock has strong rockburst proneness. Characteristics of AE accumulation of hit number-time curve belongs to class III, AE counts increase suddenly when the stress is near the peak, the rock has a sudden and heavily destroy quickly, whose rockburst proneness are strong. The tunnel construction practice shows that there are rockburst happened in research section, but because of enough groundwater, it is designated as weak rockburst. The study of rockburst proneness provides information for safe construction and optimizing design of Galongla Tunnel, and provides reference to other similar projects in high geo-stress areas.

Key words: tunnel; impact performance indicators; elastic deformation energy index; acoustic emission characteristic; rockburst proneness