

“铁篦子”方案在岩爆区的应用

王太兴¹, 王西奎¹, 邹俊鹏², 谭旭燕²

(1. 中国葛洲坝集团第三工程公司, 陕西 西安 710000;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430000)

摘要: 为减少岩爆控制的规模, 采用“铁篦子或钢筋排”方案对其进行研究。利用隧道开挖后周围岩体的弹性能密度计算不同岩爆等级发生时的动能; 根据前期对 NJ-TBM 隧洞地应力的反分析成果, 结合工程区域采取应力释放孔等措施, 确定不同岩爆区的最大岩块及其最大速度, 且假定最大岩块以最大速度向钢板/钢筋进行冲击, 从而建立“铁篦子或钢筋排”方案计算模型; 基于该模型, 将所提出的“铁篦子或钢筋排”方案分别应用到强岩爆区、中等岩爆区以及弱岩爆区。结果表明: 在强岩爆区(钢拱架间距 1.5 m, 每延米 30 根 $\Phi = 20$ mm “铁篦子”的方案)中岩爆区(钢拱架间距 1.7 m, 每延米 20 根 $\Phi = 22$ mm “铁篦子”的方案)弱岩爆区(钢拱架间距 2.0 m, 每延米 20 根 $\Phi = 20$ mm “铁篦子”的方案)均未使钢筋出现塑性区。因此, 所提出的方案不会产生塑性区。

关键词: “铁篦子”方案; 岩爆; 动能; 反分析; 计算模型; 塑性区; 支护

中图分类号: TU416.217 文献标志码: A

Application of the ‘iron grate’ program in the area of rock burst

WANG Taixing¹, WANG Xikui¹, ZOU Junpeng², TAN Xuyan²

(1. No. 3 Engineering Co., Ltd., China Gezhouba Group, Xi'an 710000, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Geo-mechanics and Geo-technical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: To reduce the scale of rockburst control, the “iron grate” or “steel bar” scheme was analysed in this paper. The kinetic energy of different rockburst grades was calculated by using the elastic energy density of the surrounding rock mass after tunnel excavation. Based on the back analysis results of NJ-TBM tunnel ground stress and the stress release hole adopting in the engineering area, the maximum rock mass and the maximum velocity of different rockburst zones were determined. A “iron bar or bar row” solution was established by assuming that the maximum rock mass was impacted at the maximum speed to the steel plate / steel bar. Based on the model, the proposed scheme was applied to the strong rockburst, medium rockburst and weak rockburst respectively. The results showed that the program of steel arch spacing 1.5 m and the number of “iron grate” ($\Phi = 20$ mm) was 30 at each extension in the strong rockburst area hasn't appeared plastic area. The program of steel arch spacing 1.7 m and the number of “iron grate” ($\Phi = 22$ mm) was 20 at each extension in Medium rockburst area, the program of steel arch spacing 2.0 m and the number of “iron grate” ($\Phi = 20$ mm) was 20 at each extension in weak rockburst area hasn't appeared plastic area. So the proposed scheme wasn't produced plastic zone in the rockburst area.

Key words: esteel barr scheme; rockburst; kinetic energy; back analysis; calculation model; plastic zone; application

0 引言

岩爆是地下工程开挖过程中, 坚硬、脆性围岩在

高应力条件下, 因开挖扰动导致围岩应力重新分布和应力集中, 岩体内储存的弹性应变能突发性的急剧释放, 而产生的爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种动力失稳、破坏性的地质灾害^[1-3]。随着我

收稿日期: 2017-02-14; 网络出版时间: 2017-03-31 09:03:04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/37.1391.T.20170331.0903.012.html>

作者简介: 王太兴(1973—)男, 湖北枣阳人, 工程师, 主要研究方向为水电工程项目管理. E-mail: 774347234@qq.com

国矿山、隧道开发逐步转入深部,并且范围越来越大,岩爆问题日渐突出,岩爆的预测与控制已发展成为世界性的难题^[4-5],我国对岩爆的最早记录始于1933 抚顺胜利煤矿^[6-7]。国内外对岩爆开展大量的研究,取得一些重要进展,针对岩爆这一世界难题,很多学者提出许多不同的理论,较成熟的理论有强度理论、能量理论、刚度理论、断裂损伤理论和动力扰动理论等^[8-11]在岩爆的类型、特征、机制和规律等方面有一定的认识。HOOK E 等人^[12]认为岩爆是高地应力区洞室围岩剪切破坏作用的产物;谭以安、谷明成等人^[13-14]利用扫描电镜对天生桥引水隧洞灰岩岩爆碎片进行观察研究;徐奴文、唐春安、武选正等人^[15-16]对锦屏二级水电站施工排水洞岩爆进行数值模型;崔兰、王树仁等人^[17]应用 UDEC 计算程序模拟深部圆巷开挖围岩能量耗散特征;陈宗基^[18]提出一些对岩爆和煤爆进行定位、预测和缓解的实用方法;陈卫忠等人^[19]研究对急倾斜层状岩体中举行地下洞室群的开挖施工理论以及优化方案。冯夏庭等人^[20]针对岩爆预测问题,提出基于支持向量机的预测方法,通过对影响岩爆因素的分析,然后运用支持向量机理论建立岩爆预测的支持向量机模型;张波等人^[21]研究基于各向异性的深埋公路隧道安全稳定性。

本研究在前人的研究基础上,采用“铁篦子或钢筋排”方案,分析不同岩爆等级发生时的动能,根据前期对 NJ—TBM 隧洞地应力的反分析成果,结合工程区域采取应力释放孔等措施建立本方案的计算模型;基于该模型,最后将所提出的“铁篦子或钢筋排”方案分别应用到强岩爆区、中等岩爆区以及弱岩爆区,验证方案的正确性。

1 工程概况

巴基斯坦 N—J 水电引水隧洞项目采用 TBM 施工,为平行两条引水隧洞,隧洞间距 25 m,隧洞单条长度约 11.5 km。该地段沟脊相间、冲沟发育,地形地质条件较为复杂。工程所在区域构造运动强烈、地震活动频繁,N—J 水电引水隧洞最大埋深近 2 000 m,为高地应力场的形成提供条件。同时,埋深超过 1 000 m 的地层约占 45%,对应砂岩的单轴抗压强度高达 150 MPa;对于深埋围岩高地应力区^[22-23]在 TBM 掘进过程中产生岩爆的风险很大。

由于岩爆的复杂性及其 TBM 隧洞施工条件等的限制,要准确预测预报岩爆与控制岩爆存在很大的难度。因此,在岩爆预测预报与工程防治实践中,

要特别重视施工过程中的地质工作和预测工作,通过现场细致的工作,适时进行相关的预测预报,以期岩爆的预测预报更能接近实际。由于 TBM 施工的应力释放没有钻爆法充分,减小岩爆控制规模的方法除了布设超前卸压孔、卸压孔预裂爆破之外,护盾后方应针对不同的岩爆等级与规模开展抗冲击设计,确保护盾后方设备和人员的安全。高应力特别是岩爆巷道,由于应力大、变形大且具有动力破坏的特点而难以支护,因而不能采用常规的支持方法。因此,在施工现场采用“铁篦子或钢筋排”方案进行支护,其中,钢筋采用普通螺纹钢,钢板采用 07MnCrMoVR 钢板。本研究采用有限元模拟“铁篦子”的受力分析,岩块给定的速度边界条件,即“在对支护参数进行校核时,为了安全,假定最大岩块以最大速度向钢板/钢筋进行冲击”,不同等级岩爆区的岩块速度在本文第 2 节明确标明“铁篦子”的材料参数见表 1。

表 1 支护材料参数

Table 1 Material parameters

名称	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
钢筋	210	235	7.8
钢板	210	490	7.8

2 不同岩爆等级发生时的动能

岩爆过程是岩体弹性应变能转化为动能的过程,首先根据前期研究成果,计算隧道开挖后周围岩体的弹性能密度,根据弹性能密度计算岩爆发生时岩块的最大动能。

根据国内外的研究成果^[24-25],一般认为对于 1 m 左右的爆坑,岩爆发生时抛射的初速度可以达到如下等级:

- (1) 弱岩爆: 弹射平均速度 ≤ 2 m/s;
- (2) 中等岩爆: 弹射平均速度 2 ~ 5 m/s;
- (3) 强烈岩爆: 弹射平均速度 5 ~ 10 m/s;
- (4) 严重岩爆: 弹射平均速度 > 10 m/s。

根据前期对 NJ—TBM 隧洞地应力的反分析成果,结合工程区域采取应力释放孔等措施,考虑工程实际中的不可预知性,经与地质工程师磋商,铁篦子设计时按照如下情况进行复核:

- (1) 强岩爆区: 岩块的最大速度可达 6 m/s,根据现场岩爆区爆坑的情况,为了安全最大岩块取 2.0 m³;
- (2) 中等岩爆区: 岩块的最大速度取 3 m/s,根据现场岩爆区爆坑的情况,为了安全最大岩块取 1.0 m³;
- (3) 弱等岩爆区: 岩块的最大速度取 1.5 m/s,为了安全最大岩块取 0.5 m³。

在对支护参数进行校核时,为了安全,假定最大岩块以最大速度向钢板/钢筋进行冲击,因此,可以建立计算模型,见图1。以下将基于此计算模型分析钢板/钢筋在不同等级岩爆区内的受力情况。



图1 计算模型
Fig.1 The calculation model

3 “铁篦子”方案验算

3.1 “铁篦子”受力分析

3.1.1 强岩爆区

对于强岩爆区,采用钢拱架间距1.5 m,每延米30根 $\Phi = 20$ mm“铁篦子”方案(简称方案一),钢筋没有出现塑性破坏;而采用钢拱架间距1.5 m,每延米20根 $\Phi = 22$ mm“铁篦子”方案(简称方案二),钢筋可能会出现塑性破坏;因此,建议采用钢拱架间距1.5 m,每延米30根 $\Phi = 20$ mm“铁篦子”方案,采用1 cm厚度的钢板进行分隔,每间隔摆放2根 $\Phi = 20$ mm钢筋,间距5 mm。强岩爆冲击时铁篦子的受力分布见图2、3。

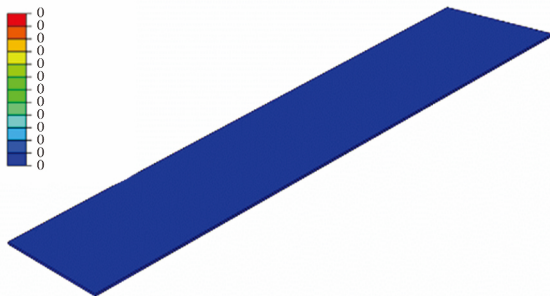


图2 方案一钢筋的塑性区与图例(放大)
Fig.2 The plasticity region of plan 1 and its legend

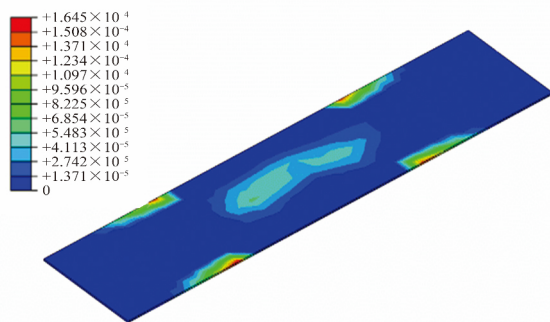


图3 方案二钢筋的塑性区与图例(放大)
Fig.3 The plasticity region of plan 2 and its legend

3.1.2 中等岩爆区

中等岩爆区,采用钢拱架间距1.7 m,每延米20

根 $\Phi = 22$ mm“铁篦子”方案(简称方案三),钢筋没有出现塑性破坏,而采用钢拱架间距1.7 m,每延米20根 $\Phi = 20$ mm“铁篦子”方案(简称方案四),钢筋可能会出现局部塑性破坏;因此,建议取钢拱架间距1.7 m,每延米20根 $\Phi = 22$ mm“铁篦子”方案;采用3 cm厚钢板分隔,每间隔放3根 $\Phi = 22$ mm钢筋。中等岩爆冲击时铁篦子的受力分布见图4、5。

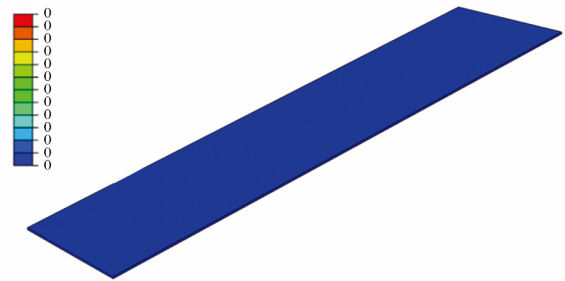


图4 方案三钢筋的塑性区与图例(放大)
Fig.4 The plasticity region of plan 3 and its legend

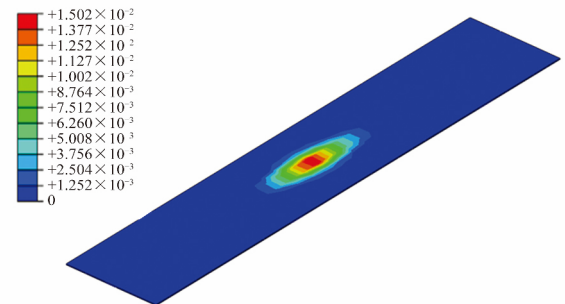


图5 方案四钢筋的塑性区与图例(放大)
Fig.5 The plasticity region of plan 4 and its legend

3.1.3 弱岩爆区

弱岩爆区,采用钢拱架间距2.0 m,每延米20根 $\Phi = 20$ mm“铁篦子”方案(简称方案五),钢筋没有出现塑性破坏,可以满足要求。强岩爆冲击时铁篦子的受力分布见图6。

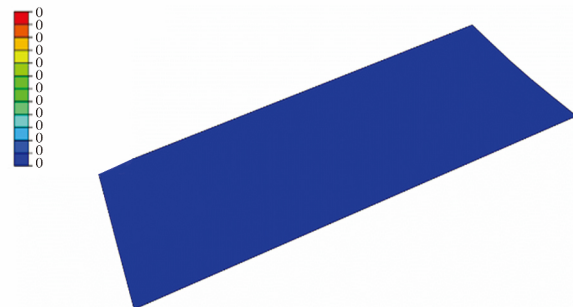


图6 方案五钢筋的塑性区与图例(放大)
Fig.6 The plasticity region of plan 5 and its legend

通过计算不同间距钢拱架、每延米不同钢筋数的方案,得出对于不同岩爆等级区域应该采取的具体“铁篦子”方案如下:

(1) 强岩爆区: 建议采用钢拱架间距 1.5 m, 每延米 30 根 $\Phi = 20$ mm “铁篦子”方案; 采用 1 cm 厚度的钢板进行分隔, 每间隔摆放 2 根 $\Phi = 20$ mm 钢筋, 间距 5 mm;

(2) 中岩爆区: 建议取钢拱架间距 1.7 m, 每延米 20 根 $\Phi = 22$ mm “铁篦子”方案; 采用 3 cm 厚钢板分隔, 每间隔放 3 根 $\Phi = 22$ mm 钢筋;

(3) 弱岩爆区: 采用钢拱架间距 2.0 m, 每延米 20 根 $\Phi = 20$ mm “铁篦子”方案。

3.2 护盾上方钢板验算

施工现场有厚度为 3 cm 的 07MnCrMoVR 钢板, 跨度拟取 3.8 m, 现对此方案在强岩爆区进行验算。从图 7 可以看出, 该方案下钢板没有出现塑性区; 因此, 中等岩爆区和弱岩爆区也不会产生塑性区。对于强岩爆区, 护盾采用厚度为 3 cm、间距为 3.8 m 的钢板能够满足要求。

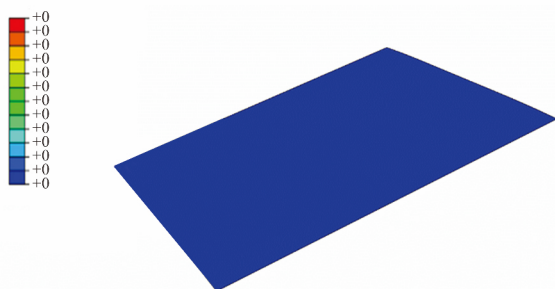


图 7 验算方案的塑性区

Fig. 7 The plasticity region of check program

4 结论

本研究采用“铁篦子或钢筋排”方案, 分析不同岩爆等级发生时的动能; 根据前期对 NJ—TBM 隧洞地应力的反分析成果, 结合工程区域采取应力释放孔等措施建立本方案的计算模型; 基于该模型, 分别得出对于不同等级岩爆区域应该采取的钢拱架间距、每延米不同钢筋数等“铁篦子或钢筋排”方案, 并进行验证。主要得到以下结论:

(1) 以巴基斯坦 N—J 水电站引水隧洞项目为工程依托, 采用“铁篦子或钢筋排”方案, 对不同岩爆等级发生时的动能进行分析, 又根据前期对 NJ—TBM 隧洞地应力的反分析成果, 结合工程区域采取应力释放孔等措施建立本方案的计算模型。

(2) 将所提出的“铁篦子或钢筋排”方案分别应用到强岩爆区、中等岩爆区以及弱岩爆区, 结果表明所提方案不会在岩爆区产生塑性区。

(3) 分别针对不同等级的岩爆区给出建议性的支护意见, 对实际工程具有一定的应用价值。对强

岩爆区, 建议钢拱架间距取 1.5 m, “铁篦子”每延米设置 30 根 $\Phi = 20$ mm; 对中等岩爆区, 建议钢拱架间距取 1.7 m, “铁篦子”每延米设置 20 根 $\Phi = 22$ mm; 对弱岩爆区, 建议钢拱架间距取 2.0 m, “铁篦子”每延米设置 20 根 $\Phi = 20$ mm; 护盾钢板, 采用跨度 3.8 m, 厚度为 3 cm 的钢板基本可以满足要求。

参考文献:

- [1] 邱道宏, 陈剑平, 张秉鹤, 等. 深埋长大公路隧道岩爆预测及防治研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(6): 950-955.
- [2] QIU Daohong, CHEN Jianping, ZHANG Binghe, et al. Study on rockburst prediction and prevention in deep and over length highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(6): 950-955.
- [3] 刘金海, 冯涛, 袁坚. 基于非线性灰色归类模型的岩爆预测方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 821-824.
- [4] LIU Jinhai, FENG Tao, YUAN Jian. Rock burst prediction method based on the nonlinear grey model of classification[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 821-824.
- [5] 邓建, 朱合华, 丁文其. 不等跨连拱隧道施工全过程的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 476-480.
- [6] DENG Jian, ZHU Hehua, DING Wenqi. Finite element simulation of whole excavation operation of a unequal-span double-arch tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 476-480.
- [7] SHABAROV A N. On formation of geodynamic zones prone to rock bursts and tectonic shocks[J]. Journal of Mining Science, 2001, 37(2): 129-139.
- [8] SINGH S P. Burst energy release index[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1988, 21(2): 149-155.
- [9] 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.
- [10] ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034-2042.
- [11] 顾金才, 范俊奇, 孔福利, 等. 抛掷型岩爆机制与模拟试验技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1081-1089.
- [12] GU Jincai, FAN Junqi, KONG Fuli. Mechanism of ejective rockburst and model testing technology I[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1081-1089.
- [13] 谢和平, PARISEAU W J. 岩爆的分形特征和机制[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 28-37.
- [14] XIE Heping, PARISEAU W G. Fractal character and mechanism of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(1): 28-37.
- [15] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 深埋硬岩隧洞岩爆倾向性

- 指标 RVI 的建立及验证 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1126-1141.
- QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Development and validation of rockburst vulnerability index (RVI) in deep hard rock tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1126-1141.
- [10] 景锋, 边智华, 杨火平, 等. 深埋长隧道地应力测量与岩爆预测分析 [J]. 人民长江, 2008, 39(1): 80-82, 93.
- JING Feng, BIAN Zhihua, YANG Huoping, et al. Geostress measurement and rockburst prediction for high buried tunnels [J]. Yangtze River, 2008, 39(1): 80-82, 93.
- [11] 黄学军, 姜永东. 隧道岩爆的判据与预测预报 [J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(2): 7-9.
- HUANG Xuejun, JIANG Yongdong. Criterion for rockburst in tunnel and its forecast [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2005, 32(2): 7-9.
- [12] HOOK E, BROWN E T. 岩石地下工程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986
- [13] 谷明成, 何发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1324-1329.
- GU Mingcheng, HE Faliang, CHEN Chengzong. Study on rockburst in Qinling tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1324-1329.
- [14] 谭以安. 模糊数学综合评判在地下洞室岩爆预测中的应用 [C]//第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集. 北京: 知识出版社, 1989: 247-253.
- [15] 徐奴文, 唐春安, 周济芳, 等. 锦屏二级水电站施工排水洞岩爆数值模拟 [J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 134-139.
- XU Nuwen, TANG Chun'an, ZHOU Jifang, et al. Numerical simulation of rockburst on the drain tunnel in the Jinping Second Level Hydropower Station [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(4): 134-139.
- [16] 武选正, 李名川, 伍宇腾. 锦屏水电枢纽辅助洞工程岩爆现象分析及防治措施 [J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(3): 28-33.
- WU Xuanzheng, LI Mingchuan, WU Yuteng. Analysis and prevention measures for rockburst in the auxiliary tunnel of the Jinping Hydropower State [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2008, 38(3): 28-33.
- [17] 崔兰, 王树仁. 深部圆巷开挖围岩能量耗散特征数值模拟分析 [J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 102-106.
- CUI Lan, WANG Shuren. Numerical simulation of the energy dissipation characteristics of an excavated circular tunnel under high stress conditions [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(4): 102-106.
- [18] 陈宗基. 岩爆工程实录、理论与控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 12(6): 11-17.
- TAN Tjongkie. Rockbursts, case records, theory and control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 12(6): 11-17.
- [19] 陈卫忠, 李术才, 朱维申, 等. 急倾斜层状岩体中巨型地下洞室群开挖施工理论与优化研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3281-3287.
- CHEN Weizhong, LI Shucan, ZHU Weishen. Excavation and optimization theory for giant underground caverns constructed in high dipping laminar strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3281-3287.
- [20] 冯夏庭, 赵洪波. 岩爆预测的支持向量机 [J]. 东北大学学报, 2002, 23(1): 57-59.
- FENG Xiating, ZHAO Hongbo. Prediction of rockburst using support vector machine [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2002, 23(1): 57-59.
- [21] 张波. 基于各向异性深埋公路隧道安全稳定性研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007: 95-114.
- ZHANG Bo. Study on security and stability of deep buried highway tunnel based on anisotropic theory [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, 2007: 95-114.
- [22] 姜云, 王兰生. 深埋长大公路隧道高地应力岩爆和岩溶突水问题及对策 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1319-1323.
- JIANG Yun, WANG Lansheng. Problems of high stress rock burst and water outburst and countermeasures in deep and long tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1319-1323.
- [23] 王青海, 李晓红, 艾吉人, 等. 通渝隧道围岩变形和岩爆的数值模拟 [J]. 地下空间, 2003, 23(3): 291-296.
- WANG Qinghai, LI Xiaohong, AI Jiren, et al. Numerical simulation of rock deformation and rockburst of Tongyu Tunnel [J]. Underground Space, 2003, 23(3): 291-296.
- [24] 张永习. 可拓综合评判在某水工隧洞岩爆等级评价中的应用 [J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(2): 58-63.
- ZHANG Yongxi. Application of extensible comprehensive evaluation for rock-burst prediction in a hydro-tunnel [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2012, 42(2): 58-63.
- [25] 张乐文, 李镐, 秦杰. 近蚀变带地应力异常分布对岩爆风险强度影响研究 [J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(4): 30-44.
- ZHANG Lewen, LI Hao, QIN Jie. Impact of abnormal stress distribution near the alteration belt on rockburst risk strength [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(4): 30-44.

(编辑: 陈燕)