

文章编号:1672-3961(2009)04-0134-06

# 锦屏二级水电站施工排水洞岩爆数值模拟

徐奴文<sup>1</sup>,唐春安<sup>1</sup>,周济芳<sup>2</sup>,唐烈先<sup>3</sup>,梁正召<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 成都 610021;  
3. 大连力软科技有限公司, 辽宁 大连 116000)

**摘要:**岩爆是一种极为复杂的动力失稳现象.在深埋隧洞的勘察设计和施工过程中,高地应力及其诱发的频繁岩爆,是影响隧道洞室稳定的重要因素之一.作为四川雅砻江锦屏二级水电站的重要的临时工程,施工排水洞在进入埋深1600m后就发生多次岩爆,严重制约了工程的进展,为了研究岩爆发生机理与高地应力之间的关系以及更好地预测岩爆在隧洞内发生的位置,运用渐进破坏过程数值分析软件RFPA(realistic failure process analysis)对施工排水洞进行初步的应力分析,得出与现场实测相吻合的初始地应力拟合曲线.同时,隧洞开挖引起应力重分布而产生的围岩破坏的数值模拟也很好的印证了现场发生的岩爆情况,表明基于渐进破坏过程数值分析的RFPA可以真实地模拟高地应力下岩爆机理.

**关键词:**锦屏二级水电站;围岩;岩爆;应力分布;数值模拟

**中图分类号:**TU457 **文献标志码:**A

## Numerical simulation of rockburst on the drain tunnel in the Jinping Second Level Hydropower Station

XU Nu-wen<sup>1</sup>, TANG Chun-an<sup>1</sup>, ZHOU Ji-fang<sup>2</sup>, TANG Lie-xian<sup>3</sup>, LIANG Zheng-zhao<sup>1</sup>

(1. Department of Civil and Hydraulic engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. Ertan Hydropower Development Company, Chengdu 610021, China;  
3. Dalian Mechsoft Co., LTD, Dalian 116000, China)

**Abstract:** Rock-burst is a very complicated dynamical instability phenomenon. High ground stress and its induced frequent rock-bursts are major influences of tunnel instability during the survey and design and construction stages. As an important and casual construction of the Jinping Second Level Hydropower Station on the Yalongjiang River, Sichuan Province, when the drain tunnel was excavated at the depth of 1600 m, there frequently occurred plenty of rock-bursts, which restricted the development of construction. Aiming to investigate the relationship between the rock-burst mechanism and high ground stress, and to effectively predict the location of rock-bursts in the drain tunnel, a progressive failure progress numerical analysis code-RFPA was used to analyze the stress, and the fitting curves of the initial stress were obtained corresponding to the site measurement. Meanwhile, on the basis of RFPA simulation, the disturbed zones in the surrounding rock mass induced by stress redistribution resulting from excavation agreed with the rock-burst fields, which indicated that RFPA can virtually simulate the mechanism of rock-burst.

**Key words:** Jinping second level hydropower station; surrounding rock; rockburst; stress distribution; numerical simulation

## 0 引言

岩爆最早出现在1908年南非Witwatersrand的金矿和印度Kolar Gold Field的矿山,开采中首次感

受到地表的震动和岩体的破坏.随着国民经济的持续快速发展,我国在水电、水利、铁路、公路、矿山等领域的建设正密集展开,相关隧洞有更深、更长、更大的趋势.在深埋隧道勘察设计和施工过程中,高地应力的存在,是影响隧道洞室稳定的重要因素之一,

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973计划)资助项目(2007CB209400);国家自然科学基金重点资助项目(40638040,10672028)

作者简介:徐奴文(1981-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要研究方向为岩土工程稳定性分析及岩石破裂过程数值模拟. E-mail: nwxu@yahoo.cn

已为大量工程实践所证明,其主要表现为硬岩岩爆和软岩大变形或塑性破坏.在水电工程中的二滩水电站、白鹤滩水电站、拉西瓦水电站、太平驿水电站、官地水电站等均面临有高地应力下的岩爆或塑性破坏问题.姜云,王青海等人对深埋长隧道围岩变形和高应力岩爆问题都作了相关研究<sup>[1-2]</sup>.岩爆是高应力下岩石工程中围岩体的突然破坏,并伴随着应变能的突然释放,因而产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种极为复杂的动力失稳地质灾害.迄今为止,人们对其形成机理还无统一的认识.E. Hoek等人认为,岩爆是高地应力区洞室围岩剪切破坏作用的产物<sup>[3]</sup>.Zoback教授在解释钻孔崩落现象成因时,也认为类似“岩爆”的孔壁崩落破坏属于剪切破坏.张镜剑等人论述了岩爆的预测预报,并对锦屏二级水电站辅助洞发生的岩爆进行了介绍<sup>[4]</sup>.陈陆望等人对坚硬脆性岩体中圆形和马蹄形洞室岩爆破坏进行了平面应变实验研究,得到与工程实际基本一致的岩爆破坏过程<sup>[5-6]</sup>.尽管国内外学者在岩爆的形成、发生机理上取得了进展,但都没有从根本上解决深埋长隧洞的岩爆问题,特别是针对隧洞在高地应力作用下岩爆发生的位置以及基于数值模拟的岩爆分析存在不足.运用渐进破坏过程数值分析系统RFPA对锦屏二级水电站排水洞桩号SK11+0~SK17+0(平均埋深1500m,二叠系栖霞组K22+029断面,石灰岩)在隧道开挖过程中围岩的渐进破坏模式及高地应力特性进行研究,并结合现场施工的岩爆统计情况对比数值模拟研究分析得出深埋隧道岩爆与应力的关系.

## 1 工程背景

### 1.1 概况

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江干流锦屏大河湾上,利用雅砻江锦屏150km长大河湾的天然落差,截弯取直凿洞引水,电站水头约为310m,总装机容量4800MW,是雅砻江干流上的重要梯级电站.

锦屏二级水电站穿越锦屏山的长隧洞由平行的2条辅助洞和4条引水隧洞组成,辅助洞长约17.5km,引水隧洞长约16.67km.为了施工需要,在B线辅助洞与4号引水隧洞之间增设了一条全长约16.73km的施工排水洞,各隧洞上覆岩体一般埋深为1500~2000m,最大埋深约为2525m,具有埋深大、洞线长、洞径大的特点,成为锦屏二级水电枢纽的关键控制性工程.施工排水洞工程属于锦屏二级

水电站的重要的临时工程,由进口组装洞、隧洞、出口拆卸洞组成,其中隧洞全长约17.5km,开挖断面为直径7.2m的圆形隧洞,桩号SK0+400.000(西端)~SK15+734.255(东端)为TBM施工段,圆形断面(全断面掘进机)开挖,主要功能是排出4条引水隧洞、2条辅助洞施工期间的出水,目前开挖了4030m(截止2009年3月底),位置如图1所示.

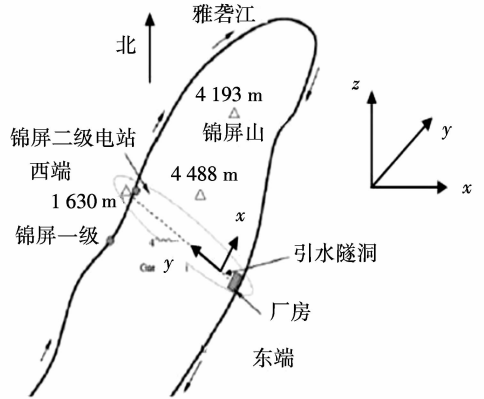


图1 施工排水洞位置

Fig.1 Location of the drain tunnel

### 1.2 地质条件和剖面图

锦屏二级水电站地处青藏高原向四川盆地过渡的地貌斜坡地带,锦屏山以近南北向分布于大河湾内,山势雄厚,重峰叠嶂,沟谷深切,主体山峰高程4000m以上,最高峰4488m,最大高差达3000m以上.施工排水洞从东到西分别穿越盐塘组大理岩(T<sub>2y</sub>)、白山组大理岩(T<sub>2b</sub>)、三迭系上统砂板岩(T<sub>3</sub>)、杂谷脑组大理岩(T<sub>2z</sub>)、三迭系下统绿泥石片岩和变质中细砂岩(T<sub>1</sub>)等地层.岩层陡倾,其走向与主构造线方向一致.根据工程地质条件和岩石力学试验结果,各岩层及断层材料力学参数如表1所示,施工排水洞工程纵剖面见图2.

表1 岩体材料力学参数<sup>[7]</sup>

Table 1 Mechanical parameter of rockmass

岩性	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模型/GPa	泊松比
T <sub>2z</sub> 大理岩	26.40	15.00	0.26
T <sub>1</sub> 绿泥石岩	25.50	14.00	0.3
T <sub>3</sub> 大理岩	26.20	20.00	0.26
T <sub>2b</sub> 大理岩	26.30	25.00	0.23
T <sub>2y</sub> 云母大理岩	25.50	14.00	0.25
断层	25.00	5.00	0.32

## 2 深埋隧道围岩渐进破坏过程的数值模拟

### 2.1 RFPA<sup>2D</sup>简介

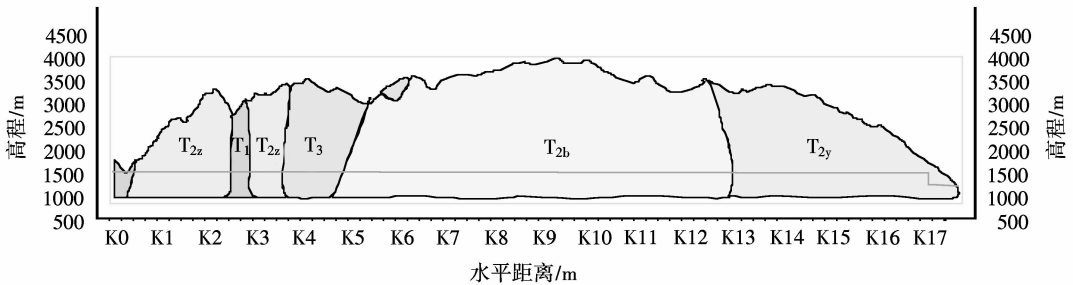


图2 锦屏二级水电站施工排水洞工程地质纵剖面图

Fig.2 Longitudinal section of drain tunnel geotechnical for the Jinping Second Level Hydropower Station

RFPA<sup>2D</sup>是大连力软科技有限公司(Mechsoft)研究开发的二维材料真实破裂过程分析数值模拟方法.RFPA的基本原理在相关文献中都作了详细介绍<sup>[8-10]</sup>.简言之,材料尺度的单元力学性质服从某种特定的分布,并沿用连续介质力学方法描述单元的行为,为了反映材料性质的细观非均匀性,在该程序中首先把材料看作是由大小相同的四边形单元组成,并且引入 Weibull 统计分布函数来进行描述<sup>[11]</sup>,即:

$$f(u) = \frac{m}{u_0} \cdot \left(\frac{u}{u_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{u}{u_0}\right)^m}, \quad (1)$$

式中: $u$ ——岩石介质微元体力学性质参数(强度/MPa、弹性模量/MPa、泊松比等);

$u_0$ ——微元体力学性质的平均值;

$m$ ——分布函数的形状参数,其物理意义反映了岩石介质的均质性,定义为岩石介质的均匀性系数;

$f(u)$ ——是岩石微元体力学性质  $u$  的统计分布密度( $\text{MPa}^{-1}$ ).

式(1)反映了某种岩石细观力学性质非均匀性分布的情况.随着均匀性系数  $m$  的增加,微元体的力学性质将集中于一个狭窄的范围之内,表明岩石介质的性质较均匀;而当均匀性系数  $m$  值减小时,则微元体的力学性质分布范围很宽,表明岩石介质的性质是非均匀的.

图3给出了不同均匀性系数岩石介质的强度或弹性模量的分布图( $u$ 代表强度或弹性模量等力学性质参数).RFPA<sup>2D</sup>包括两方面的功能:应力分析和破坏分析.RFPA<sup>2D</sup>的应力分析采用有限元法进行;破坏分析则是根据一定的破坏准则来检查材料中是否有基元破坏.对破坏单元则采用刚度特性退化(处理分离)和刚度重建(处理接触)的办法进行处理.考虑到岩体材料的抗拉强度远小于抗压强度,因此采用了压拉强度比为10的强度准则作为单元破坏的强度判据,单元在理想单轴受力状态下满足的压缩破坏与拉伸破坏本构关系如图4所示.

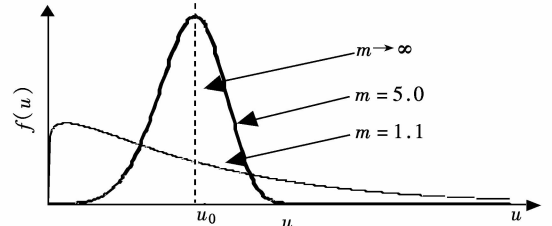
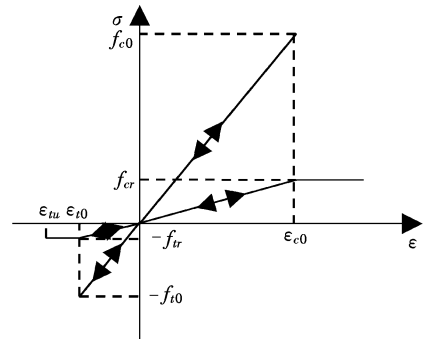


图3 不同均值度系数曲线

Fig.3 Curve of different homogeneity index

图4 单元单轴应力状态下的弹-脆-塑性本构关系  
Fig.4 Elastic-brittle-plasticity damage constitutive relationship of element under uniaxial stress state

## 2.2 计算方案及结果分析

目前,施工排水洞开挖到东端桩号为SK11+906处,为便于结合实际情况分析问题,取桩号SK11+0~SK17+0之间的隧洞进行数值模拟研究,隧洞通过这组岩层时的埋深在1600m到2000m之间,对应的 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的地应力范围分别为

$$\sigma_x = 35.67 \sim 43.11 \text{ MPa}, \sigma_y = 41.32 \sim 45.88 \text{ MPa},$$

$$\sigma_z = 37.29 \sim 51.43 \text{ MPa}.$$

由于开挖洞段穿越的盐塘组和白山组大理岩属于硬脆性岩石,其单轴抗压强度在51MPa以上,隧道埋深最大的地方也超过2000m,依据对现场地质勘察推测,在这些大埋深的地段有可能发生岩爆.为此,根据隧道地应力资料,本节对施工排水洞可能发生岩爆的地段进行数值模拟,分析不同埋深条件下隧道围岩应力分布,并结合现场岩爆统计资料研究岩爆与隧道开挖引起应力变化之间的相互关系.图5是隧道开挖洞段山体简化模型.

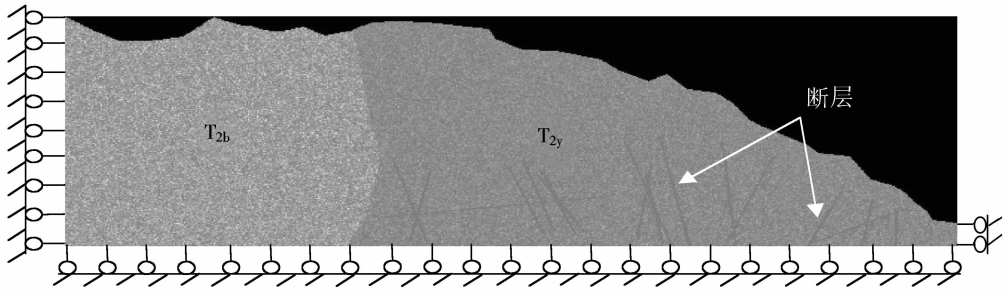


图5 开挖洞段山体有限元模型  
Fig.5 FEM model of mountain excavated

图6为通过图5有限元模型计算所得到的施工排水洞截取的桩号沿洞轴线最大主应力( $\sigma_1$ )和最小主应力( $\sigma_3$ )随进深的变化曲线.从图中拟合的曲线可以看出最大主应力在沿洞轴线方向主要是由埋深(即岩体的质量)决定的,这与现场测试的初始地应力是一致的,该结果与陈秀铜等人通过反演回归分析得到的三维初始地应力场曲线基本吻合<sup>[7]</sup>.

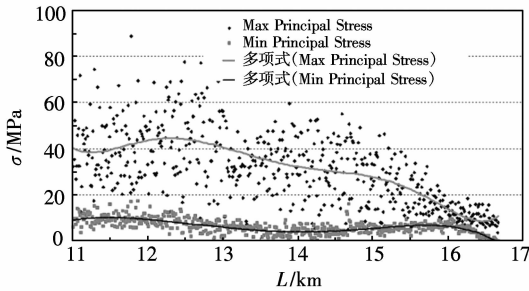


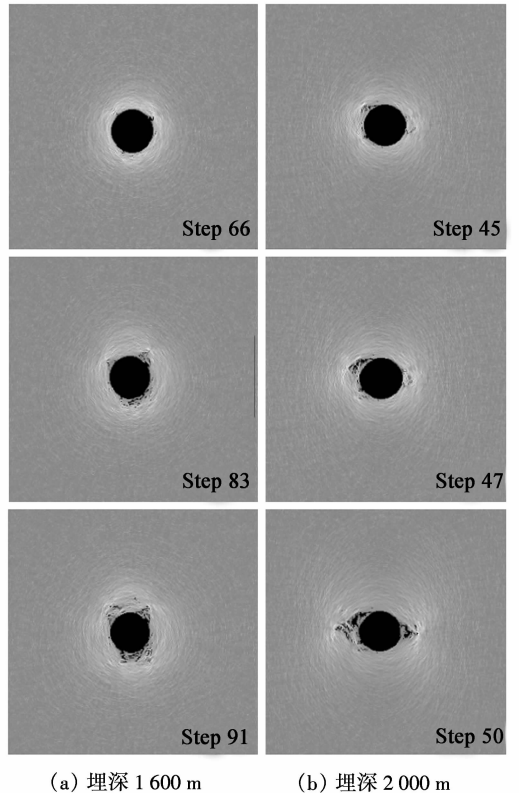
图6 施工排水洞沿轴线最大主应力( $\sigma_1$ )和最小主应力( $\sigma_3$ )随隧洞进深  $L$  变化曲线  
Fig.6 The evolution curve of relationship between length and stress in drain tunnel

图7为施工排水洞在不同埋深时TBM机开挖后引起的洞室破坏形式.从图(a)、(b)可以看出,在不同埋深时隧洞的破坏模式不同.埋深1600m时,破坏主要集中在洞壁左、右拱肩及隧洞底部;埋深2000m时,破坏主要集中在隧洞左拱肩和右侧壁.

2.3 现场岩爆统计分析

根据现场岩爆统计分析,从施工排水洞从东端开始开挖直至桩号 SK11 + 906 期间,共发生 6 次强烈的岩爆,在强烈的岩爆间伴随若干轻微和中等程度岩爆.隧洞围岩在该洞段主要存在 3 种破坏形式:岩爆、剥落和垮落,但破坏较弱,未对工程施工造成影响.具体岩爆情况见表 2 和图 8,其破坏大致范围见图 9.岩爆发生的具体特征:岩爆以轻微-中等岩爆为主,塌坑以 0.4 ~ 1.5 m 为主,最大塌坑深度为 2.5 m.岩石多为中厚层致密状块状构造的灰色~灰黑色大理岩,白色~灰白色中粒结晶大理岩,新鲜,性脆,硬质岩,岩体完整性较好,节理裂隙不发育,地下水呈干燥-渗水状,围岩类别为 II~III 类围岩.

岩爆多发生于洞室两侧,产生时无征兆或者征兆不明显,具有突发性并伴随清脆的响声或闷声,初次岩爆产生部位大多于刀盘之内(距掌子面 0 ~ 5 m),其次位于 TMB 刀盘与撑靴之间(距掌子面 5 ~ 15 m 左右),多为轻微岩爆,二次岩爆多发生在距离掌子面 20 m 外,多为强烈岩爆,破坏性大.



(a) 埋深 1600 m (b) 埋深 2000 m  
图7 不同埋深时开挖引起的洞室破坏形式  
Fig.7 Damage shape of tunnel induced by excavation at various depth

2.4 两者对比研究

上两节通过隧洞围岩渐进破坏过程的数值模拟和现场照片可得,数值模拟的洞室破坏形式与现场岩爆产生的破坏位置接近或者吻合,图 7、9 分别给了两者的对比关系.通过数值模拟可以发现,现场针对不同埋深情况下的支护措施可以有效地控制岩爆发生的次数和位置,为工程顺利进行和现场设备人员安全提供了有力的保障.

表2 岩爆实例及现象  
Fig.2 Rockburst example and phenomenon

岩爆 发生时间	桩号(桩号段)	表现形式	埋深/m	岩爆部位	岩爆块 体特点	与当次爆破 滞后时间	岩爆后岩体 UCS/MPa
2008-08-14	SK14 + 415 ~ SK14 + 390	剥落、劈裂、弹射、零星掉块	1 600	洞顶及两侧, 9点和2点钟的位置, 与洞轴线45°夹角	2.1 m深	开挖后0~10 h内	> 65
2008-09-12	SK14 + 241 ~ SK14 + 251	剥落、劈裂、弹射、有集中崩塌现象	1 600 ~ 1 700	洞壁两侧, 左侧8点到10点位置, 右侧2点到3点位置	2.0 m深	开挖后20~25 h内	> 65
2008-09-22	SK14 + 230 ~ SK14 + 220	劈裂、弹射	1 600 ~ 1 700	洞壁左侧, 7点到9点位置	2.5 m深	开挖后40~50 h内	> 65
2009-02-04	SK12 + 445 ~ SK12 + 465	T2b大理岩, III类围岩, 强烈岩爆前有小岩爆	1 800	洞顶, 洞壁左侧10点到12点位置	2.2 m深	开挖后20 h	> 65
2009-03-02	SK11 + 940 ~ SK11 + 950	剥落、劈裂、弹射、有集中崩塌现象, 强烈岩爆前有小岩爆	1 850	洞壁左侧7点到12点位置	2.3 m深	—	> 77
2009-03-07	SK11 + 906 ~ SK11 + 917	剥落、弹射, 强烈岩爆前无征兆	1 900	洞壁左侧8点到11点位置	2.5 m深	开挖35 h后	> 77

注: 据锦屏二级水电站深埋长隧洞快速施工关键技术国际咨询会北京振冲公司汇报内容

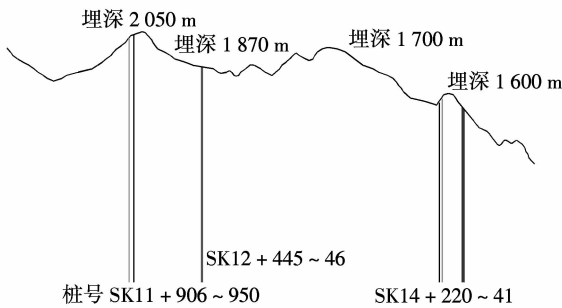


图8 施工排水洞沿线岩爆频发区段

Fig.8 The rockburst section in the drain tunnel

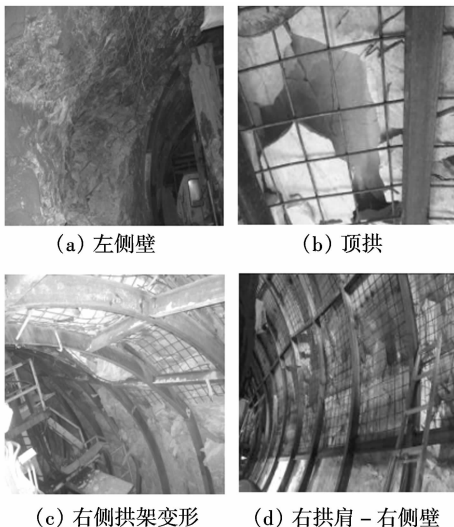


图9 施工排水洞围岩岩爆破坏现场照片

Fig.9 Locale pictures of the rockburst field in the drain tunnel

### 3 结论

通过渐进式破坏分析软件 RFPA 对锦屏二级水电站排水洞初始应力和洞室破坏形态进行了分析, 初步探讨了岩爆与高地应力之间的相互关系, 得到如下相关结论:

(1) 渐进式破坏分析软件 RFPA 可以应用于洞室围岩破坏数值模拟分析, 能够有效地模拟高地应力下隧洞围岩破坏的结构形式, 并能得到与现场接近或者吻合的破坏模式, 从而有效地指导现场支护措施, 保证工程进展和设备人员安全;

(2) 不同埋深情况下, 施工排水洞围岩破坏和岩爆产生的位置各不尽相同, 说明高地应力是影响岩爆的重要因素之一;

(3) 分析成果可初步应用于工程实践. 现场经验和数值试验表明, 对深埋隧洞, 前期分析计算是必不可少的, 而在后期施工阶段进行跟踪复核也是一项重要的工作.

致谢: 本文部分资料来源于二滩水电开发责任有限公司锦屏管理局工程技术二部, 在此向相关人员给予的支持表示衷心感谢.

#### 参考文献:

[1] 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.
- [2] 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.
- [3] HOEK E, BROWN E T. 岩石地下工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- HOEK E, BROWN E T. Underground rock engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.
- [4] 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):2034-2042.
- ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(27):2034-2042.
- [5] 陈陆望, 白世伟. 坚硬脆性岩体中圆形洞室岩爆破坏的平面应变模型实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(26):2504-2509.
- CHEN Luwang, BAI Shiwei. Research on plane strain model test of rockburst of circular cavern in hard brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(26):2504-2509.
- [6] 陈陆望, 白世伟, 殷晓曦, 等. 坚硬岩体中马蹄形洞室岩爆破坏平面应变模型试验[J]. 岩土工程学报, 2008(30):1520-1525.
- CHEN Luwang, BAI Shiwei, YIN Xiaoxi, et al. Research on plane strain model test of rockburst of circular cavern in hard brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(30):1520-1525.
- [7] 陈秀铜, 李璐. 锦屏二级水电站引水隧洞区域三维初始地应力场反演回归分析[J]. 水文地质工程地质, 2007(6):55-59.
- CHEN Xiutong, LI Lu. Inverse analysis of initial field stress for Jinping-2 hydropower station tunnel area[J]. Hydrological Geology and Engineering Geology, 2007(6):55-59.
- [8] TANG C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34:249-261.
- [9] TANG C A, LIU H, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—Part I: effects of heterogeneity[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2000, 37:555-569.
- [10] 杨菊英, 张娟霞, 王大国, 等. 颗粒增强复合材料中界面破裂过程数值模拟研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1):18-24.
- YANG Juying, ZHANG Juanxia, WANG Daguo, et al. Numerical simulation of interfacial debonding failure process of particulate reinforced composites[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1):18-24.
- [11] WEIBULL W A. statistical distribution function of wide application[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18:293-297.

(编辑:陈燕)