

# 深埋特长公路隧道岩爆预测综合研究

吕庆<sup>1</sup>, 孙红月<sup>1</sup>, 尚岳全<sup>1</sup>, 陈侃福<sup>2</sup>, 徐国锋<sup>2</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 岩爆预测一直是地下工程世界性难题之一。以台缙高速公路苍岭隧道的岩爆预测为例, 从隧道区围岩的岩体特征和隧道区初始应力场两方面着手, 通过工程地质调查研究和区域地质资料分析, 对隧道区进行工程地质分类。划分隧道沿线各洞段隧道围岩类别, 通过室内岩石力学试验, 掌握隧道沿线围岩的物理力学特性; 分析区域地震震源机制解、地应力实测资料, 揭示区域构造地应力场环境。在研究过程中选取典型部位, 采用水压致裂法实测工程区地应力的方向和大小。通过三维有限元反演工程区的初始应力场, 在初始应力场和隧道围岩岩石力学性质研究的基础上, 结合各洞段隧道断面开挖数值分析结果和现有国内外多种岩爆判别准则, 对苍岭隧道岩爆发生的部位和等级进行预测, 为制定合理的开挖支护方案提供依据。

**关键词:** 隧道工程; 岩爆; 地应力; 数值模拟

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)16-2982-07

## COMPREHENSIVE STUDY ON PREDICTION OF ROCKBURST IN DEEP AND OVER-LENGTH HIGHWAY TUNNEL

LU Qing<sup>1</sup>, SUN Hong-yue<sup>1</sup>, SHANG Yue-quan<sup>1</sup>, CHEN Kan-fu<sup>2</sup>, XU Guo-feng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Planning, Design and Research Institute of Communications, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Cangling tunnel in Taizhou—Jinyun highway, with a depth about 768 m and with a length about 7.6 km, will be the deepest and longest tunnel in Zhejiang Province after construction. Rockburst is a serious problem during the tunnel excavation. For the prediction of rockburst, physico-mechanical properties of the rock masses were tested in the laboratory; and the in-situ stress state in the engineering area was measured and analyzed. Then, the rock masses along the tunnel were classified on the basis of local geological investigation. A mechanical model was developed to express the actual conditions of the engineering area according to properties of the rock masses, focal mechanism solutions, and in-situ stress state. The in-situ stress field of the engineering area was regressed by 3D finite element method (FEM) by using in-situ measured stress. The calculated results were applied to numerical analysis of the stress distribution in rock masses around the tunnel. Finally, the probability and intensity of rockburst along tunnel were predicted according to four different rockburst prediction models developed by predecessors on the basis of calculated stress distribution around the tunnel and uniaxial compressive strength of the rock masses.

**Key words:** tunneling engineering; rockburst; in-situ stress; numerical simulation

**收稿日期:** 2004-08-13; **修回日期:** 2004-12-08

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40372118)

**作者简介:** 吕庆(1978-), 男, 2001年毕业于浙江大学土木工程系结构工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土体稳定性等方面的研究工作。

E-mail: lvqing@zju.edu.cn.

# 1 引 言

岩爆是高地应力区的地下工程在开挖过程中或开挖完毕后，围岩因开挖卸荷发生脆性破坏而导致储存于岩体中的弹性应变能突然释放且产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种动力失稳地质灾害。其直接威胁人员、设备安全，影响工程进度，已成为地下工程世界性难题之一。近几十年来，国内外在岩爆预测方面作了大量的研究工作，提出了一系列的理论和方法，如失稳理论、强度理论、能量理论、断裂损伤理论和突变理论等；并采用了数值分析方法、模糊数学综合评判方法、分形几何法和人工神经网络法等<sup>[1-8]</sup>。岩爆预测的目的是为岩爆防治提供可能发生的位置、烈度等信息。然而，由于岩爆预测问题的复杂性，到目前为止还没有哪一种理论或方法能准确地预测岩爆，满足工程建设的需求。

本文以台缙高速公路苍岭隧道的岩爆预测研究为例，在宏观地质调查的基础上，结合地应力的现场实测，多种形式的岩石力学试验研究和三维有限元数值模拟多种方法和手段，综合分析评价了隧道工程区地应力和隧道沿线围岩应力的分布规律，并在此基础上根据已有的国内外多种岩爆判别准则，对隧道开挖岩爆发生的部位和等级进行综合分析和预测，从而为合理制定隧道的开挖支护方案提供依据。

# 2 工程概况及工程区地质条件

苍岭隧道位于浙江省仙居县与缙云县交界的括苍山脉中低山区。隧道为左右线设置，东西走向，其中左线里程桩号为 K94+760~K102+290，右线里程桩号为 K94+760~K102+340。单个隧道长度约 7.6 km，隧道最大埋深约 768 m，属深埋特长公路隧道，也是浙江省内目前在建的最长最深的公路隧道。

隧道工程区地貌主要以中低山、丘陵为主。隧道区地面高程为 190~1 077 m，隧道线路高程为 239~370 m，隧道埋深为 50~768 m。苍岭隧道处于余姚-丽水大断裂与鹤溪-奉化大断裂所夹的断块内，为 NE，NEE 向断裂构造发育，卫星影像图反映清晰。隧道洞身主要穿过微风化和新鲜的熔结凝灰岩、角砾凝灰岩和钾长石花岗斑岩，局部穿过

断裂带及岩相接触带。现场调查和钻探资料表明，在断层及其影响带内岩体裂隙发育，岩体破碎；在远离断层地段，岩体较为完整，岩质坚硬，强度较高。

# 3 工程区岩石力学性质研究

国内外大量的研究结果表明：工程区岩体的岩性是决定岩爆发生的一个重要因素。岩爆一般发生在完整性好，裂隙发育少，质地坚硬，岩性脆的岩体中。为了查明苍岭隧道围岩岩性及强度特征，同时给隧道围岩分类以及围岩的储能条件评价提供依据，给地应力数值反演分析提供岩体的物理力学参数，研究过程中进行了多种形式的岩石力学试验。

## 3.1 岩石变形破坏全过程试验

岩爆的发生与岩体的储能条件很有关系。通过岩石变形破坏全过程试验可以对岩石的储能性进行正确的评价。如图 1 所示，岩石在加载至  $\sigma_0$  (本次研究取峰值强度  $R_b$  的 70%) 卸载， $\Phi_C$  为卸载前聚集在岩石内部的总应变能； $\Phi_{ST}$  是由于岩石产生塑性变形和内部产生微破裂而消耗的能量； $\Phi_{SP}$  为卸载后仍然储存在岩石中的应变能。据此，波兰学者 Kidybinski 提出如下定义：

$$W_{ET} = \Phi_{SP} / \Phi_{ST} \tag{1}$$

式中： $W_{ET}$  为弹性能量指数，也称为冲击倾向指数。

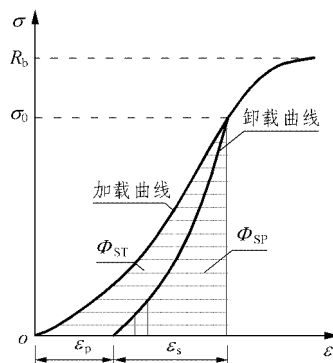


图 1 岩石试样能量计算示意图  
Fig.1 Energy accumulation in rock specimen

根据国内外现场试验与研究成果<sup>[2,9-11]</sup>， $W_{ET}$  值越大，围岩破坏时释放的冲击能量就越大。因此，其可较好地反映岩爆的可能性。波兰国家标准建议：

$W_{ET} < 2.0$	(无岩爆)	} (2)
$2.0 < W_{ET} < 5.0$	(出现中、低岩爆)	
$W_{ET} \geq 5.0$	(严重岩爆)	

式(2)称为岩爆预测的能量判据。

苍岭隧道围岩的主要岩性为熔结凝灰岩，伴有少量的花岗斑岩。选择钻孔中微风化和新鲜岩石试样进行岩石变形破坏全过程试验。按高径比 2 : 1 的比例切取标准样。试验在 MTS815Teststar 程控伺服岩石力学试验系统上进行。试验初期采用轴向位移控制，速率为 0.1 mm/min。当加载到约为峰值强度  $R_b$  的 70% 时，进行卸载得到卸载曲线，再加载直至试件破坏，得到完整的应力 - 应变曲线。9 组试样中有 3 组由于试样存在微裂缝，使试样沿裂缝产生破坏。另有 2 组试样由于卸载过早，造成  $W_{ET}$  计算值偏小。剩余的 4 组试样计算得  $W_{ET}$  为 2.17 ~ 2.26。按照能量判据，隧道区围岩具备了发生中低岩爆的储能条件。

### 3.2 岩石单轴抗压强度试验

为了查明隧道区围岩的强度特征，为后面的岩爆预测提供强度参数。对工程区 13 个钻孔，共 140 个岩样进行了单轴抗压强度试验。表 1 为 2 种主要围岩的单轴抗压强度试验结果。

表 1 两种主要围岩单轴抗压强度试验值

Table 1 Uniaxial compressive strengths of the two main specimens

岩样	单轴抗压强度/MPa	
	天然岩样	饱和岩样
熔结凝灰岩	169.3	151.3
花岗斑岩	180.4	165.6

### 3.3 钻孔波速测试和现场勘察

此次研究在地面工程地质调查、区域地质构造及隧道沿线地带线性构造的遥感解译、天然露头或人工露头的裂隙统计、裂隙间距计算、岩石强度试验、钻孔波速测试和岩石风化带厚度调查的基础上，将苍岭隧道全线分为 11 个工程地质段。为了合理评价这 11 个地质分段的围岩类别，同时，也为了给后面的地应力反演提供合理的物理力学参数。在隧道沿线进行了钻孔波速测试和现场勘察。结果表明：隧道区大部分围岩的岩体完整，纵波波速  $V_p$  值在 3.2 ~ 4.2 km/s。根据文[12]附录 G，可判断隧道区围岩以 IV 类为主，部分为 V 类，断层破碎带为 I 类。二郎山隧道岩爆统计结果表明：岩爆段围岩类别均为 IV, V 类，节理很发育的 II, III 类围岩不会发生岩爆<sup>[9]</sup>。

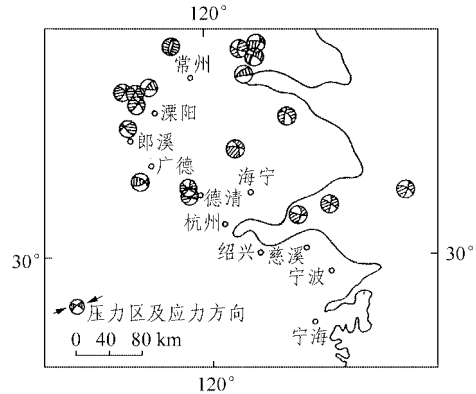
## 4 工程区地应力环境的综合研究

地应力是决定岩爆发生的另外一个重要因素。地应力的准确评价直接影响到岩爆预测的可靠性。本次研究，在分析区域构造应力场和临近工程地应力测量资料的基础上，结合工程区地应力的现场测试结果，并通过三维数值反演分析的方法，综合评价了隧道沿线围岩初始地应力场的分布规律。

### 4.1 区域构造应力场环境和已有测试结果分析

工程区的初始应力场是受区域构造应力场控制的。研究工程区附近构造应力场环境和已有地应力测试资料可以掌握隧道区初始应力场的大致规律。

震源机制解是分析现今地壳构造应力场的重要依据之一，尤其是震源深度较大的强震活动的震源机制解参数，能较客观地反映地壳应力场的基本特征。图 2 为工程区以北震源机制解。通过对工程区附近震源机制的分析可知：工程区以北现今的构造主压应力方向总体表现为 NEE 向；工程区以南的则多呈 NW 向。因此，工程区的现今构造主压应力方向总体特征应表现为近 EW 向或 NWW 向。



注：此图据国家地震局地质研究所《秦山三期核电站工程地震安全性评价报告》(1996 年 5 月)

图 2 工程区以北震源机制解

Fig.2 Focal mechanism solutions in north areas to the engineering site

在此基础上，分析了工程区临近的浙江北部天荒坪抽水蓄能电站、工程区临近的金丽温高速公路缙云县新碧镇姓姚村高边坡地应力实测资料。结果表明：隧道工程区的最大主应力  $\sigma_1$  为 17.9 ~ 27.3 MPa。从已有测点的应力大小和方位看，该区地应力以自重应力场为主。

### 4.2 初始地应力场的现场实测及结果分析

工程区采用水压致裂法进行了 3 个钻孔的地应力测量,各钻孔地应力测量结果具有以下特点:(1)最大水平主应力( $\sigma_H$ )明显高于上覆岩体的重量,最小水平主应力( $\sigma_h$ )也高于上覆岩体的重量;(2)水平主应力随深度的增加而迅速增大,各钻孔的水平主应力随深度增加的线性拟合结果见表 2;(3)各钻孔实测最大主应力方向为 NW30°~72°,表明测孔附近地应力以 NW 向挤压为主。

表 2 钻孔地应力测量水平主应力随深度增加的拟合结果

Table 2 Fitting results of horizontal principal stresses increased with depth based on in-situ data

钻孔编号	$\sigma_H$ 和 $\sigma_h$ 随深度 $H$ 的变化关系	孔口标高/m
CS1	$\sigma_H = 0.098\ 8H + 3.124\ 2$ $\sigma_h = 0.054\ 4H + 2.694\ 0$	401.30
CS2	$\sigma_H = 0.067\ 0H - 0.013\ 2$ $\sigma_h = 0.035\ 0H + 1.810\ 0$	612.13
CS3	$\sigma_H = 0.155\ 1H - 0.156\ 8$ $\sigma_h = 0.102\ 0H - 0.548\ 1$	393.60

注:(1)  $\sigma_H$ 和 $\sigma_h$ 分别为最大及最小水平主应力;(2)  $H$ 为测点埋深(m)。

### 4.3 初始地应力场的三维有限元反演分析

根据工程区的地貌特点和地质构造特点,取隧道工程区 3 km×8 km 的一块长方形区域作为主要的计算区域,取标高 0.000 m 为计算模型的底面。隧道区位于计算模型的中央,使隧道线路距模型的边界有足够大的距离,消除了模型的边界效应可能对结果产生的影响。计算过程中考虑了主要断层的影响。参考前面隧道区围岩力学性质研究结果,计算模型的计算参数如表 3 所示。

表 3 岩体物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical properties of rock masses

岩体类型	变形模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )
完整岩体	15 000	0.22	26.5
断层破碎带	8 000	0.26	24.0

计算模型采用 10 节点四面体单元,考虑到计算的规模较大,建立有限元模型时采用了不同的网格密度:在隧道附近网格密度较大,其他的地方网格相对稀疏。在断层和地应力测试孔附近对网格进行了加密。图 3 为有限元计算模型,模型共计单元数 183 665 个,节点数 261 159 个。

地应力场有限元反演分析的方法有直接调整边界条件法和多元回归分析法<sup>[13, 14]</sup>。本次计算通过直

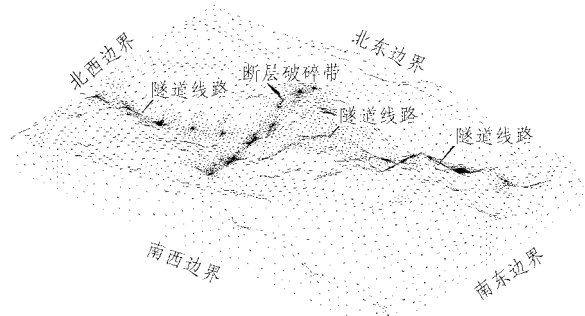


图 3 地应力场反演分析计算模型

Fig.3 Finite element back analysis model of in-situ stress field based on measured results

接调整边界条件法进行地应力场的反演分析。具体的反演分析过程分 3 步实施:(1)首先计算不同边界条件下隧道工程区域地应力场的变化方式,从而寻求最佳的边界条件类型;(2)然后在确定边界类型的基础上,通过不断改变边界力作用方式和大小量值,使计算区内已知点的计算应力和实测值达到最佳拟合;(3)最后通过适当改变模型边界力的大小,计算地应力实测值和计算值的平方差,找出平方差值最小的模型边界条件。

按照反演出的计算模型边界条件,计算得出隧道沿线围岩的初始应力场。结果表明:隧道线路附近最大的水平主应力在隧道线路 K98+300~K100+200 段附近,最大水平主应力( $\sigma_H$ )为 14.8~17.3 MPa,最大的竖向应力( $\sigma_y$ )为 13.0~17.3 MPa。在隧道线路的大部分区域水平应力起主导作用,即最大主应力为水平应力,只是在隧道埋深最大的 K98+060~K100+440 段垂直方向的应力为最大主应力。计算得最大水平主应力方向约为 NW69°,与实测地应力方向的平均值一致。最大主应力方向和隧道线路方向的夹角为 6°~39°。

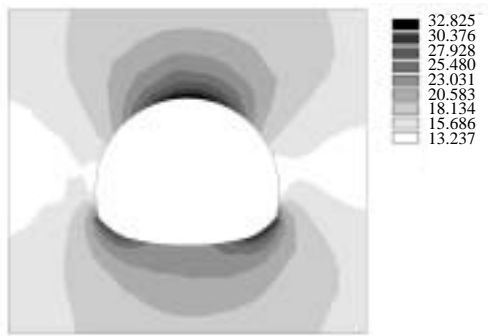
### 4.4 隧道开挖后的围岩应力分析

利用反演出的初始应力场进一步分析隧道开挖后,隧道围岩应力的大小,为岩爆评价提供依据。计算分析中考虑了主应力方向和隧道线路走向夹角的影响。在进行开挖断面分析计算的时候按照弹性力学中的应力换算公式将主应力换算为垂直于隧道线路走向方向的水平应力(记为 $\sigma_x$ )。

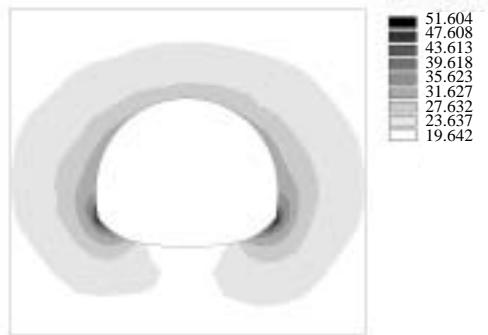
计算模型选取 50 m×40 m(高×宽)的断面按照平面应变问题作有限元分析。隧道断面尺寸按照设计图选取。模型的下边界和左边界施加位移光滑约束,右边界和上边界分别施加前面计算得到隧道沿线各段的初始应力值 $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 。通过单元的生成技

术来实现隧道开挖模拟。模型的材料参数同表 3。

计算结果表明：在隧道开挖后，隧道开挖断面的围岩全部处于受压应力状态。随着隧道断面所处的初始应力场环境的变化和隧道埋深的不同，在隧道开挖断面的不同部位有不同程度的压应力集中。一般规律为：当初始应力场中的水平应力占主导地位时，最大压应力发生在隧道开挖断面的拱顶处；当初始应力场中的水平应力和竖向应力相当的时候，最大主压应力发生在隧道开挖断面的拱脚附近(如图 4 所示)。隧道全线的最大压应力( $\sigma_1$ )的峰值为 59.5 MPa，洞壁的切向应力最大值( $\sigma_\theta$ )为 48.9 MPa。



(a)  $\sigma_x = 14.1$  MPa,  $\sigma_y = 7.1$  MPa



(b)  $\sigma_x = 15.0$  MPa,  $\sigma_y = 16.7$  MPa

图 4 不同地应力环境下隧道围岩应力 $\sigma_1$ 分布比较(压应力为正, MPa)

Fig.4 Distribution of  $\sigma_1$  under different initial stress states after excavation (positive for compression stress, MPa)

### 5 岩爆的综合分析与预测

近几十年来，国内外学者在对岩爆形成机理和已发生岩爆的资料研究的基础上，提出了多种假设和判据。本次研究，主要选择了 4 种有代表性的判据，即能量判据、 $R_b / \sigma_1$ 判据、陶振宇判据及 Russenes 判据。分别对隧道各个洞段依次分析，然

后在以上判据判断的基础上，综合评价了各个洞段岩爆发生的可能性和发生的强度。能量判据前面已经阐述过了，下面就 3 种判据做一简单介绍：

#### (1) Russenes 判据

挪威的 Russenes 在 1974 年提出了一种国内外很有影响的岩爆烈度分级方案，并应用有限元法和 Kirsch 方程计算洞壁最大切向应力  $\sigma_\theta$ 。利用  $\sigma_\theta$  与岩样单轴抗压强度  $R_c$  的比值判断岩爆烈度，即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta / R_c < 0.20 & \quad (\text{无岩爆}) \\ 0.20 \leq \sigma_\theta / R_c < 0.30 & \quad (\text{弱岩爆}) \\ 0.30 \leq \sigma_\theta / R_c < 0.55 & \quad (\text{中岩爆}) \\ 0.55 \leq \sigma_\theta / R_c & \quad (\text{强岩爆}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

#### (2) 陶振宇判据

陶振宇判据为

$$\left. \begin{aligned} R_c / \sigma_1 > 14.5 & \quad (\text{无岩爆}) \\ R_c / \sigma_1 = 14.5 \sim 14.5 & \quad (\text{低岩爆}) \\ R_c / \sigma_1 = 5.5 \sim 2.5 & \quad (\text{中岩爆}) \\ R_c / \sigma_1 < 2.5 & \quad (\text{高岩爆}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

#### (3) $R_b / \sigma_1$ 判据

$R_b / \sigma_1$ 判据为

$$\left. \begin{aligned} R_b / \sigma_1 = 3 \sim 6 & \quad (\text{会发生岩爆}) \\ R_b / \sigma_1 < 3 & \quad (\text{严重岩爆}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

运用上面几种应力判据对岩爆进行预测过程中，各洞段的最大主应力  $\sigma_1$  和拱壁切向应力  $\sigma_\theta$  采用前面有限元分析的结果。考虑到工程区花岗岩分布范围很小，且试样的强度也比熔结凝灰岩高，从安全的角度考虑，岩样的强度指标均取熔结凝灰岩的试样强度。如前所述，熔结凝灰岩天然岩样的单轴抗压强度  $R_c$  为 169.3 MPa，饱和岩样的单轴抗压强度  $R_b$  为 151.3 MPa。实际分析中取天然单轴抗压强度  $R_c$  为 160 MPa，取饱和单轴抗压强度  $R_b$  为 150 MPa。

表 4 列出根据 Russenes 判据分析的隧道各段岩爆预测的结果。其余各个判据的具体分析过程与此相似，限于篇幅，没有一一列出。

根据各个岩爆判据分析，并考虑到 III 类围岩一般不易发生岩爆，综合判断苍岭隧道开挖发生岩爆的可能性预测结果为：在公路隧道 K98 + 637 ~ K99+638 段，由于隧道的埋深较大，同时构造应力水平也较高，可能有中等岩爆发生；在公路隧道 K97 + 702 ~ K98 + 637 段以及 K99+638 ~ K100+892

表 4 隧道各段岩爆预测结果(据 Russenes 判据)

Table 4 Prediction results of rockburst along the tunnel (according to Russenes's criterion)

公路里程	$R_c / \text{MPa}$	$\sigma_{ij} / \text{MPa}$	$\sigma_{ij} / R_c$	岩爆发生与否
K96 + 980 ~ K97+350	160	21.8	0.14	无岩爆
K97+350 ~ K97+702	160	20.9	0.13	无岩爆
K97 + 702 ~ K98+080	160	26.7	0.17	无岩爆
K98 + 080 ~ K98+225	160	32.8	0.21	弱岩爆
K98 + 225 ~ K98+425	160	38.6	0.24	弱岩爆
K98 + 425 ~ K98+637	160	44.8	0.28	弱岩爆
K98 + 637 ~ K99+638	160	50.9	0.32	中岩爆
K99 + 638 ~ K100+127	160	44.8	0.28	弱岩爆
K100 + 127 ~ K100+440	160	38.9	0.24	弱岩爆
K100 + 440 ~ K100+892	160	32.8	0.21	弱岩爆
K100 + 892 ~ K101+585	160	27.3	0.17	无岩爆
K101 + 585 ~ K102+207	160	21.8	0.14	无岩爆
K102 + 207 ~ K102+425	160	21.8	0.14	无岩爆

段可能有低岩爆活动。

## 6 结 语

对于苍岭隧道这样深埋特长隧道开挖前进行岩爆预测研究是必要的。在已有的研究水平和研究成果的基础之上,从隧道围岩的岩体特征和隧道区初始应力场两方面着手,在宏观地质调查的基础上,通过地应力的现场实测,多种形式的岩石力学试验研究和三维有限元数值模拟多种方法和手段,对隧道工程区地应力和隧道沿线围岩应力的分布规律进行综合分析评价,并根据已有的国内外多种岩爆判别准则,对隧道开挖岩爆发生的部位和等级进行预测。这是一套实用的岩爆预测方法。

但是,岩爆预测问题极为复杂,影响岩爆发生的因素很多。应该指出,这样的岩爆预测研究仍具有不确定性,为了隧道的顺利建设,在隧道开挖施工过程中应加强监测、开展超前预报研究工作,并结合工程建设开展岩爆防治措施的研究工作。

## 参考文献(References) :

- [1] 陶振宇. 高地应力区的岩爆及其判别[J]. 人民长江, 1987, (5) : 25 - 32. (Tao Zhenyu. Rockburst and evaluation method in high ground stress field[J]. Yangtze River, 1987, (5) : 25 - 32. (in Chinese))
- [2] Kidybinski A. Bursting reliability indices of coal[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr, 1981, 18(4) : 295 - 304.
- [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, 17(5) : 493 - 501. (Wang Yuanhan, Li Wodong, Lee P K K, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5) : 493 - 501. (in Chinese))
- [4] 冯夏庭. 地下峒室岩爆预报的自适应模式识别方法[J]. 东北大学学报, 1994, 15(5) : 471 - 475. (Feng Xiating. Adaptive pattern recognition to predict rockbursts in underground openings[J]. Journal of Northeastern University, 1994, 15(5) : 471 - 475. (in Chinese))
- [5] 陈海军, 郗能惠, 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, 24(2) : 229 - 232. (Chen Haijun, Li Nenghui, Nie Dexin, et al. A model for prediction of rockburst by artificial neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2) : 229 - 232. (in Chinese))
- [6] 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. (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. (in Chinese))
- [7] 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. (Xu Linsheng, Wang Lansheng, Li Tianbin. Present situation of rockburst research at home and abroad[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4) : 24 - 27. (in Chinese))
- [8] 姜繁智, 向晓东, 朱东升. 国内外岩爆预测的研究现状与发展趋势[J]. 工业安全与环保, 2003, 29(8) : 19 - 22. (Jiang Fanzhi, Xiang Xiaodong, Zhu Dongsheng. The current status and developing tendency of rock blasting forecast at home and abroad[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2003, 29(8) : 19 - 22. (in Chinese))
- [9] 徐林生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施的研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1) : 61 - 64. (Xu Linsheng. Research of rockburst character and prevention measure in Erlang mountain highway tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(1) : 61 - 64. (in Chinese))

Chinese))

[10] 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): 1 325 - 1 329. (Gu Mingcheng , He Faliang , Chen Chengzong. Study on rockburst in Qinling tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2002 , 21(9) : 1 325 - 1 329.(in Chinese)

[11] 蔡美峰,王金安,王双红. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38 - 42.(Cai Meifeng , Wang Jin'an , Wang Shuanghong. Analysis of energy distribution and prediction of rockburst during deep mining excavation in Linglong gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2001 , 20(1) : 38 - 42.(in Chinese))

[12] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路工程地质勘察规范(JTJ 064 - 98)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999. (The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specification for Survey of Highway Engineering Geology(JTJ 064 - 98)[S]. Beijing : China Communications Press , 1999.(in Chinese))

[13] 尚岳全. 岩体稳定与区域稳定数值模拟模型边界条件确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 201 - 204. (Shang Yuequan. The ways of determining boundary conditions in geomechanical numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1999 , 18(2) : 201 - 204.(in Chinese))

[14] 孙红月,尚岳全,张春生. 大型地下洞室围岩稳定性数值模拟分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(1): 70 - 85. (Sun Hongyue , Shang Yuequan , Zhang Chunsheng. Numerical modeling analysis for surrounding rockmass stability of large underground cavities[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science) , 2004 , 38(1) : 70 - 85.(in Chinese))

## 深部岩体工程灾害控制学术研讨会

### 主办

国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础理论研究与应用”办公室；中国岩石力学与工程学会软岩工程专业委员会；中国岩石力学与工程学会测试专业委员会；中国岩石力学与工程学会岩体物理数学模拟专业委员会；中国岩石力学与工程学会教育工作委员会

### 承办

黑龙江科技学院

### 协办

国家电力公司成都勘测设计研究院；中国矿业大学(北京)岩土工程研究所；北京火箭软件有限公司；ADINA 中国—亚得科技有限责任公司；《岩石力学与工程学报》；《矿山压力与顶板管理》

### 顾问委员会

王思敬 古德生 钱鸣高 谢和平 鲜学福 朱旺喜 杨立中 高德利

### 学术委员会

主任：钱七虎

副主任：何满潮

委员：彭苏萍 姜耀东 贺永年 李夕兵 潘一山 缪协兴 王明洋 唐春安

聂孟荀 方祖烈 蔡美峰 杨强 邬爱清 康红普 余诗刚 曹胜根

### 组织委员会

主任：张凤武

副主任：景海河 杨晓杰 孙广义

委员：孙晓明 周火明 韩军 林鹏 王金安 乔兰

### 会议日期与地址

2005 年 8 月 23 ~ 28 日

黑龙江省哈尔滨市黑龙江科技学院报告厅

### 研讨主题

(1) 深部工程岩体力学基础理论研究；(2) 深部长埋隧洞及地下厂房工程；(3) 深部地应力及岩石力学测试新技术；(4) 深部岩体工程物理与数值模拟新技术；(5) 学部工程围岩稳定性控制新技术；(6) 深部多相介质；(7) 多场耦合作用机制及灾变控制；(8) 振兴东北老工业基地教育与人才战略问题