

深埋硬岩隧洞开挖诱发破坏的防治对策研究

陈国庆¹, 冯夏庭¹, 张传庆¹, 江 权¹, 苏国韶²

(1. 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 430071;

2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对深埋硬岩隧洞围岩脆性破坏分析时传统应力指标的局限性和相应防治措施理论研究不足的特点, 在数值分析中应用反映高地应力下硬岩脆性破坏特点的 RDM 本构模型, 结合局部能量释放率评价指标分析硬岩脆性破坏过程中能量释放的强弱, 对深埋隧洞开挖过程中防治围岩脆性破坏的设计及施工措施进行综合性研究。首先, 通过评价隧洞群洞间距、施工进度等设计方案对围岩能量释放的影响, 提出预防岩爆发生的区域性对策。然后, 针对能量释放的时空演化规律, 本着减压卸能的原则, 给出支护时机、支护类型和参数的设计建议。同时, 在施工控制措施方面通过分析在掌子面上布置应力释放孔爆破卸压防治岩爆的效果, 给出应力释放孔布置方案的优化建议。最后, 应用上述方法对锦屏二级水电站辅助洞围岩的脆性破坏提出工程防治措施, 实践结果表明, 所提出的防治对策完全可行, 可供类似工程借鉴。

关键词: 隧道工程; 深埋隧洞; 岩爆; 防治措施; 局部能量释放率; 应力释放孔

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)10 - 2064 - 08

RESEARCH ON PREVENTION MEASURES FOR FAILURE INDUCED BY TUNNELING IN DEEP HARD ROCK

CHEN Guoqing¹, FENG Xiating¹, ZHANG Chuanqing¹, JIANG Quan¹, SU Guoshao²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Civil and Architecture Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: Aiming at the insufficient theoretical study on rockburst prevention and the limited evaluation of traditional stress index in the tunneling in deep hard rock, a new method for rockburst prevention measures based on local energy release rate index is proposed. The design and construction control measures in the process of tunneling is comprehensively researched by using energy release rate index, which is analyzed in the numerical calculation using a new constitutive model reflecting the brittle failure of hard rock. First tunnel pitch and different tunneling sequences are proposed as a regional prevention measure by comparing the energy release magnitude of rock wall. Then the support opportunity and parameters of the design proposal are given based on the destress principle in the space-time evolution of the energy release. Meanwhile, the effect of the stress release hole for rockburst prevention is analyzed in the process of construction, the layout pattern of stress release hole is also optimized. At last, the prevention measures of rockburst failure for Jinping II Hydropower Station diversion tunnels are proposed. The practical results show that the proposed control measures are entirely feasible; and the method could benefit other similar projects.

收稿日期: 2008 - 05 - 28; **修回日期:** 2008 - 07 - 08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539090); 国家自然科学基金青年基金资助项目(50709037); 国家科技支撑计划项目(2006BAB04A06); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2 - YW - 109 - 3)

作者简介: 陈国庆(1982 -), 男, 2004年毕业于河海大学水利水电工程专业, 现为博士研究生, 主要从事地下岩土工程和水工结构方面的研究工作。E-mail: chenguoqing1982@yahoo.com.cn

Key words: tunnelling engineering; deep tunnel; rockburst; prevention measures; local energy release rate; stress release hole

1 引言

近年来, 随着西部大开发战略的实施, 以及南水北调、西气东输等重大工程的启动, 深埋长隧洞的数量快速增长, 如已建太平驿水电站引水隧洞全长 10.5 km, 最大埋深达 600 m; 在建的锦屏二级水电站 4 条引水隧洞, 单洞平均长约 16.7 km, 最大埋深达 2 525 m^[1~3]; 拟建的南水北调西线工程中最长的引水隧洞长约 73 km。大长度、大断面、大埋深的特点将是 21 世纪我国隧道工程发展的总趋势。深埋高地应力条件下硬岩地下工程的建设面临的主要难题是岩爆灾害的防治, 因其发生在时间上具有突然性, 空间上具有随机性, 形式上常表现为爆裂弹射, 故破坏力大, 防治困难, 至今仍为一个世界性难题。

近年来一些学者针对具体工程开展了大量关于岩爆防治的研究工作。徐林生^[4]从现场岩爆实录分析了二郎山隧洞和通渝隧道的岩爆现象。姜云和王兰生^[5]从现场岩爆特征提出二郎山和华蓥山隧道的防治措施。吕庆等^[6]从隧道围岩的岩体特征和初始应力场两方面着手对苍岭隧道岩爆发生进行了探讨。汪波等^[7]从应力释放方法探讨了隧道岩爆预测的数值分析及初期支护时机。徐则民等^[8]就岩爆的灾害研究做了系统的分析。邱道宏等^[9]运用可拓理论就埋深隧道的岩爆防治措施进行了研究。

这些研究工作对隧洞现场施工中岩爆破坏防治具有重要的指导意义。但实质上岩体变形破坏是能量耗散与释放的综合结果, 能量耗散主要用于诱发岩体损伤, 导致材料性质劣化和强度丧失; 能量释放才是引发岩体突然破坏的内在原因^[10]。采用传统的应力、位移指标进行分析和评价均存在一定的局限性, 鉴于要从能量角度研究岩爆的防治措施这一事实, 本文应用反映高地应力下硬岩脆性破坏特点的 RDM 本构模型^[11], 结合局部能量释放率指标^[12], 利用 FLAC^{3D} 数值软件, 从洞线布置、施工进度和支护参数等方案的设计及施工控制措施多方面着手, 通过分析多因素对能量释放的强弱变化, 提出了岩爆防治的综合对策。最后, 对锦屏二级水电站引水隧洞和辅助洞的现场岩爆破坏情况进行了分析, 为工程的安全施工提供了理论

依据。

2 岩体劣化模型及局部能量释放率

2.1 硬岩脆性破坏的本构描述

硬脆性围岩在较高的二次应力作用下, 储存了大量的弹性能, 围岩破坏后其能量急剧释放, 导致围岩葱皮剥落、劈裂及弹射等脆性破坏的发生。破坏机制往往表现为剪切破坏和劈裂张拉破坏。本文采用一种可描述高地应力下硬岩脆性破坏和围岩性状恶化的弹脆塑性本构模型——岩体劣化模型(rock deterioration model, RDM), 该模型在CWFS本构模型的基础上^[13]提出, 认为破损区内的岩体力学性质随着岩体破损程度的不同而发生相应劣化, 即破损区内围岩力学参数是等效塑性应变的函数:

$$\bar{\epsilon}^p = \int \sqrt{\frac{2}{3} (d\epsilon_1^p d\epsilon_1^p + d\epsilon_2^p d\epsilon_2^p + d\epsilon_3^p d\epsilon_3^p)} dt \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} E(\bar{\epsilon}^p) &= E_0 f_E(\bar{\epsilon}^p) \\ c(\bar{\epsilon}^p) &= c_0 f_c(\bar{\epsilon}^p) \\ \varphi(\bar{\epsilon}^p) &= \varphi_0 f_\varphi(\bar{\epsilon}^p) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: E_0 , c_0 , φ_0 分别为岩体初始状态时的弹性模量、黏聚力和内摩擦角; $E(\bar{\epsilon}^p)$, $c(\bar{\epsilon}^p)$, $\varphi(\bar{\epsilon}^p)$ 分别为一定等效塑性应变下岩体的弹性模量、黏聚力和内摩擦角; $f_E(\bar{\epsilon}^p)$, $f_c(\bar{\epsilon}^p)$, $f_\varphi(\bar{\epsilon}^p)$ 分别为弹性模量、黏聚力和内摩擦角的变化函数, 是等效塑性应变参量的函数(见图 1), 可以采用线性函数, 也可以选用其他函数。

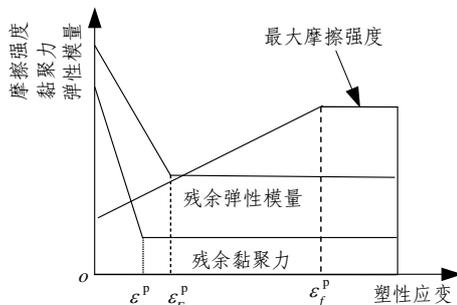


图 1 弹性模量、黏聚力、摩擦强度与塑性应变的关系(RDM 模型)

Fig.1 Relationship between elasticity modulus, cohesion and friction strength with plastic strain(RDM model)

2.2 局部能量释放率

从能量的观点来看, 岩爆的危害性与岩体是否能储存足够多的能量以及释放的能量大小有很大关系。用传统的应力等指标只能定性分析岩爆的风险性, 本文利用局部能量释放率(LERR)指标, 基于岩爆是以能量释放为主要特征的破坏现象的认识, 即围岩局部集聚的应变能超过岩体的极限储能能时, 单位体积岩体突然释放的能量, 相应的计算公式如下:

$$LERR_i = NE_{i_{max}} - NE_{i_{min}} \quad (3)$$

$$ERE = \sum_{i=1}^n LERR_i V_i \quad (4)$$

式中: $LERR_i$ 为第 i 个单元局部能量释放率, $NE_{i_{max}}$ 为第 i 个单元脆性破坏前的弹性应变能密度峰值, $NE_{i_{min}}$ 为第 i 个单元脆性破坏后的弹性应变能密度谷值, ERE 为总的弹性释放能, V_i 为第 i 个单元的体积。NE 可表示为

$$NE = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] / (2E) \quad (5)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为单元应变能峰值对应的最大、中间和最小主应力; ν 为泊松比; E 为弹性模量。

在数值计算过程中, 单元脆性破坏的判别标准由 RDM 模型控制。

3 洞线布置及施工进度防治岩爆研究

洞间距直接影响到洞室群的整体稳定性, 开挖过程中相邻隧洞应力场的相互干扰, 导致不同施工进度下各隧洞围岩破坏程度的不同。因此, 研究不同间距和施工进度下各隧洞围岩能量释放大小的规律, 对采取合理的布置和施工方案控制岩爆破坏具有重要意义。

本文以两相临平行圆形隧洞为例, 隧洞的直径为 8 m, 分析不同洞间距情况下两洞掌子面不同间距对隧洞掌子面和围岩拱顶能量释放规律。锦屏二级水电站引水隧洞整个洞线以 II, III 类硬脆性大理岩为主, 本构模型采用 DAM 模型, 相应的力学参数如表 1 所示, 其中, 临界塑性应变根据现场监测信息采用反演方法获得^[14]。计算模型如图 2 所示。

两隧洞洞间距分别为 10, 16, 24 m 的情况下, 洞 2 比洞 1 超前开挖 0, 5, 10, 15 m 时释放能量化规律见图 3。其中, 能量释放量是模型中每个

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

黏聚力峰值/MPa	黏聚力残余值/MPa	初始内摩擦角/(°)	内摩擦角峰值/(°)	抗拉强度/MPa	弹性模量峰值/GPa
12	0.5	20	48	2	60
弹性模量残余值/GPa	泊松比	弹性模量临界塑性应变 /10 ⁻³	摩擦角临界塑性应变 /10 ⁻³	黏聚力临界塑性应变 /10 ⁻³	剪胀角/(°)
30	0.25	1.7	1.7	2.4	30

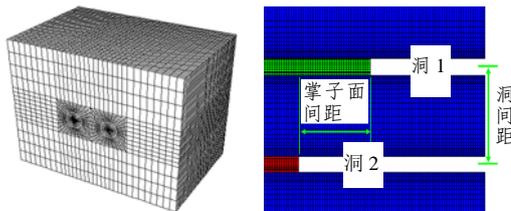


图 2 计算模型示意图

Fig.2 Sketch of numerical model

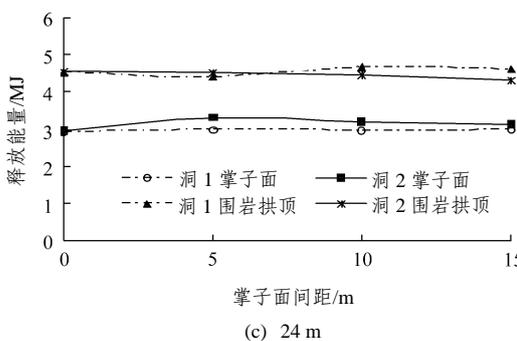
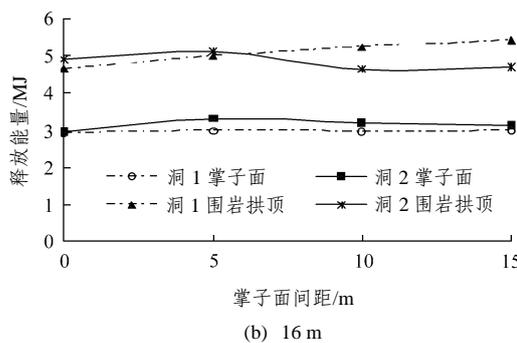
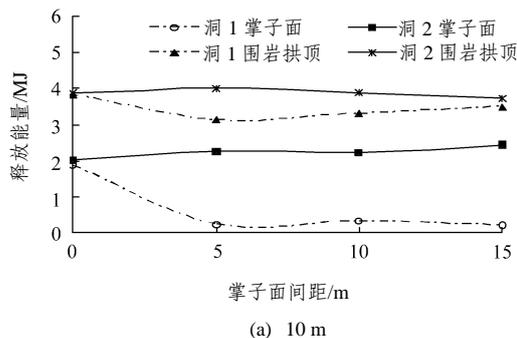


图 3 不同洞间距下释放能量对比

Fig.3 Contrast of released energy under different spaces

单元 $LERR$ 之和。洞 2 掌子面和围岩拱顶释放能量都比洞 1 的大, 说明先施工隧洞使周围岩体的能量释放一部分, 导致后施工隧洞岩爆风险性较先施工的隧洞要小。随着两隧洞间距的变大, 两隧洞释放能量变化规律的差别变小。可见, 选择不同洞线布置方案和施工开挖顺序可达到控制围岩岩爆破坏的目的, 这是一种区域性的岩爆防治措施。

4 支护时机与参数的选择

在合理的洞线布置方案、最优的施工进度安排确定后, 合理的支护时机、针对性的支护方式和支护参数的设计是控制岩爆灾害、减小损失最有力的手段。

4.1 支护时机

以锦屏二级水电站引水隧洞 1# 洞为例, 研究掌子面向前掘进时不同支护时机对围岩脆性破坏的影响, 隧洞掌子面开挖过程如图 4 所示, 设掌子面的掘进速度为 8 m/d。

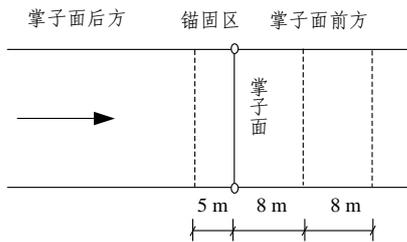


图 4 隧洞掌子面开挖过程示意图
Fig.4 Driving process of tunnel work plane

围岩锚固区深度为 6 m, 锚杆间距为 1 m×1 m, 本文采用等效方法^[15]来模拟锚杆对围岩的加固效应, 即

$$c_1 = c_0 + \eta \frac{\tau s}{ab} \tag{6}$$

$$\varphi_1 = \theta + \varphi_0 \tag{7}$$

式中: c_1 , φ_1 分别为锚固岩体的黏聚力和内摩擦角; τ 为锚杆材料的抗剪强度, 本文取 $\tau = 150 \text{ MPa}$; s 为锚杆的横截面面积; a , b 分别为锚杆的纵、横向间距; η 为黏聚力综合经验系数, 一般取为 2~5; θ 为内摩擦角经验增值, 本文取 $\theta = 5^\circ$ 。

表 2 给出了不同支护时机能量释放量的大小, 及时支护方案能量释放量比无支护方案减少 70%, 比滞后 1, 2 d 支护方案分别减少 30% 和 33%, 表明

表 2 不同支护时机释放能量的比较

Table 2 Energy releases under different support opportunities

支护方案	释放能量/kJ
无支护	3.22×10^4
及时支护	9.64×10^3
滞后 1 d 支护	1.37×10^4
滞后 2 d 支护	1.44×10^4

滞后支护导致更多围岩破坏, 释放更多能量。因此, 及时支护能提高围压, 减小不规则棱角导致的应力集中, 可有效地减少岩爆灾害的发生, 在岩爆破坏特别严重的地段有必要进行超前支护。

4.2 支护方式

存在岩爆威胁隧洞的支护系统应具备以下特点: (1) 支护体系要有较高的承载能力, 且对隧洞开挖后围岩表面有较高的覆盖率; (2) 支护系统应遵循控制能量释放的原则, 允许破坏前岩体发生较大的位移, 从而吸收更大的能量。

由于硬脆性岩体破坏前总变形量不大, 要使较大范围内围岩的能量得以释放, 需要允许围岩发生一定程度的损伤, 支护结构要能使围岩在控制的条件下逐步破坏, 使其产生一定的塑性变形, 从而消耗掉部分能量, 进而降低岩爆发生的风险性, 达到“以柔克刚”的目的。以锚杆、喷射混凝土和钢筋网为主的柔性支护系统是控制岩爆破坏最合适支护类型。

4.3 支护参数选择

锚杆支护系统对岩体起加固和补强作用, 可分为机械式锚杆、砂浆锚杆和摩擦式锚杆 3 种。当围岩发生岩爆时, 围岩表面位移量很大, 为了保证在较大位移量下支护的可靠性, 摩擦式锚杆是较好的选择, 在位移量很大时仍有较大的承载能力。锚杆采用梅花型布置, 不宜过长, 长度应当大于岩石最大抛出深度, 可以根据计算得到的能量释放率最大处的围岩深度确定, 一般为 1.5~3.5 m。纵横间距密度大(密锚), 一般为 0.5 m×1.5 m~1.5 m×2.0 m, 随着岩爆烈度的增加, 纵横间距随之减小, 密锚便于挂网, 可以防止大块岩爆岩石剥离掉块和弹射等现象的发生, 而且便于与喷网形成系统组合, 达到充分加固围岩的作用。

喷射混凝土宜采用可以明显提高喷层的抗拉和抗剪强度, 5~15 cm 厚的 C30 强度等级混凝土较

为合适，并且具有相当柔性并且能承受较大的变形而不使表面开裂的材料。如塑料纤维混凝土，泡沫混凝土、钢纤维混凝土、纳米材料混凝土等在岩爆的冲击载荷作用下仍能承受一定的外力。

钢筋网在打完系统锚杆后就应立即安设，直径为 6~8 mm，间距为 20 cm×20 cm，尽量用挂“整体网”的方法，紧贴周壁岩石布置，有助于喷、锚、网形成浑然一体的整体组合作用，相辅相成，进而起到防止岩爆或降低岩爆发生风险性的作用。

5 应力释放孔对岩爆控制效应研究

在一系列设计方案确定后，在施工开挖过程中主动地引导部分能量的释放，对于减小开挖后支护结构的压力，或者提高支护结构对岩爆的控制效果具有重要意义。应力释放孔就是这样一种重要的现场施工防治措施，利用局部解危的思想，通过垂直于掌子面钻孔施爆，使掌子面相当深度范围内形成破碎带，解除掌子面附近围岩的应力集中现象，使应力向深部转移，减少岩体聚积的弹性能，以降低掌子面发生岩爆的风险性。

本节以辅助洞 B 为例分析隧洞掌子面布置应力释放孔后对掌子面卸压消能的效果，分析应力释放孔布置方案对掌子面能量释放的影响。辅助洞 B 模型网络如图 5 所示，其洞断面尺寸为 6.2 m×7.5 m (长×宽)。

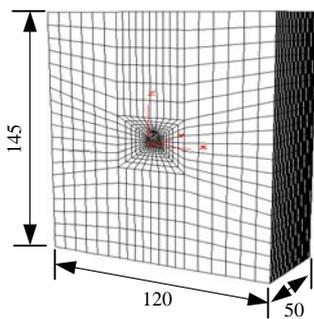


图 5 辅助洞 B 模型网格示意图(单位: m)
Fig.5 Meshes of sub-tunnel B model(unit: m)

5.1 应力释放孔的卸压消能效应

应力释放孔的孔径为 0.05 m，孔深为 5 m，爆破造成的破碎区内岩体力学参数降为原岩的 0.5 倍，原岩的计算参数同表 1。破碎区范围为孔周围 0.5 m 范围内，以反映爆破卸压区内岩体力学参数的改变。

图 6 给出了 2 种应力释放孔的布孔方案，方案 1：在掌子面中间按三排均匀布置(见图 6(a))；方案 2：在掌子面周边均匀布置(见图 6(b))。

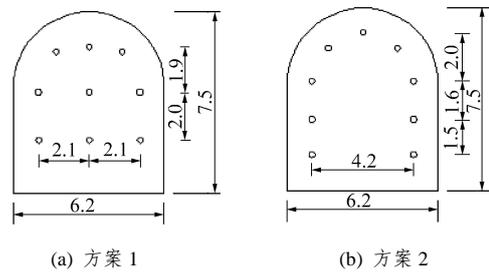


图 6 辅助洞 B 布孔方案(单位: m)
Fig.6 Layouts of sub-tunnel B(unit: m)

计算结果如表 3 所示，表中给出了不同方案掌子面塑性区面积、破损区面积及总释放能量大小。其中，破损区为能量释放率大于 100 J/m² 以上的单元；累计能量为掌子面 LERR 乘以面积，代表掌子面总的释放能量。可见，布孔后，塑性区面积比无孔时增大，而破损区和累积能量均大幅减小，说明应力释放孔的卸压消能作用明显，有效降低了掌子面脆性破坏程度。由图 7 可见，布置应力释放孔后塑性区面积增加，掌子面能量耗散变多而剩下的弹性应变能变小，岩爆的风险性随之变小。

表 3 辅助洞 B 计算结果比较

方案	塑性面积/m ²	破损面积/m ²	累计能量/kJ
无孔	42.0	41.9	4.36×10 ³
方案 1	42.5	17.1	2.30×10 ³
方案 2	42.8	16.4	2.25×10 ³

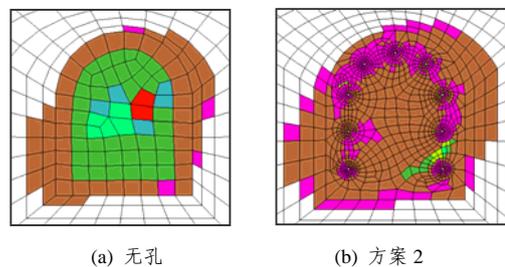


图 7 塑性区分布
Fig.7 Distribution of plastic zone

由图 8 可见，布置应力释放孔后，掌子面的应力值从 39 MPa 下降至 20 MPa，减轻了掌子面的应

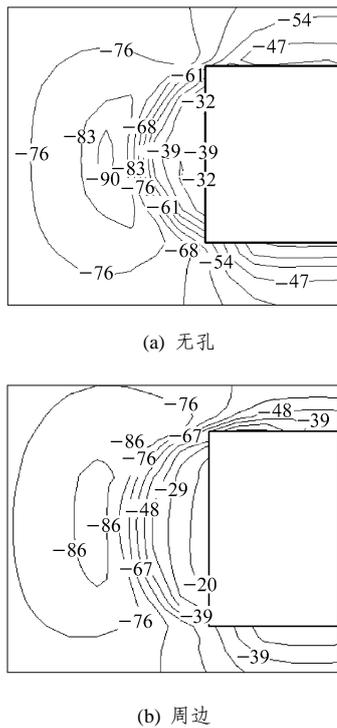


图 8 纵剖面最大主应力分布(单位: MPa)

Fig.8 Maximum principal stress distribution(unit: MPa)

力集中程度, 将应力峰值向深部转移, 降低了掌子面发生岩爆的风险性。

由图 9 可见, 掌子面中间部位的 $LERR$ 从未布孔方案的 90 kJ/m^2 降低到 46 kJ/m^2 , 应力释放孔周边的 $LERR$ 也从 100 kJ/m^2 左右降低到 20 kJ/m^2 , 能量释放量明显降低, 可以使深部围岩内积聚的能量以微小破裂的形式释放, 减少弹性应变能的释放总量。

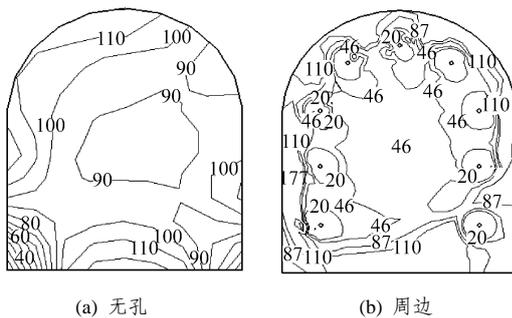


图 9 掌子面 $LERR$ 分布(单位: kJ/m^2)

Fig.9 $LERR$ distribution(unit: kJ/m^2)

以上分析结果, 均较好的表明了应力释放孔对于减小掌子面岩体承受的压力, 降低存储的弹性能和破坏时释放的能量具有明显的效果, 可有效地控制开挖后岩爆的烈度, 降低其发生机率。

5.2 应力释放孔布置方案的优化

掌子面岩体中不同的应力场分布对应不同的储存弹性能, 不同的应力释放孔布置方案, 所能卸掉的压力和消耗掉的能量不同, 同时, 不同位置的扰动对周围应力分布的影响效应不同, 故优化应力释放孔的布置是必要的。本文对两种典型的布置方案进行了比较。

由表 3 可见, 方案 2 的塑性区比方案 1 大, 卸压消能的范围扩大, 而破坏区和能量释放量小, 说明岩体开挖后释放的能量小, 破坏的范围小。因此, 对于城门洞形状的辅助洞来讲, 采用周边布孔方案比中间均匀布孔方案防治掌子面脆性破坏的效果稍好。说明针对不同洞形的不同应力场分布, 开展应力释放孔布置方案的优化具有积极意义。

6 辅助洞开挖过程中现场实例分析

锦屏二级水电站辅助洞开挖采用从东西两端向中部同时掘进的方式。目前辅助洞已经穿越了盐塘组大理岩, 深入到埋深达 2100 m 的白山组类大理岩中, 且辅助洞 B 超前辅助洞 A 的 600 m 。随埋深增大, 辅助洞围岩岩爆问题逐渐突出。洞室开挖过程中揭露: 辅助洞岩爆主要发生在整体结构、块状结构等岩体中, 以片块状剥落为主, 局部伴有少量弹射, 如图 10(a)所示; 当埋深较大后, 岩爆发生的部位主要分布在开挖掌子面和隧洞东边侧拱; 岩爆发生的活跃期通常在掘进后的几小时内, 距掌子面 $1\sim 2$ 倍洞径范围内; 随着掌子面的推进, 岩爆的持续期一般在 24 h 内, 但有的部位几个月后仍有岩爆声音和片帮剥落现象; 岩爆波及深度大小不一, 大多数为 $5\sim 30 \text{ cm}$, 规模较大的岩爆坑最深可达 $70\sim 120 \text{ cm}$ 。另外, 统计结果表明, 处于超前的辅助洞 B 岩爆比辅助洞 A 更为强烈。



(a) 辅助洞岩爆层状剥落



(b) 掌子面进行钻孔卸压施工



(c) 辅助洞岩爆的挂网防治措施

图 10 辅助洞岩爆与防治

Fig.10 Rockburst and prevention of sub-tunnel

为了减小和抑制岩爆发生的频率和强度，经研究，采用在掌子面打 9 个超前应力释放孔的防治措施，有效地减轻了掌子面岩爆烈度；在开挖爆破后，及时采用喷射混凝土封闭围岩，也一定程度抑制了开挖后围岩岩爆的范围，如图 10(b)所示；而对一些发生过较大规模岩爆的部位采用挂“整体网”的措施，如图 10(c)所示，有效地防止了岩爆的进一步扩大。实践证明，目前这些防治措施已有效控制辅助洞的岩爆，避免和减小了岩爆对现场人员和机械安全的威胁。

7 结 论

本文从设计和施工两个角度对防治岩爆的措施及其效果进行了定量分析和评价，主要得出以下结论：

(1) 深埋硬岩隧洞受高地应力作用，洞室开挖后岩体内积聚的大量能量突然释放，脆性破坏现象

严重。基于能量释放原理，结合数值方法是研究围岩脆性破坏防治措施的有效途径。锦屏二级水电站引水隧洞和辅助洞工程实例的计算分析表明了该方法的合理性和正确性。

(2) 洞线的合理布置和相邻隧洞的施工进度对能量释放规律有着重要影响，在一定的洞间距下隧洞超前掘进距离优化可以作为一种防治脆性破坏的区域性措施。

(3) 对于高应力下具有脆性破坏特征的围岩应及时支护，支护系统应该采用柔性支护类型，锚杆布置采用短而密的摩擦型锚杆，喷混凝土具有柔性变形的特点，再及时安装好钢筋网，三者共同作用防治深埋硬岩洞室岩爆破坏。

(4) 应力释放孔作为脆性破坏防治措施的局部解危方法，减轻了应力集中程度并使其向深部转移，同时使围岩积聚的弹性应变能提前得以耗散，有效降低围岩发生岩爆的风险性。

(5) 锦屏辅助洞掌子面目前采用的打应力释放孔、洞室开挖后及时进行喷锚支护、岩爆较严重的部位采用挂网喷锚等综合处理措施，有效地抑制了岩爆发生的频率和强度，表明文中提出的岩爆综合防治措施具有较好的实用性。

参考文献(References):

- [1] 吴世勇, 王 坚, 王 鹤. 锦屏水电站辅助洞工程地下水及治理对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1 959 - 1 967.(WU Shiyong, WANG Jian, WANG Ge. Underground water and its treatment strategy in auxiliary tunnels of Jinping Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1 959 - 1 967.(in Chinese))
- [2] 张春生. 雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞关键技术问题研究[J]. 中国勘察设计, 2007, (8): 41 - 44.(ZHANG Chunsheng. Study on key technology of Jinping II Hydropower Station[J]. China Investigation and Design, 2007, (8): 41 - 44.(in Chinese))
- [3] 陈国庆, 冯夏庭, 周 辉, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增): 417 - 422.(CHEN Guoqing, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Numerical analysis of the long-term stability of the diversion tunnel in Jinping II Hydropower Station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Supp.): 417 - 422.(in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 姜云, 王兰生. 深埋长大公路隧道高地应力岩爆和岩溶涌突水问题及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 319 - 1 323.(JIANG Yun, WANG Lansheng. Problems of high geostress rockburst and water outburst and countermeasures in deep and long tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 319 - 1 323.(in Chinese))
- [6] 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): 2 982 - 2 988.(LU Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Comprehensive study on prediction of rockburst in deep and over-length highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 982 - 2 988.(in Chinese))
- [7] 汪波, 何川, 俞涛. 苍岭隧道岩爆预测的数值分析及初期支护时机探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1 181 - 1 186.(WANG Bo, HE Chuan, YU Tao. Study on numerical analysis of rockburst and support time in Cangling Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1 181 - 1 186.(in Chinese))
- [8] 徐则民, 黄润秋, 范柱国, 等. 长大隧道岩爆灾害研究进展[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 16 - 24.(XU Zemin, HUANG Runqiu, FAN Zhuguo, et al. Progress in research on rockburst hazard of long tunnel with large section[J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(2): 16 - 24.(in Chinese))
- [9] 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]. 地下空间学报, 2006, 2(6): 950 - 956.(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 - 956.(in Chinese))
- [10] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 003 - 3 010.(XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 003 - 3 010.(in Chinese))
- [11] 江权, 冯夏庭, 陈国庆. 考虑高地应力下围岩劣化的硬岩本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 144 - 152.(JIANG Quan, FENG Xiating, CHEN Guoqing. Study on constitutive model of hard rock considering surrounding rock deterioration under high geostresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 144 - 152.(in Chinese))
- [12] 苏国韶, 冯夏庭, 江权, 等. 高地应力下地下工程稳定性分析与优化的局部能量释放率新指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 453 - 2 460.(SU Guoshao, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Study on new index of local energy release rate for stability analysis and optimal design of underground rock mass engineering with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 453 - 2 460.(in Chinese))
- [13] VAHID H, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(1): 35 - 48.
- [14] 苏国韶, 冯夏庭. 基于粒子群优化算法的高地应力条件下硬岩本构模型的参数辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 029 - 3 034.(SU Guoshao, FENG Xiating. Parameter identification of constitutive model for hard rock under high in-situ stress condition using particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 029 - 3 034.(in Chinese))
- [15] 陈卫忠, 朱维申, 王宝林, 等. 节理岩体中洞室围岩大变形数值模拟及模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 223 - 229.(CHEN Weizhong, ZHU Weishen, WANG Baolin, et al. Numerical simulation and testing study of large deformation for cavern's surrounding jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 223 - 229.(in Chinese))