

# 锦屏二级水电站引水隧洞 TBM 开挖方案对岩爆风险影响研究

吴世勇<sup>1</sup>, 周济芳<sup>1</sup>, 陈炳瑞<sup>2</sup>, 黄满斌<sup>3</sup>

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 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 430071; 3. 沈阳铁道勘察设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110013)

**摘要:** 为了提高施工效率, 降低现场施工人员和设备的风险, 锦屏二级水电站 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>引水隧洞采用大断面 TBM 进行施工。超大埋深 TBM 全断面施工, 对于等级较强的岩爆, 仍然可能会给 TBM 设备带来一定伤害。为此, 通过微震实时监测和数值分析等手段, 开展 TBM 施工速度、导洞施工等 TBM 开挖方案对岩爆风险的影响研究。结果表明, 降低 TBM 施工速率, 有利于降低岩爆发生的风险; 导洞施工+TBM 联合施工对于极强岩爆风险的防范是十分有利的。研究成果可为 TBM 安全快速掘进提供重要的参考价值, 也将为其他工程提供借鉴, 具有重要的工程价值。

**关键词:** 隧道工程; 深埋长隧洞; TBM; 开挖方案; 岩爆; 演化规律

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2015)04-0728-07

## EFFECT OF EXCAVATION SCHEMES OF TBM ON RISK OF ROCK BURST OF LONG TUNNELS AT JINPING II HYDROPOWER STATION

WU Shiyong<sup>1</sup>, ZHOU Jifang<sup>1</sup>, CHEN Bingrui<sup>2</sup>, HUANG Manbin<sup>3</sup>

(1. *Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China*;  
2. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 3. *Shenyang Railway Survey Design Consulting Company Limited, Shenyang, Liaoning 110013, China*)

**Abstract:** To improve the efficiency of construction and reduce the risk of personnel and equipment on construction site, the large-section Tunnel Boring Machine(TBM) was used in digging the diversion tunnels #1, #3 at Jinping II hydropower station. When a strong occurs, the full-section TBM construction in deep underground, may bring damage to TBM. Therefore, through the real time microseismic monitoring and numerical analysis, the influence of excavation scheme of TBM and the construction of pilot tunnel on the risk of rock burst was studied. Lower speed of construction progress was found to be able to reduce the risk of rock burst. The excavation of pilot tunnel together with tunneling with TBM was found to be beneficial to prevent the strong rock burst.

**Key words:** tunnelling engineering; deep buried long tunnel; TBM; excavation scheme; rock burst; evolution law

**收稿日期:** 2014-01-06; **修回日期:** 2014-07-26

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2011BAZ03221B05); 国家自然科学基金委主任基金项目(11355001)

**作者简介:** 吴世勇(1965-), 男, 博士, 1987年毕业于清华大学水力机械专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事水电工程技术与管理方面的研究工作。E-mail: wushiyong@ehdc.com.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.009

# 1 引言

锦屏二级水电站引水系统采用 4 洞 8 机布置形式，电站进水口位于锦屏大河弯西端景峰桥，厂址位于东端的大水沟。引水隧洞横穿跨越锦屏山平行布置，洞线平均长度约 16.67 km，隧洞直径 12.4 ~ 13 m，4 条引水隧洞中心距为 60 m，主轴线方位角为 N58°W；立面为缓坡布置，底坡 3.65‰，隧洞沿线上覆岩体一般埋深 1 500 ~ 2 000 m，最大埋深约为 2 525 m，具有洞线长、埋深大、洞径大等特点，为超深埋长隧洞特大型地下水工程<sup>[1-2]</sup>。

引水隧洞群地处高山峡谷地区，具有隧洞长、埋深大、应力高等特点，高地应力带来的岩爆问题尤为突出，已成为制约本工程建设安全和施工进度的关键技术问题。国内外学者针对岩爆开展了大量的研究，包括大量的岩爆机制研究、岩爆倾向性室内试验研究、微震监测研究、深埋隧洞围岩稳定分析等<sup>[3-11]</sup>。锦屏二级水电站的 7 条深埋长隧洞，涵盖了不同开挖径、断面形态和施工方法(D&B, TBM)，岩爆的表现形式也比较丰富。尤其是 1<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>引水隧洞采用直径达 12.4 m 的大断面硬岩掘进机进行施工，考虑 TBM 应对强岩爆的风险较大，有必要分析 TBM 开挖方案对岩爆演化规律的影响，包括 TBM 施工速度对岩爆风险的影响、不同半导洞开挖方案的岩爆演化规律，便于在实际施工中，选择较为合理的 TBM 开挖掘进方案，最大限度的

降低岩爆产生的危害程度和等级。

# 2 TBM 主要设备技术参数

1<sup>#</sup>引水洞 TBM 为美国 ROBBINS 公司生产的型号 410-319 开敞式 TBM，平直型刀盘设计，如图 1 所示。其主要的技术参数指标如表 1 所示，滚刀采用 19"直径滚刀，破岩效率比较高，刀具的耐磨性比较好，中心滚刀间距 100 mm 左右，面板刀的刀间距为 86.5 mm，基本上为通用的滚刀间距。TBM 的支护系统分为 3 个区，L1 区为应急安全支护区，可以施作锚杆、钢筋网、钢拱架、钢瓦片、喷射混凝土。L2 区为主要支护区，可以施作锚杆与喷射混凝土。L3 区为补强支护区，可以施作喷射混凝土。



图 1 ROBBINS 410-319 开敞式 TBM

Fig.1 Open type TBM, ROBBINS 410-319

表 1 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>引水洞 TBM 的主要技术指标  
Table 1 Main indices of long tunnels #1 and #3

| TBM 编号             | TBM 型号          | 整机                     |         |             |         |          | 刀具       |           |      |          |      |  |
|--------------------|-----------------|------------------------|---------|-------------|---------|----------|----------|-----------|------|----------|------|--|
|                    |                 | 直径/m                   | 长度/m    | 质量/kg       | 装机功率/kW | 最小转弯半径/m | 滚刀直径(/") | 最大刀具荷载/kN | 刀具数量 | 平均刀间距/mm | 刀具安装 |  |
| 1 <sup>#</sup> TBM | ROBBINS 410-319 | 新装刀 12.43, 磨损至极限刀 12.4 | 约 210   | 约 1 400 000 | 6 078   | 800      | 17, 19   | 267       | 80   | 89.0     | 背装   |  |
| 2 <sup>#</sup> TBM | HERRENKNECHT    | 新装 12.44, 磨损极限 12.40   | 约 172.5 | 约 1 200 000 | 7 500   | 800      | 19       | 315       | 81   | 78.7     | 背装   |  |

| TBM 编号             | 刀盘    |                |               |           | 推进油缸撑靴系统支护设备(L3 区) |           |                 |       |                 |  |                 |
|--------------------|-------|----------------|---------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-------|-----------------|--|-----------------|
|                    | 功率/kW | 额定扭矩/(kN·m)    | 最大脱困扭矩/(kN·m) | 旋转方向      | 最大旋转速度/RPM         | 推荐刀盘推力/kN | 可承受最大推力/kN      | 行程/mm | 最大操作压力/bar      | 混凝土喷射能力/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 混凝土喷射范围         |
| 1 <sup>#</sup> TBM | 4 410 | 16 519(2.4RPM) | 24 778        | 左右旋转、单向出碴 | 5.6                | 22 703    | 24 260          | 1 820 | 345             | 2 × 15                                     | 环向 260°, 纵向 3 m |
| 2 <sup>#</sup> TBM | 4 900 | 13 167(3.2RPM) | 21 067        | 左右旋转、单向出碴 | 5.0                | 24 885    | 35 625(310 bar) | 1 850 | 350(109 956 kN) | 2 × 15                                     | 环向 260°, 纵向 3 m |

3#引水洞 TBM 为德国 HERRENKNECHT 公司生产的开敞式 TBM，平直型刀盘设计。其主要的技术参数指标如表 1 所示，滚刀采用 19"直径滚刀，破岩效率比较高，刀具的耐磨性比较好，中心滚刀间距 100 mm，面板刀的刀间距为 90 mm，基本上为通用的滚刀间距。TBM 的支护能力分为 3 个区，L1 区为应急安全支护区，可以施作锚杆、钢筋网、钢拱架、钢瓦片、喷射混凝土。L2 区为主要支护区，可以施作锚杆，喷射混凝土。L3 区为补强支护区，可以施作喷射混凝土。与 ROBBINS 机器的撑靴相比，海瑞克机器撑靴短宽，撑靴面积 16.53 m<sup>2</sup>。

### 3 TBM 施工速度对岩爆风险的影响

为了研究施工速度对 TBM 岩爆风险的影响，TBM 施工过程中开展了岩爆微震实时监测分析与预警，通过对微震信息的分析，系统研究了 TBM 施工速度对 TBM 岩爆风险的影响及规律。实际上，在同地质与施工条件下，TBM 进尺越大，围岩体能量释放越剧烈，也越大，围岩发生岩爆的风险也越高。但由于岩石材料的复杂性与非均质性，TBM 施工过程中，不同洞段围岩体的地质条件不同，有的甚至差异较大，导致 TBM 施工速度与隧洞围岩释放能量、微震活动性之间并不成比例。图 2 为微震事件数与 TBM 日进尺的演化规律<sup>[3]</sup>，可见看出，TBM 开挖速度越快，围岩体的应力调整活动越剧烈，微震系统监测到的微震事件越多，发生岩爆的风险越高。TBM 日进尺小于 9 m 时，微震事件低于其平均值 18.9 个/d，且在支护及时、起效快的情况下，强岩爆发生几率相对较小；TBM 日进尺小于 5 m 时，微震活动较低，微震事件基本低于 10 个/d，在地质条件较好，支护及时、起效快的情况下，发生中等岩爆的风险相对较低。

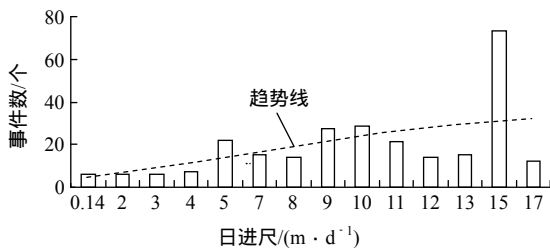


图 2 微震事件随 TBM 日进尺的演化规律<sup>[3]</sup>  
Fig.2 Microseismic events with TBM excavation<sup>[3]</sup>

以 2010 年 5 月 28 日至 8 月 21 日为例，1 d 内不同时间段累计微震事件时域内演化规律见图 3<sup>[3]</sup>。

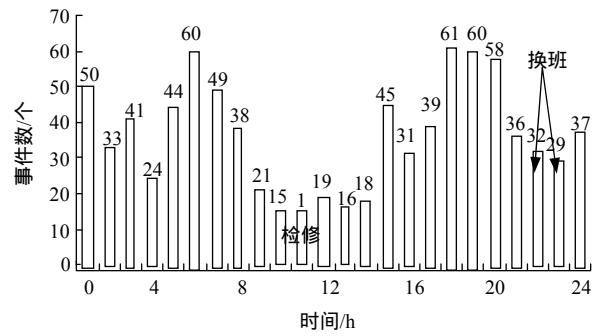


图 3 不同时间段累计微震事件时域内演化规律<sup>[3]</sup>  
Fig.3 Accumulated microseismic events in different time periods<sup>[3]</sup>

围岩体的应力调整在每天早上 8 点至下午 2 点处于平静期，该期间为 TBM 检修时间，围岩体不受开挖扰动的影响，围岩体的应力调整处于一个相对平静期，其中在上午 8~10 点围岩体的应力调整略高于上午 10 至下午 2 点，这是因为 TBM 开始检修的 2 h 内，应力调整较为活跃，致使围岩微破裂信号较多，微震事件较多；从下午 2 点起，围岩体的应力调整开始逐渐进入活跃期，晚上 6 点至晚上 9 点，应力调整的幅度最为剧烈，这是因为在 TBM 检修期间围岩体积蓄的能量进行了重新分配，重新分配后的能量集中区(应力集中区)主要分布在掌子面前方 4~10 m 的范围，因此在 TBM 施工初始的几个小时内，微震事件较少，岩爆风险相对较小，当开挖至能量集中区，即晚上 6~9 点期间，围岩体微破裂非常严重，微震事件最多，岩爆风险相对较高，当 TBM 开挖通过该洞段后，围岩体的岩爆风险有所降低。

据统计，围岩释放的总能量随 TBM 日进尺变化的演化规律如图 4 所示。可以看出，随着 TBM 施工速率的增加，围岩破坏时的能量释放量略有增加，但增加程度不明显，这主要是由于 TBM 掘进过程中围岩破坏时的能量释放大小主要取决于原始地应力场和围岩地质条件，由于围岩内部存在节理面、结构面、岩溶等不良地质体，使得不同区段围岩的应力场、地质条件也有一定差别。因此总体来看，随着 TBM 日进尺提高，围岩释放的总能量有所增加，但并不成比例关系<sup>[4]</sup>。

总体来说，围岩内部的应力调整活动和 TBM 施工及其施工速率关系较为明显，随着 TBM 施工速度(日进尺)增加，围岩应力调整相对活跃，微震事件也相对较多；随着 TBM 施工速率的降低，围岩体的微震活动呈降低趋势。因此，当围岩内部应

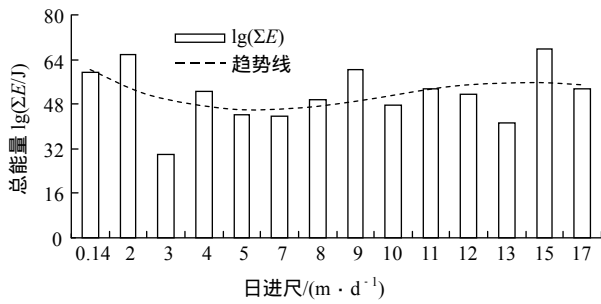


图 4 围岩释放的总能量随 TBM 日进尺的演化规律<sup>[11]</sup>

Fig.4 The total energy release of rock mass with TBM excavation<sup>[11]</sup>

力调整较为活跃、有较大释放能量、具有较强岩爆倾向的洞段，可采取降低 TBM 施工速率、调整开挖时段、降低应力调整速率的策略与措施降低岩爆发生的风险<sup>[11]</sup>。

### 4 半导洞开挖对 TBM 施工岩爆风险的影响

TBM 在高埋深洞段施工可能会遭遇极强岩爆，经多次技术论证和研究，决定采用预先开挖导洞的方式释放能量，以期达到避免地应力集中、降低施工过程中岩爆风险的目的。本文采用微震监测和数值模拟分析方法研究半导洞开挖对 TBM 施工岩爆风险的影响。强~极强岩爆洞段 TBM 上导洞开挖如图 5 所示。

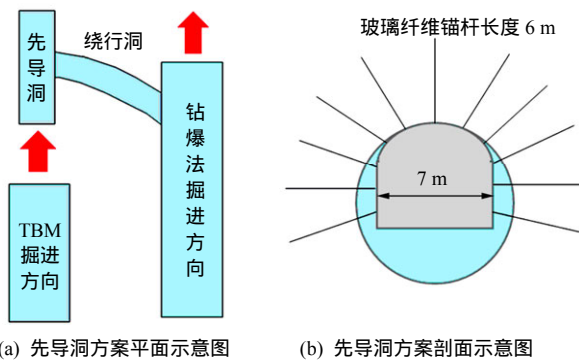


图 5 强~极强岩爆洞段 TBM 上导洞开挖法示意图

Fig.5 Sketch of excavation of pilot tunnel above TBM tunnel in the section with strong-extreme strong rock burst

#### 4.1 微震活动特征

考虑到 2#引水隧洞已提前开挖到 TBM 前方，具备临洞监测的条件，因此在 2#引水隧洞靠近 1#引水隧洞 TBM 开挖掌子面的洞段边墙内布置传感器，传感器布置方案如图 6 所示，用来监测 1#洞 TBM 掌子面的微震活动情况，并开展实时的微震监测和

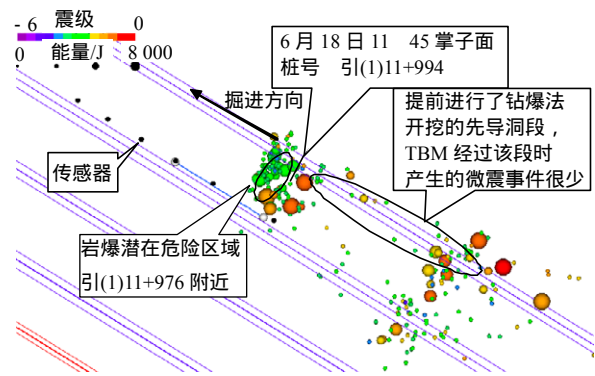


图 6 2010 年 5 月 06 日~6 月 18 日 TBM 全断面开挖监测到的 298 个微震事件

Fig.6 298 microseismic events monitored during the period from May 6, 2010 to June 18th, 2010

数据分析工作。TBM 开挖活动同节 3 所述。2010 年 5 月 06 日至 6 月 18 日 TBM 全断面开挖监测到 298 个微震事件，空间分布如图 6 所示。

微震监测结果表明：2010 年 7 月 6 日凌晨 2:00 和凌晨 4:50，在引(1)11+862~11+935 段水流左侧部位发生 2 声巨响，证明本项目第一次对岩爆时间的预测取得初步成功，但由于岩爆发生机制极为复杂，且影响的因素非常多，对于岩爆发生时间的精确预测仍然存在很大难度<sup>[3]</sup>。图 7 为此次岩爆发生后隧洞局部破坏图。

图 8 为微震事件密度云图，可以看出先导洞段 TBM 扩挖过程微震事件的空间变化规律：TBM 扩挖时微震事件活跃性较低，仅在开挖洞段的两端存在应力集中现象，未发生较强岩爆，可见先导洞的开挖可有效降低 TBM 开挖诱发的岩爆风险。

#### 4.2 半导洞开挖应力迁移特征分析

##### 4.2.1 数值模拟

选取隧道掘进方向为 x 轴正方向，隧道横向为 y 轴方向，垂直向为 z 轴方向，模型的长×宽×高为 400 m×310 m×150 m，模型划分为约 119 万个单元。



(a)



(b)

图7 中等岩爆现场图片(2010年7月6日)

Fig.7 The intermediate rockburst in July 6th, 2010

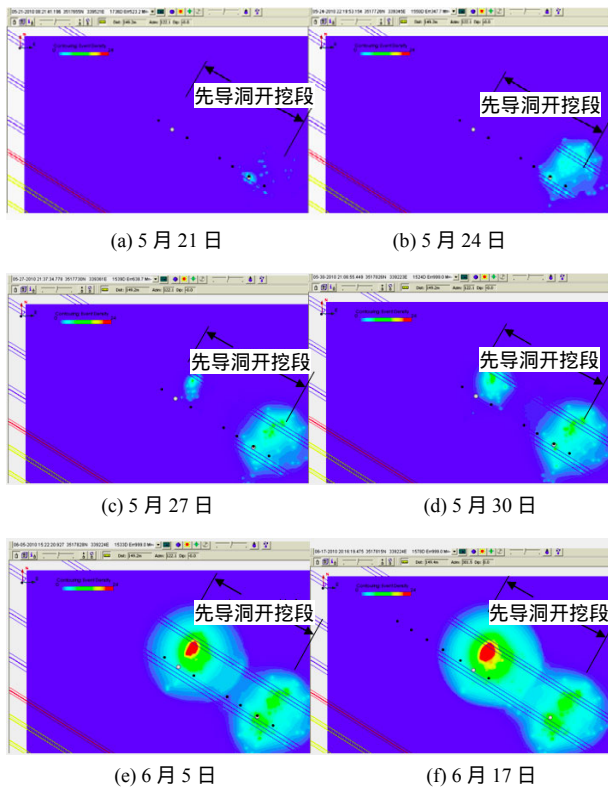


图8 超前开挖导洞微震事件密度云图(2010年)

Fig.8 Contour plots of microseismic events density in advanced excavation(in 2010)

模型中1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>引水隧洞轴间距为60 m, 主要计算分析隧洞开挖对两隧洞之间破坏模式的影响。模型中1<sup>#</sup>引水洞半导洞试验洞段的中段已开挖、2<sup>#</sup>洞已开挖完成, 1<sup>#</sup>洞半导洞待开挖长度为60 m。模型两侧边界水平位移被约束, 底部边界竖向位移被约束。模型施加的水平应力为15 MPa, 垂直应力为65 MPa(根据引水隧洞数值分析结果和实测应力水平进行预测)。假定模型岩性为硬脆弹性, 岩石材料物

理力学参数如表2<sup>[4]</sup>所示。

表2 数值模拟中采用的岩石物理力学参数<sup>[4]</sup>

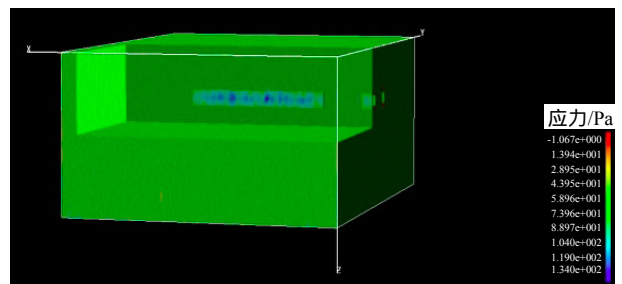
Table 2 Physico-mechanical parameters of rock mass used in numerical simulation<sup>[4]</sup>

| 均值度 | 弹性模量<br>均值 $E_0/\text{GPa}$ | 单轴抗压<br>强度/MPa | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 内摩擦<br>角/( $^\circ$ ) | 泊松<br>比 | 压拉<br>比 |
|-----|-----------------------------|----------------|--|-----------------------|---------|---------|
| 3   | 23                          | 80             | $2.76 \times 10^{-6}$                      | 53.9                  | 0.2     | 10      |

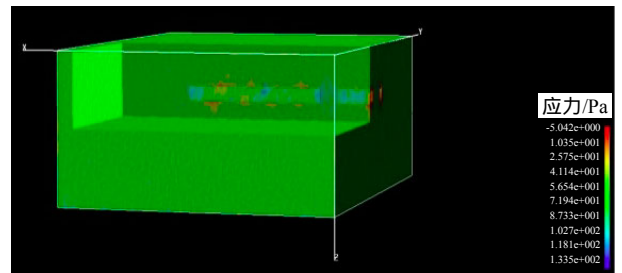
考虑到岩爆的发生是在高地应力条件下隧洞开挖过程中、由于围岩开挖卸荷引起的围岩应力重新分布导致围压爆发性破坏的一种现象, 数值计算过程每步开挖步长设为5 m, 应力荷载通过12步加载完成。开挖从2<sup>#</sup>隧洞x轴零点开始, 直至模型发生破坏。

### 4.2.2 数值模拟结果

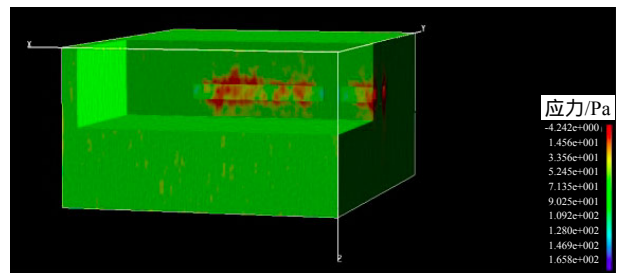
图9为隧洞开挖渐进破坏演化过程。从图9中可看出: 在TBM掘进前, 隧洞拱肩部位承受较大压应力, 图中显示为蓝色区域(见图9(a)); 随着往前开挖和加载步数的增加, 应力集中区域转移到隧洞拱顶和拱底, 由于开挖引起的应力扰动诱发拱顶应力局部集中(见图9(b)); 围岩宏观破坏主要沿隧道掘进方向产生, 由应力压致拉裂生成(见图9(c));



(a)



(b)



(c)

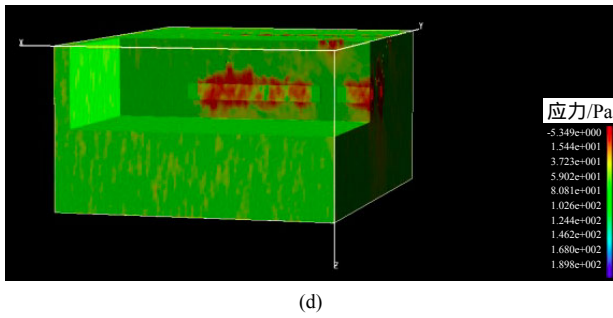


图 9 隧洞开挖渐进破坏演化过程

Fig.9 Progressive damage process in tunnel excavation

岩爆发生的初始位置位于隧洞拱顶和拱肩处，并逐渐向围岩深部发展，岩爆发生的位置是局部的、随机的、且不同时发生的<sup>[3]</sup>(见图 9(d))。这与现场 TBM 开挖过程的岩爆现象基本吻合。

对现场岩爆破坏现象的研究发现，不同尺度岩体的破裂都是局部的。实验室内小尺度岩样的破裂，无论是剪破裂还是拉破裂，都是由于均匀变形发展到局部化变形直至突然破裂的过程。引水隧洞岩爆的发生也集中在隧道的局部范围，如隧洞上游拱肩及拱顶位置。

### 4.3 TBM 与钻爆法开挖岩爆破坏特征

1#引水隧洞为白山组(T<sub>2b</sub>)，岩性主要为杂色厚层致密细晶大理岩和结晶灰岩，局部节理发育，整体围岩较好，岩体干燥，具有良好的高应力赋存条

件，同时处于埋深 2 000 m 地段，TBM 全断面开挖以中等 - 强烈岩爆为主。相邻的 2#引水隧洞在 11+060 ~ 006 处发生强烈岩爆，如图 10 所示。岩爆发生过程，伴随强烈的震感，右侧岩石发生弹射，伴有巨响，弹射距离为 10 ~ 15 m，岩坑深度为 2 ~ 3 m，呈块状 - 片帮状崩裂，底板出现 3 条裂缝，其中一条贯穿隧洞底板，宽为 15 ~ 25 cm，深度约 1.5 m，如图 11 所示。



图 10 隧洞开挖现场破坏图片

Fig.10 Failure picture of tunnel in excavation

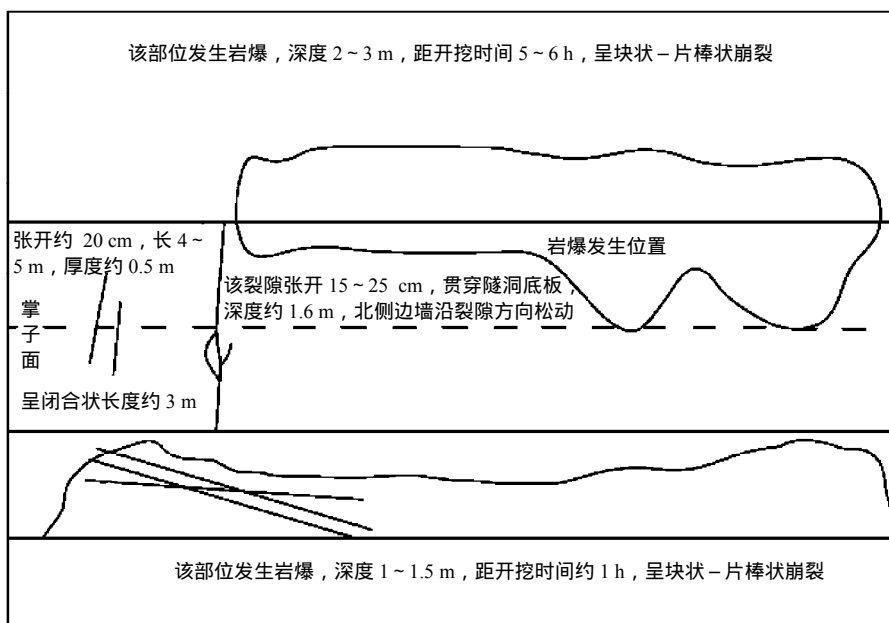


图 11 隧洞开挖现场破坏模式

Fig.11 Failure mode of tunnel in excavation

## 5 结 论

通过上述分析研究,可以得出以下结论:随着TBM施工速率的增加,围岩微震活动趋向活跃;随着TBM施工速度降低,围岩微震活动有明显降低的趋势。TBM检修期微震活动较为平缓,围岩处于平静期,施工至掌子面前方4~10m时,微震活动最为活跃。在TBM开挖过程中能量释放具有一定的随机性,与TBM开挖进尺无明显关系。

基于上述认识,对可能产生的岩爆灾害采用相应的治理手段和措施:

(1) 在微震活动较为频繁、围岩释放能量高、有强岩爆倾向的洞段,采取降低TBM施工速率、增加应力释放时间、降低应力调整速率的措施。

(2) 对于预估的发生极强岩爆的能量释放阈值及高埋深处,TBM采取一次全断面开挖面临较大的岩爆风险,可采取开展超前开挖先导洞的方式,降低岩爆的风险和危害。

(3) 随着TBM掘进通过半导洞,在超前开挖导洞端部易形成应力集中区,造成岩柱的压制破坏,施工过程中应加强防范。

(4) 实践证明,预先开挖先导洞的方式,使得隧洞围岩地应力重新分布和调整,可有效降低高岩爆风险地区对人员及设备的危害。

### 参考文献(References):

- [1] 吴世勇,周济芳. 锦屏二级水电站长引水隧洞高地应力下开敞式硬岩隧道掘进机安全快速掘进技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1 657-1 665.(WU Shiyong, ZHOU Jifang. Research on safe and fast tunneling technology by open-type hard rock tbn under high geostress of long diversion tunnels of jinping ii hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1 657-1 665.(in Chinese))
- [2] 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.(in Chinese))
- [3] 大连力软科技有限公司. 雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞、排水洞岩爆段微震监测技术服务总结报告[R]. 大连:大连力软科技有限
- 公司, 2011.(Dalian Mechanics Software Company, Ltd.. The summary report of microseismic monitoring technology service in diversion tunnels and drainage tunnels of Jinping hydropower station of Yalong River[R]. Dalian: Dalian Mechsoft Co., Ltd., 2012.(in Chinese))
- [4] 黄满斌. 深埋隧道岩爆机制与微震监测预警初探[硕士学位论文][D]. 大连:大连理工大学 2005.(HUANG Manbin. Study on mechanism and microseismic monitoring for rockburst in deep tunnels[M. S. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.(in Chinese))
- [5] TANG C A, WANG J M, ZHANG J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(3): 193-208.
- [6] 王文星,潘长良,冯涛. 确定岩石岩爆倾向性的新方法及其应用[J]. 有色金属设计, 2001, 28(4): 42-46.(WANG Wenxing, PAN Changliang, FENG Tao. The new methods for determining rock-burst proneness of rock[J]. Nonferrous Metals Design, 2001, 28(4): 42-46.(in Chinese))
- [7] 左宇军,李夕兵,唐春安,等. 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 809-1 820.(ZUO Yujun, LI Xibing, TANG Chun'an, et al. Experimental investigation on failure of rock subjected to 2D dynamic-static coupling loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 809-1 820.(in Chinese))
- [8] 陈景涛,冯夏庭. 高地应力条件下岩石的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 537-1 543.(CHEN Jingtao, FENG Xiating. True triaxial experimental study on rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 537-1 543.(in Chinese))
- [9] CHEON D S, JEON S, PARK C, et al. An experimental study on the brittle failure under true triaxial conditions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3): 448-449.
- [10] ALEXEEV A D, REVVA V N, ALYSHEV N A, et al. True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction[J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 58(2): 245-250.
- [11] 陈炳瑞,冯夏庭,曾雄辉,等. 深埋隧洞TBM掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275-283.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, ZENG Xionghui, et al. Real-time microseismic monitoring and its characteristic analysis during TBM tunneling in deep-buried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 275-283.(in Chinese))