

DOI: 10.11779/CJGE201605012

# 不同开挖方式下深埋隧洞微震特性与岩爆风险分析

赵周能<sup>1, 2</sup>, 冯夏庭<sup>2, 3</sup>, 肖亚勋<sup>3</sup>, 丰光亮<sup>3</sup>

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004;  
3. 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)

**摘 要:** 在分析钻爆法和 TBM 法开挖下围岩应力状态的基础上, 基于锦屏二级水电站深埋隧洞微震监测数据, 对比研究了钻爆法和 TBM 法开挖条件下深埋隧洞的微震特性及岩爆风险。结果表明: ①钻爆法开挖引起的围岩应力集中距洞壁较远, 形成的应力梯度较小; 而 TBM 法开挖引起的围岩应力集中临近洞壁, 形成的应力梯度较大。②钻爆法开挖时围岩应变能主要集中在爆破后数小时, 尤其是在 1 h 内释放, 而 TBM 法以连续的方式开挖卸载, 剧烈的能量释放伴随着施工全过程。③TBM 法开挖导致的事件震级及震源破裂尺度均比钻爆法开挖引起的大。④钻爆法开挖时, 围岩积聚的应变能大多以岩体破裂的形式耗散, 以岩爆形式显现的较少; 而 TBM 法开挖时, 围岩应变能常逐次释放, 导致事件频繁发生, 而且部分应变能以岩爆形式显现, 一般地, 同一小范围内常多次发生轻微岩爆, 高等级岩爆孕育过程中常伴有低等级岩爆, 如中等岩爆发生前伴有轻微岩爆, 强烈岩爆孕育过程中伴有轻微和(或)中等岩爆, 以此类推。综合上述研究结果认为, 在具有强岩爆风险的深埋隧洞中, 就防治岩爆而言, 钻爆法优于 TBM 法。

**关键词:** 深埋隧洞; 微震; 岩爆; 钻爆法; TBM

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0867-10

**作者简介:** 赵周能(1976-), 男, 讲师, 博士, 主要从事采矿及深部岩石力学方面的研究工作。E-mail: zhzhneng@163.com。

## Microseismic characteristics and rockburst risk of deep tunnel constructed by different excavation methods

ZHAO Zhou-neng<sup>1, 2</sup>, FENG Xia-ting<sup>2, 3</sup>, XIAO Ya-xun<sup>3</sup>, FENG Guang-liang<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Engineering and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;  
2. Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Based on the stress state analysis and microseismic monitoring data of the surrounding rock of Jinping II Hydropower Station, microseismic characteristics and rockburst risk of deep tunnel constructed by TBM-drilling and blasting method are compared and studied. The results show that: (1) The stress concentration of the surrounding rock caused by the drilling-blasting method is far more away from the tunnel wall than that by TBM, and the stress gradient is small, while the stress gradient caused by TBM excavation is large. (2) The strain energy of the surrounding rock mainly releases in several hours after blasting, especially in the first hour. Under the condition of TBM excavation, the stress of the surrounding rock unloads with the continuous mode and the energy violently releases in whole construction process. (3) The Microseismic magnitude and seismic source fracture scale caused by TBM excavation are larger than those by drilling-blasting method. (4) By the drilling-blasting method, the strain energy of the surrounding rock rarely dissipates in the form of rockburst but mostly in the form of rock mass cracking. By TBM excavation, the strain energy of the surrounding rock successively dissipates, resulting in frequent microseismic events. Part of strain energy can dissipate in the form of rockburst. Generally, mild rockbursts often occur in the same range. The inoculation process of high-grade rockburst accompanies with the occurrence of low-grade rockburst. For instance, the occurrence of medium rockburst accompanies with mild rockburst and strong rockburst accompanies with medium rockburst and mild rockburst, and so on. In conclusion, the drilling-blasting method is superior to TBM for rockburst prevention and control of deep tunnel with strong rockburst risk

**Key words:** deep tunnel; microseismicity; rockburst; drilling-blasting method; TBM

## 0 引 言

深部地下工程在建设过程中往往会遇到一些明显

**基金项目:** 国家自然科学基金国际合作重大项目(41320104005); 国家自然科学基金项目(11402218); 西南科技大学博士研究基金项目(14zx7106)

收稿日期: 2015-05-06

区别于浅部地下工程的地质灾害,其中之一便是岩爆。它是高地应力地区由于地下工程开挖卸荷引起的围岩弹性破裂的现象<sup>[1]</sup>,属于一种动力失稳地质灾害。岩爆不仅损坏工程设备、影响施工进度,而且还严重威胁施工人员的生命安全。例如,2009年11月28日,锦屏二级水电站施工排水洞发生一次极强岩爆,爆坑长约30 m,最深处达8 m,沿轴线约28 m长的支护系统全部被摧毁,正在作业的TBM设备被埋,严重影响工程进度,并造成7名工人遇难,1人受伤的惨剧。因此,通过有效手段对岩爆灾害进行监测,为岩爆防治提供可靠参考,对于确保深埋地下工程施工安全显得尤为重要。

研究表明,岩爆孕育发生过程往往伴有微震前兆信息<sup>[2]</sup>。所以,能实现远距离、动态、三维、实时监测的微震监测技术越来越多的应用于岩爆监测中。如国外的波兰煤矿、南非金矿、加拿大镍矿和澳大利亚铜矿等利用微震监测技术来管理矿山安全<sup>[3-6]</sup>。国内的红透山铜矿、冬瓜山铜矿、华丰煤矿、三河尖煤矿等矿山<sup>[7-11]</sup>利用微震监测技术对岩爆或冲击地压进行预测和预报。针对这些工程实际,国内外学者基于微震信息对岩爆进行了大量研究,并取得了丰富的成果<sup>[3-11]</sup>。但这些研究主要以矿山工程为背景,而涉及深埋长大隧洞工程的甚少。

近年来,基于微震监测技术的深埋隧洞岩爆研究主要是针对锦屏二级水电站深埋隧洞工程进行的。其中冯夏庭等<sup>[12]</sup>、陈炳瑞等<sup>[13]</sup>针对岩爆发生的时间将岩爆划分为即时型和时滞型两类岩爆,并对其孕育机制进行了研究。陈炳瑞等<sup>[14]</sup>通过分析深埋隧洞TBM掘进过程中开展微震监测存在的困难与不足,对现有微震监测技术进行了优化与改进,并取得了预期效果。明华军等<sup>[15]</sup>基于微震数据,利用矩张量分析了深埋隧洞岩爆机理。肖亚勋等<sup>[16]</sup>结合微震信息对比研究了TBM半导洞掘进与全断面掘进的岩爆风险,认为TBM半导洞掘进的岩爆风险远远低于TBM全断面掘进。于群等<sup>[17]</sup>针对锦屏二级水电站深埋引水洞特殊的地质条件和施工特征建立了微震监测系统,实现了工程开挖过程中围岩微震活动的实时监测与分析。这些研究成果对深埋隧洞岩爆防治具有重要意义,但是多从单一开挖方式的角度来分析隧洞岩爆。而基于现场微震监测数据,对比分析不同开挖方式(钻爆法和TBM法)下的微震特性,进而评估岩爆风险的研究未见报道。鉴于此,本文选取两段长度相等,埋深和工程地质条件相似而开挖方式不同的深埋隧洞为工程背景,深入探讨钻爆法和TBM法开挖条件下的微震特性,揭示两者的差异性,而后,在此基础上进行岩爆风险分析,以期对深埋隧洞岩爆防治及开挖方法论证和选

取提供参考依据。

## 1 钻爆及TBM开挖的围岩应力状态

岩体微震特性受诸多因素影响,开挖方法就是其中之一。目前,岩体开挖方法主要有钻爆法和TBM法,而又以钻爆法居多。由于这两种开挖方法的破岩机理不同,导致岩体微震特性存在明显差异。

### 1.1 TBM破岩机理

TBM凿进挖掘系统主要由装有盘形滚刀(简称盘刀)的刀盘、刀盘旋转驱动装置和刀盘纵向推进装置三部分组成,其破岩过程可分为盘刀侵入岩体和两盘刀之间岩石碎片形成两个阶段<sup>[18-19]</sup>。在液压系统的推力作用下,盘刀侵入岩石,在刀尖下和刀具侧面形成高应力压碎区和放射状裂纹。当盘刀在轴压力(推力)和滚动力(扭矩)共同作用下滚压掌子面时,盘刀连续扩大它的压碎区,产生裂纹并使之扩展。当其中一条或多条裂纹扩展到自由表面或邻近盘刀造成的裂纹时,形成岩石碎片,继而使岩石成片剥落。

由于TBM是在轴压力和滚动力作用下使盘刀在掌子面的岩面上连续滚压造成岩体破碎。因此,TBM法开挖时,开挖边界上的地应力是一个缓慢的准静态卸载过程<sup>[20]</sup>,变形能逐步释放,开挖后硬质完整岩体的岩壁上往往留有清晰可见的刀痕,这说明TBM盘刀破岩时对洞壁围岩损伤较小。

### 1.2 钻爆法破岩机理

钻爆法是利用炸药在岩体内爆炸时所释放出来的以冲击波和高温高压爆生气体的形式作用于岩体的爆炸能来破坏岩石,其破岩过程由冲击波及其产生的应力波的动作用和爆生气体的静压力作用共同完成。这一过程一般会在数毫秒内完成,属动态卸载开挖过程。

首先,炸药起爆后,高温高压的爆生气体急剧膨胀而产生数万兆帕的压力,其值远远超过岩石的动抗压强度,在此压力作用下,孔壁受到强烈压缩而形成空腔或产生粉碎性破坏(称为粉碎区)。随后,冲击波衰减为应力波。在应力波作用下,一方面,遍布于岩体内的原生裂纹被激活并扩展,导致岩体内裂纹密布,完整性变差,此效应称为动压的“震裂”作用<sup>[21]</sup>;另一方面,岩石质点在径向压应力作用下产生径向位移,并由此衍生切向拉应力,导致岩石产生拉伸破坏,形成径向裂隙。同时,爆生气体的膨胀推力使动压作用下产生的裂纹继续延伸和扩展。至此,由于应力波和爆生气体经过粉碎区及径向裂隙区后消耗了大量能量,径向压力将迅速下降,使储存于岩石中的一部分应变能释放出来,形成指向爆源的卸载波,从而引起径向拉应力,使岩石产生环向裂隙。在径向和环向裂

隙切割下, 最终形成破裂区, 实现岩石的破碎。破裂区以外, 应力波已衰减到不足以引起岩石宏观破裂, 但仍会对存在原生缺陷(如微裂纹、节理等)的岩体产生损伤, 导致围岩性能的劣化和承载力的下降。

### 1.3 两种开挖方法的围岩应力状态

由上述分析可知, 破岩机理明显不同的钻爆法和 TBM 法对围岩的影响显然是不一样的, 见图 1<sup>[22]</sup>, 可见, 用钻爆法开挖隧洞时, 围岩存在一个裂纹区, 即直接影响区(见图 1 中的第一影响区), 而用 TBM 法开挖隧洞时没有这一裂纹区。无论用哪种方法开挖, 对围岩都会产生一种地应力重分配而围岩仍完整稳定的区域, 即图 1 中的第二影响区, 但 TBM 法开挖的第二影响区比钻爆法为小。

可见, 由于钻爆法开挖产生的裂纹区(图 1 中的第二影响区)降低了洞壁承载力, 导致最大切向应力  $\sigma_{\theta B}$  (围岩应力集中) 转移至承载能力强、处于三向应力状态的距洞壁较远的岩体上, 造成的切向应力梯度较小。而 TBM 开挖时, 洞壁完整性好, 承载力高, 仅洞壁薄层在高应力作用下发生屈服, 使得最大切向应力  $\sigma_{\theta T}$  (围岩应力集中) 临近洞壁, 形成的切向应力梯度较大, 见图 2。

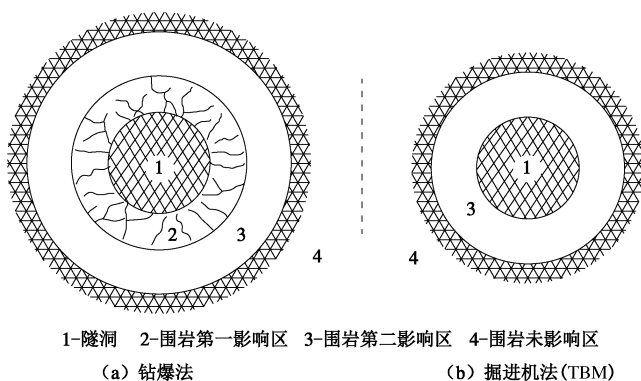


图 1 两种开挖方法对圆形隧洞围岩的影响<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Influence of two excavation methods on surrounding rock<sup>[22]</sup>

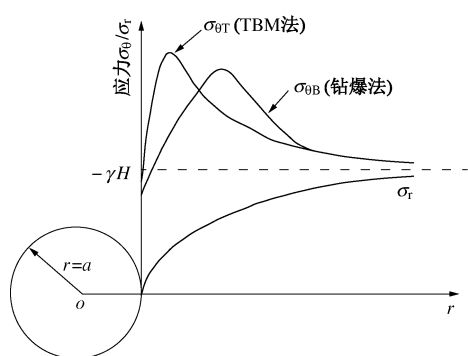


图 2 钻爆法和 TBM 法引起的围岩应力分布

Fig. 2 Stress distribution of surrounding rock caused by drilling-blasting method and TBM excavation

## 2 钻爆法及 TBM 法开挖的微震特性

### 2.1 工程背景简介

对比分析洞段平面布置及工程地质剖面如图 3 所示, 其中钻爆法开挖段(引(3)5+765—6+200 (3-3-W) 和引(4)5+405—6+085 (3-4-W)) 长 1115 m, 埋深介于 1852~2132 m; TBM 法开挖段(引(3)10+050—11+165) 长 1115 m, 埋深介于 1864~2230 m; 隧洞断面布置参见文献[23]。总体来看, 钻爆法和 TBM 法开挖段的埋深近似相等, 由此引起的误差小, 可忽略不计。这两种开挖方法的洞段岩性均为  $T_{2b}$  灰白色中粗晶厚层状大理岩, 属 II—III 类围岩, 地质构造相似, 岩体较完整, 地下水不发育。采用南非 ISS 微震监测系统对隧洞开挖过程的岩爆灾害进行连续实时监测, 监测系统组成参见文献[14]。

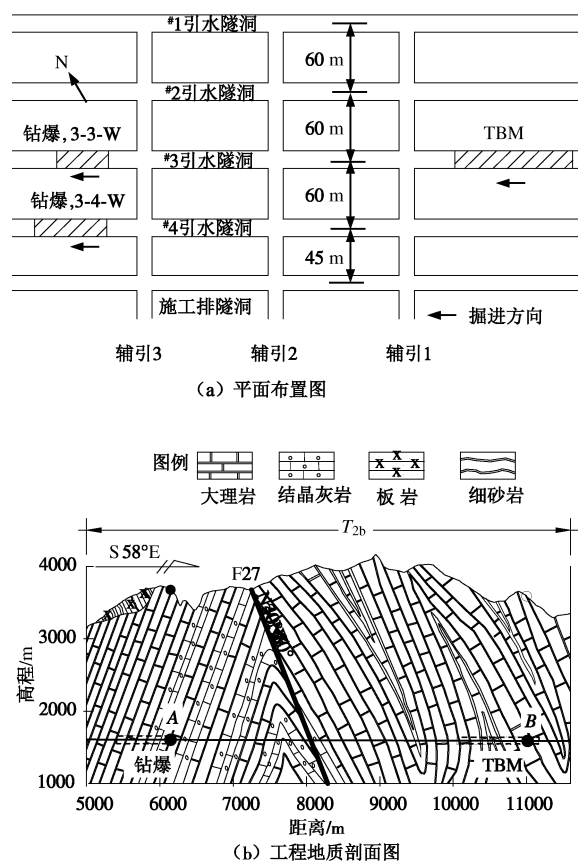


图 3 对比分析洞段平面布置及工程地质剖面图

Fig. 3 Plane layout and engineering geologic profile

### 2.2 微震响应时间

在 24 h 内, 8:00—14:00 为 TBM 检修时间, 14:00—22:00 及 22:00—次日 8:00 分别为 2 个班次的掘进时间。在单个班次中, TBM 连续作业时长为 6~10 h, 占 70.05%, 见图 4。钻爆法在 24 h 内一般作业 1, 2 个班次, 平均班进尺约 4 m。

一般地, 开挖卸荷特性差异会导致微震响应时间不同。TBM 以连续的方式开挖卸载, 属缓慢的准静态卸载过程, 开挖全过程伴有许多事件, 占 77.85%; 因检修或其它原因而停止作业后产生的事件, 占 22.15%。显然, 事件主要产生于 TBM 开挖过程中。钻爆法以一定间隔时间(爆破循环时间)快速瞬态卸载的方式向前推进, 属动态卸载过程, 事件出现于卸载之后。

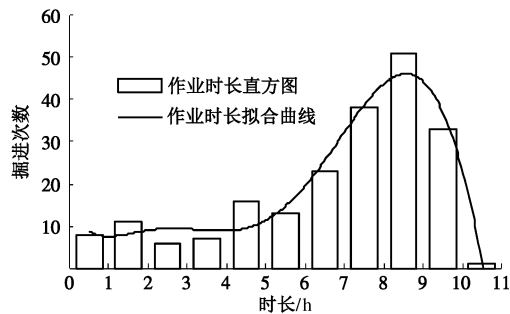


图 4 TBM 连续作业时长 (2010-05-28—09-19)

Fig. 4 Continuous operation duration of TBM (2010-05-28—09-19)

图 5 (a) 为不受附近掌子面爆破影响的 3-3-W 及 3-4-W 洞段爆破开挖卸荷后 8 h 内引起的事件, 占不受附近爆破影响的事件数的 98.53%, 图 5 (b) 为 TBM 停止开挖后 8 h 内发生的事件, 占停止开挖后总事件数的 84.62%。由图 5 可见, 深埋隧洞停止开挖卸载后, 钻爆法和 TBM 法开挖导致的事件与时间均呈幂函数关系, 表明不同卸载方式下, 事件响应时间分布规律具有很好的相似性, 遵循相同的规律。图中显示, 无论钻爆法还是 TBM 法, 隧洞开挖卸载后 1 h 内产生的事件为最多, 分别占各自范围的 64.58%, 44.06%, 之后则迅速减少。这说明停止开挖后短时间内, 岩体破裂活动最为剧烈, 围岩应变能释放最多, 而后趋于缓和。另外还可看出, 在停止开挖卸载后 1 h 内, 钻爆法引起的事件数明显较 TBM 法多。这主要是由于 TBM 在开挖过程中大部分能量已被释放, 而钻爆法属瞬间卸载, 应变能主要集中在爆破后数小时, 尤其是 1 h 内释放所致。

可见, 与 TBM 法相比较, 钻爆法开挖时围岩应变能主要集中在爆破后数小时, 尤其是 1 h 内释放, 施工人员可以避开此时段而进行作业; 而 TBM 法以连续的方式开挖卸载, 剧烈的能量释放伴随着施工全过程。

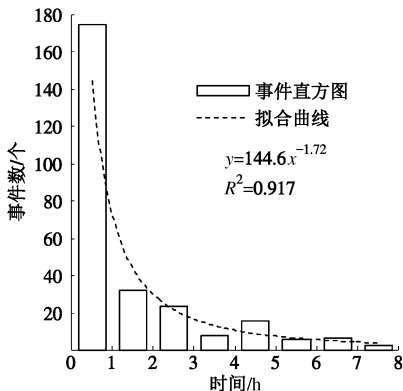
2.3 事件震级及震源破裂尺度

(1) 事件震级

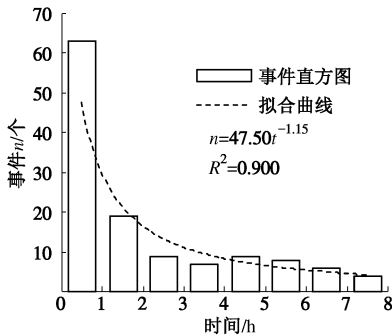
ISS 微震监测系统采用当地震级  $M_L$  来描述微震事件的量级, 并按下式进行计算:

$$M_L = \alpha \lg E + \beta \lg M + \gamma \quad (1)$$

式中,  $E$  为事件微震能 (J),  $M$  为地震矩 ( $N \cdot m$ ),  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  为常数, 本文分别取 0.3441, 0.5161, -6.572。



(a) 3-3-W 及 3-4-W 钻爆法开挖引起的事件



(b) TBM 停止开挖后发生的事件

图 5 微震响应时间

Fig. 5 Response time of microseisms

钻爆法开挖段记录的事件震级大部分集中在 -3~0 之间, 占 80.72%, 并在 -2.5~-2.0 区间出现峰值, 平均震级约 -1.68, 见图 6。TBM 法开挖段记录的事件震级主要介于 -2~0.5, 占 80.31%, 峰值位于 -1.5~-1.0 区间, 平均震级约 -0.95。对比分析发现, 总体来看, TBM 法开挖段产生的事件震级明显高于钻爆法开挖段。

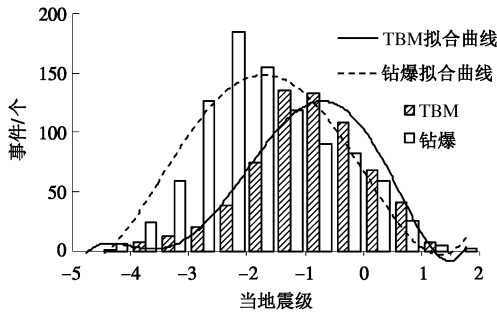


图 6 事件震级分布

Fig. 6 Magnitude distribution of microseisms

(2) 震源破裂尺度

微震震源破裂尺度可以通过视体积<sup>[24]</sup>来描述, 其

计算公式如下:

$$V_a = \frac{\mu P^2}{E}, \quad (2)$$

式中,  $V_a$  为视体积 ( $\text{m}^3$ ),  $\mu$  是岩石的刚度 (剪切模量),  $P$  为微震体变势 ( $\text{m}^3$ ),  $E$  为微震能量 (J)。由式 (2) 可以看出, 视体积依赖于微震体变势和微震能量。由于其为标量, 可以很容易以累积或等值线图的形式处理, 是一个较为稳定的参数。对于一个给定的事件, 常采用视体积测量震源非弹性变形的岩体体积。为计算方便, 假设震源非弹性变形区为球形, 并用视体积半径来衡量震源非弹性变形区的大小<sup>[24]</sup>。由图 7 可见, 钻爆法开挖段的事件视体积半径主要集中分布于 2~6 m, 占 61.45%, 平均半径约 5.85 m。而 TBM 法开挖段的事件视体积半径以 4~9 m 居多, 占 61.54%, 平均半径约 7.15 m。显然, TBM 法开挖引起的岩体破裂尺度较钻爆法开挖引起的大。

综上可以得出, 从整体来看, TBM 法开挖导致的事件震级及震源破裂尺度均比钻爆法开挖引起的大, 由第 2 节可知, TBM 开挖对岩体损伤小, 围岩完整性高, 承载力强, 可以储存较多能量, 使得岩体破裂时释放的能量较多, 导致事件震级和震源破裂尺度较大。而钻爆法开挖对围岩损伤大, 洞壁近处存在裂纹区, 致使围岩承载力下降, 进而导致围岩极限储能下降, 聚集的能量有限, 所以岩体破裂时释放能量相对较少, 诱发事件的震级及破裂尺度相对较小。

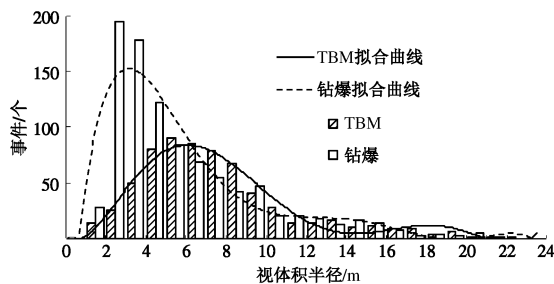


图 7 事件视体积分布

Fig. 7 Apparent volume distribution of microseisms

## 2.4 微震能释放特性

硬质脆性岩体在开裂或摩擦滑动过程中以弹性波形式向外辐射的应变能称为微震能, 它是岩体由弹性变形向非弹性变形转化的结果。根据断裂力学的观点, 岩体开裂或滑动速度越慢, 辐射的能量就越少, 一般地, 准静力开裂或滑动过程将不会产生辐射能。MENDECKI<sup>[1]</sup>研究认为, 在时域内, P 波和 S 波辐射的微震能  $E_{p,s}$  与经由远场速度脉冲的平方值修正后在时段  $t_{p,s}$  上的积分成正比:

$$E_{p,s} = \frac{9}{5} \pi \rho v_{p,s} R^2 \int_0^{t_s} \dot{\mu}_{\text{corr}}^2(t) dt. \quad (3)$$

式中  $\rho$  为岩体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $v_{p,s}$  为 P 波和 S 波波速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $R$  为测点与震源的距离 ( $\text{m}$ );  $\dot{\mu}_{\text{corr}}(t)$  为 P 波或 S 波速度脉冲 ( $\text{m}/\text{s}$ )。

为了便于分析问题并考虑到每次开挖循环进尺, 选取#3 引水洞引(3)6+094—6+145 及引(3)11+015—11+068 洞段 (分别对应于图 1 (a)、(b)) 发生的微震事件作为分析数据。其中钻爆法开挖段引(3)6+094—6+145 于 2011 年 4 月 10—23 日完成开挖, 洞长 51 m; TBM 法开挖段引(3)11+015—11+068 于 2010 年 6 月 8—14 日完成开挖, 洞长 53 m。两个洞段的埋深分别为 2004 m 和 2058 m, 岩性均为 T<sub>2b</sub> 灰白色中粗晶厚层状大理岩, 地下水不发育, 围岩较完整, 地质构造相似。由于这两个洞段的埋深、洞长以及工程地质条件基本相似, 选取的分析数据能够较好地揭示两种不同开挖方法引起的微震能释放特性的差异性。

### (1) 微震事件分布

图 8 示出了选定洞段开挖期间微震事件平面投影分布, 图中球体颜色代表微震事件当地震级大小, 色彩越鲜艳, 震级越大; 球体大小代表事件释放的能量大小, 尺寸越大, 释放能量越多。钻爆法和 TBM 法开挖段在开挖期间分别产生 96, 93 个事件。事件分布集中, 大小不一, 颜色各异。

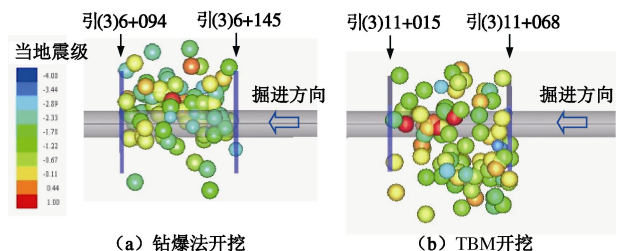


图 8 事件平面投影图

Fig. 8 Plane projection of microseisms

### (2) 单个事件微震能分布

由图 9 可见, 钻爆法开挖时微震能对数主要以 1~5 为主, 占 87.5%, 其中尤以 2, 3 为最多, 占 25.0%; 而 TBM 法开挖时微震能对数主要集中于 2~6, 占 84.95%, 其中尤以 4, 5 居多, 占 28.13%; 与钻爆法相比, TBM 法的微震能对数分布曲线峰值向横坐标正方向前移两个单位。显然, TBM 法开挖诱发的单个事件微震能总体上比钻爆法的高。

### (3) 微震能释放的时间间隔

一般地, 事件依次发生的时间间隔长短反映了岩体破裂活动的剧烈程度和岩体应变能释放的快慢。由图 10 可以看出, 无论钻爆法开挖还是 TBM 法开挖, 事件先后发生的时间间隔主要分布在 12 h 以内, 分别占各自范围的 80.21% 和 81.72%, 其中又以 1 h 为最多, 分别占各自范围的 32.29% 和 50.54%, 之后则迅速减

少。由此可见，这两种开挖方法诱发的事件依次发生的时间间隔变化趋势具有很高的相似性，但在时间间隔小于 1 h 范围内，TBM 法开挖诱发的事件较钻爆法多，表明 TBM 开挖时事件持续发生的概率比钻爆法高。

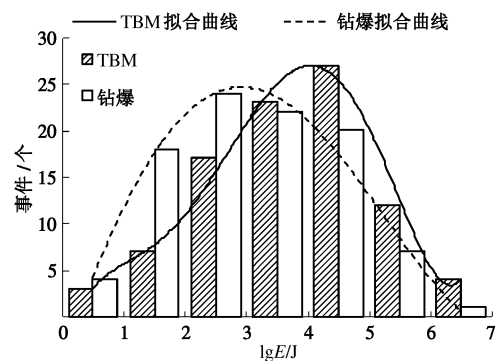


图 9 微震能大小分布

Fig. 9 Distribution of microseismic energy

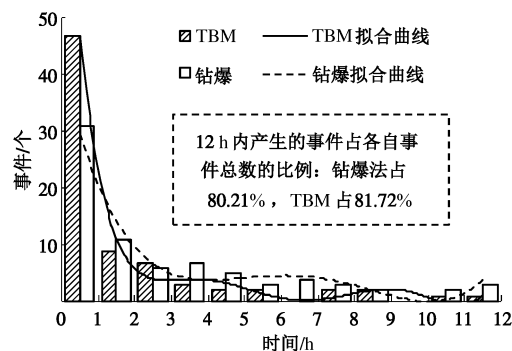


图 10 事件依次发生的时间间隔

Fig. 10 Time interval of successive microseisms

(4) 围岩应变能显现形式

TBM 法开挖时围岩产生较多微震能较大的事件，其中部分事件为岩爆，见图 12 (a)。根据现场施工记录，TBM 在开挖过程中共发生 16 次轻微、5 次中等及 3 次强烈岩爆，其中轻微岩爆释放能量的对数一般为 3~5.5，中等岩爆为 4.5~6，强烈岩爆为 6 以上。需要指出的是，现场岩爆等级划分以爆坑深度<sup>[25]</sup>为依据，所以轻微和中等岩爆所释放的能量范围出现部分重叠。

对比分析图 12 (a) 及图 8 (b) 可以发现，TBM 开挖过程中，某一范围在一定时间内（如 6 月 10—14 日）连续出现数个大事件，其中部分大事件为岩爆；一般地，同一小范围内常多次发生轻微岩爆，高等级岩爆孕育过程中常伴有低等级岩爆，如中等岩爆发生前伴有轻微岩爆，强烈岩爆孕育过程中伴有轻微和（或）中等岩爆，以此类推。表明 TBM 法开挖时围岩应变能往往是逐次释放的，这与第 1 节的理论分析

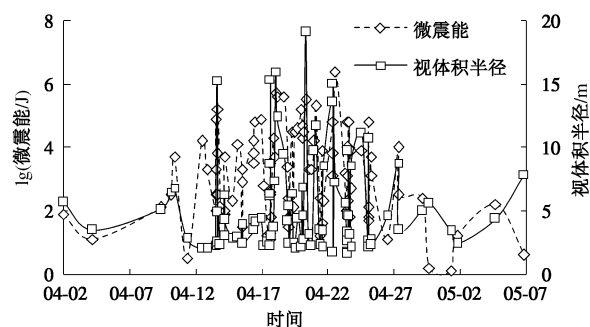
相吻合。2009 年 11 月 28 日锦屏二级水电站排水洞 TBM 开挖段发生的一次极强岩爆（见表 1）也证实了上述结论的正确性。由表 1 可见，11.28 极强岩爆孕育过程中，在岩爆范围内发生 1 次中等岩爆、3 次强烈岩爆，另外还伴有大量轻微岩爆，最后于 2009 年 11 月 28 日 0:50 在 SK 9+283—9+313 发生极强岩爆，爆坑波及深度达 5~8 m。

表 1 施工排水洞 TBM 开挖段 11.28 极强岩爆

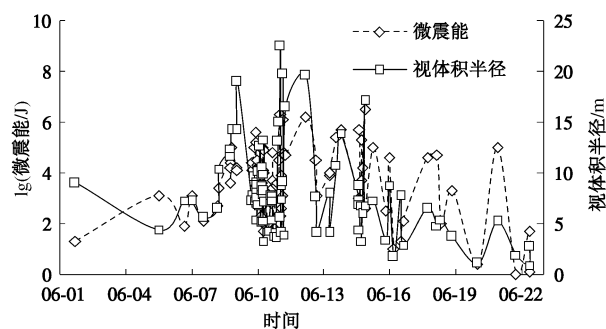
Table 1 Extremely strong rockburst happening in construction and drainage hole

时间	柱号	岩爆等级
2009-10-09	SK9+301—9+322	强烈
2009-11-06	SK9+292	中等
2009-11-07	SK9+291—9+296	强烈
2009-11-15	SK9+287—9+292	强烈
2009-11-28	SK 9+283—9+313	极强

注：表中仅列出极强岩爆孕育过程中发生的中等和强烈岩爆，大量轻微岩爆未列出



(a) 钻爆法开挖(2011年)



(b) TBM开挖(2010年)

图 11 事件微震能与视体积的时序分布

Fig. 11 Sequential distribution of microseismic energy and apparent volume of events

由图 12 (b) 可见，钻爆法开挖过程中亦出现较大事件，其中仅有两个大事件为岩爆（中等和强烈岩爆各一次），其余事件为围岩深部裂纹扩展或摩擦滑移，其应变能在岩体破裂过程中被耗散。

在深埋隧洞中，钻爆法和 TBM 法开挖时出现上述差异的主要原因是，钻爆法开挖时，围岩损伤大，

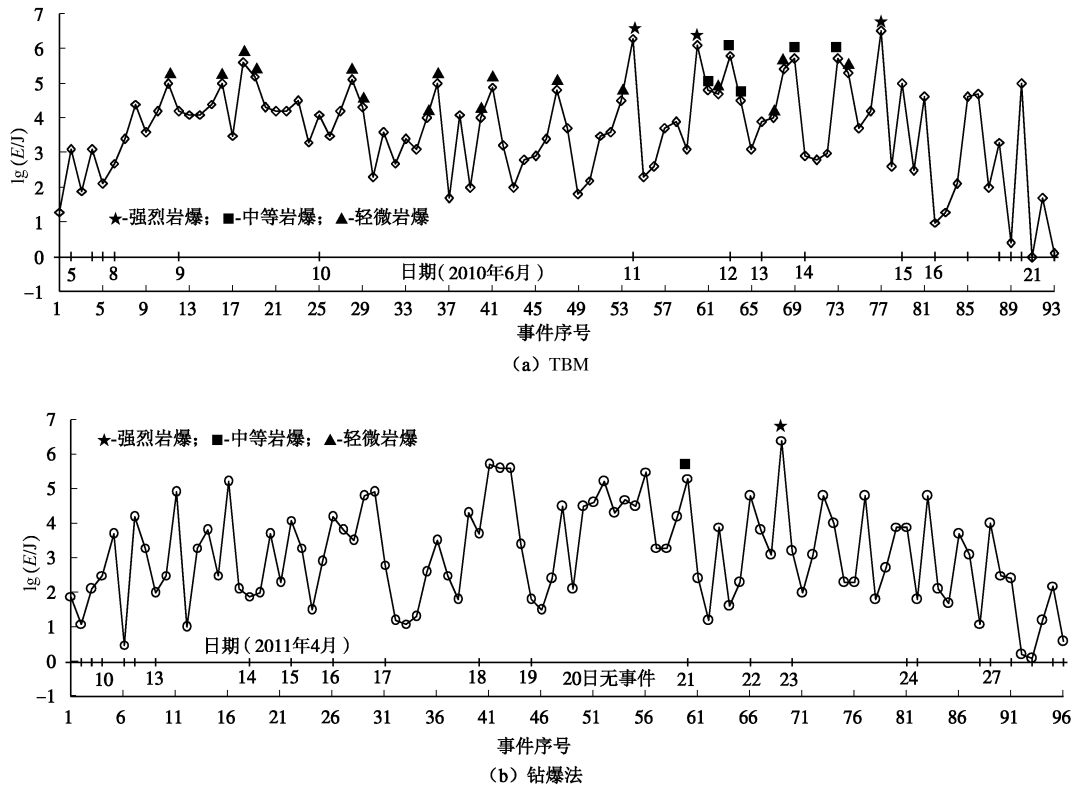


图 12 事件及岩爆分布

Fig. 12 Distribution of microseisms and rockburst

最大切向应力向围岩深部转移（见图 2），形成的应力梯度相对较小，岩体破裂大部分发生在围岩深部。而 TBM 法开挖时，围岩损伤小，洞壁完整性好，承载力大，使得最大切向应力位于洞壁近处，造成较大的应力梯度，导致开挖后洞壁附近持续出现岩体破裂活动，并伴随大量事件；随着岩体破裂增多，最大切向应力逐渐向围岩深部和破裂区附近完整岩体转移。在这一过程中，如果积聚的应变能过大，将导致中等、强烈，甚至极强岩爆的发生，11.28 极强岩爆就属于此类情况。

值得指出的是，同一事件的不同微震特性参数之间存在着一定的关联性，见图 12。可以看出，从事件时序来看，无论钻爆法还是 TBM 开挖，微震活跃时段，出现大破裂尺度及高微震能事件的概率增大；部分事件的微震能与破裂尺度呈现正相关关系，但从总体上来看，事件微震能与破裂尺度之间不存在严格的正相关关系，其主要原因在于事件微震能除与破裂尺度有关外，还与岩体开裂或滑动的速度密切相关。

### 3 不同开挖方式的岩爆风险对比分析

通过上述钻爆法与 TBM 法开挖下的微震特性对比分析可以看出：

(1) 钻爆法开挖条件下，在每次开挖爆破之后的数小时（如 4 h）之内，掌子面附近围岩具有很强的微

震活动性，围岩的应力和能量调整最为剧烈，岩爆的风险程度最高；之后，围岩微震活动性呈减弱趋势，岩爆风险也随之降低，见图 5。TBM 开挖条件下，开挖过程及停机 1 h 以内岩体微破裂活动频繁，围岩微震活动十分活跃，剧烈的应力和能量调整伴随着施工全过程，预示着高岩爆风险。不同开挖方式下岩爆孕育过程微震信息随时间演化规律详见文献[26]。由此使得钻爆法和 TBM 开挖发生岩爆的高峰期具有明显差异，前者高峰期为爆破后 4 h 以内，而后者为整个作业过程。从防治岩爆角度来看，前者可以通过有意识地避让岩爆的高发时段而进行作业，或者采用机械作业；而后者则不然，难以有效避开岩爆高发期而进行作业。

(2) TBM 开挖引起的微震事件震级及震源破裂尺度比钻爆法大，岩体破裂时释放的能量更多，围岩应力和能量调整更剧烈，所呈现的岩爆风险程度更高，见图 6，7。

(3) 从微震能释放特性来看，TBM 开挖时，岩体微破裂活动更频繁，能量释放速率更大，见图 9，10。同一区域会持续发生多次轻微岩爆，高等级岩爆孕育过程中常伴有低等级岩爆，如中等岩爆发生前伴有轻微岩爆，强烈岩爆孕育过程中伴有轻微和（或）中等岩爆，以此类推，而钻爆法所呈现的此特征不明显，见图 12。

综上,在具有强烈岩爆倾向性的深埋地下工程施工过程中,TBM 开挖面临的岩爆危害程度比钻爆法高。因此对于具有强岩爆风险的深埋隧洞工程,就防治岩爆而言,钻爆法开挖优于 TBM 开挖,其它工程实践<sup>[27-28]</sup>也很好证明了这一结论。

南盘江天生桥二级水电站引水隧洞的岩爆统计结果<sup>[27]</sup>显示,TBM 开挖与钻爆法开挖相比较,就岩爆洞段占统计洞段的比率来看,前者为后者的 2.3 倍,就每公里发生岩爆的次数而言,前者为后者 5.5 倍,显然,TBM 开挖所发生岩爆风险程度和范围均比钻爆法大,这与上述结论相吻合。

锦屏 II 级水电站施工排水洞(TBM)与辅助洞 A,B(钻爆法)在里程相对应洞段的岩爆情况也很好印证了上述结论。锦屏 II 级水电站排水洞在桩号 SK9+283—12+102 处的埋深为 1760~2360 m,交通辅助洞 A,B 与此相对应的埋深为 1719~2299 m,两者埋深相差仅 2.39%~2.65%,可近似于相等。排水洞为圆形断面,采用 TBM 开挖,洞径为 7.2 m;辅助洞 A,B 采用钻爆法开挖,断面为城门洞形,尺寸为 7.0 m×(7.6,8.0 m)(宽×高)。三者断面尺寸相近,且在水平面上的轴线距离为 35 m,在垂直面上的距离不足 100 m。它们所穿越的地层为具有强烈岩爆倾向性的白山组大理岩。表 2 为排水洞与辅助洞 A,B 在上述洞段(长 2819 m)开挖过程中的岩爆统计结果。

表 2 排水洞与辅助洞岩爆统计对比表<sup>[28]</sup>

Table 2 Comparison of rockbursts of drainage and access tunnels<sup>[27]</sup>

洞段名称	岩爆洞段累计长度/m	占总长比例/%	轻微岩爆/%	中等岩爆/%	强烈岩爆/%	极强岩爆/%
排水洞(TBM 开挖)	874.74	31.03	16.85	6.29	3.43	4.46
辅助洞 A(钻爆开挖)	428.00	15.18	12.98	2.20	无	无
辅助洞 B(钻爆开挖)	324.00	11.29	9.40	2.09	无	无

由表 2 可见,对于洞长相同,地质条件和断面尺寸相似的洞段,采用 TBM 开挖(排水洞)时,岩爆段累计长度为 874.74 m,占总长的 31.03%,其中轻微、中等、强烈和极强岩爆段所占比例分别为 16.85%,6.29%,3.43%,4.46%。而采用钻爆法开挖(辅助洞 A,B)时,所发生的岩爆均为轻微及中等岩爆,并无强烈和极强岩爆发生;A 洞的岩爆段累计长度为 428 m,占总长的 15.18%,其中轻微、中等岩爆段所占比例分别为 12.98%,2.20%;B 洞的岩爆段累计长度为 324 m,占总长的 11.29%,其中轻微、中等岩爆段所占比例分别为 9.40%,2.09%。对比分析可以明显看出,对于有强烈岩爆倾向性的深埋隧洞,在地质条件和隧

洞断面尺寸均相似条件下,无论发生岩爆的累计总长度还是岩爆等级,钻爆法开挖均比 TBM 开挖小,这说明,对于具有强烈岩爆倾向性的深埋隧洞,钻爆法开挖更有利于隧洞安全施工,这与前述结论相吻合。

4 结 论

(1) 钻爆法开挖引起的围岩应力集中距洞壁较远,形成的应力梯度较小;而 TBM 开挖引起的围岩应力集中临近洞壁,形成的应力梯度较大。

(2) 钻爆法开挖时围岩应变能主要集中在爆破后数小时,尤其是在 1 h 内释放,施工人员可以避开此时段而进行安全作业;而 TBM 法以连续的方式开挖卸荷,剧烈的能量释放伴随着施工全过程。

(3) TBM 法开挖导致的事件震级及震源破裂尺度均较钻爆法引起的大。

(4) 钻爆法开挖时,围岩积聚的应变能大多以岩体破裂的形式耗散掉,以岩爆形式显现的较少。而 TBM 法开挖时,围岩应变能逐次释放,导致事件频繁发生,而且部分应变能以岩爆形式显现;一般地,同一小范围内常多次发生轻微岩爆,高等级岩爆孕育过程中常伴有低等级岩爆,如中等岩爆发生前伴有轻微岩爆,强烈岩爆孕育过程中伴有轻微和(或)中等岩爆,以此类推。

综合上述研究结果认为,在具有强岩爆风险的深埋隧洞(道)中,就防治岩爆而言,钻爆法优于 TBM 法。

致 谢:感谢中国科学院武汉岩土力学研究所锦屏 II 水电站微震监测项目组的陈炳瑞博士等在获取微震数据及收集岩爆实例等方面所做的贡献。

参考文献:

[1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945 - 1956. (QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945 - 1956. (in Chinese))

[2] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. 1st ed. London: Chapman and Hall, 1997.

[3] DURRHEIM R J. The deep mine and future mine research programmes-knowledge and technology for deep gold mining in South Africa[C]// POTVIN Y, HADJIGEORGIOU J, STACEY D, eds. Challenges in Deep and High Stress Mining. Nedlands: Australian Center for Geomechanics, 2007: 130 -

- 140.
- [4] POTVIN Y, HUDYMA M R. Seismic monitoring in highly mechanized hardrock mines in Canada and Australia[C]// VAN ASWEGEN G, DURRHEIM R J, ORTLEPP W D, eds. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Johannesburg: The South Institute of Mining and Metallurgy, 2001: 267 - 280.
- [5] SIKORA M, WROBEL L. Application of rule induction algorithms for analysis of data collected by seismic hazard monitoring systems in coal mines[J]. Archives of Mining Sciences, 2010, **55**(1): 91 - 114.
- [6] VALLEJOS J A, MCKINNON S D. Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, **48**(4): 616 - 625.
- [7] 赵兴东, 李元辉, 刘建坡, 等. 红透山矿深部开采岩爆潜在区微震活动性研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, **30**(9): 1330 - 1333. (ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hu, LIU Jian-po, et al. Study on microseismic activity in potential rockburst zone during deep excavation in Hongtoushan Mine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, **30**(9): 1330 - 1333. (in Chinese))
- [8] 唐礼忠, 杨承祥, 潘长良. 大规模深井开采微震监测系统网布置优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(10): 2036 - 2042. (TANG Li-zhong, YANG Cheng-xiang, PAN Chang-liang. Optimization of microseismic monitoring network for large-scale deep well mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(10): 2036 - 2042. (in Chinese))
- [9] 唐绍辉, 潘懿, 黄英华, 等. 深井矿山地压灾害微震监测技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(2): 3597 - 3603. (TANG Shao-hui, PAN Yi, HUANG Ying-hua, et al. Application research of micro-seismic monitoring technology to geostress hazards in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(2): 3597 - 3603. (in Chinese))
- [10] 姜福兴, 杨淑华, 成云海, 等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(5): 1511 - 1516. (JIANG Fu-xing, YANG Shu-hua, CHENG Yun-hai, et al. A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, **49**(5): 1511 - 1516. (in Chinese))
- [11] 曹安业, 窦林名, 秦玉红, 等. 高应力区微震监测信号特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, **24**(2): 146 - 149. (CAO An-ye, DOU Lin-ming, QIN Yu-hong, et al. Characteristic of microseismic monitoring signal in high stressed zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, **24**(2): 146 - 149. (in Chinese))
- [12] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(3): 433 - 444. (FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts at deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 433 - 444. (in Chinese))
- [13] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(3): 561 - 569. (CHEN Bing-rui, FENG Xia-ting, MING Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts at deep tunnels: time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(3): 561 - 569. (in Chinese))
- [14] 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 Bing-rui, FENG Xia-ting, ZENG Xion-ghui, 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))
- [15] 明华军, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 基于矩张量的深埋隧洞岩爆机理分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(1): 163 - 181. (MING Hua-jun, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, et al. Rockburst mechanism analysis for deep-buried tunnel based on moment tensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(1): 163 - 181. (in Chinese))
- [16] 肖亚勋, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞极强岩爆段隧道掘进机半导洞掘进岩爆风险研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(10): 3111 - 3118. (XIAO Ya-xun, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, et al. Rockburst risk of tunnel boring machine part-pilot excavation in very strong rockburst section of deep hard tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(10): 3111 - 3118. (in Chinese))
- [17] 于群, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2315 - 2322. (YU Qun, TANG Chun-An, LI Lian-chong, et al. Nucleation process of rockbursts based on microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2014, **36**(12): 2315 – 2322. (in Chinese))
- [18] 李 亮, 傅鹤林. TBM 破岩机制及刀圈改形技术研究[J]. 铁道学报, 2000, **22**(增刊): 8 – 10. (LI Liang, FU He-li. Rock breaking mechanism by TBM and modification to pan knife ring[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, **22**(S0): 8 – 10. (in Chinese))
- [19] 刘志杰, 腾弘飞, 史彦军, 等. TBM 刀盘设计若干关键技术[J]. 中国机械工程, 2008, **19**(16): 1980 – 1985. (LIU Zhi-jie, TENG Hong-fei, SHI Yan-jun, et al. Cutter head design key issues of a full face rock tunnel boring machine(TBM)[J]. China Machine Engineering, 2008, **19**(16): 1980 – 1985. (in Chinese))
- [20] BARTON N. TBM tunneling in jointed and faulted rock [M]. Rotterdam: Balkema, 2000: 61 – 64.
- [21] 潘井澜. 爆破破岩机理的探讨[J]. 爆破, 1994(4): 1 – 6. (PAN Jing-lan. The discussion of rock mechanism by blasting[J]. Blasting, 1994(4): 1 – 6. (in Chinese))
- [22] 薛备芳. 掘进机开挖法与钻爆法对围岩稳定性影响的比较[J]. 水利电力施工机械, 1995, **17**(4): 16 – 17. (XUE Bei-fang. Comparison of the influence on the tunnel surrounding rock between TBM and blasting excavation[J]. Construction Machinery for Hydraulic Engineering and Power Station, 1995, **17**(4): 16 – 17. (in Chinese))
- [23] 赵周能, 冯夏庭, 丰光亮, 等. 深埋隧洞微震活动区与岩爆的相关性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 491 – 497. (ZHAO Zhou-neng, FENG Xia-ting, FENG Gang-liang, et al. Study on relativity between rockburst and microseismic activity zone in deep-buried tunnel[J], Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 491 – 497. (in Chinese))
- [24] MENDECKI A J. Real time quantitative seismicity in mines[C]//YOUNG R P ed. Proceedings of Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1993: 287 – 296.
- [25] GB 50287—2006 水力发电工程地质勘查规范[S]. 2006. (GB 50287 — 2006 Code for hydropower engineering geological investigation[S]. 2006. (in Chinese))
- [26] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 等. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 118 – 141. (FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui, ZHANG Chuan-qing, et al. Mechanism, warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013: 118 – 141. (in Chinese))
- [27] 欧阳孝忠. 深埋隧洞岩爆特征及规律成因浅析[J]. 贵州水力发电, 1996, **27**(4): 16 – 21. (OUYANG Xiao-zhong. Preliminary analysis on cause of regular pattern formation of rock burst in tunnels buried deeply[J]. Guizhou Water Power, 1996, **27**(4): 16 – 21. (in Chinese))
- [28] 侯 靖, 张春生, 单治钢. 锦屏Ⅱ级水电站深埋引水隧洞岩爆特征及防治措施[J]. 地下空间与工程学报. 2011, **7**(6): 1251 – 1257. (HOU Jing, ZHANG Chun-sheng, SHAN Zhi-gang. Rockburst characteristics and the control measures in the deep diversion tunnel of Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(6): 1251 – 1257. (in Chinese))