

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.004

于洋. 岩体隧洞岩爆过程微震特征及其扩展机制[J]. 水利水运工程学报, 2017(1): 26-31. (YU Yang. Characteristics and evolution mechanism of micro-seismic events of rockbursts in deep rock tunnels[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(1): 26-31. (in Chinese))

岩体隧洞岩爆过程微震特征及其扩展机制

于洋

(华东交通大学, 土木与建筑学院 岩土工程研究所, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于深部岩体隧洞不同开挖方式下的岩爆现场情况及微震监测数据, 确立了最大能量微震事件岩爆发生时间、等级的判定标准。在此基础上, 对深埋隧洞即时型岩爆的孕育及发生过程进行了研究, 结果表明: 即时型岩爆孕育过程中围岩岩体处于破坏加速集聚并不断扩展的过程, 此过程中微震事件数量不断增加、能量参数不断增大, 当岩爆发生时达到最大值; TBM 开挖过程可近似为准静态卸荷, 受到开挖方式的影响其裂隙扩展范围相对较小, 围岩承载力也较强; 而钻爆法开挖是初始应力的动态卸荷, 爆破冲击荷载造成的裂隙扩展范围较大, 同时其围岩储能能力相对较差。

关键词: 深埋隧洞; 微震事件; 即时型岩爆; TBM; 钻爆法

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)01-0026-06

深部岩体隧洞开挖过程中, 围岩应力的分布特征与开挖方式之间具有密切的关系。Abuov 等^[1]的研究成果表明, 钻爆法开挖会在掌子面附近的围岩中激发应力波, 同时造成围岩岩体的损伤, 在炸药爆破荷载的作用下其初始应力属于高速的动态卸载过程; Cai^[2]经研究发现, 当深部岩体隧洞爆破开挖时, 瞬时(爆破作用)开挖会导致隧洞围岩边界上不平衡力的大量分布, 进而导致部分围岩应变能转化为岩体动能, 需要一段时间的应力调整才能使其耗散; 卢文波等^[3]指出, 中、高地应力条件下爆破开挖所产生应力波是导致围岩开挖松动现象产生的主要原因; 严鹏等^[4]运用 Laplace 变换的计算方法, 推导出了基于弹性本构模型的全断面爆破开挖方式下隧洞围岩应力调整的解析解, 其研究成果表明, 对于 TBM(准静态卸载过程)和钻爆开挖过程(动态卸载过程), 隧洞围岩经历两种截然不同的应力调整路径。综上所述, 钻爆法与 TBM 两种不同开挖方式下隧洞围岩应力的调整方式截然不同, 因此其微震活动性也应该表现出不同的特征。

从已有文献来看, 在针对岩爆孕育过程方面的研究中, 未考虑到开挖方式的影响。深埋隧洞施工过程主要有钻爆法及 TBM 两种开挖方式, 不同开挖方式下在微震监测方法、掌子面的应力路径及弹性应变能释放方式等方面都具有显著区别^[5-6]。本文运用微震监测的研究手段, 基于锦屏二级水电站不同开挖方式下的岩爆典型案例, 对其孕育及发生过程中围岩裂隙的演化规律及扩展机制进行了对比分析, 其研究成果可为深埋隧洞不同开挖方式下岩爆风险的控制提供依据。

1 工程概述

锦屏二级水电站(如图 1 所示)位于中国四川省凉山彝族自治州境内的雅砻大河弯处的干流上。利用雅砻江大河弯处 288 m 的天然落差, 截弯取直凿洞引水发电。该水电站的装机容量为 24 800 MW, 单机容量为 600 MW, 平均发电量 242.3 亿 kW·h, 确保出力 1 972 MW, 年利用时间超过 5 048 h, 它是雅砻江上水

收稿日期: 2016-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509092)

作者简介: 于洋(1982—), 男, 黑龙江安达人, 讲师, 博士, 主要从事深部岩体力学方面的研究。

E-mail: lukeryuyang@163.com

头最高、装机容量最大的引水发电站,属于雅砻江梯级开挖中的骨干水电站。工程枢纽主要由首部抵闸、引水系统以及尾部地下厂房3部分组成。水电站深埋隧道围岩以Ⅱ,Ⅲ类大理岩为主,岩石坚硬完整致密,少有结构面发育,单轴抗压强度为55~114 MPa,弹性模量为25~40 GPa,变形模量为8~16 GPa。施工过程中发生规模不等的岩爆数百次,岩爆发生区占隧洞总长的18.68%,累计长度达8 km以上,对施工进度及工程安全造成了巨大影响。本研究根据岩爆发生时所发出的声响级别、爆坑断面尺寸及其孕育过程中的破坏特征,将岩爆划分为轻微、中等、强烈3个级别,具体划分标准详见文献[7]。依据上述标准纵观整个引水隧洞的开挖过程,轻微~中等岩爆区域累计长度达6 km,强烈的达到2 km以上。运用南非ISS监测系统,对锦屏二级水电站深埋隧洞钻爆法及TBM两种不同开挖方式下的整个开挖过程展开连续性微震实时监测研究。

2 岩爆孕育过程的微震特征分析

2.1 微震事件的评价指标

岩石破裂过程中会以弹性波的形式向外辐射能量,理论上每一个破裂产生时都会向外界辐射弹性波,即为一个微震事件。微震监测过程中获得的微震事件主要有以下两方面评价参数:

(1) 微震辐射能 E 岩体开裂是弹性变形向非弹性变形转化的过程,在开裂的同时会向外界辐射能量,经常用以描述地震发生前岩体的变化特征,微震能量的表达式为:

$$E_{p,s} = \frac{8}{5} \pi \rho v_p R^2 \int_0^{t_s} u_{\text{corr}}^2(t) dt + \frac{8}{5} \pi \rho v_s R^2 \int_0^{t_s} u_{\text{corr}}^2(t) dt \quad (1)$$

式中: $E_{p,s}$ ($E_p + E_s$) 是微震事件能量; ρ 为岩体的密度; v_p, v_s 分别为P波及S波的波速; R 为震源距; t_s 为计算时间; $u_{\text{corr}}^2(t)$ 为微震波形速度脉冲在时间上的函数。

(2) 局部震级 M 在地震领域中普遍采用震级来描述地震事件的量级,然而震级不是一个严格定义上的量值,有许多描述的震级尺度。采用局部震级针对岩爆震级进行描述^[8],它综合考虑了地震矩和微震释放能的共同作用。微震事件的局部震级 M 计算公式为:

$$M = 0.344 \lg E + 0.516 \lg M_s - 6.572 \quad (2)$$

式中: E 为微震事件辐射能量值; M_s 为微震事件地震矩,其他各项常数由系统根据 $E-M_s$ 曲线经拟合计算后给出。

2.2 钻爆法开挖方式下微震特征分析

由于深埋隧洞开挖过程中会产生大量的微震事件,而一些相对很小的微震事件对工程造成的危害可以忽略,因此对所有的微震事件进行分析大大增加了不必要的工作量。破裂产生得越剧烈所对应微震事件释放的能量越大,同时对工程的危害也就越大^[9-12],及时把握最大能量事件的演化规律对工程安全性具有重要的指导意义。

以爆坑中线为中心前后30 m的范围被认为是岩爆的有效影响范围^[13-14],同样基于此范围展开微震活动性研究(文中定义为“岩爆活动区”)。2011年1月5日凌晨1:00左右,当钻爆法开挖方式下的1-P-E工作面开挖至SK8+682时,现场扒渣过程中在SK8+678南侧边墙至拱肩处发生了中等岩爆;随后的1月11日15:30,当1-P-E开挖到SK8+711位置时,于SK8+709南侧边墙至拱顶处发生强烈岩爆,岩爆最大爆坑深度

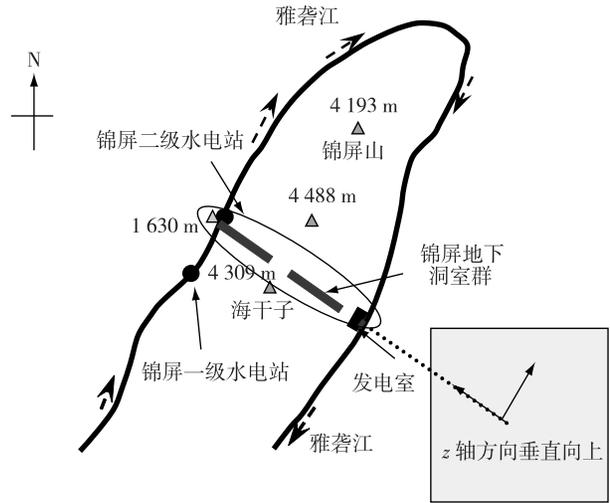


图1 锦屏二级水电站位置

Fig. 1 Location of diversion tunnels of Jinping II hydropower station

为 1.6 m。此次岩爆造成了现场设备的损坏,但所幸并无人员伤亡。此次即时型中等及强烈岩爆孕育及发生过程中最大能量微震事件及其所对应的震级演化特征见图 2。从图 2 可见,钻爆法开挖方式下:①中等岩爆发生过程中,最大能量微震事件的能量为 $10^5 \sim 10^6$ J,震级为 $0 \sim 0.6$;②强烈岩爆发生时,微震事件最大能量大于 10^6 J,震级则大于 0.6;③对于一个完整的岩爆孕育过程,最大能量微震事件向高能量、大震级方向移动,当岩爆发生时所对应的能量、震级均达到最大值。

2011 年 1 月 25 日至 2 月 1 日期间,上述 1-P-E 工作面施工过程中无岩爆发生,图 3 为 2011 年 1 月 25 日至 2 月 1 日最大能量微震事件的能量、震级演化特征。从图 3 可见:无岩爆发生时,每日最大微震事件能量均小于 10^5 J;而最大震级也均小于 -0.6,甚至达到了 -1 以下。这表明无岩爆发生时围岩较为稳定,仅有较小尺度的岩石破裂发生。

钻爆法开挖方式下多次岩爆孕育及发生过程中的微震事件率随时间变化如图 4。从图 4 可见:钻爆法开挖即时性岩爆孕育过程中岩爆活动区的微震事件率在岩爆发生的前 4 日至前 2 日的微震事件率相对平稳并且均小于 20%,而在岩爆发生前一日微震事件率迅速上升到 25%左右,岩爆发生当天微震事件率达到最大值均约为 30%。由于微震事件是围岩破裂的真实反映,因此即时型岩爆孕育过程中的围岩岩体主要经历裂隙的稳定发展阶段、加速集聚、岩爆的发生 3 个阶段;同时说明钻爆法开挖下岩爆的发生主要是由于裂隙的加速积累并不断贯通所导致。

2.3 TBM 开挖方式下微震特征分析

TBM 掘进过程中围岩的微震活动性与掘进机的开挖速率具有明显相关性,掘进速率减慢,围岩的微震活动明显降低;掘进速率加快,微震活动性明显增加;一般情况下,TBM 检修期间是微震活动的平静期,相对最活跃期在检修后掘进的 4~6 h^[8]。

2010 年 6 月 11 日凌晨 00:30,TBM 开挖至桩号 K11+034 开挖段时,于 K11+040~046 段南侧边墙至拱肩处发生强烈岩爆,此次岩爆最大爆坑深度为 1.2 m,岩爆发生位置在 TBM 开挖卸荷效应影响范围内,因此定义为典型的即时型强烈岩爆。

此 TBM 诱发强烈岩爆孕育及发生过程中的最大能量微震事件所对应的能量、震级演化特征如图 5 所示。对于深埋隧洞 TBM 开挖洞段有如下认识:①无岩爆发生时,每日最大能量微震事件所释放能量值均小于 10^5 J,震级也小于 0;②有轻微及中等岩爆发生时,最大微震事件所释放能量在 $10^5 \sim 10^6$ J,震级也基本保持在 $0 \sim 0.6$;③强烈岩爆发生时,最大微震事件所释放能量达到 10^6 J,震级大于 0.6。

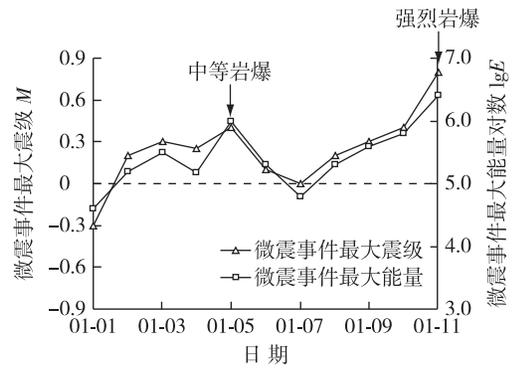


图 2 钻爆法开挖诱发即时型岩爆最大微震事件演化特征
Fig. 2 Evolution of maximum micro-seismic events with immediate rockbursts

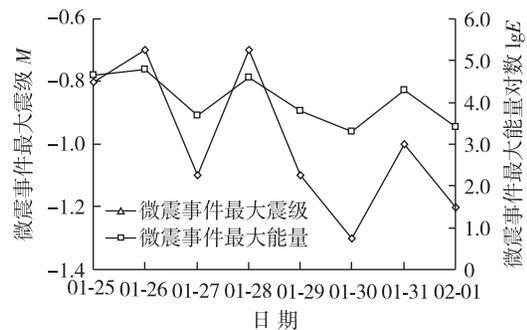


图 3 钻爆法开挖无岩爆的最大微震事件演化特征
Fig. 3 Evolution of maximum micro-seismic events without rockburst

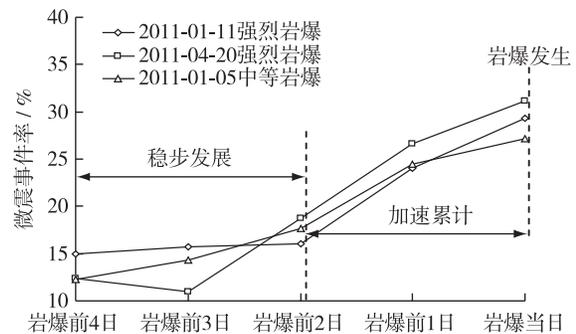


图 4 岩爆孕育及发生过程中微震事件变化规律
Fig. 4 Change law of micro-seismic events during rockbursts

两种不同开挖方式下,多次不同等级岩爆孕育过程中最大能量微震事件均表现出上述演化特征,在此不一一举例。无论对于 TBM 或钻爆法洞段,其即时型岩爆孕育的表征形式可能不同,但破坏机制应相同^[9-10]。针对最大微震事件的研究,弱化了对表征形式的描述。TBM 与钻爆法洞段内岩爆孕育过程的最大微震事件的演化特征基本一致。因此,微震信号的最大能量微震事件的演化特征可作为预警岩爆发生时间及等级的依据。

3 不同开挖方式下微震信息分布范围及扩展机制研究

2011 年 4 月 20 日,钻爆法开挖方式下掌子面开挖到 K6+103~112 位置时,掌子面靠近南侧边墙位置发生强烈岩爆,此次岩爆爆坑最大深度为 1.1 m,爆坑呈宽 9.6 m,高 8 m 左右的类似圆形断面,表面起伏不定。此次即时型岩爆孕育及发生过程中此范围内的微震事件能量对数 $\lg E$ 的最大值为 6.56(岩爆事件所对应的微震能量),最小值为 0.53,其微震事件空间分布见图 6。从图 6 可见,钻爆法开挖方式下即时型岩爆孕育及发生过程中微震事件主要集中在岩爆发生区,并且沿洞径方向主要分布在爆坑中线为中心前、后方 25 m(约为 2 倍洞径)范围内。

图 7 为 TBM 开挖方式下 2010 年 6 月 11 日即时型岩爆孕育及发生过程中微震事件空间分布情况。图 8 为钻爆法以及 TBM 开挖方式下,岩爆活动区累计微震能量值的变化过程。

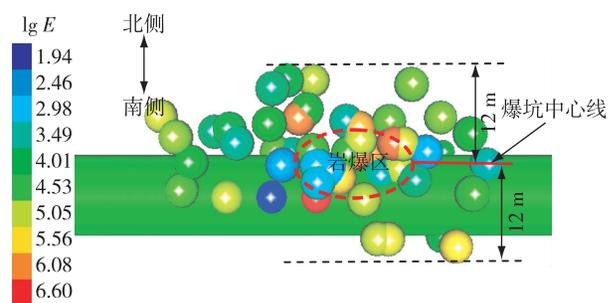


图 7 2010 年 6 月 11 日岩爆微震事件定位
Fig. 7 Micro-seismic events in rockburst area

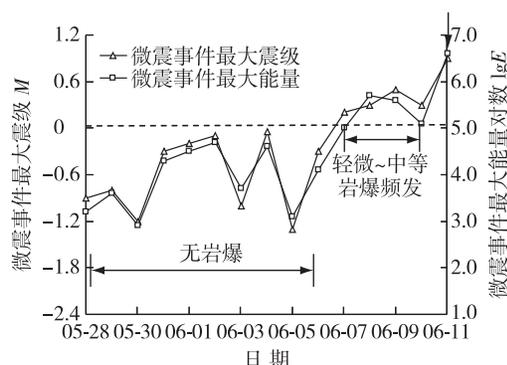


图 5 TBM 开挖即时型岩爆最大微震事件特征演化
Fig. 5 Evolution of maximum micro-seismic events during immediate rockbursts

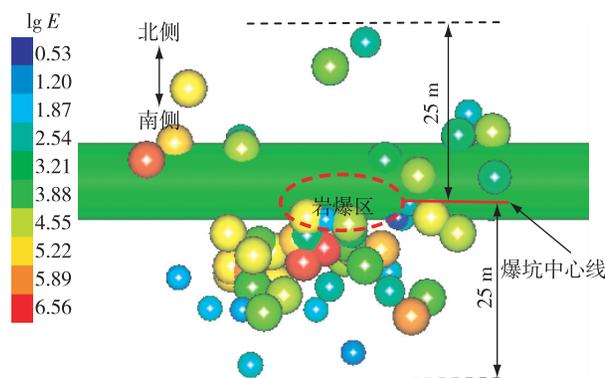


图 6 2011 年 4 月 20 日岩爆微震事件定位
Fig. 6 Micro-seismic events in rockburst area

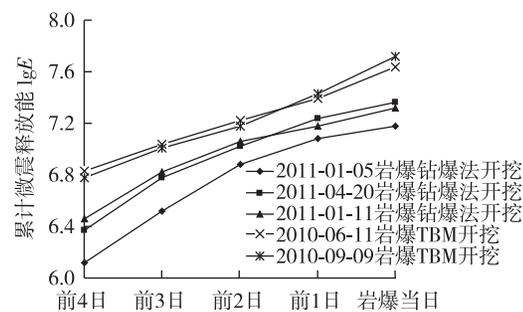


图 8 不同开挖方式下岩爆活动区微震能量变化
Fig. 8 Changes of micro-seismic energy in rockburst activity zone

从图 7 可见,TBM 开挖微震事件沿洞径方向具有与钻爆法不同的空间范围,主要分布在岩爆区中心前、后方 12 m(约为 1 倍洞径)的范围内,明显小于钻爆法开挖。分析其原因在于:钻爆法开挖过程可近似看作为初始应力动态卸荷,由于爆破荷载的冲击作用,其造成的围岩破损范围较大;而相对于钻爆法开挖方式来说,TBM 开挖过程可近似为准静态卸荷,造成的围岩破损范围相对较小,因此其微震活动范围小于钻爆法开挖。

从图 8 可见,钻爆法开挖过程中所释放的微震能小于 TBM 开挖;同时,不论对于钻爆法还是 TBM 来说,岩爆活动区每日累计微震能量均具有在岩爆孕育过程中不断增大,并且在岩爆当天达到最大值的特征。

从断裂力学的角度出发,围岩裂隙的尺寸越小、扩展速度越慢,在裂隙产生过程中所产生的微震能量值也就越小,静态裂隙的扩展过程不辐射微震能量^[11]。综上所述,TBM与钻爆法开挖方式下岩爆过程中每日的累计微震能量释放值均不断增加,说明上述两种不同开挖方式下即时型岩爆孕育过程中,岩爆区围岩岩体均处于破坏加速积累、不断扩展并相互贯通的过程;上述过程中,当岩体破坏发展并相互贯通到一定程度时,伴随着围岩弹性势能的突然释放就会导致岩爆发生。同时,钻爆法开挖方式下的累计微震能量释放值小于TBM开挖,究其原因是因为爆破荷载的冲击作用在解除隧道开挖过程中的应力集中现象的同时,破坏了围岩岩体的完整性,相对降低了围岩储能能力。

4 结 语

针对深埋硬岩隧洞钻爆法及TBM两种不同开挖方式下的岩爆情况及现场微震监测数据进行了综合分析,并对即时型岩爆的孕育及发生过程进行了研究分析,得出以下结论:

(1)不论是钻爆法还是TBM开挖,每日最大能量微震事件均小于 10^5 J,震级也小于0时,无岩爆风险;每日最大能量微震事件在 $10^5 \sim 10^6$ J,震级也基本保持在0~0.6时,具有轻微及中等岩爆发生风险;每日最大能量微震事件达到 10^6 J,震级大于0.6,则具有强烈岩爆发生风险。

(2)两种不同开挖方式下即时型岩爆的孕育过程中,岩爆区围岩岩体处于破坏加速集聚并不断扩展的过程;此过程中微震能量参数不断增大,同时每日最大能量微震事件向高能量、大震级方向移动,当岩爆发生时,最大能量微震事件所对应的能量、震级均达到最大值。

(3)TBM开挖过程可近似为准静态卸荷,造成的围岩裂隙扩展范围相对较小,同时围岩也具有较高的承载力;而钻爆法开挖过程为初始应力的动态卸荷,爆破冲击荷载可造成大范围的裂隙扩展,同时降低了围岩储能能力。

参 考 文 献:

- [1] ABUOV M G, AITALIEV S M, ERMEKOV T M, et al. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the roof of mining excavations[J]. Journal of Mining Science, 1989, 24(6): 581-590.
- [2] CAI M. Influence of stress path on tunnel excavation response-numerical tool selection and modeling strategy[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 618-628.
- [3] 卢文波, 金李, 陈明, 等. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 4653-4657. (LU Wenbo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on the mechanism of jointed rock mass loosening induced by dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Suppl1): 4653-4657. (in Chinese))
- [4] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 深部岩体开挖方式对损伤区影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1097-1106. (YAN Peng, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. In-situ test research on influence of excavation method on induced damage zone in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1097-1106. (in Chinese))
- [5] ZHANG C, FENG X T, ZHOU H, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(3): 275-288.
- [6] ZHANG C Q, FENG X T, ZHOU H. A top pilot tunnel preconditioning method for the prevention of extremely intense rockbursts in deep tunnels excavated by TBMs[J]. Rock Mech and Rock Eng, 2012, 45: 289-309.
- [7] CHEN B R, FENG X T, LI Q P, et al. Rock burst intensity classification based on the radiated energy with damage intensity at Jinping II hydropower station, China[J]. Rock Mech and Rock Eng, 2013, 48(1): 289-303.
- [8] AKI K. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress strain drop from the G-wave spectrum[J]. Bulletin of Earthquake Research Institute, 1966, 44(12): 73-88.
- [9] 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-duried tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2):

275-283. (in Chinese))

- [10] 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. (FENG Xiating, CHEN Bingrui, ZHANG Chuanqing, et al. Mechanism warning and dynamic control of rockburst development processes[M]. Beijing: Sciences Press, 2013. (in Chinese))
- [11] 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 Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433-444. (in Chinese))
- [12] 于洋, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞不同开挖方式下即时型岩爆微震信息特征及能量分形研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2622-2628. (YU Yang, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al. Analysis of energy fractal and microseismic information characteristics about immediate rockbursts in deep tunnels with different excavation methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2622-2628. (in Chinese))
- [13] FENG Xiating, YU Yang, FENG Guangliang, et al. Fractal behaviour of the microseismic energy associated with immediate rockbursts in deep, hard rock tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 98-107.
- [14] FENG Guangliang, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al. A microseismic method for dynamic warning of rockburst development processes in tunnels[J]. Rock Mech and Rock Engineering, 2015, 48(5): 2061-2076.

Characteristics and evolution mechanism of micro-seismic events of rockbursts in deep rock tunnels

YU Yang

(Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The micro-seismic monitoring data obtained from the rockbursts in the deep rock tunnels excavated by the drill-and-blast and tunnel boring machine (TBM) methods are analysed, and the analysis results concerning the daily maximum micro-seismic energy can be used as a basis for estimating the time and intensity of the rockbursts. The processes of immediate rockbursts with different excavation methods are compared, and the distribution characteristics of the micro-seismic informations are analyzed. The analysis results show that the damage of the rock mass is gathering and expanding in the processes of the immediate rockbursts, and that the number and energy release of the micro-seismic events increase continuously before the rockburst happens and totally increase to a critical value when the rockburst happens: the TBM excavation involves a quasi-static unloading whose damage is to the local area, the bearing capacity and the storage capacity of the energy of the surrounding rock are stronger; and an initial in-situ stress of the tunnel face during TBM excavation consists of the dynamic unloading stress fields whose damage range is more wide, and the bearing capacity and the storage capacity of the energy of the surrounding rock are relatively poor. The analysis results not only help to understand the law of each rockburst, but also provide a reasonable scientific basis for prediction and prevention of the rockbursts in the deep rock tunnels under different excavation conditions.

Key words: deep tunnels; micro-seismic events; immediate rockbursts; tunnel boring machine (TBM); drill-and-blast method