

# 分幅开挖方式下高应力硬岩地下洞室的 微震特性及稳定性分析

赵金帅<sup>1,2</sup>, 冯夏庭<sup>1,3</sup>, 江权<sup>1</sup>, 陈炳瑞<sup>1</sup>, 肖亚勋<sup>1</sup>,  
胡磊<sup>3</sup>, 丰光亮<sup>1</sup>, 李鹏翔<sup>3</sup>

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 高应力硬岩大型地下洞室开挖卸荷导致围岩片帮、塌方事故频发, 严重威胁现场施工人员及设备的安全。从降低围岩局部破坏风险的角度考虑, 白鹤滩水电站右岸主变室第IV层采用分幅开挖方案。通过构建微震监测系统, 研究分幅开挖下岩体的微震特性及稳定性, 监测结果表明: 上游半幅开挖诱发的微震事件、能量大于下游半幅诱发的, 且上、下游半幅开挖均表现出了掌子面贯通前微震事件、能量增大的特性, 这主要受两相向掘进掌子面前方支承压力叠加的影响; 上游半幅开挖诱发微震事件频发且出现了从集现象, 下游半幅开挖诱发的微震事件较少且事件空间分布离散, 规律性不明显; 采用 Schmidt 数、事件活动率与累积视体积、能量指数与累积视体积评价研究区域的稳定性, 结果显示, 较之于应变硬化阶段, 处于应变软化阶段的岩体发生不稳定变形破坏的风险较大。研究结果可为白鹤滩水电站地下洞室施工方案的优化提供重要参考, 同时也可为其他类似工程的施工提供借鉴。

**关键词:** 高应力; 分幅开挖; 局部变形; 稳定性评价

中图分类号: U 453.2

文献识别码: A

文章编号: 1000-7598(2018)03-1020-08

## Analysis of microseismic characteristics and stability of underground caverns in hard rock with high stress using framing excavation method

ZHAO Jin-shuai<sup>1,2</sup>, FENG Xia-ting<sup>1,3</sup>, JIANG Quan<sup>1</sup>, CHEN Bing-rui<sup>1</sup>, XIAO Ya-xun<sup>1</sup>,  
HU Lei<sup>3</sup>, FENG Guang-liang<sup>1</sup>, LI Peng-xiang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

**Abstract:** Excavations of large-scale hard-rock underground caverns with high stress often result in rib spalling and collapse of surrounding rock, threatening the safety of on-site builders and equipment. From the perspective of reducing the risk of local failure of surrounding rock, framing excavation method was adopted in the fourth floor of the right transformer chamber of the Baihetan hydropower station. In order to study the microseismic (MS) characteristics and stability, MS monitoring was carried out in the right transformer chamber. The results show that: By the excavation of upstream rock, the number of MS events and energy release were greater than the downstream rock. In the process of working face advancing, the number of MS events and the energy increased, which was in accordance with the overlay abutment pressure. When the upstream rock was excavated, the excavation unloading induced seismic events and the cluster phenomenon. In contrast, the excavation of downstream rock only induced few MS events. The Schmidt number, the activity rate, the cumulative volume, and the energy index were combined to evaluate the stability of the study

收稿日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金国际合作重大项目 (No.41320104005); 国家自然科学基金重点项目 (No.11232024)。

This work was supported by the Projects of International Cooperation and Exchanges NSFC (41320104005) and the Key Program of National Natural Science Foundation of China (11232024).

第一作者简介: 赵金帅, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事深部地下工程围岩稳定性监测、分析及岩土力学方面的研究工作。E-mail: jszhaomechanics@126.com

area. The study found that compared with the strain hardening phase, the rock mass in the stage of strain softening has a greater risk of unstable deformation and failure. The results can provide valuable reference to the optimization of construction scheme of the Baihetan hydropower station. At the same time, the results can also provide reference to other similar projects of construction.

**Keywords:** high stress; framing excavation; local deformation; stability evaluation

## 1 引言

随着不可再生能源的逐渐枯竭及西南地区水资源的高效循环利用,诸多深部地下工程相继施工建设,而深部地下工程所处的“三高一扰动”恶劣环境,使岩体的变形破坏有别于浅埋工程,常规监测方式可以有效获得围岩表面或浅部的应力及变形,但具有一定的空间局限性,无法有效衡量岩体内部的微破裂或潜在破裂的深度及程度。微震(MS)监测技术通过探测岩体受力变形释放的弹性波来反演微破裂发生的时间、位置、震级等参数,而这些微破裂往往是岩体发生宏观失稳破坏的前兆。

现代计算机技术发展迅速,使得微震监测在南非、加拿大、澳大利亚、波兰等国的矿山得到了普遍使用,如基于实测数据反演应力、应变场<sup>[1]</sup>、判定震源机制<sup>[2-3]</sup>、风险评估<sup>[4]</sup>等。另外,因我国经济高速发展及循环开发资源战略的需要,促使微震监测在我国矿山、水电工程和地下油气料储存洞室中广泛应用。例如,李庶林等<sup>[5]</sup>在凡口铅锌矿建立64通道全数字型ESG微震监测系统,实现了微震事件的三维空间定位、信号实时在线监测分析和处理;唐礼忠等<sup>[6]</sup>根据冬瓜山铜矿微震监测数据,研究了围岩视应力和位移特征,对区域性危险地震进行预测;陆菜平等<sup>[7-8]</sup>采用波兰SOS微震监测系统研究煤矿冲击矿压规律,揭示了矿震发生过程中的微震频谱演变规律及高应力集中区的矿震活动规律。冯夏庭<sup>[9]</sup>、陈炳瑞<sup>[10]</sup>等基于锦屏Ⅱ级水电站深埋地下隧道监测的微震数据,根据岩爆发生时间将岩爆划分为即时型岩爆和时滞型岩爆,并研究了岩爆孕育机制;肖亚勋等<sup>[11]</sup>结合深埋高应力隧道微震信息,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;张伯虎等<sup>[12]</sup>在大岗山水电站地下洞室采用ISS微震监测系统,分析了顶拱塌空区的稳定性;Xu等<sup>[13]</sup>在锦屏Ⅰ级水电站边坡和大岗山水电站右岸边坡布置了ESG微震监测系统,分析了微震事件分布与边坡稳定性之间的关系。

上述研究主要以某一典型岩爆的孕育规律或风险区域圈定为主,对于分幅开挖方式诱发的岩体微震响应和洞室稳定性评价,仍缺乏相关研究。本文

以白鹤滩右岸主变室为研究对象,采用微震监测技术研究分幅开挖诱发的岩体微震活动规律及破裂机制,并评价洞室的稳定性。

## 2 构建微震监测系统

### 2.1 工程背景

白鹤滩水电站右岸主变室位于河谷两侧的坝肩上游山体内,洞室规模(长×宽×高)368.0 m×21.0 m×40.5 m,轴向N10°W。围岩主要由P<sub>2</sub>β<sub>2</sub><sup>3</sup>和P<sub>2</sub>β<sub>1</sub><sup>3</sup>层新鲜的隐晶质玄武岩、斜斑玄武岩、杏仁玄武岩、角砾熔岩组成。地应力以河谷构造应力为主,水平应力大于垂直应力,第一和第二主应力基本水平,第三主应力大致垂直,最大主应力值为22~26 MPa,方位在N0°~20°E范围,倾角2°~11°。岩石强度应力比为3~5,考虑到洞室开挖围岩应力重分布后最大集中应力为50~60 MPa量值,则岩石的强度/应力比值为2~3,主变室属于高地应力区<sup>[14]</sup>。

### 2.2 微震系统及开挖方案概述

南非IMS微震监测系统硬件包括服务器、地震处理器netSP、数字转换器netADC、供电电源UPS+、小猫DSL Modem、大猫Modem、时间同步Time Distributer、传感器和通讯电缆等,如图1(a)所示,软件包括参数设置软件Synapse、微震事件实时显示软件Ticker 3D、数据处理软件Trace、数据解译软件JDI。微震监测系统网络拓扑结构如图1(b)所示,现场监测采用3个分站。系统正常运转后,传感器采集的岩石破裂信号分别经netADC、netSP、DSL Modem和Modem传输至服务器。技术人员于办公室内完成数据的处理与分析,并将反馈结果通过Ethernet传输至武汉岩土力学研究所和业主办公室。

本试验重点监测主变室IV层开挖诱发的岩体微震特性,监测区域桩号0~49.55~0+90,传感器空间布置如图1(b)所示。主变室IV层采用等间距分幅段、两掌子面相向掘进方式,即先开挖上游半幅,再开挖下游半幅。微震系统采用定点放炮校准波速场来保证现场定位精度小于5 m。监测期间采集的微震事件定位误差如图2所示,误差主要分布在2~3 m,满足现场定位精度的要求。

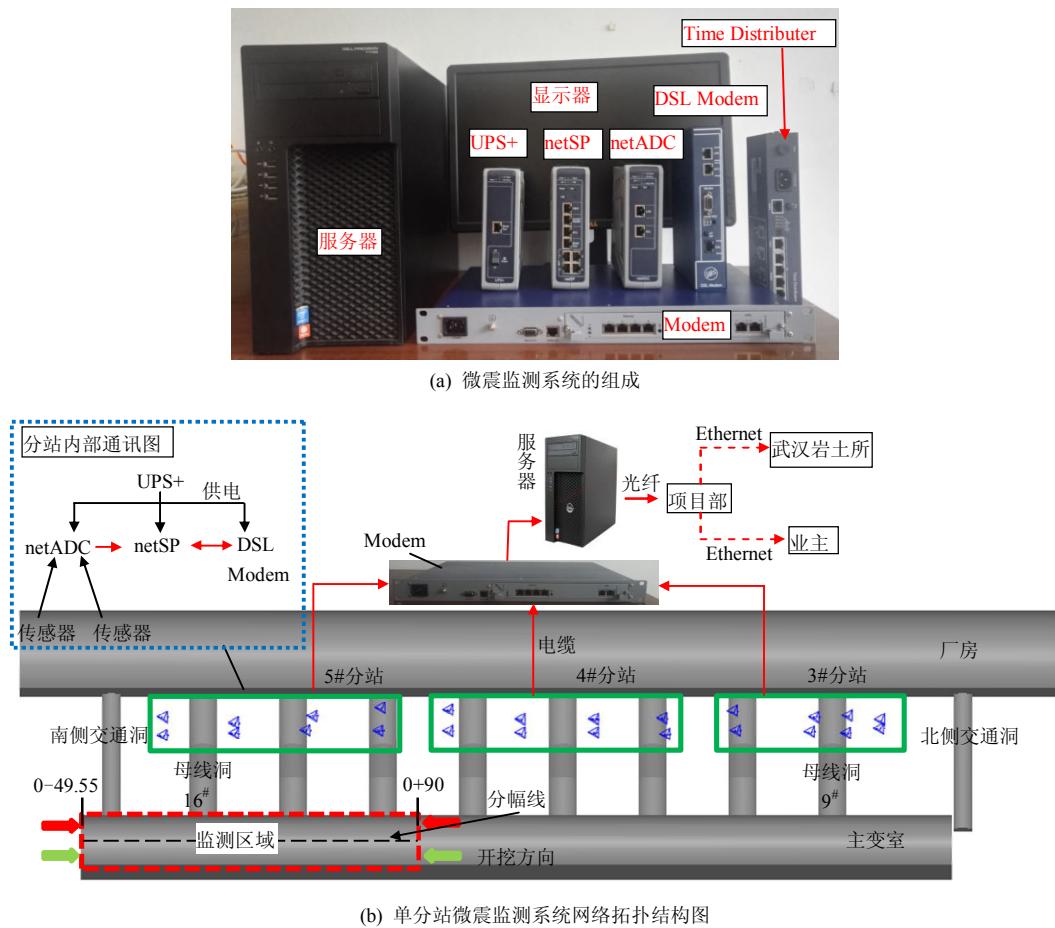


图 1 微震监测系统的组成及网络拓扑结构图

Fig.1 Composition of microseismic monitoring system and network topology structure

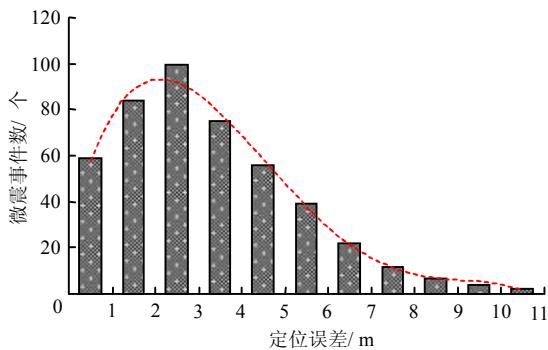


图 2 微震事件定位误差分布图

Fig.2 Location errors of MS events

### 3 分幅开挖诱发的岩体微震特性分析

#### 3.1 微震事件时间演化规律

微震监测系统自 2016 年 8 月 1 日正常运转, 截至 9 月 10 日共采集 460 个有效定位事件, 其中 8 月 1~18 日为主变室 IV 层上游半幅开挖阶段, 8 月 19~9 月 10 日为下游半幅开挖阶段。诱发的微震事件、累积能量时间演化曲线如图 3 所示。由图可知, 上游半幅开挖诱发的微震事件较多, 累积诱发 303

个, 平均每天诱发 17 个, 而且上游半幅开挖过程中累积能量曲线快速增长; 下游半幅开挖诱发的微震事件相对较少, 累积诱发 157 个, 平均每天诱发 7 个, 开挖卸荷导致岩体释放能量相对较小, 累积能量曲线缓慢增长。

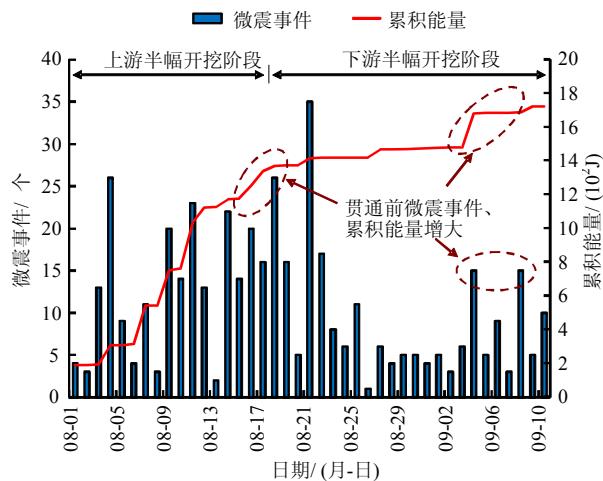


图 3 微震事件和累积能量时域演化

Fig.3 Time domain evolution of MS events and cumulative energy

累积能量随微震事件增加而增加, 但关系不是很明显。能量释放大小主要取决于围岩破坏前的原岩应力场及地质条件, 即应力集中程度越大, 围岩岩性越坚硬, 则围岩具备积聚大量弹性应变能的先天条件, 破坏时释放的能量越大。此外, 掌子面贯通前微震事件、累积能量增大, 这主要是受掌子面开挖卸荷影响。掌子面前方一定范围内支承压力达到峰值, 而相向掘进导致两掌子面前方支承压力发生叠加, 应力进一步集中<sup>[15]</sup>, 岩体积聚了大量弹性应变能。当掌子面推进至应力集中区, 开挖卸荷诱发大量微震事件和累积能量。

### 3.2 微震事件空间分布规律

图4为诱发的微震事件空间分布, 图中球的大小代表能量, 颜色代表震级。开挖上游半幅诱发的

微震事件较多、震级较大, 且微震事件形成两个从集区, 如图4(a)所示, 开挖下游半幅诱发的微震事件较少, 空间分布离散, 规律性不明显, 如图4(b)所示, 说明上游半幅开挖卸荷造成的岩体微破裂程度较大。此外, 主变室IV层开挖卸荷导致的岩体微破裂区域主要集中在下游侧, 这可能与洞室开挖后的二次地应力场有关。将监测区域内的微震事件视应力 $\sigma_A$ 投影到主变室横剖面上, 如图5所示, 该图清晰的显示了主变室下游侧拱脚出现应力集中, 预示该区域岩体发生严重的损伤破裂。微震监测的应力集中位置及最大主应力 $\sigma_1$ 方位与刘国锋等<sup>[16]</sup>研究白鹤滩片帮得出的地应力分布结果一致。值得注意的是, 随着主变室开挖高度增加, 应力集中程度加剧, 主变室上游拱肩的支护加固工作不容忽视。

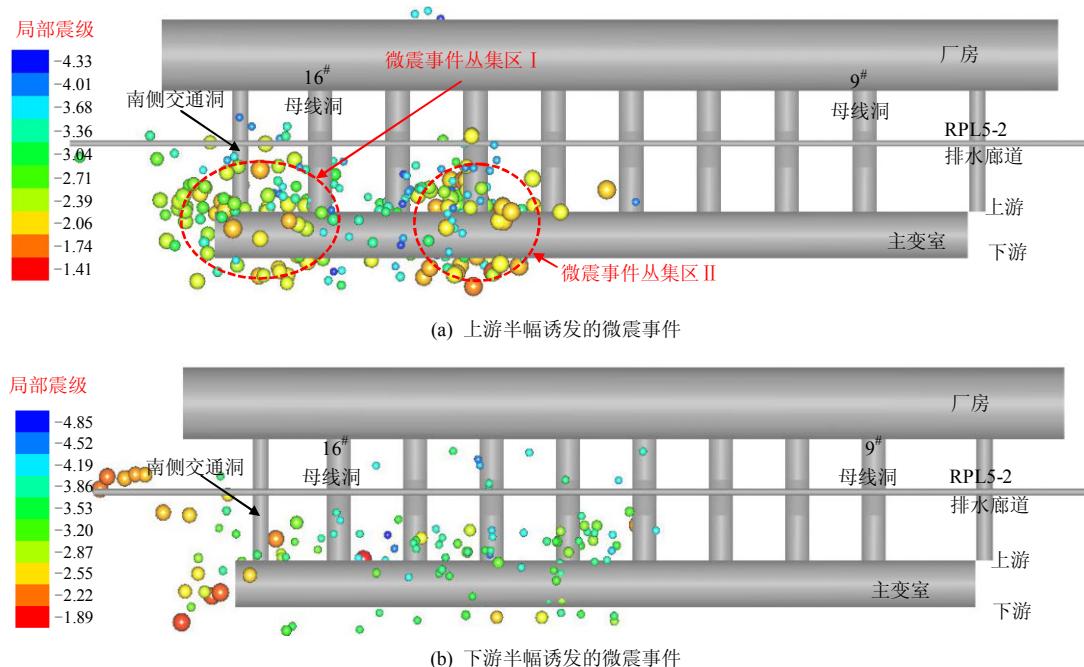


图4 微震事件空间分布规律  
Fig.4 Spatial distribution of MS events

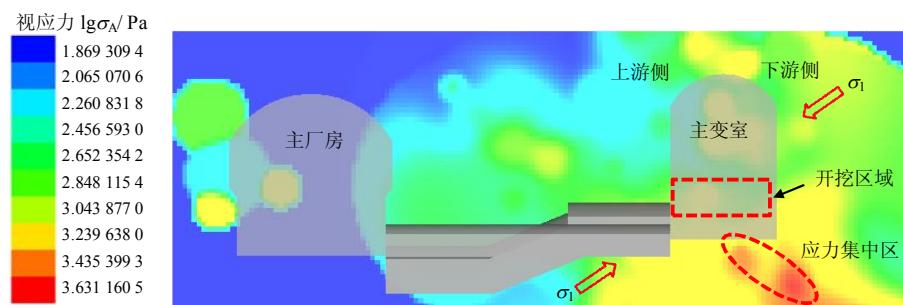


图5 微震事件视应力分布云图  
Fig.5 Apparent stress distribution cloud of MS events

### 3.3 破裂机制分析

Gibowicz等<sup>[17]</sup>分析了URL地下实验室开挖过

程中的声发射及微震数据, 认为张拉破裂事件的S波和P波能量比满足 $E_S/E_P < 10$ ; Boatwright等<sup>[18]</sup>基

于现场实测信息及理论分析验证了剪切破裂事件的能量比满足  $E_s/E_p > 20$ 。目前, 基于能量比判定震源破裂机制的准则为

$$\left. \begin{array}{ll} E_s/E_p < 10, & \text{张拉破裂} \\ 10 \leq E_s/E_p \leq 20, & \text{混合破裂} \\ E_s/E_p > 20, & \text{剪切破裂} \end{array} \right\} \quad (1)$$

本文以南侧交通洞及 16#母线洞附近的微震事件从集区 I 为例, 研究开挖卸荷诱发的岩体破裂机制。微震监测结果显示  $E_s/E_p < 10$  的微震事件占该采

集数据的 71.6%,  $10 \leq E_s/E_p \leq 20$  的微震事件占 18.3%, 表明该区域围岩破坏以张拉破裂机制为主。现场踏勘发现, 主变侧 16#母线洞口围岩发生环向破裂, 母线洞拱顶由表及里渐进破坏, 该类破坏属于典型的应力主导型张拉破裂; 南侧交通洞拱顶微震事件丛集, 多面临空、多面卸荷条件下, 切向应力集中引起钢筋拱挤压致喷层拉裂, 裂隙迹线延伸 20 m 左右, 如图 6 所示。以上案例证实了微震监测的岩体破裂机制与现场围岩实际破裂形式的一致性。

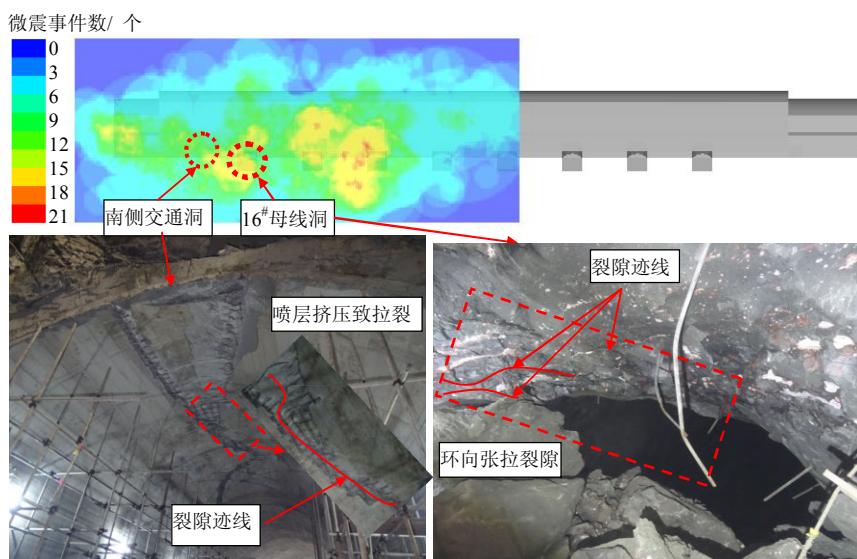


图 6 微震事件云图和对应的破坏  
Fig.6 MS events contours and the corresponding damage

## 4 洞室稳定性分析评价方法

### 4.1 Schmidt 数、事件活动率与累积视体积曲线评价

Schmidt 数衡量岩石流变特性的时空复杂程度, 也是唯一可以反映岩体潜在不稳定的参数。Schmidt 数越小, 岩体发生破坏的可能性越大。日常监测中, Schmidt 对数  $\lg(S_{Cs})$  与累积视体积  $V_A$  曲线可以起到判定岩体稳定性的作用<sup>[19]</sup>。累积视体积表示的是震源非弹性变形区岩体的体积, 可通过记录的波形参数计算得到, 是一个较为稳健的震源参数。主变 IV 层开挖期间, Schmidt 对数与累积视体积曲线如图 7 所示。监测初始阶段, 主变室开挖进尺较大, 微震事件活动率较高, 8 月 5 日累积视体积急剧增大, 震动 Schmidt 数对数值则快速下降, 预示岩体进入不稳定状态, 边墙片帮、交叉洞室环向开裂频发。这段时期以微震事件的局部震级  $m_L = -2.0$  为主, 微震事件多且大震级事件的发生伴随大量的小震级事件, 频繁的爆破、施工扰动造成岩体持续损伤裂化,

岩体呈现渐进性破坏形式。8 月 11 日微震事件骤增, 且局部震级以  $m_L = -1.5$  为主, 事件多、震级大, 岩体累积视体积急剧增大, Schmidt 数对数值快速下降, 岩体稳定性降低。现场踏勘发现, 8 月 11 日两相向掌子面均开挖至母线洞附近, 在多面临空、多

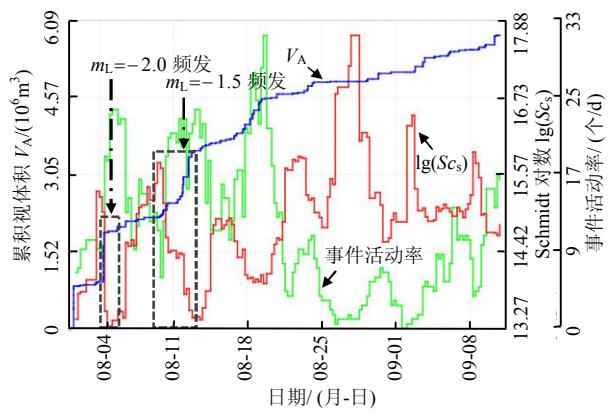


图 7 Schmidt 数、事件活动率与累积视体积曲线  
Fig.7 Curves of Schmidt number, activity rate and cumulative apparent volume

面卸荷环境下, 微震事件频发且震级较大, 导致原生裂纹扩展或次生裂纹萌生。开挖过程中微震事件数量多, 局部岩体出现片帮、应力型开裂, 但主变室整体是稳定的。对比分析发现, 开挖下游半幅时岩体累积视体积增幅减小, Schmidt 数对数值下降幅度降低, 预示岩体进入较稳定状态。

## 4.2 能量指数与累积视体积曲线评价

视应力是一个与震源模型无关的描述震源处动态应力释放的震源参数, 可以作为评价应力局部水平的震源参数。由地震学理论可知, 能量指数  $EI$  和视应力存在正相关性, 视体积反映围岩非弹性变形特征, 现场监测的能量指数和视体积变化可以评价岩体的稳定性及获取岩体灾害发生前的信息和规律, 实质上是揭示现场工程岩体应力与应变的一种相对较复杂的关系。主变室IV层开挖过程中能量指数与累积视体积演化曲线如图8所示, 2016年8月7~8月15日, 上游半幅两掌子面相向掘进至母线洞附近, 岩体储能超过极限存储能力, 累积视体积迅速增大, 能量指数骤降, 围岩处于应变软化阶段, 预示岩体稳定性变差, 围岩变形破裂风险增大。8月16~9月10日, 掌子面进尺减小, 累积视体积增幅明显减缓, 能量指数曲线虽出现短暂的大幅波动, 但整体呈递增趋势, 预示岩体处于裂纹压密的应变硬化阶段, 岩体较稳定。

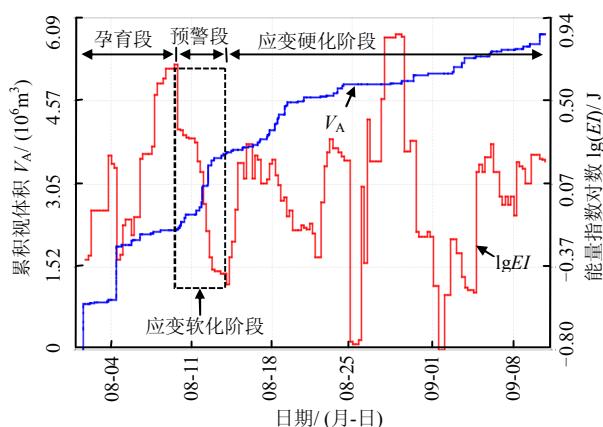


图8 视体积与能量指数变化规律

Fig.8 Evolution laws of apparent volume and energy index

应变硬化阶段(周期 26 d)和应变软化阶段(周期 9 d)的微震事件震级分布如图9所示。应变软化阶段周期短, 但诱发 150 个微震事件, 事件震级以-2.2~ -1.7 范围为主; 应变硬化阶段周期长, 累积诱发 224 个微震事件, 事件震级以-3.7~ -3.2 范围为主, 说明较之于应变硬化阶段, 处于应变软化阶

段的岩体发生不稳定变形破坏的风险较大。

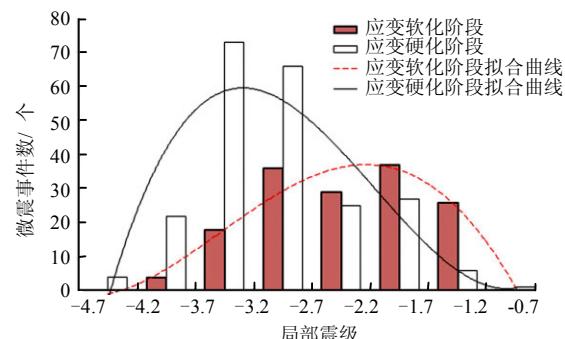


图9 应变硬化(软化)阶段的震级分布

Fig.9 Magnitude distribution of strain hardening (softening) stage

## 5 结 论

(1) 上游半幅开挖诱发微震事件形成两个丛集区; 下游半幅开挖诱发的微震事件较少且空间分布离散, 规律性不明显, 说明上游半幅开挖时, 岩体的损伤裂化程度较大。

(2) 微震事件视应力集中区, 可以有效圈定变形破裂风险位置, 并估算最大主应力方位。

(3) 基于能量比判定震源机制可知, 微震事件从集区 I 主要发生张拉破裂。主变室南侧交通洞顶拱的挤压致拉裂和 16#母线洞口环向开裂证实了微震监测结果的准确性。

(4) Schmidt 数、事件活动率与累积视体积曲线, 能量指数与累积视体积曲线可以有效衡量岩体的局部稳定性及洞室整体稳定性。结果显示, 较之于应变硬化阶段, 处于应变软化阶段的岩体发生不稳定变形破坏的风险较大。

**致谢:** 感谢中国科学院武汉岩土力学研究所刘国锋博士、段淑倩博士、裴书峰博士、张建聪博士、东北大学田冕博士在微震监测期间提出的宝贵意见。

## 参 考 文 献

- [1] VACLAV VAVRYCUK. Earthquake mechanisms and stress field[J]. Encyclopedia of Earthquake Engineering, 2015, (1): 1–21.
- [2] TEZUKA K, NIITSUMA H. Stress estimated using microseismic clusters and its relationship to the fracture system of the Hijiori hot dry rock reservoir[J]. Engineering Geology, 2000, 56(1–2): 47–62.
- [3] WYSS M, BRUNE J N. Seismic moment, stress and

- source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1968, 73(14): 4681—4694.
- [4] URBANCIC T I, TRIFU C I. Recent advances in seismic monitoring technology at Canadian[J]. **Journal of Applied Geophysics**, 2000, 45(4): 225—237.
- [5] 李庶林, 尹贤刚, 郑文达, 等. 凡口铅锌矿多通道微震监测系统及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2048—2053.  
LI Shu-lin, YIN Xian-gang, ZHENG Wen-da, et al. Research of multichannel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2048—2053.
- [6] 唐礼忠, 汪令辉, 张君, 等. 大规模开采矿山地震应力和变形与区域性危险地震预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1168—1178.  
TANG Li-zhong, WANG Ling-hun, ZHANG Jun, et al. Seismic apparent stress and deformation in a deep mine under large-scale mining and areal hazardous seismic prediction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(6): 1168—1178.
- [7] LU C P, DOU L M, ZHANG N, et al. Microseismic frequency spectrum evolutionary rule of rockburst triggered by roof fall[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2013, 64(6): 6—16.
- [8] 陆菜平, 窦林名, 曹安业, 等. 深部高应力集中区域矿震活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2302—2308.  
LU Cai-ping, DOU Lin-ming, CAO An-ye, et al. Research on microseismic activity rule in deep high-stress concentration district[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2302—2308.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 张伯虎, 邓建辉, 高明忠, 等. 基于微震监测的水电站地下厂房安全性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 937—944.  
ZHANG Bo-hu, DENG Jian-hui, GAO Ming-zhong, et al. Safety evaluation research based on microseismic monitoring in underground powerhouse of hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(5): 937—944.
- [13] XU N W, DAI F, LIANG Z Z, et al. The dynamic evaluation of rock slope stability considering the effects of microseismic damage[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(2): 621—642.
- [14] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 金沙江白鹤滩水电站地下厂房顶拱第一层及后续边墙开挖支护咨询材料[R]. 杭州: 中国水电工程顾问集团华东勘测设计研究院, 2014.  
Huadong Engineering Corporation Limited of Hydro China Corporation. Consulting materials on the first layer and subsequent excavation and supporting of Baihetan hydropower station, Jinsha River[R]. Hangzhou: Huadong Engineering Corporation Limited of Hydro China Corporation, 2014.
- [15] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版, 2003.  
QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.

下转第 1081 页

- Geotechnical Engineering**, 2014, 36(3): 508—518.
- [22] HICKS M A, SAMY K. Influence of heterogeneity on undrained clay slope stability[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 2002, 35(1): 41—49.
- [23] SRIVASTAVA A, SIVAKUMAR BABU G L. Effect of soil variability on the bearing capacity of clay and in slope stability problems[J]. **Engineering Geology**, 2009, 108(1): 142—152.
- [24] WU S H, OU C Y, CHING J, et al. Reliability-based design for basal heave stability of deep excavations in spatially varying soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(5): 594—603.
- [25] LI D Q, QI X H, PHOON K K, et al. Effect of spatially variable shear strength parameters with linearly increasing mean trend on reliability of infinite slopes[J]. **Structural Safety**, 2014, 49: 45—55.
- [26] 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑不排水抗剪强度空间变异性的条形基础极限承载力随机分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1095—1105.  
QI Xiao-hui, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Stochastic analysis of ultimate bearing capacity of strip footing considering spatial variability of undrained shear strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1095—1105.
- [27] GRIFFITHS D V, HUANG J, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis using RFEM with non-stationary random fields[C]//Geotechnical Safety and Risk V. [S. l.]: [s. n.], 2015: 704—709.
- [28] CHING J, WANG J S. Application of the transitional Markov chain Monte Carlo algorithm to probabilistic site characterization[J]. **Engineering Geology**, 2016, 203: 151—167.
- [29] GRIFFITHS D V, YU X. Another look at the stability of slopes with linearly increasing undrained strength[J]. **Géotechnique**, 2015, 65(10): 824—830.
- [30] RACKWITZ R. Reviewing probabilistic soils modelling[J]. **Computers and Geotechnics**, 2000, 26(3): 199—223.
- [31] PAPAIOANNOU I, STRAUB D. Computing the reliability of shallow foundations with spatially distributed measurements[C]//Geotechnical Safety and Risk V. [S. l.]: [s. n.], 2015: 958—963.
- [32] DER KIUREGHIAN A, KE J B. The stochastic finite element method in structural reliability[J]. **Probabilistic Engineering Mechanics**, 1988, 3(2): 83—91.
- [33] 李典庆, 蒋水华. 边坡可靠度非侵入式随机分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
LI Dian-qing, JIANG Shui-hua. A non-intrusive stochastic analysis method for slope reliability[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [34] 邓东平, 李亮. 两种滑动面型式下边坡稳定性计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 372—380.  
DENG Dong-ping, LI Liang. Research on calculation methods of slope stability under two types of sliding surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(2): 372—380.

---

上接第 1026 页

- [16] 刘国锋, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 865—878.  
LIU Guo-feng, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse caverns in Baihetan[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(5): 865—878.
- [17] GIBOWICZ S J, YOUNG R P, TALEBI S, et al. Source parameters of seismic events at the underground research laboratory in Manitoba, Canada: scaling relations for events with moment magnitude smaller than -2[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1991, 81(4): 1157—1182.
- [18] BOATWRIGHT J, FLETCHER J B. The partition of radiated energy between P and S waves[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1984, 74: 361—376.
- [19] MENDECKI A J, LYNCH R A, MALOVICHKO D A. Routine seismic monitoring in mines[C]//Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference. Western Australia: [s. n.], 2010.