

爆破开挖诱发的地下交叉洞室微震特性及破裂机制分析

赵金帅^{1,2}, 冯夏庭^{1,3}, 王鹏飞⁴, 江权¹, 陈炳瑞¹, 周扬一³, 裴书锋^{1,2}

(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. 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; 4. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

摘要: 白鹤滩水电站右岸地下多洞室间相互施工扰动, 使得母线洞等交叉洞室围岩的微震活动规律及破裂机制十分复杂。引进南非IMS微震监测系统, 研究高地应力、多面临空卸荷应力环境下交叉洞室围岩的微震特性及破裂孕育机制。根据地下厂房区围岩岩性、错动带及断层分布, 选取监测效果较佳的传感器并合理布置; 通过定点敲击试验进行波速反演, 分析震源定位的精度; 以10#母线洞掉块案例为工程背景, 分析爆破开挖诱发的交叉洞室岩体破裂微震事件与能量释放时空演化规律, 并基于S波和P波的能量比(E_S/E_P), 归纳、总结了掉块发生过程中岩体破裂演化机制: 大量张拉事件发生(爆破冲击诱发)→拉剪、压剪事件发生→张拉事件、剪切事件交替发生(集中应力和节理综合影响)→掉块发生(重力和节理综合作用)。研究结果有利于优化白鹤滩水电站右岸地下洞室群交叉部位的开挖方案, 同时对类似工程的开挖和支护具有重要借鉴意义。

关键词: 高应力; 地下交叉洞室; 微震监测; 时空演化; 破裂机制

中图分类号: U 453.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)07-2563-11

Analysis of microseismic characteristics and fracture mechanism of underground caverns induced by blasting excavation

ZHAO Jin-shuai^{1,2}, FENG Xia-ting^{1,3}, WANG Peng-fei⁴, JIANG Quan¹,
CHEN Bing-rui¹, ZHOU Yang-yi³, PEI Shu-feng^{1,2}

(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; 4. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Mutual construction of underground caverns on the right bank of Baihetan hydropower station caused complex microstructures and rupture mechanism of surrounding rock of intersecting caverns. In this study, the IMS system was introduced to investigate microseismic characteristics of surrounding rock of caverns and rupture mechanisms under high stress, multi-faceted unloading stress conditions. According to the lithology, fault zone and fault distribution in the underground powerhouse area, the sensors with perfect monitoring effect were chosen and rationally arranged. The accuracy of the source location was analyzed by using the velocity inversion through the fixed point percussion test. Based on the case of failure of the #10 omnibus cave, this study analyzed the spatial-temporal evolution of microseismic events and energy release of the intersected chambers. Meanwhile, according to the energy ratio (E_S/E_P) criteria, the evolution mechanism of rock mass rupture was discussed, which included a large number of tension events (blasting shock caused), pull-shear and pressure-shear events, tension and shear events alternately (the effect of concentrated stress and joint) and failure (the effect of gravity and joint) in the order of occurrences. This study is helpful to optimise the excavation scheme of the underground section on the right bank of Baihetan hydropower station, and it is of significance for the excavation and support of similar projects.

Keywords: high stress; underground intersected chambers; microseismic monitoring; spatial-temporal evolution; rupture mechanism

收稿日期: 2017-12-01

基金项目: 中科院前沿科学重点研究项目(No. QYZDJ-SSW-DQC016); 国际深部地质工程研究计划(No. 115242KYSB20160017)。

This work was supported by the Projects of Chinese Academy of Sciences Frontier Science Research (QYZDJ-SSW-DQC016) and the International Deep Geological Engineering Research Program (115242KYSB20160017).

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

1 引言

我国西部地区现代地壳活动剧烈，强烈的地质挤压、切割和抬升作用，使该地区水资源丰富的同时，也形成了高应力场和复杂的地质条件。许多巨型水电站在西部地区相继施工建设。大型地下洞室具有高埋深、高应力、大跨度的特点，其稳定性和安全问题引起了众多研究人员的重视。例如，洞室群结构复杂，存在相互施工扰动；大型地质构造极易诱发岩体松弛垮塌等。其中，连接各大洞室的交叉洞室，由于其特殊的空间位置，多面临空、多面卸荷的应力环境，外加爆破扰动的影响，导致交叉洞室围岩变形破坏规律十分复杂，极易在交叉部位发生岩爆、片帮、塌方、环向开裂^[1-2]等破坏，且破坏发生前难以及时识别，严重威胁着现场工人的生命及设备财产安全。交叉洞室的另一特点是易受高边墙卸荷影响，导致围岩向洞室临空面方向发生局部变形破坏。因此，有必要开展地下交叉洞室围岩的稳定性研究。

针对地下交叉洞室的稳定性问题，国内外学者做了许多相关研究。在评估地下交叉洞室围岩开挖损伤及微震特性方面，Kwon 等^[3]采用现场原位试验和室内试验研究地下交叉洞室的开挖损伤区(EDZ)特性，并基于试验结果运用原位应力比、弹性模量、开挖损伤区尺寸等参数进行敏感性分析；Cai 等^[4]基于 URL 试验交叉洞室开挖过程中的声发射和微震监测数据，提出了一种量化开挖损伤区范围和程度的微观力学模型；赵周能等^[5]根据锦屏二级水电站引水隧洞的微震监测数据，研究了爆破开挖扰动作用下深埋隧洞的微震分布规律；杨林德等^[6]针对龙滩水电站地下厂房中主支洞交叉处岩体的稳定性分析进行了分步开挖下的弹塑性数值模拟，证实了主支洞交叉处的岩体是应力松弛和塑性区的主要分布区域。在分析交叉洞室围岩变形破坏特征方面，董联杰等^[7]采用数值计算方法模拟某水电站地下洞室交叉口的坍塌破坏过程，分析其产生坍塌破坏的原因及其影响因素；李宁等^[8]根据拉西瓦水电站地下厂房区母线洞交叉洞室在地下洞室结构中的特殊位置，采用数值计算方法探讨了环向裂缝的成因。在研究交叉洞室围岩支护加固技术方面，刘国庆等^[9]研究了预应力锚索的锚固机制；周建民等^[10]对塌方进行分类的基础上，分析了洞室不同部位塌方的特点，总结了“先拱法”治理洞室交叉部位塌方的一般步骤和技术要点；郝宪杰等^[11]采用数值模拟分析了柱状节理交叉洞室的塌方破坏特征，并提出了针对

性的支护加固方案。以上学者对交叉洞室做了系统的研究，取得了丰富成果，但并没有研究多面临空卸荷条件下交叉洞室围岩的破裂演化过程，进而从围岩破裂演化的角度研究交叉洞室的稳定性问题。

目前，国内外采用微震系统监测母线洞等交叉洞室的案例较少，爆破开挖诱发交叉洞室围岩内部微破裂的形成和发展，特别是含节理条件下围岩的破裂机制尚未有深入研究。作为微震监测大型地下洞室稳定性的补充，本文采用 IMS 微震监测系统，以在建白鹤滩水电站右岸地下洞室群中的母线洞作为研究对象，研究高应力大型地下洞室群交叉洞室的开挖卸荷特征及围岩内部破裂演化规律，揭示围岩内部微裂隙破坏机制，为工程安全施工提供参考。

2 工程概况及微震监测方案

2.1 工程地质条件

白鹤滩水电站引水发电系统左右岸基本对称布置，右岸地下洞室群的空间布置如图 1 所示，主厂房水平埋深为 420~800 m，垂直埋深为 420~540 m，洞室全长为 438 m，岩锚梁以上开挖跨度为 34 m，以下开挖跨度为 31 m，开挖高度为 88.7 m。主变室平行布置于主厂房下游侧，洞室尺寸为 368.0 m×21.0 m×40.5 m (长×宽×高)。主厂房与主变室间岩体贯通 8 条母线洞，相邻母线洞中心间距为 38 m，母线洞轮廓为直墙半圆拱型，断面尺寸为 12 m×11 m。

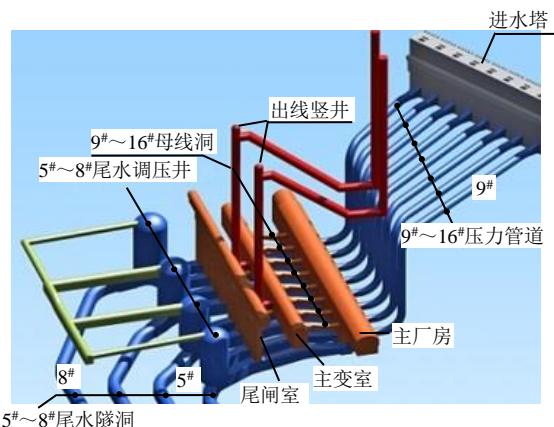


图 1 白鹤滩右岸地下洞室群布置图

Fig.1 Layout of underground caverns on the right bank of Baihetan hydropower station

厂房区为单斜岩层，岩层总体产状为 N48°~50°E，SE∠15°~20°，厂房轴线方位角为 N10°W，母线洞轴线方位角为 N80°E。右岸地下厂房区围岩岩性主要为 P2β3³~P2β6¹ 隐晶质玄武岩、斜斑玄武

岩、杏仁状玄武岩、角砾熔岩及凝灰岩等, 岩体多为微风化或新鲜状态, 坚硬且完整性较好, 围岩以II、III₁类为主, 局部分布少量IV类围岩^[12]。结合现场编录的白鹤滩右岸主变室上游边墙工程地质剖面图

面图^[12](见图2)可知, 除分布错动带、断层外, 本文研究的10#母线洞附近区域还揭露较多的随机分布节理, 易诱发交叉洞室围岩发生不稳定变形破坏, 影响大型地下洞室的整体安全及施工进度。

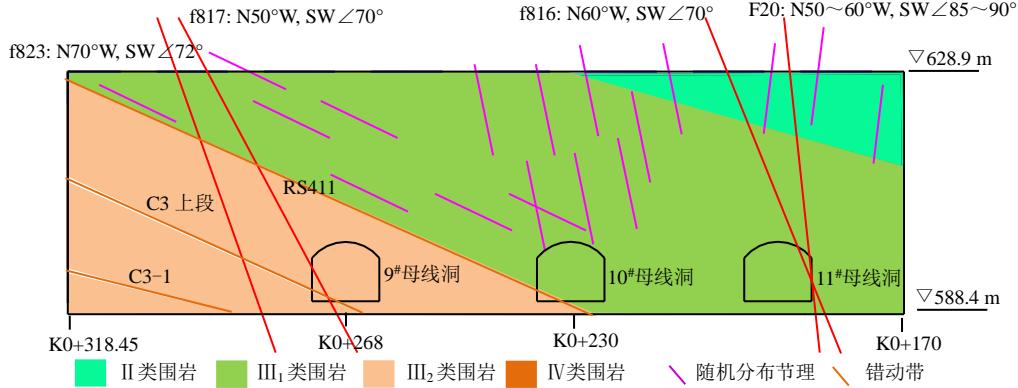


图2 白鹤滩右岸主变室上游边墙工程地质剖面图

Fig.2 Engineering geological section of the upstream wall of the main transformer on the right bank of Baihetan

右岸厂区地应力^[12]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。最大主应力为22~26 MPa, 走向N0°~20°E, 倾角为2°~11°; 中间主应力大约为14~18 MPa, 最小主应力大约为13~16 MPa。岩石强度应力比(单轴抗压强度 σ_c /最大主应力 σ_1)大约为2.85~5.09, 局部存在应力集中现象, 应力

最大可达30 MPa以上。白鹤滩地下洞室群初始应力较高, 属高地应力区。

2.2 开挖方案

白鹤滩右岸地下洞室采用传统钻爆法分层下卧开挖。目前进行主厂房IV层、主变室V层及10#、11#母线洞的开挖, 如图3所示。各掌子面开挖信息概述如下: 主厂房与主变室掌子面平行且推进方向

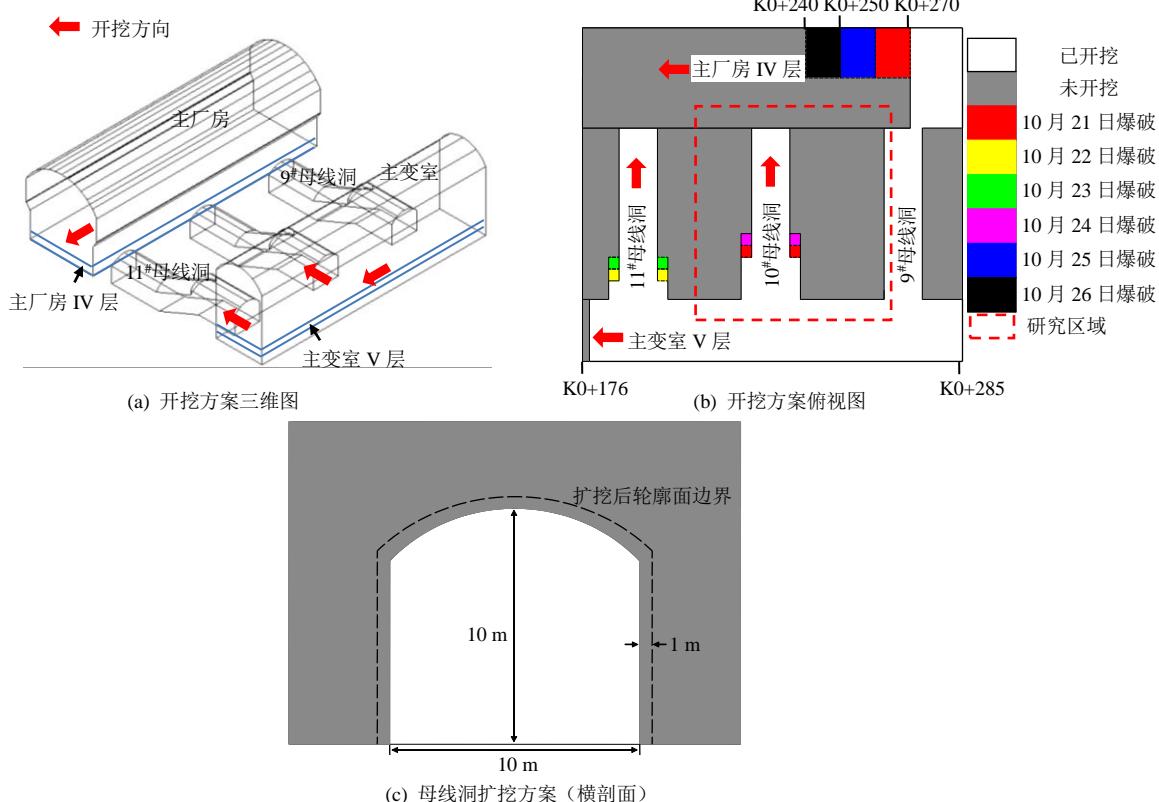


图3 白鹤滩水电站右岸地下厂房区开挖方案示意图

Fig.3 Schematic of excavation schemes against underground powerhouse on the right bank of Baihetan hydropower station

一致,母线洞掌子面垂直于上述两掌子面;母线洞先于主厂房、主变室开挖完成(断面尺寸为10 m×10 m)。文中所述的母线洞开挖实际为母线洞爆破修边扩挖,扩挖后的断面尺寸为12 m×11 m,日进尺3 m;主厂房IV层开挖完成后,主厂房侧母线洞口出露。

本文以2016年10月22日05:50:15发生的10#母线洞顶拱掉块案例为工程背景,研究多面临空应力环境下母线洞爆破开挖诱发的围岩微震活动演化规律及其破裂机制,进而评估母线洞室的稳定性。10#母线洞采用周边孔光面爆破,炸药种类为2#岩石乳化炸药,具体的爆破参数如表1所示。研究区域范围及现场爆破施工信息如图3(b)、3(c)所示,现场爆破以时间为序(图3(b)所示),依次进行爆破、开挖施工。由图3(b)可知,研究区域内仅有10月21日和10月24日进行10#母线洞的爆破施工。

表1 10#母线洞爆破参数

Table 1 Blasting parameters of #10 omnibus bar cave

炸药种类	药卷直径/mm	孔径/mm	孔深/cm	孔数	线装药密度/(g/m)	爆破方式
2#岩石乳化炸药	32	60	300	10	300	光面爆破

2.3 监测方案

2.3.1 传感器站网布置

根据白鹤滩右岸地下洞室群的空间布置,选取空间上距离母线洞较近的RPL5-2排水廊道安装微震传感器,可得到较佳的监测效果。结合白鹤滩右岸地下厂房区断层、错动带分布,分别在RPL5-2排水廊道K0+230~K0+290洞段注浆埋设6个灵敏度为1 V/g、频率响应范围0.1~8 000.0 Hz(± 3 dB)的单向加速度型传感器(编号11#~16#)和K0+15~K0+230洞段注浆埋设18个固有频率10 Hz、响应范围为10~2 000 Hz的单向速度型传感器(编号为17#~34#)。监测断面等间距布置,每个断面安装2个传感器,其中加速度型传感器断面间距为15 m,速度型传感器断面间距为30 m。

岩石破裂激发的应力波在岩体介质传播过程中受介质阻尼的影响,存在固有及散射衰减,且岩石介质的强度和硬度越高,其应力波衰减指数越小^[13]。本文研究10#母线洞顶拱掉块案例,选取距离10#母线洞较近的11#~22#传感器进行震源参数计算,其他传感器距离研究区域内震源相对较远,未参与震源参数的计算。传感器站网空间布置如图4所示,具体安装参数如表2所示。

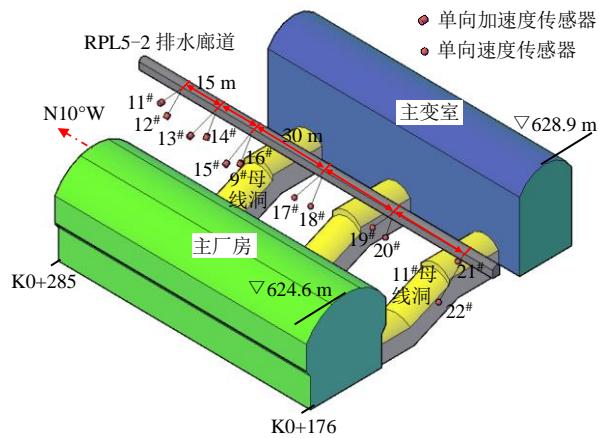


图4 传感器站网空间布置图
Fig.4 Three-dimensional layout of sensor network

表2 传感器安装参数

Table 2 Parameters of sensor installation

编号	类型	桩号	孔口高程/m	探头深/m	下倾角/(°)	方位角/(°)
11	加速度	K0+289	622.6	7.60	5	257
12	加速度	K0+289	621.5	7.33	45	250
13	加速度	K0+274	622.4	10.65	20	265
14	加速度	K0+274	621.2	6.78	61	263
15	加速度	K0+258.5	622.1	11.57	29	273
16	加速度	K0+258.5	621.2	8.53	60	265
17	速度	K0+228	622.4	12.24	13	252
18	速度	K0+228	621.1	9.50	59	255
19	速度	K0+198	622.6	8.31	5	250
20	速度	K0+198	621.1	6.24	64	256
21	速度	K0+167.5	622.4	2.20	18	266
22	速度	K0+167.5	621.3	14.59	45	261

2.3.2 震源定位方程及定位精度测量

假设岩体破裂时间为 t_0 ,破裂时的震源坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,接收到破裂信号的传感器坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,传感器监测到的破裂信号P波到时和S波到时分别为 t_i^P 和 t_i^S 。震源与传感器之间的距离为 R_i ,其计算公式为

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (1)$$

震源定位目标函数为

$$f = \sum_{i=1}^n |t_i^P - t_0 - R_i/V^P| + \sum_{i=1}^n |t_i^S - t_0 - R_i/V^S| \quad (2)$$

式中: f 为到时残差; V^P 为P波的传播速度; V^S 为S波的传播速度。

当到时残差取最小值(等于0或者趋近于0),解得的 (x_0, y_0, z_0) 即为所求的岩体破裂震源坐标。

为了采用上述方法求解岩体破裂位置,需要事先求解出P波和S波的传播速度。岩石是一种具有非均质性、不连续性的复杂材料,致使微震信号在

岩体不同方向、不同区域的传播速度存在差异, 获取准确的岩体波速十分困难。各向异性速度模型可以准确反映岩石的这种性质^[14-15], 但各向异性速度模型未知参数太多, 单一震源时无法求解。鉴于白鹤滩右岸传感器安装位置距交叉洞室震源相对较近, 且玄武岩岩石强度、硬度较高, 应力波衰减指数较小, 故将研究区域内的应力波传播路径近似为线性是合理的。

现场测量震源定位精度的方法有定点爆破、定点敲击等, 即把爆破或敲击位置作为已知震源, 进行反演分析。本文采用定点敲击洞室围岩进行定位精度的测量, 图5为现场机械定点敲击围岩后, 被触发的传感器记录的P/S波到达时刻与距离的关系曲线。试验结果显示被触发的传感器与震源距离和信号走时线性拟合效果良好, 由定点敲击位置与微震事件定位结果对比可知, 定位误差为6.2 m, 如表3所示, 满足现场工程定位精度的要求。

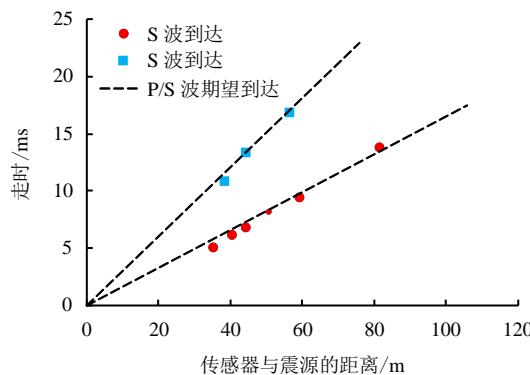


图5 P/S波到达时刻与距离的关系曲线

Fig.5 Relation curves between P or S waves at arrival time and distance

表3 定点敲击定位误差分析
Table 3 Locating error of fixed-point beat

方位	敲击坐标/m	定位坐标/m	各方位误差/m	定位误差/m
X	231.2	229.4	1.8	
Y	-56.3	-59.9	3.6	6.2
Z	-28.1	-23.4	4.7	

3 爆破开挖诱发的岩体微震响应特性分析

3.1 爆破信号和微震信号识别

研究爆破开挖诱发岩体微震特性的首要任务是识别爆破信号和微震(岩石破裂)信号。一般情况下, 判定爆破信号的原则有: ①事件是否发生在通常的爆破时间段? ②相对于正常的微震事件, 爆破波谱图上的S波更微弱, 即S波到时拾取困难。

③现场施工采用毫秒微差爆破, 致使激发的爆破波谱具有多重持续性, 即一个爆破波谱图上含有多个相似事件。典型爆破信号如图6(a)所示。一般情况下, 微震(岩石破裂)信号的判定原则为: 波谱图上只有一个事件, P/S波到时清晰, 微震事件能量曲线在S波到时处陡增(S波为主要能量载体)。典型微震(岩石破裂)信号如图6(b)所示。

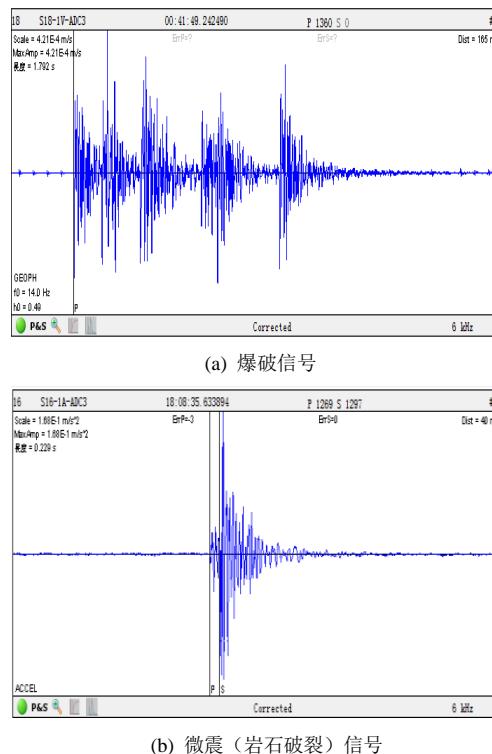


图6 典型微震信号图

Fig.6 Typical microseismic signal

3.2 微震事件时间分布规律

2016年10月21~26日, 各掌子面开挖卸荷诱发的研究区域内微震事件和爆破事件随时间演化规律如图7所示, 由图可见: 10月21~26日, 微震事件先减少后增多再减少; 10月21~23日, 微震事件数量递减, 10月21日微震事件数量为监测期间最多, 达到51个之多; 10月24日微震活动频繁, 当日诱发微震事件31个, 10月24~26日微震事件数量呈缓慢减少趋势。由现场施工记录可知, 10#母线洞内的爆破施工日期分别为10月21日和10月24日, 其余时段的爆破事件为相邻洞室的爆破扰动所致。结合微震系统监测到的爆破事件可知, 研究区域内爆破对10#母线洞围岩扰动程度较大, 诱发较多的微震事件。一般情况下, 微震事件与爆破事件密切相关, 爆破事件越多, 微震活动越活跃; 反之, 爆破事件越少, 微震活动越微弱。

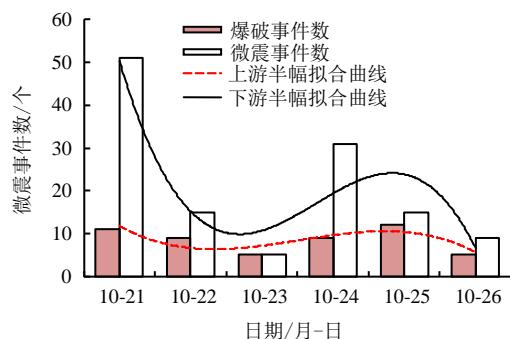


图 7 微震事件、爆破事件与时间关系分布图
Fig.7 Relationship chart between microseismic events, blasting events and time

2016 年 10 月 21~26 日每天不同时段的微震事件及能量释放演化规律见图 8。由图可知，微震活动在每天 9:00~17:00 点处于平静期，能量释放较少；18:00~23:00 点微震活动最活跃，微震事件数最多，累积能量释放最大，这是因为现场爆破时间为 18 点，爆破冲击荷载诱发围岩在短时间内发生大量微破裂；爆破后应力发生调整和重分布，重分布后的应力集中区主要分布在掌子面前方 4~10 m 范围内^[16]；当开挖至应力集中区，即爆破后次日 4:00~8:00 点期间，微震事件频发，能量增幅明显，微震活动趋向活跃。2016 年 10 月 22 日 05:50:15，10#母线洞顶拱发生掉块，即掉块发生于开挖卸荷导致的围岩微破裂活跃时期。研究区域内的围岩微破裂事件主要由 10#母线洞开挖卸荷及相邻洞室的施工扰动引起，微震活动频率可以较好地反映现场开挖活动的频率。

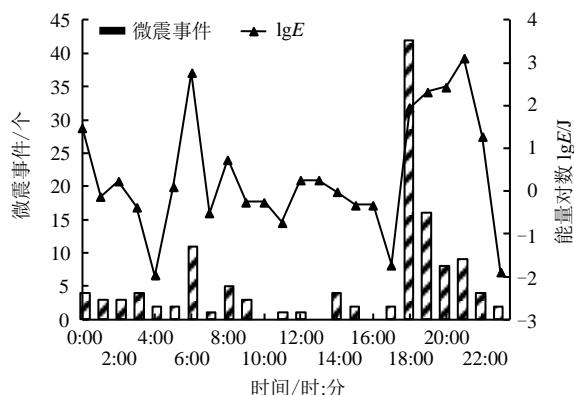


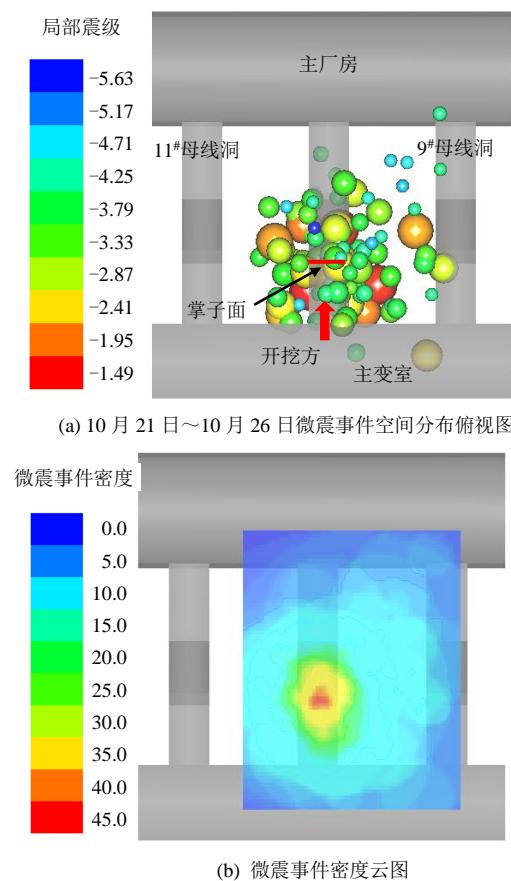
图 8 不同时段的微震事件及辐射能量分布规律
Fig.8 Distribution of accumulated microseismic events at different times of each day

总之，围岩微震活动和爆破有明显的关系，10#母线洞爆破诱发的研究区域内微震事件和爆破事件明显多于相邻洞室爆破扰动诱发的，即爆炸源距离

研究区域越近，则爆破造成围岩损伤劣化程度越严重，围岩微震活动越活跃。结合现场施工工况可知，10#母线洞顶拱掉块是在相邻掌子面开挖造成交叉洞室围岩损伤裂化的基础之上，由 10#母线洞爆破开挖诱发的。因此，针对具备发生不稳定变形破坏倾向的交叉洞室区域，应控制爆破装药量或减少爆破进尺，减少对围岩的扰动，避免或降低围岩发生不稳定变形破坏的风险。

3.3 微震事件与能量释放空间演化规律

高应力地下交叉洞室开挖卸荷导致岩体破裂微震活动在空间上具有明显的特征与规律。图 9 为研究区域内微震事件空间分布规律，其中不同颜色代表震级大小，球大小正比于微震事件辐射微震能，即能量释放越大，球越大。由图 9(a)微震事件空间分布可知，微震事件大多分布在 10#母线洞中部至主变室侧交叉洞口区域，而母线洞邻近厂房侧鲜有微震事件发生，这主要与母线洞的开挖施工有关，目前 10#母线洞由主变室侧向主厂房侧开挖。图 9(b)为 10#母线洞微震事件密度云图，其揭示的微震事件丛集特征与微震事件空间分布规律一致，进一步



(a) 10 月 21 日~10 月 26 日微震事件空间分布俯视图

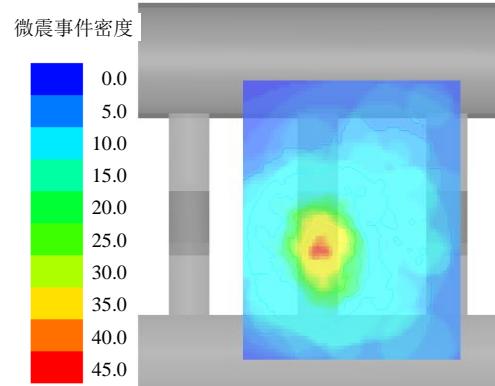


图 9 微震事件空间分布及对应的微震事件密度云图
Fig.9 Spatial distribution of microseismic events and corresponding microseismic event density

证实了 10#母线洞中部区域的微震活动最为活跃。地下洞室围岩的失稳破坏容易发生在应力集中区, 而微震事件从集可以有效揭示围岩的潜在失稳破坏区域, 即微震事件越多、能量释放越大, 该区域发生失稳破坏的可能性越大。

图 10 为研究区域内微震事件空间演化规律图。图中颜色代表微震事件发生时间, 球大小正比于辐射微震能。2016 年 10 月 21 日 18 点, 10#母线洞爆破施工, 微震事件在爆破后 1 h 内频发并迅速从集于掌子面附近, 爆破开挖诱发的微震事件和能量释放空间分布见图 10(a), 当日诱发微震事件 51 个,

能量释放 $10^{1.93}$ J; 10 月 22 日掉块发生前夕, 一方面, 相邻洞室的爆破扰动造成 10#母线洞围岩发生一定程度的累积损伤; 另一方面, 如前文所述, 10 月 21 日 18 点爆破后, 充分调整后的应力集中区主要分布于掌子面前方 4~10 m 范围内, 因此, 当开挖至应力集中区, 局部区域出现应力集中加剧和能量积聚, 掌子面附近偶尔发出清脆的岩石破裂声, 母线洞顶拱掉块发生, 破坏深度为 0.20~0.25 m, 岩石破裂产生的微震事件和能量释放见图 10(b); 10 月 23 日 10#母线洞无开挖, 掌子面附近围岩应力调整趋于稳定, 相邻洞室爆破扰动程度较小, 围岩

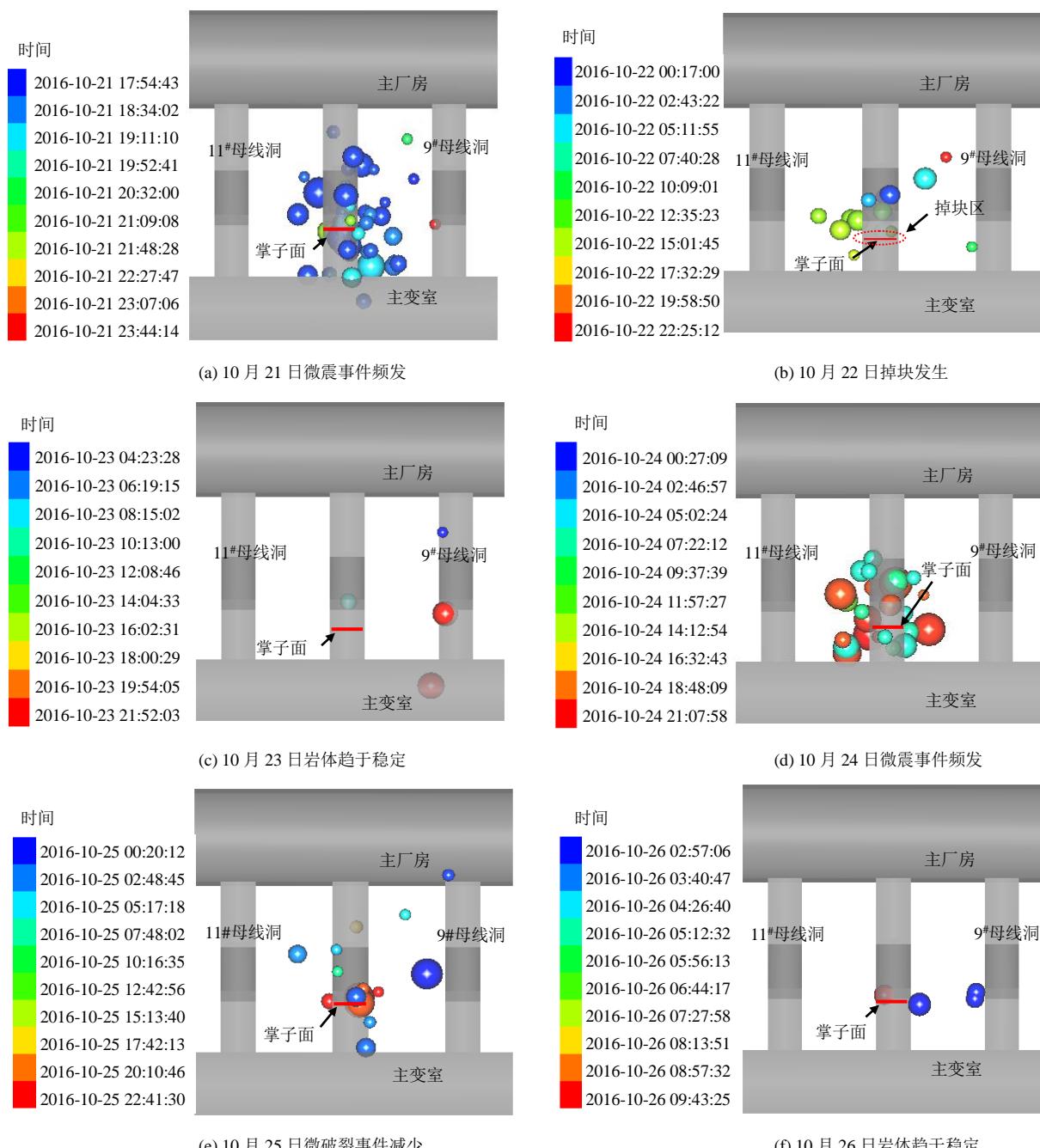


图 10 爆破作用下微震事件及能量释放空间演化

Fig.10 Spatial evolution of microseismic events and released energy under blasting effect

微破裂活动较弱, 微震事件和能量释放见图 10(c); 10月 24 日 10#母线洞爆破施工, 围岩微破裂活动再次活跃, 爆破导致围岩发生大量微震事件并释放大量微震能量, 空间分布见图 10(d); 10月 25 日 10#母线洞无施工, 受应力调整和相邻洞室爆破扰动影响, 掌子面附近发生少量微破裂事件, 空间分布见图 10(e); 10月 26 日 10#母线洞无施工, 围岩应力调整幅度较小, 围岩微破裂活动微弱, 掌子面附近仅诱发 2 个微震事件, 微震事件空间分布见图 10(f)。

4 破裂机制分析

4.1 破裂机制判定

地震学上, S 波和 P 波的能量比 (E_S / E_P) 是揭示围岩破坏机制^[17]的一个重要指标。目前, 能量比判定震源破裂机制的准则^[18]为

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

根据 10 月 21~26 日现场监测到的微震事件, 绘制微震事件的 E_S / E_P 与震级分布^[17] (见图 11)。由图可知, 爆破开挖诱发围岩微破裂震级范围主要集中在 -4.4~ -2.4, 最大震级为 -1.4, 事件震级整体偏小; $E_S / E_P < 10$ 的微震事件数量较多, $10 \leq E_S / E_P \leq 20$ 或 $E_S / E_P > 20$ 的微震事件所占比例相对较小。 E_S / E_P 整体值偏小, 说明现场诱发的微震事件主要为张拉型破裂机制, 即爆破开挖诱发的微震事件聚集以拉伸破坏形式为主, 局部夹杂少量拉伸-剪切混合破裂或剪切破裂形式的微震事件。

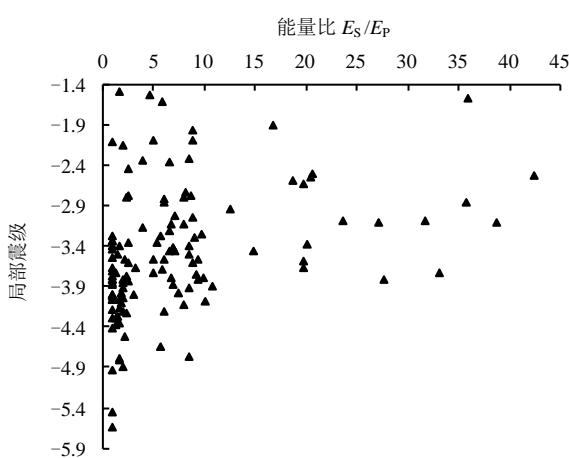


图 11 能量比 E_S/E_P 与震级分布

Fig.11 Distribution of E_S/E_P and local magnitude

从地质力学的角度考虑, 母线洞贯通使得主厂房与主变室间岩柱四面临空, 集中应力转移至岩柱

体承载, 在这种近似单轴压缩应力环境下, 极易导致岩体产生卸荷松弛和压致拉裂。基于微震能量比判定准则, 分析、总结 10#母线洞顶拱掉块的破裂机制发现: 微震事件主要以张拉型破坏为主, 剪切破坏和拉剪、压剪混合破坏相对较少。现场监测到的微震事件破裂机制与地质力学机制分析结果基本一致。

4.2 破裂孕育机制分析

10#母线洞发生的掉块孕育机制如图 12~14 所示。图 12 为 10 月 21 日~23 日在掉块附近区域发生的岩体破裂机制演化图, 图中圆球代表微震事件, 圆球大小正比于里氏震级, 即震级越大, 圆球半径越大, 反之亦然。由图 12~14 可以看出: ①2016 年 10 月 21 日 18:00 点爆破后, 爆破冲击能诱发围岩在掌子面附近迅速发生大量张拉破裂事件, 同时, 高应力环境下开挖卸荷导致应力发生调整和重分布, 进一步渐进加剧张拉裂纹的扩展、贯通或张开。②10#母线洞附近分布较多随机节理 (如图 2、13(a) 所示), 在重分布切向集中应力作用下, 高密压缩的节理面发生剪切滑移, 产生剪切事件。掉块发生前夕, 剪切破裂事件和张拉破裂事件交替发生, 掉块事件最终在重力和节理的综合影响下, 以剪切破裂的形式发生。掉块发生后的破坏形态如图 13(b) 和图 14 所示。现场踏勘发现, 掉块发生位置与微震事件从集区域一致, 掉块区域范围为 3.50 m×1.70 m×0.25 m(长度×宽度×深度), 破坏区域分布随机节理, 且节理揭露处破坏深度较大。③掉块后发生的微震事件仍以张拉事件为主导, 伴有少量混合事件。

归纳、总结该掉块的孕育机制为: 大量张拉事件发生 (爆破开挖诱发) → 拉剪、压剪事件发生 → 张拉事件、剪切事件交替发生 (集中应力和节理综合影响) → 掉块发生 (重力和节理综合作用)。上述表明, 该掉块案例属于在高应力环境下, 爆破开挖诱发的随机节理处破坏事件, 属于应力-结构型破坏。针对高应力地下交叉洞室围岩破裂机制的特点, 建议采取降低微震活动性 (减少扰动), 爆破后及时先喷后锚, 再挂网, 紧复喷的防控策略, 这是因为: ①相邻掌子面开挖卸荷导致应力转移至岩柱体 (即交叉洞室区域) 承载, 致使交叉洞室区域应力容易集中, 进一步加剧了围岩损伤劣化程度。因此, 从减少微震事件数量及能量释放的角度考虑, 应控制交叉洞室的钻爆掘进速度及爆破装药量, 减少外界扰动; ②切向集中应力作用下, 随机节理及其附近裂隙不断向围岩内部扩展, 最终形成由节理面控制边界的破坏坑。因此, 及时喷锚支护封闭围岩, 改

善应力环境, 抑制裂纹向围岩内部扩展; ③挂网+复喷支护不仅可以有效降低开挖卸荷造成的应力调

整程度及幅度, 而且还可以有效发挥围岩体的自承载能力。

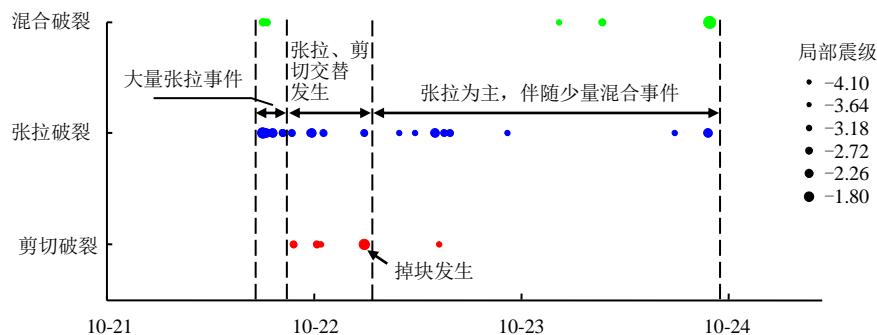


图 12 岩体破裂机制演化
Fig.12 Evolution of rock mass fracture mechanism

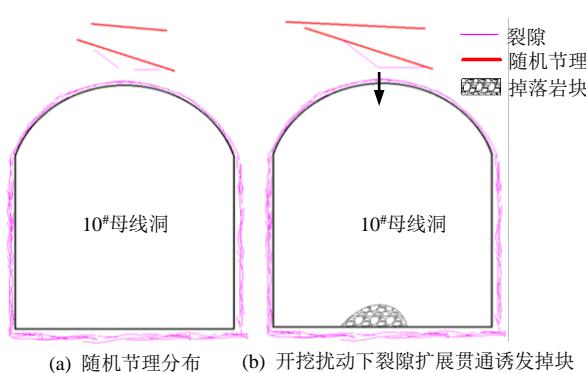


图 13 随机节理分布及掉块孕育过程的扩展变化示意图
Fig.13 Random joint distribution and its development during pregnant process of failure of rock mass

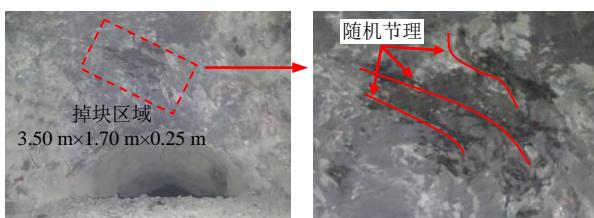


图 14 10#母线洞应力-结构型破坏形态
Fig.14 State and shape of the stress-structure failure of 10# busbar chamber

5 结 论

(1) 爆破开挖诱发的岩体破裂微震活动演化规律明显: 微震事件时间上频发于爆破后数小时内, 尤其是爆破后 1 h 内, 空间上从集于掌子面附近; 母线洞掉块位置与微震事件从集区域一致, 节理控制破坏坑边界。

(2) 母线洞贯通使得主厂房与主变室之间岩柱四面临空, 集中应力转移至岩柱体承载, 在这种近似

单轴压缩应力环境下, 极易导致岩体产生卸荷松弛和压致拉裂。现场监测到的微震事件破裂机制与地质力学机制分析结果基本一致。

(3) 母线洞顶拱掉块属于在高应力环境下, 爆破开挖诱发的随机节理处破坏事件, 属于应力-结构性破坏。该掉块的发生原因为: 爆破瞬时作用+应力后续调整。10#母线洞拱顶掉块的孕育机制为: 大量张拉事件发生(爆破开挖诱发)→拉剪、压剪事件发生→张拉事件、剪切事件交替发生(集中应力和节理综合影响)→掉块发生(重力和节理综合作用)。掉块后发生的微震事件仍以张拉事件为主导, 伴有少量混合事件。

致 谢: 衷心感谢中国长江三峡集团白鹤滩建设部、中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、中国葛洲坝集团白鹤滩施工局等单位在现场微震监测方面给予的大力支持和帮助!

参 考 文 献

- [1] 向天兵, 冯夏庭, 江权, 等. 大型洞室群围岩破坏模式的动态识别与调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 871—883.
XIANG Tian-bing, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Failure mode dynamic recognition and control for surrounding rock of large scale cavern group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 871—883.
- [2] 刘国峰, 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.
- [3] KWON S, LEE C S, CHO S J, et al. An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24: 1—13.
- [4] CAI M, KAISER P K. Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2005, 20(4): 301—310.
- [5] 赵周能, 冯夏庭, 焦凯, 等. 爆破开挖扰动作用下深埋隧洞的微震分布规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(8): 1179—1183.
ZHAO Zhou-neng, FENG Xia-ting, JIAO Kai, et al. Microseismic event distribution in deep tunnels under the disturbance of blasting excavation[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2013, 34(8): 1179—1183.
- [6] 杨林德, 邓涛, 陈海军. 龙滩水电站地下厂房主支洞交叉处稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 679—684.
YANG Lin-de, DENG Tao, CHEN Hai-jun. Stability of rockmass between main tunnel and sub-tunnels of underground power houses at Longtan hydro-power station[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(5): 679—684.
- [7] 董联杰, 李小根, 李震, 等. 某水电站地下洞室交叉口应力型坍塌破坏分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 28—32.
DONG Lian-jie, LI Xiao-gen, LI Zhen, et al. Analysis of stress-type collapse failure of underground caverns at a hydropower station[J]. **Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)**, 2014, 35(5): 28—32.
- [8] 李宁, 孙宏超, 姚显春, 等. 地下厂房母线洞环向裂缝成因分析及处理措施[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 439—446.
LI Ning, SUN Hong-chao, YAO Xian-chun, et al. Cause analysis of circumferential splits in surrounding rock of busbar tunnels in underground powerhouse and reinforced measures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 439—446.
- [9] 刘国庆, 肖明, 周浩. 地下洞室预应力锚索锚固机制及受力特性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 439—446.
LIU Guo-qing, XIAO Ming, ZHOU Hao. Analysis of mechanical characteristics and anchoring mechanism of prestressed anchor cable in underground caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Supp.1): 439—446.
- [10] 周建民, 金丰年, 王斌, 等. 洞室交叉部位塌方的处理技术[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 278—282.
ZHOU Jian-min, JIN Feng-nian, WANG Bin, et al. Techniques of settling collapse at grotto's intersection[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(2): 278—282.
- [11] 郝宪杰, 冯夏庭, 李邵军, 等. 柱状节理玄武岩隧洞破坏模式及其力学机制模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 837—846.
HAO Xian-jie, FENG Xia-ting, LI Shao-jun, et al. Failure mode of columnar jointed basalt tunnel and its mechanism simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 837—846.
- [12] 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.
- [13] 曹安业. 采动煤岩冲击破裂的震动效应及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
CAO An-ye. Research on seismic effort of burst and failure of coal-rock mass associated with mining and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [14] 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 Xia-ting, CHEN Bing-rui, ZHANG Chuan-qing, et al. Mechanism, warning and dynamic control of

- rockburst development processes[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [15] 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.
- [16] CHEN B R, FENG X T, HUANG S L, et al. Spatial-temporal feature of stress field evolution for Jinping II marble excavation under high stress zone[C]// Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference on
- Engineering Plasticity and Its Applications. Wuhan: [s. n.], 2010: 178—183.
- [17] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [18] GIBOWICZ S J, YOUNG R P, TALEBI S, RAWLENCE D J. 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.
- [19] 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.

上接第 2545 页

- [14] HE Y, HAZARIKA H, YASUFUKU N, et al. Evaluating the effect of slope angle on the distribution of the soil-pile pressure acting on stabilizing piles in sandy slopes[J]. **Computers & Geotechnics**, 2015, 69: 153—165.
- [15] ASHOUR M, ARDALAN H. Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction[J]. **Computers & Geotechnics**, 2012, 39(1): 85—97.
- [16] SAWANT V A, SHUKLA S K. Three-dimensional finite element analysis of laterally loaded piles in sloping ground[J]. **Indian Geotechnical Journal**, 2012, 42(4): 278—286.
- [17] 刘兹胜, 卓杨, 时蓓玲, 等. 高桩码头桩基在倾斜泥面中的水平承载性能研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1—11.
LIU Zi-sheng, ZHUO Yang, SHI Bei-ling, et al. Horizontal bearing capacity of pile foundation in high-piled wharf with inclined ground surface[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(12): 1—11.
- [18] CHIOU J S, KO Y Y, HSU S Y, et al. Testing and analysis of a laterally loaded bridge caisson foundation in gravel[J]. **Soils and Foundations**, 2012, 52(3): 562—573.
- [19] 刘俊龙. 砾卵石层中预制桩的承载性状研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1280—1284.
LIU Jun-long. Research on bearing capacity behavior of precast concrete piles in gravel stratum[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1280—1284.
- [20] 中国建筑科学研究院. JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
China Academy of Building Research. JGJ 106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.