

文章编号: 1000-7598 (2013) 02-0491-07

深埋隧洞微震活动区与岩爆的相关性研究

赵周能¹, 冯夏庭^{1,2}, 陈炳瑞², 丰光亮², 陈天宇¹

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 沈阳 110819;

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, 武汉 430071)

摘 要: 基于锦屏二级水电站深埋引水隧洞和排水洞大量微震监测数据及上百个不同等级岩爆实例, 研究了深埋隧洞微震活动区与岩爆之间的关系。研究表明: (1) 微震活动分布范围主要介于掌子面后方 3 倍洞径至前方 1.5 倍洞径之间, 而岩爆高发区位于掌子面后方 3 倍洞径以内, 表明岩爆高发区与微震事件主要分布范围相吻合; (2) 隧洞工程岩爆潜在风险重点关注区域是掌子面后方 3 倍洞径已开挖范围, 以及掌子面前方 1.5 倍洞径施工范围; (3) 微震事件及岩爆分布呈区域性集结特点, 其中一部分岩爆发生于微震事件集结区内部, 另一部分岩爆发生于微震事件集结区边缘, 这是岩体破坏过程中所固有的现象, 与微震事件集结区边缘局部应力集中密切相关。

关 键 词: 岩石力学; 深埋隧洞; 微震; 岩爆; 相关性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Study of relativity between rockburst and microseismic activity zone in deep tunnel

ZHAO Zhou-neng¹, FENG Xia-ting^{1,2}, CHEN Bing-rui², FENG Gang-liang², CHEN Tian-yu¹

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

Abstract: Based on a large amount of microseismic monitoring data and hundreds of rockbursts with different intensities occurring in the deep diversion and drainage tunnels of Jinping II hydropower station, relativity between rockburst and microseismic activity zone is studied. The conclusions are drawn as follows. (1) Microseismic activity mainly ranges from 3 times the tunnel diameter behind working face to 1.5 times ahead; and rockburst high-risk zone lies in the region as large as 3 times the tunnel diameter behind working face. Therefore rockburst high-risk zone is greatly in accordance with the main microseismic activity zone. (2) Potential rockburst high-risk zones in tunnel project are highly localized in the region already excavated as large as 3 times the tunnel diameter behind working face and the region under construction as large as 1.5 times the tunnel diameter ahead of working face. (3) Seismic events and rockburst distribution are characterized by regional aggregation. Some of them happen in the aggregation region of seismic events. Others happen on the edge of aggregation region of seismic events. That is an inherent phenomenon in the failure progress of rock mass and closely related to local stress concentration on the edge of aggregation region of seismic events.

Key words: rock mechanics; deep tunnel; microseismic; rockburst; relativity

1 引 言

岩爆是在高地应力条件下地下洞室开挖过程中, 硬脆性围岩因开挖卸荷导致洞壁应力分异, 使储存于岩体中的弹性应变能突然释放, 因而使岩体产生爆裂松脱、剥落、弹射、甚至抛掷等现象的一种动力失稳地质灾害^[1]。岩爆灾害是深部地下工程

所面临的突出问题之一, 它不仅损坏工程设备、影响施工进度, 同时还严重威胁施工人员的生命安全。例如, 锦屏二级水电站, 2009 年 11 月 28 日, 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, 支护系统全部被摧毁, TBM 设备严重受损, 并造成 7 人遇难; 2010 年 2 月 4 日, 2[#]引水隧洞引 (2) 11+006~11+070 洞段发生极强岩爆, 正在出

收稿日期: 2012-05-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目 (No. 2010CB732006)。

第一作者简介: 赵周能, 男, 1976 年生, 博士研究生, 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

渣作业的施工车辆被岩爆冲击倒转 90°，车身严重受损，导致停工数日。又如河南省千秋煤矿，2011 年 11 月 3 日发生重大冲击地压事故，导致 10 人死亡，50 余人被困井下。为确保深部地下工程施工安全，避免因岩爆而造成各种工程损失，必须对岩爆进行预测与控制。所以，岩爆预测是深部地下工程的一个重要课题，具有十分重要的现实意义。

岩体在受力变形的破裂过程中所释放的地震波称之为微震，其震源就是岩石破裂的位置。微震监测技术的基本原理是利用在空间上不同方位布置的传感器，获取岩体产生微破裂过程所发出的地震波信息，对其加以分析、处理后确定微震事件发生的时间、位置、大小、数量及能量释放等信息，以此为基础推断岩体内部应力状态、破坏情况，进而对岩爆灾害进行动态预测预警。在众多岩爆预测方法中，以能实现实时连续监测的微震监测技术效果最为显著，且应用最为广泛，如南非、加拿大、澳大利亚、波兰、美国、智利以及我国等国均有大量应用^[2-10]，并在微震系统组成、定位方法优化、波形分析、微震事件时空分布规律、微震频谱演变规律、基于微震监测的矿山地压活动规律等方面开展了大量的研究工作，取得了丰富的研究成果。但这些研究主要是以矿山工程为背景，而针对深埋隧洞工程的相关研究^[11-13]较少，尤其是针对深埋隧洞微震活动区及其与岩爆的关系的系统研究鲜有报道。鉴于此，本文以锦屏二级水电站深埋引水隧洞和排水洞中部强岩爆段为工程背景，开展了微震活动区与岩爆关系的研究，通过对微震监测数据及大量岩爆实例进行综合分析，获得了微震活动空间分布特征及其与岩爆的关系，为准确、快速确定岩爆发生区域，并采取有针对性的防治措施提供科学依据。

2 微震监测范围及监测系统简介

锦屏二级水电站深埋长大引（排）水隧洞工程由 4 条引水隧洞和 1 条排水洞组成，平均长度约 16.7 km，平均埋深约 1 610 m，最大埋深达 2 525 m，其中埋深超过 1 500 m 的洞段长度占总长的 75.7~75.9%。隧洞断面布置如图 1 所示，其中 1#、3#引水隧洞为圆形断面，2#、4#引水隧洞属上断面为半圆、下断面由 3 段圆弧组成的马蹄形断面，4 条引水隧洞均采用两次开挖，上断面设计开挖宽度为 13 m，实际开挖宽度约 13~14 m，高为 8 m，其等效洞径为 11 m；排水洞为圆形断面，采用全断面开挖，设计开挖洞径为 7.2 m，实际开挖洞径平均为 8 m。微震监测工作主要针对隧洞中部（桩号 5~10 km）强

岩爆段展开。该区域岩性主要为白山组大理岩，地层总体走向以 NNE 向为主，工程区内断层均属非活动断层，充填较密实且破碎带宽度均小于 5 m，围岩以 II、III 类为主，岩石坚硬完整致密，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。

采用南非 ISS 微震监测系统对引水隧洞上断面及排水洞全断面钻爆法开挖过程中的岩爆灾害进行连续实时监测，监测系统组成参见文献^[11]。

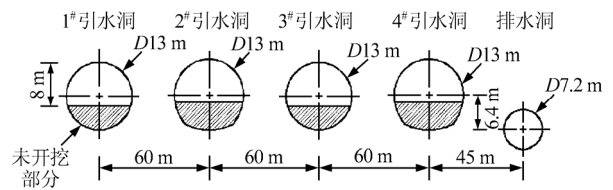


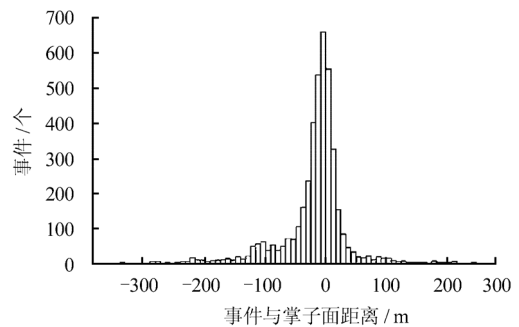
图 1 隧洞断面布置示意图

Fig.1 Layout of the cross-section in deep tunnel

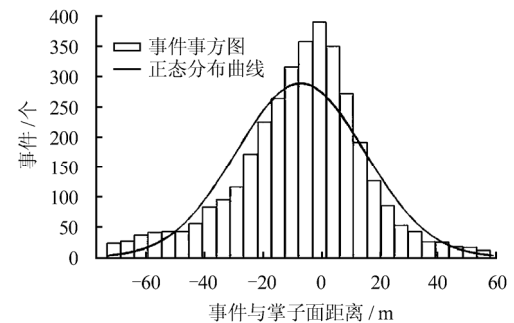
3 深埋隧洞微震活动及岩爆分布范围

3.1 隧洞工程微震活动区

通过对监测期间（14 个月）获取的大量监测数据进行统计分析，得到了引（排）水隧洞微震事件沿隧洞轴向分布范围，如图 2、3 所示。



(a) 整体分布



(b) 掌子面附近

图 2 1#~4#引水隧洞微震监测范围内微震事件分布范围

Fig.2 Distribution range of microseismic events in monitoring region of diversion tunnels #1-#4

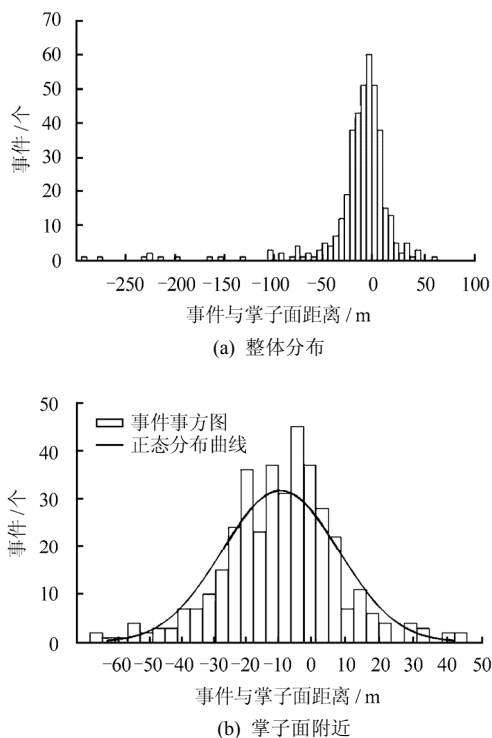


图 3 排水洞微震监测范围内微震事件分布范围
Fig.3 Distribution range of microseismic events in monitoring region of drainage tunnel

由图可见：（1）由于不同隧洞的掌子面相差一定距离（约 30~350 m），开挖爆破扰动引起相邻隧洞围岩产生微破裂，导致掌子面前后方较大范围内均有微震事件分布，但随着与掌子面距离的增加而递减；（2）大部分微震事件分布于掌子面附近，其中 1#~4#引水隧洞占 83.77%，排水洞占 94.25%。

由图 2(b)可见，1#~4#引水隧洞掌子面附近的微震事件近似服从均数 μ 为 -7.36、标准差 σ 为 22.17 的正态分布，取 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 即 (-29.53, 14.81) 为事件主要分布范围，约为掌子面后方 30 m、前方 15 m 的区域，分别为引水隧洞等效洞径的 2.7 倍和 1.4 倍。由图 3(b)可以看出，排水洞掌子面附近的微震事件近似服从均数 μ 为 -9.12、标准差 σ 为 17.0 的正态分布，取 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 即 (-26.12, 7.87) 为事件主要分布范围，约为掌子面后方 26 m、前方 8 m 的区域，分别为排水洞实际开挖洞径的 3.3 倍和 1.0 倍。

综上所述，微震事件（活动）主要分布范围介于掌子面后方 3 倍洞径至前方 1.5 倍洞径之间。

3.2 隧洞工程岩爆分布范围

岩爆孕育过程是震源区介质的损伤演化过程^[14]，其实质是岩体微破裂萌生与扩展，因此，岩爆可以看作岩体微破裂演化诱致灾变的过程，围岩微破裂演化区或微震活动区就是岩爆的潜在风险区，现场

监测数据较好地证明了该结论。

通过对上百个不同等级岩爆实例的综合分析得出，1#~4#引水隧洞和排水洞微震监测区域的岩爆分别发生于掌子面后方 300、400 m 以内，但大部分位于其掌子面附近，如引水隧洞：83.33%介于掌子面后方 0 至 30 m 之间，为 2.73 倍洞径，见图 4；在排水洞：72.97%位于掌子面后方 27 m 以内，为 3.38 倍洞径，见图 5。对比分析图 2~5 可以看出，岩爆分布范围与掌子面后方微震活动区完全一致。由此得出，掌子面后方主要微震活动区（3 倍洞径以内）是岩爆高发区，需重点防治。

另外，需要指出的是，掌子面后方 3 倍洞径以外仍有岩爆发生，其中引水洞占 16.67%，排水洞占 27.03%，但以时滞型岩爆居多。究其原因，一方面是隧洞开挖后，部分区域支护措施滞后，未形成有效支护强度；另一方面是隧洞群多工作面同时施工，隧洞频繁受到开挖爆破扰动的影响。时滞型岩爆孕育机制详细分析参见文献[13]。

3.3 岩爆潜在风险重点关注区域

深部岩体处于三向原岩高应力平衡状态，其内部贮存大量弹性能。隧洞开挖卸载后，岩体内原有的应力平衡被打破，由此引起岩体内的应力重分布，原来的三向受力状态变为二向受力状态，甚至出现单向受力状态，局部产生应力集中。这种应力状态

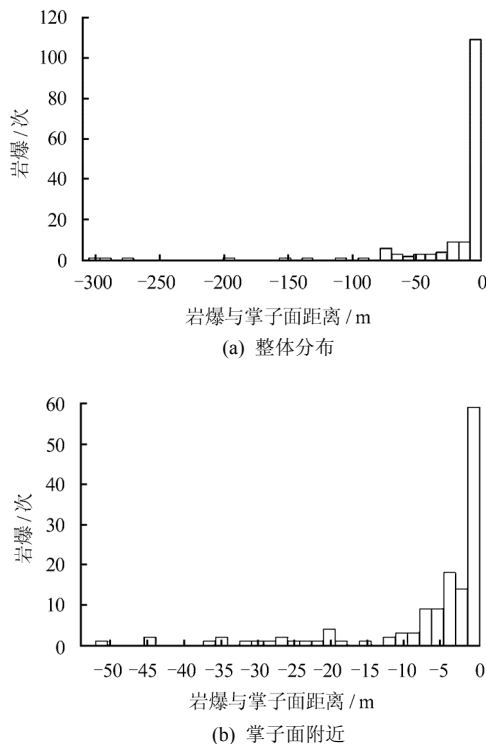


图 4 1#~4#引水隧洞微震监测范围内岩爆分布范围
Fig.4 Distribution range of rockburst in microseismic monitoring region of diversion tunnels #1-#4

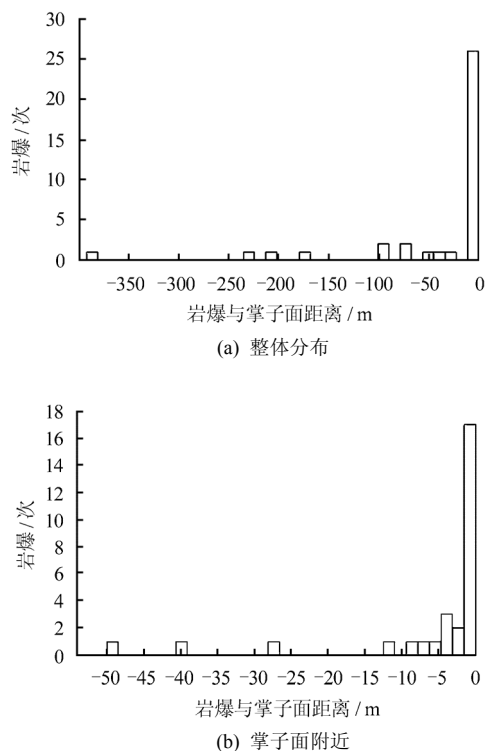


图5 排水洞微震监测范围内岩爆分布范围

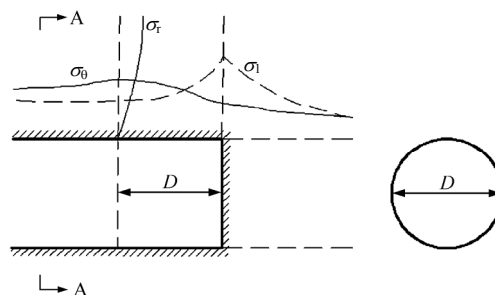
Fig.5 Distribution range of rockburst in microseismic monitoring region of drainage tunnel

的变化必然会导致积聚在岩体中的弹性能释放,使开挖面附近岩体产生破裂活动,伴随微震现象,甚至发生岩爆等强烈的脆性响应,直到形成新的稳定的应力平衡状态为止。应力平衡系统的重建是一个动态演化过程,其实质是围岩应力状态的持续调整,同时导致众多微破裂活动,并伴随大量微震事件,故微震活动区直接反映了围岩应力的调整范围,即介于掌子面后方3倍洞径至前方1.5倍洞径之间。

加拿大 Mine-By 试验隧洞(长为46 m,直径为3.5 m)机械开挖段的现场监测结果显示^[15],高应力隧洞掌子面开挖卸荷后无支护条件下,掌子面后方微震(应力调整)活动主要集中在约2倍洞径范围内。三向光弹试验和三维有限元分析结果^[16]表明,隧洞应力调整范围大约介于掌子面前方1倍洞径至掌子面后方2倍洞径之间,其中沿洞轴向最大应力位于掌子面附近,最大切向应力位于掌子面后方1倍洞径处,随着掌子面的推进,应力调整范围逐渐前移,如图6所示。经对比分析得出,现场监测结果与试验结果基本相符。由于实际工程受地应力大小、地层岩性、地质构造、水文地质条件、开挖施工方法等诸多因素的影响,导致由现场监测数据确定的围岩应力调整范围较试验结果稍大,但更符合实际情况。

由此得出,隧洞工程岩爆潜在风险重点关注区

域是掌子面后方3倍洞径已开挖范围,以及掌子面前方1.5倍洞径施工范围。



图中 σ_0 、 σ_r 及 σ_1 分别为洞壁切向、径向及轴向应力; D 为洞径

图6 掌子面附近的应力分布^[16]

Fig.6 Stress distribution near the work face

4 深埋隧洞微震事件空间分布特征及其与岩爆的关系

4.1 微震事件及岩爆空间分布特征

(1) 大多数岩爆在孕育过程中,微震事件持续增加,位置不断集中,最后形成集结区^[12]。

(2) 微震事件及岩爆分布呈现区域性集结特点。

微震监测范围内,各洞段微震事件及岩爆分布规律基本一致。限于篇幅,仅以典型洞段为例分析微震事件和岩爆分布规律及其影响因素,以期得出一些有益认识。由图7可见,引(4)5+097~6+085洞段埋深介于1 598.14~2 114.58 m之间,增幅为32.32%,埋深差异对岩爆影响较大;该洞段为 T_{2b} 灰白色厚层状中细晶大理岩,岩石新鲜,属II、III类围岩,其完整性较好,岩溶不发育,地下水不丰富,仅局部区域存在渗滴水。

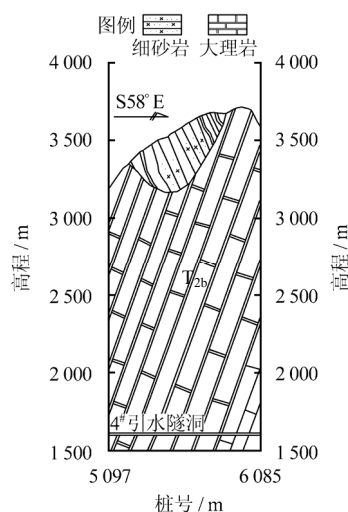


图7 引(4)5+097~6+085洞段工程地质剖面图

Fig.7 Geologic profile of the fourth diversion tunnel ranging from 5 097 to 6 085 m

由图8可见, 该洞段微震事件及岩爆呈现区域性集结的特点, 其中引(4)5+730~6+085区段大部分区域产生众多微震事件, 且较大震级事件多, 分布集中, 微震非常活跃, 多次发生岩爆, 其主要原因: 一是该范围洞壁干燥, 围岩以III类为主, 发育多组结构面, 存在局部应力集中; 二是隧洞埋深(2070.43~2114.58 m)大、地应力高。

另外, 部分微震活跃区未发生岩爆, 主要是由于施工过程中及时加强了支护, 提高了围岩完整程度和整体承载能力, 显著增加了围岩强度和抗冲击能力所致。引(4)5+446~730及引(4)5+097~336区段围岩为II类, 结构面不发育, 以小震级事

件为主, 空间上具有整体分散、局部集中的特点, 随着埋深的减小, 微震活动呈减弱趋势, 事件集结区发生3次中等岩爆。引(4)5+336~446区段围岩为III类, 其结构面发育, 并有渗滴水, 产生微震事件少, 且以小震级居多, 微震较弱, 岩爆风险低。

基于上述分析可以看出, 一方面, 由东向西, 随着埋深减小, 地应力降低, 微震事件呈减少趋势, 微震活动逐渐减弱, 岩爆强度及频次递减; 另一方面, 微震事件及岩爆分布呈区域性集结特点, 其主要原因是隧洞埋深及地质条件存在差异; 另外, 开挖施工方法如支护情况也是其原因之一。

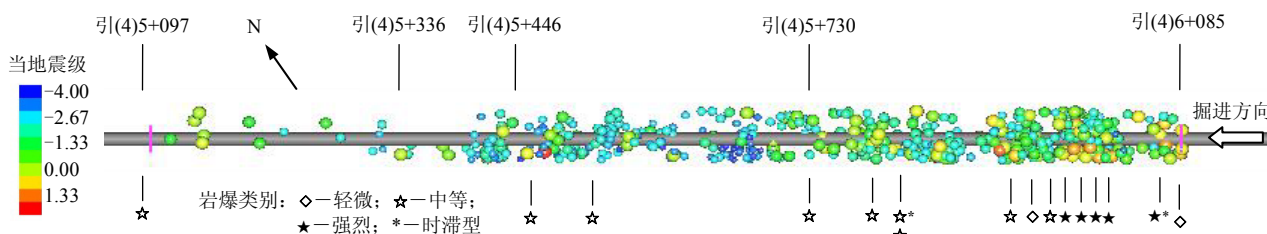


图8 引(4)5+097~6+085洞段微震事件及岩爆分布
Fig.8 Distribution of microseismic events and rockbursts in the fourth diversion tunnel ranging from 5 097 to 6 085 m

4.2 微震事件集结区与岩爆位置的关系

对现场监测数据及上百个岩爆实例进行统计分析得出:

(1) 一部分岩爆发生于微震事件集结区内部, 如图9(a)、(b)所示。

(2) 另一部分岩爆发生于微震事件(微破裂)集结区边缘, 而不是集结区内部, 如图9(c)~(g)所示。该现象与前人的室内试验结果较为一致, 见图10。文献[17]试验结果表明, 透明的脆性有机玻璃板微破裂空间分布存在如下现象: 微破裂丛集(集结)区在预置缝中部, 而大破裂却发生在裂缝延长线上或其分支上。另外, 1992年中俄美合作大样本岩石(灰岩, 尺寸1000 mm×500 mm×500 mm)声发射试验结果亦显示, 微破裂集结的位置不一定位于微破裂发育的中心, 特别是大事件往往发生在成核区的边缘, 而不是成核区中心^[18]。基于室内试验及现场监测结果证实, 岩爆(或大破裂)发生于微破裂集结区边缘这一现象是客观存在的, 并非个别现象, 是岩体破坏过程中所固有的现象。

研究发现, 该现象与微破裂集结区围岩应力场的非均匀性密切相关。一般地, 在隧洞开挖卸荷作用下, 围岩应力重分布, 引起应力集中, 进而使岩

体发生破裂活动, 并伴有微震事件; 岩体破裂活动越强烈, 事件越集结。在应力调整初期, 岩体近似于均匀变形, 微破裂的萌生和发展具有弥散特性, 呈随机的均匀分布, 彼此间相距较远, 单个微破裂的影响范围较小, 仅对有限范围内的相邻微破裂产生影响。随着围岩应力进一步调整, 岩体内部固有缺陷附近产生局部应力集中, 使得微破裂的产生和演化从无序转为有序, 出现局部化, 微破裂密度增大, 相互间作用加强, 导致微破裂相互归并成核, 形成宏观裂缝。在围岩应力调整、微破裂演化过程中, 微震事件分布由分散逐步变成集中。一方面, 当事件集结到一定程度时, 集结区岩体完整性变差, 承载能力下降, 岩体强度降低, 对周围岩体约束作用减弱; 另一方面, 众多微破裂活动造成事件集结区能量耗散, 应力松弛, 出现应力转移, 导致事件集结区边缘形成高应力集中, 储存大量可释放应变能, 使岩体处于临界稳定状态。由于在开挖扰动作用下, 原有和新生微破裂进一步向前扩展延伸, 事件集结区边缘原有能量平衡系统势必被打破, 从而导致围岩储存应变能突然释放, 使岩体产生爆裂、松脱、剥离、弹射、抛掷等破坏现象的动力失稳地质灾害, 即发生岩爆。

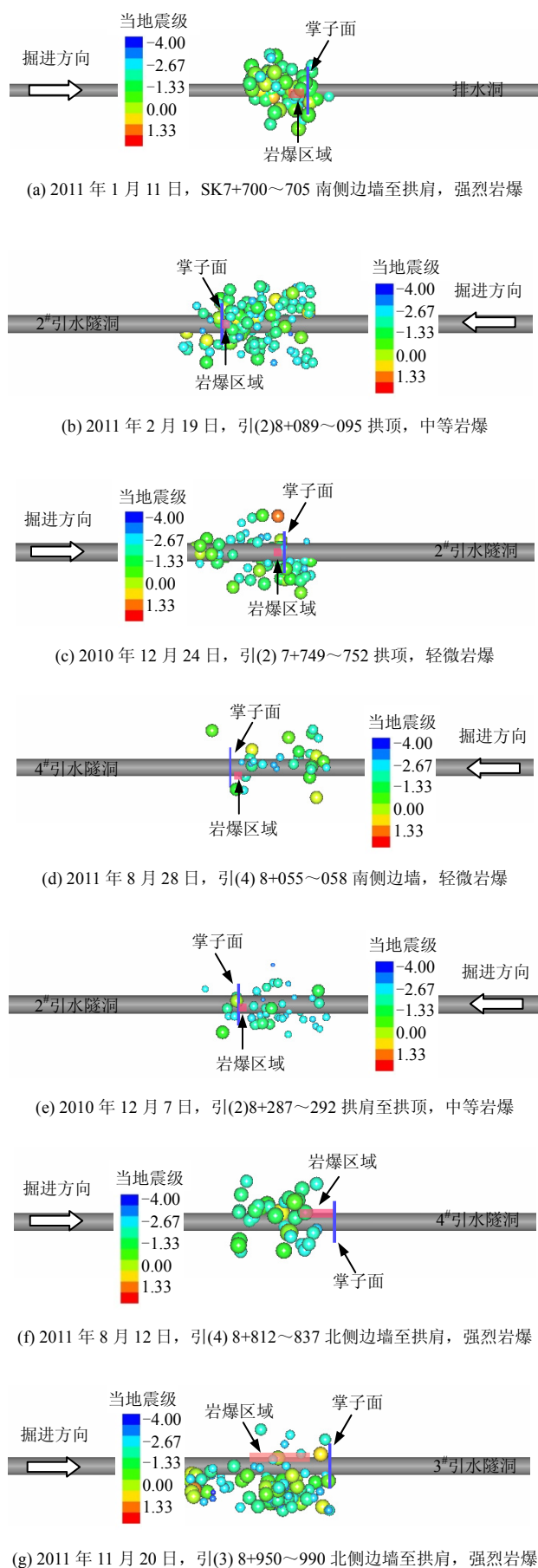


图9 不同等级典型岩爆与微震事件集结区的关系
 Fig.9 Relativity between typical rockbursts with different intensities and microseismic activities aggregation zone

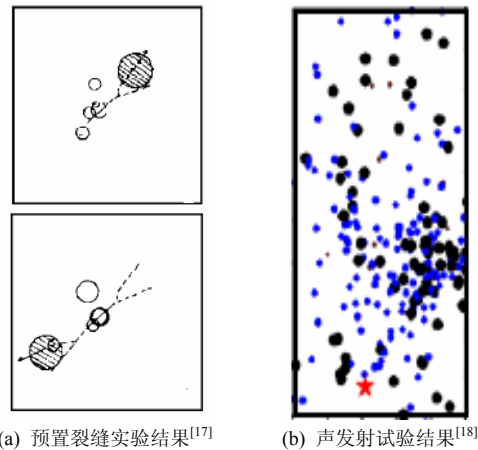


图10 大事件与微破裂集结区的关系
 Fig.10 Relativity between high-energy event and microfracturing aggregation zone

5 结论

- (1) 微震事件(活动)分布范围主要介于掌子面后方3倍洞径至前方1.5倍洞径之间,而岩爆高发区置于掌子面后方3倍洞径以内,表明岩爆高发区与微震事件(活动)主要分布范围相吻合。
- (2) 隧洞工程岩爆潜在风险重点关注区域是掌子面后方3倍洞径已开挖范围,以及掌子面前方1.5倍洞径施工范围。
- (3) 微震事件(活动)及岩爆分布呈区域性集结特点,其中一部分岩爆发生于微震事件集结区内部,另一部分岩爆发生于微震事件(微破裂)集结区边缘,这是岩体破坏过程中所固有的现象,与微震事件集结区边缘局部应力集中密切相关。

致谢: 感谢中国科学院武汉岩土力学研究所明华军博士、肖亚勋博士、李清鹏硕士,及东北大学李广宽硕士、陈东方硕士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] 徐林生, 王兰生, 李天斌, 等. 二郎山公路隧道岩爆特征预测研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, (2): 55-59.
 XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Tian-bin, et al. Study on the character of rockburst and its forecasting in the Erlang Mountain tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1999, (2): 55-59.

[2] 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 ed. Challenges in Deep and High Stress Mining. Nedlands: Australian Center for Geomechanics, 2007: 130—140.
- [3] BLAKE W, HEDLEY D G F. Rockbursts: case studies from North American hardrock mines[M]. [S. 1.]: Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 2003: 19—28.
- [4] MIKULA P A. The practice of seismic management in mines—how to love your seismic monitoring system[C]// POTVIN Y, HUDYMA M ed. Controlling Seismic Risk-RaSiM6. Nedlands: Australian Center for Geomechanics, 2005: 21—31.
- [5] MENDECKI A J. Seismic monitoring in mines[M]. 1st ed. London: Chapman and Hall, 1997.
- [6] 杨承祥, 罗周全, 唐礼忠. 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 818—824.
YANG Cheng-xiang, LUO Zhou-quan, TANG Li-zhong. Study on rule of geostatic activity based on microseismic monitoring technique in deep mining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(4): 818—824.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣, 等. 煤岩冲击前兆微震频谱演变规律的试验与实证研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 519—525.
LU Cai-ping, DOU Lin-ming, WU Xing-rong, et al. Experimental and empirical research on frequency-spectrum evolution rule of rockburst precursory microseismic signals of coal-rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 519—525.
- [10] 杨志国, 于润沧, 郭然, 等. 基于微震监测技术的矿山高应力区采动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3632—3638.
YANG Zhi-guo, YU Run-cang, GUO Ran, et al. Research of mining based on microseismic monitoring technology in high-stress area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3632—3638.
- [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 Bing-ru, FENG Xia-ting, ZENG Xiong-hui, 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.
- [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-ru, 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.
- [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-ru, 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.
- [14] 尹祥础. 地震预报的新途径——加卸载响应比理论[J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 1—7.
YIN Xiang-chu. A new approach to earthquake prediction—load/unload response ratio(LURR) theory[J]. **Mechanics in Engineering**, 2004, 26(6): 1—7.
- [15] MARTIN C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1997, 34(5): 698—725.
- [16] 侯发亮, 刘小明, 王敏强. 岩爆成因再分析及烈度划分探讨[C]//第3届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992: 448—457.
HOU Fa-liang, LIU Xiao-ming, WANG Min-qiang. Discussion on rockburst origin and degree[C]// Proceedings of the 3rd Academic Conference on National Rock Dynamics. Wuhan: Technical University of Surveying and Mapping Press, 1992: 448—457.
- [17] 杨润海, 许昭永, 赵晋明, 等. 微破裂成核过程和应力(场)关系的实验研究[J]. 地震研究, 1998, 21(2): 128—133.
YANG Yun-hai, XU Zhao-yong, ZHAO Jin-ming, et al. Experimental study between core-forming process of micro rupture and stress field[J]. **Journal of Seismological Research**, 1998, 21(2): 128—133.
- [18] 李世愚, 和泰名, 尹祥础. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.