

基于微震监测技术的岩爆预警研究

黄志平¹,唐春安²,李立民³,张鹏海⁴

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 大连理工大学土木工程学院,辽宁 大连 116024;
3. 中铁第一勘察设计集团有限公司,陕西 西安 710043;4. 东北大学岩石破裂与失稳研究所,辽宁 沈阳 110004)

摘要 目的 通过微震监测系统(MMS)对锦屏二级水电站施工排水洞进行微震监测,对比分析“11·28”极强岩爆灾害实际情况与微震监测结果,探讨岩爆发生的前兆特征及预警预报方法.方法 首先对监测隧洞复杂条件下进行微震系统构建,然后进行数据采集、信号过滤与分析,总结微震事件多种指标演化规律.结果 提出“多指标、多步骤”综合评价强岩爆、极强岩爆微震预警机制:第一步,确定有效数据,事件数10次/d,能量0.1 kJ/次、位置距离临空面小于10 m;第二步,事件聚集度;第三步,突增事件,超过50次/d,能量超过10 kJ/次、累积能量超过100 kJ/次,是极强岩爆前兆.结论 发生强、极强岩爆前具有明显微破裂前兆特征,微震事件空间分布规律由无序、随机分散向有序、集中自组织演变;有效微震事件数目、集中程度、单个事件能量大小及其累计能量释放速率等多个指标是强、极强岩爆预警机制的重要依据.

关键词 微震监测;预警机制;深埋隧洞;岩爆;前兆特征

中图分类号 TU457 文献标志码 A

Research on Early Warning of Rock Burst Based on Microseismic Monitoring Technology

HUANG Zhiping¹, TANG Chun'an², LI Limin³, ZHANG Penghai⁴

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering; Dalian University of Technology; Dalian, China, 116024; 3. China Railway First Survey and Design Institute Co., Ltd., Xi'an, China, 710043; 4. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang, China, 110004)

Abstract: It aims to explore the precursory characteristics and early warning method of rockburst, the microseismic monitoring system MMS was used to monitoring the construction drainage tunnel in Jinping II hydropower station, by comparing the “11·28” strong rockburst disaster situation and microseismic monitoring results. First, microseismic monitoring system is set up under complex conditions of construction drainage tunnel, then data acquisition and signal filtering and analysis are carried out, the various indicators of microseismic events are summarized. The results show that “

收稿日期:2017-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51604175);中国博士后科学基金项目(2016M601338);秦岭输水隧洞越岭段岩爆微震监测技术服务项目(TYY-2017-WZJC-1)

作者简介:黄志平(1975—),男,博士,主要从事深部岩石力学岩爆灾害及微震技术方面研究.

multi-index and multi-steps comprehensive evaluation" is presented as early warning mechanism of strong rockburst and pole-strength rockburst. First step, effective datas are determined which number of events are more than 10 times/d, and energy is more than 0.1 kJ/time, and events distances is less than 10 m from free surface. Second step, event aggregation degree is observed. Third step, when events suddenly increase, the precursor of strong rockburst is judged by the fact which number of events are more than 50 times/d, energy is more than 10 kJ/time, and accumulative energy is more than 100 kJ/time. The following conclusions are obtained: a lot of obvious micro-rupture precursors arise before rockburst. Spatial distribution law of microseismic events is subjected from disorder, random distribution to the regional distribution with the increase of microseismic events, and from disorder to order dispersion concentration of self-organization evolution. The analysis of a number of quantitative indicators is adopted according to the number of microseismic events every day, spatial distance away from excavating face, concentration degree, energy released even in per unit time, accumulative energy release rate. Where the basis for the prediction of strong or pole-strong rockburst is provided.

Key words: microseismic monitoring; early warning mechanism; deep buried tunnel; rock burst; precursory characteristics

近年来,我国陆续启动了许多重大地下深部岩石工程,如深部资源开发、南水北调、海底交通隧道、西部水利资源开发等。这些岩石工程普遍具有一些特点:埋深大、洞线长、地下水丰富、地质条件复杂。随着岩体工程向深部发展,高应力条件下硬脆岩体发生“岩爆”的问题变得越来越突出,已经成为开采深部矿产资源以及建设大型地下工程必须面对的一大瓶颈问题^[1-3]。微震监测技术(Microseismic Monitoring Technique, MS)通过声波分析岩爆事件的时间、位置和震级(也称“时空强”三要素)。灵敏度较高的微震监测系统还可以捕捉比岩爆震级更小的岩石微破裂前兆事件,为岩爆预报提供了潜在的可能性。

20世纪40年代,美国矿业局^[4]首次使用微震监测技术探测地下矿井的岩爆灾害。20世纪60年代,南非在深部金矿开采中使用该技术进行岩爆研究^[5-6],取得一定效果。1983年,英国赛恩赫德雷煤矿^[7],井下BV15、BV24、BV26等采场工作面发生瓦斯冲击破坏,研究人员针对微震事件最高频率与瓦斯突出的关系进行了研究。加拿大萨德伯里盆地、南非约翰内斯堡金矿、美国科达伦多矿、澳大利亚西澳金矿、智利矿山广泛地建

立了微震监测站,使该技术成为监测冲击地压灾害主要手段^[8]。目前,由于我国微震监测技术应用的时间较晚,在20世纪70年代初期,我国部分工程应用微震技术,相关技术理论研究处于初步阶段。21世纪以来,唐春安^[9-10]、李庶林^[11]等引进加拿大ESG公司的微震监测技术建立了64通道全数字型微地震监测系统,对冲击地压预报进行了研究。姜福兴^[12-13]联合澳大利亚联邦科学院共同研制新型防爆微震监测系统,设计了井下微震定位监测系统,用于实时监测岩体破裂及灾变过程。在冬瓜山铜矿,冯夏庭^[14]、杨承祥^[15]所在的课题组引进南非ISS微震监测系统,对开采引起的岩体应力活动和变形规律进行了研究。雷文杰^[16]借助ESG微震监测系统提取突变信号的频带能量和事件数,及应力应变变曲线的4个阶段微震响应特征,预测现场岩体的宏观断裂失稳做了很好研究。

总体而言,MS技术在我国岩石工程中远没有达到普及应用的程度。究其原因,有如下两点:一是系统设备价格昂贵,二是应用过程中一直没有非常成功的岩爆监测预报案例,后者更是问题的关键。由于对于岩爆现象和机理的研究还缺乏深入的认识,迄今为止,

尚处于经验和假设阶段^[17-18],面对先进监测系统得到的大量监测数据,如何充分利用和分析这些第一手资料并进行合理的解释,从中得到可以预测未来岩爆的信息,则是岩爆监测预报工作中的难点.针对以上问题,笔者基于锦屏二级水电站施工排水洞的微震监测数据,以“11·28”极强岩爆为例,对岩爆发生前的微震事件数、空间位置、能量等数据进行详细分析,尝试揭示岩爆发生的前兆特征及提出岩爆预警的初步方法.

1 工程概况

根据所监测隧洞排水洞揭露地层情况,岩石多为大理岩,新鲜、性脆、硬质岩,岩体完

整性较好.围岩抗压强度通常在 60 ~ 90 MPa.隧洞上覆岩体一般埋深为 1 500 ~ 2 000 m,最大埋深为 2 525 m,具有埋深大、洞线长、洞径宽的特点.地质剖面图见图 1.排水洞位于 B 线辅助洞与 4#引水隧洞之间,洞径为 7.2 m,中心距分别为 35 m 和 45 m,长约 17.73 km.洞线平行于引水隧洞布置,主洞段方位角为 N58°W,施工排水洞西端延伸接西引 2#施工支洞,洞轴线由进口段 N82°E 经过转角 40°、半径 400 m 的转弯形成与引水隧洞、辅助洞平行 N58°W 洞轴线,东端桩号 SK15+834.255 m 交叉点处,洞轴线往南折向 N23.35°W 方位角.采用 TBM 法施工.

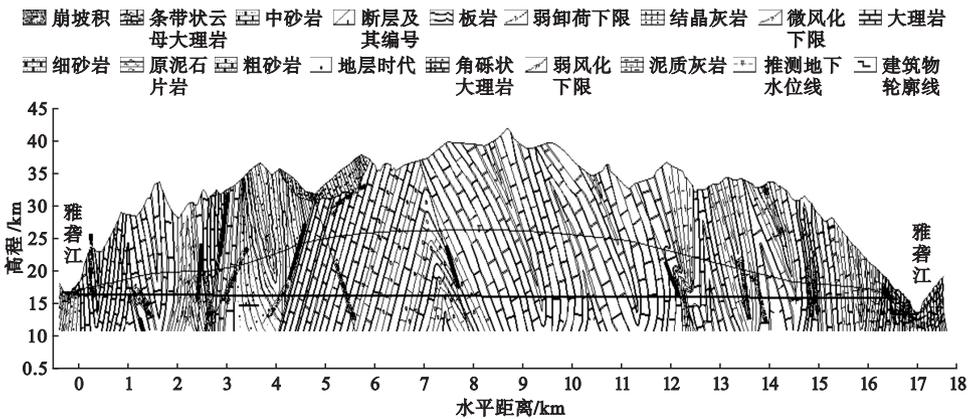


图 1 隧洞工程地质剖面图

Fig. 1 Geology cross-section drawn of tunnel engineering

2 微震事件信号初步分析

多个传感器在不同时刻不同位置接收到的多种典型信号如图 2 所示.

(1) TBM 掘进产生的信号(见图 2(a)):具有波形连续、振幅较低的特点,P 波和 S 波到达时间很难确定,因此一般也无法定位,信号电压振幅值较低,数量级为 10^{-2} .

(2) 机车鸣笛信号(见图 2(b)):对于传感器安装较浅或者传感器孔正好位于波源上方时,机车鸣笛容易产生信号,机车鸣笛的声波在空气中传播时衰减较快.信号电压振幅值较低,数量级为 10^{-1} .

(3) 微震事件信号(见图 2(c)):对于岩石微破裂所产生的事件,其电压值有高有低,有的 P 波 S 波到达明显,有的 P 波到达明显但 S 波到达并不明显,因此判断的时候不能一概而论,需要根据其产生的时间、电压值的大小、波形形状来综合判断.图 2(c) 显示 P 波和 S 波到达位置十分明显.如图 2(d) 中所示,S 波位置不明显.

(4) 岩爆信号如图 2(e) 和(f) 所示:微震监测系统监测到发生岩爆的波形为方形波,由于信号强烈,故大部分传感器均会接收到清晰信号,其中最大信号电压振幅值最大达到 5.7 V,最小的也是 4.4 V,相比 TBM 掘

进时所产生的最大信号电压振幅值数量级 破裂微震事件振幅值,最高可达 10 倍以上.
 10^{-2} 而言,将是后者 100 倍以上. 相比岩石微

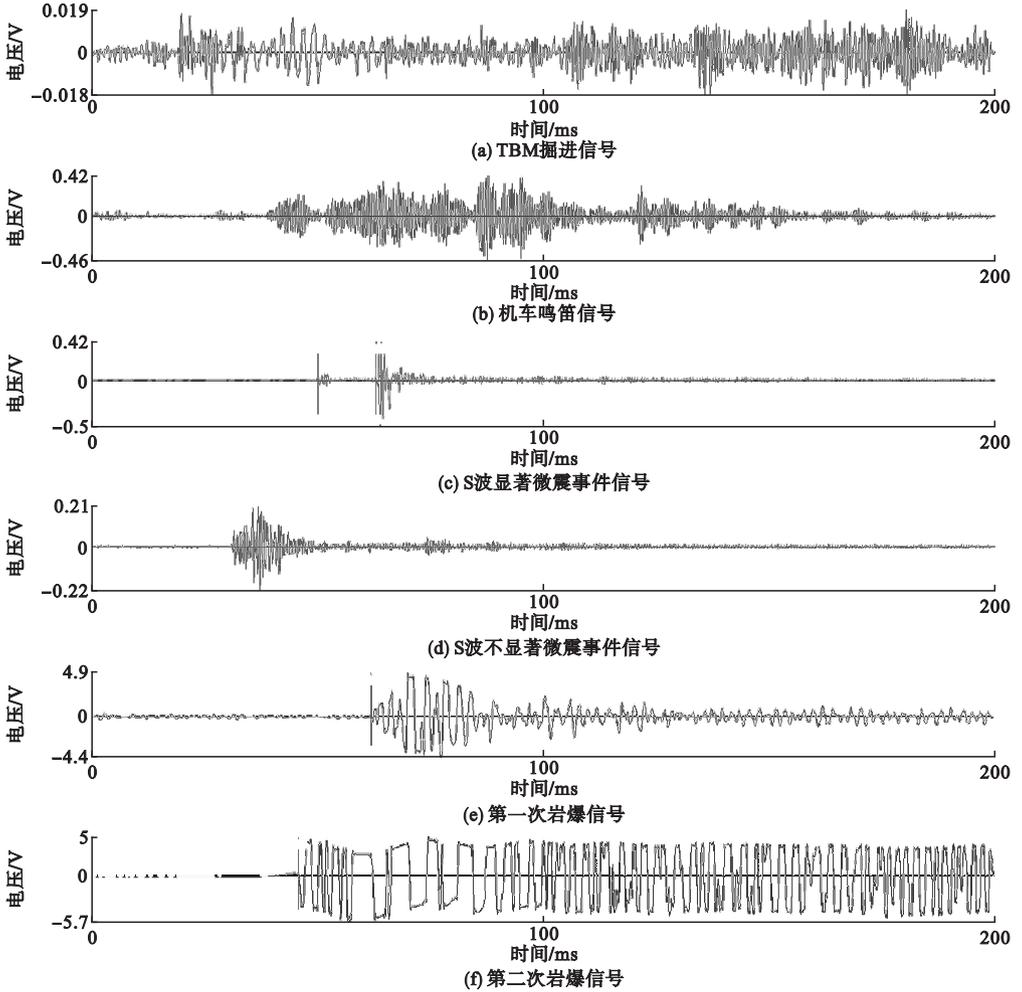


图 2 多种信号典型波形图

Fig. 2 A variety of typical signal waveforms

3 微震监测数据分析结果

3.1 微震事件空域分布

采用 P 波首次进入时间法进行定位,其原理是利用传感器接收的直达 P 波起始点的时间差,假设岩体均质、各向同性,即 P 波在各个传播方向上保持某一定值,在标定波速条件下进行空间定位.从震源传播到测站的最短时间可由下式描述:

$$t_i - t_0 = \frac{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2}}{v(x_0, y_0, z_0)} \quad (1)$$

式中: t_i 为 P 波到达第 i 个传感器的时间; t_0

为震源发震时间; (x_0, y_0, z_0) 为震源坐标; (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个传感器的坐标; $v(x_0, y_0, z_0)$ 为 P 波在介质中的传播速度.方程中有 (x_0, y_0, z_0, t_0) 4 个未知参数,故至少需要 4 个传感器的数据.如果每个传感器 P 波、S 波到达位置明显,两者结合定位,一般选取 3 个有效传感器亦可.

微震事件三维空间分布如图 3 所示.笔者选取 2009 年 9 月 23 日到 10 月 13 日部分监测结果,其中每天事件数超过 10 次.图中每一个微震事件都是以一个圆球表示,圆球半径越大,表示该事件释放能量越强.颜色不

同代表不同的微震震级,颜色愈深,表示震级愈大.从监测数据分析结果,显示微震事件初始是随机离散分布.随着微震事件增多,开始表现出局部区域相互聚集特征,除少部分事件离散分布外,大部分事件集中在一较小区域或者一条短线上范围内.微震事件愈集中,

表明这个区域岩石破裂愈严重,说明该区域愈危险,发生岩爆的可能性增加.不论是从垂直施工排水洞方向观察还是沿施工排水洞方向观察,微震事件的空间分布显示出自由无序分散向有序集中自组的演化规律.

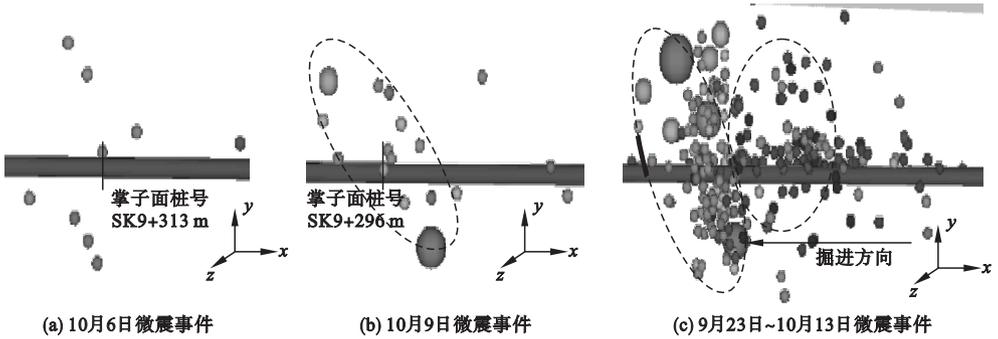


图3 微震事件三维空间分布图

Fig. 3 3D spatial distribution of microseismic events

3.2 微震事件能量释放大小分析

岩体在破坏过程中,产生裂纹,以弹性波的形式向外界辐射的能量是由于弹性变形向非弹性变形转化所产生的,可以描述地震发生前岩体的变化规律,在监测系统中,通过微震仪器接收并计算出来:

$$E_{p,s} = \frac{8}{5} \pi \rho v_{p,s} R^2 \int_0^{t_s} u_{con}^2(t) dt. \quad (2)$$

式中: ρ 为岩石密度; $v_{p,s}$ 为P波、S波波速; R 为到震源距离; $u_{con}^2(t)$ 为波形速度脉冲时间函数.

微震事件、能量释放与发生岩爆程度等级统计结果见表1.表中,每日微震事件释放能量随事件数增多而增加.总体上,微震事件

数越多累计释放能量越大.但是,不同时间段,事件数多少与能量大小,没有必然关系.即数目多,不一定就释放能量大,事件数较少,能量释放未必就少.比如10月3日事件数57次,分别多于4日、9日、14日、15日的53次、18次、9次、10次.而10月3日事件释放能量8.73 kJ,分别少于4日、9日、14日、15日的22.21 kJ、13.34 kJ、24.84 kJ、10.93 kJ.11月28日的63个,分别多于11月14日、15日、20日、21日的61次、35次、17次、26次,但是能量却为153.44 kJ,分别少于11月14日、15日、20日、21日的198.33 kJ、156.11 kJ、166.58 kJ、217.31 kJ.

表1 微震事件、能量释放与发生岩爆程度等级统计

Table 1 Microseismic events, energy release and rockburst degree statistics

日期	事件/次	能量/kJ	岩爆等级	日期	事件/次	能量/kJ	岩爆等级	日期	事件/次	能量/kJ	岩爆等级
9月23日	9	0.05	无	10月16日	5	7.52	中等	11月8日	7	0.95	轻微
9月24日	15	0.03	无	10月17日	9	0.34	无	11月9日	3	0.60	轻微
9月25日	16	0.81	轻微	10月18日	5	5.12	中等	11月10日	3	0.25	轻微
9月26日	0	0.00	无	10月19日	3	0.35	无	11月11日	3	0	无
9月27日	17	0.01	轻微	10月20日	2	0.40	无	11月12日	5	0.04	无

续表

日期	事件/ 次	能量/ kJ	岩爆 等级	日期	事件/ 次	能量/ kJ	岩爆 等级	日期	事件/ 次	能量/ kJ	岩爆 等级
9月28日	2	0.00	无	10月21日	2	0.15	无	11月13日	4	0.08	无
9月29日	8	0.02	无	10月22日	3	0.08	无	11月14日	61	198.33	强
9月30日	8	0.05	无	10月23日	5	0.07	无	11月15日	35	156.11	强
10月1日	12	2.19	中等	10月24日	2	0.00	无	11月16日	3	1.73	中等
10月2日	15	0.80	轻微	10月25日	1	0.02	无	11月17日	4	15.59	较强
10月3日	57	8.73	中等	10月26日	7	19.24	中等	11月18日	3	0.07	无
10月4日	53	22.21	较强	10月27日	6	3.59	中等	11月19日	5	2.58	中等
10月5日	17	4.09	中等	10月28日	1	0.06	无	11月20日	17	166.58	强
10月6日	10	1.64	中等	10月29日	9	12.99	中等	11月21日	26	217.31	强
10月7日	5	7.31	中等	10月30日	7	3.54	中等	11月22日	4	2.38	中等
10月8日	4	3.36	中等	10月31日	3	0.97	轻微	11月23日	1	0	无
10月9日	18	13.34	强	11月1日	4	0.59	轻微	11月24日	4	8.87	较强
10月10日	4	0.33	轻微	11月2日	3	1.33	轻微	11月25日	4	10.10	较强
10月11日	5	0.09	无	11月3日	3	1.13	轻微	11月26日	1	0.00	无
10月12日	1	0.03	无	11月4日	3	12.44	中等	11月27日	0	0.00	无
10月13日	0	0.00	无	11月5日	5	5.99	中等	11月28日	63	153.44	极强
10月14日	9	24.84	较强	11月6日	15	15.29	较强	11月29日	0	0	无
10月15日	10	10.93	较强	11月7日	23	19.57	较强				

从9月23日~11月29日的测试数据统计可知,在10月3日、4日、9日事件数分别是57次、53次、18次,11月6日、7日、14日、15日、20日、21日、28日事件数分别是15次、23次、61次、35次、17次、26次、63次。整个监测期间内,可以求出微震事件数平均值为10.1次/d,但不同时段内发生微震事件数目存在明显差别。在岩爆密集发生时段内,微震事件较多。预测10月3日、4日岩爆为轻微到中等等级,而10月9日为强岩爆等级,如在9月23日~10月9日,微震事件平均数为15.6个,在10月1日至10月9日,微震事件数平均值为21.2次/d。而在10月10日~11月5日,进行机器维修、隧洞支护导致掘进速度缓慢时,微震事件数平均为4.5次/d。在11月6日~11月28日,微震事件平均数为12.8次/d。在这段时间内,出现了多次微震事件数明显升高现象,尤其对于

发生岩爆当日和相邻日,微震数出现突增现象。事件数多不一定释放能量多,仅仅根据微震事件数目判断岩爆等级,有可能得到与实际情况相反结果,因此除了考虑微震事件数目多少,还要考虑能量释放问题。

累计释放能量曲线如图4所示。从图中可以看出,监测期间内平均每日的能量为17.11 kJ,根据每日平均能量的变化可将监测期间大致分为三个阶段:9月23日~10月9日为第一阶段,能量平均值为3.8 kJ/d(其中岩爆发生后10月1日~10月9日为7.08 kJ/d);10月10日~11月5日为第二阶段,能量平均值为4.15 kJ/d;11月6日~11月28日为第三阶段,能量平均值为42.17 kJ/d。在第一阶段发生了中等到较强岩爆,第二阶段为塌方和轻微的岩爆,第三阶段为强岩爆到极强岩爆。

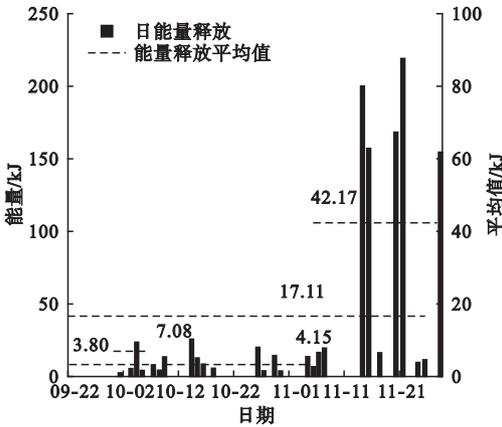


图4 施工排水洞 TBM 掘进微震事件能量释放

Fig. 4 Energy release of microseismic event in the drain tunnel with TBM boring

3.3 微震事件能量释放时域分析

极低能量的微震事件对岩爆孕育过程的影响甚微,图5中仅列出了单个微震事件能量释放大于0.1 kJ的能量统计与时间的关系。“11·28”极强岩爆发生前1 min内释放能量累计为104.41 kJ,2 min内累计释放120.31 kJ,12 min内累计释放141.53 kJ,从0:42:43到2:39:31,累计释放了153.44 kJ.从微震监测数据可见,释放能量开始显现剧烈,然后逐渐降低直至消失,在较短时间内连续出现较大能量的微震事件.可知这次极强岩爆的特点:微震事件多而集中、能量大、时间短、位置靠近掌子面.

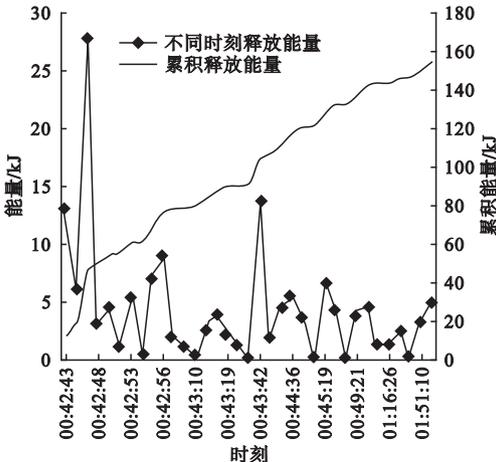


图5 “11·28”极强岩爆释放能量与时间关系

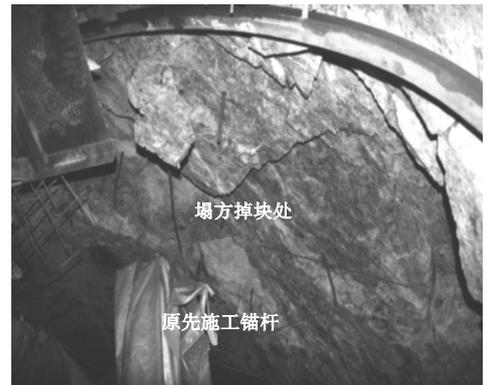
Fig. 5 Relationship between energy release and time of extremely strong rockburst in “11·28”

4 监测与实际岩爆比较分析

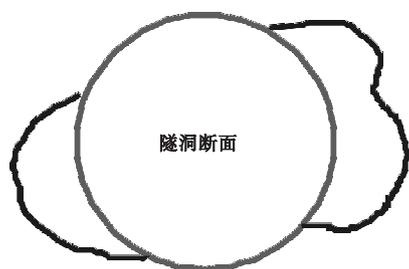
根据微震事件处理对10月9日的强岩爆做出预测分析.第一次出现微震震源时,预测在掌子面桩号SK9+296 m将发生岩爆,当第二次微震震源出现后,预测岩爆区位置桩号SK9+301~319 m.应及时对相关施工单位及上级管理部门进行两次岩爆预报通报.10月9日上午,在现场离预测岩爆区域10 m左右位置开始发生了强烈岩爆导致大面积塌方及现场TBM停机.如图6所示岩爆多发生于洞室两侧,产生时无征兆,具有突发性伴有清脆的响声或闷声,初次岩爆产生部位大多位于刀盘之内(距掌子面0~5 m),多为轻微岩爆,其次位于TBM刀盘与撑靴之间(据掌子面5~15 m),多为中等至强烈岩爆,破坏性极大.根据微震监测结果与实际岩爆破坏吻合情况,表明破坏位置与微震事件空间分布十分一致.



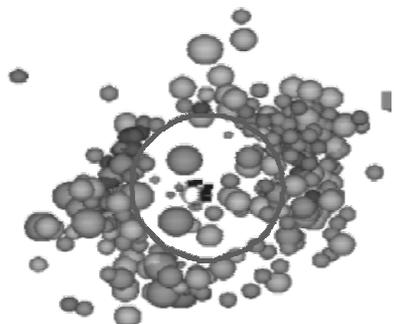
(a) 隧洞南侧壁实际岩爆位置



(b) 隧洞北侧壁实际岩爆位置



(c) 隧洞岩爆示意图



(d) 隧洞岩爆微震事件监测图

图6 常见岩爆发生的部位实际图与示意图

Fig. 6 Site actual figure happened and schematic diagram of common rock burst

在桩号 SK9 + 288 m ~ SK9 + 317 m 段掘进过程中,于2009年11月28日凌晨0:50分发生极强岩爆. 强烈的冲击波伴有轰雷般震耳响声,引起 TBM 设备剧烈的震动,整个隧洞空间瞬间弥漫灰白色的粉尘,持续约 10 分钟后逐渐消散. 破坏范围为延洞轴线长度约 35 m,顶拱及两侧边墙大范围坍塌,爆坑塌落最深处约 8 m 左右(11月30日测量),在岩爆破坏范围内的支护全部损坏,设备受损严重,该次岩爆造成 TBM 主梁断裂, TBM 刀盘向后约 30 m 范围内被石碴掩埋. 把这次巨大地质灾害事件称为“11·28”极强岩爆.

5 结 论

(1) 提出强岩爆及极强岩爆“多指标、多步骤”综合评价的微震预警方法. 第一步确定用于预警的数据范畴,针对本次监测的深埋大理岩隧洞,可以选择每日微震事件数在 10 个以上、事件发生位置距离临空面(如掌子面、已开挖隧洞和硐室自由面)小于 10 m

范围以及能量释放在 0.1 kJ 以上的微震事件作为预警分析的数据集;第二步考察微震事件的聚集程度和迁移方向;第三步重点关注异常情况,微震事件突增,事件数目超过 50 次/d,几分钟之内连续出现较大能量的微震事件、单个事件能量释放超过 10 kJ、累积能量释放超过 100 kJ,是极强岩爆的特征.

(2) 揭示微震事件的空间演化过程及其规律. 初始事件分布特征呈现离散随机性,随着微震事件的增多,逐渐由分散无序向集中有序自组织演变. 说明岩爆是岩体破裂、积累、及局部破坏的结果,同时这些微破裂前兆是可以被微震监测系统所监测到的.

(3) 对于锦屏二级水电站大理岩施工排水洞“11·28”岩爆,采用 TBM 掘进施工,把每日有效微震事件超过 10 个的高频次的微震信号应作为岩爆预警的重要因素之一. 一旦每日发生微震事件超过 10 个,则需要密切关注,加强支护、或者改变掘进速度及其他预防岩爆的措施.

参考文献

- [1] 唐春安. 深埋地下工程岩爆灾害机制及其预警方法研究[C]// 第一届中俄矿山深部开采岩石动力学高层论坛论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2011.
(TANG Chun'an. Research on rockbursts mechanics and early warning methods in deep buried underground engineering [C]// The First High-level Forum on Rock Dynamic Mechanics during Deep Caving in Mine between China and Russia. [S. l.]: [s. n.], 2011.)
- [2] DOU L, CHEN T, GONG S, et al. Rockburst hazard determination by using computed tomography technology in deep workforce[J]. Safety science, 2012, 50(4): 736 - 740.
- [3] 李世愚, 和雪松, 张少泉, 等. 矿山地震监测技术的进展及最新成果[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 853 - 859.
(LI Shiyu, HE Xuesong, ZHANG Shaoquan, et al. Development and recent achievement of mining shock observation[J]. Progress in geophysics, 2004, 19(4): 853 - 859.)
- [4] JENKINS F M, WILLIAMS T J, WIDEMAN C J. Rock burst mechanism studies at the Lucky Friday Mine [C]// Proceedings of the 31st U. S. Symp. Rock Mechanics. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990.

- [5] 樊栓保. 国内外煤与瓦斯突出预测的新方法[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(5): 17-19. (FAN Shuanbao. New method of coal and gas outburst prediction at home and abroad [J]. Mining safety and environmental protection, 2000, 27(5): 17-19.)
- [6] POTVIN Y, HUDYMA M R. Seismic monitoring in highly mechanized hard rock mines in Canada and Australia [C]//Rock Burst and Seismicity in Mines. Johannesburg: SAIMM, 2001.
- [7] MORRISON D M, MACDONALD P. Rockbursts at Inco mines [C]//Fairhurst. Rock Burst and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990.
- [8] GREEN R W E. Instrumentation networks for observation of mine-induced seismicity [C]//Rockburst and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1990.
- [9] 唐春安, 王继敏. 岩爆及其微震监测预报: 可行性与初步实践[J]. 岩石力学与工程动态, 2010, 89(1): 43-55. (TANG Chun'an, WANG Jimin. Rock and seismic monitoring and prediction: the feasibility and the preliminary practice [J]. Rock mechanics and engineering news, 2010, 89(1): 43-55.)
- [10] 唐春安. 岩石的破裂、失稳及岩爆[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004. (TANG Chun'an. Fracture, instability and rockburst of rocks [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004.)
- [11] 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 Shulin, YIN Xiangang, ZHENG Wenda, et al. Research of multi-channel microseismic monitoring system and its application to Fankou lead-zinc mine [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2005, 24(12): 2048-2053.)
- [12] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1932-1937. (JIANG Fuxing, YE Genxi, WANG Cunwen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(9): 1932-1937.)
- [13] 姜福兴, 苗小虎, 王存文, 等. 构造控制型冲击地压的微地震监测预警研究与实践[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 900-903. (JIANG Fuxing, MIAO Xiaohu, WANG Cunwen, et al. Predicting research and practice of tectonic controlled coal burst by micro-seismic monitoring [J]. Journal of China coal society, 2010, 35(6): 900-903.)
- [14] 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 Hua-jun, et al. Evolution law and mechanism of rock bursts in deep tunnels: immediate rock burst [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2012, 31(3): 433-444.)
- [15] 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 Chengxiang, LUO Zhouquan, TANG Lizhong. Study on rule of geostatic activity based on micro-seismic monitoring technique in deep mining [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2007, 26(4): 818-824.)
- [16] 雷文杰, 王洪栋. 砂岩单轴压缩微震响应小波包能谱特征[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1111-1115. (LEI Wenjie, WANG Hongdong. Characteristics wavelet packet energy spectrum on micro-seismic activities of sandstone samples under uni-axial compressive tests [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(5): 1111-1115.)
- [17] BROWN E T. Rock burst: prediction and control, tunnels and tunneling [M]. [S. l.]: [s. n.], 1984.
- [18] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock [M]. London: The Institution of Mining and Metallurgy, 1980.