

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.03.005

基于微震监测的岩爆预警方法研究

吴海源¹, 于群¹, 杜志远¹, 郭晋¹, 廖志毅², 唐春安³

(1. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 深地科学与绿色能源研究院,
土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;

3. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以锦屏二级水电站深部隧洞为研究对象, 采用微震监测技术, 对卸荷作用下的深埋隧洞微震活动性时空分布规律及时序规律展开研究。基于现场岩爆记录与微震监测结果比对, 探讨了岩爆与微震活动间的内在联系并提出深埋隧洞岩爆监测预警方法。监测结果表明: 岩爆发生前具有明显的微破裂前兆特征, 微震事件由空间无序分散逐渐向有序集中的自组织演化, 微震参数包括累计事件数、微震能量密度、累积视体积及能量指数的异常变化均可作为岩爆预警指标。基于研究结果, 提出高地应力条件下深埋隧洞岩爆监测预警方法, 预测准确率达到80.6%, 实用效果较好并为此类地下工程的岩爆预测提供借鉴意义。

关键词: 岩爆; 微震监测; 微破裂前兆; 预测预警

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)03—0025—06

Rockburst Early Warning Method Based on Microseismic Monitoring Technology

WU Haiyuan¹, YU Qun¹, DU Zhiyuan¹, GUO Jin¹, LIAO Zhiyi², TANG Chun'an³

(1. Shenyang University of Technology, School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang, Liaoning 110870, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization,
Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, College of Civil and Transportation Engineering,
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

3. Dalian University of Technology, State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to reveal the internal relationship between rockburst and microseismic activities and to propose the monitoring and early warning method of rockburst in deep tunnel, the deep-buried tunnel of Jinping II Hydropower Station is taken as an example. The spatiotemporal distribution and time sequence characteristics of microseismic activities in deep-buried diversion tunnel under unloading are analyzed in detail with the aid of the microseismic monitoring technology. The monitoring results show that the rockburst has obvious precursory characteristics of micro-fracture before the occurrence of rockburst. Microseismic events gradually evolve from spatial disordered dispersion to ordered set, and the abnormal changes of the microseismic indicator, i. e., cumulative events, energy density, cumulative apparent volume and energy index, could be regarded as an early warning index of rockburst. A rockburst monitoring and early warning method for deep and long tunnels under high ground stress is then proposed, and the corresponding predicted accuracy is demonstrated as high as 80.6%. The results in this study show good effects in practical application and provide an important reference for the prediction of rockburst in of the deep underground engineering.

Keywords: rockburst; microseismic monitoring; micro-fracture precursor; early warning

收稿日期: 2020-02-10

修稿日期: 2020-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51904189)

作者简介: 吴海源(2000—), 男, 四川达州人, 本科在读, 所学专业为城市地下空间工程。E-mail: why00731@hotmail.com

岩爆是在外界扰动影响下,存储于岩体中的弹性应变能突然释放,导致围岩爆裂弹射的动力失稳现象,是地下工程尤其是深部地下工程常见的动力地质灾害。岩爆的危险性主要在于发生过程短促,具有很强的突发性、随机性和危害性^[1-3],常常使人猝不及防造成严重伤亡,甚至摧垮整个工作面,对工程建设威胁巨大。2009 年 11 月 28 日,四川雅砻江锦屏 II 级水电站施工排水洞突发极强岩爆,塌方总量达 400 余 m^3 ,并造成价值 1.2 亿 TBM (Tunnel Boring Machine, TBM) 永久性长埋和 7 死 1 伤的惨痛局面。由此可见,岩爆对于地下工程建设和人员安全危害巨大,如何有效预测及控制岩爆灾害的发生已成为我国地下工程安全建设亟待解决的问题。

对岩爆监测而言,传统监测手段仅能测得局部岩体的应力或应变,却无法评价整体岩体的稳定性。近年来,微震监测技术 (Microseismic Monitoring Technology, MMT) 作为先进的空间岩体微破裂监测技术,基于对岩体微破裂事件的捕获和定位算法,从而对潜在危险区和岩爆区进行圈定和识别。该监测技术已在采矿工程^[4-6]、地下工程^[7]、隧道工程^[8]、水利水电工程^[9-11]等领域得到广泛应用并取得了丰富的研究成果,使得对岩体的稳定性评价及岩爆的预测预警成为可能。但上述研究内容及成果仍存在以下不足:

(1) 岩爆预警指标单一。岩体微破裂的每个信号都包含了岩体状态变化的丰富信息,而如何面对先进系统获取大量的监测数据,基于对数据的挖掘进行合理的解释,从中得到预测岩爆的多元信息,则是岩爆预警工作中的重点。

(2) 岩爆预测预警判别标准和评判体系不够健全。现有关于微震信息在岩爆预警中应用的报道主要体现在成功个案上,由此建立的预警判据和方法缺乏普适性。

全长超过 17 km 的雅砻江锦屏水电工程交通隧洞穿越不同地层单元,全面贯通后岩爆累计长度达 3.31 km,发生烈度大频度高,造成严重的人员伤亡和设备损失。因此,本文以锦屏水电工程引水洞发生的多次中等至强烈岩爆为例,通过微震监测技术,基于微震事件“时空强”演化特征,对岩爆发生前的微破裂前兆特征开展研究,揭示微震预警指标,包括微震累积事件数、微震能量密度、累积视体积及能量指数的时空变化规律与岩爆内在联系,提出深埋隧洞岩爆监测预警方法。

1 工程地质概况及微震监测系统的构建

1.1 工程概况

锦屏水电工程坐落于四川凉山州雅砻江上,是

我国西电东送的重要标志性工程。水电工程隧洞群是由平均长度超过 16.7 km,走向 $\text{N}58^\circ\text{W}$ 的相互平行的 7 条隧洞组成,分别由交通洞、引水洞及排水洞组成。施工过程分别采用 TBM 法和钻爆法掘进。各条隧洞开挖形状、截面尺寸及剖面布置详图如图 1 所示。

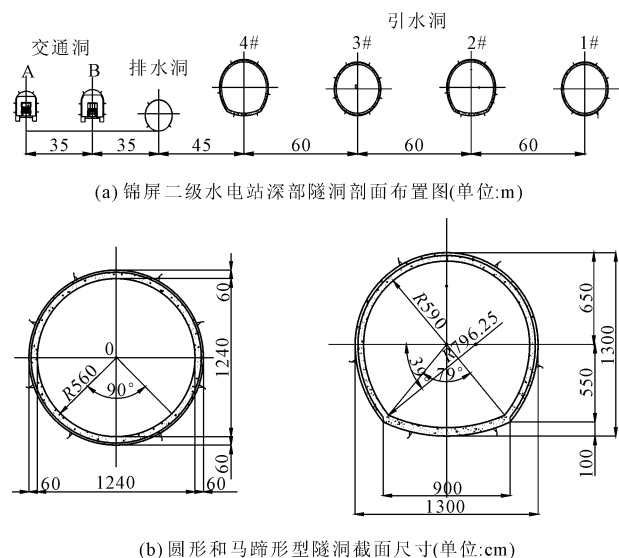


图 1 锦屏水电工程隧洞群总体布置及施工详图

1.2 地质概况

锦屏 II 级水电站工程地质平面图详见图 2,工程所处地层总体走向以 NNE 向为主,隧洞群由西往东依次穿过的主要岩层有三迭系下统绿泥片岩和变质中细砂岩等地层 T_1 、杂古脑组大理岩 T_{2z} 、三迭系上统板砂岩 T_3 、白山组大理岩 T_{2b} 及盐塘组大理岩 T_{2y} 。围岩新鲜性脆硬质岩,岩体完整性较好,围岩抗压强度在 55 MPa ~ 114 MPa,隧洞群埋深深度从 1 500 m 至 2 200 m 不等,最大埋深为 2 525 m,该隧洞具有埋深大、洞线长、施工难度大及地质条件多样复杂等特点,是我国现有的特大型地下水工程。

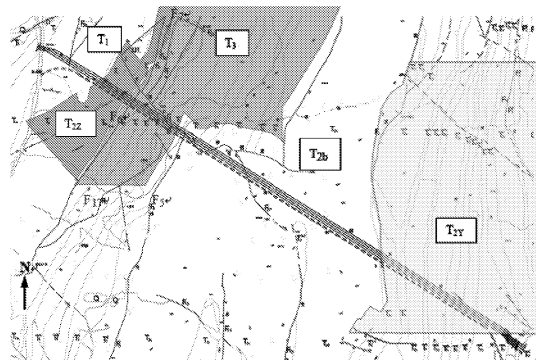


图 2 锦屏二级水电工程地质平面图

1.3 微震监测原理及监测系统的构建

工程扰动影响下,岩体内部必将产生局部应力积累和集中现象,当积累的应力能超过岩体强度后,就会在其内部产生微破裂事件,并伴随弹性波的快速释放和传播,这种现象在地质上称为微震(MS)。与此同时,该弹性波可被由周围布置的多个传感器所接收,通过对波形的处理分析并基于反演方法就可以得到岩体中微破裂事件发生的时间、空间和强度,即地球物理学中的“时、空、强”三要素^[12]。微震事件定位原理如图3所示。根据微裂纹的破裂和损伤程度,就有可能推断岩石宏观破裂的发展趋势。

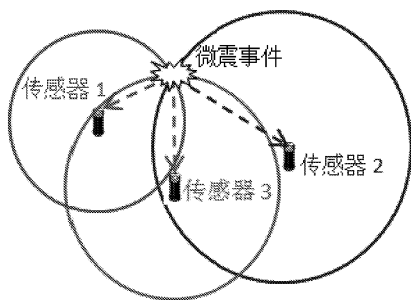


图3 微震监测原理图

锦屏水电工程微震监测采用 ESG (Engineering Solution Group, ESG) 监测系统,该系统主要由三部分构成:信号采集系统、信号处理系统及传感器。传感器以阵列形式安装在隧洞壁的两侧(每侧布置三个),传感器间隔 50 m。微震监测系统工作原理及工作流程见图4所示。

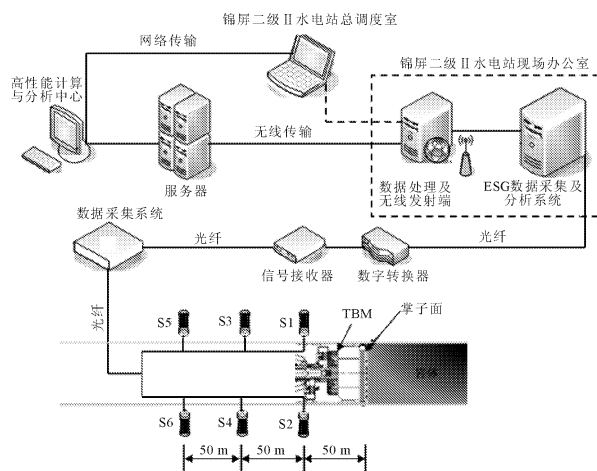


图4 锦屏水电工程微震监测系统工作流程图

2 岩爆监测预警方法研究

2.1 岩爆预测预警指标

随着地球物理学的发展及对岩爆问题认识的深

入,借助天然地震预测的研究成果,基于微震监测技术手段对岩爆进行预测预警成为可能^[12]。通过 ESG 监测系统,震源参数除包括震源时空位置、里氏震级和应力降外,还包括微震能量密度、地震距、视应力等重要参数。通过对上述震源参数的量化分析及时空变化规律判断岩爆微破裂前兆特征,进而确定岩爆潜在危险区并发出预警警示。预警相关参数描述如下:

(1) 微震累计事件数。岩爆的物理过程可以通过损伤力学来描述^[13]。岩体内部产生新损伤的同时一定伴随微震(声发射)的发生,微震累积事件数直接对应着岩体的损伤程度^[7,14]。微震累计事件数越多,对应破裂区域的岩体强度弱化程度越严重,由此可作为岩体微破裂损伤和岩爆破坏的依据。

(2) 微震能量密度。微震能量密度表示单位体积内岩体微破裂释放和耗散的能量,它可以综合反映岩体微破裂损伤的程度,并可以表征损伤区域内岩体应变能的释放及演化过程。岩体中的高能量密度分布区对应着岩体微破裂集中区和损伤严重区^[15],其关系式可表示为:

$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{j=1}^m E_j}{a^D} \quad (1)$$

式中: ε_i 为能量密度; E 为地震辐射能量; D 为空间维数; a 为边长。

(3) 累积视体积和能量指数。地震学中,视体积和能量指数通常是用来研究地震孕育过程的重要参数,它们可以反映出地震发生前围岩的变化特征和演化规律^[16-17]。当能量指数随着累积视体积的增加而增加时,说明岩体处于应变硬化阶段,此时岩体趋于稳定;当累计视体积增大而能量指数迅速减小时,说明震源区内的驱动应力也迅速下降,且应力降越快,岩体劣化失稳越严重,此时的岩体将处于严重损伤状态,发生岩爆的概率大大增加。因此,可通过上述参数变化特征获取岩爆微破裂前兆信息。视体积和能量指数的关系表达式如下:

$$V_A = \frac{M}{2\sigma_A} \quad (2)$$

式中: V_A 为视体积; σ_A 为视应力; M 为地震矩。

$$EI = \frac{E}{10^{c_1 \log P + c_2}} = 10^{-c_2} \frac{E}{P^{c_1}} \quad (3)$$

式中: EI 为能量指数; E 为地震辐射能量; P 为地震势; c_1, c_2 为常量。

2.2 岩爆预测预警的一般模式

自锦屏二级水电站深埋隧洞微震监测系统运行以来,获取了大量有效监测数据。基于对上述震源

参数的分析结果,建立了锦屏深埋隧洞岩爆预测预警方法及一般模式,详见图 5。对施工现场的 5 条隧洞(包括 4 条引水洞及 1 条排水洞)监测结果显示,在现场记录的 237 次岩爆中,有 191 次被准确预测预警,包括岩爆发生位置和发生烈度,准确率达到 80.6%^[18]。该方法可对隧洞施工开挖提供指导依据,并为此类隧洞岩爆的预测预警提供借鉴意义。

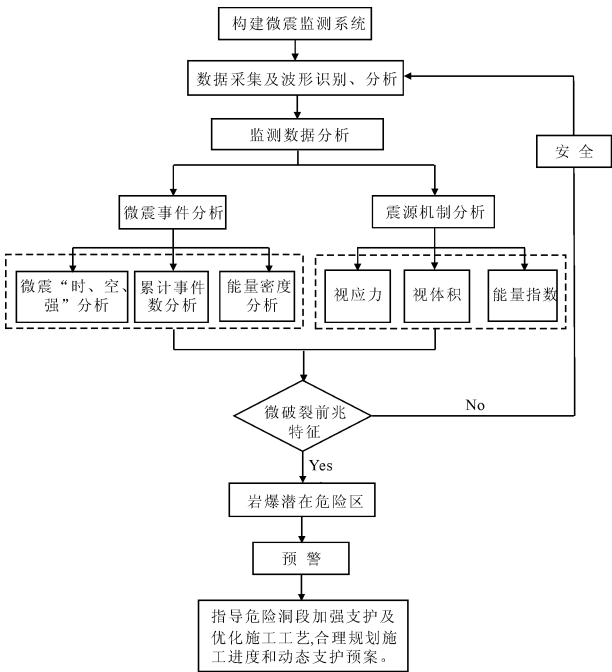


图 5 深埋隧洞岩爆预测预警流程图

3 典型案例分析

典型岩爆事件发生在 3#引水洞 9 + 000 m—9 + 300 m 之间,该洞段开挖过程中经历多次中等—强烈不同烈度的岩爆。其中,在 2011 年 7 月 1 日—7 月 25 日期间内发生中等岩爆 4 次及强烈岩爆 1 次,岩爆发生时间、具体位置及发生烈度详见表 1。

表 1 3#引水洞岩爆发生基本概况

序号	岩爆时间 (年-月-日)	岩爆位置/m	岩爆等级
1	2011-07-07	引(3)9 + 250 ~ 249	中等
2	2011-07-09	引(3)9 + 242 ~ 239	中等
3	2011-07-11	引(3)9 + 239 ~ 236	中等
4	2011-07-17	引(3)9 + 226 ~ 222	中等
5	2011-07-20	引(3)9 + 250 ~ 218	强烈

3.1 微震监测结果

图 6 为 3#引水洞在 2011 年 7 月 3 日—7 月 20 日微震活动“时空强”演化分布图。从空间上看:图 6(a) 显示在掌子面引(3)9 + 248 出现 7 个高能微震事件,单个微震能量最大值达到 2.74×10^4 J。随后几天,微震事件进一步聚集,在引(3)9 + 239 m—9 + 259 m 形成一个微震事件簇集区 A,见图 6(b)。由于在该期间产生的高能事件较多且呈群集状态,微震活动由起初的无序分散渐进向有序

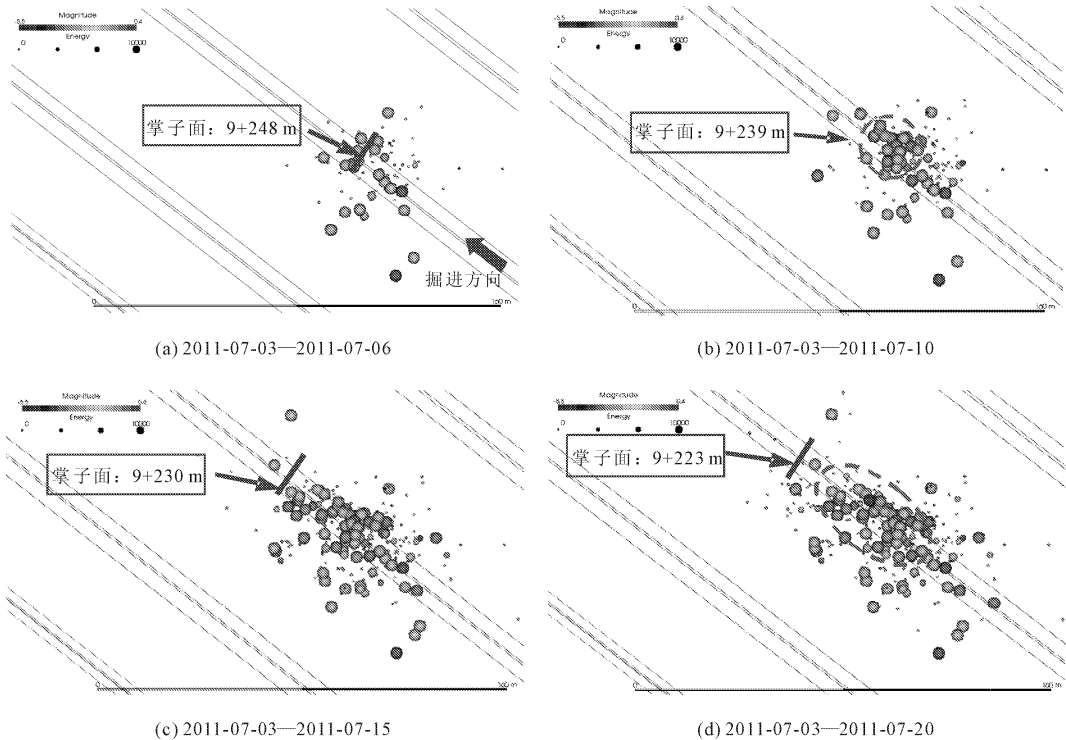


图 6 3#引水洞微震活动“时、空、强”分布情况

自组织演化。在接下来的 9 d 内,随着工作面的推进,微震事件也有一定发展,掌子面后方高能大震事件持续出现,且微震事件簇集区 A 逐渐扩大至簇集区 B,此过程也是应力不断积累的过程。与此同时,围岩强度随时间发展也在不断裂化,最终于 2011 年 7 月 20 日发生强岩爆。

3.2 微震累计事件数分析

从时间上看:2011 年 7 月 3 日—7 月 20 日期间内 3#引水洞单日微震累计事件数随时间变化关系曲线详见图 7。

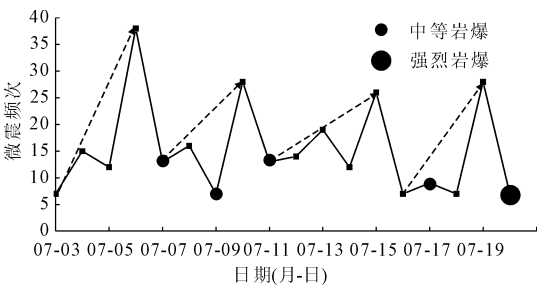


图 7 3#引水洞微震活动事件频率

由图 7 可知,每次岩爆发生前,微震事件均经历一个迅速上升过程,每日累积事件数均大于 25 个

(日平均事件数为 16 个),单日累计事件最大数达 38 个,岩爆发生在微震活动高峰期的当日或相邻日。因此,微震事件突然剧增可视为岩爆的微破裂前兆特征。

3.3 微震能量密度特征分析

图 8 为 2011 年 7 月 3 日—7 月 20 日期间内微震能量密度云随时间的演化示意图。在 7 月 6 日,即岩爆发生的前一天岩爆核心区开始显现。随后 9 d 内(见图 8(b)和 8(c)),由能量密度云显示的成核区十分显著并逐步向四周发展扩大,这说明岩体内部损伤程度开始加剧,微裂纹正经历萌生、发展、合并及贯通进而形成大尺度裂纹的过程。该期间内,岩体累计损伤愈加严重,岩体力学性能严重劣化,导致岩体强度和稳定性大大降低。该演化过程和微震活动时空分布规律基本相一致,且能量损失区和微震聚集区相重叠,这更加映证了该区域内岩体力学性能严重劣化的可能性。最终于 2011 年 7 月 20 日微震能量耗散密度云值达到峰值并发生强岩爆。因此,微震能量密度云可很好的反映出工程扰动影响下,岩体损伤程度随时空演化关系,可在第一时间确定岩爆成核区的位置及发展情况。

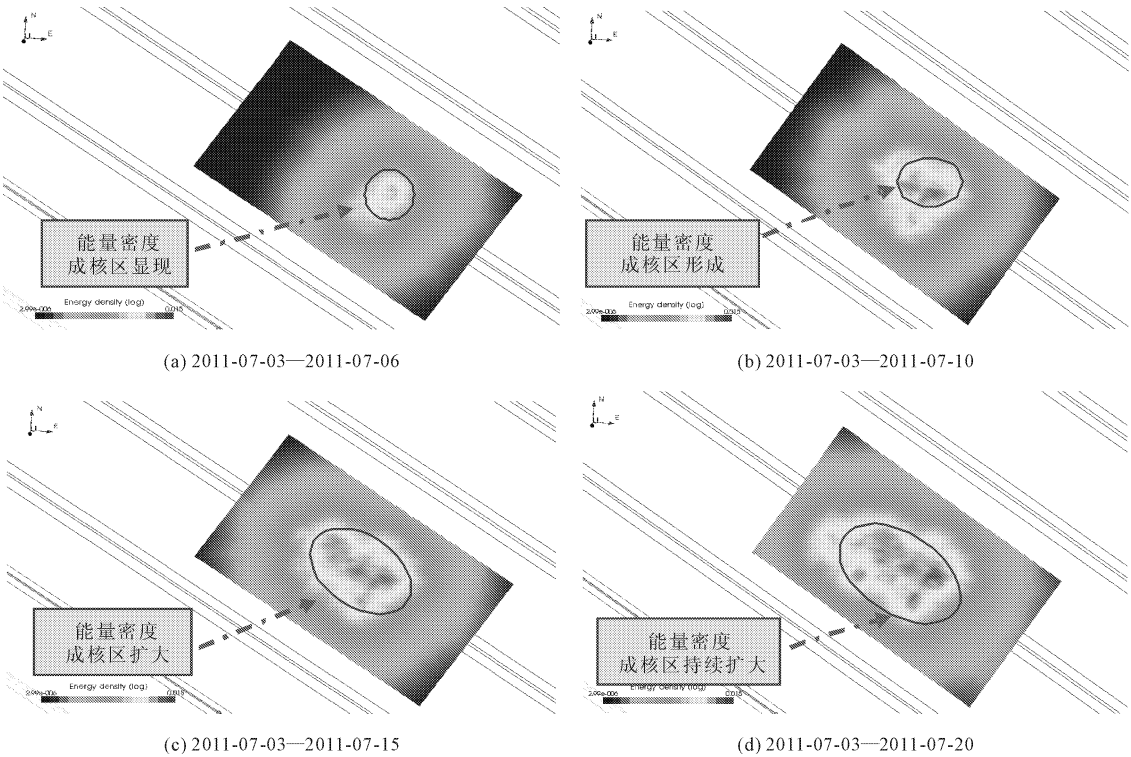


图 8 3#引水洞微震能量密度演化示意图

3.4 累积视体积与能量指数时序特征分析

图 9 显示了 3#引水洞累积视体积和能量指数

的时序变化曲线(2011 年 7 月 3 日—7 月 20 日)。由图 9 可知,该曲线可划分为岩爆预警期和危险期。

在预警内,能量指数快速下降而累计视体积迅速上升,这是岩爆发生前的显著特征,随后围岩进入岩爆危险期。2011 年 7 月 4 日—7 月 9 日,能量指数迅速下降而累计视体积持续增长,这说明该时期的围岩经历破坏前的压密和弹性变形阶段后,震源区域内的驱动应力迅速增大,岩体进入峰值强度前的破坏阶段,岩体力学性能裂化,岩爆概率大大增加。随后 4 天内(7 月 12 日至 7 月 15 日),围岩又重复经历一次上述过程,该时期内的曲线斜率较上一阶段更加陡峭,说明岩爆烈度加剧,最终在 7 月 20 日发生强岩爆。

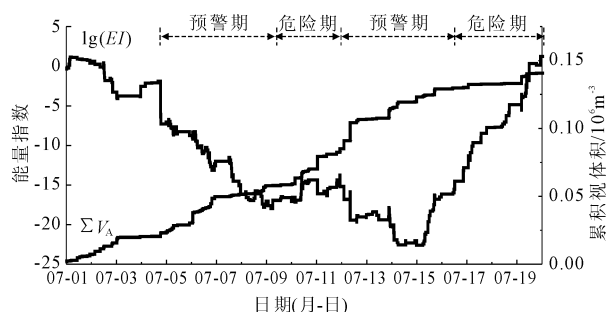


图 9 3#引水洞的累积视体积与能量指数随时间的变化曲线

4 结 论

(1) 将微震监测技术应用于锦屏深埋隧道的岩爆监测中,实现了对深埋隧洞岩爆潜在危险区的实时监测、分析和预警。为锦屏水电工程地下洞室开挖及动态支护提供超前预测和技术支持。

(2) 通过提取和分析微震参数,包括微震累计事件数、能量密度、累积视体积及能量指数,揭示了微震事件的时空演化规律与岩爆间内在联系。岩爆发生前,微震事件由空间无序分布逐渐向有序的自组织演化,微震能量密度以成核区逐渐扩大,微震累计事件数和累积视体积 ΣV_A 突增,而能量指数 $\lg(EI)$ 骤降,这些参数的异常变化均可作为岩爆微破裂前兆信息和预警指标。

(3) 基于上述研究成果,提出高地应力条件下深埋隧洞岩爆预测预警方法及一般模式。通过现场岩爆记录比对,该方法预测准确率达到 80.6%,具有较高的准确率和实用性,同时也为同类隧洞工程的岩爆预测及防治提供借鉴。

参考文献:

[1] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(4):649-673.
[2] 王喜华. 雅鲁藏布江峡谷段某深埋隧道岩爆特征分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):25-29.

[3] 陈云,阮怀宁,朱珍德. 深埋隧洞岩爆成因机理分析与防治研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1):209-212.
[4] 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(4):818-824.
[5] 杨天鸿,郑超,张鹏海,等. 基于微震监测的矿山岩体强度动态标定方法研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,39(4):548-554.
[6] 郑超. 基于微震监测数据的矿山岩体强度参数表征方法研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.
[7] 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.
[8] 李奥,张顶立,房倩,等. 基于微震监测的高速铁路大跨度过渡段隧道开挖损伤区分布特性及演化规律[J]. 中国铁道科学,2020,41(2):53-62.
[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.
[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.
[11] 于群,唐春安,李连崇,等. 基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(12):2315-2322.
[12] Tang C A, Wang J M, Zhang J J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010,2(3):193-208.
[13] Sato K, Isobe T, Mori N, et al. Microseismic activity associated with hydraulic mining[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1986,23(1):85-94.
[14] 张明,李仲奎,杨强,等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006(12):2493-2501.
[15] 窦林名,何江,巩思园,等. 采空区突水动力灾害的微震监测案例研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(1):20-25.
[16] Mendecki A J. Seismic Monitoring in Mines[M]. London: Chapman & Hall; 1997.
[17] 刘建坡,李元辉,等. 微震技术在深部矿山地压监测中的应用[J]. 金属矿山,2008(5):125-128.
[18] 唐烈先,唐春安,马天辉,等. 雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞、排水洞强岩爆洞段微震监测技术服务(A标)[R]. 大连:大连力软科技有限公司,2011.