

深埋隧道地压多通道微震监测技术应用研究

高真平¹ 李庶林¹ 黄波¹ 胡静云²

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院 厦门 361005; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司 长沙 410012)

摘要 针对北武夷山隧道大埋深、大跨度、多头掘进汇合处的高地应力以及可能诱发的岩爆灾害等问题,采用全数字型多通道微震监测技术开展监测和预警研究。提出了结合微震事件率倍比、微震能量倍比与微震定位事件集群密度三个参数的综合预警方法,首次将微震事件率倍比与微震能量倍比两个微震参数应用于铁路隧道岩爆动力破坏监测预警中,首次根据各微震参数的理论意义与专家经验提出不同参数在岩爆发生概率中的权重值,把各参数的预警指标与隧道埋深和围岩分级联系起来,制定了基于多微震参数的岩爆发生概率的综合定量评分体系。该研究在实际监测应用中多次对岩爆进行了有效的监测预警,对安全施工起到了很好的指导作用。

关键词 隧道 微震监测 高地应力 岩爆 预警

1 前言

北武夷山位于福建省武夷山市北侧约 29km 处,属于京福闽赣客专铁路。北武夷山隧道全长约 14629m,最大埋深可达 1100m,隧道开挖净断面尺寸大,为当时国内埋深最大、长度最长的单洞双线隧道。北武夷山隧道具有埋深大、长度长、断面大、高地应力与硬岩等特点,在高应力区,通过局部岩层破碎地段时洞壁岩体有剥离和掉块现象,新生裂缝较多,成洞性差,而隧道开挖毛洞几何尺寸大,开挖过程将会面临岩爆的严重威胁,对隧道的安全生产具有潜在的危害。

本研究针对北武夷山隧道在开挖施工过程的地压问题,如多头掘进对接时的高应力集中问题、大深度地段的岩爆灾害的监测预警问题等,采用国际上先进的多通道问诊监测系统开展隧道施工过程中的地压综合监测和灾害预警技术应用研究。此前,黄玉仁等已经通过室内试验研究了武夷山隧道围岩破坏过程中的声发射特性^[1],还利用微震监测的事件率和能量率进行了岩爆的预警研究^[2]。但显然,影响因素的多样性导致单一指标的评价并不一定能全面反映高地压和岩爆等灾害的发生。已有学者提出了多指标的综合评价法^[3-4],在此基础上,黄玉仁等又研究了运用多指标模糊数学综合评价法对岩爆倾向性进行分析^[5]。而本次研究则基于多微震参数制定出岩爆发生概率的综合定量评分体系,使其应用于岩爆预警和隧道贯通时的高应力监测分析。

2 北武夷山隧道工程背景简介

北武夷山隧道进口位于江西省上饶县五府山镇甘溪村石罗坑,穿越福建与江西交界分水岭—武夷山脉,出口位于福建省武夷山市洋庄乡坑口村。隧道全长约 14629m,其 DK525+760~DK529+600 中间段埋深为 644.3~1100m,属于极高应力区。隧址区分布的地层主要为江西段侏罗系上统南园组流纹质溶结凝灰岩为主;福建段为侏罗系上统南园组流纹质晶屑凝灰岩。区内甘巴岭附近为晚侏罗世鹅湖岭回旋第三亚旋回张坑口花岗岩侵入。隧道区域内的总体构造主要为新华夏系的构造形迹,主要由一组走向近于南北逐渐向北东向偏转的压扭性断裂、挤压带,长轴呈北北东向的大型花岗岩侵入体表现最为清楚。隧道区地下水类型有孔隙水、基岩裂隙水和构造裂隙水,受大气降雨补给,向低洼处排泄。

武夷山隧道为单洞双线客专隧道,隧道开挖净断面尺寸大,隧道开挖尺寸见图 1 所示,最大宽度超过 15m,最大高度超过 13m,开挖断面面积超过 150m²。

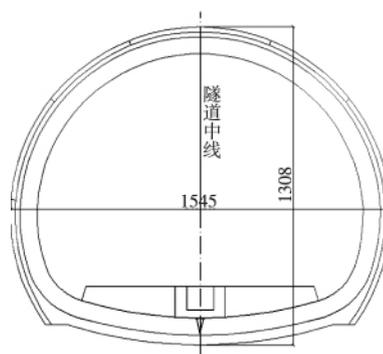


图 1 隧道设计断面图(单位:cm)

3 监测系统及监测方案

3.1 多通道系统简介

监测设备采用加拿大 ESG 公司微地震仪器一台,系统硬件主要包括 3 个部分,即传感器、数据采集与处理器、时间同步源发生器。系统共携带 6 个单轴加速度型传感器,传感器监测频率范围为 50~5000Hz,传感器灵敏度为 30V/g。一个数据采集仪可以同时采集 6 个通道(传感器)的模拟信号,全数字型地震仪采样频率为 10kHz。主服务器为 Dell 双硬盘双网卡服务器。因为微震事件定位的需要,微震监测系统采用了 GPS 授时的时间同步源发生器,同步授时精度为 1×10^{-6} s。

多通道微震监测系统的结构见图 2 所示。整套系统具有实时监测、全范围立体监测、空间定位、全数字化数据采集、存储和处理、数据的远传输送和远程监测以及多参数多分析方法等特点。

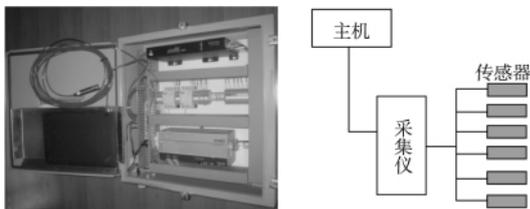


图 2 武夷山隧道多通道微震监测系统组成图

3.2 监测方案设计

根据隧道围岩等级和开挖掌子面到二次衬砌之间距离的不同,采取 2 种不同的传感器布置方案。以 V 级围岩隧洞为例,采取 2 榦传感器布置方式,每榦布置 3 个传感器。随着二次衬砌及防水板施工的推进,当防水板施工作业触及最后一榦传感器时,回收最后一榦传感器并向前轮换到最前排,见图 3 所示。

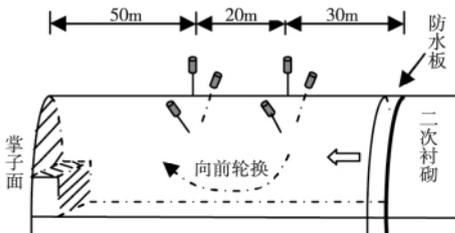


图 3 北武夷山出口段隧洞走向传感器布置图

4 地压应用案例分析

4.1 岩爆预警方法研究

(1) 多参数预警方法

岩体工程是一个动态过程,地下条件复杂,对于岩爆现象的认识不能很深入地了解其发生机制

和各种影响因素,因此采用单一的参数对岩爆进行预警具有很大的难度与局限性。而多通道全数字型微震监测技术是目前国际上关于岩石工程稳定性监测的最先进的监测技术,它可以获得关于微震事件的多个微震参数,例如事件率、能量释放率、微震源空间位置等,这些参数能从不同的侧面反映岩体破裂程度与稳定性状态,从而对岩爆灾害进行更为准确的预警。北武夷山基于多微震参数,提出了通过微震事件率倍比、微震能量倍比与微震定位事件簇群密度三个参数来综合定量预警的方法。

① 微震事件率倍比

微震事件率倍比 D 为正常水平时的微震事件率 C_1 与异常情况下的微震事件率 C_2 的比值,即:

$$D = \frac{C_2}{C_1} \quad (1)$$

② 微震能量倍比

对于一个非定位事件来说,因不知道震源的发生位置,所以无法得到该微震事件的绝对能量。但是,可通过该非定位事件的监测波形计算出其相对能量 E ,计算公式为:

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{X_k}{\Omega} \times X_k \times 10^{-4} \right) \quad (2)$$

式中, N 为采样点总数; X_k 为信号幅值; Ω 为传感器阻抗值。

能量倍比 e_1 的定义为异常情况下的微震相对能率值的均值 E_2 与正常情况下该均值 E_1 的比值,即:

$$e_1 = \frac{E_2}{E_1} \quad (3)$$

③ 定位事件簇群密度

假设簇群定位事件集合为 $E(x_n, y_n, z_n)$, 则微震定位事件簇群密度值 ρ_e 为:

$$\rho_e = \frac{n}{A_0} \quad (4)$$

式中, n 为微震事件数, A_0 为事件覆盖区域体积,

$$A_0 = (x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})(z_{\max} - z_{\min})$$

$$x_{\max} = \text{Max}(E_{x_n}), x_{\min} = \text{Min}(E_{x_n})$$

$$y_{\max} = \text{Max}(E_{y_n}), y_{\min} = \text{Min}(E_{y_n})$$

$$z_{\max} = \text{Max}(E_{z_n}), z_{\min} = \text{Min}(E_{z_n})$$

(2) 预警指标的确定

根据岩爆的主要影响因素、对隧道现场监测经验总结,本研究确定了各参数在预警岩爆事件中的权重值,见表 1 所示,权重值的高低代表了该参数在预警岩爆是否发生时的重要程度。

表 1 多微震参数在岩爆前兆预警综合定量方法中的权重值

参数名称	微震事件率倍比	微震能量倍比	定位事件集群密度
权重值	0.3	0.4	0.3

基于武夷山隧道岩爆的实际微震监测结果的总结,考虑多微震参数预警指标的影响因素,本研究提出了武夷山隧道岩爆前兆预警的多微震参数指标,见表 2 所示。

通过处理前兆信息可获得三个微震参数的数

表 2 武夷山隧道岩爆前兆预警指标

微震参数名称	I~II类围岩		III~V类围岩	
	埋深 800m	埋深<800m	埋深 800m	埋深<800m
微震事件率倍比	倍比值 3	倍比值 4	倍比值 4	倍比值 4.5
定位事件集群密度	6个/10 ³ m ³	6.5个/10 ³ m ³	6.5个/10 ³ m ³	7个/10 ³ m ³
微震能量倍比	倍比值 3.5	倍比值 4.5	倍比值 4.5	倍比值 5

表 3 多参数岩爆前兆综合定量预警方法评分体系

分项参数	微震事件率倍比		微震能量倍比		定位事件集群密度	
权重值	0.3		0.4		0.3	
分项得分计算标准	分项取值	分项得分	分项取值	分项得分	分项取值	分项得分
	<预警指标值	$\frac{D}{\text{预警指标值}} \times 0.3$	<预警指标值	$\frac{e_1}{\text{预警指标值}} \times 0.4$	<预警指标值	$\frac{\rho_c}{\text{预警指标值}} \times 0.3$
	≥预警指标值	0.3	≥预警指标值	0.4	≥预警指标值	0.3
概率计算公式	对各分项得分进行累加,即得到岩爆的发生概率					
发生概率	0~0.2	0.2~0.5	0.5~0.7	0.7~1		
描述	低	较低	较高	高		

4.2 岩爆预警案例

(1)2012年9月8日9时进行掘进放炮后,通过对监测数据的实时处理,发现单通道微震事件数从10时开始急剧增加,从正常情况下的0~5个/h激增到32个/h,同时微震事件相对能量释放也从正常情况下的0~0.1J/h激增到4.2J/h,见图4所示,事件率与能率两个参量均出现异常,说明围岩体破裂的活动性与强度均在急剧增加,根据多微震参数岩爆前兆预警综合定量方法,计算得出岩爆发

值水平,然而监测到一定量的岩石破裂事件,并不能最终一定确定岩爆会发生,并且不同的参数在预警岩爆是否发生时的权重值是不同的。因此根据微震系统监测到的岩石破裂事件,需要一个综合的评分系统来定量地计算岩爆发生的概率大小。本研究根据不同微震参数在岩爆前兆预警综合定量方法中的权重值与各参数的预警指标,建立了多微震参数岩爆前兆综合定量预警方法的评分体系,见表 3 所示。

生概率为0.7,发生概率非常高。因此监测人员发出了预警信息,要求施工人员暂缓进入掌子面进行出渣等作业,待微震监测各项参量恢复正常后再进入掌子面作业。随后从13时开始,单通道事件率与能率均快速下降,于16时恢复至正常水平,在与现场施工技术人员对掌子面区域在安全的前提下进行实地勘查后,确认现场发生过轻微岩爆,没有进一步发生较大规模的失稳与岩爆迹象。

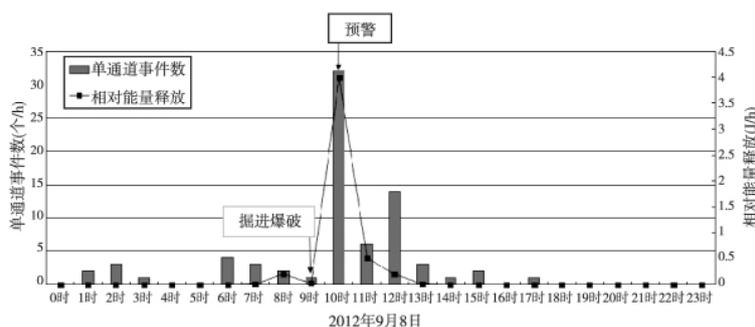


图 4 事件数与能量随时间的变化趋势

(2)2012年10月13日8时进行掘进放炮后,通过对监测数据的实时处理,发现单通道微震事件数从9时开始急剧增加,从正常情况下的0—10个/h激增到210个/h,同时微震事件相对能量释放也从正常情况下的0—0.1J/h激增到11.7J/h,见图5所示。通过多微震参数综合定量方法计算得岩爆发生概率为0.7,因此监测人员发出了预警信息,要

求施工人员暂缓进入掌子面进行出渣等作业。随后从10时开始,单通道事件率与能率均快速下降,于14时恢复至正常水平,在与现场施工技术人员对掌子面区域在安全的前提下进行实地勘查后,确认现场发生过轻微岩爆,见图6所示,同时围岩体完整性程度较好,没有进一步发生较大规模的失稳与岩爆迹象。

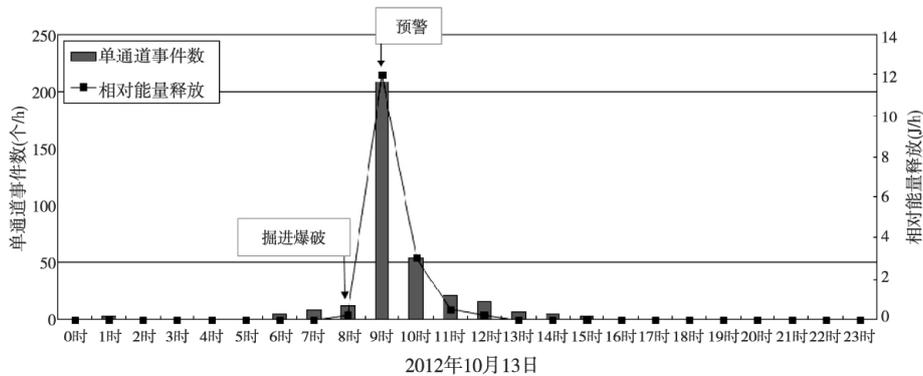


图5 事件数与能量随时间的变化趋势



图6 岩爆弹射下的岩块

(3)12月26日8时隧道掘进放炮后,从9时到

10时监测到3个微震定位事件,定位事件主要发生在隧道的侧帮区域,由于定位事件率与能量均较小,故没有发出预警信息。12月27日7时掌子面继续掘进爆破后,8时定位事件共监测到12个,定位事件数发生较大幅度地增加,从8时到11时持续监测到17个定位事件。定位事件位于掌子面附近的隧道侧帮区域,定位事件率随时间的变化趋势见图7所示,定位事件平面图如图8所示。26日监测到的微震事件震级在-4.5~-5.5之间,岩石破裂强度非常弱,27日8时监测到的微震事件震级大部分在-4~-5.5之间,少部分事件震级达到了一2.8,显示岩石破裂频次与强度均有大幅度增加。

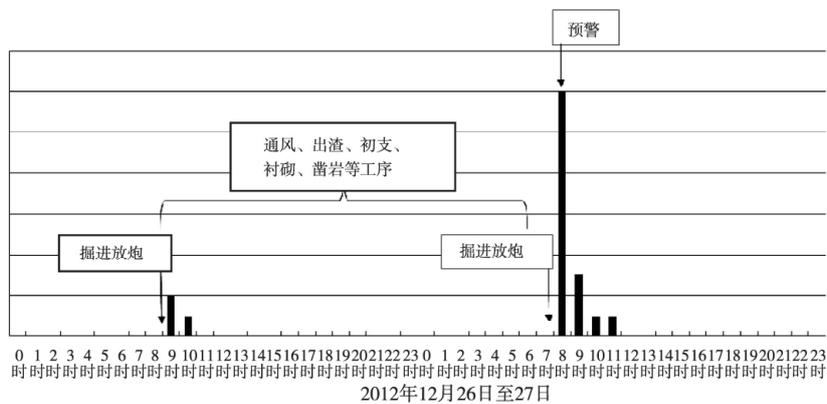


图7 微震定位事件率随时间的变化趋势

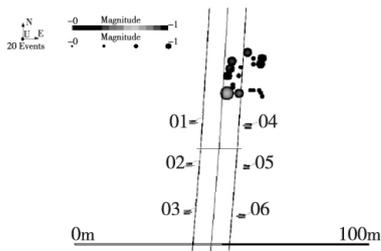


图8 微震源定位事件平面图

通过对系统监测到的微震事件进行统计分析,根据多微震参数岩爆前兆预警综合定量方法计算得岩爆发生概率为 0.985,发生概率非常高,因此监测人员于 27 日 8 时发出了预警信息。岩爆预警信息发出后,相关工序的施工人员推迟了进入掌子面作业的时间。监测技术人员待三个微震参数均重新趋于平静稳定后进入掌子面附近进行了现场勘查,发现在微震定位事件区域的隧道侧帮发现了岩体剥落的现象,母岩体表面可见较光滑的破裂面,见图 9 所示。

4.3 隧道贯通时的高应力监测分析

(1) 定位事件

竹坪小里程掌子面于 2013 年 1 月份开挖到 DK531+303 里程,随后便停止了开挖。麻子坑小里程掌子面施工平均每日向竹坪段小里程掌子面推进 3m,截止 2013 年 4 月 1 日,麻子坑小里程掌子

面已推进至 DK531+306~+303,竹坪与麻子坑小里程掌子面贯通。截止到 2013 年 3 月 31 日,微震监测共监测到 11 个定位事件,基本上位于竹坪小里程掌子面附近,微震事件率处于低水平。4 月 1 日隧道贯通,微震定位事件数增加了 15 个,这些定



图9 岩爆后母岩体上形成的光滑破裂面

位事件的近震震级在 -5.5 至 -2 之间,截止到 4 月 1 日定位事件空间分布见图 10。由图可知,定位事件基本上分布在贯通位置的周围,表明隧道的贯通导致的隧道围岩应力重分布主要集中在贯通位置附近,同时根据微震事件率与能量释放参量可知应力重分布剧烈程度较小。从 4 月 2 日开始,微震定位事件数便开始快速降低,恢复至正常水平,表明隧道围岩的应力重分布过程趋于结束,围岩体重新处于稳定状态。

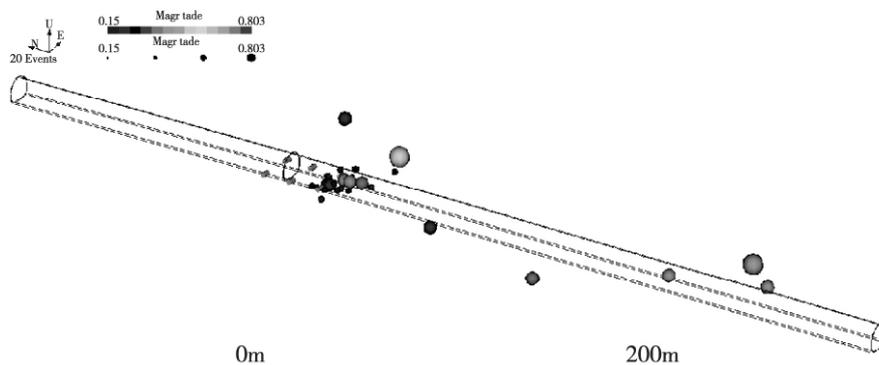


图10 微震定位事件空间分布图

(2) 非定位事件

在麻子坑掌子面向竹坪斜井掌子面不断推进与贯通的过程中,对从 2013 年 3 月 9 日至 4 月 7 日的微震监测单通道触发数据进行了处理,所有传感器累加的单通道微震事件数和能量随时间的变化

趋势见图 11 所示。通过对监测数据的分析可得:隧道贯通前后两个参量处于较低水平,隧道围岩体在开挖与贯通过程中的应力重分布所导致的围岩微震活动性与强度均较小,说明围岩体发生较大规模的冒顶片帮与失稳的可能性较小。

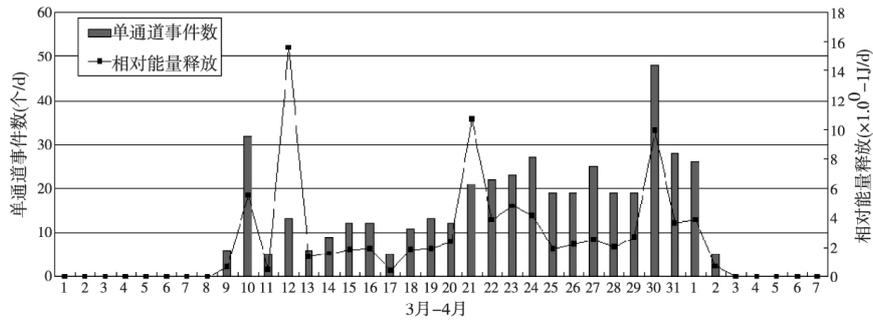


图 11 总触发事件数和能量随时间变化趋势图

5 结论

(1)本研究将微震事件率倍比、微震能量倍比与微震定位事件集群密度三个参数的预警指标与隧道埋深和围岩分级联系起来,制定了基于多微震参数的岩爆发生概率的综合定量评分体系,并有多多个成功预警案例。

(2)采用多通道微震监测技术和本文中提出的预警方法,对北武夷山隧道施工中的岩爆灾害进行了多次成功的预警,验证了本文提出的方法和参数的可行性。

(3)采用微震监测技术可以很好地对多头掘进作业时贯通段过程中的的高应力重分布随时间变化特性、围岩稳定性等进行有效的实时时空过程的监测和显示。

(4)本研究表明在大深度、高应力环境中的隧道施工过程中,采用多通道微震监测技术对地压灾害进行监测是可信的和有效的。

参考文献

- [1] 黄玉仁,林朝阳,毛建喜等. 武夷山隧道围岩破坏过程中的声发射特性研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2015,54(02):292-296.
- [2] 黄玉仁,毛建喜,林朝阳等. 基于微震监测的深埋隧道岩爆预警研究[J]. 隧道建设,2014,34(s):15-19.
- [3] 汪波,何川,吴德兴. 深埋特长隧道岩爆预测研究[J]. 铁道工程学报,2009(11):45-49.
- [4] 杨健,武雄. 岩爆综合预测评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(03):411-416.
- [5] 黄玉仁,毛建喜,林朝阳等. 深埋长大隧道岩爆倾向性多指标评价[J]. 铁道工程学报,2014(07):89-94.