

声发射在隧道开挖过程监测

程武伟¹, 汪文有², 孟繁兴¹,

(1. 华东勘测设计研究院 杭州, 310014; 2 北京化工大学 化工过程机械, 北京 100029)

摘要: 本文主要介绍了声发射技术在 TBM 隧道开挖过程的监测应用成果, 根据声发射信号波形、频谱成分特征对岩石破裂信号进行分析和研究, 采用三维定位、能量分析等方法对围岩松弛深度进行测定, 根据声发射破裂信号的变化特征来分析 TBM 施工在不同掘进阶段的岩体性状演变规律。

关键词: 声发射技术; 监测; 隧道; 松弛深度

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Monitoring of AE during tunnel excavation

WU Wei Cheng¹, WEN You Wang², FAN Xing Meng¹

(1. East China Investigation and Design Institute Hangzhou, 310014, 2.Beijing University of Chemical Technology Chemical Process Equipment, Beijing 100029)

Abstract: This paper introduces acoustic emission (AE) technology applied to on-line tunnel monitoring during TBM excavation process. AE features, waveforms and spectrum are used for rock burst analysis. Three-dimensional location and energy analysis methods are used for determining the depth of loose rock. In addition, characteristics of rock integrity during TBM excavation process are analyzed based on the changes of AE features in different TBM stages relative to the AE sensor positions.

Key words: Acoustic emission, monitoring, tunnel, relaxation depth

1 引言

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射, 也称为应力波发射^[4]。岩体在自然状态下任何一点均处于受力平衡状态, 工程开挖前后岩体会有初始应力场产生应力再分布, 形成新的围岩的应力状态, 应力状态的调整过程增加了岩体的不连续性和非均质性, 伴随或伴生岩体活动的能量释放过程^[3], 也是产生声发射的过程。

深埋长大 TBM 隧道施工遇到的问题包括断层破碎带、岩爆、涌水、溶洞和膨胀岩等。通过对四川锦屏引水隧洞区大理岩的 TBM 开凿过程的声发射监测, 用来研究引水隧洞横断面在应力调整过程中微破裂发生的位置、范围及频率等, 以期用于支护参数优化设计、辅助分析岩体地应力、对脆性大理岩岩体力学性质及支护机理的深化研究、根据声发射信号的强度、活度及发展变化规律, 研究对隧

道开挖过程的地质灾害进行早期预警或预报。本次监测试验是利用钻爆法施工隧洞位置暂领先于 TBM 施工洞前的便利, 在试验洞向未掘进 TBM 隧道围岩处通过钻孔进行布点, 采用三维定位对声发射事件进行定位, 找出 TBM 掘进前后围岩变化特征及围岩松弛深度的规律特征。

2 本次声发射监测意义及特点

锦屏引水隧洞区大理岩因为其特殊的应力环境和岩体力学特性, 使得隧洞开挖以后与常规条件下的响应方式存在较大差别。为了解岩爆、片帮、屈服损伤等一系列围岩状态出现在深埋脆性大理岩中的破坏特征, 特选定了围岩变形、应变、声发射、光纤光栅、钻孔电视、钻孔声波等综合监测方法进行监测试验。

2.1 声发射监测的目的和意义

声发射监测的主要目的是: 确定声发射源的部

位；分析声发射源的活动情况从而进行破坏分析或预报；确定声发射发生的时间或载荷；评定声发射源的严重性等。

本次声发射监测目的为了解引水隧洞横断面应力调整过程中微破裂发生位置和范围，确定 3#引水隧洞 TBM 掘进过程中引起洞周岩体应力松弛的深度以及松弛时间。除直接帮助进行支护参数优化设计以外，还可以帮助分析岩体地应力、脆性大理岩岩体力学性质及支护机理的深化研究工作。根据声发射信号的强度、活度及发展变化规律，进行破坏或安全预报。

2.2 监测区域内的地质及地球物理特征

试验洞段地层为中三迭统盐塘组 T_{2y}^5 灰白色厚层状大理岩，厚层状结构；洞段揭露围岩岩石呈微风化~新鲜，围岩完整性差~较完整，围岩分类为 III 类；局部结构面发育段岩体较破碎，附近发育两条 $EW N \angle 75^\circ$ 张性破碎带，宽 10~40cm，带内岩石破碎，充填泥质、铁锰质渲染，沿面溶蚀，间距约 3m；洞肩及洞顶多产生构造应力坍塌，坍塌 10~20cm。

试验区域内岩体地震波波速范围为 3062~6284m/s，平均地震波速为 4758m/s；试验区域内岩体单孔声波波速范围为 4600~6700m/s，平均声波波速为 6100m/s。

2.3 声发射传感器布置特征

本项目利用引水隧洞 2#横通洞开挖 2-1#试验支洞，通过多种监测仪器的预埋对 TBM 开挖的 3#引水隧洞进行全方位的监测。经过多次设计调整和变更最终确定引水隧洞 2#横通道声发射监测位置及监测范围见图 2.1。

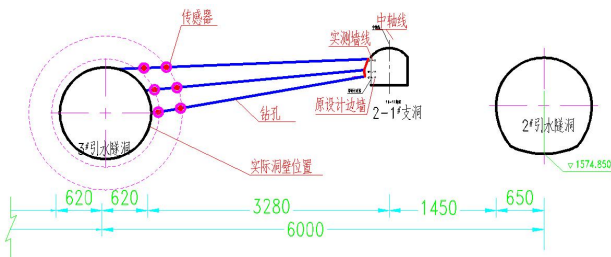


图 2.1 声发射现场监测布置示意图

声发射监测传感器分别布置在 11-11 和 12-12 断面，其中 11-11 断面桩号位于引₍₃₎13+425，至上而下监测孔编号为 A11-11、B11-11、C11-11；12-12 断面桩号位于引₍₃₎13+428，至上而下监测孔编号为 A12-12、B12-12、C12-12；每个监测孔布置两个传

感器，间距 3.05 米。

监测软件系统内 X 方向正向为 TBM 掘进方向，12-12 断面与 11-11 断面在 X 方向坐标分别为 0 和 3000 左右；Y 方向为垂向；Z 方向为孔深方向；1、3、5、7、9、11 号传感器位于靠近 3#TBM 引水隧洞一侧；监测系统默认单位为 mm，软件系统内传感器三维定位关系如图 2.2，经大地坐标换算后的传感器的相对位置及与 3#引水隧洞的位置关系见图 2.3。

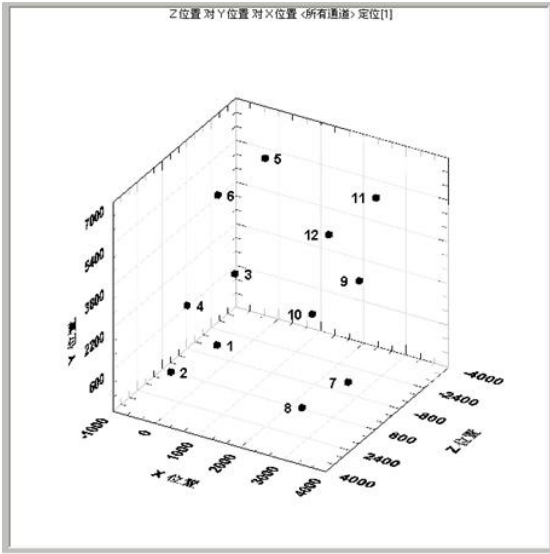


图2.2 软件系统内传感器定位显示图

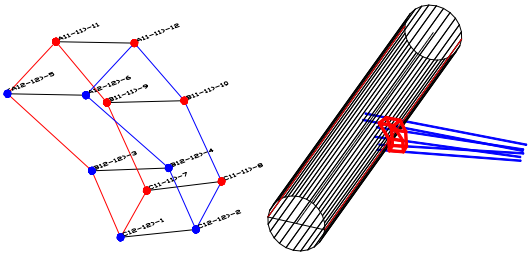


图 2.3 声发射监测区域空间位置示意图

2.4 本次声发射监测设备与应用特点

声发射技术已有极其广泛的应用领域，包括应用于岩石力学、岩石地质与岩石破坏性等方面的应用和研究，然而，目前国内和国际上声发射在岩石方面的研究基本是针对实验室模型试样或短时间的现场局部检测。本文介绍了国内首次尝试的 TBM 隧洞施工过程中的声发射监测试验，本次监测试验具有监测范围较大、监测时间长、监测数据量超大、监测背景极其复杂等特点，取得了如何在恶劣的地质与现场环境下进行复杂的声发射监测的第一手资料，为今后在岩石方面进行更深入声射研究提供成果并积累经验。

隧洞现场监测的一个重要特点是现场工作环境

较差，交通和通信不方便，同时要求所用仪器必须具有良好的防水、防潮、防震、长时间连续工作、断电保护甚至通过互联网接口或无线网络实现远程操作控制的能力。为保证监测试验能顺利进行特选取美国物理声学公司的 16 通道 SHII-SRM 全天候声发射监测系统及 R.45IC-LP-AST 型传感器（带内置放大器，理论上可接收的声发射信号频率为 1k~1MHz），通过特制的深孔传感器安装固定装置（关于传感器与耦合固定装置已提交相关专利申请），将传感器精确安放于 30 米深，充满地下水的直径约 95mm 的钻孔中，并成功解决了传感器与洞壁之间紧密耦合、传感器收放自如等问题。

3 监测结果

本次监测顺利地完成了 TBM 掘进掌子面距监测区域约-50m 起至 TBM 掘进掌子面离开监测区域 150m 远共计距离超过 200m，时间将近 20 天的岩体声发射活动情况。3#TBM 引水隧洞直径为 12.4m，根据 TBM 掘进距离监测断面的位置与隧洞直径的对应关系，将本次声发射监测过程分为 3 个阶段 9 个过程，分别为：

（1）TBM 掌子面到达监测中心位置之前（包括进入-3.5 倍洞径前、进入-3.5~-2.5 倍洞径范围、进入-2.5~-1.5 倍洞径范围、进入-1.5~-0.5 倍洞径范围）；

（2）TBM 掌子面到达监测中心位置附近（即进入-0.5 倍洞径~离开+0.5 倍洞径范围）；

（3）TBM 掌子面离开监测中心位置之后（包括离开+0.5~+1.5 倍洞径范围、离开+1.5~+2.5 倍洞径范围、离开+2.5~+3.5 倍洞径范围和离开+3.5 倍洞径范围）

各阶段详细施工进度情况见表 3.1。

表 3.1 TBM 施工进度表

序号	编号	对应桩号	抵达日期 时间
1	-3.5 洞径	引(3)13+469.9	2009/12/8 13:30:00
2	-2.5 洞径	引(3)13+457.5	2009/12/9 16:40:00
3	-1.5 洞径	引(3)13+445.1	2009/12/12 01:30:00
4	-0.5 洞径	引(3)13+432.7	2009/12/13 01:40: 00
5	0 洞径	引(3)13+426.5	2009/12/13 13:30: 00
6	+0.5 洞径	引(3)13+420.3	2009/12/13 21:45: 00
7	1.5 洞径	引(3)13+407.9	2009/12/15 02:14: 00
8	2.5 洞径	引(3)13+395.5	2009/12/15 20:10: 00

9	3.5 洞径	引(3)13+383.1	2009/12/16 04:50:0000
---	--------	--------------	-----------------------

3.1 开挖前距离较远时的岩体活动信号特征

TBM 掘进掌子面进入监测中心位置-3.5 倍洞径前发生较少数量的撞击信号，未能捕捉到有效定位事件，表明 TBM 掘进机在进入 3.5 倍洞径前未对监测范围内的岩体造成影响，岩体处于稳定状态，该时段无明显声发射破裂信号发生。

3.2 开挖靠近监测断面时的岩体活动信号特征

TBM 掘进掌子面进入监测中心位置-3.5 倍洞径~0.5 倍洞径前（距监测中心位置约 6.2m），受 TBM 掘进机巨大推动力作用下监测范围内开始出现岩体破裂事件，破裂信号出现在掌子面前方及隧洞右上 7m 范围内，并随着掌子面位置的靠近破裂事件个数不断增加。但总体分布的规律性不明显，说明在 3#引水隧洞未形成前，没有开挖卸荷作用的岩体有微小破裂产生，且多为随机事件。该时段的破裂信号的分布情况见图 3-1，其中(a)为 TBM 掌子面距监测中心位置-3.5~-2.5 倍洞径；(b)为 TBM 掌子面距监测中心位置-2.5~-1.5 倍洞径；(c)为 TBM 掌子面距监测中心位置-1.5~-0.5 倍洞径。

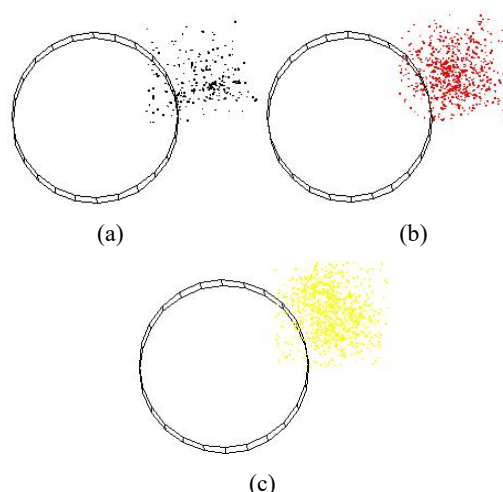


图 3-1 未开挖距离较远的破裂信号分布特征

3.3 开挖位于监测断面附近时的岩体活动信号特征

TBM 掘进掌子面通过监测中心位置±0.5 倍洞径前后（距监测中心位置约±6.2m）共经历 20 小左右，有效监测时间约 12 个小时，在该过程中 3#引水隧洞逐渐形成，开挖卸荷开始对围岩稳定性产生影响，在右拱肩有明显的破裂信号集中区，说明在从开挖完成后较短时间内，隧洞拱肩部分所受到的围岩变形最大。在隧洞右侧中部距洞壁 1~3m 范围存在一处明显破裂集中区，说明该位置围岩较脆弱（有结构面存在）。该时段的破裂信号的分布情况

见图 3-2。

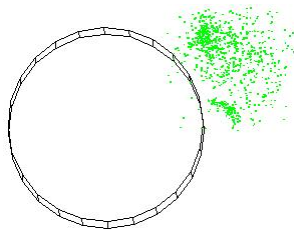


图 3-2 开挖位于监测断面附近的破裂信号分布特征

3.4 开挖离开监测断面后的岩体活动信号特征

TBM 掘进掌子面在通过监测中心位置 0.5 倍洞径后（距监测中心位置大于 6.2m），3#引水隧洞完全形成，隧洞周边岩体开始进行应力的重新分布和调整，岩体破裂信号大致按以隧洞轴线中心位置以辐射状向隧洞四周分布。该时段的破裂信号的分布情况见图 3-3，其中(a)为 TBM 掌子面距监测中心位置+0.5~+1.5 倍洞径；(b)为 TBM 掌子面距监测中心位置+1.5~+2.5 倍洞径；(c)为 TBM 掌子面距监测中心位置大于+3.5 倍洞径。

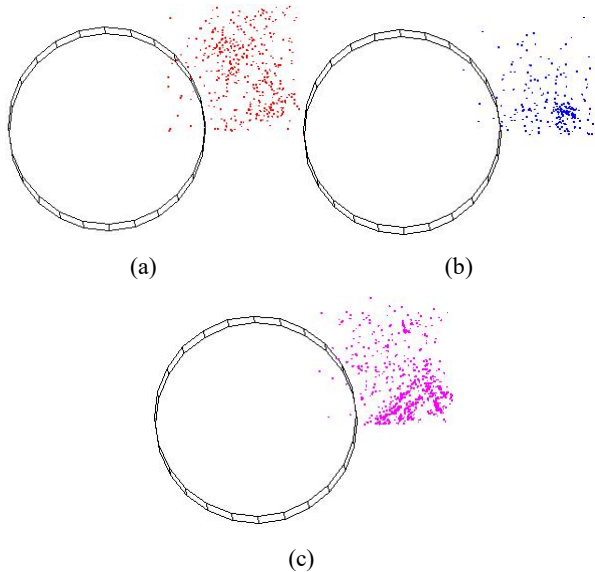


图 3-3 开挖远离监测断面的破裂信号分布特征

3.5 岩体声发射破裂信号定位特征分析

隧洞形成后，声发射监测到的破裂信号主要是由于岩体自身进行应力调整而产生的，破裂信号的分布的长轴方向为近似与主应力方向一致。监测到的声发射破裂信号主要分布在距洞壁 1.5~5m 范围内，其中 2~4m 洞壁范围内破裂信号数量更为集中。据此故可将距洞壁 0~1.5m 范围划为岩体完全松弛区，1.5~5m 范围划为岩体扰动区，5m 范围之外划为原岩状态区，其中扰动后的岩体在经过长期应力调整后可能成为松弛区的一部分也可能恢复到原岩性质。该规律与用声波法测试出来的 3~4m 的

平均围岩松弛厚度相接近。施工开挖完成较长时间内的破裂信号综合分布特征图 3-4，其中(a)为截面图；(b)为 3D 图；(c)为距离洞壁距离统计分布图。

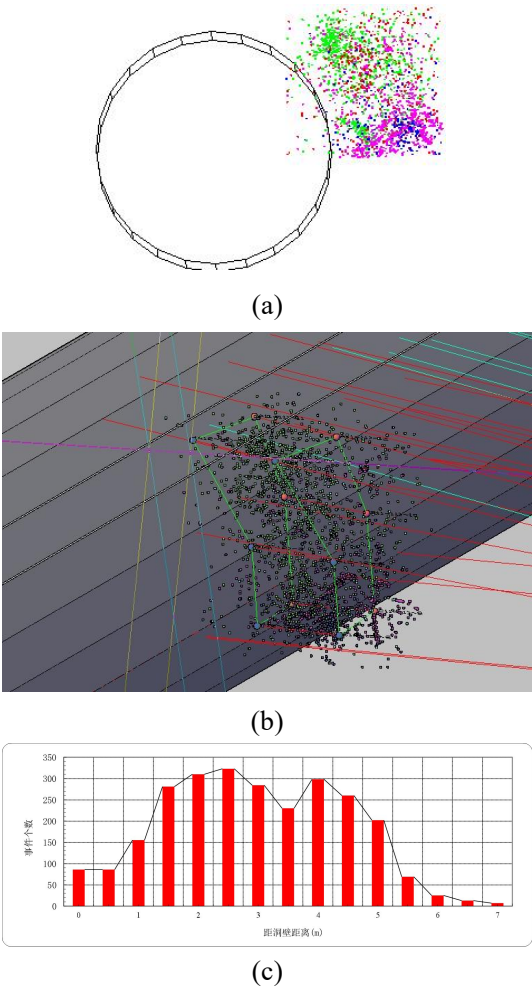


图 3-4 施工开挖完成较长时间内的破裂信号综合分布特征

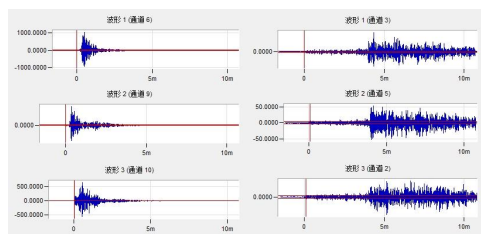
3.6 声发射破裂信号特征分析

(1) 声发射破裂信号频率特征

本次所采用 PAC 公司的声发射 SH-II-SRM 系统理论上可接收的声发射信号频率为 1~1MHz，R.45IC-LP-AST 型传感器理论上可接收的声发射信号频率为 1k~1MHz，有效接收信号频率范围 1k~50kHz，其中心峰值频率约为 20.83kHz，也即本次监测理论上主要接收频率范围在 1~50kHz 较高频率的岩体破裂信号。

(2) 声发射破裂信号波形特征

本次声发射监测试验接到的声发射信号波形种类极多，其中具有典型声发射信号特征的波形可见图 3-5，其中(a)图为较理想的破裂信号波形，(b)图为含白噪的破裂信号波形。



(a) (b)

图 3-5 典型的发射监测破裂信号波形图

(3) 声发射破裂信号能量特征

本次声发射监测从 2009 年 12 月 6 日开始, 于 2009 年 12 月 25 日结束, 捕获到可供分析研究的有效信号个数为 19605 个, 所有信号能量最大值为 65535, 能量平均值为 386, 累计能量值为 8941389。在到达监测位置之前(施工开挖 12 小时之前)所监测到的破裂信号能量最大值、能量平均值和累计能量值均相对较小, 说明在隧洞未形成前岩体所受外力有限, 对岩体的稳定性影响不大, 破裂信号强度也较弱; 在 TBM 通过监测中心位置的过程中(开挖前后 20 小时之内)隧洞形成, 岩体局部突然卸荷, 信号能量的各项指标迅速到达较高水平, 信号强度极强; TBM 掌子面在通过监测断面 0.5 倍洞径后信号的各项能量指标值逐步降低, 信号强度总体减弱, 而平均能量值在开挖完成后 7.5 倍洞径范围内(开挖后一周时间内)则有先减小后增大再减小的趋势, 说明围岩在施工完成较长时间段内仍可能进行较强的局部应力调整。本次声发射监测在不同时段破裂信号的平均能量特征分布情况图 3-6。

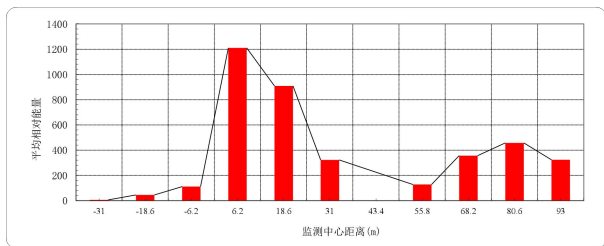


图.3-6 声发射破裂信号平均能量分布特征图

(4) 声发射破裂信号其它特征

可定位信号距离某个传感器的时间差 ΔT 范围为 $0 \sim 1200 \mu s$, 平均时间差 ΔT 为 $483 \mu s$, 即可定位信号距离某个传感器的有效距离范围为 $0 \sim 6m$, 有效距离平均值为 $2.4m$; 监测到的声发射破裂信号幅值范围为 $20 \sim 99dB$, 平均幅值 $46dB$ 。

(5) 监测区域内岩体破裂信号事件个数的变化特征

在声发射破裂信号监测的全过程中, 时间段内共获得有效定位事件有 4633 个。在整个监测过程

中, TBM 掌子面距离监测中心位置 $-1.5 \sim -0.5$ 倍洞径和 $-0.5 \sim +0.5$ 洞径范围时破裂信号发的频率相对较高; 在到达 TBM 掌子面距离监测中心位置 -1.5 倍洞径之前 TBM 掘进机的巨大推动已对岩体的结构和稳定性产生影响, 并局部产生破坏, 破裂信号发生率较低; 在 TBM 掌子面离开监测中心位置 $+0.5 \sim +2.5$ 洞径范围内 3#引水隧洞已经形成, 破裂信号发生率仍相对较高; 在 TBM 掌子面离开监测中心位置 $+3.5$ 洞径范围后岩体内部应力调整作用减小, 且有随时间推移和 TBM 掌子面的渐远破裂信号发生率随之降低的趋势。见图 3-7。

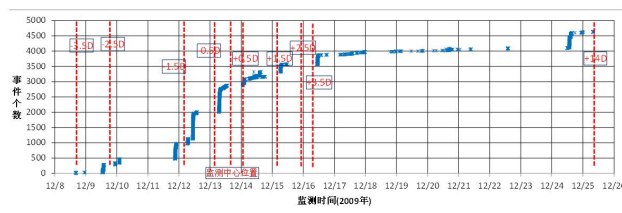


图 3-7 声发射监测事件发生个数随时间变化散点图

4 结论和建议

通过本次声发射监测试验可得出如下结论:

(1) 通过对声发射破裂信号在隧洞不同开挖时间的分布和个数变化情况可实现对隧洞施工开挖过程的岩体应力变化情况的判断和分析, 可为围岩支护参数优化设计提供相关信息。

(2) 声发射破裂信号在空间的分布规律与围岩松弛厚度和岩体受应力调整作用的扰动深度有关。

(3) 声发射破裂信号的能量特征反映了在隧洞施工开挖形成一段时间内围岩的应力调整大致是一个由强到弱的过程, 但期间仍可能会存在局部的反复过程。

(4) 由于 TBM 动态掘进的实时监测会有大量的切割干扰信号与有效的声发射破裂信号叠加且无法实现有效滤除, 只能在 TBM 停止切割的状态下获取更有意义的信息。由此采用时间滤波将会舍去 TBM 切割过程中产生的有用声发射数据。故声发射监测更适用于瞬态掘进的实时监测, 即对钻爆法隧洞施工进行声发射监测更具有优越性。

(5) 由于试验受现场条件的限制无法对隧洞周边实施全方位的监测, 声发射破裂信号分布研究仍是局限性的, 尚不能对隧洞周边大范围的岩体应力在开挖前后的变化情况进行全面反映。

(6)声发射技术在岩石方面特别是隧洞现场岩石开挖的研究仍属于初级阶段,尽管其在岩爆预测、安全性评价及与岩体力学性质的关系等方面的深化研究还需要进行大量的试验和工作。但本文的现场试验研究表明,声发射不失为一种较有潜力及实际应用价值的岩石状况现场监测技术方法,值得进行更深入的研究以开发利用其价值。

参考文献

- [1] 张伯崇,角田隆彦,李方全等. 水压致裂裂缝的形成和扩展形式[M]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所/日本电力中央研究所, 1999..
- [2] 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [3] 王思敬,杨志法,傅冰骏等. 中国岩石力学与工程[M]. 河南: 河南大学出版社, 2004..
- [4] 梁华,业成,蒋俊. 中国第十二届声发射学术研讨会论文集[C]. 南京: 中国无损检测学会声发射专业委员会, 2009.
- [5] Yao G H , Song Z P , Yu X B. Experimental study on acoustic emission characteristics of limestone. Coal Geol Ex plor , 2006 ,34 (6) : 44(姚改焕, 宋站平, 余贤斌. 石灰岩声发射特性的试验研究.煤田地质与勘探, 2006 , 34 (6) : 44)
- [6] Zhao X D , Tang C A , Li Y H , et al. Study on AE activity characteristics under uniaxial compression load. Chin J Rock MechEng , 2006 , 25 (Supp 2) : 3673(赵兴东, 唐春安, 李元辉, 等. 花岗岩破裂全过程的声发射特性研究. 岩石力学与工程学报, 2006 , 25 (增刊 2) : 3673)
- [7] Fu X M. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks. J ChengduUniv Nat Sci , 2005 , 32 (1) : 17(付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究.成都理工大学学报:自然科学版, 2005 , 32 (1) : 17)
- [8] Liu H Y, Tang C A , Yang T H , et al. Numerical simulation research of acoustic emission characteristics under symmetrical and asymmetrical compressive loads. Rock Soil Mech , 2001 , 22(4) : 383(刘红元, 唐春安, 杨天鸿, 等. 对称和非对称载荷下声发射特征的数值模拟研究. 岩土力学, 2001 , 22 (4) : 383)