

# 深埋隧洞 TBM 施工过程中围岩损伤演化声发射试验

陈炳瑞<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>, 肖亚勋<sup>1</sup>, 明华军<sup>1</sup>, 张春生<sup>2</sup>, 侯靖<sup>2</sup>, 褚卫江<sup>2</sup>

(1. 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, 湖北 武汉 430071;

2. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 锦屏二级水电站深埋引水隧洞处于西南高应力区, 地质条件复杂, 岩爆、突水、塌方等工程地质灾害突出, 掌握 TBM 开挖围岩损伤演化规律, 设计有效的支护方案防治 TBM 施工过程中地质灾害的发生是非常重要的。为此, 开展 TBM 施工过程中声发射监测试验, 研究 TBM 开挖过程中围岩损伤的演化规律。试验结果表明: 沿洞轴线方向, TBM 开挖时掌子面前约 10 m 的范围内围岩已受到不同程度的损伤, TBM 开挖后围岩损伤破裂主要集中在掌子面后 7 m 的范围内, 其中以掌子面后 3 m 时为最; 沿洞径方向, 围岩受损伤的范围约 9 m, 根据损伤程度的不同, 划分为松动区、损伤区和扰动区, 依次为距洞壁 3, 3~9 和 9~22 m 的范围。从力学的角度揭示损伤演化的机制和松动区、损伤区和扰动区划分的依据, 为支护措施设计与支护时机的选取提供科学依据。分析讨论传感器选取、传感器布置、现场噪音及地质条件等各种因素对围岩损伤结果的影响及进一步发展和研究的方向。

**关键词:** 隧道工程; 现场试验; 声发射; 深埋隧洞; 损伤演化

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)08 - 1562 - 08

## ACOUSTIC EMISSION TEST ON DAMAGE EVOLUTION OF SURROUNDING ROCK IN DEEP-BURIED TUNNEL DURING TBM EXCAVATION

CHEN Bingrui<sup>1</sup>, FENG Xiating<sup>1</sup>, XIAO Yaxun<sup>1</sup>, MING Huajun<sup>1</sup>, ZHANG Chunsheng<sup>2</sup>,  
HOU Jing<sup>2</sup>, CHU Weijiang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. HydroChina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

**Abstract:** Diversion tunnels of Jinping II hydropower station, which is located at high stress zone, Southwest China, encounter many geological disasters, such as rockburst, water bursting, collapse of tunnel and so on during construction. It is very important to master damage evolution of surrounding rock and to design effective supporting measures to prevent or relieve geological disaster. Therefore, acoustic emission(AE) test was carried out and law of damage evolution of marble was studied. Different damage of surrounding rock comes up in 10 m range before free face during TBM working; and main damage or cracking is developed in 7 m range; 3 m location is the most severe after free face. Damage range of surrounding rock is about 9 m in direction of tunnel axis. Relaxation, damage and disturbed zone are distinguished by evolution law of AE events, energy release and mechanism of damage evolution. Relaxation and damage range of surrounding rock are 3, 3 - 9, and 9 - 22 m far from tunnel wall, respectively. Mechanism of damage evolution is illuminated by AE and mechanical characteristics before and after peak strength of rock mass. The influences of sensor types and arrangement, environmental noise and geological conditions on testing result are discussed; and the directions to improve testing result are also

**收稿日期:** 2010 - 03 - 21; **修回日期:** 2010 - 06 - 17

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732006); 国家自然科学基金资助项目(50909092); “十一五”国家科技支撑计划课题(2008BAB29B01)

**作者简介:** 陈炳瑞(1976 - ), 男, 博士, 2001年毕业于东北大学采矿工程专业, 现任副研究员, 主要从事岩石力学及岩石工程稳定性智能分析方面的研究工作。E-mail: brchen@whrsm.ac.cn; cbrzm@163.com

pointed out.

**Key words:** tunnelling engineering; in-situ test; acoustic emission(AE); deep-buried tunnel; damage evolution

## 1 引言

TBM 施工技术由于其施工速度快、效率高、隧道成型好、对周边环境影响小以及作业安全等优点, 目前已在世界越来越多的国家得到应用。随着 TBM 在隧洞掘进中的广泛使用, 国内外众多学者对 TBM 的破岩机制及其实际工程应用中遇到的问题从地质、力学、试验等角度进行了深入分析和研究, 如 M. Sapignia 等<sup>[1]</sup>应用岩石力学分级的方法, 建立了 RMR 系统与 TBM 在隧道掘进过程中速率的关系, 以确保掘进过程中围岩的稳定性; Q. M. Gong 等<sup>[2, 3]</sup>运用离散元方法, 模拟了 TBM 在掘进时岩体破裂发展形态及其和掘进速率的关系, 深入解释了裂隙形成和发展的 3 个阶段; R. Gertscha 等<sup>[4]</sup>通过一系列试验研究了 TBM 掘进机在硬、脆性岩体施工时, 隧道半径和掘进速度的关系; 徐则民等<sup>[5]</sup>研究了 TBM 刀具设计中围岩石力学参数的选择问题; 秦淞君<sup>[6]</sup>研究了隧道掘进机掘进时的岩石特征的判定问题; 冷先伦等<sup>[7, 8]</sup>用有限差分方法, 研究了 TBM 开挖对围岩的扰动特征, 认为相同条件下 TBM 开挖位移和塑性区分别约为钻爆法的 65% 和 70%。但目前的研究多局限于理论分析和数值模拟, 深埋硬岩 TBM 开挖对围岩损伤的时空演化规律, 缺乏详细现场试验研究。

声发射是指材料在外力作用下, 其内部变形或裂纹扩展过程中, 由应变能的瞬态释放而产生弹性波的现象。隧洞开挖引起围岩应力场的调整, 导致新裂纹产生、旧裂纹扩展, 聚集于岩体内部的能量以弹性波的形式进行释放, 产生大量的声发射信息。不同尺寸、不同形式的微破裂, 岩体所释放出的声发射信号强弱和特征是不同的<sup>[9]</sup>, 通过捕捉岩石微破裂产生的声发射信息, 可以系统研究围岩损伤时空演化规律、损伤机制及微破裂的强弱等。对于室内岩石试样, 李庶林等<sup>[10~12]</sup>对各种应力路径下岩石声发射力学试验进行了较为系统的研究, 取得了丰硕的成果; 对于现场声发射试验, 李正旺等<sup>[13]</sup>进行了隧洞围岩声发射监测, 分析和解释了隧洞开挖后的“松弛现象”, 并通过矩张量分析法研究了不同声发射信号的破裂类型; C. D. Martin 等<sup>[14, 15]</sup>进行了

微震/声发射监测, 系统地研究了洞室开挖后围岩的损伤与破坏, 并根据微震/声发射监测数据提出了基于张拉破坏的破坏源尺寸评价模型<sup>[9]</sup>。可见用声发射监测技术评价围岩的损伤具有其他监测手段所没有的独特优势, 但目前这些隧洞的开挖都是基于钻爆法施工, 对于 TBM 施工对围岩损伤的研究, 缺乏必要的现场声发射试验。

鉴于此, 为了获得 TBM 开挖过程中围岩损伤的时空演化规律, 为深埋隧洞 TBM 施工支护措施设计与支护时机的选取提供科学依据, 开展了深埋硬岩 TBM 施工过程中声发射监测试验。

## 2 试验简介

### 2.1 试验场所概述

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州境内的雅砻江锦屏大河弯处雅砻江干流上, 系利用雅砻江锦屏 150 km 长大河弯的天然落差, 裁弯取直凿洞引水, 共平行布置 7 条隧洞, 由南向北依次为辅助洞 A、辅助洞 B、施工排水洞、4<sup>#</sup>引水隧洞(简称为引 4<sup>#</sup>, 下同)、引 3<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>和 1<sup>#</sup>, 洞线平均长度约 16.7 km, 其中, 引 2<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>为钻爆法施工, 上下台阶开挖, 开挖洞径 13 m; 引 1<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>为 TBM 施工, 全断面开挖, 开挖洞径 12.4 m。

为了研究 TBM 施工过程中引 3<sup>#</sup>围岩损伤演化规律, 声发射试验场所选在了锦屏二级水电站引 2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>之间的 2<sup>#</sup>横通洞的 1<sup>#</sup>试验洞内(简称 2-1 试验洞), 如图 1 所示。2-1 试验洞为马蹄形, 断面尺寸为 5 m×5 m, 其洞口距离引 2<sup>#</sup>东端洞口约 3.2 km, 上覆岩层厚度约 1 850 m, 岩性为 T<sub>2y</sub><sup>5</sup> 灰白色层状中粗晶大理岩, 节理裂隙较为发育, 洞内局部溶蚀含水, 有渗水、出水现象, 局部边墙岩体破碎, 试验过程破碎岩体有掉落现象, 根据地质雷达探测结果<sup>[16]</sup>, 声发射监测区域附近存在 4 条明显的近 EW 向节理带 S1, S2, S3 和 S4(见图 2), 节理带岩屑、碎石、泥质、铁锰质充填, 围岩类别为以 III 类为主。岩石单轴抗压强度为 80~110 MPa, 弹性模量为 30~50 GPa。

### 2.2 声发射系统

声发射试验采用美国 PAC 公司的 DiSP 声发射

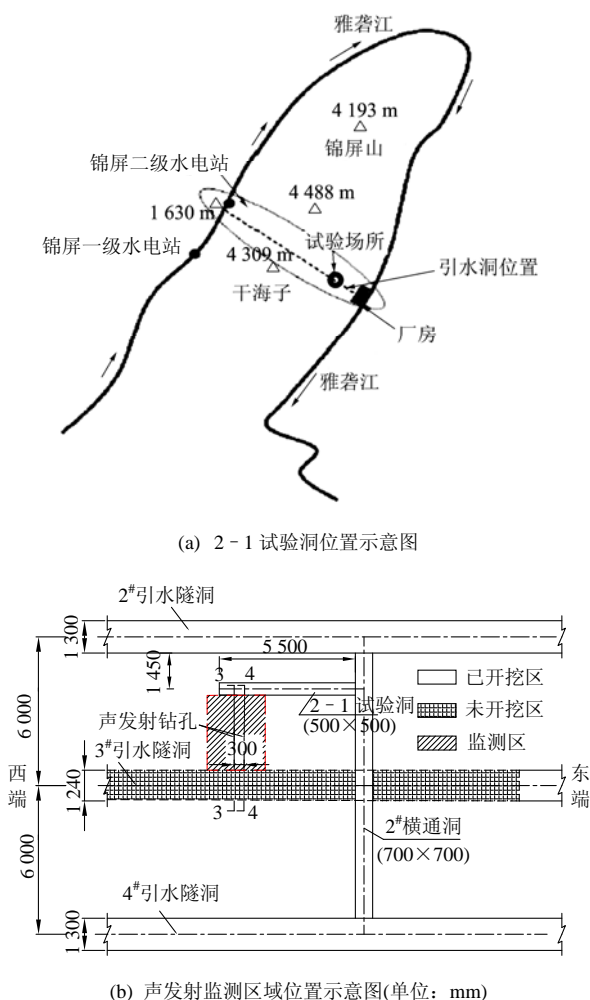


图1 声发射监测区域位置图  
Fig.1 Location of AE monitoring zone

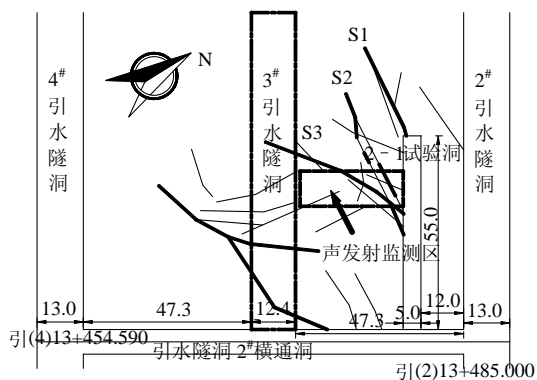


图2 声发射监测区节理裂隙分布(单位: m)<sup>[16]</sup>  
Fig.2 Distribution of joints and cracks near AE monitoring zone(unit: m)<sup>[16]</sup>

测试系统, 该系统包括: 传感器、前置放大器、声发射采集卡、主机系统和处理软件, 采集系统及工作原理见图3。

根据前期现场声发射试验, 传感器选用谐振频率为 40 KHz 的 SR40M 型号传感器为宜; 为了更好、

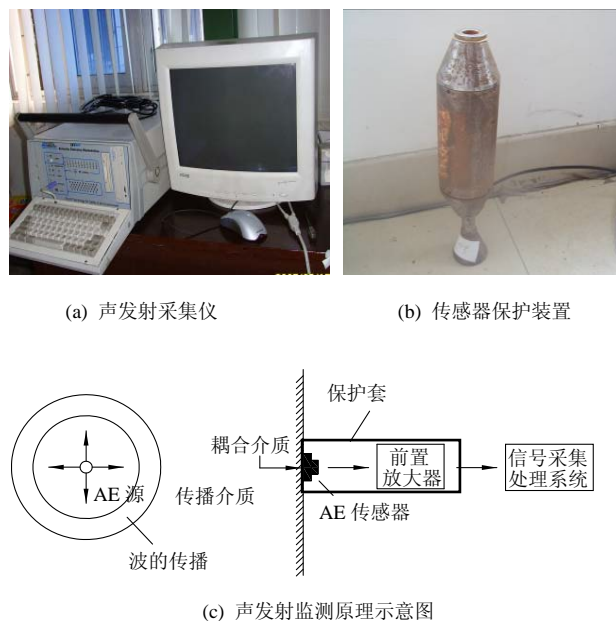


图3 声发射监测系统及原理  
Fig.3 AE monitoring system and principle

更稳定地监测声发射信号, 选用了性能优越的 2/4/6 - AST 前置放大器。为了防止地下水、监测隧洞开挖、塌孔等不良地质条件对前置放大器和传感器的损坏, 为了尽量降低长期监测中静电对声发射信号的干扰, 及为了便于传感器深孔安装与回收, 设计了如图3(b)所示的传感器保护装置, 将传感器和前置放大器一起封装于保护套内。

### 2.3 传感器布置方案及安装

传感器布置不仅影响声发射信号的监测, 而且对不同的源定位算法的定位速度、精度及定位结果的唯一性也有不同程度的影响。合理的传感器布置方案不仅能够更大范围地监测到更多有效声发射信号, 而且能使定位算法快速准确的确定声发射源位置和时间。

考虑到现场操作的可行性, 并最大可能的使传感器形成一个良性阵列, 设计了“梯形体”传感器布置方案: 沿垂直于引3#洞轴线方向共平行布置 3-3 和 4-4 两个监测断面, 两断面相距 3.0 m, 3-3 监测断面距离 2-1 试验洞掌子面 7.0 m (见图1); 2 个断面传感器布置方式相同, 每个监测断面布置 4 个传感器, 以 3-3 断面为例 (见图4), 传感器 SF1-1 和 SF1-4 距离隧洞壁的距离相同为 1.8 m, SF1-2 和 SF1-3 距离隧洞壁的距离相同为 4.0 m, SF1-1 和 SF1-2 相距 3.6 m, SF1-2 和 SF1-3 相距 2.1 m, SF1-3 和 SF1-4 相距 3.6 m, SF1-1 和 SF1-4 相距 6.6 m。

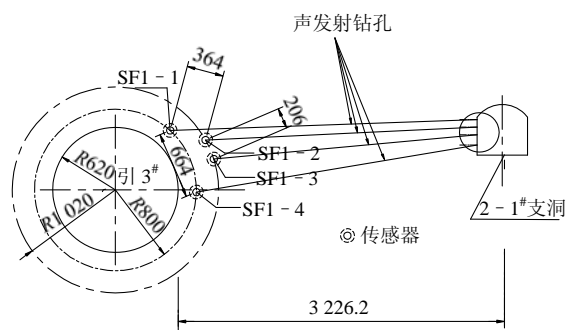


图 4 3-3 监测断面声发射传感器布置图(单位: mm)

Fig.4 Location of AE sensors on section 3-3(unit: mm)

TBM 开挖围岩损伤监测, 传感器布置采取预埋策略, 即在 TBM 开挖至监测断面之前将声发射传感器安装完毕, 过程如下: 根据传感器布置方案, 确定 2-1 试验洞南侧边墙声发射钻孔的分布(见图 5), 并按设计要求钻传感器安装孔, 钻孔直径 76 mm; 接着, 将传感器与前置放大器封装至保护套内, 并通过断铅试验检查传感器与保护套的耦合状况与封装效果, 满足安装要求时, 利用特制的安装杆和防水胶将其安装至钻孔底部; 接着, 待黏接牢固后, 通过固定在保护套尾部的铁丝和安装杆联合检验保护套与安装孔底部耦合状况, 耦合良好撤出安装杆, 否则取出传感器保护套, 对钻孔底部进行特殊处理后, 再次安装直至符合要求。

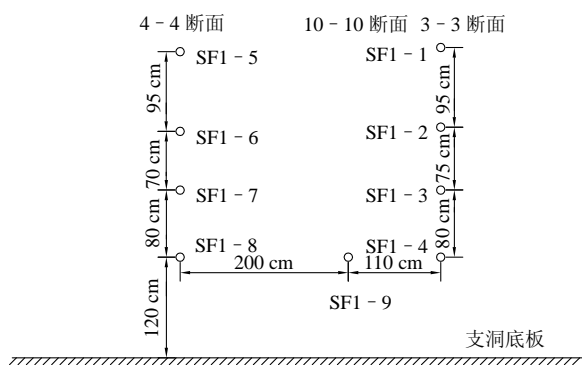


图 5 2-1 试验洞南侧边墙钻孔分布示意图

Fig.5 Location of boreholes on south-wall of test tunnel 2-1

## 2.4 波在大理岩中的传播速度

试验前测定波在围岩中的传播速度, 掌握波在围岩中传播的规律, 对于正确分析声发射监测结果, 评定围岩损伤区范围及程度是十分重要的。

但由于本次试验具有如下特点: (1) 传感器安装钻孔较深(28~30 m); (2) 传感器间的距离相对较

远; (3) 2-1 试验洞监测区域节理裂隙较为发育, 波在岩体内的衰减较为严重, 致使通过声发射系统的 AST(自动传感器测试)功能或岩壁表面敲击法, 无法测试监测区域内波的传播速度。为此采用如下措施: (1) 传感器安装前先在 SF1-4 和 SF1-8 内进行了跨孔声波测试, 监测区域内 P 波波速均值为 4.80 km/s; (2) 传感器安装后, 在 SF1-9(见图 5) 钻孔内, 用安装杆敲击孔底, 通过 SF1-4 和 SF1-8 传感器接受到的敲击信号, 计算监测区域的 P 波波速, 测试结果为 5.10 km/s。

综合 2 次测试结果 P 波波速取值 4.95 km/s。

## 2.5 波在大理岩中的衰减规律

弹性波在 2-1 试验洞  $T_{2y}^5$  大理岩中的衰减规律的测试, 采用 6 个 SR40M 型号传感器, 按图 6 所示的方案布置, 发射源通过锤击产生, 分别在在传感器①, ⑥位置各进行 5 次锤击, 依据监测到的声发射信号的平均幅值, 衰减规律如图 7 所示。



图 6 衰减测试传感器布置简图(单位: mm)

Fig.6 Location of sensors of attenuation test(unit: mm)

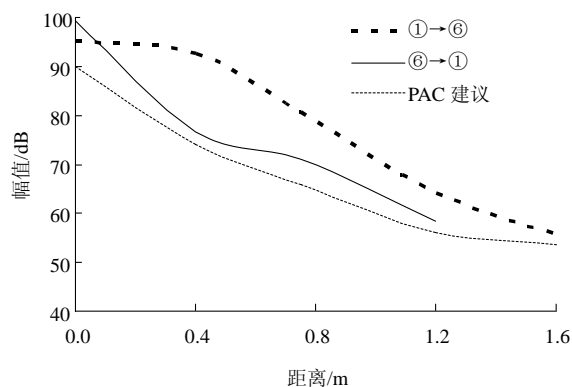


图 7 不同条件下声波衰减规律对比

Fig.7 Comparison of attenuation law of P-wave under different conditions

从试验结果可以看出, 不同传播方向声波的衰减规律有所不同; 声发射信号衰减基本遵循负指数衰减规律, 但衰减幅值明显低于美国物理声学公司建议的材料衰减规律<sup>[17]</sup>。

在节理和裂隙比较发育的不良条件下, 不足 100 dB 的声发射信号, 衰减至 45 dB 前仍能传播

1.5 m 左右,在地质条件较好的岩体中,应能传播更远,现场开挖过程中岩体破裂释放的能量往往更高,因此,传感器对于 5 m 左右微破裂信号应该可以监测到的,也就是说目前的传感器布置方案是合理的。

## 2.6 TBM 开挖声发射监测参数设置

根据前期试验结果,TBM 开挖围岩损伤声发射监测主要参数设置如下:

(1) 滤波参数: TBM 开挖时环境噪音非常复杂,锚杆钻机、TBM 本身的震动、TBM 破岩等多种噪音同时作用时,交互影响,对声发射监测与结果分析影响非常大。为了尽可能地消除环境噪音的影响,TBM 工作时,信号振幅阈值采用浮动型,即根据环境噪音的变化,阈值在[40 dB, 60 dB]内实时动态的调整;为了采集到更多有效的微破裂信号,TBM 等现场机械设备停止工作的间隙,信号阈值采用固定型,阈值取值 35 dB;电器噪音多为突发性信号,持续时间短,振铃计数小,为了消除电器噪音的干扰,前端滤波对所有通道摒弃了振铃较低的声发射信号;为了消除载重车辆和 TBM 工作部分振动信号对声发射监测的影响,前端滤波对所有通道滤去了平均频率较低的声发射信号;模拟滤波器频率采集范围为 10~100 kHz。

(2) 波形参数:采集卡采样频率为 500 kHz;预触发时间为 512  $\mu$ s,每个声发射事件波形记录长度为 4 K。

(3) 定位参数波速为 4.95 km/s,迭代步数为 500 次。

## 3 围岩微破裂识别算法

围岩微破裂识别算法,即微破裂源定位算法,是根据传感器坐标和传感器监测到时,确定破裂源位置和时间,进而评定围岩损伤范围和损伤程度的一种分析方法,在岩石工程等众多领域有着广泛应用。

微破裂源定位算法种类众多,最常用的是 Geiger 定位方法<sup>[18]</sup>,该方法是一种将源定位这一非线性问题,通过忽略高阶项,转化为线性问题的一种经典定位方法,基本原理可简述如下:

假设  $n$  个传感器的观测到时为  $W_1, W_2, \dots, W_n$ ,求源位置  $(x, y, z)$  和微破裂发生时间  $t$ ,使得目标函数最小,目标函数为

$$Q = \sum_{k=1}^n [W_k - f_k(\mathbf{B})]^2 \quad (1a)$$

其中,

$$f_k(\mathbf{B}) = t + \frac{\sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2}}{V} \quad (1b)$$

$$\mathbf{B} = \{t, x, y, z\}^T$$

式中:  $f_k(\mathbf{B})$  为计算监测到时;  $\mathbf{B}$  为微破裂发生时间和微破裂源三维坐标;  $x_k, y_k, z_k$  为第  $k$  个传感器位置坐标;  $V$  为波在介质中传播的速率。

对于式(1)的求解,最常用的是最小二乘法,即令  $\mathbf{B} = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}^T$ ,  $m = 4$ ,分别为微破裂发生时间和微破裂源三维坐标,为了使  $\mathbf{B}$  满足使  $Q$  最小,  $b_i$  应满足如下方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

由于  $f_k(\mathbf{B})$  为非线性表达式,式(1)无法直接求解,通常通过泰勒展开,略去二次及二次以上的项,使其线性化,逐次迭代使其解逼近真值。

## 4 TBM 施工围岩损伤演化特征

### 4.1 沿隧洞轴线方向围岩损伤演化规律

TBM 掘进单位长度时,监测区域(见图 1(b))内声发射活动规律如图 8 所示,图中横坐标负值表示 TBM 未掘进至监测断面,正值表示 TBM 已掘过监测断面,单位长度声发射事件数表示 TBM 开挖单位长度声发射仪监测到的围岩破裂的声发射事件之和,单位长度能量释放表示 TBM 开挖单位长度声发射仪监测到的围岩破裂释放的能量之和。从图 8 可以看出,TBM 开挖时掌子面前约 10 m 的范围内已有一定规模的声发射事件及能量释放,表明围岩已受到扰动与损伤;而 TBM 开挖后声发射事件和能量释放主要集中在掌子面后 7 m 的范围内,其中距离掌子面 3 m 时的声发射事件最多,且能量最大,这表明开挖卸荷造成的围岩损伤破裂主要集中在掌子面后 7 m 的范围内,其中以掌子面后 3 m 时为最。

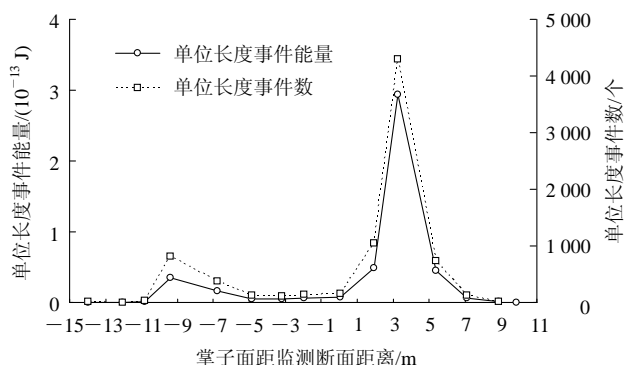


图 8 TBM 掘进时监测区域内声发射活动规律  
Fig.8 Activity law of AE in monitoring zone during TBM excavation

从声发射仪监测到声发射信号到 TBM 掘进至监测断面时的累计声发射事件的空间分布(见图 9), 声发射累计事件主要集中在面向掌子面右拱肩, 掌子面前约 6 m 的范围内。

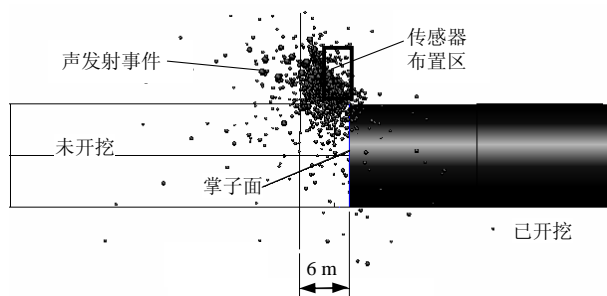


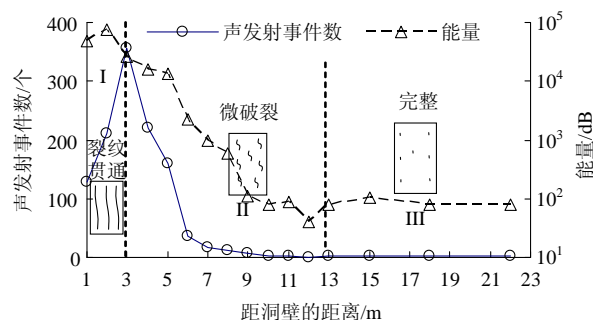
图 9 TBM 掘进至监测区域时掌子面前方声发射事件分布  
Fig.9 Distribution of AE events before tunnel face when TBM excavates to monitoring zone

TBM 开挖至高应力区时, 为了有效地减缓岩爆发生的概率和烈度, 对掌子面前方区域进行应力释放时, 钻孔布置应确保穿过声发射强活动区, 深度以不低于 10 m 为宜, 这一结论为强岩爆区掌子面前方应力释放孔的设计提供了第一手的现场试验资料; 掌子面后, 应在强损伤破裂区形成前及时对围岩进行喷锚支护, 尽量保持围岩的完整性, 可有效预防掘进时应力调整直接引起的岩爆, 也可预防掘进后应力再次调整诱发的岩爆。

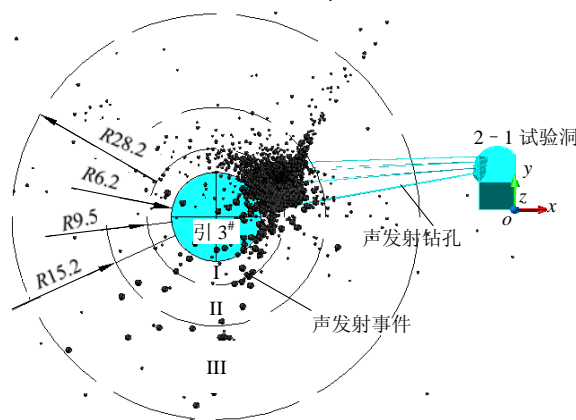
#### 4.2 沿洞径方向围岩损伤演化规律

TBM 开挖通过声发射监测区域后, 监测区域内声发射事件与围岩损伤演化的关系如图 10(a)所示, 空间分布如图 10(b)所示, 图 10(b)中球体的大小表示能量的大小。随着距离洞壁距离的增加声发射事件数表现出先增加后减小的趋势, 围岩体破裂释放的能量总体表现为下降趋势。在距离洞壁 3 m 的范围内能量释放保持在一个较高水平, 而声发射事件数距离洞壁越近越少, 这说明洞壁 3 m 的范围内, 距离洞壁越近围岩破裂的尺度相对越大, 能量释放相对越多, 该区域可以认为是微裂纹形成与贯通围岩松动区 I; 3~9 m 的范围内, 声发射事件数和围岩破裂释放的能量都呈快速下降趋势, 主要因为该区域围岩以旧裂隙的扩展和新裂隙的萌生微破裂为主, 并且随着距离的增加微破裂的数目逐渐减小, 该区域可以认为是围岩的损伤区 II; 距离洞壁 9~

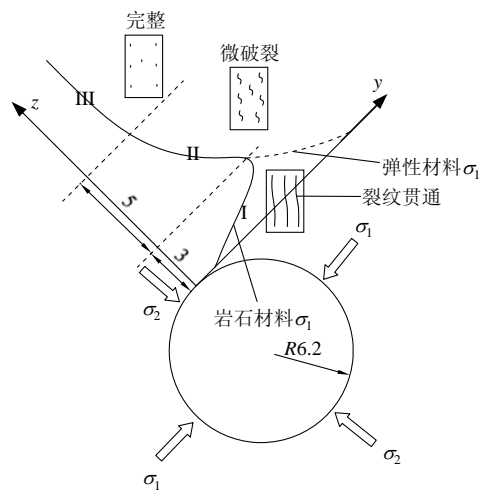
22 m 范围内, 声发射事件数和围岩破裂释放的能量基本上趋于稳定, 处于一个较低水平, 可以认为该区域为围岩扰动区 III, 其演化的机制可以通过对比



(a) 声发射事件数与围岩损伤演化的关系



(b) 声发射事件与损伤区域的空间分布(单位: m)



(c) 围岩损伤演化机制(单位: m)

图 10 TBM 开挖沿洞径方向围岩损伤演化及机制

Fig.10 Damage evolution and mechanism of surrounding rock along radial direction of tunnel during TBM excavation

岩石室内试验表现出的力学特征进行解释说明(见图 10(c))。



TBM 开挖后应力场不但大小而且方向发生一系列调整,洞壁处应力状态由原来的三向应力,调整为两向应力,对于理想弹性材料,最大主应力场演化规律如图 10(c)虚线所示,但对于岩石这种非均质天然地质材料,随着应力的集中,当超过材料的承载极限时,必然发生一系列的微破坏,致使围岩的承载能力下降,该区域围岩体主要表现为峰值后力学特性,主要发生区为图 10 所示的开挖松动区 I;随着距洞壁的距离的增加,围岩承受的最大载荷进一步降低,围压进一步增加,围岩体只是出现了旧裂隙的扩展和新裂隙的萌生,并未形成裂隙的贯通与宏观破坏,该区围岩主要表现为岩石加载破坏前的力学特性,仍具有很高的承载能力,该区域为 TBM 开挖损伤区 II(见图 10);随着距离的进一步增加,围岩应力场基本趋于原岩应力场,岩体虽受扰动但基本表现为原岩的力学特性,该区为 TBM 开挖围岩扰动区 III。

因此,支护措施选取时,锚杆的长度要足以穿过松动区,保证其在完整岩石区的入岩深度不小于 1 m 为宜,这一结论为强岩爆区 6 m 支护锚杆的设计提供了重要参考依据。

## 5 影响因素探讨

(1) TBM 开挖,围岩损伤破裂释放的弹性波是一种宽频段多种波型(如 P 波和 S 波)混合的复合波,试验采用的是单向谐振型传感器,传感器频率范围有限,且只能监测到一个方向应力波,再加上传感器的耦合、信号的衰减和不良地质条件等诸多因素的影响,监测到的只是某种特定尺寸微破裂所释放的信号,反应的只是围岩微破裂一般特征和规律,若要获得理想的全面的声发射信号,声发射监测时,应采取多频段、多型号传感器互补的策略。

(2) TBM 本身的振动、刀盘碎岩及锚杆钻机 etc 现场噪音是影响声发射监测及分析的重要因素,尽管论文已对声发射信号进行滤噪,但受监测系统及目前滤波技术的限制,滤噪主要是单指标滤噪,仍有许多干扰信号(尤其是 TBM 破岩的噪音)无法较好地滤去,影响最后的试验结果。因此,综合考虑多种滤波指标,研究新的滤波方法,进一步减小环境噪音的影响是必要的。

(3) 声发射定位结果出现了如图 9 和 10(b)(一些破裂源出现在已开挖的隧洞里)所示的不合理现象,

主要有 2 个方面的原因:一是由于现场地质条件的复杂性,弹性波在岩体中传播的速度难于准确确定;二是监测设备弹性波拾取时存在误差。因此,一方面可以通过波速和破裂源位置一起反演的方法解决波速不易确定的问题;另一方面可以通过改善弹性波识别算法,提高到时识别精度。

(4) 传感器的空间布置对围岩损伤演化监测结果也有较大的影响。传感器空间分布使传感器形成一个阵列,对于阵列内的声发射事件,定位算法具有较好的定位精度和收敛性,但对于传感器阵列之外的声发射事件定位算法的定位精度及收敛性还存在一定的问题。因此,一方面要优化传感器布置方案,尽可能地使监测对象分布在传感器阵列之内;另一方面要改善源定位算法,尽可能地减少源定位算法对传感器阵列的依赖。

(5) 传感器为高频段传感器,其有效监测距离较近,当传感器距离声发射源较远,且岩体地质条件不是很好的情况下,围岩破裂发出的微小声发射事件是难于接收到的,这也势必影响声发射监测围岩损伤分析结果。

## 6 结 论

通过 TBM 施工声发射试验,对 TBM 施工诱发的围岩损伤进行了分析与研究,得到了如下结论:

(1) 沿洞轴线方向,TBM 开挖时掌子面前约 10 m 的范围内围岩已受到不同程度的损伤与扰动,但主要损伤集中在掌子面前约 6 m 的范围内,TBM 开挖后围岩损伤破裂主要集中在掌子面后 7 m 的范围内,其中以掌子面后 3 m 时为最。

(2) 沿洞径方向,围岩受损伤的范围约 9 m,其中 3 m 范围内为松动区,3~9 m 为损伤区,9~22 m 为扰动区。

(3) 根据岩石峰值强度前后的力学特性和声发射演化规律,从机制上解释了岩石损伤演化规律与松动区、损伤区和扰动区划分的依据。

(4) 在掌子面前进行应力解除爆破时,钻孔布置应确保穿过声发射强活动区,深度以不低于 10 m 为宜;掌子面后,应在强损伤破裂区形成前及时对围岩进行喷锚支护,尽量保持围岩的完整性;支护措施选取时,锚杆的长度要足以穿过松动区,保证其在完整岩石区的入岩深度不小于 1 m 为宜。

(5) 分析讨论了传感器选取与布置、现场噪音

及地质条件等各种因素对围岩损伤结果的影响及进一步发展的方向。

试验成果对于评价围岩损伤范围评价及损伤机制的认识具有重要意义;对掌子面前应力释放孔的设计,现场支护措施的设计,支护时机的选取具有实际参考价值;对相关研究工作的深入开展具有重要参考价值。

**致谢** 本试验的开展是在中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、二滩水电开发有限责任公司、杭州华东工程检测技术有限公司、浙江华东建设工程有限公司的协助下完成的,试验方法的许多改进和他们的积极建议是分不开的;于洋硕士、李邵军博士和李占海博士试验过程中的辛苦努力和有意义的建议也是本试验成功完成的基础,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献(References):

- [1] SAPIGNIA M, BERTIB M, BETHAZE E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(6): 771 - 788.
- [2] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(2): 183 - 191.
- [3] GONG Q M, JIAO Y Y, ZHAO J. Numerical modeling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(1): 46 - 55.
- [4] GERTSCHA R, GERTSCHB L, ROSTAMIC J. Disc cutting tests in Colorado Red Granite: implications for TBM performance prediction[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(2): 238 - 246.
- [5] 徐则民, 黄润秋, 张俦元. TBM 刀具设计中围岩力学参数的选择[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(2): 230 - 234.(XU Zemin, HUANG Runqiu, ZHANG Zhuoyuan. The mechanical parameters of surrounding rocks considered in TBM cutter design[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 230 - 234.(in Chinese))
- [6] 秦淞君. 隧道掘进机(TBM)掘进时的岩石特征判定问题[J]. *铁道建筑*, 1999, (8): 2 - 4.(QIN Songjun. Judgement of characteristic of rock mass during TBM working[J]. *Railway Engineering*, 1999, (8): 2 - 4.(in Chinese))
- [7] 冷先伦. 深埋长隧洞 TBM 掘进围岩开挖扰动与损伤区研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009. (LENG Xianlun. Study of excavation disturbed zone and damage zone in surrounding rock of deeply buried long tunnel by TBM driving[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))
- [8] 冷先伦, 盛 谦, 朱泽奇, 等. 不同 TBM 掘进速率下洞室围岩开挖扰动区研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增 2): 3 692 - 3 698.(LENG Xianlun, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study of excavation disturbed zone in surrounding rock of tunnel with various TBM driving rates[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Supp.2): 3 692 - 3 698.(in Chinese))
- [9] CAI M, KAISERA P K, MARTIN C D. Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(8): 1 135 - 1 145.
- [10] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies of acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [11] 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增 2): 3 673 - 3 678.(ZHAO Xingdong, TANG Chun'an, LI Yuanhui, et al. Study of AE activity characteristics under uniaxial compression loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3 673 - 3 678.(in Chinese))
- [12] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 矽卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. *岩石力学*, 2009, 30(10): 2 929 - 2 934.(XU Suchao, FENG Xiating, CHEN Bingrui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading tests and acoustic emission characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(10): 2 929 - 2 934.(in Chinese))
- [13] 李正旺, 汤山茂德, 吉冈上也, 等. 岩石隧洞掘进过程中松弛区域的声发射评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增 1): 1 177 - 1 181. (LI Zhengwang, SHIGENORI Y, KOJI H, et al. Study of estimation of loosened region around rock cavern by acoustic emission technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Supp.1): 1 177 - 1 181.(in Chinese))
- [14] MARTIN C D, READ R S. AECL's Mine-by experiment: a test tunnel in brittle rock[C]// *Proceedings of the Second North American Rock Mech. [S. l.]: [s. n.], 1996: 13 - 24.*
- [15] EMSLEY S, OLSSON O, STENBERG L, et al. ZEDEX—a study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring[R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1997.
- [16] 程武伟, 孟繁兴, 周文秋, 等. 引水隧洞 2#横通洞表面雷达探测报告[R]. 杭州: 华东工程检测技术有限公司, 2009.(CHENG Wuwei, MENG Fanxing, ZHOU Wenqiu, et al. Report on radar detection of traffic tunnel #2 of diversion tunnel[R]. Hangzhou: East China Engineering Check and Measure Technique Ltd., 2009.(in Chinese))



- 
- [17] Physical Acoustic Corporation. Disp user's manual[R]. Princeton Junction: Physical Acoustic Corporation, 2001. epicenters from the arrival time only[J]. Bulletin of Saint Louis University, 1912, (8): 60 - 71.
- [18] GEIGER L. Probability method for the determination of earthquake