

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S2.048

# 北山坑探设施开挖损伤区现场声发射监测试验研究

陈世万<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 王贵宾<sup>2</sup>, 李二兵<sup>3</sup>, 陈亮<sup>4</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 3. 解放军陆军工程大学 国防工程学院, 江苏 南京 210007; 4. 核工业北京地质研究院 环境工程研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 为研究爆破开挖对围岩的损伤, 在高放废物地质处置地下设施(北山坑探设施)开展了开挖损伤区(EDZ)的研究。对多个爆破回次开挖全过程进行了声发射监测试验, 根据声发射撞击数演化特征, 将爆破开挖围岩的损伤过程分为爆破损伤阶段和渐进损伤阶段, 分析了声发射信号频率演化规律。根据两阶段信号参数特征分析了对应阶段微破裂机制, 通过高频探地雷达圈定了开挖损伤区范围, 发现各回次开挖损伤区的厚度与声发射撞击数具有较好的相关关系, 并分析了室内及现场试验岩石(体)的“蠕变”特征与声发射演化规律。分析认为, 爆破后声发射演化特征是围岩渐进损伤过程的直接体现, 渐进损伤在位移上表现为“蠕变”特征, 声发射能有效地表征围岩的变形过程及其所处的损伤状态。研究成果对声发射现场应用表征围岩的损伤状态具有一定参考价值。

**关键词:** 开挖损伤区(EDZ); 声发射(AE); 高放废物地质处置; 雷达

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0349 - 010

## Experimental study of acoustic emission monitoring in situ excavation damage zone of Beishan exploration tunnel

CHEN Shi-wan<sup>1</sup>, YANG Chun-he<sup>1,2</sup>, WANG Gui-bin<sup>2</sup>, LI Er-bing<sup>3</sup>, CHEN Liang<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. College of Defense Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing, Jiangsu 210007, China; 4. Division of Environment Engineering, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In situ experiments were conducted in Beishan exploration tunnel(BET) in Beishan, Gansu, the most potential candidate site of Chinese high-level radioactive waste repository, to study the rock damage caused by blasting. Acoustic emission(AE) was monitoring during all the blasting process. Firstly, blasting damage stage and progressive damage stage are identified based on AE evolution for each blast round. Then the evolution of AE signal frequency is analyzed; and the damage mechanisms for blasting damage stage and progressive damage stage are analyzed based on AE signal characteristics. The thickness of excavation damage zone of each blast round is delineated by ground penetrating radar with high-frequency antenna. The thickness of each blast round is correlated well with the number of AE hits. At last, we analyze the displacement and AE characteristic in laboratory creep test and field displacement measurement test. Since AE evolution is a direct indicator of progressive damage process, AE can be used to describe the creep behavior and the damage state of rock mass.

**Keywords:** excavation damage zone(EDZ); acoustic emission(AE); high-level radioactive waste repository; radar

## 1 引 言

深地质处置是当前国际上公认可行的高水平放射性废物处置方法, 即将高放废物埋存于距地面 500 ~ 1 000 m 深地质处置库中<sup>[1]</sup>。处置库的开挖将对围岩产生损伤, 形成开挖损伤区( excavation damage zone, EDZ)。开挖损伤区内新裂隙的形成和

原有裂隙的扩展, 使围岩渗透率增大, 为核素迁移提供潜在通道。此外, 开挖损伤将劣化岩体的力学性质, 影响处置库的长期安全运行, 认识开挖损伤区的形成机制和演化过程, 圈定损伤区的范围对高放废物处置工程十分重要。

岩体内裂纹的产生和扩展将释放声发射信号, 岩体内声发射活动是裂纹发展的直接体现, 为研究

收稿日期: 2017-06-19

基金项目: 核设施退役及放射性废物治理科研项目( No. FZ1402 )。

This work was supported by the Project of Decommissioning of Nuclear Facilities and Radioactive Waste Management (FZ1402).

第一作者简介: 陈世万, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事高放废物地质处置岩石力学方面研究工作。E-mail: chswan01@163.com

通讯作者: 王贵宾, 男, 1975 年生, 博士, 副研究员, 主要从事高放废物地质处置方面科研工作。E-mail: gbwang@whrsm.ac.cn

破裂过程提供丰富的信息，如裂纹演化过程、破裂位置及大小、破裂机制等，国外地下实验室广泛应用声发射监测开展 EDZ 的研究<sup>[2-10]</sup>。Cai 等<sup>[2]</sup>应用张拉模型，分析了加拿大 URL Mine-by 试验巷道的声发射事件，通过监测数据表征围岩的损伤状态，建立了考虑损伤的数值模型。Young 等<sup>[3]</sup>分析了加拿大地下实验室长期监测的声发射时空演化规律、幅-频分布、微破裂事件机制等，通过声发射活动规律认识了围岩渐进损伤过程及控制因素。Falls 等<sup>[4-5]</sup>通过分析瑞典 ASPO 地下实验室 ZEDEX 巷道及加拿大地下实验室 Mine-by 巷道声发射活动特征，对比了不同地应力条件下声发射的活动性。加拿大地下实验室位于较高地应力区，如地下 420 m 的 Mine-by 巷道，最大主应力可超过 60 MPa，声发射监测能很好地刻画开挖后地应力重分布导致损伤区的形成过程。由于高地应力控制了损伤区的形成，难以分析爆破对岩体的损伤过程<sup>[10-11]</sup>。对于同样位于地下 420 m 的瑞典 ZEDEX 巷道，地应力水平较低，在开挖诱导主应力小于起裂应力的条件下巷道开挖后仍观察到较多声发射信号，针对这一现象 Falls<sup>[4-5]</sup>等仅简单地将声发射归因于施工过程，并未深入分析爆破损伤声发射演化规律。

我国高放废物处置工作相对开展较晚，尚未开展系统的高放废物地质处置 EDZ 的研究，但近些年来在大量地下工程的建设实践中开展了深入的 EDZ 研究，如在锦屏二级水电站建设过程中张春生等<sup>[12-13]</sup>用集合声发射、波速测试、多点位移计、数字钻孔电视等手段，系统地研究了地下工程开挖对岩体的损伤，分析了引水隧洞围岩在高地应力条件下随时间渐进破坏的现象，建立应力腐蚀模型分析了围岩的长期响应过程<sup>[14]</sup>。严鹏等<sup>[15-16]</sup>分析了岩体动态开挖过程（爆破荷载和地应力高速释放）及静态过程（地应力重分布）对岩体造成的损伤，比较了钻爆法和 TBM 开挖围岩损伤区的特性。郭亮等<sup>[17]</sup>讨论了地质雷达用于探测开挖损伤区的可行性，应用探地雷达圈定开挖损伤区范围。我国大量地下工程的开挖实践为高放废物地质处置工程中 EDZ 研究积累了丰富经验和认识，但大多集中于 EDZ 对工程稳定性的影响，系统研究损伤过程的研究较少，研究区域地质条件与预选处置场址差异较大，相关研究成果对高放废物地质处置工程参考价值有限。

2016 年我国建成高放废物处置地下试验设施即北山坑探设施（BET），并在该设施内布置了专门的 EDZ 研究巷道，开展爆破开挖对围岩损伤的试验研究，应用多种监测手段（声发射、波速测试、

雷达、多点位移计等）研究爆破开挖形成 EDZ 的特征，重点分析爆破开挖巷道围岩内声发射演化特征，研究爆破开挖损伤区的形成过程，研究成果为我国地下实验室的建设和相关试验研究提供参考。

## 2 工程概况及试验方案

### 2.1 工程概况

北山坑探设施（BET）工程位于甘肃省酒泉市肃北县马鬃镇十月井处，最大埋深为 50 m，本次开展高放废物地质处置工程的现场试验研究。试验场址靠近十月井断裂带（见图 1(a)），十月井断裂走向为 50°~60°，倾角为 70°~80°，走向上呈舒缓波状。断裂在地貌上呈明显的线型负地形，断裂带内岩石破碎强烈，各种岩脉十分发育，主要以石英脉、花岗岩脉为主。在斜坡道落平处布置钻爆试验段，开展爆破试验及 EDZ 监测试验。北山坑探设施所处地段岩体主要为英云闪长岩，局部裂隙发育。岩石单轴饱和抗压强度为 146.7~162.8 MPa，岩体总体质量良好。如图 1(b)所示，本次试验主要评价 5 个钻爆回次的开挖损伤区，钻爆试验段及 EDZ 监测巷道位于斜井落平处。EDZ 监测巷道先于钻爆试验段开挖，由垂直于钻爆试验段(TL1)及平行于钻爆试验段(TL2)组成。钻爆试验各回次进尺均为 2 m，各回次爆破参数见表 1。

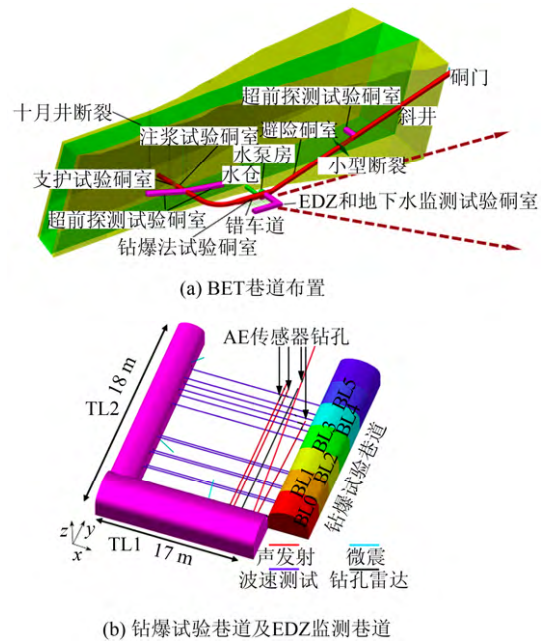


图 1 北山坑探设施（BET）及 EDZ 研究巷道  
Fig.1 Layout of Beishan exploration tunnel (BET) and EDZ test tunnel

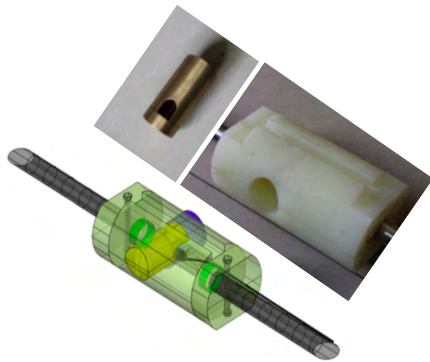
### 2.2 试验设备及试验方案

爆破试验段开挖前，完成 B1~B4 钻孔内声发

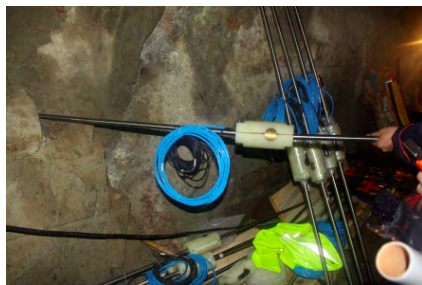
表 1 各回次钻爆参数

掏槽方式及参数	回次				
	BL1	BL2	BL3	BL4	BL5
掏槽方式	直眼	单楔形	复合楔形	复合楔形	直眼
炸药单耗/(kg/m <sup>3</sup> )	2.07	2.02	2.00	2.07	2.69
周边孔间距/mm	400	400	400	300	300

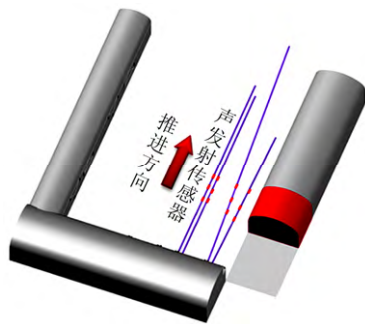
射传感器的安装和调试，采用美国物理声学公司的 Sensor Highway II 声发射系统及其配套设备。声发射传感器安装采用专门设计的声发射安装装置（见图 2(a)、2(b)）。该装置设计了与钻孔直径（96 mm）配套的弧形端面的铜套，并通过液压系统使传感器与钻孔壁紧密贴合。声发射传感器为美国物理声学公司的前放（40 dB）一体 R.451C 传感器，峰值响应频率为 16.6 kHz，有效工作频率为 1~90 kHz，



(a) 声发射传感器安装装置



(b) 传感器安装现场组装图



(c) 声发射阵列随着钻爆回次推进

图 2 声发射安装装置及传感器布置

Fig.2 Acoustic emission mounting device and sensors arrangement

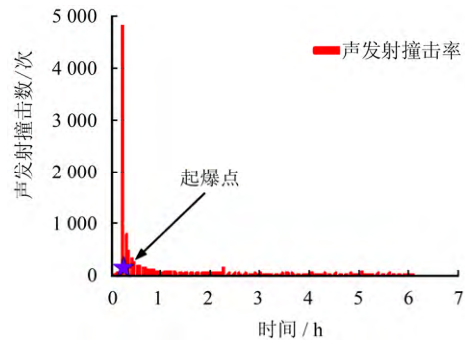
相对于室内试验上百 kHz 声发射传感器为低频声发射传感器，可以实现更广范围的监测。为确保声发射传感器对钻爆试验多个回次均形成有效的监测阵列，提高声发射信号质量和定位精度，声发射传感器随着钻爆回次的推进同步推进（见图 2(c)）。由于采用了本套安装装置，声发射传感器移动时只需将液压囊泄压后推进至设计位置再重新加压即可。本次声发射监测应用 16 个声发射传感器。各回次爆破前打开声发射开始监测，各回次爆破后保持 6~24 h 施工平静期，此期间禁止人员进入巷道施工，以获得未受干扰的声发射数据。

### 3 试验结果

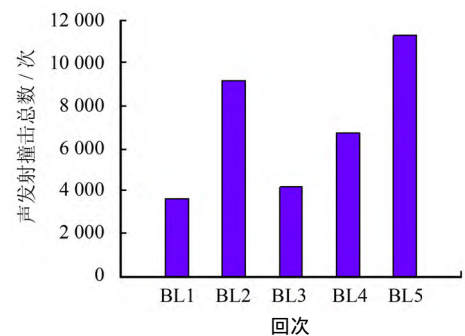
#### 3.1 声发射撞击与爆破损伤阶段划分

##### 3.1.1 声发射撞击率

本次现场试验场址地应力较小，爆破后声发射事件较少（100~300 个），且定义事件大多集中在爆破短时间内，难以用事件数来分析声发射演化规律。通过人工识别，对各回次（BL1~BL5 为第 1~5 回次）选取 3 个信号质量较好的声发射通道监测数据来分析声发射演化规律。以第 2 回次某通道监测数据为例，爆破后声发射撞击数如图 3(a)所示。爆破瞬间声发射撞击剧增，之后在数小时内撞击数逐步减少，但仍在较长时间内保持较高撞击率，表



(a) 第二回次声发射撞击



(b) 前 5 回次声发射撞击总数

图 3 声发射测试结果

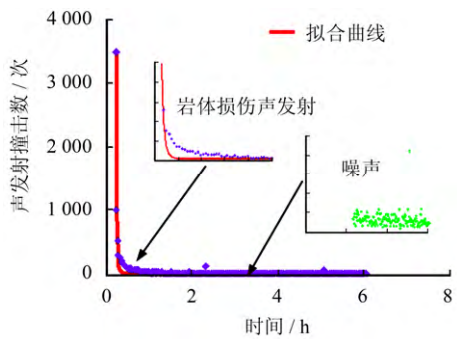
Fig.3 Results of AE monitoring



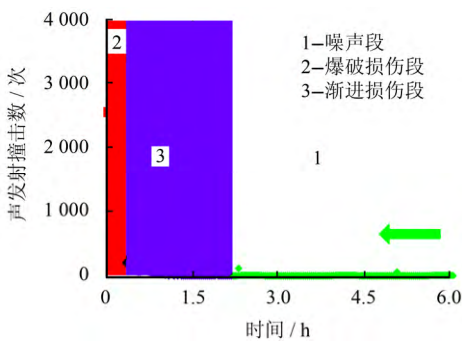
明损伤并非在爆破瞬间完成，即使在此低埋深、低地应力条件下仍存在渐进微破裂（损伤）过程。各回次声发射撞击总数如图 3(b)所示。

### 3.1.2 爆破开挖岩体声发射特征

从图 4(a)分析爆破后围岩声发射撞击率演化规律发现，声发射撞击率随时间演化可划分为多个阶段。声发射撞击率在爆破后较长时间后逐步趋于稳定，通过分析声发射信号特征，认为稳定的声发射撞击更可能是由于系统噪声而不是岩石内微破裂诱发。此外，爆破瞬间声发射撞击率增长至峰值，随之快速衰减，然后衰减逐步减慢。初步判定爆破后岩石的破裂过程可分为爆破损伤段、渐进损伤段和稳定阶段（噪声阶段）3 个阶段，如图 4(b)所示。



(a) 爆破后声发射演化



(b) 损伤阶段划分

图 4 声发射演化及损伤阶段

Fig.4 Evolution of AE hits and damage stages identification

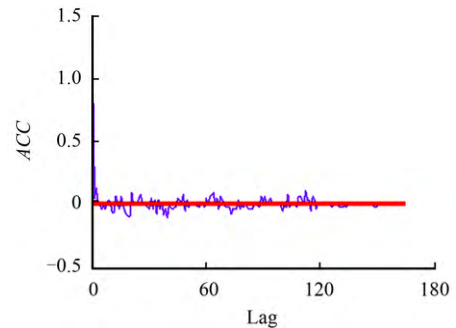
声发射撞击率随时间演化为时间序列为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ， $x_i$  为声发射在对应时间的撞击率， $n$  为对应的时间。本文提出一种通过声发射演化特征（见图 5）划分爆破后岩石损伤过程方法：

(1) 首先需要将噪声段从时间序列中剔除。采用白噪声判定程序：建立时间序列  $X_3 = \{x_k, x_{k+1}, \dots, x_n, k = 1, 2, \dots, n\}$ ，对  $X_3$  进行去趋势项得  $X_3'$ 。按照式 (1) 计算逐次计算  $X_3'$  的自相关系数  $ACC(m)$ 。

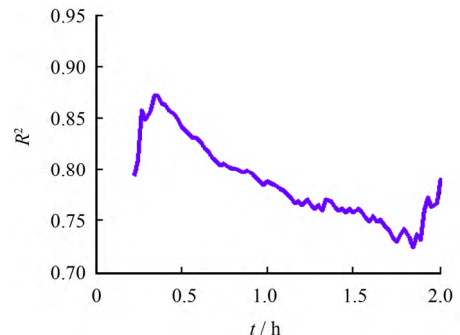
$$ACC = \frac{\sum_{j=k}^{n-m-1} x_{m+j} x_j}{\sum_{j=k}^n x_j x_j} \quad (1)$$

式中： $m = 0 \sim n-1$ 。

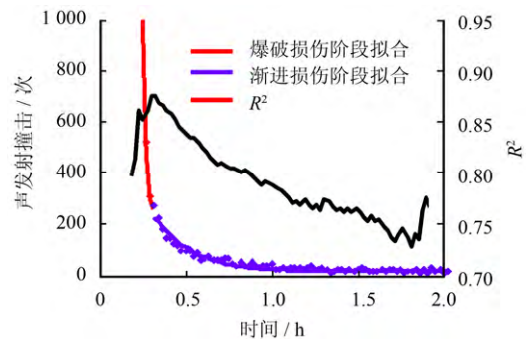
逐次计算  $X_3'$  的自相关系数直到自相关系数均趋近于 0 如图 5(a)所示，对应的  $X_3 = \{x_k, x_{k+1}, \dots, x_n\}$  即为完全随机噪音，将此阶段判定为稳定阶段。



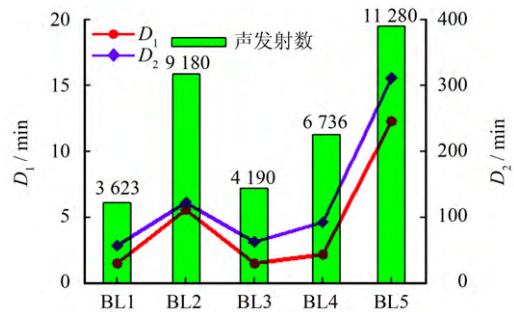
(a)  $X_3'$  的自相关系数计算



(b) 通过移动法确定  $X_2$  相关系数 ( $R^2$ )



(c)  $X_2$  和  $X_3$  的最优拟合曲线



(d)  $D_1$ 、 $D_2$  与声发射撞击总数的对比

图 5 根据声发射划分损伤阶段方法

Fig.5 Method of damage stages identification based on AE hits evolution

(2) 将除去  $X_3$  余下的序列  $X' = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$  分为两个时间序列  $X_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_j, j=1:k\}$  和  $X_2 = \{x_j,$

$x_{j+1} \dots x_k, j=1:k\}$ 。对这 2 组序列分别用 2 个指数函数进行移动拟合，同时记录拟合相关系数  $R^2$ ，如图 5(b)所示。由图可见，相关系数  $R^2$  随时间先增加后减少，出现一个峰值。图 5 中，据此峰值点  $X'$  可以最好地被拟合，分析认为该点前后声发射受控于不同机制，前部分声发射随时间衰减迅速，为爆破损伤控制段；后部分声发射随时间衰减减弱，为渐进损伤控制段。以此点为界将  $X'$  分成了两部分为爆破损伤段  $X_1=\{x_1, x_2, \dots, x_j\}$  和渐进损伤段  $X_2=\{x_j, x_{j+1} \dots x_k\}$ 。

按这种方法将前 5 回次声发射爆破损伤和渐进损伤进行了划分如图 5(d)及表 2 所示。由图表可见，爆破损伤段持续时间  $D_1$ 、渐进损伤段持续时间  $D_2$  均与声发射总数有较好的相关关系，即爆破损伤段  $D_1$ 、渐进损伤段  $D_2$  持续时间越长，声发射撞击数目越多，爆破对围岩损伤越显著。声发射撞击总数是衡量岩石损伤的直接指标，这种一致性证实了这种爆破损伤阶段划分的合理性。

表 2 据声发射演化划分损伤阶段持续时间

Table 2 Duration of damage stages based on AE evolution

损伤阶段持续时间 /min	回次				
	第 1	第 2	第 3	第 4	第 5
爆破损伤段	1.36	5.5	1.36	2.04	12.29
渐进损伤段	54.59	120.1	60.18	89.76	309.71

### 3.2 声发射信号参数分析

#### 3.2.1 声发射信号频率分析

声发射信号频率是表征岩石内破裂机制演化的有效参数，岩石中张拉破坏产生的声发射频率高于剪切破坏。对声发射信号进行快速傅里叶变换，获得声发射信号的频谱分布，在此基础上计算声发射信号峰值频率及质心频率，频谱图中最大幅值所对应的频率即为峰值频率。声发射信号频谱的质心为质心频率，是一个具有平均性质的指标。以第 5 回次一个通道监测数据分析爆破过程中声发射信号的频率演化特征如图 6 所示。从图中可以看出，爆破后一段时间内声发射峰值频率和质心频率均在较广的范围内分布（传感器信号响应频率为 1~90 kHz）。声发射质心频率及峰值频率分布特征：(1) 爆破前装药等施工噪音频率较低；(2) 爆破瞬间，声发射信号频率突变，在更广范围内分布，且低频成分（10~40 kHz）占主导部分；(3) 之后声发射信号频率回升，并在较高水平波动，此阶段声发射信号主要由围岩内微破裂诱导；微破裂诱发声发射信号频率更高。

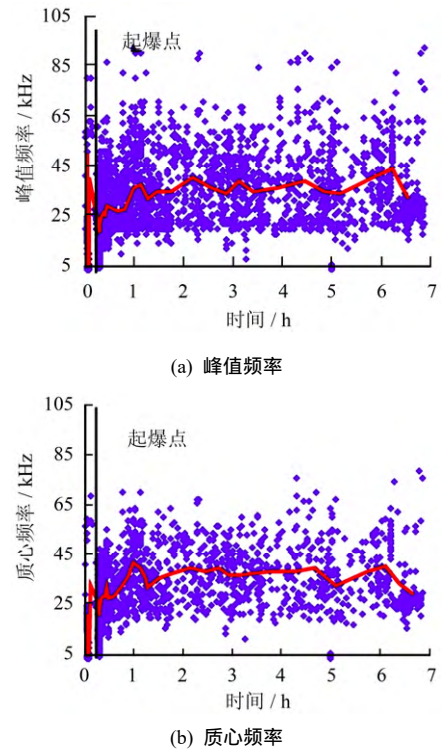


图 6 峰值频率和质心频率

Fig.6 Evolution of peak frequency and centroid frequency

#### 3.2.2 声发射信号 R/A-AF 关系解译声发射源机制

声发射信号上升时间与幅值的比值( $R/A$ )与信号平均频率 ( $AF$ ) 的关系常被用于分析声发射事件破裂源的破裂机制<sup>[19-20]</sup>。已经证实，剪切破裂产生的声发射信号具有较低的平均频率以及较高的  $R/A$  值，而张拉破裂产生的声发射信号平均频率较高， $R/A$  值较低。按此分析方法，对爆破损伤段与渐进损伤段对  $R/A$  值—平均频率 ( $AF$ ) 分布进行分析。如图 7 所示，爆破损伤段，声发射撞击  $R/A-AF$  主要位于直线  $y = 0.004x + 15$  下，声发射事件主要由较大尺度的剪切破裂诱导；对于渐进损伤段，声发射撞击  $R/A-AF$  主要位于直线  $y = 0.004x + 15$  之上，表现为低  $R/A$  值及高平均频率，显示声发射事件主

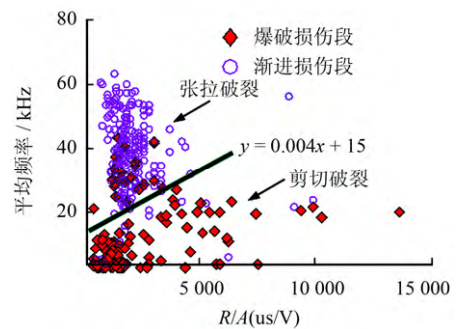


图 7 声发射波形特征分析破裂机制

Fig.7 Cracking mechanism determined by  $R/A$  and average frequency



要由小尺度的张拉破裂诱导。声发射信号在爆破损伤段和渐进损伤段机制的明显不同也证实了上文介绍的阶段划分方法是合理的。

### 4 分析与讨论

#### 4.1 损伤区声发射与损伤区厚度

高频探地雷达在花岗岩巷道圈定损伤区的能力已被证实<sup>[22-23]</sup>。巷道内损伤区形成后,由于裂纹体积的显著增加,损伤区内含水率显著改变,导致损伤区介电常数等发生显著的改变,雷达探测在损伤区将出现明显响应。钻爆试验段开挖后,在巷道顶底板及边墙布置了10条测线(见图8(a),图中1~10为测线),应用200 MHz低频天线及1.5 GHz高频天线探地雷达探测损伤区。对数据进行直达波、壁面反射波剔除、数字滤波等处理,以左帮1号测线为例处理结果如图8(b)~8(c)所示。在距边墙0.10~0.25 m范围内出现明显的雷达反射信号,认

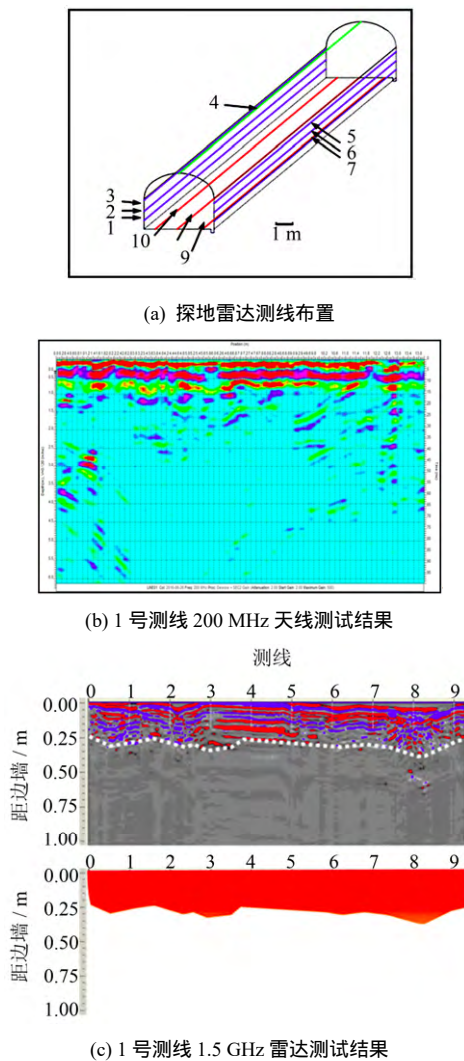


图8 探地雷达测线布置和1号测线测试结果  
Fig.8 Arrangement of measuring-line of ground penetrating radar and test result of No.1 survey line

为在此范围内围岩爆破损伤显著,其介电常数等性质存在剧烈变化。200 MHz 天线波长较长,分辨率明显低于1.5 GHz 高频天线。应用高频天线圈定损伤区的范围见表3。

**表3 根据测线圈定损伤区**  
**Table 3 Thickness of EDZ determined by GPR**

测线 BL	圈定损伤区深度/m	测线 BL	圈定损伤区深度/m
左 1	0.20	右 2	0.22
左 2	0.18	右 3	0.18
左 3	0.25	底 1	0.20
拱顶	0.20	底 2	0.20
右 1	0.18	底 3	0.20

注:雷达圈定损伤区平均值,底板由于碎石的存在使雷达信号微弱,底1~3测线圈定损伤区可靠性较差。

通过高频探地雷达圈定各回次EDZ形态如图9所示。各回次EDZ大多表现为中部较薄,底部较后的特征,是由于底部受围岩夹持作用,爆破产生的更多能量作用于围岩导致底部损伤剧烈;推测各回次前部由于距自由面较近,将产生较少的损伤(由于当前回次的前部与上一回次底部相交,各回次前部损伤难以区分是否由当前回次造成)。当然,各回次爆破损伤区的形态受多种因素控制,如装药结构、起爆顺序等。

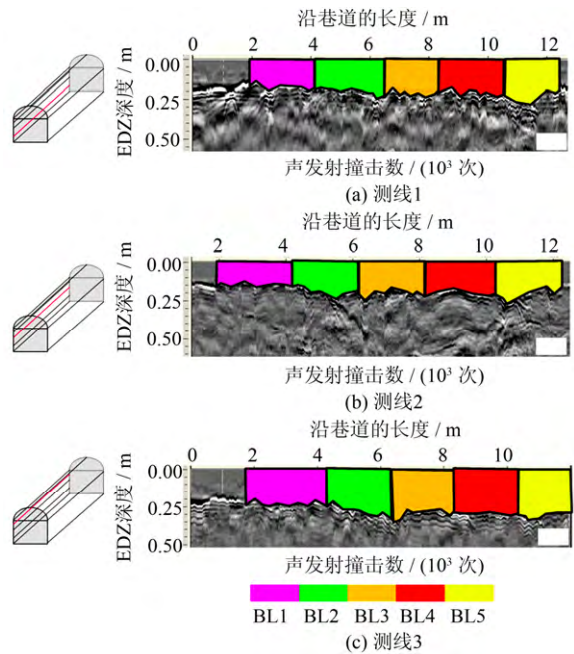


图9 通过高频探地雷达圈定各回次损伤区  
Fig.9 EDZ delineation by GPR for each blast round

对各测线各回次圈定EDZ深度进行统计,见表4,各回次EDZ平均厚度为17~24 cm。各回次EDZ平均厚度与各回次声发射撞击数具有较好的一致性(见图10),声发射撞击数越高,对应回次EDZ厚度越厚,证实了两种方法表征开挖损伤的一致性。

### 4.2 渐进损伤阶段声发射演化特征（与位移）

根据岩石流变理论，低应力条件下，岩石经历初始蠕变过程可由式（2）有效表征。

表 4 根据测线圈定损伤区

爆破回次	第一	第二	第三	第四	第五
损伤区厚度/cm	17.0	23.0	21.5	22.0	24.0

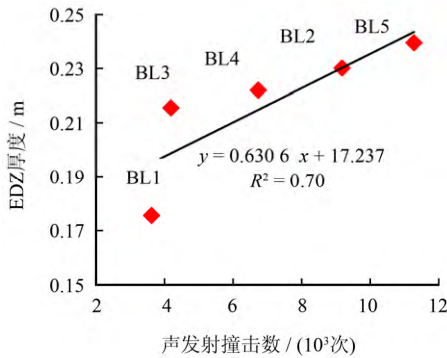


图 10 各回次声发射撞击数与 EDZ 厚度关系

Fig.10 Relationship between number of AE hits and EDZ thickness

$$\varepsilon = A + B(1 - e^{-ct}) \quad (2)$$

式中： $\varepsilon$ 为岩石的应变； $t$ 为时间； $A$ 、 $B$ 、 $c$ 为应力及岩石力学参数， $c$ 表示岩石的黏弹性性质，与岩石所处应力状态无关，由岩石的性质决定， $c$ 值决定初始蠕变过程持续时间  $t_d = 1/c$ 。

#### 4.2.1 渐进损伤过程声发射演化

陈亮等<sup>[24]</sup>开展了北山花岗岩室内蠕变试验，并记录了蠕变过程声发射。应用式（2）对加速蠕变前的应变及声发射进行拟合如图 11 所示。蠕变过程中应变及声发射均能由式（2）有效拟合。应变及声发射拟合参数  $c$  值较为接近，分别为 0.60 和 0.72，计算初始蠕变时间分别为 1.67 h 和 1.39 h。岩石初始蠕变过程实际上是岩石弹黏性损伤过程，声发射活

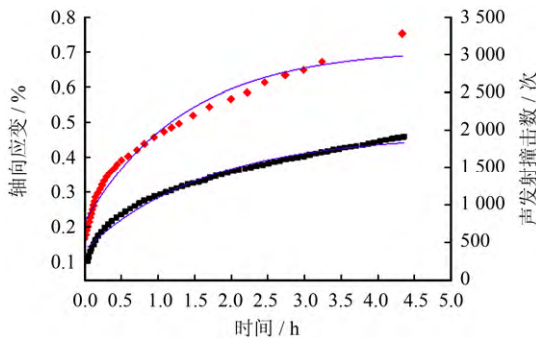


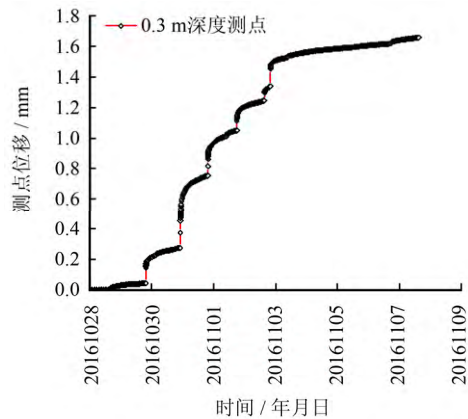
图 11 北山花岗岩蠕变试验中声发射及轴向应变演化规律<sup>[24]</sup>

Fig.11 Evolution rules of acoustic emission and axial strain in creep test of Beishan granite<sup>[24]</sup>

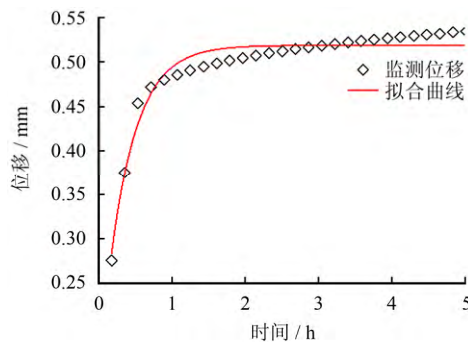
动性是损伤过程的直接表征，根据声发射活性，能很好地表征蠕变过程岩石的黏弹性损伤过程。

#### 4.2.2 原位位移监测与声发射演化过程

为研究爆破开挖后围岩变形规律，在钻爆试验段开挖前布置了多点位移计，但由于爆破对设备损伤，未能获得位移监测数据。但在北山坑探设施专门的变形监测项目中通过多点位移计测得爆破后位移数据。位移监测点距钻爆试验段均位于地下 50 m，相距约 30 m，岩性及地应力条件十分接近，具有很好的参考价值。从与待开挖巷道呈一定角度巷道内向待测回次钻孔，布置多点位移计。围岩内 0.3 m 测点监测得多个爆破回次位移监测结果如图 12(a)所示。由于掌子面空间效应<sup>[25-26]</sup>，在各回次开挖后均出现位移阶跃上升，随后位移增长呈指数衰减，表现为类似“蠕变”的特征。应用式（2）对位移测点对应回次开挖后位移演化曲线进行拟合，如图 12(b)所示，拟合曲线能较好地拟合现场实测位移，计算围岩初始变形持续时间为 0.37 h。



(a) 距开挖面 0.3 m 位移监测数据



(b) 对应爆破回次位移及拟合曲线

图 12 北山坑探设施位移监测

Fig.12 Displacement monitoring results in BET

按上述的分析方式对钻爆试验 5 个回次声发射演化曲线分析。应用声发射数据分析之前需剔除噪声段及爆破影响段，分析除去噪声影响的渐进损伤阶段声发射。利用式（2）拟合声发射演化曲线如图 13 所示。各回次声发射演化均能由式（2）有效拟

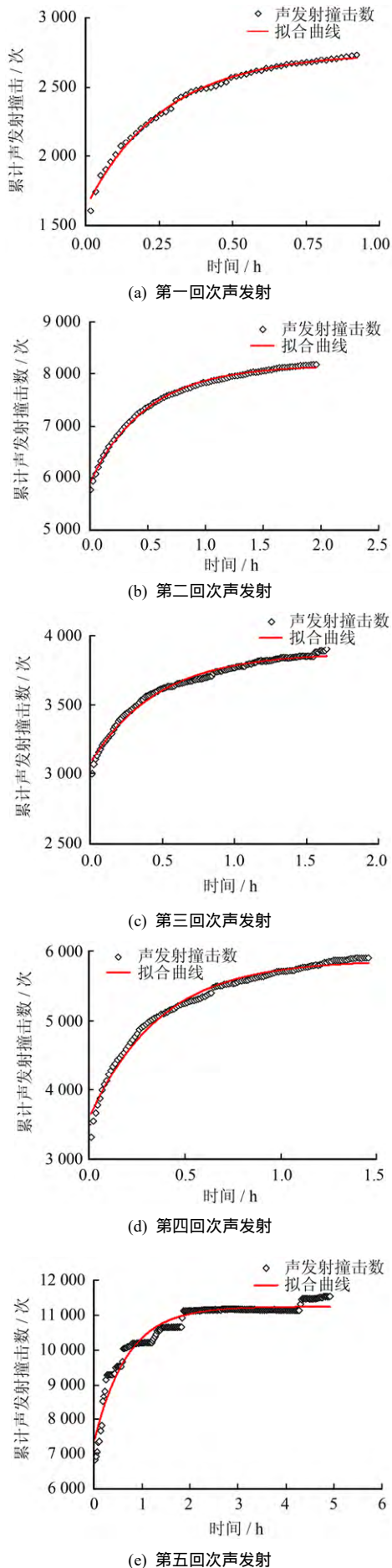


图 13 声发射撞击演化规律  
Fig.13 Evolution rules of AE hits

合，声发射活动性能有效反映围岩的“蠕变”损伤过程。各回次初始蠕变阶段计算结果见表 5，计算初始蠕变时间与位移初始蠕变时间吻合较好，且各回次初始变形持续时间与损伤区厚度具有较好的一致性。由于本次现场试验位置地应力很低，岩石渐进损伤、发生变形的过程持续时间短，声发射和变形在较短时间内表现出“蠕变”的特征，因此应用蠕变的概念进行分析。

对于地质条件相似的爆破开挖，不同爆破参数对围岩造成不同程度损伤，使各回次围岩的力学性质存在差异。声发射及位移监测对象为不同程度损伤的围岩，开挖后围岩的渐进损伤过程在位移上表现为类似于“蠕变”特征，声发射表现为受控于围岩“蠕变”损伤过程。各回次声发射及变形过程的差异实际上是围岩所受损伤差异的直接体现。一方面，据声发射演化规律能有效认识围岩损伤状态，认识围岩所处的应力-应变调整状态，评价不同开挖方式对围岩的损伤。另一方面，声发射演化可用于推算损伤岩体的力学参数。本次试验条件下地应力较低，围岩并未发生加速蠕变即渐进失稳破坏，声发射参数可用于评价不同损伤状态岩体初始变形阶段黏弹性性质。将来地下实验室深部高地应力围岩，可能出现类似于加拿大 URL 地下实验室的楔形渐进破坏，声发射可能更进一步应用以表征和预测围岩的加速损伤过程。总之，声发射对围岩的破裂十分敏感，是岩体内破裂的直接体现。建立声发射演化规律与围岩性质和所处状态的关系将为实际工程提供有价值的参数。

表 5 各回次初始损伤阶段持续时间  
Table 5 Duration of every blast round

参数	爆破回次				
	第一	第二	第三	第四	第五
持续时间 $t_d$ / h	0.27	0.49	0.47	0.36	0.68
损伤区厚度/cm	17	23	21.5	22	24

### 5 结 论

(1) 根据声发射 (AE) 撞击率演化特征，提出一种爆破损伤过程分段方法，将爆破开挖围岩的损伤过程分为爆破损伤段及渐进损伤段。对爆破后声发射信号参数开展分析，声发射信号  $R/A-AF$  分布表明在爆破损伤段围岩内微破裂主要为剪切破裂，在渐进损伤段围岩内微破裂主要为张拉破裂。

(2) 在高频探地雷达圈定开挖损伤区范围为距离开挖面 0.10 ~ 0.25 m 处，分析了各钻爆回次损伤区形态，各回次声发射撞击总数与雷达圈定厚度



具有很好的一致性。声发射及高频雷达是表征爆破损伤程度的有效手段。

(3) 声发射活动性是岩体变形和损伤过程的直接体现, 应用蠕变曲线分析了各回次声发射演化, 各回次初始变形时间与各回次损伤区厚度具有较好的一致性, 证实声发射能有效表征围岩所处的损伤状态。

### 参 考 文 献

- [1] 王驹, 陈伟明, 苏锐, 等. 高放废物地质处置及其若干关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 801 - 812.  
WANG Ju, CHEN Wei-ming, SU Rui, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(4): 801 - 812.
- [2] CAI M, KAISER 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): 1135 - 1145.
- [3] YOUNG R P, COLLINS D S, Reyes-Montes J M, et al. Quantification and interpretation of seismicity[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1317 - 1327.
- [4] FALLS S D, YOUNG R P. Examination of the excavation-disturbed zone in the swedish ZEDEX tunnel using acoustic emission and ultrasonic velocity measurements[J]. **ISRM International Symposium-EUROCK 96**, 1996.
- [5] FALLS S D, YOUNG R P. Acoustic emission and ultrasonic-velocity methods used to characterise the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock[J]. **Tectonophysics**, 1998, 289(1): 1 - 15.
- [6] ANDERSSON J C, MARTIN C D. The Äspö pillar stability experiment-part I. Experiment design[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(5): 865 - 878.
- [7] ANDERSSON J C, MARTIN C D, STILLE H. The Äspö pillar stability experiment. part II. Rock mass response to coupled excavation-induced and thermal-induced stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46(5): 879 - 895.
- [8] JOHANSSON E, SIREN T, HAKALA M, et al. Onkalo Pose experiment-phases 1 & 2: Execution and monitoring[R]. Finland: [s. n.], 2014.
- [9] VALLI J, HAKALA M, WANNE T. Onkalo Pose Experiment-phase 3. Execution and monitoring[R]. Finland: [s. n.], 2013.
- [10] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1251 - 1275.
- [11] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1413 - 1426.
- [12] 张春生, 褚卫江, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞大型原位试验研究 I - 试验方案[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1691 - 1701.  
ZHANG Chun-sheng, CHU Wei-jiang, HOU Jing, et al. In-situ test on diversion tunnel at Jinping II Hydropower Station I-Test design[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(8): 1691 - 1701.
- [13] 褚卫江, 张春生, 陈平志, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞大型原位试验研究 II - 试验成果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8): 1702 - 1710.  
CHU Wei-jing, ZHANG Chun-sheng, CHEN Ping-zhi, et al. In-situ test on diversion tunnel at Jinping II Hydropower Station II - Analysis of results[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(8): 1702 - 1710.
- [14] 张春生, 刘宁, 朱焕春, 等. 锦屏深埋大理岩破裂扩展时间效应与控制效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1964 - 1972.  
ZHANG Chun-sheng, LIU Ning, ZHU Huan-chun, et al. Time-dependent behavior of crack propagation and evaluation of control effect of Jinping deep marble[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(10): 1964 - 1972.
- [15] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 深部岩体开挖方式对损伤区

- 影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1097 - 1106.
- YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. In-situ test research on influence of excavation method on induced damage zone in deep tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1097 - 1106.
- [16] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. TBM 和钻爆开挖条件下隧洞围岩损伤特性研究[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(11): 121 - 128.
- YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Study of the damage characteristics of surrounding rocks for tunnels constructed using TBM and drill-and-blast[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(11): 121 - 128.
- [17] 郭亮, 李俊才, 张志铨, 等. 地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊 1): 3009 - 3015.
- GUO Liang, LI Jun-cai, ZHANG Zhi-cheng, et al. Research on surrounding rock loose zone of tunnel under unsymmetrical loading with ground penetrating radar and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Supp.1): 3009 - 3015.
- [18] SAGAR R V, RAO M. An experimental study on loading rate effect on acoustic emission based  $b$ -values related to reinforced concrete fracture[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 70: 460 - 472.
- [19] OHTSU M, ISODA T, TOMODA Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2007, 25: 21 - 32.
- [20] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. *Mechanics Research Communications*, 2011, 38(3): 153 - 157.
- [21] CHEN S, YANG C, WANG G, et al. Similarity assessment of acoustic emission signals and its application in source localization[J]. *Ultrasonics*, 2016, 75: 36 - 45.
- [22] SILVAST M, WILJANEN B, ONKALO EDZ. measurements using ground penetrating radar(GPR) method[R]. Posiva Oy: [s. n.], 2008.
- [23] SIREN T, KANTIA P, RINNE M. Considerations and observations of stress-induced and construction-induced excavation damage zone in crystalline rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 73: 165 - 174.
- [24] 陈亮, 刘建锋, 王春萍, 等. 不同温度及应力状态下北山花岗岩蠕变特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1228 - 1235.
- CHEN Liang, LIU Jian-chun, WANG Chun-ping, et al. Creeping behavior of Beishan granite under different temperatures and stress conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1228 - 1235.
- [25] 孙钧, 朱合华. 软弱围岩隧洞施工性态的力学模拟与分析[J]. *岩土力学*, 1994, 15(4): 20 - 33.
- SUN Jun, ZHU He-hua. Mechanical simulation and analysis of behaviour of soft and weak rocks in the construction of a tunnel opening[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(4): 20 - 33.
- [26] 乔丽苹, 刘杰, 李术才, 等. 地下工程开挖面空间效应特征研究及应用\_乔丽苹[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊2): 481 - 487.
- QIAO Li-ping, LIU Jie, LI Shu-cai, et al. Study of spatial effect of excavation face for underground facility and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Supp.2): 481 - 487.

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S2.049

# 与医用 CT 配合使用的冻土三轴仪的研制与应用

陈世杰<sup>1,2</sup>, 马 巍<sup>1</sup>, 李国玉<sup>1</sup>, 刘恩龙<sup>1</sup>, 张 革<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 针对适用于低温环境下的配合医用 CT 实时扫描的冻土三轴仪的不足, 研制了新的冻土三轴仪, 介绍了其组成及其研发过程中需要克服的技术难点。利用该装置可以完成低温环境下试样的三轴加卸载试验, 配合医用 CT 机时可实现整个力学过程的实时动态扫描。进行了冻结兰州黄土三轴加载实时 CT 扫描试验, 试验结果表明, 新研制仪器的各项参数均能满足冻土试样在三轴压缩和卸载过程中的实时 CT 扫描条件, 也能够得到不同载荷条件下的高质量细观结构 CT 图像, 文中对试验结果进行了分析和讨论。该装置的成功研制为建立细观结构和宏观力学性质之间的联系提供一种新的技术手段。

**关 键 词:** 冻土; CT 扫描; 装置; 实时加载; 细观结构变化

**中图分类号:** TU 435

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0359 - 09

## Development and application of triaxial apparatus of frozen soil used in conjunction with medical CT

CHEN Shi-jie<sup>1,2</sup>, MA Wei<sup>1</sup>, LI Guo-yu<sup>1</sup>, LIU En-long<sup>1</sup>, ZHANG Ge<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For solving the deficiency of triaxial apparatus of frozen soil in matching the real-time scanning of medical CT in the low temperature environment, a new triaxial apparatus of frozen soils is developed successfully. The configuration of the apparatus and the technical difficulties that need to be overcome in the development process are also introduced. The apparatus can be used to complete the triaxial loading and unloading test in the low temperature environment. Meanwhile, the medical CT matched with the newly developed apparatus can realize the real-time dynamic scanning in the whole mechanical process. On this basis, the real-time CT scanning test of frozen loess under triaxial loading is conducted. The test results show that the parameters of the newly developed apparatus can meet the real-time CT scanning conditions of the frozen soil samples under triaxial loading and unloading. In addition, the high quality mesoscopic CT images of different load conditions are obtained; and then the test results are also analyzed and discussed. The development of the apparatus has provided a new technical means for establishing the relationship between the mesostructure and the macroscopic mechanical properties.

**Keywords:** frozen soil; CT scanning; apparatus; real-time loading; mesostructure change

## 1 引 言

CT扫描技术已在医用领域的不断发展和完善, 也已经广泛地应用于岩土工程领域的各研究方向。将该项技术配合相关的加载设备可作为一种新的无损检测手段, 在无扰动的在不中断试验的条件下对试验材料的整个力学试验过程实时扫描和动态观测, 得到试样内部细观结构变化、细观颗粒的物质

迁移、裂隙演化、局部密度等变化情况。把细观结构特性和宏观力学试验相结合, 通过数字图像处理技术, 将研究中的力学试验过程信息转化为储存在计算机中的数字图像, 运用计算机对图像信息进行分析和处理, 从而得到所需要的研究结果。随着CT机的更新换代和研究的不断深入, 与CT机配合使用的相关加载设备也不断地改进以满足不同的试验要求。20世纪90年代初期冻土工程国家重点实验室由

收稿日期: 2017-06-28

基金项目, 国家自然科学基金重点项目 (No. 41630636); 甘肃省科技重大专项计划项目 (No. 143GKDA007); 中国科学院率先行动“百人计划”资助项目 (刘恩龙); 冻土工程国家重点实验室课题 (No. Y252J81001)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41630636), the Science and Technology Major Project of Gansu Province(143GKDA007), the Pioneer & Hundred Talents Program of CAS(Dr Liu Enlong), and Project of the State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering of CAS(Y252J81001).

第一作者简介: 陈世杰, 男, 1984年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事冻土细观试验与研究。E-mail: chsj53719@lzb.ac.cn