

文章编号: 1001-4888(2016)05-0645-10

# 基于地应力场加卸载的 地下洞室稳定模型试验研究<sup>\*</sup>

祝方才<sup>1</sup>, 刘丙肖<sup>2</sup>, 李大建<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南株洲 412007; 2. 湖南化工职业技术学院 商学院, 湖南株洲 412006)

**摘要:** 加卸载响应比理论是研究非线性系统稳定的一种重要方法。本文分析了该理论的本质含义, 研究了该理论在洞室稳定分析中存在的问题, 提出了基于应力边界值即地应力场增减实现加卸载的方法。文中以某矿山巷道稳定研究作为工程背景, 建立了相似材料平面应变模型。通过对顶部边界应力进行逐级加卸载, 主要研究了拱顶竖向压力、拱顶沉降和声发射的响应特征。结果表明, 当应力不太大时, 拱顶竖向压力和拱顶沉降的加卸载响应比值接近 1; 当围岩接近破坏时, 比值出现突然的增加, 并伴随较大的波动。声发射能量和事件数虽未出现类似特征, 但总体来说, 随着荷载的增加, 声发射呈现增加的趋势。

**关键词:** 地应力场; 洞室稳定; 加卸载响应比; 声发射; 拱顶沉降; 围岩压力

**中图分类号:** TD31

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-15-200

## 0 引言

地下洞室(简称洞室)稳定是矿山、水电、交通等工程的主要研究内容之一。洞室稳定常用关键点位移作为判断依据, 公路隧道设计细则<sup>[1]</sup>对此做了具体说明, 为进一步研究洞室稳定发展趋势, 祝方才等<sup>[2]</sup>提出用洞室中截面外的塑性(损伤)区面积<sup>[2]</sup>来刻画洞室稳定性。由于洞室稳定不像边坡一样出现明显的滑动面(带), 难以确定安全系数, 引入了强度折减法<sup>[3]</sup>来描述洞室稳定安全系数, 强度折减法常通过塑性区贯通来判断洞室失稳。为充分利用洞室变形信息, 用破损区范围、塑性应变和能量释放<sup>[4,5]</sup>来综合评价洞室稳定。洞室变形稳定是一个与外界交换能量等信息的过程, 利用信息熵方法<sup>[6,7]</sup>来判别稳定发展特征。

## 1 洞室稳定分析的加卸载响应实现

加卸载响应比理论由尹祥础<sup>[8]</sup>于 20 世纪 80 年代提出, 最初应用在地震分析中, 而后逐步应用在边坡和洞室稳定中, 其核心思想是将所研究力学系统视作一非线性系统, 类似于岩石单轴受压情况下的应力应变关系, 选择该非线性系统某一力学响应参数, 分析不同受力阶段的加卸载响应比。加卸载响应比定义为  $Y = \frac{X_+}{X_-}$ , 其中  $X_+$  为加载阶段的响应率;  $X_-$  为卸载阶段的响应率。响应率定义为  $X = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P}$ , 其中  $\Delta P$  和  $\Delta R$  分别表示载荷  $P$  和响应  $R$  的增量, 如图 1 所示。

当介质处于弹性阶段时, 系统处于稳定状态, 从图 1 可看出 A 点的载荷与响应成线性关系或者近

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-10-25; 修回日期: 2016-01-03

基金项目: 湖南省自然科学基金重点项目(13JJ2033)

通讯作者: 祝方才(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事隧道工程和边坡稳定的教学与研究。Email: zhufangcai@163.com

似线性关系,在此阶段加载时( $\Delta P > 0$ )的响应率与卸载时( $\Delta P < 0$ )的响应率相等,即  $X_+ > X_-$ ,此时  $Y = 1$ 。到了损伤阶段,加载的响应率要大于卸载时的响应率即  $X_+ = X_-$ ,此时  $Y > 1$ ,随着损伤的累积, $Y$  会随之增大,当系统失稳时, $Y$  到达最大值。材料在载荷作用下,其响应(变形)与载荷增幅之比在加载和卸载情况下表现不同,特别是在接近临界状态时,加载响应比大于卸载响应比,这一特性已成功运用于地震预报<sup>[9-12]</sup>、矿山微震分析<sup>[13]</sup>以及材料破坏<sup>[14]</sup>中,并有应用于房屋结构整体稳定、边坡稳定分析的研究。

洞室开挖后围岩应力重分布,各部分处于不同的应力状态。根据弹塑性力学原理<sup>[15]</sup>,围岩各部分或处于加载状态或处于卸载状态,若将洞室稳定研究课题视作对非线性系统的分析,可通过加卸载效应来分析洞室稳定性<sup>[16]</sup>。对于洞室稳定这一非线性系统,如何进行加卸载是加卸载响应比理实施的关键。就圆形深埋隧道而言,可通过模拟开挖方式来实现加卸载,而其他轮廓形状和地应力分布形式的洞室则难以采用该方式实现加卸载,有研究通过输入地震波<sup>[17]</sup>实现整体加卸载。为避免动力效应,本文采用在模型边界上加卸载,避免了洞室围岩不同应力状态导致的不同加卸载情况,符合加卸载响应比研究的核心思想。本文将利用该思路结合某工程实例开展模型试验研究。

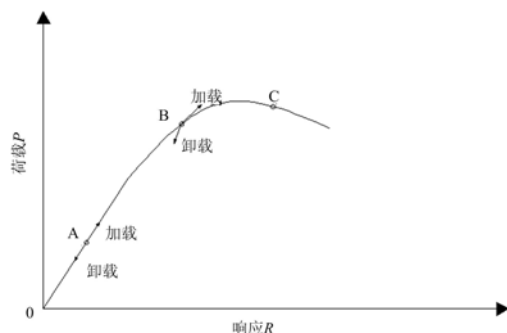


图 1 加卸载响应比原理

Fig. 1 Mechanism of Load/Unload Response Ratio (LURR) for studying nonlinear system

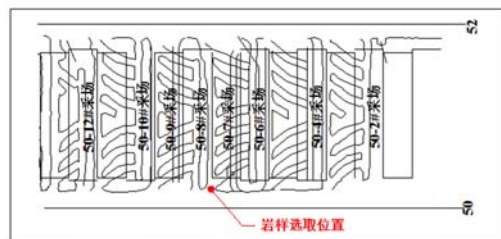


图 2 某铜矿隔离矿柱回采平面布置

Fig. 2 Schematic layout of stopes

## 2 工程背景及试验方案

### 2.1 工程背景

某大型深埋铜金属矿山,为回收矿柱,需要研究出矿巷道稳定性,如图 2 所示。在矿柱回采过程中,将对运输巷道造成多次扰动,因此需要对其进行稳定分析,本文选取-760m 中段出矿运输巷道作为研究对象。

该铜矿-760m 水平出矿巷道围岩主要为砂岩和大理岩,其次为闪长岩和矽卡岩。此次岩样的选取地点为 50 线 50-8 采场穿脉位置和出矿巷道位置处,如图 2 所示。为研究爆破震动和开挖对巷道稳定的影响,将围岩考虑为一种岩石即大理岩,进行出矿运输巷道室内模型试验研究,该巷道为直墙圆拱巷道,高×宽×边墙高度为 4.5m×4.5m×2.25m。

### 2.2 模型试验装置

为简化分析,采用平面应变模型,几何比例尺取为 1:25,建立如图 3 所示的室内试验模型。根据弹性力学理论,洞室按 3~5 倍半径建立边界,模型箱长×宽×高为 600mm×200mm×800mm,模型箱内壁附有一层约 0.1mm 厚的聚乙烯薄膜,以减少周边摩擦并尽量消除模型边界效应,具体见图 3。模型箱采用 1cm 厚的钢板,模型箱侧面钢板以 75 号角钢通过螺栓连接,底部则采用焊接。试件一次浇筑成型,顶部施加荷载。试验过程中模型近似处于平面应变状态。

本次试验加载系统为西安力创公司生产的微机控制多点加载系统,采用 100kN 加载头进行加卸载,荷载通过 1cm 厚钢垫板施加,如图 4 所示。

为研究巷道在加卸载状态下的响应特征,采用逐级加卸载的方式对试件施加荷载。结合相似材料

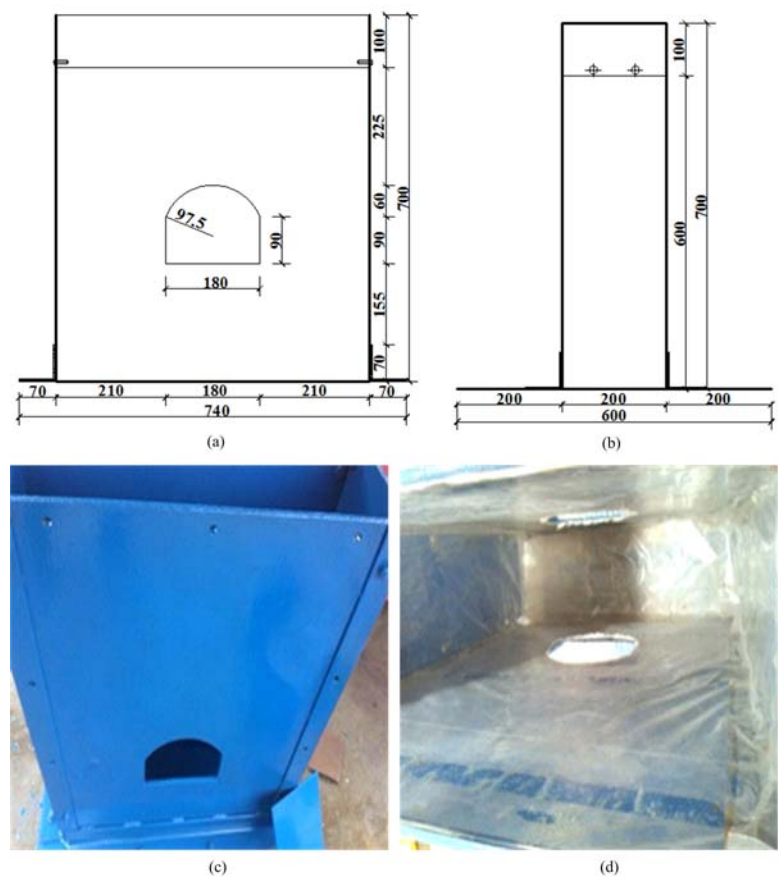


图 3 模型箱尺寸及实物(单位:mm)

Fig. 3 Dimension of model box and its photos(unit: mm)



图 4 微机控制多点加载系统

Fig. 4 Multi-channel load system

的物理力学参数,预先对试件施加 5kN 的荷载,然后开挖洞室(巷道),洞室开挖完成后,安装沉降和收敛观测用的百分表和位移计,而后进行逐级加卸载。

在前人工作的基础上,设计了相似材料模型<sup>[18]</sup>,采用容重相似比  $C_\gamma=2$ ,几何相似比  $C_L=25$ ,通过配比试验确定相似材料的比例为石膏:砂:水泥:水=0.7:4:0.4:1.0,其具体参数如表 1 所示。大理岩和相似材料单轴受压条件下的应力应变曲线如图 5 所示。

2.3 测试仪器布置

本模型试验测试参数包括拱顶沉降、周边收敛、围岩压力和声发射。拱顶沉降和周边收敛采用百分表,围岩压力采用微型土压力盒,声发射采用美国物理声学仪器公司的 PCI-2 系统,百分表和土压力盒布置在隧道纵向中部,声发射探头布置在模型箱上。由于自行设计的位移观测系统不稳定,这里只列出百分表测出的拱顶沉降数据。围岩压力测试采用微型应变式土压力盒,土压力盒距离洞壁大致为 2cm,

洞顶、洞底和洞壁各布置 1 个,具体位置见图 6 所示。为反映围岩破裂情况,在模型箱不同位置上布置了 8 个声发射探头,根据测试仪器系统相关要求<sup>[19]</sup>,传感器尽量不要布置在在同一个面上,本次测试采用了交错布置方式,传感器布置坐标如表 2 所示。

表 1 大理岩及相似材料物理力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of marble and similarity material

|      | 密度 $\rho$<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 单轴抗压<br>强度 $\sigma_c$<br>(MPa) | 弹性模量<br>$E(\text{GPa})$ | 泊松比<br>$\mu$ |
|------|--------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------|
| 大理岩  | 2.7                                              | 105                            | 23                      | 0.26         |
| 相似材料 | 1.35                                             | 2.1                            | 0.45                    | /            |

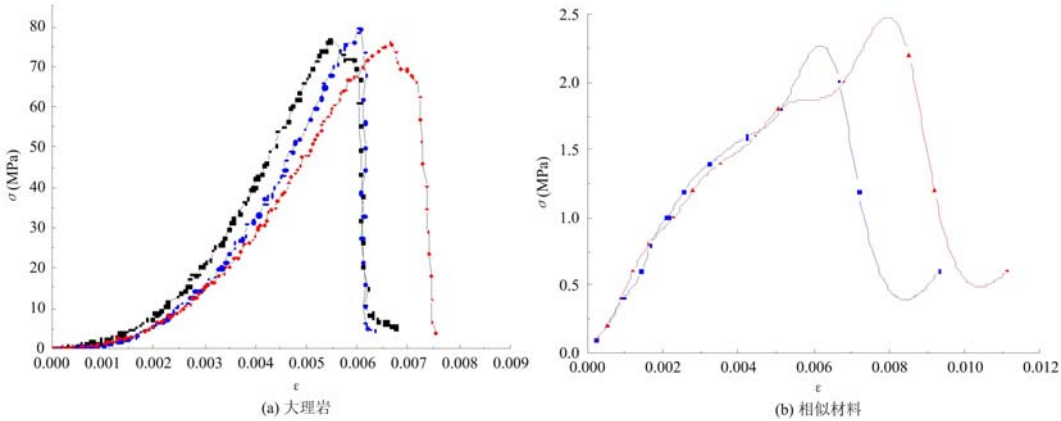


图 5 大理岩和相似材料应力应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of marbles and similar materials

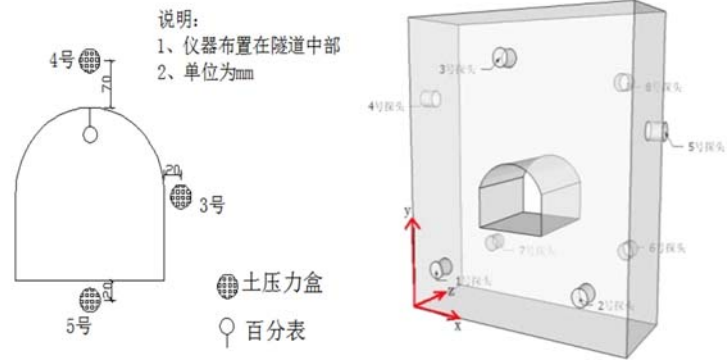


图 6 测试元件布置

Fig.6 Position of measuring apparatus

表 2 声发射传感器坐标

Tab.2 Coordination of AE sensors

| 传感器 | X(mm) | Y(mm) | Z(mm) |
|-----|-------|-------|-------|
| 1   | 11    | 33    | 0     |
| 2   | 42    | 12    | 0     |
| 3   | 31    | 60    | 0     |
| 4   | 0     | 51    | 11    |
| 5   | 62    | 45    | 11    |
| 6   | 11    | 13    | 22    |
| 7   | 53    | 16    | 22    |
| 8   | 51    | 55    | 22    |

3 试验过程

3.1 洞室开挖

模型试验开洞方式主要有“先加载后开洞”和“先开洞后加载”两种开挖方式<sup>[20]</sup>。前者指在开挖之前,对模型施加一定量的载荷,并且保持载荷不变,然后开洞;后者则在开挖后再对模型施加载荷,前一种方式更接近工程实际。结合试验目的,本试验采用“先加载后开洞”的方式。模型试验由于尺寸受限,难以完全模拟现场洞室开挖,目前主要采用手工挖掘或小型机器遥控方式进行模拟开挖,较为简单的是预制洞室件埋入,然后通过脱模等方式拔出,本试验利用石蜡预制洞室实体,并在石蜡中插入电热管,通过电热管加热融化石蜡模拟洞室开挖。开挖前荷载加到 5kN,融化整个石蜡的时间约为 50min,然后清

理洞室,最终完成时间为 60min,开挖过程及开挖结束后洞室如图 7 所示。

3.2 加卸载过程

将一次加载过程和一次卸载过程称为一级荷载,荷载级数如表 3 所示。第 1、2 次加卸载之间停大约 5min。第 3 次加卸载开始,加载和卸载结束时,留 3min 的时间以便记录和保存数据,加载卸载量分别为 6kN、4kN,加卸载时间分别为 120s、80s,逐级加卸载直至洞室围岩出现显著破坏,即洞壁发生明显破裂或荷载无法进一步施加。



图 7 模拟开挖

Fig. 7 Simulated excavation of tunnel

表 3 加卸载级数及荷载值

Tab. 3 Load/unload steps and corresponding values

| 荷载级数 | 荷载             | 荷载级数 | 荷载             |
|------|----------------|------|----------------|
| 1    | 5kN-9kN-7kN    | 10   | 22kN-28kN-24kN |
| 2    | 7kN-12kN-8kN   | 11   | 24kN-30kN-26kN |
| 3    | 8kN-14kN-10kN  | 12   | 26kN-32kN-28kN |
| 4    | 10kN-16kN-12kN | 13   | 28kN-34kN-30kN |
| 5    | 12kN-18kN-14kN | 14   | 30kN-36kN-32kN |
| 6    | 14kN-20kN-16kN | 15   | 32kN-38kN-34kN |
| 7    | 16kN-22kN-18kN | 16   | 34kN-40kN-36kN |
| 8    | 18kN-24kN-20kN | 17   | 36kN-42kN-38kN |
| 9    | 20kN-26kN-22kN |      |                |

4 试验结果分析

4.1 拱顶沉降

拱顶沉降是反映洞室稳定的重要指标,拱顶沉降测读为每 1kN 读一次数,每级加载结束时立即读数,然后接近 3min 时再读一个数,其中较大值作为最终值,卸载停止时流程与加载相同,但取较小值作为最终值,列出代表性的荷载分级拱顶沉降于图 8。

由图 8 可知,在荷载较低的情况下,围岩基本处于稳定状态,拱顶沉降不大,随着荷载的增加,拱顶沉降逐渐增大,到第 14 级荷载时,洞壁出现可见裂缝,裂缝大致位于边墙中部,呈沿隧道全长贯通性状,且声发射存在较大增幅,洞壁接近失稳,如图 9 所示。

由图 9 可知,14 级荷载后,拱顶沉降在卸载时并不减小,表明围岩进入塑性状态,并出现一定的永久变形。从加卸载曲线可知,随着荷载的增加,以拱顶沉降为响应值的加卸载响应比逐渐增加,荷载—拱顶沉降按照二阶多项式对加载和卸载阶段进行分段拟合,得出加载段和卸载段在加卸载分界点处的斜率,从而得出加卸载响应比,如图 10 所示。

由图 10 可知,当隧道接近破坏时,加卸载响应比值剧烈波动,甚至出现负值,具体表现为当竖直荷载减少时,拱顶沉降基本不变,表明此时围岩进入塑性状态。

4.2 拱顶围岩竖向土压力分析

围岩压力是反映围岩稳定发展情况的主要指标之一,如图 6 所示,本试验布设了 4 个土压力盒。在测试过程中发现,随着荷载的施加,拱顶围岩竖向压力表现出明显的增减,当达到某一值后,围岩竖向压力在竖直荷载减少时反而增加,如图 11 所示。

在前 7 级荷载前,边墙处的围岩水平压力随加载而增大,随卸载而减少,在 8 级荷载及以后,围岩水



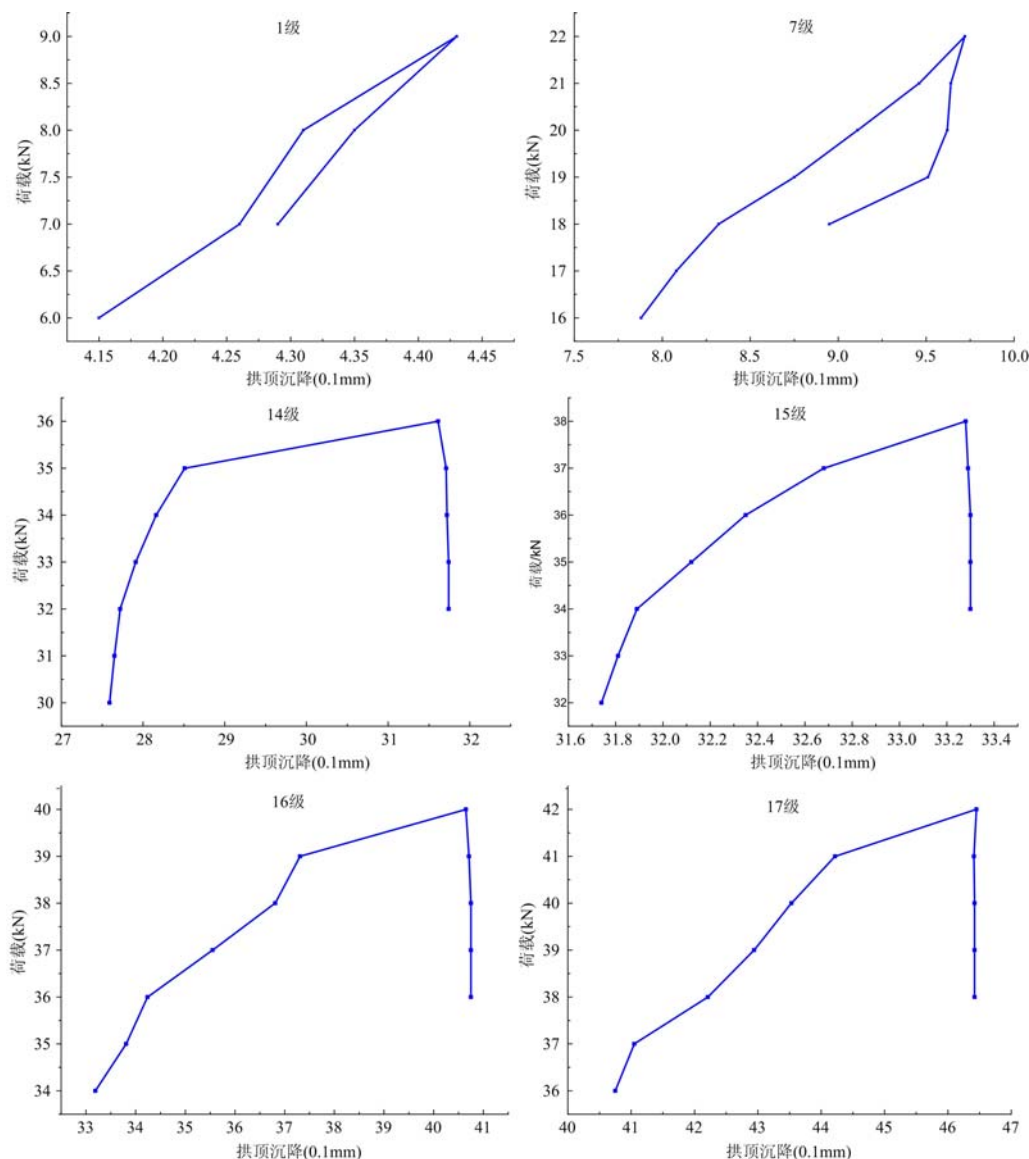


图 8 加卸载过程中的拱顶沉降

Fig. 8 Crown subsidence during multi-stage incremental load/unload



图 9 洞壁裂缝

Fig. 9 Crack development in the middle of sidewall

平压力呈逐渐增大的趋势。拱底围岩竖向压力在逐级加载前期阶段和后期阶段呈较大的波动,其余段则变化较小。由此可知,拱顶竖向压力相对来说可较好反映加卸载响应比特征。

#### 4.3 声发射特性

声发射反映了工程岩体的变形破坏特性。声发射能量并不是岩石破碎时释放的绝对能量<sup>[19]</sup>,而是声发射监测系统处理后的相对能量,反映岩体失稳发展特征。图 12 中给出了 1、7、14 和 17 级加卸载条件下声发射活动位置。

第 14 级加载结束时,发现洞壁出现细微裂纹,对比图 9 和图 12 可知,在洞壁开裂处位置,出现较为集中的声发射,卸载时的声发射也较多,且数目及能量数均不低,与常理相背。一个原因是本试验中声发射在加卸载末期立即读数,而由于弹性后效效应岩石微破裂还未完成,导致在卸载阶段微

破裂可能继续发育;另一个原因是边界条件导致的,包括:1)模型本身与模型箱之间的摩擦;2)顶面加载局部应力作用导致的声发射,关于这方面的原因可由图13中加卸载结束后声发射事件分布图证实。由此可知,在加卸载过程中进行声发射测试需要考虑模型边界条件,且不能直接计算加卸载响应比。

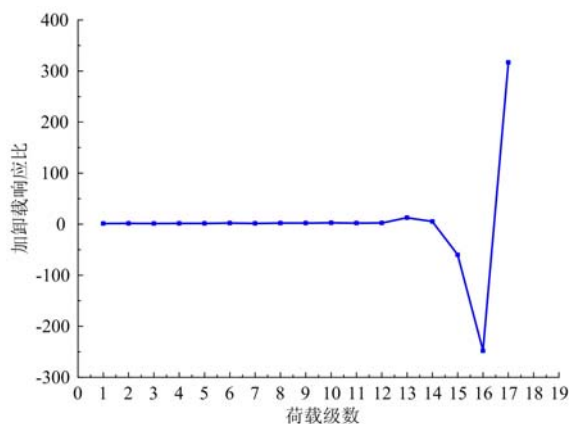


图10 拱顶沉降加卸载响应比

Fig. 10 LURR of crown subsidence

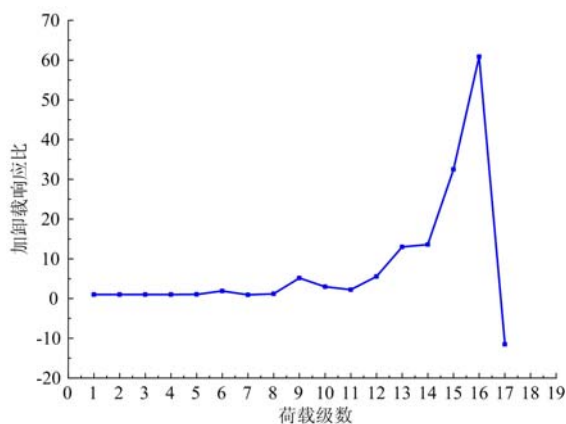


图11 拱顶围岩竖向压力加卸载响应比

Fig. 11 LURR of earth pressure of surrounding rocks of crown

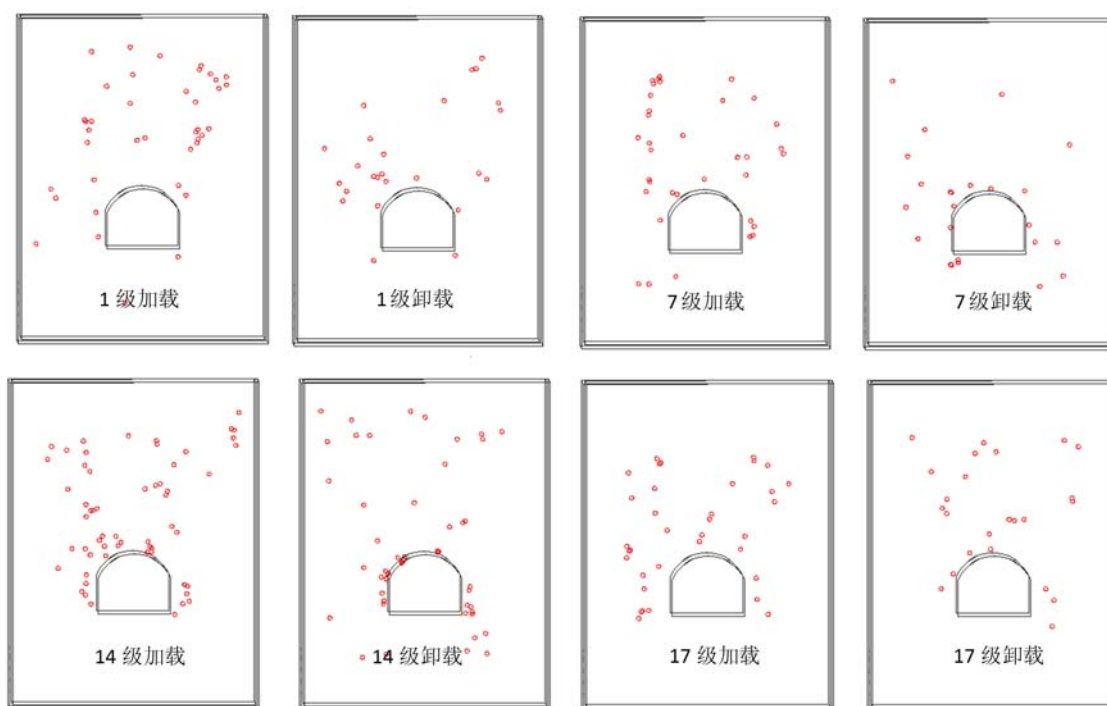


图12 分级加卸载条件下声发射定位图

Fig. 12 AE position at the end of load/unload

为进一步研究围岩声发射,笔者进一步分析了距离洞壁0.5倍半跨和1倍半跨处的声发射事件数,加载和卸载声发射事件数的响应比没有明显的变化特征,如图14所示。

## 5 结论

以某矿山隔离矿柱回采巷道稳定研究为工程背景,设计了相似材料模型试验方案,研究了基于加卸载响应比的洞室稳定发展特征。

1) 通过边界荷载(地应力)增减,实现了基于地应力场的洞室加卸载,克服了现有加卸载响应比理

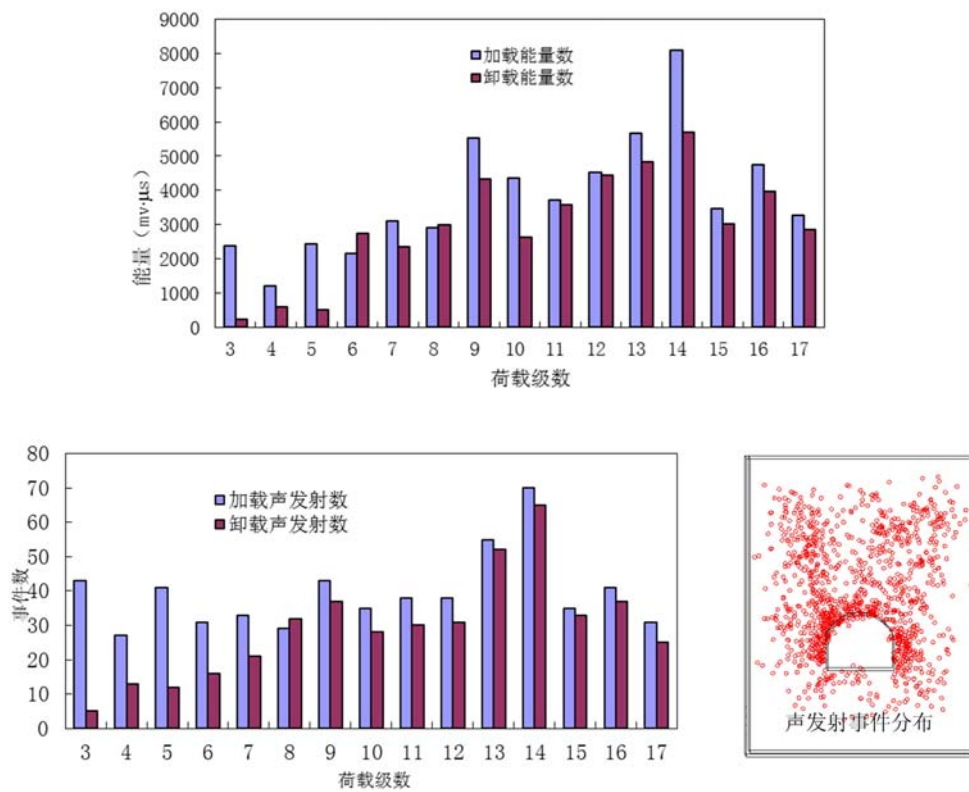


图 13 加卸载过程中声发射统计及分布

Fig. 13 AE events, energy and location

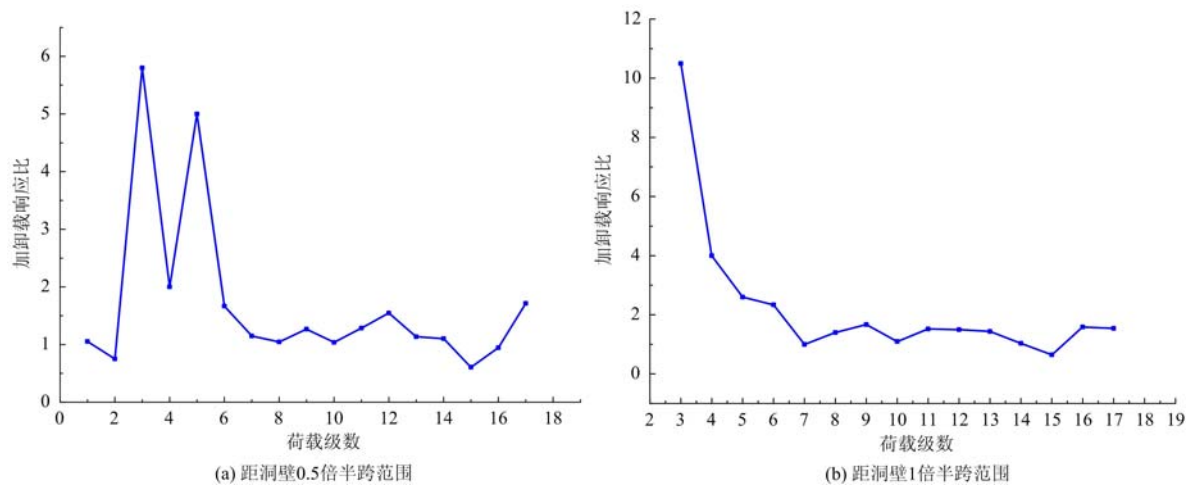


图 14 不同范围围岩声发射事件数加卸载响应比

Fig. 14 LURR of AE events at different range of surrounding rocks

论在洞室稳定研究中存在的难以定义问题,与通过地震荷载实施加卸载相比避开了动力效应。

2) 建立了相似材料试验模型,通过逐级加卸载研究了反映洞室稳定的主要力学响应参数,拱顶沉降、拱顶竖向围岩压力和声发射。

3) 拱顶沉降能够较好地反映洞顶围岩稳定发展情况,接近破坏时,LURR 值会大幅增加,并伴随剧烈波动,拱顶竖向围岩压力也有类似特征,声发射事件数和能量的 LURR 值在逐级加卸载过程中未出现明显变化,但其累计值反映了洞室稳定发展特征。



## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业推荐性标准. JTG/T D70—2010 公路隧道设计细则[S]. 北京:人民交通出版社, 2010 (Voluntary standards of the People's Republic of China. JTG/T D70—2010 guidelines for design of highway tunnel[S]. Beijing: China Communication Press, 2010(in Chinese))
- [2] 祝方才, 刘丙肖, 杨承祥. 大型深埋硬岩矿山回采优化的数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2014(8):11—14 (ZHU Fangcai, LIU Bingxiao, YANG Chengxiang. Numerical analysis of stoping optimization of large-scale deep-buried stopes with hard rocks [J]. Metal Mine, 2014(8):11—14(in Chinese))
- [3] 江权, 冯夏庭, 向天兵. 基于强度折减原理的地下洞室群整体安全系数计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2009, 30(8):2483—2488 (JIANG Quan, FENG Xiating, XIANG Tianbing. Discussion on method for calculating general safety factor of underground caverns based on strength reduction theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2483—2488 (in Chinese))
- [4] 江权, 冯夏庭, 苏国韶 等. 高地应力下拉西瓦水电站地下洞室群稳定性分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5):132—140 (JIANG Quan, FENG Xiating, SU Guozhao, et al. Stability analysis of large underground caverns in Laxiwa hydropower plant under high crustal stress[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5):132—140(in Chinese))
- [5] 苏国韶, 冯夏庭, 江权 等. 高地应力下大型地下洞室群开挖顺序与支护参数组合优化的智能方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1):2800—2808 (SU Guozhao, JIANG Quan, FENG Xiating, et al. Intelligent method of combinatorial optimization of excavation sequence and support parameters for large underground caverns under condition of high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl. 1):2800—2808(in Chinese))
- [6] 赵瑜, 卢义玉, 康勇. 隧道围岩卸荷演化过程的 Kolmogorov 熵分析[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(9):1006—1010 (ZHAO Yu, LU Yiyu, KANG Yong. Kolmogorov entropy analysis of surrounding rock system in the processing of unloading for deep-buried tunnels[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(9):1006—1010 (in Chinese))
- [7] 许传华, 任青文. 围岩稳定分析的熵突变准则研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3):437—440 (XU Chuanhua, REN Qingwen. Criterion of entropy catastrophe of stability of surrounding rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3):437—440(in Chinese))
- [8] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987, 3(1):1—7 (YIN Xiangchu. Exploring new approach to earthquake prediction[J]. Earthquake Research in China, 1987, 3(1):1—7 (in Chinese))
- [9] Yin Xiangchu, Mora P, Peng Keyin. Load/unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction [J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159(9):2511—2523.
- [10] Yin Xiangchu, Yu Huaizhong, Victor Kukshenko. Load/Unload Response Ratio(LURR) Accelerating Energy Release(AER) and state vector evolution as precursors to failure of rock specimens[J]. Pure and Applied Geophysics, 2004, 161(11-12):2405—2416.
- [11] Yin Xiangchu, Zhang Langping, Zhang Huihui. LURR's twenty years and its perspective[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(11-12):2317—2341.
- [12] Yin Xiangchu, Zhang Langping, Zhang Yongxian. The newest development of Load/Unload Response Ratio (LURR)[J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(3-4):711—722.
- [13] 尹祥础, 尹讯飞, 余怀忠 等. 加卸载响应比理论用于矿震预测的初步研究[J]. 地震, 2004, 24(2):25—30 (YIN Xiangchu, YIN Xunfei, YU Huaizhong, et al. Preliminary study on mining induced earthquake prediction in terms of Loading-Unloading Response Ratio(LURR)[J]. Earthquake, 2004, 24(2):25—30(in Chinese))
- [14] Mora P, Wang Yuchang, Yin Xiangchu, et al. Simulation of the Load-Unload Response Ratio and critical sensitivity in the lattice solid model[J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159:2525—2536.
- [15] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002:144—149 (ZHENG Yinren, SHEN Zhujiang, GONG Xiaonan. The principles of geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing:China Architecture and Building Press, 2002:144—149 (in Chinese))
- [16] 陈为公. 加卸载响应比理论在地质灾害预测领域的研究进展[J]. 力学与实践, 2015, 37(1):25—32 (CHEN

- Weigong. Research progress of load-unload response ratio theory in the field of geological disaster forecast[J]. Mechanics and Practice, 2015, 37(1):25—32 (in Chinese))
- [17] 杨锋, 阮飞鹏. 加卸载响应比理论在隧道结构抗震稳定性评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(5):113—115 (YANG Feng, RUAN Feipeng. Application of loading-unloading response ratio theory to aseismic stability assessment of tunnel[J]. Journal of Noah China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, 32(5):113—115 (in Chinese))
- [18] 刘长武, 翟才旺. 地层空间应力场的开采扰动与模拟[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2005 (LIU Changwu, ZHAI Caiwang. Spatial strata stress field evolution regularity induced by mining engineering and simulation[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2005 (in Chinese))
- [19] 周志华. 动静组合载荷与渗透水压作用下裂隙岩体断裂机理研究[D]. 长沙:中南大学, 2014 (ZHOU Zhihua. Crack propagation mechanism of fractured rock under static-dynamic loading and seepage water pressure(Ph. D. Thesis)[D]. Changsha: Central South University, 2014(in Chinese))
- [20] 曾亚武, 赵震英. 地下洞室模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增):1745—1749 (ZENG Yawu, ZHAO Zhenying. Model testing studies of underground openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Suppl):1745—1749(in Chinese))

## Model Experimental Study of Underground Cavern Stability Based on Load/Unload of In-Situ Stress Field

ZHU Fang-cai<sup>1</sup>, LIU Bing-xiao<sup>2</sup>, LI Da-jian<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. School of Business, Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou 412006, China)

**Abstract:** The load/unload response ratio (LURR) theory is one of the important methods to study the stability of nonlinear system. In this paper, the essential meaning of the theory is analyzed, and the problems existing in the underground cavern stability analysis are studied. Based on stress boundary value (i. e. in-situ stresses) increase/decrease, a method to realize in-situ stress field loading/unloading is proposed. Taking the stability study of a mine tunnel as the engineering background, a plane strain model of similar material was established. Through step by step loading and unloading to top boundary stress, the vertical pressure on cavern crown, the crown settlement and the response characteristics of acoustic emission were studied. Results show that when the stress is not too large, both LURRs of vertical pressure on cavern crown and crown settlement are close to 1; whereas, when surrounding rock is close to destruction, the ratio suddenly increases and is accompanied by a larger fluctuation. Although there is no similar feature of acoustic emission energy and event number, but generally speaking, with the increase of load, the acoustic emission increases.

**Keywords:** in-situ stress field; cavern stability; Load/Unload Response Ratio (LURR); Acoustic Emission (AE); crown settlement; surrounding rock pressure