

岩石破坏前的损耗比及加卸载响应比特性研究*

高真平¹ 李庶林¹ 黄波¹ 陈东霞¹ 胡静云²

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

摘要:以多种岩石循环加卸载声发射试验为基础,针对岩石损耗比和加卸载响应比特性进行了研究,探索岩石在受载过程中的内部损伤演化和破坏前兆特性。结果表明,在循环加卸载下角岩等三种岩石损耗比变化特性一致:低应力水平阶段损耗比较大,呈明显下降趋势;中等应力水平阶段比值下降趋势较平缓;高等应力水平阶段比值趋于稳定,在0.08~0.10时,试样破坏。而钨钼矿等三种岩石加卸载响应比变化特性一致:低应力水平阶段卸载时几乎没有声发射,加卸载响应比较大;中等应力水平阶段卸载时声发射较活跃,比值下降至1左右;高等应力水平阶段卸载时声发射很活跃,当比值重新大于1时,试样破坏。试验结果都体现了岩石内部损伤从很小到稳定扩展再到不稳定扩展的过程。可见,损耗比和加卸载响应比的变化特性均可用于评价岩石损伤情况,也可用作岩石破坏预测的参考依据。

关键词:声发射;损耗比;加卸载响应比;损伤演化;破坏前兆

中图分类号:TU45

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)01-0035-06

Study on the Characteristics of Loss Ratio and Loading-unloading Response Ratio before Rock Failure

Gao Zhenping¹, Li Shulin¹, Huang Bo¹, Chen Dongxia¹, Hu Jingyun²

(1. School of Architectural and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, P.R. China;

2. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, P.R. China)

Abstract: On the basis of the acoustic emission for rock under cyclic loading and unloading, the characteristics for the loss ratio and loading-unloading response ratio of rocks is studied, and the evolution of the internal damage in the course of loading and the precursor characteristics of failure are explored. The results show that the variation characteristics of loss ratio of three kinds of rocks like hmfelswere are consistent under loading and unloading conditions; The loss ratio is relatively large in the low stress level stage, and it shows a clear downward trend. After entering the medium stress level, the ratio decreases with a relatively flat trend. In higher stress level, the ratio tends to be stable, and the specimen fails at 0.08~0.10. At the same time, the variation characteristics of loading-unloading response ratio of three kinds of rocks like tungsten and molybdenum ores are consistent. There were almost no acoustic emission at the unloading stage in the low stress level stage, and the loading-unloading response ratio were relatively large. Acoustic emission was more active at the unloading stage in the medium stress level, and the ratio dropped to about 1. In higher stress level, acoustic emission was very active at unloading stage, and the specimen failed when the ratio increased over 1 again. The results reflect the process of rock internal damage from small to steady expansion and then to unstable expansion. So the variation characteristics of loss ratio and loading-unloading response ration can be used to evaluate the damage of rock, and also can be used as a reference for prediction of rock failure.

Keywords: acoustic emission; loss ratio; load-unload response ratio; damage evolution; failure precursor

* 收稿日期:2016-07-21(修改稿)

作者简介:高真平(1991-)女,重庆梁平人,硕士生,主要从事声发射与微地震监测研究。

E-mail: 1277843704@qq.com

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2013BAB02B06)

0 引言

岩石破坏的前兆特性是岩石力学研究的重要理论和实验研究方向,也是工程应用的重大技术难题。开展对岩石前兆特性的研究,对于工程中的岩体稳定性监测和防灾减灾具有十分重要的意义。真正的地球介质往往不是完全弹性的,当扰动在介质中传播时会有机械能转变为热能,这种转变过程中的各种机制统称为内摩擦。陈颢等^[1]用损耗比来表述岩石的内摩擦,损耗比代表着每个应力循环中能量的耗散情况。能量耗散越多,岩石越接近破坏点,因此,损耗比的大小和变化情况可以作为岩石破坏前的前兆特性。赵忠虎等^[2]分析了岩石变形破坏过程中耗散能和释放能对岩石破坏所起的作用,认为能量耗散会降低岩石强度,能量释放会造成岩石破坏。刘祥鑫等^[3]通过不同岩石的声发射试验,得出能率可以很好描述岩石破裂损伤的整个阶段。董春亮等^[4]通过泥岩的单向压缩声发射试验分析了岩石的能量转化和声发射特征,构建了损伤本构模型,通过结果对比得出两种损伤演化规律基本一致。高保彬等^[5]还通过不同破坏类型的岩石声发射试验研究得出分形维值在岩石破坏前会突降的前兆特性。尹祥础等^[6]则结合岩石声发射特性试验研究首先提出岩石的加卸载响应比理论,探讨了加卸载响应比能反映岩石破坏的前兆特性。该理论自提出以来,已经在国内得到了认同,如王裕仓等^[7]通过岩石压缩破坏的加卸载试验以应变为响应验证了加卸载响应比可被用作岩石破坏预测前兆的正确性;刘建坡^[8]对花岗岩和大理岩在循环荷载下的岩石损伤与声发射的关系进行了研究,采用加卸载响应比理论研究了岩石破坏失稳的前兆;张晖辉等^[9]在三轴应力条件下对岩石试件进行了循环载荷和声发射特性试验研究,将能量释放和加卸载响应比对岩石损伤破坏的影响结合起来分析。但是,目前将损耗比和加卸载响应比结合起来的综合研究却并不多。本文针对循环加卸载条件下多种岩石的破坏全过程,采用损耗比和加卸载响应比理论共同探索岩石破坏前的失稳前兆,为岩体工程中的多通道声发射监测微震监测预警技术应用提供依据。

1 试验方法

1.1 岩样描述与制备

本实验采用取自内蒙万城铅锌矿的铅锌矿和

哈尔滨松江铜矿的角岩、花岗岩和钨钼矿等岩石试样。其中,铅锌矿为致密块状,呈半金属光泽,角岩为斑状变晶结构,基质主要为碳质和细粒石英;花岗岩为花岗闪长斑岩,呈浅灰色,块状构造,半自形中粒等粒结构。试验前将岩石加工成规格为 50 mm×100 mm 的圆柱体试样,制备好的典型岩石试样如图 1 所示。

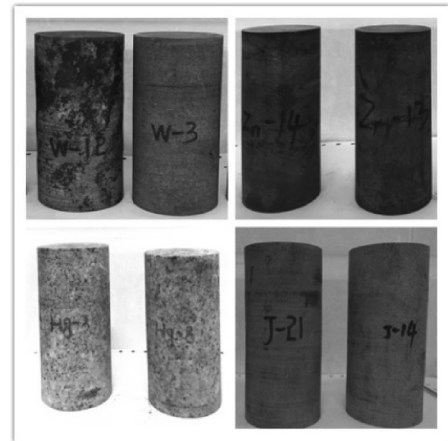


图 1 典型岩石试样图

Fig. 1 Typical rock specimens

1.2 试验设备

试验采用美国物理声学公司生产的 MICRO-II-32 声发射系统和长春机械科学研究院有限公司生产的 YNS-Y600 电液伺服压力试验机协同工作。整个试验过程中需时刻保持加载系统和监测系统在时间上的同步,如图 2 所示。



图 2 岩石力学试验机和 MICRO-II-32 声发射系统

Fig. 2 Rock mechanical test machine and acoustic emission monitoring system MICRO-II-32

声发射监测系统主要包括四大部分,分别为声发射传感器、声发射前置放大器、声发射卡(PCI-8)、声发射主机处理软件。该套声发射系统由两块 PCI 卡组成,最大可用通道数有 16 个,采样频率为 1~400 kHz 的带宽,最大信号增益幅度为 100

dB,传感器灵敏度为 $54 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,最佳响应频率范围为 $200 \sim 750 \text{ kHz}$ 。

加载系统可施加的最大荷载为 60 t ,测量范围为试验机最大负荷的 $2\% \sim 100\%$,测量精度优于示值的正负 1% 。采用先进的位移传感器测量油缸活塞位移,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。加载可调节的速度范围为 $0.01 \sim 50 \text{ mm}/\text{min}$,精度达正负 0.5% 。该系统可实现试验的全程监控,并自动采集处理试验数据,显示试验力-时间曲线、应力-位移曲线、位移-时间曲线等。

本试验采用6个传感器同时工作,对称布置于试样上下端左右两侧和中部的先后处位置。为了加强试样与传感器之间的耦合效果,在传感器与试件接触的部分涂抹了适量黄油,并用橡胶带将探头牢牢固定于试件上。

1.3 加载方式

试验采用单轴增量循环加卸载方式,首先加载至 10 kN ,然后卸载,再加载,每次最大应力增加 30 kN ,每次都卸载至接近 0 ,后续再根据其简单加载强度和实际声发射变化特性适当改变增量,直到试样破坏为止,其循环加卸载方式示意图如图3所示。

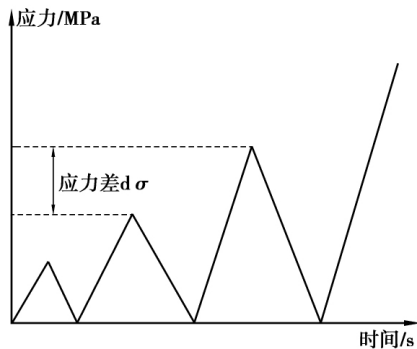


图3 循环加卸载方式示意图
Fig. 3 The cyclic loading and unloading curves

2 实验研究方法

本研究为探讨岩石在增量循环加卸载条件下的损伤演化情况和破坏前兆特性,分别采用损耗比和加卸载响应比两种分析方法,从能量损耗和加卸载过程声发射变化两方面来对试验结果进行研究。

2.1 损耗比

在完全弹性介质中,波的传播不发生能量的损失。但是,真正的地球介质往往不是完全弹性的,扰动在介质中传播时存在能量耗散现象,会有部分机械能转变为热能,而这种转变过程中的各种机制统称为内摩擦。对于固体特别是岩石材料,内摩擦

的机制要复杂很多,岩石中声波的衰减还与岩石微观结构有关,并随固体性质的不同有很大变化。岩石中内摩擦引起的耗散可用“损耗比” η 来定义:

$$\eta = \Delta W / W \quad (1)$$

式中: ΔW 是试件经过一个应力循环时所损失的能量; W 是当应变为极大时所储存的最大应变能,如图4所示。

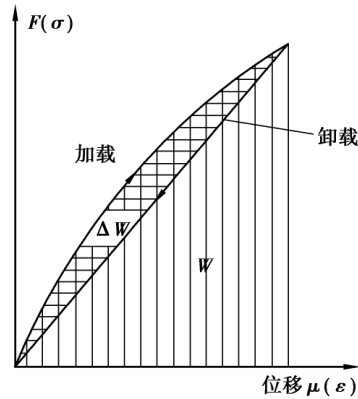


图4 由循环加载实验确定岩石的内摩擦
Fig. 4 Determination of loss ratio caused by internal friction of rock through cyclic loading test

2.2 加卸载响应比

在材料的本构曲线中,非弹性变形具有不可逆性,曲线加载应变响应率与卸载应变响应率的差异反映了材料的损伤程度,二者的比值即为加卸载响应比。其理论的主要思路是系统在稳定状态时的比值与非稳定状态时的比值是完全不同的^[9]。把应力当作荷载,把应变当作响应,加卸载响应比 Y 定义为^[10]:

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \frac{d\varepsilon_+ / d\sigma_+}{d\varepsilon_- / d\sigma_-} = \frac{E_-}{E_+} \quad (2)$$

式中: X 为声发射响应率;下标“+”、“-”分别代表加卸、载阶段; ε 为应变; σ 为应力; E 为弹性模量。

结合加卸载过程中的损伤变化率和声发射数和式(2)可得加卸载响应比为^[8]:

$$Y = E_- / E_+ = \Delta D_+ / \Delta D_- = N_+ / N_- \quad (3)$$

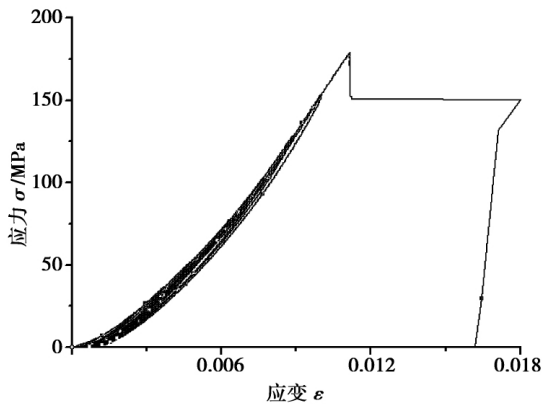
式中: ΔD 为损伤变量变化率; N 为声发射数。

3 结果分析

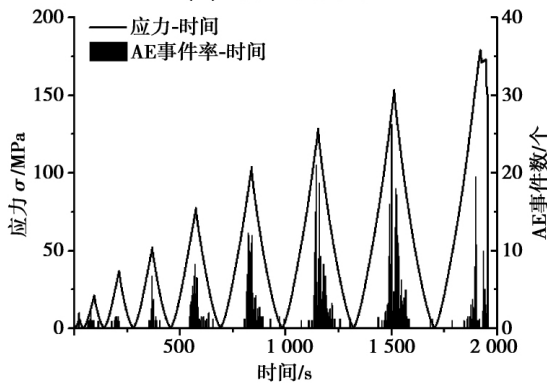
3.1 岩石声发射试验结果

本次试验分别对花岗岩、角岩、钨钼矿和铅锌矿进行了增量循环加卸载试验,每种岩石分别进行3组试验。通过试验,得到了各岩石在加卸载试验中的应力-应变曲线图和应力-时间-声发射事件率曲线图,图5(a)、(b)给出了典型岩样铅锌矿的相

关曲线图。



(a)应力-应变曲线图



(b)应力-时间-声发射事件率曲线图

图 5 铅锌矿试验结果图

Fig. 5 Testing results of lead zinc mine

本试验通过图 5(a)、(b) 所示曲线图来分别进行损耗比和加卸载响应比分析。当然,可先从应力-时间-声发射事件率曲线图中直观地观察岩石在每阶段的加、卸载过程中的损伤扩展情况,并将结果与后续分析结果进行对比。

3.2 损耗比变化特性分析

在分析损耗比的变化情况时,选取了循环次数较多的具有研究和代表意义的花岗岩、角岩和铅锌矿来分析。同种岩样的每组试验结果存在一定的差异,但是都表现出相似的规律特性,选取典型的试验结果作分析,采用式(1)计算得到不同循环时的损耗比值,各典型岩石损耗比变化情况如图 6 所示。

由图 6 可见,3 种岩石在循环初期的损耗比与全过程相比都相对较大,特别是花岗岩和铅锌矿,起始值都超过了 0.3,而角岩的损耗比从一开始就比这二者低较多,这与岩石本身的性质有关,由于试验所用角岩非常均匀质密且无明显节理,从初始加载至最终突然破坏前整个过程中几乎没有声发射产生,直至破坏时,声发射骤增。所以其损耗比在低应力阶段相对较低,具有一定的特殊性。而在该阶段,花岗岩和铅锌矿的损耗比呈明显的下降趋

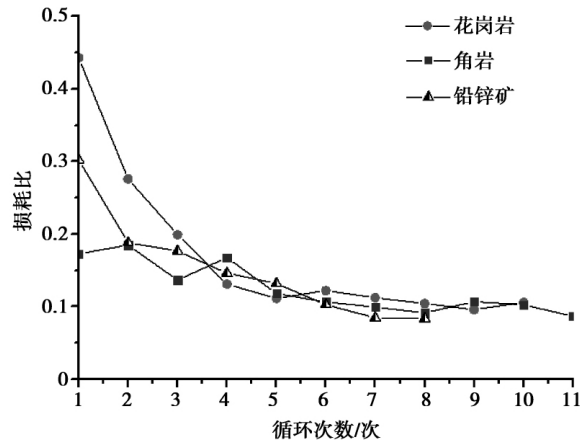


图 6 损耗比变化情况曲线图

Fig.6 Variation curves of loss ratio

势,说明在低应力水平阶段随着应力的逐渐增大,试样在循环荷载下总应变能 W 不断增大而所损耗的能量 ΔW 并无明显增加。加之这个阶段里并无明显声发射产生,体现出岩石内部的损伤很小,这可与损耗比的迅速下降联系起来。到中等应力水平阶段,岩石损耗比都在 0.1~0.2 之间波动,但整体呈下降趋势且逐渐趋于平缓,说明在该阶段的循环应力中岩石材料能量的耗散 ΔW 随着总能量 W 的增大开始有所增加,而该过程产生的声发射增多,体现出岩石内部的损伤开始发展,这和耗散能量的增加相关联。在高应力水平阶段,3 种岩石的损耗比都在 0.1 附近稍有起伏,显得比较平缓且稳定,临近最终破坏前的最后一次循环中,角岩和铅锌矿的损耗比为 0.08,花岗岩为 0.10。这说明在这个阶段,随着应力水平越来越高,每次循环总应变能 W 增大的同时岩石材料耗散的能量 ΔW 也越来越多,此阶段观察到的声发射现象也十分活跃,岩石内部的损伤不断扩展直至破坏。这 3 个阶段的声发射变化特征及其代表的岩石损伤演化情况都和能量的耗散情况相对应,从曲线的整体来看,3 种岩石损耗比曲线总体趋势都是逐渐下降并趋于平缓,最终在 0.08~0.10 之间,岩石发生破坏。这种一致的变化特性可成为岩石破坏的前兆,为实际工程中的监测预警提供参考依据。

3.3 加卸载响应比变化特性分析

由于角岩内部结构均匀质密,在整个试验过程中并无明显声发射产生,所以选取花岗岩、钨钼矿和铅锌矿进行加卸载响应比变化特征的研究,利用岩样每次循环加、卸载过程中的声发射数采用式(3)计算得 3 种岩石在不同循环次数时的加卸载响应比值。表 1 为 3 种岩样在每次加、卸载循环时的声发射数比值。

表 1 岩样在循环加卸载下的声发射数比
 Table 1 The acoustic emission ratio of rock samples under cyclic loading and unloading

岩样	循环加卸载声发射数比				
	2	3	4	5	6
花岗岩	—	—	3/1.5	2.25/1.75	2/1.5
钨钼矿	—	—	14.25/3.5	60/86.75	161.75/151.5
铅锌矿	18/2	14.5/4.5	19.75/18	88.75/47.5	176.75/223

岩样	循环加卸载声发射数比				
	7	8	9	10	11
花岗岩	3.25/2	12.5/8.75	20/27.25	273.75/281	154.5/48.25
铅锌矿	162/188.5	190/226	105/45		

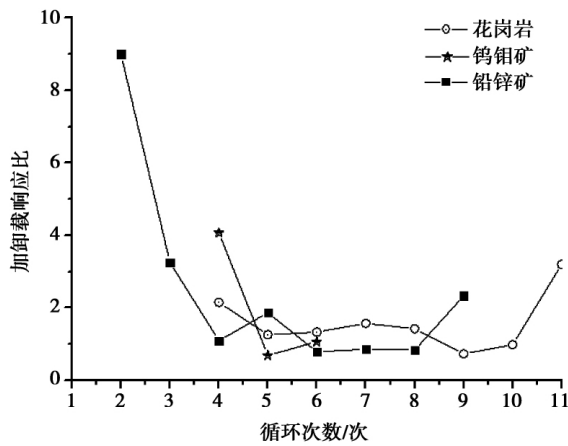


图 7 加卸载响应比变化曲线

Fig.7 Curves of loading/unloading response ratio

由图可见,在较低应力水平阶段的循环初期,铅锌矿从第 2 次循环开始便出现加卸载响应比且比值较大,而花岗岩和钨钼矿从第 4 次循环开始才出现,比值相对较小。因为在加载初期,岩石受到初始应力作用,其内部微裂隙会逐渐闭合,试样局部发生不可逆变形,但较低的应力水平致使此类损伤较小,且主要来自于加载阶段,因而卸载阶段产生的声发射很少,初期加卸载响应比值较大。花岗岩和钨钼矿在前 3 次循环中的卸载阶段几乎没有声发射,而铅锌矿从第 2 次循环开始加、卸载过程便都有声发射产生,故加卸载响应比出现更早。花岗岩和钨钼矿在初始的几次循环加载中,岩石内部损伤很小,加、卸载阶段几乎不产生声发射,到第 4 次循环加载时,损伤有所增大,加卸载过程出现较多声发射,但加载过程仍占主要,所以加卸载响应比 Y 值出现(字母格式更改),且数值相对较大,只

因损伤特别是卸载过程中的损伤增大,故而比值小于铅锌矿初始加卸载响应比。当进入中等应力水平至较高应力水平之间的阶段时,从花岗岩和钨钼矿的曲线图观察可得,二者的加卸载响应比逐渐下降到 1 左右并趋于稳定,这是因为此阶段加载时的声发射主要来自于微裂纹的产生和稳定发展,而卸载时由于局部的不可逆变形和弹性可恢复变形之间产生的残余拉应力造成了卸载过程中的损伤,且该损伤随着循环应力的增大而逐渐增加,故而加卸载响应比值趋于 1。当试样接近破坏时,在高应力的作用下,岩石在加、卸载过程中的裂纹加速扩展,损伤明显增大,通过对比加卸载过程声发射现象的活跃程度可知,加载过程的损伤增长速度大于卸载过程,所以加卸载响应比会重新大于 1。这种现象可用于预测岩石破坏,但是由于岩石最终发生破坏的时间一般很短,很难及时掌握(由图可见在破坏前加卸载响应比均在 1 左右),所以一般对加卸载响应比约为 1 时着重进行分析。钨钼矿在第 5 次循环时所对应的循环最大应力占峰值应力的 67%;花岗岩在第 9 次、第 10 次循环所对应的循环最大应力分别占峰值应力的 71% 和 82%;铅锌矿在第 6~8 次循环最大应力分别占峰值应力的 60%、72%、85%。由此可见,当加卸载响应比下降至约为 1 时,此时所对应的应力占岩石峰值应力的 60%~71%,在破坏前的最后一次循环所对应的应力占峰值应力的 67%~85%。这说明加卸载响应比约为 1 时岩石应力在 60%~85% 之间,这为岩石破坏预测提供了一定的分析反映时间和参考依据。

3.4 对比与分析

在试样加载破坏的整个过程中,其声发射变化特征反映了岩石内部损伤裂纹从萌生到稳定扩展再到不稳定扩展的变化情况。在这个过程中,各损耗比从迅速下降到缓慢下降再到保持平稳至岩石破坏,3 个特征阶段代表着岩石耗散能量的变化情况:一阶段耗散的能量并无明显增加,二阶段开始逐渐增加,三阶段增长加快。这 3 个阶段和声发射的变化情况相对应,一阶段主要在加载时有声发射产生,二阶段卸载时的声发射开始逐渐增加,三阶段加、卸载时的声发射均迅速增加且加载过程的增大速率大于卸载过程,声发射现象反映了岩石的损伤变化情况,二者对应起来说明了能量的损耗变化特征也能反映岩石内部损伤的演化过程。而加卸载响应比也分为 3 个变化阶段,初始阶段比值较大,中等应力水平阶段保持在 1 左右,在高应力水平阶段比值会重新大于 1,岩石发生破坏。这 3 个

阶段分别代表着加载、卸载过程中损伤扩展的相对情况,也和声发射特征相对应,从而反映出岩石在整个过程中的损伤水平。由此可见,损耗比和加卸载响应比的变化特征都相对应地反映出了试样损伤的演化情况,和声发射结果一致,且损耗比在岩石破坏前的平稳性(0.08~0.10)和加卸载响应比重新大于1(着重考虑比值约为1)的现象都可成为预测岩石破坏的良好参考依据。

4 结论

(1) 岩石材料在受载过程中的能量损耗和损伤演化情况可通过损耗比来体现,损耗比在低应力水平阶段较大,呈明显下降趋势,进入中等应力水平阶段后缓慢下降,在高应力水平阶段趋于稳定,至0.08~0.10时岩石发生破坏,整个变化过程体现了岩石损伤的演化情况,也为岩石破坏预测提供了有效参考依据。

(2) 岩石受载过程的加卸载响应比反映了岩石内部损伤扩展程度,低应力水平阶段时比值较大,中等应力水平阶段时比值趋于稳定,在1左右,进入高应力水平阶段后,当比值重新大于1时试样破坏。考虑到实际破坏时间较短,所以一般考虑加卸载响应比约为1时作为岩石破坏预测的判断依据,着重进行分析。

(3) 损耗比可通过应力应变直接进行能量的耗散计算,比较简单,而加卸载响应比可以用声发射参数得到,过程中还可通过声发射情况直观判断损伤扩展程度,二者各有优势,在实际工程中,可结合二者共同为监测预警提供参考依据。

参考文献(References)

- [1] 陈颢. 地壳岩石的力学性能-理论基础与实验方法[M]. 北京: 地震出版社, 1988. (Chen Yong. Mechanical properties of crustal rocks-the theoretical basis and experimental methods [M]. Beijing: Seismological Press, 1988. (in Chinese))
- [2] 赵忠虎, 谢和平. 岩石变形破坏过程中的能量传递和耗散研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(2): 26-31. (Zhao Zhonghu, Xie Heping. Energy transfer and energy dissipation in rock deformation and fracture [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(2): 26-31. (in Chinese))
- [3] 刘祥鑫, 张艳博, 孙光华, 等. 不同岩石声发射时频特性实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 776-782. (Liu Xiangxin, Zhang Yanbo, Sun Guanghua, et al. Experimental study on acoustic emission time frequency characteristics of different rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 776-782. (in Chinese))
- [4] 董春亮, 赵光明. 基于能量耗散和声发射的岩石损伤本构模型[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(5): 1116-1122, 1128. (Dong Chunliang, Zhao Guangming. Constitutive model of rock damage based on energy dissipation and acoustic emission [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1116-1122, 1128. (in Chinese))
- [5] 高保彬, 李回贵, 李化敏. 不同破坏类型岩石的声发射及分形特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 358-363. (Gao Baobin, Li Huihui, Li Huamin. Study on acoustic emission and fractal characteristics of different damage types of rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(2): 358-363. (in Chinese))
- [6] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平. 加卸载响应比理论及其在地震预测中的应用研究进展[J]. 地球物理学报, 1994, 37(增1): 223-230. (Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping. Development of load-unload response ratio theory and its application to earthquake prediction [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(Supp.1): 223-230. (in Chinese))
- [7] 王裕仓, 尹祥础, 王海涛. 地震预测的加卸载响应比岩石实验模拟[J]. 中国地震, 1998, 14(2): 126-130. (Wang Yucang, Yin Xiangchu, Wang Haitao. The simulation of rock experiment on load/unload response ratio on earthquake prediction [J]. Earthquake Research in China, 1998, 14(2): 126-130. (in Chinese))
- [8] 刘建坡. 基于声发射技术岩石破坏前兆特征实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008. (Liu Jianpo. Study on precursory characteristics of rock failure based on acoustic emission technique [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese))
- [9] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环载荷下大试件岩石破坏声发射实验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3621-3628. (Zhang Huihui, Yan Yuding, Yu Huaizhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load-fracture precursor of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3621-3628. (in Chinese))
- [10] 李世愚. 岩石断裂力学导论[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2010. (Li Shiyu. Introduction of rock fracture mechanics [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese))