

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.06.001

逐级加卸载扰动下脆性岩石加卸载响应比试验研究

祝方才¹, 谭园辉¹, 艾成才², 刘丙肖³

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中国铁塔股份有限公司 泰安市分公司, 山东 泰安 271000;
3. 湖南化工职业技术学院 会计与造价教研室, 湖南 株洲 412006)

摘要: 以某金属矿山隔离矿柱回采为工程背景, 取该矿典型矿岩进行单轴和三轴逐级加卸载扰动试验, 研究逐级加卸载扰动模式下, 利用加卸载响应比预测岩石变形破坏方法。研制了可实现声发射便捷定位的加载转换装置, 解决了三轴腔表面定位存在的干扰和信号削弱等问题。试验结果表明: 以轴向应变、声发射能量作为响应参数, 可反映岩石变形破坏过程; 单次效应和扰动平均效应2种计算方法下加卸载响应比(LURR)均存在随荷载增加而增大的趋势, 但后者不如前者明显。

关键词: 逐级加卸载扰动; 加卸载响应比; 轴向应变; 声发射

中图分类号: TD315

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)06-0001-06

An Experimental Study on Load/Unload Response Ratio of Brittle Rocks Under Graded Load / Unload Disturbance

ZHU Fangcai¹, TAN Yuanhui¹, AI Chengcai², LIU Bingxiao³

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. China Tower Tai'an City Branch Company, Tai'an Shandong 271000, China;

3. Department of Accounting and Cost, Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou Hunan 412006, China)

Abstract : With the stopping of barrier pillars in metal mines the engineering background, a graded load-unload disturbance test of typical rocks has been conducted under uni-axial and conventional triaxial compression, with load / unload response ratio (LURR) theory applied in prediction of rock deformation and failure. An apparatus for loading conversion has been designed for the location of acoustic emission (AE), thus overcoming the interruption and reduction of AE signals in the process of the location of the surface of triaxial cavity. Experimental results show that, with axial strain and acoustic emission energy the LURR parameters, the deformation and failure process of rocks can be best reflected. Compared with two calculation methods including single and accumulation ones, LURR presents increment along with an increase in load, nevertheless, with the latter not so obvious as the former.

Keywords : graded load/unload perturbation ; load/unload response ratio ; axial strain; acoustic emission

0 引言

岩石变形破坏是一非线性过程, 在此过程中岩

石的加载响应和卸载响应不同, 在接近破坏时加载响应明显增大, 据此可预测岩石破坏。尹祥础等^[1]基于这一非线性过程, 提出了加卸载响应比 (load/

收稿日期: 2016-09-13

基金项目: 湖南省自然科学基金资助重点项目 (13JJ2033)

作者简介: 祝方才 (1972-), 男, 湖北荆州人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事洞室和边坡稳定方面的教学与研究,

E-mail: zhufangcai@163.com

unload response ratio, LURR) 理论, 并将其应用于地震预测中获得了成功。近年来, LURR 理论逐渐应用于边坡和洞室稳定分析中。

冬瓜山铜矿位于安徽省铜陵市, 是典型的千米超深大型矿山, 具有高地应力、高地温特点。采用暂留隔离矿柱连续回采空场嗣后充填采矿方法, 运用先采矿房、再采矿柱、最后采隔离矿柱的三步回采方法采矿^[2]。第三个步骤回采, 即回采隔离矿柱时, 由于受前两次扰动的影响工程和地质条件相对恶劣, 原因是隔离矿柱开始回采时, 周围介质不再是高强度的矿岩, 而是强度较低的胶结充填体或全尾砂充填。在多次采动影响下, 围岩应力不断变化, 围岩可能出现失稳情况^[3]。本文通过对冬瓜山典型脆性岩石单轴和三轴轴向加卸载扰动, 将 LURR 理论引入到脆性岩石破坏的前兆分析中, 以期能对围岩失稳进行预测。

1 试验方案及加卸载试验

岩样是从冬瓜山 -760 m 水平 50 线 50-8 采场穿脉位置和出矿巷道位置处采得的大理岩, 加工后如图 1 所示。



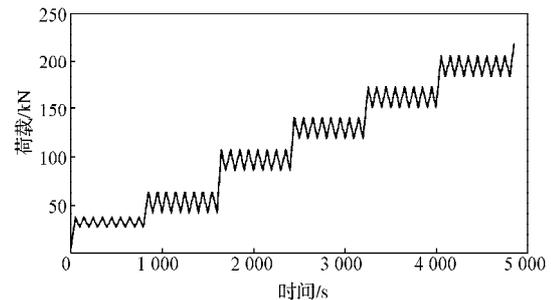
图 1 大理岩岩样

Fig. 1 Marble rock specimens

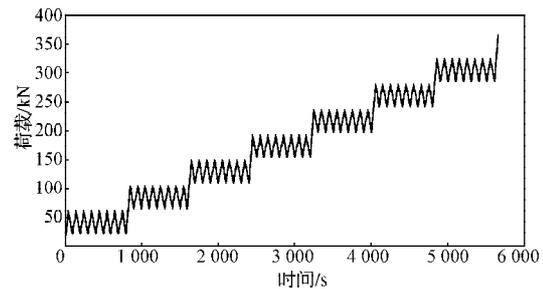
试验加载系统采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 岩石力学试验系统, 加载速率 0.01~100 kN/s, 可进行单轴和三轴逐级扰动加卸载试验。采用美国物理声学公司 (PAC) 制造的 PCI-2 声发射测试系统进行声发射测试。

为研究岩石在不同应力状态时加卸载响应特性, 进行单轴和三轴条件下轴向逐级加卸载试验。在加卸载试验前, 根据预估的岩石强度设定载荷级数, 每个级别扰动大小取极限荷载的 1/15, 约为 10.86 kN, 采用三角扰动大小方式。由 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》得知, 标准岩样单轴试验加载速率为 0.5~0.8 MPa/s。考虑到试验要测加卸载过程的声发射数据, 且声发射系统采集数据时存在一定的滞后性,

因此本文加卸载速率定为 0.25 MPa/s (即 0.5 kN/s)。试验前用位移控制方式预压 0.5 kN 的力, 使岩样端部与试验机的上下压头接触紧密; 再将加载系统转为力控制方式, 当达到预定荷载时力方式改为三角波, 扰动频率为 0.01 Hz; 然后按图 2 中的荷载大小进行加载, 循环次数为 8 次。试验结束后取出岩样, 观察岩样的破坏状态如图 3 所示。加卸载实施方式有 2 种, 一种是逐级加卸载模式, 另一种为逐级加载扰动^[4]模式, 后者相对前者而言对 LURR 可起累积放大效应, 但累积效应对岩石性质的影响有待考察。



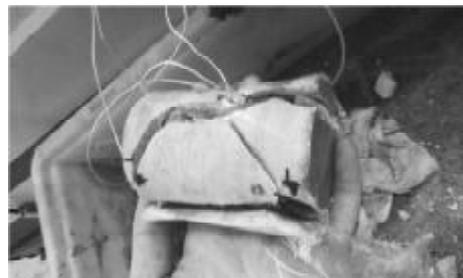
a) 单轴加卸载



b) 三轴加卸载

图 2 加卸载示意图

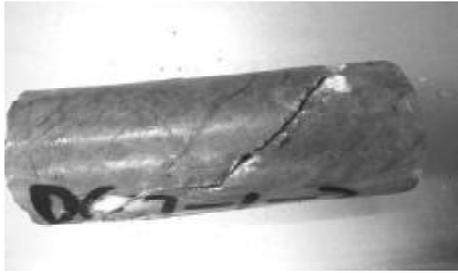
Fig. 2 Diagrams of graded load/unload process



a) 单轴压缩



b) 围压为 8 MPa 时的三轴压缩



c) 围压为 15 MPa 时的三轴压缩

图3 不同压缩条件下的大理岩岩样破坏图

Fig. 3 A physical image of marble specimen failure under different compression

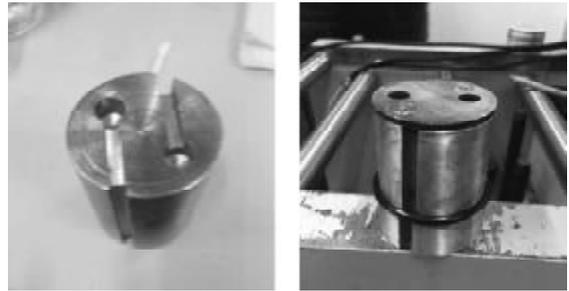
单轴和三轴试验中大理岩有 2 种, 一种单轴抗压强度约 83 MPa, 另一种约 111 MPa, 单轴试验采用前者, 三轴试验采用后者。单轴加载情况下荷载级数分别为 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 和 120% 单轴抗压强度, 三轴加载情况下则分别为 20%, 40%, 60%, 80%, 100%, 120% 和 140% 单轴抗压强度。

2 具有声发射内定位功能的加载试验装置

对岩样进行声发射试验时, 要求声发射传感器与岩样贴合紧密; 在岩石三轴室内声发射试验中, 声发射探头不便于直接布于试样上, 而将声发射传感器直接贴附于声发射系统的三轴室外壁^[5-7]。由于岩样与声发射传感器并非直接接触, 不同介质之间的声波传递会因传输距离增大、传播路径复杂出现较大损耗和失真, 使得接收到的事件数及能量削弱, 无法获得可靠的声发射信息。同时声发射传感器置于外壁时, 易受到试验设备以及周围环境的电磁及噪音干扰而进一步影响结果准确性。针对上述不足, 研制了一套用于三轴声发射试验的加载头, 如图 4 所示。

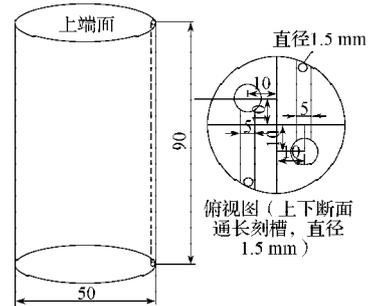
上、下压头所用材质为不锈钢, 均为圆柱体。上压头为 $\Phi 50 \text{ mm} \times H 90 \text{ mm}$; 下压头上部为 $\Phi 50 \text{ mm} \times H 45 \text{ mm}$ 的圆柱体, 下部为 $\Phi 53 \text{ mm} \times H 20 \text{ mm}$ 的圆柱体, 中间套一皮垫来缓冲三轴室的底座冲击力, 从而能精确地固定在三轴机架的底座上。为固定声发射探头, 以距离端面圆心 14.14 mm 的 2 个点为圆心对称挖除 2 个端面 $\Phi 10 \text{ mm} \times H 10 \text{ mm}$ 的圆柱体。此外端面以及圆周面上还加工了一条边长 5 mm 的矩形线槽用来将传感器的线引到三轴室外面。同时为了防止端面线槽尺寸大而造成试验断部受力集中, 专门加工了厚 3 mm 的压片, 同样开挖两个 $\Phi 10 \text{ mm}$ 的小孔, 并通过攻丝将压片与压头固定在一起, 以避免传感器由于试验扭转等造成损坏。底部用橡胶材料填垫, 周围缝隙用橡皮泥封堵, 这样既可保证传感器采集面紧贴试样端面, 又可保证传感器可承受岩样变形挤

压后弹性回缩而不致损坏。

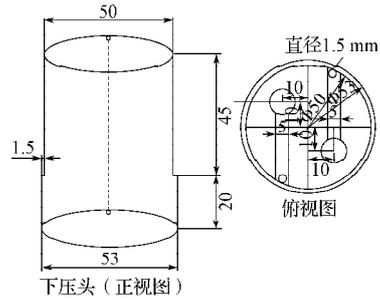


a) 上压头实物

b) 下压头实物



c) 上压头尺寸



d) 下压头尺寸

图4 声发射定位专用加载头

Fig. 4 Special loading heads for the location of acoustic emission

3 试验结果分析

3.1 加卸载响应比特征

LURR 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。响应率可以定义为 $X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P}$, 其中 ΔP 和 ΔR 分别表示载荷 P 和响应 R 的增量。

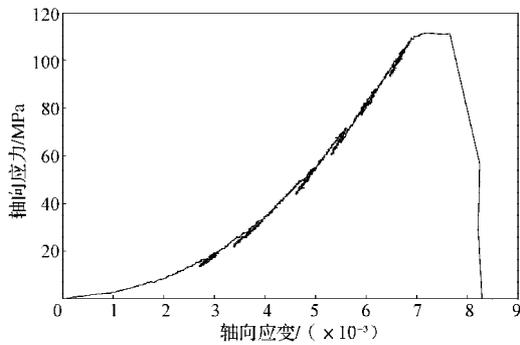
以轴向应力与声发射能量为例, 计算的一个加卸载响应比, 如表 1 所示。以轴向应变和发射能量作为岩样轴向加卸载扰动下的响应参数, 来反映岩样的变形破坏过程。

单轴压缩下大理岩的加卸载响应特征如图 5 所示, 其中图 5b 和 5c 为单次加卸载的 LURR, 图 5d 和 5e 为考虑累积效应计算的 LURR。

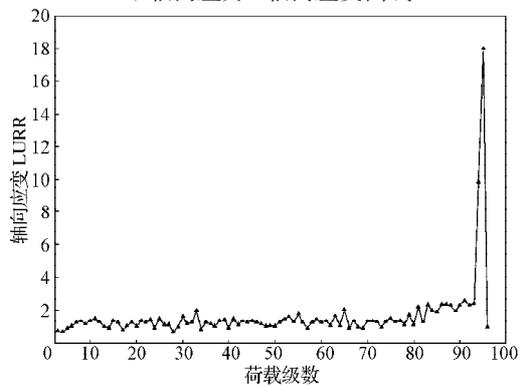
表1 加卸载响应比计算结果

Table 1 Loading/unloading response ratio calculation

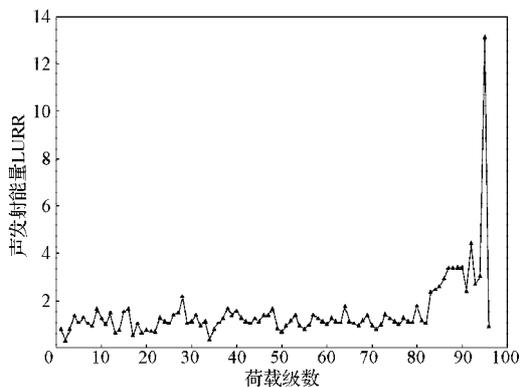
应力 /MPa	ΔP_+	ΔP_-	声发射能量数	ΔR_+	ΔR_-	X_+	X_-	LURR
31.66			42 222					
31.99	0.33	0.53	42 676	454	294	1 375.76	554.72	2.48
31.46			42 382					



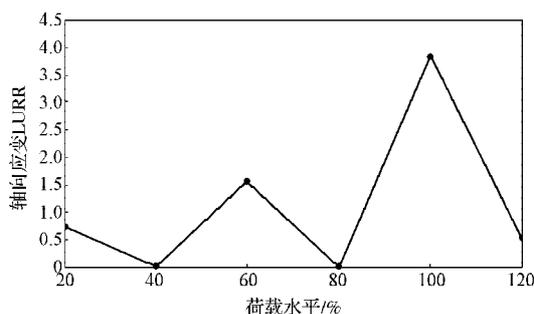
a) 轴向应力-轴向应变曲线



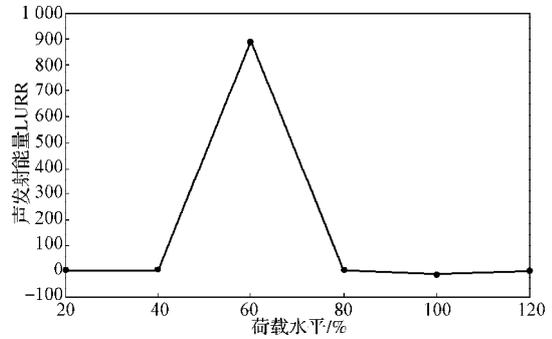
b) 轴向应变 LURR-荷载级数曲线



c) 声发射能量 LURR-荷载级数曲线



d) 考虑累积效应的轴向应变 LURR-荷载水平曲线



e) 考虑累积效应的声发射能量 LURR-荷载水平曲线

图5 单轴压缩下大理岩加卸载响应特征

Fig. 5 Response of marble specimen under an uniaxial compression

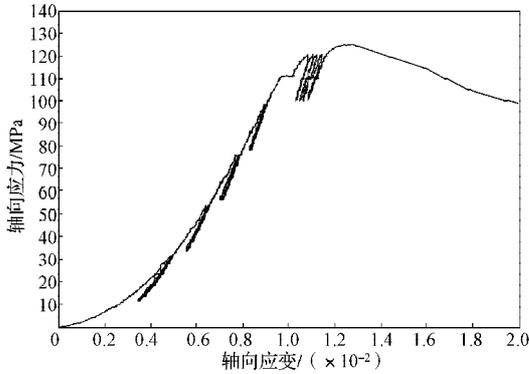
由图 5b 和 5c 可知, 荷载初期加载变化量和卸载变化量相同, 此时 LURR 在 1~2 之间波动。随荷载增大岩石内部微裂隙逐渐增多, 加卸载响应比值逐渐增大。LURR 在 75 级荷载后略有增大, 在 94 级荷载时 LURR 达到最大值, 随后岩样发生破坏, 此时 LURR 急剧回落。由此可知, LURR 反映了岩石变形破坏过程, 在峰值附近出现剧烈波动, 反映了峰值附近岩石剧烈破坏这一特征, 特别是破坏后岩石已失去完整性, LURR 值则无法反映破坏后情况。

由图 5d 和 5e 可知, 若考虑将扰动效应进行累积平均, 加载过程中 LURR 值有类似图 5b 和 5c 的变化趋势, 但在荷载中期可能出现较大值。可能的原因是由于岩石试件表面剥落导致的声发射 LURR 出现异常情况, 这需要在试验分析中注意观察。

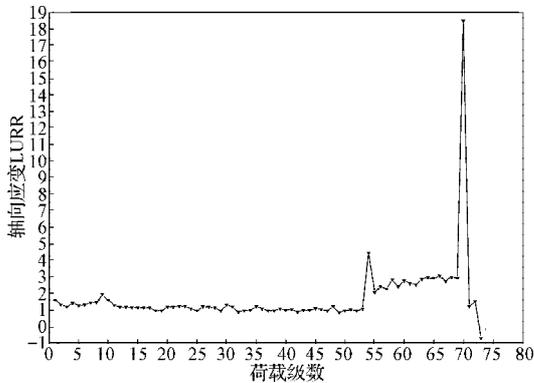
三轴加载条件下岩石加卸载响应特征与单轴条件下类似, 试验得到了 2 种围压 8 MPa (5 级荷载即破坏) 和 15 MPa 情况下的加卸载响应特征, 如图 6~7 所示。其中图 6b、图 6c 和图 7a、图 7b 为单次加卸载的 LURR, 图 6d、图 6e 和图 7c、图 7d 为考虑累积效应计算的 LURR。

由图 6b 和图 6c 可知, 在 10 级荷载前, 由于施加围压, 岩样孔隙裂隙加密, 岩样为非线性变形, LURR 在 1.5~2.5 之间波动。随后岩样进入弹性阶段, LURR 值稳定在 1 左右。随着荷载级数的逐渐加大, 岩石内部微裂隙逐渐增多, 导致试件稳定性下降。52 级荷载时, LURR 值突增到 5.5, 随后稳定在 3~5 之间。随着荷载级数的继续加大, 岩样抵抗失稳破坏的能力下降, 此时同样大小的加卸载荷载, 岩样的响应增

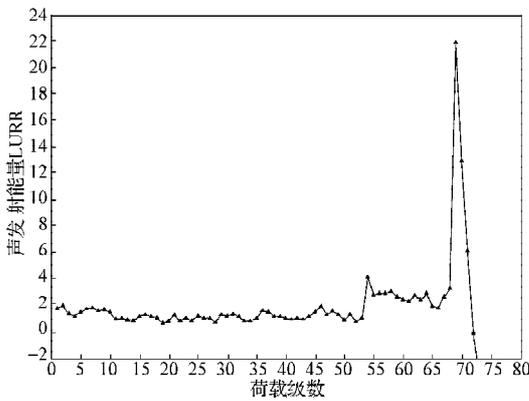
大, 岩样的临界敏感性增大, 在岩样破坏前, LURR 同样有突然增大又迅速回落的过程。图 6d, 6e 是考虑扰动累积效应时的 LURR 值, 也较好地反映了岩石的变形破坏过程。



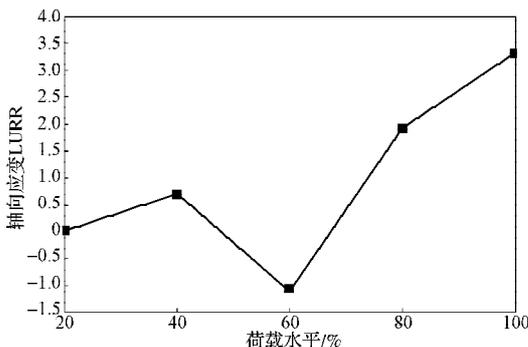
a) 轴向应力-轴向应变曲线



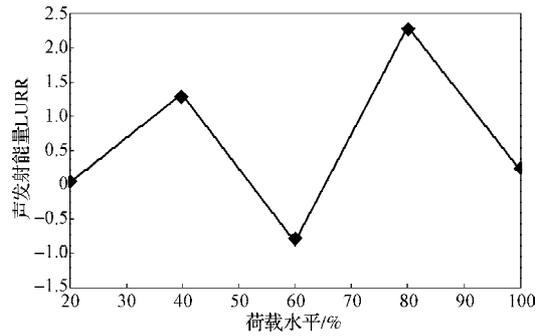
b) 轴向应变 LURR-荷载级数曲线



c) 声发射能量 LURR-荷载级数曲线



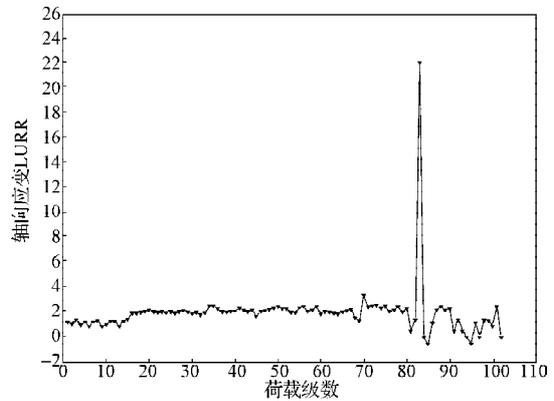
d) 考虑累积效应的轴向应变 LURR-荷载水平曲线



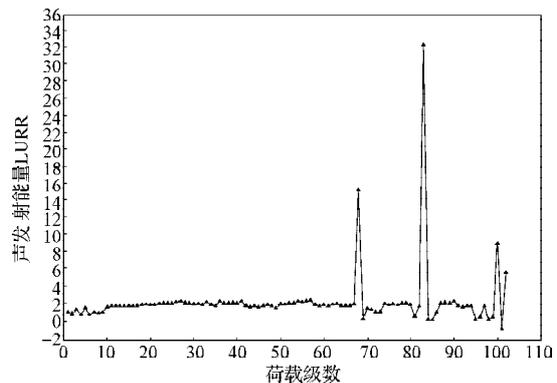
e) 考虑累积效应的声发射能量 LURR-荷载水平曲线
图 6 8 MPa 围压下大理岩加卸载响应特征

Fig. 6 Response of marble specimen under a conventional triaxial compression with 8 MPa the confining pressure

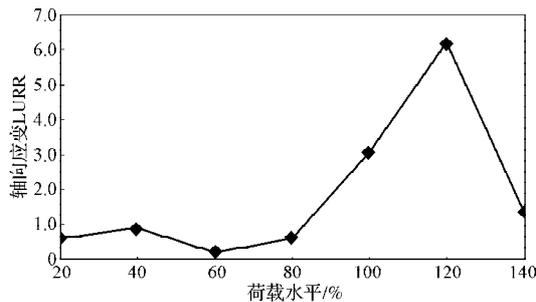
图 7a 和图 7b 是分别以轴向应变和声发射能量作为响应求出的 LURR。后者与前者不同之处在于, 70 级荷载时 LURR 值有小范围突增, 这是因为随着荷载水平的不断提高, 岩石内部损伤累计, 微裂隙增大, 岩样内部发生局部破坏。但在围压作用下仍处于压密状态故而能继续承载。岩样内部的这些变化发出的声发射波被传感器检测到, 因此算出的 LURR 值有小幅度的突增。LURR 值在 83 级荷载时出现突然增大又急剧回落的过程, 随后岩样发生宏观破坏, 两种参数作为响应得出的结论较为一致。图 7c 和图 7d 中考虑扰动累积效应时的 LURR 值同样反映了岩石变形破坏过程。



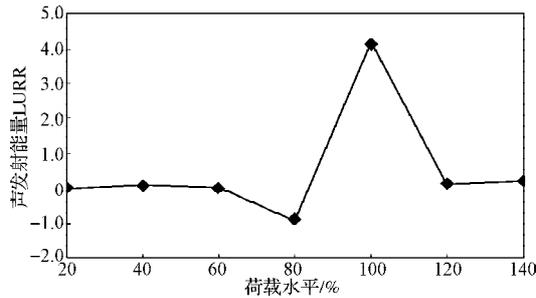
a) 轴向应变 LURR-荷载级数曲线



b) 声发射能量 LURR-荷载级数曲线



c) 考虑累积效应的轴向应变 LURR-荷载水平曲线



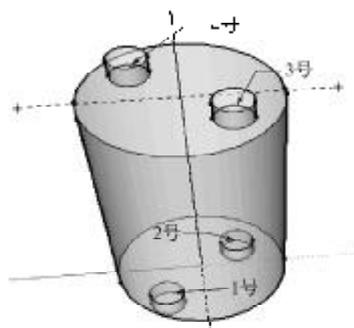
d) 考虑累积效应的声发射能量 LURR-荷载水平曲线

图 7 15 MPa 围压时大理岩加卸载响应特征

Fig. 7 Response of marble specimen under a conventional triaxial compression with 15 MPa the confining pressure

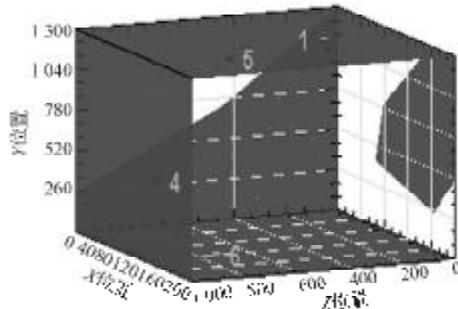
3.2 声发射定位分析

三轴声发射定位软件设置与单轴相同, 通过本文设计加工的上下压头, 共放置 4 个声发射传感器, 如图 8a 所示, 声发射定位事件数如图 8b 所示。



a) 声发射传感器布置图

Z位置对Y位置、Y位置对X位置、所有通道、定位叫



b) 声发射定位事件数

图 8 声发射传感器布置及 8 MPa 围压声发射定位结果

Fig. 8 Layout of AE sensor and location of AE with 8 MPa the confining pressure

1, 2 号传感器装在下压头上与岩样下端面接触, 3, 4 号传感器装在上压头上与岩样上端面接触。上下断面传感器连线成垂直状态, 以保证两端面传感器在不同平面, 从而满足三维定位要求。由于标准岩样的断面面积和声发射传感器的尺寸限制, 上下压头共放置 4 个传感器, 三维定位至少也需要 4 个声发射传感器。造成试验事件数偏少的原因可能是其中某个传感器在岩样加卸载过程中接触不紧密或有损坏。

由图 8b 可知, 初始加载时, 上端部声发射比较集中, 同时由于围压的作用, 在岩样圆周面附近也出现了比较分散的事件数。围压加载到恒定值时轴压在 30 MPa 左右, 此时声发射事件在试件内呈分散分布, 尚不足以反映试件破坏过程, 其主要原因是该声发射系统只配备了长方体定位, 无法进行圆柱体定位, 这还需要进一步改进。

4 结语

通过室内岩石单轴和三轴逐级加卸载扰动试验, 研究了岩石应变和声发射能量的加卸载响应比特征, 并分析了单次和累积效应条件下的 LURR 特征。试验结果表明, 单次统计效果较好, 累积效应也能反映岩石变形破坏过程。

介绍了课题组研制的单三轴条件下声发射定位加载转换装置, 并应用于试验中, 解决了三轴腔表面定位存在的干扰和信号削弱等问题。

参考文献:

[1] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比: 一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, 1994, 37(6): 767-775.
 YIN Xiangchu, CHEN Xuezhong, SONG Zhiping, et al. The Load-Unload Response Theory: A New Approach to Earthquake Prediction[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(6): 767-775.

[2] 李冬青, 王李管. 深井硬岩大规模开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 108-109.
 LI Dongqing, WANG Liguan. Theory and Technology of the Massive Mining in Deep Metal Mines[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 108-109.

[3] 张良贵. 多步骤回采时采场底部结构稳定性监测与分析[J]. 现代矿业, 2014(6): 90-91, 97.
 ZHANG Lianggui. Monitoring and Analysis on the Stability of the Bottom Structural of the Stope of Multi-Step Stopping [J]. Modern Mining, 2014 (6): 90-91, 97.