

文章编号: 1673-3363-(2014)05-0788-07

加卸荷条件下胶结充填体声发射 b 值特征研究

龚鹂¹, 李长洪¹, 赵奎²

(1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 土木与环境工程学院, 北京 100083;

2. 江西理工大学工程研究院, 江西 赣州 341000)

摘要 为认识胶结充填体在外界扰动下的响应特征, 进行了单轴循环加卸载试验, 研究了胶结充填体在加-卸载过程中声发射 b 值特征。试验结果表明: 在胶结充填体压密阶段, 声发射 b 值先减小后增大; 在弹性阶段, 声发射 b 值随应力的增大而有序下降; 经多次加卸载后, 当加载应力不断接近峰值应力时, 声发射 b 值持续大幅度减小。在卸载阶段, 胶结充填体具有明显的声发射事件。当卸载始于压密阶段时, 声发射 b 值是逐渐增大的; 当卸载始于弹性阶段时, 声发射 b 值在小范围内波动; 当卸载始于胶结充填体临界状态时, 声发射 b 值呈现“台阶”状上升。声发射 b 值数值表现出的不同特征, 说明在加卸载过程中微破裂处于动态演化之中。

关键词 胶结充填体; 加载; 卸载; 声发射 b 值

中图分类号 TU 45

文献标志码 A

Experimental study on b -value characteristics of acoustic emission of cemented filling body under loading and unloading test

GONG Cong¹, LI Changhong¹, ZHAO Kui²

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education of China for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Engineering Institute, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract In order to study the response characteristics of cemented filling body under external disturbance, the studies have been carried out by virtue of uniaxial cyclic loading and unloading tests on cemented filling body, and the b -value characteristics of acoustic emission (AE) of cemented filling body is examined. The results show that, during the compression phase, the b -value decreases firstly and then increases. By contrast, the b -value declines orderly as stress increases in elastic stage. After undergoing repeated loading and unloading, the b -value reduces greatly as loading stress approaches to the peak stress. Similarly, The AE events are obvious in unloading process. The b -value increases gradually when unloading is started from compressing phase. And when unloading is started from elastic phase, the b -value fluctuates in a small range respectively. Finally, the b -value appears step-increasing trend when unloading is started at critical state of cemented filling body. The different b -value characteristics indicates that the occurrence of micro crack is in dynamic evolution during loading and unloading process.

Key words cemented filling body; loading; unloading; b -value of acoustic emission

收稿日期: 2013-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51064010, 50364012); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731500)

作者简介: 龚鹂(1985—), 男, 江西省南昌县人, 博士研究生, 从事岩石力学与岩层控制方面的研究。

通信作者: 李长洪

E-mail: lch@ustb.edu.cn

Tel: 13701252926

岩石类材料在不同的外界荷载作用下, 其力学性能以及由此所引起的各种外在响应存在一定的差异性。对于岩石(体)和其他相关结构单元而言, 受开挖、爆破等因素的影响, 它们处于反复加卸载过程中; 因此, 研究它们在加卸载条件下性状变化特征具有重要意义。

文献[1]的研究表明: 岩体在加卸载条件下的力学特性有本质的区别。文献[2]对灰岩进行了卸围压试验, 着重研究了卸载速度对岩体破坏形式与破坏应力差的影响。文献[3]研究了卸载速率对试件强度的影响, 并提出屈服接近速率这一概念来表征加载和卸载下的应力增加或减小的速率。文献[4]进行了循环加卸载试验, 得到砂岩动应变、动弹性模量、阻尼的变化特征。文献[5]研究了不同围压、不同卸载量下红砂岩弹性模量的变化特征。文献[6]研究了红砂岩在单轴循环加卸载条件下的可释放弹性应变能与耗散能的演化及分配规律。文献[7]研究了花岗岩耗散能与岩样破坏形式的关系, 发现岩样发生延性破坏所耗散的能量大于脆性破坏所耗散的能量。在声发射研究方面, 文献[8-9]对盐岩和砂岩进行了周期荷载试验, 结果表明: 盐岩声发射主要出现在加载阶段与卸载初期; 而对砂岩而言, 应力上限的改变对其声发射影响显著, 主要表现在声发射的发展模式上。文献[10]研究了不同加载方式下砂岩的声发射特征, 研究结果表明: 在单轴压缩条件下岩样在变形的不同阶段具有不同的声发射特征; 而在常规三轴试验下, 岩样声发射主要出现在屈服阶段和卸围压阶段。文献[11]分析了大理岩在常规三轴试验与卸围压试验中的声发射特性, 发现声发射幅值随着围压的增大而增大, 最大振铃计数率和最大能率出现在峰值后; 而在卸围压试验中, 大理岩声发射率与能率会突然增大。文献[12]研究发现: 砂卡岩声发射曲线大致可分为4个阶段; 而在循环加卸载条件下, 费拉西蒂比随循环次数的增多而减小, 并且在卸载过程中仍有大量的声发射现象。文献[13]研究发现: 煤样在分级加载条件下, 声发射主频在恒载阶段最小, 加载初期次之; 而在卸载过程中声发射主频经历了先增大而后下降的过程。文献[14]得到砂岩在初始压密阶段、弹性阶段、应变硬化阶段、应变软化阶段的声发射能量与振幅特征。文献[15]通过对花岗岩、大理岩、砂岩的研究发现, 声发射分形维数与 b 值在岩样接近破坏时快速下降至最低点, 并将此作为岩样即将破坏失稳的

前兆特征。文献[16]运用卸载理论讨论了岩石破坏过程中的声发射特征, 认为卸载响应比接近1时可作为岩石破坏失稳的前兆特征。

伴随着无废开采技术的发展, 胶结充填采矿法在金属矿山的应用比重逐步增大, 如武山铜矿、永平铜矿、冶山铁矿均采用胶结充填采矿法, 并且胶结充填体灰砂比为1:4。胶结充填体作为胶结充填采矿法中一个重要的结构单元, 对维护采场稳定、预防大规模地压活动具有重要作用。目前, 对胶结充填体的研究主要集中在充填材料的选择与配比设计、充填体强度的确定, 以及充填体力学特性等方面, 文献[17]研究了下向分层充填法中充填体的破坏模式与变形特征; 文献[18]分析了单轴拉伸条件下不同配比充填体力学性质的变化规律。然而, 对充填体在外界扰动下的声发射特征确定鲜有报道。本文对灰砂比为1:4的胶结充填体进行了单轴循环加卸载试验; 结合能量分析, 讨论了加卸载过程中胶结充填体的声发射参数变化特征; 在此基础上, 研究了加卸载过程中声发射 b 值的变化特征。

1 试验条件与方案

1.1 试验系统

试验系统由中国科学院武汉岩土力学研究所研制的RMT-150C岩石力学试验系统与北京声华兴业有限公司研制的SAEU2S数字声发射系统组成。其中: RMT-150C岩石力学试验系统最大荷载为1 000 kN, 活塞行程50 mm, 机架刚度 5×10^6 N/mm; SAEU2S声发射系统为多通道构成的声发射系统, 能实时采集声发射信号。

1.2 试验方案

试验中, 胶结充填体骨料取自某矿山分级尾砂, 粒径为200目。胶结材料为32.5号水泥; 试件灰砂比为1:4, 质量分数为71%, 尺寸为50 mm×100 mm。试验采用保持应力下限不变, 逐步提高应力上限的变幅循环加卸载方式。根据胶结充填体单轴抗压试验结果, 试验共分4次加载: 前3次加载的应力上限分别为胶结充填体强度的40%, 60%, 80%; 第4次加载至胶结充填体破坏。加、卸载速率均为0.01 kN/s。每次卸载应力约为充填体强度的10%。试验中, 声发射采样长度设置为2 048 Byte, 采样间隔为60 μ s, 前放增益为40 dB。声发射传感器型号为SR150M, 工作频率为60~400 kHz, 中心频率为150 kHz。试验测试系统见图1。

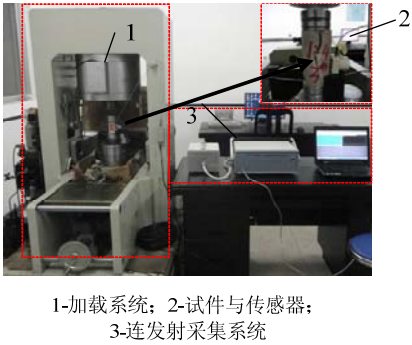


图 1 试验测试系统
Fig.1 Measurement system for experiment

2 结果分析

2.1 能量演化及分配规律

胶结充填体在外界载荷作用下的损伤破坏，其实质为能量耗散与释放的过程。因此，了解认识充填体能量演化及其分配规律有助于认识胶结充填体的声发射特征。图 2 为 14-8[#]试件应力-应变曲线，从图中可以看出：当一次加载完成，而后对胶结充填体进行卸载时，加载曲线与卸载曲线并不重合，表现为卸载曲线会低于加载曲线。在不计加卸载过程中各种能量损耗的条件下，根据能量守恒可知：加载曲线下方的面积为外界对胶结充填体所做的功；卸载曲线下方的面积为胶结充填在卸载过程中

所释放的弹性应变能。它们两者之间的差值为胶结充填体在加卸载过程中的耗散能。可释放应变能与耗散能的关系见图 3。

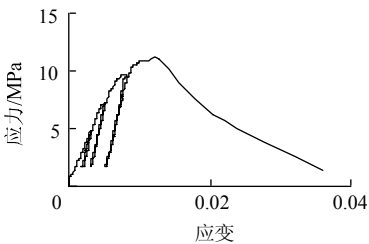


图 2 应力-应变曲线
Fig.2 Strain-stress curve

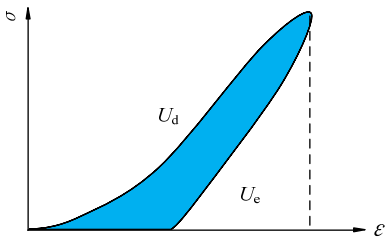


图 3 可释放应变能与耗散能关系
Fig.3 Relationship between releasable strain energy and dissipated energy

通过对加卸载曲线进行多项式拟合，而后对拟合曲线进行积分，得到可释放应变能 U_d 与耗散能 U_e 的数值大小，见表 1。

表 1 循环加卸载过程中耗散能与可释放应变能
Table 1 Dissipated energy and releasable strain energy under loading-unloading process

编号	耗散能 $U_d/(10^{-6}J\cdot mm^{-3})$			可释放应变能 $U_e/(10^{-6}J\cdot mm^{-3})$			耗散能 U_d /可释放应变能 U_e		
	第 1 个循环	第 2 个循环	第 3 个循环	第 1 个循环	第 2 个循环	第 3 个循环	第 1 个循环	第 2 个循环	第 3 个循环
14-3	9.030	9.463	25.759	2.668	9.363	15.333	3.385	1.011	1.680
14-4	3.575	4.991	7.561	1.739	4.735	6.621	2.056	1.054	1.142
14-5	2.701	3.614	9.880	2.216	3.585	7.328	1.219	1.008	1.348
14-6	4.127	5.054	13.329	1.780	4.912	7.797	2.318	1.029	1.709
14-7	4.518	6.786	13.183	2.913	5.163	6.939	1.551	1.314	1.900
14-8	2.968	3.046	6.432	2.155	3.670	6.163	1.377	0.830	1.044
14-9	3.552	5.651	10.916	1.864	4.870	6.651	1.905	1.160	1.641

图 4, 5 为各试件在每个循环中对应的可释放应变能与耗散能特征曲线，从图中可以看出：可释放应变能随着循环周次与加载上限应力水平的提高而呈现近似线性增长；在第 3 个循环中，加载应力接近胶结充填体峰值应力时，各试件(14-3[#]试件除外)可释放应变能约为 $6.0\times 10^{-6}J/mm^3$ ，说明每个胶结充填体在临近破坏时都有一个储能极限；同样，在第 1 个循环中，加载上限应力水平约为 0.4 时，各试件耗散能约为 $4.8\times 10^{-6}J/mm^3$ ，说明在胶结充填体微裂纹压密阶段所消耗的能量也趋于一致。

图 6 给出了各试件在每个循环中耗散能与可释放应变能比值曲线，从图中可以看出：耗散能与可释放应变能比值曲线总体呈现“V”形，说明在第 1 个循环中，胶结充填体在微裂纹压密阶段所耗散的能量占主导地位；而在第 2 个循环中，可释放应变能的比重增大，其数值也与耗散能相当；在第 3 个循环中，耗散能与可释放应变能比值曲线上扬，耗散能再次占主导地位，表明外界对胶结充填体所做功，主要用于微裂纹发展、汇集与贯通。

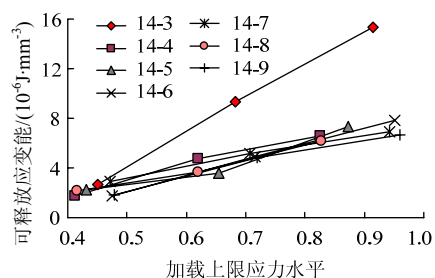


图4 应力水平-可释放应变能曲线

Fig.4 Relationship between stress level and releasable strain energy

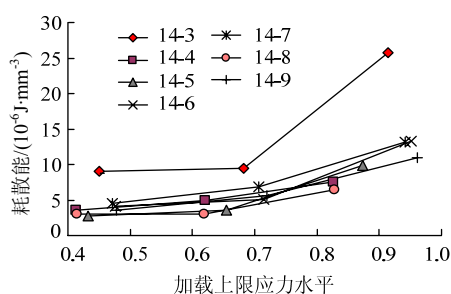


图5 应力水平-耗散能曲线

Fig.5 Relationship between stress level and dissipated energy

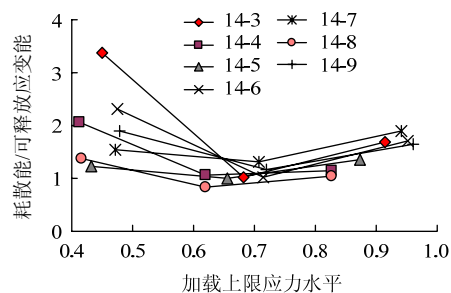


图6 应力水平-耗散能/可释放应变能曲线

Fig.6 Relationship between stress level and dissipated energy/ releasable strain energy

2.2 特征参数变化特征

本文对应变进行了归一化处理^[19]。在胶结充填体加载过程中, 取 K_+ 为 X 轴数值, 并定义为

$$K_+ = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}, K_+ \in [0, 1] \quad (1)$$

式中: ε 为每个循环加载过程中胶结充填体实时应变值; ε_{\min} 为加载过程中胶结充填体最小应变值; ε_{\max} 为加载过程中胶结充填体最大应变值。

在卸载过程中, 取 K 为 X 轴数值, 并定义为

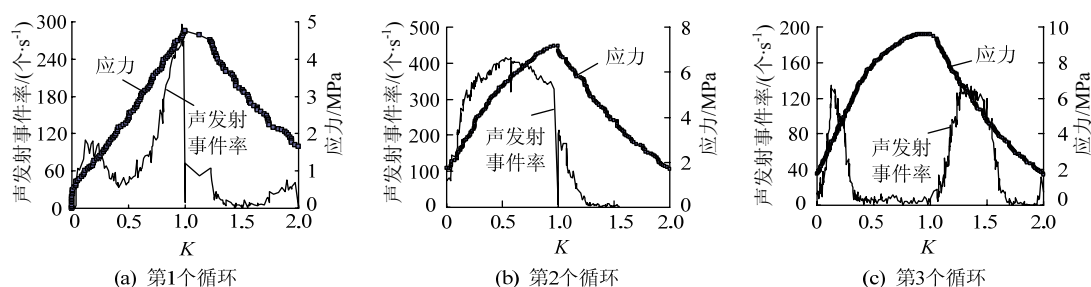
$$K_- = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} + 1, K_- \in [1, 2] \quad (2)$$

式中: ε 为每个循环卸载过程中胶结充填体实时应变值; ε_{\min} 为卸载过程中胶结充填体最小应变值; ε_{\max} 为卸载过程中胶结充填体最大应变值。

因此, 在每一个循环加卸载过程中, $K \in [0, 2]$ 。

图7给出典型试件(14-5[#]试件)在加-卸载过程中声发射事件率特征曲线, 从图中可知: 在压密阶段初期声发射事件明显, 而后随着加载应力的增大, 声发射事件率呈现线性增长的态势; 在弹性阶段, 声发射事件率伴随应力的增大而快速增长, 但在加载后期其数值略有下降, 说明胶结充填体内部微裂纹得到较为充分的发展; 第3次加载应力上限约为胶结充填体峰值应力的90%, 声发射事件率在加载初期依然保持快速增长, 但随着应力的增大胶结充填体出现声发射平静期, 此时对应的应力约为峰值应力的63%~90% (K 约为0.35~1.00)。

对比3个循环卸载过程声发射事件率曲线可以发现: 胶结充填体在压密阶段和弹性阶段卸载时, 其声发射事件率总体随着应力的减小而减小; 当卸载开始于临界状态时, 声发射事件率先随应力的减小而增大, 而后又逐步减小; 并且有声发射事件率增大所对应的应力区间与声发射平静期所对应的应力区间是一致的。即在应力约为胶结充填体峰值的63%~90%时, 在加载阶段出现声发射平静期; 而在卸载阶段随着应力的减小声发射事件率是增大的。

图7 14-5[#]试件加-卸载过程事件率曲线Fig.7 Curve of AE rate under loading-unloading process for 14-5[#] specimen

与图 7 对应, 图 8 为 14-5[#]试件加-卸载过程中声发射能率变化曲线。从图中可以看出: 在压密阶段初期, 声发射能率明显大于后期压密阶段, 说明在胶结充填体压密阶段, 声发射声源性质有所不同。在弹性阶段, 声发射能率先经历一个增长的过程, 而后进入一个下降的过程。在第 3 次加载过程中, 声发射能率一个明显的特征是: 对应于声发射

平静期, 声发射能率出现激烈的振荡。说明胶结充填体微裂纹进入了非稳定破裂发展阶段。与加载阶段相比, 在卸载阶段, 随着应力的减小, 声发射能率总体是下降的。但在第 1 次卸载的后期, 声发射能率有较为显著的增大; 其原因在于, 在相对低应力水平卸载时, 胶结充填体颗粒层面间结构得到了局部恢复与重新调整。

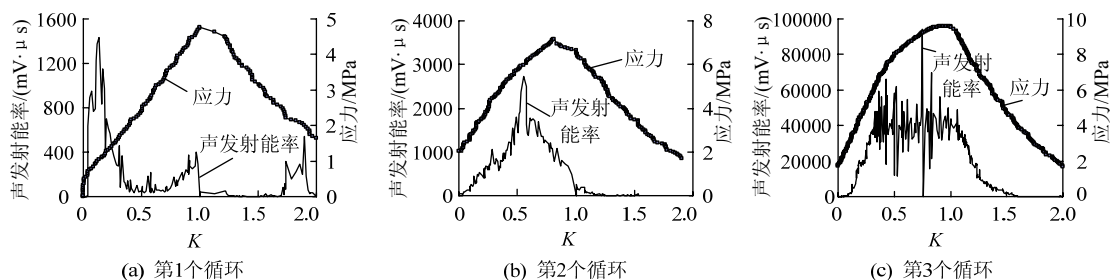


图 8 14-5[#]试件加-卸载过程能率曲线

Fig.8 Curve of AE energy rate under loading-unloading process for 14-5[#] specimen

2.3 声发射 b 值特征

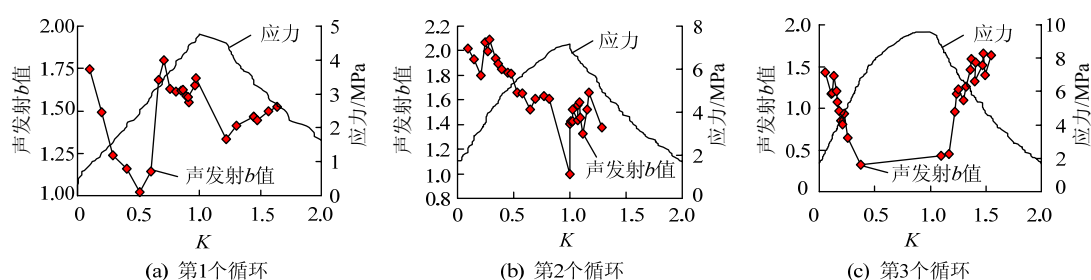
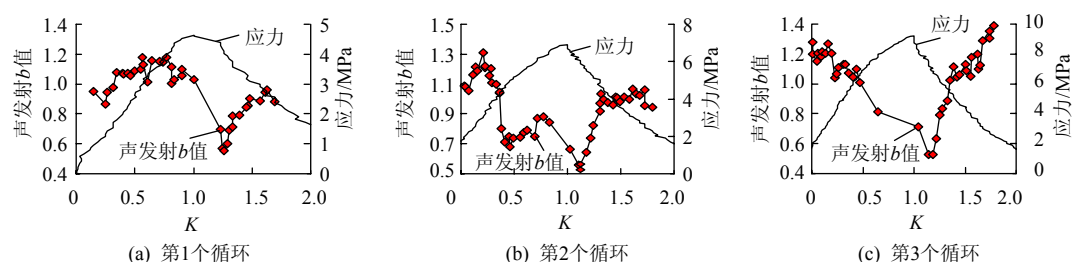
Gutenberg 与 Richter 于 1941 年提出了著名的地震震级与频率之间的统计关系式

$$\lg N = a - bM \quad (3)$$

式中: M 为震级; N 为震级在 ΔM 中地震频度; a , b 为常数, 其中 b 值是相对震级分布的函数。本文以声发射振幅“代替”地震震级 M 来计算 b 值; 因此, b 值是裂纹扩展尺度的函数, 并且其动态变化特征具有直接的物理意义。本文采用最小二乘法计算 b 值。每次以 1 000 个声发射振幅数据为采样窗口, 滑动窗口取 500, 震级间隔 ΔM 取 0.2 dB。在数据处理过程中, 以每个采样窗口的中间时刻作为 b 值的标度。

图 9, 10 给出 14-5[#]试件与 14-8[#]试件在加-卸载过程中声发射 b 值特征曲线, 从图中可以看出: 两试件在加-卸载过程中的声发射 b 值变化特征趋于一致; 因此, 本文仅对 14-5[#]试件进行相关的论述。图 9a 显示: 在初始压密阶段, 声发射 b 值随应力的增大而较大幅度减小。根据声发射事件率与声发射能率的变化特征, 说明此时胶结充填体大尺度的破坏比例大, 并且这种破坏主要是由胶结充填体内部大孔洞发生位错所引起的; 而后, 在 K 值约为 0.5~0.7 时, 声发射 b 值发生跃迁, 说明胶结充填体内部微破裂状态发生了突然的变化, 小尺度破坏的比例增加; 随着应力进一步增大, 声发射 b 值基本稳定在 1.60, 反映的是胶结充填体内部微破裂发展比较恒定。图 9b 为 14-5[#]试件在第 2 次加-卸载过程

中声发射 b 值特征曲线。本次加载上限应力为 7.17 MPa, 约为胶结充填体峰值应力的 65%, 胶结充填体主要处于弹性阶段。从图中可以看出: 声发射 b 在加载前期出现一小的波动; 而后, K 值在 0.21~0.60 范围内, 声发射 b 值从 2.1 逐步有序下降为 1.6, 说明胶结充填微破裂逐渐由小尺度破坏向大尺度破坏转化; 随后, 声发射 b 值大小几乎恒定不变。第 3 次加载上限应力为 9.57 MPa, 约为胶结充填体峰值应力的 90%。从图 9c 可以看出: K 值在 0.5~1.0 范围内时, 应力曲线向下“凹”, 胶结充填体存在较为明显的塑性变形。通过对声发射事件率与能率分析可知, 此阶段出现声发射出现平静期, 但声发射能率大; 而此时的声发射 b 值持续地下降, 其最小值约为 0.3, 说明胶结充填体进入大尺度的破裂过程之中。在卸载过程中, 当卸载始于胶结充填体压密阶段时, 其声发射 b 值是逐步增大的, 小尺度的破裂比重增大, 见图 9a; 当卸载始于胶结充填体弹性阶段时, 声发射 b 值在小范围内波动, 说明微破裂演化缓慢, 见图 9b; 而当卸载始于胶结充填体临界状态附近时, 声发射 b 值呈现“台阶状”, 见图 9c。即在起始卸载阶段, 声发射 b 值较小, 体现的是大尺度的破坏; 随后, 声发射 b 值逐级跃升, 说明充填体内部微破裂尺度逐步减小; 随着声发射 b 值的进一步跃升, 破裂在更小的尺度发生。至此, 胶结充填体的大部分区域分布着不同尺度的破坏, 胶结充填体损伤恶化。

图9 14-5[#]试件加-卸载过程 b 值曲线Fig.9 Curve of AE b -value under loading-unloading process for 14-5[#] specimen图10 14-8[#]试件加-卸载过程 b 值曲线Fig.10 Curve of AE b -value under loading-unloading process for 14-8[#] specimen

3 结 论

1) 在循环加卸载条件下,胶结充填体可释放应变能与耗散能随应力上限与加卸载次数的增加而增大。在压密阶段,外界对胶结充填体所做功主要以颗粒之间发生位错的形式而被消耗,此时耗散能占主要地位;而在弹性阶段,可释放应变能的比重增大。当胶结充填体临近破坏时,充填体试件所存储的可释放应变能数值趋于一致。

2) 声发射 b 值的演化特征与微裂纹演化有关。在压密阶段,初期声发射能率明显大于后期,声发射 b 值数值先减小,而后发生跃迁,最后又趋于稳定,说明胶结充填体在压密阶段前期主要以较大尺度的破坏为主;之后,小尺度的破坏比重增大;在压密阶段的后期,不同尺度的破坏处于稳定发展之中。在弹性阶段,声发射 b 值随着应力的增大而逐步有序地减小,说明微破裂尺度逐渐增大。当加载应力不断接近峰值应力时,声发射能率出现激烈振荡,声发射 b 值持续大幅减小,胶结充填体进入大尺度的破裂之中。

3) 在卸载阶段,声发射 b 值数值表现出较强的规律性:当卸载始于压密阶段时,声发射 b 值是逐渐增大的,胶结充填体主要以小尺度的破坏为主;当卸载始于弹性阶段时,声发射 b 值在小范围内波动,说明微破裂演化缓慢;当卸载始于胶结充填体临界状态时,声发射 b 值呈现“台阶”状上升,说

明在此卸载过程中,胶结充填体进入不同尺度的破裂之中。

参考文献:

- [1] 哈秋龄. 加载岩体力学与卸荷岩体力学[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 114.
HA Qiuling. Loading and unloading rock masses mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 114.
- [2] 王在泉, 张黎明, 孙辉, 等. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1045-1050.
WANG Zaiquan, ZHANG Liming, SUN Hui, et al. Experimental study of mechanical properties of limestone under different unloading velocities[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1045-1050.
- [3] 张凯, 周辉, 潘鹏志, 等. 不同卸荷速率下岩石强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2072-2078.
ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2072-2078.
- [4] 刘建锋, 谢和平, 徐进, 等. 循环荷载作用下岩石阻尼特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 712-717.
LIU Jianfeng, XIE Heping, XU Jin, et al. Experimental study on damping characteristics of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 712-717.
- [5] 王瑞红, 蒋昱州, 刘杰, 等. 循环加卸载对砂岩变形

- 特征影响试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 231-235.
- WANG Ruihong, JIANG Yuzhou, LIU Jie, et al. Experimental study of deformation characteristics of sandstone under cyclic loading and unloading conditions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 231-235.
- [6] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下红砂岩能量演化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 953-962.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Experimental research on energy evolution of red sandstone samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 953-962.
- [7] 朱泽奇, 盛谦, 肖培伟, 等. 岩石卸围压破坏过程的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 1): 2675-2681.
- ZHU Zeqi, SHENG Qian, XIAO Peiwei, et al. Analysis of energy dissipation in process of unloading confining pressure failure of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup 1): 2675-2681.
- [8] 许江, 唐晓军, 李树春, 等. 周期性循环载荷作用下岩石声发射规律试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1241-1246.
- XU Jiang, TANG Xiaojun, LI Shuchun, et al. Experimental research on acoustic emission rules of rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1241-1246.
- [9] 任松, 白月明, 姜德义, 等. 周期荷载作用下盐岩声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1613-1618.
- REN Song, BAI Yueming, JIANG Deyi, et al. Experimental research on acoustic emission property of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1613-1618.
- [10] 苏承东, 翟新猷, 李宝富, 等. 砂岩三轴压缩过程中声发射特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 225-230.
- SU Chengdong, ZHAI Xinxian, LI Baofu, et al. Experimental study of the characteristics of acoustic emission for sandstone specimens under uniaxial and triaxial compression tests[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 225-230.
- [11] 张黎明, 王在泉, 石磊, 等. 不同应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1230-1236.
- ZHANG Liming, WANG Zaiquan, SHI Lei, et al. Acoustic emission characteristics of marble during failure process under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1230-1236.
- [12] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 砂卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2929-2934.
- XU Suchao, FENG Xiating, CHEN Bingrui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (10): 2929-2934.
- [13] 李楠, 王恩元, 赵恩来, 等. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1099-1103.
- LI Nan, WANG Enyuan, ZHAO Enlai, et al. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1099-1103.
- [14] 姜永东, 鲜学福, 尹光志, 等. 岩石应力应变全过程的声发射及分形与混沌特征[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2413-2418.
- JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, YIN Guangzhi, et al. Acoustic emission fractal and chaos characters in rock stress-strain procedure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2413-2418.
- [15] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2559-2563.
- LI Yuanhui, LIU Jianpo, ZHAO Xingdong, et al. Study on b -value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2559-2563.
- [16] 包春燕, 姜谟男, 唐春安, 等. 单轴加卸载扰动下石灰岩声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3871-3877.
- BAO Chunyan, JIANG Annan, TANG Chunan, et al. Study of acoustic emission characteristics of limestone under cycle uniaxial loading-unloading perturbation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Sup 2): 3871-3877.
- [17] 赵奎, 王晓军, 刘洪兴, 等. 布筋尾砂胶结充填体顶板力学性状试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 9-14.
- ZHAO Kui, WANG Xiaojun, LIU Hongxin, et al. Experimental study of mechanical behaviors of cemented tailings backfill roof with reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 9-14.
- [18] 邓代强, 姚中亮, 唐绍辉. 单轴拉伸条件下充填体的力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 32-34.
- DENG Daiqiang, YAO Zhongliang, TANG Shaohui. Study on the mechanical property of backfill under split tension[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(1): 32-34.
- [19] 孔凡标. 载荷岩体动力学响应特性试验研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2008.