

单轴多级循环加载下原煤加卸载响应比演化特征

赵毅鑫^{1, 2, 3}, 龚爽^{1, 2}, 滕腾^{1, 2}, 姜耀东^{1, 3}, 杨志良^{1, 2}, 陈恺¹

(1. 中国矿业大学(北京) 共生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083;
3. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 煤矿井工开采往往对采场周边煤岩体产生周期性扰动, 研究单轴多级循环加卸载条件下煤变形及破坏特征有助于深入认识煤柱损伤、劣化及失稳破坏机制, 并为获取煤柱失稳前兆提供有效分析手段。通过开展原煤单轴多级循环加卸载实验, 利用弹性模量变化量提取加卸载响应比以描述原煤破坏前兆特征; 并基于声发射累计振铃计数定义加卸载响应比, 探讨原煤破坏过程中内部损伤演化特征及破坏前兆。此外, 通过对实验前、后煤样内部结构的 CT 扫描, 结合逆向化建模方法, 分析煤样破坏特征及模拟单元数量对加卸载响应比数值计算结果的影响。研究发现: 基于实验获得的单轴循环载荷下原煤加卸载响应比存在 3 个变化阶段, 且在每级应力水平下均呈周期性“W”型变化特征; 当荷载水平逐渐升高时加卸载响应比呈下降趋势, 当荷载水平较高且接近峰值荷载时, 加卸载响应比先下降后急剧上升; 而基于声发射累计振铃数计算的加卸载响应比则呈持续减小趋势, 并在破坏前接近 1。

关键词: 岩石力学; 循环加卸载; 加卸载响应比; 三维逆向化; CT 扫描

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)05 - 1096 - 10

Characteristics of the load/unload response ratio of raw coal under uniaxial multi-level cyclic loading

ZHAO Yixin^{1, 2, 3}, GONG Shuang^{1, 2}, TENG Teng^{1, 2}, JIANG Yaodong^{1, 3}, YANG Zhiliang^{1, 2}, CHEN Kai¹

(1. *Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China*; 2. *College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China*)

Abstract: In mining engineering, the periodic perturbation to rock mass induced by roadway excavation and mining affects the mechanical properties of surrounding rocks. Thus, studying the failure characteristic of raw coal under cyclic loading will help to understand the damage and deterioration mechanism of coal pillar, and to provide the effective means for the analysis of coal pillar instability. In this study, a uniaxial cyclic loading and unloading experiment at different stress levels on raw coal was conducted. Based on the experiment, a load/unload response ratio was defined according to the variation of elastic modulus to describe the failure characteristics of coal. Another response ratio was defined with the accumulative acoustic emission ring counts to describe the evolution

收稿日期: 2017 - 09 - 11; **修回日期:** 2018 - 01 - 11

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0600708, 2016YFC0801401); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QM01)

Supported by the National Key R&D Program of China(Grant Nos. 2016YFC0600708 and 2016YFC0801401) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. 2009QM01)

作者简介: 赵毅鑫(1977 -), 男, 博士, 2001年毕业于中国矿业大学工程力学专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与采矿工程方面的教学与研究工作。E-mail: zhaoyx@cumtb.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1153

of internal damage of coal. A three-dimensional numerical model was established and studied based on the geometric data obtained by CT scanning. The results show that the evolution of the load/unload response ratio of raw coal under uniaxial cyclic loading has three stages, showing a periodic W-shaped variation at each stress level. Moreover, the load/unload response ratio decreases with the increase of loading stress level. It is also found that the load/unload response ratio drops a little bit and then increases suddenly as the loading stress close to the peak stress. However, the load/unload response ratio reaches minimal and fluctuates near 1 as the specimen is on the verge of damage based on the analysis of acoustic emission ring counts.

Key words: rock mechanics; cyclic loading and unloading; load/unload response ratio; three-dimensional numerical inversion method; CT scan

1 引言

采矿过程中煤柱的安全稳定对于采场岩层运移及采区巷道稳定性控制具有重要意义。煤矿开采过程中, 由于生产工艺和地质条件等因素, 需留设多种类型煤柱, 煤柱在开采扰动反复加卸载作用下, 内部原生裂隙不断扩展、汇聚, 并最终诱发煤柱失稳破坏^[1]。同时, 在开采工作面超前支承压力峰值逐渐靠近煤柱过程中, 上覆基本顶周期破断影响下, 超前移动支承压力表现出明显台阶式上升变化规律。然而, 煤柱在不同受载阶段, 其载荷也随着顶板的微破裂而产生微小的载荷变化。因此, 研究单轴多级循环加卸载条件下煤变形及破坏特征, 有助于深入认识煤柱损伤、劣化及失稳破坏机制, 并为分析煤柱失稳前兆提供有效手段。

尹祥础等^[2-4]针对加卸载过程对岩石材料的扰动特征, 提出了加卸载响应比(load/unload response ratio, 简称为 LURR)的概念, 证明了加卸载响应比与能量加速释放有相同的物理机制, 并使用 LURR 理论尝试对矿震进行了预测。宋治平等^[5]研究了加卸载响应比在地震预测中的时空演变特征, 得到了地震前加卸载响应比值异常的迁移方向和迁移速率。J. E. Trotta^[6]研究了 LURR 理论在预测某些地震时对具体参数的敏感性。在实验研究方面, 施行觉等^[7]、王裕仓等^[8]分别采用纵波速度和应变为 LURR 理论中的响应量, 验证了加卸载响应比理论适用于样品破坏前兆特征的捕捉。苗胜军等^[9]利用单轴循环加卸载扰动实验, 证明了用加卸载响应比理论定量分析岩石试件损伤演化过程的可行性。余怀忠等^[10-11]针对片麻岩进行三轴循环加卸载实验, 发现岩石材料内部的损伤发展过程与加卸载响应比演化具有一致性, 并从理论和实验 2 个方面证实了不同响应量的选择在材料演化过程中所得到的加卸载响应比值具有相同的演化趋势。在数值模拟方面, 王

裕仓等^[12]模拟了固体材料在发生损伤破坏时的加卸载过程, 得出材料内部越均匀或越呈现脆性, Y 值上升越晚, 而 Y 曲线越陡。刘建坡^[13]利用 REPA 模拟软件对 LURR 在岩石破坏前兆特征的应用进行了研究。Y. Can 等^[14-15]利用 SLM(solid lattice model) 论证了加卸载响应比的大小会随着载荷的增加而升高, 然后升高到峰值, 在主破裂发生之前, 加卸载响应比值急剧下降, 并提出了 maximum faulting orientation(MFO), 即最大断层作用方向的概念, 形成了计算加卸载响应比值的新方法。

尽管目前对岩石材料的加卸载响应特征已有了初步研究, 但针对原煤材料的认知仍很有限。一方面, 原煤具有一定的记忆能力^[16], 在循环加卸载条件下, 应力-应变曲线形成滞回环, 且其强度、弹性模量和破坏特征均会随载荷发生变化。另一方面, 原煤的变形破坏特征对加卸载速度和应力比例等具有一定的依赖性^[17-20]。因此, 开展循环载荷下原煤破坏特征研究仍具有重要意义。本文开展了单轴多级循环载荷下原煤加卸载破坏实验, 利用弹性模量演化曲线的斜率来定义加卸载响应比, 并以声发射振铃计数统计规律描述加卸载响应比, 以分析原煤破坏前兆特征。此外, 基于工业 CT 扫描的三维逆向建模方法, 模拟计算还原了样品破坏过程, 并与煤样破坏后内部结构破坏特征相对照, 研究结果可为分析多级循环加载条件下原煤破坏特征及失稳前兆等演化特征提供参考。

2 实验研究

2.1 实验样品

原煤样品来自北京木城涧矿大台井-10 开采水平 3[#]煤层。该煤层为急倾斜煤层, 平均角度为 $45^{\circ} \sim 88^{\circ}$, 埋深为 820 m, 属石炭纪。样品加工为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱试件。煤样单轴抗压强度

6.11~20.5 MPa, 单轴抗拉强度 2.33~8.09 MPa, 弹性模量 0.307~1.06 GPa, 泊松比 0.15~0.35。

2.2 实验系统及方法

实验加载系统采用煤炭资源与安全开采国家重点实验室的 EHF - EG200 kN 型全数字液压伺服试验机。最大荷重为动态±200 kN、静态±300 kN; 最大行程为±50 mm; 载荷精度为显示值的±0.5%以内。声发射监测系统采用 SAEU2S 声发射系统, 采用四通道采样模式, 采样频率为 2 500 kHz, 采样长度为 2 048(点数), 参数间隔为 2 000 μs, 锁闭时间为 2 000 μs, 波形触发模式为内触发, 波形门限为 30, 参数门限为 30, 前放增益为 40, 主放增益为 0, 滤波器为 20~100 K, 前后采集长度为 51.2 μs。图 1 为实验设备与样品安装。

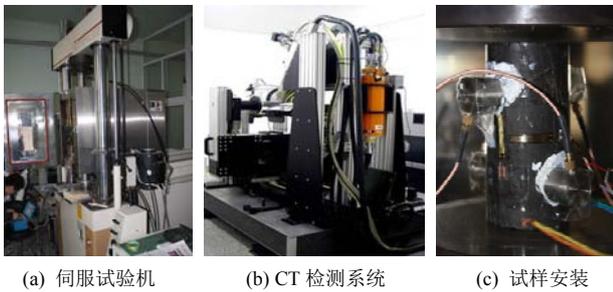


图 1 实验设备与样品安装

Fig.1 Experimental equipment and sample installation

采用位移控制方式, 速率为 10 μm/s, 并同步采集声发射信号。位移加载每 100 μm 为一级, 当位移加载级别达到时, 采用三角形扰动的方式进行循环加载, 扰动大小为±50 μm, 每级位移(荷载水平)下各扰动 10 次; 扰动结束后位移卸载到 0 并重新加载到下一级位移水平, 再次扰动; 如此循环加卸载直至试样破坏。图 2 表明煤样在第四级扰动下发生宏观破坏, 每级位移水平下依次经历加载、扰动和卸载 3 个阶段。整个多级加卸载过程共持时 512.9 s, 极限荷载 46.526 kN 出现于加载开始后 477.6 s。实验中为防止压头与试件表面脱离产生不必要的误差, 每个循环卸载阶段并未严格达到完全卸载状态。

2.3 循环加卸载结果分析

图 3(a)为多级循环加卸载下的应力 - 应变曲线, 显然, 循环荷载下原煤的应力 - 应变曲线出现滞回环。从图中可以看出, 当完成第一级循环扰动时, 应变从初始值增大到 0.002 617 με; 当完成第二级循环扰动时, 应变达到 0.004 517 με; 当完成第三级循环扰动时, 应变达到 0.006 395 με; 随着进入第四级循环扰动, 煤样内部的损伤不断增大, 最终试样失稳破坏。

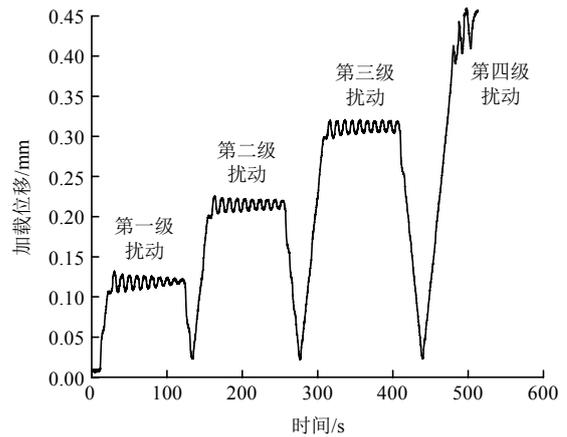
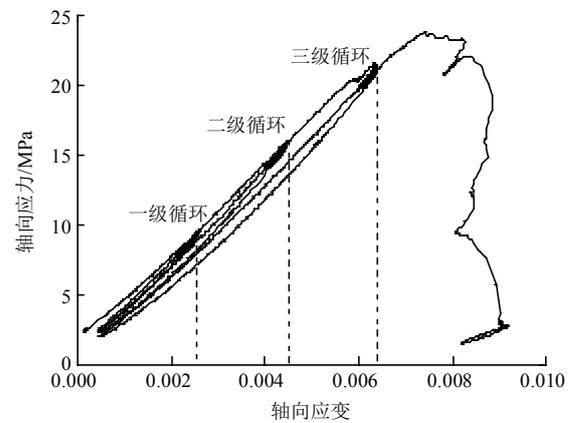
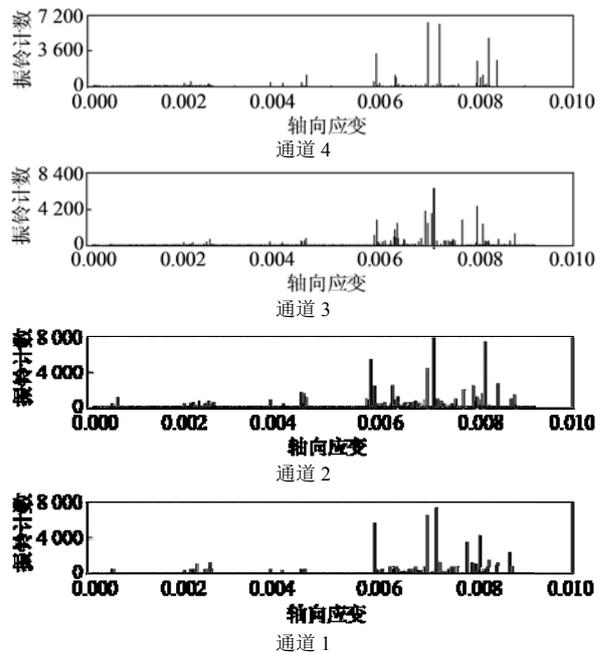


图 2 循环加卸载位移 - 时间曲线

Fig.2 Time curve of cyclic displacement



(a) 轴向应力 - 应变曲线



(b) 累计振铃计数 - 轴向应变曲线

图 3 轴向应力和累计振铃计数随轴向应变变化情况

Fig.3 Variation of axial stress and cumulative ringing counts with axial strain

采用应变作为加卸载响应比理论中的响应量^[2-4],

并基于线弹性本构关系，可以得出：

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma} = \frac{1}{E} \quad (1)$$

则加卸载响应比值为

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \frac{1/E_+}{1/E_-} = \frac{E_-}{E_+} \quad (2)$$

式中： X 为响应量， ΔR 为响应变化量， ΔP 为载荷变化量， X_- 和 X_+ 分别为卸载和加载时的响应量， E_- 和 E_+ 分别为卸载和加载时的弹性模量， $\Delta \varepsilon$ 和 $\Delta \sigma$ 分别为应变变化量和应力变化量。

考虑到煤岩类材料在循环加卸载过程中应力 - 应变曲线出现滞回环，说明该类煤岩是具有弹塑性性质的材料，根据以往经验和蔡美峰^[21]研究结果，对该类材料一般采用弹塑性模型来计算其弹性模量，即加载阶段的弹性模量取应力 - 应变曲线直线段的斜率，卸载阶段的弹性模量取卸载曲线的割线斜率，即应力 - 应变曲线峰值与谷值斜率。加载到极限荷载，即第四级循环阶段中的第一个峰值，之后数据波动较大，故未对后面数据进行分析。随着加卸载循环的进行， E_+ 整体呈现增加趋势，中间值波动较大，每一级循环开始阶段 E_+ 值变化较大，经过 3, 4 个循环后 E_+ 突然变小，结束阶段又增大，基本呈“M”型变化，如图 4(c) 所示。而 E_- 总体变化不大，在每一级循环阶段开始时值较大，到循环结束时逐渐变小，在破坏前突然上升，如图 4(b) 所示。在整个加卸载实验临近破坏时，两者变化较大。加卸载响应比基本在 1 附近波动，在每一级循环开始、中期和循环结束阶段数值较大，基本呈“W”型，其在临近破坏的第三级结束第四级开始阶段先下降，破坏前突然上升，如图 4(a) 所示。分析以上现象可知，在加载初始阶段，由于材料内部处于初始压密阶段， E_+ 值迅速增加，而卸载阶段材料内部结构无明显变化，导致 E_- 值基本无变化，所以加卸载响应比值 Y 数值比较大；随着荷载的增加，材

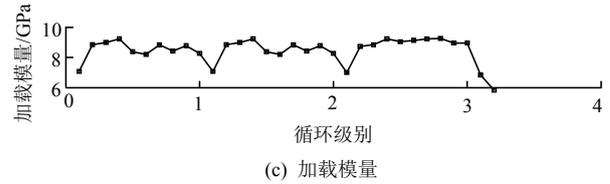
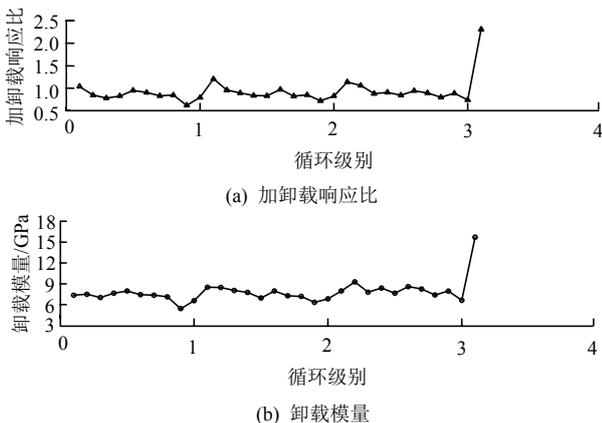


图 4 不同循环阶段加卸载响应比及响应量

Fig.4 Variation of response ratio to loading/unloading at different cycles

料进入弹性阶段，内部结构进入稳定变化阶段，加卸载响应比 Y 值始终在 1 附近波动；在材料临近破坏时，内部损伤加剧， E_+ 迅速降低， E_- 也开始降低，但降低速度远小于 E_+ ，所以 Y 值会突然增大。

对于实验中第三级末尾阶段， Y 值呈下降趋势的原因可采用临界敏感性理论进行分析，即在 Y 达到临界值之前，小的扰动不会诱发破坏，当 Y 达到临界值之后，则可能会诱发破坏，这表明加卸载响应比 Y 值与临界敏感性相一致。载荷水平较低时，材料的损伤程度较小，其内部结构的稳定性较高，因而材料的临界敏感性较低，加卸载响应比 Y 值也较小，微小的扰动不会导致原煤破坏，但造成原煤材料内部损伤微扩展及变形微增量。随载荷水平的提高，原煤材料内部损伤和破坏不断加剧，此时煤样宏观表现出刚度下降，且内部结构稳定性逐渐下降。正是由于载荷水平不断提高，而抵抗失稳破坏的能力却不断下降，所以失稳破坏的可能性在逐渐增大，导致材料的临界敏感性不断增加， Y 值增大。当载荷水平较高时，在加卸载响应比 Y 即将达到临界值之前，原煤材料内部损伤较大，抵抗失稳破坏能力大为降低，其临界敏感性迅速增加，任何微小扰动就会导致材料失稳；在 Y 达到临界值之后，原煤材料开始进入自驱动演化过程，临界敏感性会逐渐减小，而 Y 值也会明显减小。

包春燕等^[22]采用相似加载方案，针对石灰岩的加卸载响应比进行分析，对比发现：煤和石灰岩在相似加载模式下的加卸载响应比 Y 值变化趋势基本一致，荷载水平较低时， Y 值呈下降趋势；随加载继续， Y 值基本在 1 附近波动；当荷载水平较高且接近峰值荷载时， Y 值先下降后急剧上升。然而两者亦存在差异，如煤初始 Y 值相对较小，石灰岩破坏前 Y 值上升幅度和变化率明显大于原煤等。

2.4 声发射结果分析

图 3(b) 为煤样破坏过程中声发射振铃计数曲线。可以看出，轴向应变分别达到 0.002 617, 0.004 517, 0.006 395 μe 时，累计振铃计数均发生突

增, 该时刻煤样处于开始卸载时刻, 煤样内部发生较明显的裂隙发育及演化现象; 随荷载继续增加, 应变达到 $0.00704 \mu\text{s}$ 时, 累计振铃计数达到极大值, 预示煤样即将发生整体失稳破坏。损伤变量 D 具有多种定义方法, 其中较为简单的一种是选用材料的弹性模量 E 来进行定义。根据等效应变原理, 损伤变量 D 的表达形式为

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (3)$$

式中: E_0 为材料无损伤时的弹性模量值, E 为受损材料的弹性模量值。

杨永杰等^[23]研究表明, 损伤变量 D 与声发射振铃次数 N 之间存在如下关系:

$$D = \frac{N}{N_m} \quad (4)$$

式中: N 为材料承受载荷内部产生损伤后的声发射振铃次数, N_m 为材料完全损伤时的累计声发射振铃计数。

记加载和卸载过程中的损伤变量 D 的变化率分别为 ΔD_+ 和 ΔD_- , 加载和卸载过程中产生的声发射振铃次数分别为 N_+ , N_- 。则有如下关系:

$$\Delta D_+ = N_+ / N_m \quad (5)$$

$$\Delta D_- = N_- / N_m \quad (6)$$

$$\frac{\Delta D_+}{\Delta D_-} = \frac{N_+}{N_-} \quad (7)$$

根据地震学中定义^[24], 可将加卸载响应比值 Y 定义如下:

$$Y = \frac{N_+}{N_-} \quad (8)$$

由此可得声发射振铃计数与加卸载响应比的关系^[24]:

$$Y = \frac{E_-}{E_+} = \frac{\Delta D_+}{\Delta D_-} = \frac{N_+}{N_-} \quad (9)$$

对式(9)中声发射振铃计数进行处理, 可以计算出由振铃计数所表征的加卸载响应比值。

图5为根据4个通道声发射振铃次数计算得到的加卸载响应比变化情况。可以看出: 在荷载水平较低时, 加卸载响应比数值较大。随荷载增加, Y 值逐渐递减, 在临近破坏阶段 Y 值最小, 且在1附近波动。这主要是因为声发射一般产生于材料内部微结构调整阶段, 且多提前于应力-应变的改变。因此, 在实验荷载水平较低时, 声发射信号多集中于加载阶段, 此时 Y 值较大; 当荷载水平较高特别是临近破坏时, 卸载阶段会产生残余拉应力, 当残余拉应力超过煤样抗拉强度时, 亦会产生损伤, 而

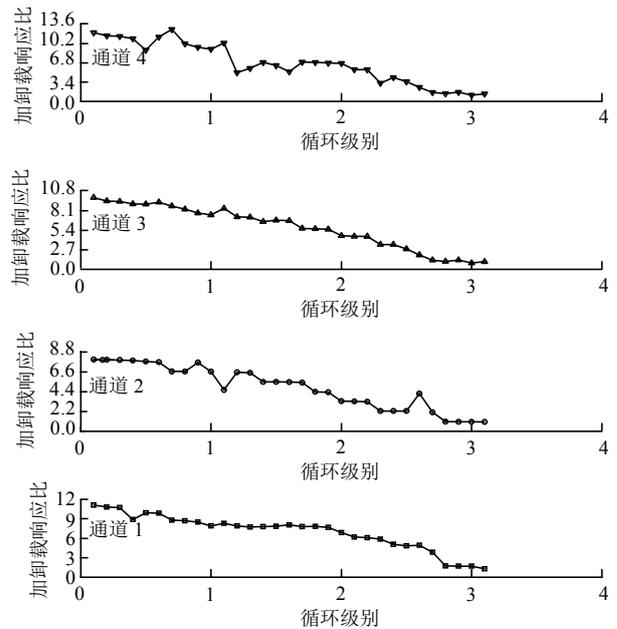


图5 不同通道声发射振铃数对应加卸载响应比变化情况
Fig.5 Variation of response ratio to loading/unloading based on the ringing counts at different cycles levels

卸载阶段声发射信号亦可能增多至与加载阶段持平, 因此由声发射振铃次数所计算的 Y 值在材料接近破坏阶段时趋近于1。

对比图4, 5 不难发现, 基于2种方法得到的加卸载响应比各有不同, 前者的破坏前兆是加卸载响应比突然增大, 而后者则是加卸载响应比趋近于1。产生这种不一致的原因主要是, 前者基于弹性模量计算响应量, 该方法更为直接, 相对更加准确; 而后者以声发射振铃计数来计算, 该方法相对间接, 数据易受干扰, 但该方法可结合工程尺度试验中的地音或微震数据评估更大区域煤岩体稳定性。当然, 针对不同加载条件下2种方法计算结果的准确性和判断失稳的有效性仍有待后续深入研究。

3 三维重构模型构建及数值模拟

3.1 煤样 CT 扫描与重构

采用中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室 ACTIS300 - 320/225 工业 CT 系统, 对实验前、后煤样分别进行内部结构扫描。测试煤样 CT 扫描结果分辨率约为 $80 \mu\text{m}$, 设备如图 1(b)所示。CT 扫描图像中, 不同灰度代表样品内部材料对 X 射线的吸收程度不同; 图中的黑色区域表现为对 X 射线吸收较低区域, 代表低密度物质, 如孔隙、裂隙等; 亮白色区域为对 X 射线吸收较高区域, 代表高密度物质, 如坚硬夹杂等, 具体如图 6(a)所示。

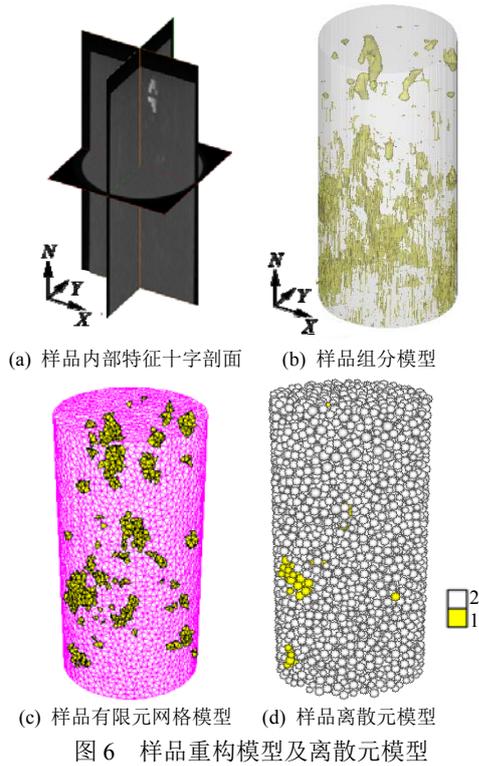


图 6 样品重构模型及离散元模型

Fig.6 Reconstructed model of the sample

通过已有二维图像序列，进行边界识别等分割处理，再利用 Mimics 软件进行逆向化建重构^[25-26]，结果如图 6(b)所示。

3.2 模型建立与参数设置

将三维模型进行网格划分(见图 6(c))后，导入离散元软件 PFC^{3D} 进行加卸载响应比数值模拟^[25]，模型如图 6(d)所示。模型为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体，共有颗粒单元 6 997 个。

表 1 为数值模型中 2 种组分主要力学参数。组分 1 为高密度夹杂物质，包含的颗粒单元数量为 101 个，约占颗粒单元总数的 1.44%；组分 2 为煤基质，约占颗粒单元总数的 98.56%。以位移控制进行加载，加载开始时速度缓慢增加，临近转换点时，速度逐渐降为 0，卸载开始则速度反向缓慢增加，如此反复进行。具体加载过程如图 7 所示。

表 1 数值模拟参数表

Table 1 Parameters for numerical simulation

组分	法向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	法向强度/ Pa	切向强度/ Pa	摩擦 因数	含量/%
组分 1	2×10^{10}	2×10^{10}	3×10^7	3×10^7	0.20	1.44
组分 2	3.2×10^9	3.2×10^9	0.78×10^6	0.78×10^6	0.38	98.56

3.3 模拟结果分析

由图 7, 8 可以看出，煤样共经历了 3 级完整的循环加卸载过程，在第四级循环载荷施加过程中，

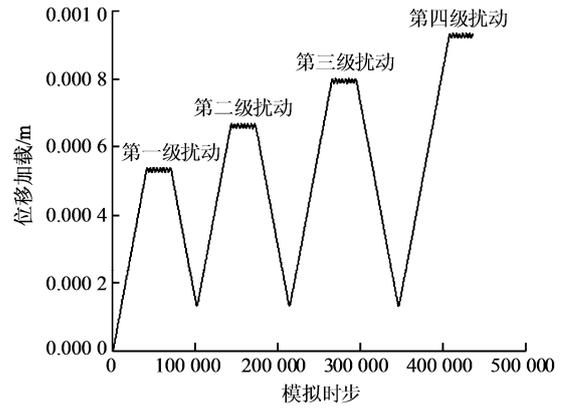


图 7 数值模型位移控制加载曲线

Fig.7 Loading curve based on the displacement control

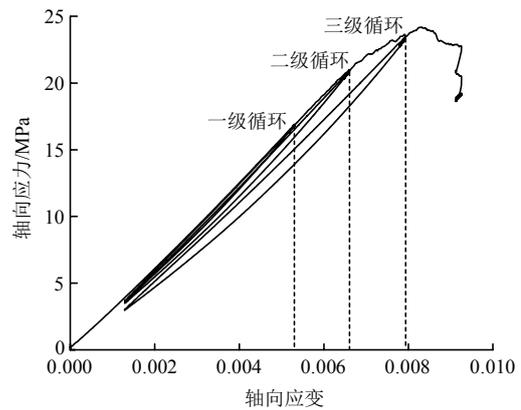


图 8 数值模拟得到的应力 - 应变曲线

Fig.8 Stress-strain curve from numerical simulation

煤样发生宏观破坏。其中，第一级和二级循环加卸载都是在弹性阶段进行的，滞回现象并不明显。随载荷继续增大，加载过程表现出明显非线性特征。接近峰值载荷(24.23 MPa)时，进行第三级循环加卸载，出现较明显滞回现象。在第四级循环加卸载时，应力突然降低，煤样发生宏观破坏。

图 9 为不同循环加载阶段煤样内各单元位移矢量图。在达到峰值载荷前，各单元位移矢量大都从煤样两端指向中部。峰值过后，位移矢量有较明显变化，最终形成拉剪破坏，如图 9(d)所示。图 10 为最终破坏的试样及内部破坏特征的 CT 扫描图。从图中可以看到，煤样破坏后，产生了贯穿煤样内部的裂隙带(白色条带)。如图 10(a)和(c)所示，裂隙从煤样上部边缘斜向下指向中部，为剪切破坏形式；部分裂隙直向下贯穿整个煤样，为劈裂破坏形式。从裂隙的位置及方向可以判断出，煤样最终以劈裂破坏为主。

图 11 为基于数值模拟结果，利用式(1)和(2)计算获得的加卸载响应比随加载过程变化情况。可以看出：在前两级循环加载阶段， E_+ 基本保持不变， E_- 有增大趋势，但变化不大，始终维持在 3 GPa 左

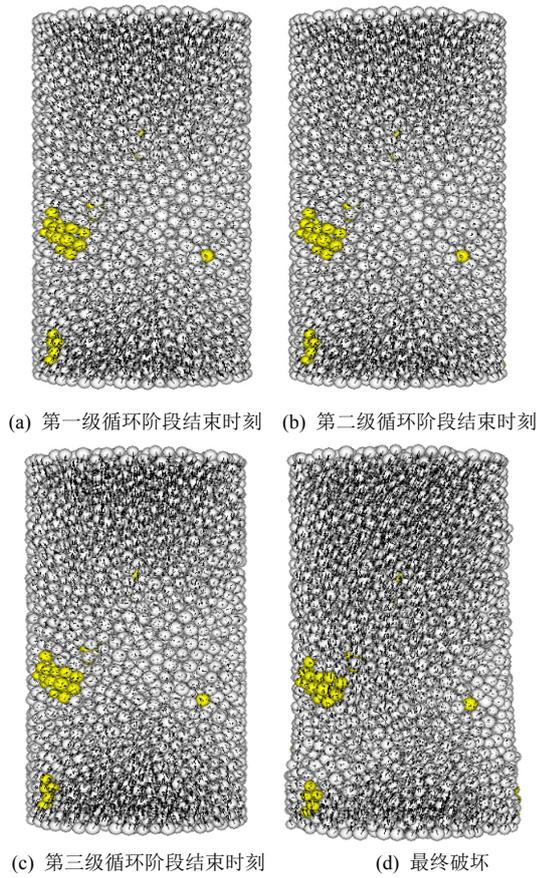


图9 不同加载阶段模型内各单元位移矢量图
Fig.9 Displacement vectors in the model at different loading/unloading states

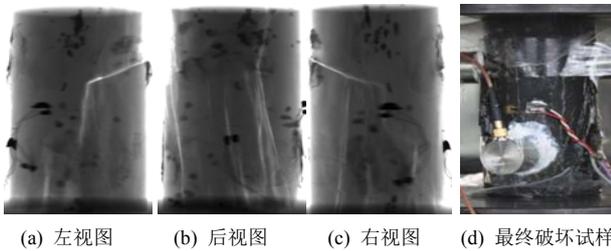


图10 最终破坏试样及内部破坏特征 CT 扫描情况
Fig.10 CT images of the fractured coal specimen

右, 加卸载响应比始终在 1 左右; 第三级循环加载阶段, E_- 突然增大到 4.07 GPa, 同时 E_+ 降低至 2.96 GPa, Y 值即出现波动; 煤样破坏发生在第四个循环加载阶段, 主要表现出 E_- 急剧增大至 9.78 GPa, 而 E_+ 突然降低为负值, 加卸载响应比也随之发生波动, 该结果与实验结果基本吻合。

对比实验结果发现: 循环加载初期, E_+ 和 E_- 以及加卸载响应比并未出现实验过程中的波动现象。主要原因为试样内部裂隙会随循环加卸载不断演化, 进而引起弹性模量波动, 而数值模拟中未考虑裂隙影响, 且模拟结果中弹性模量变化不大。综上所述, 试样临近破坏时, 加卸载弹性模量 E_+ , E_- 及加卸载响应比都出现较明显变化, 可作为破坏

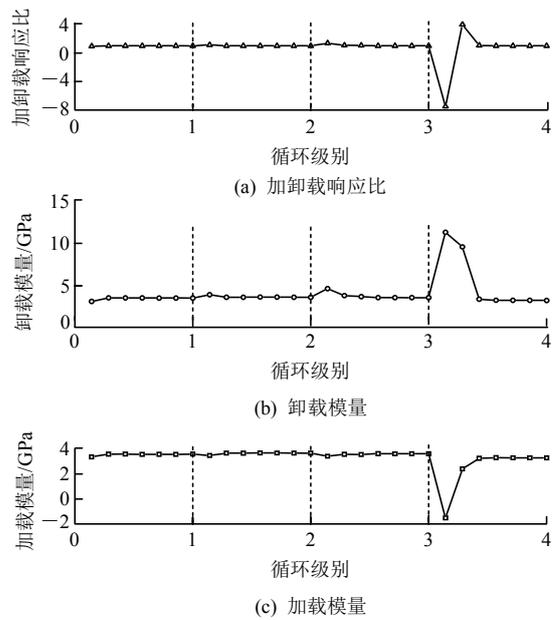


图 11 加卸载响应比及加卸载模量变化情况

Fig.11 Variation of response ratio to loading/unloading and modulus

前兆依据。

3.4 模型单元数对加卸载响应比影响

通过改变颗粒半径, 得到 4 种不同单元数量的三维模型(模型 a, b, c, d 单元数分别为 2 786, 6 997, 11 106, 15 433 个), 在相同材料参数下, 对其进行相同加载方式下的模拟分析。

图 12 为 4 种模型计算获得的应力 - 应变曲线。可以看出: 部分模型可经历多达 7 级循环加卸载过程才出现破坏; 随单元数量增多, 模型宏观弹性模量有所增大, 峰值应力则随单元数量增多有明显增大趋势。图 13, 14 分别为不同单元数量模型在不同循环级别下加卸载模量(E_+ 和 E_-)。

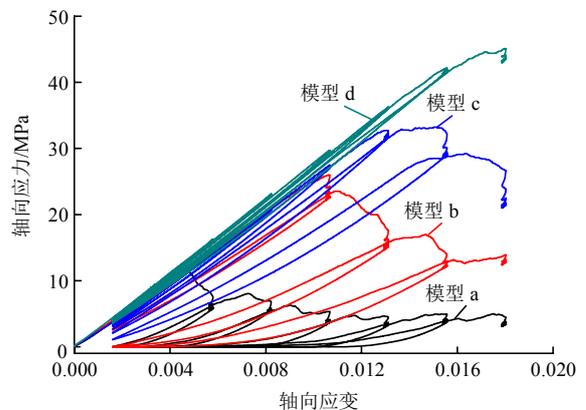


图 12 不同单元数量应力 - 应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of coal sample with different particle numbers

图 13 为不同模型在不同加载阶段的加载模量

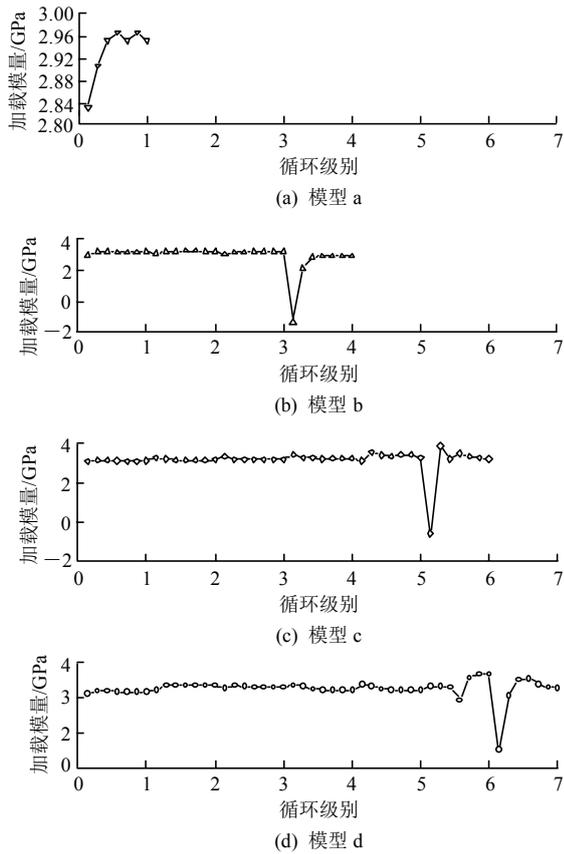


图 13 不同单元数量模型在不同加载阶段的加载模量 E_+
 Fig.13 Loading modulus E_+ of coal sample with different particle numbers

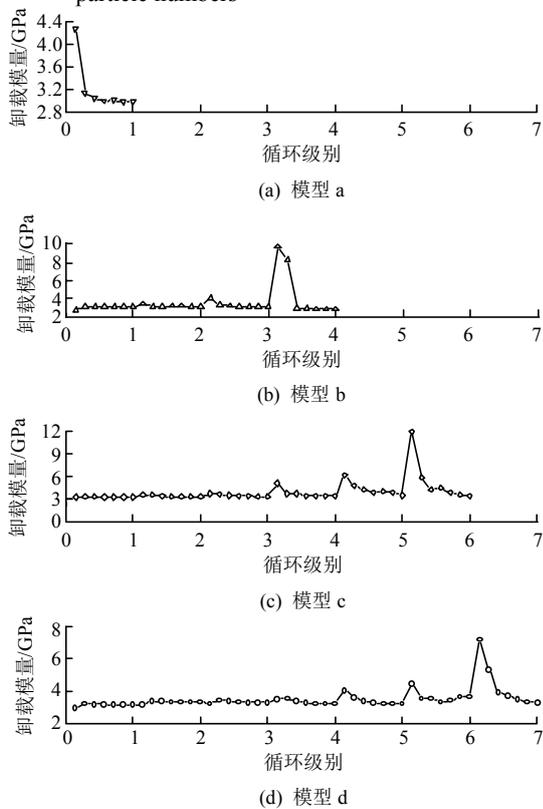


图 14 不同单元数量模型在不同加载阶段的卸载模量 E_-
 Fig.14 Unloading modulus E_- of coal sample with different particle numbers

E_+ 。可以看出：在加载初期， E_+ 先稍增大后趋于平缓，如模型 b，c 和 d；在加载中期，模型 b 仍呈先增大后趋于平稳趋势，但模型 c 和 d 均为先升至较大值然后降低；且 4 种模型中 E_+ 波动范围较小，在试样临近破坏前， E_+ 均表现出先降低后升高的波动特征，如模型 a 第一循环、模型 b 第三循环、模型 c 第五循环和模型 d 第六循环。此外，当应力接近峰值时， E_+ 会突降至最小值。

图 14 为不同模型在不同加载阶段卸载模量 E_- 。可以发现：模型 c 和 d 的加载前期， E_- 大致呈先缓慢增大后趋平稳变化趋势，随加载继续， E_- 峰值整体呈上升趋势，最后降低。且当应力接近峰值循环卸载阶段时， E_- 达到最大值。对比图 13 和 14 可知，在每个循环初始阶段， E_- 波动幅度均大于 E_+ 幅度。

图 15 为不同单元数量模型计算获得的加卸载响应比变化情况。在加载前期，加卸载响应比 Y 始终在 1 附近波动。当应力接近峰值时， Y 值则出现先减后增的变化，如模型 b 和 c 最后一个循环。

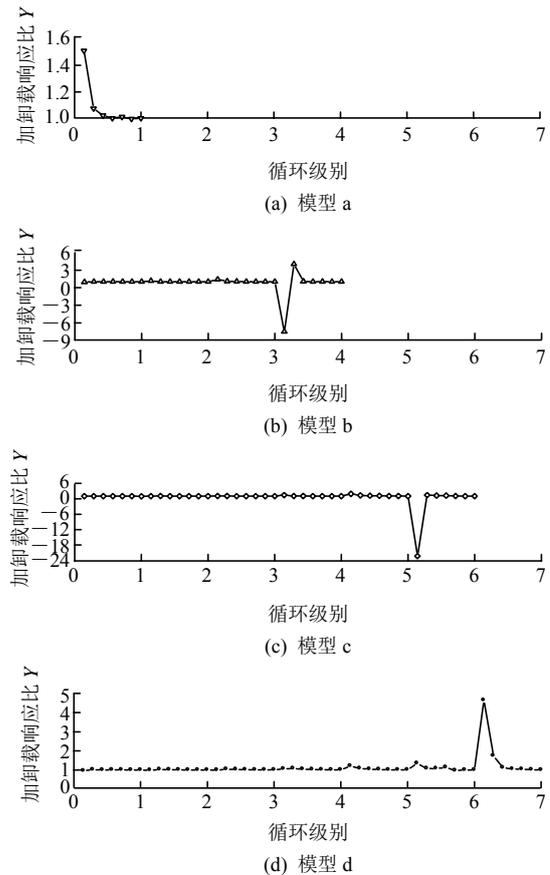


图 15 不同单元数量模型加卸载响应比变化情况
 Fig.15 Response ratio to loading/unloading of coal sample with different particle numbers

综上，在加载前中期， E_+ ， E_- 和 Y 值变化幅度

均不大;当应力接近试样破坏应力时, E_+ , E_- 和 Y 值发生突变。相比而言,数值模拟获得的 E_- 和 Y 值变化幅度更为明显。此外,在数值重构的煤样模型中,由于基质和夹杂都为均质,加卸载响应比的突变点非常接近峰值,使得提前预测试样破坏较为困难。因此,后续仍需针对原煤开展更多的实验和数值模拟研究,以期细化加卸载响应比演化规律分析,为后续潜在的工程应用提供参考和借鉴。

4 结 论

本文通过开展原煤单轴多级循环加卸载实验,利用弹性模量变化量表述的加卸载响应比分析了原煤破坏特征;并基于声发射累计振铃计数定义加卸载响应比,探讨原煤破坏过程中内部损伤演化特征及破坏规律。此外,通过对实验前、后煤样内部结构的 CT 扫描,结合逆向化建模方法,分析了煤样破坏特征及模拟单元数量对加卸载响应比变化的影响。得出如下主要结论:

(1) 基于实验获得的单轴循环载荷下原煤加卸载响应比存在 3 个变化阶段,且在每级应力水平下均呈周期性“W”型变化特征;当荷载水平逐渐升高时,加卸载响应比呈下降趋势,当荷载水平较高且接近峰值荷载时,加卸载响应比先下降后急剧上升;而基于声发射累计振铃数计算的加卸载响应比则呈持续减小趋势,并在破坏前接近 1。对比以往类似加载条件下硬岩加卸载响应比演化特征发现,原煤的初始加卸载响应比值相对较小,且破坏前加卸载响应比值上升幅度和变化率明显小于硬岩。

(2) 基于 CT 扫描的逆向化建模可有效构建考虑内部结构的数值模型,但模型本身精度亦受扫描分辨率的影响;模型单元尺寸也影响着模型精度,不同单元数量的模型可承受的循环加卸载次数不同;且循环加载初期,加载模量 E_+ 和卸载模量 E_- 及加卸载响应比并未出现实验过程中的波动现象。但在模型临近破坏时,加卸载弹性模量及加卸载响应比均出现较明显变化,可作为破坏前兆的依据。

致谢 感谢中国矿业大学(北京)越崎杰出学者计划的支持。

参考文献(References):

[1] SINGH U K, DIGBY P J. A continuum damage model for simulation of the progressive failure of brittle rocks[J]. International Journal of

Solids and Structures, 1989, 25(6): 647 - 663.

- [2] 尹祥础,陈学忠,宋志平. 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(1): 223 - 230.(YIN Xiangchu, CHEN Xuezhong, SONG Zhiping. The development of load-unload response ratio theory and its application to earthquake prediction[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(1): 223 - 230.(in Chinese))
- [3] 尹祥础, PETER M, 彭克银. 加卸载响应比(Load/Unload Response Ratio)、能量加速释放(AE/MR)的临界区尺度及地震预测[J]. 国际地震动态, 2004, (5): 24 - 30.(YIN Xiangchu, PETER M, PENG Keyin. Load/unload response ratio, critical region scale of energy accelerated release and earthquake prediction[J]. Recent Development in World Seismology, 2004, (5): 24 - 30.(in Chinese))
- [4] 尹祥础, 尹迅飞, 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[J]. Earthquake, 2004, 24(2): 25 - 30.(in Chinese))
- [5] 宋治平, 尹祥础, 梅世蓉. 地震前兆异常迁移速率的非线性变化特征及其力学解释[J]. 地震, 1996, 16(4): 372 - 376.(SONG Zhiping, YIN Xiangchu, MEI Shirong. The nonlinear variation characteristics of seismic precursor anomaly migration velocity and its mechanical interpretation[J]. Earthquake, 1996, 16(4): 372 - 376.(in Chinese))
- [6] JULIE E T. An independent assessment of the load/unload response ratio(LURR) proposed method of earthquake prediction[M. S. Thesis][D]. Providence: Brown University, 2004.
- [7] 施行觉, 许和明, 万永中, 等. 模拟引潮力作用下的岩石破裂特征——加卸载响应比理论的实验研究之一[J]. 地球物理学报, 1994, 37(5): 633 - 637.(SHI Xingjue, XU Heming, WAN Yongzhong, et al. The characteristic of rock fracture under simulated tide force-laboratory study on the theory of loading and unloading response ratio[J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(5): 633 - 637.(in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 苗胜军, 樊少武, 蔡美峰, 等. 基于加卸载响应比的载荷岩石动力学特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 329 - 333.(MIAO Shengjun, FAN Shaowu, CAI Meifeng, et al. Dynamic characteristics experiment study of loading rock based on theory of load/unload response ratio[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 329 - 333.(in Chinese))

- [10] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究[J]. 中国地震, 2003, 19(1): 58 - 66.(YU Huaizhong, YIN Xiangchu, XIA Mengfen, et al. Experimental research on the theory of LURR(Load/unload response ratio)[J]. Earthquake Research in China, 2003, 19(1): 58 - 66.(in Chinese))
- [11] 余怀忠, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比(LURR)响应量的研究[J]. 西北地震学报, 2004, 26(4): 298 - 302.(YU Huaizhong, YIN Xiangchu, LIANG Naigang. Research on the response of load/unload response ratio[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 26(4): 298 - 302.(in Chinese))
- [12] 王裕仓, 尹祥础, 彭克银, 等. 加卸载响应比的数值模拟[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 669 - 676.(WANG Yucang, YIN Xiangchu, PENG Keyin, et al. Numerical simulation on load/unload response ratio theory[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(5): 669 - 676.(in Chinese))
- [13] 刘建坡. 基于声发射技术岩石破坏前兆特征实验研究[硕士学位论文][D]. 沈阳: 东北大学, 2008.(LIU Jianpo. Study on precursory characteristics of rock failure based on acoustic emission technique[M. S. Thesis][D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.(in Chinese))
- [14] CAN Y, PETER M. Some preliminary thoughts about the LURR phenomenon[C]// Proceedings of the 4th ACES Workshop. Beijing: China Earthquake Administration. [s.l.]: [s.n.], 2004: 85 - 87.
- [15] ABE S, PLACE D, MORA P. A parallel implementation of the lattice solid model for the simulation of rock mechanics and earthquake dynamics[J]. Pure and Applied Geophysics, 2004, 161(11): 2 265 - 2 277.
- [16] 巩思园, 窦林名, 何江, 等. 深部冲击倾向煤岩循环加卸载的纵波波速与应力关系试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 41 - 47.(GONG Siyuan, DOU Linming, HE Jiang, et al. Study of correlation between stress and longitudinal wave velocity for deep burst tendency coal and rock samples in uniaxial cyclic loading and unloading experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 41 - 47.(in Chinese))
- [17] 尤明庆. 复杂路径下岩样的强度和变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 23 - 28.(YOU Mingqing. Strength and deformation of rock under complex loading path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 23 - 28.(in Chinese))
- [18] 汪斌, 朱杰兵, 鄢爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 138 - 2 145.(WANG Bin, ZHU Jiebing, WU Aiqing, et al. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 138 - 2 145.(in Chinese))
- [19] 杨永杰, 宋扬, 楚俊. 循环荷载作用下煤岩强度及变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 201 - 205.(YANG Yongjie, SONG Yang, CHU Jun. Experimental study on characteristics of strength and deformation of coal under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 201 - 205.(in Chinese))
- [20] 周家文, 杨兴国, 符文熹, 等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1 172 - 1 183.(ZHOU Jiawen, YANG Xingguo, FU Wenxi, et al. Experimental test and fracture damage mechanical characteristics of brittle rock under uniaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1 172 - 1 183.(in Chinese))
- [21] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 45 - 48.(CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2013: 45 - 48.(in Chinese))
- [22] 包春燕, 姜谔男, 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 2): 3 871 - 3 877.(BAO Chunyan, JIANG Annan, TANG Chun'an, 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(Supp.2): 3 871 - 3 877.(in Chinese))
- [23] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 98 - 104.(YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98 - 104.(in Chinese))
- [24] 尹祥础, 刘月. 加卸载响应比——地震预测与力学的交叉[J]. 力学进展, 2013, 43(6): 555 - 580.(YIN Xiangchu, LIU Yue. Load-unload response ratio—An interplay between earthquake prediction and mechanics[J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(6): 555 - 580.(in Chinese))
- [25] ZHAO Y X, LIU S M, ZHAO G F, et al. Failure mechanisms in coal: Dependence on strain rate and microstructure[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2015, 119(9): 6 924 - 6 935.
- [26] 赵毅鑫, 赵高峰, 姜耀东, 等. 基于微焦点 CT 的煤岩微观破裂机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 128 - 132.(ZHAO Yixin, ZHAO Gaofeng, JIANG Yaodong, et al. Study on meso fracture mechanism of coal based on micro-CT[M]. Beijing: Science Press, 2013: 128 - 132.(in Chinese))