

循环载荷下干燥及饱和砂岩的变形及声发射特征

汪泓^{1,2,3}, 杨天鸿¹, 刘洪磊¹, 赵永川¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819 ; 2. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025 ;
3. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要 : 对取自陕西榆横矿区小纪汗煤矿顶板砂岩的干燥和饱和试件进行单轴循环加卸载试验及声发射监测 , 分析了不同含水状态岩石的强度以及变形特征、声发射特征和加卸载响应比变化情况。结果表明 , 水对上述性质具有显著影响。饱和试件强度和滞回环数量均低于干燥试件 , 压密阶段轴向应变比干燥试件增加 18.9% , 峰值强度前轴向应变比干燥试件降低 17.4% , 干燥和饱和试件在循环加载过程中弹性模量均有增大趋势 ; 干燥试件在整个加卸载过程中声发射能量累积为 3.87×10^{-11} J , 饱和试件声发射能量累积为 2.58×10^{-11} J , 仅为干燥试件的 66.67% ; 干燥和饱和试件的加卸载响应比呈现类似的变化规律 , 但饱和试件的加卸载响应比峰值特征时间比干燥试件短 , 宏观裂纹形成得更早。

关 键 词 : 单轴压缩 ; 循环加卸载 ; 饱和岩石 ; 声发射 ; 加卸载响应比

中图分类号 : TD 458 文献标志码 : A 文章编号 : 1005 - 3026(2016) 08 - 1161 - 05

Deformation and Acoustic Emission Characteristics of Dry and Saturated Sand Under Cyclic Loading and Unloading Process

WANG Hong^{1,2,3}, YANG Tian-hong¹, LIU Hong-lei¹, ZHAO Yong-chuan¹

(1. School of Resources & Civil Engineering , Northeastern University , Shenyang 110819 , China ; 2. Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Resources , Guiyang 550025 , China ; 3. College of Mining , Guizhou University , Guiyang 550025 , China. Corresponding author : WANG Hong , E-mail : 7653606@qq. com)

Abstract : Uniaxial cyclic loading/unloading experiments were conducted on dry and saturated sandstones from Xiaojihan coal mine in Shaanxi province to study the deformation and strength characteristics , acoustic emission (AE) and load/unload response ration (LURR) in the failure process of sandstones. The results show that water has a significant influence on the properties mentioned above. The compressive strength and plastic hysteresis loops number of water-saturated specimens are less than that of dry specimens , and the axial strain in the compaction stage of water-saturated specimens is 18.9% larger than that of dry specimens , but the axial strain prior to peak strength of water-saturated specimens is 17.4% less than that of dry specimens. The elastic moduli of dry and saturated specimens both tend to increase during the cyclic loading/unloading process. AE cumulative energy of dry and saturated specimens is 3.87×10^{-11} J and 2.58×10^{-11} J respectively , and the latter is reduced by 33.3% . Furthermore , the LURR of dry and saturated specimens shows similar changing laws , but the characteristic peak time of saturated specimens appears earlier , which means the macroscopic crack generates earlier in saturated specimens.

Key words : uniaxial compression ; cyclic loading/unloading ; saturated rock ; acoustic emission ; load/unload response ration

声发射(acoustic emission , AE)现象与岩石的岩石变形、破坏演化规律的有效手段。
变形损伤过程有密切联系^[1] , 声发射技术是研究 Mansurov^[2]在对岩石的破坏类型进行研究时 , 采

用声发射技术获取了岩石的变形信息. Pestman 等^[3]采用声发射技术研究了砂岩的损伤扩展和应力记忆效应. Aker 等^[4]利用声发射对预制裂纹岩石破坏过程中的矩张量进行分析,研究了剪应力和拉应力的组合作用. 王晓南等^[5]研究了冲击载荷下煤岩组合体的声发射规律,认为声发射活动强度与煤岩体的冲击倾向性有关.

岩土工程经常受到循环载荷的作用,这种作用会导致岩体劣化,是影响岩土工程稳定的重要因素之一^[6]. 工程岩体在循环载荷下的力学特性是岩块和结构面力学响应的综合体现,因此,岩块作为工程岩体的重要组成部分,其在循环载荷下的力学特性应当受到关注. Eberhardt 等^[7]对脆性岩石开展了单轴循环加卸载试验,研究了变形过程中岩石的断裂损伤力学特性. 徐速超等^[8]研究了砂卡岩单轴循环加卸载下的声发射特性,发现砂卡岩在循环加卸载作用下具有反凯塞效应,并且随着加卸载循环次数的增加,费拉西蒂比逐渐变小. Akai 等^[9]对岩石的蠕变、循环载荷的应变率进行了对比研究. 在复杂地质环境中,岩体在受循环载荷作用的同时还耦合了水的作用,因此研究水化和循环载荷共同作用下的岩石力学问题十分必要. 目前,采用声发射技术研究循环载荷作用下不同饱水状态岩石强度变形特征及其声发射特征的研究成果还较少.

陕西榆横矿区的侏罗白垩纪砂岩作为煤层顶底板分布广泛,多属于含水层,本文对取自该地区的岩样进行干燥和饱水状态下的单轴循环加卸载和声发射监测试验,研究了干燥和饱和试件的强度、变形特性和声发射特征,并分析了基于加卸载响应比的不同饱和状态下弱胶结砂岩的破坏前兆,可为煤矿含水岩层顶底板及巷道稳定性研究提供参考.

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验所用砂岩取自陕西榆横矿区小纪汗煤矿井下距离地面 310 m 处 2 号煤层顶板. 从现场取大块后在室内加工成直径 50 mm、长度 100 mm 的圆柱体试件,两端不平行度小于 0.05 mm,加工精度满足《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)的要求. 为确定试验所用试件的均一性,采用瑞士 Proceq 公司生产的超声波混凝土测试仪(TICO)对试件进行波速测试,选择波速接近的试件开展试验. 根据试验需要,干燥和饱和

试件的制备方法如下:首先将试件放入烘箱内烘干 100 h 成为干燥样品,然后将部分干燥样品放入真空室抽空后注入纯净水,浸泡 30 d 后成为饱和试件. 试验中分别采用干燥、饱和试件各 3 枚进行循环加载. 图 1 为试验所用试件,质地均匀致密且无肉眼可见自然节理. 相关参数见表 1,其中 A35、A49 和 A53 为干燥试件,A17、A42 和 A60 为饱和试件.

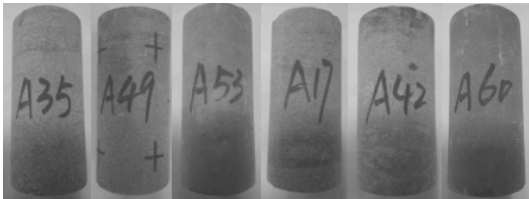


图 1 试验所用岩石试件
Fig. 1 Tested rock samples

表 1 试件参数
Table 1 Parameters of specimens

编号	直径×长度 mm	密度 g·cm ⁻³	波速 m·s ⁻¹	抗压强度 MPa	试件 类型
A35	47.58×100.06	2.36	2788.02	70.01	干燥
A49	47.66×100.80	2.42	2956.01	61.51	
A53	47.45×100.08	2.41	2934.90	78.08	
A17	47.91×100.60	2.39	3076.45	55.53	饱和
A42	47.60×100.4	2.33	3059.43	42.17	
A60	47.67×100.80	2.38	3019.87	46.98	

对同批试件切片加工后用偏光显微镜扫描观测,获得试件的显微照片,见图 2. 从图中可以清晰看到石英、长石及胶结物的分布. 同时对试样进行 X 射线衍射分析,结果表明,试样中所含矿物成分按可能性高低排序为:石英、钠长石、铁白云石、红铀矿、斜绿泥石. 另外还有微赤铁矿、菱铁矿、斜长石、伊利石、氯铜铝矾等矿物成分,但含量较低. 从矿物成分的含量可以大致判断,本次试验所用砂岩的胶结类型主要为泥质胶结,同时还伴随有部分铁质胶结. 试样中,碎屑颗粒以石英和长石为主,呈棱角和次棱角状的石英颗粒质量分数为 55%~60%;呈棱角状的钠长石颗粒质量分数为 20%~25%;铁白云母及其他矿物占 10%,碎屑颗粒的粒径以 0.3~0.5 mm 为主.

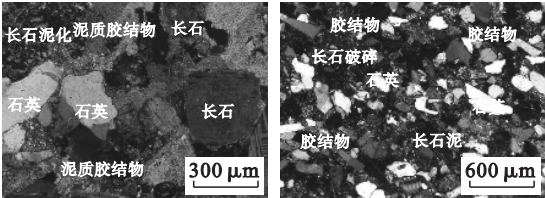


图 2 偏光显微镜分析结果
Fig. 2 Polarizing microscope analysis results

1.2 试验设备及试验方法

循环载荷试验采用 TAW - 2000 kN 微机控制电液伺服三轴试验系统,数据采集系统采用应力传感器、位移传感器和静态应变仪对岩石所加荷载和纵向及横向变形进行量测,声发射监测采用 PAC 公司的 PCI - II 声发射采集系统.

采用应力逐级增大循环加载的试验方式,循环峰值载荷每次增加 20 kN,卸载到 10 kN,即载荷从 0→30→10→50→10→70→10→90→.....直到试件破坏.循环加载过程中对试件进行持续声发射监测.

2 试验结果及分析

2.1 强度及变形特征分析

循环加卸载条件下的应力 - 应变曲线能够有效反映岩石的变形特性和强度特性.试验测得不同饱和状态的弱胶结砂岩单轴循环加卸载作用下典型应力 - 应变曲线,如图 3 所示.本文选择干燥及饱和试件 A53 和 A17 进行分析.

从试件强度来看(表 1),饱水后试件的抗压强度明显降低,干燥试件抗压强度为 78.08 MPa,而饱和试件抗压强度为 55.53 MPa;饱水后试件在受载过程中经历的塑性滞回环仅有 4 个,比干燥试件的塑性滞回环少 2 个(见图 3).二者间抗压强度相差 22.55 MPa,降低程度为 28.9%,说明水的作用对于弱胶结砂岩强度具有较大影响.这是因为水对砂岩中的胶结物起到软化及润滑作用,导致胶结物发生松动、运移和扩散^[6];另一方面,水对岩石颗粒间的接触面起到润滑作用,引起颗粒接触面间摩擦系数和黏聚力降低,从而导致岩石强度的弱化.

从试件变形特征来看(图 3),干燥和饱和两种状态试件在受压过程中均出现了明显的压密阶段,后者压密过程更长,其压密阶段应变比干燥试件高出 18.9%.这是因为在循环加卸载初始阶段,岩石内部原生裂隙、孔隙在压力作用下开始闭合,饱和试件在水分子的作用下,内部岩石颗粒间的联系减弱,胶结物遇水软化,强度较低,变形加大,导致裂隙不断调整且被压密的过程更长,因此轴向饱和试件表现出更加显著的变形.进入稳定变形阶段后,两种不同含水状态试件加载曲线的斜率随加卸载过程逐次增加.

岩石的弹性模量是反映岩石力学特性的重要指标,单轴循环加卸载过程中试件的弹性模量随着循环荷载次数增加不断发生变化,本文采用每

个循环加载曲线最大应力点(即卸载点)和最小应力点的连线斜率计算该加卸载阶段的弹性模量,见图 4.整体上干燥和饱和两类试件的弹性模量均呈现增大趋势.干燥和饱和试件在循环加载过程中分别产生了 6 个和 4 个塑性滞回环,且随着应力增大和循环次数的增加,塑性滞回环向应力增加方向偏移,同时每次循环后产生的塑性应变逐次减少,累积的变形量不断增加,达到峰值强度时干燥试件的轴向应变比饱和试件高出 20.9%.可以推断,由于不同的含水量造成岩石内部颗粒间力学作用机制的差异,从而造成弹性模量和轴向应变的变化.

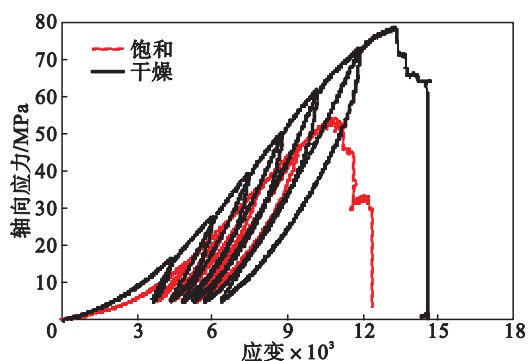


图 3 干燥及饱和弱胶结砂岩应力 - 应变曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of dry and saturated sandstone

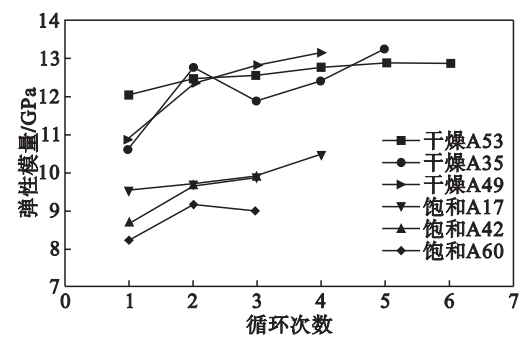


图 4 循环加卸载弹性模量 - 循环次数曲线
Fig. 4 Curves of cyclic loading and unloading elastic modulus vs cyclic numbers

2.2 声发射特征分析

岩石在受力破坏时,内部微裂纹的压密、萌生、扩展和贯通均会伴随着声发射的产生,藉此可以研究岩石损伤演化的过程.图 5 是循环加卸载时不同饱和程度试件应力、声发射能量累计数随时间的变化情况.从声发射能量累计数的变化过程来看,对于干燥试件,随着循环次数的增加,声发射活动水平保持平稳缓慢上升,直至试件破坏失稳前声发射能量累计数才出现爆发式增长,说明干燥试件内部的裂纹不断扩展,在破坏前瞬间

贯通,饱和试件声发射累计数在 1 100 s、1 900 s 和破坏前分别出现三次阶跃式增长,说明在试件受压过程中,出现了局部的裂纹连通和破坏,随着应力增大形成宏观贯通。这是由于在水的作用下,饱和试件的强度已经降低,在受压过程中更容易出现局部损伤,导致变形过程中出现多次声发射能量累计数的阶跃式增长。图 6 为试件的破坏形式,可以看出干燥试件属于单一的剪切破裂,饱和试件则存在主破裂和多个局部破裂,二者破坏形式与对应的声发射特征吻合。

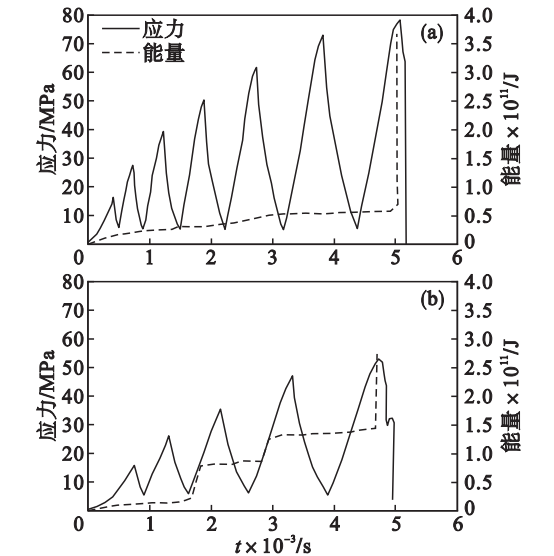


图 5 应力-时间-能量累积关系曲线
Fig. 5 Stress-time-energy relationship of sandstone under different moisture contents
(a)—干燥试件;(b)—饱和试件.

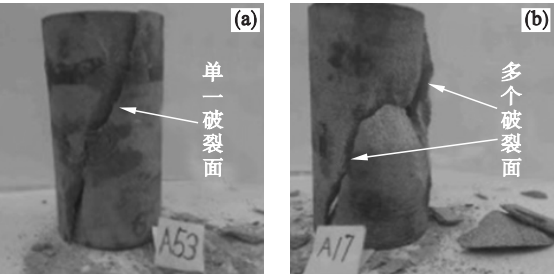


图 6 试件破坏形式
Fig. 6 Specimen failure modes
(a)—干燥试件;(b)—饱和试件.

从声发射累计数的数量变化来看,干燥试件在整个加卸载过程中能量累积为 $3.87 \times 10^{-11} \text{ J}$,饱和试件能量累积为 $2.58 \times 10^{-11} \text{ J}$,仅为干燥试件的 66.67%. 该现象反映出饱和试件声发射活动能力要远低于干燥试件. 这是由于饱和试件内部的水降低了岩石颗粒间接触面的摩擦力,同时岩石内部的胶结物在水的作用下发生软化,使得

岩石在裂纹萌生扩展过程中所需能量减少,导致声发射活动减少.

2.3 加卸载响应比分析

加卸载响应比(load/unload response ratio , LURR)理论是 Yin 等^[10]提出的用于研究非线性系统失稳前兆和失稳预报的理论,LURR 值用 Y 表示, $Y = X_+ / X_-$, X_+ 和 X_- 分别表示加载与卸载阶段的响应. 通常用下式计算响应量:

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow \infty} \frac{\Delta R}{\Delta P} \tag{1}$$

式中 ΔR 和 ΔP 是当荷载为 P 时, P 和响应 R 所对应的增量. 通过这一指标来研究岩石的失稳破坏过程:当岩石处于弹性阶段时 $X_+ = X_-$, $Y = 1$;岩石发生损伤时, $X_+ > X_-$, $Y > 1$ 且随着比值增加 Y 值继续增大;当岩石临近失稳, Y 值达到最大. 地震学中通常采用地震能量 E 作为响应量,响应比 Y 表示如下:

$$Y = \left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+ / \left(\sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_- \tag{2}$$

本文用声发射能量数代替地震能量来对弱胶结砂岩的加卸载响应比展开研究. N_+ 和 N_- 分别为加载和卸载时声发射能量数目,当 $m = 1$ 时,认为 E^m 为声发射能量本身. 图 7 为本文典型干燥和饱和试件加卸载响应比 Y 随时间变化曲线, Y 值由每个循环加载过程中的加载段及卸载段的声发射能量数计算获得.

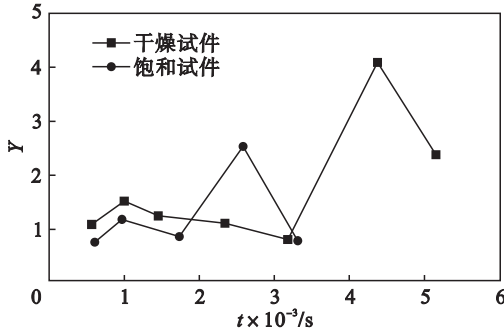


图 7 加卸载响应比 Y 随时间变化曲线
Fig. 7 Vaule Y of LURR vs time

如图 7 所示,干燥和饱和试件的 Y 值随时间的变化呈现类似的趋势,即“小幅升高—降低—急剧升高—迅速回落”. 在初始加载阶段,加载造成岩石内部孔隙压密和微裂纹产生,声发射能量释放,卸载时应力降低,发生弹性变形岩石恢复,释放能量比加载时小, Y 值升高. 随着应力水平升高,岩石中聚集能量增加,同时损伤累积,不断出现新的微裂纹并与旧有裂纹连通,该阶段加载产生的声发射能量略小于卸载, Y 值随循环加载渐次小幅降低;当应力水平进一步升高,宏观贯通产

生 ,导致试件稳定性迅速下降 ,加载阶段产生更多声发射能量 , Y 值急剧升高 ;当经过峰值强度后 ,试件即将发生宏观失稳破坏 ,其内部的应力 - 损伤变化对外界的扰动不再敏感 ,加卸载响应比 Y 值会迅速下跌 .可见 ,对于干燥和饱和试件来说 , Y 值迅速回落可以看作是岩石失稳破坏的前兆 .

虽然饱和试件与干燥试件的 Y 值变化规律趋势相近 ,但是二者仍存在差异 .加卸载响应比的峰值对应岩石试件宏观裂纹的形成时刻 ,故本文引入加卸载响应比峰值特征时间并对此进行分析 .对试件循环加卸载过程的时间进行归一化 ,令 Y 值峰值强度时刻为 T_1 ,试件破坏时刻为 T_2 ,则 $T = T_1/T_2$ 即为 Y 值的峰值特征时间 .不同饱和状态的试件 T 值计算结果见表 2 .

表 2 不同试件峰值特征时间

Table 2 Characteristic peak time for different specimens

干燥			饱和		
A35	A49	A53	A17	A42	A60
0. 88	0. 83	0. 85	0. 77	0. 72	0. 75

从表 2 可以看出 ,相对于干燥试件 ,饱和试件的 $T_{\text{饱和}}$ 值较小 ,均值为 0. 746 ,比干燥试件的 $T_{\text{干燥}}$ 均值 0. 853 低 12. 58% ,说明饱和试件加卸载响应比峰值强度在岩石受载过程中出现较早 ,而干燥试件加卸载响应比峰值强度出现较晚 ,表现为更加突然的岩石失稳破坏 .可以推断 ,由于饱和试件中含水造成的岩石强度弱化、内部颗粒间摩擦减弱等导致了其 Y 值的峰值特征时间的提前 .

3 结 论

- 1) 水对弱胶结砂岩的抗压强度和变形特征产生较大影响 .饱和试件的抗压强度较干燥试件降低 28. 9% ,塑性滞回环的个数比干燥试件少 2 个 ,饱和试件压密阶段更长 ,达到峰值强度时饱和试件轴向应变比干燥试件小 16. 7% .
- 2) 水对循环加卸载过程中声发射特征具有显著影响 .饱和试件在受压过程中声发射能量累计数出现三次阶跃式增长 ,干燥试件仅在失稳破坏前出现陡增 ,整个受载过程饱和试件的声发射能量累计数比干燥试件低 33. 3% .
- 3) 作为岩石失稳判断的前兆指标 ,饱和试件和干燥试件均表现出“ 小幅升高—降低—急剧升高—迅速回落 ”的变化趋势 ;饱和试件的加卸载响应比峰值特征时间比干燥试件早出现 12. 5% ,

- 试件失稳破坏持续时间较长 .
- 本文从砂岩试件的强度变形特征 ,声发射特征和加卸载响应比等方面讨论了干燥和饱和砂岩试件在循环载荷下的力学响应特性 .下一步需要在矿山现场开展现场检测、试验以及数值模拟等工作 ,研究循环载荷和水岩作用条件下工程岩体的力学响应 .
- 参考文献：
- [1] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* ,1993 ,30(7) : 883 - 899 .

[2] Mansurov V A. Acoustic emission from failing rock behavior [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* ,1994 ,27(3) : 173 - 180 .

[3] Pestman B J ,van Muster J G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* ,1996 ,33(6) 585 - 593 .

[4] Aker E , Khn D , Vavryuk V , et al. Experimental investigation of acoustic emissions and their moment tensors in rock during failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2014 ,70 286 - 295 .

[5] 王晓南 ,陆菜平 ,薛俊华 ,等 . 煤岩组合体冲击破坏的声发射及微震效应规律试验研究[J]. *岩土力学* ,2013 ,34(9) : 2569 - 2575 .
(Wang Xiao-nan , Lu Cai-ping , Xue Jun-hua , et al. Experimental research on rules of acoustic emission and microseismic effects of burst failure of compound coal-rock samples[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2013 ,34(9) 2569 - 2575.)

[6] Lu Y F , Shao J F. Modeling of an-isotropic damage in brittle rocks under compression dominated stress[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2002 ,26(10) 945 - 961 .

[7] Eberhardt E ,Stead D ,Stimpson B. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* ,1999 ,36(3) 361 - 380 .

[8] 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 Su-chao ,Feng Xia-ting ,Chen Bing-rui. 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.)

[9] Akai K ,Ohnishi Y. Strength and deformation characteristics of soft sedimentary rock under repeated and creep loading [C]//The Fifth International Congress on Rock Mechanics. Melbourne ,1983 :A121 - A124 .

[10] Yin X C ,Mora P ,Peng K ,et al. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction[J]. *Pure and Applied Geophysics* , 2002 ,159(10) 2511 - 2523 .