

文章编号: 1000-7598 (2012) 03-0725-07

盐岩三轴卸荷力学特性试验研究

郭印同¹, 杨春和¹, 付建军²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

摘 要: 结合金坛地下盐穴储气库工程, 以腔体围岩实际受力状态为研究依据, 进行了盐岩卸围压力学特性试验, 得到了盐岩卸围压过程的应力-应变关系、变形特征及其规律。试验结果表明, 在卸围压初始阶段, 试样的轴向和径向应变增加相对缓慢, 且应变值和围压基本呈线性, 随着围压继续降低, 轴向与径向应变值急剧增加; 卸载曲线与加载曲线相比, 在最大主应力 σ_1 相等的条件下, 当卸载围压达到与常规三轴压缩围压相对应值时, 对应的轴向和径向应变值较三轴压缩时应变值要大, 表明卸荷试验能引起试样更大的变形, 卸荷产生的扩容量比加载时扩容量更大, 更容易导致试样变形破坏; 盐岩卸围压表现为塑性变形特征, 与其他硬岩卸围压脆性破坏有较大区别。研究结果对盐穴储气库工程的稳定性评价和注采气过程具有一定的指导意义和参考价值。

关 键 词: 盐岩; 储气库; 卸围压试验; 应变

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental research on mechanical characteristics of salt rock under triaxial unloading test

GUO Yin-tong¹, YANG Chun-he¹, FU Jian-jun²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Mid-South Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Changsha 410014, China)

Abstract: With the project of Jintan underground gas storage, taking the cavity actual bearing conditions as the object of study, carrying out unloading confining pressure test of salt rock under different conditions, the complete stress-strain curves, deformation characteristics are obtained. The test results show that axial and radial strains increase slowly in the initial stage of unloading confining pressure; and the relation between strain and confining pressure is linear. Along with the confining pressure continuous decrease, axial and radial strain values increase sharply. Comparing the loading and unloading curves, under the conditions of the same maximum principal stress, when the unloading confining pressure is the same as triaxial compression pressure value, the axial and radial strains variations are larger than that of loading conditions. Under the same initial stress conditions, the changing magnitude of stress required for rock failure is less than that of triaxial compressive process. It is shown that the plastic deformation of salt rock is different from hard rock of brittle failure under unloading confining pressure. The conclusion can be useful in underground gas storage engineering stability analysis and gas injection/extraction process.

Key words: salt rock; gas storage; unloading confining pressure test; strain

1 引 言

目前针对地下空间岩土工程问题, 国内外学者通常采用加载试验的方法进行岩石力学特性研究, 并且对水电工程地下洞室开挖等属于卸荷力学状态的研究也大多采用常规的加载方式。然而, 岩体加

载和卸载过程是不同的应力路径, 其卸载条件下变形和破坏机制与常规压缩条件下的加载过程有本质的不同, 岩体表现出的力学及变形特性也有本质区别^[1-3]。

国外学者从 20 世纪 70 年代就开始对卸荷应力路径下的岩石力学问题开展了相关研究工作。近年

收稿日期: 2010-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50904062, 51104144); 国家重点基础研究发展规划 (973) (No. 2009CB724603, 2010CB226701); “十二五”国家科技重大专项 (No. 2011ZX05005-006)。

第一作者简介: 郭印同, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事岩石力学及其在石油工程中的应用研究。E-mail: guoyt0724@yahoo.com.cn

来随着我国水电工程的发展和深部矿山的开采,国内岩土工程学者也逐渐开展了岩石卸荷力学特性研究,取得了一系列成果。尤明庆等^[4]介绍了模拟地下岩体破坏的三轴卸围压试验,以塑性变形量和本征强度统一研究了三轴压缩和卸围压两种力学过程,提出了材料参数弱化模量来描述岩样的本征强度降低。

黄润秋等^[5-8]结合锦屏水电站洞室开挖工程,进行了不同卸荷路径条件下大理岩室内卸荷试验研究,得到了高应力条件下的卸荷力学特性。周小平等^[9]根据损伤力学理论建立了岩石处于卸荷条件下的全过程应力-应变关系,得到了岩石卸荷破坏所需要的应力比连续加载破坏时小、卸荷破坏时的变形比连续加载时大的结论。吕颖慧等^[10]进行了高应力条件下卸围压并增大轴压的花岗岩卸荷试验,描述了卸荷过程中岩石渐进破坏的应力-应变曲线和力学参数损伤劣化规律,建立了岩石由压剪破裂逐渐过渡到张剪破坏的渐进演化体系。另有多位学者^[11]对煤岩、砂岩等进行了卸荷试验研究。

上述文献中卸荷试验多针对水电地下洞室与深部采矿工程,故卸荷试验研究对象多为硬脆性岩石,如花岗岩、大理岩、煤岩等,对软岩卸荷试验条件下的研究几乎没有涉及。而我国目前开展的能源天然气地下盐穴储气库工程中,在储气库的水溶造腔以及注采气运行过程中,腔体围岩实际上处于逐渐卸载及加卸载的应力环境^[12],因此,有必要开展盐岩三轴条件下卸载力学特性研究。

本文以江苏金坛在建储气库盐矿钻孔取芯盐岩为研究对象,在实验室开展了储气库盐岩在三轴条件下峰前卸围压试验研究,得到了加卸载应力路径下的全过程曲线,并与常规三轴压缩试验结果进行对比分析,得到了盐岩在不同围压条件下卸围压过程的变形特性及其规律,其结果可对储气库造腔及运行过程中腔体稳定性评价提供技术参考。

2 试验准备与方案设计

2.1 试验准备

本次试验盐岩样品取自江苏金坛盐矿,取芯深度为 900~1 100 m。经矿物含量分析,主要成分为 NaCl、Na₂SO₄ 和不溶物,盐岩组分比例在 85% 以上,不溶物成分主要为钙芒硝泥岩、云灰质泥岩及膏泥岩等。

按照国际岩石力学学会的有关标准加工。由于盐岩试样遇水易潮解,加工过程中采用干式法打磨

加工,以避免引起力学性质的改变。加工试样直径为 50 mm,高度为 100 mm 的标准圆柱体,上下两个端面的平行度在 ± 0.03 mm 以内,试样如图 1 所示。



图 1 典型盐岩试样

Fig.1 Typical samples of salt rock

2.2 试验方案

本次卸荷试验在中国科学院武汉岩土力学研究所 MTS815.03 型岩石力学试验机上完成。室内三轴试验条件下,卸荷试验可分为卸轴向载荷和卸围压两种情况^[13]。研究循环加卸载条件下的力学特性属于卸轴向载荷;而针对卸围压试验,又分为保持轴向载荷不变,同时卸围压的卸荷试验与增加轴压的同时卸围压的卸荷试验两种方案。

笔者此处采用的为卸围压试验,具体的试验方案步骤如下:

(1) 首先以 0.05 MPa/s 的速率施加静水压力 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) 到设定值,根据实际工况本次试验设定围压分别为 2.5、5.0、10.0、15.0、20.0 MPa;

(2) 以 0.05 MPa/s 施加轴压 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 至预定的初始应力水平;

(3) 以 0.05 MPa/s 的速率卸围压的同时,以 0.05 MPa/s 的速率增加轴压,即保持最大主应力 σ_1 不变;

(4) 达到极限变形,停止试验。

同时为了能够对比常规三轴压缩与卸围压试验条件下盐岩力学特性的差异,同时进行了相应围压条件下的三轴压缩试验,卸荷试验参数见表 1 所示。

表 1 三轴卸荷试验工况
Table 1 Conditions of triaxial unloading tests

试样编号	围压/MPa	试验类型	偏应力卸载点/MPa
1 [#]	2.5	卸围压	31.77
2 [#]	5.0	卸围压	38.35
3 [#]	10.0	卸围压	57.29
4 [#]	15.0	卸围压	62.51
5 [#]	20.0	卸围压	59.04

3 试验结果与分析

3.1 变形特性

首先进行了盐岩常规三轴压缩试验, 围压数值见表1。图2为三轴压缩全过程应力-应变关系曲线, 表2为三轴压缩试验最大与最小主应力值。不足之处是由于试验机应变测试传感器量程所限, 在可测量范围内未得到盐岩试样破坏阶段。从图2中可以得到, 围压为2.5 MPa时其应力-应变关系曲线有一个峰值应力点, 后继续加载过程中, 应力降低值较小, 引起轴向和径向应变的急剧增加; 而其余试验围压条件下盐岩试样均表现为应变硬化特征, 在试验机应变传感器量程范围内都未得到应力降低段; 同时发现, 除低围压(2.5 MPa)外, 其余围压三轴压缩过程中轴向应变值均大于径向应变值。

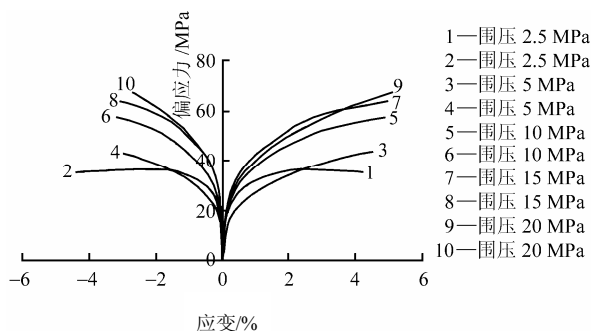


图2 盐岩三轴压缩应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain curves of salt rock in triaxial compression tests

表2 三轴压缩试验最大与最小主应力值
Table 2 The maximum principal stresses and the minor principal stresses of triaxial compression tests

试样编号	围压/MPa	最大主应力/MPa
C1 [#]	2.5	39.12
C2 [#]	5.0	48.59
C3 [#]	10.0	67.25
C4 [#]	15.0	78.99
C5 [#]	20.0	87.44

图3为盐岩在围压(数值见表1)下峰前卸围压应力-应变关系曲线。从图中可以看出, 在保持最大主应力 σ_1 不变条件下卸围压时, 轴向与径向应变斜率很小。卸围压开始之前, 试样已产生侧向扩容, 但量值较小; 卸围压开始之后, 轴向和径向应变都急剧增加, 即表现出明显的侧向扩容。卸围压试验与常规三轴压缩试验相比, 其应力-应变关系曲线中轴向和径向应变更加平缓。与其他硬脆性岩石在卸

围压试验中表现出强烈的脆性特征不同, 盐岩卸围压过程仍表现为塑性变形特征, 其轴向与径向应变急剧增加, 侧向扩容明显, 在传感器可测量范围内仍未得到试样破坏阶段。在围压为2.5 MPa卸围压试验中, 当围压卸载到0.15 MPa时, 最大主应力为 $\sigma_1 = 34.27$ MPa, 而盐岩的单轴抗压强度均值为25 MPa左右, 由此可得, 当试样经历了一个加载围压到卸载围压过程后, 盐岩的抗压强度参数得到增加。

地下工程实际工况条件下, 岩体本身处于三向受力状态, 其加载过程已经完成^[12]。因此, 在分析卸围压试样变形过程时可将加载阶段引起的轴向与径向应变暂时忽略不计, 只研究卸载开始后由于卸围压引起的变形, 并设定其变形量从0开始, 因此, 可得到图4忽略加载变形后试样卸围压阶段的应力-应变关系曲线。

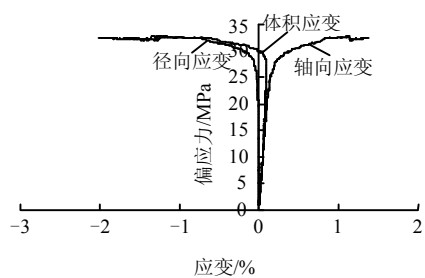
由图4可知, 在不考虑初始加载压缩变形阶段条件下, 卸围压阶段试样变形规律为: 在卸围压初始阶段, 轴向和径向应变值相差不大, 卸围压初始阶段, 应力-应变关系曲线呈近似线性发展, 而当卸围压应变值达到一定值时, 随围压继续降低, 轴向和径向应变都呈加速增加。应力-应变关系曲线最突出的特征是体积应变曲线比较光滑, 在破坏前没有明显的突变, 其变化趋势与径向应变的发展规律一致。

3.2 卸围压与应变分析

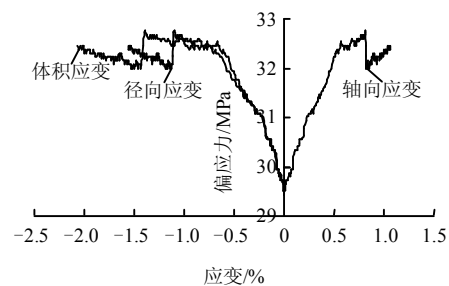
图5为三轴卸荷时围压-应变关系曲线, 表3为三轴卸荷时围压-应变试验结果。从图5和表3中可知, 在加载试验终止段, 不同围压条件下卸围压点轴向应变值均大于径向应变值; 卸围压开始阶段, 随围压降低, 试样的轴向和径向应变增加相对缓慢, 两者之间的差值呈逐渐减小的趋势, 且应变值和围压基本上呈线性关系; 随着围压继续降低, 轴向与径向应变值都急剧增加, 且和围压不再呈线性关系, 试样出现不可恢复的塑性变形。

3.3 卸围压与三轴压缩试验对比

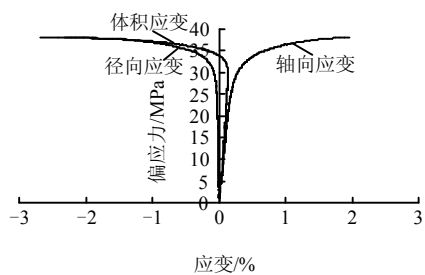
图6为卸围压与常规三轴压缩试验应变结果对比, 表4为卸围压与常规三轴压缩结果对比。从图6和表4中可知, 在最大主应力 σ_1 相同条件下, 卸载曲线与加载曲线相比, 当卸载围压达到与常规三轴压缩围压相应值时, 对应的轴向应变和径向应变值较加载时变化量要大, 说明卸载试验能引起试样更大的变形量, 更容易导致试样破坏。在相同主应力差下, 卸载产生的扩容量比加载产生的扩容量更大。



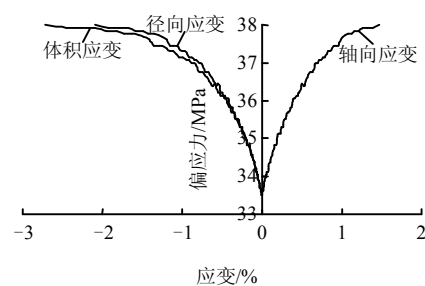
(a) 围压 2.5 MPa



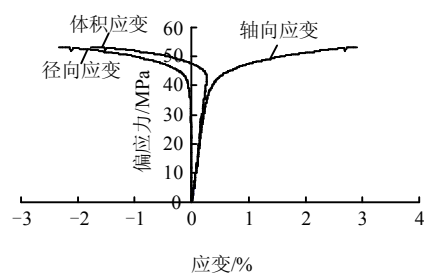
(a) 围压 2.5 MPa



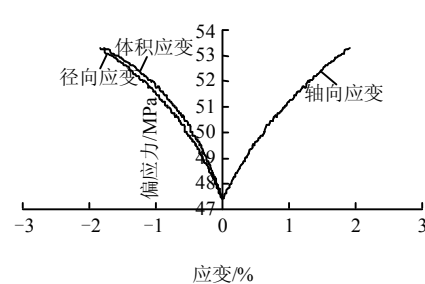
(b) 围压 5.0 MPa



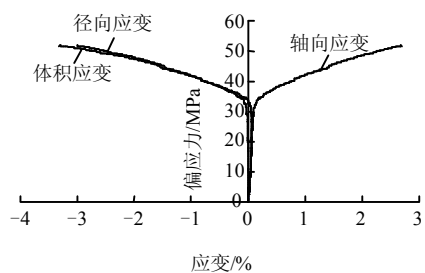
(b) 围压 5.0 MPa



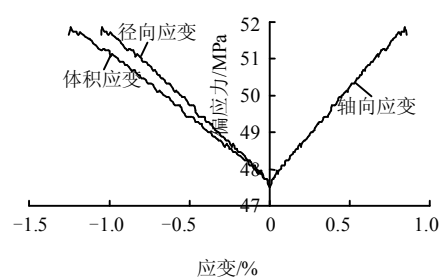
(c) 围压 10.0 MPa



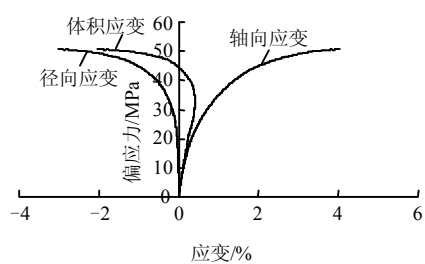
(c) 围压 10.0 MPa



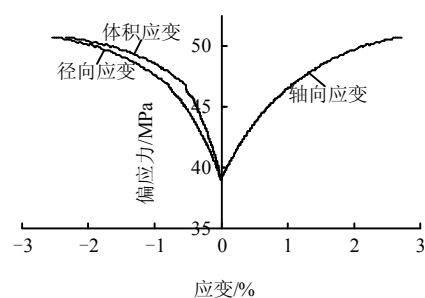
(d) 围压 15.0 MPa



(d) 围压 15.0 MPa



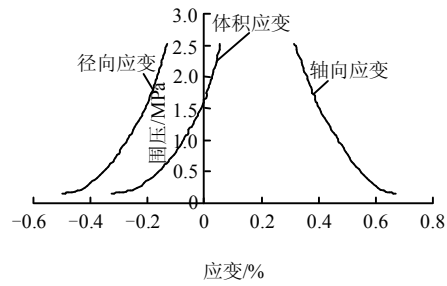
(e) 围压 20.0 MPa



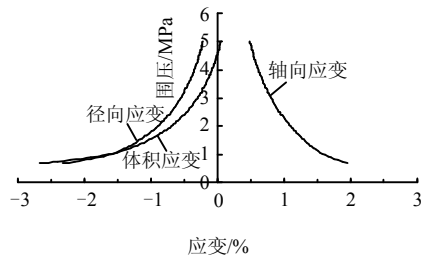
(e) 围压 20.0 MPa

图3 峰前卸围压试验应力-应变关系
Fig.3 Stress-strain curves of pre-peak unloading
confining pressure

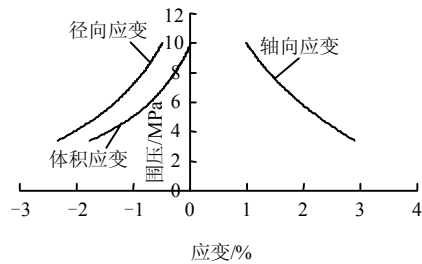
图4 忽略加载变形后卸围压阶段的应力-应变关系曲线
Fig.4 Stress-strain curves of rock samples in unloading
without considering initial strain



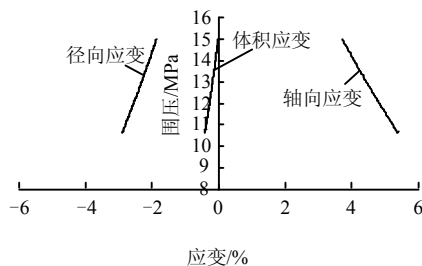
(a) 围压 2.5 MPa



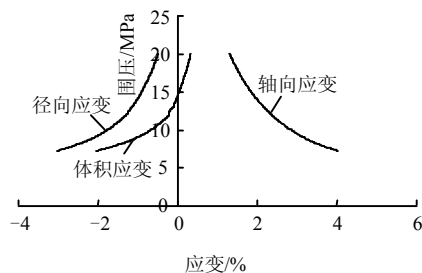
(b) 围压 5.0 MPa



(c) 围压 10.0 MPa



(d) 围压 15.0 MPa



(e) 围压 20.0 MPa

图5 三轴卸荷围压-应变关系曲线

Fig.5 Triaxial unloading confining pressure vs. strain curves

表3 三轴卸荷围压-应变试验结果

Table 3 Triaxial unloading confining pressure vs. strain test results

试样 编号	卸载 围压点 /MPa	终止 围压点 /MPa	卸载点 轴向应 变/%	终止点 轴向应 变/%	卸载点 径向应 变/%	终止点 径向应 变/%
1 [#]	2.5	0.15	0.31	0.67	-0.13	-0.50
2 [#]	5.0	0.70	0.49	1.96	-0.22	-2.32
3 [#]	10.0	3.40	0.99	2.90	-0.48	-2.33
4 [#]	15.0	10.70	3.71	5.40	-1.87	-2.90
5 [#]	20.0	7.26	1.30	4.03	-0.49	-3.03

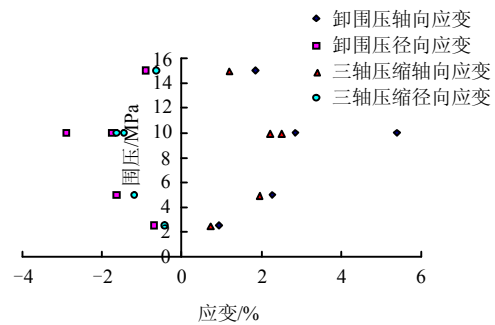


图6 卸围压与常规三轴压缩应变对比

Fig.6 Triaxial unloading and compression confining pressure vs. strain curves

表4 试样卸围压与常规三轴压缩结果对比

Table 4 Comparison between triaxial unloading and compression test results

试样 编号	对应围压 /MPa	最大主应力 /MPa	对应轴向 应变/%	对应径向 应变/%
2 [#]	2.5	38.35	0.94	-0.70
3 [#]	5.0	57.29	2.26	-1.64
4 [#]	10.0	62.51	5.40	-2.90
5 [#]	10.0	59.04	2.84	-1.75
5 [#]	15.0	59.04	1.84	-0.90
C1 [#]	2.5	38.35	0.71	-0.42
C2 [#]	5.0	57.29	1.93	-1.20
C3 [#]	10.0	62.51	2.20	-1.46
C3 [#]	10.0	59.04	2.48	-1.65
C4 [#]	15.0	59.04	1.17	-0.64

注：对应围压是指由高级围压卸载到低一级围压时与相应的常规三轴压缩试验结果的对比分析。

三轴加载试验中，试样均处于三向压缩状态，其破坏是增加轴向应力达到试样的承载能力，抵抗破坏时的强度宏观上凝聚力起到主导作用。而在卸载试验中，由于侧向围压逐渐减小，卸荷效应导致抗破坏时的岩石强度宏观上凝聚力减小、同时更主要的由内摩擦角承担。两者主要不同点为：

(1) 三轴加载试验中，试样破坏是由于其轴向压缩变形破坏所致；而卸荷试验中，试样破坏是由

于其卸荷方向的强烈扩容所致。

(2) 在加载试验中随围压的增大, 峰值轴向应变逐渐增加, 延性特征较为明显。

(3) 在相同围压条件下, 达到相同的最大主应力时卸荷试验中应变大于加载试验, 卸荷试验条件能引起试样更大的变形量, 更容易导致试样破坏。

(4) 试样加载试验破坏是吸收试验机的能量, 而卸载围压试验是通过自身释放能量来实现的。

4 结 论

(1) 卸围压与常规三轴压缩试验相比, 其应力-应变关系中轴向和径向应变更加平缓。

(2) 在卸围压的初始阶段, 试样的轴向和径向应变增加相对缓慢, 且应变值和围压基本上呈线性关系, 随着围压的继续降低, 轴向应变与径向应变值急剧增加, 且和围压不再呈线性关系, 试样出现不可恢复的塑性变形。

(3) 在最大主应力 σ_1 相同的条件下, 当卸载围压达到与常规三轴压缩围压相应值时, 对应的轴向应变和径向应变值较加载时变化量要大, 卸荷试验能引起试样更大的变形, 更容易导致试样变形破坏。

(4) 在相同的主应力差下, 卸载产生的扩容量比加载的扩容量更大。

(5) 盐岩卸围压试验变形表现为塑性变形特征, 与其他硬脆性岩石均有较大区别。

参 考 文 献

- [1] 徐松林, 吴文, 王广印, 等. 大理岩等围压三轴压缩全过程研究 I: 三轴压缩全过程和峰前、峰后卸围压全过程试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 763—767.
XU Song-lin, WU Wen, WANG Guang-yin, et al. Study of complete procedures of marble under triaxial compression I: Testing study of complete procedure of triaxial compression and the processes of unloading confining pressure at the pre-peak and post-peak[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(6): 763—767.
- [2] 刘豆豆, 陈卫忠, 杨建平, 等. 脆性岩石卸围压强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2588—2594.
LIU Dou-dou, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. Experimental research on strength characteristic of brittle rock unloading confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2588—2594.
- [3] 沈军辉, 王兰生, 王青海, 等. 卸荷岩体的变形破裂特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2028—2031.
SHEN Jun-hui, WANG Lan-sheng, WANG Qing-hai, et al. Deformation and fracture features of unloading rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(12): 2028—2031.
- [4] 尤明庆, 华安增. 岩石岩样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24—29.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Triaxial confining depressure test of rock sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(1): 24—29.
- [5] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21—33.
HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 21—33.
- [6] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2205—2213.
HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2205—2213.
- [7] 高春玉, 徐进, 何鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456—460.
GAO Chun-yu, XU Jin, HE Peng, et al. Study of mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 456—460.
- [8] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 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): 2138—2145.
WANG Bin, ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, et al. Experimental study of mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 2138—2145.

- [9] 周小平, 哈秋聆, 张永兴, 等. 峰前围压卸荷条件下岩石的应力-应变全过程分析和变形局部化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3236—3245.
ZHOU Xiao-ping, HA Qiu-ling, ZHANG Yong-xing, et al. Analysis of localization of deformation and complete stress-strain relation for mesoscopic heterogenous brittle rock materials when axial stress is held constant while lateral confinement is reduced[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(18): 3236—3245.
- [10] 吕颖慧, 刘泉声, 江浩, 等. 基于高应力下花岗岩卸荷试验的力学变形特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 337—343.
LÜ Ying-hui, LIU Quan-sheng, JIANG Hao, et al. Study of mechanical deformation characteristics of granite in unloading experiments of high stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 337—343.
- [11] 张黎明, 王在泉, 宋全锋, 等. 粉砂岩卸荷破坏全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊1): 5043—4037.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SONG Quan-feng, et al. Experimental study of the total failure course of siltsand under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 5043—4037.
- [12] FUENKAJORN K, PHUEAKPHUM D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt[J]. **Engineering Geology**, 2010, 112(1—4): 43—52.
- [13] 李宏哲, 夏才初, 闫子舰, 等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2104—2109.
LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, YAN Zi-jian, et al. Study of the marble unloading properties of Jinping Hydropower Station under high stress conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2104—2109.