

文章编号: 1000-7598(2009)12-3562-07

循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究

杨春和¹, 马洪岭¹, 刘建锋²⁻⁴

(1.中国科学院武汉岩土力学所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.四川大学 水力学与山区河流开发保护重点实验室, 成都 610065;
3.四川大学 工程科学与灾害力学研究所, 成都 610065; 4.四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘 要: 在MTS815 Flex test GT岩石力学试验机上对盐岩进行了单轴循环加、卸载试验研究盐岩的变形特性, 试验表明, 循环加、卸载强化了变形的线性特征, 各级卸载、再加载曲线主要是由直线段组成。随着荷载级别的增高, 直线段的变形模量总体上呈现微弱上升的趋势, 各级卸载、再加载曲线变形模量的变异系数分别为 8.05%和 7.45%, 可以用各级加、卸载曲线直线段变形模量的平均值来分别表征加、卸载的变形特征。每级卸载曲线的变形模量都要大于再加载曲线的变形模量, 卸载的泊松比都要小于再加载的泊松比。与单轴试验相比, 卸载和再加载的变形模量都要大于单轴应力应变全过程试验。根据以上分析, 得出了简单应力状态下加、卸载本构关系。对各级塑性滞回能进行了计算, 发现塑性滞回能随着级别的增高而增高, 并对其进行了拟合。分析表明, 卸载、再加载变形参数比单轴应力应变全过程试验参数更具有规律性, 更能表征盐岩地下工程中的变形特性。

关 键 词: 循环加、卸载; 盐岩; 变形

中图分类号: TU 458+.3

文献标识码: A

Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading

YANG Chun-he¹, MA Hong-ling¹, LIU Jian-feng²⁻⁴

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
3. Institute of Engineering Science and Disaster Mechanics, Sichuan University, Chendu 610065, China;
4. School of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Uniaxial cycling loading and unloading tests of rock salt were performed on MTS, and the results showed that loading and unloading progresses strengthen the linear character of curves; the main part of curves is linear. Followed with the step, deformation modulus is in slightly rising trend. The coefficient of variation of deformation modulus of unloading curves is 8.05%, while that of loading curves is 7.45%. So the deformation features can be characterized by the average deformation modulus of loading and unloading curves. In every step, the unloading deformation modulus is higher than the loading's, while the loading Poisson ratio is higher than the unloading's. Compared with uniaxial test, the loading and unloading deformation moduli are higher. Based on the analysis, the constitutive relation under simple stress state has been built. In every step plastic hysteresis energy was calculated, and the result showed it increased by the step. The analysis showed the deformation parameters under loading and unloading test are much more regular and consistent than those under uniaxial test, these parameters can characterize the deformation of underground engineering of rock salt better.

Key words: cycling loading and unloading; rock salt; deformation

1 引 言

岩石材料的弹性参数在传统的方法中是通过

单轴加载曲线获取的。岩石单轴压缩试验是进行岩石力学参数测定的基本方法, 但在实际的地下工程中, 围岩通常是处于一种卸荷的应力环境。由于岩

收稿日期: 2009-07-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973) (No. 2009CB724602, 2009CB724603); 国家杰出青年基金 (No. E50725414); 科技部重大国际合作计划项目 (No. 2007DFB60100); 国家自然科学基金 (No. 50774076)。

第一作者简介: 杨春和, 男, 1962年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事盐岩力学研究方面的工作。E-mail: chyang@whrsm.ac.cn

样单轴加载试验与岩体工程的实际情况完全不同，所以实验室测得的泊松比不能完全表征工程中的弹性参数。

加、卸载试验与普通单轴、三轴试验相比，可以揭示更多的力学现象。谢红强得出岩体在加、卸载力学条件下，岩体的力学性质有本质的区别。含有节理、裂隙的岩体，加载时仍有很好的力学性能，但卸载导致出现拉应力时，岩体中结构面的力学特性将发生本质的变化^[1]。任建喜对卸载损伤过程进行 CT 实时监测，得出了节理岩石的卸载破坏具有突发性^[2]。何世秀研究了真三轴和普通三轴侧向卸载条件下的屈服特性^[3]。哈秋龄等根据三峡工程坝基岩石的力学性质，提出了“卸荷岩石力学”的观点^[4]。

在盐岩试验中，试验室应用的盐岩试样是经过钻井取芯取得，盐岩试样原本处于地应力的环境中，经过取芯、密封、运输以及岩样加工，盐岩试样得到了足够长时间的应力释放。岩石的变形记忆特征^[5]说明了岩石曾经所受的应力状态对岩石变形的影响。在盐岩储存库的水溶开挖以及储气库采气过程中，盐岩围岩实际上处在逐渐卸载的应力环境中；而储气库注气时，盐岩围岩则是处在卸载后的再加载应力环境中。因此，在试验室中对盐岩进行加、卸载试验研究是非常有必要的。

本文利用 MTS 815 Flex Test GT 试验系统，对超深地层盐岩进行循环加、卸载试验，分析卸载阶段和再加载阶段的力学变形特性，从而为盐岩地下储存库稳定性分析提供更合理的力学参数和力学模型。

2 试验方法

本实验是在四川大学水利水电实验室 MTS 815 Flex Test GT 上进行。对 4 块盐岩分别进行单轴循环加、卸载试验，每次试验有 7 级等增量加、卸载，如表 1 所示。试验加载方式采取等速轴向应力控制，试验过程中测试试件轴向应力及纵横向变形。

表 1 循环加、卸载试验方案
Table 1 Cycling loading and unloading test scheme

加卸载级别	卸载 / MPa	加载 / MPa
1 级	7.70~0.25	0.25~8.30
2 级	8.30~0.25	0.25~9.00
3 级	9.00~0.25	0.25~9.60
4 级	9.60~0.25	0.25~10.30
5 级	10.30~0.25	0.25~10.90
6 级	10.90~0.25	0.25~11.50
7 级	11.50~0.25	0.25~破坏

本试验盐岩采自某油田盐岩钻井岩芯，深度为 1 900~2 080 m。试样均采用车床干车法对两端面和环面进行精细加工。根据国际岩石力学学会实验室与现场试验标准化委员会制定的《岩石力学试验规程》，试样直径大小与试样颗粒直径比要大于 10: 1，故试样加工尺寸为 $\varphi \times H = 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。

3 试验结果分析

图 1 为盐岩典型的单轴压缩应力-应变曲线图。

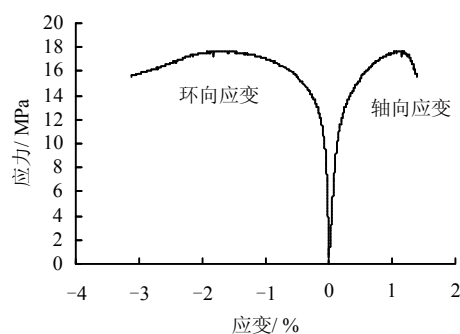


图 1 盐岩单轴应力-应变全程曲线
Fig.1 Complete stress-strain curves of rock salt under uniaxial loading

在处理盐岩试验数据过程中发现，盐岩的弹性段非常短且不明显，常常是变形模量随着应力、应变的增加而一直降低。同一曲线的弹性模量计算与选取的直线段有很大关系，如 57[#]盐岩，选取 1~2 MPa 段计算时，弹性模量为 18.05 GPa；选取 2~3 MPa 段计算时，弹性模量为 15.13 GPa；选取 3~4 MPa 段计算时，弹性模量为 13.12 GPa；选取 4~5 MPa 段计算时，弹性模量为 12.00 GPa；选取 5~6 MPa 段计算时，弹性模量为 11.19 GPa；从表 2 可以看出，盐岩的弹性模量和泊松比离散性非常大，分别达到 39%，52%，这种离散性不仅包含了岩样本身的离散性，更多地还有计算时带入的离散性。

表 2 加、卸载变形参数及单轴试验参数
Table 2 Parameters of loading and unloading test and aniaxial test

编号	卸载		加载		单轴加载	
	变形模量 / GPa	泊松比	变形模量 / GPa	泊松比	变形模量 / GPa	泊松比
76 [#]	24.85	0.086	18.79	0.390	8.48	0.368
120 [#]	26.66	0.087	23.61	0.153	12.63	0.310
74 [#]	21.90	0.083	17.64	0.256	4.50	0.278
57 [#]	31.61	0.078	26.65	0.103	11.30	0.066
平均值	26.26	0.080	21.67	0.230	9.23	0.260

图2为典型的盐岩循环加、卸载试验曲线。从图中可以看出,在超过上一级卸载载荷时,应力-应变曲线仍沿着原来的单轴加载曲线上升,这种现象就是岩石的变形记忆^[5-6]。已有研究证明,岩样经过轴向应力的加、卸载之后,变形的线性特征得到强化^[7],从图中可以看出,各级卸载和加载曲线有非常强的线性特征,明显的直线段更容易消除计算时带入的误差。盐岩的单轴加载和卸载后的加载存在很大的不同,笔者将卸载后的加载称为“再加载”。下面分别对卸载曲线和再加载曲线以及塑性滞回环进行分析。

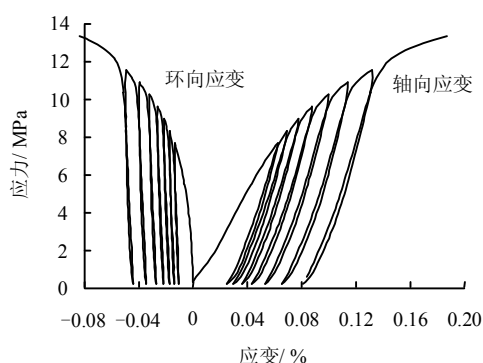


图2 典型盐岩循环加、卸载应力-应变关系曲线
Fig.2 Typical stress-strain curves of rock salt under cycling loading and unloading

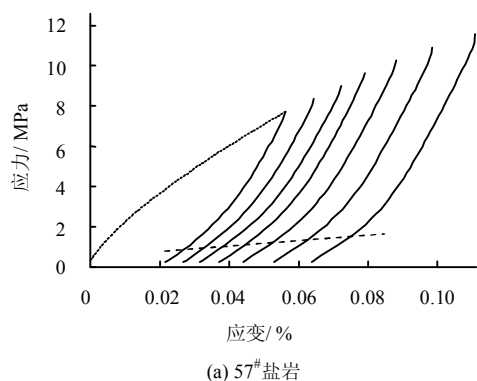
3.1 卸载曲线分析

图3为4块盐岩卸载阶段的应力-应变曲线,从总体上看,7级卸载曲线规律相同,每个曲线可以划分成两段,直线段和末端的曲线段。直线段和曲线段有明显的临界点,临界点随级数的增加而微量增加,近乎平行于 x 轴,看图3(a)中的平衡虚线,从应力角度曲线段只占总体的3%以下,从应变角度看仅占14.7%以下,曲线段仅仅是在压力接近0时出现或者说接近卸载-加载转折点时出现,可以认为,卸载曲线主要是由直线段构成,这与金属材料类似。

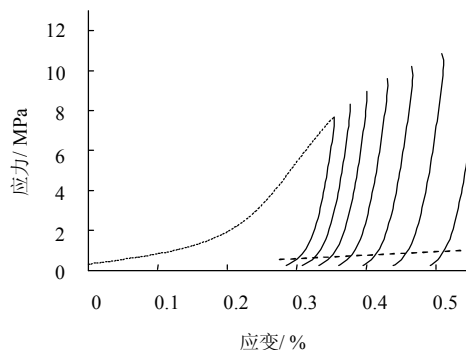
每级卸载曲线的直线段近乎平行,从计算的直线段的变形模量看(表3),随着级数的增加,变形模量也会增加,但增量不大,近乎相等,7级卸载曲线直线段的斜率最大的变异系数为8.05%,离散度非常小,可以认为,各级卸载曲线是平行的,可以用各级卸载曲线直线段变形模量的平均值来表示卸载曲线的变形特性。

在盐岩地下工程中,水溶建腔以及储气库采气过程盐岩围岩均处于应力卸荷环境之中,在数值建

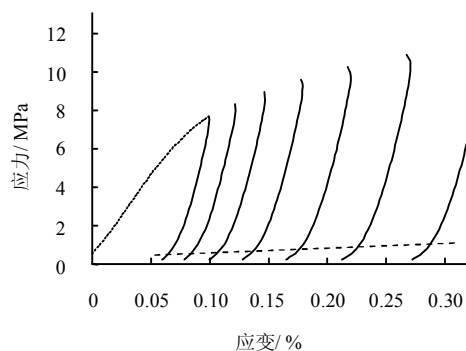
模选取参数时,选择卸载曲线的变形模量和泊松比更接近真实的物理状况。



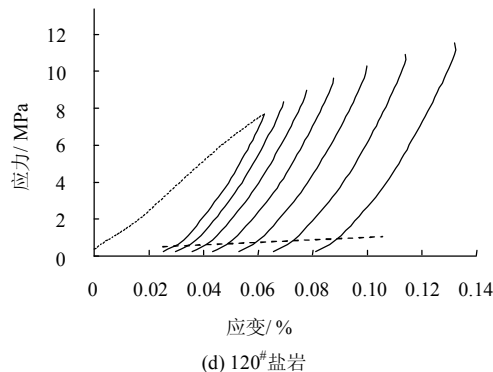
(a) 57#盐岩



(b) 74#盐岩



(c) 76#盐岩



(d) 120#盐岩

图3 循环卸载应力-应变关系曲线
Fig.3 Stress-strain curves under cycling loading and unloading

表 3 循环再加、卸载力学参数表
Table 3 Parameters under loading and unloading

加载级	编号及加载方式															
	76 [#]				120 [#]				74 [#]				57 [#]			
	卸载		加载		卸载		加载		卸载		加载		卸载		加载	
	变形 模量 / GPa	泊松比	变形 模量 / GPa	泊松比	变形 模量 / GPa	泊松比	变形 模量 / GPa	泊松比	变形 模量 / GPa	泊松比	变形 模量 / GPa	泊松比	变形 模量 / GPa	泊松比	变形 模量 / GPa	泊松比
1 级	23.99	0.096	18.56	0.351	25.61	0.081	22.77	0.159	19.79	0.070	15.35	0.196	28.83	0.070	23.25	0.083
2 级	24.39	0.093	19.18	0.366	26.57	0.091	22.70	0.129	19.66	0.084	16.44	0.225	28.99	0.070	24.68	0.088
3 级	24.81	0.086	19.24	0.372	26.90	0.076	23.40	0.153	21.5	0.088	17.41	0.238	30.68	0.075	26.87	0.102
4 级	24.15	0.089	18.77	0.375	26.20	0.094	23.55	0.146	22.07	0.088	18.21	0.239	33.29	0.072	27.3	0.093
5 级	24.87	0.082	18.56	0.429	26.07	0.093	24.16	0.152	22.53	0.086	18.63	0.264	32.99	0.081	28.13	0.116
6 级	25.47	0.078	18.8	0.431	27.15	0.092	24.37	0.156	23.29	0.080	18.84	0.285	32.93	0.087	27.75	0.101
7 级	26.27	0.078	18.4	0.406	28.15	0.083	24.30	0.174	24.48	0.083	18.57	0.345	33.55	0.089	28.59	0.139
平均值	24.85	0.086	18.79	0.390	26.66	0.087	23.61	0.153	21.90	0.083	17.64	0.256	31.61	0.078	26.65	0.103
标准差	0.800	0.007	0.320	0.032	0.835	0.007	0.700	0.013	1.763	0.006	1.313	0.048	2.069	0.008	1.961	0.019
变异系数/ %	3.22	8.36	1.70	8.22	3.13	8.14	2.96	8.84	8.05	7.70	7.45	18.78	6.55	10.19	7.36	18.47

3.2 再加载曲线分析

图 4 为 4 块盐岩的循环再加载应力-应变曲线。从再加载曲线看，在上升到卸载曲线载荷前，再加载曲线近似一条直线，且各级再加载曲线近乎平行。从计算的再加载曲线变形模量来看，变形模量随级数增加而增加，但变化较小，与平均值的离散度很小，变异系数低于 7.45%。可以用各级再加载曲线直线段变形模量的平均值来描述再加载曲线的变形特性。由岩石的记忆特性可知，当再加载最大应力低于地下盐岩的初始静水压力时，再加载曲线为直线。

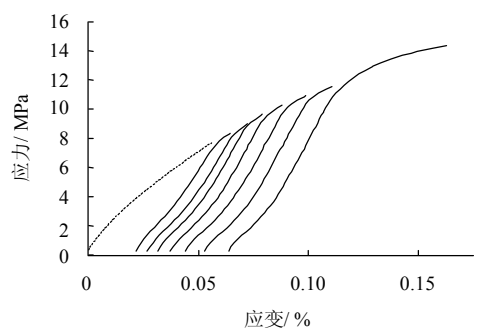
在盐岩地下储气库注气过程中，盐岩围岩均处于应力再加载状态，且储气库注气压力均低于地下盐岩的初始静水地应力，则在数值建模选取参数时，选择再加载曲线的变形模量和泊松比更接近真实的物理状况。

一般岩石的加、卸载曲线与初始加载曲线的斜率基本是一样的或差距不太大，而盐岩的加、卸载曲线的斜率明显大于初始加载曲线，这主要是因为应力释放对盐岩的物理力学性质影响比较大，这也说明了试验室中的盐岩弹性阶段很短。盐岩是比普通软岩还要软的岩石，且是结晶构造，在 2 000 m 下面埋深的盐岩处于约 40 MPa 的静水压力状态，经过钻井取芯、密封到岩样加工进入试验室，经过了足够长时间的应力释放，晶体之间应该有了部分滑移变形，由一种“较高致密”的晶体转变到“次高致密”的晶体。在试验室中，盐岩初始的力学行为并没有完全反映出地下 2 000 m 处盐岩真实的力学性质，建议盐岩试验之前对盐岩进行“静水地应力恢复”。

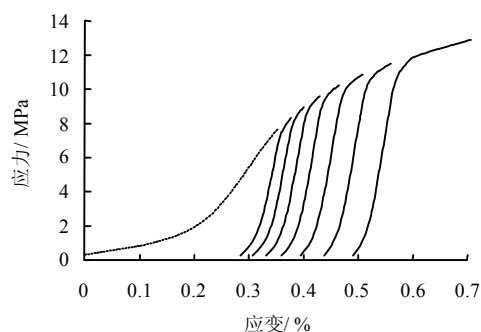
3.3 加、卸载对比分析

从图 3、图 4 以及表 3 都可以看出，每级卸载曲线的变形模量都要大于再加载曲线的变形模量，而再加载曲线的泊松比要大于卸载曲线的泊松比。这与大理岩在三轴围压下的加、卸载试验正好相反^[8]，原因应该是由围压的作用。按照变形模量计算，在同样的应力差范围内，卸载曲线的横向变形和纵向变形都要小于再加载曲线。从力学机制上讲，这是由于部分塑性变形引起的。

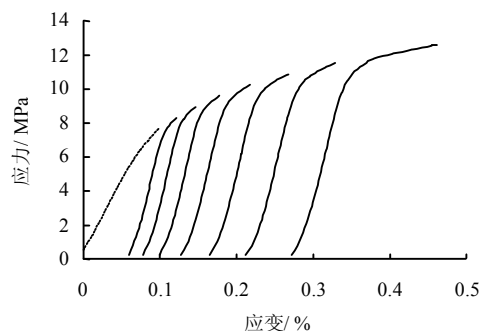
从上面分析可知，卸载变形模量可由各级卸载曲线变形模量的平均值来表征，再加载变形模量可由各级再加载曲线变形模量的平均值来表征。表 3 给出了 4 个试样加、卸载的变形参数平均值以及单轴加载的变形参数，由表 3 可以看出，单轴加载的变形模量从 4.5~12.63 GPa，泊松比变化范围为 0.066~0.368，离散性非常大，除了试样本身具有离散性外，还有人为计算带来的离散性、钻井取芯应力释放不同造成的离散性等。卸载和再加载的变形参数离散性要远小于单轴加载的变形参数，去除试样本身的离散作用，卸载和再加载变形参数更能表征岩样的变形特性，这一点盐岩与普通岩石不同^[9-10]。卸载和再加载情况的变形模量都要大于单轴加载时的弹性模量，这说明处于高地应力下的盐岩在钻井取芯之后得到了应力释放，原本在高地应力下的致密结构由于没有了围压的作用而变得“松散”，这里的“松散”是指力学意义上的“松散”，并非指密闭性意义上的松散，盐岩的密闭性公认为是远高于普通岩石的。



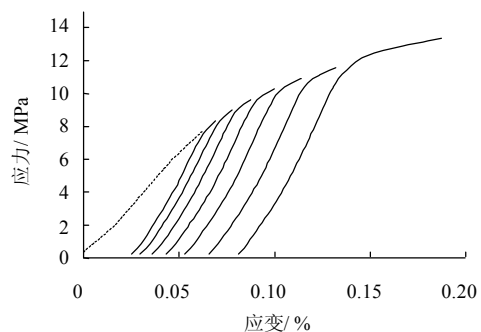
(a) 57# 盐岩



(b) 74# 盐岩



(c) 76# 盐岩



(d) 120# 盐岩

图 4 循环加载应力-应变关系曲线

Fig.4 Stress-strain curves under cycling loading and unloading

3.4 加、卸载本构关系

由前面的分析可知, 当加、卸载低于地下盐岩

初始静水压力时, 卸载和再加载曲线都遵循斜率不同的线性关系。为此, 建立简单应力下的加、卸载本构关系。

$$\sigma < \sigma_p: \begin{cases} \sigma = E_1 \varepsilon & \Delta \sigma > 0 \\ \sigma = E_2 \varepsilon & \Delta \sigma < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_1 为加载变形模量; E_2 为卸载变形模量; σ_p 为初始盐岩静水地应力。

$\sigma < \sigma_p$ 为加、卸载本构关系的适用条件, 即只有低于初始盐岩静水压力状态时, 加、卸载本构关系才有作用。一般来讲, 在盐岩工程中, 盐岩围岩的应力状态变化都要低于初始盐岩静水压力水平。

$\Delta \sigma > 0$ 或 < 0 是加、卸载判定准则, 当 $\Delta \sigma > 0$ 时为加载本构关系, 当 $\Delta \sigma < 0$ 时为卸载本构关系。

由图 5 可以看出, 虽然卸载和再加载都是线性本构关系, 但由于卸载和再加载过程不是同一个弹性过程, 即加、卸载有不同的变形模量, 每次卸载将会产生不同程度的塑性变形, 如图 5, 变形的大小与卸载的上、下限应力有关。对于复杂应力路径下的加、卸载变形特性, 需要更多的试验进行分析, 本文对此不做讨论。

盐岩地下洞室进行压气蓄能时, 每天都要经历一次压气和放气的过程, 从力学角度讲, 即加载和卸载的过程, 加、卸载本构关系对于压气蓄能具有重要的作用。

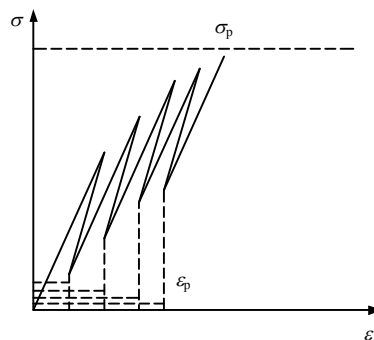


图 5 加、卸载本构关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of constitutive relation under loading and unloading

3.5 滞回能分析

塑性滞回环的存在已经为许多试验所证实, 且对塑性滞回环的特性也有许多的研究^[11]。图 6 为 57# 盐岩的第 2、第 4、第 6 级塑性滞回曲线。从曲线上看, 由于存在着塑性变形, 滞回曲线没有封闭。

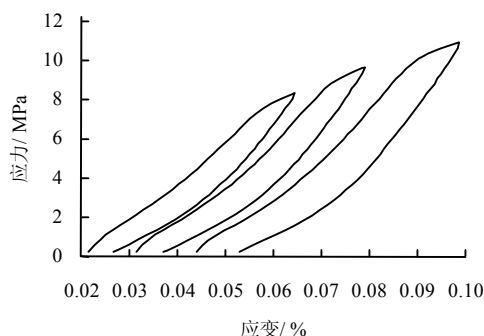


图 6 典型循环塑性滞回曲线
Fig.6 Typical step plastic hysteretic curve

滞回能是确定加、卸载过程中能耗量的主要参数。循环滞回能的大小等于它对应的滞回环的面积。

$$\Delta w_p = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} (\sigma_2 - \sigma_1) d\varepsilon \quad (2)$$

从式(2)中可以看出,塑性滞回能的大小除了与 $\sigma-\varepsilon$ 关系有关以外,还与加、卸载的上下限应力水平有关。

根据式 1 计算出了不同岩样不同级别的滞回能,如表 4。图 6 为不同级别的滞回能曲线,从总体上看,滞回能随着卸载载荷的增大而增大,图 7 为不同盐岩试样的塑性滞回能与卸载载荷关系曲线图。式(3)为塑性滞回能平均值随应力水平的拟合公式。

表 4 不同盐岩不同级别的滞回能
Table 4 Hysteresis energy of different rock salts in different stages

级别	滞回能 57 [#] (10^6J/m^3)	滞回能 74 [#] (10^6J/m^3)	滞回能 76 [#] (10^6J/m^3)	滞回能 120 [#] (10^6J/m^3)	平均值 (10^6J/m^3)
0.25~8.30	0.054 0	0.166 3	0.184 7	0.061 0	0.116 5
0.25~9.00	0.068 1	0.209 1	0.214 1	0.061 4	0.138 2
0.25~9.60	0.086 0	0.286 2	0.273 3	0.072 6	0.179 5
0.25~10.30	0.112 9	0.392 1	0.357 2	0.088 0	0.237 6
0.25~10.90	0.153 1	0.523 0	0.465 4	0.109 0	0.312 6
0.25~11.50	0.196 3	0.679 8	0.601 3	0.139 8	0.404 3

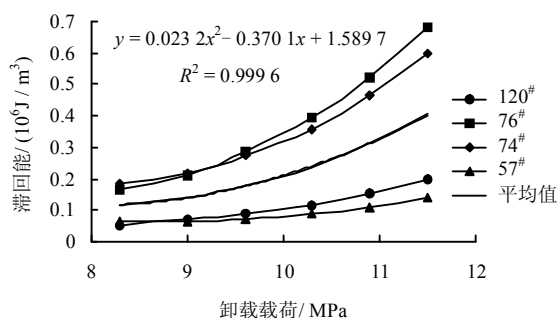


图 7 塑性滞回能与卸载载荷关系曲线
Fig.7 Relationships between plastic hysteresis energy and unloading stage

对塑性滞回能的平均值进行拟合,可得:

$$W_p = 0.023 2\sigma^2 - 0.370 1\sigma + 1.589 7 \quad (3)$$

式中: W_p 为塑性滞回能; σ 为卸载应力水平。

4 结 论

通过对循环加、卸载试验数据分析得到以下结论:

(1) 加、卸载强化了变形的线性特征,各级卸载曲线和再加载曲线存在着类似的性质,卸载和再加载曲线主要由直线段构成,用直线段的卸载变形参数和再加载变形参数对 2 个过程中的变形特性进行描述是符合实际情况的。

(2) 随着级别的增高,无论是卸载还是再加载,直线段的变形模量总体上呈上升的趋势,但增加并不明显,各级卸载曲线直线段变形模量的变异系数仅为 8.05%,各级再加载曲线直线段变形模量的变异系数仅为 7.45%,可以用各级曲线直线段变形模量的平均值来分别表征卸载曲线和再加载曲线的变形特征。

(3) 每级卸载曲线直线段的变形模量都要大于再加载曲线直线段的变形模量,同时,每级卸载曲线直线段的泊松比都要小于卸载曲线直线段的泊松比。即在同样的应力差范围内,卸载情况下的横向变形和纵向变形都要小于再加载情况下的,从力学机制上讲,这是由于塑性变形引起的。

(4) 同单轴试验相比,卸载曲线直线段的变形模量和再加载曲线直线段的变形模量都要大于单轴试验,而且表现了更强的规律一致性。根据分析得出了简单应力状态下的加、卸载本构关系。

(5) 各级塑性滞回能随着卸载应力水平的增高而增高,并对其关系进行了拟合。

通过对加、卸载试验的分析,建议盐岩试验前都要对试样进行“静水地应力”恢复。

致谢: 感谢四川大学水利水电学院 MTS815 材料特性实验室工作人员。

参 考 文 献

- [1] 谢红强, 何江达, 徐进. 岩石加卸载变形特性及力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 336—338.
XIE Hong-qiang, HE Jiang-da, XU Jin. Deformation characteristics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 336—338.

- [2] 任建喜, 葛秀润, 蒲毅斌. 节理岩石卸载损伤破坏过程 CT 实时监测[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 575—578.
REN Jian-xi, GE Xiu-run, PU Yi-bin. Real-time CT test of damage failure process of jointed rock sample in unloading confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 575—578.
- [3] 何世秀, 龙立华, 杨雪强, 等. 黏性土卸载屈服特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 449—452.
HE Shi-xiu, LONG Li-hua, YANG Xue-qiang, et al. Experimental study of yield property of clayey soil under unloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29 (Supp): 449—452.
- [4] 哈秋龄, 李建林, 张永兴, 等. 节理岩体卸载非线性岩石力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [5] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 57.
- [6] 韩贝传. 岩石的记忆功能及对岩体变形的影响[J]. 工程地质学报, 1998, 6(4): 326—332.
HAN Bei-chuan. The memory function of rock and its influence on deformation of rock mass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1998, 6(4): 326—332.
- [7] 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 Ming-qing. Strength and deformation of rock under complex loading path[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(1): 23—28.
- [8] 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 on mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 456—460.
- [9] 苏承东, 杨圣奇. 循环加卸载下岩样变形与强度特征试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 667—671.
SU Cheng-dong, YANG Sheng-qi. Experimental study on deformation and strength characteristics of rock specimens under cyclic loading and unloading[J]. **Journal of Hohai University(Natural Science)**, 2006, 34 (6): 667—671.
- [10] 尤明庆, 苏承东, 徐涛. 岩石试样的加载卸载过程及杨氏模量[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 588—592.
YOU Ming-qing, SU Cheng-dong, XU Tao. Loading or unloading process in axial direction and Young's modulus of rock specimen[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 288—592.
- [11] 许江, 鲜学福, 王鸿, 等. 循环加、卸载条件下岩石类材料变形特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3040—3045.
XU Jiang, XIAN Xue-fu, WANG Hong. Experimental study on rock deformation characteristics under cycling loading and unloading conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(1): 3040—3045.

上接第 3561 页

- YANG Qiang, CHEN Xin, ZHOU Wei-yuan. Elastoplastic basis of geotechnical engineering reinforcement analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(4): 553—557.
- [31] 杨强, 薛利军, 王仁坤, 等. 岩体变形加固理论及非平衡态弹塑性力学[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3704—3712.
YANG Qiang, XUE Li-jun, WANG Ren-kun, et al. Reinforcement theory considering deformation mechanism of rock mass and non-equilibrium elastoplastic mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(20): 3704—3712.
- [32] 杨强, 杨晓君, 陈新. 基于 D-P 准则的理想弹塑性本构关系积分研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 15—19.
YANG Qiang, YANG Xiao-jun, CHEN Xin. On integration algorithms for perfect plasticity based on Drucker-Prager Criterion[J]. **Engineering Mechanics**, 2005, 22(4): 15—19.
- [33] RICE J R. Inelastic constitutive relations for solids: an integral variable theory and its application to metal plasticity[J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 1971, 19(1): 433—455.
- [34] YANG Q, CHEN X, ZHOU W Y. Multiscale thermodynamic significance of the scale invariance approach in continuum inelasticity[J]. **ASME Journal of Engineering Materials and Technology**, 2006, 128(4): 125—132.
- [35] 殷有泉. 非线性有限元基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [36] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [37] ZIEGLER H. An introduction to thermomechanics[M]. Amsterdam: North-Holland Publication Corporation, 1997.