

时间间隔影响下的岩盐疲劳特性试验研究*

李鑫¹, 孙鑫², 徐秋海³, 刘保县²

(1. 重庆市渝北区建设工程质量监督站, 重庆 401120; 2. 西华大学 建筑与土木工程学院, 成都 610039;
3. 徐州华美房地产开发有限公司, 江苏 徐州, 221006)

摘 要:运用实验室自主研发的多功能试验机开展岩盐疲劳试验,研究了时间间隔因素影响下岩盐变形和弹性常数的演化规律。由于岩盐具有出色的流变性,在经典疲劳试验中插入时间间隔会使疲劳损伤规律发生改变,为岩石疲劳特性的研究提供了新的思路。试验结果显示:(1)与正常加卸载循环相比,时间间隔后的循环产生的残余变形更大。(2)时间间隔后的循环内弹性模量总体大于时间间隔前的循环内弹性模量,但是泊松比随时间间隔变化的趋势并不明显,呈一致的上升规律。(3)时间间隔对残余变形的积累有加速效应,时间间隔越长,疲劳过程中产生的残余变形积累越快,岩盐最终疲劳寿命越短。

关键词: 岩盐;时间间隔;疲劳

中图分类号:U451 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)03-0606-06

Study on Fatigue Properties of Rock Salt Influenced by Time Interval

Li Xin¹, Sun Xin², Xu Qiuhai³, Liu Baoxian²

(1. Chongqing Yubei District Construction Project Quality Supervisory Station, Chongqing 401120, P.R. China; 2. School of Architectural and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, P.R. China; 3. Huamei Real State, Xuzhou, Jiangsu 221006, P.R. China)

Abstract: The authors do a research on the evolution law of fatigue deformation and elastic constants of rock salt influenced by interval using the multifunctional test machine invented by the staff of their own laboratory. The mechanism of fatigue activities is expounded by dislocation theory and principle of least action. The insertion of time interval in classic fatigue would change the law of fatigue damage. A new thought was produced for the research of rock damage. The results show that: (1) compared with the residual deformation in normal loading-unloading circle, residual deformation in circle after interval is larger; (2) elasticity modulus in circles after interval is larger than that in circles before interval generally, while Poisson's ratio does not change obviously with interval; (3) time interval accelerates accumulation of residual deformation. Longer the interval is, faster the residual deformation accumulates during fatigue process is, shorter fatigue life rock salt has.

Keywords: salt rock; interval; fatigue

0 引言

大量工程实践表明,在进行岩体工程施工、运行过程中,岩石通常处于反复加卸载状态,如高边坡开挖加固过程、地下洞室的开挖施工等^[1]。值

得注意的是,在储气库里,每一次注、采气过程中有一定时间间隔,并非处于理想的连续循环加卸载状态下。与一般岩石不同,岩盐具有较强的自愈性,时间间隔为岩盐内部晶格重新排布提供了时间,使岩盐的某些力学特性发生变异,最终影响疲劳

* 收稿日期:2016-12-14(修改稿)
作者简介:李鑫(1984-),男,重庆大足人,硕士,工程师,主要从事工程建设质量监督工作。
E-mail: 635897437@qq.com

强度。

国内外众多学者对岩石的疲劳损伤及相关力学特性进行了大量研究。Eberhardt 等^[2]在大量脆性岩石的单轴压缩循环加卸载试验基础上,对岩石单轴循环加卸载过程中的断裂损伤力学特性进行了分析。杨春和等^[3]通过对岩盐的单轴循环加、卸载试验,推导出岩盐在简单应力状态下加、卸载本构关系。郭印同等^[4]通过对岩盐进行单轴循环疲劳试验,提出改变上限应力和平均应力会显著影响疲劳的进程。周家文等^[5]通过对砂岩的单轴循环加、卸载试验,提出岩石单轴循环加卸载条件下的宏观疲劳破坏模式取决于内部微裂纹的断裂扩展形式。尤明庆等^[6-7]对复杂应力路径下岩石的强度和变形特征进行了研究,提出了大理岩单轴循环加卸载条件下峰值强度的强化比例。谢红强等^[8]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。刘建锋等^[9-11]对岩石单轴压缩循环加卸载条件下的强度和变形特征、弹性参数估算和阻尼特性等问题进行了研究。

上述研究成果对岩石单轴循环过程中的疲劳损伤研究具有重要的指向性作用,但甚少提及时间间隔对岩石疲劳过程中各种力学参数以及最终疲劳寿命的影响,这对保证岩盐地下储气库在注、采气过程中的安全运行有重要实际意义。

1 试验条件及实验方法

1.1 试验条件

试验使用的岩盐试样取自巴基斯坦喜马拉雅山区,埋深较大,外观呈纯白色或浅红色。其中NaCl含量相对较高,岩盐组分比例达到90%以上。试件统一加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱形试样,上下端面平整度控制在 $\pm 0.03\text{ mm}$,以减小端部效应。

由于试件个体差异会在一定程度上影响岩盐的力学性质,为保证试件岩性稳定、减小离散性,尽量选择颜色相对一致,含杂质成分相近,裂纹长度、数量和大小差异较小的岩盐试样进行加工,最大程度地降低离散性。

1.2 试验方案设计

试验进行单轴循环加卸载至岩盐试件破坏,并记录数据。通过普通单轴试验测得该类岩盐单轴抗压强度为43.62 MPa。利用机器程序控制试验流程,试验开始时,加载至上限压力为单轴抗压强度的85%,下限压力为3 kN,加卸载速率均为5 kN/s。

疲劳试验分别进行常规的标准组试验和插入时间间隔的对照组试验(X_{\min})。对照组试验是在常规疲劳试验基础上,在每两个循环后插入一个时间间隔,时间间隔分别为恒定的5 min、10 min、15 min和20 min 4种情况的设计时间,图1为对照组试验荷载路径简图,其中 X 为时间间隔。具体试验参数如表1所示。

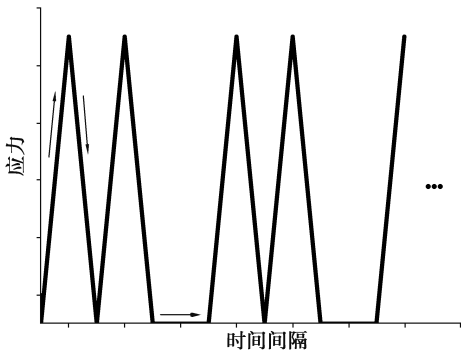


图1 对照组荷载路径简图
Fig. 1 Sketch of control groups' load path

表1 试件尺寸及加载峰值
Table 1 Sizes of sample and loading peaks

岩样编号	高度/mm	直径/mm	上限压力值/kN
0 min	100.43	50.55	71.22
5 min	99.98	50.81	73.35
10 min	99.84	50.73	70.26
15 min	100.51	50.37	69.99
20 min	100.31	50.83	70.10

2 试验结果及强度变形特征

结合单轴循环加、卸载试验结果,分析间隔时间对岩盐疲劳、变形及循环弹性常数的影响。

2.1 循环加卸载应力-应变曲线

图2为时间间隔5 min作用下的疲劳应力-应变曲线。

整个疲劳过程表现出“疏—密—疏”的情况,反映了残余变形积累的3个阶段^[4],说明导致岩盐发生疲劳破坏的原因是内部残余变形不断积累。图3为图2前10个循环放大特征图,发现加入时间间隔因素的应力-应变曲线与常规情况有所不同,残余变形的发展趋势不是递减的,而是随时间间隔的出现分成奇偶次循环序列分别减小,如第5个循环产生的残余应变明显大于第4个循环。

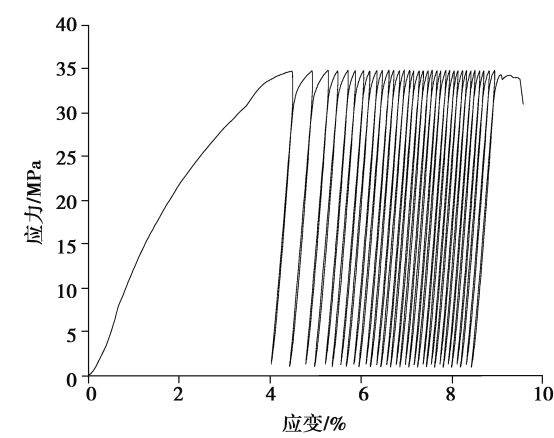


图 2 5 min 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves at 5 min

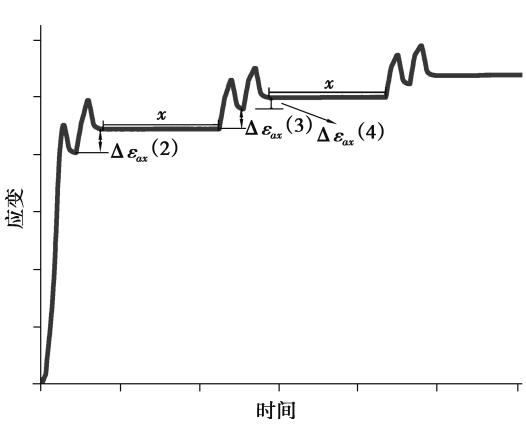


图 4 应变路径曲线

Fig. 4 Strain-path curve

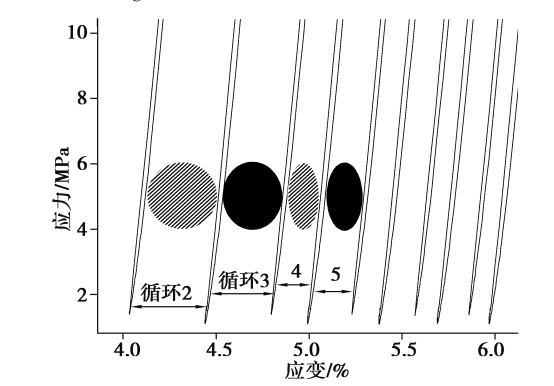
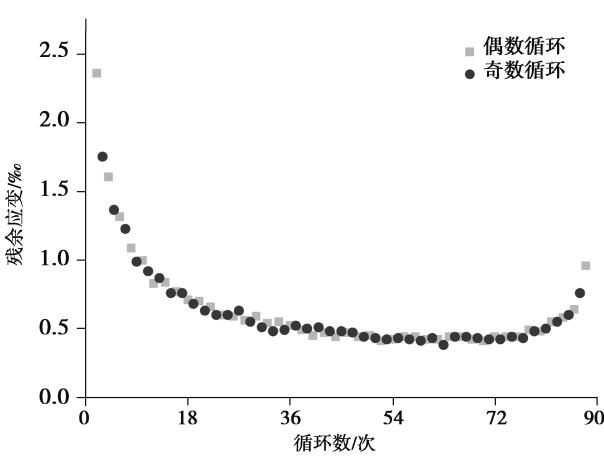
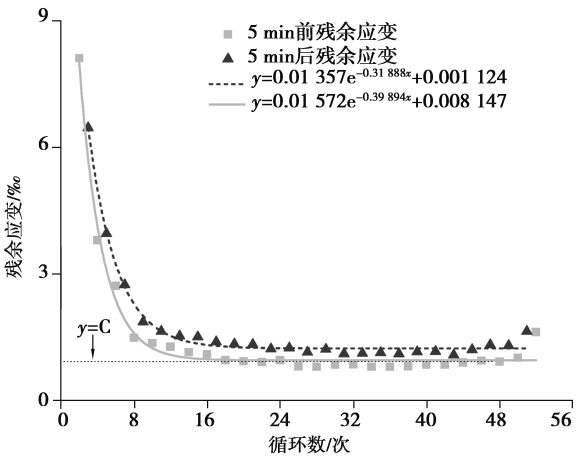


图 3 5 min 应力-应变曲线局部放大图

Fig. 3 Partial enlarged drawing of stress-strain curve within 5 min



(a) 经典疲劳



(b) 5 min

图 5 残余应变的变化

Fig. 5 Changing of residual strain

2.2 不可逆变形发展规律

岩石在受外荷载作用下的变形情况通常分为可逆变形和不可逆变形。可逆变形属于弹性变形的情况,不可逆变形主要由塑性变形引起。以轴向变形为例,图 4 为对照组试验前 6 次循环的应变发展简图,其中 $\Delta\epsilon_{ax}(i)$ 表示第 i 次循环中产生的残余应变, x 为时间间隔, $\Delta\epsilon_{ax}(2)$ 、 $\Delta\epsilon_{ax}(4)$ 在相邻时间间隔前即为时间间隔前残余应变, $\Delta\epsilon_{ax}(3)$ 在相邻时间间隔后即为时间间隔后残余应变,推广至整个疲劳试验过程中即为:偶数次循环产生的残余应变均为时间间隔前残余应变,奇数次循环产生的残余应变均为时间间隔后残余应变。

将标准组及对照组试验结果分别按奇偶次循环两组序列对轴向残余应变发展进行说明,偶数次循环为时间间隔前,奇数次循环为时间间隔后。因第 1 次循环产生的残余变形既不属于时间间隔前也不属于时间间隔后,所以在后文残余变形数据中均未统计。从图 5 中发现,插入时间间隔后,残余应变发展出现明显差异。

选取指数函数 $y=ae^{bx}+C$ 对图 5 中散点进行拟合,其中 $y=C$ 为函数水平渐近线,代表残余应变稳定发展阶段的平均水平。表 2 为统计数据,发现 $C_{前}$ 、 $C_{后}$ 以及 $(C_{前}-C_{后})$ 随时间间隔的增加总体呈上升趋势,说明时间间隔对疲劳过程中残余应变的积

累有加速作用,且时间间隔越大,残余应变积累越明显。还发现岩盐疲劳寿命是随间隔时间增大而不断减小的,由于岩盐的疲劳破坏是塑性变形不断积累导致的,残余应变积累效率越高,岩盐疲劳寿命越低,说明时间间隔会显著降低其疲劳寿命。

表 2 C 值及疲劳寿命统计
Table 2 C-value and fatigue life

岩样编号	$C/\gamma = ae^{bx} + C$			疲劳寿命 /次
	$C_{前}/\text{‰}$	$C_{后}/\text{‰}$	$(C_{后} - C_{前})/\text{‰}$	
—	0.48	0.49	0.01	88
5 min	0.814 7	1.124	0.309 3	51
10 min	1.037	1.39	0.353	24
15 min	1.631	2.457	0.826	13
20 min	1.184	2.376	1.192	20

2.3 循环弹性常数分析

假设加载到最大轴向应力 $\sigma_{axmax}(i)$ 时的应变为总应变 $\varepsilon^{total}(i)$, 卸载到 0 时的应变为不可逆应变 $\varepsilon^{per}(i)$, 两者差值为弹性应变 $\varepsilon^{ela}(i)$, 轴向应变和径向应变表示为

$$\varepsilon_{ax}^{ela} = \varepsilon_{ax}^{total}(i) - \varepsilon_{ax}^{per}(i)$$
$$\varepsilon_{lat}^{ela}(i) = \varepsilon_{lat}^{total}(i) - \varepsilon_{lat}^{per}(i)$$

(2)

式中: $\varepsilon_{axela}(i)$ 为轴向弹性应变, $\varepsilon_{latela}(i)$ 为径向弹性应变, i 为循环次数。

由轴向弹性应变得到每一次循环过程中弹性模量 E_i 为

$$E_i = \frac{\sigma_{ax}^{max}(i)}{\varepsilon_{ax}^{ela}(i)}$$

(3)

同时计算出每次循环过程中的泊松比 ν_i 为

$$\nu_i = - \frac{\varepsilon_{lat}^{ela}(i)}{\varepsilon_{ax}^{ela}(i)}$$

(4)

得到弹性常数变化曲线,如图 6。

(1) 弹性模量发展规律:①从图 6 中发现,以式(2)得到的弹性模量发展呈现波动性,总体上无明显增大或减小趋势,但在 0.3 GPa 范围内波动。②时间间隔前后弹性模量的差异十分明显,除少数点出现异常情况外,时间间隔后弹性模量总大于时间间隔前弹性模量,说明时间间隔会在一定程度上增加岩盐的塑性积累,降低其疲劳寿命。

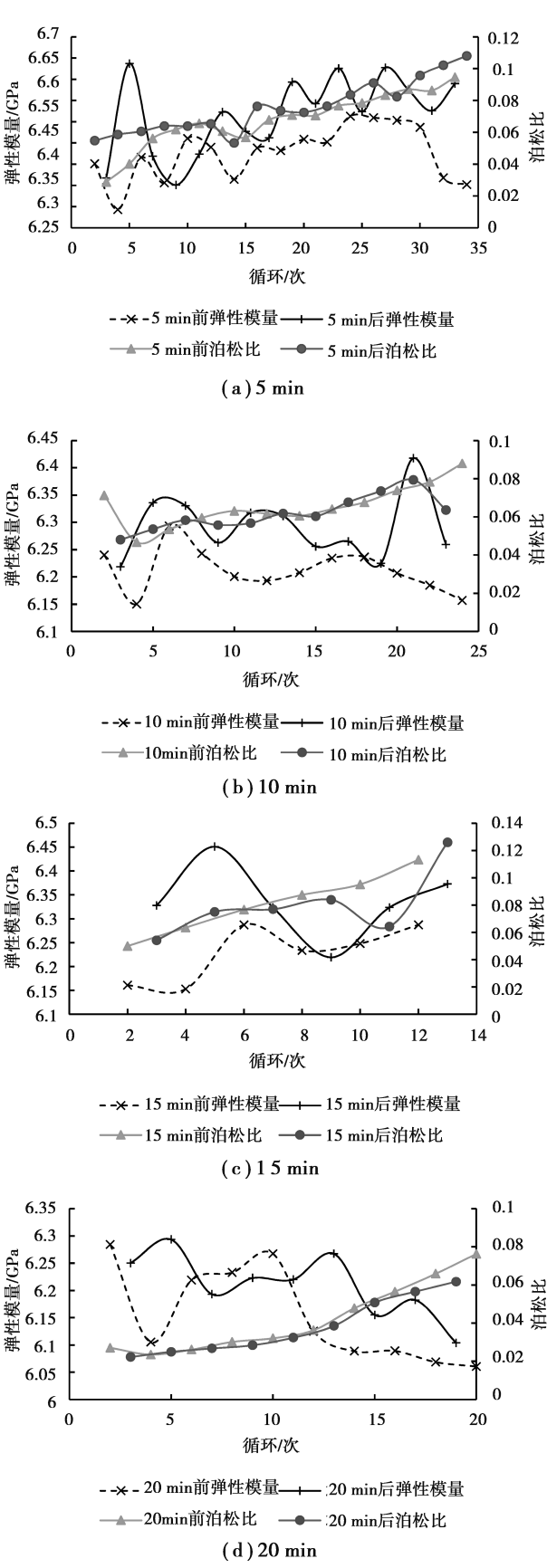


图 6 弹性模量和泊松比

Fig. 6 Modulus of elasticity and Poisson's ratio

(2) 泊松比发展规律:①泊松比发展总体呈上

升趋势,说明随着循环次数的增加,径向应变速率大于轴向应变速率。泊松比在一定程度上反映的是材料横向变形的程度,可以认为随着循环的不断进行,岩盐试件横向产生的微裂纹在不断发生断裂扩展。② 时间间隔前后曲线几乎完全重合,说明时间间隔对泊松比变化几乎没有影响。

2.4 间隔时长对残余应变累积的影响

依据前文的符号说明,设每次循环的产生的残余应变为 $\Delta\varepsilon_{ax}(i)$,为描绘轴向不可逆变形量的发展趋势,提出

$$\varepsilon_{ax}^{plus}(i)=\begin{cases}\sum_{n=2}^i\varepsilon_{ax}(n),i\geqslant 2,n\text{ 为偶数}\\\sum_{n=3}^i\varepsilon_{ax}(n),i\geqslant 3,n\text{ 为奇数}\end{cases}\quad (5)$$

定义 $\varepsilon_{axplax}(i)$ 为第 i 次循环数以前的轴向叠加残余应变,由于时间间隔因素的影响,将周期分解为奇偶次循环数进行分别叠加,如图 7 所示。

拟合图 7 曲线,统计趋势线斜率 K ,试验结果拟合后各参数及疲劳寿命如表 3。

表 3 拟合参数

Table 3 Fitting parameters

$K_{前}/\%$	$K_{后}/\%$	$(K_{前}-K_{后})/\%$
0.4	0.6	0.2
0.5	0.8	0.3
0.9	1.3	0.4
0.7	1.2	0.5

现对图 7 和表 2、表 3 反映出的规律进行深入分析:

时间间隔前后残余应变的发展是有差异的。时间间隔后的残余应变速率总是大于时间间隔前的残余应变速率,表明时间间隔会加速岩盐疲劳试验中不可逆变形的积累。表 3 中时间间隔前后趋势线斜率差随间隔时间增加呈增长趋势,说明间隔时间越长,残余应变的积累速率越快。岩石在疲劳试验中发生破坏的主要原因是内部塑性变形的不断积累。残余变形积累越快、越多,试件越容易发生疲劳破坏。表 2、表 3 将对照组试验中不同时间间隔与疲劳寿命相联系,发现随着时间间隔的增大,岩盐的疲劳寿命下降趋势十分明显,这也印证了试验结果的合理性。

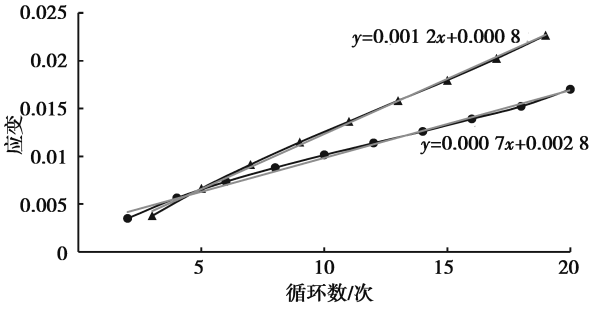
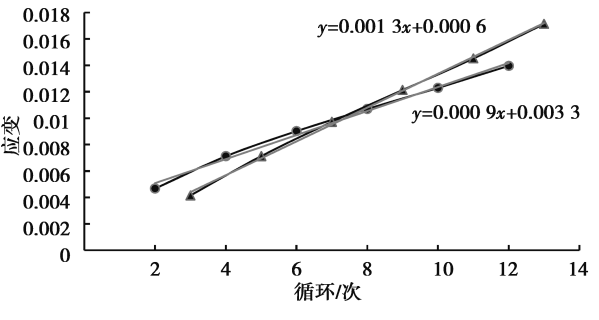
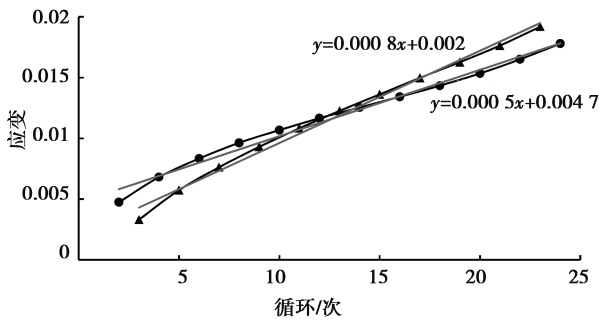
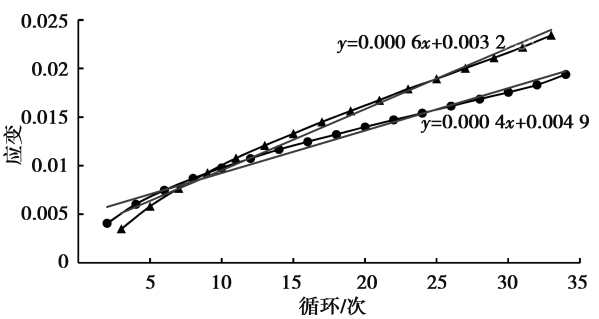


图 7 轴向叠加残余应变

Fig. 7 Superposition of axial residual strain

3 结论

将不同时间间隔插入岩盐疲劳试验中,研究时间间隔对其残余变形和疲劳寿命的影响,结论主要有:

(1) 岩盐疲劳试验中的时间间隔后残余变形总体大于时间间隔前残余变形;疲劳试验中时间间隔的存在一定程度上加速了残余变形的积累,且时间间隔越大,残余变形积累速度越快,岩盐疲劳寿命越低。

(2) 峰后循环内弹性模量在时间间隔前后表现出明显的差异,波动性明显且时间间隔前弹性模量平均水平大于时间间隔后弹性模量平均水平;泊松比几乎不受时间间隔的影响,时间间隔前后泊松比呈几乎相同的上升规律。

参考文献(References)

[1] Lemaitre J, Chaboche J L. Mechanics of solid materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[2] 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.

[3] 杨春和, 马洪岭, 刘建锋. 循环加、卸载下盐岩变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3562-3568. (Yang Chunhe, Ma Hongling, Liu Jianfeng. Study of deformation of rock salt under cycling loading and unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3562-3568. (in Chinese))

[4] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1353-1359. (Guo Yintong, Zhao Kelie, Sun Guanhua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1353-1359. (in Chinese))

[5] 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): 1172-1183. (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): 1172-1183. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 尤明庆, 苏承东. 大理岩试样循环加载强化作用的试验研究[J]. 固体力学学报, 2008, 29(1): 66-72. (You Mingqing, Su Chengdong. Experimental study of strengthening of marble specimen in cyclic loading of uniaxial or pseudo-triaxial compression [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(1): 66-72. (in Chinese))

[8] 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 Hongqiang, He Jiangda, Xu Jin. Deformation characterslics of rock under loading and unloading conditions and experimental study of mechanical parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 336-338. (in Chinese))

[9] 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 of damping characteristics of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 712-717. (in Chinese))

[10] 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 of 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))

[11] 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 Jiebing, Wu Aiqing, 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. (in Chinese))