

文章编号:1000-582X(2006)04-0080-03

# 循环载荷条件下岩石塑性滞回环的演化规律\*

王 鸿,许 江,杨秀贵

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘 要:**通过对循环载荷条件下细粒砂岩在不同载荷水平、不同位移速率时的变形特性及其塑性滞回环演化规律的分析发现:1)循环载荷条件下岩石的加、卸载曲线不重合,将形成一封闭的塑性滞回环,该塑性滞回环从第2循环起将趋于稳定;2)不同载荷水平和不同位移速率下第1循环时的各拟合参数值与第2循环相比存在有较大变化,但从第2循环曲线起,各拟合参数均将逐渐趋于恒定;3)随着位移速率和载荷水平的变化,其拟合参数将随之而发生变化;4)在相同位移速率和相同载荷水平条件下,同一次循环时岩石变形曲线的加载段与卸载段的相应拟合参数值不同。

**关键词:**循环载荷;塑性滞回环;细粒砂岩

**中图分类号:**TD313

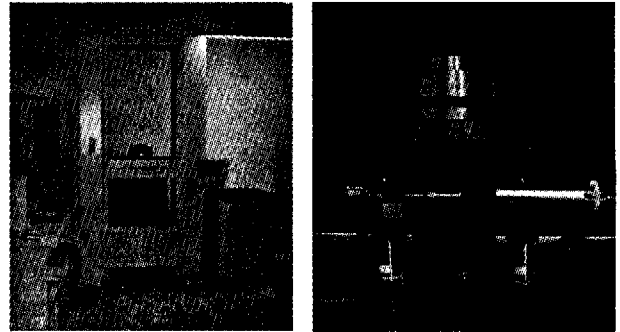
**文献标识码:**A

迄今为止,已有大量有关岩石类材料在各种不同实验条件下所表现的变形、强度、破坏等基本力学属性及其理论分析等方面的研究成果。其中就有关岩石类材料循环载荷条件下的变形特性研究方面,文献[1-3]认为,如果对岩石类材料实施多次反复加、卸载,且每次循环荷载变化区间与第1次相同的话,则其变形曲线将形成一个塑性滞回环,且该塑性滞回环将随着加、卸载次数的增加而愈来愈狭窄,且其加载段与卸载段的变形曲线也将彼此愈来愈靠近,一直到某次循环没有塑性变形为止。但文献[4]却给出了另一种结论,认为岩石在循环加、卸载条件下的卸载曲线与加载曲线不相重合,将形成一封闭的塑性滞回环,但该塑性滞回环从第2次循环起可能不再发生变化。笔者拟在文献[4]的基础上进一步论证岩石类材料塑性滞回环的演变规律。

## 1 实验方法

笔者选用细粒砂岩作为研究对象,并用湿式加工法将采集的岩石样本加工成 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}^3$ 的圆柱体试件,其加工精度满足国际岩石力学学会建议实验规范要求,加工成型后的试件保持自然干燥状态,试件的物理力学参数与文献[4]中相同。实验以日本岛津公司生产AG-I 250型精密电子万能试验机(如图1(a)所示)作为动力设备,实验时,载荷检测采用安置在该材料试验机上的荷重计直接测定,试件纵向变形的检

测则采用在试验机纵向方向上布设的2个引伸计的位移检测仪(如图1(b)所示)直接测定。



(a) 材料试验机

(b) 位移检测仪

图1 实验设备

考虑到文章的重心是探索在不同位移速率和不同载荷水平下循环加、卸载对细粒砂岩变形特性的影响,实验时选取了3种不同位移速率(0.05 mm/min、0.10 mm/min和0.20 mm/min)和2种不同载荷水平(15 kN和30 kN)。在进行正式实验之前,首先是要测定细粒砂岩试件的峰值载荷以便合理确定具体载荷水平,然后再以不同位移速率和不同载荷水平按下述加、卸载路径进行循环加、卸载:1)将纵向载荷以对应位移速率 $v$ 从零加载到相应的载荷水平 $P$ ,再以同样的位移速率将其卸载到零;2)再将纵向载荷以同一位移

\* 收稿日期:2005-12-23

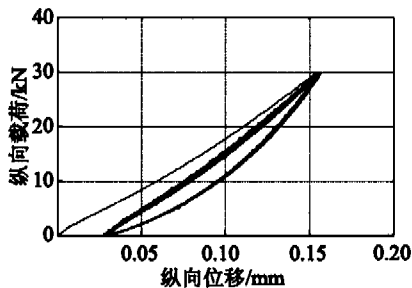
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50334060);重庆市院士基金资助项目;教育部优秀青年教师资助计划项目

作者简介:王鸿(1980-),女,重庆市人,重庆大学硕士研究生,主要从事岩石力学与工程的研究。

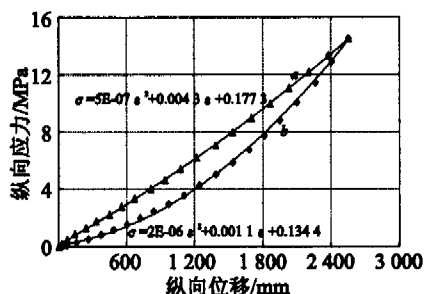
速率  $v$  从零加载到同一载荷水平  $P$  后,以同样的位移速率将其卸载至零,完成第 2 次循环实验;3) 不间断地重复第 2 步,直至完成规定次数的循环实验;4) 以相同位移速率连续加载至试件产生宏观破坏;5) 更换试件,并改变位移速率  $v$  或载荷水平  $P$ ,重复第 1-4 步实验步骤<sup>[4-7]</sup>。

## 2 实验结果分析

图 2(a)具体给出了位移速率为 0.20 mm/min、载荷水平为 30 kN 时细粒砂岩在循环载荷条件下的前 10 次循环的典型载荷-位移曲线,从该图中可以看出,由于岩石本身的非线性特性,细粒砂岩在循环加、卸载情况下的卸载曲线和加载曲线不相重合,确实将形成一个封闭的塑性滞回环,除了第 1 次循环到第 2 次循环所得到的塑性滞回环面积有较大的变化以外,从第 2 次循环开始,其塑性滞回环的面积基本上都是大致相同的,亦即第 2 次循环开始其塑性滞回环可能将不会因循环次数  $N$  的增加而产生明显的变化。同时从第 2 循环起,每次循环加、卸载完成后产生的残余位移量也几乎接近于零。



(a) 循环载荷条件下的典型载荷-位移曲线



(b) 加、卸载段应力-应变曲线及其拟合

图 2 循环载荷条件下的典型变形曲线

将所取得的实验数据结果分析整理,得到循环载荷条件下的应力-应变曲线(如图 2(b)所示),将其中每一塑性滞回环分解为加载段和卸载段 2 个部分,并对每次循环中的加、卸载应力-应变曲线段分别进行二次曲线拟合:

$$\sigma = A \cdot \varepsilon^2 + B \cdot \varepsilon + C. \quad (1)$$

其中,  $A$ 、 $B$  和  $C$  为拟合参数,其不同载荷水平和不同位移速率下每个塑性滞回环的加载段和卸载段的各拟合参数  $A$ 、 $B$  和  $C$  分别与循环次数  $N$  之间的关系曲线如图 3 和图 4 所示。

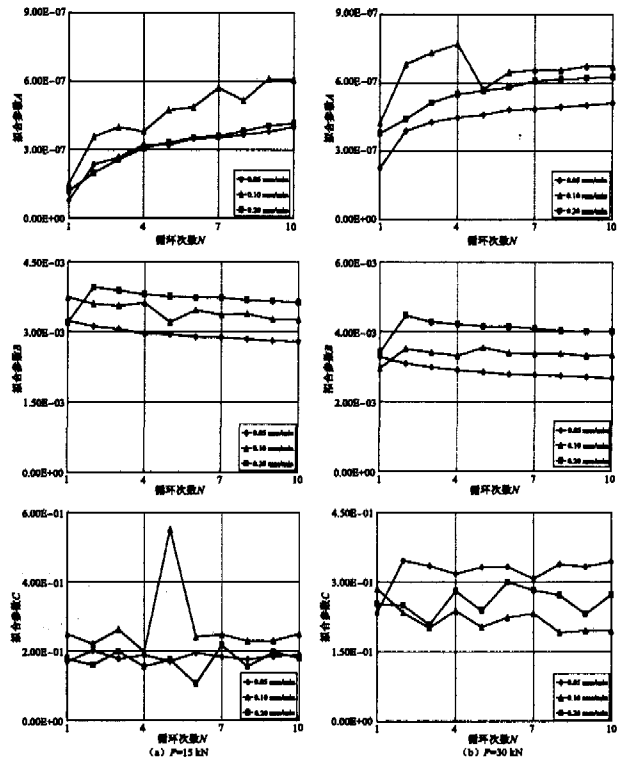


图 3 加载段的拟合参数与循环次数间的关系曲线

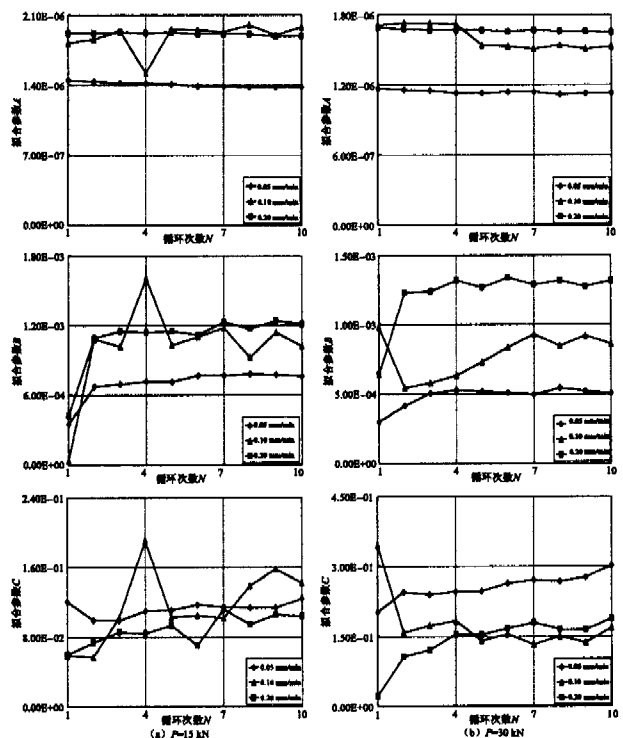


图 4 卸载段的拟合参数与循环次数间的关系

综合分析图 3 和图 4 中各拟合参数的变化趋势,不难发现,细粒砂岩在不同载荷水平、不同位移速率时循环载荷条件下的变形曲线的演化存在以下基本规律:

1) 从总体趋势上来看,第 1 循环曲线的拟合参数与第 2 循环曲线的拟合参数存在有较大变化,但从第 2 循环起,其拟合参数的变化明显减小,并逐渐趋于稳定;

2) 随着位移速率的增大,在相同的载荷水平时岩石变形曲线的加载段和卸载段的拟合参数  $A$  和  $B$  大致将随之而逐渐增加,而拟合参数  $C$  却随之逐渐减小;

3) 随着载荷水平的增加,在相同的位移速率时岩石变形曲线的加载段的各拟合参数均呈现逐渐增加的趋势,但在岩石变形曲线的卸载段,拟合参数  $A$  和  $B$  随之增加有逐渐降低的趋势,拟合参数  $C$  却随之增加呈逐渐增加的趋势;

4) 在相同位移速率和相同载荷水平条件下,其加载段的拟合参数  $A$  比卸载段的拟合参数  $A$  要小,而加载段的拟合参数  $B$  和  $C$  则要比卸载段的拟合参数  $B$  和  $C$  要大;

### 3 结论

笔者对细粒砂岩在循环加、卸载条件下所形成的塑性滞回环演化规律进行了探讨,并对不同位移速率和不同载荷水平下的各塑性滞回环按加、卸载变形曲线段分别进行了拟合,在对各拟合参数进行系统深入分析的基础上发现:

1) 岩石在循环加、卸载条件下的卸载曲线与加载曲线不相重合,将形成一封闭的塑性滞回环,但该塑性滞回环从第2次循环起可能将趋于稳定;

2) 对于不同载荷水平和不同位移速率下的各拟合参数,第1循环曲线的拟合参数与第2循环曲线的拟合参数存在有较大变化,但从第2循环起,其拟合参数的变化明显减小,并逐渐稳定;

3) 随着位移速率和载荷水平的变化,其拟合参数也将随之而发生变化;

4) 在相同位移速率和相同载荷水平条件下,岩石变形曲线的加载段的拟合参数  $A$  比卸载段的要小,但其加载段的拟合参数  $B$  和  $C$  则要比卸载段的拟合参数  $B$  和  $C$  要大.

笔者仅仅针对细粒砂岩讨论了在2种不同载荷水平和3种不同位移速率时循环载荷条件下变形曲线所形成的塑性滞回环的演化特征,但对岩石类材料是否都普遍适用以及该性质在岩土工程中的作用等都还有待进一步实验与研究.

### 参考文献:

- [1] 蔡美峰,何满朝,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] JAGER J C, COOK W N G. 岩石力学基础[M]. 北京:科学出版社,1983.
- [3] 刘云平,席道瑛,张程远,等. 循环应力作用下大理岩砂岩的动态响应[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2): 216-219.
- [4] 许江,王维忠,杨秀贵,等. 细粒砂岩在循环加、卸载条件下变形实验[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2004,27(12):60-62.
- [5] 李永盛. 加载速率对红砂岩力学效应的试验研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版),1995,23(3):265-269.
- [6] 许江,鲜学福,大久保诚介. 循环载荷对三城目安山岩变形特性的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2000,11(1):38-41.
- [7] 席道瑛,王少刚,刘小燕,等. 岩石的非线性弹塑性响应[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(6):772-777.

## Evolution of Plastic-loop of Fine-sandstone Under the Loading and Unloading Conditions

WANG Hong, XU Jiang, YANG Xiu-gui

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The deformation characteristics and the plastic-loop of the fine-sandstone is studied under the loading and unloading condition at the three different deformation-rates and the two different stress-levels, the results show: 1) There is really the plastic-loop in the deformation curve for the loading deformation curve is different from the unloading deformation curve. But the plastic-loop is nearly unchangeable since the second circulate loading. 2) There is different for every imitational parameter between the first deformation curve and the second deformation curve at the different stress-levels and the different deformation-rates, but every imitational parameters become more and more invariable gradually since the second circulate curve. 3) With the change of the deformation-rates and stress-levels, the imitational parameters will change with it. 4) The imitational parameters are different for loading section and unloading section of the fine-sandstone deformation curve at the same circulate curve under the same deformation -rate and stress-level.

**Key words:** the loading and unloading conditions; the plastic-loop; fine-sandstone