

# 循环荷载作用下花岗岩动力特性试验研究

朱明礼<sup>1,2</sup>, 朱珍德<sup>1,2</sup>, 李刚<sup>1,2</sup>, 邱玉华<sup>1,2</sup>, 陈哲<sup>3</sup>, 李金旺<sup>3</sup>

(1. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 核工业南京工程勘察院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 通过在 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机对取自海南昌江核电厂一期工程常规岛的微风化和中风化黑云母花岗岩进行单轴压缩变形试验和循环加卸载试验, 研究花岗岩动应力-动应变曲线滞回特性和动弹性模量与阻尼比同弹性模量之间的规律, 并利用广义开尔文流变模型来描述循环荷载下花岗岩的滞回曲线和能量损耗情况。研究表明: 花岗岩在循环荷载作用下的加卸应力-应变曲线形成滞回环, 随着循环数的增加, 滞回环向轴向应变增大的方向移动, 且越来越密集; 花岗岩的滞回环面积和最大弹性应变能都随弹性模量的增加而减少, 而动弹性模量则相反, 阻尼比先随弹性模量的增大而增大, 达到一峰值后, 随弹性模量的增大而减少; 广义开尔文模型可以较好地描述花岗岩的滞回曲线和能量损耗情况。研究成果对海南昌江核电厂地基的地震反应分析和场地安全性评价有着重要的参考意义。

**关键词:** 岩石力学; 循环荷载; 动弹性模量; 阻尼比; 广义开尔文流变模型

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)12-2520-07

## EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF GRANITE UNDER CYCLIC LOADING

ZHU Mingli<sup>1,2</sup>, ZHU Zhende<sup>1,2</sup>, LI Gang<sup>1,2</sup>, QIU Yuhua<sup>1,2</sup>, CHEN Zhe<sup>3</sup>, LI Jinwang<sup>3</sup>

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China*; 3. *Nanjing Engineering Investigation Institute of Nuclear Industry, Nanjing, Jiangsu 210003, China*)

**Abstract:** The uniaxial compression-deformation test, cyclic loading and unloading tests on slightly weathered and middle differentiation biotite granite comes from the Changjiang of Hainan nuclear power first-stage construction conventional island are performed on the RMT-150B multi-function automatic rigid rock servo controlled testing machine. The granite hysteretic characteristics of dynamic stress-dynamic strain curves and the law between elastic modulus and dynamic elastic modulus, damping ratio are researched. And the viscoelastic generalized Kelvin rheological model is used to describe granite hysteresis curve and energy loss. The results show that the curves of strain and stress for loading and unloading are hysteresis loops. With the increase of cyclic number, hysteresis loops move to the direction of axial strain increasing, more and more dense. The areas of hysteresis loop and the maximum elastic strain energy decrease with increase of elastic modulus; however the dynamic elastic modulus is opposite. First, damping ratio increases with increase of elastic modulus; but after reaching its peak value, damping ratio decreases with increase of elastic modulus. The biotite granite hysteretic loop and energy loss can describe well by generalized Kelvin rheological model. The results offer great reference to seismic response

**收稿日期:** 2009-04-29; **修回日期:** 2009-06-15

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50674040); 国家自然科学基金、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539090); 山东科技大学矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放基金项目(MDPC0605)

**作者简介:** 朱明礼(1983-), 男, 2004年毕业于河海大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: njzhu2004@163.com

analysis and site safety evaluation of the Changjiang nuclear power plant.

**Key words:** rock mechanics; cyclic loading; dynamic elastic modulus; damping ratio; generalized Kelvin rheological model

## 1 引言

我国是世界上多地震的国家,也是蒙受地震灾害最为深重的国家之一。岩土体的动剪切模量和阻尼比是反映岩土体在地震动作用力下应力-应变特性的主要指标,也是进行地震反应分析和场地安全性评价的重要参数。因此,研究循环荷载作用下岩石动力特性有着重要的理论意义和实用价值。

A. N. Tutuncu 等<sup>[1~17]</sup>对岩石在周期性荷载作用下的强度、变形、阻尼特性、滞回曲线、疲劳损伤及动态响应等进行了研究,取得了丰富的研究成果。A. N. Tutuncu 等<sup>[1, 2]</sup>对沉积岩在单轴循环应力作用下进行了研究,指出应力应变滞后回线的特征与施加荷载的频率、应变振幅等因素有关; K. Nishi 等<sup>[3, 4]</sup>通过动态试验,得到了岩石动剪切模量与阻尼比和围压的关系;葛修润等<sup>[5, 6]</sup>对循环荷载作用下岩石变形和强度特征进行过系统的研究,认为岩石的疲劳寿命主要由岩石本身结构、幅值荷载和荷载差决定;刘建锋等<sup>[7]</sup>对循环荷载作用下岩石阻尼特性进行了研究,得出动弹模和阻尼比与动荷载大小的关系;席道瑛等<sup>[8, 9]</sup>运用 Preisach-Mayergoyz 模型(PM 模型)对岩石非线性弹性滞后和记忆特性进行研究;陈运平等<sup>[10]</sup>从应力-应变滞后回线 X 形的切线模量出发,探讨岩石滞后的定量描述。

随着能源需求的持续快速增长,我国核电建设已经由适度发展到积极推进时期,到 2020 年,国内核电的装机容量将达到  $6 \times 10^7$  kW 左右。海南昌江核电站位于海南省昌江县海尾镇塘兴村,濒临北部湾。核电站主厂区核岛地基主要为微风化黑云母花岗岩,并有部分石英闪长岩和岩脉;常规岛的地基主要为微风化和中等风化黑云母花岗岩,并有部分脉岩穿插其中。昌江核电站规划建设 4 台  $65 \times 10^4$  kW 核电机组,建成后将极大缓和海南省电力短缺的现状。

核电站的事故具有很高的社会危险性,因此应有较高的抗震性能要求。本文对取自海南昌江核电站一期工程常规岛的微风化和中风化黑云母花岗岩进行单轴循环加卸载试验,研究了花岗岩动应力-动应变曲线滞回特性;动弹性模量和阻尼比同弹性

模量之间的规律,并利用广义开尔文流变模型来描述循环荷载下花岗岩的滞回曲线和能量损耗情况。研究结果对海南昌江核电站的地震反应分析和场地安全性评价有着重要参考意义。

## 2 试验

### 2.1 试样制备

试验所用岩石为微风化和中风化黑云母花岗岩,取自海南昌江核电站一期工程常规岛的地面下 15~50 m 深,按《水利水电工程岩石试验规程》制样要求,制备标准试样,尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。共制 11 组,每组 6 个试样,其中 3 个做单轴抗压强度试验,另外 3 个进行循环荷载下阻尼比试验。

### 2.2 试验设备

岩石阻尼比试验采用 RMT-150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机,其轴向最大荷载为 1 000 kN,振动波形可为斜坡、正弦波、三角波、方波,振动频率为 0.001~1.000 Hz。

### 2.3 试验方法

首先,在每组取 3 个试样做单轴压缩变形试验,得到各组平均弹性模量和平均单轴抗压强度,按弹性模量从小到大顺序对试样分为 1~11 组;然后,将每组剩余的 3 个试样(记为 a, b, c)做单轴循环加卸载试验,其具体步骤如下:先加载到应力 20 MPa,再进行波形为正弦波,振幅为 10 MPa,频率为 1 Hz,振动次数为 30 次的循环加卸载试验。

### 2.4 试验原理

因为岩石试样为非理想弹性体,所以其动应力与动应变的波形线在时间上并不完全对应,两者之间有时间差,这使同一振动周次的动应力和动应变曲线形成滞回环(见图 1)。动弹性模量  $E_d$  和阻尼比  $\lambda$  定义为

$$\left. \begin{aligned} E_d &= (\sigma_{d\max} - \sigma_{d\min}) / (\varepsilon_{d\max} - \varepsilon_{d\min}) \\ \lambda &= A / (4\pi A_s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{d\max}$ ,  $\sigma_{d\min}$  分别为动应力-动应变滞回曲线最大和最小动应力;  $\varepsilon_{d\max}$ ,  $\varepsilon_{d\min}$  分别为滞回曲线最大和最小动应变;  $E_d$  为动弹性模量;  $A$  为滞回曲

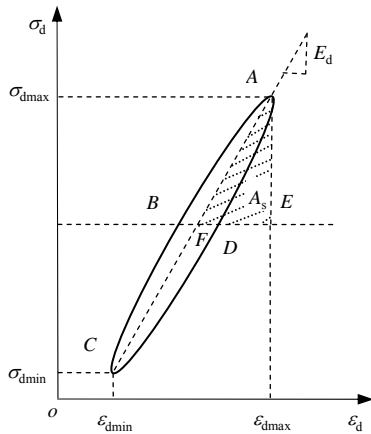


图1 动应力 - 动应变滞回环

Fig.1 Hysteresis loop of dynamic strain and stress

线  $ABCD$  所包含的面积;  $A_s$  为三角形  $AEF$  的面积;  $\lambda$  为阻尼比。

滞回曲线  $ABCD$  所包含的面积大小反映岩石在一个循环周期中所耗散的能量大小。  $4A_s$  反映了岩石在一个周期内所储备的最大弹性应变能。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 单轴压缩变形试验结果

通过单轴压缩试验得到黑云母花岗岩的单轴抗压强度为  $37.5 \sim 85.8$  MPa, 平均值为  $52.7$  MPa; 弹性模量为  $14.92 \sim 32.74$  GPa(见表 1)。

表1 花岗岩单轴压缩和单轴循环加载卸载试验结果  
Table 1 Test results of granite uniaxial compression and cyclic loading and unloading

岩样组号	弹性模量 /GPa	动弹性模量 /GPa	A/kPa	$4A_s/kPa$	阻尼比 /%	单轴抗压强度 /MPa
1	14.92	16.99	2.808	12.323	7.25	45.8
2	16.50	17.60	2.550	10.600	7.66	42.4
3	19.92	23.39	2.400	9.400	8.13	39.4
4	20.14	23.98	2.298	9.120	8.02	43.8
5	20.53	25.31	2.100	8.553	7.82	37.5
6	23.00	27.00	2.000	8.200	7.76	45.8
7	24.81	28.05	1.700	7.400	7.31	85.8
8	26.44	30.01	1.599	7.168	7.10	42.4
9	27.30	31.35	1.430	6.338	7.18	63.9
10	29.92	34.48	1.343	6.097	7.01	78.7
11	32.74	35.03	1.178	6.007	6.24	54.5

#### 3.2 循环应力 - 应变曲线

因为篇幅有限, 这里仅给出 9 组一个试样 a 的

动应力 - 动应变曲线(见图 2)和每组一个试样的第 16 次循环动应力 - 动应变曲线(见图 3)。

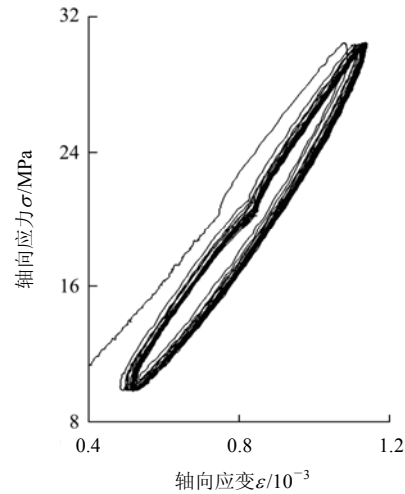


图2 试样 9a 动应力 - 动应变曲线

Fig.2 Dynamic strain-stress curves of sample 9a

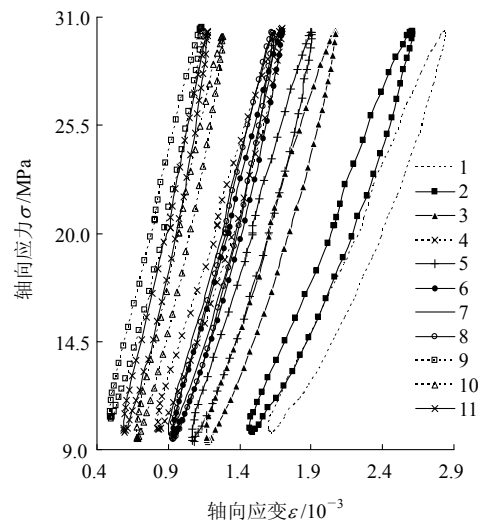


图3 1~11 组岩样的第 16 次循环动应力 - 动应变关系曲线  
Fig.3 The sixteenth cycle dynamic strain and stress curves of groups rock samples No.1 - No.11

由图 2, 3 可得: 黑云母花岗岩在循环加载与卸载的应力 - 应变曲线并不重合, 而是形成一个滞回环; 各循环加载卸载应力 - 应变滞回环在荷载翻转处是尖叶状, 而不是椭圆形。这与刘建锋等<sup>[7]</sup>研究成果类似, 说明荷载翻转时试样的弹性变形响应迅速, 塑性变形小。

由图 2 可得: 第一个应力应变滞回环并不闭合, 在加载曲线与卸载曲线之间产生了较大的残余变形; 刚开始循环时滞回曲线分布的比较稀, 但随着循环循环次数的增加, 滞回曲线越来越密集, 最后滞回曲线几乎在一个滞回圈上重复而达到稳定。为

了更清楚地表示动应力 - 应变曲线与循环次数之间的关系, 将试样 9a 的第 1, 2, 5, 10, 20 和 30 次动应力 - 动应变曲线绘成图 4。由图 4 可知, 随着循环次数的增加, 动应力 - 动应变循环曲线向轴向应变增大的方向移动的。

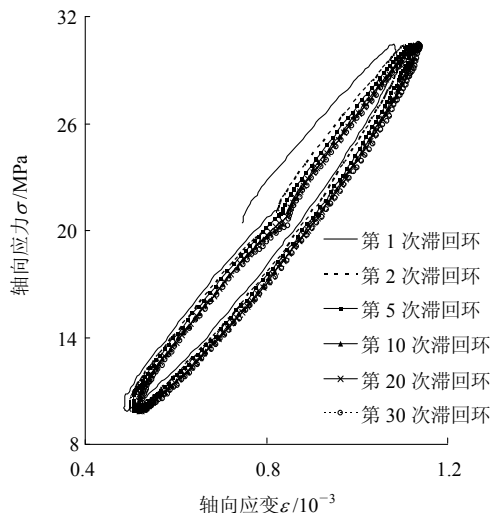


图 4 试样 9a 的部分循环动应力 - 应变曲线  
Fig.4 Partial dynamic strain and stress curves of sample 9a

图 5 为根据试样 9a 第 2, 5, 10, 20 和 30 次动应力 - 动应变曲线计算出来的阻尼比和动弹性模量与循环次数的关系曲线。从图 5 可知, 花岗岩的阻尼比和动弹性模量都是随循环次数的增加而减少。这是因为: 在低应力水平时, 循环应力对花岗岩的力学性质有循环强化效应<sup>[12]</sup>, 滞回圈面积会随循环次数的增加而减少至一稳定值, 故阻尼比随循环次数的增加而减少。最初几次循环会产生较大的不可逆的变形(即塑性变形), 随着循环次数的增加每次循环产生的塑性变形会越来越小。每次循环产生的塑性变形越大, 则该循环应变振幅会越小(见图 3),

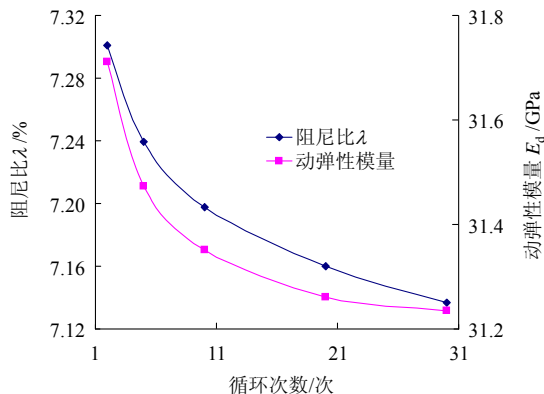


图 5 试样 9a 的阻尼比和动弹性模量随循环数的变化  
Fig.5 Damping ratio and dynamic elastic modulus of sample 9a versus cycle number

动弹性模量就越大。故动弹性模量也是随循环次数的增加而减少。

### 3.3 阻尼比和动弹性模量计算与分析

试样在循环荷载作用下的动弹性模量和阻尼比的计算, 均取第 16 次循环的动应力 - 动应变曲线。阻尼比大小的求取关键是要计算出动应力 - 动应变滞回环的面积大小。本文采用分段拟合方法, 即首先将动应力 - 动应变滞回曲线分成加载段和卸载段两段, 进行对各曲线段进行二次函数拟合(见图 6), 再通过积分计算滞回环的面积。

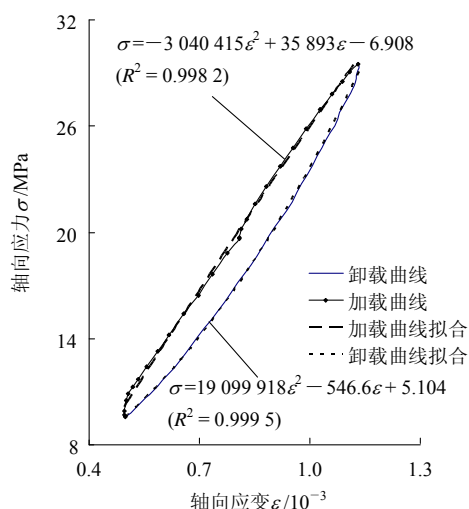


图 6 试样 9a 动应力应变滞回环曲线拟合  
Fig.6 Fitting curves of dynamic strain and stress hysteresis loop of sample 9a

求得动应力 - 动应变滞回环面积之后, 根据式(1)可以计算出每个试样  $4A_s$  面积(即最大弹性应变能)、动弹性模量和阻尼比。将每组 3 个试样求平均值便得到每组平均  $4A_s$  面积、平均动弹性模量和平均阻尼比(结果见表 1、图 7, 8)。

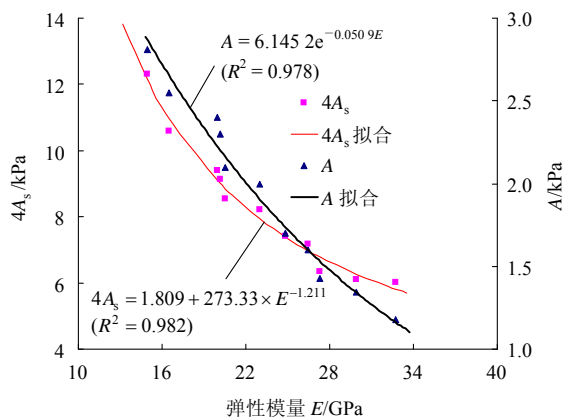


图 7 A 和  $4A_s$  面积随弹性模量的变化  
Fig.7 Variation of A and  $4A_s$  versus elastic modulus

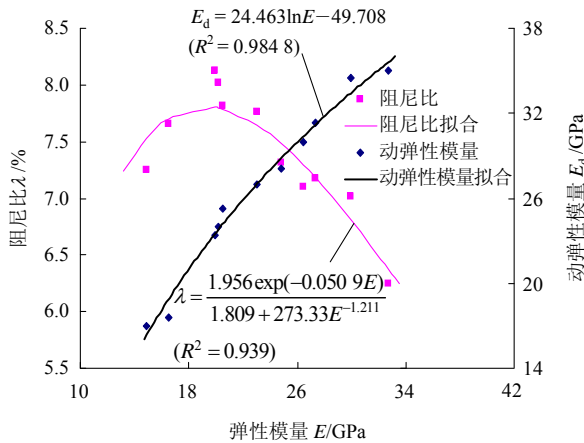


图8 动弹性模量和阻尼比随弹性模量的变化  
Fig.8 Dynamic elastic modulus and damping ratio versus elastic modulus

试验结果(见图 7, 8 和表 1)表明: (1) 黑云母花岗岩的滞回环面积和  $4A_s$  面积都随弹性模量的增加而减少, 拟合曲线见图 7 和表 2; (2) 动弹性模量随着弹性模量的增加而增加, 其拟合曲线见图 8 和表 2; (3) 阻尼比先随弹性模量的增大而增大, 达到一峰值后, 随弹性模量的增大而减少。当弹性模量趋近 0 时, 由表 2 和图 7 可知, 这时滞回环的面积是常数, 而  $4A_s$  面积(即最大弹性应变能)则趋近于无穷大, 此时阻尼比趋近于 0; 当弹性模量趋近于  $+\infty$  时, 滞回环的面积则趋近于 0, 此时阻尼比也趋近于 0。所以当弹性模量由 0 增加到  $+\infty$  过程中, 阻尼比先随弹性模量的增大而增大, 达到一峰值后, 随

表2 广义开尔文模型参数反演值及准则函数值  
Table 2 Inversion values of parameters generalized Kelvin theological model and criterion function values

试样编号	$E_0$ /MPa	$E_1$ /MPa	$\eta_1$ /(MPa·s)	$f$
1a	17 102	18 339	17 197	$1.51 \times 10^{-9}$
2a	18 629	20 072	19 377	$1.12 \times 10^{-9}$
3a	23 423	25 769	21 982	$4.10 \times 10^{-10}$
4a	24 246	44 932	24 445	$3.35 \times 10^{-10}$
5a	26 535	26 799	16 596	$2.91 \times 10^{-10}$
6a	27 949	32 552	25 485	$4.07 \times 10^{-10}$
7a	29 197	33 613	21 410	$2.23 \times 10^{-10}$
8a	32 291	29 822	18 698	$2.76 \times 10^{-10}$
9a	35 088	80 000	25 478	$1.97 \times 10^{-10}$
10a	35 461	48 077	38 278	$1.18 \times 10^{-10}$
11a	35 714	58 824	37 467	$3.58 \times 10^{-10}$

弹性模量的增大而减少。

由滞回环面积和  $4A_s$  面积随弹性模量变化的关系式和式(1)便可得阻尼比随弹性模量变化的关系式(见图 8)。

### 3.4 滞回曲线理论研究

本文利用广义开尔文流变模型来描述循环荷载下黑云母花岗岩的滞回曲线和能量损耗情况。广义开尔文模型是由胡克弹簧和开尔文体串联而成(见图 9)。

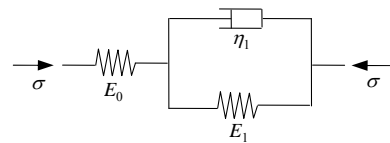


图9 广义开尔文流变模型示意图

Fig.9 Sketch of generalized Kelvin rheological model

广义开尔文模型的本构方程为

$$\eta_1 \dot{\varepsilon} + E_1 \varepsilon = \frac{E_0 + E_1}{E_0} \sigma + \frac{\eta_1}{E_0} \dot{\sigma} \quad (2)$$

本文试验采用振动波形为正弦波, 应力可表示为  $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \sin(\omega t)$ , 其中  $\sigma_0$  为平均应力,  $\sigma_1$  为振幅,  $\omega$  为角速度。将  $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \sin(\omega t)$  代入式(2)可得

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E_1}{\eta_1} \varepsilon = \frac{E_0 + E_1}{\eta_1 E_0} [\sigma_0 + \sigma_1 \sin(\omega t)] + \frac{\omega \sigma_1}{E_0} \cos(\omega t) \quad (3)$$

式(3)为一阶线性微分方程, 求解可得

$$\varepsilon = P_1 \sin(\omega t) - \omega P_2 \cos(\omega t) + P_3 + (\varepsilon_0 + \omega P_2 - P_3) \cdot \exp(-E_1 t / \eta_1) \quad (4a)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{\sigma_1}{\left(\frac{E_1}{\eta_1}\right)^2 + \omega^2} \left[ \frac{(E_0 + E_1)E_1}{E_0 \eta_1^2} + \frac{\omega^2}{E_0} \right] \\ P_2 &= \frac{\sigma_1}{\eta_1 \left[ \left(\frac{E_1}{\eta_1}\right)^2 + \omega^2 \right]} \\ P_3 &= \frac{(E_0 + E_1)\sigma_0}{E_0 E_1} \end{aligned} \right\} \quad (4b)$$

式中:  $\varepsilon_0$  为  $t = 0$  时刻的轴向应变值。

根据不同时刻  $t_i$  的轴向应变实测值  $\varepsilon_i$  可以建立参数辨识的准则函数  $f$  为

$$f = \sum_{i=1}^n [\varepsilon_i - P_1 \sin(\omega t_i) + \omega P_2 \cos(\omega t_i) - P_3 - (\varepsilon_0 + \omega P_2 - P_3) \exp(-E_1 t_i / \eta_1)]^2 \quad (5)$$

将已知值  $t_i, \varepsilon_i, \varepsilon_0, \sigma_0, \sigma_1, w$  代入式(5)中, 使  $f$  达到最小的一组  $E_0, E_1, \eta_1$  即为待求的参数值。

本文利用最小二乘法对各个花岗岩试样第 16 次循环的动应力 - 应变曲线进行参数辨识。限于篇幅, 这里每组仅给出一个试样的参数辨识结果和关系系数(见表 2)。从表 2 可以看出: 参数  $E_0$  随试样弹性模量的增加而增加, 参数  $\eta_1$  和参数  $E_1$  与弹性模量没有明显的单调关系。这是因为:  $E_0$  表示没有滞回效应的变形, 其物理意义为试样的动弹性模量, 表 1 中动弹性模量值和表 2 中  $E_0$  值十分接近, 相差不到 10%。而参数  $\eta_1$  和  $E_1$  综合影响滞回曲线的面积。

图 10 为试样 1a 滞回曲线和广义开尔文模型拟合结果的比较, 可见广义开尔文模型能较好地反映黑云母花岗岩滞回曲线和能量耗散情况。

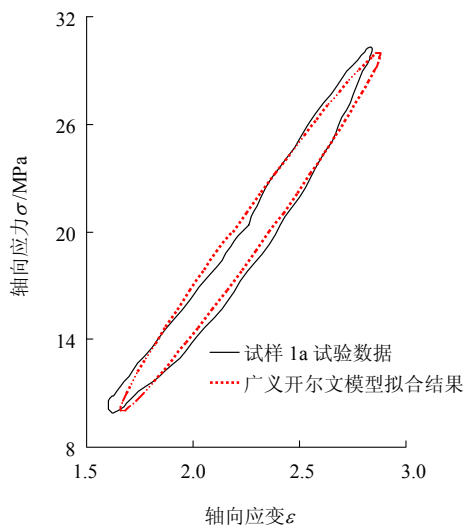


图 10 试样 1a 滞回曲线和广义开尔文模型拟合结果比较  
Fig.10 Results comparison between hysteresis curve of sample 1a and the fitting result by generalized Kelvin model

## 4 结 论

通过在 RMT - 150B 多功能全自动刚性岩石伺服试验机对取自海南昌江核电一期常规岛微风化和中风化黑云母花岗岩进行单轴压缩变形试验和单轴循环加卸载试验, 研究了花岗岩动应力 - 动应变曲线滞回特性和动弹性模量和阻尼比同弹性

模量之间的规律, 并利用广义开尔文流变模型来描述循环荷载下花岗岩的滞回曲线和能量损耗情况。本文得到了如下主要结论:

(1) 黑云母花岗岩循环加载与卸载的应力 - 应变曲线并不重合, 而是形成一个滞回环, 第一个循环动应力 - 动应变滞回环并不闭合, 但随着循环数的增加, 滞回环向轴向应变增大的方向移动, 且越来越密集, 最后几乎在一个滞回环上重复并达到稳定。花岗岩的阻尼比和动弹性模量都是随循环次数的增加而减少。

(2) 黑云母花岗岩的滞回环面积和最大弹性应变能(即  $4A_s$  面积)都随弹性模量的增加而减少; 动弹性模量随着弹性模量的增加而增加; 阻尼比先随弹性模量的增大而增大, 达到一峰值后, 随弹性模量的增大而减少。

(3) 广义开尔文流变模型可以较好地描述循环荷载下黑云母花岗岩的滞回曲线和能量损耗情况。

## 参考文献(References):

[1] TUTUNCU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, part I: effect of frequency and strain amplitude[J]. Geophysics, 1998, 63(1): 184 - 194.

[2] TUTUNCU A N, POLIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, part II: hysteresis effects and influence of type of fluid on elastic moduli[J]. Geophysics, 1998, 63(1): 195 - 203.

[3] NISHI K, KOKUSHAO T, ESSAHI Y. Dynamic shear modulus and damping ratio of rocks for a wide confining pressure range[C]// Proceedings of the Fifth Congress of International Society for Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1983: 223 - 226.

[4] BAGDE M N, PETROS V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(2): 237 - 250.

[5] 葛修润. 周期荷载作用下岩石大型三轴试验的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11 - 19.(GE Xiurun. Study of deformation and strength behavior of the large-sized triaxial rock samples under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(2): 11 - 19.(in Chinese))

[6] 葛修润, 蒋 宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 581 - 1 585. (GE Xiurun, JIANG Yu, LU Yunde, et al. Test study of fatigue

- deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 581 - 1 585.(in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 席道瑛, 王鑫, 陈运平. 描写岩石非线性弹性滞后和记忆的宏观模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 212 - 2 219.(XI Daoying, WANG Xin, CHEN Yunping. Macroscopic model of hysteresis and memory for the description of rock nonlinear elastic[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 212 - 2 219.(in Chinese))
- [9] 席道瑛, 刘斌, 田象燕. 饱和岩石的各向异性及非线性弹性响应[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 109 - 118.(XI Daoying, LIU Bin, TIAN Xiangyan. Anisotropy and nonlinear viscoelastic behavior of saturated rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(1): 109 - 118.(in Chinese))
- [10] 陈运平, 王思敬, 王恩志. 岩石应力-应变滞后现象的定量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 4 066 - 4 073.(CHEN Yunping, WANG Sijing, WANG Enzhi. Quantitative study of stress-strain hysteretic behaviors in rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4 066 - 4 073.(in Chinese))
- [11] XI D Y, CHENG J Y, YI L K. The attenuation of stress waves in fluid saturated porous rock[J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 10(5): 565 - 570.
- [12] 席道瑛, 刘小燕, 张程远. 应力控制疲劳载荷作用下循环硬化的应变响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 807 - 1 810.(XI Daoying, LIU Xiaoyan, ZHANG Chengyuan. Strain response of cyclic hardening under fatigue loading on saturated rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 807 - 1 810.(in Chinese))
- [13] 包雪阳, 施行觉. 岩石非线性弹性的实验研究及其 P-M 模型的理论解释[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 397 - 3 404.(BAO Xueyang, SHI Xingjue. Experiment research and interpretation on nonlinear elasticity of rock using P-M model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 397 - 3 404.(in Chinese))
- [14] 陈运平, 刘干斌, 姚海林. 岩石滞后非线性弹性模拟的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 341 - 347.(CHEN Yunping, LIU Ganbin, YAO Hailin. Study of simulation for hysteretic nonlinear elasticity of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 341 - 347.(in Chinese))
- [15] OKUR D V, ANSAL A. Stiffness degradation of natural fine grained soils during cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(9): 843 - 854.
- [16] 许江, 杨红伟, 李树春, 等. 循环加、卸载孔隙水压力对砂岩变形特性影响实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 892 - 899.(XU Jiang, YANG Hongwei, LI Shuchun, et al. Experimental study of effects of cyclic loading and unloading pore water pressures on deformation characteristic of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 892 - 899.(in Chinese))
- [17] 贺建清, 阳军生, 靳明. 循环荷载作用下掺土煤矸石力学性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 199 - 205.(HE Jianqing, YANG Junsheng, JIN Ming. Experimental study of mechanical behaviors of coal gangue mixed with soil under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 199 - 205.(in Chinese))