

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2022.03.007

## 循环扰动荷载作用下花岗岩损伤及破裂特性研究

陈文昭<sup>1</sup>, 蒋一凡<sup>1</sup>, 刘夕奇<sup>2\*</sup>

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 岩体的稳定性是深部岩、矿开采过程中重需关注的安全问题, 而动力扰动是影响岩体稳定性的重要因素。以双江口水电站深部岩石(花岗岩)为研究对象, 对花岗岩进行了室内动静组合加载下的单轴压缩试验, 并对岩石破坏后的碎屑粒径、分形维数以及岩石加载过程中的损伤演化进行了分析。得到以下结论: 1) 随着扰动应力幅值的增大, 岩石的碎屑分布越趋于均匀; 2) 岩石在扰动荷载作用下的碎屑粒径分布满足分形规律, 可以用分形维数来表征岩石的破碎程度, 且分形维数  $F$  与扰动幅值  $\Delta\sigma$  表现出良好的线性关系, 即随着扰动幅值增加, 分形维数增大, 破碎程度加深; 3) 扰动荷载作用下, 损伤变量呈增大-平稳-增大的变化趋势, 且扰动幅值  $\Delta\sigma$  的大小对岩石平稳区段的循环次数和损伤变化速率存在显著影响。

**关键词:** 花岗岩; 循环扰动; 应力幅值; 分形维数; 损伤演化

中图分类号: TU45 文献标志码: A

文章编号: 1673-0062(2022)03-0047-08 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Damage and Fracture Characteristics of Granite Under Cyclic Disturbance Loading

CHEN Wenzhao<sup>1</sup>, JIANG Yifan<sup>1</sup>, LIU Xiqi<sup>2\*</sup>

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;  
2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430000, China)

**Abstract:** The stability of rock mass is a serious safety problem in the process of deep rock and mining, and dynamic disturbance is an important factor affecting the stability of rock mass. The deep rock (granite) of Shuangjiangkou Hydropower Station is taken as the research object. The uniaxial compression test of granite under dynamic and static combined loading is carried out in the laboratory, and the particle size, fractal dimension and damage evolution of the rock are analyzed. The results are as follows: (1) with the in-

收稿日期: 2021-12-17

基金项目: 湖南省教育厅重点科研项目(18A252)

作者简介: 陈文昭(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程高边坡、岩土工程勘察等方面的研究。E-mail: cwzusc@126.com。\* 通信作者: 刘夕奇(1989—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事深部岩石力学与工程方面的研究。E-mail: Liu-Xiqi@whu.edu.cn

crease of the amplitude of disturbance stress, the distribution of rock debris tends to be more uniform. (2) The particle size distribution of rock debris under disturbance load meets the fractal law, and the fractal dimension can be used to characterize the degree of rock fragmentation. The fractal dimension  $F$  has a good linear relationship with the disturbance amplitude  $\Delta\sigma$ , that is, with the increase of disturbance amplitude, the fractal dimension increases and the degree of fragmentation deepens. (3) Under the disturbance load, the damage variable has a trend of increasing-stationary-increasing, and the disturbance amplitude  $\Delta\sigma$  has a significant influence on the number of cycles and damage change rate of the stationary section of rock.

**key words:** granite; cyclic disturbance; stress amplitude; fractal dimension; damage evolution

## 0 引言

随着各国浅层矿产资源的开采殆尽,岩、矿采掘作业逐渐深入深部地下空间。深部岩石相较于浅部岩石而言,往往处于“三高一扰”的复杂力学环境中,在该环境下极易引发深埋隧洞围岩产生高能级、大体量的岩爆、冲击地压等工程灾害,甚至可能导致采场失稳坍塌,对施工人员及设备安全构成严重威胁<sup>[1-2]</sup>。因此,合理地岩石进行扰动荷载作用下的研究,对于防止地下工程灾害事故的发生具有重要意义。

近年来,诸多岩石领域学者对岩石在动静组合加载下的力学特性进行了大量的研究,从而对揭示深部岩体的岩爆成灾机制具有一定的意义。如,杨福见等<sup>[3]</sup>基于对岩体开挖后岩体内部应力重分布的理解,提出了一种研究深部岩石在扰动荷载作用下力学特性的新方法;S. Ghasemi 等<sup>[4]</sup>对辉长岩试样进行单调和循环加载试验,研究了辉长岩中微裂纹在静、动荷载作用下的演化规律,结果表明,循环加载的试样比单调加载的试样更早出现微裂纹扩展,且除加载至峰值强度的试样外,循环加载的试样微裂纹长度较高;刘德克等<sup>[5]</sup>利用有限元软件 FLAC<sup>3D</sup> 探究了岩石在动静组合加载的不同单轴轴压作用下的岩石的强度变化、破坏特征及应力应变等力学特性进行了分析;T. Xu 等<sup>[6]</sup>通过砂岩样品进行了一系列常规单轴压缩试验和循环加载试验,得到了最大应力和应力幅值与单轴抗压强度的比值是影响砂岩疲劳寿命的最重要因素,数值砂岩试样最大应力和/或应力幅值越大,疲劳寿命越短;杨鹏等<sup>[7]</sup>通过对大理岩、砂卡岩和蛇纹岩三种岩石开展不同应力扰动幅值下的力学试验,提出了应力上限门槛值的概念,认为循环扰动加载下应力只要不大于上限

门槛值,岩样就不会发生破坏。此外,还有诸多学者从蠕变特性、声发射特征、红外热像、能量耗散等<sup>[8-14]</sup>角度对循环荷载作用下岩石的力学特性、损伤及破裂等方面进行了研究。

以上学者的研究虽然取得了丰富的成果,但大多数的研究在于研究岩石在循环荷载作用下的变形特征以及岩石在不同应力水平、应力幅值条件下的力学特性,而对岩石在高应力条件下的循环扰动试验还研究较少。因此,本文以四川省双江口水电站深部隧洞采集的岩样为研究对象,对其进行了室内动静组合加载下的单轴压缩试验,揭示循环扰动荷载对岩石的影响规律,从而为隧道工程施工及岩爆预警提供理论依据。

## 1 试样制备及方案

### 1.1 试验设备及试样制备

本次试验采用的仪器为中国科学院武汉岩土研究所研制的 RMT 系列电液伺服试验机(如图 1 所示)。该力学试验系统可以实现频率在 0 ~ 20 Hz 之间、荷载大小在 0 ~ 500 kN 之间的轴向循环扰动荷载,精确地测量试样在单轴条件下的力学特征。



图1 试验设备

Fig. 1 Test equipment

本文研究的试样为取自四川省双江口水电站的花岗岩,岩体完整且材质较硬,无明显节理,主要由石英、黑云母等矿物质组成。采用水刀切割方法,将一整块岩石切割成 30 个 50 mm×100 mm 的试验标准圆柱体试样。采用图 1 设备对岩样进行单轴压缩试验,得到岩样的静力学参数如表 1 所示,单轴压缩应力-应变曲线如图 2 所示。

表 1 岩石静力学参数

Table 1 Static parameters of rock

岩石类型	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
花岗岩	144.84	31.294	0.21

1.2 试验方案

试验采用单轴动静组合加载方式,具体加载过程如图 3 所示,先采用斜坡控制力的方式对岩样缓慢施加轴向静荷载,加载至一定数值  $\sigma_m$  后施加波形为正弦波的循环扰动荷载,图中  $T$  为一个循环加载周期,扰动荷载上限记作  $\sigma_{max}$ ,下限记作  $\sigma_{min}$ ,扰动幅值  $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ 。

具体加载方案如表 2 所示,首先对岩样以 5 kN/s 的速率施加轴向静载,加载至单轴抗压强度的 60%、70% 和 80% 后,再施加扰动荷载,扰动荷载的幅值为 20 MPa、30 MPa 和 40 MPa,试验直至岩样破坏为止。

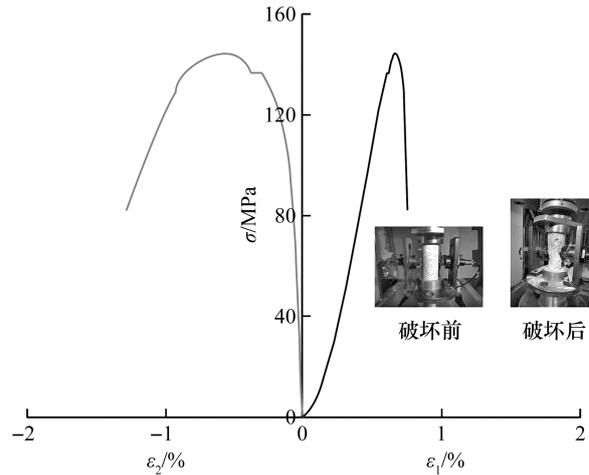


图 2 单轴压缩应力-应变曲线

Fig. 2 Uniaxial compression stress-strain curve

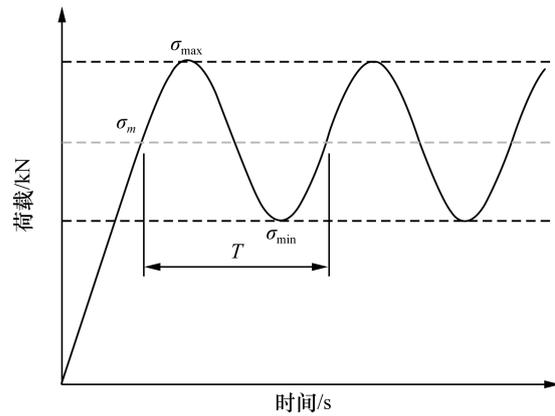


图 3 循环扰动荷载加载过程示意图

Fig. 3 Diagram of loading process of cyclic disturbance load

表 2 循环动力扰动力学试验方案

Table 2 Cyclic Dynamic Disturbance Test Scheme

岩样编号	$\sigma_{max}$ /MPa	上限应力比/%	$\sigma_{min}$ /MPa	下限应力比/%	$\sigma_m$ /MPa	平均应力比/%	幅值/MPa
Gra60%-1	96.904	66.90	76.904	53.10	86.904	60	20
Gra60%-2	101.904	70.36	71.904	49.64	86.904	60	30
Gra60%-3	106.904	73.81	66.904	46.19	86.904	60	40
Gra70%-1	111.388	76.90	91.388	63.10	101.388	70	20
Gra70%-2	116.388	80.36	86.388	59.64	101.388	70	30
Gra70%-3	121.388	83.81	81.388	56.19	101.388	70	40
Gra80%-1	125.872	86.90	105.872	73.10	115.872	80	20
Gra80%-2	130.872	90.36	100.872	69.64	115.872	80	30
Gra80%-3	135.872	93.81	95.872	66.19	115.872	80	40

2 试件破坏分析

2.1 破碎岩块筛分

对破碎后的岩石采用 0.05 ~ 45 mm 的标准

筛进行筛分试验,将碎屑粒径分为 0.05 ~ 1 mm、1 ~ 5 mm、5 ~ 10 mm、10 ~ 15 mm、15 ~ 20 mm、20 ~ 25 mm、25 ~ 30 mm、30 ~ 35 mm、35 ~ 40 mm、40 ~ 45 mm 十个等级,并称量各筛孔上剩余碎屑

的质量,将其转换成各筛孔孔径下岩石碎屑的筛下累计百分含量,得到花岗岩在不同扰动幅值下

的碎屑颗粒级配曲线,如图 4 所示。

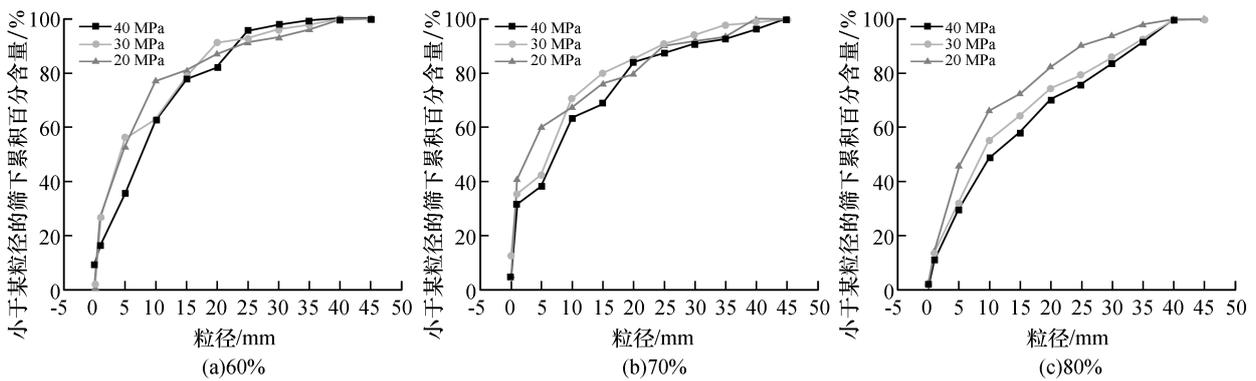


图 4 不同扰动幅值下的颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle gradation curve under different disturbance amplitude

工程上常用级配曲线的不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  量化粒径分布的均匀程度和连续性程度,从而判断级配优劣<sup>[15]</sup>。其中:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2)$$

式中: $d_{10}, d_{30}, d_{60}$  分别表示小于某粒径的质量占总质量的 10%, 30%, 60% 所对应的粒径。

由图 4 中的级配曲线可以得到的相应的特征粒径,从而计算出不同工况下的碎屑的不均匀系数和曲率系数,如表 3 所示。

表 3 颗粒级配不均匀系数及曲率系数

Table 3 Inhomogeneous coefficient and curvature coefficient of particle gradation

岩样	Gra60% -1	Gra60% -2	Gra60% -3	Gra70% -1	Gra70% -2	Gra70% -3	Gra80% -1	Gra80% -2	Gra80% -3
$C_u$	29.57	23.89	23.17	21.14	20.57	19.18	18.80	18.38	17.36
$C_c$	4.45	3.82	3.22	2.94	2.78	2.69	1.53	1.92	1.84

当曲率系数  $3 \geq C_c \geq 1$  时,碎屑颗粒的分布是连续的,由表 3 的计算结果可以看出,静载加至单轴抗压强度的 60% 时,不同应力扰动幅值对应的曲率系数  $C_c$  分别为 4.45、3.82、3.22,说明岩样碎屑分布是不连续的;而静载加至单轴抗压强度的 70% 和 80% 后,在不同应力幅值作用下的碎屑曲率系数均大于 1 且小于 3,说明连续。当不均匀系数  $C_u \geq 5$  时,碎屑的粒径分布是不均匀的,且  $C_u$  越大碎屑的均匀性越差<sup>[16]</sup>。也即,曲线越平缓,碎屑粒径的变化范围越大。从表 3 的计算结果可以看出,虽然不均匀系数都大于 5,但却呈现减小的趋势,说明随着初始静载及扰动应力幅值的增大,岩样碎屑的分布越趋于均匀。

由上述岩样碎屑粒径分析并结合宏观破坏现象观察可以得出,不同应力扰动幅值加载下,岩样

碎屑分布有明显不同。当扰动应力幅值较小时,岩样碎屑破碎程度较低,碎屑粒度差较大,分布不均匀,且连续性较差,主要分布为较大的片状碎屑;而在较大的应力扰动幅值加载下,模型岩样破碎程度较高,碎屑粒度分布较均匀,连续性相对较好。

## 2.2 分形维数的计算

根据 N. E. Odling 等<sup>[17]</sup>学者建立的岩石碎屑粒径分布的分形模型,分形维数  $F$  可以通过筛分试验的质量-频率关系求得。岩石在循环扰动荷载作用下产生的碎屑分布方程为:

$$\frac{M(x)}{M_T} = \left(\frac{x}{x_m}\right)^{3-F} \quad (3)$$

上式两边同时取对数,得:

$$\lg\left(\frac{M(x)}{M_T}\right) = (3 - F)\lg\left(\frac{x}{x_m}\right) \quad (4)$$

式中:  $M_T$ 、 $M_{(x)}$  为碎屑的总质量和筛下累计质量;  $x_m$ 、 $x$  为最大碎屑粒径和粒径;  $F$  为分形维数。

图5、图6、图7是对初始时施加不同静载  $\sigma_m$  的  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  散点图进行线性拟合的直线,拟合直线的斜率为  $(3-F)$ ,进而可以求出分形

维数  $F$ 。由图5~图7可知,花岗岩破碎碎屑筛下累计质量的百分含量与筛孔尺寸在双对数坐标系中呈现良好的线性相关关系,说明可以用分形维数定量表征岩石试件的破碎程度。

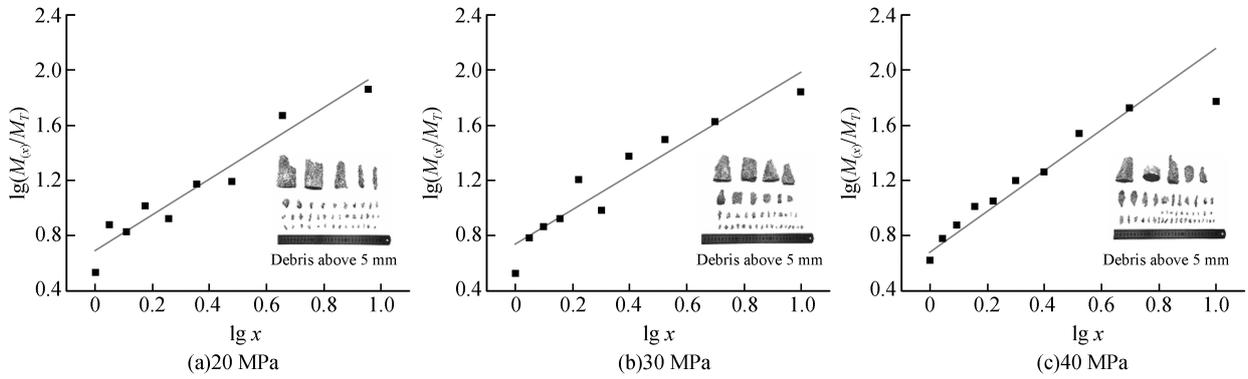


图5 60%的  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  曲线  
Fig.5  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  curve of 60%

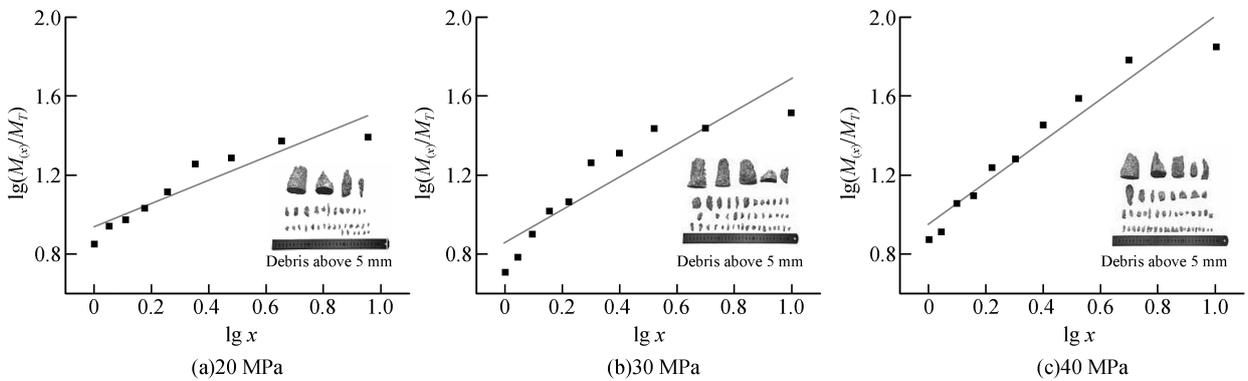


图6 70%的  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  曲线  
Fig.6  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  curve of 70%

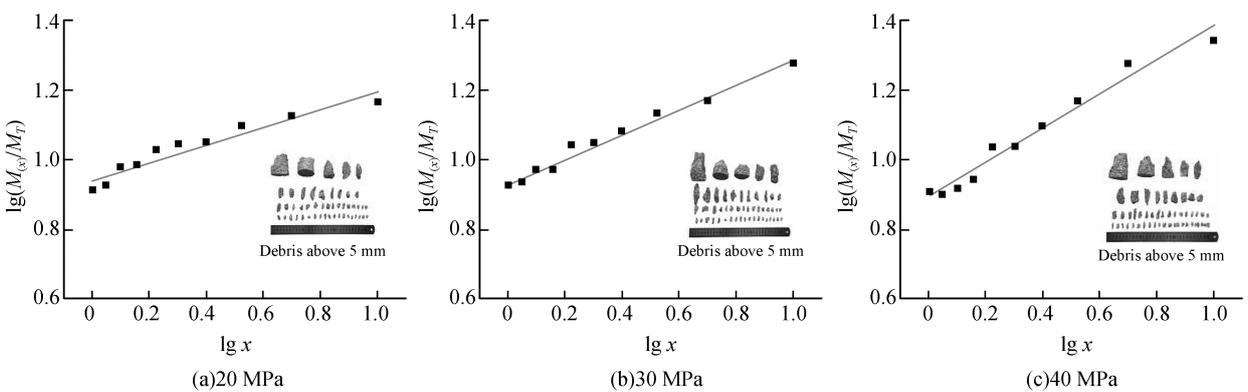


图7 80%的  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  曲线  
Fig.7  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  curve of 80%

2.3 分形维数与扰动幅值的关系

根据上述  $\lg(M_{(x)}/M_T) - \lg x$  曲线中拟合直线的斜率,求得不同工况下各岩样的分形维数  $F$  如表4所示。由表可知,相关系数  $R^2$  均处于较高水平,说明岩石在循环扰动荷载加载下的碎屑粒径分布满足分形规律。当试件具有相同轴向静应力  $\sigma_m$  时,分形维数  $F$  随着扰动幅值的增大而增大,最大分形维数达到2.4左右。由于可以用分形维数表征岩石的破碎程度,则可总结出: $F$  值越大,岩石破碎的程度越高。

表4 花岗岩碎屑参数统计

Table 4 Statistics of granite debris parameters

岩样	分形维数 $F$	相关系数 $R^2$
Gra60%-1	1.525 4	0.874 6
Gra60%-2	1.701 8	0.904 3
Gra60%-3	2.026 3	0.945 9
Gra70%-1	1.943 1	0.940 1
Gra70%-2	2.165 9	0.854 9
Gra70%-3	2.244 8	0.904 5
Gra80%-1	2.207 7	0.968 2
Gra80%-2	2.382 5	0.961 5
Gra80%-3	2.461 5	0.909 9

3 扰动荷载下模型损伤分析

岩石破坏的过程在某种意义上也可以定义为损伤累积的过程,当损伤变量达到一定值时,岩石发生破裂。根据岩石在单轴压缩条件下的损伤本构方程<sup>[7]</sup>:

$$\sigma = \varepsilon E(1 - D) \tag{5}$$

由于在循环扰动荷载作用下,扰动幅值  $\Delta\sigma$  保持不变,因此,可将式(5)中的  $\sigma$  由  $\Delta\sigma$  代替,便得到循环扰动荷载作用下损伤变量  $D$  与应变之间的关系式:

$$D = 1 - \frac{\Delta\sigma}{E\varepsilon} \tag{6}$$

对式(6)两边同时进行求导,得:

$$dD = \frac{\Delta\sigma}{E\varepsilon^2} d\varepsilon \tag{7}$$

对式(7)两边同时积分,得:

$$\int_0^D dD = \frac{\Delta\sigma}{E} \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \frac{1}{\varepsilon^2} d\varepsilon \tag{8}$$

$$D + C_1 = \frac{\Delta\sigma}{E} \left( \frac{1}{\varepsilon_0} - \frac{1}{\varepsilon} \right) + C_2 \tag{9}$$

式中: $\varepsilon_0$  为循环扰动开始时得纵向应变; $\varepsilon$  为试样破坏时的纵向应变; $C_1$ 、 $C_2$  为积分常数。当  $D=0$  时, $\varepsilon_0 = \varepsilon$ ,代入式(9),得  $C_1 = C_2$ 。当  $D=1$  时,试样破坏,假设  $\varepsilon_d$  为试样破坏时的纵向应变,将  $\varepsilon = \varepsilon_d$  代入式(9),得:

$$\frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{\varepsilon_d \cdot \varepsilon_0}{\varepsilon_d - \varepsilon_0} \tag{10}$$

将式(10)和  $C_1 = C_2$  代入式(9),得:

$$D = \frac{\varepsilon_d \cdot \varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_d} \tag{11}$$

图8为岩石在轴向静载加至试验设计的单轴抗压强度后,不同扰动幅值下循环次数与损伤变量的关系曲线。从图8中可以看出,损伤变量在循环扰动作用下,呈现出快速增大-平稳增长-快速增长的变化趋势,且随着扰动幅值的增大,平稳增长过程中循环次数显著减小。

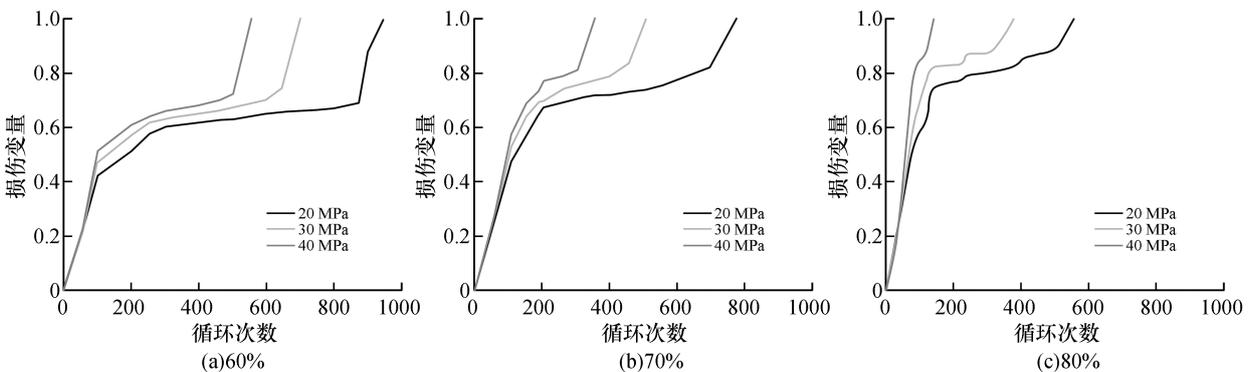


图8 循环次数与损伤变量曲线  
Fig.8 Cycle number and damage variable curve

将平稳增长区段损伤变量的变化率定义为  $V$ ,计算公式如下:

$$V = \frac{D_b - D_a}{C_b - C_a} \quad (12)$$

式中: $D_b$ 、 $D_a$  为平稳区段起始损伤变量; $C_b$ 、 $C_a$  为平稳区段起始扰动荷载已循环的次数。

表5为运用式(12)计算出各岩样平稳区段损伤变化率结果。由表5可知,扰动荷载的幅值和初始时施加的轴向静载的大小都对损伤变化率有很大的影响,当初始静载较小时,即初始静载加至抗压强度的60%,70%时,对应的3种扰动幅

值下的损伤变化率差值在0.2范围内,损伤变量变化率随扰动幅值的增加的变化速率较慢;当初始施加的轴向静载为单轴抗压强度的80%后,3种扰动幅值下的变化率为0.89、1.34、5.5,损伤变量的变化率随着扰动幅值的增加而显著提高。扰动幅值为40 MPa时,3种不同初始静载下的变化率分别为0.76、0.81、5.5,说明不同的初始静载对损伤的变化率也有一定的影响。

表5 损伤变化率

Table 5 Damage change rate

岩样	Gra60% -1	Gra60% -2	Gra60% -3	Gra70% -1	Gra70% -2	Gra70% -3	Gra80% -1	Gra80% -2	Gra80% -3
变化率 $\times 10^{-3}$	0.28	0.56	0.76	0.46	0.62	0.81	0.89	1.34	5.5

## 4 结 论

1)随着岩样加载扰动应力幅值的增大,岩样碎屑的分布越趋于均匀。初始静载加至单轴抗压强度的60%时,不同扰动幅值下岩石的碎屑分布是不连续的,碎屑破坏程度较低;当初始静载加至大于单轴抗压强度70%以上时,岩石的碎屑分布是连续的,且破碎程度较高。

2)分形维数  $F$  可以用来定量评价岩石的破碎特性。岩石在扰动荷载作用下的破碎粒径分布符合分形规律,且随着初始时施加的轴向静载  $\sigma_m$  和扰动幅值  $\Delta\sigma$  的增大,分形维数  $F$  越大,岩石破碎程度越深,表现出良好的线性相关关系。

3)扰动荷载作用下,损伤变量呈增大-平稳-增大的变化趋势,且扰动幅值  $\Delta\sigma$  的大小对岩石平稳区段的循环次数和损伤变化速率存在显著影响。

### 参考文献:

- [1] 梁伟章,赵国彦. 深部硬岩长短期岩爆风险评估研究综述[J]. 岩石力学与工程学报,2021,41(1):19-39.
- [2] ZANG C W, CHEN M, ZHANG G C, et al. Research on the failure process and stability control technology in a deep roadway: Numerical simulation and field test[J]. Energy science & engineering, 2020, 8(7): 1-14.
- [3] 杨福见,胡大伟,周辉,等. 动载扰动后花岗岩物理力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(6): 1459-1467.
- [4] GHASEMI S, KHAMEHCHIYAN M, TAHERI A, et al. Microcracking behavior of gabbro during monotonic and

cyclic loading[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2021, 54(5): 2441-2463.

- [5] 刘德克,李克钢,吴勇,等. 一维动静组合加载下岩石力学特性的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(5): 30-34.
- [6] XU T, FU M, YANG S Q, et al. A numerical meso-scale elasto-plastic damage model for modeling the deformation and fracturing of sandstone under cyclic loading[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2021, 54(5): 4569-4591.
- [7] 刘涛,杨鹏,吕文生,等. 岩石在不同应力幅值下受低频循环扰动的力学特性试验[J]. 煤炭学报,2017,42(9): 2280-2286.
- [8] 刘玉春,赵扬锋,王进铭,等. 正长花岗岩破坏过程声发射特征试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2021, 32(5): 202-208.
- [9] 刘基程,马林建,张宁,等. 岩石变形破坏过程的能量演化研究进展[J]. 地下空间与工程学报,2021, 17(3): 975-986.
- [10] 苗胜军,刘泽京,赵星光,等. 循环荷载下北山花岗岩能量耗散与损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 928-938.
- [11] MAJI V, MURTON J B. Experimental observations and statistical modeling of crack propagation dynamics in limestone by acoustic emission analysis during freezing and thawing[J]. Journal of geophysical research: Earth surface, 2021, 126(7): 006127.
- [12] MISHRA S, KHETWAL A, CHAKRABORTY T. Dynamic characterisation of gneiss[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2019, 52(1): 61-81.

(下转第88页)

- Exploring the mechanisms of the reductase activity of neuroglobin by site-directed mutagenesis of the heme distal Pocket[J]. *Biochemistry*, 2015, 54(3):722-733.
- [13] LI X, ZHUGE Z, CARVALHO L, et al. Inorganic nitrate and nitrite ameliorate kidney fibrosis by restoring lipid metabolism via dual regulation of AMP-activated protein kinase and the AKT-PGC1 $\alpha$  pathway[J]. *Redoxbiology*, 2022, 51:102266.
- [14] BURMESTER T, WEICH B, REINHARDT S, et al. A vertebrate globin expressed in the brain [J]. *Nature*, 2000, 407(6803):520-523.
- [15] 林英武. 血红素蛋白二聚 寡聚与多聚[J]. *化学进展*, 2014, 26(6):987-995.
- [16] HAI-XIAO L, LIANZHI L, BO H, et al. Neuroglobin is capable of self-oxidation of methionine64 introduced at the heme axial position[J]. *Dalton transactions*, 2018, 47(32):10847-10852.
- [17] ASCENZI P, MARINO M, POLITICELLI F, et al. Cardiolipin modulates allosterically the nitrite reductase activity of horse heart cytochrome *c*[J]. *Journal of biological inorganic chemistry*, 2014, 19(7):1195-1201.
- [18] TISO M, TEJERO J, BASU S, et al. Human neuroglobin functions as a redox-regulated nitrite reductase [J]. *Journal of biological inorganic chemistry*, 2011, 286(20):18277-18289.
- [19] WU L B, YUAN H, GAO S Q, et al. Regulating the nitrite reductase activity of myoglobin by redesigning the heme active center[J]. *Nitric oxide*, 2016, 57:21-29.

---

(上接第53页)

- [13] 龚鹵, 赵坤, 包涵, 等. 红砂岩蠕变破坏声发射震源演化及其分形特征[J]. *岩土力学*, 2021, 42(10):2683-2695.
- [14] MANSOURI H, AJALLOEIAN R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests [J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2018, 110:19-27.
- [15] 舒和平. 黄土丘陵地区小流域泥石流形成与运动特征模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019:78-79.
- [16] 舒和平, 齐识, 宁娜, 等. 甘肃省南部武都区泥石流灾害风险评估研究[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(6):34-41.
- [17] ODLING N E. Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficients[J]. *Rock mechanics and rock engineering*, 1994, 27(3):135-153.