

# 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究\*

葛修润<sup>1,2</sup> 蒋宇<sup>2,3</sup> 卢允德<sup>2</sup> 任建喜<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (<sup>2</sup>上海交通大学建筑工程与力学学院 上海 200030)

(<sup>3</sup>河北省建筑设计研究院上海分院 上海 200125)

**摘要** 利用 RMT-150B 岩石力学多功能试验机完成了单轴压缩状态下砂岩、大理岩和花岗岩试件疲劳破坏变形及机理的较为系统的试验研究。试验结果表明,岩石的疲劳破坏受到静态应力-应变全过程曲线的控制,疲劳破坏时的变形量与周期荷载的上限应力在静态应力-应变全过程曲线后区对应的变形量相当。将岩石轴向不可逆变形发展划分为初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段 3 个阶段,3 个阶段变形的累积将导致岩石的最终破坏。影响岩石疲劳寿命的主要因素是周期荷载的上限应力和幅值。

**关键词** 岩石力学, 疲劳, 不可逆变形, 周期荷载, 应力-应变全过程曲线

分类号 TU 458

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)10-1581-05

## TESTING STUDY ON FATIGUE DEFORMATION LAW OF ROCK UNDER CYCLIC LOADING

Ge Xiurun<sup>1,2</sup>, Jiang Yu<sup>2,3</sup>, Lu Yunde<sup>2</sup>, Ren Jianxi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China*)

(<sup>2</sup>*Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030 China*)

(<sup>3</sup>*Shanghai Branch, Hebei Provincial Architectural Design Research Institute, Shanghai 200125 China*)

**Abstract** Testing study is made on the fatigue failure and deformation mechanism of sandstone and marble under uniaxial compression condition with rock mechanics test equipment RMT-150B. Testing result shows that the fatigue failure curve is controlled by complete stress-strain curve under static loading. The terminal strain of fatigue failure is equal to that of post-peak corresponding to the maximal cyclic load. The development of irreversible deformation can be divided into three phases, that is, initial phase, uniform velocity phase and accelerated phase. The accumulative deformation at three stages will lead to the final failure. The amplitude and maximum of cyclic load are the most important effect factors on fatigue lifespan of rock.

**Key words** rock mechanics, fatigue, irreversible deformation, cyclic load, complete stress-strain curve

## 1 引言

在岩体工程运营阶段,岩体在周期荷载作用下的力学性能是影响岩体工程长期稳定性的重要因素之一。研究周期荷载作用下岩石的疲劳变形特性及

演化规律,有助于正确认识岩体的破坏机理,进而科学地评价岩体的长期稳定性。周期荷载作用下岩石的疲劳破坏机理研究一直是岩石力学工作者关注的前沿课题之一<sup>[1~4]</sup>。

本文利用作者主持研制开发成功的 RMT-150B 岩石力学试验系统<sup>[5,6]</sup>,对岩石的疲劳变形特性进

2002 年 11 月 26 日收到初稿,2003 年 1 月 1 日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金(10172057, 10202019)资助项目。

作者 葛修润 简介:男,68 岁,现为中国科学院武汉岩土力学研究所研究员、中国工程院院士、博士生导师,主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。

行了较为深入的试验研究，得出了单轴周期荷载作用下岩石疲劳破坏的控制量及疲劳破坏过程中不可逆变形的发展规律。

## 2 岩石试样及试验方法

试验所用的岩样包括红砂岩、大理岩和花岗岩。红砂岩取自江西贵溪，大理岩取自四川雅安，花岗岩取自湖北大悟。为保证试验结果的可比性，试样通过在一大块岩石的某一面密集套钻取得。为防止在钻芯时试件中产生较大的热应力，加工时采用了水钻法。试件为国际标准圆柱形试件( $f = 50 \text{ mm}$ ,  $H = 100 \text{ mm}$ )。

### 2.1 岩矿分析

扫描电镜分析表明，大理岩主要矿物成分为碳酸盐矿物，呈镶嵌粒状变晶结构，粒度均匀。红砂岩呈细粒结构，其均匀性较大理岩差。花岗岩为不等粒、似斑状、蠕虫状结构。

X 射线分析结果表明，红砂岩的主要成分为：石英(60%)、长石(24%)、方解石(8%)、高岭石(8%)。大理岩的主要成分为：石英(5%)、云母(6%)、方解石(89%)。花岗岩的主要成分为：石英(20%)、长石(65%)、黑云母(15%)。

### 2.2 试验方法及参数

全过程和疲劳周期试验均在上海交通大学岩石力学研究所 RMT-150B 岩石力学试验系统上进行。这是一套先进的电液伺服试验系统，其突出的优点是对大多数脆性岩石都能在纵向应变率的控制下获得全过程曲线，而且可以进行压缩情况下的疲劳试验。试验可以采取载荷控制和变形控制两种方式。

静态全过程试验以纵向变形控制，加载速率为  $0.0005 \text{ mm/s}$ 。

疲劳破坏试验以载荷控制，加载波形为正弦波，频率为  $0.2 \text{ Hz}$ 。加载波形的特征参数如图 1 所示，各参数意义如下， $s_{\max}$  为周期荷载的上限应力； $s_{\min}$  为周期荷载的下限应力， $\Delta s = s_{\max} - s_{\min}$ ， $\Delta s$  为荷载幅值； $T$  为周期， $f = 1/T$ ， $f$  为频率。

从加载波形可以看出，影响岩石疲劳破坏的因素很多，如周期荷载的幅值  $\Delta s$ 、上限应力  $s_{\max}$ ，周期荷载的频率和加载波形等。在本试验中，只采用了一种加载波形和频率，侧重研究不同的上限应力和幅值对疲劳破坏过程及最终破坏量的影响。

除了上述因素之外，周期荷载作用下岩石的疲

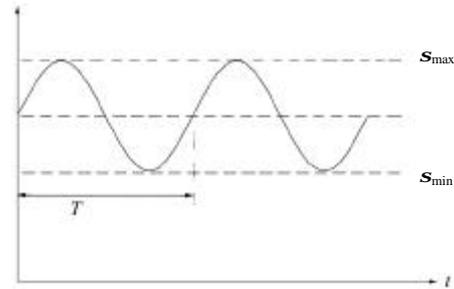


图 1 周期加载波形示意图

Fig.1 Sketch of wave shape of cyclic loading

劳特性还受到门槛值的影响<sup>[7, 8]</sup>，当周期荷载的上限应力值低于某数值时，无论荷载作用多少个周期数，岩石都不会破坏。实际上，门槛值的存在是上限应力对岩石疲劳特性影响的一种反映。

试验中通过固定下限应力、改变上限应力的方法来研究不同的幅值和上限应力对岩石疲劳破坏特性的影响。试验参数如表 1 所示，应力以应力比的形式给出，应力比表示试验设定的应力参数与岩石静态强度( $s_c$ )之比，如上限应力比就是指上限应力与岩石静态强度之比。本试验在门槛值以上选择了 3 种不同的应力比。

表 1 疲劳试验参数

Table 1 Fatigue testing parameters

上限应力比	下限应力比	频率/ Hz	波形
0.9/0.85/0.8	0.3	0.2	正弦波

## 3 试验结果分析

### 3.1 静态全过程试验

由于初期取样严格，岩石的离散性得到了很好的控制。图 2 给出了花岗岩静态全过程曲线，重演性很好，后区部分也比较符合，这为疲劳试验控制指标的选取和对比分析提供了重要的依据。砂岩和大理岩的单轴曲线也重合得相当好。

### 3.2 周期荷载作用下岩石疲劳破坏的控制量

图 3 给出了红砂岩 RS-4-1<sup>#</sup> 试件在周期荷载作用下的疲劳破坏曲线，同一图中与之对照的是静态全过程曲线。疲劳试验的上限应力比为 0.8，幅值为  $0.5s_c$  (具体参数可参照表 2)，试件在 8458 个周期后破坏。为了避免周期加载过程中曲线过于密集，

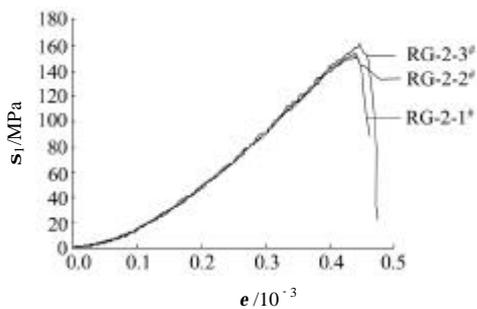


图 2 花岗岩单轴压缩应力-应变全过程曲线

Fig.2 Complete stress-strain curves of granite under uniaxial compression

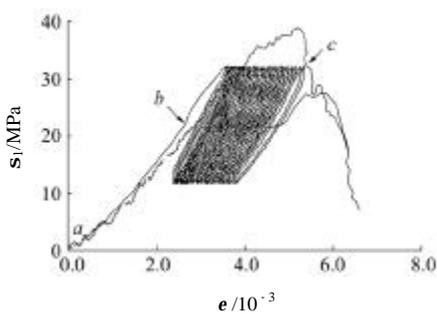


图 3 RS-4-1# 红砂岩疲劳试验曲线

Fig.3 Fatigue testing curves of redstone RS-4-1#

在软件中设定只有轴向位移的增量超过 0.0125 mm 时,才画一个滞回圈。从图 3 中可以看出,周期荷载作用下岩石的疲劳破坏曲线可以看成 2 部分:第 1 部分(ab 段)是为达到周期荷载的平均值所进行的

等速率加载过程,力的加载速率 0.1 kN/s;第 2 部分(bc 段)是以周期荷载平均值为起点,正弦波反复作用的疲劳过程。c 点之后的几个周期由于承载力已经上升不到预先设定的上限应力,故认为 c 点为实际的疲劳破坏点。

通过疲劳曲线和静态全过程曲线的对比,可以得到一个重要的结论:岩石的疲劳破坏完全受到静态全过程曲线的控制,疲劳破坏时的应变即为周期荷载上限应力所对应的静态全过程曲线中峰后部分的应变。

图 4 给出了大理岩 M-2-1#的疲劳试验结果,上限应力比为 0.9,幅值为 0.6s\_c,744 个周期后破坏;图 5 给出了花岗岩 RG-5-3#的疲劳试验结果,上限应力比为 0.8,幅值为 0.5s\_c,6 072 个周期后破坏。尽管试件的岩性不同,上限应力和幅值各异。但是,破坏点变形的规律相同,都受到静态全过程

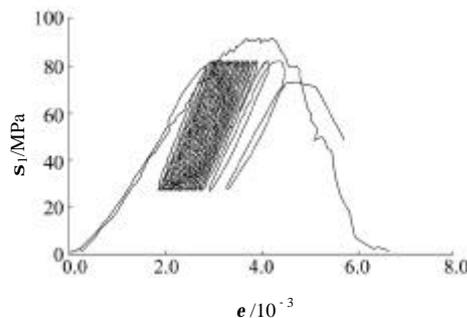


图 4 M-2-1#大理岩疲劳试验曲线

Fig.4 Fatigue testing curves of marble M-2-1#

表 2 疲劳试验结果

Table 2 Fatigue testing results

岩性	编号	上限应力/MPa	下限应力/MPa	幅值/MPa	疲劳寿命/次	破坏点应变/10 <sup>-3</sup>	控制点应变/10 <sup>-3</sup>	误差/‰
红砂岩	RS-3-1#	33.9	11.3	22.6	691	5.634 0	5.414 6	0.148 8
	RS-3-3#	33.9	11.3	22.6	114	5.880 4	5.414 6	0.565 8
	RS-5-1#	32.0	11.3	20.7	508	5.402 4	5.428 9	- 0.026 5
	RS-4-1#	30.2	11.3	18.9	8 458	5.324 1	5.512 8	- 0.188 7
大理岩	M-2-1#	81.1	27.0	54.1	744	4.362 3	4.527 1	- 0.164 8
	M-3-1#	76.6	27.0	49.6	372	4.064 5	4.794 8	- 0.730 3
	M-3-3#	76.6	27.0	49.6	507	5.150 5	4.794 8	0.355 7
	M-2-2#	72.1	27.0	45.1	13 000	3.190 1	4.721 5	未破坏
花岗岩	RG-1-1#	141.3	47.1	94.2	30	4.843 4	5.271 0	- 0.427 6
	RG-3-1#	141.3	62.8	78.5	174	4.878 9	5.271 0	- 0.392 1
	RG-4-2#	141.3	78.5	62.8	113	4.978 0	5.271 0	- 0.293 0
	RG-4-1#	141.3	78.5	62.8	629	5.718 1	5.271 0	0.447 1
	RG-5-3#	125.6	47.1	78.5	6 072	4.759 4	5.323 9	- 0.564 5

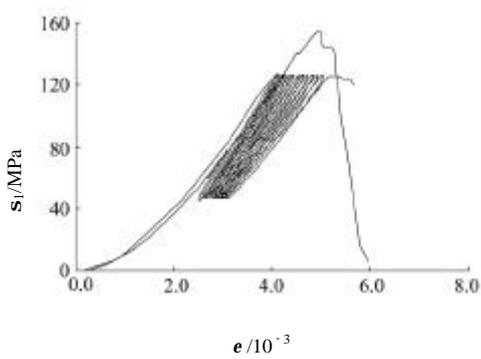


图5 RG-5-3#花岗岩疲劳试验曲线  
Fig.5 Fatigue testing curves of granite RG-5-3#

曲线的控制。

为了验证结论的普遍性，进行了大量的疲劳试验，试验结果见表 2。从现有的试验资料来看，破坏点的应变误差可以控制在 1‰以内，这在工程上是非常小的。不同岩石比较，花岗岩的误差略大，大理岩次之，红砂岩符合得最好。误差随着岩石脆性的增加而有所上升。

岩石的疲劳破坏受到静态全过程曲线的控制，不仅在峰值以前的周期试验中得到了验证，在峰后卸载再加载循环的疲劳试验中也可以得到充分的反应，试验曲线如图 6 所示，仍然服从上述规律。

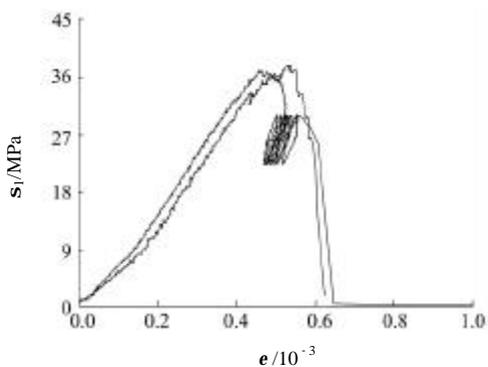


图6 峰后疲劳试验  
Fig.6 Fatigue testing curves of post-peak

综合上述试验结果，可以把变形作为岩石疲劳破坏的控制因素，当变形总量累积到静态全过程曲线的控制点时疲劳破坏发生。这样就可以通过简单的静态全过程试验来预测岩石的疲劳破坏终点，而不需要进行试验周期长、设备要求高的疲劳试验，从而节省大量的人力、物力。

后继的研究表明，利用变形作为岩石疲劳破坏的准则远比从强度角度定义的破坏准则更为准确，

可以很好地降低离散性的影响。现在这方面的研究已经逐渐得到了大家的重视<sup>[9-11]</sup>。

由于控制点是不可逆变形累积的终点，可把上述规律称之为不可逆变形的静态规律。下面从整个疲劳破坏过程，分析不可逆变形的动态发展规律。

### 3.3 岩石疲劳破坏不可逆变形的发展规律

周期荷载作用下，岩石变形的弹性部分在卸荷的过程中将会得到恢复，但是不可逆变形(又称塑性变形或残余变形)会残留下来。不可逆变形的大小、增长趋势及总的累积量是岩石疲劳力学性能更本质的反映，与损伤过程直接相关，所以从不可逆变形的角度研究疲劳破坏过程更为科学和准确。

图 7 给出了不可逆变形与循环次数之间的关系曲线，其中，轴向应变指不可逆应变，可以看出整个疲劳过程的不可逆变形发展可以划分为 3 个阶段：开始阶段发展速率较快；经过一定的周期之后逐渐趋于稳定，以等速率发展；临近破坏又逐渐加速破坏。借用蠕变的概念<sup>[12]</sup>，可以把轴向不可逆变形的发展分为初始阶段、等速阶段和加速阶段。在红砂岩、大理岩和花岗岩疲劳寿命较高的试验中，都可以观察到稳定的 3 阶段的发展规律，曲线呈倒 S 形。

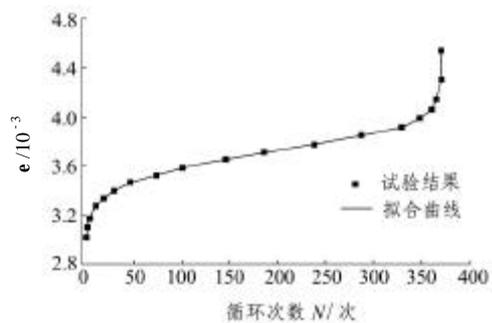


图7 轴向不可逆变形发展曲线  
Fig.7 Development curve of axial irreversible displacement

随着岩石自身属性、应力状态的改变，上述 3 阶段曲线的性状可能会有所改变。如果 3 阶段规律中变形的速率相差不大，则 3 阶段曲线表现为一较平缓的反弯递增曲线。在花岗岩疲劳寿命较低的试验(上限应力比较高，幅值较大，如应力比为 0.9 和 0.85)中可以观察到这一点，如图 8 中的曲线 c 所示。

如果应力水平较低(比如在门槛值以下)，则可能不产生疲劳破坏。不可逆变形在经过初始阶段之

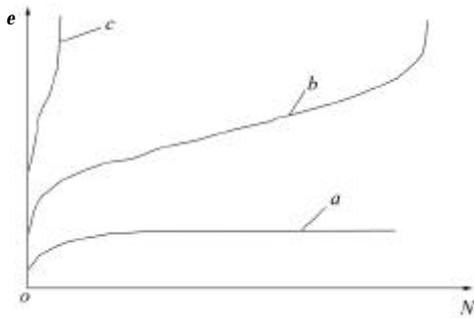


图 8 发展曲线的分类

Fig.8 Sort of development curves

后趋于稳定,在相当长的时间内没有明显的增长。

这样,岩石疲劳破坏过程的变形规律可以概括为图 8 中的 3 种形式,在大多数情况下表现为 *b* 类形式;脆性岩石的高应力比加载表现为 *c* 类形式;上限应力在门槛值以下表现为 *a* 类形式。此 3 种形式中,*b* 类的 3 阶段规律具有普遍性。在大多数疲劳试验中都可以观察到,*a*,*b* 类曲线可以看成是 3 阶段曲线的变形和退化。

分析典型的 3 阶段曲线:等速率过程占了疲劳寿命的绝大部分时间,是疲劳的主要部分,但累积的变形量却只占变形总量的 1/3 左右,其余 2 个阶段经历的时间比较短,累积的变形却很大。

在疲劳试验中可以发现,周期荷载的上限应力和幅值对不可逆变形的发展过程有显著的影响。

提高周期荷载的上限应力,则初始变形和循环变形的比率会提高,而达到破坏所需的累积位移总量会降低,这将显著地降低试件的疲劳寿命,使试件很快就破坏。同时,提高上限应力也会提高等速过程的不可逆变形的发展速率(如对于红砂岩,上限应力比为 0.9,0.85 和 0.8 时对应的应变速率分别为  $1.5 \times 10^{-2}$ ,  $3.3 \times 10^{-3}$  和  $2.0 \times 10^{-4}$  mm/s。上限应力提高 5%,等速速率提高了 1 个数量级)。此外,提高上限应力还会提高第 1 和第 3 阶段在整个累积位移中所占的比例,从而加快试件的破坏。

在上限应力不变的情况下加大幅值,则每一个周期的滞环增大,这表明在每个周期中有更多的能量损耗,岩石的损伤也就更大,产生的不可逆变形也就越大,这也将显著地缩短岩石的疲劳寿命。

## 4 结语与讨论

本文完成了单轴压缩状态下,砂岩、大理岩和花岗岩 3 种典型岩石的疲劳变形特性及破坏机理的较为系统的试验研究,试验结果表明:

(1) 岩石的疲劳破坏受到静态应力-应变全过程曲线的控制,疲劳破坏终点的变形量与该周期荷载的上限应力在静态应力-应变全过程曲线后区对应的变形量相当,此规律适用于不同岩性的岩石。

(2) 周期荷载作用下,岩石轴向不可逆变形发展可以划分为 3 个阶段:初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段。3 个阶段变形的累积将导致岩石的最终破坏。

(3) 周期荷载的上限应力和幅值对不可逆变形的发展过程有重要的影响,是影响岩石疲劳寿命的主要因素。

## 参考文献

- 葛修润,卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56~60
- 葛修润,任建喜,蒲毅彬等. 岩石疲劳损伤扩展规律 CT 细观分析初探[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 191~195
- Akai R, Ohnishi Y. Strength and deformation of rock[A]. In: Proc. of 5th ISRM[C]. [s. l.]: [s. n.], 1982, 40~45
- Müller Loepold, Ge Xiurun. Studies on the mechanical behavior (deformation behavior) of jointed rock masses under cyclic load[A]. In: Proc. of the 5th International Rock Mechanics Conference[C]. Australia: [s. n.], 1983, 1: 43~49
- 葛修润,周百海. 岩石力学室内试验装置的新进展[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 50~56
- 葛修润,周百海,刘明贵等. 电液伺服自适应控制岩石力学试验机及其对岩石力学某些问题研究的意义[J]. 岩土力学, 1991, 12(2/3): 8~13
- 葛修润. 周期荷载下岩石大型三轴试件的变形和强度特性研究[J]. 岩土力学, 1987, 8(2): 11~19
- 赵明阶,许锡宾,徐 蓉. 岩石在三轴加卸荷过程中的一种本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 626~631
- 沈明荣. 应变破坏判据的试验研究[A]. 见:刘汉东编. 岩石力学理论与工程实践[C]. 郑州:黄河水利出版社, 1997, 25~30
- 凌建民,孙 钧. 建立在损伤应变空间的岩体破坏准则[J]. 同济大学学报, 1995, 23(5): 483~487
- 任建喜,葛修润. 单轴压缩岩石损伤演化细观机理及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 425~431
- 陶振宇,潘别桐. 岩石力学原理与方法[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1991, 87~89