

DOI: 10.11779/CJGE201509019

循环荷载作用下岩石疲劳本构模型初探

郭建强, 黄质宏

(贵州大学土木工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘 要: 为研究循环荷载作用下岩石的疲劳本构模型, 提出了 3 个疲劳基本元件: 弹性疲劳元件 (HF)、黏性疲劳元件 (NF) 和塑性疲劳元件 (YF)。通过疲劳基本元件的组合建立了稳定疲劳模型 (广义开尔文与伯格斯疲劳模型) 与不稳定疲劳模型 (非线性黏弹塑性疲劳模型); 当且仅当 $n>1$ 时, 非线性黏弹塑性疲劳模型才可完整模拟岩石的减速疲劳、等速疲劳和加速疲劳 3 个阶段。研究表明: 非线性黏弹塑性疲劳模型可较好的模拟岩石的疲劳变形规律; 若疲劳变形规律具有明显的减速、等速及加速阶段, 则加速疲劳参数 n 将随岩石单轴抗压强度增大而减小。根据研究结果提出用临界应力比而非临界应力设计疲劳试验的参数, 可能更为合理。

关键词: 循环荷载; (不) 稳定疲劳; 非线性黏弹塑性疲劳模型; 临界应力

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)09-1698-07

作者简介: 郭建强(1980-), 男, 博士, 主要从事岩土工程等方向的教学、科研及工程实践等。E-mail: dianxiyou@163.com。

Constitutive model for fatigue of rock under cyclic loading

GUO Jian-qiang, HUANG Zhi-hong

(College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical behavior of rock subjected to cyclic loading, the basic components based on the creep theory are performed to study the fatigue behaviors, of rock, and hereby both stationary fatigue (modified Kelvin model and Burgers model) and non-stationary fatigue (nonlinear viscoelastoplastic model for fatigue) are proposed to describe their fatigue behaviors. The model can simulate reduction, constant and acceleration if and only if $n>1$. The predicted fatigue behaviors are consistent with the observations in tests. It is shown that the model is capable of describing the fatigue behaviors of rocks. If the development of irreversible deformation can be divided into three phases, that is, initial phase, uniform velocity phase and accelerated phase, the accelerated fatigue parameter gradually decreases with the increase of uniaxial compressive strength of rock. It is more important to design fatigue parameters using the stress ratio rather than the threshold for fatigue failure.

Key words: cyclic loading; (non) stationary fatigue; nonlinear viscoelastoplastic model for fatigue; critical stress

0 引 言

在岩石工程中, 经常遇到有关岩石的疲劳问题。比如, 抽水蓄能电站上下游库水位的周期性变动、能源储库注采、承受周期性荷载作用的公路铁路路基等。可见, 研究循环荷载作用下岩石的变形特性, 对科学评价岩石工程的长期稳定性具有重要意义。

葛修润等^[1]通过改变上下限应力的循环试验发现岩石疲劳破坏受静态应力-应变全过程曲线的控制, 且疲劳演化规律可分为减速、等速和加速 3 个阶段; 肖建清等^[2]也发现疲劳可分为 3 个阶段; 刘杰等^[3-4]开展了波形、频率、应力水平及加载速率对岩石疲劳特性影响; 左宇军等^[5]分析了受静载荷岩石在周期载荷作用下破坏及变形发展规律; 倪晓慧等^[6]开展了 7 种不同频率条件下花岗岩单轴循环试验; 席道瑛等^[7]

研究了饱和多孔岩石中行波能量的衰减和虚模量随温度变化的规律; 蒋宇等^[8]研究了岩石疲劳破坏过程中的变形规律和声发射特征; 樊秀峰等^[9]利用实时超声波速, 研究了循环荷载作用下岩石疲劳损伤特性; 任建喜等^[10]指出幅值和波形对疲劳寿命的影响实质是能量耗散的差异, 频率实质是加载速率的差异; 冯春林等^[11]提出了测定岩石临界应力的新方法; 郭印同等^[12]确定了盐岩的临界值为单轴抗压强度 75%~80%; 杨永杰等^[13]提出煤岩临界值不超过其单轴抗压强度 81%; 王者超等^[14]提出了基于内变量理论的花岗岩疲劳本构模型。

基金项目: 贵州省科学技术基金项目 (黔科合丁宁[2015]2037 号); 贵州大学人才引进科研项目 (贵大人基合字 (2014) 26 号)

收稿日期: 2014-10-15

以上研究成果可归结为以下几点:①上下限应力、振幅以及加卸载频率对岩石的疲劳寿命有影响;②疲劳破坏存在临界值,即上限应力大于临界值,岩石才可能发生疲劳破坏;③与蠕变破坏相类似,岩石疲劳曲线(应变-循环次数 N)也可划分为3个阶段:减速阶段、等速阶段及加速阶段。当前,岩石疲劳寿命的研究已受到了广泛的关注,但量化研究尚显欠缺。

因此,本文借鉴蠕变理论已有的成果,试图通过提出疲劳基本元件及基本元件的组合,建立岩石的疲劳模型,为循环荷载条件下岩石工程数值计算提供基础。

1 岩石疲劳特性

1.1 疲劳试验基本理论

以正弦波形式进行应力控制的循环试验,公式如下:

$$\sigma = \sigma_{\min} + A[1 + \sin(\omega t)] \quad (1)$$

式中 σ_{\max} , σ_{\min} , σ_{av} 分别为循环荷载上限应力、下限应力及平均应力;上(下)限应力与岩石静态强度(σ_c)之比称为上(下)限应力比; T 为岩石单个加卸载循环周期所需时间,与频率 f 关系为 $Tf=1$; N 为疲劳试验循环次数(N 取正实数,例如2.0001, 9.9999等),与岩石疲劳试验时间 t 满足 $t=NT$;周期荷载振幅 $2A=\sigma_{\max}-\sigma_{\min}$;角速度 $\omega=2\pi f$ 。

1.2 岩石疲劳特性

岩石疲劳曲线如图1所示^[1]。其中,a类为上限应力较小条件下,塑性应变最终趋于恒定值的稳定疲劳;b类、c类为塑性变形无限增长直至破坏的不稳定疲劳。高应力比加载条件下,脆性岩石疲劳破坏常表现为c类;而b类的疲劳破坏则较为普遍。基于已有的研究成果,将岩石疲劳过程分为3个阶段(以曲线b为例):疲劳速率随时间(或循环次数)增加而减小的减速疲劳阶段(b1~b2段);疲劳速率随时间(或循环次数)基本保持不变的等速疲劳阶段(b2~b3段);疲劳速率迅速增加直至破坏的加速疲劳阶段(b3~b4段)。

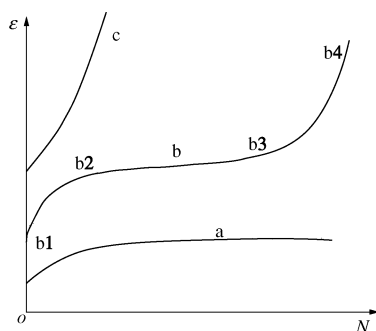


图1 岩石疲劳曲线^[1]

Fig. 1 Development curves of rock fatigue^[1]

岩石即可发生稳定疲劳(图1中a类),也可发生

不稳定疲劳(图1中b, c类),这主要取决于循环荷载的上限应力。上限应力大于临界应力 σ_{crl} 时,按不稳定疲劳发展;上限应力小于临界应力 σ_{crl} 时,按稳定疲劳发展。

在已有研究成果的基础上,为实现岩石疲劳变形的定量化研究,采用如下两个约定:

(1) 塑性变形等效性

岩石疲劳曲线与蠕变曲线相似,为了能够利用蠕变理论的相关研究成果,将岩石疲劳看作是应力函数 $F(f, \sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_c)$ 作用下的蠕变。其中,应力函数 F 满足下式:

$$F = \sigma_{av} e^{\left(\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{crl}}{\sigma_c}\right)f} \quad (2)$$

由式(2)并结合循环试验成果可知,加载频率 $f \rightarrow 0$,应力函数 $F = \sigma_{av}$,表示平均应力作用下岩石的蠕变; $F < \sigma_{av}$ 为稳定疲劳; $F > \sigma_{av}$ 为不稳定疲劳。

(2) 塑性变形连续性

严格来说,加卸载循环条件下岩石的塑性变形呈现为不均一和不连续性,然而,考虑到岩石的损伤与塑性变形是一个逐步累积的过程。因此可把塑性变形看作是连续的,满足下式

$$\varepsilon^p = \begin{cases} \int_0^t \dot{\varepsilon}^p(t) dt \\ \Delta \varepsilon_1^p + \Delta \varepsilon_2^p + \dots + \Delta \varepsilon_n^p = \sum \varepsilon_i^p \\ \varepsilon_{i0}^p = \varepsilon_{(i-1)e}^p \end{cases} \quad (3)$$

式中 ε^p 为总塑性变形; $\Delta \varepsilon_i^p = \varepsilon_{ie}^p - \varepsilon_{i0}^p$ 为第 i 循环周期的塑性变形; ε_{i0}^p , ε_{ie}^p 分别为第 i 个循环初始与结束的塑性变形。

2 疲劳模型的基本元件

2.1 基本元件

采用与蠕变本构模型相似的方法,定义了3个基本疲劳元件:弹性疲劳元件(HF)、黏性疲劳元件(NF)和塑性疲劳元件(YF)。

(1) 弹性疲劳元件

与蠕变理论的弹性元件相似,该元件的力学模型如图2所示,以符号HF代表。本构方程满足下式, k 为弹性疲劳系数,可通过拟合方法获得。

$$F(f, \sigma_{\max}, \sigma_{\min}, \sigma_c) = k \cdot \varepsilon(N) \quad (4)$$



图2 弹性疲劳元件力学模型

Fig. 2 Hookean fatigue solid

弹性疲劳元件具有瞬时弹性变形性质,只要应力函数不为零,就有相应应变 ε ;当 F 为零时, ε 也为

零。

(2) 塑性疲劳元件

循环荷载的上限应力小于材料临界应力 σ_{cri} (或材料的长期强度), 即使循环次数 N 趋于无穷大, 塑性变形仍为零; 若循环荷载的上限应力大于材料临界应力, 即使循环次数不增加, 塑性变形仍会不断增加, 具有这一性质的物体称为理想塑性疲劳体。其力学模型可用摩擦片表示, 以符号 YF 代表, 如图 3 所示。其本构方程为

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} < \sigma_{\text{cri}} \text{ 时, } \varepsilon(N) &= 0; \\ \sigma_{\max} > \sigma_{\text{cri}} \text{ 时, } \varepsilon(N) &\rightarrow \infty. \end{aligned}$$



图 3 塑性疲劳元件力学模型

Fig. 3 Plasticity fatigue solid

(3) 黏性疲劳元件

牛顿流体 (Newtonian fluid) 是一种理想黏性体, 即应力与应变速率成正比, 用一个带孔活塞组成的阻尼器来表示黏性疲劳元件, 其简化力学模型如图 4 所示, 用符号 NF 表示。

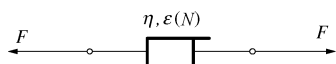


图 4 黏性疲劳元件力学模型

Fig. 4 Newtonian fatigue fluid

黏性疲劳元件本构方程为

$$F = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = \eta f \frac{d\varepsilon}{dN}, \quad (5a)$$

式中, η 为黏性疲劳系数, $d\varepsilon/dN$ 为每个循环周塑性应变增加量。

对式 (5a) 积分可得

$$\varepsilon = \frac{F}{\eta} t + C. \quad (5b)$$

C 为积分常数, 当 $t=0$ 时, $\varepsilon=0$, 则 $C=0$,

$$\varepsilon = \frac{F}{\eta} t. \quad (5c)$$

2.2 组合模型

(1) 元件组合

由变形协调条件可知, 一个或多个元件的组合体应满足如下条件:

a) 串联条件下, 组合体的应力函数处处相等, 而总应变等于各个元件的应变之和。

b) 并联条件下, 组合体的应变处处相等, 而总应力函数等于各个元件的应力函数之和。

(2) 广义开尔文疲劳模型

图 5 中曲线 a 所对应模型为广义开尔文疲劳模型。该力学模型由弹性疲劳元件与黏性疲劳元件并联, 再

与弹性疲劳元件串联而得, 如图 5 所示。

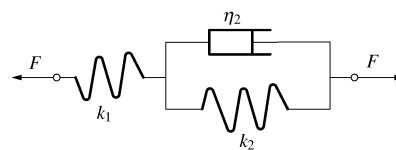


图 5 广义开尔文疲劳模型

Fig. 5 Modified Kelvin model for fatigue

借鉴蠕变理论的相关研究成果, 可得广义开尔文疲劳模型见下式:

$$\varepsilon = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2}{f\eta_2} N} \right). \quad (6)$$

由式 (6) 可知, F/k_1 反映疲劳试验第一阶段变形量; $F/k_1 + F/k_2$ 为组合体最终塑性变形。

广义开尔文疲劳模型与黏性疲劳元件串联, 可得伯格疲劳模型, 本构模型见下式:

$$\varepsilon = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{\eta_1 f} N + \frac{F}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2}{f\eta_2} N} \right). \quad (7)$$

3 非线性黏弹塑性疲劳模型

3.1 模型的建立

基于文献[15~17]的研究成果, 建立了非线性黏塑性疲劳模型, 其力学模型如图 6 所示。该模型由非线性黏塑性疲劳元件与塑性疲劳元件并联而得。

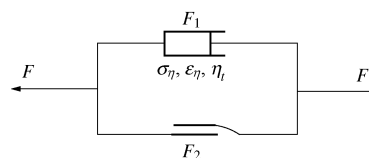


图 6 非线性黏塑性疲劳模型

Fig. 6 Nonlinear viscoplastic model for fatigue

通过非线性处理, 可得非线性黏性疲劳元件的黏性疲劳系数^[15] $\eta = \eta(t, n) = \eta_0(t_0/t)^{n-1}$ 。由模型应变处处相等, 可得非线性黏塑性疲劳模型相应的状态方程:

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = \varepsilon(N) = \varepsilon_{\text{cri}} = \varepsilon_{\eta} \\ F = F_1 + F_2 \end{cases}. \quad (8)$$

式中 t_0 为单位参考时间, 为计算方便设定为 1; t 为疲劳试验的时间; η_0 为非线性黏性疲劳元件的黏性疲劳系数初始值; n 为加速疲劳参数, 参数 η_0 , n 均可通过数值拟合方法获得。通过非线性处理方法, 可以看出: n 小于 1, 非线性黏性疲劳元件的黏性疲劳系数随时间的增加而逐渐增加, 这将导致随时间的增加疲劳变形速率逐渐减小; n 等于 1, 非线性黏性疲劳元件的黏性疲劳系数将保持不变, 即非线性黏性疲劳元件蜕化为线性黏性疲劳元件; n 大于 1, 非线性黏性疲劳元件的黏性疲劳系数随时间的增加而逐渐减小, 这将

导致随时间的增加疲劳变形速率呈现逐渐增加的趋势, 对此, 也将所建立的疲劳模型中予以讨论。

$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{cri}}$ 时, 非线性黏塑性疲劳模型蜕化为塑性疲劳元件, 变形等于零; $\sigma_{\max} > \sigma_{\text{cri}}$ 时, 两个疲劳元件应变相等且不为零。结合状态方程 (8), 可得非线性黏塑性疲劳模型本构方程

$$\varepsilon(N) = \frac{F_1}{\eta_1 f} t = \frac{F_1}{\eta_0 f^n} N^n \quad (9)$$

伯格疲劳模型与非线性黏塑性疲劳模型串联, 可得一个能反映不稳定疲劳的非线性黏弹塑性疲劳模型, 如图 7 所示。

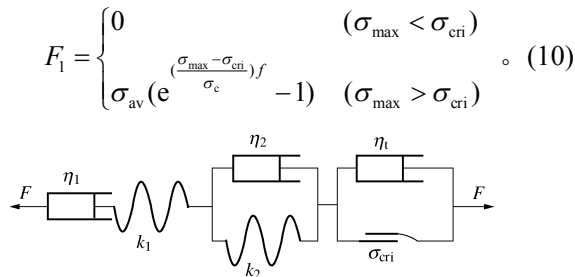


图 7 非线性黏弹塑性疲劳模型

Fig. 7 Nonlinear viscoelastoplastic model for fatigue

$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{cri}}$ 时, 非线性黏塑性疲劳模型不起作用, 蜕化为伯格疲劳模型, 其本构方程如式 (7) 所示。

$\sigma_{\max} > \sigma_{\text{cri}}$ 时, 相应的状态方程, 如下所示:

$$\begin{cases} F = F_{\text{bur}} = F_{\text{noI}} \\ \varepsilon = \varepsilon_{\text{bur}} + \varepsilon_{\text{noI}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, F_{bur} , F_{noI} , ε_{bur} , ε_{noI} 分别为图 7 中伯格疲劳模型和非线性黏塑性疲劳模型相应的应力函数与应变。联立式 (7)、(9)、(10)、(11), 可得非线性黏弹塑性疲劳模型:

$$\varepsilon(N) = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{\eta_1 f} N + \frac{F}{k_2} (1 - e^{-\frac{k_2}{f \eta_2} N}) + \frac{F_1}{\eta_0 f^n} N^n \quad (12)$$

3.2 模型讨论

通过对式 (12) 的讨论, 可得

(1) $N=0$, 可得 $\varepsilon(0) = F/k_1$, 此阶段应力应变关系可利用静态条件下本构理论解决。

(2) $f \rightarrow 0$, 则 $\sigma \rightarrow \sigma_{\min} + A = \sigma_{\text{av}}$, 即岩石受力状态是蠕变。因此, 蠕变可看作是频率趋近于零的疲劳试验。

(3) 当 $\sigma_{\max} < \sigma_{\text{cri}}$, 循环次数 N 足够大的情况下, 可得 $\varepsilon \rightarrow F/k_1 + F/\eta_1 f$ 。因此, 当循环次数 N 达到一定值后, 应变速率趋近于常量 $F/\eta_1 f$, 说明岩石没有进入加速疲劳阶段。因此, 式 (12) 从理论上解释了上限应力小于临界应力情况下, 岩石不会发生疲劳破坏。

(4) 当 $\sigma_{\max} > \sigma_{\text{cri}}$:

$$\Delta \varepsilon_N = \frac{F}{\eta_1 f} + \frac{F_1}{\eta_0 f^n} ((N+1)^n - N^n) + \frac{F}{k_2} e^{-\frac{k_2}{f \eta_2} N} (1 - e^{-\frac{k_2}{f \eta_2}}) = \frac{F}{\eta_1 f} + P + Q \quad (13)$$

由式 (13) 可看出, 参数 n 对疲劳模型 (12) 具有决定性影响。 $n < 1$ 时, P , Q 均为减函数且逐渐趋于零, 因此, 应变速率是逐渐减小并最终趋于 $F/\eta_1 f$, 即式 (12) 只能表征减速和等速疲劳阶段。因而, 岩石不会发生疲劳破坏, 这与上限应力大于临界应力会致岩石破坏相矛盾; $n=1$ 时, Q 为趋于零的减函数, 因此, 应变速率先减小, 后基本保持不变, 即式 (12) 表征只能减速与等速疲劳两个阶段。同理, 这与上限应力大于临界应力会致岩石破坏相矛盾; $n > 1$ 时, P 为增函数, Q 为减函数, 由式 (13) 可知, 应变速率经历减小、基本不变及急剧增大 3 个阶段, 即式 (12) 能模拟疲劳的 3 个阶段。

通过以上分析讨论, $\sigma_{\max} > \sigma_{\text{cri}}$ 条件下, 参数 $n \leq 1$ 时, 式 (12) 实质上为伯格疲劳模型; 当且仅当 $n > 1$ 时, 式 (12) 才可模拟岩石减速、等速和加速疲劳 3 个阶段。

4 疲劳模型的验证

曲线拟合法是确定岩石本构模型参数常用的一种方法。因此, 为验证非线性黏弹塑性疲劳模型的合理性与有效性, 采用 1stOpt 软件的差分进化算法 (differential evolution), 对非线性黏弹塑性疲劳模型进行了参数识别。

利用 1stOpt 软件对非线性黏弹塑性疲劳模型进行参数反演的具体步骤为: ①将式 (12) 以自定义函数的形式输入软件; ②将岩石循环的试验数据输入软件; ③选择一种算法 (本文选用差分进化法) 进行计算, 即可获得疲劳模型的参数。其中, 反演的结果见表 1 与图 8~10。

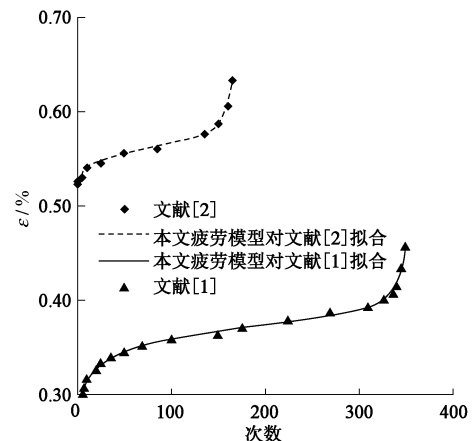


图 8 硬岩疲劳模型拟合结果

Fig. 8 Comparison between fitting results and values in Reference [1] and [2] for hard rock

表 1 非线性黏弹塑性疲劳模型拟合参数
Table 1 Fitting parameters for nonlinear viscoelstoplastic fatigue models

| 参数 | 岩性 | 频率 | $\sigma_{\text{cr}}/\text{MPa}$ | σ_c/MPa | k_1 | k_2 | η_0 | η_1 | η_2 | n | 相关系数 |
|----|-----------|-----|---------------------------------|-----------------------|------------------------|----------|-------------------------|-------------------------|----------|---------|-------|
| F | 文献[1] 大理岩 | 0.2 | 72.99 | 90.11 | 179.348 | 1034.713 | 2.4885×10^{10} | 1551.606 | 90.826 | 39.239 | 0.999 |
| | 文献[2] 花岗岩 | 0.2 | 116.18 | 143.43 | 176.124 | 4892.673 | 0.657 | 1819.408 | 216.673 | 22.743 | 0.998 |
| | 文献[12] 盐岩 | 1.0 | 19.94 | 24.93 | 1.131×10^{17} | 36.651 | 26.802 | 18.024 | 0.364 | 57.851 | 0.996 |
| | 文献[13] 煤岩 | 0.5 | 22.72 | 28.40 | 20.088 | 374.660 | 3.675×10^{-51} | 5.401×10^{120} | 73.772 | 123.829 | 0.993 |

注：杨永杰等通过纵波波速预估了文献[13]的煤岩单轴抗压强度；文献[1]临界强度按应力比 0.81 确定，其余按应力比 0.80 确定。

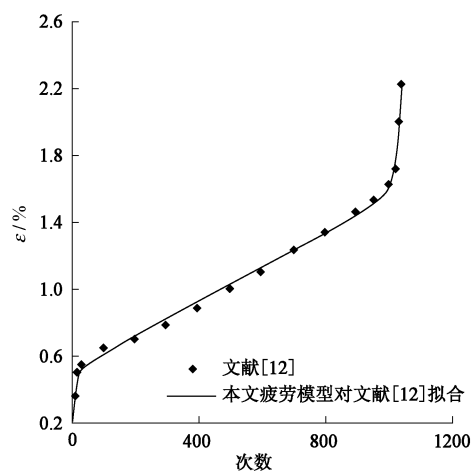


图 9 软岩疲劳模型拟合结果

Fig. 9 Comparison between fitting results and values in Reference [12] for soft rock

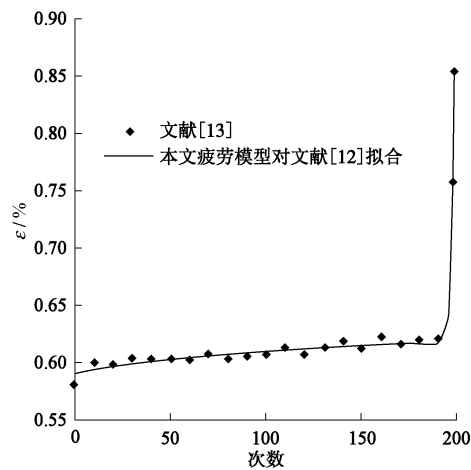


图 10 软岩疲劳模型拟合结果

Fig. 10 Comparison between fitting results and values in Reference [13] for soft rock

由表 1 及图 8~10 可以看出：①图 8, 9 的岩石变形规律较为符合图 1 中的“b 类”曲线；而图 10 的岩石变形规律较为接近图 1 中的“c 类”曲线，这可能是文献[13]进行疲劳试验时上限应力较高所致。②无

论对硬岩还是软岩，非线性黏弹塑性疲劳模型的拟合效果较好，对大理岩、花岗岩、盐岩及煤岩的相关系数均在 0.993 以上，最高达 0.999。因此，非线性黏弹塑性疲劳模型可较好的模拟岩石的疲劳。

从表 1 硬岩与软岩拟合参数的对比可以看出：①相对于其他参数，黏性疲劳系数 η_2 、弹性疲劳系数 k_2 与加速疲劳参数 n 都比较稳定，变化不大。②加速疲劳参数 n 表现为随岩石单轴抗压强度增大而逐步减小的趋势。这说明，在循环荷载作用下软岩比硬岩的破坏可能更突然，这一点也可从图 8~10 疲劳试验条件下岩石的变形规律得到验证，其机制为何及此规律是否是一般性规律有待于更进一步研究。

需要说明：煤岩单轴抗压强度大于盐岩的单轴抗压强度，但煤岩加速疲劳参数 n 大于盐岩加速疲劳参数主要原因：①煤岩单轴抗压强度通过纵波波速换算而得，而非通过岩石压缩试验确定。②煤岩疲劳试验的应力比可能较高。比如，若煤岩实际的单轴抗压强度为 24 MPa，则其疲劳试验的上限应力比将高达 0.959，而非试验设计的上限应力比 0.81。因此，当岩石的疲劳变形规律符合图 1 中的“b 类”曲线时，加速疲劳参数 n 将随岩石单轴抗压强度增大而减小。

由于岩石的离散性，疲劳试验过程中，很可能会出现诸如文献[12]所描述的情况：即上限应力大于临界应力，但经过很多次循环后试样仍未破坏，或试样还未达到设计的上限应力就已经破坏。为了避免这种情况的出现，根据本文的研究成果，并结合文献[13]在岩石循环试验过程中的处理方法，提出如下两点建议：

(1) 利用纵波波速遴选试样和推求其静态抗压强度。

(2) 利用临界应力比而非临界应力设计试验参数，可能更为合理。比如，从已知静态抗压强度标准值为 150 MPa、临界应力为 112.5 MPa 的花岗岩石块上，制备了规格为直径 50 mm、高度 100 mm 的 3 块试样。通过纵波波速换算而得的静态抗压强度分别为

140, 150, 160 MPa。若按临界应力比 0.75 来设计试验参数, 则可得 3 块试样试验的临界应力分别为 105, 112.5, 120 MPa。可见, 用临界应力比来设计疲劳试验的参数, 即考虑了岩石的离散性, 又考虑了临界应力的一般性。

5 结 论

(1) 借鉴蠕变理论得相关研究成果, 定义了 3 个疲劳基本元件: 弹性疲劳元件 (HF)、黏性疲劳元件 (NF) 和塑性疲劳元件 (YF)。

(2) 利用疲劳元件组合, 建立了稳定疲劳模型 (广义开尔文与伯格斯疲劳模型) 与不稳定疲劳模型 (非线性黏弹塑性疲劳模型)。

(3) 非线性黏弹塑性疲劳模型从理论角度解释了上限应力小于临界应力情况下, 岩石不会发生疲劳破坏; 而上限应力大于临界应力情况下, 岩石会发生疲劳破坏的问题。

(4) 加速疲劳参数 n 对非线性黏弹塑性疲劳模型具有决定性影响: 参数 $n \leq 1$ 时, 模型实质为广义开尔文或伯格斯疲劳模型; 当且仅当 $n > 1$ 时, 才能模拟岩石的减速疲劳、等速疲劳与加速疲劳 3 个阶段。

(5) 当岩石疲劳变形规律具有明显的减速疲劳、等速疲劳及加速疲劳 3 个阶段时, 则加速疲劳参数 n 表现为随岩石单轴抗压强度增大而减小趋势。

(6) 试验数据的拟合结果表明, 非线性黏弹塑性疲劳模型可较好的模拟岩石的疲劳; 针对疲劳试验过程中可能遇到问题, 提出用临界应力比而非临界应力设计疲劳试验的参数。

参考文献:

- [1] 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): 1581 - 1585. (GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(10): 1581 - 1585. (in Chinese))
- [2] 肖建清, 丁德馨, 徐 根, 等. 常幅循环荷载下岩石的变形特性[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, **41**(2): 685 - 691. (XIAO Jian-qing, DING De-xin, XU Gen, et al. Deformation characteristics of rock under constant amplitude cycling loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, **41**(2): 685 - 691. (in Chinese))
- [3] 刘 杰, 李建林, 张玉灯, 等. 循环荷载下岩体能量特征及变形参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 3505 - 3513. (LIU Jie, LI Jian-lin, ZHANG Yu-deng, et al. Analysis of energy characteristics and deformation parameters of rock mass under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3505 - 3513. (in Chinese))
- [4] 刘 杰, 李建林, 邓华锋. 宜昌砂岩三角波加载段变形速率预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 633 - 639. (LIU Jie, LI Jian-lin, DENG Hua-feng, et al. Study of prediction model for triangular wave loading section deformation rate of yichang sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 633 - 639. (in Chinese))
- [5] 左宇军, 李夕兵, 唐春安, 等. 受静载荷的岩石在周期荷载作用下破坏的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(5): 927 - 932. (ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, TANG Chun-an, et al. Experimental investigation on failure of statically loaded rock subjected to periodic load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(5): 927 - 932. (in Chinese))
- [6] 倪晓慧, 李晓娟, 朱珍德. 不同频率循环荷载作用下花岗岩细观疲劳损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(1): 164 - 169. (NI Xiao-hui, LI Xiao-juan, ZHU Zhen-de. Characteristics of meso-damage of granite samples subjected to dynamic uniaxial cyclic loading with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(1): 164 - 169. (in Chinese))
- [7] 席道瑛, 杜 赟, 席 军, 等. 饱和砂岩在疲劳荷载作用下的黏弹性性质[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(5): 865 - 870. (XI Dao-ying, DU Yun, XI Jun, et al. Viscoelastic properties of saturated sandstones under fatigue loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(5): 865 - 870. (in Chinese))
- [8] 蒋 宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(11): 1810 - 1814. (JIANG Yu, GE Xiu-run, REN Jian-xi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(11): 1810 - 1814. (in Chinese))
- [9] 樊秀峰, 简文彬. 砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 557 - 563. (FAN Xiu-feng, JIAN Wen-bin. Experimental research on fatigue characteristics of sandstone using ultrasonic wave velocity method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 557 - 563. (in Chinese))

- [10] 任建喜, 蒋 宇, 葛修润. 单轴压缩岩石疲劳寿命影响因素试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **27**(11): 1282 - 1285. (REN Jian-xi, JIANG Yu, GE Xiu-run. Test and analysis on rock fatigue life due to affecting factors under uniaxial compression[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **27**(11): 1282 - 1285. (in Chinese))
- [11] 冯春林, 吴献强, 丁德馨, 等. 周期荷载作用下白砂岩的疲劳特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2749 - 2754. (FENG Chun-lin, WU Xian-qiang, DING De-xin, et al. Investigation on fatigue characteristics of white sandstone under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2749 - 2754. (in Chinese))
- [12] 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 Yin-tong, ZHAO Ke-lie, SUN Guan-hua, 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))
- [13] 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 Yong-jie, SONG Yang, CHU Jun. Experimental study on 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))
- [14] 王者超, 赵建刚, 李术才, 等. 循环荷载作用下花岗岩疲劳力学性质及其本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(9): 1888 - 1900. (WANG Zhe-chao, ZHAO Jian-gang, LI Shu-cai, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subjected to cyclic load and its constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(9): 1888 - 1900. (in Chinese))
- [15] 赵宝云. 岩石拉、压蠕变特性研究及其在地下大空间洞室施工控制中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. (ZHAO Bao-yun. Study on the rock creep behaviors and its applications in construction of large-span multi-arch underground hydraulic cavities[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese))
- [16] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 531 - 537. (XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, YANG Song-lin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (I): experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 531 - 537. (in Chinese))
- [17] 杨圣奇. 岩石流变力学特性的研究及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 2011. (YANG Sheng-qi. Study on rheological mechanical properties of rock and its engineering applications[D]. Nanjing: Hohai University, 2011. (in Chinese))