

# 高压物理学报

高围压下砂岩循环加-卸载损伤本构及损伤阈值  
刘之喜

**Damage Constitutive of Cyclic Loading and Damage Threshold of Rock under High Confining Pressure**  
LIU Zhixi

引用本文:

刘之喜. 高围压下砂岩循环加-卸载损伤本构及损伤阈值[J]. 高压物理学报, 2020, 34(4):044203. DOI: 10.11858/gywlxb.20190809

LIU Zhixi. Damage Constitutive of Cyclic Loading and Damage Threshold of Rock under High Confining Pressure[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2020, 34(4):044203. DOI: 10.11858/gywlxb.20190809

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190809>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于八面体理论的岩石循环加-卸载本构模型及修正](#)

Study and Correction of Cyclic Loading–Unloading Constitutive Model of Rock Based on Octahedral Theory  
高压物理学报. 2020, 34(2): 024202 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190797>

[5083铝合金宽应变率实验与基于损伤的本构模型研究](#)

Experimental Study of Wide Strain Rates and Constitutive Model Based on Damage of 5083 Aluminum Alloy  
高压物理学报. 2017, 31(1): 51 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.01.008>

[不同硬度30CrMnSiNi2A钢的动力学本构与损伤参数](#)

Dynamic Constitutive and Damage Parameters of 30CrMnSiNi2A Steel with Different Hardnesses  
高压物理学报. 2017, 31(3): 239 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.03.005>

[三向围压下碳酸盐岩的动力学试验](#)

Experimental Study on Dynamic Mechanics of Carbonate Rock under Triaxial Confining Pressure  
高压物理学报. 2019, 33(2): 024201 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180667>

[陶瓷材料宏观动态新本构模型](#)

A Macroscopic Dynamic Constitutive Model for Ceramic Materials  
高压物理学报. 2020, 34(4): 044201 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190863>

[榍石的冲击高压行为与辐照损伤效应对比研究](#)

A Comparative Study on Influence of High-Pressure Shocking and Radiation Damage on Titanite  
高压物理学报. 2019, 33(1): 011101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180546>

# 高围压下砂岩循环加-卸载损伤本构及损伤阈值

刘之喜

(安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**在深部巷道掘进过程中, 岩体受周期荷载和高地应力共同作用, 一般的强度准则无法对岩石的应力-应变曲线进行描述和表征, 而高地应力下岩石的循环加-卸载本构是预测深部巷道在周期荷载作用下长期稳定性关键, 因此关于高围压下岩石的本构研究具有一定的工程意义。岩石受外部荷载直至破坏的过程是旧裂纹扩展和新裂纹增长、扩展的过程, 已有的研究表明, 单位体积岩石裂纹数服从 Weibull 分布, Griffith 准则认为岩石的破坏是由岩石的裂纹扩展所导致的, 为此通过对 Weibull 建立的统计损伤本构扩展, 基于裂纹数服从 Weibull 分布以及裂纹扩展服从 Griffith 准则, 建立了高围压下岩石循环加-卸载统计损伤本构。通过本构的等式变换, 对本构损伤阈值进行了研究, 并进一步以砂岩的偶数次循环加-卸载试验数据对本构参数进行拟合, 得到参数的演化规律, 将本构理论值与砂岩奇数次循环加-卸载试验数据对比, 验证了本构模型的正确性, 为高围压下岩石的循环加-卸载本构研究提供了新的思路。

**关键词:**高围压; 循环加-卸载; 本构模型; 损伤阈值

**中图分类号:** TU457; O347.3

**文献标识码:**A

地下岩石工程经常受到加-卸载作用, 如交通、地震、巷道掘进等, 为此诸多学者对岩石的加-卸载性质展开研究, 然而这些研究极少涉及深部高地应力下岩石的加-卸载本构。深部岩体开挖作为高围压下岩石加-卸载作用的经典例子, 在其掘进期间, 围岩受到高围压及加-卸载的反复作用, 其动力响应随之改变, 对围岩长期稳定性的影响颇大, 目前关于高围压下岩石循环加-卸载本构模型的研究较少。许多专家主要针对深部开采的定量界定与分析、低围压岩石本构模型建立、循环加-卸载试验方法、疲劳变形特性、能量耗散等方面进行研究, 取得了丰硕的成果<sup>[1-6]</sup>。

目前岩石循环加载损伤本构模型的建立主要有两种方法: 一是通过加-卸载试验, 假设岩石服从某些数学模型, 从而建立岩石的数学本构模型; 二是在岩石中引入损伤变量, 为可靠地利用统计物理的概念奠定基础, 这方面的开创性工作为 Weibull 的统计尺寸效应理论, 即假设岩石的微元破坏服从 Weibull 公式, 微元强度服从某一强度准则, 从而建立岩石的统计损伤本构模型<sup>[7-9]</sup>。李西蒙等<sup>[10]</sup>在单轴分级加-载作用的研究中建立了循环加-卸载条件下轴向应变与循环次数之间的理论模型, 并且通过逆函数实现了对岩石疲劳寿命的预测。曹文贵等<sup>[11]</sup>在岩石本构模型研究中基于 Weibull 公式对岩石的损伤模型进行了研究, 将概率分布公式应用到岩石损伤力学中, 通过大量的试验验证了其合理性与正确性, 并且在工程实际中得到了应用。张平阳等<sup>[12]</sup>通过在循环加-卸载岩石本构模型中引入内疲劳的变形模量公式, 提出了一种新的能够描述岩石循环加-卸载的本构模型。邓华锋等<sup>[13]</sup>发现能量耗散率与残余应变的相关性, 为循环加-卸载中岩石能量参数的准确计算提供了较好的思路。刘树新等<sup>[14]</sup>基于岩石裂纹三重分布的特征, 引入不均匀系数, 对 Weibull 分布下的岩石参数确定方法进行了研究, 明确了参数的物理意义和确定方法。以上研究都是关于单轴循环加-卸载或低围压下循环加-卸载研究, 高围压下的研究则主要针对岩石渗水特性、能量演化、破坏机制以及声发射等<sup>[15-18]</sup>, 较少涉及高围压

\* 收稿日期: 2019-07-11; 修回日期: 2019-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(51404013)

作者简介: 刘之喜(1992—), 男, 硕士, 主要从事岩石非线性力学及能量演化研究. E-mail: 17355486579@163.com

下岩石循环加-卸载本构模型。对于高地应力和周期荷载作用下岩石表现的非线性力学特性, 使用传统的强度准则已无法进行描述和表征, 因此高围压下岩石循环加-卸载损伤本构模型研究具有一定的工程意义。

目前关于岩石的 Weibull 分布的本构模型, 都是对单轴压缩下或常规三轴压缩下的本构模型描述, 并且均假设岩石微元破坏服从某一强度准则, 但是以最大正应力理论、最大正应变理论、最大剪应力理论、八面体剪应力理论、D-P 准则以及摩尔库仑准则建立的 Weibull 分布, 均假设岩石为连续的均匀介质, 这些强度准则的建立都与岩石的实际情况不相符。Griffith 认为岩石内部存在着许多细微裂隙, 在外部荷载作用下细微裂隙产生应力集中现象, 致使裂纹扩展引起破坏, 因此 Griffith 准则建立在普遍适用的能量概念和含有裂纹的物体之上, 突破了传统的局部分析方法。本研究通过对 Weibull 建立的统计损伤本构进行扩展, 基于裂纹数服从 Weibull 分布以及裂纹扩展服从 Griffith 强度准则, 建立一种能够表示高围压下岩石循环加-卸载统计损伤本构模型; 对本构的损伤阈值进行研究, 基于砂岩在高围压下偶数次循环加-卸载曲线, 对岩石的参数演化规律进行分析, 进一步利用奇数次循环的应力-应变曲线与本构理论值进行对比, 进而验证本构模型的正确性与精确性。

## 1 岩石本构模型

由曹文贵等<sup>[11]</sup>关于岩石统计损伤理论的研究, 岩石的损伤本构关系为

$$\sigma_i = E\varepsilon_i(1-D) + \mu(\sigma_j + \sigma_k) \quad (1)$$

式中:  $E$  为材料弹性模量;  $\sigma_i$  为名义应力,  $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$  为主应力 ( $i, j, k = 1, 2, 3$ );  $\varepsilon_i$  为应变;  $\mu$  为泊松比;  $D$  为损伤变量, 对于微裂纹各向同性分布的情况, 损伤变量可采用标量形式; 对于微裂纹有规律地平面分布的情况, 可用与裂纹垂直的矢量表示损伤; 对于微裂纹各向异性分布的情况, 损伤变量可采用张量形式。以 Griffith 准则描述岩石裂纹扩展强度, 说明裂纹服从各向异性分布, 因此损伤变量可以是张量。目前在岩石损伤本构模型研究中主要考虑最大主应力方向的应力-应变关系, 并且用张量表示损伤时, 虽然能够更真实地反映微观裂纹的排列状态及其力学特性, 但是其数学表达式比较复杂, 在工程应用方面存在较大难度, 所以本研究中的损伤变量使用标量形式。

研究表明, 单位体积岩石裂纹数服从随机分布<sup>[9]</sup>。根据 Griffith 准则, 当裂纹拉应力超过该点抗拉强度时, 裂纹就会扩展, 导致试件破坏。岩石加载过程往往是新裂纹生成、扩展和旧裂纹扩展的过程。基于上述研究, 令裂纹扩展服从 Griffith 准则, 设加载过程中裂纹扩展数为  $n$ , 破坏时裂纹扩展总数为  $N$ , 则可以把损伤变量  $D$  定义为  $n$  与  $N$  的比值,  $n=0$  时岩石无损伤产生,  $n=N$  时裂纹全部张开, 岩石破坏。因此做出以下假设: (1) 材料内部存在众多互不影响的裂纹, 忽略材料局部特性的变化; (2) 裂纹三维空间形状和裂缝平面内应力的影响忽略不计; (3) 从初始加载到损伤阈值处都是弹性阶段。

根据 Weibull 分布, 损伤变量  $D$  的表达式<sup>[16]</sup>为

$$D = \int_0^F P(x) dx \quad (2)$$

式中:  $P(x)$  表示岩石损伤变量的密度函数,  $P(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m\right]$ , 其中  $F_0, m$  为本构模型参数。

在高围压下岩石的最大主应力与最小主应力均为正值, 所以  $\sigma_1 + 3\sigma_3 > 0$ , 其中:  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小主应力, 与围压  $\sigma_m$  相等, 其中围压是不变的。因此在高围压下 Griffith 破坏准则为

$$\sigma_t = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_t$  为应力集中处裂纹扩展的拉应力。故在 Griffith 准则下岩石的裂纹张开强度为

$$F = \frac{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)^2}{8(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)} \quad (4)$$

式中:  $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_3$  为损伤变量修正后的名义最大主应力和名义最小主应力。其中

$$\bar{\sigma}_i = \frac{\sigma_i}{1-D} \quad (5)$$

将式(4)代入式(2), 可得

$$D = 1 - \exp \left\{ - \left[ \frac{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)^2}{8F_0(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)} \right]^m \right\} \quad (6)$$

将式(6)再代入式(1), 可得其本构模型的表达式为

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp \left\{ - \left[ \frac{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)^2}{8F_0(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)} \right]^m \right\} + 2\mu\sigma_3 \quad (7)$$

Weibull 分布的概率公式的损伤变量表达式中存在损伤变量, 使得本构模型无法使用数据处理软件进行拟合, 本研究将基于 Weibull 分布的本构模型进行简单变换, 消去损伤变量表达式中的损伤变量, 并对本构进行等式变换。

将式(7)变换可得

$$\frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}{E\varepsilon_1} = \exp \left\{ - \left[ \frac{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)^2}{8F_0(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_3)} \right]^m \right\} = 1 - D \quad (8)$$

根据式(5), 将式(6)由含损伤变量的名义主应力表达式转换成由主应力和损伤变量共同描述的岩石裂纹张开强度

$$F = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{8(\sigma_1 + \sigma_3)(1 - D)} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9), 消去损伤变量, 可得

$$F = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 E\varepsilon_1}{8(\sigma_1 + \sigma_3)(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \quad (10)$$

将式(10)代入本构方程式(7), 可得

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp \left\{ - \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 E\varepsilon_1}{8F_0(\sigma_1 + \sigma_3)(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \right]^m \right\} + 2\mu\sigma_3 \quad (11)$$

## 2 循环加-卸载试验

图 1 为张媛等<sup>[15]</sup>获得的高围压下岩石循环加-卸载试验曲线。张媛等<sup>[15]</sup>进行了围压分别为 20、40、60 MPa 时的三轴循环加-卸载试验, 每次加载的围压都相同, 轴向荷载采用应力控制方式, 加载波形为三角波。每次循环的加载上限为岩石强度的 70%, 下限为岩石强度的 25%。砂岩的弹性模量为 45 GPa, 泊松比为 0.142。从其使用数学模型得到的拟合曲线中, 可以获得每个循环中岩石的应力-应变曲线。本研究使用高围压循环加-卸载岩石本构模型, 对张媛等<sup>[15]</sup>获得的试验数据进行拟合。

## 3 损伤阈值确定及本构模型参数拟合

### 3.1 损伤阈值的确定

为了研究本构模型的适用范围, 需要根据高围压下循环加-卸载应力-应变曲线和本构模型, 对岩石的损伤变量进行探讨, 以此确定岩石的损伤阈值, 确定本构模型的使用范围。将式(1)进行等式变换,

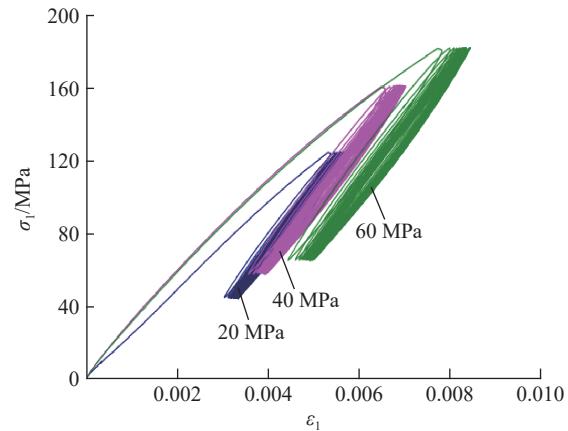


图 1 不同围压下  $\sigma_1-\varepsilon_1$  曲线  
Fig. 1 Axial stress-strain curves under different confining pressures

可得

$$D = \frac{E\varepsilon_i + \mu(\sigma_j + \sigma_k) - \sigma_i}{E\varepsilon_i} \quad (12)$$

在围压相等的高围压下, 式(12)可变为

$$D = \frac{E\varepsilon_1 + 2\mu\sigma_3 - \sigma_1}{E\varepsilon_1} \quad (13)$$

当  $D=0$  时, 岩石不发生损伤; 当  $D>0$  时, 岩石开始发生损伤, 并且损伤是一个连续过程。将岩石参数代入式(13), 可知砂岩在围压为 20、40、60 MPa 时发生损伤, 应变值分别为  $3.1822 \times 10^{-4}$ 、 $6.3644 \times 10^{-4}$ 、 $7.1111 \times 10^{-4}$ 。由图 1 可知: 在应力较小处, 岩石已经产生损伤, 并且不同围压下循环下限的应变值均大于产生初始损伤时的应变阈值; 随着围压增大, 岩石的损伤阈值也随之增加, 呈非线性增长。高围压下岩石本构模型产生损伤时的轴向应变值较小, 即岩石的弹性阶段较短, 从侧面反映了岩石在高围压下的非线性力学特征。

### 3.2 本构模型的参数拟合

通过推导得到了高围压下砂岩的本构模型, 如式(11)所示。式(11)中包含  $\exp[-(F/F_0)^m]$  形式, 其中  $F_0$ 、 $m$  需要通过拟合得到, 且两个参数并不是相互独立的。一般采用 Levenberg Marquardt 算法对式(11)进行迭代。在使用 Levenberg Marquardt 算法进行迭代的过程中, 如果对参数的拟合初值选取不当, 容易造成本构无法拟合, 为此对式(11)进行等式变换, 变换后的形式为

$$y = F_0 x^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

式中:  $y = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 E\varepsilon_1}{8(\sigma_1 + \sigma_3)(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)}$ ,  $x = \ln \frac{E\varepsilon_1}{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}$ ,  $F_0$ 、 $m$  均为本构模型参数。与式(11)相比, 式(14)在使用 Levenberg Marquardt 算法拟合的过程中, 可以直接将两个拟合参数初值赋 1 进行迭代拟合, 解决了拟合参数初值不易选取的问题。以下将以第 1 次加载阶段的参数拟合为例说明具体拟合过程。

图 2 为岩石在 60 MPa 围压下第 1 次加载时的应力-应变拟合曲线。从图 2 可以看出, 第 1 次加载的拟合效果相对良好, 并且将拟合得到的参数代入本构模型中时, 能够较好地描述岩石的应力-应变曲线。

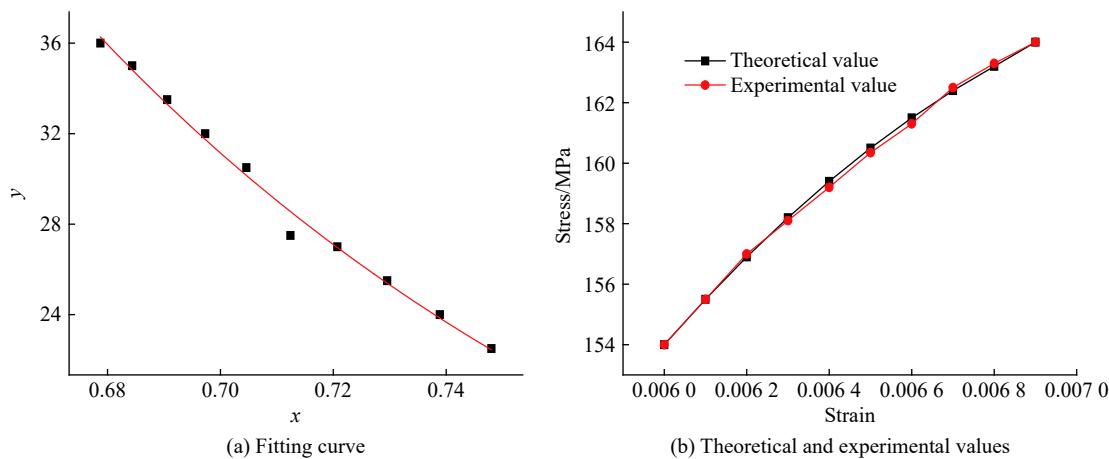


图 2 第 1 次循环加载曲线拟合及验证

Fig. 2 Curve fitting and verification of the first cyclic loading

本研究以围压为 60 MPa 时砂岩第 2、4、6、8、10 次循环加-卸载原始数据为例进行拟合, 具体参数如表 1 所示, 其中  $M$  为循环次数。拟合的校正系数均在 0.99 以上, 说明拟合效果良好。

表1 围压为60 MPa时本构模型参数

Table 1 Parameters of constitutive model with confining pressure of 60 MPa

M	Load parameters		Unload parameters	
	$F_0$	$m$	$F_0$	$m$
2	5.870 04	-0.202 98	21.330 95	-0.141 14
4	6.648 45	-0.216 03	23.502 82	-0.137 86
6	7.103 79	-0.222 77	24.513 79	-0.136 14
8	7.426 85	-0.229 51	25.231 08	-0.134 94
10	7.677 44	-0.231 40	26.171 96	-0.133 82

## 4 参数的演化规律及本构模型的验证

### 4.1 参数的演化规律及其物理意义

通过表1可以看出:无论是加载阶段还是卸载阶段,参数 $F_0$ 均随着循环次数的提高呈非线性增长;但是加载参数 $m$ 在加载阶段随着循环次数的增加而逐渐减小,在卸载阶段随着循环次数的增加而增大。图3显示了循环加-卸载本构参数的演化规律。

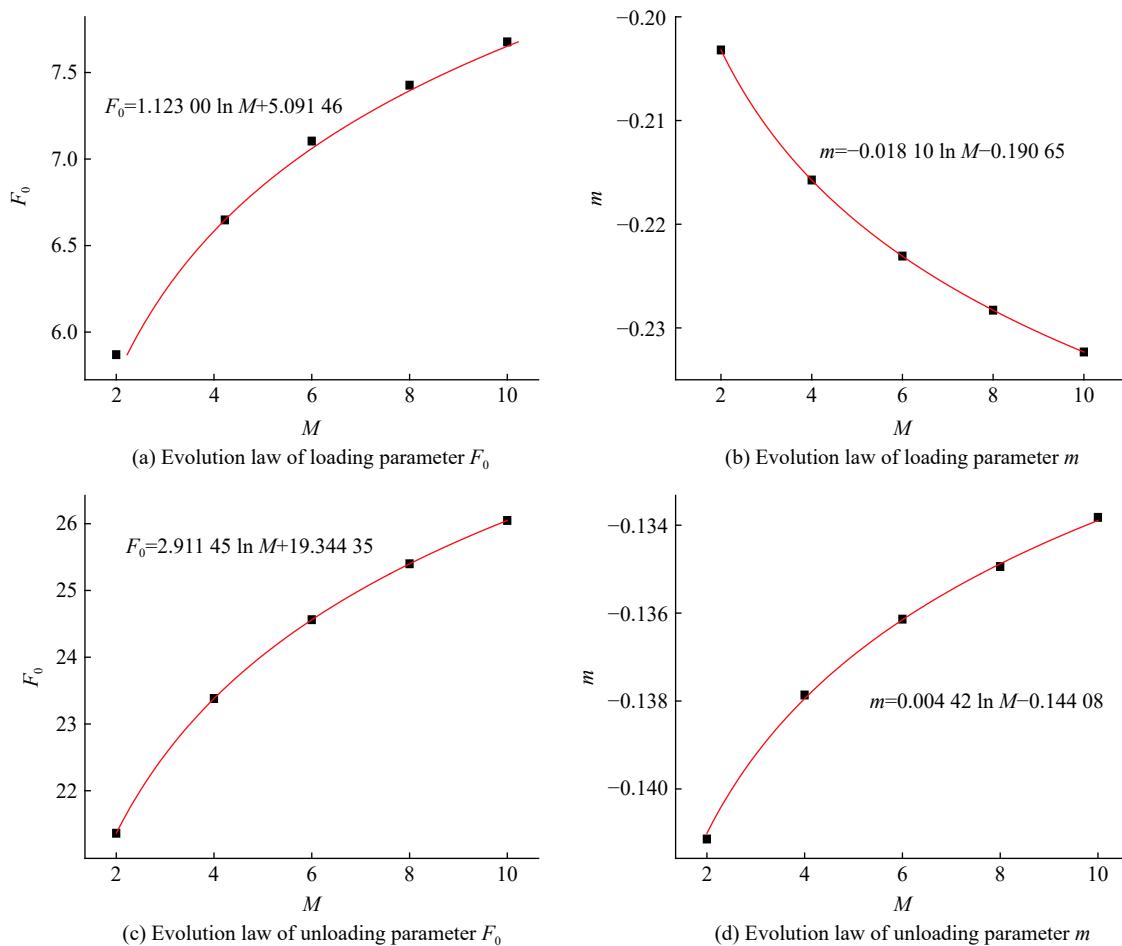


图3 循环加-卸载本构参数演化规律

Fig. 3 Evolution of cyclic loading and unloading constitutive parameters

在同一组数据中,只有循环次数是不断变化的,使用数据处理软件进行拟合后发现,参数的演化趋势服从

$$y = a \ln M + b \quad (15)$$

式中:  $a$ 、 $b$  表示拟合参数,  $M$  表示循环次数。

从图3(a)、图3(c)拟合得到的参数演化规律可以看出, 随着循环次数的增多, 无论是加载还是卸载, 参数  $F_0$  都随着加载次数的增多呈逐渐上升趋势。根据第1节推导过程中的假设, 参数  $F_0$  与裂纹扩展的强度有关, 参数  $m$  与岩石裂纹分布有关。随着加载次数增多, 岩石逐渐硬化, 岩石裂纹扩展时所需强度逐渐增高, 说明参数  $F_0$  越大, 岩石裂纹扩展需要的强度越大, 岩石的硬化度越高。岩石并非通常假设的各向同性均质体, 其内部存在许多细微裂纹, 因此施加外部荷载时, 岩石中的部分微裂纹会闭合, 当荷载增加到一定程度时, 部分闭合的裂纹开始扩展, 新裂纹生成、扩展。由于裂纹间并非光滑, 存在界面摩擦, 随着循环次数增多, 部分可张开的裂纹在荷载作用下闭合所需克服的摩擦力减小, 所以随着循环次数增多, 在荷载作用下旧裂纹扩展、新裂纹生成及扩展越多, 并且部分原始裂纹闭合也越多。新裂纹生成及扩展需要的力远远大于原始裂纹闭合需要克服的摩擦力, 所以在加载阶段新裂纹生成及扩展数相比原始裂纹闭合的裂纹数要少。在卸载阶段, 由于荷载减小, 部分闭合的裂纹逐渐张开, 而扩展的裂纹和新增裂纹扩展部分并不会因为外部荷载的减小而闭合, 所以参数  $m$  呈上升趋势; 而在加载阶段, 由于在荷载作用下闭合的原始裂纹较多, 所以整体呈下降趋势。基于上述分析, 可以认为, 本构参数  $m$  与裂纹扩展数量呈正相关, 裂纹张开数越多, 参数  $m$  越大。

## 4.2 参数与围压的关系

为了便于应用岩石循环加-卸载本构模型, 对围压与岩石参数之间的关系进行了研究, 见图4。

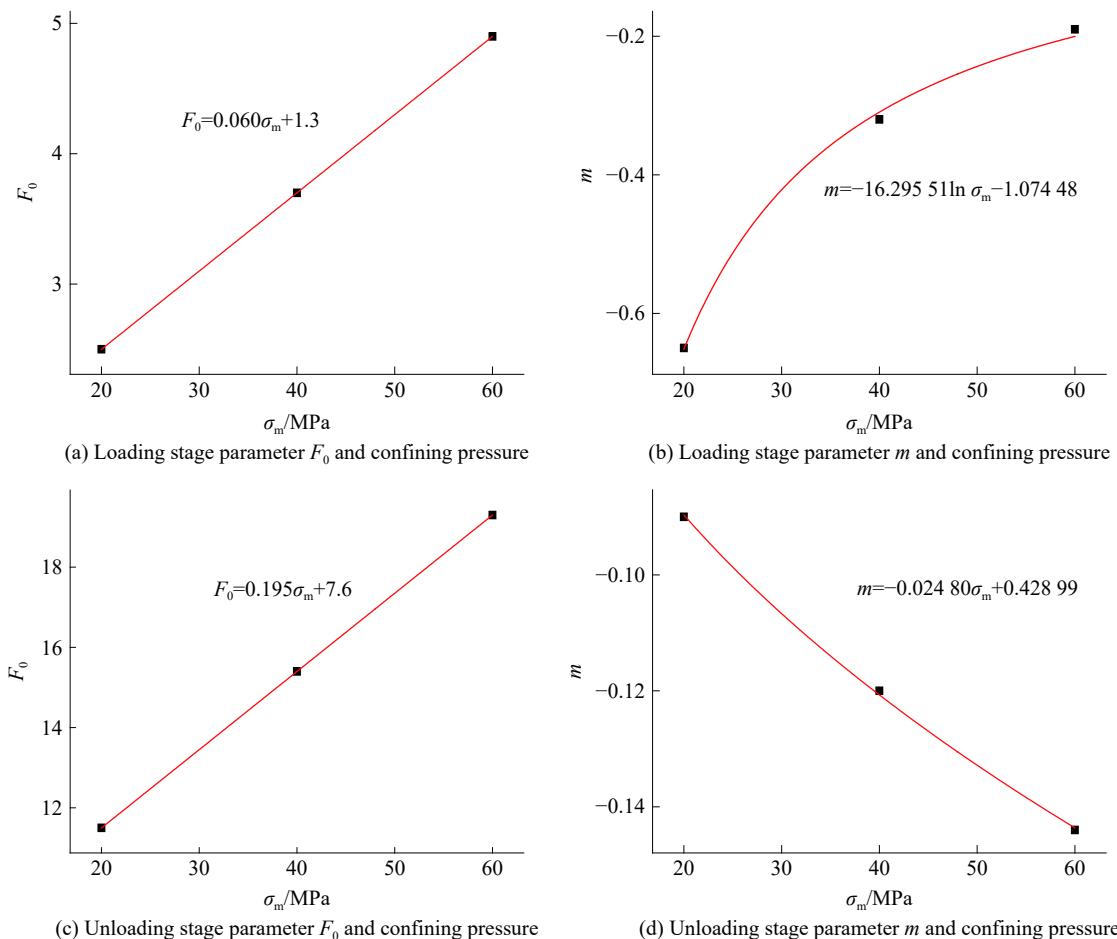


图4 围压与本构模型参数的关系

Fig. 4 Relationship between confining pressure and constitutive model parameters

图4中参数 $\sigma_m$ 表示围压大小。通过对不同围压下本构模型参数的演化规律进行分析可以发现,参数 $F_0$ 与围压的大小呈线性关系,参数 $m$ 与围压的大小呈非线性关系。利用围压与参数的关系可以得出第1次加-卸载参数,进而得到对应围压下岩石参数的演化规律,对于深部岩石在长期周期荷载作用下的变形预测具有一定的借鉴意义。

### 4.3 本构模型的验证

基于参数的演化规律,将式(15)代入式(11),可以得到高围压下岩石的统计损伤本构模型

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \exp \left\{ - \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 E\varepsilon_1}{8(C \ln M + D)(\sigma_1 + \sigma_3)(\sigma_1 - 2\mu\sigma_3)} \right]^{A \ln M + B} \right\} + 2\mu\sigma_3 \quad (16)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 均为本构模型参数,加载阶段的参数与卸载阶段的参数不相同,加载阶段 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 的具体数值如图3(a)、图3(b)所示,卸载阶段的参数数值如图3(c)、图3(d)所示。如果将拟合得到的参数代入本构模型中对比理论值与原始数据只能说明拟合的效果,而不能表明本构模型的正确性。为此基于上述偶数次加载参数的拟合公式,求出奇数次循环的参数值,将奇数次循环的参数代入本构模型中得出本构的理论值。通过对比加-卸载曲线的原始数据与本构对应的理论值来验证本构模型的正确性,如图5所示。

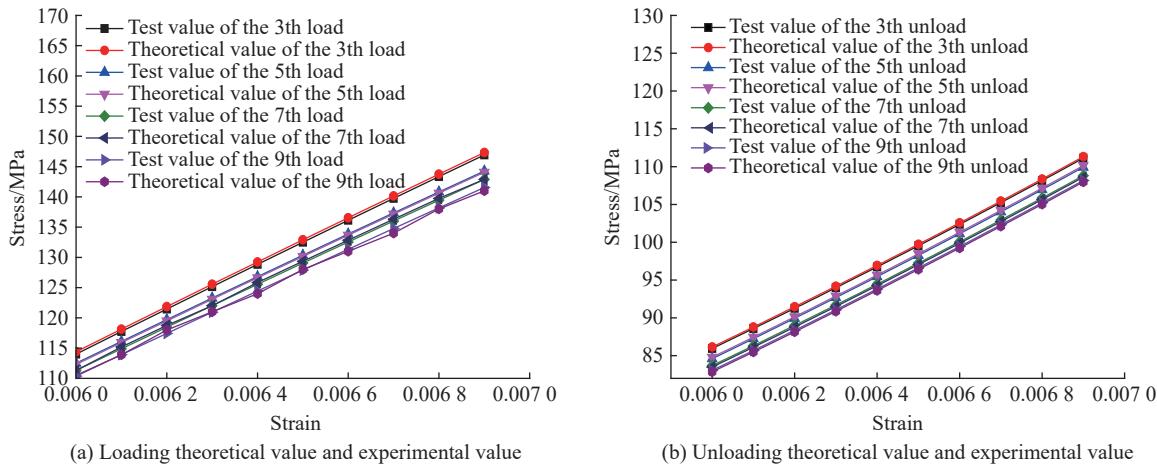


图5 奇数次循环的加-卸载曲线理论值与原始数据对比

Fig. 5 Comparison of theoretical values of loading and unloading curves with original data for odd cycles

对比理论值与原始数据发现,基于Griffith准则的统计损伤本构模型能够较好地描述和表征高围压下岩石循环加-卸载应力-应变曲线,说明了本构模型的合理性及正确性。对于围压为20、40 MPa的循环加-卸载,采用同样的方法进行研究,除了 $F_0$ 、 $m$ 的大小不同,不同循环下的参数演化规律也服从式(15),故在此不再一一列举。以Griffith准则建立的本构模型理论值与高围压下岩石变形的试验值较吻合,从而为描述岩石在高围压下的应力-应变曲线提供了新的思路。

## 5 结 论

(1)根据Griffith准则,岩石内部存在许多细微裂纹,岩石破坏是由于裂纹的扩展。已有的研究也表明,岩石内部裂纹服从Weibull分布。因此,基于Griffith准则建立的统计损伤本构模型与岩石的实际情况更相符。该模型参数少,参数演化规律明确,且便于拟合。该研究方法对高围压下受周期荷载作用的岩石变形预测具有一定借鉴意义。

(2)通过本构模型的等式变换,确定了不同围压下岩石的损伤阈值,损伤阈值处的轴向应变值较小,并且不同围压下产生损伤时的应变值随着围压增大呈现非线性增长。

(3)对本构模型参数的演化规律进行分析发现:参数 $F_0$ 与围压呈线性关系,并且 $F_0$ 与裂纹扩展强

度呈正相关性;参数  $m$  与裂纹张开数目相关,裂纹张开数目越多,  $m$  越大;参数  $F_0$  随着围压的增大呈线性增长,参数  $m$  随围压的增加呈非线性增长。

(4)采用偶数次循环的加载和卸载曲线对本构参数进行分析,得到本构参数在不同循环次数和不同围压下的演化规律,由此计算出奇数次循环的加载和卸载曲线本构理论值,并与试验曲线对比,验证了本构模型的合理性和正确性。

## 参考文献:

- [1] 王伟,田振元,朱其志,等.考虑残余应力的砂岩损伤理论模型 [J].岩石力学与工程学报,2015,34(Suppl 2): 3676–3682.  
WANG W, TIAN Z Y, ZHU Q Z, et al. Study of statistical damage constitutive model for rock considering waterpressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Suppl 2): 3676–3682.
- [2] 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,2017,40(9): 2280–2286.  
LIU T, YANG P, LÜ W S, et al. Rock mechanical properties experiments with low-frequency circulation disturbance under different stress amplitudes [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 40(9): 2280–2286.
- [3] 何明明,陈蕴生,李宁,等.单轴循环荷载作用下砂岩变形特性与能量特征 [J].煤炭学报,2015,40(8): 1805–1812.  
HE M M, CHEN Y S, LI N, et al. Deformation and energy characteristics of sandstone subjected to uniaxial cyclic loading [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1805–1812.
- [4] 姚强岭,刘亚鹏,陈田,等.地下水库人工坝体强度损伤演化特征试验研究 [J].煤炭学报,2018,43(4): 1111–1117.  
YAO Q L, LIU Y P, CHEN T, et al. Experimental study of damage evolution of artificial dam strength of underground reservoir [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1111–1117.
- [5] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析 [J].煤炭学报,2015,40(1): 1–10.  
XIE H P, GAO F, JU Y, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1–10.
- [6] DEHLER W, LABUZ J F. Stress path testing of an anisotropic sandstone [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 116–119.
- [7] 王者超,赵建纲,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 Z C, ZHAO J G, LI S C, et al. Fatigue mechanical behavior of granite subject to cyclic load and its constitutive model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(9): 1888–1900.
- [8] 易其康,马林建,刘新宇,等.考虑频率影响的盐岩变参数蠕变损伤模型 [J].煤炭学报,2015,40(Suppl 1): 93–99.  
YI Q K, MA L J, LIU X Y, et al. A variable parameters-based creep damage model considering the effect of frequency for rock salt [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(Suppl 1): 93–99.
- [9] 霍润科,李宁,刘汉东.受酸腐蚀砂岩的统计本构模型 [J].岩石力学与工程学报,2005,24(11): 1852–1856.  
HUO R K, LI N, LIU H D. Statistical constitutive model of sandstone subjected to hydrochloric acid attack [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(11): 1852–1856.
- [10] 李西蒙,刘长友,鲁岩,等.单轴分级循环加载条件下砂岩疲劳变形特性与损伤模型研究 [J].中国矿业大学学报,2017,46(1): 8–16.  
LI X M, LIU C Y, LU Y, et al. Fatigue deformation characteristics and damage model of sandstone subjected to uniaxial step cyclic loading [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(1): 8–16.
- [11] 曹文贵,张升.基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究 [J].湖南大学学报(自然科学版),2005,32(1): 43–47.  
CAO W G, ZHANG S. Study on the statistical analysis of rock damage based on Mohr-Coulomb criterion [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2005, 32(1): 43–47.
- [12] 张平阳,夏才初,周舒威,等.循环加-卸载岩石本构模型研究 [J].岩土力学,2015,36(12): 3354–3359.  
ZHANG P Y, XIA C C, ZHOU S W, et al. Constitutive model for rock under cyclic loading and unloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3354–3359.
- [13] 邓华锋,胡玉,李建林,等.循环加卸载过程中砂岩能量耗散演化规律 [J].岩石力学与工程学报,2016,35(Suppl 1): 2869–2875.

- DENG H F, HU Y, LI J L, et al. The evolution of sandstone energy dissipation under cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl 1): 2869–2875.
- [14] 刘树新, 刘长武, 韩小刚, 等. 基于损伤多重分形特征的岩石强度 Weibull 参数研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1786–1791.
- LIU S X, LIU C W, HAN X G, et al. Weibull distribution parameters of rock strength based on multi-fractal characteristics of rock damage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1786–1791.
- [15] 张媛, 许江, 杨红伟, 等. 循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规律的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 320–326.
- ZHANG Y, XU J, YANG H W, et al. Effect of confining pressure on evolution law of hysteresis loop of sandstone under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 320–326.
- [16] 赵永川, 杨天鸿, 肖福坤, 等. 西部弱胶结砂岩循环载荷作用下塑性应变能变化规律 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1813–1819.
- ZHAO Y C, YANG T H, XIAO F K, et al. The variation law of plastic strain energy of western weak cemented sandstone during cyclic loading experiment [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1813–1819.
- [17] 何俊, 潘结南, 王安虎. 三轴循环加卸载作用下煤样的声发射特征 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 84–90.
- HE J, PAN J N, WANG A H. Acoustic emission characteristics of coal specimen under triaxial cyclic loading and unloading [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 84–90.
- [18] 丁长栋, 张杨, 杨向同, 等. 致密砂岩高围压和高孔隙水压下渗透率演化规律及微观机理研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 15–23.
- DING C D, ZHANG Y, YANG X T, et al. Permeability evolution of tight sandstone under high confining pressure and high pore pressure and its microscopic mechanism [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 15–23.

## Damage Constitutive of Cyclic Loading and Damage Threshold of Rock under High Confining Pressure

LIU Zhixi

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of  
Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

**Abstract:** In the process of deep roadway excavation, the rock mass is subjected to periodic load and high geostress, so the general strength criterion cannot describe the stress-strain curve of rock. However, the cyclic loading and unloading constitutive model of rock under high geostress is the key to predict the long-term stability of deep roadway under periodic load, thus it is urgent to carry out the study of rock constitutive model under high confining pressure. The process of rock subjected to external load to failure presents the propagation of original cracks, growth and propagation of new crack. Previous studies have shown that the number of cracks in rock obeys Weibull distribution and the Griffith criterion assumes that the failure of rock is caused by the crack propagation. Based on these criteria, this paper establishes a statistical damage constitutive theory of cyclic loading and unloading of rock under high confining pressure by extending Weibull statistical damage constitutive. Through the equation transformation of constitutive model, the threshold value of constitutive damage is studied. Furthermore, the constitutive parameters was fitted with the data of even cyclic loading and unloading test, and the evolution rule of the parameters is obtained. By comparing the constitutive theory with the odd cyclic loading and unloading test, the accuracy of the constitutive model is verified, which provides a new insight for the study of the constitutive model of rock under high confining pressure.

**Keywords:** high confining pressure; cyclic loading and unloading; constitutive model; damage threshold