

# Study on the Rock Statistical Damage Constitutive Model

Liansheng Tang<sup>1</sup>, Haitao Sang<sup>2,3\*</sup>, Jing Song<sup>1</sup>, Zhengui Luo<sup>1</sup>, Haokun Chen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Earth Sciences and Geological Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou

<sup>2</sup>School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou

<sup>3</sup>Guangdong Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Guangzhou

Email: [eestls@mail.sysu.edu.cn](mailto:eestls@mail.sysu.edu.cn), \* [772192033@qq.com](mailto:772192033@qq.com)

Received: Jun. 14<sup>th</sup>, 2014; revised: Jul. 15<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jul. 20<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

To establish a rock statistical damage constitutive model taking the defects such as the rock micro-cracks and the characteristics of their random distribution into account, the vital steps are to select a method scientifically to measure the rock micro-strength, which is capable of reflecting its damage conditions; as well as the pattern of randomly distributed damage in rock and the determination of the model parameters. Firstly, a damage constitutive equation for rock under three dimensional stress conditions is established, in terms of the Lemaitre's hypothesis of strain equivalence; then discussions are presented in detail to address the frequently employed rock strength criterions such as *M-C* strength criterion and the rock micro-element strength probability models such as *Weibull* probability distribution. Based on the *H-B* criteria and the power function distribution, a statistical damage constitutive model for rock is proposed, and the method of determination for the relative model parameters is suggested; Furthermore, a case study is introduced to testify the validity of the constitutive model and the method to obtain the parameters which are proposed in this paper; at last, suggestions on the further research and its method are addressed.

## Keywords

Rock, Strength Criterion, Statistic Damage, Constitutive Model

---

## 岩石损伤统计本构模型研究

\*通讯作者。

汤连生<sup>1</sup>, 桑海涛<sup>2,3\*</sup>, 宋晶<sup>1</sup>, 罗珍贵<sup>1</sup>, 陈浩昆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中山大学地球科学与地质工程学院, 广州

<sup>2</sup>中山大学工学院, 广州

<sup>3</sup>广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州

Email: [eestls@mail.sysu.edu.cn](mailto:eestls@mail.sysu.edu.cn), [772192033@qq.com](mailto:772192033@qq.com)

收稿日期: 2014年6月14日; 修回日期: 2014年7月15日; 录用日期: 2014年7月20日

## 摘要

从岩石微裂隙等缺陷及随机分布的特点出发, 建立岩石损伤统计本构模型, 其核心在于科学地选取反映损伤程度的岩石微元强度度量方法、岩石内部损伤随机分布的形式以及模型参数。首先基于 *Lemaitre* 应变等价性假说建立了三维应力作用下岩石损伤本构方程, 讨论了常用的 *M-C* 等3个岩石强度准则和 *Weibull* 分布等5个岩石微元强度概率模型。然后基于 *H-B* 强度准则和幂函数分布建立了岩石的损伤统计本构模型, 并给出了相关参数的确定方法, 借助引用的实例验证了本文所建模型和参数确定方法的有效性, 最后建议了下一步研究的重点方向。

## 关键词

岩石, 强度准则, 统计损伤, 本构模型

## 1. 引言

岩石是一种或多种矿物的集合体, 经历了复杂的结构变动历史, 在宏观裂纹出现之前, 其内部已经产生了微裂纹及微观空洞, 材料中的这些微观缺陷的出现和发展即为损伤。对于岩石来说, 其强度理论的核心问题是本构模型。实际上, 岩石损伤理论就是研究受损材料的损伤演化规律及其破坏的理论, 其核心问题是损伤模型, 即确立损伤变量及其转化的问题。

Krajcinovic D 等[1] [2]假设岩石微元强度服从 *Weibull* 分布, 以轴向应变表示岩石微元强度, 建立了特定围压下岩石破裂全过程的损伤本构关系。蒋薇[3] [4]岩石微元强度服从对数正态分布和二次抛物线型 *Mohr* 强度准则, 建立了三轴压缩条件下岩石的损伤本构模型。岳洋[5]基于应变强度理论和岩石微元强度服从幂函数分布的假定, 建立了岩石破坏过程中的损伤统计本构模型。谢和平院士[6]建议用分形几何的方法, 用分形维数来沟通微观量与宏观量之间的联系, 大大简化分析和计算过程, 为岩石类材料的损伤断裂研究开辟了一条新途径。在岩石强度准则方面, 许江[7]、曹文贵[8]等采用 *Drucker-Prager* 准则来表达岩石微元强度, 但 *Drucker-Prager* 准则是比较保守的, 不如 *Mohr-Coulomb* 准则和 *Hoek-Brown* 准则准确。陈星等[9]通过分别采用 *Mohr-Coulomb* 准则和 *Hoek-Brown* 准则模拟卸荷岩体力学性质的试验, 表明 *Hoek-Brown* 准则描述岩体的破坏模式更准确。总结目前的研究现状, 岩石损伤统计本构模型的建立过程就是选择损伤模型、强度准则、岩石微元强度概率模型的过程, 关键点是选取三者的计算公式。目前不同的学者已经根据不同的强度准则和微元强度概率模型研究了不同的岩石损伤统计本构模型[10]-[19], 但是还没有 *H-B* 准则与幂函数概率模型组合的岩石统计损伤本构模型。

本文对目前公开常用的微元屈服准则和微元概率分布模型进行了总结归纳, 找出了建立岩石统计损伤模型的普遍方法, 并借助该方法建立了 *H-B* 准则与幂函数概率模型组合的岩石统计损伤本构模型, 然后引用实例证明本文所建模型和参数确定方法是合理的。

## 2. 损伤模型的建立

### 2.1. 损伤本构关系

根据 Lemaitre 应变等价性假说[20]，假定岩石微元破坏前服从广义 Hooke 定律，可建立岩石损伤本构的基本关系式：

$$\sigma = \sigma^* (1-D) = E\varepsilon(1-D) \quad (1)$$

式中， $\sigma$  为应力， $\varepsilon$  为应变， $D$  为损伤变量， $E$  为弹性模量。

用有效主应力  $\sigma_1$  代入式(1)，得到三维应力作用下岩石损伤本构方程：

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1(1-D) + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

式中  $\nu$  为泊松比。

显然，确定损伤本构关系的关键是确定损伤变量  $D$ 。

### 2.2. 损伤变量

在连续加载过程中，岩石内部微结构一旦损伤便开始表现出不可逆性。损伤的持续扩展，使得岩体各微结构的微元件有效应力不断集中与增大，而局部损伤的发生与扩展又不断削弱岩石的整体承载能力，这反过来又导致其他岩石微元件有效应力继续升高，从而引发新的损伤效应。据刘立等[21]利用高倍电镜对岩石微结构的观察，岩石内原始微裂隙的分布一般不具有显著的非均匀性。因此，可将岩石内损伤的发生、扩展及力学特征视为一个整体的连续变化过程。

由于岩石是一种非均匀性材料，内含大量随机分布的空隙等缺陷，因此在外荷载作用下，岩石微元件的破坏一般具备随机性，定义损伤变量  $D$  为某一应力水平  $F$  下已经破坏的微元数目  $n$  与初始状态下微元总数目  $N$  的比值，即

$$D = \frac{n}{N} \quad (3)$$

根据岩石的全应力—应变曲线可知，岩石微元在破坏后并非完全失去承载能力，而仍能承受一部分压应力与剪应力，考虑引进修正参数  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 1$ ) [22]，即假定在某一应力水平  $F$  下已经破坏的  $n$  个微元中真正失去承载能力的微元个数为  $\alpha n$  个，则修正后的损伤变量表达式为

$$D' = \frac{\alpha n}{N} \quad (4)$$

在外荷载作用下，岩石微元的破坏是随机的，并注意到 Krajcinovic 模型，损伤变量就是微元破坏概率，因此可假定岩石微元的破坏概率  $P$  的微元强度分布密度函数为  $\phi(x)$ ，则有：

$$D = P = \int_{-\infty}^F \phi(x) dx \quad (5)$$

由此可看出，损伤变量确定的关键在岩石微元强度  $F$  与微元强度分布密度函数为  $\phi(x)$  的确定[6]。

## 3. 强度准则

岩石的强度准则主要是以岩石的应力状态为依据。近 200 年来已经提出上百种准则[23]，但至今普遍适用的强度准则尚未发现。因此，关于它的研究、讨论和应用仍然在不断的发展和创新的。目前常用的岩石强度准则有 Mohr-Coulomb 准则(M-C 准则)、Drucker-Prager 准则(D-P 准则)和 Hoek-Brown 准则(H-B 准则)。

### 3.1. *M-C* 准则

大量的试验和工程实践已证实 *M-C* 强度理论能较好地描述岩土材料的强度特性，因而在岩土工程领域得到了广泛的应用。然而由于 *M-C* 准则在三维空间的屈服面为不规则的六角形截面的角锥体表面，在  $\pi$  平面上的图形为不等角六边形，存在尖顶和棱角，给数值计算带来困难[24]。其表达式为

$$F = f = \frac{1}{3}I_1\sin\varphi + \left( \cos\theta_\sigma - \frac{1}{3}\sin\theta_\sigma\sin\varphi \right) \sqrt{J_2} - c\cos\varphi \quad (6)$$

式中， $I_1$  为第一应力不变量， $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ； $J_2$  为第二应力偏量不变量， $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2]$ ， $\theta_\sigma$  为应力洛德角  $\left(-\frac{\pi}{6} \leq \theta_\sigma \leq \frac{\pi}{6}\right)$ 。

### 3.2. *D-P* 准则

*D-P* 准则是在 *M-C* 准则和塑性力学 *Mises* 准则基础上扩展和推导而来。在主应力空间，*D-P* 准则的屈服面为光滑圆锥，而在  $\pi$  平面上为圆形，这不仅克服了数值计算的困难，且其计算效率相对较高。基于主应力表示的 *Drucker-Prager* 准破坏则[7] [25]为

$$F = f(\sigma) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (7)$$

式中， $\alpha$ 、 $k$  为仅与岩石的内摩擦角  $\varphi$  和粘聚力  $c$  相关的试验常数，计算式如下：

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \quad k = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}$$

### 3.3. *H-B* 准则

*Hoek* 等在参考 *Griffith* 经典强度理论的基础上，通过大量试验提出了岩体非线性破坏经验准则[9] [26] [27]，通常称为 *H-B* 准则。该准则综合考虑了岩体破碎、岩块强度、结构面强度等影响因素。

采用 *H-B* 破坏准则时，岩体微元强度为：

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \left( n \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中， $\sigma_c$  为完整岩体的单轴抗压强度， $\sigma_c = \frac{P}{A}$ ； $n$ 、 $s$  均为与岩体特征有关的常数； $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为最大、最小主应力。

## 4. 岩石微元强度概率模型

根据目前的研究[3] [5] [7] [27]-[29]，岩石损伤本构模型中常用的微元强度概率模型有 *Weibull* 分布、幂函数分布、正态分布、对数正态分布和泊松分布。

### 4.1. *Weibull* 分布模型

若假定岩石微元强度服从 *Weibull* 分布，则其概率密度函数为[7] [28]：

$$\phi(x) = \frac{m}{F_0} \left( \frac{x}{F_0} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{x}{F_0}\right)^m} \quad (9)$$

式中， $x$  为微元强度的随机分布变量， $m$  与  $F_0$  为 *Weibull* 分布参数。

式(9)代入式(5)，得：

$$D = 1 - e^{-\left(\frac{F}{F_0}\right)^m} \quad (10)$$

#### 4.2. 幂函数分布模型

若假定岩石微元强度服从幂函数分布，则其概率密度函数[5] [29]为：

$$\phi(x) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{x}{F_0}\right)^{m-1} \quad (11)$$

式中， $x$  为微元强度的随机分布变量， $m$  与  $F_0$  为幂函数分布参数。

式(11)代入式(5)，得：

$$D = \left(\frac{F}{F_0}\right)^m \quad (12)$$

#### 4.3. 正态分布

若假定岩石微元强度服从正态分布，则其概率密度函数[3]为：

$$\phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (13)$$

式中， $x$  为微元强度的随机分布变量， $\mu$  与  $\sigma$  为正态分布参数。

式(13)代入式(5)，得：

$$D = \phi(F) \quad (14)$$

式中， $\phi(F)$  为标准正态分布函数。

#### 4.4. 对数正态分布

若假定岩石微元强度服从正态分布，则其概率密度函数[3] [9] [27]为：

$$\phi(x) = \frac{1}{xs_0\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{\ln x - F_0}{s_0}\right)^2}{2}} \quad (15)$$

式中， $x$  为微元强度的随机分布变量， $s_0$  与  $F_0$  为对数正态分布参数。

式(15)代入式(5)，得：

$$D = \varphi\left(\frac{\ln F - F_0}{s_0}\right) \quad (16)$$

式中， $\varphi\left(\frac{\ln F - F_0}{s_0}\right)$  为标准正态分布函数。

#### 4.5. 泊松分布模型

唐春安[30]通过在一维情况下推导，并进行推广得到任意维数情况下服从泊松分布模型的损伤变量表达式

$$D = 1 - \left(\left(\frac{x}{a}\right)^m + 1\right) e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^m} \quad (17)$$

式中,  $m$  为维数 ( $m=1\sim 3$ );  $\alpha$  为综合完整度, 表示各种缺陷的平均间距(数学期望)。

## 5. 统计损伤本构模型

通过以上的文献总结和分析, 可以发现目前建立岩石统计损伤模型的普遍方法就是: 基于应变等价假设, 利用微元屈服准则和微元概率分布模型相结合建立岩石的损伤统计本构模型的表达式, 通过实验数据的线性回归确定其中的参数, 从而建立岩石的损伤统计本构模型。这其中, 由于各自采用的岩石微元强度屈服准则与概率分布函数不同, 而出现目前存在的各种不同的岩石损伤统计本构模型。

虽然  $H-B$  准则在描述岩体的破坏模式方面更准确, 但是它并不能很好的反映岩石强度峰后阶段的软化特征。同时, 目前采用微元强度服从  $Weibull$  分布假定的较多, 而采用幂函数概率分布模型的较少。因此本文试着采用  $H-B$  准则与幂函数概率模型组合的模式来建立岩石损伤统计本构模型, 一者以实例来说明目前建立岩石统计损伤模型的普遍方法, 二者来验证此方法是否合理。具体求解过程如下。

将(4)、(12)式代入(2)式, 得:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \left( 1 - \alpha \left( \frac{F}{F_0} \right)^m \right) + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (18)$$

将式(8)代入式(18)得

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \left( 1 - \alpha \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \left( n \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}}}{F_0} \right)^m \right) + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (19)$$

至此得到基于  $H-B$  准则和幂函数概率模型组合的岩石损伤本构模型, 其中含有  $m$ 、 $F_0$ 、 $n$ 、 $s$  共 4 个参数。

对于参数  $n$  和  $s$  [28], 由式(8), 令  $F=0$  可得

$$\left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \right)^2 = n \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \quad (20)$$

令

$$y = \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_c} \right)^2, \quad x = \frac{\sigma_3}{\sigma_c}$$

则式(20)可变为

$$y = nx + s \quad (21)$$

通过三轴试验数据的线性回归方法可以确定参数  $n$  和  $s$ 。

对于参数  $m$  和  $F_0$ , 将式(19)变形移项整理得

$$\ln \left( \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \left( n \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \right) = \frac{1}{m} \ln \left( \frac{1 - \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E\varepsilon_1}}{\alpha} \right) + \ln F_0 \quad (22)$$

令

$$Y = \ln \left( \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \left( n \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \right),$$

$$X = \ln \left( \frac{1 - \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E\varepsilon_1}}{\alpha} \right)$$

则式(22)变为

$$Y = \frac{1}{m} X + \ln F_0 \tag{23}$$

通过三轴试验数据的线性回归法亦可以确定参数  $m$  和  $F_0$ 。

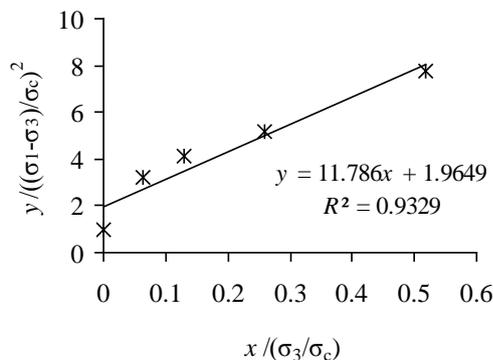
### 6. 算例

引用文献[31]和[32]中对大理岩的三轴试验资料，岩石弹性模量  $E = 93.5 \text{ GPa}$ ，泊松比  $\nu = 0.2$ ，粘聚力  $c = 26.42 \text{ GPa}$ ，内摩擦角  $\varphi = 31.064^\circ$ ，在不同围压下岩石的峰值强度值如表 1 所示。

假定岩体破坏服从  $H-B$  准则，计算可得  $y-x$  关系如图 1，求得  $n = 11.786$ ， $s = 1.96$ 。令参数  $\alpha = 0.5$ ，同时将参数  $n$ 、 $s$  代入式(24)，得到  $Y-X$  的关系曲线，如图 2，则参数  $m = -0.378$ ， $F_0 = 89.747$ 。至此，得到大理岩的损伤统计本构方程

**Table 1.** Peak strength under different confining pressure  
**表 1.** 不同围压下岩石的峰值强度

试验点	$\sigma_3(\text{MPa})$	$\sigma_1(\text{MPa})$	$\varepsilon_1(\times 10^{-3})$
1	0	77.381	1.875
2	5	143.0952	3.438
3	10	167.1429	3.75
4	20	196.1905	6.25
5	40	235.4762	13.125



**Figure 1.** Obtaining parameters  $n$  and  $s$   
**图 1.** 参数  $n$ 、 $s$  分析

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \left( 1 - 0.5 \times \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_c \left( \frac{11.786 \times \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1.96}{89.747} \right)^{\frac{1}{2}}}{89.747} \right)^{-0.378} \right) + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (24)$$

根据文献[3]的数据，在围压为 40 MPa 情况下，从理论与试验两方面比较岩石的应力 - 应变曲线，见图 3。如图 3 所示，采用本文所建立的本构模型所得计算结果与试验结果基本吻合，但理论值整体偏大，这主要是由于  $m$ 、 $F_0$ 、 $n$ 、 $s$  四个参数均采用线性拟合而造成的误差。另外，随着应变的增大，理论计算值逐渐偏离试验值，但应当指出，本文所建立的模型与试验值的最大误差不超过 25%，采用本文所建议的方法获取岩石的应力应变关系基本上是合理可行的。

### 7. 结论

- 1) 岩石损伤统计本构模型的建立过程就是选择损伤模型、强度准则、岩石微单元强度概率模型的过程，关键点是选取三者的计算公式。
- 2) 本文所建立的岩石损伤统计本构模型能够较好地描述岩石弹性变形阶段的力学行为，但不适用于描述岩石塑性变形阶段的本构关系。

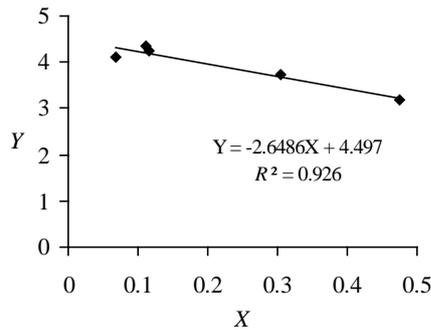


Figure 2. Obtaining parameters  $m$  and  $F_0$   
图 2. 参数  $m$ 、 $F_0$  分析

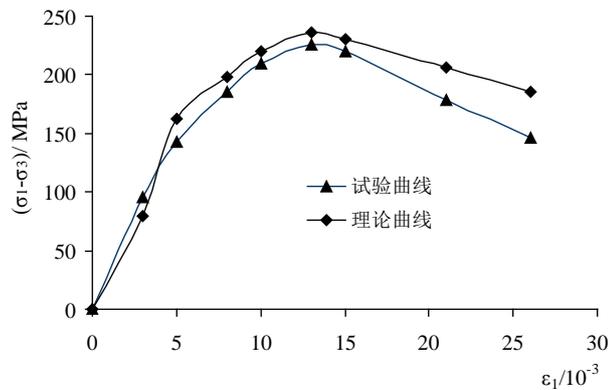


Figure 3. Comparison between analytical results and experimental data  
图 3. 理论和试验比较

3) 采用统计损伤模型, 将连续介质理论和损伤理论有机的结合起来, 为岩石类脆性材料的本构模型研究开辟了新途径, 但是对于岩石微元强度分布的概率函数形式的系统研究与对比分析需要进一步深入研究。

4) 建立能够反映岩石不同变形阶段力学特性的本构模型, 是下一步需要努力的方向, 这种模型尤其是要能较为准确的表达峰值后区的残余强度。

## 致 谢

感谢国家自然科学基金资助项目(40872205)、全国高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20120171110031)、广东省自然科学基金资助项目(07003738)和广东省科技计划资助项目(2008B030303009)对本论文工作的资助。

## 项目基金

国家自然科学基金资助项目(40872205); 全国高等学校博士学科专项科研基金资助项目(20120171110031); 广东省自然科学基金资助项目(07003738); 广东省科技计划资助项目(2008B030303009)。

## 参考文献 (References)

- [1] Krajcinovc, D. and Fonseka, G.U. (1981) The continuous damage theory of brittle materials, part I and part II. *Journal of Applied Mechanics*, **48**, 809-824.
- [2] Krajcinovc, D. (1983) Creep of structures—A continuous damage mechanics approach. *Journal of Structure Mechanics*, **11**, 1-11.
- [3] 蒋薇, 邓建, 司庆超 (2010) 基于 Mohr 准则的岩石损伤本构模型及其修正研究. *河北工程大学学报(自然科学版)*, **2**, 30-37.
- [4] 蒋薇, 邓建, 李隐 (2010) 基于对数正态分布的岩石损伤本构模型研究. *地下空间与工程学报*, **6**, 1190-1194.
- [5] 岳洋 (2010) 岩石损伤本构模型研究. *贵州大学学报(自然科学版)*, **4**, 117-119.
- [6] 谢和平(1990) 岩石、混凝土损伤力学. 中国矿业大学出版社, 徐州.
- [7] 许江, 李树春, 刘延保等 (2007) 基于 Drucker-Prager 准则的岩石损伤本构模型. *西南交通大学学报*, **3**, 278-282.
- [8] 曹文贵, 赵明华, 刘成学 (2004) 基于 Weibull 分布的岩石损伤软化模型及其修正方法研究. *岩石力学与工程学报*, **19**, 3226-3231.
- [9] 陈星, 李建林 (2010) Hoek-Brown 准则在卸荷岩体中的应用探析. *水电能源科学*, **1**, 44-46.
- [10] 杨圣奇, 徐卫亚, 韦立德等 (2004) 单轴压缩下岩石损伤统计本构模型与试验研究. *河海大学学报(自然科学版)*, **2**, 200-203.
- [11] 刘成学, 杨林德, 曹文贵 (2007) 岩石统计损伤软化本构模型及其参数反演. *地下空间与工程学报*, **3**, 453-457.
- [12] 李树春, 许江, 李克钢 (2007) 基于初始损伤系数修正的岩石损伤统计本构模型. *四川大学学报(工程科学版)*, **6**, 41-44.
- [13] 徐卫亚, 韦立德 (2002) 岩石损伤软化统计本构模型的研究. *岩石力学与工程学报*, **6**, 787-791.
- [14] 杨友卿 (1999) 岩石强度的损伤力学分析. *岩石力学与工程学报*, **1**, 23-27.
- [15] 周维垣, 剡公瑞, 杨若琼 (1998) 岩体弹脆性损伤本构模型及工程应用. *岩土工程学报*, **5**, 54-57.
- [16] 李杭州, 廖红建, 盛谦 (2006) 基于统一强度理论的软岩损伤统计本构模型研究. *岩石力学与工程学报*, **7**, 1331-1336.
- [17] 张明, 李仲奎, 苏霞 (2005) 准脆性材料弹性损伤分析中的概率体元建模. *岩石力学与工程学报*, **23**, 4282-4288.
- [18] 韦立德, 徐卫亚, 邵建富 (2003) 饱和和非饱和岩石损伤软化统计本构模型. *水利水运工程学报*, **2**, 12-17.
- [19] 韦立德, 徐卫亚, 杨春和 (2004) 饱和、非饱和岩石损伤统计本构模型探讨. *岩石力学与工程学报*, **z1**, 4285-4291.
- [20] Lemaitre, J. (1984) How to use damage mechanics. *Nuclear Engineering and Design*, **80**, 233-245.

- [21] 刘立, 王泽云, 刘保县 (2003) 层状岩石损伤本构关系的研究. *四川工业学院学报*, **B12**, 90-93.
- [22] 陈爱军 (2005) 岩石统计损伤本构模型及其相关系数确定的研究. *森林工程*, **2**, 49-51.
- [23] 俞茂宏, 刘继明, Yoshiva, O.D.A.等 (2007) 论岩土材料屈服准则的基本特性和创新. *岩石力学与工程学报*, **9**, 1745-1757.
- [24] 陈星, 胡必豪, 袁剑 (2010) 摩尔匹配 D-P 准则在开挖工程中的应用研究. *露天开采技术*, **1**, 11-13, 17.
- [25] 胡盛明, 胡修文 (2011) 基于量化的 GSI 系统和 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数的估计. *岩土力学*, **3**, 861-866.
- [26] 石崇, 蒋新兴, 朱珍德等 (2011) 基于 Hoek-Brown 准则的岩石损伤本构模型研究及其参数探讨. *岩石力学与工程学报*, **1**, 2647-2652.
- [27] 林杭, 曹平, 李江腾, 江学良, 何忠明 (2010) 基于 Hoek-Brown 准则的三维边坡变形稳定性分析. *岩土力学*, **11**, 3656-3660.
- [28] 岳洋 (2010) 基于不同分布的岩石损伤本构模型比较. *山西建筑*, **24**, 137-138.
- [29] 游强, 游猛 (2011) 岩石统计损伤本构模型及对比分析. *兰州理工大学学报*, **3**, 119-123.
- [30] 唐春安 (1993) 岩石破裂过程中的灾变. 煤炭工业出版社, 北京.
- [31] 曾亚武, 赵震英, 朱以文 (2002) 岩石材料破坏形式的分叉分析. *岩石力学与工程学报*, **7**, 948-952.
- [32] 蒋维 (2011) 岩石统计损伤本构模型与圆形硐室岩爆研究. 硕士学位论文, 中南大学, 长沙.