

纳米混凝土声发射特性分析及其力学参数与声发射参数关系的研究*

谢志龙¹ 闫小青¹ 扶名福^{2†} 樊保圣¹

(1 南昌大学建筑工程学院 南昌 330031)

(2 南昌工程学院 南昌 330099)

摘要 本文对不同二氧化硅掺量的纳米混凝土进行单轴压缩声发射试验。试验结果表明：当二氧化硅掺入量不超过3%时，纳米混凝土的声发射活性随着二氧化硅掺入量的增加而明显增强。从时间角度出发，在以时间参数作为中间变量的基础上推导出声发射能量累计数与应变的耦合关系。利用基于weibull分布的混凝土损伤本构模型，进一步推导出声发射累计数与应力以及损伤之间的耦合关系。结果表明理论曲线和试验数据结果吻合程度较好。

关键词 纳米混凝土，声发射，weibull分布，损伤本构模型

中图分类号：O348.8

文献标识码：A

文章编号：1000-310X(2012)06-0462-06

Analyses of acoustic emission characteristics of Nano-concrete and the relationship between mechanical parameters and acoustic emission parameters

XIE Zhilong¹ YAN Xiaoqing¹ FU Mingfu² FAN Baosheng¹

(1 School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031)

(2 Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099)

Abstract This article is based on a different SiO₂ content of Nano-concrete under uniaxial compression of Acoustic Emission (AE) testing. Test results show that when SiO₂ content is less than 3%, AE activity of nano concrete enhances with the increase of SiO₂ content. Starting from the time domain, the coupling relation between AE cumulative energy and strain is derived, which is based on the time parameter as an intermediate variable. Further, the coupling relation between AE cumulative energy and stress and damage is deduced, which is based on distribution of the Weibull concrete damage constitutive model. Results indicated that theory curves and test dates matched well.

Key words Nano-concrete, Acoustic Emission, Distribution of Weibull, Concrete damage constitutive model

2012-03-06 收稿; 2012-09-21 定稿

*本项目由江西省研究生创新专项资金(YC10A034)、国家自然科学基金资助项目(10972098)资助

作者简介: 谢志龙 (1986-), 男, 浙江临海人, 硕士研究生, 研究方向: 声发射检测。

闫小青 (1964-), 女, 副教授, 博士, 研究生导师。

扶名福 (1953-), 男, 教授, 博士, 博士生导师。樊保圣 (1986-), 男, 硕士研究生。

†通讯作者: 扶名福, E-mail: fmf@ncu.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 引言

声发射 (Acoustic Emission) 是材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象^[1], 声发射信号包含材料破坏过程中的丰富信息。声发射作为一种反映混凝土内部状态变化的工具, 其活性和强度反映了混凝土损伤的程度, 与混凝土内部缺陷的演化繁衍直接相关。因此, 混凝土声发射与混凝土的损伤变量、本构方程之间存在着内在的必然联系^[2]。日本学者 Ohtsu^[3]于 1987 年提出一个关于声发射事件数与应力的经验公式, 并利用该公式来对混凝土的初始损伤进行评估。美国学者 Dai^[4]等在 1997 年提出了另外一个关于声发射数和应力的理论模型, 同时指出该模型能够用来评价材料的损伤及强度。我国学者董毓利, 谢和平^[5]分析了砗在受压过程中的声发射特性, 利用内变量理论建立砗受压损伤本构模型。纪洪广, 贾立宏等^[6]根据混凝土在不同阶段的声发射特征, 推导出声发射参数与损伤参量之间的关系, 建立了混凝土在一维状态下用声发射参数表示其损伤的本构方程。王明^[7]分析了不同荷载水平的损伤过程, 提出了声发射概率密度函数的概念, 并将其应用到混凝土材料的损伤评估。刘向峰, 汪有刚^[8]利用损伤力学基本原理和热力学定律, 推导出煤岩损伤演化方程, 通过拟合损伤与声发射能量累积关系曲线, 得到声发射能量累积与应力应变的理论关系。薛云亮, 李庶林等^[9]采用基于 Weibull 分布的损伤本构模型及声发射数与损伤变量间的经验公式, 推导出应力、应变参量与声发射数参量的耦合模型。

纳米混凝土是将纳米矿粉 (如纳米 SiO₂、纳米硅粉、纳米 CaCO₃ 等) 作为外掺剂加入到普通水泥混凝土中, 对其微观结构进行改性。众多学者^[10-11]对纳米混凝土的物理力学性能进行探讨。研究表明纳米矿粉的掺入, 可以增加混凝土的密实性, 使其强度、韧性、抗渗性和耐久性能得以提高。然而, 关于纳米混凝土损伤破坏机理方面的研究还很少。

此外, 声发射技术是一门理论落后于实践的技术, 对于混凝土结构而言, 如何在理论上建立起声发射参数与力学参数之间的定量关系并给出结构失稳破坏的判据成为一个难题。本文将纳米 SiO₂ 作为外掺剂引入到普通混凝土中, 采用声发射技术研究不同 SiO₂ 掺量纳米混凝土在单轴压缩过程中的声发射特性, 推导出混凝土声发射参数与力学参数的耦合关系, 为运用声发射技术研究混凝土的损伤破坏过程提供理论支撑。

2 试件制备和试验方法

2.1 原材料及试样制备

本文采用的水泥为海螺牌 42.5 级普通硅酸盐水泥, SiO₂ 为德国瓦克公司生产的气相法二氧化硅, 其 SiO₂ (NS) 含量为 99.9%, 平均粒径为 40 nm, 比表面积为 400 m²/g, 采用浓度为 20% 的聚羧酸盐减水剂。本文主要研究不同 SiO₂ 掺量纳米混凝土试件的声发射特性, 因此设计试验时在保证水胶比、砂率、强度等级等条件下, 仅按照 SiO₂ 的不同掺量将试件分为 4 组 (见表 1), 每组 5 个, 共 20 个试件。试件采用边长为 150 mm 的正方体混凝土试块, 在温度为 (20±2) °C 和相对湿度大于 90% 的湿空气中养护 24 h, 脱模后标准养护 28 d。

2.2 试验装置及方法

采用 SHT4306 型微机控制电液伺服万能试验机对混凝土试件进行单轴压缩试验。试验采用位移控制, 加载速率为 0.02 mm/s。采用美国声学物理公司 (PAC) 生产的 PCI-2 声发射采集仪对试验过程进行跟踪监测。选用带宽为 100 kHz~1.0 MHz 的宽频传感器, 利用耦合剂 (真空酯) 通过橡胶带将其固定于试件表面。前置放大器增益设为 40 dB, 门槛值设置为 40 dB, 采样频率为 2 MHz。

表 1 不同 SiO₂ 掺量纳米混凝土的配合比及其力学性能

试件编号	W/B	SiO ₂ 掺量 (%)	配合比				弹性模量 (GPa)	峰值应力 (MPa)	
			W	C	SiO ₂ (kg/m ³)	G			
NS-0	0.36	0.0	180	367.0	0.0	571	1332	3.8	47.8
NS-1	0.36	1.0	180	363.3	3.7	571	1332	4.4	47.9
NS-2	0.36	2.0	180	359.6	7.4	571	1332	5.0	49.1
NS-3	0.36	3.0	180	355.9	11.1	571	1332	6.0	50.8

注: W/B—水胶比, W—用水量, C—水泥, S—砂, G—碎石

3 不同 SiO₂ 掺量纳米混凝土的声发射特性分析

声发射累计数指在一个声发射过程中, 声发射信号某一特征量的累加值^[12]。这类参数从整体上描述了声发射总强度和材料内部损伤的积累情况, 是材料内部结构变化累加效果的外部表现。本文主要是通过能量累计数来描述纳米混凝土在单轴受压状态下的声发射现象。

在本次试验的所有试件中, 混凝土受力变形破坏过程的声发射特性大体上相近。单轴压缩下纳米混凝土声发射的典型曲线如图 1 所示。由试验结果绘制出不同 SiO₂ 掺量纳米混凝土的声发射能量累计数与相对应力的变化曲线, 如图 2 所示。通过对比研究可以发现:

(1) 不同 SiO₂ 掺量纳米混凝土试样在单轴压缩过程中的声发射曲线的趋势基本相同, 大致可以分为三个阶段, 即: ①初始阶段。在加载初期, 约在峰值应力的 0%~20% 的范围内, 声发射能量累计数较小。此阶段对应于混凝土的压密阶段, 试样原始裂纹逐渐闭合, 致使其内部微结构发生微小变化, 因而声发射信号较弱。②稳定阶段。该阶段大约在峰值应力的 20%~90%, 在该范围内, 声发射能量累计曲线随着相对应力水平的提高而平稳上升。随着荷载的增加, 试样内部逐渐产生新的裂纹, 出现扩容现象。此阶段声发射信号开始趋于活跃, 声发射能量逐渐增加, 可以作为纳米混凝土破坏的前兆。③不稳定阶段。当应力超过峰值应力的 90% 以后, 声发射能量累计数曲线突然迅速增加, 呈指数增长。此时, 某些微裂纹发生聚合、贯通, 裂纹之间的相互作用不断加剧, 出现宏观裂纹。因而产生强烈的声发射信号。

(2) 进一步比较可以发现: NS-1 试样和 NS-0 试样相比, 其声发射能量累计曲线变化不大, 声发射活性接近; NS-2 试样的能量累计曲线有所提高, 活性增强; NS-3 试样的能量累计曲线最高, 活性最强。研究表明^[13-14]纳米 SiO₂ 的掺入, 能较快地与水泥水化产物 Ca(OH)₂ 进行二次水化反应, 生成 CSH 凝胶, 不仅降低了 Ca(OH)₂ 的含量, 而且还细化了 Ca(OH)₂ 晶体, 使水泥石密实, 改善界面结构。当纳米 SiO₂ 掺入量不超过适宜掺入量 3% 时, 随掺入量的增加, 试件强度较基准试件均有所提高。随着

混凝土强度的提高, 混凝土内部的界面结合力和砂浆的强度都有所增大, 密实度也相应提高, 所以裂缝在高强度混凝土的扩展过程中所消耗和释放的能量都比低强度的混凝土要高, 因此声发射信号增强。故当 SiO₂ 掺入量不超过 3% 时, 纳米混凝土其声发射活性随着 SiO₂ 掺入量的增加而明显增强。

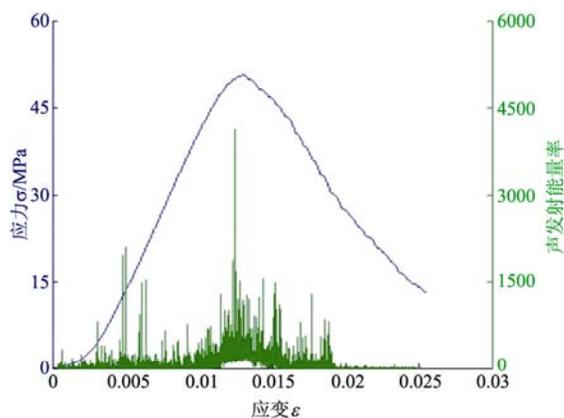


图 1 应力-应变-声发射能量历程曲线

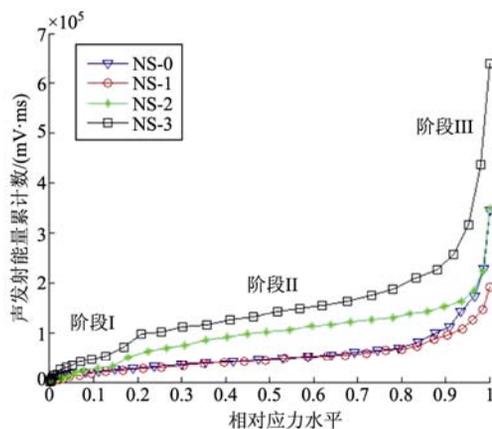


图 2 纳米混凝土的声发射能量累计曲线对比

4 纳米混凝土力学参数与声发射参数的耦合关系

4.1 声发射能量累计数与应变的耦合关系

从以上实验结果的分析中可以发现, 声发射特性与纳米混凝土内部微裂缝的开展是紧密相关的。随着荷载的增加, 微裂纹逐渐积累, 声发射能量也在积聚增加。混凝土内部的裂纹、缺陷是影响其力学性质的重要因素, 因此, 声发射能量累计数与混凝土的力学特性之间有着必然的联系。本次试验采用位移控制, 加载速率为 0.02 mm/s, 同时利用声发

射仪进行同步监测。由图3可知应变与时间的关系基本是线性的, 即应变 ε 和时间 t 之间存在以下关系:

$$\varepsilon = k_1 t + \varepsilon_0, \quad (1)$$

式中, k_1 为加载应变率, 对本试验, 取 $k_1 = 1.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; ε_0 为常数, 即混凝土试件在浇筑成型过程中产生的初始应变。

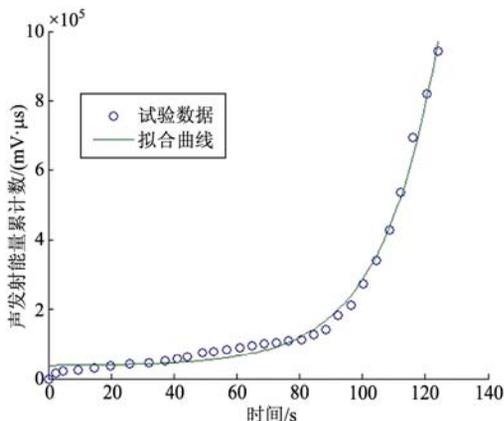


图3 声发射能量累计数与时间的拟合曲线

通过拟合声发射能量累计数与时间关系的试验数据, 发现声发射能量累计数和时间之间存在着指数函数的关系, 如图3所示。因此, 对于试验中选取的试样, 声发射能量累计数和时间的函数关系可以用指数函数来表示, 即

$$w_e = a \exp(bt), \quad (2)$$

式中, a , b 均为常数, 可由试验数据拟合确定。由式(1)和式(2), 可得

$$w_e = a \exp\left[\frac{b}{k_1}(\varepsilon - \varepsilon_0)\right], \quad (3)$$

式(3)建立了声发射能量累计数与应变之间的耦合关系。

4.2 声发射能量累计数与应力以及损伤变量的耦合关系

根据 Lemaitre 应变等价性假设^[15], 可得单轴压缩条件下混凝土类材料损伤本构关系,

$$\sigma^* = \sigma(1 - D) = E\varepsilon(1 - D), \quad (4)$$

式中: σ^* 为有效应力; σ 为名义应力; D 为损伤变量; E 为混凝土弹性模量; ε 为应变。

唐春安^[16]假设混凝土类材料的微元强度满足 weibull 分布, 即

$$\phi(\varepsilon) = \frac{m}{\alpha} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right], \quad (5)$$

式中, m , α 分别为形状参数和尺度参数, 均为常数。

由于微元破坏的随机性, 故以微元破坏概率作为其损伤变量 D , 即

$$D = \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \phi(x) dx = \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_0}{\alpha}\right)^m\right] - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right], \quad (6)$$

将式(6)代入式(4), 可以得到混凝土类材料应力-应变全过程曲线的本构模型, 即

$$\sigma^* = E\varepsilon \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_0}{\alpha}\right)^m\right] + \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^m\right] \right\}. \quad (7)$$

杨明辉等^[17]通过应力-应变全曲线的几何边界条件, 求出单轴情况下损伤本构模型参数的表达式,

$$m = \frac{1}{\ln(E\varepsilon_c/\sigma_c)}, \quad \alpha = \frac{\varepsilon_c}{(1/m)^{\frac{1}{m}}}, \quad (8)$$

式中, ε_c 为峰值应变, σ_c 为峰值应力。

由式(3)可得,

$$\varepsilon = \frac{b}{k_1} \ln \frac{w_e}{a} + \varepsilon_0, \quad (9)$$

将式(9)代入式(6), 可得声发射能量累计数与应力的耦合关系, 即

$$D = \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_0}{\alpha}\right)^m\right] - \exp\left[-\left(\frac{b}{\alpha k_1} \ln \frac{w_e}{a} + \frac{\varepsilon_0}{\alpha}\right)^m\right], \quad (10)$$

将式(9)代入式(7), 可得声发射能量累计数与损伤变量的耦合关系, 即

$$\sigma^* = E\varepsilon \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_0}{\alpha}\right)^m\right] + \exp\left[-\left(\frac{b}{\alpha k_1} \ln \frac{w_e}{a} + \frac{\varepsilon_0}{\alpha}\right)^m\right] \right\}. \quad (11)$$

4.3 试验验证

为验证本文模型的正确性, 结合本次试验的结果, 利用最小二乘法分别对应变-时间曲线和声发射能量累计数-时间曲线进行拟合, 由此得到参数 a , b , 其结果列于表2。将其结果分别代入式(3)、

式(10)和式(11)后,即可确定声发射能量累计数与应变、应力和损伤之间的耦合关系。图4至图6分别给出了NS-3试件的声发射能量累计数与应变、应力和损伤的试验结果和本文建立模型得到的曲线。

通过比较可以发现,本文所建模型与试验数据吻合程度较好,说明所建模型是合理的,正确的。同时,本文模型建立了声发射参数与应力和损伤之间的定量关系,实现通过声发射参数来确定混凝土的实际受力情况以及测量混凝土的损伤程度和损伤状况,给出判断结构失稳破坏的依据。

表2 本文模型拟合纳米混凝土声发射参数与力学参数关系曲线的参数

试件编号	weibull分布参数		拟合参数	
	m	α	a	b
NS-0	1.78	0.020	19.4	0.089
NS-1	3.79	0.017	122.8	0.080
NS-2	2.71	0.019	1141.5	0.057
NS-3	1.92	0.018	2212.0	0.048

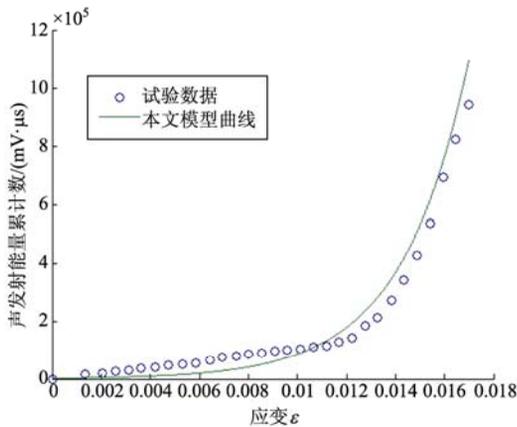


图4 声发射能量累计数与应变的关系曲线

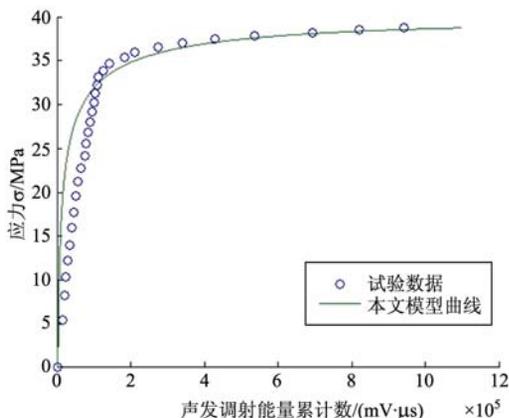


图5 声发射能量累计数与应力的关系曲线

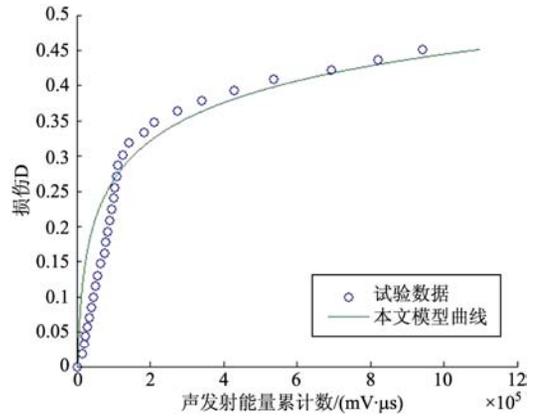


图6 声发射能量累计数与损伤的关系曲线

5 结论

本文通过分析和比较不同SiO₂掺量的纳米混凝土在单轴压缩过程的声发射特性,可以得出以下结论:

(1) 声发射能量累计曲线能够动态的表征纳米混凝土的损伤过程。不同SiO₂掺量的纳米混凝土在单轴压缩过程中的声发射曲线都表现出3个特征阶段,这与混凝土内部原始裂纹的闭合以及微裂纹的产生、扩展至宏观裂纹形成和断裂过程相对应。当SiO₂掺入量不超过3%时,纳米混凝土的声发射活性随着SiO₂掺入量的增加而明显增强。

(2) 将时间参数作为中间变量,建立应变与声发射能量累计数的定量关系,再利用基于weibull分布的混凝土损伤本构模型,推导出声发射能量累计数与应力以及损伤变量之间的耦合关系。该模型形式简单,参数易于求解,且与试验结果拟合精度较高。为研究声发射参数与力学参数之间的关系提供一种新思路。

(3) 由于混凝土材料的声发射性能受到多种因素的影响,如水灰比、构件尺寸、龄期、强度、试验加载方式等因素的影响。建议增加其它类型混凝土试验以验证本文模型或对本文模型进行改进,以便对混凝土声发射机理进行更深入的研究。

参 考 文 献

[1] 沈功田,戴光,刘时风.中国声发射检测技术进展——学会成立25周年纪念[J].无损检测,2003,25(6):302-307.
 [2] 纪洪广,蔡美峰.混凝土材料声发射与应力-应变参量耦合关系及应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):227-231.

- [3] OHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application [J]. *Acoustic Emission*, 1987, 6 (2):99-108.
- [4] DAI S T, LABUZ J F. Damage and failure analysis of brittle materials by acoustic emission [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1997, 9 (4):200-205.
- [5] 董毓利, 谢和平, 李玉寿. 砼受压全过程声发射特性及其损伤本构模型[J]. *力学与实践*, 1995, 17(4): 25-28.
- [6] 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎. 混凝土损伤的声发射模式研究[J]. *声学学报*, 1996, 21(4): 601-608.
- [7] 王明. 混凝土力学参数与声发射参数之关系研究[J]. *福建建筑*, 2010, 142(4): 101-103.
- [8] 刘向峰, 汪有刚. 声发射能量累积与煤岩损伤演化关系初探[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2011, 30(1): 1-4.
- [9] 薛云亮, 李庶林, 林峰, 等. 类岩石材料声发射参数与应力和应变耦合本构关系[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(6): 664-670.
- [10] 扶名福, 熊进刚, 宋固全. 纳米材料在混凝土中的研究与应用——第十三届全国结构工程学术会议特邀报告[J]. *工程力学*, 2004 年 S1 期: 48-51.
- [11] 季韬, 黄与舟, 郑作樵. 纳米混凝土物理力学性能研究初探[J]. *混凝土*, 2003, 3: 13-14.
- [12] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 18-20.
- [13] 叶青, 张泽南, 陈荣升. 纳米 SiO₂ 与水泥硬化浆体中的 Ca(OH)₂ 反应[J]. *硅酸盐学报*, 2003, 31(5): 517-522.
- [14] 王立久, 王宝民. 纳米 SiO₂ 对硅酸盐水泥性能影响实验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2003, 43(5): 666-669.
- [15] 曹文贵, 方祖烈, 唐学军. 岩石损伤软化统计本构模型之研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(6): 628-633.
- [16] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 10-28.
- [17] 杨明辉, 赵明华, 曹文贵. 岩石损伤软化统计本构模型参数的确定方法[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 1-7.