

文章编号: 1008-0562(2009)04-0585-04

# 混凝土损伤破坏的协同问题

臧晓光<sup>1</sup>, 潘永战<sup>1,2</sup>, 王国艳<sup>1,3</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 河南科技大学 建筑工程学院, 河南 洛阳 471003;  
3. 辽宁工程技术大学 力学与工程科学系, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 针对混凝土的力学性能在很大程度上取决于初始损伤的问题, 而现有的损伤力学研究观点和理论都是基于某种假定 (或简化) 对混凝土损伤演化进行研究, 很难从本质上对混凝土损伤演化过程进行描述。尝试从系统的观点出发, 采用热力学和协同学的基本理论和方法研究受载条件下的混凝土损伤演化问题。应用协同学的绝热消去法得到了材料考虑初始损伤条件下的非线性力学模型, 研究破坏过程中的相变问题, 并加以深入分析, 获得了材料受载破坏过程中裂纹的平均取向规律, 揭示了破坏过程中的声发射现象和体征规律, 并应用数值模拟验证了理论分析的正确性。通过研究, 有望得到混凝土损伤演化过程、本构关系等更本质的描述, 为进一步研究损伤演化问题指明了方向。

**关键词:** 混凝土; 初始损伤; 协同演化; 结构缺陷

**中图分类号:** TU 528.1

**文献标识码:** A

## Oretic analysis of damage evolvement of concrete based on synergetics

ZANG Xiaoguang<sup>1</sup>, PAN Yongzhan<sup>1,2</sup>, WANG Guoyan<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. School of Architecture and Engineering Henan University of Science and Technology, Luoyang, 471003 China; 3. School of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;)

**Abstract:** Analyze the synergetic damage of concrete by the method of thermodynamics and synergetics based on the characteristics of original damage consist in such brittle materials. Structural defects in rock and concrete and its influence on material damage under loads is summarized and auctorial opinions are put forward about these questions. The controlled action, coactions and synergetic characteristics of structural defects to the process of material damage are analyzed. Synergetics effects of phase transition and acoustic emission of material damage process are studied. The evolvement equation and mechanics model are established and the damage process is described truly based on synergetics analysis. At last show the prospect of damage mechanics and destroy mechanics and point out that the main direction is to found the synergetic damage theory of concrete and study the effect mechanism of structural defects towards the damage process.

**Key words:** concrete; original damage; synergetic evolvement, construction shortcomings

## 0 引言

材料的损伤和破坏是一类极为普遍的现象, 也是当前力学界与工程界均十分关注的一个焦点。虽然对材料损伤和破坏问题已进行了多年、广泛的研究, 但大多数基本问题仍未找到令人满意的答案。事实上, 损伤问题跨越了固态物质从原子键断裂到固体出现宏观分离, 高达 100 多倍的尺度差异, 哪些尺度上的哪些因素对宏观破坏是不可忽略的重要因素, 至今尚不十分清楚。

在损伤演化过程中, 出现在细观层次的过程包括微损伤的成核、扩展、连接及愈合等不同类型的

过程。一般而言, 这些过程既受确定性动力学控制, 又受无序性因素影响。在各种不同的条件下, 有时有些过程基本上呈现为一种随机过程, 而有些过程则主要表现为一种确定性的动力学过程。不同的元过程通常需采用不同的描写方法。原则上, 材料损伤问题可采用基本的微观模型, 从分子、原子出发, 用传统的统计物理方法处理。但是, 材料的损伤, 尤其是有外应力作用的情形, 通常是远离平衡条件下的演化现象。在这种情形下, 宏观现象与微观运动之间没有简单的联系。

作为一种非均匀的多相介质, 混凝土材料由于成型工艺、养护条件等原因, 在构件承载之前, 混

收稿日期: 2007-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50874046、50804026); 山东省自然科学基金资助项目 (Z2007F10);

教育部博士点基金资助项目 (200804290002); 青岛市科技计划基金资助项目 (07-2-J-16-jch)

作者简介: 臧晓光 (1973-), 男, 山东 青岛人, 主要从事混凝土结构方面的教学与科研工作。E-mail: zangxg@qtech.edu.cn。本文编校: 于永江

混凝土不同层次的相界面及水泥浆本身,已经存在着大量的由干缩及凝结硬化所引起的各种尺度的随机分布裂纹,即初始损伤,这些材料初始缺陷不仅在荷载作用下进一步扩展,而且对混凝土材料破坏起着关键性的控制作用。

基于混凝土材料破坏的以上特征,外界条件的复杂性,以及混凝土材料自身的非线性,这些都导致采用常规研究方法时,损伤的动态演化规律的研究十分困难<sup>[1-2]</sup>。传统的观点将混凝土受载破坏的过程看作外力作用的结果进行研究。然而,研究损伤演化所考察的系统,通常处于远离平衡的条件下,损伤的演化过程中一般包含互相耦合的多种非线性过程,涉及从微观到宏观各种尺度的过程,是多尺度、多层次子系统之间的相互耦合。单纯的细观理论和只涉及宏观描述唯象理论并不能充分反映损伤演化的机理。损伤演化过程是材料内包含各种不同尺度、不同类型的复杂微结构自身演化的一种群体效应,依赖于复杂微结构的集体相互作用。从本质上来讲,材料的力学性能是其微结构在自组织状态下对作用的一种反应。本文尝试应用协同学的处理方法,从混凝土材料破坏过程中的相变、声发射等特征参量的变化特征来研究材料破坏过程。

## 1 混凝土材料非连续性问题

如前所述,在进行混凝土受载分析时,可以将其分成由众多子系统组成的大系统,而子系统的划分可以混凝土中集料和水泥浆体的界面为分界面。

采用的不连续模型构造示意图如图1。

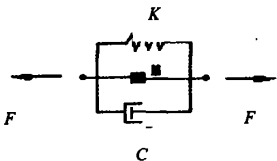


图1 力学模型示意图

Fig.1 sketch map of mechanical model

按照一般的动力学理论,假设变形抗力F是位移y和时间t的函数,阻尼力是该块体运动速度 $\dot{y}$ 和时间t的函数,故加载过程中该块体的动力学平衡方程为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F \quad (1)$$

其中,y为块体相对于平衡位置的位移,在宏观上,它与混凝土的应变相对应。 $\dot{y}$ 、 $\ddot{y}$ 分别为y对时间t的一阶导数和二阶导数,其物理意义为块体运动的速度和加速度,M、C、K表示块体的

质量、子系统的阻尼和刚度,F表示块体所受该方向上外界作用的总和。

取y、 $\dot{y}$ 为状态变量,且令 $y = x_1$ 、 $\dot{y} = x_2$ ,则各状态参量的变化方程可表示为

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (2)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \ddot{y} = -\frac{C}{M}x_2 - \frac{K}{M}x_1 + \frac{F}{M} \quad (3)$$

应用协同学的绝热消去法则并进行相应处理<sup>[3-7]</sup>可得到材料的一种力学模型<sup>[8]</sup>

$$\epsilon(t) = -\frac{K}{2CX_0}(t^2 - t_0^2) + \frac{1}{CX_0} \int_0^t f(t)dt + \frac{W(t)}{CX_0} \quad (4)$$

从该力学模型可以看出对于含有初始损伤的混凝土材料,在加载过程中其应力应变关系存在以下特点:

①式(4)右边第二项的积分项表明岩体某一时刻的状态与其受载历史有关,这说明岩体损伤演化的不可逆性,此点也是已经为诸多试验现象(如应变积累、凯瑟效应等)所证实的;

②应变包含一个随机项 $W(t)$ ,在平衡状态下,

该项的量值不足以影响岩体的损伤演化,但在远离平衡态时,该项可能成为影响岩体损伤演化的“导火索”,即涨落,这也是导致同样岩的体材料在同样的加载条件下发生不同破坏路径的根本原因;

③材料的应变也与阻尼有关;

④在其它条件不发生改变时,若试件采取快速加载,即对应较小的t与 $t_0$ 的差值而 $f(t)$ 值不变,此时公式(4)右面第三项变小,其余各项不变,所以导致 $x_1(t)$ 的值比慢速加载时减小。也就是说,加载速率越大,相同应力所对应的应变越小。

## 2 混凝土材料损伤演化相变问题

在加载过程中,在一些点上,混凝土材料作为一个系统在宏观上的态将会出现的急剧变化,这同平衡态中出现相变的现象类似,因此可将平衡相变中的基本概念和处理方法,类比到混凝土材料系统中来<sup>[9]</sup>。为了直观地描述混凝土材料受载破坏过程,我们选取在单轴加载条件下,混凝土材料所有裂纹在平行于加载方向上的投影矢量(方向取坐标系正方向)和与其在垂直于加载方向上的投影矢量(方

向取坐标正方向)和的矢量和(称之为裂纹平均取向)为序参量。为了更加直观地表达,也可对该序参量用数学方式进行归一化处理:取该矢量与第一象限夹角平分线之间的夹角(取逆时针为正)与 $\pi/4$ 的比值代表序参量,用 $q$ 表示。

则自由能公式变为<sup>[10-11]</sup>

$$F(q, \sigma) = F(0, \sigma) + \frac{1}{2} \alpha(\sigma) q^2 + \frac{1}{4} \beta(\sigma) q^4 \quad (5)$$

上述过程在混凝土材料损伤演化过程中相应的描述如下:

在混凝土材料尚未加载时,由名义应力决定的 $\alpha$ 是一个非负值。随着荷载由零逐渐增加(或减小),名义应力 $\sigma$ 也发生改变,导致 $\alpha$ 的值逐渐减小,但只要保证 $\alpha > 0$ ,  $q = 0$ 就是系统的稳定平衡点;当 $\alpha$ 的值减小到零时,系统在平衡点达到一种随遇平衡状态,此时即为混凝土材料的相变点;

当 $\alpha < 0$ 时,  $q = 0$ 由稳定平衡点变为不稳定平衡点,同时又出现两个新的稳定平衡点

$$q_{02,3} = \pm \left( -\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中正号的平衡点对应于材料受压状态,负号的平衡点对应于材料受拉状态。

### 3 混凝土材料声发射协同问题

#### 3.1 混凝土材料声发射的协同学分析

材料的声发射信号绝大多数产生自微裂纹的开裂和扩展。声发射现象与混凝土材料内部裂纹扩展有直接的对应关系,是裂纹扩展的表征。声发射参数的变化,也表明混凝土材料内部损伤的演化。

以材料破坏过程中的声发射大事件计数率 $N_o$ 为序参量,通过已知的大事件计数率与事件计数率 $N_e$ 的关系并运用协同学的方法处理得到材料破坏过程中声发射事件数在临界状态时与加载时间的关系为<sup>[12]</sup>

$$N_o(t) = \frac{N_o(0)}{1 - N_o(0)nt} \quad (7)$$

其中 $N_o(0)$ 为该临界状态声发射事件计数率的初值, $n$ 为与受载状态和材料性质有关的参数。此时如果 $n < 0$ ,则随着时间的增长,序参量逐渐减小。对于混凝土材料系统来说,这是由于大的断裂事件的频繁发生,造成了混凝土材料内部应力的重分布,从而减小了单位时间内的声发射事件计数率。而如果 $n > 0$ ,则随着时间的增长,序参量逐渐增大并且一旦 $N_o(0)nt$ 的值减小到趋近于1时,声发射时间总数将趋近于无穷大。这显然对应着系统的突变状态。

在非临界状态时,

$$N_o(t) = \frac{1}{k_1 + k_2 e^{-mt}} \quad (8)$$

其中 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $m$ 为与受载状态和材料性质有关的参数。当 $m > 0$ ,混凝土材料声发射事件计数率的增长系数大于其衰减系数,对应的过程为材料初期加载过程中裂纹的逐步扩展。由式(8)可以看出,此时声发射事件计数率将随着时间的增长逐步增大。当 $m < 0$ 时,声发射事件计数率的增长系数小于其衰减系数,从式(8)可以看出,此时声发射事件计数率将随着时间的增长逐渐减小。

上述混凝土材料的声发射率变化规律统一解释为这样的过程:在混凝土材料加载初期,裂纹逐渐产生,初始裂纹和新增裂纹逐步扩展,混凝土材料声发射事件计数率逐渐增大。荷载达到一定水平后,大小裂纹迅速扩展导致混凝土材料声发射事件计数率剧增,在宏观上表现为混凝土材料在荷载下的行为产生突变。经过此一阶段的裂纹扩展,混凝土材料内部产生应力重分布,裂纹扩展的行为又趋于缓和,混凝土材料声发射事件计数率也相应地有一个下降的过程。随着荷载的增加,又开始新一轮的上述过程。所以说,混凝土材料的整个受载破坏过程中的声发射计数率就是上述“相对平稳增长—突变—衰减—相对平稳增长—突变...”的不断循环过程。但是,在混凝土材料达到屈服强度之前,以增长为主,过了屈服点之后,以衰减为主。

#### 3.2 混凝土材料声发射规律的数值模拟

应用东北大学材料破裂失稳中心研发的RFPA<sup>2D</sup>软件对混凝土在单压条件下的破坏过程进行了模拟,获得了混凝土破坏全过程声发射率曲线。从中可以看到材料声发射率演化的典型的突变特征:声发射率峰值远远大于其它加载步的值。在峰值前,声发射演化呈逐步积累的过程,然后在很

短的时间内(在等应变率加载的情况下)达到很大的值。随后迅速下降,进入一个新的积累过程,直至另一次突变。由数值模拟结果可以看出,应用协同学处理方法得到的混凝土破坏过程中的声发射规律是正确的。

#### 4 混凝土损伤演化不稳定性问题

从协同学观点出发,考虑热力学参量(温度、自由能和熵等)在混凝土损伤演化中的作用,综合力学参量和热学参量,构造系统的动力学方程,将混凝土材料的破坏过程视为非平衡相变现象,通过线性稳定性分析,可以从材料的热弹性不稳定性这一角度寻求混凝土材料的弹性极限的方法。

我们可以选取两种有代表性的参量,力学参量取应变 $\varepsilon$ ,热力学参量取温度 $T$ ,而将自由能 $F$ 看成二者的函数

$$F = F(T, \varepsilon) \quad (9)$$

引入热流密度 $q$ 、焓流密度 $\frac{q}{T}$ 、粘滞系数 $\eta$ 等参数并推导后可得判断材料是否处于稳定状态的Hurwitz判据<sup>[12]</sup>

$$\Phi\left(k, \frac{\partial \varepsilon_a}{\partial t}, \varepsilon_a\right) = \left(\frac{K\eta}{EC_V}\right) \left(\frac{K}{C_V} + \frac{\eta}{\rho}\right) k^4 + \left[(c + \alpha\gamma T_0 AB) \left(\frac{K}{C_V} + \frac{\eta}{\rho}\right) - \frac{CE}{C_V}\right] k^2 - \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon_0} T_0 \alpha B \frac{\partial \varepsilon_a}{\partial t} > 0 \quad (10)$$

由式(10)可知,混凝土的弹性极限应变不仅与其材料性质密切相关,还与其承受作用时的热力学性质(温度、自由能和熵等)有关。

此外,根据上式还可看出混凝土在一定条件下的弹性极限应变还与应变速率有关,这与在受载试验中混凝土等脆性材料所表现出来的动力效应是一致的。

#### 5 结论

混凝土的力学性能是包括初始损伤在内的各

种组成成分对荷载集体响应的结果。现有的损伤力学研究观点和理论都是对混凝土本身做了种种假定(简化)之后,针对混凝土损伤演化某一具体方面进行描述的,没有把受载条件下的混凝土视为一个完整的、具有自组织性的系统,也就很难从本质上对混凝土损伤演化过程进行描述。本文尝试从系统的观点出发,采用热力学和协同学的基本理论和方法研究混凝土受载条件下的损伤演化问题。得到了混凝土材料考虑初始损伤条件下的力学模型,并对材料破坏过程中的相变和声发射现象进行分析,数值模拟的结果证明了理论分析的正确性。初步建立了混凝土协同破坏理论框架。通过研究,有望得到混凝土损伤演化过程、本构关系等更本质的描述,进一步开展此方面的研究,无疑具有重大的理论价值。

#### 参考文献:

- [1] Neville A.M. Properties of concrete (third edition) [M]. London: Pitman Publishing Limited, 1981.
- [2] Kaplan M.F. Crack propagation and the fracture of concrete. ACI Journal[J]. 1961. 58(11): 591-610.
- [3] J.W.Dougill, et. al. Journal of Engineering Mechanics[J]. ASCE. 1976(102): 333.
- [4] H. Haken. Advanced Synergetice. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 1983.
- [5] H. Haken. Information and Self-organization: Macroscopic Approach to Complex Systems[M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 1988
- [6] Haken H.. Synergetics, An Introduction Springer Series Synergetics(3rd edition) [M], Vol. 1. Berlin:Springer, 1983.
- [7] W. Guttinger. The Physics of Structure Formation Theory and Simulation[M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 1987
- [8] 魏金波. 混凝土损伤演化的协同学研究及本构模型的建立[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2006.
- [9] 21 E. Scholl. Nonequilibrium Phase Transitions in Semiconductors[M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 1987
- [10] W. Ebeling. Selforganization by Nonlinear Irreversible Processes[M]. Berlin Heidelberg, New York: Springer, 1986
- [11] Trevor Hogg. Habib Talham. David Rees. Learning in a self-organizing pattern formation system[J]. Pattern Recognition Letters 1999, (20): 1-5
- [12] 潘永战. 混凝土受载破坏过程的协同学分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2005.

# 混凝土损伤破坏的协同问题

作者: 臧晓光, 潘永战, 王国艳, ZANG Xiaoguang, PAN Yongzhan, WANG Guoyan  
 作者单位: 臧晓光, ZANG Xiaoguang(青岛理工大学土木工程学院, 山东, 青岛, 266033), 潘永战, PAN Yongzhan(青岛理工大学土木工程学院, 山东, 青岛, 266033; 河南科技大学建筑工程学院, 河南, 洛阳, 471003), 王国艳, WANG Guoyan(青岛理工大学土木工程学院, 山东, 青岛, 266033; 辽宁工程技术大学力学与工程科学系, 辽宁, 阜新, 123000)  
 刊名: 辽宁工程技术大学学报(自然科学版) **ISTIC** **PKU**  
 英文刊名: JOURNAL OF LIAONING TECHNICAL UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE EDITION)  
 年, 卷(期): 2009, 28(4)  
 引用次数: 0次

## 参考文献(12条)

1. Neville A M [Properties of concrete](#) 1981
2. Kaplan M F [Crack propagation and the fracture of concrete](#) 1961(11)
3. J W Dougill [查看详情](#) 1976(102)
4. H Haken [Advanced Synergetics](#) 1983
5. H Haken [Information and Self-organization: Macroscopic Approach to Complex Systems](#) 1988
6. Haken H [Synergetics, An Introduction Springer Series Synergetics](#) 1983
7. W Guttinger [The Physics of Structure Formation Theory and Simulation](#) 1987
8. 魏金波 [混凝土损伤演化的协同学研究及本构模型的建立](#) 2006
9. E Scholl [Nonequilibrium Phase Transitions in Semiconductors](#) 1987
10. W Ebeling [Selforganization by Nonlinear Irreversible Processes](#) 1986
11. Trevor Hogg Habib Talham. David Rees. [Learning in a self-organizing pattern formation system](#) 1999(20)
12. 潘永战 [混凝土受载破坏过程的协同学分析](#) 2005

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 邱玲. 徐道远. 朱为玄. 邓爱民 [混凝土压缩时初始损伤及损伤演变的试验研究](#) -合肥工业大学学报(自然科学版) 2001, 24(6)  
 混凝土在浇筑时会产生空隙和微裂纹, 形成初始损伤, 但其定量十分困难. 文章通过试验的方法在5组同一种混凝土试块中掺入不同数量的引气剂模拟初始损伤, 通过单轴压缩试验, 测出了该种混凝土的初始损伤值及理想无损弹模, 并分析了试块在达到强度极限前的损伤演变规律. 试验结果表明, 当荷载小于试块最大承载力的40%~50%时, 损伤并不发展, 其后才有所发展并逐渐增大.
2. 学位论文 徐俊祥 [混凝土结构的损伤力学分析](#) 2004  
 在实际工程中使用的材料或构件及结构是存在初始损伤的, 其从开始变形直至破坏, 是一个逐渐劣化的过程, 在这个过程中, 微裂纹的聚合和长大造成了宏观裂纹的形成和发展. 而应运而生的损伤力学恰是研究材料内部微观缺陷的产生和发展所引起的宏观力学效应及最终导致材料破坏的过程和规律的一门学科. 在土木工程结构中, 混凝土是一种被广泛采用的材料, 其在浇筑成型过程中也不可避免的会有初始损伤存在, 这些初始损伤在外载的作用下会不断的演化发展. 为了对混凝土结构进行损伤力学的计算分析, 该文通过混凝土试件的拉伸和压缩试验, 利用损伤力学的理论, 对混凝土结构的初始损伤进行了分析, 得出了一定参考价值的初始损伤值及峰值应力对应的损伤值, 其对于混凝土损伤模型的建立及该模型在工程中的应用具有一定的意义. 另外, 混凝土损伤破坏准则的建立对于损伤力学在混凝土结构中的应用也具有重要的作用, 为此, 该文中将损伤变量引入了Drucker-Prager准则, 此外, 还根据损伤的能量释放率定义对损伤的破坏准则进行了初步的探讨. 该文将上述试验确定的混凝土的初始损伤值及损伤阈值引入河海大学徐道远教授提出的指数函数损伤模型, 根据损伤问题的初边值条件, 建立了含损伤的有限元方程, 并基于大型通用有限元软件Marc编制了损伤计算程序, 通过算例进行了程序的验证, 使得对混凝土结构的损伤模拟成为了可能, 为损伤力学在土木工程中的应用进行了有益的探索. 当混凝土结构在外载作用下进入损伤破坏阶段后, 在该文内认为当混凝土结构内的损伤达到损伤阈值后, 在结构内部将会产生微裂纹, 由于这些裂缝的存在, 使得混凝土结构的损伤分析变得异常困难, 为此该文以抹平式裂纹模型为基础, 引入指数函数损伤模型, 以调整单元刚度的方法考虑裂纹和损伤的影响, 建立了混凝土结构损伤破坏分析的数值方法, 并进行了算例分析, 取得了较好的结果. 该文最后利用上述的混凝土损伤分析方法, 以索风营水电站大坝为工程背景对其进行了损伤力学分析, 得出了合理的结果.
3. 会议论文 荆松吉. 卢芳云 [混凝土初始损伤对爆炸毁伤影响的数值模拟](#) 2007  
 本文运用LS-DYNA进行了侵彻弹对含混凝土多层介质的动、静爆破毁伤效果的数值模拟研究. 结果表明, 侵彻造成混凝土的初始破坏对最终的毁伤效果有较大影响, 并且在某些情况下是不可忽略的. 这也是造成静爆与飞行试验结果存在差异的一个重要原因. 另外基于对已有的静爆试验经验公式的分析, 考虑钻孔或侵彻产生的损伤, 引入初始损伤度的概念对原有公式进行改进. 使公式对动爆或飞行试验有更好的适用性. 提高其对毁伤效果的预测能力.
4. 学位论文 王向东 [混凝土损伤理论在水工结构仿真分析中的应用](#) 2004  
 混凝土大坝等混凝土结构在各种外界因素的作用下, 材料会产生损伤, 因此结构处于一个损伤场中, 且损伤在外界因素的作用下将会进一步发展, 如果按无损情况来分析计算, 显然与结构的实际情况会有一定的差异, 因此在结构的分析中必须考虑材料的损伤特性才能得到结构的真实力学响应和工作性态

. 因此, 混凝土损伤力学已日益受到人们的重视. 本论文在徐道远教授为首的河海大学断裂与损伤课题组研究成果的基础上, 对混凝土的损伤理论和工程应用中的若干问题进行了研究, 通过对混凝土材料的破坏机理分析, 认为混凝土体从受外荷载 (或其它外界因素) 作用起, 直至破坏的过程, 就是一个在初始损伤的基础上, 损伤发展和积累的过程. 本文用损伤描述了混凝土的应力应变软化效应及混凝土破坏过程中断裂与损伤的交织行为, 揭示了混凝土破坏机理的实质. 提出了三种混凝土损伤定量计算的方法, 同时还得到了推算无损混凝土弹性模量和强度的方法. 由于混凝土材料的拉、压性质不同, 所以也进行了与定量分析有关的混凝土拉、压损伤定量转换关系的研究. 得出了在绝对值相同应变情况下, 拉、压损伤定量转换公式. 设计了一套测试方案, 以加引气剂模拟初始损伤的方法, 并可实现的轴向拉、压等试验所测得的弹性模量, 再根据损伤理论, 得出了混凝土的初始损伤 $D_c(0)$ 和损伤阈值 $D_c(f)$ . 分析了混凝土的损伤参数作为材料参数也具有尺寸效应, 并对混凝土损伤参数的尺寸效应问题进行了研究, 导出了将小尺寸试件测得的损伤参数 $D_c(0)$ 和 $D_c(f)$ 转换为实际大尺寸结构损伤参数的关系式. 并对普通混凝土给出了一些大尺寸试件的 $D_c(0)$ 和 $D_c(f)$ 的参考值. 讨论了将损伤反映到损伤有限元支配方程中的方法, 得到了混凝土损伤场有限元计算的方程. 据此可进行混凝土结构随荷载变化的损伤仿真计算. 分析了进行混凝土大坝的损伤仿真有限元分析的方法, 推导了损伤仿真有限元方程. 并对某大坝进行了损伤仿真计算, 得到了损伤场随时间的变化规律, 并用损伤理论对其作了分析. 从计算结果看出, 混凝土大坝损伤场随时间的变化规律与应力随时间的变化规律有所不同, 损伤场才能够更有效的反映结构的工作性态, 方能正确地估计其使用寿命, 因此有力地证明了损伤仿真计算的必要性和重要性.

## 5. 期刊论文 [徐俊祥, 刘西拉, XU Jun-xiang, LIU Xi-la 混凝土初始损伤模拟和在混凝土重力坝抗震分析中的应用](#) - [上海交通大学学报](#)2006, 40 (6)

混凝土结构在外部荷载作用下的破坏过程是初始损伤不断演化发展和新的损伤不断形成的过程. 通过试验确定了混凝土在浇注过程中形成的初始损伤, 并据此对Jeeho Lee的塑性损伤模型进行了修正, 然后利用该模型对乌江上某重力坝进行了地震作用下的动力损伤分析, 并分别与不记入动水压力影响和不考虑应变率影响的结果进行了对比, 所得结论对混凝土坝的震害研究有一定的参考价值.

## 6. 学位论文 [陈小佳 基于非线性超声特征的混凝土初始损伤识别和评价研究](#) 2007

混凝土材料在基础设施建设中占了绝大比例, 随着基础设施的老齡化, 对其现状的评估日益受到重视. 在役结构中混凝土多处处在损伤的早期积累阶段, 对其损伤进行识别和累计损伤进行定量描述, 是非常有益的. 超声扫描技术能够观测到材料内部的变化情况, 然而对于混凝土材料而言, 基于线性波动理论的传统超声方法具有较大局限性. 目前对混凝土材料损伤的识别和定量无损评估仍然是具有挑战性的课题. 由于混凝土材料的复杂性以及由此产生的不同力学性能, 混凝土本身就是一种非线性材料, 一般损伤后其非线性更加明显. 因此, 研究利用材料非线性所表现出的超声特征, 对其损伤进行探测和量化的表征, 无疑具有重要的理论意义, 对在役结构材料的量化评估也具有较高的实用价值.

本文从材料细观损伤力学角度出发, 以波动理论为基础, 通过混凝土材料损伤后表现出的非线性超声特征, 对材料裂纹的出现、发展进行表征, 从而实现了对混凝土材料初始损伤的探测和累计损伤的定量评估. 主要的工作和成果如下:

总结提出了基于相对非线性系数的超声高阶谐波和超声调制两种方法. 即利用基频谐波幅值平方和二阶谐波幅值的比值作为相对非线性系数; 和在两个谐波输入情况下, 利用非线性超声旁频幅值和两个谐波输入幅值积比值的作为相对非线性调制参数, 表征材料内部结构改变的信息. 两者可以作为相互印证的印证.

探讨了裂缝合产生的非线性超声调制机理, 采用弹簧模型模拟裂缝裂隙上的力学行为, 提出了针对开裂材料的非线性超声调制方法. 指出了裂缝在多个位移场下产生的非线性超声高阶谐波和超声调制特征, 与按照经典非线性理论所得到的结果相似.

提出了改进的非线性超声调制测试方法. 该方法利用材料非线性超声特性所产生的旁频能量代替旁频幅值, 作为描述材料非线性程度的定量指标. 采用基于相对非线性超声调制幅值的方法, 消除了由于混凝土衰减等不利因素的影响, 使得测试方法更为实用. 并设计了一种非线性超声调制测试方案. 总结了非线性超声数值信号处理的关键技术.

对在碱骨料反应下混凝土试件的累积损伤进行了跟踪试验研究, 首次通过非线性超声特征定量观测到了碱骨料反应下试件从初始微裂出现、发展和连通等不同阶段的全过程损伤演化的过程. 表明本文提出的非线性高阶谐波方法和非线性超声调制方法均能表征材料内部裂缝的产生和发展的演变过程, 且对裂缝的产生十分敏感. 证明所提出的方法和测试技术是十分有效的, 为利用非线性超声方法检测材料的损伤程度奠定了基础.

最后探讨了材料非线性系数与损伤变量之间的内在联系. 利用材料退化后表现出的非线性超声特性, 定量表征材料的损伤程度, 为损伤评估建立起了一条较为合理的路线. 探讨了利用混凝土弹性参数反演其强度的可行性, 初步推导了混凝土强度退化与非线性系数变化的关系式.

## 7. 期刊论文 [欧阳利军, 余江滔, 张克纯, OuYang Li-jun, Yu Jiang-tao, Zhang Ke-chun 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点承载力计算分析](#) - [工程抗震与加固改造](#)2009, 31 (6)

对5个不同损伤程度的框架节点采用玄武岩纤维加固后进行低周反复荷载试验. 考虑混凝土框架节点受损修复后初始损伤的影响, 提出构件修复后混凝土承载力折减系数; 基于现行设计规范, 建立玄武岩纤维加固混凝土框架节点考虑构件初始损伤的承载力计算公式, 为震损混凝土构件的加固设计提供参考.

## 8. 期刊论文 [邓爱民, 徐道远, 符晓陵, 朱为玄, 王向东 混凝土单轴拉伸损伤试验研究](#) - [合肥工业大学学报\(自然科学版\)](#)2003, 26 (1)

在几组混凝土试件中, 采用掺入不同量的引气剂的试验方法, 人为地制造随机的细微空隙, 以模拟不同程度的损伤. 通过测定几组不同损伤程度混凝土试件的弹性模量和绘制试件受力变形曲线, 计算了单轴拉伸情形下的初始损伤和峰值应力所对应的损伤. 与别人所做的压缩损伤试验比较, 探讨了混凝土材料拉伸与压缩时损伤的区别及相同应变水平下拉伸损伤与压缩损伤的关系, 并利用指数函数损伤模型推算了混凝土临界损伤.

## 9. 会议论文 [于广明, 潘永战, 王国艳 岩石、混凝土损伤协同特征研究](#) 2009

岩石、混凝土的力学性能在很大程度上取决于初始损伤. 现有的损伤力学研究观点和理论都是基于某种假定 (或简化) 对岩石、混凝土损伤演化进行研究, 很难从本质上对混凝土损伤演化过程进行描述. 本文尝试从系统的观点出发, 采用热力学和协同学的基本理论和方法研究岩石、混凝土受载条件下的损伤演化问题. 应用协同学的绝热消去法得到了岩石、混凝土材料考虑初始损伤条件下的非线性力学模型, 研究岩石、混凝土破坏过程中的相变问题, 并加以深入分析, 获得了岩石、混凝土材料受载破坏过程中裂纹的平均取向规律, 揭示了岩石、混凝土破坏过程中的声发射现象和体征规律, 并应用数值模拟验证了理论分析的正确性. 初步建立了岩石、混凝土协同破坏理论框架. 通过研究, 有望得到岩石、混凝土损伤演化过程、本构关系等更本质的描述, 为进一步研究岩石、混凝土损伤演化问题指明了方向.

## 10. 期刊论文 [梁斌, 陈忠富, 陈小伟, 卢永刚, LIANG Bin, CHEN Zhong-fu, CHEN Xiao-wei, LU Yong-gang 混凝土初始损伤对爆炸压碎区尺寸影响分析](#) - [弹箭与制导学报](#)2007, 27 (2)

文中在对已有经验公式分析的基础上, 考虑钻孔或侵蚀对炮孔产生损伤的影响, 引入一个无量纲的参数, 提出预估混凝土介质中爆炸压碎区半径的经验公式, 通过文献实验对经验公式参数进行拟合, 并由文献提供的全尺寸实验对提出的公式进行验证, 分析比较表明, 文中提出的公式预估与实验符合较好.

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_ingcjsdxxb200904019.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ingcjsdxxb200904019.aspx)

下载时间: 2010年5月31日