

岩石、混凝土损伤协同特征研究

于广明¹ 潘永战^{2,1} 王国艳^{1,3}

1. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛, 266033; 2. 河南科技大学建筑工程学院, 洛阳, 471003;

3. 辽宁工程技术大学力学与工程科学系, 阜新, 123000

摘要: 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、混凝土卸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、混凝土材料卸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。

关键词: 岩石 混凝土 初始损伤 协同演化

1 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。似乎可以认为, 它与湍流并列, 堪称力学中最复杂、最困难的两大难题, 也是非线性科学中两个重要范例。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

量的由于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。

对于岩石材料, 在我们所研究的荷载施加之前, 在岩石内部也大量存在具有一定方向、宽度、间距和迹长的随机分布的不连续结构面。这些材料初始缺陷不仅在荷载作用下进一步扩展, 而且对岩石、混凝土材料破坏起着关键性的控制作用。

基于岩石、混凝土材料破坏的以上特征, 外界条件的复杂性, 以及岩石、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^[1-2]。传统的观点将混凝土卸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。从本质上来说, 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, 从岩石、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。

2 基于协同学绝热消去法的材料非连续性力学模型

如前所述,在进行岩石、混凝土受力分析时,可以将其分成由众多子系统组成的一个大系统,而子系统的划分可以以岩石中的结构面或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。

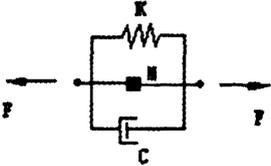


图 1 力学模型示意图

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:

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

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

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

$$\varepsilon(t) = -\frac{K}{2CK_0}(t^2 - t_0^2) + \frac{1}{CX_0}\int_0^t f(t)dt + \frac{W(t)}{CX_0} \quad (4)$$

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

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;

岩体的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;

岩体材料的应变也与岩体的阻尼有关;

在其他条件不发生改变时,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。

3 岩石、混凝土材料损伤演化的相变分析

在加载过程中,在一些点上,岩石、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,类比到岩石、混凝土材料系统中来^[9]。为了直观地描述岩石、混凝土材料受载破坏过程,我们选取在单轴加载条件下,岩石、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(方向取坐标系正方向)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^[10-11]

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

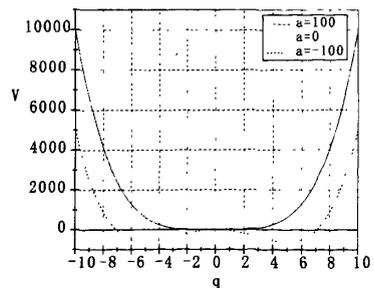


图 2 $\beta = 1$ 时的势函数曲线

上述过程在岩石、混凝土材料损伤演化过程中相应的描述如下:

在岩石、混凝土材料尚未加载时,由名义应力决定的 α 是一个非负值。随着荷载由零逐渐增加(或减小),名义应力 σ 也发生改变,导致 α 的值逐渐减小,

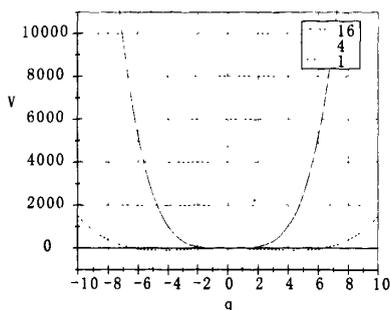


图3 $\alpha = -20$ 时的势函数曲线

但只要保证 $\alpha > 0, q = 0$ 就是系统的稳定平衡点;

当 α 的值减小到零时,系统在平衡点达到一种随遇平衡状态,此时即为岩石、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

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

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。

4 岩石、混凝土材料声发射现象的协同效应

4.1 岩石、混凝土材料声发射的协同学研究

材料的声发射信号绝大多数产生自微裂纹的开裂和扩展。声发射现象与岩石、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,间接上也表明了岩石、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_0 为序参量,通过已知的大事件计数率与事件计数率 N 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^[12]:

$$N_0(t) = \frac{N_0(0)}{1 - N_0(0)nt} \quad (7)$$

其中 $N_0(0)$ 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。对于岩石、混凝土材料系统来说,这是由于大的断裂事件的频繁发生,造成了岩石、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 $N_0(0)nt$ 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,

$$N_0(t) = \frac{1}{k_1 + k_2 e^{-mt}} \quad (8)$$

其中 k_1, k_2, m 为与受载状态和材料性质有关的参数。当 $m > 0$, 岩石、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。

上述岩石、混凝土材料的声发射率变化规律统一解释为这样的过程:在岩石、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,岩石、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岩石、混凝土材料声发射事件计数率剧增,在宏观上表现为岩石、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,岩石、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,岩石、混凝土材料声发射事件计数率也相应的有一个下降的过程。随着荷载的增加,又开始新一轮的上述过程。所以说,岩石、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,在岩石、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。

4.2 岩石、混凝土材料声发射规律的数值模拟

应用东北大学岩石破裂失稳中心研发的 RF-PA^{2D} 软件对岩石、混凝土在单压条件下的破坏过程进行了模拟。图4为混凝土破坏全过程声发射率曲线。在此图中,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他加载步的值。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岩石、混凝土破坏过程中的声发射规律是正确的。

5 岩石、混凝土材料损伤演化的热弹性不稳定性分析

从协同学观点出发,考虑热力学参量(温度、自

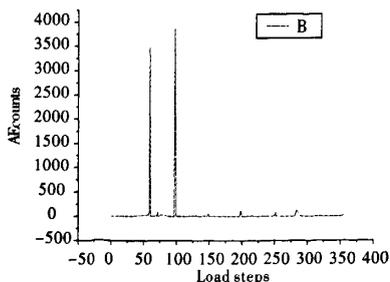


图4 材料声发射全过程曲线

由能和熵等)在混凝土损伤演化中的作用,综合力学参量和热力学参量,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 ε ,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 、熵流密度 q/T 、黏滞系数 η 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^[12];

$$\begin{aligned} \varphi\left(k, \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial t}, \varepsilon_\alpha\right) &= \left(\frac{K\eta}{EC_v}\right)\left(\frac{K}{C_v} + \frac{\eta}{\rho}\right)k^4 \\ &+ \left[\left(c + \alpha\gamma T_0 AB\right)\left(\frac{K}{C_v} + \frac{\eta}{\rho}\right) - \frac{CE}{C_v}\right]k^2 - \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon} \Big|_0 T_0 \alpha B \\ \frac{\partial \varepsilon_\alpha}{\partial t} &> 0 \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知,岩石、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)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,这与在受载试验中岩石、混凝土等脆性材料所表现出来的动力效应是一致的。

6 结语

岩石、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岩石、混凝土受载条件下的损伤演化问题。得到了岩石、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,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 Synergetics. 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] H. Haken. Synergetics, An Introduction [M]. Springer Series Synergetics (3rd edition), 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 [硕士学位论文] [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2006
- [9] 21E. 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 [硕士学位论文] [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2005