

固体破坏的损伤演化诱致突变现象^{*}

夏蒙梵

(北京大学物理系,北京 100871)

柯孚久

(北京航空航天大学物理系,北京 100083)

白以龙

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘要 固体破坏问题在理论上及实际上均极为重要,是涉及力学、物理学及非线性科学等学科的一个十分复杂的基本问题.文章介绍了基于细观非线性动力学模型的研究所取得的进展.发现系统显示一种共性特征,称为演化诱致突变,即演化模式从整体稳定向灾变性模式转变,宏观破坏的样本个性行为,以及宏观性质对细观无序性的敏感性.

关键词 损伤与破坏,细观非线性动力学模型,演化诱致突变

Abstract Failure in solids is a problem of scientific and technological importance and is a complex and fundamental problem dealing with a wide range of disciplines including mechanics, physics and nonlinear science. This paper reviews the progress in studies of mesoscopic nonlinear dynamical models. It is found that these systems show universal characteristics, known as evolution induced catastrophe, which involve the conversion of globally stable evolution modes to catastrophic modes, the sample-specific behavior of macroscopic failure, and the sensitivity of macroscopic properties to mesoscopic disorder.

Key words damage and failure, mesoscopic nonlinear dynamic model, evolution induced catastrophe

1 固体破坏问题:对物理学的挑战

固体材料在使用过程中的损伤、破坏是一个重大的理论问题,又是大量经济损失和灾难性事故的根源,古今中外概莫能外.

2000多年前,中国有个哲学家韩非曾写过这样的话:“千丈之堤,以蝼蚁之穴溃”.他已注意到,区区蝼蚁之穴对大堤造成的损伤竟能使这个庞然大物崩溃.

1988年春,美国一家航空公司的一架波音737飞机在夏威夷群岛上空约7.2km的高空飞行时,机身及顶部一段约6m长的外壳突然脱落,使飞机陷入危险境地,后来终于成功着陆,故事影片“Miracle Landing”(“九霄惊魂”)即以

此事为背景.事后查明,事故起因于几条小裂纹,每条裂纹均在承载容限以内,它们却通过相互作用而演化为严重的事故.西方国家的统计表明,由于固体材料的各类损伤破坏所造成的损失,每年约占国民生产总值的10%.因此,人们不难相信,固体的损伤、破坏是一类普遍存在而又关系重大的现象.在现代科学中,固体破坏是固体力学和固体物理的基本问题之一,虽然从伽里略开始已进行了数百年的广泛研究,取得不少进展,但从总体上讲,其中大多数基本问

^{*} 国家自然科学基金、攀登计划“非线性科学”基金及航空科学基金资助项目

1996年3月20日收到初稿,1996年5月10日修回

题仍未找到令人满意的答案,以致人们将它归入“连基本概念也还不十分清楚的问题”^[1]。似乎可以把固体破坏与流体湍流并列为力学中最复杂的两大难题,已有的研究途径,如经典强度理论、断裂力学等,在处理损伤、破坏问题时遇到了困难。

固体的理论强度可用如下方式估算:设一个原子对其晶格点阵平衡位置的偏离为 x ($x \ll b$, b 为原子间距) 时,它所受的力可近似用 Hooke 定律表示,即

$$= \max \sin\left(\frac{2x}{b}\right) \sim \max \frac{2x}{b} \sim E \frac{x}{b},$$

由此得到 $\max \sim E/2 \sim 10^{-1} E$ 。但是,金属的强度通常只有 $\sim 10^{-4} E$,与理论值相差甚远。

若用断裂力学的概念来估算材料强度,则有

$$c \sim \sqrt{\frac{E}{a}} \sim \sqrt{\frac{E \times 0.01 Eb}{a}} \sim \frac{E}{10} \sqrt{\frac{b}{a}},$$

式中 σ_c 是表面能,可由势函数估算,约为 $0.01 Eb$, a 为裂纹尺寸,当 $a \sim 10^6 b$ 为 mm 量级时, $c \sim 10^{-4} E$ 。但实验表明,样品内所含裂纹小于该尺寸时,仍会出现低应力水平的断裂。

固体破坏是一类十分复杂的现象,其复杂性与它的下列特点有密切关系:

(1) 损伤、破坏问题所考察的系统,特别是具有外力作用的情形,通常处于远离平衡的条件下,包含互相耦合的多种非线性过程。

(2) 损伤、破坏现象涉及从微观到宏观各种尺度的过程,特别是在介于微观与宏观之间的所谓细观层次上有丰富的现象,它们在损伤、破坏问题中起关键性作用。

(3) 绝大多数固体材料内存在不同尺度、不同类型的复杂微结构并呈现无序分布。固体破坏过程与这些无序微结构的集体效应有密切关系,而且在一定条件下对其细节极为敏感。

固体破坏现象的这些特点具有相当浓厚的“物理学”色彩。已有的力学方法难以全面反映

这些特点。历史上,力学是物理学的第一章并进而独立出来,现在又要重新回归到物理学中去吗?简单的回归显然不能解决问题,简单地套用传统物理学方法不能解决固体破坏问题。这个问题至少包括以下几点:

(1) 固体破坏作为远离平衡的现象,微观的原子分子层次与宏观层次之间没有简单的直接联系。直接基于微观描写的传统统计物理学用来处理固体破坏问题,至少在现阶段还是很困难的。如何处理丰富的细观现象的集体效应,在统计物理学中并没有现成的方法可以直接套用。

(2) 固体破坏是复杂的非线性演化过程,而传统物理学在处理非线性问题时常令人颇感棘手。近年来,非线性科学的发展是一股巨大的推动力。但是,固体破坏问题看来难于归入非线性科学中研究较为透彻的类型,如混沌等,因此,似乎不是现有的物理理论和非线性理论能够解决的。

(3) 物理学擅长处理无序性,但面对固体破坏现象中与无序性有关的效应却远非得心应手。这是由于在固体破坏现象中,起作用的是无序微结构的复杂的集体效应,而且它们经历复杂的非线性演化过程。

这样看来,固体破坏问题不仅是力学中的一大难题,而且也是对物理学的一场新的挑战。Prigogine(1977年诺贝尔化学奖得主)认为,把材料的破坏与远离平衡条件下的非线性动力学联系起来,可能会成为材料科学领域内的一个重要的突破点。de Gennes(1992年诺贝尔物理学奖获得者)认为,无序与断裂问题的研究可能成为物理学与力学的新结合点。近年来,出现了一系列探索性工作,试图把力学、材料科学与物理学、非线性科学结合起来,处理固体损伤、破坏问题^[1,2]。这是一种很值得注意的动向。无论在力学领域还是物理学领域,都应关心这方面的进展。有迹象表明,发展关于固体损伤、破坏的非平衡非线性统计演化理论可能是一种有希望的途径,其中一个重要环节是基于“细观模型”的统计演化理论。

2 细观模型:探索共性

上面已经提到,固体破坏通常是远离平衡的现象,微观层次与宏观层次之间没有简单的直接联系,而丰富的细观现象则起关键作用.一种看来比较可行的方案是把固体破坏的统计演化理论分解为从微观到细观的统计理论和从细观到宏观的统计理论.

近来出现的很多有关固体破坏的理论工作是以细观模型为基础的,即把材料的细观单元或细观尺度的微裂纹、微孔洞等作为构成系统的单元.从微观角度考察,这些细观尺度的单元实际上仍是自由度非常大的系统,但作为动力学系统的单元或统计描述的单元,只可能赋予少数几个变量,以反映最必要的基本信息.这就使得细观模型在很大程度上是一种抽象模型,而且可有各式各样的类型.由于细观模型的这种特点,重要的问题应是那些与模型细节关系不大的带共性的行为特征.这些共性特征可能反映了固体破坏现象中有本质意义的东西,并且可为进一步构造更加符合实际的模型提供一个出发点.

细观模型通常采用由细观单元构成的点阵或网络.如令一个单元有完好和损坏两种可能的状态,便可描写系统内的微损伤;系统内全部单元被破坏,或损坏单元构成的集团贯穿整个样本,则被视为宏观破坏状态.在细观模型中,以很自然的方式引入细观无序性,例如,按某种给定的统计分布函数无规地赋予每个单元不同的强度或弹性模量等.

细观模型一般是复杂的非线性系统.目前能进行的解析研究是很有限的.大量的工作是进行计算机模拟,通常需耗费相当多的机时.模拟计算一般是在给定外载的条件下,交替进行下述两个步骤:按一定的规则对相应位形确定控制场(如应变场或应力场);按一定规则由控制场和单元的性质决定损伤的发展.由于损伤发展会导致控制场改变,因而上述两个步骤需反复交替进行.最终系统将演化为一个不变的

状态或完全破坏状态,对前一种情形可改变外载条件继续模拟,直至完全破坏为止.

确定控制场的规则可采用不同的模型.最简单的是作平均场近似,可以得到一些带共性的规律如标度律等,但不能反映一些最重要的非线性行为.有一类工作以远离平衡的生长模型研究网络中损伤的发展,确定控制场的规则,相当于在给定外边界条件和移动内边界条件下,强性介质应力场弛豫到平衡.对较大的系统,这需耗费相当多的机时.为了对由大量系统组成的系综进行统计分析,还引入了一些既能反映主要的非线性特征,又能比较快捷地确定控制场的规则,从而推动了关于共性行为统计规律的研究.

确定损伤发展的规则也有不同的模型.一类是确定性的动力学模型,例如,控制场确定以后,令超过破坏阈值最多的单元损坏,或令一切超过阈值的单元同时损坏.在这种模型中,所处理的是一种确定性的非线性动力系统,无序性在初始给定以后不再变化,是一种“冻结的”无序性.另一类是随机演化模型,由控制场和单元的性质,按某种概率函数随机地确定将被破坏的单元.还有一类模型是考虑确定性动力学过程与随机过程并存的系统,可以更好地反映实际系统的一些重要特征.

从各种细观模型模拟固体损伤、破坏的结果,可以看到固体破坏有一类重要的共性行为,它们被概括为“固体破坏的损伤演化诱致突变现象”,这主要发生在脆性介质中.

3 从损伤到破坏:演化诱致突变

由生长模型模拟的应力-应变曲线有相似的特征,典型结果如图1所示,这是包含单元强度无序性的二维网络的应力(F)-应变(ϵ)曲线, L 是网络的尺度.基于平均场近似,可给出一条遵从标度律的曲线,图中用 ϵ_c 标出.图1表明,从损伤演化转变为整体破坏有突变性特征.在低损伤区,基本上遵从标度律,只有微弱的涨落.随着损伤的发展,涨落逐渐增强,接近

物理

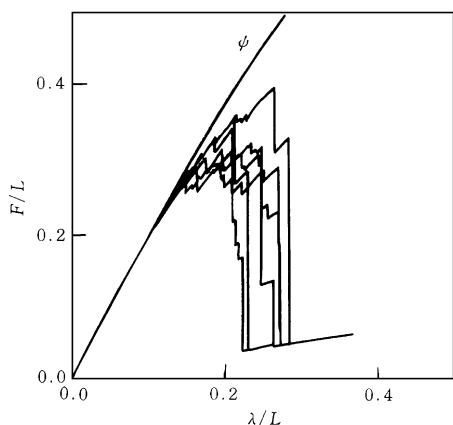


图1 二维生长模型的应力(F) - 应变(λ)曲线
(标有 ψ 的是标度律曲线, $L = 20, 40, 80$)

整体破坏时,不同样本可呈现显著差异.

图2是确定性过程与随机过程并存的二维系统的模拟结果,控制场采用非局域平均场模型,一方面反映了微损伤引起的应力涨落效应,另一方面又根据不同的局部位形在不同区域对应力场作不同尺度的平均.每幅图所标的数字相应于模拟的“步数”,反映了损伤、破坏的演化过程.可以看出,从损伤演化转变为整体破坏同样呈现突变性特征.

一大类细观模型的模拟结果均显示一种重要的共性特征,即固体的破坏过程表现为从整体稳定条件下的损伤演化转变为突发性的灾变.这称为固体破坏的演化诱致突变现象.可以把系统的演化区分为两种模式:整体稳定模式(GS模——globally stable modes)和演化诱致突变模式(EIC模——evolution induced catastrophic modes).固体的破坏可归结为从GS模转变为EIC模.这种现象有如一则寓言所描述的:一根稻草压垮一头牛,放最后一根稻草之前牛还是整体稳定的,最后一根稻草引发了级联后果,把牛压垮.固体破坏过程的这种图像已在一些实验观测中得到印证.

在细观尺度上考察损伤、破坏的演化过程,发现在低损伤区、控制场大体上是均匀的,平均场近似基本适用,系统的演化主要表现为微损

伤的随机发展.在接近于宏观破坏的高损伤区,控制场出现明显的涨落,有局部化倾向,微损伤发展的相关性逐渐增强,当由GS模转变为EIC模时,出现从小尺度到大尺度的级联破坏过程,最终导致突发性的宏观破坏.演化诱致突变现象是在与控制场耦合下微损伤集体相互作用和非线性演化的结果.由图1可以看出,它的一个重要特征是不同的样本的行为呈现强烈涨落,这称为样本个性行为.

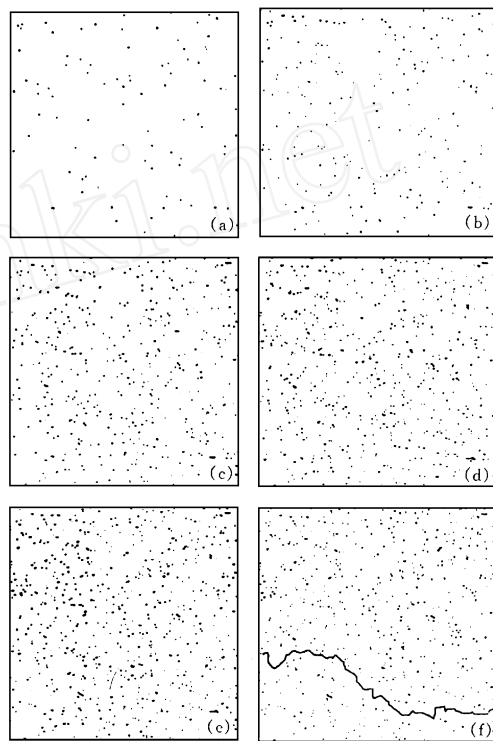


图2 二维非局域平均场模型,
确定性动力学过程与随机过程并存

(a) 100; (b) 300; (c) 500; (d) 700; (e) 831; (f) 832

4 样本个性行为:宏观破坏现象的统计描述

为了研究细观现象与宏观行为之间的联系,在细观模型中可分别定义系统的细观描写和宏观描写.例如,为了研究随机微损伤对宏观行为的影响,可引入损伤斑图(pattern)作为细观描写,它标明了每个细观单元的状态:完好或

损坏;而损伤分数 p ,即系统内损坏单元所占的比例,则可作为对损伤的宏观描写, p 值相同的系统被视为宏观上相同的样本.又如,标明每个单元强度的斑图给出了样本性质的细观描写,而单元强度无规分布的统计分布函数则应归之于一种宏观描写,即单元强度遵从相同统计分布函数的一组样本被看作是宏观上相同的样本.以下所考察的样本系综均由宏观上相同、但有细观差异的样本组成.

细观模型模拟结果表明,宏观上相同的和因有细观无序性而在细观上有差异的样本,其宏观破坏行为可表现出显著差异,例如,宏观破坏强度、宏观破坏时的临界损伤分数等对这些样本可取不同的值.这种现象称为固体破坏的样本个性行为.

宏观破坏的样本个性行为,意味着宏观变量不能完全确定宏观破坏行为,描写宏观破坏的物理量(破坏强度、临界损伤分数等)在宏观层次上不再是确定性的变量,而是一些随机变量.换言之,在宏观层次上,不可能对宏观破坏行为作确定性的预言,只可能作概率性预言,必需引入统计描述.

这里,用一个简单的例子说明这种统计描述.考虑 N 个单元构成的周期性一维链,这相当一组平行的周期排列的纤维组成的样品.假定单元的强度均为 c ,系统内包含损伤分数为 p 的初始随机损伤,研究在名义应力 σ_0 作用下系统的演化.

模拟结果发现,“宏观变量” p 与 σ_0 不能完全确定系统的宏观行为.假定损伤分数为 p 的一切可能的损伤斑图均有相同的概率,便可定出系统的破坏概率(即 EIC 模出现概率) $\Phi(p, \sigma_0)$.图 3 是典型的 $\Phi-p$ 曲线,其中 $\sigma_0 = \sqrt{2}$, $N = 10, 20, 30$.可以看到,在高度损伤区($p \sim 1$), $\Phi = 1$,即所有样本无区别地全部破坏;在轻微损伤区($p \ll 1$), $\Phi = 0$,所有样本都不会破坏.在这两个区,宏观行为是比较确定的.一个值得注意的特点是,在中度损伤区, p 与 σ_0 不能完全确定系统的宏观行为.这个 $0 < p < 1$ 的区 $p_L < p < p_U$ 称为过渡区,是 GS 与 EIC 两种

演化模式共存区域.可以证明,在热力学极限下, $p_L \rightarrow 0$ 而 $p_U \rightarrow 1 - \sigma_0/c$.这个结果与平衡相变的预言很不相同.由等效逾渗理论可给出一个确定的临界点 $p_0 = 1 - \sigma_0/c$ (由平均场近似也得到这个结果).这说明演化诱致突变现象不能归之为平衡相变.

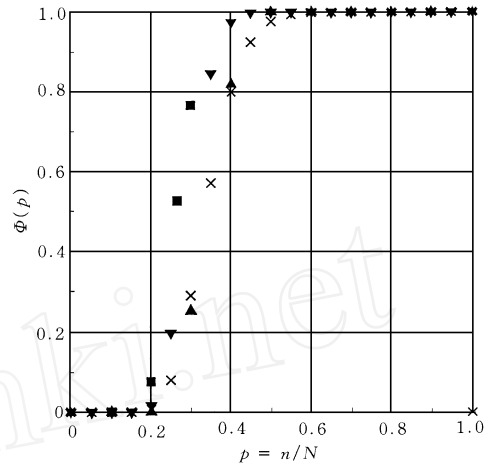


图 3 一维链破坏概率 $\Phi-p$ 曲线
($\sigma_0 = \sqrt{2}$; $\square: N=10$; $\blacktriangledown: N=20$; $\times: N=30$)

细观模型模拟的结果,显示系统在细观层次和宏观层次有相反的行为倾向.在低损伤区,损伤的发展在细观上是随机的,在宏观上其行为则是相当确定的.从中度损伤区演化至接近宏观破坏的情形,细观上损伤发展的相关性越来越强,而宏观行为却越来越不确定.

固体损伤、破坏的细观模型在细观层次和宏观层次所表现出的相反行为倾向都是与细观无序性密切相关的.在低损伤区,微损伤的随机发展是细观无序性的直接结果,在平均场近似下,这种无序性只导致样本宏观行为的微小涨落.中度损伤区演化至破坏时,细观上损伤发展的相关性及其样本宏观行为的强烈涨落并非与细观无序性无关,也不是初始细观无序性的简单表现,而是在非线性演化过程中,细观无序性的效应被强烈放大的结果.这使得无序性效应不仅表现在细观层次,而且在宏观层次也有显著反映,这表明,固体宏观破坏的样本个性行为反

映了系统宏观行为对细观无序性的敏感性。

5 非线性演化:跨越宏观和细观两个层次的敏感性

细观无序性本身是属于细观层次的现象,对于初始宏观条件相同的一组样本,细观无序性引起的样本间的差异在初始宏观行为中并无反映.固体破坏的样本个性行为表明,当系统演化到接近宏观破坏时,细观无序性引起的细观差异发展为显著的宏观差异.这是系统宏观行为对细观细节的敏感性,是一种跨越宏观和细观两个层次的敏感性.

这里,仍以周期性一维链为例考察这种敏感性.定义“近邻对”为初始时刻宏观上相同、细

观上只有最小差异的一对样本,即初始损伤分数均为 p ,损伤斑图中只有一对相邻的完好-损坏单元交换位置而其余单元状态均相同的一对样本.令近邻对演化终态的损伤分数之差为 p' ,其可能的取值范围为 $0 < |p'| < 1 - p$.研究初始损伤分数为 p 的一切近邻对,并统计不同的终态差异 $|p'|/(1-p)$ 的出现概率,其典型结果如图 4 所示 ($N = 20, \sigma_0 = \sqrt{2}$).图 4 表明,在初始损伤较低 (p 小) 或较高 (p 大) 的区域,概率分布集中在 $p' \sim 0$ 附近,近邻对呈现相同的宏观行为.但是,对于有中度初始损伤的近邻对,终态有极端差异 $|p'|/(1-p) \sim 1$ 的事件有不可忽略的概率.图 4 所示的概率分布给出了对敏感性的一种度量.

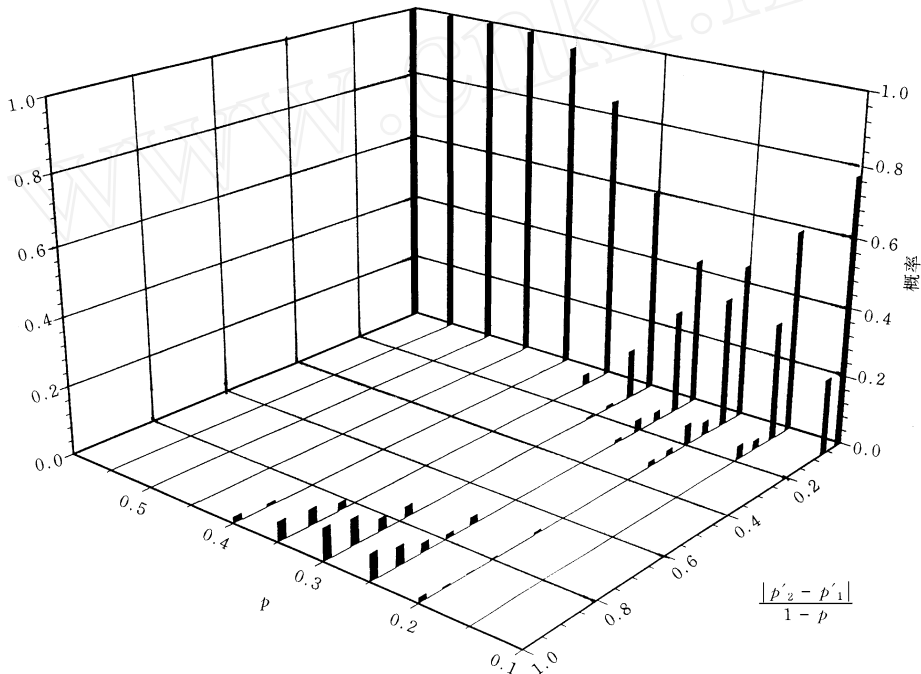


图 4 近邻对不同终态差异的出现概率 ($N = 20, \sigma_0 = \sqrt{2}$)

图 5 是近邻对有极端终态差异 $|p'|/(1-p) = 1$ 的概率随名义应力 σ_0 的变化,图中 $L_c = \sigma_0 / (\sigma_c - \sigma_0)$, $N = 20, p = 0.3$.图 5 表明,在中等应力区,宏观行为对细观细节有明显的敏感性,而在低应力和高应力区,这种敏感性消失.

在非线性的系统中,敏感性的出现有实质性的意义,最著名的当属混沌现象中的初值敏感性.本文所介绍的固体宏观破坏行为对细观无序性的敏感性是固体细观模型非线性特征的重要表现之一,它与混沌现象中的初值敏感性有

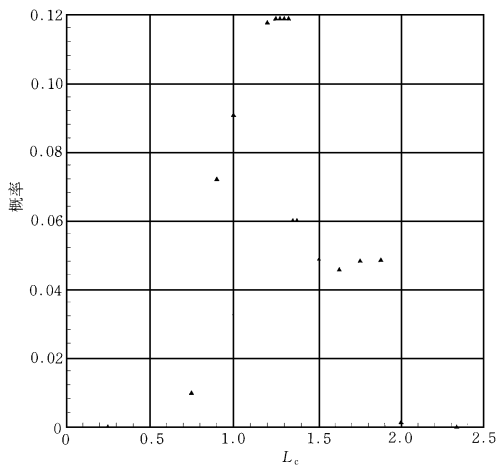


图5 近邻对终态差异为 $|p|/(1-p) = 1$ 的概率随 $L_c = \sigma' / (\sigma_c - \sigma_0)$ 的变化 ($N = 20, p = 0.3$)

所不同,是一种跨越宏观和细观两个层次的敏感性.在相空间中,可划分为敏感区和不敏感区,它们是随着名义应力 σ_0 的变化而移动的.

固体破坏现象中跨越宏观和细观两个层次的敏感性是系统非线性演化的结果.宏观上相

同但有微小的细观差异的样本,在非线性演化过程中,其差异可被强烈放大,最终表现为显著的宏观差异.

6 结语

固体破坏问题在理论上和实际上均极为重要,当前它是多种学科交叉的课题,并处于学科发展的前沿.这是一类十分复杂的问题,发展关于固体损伤、破坏的非平衡非线性统计演化理论,可能是解决固体破坏问题的一种有希望的途径.

脆性介质破坏的一类重要的共性行为是演化诱致突变现象,即从整体稳定模式向灾变性模式的突发性转变、宏观破坏的样本个性行为、以及跨越宏观和细观两个层次的敏感性.

参 考 文 献

- [1] 夏蒙芬、韩闻生、柯孚久等,力学进展,25(1995),1.
- [2] 夏蒙芬、韩闻生、柯孚久等,力学进展,25(1995),145.

形变过程内耗*

孔庆平 周 浩 张 平

(中国科学院固体物理研究所,合肥 230031)

摘 要 形变过程内耗是在范性形变进行过程中测出的内耗.文章介绍了形变过程内耗的测量方法和目前人们对这种内耗的实验规律和微观机制的认识以及它可能提供的关于形变微观过程的知识.

关键词 内耗,形变,位错

Abstract The internal friction associated with deformation is measured simultaneously in the process of plastic deformation. The methods of measurement, the main experimental results, and the microscopic mechanism of this kind of internal friction are reviewed. The possible information deduced from it on the microscopic process of deformation is prospected.

Key words Internal friction, deformation, dislocation

1 引言

内耗是物体作机械振动时由于内部原因所

引起的振动能量的消耗,一般用一个振动周期内消耗的能量 w 与试样振动能 W 之比

* 1996年4月1日收到初稿,1996年6月14日修回