

从“哥伦比亚”号悲剧看多尺度力学问题¹⁾

白以龙 * 汪海英 * 柯孚久 ** 夏蒙禁 *,†

(*中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080)

**(北京航空航天大学应用物理系, 北京 100083) †(北京大学物理系, 北京 100871)



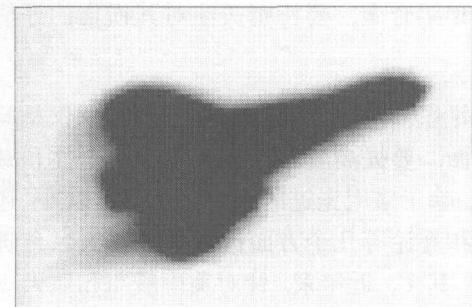
白以龙, 中国科学院力学研究所研究员, 中国科学院院士, 欧洲科学院外籍院士。《中国科学》、《力学进展》等副主编, 《International Journal of Impact Engineering》、《自然科学进展》等编委, IUTAM General Assembly 成员, 中国力学学会第 5 届理事会理事长。在非线性连续介质力学领域, 针对变形局部化问题, 建立了热塑剪切方程, 并得到关于其演化的一系列结论。这些结果被后续工作所证实, 认为是典型模型, 所建立的损伤局部化判据被称为“白判据”。提出了延性极限的不稳定性机理。针对真实材料受冲击载荷产生的大量微损伤, 建立了亚微秒应力脉冲技术和微损伤演化模型, 提出了统计细观力学的理论描述和破坏规律。至今已发表学术论文约百余篇, 英文专著两部。1993 年获国家自然科学二等奖。1999 年获何梁何利科技进步奖。1999 年获周培源力学奖。

摘要 航空航天安全蕴含着大量的涉及多个物理层次的多尺度力学问题。多尺度力学问题对现有的力学概念和理论是一个巨大的挑战。以铝合金层裂和岩石脆性破坏为典型案例, 讨论了多尺度力学问题的特点、难点以及可能的处理方法, 说明合理表征和处理多尺度问题的跨尺度耦合及跨尺度敏感性是解决多尺度问题的关键。

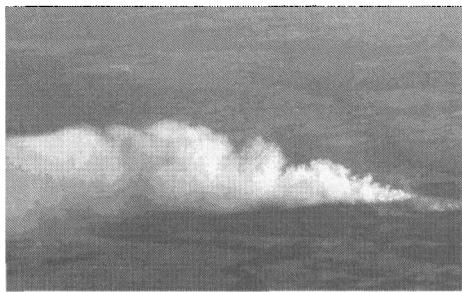
关键词 多尺度力学, 跨尺度耦合, 跨尺度敏感性

1 航空航天安全中所蕴含的多尺度力学问题

2003 年 2 月 1 日, 美国航天飞机“哥伦比亚”号在执行 STS-107 次飞行任务返航时, 在空中解体坠毁。这样的大事故已经不止一次了。1986 年 1 月 28 日, 美国航天飞机“挑战者”号在执行 STS-51-L 次飞行任务时, 起飞后 73 秒在空中爆炸坠毁。“哥伦比亚”号事故调查委员会 (CAIB), 在 2003 年 8 月 26 日发表的最终调查报告中说^[1], 航天飞机“哥伦比亚”号在起飞 82 秒后, 一块泡沫脱落, 击中其左翼, 使其碳隔热保护层受损。这个损伤使得“哥伦比亚”号在再入大气层时, 有超热气体进入翼的结构, 最终导致“哥伦比亚”号解体坠毁 (图 1)。委员会认为, NASA 目前所采用的检查技术, 不足以评价增强碳-碳复合材料 (RCC) 系统元件及其支撑结构和附属硬件的结构整体性。委员会的建议是, NASA 应该采用先进的无损检测技术, 以减轻航天飞机和航天员的危险。飞行器的安全性是航空界, 乃至全社会关注的一个焦点。例如, 在欧洲, 针对空中客车 A380 以后 (2020 年) 的空客系列, 目标是将事故的



(a) 哥伦比亚号最后照片

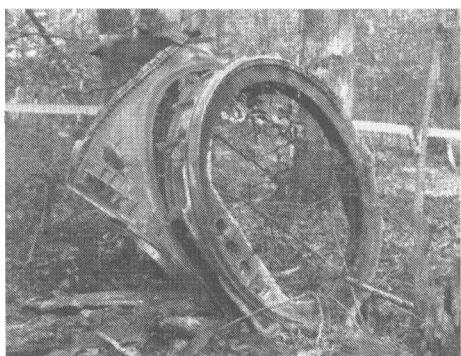


(b) 残片的浓烟

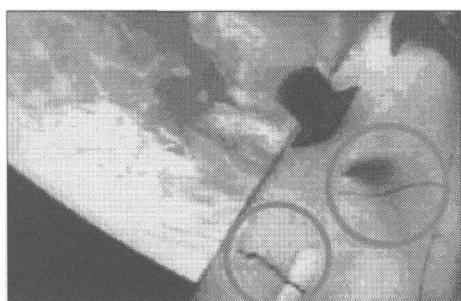
图 1 美国哥伦比亚号航天飞机失事照片

本文于 2005-03-23 收到。

1) 国家科技部“973”计划 (G2000077305) 和国家自然科学基金 (10172084, 10232040, 10232050, 10372012, 10302029, 10472118) 资助。



(c) 空间舱残骸



(d) 左翼上的裂纹

图 1 美国哥伦比亚号航天飞机失事照片 (续)

发生量减少 8 成。因此提出，对于先进复合材料、钛合金和铝合金，要特别关注对其损伤的评估和维修。

事实上，采用先进的无损检测技术仅仅是问题的一个方面。要提高航空和航天器的安全性和减少突发事故，除了采用先进的无损检测技术以外，还需要从技术和理论等几个方面进行系统性的综合研究才能奏效。其实，近年来，针对美国航空和航天飞行中的多起事故，科学家和工程师们已经针对预测和防止机械失效提出了所谓的“预测和健康管理”^[2]。他们认为，一个航空和航天器的安全性是涉及到 6 个层次的系统工程：即材料、元件、器件、子系统、系统和整机。虽然预测和防止机械失效的任务是在整机这一最顶层，但是损伤却是起源于最底层，即材料的微损伤。因此，在“预测和健康管理”这一系统工程中要考虑 5 个相互关联的部分：整机和它包含的 5 个层次 - 传感器系统 - 诊断系统 - 预测算法 - 人机界面。一般来说，传感器系统和人机界面涉及较多的技术问题，而预测算法和诊断涉及更多的力学理论问题。其中，对材料的微损伤，经过在好多个不同尺度的物质和结构层次上的损伤演化，最终导致整体结构的破坏，则是预测算法的核心，这也就是我们所谓的多尺度力学问题。

2 多尺度力学问题的难点和特点

对于多尺度的损伤演化问题的难度，力学家们已经有了较深的感触。正如 McDowell^[3] 所说的，衡量微尺度上非均匀的分布型损伤，对宏观刚度和损伤演化的影响，是个挑战；严格处理这些非均匀的分布型损伤所需要的工具，迄今在连续损伤力学中尚未全面发展起来。这里所涉及的困难，可以用图 2 表示。与气体不同，固体包括了从原子结构，到晶格结构，到晶粒结构，再到宏观材料单元，若干个物理行为大不相同的尺度和层次，而固体的破坏，就恰恰必须跨过这些物质层次，因此破坏现象不可避免地是这些不同层次上的物理规律相互耦合的最终体现。但是，每个层次上的物理规律往往并不相似，还有，他们的特征时间尺度也往往是大不相同的。所以，我们认为多尺度问题的挑战性在于：如何恰当处理在不同物质层次上的，具有不同的特征时间和空间尺度的，不同的物理规律的非线性跨尺度耦合^[4]。这种挑战，使得在连续介质力学中已经充分发展起来的处理不同尺度问题的有效分析方法，例如相似法和小扰动法，失去了威力。

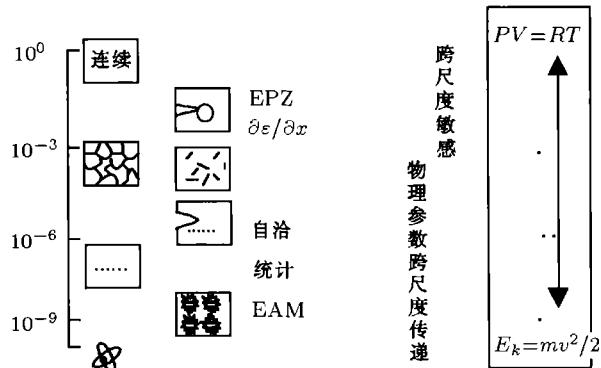


图 2 跨尺度关联的示意图

那么，突破这个瓶颈的研究策略应该是怎么样的呢？Barenblatt^[5] 在 1992 年的世界力学大会闭幕式演说中讲到的思路是一种途径。他认为，第 1，在这类现象的数学模型中，力学的宏观方程要和微结构转变的动力学方程形成统一的方程组 (form a unified set)，第 2，它们应该被联立地求解 (should be solved simultaneously)。所以，这里的困难是双重性的。一方面，应选择恰到好处的微结构转变的表征 (即，不太多，不至于无法处理，又不太少，以免丢掉了会影响宏观大局的关键微结构特征)，并将其与宏观力学方程恰当耦合联立起来，这是一大难题。另一方面，正确解出这个跨尺度耦合的联立方程的

解，又是一个难题。但是，这是必须攻克的难关。虽然这种包含了微结构转变的动力学准连续的理论框架，对于相对均匀的损伤分布是相当有效的，然而，对于突发灾变的预测，这种准连续的理论难以给出及时的预告，必须开辟新的思路和理论途径。

我们从航天器的抗强动载加固问题出发，延伸到大量的类似的损伤演化和破坏的问题，对微损伤的成核、发展、连接，最终导致的材料整体的宏观破坏的现象，从宏观和细观结合的角度，在理论框架、实验验证和预测概念等方面做了一些探索，发现这一类多尺度问题具有一些重要的特点，以下我们将以铝合金层裂和岩石脆性破坏问题作为典型案例，说明多尺度问题的特点，特别是其中反映其物理本质的跨尺度耦合的特征表征。

2.1 铝合金层裂的多尺度分析

平面碰撞产生的拉伸应力波，在材料中形成损伤与失效，又称层裂或崩落，是与由一条宏观裂纹失稳控制的静态断裂极为不同的失效现象。从细观上看，拉伸应力波在层裂现象中，不是造成一条宏观裂纹失稳，而是在材料中形成大量的微空洞或垂直于应力波传播方向的平行微裂纹，这些微空洞或微裂纹成核、扩展、连接，以至最终导致宏观失效^[6]。因此，应力波引起的层裂现象，是一个典型的微损伤累积演化，导致宏观失效的多尺度问题。

从物理上看，在这个应力波引起的微损伤演化最终导致宏观失效的多尺度问题中，蕴涵了3个速率过程：宏观应力波过程，微损伤的成核过程和扩展过程，它们分别有3个不同的特征时间尺度^[7]：

宏观波动特征时间

$$t_i = \frac{L}{a} \quad (1)$$

微损伤成核特征时间

$$t_N = (n_N^* c^{*4})^{-1} \quad (2)$$

微损伤扩展特征时间

$$t_V = \frac{c^*}{V^*} \quad (3)$$

其中， L 是靶板的厚度， a 是弹性波速， n_N^* 是微损伤数密度的成核速率， c^* 是微损伤尺寸， V^* 是微损伤扩展速率。

3个速率过程的特征时间尺度之比，反映了3个速率过程的竞争与耦合。同时，3个速率过程的特征时间尺度之比，构成了反映宏观波动过程与两个微损伤速率过程的跨尺度竞争与耦合的德博拉(Deborah)数

$$De^* = \frac{t_V}{t_i} = \frac{ac^*}{LV^*} \quad (4)$$

和

$$De = \frac{t_N}{t_i} = \frac{a}{Ln_N^* c^{*4}} \quad (5)$$

以及反映两个微损伤速率过程-成核和扩展-相互竞争与耦合的内禀德博拉(Deborah)数

$$D^* = \frac{t_V}{t_N} = \frac{n_N^* c^{*5}}{V^*} \quad (6)$$

但是，两个德博拉数和1个内禀德博拉数，只有两个是独立的，它们之间满足

$$D^* = \frac{De^*}{De} \quad (7)$$

应力波导致的层裂失效问题中的3个速率过程和它们的特征时间尺度，及相关的组合无量纲数汇总在表1中。

我们用数值方法考察了德博拉(Deborah)数 De^* 和 De 对靶板内损伤演化的影响。

表1 应力波导致的层裂失效问题中的3个速率过程和它们的特征时间尺度及相关的组合无量纲数

特征时间尺度			Deborah数代表了3个速率过程的特征时间的相互关系	
宏观外加波动特征时间	微裂纹成核特征时间	微裂纹扩展特征时间	细观/宏观	扩展/成核
$t_i = L/a$	$t_N = (n_N^* c^{*4})^{-1}$	$t_V = c^*/V^*$	$De = \frac{t_N}{t_i} = \frac{a}{Ln_N^* c^{*4}}$ $De^* = \frac{t_V}{t_i} = \frac{ac^*}{LV^*}$	$D^* = \frac{t_V}{t_N} = \frac{n_N^* c^{*5}}{V^*}$

图3表示在其它无量纲数固定的情况下，靶板中的最大损伤随 De 和时间的变化。该变化有两个主要特点：其一是，对于某一确定的 De ，最大损伤随时间的增加而增加，并在拉伸载荷消失后维持在一个不变的最大损伤值。其二是，该最大损伤值随德博拉数的减小而增加。应该注意的是，在这些结果中，德博拉数 De^* 取为恒值0.415；因此，减小的 De ，相当于增加的内禀德博拉数 D^* 。

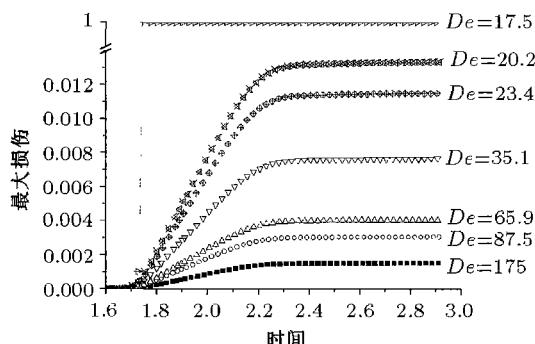


图3 最大损伤随德博拉数 De 和时间的变化

计算参数为 $M = 0.0305, S = 0.167, De^* = 0.415$

注意最大损伤趋于不变的现象

图4表示在其它无量纲数固定的情况下，靶板中的最大损伤随 De^* 和时间的变化。该变化也有两个主要特点：其一是，对于某一确定的 De^* ，最大损伤随时间的增加而增加，这与 De 的影响是类似的。其二是，最大损伤随时间的增加，则呈现两种不同的趋势。对于较大的 De^* 值，最大损伤的增加趋向恒定，这与 De 的影响趋势相似。但是，对于较小的 De^* 值，最大损伤经过一段较平稳的增加后，突然急剧增加，这主要是由于 De^* 较小时，损伤演化很快由微损伤成核占主导作用转成微损伤扩展占主导作用。在这个计算中， De 取为恒值65.9，因此，减小的 De^* ，相当于减小的内禀德博拉数 D^* 。

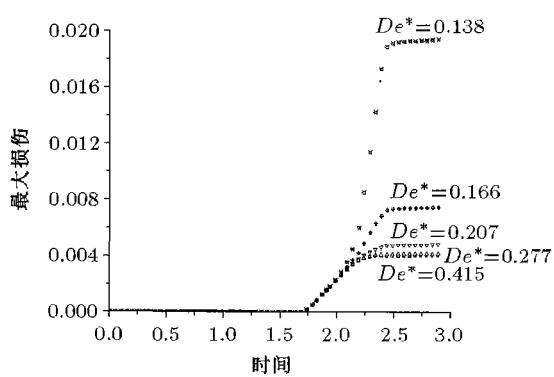


图4 最大损伤随德博拉数 De^* 和时间的变化

计算参数为 $M = 0.0305, S = 0.167, De = 65.9$

这个不稳定的趋势，可以再从损伤的空间分布演化上考察。图5清楚地反映了较小的德博拉数 De^* 控制了损伤局部化的形成。所以，从计算结果直观来看，反映微损伤扩展的德博拉数 De^* 比反映微损伤群体成核的德博拉数 De ，更本质地反映了微损伤演化向宏观失效的转变。

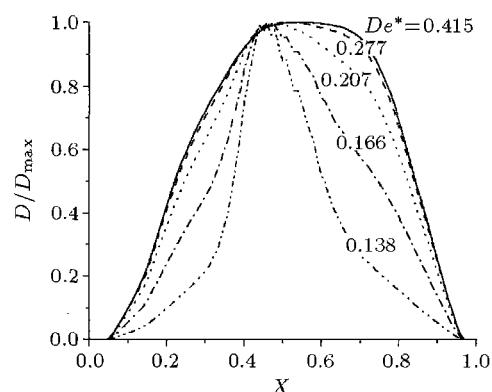


图5 相对损伤的空间分布，随德博拉数 De^* 的变化

计算参数为 $M = 0.0305, S = 0.167, De = 65.9$

注意对于较小的德博拉数 De^* ，相对损伤表现出的局部化形态

从数值计算结果中已经看出，反映跨尺度的宏观波动过程与两个微损伤速率过程竞争与耦合的德博拉(Deborah)数 De^* 和 De 所起的作用是相当不同的。其实，从物理上看，两个德博拉数有本质上的不同。德博拉数 De 反映微损伤群体成核是一个在微观空间近似均匀分布的现象，并且微损伤成核的不均匀性来源于应力场的不均匀性；而德博拉数 De^* 反映的是微损伤个体的失稳性扩展，在这个过程中，微损伤成核的不均匀性被强烈放大。较小的德博拉数 De^* 代表了相对于波动载荷作用时间，微损伤扩展具有较短的特征时间，因此，成核损伤的不均匀性被放大的程度更强，损伤局部化越容易形成。

至此，我们基本清楚了，在平面碰撞产生应力波引起微损伤演化，并最终导致宏观失效的问题，本质上是外加的波动加载过程、微损伤的成核过程和微损伤的扩展过程，3个速率过程相互竞争与耦合的过程；尺度比要与速度比组合，形成特征时间之比才起作用。他们之间的关系，表现为有两个独立的无量纲量。从对损伤演化向宏观失效过渡的刻画上看，德博拉数 De^* 相对于 De 是一个更具特征性的跨尺度耦合效应的表征。

2.2 岩石脆性破坏的分析

岩石是典型的非均匀脆性介质，它的破坏通常经过3个阶段：微损伤的稳定聚集、损伤局部化和灾

变。这类结构或材料的突发灾变的根本性来源，是微结构损伤的跨尺度的强耦合关联，在应力重分布的推动下，自发涌现出了自持的、从小到大的损伤级串 (inverse cascade)，以至最终形成宏观整体的破坏。一些小尺度的无序性细节在损伤演化的非线性动力学过程中可能被强烈放大，导致在大尺度上，甚至对整个系统的显著效应，这是所谓的跨尺度敏感性^[8]。

由于存在跨尺度敏感性，我们面临着双重困难。一方面，它使得平均性质几乎相同的系统的整体破坏行为可能呈现显著差异，即系统的破坏具有样本个性或不确定性，这是破坏预测所面临的主要困难之一。并且，对于触发那个造成最终宏观整体破坏的强耦合关联级串的微结构位形和相应的敏感部位，在级串出现之前，是很难识别出来的，因为这不是一种静态微结构的识别，而是要结合非均匀应力场的演化的微结构演化结局预测的识别。另一方面，对于这种微结构敏感部位所触发的强耦合关联级串，已经很难用准连续近似或者简单的平均方法来处理了。因此，从工程实践对预测突发灾变的要求出发，必须发展新的概念和工具。

从物理本质上讲，多尺度系统中，尤其是在小尺度范围，不可避免地会存在无序性和外界随机因素的影响，从小尺度开始萌生和发展的微损伤与它们有密切关系。由于不可能对各个尺度上的无序结构及其敏感效应作详尽无遗的描述，因此必须求助于一些统计模型，如驱动非线性阈值模型^[9]，来对非均匀脆性介质损伤破坏过程的一些共性特征进行描写。

驱动非线性阈值系统中包含大量非线性相互作用的细观单元，通过对每一个单元赋予1个固定的失效阈值 σ_c 来描述材料的细观非均匀性。在驱动力作用下，当细观单元所承受的应力达到失效阈值时，细观单元失效。假设初始时刻满足强度分布函数 $h(\sigma_c)$ ，对于失效单元不再统计其强度。于是由于细观单元失效，强度分布函数随时间和驱动应力的改变而发生演化。假设 t 时刻的强度分布函数是 $f(\sigma_c, t)$ ，满足初始条件

$$f(\sigma_c, t=0) = h(\sigma_c) \quad (8)$$

$h(\sigma_c)$ 是1个连续函数并且满足归一化条件

$$\int_0^\infty h(\sigma_c) d\sigma_c = 1 \quad (9)$$

$h(\sigma_c)$ 通常采用Weibull分布， $h(\sigma_c) = m \frac{\sigma_c^{m-1}}{\eta^m} \exp\left(-\frac{\sigma_c^m}{\eta^m}\right)$ 。

考察1个准静态单调加载过程，并且采用全局平均场近似，假设失效的细观单元的应力由所有剩下的好单元平均分担

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1-D} \quad (10)$$

其中， $D = D(\sigma_0)$ ，是名义应力为 σ_0 时的平衡损伤分数， D 由如下方程求得

$$D(\sigma_0) = \int_0^{\frac{\sigma_0}{1-D}} h(\sigma_c) d\sigma_c \quad (11)$$

采用驱动非线性阈值模型分析了上述加载过程，发现该模型具有临界敏感性特征，说明如下：定义系统对外界控制变量响应的敏感度为

$$S(\sigma_0) = \frac{\sigma_0}{R(\sigma_0)} \frac{dR(\sigma_0)}{d\sigma_0} \quad (12)$$

其中，取外载 σ_0 为外界控制变量， R 是系统对外载的响应，它可以用能量的释放率来表示

$$R(\sigma_0) = \frac{dQ(\sigma_0)}{d\sigma_0} \quad (13)$$

其中 Q 是损伤导致的累积能量释放率。

图6给出了准静态单调加载时敏感度随名义应力的变化关系。可以看出，在灾变前 S 显著增加，这意味着系统在接近灾变点时变得很敏感，这种行为称为临界敏感性。

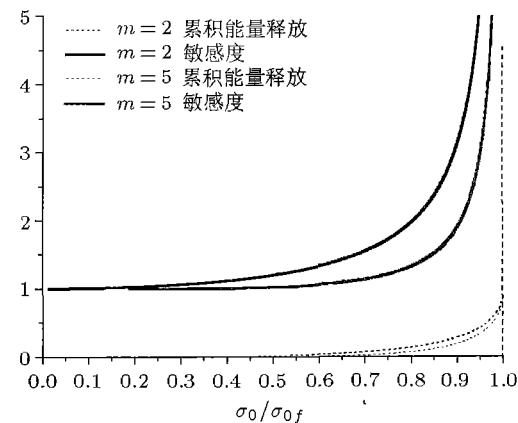


图6 准静态加载过程累积能量释放和敏感度随着名义应力的变化

为了考虑非均匀介质破坏的非平衡演化过程，在驱动阈值模型中引入损伤弛豫模型，我们也观察到类似的现象。图7给出了该过程中累积能量释放和敏感度的变化。可以看出，当系统趋向于灾变点时，敏感度显著升高。但是，与准静态过程不同，

非平衡演化效应使得灾变和临界敏感性的出现被明显推迟，而且，由于非平衡效应的影响，趋向灾变点时，敏感度不一定是单调升高，而可能是升高后下降然后出现灾变。尽管如此，敏感度的显著升高仍然是带有共性的特征。因此，临界敏感性是灾变发生的共同前兆，如果能够检测敏感度的变化，便可能为灾变预测提供线索。

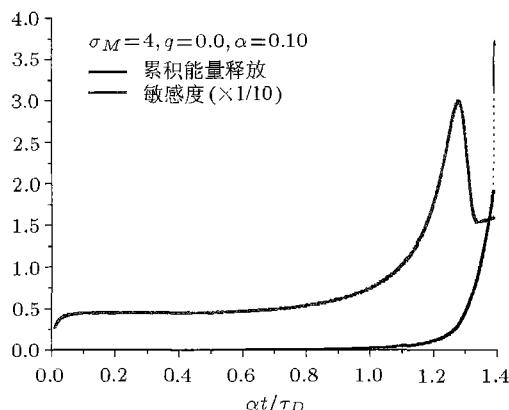


图7 非平衡加载过程中敏感度和累积能量释放随时间的演化

3 结束语

“哥伦比亚”号悲剧，以及许多由在物质的较低层次上发生的微结构转变所触发的强耦合关联级串所最终导致的突发性整体灾变，关键在于它们是多尺度的力学问题。本文讨论了多尺度力学问题的特点、难点以及可能的处理方法，说明合理表征和处理多尺度问题的跨尺度耦合及跨尺度敏感性是解决多尺度问题的关键^[10,11]。这也是对现有的力学概念和理论的一个强有力地挑战，所以，发展新的力学工具和理论，又满足航空和航天器安全性和减少突发事故的要求，是力学家的历史责任。

A VIEW ON MULTI-SCALE MECHANICAL PROBLEMS FROM COLUMBIA TRAGEDY

BAI Yilong* WANG Haiying* KE Fujiu*,** XIA Mengfen*,†

(*LNM, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

(**Department of Applied Physics, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China)

(†Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Many multi-scale mechanical problems concerning multiple physical levels are crucial in aeronautic and astronauic safety. Multi-scale problems are great challenges with respect to current mechanical concepts and theories. In this paper, taking spallation in Al alloy and brittle fracture in rocks as typical examples, we discuss typical features, difficulties and potential solutions to multi-scale problems. It is shown that a reasonable characterization and treatment of the trans-scale coupling and trans-scale sensitivity are keys to the multi-scale problems.

Key words multi-scale mechanics, trans-scale coupling, trans-scale sensitivity

参 考 文 献

- 1 Columbia Accident Investigation Board (CAIB). CAIB'S Final Report. <http://www.caib.us/news/report/default.html>, 2003
- 2 Becker KC, Byington CS, Forbes NA, et al. Predicting and preventing machine failure. *The Industrial Physicist*, 1998, 4(4): 20~23
- 3 McDowell DL. Applications of continuum damage mechanics to fatigue and fracture. *ASTM STP*, 1997, 1315: 1~3
- 4 Bai YL, Wang HY, Xia MF, et al. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales. *Appl Mech Rev*, 2005, in press.
- 5 Barenblatt GI. Micromechanics of fracture. In: Bodner SR, Singer J, Solan A, et al eds. *Theoretical and Applied Mechanics*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers BV, 1992
- 6 Curran DR, Seaman L, Shockley DA. Dynamic failure of solids. *Physics Reports*, 1987, 147: 253~388
- 7 Wang HY, Bai YL, Xia MF, et al. Spallation analysis with a closed trans-scale formulation of damage evolution. *Acta Mechanica Sinica*, 2004, 20: 400~407
- 8 Bai YL, Xia MF, Wei YJ, et al. Non-Equilibrium Evolution of Collective Microdamage and Its Coupling with Mesoscopic Heterogeneities and Stress Fluctuations. In: Horie Y, Davisona L, Thadhani NN, eds. *Shock Dynamics and Non-Equilibrium Mesoscopic Fluctuations in Solids*. New York: Springer-Verlag, 2002. 255~278
- 9 Zhang XH, Xu XH, Xia MF, et al. Critical sensitivity in driven nonlinear threshold systems. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161: 1931~1934
- 10 Wang HY, He GW, Xia MF, et al. Multiscale coupling mechanical systems. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59: 1677~1686
- 11 何国威, 夏蒙芬, 柯孚久等. 多尺度耦合现象: 挑战和机遇. 自然科学进展, 2004, 14(2): 121~124 (He Guowei, Xia Mengfen, Ke Fujiu, et al. Multiscale coupling: challenges and opportunities. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(2): 121~124 (in Chinese))