

# 工程结构损伤的两个重要科学问题 ——分布式损伤和尺度效应\*

白以龙

(华南理工大学, 广东 广州 510640; 中国科学院 力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 工程结构的失效起始于底层, 即从材料中的孤立的空洞成核开始, 形成微裂纹, 发展为宏观裂纹, 直至整个结构破坏, 因此分布式损伤和尺度效应在工程结构损伤问题中显得十分重要. 本文简要介绍了一种处理分布式损伤(微损伤)的方法——“统计细观损伤力学”, 以及基于该方法讨论了分布式损伤的演化规律. 对于跨尺度失效问题的尺寸效应, 通过分析应力波引起的损伤问题(存在 2 个反映尺度效应的 Deborah 数), 指出各类尺度耦合的机理和特征是关键点.

**关键词:** 分布式损伤; 尺度效应; 工程结构

**中图分类号:** O 346 **文献标识码:** A

## 1 分布式损伤和尺度效应在工程结构损伤问题中的重要性

在最近(2002 年 6 月)全美第十四次理论和应用力学大会上, 美国航天局(NASA) Langley 研究中心的 Starnes 所做的“关于美国航天器的材料和结构综合评述”的大会报告中, 仔细阐述了两大方面的问题: 一方面关心老龄飞机的损伤和寿命预测; 一方面关心下一代航天器所用新材料和结构的损伤容限(计划期限 2006 年)和基于物理的、一体化的材料和结构剪裁(计划期限 2021 年). 1988 年, 美国夏威夷群岛执行各岛间客运航班的一架波音 737 客机在飞行中发生掀顶事故, 造成一人遇难. 经美国国家交通委员会 13 个月调查, 有关专家认为, 事故起因均在(断裂力学)承载容限内的几条小裂纹, 它们的位形很不利, 容易贯通. 此事, 后来拍成故事片“Miracle landing”, 中文译名“九霄惊魂”, 开始引起了社会上对飞机损伤的关注. 即使老龄飞机的损伤和寿

命预测的重要性, 已为社会公众所认识, 但出于经济和技术等多方面的原因, 老龄飞机的运行仍然是客运现实. 几年前一家小型的美国航空公司的客机出事, 其中一个主要原因就是, 该公司为节省成本, 购买大型航空公司淘汰下来的老龄飞机运行. 今年, 台湾华航客机失事, 也发生在其即将向泰航转售移交的最后一次航班. 至于, 下一代航天器所用新材料和结构的损伤容限和基于物理的、一体化的材料和结构剪裁, 虽然已经是计划内的目标, 但是, 所遇到的问题依然很多. 以美国多年作为单级入轨主要机型的 X-33 为例, 由于复合材料结构的液氢燃料舱在加载后, 发生微裂纹和层间开裂, 这一损伤问题未能解决, 该型号被迫下马.

所以, 不久前, Becker 等人<sup>[1]</sup>在“预测和防止机械失效”一文中, 提出了关于“预测和安全管理(PHM)”的观点. 文中指出, 美国国防部把全方位的 PHM 系统, 应用于其最先进的联合攻击歼击机(JSF). 该新机型已经波音和马丁-洛克希德两大公司竞争研制和试飞, 结果后者获胜, 有望成为 F16 和 F22 之后的新机型, 从而得到美国和欧洲几千亿美元的定单. 用于联合攻击战斗机的预测和安全管理体系的核心思路是, 从飞行器整体-系统-分系统-部件-元件-材料六个层次的构成, 形成安全

收稿日期: 2002-09-03

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172084)

作者简介: 白以龙(1940-), 男, 研究员, 中国科学院院士, 华南理工大学双聘院士, 主要从事冲击动力学、统计细观损伤力学等的研究.

管理.虽然任务要求是针对整体的,但是失效起始于最底层.也就是从材料中的孤立的空洞成核开始,经过空洞取向,形成微裂纹,发展为宏观裂纹,直至整个结构破坏.整个预测和安全管理计划的奋斗目标则是,综合传感测量、信号诊断和损伤累积的预测算法提供预告警报,并采取相应的安全管理措施.而整个计划的核心是材料中损伤累积的预测算法,这也是整个问题的科学和物理核心.

其实,不仅在航天航空工业关注工程结构损伤的预测和安全管理,涉及大量人流、物流的民用工程结构,更是如此.最近华南理工大学交通学院和广东省交通厅合作,用纤维增强复合材料补强的新方法,对广东省德庆县西江支流上的一座70米长的单拱钢筋混凝土刚架拱桥进行的加固,就是这方面的一次有示范性的科研工程实践.该桥于1995年建成通车,2001年,在日常养护中首先在桥南侧斜支梁上发现多条裂纹,此后,又在主拱梁上发现类似的许多小裂纹,据估计可能是由于从西向东有大量超载货车运行所致.据当地管理部门负责人讲,该县辖区内许多桥梁均有类似的情况,如上游的西江大桥.根据这个实际例子,我们可以具体体会到工程结构的健康和安全管理是多么普遍和重要的一个问题.通俗地讲,今后,我们不但要做工程的设计者,还要做工程结构的医生,包括:检测、监测、诊断和分析,治疗以及健康管理措施.2001年10月国家自然科学基金委员会工程和材料科学部召开了“重大工程灾变行为与健康监测学术研讨会”,以期交流和推动重大工程灾害包括自然灾害和灾变危害的研究,针对其累积损伤和灾变行为的演化规律,发展相关的损伤检测、健康监测、安全评定和灾变防治理论和技术.

如前所述,这个问题是个全球性的工程科学问题,因为,不但大型工程结构的健康、安全问题为社会所关注,珍惜地球资源以及避免废弃工程物对自然环境的破坏,也是重要的出发点.

## 2 分布式损伤(微损伤)

从科学上讲,如果上述问题只包括少数宏观裂纹,20世纪发展起来的断裂力学已经可以对其失效预测和技术处理,给出相当成熟的有效工程处理办法.现在的困难主要集中在分布式损伤(微裂纹或微空洞群体)和尺寸效应上.因为是分布式损伤,断裂力学使不上劲,连续损伤力学又经验性过强,难于与物理基础挂钩;也因为分布式损伤,细观结构尺寸

及其效应,卷入了宏观失效现象,涉及跨尺度问题,造成尺度效应,室内缩比实验需要相应的物理、力学原则做指导才能推广.这些工程科学需求,呼唤着新的力学方法和理论.

其实,预测和防止灾难性的事故,一直是科学家和工程师们长期追求的目标.但是,到了20世纪60年代,钱学森仍指出,“固体强度……直到现在也还没有较全面的微观理论,没有工程技术上可用的肯定结果”(序言<sup>[2]</sup>).不久前,英国的 Miller<sup>[3]</sup>更具体地阐述了这个问题.他指出,弹性和弹塑性断裂力学恰当地解决了宏观裂纹导致的破坏问题.但是,一旦出现与材料微观结构相关的微裂纹或微空洞等损伤破坏现象时,以上理论就都失效了,必须发展新的力学理论.美国 ASTM,经过专家研讨,曾由 McDowell<sup>[4]</sup>写了一篇总结来概括专家们的观点,其中写道:“分布式微损伤的效应,强烈依赖于近邻和次近邻的间距”,“严格处理非均匀分布缺陷,要求发展出迄今在损伤力学中尚未发展出的工具”<sup>[4]</sup>.

我们最近发展了一种“统计细观损伤力学”的方法,来处理这类微损伤问题.其主要概念是“微损伤数密度” $n$ 的演化,即微损伤在描述其状态的单位相空间体积中的个数随时间的变化.举例来讲,如果我们所面对的实际问题是许多相互平行的、圆盘状的微裂纹,或者是许多球形的空洞,那么,就可以用这些微损伤的直径  $c$  和宏观体积单元的位置  $x$  作为描写这些微损伤状态的相空间  $\{c, x\}$ .例如“微损伤数密度” $n = 10 \text{ mm}^{-3} \mu\text{m}^{-1}$ 就意味着在空间位置  $x$  处的一立方毫米的体积中,在微损伤尺寸为  $c$  的微损伤尺度处的一微米区间里,有10条微裂纹或10个微空洞.那么,  $n = n(t, c, x)$ ,  $t$  是时间,表示微损伤数密度的演化.“微损伤数密度” $n$ 和传统的连续损伤  $D$  之间的关系,可以用如下积分来表达:

$$D(t, x) = \int_0^{\infty} n(t, x, c) \cdot c \cdot dc \quad (1)$$

这里,  $D$  是某一微裂纹或微空洞的失效体积.这样,接下来的问题就是如何找到“微损伤数密度” $n$ 的演化规律.根据统计力学的原理,可以导出如下“微损伤数密度” $n$ 在相空间的演化方程,

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(n \cdot A)}{\partial c} + \frac{\partial(n \cdot v)}{\partial x} = n_N \quad (2)$$

这里,  $n_N$  和  $A$  分别是微损伤的成核速率和扩展速率,  $v$  是宏观物质微团的运动速度.这样,知道了微损伤成核和扩展的细观动力学规律,就可以得到“微损伤数密度” $n$ 的演化.在这里,我们不去详述这个烦琐的求解过程,而只是说明“微损伤数密度” $n$ 的

演化的两个主要特征. 一是饱和现象, 二是运动前沿, 如图 1 所示.

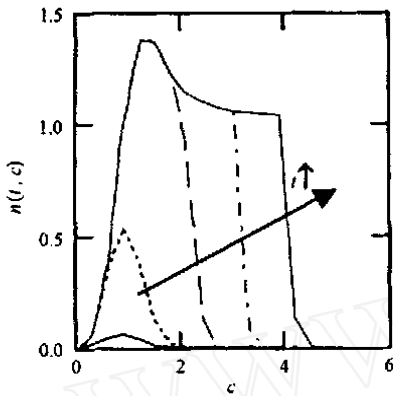


图 1 “微损伤数密度” $n$ 的演化

Fig. 1 Evolution of “density of microdamage number”,  $n$ . 图左侧显示了“微损伤数密度” $n$ 的饱和现象 - 数密度  $n$  的曲线随时间增加趋于饱和曲线. 图右侧显示了“微损伤数密度” $n$ 的运动前沿 - 数密度  $n$  的曲线随时间增加有一个向右推移的峰面.

饱和现象是指, 由于微损伤成核和扩展两个细观动力学过程之间的耦合, 对于某一微损伤尺度, 其对应的“微损伤数密度” $n$  会演化趋近到某一饱和值, 然后, 就不会再增加了. 运动前沿是指, 微损伤群体有一个随时间向更大尺寸扩展的峰面, 也就是, 大尺寸的微损伤所占比例随时间而增加, 这是微损伤导致失效的一个重要原因.

Barenblatt 于 1992 年在 ICTAM 指出<sup>[5]</sup>: “在这些现象的数学模型里, 力学的宏观方程和微观结构转变的动力学方程, 组成了统一的方程组, 这个方程组应该被联立地求解. 我们在研究损伤积累导致失效的问题中<sup>[6]</sup>, 将上述“微损伤数密度”演化方程与连续介质力学的场方程联立, 构成了对运动、变形和损伤场演化的整体描述, 以及这个宏观场与损伤的细观动力学过程的耦合描述. 并且, 还进一步找到, 如何去近似地封闭这个宏观连续介质力学和跨尺度的损伤动力学方程组方法, 并实现了联立求解.

这种“统计细观损伤力学”的方法的优点是, 它能将微损伤的细观动力学规律和宏观力学紧密结合起来; 它的不足之处是, 它未能直接处理微损伤之间的相互作用.

### 3 尺度效应

1997 年 Bazant 和 Chen (陈尔平)<sup>[7]</sup>以“Scaling of structure failure”为题, 发表了长达 34 页的综合评述 (中文译文见“力学进展”), 全面地评论了结构

失效中的尺度效应及其物理来源, 如: 边界层效应; 三维应力奇异性; 扩散引起的时效和本构关系中包含的时效等, 有兴趣的读者可以参考.

所谓“尺寸效应”是指, 在一个现象里面, 所讨论的对象宏观尺寸会与其他力学或物理特征量耦合成为一个无量纲控制参量, 或者说, 讨论的对象不再服从几何相似律, 从而, 室内小型实验结果, 不能简单地推广到工程原型上去. 例如, 对于分布式损伤所涉及的跨尺度问题, 就会存在一个细观尺寸与宏观尺寸的尺度比这样一个无量纲控制参量. 而对于同一种材料而言, 细观尺寸是不变的材料常数, 所以, 当把室内小型实验与工程原型比较时, 该尺度比将随宏观尺寸的变化而变化, 从而破坏了几何相似. 但是, 这个推理中隐含了一个疑问, 这就是跨尺度的尺度比一般都很小, 比如力学实验的试样约为厘米或分米, 而材料的晶粒约为毫米或微米, 所以尺度比约为  $10^{-1} \sim 10^{-5}$ . 那么, 这个很小的无量纲量是如何会形成数量级为一的影响的呢?

基于这种思考, 人们必须设法阐明在跨尺度失效问题中尺度效应的物理机理是什么. Barenblatt 提出表征微结构的特征时间与宏观外加特征时间关系的无量纲数——Deborah 数, 将是跨尺度耦合问题研究中的一个关键. 但是, 在 Barenblatt 的这个处理中, 跨尺度的尺度比又完全消失了.

我们通过“统计细观损伤力学”的方法, 针对应力波导致的损伤失效问题, 发现除了表征微损伤动力学的特征时间与宏观外加波动特征时间关系的 Deborah 数外, 相互依存又相互竞争的细观动力学之间, 如微损伤成核和扩展之间, 还会构成内禀的 Deborah 数. 相应的无量纲、归一化 (方程中所有的变量均为无量纲量, 并且数量级均为一) 的近似损伤演化方程为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial \bar{T}} + \bar{D} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{X}} = \text{De}^* \cdot^{-1} F(\bar{D}^*, \bar{v}, \bar{D}) \quad (3)$$

式中  $F$  是损伤动力学函数, 式中含有两个 Deborah 数,

$$\bar{D}^* = \frac{n_{NC}^* \cdot^5}{V^*} \quad (4)$$

$$\text{De}^* = \frac{ac^*}{LV^*} \quad (5)$$

式中  $a, L, c^*, V^*, n_N^*$  分别是弹性波速, 宏观尺寸, 细观微损伤特征尺寸, 微损伤特征扩展速率和微损伤特征成核速率. 可以看出, 直接表示尺度效应的尺度比  $c^*/L$ , 并没有直接成为现象的控制参量, 而

是通过与弹性波速度及微损伤扩展速率的耦合,以微损伤扩展的特征时间与宏观弹性波传播的特征时间之比,而成为现象的控制参量,控制了整体现象的进程.这也解释了为什么极其微小的跨尺度的尺度比会形成数量级为一的影响.

另一方面,内禀的 Deborah 数,则反映了一种内禀的临界状态.研究发现,它与宏观上出现的损伤局部化密切相关,因此,可以作为宏观失效的前兆.

在这个例子中,两个 Deborah 数,共同控制着这个跨尺度的失效问题及其尺寸效应.可以看出,对于跨尺度的失效问题,必须抓住各类尺度耦合的机理和特征,这是处理相应尺度效应问题的关键.

## 4 小 结

(1) 分布式损伤和失效的尺度效应是航天、航空飞行器和大型民用结构普遍存在的问题,从工程结构的健康、安全管理和可持续发展的角度出发,更是当前国际工程和科学界关注的焦点,值得我们重视.

(2) 这类科学问题的关键是,真正将宏观服役工况与微-细观结构的动力学耦合起来,揭示跨尺度的尺度效应的控制机理.

### 参考文献:

[1] Becker K C, Byington C S, Forbes N A, et al. Pre-

dicting and preventing machine Failures [J]. *Industrial Physicists*, 1998, 4(4): 20 - 23.

[2] 钱学森. 物理力学讲义 [M]. 北京: 科学出版社, 1962.

[3] Miller K J. A historical perspective of the important parameters of metal fatigue, and problems for the next century [A]. *Proc of 7<sup>th</sup> Int Fatigue Congress* [C]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 15 - 40.

[4] McDowell D L. Applications of continuum damage mechanics to fatigue and fracture [J]. 1997, *STP 1315*: 1 - 3.

[5] Barenblatt G I. *Micromechanics of fracture* [A]. *Theoretical and Applied Mechanics* [C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers BV, 1992.

[6] Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. Non-equilibrium evolution of collective microdamage and its coupling with mesoscopic heterogeneities and stress fluctuations [A]. *High-Pressure Shock Compression of Solids VI: Old Paradigms and New Challenges* [C]. New York: Springer-Verlag, 2002 (to appear).

[7] Bazant Z P, Chen E P. Scaling of structural failure [J]. *Appl Mech Rev*, 1997, 50(10): 593 - 627.

[8] Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. Closed trans-scale statistical microdamage mechanics [J]. *Acta Mech Sinica*, 2002, 18(1): 1 - 17.

# Two Important Scientific Problems in Engineering Structures ——Distributed Damages and Scale Effect

Bai Yi-long

(South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China; State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The failure of engineering structures begins at the lower levels of material microstructures from micro-void or micro-crack to macro-crack, and then to the total structural failure. Therefore distributed damages and scale effects are very important in engineering structural failures. "Statistical meso damage mechanics", an effective method in dealing with distributed damages, is introduced in this paper. The development of the distributed damages and the scale effects of the damage induced by stress waves are also discussed. There are two Deborah numbers and the key to the scale effects in the problems is the coupling between the scales.

**Key words:** distributed damage; scale effect; engineering structures

责任编辑:张 泰