

航天器损伤评估和安全管理中的 多尺度力学问题

白以龙¹, 许向红², 柯孚久², 夏蒙焚^{1,3}

(1. 中国科学院力学所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080;

2. 北京航空航天大学应用物理系, 北京 100083;

3. 北京大学物理系, 北京 100871)

摘要: 文章指出航天器的安全性涉及到材料、元件、器件、子系统、系统和整机 6 个层次。虽然预测和防止失效的任务是在整机层次, 但是损伤却是起源于材料的微损伤这一最底层。损伤从原子层次到整机层次的在多个尺度层次上的演化诱致了整体的破坏。由此引入多尺度力学, 即研究各种不同长度尺度和时间尺度相互耦合现象的科学。文章试图将力学的宏观运动方程和微结构转变的动力学方程组成统一的方程组, 从而得到宏观标量损伤 D 与微损伤数密度 n 的关系。文章还指出对于航天器的抗辐射加固问题, 微损伤成核和发展的特征时间, 与宏观特征空间尺度, 以及外加载荷的特征时间之间的耦合关系, 即德博拉 (Deborah) 数, 是判断这类损伤演化诱致失效问题的一个关键。

关键词: 损伤评估和安全管理; 多尺度力学

中图分类号: O346.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379 (2006) 05-0249-04

1 前言

一个大的工程系统, 在其工作的环境、工况下能否在设定的有效期内正常工作, 不仅是设计、运行人员, 也是社会普遍关注的问题。作为世界大国综合国力和技术水平的一种集中体现, 在复杂的空间环境中运行的航天器这一复杂的工程系统, 它能否正常工作自然是众所关注的。

然而, 空间环境复杂多变^[1,2], 空间辐射、太阳活动、微流星、空间碎片等等都会对航天器造成损伤, 甚至灾难, 这样的事例已经屡见不鲜。从空间微观粒子例如原子氧的掏蚀效应, 到宏观物体例如大块空间碎片的撞击, 都是造成航天器受损的原因。只不过有的损伤表现为渐进式的积累失效, 有的表现为突然的崩溃。以空间碎片为例, 其总数已经超过数千万个, 法国的侦察卫星被火箭残骸的空间碎片撞击而失效, 只是许多空间损伤失效的一个案例。2003 年“哥伦比亚”号航天飞机在返航时

解体坠毁则是一个更悲惨的事件。该航天飞机在起飞 82 s 后, 一块泡沫脱落击中其左翼, 使其碳隔热保护层受损; 然而仍决定按原计划返航, 致使其在再入大气层时有超热气体进入翼结构, 最终导致“哥伦比亚”号解体。“哥伦比亚”号事故调查委员会在最终调查报告中认为^[3], NASA 目前所采用的检查增强的碳-碳复合材料 (RCC) 系统元件的技术, 是不能充分认定增强的碳-碳复合材料结构的整体性的。

2 关于多尺度力学的思考

促使人们重视这类问题的原因, 正如 Miller 在国际疲劳大会上指出的, “随着我们进入第三个千年, 由于追求更高的有效性, 工程师们将设计极限愈加推向极致, 更多的灾难性的疲劳失效将会发生”, “无论是缺陷的尺寸, 还是疲劳裂纹扩展的增量都是处在了亚微米到原子尺度的范围内了”^[4]。鉴于争取最大限度的有

收稿日期: 2006-09-01; 修回日期: 2006-09-15

基金项目: 国家自然科学基金 (10572139, 10432050) 和中国科学院知识创新工程项目 (KJ CX2-SW-L2)。

作者简介: 白以龙 (1940-), 男, 中国科学院力学研究所研究员, 中国科学院院士, 主要从事固体变形、损伤、破坏的非线性力学性质的研究, 以及纳米/微米尺度力学和跨尺度关联方面的研究。联系电话 (010) 62548133。许向红 (1975-), 女, 博士后, 北京航空航天大学应用物理系讲师。柯孚久, 女, 北京航空航天大学应用物理系教授。

效载荷一直是航天器设计所追求的目标, 选用新型材料和结构, 追求极限设计, 在航天器上表现得更为突出, 因此, 损伤评估的问题也就更为突出了。

特别是新材料的层出不穷, 使这些问题更具挑战性。近年来, 除了基于晶体和晶粒的新型金属和非金属材料、各类复合材料以外, 非晶金属玻璃^[5]、纳米晶材料^[6]等也开始为航天器所使用。所以要求力学从对均匀介质的描述, 扩展到对细观乃至微观(原子层次)非均匀材料力学行为的描述。一般说来, 弹性系数类的力学行为通常对微结构的不均匀性不太敏感; 然而, 破坏类的崩溃行为则对微结构的不均匀性非常敏感。Weibull 统计分布是使用中有效的一个统计工具, 我们采用 Weibull 分布来描述材料的微结构单元的强度, 发现刻画非均匀性的 Weibull 模量与这类非均匀材料中损伤局部化的发生有直接关系, 从而可能为其损伤评估提供一种可行的途径^[7]。然而对于原子层次为无序性排列的材料, 例如块体金属玻璃, 还出现了许多新的问题。块体金属玻璃兼具金属和玻璃的特性: 包括耐腐蚀(因为是无序结构, 没有结构性的晶粒间隙)、弹性好、受到冲击时能量损失少、高屈服强度、高硬度、高比强度(其比强度可达钛的两倍, 不锈钢的三倍)等特点, 引起航天界的重视。美国航空航天的 Genesis 项目采用了块体金属玻璃做成盘状结构, 来收集太阳风中的物质, 然而该项目在 2004 年秋返回地面时发生了撞击事故。2005 年该项目的执行者在 APS(美国物理学会)的会议上报道说, 虽然如此, Zr 基块体金属玻璃的太阳风收集器, 被完好回收(recovered in pristine condition), 这种合金玻璃是这次行动的关键环节, 它非常适合测量太阳风的组成, 其一是因为金属玻璃的原子无序结构, 使得它降低了太阳风的离子在注入过程中的分离(fractionation)和由于扩散造成的太阳风离子的损失; 其二是因为金属玻璃中没有晶界, 使得它消除了发生高扩散速率的路径。这种金属玻璃将有助于阐明太阳高能粒子的起源。然而问题另一面是块体金属玻璃特有的损伤方式, 就是它极容易以剪切带的形式失效。怎么来预测这类损伤呢? 目前的一种学说是, 由于该材料中的原子为无序排列, 就自然会存在和产生“自由体积”, 而这会是剪切带产生的根源。而从原子层次的“自由体积”, 到显

显微镜下可见的剪切带, 其实是一个跨越了几个空间尺度的损伤演化问题。不仅如此, 我们发现不同时间尺度的耦合是判断这类剪切带出现的关键环节, 即: 由“自由体积”的复合产生率所决定的德博拉(Deborah)数是其表征^[8]:

$$De_G = \frac{t_G}{t_{ex}} = \frac{\dot{\gamma}}{G_\xi \gamma}, \quad (1)$$

式中: $t_{ex} = \frac{\gamma}{\dot{\gamma}}$ 代表外加载荷的特征时间;

$t_G = G_\xi^{-1}$ 表示“自由体积”的复合产生率的特征时间, 其中, G_ξ 是“自由体积”的产生率函数, ξ 是“自由体积”的浓度。

对这类多个空间和时间尺度相耦合的问题, 我们下面还要介绍。附带说一句, 几年来, 甚至材料在光辐照下的老化(化学老化和物理老化)也开始用多尺度力学的观点来研究^[9]。

其实, 在如此复杂的空间环境中运行的航天器, 在运行中发生不同程度的, 特别是意料之外的损伤几乎是难以避免的, 因此除了能对新型材料和特有的损伤方式给出材料力学的参数判据以外, 一个更加关键的问题是要能结合加载环境的变化(场的演化)及时做出正确的判断和决策, 以保障人员和关键设施的安全。为了达到航天器的安全性和健康运行的目的, 需要从工程技术, 模拟实验和科学理论等几个方面进行系统性的综合研究。下面侧重于后者再做一些讨论。

3 航天器的损伤评估和安全管理

近年来, 针对美国航空和航天事业的发展, 科学家和工程师们提出了“预测和健康管理系统”^[10]。他们认为, 一个工程系统, 特别是航空和航天器, 其安全性是涉及到 6 个层次的系统工程: 即材料, 元件, 器件, 子系统, 系统和整机。虽然预测和防止失效的任务是在整机层次, 但是损伤却是起源于材料的微损伤这一最底层。因此, 要想预测在材料的微结构这一最底层发生的微损伤对整机工作性能的影响, 需要把通过各类模拟、传感和诊断系统得到的数据, 通过基于科学理论的预测算法, 变成可供工程决策的技术建议。然而, 这绝非易

事,因为正如前面所指出的,这涉及到的是所谓的多尺度问题,即损伤从原子层次到整机层次的在多个尺度层次上的演化诱致整体的破坏。正如 Glimm^[11]指出的多尺度科学是一门研究各种不同长度尺度和时间尺度相互耦合现象的科学,“多尺度科学处于当代科学的许多极富挑战性问题的核心,因此,发展多尺度科学的方法论体系既是一种需要也是一种挑战。”显而易见,对航天器环境工程而言,这样一种观点,有可能帮助人们全面地处理上述这类损伤评估和安全管理问题。

对于多尺度的损伤演化问题,关键是如何描述微尺度上非均匀的分布型损伤的非平衡的发展,特别是要研究损伤的跨尺度非线性演化和多尺度耦合导致的整体性的大尺度极端事件问题。然而严格处理这些问题,按照现有的连续损伤力学尚未能解决^[12]。因为固体包括了从原子,到晶格结构,到晶粒,再到宏观单元若干个物理行为大不相同的多个层次,而固体结构的损伤破坏是跨过这些物质层次的最终体现,因此是这些层次上的物理规律的相互耦合的表现。加之,每个层次上的特征时间尺度也往往是大不相同的。所以,多尺度问题就是要处理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现象^[13]。

那么,如何处理这类问题呢? Barenblatt^[14]认为,首先,这类现象的数学模型应该是一个能将力学的宏观运动方程和微结构转变的动力学方程形成统一的方程组;其次,这个方程组应该被联立地求解。对于为损伤累积演化问题,这种类型的统一方程组的一个可能的案例是^[15]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nA)}{\partial C} + \nabla \cdot (n\mathbf{v}) = n_N, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = \rho^{-1} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial e_i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla e_i = \rho^{-1} \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{v} - \rho^{-1} \nabla \cdot \mathbf{h} + q, \quad (5)$$

其中:方程(2)是微损伤数密度的场演化方程, n 是微损伤数密度, A 是微损伤的扩展速率, n_N 是微损伤的扩成核速率;其余(3)、(4)、(5)三个方程分别是宏观的连续性方程、动量方程和能量方程。这些

方程要通过宏观的本构方程联系起来;而本构方程又是依赖于损伤演化的,

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\varepsilon}, D), \quad (6)$$

最简单的宏观标量损伤 D 与微损伤数密度 n 的关系可写为:

$$D(t, \mathbf{x}) = \int_0^\infty n(t, \mathbf{x}, C) \cdot \tau \cdot dC. \quad (7)$$

这样一组方程就可以将微损伤的演化和宏观场的变化结合起来了^[19]。

我们曾经针对航天器的抗辐射加固问题,针对航天器用合金材料中的微损伤的成核、发展、连接、最终导致的宏观破坏的现象,通过试验和总结实验数据,形成了上面这样的具体的力学理论描述。这里不详述具体的解决过程和结果,而只想指出:研究发现微损伤成核和发展的特征时间,与宏观特征空间尺度,以及外加载荷的特征时间之间的耦合关系,即德博拉(Deborah)数,是判断这类损伤演化诱致失效问题的一个关键^[17]。即在应力波引起的微损伤演化导致失效这个问题中,多空间尺度和多时间尺度是通过速率效应耦合在一起的。“应力波德博拉数” $De^* = \frac{ac^*}{LV^*}$ 控制了损伤演化的进程,其中: a 是材料的声速, L 是样本的宏观特征尺寸, c^* 是微损伤的特征尺寸, V^* 是微损伤的特征扩展速率;“内禀德博拉数” $D^* = \frac{n_N^* c^{*5}}{V^*}$ 则是发生损伤局部化转变的特征表征,对失效预测有重要的实际意义,其中 n_N^* 是微损伤的特征成核率。

4 结束语

综上所述,在航天器环境工程中采用和发展多尺度力学问题的描述方法,揭示微结构演化所导致的损伤积累以及预测突发性整体灾变的发生,既是对现有的力学的挑战,也将提高航天器工程损伤评估和安全的水平。

参考文献 (References)

- [1] 柯受全. 卫星环境工程和模拟试验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1996[Ke Shouquan. Spacecraft environment engineering and simulation test[M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1996]

- [2] 庞贺伟, 冯伟泉. 影响 GEO 卫星长寿命高可靠的空间环境因素及其评估、验证和保障技术研究[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(2): 63~66[Pang Hewei, Feng Weiquan. Space environmental factors influencing on GEO satellite's life and reliability and their evaluation, verification and guarantee technologies[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(2):63~66]
- [3] Wikipedia. The free Encyclopedia[M]. 2003
- [4] Miller J K . A historical perspective of the important parameters of metal fatigue and problems for the next century[A]. In: Wu X R, Wan Z G. Fatigue 99 proc 7th int fatigue congress[C]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 15~40
- [5] Wang W H , Dong C, Shek H C. Bulk metallic glasses[J]. Materials Science and Engineering R, 2004, 44: 45~89
- [6] Bai Y, Zheng Q, Wei Y. IUTAM symposium on mechanical behavior and micro-mechanics of nanostructured materials[A]. 2006 Springer, the Netherlands, 2006
- [7] Xu X H , Ma S P, Xia M F, Ke F J, Bai Y L. Damage evaluation and damage localization of rock[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2004, 42: 131~138
- [8] Bai Y L, Liu L F, Dai L H, Ke F J. Comparison of shear banding in BMGs due to thermo-softening and free volume creation[A]. Conference of mechanics and mechanical properties of non-crystalline materials, i: amorphous metals[C]. Beijing, 2006-4-23~28
- [9] Benkhenafou F, Nait-Abdelaziz M, Zairi F, Chikh-Bled M, Verdu J. Photoageing and fracture behavior of a polypropylene film[A]. In: G C Sih, M S T de Castro. Multiscale behavior of materials and structures[C]. 2006: 117~128
- [10] Becker, Byington, Forbes, Nickerson. Predicting and preventing machine failure[J]. The Industrial Physicist, 1998, 4(4): 20~23
- [11] Glimm J, Sharp H D. Multiscale science: a challenge for the twenty-first century[J]. SIAM News, 1997, 30(8), 1~7
- [12] McDowell. Applications of continuum damage mechanics to fatigue and fracture[J]. ASTM STP, 1997, 1315: 1~3
- [13] Bai Y L, Wang H Y, Xia M F, Ke F J. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales[J]. Appl Mech Rev, 2005, 58(6): 372~388
- [14] Barenblatt I G. Micromechanics of fracture[A]. In: Bodner SR, Singer J, Solan A, Hashin Z. Theoretical and applied mechanics[C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers BV, 1992
- [15] Bai Y L, Xia M F, Wei Y J, Ke F J. Non-equilibrium evolution of collective microdamage and its coupling with mesoscopic heterogeneities and stress fluctuations[A]. In: Horie Y, Davisona L, Thadhani N N. Shock dynamics and non-equilibrium mesoscopic fluctuations in solids[C]. New York: Springer-Verlag, 2002, 255~278

Multiscale Mechanical Problems in Damage Evaluation and Safety Management of Spacecraft

BAI Yilong¹, XU Xianghong², KE Fujui², XIA Mengfen^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Non-linear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Department of Applied Physics, Beihang University, Beijing 100083, China; 3. Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This paper points out that the spacecraft safety concerns a six-layer hierarchy problem, which consists of material, element, component, subsystem, system, and whole machine. Though the task of prediction and prevention of failure is on the top level, the initial damage may come from the lower microstructural level in materials. The damage evolution with coupling multi-levels, from atom level to whole machine level, may lead to eventual rupture at the whole level. Therefore, multi-scale mechanics is introduced to study the phenomena that couple various length and time scales. The paper suggests that the macroscopic equations of mechanics and the kinetic equations of microstructural transformations should form a unified set. Then, the relationship between macroscopic damage variable D and microdamage number density n can be obtained. Additionally, it is pointed out that the key point to judge the failure induced by the damage evolution in the radiation-resistance and reinforcement problems of spacecraft can be attributed to the coupling relationships among the characteristic time of nucleation and growth of microdamages, the macroscopic characteristic spatial scale, and the characteristic time of external loading, i.e., the Deborah numbers.

Key words: damage evaluation and safety management; multiscale mechanics