



准脆性材料细观损伤力学

Damage Micromechanics of Quasi-Brittle Materials

冯西桥 余寿文 著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



准脆性材料细观损伤力学

Damage Micromechanics of Quasi-Brittle Materials

冯西桥 余寿文 著



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是一本关于脆性和准脆性材料细观损伤力学的专著。书中介绍了一种细观损伤力学理论——微裂纹扩展区理论,以及作者在脆性损伤力学方面的系列研究成果。全书分9章,分别介绍损伤力学的基本概念和方法、研究现状和发展方向,拉伸和压缩下的微裂纹扩展区损伤模型,准脆性材料应变软化的分析,残余应变的细观物理机制及其计算,微裂纹相互作用与准细观损伤力学模型,裂纹尖端的损伤局部化模型,微裂纹屏蔽效应的研究和大量微裂纹相互作用的计算方法。

本书可供从事固体力学、材料科学及相关领域研究的科研人员及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

准脆性材料细观损伤力学/冯西桥,余寿文著. —北京:
高等教育出版社,2002

ISBN 7-04-010525-X

I. 准… II. ①冯…②余… III. 脆性材料—损伤(力学)
IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 098988 号

准脆性材料细观损伤力学

冯西桥 余寿文 著

| | | | |
|------|-----------------|------|---|
| 出版发行 | 高等教育出版社 | 购书热线 | 010-64054588 |
| 社 址 | 北京市东城区沙滩后街 55 号 | 免费咨询 | 800-810-0598 |
| 邮政编码 | 100009 | 网 址 | http://www.hep.edu.cn |
| 传 真 | 010-64014048 | | http://www.hep.com.cn |

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 高等教育出版社印刷厂

| | | | |
|-----|--------------|-----|-------------------|
| 开 本 | 787×960 1/16 | 版 次 | 2002 年 7 月第 1 版 |
| 印 张 | 14.75 | 印 次 | 2002 年 7 月第 1 次印刷 |
| 字 数 | 260 000 | 定 价 | 23.80 元 |
| 插 页 | 1 | | |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

作者简介



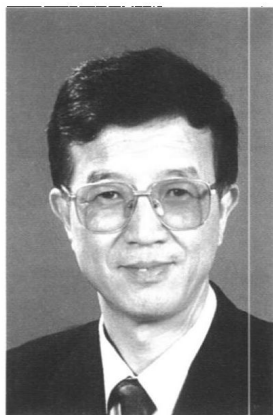
冯西桥 男，1968年5月生，河北肃宁人。清华大学工程力学系教授。

1990年本科毕业于清华大学工程力学系，1991年7月获清华大学工学硕士学位，1995年3月获清华大学工学博士学位。1997年6月清华大学核能技术设计研究院博士后出站。1997年9月至1998年4月获洪堡奖学金，在德国达姆施塔特工业大学力学研究所和荷兰代尔夫特工业大学机械工程与海洋技术系任客籍研究员。1999年5月被清华大学作为优秀归国人员引进，在工程力学系任教。

近十年来一直从事材料宏微观力学的理论和实验研究。曾主持或参加全国优秀博士学位论文作者专项资金项目“纳米材料的宏微观力学”，教育部跨世纪优秀人才基金项目“先进结构复合材料的跨尺度力学研究”，国家自然科学基金委员会海外青年学者合作研究基金项目“微尺度断裂分析的虚内键方法”，国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目“微/纳米尺度力学与智能材料的力学”，国家自然科学基金“八五”重大项目“材料的损伤、断裂机理与宏微观力学理论”和“九五”重大项目“材料的宏微观力学与强韧化设计”，国家自然科学基金重点项目“细观力学基础”，国家自然科学基金项目“网络交织复合材料的细观力学研究”，国家“863”高技术项目“10 MW高温气冷试验堆(HTR-10)”等十几项科研项目研究。在细观力学、损伤和断裂力学、本构关系、材料与结构的安定理论等方面发表论文80余篇，与余寿文教授合著《损伤力学》1部。

目前主要的研究方向有：纳米材料力学，准脆性材料的损伤、断裂与尺度效应，微/纳米尺度力学，网络交叉复合材料等非均质材料的本构关系。

导师简介



余寿文 男、1939年5月生、福建仙游人。

清华大学工程力学系教授，博士生导师。曾任清华大学副校长兼研究生院院长，中国力学学会副理事长。现兼任中国高等教育研究会副理事长、国际断裂大会执委（1997—2001）。德国应用数学与力学学会（GAMM）会员、欧洲力学学会（EMS）会员。1985至1987年获洪堡奖学金，任德国达姆施塔特工业大学力学研究所客籍研究员。现兼任《固体力学学报》主编、《机械强度》杂志副主编，同济大学、华南理工大学、华中科技大学、西南交通大学等校兼职教授。合著《弹塑性断裂力学》、《弹性理论》、《损伤力学》

等4部，主编《固体力学进展》等2部。在断裂力学、损伤力学、细观力学、板壳理论等分支学科，在国内外发表学术论文240余篇，已培养博士生11名，硕士生16名。“裂纹扩展与断裂准则”和“材料本构关系的宏-微观力学理论”等项目分别获国家自然科学三等奖（1987和1994）和国家教委科技进步一等奖各2次。另获部委级多项科技奖励。在工程教育方面发表研究论文20余篇。近年来倡导并从事宏细观损伤力学与微力电系统细观力学的研究。

前 言

从人类最早的工具材料之一——岩石,到历史悠久的人工合成材料——砖、陶瓷、玻璃、铸铁和混凝土,到一些现代的新型材料如某些聚合物、合金和复合材料,都属于脆性或准脆性材料。毫无疑问,这些材料在建筑、水利、交通、采矿以及诸多现代新兴工业领域都占有重要的地位。顾名思义,这些材料最主要的特点就是比较脆,尤其是承受拉伸的能力较差。因此,在这些材料的工程结构设计中应尽量避免出现大的拉应力。由于材料脆性引起的灾难性事故不胜枚举,直到进入 21 世纪的今天,虽然科学技术已经在很多领域取得了辉煌的成就,但是人们对脆性和准脆性材料的破坏机理的认识还相当肤浅,因而未能建立起比较完备、系统的数学描述手段,对材料和结构破坏的预测仍缺乏合理而有效的力学模型。

损伤力学的建立,源于 1958 年 Kachanov 和 1963 年 Rabotnov 对金属材料在高温蠕变情况下性能逐渐劣化的力学参量描述。在 20 世纪 70 年代和 80 年代,连续介质损伤力学和细观损伤力学开始蓬勃发展,并取得了一批重要的理论成果。对于以孔洞形核和演化为主要损伤机制的韧性材料,以 Lemaitre 和 Chaboche 等人为代表的一些工作基于连续介质力学和内变量理论,而 Gurson 模型及其修正理论则基于细观力学的分析,这些工作在理论上已经比较完整,并且得到了多方面的应用。相对而言,脆性和准脆性材料的连续介质损伤力学和细观损伤力学都不够成功。尽管我们可以在文献中找到难以列数的脆性损伤模型,但是它们在理论的完整性、适用范围的普遍性等方面都难如人意。这主要归因于这类材料力学行为的复杂性。

1991 年 9 月,本人有幸成为清华大学破坏理论与本构关系研究室的博士生,师从余寿文教授。在这里有一个宽松自由、学术氛围浓厚而且要求严格的学习和科研环境。入学后的几个月里,我阅读了与损伤力学有关的文献上百篇,形成了对损伤力学发展现状的基本认识,并选择准脆性材料的微裂纹细观损伤作为博士论文的主要研究题目。准脆性材料变形和损伤行为的一个突出特点是各

向异性,这显然是与微裂纹的几何特征及其扩展的方向性直接相关的。准脆性材料中的微裂纹损伤机制多种多样,非常复杂,因此,微裂纹细观损伤的描述是一个难题。在经过一段时间的探索后,在一个偶然的时机里想到用微裂纹的取向作为损伤描述的出发点,根据取向将微裂纹分类,如未扩展的微裂纹、已扩展的微裂纹、摩擦滑移的微裂纹等,并利用集合的概念来处理损伤演化过程中不同种类微裂纹的增减。这就是微裂纹扩展区概念形成的初始过程。在接下来的两年多时间里,我在导师指导下对准脆性材料的细观损伤与断裂问题进行了逐步深入的研究,包括三轴拉伸和压缩下的细观损伤机制与本构关系、应变软化的分析、裂纹尖端的损伤行为等。此外,在连续损伤力学方面也做了一点工作,研究了弹性结构的损伤安定问题,但限于本书的题目,这里不作介绍。

尔后,我于1997年9月到德国达姆施塔特工业大学作洪堡学者,合作者是在断裂力学和损伤力学方面颇有建树的Dietmar Gross教授。其间,我的部分工作仍然是准脆性材料的微裂纹损伤力学,包括残余应变的细观力学分析、复杂加载下微裂纹相互作用的计算方法等。1999年夏天回国后,微裂纹损伤仍然是本人研究工作的方向之一,具体工作包括准细观损伤力学模型、微裂纹相互作用的计算方法等。

本书主要介绍我和余寿文教授以及合作者在近十年中在准脆性材料细观损伤力学方面的一些研究成果,以及作者对该领域的研究与发展的一些看法。将这些工作整理发表,但愿起到抛砖引玉的作用。本书力求简明易懂,例如第六章中的微裂纹相互作用效应计算方法和准细观损伤力学模型都是为了使力学分析简化而做的一些尝试。但是,鉴于准脆性材料细观损伤的复杂性和细观损伤力学的特点,本书内容对工程师而言似乎仍嫌复杂。与其他细观损伤力学模型一样,这里介绍的理论研究结果对于增进对材料破坏机制的认识,解释一些复杂宏观现象的细观物理原因,构建宏观性质与细观结构之间的关系应该是有益的,并有望为该领域的进一步发展有所推动和启示。书中的错误与不妥之处,敬请专家与读者批评指正。

本书工作是在余寿文教授的引领、支持与帮助下完成的。除了与余寿文教授多年来愉快的合作外,我也由衷感谢清华大学破坏理论与本构关系研究室这个团结奋进的集体,黄克智院士、杨卫教授、郑泉水教授、孙学伟教授、方岱宁教授、庄茁教授等也给了本人很多帮助和好建议。作者还感谢Dietmar Gross教授在本人做洪堡学者期间所提供的全方位的支持。此外,北京航空航天大学张行教授审阅了本书初稿,并提出了很有价值的修改意见。1999级研究生李佳音完成了第九章的大部分数值计算工作。本书所涉及的研究工作还获得了国家自然科学基金委员会、教育部以及德国亚历山大·封·洪堡基金会的资助。这

本专著是在教育部全国优秀博士学位论文作者专项资金的资助下出版的。在此谨对上述支持表示衷心感谢。

冯西桥

2001年9月

于北京清华园

主要符号表

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| a, \bar{a} | 微裂纹半径及其平均值 |
| a_0, a_u, a_s | 微裂纹的初始半径, 以及第一次和第二次扩展后的半径 |
| a_1, a_2 | 椭圆的主轴半长 |
| a_k | 微裂纹弯折扩展的长度 |
| a_p | 微裂纹的内聚力损伤区半径 |
| B_c | 应力集中张量 |
| B'_{ij} | 裂纹张开位移张量 |
| b, b_j | 微裂纹张开位移矢量及其分量 |
| \bar{b}^p | 细观塑性引起的微裂纹平均张开位移 |
| \bar{b}^s | 残余应力释放引起的微裂纹平均张开位移 |
| E | 杨氏模量 |
| e_i | 第 i 个基矢量 |
| f | 微裂纹密度因子, 或孔洞体积百分比 |
| G | 切变模量 |
| \bar{G} | 量纲为一的能量释放率 |
| g'_{ij} | 从整体坐标系到局部坐标系的坐标转换矩阵 |
| H | 损伤区高度 |
| I | 单位张量 |
| J | J 积分 |
| J_∞, J_{ip} | 远场和裂纹尖端损伤饱和区内的 J 积分 |
| K_I, K_{II} | I 型和 II 型应力强度因子 |
| K_{Ic}, K_{IIc} | 微裂纹第一次扩展的 I 型和 II 型临界应力强度因子 |
| K_{Icc}, K_{IIcc} | 微裂纹第二次扩展的 I 型和 II 型临界应力强度因子 |
| K_I^∞, K_I^{ip} | 远场和裂纹尖端损伤饱和区内的应力强度因子 |

| | |
|--|-------------------------------------|
| l | 损伤局部化带的长度 |
| M | 载荷因子 |
| N_c | 代表性体积单元中的微裂纹总数 |
| n | 微裂纹的法向单位矢量 |
| n_c | 微裂纹的数目密度 |
| n_{cc} | 二次扩展微裂纹的数目密度 |
| p | 微裂纹的概率密度分布函数 |
| p^* | 微裂纹的侧向压力 |
| R_0, R_s | 裂纹尖端无损区和损伤饱和区的边界 |
| R_1, R_2 | 子域 Γ 的两个主轴的半长 |
| (r, α) | 平面极坐标 |
| (r, α, z) | 圆柱坐标 |
| S | 微裂纹面的表面面积 |
| S, S_{ijkl} | 柔度张量及其分量 |
| S_{ijkl}^0, L_{ijkl}^0 | 有效介质的柔度张量和刚度张量 |
| S_{ijkl}^m | 基体的弹性柔度张量 |
| S_K | 微裂纹损伤对应力强度因子的屏蔽比 |
| S_{upp}^0, S_{low}^0 | 有效介质柔度张量的上限和下限 |
| $S^T, S^{SCM}, S^{DM}, S^{GSCM}$ | 由非相互作用方法, 自洽方法, 广义自洽方法, 微分方法得到的有效柔度 |
| \bar{S}_{ijkl}^c | 单个微裂纹引起代表性体元的柔度变化 |
| t | 时间或表示加载次序的一个参量 |
| t^α | 第 α 条微裂纹上的面力 |
| V | 代表性体积单元的体积 |
| V_r | 微裂纹的残余张开体积 |
| x_i | 整体坐标系中的笛卡儿坐标 |
| x_i' | 局部坐标系中的笛卡儿坐标(撇号表示矢量或张量在局部坐标系中的分量) |
| \bar{x}_i | 主应力坐标系中的笛卡儿坐标 |
| Γ | 有效场 - 子域模型中的子域 |
| δ_{ij} | Kronecker 符号 |
| $\boldsymbol{\epsilon}, \epsilon_{ij}$ | 应变张量及其分量 |
| $\epsilon^c, \epsilon^\infty$ | 单拉时开始损伤和发生应力跌落的临界应变 |
| ϵ_{ij}^c | 微裂纹引起的应变 |

| | |
|---|-----------------------------------|
| ϵ_{ij}^e | 弹性应变 |
| ϵ_{ij}^r | 残余应变 |
| $\bar{\epsilon}_{ij}, \bar{\epsilon}_{ij}^m, \bar{\epsilon}_{ij}^c$ | 代表性体积单元的平均应变, 基体的平均应变以及微裂纹引起的应变增加 |
| ϵ_{ij}^* | 细观应变 |
| θ, φ | 微裂纹的取向角 |
| θ_0, φ_0 | 最先发生摩擦滑移(或弯折扩展)的微裂纹取向角 |
| θ_{\max} | 单拉时表示微裂纹扩展取向范围的角度参数 |
| Λ | 微裂纹的弯折扩展区 |
| Λ^{af} | 微裂纹之间的应力传递因子矩阵 |
| μ | 摩擦因数 |
| ν | 泊松比 |
| Π | 微裂纹的摩擦滑移区 |
| ξ, η | 稀疏修正方法中有效介质的修正参数 |
| σ | 单向拉伸应力 |
| $\boldsymbol{\sigma}, \sigma_{ij}$ | 应力张量及其分量 |
| $\sigma_{ij}^0, \epsilon_{ij}^0$ | 有效应力场和有效应变场 |
| σ^c, σ^{cc} | 单拉时开始损伤和发生应力跌落的临界应力 |
| σ_{low}^0 | 有效应力场的下限 |
| $\sigma_{ij}^r, \bar{\sigma}_{ij}^r$ | 残余应力及其在微裂纹面上的平均 |
| σ_{ij}^* | 细观应力 |
| $\bar{\sigma}_{ij}, \bar{\sigma}_{ij}^m, \bar{\sigma}_{ij}^c$ | 代表性体积单元的平均应力, 基体的平均应力以及微裂纹引起的应力降低 |
| $\bar{\sigma}_{ij}$ | 应力角分布函数 |
| σ_{ij}^∞ | 远场应力 |
| τ_c | 粘合力 |
| $\tau_f, \tau_{f, \max}$ | 摩擦力和最大摩擦力 |
| $\boldsymbol{\tau}_f$ | 摩擦力矢量 |
| Ω | 微裂纹扩展区 |
| ω, ω_{ij} | 标量损伤变量和二阶张量损伤变量 |
| 上标 α | 第 α 个微裂纹 |

目 录

| | | |
|--------------|-----------------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论 | 1 |
| § 1.1 | 损伤力学简史 | 1 |
| § 1.2 | 连续损伤力学和细观损伤力学 | 2 |
| § 1.3 | 损伤力学的基本方法 | 4 |
| § 1.4 | 脆性材料的损伤 | 8 |
| § 1.5 | 韧性材料的空洞损伤 | 12 |
| § 1.6 | 损伤力学的其他问题和发展展望 | 15 |
| § 1.7 | 本书主要内容 | 17 |
| 第 2 章 | 拉伸载荷下的微裂纹扩展区 | 20 |
| § 2.1 | 引言 | 20 |
| § 2.2 | 代表性体积单元 | 21 |
| § 2.3 | 单个微裂纹引起的柔度张量 | 22 |
| § 2.4 | 微裂纹扩展区 | 24 |
| § 2.5 | 平面应力下的微裂纹扩展区 | 27 |
| § 2.6 | 三轴应力下的微裂纹扩展区 | 31 |
| § 2.7 | 损伤本构关系 | 34 |
| § 2.8 | 算例 | 35 |
| § 2.9 | 小结 | 41 |
| 第 3 章 | 压缩载荷下的微裂纹扩展区模型 | 43 |
| § 3.1 | 引言 | 43 |
| § 3.2 | 闭合微裂纹的摩擦滑移 | 44 |
| § 3.3 | 压缩载荷下的微裂纹扩展区 | 56 |
| § 3.4 | 微裂纹扩展区的演化及柔度张量的计算 | 58 |
| § 3.5 | 微裂纹的弯折扩展 | 59 |
| § 3.6 | 算例 | 67 |

| | | |
|--------------|------------------------------|------------|
| § 3.7 | 小结 | 69 |
| 第 4 章 | 准脆性材料软化的细观力学分析 | 70 |
| § 4.1 | 引言 | 70 |
| § 4.2 | 不同变形阶段的细观损伤机制 | 71 |
| § 4.3 | 单向拉伸情况下的软化分析 | 74 |
| § 4.4 | 三轴拉伸情况下的软化分析 | 80 |
| § 4.5 | 三轴压缩情况下的软化分析 | 83 |
| § 4.6 | 小结 | 85 |
| 第 5 章 | 准脆性材料的残余应变分析 | 87 |
| § 5.1 | 引言 | 87 |
| § 5.2 | 残余应力释放引起的残余应变 | 88 |
| § 5.3 | 细观塑性引起的残余应变 | 90 |
| § 5.4 | 单个微裂纹引起的非弹性应变 | 94 |
| § 5.5 | 总体有效本构关系 | 95 |
| § 5.6 | 算例分析 | 97 |
| § 5.7 | 小结 | 103 |
| 第 6 章 | 微裂纹体有效弹性模量的计算方法 | 105 |
| § 6.1 | 引言 | 105 |
| § 6.2 | 有效模量估计方法的统一框架 | 106 |
| § 6.3 | 基于 Taylor 模型的有效介质方法 | 117 |
| § 6.4 | 考虑相互作用效应的微裂纹扩展区模型 | 126 |
| § 6.5 | 准细观损伤力学模型 | 135 |
| § 6.6 | 小结 | 139 |
| 第 7 章 | 微裂纹屏蔽效应 | 141 |
| § 7.1 | 引言 | 141 |
| § 7.2 | 本构关系 | 145 |
| § 7.3 | 损伤饱和区的应力-应变场 | 150 |
| § 7.4 | 裂纹尖端 J 积分守恒的条件 | 152 |
| § 7.5 | 微裂纹屏蔽比的计算 | 155 |
| § 7.6 | 小结 | 158 |
| 第 8 章 | 裂纹尖端的损伤局部化 | 160 |
| § 8.1 | 引言 | 160 |
| § 8.2 | 脆性材料裂纹尖端的损伤模式 | 161 |
| § 8.3 | 损伤局部化带的计算 | 165 |
| § 8.4 | 断裂准则分析 | 169 |

| | | |
|---------------------------|-----------------------------|------------|
| § 8.5 | 两个共线裂纹的连接 | 170 |
| § 8.6 | 周期分布共线裂纹的连接 | 176 |
| § 8.7 | 小结 | 177 |
| 第 9 章 | 大量微裂纹相互作用的计算方法 | 178 |
| § 9.1 | 引言 | 178 |
| § 9.2 | 有效场-子域模型 | 179 |
| § 9.3 | 拉伸下材料强度的尺寸效应 | 186 |
| § 9.4 | 压缩下材料强度的尺寸效应 | 190 |
| § 9.5 | 微裂纹体有效模量的数值计算 | 192 |
| § 9.6 | 小结 | 193 |
| 参考文献 | | 195 |
| 索引 | | 212 |
| Brief Introduction | | 216 |
| Contents | | 217 |

第1章

绪论

§ 1.1 损伤力学简史

在工程设计中,人们最关心的往往是结构(或构件)的强度、寿命和经济性。最初人们认为,经过周密设计分析和实验验证了的强度或刚度是不会改变的,但后来发现事实并非如此。例如,1860—1870年间铁道工程中发生了多起机车车轴、车轮和铁轨的断裂事故,1954年发生了英国彗星号喷气式客机空中突然爆炸事故,事后有关专家对设计和实验都进行了严格校核,但并未发现问题^[1,2]。大量事实告诉人们,材料在使用过程中会发生损伤,导致材料强度、刚度等机械性能的逐渐下降,损伤累积到一定程度就将造成材料破坏。于是,如何揭示损伤的本质和规律,探索材料在出现宏观裂纹或破坏以前的内部微观结构变化,更深入和全面地了解材料的行为,建立相应的宏细观破坏理论,便成为力学家和材料学家共同关注的一个重要问题。

材料的性能很大程度上取决于其内部缺陷。材料的内部缺陷可以从几何上粗糙地分为点缺陷(空穴、异质原子等)、线缺陷(位错等)、面缺陷(滑移面、微裂纹、晶界等)和体缺陷(微孔洞、夹杂等)。这些缺陷可以是在材料的形成或加工过程中产生的,也可以是在使用过程中形成的,它们一般分布在整个材料之中。在力、热、电、磁等外部载荷或其他环境因素作用下,材料的细观结构中可以发生缺陷的形核、长大等不可逆的热力学耗散过程,在宏观上通常表现为材料性能的劣化直至破坏,这种过程称为材料的损伤。损伤力学正是用连续介质力学、细观力学等方法,研究材料在不同尺度上损伤的物理过程及其对材料行为影响的一门固体力学分支学科。

1958年,L. M. Kachanov^[3]在研究金属的蠕变时提出了连续度 ψ 的概念,

它定义为材料横截面上的有效承载面积与总面积之比,并给出了连续度的演化方程

$$\dot{\psi} = B \left(\frac{\sigma}{\psi} \right)^{\nu} = B \bar{\sigma}^{\nu} \quad (1.1)$$

式中,字母符号上方的·表示关于时间的导数, B 和 ν 为材料参数, σ 为Cauchy应力, $\bar{\sigma} = \sigma/\psi$ 称为净应力。1963年,Rabotnov^[4]引进了损伤因子 $\omega = 1 - \psi$ 的概念,建议了如下的耦合损伤的本构方程和损伤演化方程

$$\dot{\epsilon}^c = A \frac{\sigma^n}{(1-\omega)^m}, \quad \dot{\omega} = B \frac{\sigma^{\nu}}{(1-\omega)^{\mu}} \quad (1.2)$$

式中, ϵ^c 为蠕变应变, A 、 B 、 m 、 n 、 ν 和 μ 为材料参数。

Kachanov和Rabotnov工作的重要意义在于,他们将材料中复杂的、离散的损伤劣化过程及其对本构关系、破坏行为的影响,通过一个简单的连续介质内变量(称为损伤变量)来引入,从而奠定了损伤力学的基础。此后,Leckie和Hayhurst^[5,6],Broberg和Hult^[7,8]等人进一步发展明确了损伤的概念。但直到1977年,Janson和Hult^[9]才首次提出了损伤力学的名词。很快,这一力学分支在航空航天、核能工业等的推动下得到迅速发展。Lemaitre和Chaboche^[10],Murakami和Ohno^[11],Rousselier^[12],Krajcinovic^[13-15],Cordebois和Sidoroff^[16]相继建立了各向同性或各向异性的连续损伤模型,为连续损伤力学的发展作出了重要贡献。

另一方面,Eshelby^[17],Hill和Rice^[18,19],Mura^[20],Kröner^[21]等人出色的研究工作,使得细观力学得以蓬勃发展^[22-26]。到20世纪70年代,Gurson^[27],Budiansky和O'Connell^[28]等人的研究工作标志着细观损伤力学成为损伤力学的另一重要组成部分。进入20世纪80年代以后,细观损伤力学成为固体力学研究的热点之一,取得了丰富的研究成果。

自从1986年Kachanov的第一本损伤力学专著《连续损伤力学导论》^[29]出版以来,国内外已经陆续发表了一些专著、教材和评述性文章^[30-44],对损伤力学的基本内容、已经取得的主要成果进行了总结与讨论。本章仅就损伤力学的几个基本概念和问题加以简单介绍,更详尽的内容可以参见文献[29~43]及其所附文献。

§ 1.2 连续损伤力学和细观损伤力学

材料的损伤机制主要分为两类^[23,30,45],一类是微裂纹的形成、扩展和汇合,最后形成宏观裂纹,这类损伤不引起明显的塑性变形,因而称为脆性损伤机制;另一类是微孔洞的形核、长大和汇合,由于这类损伤往往伴随着显著的塑性变

形,因此也称为韧性损伤机制。这两类机制在不同的材料细观结构中和不同的加载条件下所表现出的性质会有很大差别,因此从载荷模式和材料的宏观响应来讲,损伤又可以分为弹脆性损伤、弹塑性损伤、疲劳损伤、蠕变损伤、冲击损伤、辐照损伤、电致损伤等。针对于各种各样的损伤,力学家们已经提出了很多种损伤模型,其中一些重要的模型已在文献[29~42]中得到介绍和评述。

从特征尺度和研究方法来看,各种损伤理论分为微观损伤理论、细观损伤理论和宏观损伤理论。其中微观损伤理论是在原子或分子的尺度上研究损伤的物理过程。随着计算机技术的快速发展,现在已经能用原子或分子动力学方法数值模拟数目在 10^9 以上的原子或分子所构成的材料的演化过程,这种微观模拟可以对材料的损伤破坏过程提供丰富的、基于本质的信息,也为细观损伤力学和连续损伤力学模型的发展和完善起到推动和借鉴作用。但总地来讲,这种研究方法尚处于起步阶段,还没有一套完整的微观损伤模型出现,与应用尚有相当距离。

现有的损伤模型基本上属于细观损伤力学模型和宏观损伤力学模型。宏观损伤力学又称为连续损伤力学或唯象损伤力学,它不直接考察损伤的物理背景和材料内部的细观结构变化,而是从唯象学角度出发,引入标量、矢量或张量形式的损伤变量来表征损伤的程度与效应,通过构造材料的损伤本构关系和演化方程,并拟合其中的材料参数,使理论预测与实验结果(如承载能力、寿命、刚度等)趋于一致。例如, Kachanov^[3,29], Rabotnov^[4], Lemaitre 和 Chaboche^[10,34~36,46~48], Murakami 和 Ohno^[11,49,50], Rousselier^[12], Cordebois 和 Sidoroff^[16], Krajcinovic 及其合作者^[13~15,31~33,51~53], Talreja^[54], Chow 等^[55~68] 的损伤理论均为唯象损伤理论。目前,连续损伤力学仍处在一个百家争鸣、优胜劣汰的发展阶段。连续损伤力学的主要目的是模拟材料的宏观行为而不是解释材料变形至破坏的物理本质,因此,它更容易被工程设计人员接受,并在结构设计、寿命预测、强度校核等工程实际问题中得到应用。

细观损伤力学是从材料的细观结构出发,对不同的损伤机制加以区分,通过对细观结构变化的物理过程的研究了解材料破坏的本质和规律,并借助一定的平均化方法导出材料的宏观性质。揭示各种工程材料的宏观行为与细观结构及其演化之间的关系是细观力学的基本任务。细观损伤力学主要研究尺度范围介于连续损伤力学和微观损伤力学之间的材料细观结构如微裂纹、微孔洞、剪切带、晶界等的损伤演化过程。它一方面忽略了损伤的过于复杂的微观物理过程,避免了微观统计力学的繁琐计算,另一方面又包含了不同材料的细观几何特征,为损伤变量和损伤演化方程的建立提供了一定的物理背景。一些典型的细观损伤模型有 Gurson^[22], Krajcinovic 及其合作者^[14,30,69~75], Ju 和 Lee 等^[76~80], M. Kachanov^[81], Nemat-Nasser 和 Obata^[82], Becker、Basista 和 Gross 等^[83~86], 以及其