

〔法〕J. 勒迈特 著

损伤力学教程



科学出版社

损伤力学教程

〔法〕J. 勒迈特 著

倪金刚 陶春虎 译



科学出版社

1996

(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

本书为连续损伤力学研究领域的权威性专著, 内容丰富, 论述系统, 深入浅出, 具有理论分析, 数值计算与实验研究相结合的特点。它的翻译出版对我国正在兴起的损伤力学研究具有指导意义。

全书共分为四章。第一章介绍损伤的唯象特征, 主要描述损伤的不同形式及一维损伤模型的主要概念。第二章对损伤与应变的耦合进行了三维描述。第三章讨论了损伤演变的运动规律。第四章对结构部件中裂纹萌生的预测进行了讨论。

本书可供高等理工院校高年级本科生、硕士生和博士研究生, 以及从事疲劳、断裂和损伤理论研究的教师和科研人员使用。

Jean Lemaitre

A COURSE ON DAMAGE MECHANICS

Springer-Verlag 1992

损 伤 力 学 教 程

〔法〕J. 勒迈特 著

倪金刚 陶春虎 译

李松年 校

责任编辑 朴玉芬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街15号

邮政编码: 100717

新蕾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1996年1月第一版 开本: 787×1092 1/32

1996年1月第一次印刷 印张: 8 7/8

印数: 1—1000 字数: 189 000

ISBN 7-03-004756-7/O·809

定价: 14.60 元

中文版序言

机械零部件的失效不仅会带来重大的经济损失，有时还会造成人员的伤亡，因此研究在载荷、温度和环境等因素作用下结构材料强度和刚度的下降及其使用寿命和安全可靠性，已经成为当今材料科学、力学和工程技术界所共同关注的课题。损伤力学就是近几十年发展起来的、通过力学变量来研究结构材料在载荷的作用下其性能退化并导致破坏的规律和机理的一门学科。它建立在严格的热力学和微观力学基础上，着重研究材料内部的损伤演变并发展成为工程可见裂纹的失效初级阶段。与传统的疲劳理论相比，损伤力学的实用价值还在于能更准确更科学地预测结构材料的循环寿命。

J. 勒迈特先生是法国巴黎第六大学著名教授，是近代连续损伤力学研究领域的主要创始人和卓越的代表之一。本书是作者积二十余年的教学、科研与工程应用之经验，并综合世界各国在损伤力学研究领域所取得的科学进展与成就，编写成的关于该理论系统的、完整的简明教程。本书内容丰富，论述系统，深入浅出，具有理论分析、数值计算与实验研究相结合的特点，是损伤力学研究领域的一部重要学术专著。本书既可作为高等理工院校力学专业本科生及硕士和博士研究生的教材，也可供从事断裂力学、损伤力学、材料科学及失效分析与预防研究的教师和工程科技人员参考。

我们感谢倪金刚和陶春虎二位年轻博士和科学出版社及时地将这本专著奉献给我国力学界，本书中文版的出版发行

对于我国正在兴起的损伤力学研究具有指导意义，同时对于我国高等院校和研究机构有关的科研工作也将起到积极的促进作用。

北京航空材料研究所教授 颜鸣皋
中国科学院院士

1995 年 9 月于北京

作者为中文版写的序言

《损伤力学教程》被译成汉语在中国出版使我感到万分荣幸和自豪！尽管我只认识几个汉字，但这种文字使我十分着迷。我于 1983 年、1991 年和 1994 年三次访华，与中国的朋友们，更确切地说是中国的同行们相处，感到非常愉快。中法两国文化水乳交融，有着相互交流的强烈愿望，而损伤力学则成为我们之间友谊的桥梁，因为正是在武汉华中理工大学，我第一次讲授了损伤力学，请允许我再次感谢李灏教授和黄克智教授对我多次的盛情邀请和真挚友情。

于是我很愉快地接受了北京航空航天大学倪金刚博士关于将本著作译成中文的建议，同时我坚信倪金刚博士与他的朋友，北京航空材料研究所陶春虎博士合作，在北京航空航天大学李松年教授的帮助下，他们的能力和认真负责的态度定能圆满完成这项翻译工作。现在他们以空前的速度使这项工作大功告成，科学出版社编辑朴玉芬女士和鄢德平先生对翻译质量表示赞赏，并对出版工作给予了大力支持。中科院院士颜鸣皋教授还为本著作中文版写了序言。在此我由衷地感谢所有为本著作中文版的翻译和出版工作付出辛勤劳动和给予帮助支持的朋友们，愿《损伤力学教程》一书能成为中国的力学家、物理学家和数学家们，以及我的同事和朋友们手中的一本有价值的读物！

J. 勒迈特

1995 年 6 月 6 日于巴黎

英文版序言

一个新的科学分支通常是这样发展起来的,即某些人首先提出基本设想,开始还有些犹豫,继而逐渐出现了一些其它有创造性的贡献,在达到一定的程度后,人们相继发表一些综述性文章,举行相关的学术会议,并在教科书中首次提到,最后写出专著。可以说连续损伤力学现在已经达到了这种状态。

对机械零部件或其它结构进行失效分析,或者可能的话对其进行预测,是工程科学的主要目的之一。因此,基于对已有裂纹进行分析的断裂力学成为其重要的前沿分支之一。然而断裂力学研究方法对预防事故的发生,尤其在循环载荷的条件下,则未免太迟了。因此,人们提出了关于初始先兆状态的问题,即在出现宏观可见裂纹之前,材料内部损伤的演变问题。解决这个问题一个成功的方法就是 Weibull 理论,它是以统计的方法分析所研究材料内部的“最薄弱环节”。遗憾的是,这一理论用于研究复杂的部件或结构时遇到了非常难于解决的数学问题。因此当 L. M. Kachanov 于 1958 年提出有关材料损伤的简单模型时,立即受到科技界的高度评价。这一模型后来被推广应用于研究脆性、弹性、塑性或粘性材料承受单轴或多轴、单调或循环等各种载荷情况,因此可以认为它是近乎普遍适用的。当然对于一门新兴的学科,许多问题尚有待于解决,对模型的局限性还需要做进一步的研究。

本书作者, J. 勒迈特教授是损伤力学研究领域最卓越的

代表之一。本专著涉及损伤力学研究的所有方面，从基本概念、理论和热力学分析直到数值计算及实验应用，并且还用足够的篇幅论述关于参数确定的问题。作者表达的风格生动活泼并具幽默感，而决无枯燥之嫌，所以即使是较难的章节也容易理解。一部优秀的论著终于问世了，它对于每个工程师或科技工作者研究现代材料强度问题都是非常有价值的。

我衷心祝愿本著作的出版发行取得圆满成功！

德国慕尼黑科技大学

H. 利普曼 教授

1990年8月6日于慕尼黑

引 言

封面上为什么会出现一个苹果呢？

然而为什么不可以呢？您觉得任何其它的水果类能有如此之多的味道吗？况且我喜欢苹果！说个笑话，70年代初期，在法国讲授“现代”数学是件很时髦的事，那时人们常在黑板上画一个马铃薯，用来表示一族具有相近 Bernoulli 性质射线的点集。于是为与我的同事们取乐，我就画一个苹果来表示单元体，而学生们恰好也喜爱它。

为什么要讨论损伤？

自从人们开始设计和制作零件时，就把大部分精力都花费在防止失效方面。然而在损伤概念出现之前，应力和应变的概念是很难得到发展的，这可能是因为它们与位移有关，而位移是能够看到和触觉到的。损伤则是材料在失效之前的逐渐劣化过程，而它通常是看不见摸不着的。几百年来，对断裂的研究仅仅将它当作一种与临界的载荷、应力、应变以及加载时间或加载循环数相关的“是或非”的过程。尽管 A. Palmgreen (1924), M. A. Miner (1945), 和 E. L. Robinson (1952) 等人先后提出了与失效之前材料的渐进变质相关的变量概念，但是可以说 1958 年是连续损伤力学发展的起步年，这一年里 L. M. Kachanov 发表了第一篇称为“连续性因子”场变量 ψ 的论文。约 15 年后，人们将 $D = (1 - \psi)$ 看作热力学意义上的内部状态变量： $0 \leq D \leq 1$ （无损状态为 0，失效为 1）。在这 15 年间，人们实际上忽视了这一概念，只有一

项重要研究成果于 1968 年问世, 这就是 Y. N. Rabotnov 引入的有效应力概念。损伤力学到 70 年代才得到基本的发展, 至少比断裂力学得以迅猛发展晚 10 年。到了 80 年代, 这一理论得以建立在更严格的热力学和微观力学基础上, 并且随着更多学者的介入, 该理论开始在工程上得到应用。

关于本教程的来历。

将损伤力学的主要成果汇集成系统的教学单元这一想法产生于 1983 年, 当时李灏教授邀请我在武汉华中理工大学讲授损伤力学教程; 之后便成为“损伤戏团”; 1985 年应 R. Sampaio 教授邀请去了巴西的里约热内卢; 1986 年应 S. Murakami 教授邀请去了日本名古屋; 1987 年应 H. Lippmann 教授邀请去了德国的慕尼黑; 还在巴黎由 D. Francois, A. Pineau, 和 A. Zaoui 等教授发起的为“大学-工程师学校”第三阶段的“力学与材料”专业设立了损伤力学教程。将损伤力学写成教材的形式这一机会首先是洪堡基金会通过奖励赋予的, 我与慕尼黑科技大学的 H. Lippmann 教授和 J. Najjar 教授一道, 利用 1988 年和 1989 年的“空闲时间”对损伤力学内容进行了整理。应 F. Leckie 教授之邀, 我于 1989—1990 年在美国圣巴巴拉加利福尼亚大学度过了整整一个学年, 与 F. Leckie, A. Evans, J. Hutchinson 和 R. McMeeking 这几位同行一起工作使我受益匪浅, 这次邀请又一次给我提供了提笔著书的机会。顺便提一下, “损伤戏团”还扮演着“损伤兄弟”的角色, 1986 年在意大利乌迪内, 与我的朋友 J. Hult, D. Krajcinovic, F. Leckie 和 S. Murakami 等一道讲授了 CISM 教程; 在 1988 年和 1990 年与我年轻的同事和朋友们 A. Benallal, R. Billardon 和 D. Marquis 等一道组成了“现代损伤四伙伴”。对这个显然既不完整又不准确的损伤

理论综述,我还得益于列入参考文献中的几次损伤力学会议。法国“GRECO-CNRS”以及“大变形与损伤”试验组在1980至1989年期间至少有25个协作研究小组,它是由P. Germain教授所创建的法国固体力学学校的熔炉,在此讨论了许多概念和应用上的问题。但必须讲明的是,首先与我的朋友J. L. Chaboche博士在ONERA,然后于1975年之后在卡尚(Cachan)“力学与技术试验室”,我找到了一个异常的研究与友谊的氛围,在此氛围中探讨,发展或者抛弃了一些概念。在此我感谢你们大家所给予的帮助和友谊。

本书的主要目的在于发展力学,它是一个宏观模型,以便用于工程机械部件的设计、制造、试验及控制。因此,对于机械师来说它是物理学,数学家视其为力学,计算机专家视其为数学,工程师将它作为计算,而对物理学家,它就是工程问题。

本教程共分四章:

第1章介绍损伤的唯象特征,主要描述不同类型的损伤及其一维模型的主要概念。一个重要小节讨论了损伤的测量,该领域或许需要做更进一步的研究。

第2章是关于损伤力学的主要部分,对三维状态的损伤与应变耦合进行了描述。尽管当前人们正广泛应用微观力学理论推导一般函数的解析式,但热力学依然是连续损伤力学理论的主要框架。

第3章全部用于对损伤演变动力律的研究,这是统一诸多模型的一种尝试。那些模型是针对金属、聚合物、混凝土、陶瓷及复合材料等的脆性损伤、延性与蠕变损伤、低周和高周疲劳损伤而提出的。

在第4章中,我们应用若干方法对结构部件中裂纹萌生

的预测条件进行了讨论，其中既包括简单的运算方法，也包括应用计算机程序及有限元计算得到的比较准确的方法，此外还详细介绍了由损伤增长到裂纹萌生的整个演变过程的后处理程序。

将以上几章内容写成教程的形式以便于高年级学生及研究生们阅读，并在每章的后面给出了详细的计算步骤和练习。对大学或工程师学校来说，这无疑是一本教程；但我还希望，对于一些研究中心及工业界的工程师们的继续教育来说，它又是一门崭新的学科教程。

许多人读了本书的手稿，并对书中英文的缺陷以及有关术语的解释提出了改进意见，对此深表谢意。此外，H. Lippmann 教授为本书的出版写了序言；F. Leckie 教授，A. Benallal，R. Billardon，I. Doghri 和 D. Marquis 等博士，以及我在圣巴巴拉加利福尼亚大学的学生们：S. Gunawardena，K. Herath，J. Manderscheid，D. Sherman 等对本书的出版做了许多有益的工作；June Finney 和 Sabine Lemaitre 非常仔细地打印了本书的手稿；封面上的照片是由 Annie Lemaitre 完成的，在此一并表示感谢。

J. 勒迈特

1988 年春—1991 年春

符 号 表

对于一个新的研究领域，标记选择总是困难的，因为几乎所有的字母都已经被赋予一种特定的含义。本书尽可能地按常规准则来选择标记，然而又不可能完全避免应用同样的字母来表达不同的含义，请读者多加留心并予以谅解。

运算符

x	标量
x_i	向量 $\vec{x}$ 的分量
x_{ij}	二维张量 $\mathbf{x}$ 的分量
$[x]$	矩阵
$\dot{x}$	x 对时间的导数 ($\dot{x}=dx/dt$)
$x_{i,j}$	$\vec{x}$ 的梯度
$x_{ij,j}$	$\mathbf{x}$ 的散度
δ_{ij}	Kronecker 算子: $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$, $i \neq j$ 时 $\delta_{ij}=0$
x_{kk}	$\mathbf{x}$ 的迹
$x_{ij}x_{ij}$	$\mathbf{x}^2$ 的迹
x_{ij}^D	偏张量的分量 $x_{ij}^D = x_{ij} - \frac{1}{3}x_{kk}\delta_{ij}$
$ x $	x 的绝对值
$\text{sign}(x)$	与 x 同号取+或—
$\llbracket x \rrbracket$	x 的非连续性
$\langle x \rangle$	Mac Auley 括号

若 $x < 0$, $\langle x \rangle = 0$;
 若 $x \geq 0$, $\langle x \rangle = x$

$\bar{x}$ x 的平均值
 Δx x 的范围 (峰—峰幅值)
 d, ∂, δ 微分算子
 H Heaviside 函数: $x < 0$ 时, $H(x) = 0$;
 $x \geq 0$ 时, $H(x) = 1$
 $\ln$ 自然对数

符号

a 裂纹长度
 a_{ijkl} 弹性模量
 A Gurson - Tvergaard 材料参数
 A 裂纹面积
 b 各向同性硬化材料指数
 B Gurson - Tvergaard 材料参数
 C Paris 裂纹扩展公式中的材料参数
 d 微单元长度
 D 损伤变量
 D_s, D_n 剪切与拉伸损伤变量
 $D_{ij}, \mathbf{D}$ 损伤张量分量及二阶各向异性损伤张量
 D_{ijkl} 四阶各向异性损伤张量分量
 D_c 裂纹萌生临界损伤
 D_{lc} 纯拉伸下的临界损伤
 $\dot{e}$ 比内能率
 E Young's 弹性模量
 E_T 弹塑性剪切模量

$\tilde{E}$	有效损伤弹性模量, 拉伸时为 $\tilde{E}^+$, 压缩时为 $\tilde{E}^-$
f	屈服函数
$\tilde{f}$	体力
F	力
F	耗散势函数
F_D	损伤势函数
g	应变-应力函数
$\vec{g}$	应变率不连续性向量
G	应变能释放率
G_c	材料的能量韧性
h	裂纹闭合参数
H	微硬度
H	Heaviside 函数
H_{ijkl}	弹塑性剪切刚度矩阵分量
i	电流强度
I_{kl}	单位二阶张量分量
I_{ijkl}	单位四阶张量分量
k	系数、因子
$\dot{k}$	比动能率
K	应力强度因子
K_p	循环塑性材料参数
K_v	蠕变材料参数
K_∞	粘性材料参数
K_T	应力集中系数
l	细观体积单元长度
m	质量

M	材料点
M	应变硬化材料指数
n	缺陷数
n	粘性材料指数
$\vec{n}$	单位法向向量
N	循环数
N	Norton 蠕变材料指数
N_R	断裂循环数
p	累积塑性应变
p_D	损伤门槛塑性应变
p_x	比外力功率
P	孔积率
$\vec{q}$	热流向量
Q	输入热速率
r	电阻系数
r	各向同性硬化应变
R	各向同性硬化应力变量
R_∞	各向同性硬化材料参数
R_o, R_a	刚性
R_v	三轴函数
s	比熵
s	裂纹面积
S	截面面积
S_D	损伤截面积
S	损伤强度材料参数
t	时间
T	温度

$\vec{u}$	位移向量
v	波速
V	电位差
V	体积
w_e	弹性应变能密度
w_e'	弹性余能密度
W_e	物体的弹性应变能
x	坐标
X, X_{ij}^D	一维和多维运动硬化应力变量张量及其分量
X	运动硬化材料参数
Y	应变能密度释放率
Y_s, Y_n	剪切和拉伸应变能密度释放率
Y_{ijkl}	应变能释放率张量分量
Y_c	临界断裂应变能密度释放率
α, α_{ij}	一维和多维运动硬化变量张量及其分量
γ	非线性运动硬化材料参数
Δ	幅值
$\epsilon, \epsilon_{ij}, \epsilon$	单轴和多维总应变张量
$\epsilon_e, \epsilon_{ej}', \epsilon^e$	一维和多维弹性应变张量
$\epsilon_p, \epsilon_{ij}^p, \epsilon^p$	一维和多维塑性应变张量
ϵ_H'	流体静压弹性应变
ϵ_{eq}	当量总应变
ϵ_{PD}	纯拉伸下的损伤塑性应变门槛
ϵ_R	断裂应变
η	Paris 裂纹扩展材料指数
ϕ	耗散