

材料的概率疲劳损伤特性及 现代结构分析原理

曾 攀 著

Probabilistic Fatigue
Damage Properties
of Materials

Modern Analysis
Principle
for Structures

科学技术文献出版社

材料的概率疲劳损伤特性 及现代结构分析原理

(国家自然科学基金资助项目)

曾 攀 著

科学技术文献出版社

(京)新登字 130 号

材料的概率疲劳损伤特性
及现代结构分析原理

曾攀 著

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路 15 号 邮政编码 100038)

中共重庆市委机关印刷厂印刷

新华书店重庆发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168 毫米 32 开本 10.625 印张 295 千字

1993 年 3 月第 1 版 1993 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—2000 册

科技新书目: 281—103

ISBN 7-5023-1799-6/TB·3

定 价: 13.00 元

作者简介

曾攀,生于1963年2月,海南省海口市人。1982年在西北工业大学飞机系飞机结构与强度专业获学士学位;1984年12月在北京航空航天大学航空宇航制造工程系获硕士学位;1988年6月在清华大学机械工程系获博士学位(从师俞新陆教授);1988年7月至1990年7月在大连理工大学工程力学研究所从事第一站博士后研究(从师钱令希教授,钟万勰教授,程耿东教授),并于1990年8月获副教授职称资格;1990年8月到西南交通大学应用力学研究所从事第二站博士后研究(从师孙训方教授,高庆教授),1992年10月出站后至今在清华大学机械工程系工作,1992年获“中国力学学会青年科技奖”,并被国家自然科学基金委列为同行专家评阅人。主要从事计算力学、损伤力学、岩土力学、疲劳、蠕变、大型机械结构分析等方面的研究,国内外发表论文60多篇。

序 言

这是一本学术专著，也是一本学术论文集。全书各章之间既有联系又具有独立性，既是作者多年来从事科研工作的成果积累，也反映了作者对固体力学发展趋向的一些独特见解。

这本专著主要是由以下两方面内容所组成的，即从概率统计的角度讨论材料的疲劳损伤（第一部分），以及从最优控制理论的角度讨论力学中的变分问题和结构分析原理（第二、三部分）。

第一部分是连续损伤力学为基础，应用概率统计的方法研究概率特征性单元，具体讨论疲劳损伤中的局部性及其表现形式，在此基础上建立起概率疲劳损伤力学，并进一步讨论和研究了疲劳强度概率分布、疲劳绝对尺寸效应、P-S-N 疲劳可靠性试验中最佳试件个数的确定以及实际工程中的概率疲劳损伤力学方法等专题。

第二部分是对最优控制变分原理的研究，其中包括三个专题，即连续动态最优控制理论与力学中的最优控制原理、固体力学中的连续动态演化系统与 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程以及参变量变分原理与最优控制变分原理。在这一部分里，通过最优控制变分原理与参变量变分原理之间的关系着重讨论了参变量变分原理应用范围和层次结构。

第三部分则侧重于参变量变分原理在各个具体专题中的应用，是作者对现代结构分析原理具有创见性的讨论，观点新颖，富有启发性，其中的每一篇都具有广阔的推广应用前景，特别是第十七篇以后侧重讨论了变分原理在损伤力学和细观力学中的应用，这几篇对损伤力学和细观力学中的数值计算是很有参考价值的。

书中附录较系统地介绍了损伤力学、细观力学以及参变量变分原理，以便读者概括了解这三方面的基础知识，为细读全书创造条件。

该书既可以作为工科力学专业的硕士或博士研究生的参考教

材，也可以为固体力学科研工作者在该书范围内进行深入研究时提供富有启发性的观点和思路。由于该书涉及的面十分宽广，所以，对每个具体问题的研究都还有大量深入的工作可做。相信这本书的问世将会起到推动固体力学有关学科分支向深入方向发展的作用。西南交通大学应用力学研究所的重点研究课题——损伤局部性理论的研究也将会从这本书中的有关观点和思路得到启发而向纵深方向推进，反过来又会以一系列新的科研成果来丰富这本书的内容。我们寄希望于这本书在第二版中能将这些成果以及其它方面的成果充实进去，以进一步丰富和提高这本书中的新观点、新理论和新方法。

孙训方

一九九二年三月二十一日

前 言

《国家自然科学基金项目指南》(1991年)中指出:力学是一门基础学科,又是一门技术学科,是人类认识自然的极其重要的手段之一,由于力学是定量的精确科学,它不仅为许多工程学科和某些基础学科提供了有用的工具,还已经成为现代大生产和高技术的基础之一;力学是正在蓬勃发展中的学科,它向着更广阔的应用与基础研究领域发展,力学本身的理论体系也在不断地发展,这促使力学工作者从各个层次(从宏观到微观以至分子原子层次)来研究材料的力学性质;当代力学正在突破传统的领域,与数学、物理、化学、天文、地学、生物学及相应的工程技术、医学、农学等相结合,产生了许多交叉与边缘学科。力学今后至十年内,应加强的基础研究是非线性力学,材料的变形、损伤和破坏,非平衡流体力学和环境力学等,使力学进入一个新的发展阶段。

以上这一段文字指明了我国力学在当今乃至今后十年的发展方向,也反映出国际上力学学科的发展趋势。本书试图根据以上有关的思路作为出发点,从概率统计的角度讨论材料的疲劳损伤,从最优控制理论的角度讨论力学中的变分问题和结构分析原理。

本书分三个部分:第一部分为材料的概率疲劳损伤特性(Probabilistic Fatigue Damage Properties of Materials);第二部分为力学中的最优控制变分原理(Optimal Control Variational Principle in Mechanics);第三部分为现代结构分析原理(Modern Structural Analysis Principle)。

自然界的许多规律都是随机的而非确定性的。固体材料在外荷载的作用下表现为内部微缺陷的不断增长、积累直至材料的失效,这在疲劳现象中尤为明显,因而从概率论、统计学以及近年来发展起来的连续损伤力学来研究疲劳这一动态演化的力学问题就成为自

然。本书的第一部分就是关于这方面的尝试。

第一部分包括第一篇至第九篇。第一篇以连续损伤力学(Continuum Damage Mechanics)为基础,分析以一个周期循环为基本单位的疲劳应力应变损伤场的变化,建立起初始应力场及疲劳损伤过程应力场之间的联系;第二篇全面论述了疲劳的各方面特点,包括不可逆的损伤性、概率统计性及损伤中的局部性,提出概率疲劳损伤力学的基本假设,应用连续损伤力学理论来研究特征性体积单元 RVE (Representative Volume Element),然后应用概率统计的方法研究概率性体积单元 PVE (Probabilistic—Volume Element),具体讨论疲劳损伤中的局部性及其表现形式,建立起概率疲劳损伤力学 PFDM (Probabilistic Fatigue Damage Mechanics) 基本模型;第三篇和第五篇分别就疲劳中最常用的两种概率分布,即 Lognormal 分布和 Weibull 分布,具体给出概率疲劳损伤力学中的表达式;第四篇研究疲劳统计学中的 Lognormal 分布和 Weibull 分布之间的逼近性,从数学上推导出由 Lognormal 分布去逼近和估计三参数 Weibull 分布的表达式,从而提出一种工程上简单易行实用的 Weibull 分布的三参数估计方法,并给出有关的应用图表供查阅;在随后的几篇中基于概率疲劳损伤力学讨论和研究了疲劳强度概率分布、疲劳的绝对尺寸效应问题、P-S-N 疲劳可靠性试验中最佳试件个数的确定以及实际工程中的 PFDM 方法等专题。

众所周知,经典弹性力学及弹塑性力学变分原理主要是处理静态或“准静态”力学问题,并已发展得相当完善和成熟,为至今广而用之的有限元方法奠定了坚实的基础,在工程实际中产生了巨大的效益。现代力学的几个显著特点就是高度非线性、时间的相关性以及动态演化性,这表现在描述材料本构行为的高度非线性及形式多样化的方程组与与时间相关的本构演化方程。如损伤力学中的损伤演化方程,细观力学中的空穴增长方程,粘塑性问题中的粘塑性增长律,蠕变力学中的蠕变损伤增长律等,这一类问题可统称为动态演化力学问题 (Mechanics With Kinetic Evolution)。科学的发展向人们提出新的需要,要求建立起能处理高度非线性及动态演化的力学

问题的结构分析原理。现代控制理论是吸收现代技术进步和现代数学的成就而发展的新领域，最优控制理论是现代控制理论的重要组成部分之一，用以处理时变系统及非线性系统的最优解和最优控制，从数学上讲，动态演化力学的结构变分极值问题和最优控制问题具有极大的相似性，因而从最优控制的观点和方法来研究动态演化力学问题的变分原理就成为自然。本书的第二部分及第三部分就是这种方法的初探。

第二部分包括第十篇至十二篇。第十篇主要将连续动态最优控制理论应用于力学系统中，首先就包含有本构演化方程的连续动态演化力学问题给出控制理论方面的描述以及非线性本构关系的处理，应用动态规划理论和最小值原理研究连续动态演化力学系统的时间离散化过程，就力学问题的特点推导出相应的顺向子级寻优的 Bellman 递推公式，再研究各时间子级的最小值原理，这样就从理论上将连续动态演化力学过程的求解化为各时间子级的力学变分问题，形成了最优控制变分原理。文中还应用 Hamilton 函数讨论了连续动态演化力学和系统。第十一篇讨论了连续动态演化力学系统变分求解的连续形式，即 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程。第十二篇讨论最优控制变分原理与近年发展起来的参变量变分原理之间的关系，从理论上进一步论证了参变量变分原理的应用范围和层次结构。

第三部分包括第十三篇至第二十篇。研究参变量变分原理在具体专题中的应用，并给出相应的有限元列式及求解步骤。第十三篇研究参变量变分方法在土力学基本问题中的应用。用基于参变量变分原理编制的结构分析软件 DDJ-W (S) 研究土力学中的 Rankine 挡土墙问题，从计算量，计算精度，增量步长的影响几个方面严格地考察参变量变分原理及相应的有限元方法；第十四篇研究岩土中弹塑性渗透固结问题的结构原理及相应的有限元法；第十五篇研究 Perzyna 粘塑性问题的结构分析原理及相应的有限元法；第十六篇是关于弹塑性的结构分析原理及有限元；第十七篇是研究损伤力学中的变分原理。损伤力学是近年来在国内外引起关注并发展很快的领域，具有广阔的应用前景。到目前为止，损伤力学研究的热点主要

还是在材料的损伤本构行为方面,关于它的全耦合结构分析方面研究还很少,这里应用最优控制变分原理建立起损伤全耦合分析的变分原理,并给出相应的有限元方法;第十八篇是关于蠕变损伤问题,就弹性蠕变问题,具有损伤耦合的弹塑性蠕变问题以及非线性局部化效应的蠕变问题研究相应的参变量变分原理及有限元列式,分别就 2.25Cr-1Mo 钢(在 550℃下),GH33A 合金(在 700℃下)以及 GH36 合金(在 650℃)的蠕变问题给出应用实例;第十九篇是关于细观力学中空穴模型的结构分析原理及有限元方法。细观力学可以说是当前宏观与微观研究材料力学行为的结合点,也是近年来材料本构行为研究的另一分支领域,这里基于 Gurson 提出的描述空穴型损伤的塑性本构方程,建立起用于结构分析的变分原理及有限元列式;第二十篇是关于蠕变与疲劳交互作用下的结构分析变分原理。蠕变与疲劳交互作用在喷气发动机,核电站及化工厂中是主要的损伤形式,因而在工程实际中显得非常的重要,这里同样给出能应用于工程实际的结构分析原理及具体实施方法。

损伤力学、细观力学以及参变量变分原理都是近年来发展较快的新领域,也是国内外许多学者研究的热点。虽然它们正处在发展和完善之中,但却表现出了广阔的应用前景。本书在附录部分对这几个分支领域作了一系统的介绍。另外,与本书内容有关的参变量变分原理以及二次规划也在附录中作一简要的介绍。

本书既是一部学术专著又是一本论文集。书中各专题既相互独立自成一体又相互联系形成体系,大部分内容选自作者承担的国家自然科学基金项目、国家博士后科学基金项目以及国家博士后日常科研资金项目的科研工作,许多有关内容已在国内外重要的学术刊物及会议上发表及宣读。为方便查阅,所有参考文献都在各篇专题后分别给出,有些内容难免有些重复。

希望本书能对力学、结构分析、土木、机械等专业的研究人员、教师、研究生以及高年级本科生有所帮助。由于作者水平有限,错误和不当之处,望读者和专家们指正。

本书所涉及的研究项目得到了国家自然科学基金(青年)、国家

博士后日常科研资金的资助，也得到科学技术文献出版社的大力帮助。

本书的许多工作得到了以下先生的指教和帮助，在此表示深切的感谢！

钱令希	教 授	(大连理工大学)
孙训方	教 授	(西南交通大学)
钟万勰	教 授	(大连理工大学)
俞新陆	教 授	(清华大学)
程耿东	教 授	(大连理工大学)
高 庆	教 授	(西南交通大学)
陈大鹏	教 授	(西南交通大学)
颜永年	教 授	(清华大学)
胡凌云	教 授	(北京航空航天大学)
张相周	教 授	(西北工业大学)
郭忠信	研究员	(北京航空航天大学)
张柔雷	博 士	(上海交通大学)

最后，还要向张乐燕女士致以特别的感谢，在本书的文稿准备中，她付出了大量而又烦琐的劳动。

内 容 简 介

本书内容涉及目前有关疲劳、损伤、蠕变、结构分析等方面的部分研究前沿。主要分三大部分：第一部分是关于材料的概率疲劳损伤特性的研究，内容包括疲劳损伤力学；概率疲劳损伤力学基本模型；Weibull 分布与 Lognormal 分布之间的逼近性及新的参数估计方法；疲劳强度概率分布估计；P-S-N 疲劳可靠性试验中的最佳方案；实际工程中的概率疲劳损伤力学方法等九个专题。第二部分是关于力学中的最优控制变分原理的研究，内容包括连续动态最优控制理论与力学中的最优控制变分原理；固体力学中的连续动态演化系统与 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程；参变量变分原理与最优控制变分原理等三个专题。第三部分是关于现代结构分析原理的研究，内容包括岩土力学中的参变量变分方法及有限元；岩土弹塑性渗透固结问题的结构分析原理；粘弹塑性问题的参变量变分原理及有限元；热弹塑性问题的结构分析原理；损伤力学中损伤全耦合分析的变分原理及有限元；蠕变损伤分析的变分原理和方法；细观力学中空穴模型的变分原理及有限元列式；蠕变疲劳交互作用下的结构分析原理和方法等八个专题。

损伤力学和细观力学是近年来研究的热点，其中有关的许多理论已日趋成熟。本书的许多研究都与这些内容密切相关，因此，将这些内容在附录 A 和 B 中作了详尽的介绍；另外，就与本书有关的参变量变分原理和二次规划也在附录 C 和 D 中作了介绍。

本书适合于力学、结构强度、土木、机械等专业的研究人员、教师、研究生及高年级本科生阅读，对于希望从事疲劳、损伤、概率统计以及现代结构分析等研究和对这些领域感兴趣的科技工作者，本书也是一本有价值的读物。

目 录

前 言

第一部分 材料的概率疲劳损伤特性	(1)
第一篇 关于疲劳损伤力学	(3)
第二篇 概率疲劳损伤力学基本模型	(14)
第三篇 基于 Lognormal 分布的概率疲劳损伤力学 模型	(32)
第四篇 Weibull 分布与 Lognormal 分布之间的逼近 性及新的参数估计方法	(52)
第五篇 基于 Weibull 分布的概率疲劳损伤力学 模型	(63)
第六篇 疲劳强度概率分布的估计	(68)
第七篇 疲劳的绝对尺寸效应的统计研究及分析	(74)
第八篇 P-S-N 疲劳可靠性试验中最佳试件个 数的确定	(82)
第九篇 实际工程中的概率疲劳损伤力学方法	(90)
第二部分 力学中的最优控制变分原理	(98)
第十篇 连续动态最优控制理论与力学中的最优 控制变分原理	(100)
第十一篇 固体力学中的连续动态演化系统与 Hamilton-Jacobi-Bellman 方程	(125)
第十二篇 参变量变分原理与最优控制变分原理	(133)

第三部分 现代结构分析原理 (140)

第十三篇	岩土力学中结构分析的参变量变分方法及有限元	(141)
------	-----------------------	-------

第十四篇	岩土中弹塑性渗透固结问题的数值分析原理	(172)
------	---------------------	-------

第十五篇	粘弹塑性问题的全耦合参变量变分原理及有限元	(189)
------	-----------------------	-------

第十六篇	热弹塑性问题的结构分析原理	(199)
------	---------------	-------

第十七篇	损伤力学中损伤全耦合分析的变分原理及有限元	(205)
------	-----------------------	-------

第十八篇	蠕变损伤分析的变分原理及方法	(227)
------	----------------	-------

第十九篇	细观力学中空穴模型的变分原理及有限元	(248)
------	--------------------	-------

第二十篇	蠕变疲劳交互作用下的结构分析原理和方法	(259)
------	---------------------	-------

附录 A 损伤力学的热力学理论 (270)

第一节	引言	(270)
-----	----	-------

第二节	损伤变量与测量	(272)
-----	---------	-------

第三节	损伤力学的热力学基本理论	(274)
-----	--------------	-------

第四节	延性损伤	(285)
-----	------	-------

第五节	低周疲劳	(288)
-----	------	-------

第六节	高周疲劳	(290)
-----	------	-------

第七节	蠕变损伤	(292)
-----	------	-------

附录 B 细观力学 (296)

第一节	引言	(296)
-----	----	-------

第二节	细观力学的研究内容	(297)
-----	-----------	-------

第三节	Gurson 空穴型本构模型	(302)
-----	----------------	-------

附录 C 参变量变分原理 (310)

第一节	引言	(310)
第二节	参变量变分原理的基本思想	(310)
第三节	参变量变分原理	(311)
第四节	应用	(316)
附录 D 二次规划及其算法		(318)
第一节	Kuhn-Tucker 条件	(318)
第二节	二次规划	(319)
第三节	线性互补问题的 Lemke 算法	(320)

第一部分 材料的概率疲劳损伤特性

(Probabilistic Fatigue Damage Properties of Materials)

据调查,机械部件的失效,约有 80%左右是由于疲劳而引起的,过去研究疲劳失效的方法主要是经验性或半经验性的方法,尚未形成较为严格和完善的体系。从损伤的观点来看,材料在交变外荷载作用下,其内部的微缺陷、空穴不断地产生与发展,从宏观上表现为材料的变形与衰变,当材料的损伤积累到它的临界值时则产生破坏或失效(或产生宏观裂纹),可见疲劳是和损伤密切相关的。

损伤力学是近年来发展起来的,它是研究在各种加载条件下(塑性、蠕变、疲劳等),物体中损伤随着变形而发展并最终导致破坏的过程和规律;它具有较严格的理论基础,逐渐成为固体力学中的一个分支领域。近年来许多重要的国际会议对损伤力学进行了专门讨论并发表了许多文章,如 1980 年国际理论与应用力学联合会(IUTAM)在美国召开的“连续介质力学方法在损伤与寿命估算方面的应用”会议上专门讨论了损伤力学;1981 年的 ICF-5、1981 年的 SMiRT-6、1989 年的 SMiRT-10、1991 年的 SMiRT-11、1991 年的 ICM-6 等著名会议上也发表了许多有关损伤力学方面的文章。美国材料试验学会 ASTM 也出版了有关复合材料损伤力学的文集 ASTM-STP-775;1987 年由 CISM 和 NATO 赞助并由 Springer Verlag 出版了《Continuum Damage Mechanics Theory and Applications》一书,该书可以说是目前损伤力学方面的权威著作之一。和经验性方法截然不同的是,损伤力学中引入一个损伤内变量来描述材料的损伤状态,并建立起演化方程来刻画损伤变量的演化规律,这样就能动态地和较为真实地处理物体的衰变,而经验性方法只是一种“静态”的近似,因而显得粗糙和

不真实。当然损伤力学的发展还应该与材料的有关细观和微观机制方面相结合以得到进一步的完善。

疲劳是损伤力学中研究的对象之一,所以应该应用损伤力学的理论作为研究疲劳损伤的基础。大量的事实表明:疲劳问题中有非常明显的随机性。这表现在疲劳寿命具有大方差的概率分布上,如对于中高周疲劳问题,在同样的试验条件下,同一组试件的试验寿命相差很大,有的相差1~2倍,甚至差好几倍,因而应用概率统计的方法来研究疲劳问题日益受到人们的重视。近年来的许多国际会议也给予极大的关注,如1985年在日本召开的第4届国际结构安全和可靠性会议(The 4th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability),1991年7月在日本京都举行的 ICM-6 会议以及1991年8月在日本东京召开的 SMiRT-11 会议都把疲劳的概率问题、结构可靠性和概率安全性评估作为会议专题或分组议题予以重视,并提出和完善工程结构可靠性的设计思想(Reliability-Based Design)。

和其它损伤形式相比,疲劳显现出更突出的损伤局部性。这主要表现在两个方面:①疲劳失效首先在构件的最薄弱的位置上产生;②损伤梯度的变化影响。并且疲劳的局部性实质上是和疲劳的随机概率性密切相关的。

在疲劳数据的概率统计方面,对数正态分布(Lognormal Distribution)和威布尔分布(Weibull Distribution)是最常用的,且两者均通过了疲劳数据的统计检验。前者只有二个参数,可以很方便由试验数据唯一确定,后者却有三个参数,需要求解非线性方程组或图解法求取,有时各种方法确定的 Weibull 分布的三个参数还不具有唯一性,这给实际应用带来很大的不便。从物理意义上讲,Weibull 分布似乎在疲劳问题中显得更为重要。既然疲劳数据既服从 Lognormal 分布同时又服从 Weibull 分布,那么对于疲劳问题,这两种分布一定存在内部的逼近性,于是,由此逼近性导出 Weibull 分布新的三参数估计方法就成为可能。

本部分包括第一篇至第九篇就是基于上述各方面综合地研究疲劳问题以形成概率疲劳损伤力学初步逻辑框架。