

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



疲劳断裂基础

PILAO DUANLIE JICHU

陈传尧 高大兴

华中理工大学出版社



疲劳断裂基础

陈传尧 高大兴

华中理工大学出版社

疲劳断裂基础

陈传尧 高大兴

责任编辑 湛柏琼

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.875 字数: 216 000

1991年7月第1版 1991年7月第1次印刷

印数: 1—1 000

ISBN 7-5609-0574-9/O·84

定价: 2.32元

内 容 简 介

本书介绍金属疲劳断裂的基础，在注重阐述基本概念、基本规律和基本方法的同时，也尽量反映国内、国外疲劳断裂研究的现代成果，以促进疲劳断裂理论更广泛地应用于解决工程实际问题。

本书主要内容包括疲劳破坏机理、应力疲劳、应变疲劳、疲劳统计基础、疲劳裂纹扩展规律、裂纹闭合理论、高载迟滞效应、表面裂纹的疲劳扩展及疲劳寿命预测方法等。可作为高等学校机械、材料、力学等专业本科生及研究生的教学用书，也可供从事抗疲劳断裂设计的工程技术人员和研究人员参考。

前 言

“疲劳”是引起工程结构和构件失效的最主要的原因。自从19世纪中叶以来,人们为认识和控制疲劳破坏进行了不懈的努力,在疲劳现象的观察、疲劳机理的认识、疲劳规律的研究和疲劳寿命的预测等方面,积累了相当丰富的知识。随着断裂力学的发展,近20余年的疲劳研究,尤其是疲劳裂纹扩展的研究,取得了很大的进展。这些研究成果,对于广大工程技术人员在各工业领域中成功地进行抗疲劳断裂设计无疑是十分有益的。

为了介绍疲劳断裂力学的基本理论和研究方法,介绍有关疲劳断裂的现代研究成果,我们在华中理工大学为研究生和本科生开设了“疲劳断裂力学”选修课程,并于1983年编印了《疲劳断裂力学基础》讲义。在该讲义试用的基础上,经过进一步的修改和补充,写成了本书。

本书力图比较系统地介绍应力疲劳、应变疲劳及疲劳裂纹扩展的基本现象、基本规律、基本概念和基本分析方法,着重研究疲劳裂纹扩展。讨论了裂纹闭合理论、高载迟滞模型及表面裂纹的疲劳扩展,介绍了损伤容限设计和耐久性经济寿命分析等现代研究成果,其目的是希望读者对于疲劳断裂研究有比较广泛的了解,有利于实际应用和从事进一步的研究。

由于疲劳问题的复杂性,尤其是本书中有相当一部分内容反映近一二十年甚至近几年的国内、外研究新成果,作者的理解和取舍有不甚妥当和完善之处,恳请读者批评指正。

本书可作为机械、材料、力学等不同专业的教材,注有“*”号的章节可供教师按不同要求而取舍。

本书第二、四、八章由高大兴编写,其余各章由陈传尧编写。

南京航空学院高永寿教授和华中理工大学李春植副教授对全书进行了认真的审阅并提出了一些良好的建议，在此谨致衷心的感谢。

作者
1989年元月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 疲劳研究简史	(1)
§ 1-2 疲劳设计方法简介	(5)
§ 1-3 疲劳与疲劳断裂力学	(8)
§ 1-4 疲劳破坏的断口特征	(12)
§ 1-5 疲劳破坏机理	(14)
第二章 应力疲劳	(21)
§ 2-1 $S-N$ 曲线	(21)
§ 2-2 平均应力的影响	(24)
§ 2-3 缺口疲劳寿命	(27)
§ 2-4 载荷谱与计数法	(31)
§ 2-5 Miner 累积损伤理论及其应用	(35)
* § 2-6 焊接构件的疲劳强度	(41)
第三章 疲劳应用统计学基础	(51)
§ 3-1 疲劳数据的分散性	(51)
§ 3-2 正态分布	(53)
§ 3-3 威布尔分布	(61)
§ 3-4 二元线性回归分析	(68)
* § 3-5 非线性回归和多元回归分析简介	(75)
§ 3-6 $S-N$ 曲线和 $P-S-N$ 曲线的拟合	(79)
第四章 应变疲劳	(84)
§ 4-1 单调应力-应变曲线	(84)
§ 4-2 循环应力-应变曲线	(87)
§ 4-3 滞后环曲线及循环塑性能量	(90)
§ 4-4 应变疲劳性能	(92)
§ 4-5 缺口应变分析	(97)

* § 4-6	变应变幅作用下材料的应力-应变响应	(103)
第五章	疲劳裂纹扩展	(106)
§ 5-1	疲劳裂纹扩展速率	(106)
§ 5-2	加载条件对疲劳裂纹扩展的影响	(117)
§ 5-3	腐蚀介质对疲劳裂纹扩展的影响	(125)
* § 5-4	疲劳裂纹扩展的一个力学模型	(133)
第六章	裂纹闭合理论	(138)
§ 6-1	循环载荷下的弹塑性响应	(138)
§ 6-2	裂纹闭合	(142)
§ 6-3	裂纹闭合应力的实验测量	(145)
§ 6-4	裂纹闭合对若干疲劳裂纹扩展现象的初步解释	(148)
第七章	高载迟滞效应	(151)
§ 7-1	高载迟滞	(151)
§ 7-2	Wheeler模型和Willenborg模型	(154)
* § 7-3	Matsuoka模型	(158)
§ 7-4	拉压高载作用次序对裂纹扩展的影响	(172)
第八章	疲劳裂纹扩展速率da/dN的测试	(174)
§ 8-1	原理	(174)
§ 8-2	试件	(175)
§ 8-3	试验方法	(180)
§ 8-4	数据处理	(187)
* § 8-5	ΔK_{th} 的测定	(191)
*第九章	表面裂纹及其疲劳扩展	(195)
§ 9-1	表面裂纹的应力强度因子	(195)
§ 9-2	表面裂纹的疲劳扩展形状	(204)
§ 9-3	表面裂纹疲劳扩展寿命预测	(210)
*第十章	疲劳寿命预测	(215)
§ 10-1	概述	(215)
§ 10-2	损伤容限分析中的损伤累积方法	(218)
§ 10-3	耐久性经济寿命分析	(228)
附录一	几种常用的应力强度因子	(243)

附录二 疲劳分析循环计数标准方法 (ASTM E1049-85)	(248)
附录三 通用EIFS分布参数的确定	(264)
参考文献	(272)

第一章 绪 论

1983年,《国际断裂》杂志(Int. J. of Fracture)公开发表了美国众议院科技委员会委托美国国家标准局(NBS)进行的“美国断裂损失调查报告”。这是有力学、材料、设计、结构、经济及工业活动家等专家参加的一次大型综合性断裂损失调查。调查结论指出:“断裂使美国一年损失1 190亿美元,占1982年国家总产值的4%。”上述经济损失包括了断裂、疲劳断裂、蠕变断裂等力学破坏所引起的直接或间接损失。车辆工业、建筑结构和航空工业是承受断裂损失最大的三个领域。值得注意的是,调查报告还指出,如果在工程技术人员中普及断裂疲劳的基本知识,应用现在已经取得的研究成果,将能够使上述损失减少53%。

1984年,“国际疲劳杂志”(Int. J. of Fatigue)发表了加拿大国家研究委员会关于“涉及金属疲劳断裂的重大飞机失事调查”报告。资料由国际民用航空组织(ICAO)部分成员国提供,只统计可以确认为由疲劳断裂引起的、机毁人亡的重大飞机失事。即使如此,调查结论仍然表明,70年代以来,由于金属疲劳断裂而引起的重大飞机失事平均每年达100起之多。

在容器、管道、桥梁、船舶、近海结构等工程结构中大量存在疲劳裂纹并导致灾难性事故的报导也屡见不鲜。许多统计资料表明,在所有的力学破坏中,由交变载荷作用引起的疲劳断裂破坏,占50~90%。这就要求工程技术人员设计承受变动载荷作用的结构或构件时,认真考虑疲劳问题。

§ 1-1 疲劳研究简史

疲劳问题的研究,迄今已有150余年。因为疲劳研究涉及力

学、材料、机械设计与工艺诸多学科，疲劳破坏受到载荷条件、材料、使用环境等诸多因素的影响，增加了研究的困难。为便于一般了解，在此先略述疲劳研究简史。

第一次认识到的疲劳破坏是19世纪40年代的铁路车辆轮轴在重复交变载荷作用下的破坏。人们注意到，尽管静强度已足够，但轮轴的破坏总是规则地发生在轴肩处，即使用圆角代替轴肩处的直角过渡后也仍然如此。由于这种破坏完全不同于单调加载下的正常破坏，人们提出了“这是由于振动引起结晶变化而破坏”的错误概念，并用“疲劳”来描述这种破坏。现在虽然摒弃了上述错误概念，但“疲劳”一词却一直沿用下来。

19世纪50年代至60年代，德国工程师August Wöhler (1819~1914) 在实验室进行了大量的疲劳试验，研究了铁路车辆轮轴的破坏。他的工作被认为是第一次系统的疲劳研究。Wöhler指出，随着应力幅的增加，疲劳寿命降低；且应力幅低于某一极限值时，试件将不会发生破坏。他最先引入了 $S-N$ 曲线和疲劳极限的概念，并且明确地指出，对于疲劳而言，应力幅比构件承受的最大应力更重要。1867年，他在巴黎展览馆展出了上述疲劳试验研究的成果。此后，许多研究者继续并深化了Wöhler的工作。如Gerber等人研究了平均应力对疲劳寿命的影响；John Goodmañ (1862~1935) 提出了考虑平均应力的简单理论等，在疲劳发展历史上都起过重要的作用。

20世纪初，人们开始用光学显微镜来探讨疲劳破坏的机理，观察到局部滑移线或滑移带导致了微裂纹的形成。在本世纪20年代，英国国家物理实验室的Gough(1890~1965)及其同事们在疲劳机理研究方面作出了重大的贡献，并且还研究了弯扭组合疲劳（多轴疲劳）问题。1924年，Gough在伦敦出版了第一本系统研究疲劳的书——《金属的疲劳》。其后不久，H. F. Moore于1927年在纽约也出版了《金属的疲劳》一书。

1920年，A. A. Griffith (1893~1963) 发表了他对脆性断

裂的理论计算和用玻璃作的实验结果。他发现玻璃的强度与其所含微裂纹尺寸有关。若 S 为名义断裂应力， a 为裂纹尺寸，则 $S\sqrt{a} = \text{const}$ 。这一理论已成为现代断裂力学的基础。

1929~1930年，B. P. Haigh (1884~1941) 利用缺口应变分析和残余应力的概念，合理地解释了高强度钢与低强度钢缺口试件疲劳性能的不同。这时，改善疲劳抗力的一种实际方法——喷丸处理，在汽车工业中获得了成功。原来常常在弹簧和轴肩处发生的疲劳破坏，因此而大大减少。J. O. Almen (1886~1973) 对喷丸处理作出了正确的解释，他指出，这是喷丸在构件表面层中引入了残余压应力的原因。此后，喷丸及其它引入有利残余应力改进疲劳性能的方法得到了发展。第二次世界大战期间，这类方法在飞机发动机和装甲车辆工业中得到了广泛的使用。

1945年，M. A. Miner 在 A. Palmgren 工作的基础上，提出了线性累积疲劳损伤判据，现在称为 Palmgren Miner 理论（简称 Miner 理论）。这一理论在疲劳设计中得到了广泛的应用，尽管它还存在着许多缺点，但至今仍是疲劳寿命预测的一种重要方法。

1952年，第一架喷气式客机“慧星号”在试飞300多小时后投入使用。1954年元月一次检修后的第四天，它突然失事并坠入地中海。从海底打捞起残骸后，进行了大量的试验研究。最后得到的结论是，事故是由压力舱的疲劳破坏引起的，其小疲劳裂纹起源于机身开口拐角处。该机在高空时舱内压力比舱外高57kPa，在这一压力下，设计应力仅为铝合金抗拉强度的40%，机身试验段在57kPa 载荷下试验了18 000次循环，但在此试验之前曾在70~110kPa 高载下循环了30次。可能正是这30次高载循环引入了有利的残余应力，导致对试验机身的寿命的错误估计和过高的自信。

50年代以来，闭环电液伺服试验机的使用，使疲劳研究有了很大的进展。这种试验系统可以更好地模拟试件、构件或结构的

实际载荷历程。电子显微镜的使用为进一步弄清疲劳机理开辟了新的途径。同时，G. R. Irwin (1907~) 于1957年提出了应力强度因子 K 的概念，为线弹性断裂力学及疲劳裂纹扩展寿命的预测奠定了基础。

60年代初期，低周应变疲劳性能的研究得到了发展，其中最著名的是塑性应变幅和疲劳寿命之间的 Manson-Coffin 关系，这已成为现代缺口应变疲劳分析的基础。与此同时，P. C. Paris 指出，疲劳裂纹扩展速率 da/dN 可以用应力强度因子幅度更好地进行描述。

60年代末期，美国空军F-111飞机发生的多次灾难性事故，被认为是含裂纹构件的脆性断裂引起的。这种破坏和美国军用飞机的其它疲劳问题促使断裂力学方法在B-1轰炸机研制中得到了应用，70年代B-1轰炸机研制中就是在给定可检的初始裂纹的基础上预测其疲劳裂纹扩展寿命的。

1967年12月美国西弗吉尼亚的Point Pleasant桥在没有任何预兆的情况下突然毁坏，46人丧生。事后进行的广泛研究结果表明，事故是一根带环拉杆中的缺陷扩展到临界尺寸而发生解理断裂引起的。初始缺陷的扩展是在疲劳、应力腐蚀及腐蚀疲劳下发生的。这一破坏事故对以后的 AASHTO (American Association of State and Highway and Transportation Officials) 设计规范的制定有着深远的影响。

1974年7月，美国空军颁布了军用规范Mil A-83444，它定义了新军用飞机设计的损伤容限条件，第一次在实际工程中建立了采用断裂力学进行疲劳设计的规范。美国机械工程协会(ASME) 锅炉与压力容器规范中也采用了断裂力学方法进行缺陷的评价。

近20年来，为了适应海上石油开采的需要，海洋工程得到了迅速发展。在近海结构中大量使用的焊接管结构也曾多次发生疲劳断裂，造成了严重的人员伤亡和巨大的经济损失。例如，1980年3月27日下午6时半，北海Ekofisk油田的Alexander L. Kiel-

land号平台5条支腿之一发生破坏,20分钟后平台倾复,127人落水,救起89人。事故分析结果表明,裂纹是由 $\phi 325\text{mm}$ 撑管与支腿连接的双面角焊缝处起始的,在疲劳载荷(主要是波浪力)作用下,裂纹扩展量达100mm以上,导致了平台的破坏。对于这类大型焊接结构,由于存在着大量焊缝,裂纹几乎是不可避免的。因此,其寿命主要由裂纹扩展寿命决定。

人们已经认识到断裂力学是研究结构和构件疲劳裂纹扩展的有力而现实的工具。现代断裂力学理论的成就和工程实际的迫切需要,促进了疲劳断裂研究的迅速发展。Rice的疲劳裂纹扩展力学分析(1967),Elber的裂纹闭合理论(1971),Wheeler等的超载迟滞模型(1970),Hudak等关于裂纹扩展速率标准测试方法的研究(1978),Crooker等关于疲劳裂纹扩展破坏机理的研究(1976)以及其它许多专家、学者近年来在疲劳裂纹扩展的力学模型、位错理论、短裂纹问题、随机疲劳、多轴疲劳、腐蚀疲劳、热疲劳、统计疲劳等研究中都取得了相当的成就。

70年代以来,疲劳设计和寿命分析的断裂力学方法,在航空工程、管道和压力容器、核工程、海洋工程等领域内已经或正在得到应用。近20年来,疲劳断裂研究在我国也得到飞速发展,应用亦日趋广泛。

§ 1-2 疲劳设计方法简介

由于结构或构件本身的复杂性、载荷的随机性、材料性能(尤其是疲劳性能)的分散性及各种不同使用环境等,要精确地预测疲劳寿命往往是困难的。一般来说,要进行合理的疲劳设计,需要进行下述两方面的基本研究:一是疲劳破坏判据,即在什么条件下有发生疲劳破坏的危险;二是材料疲劳性能及各有关因素(如平均应力、使用温度、介质、频率等)对疲劳性能的影响。除此之外,如何利用上述知识进行疲劳设计,如何选择适

当的设计方法，则是与工程结构的具体设计要求有关，且不断地随着人们对疲劳机理的认识而发展。

疲劳设计一般有下述几种方法：

(1) 无限寿命设计

这是一种最古老的设计方法。它以无限长寿命作为疲劳设计判据，要求结构或构件的设计应力水平低于有关的疲劳极限应力。疲劳极限应力通常是由试验确定的。在应力-寿命 ($S-N$) 曲线上，它一般是某规定的足够长的循环寿命 (如 10^7 次) 所对应的应力水平。对于需要经历这样长寿命循环的零构件，例如发动机气缸阀门弹簧，长期频繁运行的铁路车辆轮轴等，这种无限寿命设计仍然是一种简单而合理的方法。

(2) 安全寿命设计

有许多构件在使用中并不要求无限寿命，如压力容器在30~50年使用中只经受几万到几十万次载荷循环，或构件通常在低应力水平下工作，而较高的设计应力水平出现得很少。这样，再用无限寿命设计 (意味着设计应力低) 就不合理了。按照有限寿命要求进行的疲劳设计，工程中称为安全寿命设计，即所设计的构件具有足够安全的设计寿命。当然，考虑到疲劳破坏的分散性及其它因素，安全寿命设计应当具有足够的安全储备。

这一方法的基本含义是：构件的使用寿命是可以通过疲劳分析来预测的，在使用寿命结束之前，结构或构件可以进行修理或更换，以保证足够的安全。寿命的计算可以依据应力-寿命关系，应变-寿命关系或裂纹扩展关系来进行。

安全寿命设计在汽车、容器、飞机制造、桥梁等各工业领域中得到了广泛的应用。

(3) 破损安全设计

破损安全设计是70年代初由美国空军发展起来的。飞机结构通常不允许有很大的安全系数，因为安全系数大将增加不必要的重量；但也不可因为安全储备不足而造成破坏事故。同时还认识

到由于裂纹的存在，安全寿命设计并不能完全确保安全。因此，随着断裂力学的发展，采用了下述疲劳设计准则：即允许构件带疲劳裂纹使用，但保证在这些疲劳裂纹被检查出来并进行维修或更换之前，不会因裂纹而导致结构发生破坏。这就是所谓破损安全设计。其设计要点是：有多余的载荷传递路线；发生局部开裂后结构仍有必要的剩余强度。因此，这种设计常常采用多路传力系统或在结构中布置分段止裂件，以达到破损安全的目的。

(4) 损伤容限设计

这种方法是对破损安全设计的进一步改进。在损伤容限设计中，假定构件中存在着裂纹（由制造加工或疲劳形成），然后用断裂力学方法分析并用试验验证，在周期性检查肯定能发现之前，这些裂纹是否会扩展到足以引起疲劳破坏的尺寸。为了保证所容许的裂纹在检查周期内不会扩展到引起结构破坏，构件往往要采用裂纹扩展缓慢且断裂韧性较高的材料制造。

美国空军已经制定了损伤容限规范。我国航空工业部也于1985年出版了《飞机结构损伤容限设计指南》。

(5) 耐久性设计

耐久性是在规定的使用条件下抗疲劳开裂性能的一个定量度量。耐久性设计与损伤容限设计的差别在于：损伤容限设计注意的是保证飞机结构的安全性，着重分析那些情况最危险，尺寸相对较大的裂纹，防止它们在使用中扩展到其临界裂纹长度 a_c 而引起破坏；而耐久性设计注意的是保证结构的功能且具有足够的经济寿命，着重于用统计方法分析大量的、尺寸相对较小的初始裂纹，考查并控制这些裂纹在使用中可能会扩展到大于经济修理裂纹尺寸 a_e 的百分率。结构使用到某一寿命时，发生了不能经济地修理的广布损伤，而不修理又可能引起结构的功能性问题，则这一寿命一般就定义为“经济寿命”。这种分析方法力图确定在不同使用时刻下结构中的裂纹尺寸分布，因此不但能获得好的经济效益，还具有高的可靠性。

这种设计方法在80年代初期首先为美国空军采用。它是当代飞机结构强度设计技术的最新发展，其基本原理同样可以应用于其它领域。

上述疲劳设计方法，经历了考虑无限寿命，考虑有限寿命，考虑检修周期，以及从不考虑裂纹，考虑单个危险裂纹到考虑结构中的裂纹尺寸分布这样几个阶段，反映了疲劳断裂设计思想的发展与进步，但是，各种设计方法不能完全相互取代，而应相互补充和配合，根据不同的结构和使用条件采用不同的设计方法，以便得到最满意的效果。

由于疲劳问题的复杂性以及影响疲劳断裂性能的因素繁多，所以疲劳分析与试验验证有极为密切的关系。在疲劳设计中若仅仅只依靠分析而不进行试验验证，则必须对于分析的不准确性引入足够大的安全系数，或者必须允许一定概率的破坏。例如，计算疲劳寿命比所要求的设计使用寿命大一个数量级，或者允许构件破坏而不危及人身安全，不会造成整个结构严重毁坏，则也许可以不进行试验验证。除此之外，大部分情况下的疲劳分析应当进行适当的试验验证。

作为设计验证的疲劳试验，因为需要模拟典型的使用条件，故其要求比研究性试验苛刻得多。例如，试验载荷的确定等都需要认真仔细地考虑。人们常用增大载荷的方法来加快试验速度，但必须考虑这样可能会导致结论的错误。因为较高的试验载荷会改变构件的实际残余应力，试验速度加快将使腐蚀的影响没有足够的时间得以显示，等等。

§ 1-3 疲劳与疲劳断裂力学

金属疲劳的概念，最早可能是J. V. Poncelet于1839年在巴黎大学讲演时采用的。当时，“疲劳”一词被用来描述周期拉