



面向21世纪课程教材



“三五”力学规划系列教材

# 疲劳与断裂

(第二版)

杨新华 陈传尧 编著



配套微课视频



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

面向 21 世纪课程教材  
普通高等教育“十三五”力学规划系列教材

# 疲劳与断裂(第二版)

编 著 杨新华 陈传尧



华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书是“疲劳与断裂”国家精品课程和国家精品资源共享课的配套教材。全书共九章,主要内容包括:疲劳载荷的刻画和表征,疲劳裂纹的萌生和扩展机理,高周疲劳、低周疲劳和疲劳裂纹扩展寿命预测方法,线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学的基本理论和方法等。每章后面附有一定量的思考题与习题,便于读者强化或检验学习效果。

本书可作为力学、机械、材料、土木、能源、航空航天等专业本科学生的教材,也可供相关专业研究生、教师、研究和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

疲劳与断裂/杨新华,陈传尧编著. —2版. —武汉:华中科技大学出版社,2018.8  
普通高等教育“十三五”力学规划系列教材  
ISBN 978-7-5680-4367-0

I. ①疲… II. ①杨… ②陈… III. ①疲劳断裂-高等学校-教材 IV. ①O346.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 175589 号

疲劳与断裂(第二版)

杨新华 陈传尧 编著

Pilao yu Duanlie(Di-er Ban)

策划编辑:张少奇

责任编辑:程青

封面设计:刘婷

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:12.75

字数:266千字

版次:2018年8月第2版第1次印刷

定价:36.80元



华中科大

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 第二版前言

疲劳与断裂是工程中最常见、最重要的失效模式。20世纪80年代初,美国众议院科技委员会委托国家标准局进行过一次关于断裂造成的损失的大型综合调查。根据调查结果,断裂使美国一年损失1190亿美元,约占1982年国内生产总值的4%。调查报告指出,向工程技术人员普及关于断裂的基本概念和知识可以使损失减少29%;如果在工程中应用已有的研究成果,还可以使损失再减少24%。可见,普及疲劳与断裂方面的知识,推动已有研究成果的应用,是非常重要的。这在很大程度上有赖于教学。

华中科技大学从1983年起在工程力学专业本科生中开设“疲劳与断裂”课程,是国内最早开设该课程的学校之一。1985年,陈传尧教授为该课程编写了《疲劳断裂讲义》。在经过多轮教学的使用和修改之后,1991年,该讲义改编为教材《疲劳断裂基础》,由华中理工大学出版社出版。进入21世纪以后,教材在知识体系方面获得了进一步的完善和更新。2002年,经过新一轮改编的教材《疲劳与断裂》(以下简称02版教材),被遴选为“教育部面向21世纪课程教材”,并在合校后的华中科技大学出版社出版。该教材一经诞生,就受到了其他院校的广泛欢迎。截至2016年底,该教材已重印9次,总印数近万本,成为疲劳和断裂类课程使用最多的教材之一。2006年,该教材获得华中科技大学优秀教材特等奖。

在陈传尧教授打造的良好课程基础上,近年来,华中科技大学“疲劳与断裂”课程组以现代教育思想为指导,遵循力学学科和教育学的内在发展规律,注重学生综合素质和创新能力的培养,充分运用现代教育技术和网络平台,努力建设一流的网络教学资源。2007年和2013年,先后建成“疲劳与断裂”国家精品课程和国家精品资源共享课。

02版教材使用至今已有16年。在这期间,科学研究和技术创新获得了飞速发展,一些相关国家标准也已作废或更新。为了适应这些发展,许多教学内容需要进行调整和补充。另外,传统上,“断裂力学”是“疲劳与断裂”的先修课程。但是,近年来,随着本科课时总数的压缩,一些学校不再开设“断裂力学”课程,因此需要在“疲劳与断裂”教材中补充“断裂力学”的主要内容。本书就是为适应上述要求而在02版教材基础上改编而成的。

本书主要内容包括:疲劳载荷的刻画和表征,疲劳裂纹的萌生和扩展机理,高周疲劳、低周疲劳和疲劳裂纹扩展寿命预测方法,线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学的基本理论和方法等。全书共九章,除第1章绪论以外,可以分为三个部分。第2至第4章是第一部分,主要讨论不同载荷水平下裂纹萌生寿命的预测。第5至第7章是第二部分,介绍线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学的基本理论,以及在工程中常见的表面裂纹问题的应力强度因子计算。第8章和第9章为第三部分,讨论疲劳裂纹扩展寿命的预测。每章后面附

有一定的思考题与习题,便于读者强化或检验学习效果。书末附有国内外相关的试验标准,供使用时查阅参考。

本书可作为力学、机械、材料、土木、能源、航空航天等专业本科学生的教材。如果没有“断裂力学”作为先修课程,那么建议 56 学时,其中 8 学时实验。如果有先修课程,则第 5 至第 7 章可以略讲,建议 40 学时,其中 4 学时实验。本书也可供相关专业研究生、教师、研究和工程技术人员参考。

在本书改编和出版过程中,华中科技大学教务处和土木工程与力学学院提供了经费支持,硕士研究生李杰、冯炎和胡健参与了书稿校对和部分绘图工作,在此一并致以诚挚的谢意。最后,还要感谢华中科技大学出版社张少奇编辑和程青编辑以及所有为本书提供支持和付出辛勤劳动的同志。

作者

2018 年 1 月

## 第一版前言

1996年1月,国家教育委员会“面向21世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划”所属之“工科本科力学系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目组,在北京召开了立项与开题研讨会。会议指出本项目组主要研究内容和目标是:更新课程内容,重组课程结构,设计新型模块系列,实现课程优化配置;提高起点,减少重复,使相关课程融合贯通,形成力学总体概念;加强学生综合能力(包括课程之间,学科之间,理论、实验、计算与工程应用之间的综合能力)的培养和训练。

原华中理工大学力学系作为项目主持单位之一,于1996年初提出了一个分层次、小型、模块化工科本科力学系列课程设置方案。课程设置框架如下图所示。



在应用力学部分,我们将注意力集中在应用计算力学的现代成果,增强学生处理实际工程问题的能力;应用破坏理论的成果,增强学生对于不同失效模式下的设计控制能力;应用近、现代实验技术的进步,增强学生通过实验探索未知问题的能力三个方面。

2000年,我们又承担了教育部“世行代款21世纪初高等教育教学改革项目”——“理工科力学专业创新能力培养和系列课程综合改革的研究与实践”。对于本科力学专业系列课程的设置,提出了精炼理论分析类课群、加强计算类课群、开放实验类课群、探索贴近工程与学科交叉类课群的指导思想。

疲劳与断裂是工程中最常见的、最重要的失效模式。20世纪后半期,断裂力学的迅速发展,不仅促进了断裂控制方法的进步,更使人们较深入地认识了材料与结构中疲劳裂纹的扩展规律,促进了抗疲劳、抗断裂设计技术的发展。在各工程领域应用疲劳与断裂的研究成果,发展工程适用的抗疲劳、抗断裂实用设计技术,将是21世纪设计水平提高的重要标志之一。

20世纪80年代初,美国众议院科技委员会委托国家标准局进行了一次关于断裂造成的损失的大型综合调查,根据调查结果,断裂使美国一年损失1190亿美元,约占1982年国家生产总值的4%。调查报告同时还指出,向工程技术人员普及关于断裂的基本概念和知识,可减少损失29%;若应用现有成果,可再减少损失24%。因此,向工程技术人员普及关于疲劳和断裂的基本概念,是十分必要的。

鉴于此,为了适应21世纪技术进步的需求,使力学与非力学专业的工科本科学生(未

来的工程师、设计师)具有对疲劳与断裂破坏这类工程中最常见失效模式的发生与发展机理、规律、设计控制方法等的基本认识,我们编写了这本教材。

这本《疲劳与断裂》教材,包括疲劳裂纹萌生机理与规律;应力疲劳与应变疲劳;断裂与断裂控制;疲劳裂纹扩展规律;现代抗疲劳设计方法等。希望能够突出疲劳裂纹萌生、扩展直至断裂的发生与发展机理、规律;突出抗疲劳、抗断裂设计技术的基本原理、基本方法及其应用;有助于工科学生在将来的工程实践中自觉地增强对于抗疲劳与抗断裂设计的考虑。

断裂是由于裂纹的存在而引发的。而引发断裂的裂纹,绝大多数都是在疲劳载荷作用下发生或发展而成的。因此,将疲劳与断裂放在一起讨论,有利于增强对于材料/结构中裂纹发生、发展直至引起断裂失效的全过程的认识,有利于综合控制设计,还有利于减少重复、减少学时。

本教材可以作为力学、机械、材料、土木、能源、交通等专业本科学生的课程教材,学时为32~40学时;也可供研究生选用或供工程技术人员参考。

衷心感设为本教材的编写、试用、出版提供支持和方便的所有同志们。

陈传尧

2001年4月于华中大喻园

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 疲劳断裂研究的发展历程 .....	(1)
1.2 什么是疲劳 .....	(3)
1.3 结构的抗疲劳设计方法 .....	(6)
1.4 疲劳断口特征 .....	(8)
1.5 疲劳破坏机理 .....	(11)
小结 .....	(14)
思考题与习题 .....	(15)
<b>第 2 章 高周疲劳</b> .....	(16)
2.1 基本 S-N 曲线 .....	(16)
2.2 平均应力的影响 .....	(19)
2.3 影响疲劳性能的若干因素 .....	(24)
2.4 缺口疲劳 .....	(28)
2.5 变幅循环载荷作用下的疲劳 .....	(32)
2.6 随机载荷谱与循环计数法 .....	(37)
小结 .....	(41)
思考题与习题 .....	(41)
<b>第 3 章 疲劳应用统计学基础</b> .....	(44)
3.1 疲劳数据的分散性 .....	(44)
3.2 正态分布 .....	(45)
3.3 威布尔分布 .....	(52)
3.4 线性回归分析 .....	(55)
3.5 S-N 曲线和 P-S-N 曲线的拟合 .....	(63)
小结 .....	(66)
思考题与习题 .....	(66)
<b>第 4 章 低周疲劳</b> .....	(67)
4.1 单调应力-应变响应 .....	(67)
4.2 循环应力-应变响应 .....	(70)
4.3 随机载荷下的应力-应变响应 .....	(73)



4.4	低周疲劳分析	(76)
4.5	缺口件的疲劳	(81)
	小结	(87)
	思考题与习题	(88)
<b>第5章</b>	<b>线弹性断裂力学</b>	(91)
5.1	结构中的裂纹	(91)
5.2	平面问题的应力函数及其复变函数表示	(94)
5.3	裂纹尖端场	(98)
5.4	应力强度因子	(104)
5.5	基于应力强度因子的断裂控制设计	(106)
5.6	材料断裂韧度的试验测试	(109)
5.7	能量释放率	(114)
	小结	(115)
	思考题与习题	(115)
<b>第6章</b>	<b>表面裂纹</b>	(117)
6.1	拉伸载荷作用下无限大体中的埋藏裂纹和表面裂纹	(118)
6.2	拉伸载荷作用下有限体中的表面裂纹	(122)
6.3	弯曲和拉弯组合载荷作用下有限体中的表面裂纹	(131)
	小结	(134)
	思考题与习题	(135)
<b>第7章</b>	<b>弹塑性断裂力学</b>	(136)
7.1	裂纹尖端的小范围屈服	(136)
7.2	裂纹尖端张开位移	(141)
7.3	弹塑性断裂控制设计	(145)
7.4	$J$ 积分	(146)
	小结	(150)
	思考题与习题	(151)
<b>第8章</b>	<b>疲劳裂纹扩展</b>	(152)
8.1	疲劳裂纹扩展速率	(152)
8.2	疲劳裂纹扩展寿命预测	(155)
8.3	关于疲劳裂纹扩展寿命的一些讨论	(158)
8.4	应力比和加载频率对疲劳裂纹扩展的影响	(161)
8.5	腐蚀疲劳	(164)
	小结	(166)
	思考题与习题	(167)

<b>第 9 章 裂纹闭合理论与高载迟滞效应</b> .....	(169)
9.1 循环载荷作用下裂纹尖端的弹塑性应力-应变响应 .....	(169)
9.2 裂纹闭合理论 .....	(172)
9.3 高载迟滞效应 .....	(176)
小结 .....	(180)
思考题与习题 .....	(182)
<b>附录 A 几种常用的应力强度因子</b> .....	(183)
A.1 均匀拉伸的中心裂纹板 .....	(183)
A.2 中心线上受集中力拉伸的中心裂纹板 .....	(183)
A.3 裂纹表面受一对法向集中力作用的中心裂纹问题 .....	(184)
A.4 均匀拉伸的单边裂纹板 .....	(185)
A.5 纯弯曲下的单边裂纹板 .....	(185)
A.6 均匀拉伸的双边裂纹板 .....	(186)
A.7 受均匀轴向拉伸的环形裂纹圆棒 .....	(186)
A.8 受扭转的环形裂纹圆棒 .....	(187)
<b>附录 B 国内外相关的试验标准</b> .....	(188)
B.1 国内标准 .....	(188)
B.2 国际标准 .....	(188)
<b>参考文献</b> .....	(191)

# 第 1 章 绪 论

疲劳(fatigue)与断裂(fracture)是引起工程结构和构件失效的最主要的原因。时至今日,人们对传统强度(即无缺陷材料在静载荷作用下的强度)的认识已经相当深刻,工程中强度设计的实践经验和积累也十分丰富,对于传统强度的控制能力也大大增强。因此,由疲劳与断裂引起的失效在工程失效中所占的比重越来越突出。

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、疲劳寿命的预测和抗疲劳设计技术的发展等方面积累了丰富的知识。20 世纪 50 年代,断裂力学的快速兴起和发展,进一步促进了疲劳裂纹扩展规律及断裂失效控制理论和方法的研究。疲劳断裂失效涉及循环或扰动载荷的多次作用、材料缺陷的形成与扩展以及使用环境的影响等许多方面,问题的复杂性是显而易见的。因此,对许多疲劳断裂问题的深入认识和根本解决,还有待于开展进一步的研究工作。尽管如此,学习和了解现有研究成果,掌握疲劳与断裂的基本概念、规律和方法,对于成功开展工程结构系统抗疲劳断裂设计来说,无疑是十分有益的。

## 1.1 疲劳断裂研究的发展历程

疲劳问题的研究起源于 19 世纪上半叶欧洲工业革命的萌芽时期。1829 年,德国采矿工程师 Albert 对矿山卷扬机焊接铁链的重复载荷试验,是已知的有关疲劳问题最早的研究。在这项试验中,铁链支承在一个直径为 3.6 m 的圆盘上,曲柄连接器带动一个扇形块使圆盘来回摆动,从而使链节受到每分钟 10 次、总计高达  $10^5$  次的反复弯曲作用。1842 年,法国凡尔赛附近发生了一起铁路事故,事故的原因是机车前轴的疲劳破坏,这大大吸引了人们对金属疲劳问题的研究兴趣。1843 年,英国铁路工程师 Rankie 通过分析发现,机车部件中的应力集中是非常危险的。1849 年,英国人 Hodgkinson 针对铁路桥梁采用的锻铁和铸铁材料,借助旋转凸轮开展了梁的反复弯曲试验。1854 年,Braithwaite 在其关于金属疲劳断裂的著述中,首次采用“Fatigue(疲劳)”这个术语描述金属在载荷的反复作用下发生的开裂现象和行为。

在 1852—1869 年间,德国工程师 Wöhler 对钢制列车车轴的疲劳破坏开展了长期而且非常系统的试验研究,发现钢质车轴在循环载荷作用下的强度远低于静载强度,并首次提出采用应力幅-寿命曲线(即 S-N 曲线)描述疲劳行为的方法以及“疲劳极限”的概念。1874 年,德国工程师 Gerber 提出了考虑平均应力影响的疲劳寿命计算方法。1899 年,Goodman 进一步提出了考虑平均应力影响的简化理论。他们的工作奠定了对称和非对称恒幅疲劳问题寿命预测的理论基础。

在 20 世纪前半叶,随着实验观察技术手段和研究水平的提高,有关疲劳破坏问题机理和规律的研究与认识进入一个高峰。Ewing 等人在 1900—1903 年期间针对瑞典铁的疲劳问题开展了研究,获得了试样表面循环损伤的大量光学照片,发现在多晶材料的许多晶粒内部出现了滑移带,这些滑移带在疲劳过程中逐步变宽,并形成裂纹。1910 年,Basquin 发现应力幅-寿命(即疲劳循环数)的双对数图在很大的应力范围内都表现为线性关系。同一年,Bairstow 研究了金属的循环硬化和软化问题,通过多级循环试验给出了形变滞后与疲劳破坏的关系。通过总结过去的研究成果,英国人 Gough、美国人 Moore 和 Kommers 先后于 1926 年和 1927 年出版了书名同为《金属的疲劳》的著作。此后, Palmgren(1924)和 Miner(1945)先后提出了疲劳破坏的线性损伤累积理论; Langer(1937)研究了变幅循环载荷下的疲劳问题; Weibull(1939)提出了材料强度的统计理论; Neuber(1946)研究了单向形变和循环形变的缺口效应。1954 年, Coffin 和 Manson 研究了由温度变化和高应力幅循环载荷引起的疲劳问题,分别独立地提出了塑性应变损伤理论,给出了材料发生疲劳破坏时载荷反向次数同塑性应变幅之间的经验关系,称为 Coffin-Manson 关系,从而为低周应变疲劳分析和寿命预测奠定了基础。

从 20 世纪初开始快速发展起来的断裂力学,为研究疲劳裂纹扩展提供了理论基础。1913 年, Inglis 发表了无限大板中含有一个穿透板厚的椭圆孔的弹性力学解析解。数年后,即 1920 年, Griffith 在研究脆性材料的断裂时,针对理想化的 Griffith 裂纹(即割缝),根据 Inglis 解给出了由裂纹引起的应变能变化值,并由此提出了著名的 Griffith 判据。1948 年, Irwin 提出了对 Griffith 理论的修正,并引进能量释放率作为裂纹起裂临界状态的判据,这标志着线弹性断裂力学理论的诞生。由于能量释放率计算起来不太方便,在 Irwin 提出能量释放率判据后的最初 10 年,断裂力学的研究一直没有取得显著进展。1957 年,考虑到裂纹尖端应力的奇异性, Irwin 提出了一个新的物理量——应力强度因子(stress intensity factor)。由于应力强度因子是一个仅与裂纹尖端局部相关联的量,它的确定相对于能量释放率要容易一些。Irwin 还根据当时已经知道的若干裂纹问题的精确解,导出了相应的应力强度因子。至此,线弹性断裂力学理论已经建立起来。基于断裂力学的研究成果, Paris 等人在 1961 年研究了恒幅循环加载下的疲劳裂纹扩展问题,指出疲劳裂纹在每次应力循环中的扩展量(即疲劳裂纹扩展速率(fatigue crack growth rate))与应力强度因子范围(stress intensity factor range)有关。1963 年, Paris 提出了著名的疲劳裂纹扩展速率公式,即 Paris 公式,从而将线弹性断裂力学与疲劳两门学科融合起来。1971 年,在平面应力试件的拉拉疲劳裂纹扩展试验中, Elber 首次观察到裂纹的闭合现象,并且发现即便在循环拉伸载荷的作用下,疲劳裂纹也能够保持闭合状态。这表明,控制疲劳裂纹扩展速率的更本质的参量是有效应力强度因子范围。

在工程师和科学家们的不懈努力的推动下,疲劳已经逐步发展成内容丰富、自成体系,并与断裂力学有机结合的一门学科。

## 1.2 什么是疲劳

### 1.2.1 疲劳的基本概念

什么是疲劳?

美国试验与材料协会(American Society for Testing and Materials)在《疲劳试验及数据统计分析之有关术语的标准定义》(ASTM E206—72)中给出了如下的定义:“在材料的某点或某些点承受扰动应力,且在足够多的循环扰动作用之后形成裂纹或完全断裂,由此所发生的局部永久结构变化的发展过程称为疲劳。”



上述定义清楚地指出,疲劳问题具有下述特点。

(1) 只有在承受扰动应力(fluctuating stress)作用的条件下,疲劳才会发生。

所谓扰动应力,是指随时间变化的应力,用“ $\sigma$ ”或“ $S$ ”表示。除了应力以外,疲劳载荷还可以用力、位移、应变等给出,因此可以更一般地称之为扰动载荷(fluctuating load)或循环载荷(cyclic load)。载荷随使用时间的变化可以是有规则的,也可以是无规则的,甚至是随机的,如图 1.1 所示。例如,当弯矩不变时,旋转弯曲轴中某点的应力就是恒幅循环(或等幅循环)应力;起重行车吊钩分批吊起不同的重物,承受变幅循环的应力;而车辆在不平的道路行驶,弹簧等零、构件承受的载荷是随机的。

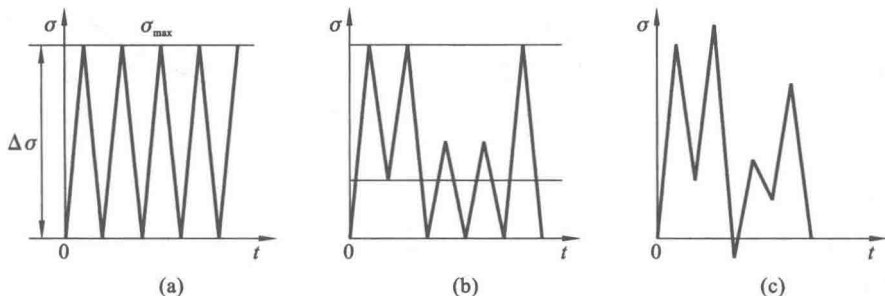


图 1.1 疲劳载荷的基本形式  
(a)恒幅循环;(b)变幅循环;(c)随机载荷

(2) 疲劳破坏起源于高应力或高应变的局部。

静载下的破坏,取决于结构整体。疲劳破坏则由应力或应变较高的局部开始,形成损伤并逐渐累积,导致破坏发生。可见,局部性是疲劳的显著特点。零、构件的应力集中处,常常是疲劳破坏的起源。疲劳研究所关心的正是这些引起应力集中的局部细节,包括几何形状突变、材料缺陷等。因此,要研究细节处的应力应变,注意细节设计,尽可能减小应力集中。

(3) 疲劳破坏是要在足够多次的扰动载荷作用之后形成裂纹或完全断裂。

在经历足够多次的扰动载荷作用之后,裂纹首先从材料内部高应力或高应变的局部开始形成,称为裂纹起始(或裂纹萌生(initiation))。此后,在扰动载荷的继续作用下,裂纹进一步扩展(propagation),直至达到临界尺寸而发生完全断裂。裂纹从萌生,扩展,到断裂的三个阶段,是疲劳破坏的又一特点。研究疲劳裂纹萌生和扩展的机理及规律,是疲劳研究的主要任务。

(4) 疲劳是一个发展过程。

由于扰动载荷的作用,零、构件或结构从一开始使用,就进入了疲劳的发展过程。裂纹的萌生和扩展,就是在这一发展过程中不断形成的损伤累积的结果,最后的断裂,标志着疲劳过程的终结。这一发展过程所经历的时间或扰动载荷作用的次数,称为寿命。采用载荷作用次数表达的寿命通常用符号“ $N$ ”表示。寿命不仅取决于载荷水平,还取决于载荷频率,更取决于材料抵抗疲劳破坏的能力。疲劳研究的目的是要预测寿命,因此要研究寿命预测的方法。

材料发生疲劳破坏,往往需要经历裂纹起始或萌生、裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展(即断裂)三个阶段。疲劳总寿命也相应地由三部分组成。因为裂纹在失稳扩展阶段扩展的速度非常快,裂纹失稳扩展阶段的寿命在总寿命中的占比很小,在估算寿命时通常可以不予考虑,所以一般可将总寿命  $N_t$  分为裂纹萌生寿命  $N_i$  与裂纹扩展寿命  $N_p$  两个部分,即

$$N_t = N_i + N_p \quad (1-1)$$

裂纹萌生寿命是指消耗在小裂纹形成和早期扩展上的那部分寿命,而裂纹扩展寿命则是指总寿命中裂纹从扩展到破坏的那一部分。确定裂纹萌生和扩展两个阶段的界限往往比较困难。一般来说,这个界限与构件材料、尺寸和裂纹检测设备的水平有关。裂纹萌生寿命一般根据应力-寿命关系或应变-寿命关系进行预测,而裂纹扩展寿命则必须采用断裂力学理论进行研究。

完整的疲劳分析,既要研究裂纹的起始或萌生,也要研究裂纹的扩展。但在某些情况下,可能只需要考虑裂纹萌生寿命或裂纹扩展寿命其中之一,并由此给出寿命估计。例如,高强度脆性材料断裂韧性低,一旦出现裂纹就会引起破坏,裂纹扩展寿命很短。因此,对于由高强度脆性材料制造的零、构件,通常只需考虑裂纹萌生寿命,即  $N_t = N_i$ 。而与此相对的是,一些焊接、铸造的构件或结构,因为在制造过程中已不可避免地引入了裂纹或类裂纹缺陷,其裂纹起始寿命已经结束,因此只需考虑其裂纹扩展寿命,即  $N_t = N_p$ 。

### 1.2.2 扰动载荷的描述

扰动载荷随时间变化的关系一般采用图或表的形式描述,称为载荷谱(load spectrum)。由应力给出的载荷谱称为应力谱,类似地,还有应变谱、位移谱、加速度谱等等。显然,研究材料疲劳问题,首先要研究载荷谱的描述与简化。



最简单的扰动载荷是恒幅应力循环载荷,如图 1.2 所示。描述它的应力水平至少需要两个参量。一般来说,最大应力(maximum stress)  $\sigma_{\max}$  和最小应力(minimum stress)  $\sigma_{\min}$  是描述恒幅应力循环载荷的两个基本参量。

除此以外,在疲劳问题的研究和分析中,还常常用到下述几个参量。这些参量可以通过最大应力和最小应力导出。

应力范围(stress range)是最大应力和最小应力的差,即

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (1-2)$$

应力幅(stress amplitude)是最大应力和最小应力差的一半,即

$$\sigma_a = \frac{1}{2}\Delta\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (1-3)$$

平均应力(mean stress)是最大应力和最小应力的平均值,即

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (1-4)$$

应力比(stress ratio)是最小应力和最大应力之比,即

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1-5)$$

应力比可以反映载荷的循环特征。当  $\sigma_{\min} = -\sigma_{\max}$  时,  $R = -1$ , 表明载荷是对称循环;当  $\sigma_{\min} = 0$  时,  $R = 0$ , 表明载荷是脉冲循环;而当  $\sigma_{\min} = \sigma_{\max}$  时,  $R = 1$ ,  $\sigma_a = 0$ , 表明载荷是静载荷或恒定载荷,如图 1.3 所示。

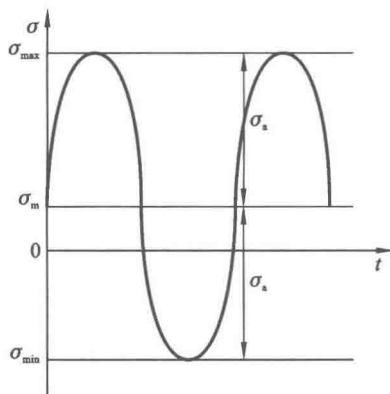


图 1.2 恒幅应力循环载荷

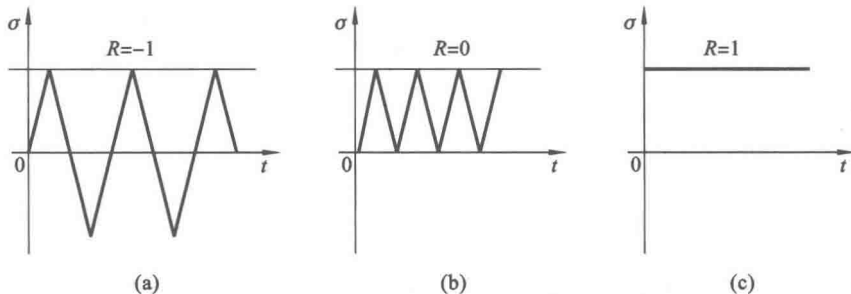


图 1.3 不同应力比下的应力循环  
(a)对称循环;(b)脉冲循环;(c)静载荷

此外,还有频率和波形的不同。图 1.4 给出的是几种不同波形的应力循环。

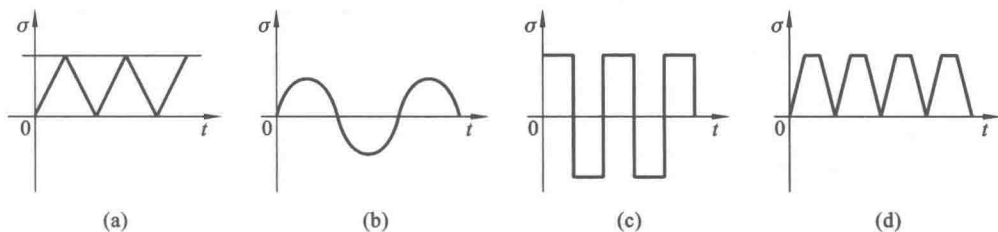


图 1.4 不同波形的应力循环

(a)三角波;(b)正弦波;(c)矩形波;(d)梯形波

和扰动应力水平相比,扰动载荷的频率和波形对疲劳的影响尽管是次要的因素,有时候也需要引起足够的重视。例如,在腐蚀环境下,频率对疲劳的影响往往会被显著放大。

## 1.3 结构的抗疲劳设计方法

### 1.3.1 无限寿命设计(infinite-life design)

人们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发生的破坏。德国工程师 Wöhler 在开展一系列的试验研究后指出:对于疲劳,应力幅比构件承受的最大应力更重要。应力幅越大,疲劳寿命越短;当应力幅小于某一极限值时,疲劳破坏将不会发生。他还最先引入了应力-寿命(或 S-N)曲线和疲劳极限(fatigue limit)的概念,并于 1867 年在巴黎展出了他的研究成果。

根据他的研究成果,对于受循环载荷作用的无裂纹构件,控制循环应力幅  $\sigma_a$ ,使其小于材料的疲劳极限  $\sigma_f$ ,则疲劳裂纹就不会萌生,从而可以实现无限寿命的设计目的。因此,无限寿命的设计条件为

$$\sigma_a < \sigma_f \quad (1-6)$$

对于发动机气缸阀门、顶杆、弹簧,以及长期频繁运行的轮轴等零、构件,消耗材料不多而又需要经历无限次载荷循环( $>10^7$ 次),无限寿命设计至今仍是一种简单而合理的方法。

20 世纪 60 年代有关疲劳裂纹扩展的研究成果表明,裂纹扩展的控制参量——应力强度因子范围存在一个门槛值(threshold value)。对于受循环载荷作用的含裂纹构件,控制其应力强度因子范围  $\Delta K$ ,使其小于门槛值  $\Delta K_{th}$ ,则裂纹永远不会扩展,从而也可以达到无限寿命的设计目的。在这种情况下,无限寿命的设计条件为

$$\Delta K < \Delta K_{th} \quad (1-7)$$



### 1.3.2 安全寿命设计 (safe-life design)

无限寿命设计要求将构件中的工作应力控制在很低的水平,因此材料的潜力很难得到充分发挥。对于并不需要经受很多次载荷循环的构件来说,无限寿命设计很不经济。有必要根据应力-寿命曲线,如 Basquin 公式,获得与目标寿命  $N$  对应的疲劳强度 (fatigue strength)  $\sigma_N$ , 然后通过控制循环应力幅  $\sigma_a$ , 使其满足

$$\sigma_a < \sigma_N \quad (1-8)$$

以确保构件在有限长的目标寿命期内不发生疲劳破坏。这样的设计称为安全寿命设计或有限寿命设计。

借助 Palmgren 和 Miner 的线性损伤累积理论 (linear fatigue damage cumulative rule), 还可以开展在变幅载荷和随机载荷作用下构件的安全寿命设计。

考虑到疲劳破坏的不确定因素很多,安全寿命设计应当具有足够的安全储备。民用飞机、容器、管道、汽车等,大都采用安全寿命设计。

### 1.3.3 损伤容限设计 (damage tolerance design)

由于材料在生产和加工过程中不可避免地会引入缺陷,安全寿命设计通常并不能完全确保安全。1957年,针对含裂纹体, Irwin 提出了作为裂纹尖端场控制参量的应力强度因子,为线弹性断裂力学和疲劳裂纹扩展规律的研究奠定了基础。1963年, Paris 提出疲劳裂纹扩展速率可以由应力强度因子范围描述,为疲劳裂纹扩展寿命预测提供了方法。

损伤容限设计,是为保证含裂纹或可能含裂纹的重要构件的安全,从20世纪70年代开始发展并逐步应用的一种现代疲劳断裂控制方法。这种方法的设计思路是:假定构件中存在着裂纹(依据无损探伤能力、使用经验等假定其初始尺寸),利用断裂力学分析、疲劳裂纹扩展分析和试验等手段进行验证,证明在定期检查肯定能发现之前,裂纹不会扩展到足以引起破坏。

断裂判据和疲劳裂纹扩展速率方程是损伤容限设计的基础。

损伤容限设计希望在裂纹到达临界尺寸前检出裂纹。因此,要选用韧性较好、裂纹扩展缓慢的材料,以保证有足够大的临界裂纹尺寸和充分的时间,安排检查并及时发现裂纹。

### 1.3.4 耐久性设计 (durability design)

从20世纪80年代起,以经济寿命控制为目标的耐久性设计概念形成。

结构使用到某一寿命时,产生了不能经济修理的广布损伤,而不修理又可能引起结构的功能问题,这一寿命就称为经济寿命 (economic life)。

耐久性是指构件和结构在规定的使用条件下抗疲劳断裂性能的一种定量度量。这种方