

工程构件疲劳寿命预测 理论与方法

金属材料的疲劳应力—应变规律
确定的应力—时间历程
随机应力—时间历程
随机载荷序列的计算机再生方法
常规外推方法及其特点
标准载荷累积频次分布的计算外推
线性疲劳损伤累积理论
非线性疲劳损伤累积理论
双线性疲劳损伤累积理论
常规疲劳强度设计
常规疲劳寿命预测
 H_0 对计算疲劳寿命的影响
 H_0 的确定方法
线图法的基本理论及处理方法
线图的应用
载荷与计数分析
计算寿命比较研究
局部应力—应变分析
应变疲劳寿命曲线
疲劳损伤累积
关于局部应力—应变法的应用
裂纹的类型及应力、应变场描述
弹—塑性有限元分析裂纹尖端应力、应变场
弹—塑性有限元方法分析实例
疲劳裂纹扩展基本规律
裂纹扩展寿命计算方法
框架式构件应力强度因子计算问题
框架式构件应力强度因子的变形能表达式
应力强度因子表达式从试件到构件的推广问题

●刘义伦/著
湖南科学技术出版社



GONG CHENG GOU JIAN PI LAO SHOU MING YU CE LI LUN YU FANG FA
gong cheng gou jian pi lao shou ming yu ce li lun yu fang fa

工程构件疲劳寿命预测
理论与方法

●刘义伦 / 著

湖南科学技术出版社

江苏工业学院图书馆
藏书章

工程构件疲劳寿命预测理论与方法

著 者:刘义伦

责任编辑:肖和国

出版发行:湖南科学技术出版社

社 址:长沙市展览馆路 11 号

印 刷:湖南湘潭望城县印刷厂

厂 址:望城县高塘岭镇湘江东路 251 号

邮 编:410200

(印装质量问题请直接与本厂联系)

出版日期:1997 年 6 月第 1 版第 1 次

开 本:850mm×1168mm 1/32

印 张:8.5

插 页:4

字 数:217,000

印 数:1—500

书 号:ISBN 7—5357—2227—X/TB·10

定 价:19.00 元

(版权所有·翻印必究)

前 言

疲劳破坏是工程和机械构件最常见的失效形式。由疲劳引起的灾难性事故屡见不鲜,如飞机失事、桥梁断裂、钻井平台倾覆等,由此造成的损失非常巨大。为避免事故和减少损失,人们一直在研究提高构件的抗疲劳能力和探索更准确的构件疲劳寿命预测方法。

传统的机械设计均采用静强度设计方法,由所取的安全系数的大小确定构件的使用可靠度,而疲劳问题的考虑则多以无限寿命方法进行校核。这种设计方法目前我国还未被广泛采用。然而,理论和实践均已证明,传统设计方法尽管加大安全系数而使构件的尺寸增大,但并不能避免构件的疲劳破坏和突然断裂,这是因为疲劳损伤与构件的形状、材料及其承受的载荷有着特殊的关联,它们之间的相互影响关系目前尚未完全探明,以传统的强度理论难以解释。

本书试图从构件疲劳寿命预测的角度介绍有关疲劳理论及其应用方法,其重点在传统的累积频次分布和 $S-N$

N 曲线的应用上,这其中相当一部分的内容是作者及其课题组近年来的研究成果,也有一部分取自国内未见以中文发表的国外书刊。

本书在撰写过程中,得到了中国工程院院士钟掘教授的许多指导。中国工程院院士何继善教授和钟掘教授热情地为本书的出版作了推荐,作者感激两位导师的擢拔之情。

由于作者的水平以及时间所限,书中不妥之处和错误在所难免,恳请各位专家及读者批评指正。

作 者

1996年10月于长沙

内 容 提 要

本书重点介绍近年来工程构件疲劳寿命预测和疲劳强度设计实用研究成果,这些成果在常规疲劳寿命预测方面形成了独到理论。全书 80% 的内容是在国内著作中首次出版,其中的随机载荷序列的计算机模拟方法、载荷累积频次分布的计算外推法、以材料的一般性能参数推算其疲劳特性参数的方法、常规疲劳寿命预测线图法、典型构件裂纹扩展寿命计算等内容不仅具有重要的适用价值,而且是该领域深层次研究的基础。书中对裂纹尖端应力、应变场弹—塑性有限元分析方法、J 积分的数值计算方法、雨流计数的 Push Down List 编程方法等应用技术均作了较详细的介绍。

本书可作为工程技术人员科研和设计的重要参考著作,也可作为研究生、本科生的教材和教学参考书。

全书约 21 万字,图表 140 余幅,参考文献 80 余篇。

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 疲劳问题研究历史回顾	(2)
第二节 疲劳的特征,疲劳破坏过程和断口	(7)
第三节 疲劳的分类	(16)
第四节 疲劳分析方法在工程中的应用	(18)
第二章 金属材料的疲劳特性	(23)
第一节 金属材料的疲劳应力—应变规律	(23)
一、包辛格效应	(25)
二、玛辛特性	(26)
三、循环硬化和循环软化	(26)
四、记忆特性	(27)
第二节 材料的 $S-N$ 曲线	(28)
一、 $S-N$ 曲线形式	(28)
二、试件 $S-N$ 曲线向构件 $S-N$ 曲线转换	(32)
三、根据材料的性能参数确定构件的 $S-N$ 曲线	(39)
第三节 平均应力图	(40)
一、 $A-M$ 图	(40)
二、史密斯图	(41)
三、罗斯图	(43)
第三章 应力—时间历程分析	(45)
第一节 确定的应力—时间历程	(46)
一、周期性的应力—时间历程	(46)

二、非周期性的应力—时间历程	(47)
第二节 随机应力—时间历程	(48)
第三节 随机载荷序列的计算机再生方法	(50)
一、工程载荷统计分析	(51)
二、过渡矩阵及其形成	(52)
三、载荷序列生成	(55)
四、特种载荷模拟	(62)
第四章 计数法与累积频次分布	(64)
第一节 单参数计数法	(65)
第二节 双参数计数法	(68)
第三节 单参数计数与双参数计数的关系	(74)
第五章 载荷累积频次分布的实用外推方法	(78)
第一节 常规外推方法及其特点	(78)
一、直接外推	(80)
二、以载荷段中极值为基础的外推	(80)
三、常规外推方法的特点	(82)
第二节 标准载荷累积频次分布的计算外推	(82)
一、标准载荷累积频次分布	(82)
二、外推公式的推导	(84)
第三节 与常规外推比较	(88)
第四节 两种计算外推方法比较	(91)
第五节 几点结论	(92)
第六章 损伤累积理论及常规疲劳理论应用	(94)
第一节 线性疲劳损伤累积理论	(95)
一、原始曼纳法则	(95)
二、曼纳法则的修正	(97)
第二节 非线性疲劳损伤累积理论	(98)
第三节 双线性疲劳损伤累积理论	(103)
第四节 常规疲劳强度设计	(107)
一、等应力幅的对称循环载荷	(107)
二、等应力幅的不对称循环载荷	(108)

三、 变应力幅下安全系数·····	(109)
四、 复合应力作用的安全系数·····	(111)
第五节 常规疲劳寿命预测 ·····	(113)
一、 常规疲劳寿命预测步骤·····	(114)
二、 复合应力作用下构件疲劳寿命预测·····	(116)
第七章 H_0对计算疲劳寿命的影响及其确定方法 ·····	(121)
第一节 H_0对计算疲劳寿命的影响 ·····	(122)
一、 计算公式推导与转换·····	(122)
二、 H_0 与预测寿命的关系·····	(124)
第二节 H_0的确定方法 ·····	(130)
一、 “过损伤”和“欠损伤”的概念·····	(130)
二、 损伤率作为确定 H_0 的依据设想·····	(132)
三、 H_0 的计算方法·····	(133)
第三节 几点说明 ·····	(134)
第八章 工程构件疲劳寿命预测线图法 ·····	(136)
第一节 线图法处理范围 ·····	(137)
第二节 线图法的基本理论及处理方法 ·····	(138)
一、 线图参数确定·····	(138)
二、 数值计算·····	(140)
第三节 线图的应用 ·····	(149)
第四节 本章小结 ·····	(151)
第九章 计数法对计算疲劳寿命影响问题 ·····	(152)
第一节 载荷与计数分析 ·····	(153)
一、 载荷类型·····	(153)
二、 计数分析·····	(153)
第二节 计算寿命比较研究 ·····	(166)
一、 载荷累积频次分布曲线比较·····	(166)
二、 计算寿命值比较研究·····	(167)
第三节 计数法的应用评述 ·····	(174)
第十章 局部应力—应变法预测构件疲劳寿命 ·····	(177)
第一节 局部应力—应变分析 ·····	(178)

一、 诺伯法的公式	(179)
二、 诺伯法的应用	(181)
三、 修正诺伯法	(182)
第二节 应变疲劳寿命曲线	(184)
第三节 疲劳损伤累积	(187)
第四节 关于局部应力—应变法的应用	(190)
第十一章 裂纹尖端应力—应变场弹塑性有限元分析	(192)
第一节 裂纹的类型及应力—应变场描述	(193)
一、 裂纹的类型	(193)
二、 裂纹尖端附近的应力—应变场	(194)
第二节 弹—塑性有限元分析裂纹尖端应力—应变场	(198)
一、 数值方法概述	(198)
二、 弹—塑性有限元基本方法	(198)
第三节 弹—塑性有限元方法分析实例	(204)
一、 构件模型化处理与算法	(204)
二、 计算结果分析	(208)
第四节 几点说明	(215)
第十二章 疲劳裂纹扩展问题	(216)
第一节 疲劳裂纹扩展基本规律	(217)
一、 应力强度因子概念	(217)
二、 裂纹扩展速率	(218)
第二节 裂纹扩展寿命计算方法	(221)
第三节 框架式构件应力强度因子计算问题	(225)
一、 J 积分算式及其路径	(226)
二、 计算结果	(231)
第四节 框架式构件应力强度因子的变形能表达式	(234)
一、 构件的变形能分析	(235)
二、 K 表达式 $K=f(U)$	(236)
第五节 应力强度因子表达式从试件到构件的推广问题	(240)

一、算式转换的基础	(240)
二、转换式推导	(241)
三、关于转换式的应用问题	(243)
第十三章 工程构件疲劳寿命预测实例	(245)
第一节 轧辊的形状及载荷分析	(245)
第二节 轧辊的材料及结构参数	(248)
一、 σ_b 的确定	(247)
二、 σ_D 的确定	(247)
三、构件的 $S-N$ 曲线	
第三节 轧辊疲劳寿命预测计算和结论	(249)
参考文献	(253)

第一章 绪 论

工程设备中,构件的疲劳破坏高达 70%到 90%。小到螺丝钉的断裂,大到桥梁倒塌、飞机折断、钻井平台倾覆,都有疲劳破坏的先例。疲劳破坏引起的损失非常巨大。因此,从 19 世纪上半叶开始,理论界和工程界一直在研究疲劳破坏的机理及其防治对策,研究成果不断地被报道出来^[1-2]。

工程构件承受的载荷很多是变化的。疲劳是构件承受交变载荷所表现出来的特有现象。每一个小于材料强度极限的载荷均对构件造成一定的损伤。疲劳破坏具有突然性,预先没有很明显的预兆,这样造成的损失往往更大。

疲劳问题的研究和应用,最初只限于那些对人身安全有重大影响(如飞机)或耗资巨大的设备和构件。随着世界范围内能源危机的出现和材料价格上涨,加之产品和工程市场竞争日趋激烈,迫使大部分机械工程和建筑工程领域的技术人员也要运用疲劳理论和方法,以创造出既安全又经济的产品和工程。今天,人们对疲劳问题已经有了较深刻的了解,在疲劳问题防治对策和分析上也有一定的方法;但就其机理而言目前尚不十分清楚,在很多情况下理论分析结论与实验还有一定的差距,还不能为工程实际提供有效、放心的指导。正因为如此,疲劳问题至今仍然引起人们的极大兴趣,许多民用、军事、政府部门和组织愿意资助此类项目的研究。目前世界范围内形成了构件疲劳和寿命研究的热点。

第一节 疲劳问题研究的历史回顾

人们对疲劳问题的研究始于上世纪初。1829年,德国采矿工程师阿贝特(W. A. J. Albert)对链条进行了重复加载试验,提出了关于疲劳问题的研究报告,从而开始了人们对疲劳问题研究的历史。上世纪30年代,铁路在欧洲发展非常迅速。由于铁路的兴起而出现的两个问题,引起了人们对疲劳问题的进一步研究:一是铁路车轮轮轴总是有规律地在轴肩处发生断裂;二是铁路桥梁采用铁制桥发生的疲劳问题。

1839年波恩斯莱特(Poncelet)首先使用“Fatigue”一词来描述“在反复施加的载荷作用下的结构破坏”。1854年勃瑞斯威特(Braithwaite)在伦敦土木工程师学会上第一个以“疲劳”一词作为题目发表了论文。

首次提出材料疲劳特性 $S-N$ 曲线的是德国铁路工程师韦勒(August Wöhler)。1852年,韦勒发明了等幅对称循环加载疲劳试验机,从1852年到1870年间,进行了许多重复变应力的疲劳试验。韦勒是第一个对疲劳问题进行较系统的研究和第一个把工作应力和疲劳极限联系起来的人。为了纪念韦勒的开创性工作,在德国,人们把 $S-N$ 曲线称为Wöhler曲线。

整个19世纪,欧洲除韦勒之外,对疲劳问题研究比较著名的或贡献比较突出的还有费尔巴尔(Fairbairn)、贝克(Baker)、盖尔博(Gerber)、古德曼(Goodman)。其中费尔巴尔对金属铆接架进行了疲劳试验;贝克报告了他与韦勒相似的小试件疲劳试验。特别是在19世纪下半叶,韦勒的简单试验得到了发展,人们开始考虑平均应力对疲劳寿命的影响,并对平均应力、应力幅值、拉伸强度极限等之间的关系提出一些假设。其中盖尔博假定平均应力 σ_m 、应力幅值 σ_a 、对称循环持久限 σ_{-1} 和拉伸强度极限 σ_b 之间呈抛物线关系:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_b}\right)^2 = 1 \quad (1.1)$$

古德曼假设它们之间有直线关系：

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_b} = 1 \quad (1.2)$$

通过试验，人们发现钢和铝合金试验点都落在这两条线的附近。至今这两个假设仍具有重要意义。

从总体来看，19世纪对疲劳问题的研究还只处于较低级的水平上，人们还不能对构件疲劳寿命进行预测，还不能对种种疲劳现象进行解释，总共发表有关论文大约80篇。

进入20世纪以来，疲劳问题的研究发展比较迅速。研究的主要方面有二，其一是较深入地进行了机理研究；其二是开展了较复杂的试验研究。

本世纪初，由于光学显微镜的应用，推动了疲劳机理研究的快速发展。通过显微镜，人们观察到了滑移线和滑移带引起的裂纹。20~30年代，英国伦敦国家物理实验室的赫尔伯特(Herbert)、高夫(Gough)等人根据材料的内部组织的改变来解释疲劳现象，这是对疲劳机理研究作出的重要贡献。20年代对疲劳机理研究作出过重大贡献的还有格里费斯(Griffith)。他应用热力学第一定律和第二定律，从能量角度出发，研究了为什么玻璃的实际强度要比从它的分子结构所预期的抗拉强度低几个数量级的问题。他推测这是由其内部缺陷或微小裂纹引起的应力集中所造成的，从而提出了应力 σ 、裂纹尺寸 a 与材料性质 A 之间的关系： $\sigma = A/a$ ，或 $\sigma \sqrt{a} = \text{常数}^{[2]}$ 。

在这以后发生了一系列低应力脆断事故，应用传统力学已无法进行解释，促使人们想起了Griffith。由此开创了断裂力学这一力学重要分支。Griffith被认为是断裂力学之祖。

试验研究是疲劳研究的重要手段。本世纪20~50年代，在人们了解到常用材料具有“疲劳”这一特性后，便开展了对更多、更广泛材料的实验研究，试验的目的在于了解更多材料的疲劳基本特

性和研究抗疲劳措施。试验材料除常用的结构钢、铸铁和常用有色金属材料外,还对橡胶、塑料和一些稀贵金属作了疲劳试验。在探索疲劳机理和研究抗疲劳对策上,提出了一些著名解释和结论。如:哈埃(B. Haigh)合理地解释了高强度钢和软钢的缺口试件的不同疲劳特性;美国工程师阿尔门(O. Almen)在 30 年代正确地解释了采用喷丸工艺改善疲劳特性的机理,当时喷丸工艺被广泛地用在汽车的轮轴和弹簧上。1936 年荷尔格(Horger)指出,辗压材料表面能够抑制裂纹的生长。1937 年诺依博(Neuber)提出了缺口处的应力梯度效应,并提出了从理论应力集中系数 α_K 计算疲劳缺口系数 K_f 的式子:

$$K_f = 1 + \frac{\alpha_K - 1}{1 + \sqrt{\rho'/r}} \quad (1.3)$$

这个式子同时考虑了缺口尺寸 r 和应力梯度及内切圆半径 ρ' 。

由于很多实际载荷具有随机性,因此疲劳试验应能做到变幅加载。1938 年,盖斯纳(Gassner)首次提出了程序疲劳试验方法。此外,他还和泰希曼(Teichmann)一起提出了“变幅疲劳强度”的概念:较高的但较少出现的应力可以超过疲劳持久限,而较低的但较频繁出现的应力要在疲劳持久限以下^[3]。所谓程序试验就是将载荷累积频次分布的载荷分为若干个程序循环,叫做“程序块”,形成一系列高低应力循环的混合,以模拟实际工作载荷状况。试验时一个程序块接着一个程序块地将载荷加到试件上去,直到试件疲劳破坏为止。在盖斯纳之前,疲劳试验一直没有超过韦勒的等幅试验范围。盖斯纳对实际载荷的模拟试验作出了重要贡献。

在本世纪上半叶,对疲劳理论作出重大贡献的还有曼纳(Miner)和瑞典工程师帕勒姆格雷(Palmgren)。1945 年曼纳在帕勒姆格雷于 1924 年提出了球轴承疲劳准则的基础上发表了著名的线性疲劳损伤累积假设,即所谓 Palmgren - Miner 或简称为 Miner 法则。形如

$$S = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1.4)$$

这个假设认为,每一个应力循环对最后的疲劳持久限都有一定的影响,并对构件造成某种程度的疲劳损伤;这种损伤累积起来,达到一定限度,构件就发生破坏。虽然这个假设仍存在某些不足,但这个假设理论明确、形式简单,而且在许多情况下计算与实际有相当程度的相符。故直至今日,这个法则仍然是疲劳寿命预测中最重要的公式之一。

50年代后,疲劳的研究进入了探讨与破坏有关的影响因素和机理的新阶段。这段时期航空事业发展很快,空难事故也随之增加。如1954年两架英国慧星式最早喷气客机接连失事,从高空坠毁。经事后调查,事故是由压力舱疲劳破坏所引起。属于此类已查明由于疲劳引起的重大事故还有:1967年美国西弗吉尼亚州的Point Pleasant大桥在没有任何预兆的情况下突然断裂;1988年美国一架客机在航行中被掀去座仓的顶部,幸好这次事故除一名空姐外其余无一身亡;1980年北海“亚力山大”钻井平台倾覆。这些事故造成的损失巨大,迫使人们的研究更加深入,考虑的影响因素更加广泛,如温度对疲劳的影响、航空发动机的“噪声疲劳”、核反应的辐射疲劳、腐蚀疲劳问题等。所使用的手段更加先进,如电子显微镜、扫描显微镜能将材料放大几十万倍,在接近原子尺寸的状态下对疲劳断口进行分析,大大地扩展了人们了解疲劳过程和机理的视野。70年代初,电子计算机控制的液压伺服试验机使疲劳试验能够模拟实际的载荷。为了使问题具有普遍意义,70年代中,德国的研究所研究开发了载荷再生方法^[4]。他们将载荷的中值和幅值表示成正态分布的密度函数,然后由数值方法再生出任意次数的载荷。以这种方法再生载荷,并用液压试验机进行加载,对铝合金、铝镁合金等几种材料进行系统研究的报告出现于1989年的德国一本博士论文之中。此外,在试验方法、统计方法、处理方法、标准化方面50年代以后在理论上和实践上都获得了很大成功。

在疲劳和寿命预测理论上,有两个重大进展需要特别指出。60年代中期,许多研究者(如Martin, Sinclair等人)开始研究局部应

力—应变疲劳寿命估算方法^[5-6]。目前,该法已经开始应用于工程预测。虽然局部应力—应变法尚有一些不成熟的地方,但就其理论基础和分析过程而论,仍被认为是较符合实际的方法。由于缺口处存在着强烈的应力集中,缺口根部的应力与名义应力相差很大,因而缺口的存在使得这种应力—应变分析变得困难。局部应力—应变法研究的是缺口根部的应力—应变与损伤的关系,将分析焦点直接对准危险点。其中重要的公式有描述弹—塑性应变幅值 $\Delta\epsilon$ ($\Delta\sigma$)与疲劳寿命 N 之间关系的巴斯昆(Basquin)方程

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f (2N)^b \quad (1.5)$$

和迈松—柯芬(Manson—Coffin)公式^[7,8]

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N)^c \quad (1.6)$$

由于局部应力—应变法的产生,引起了雨流计数法的问世。1968年日本人 Matsuishi 和 Endo 发表了雨流法的研究论文^[9]。这种计数法计下所有的应力封闭环,被认为是局部应力—应变法最适合的计数法。70年代有关雨流法的实施以及计算机程序开发论文相继出现。直到今天,对雨流计数法的研究仍然没有中断^[10-13]。

理论上的另一个重大进展是断裂力学的产生和发展,它给疲劳机理研究、寿命预测提供了新的有力工具。自从30年代 Griffith 提出了玻璃的裂纹与其强度关系后,1950年奥洛万(Orowan)和伊文(Irwin)研究了材料塑性对裂纹扩展的影响,修正了 Griffith 的理论。7年后 Irwin 提出了应力强度因子的概念^[14]。断裂力学对研究疲劳问题的贡献主要在于两方面,一是提供了分析裂纹尖端应力—应变场的理论方法,使人们了解裂纹尖端的应力因素和其对裂纹扩展趋势的“促进”和“制约”作用;二是建立了应力强度因子与裂纹扩展速率之关系。这方面最著名的是帕里斯(Paris)公式^[15]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta k)^m \quad (1.7)$$

和福尔曼(Forman)公式^[16]: