



飞行器系列丛书

结构疲劳寿命分析

FATIGUE LIFE ESTIMATION OF STRUCTURES

姚卫星 著

非
外
借



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

飞行器系列丛书

结构疲劳寿命分析

姚卫星 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

疲劳破坏是结构的主要失效形式,因此结构的疲劳强度和疲劳寿命是结构性能研究的主要内容之一。本书系统阐述了结构疲劳寿命分析的基本原理、方法和过程。主要包括金属材料的疲劳性能、疲劳载荷谱、影响结构疲劳性能的主要因素、疲劳累积损伤理论、估算结构疲劳寿命的名义应力法、局部应力应变法和应力应变场强法、多轴疲劳、振动疲劳等内容。本书的特点是围绕结构疲劳寿命估算,系统地介绍了所需的材料性能、估算原理、估算方法和估算步骤,并给出了丰富的算例和工程实例。

本书可供从事结构设计和结构强度研究的人员参考,也可作为研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

结构疲劳寿命分析 / 姚卫星著. — 北京: 科学出版社, 2019. 1

(飞行器系列丛书)

ISBN 978-7-03-058465-6

I. ①结… II. ①姚… III. ①飞行器—疲劳寿命估算
IV. ①V216. 6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第184066号

责任编辑: 许 健 / 责任校对: 谭宏宇
责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

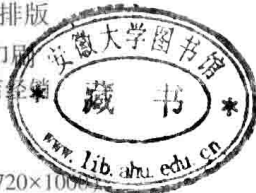
2019年1月第一版 开本: B5(720×1000)

2019年1月第一次印刷 印张: 24 1/4

字数: 500 000

定价: 130.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



飞行器系列丛书

编委会

名誉主任：赵淳生 郭万林 聂 宏

主 任：夏品奇

副主任：姚卫星 裘进浩 高存法

委 员（按姓氏笔画排序）：

王立峰 王同光 邓宗白 史治宇 余雄庆 陆志良
陈少林 陈仁良 陈国平 金栋平 赵 宁 胡俊辉
袁慎芳 蒋彦龙

丛 书 序

飞行器是指能在地球大气层内外空间飞行的器械,可分为航空器、航天器、火箭和导弹三类。航空器中,飞机通过固定于机身的机翼产生升力,是数量最大、使用最多的航空器;直升机通过旋转的旋翼产生升力,能垂直起降、空中悬停、向任意方向飞行,在航空器中具有独特的不可替代的作用。航天器可绕地球飞行,也可远离地球在外太空飞行。1903年,美国的莱特兄弟研制成功了人类第一架飞机,实现了可持续、有动力、带操纵的飞行。1907年,法国的科尔尼研制成功了人类第一架直升机,实现了有动力的垂直升空和连续飞行。1957年,人类第一颗人造地球卫星由苏联发射成功,标志着人类由此进入了航天时代。1961年,苏联宇航员加加林乘“东方1号”飞船进入太空,实现了人类遨游太空的梦想。1969年,美国的阿姆斯特朗和奥尔德林乘“阿波罗11号”飞船登月成功,人类实现了涉足地球以外的另一个天体。这些飞行器的成功,实现了人类两千年以来的各种飞行梦想,推动了飞行器的不断进步。

目前,飞行器科学与技术快速发展,各种新构型、新概念飞行器层出不穷,反过来又催生了许多新的飞行器科学与技术,促使人们不断地去研究和探索新理论、新方法。出版“飞行器系列丛书”,将为人们的研究和探索提供非常有益的参考和借鉴,也将有力促进飞行器科学技术的进一步发展。

“飞行器系列丛书”,将介绍飞行器科学与技术研究的最新成果与进展,主要由南京航空航天大学从事飞行器设计及相关研究的教授、专家撰写。南京航空航天大学已研制成功了30多种型号飞行器,包括我国第一架大型无人机、第一架通过适航审定的全复合材料轻型飞机、第一架直升机、第一架无人直升机、第一架微型飞行器等,参与了我国几乎所有重大飞行器型号的研制,拥有航空宇航科学与技术一级学科国家重点学科。在这样厚重的航空宇航学科基础上,撰写出“飞行器系列丛书”并由科学出版社出版,具有十分重要的学术价值,将为我国航空航天界献上的一份厚重的礼物,为我国航空航天事业的发展作出一份重要的贡献。

祝“飞行器系列丛书”出版成功!

夏品奇

2017年12月1日于南京

前 言

强度、刚度和疲劳寿命是一切工程结构的基本性能,疲劳破坏是结构失效的主要形式之一,因此疲劳性能是工程结构研究的关键内容之一。

材料的疲劳是一个十分复杂的问题,至今还是一个科学之“谜”,因为影响材料疲劳强度或疲劳寿命的因素很多,而且绝大多数影响因素目前还无法很好地从物理上给予定量的数学描述,因此也就无法对结构的疲劳强度或疲劳寿命作出精确的分析。

本书的初版出版于2003年,得到国防科技图书出版基金的资助,并一直用作南京航空航天大学研究生教材,还多次作为培训教材在结构强度培训班上使用。初版内容仅限于金属材料在常规机械载荷作用下的疲劳寿命分析。随着我国先进装备制造的不断进步,其内容已不太适应现代结构疲劳寿命分析的需要,同时近年来结构疲劳寿命分析的理论和方法也有了很大进展,因此有必要进行比较大的调整和补充。本书仍然主要介绍作者及其研究小组在结构疲劳寿命分析研究方面的理论和工程应用成果,但增加了多轴疲劳和振动疲劳内容,删掉了疲劳可靠性方面的内容,同时增加了多个具有代表性的工程实例。

本书的特点有两个:其一,用数学方法对有关疲劳行为作定量描述,便于在疲劳寿命分析时应用;其二,理论与实践相结合,给出了多个分析实例,通过实例加深对理论、算法和步骤的理解。

在此,首先要感谢我的研究生导师——西北工业大学的杨庆雄教授,是他引导我进入了结构疲劳研究领域,他研究学术问题的思想、方式和作风深深影响了我。我要感谢我的博士后合作导师——清华大学俞新陆教授和颜永年教授,我从他们的研究中汲取了思考问题的方法,从他们的研究中得到了启示,发展了一套在理论上完备和自洽的场强法理论。同时还要感谢我的研究生和博士后,本书的很多内容得益于他们的具体研究工作。

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。



2017年6月于南京航空航天大学东华湖畔

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 疲劳 | 1 |
| 1.1.1 疲劳定义 | 1 |
| 1.1.2 疲劳的分类 | 1 |
| 1.2 疲劳寿命 | 2 |
| 1.2.1 按损伤发展定义的疲劳寿命 | 2 |
| 1.2.2 由设计准则定义的疲劳寿命 | 4 |
| 1.2.3 从使用角度定义的疲劳寿命 | 4 |
| 1.3 疲劳寿命分析发展简史 | 4 |
| 1.4 疲劳研究方法 | 7 |
| 1.4.1 疲劳研究的三个尺度 | 7 |
| 1.4.2 疲劳机制 | 7 |
| 1.4.3 经验方法 | 12 |
| 1.4.4 断裂力学方法 | 13 |
| 1.4.5 讨论 | 14 |
| 1.5 确定疲劳寿命的方法 | 15 |
| 第 2 章 金属材料的疲劳性能 | 18 |
| 2.1 金属材料的拉伸特性 | 18 |
| 2.2 金属材料的循环应力-应变特性 | 20 |
| 2.2.1 循环硬化和循环软化 | 21 |
| 2.2.2 循环蠕变和循环松弛 | 23 |
| 2.2.3 Bauschinger 效应 | 23 |
| 2.2.4 Masing 特性 | 24 |
| 2.2.5 稳态循环应力-应变曲线 | 25 |
| 2.2.6 记忆特性与可用性系数 | 27 |
| 2.2.7 瞬态循环应力-应变曲线 | 29 |
| 2.3 金属材料的 $S-N$ 曲线 | 32 |
| 2.3.1 $S-N$ 曲线 | 32 |
| 2.3.2 $S-N$ 曲线的拟合 | 35 |
| 2.3.3 等寿命曲线 | 42 |

| | | |
|------------|--------------------------|------------|
| 2.3.4 | 疲劳极限 | 44 |
| 2.3.5 | 获得疲劳极限的试验方法 | 52 |
| 2.3.6 | 疲劳极限图 | 53 |
| 2.3.7 | $p-S-N$ 曲线 | 54 |
| 2.4 | 应变-寿命曲线 | 57 |
| 2.4.1 | $\Delta\varepsilon-N$ 曲线 | 58 |
| 2.4.2 | $\varepsilon_{cq}-N$ 曲线 | 62 |
| 第3章 | 疲劳载荷谱 | 65 |
| 3.1 | 疲劳载荷谱的种类 | 66 |
| 3.1.1 | 常幅谱 | 66 |
| 3.1.2 | 块谱 | 66 |
| 3.1.3 | 随机谱 | 67 |
| 3.2 | 雨流法 | 69 |
| 3.3 | 机动类飞机的载荷谱 | 72 |
| 3.3.1 | 任务剖面 | 72 |
| 3.3.2 | 载荷谱组成 | 73 |
| 3.4 | 运输类飞机载荷谱 | 80 |
| 3.4.1 | 突风载荷 | 80 |
| 3.4.2 | 机动载荷 | 80 |
| 3.4.3 | 地面载荷 | 82 |
| 3.4.4 | 地-空-地循环 | 86 |
| 3.5 | 试验谱编制 | 86 |
| 3.5.1 | 高载截除 | 87 |
| 3.5.2 | 低载删除 | 87 |
| 3.5.3 | 载荷谱的等效 | 98 |
| 3.5.4 | 飞-续-飞试验谱的编制 | 99 |
| 3.5.5 | 严重谱 | 101 |
| 第4章 | 影响结构疲劳性能的主要因素 | 107 |
| 4.1 | 应力集中的影响 | 108 |
| 4.1.1 | 平均应力模型 | 109 |
| 4.1.2 | 场强法模型 | 113 |
| 4.1.3 | 断裂力学模型 | 115 |
| 4.1.4 | 小结 | 117 |
| 4.1.5 | 算例 | 120 |
| 4.1.6 | 实例 | 123 |

| | | |
|-------|-------------------|-----|
| 4.2 | 尺寸的影响 | 128 |
| 4.2.1 | 均匀应力场的尺寸系数 | 128 |
| 4.2.2 | 非均匀应力场的尺寸系数 | 131 |
| 4.3 | 表面状态的影响 | 134 |
| 4.3.1 | 表面加工粗糙度 | 134 |
| 4.3.2 | 表层组织结构 | 137 |
| 4.3.3 | 表层应力状态 | 138 |
| 4.4 | 载荷的影响 | 142 |
| 4.4.1 | 载荷类型的影响 | 142 |
| 4.4.2 | 加载频率的影响 | 142 |
| 4.4.3 | 平均应力的影响 | 145 |
| 4.4.4 | 载荷波形的影响 | 145 |
| 4.4.5 | 载荷停歇和持续的影响 | 146 |
| 第5章 | 疲劳累积损伤理论 | 148 |
| 5.1 | 损伤的定义 | 148 |
| 5.2 | 疲劳累积损伤理论及其分类 | 148 |
| 5.2.1 | 三要素 | 148 |
| 5.2.2 | 分类 | 149 |
| 5.2.3 | 剩余寿命模型 | 150 |
| 5.2.4 | 剩余强度模型 | 151 |
| 5.2.5 | 剩余刚度模型 | 152 |
| 5.2.6 | 小结 | 153 |
| 5.3 | 线性疲劳累积损伤理论 | 154 |
| 5.3.1 | 等损伤线性疲劳累积损伤理论 | 154 |
| 5.3.2 | 等损伤分阶段线性疲劳累积损伤理论 | 159 |
| 5.3.3 | 变损伤线性累积损伤理论 | 161 |
| 5.4 | 非线性疲劳累积损伤理论 | 163 |
| 5.4.1 | Carten - Dolan 理论 | 163 |
| 5.4.2 | Chaboche 理论 | 164 |
| 5.5 | 关于疲劳累积损伤理论的讨论 | 165 |
| 5.5.1 | 模型的评估 | 165 |
| 5.5.2 | 模型的试验数据评估 | 165 |
| 5.5.3 | 结论 | 170 |
| 第6章 | 名义应力法 | 174 |
| 6.1 | 名义应力法基本原理 | 174 |

| | | |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 6.1.1 | 名义应力法估算结构疲劳寿命的步骤 | 174 |
| 6.1.2 | 材料性能数据 | 175 |
| 6.1.3 | 名义应力法的种类 | 177 |
| 6.2 | 传统的名义应力法 | 177 |
| 6.2.1 | 名义应力法 | 177 |
| 6.2.2 | 算例 | 177 |
| 6.2.3 | 实例 | 187 |
| 6.3 | SSF 法 | 197 |
| 6.3.1 | SSF 法 | 197 |
| 6.3.2 | 等效 SSF 法 | 201 |
| 6.3.3 | 实例 | 204 |
| 6.4 | 小结与讨论 | 215 |
| 第 7 章 | 局部应力应变法 | 217 |
| 7.1 | 局部应力应变法的基本假设 | 217 |
| 7.1.1 | 局部应力应变法估算结构疲劳寿命的步骤 | 218 |
| 7.1.2 | 局部应力应变法的种类 | 218 |
| 7.1.3 | 关于局部应力应变法原理的讨论 | 219 |
| 7.2 | 结构局部应力应变的计算 | 220 |
| 7.2.1 | Neuber 近似解法 | 221 |
| 7.2.2 | 弹塑性有限元解法 | 223 |
| 7.2.3 | 缺口弹塑性应力应变的 Neuber 解与有限元解的比较 | 224 |
| 7.3 | 局部应力应变法的稳态法 | 226 |
| 7.3.1 | 算例 | 227 |
| 7.3.2 | 实例 | 237 |
| 7.4 | 局部应力应变法的瞬态法 | 245 |
| 7.5 | 小结 | 254 |
| 第 8 章 | 应力应变场强法 | 255 |
| 8.1 | 应力场强法基本原理 | 255 |
| 8.1.1 | 基本原理 | 255 |
| 8.1.2 | 应力场强法基本假设的试验验证 | 258 |
| 8.1.3 | 缺口件疲劳寿命估算方法的讨论 | 264 |
| 8.2 | 应力场强法对有关疲劳现象的解释 | 267 |
| 8.2.1 | 疲劳缺口减缩系数 | 267 |
| 8.2.2 | 不同加载方式下疲劳极限 | 270 |
| 8.2.3 | 多轴比例复合载荷作用下的疲劳极限 | 273 |

| | | |
|-------|------------------|-----|
| 8.2.4 | 疲劳尺寸系数 | 275 |
| 8.3 | 应力场强法的应用 | 278 |
| 8.3.1 | 算例 | 279 |
| 8.3.2 | 实例 | 281 |
| 8.4 | 小结 | 284 |
| 第9章 | 多轴疲劳 | 287 |
| 9.1 | 多轴疲劳载荷谱的处理 | 287 |
| 9.1.1 | 常用的多轴疲劳试验件 | 288 |
| 9.1.2 | 应力不变量和应变不变量 | 289 |
| 9.1.3 | 等效应力和等效应变 | 290 |
| 9.1.4 | 试验常用的载荷路径 | 291 |
| 9.1.5 | 多轴疲劳载荷谱的处理 | 293 |
| 9.2 | 多轴循环应力-应变关系 | 294 |
| 9.3 | 多轴疲劳破坏准则 | 295 |
| 9.3.1 | 多轴疲劳破坏准则分类 | 295 |
| 9.3.2 | 等效损伤量 | 297 |
| 9.3.3 | 直接损伤量 | 302 |
| 9.3.4 | 多轴疲劳破坏准则评估 | 305 |
| 9.3.5 | 讨论 | 306 |
| 9.4 | 多轴疲劳累积损伤理论 | 307 |
| 9.4.1 | 疲劳累积损伤理论分类 | 307 |
| 9.4.2 | 多轴线性累积损伤模型 | 308 |
| 9.4.3 | 多轴非线性累积损伤模型 | 309 |
| 9.4.4 | 多轴疲劳累积损伤新模型 | 310 |
| 9.4.5 | 方法评估 | 311 |
| 9.4.6 | 阶梯谱下的多轴疲劳损伤累积研究 | 314 |
| 9.4.7 | 块谱和随机谱下的累积损伤理论研究 | 322 |
| 9.4.8 | 小结 | 327 |
| 9.5 | 缺口件的多轴疲劳寿命分析 | 328 |
| 9.5.1 | 名义应力法 | 328 |
| 9.5.2 | 局部应力应变法 | 329 |
| 9.5.3 | 临界距离法 | 331 |
| 9.5.4 | 应力应变场强法 | 333 |
| 9.5.5 | 小结 | 333 |
| 附录 | 疲劳寿命数据 | 334 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第 10 章 振动疲劳 | 348 |
| 10.1 振动疲劳的定义 | 348 |
| 10.2 振动疲劳寿命分析 | 348 |
| 10.2.1 结构振动 | 348 |
| 10.2.2 振动疲劳寿命分析方法分类 | 349 |
| 10.3 结构振动疲劳试验 | 350 |
| 10.3.1 椭圆孔板 | 350 |
| 10.3.2 半圆形槽缺口试验件 | 350 |
| 10.3.3 U形槽缺口试验件 | 353 |
| 10.3.4 连接件 | 356 |
| 10.4 结构振动疲劳寿命估算的时域法 | 357 |
| 10.4.1 时域法 | 357 |
| 10.4.2 随机过程时域模拟方法 | 358 |
| 10.4.3 算例 | 359 |
| 10.5 结构振动疲劳寿命分析的频域法 | 360 |
| 10.5.1 功率谱密度 | 360 |
| 10.5.2 寿命分析基本理论 | 363 |
| 10.5.3 频域法疲劳寿命分析流程 | 364 |
| 10.5.4 应力幅值的概率密度函数 $p(S)$ | 364 |
| 10.5.5 算例分析 | 366 |
| 10.6 缺口件的振动疲劳寿命分析 | 367 |
| 10.6.1 动力学下的应力集中系数 | 367 |
| 10.6.2 局部应力分析法 | 368 |
| 10.6.3 名义应力分析法 | 369 |
| 10.7 连接件的振动疲劳寿命分析 | 370 |
| 10.7.1 动力学下的应力严重系数 SSF | 370 |
| 10.7.2 连接件的振动疲劳寿命分析步骤 | 372 |
| 10.7.3 算例 | 372 |

第1章 绪 论

强度、刚度和疲劳寿命是工程结构使用的三个基本要求。疲劳破坏是工程结构和机械失效的主要原因之一,引起疲劳失效的循环载荷的峰值往往远小于根据静态断裂分析估算出来的“安全”载荷。因此开展结构疲劳研究有着重要的意义。

本章简要介绍与结构疲劳有关的概念和结构疲劳寿命分析的方法。

1.1 疲 劳

1.1.1 疲劳定义

疲劳一词的英文是“fatigue”,意思是“劳累、疲倦”。作为专业术语,用来表达材料在循环载荷作用下的损伤和破坏。国际标准化组织(ISO)在1964年发表的报告《金属疲劳试验的一般原理》中对疲劳所作的定义是:“金属材料在应力或应变的反复作用下所发生的性能变化叫做疲劳;虽然在一般情况下,这个术语特指那些导致开裂或破坏的性能变化”。这一描述也普遍适用于非金属材料。

一次加载导致材料或结构失效的最大载荷被称为静强度,多次载荷作用导致材料或结构失效的情况被称为疲劳,其载荷的作用次数被称为疲劳寿命,对应的载荷值被称为疲劳强度。

1.1.2 疲劳的分类

可以从不同的角度对疲劳进行分类。

在常温下工作的材料或结构的疲劳破坏取决于外载的大小。从微观上看,疲劳裂纹的萌生都与局部微观塑性有关,但从宏观上看,在循环应力水平较低时,弹性应变起主导作用,此时疲劳寿命较长,称为应力疲劳或高周疲劳(high cycle fatigue, HCF)。在循环应力水平较高时,塑性应变起主导作用,此时疲劳寿命较短,称为应变疲劳或低周疲劳(low cycle fatigue, LCF)。如果循环应力水平很低,材料或结构宏观上处于弹性状态,此时疲劳寿命很长($>10^7$),这种情况被称为超高周疲劳(very high cycle fatigue, VHCF; gigacycle fatigue, GCF),见图 1.1。

不同的外部载荷会造成不同的疲劳破坏形式,由此可以将疲劳分为:机械疲

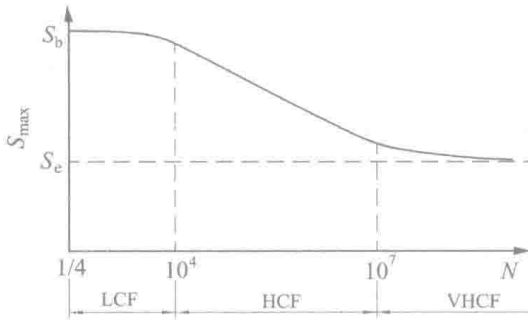


图 1.1 疲劳寿命曲线

劳——仅有外加应力或应变波动造成的疲劳失效；蠕变疲劳——循环载荷同高温联合作用引起的疲劳失效；热机械疲劳——循环载荷和循环温度同时作用引起的疲劳失效；腐蚀疲劳——在存在侵蚀性化学介质或致脆介质的环境中施加循环载荷引起的疲劳失效；滑动接触疲劳和滚动接触疲劳——载荷的反复作用与材料间的滑动和滚动接触相结合分别

产生的疲劳失效；预腐蚀疲劳——材料或结构先经过一段时间的腐蚀，然后再在机械载荷作用下发生的疲劳失效；微动疲劳——脉动应力与表面间的来回相对运动和摩擦滑动共同作用产生的疲劳失效；振动疲劳——外载荷仅作用一个循环，但在材料或结构内部产生多个应力或应变循环而引起的疲劳失效。材料或结构的失效大多数是由于发生上述某一种疲劳过程，但某些工程结构的疲劳失效是在多种疲劳荷载的共同作用下发生的。

从疲劳危险点的应力状态看，疲劳又可以分为单轴疲劳和多轴疲劳。多轴疲劳又分为多轴比例疲劳和多轴非比例疲劳。单轴疲劳是指材料或结构的疲劳危险点的应力状态只有一个应力或应变分量，材料的疲劳性能试验通常属于这种情况。对于工程结构，如果一个应力或应变分量远大于其他分量，那么也可近似为单轴疲劳。多轴比例疲劳是指疲劳危险部位受到两个或两个以上比例关系不随时间变化的应力或应变分量的作用而引起的疲劳失效，单工况外载荷作用下的缺口件的疲劳问题属于这一情况。多轴非比例疲劳是指疲劳危险部位受到两个或两个以上比例关系随时间变化的应力或应变分量的作用而引起的疲劳失效，多工况外载荷作用下的结构疲劳问题通常属于这一情况，通常这种情况被简称为多轴疲劳。

1.2 疲劳寿命

疲劳寿命是指材料或结构直至破坏所受到的循环载荷的作用次数或时间。所谓疲劳破坏或疲劳失效的定义或准则是多种多样的。

1.2.1 按损伤发展定义的疲劳寿命

从疲劳损伤发展过程看，有二阶段疲劳寿命模型、三阶段疲劳寿命模型和多阶段疲劳寿命模型。二阶段模型将疲劳寿命分为裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命，如图 1.2 所示。结构或材料从受载开始到裂纹达到某一给定的裂纹长度 a_0 为止的

循环次数称为裂纹形成寿命,此后裂纹扩展到临界裂纹长度 a_{cr} 为止的循环次数称为裂纹扩展寿命;从疲劳寿命预测的角度看,这一给定的裂纹长度与预测所采用的寿命性能曲线有关^[1]。



图 1.2 二阶段疲劳寿命模型

三阶段模型认为疲劳损伤过程由无裂纹、小裂纹和大裂纹三个阶段组成^[2],见图 1.3。其中, a_{smU} 为小裂纹的上限尺寸, a_{smL} 为小裂纹的下限尺寸, a_0 为工程裂纹尺寸。上述各裂纹尺寸与材料和外载有关^[2]。从开始加载直到裂纹尺寸为 a_{smL} 的载荷循环次数或时间被称为裂纹形成寿命,从裂纹尺寸 a_{smL} 到 a_{smU} 的载荷循环次数或时间被称为小裂纹扩展寿命,从裂纹尺寸 a_{smU} 到 a_{cr} 的载荷循环次数或时间被称为大裂纹扩展寿命,小裂纹扩展寿命与大裂纹扩展寿命之和被称为裂纹扩展寿命,裂纹扩展寿命与裂纹形成寿命之和则被称为疲劳全寿命。但是在工程上通常还是以 a_0 作为有无裂纹的分界点。



图 1.3 三阶段疲劳破坏模型

多阶段模型将小裂纹阶段再细分为三个阶段:微观小裂纹、物理小裂纹和结构小裂纹^[3],如图 1.4 所示。其中, a_{pl} 为塑性驻留区形成尺寸, a_{smL} 为微观结构小裂纹尺寸, a_{psl} 为物理小裂纹尺寸, a_1 为线弹性断裂力学可应用的最小裂纹长度。



图 1.4 多阶段疲劳寿命模型

上述模型中各阶段疲劳寿命之和称为疲劳全寿命。除上述三个模型外,还有不少模型研究了各个阶段的分界点,参见文献[4]~文献[11]。

1.2.2 由设计准则定义的疲劳寿命

从设计准则看,有试验寿命、设计寿命、安全寿命、经济寿命、可靠性寿命等诸多术语。

试验寿命是指材料或结构在疲劳试验中实际达到的寿命。

设计寿命是工程结构设计的一个性能指标,是设计方或产品所有者期望实现的寿命值,由产品的设计要求确定。结构的实际疲劳寿命应大于等于设计寿命。

安全寿命对应于安全寿命设计准则,是由疲劳试验给出的。安全寿命 N_s 等于试验寿命 N_{test} 除以疲劳分散系数 n_f , 即 $N_s = N_{\text{test}}/n_f$, 对于航空结构 n_f 通常取 4。

经济寿命对应于耐久性设计准则,是执行耐久性工作计划所表示的疲劳寿命。通常已考虑了分析和试验中暴露出来的结构局部设计和制造缺陷的改进。当试验结构出现遍布损伤,对其修理不经济,而若不进行修理又影响其功能时所对应的试验寿命被称为经济极限寿命。经济寿命 N_e 等于经济极限寿命 N_{e0} 除以裂纹扩展寿命分散系数 n_c , 即 $N_e = N_{e0}/n_c$, 对于航空结构 n_c 通常取 2。

可靠性寿命对应于可靠性设计准则,是指在规定的使用条件下,达到指定的可靠度,材料或结构仍然能够完成规定功能的时间。所以可靠性寿命 N_R 是结构可靠度 R 的函数。

1.2.3 从使用角度定义的疲劳寿命

从使用的角度出发,又有使用寿命、修理寿命、剩余寿命等术语^[12]。

使用寿命是一个不十分明确的概念,有时将结构开始使用到当前的使用时间称为使用寿命;有时又将结构的实际寿命除以疲劳分散系数称为使用寿命,也即可能是安全寿命或者是经济寿命。

修理寿命是指结构修理后所具有的总寿命,有时也把结构修理产生的疲劳寿命增量称为修理寿命。

剩余寿命是指结构消耗了一部分寿命后,结构还具有的寿命。这种消耗可能是结构服役了一段时间,结构受到意外损伤,结构受到了其他荷载的作用,或者结构经过了一段时间的试验,其本质是在结构中产生了一定的损伤,而损伤造成了结构对抗疲劳载荷能力的下降。

1.3 疲劳寿命分析发展简史

疲劳是一个既古老又年轻的交叉学科研究分支,自 Wöhler 将疲劳纳入科学研

究的范畴至今,疲劳研究仍有方兴未艾之势,材料疲劳的真正机理以及对其的科学描述至今尚未得到很好的解决。疲劳寿命分析方法是疲劳研究的主要内容之一,从疲劳研究史可以看到疲劳寿命分析方法的研究伴随了整个疲劳研究史。这里作一简单回顾^[13-15]。

金属疲劳的最初研究是德国矿业工程师 W. A. J. Albert 在 1829 年前后完成的。他对铁制的矿山升降机链条进行了反复加载试验,以校验其可靠性,1837 年 Albert 首次公开发表了疲劳试验结果。

1842 年,英国铁路工程师 W. J. M. Rankine 对疲劳断裂的不同特征有了认识,并注意到了机器部件存在应力集中的危险性。

1854 年,术语“fatigue”一词首次在 Braithwaite 的文章中出现。

1852~1869 年,Wöhler 对疲劳破坏进行了系统的研究。1858 年他测试了火车轮轴的使用载荷,并建议采用无限寿命设计。1860 年他开始公开发表火车轮轴的疲劳试验结果,从这些结果中,他得出了应力幅值对疲劳寿命影响最大的结论;他还探讨了平均应力的影响以及有限疲劳寿命和无限疲劳寿命间的差别。他发现由钢制作的车轴在循环载荷作用下,其强度大大低于它们的静载强度,提出了利用 $S-N$ 曲线来描述疲劳行为的方法,并且提出了疲劳“耐久极限”这个概念。其间他还注意到了疲劳的分散性,建议疲劳设计时的安全系数应比静强度设计时的要大。1910 年 Spangenberg 首先给出了 $S-N$ 曲线(即 Wöhler 曲线,而 Wöhler 采用的是表格形式),但直到 1920 年才由 Basquin 用公式 $\sigma_a = CR^n$ 表述了有限寿命的 $S-N$ 曲线,并指出应力对疲劳循环数的双对数图在很大的应力范围内表现为线性关系。

1874 年,德国工程师 H. Gerber 开始研究疲劳设计方法,提出了考虑平均应力影响的疲劳寿命计算方法;Goodman 也讨论了类似的问题。1886 年,Bauschinger 提出了“Bauschinger 效应”。1889 年,Kirsch 首先计算了含圆孔的无限大板的应力集中系数。

1903 年,Ewing 观察到了旋转弯曲疲劳试验件表面有滑移带,1934 年,Polanyi 提出位错理论,这两者构成了金属疲劳机理研究的基础。

1905~1925 年,Smith 研制了疲劳试验机并通过试验获得了迟滞回线;Gough 进行了扭转疲劳试验,给出了拉扭联合作用下的疲劳强度;Griffith 和 Inglis 研究了含裂纹板的断裂问题。英国进行了全尺寸飞机结构的疲劳试验,提到了“疲劳缺口效应”。1929 年,Haigh 研究了缺口敏感性。1937 年,Neuber 指出缺口根部区域内的平均应力比峰值应力更能代表受载的严重程度。

1931 年,NACA 测量了飞机的载荷谱,Batson 等测量了汽车弹簧的疲劳载荷谱。1931 年,人们认识到高静强度材料并不一定具有较高的疲劳强度;1938 年,人们认识到残余压应力可以改善疲劳强度。