

# 金属疲劳

JINSHUPILO

王栓柱 编著

福建科学技术出版社

# 金属疲劳

王栓柱 编著

---

福建科学技术出版社

一九八五年·福州

# 金属疲劳

王栓柱 编著

\*

福建科学技术出版社出版

(福州得贵巷27号)

福建省新华书店发行

福建新华印刷厂印刷

开本850×1168毫米 1/32 18.25印张 430千字

1986年5月第1版

1986年5月第1次印刷

印数: 1—2,090

书号: 15211·70 定价: 4.40元

## 内 容 提 要

本书介绍了金属疲劳的基本概念和理论 收集了大量的疲劳性能数据,反映了近几年国内外疲劳研究的最新成就。书中着重讨论了低循环疲劳、材料与构件的寿命预测方法,对高温疲劳、腐蚀疲劳、缺口影响、微观机理等方面也作了比较详细的阐述。书末还附有了常用的疲劳数据统计处理程序。

本书可供从事材料科学、机械冶金、应力分析等专业的工程技术人员以及工院校学生和研究生参考。

## 出 版 说 明

《金属疲劳》一书是应航空工业和一般机械工业的需要，在航空工业部科学技术委员会吴大观同志的亲切关怀和指导下编写而成的。全书主要由王栓柱同志撰写，参加编写工作的还有迟书跃、程怀瑞、张继荣、孙秦、王兴国、崔遂玲、李肇飞、程泽兵等同志。石琪同志为本书的整理做了大量工作。此外，还有许多同志为本书提供数据和图片。吴大观同志十分认真而详细地审阅了书稿。在编写过程中还得到了孙训方教授的支持和鼓励。谢济洲高级工程师，徐灏、哈宽富、杨峥等教授对书中内容提出了许多宝贵意见。在此一并表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，加之编写时间紧迫，书中缺点和错误一定不少，恳切希望参阅这本书的同志给予批评指正。

作 者

一九八五、五

## 绪 言

工程材料和构件在使用过程中，由于承受循环变动负荷的影响，以致裂纹的萌生和扩展，直至最后断裂的整个过程，通常称为“金属的疲劳”。

疲劳破坏是一种“潜藏”的失效方式。无论在静载荷下显示脆性或韧性的材料，在疲劳断裂时都不会产生明显的塑性变形。断裂是突然发生的，有时事先没有任何先兆。因而疲劳断裂具有很大的危险性，往往给人们的生命和财产带来严重的损失。例如桥梁、船舶、飞机、发动机都曾发生过多灾性的疲劳破坏。据不完全统计，由于交变载荷所引起的疲劳破坏，占机械失效总数的50~90%。以航空发动机部件损坏原因的资料记载，在1226次失效事故中，疲劳蠕变（持久）破坏的约占51%。对于汽车来说，部件的破坏约有85%以上的是由于机械疲劳、接触疲劳和热疲劳所引起的。其它机械构件，如海洋石油钻井平台受到海浪的冲击，火车的轴承受旋转弯曲载荷而产生的挠曲，核反应堆外壳由于温度循环而产生周期的热应力等，最终都将发生疲劳断裂。鉴于疲劳破坏危害之大，从二十世纪五十年代起就开始了抵抗疲劳的研究。经过一百多年的发展，逐步成为一门新兴的学科，深入到燃气

轮机、超音速飞机及其发动机结构、石油化工、运输设备等现代科学技术的各个领域。由于疲劳现象的复杂性，使之涉及材料科学、力学、金属物理、应用数学等学科，对其研究的重要性愈来愈受到广大科学工作者的重视。

随着理论研究和实验技术的发展，疲劳寿命预测的准确程度正在不断提高。在本世纪五十年代以前，研究对象主要是应力疲劳。近二十余年来，对疲劳破坏的机理研究日趋深化。从应力疲劳过渡到应变疲劳，作为设计准则，名义应力法已逐步被局部应变法所代替。尤其是近几年来，世界各国都采用材料疲劳性能数据去预测构件寿命。例如航空发动机以往大都采用整机试车的办法确定寿命。这种方法既不准确又不经济。目前则代之以确定发动机关键部位的危险部位，如应力集中区，以预测危险部位的寿命去确定部件和整机寿命。其中局部应力——应变法就是一种广泛采用的寿命预测方法。

国营红旗机械厂疲劳断裂试验室，近年来根据航空发动机研制的需要，开展材料和结构的疲劳寿命研究，积累了大量工程数据，在国内外学术刊物、学术会议上发表过多篇文章。中国航空学会曾在该厂举办过疲劳专题学习班。在这些工作的基础上，收集了国内许多其他单位的研究成果，参考了其他国家有关专著，编写了这本书。

书中第一章系统地介绍了有关疲劳的基本知识；第二章讨论了金属材料循环变形特征及位错结构；第三章讨论了低循环疲劳的基本规律及试验方法；第四、五两章主要介绍疲劳裂纹的萌生机制和扩展规律；第六章提供了疲

劳性能数据的统计处理方法和常用的计算机程序；第七章讨论了变应力下的疲劳损伤；第八章分析了缺口的存在对疲劳性能的影响；第九章介绍了环境介质在疲劳破坏中所起的作用；第十章简要地介绍了多轴应力和应变状态下的疲劳；书末还附有常用的疲劳数据统计处理程序。

全书从工程应用出发，以寿命预测为主导编写而成。可望对从事疲劳研究的工程技术人员、材料和结构强度的设计人员均会有所帮助。

吴大观



# 目 录

绪 言	吴大观
第一章 疲劳强度基础	( 1 )
第一节 疲劳的研究历史	( 1 )
第二节 金属疲劳的分类	( 4 )
第三节 疲劳曲线图	( 8 )
第四节 疲劳强度设计	( 27 )
第五节 疲劳断裂	( 30 )
第二章 金属的循环变形	( 45 )
第一节 静态和准静态加载	( 45 )
第二节 循环加载的滞后回线	( 47 )
第三节 循环硬化和软化	( 54 )
第四节 循环应力—应变曲线	( 60 )
第五节 平均应力和平均应变	( 65 )
第六节 金属循环变形机理	( 73 )
第三章 低循环疲劳	( 89 )
第一节 低循环疲劳寿命	( 91 )
第二节 低循环疲劳的能量考虑	( 99 )
第三节 平均应力和平均应变对应变—寿命曲线的影响	( 105 )
第四节 低循环疲劳寿命预测	( 112 )
第五节 低循环疲劳试验设备	( 116 )
第六节 测试技术	( 128 )

<b>第四章 疲劳损伤与裂纹萌生</b> .....	(148)
第一节 损伤的概念与损伤力学.....	(148)
第二节 不可逆热力学基础.....	(156)
第三节 损伤力学在疲劳中的应用.....	(165)
第四节 疲劳损伤的微观机制.....	(168)
第五节 疲劳裂纹的萌生.....	(177)
<b>第五章 疲劳裂纹的扩展</b> .....	(190)
第一节 断裂力学的基本概念.....	(191)
第二节 疲劳裂纹的扩展规律.....	(213)
第三节 疲劳裂纹的扩展机理.....	(231)
第四节 短裂纹的扩展.....	(242)
第五节 疲劳裂纹扩展速率的统计分布.....	(248)
第六节 疲劳裂纹扩展速率的测试方法.....	(251)
<b>第六章 疲劳数据的统计分析 with 可靠性</b> .....	(263)
第一节 概率论与数理统计基础.....	(263)
第二节 安全寿命分析.....	(282)
第三节 不完全寿命的统计容差极限.....	(288)
第四节 对比试验.....	(294)
第五节 筛选试验.....	(310)
第六节 应力(应变)一寿命曲线的统计分析.....	(324)
第七节 疲劳裂纹扩展速率数据的统计分析.....	(332)
第八节 疲劳强度的可靠性设计.....	(334)
<b>第七章 变幅加载下的疲劳</b> .....	(343)
第一节 载荷谱.....	(344)
第二节 变幅加载时应力和应变分析.....	(346)
第三节 随机载荷一时间历程的统计处理.....	(348)
第四节 谱载荷下的积累损伤.....	(375)

第五节	超载与迟滞效应·····	(384)
<b>第八章</b>	<b>缺口构件的疲劳·····</b>	<b>(399)</b>
第一节	缺口根部的应力—应变集中·····	(399)
第二节	局部应力应变的计算与测量·····	(407)
第三节	缺口对疲劳寿命的影响·····	(418)
第四节	带有平均应力的缺口构件疲劳寿命·····	(422)
第五节	伴随试验法·····	(425)
第六节	用局部应力应变法预测缺口构件疲劳裂纹 形成寿命·····	(432)
第七节	零件尺寸对疲劳寿命的影响·····	(451)
<b>第九章</b>	<b>环境对疲劳的影响·····</b>	<b>(455)</b>
第一节	高温疲劳·····	(455)
第二节	热疲劳·····	(480)
第三节	腐蚀疲劳·····	(488)
第四节	接触疲劳·····	(503)
<b>第十章</b>	<b>多轴应力状态下的疲劳·····</b>	<b>(510)</b>
第一节	静态强度理论·····	(510)
第二节	双向应力状态下的疲劳·····	(523)
第三节	多轴应力状态下的疲劳·····	(532)
<b>附表</b>	·····	<b>(552)</b>

# 第一章 疲劳强度基础

这一章将介绍：疲劳研究的发展过程；工程结构中各种疲劳现象的分类和疲劳应力；传统的疲劳曲线图；疲劳断裂的研究方法和疲劳断口的宏观与微观特征。

## 第一节 疲劳的研究历史

有关疲劳的研究已经有一百多年的历史，1839年巴黎大学教授 J.U.Poncelet 在讲课中首先使用了“金属疲劳”的概念。1850~1860年德国工程师 Wöhler，针对当时火车轴在重复应力的作用下，多次发生台肩处断裂事故，首先开展了疲劳的试验研究，提出了应力—寿命图和疲劳极限的概念。1870~1890年间，在 Wöhler 工作的基础上，Gerber 研究了平均应力对疲劳寿命的影响。Goodman 提出了考虑平均应力影响的简单理论。

本世纪初，光学显微镜的出现为研究疲劳机制提供了工具。确认局部应力集中区的滑移线或滑移带是产生疲劳微裂纹的先兆。Gough 在研究疲劳机制和多轴应力状态下疲劳现象的基础上，写出了第一本关于金属材料疲劳的专著<sup>(1)</sup>。1920年Griffith发表了关于脆性材料断裂的理论和试验结果。他发现玻璃的强度取决于所包含的微裂纹的长度。如果 $S$ 表示断裂时的名义应力， $a$ 为断裂时的裂纹长度，则 $S\sqrt{a}$ 为一个常数。Griffith理论的出现标志着断裂力学的开端。1937年Neuber提出了在缺口根部的应力梯度效应，他认为缺口根部一个体积元内的平均应力比缺口

处峰值应力还为重要。1945年Miner用公式表达出线性积累损伤理论。尽管这个理论还存在着不少缺点，由于其形式简单、使用方便，所以至今仍被人们所普遍接受。

五十年代初期，“慧星”号客机经过300多小时飞行试验之后，投入航线使用，1954年元月，就在检查后的第四天，坠入地中海。事后将残骸从海底打捞出来，对于其部件进行了认真的分析和研究，最后肯定这次坠毁事件是密封舱疲劳破坏引起。疲劳微裂纹产生于机翼上转角应力集中部位。在两架“慧星”号相继失事之后，这批飞机全部停飞，进行全面检查和试验，注意力集中放在飞机骨架的疲劳强度设计上。

类似灾难性的事故出现使疲劳研究有了较大的发展。首先，电液伺服试验机的出现为模拟试样、构件乃至整个结构的受力状态提供了强有力的手段。而电子显微镜的出现又极大地促进了疲劳机制的研究。就在这同一时期，力学理论上又提出了应力强度因子 $K$ 的概念<sup>(2)</sup>。在此基础上发展起来的线弹性断裂力学，成为疲劳裂纹扩展寿命预测的基础。

六十年代前后，控制应变的低循环疲劳试验已积累了大量数据。Manson-Coffin公式概括了塑性应变幅值和疲劳寿命之间的关系<sup>(3,4)</sup>。这些设想已成为现在缺口试样应变疲劳寿命分析的基础。

Paris在1963年提出疲劳裂纹扩展速率 $da/dN$ 和应力强度因子幅值 $\Delta k$ 之间的关系，当时并没有得到人们的承认。到了六十年代后期，经对F-111飞机的灾难性事故的分析，归结为含有微裂纹的部件脆性断裂所引起。这些失效事例以及美国军用飞机中所出现的其它一些疲劳问题，为美国在七十年代进行B-1轰炸机设计时应用断裂力学奠定了基础。这首先承认在构件中不可避免地存在着微裂纹或者微观缺陷，在外加载荷的作用下，这些裂

纹或缺陷在一定条件下会扩展。在整个飞机寿命设计时，就应考虑到这些裂纹的扩展寿命。1967年，美国东部维吉尼亚州一座大桥突然崩塌，事先没有发现任何先兆。大量的调查研究指出，由于疲劳、应力腐蚀和腐蚀疲劳等原因使吊环上产生初始裂纹。这些裂纹扩展至临界尺寸，最后导致解理断裂，使大桥在瞬间全部崩塌。类似事故的不断出现，对大型结构的设计指导思想产生了很大影响。1974年在美国空军颁布的军用规范A-83444中，就明确地规定了军用飞机在设计时对损伤容限的要求。从此，断裂力学就成为疲劳研究的重要理论工具。

随着科学技术和试验技术的发展，疲劳又成为一个综合性很强的研究课题，涉及广泛的学术领域<sup>(6)</sup>。人们可以从不同的角度和尺度对疲劳现象进行研究。图1—1示意地表示了这种情况。可以看出它具有某些边缘学科的性质。我们感兴趣的是中间这些层次，也就是从微观组织、裂纹尖端到试样、零件这些范围。

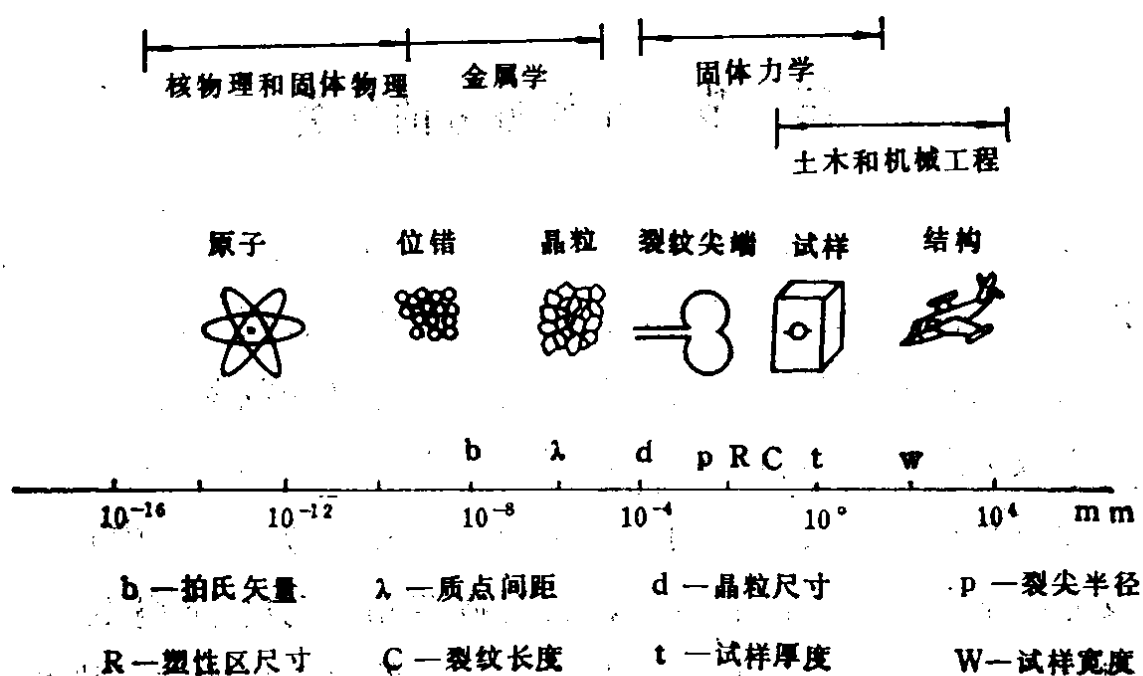


图1—1 不同学科所研究的裂纹尺寸<sup>(6)</sup>

由于疲劳现象是一个复杂的问题，人们对疲劳本质的认识也是由浅入深的。据不完全统计，到1970年止，世界各国发表的有

关疲劳的论文11000多篇。其中1880~1940年约150篇，到1960年已猛增到3500多篇，而1960~1970年仅十年间论述疲劳的文章多达7000余篇。近十余年来，随着断裂力学的发展和电子计算机技术的应用，使疲劳研究以崭新面目出现，在广泛的领域内受到应有的重视。

我国对疲劳现象的试验研究可追溯到五十年代初期。随着我国自己的航空工业体系的建立，相继成立了专门从事疲劳研究的试验室。经过二十多年的发展，疲劳专业研究队伍已初具规模。研究对象从航空航天，到海洋石油化工、压力管道、交通运输、通用机械等。研究范围也由一般高周疲劳、旋转弯曲到应变疲劳、高温疲劳、热疲劳、腐蚀疲劳和各种复合疲劳。可以预料，随着我国四个现代化的进程，为了充分发挥现有材料的强度潜力，减轻重量，提高产品性能，准确估算部件和结构的寿命，疲劳研究必将成为活跃的研究学科之一。

## 第二节 金属疲劳的分类

疲劳可以按照不同的方法进行分类。例如按受力方式的不同，可以分为弯曲疲劳、拉压疲劳、扭转疲劳和复合疲劳；按照载荷与时间的关系确定与否，可以分为定常疲劳（即载荷与时间有确定的函数关系）和随机疲劳（随机载荷作用下的疲劳）；按温度、介质和接触情况的不同，又可分为一般疲劳（空气中）和腐蚀疲劳，常温疲劳和高温疲劳，接触疲劳和微动磨损腐蚀疲劳（也称擦伤疲劳或咬蚀）。除此之外，构件由于急骤地受热和冷却产生很大的热应力循环而导致破坏则称为热疲劳。目前比较多的研究工作是按照破坏前所经历的载荷循环周次来划分，一般破断周次 $N_f > 10^4$ 时习惯称为高周疲劳， $N_f < 10^4 \sim 10^5$ 称为低周

(循环) 疲劳。

### 1·2·1 疲劳加载方式

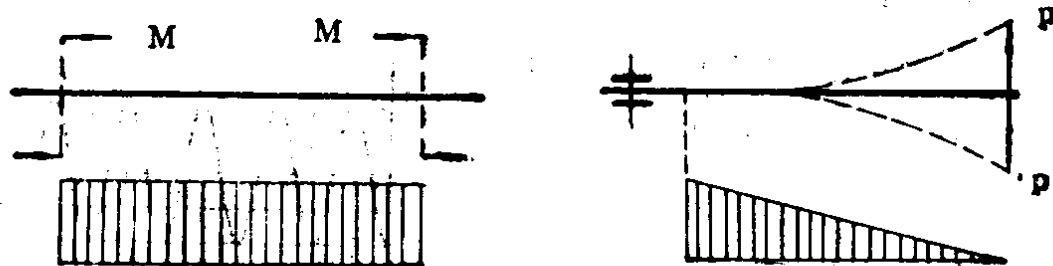
在疲劳试验中有两种不同的加载方式：载荷控制—柔性加载；变形控制—刚性加载<sup>(7)</sup>。

柔性加载：指在试验过程中载荷大小保持恒定，试样位移不受限制，疲劳损伤随加载系统的刚度而变化。

刚性加载：指在试验过程中试样的位移保持不变，载荷随试验系统的刚度而变化。

下面介绍工程中常遇到的疲劳加载类型：

(i) 弯曲疲劳 试样承受反复的弯矩，又可分为平面弯曲疲劳和悬臂弯曲疲劳，如图1—2。

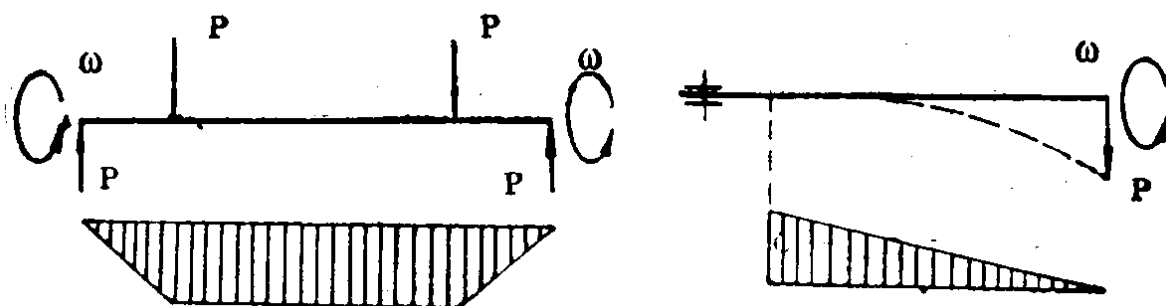


a. 平面弯曲

b. 悬臂弯曲

图1—2 弯曲疲劳

(ii) 旋转弯曲疲劳 试样在旋转过程中承受一定的弯矩。如图1—3。工程中很多构件承受这种载荷。如运行中的火车轴等。



a. 平面旋转弯曲

b. 悬臂旋转弯曲

图1—3 旋转弯曲疲劳



(iii) 扭转疲劳 试样承受周期性的扭矩作用。机械构件中的各种传动轴的失效即属这类疲劳。加载情况如图1—4。



图1—4 扭转疲劳

(iv) 冲击疲劳 试样受到重复的冲击载荷作用。简谐载荷与冲击载荷的叠加反映了汽车、铁路、建筑等结构上零、部件的受载特点。

(V) 轴向疲劳，这是工程中最常见，也是研究最多的一种。循环载荷是沿试样（或构件）轴线方向施加的，根据载荷是否过零点又可分为拉拉型 ( $P \geq 0$ ) 和拉压型两种。在以后的讨论中，凡未加特殊说明的都指轴向疲劳。

### 1.2.2 循环应力

图1—5为正弦循环应力谱。它由最大应力 $\sigma_{max}$ 、最小应力 $\sigma_{min}$ 、循环周期 $T$ 来描述。应力变化的特点可用平均应力 $\sigma_m$ 和应力幅值 $\sigma_a$ 来确定。

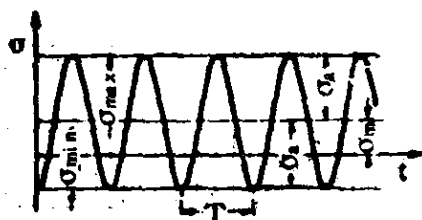


图1—5 正弦循环应力谱

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

$\sigma_m$ 相当于循环应力中的静态分量，而 $\sigma_a$ 则为变动分量。

于是可以得到简单的关系式

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a \quad \sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

相应的应力范围

$$2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

循环载荷的不对称特点由应力比来表示

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$