



面向21世纪课程教材

# 疲劳与断裂

**Fatigue and Fracture**

陈传尧 编著



■ 华中科技大学出版社

1.2.1  
3

面向21世纪课程教材

# 疲劳与断裂

陈传尧 编著

华中科技大学出版社  
· 武汉 ·

图书在版编目(CIP)数据

疲劳与断裂/陈传尧 编著

武汉:华中科技大学出版社, 2002年1月

ISBN 7-5609-2596-0

I. 疲…

II. 陈…

III. 疲劳断裂

IV. O346.1

疲劳与断裂

陈传尧 编著

责任编辑:佟文珍

责任校对:蔡晓瑚

封面设计:刘 卉

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:武汉市新华印刷有限责任公司

开本:787×1092 1/16

印张:13

字数:218 000

版次:2002年1月第1版

印次:2002年1月第1次印刷

印数:1-1 000

ISBN 7-5609-2596-0

定价:16.50元

凡有缺页,请向出版社发行部调换)

## 内 容 提 要

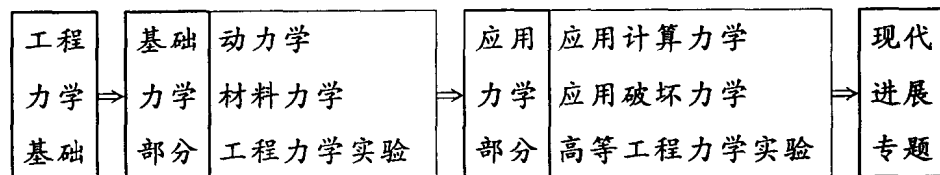
《疲劳与断裂》一书,系面向 21 世纪课程教材。全书共十章。重点讲授疲劳裂纹萌生机理与规律;应力疲劳与应变疲劳;断裂与断裂控制;疲劳裂纹扩展规律;现代抗疲劳设计方法等。书中并附有一定量思考题与习题,以及计算实例,加强了实用性。

全书结构体系合理,论述简明,有较强的科学性和实用性,有明显的教材特色,可以作为机械、材料、土木、能源、力学等专业本科学生的课程教材,也可供研究生选用或供工程技术人员参考。

## 前 言

1996年1月,国家教委“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,以增强学生处理实际工程问题的能力;应用破坏理论的成果,以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,以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“世行贷款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所造成的损失的大型综合调查,1983 年,在《国际断裂》杂志上发表了调查委员会给国会的报告。报告指出,断裂使美国一年损失 1190 亿美元,占 1982 年国家总产值的 4%。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。

有鉴于此,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)具有对于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。希望能够突出对于疲劳裂纹萌生、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,将断裂与疲劳放在一起讨论,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。

衷心感谢为本教材的编写、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>第一章 绪论</b> .....	(1)
1.1 什么是疲劳 .....	(1)
1.2 疲劳断裂破坏的严重性 .....	(4)
1.3 疲劳设计方法 .....	(5)
1.4 疲劳破坏机理与断口特征 .....	(7)
1.5 疲劳断裂研究方法 .....	(14)
小结 .....	(15)
思考题与习题 .....	(16)
<b>第二章 应力疲劳</b> .....	(17)
2.1 基本 S-N 曲线 .....	(17)
2.2 平均应力的影响 .....	(21)
2.3 影响疲劳性能的若干因素 .....	(25)
2.4 缺口疲劳 .....	(29)
2.5 变幅载荷谱下的疲劳寿命 .....	(32)
2.6 随机谱与循环计数法 .....	(37)
小结 .....	(43)
思考题与习题 .....	(43)
<b>第三章 疲劳应用统计学基础</b> .....	(46)
3.1 疲劳数据的分散性 .....	(46)
3.2 正态分布 .....	(47)

3.3	威布尔分布	(55)
3.4	二元线性回归分析	(59)
3.5	$S-N$ 曲线和 $p-S-N$ 曲线的拟合	(67)
	小结	(69)
	思考题与习题	(70)
<b>第四章</b>	<b>应变疲劳</b>	<b>(71)</b>
4.1	单调应力-应变响应	(71)
4.2	滞后环和循环应力-应变响应	(74)
4.3	材料的记忆特性与变幅循环响应计算	(76)
4.4	应变疲劳性能	(80)
4.5	缺口应变分析	(85)
	小结	(91)
	思考题与习题	(92)
<b>第五章</b>	<b>断裂失效与断裂控制设计</b>	<b>(95)</b>
5.1	结构中的裂纹	(95)
5.2	裂纹尖端的应力强度因子	(97)
5.3	控制断裂的三个基本因素	(103)
5.4	材料的断裂韧性 $K_{Ic}$	(104)
5.5	断裂判据与断裂控制设计的基本概念	(109)
	小结	(112)
	思考题与习题	(113)
<b>第六章</b>	<b>表面裂纹</b>	<b>(114)</b>
6.1	拉伸载荷作用下无限大体中的埋藏裂纹和表面裂纹	(115)
6.2	拉伸载荷作用下有限体中表面裂纹的应力强度因子	(119)
6.3	弯曲载荷作用下有限体中表面裂纹的应力强度因子	(127)
	小结	(131)
	思考题与习题	(132)



<b>第七章 弹塑性断裂力学简介</b> .....	(134)
7.1 裂纹尖端的小范围屈服 .....	(134)
7.2 裂纹尖端张开位移 .....	(139)
7.3 COD 测试与弹塑性断裂控制设计 .....	(141)
小结 .....	(145)
思考题与习题 .....	(146)
<b>第八章 疲劳裂纹扩展</b> .....	(147)
8.1 疲劳裂纹扩展速率 .....	(147)
8.2 疲劳裂纹扩展寿命预测 .....	(151)
8.3 影响疲劳裂纹扩展的若干因素 .....	(158)
小结 .....	(163)
思考题与习题 .....	(165)
<b>第九章 裂纹闭合理论与高载迟滞效应</b> .....	(167)
9.1 循环载荷下裂尖的弹塑性响应 .....	(167)
9.2 裂纹闭合理论 .....	(170)
9.3 高载迟滞效应 .....	(174)
小结 .....	(179)
思考题与习题 .....	(179)
<b>第十章 疲劳寿命预测和抗疲劳设计</b> .....	(180)
10.1 概述 .....	(180)
10.2 损伤容限设计 .....	(181)
10.3 耐久性设计 .....	(186)
小结 .....	(189)
思考题与习题 .....	(189)
<b>附录 A 二维裂纹问题的弹性解</b> .....	(190)

附录 B 相关试验标准 .....	(193)
部分习题参考答案 .....	(197)
参考文献 .....	(198)

# FATIGUE AND FRACTURE

## 疲劳与断裂

### 第一章 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。在进入 21 世纪的今天,人们对传统强度(静载荷作用、无缺陷材料的强度)的认识已相当深刻,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,疲劳与断裂引起的失效在工程失效中越来越突出。

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都积累了丰富的知识。20 世纪 50 年代中断裂力学的发展,进一步促进了疲劳裂纹扩展规律及失效控制的研究。疲劳断裂失效涉及到扰动使用载荷的多次作用,涉及到材料缺陷的形成与扩展,涉及到使用环境的影响,等等,问题的复杂性是显而易见的。因此,疲劳断裂许多问题的认识和根本解决,还有待进一步深入研究。尽管如此,了解现代研究成果,掌握疲劳与断裂的基本概念、规律和方法,对于广大工程技术人员在工程实践中成功地进行抗疲劳断裂设计无疑是十分有益的。

#### 1.1 什么是疲劳?

人们认识和研究疲劳问题,已经有 150 年的历史。在不懈地探究材料与结构疲劳奥秘的实践中,对疲劳的认识不断地得到修正和深化。

什么是疲劳?这里引述美国试验与材料协会(ASTM)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)中所作的定义:

在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的材料中所发生的局部的、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。更一般地, 也可称之为扰动载荷, 载荷可以是力、应力、应变、位移等。如图 1.1 所示, 载荷随使用时间的变化可以是有规则的, 也可以是不规则的, 甚至是随机的。如当弯矩不变时, 旋转弯曲轴中某点的应力, 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; 车辆在不平的道路上行驶, 弹簧等零、构件承受的载荷是随机的。

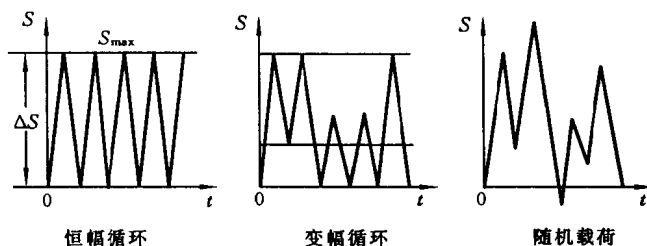


图 1.1 疲劳载荷形式分类

描述载荷-时间变化关系的图或表, 称为载荷谱。图 1.1 给出了应力随时间的变化, 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, 在研究疲劳问题时, 首先要研究载荷谱的描述与简化。

最简单的循环载荷是恒幅应力循环载荷。图 1.2 所描述的是正弦型恒幅循环应力。显然, 描述一个应力循环, 至少需要两个量, 如循环最大应力  $S_{max}$  和最小应力  $S_{min}$ 。这二者是描述循环之应力水平的基本量。

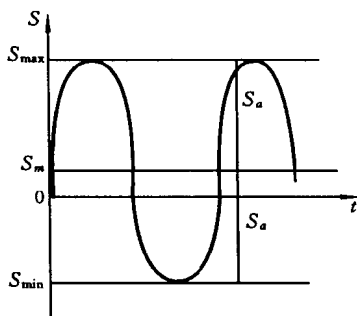


图 1.2 正弦型恒幅循环应力

疲劳分析中, 还常常使用到下述参量, 即应力变程(全幅)  $\Delta S$  定义为

$$\Delta S = S_{max} - S_{min} \quad (1-1)$$

应力幅(半幅)  $S_a$  定义为

$$S_a = \Delta S / 2 = (S_{max} - S_{min}) / 2 \quad (1-2)$$

平均应力  $S_m$  定义为

$$S_m = (S_{max} + S_{min}) / 2 \quad (1-3)$$

应力比  $R$  定义为

$$R = S_{min} / S_{max} \quad (1-4)$$

其中, 应力比  $R$  反映了不同的循环特征, 如当  $S_{max} = -S_{min}$  时,  $R = -1$ , 是对称循环;  $S_{min} = 0$  时,  $R = 0$ , 是脉冲

循环； $S_{\max} = S_{\min}$  时， $R = 1$ ， $S_a = 0$ ，是静载荷。如图 1.3 所示。

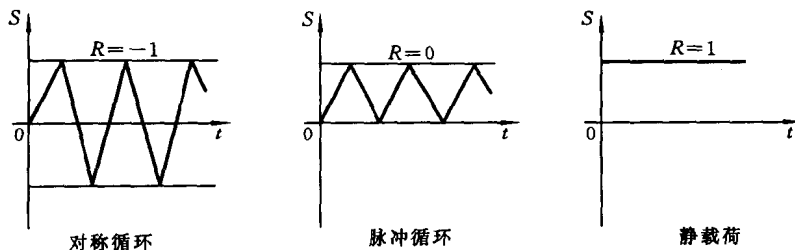


图 1.3 不同应力比下的应力循环

上述参量中，需且只需已知其中任意两个，即可确定循环应力水平。为使用方便，设计时，一般用最大应力  $S_{\max}$  和最小应力  $S_{\min}$ ，二者比较直观，便于设计控制；实验时，一般用平均应力  $S_m$  和应力幅  $S_a$ ，便于施加载荷；分析时，一般用  $S_a$  和应力比  $R$ ，便于按循环特性分类研究。

此外，还有循环频率和波形的不同，但其影响是次要的。

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，局部性是疲劳的明显特点。零、构件应力集中处，常常是疲劳破坏的起源。因此，要注意细节设计，尽可能减小应力集中。疲劳研究所关心的正是这些由几何形状变化或材料缺陷等引起应力集中的局部细节，要研究这些细节处的应力应变。

3) 疲劳破坏是在足够多次的扰动载荷作用之后，形成裂纹或完全断裂。

足够多次的扰动载荷作用之后，从高应力或高应变的局部开始，形成裂纹，称为裂纹起始（或裂纹萌生）。此后，在扰动载荷作用下，裂纹进一步扩展，直至到达临界尺寸而发生完全断裂。裂纹萌生—扩展—断裂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。

由于扰动应力的作用，零、构件或结构一开始使用，就进入了疲劳的“发展过程”。所谓裂纹萌生和扩展，是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”。它不仅取决于载荷水平，还依赖于其作用次数或时间，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，要经历裂纹起始或萌生、裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展

(断裂)三个阶段,疲劳总寿命也由相应的部分组成。因为裂纹失稳扩展是快速扩展,对寿命的影响很小,在估算寿命时通常不予考虑。故一般可将总寿命分为裂纹起始或萌生寿命与裂纹扩展寿命两部分,即

$$N_{\text{total}} = N_{\text{initiation}} + N_{\text{propagation}} \quad (1-5)$$

进行裂纹起始寿命分析时,一般按应力-寿命或应变-寿命关系进行,称为传统疲劳;疲劳裂纹扩展寿命分析则必须考虑裂纹的存在,需用断裂力学方法研究,故称为断裂疲劳。

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,并注意两部分寿命的衔接。但在某些情况下,也可能只需要考虑裂纹起始或扩展其中之一,并由此给出其寿命的估计。例如,高强脆性材料的断裂韧性低,一出现裂纹就会引起破坏,裂纹扩展寿命很短,故对于由高强度材料制造的零、构件,通常只需考虑其裂纹起始寿命,即  $N_t = N_i$ 。延性材料构件有相当长的裂纹扩展寿命,则一般不宜忽略。而对于一些焊接、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,故可以忽略其裂纹起始寿命,取  $N_t = N_p$ ,即只需考虑其裂纹扩展寿命即可。

## 1.2 疲劳断裂破坏的严重性

发生断裂是因为有裂纹存在,而裂纹萌生并扩展到足以引起断裂的原因则很少不是由于疲劳引起的。如二次世界大战期间美国制造的全焊接船舶,有近千艘出现开裂,200余艘发生严重断裂破坏。1952年,第一架喷气式客机(英国的彗星号)在试飞300多小时后投入使用。1954年1月一次检修后的第4天,客机在飞行中突然失事坠入地中海。打捞起残骸并进行研究后的结论认为,事故是由压力舱的疲劳破坏引起的,疲劳裂纹起源于机身开口的拐角处。1967年12月15日,美国西弗吉尼亚的Point Pleasant桥突然毁坏,造成46人死亡,事故原因是由一根带环拉杆中的缺陷在疲劳、腐蚀的作用下扩展到临界尺寸而引起的。1980年3月27日下午6时半,英国北海Ekofisk油田的Alexander L. Kielland号钻井平台倾覆,有127人落水,只救起89人。事故分析表明,裂纹由 $\phi 325\text{mm}$ 的撑管与支腿连接的焊缝处起始,在疲劳载荷(主要是波浪力)的作用下,扩展100多毫米后发生断裂,导致平台倾覆的事故。

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所造成的损失的大型综合调查。1983年,在《国际断裂》杂志(Int. J. Fracture, Vol. 23, No. 3, 1983. 译文见《力学进展》,No. 2, 1985)上发表了调查委员会给国会的报告。报告指出,断裂使美国一年损失1190亿美元,占

1982年美国国家总产值的4%。遭受损失最严重的三个行业是：车辆业(125亿美元/年)，建筑业(100亿美元/年)，航空工业(67亿美元/年)。值得注意的是报告还指出，向工程技术人员普及关于断裂和疲劳的基本概念和知识，可减少损失29%(345亿美元/年)，应用现有成果，可再减少损失24%(285亿美元/年)。因此，向工程技术人员普及关于断裂和疲劳的基本概念和知识，是十分必要的。

1984年《国际疲劳》杂志(Int. J. Fatigue, Vol. 6, No. 1)发表的国际民航组织(ICAO)《涉及金属疲劳断裂的重大飞机失事调查》指出：“80年代以来，由金属疲劳断裂引起的机毁人亡重大事故，平均每年100次。”20世纪的最后10年，尽管安全水平有了进一步提高，但世界民航每年发生重大死亡的飞行事故次数仍在48~57次之间。1999年，发生飞行死亡事故次数为48起，事故死亡人数为730人。

1993年，美国政府报告(PB94—143336, 1993.)发表了1973—1990年期间的飞行使用故障统计结果，表1-1给出了四种常用机型的数据。可见疲劳开裂仍然是值得密切关注的。

表 1-1 美国 SDR 使用故障报告 (1973—1990 年)

机 型	SDR 报告总次数		涉及疲劳开裂的 SDR 次数	
	飞机数	报告数	飞机数	报告数
Boeing 727	2364	36315	774	3294
737	1097	15437	257	2069
747	381	6936	134	543
DC—9	1465	26128	493	1532

工程实际中发生的疲劳断裂破坏，占全部力学破坏的50%~90%，是机械、结构失效的最常见形式。因此，工程技术人员必须认真考虑可能的疲劳断裂问题。

## 1.3 疲劳设计方法

### 1. 无限寿命设计

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 August Wöhler(1819—1914年)进行了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；应力幅小于某一极限值时，将不发生疲劳破坏。”他

最先引入了应力-寿命( $S-N$ )曲线和疲劳极限的概念,并于1867年在巴黎展出了其研究成果。

基于上述研究成果可知,对于无裂纹构件,控制其应力水平,使其小于疲劳持久极限( $S_f$ ),则不萌生疲劳裂纹。于是,无限寿命设计(Infinite-life design)条件为

$$S < S_f \quad (1-6)$$

材料的疲劳持久极限  $S_f$  由  $S-N$  曲线给出。

对于需要经历无限次循环( $> 10^7$ 次)的零、构件,如发动机气缸阀门、顶杆、弹簧、长期频繁运行的轮轴等,无限寿命设计至今仍是一种简单而合理的方法。

20世纪60年代研究裂纹扩展的结果指出,裂纹扩展的控制参量——应力强度因子幅度也存在着一个门槛值。对于已有裂纹存在的构件,控制其应力强度因子,使其小于门槛值,则虽有裂纹但不扩展,也可实现无限寿命设计。

## 2. 安全寿命设计

无限寿命设计要求将构件中的使用应力控制在很低的水平,材料的潜力得不到充分发挥,对于并不需要经受很多循环次数的构件,无限寿命设计就很不经济。

1945年,M. A. Miner 提出了变幅载荷作用下的疲劳损伤累积方法和判据,使变幅载荷作用下的疲劳寿命预测成为可能。

使构件在有限长设计寿命内,不发生疲劳破坏的设计,称为安全寿命设计(Safe-life design)或有限寿命设计。民用飞机、容器、管道、汽车等,大都采用安全寿命设计。

材料的  $S-N$  曲线和 Miner 累积损伤理论,是安全寿命设计的基础。当然,考虑到疲劳破坏的分散性等不确定因素,安全寿命设计应当具有足够的安全储备。

## 3. 损伤容限设计

由于裂纹的存在,安全寿命设计并不能完全确保安全。

1957年,G. R. Irwin 提出了裂纹尖端场控制参量——应力强度因子  $K$  的概念,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,P. C. Paris 提出疲劳裂纹扩展速率可以由应力强度因子幅度  $\Delta K$  来描述。这使疲劳裂纹扩展寿命预测研究得到快速发展。

损伤容限设计(Damage tolerance design),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),用断裂力学分析、疲劳裂纹扩展分析和试验验证,保证在定期检查肯定能发现裂纹之前,裂纹不会扩展到足以引起破坏。



断裂判据和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  $a_c$  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  $a_c$  和充分的时间,安排检查并及时发现裂纹。

#### 4. 耐久性设计

20世纪80年代起,以经济寿命控制为目标的耐久性设计(Durability design)概念形成。耐久性是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。这种方法首先要定义疲劳破坏严重细节(如孔、槽、圆弧、台阶等)处的初始疲劳质量,描绘与材料、设计、制造质量相关的初始疲劳损伤状态,再用疲劳或疲劳裂纹扩展分析预测在不同使用时刻损伤状态的变化,确定其经济寿命,制定使用、维修方案。

结构使用到某一寿命时,发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,这一寿命称为经济寿命。

耐久性设计由原来不考虑裂纹或仅考虑少数最严重的单个裂纹,发展到考虑全部可能出现的裂纹群;由仅考虑材料的疲劳抗力,发展到考虑细节设计及其制造质量对疲劳抗力的影响;由仅考虑安全,发展到综合考虑安全、功能及使用经济性;提供指导设计、制造、使用、维护的综合信息。耐久性设计已经开始应用于一些飞机结构及其它重要工程构件中,是21世纪疲劳断裂控制研究的一个主要发展方向。

上述各种疲劳设计方法,都反映了疲劳断裂研究的发展与进步。但是,由于疲劳问题复杂,影响因素多,使用条件和环境差别大,各种方法不是相互取代,而是相互补充的。不同构件,不同情况,应当采用不同方法。

正因为疲劳问题涉及因素多,情况复杂,对重要构件的抗疲劳设计必须进行充分的试验验证。若仅依据分析,则必须保证足够的安全裕度(其设计使用寿命往往仅为计算寿命的  $1/4 \sim 1/10$ )。采用损伤容限设计时,在安排检修时必须保证足够高的裂纹检出概率。

## 1.4 疲劳破坏机理与断口特征

### 1.4.1 疲劳断口的宏观特征

疲劳破坏的断口,大都有一些共同的特征。图1.4是某飞机机轮铸造镁合金轮毂的疲劳断口照片。

图1.4所示之飞机轮毂疲劳破坏断口,是典型的疲劳破坏断口,有如下明显