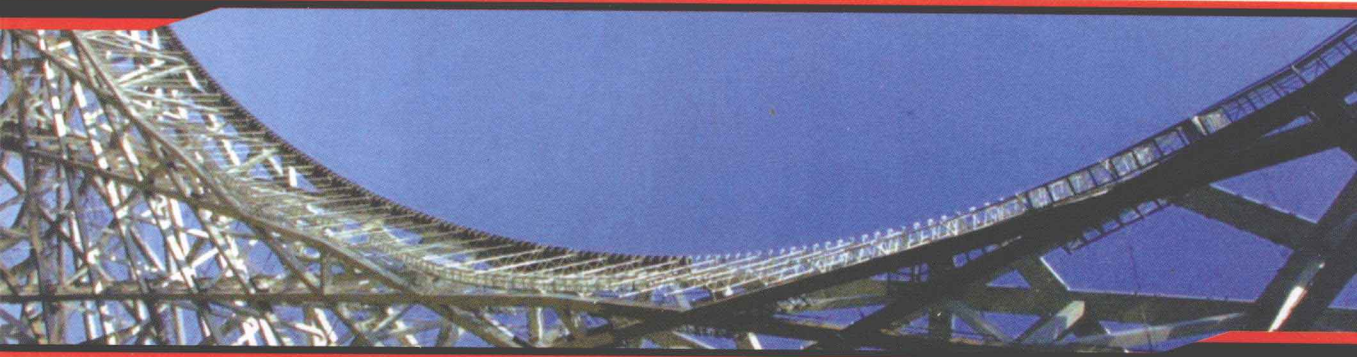


高等学校规划教材·力学  
PROGRAMMING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



# 结构疲劳与断裂

殷之平 主编

西北工业大学出版社

高等学校规划教材·力学

# 结构疲劳与断裂

主编 殷之平

编者 殷之平 谢 伟

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书系统地介绍了金属材料的疲劳学和断裂力学的基本理论知识。内容包括疲劳的基础知识和概念、影响因素、疲劳寿命估算,断裂力学的基础知识和概念、裂纹扩展寿命、剩余强度等知识,以及相关的疲劳、裂纹扩展试验技术。

本书可作为高等学校强度专业本科生教材,也可供兵器、船舶、航空航天、机械等相关专业师生和科学技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

结构疲劳与断裂/殷之平主编. —西安:西北工业大学出版社,2012.6  
ISBN 978-7-5612-3357-3

I. ①结… II. ①殷… III. ①金属疲劳②金属—断裂 IV. ①TG111

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 129256 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印刷者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:8.625

字 数:201 千字

版 次:2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

定 价:20.00 元

# 前 言

本书是为适应现代科学技术发展和教学改革的需要,为航空航天类飞行器设计专业及结构强度专业的本科生编写的教材,并可供从事结构疲劳断裂分析的工程技术人员参考。

本书是在积累了多年“结构疲劳与断裂”教学经验以及紧密联系工程实际的基础上编写而成的。笔者力求做到既保证理论体系的完整,又反映现代技术的最新成果。同时在总结已有教材和专著的基础上,以《结构疲劳与断裂》(傅祥炯主编)为范本,吸收当今国际先进飞行器结构疲劳与损伤容限的设计思想,按学科体系纂辑而成。本书具有既系统阐述理论,又紧密结合工程实际;既直接传授知识,又具有一定的启发性、创新性;论述由浅入深,重点突出,点面结合,逻辑性强等特点。

本书系统地介绍了金属材料的疲劳学和断裂力学的基本理论知识。作为一门专业课程教材,本书充分体现了专业特色,理论要点主要围绕航空飞行器结构和航空材料,在论述分析中注意培养学生分析和解决工程实际问题的能力。

本书的绪论和第1~5章由殷之平编写,第6~11章由谢伟编写,第12章、第13章由殷之平、谢伟共同编写。本书由殷之平任主编,并完成统稿。

西北工业大学黄其青教授在百忙中审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。在本书编写过程中,屠少威、李国峰和李志贤对书中的文字、公式和图表做了全面的校对和绘制,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中存在的不足之处恳请读者批评指正。

编 者

2011年10月

# 目 录

绪 论	1
0.1 疲劳学及断裂力学的发展	1
0.2 疲劳学与断裂力学的关系	2
0.3 疲劳设计方法	3
第 1 章 疲劳基本特征和断口分析	5
1.1 疲劳破坏的基本特征	5
1.2 疲劳破坏的机理	5
1.3 断口分析	8
第 2 章 疲劳的基本概念	13
2.1 交变应力	13
2.2 疲劳强度和疲劳极限	15
2.3 S-N 曲线	16
2.4 $\epsilon$ -N 曲线	20
2.5 循环应力-应变曲线	23
2.6 等寿命曲线	25
第 3 章 影响疲劳强度的因素	28
3.1 应力集中的影响	28
3.2 尺寸效应	31
3.3 表面粗糙度	32
第 4 章 结构疲劳寿命估算	33
4.1 线性疲劳累积损伤理论	33
4.2 修正的线性疲劳累积损伤理论	34
4.3 应力寿命估算	35
4.4 应变寿命估算	41
第 5 章 疲劳试验	43
5.1 试验目的	43
5.2 试验件	43

5.3	试验设备	44
5.4	试验方法和过程	44
5.5	试验	45
5.6	试验结果与数据处理	50
<b>第 6 章</b>	<b>线弹性断裂力学理论</b>	<b>54</b>
6.1	裂纹的分类	54
6.2	裂纹尖端附近的应力场和位移场	56
6.3	裂纹尖端塑性区	61
6.4	能量理论	66
<b>第 7 章</b>	<b>应力强度因子的计算</b>	<b>69</b>
7.1	有限元法	69
7.2	叠加法	72
7.3	Green 函数法	74
7.4	常见裂纹体裂尖应力强度因子解	75
<b>第 8 章</b>	<b>疲劳裂纹扩展寿命计算</b>	<b>81</b>
8.1	疲劳裂纹扩展速率	81
8.2	恒幅交变载荷下的疲劳裂纹扩展寿命	85
8.3	不考虑载荷顺序效应时的疲劳裂纹扩展寿命计算	86
8.4	高载迟滞模型	88
8.5	计算疲劳裂纹扩展寿命的损伤累积方法	94
<b>第 9 章</b>	<b>结构的剩余强度分析</b>	<b>96</b>
9.1	剩余强度基本概念	96
9.2	断裂判据	97
<b>第 10 章</b>	<b>断裂力学试验</b>	<b>101</b>
10.1	平面应变断裂韧度 $K_{Ic}$ 的测定	101
10.2	平面应力断裂韧度 $K_c$ 的测定	102
10.3	疲劳裂纹扩展速率 $da/dN$ 的测定	105
<b>第 11 章</b>	<b>疲劳载荷谱</b>	<b>106</b>
11.1	飞机重复载荷源	107
11.2	飞机疲劳载荷谱的编制	113
11.3	谱的计数法	115
<b>第 12 章</b>	<b>基于小裂纹理论的全寿命分析模型</b>	<b>118</b>
12.1	小裂纹概念	118

12.2	小裂纹扩展特性分析·····	119
12.3	全寿命模型·····	121
<b>第 13 章</b>	<b>疲劳断裂力学中新的数值计算方法</b> ·····	<b>124</b>
13.1	有限元重合网格法·····	124
13.2	扩展有限元法·····	125
13.3	无网格法·····	125
13.4	基于损伤力学的疲劳寿命分析·····	126
<b>参考文献</b>	·····	<b>128</b>

# 绪 论

日内瓦的国际标准化组织(ISO)在1964年发表的报告《金属疲劳试验的一般原理》中给疲劳下了一个描述性的定义:“金属材料在应力或应变的反复作用下所发生的性能叫做疲劳”,这一描述也普遍适用于非金属材料。

本书着重围绕疲劳问题,介绍疲劳问题的两个主要学科分支:疲劳学和断裂力学的基础知识和基本理论,以及最新的一些研究策略。

## 0.1 疲劳学及断裂力学的发展

疲劳学是一个包含许多学科的研究分支。已有的研究资料表明,研究疲劳的手段主要分为疲劳学和断裂力学,其研究可追溯到19世纪上半叶。

早在1843年,英国工程师W. J. M. Rankine(他后来由于对机械工程做出的贡献而成名)对疲劳断裂的不同特征有了认识,并注意到机械部件存在应力集中的危险性。与此同时,英国机械工程师学会也开始研究所谓的“晶化理论”。当时人们认为,最终疲劳破坏的材料弱化是作为材料基础的微观结构发生晶化的结果。

1852—1869年,A. Wohler的研究工作包括普鲁斯铁道部门全尺寸车轴和各种小型机械构件的弯曲、扭转和轴向加载疲劳试验。他在工作中提出利用应力幅-寿命( $S-N$ )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。今天人们广泛用来对金属进行循环加载的旋转弯曲试验机,在原理上同当年Wohler所设计的机器是一致的。

1910年,O. H. Basquin提出描述金属 $S-N$ 曲线的经验规律。他指出,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。Bairstow(1910年)在金属循环硬化和软化的早期研究中也做出了贡献,他通过多级循环试验和测量滞后回线,给出了有关形变滞后的研究结果,并指出了形变滞后和疲劳破坏的关系。

1926年,英国的H. J. Gough发表了《金属疲劳》一书,一年之后,美国的H. F. Moore和J. B. Koppers也用同样的书名发表了他们的著作。在20世纪二三十年代,疲劳已发展成为一个重要的科学研究领域。

在20世纪初,Ewing和Humfrey就已经在他们的著作中对微观裂纹慢速扩展所引起的金属疲劳作了描述,但这时还没有提出可进行定量处理脆性固体断裂的数学工具,不能直接用这些理论来描述金属材料的疲劳破坏。

1957年,Irwin指出可以用一个被称为应力强度因子的标量 $K$ 来表示裂纹尖端应力奇异性的大小,从而开拓了关于裂纹扩展引起的金属疲劳问题的研究,这就是现在断裂力学普遍使用的线弹性断裂力学。



在这种所谓的线弹性断裂力学方法出现之后,人们曾多次尝试也采用应力强度因子来描述疲劳裂纹的扩展。Pairs, Gomez 和 Anderson(1961)首先指出,在恒幅循环加载中,疲劳裂纹在每个应力循环过程中的扩展量  $da/dN$  与应力强度因子范围  $\Delta K$  有关。虽然他们讨论这个问题的文章没有被这一领域的主要杂志所接受,但此后他们的方法被广泛用来描述在裂纹尖端存在小范围塑性形变条件下的疲劳裂纹扩展。线弹性断裂力学方法吸引人之处主要在于,由远场加载条件和裂纹体的几何尺寸确定的应力强度因子范围是描述疲劳裂纹扩展的唯一参量,采用这一方法并不要求预先详细了解有关的疲劳断裂机制。

随着把断裂力学概念应用于描述疲劳破坏,人们对亚临界裂纹的扩展机制给予了更多的关注,提出了一些唯象模型和定量模型,试图从理论上解释试验中所观察到的工程材料的疲劳裂纹扩展阻力。Elber(1970年、1971年)的试验结果是这方面的一个重要贡献。他指出,即便受到循环拉伸载荷的作用,疲劳裂纹也能够保持闭合状态。这一结果也说明,疲劳扩展速率的控制因素或许不是应力强度因子范围  $\Delta K$  的名义值,而是它的有效值。这个  $\Delta K$  的有效值体现了扩展裂纹尖端后部断裂表面的影响。

20世纪70年代后期以来,人们在裂纹闭合现象研究方面和在裂纹尺寸对疲劳断裂发展的影响研究方面投入了很多力量。在进行这种研究的同时,人们还尝试建立存在大范围塑性形变和附近有应力集中情况下的疲劳裂纹扩展描述方法。

虽然恒定循环应力幅作用下的疲劳破坏是疲劳基本研究的主要内容,但由于工程应用中的服役条件不可避免地含有变幅载荷谱、腐蚀环境、低温或高温以及多轴应力状态,因此建立能够处理这些复杂服役条件的可靠寿命预测模型是疲劳研究中最棘手的挑战之一。虽然这些领域已取得重要进展,但把概念应用于实际情况时还经常需要采用半经验式处理方法。

## 0.2 疲劳学与断裂力学的关系

疲劳学研究重复载荷下材料及结构的疲劳强度及疲劳寿命问题。它以多年积累的疲劳试验数据,丰富的服役使用经验教训,研究工作者进行的大量宏、微观断口分析,深入的机理探索和已经建立的各类积累损伤理论为基础。

断裂力学研究带裂纹体的强度问题。它主要由三部分组成:静态断裂部分研究带裂纹体应力应变规律,工程上着重解决带裂纹体的剩余强度问题;疲劳裂纹扩展部分探索裂纹扩展机理、模型及裂纹扩展寿命问题;断裂力学部分应用于腐蚀环境,着重解决应力腐蚀开裂及腐蚀对裂纹扩展加速的问题。

疲劳破坏过程是从原子尺寸、晶粒尺寸到大型结构尺寸,跨越十几个量级的十分复杂的过程,形成工程界的一大难题。为研究方便,疲劳破坏过程按裂纹扩展过程可以大致分为下述几个阶段。

(1)亚结构和显微结构发生变化,从而形成永久损伤形核。

(2)产生微观裂纹。

(3)微观裂纹长大和合并,形成“主导”裂纹。一般认为,这一阶段的疲劳通常是裂纹萌生与扩展之间的分界线,即疲劳学与断裂力学的分界岭。

(4)主导宏观裂纹的稳定扩展。

(5)结构失去稳定性或完全断裂。

在实际问题中,上述过程是一个连续的过程,一般无法准确地分开。现在的研究发展是,对疲劳问题趋于统一的全寿命问题进行研究。

## 0.3 疲劳设计方法

疲劳的不同设计原理之间的主要区别在于如何定量处理裂纹萌生阶段和裂纹扩展阶段。针对这两个阶段,工程中分别运用疲劳学和断裂力学形成了下述不同方法。

### 一、疲劳法——安全寿命设计法

经典的疲劳设计方法是用循环应力范围( $S-N$ 曲线方法)或塑性(总)应变范围来描述导致疲劳破坏的总寿命。在这些方法中,通过控制应力幅来获得初始无裂纹(和具有名义光滑表面)的试样产生疲劳破坏所需的应力循环数或应变循环数。这样得到的疲劳寿命包括萌生主裂纹的疲劳循环数(可能高达总寿命的90%)和使这一主裂纹扩展到发生突然破坏的疲劳循环数。应用经典方法预测疲劳总寿命时,可以用各种方法来处理平均应力、应力集中、环境、多轴应力和应力变幅的影响。由于裂纹萌生寿命占据光滑试样疲劳总寿命的主要部分,因此经典的应力和应变描述方法在多数情况下体现了抵抗疲劳裂纹萌生的设计思想。

### 二、损伤容限法

与安全寿命法不同,疲劳设计的断裂力学方法以“损伤容限”原理作为设计基础。该方法的前提是认为损伤是一切工程构件所固有的。

原有损伤的尺寸通常用无损探伤技术(例如视觉、着色或X射线技术、超声、磁性或声发射方法)来确定。疲劳寿命则定义为主裂纹从这一原始尺寸扩展到某一临界尺寸所需的疲劳循环数或时间。可以根据材料的韧性、结构特殊部分的极限载荷、可容许的应变和可容许的构件柔度变化来选择疲劳裂纹的临界尺寸。采用损伤容限法预测疲劳扩展寿命时需要应用断裂力学的裂纹扩展经验规律。这种方法本质上是偏保守的疲劳设计方法。

### 三、“安全-寿命”和“失效-安全”概念

当使用疲劳设计的安全-寿命处理方法时,首先应该确定施加在服役结构部件上的典型循环载荷谱。在此信息的基础上,或者对部件进行分析,或者利用典型服役谱载荷对部件进行实验室试验,从而估计部件的可用疲劳寿命。用一个安全因子(或称不确定因子)对所得的可用疲劳寿命适当地进行修正,这样就求得了部件的安全寿命。当部件运行到预期的安全寿命时,即使它在服役中并没有发生任何破坏(即部件仍有相当长的剩余疲劳寿命),也要令其退役。

安全-寿命方法要求在到达一个规定的寿命之前不产生疲劳裂纹,其重点在于预防疲劳裂纹的产生。

相反,失效-安全概念的设计原则是,在一个大构件中即使有个别零件失效,其剩余部分应该保持足够的结构完整性,使构件能安全运行直至检测到裂纹为止。失效-安全方法除了要求对构件进行定期检查之外,还要求裂纹检测技术可以识别尺寸足够小的裂纹,以便能及时修理或更换有关部件。

无论使用哪一种设计原理,最好能对构件的关键部分实行定期检查(对于某些事关重大安全问题的关键结构,例如对于飞机和核工业中的结构件,甚至规定必须进行定期检查)。这种措施可以消除设计错误引起的危险后果。采用安全-寿命方法进行设计时,这一点表现得更为突出。

# 第 1 章 疲劳基本特征和断口分析

## 1.1 疲劳破坏的基本特征

交变载荷的作用使结构的疲劳破坏具有以下基本特征。

(1) 交变载荷的峰值在远低于材料的强度极限情况下,就可能发生破坏,表现为低应力脆性断裂的特征。

(2) 破坏具有局部性。无论是脆性材料还是塑性材料,疲劳破坏在宏观上均无明显的塑性变形。

(3) 破坏之前要经历一个疲劳损伤累积过程。研究表明,该过程由裂纹起始(或成核)、裂纹(稳态)扩展和裂纹失稳扩展三阶段组成。

(4) 疲劳寿命具有极大的分散性。对载荷及环境、材料及结构、加工工艺等方面多种因素相当敏感。

(5) 疲劳断口在宏观上和微观上都具有显著的特征。断口上的信息,对记录疲劳过程、研究疲劳机理以及判断事故原因都具有重要意义。

基于上述特点,“疲劳”可概括为:材料或结构的某一点或某些点,在承受波动的应力和应变情况下,发生渐进的、局部的、永久性变化的过程。

## 1.2 疲劳破坏的机理

### 一、裂纹形成

微观裂纹成核和扩展是材料寿命演化的一个重要阶段,是材料疲劳寿命的一个主要部分,一般在高周疲劳中可达 90%。由于对微观结构检测困难,关于裂纹形核和微结构裂纹扩展的定量信息是缺乏的,因此,材料寿命的这个阶段经常含糊地被称为裂纹萌生,在一般工程结构中意指达到可发现的裂纹尺寸。

Suresh 在 1998 年对裂纹形核机制进行了总结,分为以下几类:

(1) 表面裂纹形核。这类裂纹形核发生在材料表面,由于晶体面滑移不可逆转造成的滑移带的入侵或挤出,或者由于氧化和腐蚀作用,或者通过磨损而形成损伤裂纹。

(2) 表面下裂纹形核。这类裂纹形核发生在空洞或者位错塞积处。

(3) 晶界或异相界面裂纹形核。这类裂纹形核发生在晶界空穴,或形成疲劳楔形裂纹。

在裂纹形核的上述形式中,除了制造过程产生的缺陷,还包括铸造空洞和锻压崩裂或脱离的沉积粒子,还有由于环境效果例如氧化和腐蚀作用形成的损伤。

利用电子显微镜技术,可以观察到在循环加载下的金属表面滑移带中的“挤出”和“侵入”现象。图 1.1 所示为典型的“挤出”现象示意图。发生“挤出”的另一面常出现“侵入”,或在“挤出”相应的金属内部产生孔洞。“侵入”和孔洞形成应力集中,这正是裂纹可能形成的地方。

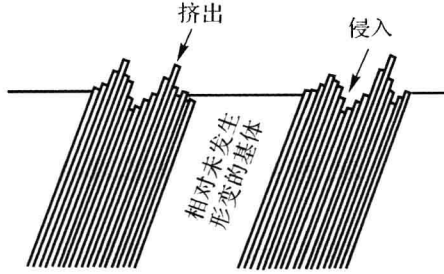


图 1.1 “挤出”“侵入”示意图

关于裂纹形成还有很多其他解释机理,如局部脆断模型、空穴聚集模型、滑移面横向内聚力丧失模型、裂纹在晶界形成(晶界成核)模型。随着科学研究的深入,一些模型能对疲劳形成速率进行预测,如吴犀甲基于位错理论推得的 ZSK 裂纹形核和 BCS 裂纹形核模型。

## 二、裂纹扩展

裂纹向材料内部扩展一般分成两个阶段。裂纹在滑移带形成后,其第 I 阶段的扩展是在最大剪应力方向上(与正应力方向成  $45^\circ$  角)。这一初始的扩展量很小,通常只有一个晶粒(见图 1.2(a))或几个晶粒(见图 1.2(b))。对于后一种情况,可以观察到,由于相邻走向的随机性而造成裂纹扩展方向的变化。阶段 I 的裂纹扩展具有明显的结晶性质,这一特性在阶段 II 就会部分地消失。阶段 I 在材料的全部疲劳寿命中占的比例在一个很宽的范围内变化,短至 10%,长至 90%。这个阶段的研究工作困难大,很难定量描述。第 II 阶段的裂纹扩展,宏观上看是沿垂直于最大正应力变的方向上扩展的,微观上看则是不断变化着的。大多数疲劳裂纹扩展都是穿晶的,如图 1.2 所示。然而也可能沿晶界扩展,但很少见。

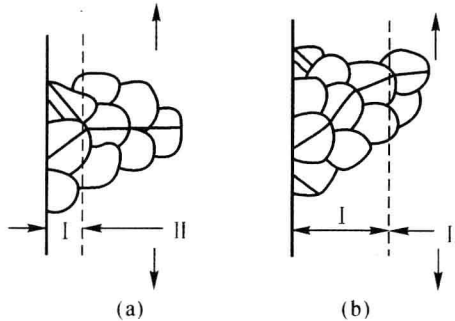


图 1.2 裂纹扩展的两个阶段  
(a)第 I 阶段; (b)第 II 阶段

有许多关于裂纹扩展机理的模型,有的很简单,有的非常复杂。现选择两个较为简单的模型作为例子,一个取自结晶性的模型,一个取自非结晶性的模型。

纽曼(P. Newman)模型包括裂纹的形成和扩展,与前面介绍的“侵入”和“挤出”形成模型相类似。它根据两个滑移平面系统的交叉滑移和硬化组合而成,如图 1.3 所示。

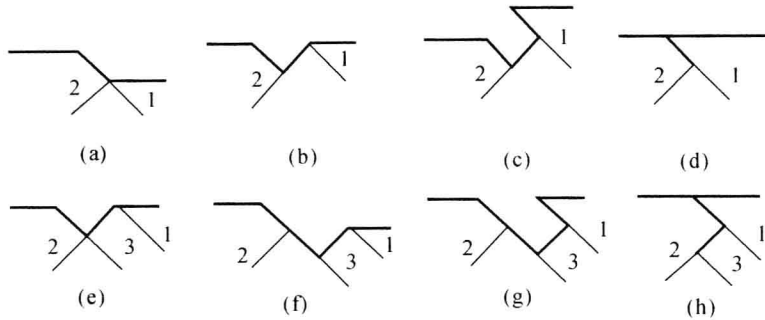


图 1.3 疲劳裂纹形成和扩展的纽曼模型

循环中,由平面 1 的粗滑移形成的滑移台阶的局部应力集中区,如图 1.3(a)所示;如果该应力集中足够大,循环的拉伸行程会激活平面 2 的滑移,平面 2 几乎垂直于平面 1,如图 1.3(b)所示;在压缩行程中,先是平面 1 滑移,形成如图 1.3(c)所示的情况,后是平面 2 起作用,形成如图 1.3(d)所示的情况;这时互相接触的滑移面是分离面,已不是一个整体,这就是裂纹的起始。这些裂纹面的接触也会导致应力集中的减缓。

在下一个拉伸行程中,形成如图 1.3(e)所示的情况,与平面 1 平行的平面 3 被激活。再接着的压缩行程中,如图 1.3(g)所示的滑移面起作用,而形成如图 1.3(h)所示的裂纹状态。上述过程的连续重复会导致进一步的裂纹扩展。

在压缩行程的滑移与前面拉伸的滑移其量级不一定相同,而且可能发生双滑移,这样就和如图 1.3 所示的情况完全不一样。

该模型已经在单晶体铜的拉伸-压缩试验中得到证实。

现在来看由莱尔德(C. Laird)和史密斯(G. C. Smith)提出的裂纹扩展的非结晶模型(见图 1.4)。在循环的拉伸行程中,作为与最大剪应力方向一致的多重滑移的结果使裂纹张开(见图 1.4(b)),塑性区扩展,裂纹尖端钝化(见图 1.4(c)),图 1.4(c)中同样方向的一对箭头表示滑移带宽度的示意图。在循环的压缩行程中,由于与前面滑移的方向相反的滑移的影响,使钝化消失,裂纹变尖锐(见图 1.4(d)(e))。裂纹尖端的分叉(小耳朵形)反映了下面所讲的疲劳条带结构。莱尔德-史密斯模型又称为塑性钝化模型,主要适用于大应力幅的情况。

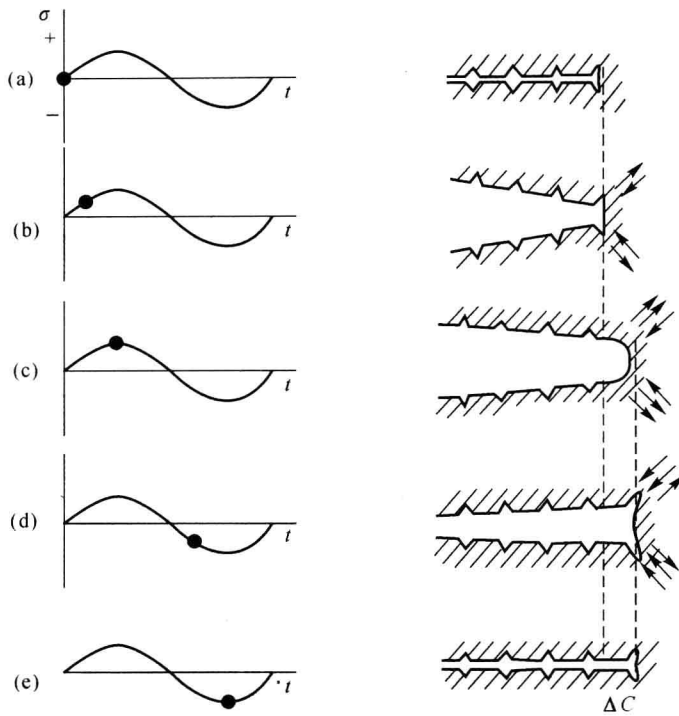


图 1.4 疲劳裂纹扩展的莱尔德-史密斯(Laird - Smith)模型

### 1.3 断口分析

断口分析一般包括宏观和微观两种方法。

微观分析是通过电子-光学方法揭示疲劳断口的性质,它是关于疲劳裂纹形成和扩展的机理、裂纹扩展速率和迟滞,以及各种外部、内部因素的特点及其影响等研究的基本资料。

宏观分析是用肉眼或低倍(25 倍以下)放大镜来观察疲劳裂纹,通过外观对结构或材料的载荷分布、过载大小等特征作出估计,从而作出疲劳破坏的判断。

典型的疲劳破坏断口有 3 个区域,按照断裂过程来分,依次是疲劳源、疲劳裂纹扩展区和最后断裂区,如图 1.5 所示。

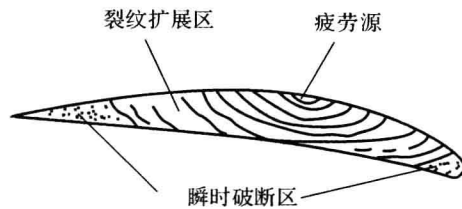


图 1.5 典型疲劳断口宏观形貌

疲劳源是疲劳破坏的起点。作为一个规律,疲劳源总是位于应力集中区的元件表面,或者位于各种缺陷处,例如非金属夹杂、淬致裂痕、机加痕迹等处。疲劳源也可能不止一个,有时几

个疲劳源会同时出现,这种情况常常是因为有多个缺陷,特别是在高应力或高应力集中的情况下,如图 1.6 所示。

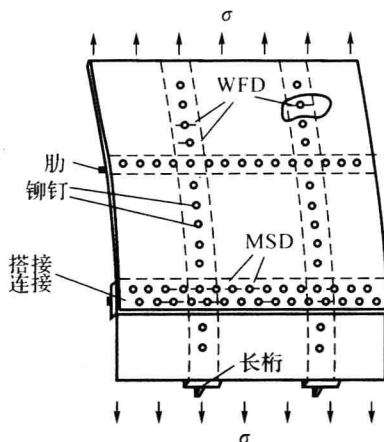


图 1.6 多细节产生的多疲劳源  
(WFD:广布疲劳损伤; MSD:多部位损伤)

疲劳源的邻近区域称为疲劳源区。由于疲劳裂纹源区是由多个微观裂纹的聚集引起的,如果这些微观裂纹不在同一平面内,就会在断口上形成台阶(在疲劳源区域)。如图 1.7 所示,图中箭头方向为裂纹扩展方向。

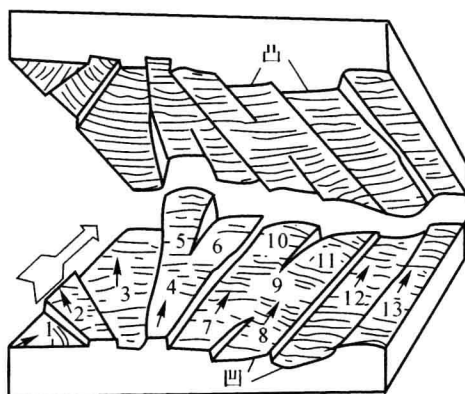


图 1.7 疲劳端口微观示意图

疲劳源区通常有光泽,呈现细结晶状态。这种状态是由裂纹扩展速率以及应力方向变化在裂纹表面之间的摩擦而引起的。随着循环次数的增加,裂纹向材料内部的扩展越来越深,形成典型的疲劳裂纹扩展区。

疲劳裂纹扩展区:一般情况下,疲劳裂纹扩展区的微观形貌具有解理或准解理断裂特征,但是,在材料晶界显著弱化的情况下,疲劳断裂也可以表现为沿晶断裂的特征。疲劳裂纹扩展区的形貌特征还包括宏观疲劳条纹(贝壳状花样,也称为贝纹线)和放射状条纹,如图 1.8 所示。

这里需要解释一下解理断裂、准解理断裂和韧窝断裂这 3 个微观裂纹断裂扩展的形貌特征。如图 1.9 所示为这 3 种典型的裂纹断裂形貌图。



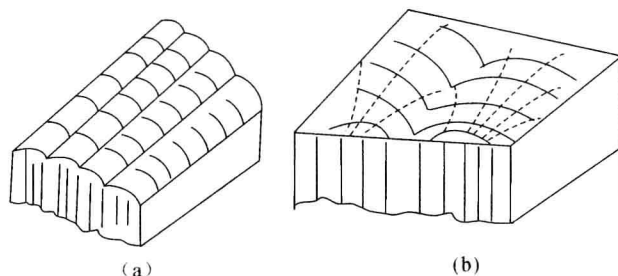


图 1.8 两类疲劳条纹示意图  
(a)塑性条纹； (b)脆性条纹

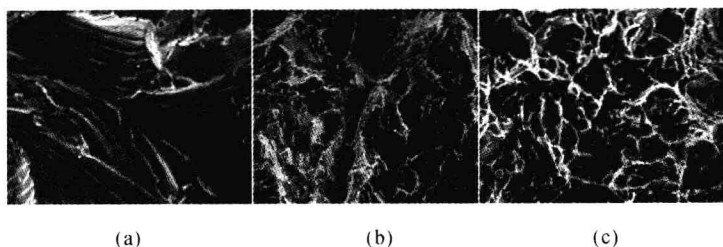


图 1.9 裂纹断裂形貌  
(a)解理断裂； (b)准解理断裂； (c)韧窝断裂

解理断裂:特征是宏观断口十分平坦,如图 1.9(a)所示,而微观形貌则是由一系列小裂面(每个晶粒的解理面)所构成的。在每个解理面上可以看到一些十分接近于裂纹扩展方向的阶梯,通常称为解理阶。其形态是多种多样的,同金属的组织状态和应力状态的变化有关。

准解理断裂:这是一种穿晶断裂(见图 1.9(b))。根据蚀坑技术分析表明,多晶体金属的准解理断裂也是沿着原子键合力最薄弱的晶面(即解理面)进行的,但由于断裂面上存在较大程度的塑性变形,故断裂面不是一个严格准确的解理面。从图 1.9(b)所示的断口微观形貌特征来看,在准解理断裂中,每个小断裂面的微观形态颇类似于晶体的解理断裂,但在各小断裂面间的连接方式上又具有某些不同于解理断裂的特征,如存在一些所谓的撕裂岭,即韧窝。

韧窝断裂:通过空洞核的形成、长大和相互连接的过程进行的断裂,称为韧窝断裂。韧窝断裂是属于一种高能吸收过程的延性断裂。其端口特征如图 1.9(c)所示,宏观形貌呈纤维状,微观形态呈蜂窝状。断裂面是由一些细小的窝坑构成的,窝坑实际上是长大了的空洞核,通常称为韧窝。

疲劳裂纹扩展区用目视观察,表面光亮,作用的应力越低,主疲劳裂纹扩展的时间就越长,断面就越光滑。这个区域的表面常呈贝纹状,这是疲劳裂纹扩展过程中留下的痕迹。它多见于低应力高周循环疲劳断口。对于低周循环疲劳断口,一般则观察不到这类贝纹线。

贝纹线是主裂纹前缘线,称为“疲劳线”,有时也叫做裂纹前缘休止线。裂纹扩展的过程及特征可由贝纹线的分布得到重要信息。它可能反映了在一些高载作用后的一段时间内,对裂纹的即刻扩展没有贡献的那些应力值。如果断面上没有贝纹线,可能是元件承受稳定的、连续的常应力幅的结果。如果贝纹线的分布很有规律,说明载荷是周期性地、有规律地变化的,贝纹线之间距离不规则说明在工作过程中遭遇到载荷或者其他不规则变化的因素的影响。图 1.10 给出了疲劳断口的贝纹线图,图中箭头方向为疲劳裂纹的扩展方向。