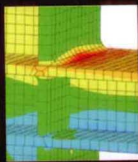
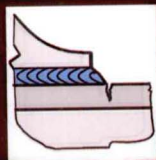
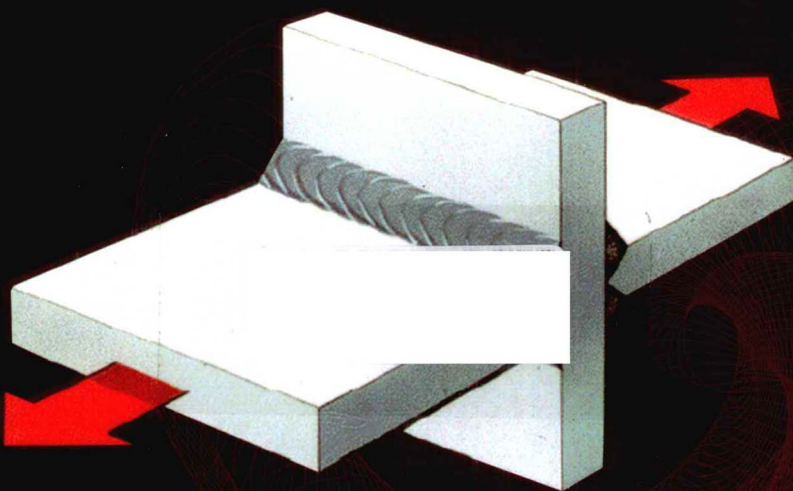


张彦华 编著

焊接结构疲劳分析

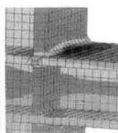
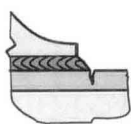


HANJIE JIEGOU
PILAO FENXI



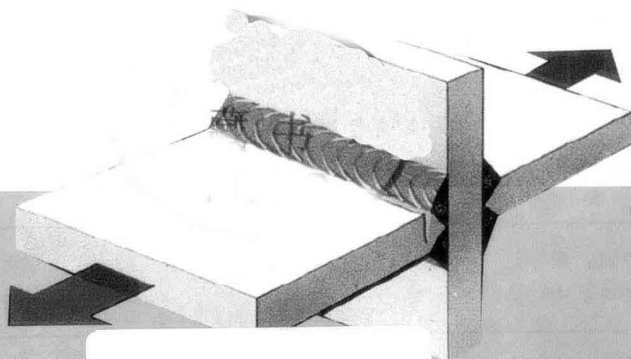
化学工业出版社

焊接结构疲劳分析



HANJIE JIEGOU
PILAO FENXI

■ 张彦华 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

焊接结构疲劳分析/张彦华编著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 3
ISBN 978-7-122-16429-2

I. ①焊… II. ①张… III. ①焊接结构—疲劳强度—分析 IV. ①TG403

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 018280 号

责任编辑: 周 红
责任校对: 边 涛

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 317 千字 2013 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

前 言



疲劳断裂是焊接结构失效的一种主要形式。研究焊接结构的疲劳行为及影响因素，是焊接结构或构件疲劳强度设计的基础。焊接结构的疲劳破坏往往起源于焊接接头的应力集中区，因此，焊接结构的疲劳实际上是焊接接头细节部位的疲劳。焊接接头中通常存在焊接缺陷、焊接残余应力，都会使焊接结构更易产生疲劳裂纹导致疲劳断裂。焊接接头的力学不均匀性也会对焊接结构的疲劳性能产生重要影响。

研究表明，在焊接结构疲劳损伤中，焊接接头局部最大应力起着主导作用，焊趾或焊根等应力集中区产生的缺口效应对焊接结构的疲劳强度有较大影响。工程设计中可精确计算焊接构件的名义应力，由于焊接工艺条件所引起的接头缺口效应在设计阶段往往难以准确预估，由此导致焊接结构的疲劳评价很难建立统一的分析方法，需要根据焊接结构的特点及载荷情况分层次进行分析，这是焊接结构疲劳强度设计的显著特点。

本书旨在较系统地介绍焊接结构的疲劳强度及评价方法。编写本书是笔者多年的想法，也是国内焊接结构强度设计与研究人员所需要参考的。

本书由张彦华编著。由于笔者对相关知识的掌握和学识水平有限，很难对焊接结构疲劳强度理论体系有全面准确的把握，书中难免存在不足之处，恳请读者予以指正。

编著者

1.1	疲劳研究的发展	1
1.2	疲劳断裂机理	2
1.3	材料的疲劳强度	8
1.3.1	应力疲劳与应变疲劳	8
1.3.2	疲劳极限图	14
1.4	影响材料疲劳性能的因素	18
1.4.1	应力集中的影响	19
1.4.2	尺寸效应	26
1.4.3	材料表面状态的影响	26
1.4.4	温度和环境的影响	29
1.5	疲劳裂纹扩展	30
1.5.1	断裂力学参量和断裂判据	30
1.5.2	疲劳裂纹扩展行为	35
1.6	腐蚀疲劳分析	38
1.6.1	腐蚀疲劳特点	38
1.6.2	腐蚀疲劳裂纹扩展特性	40
1.7	变幅载荷谱下的疲劳寿命	42
1.7.1	变幅载荷谱	42
1.7.2	Miner 线性累积损伤分析	43

2.1	焊接接头及疲劳概述	48
2.1.1	焊接接头基本形式	48
2.1.2	焊接接头的疲劳特征	50
2.2	对接接头的疲劳强度	51
2.2.1	对接接头的应力集中	51
2.2.2	对接接头的疲劳强度	53
2.3	角焊缝接头的疲劳强度	57

2.3.1	角焊缝接头的应力集中	57
2.3.2	角焊缝接头的疲劳强度	63
2.4	点焊接头的疲劳强度	70
2.4.1	点焊接头的应力集中	70
2.4.2	点焊接头的疲劳强度	72
2.5	焊接管节点的疲劳强度	73
2.5.1	焊接管节点的应力集中	73
2.5.2	管节点的疲劳性能	78
2.6	焊接结构疲劳强度影响因素分析	79
2.6.1	应力集中的影响	79
2.6.2	焊接残余应力的影响	82
2.6.3	焊接缺陷的影响	87
2.6.4	焊接接头组织性能对疲劳强度的影响	93
2.6.5	板厚的影响	95

第 3 章

焊接结构的疲劳强度分析方法

97

3.1	概述	97
3.2	名义应力评定方法	98
3.2.1	名义应力评定方法基本原理	98
3.2.2	焊接接头的疲劳强度分级	100
3.3	结构应力评定方法	107
3.3.1	结构应力与热点应力	107
3.3.2	热点应力 S_{hs} - N 曲线	112
3.4	缺口应力应变评定方法	118
3.4.1	弹性缺口应力评定方法	118
3.4.2	弹塑性缺口应力应变分析法	124
3.4.3	局部应变	124

第 4 章

焊接结构疲劳裂纹扩展断裂力学分析

132

4.1	概述	132
4.1.1	焊接接头裂纹扩展与剩余强度	132
4.1.2	疲劳裂纹扩展寿命评定	135
4.2	焊接接头应力强度因子	139

4.2.1	焊趾表面裂纹应力强度因子	139
4.2.2	焊缝根部裂纹应力强度因子	141
4.2.3	点焊接头裂纹应力强度因子	142
4.3	力学失配对疲劳裂纹扩展的影响	143
4.3.1	焊接接头的强度失配	143
4.3.2	力学失配对疲劳裂纹扩展的影响	145
4.4	焊接残余应力对疲劳裂纹扩展的影响	154
4.4.1	残余应力强度因子	154
4.4.2	残余应力对疲劳裂纹扩展的影响	157
4.5	含缺陷焊接结构的疲劳完整性评定	158
4.5.1	缺陷形状及规则化	159
4.5.2	焊接残余应力的处理	164
4.5.3	含缺陷焊接结构的疲劳评定	166

第 5 章

焊接结构疲劳强度的随机分析 175

5.1	疲劳性能数据的随机性	175
5.1.1	疲劳寿命的离散性	175
5.1.2	疲劳裂纹扩展的随机性	176
5.1.3	焊接结构的随机因素	176
5.2	疲劳强度概率分析方法	180
5.2.1	疲劳失效概率	180
5.2.2	疲劳失效概率评估	183
5.3	疲劳强度统计特性	189
5.3.1	S-N 曲线的统计特性	189
5.3.2	疲劳裂纹扩展的随机分析	193
5.4	焊接结构疲劳失效概率分析	199
5.4.1	焊接结构的随机因素	199
5.4.2	疲劳强度的概率分析	203
5.4.3	疲劳裂纹扩展失效概率分析	206

第 6 章

焊接结构的抗疲劳设计与控制 209

6.1	焊接结构的抗疲劳设计	209
6.1.1	结构疲劳设计方法概述	209
6.1.2	焊接结构的抗疲劳设计	214
6.1.3	焊接结构件的疲劳试验	220

6.2	焊接接头的抗疲劳措施	224
6.2.1	焊接接头的抗疲劳基本方法	224
6.2.2	焊接接头抗疲劳的工艺措施	226
6.3	焊接结构的合于使用评定	235
6.3.1	焊接结构完整性及合于使用性	235
6.3.2	含缺陷焊接结构的失效评定	237
	参考文献	246

第 1 章

材料的疲劳性能

疲劳断裂是金属结构失效的一种主要形式。大量统计资料表明，在金属结构失效中，约 80% 以上是由疲劳引起的。研究材料的疲劳行为及影响因素，是结构或构件疲劳强度设计的基础。

1.1 疲劳研究的发展

疲劳是材料或结构在循环载荷作用下发生的损伤和破坏现象。工程技术界对材料疲劳问题的研究和试验历史可以追溯到 19 世纪初。1829 年，德国采矿工程师 Albert 对矿山卷扬机焊接铁链进行了重复载荷试验，提出了第一份疲劳研究报告^[1,2]。随着铁路的发展，车轮轮轴以及桥梁的疲劳问题引起了人们的重视。1854 年，Braithwaite 在伦敦土木工程师学会上发表的论文中第一次用到“疲劳 (Fatigue)”一词^[3]，用于描述材料在交变载荷作用下承载能力逐渐耗尽以致最终断裂的破坏过程。

德国工程师 Wohler 根据他在 1852~1870 年间的长期试验研究，发现钢制列车车轴在重复载荷作用下的强度要远低于静载强度，疲劳寿命随着应力幅的增加而减少，当应力幅低于某一数值时，即使循环次数再多，试件也不会断裂，并且指出应力的幅值远比应力的最大值重要。Wohler 首次提出了 S-N 曲线和疲劳极限的概念，把工作应力和疲劳极限联系起来，为疲劳研究奠定了基础^[1]。1870~1890 年间，Gerber 等人研究了平均应力对疲劳的影响，Goodman 提出了关于平均应力的简化理论^[5,6]。

20 世纪初，光学显微镜开始用于疲劳机理的研究，人们观察到局部滑移线和滑移带引起的裂纹^[4]。1910 年，Basquin 提出了表征 S-N 曲线的经验公式^[2]，即在双对数坐标系下应力和循环次数之间在较大的应力范围内具有线性关系。1920 年，Griffith 发现玻璃脆性断裂时的名义应力取决于微裂纹尺寸^[7]。在 20 世纪 20 年代，Gough 等人在疲劳机理研究方面作出了重大的贡献，1924 年 Gough 出版了一部关于金属疲劳的综合性著作^[9]。1930 年，Peterson 建立

了应力集中系数和疲劳极限的关系。1937年, Neuber 提出了缺口应力集中理论^[8]。1939年, Weibull 提出了材料强度的统计理论^[10]。1945年, Miner 和瑞典工程师 Palmgren 发表了线性累积损伤准则^[11], 这就是著名的 Palmgren-Miner 准则。

人类付出昂贵的代价才获得了对材料疲劳的认识。1953~1954年间, 英国的德-哈维兰飞机公司设计制造的“彗星”号民用喷气飞机接连发生了3次坠毁事故^[2]。为了找到事故的原因, 英国皇家航空研究院的工程师进行了大量的研究工作, 终于确认罪魁祸首是座舱的疲劳裂纹。产生这种裂纹的原因是高空飞行的“彗星”客机使用增压座舱, 长时间飞行频繁起降使机体反复承受增压和减压引发飞机铝制蒙皮的金属疲劳。“彗星”号空难事故原因是当时对于金属疲劳的认识不够深入, 飞机设计并没有相应的对策, 造成机体上产生裂纹并扩展。对事故的调查让航空界开始重视压力反复变化对飞机结构的影响和研究金属疲劳问题, 为后来飞机研制解决金属疲劳问题打下了基础。例如“彗星”客机最初采用方形舷窗, 使用加压客舱的客机多次起降, 在方形舷窗拐角处会出现金属疲劳导致的裂纹。后来客机舷窗采用圆形或设计有很大的圆角, 以降低应力集中, 提高金属疲劳强度。

“彗星”号事故引起人们对低周疲劳的重视。1954年, 描述塑性应变幅值和疲劳寿命之间关系的 Manson-Coffin 公式发表^[12, 13], 材料的应变疲劳研究取得了从定性到定量的突破。1957年, 美国学者 Paris 提出了在循环载荷作用下, 裂纹尖端的应力强度因子范围值是控制构件疲劳裂纹扩展的基本参量, 并于1963年提出了著名的疲劳裂纹扩展速率公式 (Paris 公式)^[14~16], 为疲劳研究提供了一个估算疲劳裂纹扩展寿命的新方法, 后来在此基础上发展了损伤容限设计, 从而使断裂力学与疲劳这两门科学逐渐融合。

目前, 尽管工程界对材料或结构的疲劳给予了足够的重视, 制定了各种规范以防止结构的疲劳失效, 但是, 由于疲劳的影响因素较多, 在现代机械装备和工程结构的设计中要全面评估每一个技术细节对疲劳性能的影响。1998年6月3日, 德国发生的高速列车脱轨, 造成100多人遇难事故, 就是由于一个双壳车轮的钢制轮箍发生疲劳破损而引发的。随着现代机械结构日益向高温、高压、高速方向发展, 疲劳问题也会越来越突出, 材料或结构的疲劳研究和抗疲劳设计是一项永无止境的课题。

1.2 疲劳断裂机理

疲劳是材料在循环应力或应变的反复作用下所发生的性能变化, 是一种损伤累积的过程。经过足够次数的循环应力或应变作用后, 金属结构局部就会产生疲劳裂纹或断裂。

疲劳与脆性断裂相比较, 两者断裂时的形变都很小, 但疲劳断裂需要多次加

载，而脆性断裂一般不需要多次加载；结构脆性断裂是瞬时完成的，而疲劳裂纹的扩展较缓慢，需经历一段时间甚至很长时间才发生破坏。对于脆性断裂而言，温度的影响是极其重要的，随着温度的降低，脆性断裂的危险性迅速增加，但材料的疲劳强度变化不显著。

金属结构的疲劳抗力取决于材料本身、构件的形状、尺寸、表面状态和服役条件。任何材料的疲劳断裂过程都经历裂纹萌生、稳定扩展和失稳扩展（即瞬时断裂）三个阶段。在疲劳断口上可观察到“年轮弧线”的痕迹，并可分为裂纹源区、疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区，如图 1-1 所示。

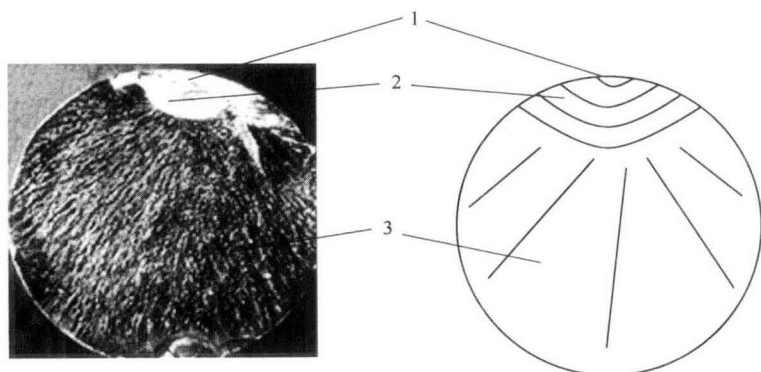


图 1-1 疲劳断口示意图
1—裂纹源；2—裂纹扩展区；3—瞬时断裂区

(1) 疲劳裂纹萌生

疲劳源区即疲劳裂纹的萌生区，疲劳裂纹萌生都是由局部塑性应变集中所引起的，这往往是由于材料的质量（冶金缺陷与热处理不当等）或设计不合理造成的应力集中，或是加工不合理造成表面粗糙或损伤等，均会使裂纹在零件的某一部位萌生。疲劳裂纹一般有三种常见的萌生方式，即滑移带开裂、晶界和孪生界开裂、夹杂物或第二相与基体的界面开裂。

疲劳裂纹大都是在金属表面上萌生的。一般认为，具有与最大切应力面相一致的滑移面的晶粒首先开始屈服而发生滑移。在单调载荷和循环载荷作用下，都会出现滑移。图 1-2 (a) 为单调载荷和高应力幅循环载荷作用下的粗滑移，在低应力幅循环载荷作用下，则出现细滑移 [图 1-2 (b)]。随着循环加载的不断进行，金属表面出现滑移带的挤入和挤出现象 [图 1-2 (c)]，滑移带的挤入会形成严重的应力集中，从而形成疲劳裂纹^[17,18]。图 1-3 为单晶体的疲劳裂纹形核示意图。图 1-4 为循环应力作用下铜单晶表面的挤入挤出形貌。

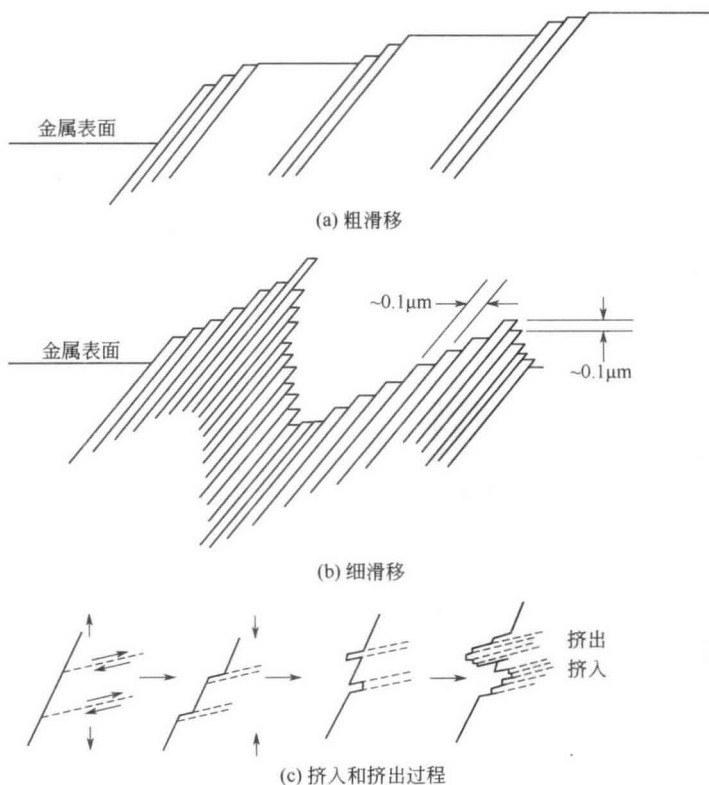


图 1-2 疲劳裂纹在金属表面上的形成过程

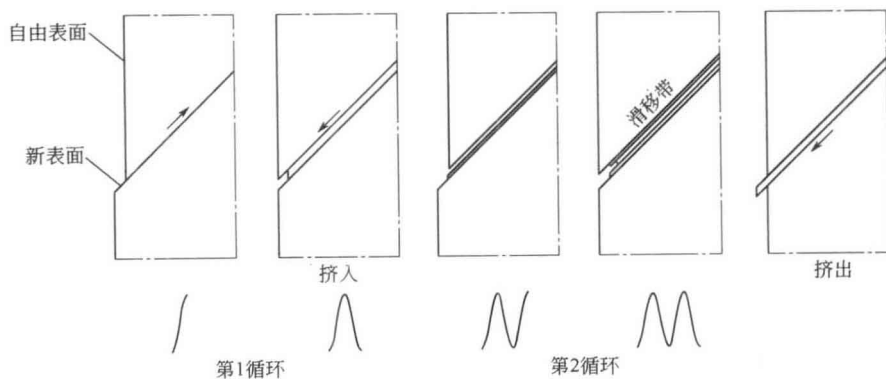


图 1-3 单晶体的疲劳裂纹形核示意图

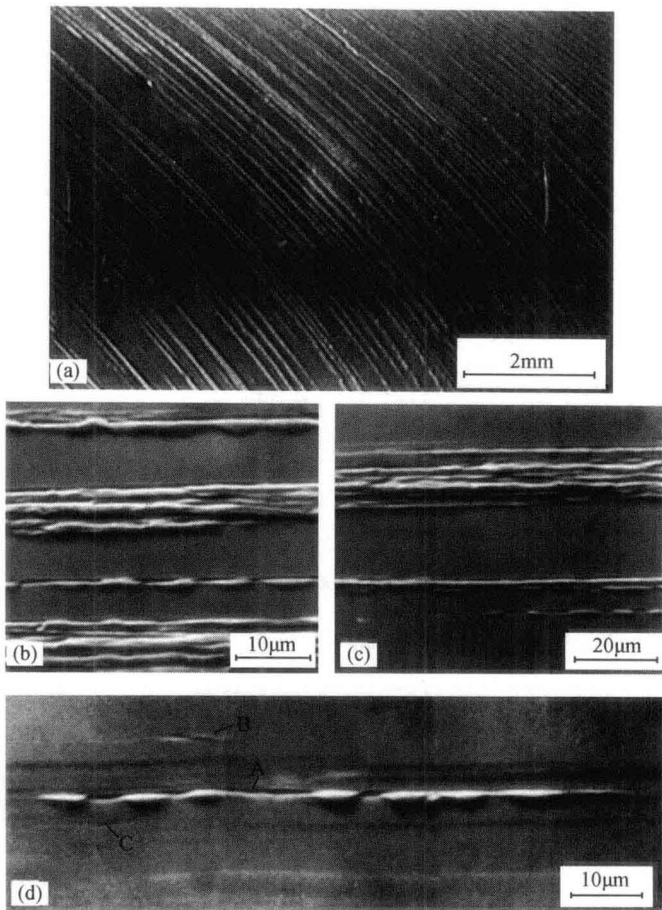


图 1-4 铜单晶表面的挤入挤出形貌

(2) 疲劳裂纹扩展

疲劳裂纹的扩展可以分为两个阶段，即第Ⅰ阶段裂纹扩展和第Ⅱ阶段裂纹扩展（图 1-5）。第Ⅰ阶段裂纹扩展时，在滑移带上萌生的疲劳裂纹首先沿着与拉应力成 45° 的滑移面扩展。在微裂纹扩展到几个晶粒或几十个晶粒的深度后，裂纹的扩展方向开始由与应力成 45° 的方向逐渐转向与拉伸应力相垂直的方向，这就是第Ⅱ阶段的裂纹扩展。裂纹从与主应力成 45° 方向逐渐转向与主应力垂直方向扩展，成为宏观疲劳裂纹直至失稳和断裂。在带切口试件中，可能不出现裂纹扩展的第Ⅰ阶段。

疲劳裂纹扩展区宏观上平坦光滑，而微观上则凹凸不平。断口表面由若干凹凸不平的小断面连接而成，小断面过渡处形成台阶。多裂纹萌生情况下，相邻裂

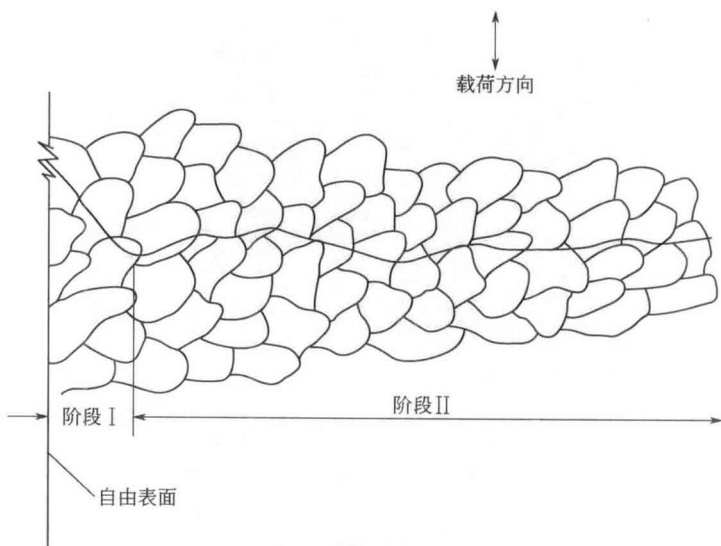


图 1-5 疲劳裂纹的扩展示意图

纹扩展相遇时还会发生重叠现象^[2] (图 1-6)。

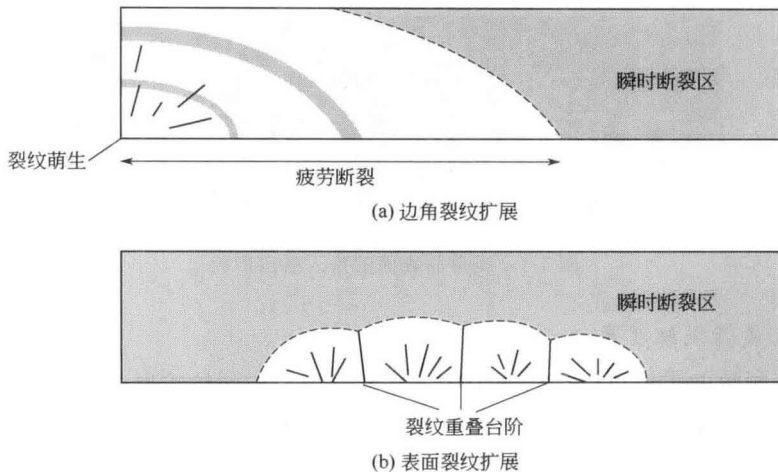


图 1-6 矩形截面试件裂纹扩展断口示意图

在裂纹扩展的第 II 阶段中, 疲劳断口在电子显微镜下可显示出疲劳条带^[5] (图 1-7)。将图 1-7 中的疲劳条带数目、排列与循环加强程序加以对照, 可以发现一个加载循环形成一个疲劳条带。变换加载程序, 疲劳条带的数目和排列也随之变化, 并由此推断出, 只在循环加载的拉伸阶段裂纹才扩展。

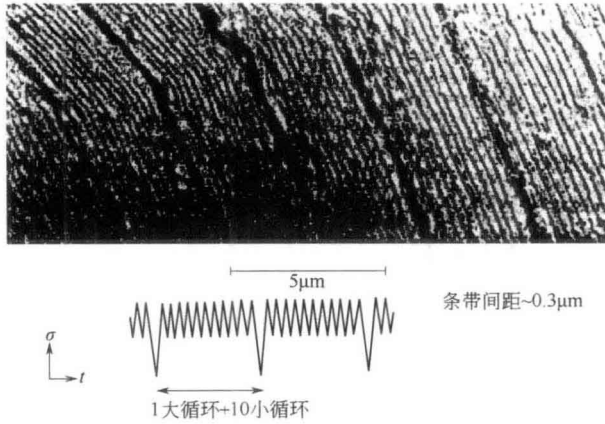


图 1-7 疲劳裂纹扩展条带

疲劳条带的形成通常引用塑性钝化模型予以说明^[19, 20]。在每一循环开始时, 应力为零, 裂纹处于闭合状态 [图 1-8 (a)]。当拉应力增大, 裂纹张开, 并在裂纹尖端沿最大切应力方向产生滑移 [图 1-8 (b)]。拉应力增长到最大值, 裂纹进一步张开, 塑性变形也随之增大, 使得裂纹尖端钝化 [图 1-8 (c)], 因而应力集中减小, 裂纹停止扩展。卸载时, 拉应力减小, 裂纹逐渐闭合, 裂纹尖端

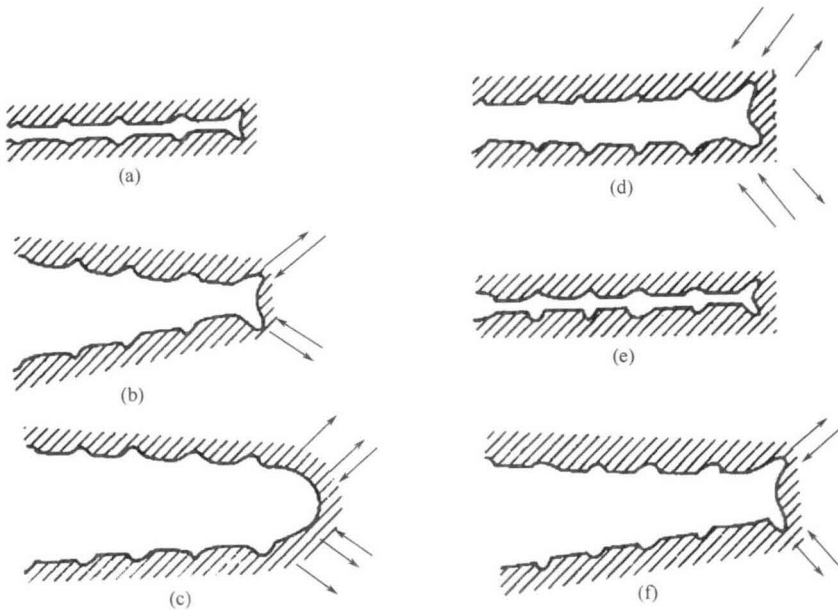


图 1-8 疲劳裂纹扩展机理示意图

滑移方向改变 [图 1-8 (d)]。当应力变为压应力时, 裂纹闭合, 裂纹尖端锐化, 又恢复到原先的状态 [图 1-8 (e)]。由此可见, 每加载一次, 裂纹向前扩展一段距离, 这就是裂纹扩展速率 da/dN , 同时在断口上留下一疲劳条带, 而且裂纹扩展是在拉伸加载时进行的。在这些方面, 裂纹扩展的塑性钝化模型与实验观测结果相符。

(3) 断裂

断裂是疲劳破坏的最终阶段, 这个阶段和前两个阶段不同, 它是在一瞬间突然发生的。这是由疲劳损伤逐渐累积引起的, 由于裂纹不断扩展, 使零件的剩余面积越来越小, 当构件剩余断面不足以承受外载荷时 (即剩余断面上的应力达到或超过材料的静强度, 或者当应力强度因子超过材料的断裂韧性时), 裂纹突然发生失稳扩展以致断裂。裂纹的失稳扩展可能是沿着与拉伸载荷方向成 45° 的剪切型或倾斜型, 这种剪切可能是单剪切 [图 1-9 (a)], 也可能是双剪切 [图 1-9 (b)]。

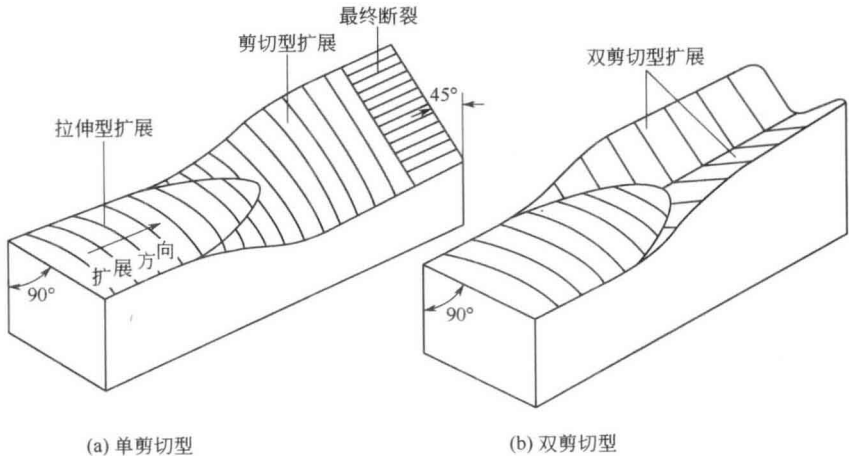


图 1-9 断面上裂纹扩展过程示意图

1.3 材料的疲劳强度

1.3.1 应力疲劳与应变疲劳

在常温下工作的结构和机械的疲劳破坏取决于外载荷的大小。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; 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, 其疲劳寿命一般低于 5×10^4 次。

(1) 应力疲劳

应力疲劳过程中, 循环塑性应变为零或者远小于弹性应变, 载荷历程以及疲劳损伤由循环应力控制。循环应力的类型主要有拉-拉、拉-压、压-压等形式, 应力与时间的关系一般为正弦波或随机载荷, 如图 1-10 所示。应力的每一个变化周期, 称为一个应力循环。在应力循环中, 有最大应力 S_{\max} 、最小应力 S_{\min} 、应力范围 ΔS 和平均应力 S_m , 应力幅值 S_a 是应力循环中的变化分量。应力循环的性质由平均应力和应力幅值来决定, 应力循环的不对称特点由应力比 $R = S_{\min}/S_{\max}$ 表示, 称为应力循环特征。

应力循环参数之间的关系为:

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

$$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad [1-1(b)]$$

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \quad [1-1(c)]$$

$$S_{\max} = S_m + S_a \quad [1-1(d)]$$

$$S_{\min} = S_m - S_a \quad [1-1(e)]$$

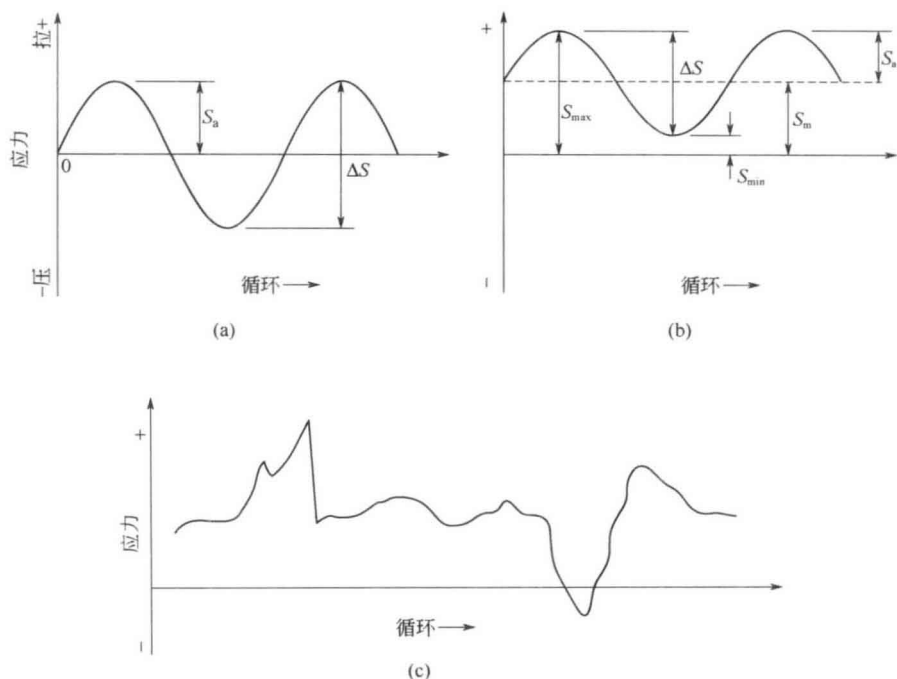


图 1-10 典型疲劳循环载荷