

机械工业出版社基金资助

抗疲劳设计

—方法与数据

赵少洋 王忠保 编著

机械工业出版社

TH140.1
7

机械工业出版社基金资助

抗疲劳设计——方法与数据

赵少汴 编著
王忠保

Vol 9/2



机械工业出版社

本书是在总结我国机械行业在抗疲劳设计方面的系列科研成果基础上,汲取必要的国外成熟方法和数据编写而成。内容包括正文和附录两部分。正文对各种抗疲劳设计方法及其设计参数的确定方法进行了系统的论述;附录提供了大量国内外材料和典型零构件的疲劳性能数据和抗疲劳设计图表。本书是一本机械设计人员进行抗疲劳设计的必备的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

抗疲劳设计——方法与数据/赵少汴,王忠保编著. —北京:
机械工业出版社, 1997. 1
ISBN 7-111-05204-8

I. 抗… II. ①赵… ②王… III. 机械材料-疲劳强度-技术
设计 IV. TH140.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 06316 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 蓝伙金 版式设计: 冉晓华 责任校对: 韩 晶
封面设计: 姚 毅 责任印制: 卢子祥
三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1997 年 3 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·35.75 印张·2 插页·877 千字
0 001—3 000 册
定价: 64.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前 言

从19世纪初叶首次发现疲劳破坏现象以来,已有近二百年的历史。在这不足两世纪的岁月里,人们对疲劳进行了大量试验研究,并越来越认识到疲劳破坏是机械产品的一种主要失效形式。现在美英等一些发达国家,对于承受循环载荷的机械,除了要进行传统的静强度计算之外,都还要进行疲劳强度校核,且后者往往是产品设计规范更主要的内容。而我国的机械设计则还停留在静强度设计阶段,对大多数本应进行抗疲劳设计的产品,还是只作静强度计算,而不进行疲劳强度计算或校核。推其原因,除了一些机械设计人员对疲劳强度的重要性认识不足外,主要是缺乏国产机械材料的抗疲劳设计数据和没有制订出各种机械产品的抗疲劳设计规范。我国自70年代起,已开始对疲劳问题进行了较多的试验研究。机械行业也从80年代开始,组织了一些研究院所、高等院校和工厂,对机械产品的抗疲劳设计方法和国产机械材料的抗疲劳设计数据进行了较系统的试验研究,为开展机械产品的抗疲劳设计打下了一定基础。本书是在总结我国十几年来在抗疲劳设计研究方面的系列成果基础上写出的,它汲取了必要的国外成熟方法和数据,是一本既反映当代世界先进水平,又适合我国机械产品使用的抗疲劳设计参考书,旨在为我国机械设计人员进行抗疲劳设计或制订专业产品的抗疲劳设计规范提供通用的设计方法和数据。本书设计方法和数据全面、系统、新颖、实用,特别是所提供的国产机械材料的抗疲劳设计数据和典型零构件及接头的抗疲劳设计方法,为目前国内现有的诸多疲劳文献中内容最多、最全的。

本书分正文和附录两大部分,正文对各种抗疲劳设计方法及其设计参数的确定方法进行了系统的论述,附录提供了大量的国内外材料和典型零构件及接头的疲劳性能数据和抗疲劳设计图表。书中的很多数据、图表都是取自郑州机械研究所、上海材料研究所、东北大学、浙江大学、西安交通大学、郑州工学院、同济大学、冶金部钢铁研究总院、洛阳拖拉机研究所、天津工程机械研究所和第二汽车制造厂等单位的试验研究报告,另外还参考了一些其它中外文献资料,在此一并表示感谢。本书选用的试验研究成果有:疲劳设计基础问题研究,常规疲劳设计方法研究,疲劳设计方法补充工作,疲劳设计方法数据库,机械强度与振动数据库,材料性能数据库研究,疲劳累积损伤规律研究,焊接接头的疲劳强度研究,典型焊接接头的疲劳强度与断裂行为研究等。这些研究成果,获得国家或机械部科技进步奖四项,获得机械部机械科学研究院科研成果奖多项。

本书由赵少汴、王忠保编著,张晓慧、陈德广参加编写。本书主要供机械设计人员使用,也供大专院校有关专业师生使用。由于作者水平所限,不尽人意之处,敬请读者指正。

编 者

1995年8月8日

常用符号表

a ——计算裂纹尺寸(mm)	$K_{\sigma N}$ —— N 次循环时的疲劳缺口系数
a_0 ——初始裂纹尺寸(mm)	K_r ——切应力下的疲劳缺口系数
a_c ——临界裂纹尺寸(mm)	K_{rD} ——切应力下的疲劳强度降低系数
da/dN ——疲劳裂纹扩展速率($\text{mm} \cdot \text{C}^{-1}$)	K'_e ——真实应变集中系数
A ——横截面积(mm^2)	L ——长度(mm)
无限次循环时的疲劳极限(MPa)	M ——弯矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
b ——疲劳强度指数	M_t ——扭矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
c ——疲劳延性指数	n ——循环次数(c)
C ——循环比	安全系数
d ——直径(mm)	子样容量
D ——直径(mm)	n' ——循环应变硬化指数
疲劳损伤	$[n]$ ——许用安全系数
D_f ——损伤和	n_N ——寿命安全系数
e ——名义应变	N ——疲劳寿命(c)
E ——弹性模量(MPa)	$2N$ ——以反向数计的疲劳寿命
f ——频率(Hz)	N_i ——裂纹形成寿命(c)
疲劳比	N_0 —— $S-N$ 曲线转折点的疲劳寿命(c)
F ——作用力(N)	N_{50} ——中值疲劳寿命(c)
ΔF ——作用力范围(N)	N_p —— $p\%$ 存活率的疲劳寿命(c)
G ——切变模量(MPa)	N_P ——疲劳裂纹扩展寿命(c)
I ——截面轴惯性矩(mm^4)	p ——存活率(%)
I_P ——截面极惯性矩(mm^4)	P ——破坏率(%)
K ——应力强度因子($\text{N} \cdot \text{mm}^{\frac{3}{2}}$)	q ——疲劳缺口敏感度
K' ——循环强度系数(MPa)	Q ——相对应力梯度(mm^{-1})
K_c ——断裂韧度($\text{N} \cdot \text{mm}^{\frac{3}{2}}$)	r ——半径(mm)
K_{1c} ——平面应变断裂韧度($\text{N} \cdot \text{mm}^{\frac{3}{2}}$)	相关系数
ΔK ——应力强度因子范围($\text{N} \cdot \text{mm}^{\frac{3}{2}}$)	R ——应力比
ΔK_{th} ——疲劳裂纹扩展门槛值($\text{N} \cdot \text{mm}^{\frac{3}{2}}$)	可靠度
K_f ——疲劳缺口系数	半径(mm)
K_{f_s} ——粗糙加工表面的疲劳缺口系数	s ——子样标准差
K_t ——理论应力集中系数	s^2 ——子样方差
K_{σ} ——正应力下的疲劳缺口系数	S ——名义应力(MPa)
K'_{σ} ——真实应力集中系数	ΔS ——名义应力范围(MPa)
$K_{\sigma D}$ ——正应力下的疲劳强度降低系数	t ——时间(h)

- T ——温度(°C)
 u_p ——与存活率相关的标准正态偏量
 $\bar{x}$ ——子样均值
 x_p —— $p\%$ 存活率下的对数疲劳寿命
 Z_R ——可靠度系数(联结系数)
 Z ——弯曲截面模量(mm³)
 Z_p ——扭转截面模量(mm³)
 α ——显著度
 β ——表面系数
 β_1 ——表面加工系数
 β_{1t} ——切应力下的表面加工系数
 β_2 ——腐蚀系数
 β_3 ——表面强化系数
 γ ——置信度(%)
 δ ——相对误差(%)
 ϵ ——尺寸系数
 真应变
 ϵ_a ——应变幅
 ϵ_e ——弹性应变
 ϵ_f ——真断裂延性
 ϵ'_f ——疲劳延性系数
 ϵ_p ——塑性应变
 ϵ_t ——总应变
 $\Delta\epsilon$ ——真应变范围
 μ ——母体均值
 ν ——泊松比
 变异系数
 δ ——缺口根部曲率半径(mm)
 σ ——应力(MPa)
 真应力(MPa)
 母体标准差
 $[\sigma]$ ——许用应力(MPa)
 σ_{-1} ——材料的对称弯曲疲劳极限(MPa)
 σ_{-1cor} ——材料的对称弯曲腐蚀疲劳极限(MPa)
 σ_{-1d} ——尺寸 d 试样的对称弯曲疲劳极限(MPa)
 σ_{-1D} ——零件的对称弯曲疲劳极限(MPa)
 σ_{-1K} ——应力集中试样的对称弯曲疲劳极限(MPa)
 σ_{-1l} ——材料的对称拉-压疲劳极限(MPa)
 σ_{-1N} —— N 次循环的材料对称弯曲疲劳极限(MPa)
 σ_{-1p} —— $p\%$ 存活率的材料对称弯曲疲劳极限(MPa)
 $\sigma_{-1\infty}$ ——无限多次循环时的材料对称弯曲疲劳极限(MPa)
 σ_0 ——脉动循环下的弯曲疲劳极限(MPa)
 σ_a ——应力幅(MPa)
 $\Delta\sigma$ ——应力范围(MPa)
 σ_b ——抗拉强度(MPa)
 σ_e ——等效应力(MPa)
 σ_f ——真断裂强度(MPa)
 σ'_f ——疲劳强度系数(MPa)
 σ_m ——平均应力(MPa)
 σ_{max} ——最大应力(MPa)
 σ_{min} ——最小应力(MPa)
 σ_r ——名义应力(MPa)
 σ_r ——应力比为 R 时的疲劳极限(MPa)
 σ_{rR} ——疲劳极限的半径向量(MPa)
 σ_R ——应力的半径向量(MPa)
 蠕变极限(MPa)
 σ_s ——屈服点(MPa)
 σ_t ——真应力(MPa)
 σ_Σ ——变幅载荷下的等效应力(MPa)
 τ ——切应力(MPa)
 τ_{-1} ——材料的对称扭转疲劳极限(MPa)
 τ_{-1K} ——应力集中试样的对称扭转疲劳极限(MPa)
 τ_{-1D} ——零件的对称扭转疲劳极限(MPa)
 τ_0 ——材料的脉动扭转疲劳极限(MPa)
 τ_a ——切应力幅(MPa)
 τ_m ——平均切应力(MPa)
 ψ ——断面收缩率(%)
 ψ_σ ——正应力下的平均应力影响系数
 $\psi_{\sigma K}$ ——缺口试样的平均应力影响系数
 $\psi_{\sigma D}$ ——零件的平均应力影响系数
 ψ_τ ——切应力下的平均应力影响系数

目 录

前言

常用符号表

第1章 概论..... 1

1.1 常用术语..... 1

1.2 疲劳发展史..... 5

1.3 疲劳分类..... 7

1.4 金属疲劳破坏机理..... 8

1.4.1 疲劳裂纹萌生..... 8

1.4.2 疲劳裂纹扩展..... 9

1.4.3 失稳断裂..... 11

1.5 疲劳断口的形貌特征..... 11

1.5.1 宏观形貌特征..... 11

1.5.2 微观形貌特征..... 13

1.6 抗疲劳设计方法..... 14

1.6.1 抗疲劳设计准则..... 14

1.6.2 现行的抗疲劳设计方法..... 14

1.6.3 分析与试验..... 15

1.6.4 展望..... 16

第2章 疲劳极限和疲劳图..... 17

2.1 $S-N$ 曲线..... 17

2.1.1 引言..... 17

2.1.2 测定方法..... 18

2.1.3 金属材料的 $S-N$ 曲线..... 20

2.1.4 理想化的 $S-N$ 曲线..... 21

2.2 疲劳极限..... 22

2.2.1 引言..... 22

2.2.2 测定方法..... 22

2.2.3 金属材料的疲劳极限数据..... 26

2.2.4 材料疲劳极限与抗拉强度间的关系..... 26

2.2.5 加载方式、横截面形状和方向性影响..... 28

2.3 概率密度函数..... 29

2.4 $p-S-N$ 曲线..... 31

2.4.1 引言..... 31

2.4.2 测定方法..... 31

2.4.3 金属材料的 $p-S-N$ 曲线..... 33

2.5 疲劳极限线图..... 33

2.5.1 Smith 图..... 33

2.5.2 Haigh 图..... 34

2.6 等寿命图..... 34

第3章 影响疲劳强度的因素..... 35

3.1 缺口效应..... 35

3.1.1 理论应力集中系数..... 35

3.1.2 疲劳缺口系数..... 41

3.2 尺寸效应..... 47

3.3 表面加工方法的影响..... 48

3.3.1 影响机理..... 48

3.3.2 切削用量的影响..... 50

3.3.3 表面加工系数线图..... 50

3.3.4 表面加工对疲劳缺口系数的影响..... 52

3.4 平均应力的影响..... 52

3.4.1 拉伸平均应力的影响..... 53

3.4.2 压缩平均应力的影响..... 54

3.4.3 扭转平均应力的影响..... 54

3.5 其它因素的影响..... 56

3.5.1 加载频率的影响..... 56

3.5.2 应力波形的影响..... 57

3.5.3 中间停歇的影响..... 57

第4章 疲劳累积损伤理论..... 58

4.1 概述..... 58

4.2 线性累积损伤理论..... 58

4.2.1 Miner 法则..... 58

4.2.2 相对 Miner 法则..... 59

4.3 双线性累积损伤理论..... 59

4.4 非线性累积损伤理论..... 60

4.4.1 损伤曲线法..... 60

4.4.2 Corten-Dolan 理论..... 61

4.5 各种疲劳累积损伤理论的寿命估算精度对比..... 62

4.6 损伤极限..... 63

第5章 常规疲劳设计	65	10.4 有限寿命下的概率疲劳设计	126
5.1 无限寿命设计	65	10.4.1 等幅应力下的概率疲劳设计	126
5.1.1 单轴应力下的无限寿命设计	65	10.4.2 变幅应力下的概率疲劳设计	127
5.1.2 多轴应力下的无限寿命设计	70	10.4.3 疲劳寿命的可靠性估算	129
5.2 有限寿命设计	73	10.5 可靠度的置信水平	130
5.2.1 单轴应力下的有限寿命设计	74	10.6 概率疲劳设计数据	130
5.2.2 多轴应力下的有限寿命设计	80	第11章 环境疲劳	136
第6章 随机疲劳	81	11.1 腐蚀疲劳	136
6.1 概述	81	11.1.1 综述	136
6.2 计数法	81	11.1.2 分述	137
6.3 程序载荷谱编制	85	11.1.3 各种影响因素对腐蚀疲劳强度的影响	140
6.4 随机疲劳强度计算	86	11.1.4 腐蚀疲劳设计方法	142
6.5 随机疲劳试验方法	87	11.1.5 腐蚀疲劳试验方法及试验装置	143
第7章 低周疲劳	89	11.1.6 腐蚀疲劳裂纹扩展	144
7.1 材料的应力-应变响应	89	11.2 低温疲劳	144
7.1.1 单调应力-应变曲线	89	11.3 高温疲劳	145
7.1.2 循环应力-应变曲线与迟滞回线	90	11.3.1 引言	145
7.2 应变-寿命曲线	91	11.3.2 金属的高温疲劳性能	145
7.3 低周疲劳寿命估算方法	94	11.3.3 影响金属高温疲劳性能的因素	147
7.4 低周疲劳试验方法	95	11.3.4 高温疲劳寿命估算方法	150
7.5 低周应变疲劳数据	95	11.4 热疲劳	152
第8章 局部应力应变法	100	11.4.1 热应力与热疲劳	152
8.1 概述	100	11.4.2 热疲劳寿命估算方法	152
8.2 疲劳寿命估算方法	101	11.4.3 热疲劳试验方法	154
8.2.1 载荷-应变标定曲线法	101	11.5 微动磨损疲劳	154
8.2.2 修正 Neuber 法	104	11.6 接触疲劳	156
8.3 推广应用于高周疲劳	106	11.6.1 失效机理	157
第9章 损伤容限设计	108	11.6.2 接触应力	157
9.1 概述	108	11.6.3 影响接触疲劳强度的因素	159
9.2 线弹性断裂力学	108	11.6.4 接触疲劳强度计算方法	160
9.3 疲劳裂纹扩展速率	110	11.6.5 接触疲劳试验方法	161
9.4 剩余寿命估算	112	11.7 冲击疲劳	161
9.5 断裂控制	114	第12章 典型零部件的抗疲劳设计	165
第10章 概率疲劳设计	116	12.1 轴的抗疲劳设计	165
10.1 概述	116	12.1.1 轴的受力特点与疲劳破坏部位	165
10.2 应力-强度干涉模型求可靠度	118	12.1.2 名义应力计算	165
10.3 无限寿命下的概率疲劳设计	122	12.1.3 疲劳强度校核	166

12.1.4 影响系数和安全系数的确定方法	167
12.2 曲轴的抗疲劳设计	167
12.2.1 连杆轴颈的疲劳强度校核	167
12.2.2 主轴颈的疲劳强度校核	170
12.2.3 曲柄臂的疲劳强度校核	170
12.3 齿轮的抗疲劳设计	174
12.3.1 渐开线圆柱齿轮传动	174
12.3.2 圆弧齿轮传动	181
12.3.3 锥齿轮传动	184
12.4 滚动轴承的抗疲劳设计	188
12.4.1 引言	188
12.4.2 按额定动负荷选择轴承	188
12.4.3 按额定静负荷选择轴承	190
12.4.4 滚动轴承的极限转速	191
12.5 弹簧的抗疲劳设计	191
12.5.1 螺旋弹簧	191
12.5.2 板弹簧	193
12.6 压力容器的抗疲劳设计	195
12.6.1 应力分析	195
12.6.2 低周疲劳设计	198
12.6.3 损伤容限设计	203
第13章 联接和接头的疲劳强度	210
13.1 轴向受力的螺纹联接	210
13.1.1 轴向螺纹联接的载荷和载荷分配	210
13.1.2 轴向螺纹联接的抗疲劳设计	213
13.1.3 提高轴向螺纹联接疲劳强度的方法	215
13.2 销钉-凸耳、螺栓和铆接头	218
13.2.1 销钉-凸耳接头	218
13.2.2 螺栓接头	221
13.2.3 铆接接头	222
13.3 焊接接头	225
13.3.1 焊接接头的疲劳断裂性能	225
13.3.2 影响焊接接头疲劳强度的因素	227
13.3.3 焊接接头的抗疲劳设计方法	241

第14章 提高零构件疲劳强度的方法	245
14.1 合理选材	245
14.2 改进结构和工艺	246
14.2.1 改进结构	246
14.2.2 改进工艺	246
14.3 表面强化	248
14.3.1 引言	248
14.3.2 表面淬火	250
14.3.3 表面化学热处理	251
14.3.4 表面冷作	252
14.3.5 硬化层厚度对疲劳强度的影响	256
14.3.6 表面强化零件的抗疲劳设计方法	256
14.4 表面防护	257
14.5 合理操作与定期检修	258
附录 抗疲劳设计图表	259
附录 A 材料疲劳极限	259
附录 B 理论应力集中系数	272
附录 C 缺口效应	301
附录 D 尺寸效应	315
附录 E 表面加工影响	321
附录 F S-N 曲线和 p -S-N 曲线	324
附录 G 平均应力影响	361
附录 H 复合应力下的疲劳强度	398
附录 I 环境影响	400
附录 J 表面处理影响	431
附录 K 低周应变疲劳特性	444
附录 L 断裂韧度和疲劳裂纹扩展	469
附录 M 疲劳累积损伤	484
附录 N 典型零部件的疲劳强度	485
附录 O 接头的疲劳强度	515
附录 P 数据处理及概率疲劳设计附表	550
附录 Q 安全系数	557
参考文献	560

第1章 概 论

1.1 常用术语^[1,2]

(1) 疲劳 (fatigue) 材料在循环应力和应变作用下, 在一处或几处逐渐产生局部永久性累积损伤, 经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程。

(2) 环境 (environment) 包围试样试验部分的化学物质和能量的组合体。

(3) 波形 (wave form) 控制的力学试验变量 (例如载荷、应力、应变) 作为时间的函数而从峰值变到峰值的形状。

(4) 反向 (reversal) 疲劳载荷中, 载荷-时间函数的一阶导数改变符号处。恒幅循环载荷中, 反向次数为循环次数的两倍。

(5) 疲劳载荷 (fatigue loading) 加于试样或服役构件的周期性或非周期性动载荷 (也称循环载荷)。

(6) 峰值载荷 (peak load) 疲劳载荷中, 载荷-时间函数的一阶导数从正数变至负数处的载荷; 恒幅载荷中的最大载荷。

(7) 谷值载荷 (valley load) 疲劳载荷中, 载荷-时间函数的一阶导数从负数变至正数处的载荷; 恒幅载荷中的最小载荷。

(8) 恒幅载荷 (constant amplitude loading) 疲劳载荷中, 所有峰值载荷均相等和所有谷值载荷均相等的载荷。

(9) 谱载荷 (spectrum loading) 疲劳载荷中, 所有峰值载荷不等, 或所有谷值载荷不等, 或两者均不相等的载荷 (也称为变幅载荷或不规则载荷)。

(10) 随机载荷 (random loading) 疲劳载荷中, 峰值载荷和谷值载荷及其序列是随机出现的一种谱载荷。

(11) 载荷单元 (block) 疲劳载荷中, 连续施加的恒幅载荷循环的特定次数, 或同样重复的有限长度的谱载荷序列。

(12) 计数法 (counting method) 谱载荷中, 从载荷-时间历程确定不同载荷参量值和计算其出现次数的方法。

(13) 应力循环 (stress cycle) 恒幅载荷中, 应力随时间作周期性变化的一个完整过程 (见图 1-1)。谱载荷中, 循环的定义随计数方法而异。

(14) 最大应力 (maximum stress) $\sigma_{\max}$ 应力循环中具有最大代数值应力 (见图 1-1)。拉应力为正, 压应力为负。

(15) 最小应力 (minimum stress) $\sigma_{\min}$ 应力循环中具有最小代数值应力 (见图 1-1)。拉应力为正, 压应力为负。

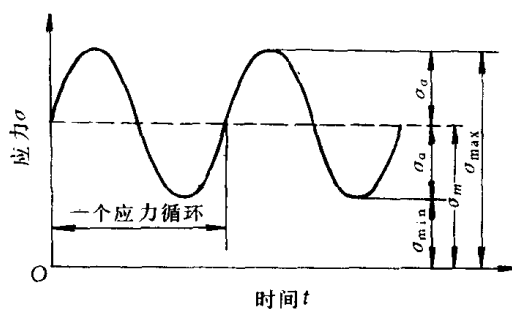


图 1-1 应力循环

(16) 平均应力 (mean stress) σ_m 应力循环中最大应力和最小应力的代数平均值 (见图 1-1), 即

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1-1)$$

拉应力为正, 压应力为负。

(17) 应力幅 (stress amplitude) σ_a 应力循环中最大应力和最小应力代数差的一半 (见图 1-1), 即

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1-2)$$

(18) 应力范围 (range of stress) $\Delta\sigma$ 应力循环中最大应力和最小应力的代数差, 即

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a \quad (1-3)$$

(19) 应力比 (stress ratio) R 应力循环中最小应力与最大应力的代数比值, 即

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1-4)$$

(20) 应力水平 (stress level) 由一对应力分量 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 确定。在给定应力比或平均应力 σ_m 的条件下, 应力水平可以用最大应力 $\sigma_{\max}$ 或应力幅 σ_a 表示。

(21) 对称循环 (reversed cycle) 平均应力 $\sigma_m = 0$ 的循环, 此时 $R = -1$ 。

(22) 脉动循环 (fluctuating cycle) 最小应力 $\sigma_{\min} = 0$ 的循环, 此时 $R = 0$ 。

(23) 疲劳寿命 (fatigue life) N 疲劳失效时所经受的应力或应变的循环次数。

(24) 中值疲劳寿命 (median fatigue life) N_{50} 将在同一试验条件下所试一组试样的疲劳寿命观测值按大小顺序排列时, 处于正中的一个数值。当试样为偶数时, 为处于正中的两个值的平均值。

(25) $p\%$ 存活率的疲劳寿命 (fatigue life for $p\%$ survival) N_p 给定载荷下母体的 $p\%$ 达到或超过的疲劳寿命的估计值, 可从个体疲劳寿命估计, p 可以是 90、95 等。

(26) N 次循环的疲劳强度 (fatigue strength at N cycles) 从 $S-N$ 曲线上所确定的恰好在 N 次循环失效的估计应力值, 也称为 N 次循环的条件疲劳极限。此值的使用条件必须与用来确定它的 $S-N$ 曲线的测定条件相同。此值一般是指在平均应力为零的条件下, 给定一组试样的 50% 能经受 N 次应力循环时的最大应力或应力幅, 亦即所谓的 N 次循环的中值疲劳强度, 用 σ_{-1N} 表示。在非对称循环下用 σ_{rN} 表示。

(27) N 次循环的中值疲劳强度 (median fatigue strength at N cycles) 母体的 50% 能经受 N 次循环的应力水平的估计值。由于试验不能直接求得 N 次循环的疲劳强度频率分布, 故中值疲劳强度乃由疲劳寿命分布特点导出。

(28) N 次循环的 $p\%$ 存活率的疲劳强度 (fatigue strength for $p\%$ survival at N cycles) 母体的 $p\%$ 经受 N 次循环而不失效的应力水平的估计值。 p 可以是 90、95、99 等。

(29) 疲劳极限 (fatigue limit) σ_r 指定循环基数下的中值疲劳强度, 循环基数一般取 10^7 。对称循环下用 σ_{-1} 表示。

(30) $p\%$ 存活率的疲劳极限 (fatigue limit for $p\%$ survival) $\sigma_{r,p}$ 指定循环基数下, 具有 $p\%$ 存活率的疲劳强度。对称循环下用 $\sigma_{-1,p}$ 表示。

(31) $S-N$ 曲线 ($S-N$ curve) 应力与至破坏循环数的关系曲线。应力可为最大应力、最

小应力、应力范围或应力幅。此曲线表示规定平均应力、应力比或最小应力下的 $S-N$ 关系。通常指 50% 存活率下的这种关系。 N 通常采用对数标尺，而 σ 则常用线性标尺或对数标尺。

(32) 50% 存活率的 $S-N$ 曲线 ($S-N$ curve for $p\%$ survival) 在各应力水平下拟合中值疲劳寿命的曲线。它是所加应力与 50% 母体能尚存的破坏循环数之间关系的一种估计量。

(33) $p\%$ 存活率的 $S-N$ 曲线 ($S-N$ curve for $p\%$ survival) 在各应力水平下拟合 $p\%$ 存活率疲劳寿命的曲线，它是所加应力与 $p\%$ 母体能尚存的破坏循环数之间关系的一种估计量。 p 可以是 90、95、99 等。

(34) $p-S-N$ 曲线 ($p-S-N$ curve) 画在同一张图上的一族不同存活率下的 $S-N$ 曲线。它反映了不同存活率下的 $S-N$ 关系。

(35) N 次循环响应曲线 (response curve for N cycles) 对几个应力水平拟合 N (如 10^5 、 10^7 等预定值) 次循环时存活率观测值的曲线。它是所加应力与经受 N 次循环尚存的母体百分数之间关系的一种估计。

(36) 滞后回线 (hysteresis diagram) 一次循环中的应力-应变回路。

(37) 循环 $\sigma-\epsilon$ 曲线 (cyclic $\sigma-\epsilon$ curve) 材料在循环加载下的应力-应变响应。通常指循环稳定后的应力-应变响应。

(38) $\epsilon-N$ 曲线 ($\epsilon-N$ curve) 应变与至失效循环数间的关系曲线。

(39) 名义应力 (nominal stress) S 不考虑几何不连续性 (如孔、沟、圆角等) 所产生的影响，而按简单弹性理论计算的净截面上一点的应力 (我国习惯上仍写作 σ)。

(40) 局部应力 (local stress) σ 按弹性理论计算所得缺口或其它应力集中源处某点的应力。

(41) 局部应变 (local strain) ϵ 按弹性理论计算所得缺口或其它应变集中源处某点的应变。

(42) 理论应力集中系数 (theoretical stress concentration factor) K_t 按弹性理论计算所得缺口或其它应力集中源的最大应力与相应的名义应力的比值。

(43) 疲劳缺口系数 (fatigue notch factor) K_f 在相同条件和在 N 次循环的相同存活率下，无应力集中试样的疲劳强度与有应力集中试样的疲劳强度之比。规定疲劳缺口系数 K_f 时，应注明试样的几何形状、应力幅、平均应力和疲劳寿命值。

(44) 疲劳缺口敏感度 (fatigue notch sensitivity) q 疲劳缺口系数与理论应力集中系数一致程度的一种度量，以 $(K_f - 1)/(K_t - 1)$ 表示。

(45) 尺寸效应 (size effect) 由于试样或零件的尺寸增大而引起的疲劳强度降低现象。材料尺寸效应的大小用尺寸系数 ϵ 表示，它是大试样的疲劳强度与其它条件相同的标准尺寸试样疲劳强度的比值。

(46) 表面系数 (surface factor) β 由于试样表面情况或环境改变而引起的疲劳强度相对变化。

(47) 疲劳强度降低系数 (fatigue strength reduction coefficient) 零件的对称疲劳极限 σ_{-1D} 与材料疲劳极限 σ_{-1} 之比。正应力下用 $K_{\sigma D}$ 表示，切应力下用 $K_{\tau D}$ 表示。

(48) 平均应力影响系数 (mean stress effect factor) 将平均应力折合为等效应力幅时的折合系数，亦称不对称循环度系数。正应力下用 ψ_σ 表示，切应力下用 ψ_τ 表示。

(49) 等寿命疲劳图 (constant life fatigue diagram) 通常用直角坐标表示的一族直线，其

每一曲线分别表示某一给定疲劳寿命下的应力幅、最大应力和最小应力与平均应力之间的关系。

(50) 安全系数 (safety factor) n 零构件在服役条件下的疲劳强度与工作应力的比值。

(51) 许用安全系数 (reserve factor) $[n]$ 安全系数的最低允许值。

(52) 循环比 (cyclic ratio) C 在某一应力 (或应变) 水平下所经历的累积循环数 n 与由 $S-N$ 曲线 (或 $\epsilon-N$ 曲线) 所估计的疲劳寿命 N 的比值。

(53) 损伤和 (damage sum) D_f 疲劳失效时的循环比平均值。

(54) 疲劳累积损伤 (fatigue damage accumulation) D 谱载荷下疲劳损伤的积累, 以循环比和表示, 即

$$D = \sum_{i=1}^n C_i \quad (1-5)$$

(55) 应力强度因子 (stress-intensity factor) K 均匀线弹性体中特定型式的理想裂纹尖端应力场的量值。

(56) 断裂韧度 (fracture toughness) 量度裂纹扩展阻力的通用术语。平面应力条件下用 K_{IC} 表示, 平面应变条件下用 K_{IIC} 表示。

(57) 计算裂纹长度 (counting crack length) a 与实际裂纹相当的直前缘裂纹长度。对于紧凑拉伸试样, 此值从加载线开始计量; 对于中心裂纹试样, 此值从试样中心线开始计量。

(58) 疲劳裂纹扩展速率 (fatigue crack growth rate) da/dN 恒幅疲劳载荷引起的裂纹扩展速率, 以循环一次的疲劳裂纹扩展量表示。

(59) 疲劳裂纹扩展门槛值 (threshold in fatigue crack propagation) ΔK_{th} 已存在的疲劳裂纹不发生扩展的应力强度因子值, 在平面应变条件下, 以 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ mm}/\text{c}$ 所对应的应力强度因子范围 ΔK 值表示。

(60) 表面冷作强化 (strengthening by surface cold working) 由于表面冷作变形在表面层内产生了压缩残余应力和使表面材料的力学性质提高所引起的疲劳强度提高现象。

(61) 表面热处理强化 (strengthening by surface heat treatment) 由于表面热处理所引起的表面疲劳强度提高现象。

(62) 母体 (population) 研究对象的全体。

(63) 子样 (sample) 母体中包括很多甚至近无限多个个体。为了推断母体的性质, 常从母体中抽取一部分个体来研究, 这些被抽取出来的一部分个体称为子样。

(64) 子样大小 (sample size) n 子样中所包含的个体数目, 即一个试验组中观测值的个数。

(65) 子样均值 (sample average) $\bar{x}$ 一个试验组中各观测值的算术平均值, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-6)$$

它是母体平均值的估计量。

(66) 子样中值 (sample median) 将一组数据按大小顺序排列, 居于正中间位置的数值称为子样中值。子样大小为偶数时, 为正中间两个数值的平均值。

(67) 子样方差 (sample variance) s^2 一个试验组中各观测值 x_i 与子样平均值 $\bar{x}$ 之差的平方和除以 $n-1$, 即

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (1-7)$$

它是母体方差的估计量。

(68) 子样标准差 (sample standard deviation) s 子样方差的平方根。它是母体标准差的估计量。

(69) 存活率 p (p percent survival) 在给定的应力 (或应变) 与循环数下, 母体中个体不破坏的百分数。

(70) 破坏率 P (P percent failure) 在给定的应力 (或应变) 与循环数下, 母体中个体破坏的百分数。它与存活率 p 间存在如下关系

$$p\% + P\% = 1 \quad (1-8)$$

(71) 可靠度 (reliability) R 强度超过工作应力的概率。

(72) 可靠度系数 (reliability coefficient) Z_R 疲劳强度与工作应力差值的均值与差值的标准差的比值, 亦称联结系数。

1.2 疲劳发展史^[3,4]

疲劳破坏现象的出现, 始于 19 世纪初叶。产业革命以后, 随着蒸汽机车和机动运载工具的发展, 以及机械设备的广泛应用, 运动部件的破坏经常发生。破坏往往发生在零构件的截面突变处, 破坏处的名义应力不高, 低于材料的抗拉强度和屈服点。破坏事故的原因一时使工程师们摸不着头脑, 直至 1829 年德国人 Albert W. A. (艾伯特) 用矿山卷扬机焊接链条进行疲劳试验, 破坏事故才被阐明。1839 年, 法国工程师 Poncelet J. V. (彭赛列) 首先使用“疲劳”这一术语来描述材料在循环载荷作用下承载能力逐渐耗尽以致最后突然断裂的现象。1843 年苏格兰人 Rankine W. J. M (兰金) 发表了第一篇疲劳论文, 论文中指出, 机车车辆的破坏是由于运行过程中金属性能逐渐变坏所致。他分析了车轴轴肩处尖角的有害影响, 指出了加大轴肩处的圆角半径可以提高其疲劳强度。1842 年 Hood (胡特) 提出了结晶理论, 认为金属在循环应力下的疲劳强度降低是振动引起的结晶化所致。1849 年美国机械工程学会还举行了专门会议对此理论进行讨论。

对疲劳现象最先进行系统试验研究的学者是德国人 Wöhler A. (沃勒), 他从 1847 年至 1889 年在斯特拉斯堡皇家铁路工作期间, 对金属的疲劳进行了深入系统的试验研究。1850 年他设计出了第一台疲劳试验机 (亦称 Wöhler 疲劳试验机), 用来进行机车车轴疲劳试验, 并首次使用金属试样进行了疲劳试验。他在 1871 年发表的论文中, 系统论述了疲劳寿命与循环应力的关系, 提出了 $S-N$ 曲线和疲劳极限的概念, 确定了应力幅是疲劳破坏的主要因素, 奠定了金属疲劳的基础。因此 Wöhler A. 被公认是疲劳的奠基人。

1874 年 Gerber W. (格伯) 根据 Wöhler 的数据, 研究了平均应力对疲劳的影响, 提出了表达极限应力幅 σ_a 和平均应力 σ_m 间关系的抛物线方程。1899 年, 英国人 Goodman J. 对疲劳极限线图进行了简化, 提出了著名的简化曲线——Goodman 图, 此图至今仍在广泛应用。1884 年 Bauschinger J. (包辛格) 在验证 Wöhler 的疲劳试验时, 发现了在循环载荷下弹性极限降低的“循环软化”现象, 引入了应力-应变迟滞回线的概念。但他的工作当时并未引起人们重视, 直到 1952 年 Keuyon (柯杨) 在做铜棒试验时才把这一概念重新提出来, 并命名为“包辛格效

应”。因此，包辛格是首次研究应力循环的人。

20 世纪初叶，开始使用光学显微镜来研究疲劳机制。1903 年 Ewing J. A. (尤因) 和 Humphery J. C. W (汉弗莱) 在单晶铝和退火的瑞典铁上发现了循环应力产生的滑移痕迹。他们通过微观研究推翻了老的结晶理论，指出了疲劳变形是由于与单调变形相类似的滑移所产生。1910 年 Bairstow (贝尔斯托) 研究了循环载荷下应力-应变曲线的变化，测定了迟滞回线，建立了循环硬化和循环软化的概念，并且进行了程序疲劳试验。

1920 年 Griffith A. A. (格里菲思) 发表了他用玻璃研究脆断的理论计算结果和实验结果。他发现，玻璃的强度取决于微裂纹尺寸，得出了 $S \sqrt{a} = C$ 的关系式 (S 为断裂时的名义应力， a 为裂纹尺寸， C 为常数)。此公式是断裂力学的基础。1926 年 Gough H. J. (高夫) 在伦敦出版了一本巨著《金属疲劳》，并在金属疲劳方面发表过 80 多篇论文，研究了弯曲与扭转同时作用下的复合疲劳，在疲劳机理方面做出了很大贡献。1929 年美国人 Peterson R. E. (彼得逊) 对尺寸效应进行了一系列试验，并提出了应力集中系数的理论值。1929~1930 年英国人 Haigh B. P. (黑格) 发表了高强度钢与低碳钢有不同缺口敏感性的论文，使用缺口应变分析和内应力的概念，对高强度钢和软钢的不同缺口效应作了合理解释。1930 年前后，在汽车工业中使用了喷丸技术，解决了车轴和弹簧经常发生疲劳破坏的问题。美国人 Alman J. O. (阿尔曼) 正确解释了喷丸提高疲劳强度的机理，提出主要是由于在表面层内建立了压缩残余应力。1936 年美国人 Horger O. J. (霍格) 和 Maulbetsch T. L. (莫尔贝奇) 指出，表面辊压能防止疲劳裂纹的形成。1937 年德国人 Neuber H. (诺伯) 在缺口疲劳强度问题中引入了“体素”和“应力梯度”的概念，指出了决定缺口疲劳强度的是缺口根部表面层小体积内的平均应力，而非缺口根部的峰值应力。第二次世界大战期间，在飞机发动机和装甲车的设计中，已利用残余压应力来提高疲劳强度。

前苏联人 Серенсен С. В. (谢联先) 在 40 年代推导出了常规疲劳的设计计算公式。根据 $S-N$ 曲线的水平段 (即疲劳极限) 进行的设计称为无限寿命设计；根据 $S-N$ 曲线的斜线段进行的设计称为有限寿命设计。为了解决变幅应力下的有限寿命设计问题，1945 年美国人 Miner M. A. (迈纳) 在对疲劳累积损伤问题进行大量试验研究的基础上，将 Palmgren J. V. (帕姆格伦) 在 1924 年估算滚动轴承寿命时提出的线性累积损伤理论公式化，形成了 Palmgren-Miner 线性累积损伤法则 (简称 Miner 法则)，此法则至今仍在广泛使用。

50 年代以后，疲劳试验研究工作得到了更为迅速的发展。在低周疲劳方面，1954 年美国航空和航天管理局 (NASA) 刘易斯研究所的 Manson S. S. (曼森) 和 Coffin L. F. (科芬)，在大量疲劳试验的基础上，提出了表达塑性应变范围与疲劳寿命间关系的 Manson-Coffin 方程，奠定了低周疲劳的基础。

在疲劳试验方面，50 年代研制出了闭环控制的电液伺服疲劳试验机。60 年代随着大规模集成电路的出现，制造出了能够模拟零件或构件服役载荷工况的随机疲劳试验机。到 70 年代，国外已广泛使用由电子计算机控制的电液伺服疲劳试验机来进行随机疲劳试验。用概率统计方法来处理疲劳试验数据是从本世纪 40 年代开始的。1949 年，Weibull W. (威布尔) 发表了著名的对疲劳试验数据进行统计分析的方法。1959 年 Pope J. A. (波普) 指出，疲劳试验的寿命数据符合对数正态分布。1963 年美国材料与试验协会 (ASTM) 的 E9 疲劳委员会出版了《疲劳试验与疲劳数据的统计分析指南》(ASTM STP91A) 一书。在概率疲劳设计方面，1961 年 Stulen F. B. (史图伦) 等人在机械设计中考虑了材料疲劳极限的概率分布。1964~1969 年，

美国人 Haugen E. B. (豪根) 对两个正态分布函数的代数运算进行了分析, 为强度干涉模型的可靠度计算奠定了基础。从 1970 年开始, 美国人 Kececioglu D. (凯塞乔格罗) 完善了用强度干涉模型进行概率疲劳设计的一套方法, 使疲劳可靠性研究走上了一个新阶段。

在疲劳裂纹扩展方面, 1957 年美国人 Paris P. C. (帕里斯) 提出, 在循环载荷作用下, 裂纹尖端的应力强度因子范围是控制零构件疲劳裂纹扩展速率的基本参量, 并于 1963 年提出了著名的指数幂定律——Paris 公式, 给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出了损伤容限设计, 从而使断裂力学和疲劳这两门学科逐渐结合起来。1967 年 Forman G. R. (福尔曼) 提出了可以考虑平均应力影响的修正公式——Forman 公式。现在, 以上两个公式都广泛用于零构件的疲劳裂纹扩展寿命估算。

在局部应力应变法方面, 1950 年 Stowell E. Z. (斯托厄尔) 对受单轴拉伸的带圆孔平板应力场的弹性解进行了塑性修正, 得到了孔边的真实应力集中系数。1961 年 Neuber H. 开始用局部应力应变研究疲劳寿命, 他对受切应力作用的有对称缺口的棱柱体进行了分析, 得出了描述缺口非线性应力-应变特性的 Neuber 定律。1966 年 Manson S. S. 和 Dolan T. J. 等人提出了根据缺口根部的应力应变分析和光滑试样的应变-寿命曲线确定缺口疲劳寿命的方法。1969 年 Topper T. H. (托珀)、Wetzel R. M. (韦策尔) 和 Morrow J. (莫罗) 等人提出了用 Neuber 公式和光滑试样的试验数据确定缺口疲劳寿命的简化方法。1971 年 Wetzel R. M. 建立了用局部应力应变分析估算零构件随机疲劳寿命的一整套方法, 并给出了计算程序, 使局部应力应变法很快发展起来。1974 年美国空军把这种方法应用到飞机部件的寿命估算上。美国汽车协会也要求各厂家在进行产品设计时, 一定要把此法纳入设计大纲。1979 年美国杜鲁门飞机公司已正式采用这种方法来估算零构件的疲劳寿命。

1.3 疲劳分类

(1) 按研究对象可以分为材料疲劳和结构疲劳。材料疲劳研究材料的, 失效机理, 化学成分和微观组织对疲劳强度的影响, 标准试样的疲劳试验方法和数据处理方法, 材料的基本疲劳特性, 环境和工况的影响, 疲劳断口的宏观和微观形貌等, 其特点是使用标准试样进行试验研究。结构疲劳则以零部件、接头以至整机为研究对象, 研究它们的疲劳性能、抗疲劳设计方法、寿命估算方法和疲劳试验方法, 形状、尺寸和工艺因素的影响, 以及提高其疲劳强度的方法。

(2) 按失效周次可以分为高周疲劳和低周疲劳。材料在低于其屈服强度的循环应力作用下, 经 $10^4 \sim 10^5$ 以上循环产生的失效称为高周疲劳; 材料在接近或超过其屈服强度的应力作用下, 低于 $10^4 \sim 10^5$ 次塑性应变循环产生的失效称为低周疲劳。高周疲劳与低周疲劳的主要区别在于塑性应变的程度不同。高周疲劳时, 应力一般比较低, 材料处在弹性范围, 因此其应力与应变是成正比的。低周疲劳则不然, 其应力一般都超过弹性极限, 产生了比较大的塑性变形, 所以应力与应变不成正比。对于低周疲劳, 采用应变作参数时, 可以得出较好的规律, 因此, 低周疲劳的主要参数是应变。这样, 低周疲劳也常称为应变疲劳。与此相应, 高周疲劳也常称为应力疲劳。但严格讲, 低周疲劳与应变疲劳的涵义是不同的, 前者考虑的是失效周次, 后者考虑的是控制参量。高周疲劳与应力疲劳也有同样差别。因高周疲劳是各种机械中最常见的, 故简称疲劳, 通常所说的疲劳一般指高周疲劳。

(3) 按应力状态可以分为单轴疲劳和多轴疲劳。单轴疲劳是指单向循环应力作用下的疲

劳,这时零件只承受单向正应力或单向切应力。例如,只承受单向拉-压循环应力、弯曲循环应力或扭转循环应力。多轴疲劳系指多向应力作用下的疲劳,也称为复合疲劳。例如弯扭复合疲劳、双轴拉伸疲劳、三轴应力疲劳、拉伸-内压疲劳等。多轴应力状态是很普遍的,不但多轴载荷能产生多轴应力,在单轴载荷作用下,缺口处的应力状态也往往是多轴的。

(4) 按载荷变化情况可以分为恒幅疲劳、变幅疲劳、随机疲劳。疲劳载荷中,所有峰值载荷均相等和所有谷值载荷均相等的载荷称为恒幅载荷。承受恒幅载荷的疲劳称为恒幅疲劳。疲劳载荷中,所有峰值载荷不等,或所有谷值载荷不等,或两者均不相等的载荷称为谱载荷(或变幅载荷),承受谱载荷的疲劳称为变幅疲劳。疲劳载荷中,峰值载荷和谷值载荷及其序列是随机出现的谱载荷称为随机载荷,承受随机载荷的疲劳称为随机疲劳。随机疲劳的幅值和频率都是随机变化的,而且是不确定的,所以它不能用一个简单的数学表达式来描述。一般要从幅域、时域和频域三个方面来描述、分析其统计特性。

(5) 按载荷工况和工作环境可以分为常规疲劳、高低温疲劳、热疲劳、热-机械疲劳、腐蚀疲劳、接触疲劳、微动磨损疲劳和冲击疲劳。在室温、空气介质中的疲劳称为常规疲劳。低于室温的疲劳称为低温疲劳,高于室温的疲劳称为高温疲劳。高于蠕变温度时,存在着蠕变和疲劳的交互作用。温度循环变化产生的热应力所导致的疲劳称为热疲劳。温度循环与应变循环叠加的疲劳称为热-机械疲劳。腐蚀环境与循环应力(应变)的复合作用所导致的疲劳称为腐蚀疲劳,它又可分为气相疲劳和水介质疲劳。滚动接触零件在循环接触应力作用下,产生局部永久性累积损伤,经一定的循环次数后,接触表面发生麻点、浅层或深层剥落的过程称为接触疲劳。静座配合零件,由于接触面间的微幅相对振动造成的磨损和疲劳的联合作用所导致的疲劳称为微动磨损疲劳。重复冲击载荷所导致的疲劳称为冲击疲劳。

1.4 金属疲劳破坏机理

工程中常用的金属均为多晶体,由于各个晶粒位向不同,位错、夹杂等微观、宏观缺陷及第二相的存在,在多晶体中存在着各向异性和非均质性。而疲劳破坏总是由应力应变最高和位向最不利的薄弱晶粒或夹杂等缺陷处起始,并沿着一定的结晶面扩展。所以金属的疲劳破坏与多晶体的非均质性和各向异性密切相关。一般说来,金属的疲劳破坏可以分为疲劳裂纹萌生、疲劳裂纹扩展和失稳断裂三个阶段。

1.4.1 疲劳裂纹萌生

疲劳裂纹萌生都是由塑性应变集中所引起,有三种常见的萌生方式:滑移带开裂,晶界或孪晶界开裂,夹杂物或第二相与基体的界面开裂。其中滑移带开裂不但是最常见的疲劳裂纹萌生方式,也是三种萌生方式中最基本的一种。这是由于在晶界开裂和夹杂物界面开裂之前,也都要先产生范性形变和形成滑移带。因此,范性形变和形成滑移带不但是滑移带开裂的基础,也是其它两种萌生方式的先决条件。

滑移带开裂的过程为出现滑移线、形成滑移带和形成驻留滑移带。金属在循环载荷作用下,首先在薄弱晶粒上产生范性形变,范性形变在金属表面上留下的痕迹便是滑移线。在一定的循环数以后,出现了硬化和软化,硬化和软化使范性形变不总是在一个滑移面上进行,而是在一个或几个滑移系上的一系列平行平面上进行。同时,又由于循环载荷下范性形变的不均匀性,使范性形变总是集中在一定的地区,这种集中在某些地区的不均匀范性形变,在金属表面上便表现为滑移带。形成驻留滑移带是形成滑移带的继续。驻留滑移带与一般滑移带