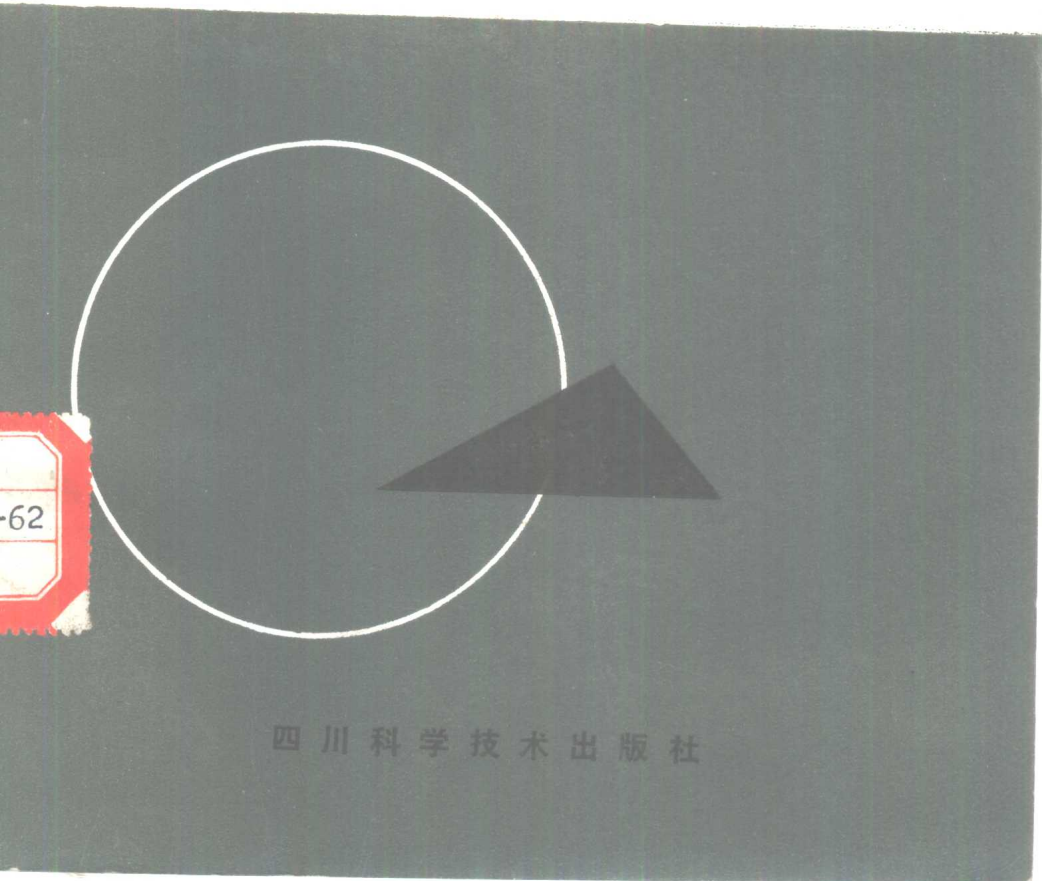


SCAILIAOPILAS

金属材料
疲劳设计手册

王庆荣 译
金祖卿 校



-62

四川科学技术出版社

金属材料疲劳设计手册

王庆荣 译

金祖卿 校

四川科学技术出版社

1988年·成都

责任编辑：赵 健

封面设计：周宝工

技术设计：杨璐璐

金属材料疲劳设计手册

王庆荣 译 金祖卿 校

四川科学技术出版社出版

(成都盐道街三号)

四川省新华书店发行

7234工厂印刷

统一书号：15298.233

1988年1月第一版 开本850×1168毫米1/32

1988年1月第一次印刷 字数310千

印数1—3000册 印张 12

定 价：2.90元

ISBN 7-5364-0628-2/TG·7

译者前言

在高温、高压、高负荷、强冲击、强振动、各种腐蚀性液体和气体或高真空的恶劣环境下工作的机器及金属构件，百分之九十以上的故障都是由金属材料疲劳失效引起的，给人们造成了极大的损失。尤其是飞机、涡轮机、舰船、车辆、桥梁等的零件、构件的疲劳失效，往往造成灾难性后果。所以，金属材料疲劳问题受到了世界各国的高度重视。为了提高机械、设备及机械零件的安全性和可靠性，不少工业发达国家对金属材料疲劳研究投入了大量的人力和物力，并取得了不少成果。这些成果已在许多高质量的机械、设备及结构的产品上得到了应用。

本书是根据日本材料学会编著的《金属材料疲劳设计便览》译出的。数十位原作者都是日本当代金属疲劳研究界的权威人士。由于金属材料疲劳设计是一门发展中的科学技术，所以无论国内还是国外，这方面的专著都还十分缺乏。译者有感于为国内广大工程技术人员、大专院校师生和研究人员提供这方面的读物，可敷大家的急需，于是不揣冒昧，完成了全书的翻译工作。如果这本译稿能对祖国的四化建设有所裨益，译者将感到不胜欣慰。

本书译稿蒙金祖卿副教授审校，孙训方教授、刘晓峰工程师、潘柏龄讲师和廖先福工程师提出宝贵意见。另外，谭独高级工程师、王勃工程师等也曾给予译者热情鼓励。在此，谨向他们表示衷心感谢。

由于译者水平所限，本书谬译之处实属难免，敬请读者不吝赐教。

王庆荣

1985年3月于成都工程机械总厂

原 著 序 言

在机械和结构物的设计中，材料强度是最重要的问题之一。人们不仅需要赋予机械及结构物以使用机能，而且为了确保其安全性和经济性，还需要知道所使用的材料的强度。如果把强度问题看作主要是疲劳强度，那就必须承认，疲劳强度设计占有极其重要的地位。

近年来，飞机、船舶、汽车、铁道车辆、工程机械等日益向大型化、高速化方向发展，这就要求它们具有高度的安全性和可靠性。此外，在需要最新技术的宇航、海洋开发、原子能工业等部门中，掌握材料强度的知识更是必不可少。随着机械设备在高温、高压、各种腐蚀性气体或高真空等苛刻环境中的使用日趋广泛，连现场技术人员也强烈地要求提高这些条件下材料强度的设计、保养和管理等技术水平。

近期开发并被人们用于各种机械和结构物上的材料有了日新月异的进步，材料强度的研究受到人们的极大重视。尤其是对材料的疲劳强度所进行的实验研究和理论研究，无论是在数量上还是在质量上都有显著进展。在世界范围内，这类研究资料浩如烟海。日本材料学会《关于材料疲劳研究的趋势》中所摘录的文献数量年年都有大幅度地增加，就清楚地表明了这一点。

为了解决疲劳强度设计上的许多难题，就必须整理研究那些浩瀚的资料和论文，弄清楚实验数据的利用方式和正确而实用的设计方针。然而，象这种必须满足于疲劳强度设计的综合性指导书籍，目前在日本国内可以说还没有。

鉴于上述原因，日本材料学会疲劳分会计划出版关于疲劳强度设计的指导性手册，决定由分会各委员分工执笔。经过多年的反复审订，今天，这本《金属材料疲劳设计便览》终于出版发行

了。

担任本书编写和编辑工作的诸君都是日本这方面的权威人士，本书内容是他们多年的研究成果和经验总结。在此，谨向做出了献身性的努力和志趣崇高的各位作者致以深切的感谢和敬意。

本书不仅是活跃在工业界的设计者、科技人员的实用指导性手册，而且对研究人员和教师亦将有所帮助。另外，它还可作为学生的一部极好的参考书。我希望这本书能被读者作为一部常用的工具书随身携带，使其对工业的发展发挥应有的作用。

编辑委员长 山田敏郎

目 录

第 1 章 许用应力	参考文献	28
1.1 材料的疲劳强度	1	
1.1.1 S—N 曲线	1	第 2 章 形状、尺寸
(A) S—N 曲线	1	30
(B) 有限寿命持久极限	3	2.1 形状、尺寸对疲劳强度的影响
(C) 有平均应力的 S—N 曲线	3	30
(D) ε —N 曲线	4	2.2 尺寸效应
(E) S—N 曲线的分散性	4	31
(F) P—S—N 曲线	5	2.2.1 尺寸效应的意义和问题
1.1.2 对称循环疲劳极限	5	31
1.1.3 疲劳极限曲线	8	2.2.2 光滑试件及缺口试件的尺寸效应
1.2 安全系数	11	34
1.2.1 经验安全系数	11	2.2.3 尺寸效应估算法
1.2.2 统计安全系数	13	36
(A) 疲劳极限的破坏概率	13	(A) 光滑试件
(B) 疲劳极限的实验值	14	36
(C) 安全系数	15	(B) 缺口试件
1.2.3 寿命、P—S—N 曲线	19	37
1.2.4 失效安全 (Fail Safe)	24	2.2.4 工业尺寸效应
		37
		(A) 坯料的压延比、锻造比
		37
		(B) 表面加工、表面处理
		38
		(C) 环境
		38
		(D) 试验值的分散性
		39
		2.3 应力集中系数、应变集中系数
		40
		2.3.1 应力集中系数
		40
		2.3.2 应力梯度
		53
		2.3.3 第二主应力的影响
		55

2.3.4 应变集中系数.....	56	3.1 加工和残余应力.....	107
2.4 缺口效应.....	59	3.2 表面加工.....	113
2.4.1 有效应力集中系 数.....	59	3.2.1 各种加工方法与材料 的拉伸强度.....	114
2.4.2 缺口材料的疲劳强 度、有效应力集中 系数和尺寸效应...	62	3.2.2 表面光洁度与表面加 工系数.....	115
2.4.3 有效应力集中系数的 求法.....	64	3.2.3 各种加工.....	116
(A) 有效应力集中系数的计 算图表.....	65	3.3 塑性加工.....	117
(B) 石桥法.....	65	3.4 镀层.....	124
(C) Siebel公式.....	73	3.4.1 镀铬.....	125
(D) Moore公式.....	73	3.4.2 镀镍.....	126
(E) 饭田法.....	75	3.4.3 其它镀层.....	127
(F) 缺口敏感系数.....	75	3.5 表面处理.....	128
2.4.4 双重缺口.....	76	3.5.1 经表面处理材料的疲 劳极限求解法.....	129
2.4.5 减载槽.....	80	3.5.2 高频淬火、扩散渗碳 处理.....	133
2.5 疲劳裂纹.....	82	(A) 应力集中系数和疲劳极 限的关系.....	133
2.5.1 非扩展裂纹和疲劳强 度.....	82	(B) 含碳量和疲劳极限的 关系.....	134
2.5.2 疲劳裂纹的扩展速 度.....	88	(C) 回火温度和疲劳极限 的关系.....	135
2.5.3 裂纹和应力强度因 子.....	91	(D) 加热时间的影响.....	136
(A) 裂纹尖端的应力分 布.....	91	(E) 尺寸效应的影响.....	137
(B) 应力强度因子的资 料.....	94	(F) 叠加波形、变动载荷 的影响.....	138
参考文献.....	102	3.5.3 渗碳淬火.....	140
		3.5.4 其它.....	141
		参考文献.....	143
第3章 加工.....	107	第4章 组合应力和平均	

应力·····	147	6.2.3 交变变动载荷的疲劳 寿命·····	176
4.1 交变应力的组合·····	147	6.2.4 直线损伤法则的 修正·····	177
4.1.1 弯扭组合·····	147	(A) Corten—Dolan 法·····	177
4.1.2 一般组合应力·····	148	(B) Freudenthal—Heller 法·····	177
4.1.3 缺口的影响·····	150	(C) 河本、中川法·····	178
4.1.4 相位差·····	151	6.3 平均应力的影响·····	178
4.1.5 其它·····	153	6.4 工作应力波的应力频率计 算法·····	180
4.2 交变应力和静态应力的 组合·····	153	6.4.1 峰值计算法·····	180
4.2.1 同种交变应力和静态 应力的组合(平均 应力)·····	153	(A) 平均应力水平的最大 峰值计算法·····	180
4.2.2 交变应力和异类静态 应力的组合·····	156	(B) 检测无效波幅的峰值 计算法·····	181
4.2.3 变形·····	157	(C) 对应峰值计算法·····	181
4.2.4 缺口的影响·····	157	(D) P _x 法·····	182
参考文献·····	159	6.4.2 波幅计算法·····	182
第5章 疲劳变形·····	160	(A) 波幅对 计 算 法·····	183
5.1 滞后的疲劳屈服·····	160	(B) 波幅对平均值计 算法·····	183
5.2 静态屈服点和疲劳屈服 点·····	161	(C) 全波法·····	184
5.3 疲劳的鲍辛格效应·····	163	(D) 雨滴流计算法·····	184
5.4 疲劳变形极限曲线·····	166	6.5 其它寿命估算法·····	185
5.5 疲劳变形法则·····	170	(A) 等价交变次数法·····	185
参考文献·····	172	(B) 加速试验法·····	186
第6章 实际工作载荷·····	173	(C) 能谱法·····	186
6.1 前言·····	173	参考文献·····	189
6.2 疲劳寿命计算法·····	174	第7章 腐蚀疲劳·····	191
6.2.1 疲劳曲线公式·····	174		
6.2.2 直线损伤法则·····	176		

7.1 腐蚀疲劳.....	191	8.2.1 循环速度效应.....	221
7.2 腐蚀疲劳强度.....	192	(A) 循环速度的影响.....	221
7.2.1 空气中的腐蚀疲劳强度.....	192	(B) 应变保持时间的影响.....	223
7.2.2 油环境中的腐蚀疲劳强度.....	193	8.2.2 蠕变和疲劳的相互作用.....	224
7.2.3 中性腐蚀环境中的疲劳强度.....	196	(A) 直线损伤法则.....	225
7.2.4 酸性、碱性、腐蚀环境中的疲劳强度.....	199	(B) 非线性损伤法则.....	226
7.3 应力条件.....	200	8.2.3 缺口效应.....	227
7.3.1 速度效应.....	200	8.2.4 气氛.....	231
7.3.2 应力种类.....	206	8.2.5 运转中止.....	233
7.3.3 实际工作载荷.....	206	8.2.6 表面处理.....	233
7.4 表面处理.....	207	8.2.7 材料组织.....	236
7.5 防腐效果.....	209	8.3 应力、温度变化时的高温疲劳.....	238
参考文献.....	212	8.4 有平均应力时的高温疲劳.....	240
第8章 高温疲劳.....	214	8.4.1 疲劳强度.....	240
8.1 金属材料的高温疲劳强度.....	214	8.4.2 疲劳变形.....	243
8.1.1 铸铁的高温疲劳强度.....	215	8.5 热疲劳.....	246
8.1.2 碳钢的高温疲劳强度.....	216	8.6 设计标准.....	248
8.1.3 耐热钢的高温疲劳强度.....	216	8.7 低温疲劳.....	252
8.1.4 耐热合金钢的高温疲劳强度.....	217	8.7.1 各种材料的低温疲劳强度.....	254
8.1.5 轻合金的高温疲劳强度.....	219	8.7.2 缺口的影响.....	259
8.2 影响高温疲劳的因素.....	221	8.7.3 材料组织的影响.....	260
		参考文献.....	260
		第9章 塑性疲劳.....	268
		9.1 塑性疲劳试验的种类和意义.....	269
		9.2 完全对称应变控制的	

低周疲劳强度与静态拉伸特性的相互关系	272	响	320
9.2.1 寿命	272	(C) 轴的拉伸强度与轮毂材质的影响	321
9.2.2 安全交变应变控制疲劳强度表式	274	(D) 尺寸效应	322
9.3 应变控制低周疲劳引起的材质变化	277	(E) 表面处理和润滑的影响	323
9.4 影响应变控制低周疲劳强度的因素	278	(F) 表面硬化法的影响	324
9.4.1 应变比或平均应变	278	10.2.5 结束语	330
9.4.2 低温	281	10.3 焊接接头和疲劳设计	330
9.5 应变控制低交变次数范围内的累积破损	281	10.3.1 焊缝疲劳强度的一般性质	330
参考文献	290	10.3.2 按局部应力进行疲劳设计	331
第10章 接头	292	10.3.3 按公称应力进行疲劳设计	334
10.1 螺栓、铆钉	292	10.3.4 焊接缺陷的评定	336
10.1.1 螺栓连接	292	10.3.5 改善疲劳强度的措施	340
10.1.2 铆钉连接	303	(A) 降低应力集中	340
10.2 配合	308	(B) 附加残余应力	340
10.2.1 配合实例	308	参考文献	342
10.2.2 配合部倍的应力状态	308	第11章 其它	346
10.2.3 配合轴的疲劳强度	312	11.1 滚动疲劳	346
10.2.4 影响配合轴疲劳强度的因素	313	11.1.1 表面及表面下的应力分布	346
(A) 配合部分形状的影响	314	11.1.2 滚动疲劳的疲劳极限与材料性质的关系	352
(B) 配合面压力的影			

(A) 材料的点蚀疲劳极限.....	352	(A) 滚动速度的影响.....	358
(B) 硬度和疲劳极限的关系.....	354	(B) 滑移率的影响.....	359
(C) 表面层塑性流动和加工硬化的影响.....	355	11.2 压力容器.....	359
11.1.3 润滑油的影响.....	356	11.2.1 喷嘴的内压疲劳强度.....	360
(A) 润滑油粘度的影响.....	356	11.2.2 螺旋焊接管以及联接板焊接管的内压疲劳强度.....	364
(B) 给油量的影响.....	357	11.2.3 容器结构的低循环疲劳设计标准.....	366
11.1.4 接触体形状和表面光洁度的影响.....	357	11.3 旋转圆盘.....	367
(A) 曲率和形状的影响.....	357	11.3.1 塑性疲劳破坏.....	368
(B) 表面光洁度的影响.....	357	11.3.2 累积塑性变形引起的不稳定破坏.....	368
11.1.5 运转条件的影响.....		参考文献.....	369

第 1 章 许用应力

1.1 材料的疲劳强度

1.1.1 S—N 曲线

(A) S—N 曲线

为了测得材料在交变载荷作用下的强度值,人们把材料加工成规定尺寸的试件,对其施加交变载荷,然后测量试件破坏时的应力循环次数,这种试验称为疲劳试验。交变载荷有拉伸压缩交变载荷、弯曲交变载荷、扭转交变载荷等数种。当试验机施加一定波形的交变载荷时、试件上产生的应力波形如图1.1所示,它在最小应力 $\sigma_{\min}$ 和最大应力 $\sigma_{\max}$ 之间变化。在这种情况下,将下式中的 σ_a 称为应力幅度, σ_m 称为平均应力。

$$\sigma_a = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (1.1)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{2} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (1.2)$$

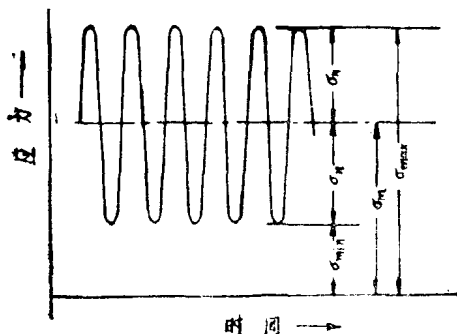


图1.1 交变应力

称平均应力为零时的应力循环为对称循环。疲劳试验通常是在对称循环下进行的。

交变应力(应力幅度或最大应力)和达到破坏(发生裂纹或断裂)时的循环次数之间的关系曲线称为S—N曲线。通常,作为纵坐

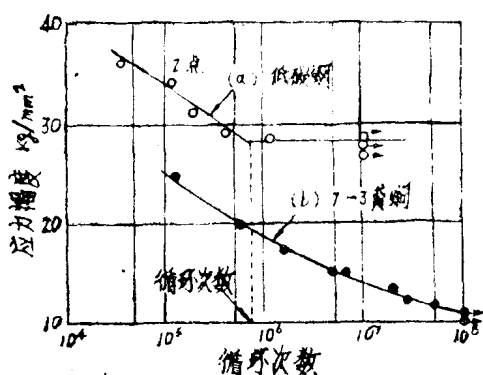


图1.2 S—N曲线(旋转弯曲)

段的交变应力用等间隔的刻度表示, 作为横坐标的循环次数用对数坐标表示。有时应力坐标也采用对数坐标。

当循环次数在 $10^6 \sim 10^7$ 以上时, 钢、铁材料的疲劳曲线上出现明显的水平段, 此水平段所对应的应力称为疲劳极限或持久极限[图1.2 (a)]。有限寿命范围的倾斜段与水平段相交处的循环次数称为循环基数。钢铁的循环基数大多在 $10^6 \sim 10^7$ 之间。

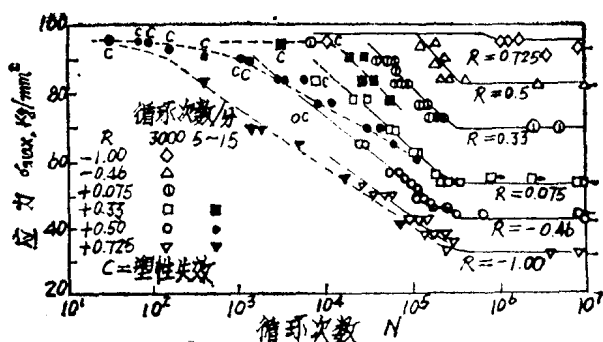


图1.3 以循环特性R为参数的疲劳曲线 (W. J. Bell等) 18—8 不锈钢, 拉伸压缩载荷

当试件承受轴向应力, 如脉动拉伸、脉动压缩或旋转弯曲等载荷时, 疲劳曲线的低循环次数范围成为如图1.3所示的水平段, 显示出接近于拉伸或弯曲静强度值之趋势¹⁾。而在扭转交变载荷的情况下, 不出现这种趋势。

用较少的试验数据绘制疲劳曲线时, 习惯上将有限寿命看作

是通过实验点中心的平滑曲线或直线。在能判定材料存在水平段（如钢铁等）的条件下，可作出表示疲劳极限的水平线。在作水平线时，要使低于该水平线所表示的应力没有产生断裂的数据。

对于某一应力水平下进行过试验而未破坏的试样，改变应力再试验到破坏，在表示前后试验的终始两点间可用虚线连接，以表示应力水平改变的试验。在最终数据中包含了前面试验的影响，这一点必须引起注意。

（B）有限寿命持久极限

在S—N曲线的有限寿命范围（倾斜段）内，把对应于给定循环次数的应力值称为有限寿命持久极限，用 $\sigma(10^6)$ 表示，括号内的值为给定循环次数。

由于飞机、车辆等需要作轻型设计，压力容器等存在低循环疲劳*问题，因而要进行定期检查，或者推算承受变动应力的材料的寿命等。由于这些原因，近年来有限寿命持久极限引起了人们的重视。

给定循环次数（寿命）的有限寿命持久极限，除了可由给定循环次数的纵线与S—N曲线交点处的应力值确定外，还可采用普罗比特试验方法²⁾或斯提阿克斯试验方法³⁾确定。

（C）有平均应力的S—N曲线

为了画出有平均应力时的疲劳曲线，可考虑采用如下试验方法：

（1）设平均应力 σ_m 不变，求出单根S—N曲线，再以 σ_m 为参数求出多条S—N曲线。

（2）设循环特性 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ 不变，求出单根S—N曲线，以R为参数画出S—N曲线族。

（3）求出用相同的动载增量 $A = \sigma_a/\sigma_m$ 为参数的S—N曲线族。

• 参照第10章

用(1)的方法可作出应力幅度—循环次数(σ_a-N)曲线;用(2)和(3)的方法,一般是作 $\sigma_{\max}-N$ 曲线。图1.3是方法(2)的例子。

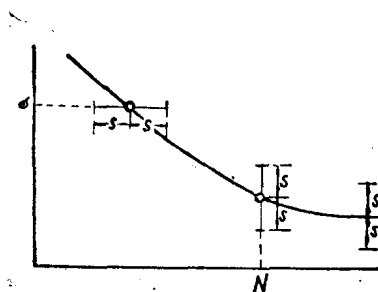
在脉动循环试验中,因为取 $\sigma_{\min}=0$,所以作出的是 $\sigma_{\max}-N$ 曲线图。但是,当取 $\sigma_{\min}$ 为不等于零的小应力时,习惯上将应力幅度的2倍作为纵坐标。

(D) $\epsilon-N$ 曲线

在压力容器、承受压力的飞机机翼、导弹和火箭发射台等或反复加热冷却的热疲劳方面,存在低循环疲劳的问题。在低循环疲劳范围内,塑性变形有很大的影响。对于这种情况,可采用会应变幅值或塑性应变幅值与断裂时循环次数的双对数曲线(应变—循环次数曲线)。

(E) $S-N$ 曲线的分散性

疲劳试验数据本身存在分散性。例如以一定的应力幅度进行多次疲劳试验,由于寿命(破坏时循环次数)在某一范围内波动,所以需要把分散性表示出来。当应力水平比疲劳极限大得多时,寿命的密度分布往往近似于对数正态分布。此时,如图1.4所表示的那样,在应力幅度 σ_a 的寿命中间值或平均值(标有符号0)的两侧,用短线段 S 表示标准偏差。若有必要,也可用 $2S$ 、 $3S$ 线段表示。



当应力水平接近疲劳极限时,寿命密度分布由对数正态分布变为近似于极值分布³⁾。

疲劳极限或有限寿命疲劳极限的分散性如图1.4所示,在疲劳极限水平的或有限寿命疲劳极限中间值的上

图1.4 $S-N$ 曲线中分散性的表示

下两侧，用纵向线段表示其标准偏差 σ 的大小。

(F) P—S—N 曲线

此外，上述某一应力水平时寿命的分散性，也可以考虑用破坏概率（或非破坏概率）来表示。例如，寿命的中间值是一半试件发生破坏（即破坏概率 $P = 50\%$ ）的寿命值。这样，把各破坏概率（如 $P = 1, 5, 10, \dots\%$ ）的位置点连接起来，画出的曲线称为概率疲劳曲线（参照 1、2、3 概率疲劳曲线）。

1.1.2 对称循环疲劳极限

在对称交变应力下进行试验，所得的疲劳极限，称为对称循环疲劳极限。对称循环疲劳极限除了随拉伸、压缩、弯曲或扭转等载荷不同而变化外，还随试件表面的加工精度、棒料的直径、板材的厚度而变化。并且，当存在实际机械零件那样形状突变的部位即有缺口时，它就显著降低。通常所说的材料疲劳极限，是采用商品试验机，以标准证件，在标准状态下进行试验所得之值来表示的。所谓标准试件，就是直径为 $5 \sim 14\text{mm}$ 左右，表面用 02 号砂纸磨光的无缺口、刻痕等应力集中部位的试件。所谓标准状态，就是空气中、室温下的状态。金属材料的对称疲劳极限，在由同一炉材料制成的试件的情况下，其分散性是颇小的。但是同一炉材料，当进行正火、淬火、回火等热处理后，疲劳极限值的分散性却往往增大。这是由于热处理不均匀性所引起的。同一种材料，由于冶炼方法不同，疲劳强度的分散性也会不同。

图 1.5~1.7 是将国内外碳钢和合金钢的有关数据，以图示的方式，表示拉伸强度和旋转弯曲疲劳极限、对称循环拉伸压缩疲劳极限、对称循环扭转疲劳极限之间的关系及其分散范围的曲线图。由这些图可知，即使是拉伸强度相同的钢材，疲劳极限的分散性也相当大。这些图给出了拉伸强度，对估计对称循环疲劳极

- 疲劳强度或有限寿命疲劳强度的标准偏差是根据普洛比特法或斯提克斯法进行统计试验计算出来的²⁾。