

疲劳试验方法手册

〔苏〕Л.М.什科利尼克 著

机械工业出版社



75 302.3-62

S

34

疲劳试验方法手册

〔苏〕Л.М.什科利尼克 著

陈玉琨 战嘉禾 译

赵少汴 校

6102/16



机械工业出版社

210276

本手册较系统地介绍了金属材料、机器零件疲劳强度特性的试验方法和试验设备。包括对加载条件, 试样, 评定准则、断口分析, 低温和高温试验, 低周疲劳, 高频疲劳, 腐蚀疲劳, 冲击疲劳, 热疲劳, 接触疲劳等, 并对名词术语进行了系统的整理。

本手册可供工厂和科研、设计部门的工程技术人员参考, 对高等院校有关专业的师生也有参考价值。

МЕТОДИКА УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ СПРАВОЧНИК

Л. М. ШКОЛЬНИК

МОСКВА «МЕТАЛЛУРГИЯ»

1978

* * *

疲劳试验方法手册

〔苏〕 Л. М. 什科利尼克 著

陈玉琨 战嘉禾 译

赵少汴 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $11\frac{7}{8}$ · 字数 258 千字

1983年4月北京第一版·1983年4月北京第一次印刷

印数 00,001—12,100 · 定价 1.85 元

*

统一书号: 15033 · 5475

前 言

要加快科学技术的发展速度，就必须改进各类产品的质量，提高材料资源的有效利用率，并尽可能降低产品的材料消耗。采用先进的结构设计和工艺过程，要求更深入的综合的了解材料的性能，其中包括循环载荷作用下的强度问题。本疲劳试验方法手册就是适应这一研究方向而编写的。

金属的疲劳是一个在交变应力作用下损伤逐渐累积、引起金属的性质变化、产生裂纹和破坏的过程。疲劳强度是金属抗疲劳的性质。

大多数机器、运输工具和其它结构的零件在使用过程中承受着周期性交变载荷的作用。因此，约有 90% 的零件损坏是和疲劳裂纹的产生和扩展分不开的。疲劳裂纹是脆性破坏的先导，这也正是其所以危险的主要原因之一。疲劳破坏时影响其强度特性的因素很多，远非任何其它型式的破坏所能比拟。其中，主要的因素有：材料性质和制造工艺、零件的结构、加载方式、与零件相接触的介质等。

疲劳极限不仅与材料的成分、组织结构、热处理和冷加工规范、试验温度等有关，而且与试件尺寸、应力状态、应力集中、试件表面状况、粗糙程度、试验介质、与其它零件的相互配合等有关。而且在疲劳试验时，如疲劳特性为离散分布，则情况更加复杂。

由于影响疲劳强度（也称循环强度）的因素很多，就要研制出许多种相应的疲劳试验方法。

IV

目前,改进机械性能测定方法的趋势向两个方向发展:

1. 金属试样试验方法有了相当的发展。主要着重于选择一个能够对金属材料的使用可靠性进行全面评价(结构强度评定)的综合性能。

2. 直接测定零件适应性的试验方法。在载荷谱、介质、温度等尽可能接近使用条件的情况下进行试验。

疲劳试验的主要内容是测定:疲劳极限;疲劳寿命;对应力集中的敏感性;循环载荷的损伤度;裂纹生长速率;出现裂纹前的循环数;剩余寿命的长短;滞后回线特性;循环加载过程中试样变形的变化;裂纹张开位移的变化;对介质、温度、频率、非对称循环、过载、尺寸效应等的敏感性。

现代的试验设计方法允许采用最少数量的试验完成同一具体试验任务。试样试验就象零件一样也应在尽可能接近实际使用的条件下进行。这样,既可以取得提高疲劳强度的论证资料,又可以大大削减实物试验的工作量,为判断零件的疲劳强度创造前提。关键的问题是保证试验条件的可比性。试件的模拟常常难于准确符合零件的残余应力状态、组织和机械性能的变化梯度、尺寸效应的估测以及介质等情况。因此,只有在接近实际工况的条件下对零件本身进行试验才能得到疲劳极限的真值。

目前,除了进行恒幅循环载荷的高周(由 10^5 到 10^7 甚至更多的循环次数)试验以外,低周变幅循环载荷和复合加载的疲劳试验也有了很大发展。在广泛的载荷参数范围进行这些试验的迫切需要促进了国内外现行试验方法的进一步完善和试验技术的发展。

材料力学在疲劳破坏方面的研究有以下几方面:

1. 规定疲劳破坏的力学准则,与此相关在试验过程中

确定受力、变形和能量的特性；

2. 研究损伤的累积，与此相关，实行各种载荷谱的程序加载和随机加载；

3. 在恒幅、程序和随机载荷作用下获取疲劳特性和疲劳图；

4. 研究恒幅载荷和变幅载荷作用下的裂纹发展动力学；

5. 研究发现疲劳损伤的物理方法（X射线透视、超声探伤、磁力探伤等）；

6. 在各种不同的应力集中、非对称循环和介质作用下测定疲劳强度特性。

疲劳特性用于：选择金属的成分、结构、强化方法和加工方法；明确生产工艺的影响；设计机器零部件；按疲劳性质检查成品和半成品的金属质量；确定疲劳破坏的部位和制定修复工艺；确定零件的使用寿命；确定检查和探伤的周期；确定经过一段工作后或产生疲劳损伤时的剩余强度；检验重要零件使用前的状况等。

目 录

前言

第一篇 疲劳强度特性及其测定方法

第一章 在循环载荷作用下金属损伤的评定方法	1
第一节 加载条件特性	1
应力循环的类型	10
加载方式	11
疲劳曲线的类型、疲劳破坏图	13
应力状态的类型	15
循环的波形	16
不对称系数	17
试样在机器上的安装、加载及试验中断的影响	20
第二节 试验用的试样	22
一般要求	22
尺寸因素	24
横截面形状	28
弯矩力臂的影响	28
平板试样的宽度	29
防止试样端部断裂	29
组合试样	30
第三节 循环损伤的评定	31
强度准则	31
变形准则	38
物理准则	41

第四节 断口分析	44
第二章 疲劳强度特性的测定方法	51
第一节 一般特性	51
第二节 多试样法及数据的统计处理	53
绘制疲劳曲线	53
疲劳强度的统计评定疲劳寿命的分布	57
疲劳极限的分布	66
统计法确定疲劳极限	69
所需试样数量的估测	77
第三节 快速估算法 (少试样法)	80
第四节 间接法	113
第五节 缩短试验时间	124
第三章 应力集中敏感性的评定方法	138
第一节 概述	138
第二节 评定准则	140
第三节 试样	148
一般要求	148
实心试样的应力集中	152
空心试样的应力集中	155
疲劳裂纹——应力集中器	158
关于切口的极限锐度	158
切口的模拟	163
第四节 循环韧性	167
第四章 低温试验和高温试验	172
第一节 低温试验	172
概述	172
设备	174
第二节 高温试验	177
概述	177

设备	179
----------	-----

第二篇 疲劳试验设备

第五章 试样的试验设备	191
第一节 试样旋转弯曲试验机	191
第二节 平板试样弯曲试验机	196
第三节 拉-压试验机	201
第四节 扭转试验机	205
第五节 复合试验机	208
第六节 程序控制试验机	211
第七节 双频加载与变频试验机	215
第八节 微型疲劳试验机	221
第六章 通用设备	223
第一节 液压激振试验机	223
第二节 惯性载荷激振试验机	232
第三节 曲柄激振试验机	234
第四节 电动激振试验机	237
第五节 国外公司的试验机	242
第七章 实际零件的试验方法	255
第一节 试验的特点	255
第二节 建筑结构、梁架、壳体和其它大尺寸零件的试验	258
第三节 飞机结构的试验	265
第四节 大截面板形零件的试验	265
第五节 大尺寸轴类零件的试验	267
第六节 齿轮试验	272
第七节 透平和压缩机叶片的试验	273
第八节 弹簧和板簧的试验	274
第九节 钢筋、金属丝、链条和履带板的试验	276
第十节 螺纹连接的试验	279

第十一节 其它零部件的试验	281
第十二节 程序试验台	284

第三篇 特殊加载方式的疲劳试验方法

第八章 低周疲劳	286
第一节 概述	286
第二节 试验方法	288
第三节 设备	295
专用试验机	296
静载试验机的控制附件	298
第九章 高频疲劳	302
第一节 试验方法	302
第二节 设备	303
第十章 腐蚀疲劳试验	305
第一节 概述	305
第二节 设备	307
一般要求	307
在液态介质中的试验装置	307
在真空和气体中的试验装置	312
摩擦-腐蚀作用下的试验装置	314
第三节 内、外静液压下的疲劳	316
第十一章 冲击疲劳试验	316
第一节 概述	316
第二节 多冲试验装置	319
第三节 平稳载荷和冲击载荷的复合试验装置	323
第十二章 热疲劳和热机械疲劳	325
第一节 概述	325
第二节 试验方法	325
第三节 设备	331

第十三章 接触疲劳试验	337
第一节 概述	337
第二节 设备	340
参考文献	346
附录	356

第一篇 疲劳强度特性及其 测定方法

第一章 在循环载荷作用下金属损伤的评定方法

第一节 加载条件特性

循环载荷下的极限强度比静载低很多，疲劳破坏可以在低于屈服极限的应力下产生。

高周疲劳的特点是金属体内通常没有宏观变形。在零件整体弹性变形的同时，在最不利定向的晶粒内产生了局部的重复弹-塑性变形，及与其伴随的循环冷作。当达到临界晶格畸变度以后，发生了原子键的断裂。

裂纹的萌生与位错在障碍物处或沿滑移带堆积产生的巨大拉应力、空位的聚合和滑移带上的挤出和挤入（挤出厚度小于1微米的薄金属瓣）有关。而疲劳裂纹的生长已知有两种主要方式：第一种方式是裂纹的反复张开和闭合；第二种是微裂纹或气孔和主裂纹相汇合。

以下所述为弯曲和拉-压疲劳试验中所用的特性。这些特性在扭转试验时以符号 τ 代替 σ 后仍然有效，在刚性载荷下以变形 ϵ 代替 σ 后也同样有效。

所述的疲劳特性在不同的宏观裂纹发展阶段或完全破坏

时进行测定。确定疲劳极限和绘制疲劳曲线的主要准则为完全破坏或表面上出现 0.5~1 毫米长的宏观裂纹。作为补充准则可应用载荷或频率的迅速下降, 变形的显著增长, 温度的急剧上升, 以及采用电磁、超声和其它方法。当然, 在同一组试验中准则应该一致。

交变载荷特性

应力循环——在一个周期变化过程中交变应力连续值的总和。

循环周期 T (秒)——一个应力循环的时间。

循环的最大应力 σ_{max} 百万牛顿/米²(公斤力/毫米²)——以代数值计的循环的最大应力, 等于循环平均应力和振幅的代数和。

循环的最小应力 σ_{min} 百万牛顿/米²(公斤力/毫米²)——以代数值计的循环的最小应力, 等于循环平均应力和振幅的代数差。

循环的平均应力 σ_m 百万牛顿/米²(公斤力/毫米²)——应力循环的静载分量 (正或负), 等于循环最大应力和循环最小应力代数和之半。

循环的应力振幅 σ_a 百万牛顿/米²(公斤力/毫米²)——应力循环交变分量的最大值, 等于循环最大应力和循环最小应力代数差之半。

循环的应力振程 $2\sigma_a$ 百万牛顿/米²(公斤力/毫米²)——循环最大应力和循环最小应力的代数差, 等于振幅的两倍。

循环不对称系数 R_a ——循环的不对称程度特性, 等于最小应力与最大应力的比值 (带有正负号)。

对称应力循环——最大和最小应力大小相等、符号相反的循环。

非对称循环——最大和最小应力绝对值不等的循环。

变号循环——应力的数值和符号都变化的循环。

同号循环——仅应力数值变化的循环。

脉动循环——应力由零变到最大值或者由零变到最小值的同号循环。

试验基数（基本的循环次数） N_b ——疲劳试验时预定的最大应力循环次数。

相似循环 $\sigma'_{max}/\sigma''_{max} = \sigma'_m/\sigma''_m = \sigma'_a/\sigma''_a$ ——最大应力比值与相应的平均应力比值和振幅比值相等的循环。

加载频率 f 赫芝·分⁻¹——单位时间的应力循环变化次数。

名义应力 σ_x 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²)——按材料力学公式计算出的应力，不考虑应力集中、残余应力和变形过程中的应力再分配（弯曲时 $\sigma = M_x/W_{oc}$ ；扭转时 $\tau = M_x/W_p$ ；拉-压时 $\sigma = P/F$ ）。

动载系数 $\delta_\sigma = \sigma_a/\sigma_m$ ——应力振幅和平均应力（循环的静载分量）的比值。

应力强度因子 K 百万牛顿/米^{3/2} (公斤力/毫米^{3/2})——裂纹尖的应力状态特性。

应力强度因子的最大值 K_{max} 百万牛顿/米^{3/2} (公斤力/毫米^{3/2})——载荷循环变化时应力强度因子的最大值。

应力强度因子的最小值 K_{min} 百万牛顿/米^{3/2} (公斤力/毫米^{3/2})——载荷循环变化时应力强度因子的最小值。

循环的应力强度振程 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ ——最大应力强度因子和最小应力强度因子之差。

应力强度振程的有效值 $\Delta K_{\phi\phi}$ 百万牛顿/米^{3/2} (公斤力/毫米^{3/2})——按断裂分析结果得出的应力强度振程。

断裂韧性： K_{IC} 百万牛顿/米^{3/2} (公斤力/毫米^{3/2})——平面应

力状态下的断裂韧性。

K_{Ic} 百万牛顿/米^{3/2} (公斤力/毫米^{3/2}) —— 平面应变状态下的断裂韧性。

K_{Isc} 百万牛顿/米^{3/2} (公斤力/毫米^{3/2}) —— 腐蚀开裂下的断裂韧性。

应力状态的刚度——切应力和法向拉应力的比值 (比值越大, 应力状态越软)。

应力梯度 G 1/毫米² —— 应力状态的不均匀程度 (沿截面、沿长度) 特性。

极限状态特性

疲劳——在交变应力的作用下, 金属损伤逐渐累积, 产生性质变化, 形成裂纹和破坏的过程。

高周疲劳——产生宏观裂纹或完全破坏的循环次数高于 $5 \cdot 10^4$ 的金属疲劳。

低周疲劳——在低于 $5 \cdot 10^4$ 次循环的弹-塑性范围产生宏观裂纹或完全破坏的金属疲劳 (按循环次数条件地区分为高周疲劳和低周疲劳。也可按应力水平、断口型式和其它准则区分)。

疲劳寿命 N (循环次数) —— 在应力高于疲劳极限下的金属疲劳特性, 当以形成给定长度的裂纹为失效准则时用 N_r 表示, 当以最终破坏为失效准则时用 N 表示。

疲劳强度——金属抗疲劳的性能。

疲劳极限 σ_R 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) —— 在给定的寿命下, 循环不对称系数为 R 时的循环最大应力值 (有水平地段的疲劳曲线为物理疲劳极限; 有水平渐近线的疲劳曲线为条件疲劳极限)。

对称循环的疲劳极限 σ_{-1} 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) ——

$\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$ 而符号相反时的疲劳极限。

脉动循环下的疲劳极限 σ_0 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) ——
 $\sigma_{\min}$ 等于或接近于零时的疲劳极限。

轴向载荷下的疲劳极限 σ_{-1p} 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²)
 ——拉-压时的疲劳极限 (σ_{-1} 表示弯曲疲劳极限)。

应力集中下的疲劳极限 σ_{-1K} 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²)
 ——有应力集中试样的弯曲疲劳极限 (轴向载荷下为 σ_{-1pK})。

有限寿命疲劳极限 σ_N 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) ——试
 验基数为 N 时的疲劳极限 (高于 σ_R)。

带裂纹试样的疲劳极限 σ_{-1T} 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²)
 ——给定尺寸的裂纹不再发展时的循环最大应力值。

腐蚀疲劳极限 σ_{-1Kop} 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) ——应力
 和介质同时作用下, 试验基数为 N 次循环时的疲劳极限。

接触疲劳极限 $(\sigma_{z\max})_R$ 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) ——
 交变接触载荷下的疲劳极限。

摩擦-腐蚀疲劳极限 $\sigma_{-1\phi}$ 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) ——交
 变应力和摩擦-腐蚀同时作用下循环基数为 N 时的疲劳极限。

折断应力 (破坏应力) σ_R 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²) ——
 当疲劳裂纹发展到破坏的时刻, 在试样剩余截面上的最大名义应力。

疲劳曲线转折点的循环次数 N_0 ——疲劳曲线变为水平
 段 (物理疲劳极限) 的转折点的横座标。

裂纹形成寿命 N_T ——产生预定尺寸裂纹的循环次数。

尚存寿命 (剩余寿命) N_* ——从裂纹形成到破坏时刻
 的循环次数。

疲劳寿命 $N = N_T + N_*$ ——由开始试验到完全破坏的总
 循环次数。

裂纹生长速率 v 微米/循环——一个循环中裂纹增加的长度。

对数裂纹生长速率 v_{lg} ——裂纹生长速率对数的增长。

裂纹尺寸 a ——表面裂纹的深度或贯穿裂纹的长度之半。

临界疲劳裂纹尺寸 a_c (毫米)——在循环载荷下开始扩展并形成应力集中的裂纹尺寸 (过渡到自行破坏的裂纹尺寸为第二种型式的临界裂纹尺寸)。

疲劳裂纹深度 l_{rp} (毫米)——断口中疲劳裂纹扩展区的深度。

相对疲劳裂纹深度 $l_{rp}/d_{p.c}$ ——疲劳裂纹发展区的深度与试样折断处工作截面的比值 ($d_{p.c}$ ——试样工作截面的直径)。

最小寿命 N_x ——试样不破坏的循环次数 (破坏率等于零)。

疲劳曲线——表示循环应力最大值或振幅值与寿命之间的特征关系的线图。

循环极限应力 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²)——疲劳极限时的最大和最小应力。

循环的极限振幅 百万牛顿/米² (公斤力/毫米²)——疲劳极限时的应力振幅。

极限应力图——在给定寿命下, 循环极限应力值与平均应力值之间的特征关系线图。

极限振幅图——在给定寿命下, 极限振幅值与循环平均应力值之间的特征关系线图。

循环变形图——在循环应变时, 应力与变形之间的关系。

寿命分布曲线——在给定的振幅和循环平均应力下根据