

疲劳性能 测试

国防工业出版社



荫

疲劳性能测试

高镇同 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书根据现代国内外材料和构件疲劳试验的情况, 针对我国航空工业和一般机械工业发展的需要, 介绍了几种常用的疲劳性能测试方法及其数据处理方法。对典型疲劳试件的制备也作了简短的说明。为了处理数据时方便起见, 书末备有所需的数字计算用表和统计用表。

本书可供高等院校疲劳专业的数学参考用, 也可供从事疲劳研究的试验人员和设计人员参考。

参加本书编写的有: 高镇同(第一、三、五、六、七、八、九章); 黄学增(第二章); 崔德瑜(第四章)。

疲 劳 性 能 测 试

高 镇 同 主 编

*

国防工业出版社出版

总发行所北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张7 3/8 159千字

1980年1月第一版 1980年1月第一次印刷 印数: 00,001—10,000册

统一书号: 15034·1860 定价: 0.78元

前 言

本书主要是参照北京航空学院材料力学教研室集体编写的“疲劳试验”讲义写成。这次修订对原讲义作了重新的编排和补充,增加了疲劳统计分析的基础知识、筛选试验、秩和检验、最少试件个数的选取、小子样实际构件 $p-S-N$ 曲线的测定以及可疑观测值的取舍等问题。

在最近一、二十年中,疲劳性能测试方法有了很大发展,其主要方面是数理统计学在疲劳试验中的应用。因为,有限寿命设计在各工业部门的广泛开展和新工艺、新材料的研制,都要求提供准确可靠的疲劳性能数据,而又由于疲劳试验结果存在很大的分散性,所以,不得不借助数理统计学的方法,来合理地安排试验程序和处理试验结果。

根据现代国内外材料和构件疲劳试验的情况,并针对我国航空工业和一般机械工业发展的需要,本书推荐了五种类型的疲劳性能测试方法及其数据处理方法。这些方法是

(一)常规试验方法

用于测定通用的 $S-N$ 曲线和疲劳极限。

(二)升降法

比较精确地测定疲劳极限。

(三) $p-S-N$ 曲线的测定

$p-S-N$ 曲线指的是具有某一存活率 p 的 $S-N$ 曲线。它主要用于疲劳设计中安全寿命的估算。

(四)对比试验法

用来比较两种不同材料、两种工艺方法或两种构造形式在疲劳性能上是否有显著差异。

(五) 筛选试验法

筛选试验即多组的对比试验。用来比较两种以上材料、工艺或构造形式在疲劳性能上是否有显著差异。

书中所介绍的几种疲劳性能测试方法，都是以数理统计理论为依据的。利用这些方法，可以经济地、有效地提供比较可靠的试验数据，从而供作材料疲劳性能鉴定与寿命估算等方面的使用。为了使各个试验室获得的试验结果，具有“可比性”与“再现性”，除了需要统一的试验方法外，疲劳试件的标准化和规格化也是十分重要的。为此，本书对疲劳试件的制备也作了简短的介绍。

最后应该指出，本书内容没有包括高应力、大应变的低循环疲劳试验方法，也未包括疲劳裂缝扩展的测试方法，但其中有些处理数据的原则还是可资利用的。

编 者 1979.4

目 录

前言

第一章	符号和术语	1
第二章	疲劳试件及其制备	8
§1	概述	8
§2	光滑试件	11
§3	缺口试件	16
§4	疲劳试件的制备	21
附录	应力集中系数图线	23
第三章	疲劳统计分析基础知识	32
§1	引言	32
§2	母体、个体和子样	34
§3	平均值和中值	35
§4	方差和标准差	37
§5	概率	42
§6	直方图和频率曲线	44
§7	正态频率函数	49
§8	标准正态偏量	53
§9	正态概率坐标纸	59
§10	威布尔频率函数	62
§11	威布尔概率坐标纸	64
§12	t 频率函数及其应用	68
第四章	常规试验方法	78
§1	引言	78
§2	常规试验步骤	78

§ 3	测定 $S-N$ 曲线的实例	85
§ 4	成组的常规试验	87
§ 5	子样大小的选择和试验误差	90
§ 6	$S-N$ 曲线的绘制	94
§ 7	利用最小二乘法拟合直线	97
第五章	升降法	104
§ 1	试验原理	104
§ 2	升降法和常规试验法的关连	106
§ 3	升降法试验的实例	108
§ 4	应力增量的选定	110
第六章	安全寿命和 $p-S-N$ 曲线的测定	113
§ 1	引言	113
§ 2	平均秩	114
§ 3	按正态分布理论估计安全寿命	116
§ 4	按威布尔分布理论估计安全寿命	120
§ 5	$p-S-N$ 曲线的绘制	124
§ 6	对于包含有越出试件的安全寿命估计	129
§ 7	$p-N$ 图的直线拟合	132
§ 8	具有置信度的安全寿命	137
§ 9	实际构件 $p-S-N$ 曲线的测定	140
第七章	对比试验	145
§ 1	引言	145
§ 2	成组对比试验	147
§ 3	F 检验	154
§ 4	成对对比试验	156
§ 5	成对对比法和成组对比法的比较	160
§ 6	秩和检验	162
第八章	筛选试验	166
§ 1	引言	166

§ 2 各子样大小相同的情况	168
§ 3 各子样大小不同的情况	177
第九章 可疑观测值的取舍	182
附表	187
附表一 平方表	187
附表二 平方根表	191
附表三 常用对数表	198
附表四 反对数表	202
附表五 存活率估计量	206
附表六 相关系数检验表	207
附表七 u_p 和 p 数值表	208
附表八 χ^2 分布数值表	210
附表九 t 分布数值表	211
附表十 F 分布数值表之一	212
附表十一 F 分布数值表之二	214
附表十二 F 分布数值表之三	216
附表十三 F 分布数值表之四	218
附表十四 F 分布数值表之五	220
附表十五 秩和检验表之一	222
附表十六 秩和检验表之二	223
附表十七 秩和检验表之三	224
参考文献	225

第一章 符号和术语

疲劳试验研究中的一个特点是,符号和专名词众多,涉及范围广泛。并且世界各国沿用的符号和专名词很不相同,即使在一个国家内也不尽统一。这对初学者来说,不能不说是一种障碍。为此,本书参考了美国材料试验学会疲劳委员会所推荐的符号和术语^[1, 27],并结合我国传统的习惯用法,提出如下建议。

(一) 疲劳强度方面

交变应力——按我国“材料力学”教程中的习惯用法,泛指随时间作周期性循环的应力 \ominus (见图 1-1)。在应力循环中各应力分量均采用符号 S , 以示与静应力 σ 相区别。

最大应力 S_{\max} ——在应力循环中具有最大代数值的应

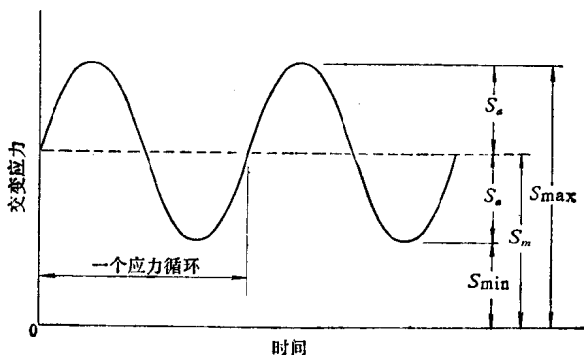


图 1-1 非对称循环

\ominus 有些文献中,交变应力指应力幅。

力(见图 1-1)。以拉应力为正;压应力为负。

最小应力 S_{\min} ——在应力循环中具有最小代数值的应力(见图 1-1)。以拉应力为正;压应力为负。

平均应力 S_m ——最大应力和最小应力的代数平均值(见图 1-1),即

$$S_m = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}$$

应力幅 S_a ——最大应力和最小应力的代数差的一半(见图 1-1),即

$$S_a = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2}$$

S_a 永为正值。

应力比 R ——最小应力与最大应力的代数比值,即

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$$

对称循环——平均应力等于零($S_m = 0$)的应力循环。此时, $S_{\min} = -S_{\max}$, $R = -1$ (见图 1-2)。

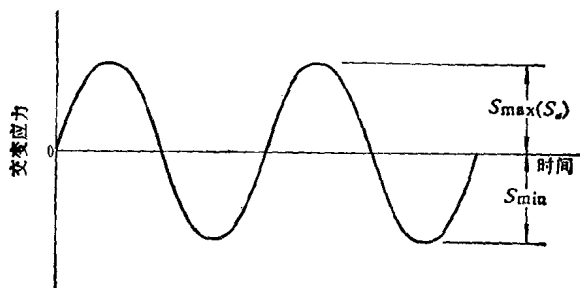


图 1-2 对称循环

脉动循环——最小应力等于零($S_{\min} = 0$)的应力循环。此时, $R = 0$ (见图 1-3)。

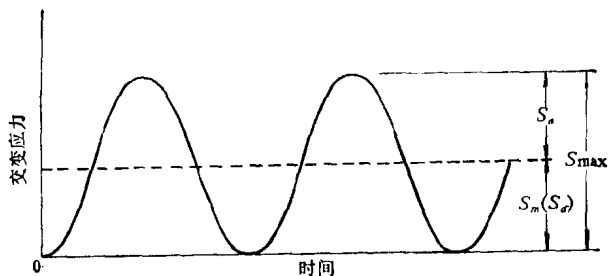


图 1-3 脉动循环

非对称循环——除对称循环外的应力循环统称非对称循环(见图 1-1)。

应力水平——应力水平由一对应力分量 S_{\max} 和 S_{\min} 来确定。在给定应力比 R 或平均应力 S_m 的条件下, 应力水平可用最大应力 S_{\max} 或应力幅 S_a 表示。应力水平的高低取决于试件破坏循环数的多少。破坏循环数越多, 表示施加的应力水平越低。

交变载荷——随时间作周期性循环的载荷(见图 1-4)。

最大载荷 P_{\max} ——在载荷循环中具有最大代数值的载

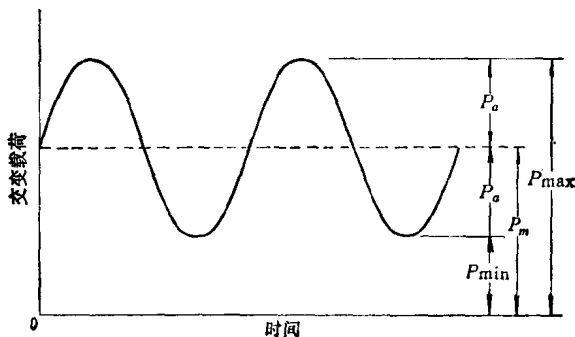


图 1-4

荷(见图 1-4)。对于轴向加载,以拉伸载荷为正;压缩载荷为负。

最小载荷 P_{\min} ——在载荷循环中具有最小代数值的载荷(见图 1-4)。对于轴向加载,以拉伸载荷为正;压缩载荷为负。

平均载荷 P_m ——最大载荷和最小载荷的代数平均值(见图 1-4),即

$$P_m = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}$$

载荷幅值 P_a ——最大载荷和最小载荷的代数差的一半(见图 1-4),即

$$P_a = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2}$$

载荷幅值永为正。

静力破坏载荷 P_b

静正应力 σ

静剪应力 τ

静最大正应力 σ_{\max}

静最大剪应力 τ_{\max}

屈服应力 σ_s

抗拉强度极限 σ_b

局部应力——在圆角、孔洞、沟槽等缺口处,根据弹性力学理论或实验应力分析方法确定的最大正应力 σ_{\max} 或最大剪应力 τ_{\max} 。

名义应力——根据材料力学方法,不计缺口处几何形状不连续性的影响,按净截面积计算出的正应力 σ_n 或剪应力 τ_n 。

应力集中系数 K_t ——局部应力与名义应力的比值, 即

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad \text{或} \quad K_t = \frac{\tau_{\max}}{\tau_n}$$

加载系数 K ——最大载荷 P_{\max} 与破坏载荷 P_b 的比值, 或最大应力 S_{\max} 与强度极限 σ_b 的比值, 即

$$K = \frac{P_{\max}}{P_b} \quad K = \frac{S_{\max}}{\sigma_b}$$

(二) 疲劳统计方面

疲劳寿命 N ——在指定的应力水平下, 试件疲劳破坏前所经受的应力循环数, 即破坏循环数。

对数疲劳寿命 $\lg N$ ——疲劳寿命 N 的对数值。

母体——研究对象的全体。

个体——母体中的一个基本单位。

子样(样本)——母体包含的个体为数众多, 甚至近似无限多。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”。

子样大小(样本容量) n ——子样所包含的个体的数目, 即一个试验组中观测值的个数。

子样平均值 \bar{x} ——一个试验组中各个观测值 x_i 的平均值, 即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

它是母体平均值的估计量。

子样中值——如果一个试验组中的观测值为奇数, 则子样中值就是所有观测值按大小顺序排列居于正中间的数值。如果观测值为偶数, 则子样中值是两个居于中间数值的平均值。它是母体中值的估计量。

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

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

它是母体方差的估计量。

子样标准差 (子样均方根差) s ——子样方差的平方根。它是母体标准差的估计量。

母体参数——确定母体频率分布的一些常数 (通常是未知的), 如母体平均值和母体标准差。

母体平均值 μ ——当子样大小 n 增加时, 子样平均值将越来越接近母体平均值。

母体方差 σ^2 ——当子样大小 n 增加时, 子样方差将越来越接近母体方差。

母体标准差 σ ——母体方差的平方根。

疲劳寿命 N_p 的存活率 p ——母体中个体疲劳寿命大于疲劳寿命 N_p 的概率。

具有存活率 p 的疲劳寿命 N_p —— N_p 的含义是, 母体中有 p 的个体疲劳寿命大于 N_p 。当 p 取较高数值时, 如 99%、99.9% 等, 则 N_p 常称做“安全寿命”。

具有存活率 p 的对数疲劳寿命 x_p ——含义与前类似。

疲劳寿命 N_p 的破坏率 P ——母体中个体疲劳寿命小于疲劳寿命 N_p 的概率。它与存活率之间存在如下关系

$$P + p = 1$$

中值疲劳寿命 N_{50} ——具有 50% 存活率的疲劳寿命。它的含义是, 母体中有 50% 个体疲劳寿命大于 N_{50} ; 有 50% 个体疲劳寿命小于 N_{50} 。

p - S - N 曲线——以应力为纵坐标, 以存活率 p 的疲劳寿命为横坐标所绘出的曲线, 即存活率——应力——疲劳寿命曲线。作图时, 将疲劳寿命取对数; 或将应力和疲劳寿命均取对数。

中值 S - N 曲线——以应力为纵坐标, 以中值疲劳寿命为横坐标所绘出的曲线, 即 50% 存活率的 S - N 曲线。通常简称作“ S - N 曲线”。

中值疲劳强度——根据中值 S - N 曲线, 在指定疲劳寿命为 N 时所对应的最大应力 S_{\max} 。

疲劳极限(或条件疲劳极限) S_r ——对于钢材, 如试件经 10^7 循环仍不破坏, 则实际上可以承受无限次循环, 故以 $N=10^7$ 时的中值疲劳强度作为疲劳极限。对于铝、镁等合金, S - N 曲线不存在水平直线部分, 如选取“循环基数”为 10^7 , 则以 $N=10^7$ 时的中值疲劳强度作为条件疲劳极限。 S_r 的下标 r 表示应力比, 如 S_{-1} 表示对称循环时的疲劳极限或条件疲劳极限。

自由度 ν ——见第三章 § 4。

显著度 α ——见第三章 § 12。

置信度 γ ——见第三章 § 12。

与存活率相关的标准正态偏量 U_p ——见第三章 § 8。

与置信度相关的标准正态偏量 U_γ ——见第六章 § 8。

单侧容限系数 k ——见第六章 § 8。

第二章 疲劳试件及其制备

§1 概 述

进行疲劳试验时，首先遇到的问题选择何种类型的试件。这主要是由试验目的决定的。疲劳试件大体上可分为两类：一类是形状简单、尺寸较小的典型“试件”；另一类是实际零构件或局部模拟的元件。本章所讨论的是属于前一类试件。典型试件又可分为“光滑试件”和“缺口试件”两种。光滑试件指的是在试验段内几乎没有应力集中的试件；而缺口试件则是在试验段内人为地制造有应力集中的试件。

所谓“应力集中”，就是在试件外形突然变化或材料不连续的地方所发生的应力局部增大的现象。如图 2-1 所示，三个板件受拉时沿截面 $m-n$ 的应力分布情况。(a)为带有中心圆孔的薄板；(b)为半圆形边缘缺口的薄板；(c)为带有圆角的薄板。可以看到，当这些板件受拉时，在缺口(包括圆孔、圆角等)处，存在有很大的局部应力 σ_{\max} 。但稍微离开缺口的地方，应力的变化就趋于缓和。在离缺口较远处的截面 $m'-n'$ 上，应力基本上是均匀分布的。

在载荷 P 作用下，根据“材料力学”方法，按净截面积计算出的应力 σ_n ，称为“名义应力”。如板厚为 δ ，则名义应力为

$$\sigma_n = \frac{P}{b\delta}$$

局部应力 σ_{\max} 是根据“弹性力学”方法计算出的。在很多情况下，由于理论计算比较复杂，因此，常常利用“光测弹性力

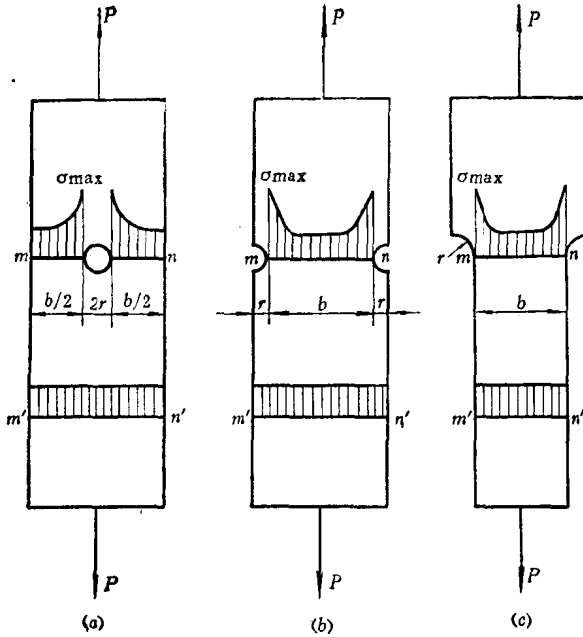


图 2-1

学”方法直接测量出来。局部应力 σ_{\max} 与名义应力 σ_n 的比值 K_t 叫做“应力集中系数”

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (2-1)$$

应力集中的程度可用应力集中系数表示。缺口半径或圆角半径 r 越小、 K_t 越大，表示应力集中越严重。对于试件的光滑平直部分， $K_t = 1$ 。对于图 2-1(a)和(b)所示的带有圆孔和半圆缺口的板件，当 $r \ll b$ 时， $K_t \approx 3$ ，表明局部应力大约是名义应力的三倍。

对于塑性材料制成的试件，在静力作用下，应力集中对强