

ICS 77.040.10
H 22



中华人民共和国国家标准

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003

金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法

Metallic materials—Fatigue testing—
Statistical planning and analysis of data

(ISO 12107:2003, IDT)

2009-06-25 发布

2010-04-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 疲劳性能的统计分布	3
5 疲劳试验的统计计划	4
6 给定应力下疲劳寿命的统计估计	6
7 给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计	7
8 $S-N$ 曲线的统计估计	8
9 试验报告	10
附录 A (资料性附录) 应用举例	11
附录 B (资料性附录) 统计表	15
附录 C (资料性附录) $S-N$ 全曲线统计估计的组合方法	17

前 言

本标准等同采用国际标准 ISO 12107:2003《金属材料——疲劳试验——数据统计方案和分析方法》(英文版)。

本标准与国际标准 ISO 12107:2003 相比,在以下方面做了编辑性修改:

——用中文惯用的小数点符号“.”代替英文采用的小数点符号“,”;

——重新编写了前言,代替 ISO 12107:2003 的前言。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 均为资料性附录。

本标准由全国钢标准化技术委员会归口。

本标准起草单位:钢铁研究总院、冶金工业信息标准研究院。

本标准起草人:高怡斐、董莉。

引 言

众所周知,即使在试验控制得非常精确的时候,疲劳试验结果也显示出很大差异。这种差异部分来自于试样之间的不一致性,包括化学成分、热处理、表面状态等的轻微差别,部分来自于工程材料的内禀特性——疲劳失效的随机过程。

对以上固有差异的精确量化对评价机械设计和结构用材料的疲劳性能是非常必要的。对于实验室比较材料的疲劳性能,包括其中的差异也是必要的。

金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法

1 范围

1.1 目的

本标准介绍了疲劳试验设计和结果数据的统计分析方法。目的就是在很高的置信度和试样数下测定金属材料的疲劳性能。

1.2 用于分析的疲劳性能

本标准提供了一种方法分析在不同应力水平下,利用线性关系在合适的坐标下估计材料的疲劳寿命。

特别的应包括以下内容:

- a) 给定应力下的疲劳寿命;
- b) 给定疲劳寿命下的疲劳强度。

本标准中的术语“应力”可以由“应变”来取代,本方法对应变函数的寿命特性分析也有效。应变控制试验的疲劳强度根据应变来考虑,应力控制试验通常按照应力来理解。

1.3 适用范围

本标准仅限于由于单一疲劳失效机理而展现出的均匀特性材料疲劳数据的分析。本标准所指的试验结果的统计特性与试验条件下的材料特性紧密相关。

实际上,给定材料的试样在不同条件下可能会显现出不同的失效机理。通常情况下,数据结果的统计特性代表着一种失效机理,可以直接分析。对于统计特性不均匀的情况,有必要对所有实例按单一分布的模型进行分析。

同一应力水平的失效既可能从表面也可能从内部发生。相应数据对应于不同失效机理的混合统计特性。这些结果类型因为需要较复杂的综合分析,标准不予考虑。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GB/T 3358 统计学术语(所有部分)

3 术语和定义

GB/T 3358 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 与统计相关的术语

3.1.1

置信度 confidence level

与统计偏差区间相对应的概率值 $1-\alpha$ 。

3.1.2

自由度 degree of freedom

总的试验项数减去估计的参数为自由度数。

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003

3.1.3

分布函数 distribution function

给出每一 x 值的函数,该函数代表自由变量 X 小于或等于 x 的概率。

3.1.4

估计 estimation

为赋值,从样品中对观测值根据取样分布函数所进行的相关赋值。

3.1.5

总体(样本) population

被考虑的个体材料或项目的总和。

3.1.6

自由变量 random variable

在制定区域任意取值的变量。

3.1.7

样品 sample

为了提供总样本的信息,从总样本中抽取的一项或多项。

3.1.8

样本大小 size

n

总样本中的项目数、批数、样品数等。

3.1.9

标准偏差 standard deviation

σ

根据算术平均值得到的平均方差的正方根值。

3.2 与疲劳相关的术语

3.2.1

疲劳寿命 fatigue life

N

在指定的应力水平下,试样达到定义的失效标准之前所经历的应力循环数。

3.2.2

疲劳极限 fatigue limit

无限寿命下的疲劳强度。

3.2.3

疲劳强度 fatigue strength

在指定疲劳寿命下,试样发生失效时的应力水平 S 值,以 MPa 表示。

3.2.4

试样 specimen

按照预定的形状和尺寸用于单一测试的材料的一部分。

3.2.5

应力水平 stress level

S

在试验控制条件下的应力强度,例如:应力幅值、最大应力和应力范围。

3.2.6

应力台阶 stress step

d

当用升降法进行试验时,相邻应力水平之间的差值,以 MPa 表示。

4 疲劳性能的统计分布

4.1 疲劳分布的概念

工程用金属材料的疲劳性能通过一组试样在各种应力水平下测定疲劳寿命与应力之间的函数关系来测定。试验结果通常将在合适坐标下的试验点拟合成 $S-N$ 曲线。 $S-N$ 曲线通常是双对数或单对数坐标下的曲线图,寿命值通常以对数形式画在横轴上。

即使在仔细操作试验、尽量减少试验误差的时候,疲劳试验结果通常也显示了很大的分散性。试验结果的分散部分是由于试样之间的化学成分或热处理不均匀,另外还与疲劳过程有关,例如在试验条件下小裂纹的萌生和扩展。

疲劳数据的变化可以用两种方式来表示:给定应力下的疲劳寿命分布和给定疲劳寿命下的强度分布。

4.2 疲劳寿命分布

在给定试验应力 S 下疲劳寿命被认为是一自由变量。当疲劳寿命的对数呈正态分布时,关系为

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_{(x)} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中 $x=\log N$, μ_x 和 σ_x 分别是 x 的平均值和标准偏差。

公式(1)给出了 x 失效的累计概率,即总样本在小于或等于 x 下失效的比例。公式(1)没有考虑在疲劳极限处或附近发生失效的概率。这一区域,一些试样可能失效,而其他试样也可能不失效。分布的形状经常是不对称的,在长寿命侧显示出更大的分散性。分布图也可能被截短,以设定的数据来代表观测列的最大疲劳寿命。

本标准不考虑一定数量的试样可能失效、而剩余试样可能不失效的情况。其他统计分布也可以用于表达疲劳寿命的变化,威布尔分布是经常用于表示不均匀分布的一种统计模型。

图 1 展示了大量试样根据试验统计计划进行的疲劳试验数据。疲劳寿命分布的形状验证了上述目的。

4.3 疲劳强度分布

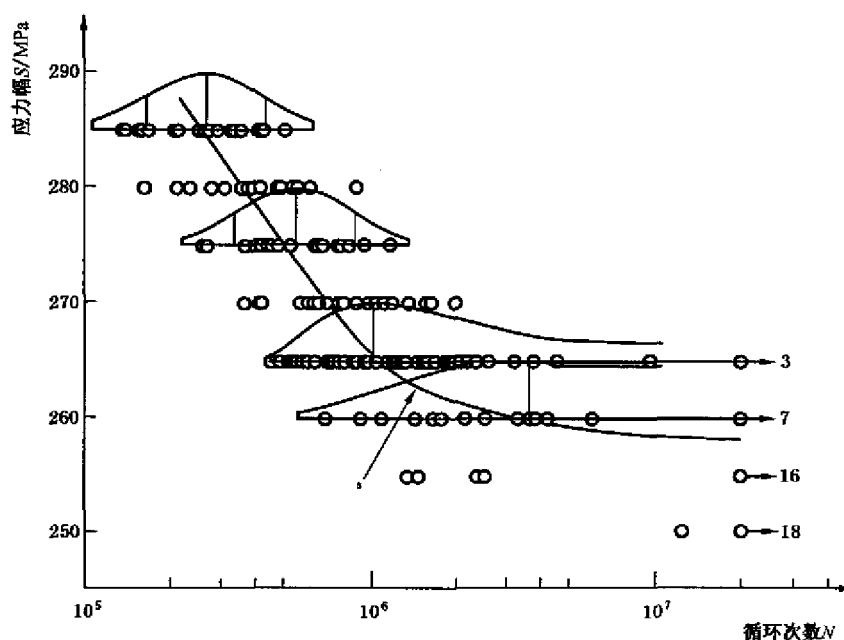
给定疲劳寿命 N 下的疲劳强度被认为是自由变量,通常按照正态分布来表达:

$$P(y) = \frac{1}{\sigma_{(y)} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] dy \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中 $y=S$ (在 N 下的疲劳强度), μ_y 和 σ_y 分别是 y 的平均值和标准偏差。

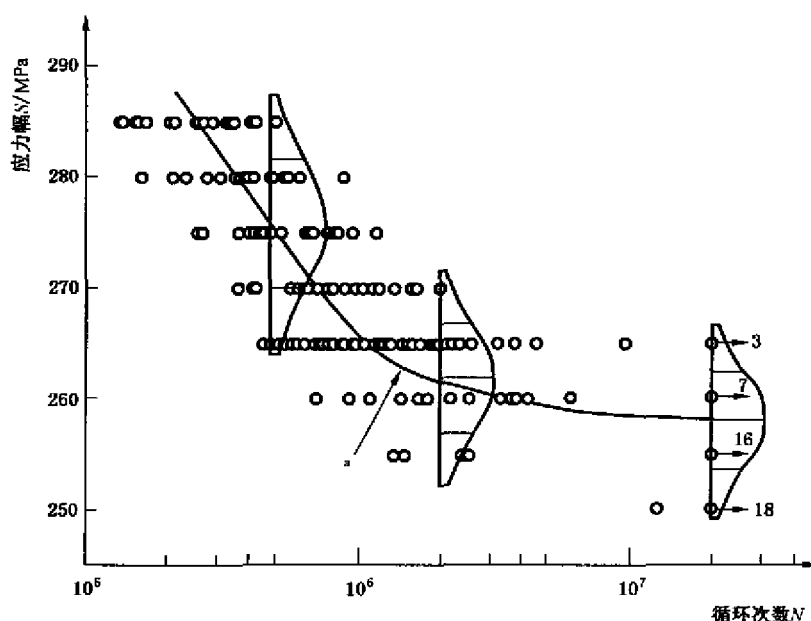
公式(2)给出了 y 失效的累计概率。它定义了疲劳强度低于或等于 y 的样品比例。其他的统计分布也可以用于表达疲劳强度的变化。当应力和疲劳寿命之间用双对数坐标表达呈线性关系时,只要 $x=\log N$ 是正态分布, $y=\log S$ 的分布也被指定为正态分布。图 2 的试验数据与图 1 相同,疲劳性能的变化这里按照典型的疲劳寿命来表达。

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003



a 中值图。

图 1 疲劳性能的变化概念——含碳为 0.25% 的碳素钢旋转弯曲受力方式下，在给定应力水平下的疲劳寿命分布图



a 中值图。

图 2 疲劳性能的变化概念——典型疲劳寿命下的疲劳强度分布

5 疲劳试验的统计计划

5.1 取样

清楚定义估计疲劳性能统计分布材料的总样本很有必要。从总样本中以随机方式选取被测试样。试样的选取应能准确代表要描述的总样本。如果总样本由几批或几组材料组成，那么试样应根据每一批或组的比例数随机抽取。试样总数应与需要的样本大小(n)相等。

如果总样本显示了一系列特性,例如,如果疲劳性能与加工时间有关,总样本就应根据时间分成几组。每组抽取的自由样品数应与组的大小成比例。

从特定组中抽取的试样会显示出与组的特定变化。这种组内的变化有时与组之间的变化同样重要。当根据经验判断出不同种类的变量是比较重要的时候,取样时应考虑这些。

对于某些材料推荐的硬度测量,如可能,应将材料的总样本分成不同的组来取样。每组的样品数尽可能相等。可以从每组随机抽取相同数目的试样组成一个试验样本(样本数为 n)。根据硬度值采取上述步骤得到的样本均匀地代表总样本。

5.2 被测试样数

试验结果的可靠性主要依赖于被测的试样数。样品数随着试验数 n 的增加而增加。

对于自由变量 x ,在概率 P 下总样本取小于或等于 $x_{(P)}$ 的概率为 P ,定义 x_1 为从总样本中抽取 n 个试样的观测最小值。 $x_1 \geq x_{(P)}$ 的概率小于或等于 α 即 $(1-P)^n$ 。因此,可以推算 $x_{(P)}$ 大于 x_1 的概率至少为 $1-\alpha$,即至少为 $1-(1-P)^n$ 。这里给出:

$$n = \frac{\ln \alpha}{\ln(1-P)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

对于疲劳寿命试验,公式(3)显示了置信度为 $1-\alpha$,真实疲劳寿命大于从 n 个试样观测到的最小寿命时总样本的失效概率为 P 。

同样概念应用于 $S-N$ 曲线的例子,因为从平均 $S-N$ 曲线对于单个的对数寿命数据的偏差可以认为是自由分布的。进一步可以假定对于不同应力的变化是恒定的, $S-N$ 曲线通常按照最小二乘法来拟合。表 1 给出了一些典型的试样数,对应于 95%置信度的试样数用于可靠性的设计目的,50%置信度的试样数用于解释试验,其他置信度用于工程应用。

表 1 在指定的失效概率水平不同置信度下试验数据被期待落在总样本真值以下的最少试样数

失效概率 $P/\%$	置信度 $(1-\alpha)/\%$		
	50	90	95
	试样数 n^a		
50	1	3	4
10	7	22	28
5	13	45	58
1	69	229	298
^a n 值修约到最接近的整数。			

5.3 试样的分配

从被测材料中抽取试样并分配到单独的疲劳试验,为了减小期待的统计偏差,原则上采取一种自由的方式。试样的试验次序对于一系列疲劳试验也应是随机的。

当几台试验机并列使用时,在每台机器的试样数应相等或接近相等,次序也是随机的,在试验之前应根据具体性能校验机器的等同性。

当试验程序包括几个独立的试验系列,例如在不同应力水平下试验或不同的材料为了比较的目的,每一系列试验应在相同或接近相同的速率下进行,因此所有试验应在大约同一时间完成。

对于不同应力下给定的被测试样数,在每一应力下重复试验的次数影响对结果变量估计值的统计置信度。

6 给定应力下疲劳寿命的统计估计

6.1 获取疲劳寿命数据的试验

在给定应力 S 下进行疲劳试验, 仔细准备一套试样测定每一试样的疲劳寿命值。要求的试样数 n 可以参考表 1 给出的典型值来确定。选择的试样数依赖于试验目的和被测材料的可靠性。本标准推荐一套至少 7 个试样用于解释试验, 一套至少 28 个试样用于可靠性设计。

6.2 概率纸上描点

准备疲劳寿命数据, $x = \log N$, 对于 n 个试样, 按从小到大分等级画图。给每一个数据编一个顺序号, 例如: $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4 \leq x_n$ 。对第 i 级数失效概率可以估计为:

$$P_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad \dots\dots\dots (4)$$

在正态概率纸上描取数据点 $(x_1, P_1), (x_2, P_2), \dots, (x_n, P_n)$ 。如果所有数据点能够很合理地拟合成直线, 那么可以推论数据满足 log-log 分布。

如果数据点没有给出直线关系, 推荐尝试其他类型。这种情况下建议在威布尔概率纸上画图。

当使用双对数坐标纸时, 疲劳寿命 N_i 不需要转化成对数值, 直接在对数纸上描点, 图 3 为 log-log 对数纸的例子。附录 A 中的 A.1 给出了描取数据点的例子。

对第 i 级数的失效概率按其他方程估计。当 n 足够大时, 能够得到几乎相同的结果。经常可以使用:

$$P_i = \frac{i}{n + 1}$$

6.3 分布参数的估计

公式(1)为疲劳寿命统计分布参数的定义。定义 $x(P)$ 值为从曲线上可以得到的失效概率 $P(\%)$ 。平均值 μ_x 和标准偏差 σ_x 的估计, 根据 $x_{(10)}$ 和 $x_{(90)}$ 的下面两个关系式:

$$\hat{\mu}_x = \frac{x_{(10)} + x_{(90)}}{2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\hat{\sigma}_x = \frac{x_{(90)} - x_{(10)}}{2.56} \quad \dots\dots\dots (6)$$

这里符号“~”代表它们是估计值。用于标准偏差的自由度数被认为是 $n-1$, 这里 n 是数据数。

疲劳寿命的变动系数, 按下式估计:

$$\hat{\eta}_N = \sqrt{\exp[(\ln 10)^2 \hat{\sigma}_x^2 - 1]} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中: $\ln 10$ 是 10 的自然对数, 其平方等于 5.302。

平均偏差和标准偏差通过下列不同的计算公式来估计:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2}{n - 1}}$$

本标准推荐使用做图法, 因为它可以在概率纸上标绘数据验证是否符合正态分布。

6.4 疲劳寿命下极限的估计值

在给定的失效概率下, 假定是正态分布, 根据式(8)在 $(1-\alpha)$ 的置信度下, 估计疲劳寿命的下极限值。

$$\hat{x}_{(p, 1-\alpha)} = \hat{\mu}_x - k_{(p, 1-\alpha, \nu)} \hat{\sigma}_x \quad \dots\dots\dots (8)$$

系数 $k_{(p, 1-\alpha, \nu)}$ 是正态分布的单边误差限, 在表 B.1 中给出。取自由度 ν 来估计标准偏差。

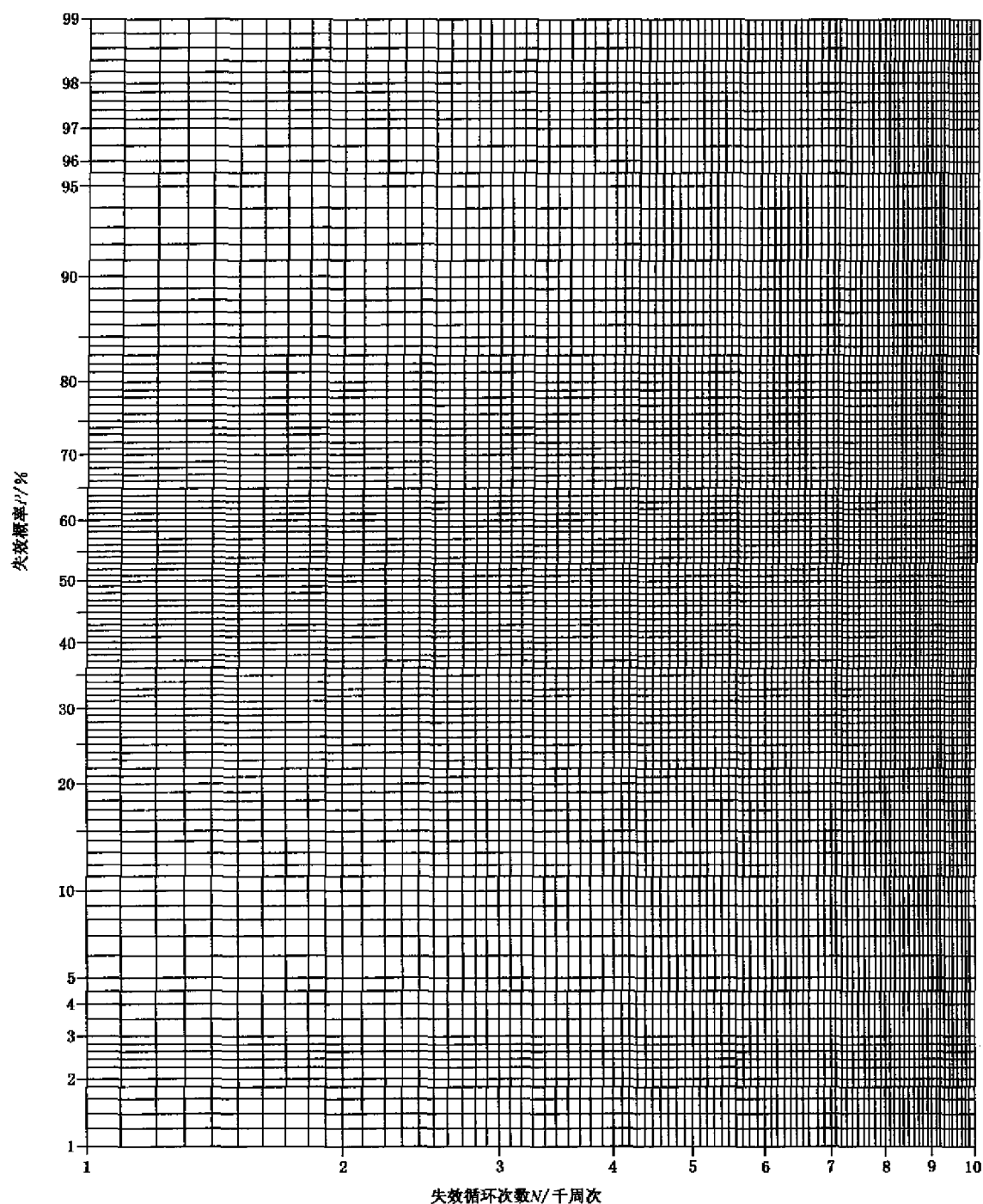


图 3 双对数概率纸的范例

7 给定疲劳寿命下疲劳强度的统计估计

7.1 获取疲劳强度数据的试验

利用升降法得到一套试样的疲劳强度数据。有必要对被测材料的平均疲劳强度和标准偏差进行粗略估计。以估计的平均强度作为第一级应力水平进行试验,应力台阶的选取接近标准偏差。在试验过程中变换不同的应力水平,如果无法得到标准偏差,以估算平均疲劳强度的 5% 作为应力台阶。

随机选取第一个试样,在第一级应力水平下,试样在给定的循环数下发生失效。同样随机选取第二

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003

个试样,如果先前的试样没有失效,增加应力水平一个应力级。如果先前的试样失效了,降低一个应力级,继续试验,直到所有试样都按照这种方式进行了试验。

对于解释性的研究要求最少 15 根试样估计疲劳强度的平均值和标准偏差。对于可靠性数据要求至少 30 个试样。

附录 A. 2.1 给出了升降法的例子,7.2 和 7.3 一起给出了分析的范例。

7.2 试验数据的统计分析

在不同应力水平下按照被测试样失效或非失效的计算频率安排试验数据,仅仅对于“失效”和“非失效”事件进行统计分析,对最少的观测数进行了分组分析。

将应力水平按升序排序, $S_0 \leq S_1 \leq \dots \leq S_l$, 这里 l 是应力水平数,指定事件数 f_i ,指定应力台阶 d 。对疲劳强度的统计分析按式(2)估计参数:

$$\hat{\mu}_y = S_0 + d \left(\frac{A}{C} \pm \frac{1}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\hat{\sigma}_y = 1.62d(D + 0.029) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{式中: } A = \sum_{i=1}^l i f_i, B = \sum_{i=1}^l i^2 f_i, C = \sum_{i=1}^l f_i, D = \frac{BC - A^2}{C^2}.$$

在式(9)中,被分析事件失效时取 $-1/2$;被分析事件非失效时取 $1/2$ 。

式(10)仅仅当 $D > 0.3$ 时才有效,这一条件通常在 d/σ_y 的范围在 $0.5 \sim 2$ 之间时才满足。

7.3 估计疲劳强度的下极限

假定疲劳强度符合正态分布,在置信度为 $1-\alpha$ 、失效概率为 P 下的疲劳强度下极限按下式估计:

$$\hat{y}_{(p,1-\alpha)} = \hat{\mu}_y - k_{(p,1-\alpha,\nu)} \hat{\sigma}_y \quad \dots\dots\dots (11)$$

这里系数 $k_{(p,1-\alpha,\nu)}$ 是正态分布的单边误差限,在表 B.1 中给出。根据自由度 ν 来估计标准偏差。

7.4 标准偏差已知的改进方法

当标准偏差已知的情况下和仅仅需要估计平均疲劳强度时,改进的升降法只需要较少试样。按照 7.1 描述的升降法进行试验,根据先前失效或非失效降低或增加应力水平一个固定的台阶。选取最初的应力水平接近估计的平均疲劳强度,应力台阶大约等于已知的标准偏差。对于解释性试验需要至少 6 个试样,对于可靠性试验要求至少 15 个试样。

如果 n 个试样在应力水平 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 按顺序试验,那么平均疲劳强度由试验应力 S_2 到 S_{n+1} 的平均值来测定,跳过第一点,不考虑哪个试验失效,哪个试验非失效。

$$\hat{\mu}_y = \frac{\sum_{i=2}^{n+1} S_i}{n} \quad \dots\dots\dots (12)$$

S_{n+1} 试验不进行,但是应力水平可以从 n 试验结果中测定。

根据公式(11)估计总样本的疲劳强度下极限,取相应于试验标准偏差的自由度数,如果未知取 $n-1$ 。

对于改进的升降法,有必要知道疲劳强度的标准偏差,按照第 8 章来估计 S-N 曲线。A. 2.2 给出了范例。

8 S-N 曲线的统计估计

8.1 获取 S-N 数据的疲劳试验

为了得到 S-N 曲线,在 50% 的失效概率不同应力水平下进行疲劳试验。假定疲劳寿命对数变量遵循正态分布,并且是应力的函数。

需要的试样总数参考表 1 给出的典型数值,考虑到试验目的和试验材料的可靠性,最少选取 8 根试样用于解释试验,建议在 4 个等间距的应力水平下,每个应力水平测试两个试样。为了可靠性设计目

的,至少需要 30 个试样。这时在 5 个等间距的应力水平下,每个应力水平测试 6 个试样。

对于通常的高周疲劳试验,应力水平通常选取疲劳寿命介于 3 个量级之间,例如:从 5×10^4 到 1×10^6 周次。

8.2 S-N 数据的统计分析

利用线性的数学模型分析 S-N 关系:

$$x = b - ay$$

这里 $x = \log N$, a 和 b 是常数。对于变量 y , $y = S$ 或 $y = \log S$, 根据最好的线性关系来选择。

对总样本平均 S-N 曲线最适合的估计由下式给出:

$$\hat{\mu}_x = \hat{b} - \hat{a}y \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\hat{a}_x = - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\hat{b} = \bar{x} + \hat{a}\bar{y} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。

n 是数据点数。

总样本的平均 S-N 曲线的对数疲劳寿命的标准偏差根据下式估计:

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x_i - (\hat{b} - \hat{a}y_i)]^2}{n-2}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中 $(n-2)$ 为自由度。

总样本的疲劳强度的标准偏差根据下式估算:

$$\hat{\sigma}_y = \frac{\hat{\sigma}_x}{\hat{a}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

疲劳强度的标准偏差通过改进的升降法来得到,见 7.4。

8.3 S-N 曲线下极限的估计

总样本在 $(1-\alpha)$ 置信度,自由度为 ν ,失效概率为 P 下的 S-N 曲线的下极限根据下式来估计:

$$\hat{x}_{(p,1-\alpha,\nu)} = \hat{b} - \hat{a}y - k_{(p,1-\alpha,\nu)} \hat{\sigma}_x \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式(18)中的平方根值是根据总样本对标准偏差估计值的一个修正,这个修正值依赖于试样数和试验范围。当试样数和范围都足够大时,修正值接近于 1,可以忽略。

8.4 线性模型充分性的校验

如果多于一个试样在三个或更多个应力水平下试验,那么就有可能校验线性模型的充分性。

当 m_i 个试样在应力水平 S_i 下试验,从第 j 级试样得到的数据可以写成 x_{ij} 。如果

$$\frac{\sum_{i=1}^l m_i [(\hat{b} - \hat{a}y_i) - \bar{x}_i]^2 (l-2)}{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 (n-l)} > F_{(1-\alpha, \nu_1, \nu_2)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

则线性关系的假设就不成立。这里 $\bar{x}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij}$, $n = \sum_{i=1}^l m_i$, l 是应力水平数。

表 B.2 给出了置信度 $(1-\alpha)$ 为 95% 时的 $F_{(1-\alpha, \nu_1, \nu_2)}$ 值。有两个自由度的定义:对于计算者自由度

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003

$\nu_1 = l - 2$, 对于式(19)自由度 $\nu_2 = n - 1$ 。

比较观测值与估计值之间的差别($x_i - \hat{x}_i$)是很有用的, 根据 $\hat{x}_i$ 画图, 如果图形显示大体上一致, 这种匹配被认为是满意的。

9 试验报告

9.1 试验结果的表达

9.1.1 总则

根据试验类型, 试验报告包括下列信息:

9.1.2 给定应力下的疲劳寿命

- 试验应力水平、估计的平均疲劳寿命, 以及对数疲劳寿命的标准偏差估计值或疲劳寿命的变动系数, 应指明试样数, 应当在报告中注明估计参数的方法(做图法或计算);
- 每支试样在指定试验应力下的疲劳寿命数据, 以及观察失效或非失效;
- 在概率纸上根据试验数据拟合曲线, 不允许对曲线进行观测范围以外的外推;
- 必要时, 在概率纸上选取疲劳寿命下极限的估计值。

9.1.3 给定疲劳寿命下的疲劳强度

- 平均疲劳强度的估计值和标准偏差的估计值, 试验的试样数。估计这些参数所采用的方法, 例如升降法;
- 各级应力水平下的试验数据表, 每支试样所能承受的循环数, 按照试验次序注明失效或非失效;
- 选定的失效概率下疲劳强度下极限的估计值。

9.1.4 S-N 曲线

- 估算的平均 S-N 曲线, 试验数据图;
- 针对每支试样(失效或非失效)的应力水平和循环数的试验数据表;
- 选定失效概率下的 S-N 曲线下极限的估计值。

9.2 相关信息

9.2.1 被测材料

试验报告中应包括被测材料信息, 例如材料牌号、加工工艺、化学成分、热处理、显微结构和力学性能等。

9.2.2 被测试样

试验报告中应包括被测试样的信息, 例如试样编号、试样尺寸、试样相对于材料的加工取向, 表面状态等。

9.2.3 疲劳试验的条件

试验报告中应把包括疲劳试验条件的信息, 例如应力类型或应变(如果是应变控制试验), 应力比或其他试验过程的特征参数, 应力波形, 试验频率, 失效定义, 试验环境等。

附录 A
(资料性附录)
应用举例

A.1 疲劳寿命统计估计的范例

表 A.1 给出了一组 7 个数据的范例,数据按照从小到大排序,因此可以根据式(4)计算相应的概率 P_i 。

$x_i = \log N_i$ 值画在正态概率纸上,通过视觉检查,进行曲线线性拟合,如图 A.1 所示。

曲线图上对应于 90%和 10%概率下的值分别为 $x_{(90)}$ 和 $x_{(10)}$:

$$x_{(90)} = 5.06$$

$$x_{(10)} = 4.75$$

根据式(5)和式(6)计算分布参数如下:

$$\hat{\mu}_x = 4.905, \hat{\sigma}_x = 0.121 \text{ 或 } \hat{N}_{(50)} = 8.04 \times 10^4 \text{ 周次}, \hat{\eta}_N = 0.63。$$

95%置信度,10%失效概率下的疲劳寿命的下极限根据式(8)来估算,表 B.1 给出的取 $k_{(0.1,0.95,6)}$ 为 2.755, $\hat{x}_{(10)} = 4.905 - (2.755 \times 0.121) = 4.572$

$$\text{或 } \hat{N}_{(10)} = 10^{4.572} = 3.73 \times 10^4 \text{ 周次。}$$

表 A.1 疲劳寿命数据的范例

试样数 i	疲劳寿命 N_i /周次	疲劳寿命的对数 $x_i = \log N_i$	概率 $P_i/\%$
1	6.05×10^4	4.782	9.43
2	6.31×10^4	4.800	22.8
3	7.39×10^4	4.869	36.4
4	8.46×10^4	4.927	50.0
5	9.11×10^4	4.960	63.6
6	9.37×10^4	4.972	77.2
7	1.25×10^5	5.098	90.6

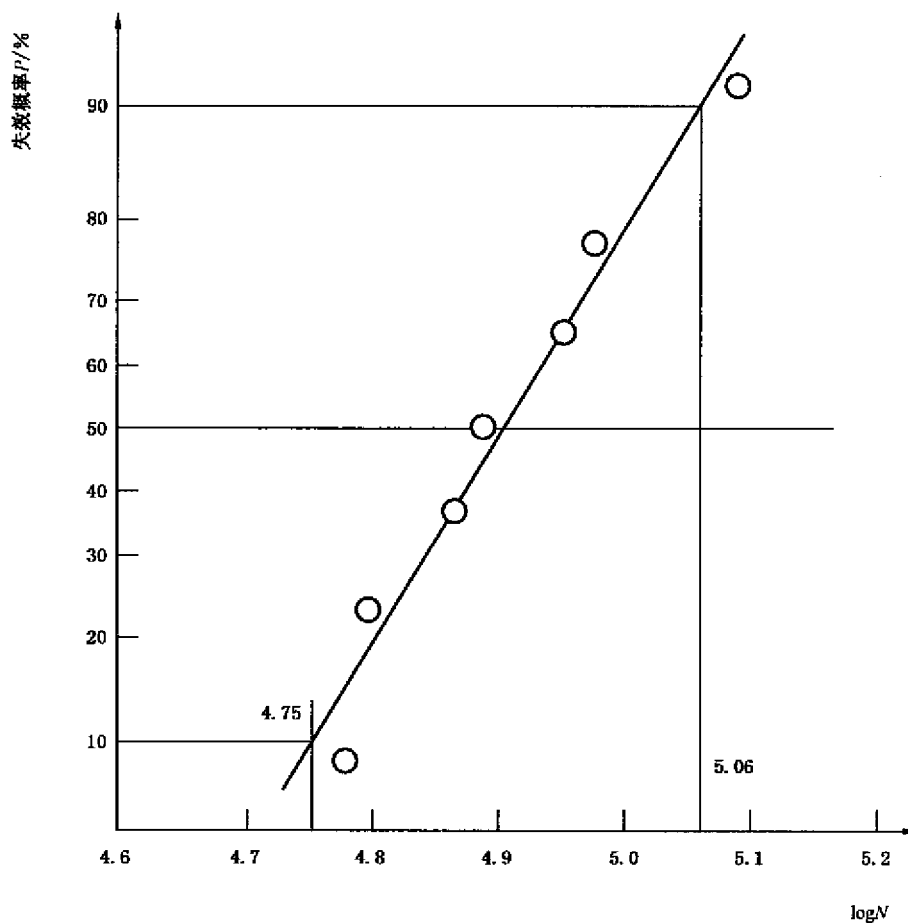


图 A.1 正态概率纸上疲劳寿命数据的图例

A.2 疲劳强度统计估计的范例

A.2.1 升降法

当利用升降法时,被测试样按照逐渐增加的应力水平顺序进行,直到发生失效。表 A.2 给出了一套数据的例子。从开始计算,表 A.2 中不发生失效的第一个有效数据为 500 MPa。在这一系列试验中,有 7 个试样失效,8 个试样没有发生失效。失效试样在分析中被当作一种情况。因此只分析三个应力水平,表 A.3 所示的, $S_0=500$ MPa,应力级 $d=20$ MPa。相关事件数 f_i 在表中的第 3 列给出,A、B、C 和 D 按以下值计算:

$$A=7 \quad B=11 \quad C=7 \quad D=0.571$$

疲劳强度的平均值和标准偏差根据式(9)和式(10)进行计算,如下:

$$\hat{\mu}_y = 500 + 20(7/7 - 1/2) = 510 \text{ MPa}$$

$$\hat{\sigma}_y = 1.62 \times 20(0.571 + 0.029) = 19.4 \text{ MPa}$$

$$\text{和 } \hat{\eta}_y = 19.4/510 = 0.038$$

注:套用式(7),疲劳强度的变动系数可以由下式来估算:

$$\hat{\eta}_y = \sqrt{\exp[(\ln 10)^2 \hat{\sigma}_y^2 - 1]}$$

失效概率 10% 的疲劳强度的下极限根据式(11)计算,置信度为 95% 时,相关系数 $k_{(0.1, 0.95, 6)}$ 值根据表 B.1 取 2.755。

$$\hat{y}_{(10)} = 510 - (2.755 \times 19.4) = 456 \text{ MPa}$$

在本例子中,应力级与标准偏差估计值足够接近, D 大于 0.3。

表 A.2 试验数据升降法的范例

应力 S_i / MPa	试样系列号															
			1				5					10				15
540									×							×
520				×				○		×		×				○
500			○		×		○					○		×		○
480		○*				○								○		
460	○*															
× 失效 ○ 通过 ○* 未计算																

表 A.3 表 A.2 中的数据分析

应力 S_i / MPa	水平 i	值		
		f_i	if_i	$i^2 f_i$
540	2	2	4	8
520	1	3	3	3
500	0	2	0	0
总和	—	7	7	11

A.2.2 改进的升降法

本例子所用的疲劳数据与 A.2.1 相同,但仅仅用了序列 1 到序列 6。表 A.4 给出了这套数据。根据上面计算的,疲劳强度的标准偏差是 19.4 MPa,自由度为 6。试验在应力级为 20 MPa,非常接近标准偏差的条件下进行。根据式(12)计算得到的平均疲劳强度如下:

$$\bar{\mu}_y = (520 + 500 + 480 + 500 + 520 + 540) / 6 = 510 \text{ MPa}$$

在 10%失效概率,95%置信度条件下根据式(11)计算得到的疲劳强度的下极限。从表 B.1 中取 $k_{(0.1, 0.95, 6)}$ 值为 2.755,如下:

$$\hat{y}_{(10)} = 510 - (2.755 \times 19.4) = 456 \text{ MPa}$$

表 A.4 改进的升降法的范例

参数	试验序列						
i	1	2	3	4	5	6	7
S_i / MPa	500	520	500	480	500	520	540
事件	○	×	×	○	○	○	— ^a

^a 试验实际上没有进行(根据先前值计算的应力水平)。

表 A.5 S-N 数据的范例

试样数 i	应力 $y_i = S_i$ MPa	疲劳寿命 N_i / 周次	疲劳寿命的对数 $x_i = \log N_i$
1	450	3.41×10^4	4.533
2	450	5.23×10^4	4.719
3	420	9.66×10^4	4.985
4	420	1.50×10^5	5.176
5	390	2.73×10^5	5.436

表 A.5 (续)

试样数 i	应力 $y_i = S_i$ MPa	疲劳寿命 N_i /周次	疲劳寿命的对数 $x_i = \log N_i$
6	390	4.12×10^5	5.615
7	360	8.01×10^5	5.904
8	360	1.32×10^6	6.121

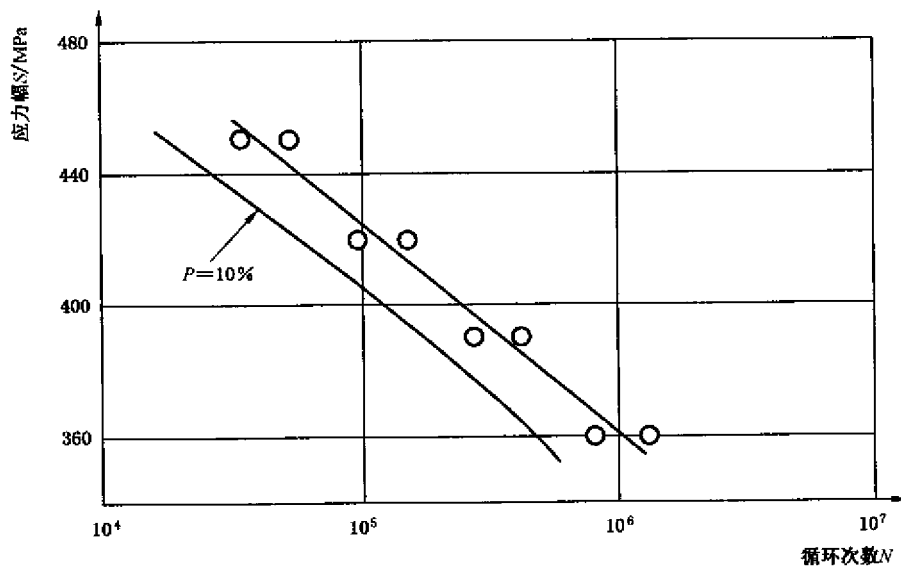


图 A.2 S-N 数据分析的范例

A.3 S-N 曲线的统计估计

一套 8 个试样的试验数据在表 A.5 中给出,利用线性模型和半对数坐标对 $y=S, x=\log N$ 进行统计分析。

y 和 x 的平均值很容易从表中得到:

$$\bar{y}=405 \text{ MPa} \quad \bar{x}=5.311$$

然后计算下列数:

$$\sum (x - \bar{x})^2 = 2.196$$

$$\sum (y - \bar{y})^2 = 9\,000$$

$$\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y}) = -138.1$$

公式(14)和(15)给出了最可能的 S-N 平均曲线估计系数,如下:

$$\hat{a}=0.015\,3 \quad \hat{b}=11.527$$

对数疲劳寿命和疲劳强度的标准偏差分别根据式(16)和式(17)进行计算:

$$\hat{\sigma}_x=0.114 \quad \hat{\sigma}_y=7.5 \text{ MPa}$$

10%失效概率,95%置信度下的 S-N 曲线的下极限根据公式(18)计算,从表 B.1 中取 $k_{(0.1,0.95,6)}$ 值为 2.755,如下:

$$\hat{x}_{(10)} = 11.527 - 0.015\,3y - 0.314 \sqrt{1.166\,7 + \frac{(y-405)^2}{9\,000}}$$

图 A.2 显示了该曲线。

附 录 B
(资料性附录)
统 计 表

表 B.1 不同概率下的正态分布单侧误差限系数 $k_{(p,1-\alpha,u)}$ 的取值

自由度 ν	概率 $P/\%$							
	10		5		1		0.1	
	置信度 $(1-\alpha)/\%$							
	90	95	90	95	90	95	90	95
2	4.258	6.158	5.310	7.655	7.340	10.55	9.651	13.86
3	3.187	4.163	3.957	5.145	5.437	7.042	7.128	9.215
4	2.742	3.407	3.400	4.202	4.666	5.741	6.112	7.501
5	2.494	3.006	3.091	3.707	4.242	5.062	5.556	6.612
6	2.333	2.755	2.894	3.399	3.972	4.641	5.301	6.061
7	2.219	2.582	2.755	3.188	3.783	4.353	4.955	5.686
8	2.133	2.454	2.649	3.031	3.641	4.143	4.772	5.414
9	2.065	2.355	2.568	2.911	3.532	3.981	4.629	5.203
10	2.012	2.275	2.503	2.815	3.444	3.852	4.515	5.036
11	1.966	2.210	2.448	2.736	3.370	3.747	4.420	4.900
12	1.928	2.155	2.403	2.670	3.310	3.659	4.341	4.787
13	1.895	2.108	2.363	2.614	3.257	3.585	4.274	4.690
14	1.866	2.068	2.329	2.566	3.212	3.520	4.215	4.607
15	1.842	2.032	2.299	2.523	3.172	3.463	4.164	4.534
16	1.820	2.001	2.272	2.486	3.136	3.415	4.118	4.471
17	1.800	1.974	2.249	2.453	3.106	3.370	4.078	4.415
18	1.781	1.949	2.228	2.423	3.078	3.331	4.041	4.364
19	1.765	1.926	2.208	2.396	3.052	3.295	4.009	4.319
20	1.750	1.905	2.190	2.371	3.028	3.262	3.979	4.276
21	1.736	1.887	2.174	2.350	3.007	3.233	3.952	4.238
22	1.724	1.869	2.159	2.329	2.987	3.206	3.927	4.204
23	1.712	1.853	2.145	2.309	2.969	3.181	3.904	4.171
24	1.702	1.838	2.132	2.292	2.952	3.158	3.882	4.143
25	1.657	1.778	2.080	2.220	2.884	3.064	3.794	4.022

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003

表 B.2 置信度 $(1-\alpha)$ 为 95%下的 $F_{(1-\alpha, v_1, v_2)}$ 的取值

v_2	自由度					
	v_1					
	1	2	3	4	5	6
1	161	200	216	225	230	234
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42

附录 C

(资料性附录)

S-N 全曲线统计估计的组合方法

C.1 范围

本附录介绍了利用实际的试样数统计估计 S-N 全曲线的一种方法,包括有限和无限的疲劳寿命范围。假定 S-N 曲线由有限疲劳寿命范围的一条斜线和无限疲劳寿命范围的水平直线组成。对于许多工程材料,选择合适的对数或半对数坐标是可行的。

C.2 获取 S-N 全曲线的疲劳试验

试验要求至少 14 个试样,8 根试样用于估计有限疲劳寿命范围的 S-N 曲线(斜线),6 根试样用于估计无限疲劳寿命范围的疲劳强度(水平线)。图 C.1 为其概念图。

分配到每条线的试样数由每支试样预测的疲劳强度来决定,交点处给出相同的统计置信度。建议要满足下列关系:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{l+1}{2l-1} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

n_1 是斜线的试样数, n_2 是水平线的试样数, l 是斜线的应力水平数。应保留额外的几支试样,因为试验不总与预测一样。额外试样用于帮助解决一些突发问题。

C.3 有限疲劳寿命范围的疲劳试验

有限疲劳寿命范围的平均 S-N 曲线(斜线部分)按照 8.1 描述的过程对 8 根试样试验来估计。

S-N 曲线的斜线部分方程按式(13)到式(15)来测定,疲劳强度的标准偏差按式(16)和式(17)进行计算。

C.4 无限疲劳寿命范围的疲劳试验

无限疲劳寿命范围的疲劳强度(水平部分)按照 7.4 描述的改进的升降法对 6 根试样进行测试估算。试验的应力台阶选择足够接近 C.3 计算的标准偏差。

曲线水平部分的平均疲劳强度按式(12)计算。

C.5 S-N 全曲线的估计

S-N 全曲线,包括有限和无限疲劳寿命区,通过组合式(13)和式(11)来得到:

$$\begin{cases} x = \hat{b} - \hat{a}y & \text{当 } y > \hat{\mu}_y \\ y = \hat{\mu}_y & \end{cases} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

C.6 S-N 全曲线的下极限

通过组合式(18)和式(11)得到:

$$\hat{x}_{(p,1-\alpha)} = \hat{b} - \hat{a}y - k_{(p,1-\alpha,u)} \hat{\sigma}_x \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

当 $y > \hat{y}_{(p,1-\alpha)}$

$$\hat{y}_{(p,1-\alpha)} = \hat{\mu}_y - k_{(p,1-\alpha,u)} \hat{\sigma}_y$$

GB/T 24176—2009/ISO 12107:2003

对于有限和无限疲劳寿命区的自由度 ν 都是 $n_1 - 2$ 。这是因为疲劳极限的统计不确定度依赖于有限疲劳寿命数据派生出的标准偏差。

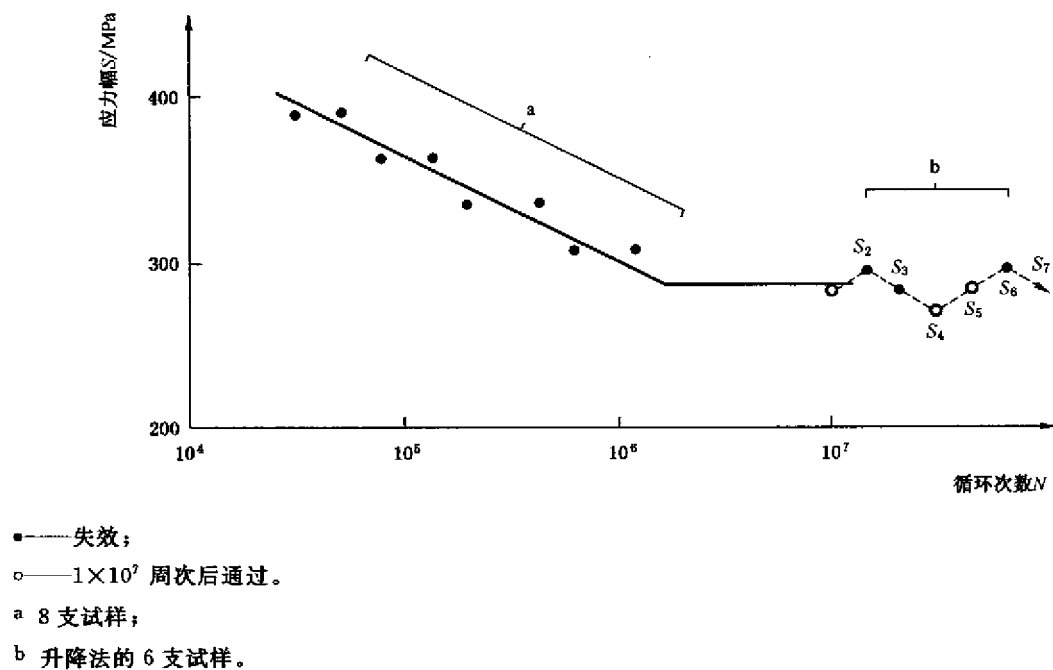


图 C.1 14 支试样估计 $S-N$ 曲线的组方法模型