



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 14229—2021

代替 GB/T 14229—1993

---

## 齿轮接触疲劳强度试验方法

Test method of surface contact strength for gear load capacity

2021-05-21 发布

2021-12-01 实施

---

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布



## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义、代号 .....	1
4 试验原理 .....	3
5 试验目的 .....	4
5.1 基础数据测定 .....	4
5.2 性能对比 .....	4
5.3 其他 .....	5
6 试验方法 .....	5
6.1 总述 .....	5
6.2 常规成组法 .....	6
6.3 少点组合法 .....	6
6.4 升降变载法 .....	7
6.5 阶梯增载法 .....	8
6.6 其他方法 .....	8
6.7 试验方法的比较 .....	8
7 试验装备 .....	9
7.1 试验机 .....	9
7.2 试验齿轮 .....	10
8 失效判据 .....	11
8.1 判别方法 .....	11
8.2 判别准则 .....	11
9 试验程序 .....	12
9.1 准备 .....	12
9.2 预备试验 .....	12
9.3 正式试验 .....	12
9.4 试验点的补充与剔除 .....	13
9.5 失效分析 .....	13
10 试验数据的统计处理 .....	13
10.1 常规成组法和少点组合法 .....	13
10.2 升降变载法 .....	16
10.3 阶梯增载法 .....	16
11 试验报告 .....	17
附录 A (资料性) 考虑置信度的统计处理方法 .....	18

附录 B (资料性) 常规成组法数据处理的算例 ..... 20

附录 C (资料性) 升降变载法数据处理的算例 ..... 25

附录 D (资料性) 阶梯增载法数据处理的算例 ..... 27

参考文献 ..... 29



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 14229—1993《齿轮接触疲劳强度试验方法》，与 GB/T 14229—1993 相比，主要技术变化如下：

- a) 更改了第1章，其中“规定”的内容增加了“或用于对比分析不同材料、不同工艺、不同修形方式等条件下齿轮的抗接触疲劳性能”，“适用”的内容从“其他金属齿轮”扩展为“其他材料齿轮或非渐开线齿轮”（见第1章，1993年版的第1章）；
- b) 更改了第2章中规范性引用文件（见第2章，1993年版的第2章）；
- c) 更改了表1中的部分代号（见表1，1993年版的表1）；
- d) 增加了“试验原理”和“试验目的”，分别编为第4章和第5章（见第4章和第5章，1993年版的第4章和第5章）；
- e) 在第6章中纳入了原文件第8章的内容（见第6章，1993年版的第8章）；
- f) 在第6章试验方法中增加了“升降变载法”“阶梯增载法”（见6.4和6.5，1993年版的第4章）；
- g) 第7、8、9、10各章分别相对原文件的第5、6、7、9各章进行了修改，其中增加了9.4“试验点的补充与剔除”（见第7章～第10章和9.4，1993年版的第5章～第7章和第9章）；
- h) 更改了附录A，增加了考虑置信度的统计处理方法，将原文件附录A的内容纳入了7.1.2（见7.1.2和附录A，1993年版的附录A）；
- i) 更改了附录B，增加了常规成组法数据处理的算例，将原文件附录B的内容纳入了7.2（见7.2和附录B，1993年版的附录B）；
- j) 更改了附录C，增加了升降变载法数据处理的算例，将原文件附录C的内容纳入了10.1.4（见10.1.4和附录C，1993年版的附录C）；
- k) 增加了附录D。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国齿轮标准化技术委员会(SAC/TC 52)提出并归口。

本文件起草单位：郑州机械研究所有限公司、中机生产力促进中心、郑州中机轨道交通装备科技有限公司、陕西法士特齿轮有限责任公司、郑州航空工业管理学院、重庆大学、綦江齿轮传动有限公司、江苏中工高端装备研究院有限公司、广东产品质量监督检验研究院、珠海格力电器股份有限公司、东莞市德晟智能科技有限公司、郑州高端装备与信息产业技术研究院有限公司、洛阳科大格尔传动研究院有限公司。

本文件主要起草人：刘忠明、王志刚、李金峰、李纪强、张敬彩、张海涛、杨翊坤、王振、刘怀举、王长路、陈志约、管洪杰、钟成堡、李裕昆、吕泮功、吴清锋、颜世钊、范瑞丽、李海霞、杨小勇、李五田、邓效忠、王海霞、魏沛堂、程中甫、张志宏、汤结贵、陈卓、格日勒图、李优华、马骋天、丁炜。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——本文件于1993年首次发布为 GB/T 14229—1993，本次为第1次修订。



# 齿轮接触疲劳强度试验方法

## 1 范围

本文件规定了关于渐开线圆柱齿轮接触疲劳强度试验的原理、目的、方法、装备、失效判据、程序、数据处理以及试验报告。

本文件适用于测定钢或铸铁材料渐开线圆柱齿轮齿面接触疲劳承载能力设计所需的基础数据,并适用于对比分析不同材料、不同工艺、不同修形方式等条件下齿轮的接触疲劳性能。其他材料齿轮或非渐开线齿轮的同类试验可参照使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 1356 通用机械和重型机械用圆柱齿轮 标准基本齿条齿廓

GB/T 3358.1 统计学词汇及符号 第1部分:一般统计术语与用于概率的术语

GB/T 3480.1 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第1部分:基本原理、概述及通用影响系数

GB/T 3480.2 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第2部分:齿面接触强度(点蚀)计算

GB/T 10095(所有部分) 圆柱齿轮 精度制

JB/T 8831 工业闭式齿轮的润滑油选用方法

## 3 术语和定义、代号

GB/T 3358.1、GB/T 3480.1 和 GB/T 3480.2 界定的术语和定义以及表1中的代号适用于本文件。

表1 代号、含义及单位

代号	含 义	单位
$A_S$	试验齿轮单个齿面点蚀面积之和	$\text{mm}^2$
$A_{SW}$	试验齿轮单个齿面工作表面积	$\text{mm}^2$
$A_{1T}$	试验齿轮副主动轮全部齿点蚀面积之和	$\text{mm}^2$
$A_{1TW}$	试验齿轮副主动轮全部齿工作表面积之和	$\text{mm}^2$
$A_{2T}$	试验齿轮副被动轮全部齿点蚀面积之和	$\text{mm}^2$
$A_{2TW}$	试验齿轮副被动轮全部齿工作表面积之和	$\text{mm}^2$
$a$	试验齿轮箱中心距	mm
$b$	工作齿宽	mm
$C$	S-N 曲线方程常数;置信度	—

表 1 代号、含义及单位 (续)

代号	含 义	单位
$C'$	修正后的 S-N 曲线方程常数	—
$C_j$	第 $j$ 条可参考的 S-N 曲线方程的常数	—
$d_1$	试验齿轮小轮分度圆直径	mm
$F_t$	端面内分度圆周上的名义切向力	N
$f_i$	各应力级对应事件出现次数	—
$K_A$	使用系数	—
$K_{H\alpha}$	接触强度计算的齿间载荷分配系数	—
$K_{H\beta}$	接触强度计算时的螺旋线载荷分布系数	—
$K_\gamma$	均载系数	—
$K_v$	动载系数	—
$k_{R,C}$	正态分布单侧容限系数	—
$l$	应力级数	—
$m$	齿轮模数	mm
	S-N 曲线方程指数	—
$m'$	修正后的 S-N 曲线方程指数	—
$N$	应力循环次数	—
$N_L$	试验齿轮齿面应力循环次数	—
$N_{L,R}$	可靠度 $R$ 下的可靠寿命	—
$N_{L,R,C}$	置信度 $C$ 和可靠度 $R$ 下的可靠寿命置信下限	—
$N_j$	齿面接触疲劳区上临界点的循环次数	—
$N_0$	齿面应力循环基数	—
$n$	试验点总数	—
$n_i$	快速测定法试验循环次数	—
$R$	可靠度	—
$R_S$	单齿点蚀面积率	%
$R_T$	齿轮副点蚀面积率	%
$R_Z$	平均最大高度粗糙度值	$\mu\text{m}$
$r$	试验有越出点时的失效试验点数	—
$S$	应力	$\text{N}/\text{mm}^2$
$s_\sigma$	升降法应力标准偏差	—
$T_1$	加载转矩的平均值	$\text{N} \cdot \text{m}$
$T_{1\max}$	加载转矩的最大值	$\text{N} \cdot \text{m}$
$u$	齿数比, $z_2/z_1$	—
$Z_E$	弹性系数	$\sqrt{\text{N}/\text{mm}^2}$

表 1 代号、含义及单位 (续)

代号	含 义	单位
$Z_H$	节点区域系数	—
$Z_L$	润滑剂系数	—
$Z_R$	粗糙度系数	—
$Z_V$	速度系数	—
$Z_W$	齿面工作硬化系数	—
$Z_X$	接触强度计算的尺寸系数	—
$Z_\beta$	接触强度计算的螺旋角系数	—
$Z_\epsilon$	接触强度计算的重合度系数	—
$\beta$	威布尔分布函数的形状参数	—
$\gamma$	威布尔分布函数的位置参数	—
$\Delta\sigma$	升降变载法应力增量	N/mm <sup>2</sup>
$\eta$	威布尔分布函数的尺度参数	—
$\mu_N$	正态分布函数的母体平均值	—
$\mu_{\ln N}$	对数正态分布函数的母体对数平均值	—
$\mu_\sigma$	升降变载法应力平均值	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma$	升降变载法试验齿轮齿面接触应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma'_{\lim}$	试验前预估疲劳极限应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_H$	试验齿轮计算齿面接触应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{H\lim}$	试验齿轮接触疲劳极限应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{Hj}$	齿面粗糙度系数不为 1 时的试验齿轮齿面接触应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{Hst}$	试验齿轮静强度最大齿面应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{H0}$	循环次数为 $5 \times 10^7$ 时的 $R$ - $S$ - $N$ 曲线应力计算值	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_N$	正态分布函数的母体标准差	—
$\sigma_{Nj}$	循环数为 $N_j$ 时 $R$ - $S$ - $N$ 曲线应力计算值	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_R$	可靠度 $R$ 下的齿面接触疲劳极限应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{R,C}$	置信度 $C$ 和可靠度 $R$ 下的齿面接触疲劳极限应力单侧置信下限	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_i$	阶梯增载试验应力级	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\lim}$	疲劳极限应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\lim j}$	第 $j$ 条参考 $S$ - $N$ 曲线的疲劳极限应力	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{\ln N}$	对数正态分布函数的母体对数标准差	—
$\sigma_0$	升降变载法初始齿面接触应力	N/mm <sup>2</sup>

## 4 试验原理

4.1 通过使试验齿轮副在受控载荷下进行啮合运转,测定齿面发生接触疲劳失效(或超过齿面应力循环基数  $N_0$  后失效)时的循环次数,或测定给定循环次数(例如  $N_0$ )下齿面发生接触疲劳失效时的应力

(载荷)水平,经过对试验数据的统计处理,用以获取反映试验齿轮接触承载能力的“应力-循环次数”曲线或“载荷-寿命”曲线<sup>1)</sup>,或用以对不同材料、不同工艺、不同修形方式等条件下齿轮的接触疲劳性能进行对比。

试验原理示例见图 1。

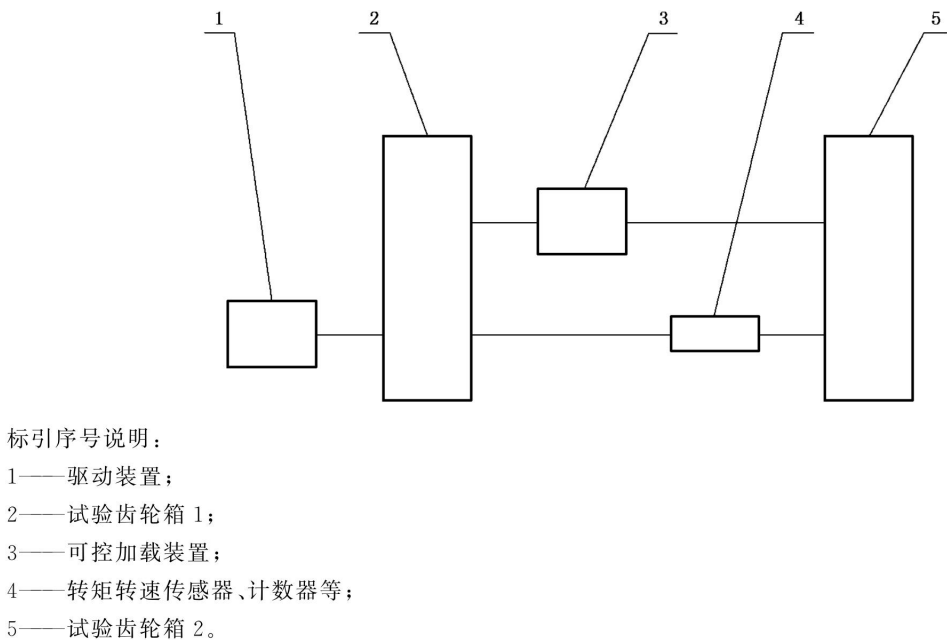


图 1 试验原理示例

4.2 由于疲劳试验数据的离散性不可避免,只有得到足够多的试验数据,其分布才具有一定的统计学意义。因此,在实际应用中若只能以有限的试验数据点进行分析或对比,应严格控制试验过程,并注意结论的局限性。

## 5 试验目的

### 5.1 基础数据测定

当采用特定材料、按照特定工艺加工试验齿轮时,通过对试验数据的处理,可以获得该类齿轮的接触疲劳极限应力或  $S-N$  曲线,以此作为该材料和工艺的强度设计基础值。具体要求如下:

- a) 对于高周疲劳寿命设计,应测定耐久性疲劳极限应力;
- b) 对于有限寿命设计,应测定对应寿命区间的  $S-N$  曲线;
- c) 当 a) 和 b) 同时要求或没有明确要求时,应测定完整的  $S-N$  曲线。试验方法见第 6 章。

### 5.2 性能对比

5.2.1 当采用不同材料或不同工艺加工的试验齿轮时,通过对试验数据的处理,可以评定不同因素对齿轮接触疲劳性能的影响。这些因素包括但不限于:

- 齿轮材料;
- 齿轮热处理;
- 机加工工艺(磨、剃等);

1) “应力-循环次数”曲线或“载荷-寿命”曲线即  $S-N$  曲线。

- 表面处理(如镀层、喷丸、超精加工等);
- 加工流程;
- 齿轮几何参数;
- 齿面修形;
- 润滑油;
- 工作温度;
- 节圆线速度。

5.2.2 依据 5.2.1 的对比,可以优化齿轮的材料、工艺、润滑条件等。为提高效率,经充分评估后,宜在有限寿命应力级下进行试验。试验点数应根据试验结果的离散性确定。每种用于对比的试验点数不宜少于 5 个。

5.2.3 如需要对比耐久性疲劳极限应力,应按照 6.4 或 6.5 要求进行试验。

### 5.3 其他

除 5.1 和 5.2 以外,其他试验目的可由研究人员自行设定。例如探讨齿轮接触疲劳的失效机理,制定齿面损伤的抑制方法等。

## 6 试验方法

### 6.1 总述

6.1.1 当齿面出现接触疲劳失效,或应力循环次数达到循环基数  $N_0$  而齿面未失效(称为“越出点”)时,试验终止并获得当前试验应力值下的一个寿命值,形成一个数据组(称为“试验点”)。当试验过程无异常时,将该试验点称为“有效试验点”,否则称为“异常试验点”。

6.1.2 齿轮接触疲劳试验有多种数据组合方法,如常规组合法、少点组合法、升降变载法、阶梯增载法等。在试验方案制定阶段,应根据试验目的和试验周期,进行合理选择。

6.1.3 试验齿轮的齿面接触应力应根据 GB/T 3480.1 和 GB/T 3480.2 按公式(1)计算(其中:“+”号用于外啮合,“-”号用于内啮合):

$$\sigma_H = \frac{Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta}{Z_V \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_X} \sqrt{\frac{F_t(u \pm 1) \cdot K_A \cdot K_\gamma \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}}{d_1 \cdot b \cdot u}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $Z_H$  ——节点区域系数;
- $Z_E$  ——弹性系数;
- $Z_\epsilon$  ——接触强度计算的重合度系数;
- $Z_\beta$  ——接触强度计算的螺旋角系数;
- $Z_V$  ——速度系数;
- $Z_L$  ——润滑剂系数;
- $Z_R$  ——接触强度计算的粗糙度系数;
- $Z_W$  ——齿面工作硬化系数;
- $Z_X$  ——接触强度计算的尺寸系数;
- $F_t$  ——分度圆上端面切向载荷,单位为牛顿(N);
- $K_A$  ——使用系数;
- $K_\gamma$  ——均载系数,本文件中  $K_\gamma = 1$ ;
- $K_v$  ——动载系数;
- $K_{H\alpha}$  ——接触强度计算时的齿间载荷分配系数;
- $K_{H\beta}$  ——接触强度计算时的螺旋线载荷分布系数;

$d_1$  ——试验齿轮小轮分度圆直径,单位为毫米(mm);

$b$  ——工作齿宽,单位为毫米(mm);

$u$  ——齿数比,  $z_2/z_1$ 。

## 6.2 常规成组法

6.2.1 该法是在多个应力级下成组进行疲劳寿命试验,并通过统计处理得到不同可靠度下疲劳曲线的一种试验方法。该法可用于比较准确地测定试验齿轮有限寿命区间内“可靠度-应力-循环次数”曲线(“R-S-N”曲线),也可用于预估齿面接触疲劳极限应力  $\sigma_{H\lim}$ 。

6.2.2 试验时,通常取4个或5个应力级,每个应力级下应有不少于5个试验点。最高应力级与次高应力级的应力间隔以总试验应力范围的40%~50%为宜,随着应力的降低,应力级间隔应逐渐减小。见图2。最高应力级试验点的循环次数应不少于  $1 \times 10^6$ ,最低应力级应有越出点。

6.2.3 当以不同材料、不同工艺、不同修形的齿轮进行对比试验时,可按该法得到不同的 R-S-N 曲线。为合理地缩短试验周期,也可取2个或3个应力级进行成组对比。

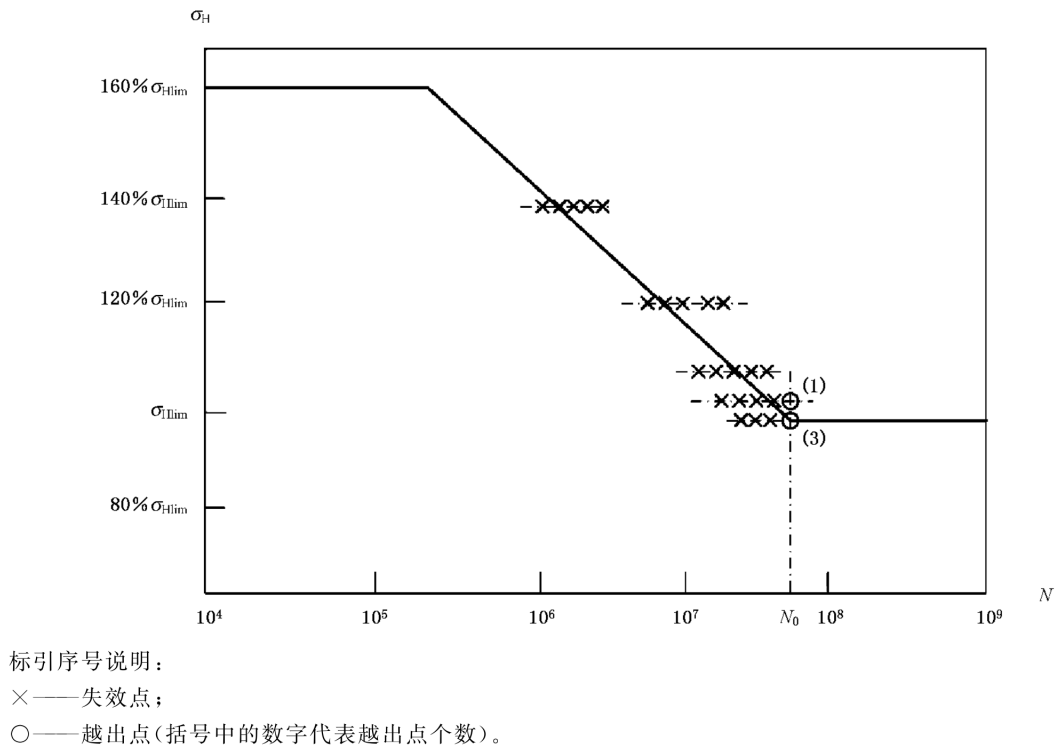


图2 常规成组法示意

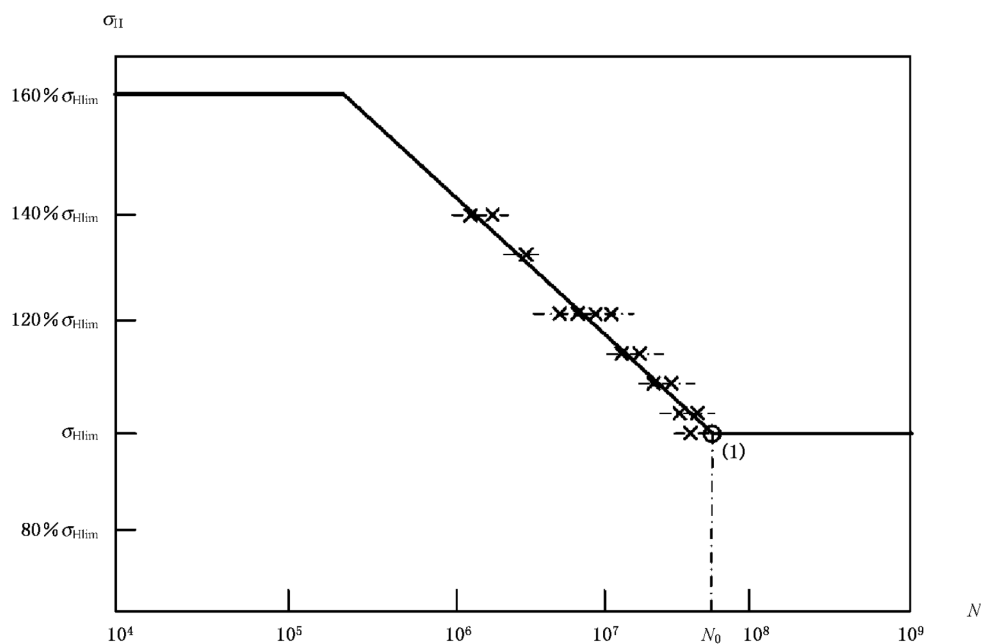
## 6.3 少点组合法

6.3.1 该法是在多个应力级下进行较少数量点的疲劳寿命试验,通过数据拟合得到 S-N 曲线。该法可用于测定试验齿轮有限寿命区间内50%可靠度下的 S-N 曲线,也可用于预估齿面接触疲劳极限应力  $\sigma_{H\lim}$ ,或可用于不同材料、不同工艺、不同修形条件下试验齿轮接触疲劳性能的对比测试。

6.3.2 试验时,通常取4个~10个应力级,每个应力级下应取1个~4个试验点(不包括越出点),总的试验点数不宜少于7个。所设置的应力级应在有限寿命区间内合理分布,见图3,原则是:

- 在高应力级区,应力级间隔可适当加大;
- 在低应力级区,应力级间隔可适当减小;
- 在最低应力级,应出现越出点。





标引序号说明：

×——失效点；

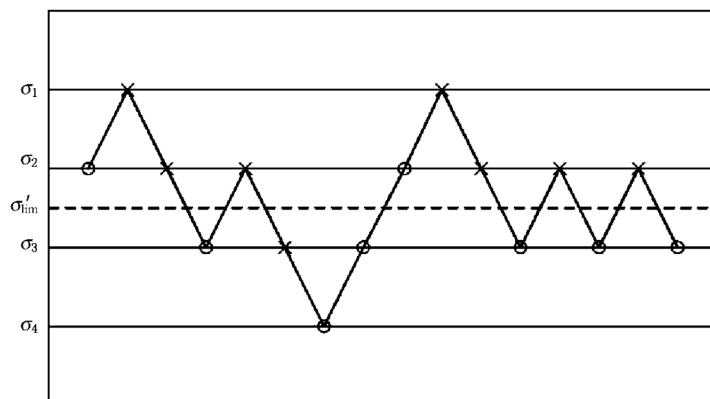
○——越出点(括号中的数字代表越出点个数)。

图 3 少点组合法示意

#### 6.4 升降变载法

6.4.1 该法是给定循环次数后,在预估疲劳极限应力  $\sigma'_{lim}$  附近设置多个应力级,依据试验点失效或越出的升降分布统计得出疲劳极限应力。该法可用于比较准确地测定齿面接触疲劳极限应力  $\sigma_{Hlim}$ 。

6.4.2 试验中,当前试件加载的应力级应由前一试件的试验结果决定。当前一试件为“失效”时,该试件加载的应力级应降低一级;“越出”时,则增高一级。“失效”和“越出”应配对出现。通常取 4 个~6 个应力级,相邻应力级的差值宜取  $\Delta\sigma = (0.04 \sim 0.06)\sigma'_{lim}$ ,考虑试验周期,所需试验点总数不宜少于 16 个。最后的有效试验点后的预测点应与第一个有效点同级。见图 4。



标引序号说明：

×——失效点；

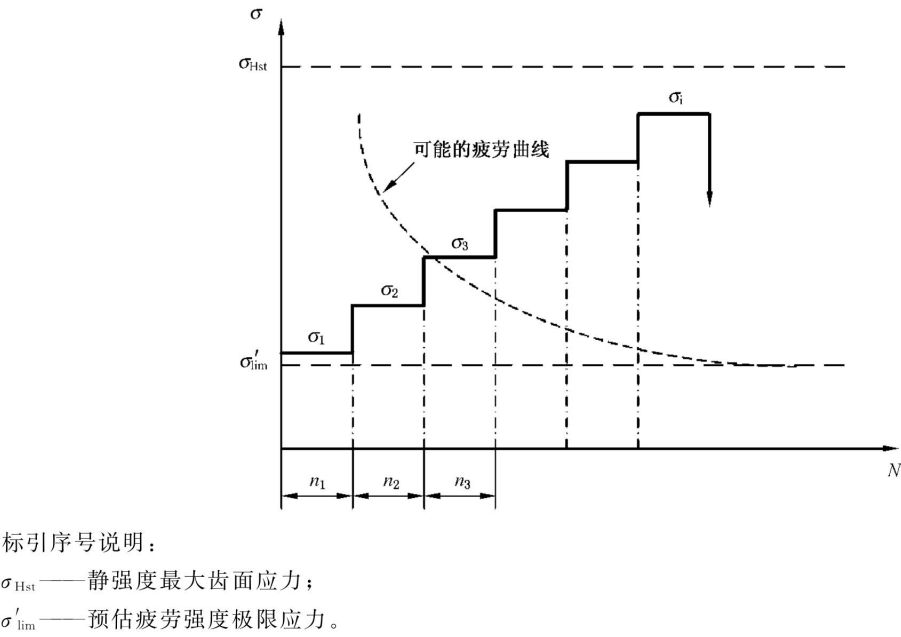
○——越出点。

图 4 升降变载法示意

6.5 阶梯增载法

6.5.1 该法是基于 Palmgren-Miner 法则,只用 1 个失效试验点,通过阶梯增量加载的方式快速获取疲劳极限应力。该法特别适用于不同材料、不同工艺、不同修形条件下,试验齿轮接触疲劳性能的快速对比试验。当已有试验数据较多时,该法也可用于齿面接触疲劳极限应力  $\sigma_{H\ lim}$  的大致测定。

6.5.2 试验时,首先预估疲劳极限应力  $\sigma'_{lim}$ ,以初始应力级  $\sigma_1 \approx \sigma'_{lim}$  为起点以阶梯增载的方式进行疲劳试验,每一应力级  $\sigma_i$  加载  $n$  次循环后观察损伤情况,如未到达设定的失效判据,则进入下一应力级  $\sigma_{i+1} = \sigma_i + \Delta\sigma$  继续试验,直至失效。见图 5。应注意,在最后的应力级下,试验齿轮不应出现除接触疲劳外其他形式的损伤。



标引序号说明:  
 $\sigma_{Hst}$  —— 静强度最大齿面应力;  
 $\sigma'_{lim}$  —— 预估疲劳强度极限应力。

图 5 阶梯增载法示意

6.6 其他方法

本文件不排斥其他的试验方法,但该方法应符合抽样和数理统计的要求,并与试验委托方或数据使用方达成一致。例如采用正交法进行对比试验时,每个对比因素至少应有 3 个试验点。

6.7 试验方法的比较

对 6.2~6.5 不同的试验方法所需要的试验点数、所得的处理结果、占用的试验周期进行比较,见表 2。

表 2 各种试验方法的对比

试验方法	可得结果			对比
	R-S-N 曲线	S-N 曲线	疲劳极限应力 $\sigma_{H\ lim}$	试验周期
常规成组法	有限寿命 <sup>a</sup>	有限寿命 <sup>a</sup>	高周疲劳寿命 <sup>a,b,c</sup>	最长
少点组合法	—	有限寿命 <sup>b</sup>	高周疲劳寿命 <sup>c</sup>	较短

表 2 各种试验方法的对比 (续)

试验方法	可得结果			对比
	R-S-N 曲线	S-N 曲线	疲劳极限应力 $\sigma_{H\ lim}$	试验周期
升降变载法	—	—	高周疲劳寿命 <sup>a</sup>	较长
阶梯增载法	—	—	高周疲劳寿命 <sup>c</sup>	最短
注：可综合使用常规成组法和升降变载法测定 R-S-N 曲线，其他试验方法常用于对比试验。在试验点数较少的情况下，试验结论有局限性。				
<sup>a</sup> 任意可靠度。 <sup>b</sup> 可靠度 $R=50\%$ 。 <sup>c</sup> 仅预估。				

7 试验装备

7.1 试验机

7.1.1 要求

7.1.1.1 宜采用功率流封闭传动形式(如图 1 所示),并具备双向运转和加载能力。中心距范围宜选为 80 mm~160 mm,加载方式可采用可控液压加载,试验齿轮线速度宜选为 8 m/s~30 m/s(不宜大于 40 m/s),并应具有以下基本功能:

- a) 保证试验齿轮接触斑点在不同载荷级下均能满足试验要求;
- b) 有足够能力补偿齿轮、轴承、密封件等处的功率损失;
- c) 试验过程中发生异常或齿轮断齿时可自动停机;
- d) 转矩加载稳定,连续可调;
- e) 在 10%~100%的加载范围内,转矩测量误差不大于被测转矩值的±1%;
- f) 保证试验齿轮具有良好润滑条件,润滑油温度控制误差不大于±5℃;
- g) 有循环次数记录装置,试验过程中工作应连续、可靠,最大记录误差不大于±0.1%。

7.1.1.2 试验中所需润滑油应按 JB/T 8831 进行选择 and 更换。一般情况下,试验机每连续运转三个月,应进行润滑油的取样检查、清洁或更换。

7.1.2 校核

应定期按照试验机的技术指标进行校验,做到:

- a) 试验齿轮的使用系数  $K_A$  的计算见公式(2),计算值不大于 1.05。

$$K_A = \frac{T_{1\max}}{T_1}$$

.....( 2 )

式中:

$T_{1\max}$ ——加载转矩最大值,单位为牛顿米(N·m);

$T_1$ ——加载转矩平均值,单位为牛顿米(N·m)。

- b) 加载系统、温度控制系统、转矩测量仪、计数器等运行精度满足设备要求。

## 7.2 试验齿轮

### 7.2.1 主要参数

7.2.1.1 用于齿轮(或齿轮材料)的基础数据试验时,宜选用圆柱齿轮,模数  $m_n=3\text{ mm}\sim 8\text{ mm}$ ,精度应满足 GB/T 10095(所有部分)规定的 4 级~6 级,基本齿廓应符合 GB/T 1356 的要求。可优先选择表 3 的参数范围,参数搭配应避免在试验中出现疲劳断齿或胶合现象。

7.2.1.2 在条件允许的情况下,试验齿轮也可按产品齿轮参数和实际运行条件进行相似设计,而在制造过程中,同一种试验齿轮的制造工艺应相同,保证试验齿轮性能的一致性。

表 3 基础数据测定推荐的试验齿轮参数

试验机中心距 mm	法向模数 mm	压力角 (°)	螺旋角 (°)	齿宽 mm
80~120	3~5	14.5~27.5	0~25	10~30
120~160	4~8	14.5~27.5	0~30	15~50

### 7.2.2 技术要求

为保证试验的规范化和问题的可追溯,试验齿轮的设计和制造应形成正式技术文件,包括几何设计、强度分析、材料控制、毛坯成形、热处理、机加工、表面强化等 7 项主要内容(如有必要,可另行增加)。应根据试验目的就试验齿轮的制造过程控制进行必要的检测并记录,试验齿轮的搬运和存储也应合理规范,详见表 4。

表 4 关于试验齿轮的技术要求

项目	分项	要 求
设计	几何设计 <sup>a</sup>	应尽可能选用齿数比接近 1 的互质齿数。对于修形试验齿轮,应就齿面接触应力分布进行具体分析,并就齿形基本设计参数、齿面修形方式、修形量进行详细记录
	强度分析 <sup>a</sup>	应保证试验齿轮在各个应力级具有足够的弯曲疲劳强度和抗胶合承载能力,避免发生其他形式的失效
制造	材料控制 <sup>b</sup>	应对材料冶炼设备、冶炼工艺进行必要控制和记录,并就化学成分、低倍组织、淬透性等物化指标进行检测。切割留存试样 1 件~3 件
	毛坯成形 <sup>b</sup>	要求同一批试验齿轮材料应来自同一冶炼炉号,并就铸件尺寸、锻造设备、锻造比、锻造工艺及锻后热处理方法进行详细记录,锻后应针对机械性能、非金属夹杂等进行检测。切割留存试样 1 件~3 件。铸造或轧制毛坯类同
	热处理 <sup>b</sup>	合理制定预备热处理与最终热处理工艺规范,记录设备型号、控制精度及介质类别等,全部试件应尽可能同炉处理,留存 1 件~3 件试样
	机加工 <sup>b</sup>	记录加工设备型号、刀具与工艺参数等,每道加工工序完成后应进行几何及精度检测
	强化处理 <sup>b</sup>	齿面采用功能涂层、光整加工等强化处理的试验齿轮,应详细记录工艺参数、设备型号、控制精度等,并就强化工艺实施后的相关指标进行检测

表 4 关于试验齿轮的技术要求 (续)

项目	分项	要 求
检测	几何精度 <sup>a</sup>	成品试验齿轮应进行几何精度检测,其中齿部精度等级按 GB/T 10095.1 和 GB/T 10095.2 应为 4 级~6 级
	内在质量 <sup>a</sup>	对于成品试验齿轮,抽样在节圆位置沿与齿面垂直方向进行表层硬度梯度与心部硬度检测,对马氏体、碳化物、残留奥氏体及心部组织等进行检测
	残余应力 <sup>b</sup>	对于成品试验齿轮,抽样在节圆位置沿与齿面垂直方向进行表层残余应力检测
	齿面粗糙度 <sup>a</sup>	对于成品试验齿轮,抽样检测节圆位置处沿齿廓方向和沿齿向的表面粗糙度
	磨齿烧伤 <sup>a</sup>	对于成品试验齿轮,检测齿面磨齿烧伤情况。参见 HB 7717—2002
储运	搬运 <sup>b</sup>	搬运过程中应轻拿轻落,不应磕碰,尤其齿廓部分不应有损伤
	存储 <sup>b</sup>	应编号涂油存放,避免发生锈蚀等损伤
<sup>a</sup> 重点控制性项目。		
<sup>b</sup> 一般控制性项目。		

## 8 失效判据

### 8.1 判别方法

以试验齿轮齿面点蚀损伤程度作为齿面接触疲劳失效的判据。判别方法有以下两种:

a) 单齿点蚀面积率的计算见公式(3)。

$$R_s = \frac{A_s}{A_{sw}} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$R_s$  ——单齿点蚀面积率, %;

$A_s$  ——试验齿轮单个齿面点蚀面积之和,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>);

$A_{sw}$  ——试验齿轮单个齿面工作表面积,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>)。

b) 齿轮副点蚀面积率的计算见公式(4)。

$$R_T = \frac{A_{1T}}{A_{1TW}} + \frac{A_{2T}}{A_{2TW}} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$R_T$  ——齿轮副点蚀面积率, %;

$A_{1T}$  ——试验齿轮主动轮全部齿点蚀面积之和,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>);

$A_{2T}$  ——试验齿轮被动轮全部齿点蚀面积之和,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>);

$A_{1TW}$  ——试验齿轮主动轮全部齿工作表面积之和,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>);

$A_{2TW}$  ——试验齿轮被动轮全部齿工作表面积之和,单位为平方毫米(mm<sup>2</sup>)。

### 8.2 判别准则

8.2.1 对于非表面硬化齿轮,点蚀一般会在所有齿面上出现。当试验齿轮副的硬度相等或相近时,设定的点蚀损伤极限值见公式(5):

$$R_T = 2\% \dots\dots\dots (5)$$

当达到公式(5)的值时,应判定该齿轮副失效。

8.2.2 对于表面硬化齿轮(包括渗碳、渗氮、碳氮共渗、火焰或感应淬火齿轮),点蚀一般首先在少数齿面上出现。设定的点蚀损伤极限值见公式(6)、公式(7):

$$R_s = 4\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

或

$$R_T = 0.5\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

当达到公式(6)的值时,应判定对应的齿轮失效;当达到公式(7)的值时,应判定该齿轮副失效。

8.2.3 齿面应力循环基数  $N_0$  一般设为  $5 \times 10^7$ 。当试验应力循环次数达到  $N_0$  而齿面点蚀未达到损伤极限时,试验可停止并判定该试验点越出。

## 9 试验程序

### 9.1 准备

9.1.1 确定试验目的,根据试验齿轮制造与检验技术文件制定试验方案,选取试验类型和确定试验方法。

9.1.2 清洗试验齿轮后目测检查,齿面不得有腐蚀、锈蚀或其他形式的损伤,然后应对试验齿轮、轮齿及齿面进行编号。

9.1.3 对试验机进行校核。

9.1.4 按试验机要求安装试验齿轮。

### 9.2 预备试验

9.2.1 检查试验齿轮齿面接触情况。加载至试验载荷后,齿面接触斑点沿工作齿宽方向应不小于 90%,沿齿高方向应不小于 80%。

9.2.2 以低于预估接触疲劳极限应力 50%对应的载荷值进行一定时长(不宜少于 2 h)的跑合试验,观察运行情况。

9.2.3 根据第 6 章要求,划分试验应力级,必要时应对每个应力级先期进行 1 个或 2 个试验点试验,以判定应力级设置的合理性。

### 9.3 正式试验

9.3.1 应按预备试验确定的应力级开始正式试验。

9.3.2 试验中应关注试验机的运转情况,并对润滑油的质量、流量、油温进行监测。对于试验中无法变载的试验机,应监控载荷变化,依据掉载程度随时停机,调整和恢复载荷,做好详细记录。

9.3.3 试验中应根据应力级的大小确定齿面检查时间间隔。试验初期可用 10 倍放大镜观察齿面,并应按照如下方法处理:

- a) 如果发现点蚀损伤但尚未达到损伤极限,继续试验并根据损伤形貌及扩展趋势缩短以后检查的时间间隔;
- b) 如果点蚀面积率超过损伤极限,取本次检查时间间隔的中间点作为齿面失效的时间终点;
- c) 如果试验过程中先期出现了其他损伤,如非正常磨损、轻微胶合等,详细记录损伤变化情况,改善润滑条件和运转参数;
- d) 如果出现中等及以上的磨损、胶合或发生轮齿断裂,判齿轮非接触疲劳失效,该组数据不能作为试验点。

9.3.4 应对点蚀损伤的形貌、位置、齿面序号及应力循环次数进行跟踪检查,并做好记录(例如覆膜或拍照)。

## 9.4 试验点的补充与剔除

### 9.4.1 补充

9.4.1.1 使用常规成组法时,同一应力级的试验点做完后应进行分布检验。如果分布函数的线性相关系数不能满足最小值要求(见 10.1.3),应补充试验点。对于正态分布,可采用  $t$  分布理论确定最少有效试验点数。

9.4.1.2 使用升降变载法时,应针对试验点数及时进行数据稳定性检验。最后连续 4 个试验点的稳定误差宜小于 0.5%。若稳定误差不能满足要求,应补充试验点。

9.4.1.3 使用其他试验方法,应结合试验点的统计学分析,判断试验结果是否具有足够的数据支撑。

### 9.4.2 剔除

9.4.2.1 当某一试验点的循环次数可疑时,可采用统计学中对可疑数据的处理方法来决定取舍。对于正态分布,宜采用肖维涅准则、格拉布斯法等。

9.4.2.2 当某一试验点的循环次数按照 9.4.2.1 选定方法被判定为过大数据时,应进一步分析该试验点的加载是否有误。如果是,应剔除该试验点。

9.4.2.3 当某一试验点的循环次数按照 9.4.2.1 选定方法被判定为过小数据时,应检查试验齿轮是否由于制造缺陷导致失效(例如磨齿后产生了表面微裂纹),并检查试验机载荷、振动是否超限。如果有一点是,应剔除该试验点。

## 9.5 失效分析

试验目的有要求时应进行失效分析。

应结合齿面点蚀形貌,借助光谱仪、光学/金相显微镜、扫描/透射电镜等检测设备,推断齿轮试件失效的原因。

## 10 试验数据的统计处理

### 10.1 常规成组法和少点组合法

#### 10.1.1 给定应力级下寿命的概率分布

10.1.1.1 在某一给定应力级下做  $n$  个试验点,得到的寿命值(循环次数) $N_L$  按递增顺序排列见公式(8)或公式(9):

a) 无越出点时:

$$N_{L1} \leq N_{L2} \leq \dots \leq N_{Ln-1} \leq N_{Ln} \quad \dots\dots\dots (8)$$

b) 有越出点且失效试验点数为  $r$  时:

$$N_{L1} \leq N_{L2} \leq \dots \leq N_{Lr-1} \leq N_{Lr} \quad \dots\dots\dots (9)$$

10.1.1.2 对于某一寿命值  $N_{Li}$  的寿命经验分布函数的表达见公式(10)或公式(11):

$$P(N_{Li}) = \frac{i}{n+1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

或

$$P(N_{Li}) = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$n$  —— 试验点总数;

$i$  —— 试验点序号。当无越出点时,  $i=1,2,\dots,n$ ; 当有越出点时,  $i=1,2,\dots,r$ 。



### 10.1.2 寿命分布函数假设

一般采用正态分布、对数正态分布或三参数威布尔分布进行分布检验,确定分布函数。三种分布函数的表达分别见公式(12)~公式(14):

正态分布

$$P(N_L) = \Phi\left(\frac{N_L - \mu_N}{\sigma_N}\right) \dots\dots\dots (12)$$

对数正态分布

$$P(N_L) = \Phi\left(\frac{\ln N_L - \mu_{\ln N}}{\sigma_{\ln N}}\right) \dots\dots\dots (13)$$

三参数威布尔分布

$$P(N_L) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N_L - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] \dots\dots\dots (14)$$

公式(12)~公式(14)中:

- $N_L$  —— 齿面应力循环次数;
- $\mu_N$  —— 正态分布函数母体平均值;
- $\sigma_N$  —— 正态分布函数母体标准差;
- $\mu_{\ln N}$  —— 对数正态分布函数母体对数平均值;
- $\sigma_{\ln N}$  —— 对数正态分布函数母体对数标准差;
- $\beta$  —— 威布尔分布函数的形状参数;
- $\eta$  —— 威布尔分布函数的尺度参数;
- $\gamma$  —— 威布尔分布函数的位置参数,当  $\gamma=0$  时,公式(14)简化为两参数威布尔分布函数。

### 10.1.3 寿命分布函数拟合与优度检验

10.1.3.1 宜采用最小二乘法进行寿命分布的拟合与优度检验,具体步骤为:

- a) 采用公式(10)或公式(11)计算  $P(N_{Li})$ ;
- b) 当按照正态分布拟合时,应按照公式(15)计算:

$$\Phi^{-1}[P(N_L)] = \frac{1}{\sigma_N}(N_L - \mu_N) \dots\dots\dots (15)$$

当按照对数正态分布拟合时,应按照公式(16)计算:

$$\Phi^{-1}[P(N_L)] = \frac{1}{\sigma_{\ln N}}(\ln N_L - \mu_{\ln N}) \dots\dots\dots (16)$$

当按照威布尔分布拟合时,应按照公式(17)计算:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - P(N_L)} = \beta [\ln(N_L - \gamma) - \ln \eta] \dots\dots\dots (17)$$

10.1.3.2 分布函数的线性相关系数应满足线性相关系数临界值的要求。当线性相关系数最小值同时满足两种以上分布时,应优先选用线性相关系数绝对值较大的分布。

10.1.3.3 不同可靠度下  $R$ - $S$ - $N$  曲线的各应力级应选取同一类型的分布。

### 10.1.4 $R$ - $S$ - $N$ 曲线参数的确定

方法如下:

- a) 按确定的寿命分布函数计算不同可靠度  $R$  下的可靠寿命  $N_{L,R}$ :  
——对于正态分布,计算见公式(18):

$$N_{L,R} = \mu_N + \sigma_N \Phi^{-1}(1 - R) \dots\dots\dots (18)$$

——对于对数正态分布,计算见公式(19):

$$N_{L,R} = \exp[\mu_{\ln N} + \sigma_{\ln N} \Phi^{-1}(1 - R)] \dots\dots\dots (19)$$



——对于三参数威布尔分布,计算见公式(20):

$$N_{L,R} = \eta \left( \ln \frac{1}{R} \right)^{\frac{1}{\beta}} + \gamma \quad \dots\dots\dots (20)$$

b) 拟合 S-N 曲线,宜按照公式(21)计算:

$$\sigma_H^m \cdot N_{L,R} = C \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

$m$  ——S-N 曲线方程的指数;

$C$  ——S-N 曲线方程的常数。

c) 以各应力级相同可靠度的“应力-循环次数”作为子样,用最小二乘法拟合,得到一系列不同可靠度下的 R-S-N 曲线。

### 10.1.5 C-R-S-N 曲线参数的确定

当要求建立 C-R-S-N 曲线时,方法见附录 A。

### 10.1.6 S-N 曲线斜率的修正

10.1.6.1 当按公式(1)计算  $\sigma_H$  时,若  $Z_R$  值不等于 1.0,则应修正 S-N 曲线的斜率。

10.1.6.2 修正后的 S-N 曲线方程参数的计算见公式(22)~公式(25):

$$m' = \left| \frac{\ln N_j - \ln N_0}{\ln \sigma_{Hj} - \ln \sigma_{H0}} \right| \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$C' = \sigma_{H0} \cdot N_0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

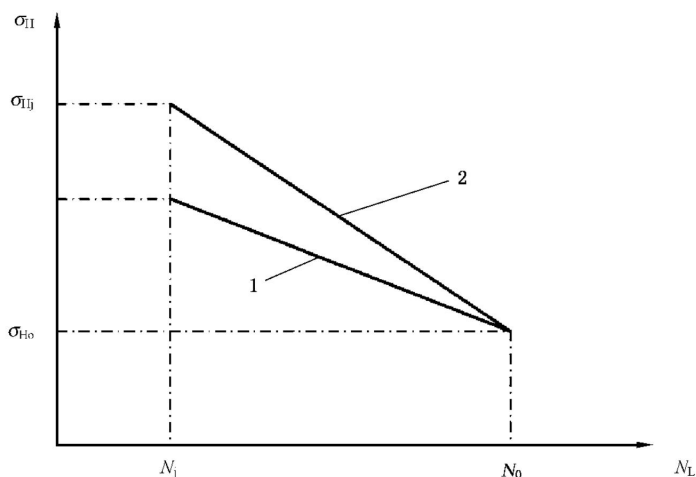
式中:

$N_j$  ——接触疲劳区上临界点循环次数;

$$\sigma_{Hj} = \left( \frac{C}{N_j} \right)^{1/m} \cdot Z_R \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\sigma_{H0} = \left( \frac{C}{N_0} \right)^{1/m} \quad \dots\dots\dots (25)$$

修正前后的 S-N 曲线见图 6。



标引序号说明:

$N_L$  ——加载循环次数;

$\sigma_H$  ——应力值,单位为牛顿每平方米(N/mm<sup>2</sup>);

1 ——未修正的 S-N 曲线,  $\sigma_H^m \cdot N_L = C$ ;

2 ——修正后的 S-N 曲线,  $\sigma_H^{m'} \cdot N_L = C$ 。

图 6 S-N 曲线斜率的修正

10.1.7 算例

见附录 B。

10.2 升降变载法

10.2.1 根据 6.4 得到不同应力级下“越出”和“失效”试验点分布后,以总点数较少原则选择“越出”或“失效”作为“分析事件”进行统计分析。

10.2.2 将应力级按升序排序,见公式(26)

$$\sigma_0 \leq \sigma_1 \leq \dots \leq \sigma_l \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:

$l$ ——应力级数。

10.2.3 应力平均值和标准偏差的估计值的计算见公式(27)~公式(32):

——平均值

$$\mu_\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中,分析事件选“失效”时取“—”,选“越出”时取“+”。

——标准偏差

$$\text{当 } \frac{NB - A^2}{N^2} \geq 0.3 \text{ 时, } s_\sigma = 1.62\Delta\sigma \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0.029 \right) \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\text{当 } \frac{NB - A^2}{N^2} < 0.3 \text{ 时, } s_\sigma = 0.53\Delta\sigma \quad \dots\dots\dots (29)$$

公式(27)~公式(29)中:

$\Delta\sigma$ ——应力增量;

$$A = \sum_{i=0}^l i f_i \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$B = \sum_{i=0}^l i^2 f_i \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$N = \sum_{i=0}^l f_i \quad \dots\dots\dots (32)$$

公式(30)~公式(32)中:

$f_i$ ——各应力级在分析事件中出现的次数。

10.2.4 可靠度为  $R$  下的疲劳极限应力  $\sigma_R$  的计算见公式(33):

$$\sigma_R = \mu_\sigma + \Phi^{-1}(1 - R) s_\sigma \quad \dots\dots\dots (33)$$

10.2.5 考虑置信度的疲劳极限应力  $\sigma_{R,C}$  的计算见 A.2。

10.2.6 完整算例见附录 C。

10.3 阶梯增载法

该法适用于疲劳极限应力的快速测定(算例见附录 D)。过程如下:

a) 记录试验中的应力级  $\sigma_i$  和对应的循环次数  $n_i$ ;

b) 选取  $J$  条( $J \geq 3$ )可参考的  $S-N$  曲线方程见公式(34):

$$\sigma_{\lim j}^m \cdot N_0 = C_j \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中:

$\sigma_{\lim j}$ ——第  $j$  条可参考的  $S-N$  曲线的极限应力值;

$C_j$ ——第  $j$  条可参考的  $S-N$  曲线方程的常数。

其中一条参考的  $S-N$  曲线应选取与试验齿轮材料、工艺相同或相近的曲线,其余参考的  $S-N$  曲线可由该曲线平移变换得到;

- c) 将应力级  $\sigma_i$  分别代入  $J$  条参考  $S-N$  曲线方程中,求解对应的寿命  $N_{ij}$ ;
- d) 根据循环次数  $n_i$  求出对应应力级  $\sigma_i$  的  $n_i/N_{ij}$  值及参考  $S-N$  曲线的  $\sum(n_i/N_{ij})$  值;
- e) 拟合  $\sum(n/N)-\sigma_{lim}$  曲线方程,求解  $\sum(n/N)=1$  时的  $\sigma_{lim}$  值。该值即为疲劳极限应力。

## 11 试验报告

应包括以下内容:

- a) 试验目的及要求;
- b) 试验方法;
- c) 试验条件及试验齿轮;
- d) 试验数据及处理结果;
- e) 损伤分析;
- f) 试验单位、报告人、审核人、日期。

## 附录 A

(资料性)

## 考虑置信度的统计处理方法

## A.1 采用常规成组法确定 C-R-S-N 曲线的参数

## A.1.1 释义

C-R-S-N 曲线是考虑置信度下的 R-S-N 曲线,即“置信度-可靠度-应力-循环次数”曲线。

## A.1.2 可靠寿命置信下限的计算

不同分布形式的计算如下:

- a) 对于正态分布,考虑置信度  $C(C \geq 50\%)$ ,可靠寿命的单侧置信下限的计算见公式(A.1):

$$N_{L,R,C} = \mu_N + k_{R,C} \sigma_N \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$\mu_N$  ——正态分布函数母体平均值;

$k_{R,C}$  ——正态分布单侧容限系数,其值与试验点数量  $n$ 、置信度  $C$  及可靠度  $R$  有关,见 GB/T 4885—2009 附录 A;

$\sigma_N$  ——正态分布函数母体标准差。

- b) 对于对数正态分布,可靠寿命的单侧置信下限的计算见公式(A.2):

$$N_{L,R,C} = \exp[\mu_{\ln N} + k_{R,C} \sigma_{\ln N}] \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$\mu_{\ln N}$  ——对数正态分布函数母体对数平均值;

$\sigma_{\ln N}$  ——对数正态分布函数母体对数标准差。

- c) 对于威布尔分布,  $P_1(N_L)$  为失效概率  $P(N_L)$  在置信度为  $C$  时的单侧置信下限,见公式(A.3):

$$P_1(N_{Li}) = \frac{i/(n-i+1)}{i/(n-i+1) + F_{1-C, 2(n-i+1), 2i}} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$F_{1-C, 2(n-i+1), 2i}$  ——自由度为  $2(n-i+1)$  和  $2i$  时  $F$  分布的值,且

$$P_1[F_{2(n-i+1), 2i} > F_{1-C, 2(n-i+1), 2i}] > 1 - C。$$

根据 10.1.2~10.1.4 进行寿命分布函数假设、拟合及可靠寿命计算。

## A.1.3 C-R-S-N 曲线拟合

## A.1.3.1 宜采用以下公式拟合 S-N 曲线,见公式(A.4):

$$\sigma_H^m \cdot N_{L,R,C} = C \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

$m$  ——S-N 曲线方程的指数;

$C$  ——S-N 曲线方程的常数。

A.1.3.2 以各应力级相同可靠度和置信度的“应力-循环次数”作为子样,采用最小二乘法拟合,得到一系列不同置信度和可靠度的 C-R-S-N 曲线。

## A.2 采用升降变载法确定疲劳极限应力

置信度为  $C$ 、可靠度为  $R$  下的疲劳极限应力置信下限的计算见公式(A.5):

$$\sigma_{R,C} = \mu_{\sigma} + k_{R,C} s_{\sigma} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

$\mu_{\sigma}$  ——应力平均值；

$s_{\sigma}$  ——应力标准偏差。

## 附录 B

(资料性)

### 常规成组法数据处理的算例

#### B.1 试验数据预处理

B.1.1 按照应力级递增把试验获得寿命数据排列,见表 B.1。

表 B.1 齿轮接触疲劳试验数据

单位为次

序号	寿命(循环次数)				
	应力级 I 1 450 N/mm <sup>2</sup>	应力级 II 1 535 N/mm <sup>2</sup>	应力级 III 1 617 N/mm <sup>2</sup>	应力级 IV 1 700 N/mm <sup>2</sup>	应力级 V 1 895 N/mm <sup>2</sup>
1	17 658 990	12 102 050	7 220 023	5 230 125	2 145 800
2	20 568 750	16 593 440	11 622 593	7 242 708	2 910 000
3	28 457 800	13 456 220	7 964 981	5 454 465	2 724 440
4	33 546 892	10 214 932	10 888 769	4 335 759	2 085 829
5	25 647 811	18 216 400	8 746 319	5 625 938	2 252 695
6	23 298 530	11 234 859	6 733 629	5 045 621	2 543 260
7	18 983 749	15 611 120	8 345 673	5 673 210	2 419 710
8	33 289 910	19 345 670	9 721 475	6 353 548	1 970 400
9	50 000 000	50 000 000	—	—	—
10	50 000 000	—	—	—	—

B.1.2 对每一应力级寿命样本按递增顺序排列并排除越出点,结果见表 B.2。

表 B.2 齿轮接触疲劳试验数据排序

单位为次

序号	寿命(循环次数)				
	应力级 I 1 450 N/mm <sup>2</sup>	应力级 II 1 535 N/mm <sup>2</sup>	应力级 III 1 617 N/mm <sup>2</sup>	应力级 IV 1 700 N/mm <sup>2</sup>	应力级 V 1 895 N/mm <sup>2</sup>
1	17 658 990	10 214 932	6 733 629	4 335 759	1 970 400
2	18 983 749	11 234 859	7 220 023	5 045 621	2 085 829
3	20 568 750	12 102 050	7 964 981	5 230 125	2 145 800
4	23 298 530	13 456 220	8 345 673	5 454 465	2 252 695
5	25 647 811	15 611 120	8 746 319	5 625 938	2 419 710
6	28 457 800	16 593 440	9 721 475	5 673 210	2 543 260
7	33 289 910	18 216 400	10 888 769	6 353 548	2 724 440
8	33 546 892	19 345 670	11 622 593	7 242 708	2 910 000

## B.2 给定应力下分布函数的确定

**B.2.1** 按公式(11)计算累积失效概率,按公式(15)、公式(16)和公式(17)分别计算各个应力级的正态分布、对数正态分布和三参数威布尔分布拟合公式所需的数据,利用极大似然法或相关系数优化法确定三参数威布尔分布的位置参数 $\gamma$ ,结果见表 B.3。

表 B.3 各个应力级下拟合公式数据点计算

应力级	序号	$N_L$	$P(N_L)$	$\Phi^{-1}(P(N_L))$	$\ln N_L$	$\ln \ln \frac{1}{1-P(N_L)}$	$\gamma$	$\ln(N_L - \gamma)$
I	1	17 658 990	0.083 3	-1.383 0	16.686 8	-2.441 7	16 344 543	14.088 9
	2	18 983 749	0.202 4	-0.833 1	16.759 1	-1.486 7		14.786 0
	3	20 568 750	0.321 4	-0.463 7	16.839 3	-0.947 4		15.256 3
	4	23 298 530	0.440 5	-0.149 8	16.963 9	-0.543 6		15.754 8
	5	25 647 811	0.559 5	0.149 8	17.060 0	-0.198 6		16.045 9
	6	28 457 800	0.678 6	0.463 7	17.163 9	0.126 6		16.309 8
	7	33 289 910	0.797 6	0.833 1	17.320 8	0.468 5		16.645 5
	8	33 546 892	0.916 7	1.383 0	17.328 5	0.910 2		16.660 6
II	1	10 214 932	0.083 3	-1.383 0	16.139 4	-2.441 7	8 956 079	14.045 7
	2	11 234 859	0.202 4	-0.833 1	16.234 5	-1.486 7		14.639 2
	3	12 102 050	0.321 4	-0.463 7	16.308 9	-0.947 4		14.961 6
	4	13 456 220	0.440 5	-0.149 8	16.415 0	-0.543 6		15.319 6
	5	15 611 120	0.559 5	0.149 8	16.563 5	-0.198 6		15.710 9
	6	16 593 440	0.678 6	0.463 7	16.624 5	0.126 6		15.848 6
	7	18 216 400	0.797 6	0.833 1	16.717 8	0.468 5		16.041 2
	8	19 345 670	0.916 7	1.383 0	16.778 0	0.910 2		16.156 3
III	1	6 7336 29	0.083 3	-1.383 0	15.722 6	-2.441 7	6 083 360	13.385 1
	2	7 220 023	0.202 4	-0.833 1	15.792 5	-1.486 7		13.943 6
	3	7 964 981	0.321 4	-0.463 7	15.890 6	-0.947 4		14.447 6
	4	8 345 673	0.440 5	-0.149 8	15.937 3	-0.543 6		14.631 9
	5	8 746 319	0.559 5	0.149 8	15.984 1	-0.198 6		14.794 9
	6	9 721 475	0.678 6	0.463 7	16.089 8	0.126 6		15.107 0
	7	10 888 769	0.797 6	0.833 1	16.203 2	0.468 5		15.385 3
	8	11 622 593	0.916 7	1.383 0	16.268 5	0.910 2		15.527 4
IV	1	4 335 759	0.083 3	-1.383 0	15.282 4	-2.441 7	3 343 058	13.808 2
	2	5 045 621	0.202 4	-0.833 1	15.434 0	-1.486 7		14.347 6
	3	5 230 125	0.321 4	-0.463 7	15.469 9	-0.947 4		14.450 5
	4	5 454 465	0.440 5	-0.149 8	15.511 9	-0.543 6		14.562 9
	5	5 625 938	0.559 5	0.149 8	15.542 9	-0.198 6		14.640 9
	6	5 673 210	0.678 6	0.463 7	15.551 3	0.126 6		14.661 4
	7	6 353 548	0.797 6	0.833 1	15.664 5	0.468 5		14.917 6
	8	7 242 708	0.916 7	1.383 0	15.795 5	0.910 2		15.176 4

表 B.3 各个应力级下拟合公式数据点计算 (续)

应力级	序号	$N_L$	$P(N_L)$	$\Phi^{-1}(P(N_L))$	$\ln N_L$	$\ln \ln \frac{1}{1-P(N_L)}$	$\gamma$	$\ln(N_L - \gamma)$
V	1	1 970 400	0.083 3	-1.383 0	14.493 7	-2.441 7	1 860 221	11.609 9
	2	2 085 829	0.202 4	-0.833 1	14.550 7	-1.486 7		12.326 6
	3	2 145 800	0.321 4	-0.463 7	14.579 0	-0.947 4		12.562 3
	4	2 252 695	0.440 5	-0.149 8	14.627 6	-0.543 6		12.880 2
	5	2 419 710	0.559 5	0.149 8	14.699 2	-0.198 6		13.234 8
	6	2 543 260	0.678 6	0.463 7	14.749 0	0.126 6		13.434 3
	7	2 724 440	0.797 6	0.833 1	14.817 8	0.468 5		13.669 6
	8	2 910 000	0.916 7	1.383 0	14.883 7	0.910 2		13.864 1

B.2.2 采用最小二乘法对表 B.3 中的相关数据点按线性模型  $Y=A+BX$  进行常数项  $A$ 、 $B$  和线性相关系数  $r$  值的计算,结果见表 B.4。相关系数临界值  $r_\alpha$  可通过计算或查表得出,见参考文献[7]。

表 B.4 拟合公式的常数项和线性相关系数表

		应力级 I	应力级 II	应力级 III	应力级 IV	应力级 V
正态分布	$B$	$1.422\ 2 \times 10^{-7}$	$2.649\ 4 \times 10^{-7}$	$5.149\ 8 \times 10^{-7}$	$1.001\ 6 \times 10^{-6}$	$2.709\ 9 \times 10^{-6}$
	$A$	-3.581 3	-3.867 3	-4.586 1	-5.629 0	-6.453 6
	$r$	0.973 5	0.985 4	0.983 9	0.969 7	0.986 0
对数正态分布	$B$	3.597 0	3.801 7	4.672 4	5.768 9	6.561 5
	$A$	-61.204 4	-62.624 0	-74.692 6	-89.600 5	-96.289 9
	$r$	0.980 5	0.985 9	0.991 4	0.978 4	0.990 9
三参数威布尔分布	$B$	1.175 7	1.458 4	1.501 0	2.637 7	1.439 0
	$A$	-18.965 2	-22.886 6	-22.507 8	-38.946 9	-19.146 3
	$r$	0.991 3	0.991 9	0.996 2	0.976 9	0.996 9
线性相关系数 临界值 (置信度 95%)	$r_\alpha$	0.878	0.878	0.878	0.878	0.878

B.2.3 从表 B.4 可知,正态分布、对数正态分布和三参数威布尔分布的线性相关系数均满足置信度为 95%时的相关系数临界值,且三参数威布尔分布的相关系数绝对值均大于其他两种分布相关系数绝对值,因此三参数威布尔分布函数是本组试验数据的最优寿命分布函数,故应采用三参数威布尔分布函数确定 C-R-S-N 曲线。

B.2.4 根据表 B.4 中三参数威布尔分布的线性模型参数  $A$  和  $B$  值进行形状参数和尺度参数的计算,结果见表 B.5。



表 B.5 三参数威布尔分布特征参数表

三参数威布尔分布	应力级 I	应力级 II	应力级 III	应力级 IV	应力级 V
形状参数 $\beta$	1.175 7	1.458 4	1.501 0	2.637 7	1.439 0
尺度参数 $\eta$	$1.012\ 7 \times 10^7$	$6.536\ 3 \times 10^6$	$3.253\ 8 \times 10^6$	$2.585\ 9 \times 10^6$	$6.001\ 5 \times 10^5$
位置参数 $\gamma$	16 344 543	8 956 079	6 083 360	3 343 058	1 860 221

## B.3 不同置信度、不同可靠度下的寿命计算

B.3.1 按公式(20)计算三参数威布尔分布的可靠寿命,见表 B.6。

表 B.6 三参数威布尔分布不同可靠度下的定应力寿命

单位为次

可靠度	应力级 I	应力级 II	应力级 III	应力级 IV	应力级 V
$R=0.50$	23 759 282	14 039 858	8 632 226	5 593 517	2 325 432
$R=0.90$	17 838 109	10 353 091	6 809 923	4 444 836	1 985 856
$R=0.95$	17 154 253	9 808 873	6 533 139	4 181 695	1 936 407
$R=0.99$	16 546 959	9 234 991	6 235 201	3 795 124	1 884 766

B.3.2 分别考虑 90%和 95%置信度,按公式(A.3)计算失效概率的单侧置信下限,重复 B.2 步骤,再计算此时的可靠寿命,见表 B.7。

表 B.7 90%和 95%置信度下三参数威布尔分布不同可靠度下的定应力寿命

单位为次

置信度	可靠度	应力级 I	应力级 II	应力级 III	应力级 IV	应力级 V
$C=90\%$	$R=0.5$	20 570 986	12 220 658	7 686 166	5 035 938	2 147 231
	$R=0.9$	15 555 604	8 309 369	6 021 013	3 843 599	1 844 299
	$R=0.95$	14 810 877	7 474 890	5 716 026	3 540 662	1 791 367
	$R=0.99$	14 022 207	6 315 690	5 339 116	3 057 039	1 728 221
$C=95\%$	$R=0.5$	19 767 978	11 677 741	7 436 558	4 879 744	2 101 237
	$R=0.9$	14 485 311	7 448 566	5 706 409	3 641 323	1 783 346
	$R=0.95$	13 598 777	6 451 458	5 362 377	3 312 870	1 722 130
	$R=0.99$	12 572 356	4 952 700	4 909 807	2 769 776	1 643 553

## B.4 C-R-S-N 曲线拟合

B.4.1 将公式(A.4)两边取对数,可以写为公式(B.1):

$$m \log \sigma_H + \log N_{L,R,C} = \log C \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

令  $Y = \log \sigma_H$ ,  $X = \log N_{L,R,C}$ ,  $B = -1/m$ ,  $A = \log C/m$ , 则公式(B.1)在双对数坐标系下视为线性模型  $Y = A + BX$ 。采用最小二乘法将置信度和可靠度相同的各应力级上的点进行直线拟合,可得到 C-R-S-N 方程,并验证相关系数  $r$ 。

B.4.2 表 B.8 列出了 90% 和 95% 置信度下三参数威布尔分布  $C-R-S-N$  方程参数拟合结果。

表 B.8 90% 和 95% 置信度下三参数威布尔分布  $C-R-S-N$  方程参数拟合结果

置信度	可靠度	$m \log \sigma_H + \log N_{L,R,C} = \log C$		相关系数 $r$	$\sigma_H^m \cdot N_{L,R,C} = C$	
		系数 A	系数 B		常数 $m$	常数 $C$
$C=90\%$	$R=0.50$	9.269 7	−0.118 4	0.999 3	8.443 6	$9.815\ 0 \times 10^{33}$
	$R=0.90$	9.367 1	−0.126 7	0.995 5	7.890 7	$1.258\ 8 \times 10^{32}$
	$R=0.95$	9.374 8	−0.127 7	0.991 6	7.827 8	$7.416\ 8 \times 10^{31}$
	$R=0.99$	9.352 8	−0.197 1	0.979 5	7.867 2	$9.027\ 6 \times 10^{31}$
$C=95\%$	$R=0.50$	9.283 1	−0.119 5	0.999 2	8.365 1	$5.308\ 4 \times 10^{33}$
	$R=0.90$	9.401 9	−0.129 5	0.993 2	7.721 4	$3.372\ 6 \times 10^{31}$
	$R=0.95$	9.413 7	−0.130 9	0.986 3	7.636 7	$1.664\ 7 \times 10^{31}$
	$R=0.99$	9.372 4	−0.129 4	0.960 8	7.730 0	$2.909\ 9 \times 10^{31}$

B.4.3 图 B.1 显示了在单对数坐标系下,95% 置信度的三参数威布尔分布  $C-R-S-N$  曲线。

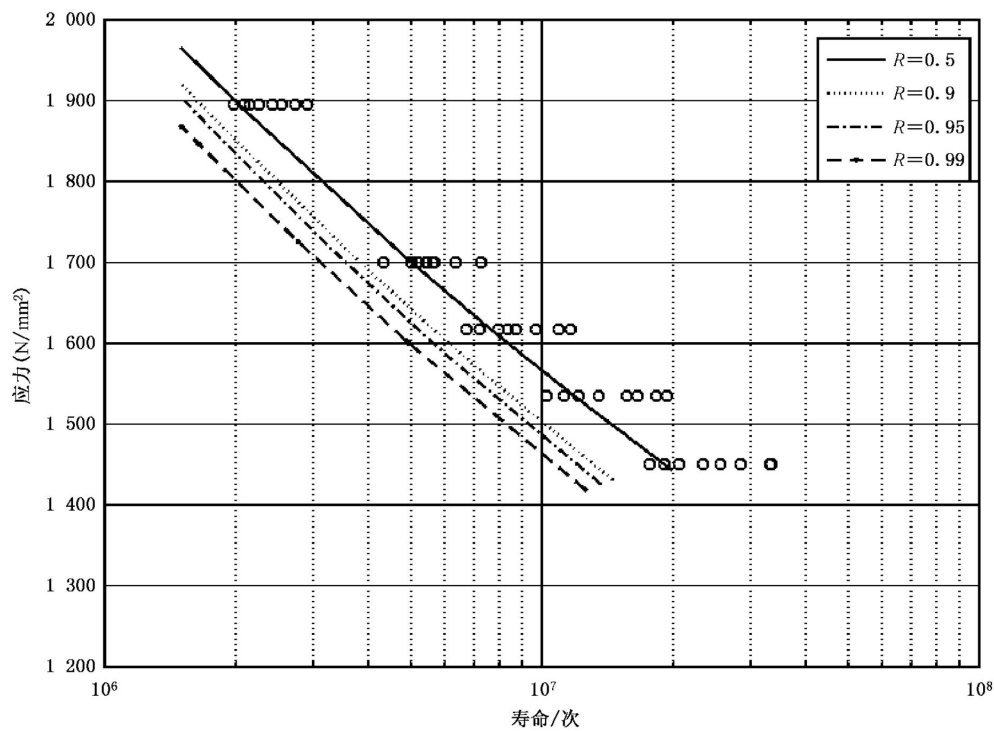


图 B.1 95% 置信度的三参数威布尔分布  $C-R-S-N$  曲线

## 附录 C

(资料性)

## 升降变载法数据处理的算例

## C.1 试验数据统计

C.1.1 本试验针对某种汽车用渗碳淬火齿轮。

C.1.2 选取 4 个应力级进行升降法试验,应力增量  $\Delta\sigma \approx 5\% \sigma_{H\lim} \approx 70 \text{ N/mm}^2$ , 经过升降法试验获得的数据见表 C.1。

表 C.1 升降法试验数据

试验次数	小轮接触应力 N/mm <sup>2</sup>	循环次数	是否失效
1	1 424	$5 \times 10^7$	N
2	1 493	$7.64 \times 10^6$	F
3	1 424	$1.21 \times 10^7$	F
4	1 358	$5 \times 10^7$	N
5	1 424	$0.79 \times 10^7$	F
6	1 358	$3.56 \times 10^7$	F
7	1 287	$5 \times 10^7$	N
8	1 358	$5 \times 10^7$	N
9	1 424	$5 \times 10^7$	N
10	1 493	$16.28 \times 10^6$	F
11	1 424	$1.02 \times 10^7$	F
12	1 358	$5 \times 10^7$	N
13	1 424	$2.29 \times 10^7$	F
14	1 358	$5 \times 10^7$	N
15	1 424	$3.6 \times 10^7$	F
16	1 358	$5 \times 10^7$	N

注：F——失效；N——越出。

C.1.3 将应力级按升序排列,统计失效和未失效的次数,见表 C.2。

表 C.2 升降法统计数据

应力 N/mm <sup>2</sup>	应力级	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	次数	
																		F	N
1 493	3		F								F							2	0
1 424	2	N		F		F				N		F		F		F		5	2
1 358	1				N		F		N				N		N		N	1	5
1 287	0							N										0	1
总计																		8	8

注：F——失效；N——越出。

C.2 试验数据处理

C.2.1 将“越出”作为分析事件,计算过程见表 C.3。

表 C.3 求应力平均值与标准偏差的过程参数计算

应力 N/mm <sup>2</sup>	应力等级 <i>i</i>	分析事件数 <i>f<sub>i</sub></i>	<i>i f<sub>i</sub></i>	<i>i<sup>2</sup> f<sub>i</sub></i>
1 424	2	2	4	8
1 358	1	5	5	5
1 287	0	1	0	0
过程参数计算		<i>N</i> = 8	<i>A</i> = 9	<i>B</i> = 13
		$\frac{NB-A^2}{N^2} = 0.359 > 0.3$		

C.2.2 按公式(27)和公式(28)计算应力平均值估计值  $\mu_{\sigma} = 1\,401\text{ N/mm}^2$ , 标准偏差估计值  $s_{\sigma} = 44\text{ N/mm}^2$ 。

C.3 疲劳极限计算

按公式(A.5)计算置信度为 95%、可靠度为 0.99 下的疲劳极限置信下限,查 GB/T 4885—2009 附录 A 可知  $k_{0.99,95\%} = 4.353$ ,可得疲劳极限置信下限值  $\sigma_{0.99,95\%} = 1\,210\text{ N/mm}^2$ 。

## 附录 D

(资料性)

## 阶梯增载法数据处理的算例

## D.1 试验与数据记录

参考图 5, 预估某种球墨铸铁齿轮的接触疲劳极限应力  $\sigma'_{\text{lim}}$  约为  $565 \text{ N/mm}^2$ , 按表 D.1 的应力级进行阶梯增载试验, 其中最低应力级宜取预估疲劳极限应力的近似值, 最高应力级应不大于 1.4 倍的预估疲劳极限应力, 每个应力级取相同的循环次数。

表 D.1 试验数据记录

接触应力 $\sigma_i$ $\text{N/mm}^2$	设定循环次数 $n_i$ 次
558.48	$2 \times 10^5$
608.10	
631.12	
656.02	
679.52	
699.89	
728.36	
753.82	
777.85	
790.11	

## D.2 选取参考 S-N 曲线

D.2.1 设主要参考曲线方程为:

$$\sigma^{13.2275} \cdot N = 1.015\,279 \times 10^{44}$$

其疲劳极限应力值  $\sigma_{\text{H lim}} = 555.72 \text{ N/mm}^2$  ( $N_{\text{L}} = 5 \times 10^7$ )。

D.2.2 设另外两条参考曲线分别为:

$$\sigma^{13.2275} \cdot N = 2.502\,498 \times 10^{44}$$

$$\sigma^{13.2275} \cdot N = 3.855\,049 \times 10^{43}$$

其疲劳极限值分别为  $594.95 \text{ N/mm}^2$  和  $516.49 \text{ N/mm}^2$ 。

## D.3 求解寿命和累积损伤值

参照参考曲线, 试验的累积损伤  $\Sigma(n/N)$  的计算过程见表 D.2。

表 D.2 累积损伤数据计算过程

接触应力 $\sigma_i$ N/mm <sup>2</sup>	设定循环次数 $n_i$ 次	$\sigma_{H\lim}=516.49$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{H\lim}=555.72$ N/mm <sup>2</sup>		$\sigma_{H\lim}=594.95$ N/mm <sup>2</sup>	
		N	$n/N$	N	$n/N$	N	$n/N$
558.48	$2 \times 10^5$	19 080 920	0.010 48	46 833 037	0.004 27	—	—
608.10		6 644 582	0.030 10	15 190 600	0.013 16	36 697 492	0.005 45
631.12		4 185 304	0.047 79	9 292 292	0.021 52	21 714 706	0.009 21
656.02		2 583 411	0.077 42	5 569 481	0.035 91	12 589 610	0.015 89
679.52		1 664 290	0.120 17	3 496 473	0.057 20	7 677 271	0.026 05
699.89		1 150 068	0.173 90	2 365 892	0.084 53	5 073 879	0.039 42
728.36		697 518	0.286 73	1 396 029	0.143 26	2 903 489	0.068 88
753.82		452 991	0.441 51	886 144	0.225 70	1 796 784	0.111 31
777.85		305 222	0.655 26	585 121	0.341 81	1 160 122	0.172 39
790.11		250 645	0.797 94	475 782	0.420 36	933 114	0.214 34
$\Sigma(n/N)$			2.641 3		1.347 7		0.664 6

D.4 求解疲劳极限应力

根据表 D.2 数据,通过插值法求解  $\Sigma(n/N)=1$  时的疲劳极限应力为 570.44 N/mm<sup>2</sup>。图 D.1 为拟合的  $\Sigma(n/N)-\sigma_{\lim}$  曲线。

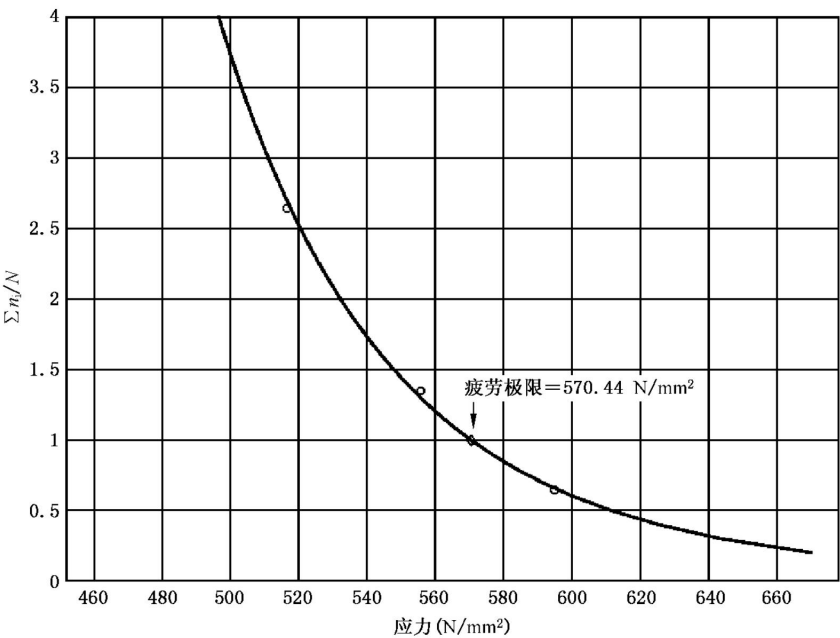


图 D.1  $\Sigma(n/N)-\sigma_{\lim}$  曲线

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 3480.6—2018 直齿轮和斜齿轮承载能力计算 第6部分:变载荷条件下的使用寿命计算
- [2] GB/T 4885—2009 正态分布完全样本可靠度置信下限
- [3] GB/T 24176—2009 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法
- [4] HB 7717—2002 航空钢制件磨削烧伤酸浸蚀检查
- [5] BS 3518-1:1993(R2015) Methods of Fatigue testing—Part 1:Guide to general principles
- [6] 朱孝录,易秉钺,廉以智,等.齿轮的试验技术与设备.机械工业出版社,1988
- [7] 高镇同.疲劳应用统计学.国防工业出版社,1986
- [8] 朱孝录.齿轮材料的接触疲劳强度.机械传动,18(3),1994
- [9] 《齿轮手册》编委会.齿轮手册(第二版).机械工业出版社,2004
- [10] 《齿轮制造手册》编辑委员会.齿轮制造手册.机械工业出版社,1998
- [11] 中国机械工程学会材料学会.机械产品失效分析丛书(零件-4)—齿轮的失效分析.机械工业出版社,1992
- [12] J.Zhang & B.A.Shaw.Performance of gears with WC/C coating[J].Power Transmissions, ISBN:978-1-138-03267-5
-

中 华 人 民 共 和 国  
国 家 标 准  
齿轮接触疲劳强度试验方法  
GB/T 14229—2021

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)  
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: [www.spc.org.cn](http://www.spc.org.cn)

服务热线: 400-168-0010

2021年5月第一版

\*

书号: 155066 · 1-67611

版权专有 侵权必究



GB/T 14229-2021



码上扫一扫 正版服务到