

齿轮的强度试验 及设计计算

松 涛 编译

大 海 校

内 容 简 介

本书是由论文集编译而成的，介绍了齿轮在不同负载条件下的疲劳强度试验及疲劳特性，并根据齿轮圆根处的组织变化和残余应力变化讨论了齿轮疲劳破坏的机理。介绍了轮齿的应力计算公式、弯曲强度的设计及渐开线圆柱内轮的负荷容量计算公式。

本书还介绍了少齿差，零齿差齿轮的效率及干涉计算。

本书可供从事齿轮设计的技术人员、研究人员、工人及大专院校机械专业的师生参考。

齿 車 の 設 計
〔日〕 会田俊夫等
选译自1966年~1972年
《机械の研究》等杂志

*

齿轮的强度试验及设计计算

松 涛 编译
大 海 校

*

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京印刷一厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 10 $\frac{1}{2}$ 220千字
1978年5月第一版 1978年5月第一次印刷 印数 00,001—31,000册
统一书号 15034·1652 定价·1.10元

目 录

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第一章 在疲劳过程中齿根圆根处的组织和残余应力的变化..... | I |
| 第一节 概述 | 1 |
| 第二节 齿根圆根处的组织变化和残余应力 | 2 |
| 一、实验方法 | 2 |
| 二、实验结果及考察 | 5 |
| 第三节 几点结论 | 11 |
| 第二章 反转时的疲劳特性 | 13 |
| 第一节 实验及观察 | 13 |
| 一、试样及疲劳试验机 | 13 |
| 二、组织变化的观察 | 13 |
| 三、残余应力的测定 | 13 |
| 四、齿根圆根处实际应力及应力集中系数 | 14 |
| 五、反转疲劳试验 | 14 |
| 第二节 实验结果 | 14 |
| 一、疲劳试验结果 | 14 |
| 二、组织变化 | 16 |
| 三、残余应力 | 18 |
| 第三节 对实验结果的考察 | 19 |
| 第三章 齿面硬化齿轮、粉末冶金齿轮、压合齿轮的弯曲疲劳强度 | 22 |
| 第一节 齿面硬化齿轮的弯曲疲劳强度 | 22 |
| 一、渗碳淬火齿轮的弯曲疲劳强度 | 22 |
| 二、火焰淬火和高频淬火齿轮的弯曲疲劳强度 | 38 |
| 三、喷丸硬化齿轮的弯曲疲劳强度 | 51 |
| 四、氮化齿轮的弯曲疲劳强度 | 60 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 五、各种齿面硬化齿轮弯曲疲劳强度的比较 | 74 |
| 第二节 粉末冶金齿轮的弯曲疲劳强度 | 75 |
| 一、粉末冶金齿轮的特性 | 75 |
| 二、粉末冶金齿轮的弯曲强度 | 76 |
| 三、粉末冶金齿轮弯曲疲劳强度的特征 | 82 |
| 四、粉末冶金齿轮的弯曲强度计算公式 | 91 |
| 第三节 压合齿轮的弯曲疲劳强度 | 91 |
| 一、压合齿轮弯曲疲劳强度的降低 | 91 |
| 二、产生在压合齿轮齿根圆根处的残余拉伸应力 | 93 |
| 三、压合齿轮的残余拉伸应力和弯曲疲劳强度降低的关系 | 97 |
| 四、过盈量的确定方法 | 101 |
| 第四章 反复正反转齿轮及中间齿轮的疲劳强度 | 106 |
| 第一节 实验方法 | 106 |
| 一、试验齿轮及弯曲疲劳试验机 | 106 |
| 二、残余应力的测定 | 107 |
| 第二节 实验结果及考察 | 108 |
| 一、弯曲疲劳试验结果 | 108 |
| 二、残余应力测定结果 | 112 |
| 第五章 二级复式重复负荷系统和等效负荷 | 115 |
| 第一节 实验方法 | 115 |
| 一、试验齿轮及弯曲疲劳试验机 | 115 |
| 二、二级复式重复弯曲疲劳试验 | 117 |
| 第二节 多级复式重复负荷系统和它的等效负荷 | 117 |
| 第三节 实验结果及考察 | 120 |
| 第六章 变动负荷系统和有效弯曲疲劳极限 | 131 |
| 第一节 符号 | 132 |
| 第二节 试验齿轮及弯曲疲劳试验机 | 134 |
| 第三节 实验结果及考察 | 134 |
| 一、过小应力对弯曲疲劳极限的影响 | 134 |

| | |
|---|-----|
| 二、二级负荷系统的有效弯曲疲劳极限 | 137 |
| 三、各种负荷系统的弯曲疲劳试验结果 | 144 |
| 第四节 齿面强度及弯曲疲劳强度对负荷变动的依赖性 | 145 |
| 第七章 齿轮的弯曲疲劳破坏机理 | 148 |
| 第一节 实验方法 | 148 |
| 一、试验齿轮及弯曲疲劳试验机 | 148 |
| 二、组织变化的观察 | 150 |
| 三、残余应力的测定 | 150 |
| 第二节 齿根圆根处拉伸侧实际应力 σ_t 、压缩侧实际应力 σ_c 及它们之比 $\gamma = -\sigma_c/\sigma_t$ | 151 |
| 第三节 在疲劳过程中齿根圆根处的组织及残余应力的变化 | 154 |
| 一、在疲劳过程中齿根圆根处的组织变化 | 154 |
| 二、疲劳过程中齿根圆根处的残余应力变化 | 157 |
| 第四节 在齿根圆根处压缩侧发生的裂纹 | 161 |
| 一、压缩侧产生裂纹的条件 | 161 |
| 二、由脉动负荷作用而引起的残余应力对弯曲疲劳破坏的影响 | 164 |
| 三、压缩侧裂纹的停留 | 165 |
| 第五节 反转时齿轮的弯曲疲劳特性 | 167 |
| 一、齿轮 G.A, G.B(S 15 C 退火, S 15 C 滚齿) | 167 |
| 二、齿轮 G.F, G.G(SCM 21、SNC 21 渗碳淬火) | 168 |
| 第六节 轮齿的弯曲疲劳破坏机理的分类 | 171 |
| 一、非硬化齿轮 | 171 |
| 二、硬化齿轮 | 171 |
| 第八章 与二个从动齿轮相啮合的主动齿轮的弯曲疲劳强度 | 174 |
| 第一节 实验方法 | 174 |
| 一、试验齿轮及弯曲疲劳试验机 | 174 |
| 二、弯曲疲劳试验 | 175 |

| | |
|---|-----|
| 第二节 实验结果及考察 | 176 |
| 一、S 15 C 齿轮的弯曲疲劳试验结果 | 176 |
| 二、S 45 C 齿轮的弯曲疲劳试验结果 | 182 |
| 第九章 轮齿压缩侧应力计算公式和运转时 的齿根应力 | 189 |
| 第一节 符号 | 190 |
| 第二节 应力计算公式的假定及其推导 | 191 |
| 第三节 在圆根曲线上应力的计算 | 194 |
| 一、由于集中负荷引起的弯曲 | 196 |
| 二、由于集中负荷引起的压缩 | 197 |
| 三、由于纯弯曲力矩引起的弯曲 | 197 |
| 四、齿根圆根处的坐标、切线、曲率半径、模数和 映像函数的关系 | 199 |
| 第四节 应力集中系数 | 201 |
| 一、公称应力 | 201 |
| 二、由于纯弯曲力矩引起的弯曲 | 202 |
| 三、由于集中负荷引起的弯曲 | 203 |
| 四、由于集中负荷引起的压缩 | 204 |
| 第五节 实用压缩侧的实际应力计算公式 | 207 |
| 第六节 实用公式求出的应力值和实测值的比较 | 209 |
| 一、齿根实际应力测定法 | 209 |
| 二、实验结果及考察 | 209 |
| 第七节 齿面上有摩擦力作用时的齿根应力 | 211 |
| 一、相对于各种摩擦系数的拉伸侧、压缩侧齿根应力 | 211 |
| 二、运转时产生的齿根应力 | 213 |
| 第十章 齿轮的弯曲强度设计 | 217 |
| 第一节 弯曲许用负荷计算公式 | 218 |
| 第二节 弯曲疲劳极限 σ_{up} 和基准弯曲疲劳极限 σ_{up0} | 222 |
| 第三节 弯曲运转条件系数 B_T | 227 |

| | | |
|------|---------------------------|-----|
| 第四节 | 弯曲寿命系数 B_N | 229 |
| 第五节 | 几点说明 | 232 |
| 第十一章 | 渐开线圆柱齿轮的负荷容量计算公式 | 233 |
| 第一节 | 概述 | 233 |
| 第二节 | 渐开线圆柱齿轮的负荷容量计算公式 | 233 |
| 一、 | 齿轮负荷容量计算公式的适用范围 | 234 |
| 二、 | 齿轮的负荷容量 | 234 |
| 第三节 | 弯曲许用负荷计算公式 | 234 |
| 一、 | 弯曲的可靠性系数 B_R | 236 |
| 二、 | 弯曲的运转条件系数 B_T | 236 |
| 三、 | 弯曲的寿命系数 B_N | 236 |
| 四、 | 弯曲的尺寸效果系数 B_S | 238 |
| 五、 | 齿形系数 Y | 238 |
| 六、 | 材料的弯曲强度 S_B | 243 |
| 七、 | 弯曲的啮合率系数 B_e | 245 |
| 八、 | 弯曲的负荷分布系数 B_B | 246 |
| 第四节 | 齿面接触压力许用负荷计算公式 | 253 |
| 一、 | 齿面接触压力的可靠性系数 C_R | 254 |
| 二、 | 润滑系数 C_L | 254 |
| 三、 | 齿面接触压力的寿命系数 C_N | 255 |
| 四、 | 齿面接触压力的尺寸效果系数 C_S | 256 |
| 五、 | 范围系数 z | 257 |
| 六、 | 材料的齿面接触压力强度 S_C | 257 |
| 七、 | 齿面接触压力的啮合率系数 C_e | 258 |
| 八、 | 齿面接触压力的负荷分布系数 C_B | 259 |
| 第五节 | 动负荷 W_D | 260 |
| 一、 | 动负荷 | 260 |
| 二、 | 动负荷计算式 | 261 |
| 第十二章 | 少齿差、零齿差齿轮的效率及干涉计算 | 264 |
| 第一节 | 概述 | 264 |

| | |
|--------------------------------|------------|
| 第二节 少齿差行星减速机 | 266 |
| 第三节 行星齿轮传动装置的分类和少齿差行星减速机 | 270 |
| 一、2 K-H 型 | 271 |
| 二、3 K 型 | 271 |
| 三、K-H-V 型 | 272 |
| 第四节 渐开线标准齿轮的啮合效率 | 272 |
| 一、标准渐开线外齿轮的啮合效率 | 273 |
| 二、标准渐开线内齿轮的啮合效率 | 278 |
| 第五节 少齿差渐开线移距内齿轮的啮合效率 | 282 |
| 第六节 零齿差渐开线移距内齿轮的啮合效率 | 288 |
| 第七节 少齿差渐开线移距内齿轮 | 290 |
| 一、渐开线内齿轮的优点和存在的问题 | 290 |
| 二、在计算移距内齿轮时所使用的符号 | 292 |
| 三、移距内齿轮的计算公式 | 293 |
| 四、设计内齿轮时应该考虑的事项 | 294 |
| 五、计算渐开线移距内齿轮的各项条件式 | 295 |
| 六、综合干涉极限图 | 309 |
| 七、实例 | 316 |
| 第八节 零齿差渐开线移距内齿轮 | 317 |
| 一、啮合方程式 | 317 |
| 二、零齿差内齿轮正常啮合的条件 | 318 |
| 三、综合极限曲线图 | 322 |
| 四、实例 | 323 |
| 第九节 说明 | 325 |
| 附表 部分钢材机械性能和热处理条件 | 326 |

第一章 在疲劳过程中齿根圆根处的组织和残余应力的变化

第一节 概 述

在多数情况下，齿轮的强度通常用齿面强度确定。在齿轮强度设计中，齿根弯曲强度历来是不作为问题的。但是，近年来随着淬火技术（高频淬火、渗碳淬火等）及齿轮磨削技术的发展，齿轮的齿面强度显著地提高、传递功率增大，并趋向于小型化，于是，齿根弯曲强度再度成为重要的问题。另一方面，到现在为止，虽然有不少关于齿根弯曲强度的研究，但多数是根据对各种齿形的光弹性实验等来确定齿根圆根处的应力集中，或者根据对各种齿形、材料和热处理后的齿轮进行疲劳试验而整理出 $S-N$ 曲线及疲劳极限。而对于轮齿弯曲强度的基本问题——轮齿的弯曲疲劳破坏机理，以及负荷作用在齿轮上而使疲劳强度发生变化等问题，目前几乎还没有进行过研究。

基于这样一种状况，本章首先研究由于负荷而引起的齿根应力，同时分析和研究轮齿达到弯曲疲劳破坏的过程及机理，在所得结果的基础上，进一步对各种负荷、材料、热处理，特别是对于齿面经硬化处理的齿轮轮齿的弯曲疲劳强度，进行理论和实验的分析。

第二节 齿根圆根处的组织变化和残余应力

一、实验方法

1. 试样及疲劳试验机

本实验用的是 S 15 C 碳素钢经滚切加工的齿轮。其参数为：模数 $m=4$ ，压力角 $\alpha=20^\circ$ ，齿数 $Z=18$ ，齿宽 $b=8.0$ 毫米，应力集中系数 $\alpha=1.57$ 。

将齿轮研磨抛光达到镜面光洁度后，在真空中加热至 900°C 保持 1 小时进行退火。为了便于用金相显微镜观察组织，需用 Jaquet 电解液进行电解研磨。退火后材料的屈服极限及拉伸强度分别为 31.7 公斤/毫米² 和 44.1 公斤/毫米²。

图 1-1 所示的疲劳试验机主要是由产生交变负荷的燃料喷射泵及其驱动装置、最高压力指示计（压力控制装置）和齿轮加压装置三部分组成。

图 1-2 所示为试验齿轮的负荷作用位置。

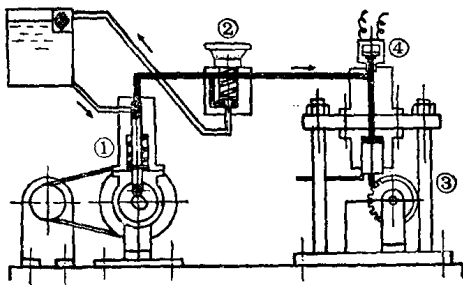


图 1-1 齿轮疲劳试验机

- ① 燃料喷射泵；② 压力控制装置；③ 齿轮加压部分；
④ 压力计。

2. 组织变化的观察

在交变负荷下经过一定的循环次数时停止疲劳试验，然后用金相显微镜观察齿轮端面齿根圆根处(图 1-2 的 A, B)的组织，观察交变应力所引起的组织变化。

3. 残余应力的测定

残余应力的测定，采用非破坏性的 X 线应力测定法测定试验材料表面局部存在的应力。把 X 线垂直于试验材料表面及与测定方向平面成 45° 方向射入，得到反射线，测定 $\text{cosec}\theta_\perp$ 、 $\text{cosec}\theta_\psi$ ，用下式求得应力值。

$$\sigma_x = K(\text{cosec}\theta_\psi - \text{cosec}\theta_\perp) \quad (1-1)$$

式中 θ_0 ——无应力状态结晶的 X 线反射角；

θ_\perp ——由试验材料表面法向射入 X 线的反射角；

θ_ψ ——与试验材料表面法向成 ψ (45°) 方向射入 X 线的反射角；

K ——根据 X 线射入角确定的常数；

$$K = \sin\theta_0 \left(\frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{\sin^2\psi} \right)$$

E 、 ν ——弹性模数、泊桑比。

图 1-3、图 1-4 所示为测定装置的一部分。齿轮支承台设计成使 X 线能正确地照射在齿轮端面的任意位置上。

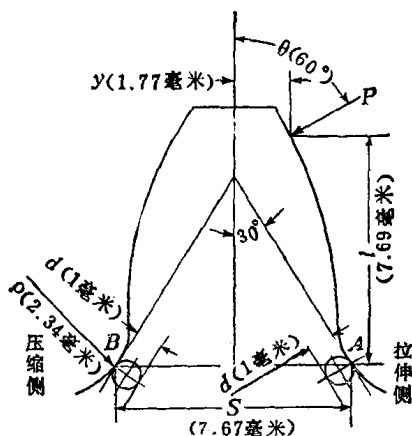


图 1-2 负荷作用位置及 X 线照射位置

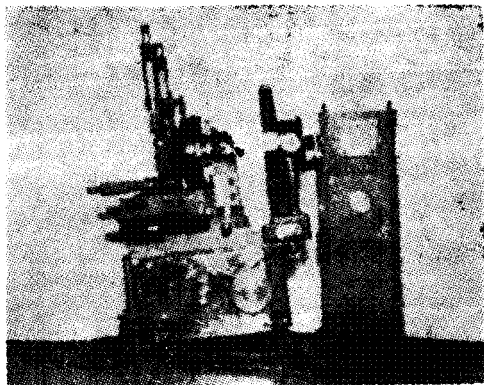


图 1-3 X 线应力测定装置

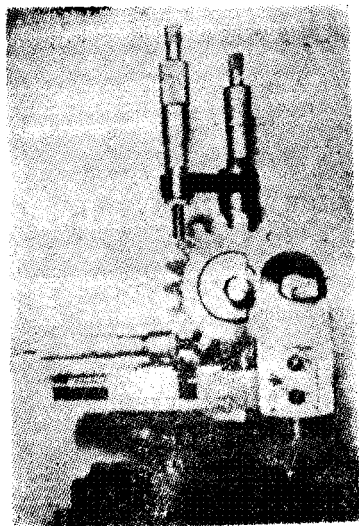


图 1-4 齿轮支承台

X 线照射位置如图 1-2 所示，应在齿轮端面上，用霍弗（Hofer）危险断面和齿形曲线的交点来确定。因为根据以往的研究成果，在此处附近产生的应力最大。

4. 齿根实际应力及应力集中系数

按下式求得齿根圆根处（见图 1-2）拉伸侧的实际应力 σ_r （考虑了应力集中的齿根圆根处产生的应力）和应力集中系数 α 。

$$\sigma_t = \left(1 + 0.08 \frac{S}{\rho}\right) (0.66 \sigma_{Nb} + 0.40 \sqrt{\sigma_{Nb}^2 + 36 \tau_N^2} + 1.15 \sigma_{Nc}) \quad (1-2)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_t}{\sigma_{Nb} + \sigma_{Nc}} \quad (1-3)$$

式中 σ_{Nb} ——弯曲分力在危险断面上引起的公称应力，

$$\sigma_{Nb} = \frac{6 P \sin \theta L}{S^2 b};$$

σ_{Nc} ——压缩分力引起的公称应力，

$$\sigma_{Nc} = -\frac{P \cos \theta}{Sb} = -\frac{6 P \cos \theta y}{S^2 b};$$

τ_N ——剪切力引起的公称应力(公称剪切应力是按危险断面上均布考虑的)，

$$\tau_N = \frac{P \sin \theta}{Sb}。$$

二、实验结果及考察

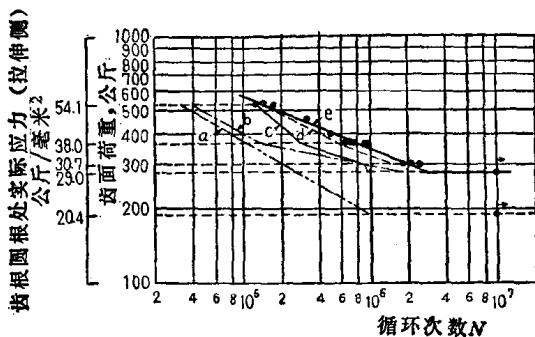


图 1-5 齿轮的 $S-N$ 曲线

1. 组织变化

在观察交变应力引起齿根圆根处的组织变化之前，先求

得试验齿轮的 $S-N$ 曲线, 如图 1-5 中的 e 线。

由此可知, 该齿轮的疲劳极限是齿面负荷 280 公斤 (拉伸侧的圆根处实际应力 $\sigma_t = 29.0$ 公斤/毫米²)。

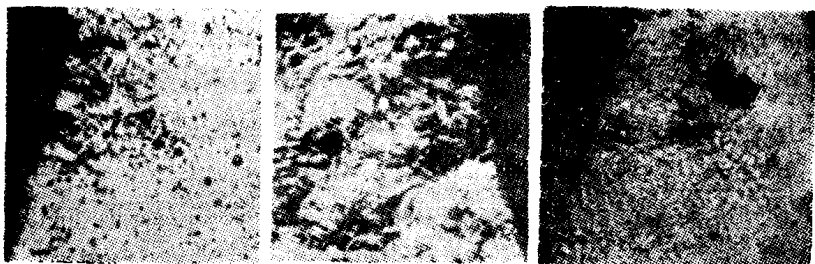
观察组织变化时, 采用了 5 种负荷: 疲劳极限的 1.9 倍 ($P = 530$ 公斤, $\sigma_t = 54.1$ 公斤/毫米²); 1.3 倍 ($P = 370$ 公斤, $\sigma_t = 38.0$ 公斤/毫米²); 1.1 倍 ($P = 300$ 公斤, $\sigma_t = 30.7$ 公斤/毫米²); 1.0 倍 ($P = 280$ 公斤, $\sigma_t = 29.0$ 公斤/毫米²); 0.7 倍 ($P = 190$ 公斤, $\sigma_t = 20.4$ 公斤/毫米²)。在一定的循环次数时终止疲劳试验, 观察齿根圆根处的组织变化。

由交变应力引起的齿根圆根处组织变化的观测结果如图 1-5 所示。图 1-5 中 a 、 b 线分别表示压缩侧、拉伸侧 (晶格) 滑移带的发生期; c 、 d 线分别表示压缩侧、拉伸侧的裂纹发生期。

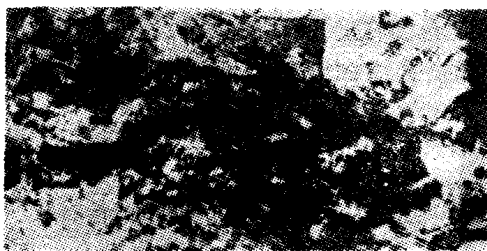
当作用的负荷大于疲劳极限时, 首先在压缩侧上发生 (晶格) 滑移带 (图 1-5 a), 如果进一步增加循环次数, 压缩侧的 (晶格) 滑移带扩展, 在拉伸侧也发生 (晶格) 滑移带 (图 1-5 b)。之后, 随着负荷循环次数的增加它们都在扩展。在疲劳过程的初期所产生的这些 (晶格) 滑移带的发生范围, 在压缩侧是宽的, 在齿根圆根处整个范围内都能看到 (晶格) 滑移带, 而拉伸侧则只在非常窄的范围内能看到 (晶格) 滑移带。图 1-6 (a 、 b) 分别表示负荷为疲劳极限的 1.3 倍、 $N = 1.5 \times 10^5$ 的情况下, 齿根圆根处拉伸侧及压缩侧的组织照片。

再增加循环次数, 首先, 压缩侧在塑性变形最高位置上发生裂纹 (图 1-5 c), 很久之后, 拉伸侧也在塑性变形最高的位置上发生裂纹 (图 1-5 d)。

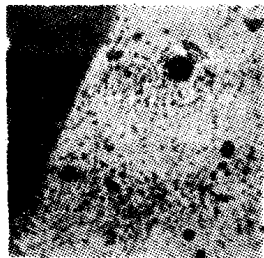
压缩侧和拉伸侧发生 (晶格) 滑移带及裂纹在时间上的不



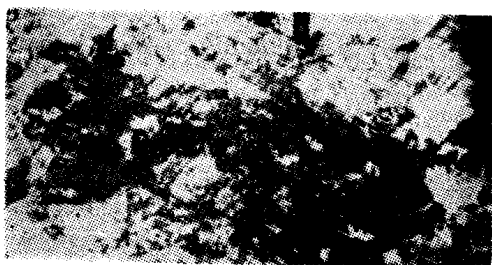
a) 拉伸侧 $P=370$ 公斤, $N=1.5 \times 10^5$ b) 压缩侧 $P=370$ 公斤, $N=1.5 \times 10^5$ c) 拉伸侧 $P=280$ 公斤, $N=10^7$



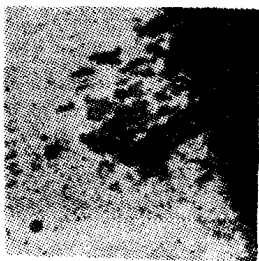
d) 压缩侧 $P=280$ 公斤, $N=2 \times 10^6$



f) 拉伸侧 $P=190$ 公斤, $N=7 \times 10^6$



e) 压缩侧 $P=280$ 公斤, $N=10^7$



g) 压缩侧 $P=190$ 公斤, $N=7 \times 10^6$

图 1-6 疲劳过程中齿根圆根处的组织变化

(放大倍数 $\times 400 \times \frac{3}{7}$)

相吻合是与交变应力值有关的。此外，压缩侧上发生裂纹的扩展速度比拉伸侧上发生裂纹的扩展速度显著地小，而且在某一循环次数(和应力值有关)之后，裂纹基本上不再扩展。尽管压缩侧比拉伸侧发生裂纹早得多，但疲劳破坏是由拉伸侧上发生的裂纹所支配。

在疲劳极限负荷的反复作用下，观察一下拉伸侧，可以看到在 $N = 2 \times 10^6$ 左右时拉伸侧开始发生(晶格)滑移带。然而，这种(晶格)滑移带在 $N = 10^7$ 时基本上没有扩展。图 1-6(c)为 $N = 10^7$ 时齿根圆根处拉伸侧的组织。

观察一下压缩侧，可以看到在 $N = 5 \times 10^5$ 时产生了相当清晰的(晶格)滑移带，并随着循环次数的增加而扩展，在 $N = 10^6$ 左右时发生了裂纹。



图 1-7 压缩侧发生裂纹停留状况(端面经过电解研磨处理，箭头表示负荷作用位置)

其后，这条裂纹在一段时间里随着循环次数的增加而有扩展，但在某一循环次数之后，循环次数即使再增加，裂纹也不再扩展。在裂纹的头端，(晶格)滑移带仅仅稍有扩展，即所谓的裂纹停留状态，这可从图 1-6(d)、(e)看出。图 1-7 所示的是在这种情况下裂纹发生的位置。

其次，当用疲劳极限以下而接近于疲劳极限的交变负荷作用时，例如用 0.7 倍的疲劳极限负荷时，在倍率为 400 的金相显微镜下看不到拉伸侧(晶格)的滑移带，见图 1-6(f)。

而压缩侧在 $N=10^6$ 左右时,就出现了(晶格)滑移带,虽然随着循环次数的增加仅有一点点扩展,但根本看不到裂纹。图 1-6(g) 所示为 $N=7 \times 10^6$ 时齿根圆根处压缩侧的组织。在疲劳过程的初期压缩侧比拉伸侧受到的疲劳损伤大,其原因之一是由于负荷的压缩分力而引起的压缩侧压缩应力绝对值比拉伸侧的拉伸应力大 30%左右。关于这些问题正在进一步研究中,准备另行介绍。

根据观察交变负荷使齿根圆根处的组织变化所得出的结果,如果在一个方向上加上负荷,在某一循环次数之后,再在反方向加上负荷时,完全能设想出疲劳极限会降低。

2. 残余应力

在一定的循环次数时停止疲劳试验,在霍弗(Hofer)危险断面和齿形曲线的交点附近测定齿根圆根曲线切线方向的残余应力,图 1-8 和图 1-9 是在承受负荷 $P=190$ 公斤(疲劳极限的 0.7 倍)及 $P=370$ 公斤(疲劳极限的 1.3 倍)时的测定结果。

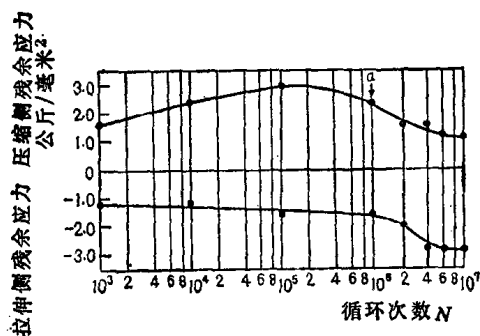


图 1-8 交变负荷所引起的齿根圆根处残余应力的变化($P=190$ 公斤)