

机械产品失效分析丛书

---

JIXIECHANPIN

● 零件—4

SHIXIAOFENXI

---

# 齿轮的失效分析

● 中国机械工程学会材料学会主编

● 机械工业出版社



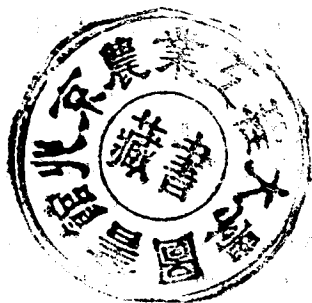
机械产品失效分析丛书

(零件-4)

# 齿轮的失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

郭志德 邵尔玉 庞钧 编著



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书介绍机械产品的关键基础零件齿轮的失效分析, 包括齿轮的受力分析及服役条件, 齿轮的失效形式及分类, 影响齿轮失效的各种因素, 典型齿轮零件的失效分析及其预防, 提出提高齿轮使用寿命的途径。

本书可供齿轮设计、制造、使用人员和进行齿轮失效分析人员以及大专院校师生参考。

2010/02

机械产品失效分析丛书

(零件-4)

齿轮的失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

郭志德 邵尔玉 庞钧 编著

\*

责任编辑: 张绪江 版式设计: 王颖

责任校对: 陈松 责任印制: 路琳

\*

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  $850 \times 1168 \frac{1}{32}$  · 印张  $5 \frac{7}{8}$  · 字数 148 千字

1992 年 9 月北京第 1 版 · 1992 年 9 月北京第 1 次印刷

印数 0,001—2,300 · 定价: 7.40 元

\*

ISBN 7-111-03127-X / TG · 688

## 前 言

机械产品失效分析是一门新的跨学科的综合性的技术，在一些国家中已将它作为一门新的独立学科加以研究和发展。这是因为尽管人们所掌握的机械设计、材料、工艺、管理等知识不断地丰富与深化，所运用的技术手段不断地更新与完善，但机械产品的失效事故仍经常发生，一些重大的失效事件往往会导致生命和财产的巨大损失。所以必须系统地研究机件的失效类型、鉴别失效类型的技术、预测及监控失效的方法，改进与预防失效的措施等。这方面的知识不仅对专业失效分析工作者是不可缺少的，而且对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员，也是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式，其发生的条件、控制与预防等有深刻的理解，才可望在创造优质产品方面获得成功。

为了在我国开展失效分析工作，中国机械工程学会委托材料学会于1980年在北京召开了第一次全国机械产品失效分析学术会议。随后，中国机械工程学会材料学会组织过多次全国性的失效分析学术会议。为了广泛开展失效分析工作，普及失效分析的基本知识，提高失效分析的技术水平，扩大失效分析队伍，进一步促进失效分析工作在机械工业中的深入发展，使失效分析工作在国民经济的发展中发挥更大的作用，材料学会决定组织编写这套《机械产品失效分析》丛书，并责成材料学会编辑出版委员会负责组织丛书的编写工作。

丛书共分三大部分：第一部分为失效分析的基础知识，第二部分为常用机械零件的失效分析，第三部分为工艺失效分析。

丛书编写的特点是讲求实用性，强调综合分析，引导读者如何正确地进行失效分析工作。因为用较多的篇幅介绍近期的应用

实例，反应我国失效分析的技术水平，主要成果和经验，同时适当引入国外先进经验以资借鉴。

在丛书编写过程中，中国机械工程学会秘书长许绍高、中国机械工程学会出版编辑委员会主任陈元直给予了极大的关注和指导。在此对参加丛书编写人员所在单位的领导对本丛书编写所给予的大力支持表示感谢。

这套丛书是供从事机械产品的设计、制造、使用、维修具有中专以上程度的工程技术人员及技术管理人员使用，也可供科研人员和大专院校师生参考，并可作为组织失效分析训练班的教材使用。

由于编著者水平有限，缺点错误之处在所难免，望各界读者批评指正，以便进一步修改补充。

中国机械工程学会材料学会

1990

# 中国机械工程学会材料学会

## 机械产品失效分析丛书编委会成员

主任委员：王仁智

副主任委员：钟群鹏

委员（按姓氏笔划序）

王仁智 方婉莹 刘民治 陈玉民 陈南平 张绪江

赵 坚 钟群鹏 唐汝钧 涂铭旌 虞 鹏 粟 滋

顾问：周惠久 张协和 陶正跃

## 编者的话

齿轮是机车车辆、农业、矿山、石油机械和机床等多种机械产品必不可少的基础零件，应用范围极广，需用量大。齿轮在各种机械中要求可靠且精确地传递动力，应具有高的疲劳强度、耐磨性能和加工精度，因而要求较高的制造技术。

目前我国已具有相当大的齿轮生产能力，基本上已能够满足各类机械产品的要求，但在实际使用中普遍反映使用寿命较低。这主要是由于我国的齿轮制造技术与国际先进水平相比差距较大，在齿轮设计、用材、制造以及使用等方面都还存在不少问题。如果对这些问题的分析研究，找出问题的所在，从而提出相应的改进措施，齿轮产品质量就难以得到提高。

通过齿轮的失效分析，可揭示齿轮的失效形式、失效原因、失效机理。通过失效分析可较准确地揭露齿轮在设计、材质、制造工艺、装配和使用等方面存在的不足之处。将这些信息反馈到有关部门，有助于改进齿轮质量，延长齿轮的服役寿命。

本书的取材，主要收集了近年来汽车、拖拉机、矿山以及其它机械行业的齿轮失效分析成果，几次全国性材料强度和机械产品失效分析会议发表的有关论文，并参考了国外齿轮失效分析有关资料。由于条件所限，国内尚有许多齿轮失效分析成果未能收入本书，有待今后继续充实。

本书分为五章，其中第一章主要叙述齿轮的受力分析及服役条件，第二章叙述齿轮的失效形式及分类，第三、四章主要叙述影响失效的诸因素，第五章叙述齿轮失效分析及其预防的七个典型实例。另外在附录中例举了一些齿轮失效分析的典型图片，其中以重载齿轮为主。

本书第一章及第二章的第一节由邵尔玉执笔，第三章由张意

萱执笔，庞钧提供了第五章的第七个典型案例文稿和附录中的六套重载齿轮失效分析的典型图片，其余章节由郭志德执笔，并进行全书统稿。陈菁提供了有关图片并协助工作。

王大伦、雷铭君、涂铭旌、鄢文彬、富振成、蔡时贤、白志仁、曹翰香等提供了有关齿轮失效分析原始图片和资料，并给予了大力支持。本书由陈玉民、王仁智进行初审和复审，谨向曾对本书的出版给予大力支持的同志表示深切的谢意。

编者 1990年10月



# 目 录

第一章 齿轮工作状况及受力分析 .....	1
第一节 齿轮结构特性及工作状况 .....	1
第二节 齿轮受力分析 .....	2
一、齿轮轮齿受力分析 .....	2
二、齿轮沿接触线的载荷分布 .....	4
三、齿根处的弯曲疲劳断裂计算 .....	7
四、在瞬时高应力作用下的断裂计算 .....	12
第三节 齿轮轮齿表面接触应力 .....	13
一、齿面接触应力分析 .....	14
二、齿轮沿截面的接触应力分布 .....	19
三、接触疲劳破坏的力学条件 .....	22
第二章 齿轮的失效形式 .....	28
第一节 齿轮的失效形式概述 .....	28
第二节 齿轮表面接触疲劳剥落失效 .....	31
一、麻点疲劳剥落形式及其损伤机理 .....	31
二、浅层疲劳剥落形式及其损伤机制 .....	33
三、硬化层疲劳剥落及其损伤机制 .....	34
四、齿轮接触疲劳破坏的断口形貌 .....	35
第三节 齿轮轮齿弯曲折断 .....	37
第四节 齿轮的磨损失效 .....	40
一、齿轮磨粒磨损 .....	40
二、胶合磨损 (刮伤) .....	41
三、腐蚀磨损 .....	42
四、齿轮轮齿端面冲击磨损 .....	43
第五节 齿轮塑性变形失效 .....	43

一、齿轮轮齿表面塑性变形失效 .....	43
二、齿轮宏观塑性变形失效 .....	45
第三章 齿轮材料及热加工工艺对齿轮失效的影响 .....	46
第一节 齿轮材料对齿轮失效的影响 .....	46
一、材料对齿轮失效的影响 .....	46
二、钢材质量对齿轮失效的影响 .....	54
第二节 锻造工艺对齿轮失效的影响 .....	57
第三节 热处理工艺对齿轮失效的影响 .....	59
一、不同热处理工艺的强化效果 .....	59
二、不同热处理工艺对齿轮失效形式的影响 .....	60
三、硬化层组织状态对齿轮失效的影响 .....	63
四、硬化层深度及表、心硬度对齿轮失效的影响 .....	68
五、热处理变形对齿轮失效的影响 .....	73
六、热处理缺陷对齿轮失效的影响 .....	79
第四章 结构及其它因素对齿轮失效的影响 .....	87
第一节 齿轮磨削工艺对齿轮失效的影响 .....	87
一、磨削烧伤对齿轮失效的影响 .....	87
二、磨削损伤产生的原因 .....	88
三、磨削损伤的防止 .....	92
第二节 结构及装配对齿轮失效的影响 .....	93
一、齿轮参数及支承结构对齿轮失效的影响 .....	93
二、齿轮传动类型对齿轮失效的影响 .....	95
第三节 润滑条件对齿轮失效的影响 .....	106
一、润滑对胶合的影响 .....	106
二、润滑对齿轮麻点剥落的影响 .....	109
三、润滑对齿面烧伤和轮齿热屈服的影响 .....	110
第五章 典型齿轮的失效分析及预防 .....	111
一、高速重载齿轮的失效 .....	111
二、5.8m 掘进机 $\phi 3m$ 大齿圈的失效 .....	118
三、压缩机齿轮的失效 .....	122

四、涡轮起动机液压离合器爆破事故 .....	125
五、东方红-75 拖拉机二轴齿轮的接触疲劳失效 .....	129
六、80t 工矿电机车从动齿轮的脆断失效 .....	137
七、人字齿轮轮齿的损伤 .....	148
附录——齿轮失效分析典型图片 .....	154
一、因材料、热处理不当造成的失效 .....	154
二、因加工不良造成的失效 .....	163
三、因使用装配不当造成的失效 .....	165
参考文献.....	170

# 第一章 齿轮工作状况及受力分析

## 第一节 齿轮结构特性及工作状况

齿轮是机器中传递功率和运动的重要零件。在各工业部门如机床、汽车、航空、仪表、造船、动力、矿山、农机等行业都广泛使用齿轮传动。齿轮传动具有传动比准确、传动平稳、传递运动工作可靠，传动效率高，结构紧凑，使用寿命比较长等优点。齿轮传动适用范围很广，传递功率从很小（如仪表齿轮）到数万千瓦；齿轮的圆周速度可从极小（如钟表齿轮）到  $100\text{m/s}$  以上；齿轮的直径从小于  $1\text{mm}$  到  $10\text{m}$  左右；传动比的范围也很大。所以，齿轮传动得到广泛的应用。

齿轮传动的分类：按齿向可分为直齿、斜齿、人字齿、曲齿；按回转体的基本形状可分为圆柱体、圆锥体；按齿廓形状可分为渐开线、摆线、圆弧线；按传动轴的空间位置可分为平行、相交、交错。直齿、斜齿和人字齿圆柱齿轮用于两平行轴之间的传动；直齿、斜齿和曲齿圆锥齿轮用于两相交轴之间的传动；斜齿轮、双曲线齿轮和蜗轮蜗杆用于相错轴之间的传动。此外还有，可将旋转运动变为直线运动的齿轮齿条传动；轴间距离小时可采用紧凑的内啮合齿轮传动等。

按齿轮传动的工作条件，又可分为闭式传动、开式传动和半开式传动三种。闭式传动封闭在箱壳内能保证良好润滑。开式传动是外露的，不能保证良好润滑。半开式传动介于二者之间，大多浸入油池内而上装护罩。

单级的圆柱和圆锥齿轮只能实现小的传动比，较大的传动比需要多级传动。蜗杆传动具有较大的单级传动比。

直齿轮制造比较简单，在传动机构中应用最多。但是直齿轮传动时，由于每对轮齿都是同时接触和脱开，容易产生冲击和噪

声，故传动平稳性较差。要使传动比较平稳，有时就采用斜齿轮传动。人字齿轮相当于两个方向相反的斜齿轮，主要用于重型机械中传递大功率用。

齿轮工作条件很复杂。在不同工作条件下使用的齿轮造成失效的特征是不同的。根据齿轮工作特点，在传递功率和运动过程中，轮齿在力的作用下，在齿根产生弯曲应力，齿面产生接触应力，齿面间相对滑动摩擦而产生磨损。有时齿间存在间隙，在啮合过程中还会产生冲击。齿轮主要失效特征是由于弯曲力矩作用而造成齿的变形和折断；由于接触应力作用而造成的表面疲劳剥落和由于摩擦作用而造成的磨损（关于齿轮失效特征及其分类将在第二章详述）。由于齿轮工作时所承载荷和转速不同，对于不同材料会造成不同的失效形式，如图 1-1 所示。因此，为了认识齿轮各种失效特点，就需仔细分析齿轮的工作条件、受力状况和各种外界损害作用，为分析齿轮失效提供理论依据。

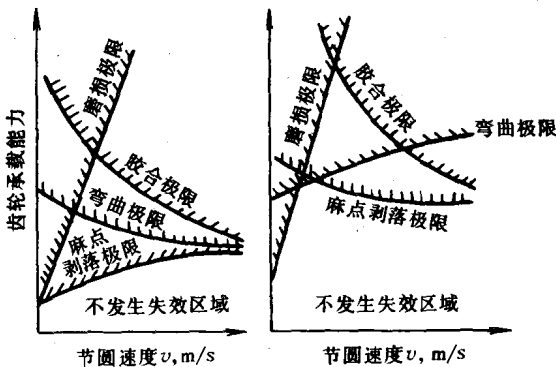


图 1-1 齿轮失效区域

## 第二节 齿轮受力分析

### 一、齿轮轮齿受力分析

齿轮啮合时齿面的法向力  $F_n$  对齿根造成弯曲应力，因此必

须首先分析各类齿轮法向力  $F_n$  的计算方法。

### 直齿圆柱齿轮的法向力

由图 1-2 可知，工作转矩  $T_1$  由主动小齿轮 1 的轴传到被动大齿轮 2。与分度圆  $d_1$  相切的工作圆周力为

$$F_t = \frac{2T_1}{d_1} \quad (1-1)$$

式中  $F_t$ ——分度圆的工作圆周力；

$d_1$ ——小齿轮的分度圆直径；

$T_1$ ——小齿轮转矩。

主动轮 1 的  $F_t$  方向与转动方向相反，而被动轮 2 则与转向相同。当齿处于啮合时才受载，所以齿上的载荷是变化的（见图 1-2）。

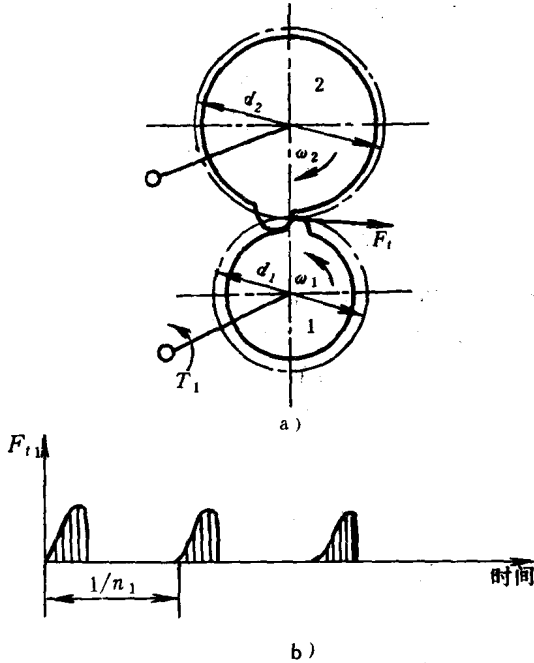


图 1-2 齿轮上的载荷

a) 分度圆上的圆周力 b) 轮齿上的变载荷  $n_1$ —小齿轮转速

作用在主动轮齿上的总压力垂直于齿面，即图 1-3 中法向力  $F_n$ 。法向力  $F_n$  可从圆周力  $F_t$  求得

$$F_n = \frac{F_t}{\cos\alpha} \quad (1-2)$$

法向力  $F_n$  通过节点与基圆相切。 $\alpha$  是分度圆端面压力角。

斜齿圆柱齿轮、直齿圆锥齿轮和弧齿圆锥齿轮的法向力的计算方法可从机械零件设计手册中查出。

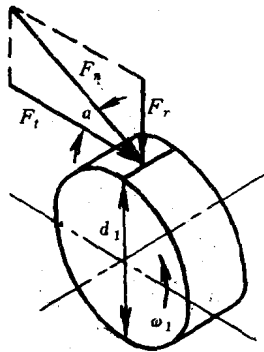


图 1-3 直齿圆柱齿轮的作用力

## 二、齿轮沿接触线的载荷分布

根据名义功率按以上方法求得的法向力  $F_n$  称为名义载荷。实际设计时要考虑影响载荷的各个因素，使计算尽量接近实际，因此要采用一些系数将载荷合理放大。考虑这些因素后的载荷为计算载荷  $F_{nc}$ ，可按下式计算

$$F_{nc} = F_n K_A K_v K_\beta = F_n K \quad (1-3)$$

式中  $K$  —— 载荷系数；

$K_A$  —— 工作状况系数；

$K_v$  —— 动载系数；

$K_\beta$  —— 载荷分布系数。下面说明各系数的意义及其取值。

### 1. 工作状况系数 $K_A$

它是考虑外部附加动载荷影响的系数。由工作机和原动机的工作特性所造成的过载，属于外部附加动载荷。例如起动和制动载荷，工作机中速度骤然改变产生的过载，偶然性的冲击载荷等等。外部附加动载荷还与系统的刚性等有关。可以通过对系统进行动力分析或实测确定外部附加动载荷，并在载荷谱中表示出来。外部动载荷的影响程度可从表 1-1 系数  $K_A$  大小中反映出来。

表 1-1 工作状态系数  $K_A$

原动机工作情况	工作机工作情况		
	平稳载荷	中等冲击	严重冲击
平稳工作	1	1.25	1.75
轻度冲击	1.25	1.5	>2
中度冲击	1.5	1.75	>2.25

① 增速传动时表中数值再乘以 1.1。

## 2. 动载荷系数 $K_v$

它是齿轮本身的因素造成的。由于加工齿轮的机床和刀具的误差，加工出来的齿轮不可避免地具有基节误差和齿形误差。同时，即使制造十分精确，轮齿变形也不可避免。这些都会引起两啮合轮齿的基节不等，造成传动不平稳和引起内部的附加动载荷。 $K_v$  值与齿轮制造精度、圆周速度、齿面硬度等有关，见表 1-2。

表 1-2 动载荷系数  $K_v$  (分子——用于直齿轮，分母——用于斜齿轮)

精度等级	齿面硬度 HB	圆周速度 $v_1$ , (m/s)			
		<3	3~8	8~12.5	12.5~20
6	<350	1/1	1.2/1	1.3/1	1.45/1.2
	>350	1/1	1.15/1	1.25/1	1.35/1.1
7	<350	1.15/1	1.35/1	1.45/1.2	~ / 1.3
	>350	1.15/1	1.25/1	1.35/1.1	~ / 1.1
8	<350	1.25/1.1	1.45/1.3	~ / 1.4	~
	>350	1.2/1.1	1.35/1.3	~ / 1.3	~



### 3. 载荷分布系数 $K_\beta$

由于齿轮、轴、轴承和箱体的变形以及齿轮制造和安装误差等原因，载荷沿接触线的分布并不是均匀的。最大载荷与名义载荷之比称为载荷分布系数，即

$$K_\beta = \frac{F_{n \max}}{F_n} \quad (1-4)$$

若齿轮位于两轴承之间作不对称布置时，由于轴的弯曲变形所造成的载荷分布不均的情况如图 1-4a 所示。假设齿轮为绝对刚体，则将发生端部局部接触（图 1-4b）；实际上，齿轮有弹性变形，即使沿全齿宽接触

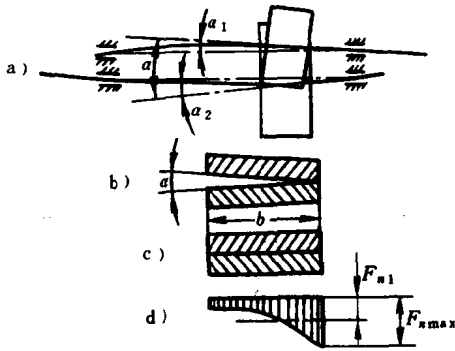


图 1-4 轴弯曲变形造成的偏载

（图 1-4c），各处的变形量也不相等，由此而造成的载荷沿齿宽分布不均匀现象见图 1-4d。这种现象称载荷集中或偏载。发生偏载的位置是齿轮首先产生失效的位置。

当齿轮位于两轴中间对称布置时，基本上不发生偏载（图 1-5a），而处于非对称布置时（图 1-5b）将出现较大的偏载。当齿轮装于悬臂轴端（图 1-5c）则偏载更严重。因此，设计时除要求轴有合理的刚度外，应该注意齿轮与轴承的相对位置，最好采用对称布置，尽可能避免悬臂布置。

轴与齿轮的扭转变形也产生偏载，见图 1-6，靠近扭矩输入的单位载荷为最大。因此，齿轮最好布置在距扭矩输入端稍远的地方，以便载荷集中有所缓和。