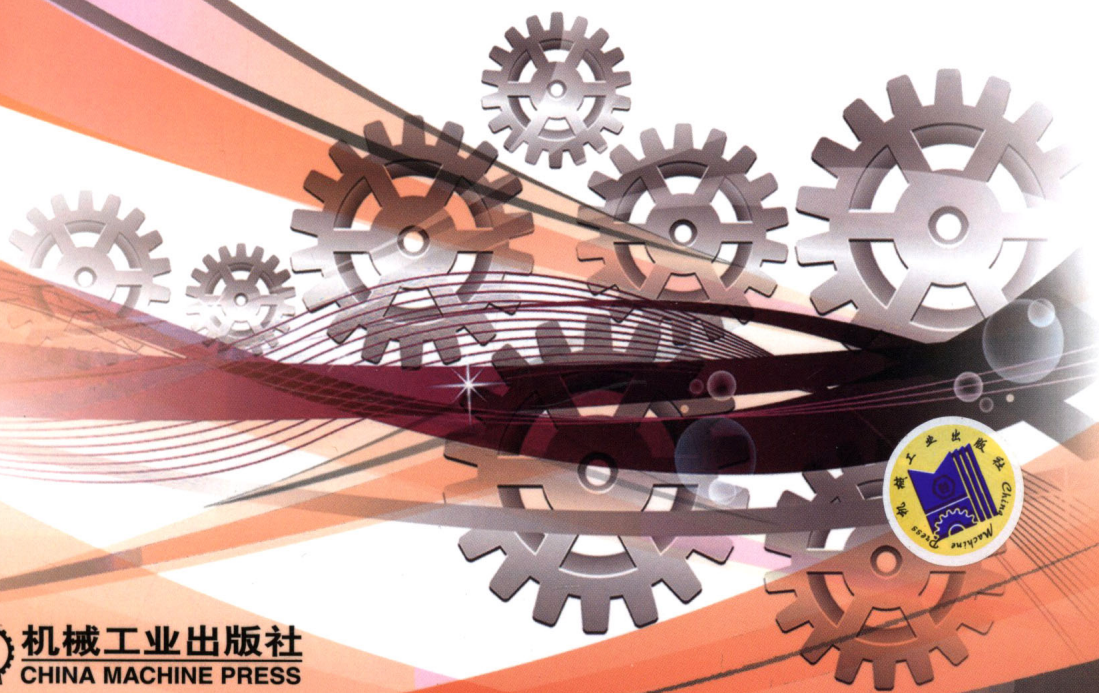


齿轮常用材料与热处理

CHILUN CHANGYONG CAILIAO YU RECHULI

张展 邵钰钊 曾建峰◎编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



齿轮常用材料与热处理

张 展 邵钰钊 曾建峰 编著



机械工业出版社

本书立足于行业内部,针对读者需求,主要介绍齿轮的失效形式及其对策、齿轮常用材料、热处理基本原理与工艺、表面热处理、化学热处理、铸铁齿轮的热处理、典型零件的热处理、大型零件的焊接与热处理、齿轮热处理缺陷与质量控制,并给出热处理技术术语的中英文对照、中日文对照,实用性非常强。

本书适合齿轮行业技术人员使用,也可供大中专院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

齿轮常用材料与热处理/张展,邵钰钊,曾建峰编著. —北京:机械工业出版社,2013.3

ISBN 978-7-111-41068-3

I. ①齿… II. ①张…②邵…③曾… III. ①齿轮—材料②齿轮加工—热处理 IV. ①TH132.41②TG616.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 319041 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:黄丽梅 责任编辑:黄丽梅 王彦青 版式设计:赵颖喆
责任校对:张媛 封面设计:赵颖喆 责任印制:郑博

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄园国丰装订厂装订)

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15 印张·330 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-41068-3

定价:46.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

合理选择材料、正确进行热处理是提高齿轮承载能力，实现其传动功能，延长齿轮使用寿命，保证其可靠运行的基础。

近 30 年来，我国齿轮热处理技术有了很大的发展，国际上最先进的热处理技术、装备优先选择在齿轮制造大国的中国上市。但我们应该清醒地看到：工艺、管理、基础材料等方面与发达国家相比仍有很大差距。

纵观当代齿轮热处理技术的发展，不难发现：齿轮渗碳及其相关配套技术及装备现状，无不围绕着提高质量、减少变形和节能降耗三个问题的稳定持续改善而发展。为此，我们应以稀土催渗技术为突破口，发展效率高、能耗低、碳排放量少的低碳热处理技术；通过应力的合理释放和变形量的提前预留，达到最终零畸变的精确热处理技术；基于材料微观组织控制，提高材料性能。同时结合国情发展 Cr-Mn-Ti 系钢代替 Cr-Ni-Mo 系钢，如 17Cr2Mn2TiH 齿轮用钢代替 17CrNiMo6 (17Cr2Ni2MoH)、20CrNi2Mo (4320H)，辅以稀土催渗技术，其硬度、强度完全相同，既能满足使用要求，又降低了原材料的成本。目前，国外在汽车上广泛采用等温淬火球墨铸铁 ADI，其具有质量轻、耐磨性好、强度高、噪声小、成本低等特点，应予以大力推广。

为满足教学、生产和科研的需要，使产学研一体化，我们编写了本书。在编写时注重科学性、先进性和实用性。

在编写过程中，得到了上海交通大学张国瑞教授，同济大学归正教授，上海理工大学崔建昆、麦云飞教授，江苏上齿集团董事长张焰庆，同行专家唐雪峰、朱江华的大力支持，在此深表感谢。

由于该书内容广泛，笔者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编著者

目 录

前言

第 1 章 齿轮损伤形式及其对策	1
1.1 齿轮损伤形式	1
1.2 齿轮损伤基本形式的特征、成因及其对策	1
第 2 章 齿轮常用材料	21
2.1 钢铁材料的分类	21
2.2 齿轮用钢	24
2.3 国外常用的齿轮材料	36
2.4 齿轮用铸铁	48
2.5 齿轮用有色金属	50
2.6 工程塑料	53
2.7 齿轮材料的选择	54
2.8 合金元素对钢性能的影响	56
2.9 试验齿轮接触、弯曲疲劳极限的确定	59
2.10 等温淬火球墨铸铁 ADI	61
2.11 稀土材料	63
第 3 章 热处理基本原理与工艺	65
3.1 热处理基本原理	65
3.2 钢的退火与正火	74
3.3 淬火与回火	81
3.4 淬火冷却介质	95
第 4 章 表面热处理	104
4.1 火焰淬火	104
4.2 感应热处理	112
4.3 激光热处理	128
第 5 章 化学热处理	131
5.1 概述	131
5.2 齿轮的渗碳及碳氮共渗	134
5.3 齿轮的渗氮及氮碳共渗	154
第 6 章 铸铁齿轮的热处理	167
6.1 灰铸铁齿轮的热处理	167
6.2 球墨铸铁齿轮的热处理与质量检验	169
6.3 可锻铸铁齿轮的热处理	174
6.4 ADI 的热处理	175

第 7 章 典型零件的热处理	179
7.1 齿轮钢材的调质处理	179
7.2 汽车、拖拉机齿轮的热处理	181
7.3 机床齿轮常用钢材及热处理	182
7.4 齿轮热处理实例	183
7.5 齿轮典型零件的热处理工艺	184
第 8 章 大型零件的焊接与热处理	190
8.1 焊接箱体	190
8.2 行星架的焊接与热处理	193
8.3 大型齿轮的焊接与热处理	198
第 9 章 齿轮热处理缺陷与质量控制	203
9.1 齿轮热处理质量的检验	203
9.2 齿轮热处理的质量控制	206
9.3 热处理质量控制的要求	208
第 10 章 热处理术语	212
10.1 金属材料术语	212
10.2 金属热处理工艺术语	213
10.3 热处理工艺材料术语	222
10.4 钢铁热处理术语（日本工业标准）	225
参考文献	231

第1章 齿轮损伤形式及其对策

1.1 齿轮损伤形式

齿轮传动零件都具有一定的功能，如承受某种载荷、传递转矩、完成某种规定的动作等。当齿轮传动零件丧失其应有的功能时，则称齿轮传动零件失效。

齿轮损伤是指齿轮在材质、尺寸、精度、表面状态等基本要素的某一或若干方面，在工艺过程或（和）使用过程中所遭受的内外伤。齿轮损伤量的积累达到某一界限，即丧失了对其规定的某种功能，这就是齿轮的某种失效模式。判定某齿轮是否失效的定性、定量依据，即失效判据，或称失效准则。根据失效的统计，在传动装置中，齿轮失效占失效总数的60%左右，其中齿轮损伤又占主要部分。

齿轮损伤的影响因素很多，包括选材、设计计算、毛坯、加工、热处理、安装调试和使用维护等。齿轮承载能力的极限值主要取决于材质、表面状态、圆周速度、润滑条件、传动方式、齿轮种类以及轮齿参数等。为避免轮齿过早损伤，必须对具体轮齿的损伤作具体分析，找出原因及对策。

关于齿轮损伤形式，有关学者早已进行了研究，如1937年白金汉（Buckingham）将齿面损伤分为六种形式；1939年利第奥（Rideout）将齿面损伤分为八种形式；1953年包索夫（Borsoff）和索莱姆（Sorem）将齿轮损伤分为六类。此外，自20世纪50年代以来，一些国家专门以标准的形式，对齿轮损伤形式进行分类，如美国的AGMA110.02—1951、AGMA110.03—1962及ANSI/AGMA110.04—1980；奥地利的ON-RMM6700—1968；德国的3979—1979等。我国由东北大学和北京科技大学负责起草的，于1982年发布的国家标准GB 3481—1983，现已修订为GB/T 3481—1997，该标准将齿轮损伤形式分为六大类，即裂纹、轮齿的折断、齿面的接触疲劳、齿面的磨损、齿面胶合以及永久变形等。

1.2 齿轮损伤基本形式的特征、成因及其对策

1. 裂纹

齿轮中，包括轮齿和其他部分（轮缘、轮辐、轮毂），表面和非表面部分，均有可能出现材料的局部损坏——裂纹或裂缝。实际上，轮齿出现的裂纹，按其形成特点，可分为两大类：工艺裂纹和使用裂纹。

① 工艺裂纹，是生产齿轮的工艺不当而造成的材料缺陷，并在一定载荷条件下，失稳扩展使齿轮失效，如铸造裂纹、锻造裂纹、焊接裂纹、热处理裂纹（如淬火裂纹）、磨削裂纹等。

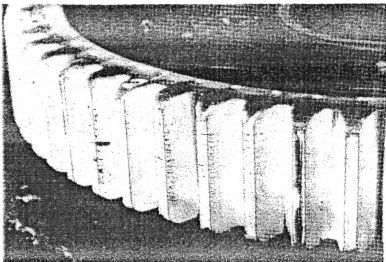
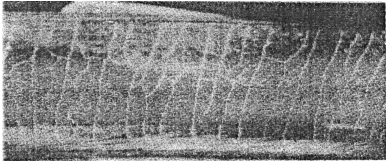
② 使用裂纹，是在零件使用过程中和环境产生的，并进而扩展，致使齿轮失效，如疲劳裂纹和应力腐蚀裂纹等。

各种裂纹的模式特征、形成原因和预防措施见表 1-1。

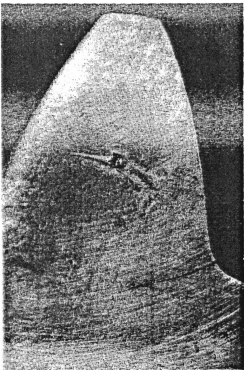
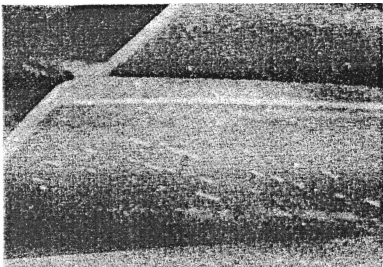
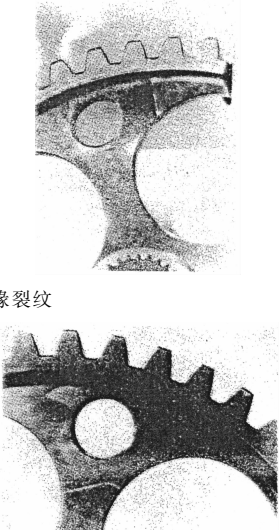
2. 轮齿的折断

断齿是指齿轮的一个或多个齿的整体或其局部的断裂。断齿常由微裂纹扩展而成。

表 1-1 裂纹的模式、特征、形成原因和预防措施

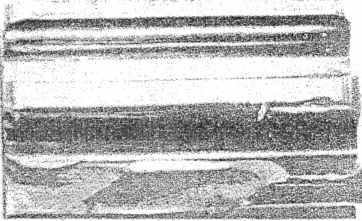
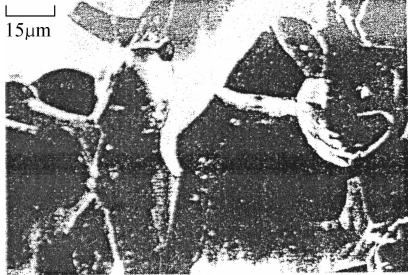
模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
淬火裂纹	相变不协调转化裂纹 穿越裂纹  淬火裂纹示意图 齿面中等硬度的淬火齿轮，加载使用一段时期后，齿根圆角、齿端面、齿顶呈现淬火裂纹	在 淬 火 时 产 生，多数呈发丝状，有时能自行扩展。裂纹有的沿齿根圆角半径方向，有的在齿的两个端面，也有穿越齿顶或存在于齿的端面的表面硬化层与心部的交界处。较大裂纹的初始部位常有锈蚀或氧化的痕迹。淬火裂纹也可能在齿轮使用一段时期后才见到。它常为其他损伤形式（如疲劳断齿）的根源	主要是淬火过程中产生过大的内应力。它通常由不适的淬火工艺，如升温过急、淬火过急、淬火过缓等引起。齿端面上的裂纹，通常由硬化层与心部交界处的相变不协调引起	根据齿轮材料、尺寸、结构和工作要求制订合理的淬火工艺规程，并严格加以控制，防止淬火速度过快或过慢，淬火温度不合适。对淬火后的齿轮应严格检验
	 在大齿轮齿顶形成的淬火裂纹			
磨削裂纹	 小齿轮齿面经硬化和磨齿后，呈现龟裂图形的网状磨削裂纹	在磨削过程中产生，常在齿面上有几乎平行的短裂纹或网状裂纹。平行裂纹通常比网状裂纹深。磨削裂纹一般较浅，肉眼不易发现，需用磁粉探伤或用 5% 硝酸乙醇腐蚀液处理等方法才能检测。有时磨削裂纹是潜在的，要在闲置若干时间或加载工作后才显示出来	主要由磨削过程中的热引起，也可能是由热处理工艺不合理（在热处理过程中形成了对磨削过热敏感的金相组织）引起。磨削过热可能是由于磨削工艺参数选择不正确，砂轮不合格或选用不当、冷却措施不当等。某些对磨削过热敏感的轮齿材料，更易产生磨削裂纹	选择适当的磨削工艺，控制进给量和磨削速度，加强冷却措施，选用不易磨裂的材质和合适的热处理工艺。适当选用合适的砂轮，并注意对其修整和平衡；采用具有断续工作表面的砂轮，以降低表层的热应力

(续)

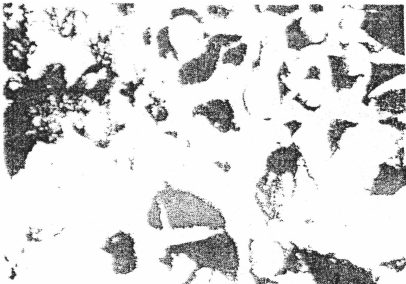
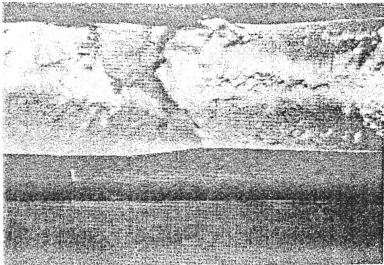
模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
疲劳裂纹	 轮齿承载面下边的齿根过渡曲面处出现的弯曲疲劳裂纹	应力为重复交变；裂纹源常为齿轮表面应力集中处，如齿根圆角、加工刀痕及材料缺陷处；尾端尖细，微观主要呈穿晶扩展，其总趋势与主应力相垂直	交变应力水平过高 材料缺陷与应力集中源影响严重	控制交变应力水平，设计时应避免过小的齿根圆角，控制工艺因素，减少不允许的表面及材料内部缺陷
	 氮化小齿轮齿面上沿接触线方向形成的轮齿接触疲劳裂纹			
轮缘和辐板裂纹	 轮缘裂纹 辐板裂纹	轮缘裂纹通常发生在两相邻齿之间的齿根部。辐板裂纹有的是由轮缘裂纹沿径向扩展而成，有的是在辐板自身中产生，不一定扩展到轮缘	轮缘断裂通常是轮齿齿根圆角疲劳裂纹发展的结果。齿轮某部分的残余应力过高，也会形成并促使疲劳裂纹扩展。对镶套式齿轮，轮缘与轮心的过盈量过大也可引起轮缘断裂。辐板损伤，多因辐板强度不足，应力集中或振动等因素引起	轮缘及辐板的尺寸应满足强度要求。减少局部应力集中因素，如切削刀痕、磨削与淬火裂纹、轮缘与辐板过渡处的尖锐圆角等，应设法减少或消除。在结构设计上应采取减振、防振措施。对镶套齿轮，应适当控制过盈量

按照断齿的原因及其断口性质的不同，断齿可分为过载折断（脆性、韧性、半脆性断裂）、轮齿剪断、塑变后折断和疲劳折断（弯曲疲劳折断和齿端折断）。各类断齿的模式、特征、形成原因和预防措施见表 1-2。

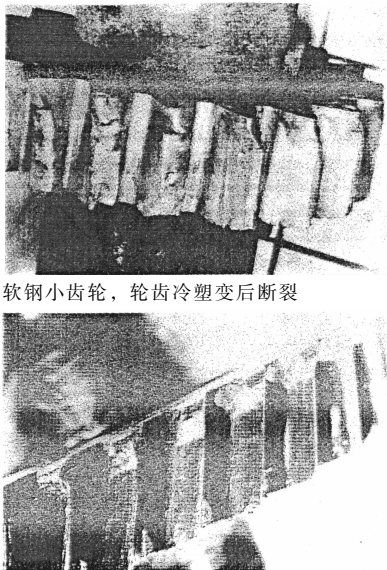
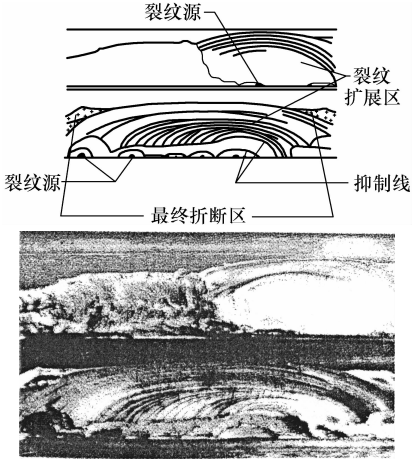
表 1-2 断齿的模式、特征、形成原因和预防措施

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
过 载 折 断	断口源区 (在齿端表面 硬化层产生) 剪切区 晶粒状 断口面 塑性变形   小齿轮、轮齿的过载折断（上图为示意图与下面的照片图相对应）  穿晶脆断微观图  15μm 晶间脆断微观图	通常只在一次或几次严重过载时发生。有时，由于过载产生的初始裂纹会缓慢扩展而折断，这时会伴随有微动腐蚀的迹象 过载断口有三种典型模式：脆性断裂、韧性断裂和半脆性断裂 断口的裂纹高速扩展区呈放射花样（当齿根厚度远小于齿宽时会呈现人字形花纹），放射方向与裂纹扩展方向大致平行，其放射中心为断裂源（人字形的顶尖指向断裂源） 脆性断裂断口无宏观可见的塑性变形，放射区占断口的很大部分，断口副常可拼合。微观主要为沿解理面的穿晶断裂（断口上常呈现光泽的小面）或沿晶界的晶间开裂。在调质齿轮中常见准解理结构 韧断断口上有肉眼可见的塑变，断口面无光泽，呈纤维状，断口终止处有平滑的韧断区（微隆起或凹陷），韧断常在塑性较好的材料中发生，其微观有明显的韧窝结构 半脆性断裂断口上无明显塑变，但可见人字形花样，它表明存在一系列交变的韧脆断裂	总是由于轮齿的应力超过其极限应力。断齿的瞬时性主要是轮齿的应力强度因子 $\Delta K_I \gg \Delta K_{Ih}$ (ΔK_{Ih} 为轮齿材料的裂纹扩展门槛值)，导致裂纹从亚临界扩展区进入高速扩展区，轮齿的应力过高常由于载荷严重集中、突然冲击过载、轴承损坏、轴弯曲或较大硬质异物挤入啮合区等引起 齿轮精度过差，齿面过于粗糙 材质有缺陷	在设计时应充分估计产生严重过载的因素，并采取相应的监控与安全装置（如过载报警器，安全联轴器等） 安装时保证接触精度，使用时防止较大的硬质异物挤入啮合区 从材质、毛坯到精加工的全过程中进行必要的质量控制（如对齿根部的微裂纹探伤等），增大齿根圆角，减少应力集中，对于硬齿面齿轮进行齿根强力喷丸，强化齿根弯曲疲劳强度

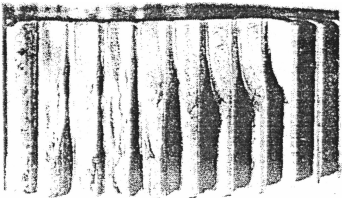
(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
过载折断 (打牙)	 塑性断裂图  承受很高的交变载荷、低循环次数后出现的 轮齿断口 (半脆性断裂或混合断裂)	同上	同上	同上
轮齿剪断	 因一次严重过载, 导致轮齿剪断 (弯曲过载)	剪断断口 (面) 类似于机加工过的表面	与“过载折断”大体相同, 但绝大多数限于齿轮副中材料强度相对较低的齿轮齿上	同“过载折断”, 但应特别注意啮合齿轮副轮齿材料的优化组合, 避免强度相差过大

(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
塑 变 后 折 断	 软钢小齿轮, 轮齿冷塑变后断裂 大齿轮严重胶合后热塑变断裂	轮齿从整体塑变开始, 最后折断。通常所有轮齿均遭损伤, 并殃及相联的齿体	同“冷塑变”或“热塑变”; 前者主要是应力集中严重超过材料强度, 而后者主要是运转过热引起齿轮材料强度的降低	对“冷塑变断齿”, 控制不当, 载荷造成过应力, 改善齿轮材质, 使轮齿工作应力低于其许用值 对“热塑变断齿”, 控制齿轮过热, 如控制“热胶合”的发生, 常控制热功率值, 使其低于许用值
疲 弯 折 疲 断 劳	 裂纹源 裂纹扩展区 抑制线 最终折断区 裂纹源 弯曲疲劳折断 (圆柱直齿轮的两个轮齿, 上图为示意图)	断口 (面) 分为两个不同的区域: 疲劳断口面 (裂纹扩展区) 和最终断口面 (过载最终折断区)。在裂纹扩展区, 即疲劳区内看不到塑变痕迹 (断口面平滑、无光泽), 有时由于被抑制线族分割, 可显现出裂纹扩展各连续阶段的间隔带, 裂纹 (断裂) 源就位于抑制线族迹线的“焦点 (出发点)”。最终断口面形貌与过载折断断口相对应	根本原因是轮齿在过高的交变应力重复作用下, 从危险截面 (如齿根) 的疲劳源起始的疲劳裂纹不断扩展, 使轮齿剩余截面上的应力超过其极限应力, 造成过载最终折断, 相应地形成两个区 主要因素: 载荷估计不足 (如载荷谱不知道, 动载严重等); 齿轮材料选用不当, 质量不能保证 (如齿根部存在非金属夹杂、加工鳞翅、热处理微裂纹、磨削烧伤等);	优选轮齿参数, 降低齿根表面粗糙度, 增大齿根圆角半径并调整齿根圆角过渡区, 以降低齿根危险截面的弯曲疲劳应力 正确选择齿轮副的材料, 并进行适当的热处理, 特别注意质量控制, 以获得较好的金相组织, 以及对齿根进行正确的喷丸处理, 以降低有害的残余应力

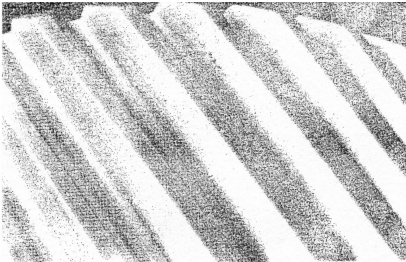
(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
疲劳折断			精度过低（如局部接触严重）；齿根向槽底过渡的曲线选择不当，特别是最小过渡圆角半径值过小使局部应力集中过大	适当选择齿轮精度，特别应注意安装精度以减少齿轮的动载荷及严重偏载 掌握传动的载荷谱，正确进行设计
	 圆柱直齿轮	断齿部位在齿端部，其他特点同“弯曲疲劳”。但应区别发生于直齿轮与斜齿轮上的齿端折断，后者可能是正常的“弯曲疲劳”表象	常由于载荷集中在直齿轮的端部，或材料缺陷集中在齿端，其他同“弯曲疲劳”	同“弯曲疲劳”，注意保证精度，特别是安装精度

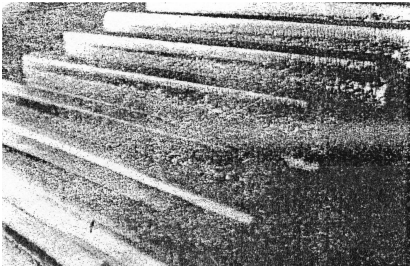
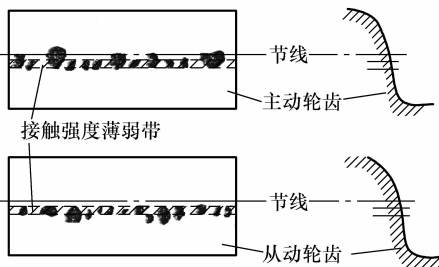
3. 齿面的接触疲劳

齿面疲劳是在过大的当量接触切应力作用下，在表面、次表面或表层下产生疲劳裂纹并进一步扩展而成的一种齿面损伤。其特征为齿面金属的移失，并在齿面上形成一些凹坑。但这类损伤主要是疲劳损伤，有别于一般磨损。齿面疲劳主要取决于相啮合齿面的接触应力和应力循环次数。齿面疲劳裂纹常呈现为不规则的细线状。根据齿面状况（如齿形精度、齿面粗糙度）、材质及载荷等条件的不同，裂纹可扩展成不同形貌与严重程度不同的齿面疲劳；点蚀、片蚀、齿面剥落和表层压碎等。它们的特征、形成原因及预防措施见表 1-3。

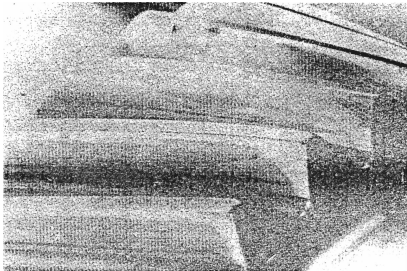
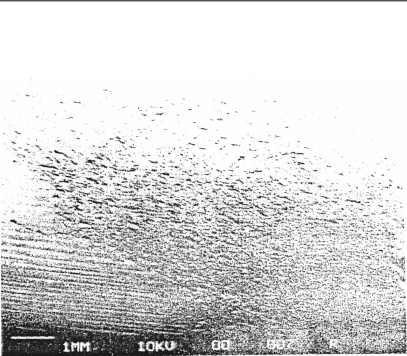
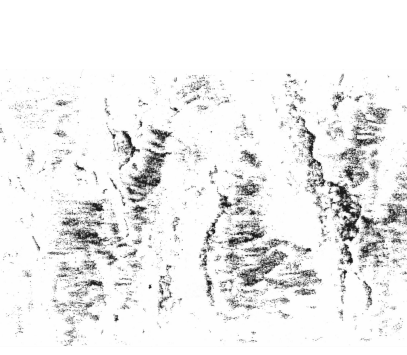
表 1-3 齿面疲劳现象的模式、特征、形成原因和预防措施

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
初期点蚀	 大齿轮齿面的初期点蚀。点蚀密度最大区与表面载荷最高区相一致	齿面出现较小的麻点（疲劳点蚀微坑），且数目不多。常发生在局部应力过高区。新工作的齿面在未经跑合时更易出现。对于软齿面，经跑合后，接触应力趋向均匀，且微坑边缘逐渐钝化，麻点不再继续扩展；但对硬齿面，初期点蚀有扩展的危险性	主要由于相啮合齿面贴合不良，造成局部过载，使齿面局部接触应力过高 齿面粗糙度过高，齿形误差较大或轴线歪斜等	提高齿形精度，采用齿廓修形以减轻动载 适当降低齿面粗糙度，按规定跑合制度进行跑合，改善齿轮的贴合状况

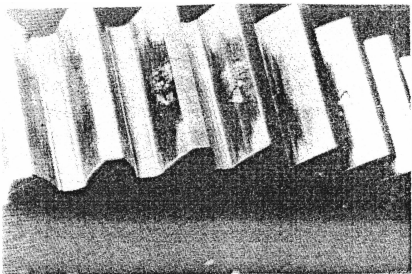
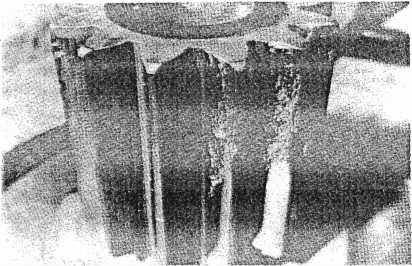
(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
点 扩 展 性 点 蚀	 调质齿轮  点蚀坑位向示意图	其点蚀坑较初期点蚀的大而深, 呈内贝壳状 一般首先出现在节线附近的下齿面上, 并且不断扩展, 使齿面严重损伤, 动载、噪声与磨损明显增大, 最终可能断齿 主动轮齿上的点蚀坑有从节线向上齿面方向扩展的趋势, 在从动轮齿上的则有离开节线向齿根部扩展的趋向	总是齿面接触应力过高。随着应力循环次数的增多, 点蚀坑不断扩展 对载荷估计不足使设计齿面接触强度不够, 硬度不够; 偏载、动载严重 (安装精度低, 轴系及箱体的误差和变形过大) 齿面粗糙度低 (对硬齿面) 润滑不良 (油品选择不当、粘度过低等)	使接触应力低于轮齿材料的疲劳极限 测定载荷谱, 正确进行强度计算 改善材质, 提高齿面硬度, 保证材料及热处理质量 提高安装精度及齿轮、轴及箱体的刚度, 对轮齿进行修形 适当选择软齿面轮齿的齿面粗糙度并进行跑合, 降低硬齿面轮齿的齿面粗糙度 改善润滑 (适当提高油的粘度, 采用合成油代替普通矿物油等)

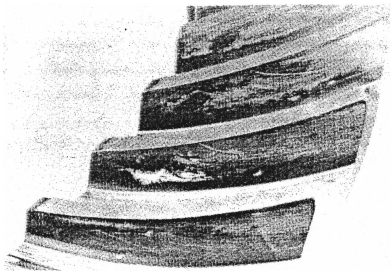
(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
点 微 点 蚀	 表面硬化小齿轮有效齿面上的微点蚀	微点蚀是一种在过载薄膜条件下运转时，轮齿工作面的接触疲劳损伤 损伤面上，肉眼可见为无光泽、霜状表面（见上图），放大后可见密密麻麻成片的微小蚀坑或微小裂纹（见中图和下图） 初期微点蚀可抛磨消除，严重时可导致点蚀，甚至剥落（扩展性微点蚀）及胶合	齿面载荷过高，齿面精度低，齿面粗糙度值高；啮合生热高而散热条件差；润滑条件不良导致近于边界润滑	控制齿面过载 适当提高精度和降低粗糙度值；保持热功率平衡，进行运转跑合；采用适当的极压添加剂或（和）油性添加剂 对于初期的微点蚀，如果整个运转条件能保持正常，则可慢慢抛磨修复
	 在低放大倍数显微镜下，齿面的微点蚀			
	 在高放大倍数（×1000）显微镜下，齿面的微点蚀			

(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
片 蚀	 调质齿轮，轮齿鼓形量偏大，局部过载严重	齿面发生面积较点蚀更大的薄碎片脱落，断口较平坦，且大部分呈现为某一顶点（断裂源）指向齿根部的倒三角形	形成机理与点蚀相近，但造成局部严重过载的因素较为突出，如轴线歪斜、齿面有较大的鼓形量等	同上，但需特别注意控制造成局部严重过载的因素
剥 落	 氮化小齿轮在最大负载区大片剥落	材料成片状剥离齿面，形成浅平（但比点蚀坑大）的剥落坑，形状不规则，坑间碎裂边的连接处呈脆裂断口 调质的中硬齿面上常可见到点蚀坑的边缘碎裂扩大连接而成的剥落，但剥落（坑间联接处及边缘）可在未达到接触疲劳极限之前发生 硬化处理齿轮通常首先在轮齿表层或次表层内产生微裂纹，然后裂纹平行于表面扩展，成片剥落。剥落片厚度较片蚀为厚，且形状更为不规则	过高的接触应力 局部过载或材料缺陷（也可热处理不良、随后形成过大内应力） 润滑油粘度不合适（常为粘度过低） 轮齿表面质量粗劣	消除造成局部过载的原因，特别是齿轮副轴线的平行度误差以及齿形误差 改善齿轮材质，适当提高硬度，特别应在热处理工艺过程中控制加热质量 对于由点蚀坑联接而成的剥落，可对凹坑边缘进行“钝化”修磨，防止裂纹扩展相接

(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
表层压碎	 表面硬化弧齿锥齿轮大轮工作齿面，其上一齿面有大量表层材料脱落形成凹坑，有多个齿面上呈现将断开的裂纹	由表层、次表层或硬软层过渡区的裂纹扩展（主要向表面）而成 常在表面硬化处理的齿面上发生，剥落坑一般较大，较深（由硬软层过渡区裂纹扩展而成的剥落坑深度常稍大于硬化层深度） 剥落坑边缘有明显的脆裂性，且常具有低周疲劳性质	由于表层材料缺陷、热处理不良、磨削过热、局部应力集中严重（过载、高残余应力）等造成表层质量不良（硬化层过浅，硬软层过渡区硬度梯度过大，硬度分布不均等），在表层或过渡层形成裂纹 材质塑性差，裂纹易于扩展	改善加工与热处理工艺，以提高轮齿硬度、降低表层与心部过渡区的硬度梯度与硬度不均匀程度，并使表硬层有足够深度 更换材料，使在保证有足够的表层及心部强度条件下具有较好塑性 从设计和安装工艺（如控制过盈配合的过盈量，使之不在轮齿心部产生高残余应力）上避免发生高残余应力

4. 齿面的耗损

齿面耗损是指齿面材料的消耗与损失。根据耗损的主要机制，齿面耗损可分为滑动磨损（机械）、腐蚀（化学）、过热（热过程）、侵蚀（流体过程）和电蚀（电弧）等五大类。

齿面滑动磨损是当两个轮齿表面作相对滑动时出现的轮齿材料移失。所以，滑动磨损就是通常工程中所指的机械磨损，简称磨损。按磨损的程度及机制不同又可有：正常磨损、过度磨损、中等及严重擦伤、磨料磨损和干涉磨损等多种模式。其中，正常磨损发生于齿轮运转寿命的早期阶段，齿面的机加工痕迹磨失，常呈现光亮状态。正常磨损有两种形式：磨光——是一种非常缓慢的磨合过程，两接触齿面凹凸不平（微凸体）被逐步磨去，直到产生光滑镜面的齿面，见图 1-1；中等磨损——上、下齿面都有金属移失，而在齿轮节曲面附近的齿表面上，开始呈现出一条连续可见而不可及（摸不着）的线带，见图 1-2，可见，正常磨损实际上是两接触齿面的一种相互磨合过程，故又称跑合磨损（Running-in wear）。因此，正常磨损通常是一种齿面材料的良性移失过程，而不是一种齿面损伤，故本书不作进一步介绍。齿面耗损的模式、特征、形成原因和预