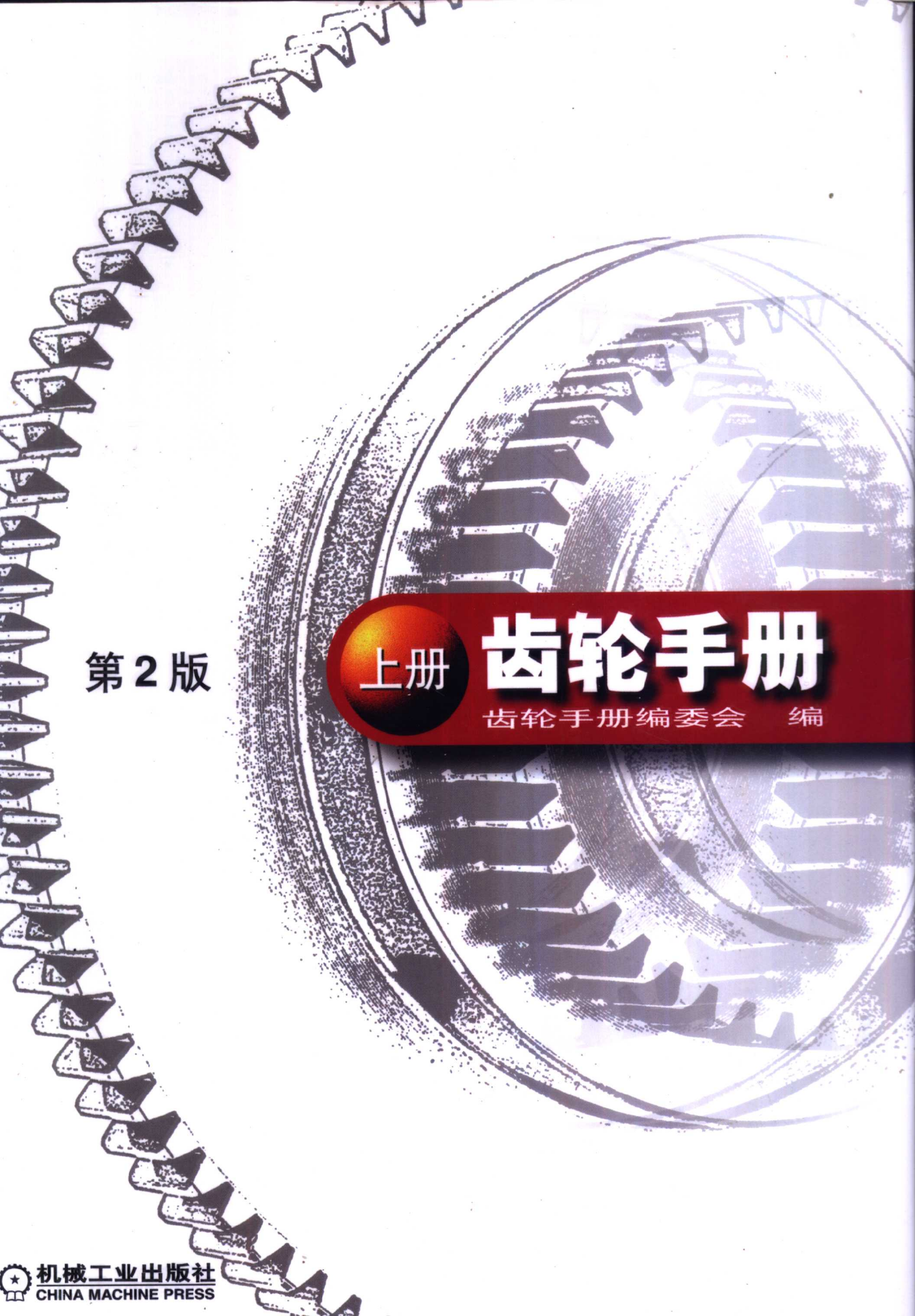




第2版

上册

齿轮手册

齿轮手册编委会 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

第 17 篇 齿轮的磨损和损伤

主 编 何德芳（东北大学）

编写人

第 1 章 何德芳

第 2 章 巩云鹏（东北大学）

第 3 章 何德芳

审稿人

蔡春源（东北大学）

蔡春源

蔡春源

齿轮磨损是在啮合传动过程中, 轮齿接触表面的材料摩擦损耗现象。齿轮的损伤是指齿轮在其材质、尺寸、精度、表面状态等基本要素, 在某一或若干方面, 在工艺过程或(和)使用过程中遭受的内、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。根据失效统计, 在传动装置中, 齿轮失效占失效总数的60%左右; 其中轮齿损伤又常占主要部分。

齿轮损伤的影响因素很广, 包括选材、设计计算、毛坯、加工、热处理、安装调整和使用维护等。轮齿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、齿形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

的分析, 找出原因与对策。

本篇分三章, 从两个方面展开: 第1、3两章介绍齿轮磨损和损伤的典型模式和原因, 损伤的预防和处理对策; 第2章则是根据实际需要和可能, 介绍齿轮的失效判据。本篇介绍的内容, 仅为齿轮损伤和失效分析提供较为直接的一些资料。

齿轮磨损和损伤的基本类型与模式的划分, 各国有所不同, 如德国的 DIN 3979、美国的 ANSI 1010—E95、我国的 GB3481—83 等。1995 年 ISO 颁布了 ISO10825: 1995《齿轮轮齿磨损和损伤术语》, 1997 年我国颁布了国标 GB/T3481—1997《齿轮轮齿磨损和损伤术语》, 后者等效于前者, 其基本内容见表 17.0-1。

表 17.0-1 齿轮磨损和损伤的基本类型 (根据 GB/T3481—1997)

齿轮磨损和损伤的类别		齿轮磨损和损伤的基本模式	
1	裂纹 Cracks (Fissures)	1.1	淬火裂纹 Hardening cracks (Quench cracks)
		1.2	磨削裂纹 Grinding cracks
		1.3	疲劳裂纹 Fatigue cracks
		1.4	轮缘和辐板裂纹 Rim and web cracks
2	轮齿折断 Tooth breakage	2.1	过载折断 Overload breakage
		2.1.1	脆性断裂 Brittle fracture
		2.1.2	韧性断裂 Ductile fracture
		2.1.3	半脆性断裂 Semi-brittle fracture
		2.2	轮齿剪断 Tooth shear
		2.3	塑性变形后折断 Breakage after plastic deformation (Smeared fracture)
		2.4	疲劳折断 Fatigue breakage
		2.4.1	弯曲疲劳 Bending fatigue
		2.4.2	齿端折断 Tooth end breakage
3	齿面疲劳现象 Surface fatigue phenomena	3.1	点蚀 Pitting
		3.1.1	初期点蚀 Initial pitting
		3.1.2	扩展性点蚀 Progressive pitting
		3.1.3	微点蚀 Micropitting
		3.2	片蚀 Flake pitting
		3.3	剥落 Spalling
		3.4	表层压碎 Case crushing
4	齿面耗损的迹象 Indications of surface disturbances	4.1	滑动磨损 Sliding wear
		4.1.1	正常磨损 (跑合磨损) Normal wear (Running-in wear)
		4.1.1.1	中等磨损 Moderate wear
		4.1.1.2	磨光 Polishing
		4.1.2	磨料磨损 Abrasive wear
		4.1.3	过度磨损 Excessive wear
		4.1.4	中等擦伤 Moderate scratching (Scoring)
		4.1.5	严重擦伤 Severe scratching

(续)

齿轮磨损和损伤的类别		齿轮磨损和损伤的基本模式	
4	齿面耗损的迹象 Indications of surface disturbances	4.1.6	干涉磨损 Interference wear
		4.2	腐 蚀 Corrosion
		4.2.1	化学腐蚀 Chemical corrosion
		4.2.2	微动腐蚀 Fretting
		4.2.3	鳞 蚀 Scaling
		4.3	过 热 Overheating
		4.4	侵 蚀 Erosion
		4.4.1	气 蚀 Cavitation erosion
		4.4.2	冲 蚀 Hydraulic erosion
		4.5	电 蚀 Electric erosion
5	胶合 Scuffing		
6	永久变形 Permanent deformation	6.1	压痕 Indentation
		6.2	塑性变形 Plastic deformation
		6.2.1	滚压塑变 Plastic deformation by rolling
		6.2.2	轮齿锤击塑变 Plastic deformation by tooth hammer
		6.3	起皱 Rippling
		6.4	起脊 Ridging
		6.5	飞边 Burrs

第 1 章 齿轮磨损和损伤基本模式的特征、产生原因及预防措施

1 裂纹

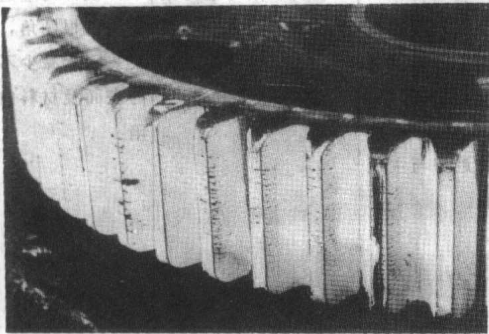
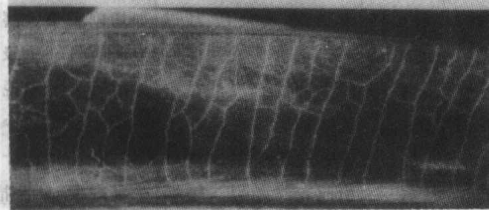
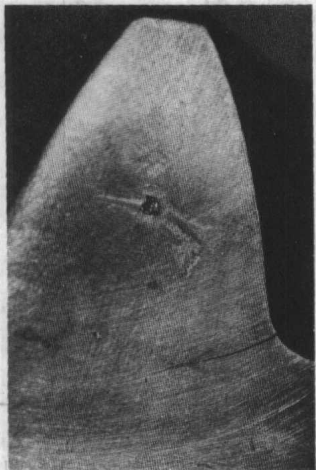
在齿轮，包括轮齿和其他部分（轮缘、轮毂、轮辐），表面和非表面部分，都可能出现材料的局部破裂——裂纹或裂缝。实际上，齿轮出现的裂纹，按其形成特点，可分为两大类：工艺裂纹和使用裂纹。工艺裂纹是生产齿轮的工艺不当而造成的材料缺陷所致，并在

一定载荷条件下失稳扩展造成齿轮失效，如铸造裂纹，锻轧裂纹、焊接裂纹、热处理裂纹（如淬火裂纹）、磨削裂纹等；而使用裂纹是在零件使用过程中和环境产生的，并进而扩展造成齿轮失效，如疲劳裂纹和应力腐蚀裂纹等。各种模式裂纹的特征、原因及预防措施见表 17.1-1。

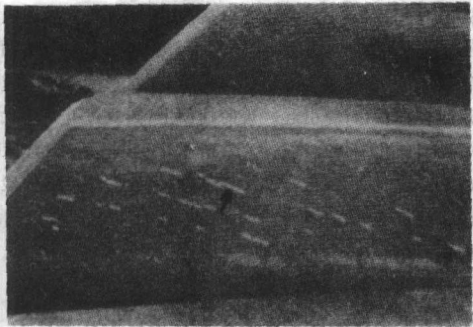
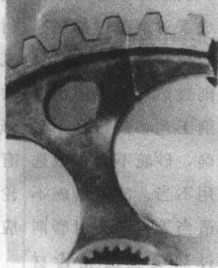
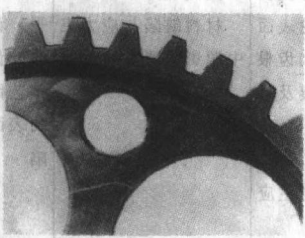
表 17.1-1 裂纹基本模式和特征、产生原因及预防措施

模式	图 例	特 征	原 因	预防措施
淬 火 裂 纹	齿面中等硬度的淬火齿轮，加载使用一短时期后，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，也有的在穿越齿顶或存在在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短时期后才见到。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。它通常由不合适的淬火工艺，如升温过急、淬火过急、淬火过缓等引起。齿的端面上的裂纹，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，防止淬火速度过高或过低，淬火温度不合适。对淬火后的齿轮应严格检验

(续)

模式	图例	特征	原因	预防措施
淬火裂纹	 在大齿轮齿顶形成的淬火裂纹	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,也有的穿越齿顶或存在在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短时期后才见到。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。它通常由不合适的淬火工艺,如升温过急、淬火过急、淬火过缓等引起。齿的端面上的裂纹,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,防止淬火速度过高或过低,淬火温度不合适。对淬火后的齿轮应严格检验
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、冷却措施不适当等。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
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

(续)

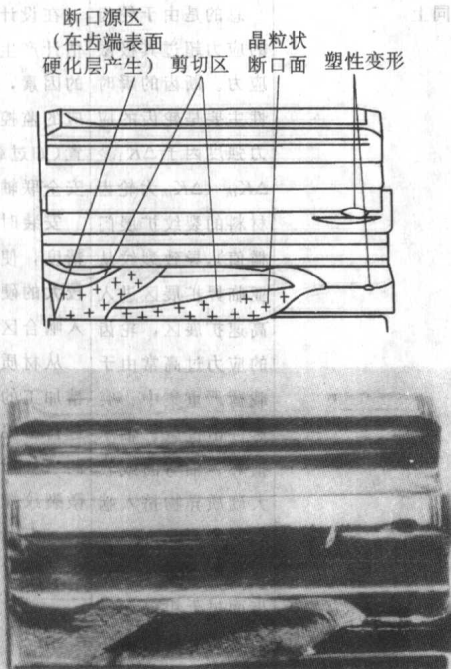
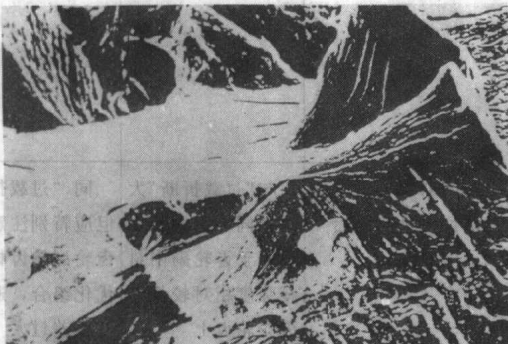
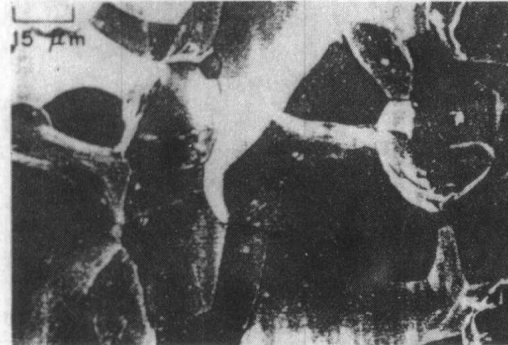
模式	图例	特征	原因	预防措施
疲劳裂纹	 氮化小齿轮齿面上沿接触线方向形成的轮齿接触疲劳裂纹	应力为重复交变；裂纹源常为齿轮表面应力集中处，如齿根圆角、加工刀痕及材料缺陷处；尾端尖细，微观主要呈穿晶扩展，其总趋势与主应力相垂直	交变应力水平过高 材料缺陷与应力集中源影响严重	控制交变应力水平，设计时应避免过小的齿根圆角，控制工艺因素减少不允许的表面及材料内部缺陷
轮缘和辐板	 轮缘裂纹	轮缘裂纹通常发生在两相邻齿之间的齿根部。辐板裂纹有的是由轮缘裂纹沿径向扩展而成，有的是在辐板自身中产生，不一定扩展到轮缘	轮缘断裂通常是轮齿齿根圆角疲劳裂纹发展的结果。齿轮某部分的残余应力过高，也会形成并促使疲劳裂纹扩展。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。以局部应力集中因素，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
板	 辐板裂纹			

2 轮齿折断（断齿）

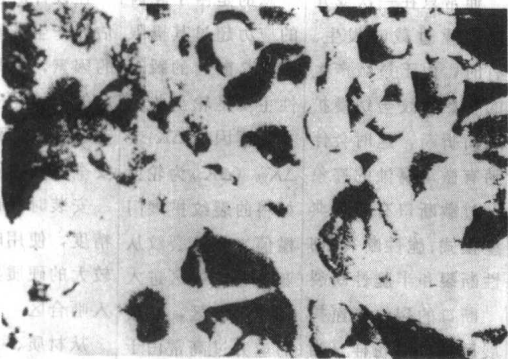
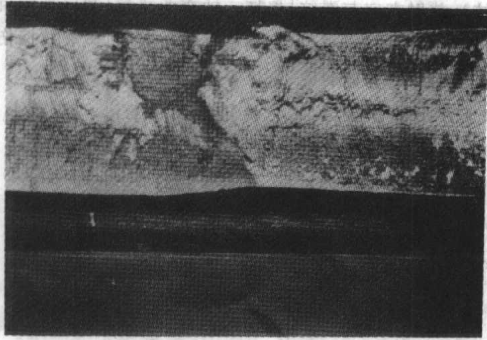
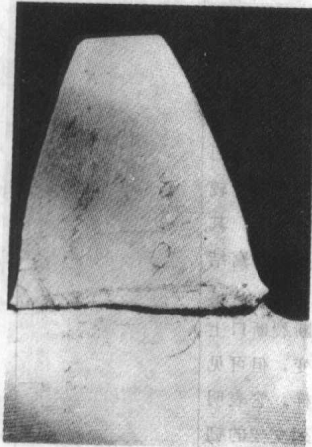
断齿是指齿轮的一个或多个齿的整体或其局部的断裂。断齿常由微裂纹扩展而成。按照断齿的原因及其

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）。各类断齿模式的特征、原因和预防措施见表 17.1-2。

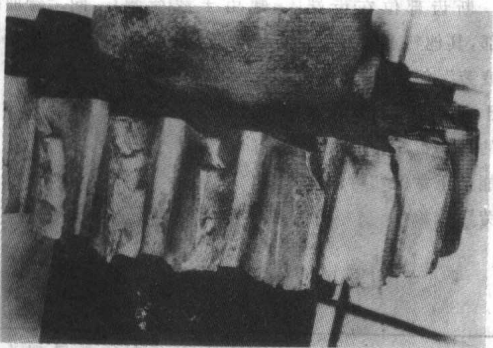
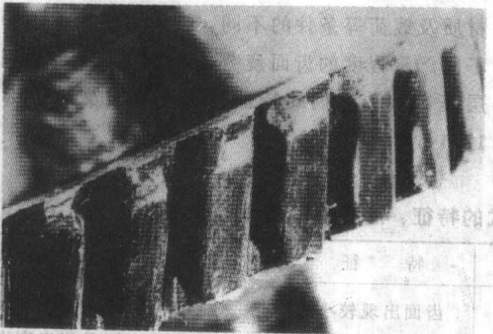
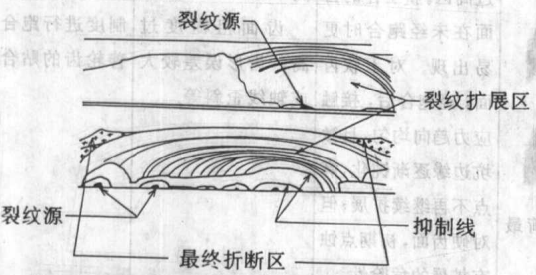
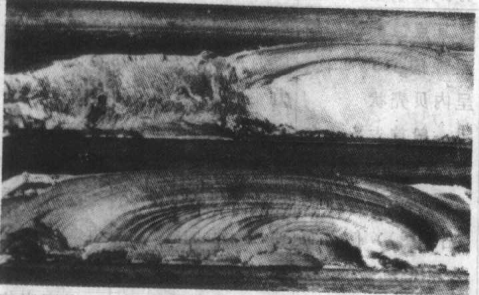
表 17.1-2 断齿基本模式的特征、原因及预防措施

模式	图 例	特 征	原 因	预 防 措 施
过载折断 (打牙)	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  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, 断口终了处有平滑的韧断区 (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	总的 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 $\Delta K_I \gg \Delta K_{th}$ (ΔK_{th} 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)

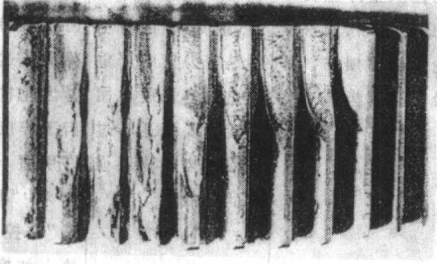
(续)

模式	图 例	特 征	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  总是由于轮齿的应力超过其极限应力。断齿的瞬时主要是轮齿的应力强度因子 $\Delta K_I \gg \Delta K_{th}$ (ΔK_{th} 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)	
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	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 劳 曲 折 疲 断 劳	  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)的疲劳源超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); 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	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, 特别应注意质量控制, 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 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

(续)

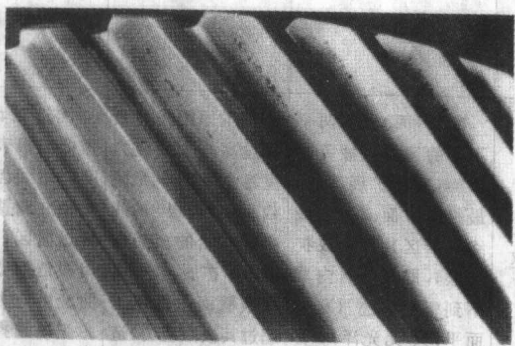
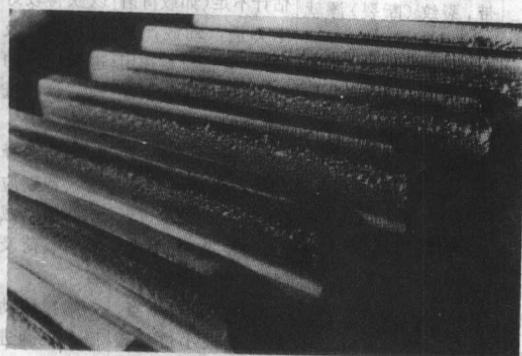
模式	图 例	特 征	原 因	预防措施
疲劳 劳端 折折 断断		断齿部位在齿端部,其他特点同“弯曲疲劳”。但应区别发生于直齿轮与斜齿轮上的齿端折断,后者可能是正常的“弯曲疲劳”表象	常由于载荷集中,在直齿轮的端部,或材料缺陷集中中在齿端,其他同“弯曲疲劳”	同“弯曲疲劳”,注意保证精度,特别是安装精度
	齿端折断(圆柱直齿轮)			

3 齿面疲劳现象

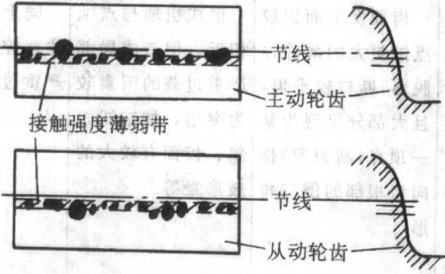
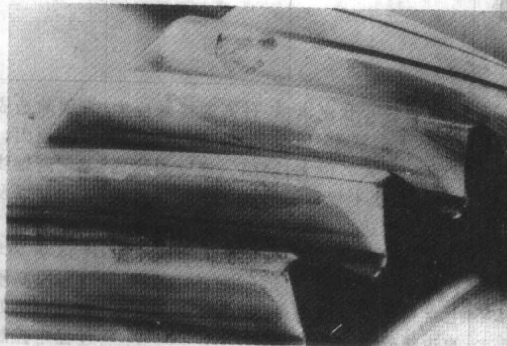
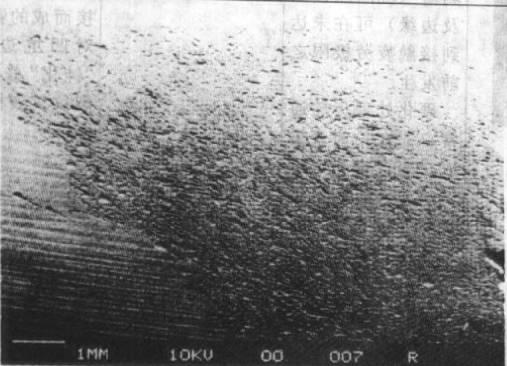
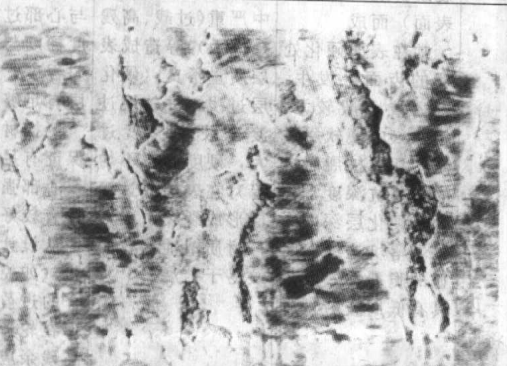
齿面疲劳是在过大的当量接触切应力作用下,在表面、次表面或表层下产生疲劳裂纹并进一步扩展而成的一种齿面损伤。其特征为齿面金属的移失,并在齿面上形成一些凹坑。但这类损伤主要是疲劳损伤,有别于一般磨损。齿面疲劳主要取决于相啮合齿面的接触

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不同严重程度的齿面疲劳: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17.1-3。

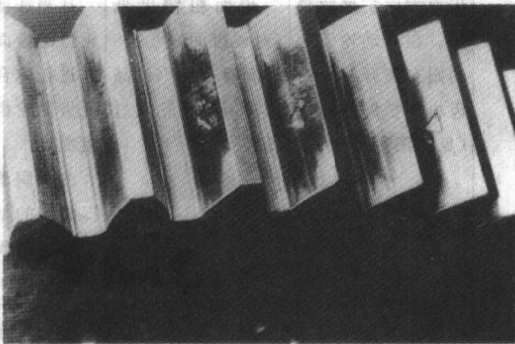
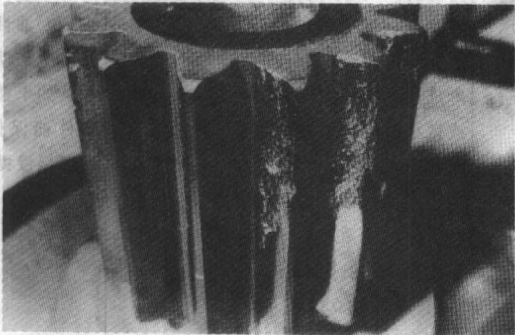
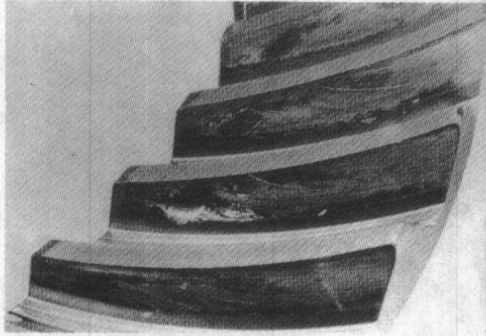
表 17.1-3 齿面疲劳现象基本模式的特征、形成原因和预防措施

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
初期 点 蚀		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,改善轮齿的贴合状况
点 蚀 扩 展 性 点 蚀		其点蚀坑较初期点蚀的要大而深,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(见上图),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	总的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)	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
	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			
	扩展性点蚀(调质齿轮)			

(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
扩展性点蚀	 点蚀坑位向 (示意图)	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 (见下图)	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)	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)
点蚀	 表面硬化小齿轮有效齿面上的微点蚀	微点蚀是一种过载荷膜条件下运转时, 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)	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
微点蚀	 在低放大倍数 (×15) 显微镜下, 齿面的微点蚀	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		
	 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		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		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(也可为热处 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
表 层 压 碎		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 齿面耗损的迹象

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 17.1-1;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 17.1-2。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,故本书下面不作进一步介绍。齿面耗损基本模式的特征、形成原因和预防措施见表 17.1-4。

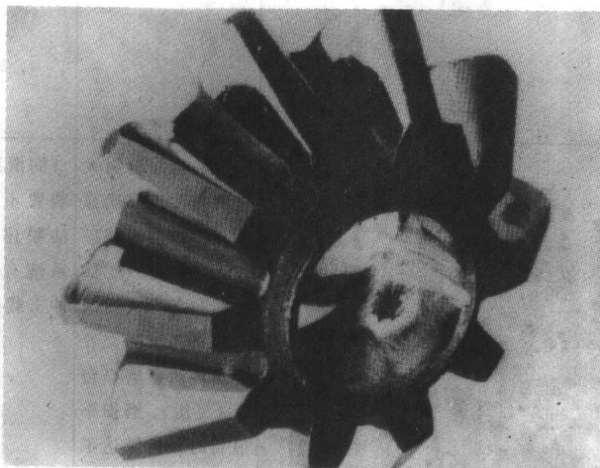


图 17.1-1 磨光(汽车差速器锥齿轮副的小齿轮,其轮齿的有效齿面都磨光亮了)

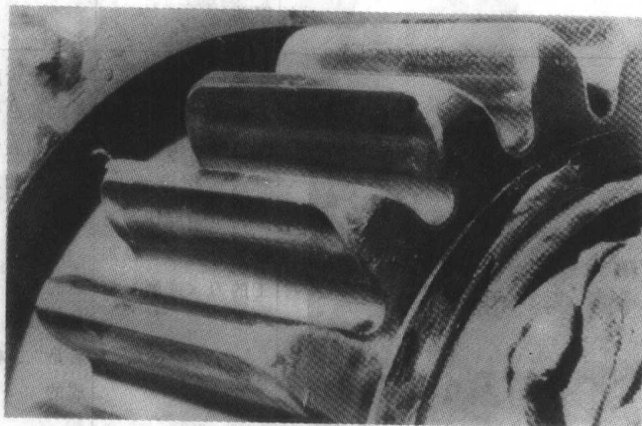
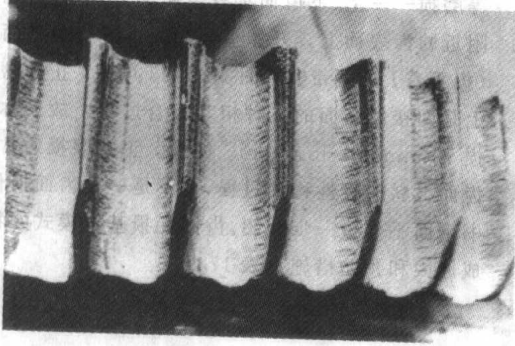
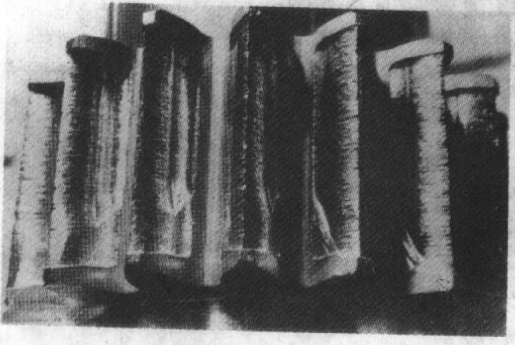
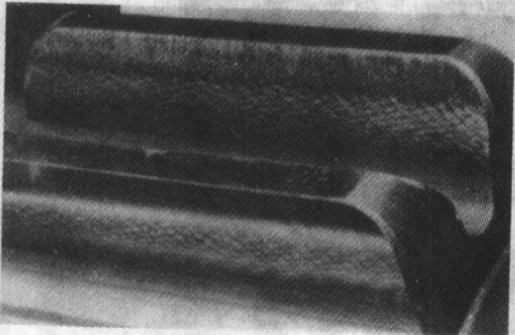
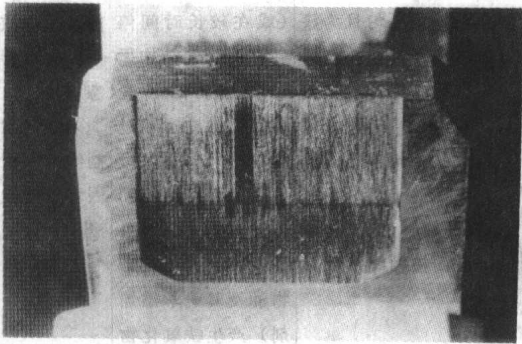
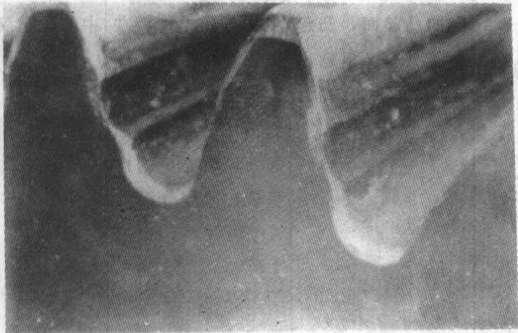
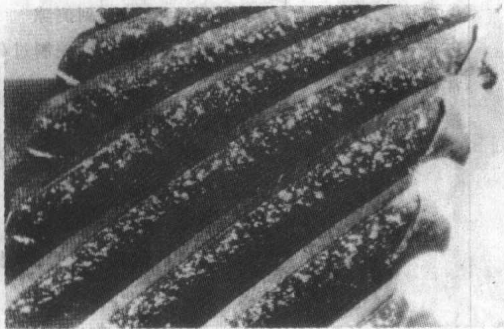


图 17.1-2 中等磨损(小齿轮齿面经中等磨损,其齿面上工作节曲面的位置清晰可辨,但摸不出棱线)

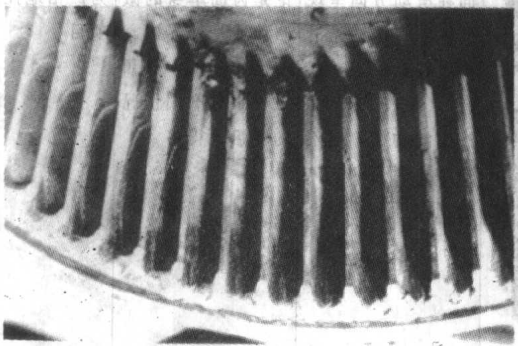
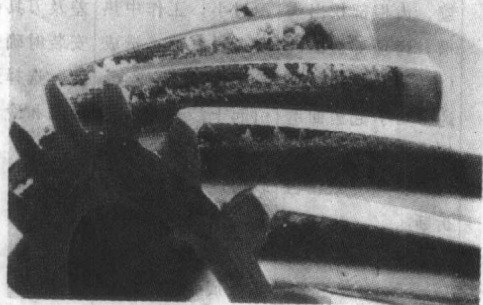
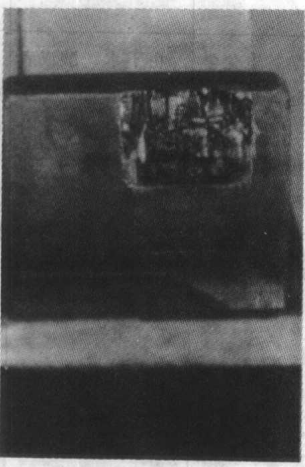
表 17.1-4 齿面耗损基本模式的特征、形成原因和预防措施

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
磨料磨损	 磨料磨损	轮齿接触表面上沿滑动方向常有较均匀的条痕, 这种多次摩擦产生的条痕一般具有重叠的特征。对开式齿轮传动, 磨损更为严重。	落在工作齿面间的外部颗粒起着磨料作用。磨料也可以是齿轮和轴承等零件损伤所产生的颗粒, 以及新齿轮装置跑合后未予清洗和其他原因而进入润滑油的焊接飞溅物、氧化皮, 锈蚀物、型砂等。	对采用飞溅润滑的闭式传动, 要及时换掉脏油, 清洗有关零件; 对循环润滑系统, 要采用过滤装置。对运转初期产生的磨粒磨损, 要注意清洗, 及时换油。对由于细颗粒造成的磨料磨损, 采用较高粘度的润滑油。对开式传动, 应采用防护措施, 选用合适的润滑剂。
过度磨损	 过度磨损 (由于过度的磨料磨损所造成)	工作齿面材料大量磨掉, 齿厚明显减薄, 齿廓形状破坏, 常在有效工作齿面与工作齿面的不接触部分的交界处出现明显磨损台阶 (见图)。磨损率很高时, 齿轮达不到设计寿命。常伴有其他的轮齿损伤, 如断齿、节线点蚀等; 且会导致齿轮严重噪声和系统振动。	润滑系统和密封装置不良或失效, 油膜建立不起来, 系统有严重振动、冲击载荷等。	采用合适的密封形式和润滑装置或排除其故障。改善润滑方式, 提高润滑油的粘度, 改善润滑油冷却装置。也可以提高工作速度、减轻载荷 (特别是减轻振动载荷)。改变齿轮的几何参数、材质、精度、齿面粗糙度等。
中等擦伤	 中等擦伤 (上齿面上存在擦伤沟槽, 下齿面上为原磨齿痕迹)	在齿面滑动方向上形成擦伤痕迹, 通常为细微沟槽, 在有效工作齿面上, 擦伤呈局部性, 其余部分还存在加工的刀 (或磨) 痕。	啮合齿面上较细小的微凸体 (有硬有软), 在齿面滑动方向上相对运动而擦伤。 也可能是由于较细的硬质微粒嵌入某一较软齿面, 随后是“二体磨损”造成的。	要控制齿面粗糙度, 以使微凸体更细小, 适当提高齿轮的几何参数、材质、精度等。 要求控制杂质、硬质微粒进入啮合, 这可控制润滑密封及过滤系统。

(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
严重擦伤		整个有效工作齿面在滑动方向呈现严重的直线型光滑沟槽, 类似于“起脊” (见表 17.1-6) 产生的沟槽, 但不是塑变而是“二体磨损”	机理同上, 但无论是齿面本身的微凸体或是外界嵌入齿面的磨料, 其颗粒比中等磨损情况的更粗大得多	同上, 当然要更为严格地控制相关项目
干涉磨损		轮齿的齿顶部, 尤其是齿根部有明显的金属移动痕迹。齿根部挖出沟槽, 齿顶部被滚圆 (见图)。干涉损伤通常可引起齿面磨损、塑性变形、胶合, 甚致导致轮齿折断	啮合参数设计不合理、加工齿形误差过大, 安装中心距过小, 工作中热变形过大等, 造成轮齿不正常啮合, 引起干涉。相啮合的轮齿顶部或根部载荷过大或啮合过紧, 使润滑油膜失效, 造成齿顶、齿根部金属急剧移动, 导致整个齿面损伤	在设计时正确选择参数; 在加工时严格控制轮齿的误差及刀具误差; 在安装时确保安装精度。选择适当的润滑油和冷却措施
化学腐蚀		由化学、电化学浸蚀引起的齿面腐蚀 在全齿面均可看到, 锈斑与蚀坑锈斑有时呈红棕色, 如齿轮时转时停, 则齿面会出现腐蚀后磨痕	由于水、酸或者不适宜的合成化学添加剂 (与高水分有关) 的作用 润滑油中的杂质也可以促使轮齿材料发生化学或电化学反应	控制腐蚀介质, 如采用化学添加剂时应掌握其成分和含量; 润滑油中添加适量的阻蚀剂以降低电极反应速率; 不使水、酸等有害物质进入油中 (如改善传动的密封性能)

(续)

模式	图 例	特 征	形成原因	预防措施
微 动 腐 蚀	 微动腐蚀 (齿轮联轴器的内齿轮齿面上产生的情况)	齿面上呈现红棕色厚度不均且为漆状薄复层, 损伤区产生红棕色氧化微粒, 齿面进而呈现形状相同、难以擦除的粉末状擦痕 (凹痕), 此凹痕沿齿面接触线发展	对于非运转状态 (或在较长时间停转) 而受到结构振动或摆动的齿轮副, 例如在运输过程中 (停转) 受到振摆, 促使接触齿面及环境介质 (润滑油及其添加剂或矿物油及其化学添加剂) 产生铁氧化物或离解产物的氧化生成物	保证微动齿轮副的环境介质较良好条件; 改善振动状态 未运转状态下控制润滑剂中的腐蚀因素 (如防止水、酸浸入)
鳞 蚀	 斜齿小齿轮轮齿上的鳞蚀	齿面上呈现不规则的凸起面, 凸起面传力后又呈现出金属光泽 (如鳞状)	由于热处理过程中的氧化作用, 在齿面上产生的一些不规则“凸起”, 轮齿传动时, 这些“凸起”就首先传力而呈现出金属光泽	控制热处理过程中的化学腐蚀因素
过 热	 轮齿齿面上由于运转中突然严重过载而产生的过热	齿廓变色 (呈现回火色), 齿面硬度降低, 沿滑动方向出现沟痕 (特别在齿顶和齿根部), 也常可见有胶合区和塑变区	由于齿面上 (或也有在轴承中) 严重摩擦造成过热, 由于严重过载, 过高速、过小的齿轮副侧隙或不合适的润滑, 致使齿廓变色、齿面硬度降低。过热也可能与严重胶合或热塑变以及不合适的研磨过程有关	保证良好的润滑条件与摩擦状态 保证合适的齿轮副侧隙 控制过载与过高速 控制与热胶合、热塑变有关的过热因素 研磨时, 采用合适的研磨参数