

机械产品失效分析丛书

JIXIECHANPIN
SHIXIAOPENXI

● 基础—5

磨损失效分析

● 中国机械工程学会材料学会主编

刘英杰 戚克强 编著

● 机械工业出版社



TH 117-1

L76

352323

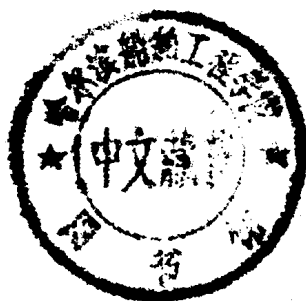
机械产品失效分析丛书

(基础—5)

磨 损 失 效 分 析

中国机械工程学会材料学会 主编

刘英杰 成克强 编著



机械工业出版社

21148/10
(京)新登字054号

磨损是摩擦学三大基本内容(摩擦、磨损、润滑)之一,磨损又是金属机械零件失效的三种主要形式(磨损、断裂、腐蚀)之一。由于磨损,造成机械零件表面材料流失而引起失效,致使经济上造成巨大损失。为了节约材料和能源,减少人力和物力的浪费,防磨和抗磨的措施十分重要。本书介绍机械零件磨损失效的主要类型,并根据作者和其他同志的实践经验,依据失效分析的基本方法介绍磨损失效分析的思路和实验技术,通过七个具体事例说明如何运用磨损失效分析的基本方法解决实际问题。本书可供质量管理、机械产品的设计、生产、试验、维修及使用人员、专职和兼职失效分析工作者使用。亦可供从事机械和材料方面研究的科研人员和大专院校师生参考。

机械产品失效分析丛书

(基础—5)

磨损失效分析

中国机械工程学会材料学会 主编

刘英杰、成克强 编著

责任编辑:张绪江 责任校对:刘思碚 樊中英

封面设计:郭景云 版式设计:吴静霞

责任印制:卢子祥

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)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $6^{7/8}$ ·字数178千字

1991年11月北京第一版·1991年11月北京第一次印刷

印数 0,001—2,700·定价:7.20元

ISBN 7-111-02777-9/TG·611

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招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, 就是对于设计工程师、材料和工艺工程师以及生产管理人员也都是十分必要的。只有对产品一切可能的失效形式、发生的条件、控制及预防措施等有深刻的理解, 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又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, 扩大失效分析工作队伍, 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《机械产品的失效分析》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, 因此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，同时适当地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设计、制造、使用、维修的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，并可做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

顾问：周惠久，张协和，陶正跃

主任：王仁智

副主任：钟群鹏

委员（按姓氏笔划）：

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，庾 鹏，栗 滋

目 录

第一章 概论	1
第一节 机械产品磨损失效的危害	1
一、造成经济上的巨大损失	1
二、导致产品质量低劣或造成机械设备事故	1
三、造成社会资源浪费	2
四、降低劳动生产率	3
五、检修工作条件恶劣	3
第二节 磨损失效分析的必要性	3
第三节 机械产品磨损失效的特性	4
一、磨损失效分析的目标	9
二、磨损的系统特性	9
三、磨损过程的动态性质	10
四、磨损类型和磨损机制的转化特性	11
第二章 磨损失效的主要类型	12
第一节 摩擦及磨损	12
一、摩擦	12
二、磨损	24
三、摩擦与磨损	25
第二节 磨料磨损	27
一、滑动磨料磨损简化模型	29
二、磨屑的形成过程	30
三、影响机械零件抗磨性的材料性能	37
四、影响材料耐磨性的工况条件	40
第三节 冲蚀磨损	42
一、简述	42
二、冲蚀磨损机制	45
三、影响冲蚀磨损率的因素	49
四、汽蚀	52

第四节 粘着磨损	54
一、定义	54
二、粘着磨损的实验研究和理论概述	55
三、机械零件的磨损特点和分类	61
四、影响粘着磨损的因素	62
第五节 疲劳磨损	66
一、定义	66
二、表面疲劳磨损的起因和发展	67
三、疲劳磨损的表示方法	71
四、影响疲劳磨损的因素及抗磨措施	71
第六节 微振磨损	74
一、定义和特点	75
二、微振磨损发生过程	76
三、主要影响因素	78
四、微振磨损的防止措施	80
第三章 磨损失效分析	85
第一节 失效分析简述和磨损失效分析	86
一、失效分析	86
二、磨损失效分析	88
第二节 磨损失效分析的依据	92
一、磨损表面形貌	93
二、磨损亚表层分析	97
三、磨屑形貌及结构分析	99
四、失效分析过程中的模拟试验	103
第三节 磨损失效的原因	106
一、结构设计	107
二、选材	107
三、工艺	109
四、使用与维护	109
第四节 磨损失效分析的实验技术	110
一、磨损失效分析中的形貌分析	114
二、表面分析仪器在磨损失效分析中的应用	120
三、铁谱仪	123

四、磨损失效分析中的组织结 构分析.....	123
五、磨损失效 分析的 样品.....	128
第四章 磨损失效分 析案例	130
例一 挖掘机斗齿的磨损失效分析.....	131
例二 锤式破碎粉磨机锤头的失效分析.....	141
例三 拖拉机履带板的 失效 分析.....	147
例四 抽油泵凡尔球的失 效分 析.....	162
例五 重载齿轮的失 效分 析.....	177
例六 凸轮—挺杆的磨损失效 分析.....	186
例七 直升飞机旋翼桨叶壳体的 失效 分析.....	201
参考文献.....	206

第一章 概 论

第一节 机械产品磨损失效的危害

一、造成经济上的巨大损失

机械零件的断裂、腐蚀和磨损是使机械装备失效的三种主要方式。有人认为磨损要比腐蚀造成更大的经济损失，而磨损研究的技术基础比腐蚀研究的基础薄弱得多。从1966年英国的教育科研部提出关于摩擦学教育和研究的报告以后，人们日益感到摩擦和磨损对整个工业的影响，纷纷调查本国摩擦、磨损所造成的经济损失。根据资料统计数字是惊人的，由于摩擦和磨损造成的经济损失是巨大的，大约可占各国国民生产总值的1~4%，或按人口平均为25~250美元。

只要有物体间的相对运动，就会产生物体的表面磨损。磨损的主要方式是磨料磨损、粘着磨损、冲蚀磨损、微振磨损和腐蚀磨损。其中以磨料磨损所造成的经济损失为最严重，占磨损所造成总的经济损失50%以上。据1985年我国不完全统计，冶金矿山、建材、电力、煤炭、农机等五个部门，钢材备件与土砂、矿石、水泥、煤炭等物料接触过程中所造成的磨料磨损，磨耗了200万t钢材备件，价值40亿元以上，这还仅是磨料磨损所造成经济损失的一部分，而五类磨损造成的经济损失估计可在150亿元以上。目前利用现有的科学技术，完全有可能降低这些经济损失。

二、导致产品质量低劣或造成机械设备事故

机械零件的耐磨损性能差，会导致设备的精度很快下降，造成产品质量不稳定。例如，自动车床刀具的过快磨损，不仅直接影响生产效率，而且增加了废品率；轧钢机轧辊耐磨性差，既浪费

资金，又影响产品质量；耐磨性较差的人造关节会直接影响人体的健康；玻璃破碎机的零件由于磨损产生大量磨屑（铁末）混入原材料中，因而造成玻璃透明度低，诸如此类，都不同程度地影响产品质量。更为严重的是，常常由于制造工艺不合理或选材不当，而使机械装备发生磨损失效，例如：直升飞机的某种零件在飞行中产生微振磨损后，进一步发展为疲劳断裂而造成飞机失事，类似的例子是很多的。

现代工业向连续自动化方向发展，磨损使整条生产线停产检修所造成的损失是可观的。如有一座现代化的钢厂，因设备的轴承磨损失效而导致全厂停工，每分钟损失300英镑。美国的一个电站设备因轴承磨损失效，每天的经济损失为2500美元，这还没有把那些使用该电站电力的厂矿企业的经济损失计算在内。所以现代工业的连续自动化发展，要求整条生产线的各种机械设备都具有良好的可靠性。设备的可靠性又是由各机械零件的质量决定的，提高零件的耐磨性是提高机械设备可靠性的措施之一。

三、造成社会资源浪费

美国机械工程师学会提出的一份“通过摩擦学研究节约能源的战略”，报告中指出：美国耗能比重最大的交通运输、电力工业、加工工业、商业和民用等四个方面占全国能源消耗的80%，但是近一半能源是使用过程中由于摩擦未经做功而损失的。自从蒸汽机发明以来的近两个世纪中，一直致力于提高原动机热循环效率，但近十多年的研究工作证明，这方面潜力有限。报告认为今后节约能源的着重点应该是改善摩擦技术，使有可能保持较高的热效率。设计更轻巧的机械设备，节约原材料和动力消耗，提高机器的可靠性以延长服役时间，减少维修费用等等，所有这些最终将反映到节约能源上来。美国估计，可能节约量为全国能源消耗的11%。

磨损使原材料和能源大量浪费。40%农机农具配件是由磨料磨损消耗的；三分之一的锅炉管是由于冲蚀磨损损坏的；金属切削刀具中硬质合金刀头，英国每年消耗2000万件，价值1亿多美元；金属冶炼、轧钢、粉末冶金、铸造、焊接等工序都要消

耗大量的能源和原材料。初步统计表明,如果零件的耐磨性提高一倍,我国一年可节约60~100亿元,相当于国民总产值的1%左右。

汽车缸套与活塞环之间的直接损失是最大的动力损失,迄今关于其磨损机理及控制措施尚未进行过认真的研究。如果对它们之间以及其它零件间摩擦情况加以改善,就有可能节约燃油10%。

四、降低劳动生产率

机械零件的磨损失效,使许多设备运行周期缩短。某厂使用锤式破碎机破碎原材料,8kg重的锤头只能工作4h,锤头部分的 $3/4 \sim 4/5$ 被磨耗,所以工人上班就检修设备更换锤头,然后工作4h,接班工人再检修设备更换锤头,因此大大降低劳动生产率,该厂1年耗费锤头备件10000支,价值15万元以上。

有些大型设备或野外的工程施工机械更换零件困难,停工检修时间长,例如水泥研磨设备的大型传动齿轮寿命只有1年,3~4m直径的大齿轮拆装很困难,大大影响了水泥的生产效率,水轮发电机的叶片由于冲蚀、气蚀磨损很快报废,直接影响了正常发电。这说明磨损失效造成设备运行周期短,停机检修时间长,严重地影响了生产效率。

五、检修工作条件恶劣

机械零件磨损失效,工人进行检修时工作条件极其恶劣,比如,研磨水泥熟料的球磨机衬板如果磨损失效,工人须进入百度高温的罐中进行检修。磨球耐磨性差,每台设备间隔一段时间要把磨球全部倾倒出来,对几十吨钢球逐个根据尺寸进行分类,工人得在粉尘严重,工作条件十分恶劣的情况下进行长时间的繁重体力劳动。

总之零件如被磨损,需要停机更换磨损零件,这项检修工作是一项又脏又累的手工操作。如果零件耐磨性好,寿命长,就可以大大地减少检修次数,延长检修周期。

第二节 磨损失效分析的必要性

磨损是摩擦学(Tribology)的重要组成部分。由于摩擦学在

应用方面具有重大的经济意义，从60年代中期引起人们的极大重视。它是一门古老而又新兴的科学技术，它涉及力学、物理化学、表面物理、材料科学、机械学、矿物学等多学科的理论和技术。磨损研究中的理论基础十分薄弱，许多问题还处于探讨、研究之中。甚至关于磨损的分类问题也有不同的看法，世界各国的学者提出若干不同的观点，不同的分类方法。因此进行失效分析往往是较复杂的，判断属于哪类磨损和采取何种相应的措施，自然会遇到困难。

磨损现象广泛地存在于自然界，而磨损的条件和发生的原因是多种多样的。在实验室中，根据孤立因素的实验结果可以提出种种理论和物理模型，但往往需附加上实验条件。根据这种途径所提出的绝大多数理论不能直接应用于生产实际，因为实用机械零件或机械设备的磨损往往不是单一的一种磨损机理在起作用，比如球磨机中的磨球，是一种消耗量占第一位的易磨损件，它工作时受多种作用力，包括：①从几米高处抛落的撞击作用；②与不同硬度磨料的接触滚动辗压作用；③在磨罐中的滑动作用。与矿料相互作用的方式不同，湿磨或干磨的条件不同，制造磨球的材料、工艺、甚至技术水平不同等因素都会直接影响磨损失效的机理和过程。甚至同样材料，在同样的设备中使用，研磨同类物料，不同厂家生产的磨球，有的碎球率可达5~10%以上，而有的碎球率则低到0.05%，其根本原因是冶金和铸造质量问题。

失效分析发展成为一门科学技术的历史仅20多年。虽然磨损失效广泛存在，可是磨损失效分析的研究历史则很短。我国在这方面的研究不到十年。因此磨损失效分析还处于摸索前进、宣传普及磨损理论和应用失效分析的思路方法及实验技术的阶段，必须给以极大的重视。

第三节 机械产品磨损失效的特性

机械零件磨损失效是个逐步发展的过程。有的零件只能工作几个小时，而有的零件可以使用几年甚至几十年的时间才需更换。

各种零件的使用条件不同，技术要求不同，磨损特征也千差万别。

零件磨损的共同特征是表面受到损伤，发生了表面材料迁移。表面损伤或材料迁移到什么程度判为零件失效，根据零件的工作条件和要求是大不相同的，粗略分为三类：

1. 与土砂，矿石相互作用的零件，多数情况下允许很大的磨损量，其磨损失重可达到零件原始重量的10~100%。比如，挖掘机斗齿，不同型号挖掘机允许磨损量不同，重量比，一般不大于25%。从整机性能来说，以不磨损其固定斗齿的斗唇为标准。某些农机零件允许磨损量达原始重的30~50%，直到影响整个部件的功能或油耗骤增和耕作深度不能达到要求为止，才更换新件。而磨机中的磨球，就是由入罐开始，尺寸逐渐减小，直到磨成尺寸很小不能使用或磨完为止。当然在运行中磨球也会产生失圆，这也属于早期失效。

斗齿使用过程中形状、尺寸的变化实例如图1-1a为斗齿刚开始使用的形状；图1-1b为斗齿磨损失效件的外形。磨损后的斗齿尺寸明显变小。

2. 设备中要求尺寸配合的零件磨损后，尽管磨损量很小，用重量法几乎测定不出，但影响设备的精度和效率，或增加其震动，这种情况必须更换零件。仔细观察零件，表面已受到损伤，如图1-2所示。图1-2a是活塞上部边缘区产生的擦伤，图1-2b是发动机曲轴与轴瓦配合部分产生的毛发状擦伤，用指甲划刮可以感觉出磨沟。虽然表面损伤轻微，但对设备的正常运行却影响很大。

国外一些公司将磨损零件表面形貌编成图谱，以便判定磨损类型及严重程度，分析原因和采取措施。日本小松制作所编写成“零件检查指南”。美国约翰·迪尔公司编制了“零件损坏鉴定”图册等，可供磨损失效分析时参考。

还有一种情况，虽然没有配合精度要求，但发生一定量的磨损(比如几微米到几百微米的磨损量)会影响设备的运行而造成失效。例如，塑料挤塑机的螺旋送料轴，在输送融化了的聚乙烯塑料过程中，与高压、含添加粉料的高温熔融塑料相互摩擦过程中

逐渐发生磨损,表面形貌如图1-3。图1-3a是螺旋送料轴的外形,图1-3b是表面磨损的形貌。该零件由38CrMoAlA材料制成,经过离子氮化处理而提高其表面硬度。目前每根轴只能加工几十吨塑料就磨损失效。如果塑料中的填料改变,则寿命有可能更短。因此,如何提高其耐磨性就是十分重要的课题。

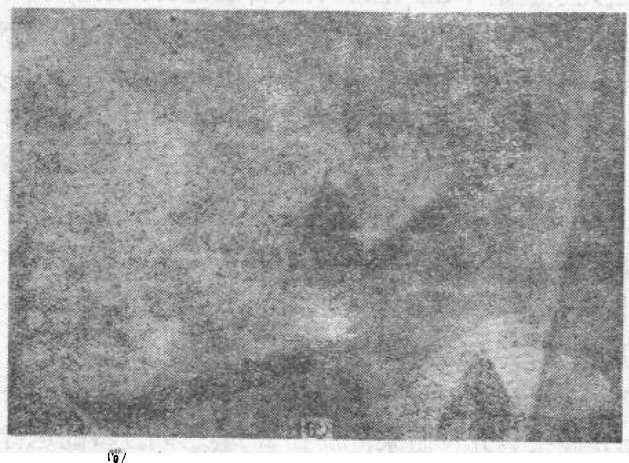


图1-1 斗齿使用过程中形状、尺寸的变化
a) 刚开始使用的斗齿外形 b) 使用后的斗齿外形

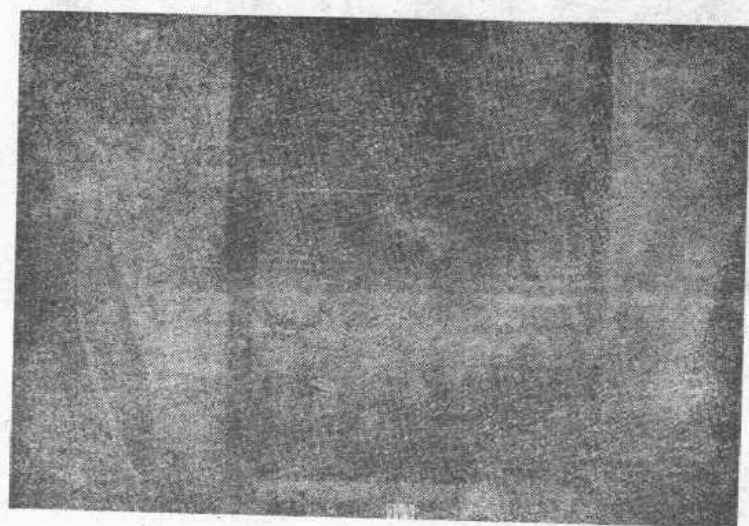
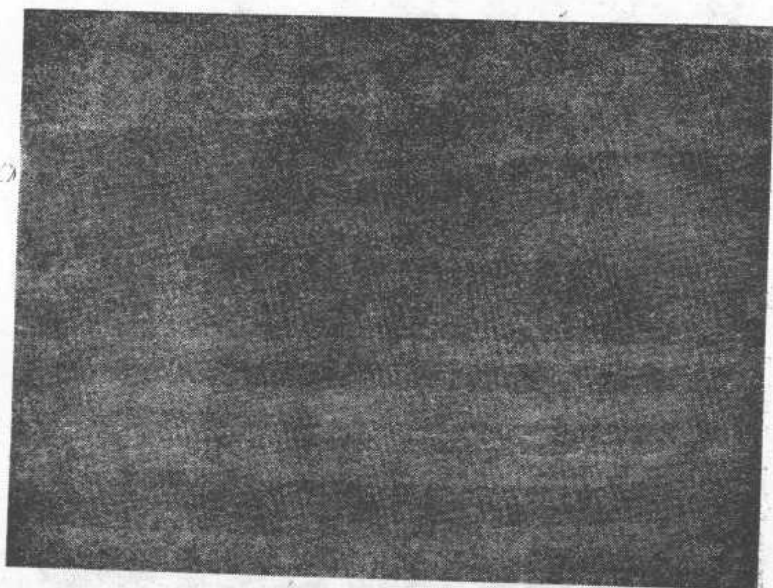


图1-2 零件表面损伤形貌

a) 活塞上部边缘区的擦伤 b) 曲轴产生毛发状擦伤

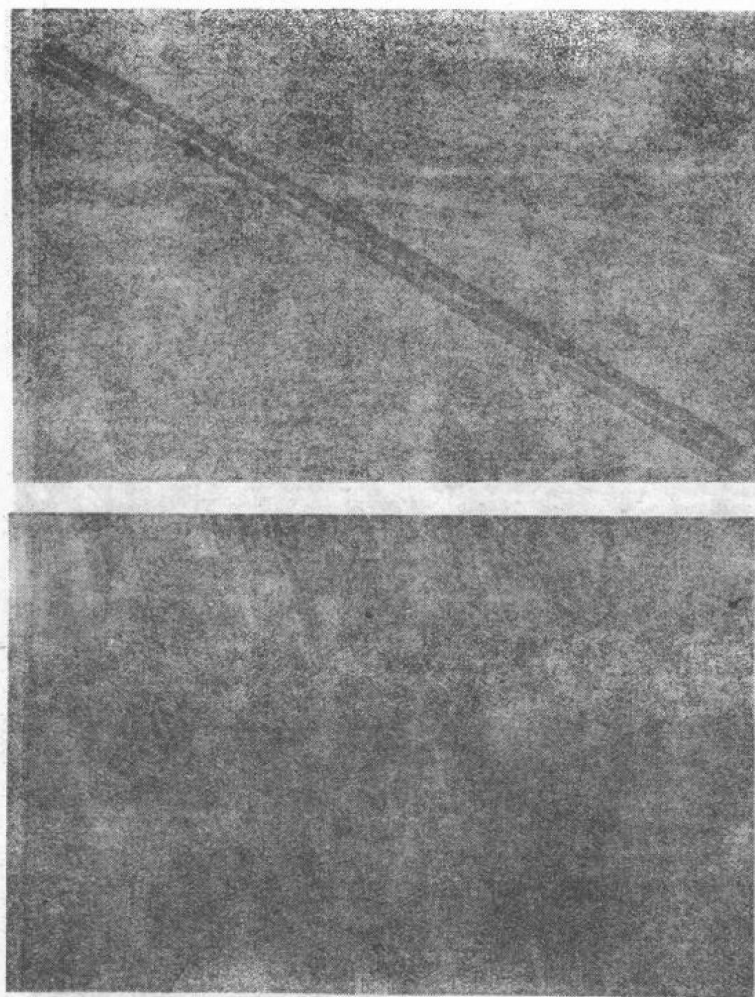


图1-3 挤塑机中螺旋送料轴的磨损形貌

a) 轴的外形 b) 磨损表面形貌

3. 磨损过程中引起零件其它类型的损坏, 如断裂。或磨损过程加速了零件的腐蚀而提前失效。

零件磨损失效的特征大体可分为上述三类, 但是在进行磨损失效分析时, 首先要区分零件损坏是属于哪一类磨损形式和造成磨损的主要机制, 这些内容在第二、三章中介绍。