

高职高专机电工程类规划教材

机电设备诊断与 维修技术

第2版

主编 张翠凤

副主编 郑文



高职高专机电工程类规划教材

机电设备诊断与维修技术

第 2 版

主 编 张翠凤
副主编 郑 文
参 编 伍凡光 吴靓



机械工业出版社

全书共六章,分别系统地阐述了机械零件失效的模式及其机理、机械
设备状态监测与故障诊断技术、机械零件修复技术、电气设备维修、机械
设备的大修理、典型设备的修理等内容,各章后附有思考题,可供读者练
习。本书在内容上体现出“机电结合、以机为主;诊断、维修并重”的编
写思路,突出了各类技术在工程实际中的具体应用,加强了新的研究成果
的介绍。

本书可作为普通高等学校、高等职业技术学院、成人高校等机电工程
类专业用教材,也可供工业企业从事设备诊断与维修的工程技术人员参考
或作为培训用教材。

图书在版编目(CIP)数据

机电设备诊断与维修技术/张翠凤主编. —2版. —北京:机械工业出版
社, 2006.5 (2007.8重印)

高职高专机电工程类规划教材

ISBN 978-7-111-08530-0

I. 机... II. 张... III. ①机电设备-故障诊断-高等学校:技术
学校-教材②机电设备-维修-高等学校:技术学校-教材 IV. TM07

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第034005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:王海峰 责任编辑:崔占军 王海峰 版式设计:冉晓华

责任校对:李秋荣 封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2007年8月第2版·第4次印刷

184mm×260mm·14.5印张·354千字

11 001—15 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-08530-0

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)68354423

封面无防伪标均为盗版

前 言

现代化设备是现代科学技术的集成，是工业生产的重要物质技术基础和工业企业的重要资产。现代化设备的机电一体化、高速化、自动化等特点使其易于操作，而它的故障诊断和维修则显得较为繁杂和困难。尤其是连续生产的装置和生产线，一旦设备故障引发整套装置或整条生产线停机，则会造成巨大的经济损失，甚至会危及安全和污染环境。因此，加强设备的现代化管理，提高技术人员对设备故障诊断和维修的技术水平，越来越显得重要和紧迫。

基于以上背景，作者着手编写本书。在编写过程中，遵循了以下指导思想。

1) 理论知识的取材和整合，以应用为目的，以必需为度。理论联系实际，理论指导实践。

2) 按照“机电结合、以机为主；诊断、维修并重”的思路，作好书中机械部分与电气、电子部分内容的编排，作好诊断部分与维修部分内容的编排。

3) 本书以介绍实用的诊断与维修技术为主，同时适当介绍近期该领域新的研究成果与信息，使本书在体现实用性的同时体现先进性。

4) 介绍典型设备的修理时，选择普通机床、液压系统、数控机床和内燃机等设备和系统，具有广泛的代表性。通过介绍上述设备和系统的修理思路和过程，引导读者培养分析和解决问题的能力。

本书是在《机电设备维修技术》基础上修订而成的，根据教学需要，对原书作了必要的调整和修改，并更名为现书名。

本书的编著者长期从事设备故障诊断和维修技术方面的教学、科研工作，长期为钢铁、烟草、造纸、家电制造、石化等行业进行相关的技术服务和技术培训，并出版著作、教材多部 and 公开发表学术论文若干篇。全书的编写是在张翠凤、郑文的组织和领导下完成的，由张翠凤负责全书的汇总、修改和编审。本书第一章由伍凡光编写，第二章由郑文编写，第三章、第五章由张翠凤编写，第四章由吴靓编写，第六章由伍凡光、张翠凤、吴靓编写。

本书在编写过程中得到机械工业出版社的热情支持和帮助，在此表示衷心感谢。

由于编著者水平有限，书中缺点和错误之处在所难免，恳请读者、专家、学者批评指正。

编著者

目 录

前言

第一章 机械零件失效的模式及其机理

理 1

第一节 机械零件的磨损 1

第二节 金属零件的断裂 8

第三节 金属零件的腐蚀损伤 10

第四节 机械零件的变形 12

思考题 14

第二章 机械设备状态监测与故障诊断技术

技术 15

第一节 概述 15

第二节 振动监测与诊断技术 17

第三节 噪声监测与诊断技术 43

第四节 温度监测技术 45

第五节 油液监测与诊断技术 53

第六节 无损检测技术 63

思考题 73

第三章 机械零件修复技术 75

第一节 焊接修复技术 75

第二节 热喷涂和喷焊技术 79

第三节 电镀修复技术 87

第四节 粘接与表面粘涂修复技术 98

第五节 表面强化技术 107

第六节 金属扣合技术 113

第七节 机械零件修复技术的选择 116

思考题 119

第四章 电气设备维修 121

第一节 电气设备监测与诊断技术 121

第二节 常用电气设备故障处理与维修技术 135

第三节 数控设备电气故障诊断与维修技术 147

思考题 153

第五章 机械设备的大修 154

第一节 机械设备大修的基本概念 154

第二节 机械设备大修前的准备 155

第三节 机械设备的大修过程 159

思考题 168

第六章 典型设备的修理 169

第一节 机床关键部件和机构的修理 169

第二节 液压系统主要液压元件的故障与维修 187

第三节 数控机床的维修 196

第四节 内燃机的修理 204

思考题 224

参考文献 225

第一章 机械零件失效的模式及其机理

在设备使用过程中，机械零件由于设计、材料、工艺及装配等各种原因，丧失规定的功能，无法继续工作的现象称为失效。当机械设备的关键零部件失效时，就意味着设备处于故障状态。机械零件失效的模式，即失效的外在表现形式，主要表现为磨损、变形、断裂等；而失效机理是指失效的物理、化学、机械等变化的过程和内在原因的实质。由于篇幅有限，本章将主要讨论具有代表性的失效模式及其机理。

第一节 机械零件的磨损

据估计，世界上的能源消耗中约有 $1/3 \sim 1/2$ 是由于摩擦和磨损造成的。一般机械设备中约有 80% 的零件因磨损而失效报废。摩擦是不可避免的自然现象，磨损是摩擦的必然结果，二者均发生于材料表面。磨损是一种微观和动态的过程，在这一过程中，零件不仅发生外形和尺寸的变化，而且会发生其它各种物理、化学和机械的变化。

通常将磨损分为粘着磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损和微动磨损五种形式。

一、粘着磨损

当构成摩擦副的两个摩擦表面相互接触并发生相对运动时，由于粘着作用，接触表面的材料从一个表面转移到另一个表面所引起的磨损称为粘着磨损。粘着磨损又称粘附磨损。

1. 粘着磨损机理

两个金属零件表面的接触，实际上是微凸体之间的接触，实际接触面积很小，仅为理论接触面积的 $1/100 \sim 1/1000$ 。所以在载荷不大时，单位面积的接触应力也很大。如果当这一接触应力大到足以使微凸体发生塑性变形，并且接触处很干净，那么两个零件的金属面将直接接触而产生粘着。而当摩擦表面发生相对滑动时，粘着点在切应力作用下变形以至断裂，造成接触表面的损伤破坏。如果粘着点的粘着力足够大，超过摩擦接触点两材料之一的强度，则材料会从该表面上被扯下，使材料从一个表面转移到另一个表面，通常这种材料的转移是由较软的表面迁移到较硬的表面上。在载荷和相对运动作用下，两接触表面重复产生粘着一剪断一再粘着的循环过程，使摩擦表面温度显著升高，油膜破坏，严重时表层金属局部软化或熔化，接触点产生进一步粘着。因此，在金属件的摩擦中，粘着磨损是剧烈的，常常会导致摩擦副灾难性破坏，应加以避免。但是，在金属件和聚合物件构成的摩擦副中，摩擦时聚合物会转移到金属表面上形成单分子层，凭借聚合物的润滑特性，可以提高耐磨性，此时粘着磨损起到了有益的作用。

2. 粘着磨损的分类

根据零件摩擦表面的破坏程度，粘着磨损可分为五类，见表 1-1。

3. 影响粘着磨损的因素

(1) 摩擦表面的状态 这主要指表面自然洁净程度和表面粗糙度。摩擦表面越洁净，越

光滑，越可能发生表面的粘着。因此，应当尽可能使摩擦表面有吸附物质、氧化物层和润滑剂。但是，温度对于金属表面氧化膜的形成也有重要影响，一些金属和合金，如不锈钢，随着温度的升高，可能形成足够厚的保护性氧化膜，使抗粘着力增强，磨损降低。

表 1-1 粘着磨损的分类

类别	破坏现象	损坏原因	实例
轻微磨损	剪切破坏发生在粘着结合面上，表面转移的材料极轻微	粘着结合强度比摩擦副的两基体金属都弱	轴与滑动轴承、缸套与活塞环
涂抹	剪切破坏发生在离粘着结合面不远的较软金属层内，软金属涂抹在硬金属表面	粘着结合强度大于较软金属的抗剪强度	主轴轴颈与巴氏合金轴瓦、重载蜗杆副
擦伤	剪切破坏，主要发生在软金属的亚表层内，有时硬金属的亚表面也有划痕	粘着结合强度比两基体金属抗剪强度都高，转移到硬面上的粘着物质又拉削软金属表面	减速器齿轮表面、内燃机铝活塞壁与缸体
撕脱	剪切破坏发生在摩擦副一方或两方金属较深处	粘着结合强度大于任一基体金属的抗剪强度，剪切应力高于粘着结合强度	主轴-轴瓦
咬死	摩擦副之间咬死，不能相对运动	粘着结合强度比任一基体金属的抗剪强度都高，且粘着区域大，切应力低于粘着结合强度	齿轮油泵中的轴与轴承、齿轮副、不锈钢螺栓与螺母

(2) 摩擦表面材料的成分和金相组织 材料成分和金相组织相近的两种金属材料之间最容易发生粘着磨损。这是因为两摩擦表面的材料形成固溶体的倾向强烈，因此，作为摩擦副的材料应当是形成固溶体倾向最小的两种材料，即应选用不同材料成分和晶体结构的材料。此外，金属间化合物具有良好的抗粘着磨损性能，因此也可选用易于在摩擦表面形成金属间化合物的材料。如果这两个要求都不能满足，则通常在摩擦表面覆盖铅、锡、银、铟之类软金属或合金，这些都是能有效地抗粘着磨损的材料。

二、磨料磨损

磨料磨损又称磨粒磨损。它是当摩擦副的接触表面之间存在着硬质颗粒，或者当摩擦副材料一方的硬度比另一方的硬度大得多时，所产生的一种类似金属切削过程的磨损，其特征是在接触面上有明显的切削痕迹。磨料磨损是十分常见又是危害最严重的一种磨损。其磨损速率和磨损强度都很大，致使机械设备的使用寿命大大降低，能源和材料大量损耗。

1. 磨料磨损机理

磨料磨损的机理有以下几种假说：

(1) 微量切削 即磨料磨损主要是由于磨料颗粒沿摩擦表面进行微量切削而引起的，微切屑大多数呈螺旋状、弯曲状或环状，与金属切削加工的切屑形状类似。

(2) 疲劳破坏 即磨料磨损是磨料使金属表面层受交变应力和变形, 使材料表面疲劳破坏, 并呈小颗粒状态从表层脱落下来。

(3) 压痕破坏 即塑性较大的材料, 因磨料在载荷的作用下压入材料表面而产生压痕, 并从表层上挤出剥落物。

(4) 断裂 即磨料压入和擦划金属表面时, 压痕处的金属要产生变形, 磨料压入深度达到临界值时, 伴随压入而产生的拉伸应力足以产生裂纹。在擦划过程中产生的裂纹有两种主要类型: 一种是垂直于表面的中间裂纹, 另一种是从压痕底部向表面扩展的横向裂纹。当横向裂纹相交或扩展到表面时, 便发生材料呈微粒状脱落, 形成磨屑的现象。

总之, 磨料磨损的机理是磨料颗粒的机械作用。

2. 磨料磨损的分类

根据摩擦表面所受的应力和冲击的不同, 磨料磨损的形式可分为三类, 见表 1-2。

表 1-2 磨料磨损的分类

分别	产生条件	破坏形式	实例
凿削式	磨料对材料表面产生高应力碰撞	从材料表面上凿削下大颗粒金属, 被磨金属有较深的沟槽	挖掘机斗齿、破碎机锤头、颚板
高应力碾碎式	磨料与金属表面接触处的最大压应力大于磨粒的压溃强度	一般材料被拉伤; 韧性材料产生变形或疲劳; 脆性材料发生裂碎或剥落	球磨机衬板与钢球、破碎机的滚轮、轧碎机滚筒
低应力擦伤式	磨料作用表面的应力不超过磨料的压溃强度	材料表面产生擦伤或微小切削痕、累积磨损	球磨机的衬板、犁铧、溜槽、料仓、漏斗、料车

3. 影响磨料磨损的因素

由于磨料磨损主要是由磨料颗粒与摩擦表面的机械作用而引起的, 因而影响它的因素也就取决于这两方面。

(1) 磨料 磨料磨损与磨料的相对硬度、形状、大小(粒度)有密切的关系。磨料的硬度相对于摩擦面材料硬度越大, 磨损越严重; 呈棱角状的磨料比圆滑状磨料的挤切能力强, 磨损率高; 在一定的粒度范围内, 摩擦表面的磨损量随磨料尺寸的增大而按比例较快地增加, 但当磨料粒度达到一定尺寸(称为临界尺寸)后, 磨损量基本保持不变, 如图 1-1 所示。这是因为磨料本身的缺陷和裂纹随着磨料尺寸增大而增多, 导致磨料的抗拉强度降低, 易于断裂破碎。

(2) 摩擦表面材料 摩擦表面材料的显微组织, 力学性能如硬度、断裂韧度、弹性模量等, 与磨料磨损也有很大的关系。一定范围内, 硬度越高, 材料越耐磨, 因为硬度反映了被磨损表面抵抗磨料压力的能力。但断裂韧度反映了材料对裂纹的产生和扩散的敏感特性, 对材料的磨损特性也有重要的影响。因此必须综合考虑硬度和断裂韧度的取值, 只有二者配合合理时, 材料的耐磨性才最佳。而弹性模量的大小, 则反映出被磨材料是否能以弹性变形的方式去适应磨料, 允许磨料通过而不发生塑性变形或切削作用, 避免或减轻表面材料的磨损程度。

图 1-2 所示为常见的工业纯金属的相对耐磨性与其弹性模量的关系。

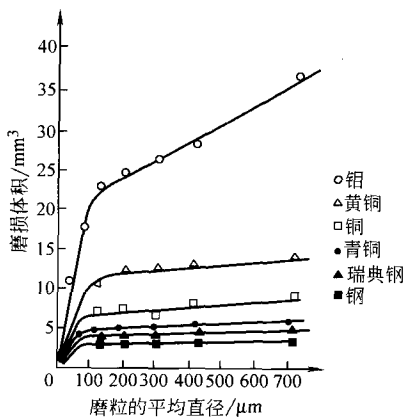


图 1-1 磨料粒度对磨损的影响

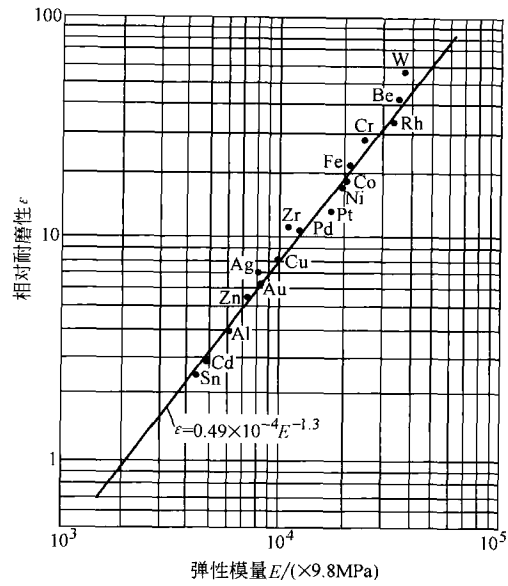


图 1-2 工业纯金属的相对耐磨性与其弹性模量的关系

三、疲劳磨损

疲劳磨损是摩擦表面材料微观体积受循环接触应力作用产生重复变形，导致产生裂纹和分离出微片或颗粒的一种磨损。

1. 疲劳磨损机理

按裂纹产生的位置，疲劳磨损的机理有两种情况：

(1) 滚动接触疲劳磨损 在滚动接触过程中，材料表层受到周期性载荷作用，引起塑性变形、表面硬化，最后在表面出现初始裂纹，并沿与滚动方向呈小于 45°的倾角方向由表向里扩展。表面上的润滑油由于毛细管的吸附作用而进入裂纹内表面，当滚动体接触到裂口处时将把裂口封住，使裂纹两侧内壁承受很大的挤压作用，加速裂纹向内扩展。在载荷的继续作用下，形成麻点状剥落，在表面上留下痘斑状凹坑，深度在 0.2mm 以下。

(2) 滚滑接触疲劳磨损 根据弹性力学，两滚动接触物体在距离表面下 0.786b 处（b 为平面接触区的半宽度）切应力最大。该处塑性变形最剧烈，在周期性载荷作用下的反复变形使材料局部弱化，并在该处首先出现裂纹，在滑动摩擦力引起的切应力和法向载荷引起的切应力叠加作用下，使最大切应力从 0.786b 处向表面移动，形成滚滑疲劳磨损，剥落层深度一般为 0.2 ~ 0.4mm。

2. 疲劳磨损的分类

疲劳磨损根据其危害程度可分为非扩展性疲劳磨损和扩展性疲劳磨损两类。

(1) 非扩展性疲劳磨损 在某些新的摩擦表面上，因接触点较少，压力较大，容易产生小麻点状的点蚀。经磨合后，接触面积扩大，实际压力降低，小麻点停止扩展。这种疲劳磨损对运动速度不高的摩擦副影响不大。

(2) 扩展性疲劳磨损 当作用在两接触表面上的交变压应力较大时, 由于材料塑性稍差或润滑不当, 在磨合阶段就产生小麻点。在载荷继续作用下, 小麻点就会发展成痘斑状坑, 逐渐使零件失效。

3. 影响接触疲劳磨损的主要因素

(1) 材质 钢中存在的非金属夹杂物, 易引起应力集中, 这些夹杂物的边缘最易形成裂纹, 从而降低材料的接触疲劳寿命。

材料的组织状态对其接触疲劳寿命也有重要影响。通常, 晶粒细小、均匀, 碳化物成球状且均匀分布, 均有利于提高滚动接触疲劳寿命。

硬度在一定范围内增加, 其接触疲劳抗力将随之增大。此外, 两接触滚动体表面硬度匹配也很重要。例如, 滚动轴承中, 滚道和滚动元件的硬度相近, 或者滚动元件比滚道硬度高出 10% 为宜。对于不同滚动件和不同工况, 其表面硬度的匹配要求不同, 可通过试验确定。

(2) 接触表面粗糙度 试验表明, 适当降低表面粗糙度可有效提高抗疲劳磨损的能力。例如, 滚动轴承表面粗糙度由 $R_a 0.40\mu\text{m}$ 降低到 $R_a 0.20\mu\text{m}$, 寿命可提高 2 ~ 3 倍; 由 $R_a 0.20\mu\text{m}$ 降低到 $R_a 0.10\mu\text{m}$, 寿命可提高 1 倍; 而表面粗糙度降低到 $R_a 0.05\mu\text{m}$ 以下对寿命的提高影响甚小。表面粗糙度要求的高低与表面承受的接触应力有关。通常接触应力大, 或表面硬度高时, 均要求表面粗糙度低。

(3) 表面残余内应力 一般地说, 表层在一定深度范围内存在有残余压应力, 不仅可提高弯曲、扭转疲劳抗力, 还能提高接触疲劳抗力, 减小疲劳磨损。但是, 过大的残余压应力反而有害。

(4) 其它因素 装配精度影响齿轮齿面的啮合接触面的大小, 自然也对接触疲劳寿命有影响。此外, 润滑油的选择也很重要, 润滑油粘度越高, 则越有利于改善接触部分的压力分布, 同时不易渗入表面裂纹中, 这对抗疲劳磨损均十分有利; 而润滑油中加入能产生化学反应形成酸类物质的添加剂, 则会降低轴承的疲劳寿命。具有腐蚀作用的环境因素 (如润滑油中的水) 对疲劳往往起有害作用。

四、腐蚀磨损

在摩擦过程中, 金属同时与周围介质发生化学反应或电化学反应, 引起金属表面的腐蚀产物剥落, 这种现象称为腐蚀磨损。它是在腐蚀现象与机械磨损、粘着磨损、磨料磨损等相结合时才能形成的一种机械化学磨损。它是一种极为复杂的磨损过程, 经常发生在高温或潮湿的环境, 更容易发生在有酸、碱、盐等特殊介质条件下。

按腐蚀介质的不同类型, 腐蚀磨损可分为氧化磨损和特殊介质下腐蚀磨损两大类。

1. 氧化磨损

除金、铂等少数金属外, 大多数金属表面都被氧化膜覆盖着。若在摩擦过程中, 氧化膜被磨掉, 摩擦表面与氧化介质反应速度很快, 立即又形成新的氧化膜, 然后又被磨掉, 这种氧化膜不断被磨掉又反复形成的过程, 就是氧化磨损。在通常情况下, 氧化磨损比其它磨损轻微得多。

基于氧化磨损的特点, 可以看出发生氧化磨损必须同时具备三个条件: ①摩擦表面要能够发生氧化, 而且氧化膜生成速度大于其磨损破坏速度; ②氧化膜与摩擦表面的结合强度大

于摩擦表面承受的切应力；③氧化膜厚度大于摩擦表面破坏的深度。

下面说明影响氧化磨损的因素。

(1) 氧化膜生长的速度与厚度 纯净金属表面在几秒钟内就会产生 5 ~ 50 分子厚度的氧化膜。金属表面在摩擦过程中，表面形成氧化物的速度要比非摩擦时快得多。在常温下，金属表面形成的氧化膜厚度非常小。

(2) 氧化膜的性质 金属表面形成的氧化膜的性质对氧化磨损有重要影响。若氧化膜紧密、完整无孔，与金属表面基体结合牢固，则有利于防止金属表面氧化；若氧化膜本身性脆，与金属表面基体结合差，则容易被磨掉。

(3) 硬度 氧化磨损与金属表面氧化膜硬度及与其结合的基体金属的硬度的比值也有关系。当前者远大于后者时，例如铝的 Al_2O_3 氧化膜硬度达 1800HBW，而铝本身硬度仅为 15HBW，摩擦时， Al_2O_3 膜即使在小的载荷作用下，也易破碎和磨损；当两者相近时，例如 CuO 硬度为 150HBW，铜硬度为 120HBW，在小载荷小变形条件下，因两者变形相近，故氧化膜不易脱落，但若受大载荷作用而产生大变形时，氧化膜也易破碎。最有利的情况是氧化膜硬度和基体硬度都很高，例如镀硬铬时，其硬度为 900HBW 左右，铬的氧化膜硬度也很高，在载荷作用下变形小，膜不易破碎，耐磨性好。然而，大多数金属氧化物都比原金属硬而脆，厚度又很小，故对摩擦表面的保护作用很有限。但在不引起膜破裂的工况下，表面的氧化膜层有防止金属之间粘着的作用，因而有利于抗粘着磨损。

2. 特殊介质下的腐蚀磨损

它是摩擦副金属材料与酸、碱、盐等介质作用生成的各种化合物，在摩擦过程中不断被除去的磨损过程。其机理与氧化磨损相似，但磨损速率较高。由于其腐蚀本身可能是化学的或电化学的性质，故腐蚀磨损的速率与介质的腐蚀性质和作用温度有关，也与相互摩擦的两金属形成电化学腐蚀的电位差有关。介质腐蚀性越强，作用温度越高，腐蚀磨损速率越大。但是，若摩擦表面受腐蚀时能生成一层结构致密且与金属基体结合牢固、阻碍腐蚀继续发生或使腐蚀减缓速度的保护膜，则腐蚀磨损速率将减小。此外，机械零件或构件所处的应力状态对腐蚀影响很大，当它受到重复应力作用时，所产生的腐蚀速率比不受应力时快得多。

腐蚀介质来源常有以下方面：

1) 工作介质，例如水泵，当它输送有腐蚀性介质时，内壁和活塞表面受腐蚀。

2) 摩擦金属表面受到工作过程中产生的腐蚀性介质作用，例如内燃机气缸活塞组零件在低温工况运行时，燃油燃烧的产物（废气）中可能有 SO_2 、 CO_2 、 NO_2 等物质，它们会与空气中的水蒸气结合，在内燃机的气缸壁上凝结成具有腐蚀性的亚硫酸、碳酸、甲酸等，引起气缸活塞组零件的腐蚀磨损。

3) 极压齿轮油中由于有极压添加剂，在一定温度和压力下，油中的添加剂能放出活性元素硫、氯、磷等，它们与金属表面作用生成化学反应膜，防止金属表面产生粘着磨损，而代之以缓慢的腐蚀磨损。

4) 润滑油在工作中因氧化形成有机酸，它们对滑动轴承材料中的铅、锡有很敏感的腐蚀作用，在轴瓦表面上生成黑点，逐渐扩展成海绵状空洞，并在摩擦过程中成小块剥落。若滑动轴承材料中含银、钼等元素，在温度不高时与润滑油中的硫化物生成硫化物膜，能起减摩作用，但在高温时膜易破裂。

五、微动磨损

两个接触表面由于受相对低振幅振荡运动而产生的磨损叫做微动磨损。它产生于相对静止的接合零件上，因而往往易被忽视。微动磨损的最大特点是：在外界变动载荷作用下，产生振幅很小（小于 $100\mu\text{m}$ ，一般为 $2\sim 20\mu\text{m}$ ）的相对运动，由此发生摩擦磨损。例如在键联接处、过盈配合处、螺栓联接处、铆钉连接接头处等结合上产生的磨损。微动磨损使配合精度下降，紧配合部件紧度下降甚至松动，联接件松动乃至分离，严重者引起事故。此外，也易引起应力集中，导致联接件疲劳断裂。

1. 微动磨损的机理

由于微动磨损集中在局部范围内，同时两摩擦表面永远不脱离接触，磨损产物不易往外排除，磨屑在摩擦面起着磨料的作用。又因摩擦表面之间的压力使表面凸起部分粘着，粘着处被外界小振幅引起的摆动所剪切，剪切处表面又被氧化，故兼有粘着磨损和氧化磨损的作用。因此，微动磨损是一种兼有磨料磨损、粘着磨损和氧化磨损的复合磨损形式。

2. 影响微动磨损的主要因素

实践与试验表明，外界条件（载荷、振幅、温度、润滑等）及材质对微动磨损影响相当大。

(1) 振幅 图 1-3 所示为用低碳钢做试验得到的结果。从图中看出，在振幅较小时，单位磨损率比较小；当振幅超过 $50\sim 150\mu\text{m}$ 时，单位磨损率显著上升。

(2) 载荷 图 1-4 所示为微动磨损量与载荷的关系。从图中看出，在一定条件下，随着载荷增大，微动磨损量将增加，但是当超过某临界载荷之后，磨损量则减小。

(3) 温度 试验发现，中碳钢在其它条件不变时，在温度为 130°C 的情况下微动磨损发生转折。超过此温度，微动磨损量大幅度降低。对于低碳钢，在 0°C 以上，磨损量随温度上升而逐渐降低，在 $150\sim 200^\circ\text{C}$ 时磨损量突然降低，继续升高温度，磨损量上升。温度从 135°C 升高到 400°C 时，磨损量增加 15 倍。

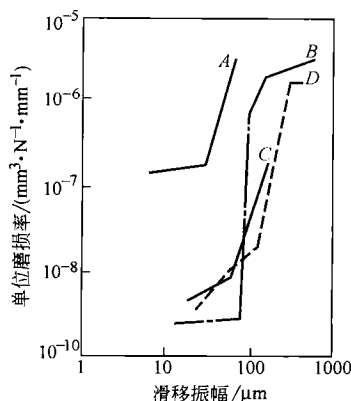


图 1-3 滑移振幅与单位磨损率的关系

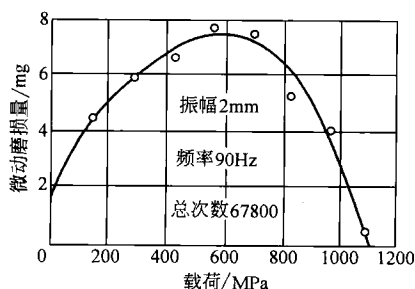


图 1-4 微动磨损量与载荷的关系

(4) 润滑 试验表明，普通的液体润滑剂对防止微动磨损的效果不佳。而用锥入度小、

抗剪强度高的润滑脂有一定效果，固体润滑剂如 MoS_2 、PTFE 等效果更好。

(5) 材质性能 提高硬度及选择适当材料配副都可以减小微动磨损。将一般碳钢表面硬度从 180HV 提高到 700HV 时，微动磨损量可降低 50%。一般地说，抗粘着性能好的材料配副对抗微动磨损也好。采用表面处理，如硫化或磷化处理以及镀上金属镀层（镉、银、铜等）都是降低微动磨损的有效措施。

第二节 金属零件的断裂

断裂是零件在机械、热、磁、腐蚀等单独作用或者联合作用下，其本身连续性遭到破坏，发生局部开裂或分裂成几部分的现象。零件断裂后不仅完全丧失工作能力，而且还可能造成重大的经济损失或伤亡事故。因此，尽管与磨损、变形相比，断裂所占的比例很小，但它仍是一种最危险的失效形式。尤其是现代机械设备日益向着大功率、高转速的趋势发展，断裂失效的几率有所提高。因此，研究断裂成为日益紧迫的课题。

断裂的分类方法很多，本书介绍其中的延性断裂、脆性断裂、疲劳断裂和环境断裂四种。

一、延性断裂

零件在外力作用下首先产生弹性变形，当外力引起的应力超过弹性极限时即发生塑性变形。外力继续增加，应力超过抗拉强度时发生塑性变形而后造成断裂就称为延性断裂。延性断裂的宏观特点是断裂前有明显的塑性变形，常出现缩颈，而从断口形貌微观特征上看，断面有大量微坑（也称韧窝）覆盖。延性断裂实际上是显微空洞形成、长大、连接以致最终导致断裂的一种破坏方式。

二、脆性断裂

金属零件或构件在断裂之前无明显的塑性变形，发展速度极快的一类断裂叫脆性断裂。它通常在没有预示信号的情况下突然发生，是一种极危险的断裂。

三、疲劳断裂

机械设备中的轴、齿轮、凸轮等许多零件，都是在交变应力作用下工作的。它们工作时所承受的应力一般都低于材料的屈服强度或抗拉强度，按静强度设计的标准应该是安全的。但实际中，在重复及交变载荷的长期作用下，机件或零件仍然会发生断裂，这种现象称为疲劳断裂，它是一种普通而严重的失效形式。在实际失效件中，疲劳断裂占了较大的比重，约 80% ~ 90%。

四、环境断裂

实际上机械零部件的断裂，除了与材料的特性、应力状态和应变速率有关外，还与周围的环境密切相关。尤其是在腐蚀环境中，材料表面或裂纹边沿由于氧化、腐蚀或其它过程使材料强度下降，促使材料发生断裂。可以看出，环境断裂是指材料与某种特殊环境相互作用而引起的具有一定环境特征的断裂方式。环境断裂主要有应力腐蚀断裂、氢脆断裂、高温蠕

变断裂、腐蚀疲劳断裂及冷脆断裂等。

1. 应力腐蚀断裂

金属材料在拉应力和特定的腐蚀介质联合作用下引起的低应力脆性断裂称为应力腐蚀断裂。它的发生极为隐蔽，往往是事先无明显征兆，造成灾难性的事故。

研究表明，应力腐蚀断裂通常是在一定条件下才产生的：①要在一定的拉应力作用下。一般情况下，产生应力腐蚀的拉应力都很低，普遍认为对于每一种材料与环境的组合，均存在一个拉应力临界值，低于这个应力临界值将不出现断裂。如果没有腐蚀介质的联合作用，机件可以在该应力下长期工作而不产生断裂。②腐蚀环境是特定的（包括介质种类、浓度、温度等）。对一种金属或合金材料，只有特定的腐蚀环境才会使其产生应力腐蚀断裂。③金属材料本身对应力腐蚀断裂的敏感性。它取决于金属材料的化学成分和组织结构。

应力腐蚀裂纹扩展机理有许多理论试图解释，如机械化学效应理论、闭塞电池腐蚀理论、表面膜破裂理论、氢蚀理论等，但尚无统一的看法。这主要是因为应力腐蚀断裂体系太大，影响因素复杂多样的缘故，以至于机理可以转变，用某一种理论模型是难以全面解释清楚的。

防止金属材料应力腐蚀的主要措施是：合理选用材料，尽量使用对工作环境条件不敏感的材料；在金属结构设计上要合理，尽可能减少应力集中，消减残余应力；采取改善腐蚀环境的措施。

2. 氢脆断裂

由于氢渗入钢件内部而在应力作用下导致的脆性断裂称为氢脆断裂。氢气的主要作用是其所产生的压力，它往往有助于某种断裂机制如解理断裂、晶界断裂等的进行。由于氢脆断裂也是裂纹萌生和扩展的过程，而裂纹的扩展速率和钢中的含氢量、氢在钢中的扩散速度有很大影响。氢在钢中的溶解度越小，其扩散系数越大，氢脆裂纹的扩展速率也就愈大，即越容易发生氢脆断裂。

氢脆断裂在工程上是一种比较普遍的现象，因而人们对氢脆机理进行了大量的研究，提出了多种理论。如其中的晶格脆化模型理论认为，高浓度的固溶氢可以降低晶界上或相界上金属晶体的原子间结合力，当局部应力等于已被氢降低了的原子间结合力时，原子间的键合就发生破坏，材料便产生脆性断裂。

3. 高温蠕变断裂

金属材料在长时间的恒温、恒应力作用下，即使应力小于屈服强度，也会缓慢地产生塑性变形的现象称为蠕变。由于蠕变变形而导致断裂的现象称为蠕变断裂。蠕变在低温下也会产生，但只有当温度高于 $0.3T_m$ （ T_m 为以热力学温度表示的熔点）时才较显著，故这种断裂又称为高温蠕变断裂。如高温高压工况下的螺栓紧固件，常因蠕变导致断裂破坏。

蠕变断裂宏观断口有明显氧化色或黑色，有时还能见到蠕变孔洞。蠕变微观断口多为沿晶断裂，无疲劳条痕。

由于致使金属零件蠕变断裂失效的主要原因是应力、温度、时间和材料的耐热性等，因此，必须从设计、制造及使用维修中采取措施以提高蠕变断裂的抗力。例如，设计上避免应力集中和早期微裂纹产生；采取隔热涂层，避免局部工作温度过高，降低零件实际温度；制造中严格控制热加工工艺；制造和修理中采用表面强化或预防措施消除表面的缺陷。

4. 腐蚀疲劳断裂

金属材料在腐蚀介质环境中，在低于抗拉强度的交变应力的反复作用下所产生的断裂称为腐蚀疲劳断裂。这种断裂破坏在化工、石油和冶金工业中尤为常见。

腐蚀疲劳断裂和纯机械疲劳断裂都是在交变应力作用下引起的疲劳断裂，但纯机械疲劳裂纹的萌生（生核）时间在整个的疲劳寿命中占很大的比例，而且交变应力小于或等于某一数值时，疲劳裂纹不能萌生，此时疲劳寿命无限长。而腐蚀疲劳断裂可以在很低的循环（或脉冲）应力下发生断裂破坏，并且往往没有明显的疲劳极限值，因而具有更大的危害性。

腐蚀疲劳断裂和应力腐蚀断裂都是应力与腐蚀介质共同作用下引起的断裂。但由于腐蚀疲劳的应力是交变的，其产生的滑移具有累积作用，金属表面的保护膜也更容易遭到破坏。因此，绝大多数金属都会发生腐蚀疲劳，对介质也没有选择性，即只要在具有腐蚀性的介质中就能引起腐蚀疲劳直至断裂，而且在容易产生孔蚀的介质下更容易发生，介质的腐蚀性越强，腐蚀疲劳也越容易发生。

防止腐蚀疲劳断裂的主要方法是：首先要防止腐蚀介质的作用。若必须在腐蚀介质下工作，则采用耐腐蚀材料，或根据不同的介质条件分别采用阴极保护或阳极保护。也可采取表面防腐涂层等表面处理方法。

5. 冷脆断裂

当金属材料所处的温度低于某一温度 T_k 时，材料将转变为脆性状态，其冲击韧度明显下降，这种现象称为冷脆。由于材料的冷脆而造成的断裂现象称为冷脆断裂。温度 T_k 为材料屈服点 σ_s 和断裂强度 σ_t 相等时的温度，即由延性断裂向脆性断裂转变的温度，称为冷脆温度。

第三节 金属零件的腐蚀损伤

金属零件的腐蚀损伤，是指金属材料与周围介质产生化学或电化学反应而导致的破坏。金属腐蚀是普遍存在的自然现象，它所造成的经济损失也是惊人的。据不完全统计，全世界因腐蚀而不能继续使用的金属制件，约占其产量的 10%，甚至更多。按金属与介质作用机理，腐蚀可分为两大类：化学腐蚀和电化学腐蚀。

一、金属零件的化学腐蚀

单纯由化学作用而引起的腐蚀叫化学腐蚀。在这一腐蚀过程中不产生电流，介质是非导电的，如干燥空气、高温气体、有机液体、汽油、润滑油等，其中前二类介质中的腐蚀称为气体腐蚀，其余的称为非电解质溶液中的腐蚀。它们与金属接触时进行化学反应形成表面膜，在不断脱落又不断生成的过程中使零件腐蚀。

大多数金属在室温下的空气中就能自发地氧化，但在表面形成氧化物层之后，如能有效地隔离金属与介质间的物质传递，就成为保护膜。如果氧化物层不能有效阻止氧化反应的进行，那么金属将不断地被氧化。据研究，金属氧化膜要在含氧气的条件下起保护膜作用必须具有以下条件：①膜必须是紧密的，能完整地把金属表面全部覆盖住；②膜在气体介质中是稳定的；③膜和基体金属的结合力强，且有一定的强度和塑性；④膜具有与基体金属相当的热膨胀系数。在高温空气中，铁和铝都能生成完整的氧化膜，但是铝的氧化膜同时具备了上

述四种条件, 具有良好保护性能, 而铁的氧化膜与铁结合不良, 则起不了保护作用。

二、金属零件的电化学腐蚀

电化学腐蚀是金属与电解质物质接触时产生的腐蚀。它与化学腐蚀的不同点在于其腐蚀过程有电流产生。常见的电化学腐蚀形式有: ①大气腐蚀, 即潮湿空气中的腐蚀; ②土壤腐蚀, 如地下金属管线的腐蚀; ③在电解质溶液中的腐蚀, 如酸、碱、盐溶液和水中的腐蚀; ④在熔融盐中的腐蚀, 如热处理车间, 熔盐加热炉中的盐炉电极和所处理的金属发生的腐蚀。大多数金属的腐蚀都属于电化学腐蚀, 其涉及面广, 造成的损失大, 腐蚀过程比化学腐蚀强烈得多。

电化学腐蚀的根本原因是腐蚀电池的形成。需要形成腐蚀电池的三个条件是: ①有两个或两个以上的不同电极电位的物体, 或在同一物体具有不同电极电位的区域, 以形成正、负极; ②电极之间需要有导体相连接或电极直接接触; ③要有电解液。

三、减轻腐蚀危害的措施

1. 正确选材

根据环境介质和使用条件, 选择合适的耐腐蚀材料, 如含有镍、铬、铝、硅、钛等元素的合金钢; 在条件许可的情况下, 尽量选用尼龙、塑料、陶瓷等材料。

2. 合理设计

在制造机械设备时, 即使应用了较优质的材料, 但如果在结构的设计上不从金属防护角度加以全面考虑, 则常会引起机械应力、热应力以及流体的停滞和聚集、局部过热等现象, 从而加速腐蚀过程。因此设计结构时应尽量使整个部位的所有条件均匀一致, 做到结构合理、外形简化、表面粗糙度合适。

3. 覆盖保护层

覆盖保护层即在金属表面上覆盖一层不同的材料, 改变表面结构, 使金属与介质隔离开来, 以防止腐蚀。常用的覆盖材料有金属或合金、非金属保护层和化学保护层等。

4. 电化学保护

对被保护的机械设备通以直流电流进行极化, 以消除电位差, 使之达到某一电位时, 被保护金属的腐蚀可以很小甚至呈无腐蚀状态。这种方法要求介质必须是导电的、连续的。根据被保护设备所接电源极性, 可分为:

(1) 阴极保护法 主要是在被保护金属表面通以阴极直流电流, 消除或减少被保护金属表面的腐蚀电池作用。

(2) 阳极保护法 主要是在被保护金属表面通以阳极直流电流, 使其金属表面生成钝化膜, 从而增大了腐蚀过程的阻力。

此外, 可用一个比零件材料的化学性能更活泼的金属铆接到零件上, 形成一个腐蚀电池, 零件作为阴性, 不会发生腐蚀。这种运用电化学原理的方法常称为牺牲阳极法。如在海洋中, 航行的船舶底部常铆接有锌块, 以保护铁壳不受海水腐蚀。

5. 添加缓蚀剂

在腐蚀性介质中加入少量能减少腐蚀速度的物质, 即缓蚀剂, 可减轻腐蚀。按化学性质, 缓蚀剂有无机和有机二种。如重铬酸钾、硝酸钠、亚硫酸钠等无机类, 能在金属表面形

成保护,使金属与介质隔开;胺盐、琼脂、动物胶、生物碱等有机化合物,能吸附在金属表面上,使金属溶解和还原反应都受到抑制,从而减轻金属腐蚀。

6. 改变环境条件

即将环境中的腐蚀介质去除,以减少其腐蚀作用。如采用通风、除湿、去除二氧化硫气体等。对常用的金属材料来说,把相对湿度控制在临界湿度(50%~70%)以下,可显著减缓大气腐蚀。在酸洗车间和电解车间里,合理设计地面坡度和排水沟,做好地面防腐蚀隔离层,来防止酸液渗透地面而使其凸起,以免损坏贮槽及机械基础。

四、气蚀

当零件与液体接触并产生相对运动,接触处的局部压力低于液体蒸发压力时,就可能导致气泡成核,并长大至一稳定尺寸。当这些气泡随液体流动到达高压区时,气泡将被压缩变形,最后被压溃、破裂。由于溃灭速度可达到250m/s,在气泡破裂的瞬间,引起液体局部的冲击压力和温度高达数百度的微射流,称为水击现象。如果气泡是紧靠在零件表面破裂,则该表面将受到微射液流的作用。在其反复作用下,在受作用的局部小区域内;零件表面将产生塑性变形,导致疲劳损坏而脱落。这种破坏在开始时呈麻坑状,随后扩展为泡沫海绵状。可以说气泡被压溃瞬时产生的局部高压和微射流冲击金属是发生气蚀浸蚀的主要原因。但是,气蚀是一种比较复杂的破坏现象,它不单是机械作用,还有化学、电化学作用,当液体中含有杂质或磨粒时,会加剧这一破坏过程。

气蚀常见于水冷式内燃机缸套外壁、水泵、水轮机叶片、液压阀门等。随着机械设备高科技含量的增多,气蚀破坏已显得越来越突出。减轻气蚀的主要措施有:

- 1) 减小与液体接触表面的振动,以减少水击现象的发生。例如增加刚性、改善支承、采取吸振措施等。
- 2) 选用耐气蚀的材料,如球状或团状石墨的铸铁、不锈钢、尼龙等。
- 3) 零件表面涂塑料、陶瓷等防气蚀材料,也可在表面镀铬。
- 4) 改进零件结构,减小表面粗糙度,减少液体流动时产生涡流现象。
- 5) 水中添加乳化油,减小气泡爆破时的冲击力。

第四节 机械零件的变形

机械零件或构件在外力的作用下,产生形状或尺寸变化的现象称为变形。过量的变形是机械失效的重要类型,也是判断韧性断裂的明显征兆。例如,起重机主梁在变形下挠曲或扭曲,汽车大梁的扭曲变形,内燃机曲轴的弯曲和扭曲等。变形量随着时间的不断增加,逐渐改变了产品的初始参数,当超过允许极限时,将丧失规定的功能。有的机械零件因变形引起结合零件出现附加载荷、相互关系失常或加速磨损,甚至造成断裂等灾难性后果。因此,对于因变形引起的失效应给予足够重视。

根据外力去除后变形能否恢复,机械零件或构件的变形可分弹性变形和塑性变形。

一、弹性变形

金属零件在作用应力小于材料屈服强度时产生的变形称为弹性变形。