



高职高专
机电工程类
规划教材

机电设备维修技术

张翠凤 主 编
郑 文 副主编



机械工业出版社
China Machine Press

本书是高职高专机电工程类规划教材之一。全书共六章,主要介绍了机械零件失效的模式及其机理、机械零件修复技术、机械设备状态监测与故障诊断技术、电气设备维修、机械设备的大修理、典型设备的修理等内容,各章后均附有思考题。本书理论联系实际,突出理论知识的应用,加强针对性、实用性和先进性。

本书可作为普通高等专科学校、高等职业技术学院、成人高校等机电工程类专业使用教材,也可供工业企业从事设备管理与维修的工程技术人员参考使用或作为培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

机电设备维修技术/张翠凤主编. —北京:机械工业出版社, 2001.7
高职高专机电工程类规划教材
ISBN 7-111-08530-2

I. 机... II. 张... III. 机电设备-机械维修-高等学校:技术学校-教材 N. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 24514 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王海峰 高文龙 张祖凤 版式设计:冉晓华

责任校对:张媛 封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 6 月第 1 版·第 4 次印刷

1000mm×1400mm B5·10.625 印张·412 千字

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

广东省高职高专机电工程类规划教材

编 委 会 名 单

主 任	杨开乔				
副主任	谢存禧	高文龙			
委 员	杨开乔	谢存禧	高文龙	蔡 敏	邵 明
	司徒忠	何友义	曾文光	蔡昌荣	卢 勇
	龚洵禹	林晓新	吴 勇	程中元	戚长政
	刘晓顺	赵小平	卢晓春	姚嘉五	吴念香
	郑建辉				
秘 书	邵 明	吴念香	郑建辉		

序

高等职业教育是我国高等教育改革和发展的新生事物，是我国高等教育不可缺少的重要组成部分。20世纪90年代以来，党中央、国务院十分重视高职高专教育，制定了一系列政策和措施，有效地推动了高职高专教育的改革和发展。中共中央、国务院《关于深化教育改革，全面推进素质教育的决定》中明确指出：“要大力发展高等职业教育，培养一大批具有必要理论知识和较强实践能力，生产、建设、管理、服务第一线 and 农村急需的专门人才”，为我国高等职业教育的改革和发展指明了方向。近年来，我省全面贯彻国家高职发展的“三改一补”方针，采取：“三多一改”的办法（即多形式、多模式、多机制和改革）发展高等职业教育，使高职高专教育出现了生机勃勃的发展势头。到目前为止，全省有独立设置的职业技术学院13所，9所本科院校举办了二级职业技术学院，10多所普通专科学校、20多所成人高校举办了高职专业，全省高职高专在校生10多万人，初步形成了具有一定办学特色的高等职业教育体系，成为我省高等教育的重要组成部分。

由于高等职业教育成规模发展的时间较短，教学体系尚不成熟，许多问题，诸如教学计划、教学内容、实践基地建设、“双师”队伍建设、教材建设等，尚在研究、摸索阶段。尤其是高职高专的教材较少，给教学工作 and 人才培养造成了一定的困难。解决好这些问题，将有利于高等职业教育的进一步改革和发展。为此，广东省教育厅十分重视高职高专教材建设。我们采取了统筹规划，分步实施的办法，积极组织有关高职院校教师分专业、分系列开展高职高专教材的编写工作。本套高职高专机电工程类规划教材的编写出版，就是我们在高职教材建设方面的一个积极尝试。这套教材共17种，由我厅和国家机械工业局教材编辑室、机械工业出版社联合组织编写。在编写过程中，全体编写人员、责任编辑、编委会成员倾注了大量的心血。本套教材较好地贯彻了职业性、实用性、系统性、超前性、地方性的编写原则，具有较明显的职教特色和地方特色，将有助于学生专业理论的学习和应用技能的训练和提高，适合于高等院校、专科学校和成人高校机电类专业使用。

这套教材的编写出版，将填补我省高职教育专业教材的空白，并对我省高等职业教育的进一步改革和发展产生积极而深远的影响。同时，我们也希望通过这套教材的出版发行，能为我国高等职业教育的改革和发展尽一份微薄之力，并为我国高职教育教材园地的建设增添一朵绚丽的小花。

广东省教育厅
2000年8月25日

前 言

随着我国社会主义市场经济体制的建立和深入,整个工业生产对现代化设备的需求和依赖程度愈来愈高。实践表明,工业企业的生产设备的技术状态对生产率、质量、成本、安全和环保等,在一定意义上可以说有决定性作用。这也是现代科学技术和社会经济互相渗透、互相促进、互相结合的一种必然趋势。

现代化设备是现代科学技术的荟萃。设备的机电一体化、高速化、微电子化等特点使设备容易操作,而设备故障的诊断和维修则比较困难。而且设备一旦发生故障,尤其是连续化生产设备,往往会导致整套设备停机,从而造成一定的经济损失,如果危及到安全和环境,也会造成严重的社会后果。因此,对于现代化设备的故障诊断和维修就显得非常必要和重要了。机电设备维修技术就是以机电设备为对象,研究和探讨故障产生的机理,设备的状态监测与故障诊断,消除故障的方法以及相应的技术。随着社会经济的迅速发展,生产规模的日益扩大,先进的生产方式的出现和采用,机电设备维修技术得到人们的重视和关注;随着测试技术、信号处理技术、计算机技术与现代表面技术的发展,机电设备维修技术更得到飞速发展。

本教材是高职高专机电工程类规划教材之一,在编写过程中遵循以下原则和指导思想:

- 1) 理论知识的取材和整合,以应用为目的,以必需、够用为度。
- 2) 为达到应用的目的,主要介绍国内外工业企业的维修技术,同时也适当介绍近期国内外在设备维修技术领域内的新的研究成果和信息,使教材具有实用性、先进性。
- 3) 按照“机电结合、以机为主”的思路,做好机电设备机械部分与电气、电子部分的内容编排。
- 4) 在介绍应用维修技术进行设备修理时,选择普通机床、数控机床和内燃机作为典型代表,既有广泛的适应性,又培养读者的逻辑思维能力和分析问题、解决问题的能力。
- 5) 考虑到维修技术本身有较强的实践性,建议在使用本教材组织教学时,应开设必要的维修技术实验和实习。

全书共六章。第一章介绍机械零件失效的模式及其机理,该章内容对维修技术的选择和应用有指导作用;第二章介绍机械零件修复技术,其中主要介绍因磨损失效的机械零件修复时采用的现代表面技术;第三章介绍机械设备状态监测与

故障诊断的各种技术和方法；第四章介绍电气设备包括数控设备电气的故障诊断与维修技术；第五章介绍机械设备的大修理；第六章介绍典型设备包括数控机床的修理。各章后均附有思考题，以便学生巩固所学知识，启发思维。

“机电设备维修技术”课程是高职高专机电工程类专业的主要专业课程之一。通过本课程的学习，应使学生达到下列基本要求：

- 1) 掌握机电设备维修技术的基本理论与基本知识。
- 2) 熟悉机械零件各种修复技术，掌握现代表面技术，能正确使用典型的表面技术装备，具有分析、选择和应用机械零件修复技术的基本能力。
- 3) 熟悉机械设备状态监测与故障诊断的各种技术与方法，能正确使用典型的监测与诊断仪器，具有实施设备状态监测与故障诊断的基本能力。
- 4) 基本掌握电气设备的诊断方法、常见故障处理和维修技术。
- 5) 熟悉机械设备大修理过程和典型设备的修理要点。

本教材由广州大学张翠凤副教授任主编，郑文副教授任副主编，华南理工大学谢存禧教授担任主审。本书第一章由中山学院伍凡光编写；第二章、第五章由张翠凤编写；第三章由郑文编写；第四章由广东水利电力职业技术学院吴靓编写；第六章由伍凡光、张翠凤、吴靓编写。

本教材在编审过程中得到广东工业大学于兆勤副教授、广州大学潘景乐高级工程师、龚光寅副教授和广东地区诸多工业企业设备部门的热情支持和帮助，在此一并表示感谢。

限于我们的知识水平和实践能力，书中难免有错误和缺点，恳请读者批评指正。

编者

2000年12月

目 录

序

前言

第一章 机械零件失效的模式及其机理	1
第一节 机械零件材料的磨损	1
第二节 金属零件的断裂	10
第三节 金属零件的腐蚀损伤	14
第四节 机械零件的变形	17
思考题	20
第二章 机械零件修复技术	21
第一节 焊接修复技术	21
第二节 热喷涂和喷焊技术	26
第三节 电镀和化学镀修复技术	36
第四节 粘接与表面粘涂修复技术	52
第五节 表面强化技术	67
第六节 金属扣合技术	74
第七节 机械零件修复技术的选择	77
思考题	83
第三章 机械设备状态监测与故障诊断技术	84
第一节 概述	84
第二节 振动监测与诊断技术	87
第三节 噪声监测与诊断技术	118
第四节 温度监测技术	125
第五节 油液监测与诊断技术	137
第六节 无损检测技术	154
思考题	172
第四章 电气设备维修	173
第一节 电气系统故障的诊断维修方法和步骤	173
第二节 电气设备监测与诊断技术	175
第三节 常用电气设备故障处理与维修技术	192
第四节 数控设备电气故障诊断与维修技术	208
思考题	216
第五章 机械设备的大修理	217
第一节 机械设备大修理的基本概念	217
第二节 机械设备大修理前的准备	218

VIII

第三节 机械设备的大修理过程	224
思考题	249
第六章 典型设备的修理	250
第一节 机床关键部件和机构的修理	250
第二节 数控机床的维修	285
第三节 内燃机的修理	294
思考题	329
参考文献	330

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。

失效的模式，即失效的外在表现形式，相当于医学上的“病症”，主要表现为损伤、变形、断裂等；而失效机理的物理、化学、机械变化等内在原因或过程实质，相当于医学上的“病理”，如损伤可由摩擦、磨损、腐蚀或气蚀等各种原因造成。机械设备类型很多，其运行工况和环境条件差异很大，机械零件失效模式也很多，由于篇幅有限，本章将主要讨论其中几种普通的、有代表性的失效模式及其机理。

第一节 机械零件材料的磨损

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。摩擦和磨损涉及的科学技术领域甚广，特别是磨损，它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、化学和机械现象。以摩擦副为主要零件的机械设备，在正常运转时，磨损一般可分为磨合（跑合）阶段、稳定磨损阶段和剧烈磨损阶段，如图 1-1 所示。

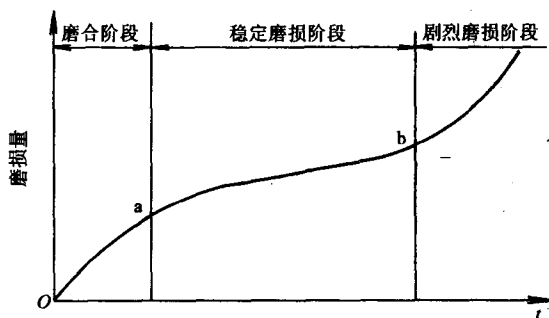


图 1-1 机械磨损过程

磨合阶段：新的摩擦副表面具有一定的粗糙度，真实接触面积小。开始磨合时，在一定载荷作用下，表面逐渐磨平，磨损速度较大，如图中的 Oa 线段。随着磨合的进行，实际接触面积逐渐增大，磨损速度减缓。在机械设备投入正式工作前认真进行磨合具有重要的意义。

稳定磨损阶段：经过磨合阶段，摩擦表面发生加工硬化，微观几何形状改变，建立了弹性接触条件。这一阶段磨损趋于稳定、缓慢。 ab 线段的斜率就是磨损速度， b 点对应的横坐标时间就是零件的耐磨寿命。

剧烈磨损阶段：经过 b 点以后，由于摩擦条件发生较大的变化，如温度快速升高，金属组织发生变化，冲击增大，磨损速度急剧增加，机械效率下降，精度降低等，最后导致零件失效，机械设备无法正常运转。

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

摩擦副的表面即使是抛光得很好的光洁表面，实际上还是高低不平的。因此，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—剪断—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，此时粘着磨损起了有益的作用。

2. 粘着磨损的分类

根据零件摩擦表面破坏程度，粘着磨损可分为五类，见表 1-1。

3. 影响粘着磨损的因素

由于摩擦表面产生粘着是产生粘着磨损的前提，因此，凡是影响接触区粘着

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

的因素,都将是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微观粗糙度。摩擦表面愈洁净,愈光滑,愈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。例如,润滑油中加入油性添加剂,能有效地防止金属表面产生粘着磨损;而大气中的氧通常会在金属表面形成一层保护性氧化膜,能防止金属直接接触和发生粘着,有利于减少摩擦和磨损。一些不容易形成较厚的保护性氧化膜的金属,如不锈钢和镍基合金,抗粘着磨损能力就差些。但是,温度对于金属表面氧化膜的形成有重要影响,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。

(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,通常在摩擦表面覆盖铅、锡、银、钼之类软金属或合金,这些都是能有效地抗粘着磨损的材料。当今,在流体动压润滑条件下工作的滑动轴承中,广泛选用巴氏合金、青铜和铝合金作为轴承衬瓦的摩擦材料,通常是在衬瓦表面上熔铸上述软金属或合金,达到减磨目的。

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。磨料磨损是机械磨损的一种,特征是在接触面上有明显的切削痕迹。在各类磨损中,磨料磨损约占一半左右,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。在农业、冶金、矿山、建筑、工程等机械设备中,磨料磨损造成的经济损失尤为巨大。因此,对磨料磨损的研究工作十分重要。

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,磨料磨损的机理是属于磨料颗粒的机械作用,磨料的来源有外界砂尘、切屑侵入、流体带入、表面磨损产物、材料组织的表面硬点及夹杂物等。

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以下三类,见表 1-2。

表 1-2 磨料磨损的分类

分类	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	挖掘机动齿、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 1-2 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。

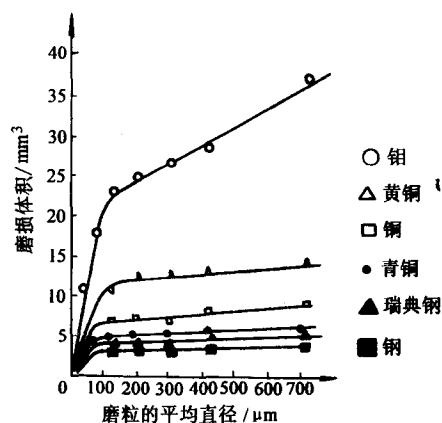


图 1-2 磨料粒度对体积磨损的影响

(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。

如图 1-3 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，即

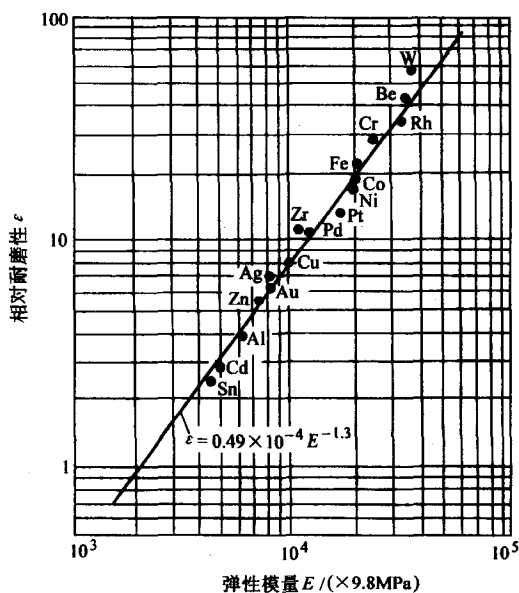


图 1-3 工业纯金属的相对耐磨性
与其弹性模量的关系

$$\epsilon = 0.49 \times 10^{-4} E^{-1.3}$$

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

疲劳磨损的过程即是裂纹产生和扩展的破坏过程。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 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 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剪应力和法向载荷引起的剪应力叠加结果下, 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 $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 。

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和扩展性两类:

(1) 非扩展性的疲劳磨损 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) 扩展性的疲劳磨损 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

因为接触疲劳磨损是由于疲劳裂纹的萌生和扩展而产生的, 所以, 凡是影响裂纹萌生和扩展的因素都对接触疲劳磨损有影响。

(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。轴承钢经处理后, 残留奥氏体越多, 针状马氏体越粗大, 则表层有益的残余压应力和渗碳层强度越低, 越容易发生微裂纹。在未溶解的碳化物状态相同条件下, 马氏体中碳的质量分数在 $0.4\% \sim 0.5\%$ 左右时, 材料的强度和韧性配合较佳, 接触疲劳寿命高。对未溶

解的碳化物，通过适当热处理，使其趋于量少、体小、均布，避免粗大或带状碳化物出现，都有利于避免疲劳裂纹的产生。

硬度在一定范围内增加，其接触疲劳抗力将随之增大。例如，轴承钢表面硬度为 62HRC 左右时，其抗疲劳磨损能力最大。对传动齿轮的齿面，硬度在 58~62HRC 范围内最佳，而当齿面受冲击载荷时，硬度宜取下限。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，润滑油品的选择也很重要，润滑油粘度愈高，则愈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；而润滑油中加入活性氯化物添加剂或是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。因此，腐蚀磨损的机理与前述三种磨损的机理不同，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。例如钢铁材料，其显著特征是在摩擦

表面沿滑动方向呈均细的磨痕,并产生红褐色片状的 Fe_2O_3 或灰黑色丝状的 Fe_3O_4 磨屑。

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。

下面就几种常用金属材料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,例如铁的氧化膜厚度为 1~3nm,铜的氧化膜厚度约 5nm。但是,氧化膜的生成速率随时间而变化。例如,钢表面的氧化膜的生长率随时间呈指数规律减小;铝在空气中氧化膜生长到约 0.2nm 时,因它使铝表面与周围介质完全隔开,氧化则停止。

(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。例如铝的氧化膜是硬脆的,在无摩擦时,其保护好,但在摩擦时其保护作用很小。低温下,铁的氧化物是紧密的,与基体结合牢固,但在高温下,随厚度增大,内应力也增大,将导致膜层开裂、脱落。在一定条件下,有些钢表面形成的氧化膜是坚韧的,对摩擦表面有显著的保护作用,例如不锈钢在高温下,表面形成了坚韧的氧化膜,起了保护作用。

(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 1800HBS,而铝本身硬度仅为 15HBS,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 150HBS,铜硬度为 120HBS,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,例如镀铬时,其硬度为 900HBS 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，例如唧筒水泵，当它输送有腐蚀性介质时，唧筒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、螺栓联结处、铆钉联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