



教育部高等职业教育示范专业规划教材

机电一体化专业

机电设备维修技术

JIDIAN SHEBEI WEIXIU JISHU

吴先文 主编



www.cmpedu.com

赠电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

教育部高等职业教育示范专业规划教材
(机电一体化专业)

机电设备维修技术

主 编	吴先文	
副主编	万文龙	
参 编	曹龙斌	曾令全
	钱 斌	赵金德
主 审	陈云明	

空
化



机 械 工 业 出 版 社

本书共分六章,主要介绍了机电设备维修的基础知识,机电设备的拆卸与装配,机械零件的修复技术,机电设备修理精度的检验,典型零部件及电器元件的维修,典型机电设备的维修等内容。

本书的特点为:将机械与电气知识有机融合于一体,兼顾机电设备维修的基础知识与基本技能,将传统设备维修技术与现代维修新技术、新工艺相结合,强调理论联系实际,列举了大量的典型现场维修实例。本书内容新颖,文字简练,通俗易懂,实用性较强。

为方便教学,本书配有免费电子课件,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电索取,咨询电话:010-88379375, Email: cmpgaozhi@sina.com。

本书既可作为三年、五年制高等职业技术教育机电一体化专业的教材,也可作为高职高专其他机械类专业的教材,并可供从事机电设备维修的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电设备维修技术/吴先文主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 1
ISBN 978-7-111-25514-7

I. 机… II. 吴… III. 机电设备—维修 IV. TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 174999 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:王玉鑫 责任编辑:于宁 王玉鑫 纪海勇

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.75 印张·339 千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-25514-7

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

随着科学技术的迅速发展和日趋综合化,知识更新的周期在缩短,生产设备正朝着大型化、自动化、高精度化方向发展。生产系统的规模变得越来越大,设备的结构也随之变得越来越复杂,设备在生产上的重要性日益显现。当代维修人员遇到的大多是机电一体化的复杂设备,先进的设备与落后的维修技术之间的矛盾正严重地困扰着企业,成为企业前进的障碍。因此,为了保证生产顺利进行,对设备维修人员提出了更高的要求。为适应这种趋势,我们从机电设备维修技术课程的培养目标及知识、能力结构要求出发,按照该课程的教学大纲编写了本书。

本书共分六章,主要介绍了机电设备维修的基础知识,机电设备的拆卸与装配,机械零件的修复技术,机电设备修理精度的检验,典型零部件及电器元件的维修,典型机电设备的维修等内容。

本书的特点为:将机械与电气知识有机融合于一体,兼顾机电设备维修的基础知识与基本技能,将传统设备维修技术与现代维修新技术、新工艺相结合,强调理论联系实际,列举了大量的典型现场维修实例。本书内容新颖,文字简练,通俗易懂,实用性较强。

本书可作为三年、五年制高等职业技术教育机电一体化专业的教材,也可作为高职高专其他机械类专业的教材,并可供从事机电设备维修的工程技术人员参考。

本书由四川工程职业技术学院吴先文任主编;常州机电职业技术学院万文龙任副主编;安徽机电职业技术学院陈云明主审。第一章由河南工业职业技术学院曹龙斌编写;第二章由四川工程职业技术学院曾令全编写;第三章由吴先文编写;第四章由烟台工程职业技术学院赵金德编写;第五章由安徽机电职业技术学院钱斌编写;第六章由万文龙编写。

限于编者的水平和经验,书中的不妥和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 机电设备维修的基础知识	1
第一节 设备维修技术的作用	1
第二节 设备维修技术的发展概况和发展趋势	2
第三节 机械零件的失效形式及其对策	4
第四节 设备维修前的准备工作	15
第五节 设备零件修理与更换的原则	18
思考题与习题	21
第二章 机电设备的拆卸与装配	22
第一节 机电设备的拆卸与清洗	22
第二节 机械零件的技术鉴定	31
第三节 装配尺寸链	35
第四节 典型零部件的装配	40
思考题与习题	52
第三章 机械零件的修复技术	53
第一节 概述	53
第二节 机械修复法	57
第三节 焊接修复法	64
第四节 热喷涂修复法	70
第五节 电镀修复法	74
第六节 胶接修复法	81

第七节 刮研修复法	86
第八节 其他修复技术	90
思考题与习题	93

第四章 机电设备修理精度的检验	95
第一节 设备修理中常用检、研具的选用	95
第二节 机电设备几何精度的检验方法	104
第三节 装配质量的检验和机床试验	114
思考题与习题	117

第五章 典型零部件及电器元件的维修	119
第一节 典型机械零部件的维修	119
第二节 常见电器元件的维修	131
第三节 常见电气故障分析与维修	138
思考题与习题	142

第六章 典型机电设备的维修	143
第一节 普通机床类设备的维修	143
第二节 数控机床类设备的维修	158
第三节 机电一体化设备的维修	184
第四节 桥式起重机的维修	188
第五节 电梯的维修	200
思考题与习题	214

参考文献	215
-------------------	-----

第一章 机电设备维修的基础知识

随着我国社会主义市场经济的建立和深入,整个工业生产对机电设备的要求和依赖程度越来越高。机电设备对工业产品的生产率、质量、成本、安全、环保等,在一定意义上有决定性作用。工业生产用的各种机电设备的状况如何,不仅反映企业维修技术水平的高低,而且是企业管理水平的标志。

生产设备在使用中会磨损,需要修理和更换零件;对一些突发性的故障和事故,需要组织抢修。机电设备维修技术就是以机电设备为对象,研究和探讨其拆卸与装配、失效零件修复、修理精度检验、故障消除方法以及响应技术。

本章主要研究和讨论机电设备维修技术的基础知识。主要内容有:设备维修技术的地位和作用、发展概况和发展趋势;机械零件的失效及其对策;设备维修前的准备;设备零件修理与更换的原则。

第一节 设备维修技术的作用

一、设备故障

保证企业生产过程的顺利进行,是设备维修工作的根本任务。

机电设备在使用中因某种原因丧失了规定机能而中断生产或降低效能时的状态称为设备故障。设备故障一般按其发展过程分为突发故障和偶发故障两类。突发故障,是指由于各种不利因素的叠加或偶然的外界因素的影响,共同发生作用,超出了设备所能承受的限度而发生的故障。它是随机的,与设备的使用时间无关,一般无明显的先兆,不可能或不便于通过早期测试或人的感官来发现。这类故障往往由操作调整失误、控制元件失灵、材料内部缺陷、电流击穿或烧毁等原因引起。偶发故障,是指由于各种因素使设备初始性能劣化、衰减过程的发展而引起的故障。这类故障是在工作中逐渐形成的,它与设备的使用时间有关,一般有明显的先兆,可以通过人的感官或早期测试发现,若能采取一定的措施,是可以避免发生的,这类故障通常是由于零件的磨损腐蚀、疲劳蠕变、材料老化等原因引起。

根据设备在使用期内所发生的故障率变化特性,设备的故障期通常可分为3个时期:

(1) 初期故障期 是指在设备初期使用阶段,由于设计、制造、装配以及材质等缺陷引发的故障。通过运转磨合、检查、改进等手段可使其缺陷逐步消除,运转趋于正常,从而实现逐渐减少这类故障的目的。认清这一特点后,就应加强改善性修理,逐项消除设备的设计、制造与装配的缺陷,使设备能较快地正常运转。设备维修部门应该把设备的改造工作列为自己的主要任务之一。

(2) 偶然故障期 这一时期是设备有效使用运转阶段,故障率稳定在比较低的水平,且大多是由于违章操作和维护不良而偶然发生。出现偶发故障,应该突击抢修,并且查清原因,采取措施,防止事故再度发生。为此,一方面应该加强对设备操作人员的技术教育,提

高他们的技术水平；另一方面要重视设备维修人员的培养教育，开展多方面训练，培养一支精干的设备维修队伍。

(3) 磨损故障期 设备由于使用日久、磨损严重而加剧劣化，故障率会剧增。这时必须采用修理措施，改善设备的技术状况。根据设备磨损的规律，应该加强对设备的日常维护和保养、预防性检查、计划修理和改善性修理。对引进的设备，则应尽快掌握操作和维修技术，充分发挥设备的效能。

二、设备维修技术的作用

“工欲善其事，必先利其器”。这里的“事”是指工作、生产，“器”是指工具、设备。就是说，工厂要想搞好生产，必须使工具和设备得心应手。这句古语，朴素地说明了设备维修工作在工业企业中的地位。在工业企业中，设备维修工作的水平，直接影响着生产能力、产品质量、产量、能源消耗、生产成本和劳动生产率等各个方面。充分发挥设备管理与维修工作的效能，使企业的生产经营活动建立在良好的物质技术基础之上，企业经济效益的提高才有保障。

加强设备的管理与维修工作，机器设备才能得到合理的使用，正确而适时地维护与保养，有计划地修理、更新、改造，企业可以获得明显的效益，主要体现在：

- 1) 提高设备完好率，延长设备的使用寿命。
- 2) 降低设备的故障率，保证企业生产的顺利进行。
- 3) 提高设备利用率，充分挖掘设备潜力。
- 4) 降低成本，减少停工损失和维修费用。
- 5) 提高产品加工的质量，减少废品损失。
- 6) 降低能源消耗，提高劳动生产率。

随着科学技术的进步和生产的不断发展，机电设备在生产中的地位 and 作用日益重要。特别是在现代机器制造企业中，主要是由工人操纵机器设备进行生产，有的工厂自动化程度很高，工人由原来操纵设备进而变为监督、控制、维修设备，而机器设备则在自控系统的操纵下进行生产。从某种意义上讲，机电设备决定着企业生产的成败。因此，加强设备管理，正确使用设备，对设备进行精心维护、保养和修理，使机电设备经常处于良好的技术状态，已成为企业管理的一项重要任务。实践证明，机电设备管理和维修状况如何，可以反映企业的生产状况。难以想象一个设备管理混乱、维修水平低下的企业，能够建立正常的生产秩序，实现均衡生产，创造最佳的经济效益。

企业要想发展，且稳定地提高经济效益，就必须处理好人与设备的关系、设备与生产的关系、生产与维修的关系，以及维修与更新、改造的关系。这是由设备管理与维修工作在企业中的地位与作用决定的。

第二节 设备维修技术的发展概况和发展趋势

机器的维护与修理和机器本身应该是结伴产生的，但其发展并不平衡，设备管理与有计划的预防性维修是最近几十年才发展起来的。越是工业发达的国家，设备管理与维修工作发展得越迅速，投入的人力、物力、财力也越多。随着工业生产的发展，设备维修的生产组

织、科学研究也不断发展。

一、我国设备维修技术的发展概况

我国设备维修工作是在新中国成立后迅速建立、发展起来的。党和国家对设备维修与改造工作很重视。20 世纪 50 年代开始尝试推行“计划预修制”。随着国民经济第一个五年计划的执行,各企业陆续建立了设备管理组织机构,1954 年全面推行设备管理周期结构和修理间隔期、修理复杂系数等一套定额标准。1961 年国务院颁布《国营工业企业工作条例(试行)》(即工业七十条),逐步建立了以岗位责任制为中心的包括设备维修保养制度在内的各项管理制度。1963 年机械工业出版社开始组织编写资料性、实用性很强的《机修手册》,使设备维修技术向标准化、规范化方向迈进了一大步。

在设备维修实践中,“计划预修制”不断有所改革,如按照设备的实际运转台数和实际的磨损情况编制预修计划;不拘束于大修、项修、小修的典型工作内容,针对设备存在的问题,采取针对性修理。一些企业还结合修理对设备进行改装,提高设备的精度、效率、可靠性、维修性等。这些已经冲破了原有“计划预修制”的束缚。与此同时,相继成立了中国机械工程学会及各级学术组织,开展了多方面的学术和技术交流活动,推动了我国设备维修与改造工作。群众性的技术革新活动,也给设备维修与改造增添了异彩。这一时期,我国工业企业的设备修理结构有两种形式:一是专业厂维修;二是企业自修。

20 世纪 70 年代末,实行改革开放,加强了国际交往,国际交流不断,取得了可喜的成绩。采取走出去、请进来等方法,学习、借鉴英国的“设备综合工程学”和日本的“全员生产维修(TPM)”,揭开了多向综合引进国外先进技术的序幕,并恢复全国设备维修学会活动,创办《设备维修》杂志,原国家经委增设设备管理办公室,1982 年成立中国设备管理协会,1984 年在西北工业大学筹建中国设备管理培训中心。1987 年国务院颁布《全民所有制工业交通企业设备管理条例》。国内企业普遍实行“三保大修制”,一些企业结合自己的情况学习和试行“全员生产维修”,初步形成一个适合我国国情的设备管理与维修体制——设备综合管理体制,使我国设备维修工作进一步完善并走向正轨。

20 世纪 90 年代,随着微电子技术、机电一体化等技术的不断成熟,特别是我国工业化水平的迅速提高,以技术改造和修理相结合的设备维修工作迅速发展。这一时期,在设备维修制度上,普遍推行状态维修、定期维修和事后维修等 3 种维修方式,以定期维修为主、向定期维修和状态维修并重的方向发展(事后维修仍然存在)。在修理类别上,大修、项修、小修 3 种类别已具有一定的代表性和普及性。

进入 21 世纪后,随着改革开放的不断深入,我国的社会主义市场经济不断完善,国外制造企业不断迁入我国,计算机技术、信号处理技术、测试技术、表面工程技术等不断应用于设备维修技术,改善性维修、无维修设计等得到迅猛发展。

二、设备维修技术的发展趋势

现代科学技术和社会经济相互渗透、相互促进、相互结合,机电设备越来越机电一体化、高速化、微电子化,这使机电设备的操作越来越容易,而机电设备故障的诊断和维修则变得困难。而且,机电设备一旦发生故障,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,还会造成严重的社会影响。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,机电设备维修技术不断得到人们的重视和关注。设备维修技术的发展必然朝着以计算机技术、信号处理技术、测试技术、表面工程技术等现代技术为依托,以现代设备状态监测与故障诊断技术为先导,以机电一体化为背景,以满足现代化工业生产日益提高的要求为目标,以不断完善的维修技术为手段的方向迅猛地发展。

三、机电设备维修技术课程的性质和任务

机电设备维修技术课程既是机电一体化专业的主要专业课程之一,又是机电工程类专业的重要专业课程之一。

通过本课程的学习,应使学生达到以下基本要求:

- 1) 掌握机电设备维修技术的基础理论与基本知识。
- 2) 熟悉机电设备的解体,设备零件的拆卸、清洗、技术鉴定方法;掌握装配尺寸链和螺纹联接件、轴与轴承、齿轮、蜗轮蜗杆以及过盈配合件的装配方法。
- 3) 熟悉机械零件各种修复技术;掌握表面工程技术;具有分析、选择和应用机械零件修复技术的基本能力。
- 4) 熟悉常用研、检具和维修电工工具的选用;掌握机电设备几何精度的检验方法、装配质量的检验和机床试验方法、机床大修质量检验通用技术要求。
- 5) 掌握螺纹联接件、轴与轴承、丝杠螺母副、壳体零件、曲轴连杆机构、分度蜗轮副、齿轮、过盈配合件等典型零部件的修理、装配和调试方法;基本掌握常见电气设备故障处理和维修技术。
- 6) 熟悉普通机床、数控机床、机电一体化设备、自动生产线设备、桥式起重机、电梯等典型机电设备的修理技术,常见故障分析及其排除方法。

第三节 机械零件的失效形式及其对策

机器失去正常工作能力的现象称为故障。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。机器发生故障后,其经济技术指标部分或全部下降而达不到预定要求,如功率下降、精度降低、加工表面粗糙度达不到预定等级或发生强烈振动、出现不正常的声响等。

机电设备的故障分为自然故障和事故性故障两类。自然故障是指机器各部分零件的正常磨损或物理、化学变化造成零件的变形、断裂、蚀损等,使机器零件失效所引起的故障。事故性故障是指因维护和调整不当,违反操作规程或使用了质量不合格的零件和材料等造成的故障,这种故障是人为造成的,可以避免。

机器的故障和机械零件的失效密不可分。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,主要有磨损、变形、断裂、蚀损等四种普通的、有代表性的失效模式。

一、机械零件的磨损及其对策

相接触的物体相互移动时发生阻力的现象称为摩擦。相对运动的零件的摩擦表面发生尺寸、形状和表面质量变化的现象称为磨损。摩擦是不可避免的自然现象；磨损是摩擦的必然结果，两者均发生于材料表面。摩擦与磨损相伴产生，造成机械零件的失效。当机械零件配合面产生的磨损超过一定限度时，会引起配合性质的改变，使间隙加大、润滑条件变坏，产生冲击，磨损就会变得越来越严重，在这种情况下极易发生事故。一般机械设备中约有80%的零件因磨损而失效报废。据估计，世界上的能源消耗约有30%~50%是由于摩擦和磨损造成的。

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，机械零件不仅会发生外形和尺寸的变化，而且会出现其他各种物理、化学和机械现象。零件的工作条件是影响磨损的基本因素。这些条件主要包括：运动速度、相对压力、润滑与防护情况、温度、材料、表面质量和配合间隙等。

以摩擦副为主要零件的机械设备，在正常运转时，机械零件的磨损过程一般可分为磨合（跑合）阶段、稳定磨损阶段和剧烈磨损阶段，如图1-1所示。

（1）磨合阶段 新的摩擦副表面具有一定的表面粗糙度，实际接触面积小。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。在机械设备正式投入运行前，认真进行磨合是十分重要的。

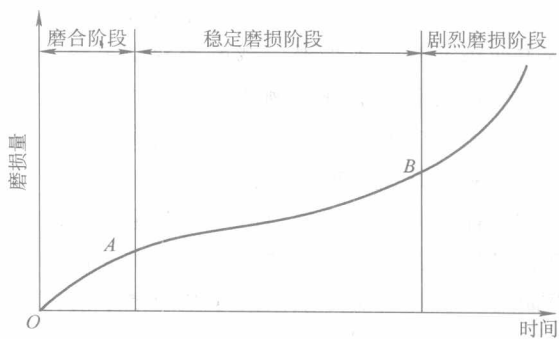


图 1-1 机械磨损过程

（2）稳定磨损阶段 经过磨合阶段，摩擦副表面发生加工硬化，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。

（3）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，从而导致零件失效，机械设备无法正常运转。

通常将机械零件的磨损分为粘着磨损、磨料磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损和微动磨损五种类型。

（一）粘着磨损

粘着磨损又称为粘附磨损，是指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。

根据零件摩擦表面的破坏程度，粘着磨损可分为轻微磨损、涂抹、擦伤、撕脱和咬死等五类。

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，但实际上也还是高低不平的。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,仅为理论接触面的1%~1‰。所以即使在载荷不大时,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,那么这两个零件的金属面将直接接触而产生粘着。当摩擦表面发生相对滑动时,粘着点在切应力作用下变形甚至断裂,造成接触表面的损伤破坏。这时,如果粘着点的粘着力足够大,并超过摩擦接触点两种材料之一的强度,则材料便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转移到较硬的表面上。在载荷和相对运动作用下,两接触点间重复产生“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。

在金属零件的摩擦中,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,在非金属零件或金属零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,此时粘着磨损则起到有益的作用。

2. 减少或消除粘着磨损的对策

摩擦表面产生粘着是粘着磨损的前提,因此,减少或消除粘着磨损的对策就有两方面。

(1) 控制摩擦表面的状态 摩擦表面的状态主要是指表面自然洁净程度和微观粗糙度。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。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。

(2) 控制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。这是因为两个摩擦表面的材料形成固溶体的倾向强烈,因此,构成摩擦副的材料应当是形成固溶体倾向最小的两种材料,即应当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能有效抵抗粘着磨损的材料,如铅、锡、银等软金属或合金。

(二) 磨料磨损

磨料磨损也称为磨粒磨损,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。它是机械磨损的一种,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50%,是十分常见且危害性最严重的一种磨损,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,能源和材料大量消耗。

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錾削式、高应力碾碎式和低应力擦伤式三类。

1. 磨料磨损机理

磨料磨损的机理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。

目前,关于磨料磨损机理有四种假说:

(1) 微量切削 认为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,

微量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) 压痕破坏 认为塑性较大的材料，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。

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

(4) 断裂 认为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。

2. 减少或消除磨料磨损的对策

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，减少或消除磨料磨损的对策也有两方面。

(1) 磨料方面 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表面材料硬度越大，磨损越严重；呈棱角状的磨料比圆滑状的磨料的挤切能力强，磨损率高。实践与实验表明，在一定粒度范围内，摩擦表面的磨损量随磨粒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。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，导致磨料的强度降低，易于断裂破碎。

(2) 摩擦表面材料方面 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）与磨料磨损有很大关系。在一定范围内，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。断裂韧度反映材料对裂纹的产生和扩散的敏感性，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，只有两者配合合理时，材料的耐磨性才最佳。弹性模量的大小，反映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，避免或减少表面材料的磨损。

（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。

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. 疲劳磨损机理

疲劳磨损的过程就是裂纹产生和扩展的破坏过程。根据裂纹产生的位置，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，两滚动接触物体在表面下 $0.786b$ （ b 为平面接触区的半宽度）处切应力最大。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 $0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 。

2. 减少或消除疲劳磨损的对策

疲劳磨损是由于疲劳裂纹的萌生和扩展而产生的,因此,减少或消除疲劳磨损的对策就是控制影响裂纹萌生和扩展的因素,主要有四个方面:

(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的条件下,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,其接触疲劳强度将随之增大。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 $58 \sim 62\text{HRC}$ 范围内最佳,而当齿面受冲击载荷时,硬度宜取下限。此外,两个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。

(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 $2 \sim 3$ 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 一般来说,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、扭转疲劳强度,还能提高接触疲劳强度,减小疲劳磨损。但是,残余压应力过大也有害。

(4) 其他因素 润滑油的选择很重要,润滑油粘度越高越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。机械设备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。具有腐蚀作用的环境因素对疲劳往往起有害作用,如润滑油中的水。

(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剥落,这种现象称为腐蚀磨损。它是与机械磨损、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。腐蚀磨损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下,更容易发生在有酸、碱、盐等特殊介质的条件下。

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的腐蚀磨损两大类。

1. 氧化磨损

我们知道,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。

氧化磨损的产生必须同时具备以下条件:一是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;二是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;三是氧化膜厚度大于摩擦表面破坏的深度。

在通常情况下,氧化磨损比其他磨损轻微得多。

减少或消除氧化磨损的对策主要有:

(1) 控制氧化膜生长的速度与厚度 在摩擦过程中,金属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 $1 \sim 3\text{nm}$,铜的氧化膜厚度约为 5nm 。但是,氧化膜的生成速度随时间而变化。

(2) 控制氧化膜的性质 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,其保护作用大,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,随着厚度增大,内应力也增大,将导致膜层开裂、脱落。

(3) 控制硬度 当金属表面氧化膜硬度远大于与其结合的基体金属的硬度时,在摩擦过程中,即使在小的载荷作用下,也易破碎和磨损;当两者相近时,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,在载荷作用下变形小,氧化膜不易破碎,耐磨性好,例如镀硬铬时,其硬度为 900HBS 左右,铬的氧化膜硬度也很高,所以镀硬铬得到广泛应用。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。但在不引起氧化膜破裂的工况下,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

特殊介质下的腐蚀磨损是摩擦副表面金属材料与酸、碱、盐等介质作用生成的各种化合物,在摩擦过程中不断被磨掉的磨损过程。其机理与氧化磨损相似,但磨损速度较快。

由于其腐蚀本身可能是化学的或电化学的性质,故腐蚀磨损的速度与介质的腐蚀性质和作用温度有关,也与相互摩擦的两个金属形成的电化学腐蚀的电位差有关。介质腐蚀性越强,作用温度越高,腐蚀磨损速度越快。

减少或消除特殊介质下的腐蚀磨损的对策主要有:

1) 使摩擦表面受腐蚀时能生成一层结构紧密且与金属基体结合牢固、阻碍腐蚀继续发生或使腐蚀速度减缓的保护膜,可使腐蚀磨损速度减小。

2) 控制机械零件或构件所处的应力状态,因为这对腐蚀影响很大。当机械零件受到重复应力作用时,所产生的腐蚀速度比不受应力时快得多。

(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称为微动磨损。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,过盈配合部件结合紧度下降甚至松动,联接件松动乃至分离,严重者会引起事故。微动磨损还易引起应力集中,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,同时两个摩擦表面永远不脱离接触,磨损产物不易往外排除,磨屑在摩擦表面起着磨料的作用;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,所以微动磨损兼有粘着磨损和氧化磨损的作用。

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. 减少或消除微动磨损的对策

实践与试验表明,外界条件(如载荷、振幅、温度、润滑等)及材质对微动磨损影响相当大,因而,减少或消除微动磨损的对策主要有以下几个方面:

(1) 载荷 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,微动磨损量将减小。采用超过临界载荷的紧固方式可有效减少微动磨损。

(2) 振幅 当振幅较小时,单位磨损率较小;当振幅超过 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ 时,单位磨损率显著上升。因此,应有效地将振幅控制在 $30 \mu\text{m}$ 以内。

(3) 温度 低碳钢,在 0°C 以上时,微动磨损量随温度上升而逐渐降低;在 $150^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 时,微动磨损量突然降低;继续升高温度,微动磨损量上升;温度从 135°C 升高到 400°C 时,微动磨损量增加 15 倍。中碳钢,在其他条件不变、温度为 130°C 时,微动磨损量发生转折;超过此温度,微动磨损量大幅度降低。

(4) 润滑 用粘度大、抗剪切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。而普通的液体润滑剂对防止微动磨损效果不佳。

(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%。一般来说,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)是降低微动磨损的有效措施。

二、机械零件的变形及其对策

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,各类传动轴的弯曲变形;桥式起重机主梁在变形下挠曲或扭曲;汽车大梁的扭曲变形;弹簧的变形等。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。

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为弹性变形和塑性变形两大类。

1. 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。

弹性变形的特点是:

1) 当外力去除后, 零件变形消除, 恢复原状。

2) 材料弹性变形时, 应变与应力成正比, 其比值称为弹性模量, 它表示材料对弹性变形的阻力。在其他条件相同时, 材料的弹性模量越高, 由这种材料制成的机械零件或构件的刚度便越高, 在受到外力作用时保持其固有的尺寸和形状的能力就越强。

3) 弹性变形量很小, 一般不超过材料原长度的 $0.1\% \sim 1.0\%$ 。

在金属零件使用过程中, 若产生超量弹性变形 (超量弹性变形是指超过设计允许的弹性变形), 则会影响零件正常工作。例如, 当传动轴工作时, 超量弹性变形会引起轴上齿轮啮合状况恶化, 影响齿轮和支承它的滚动轴承的工作寿命; 机床导轨或主轴超量弹性变形, 会引起加工精度降低甚至不能满足加工精度。因此, 在机械设备运行中, 防止超量弹性变形是十分必要的。除了正确设计外, 正确使用十分重要, 应严防超载运行, 注意运行温度规范, 防止热变形等。

2. 塑性变形

塑性变形又称为永久变形, 是指机械零件在外加载荷去除后留下来的一部分不可恢复的变形。金属零件的塑性变形从宏观形貌特征上看, 主要有翘曲变形、体积变形和时效变形三种形式。

(1) 翘曲变形 当金属零件本身受到某种应力 (例如机械应力、热应力或组织应力等) 的作用, 其实际应力值超过了金属在该状态下的拉伸屈服强度或压缩屈服强度后, 就会产生呈翘曲、椭圆或歪扭的塑性变形。因此, 金属零件产生翘曲变形是它自身受复杂应力综合作用的结果。翘曲变形常见于细长轴类、薄板状零件以及薄壁的环形和套类零件。

(2) 体积变形 金属零件在受热与冷却过程中, 由于金相组织转变引起比容变化, 导致金属零件体积胀缩的现象称为体积变形。例如, 钢件淬火相变时, 奥氏体转变为马氏体或下贝氏体时比容增大, 体积膨胀, 淬火相变后残留奥氏体的比容减小, 体积收缩。马氏体形成时的体积变化程度, 与淬火相变时马氏体中的含碳量有关。钢件中含碳量越多, 形成马氏体时的比容变化越大, 膨胀量也越大。此外, 钢中碳化物不均匀分布往往会增大变形程度。

(3) 时效变形 钢件热处理后产生不稳定组织, 由此引起的内应力处于不稳定状态; 铸件在铸造过程中形成的铸造内应力也处于不稳定状态。在常温下较长时间的放置或使用, 不稳定状态的应力会逐渐发生转变, 并趋于稳定, 由此伴随产生的变形称为时效变形。

塑性变形导致机械零件各部分尺寸和外形的变化, 将引起一系列不良后果。例如, 机床主轴塑性弯曲, 将不能保证加工精度, 导致废品率增大, 甚至使主轴不能工作。

零件的局部塑性变形虽然不像零件的整体塑性变形那样引起明显失效, 但也是引起零件失效的重要形式。如键联接、花键联接、挡块和销钉等, 由于静压力作用, 通常会引起配合的一方或双方的接触表面挤压 (局部塑性变形), 随着挤压变形的增大, 特别是那些能够反向运动的零件将引起冲击, 使原配合关系破坏的过程加剧, 从而导致机械零件失效。

3. 防止和减少机械零件变形的对策

变形是不可避免的, 我们可从下列四个方面采取相应的对策防止和减少机械零件变形。

(1) 设计 设计时不仅要考虑零件的强度, 还要重视零件的刚度和制造、装配、使用、拆卸、修理等问题。

1) 正确选用材料, 注意工艺性能。如铸造的流动性、收缩性; 锻造的可锻性、冷塑性;

焊接的冷裂、热裂倾向性；机加工的可切削性；热处理淬透性、冷脆性等。

2) 合理布置零件，选择适当的结构尺寸。如避免尖角，棱角改为圆角、倒角；厚薄悬殊的部分可开工艺孔或加厚太薄的地方；安排好孔洞位置，把盲孔改为通孔等。形状复杂的零件在可能条件下采用组合结构、镶拼结构，改善受力状况。

3) 在设计中，注意应用新技术、新工艺和新材料，减少制造时的内应力和变形。

(2) 加工 在加工中要采取一系列工艺措施来防止和减少变形。对毛坯要进行时效以消除其残余内应力。时效有自然时效和人工时效两种。自然时效，可以将生产出来的毛坯在露天存放1~2年，这是因为毛坯材料的内应力有在12~20个月逐渐消失的特点，其时效效果最佳；缺点是时效周期太长。人工时效可使毛坯通过高温退火、保温缓冷而消除内应力，也可利用振动作用来进行人工时效。高精度零件在精加工过程中必须安排人工时效。

在制定零件机械加工工艺规程中，均要在工序、工步的安排上，工艺装备和操作上采取减少变形的工艺措施。例如，粗精加工分开的原则，在粗精加工中间留出一段存放时间，以利于消除内应力。

机械零件在加工和修理过程中要减少基准的转换，保留加工基准留给维修时使用，减少维修加工中因基准不统一而造成的误差。对于经过热处理的零件来说，注意预留加工余量、调整加工尺寸、预加变形，这是非常必要的。在知道零件的变形规律之后，可预先加以反向变形量，经热处理后两者抵消；也可预加应力或控制应力的产生和变化，使最终变形量符合要求，达到减少变形的目的。

(3) 修理 在修理中，既要满足恢复零件的尺寸、配合精度、表面质量等技术要求，还要检查和修复主要零件的形状、位置误差。为了尽量减少零件在修理中产生的应力和变形，应当制定出与变形有关的标准和修理规范，设计简单可靠、好用的专用量具和工夹具，同时注意大力推广“三新”技术，特别是新的修复技术，如刷镀、粘接等。

(4) 使用 加强设备管理，制定并严格执行操作规程，加强机械设备的检查和维护，不超负荷运行，避免局部超载或过热等。

三、机械零件的断裂及其对策

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。

机械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。尤其是现代机械设备日益向着大功率、高转速的趋势发展，机械零件断裂失效的几率有所提高。尽管与磨损、变形相比，机械零件因断裂而失效的机会很少，但机械零件的断裂往往会造成严重的机械事故，产生严重的后果，是一种最危险的失效形式。

机械零件的断裂一般可分为延性断裂、脆性断裂、疲劳断裂和环境断裂四种形式。

1. 延性断裂

延性断裂又称为塑性断裂或韧性断裂。当外力引起的应力超过抗拉强度时发生塑性变形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”现象。延性断裂断口形貌的微观特点是断面有大量韧窝（即微坑）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。

2. 脆性断裂