



高职高专“十一五”规划教材

# 机械维护修理与安装

**第二版**

李士军 主编

苏阳 刘忠伟 副主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

# 机械维护修理与安装

第二版

李士军 主编

苏 阳 刘忠伟 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书共分六章。第一章机械维护与修理的基本知识,系统地介绍了摩擦学的基础知识、机械故障、零件的检测、故障诊断技术、机械维修制度;第二章机械的润滑,详细阐述了润滑原理、润滑材料、稀油润滑、干油润滑、典型零件润滑、桥式起重机润滑;第三章机械的拆卸与装配,详细阐述了机械拆装的一般工艺过程和典型零件的拆装工艺及方法;第四章机械零件修复技术,详细阐述了零件的多种修复技术;第五章机械设备的安装,简要介绍了机械设备安装的有关知识;第六章桥式起重机的修理,介绍了典型设备的修理技术。

本书内容系统,涉及面广,主次分明,既有机械维修的基础知识、管理知识,又有维护、修理与安装的详细内容,内容新颖,书中介绍了摩擦学的基础知识及先进的机械拆装与修复技术;实践性强,由理论到实践再到实例,由浅入深,易于学习。

本书可作为高职高专院校、本科院校、中专学校教材,也可供从事机修工作的技术人员、技师、技工及设备管理人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械维护修理与安装/李士军主编. —2版. —北京:  
化学工业出版社, 2010.1  
高职高专“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-122-07085-2

I. 机… II. 李… III. ①机械维修-高等学校: 技术学院-教材②机械设备-设备安装-高等学校: 技术学院-教材 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 207077 号

---

责任编辑: 高 钰  
责任校对: 陶燕华

装帧设计: 周 遥

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 13¼ 字数 356 千字 2010 年 1 月北京第 2 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

## 第二版前言

本教材的第一版已使用了6年,根据各使用院校反映的情况,为更好地服务于广大师生和社会读者,作者对原教材进行了修订,改动的主要内容为:

1. 删除原教材第一章第五节机械故障诊断技术大部分内容,只保留油样分析技术部分。主要因为在维修现场应用少,而且内容抽象,对机械类专业学生难以真正掌握。

2. 增加了桥式起重机的润滑与修理内容,桥式起重机是各类生产车间最常见的设备,将该设备作为特例进行讲解能使学生增进理论与实践的结合,其中桥式起重机的润滑放在第二章机械润滑部分,桥式起重机的修理由于内容较多单独列为第六章,其主要内容有:起重机的状态检查与负荷试验、起重机桥架变形的分析及检测方法、起重机桥架变形的修复方法、车轮啃轨与小车“三条腿”的修理。

在修订过程中,王卫海、王鹏飞、赵海艳参加了修改章节的编写。

**编者**

**2009. 11**

# 第一版前言

本书根据全国高职高专冶金机械课程组 2002 年教材编写会议精神确定的编写大纲，在 2003 年高职高专规划教材审稿会议上，八所院校的专家们又对本书进行了审议，并提出了许多宝贵意见。

通过对该课程的学习应能使达到下列基本要求：建立磨损的概念，初步了解摩擦学理论；建立故障的概念，了解延长机械使用寿命的措施及故障诊断的方法，能对一般设备故障进行常规性理论分析；充分认识机械润滑的重要性，在掌握润滑原理的基础上，能够正确选用润滑方式、润滑材料，并能进行必要的润滑系统设计；掌握机械拆装的基本原理，学会常用设备部件的拆装步骤、方法，了解机械拆装的新技术；掌握机械修复的基本原理，学会常用设备部件的修复步骤、方法，了解机械修复的新技术；了解机械维护、检修与安装的现场管理方法；了解机械基础的施工，掌握设备基础验收的方法，能对机座进行正确的安装。

本书由李士军任主编，苏阳、刘忠伟任副主编，马保振任主审。苏阳编写第二章，刘忠伟编写第四章，李秀娜编写第三章，孟继申编写第一章第一节，其余内容由李士军编写。

在本书的编写过程中，编者参考了很多国内外相关资料和书籍，在此向有关资料与书籍的编者表示感谢。

限于编者的水平和经验，书中难免有欠妥或错误之处，敬请广大读者批评指正。

**编者**

**2003. 11**

# 目 录

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 绪 论               | 1   |
| 第一章 机械维护与修理的基本知识  | 5   |
| 第一节 机械磨损          | 5   |
| 第二节 机械故障          | 11  |
| 第三节 机械故障发生的原因     | 13  |
| 第四节 零件的检测         | 18  |
| 第五节 机械故障诊断的油样分析技术 | 23  |
| 第六节 机械维护与修理制度     | 25  |
| 第二章 机械的润滑         | 32  |
| 第一节 润滑原理          | 32  |
| 第二节 润滑材料          | 38  |
| 第三节 稀油润滑          | 49  |
| 第四节 干油（润滑脂）润滑系统   | 62  |
| 第五节 典型零部件的润滑      | 72  |
| 第六节 桥式起重机的润滑      | 83  |
| 第三章 机械的拆卸与装配      | 85  |
| 第一节 概述            | 85  |
| 第二节 机械零件的拆卸       | 87  |
| 第三节 零件的清洗         | 90  |
| 第四节 零件的检验         | 93  |
| 第五节 过盈配合的装配       | 95  |
| 第六节 联轴节的装配        | 98  |
| 第七节 滚动轴承的装配       | 101 |
| 第八节 滑动轴承的装配       | 107 |
| 第九节 齿轮的装配         | 111 |
| 第十节 密封装置的装配       | 115 |
| 第四章 机械零件修复技术      | 121 |
| 第一节 金属扣合技术        | 121 |
| 第二节 工件表面强化技术      | 125 |
| 第三节 塑性变形修复技术      | 131 |
| 第四节 电镀修复技术        | 133 |
| 第五节 热喷涂修复技术       | 143 |
| 第六节 焊接修复技术        | 152 |
| 第七节 粘接修复技术        | 161 |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
|            | 第八节 零件修复技术的选择·····       | 169        |
| <b>第五章</b> | <b>机械设备的安装·····</b>      | <b>173</b> |
|            | 第一节 机械安装前的准备工作·····      | 173        |
|            | 第二节 基础的设计与施工·····        | 174        |
|            | 第三节 机械的安装·····           | 181        |
| <b>第六章</b> | <b>桥式起重机的修理·····</b>     | <b>187</b> |
|            | 第一节 起重机的状态检查及负荷试验·····   | 187        |
|            | 第二节 起重机桥架变形的分析及检测方法····· | 190        |
|            | 第三节 起重机桥架变形的修理方法·····    | 198        |
|            | 第四节 车轮啃轨与小车“三条腿”的修理····· | 207        |
|            | <b>参考文献·····</b>         | <b>212</b> |

# 绪 论

机械设备维修是设备维护和修理两类作业的总称。维护是一种保持设备规定的技术性能的日常活动，修理是一种排除故障恢复技术性能的活动。

设备在使用中，由于零部件发生各种磨损、腐蚀、疲劳、变形或老化等劣化现象，导致精度下降，性能降低，影响产品加工质量，情况严重时，会造成设备停机而使企业蒙受经济损失。设备维修就是通过对设备进行维护和修理，降低其劣化速度，延长使用寿命，保持或恢复设备规定功能而采取的一种技术活动，具体包括日常维护、设备检查、检修和修理等作业。

设备维修是保持设备固有实物形态的重要手段，而设备的实物形态又是正确反映设备使用价值的真实标志。同样的设备同时投入使用，按相同的折旧率计提折旧，虽然反映在账面上资产净值相同，但使用价值却往往因受到不同的使用条件和利用率而并不一样，所以评价一台设备的使用价值时，不能单从价值形态去衡量，而必须把实物形态结合在一起。有些设备其使用年限虽已超过折旧年限，但由于坚持了搞好设备维修的优良传统，严格进行日常维护和修理工作，所以仍能维持设备的正常运转，保证产品质量和产量，节约了购置新设备投资。这充分说明了重视设备维修的重要意义。

近年来，国际上已经把设备维修看作是一种投资，在维修作业方面也遵循价值工程的投入产出的经济原理。在这里，维修的投入是指工作中所消耗的劳动力、原材料和能源等，加上由于停产检修而造成的经济损失，计入维修费用项目，而产出是指设备经过维修后恢复和提高了可利用率和技术水平，反映出工厂由此而取得的生产率和经济效益，因而维修和生产一样，需要遵守投入产出的基本原理，追求最佳的技术经济效益。

维修方式是指导维修作业的策略性准则，通过技术上和经济上对应修设备进行分析，确定最适宜的维修时间、维修制度及修理内容。设备是由各种零部件组成的，每种零部件可以有几种维修方式。在研究设备维修方式时，首先以零部件为对象进行分析，选择最佳的维修方式，对不同的零部件可以采取不同的维修方式，然后加以综合。按照修理范围及工作量确定修理类别，作为制订修理计划的依据。

维修方式的选择原则是：通过维修，消除维修前存在的缺陷，保证设备达到规定的性能；力求维修费用和设备停修对生产的经济损失两者之和为最小。根据上述原则，对几种可能采用的维修方式进行最佳选择。

在现代工业企业里，设备的类型相当多，各种设备结构的复杂程度不同，在生产中的重要性也不同，必须认真加以分析，分别选择适合每种设备的维修方式。企业对所有设备采用统一的维修方式是不合理的。

维修方式主要有预防维修、故障维修和改善维修三种。预防维修与故障维修的划分是以设备故障发生前或发生后采取维修措施为界限。

传统的预防维修主要有定期维修和状态维修两种。定期维修制度的基本点是：对各类设备按规定修理周期结构及修理间隔期制订修理计划，到期按规定的修理内容进行检查和修理。状态维修是通过修前检查，按设备的实际技术状况确定修理内容和时间，制订出修理计划。这种维修方式比较切合实际，但必须做好设备技术状态的日常检查、定期检查和记录统计分析工作。

改善维修则从研究故障发生的原因出发,以消灭故障根源、提高设备性能和可靠性为目的而进行改造性修理采取的措施。由于设备拥有量大而构成落后,应十分重视设备的“修中有改”来提高工厂装备现代化水平。当前较普遍的方法是,在原有设备修理时,应用数控、数显、静压和动静压技术、节能技术等,改造老设备,这样不仅可以达到时间短、收效快、针对性强的效果,还能节约购买新设备的投资。

近年来,随着近代工业的发展,生产对维修的要求更加严格,设备的结构也日趋复杂,工业发达国家对维修理论与实践的研究更加深入。可靠性理论与故障物理以及质量保证等先进科学技术的问世,使维修领域通过努力探索,出现了以可靠性为中心的维修和质量维修等新的维修方式。

### 1. 以可靠性为中心的维修

20 世纪 70 年代美国航空领域产生的以可靠性为中心的维修(RCM, Reliability Centred Maintenance)是 Howard F. Heap 于 1978 年接受美国国防部的委托,研究制订飞机的维修与检修大纲时创始的,目前已经广泛应用于美国波音飞机公司制造的 B-747、B-757、B-767、B-777 以及道格拉斯和洛克希德等飞机公司制造的飞机维修上,并已推广到核电站、石化工业等流程工业设备上应用。在中国,有关军事装备部门也开始使用 RCM。

RCM 大致可分为三步进行。

(1) 确定重要功能项目 首先,对设备的系统或零部件进行功能故障分析(FFA, Functional Failure Analysis),从中确定重要功能项目。属于重要功能项目的条件如下:

- ① 出现故障时,对设备的安全性有影响;
- ② 有功能隐患;
- ③ 出现故障时,对设备的使用性有明显影响;
- ④ 出现故障时,对设备费用有明显影响。

凡重要功能项目,都应进行预防维修,其他项目则可等到发生故障后才加以修复或排除。这样就可以大大减少不必要的预防维修工作量,节约维修费用,也不致影响设备可靠性。

(2) 对重要功能项目进行故障模式及影响分析(FMECA) 故障模式及影响分析(Failure Mode Effect and Criticality Analysis)是对重要功能项目通过分析其故障模式和发生故障的原因,判断当这些项目的零部件发生故障时,将对系统、设备的功能产生的影响及造成危害的程度。

进行 FMECA 时,要求负责该项工作的技术人员对设备的性能结构、运行条件以及该设备和其他设备之间的相互关联等,都要具备丰富的知识与经验。

(3) 实行逻辑决策,确定维修作业内容 应用逻辑树分析(LTA, Logic Tree Analysis)方法,回答逻辑决策图中的一系列提问,对相应设备的零部件发生故障的原因、影响以及设备的构造、材质、劣化环境数据,结合故障发生的现象,确定有效的维修作业,然后根据维修数据确定维修时间。如果缺乏维修数据时,可根据设备劣化的发展速度来确定维修时间。倘若没有有效的维修作业时,再考虑改变设计问题。

归纳起来,以可靠性为中心的维修方式(RCM),即通过选择设备的重要功能项目,进行功能故障与故障影响的整理分析,找出故障原因,并应用逻辑树分析(LTA),对不同的故障,采取不同的维修作业,它比原来的预防维修作业更为灵活多样。而且,对安全性影响不大的项目,可以采取事后维修作业。这样,就能避免过剩维修,节约维修费用,有利于保证重点维修项目。此外,RCM 可供采用的维修种类较多,也有利于选择。因此,对可靠性和安全性要求比较高的设备,很有应用推广 RCM 的价值。

## 2. 保证产品质量的维修程序

保证产品质量的维修程序简称质量维修 (QM, Quality Maintenance), 是从发现产品加工的质量不良着手, 找出设备缺陷, 采取对策, 加以消除, 并制定巩固措施, 保证产品质量不良不再发生的维修方法。换句话说, 它是一种把产品质量与设备维修直接联系起来的维修方法。日本于 1984 年提出了质量维修, 其含义是“为确保加工物或产品质量而考虑确保设备处于良好状态的一种基本方法。具体制定不出现质量不良的设备条件, 按条件安排一系列定期点检和测定, 确定其测定值经常保证在基准值以内, 以预防质量不良, 并通过测定值的变化预测发生质量不良的可能性。”随着机器制造水平的不断提高, 特别是在批量生产中, 产品加工质量对设备的精度、性能的依赖性更大。质量维修这一新的维修方式的出现, 对保证产品质量具有更大的作用。

质量维修是通过对保证产品质量的重要因素 (如人、设备、材料、工艺方法、信息) 进行分析和管理的, 从而发现和消除因设备原因造成的产品缺陷, 使产品质量特性全部保持最佳状态, 以预防不合格产品的发生。在这里, 产品质量特性是指反映产品质量所用的各种技术参数, 如温度、速度、振动、精度保持性、安全性、可靠性、使用寿命、平均故障间隔期、能耗等, 其要求值都具体规定在产品质量标准上。

质量维修是根据可靠性工程的理论和方法, 应用了质量管理常用的排列图法、因果分析图法、直方图法、分层法、散布图法、统计分析表法等统计分析方法。

质量维修必须在以下前提条件才能使用: 设备是在自然劣化条件下发生的故障, 而不是受外界因素造成的强制劣化; 操作者对负责操作的设备具有足够的点检技能。

综上所述, 质量维修是把设备故障分析直接应用到产品质量分析上, 针对影响产品质量的重点项目, 从单台设备到零部件, 逐层深入分析, 找出造成产品质量不良的设备原因, 采取对策, 加以复原, 并建立常规的管理制度。这种做法, 具有全面性、系统性和现代科学根据。回顾改革开放以来中国维修体制的改革, 经历了维修与生产结合, 维修与经营结合的变革与充实, 取得了显著成果。当前, 中国机电产品的质量不能不令人担忧, 某些企业的领导对维修与产品质量的关系缺乏明确认识。质量维修方式从技术管理的软件角度出发, 有利于改进设备的技术状况, 保证产品质量, 针对性强, 也经济实用, 在机械制造企业中, 具有应用推广价值。

设备维修是一种投资, 它和企业经营总体经济效益有直接联系, 所以要按照衡量投资效益的投入、产出比来计算, 消除长期以来在工作中存在的导致效率降低的消极因素。

影响维修工作的重要因素如下。

① 设备维修性设计的优劣。维修性是“可修复系统、设备、元器件维修的难易程度或特性”。维修性是可靠性的组成部分, 维修性设计是可靠性设计必须考虑的因素。因此, 在产品设计阶段进行可靠性设计时, 就要考虑到设备使用时易于维修, 减少维修工作量, 缩短修理停机时间; 在满足产品性能精度及可靠性的前提下, 力求结构简单, 零件数量少, 采用积木式或插入式组件, 便于拆卸更换; 在关键部件备有监测装置, 以便及时发现设备异常的信息。提高维修设计水平往往需要在设备使用维修的工作实践中积累经验, 注意信息反馈并加以吸收和改进, 而维修性设计水平的提高, 又能使维修工作更趋方便, 两者相辅相成。

② 维修人员技术水平的高低。维修工作是一种技术性很强、兼有脑力和体力的劳动。不但要具有熟练的技能和长期实践中积累的经验, 还要有近代科学技术理论和知识作指导。例如, 在判明故障部位和原因时, 要应用故障物理理论和故障分析方法; 对高度自动化和机电一体化的高技术设备的维修, 要掌握好液压、气动、数控、数显技术; 进行科学的修理工作时, 要学会和运用修理工艺学; 开展零件修复工作, 采用堆焊、喷涂和刷镀工艺的修理工

作时,要懂得表面工程基础知识;预测故障发生时,要应用设备诊断技术;搞好设备润滑工作,要研究摩擦学理论……随着工厂装备技术水平的不断提高,维修工作也面临着很多尚未攻克的技术难关,这些都与设备部门对维修科学技术理论的研究工作不重视、不注意维修技术人员和维修工人的培训有关,这种情况必须迅速改变。

③ 维修组织系统及装备设施的完善程度。设备维修是工厂的后勤工作,这和战争一样,只有后勤措施得到巩固和完备,才能保证维修工作效率。维修组织大致分为集中制、分散制和混合制;修理工作方式分为本厂自行修理和外委修理;设备管理与设备维修单位的领导体制分为垂直领导与同属于厂部领导下的并列关系,所有这些都有各自的优点和缺点,究竟如何选择和配置,都要根据精简、效率和科学合理的原则,结合工厂的规模、车间分布的地理条件和生产条件来考虑,不宜生搬硬套,更不能以任何理由使机构和人员受到削弱,其结果只会使生产蒙受不应有的损失,这种情况是有过多次沉痛历史教训的。

维修工作虽然多半属于单项的和以手工劳动为主的,但仍需依赖完善的装备设施来保证,才能提高工作效率,缩短修理工期。机修车间(分厂)要配备必要的维修和修配件的加工设备,大中型工厂要有备件库和润滑站等设施,对高精度设备和数控设备要有精密的检验器具和测试设备等计量检测手段。配备时一定要考虑适用和经济,做到逐步完善,避免求大求全,不切实际。

本课程是机械专业及机电设备类专业的主干课程之一,该课程的任务是使学生系统地掌握设备维修与安装的基本知识和方法。其主要内容如下。

① 机械维修的基本知识:故障概念、分类、检测,维修制度等。

② 摩擦学的有关知识:摩擦、磨损、润滑。其中,摩擦与磨损放在机械维修的基本知识中简要介绍;机械润滑是机械维护的主要内容,将在第二章详细介绍。

③ 机械拆卸、装配、修复:这部分内容是机械修理的主要内容,主要介绍机械拆装工艺与方法,典型零件的拆装及常用的几种机械修复方法。

④ 机械安装:机械基础、机械安装工艺与方法。

本课程实践性较强,必须在学生有一定感性认识的基础上讲授,教学中应紧密联系现场实际;必须在学生有一定机械理论的基础上讲解,并联系有关机械设备类课程进行教学,但要注意分工,避免不必要的重复;必要时可将部分内容在生产实习中讲授。

# 第一章 机械维护与修理的基本知识

## 第一节 机械磨损

### 一、机械磨损的理论

两相互接触产生相对运动的摩擦表面之间的摩擦将产生阻止机件运动的摩擦阻力，引起机械能量的消耗并转化而放出热量，使机件产生磨损。

关于机件在摩擦情况下磨损过程的本质问题至今尚在探讨中，对摩擦、磨损曾有诸种学说，下面仅介绍目前常用的干摩擦“黏着理论”和“分子-机械理论”。

#### （一）黏着理论和分子-机械理论的一些假设

##### 1. 接触表面凹凸不平

两个物体相对运动的接触表面（即摩擦表面）有一定的粗糙度，无论怎样精密细致的加工、研磨、抛光，总是存在凹凸不平，如图 1-1 所示。不同加工方法时表面的最大粗糙高度见表 1-1。

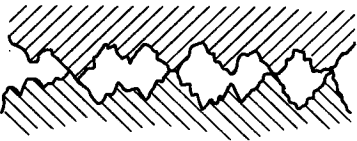


图 1-1 摩擦表面凹凸不平及其接触情况

表 1-1 不同加工方法时表面的最大粗糙高度

| 加工种类                                     | 最大粗糙高度/ $\mu\text{m}$ |
|------------------------------------------|-----------------------|
| 精车和精镗、中等精度的磨光、刮(0.5~3 点/ $\text{cm}^2$ ) | 6~16                  |
| 用硬质合金刀精车和精镗、精磨、刮(3~5 点/ $\text{cm}^2$ )  | 2.5~6                 |
| 用金刚石刀车光和镗光、超精磨                           | 1~2.5                 |
| 抛光、研磨、光磨                                 | $\leq 1$              |

##### 2. 真实接触面积很小

由于零件表面存在着凹凸不平，因此当两表面接触时，接触区就不是一个理想的平面，而是在某些个别点（微小面积）上发生接触。真实接触面积  $a$ （即在接触区域内，接触各点实际微小面积的总和，即  $\sum a_i = a$ ），远比接触区域或名义接触面积  $A$  小得多，即  $a \ll A$ 。其比值因接触材料的力学性能、接触表面的粗糙度和接触时垂直载荷的大小等情况的不同而不相同，其变动约在下式范围内，即

$$\frac{\sum a_i}{A} = \frac{a}{A} = \left( \frac{1}{10} \sim \frac{1}{10^5} \right) \quad (1-1)$$

##### 3. 真实接触面积上的压强很大

真实接触面很小，即使垂直载荷  $N$  很小的时候，在真实接触面积上，也将受到很大的压强。

#### （二）黏着理论

基于上述假设，当在很大的单位压力（压强）下，即使硬而韧的金属也将发生塑性变

形, 塑性变形接触点的应力, 等于金属的压缩屈服极限强度。这时, 金属开始塑性变形, 如同开始流动一样, 所以又将这时的压强称为流动压强, 用  $\sigma_s$  表示。真实接触面积  $a$  等于垂直载荷与流动压强之比, 即

$$a = \frac{N}{\sigma_s} \quad (1-2)$$

有摩擦时, 在接触点产生瞬时高温 (达  $1000^\circ\text{C}$  以上且可持续千分之几秒的时间), 引起两种金属发生“黏着”(冷焊); 当机件间有相对移动时, 黏着点将被剪掉, 使两金属产生“滑溜”。摩擦的产生, 就是由于黏着与滑溜交替进行的结果。这种过程使运动受到阻力, 其值等于各接触点被切断的阻力的总和, 即  $\sum F_i = F$ 。它是构成摩擦阻力的主要原因, 被称为摩擦力的剪切项, 其值等于剪切面积 (真实接触面积  $a$ ) 与材料剪切强度 ( $\tau_{\text{剪}}$ ) 的乘积, 即

$$F = a\tau_{\text{剪}} \quad (1-3)$$

此外, 该理论还认为, 当摩擦副表面较粗糙, 且两摩擦表面的硬度不同时, 则硬的尖点可嵌入软的表面, 在相对运动时, 部分表面金属也将被剪掉, 这是产生摩擦力的另一个原因, 称为摩擦力的粗糙项 (或刨削项), 用  $\tau_{\text{粗}}$  表示。当表面不太粗糙时, 粗糙项可忽略不计。这时摩擦系数为

$$f = \frac{F}{N} = \frac{a\tau_{\text{剪}}}{a\sigma_s} = \frac{\tau_{\text{剪}}}{\sigma_s} \quad (1-4)$$

即摩擦系数  $f$  等于剪切强度  $\tau_{\text{剪}}$  与屈服强度  $\sigma_s$  之比。

每当摩擦时, 接触点形成的黏着与滑溜不断相互交替的结果, 造成表面的损伤, 这就是磨损。

### (三) 分子-机械理论

分子-机械理论认为, 摩擦副接触是弹性与塑性的混合状态, 摩擦表面的真实接触部分在较大的压强作用下, 表面凸峰相互啮合, 同时相互接触的表面分子也有吸引力。在相对运动时, 摩擦过程一方面要克服表面凸峰的相互机械啮合作用, 另一方面还要克服分子吸引所产生的阻力的总和。

因此, 分子-机械理论所定义的摩擦系数 ( $f'$ ) 就是摩擦力  $F$  与垂直载荷  $N$  及分子间引力  $N_0$  之和的比值, 即

$$f' = \frac{F}{N + N_0} \quad (1-5)$$

或写成

$$F = f'(N + N_0) \quad (1-6)$$

该式称为摩擦二项式定律。摩擦时, 表面的相互机械啮合与分子之间引力的形成和破坏, 不断交替的结果就造成了磨损。

## 二、机械磨损的类型

### (一) 黏着磨损

根据黏着程度的不同, 黏着磨损的类型也不同。若剪切发生在黏着结合面上, 表面转移的材料极轻微, 则称“轻微磨损”, 如缸套与活塞环的正常磨损。当剪切发生在软金属浅层里面, 转移到硬金属表面上, 称为“涂抹”, 如重载蜗轮副的蜗杆的磨损。若剪切发生在软金属接近表面的地方, 硬表面可能被划伤, 称为“擦伤”, 如滑动轴承的轴瓦与轴摩擦的“拉伤”。当剪切发生在摩擦副的一方或两方金属较深的地方, 称为“撕脱”, 如滑动轴承的

轴瓦与轴的焊合层在较深部位剪断时就是撕脱。若摩擦副之间咬死不能相对运动则称为“咬死”，如滑动轴承在油膜严重破坏的条件下，过热、表面流动、刮伤和撕脱不断发生时，又存在尺寸较大的异物硬粒部分嵌入在合金层中，则此异物与轴摩擦生热，上述两种作用叠加在一起，使接触面黏附力急剧增加，造成轴与滑动轴承抱合在一起，不能转动，相互咬死。

## （二）磨料磨损

由于一个表面硬的凸起部分和另一表面接触，或者在两个摩擦表面之间存在着硬的颗粒，或者这个颗粒嵌入两个摩擦面的一个面里，在发生相对运动后，使两个表面中某一个面的材料发生位移而造成的磨损称为磨料磨损。在农业、冶金、矿山、建筑、工程和运输等机械中许多零件与泥沙、矿物、铁屑、灰渣等直接摩擦，都会发生不同形式的磨料磨损。据统计，因磨料磨损而造成的损失，占整个工业范围内磨损损失的 50% 左右。

由于产生的条件有很大不同，磨料磨损一般可以分为如下三种类型。

### 1. 凿削磨料磨损

机械的许多构件直接与灰渣、铁屑、矿石颗粒相接触，这些颗粒的硬度一般都很高，并且具有锐利的棱角，当以一定的压力或冲击力作用到金属表面上时，即从零件表层凿下金属屑。这种磨损形式称为凿削磨料磨损。

### 2. 碾碎式磨料磨损

当磨料以很大压力作用于金属表面时（如破碎机工作时矿石作用于颚板），在接触点引起很大压应力，这时，对韧性材料则引起变形和疲劳，对脆性材料则引起碎裂和剥落，从而引起表面的损伤。粗大颗粒的磨料进入摩擦副中的情况也与此相类似。零件产生这种磨损情况的条件是作用在磨料破碎点上的压应力必须大于此磨料的抗压强度。而许多磨料（如砂、石、铁屑）的抗压强度是较高的。因此把这种磨损称为高应力碾碎式磨料磨损。

### 3. 低应力磨料磨损

磨料以某种速度较自由地运动，并与摩擦表面相接触。磨料的摩擦表面的法向作用力甚小，如气（液）流携带磨料在工作表面做相对运动时，零件表面被擦伤，这种磨损称为低应力磨损。如烧结机用的抽风机叶轮及矿山用泥浆泵叶轮等的磨损，都属于低应力磨料磨损。

## （三）表面疲劳磨损

两接触面做滚动和滑动的复合摩擦时，在循环接触应力的作用下，使材料表面疲劳而产生物质损失的现象称为表面疲劳磨损。例如，滚动轴承的滚动体表面、齿轮轮齿节圆附近、钢轨与轮箍接触表面等，常常出现小麻点或痘斑状凹坑，就是表面疲劳磨损所形成的。

机件出现疲劳斑点之后，虽然设备可以运行，但是机械的振动和噪声会急剧增加，精度大幅度下降，设备失去原有的工作性能。因此，产品的质量下降，机件的寿命也要迅速缩短。

在滚动摩擦表面上，两摩擦面接触的地方产生了接触应力，表层发生弹性变形，在表层内部产生了较大的切应力（这个薄弱区域最易产生裂纹）。由于接触应力的反复作用，在达到一定次数后，其表层内部的薄弱区开始产生裂纹，同时，在表层外部也因接触应力的反复作用而产生塑性变形，材料表面硬化，最后产生裂纹。总而言之，是在材料的表面一层产生了裂纹。因为最大切应力与压应力的方向呈  $45^\circ$  角，所以，裂纹也都是与表面呈  $45^\circ$  角。在裂纹形成的两个新表面之间，由于有压力的润滑油的楔入，使裂纹内壁产生巨大的内压力，迫使裂纹加深并扩展，这种裂纹的扩展延伸，就造成了麻点和剥落。由此可见，接触应力是导致疲劳磨损的主要原因。

降低接触应力，就能增加抵抗疲劳磨损的强度，当然改变材质也可以提高疲劳强度。此

外, 润滑剂对降低接触应力有重要作用, 高黏度的油不易从摩擦面挤掉, 有助于接触区域压力的均匀分布, 从而降低了最高接触应力值。当摩擦面有充分的油量时, 油膜可以吸收一部分冲击能量, 从而降低了冲击载荷产生的接触应力值。例如某厂有两台 (传动功率为 200kW) 减速器, 其中一台先投入生产, 采用 30 号机械油润滑, 运行两个月后, 齿面就出现斑点; 第二台换用 28 号轧钢机油, 由于提高了用油黏度, 运行了一年半的时间未出现疲劳磨损。

#### (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, 使腐蚀和摩擦共同作用而导致零件表面物质的损失, 这种现象称为腐蚀磨损。

腐蚀磨损可分为氧化磨损和腐蚀介质磨损。大多数金属表面都有一层极薄的氧化膜, 若氧化膜是脆性的或氧化速度小于磨损速度, 则在摩擦过程中极易被磨掉, 然后又产生新的氧化膜且又被磨掉, 在氧化膜不断产生和磨掉的过程中, 使零件表面产生物质损失, 此即为氧化磨损。氧化磨损速度一般较小, 当周围介质中存在着腐蚀物质时, 例如润滑油中的酸度过高等, 零件的腐蚀速度就会很快。和氧化磨损一样, 腐蚀产物在零件表面生成, 又在磨损表面磨去, 如此反复交替进行而带来比氧化磨损高得多的物质损失, 此称为腐蚀介质磨损。这种化学-机械的复合形式的磨损过程, 对一般耐磨材料同样有着很大破坏作用。

### 三、机械磨损的一般规律

机器在运转中, 不同的构件由于磨损类型和工作条件不同, 磨损的情况也不一样。但是, 磨损的发展规律是共同的。试验结果表明, 机件的正常磨损过程大致可分三个阶段 (见图 1-2)。

#### (一) “跑合” 阶段 (曲线 $O_1A$ 段)

在这个时期内开始由于零件表面存在着加工后的不平度, 在接触点上引起高接触应力, 磨损速度很快, 曲线急剧上升。随着机械运转的时间延长, 不平度凸峰被逐渐磨损, 使摩擦表面的实际接触面逐渐增大, 磨损速度逐渐减慢, 曲线趋于 A 点时, 逐渐变得平缓。间隙由  $S_{\min}$  逐渐增大到  $S_0$ 。

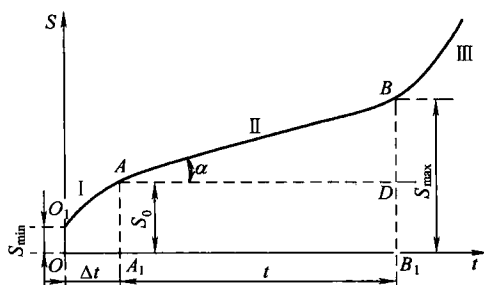


图 1-2 机械磨损发展的规律

#### (二) “稳定” 磨损阶段 (曲线 AB 段)

在这个时期内, 由于机械已经过“跑合”, 摩擦表面加工硬化, 微观几何形状改变, 从而建立了弹性接触的条件。同时在正常运转时, 摩擦表面处于液体摩擦状态, 只是在启动和停车过程中, 才出现边界摩擦和半干摩擦情况, 因此, 磨损速度降低而且基本稳定, 磨损量与时间成正比增加, 间隙缓慢增大到  $S_{\max}$ 。

#### (三) “急剧” 磨损阶段 (曲线 B 点以后部分)

经过 B 点以后, 由于摩擦条件发生较大的变化 (如温度急剧增加, 金属组织发生变化), 产生过大的间隙, 增加了冲击, 润滑油膜易破坏。磨损速度急剧增加, 致使机械效率下降, 精度降低, 出现异常的噪声和振动, 最后导致发生意外事故。

学习机械磨损发展规律的意义在于以下两个方面。

第一, 了解机件一般工作在“稳定”磨损阶段, 一旦转入“急剧”磨损阶段, 机件必须进行修理或更换, 机件在两次修理中间的正常工作时间  $t$  可由下列公式算出, 即

$$\tan \alpha = \frac{BD}{AD} = \frac{S_{\max} - S_0}{t} \quad (1-7)$$

$$t = \frac{S_{\max} - S_0}{\tan \alpha} \quad (1-8)$$

式中  $\tan \alpha$ ——磨损强度。

第二, 知道机械磨损发展过程是由自然 (正常的) 磨损和事故 (过早的、迅速增长的或突然发生意外的) 磨损组成。自然磨损是不可避免的现象, 事故磨损可以延缓, 甚至避免。要采取措施, 如提高机件的强度和耐磨性能, 改善机件的工作条件, 提高修理、装配的质量, 特别是对机件进行良好的润滑和维护, 从而减小磨损强度, 尽量缩短“跑合”时间, 达到增长机械正常工作时间, 即延长机器使用寿命的目的。

#### 四、机械磨损的影响因素

影响机械磨损的主要因素有零件材料、工作载荷、运动速度、温度、润滑、表面加工质量、装配和安装质量、机件结构特点及运动性质等。

##### (一) 零件材料对磨损的影响

零件材料的耐磨性主要取决于它的硬度和韧性。硬度决定其表面抵抗变形的能力, 但过高的硬度易使脆性增加, 使材料表面产生磨粒状剥落; 韧性则可防止磨粒的产生, 提高其耐磨性能。

经过热处理或化学热处理的钢材, 可以获得优良的力学性能, 提高机件的耐磨性。有时, 可用表面火焰淬火或高频淬火的方法使材料提高耐磨性。或者采用渗碳、渗氮、氰化的方法, 使钢的表面具有较高的硬度和耐磨性。

在组合机件中, 如轴承副中的转轴, 由于是需要加工的主要机件, 所以, 应采用耐磨材料 (如优质合金钢) 来制造; 对较简单的机件, 如轴承衬或轴瓦, 则选用巴氏合金、铜基合金、铅基或铝基合金等较软质材料 (又称减磨合金) 来制造, 以达到减小摩擦和耐磨的目的。

##### (二) 机件工作载荷对磨损的影响

一般讲, 单位压力越大, 机件磨损越加剧。除了载荷大小之外, 载荷特性对磨损有直接影响。如静载荷还是变载荷, 有无冲击载荷, 是短期还是长期载荷等。一般不应长期超负荷运转和承受冲击载荷。

##### (三) 机件运动速度对磨损的影响

机件运行时, 速度的高低、方向、变速与匀速、正转与反转、时开时停等, 都对磨损有不同程度的影响。一般情况是在干摩擦条件下, 速度越高磨损越快; 有润滑油时速度越高, 越易形成液体摩擦而减少磨损; 机器的启动频率越高, 机件的磨损亦越快。

##### (四) 温度、湿度和环境对磨损的影响

温度主要影响润滑油吸附强度。润滑油膜有相当高的机械稳定性, 但温度及化学稳定性较差, 当在高温和有化学变化时, 润滑油便失去吸附性能。

机件工作的周围环境若受到水湿、水汽、煤气、灰尘、铁屑或其他液体、气体的化学腐蚀介质等影响, 都将导致和加速机件的氧化和腐蚀磨损。

##### (五) 零件表面加工质量的影响

表面加工质量主要指机械加工质量, 包括宏观几何形状、表面粗糙度和刀痕方向。

###### 1. 宏观几何形状的影响

所谓宏观几何形状是指加工后实际形状与理想形状的偏差, 即加工精度, 如圆度、圆柱度、平行度和垂直度等, 宏观几何形状的偏差使零件表面载荷分布不均匀, 容易造成局部地方严重磨损。

###### 2. 表面粗糙度的影响

图 1-3 所示为试验测得的磨损量与表面粗糙度的关系曲线。在每种载荷下有一个最合理

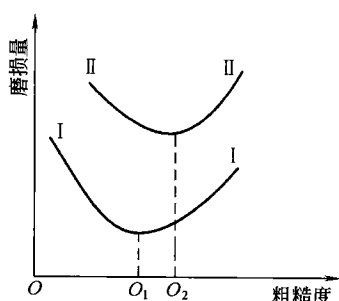


图 1-3 零件磨损量与表面粗糙度的关系

I—轻载；II—重载

的粗糙度，其磨损量最小，轻载的合理粗糙度（ $O_1$ 、 $O_2$  点）要比重载小；在相同的载荷下，一般讲，粗糙度越小，磨损越小，但超过合理点  $O_1$ 、 $O_2$  后磨损又会逐渐上升。这是因为过于光洁使接触表面增大，分子间吸引力增强，因而产生黏着磨损的可能性也就增大。

### 3. 刀痕方向的影响

刀痕方向对磨损影响较大，如果两摩擦表面的刀痕方向是平行的，而与运动方向一致，则磨损小。如果两摩擦表面的刀痕方向平行，但与运动方向垂直，则磨损大。如果刀痕方向与运动方向交叉时，则磨损在上述二者之间。

### （六）润滑对磨损的影响

润滑对减少机件的磨损有着重要的作用。例如，液体润滑状态能防止黏着磨损；供给摩擦副洁净的润滑油可以防止磨料磨损；正确选择润滑材料能够减轻腐蚀磨损和疲劳磨损等。在机件进行良好的润滑摩擦副中保持足够的润滑剂，可以减少摩擦副金属与金属的直接摩擦，降低功率消耗，延长机件使用寿命，保证设备正常运转。

### （七）装配和安装质量对磨损的影响

机件的装配质量对磨损影响很大，特别是配合间隙不应过大或过小。当间隙过小时，不易形成液体摩擦，容易产生高的摩擦热，而且不易散出，故易产生黏着磨损和摩擦副咬死现象。当间隙过大时，同样不易形成液体摩擦，而且会产生冲击载荷加剧磨损。装配好的部件或机器也应正确的安装。如果安装不正确，将会引起载荷分布不均匀或产生附加载荷，使机器运转不灵活，产生噪声和发热，造成机件过早的磨损。

### （八）机件运动副结构特点及运动性质对磨损的影响

现以轴承副为例来说明机械运动副结构特点及运动性质对磨损的影响。图 1-4（a）所示

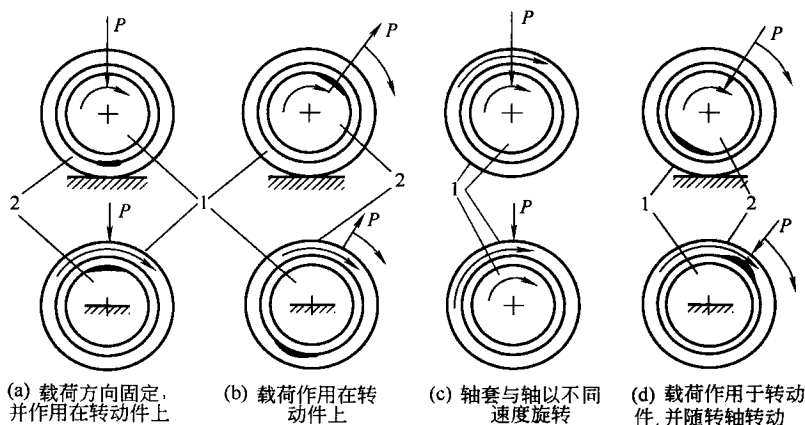


图 1-4 轴承副在不同的运动性质与不同的载荷方向作用下摩擦表面磨损的分布

1—均匀磨损；2—局部磨损