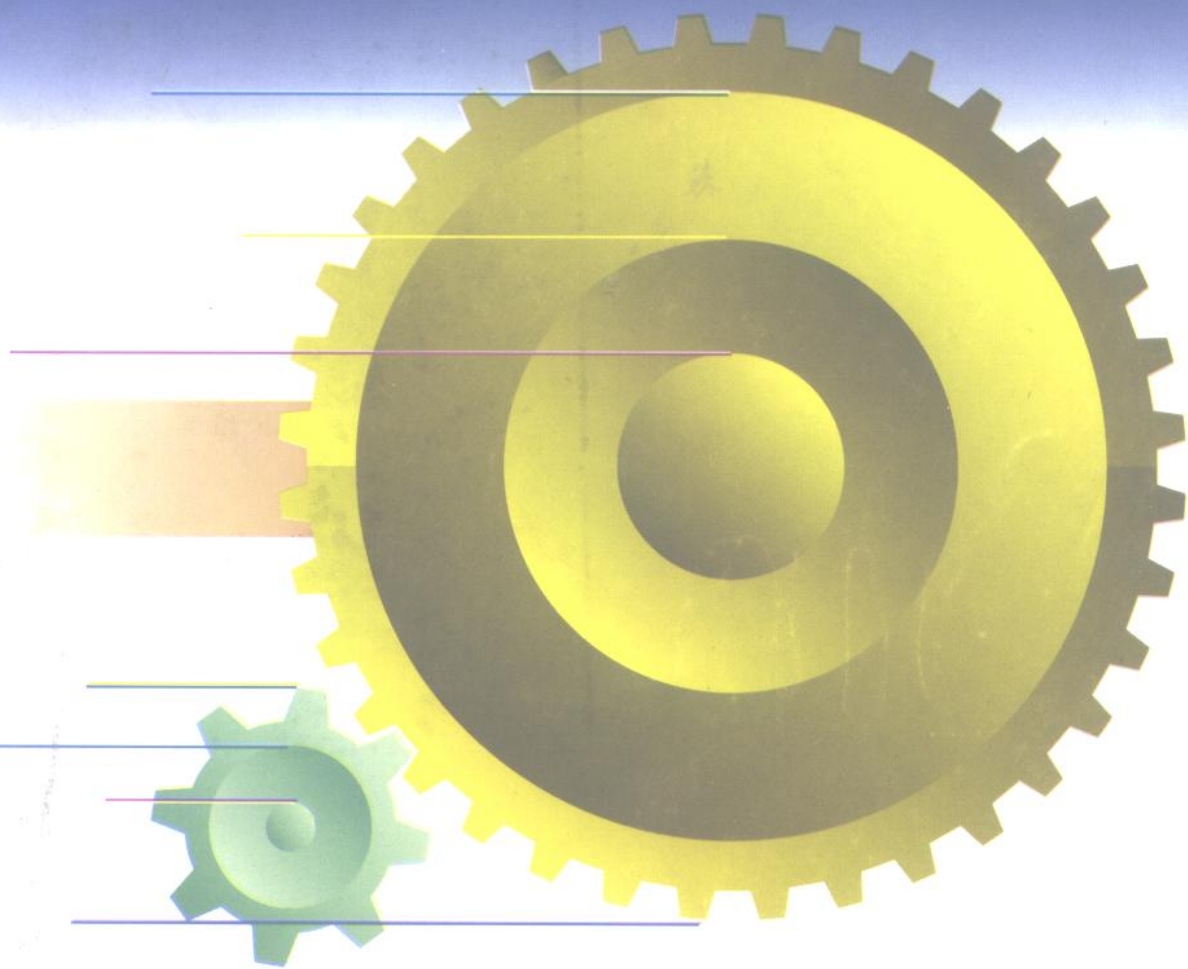


高等学校教材

# 机械设备 维修工艺学

费敬银 主编



西北工业大学出版社

高等学校教材

# 机械设备维修工艺学

费敬银 主编  
费敬银 严卫东 刘学元 编

西北工业大学出版社

1999年1月 西安

**(陕)新登字 009 号**

**【内容简介】** 本书针对机械设备在长期使用中,由于磨损、变形、腐蚀等所导致的性能下降和故障,以设备的基本零件为对象,深入浅出地论述了导致故障的原因与特性,重点介绍了实用的维修技术和国内外最新的研究成果。本书用作高等学校教材,也可供设备维修人员培训和从事设备维修的工程技术人员使用。

高等学校教材  
**机械设备维修工艺学**

费敬银 主编  
责任编辑 冯学廉  
张近乐  
责任校对 齐随印

\*

©1999 西北工业大学出版社出版发行  
(邮编:710072 西安市友谊西路127号 电话:8491147)  
全国各地新华书店经销  
西北工业大学出版社印刷厂印装  
ISBN 7-5612-1112-0/TH·56(课)

\*

开本:787毫米×1092毫米 1/16 印张:10.625 字数:256千字  
1999年1月第1版 1999年1月第1次印刷  
印数:1—2 000册 定价:13.00元

---

购买本社出版的图书,如有缺页、错页的,本社发行部负责调换。

# 前 言

机械设备是企业固定资产的重要组成部分,随着科学技术的发展,其在国民经济中占有越来越重要的地位。实践证明,设备的技术指标、工作性能对产品生产率、质量、成本、安全和环保等有决定性的作用。应用合理、先进的维修、保养与管理技术是充分发挥设备潜力的关键。由于机械设备在运行或停机过程中不可避免地存在磨损、变形、断裂、腐蚀等现象,因而必须适时进行检修、保养,使其长期处于最佳工作状态。

本教材针对构成机械设备基本零件的失效形式介绍具体的维修技术及工艺。全书共分两篇,共十一章。第一篇简要介绍零件的失效方式,第二篇重点介绍维修技术及工艺,并对液压系统构件的维修做了简要的介绍。

本教材的绪论及第一、二、三、四、八、九、十章由费敬银副教授编写,第五、六、七章由严卫东编写,第十一章由刘学元副教授编写。

在本教材的编写过程中陈德元教授提出了许多指导性的建议,秦熊浦教授对编写工作给予了极大的支持,谨此致谢。

本书由西安公路交通大学董大军副教授认真审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此深表谢意。

近年来,关于维修技术的开发、研究、应用成果很多,在编写过程中,我们力求把一些重要的内容反映出来,但由于时间和水平的限制,书中难免会有不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

1998年6月

# 目 录

绪 论	1
<b>第一篇 机械零件的失效及防止</b>	
第一章 零件磨损失效	3
第一节 摩擦与磨损	3
第二节 磨损的类型	6
第三节 零件磨损的特性	10
第四节 减轻磨损的措施	11
第二章 零件变形失效	13
第一节 变形的基本形式	13
第二节 塑性变形对金属组织和性能的影响	18
第三节 零件冷却过程中的应力和变形	20
第四节 零件在使用中变形的原因	21
第五节 减轻变形危害的措施	22
第三章 零件断裂失效	24
第一节 断裂的分类	24
第二节 断裂的基本原理	27
第四章 金属零件腐蚀失效	33
第一节 金属零件的化学腐蚀	34
第二节 金属零件的电化学腐蚀	37
<b>第二篇 机械零件修复技术</b>	
第五章 机械加工修理技术	41
第一节 修理尺寸法	41
第二节 附加零件修理法	44
第三节 局部更换修理法	46
第六章 焊接维修技术	48
第一节 常用金属件的补焊	48

第二节	钎焊 .....	53
第三节	堆焊 .....	54
第四节	塑料的补焊 .....	58
<b>第七章</b>	<b>热喷涂技术 .....</b>	<b>64</b>
第一节	概述 .....	64
第二节	热喷涂材料 .....	67
第三节	氧-乙炔火焰喷涂 .....	70
第四节	氧-乙炔火焰粉末喷焊 .....	74
第五节	电弧喷涂 .....	75
第六节	等离子喷涂和喷焊 .....	76
第七节	爆炸喷涂 .....	79
<b>第八章</b>	<b>电镀修复技术 .....</b>	<b>81</b>
第一节	电镀基本理论 .....	81
第二节	电刷镀修复技术 .....	85
第三节	低温镀铁修复技术 .....	111
第四节	镀铬修复技术 .....	122
<b>第九章</b>	<b>其它修复技术 .....</b>	<b>130</b>
第一节	变形零件的校正 .....	130
第二节	金属扣合 .....	131
第三节	粘补与粘接 .....	132
第四节	堵漏技术 .....	143
<b>第十章</b>	<b>零件修复工艺的选择 .....</b>	<b>146</b>
第一节	选择修复工艺的原则 .....	146
第二节	确定零件修复和修理工艺的方法与步骤 .....	148
<b>第十一章</b>	<b>液压元件修理工艺 .....</b>	<b>149</b>
第一节	概述 .....	149
第二节	液压泵的修理 .....	151
第三节	液压控制阀的修理 .....	156
第四节	液压缸的修理 .....	159
第五节	液压辅件的修理 .....	161
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>164</b>

## 绪 论

机械设备作为现代化的生产工具在各行各业都有广泛的应用。随着生产力水平的提高,设备本身工作状态的好坏,对企业的产品生产率、质量、成本、安全、环保、营销等起着决定性的作用。

在“无维修设计”的理想未真正成为现实之前,机械设备无论设计和制造得多么完善,其在运行或停机过程中都不可避免地由于磨损、疲劳、断裂、变形、腐蚀、老化等原因造成设备性能的劣化以致出现故障。设备性能指标下降乃至出现故障,会使其不能正常运行,或使运行成本增加,也可能造成灾难性的后果。

因此,减缓机械设备劣化的速度,排除故障、恢复设备原有的性能,需要设备维修工作者掌握一整套系统的、科学的维护和修理设备的技术和方法。

机械设备维修工艺学是以机械设备为对象,探索设备出现性能劣化的根源,研究并寻找减缓和防止设备性能劣化的技术及方法,从根本上恢复设备的使用性能并使其具有更长的使用寿命。

过去很长一段时间,维修工作的重要性并未被人们所重视,维修技术被看作是不得已而为之的技艺,更谈不上科学地系统地研究、开发使用维修技术。

直到本世纪 30 年代,随着工业进程的发展,机械设备的大量使用,人们才从实践中认识到维护维修的普遍性及重要性,并将各种新技术应用于维修领域,从而使维修技术成为一门新的学科。

编写本教材的指导思想在于:

(1) 在取材于国内成熟的实用维修技术的基础上,力争将国内外最新的维修科研成果和应用情况介绍给读者,使之既能熟悉和应用实用维修技术,又能了解维修技术的发展情况。

(2) 以机械设备为维修对象,以典型零部件为代表,有针对性地选择维修方法,从而达到举一反三、以点带面,把每种维修技术的特点和适用性尽可能多的表现出来,使之具有广泛的适应性。本教材不涉及机械设备的电气类故障、化工类等设备故障的分析及维修技术。

(3) 为了使维修技术更具有科学性和针对性,做到对症下药,有必要对机械设备的失效机理、维修原理作简要的介绍,因此该教材既包括失效分析,又包括维修技术。

(4) 各章之后均附有思考题,以帮助读者掌握各章的基本内容。

(5) 维修技术是实践性极强的技术,在教学计划安排上应加强实验课的教学内容。

(6) 每一种失效方式和维修技术的本身有其相对的独立性,这对教和学都带来了方便,使用者可根据实际情况任意选择其中的教学内容。每一种失效方式和维修技术又有其自身的深度和广度,这也为深入研究失效机理、开发应用维修技术展示出广阔的前景。各种维修技术的联合使用,高科技向各种维修技术中的渗透也极大地丰富了维修的内容。但是,由于我们对新内容的学习、吸收和实践不够,加上目前在失效分析和应用维修技术上还存在很多尚未统一的认识,本书难免挂一漏万,错误和缺点在所难免,欢迎读者批评指正。





# 第一篇 机械零件的失效及防止

## 第一章 零件磨损失效

机械设备的工作性能随使用时间的延长而下降,当其工作性能指标超出了规定的范围即出现了故障。故障的表现形式多种多样,发生的原因也各不相同,除人为因素造成的故障外一般故障形式多为磨损、变形、断裂和腐蚀等,其中因磨损而出现的故障形式最为常见。本章重点讨论与磨损有关的基本内容。

机械设备在工作过程中,有相对运动零件的表面上发生尺寸、形状和表面质量变化的现象称为磨损。

对一台大修的发动机进行检测可以发现,凡有相对运动、相互摩擦的零件(如缸套、活塞、活塞环、曲轴、主轴承、连杆轴承等)都有不同程度的磨损。磨损的速度不仅直接影响设备的使用寿命,而且还造成能耗的大幅度增加,据估计,在一些工业发达的国家,磨损造成的能源损失占能耗的三分之一左右。因此,研究摩擦与磨损具有重大的经济价值。

### 第一节 摩擦与磨损

#### 一、摩擦的基本特征

相接触的物体有相对运动或有相对运动趋势时所表现出阻力的现象称为摩擦,摩擦时所表现出阻力的大小叫做摩擦力。摩擦与磨损总是相伴发生的。而摩擦的特性与磨损的程度密切相关,因此对摩擦、磨损与润滑的研究已经成为一门新的学科——摩擦学。

关于摩擦本质的探索已经进行了数百年,机械—分子学说常被用来解释摩擦的实质。这种学说认为,摩擦力是由机械阻力和分子引力构成。对于粗糙的接触面,机械阻力是摩擦力的主要构成部分,对于光洁的表面,分子引力是摩擦力的主要构成部分。

任何表面都存在不平性,当不平滑的两个表面接触时,表面上的凹凸相互咬合,要想使之相对滑动,必然沿着凸部反复地被抬起,或者使凸部变形或破碎,此时所表现出的阻力称为机械阻力。很显然,该阻力的大小与表面粗糙程度密切相关。

当表面粗糙度小到一定程度后,摩擦面愈光洁,两表面相互接触面积就愈大,此时短程力——分子引力愈大,摩擦力也就愈大。

机械阻力和分子引力的大小是此消彼涨的,表面粗糙时,机械阻力大,分子引力小;表面光洁时,分子引力大,机械阻力小。因此在确定载荷条件下,常常存在一个最佳的粗糙度。表面粗糙度高于或低于最佳粗糙度,摩擦力都是增大的。

## 二、摩擦的种类

摩擦的种类有很多,从不同的角度分析问题,就有不同的分类方法,其中常见的是按运动方式或润滑状况来分类的。

按摩擦副的运动方式可将摩擦分为三类,即滑动摩擦、滚动摩擦和混合摩擦。

摩擦副之间作相对滑动时所表现出的摩擦称为滑动摩擦。而摩擦副之间作相对滚动时所表现出的摩擦称为滚动摩擦。摩擦副之间既有相对滑动,又有相对滚动时所表现出的摩擦称为混合摩擦,如齿轮啮合面之间的摩擦就是混合摩擦。

滑动摩擦时所表现出阻力的大小主要与摩擦副的材质、表面状态、润滑介质、载荷大小等有关。滚动摩擦时所表现出的摩擦力的大小不仅与摩擦副的材质、表面状态、润滑介质、载荷大小有关,而且还与载荷作用下摩擦副所产生的变形量有关。

按摩擦副间的润滑状态可将摩擦分为五类:即干摩擦、半干摩擦、边界摩擦、半液体摩擦和液体摩擦。

### (一) 干摩擦

摩擦副表面间完全没有润滑介质或其它杂质存在时所表现出的摩擦称为干摩擦。如离合器摩擦片与飞轮和压板之间的摩擦、制动蹄片与制动鼓之间的摩擦都接近于干摩擦。除了某些场合要求有大的摩擦力以实现特殊的目的外,大多数的摩擦副之间是不希望出现干摩擦的,在干摩擦状态下工作的零件,最易导致磨损失效。

### (二) 液体摩擦

摩擦副两表面间完全被润滑介质隔开,彼此间不发生直接接触的摩擦叫做液体摩擦,如图1-1所示。

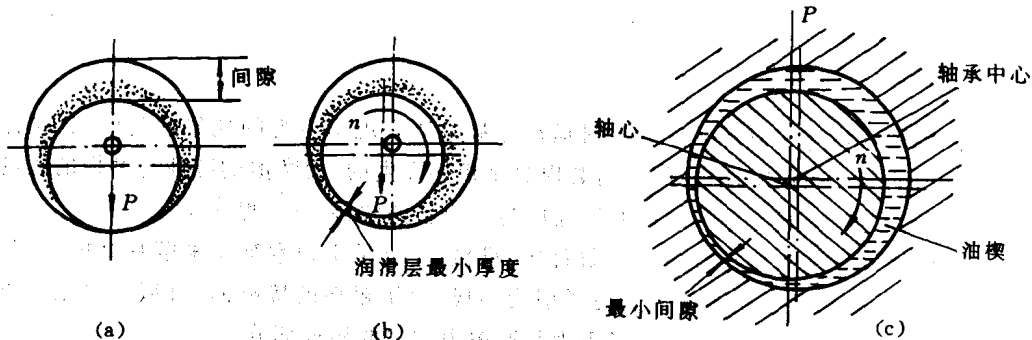


图1-1 液体摩擦图示

图1-1示意了形成液体摩擦的过程。图1-1(a)为静止状态,轴处在最低位置。当轴由静止开始转动时,随着转速的增加,润滑油在轴的带动下具有一定的流动速度,开始把轴挤向左方,润滑油流入轴的底部,使轴抬高如图1-1(b)所示;当转速进一步提高时,轴向左上方移动的量更大,转速更高时,轴的中心线与轴承的中心线趋于重合图1-1(c)。这种轴由原来的最低位置到最后上浮起来的过程就是形成液体摩擦的过程。

在液体摩擦状态下,摩擦绝大部分发生在润滑介质的内部,零件表面之间不接触,所以此时磨损很小。摩擦力主要存在于有相对运动的油层之间,力的大小取决于油层的相对运动速

度、油的粘度和摩擦面积。从减小磨损的目的出发,我们总希望摩擦副之间的摩擦方式是液体摩擦,但液体摩擦的产生及保持是有条件的。条件改变,摩擦方式也随之而变。

### (三) 边界摩擦

摩擦副两表面间只有一层很薄(0.1 μm 以下)的连续油膜存在时所产生的摩擦称为边界摩擦。摩擦面间由于有高强度耐压油膜的存在,使摩擦面不能直接接触、隔断了短程力(分子引力)的作用,使摩擦力减少很多,但机械阻力并未消除。

### (四) 半干摩擦

摩擦副两表面间部分被很薄的油膜分开,部分直接接触,这种介于干摩擦和边界摩擦之间的一种摩擦方式称为半干摩擦。其特性取决于边界摩擦和干摩擦所占的比例。

### (五) 半液体摩擦

摩擦副之间一部分被润滑介质所隔开,另一部分由薄的油膜隔开。而所承载荷的一部分由油层承担,另一部分由接触的表面所承担。这种介于液体摩擦与边界摩擦之间的一种摩擦形式称为半液体摩擦,其性质取决于液体摩擦与边界摩擦所占的比例。

上述各种摩擦方式中,以干摩擦具有最大的摩擦力和磨损速度,液体摩擦具有最小的摩擦力和磨损速度。实际存在的摩擦形式多为半干摩擦、边界摩擦、半液体摩擦。这五种摩擦形式随使用条件的变化而发生变化,有时会发生相互转化。如在正常运转条件下,轴与轴承之间在液体摩擦条件下工作,其转速的下降,会使摩擦形式发生变化,出现半液体摩擦。启动时可能是边界摩擦,甚至存在半干摩擦。

### (六) 液体摩擦形成实例(轴和轴承之间液体摩擦的形成过程)

根据流体动力学原理可知,几何形状正确的轴,以一定的间隙装在同样具有几何形状正确的轴承中,当配合间隙( $\delta$ )、润滑油的粘度( $\eta$ )、载荷( $p$ )及组合构件的尺寸保持不变时,轴在轴承中的位置,仅与轴的转速( $n$ )有关。轴与轴承之间的最小间隙  $h_{\min}$  可用下式表达

$$h_{\min} = \frac{d^2 n \eta}{18.36 p \delta c} \quad (1-1)$$

式中  $d$ ——轴的直径,mm;

$n$ ——轴的转速,r/min;

$\eta$ ——润滑油的动力粘度,Pa·s;

$\delta$ ——轴与轴承的配合间隙,mm;

$c$ ——校正系数;

$p$ ——轴颈单位投影面积上的载荷,N/m<sup>2</sup>, $p$ 可表示为  $p = \frac{W}{dL}$ 。

其中  $W$ ——轴承承受的总载荷,N;

$L$ ——轴与轴承配合长度,m。

### (七) 形成动压液体摩擦的必要条件

若以  $R_{\text{轴}}$ ,  $R_{\text{轴承}}$  分别表示轴及轴承的粗糙度,则形成液体摩擦的必要条件是

$$h_{\min} \geq R_{\text{轴}} + R_{\text{轴承}}$$

形成液体摩擦后,摩擦副表面间充满一定厚度的润滑油,摩擦副不直接接触,载荷由油层承担。此时,摩擦力表现为具有不同速度油层间相对运动时的液体摩擦力。其大小可用下式表示

$$F = \eta \frac{AV}{h} \quad (1-2)$$

式中  $F$ ——摩擦力, N;  
 $\eta$ ——润滑油动力粘度, Pa·s;  
 $A$ ——摩擦面表面积, m<sup>2</sup>;  
 $V$ ——轴相对于轴承运动的线速度, m/s;  
 $h$ ——润滑油油层厚度, m。

润滑油内部摩擦产生的热会使油的粘度( $\eta$ )下降,这可能导致摩擦状况的改变。这一结果可以用轴和轴承之间的摩擦特性为例来说明,由式1-1可知,转动着的轴与轴承之间的最小间隙 $h_{\min}$ 与油的粘度( $\eta$ )成正比,在其它条件不变的情况下,油温越高,粘度( $\eta$ )越低,最小间隙( $h_{\min}$ )越小。当最小间隙小于摩擦副的表面粗糙度之和(即 $h_{\min} < R_{\text{轴}} + R_{\text{轴承}}$ )时,摩擦特征由液体摩擦向半液体摩擦的转变,摩擦力越来越大,磨损越来越严重。摩擦产生的热使油温继续上升,油的粘度( $\eta$ )进一步下降,磨损进一步加剧,进入一种恶性循环状态。另外,油温升高,还会使油的其它性能恶化。因此,减少摩擦热和创造良好的散热条件是非常重要的。

#### (八) 最佳配合间隙( $\delta_{\text{最佳}}$ )的确定

实践证明,在形成液体摩擦条件下,当 $h_{\min} = \delta/4$ 时,摩擦力最小,此时轴与轴承的间隙称为最佳配合间隙( $\delta_{\text{最佳}}$ ),由式1-1可得

$$\frac{\delta_{\text{最佳}}}{4} = \frac{\eta n d^2}{18.36 \delta_{\text{最佳}} \rho c} \quad (1-3)$$

$$\delta_{\text{最佳}} = 2d \sqrt{\frac{\eta n}{18.36 \rho c}} \quad (1-4)$$

应当指出,这里所给出的表达式是在假定摩擦副中油的粘度和温度不变、载荷恒定等条件下导出的,实际情况可能与假设不尽相同,实际使用时应加以修正。

## 第二节 磨损的类型

设备在工作过程中,摩擦副的表面间发生一系列的物理、化学和机械的变化,如局部高温、形成氧化膜或其它化合物膜、材料的转移、润滑剂性质的变化等。根据导致磨损的主要原因,可将磨损类型分为以下几类。

### 一、磨料磨损

磨料磨损的一般定义是,由于摩擦副的一个表面硬的凸起部分和另一表面接触,或者两摩擦面间存在着硬的质点,在发生相对运动时,两个表面中的一个表面或两个表面的材料发生转移的磨损现象称为磨料磨损。

#### (一) 磨料磨损的机理

磨料与零件表面作相对运动时,作用在磨料上的力可以分解为垂直于表面的分力和平行于表面的分力,力的分配比例不同,磨损的形式也有所不同。

垂直于表面的分力使磨料嵌入表面,对于塑性好的材料的表面像打硬度一样产生大量密集的压痕,反复作用后,产生疲劳而破坏。对于脆性材料、表面不发生变形就产生脆性破坏。

平行于表面的分力使磨料产生切向运动,导致表面被刻划、切削而留下沟槽。对于塑性材料,磨料切削会在摩擦表面上切下一条切屑。对于脆性材料,磨料切削一次就从表面上切下许多碎屑。

磨料磨损是一种常见的磨损形式,其磨损速率非常大。是农业机械、矿山机械、建筑机械、工程机械设备的主要破坏形式。如一台在多砂石地区工作的推土机,仅工作几十小时后发动机就不能正常工作了。拆开检查发现缸套严重磨损,进气管内残存许多砂粒,润滑油极脏。查其原因发现,进气管接头卡损坏,使空气未经滤清而进入气缸,从而导致了严重的磨料磨损。

## (二) 影响磨料磨损的主要因素

### 1. 磨料粒度对磨损量的影响

用不同粒度的同一种磨料对不同金属作磨损速率试验发现,金属的磨损量均随磨料尺寸的增大而增加,当磨料尺寸增大到一定尺寸(称之为临界尺寸)以后,磨损速率保持不变。

### 2. 磨料的几何性质对磨损量的影响

棱角尖锐的磨料在摩擦面上滑动时,对表面的切削比圆滑磨料强,因此磨损速率高。当磨料被磨钝后,磨损速率下降,若磨料被磨碎,则磨损速率又会增加。

### 3. 磨料硬度对磨损量的影响

磨料的硬度远远超过零件的硬度,则磨损速率与磨料硬度的关系不大。磨料硬度与零件硬度相当,磨损速率与硬度有关。

如果磨料的硬度低于零件的硬度,磨损量与两者的硬度差有关,差值增大,磨损速率下降。如玻璃磨料存在于摩擦副中,会导致磨损,若提高零件硬度,磨损会减轻。

如果磨料硬度略高于零件硬度,则磨损严重,两者硬度差减小,磨损减小。因此,用表面强化的办法使零件的硬度达到或超过磨料的硬度,可以提高零件的耐磨性。但高硬度的材料、韧性下降,脆性增加,会带来其它的不良后果。

### 4. 压力对磨损的影响

对于磨料磨损来说,磨损速率与压力成正比。对于用同样材料制造的零件,压力减小一半,寿命提高一倍。因为压力减小,磨料嵌入深度减小,作用在表面上的力也就减小,所以磨损速率下降。

## (三) 减轻磨料磨损的措施

磨料磨损是目前造成机械工作性能下降以至出现故障的主要原因之一。减轻磨料磨损的常用方法如下。

### 1. 减少磨料的进入

配备高效、高容的空气滤清器及燃油、机油滤清器。

增加用于防尘的密封装置如毡圈密封件等。

在润滑系统中装入吸铁石、集屑房及油污染程度指示器。

经常清理更换空气、燃油、机油滤清装置。

### 2. 增强零件的抗磨性

用热处理和表面处理的方法改善零件材料的性质,提高表面硬度,尽可能使表面硬度超过磨料的硬度。

选用耐磨性能好的材料。对于要求耐磨又有冲击载荷作用的零件,可采用中碳钢淬火,低温回火,得到马氏体钢的办法使零件既具有耐磨性,又具有较好的韧性。

选用一硬一软的摩擦副,使磨料被软材料所吸收,减少磨料对重要、价高材料的磨损。

对于精度要求不是非常高的零件,可用在工作面上堆焊耐磨合金的办法以提高其耐磨性。

应当注意的是在磨料磨损和腐蚀作用共存的摩擦副中,仅用提高摩擦副的硬度,而较少考虑提高耐蚀性的情况下,往往会使磨损加剧。如通过热处理或选用中高碳淬火钢作酸性泥砂泵的耐磨材料,其磨损速率比低硬度耐蚀性较好材料的磨损速率更大。

## 二、粘着磨损

构成摩擦副的两个摩擦面,在相对运动时,由于粘着作用,使一个表面上的材料转移到另一个表面上所引起的磨损称为粘着磨损。

### (一) 粘着磨损机理

摩擦副在重载条件下工作,由于润滑不良、相对运动速度高、摩擦产生的热量来不及散掉,摩擦副表面产生极高的温度,材料表面强度降低,使承受高压的表面凸起部分相互粘着,继而在相对运动中被撕裂下来,使材料从强度低的表面上转移到材料强度高的表面上,造成摩擦副的灾难性破坏,如咬死或划伤。

### (二) 影响粘着磨损的主要因素

#### 1. 摩擦副表面状态对磨损量的影响

摩擦表面洁净,无吸附膜,易发生粘着磨损。金属表面经常存在吸附膜,当有塑性变形后,金属滑移,吸附膜被破坏,或者温度升高(一般认为达到 100 ~ 200 °C 时)吸附膜也会破坏,这些都易导致粘着磨损的发生。为了减轻粘着磨损的发生,应根据其工作条件(载荷、温度、速度等),选用适当的润滑剂,或在润滑剂中添加改性物质,如添加极压剂等,以建立必要的润滑条件。

#### 2. 摩擦副材料表面成分与组织对磨损量的影响

构成摩擦副的两摩擦表面的材料相互间形成固溶体的趋势,直接和粘着磨损有关。两者愈易形成固溶体或金属间化合物,愈容易发生粘着磨损。所以,同类金属或原子结构、晶体结构相近的材料,比性质有明显差异的材料构成的摩擦副更易发生粘着磨损。因此,选用性质差异大的材料构成摩擦副,是降减低粘着磨损的有效途径。在摩擦副的一个表面上覆着铅、锡、银、铜或者软的合金都可以提高抗粘着磨损的能力。如巴氏合金等常用作轴承衬瓦的表面材料,就是为了提高其抗粘着磨损的能力。

## 三、疲劳磨损

摩擦副材料表面上局部区域在循环接触应力作用下产生疲劳裂纹,由于裂纹扩展并分离出微片和颗粒的一种磨损形式称为疲劳磨损。根据摩擦副之间的接触和相对运动方式可将疲劳磨损分为滚动接触疲劳磨损和滑动接触疲劳磨损两种形式。

### (一) 滚动接触疲劳磨损机理

滚动轴承、传动齿轮等有相对滚动摩擦副表面间出现的麻点和脱落现象都是由滚动接触疲劳磨损造成的。其特点是经过一定次数的循环接触应力的作用,麻点或脱落才会出现。

实际上,纯滚动疲劳磨损是比较少见的,大多数情况下,滚动过程中总含有滑动成份。滑动引起的剪切应力与滚动时的法向正应力共同作用,使最大应力的方向和大小有很大的变化,引起疲劳裂纹的萌生和扩展方式也大不相同。一般来说可能有以下三种情况。

### 1. 裂纹萌生于表面层内并逐渐扩展

对于滚动接触面润滑条件优良、摩擦力小、表面光滑的摩擦副,由于最大应力周期性地作用于距表面一定深度处,裂纹多萌生于表面层内,裂纹沿最大应力方向或内部缺陷方向发展,当裂纹扩展至摩擦表面后形成磨屑而脱落。

### 2. 裂纹萌生于摩擦表面并逐渐扩展

在滚动兼有滑动的摩擦副(如齿轮的啮合)间,在最大接触应力作用下,表面首先产生局部塑性变形,逐渐出现裂纹并向内扩展。润滑条件差,表面粗糙度大的摩擦副,当裂纹扩展到一定深度,由于次生裂纹或内部缺陷的存在,使裂纹改变走向,最终折向表面而导致金属材料形成磨屑而脱落。

### 3. 裂纹萌生于表面硬化层与心部的过渡区并逐渐扩展

对于渗碳,表面淬火等经过表面强化处理的摩擦副,裂纹的萌生和扩展往往并不在最大应力处,而是在表面硬化层与心部交界的过渡区。过渡区裂纹发展的特点是先平行于表面扩展一段后,再垂直或倾斜于接触表面向金属表面扩展。先以小麻点剥落,然后迅速呈大块剥落,形成表面压碎现象,剥落深度大,剥落块也大。当硬化层深度不合理、心部强度太低、过渡区存在不利的残余应力时,容易在过渡区萌生裂纹。

## (二) 滑动接触疲劳磨损机理

以前,对于滑动接触疲劳磨损的研究不如滚动接触疲劳磨损研究的多。现在逐步引起了研究者的重视,有些学者还特别强调在滑动接触摩擦过程中疲劳的作用。关于滑动疲劳磨损,一般认为是按以下过程进行的。

任何固体摩擦表面都存在宏观或微观的不平性和接触的不连续性。作用于摩擦表面上法向载荷会使表面产生压平或压入,触点区产生相应的应力和应变,摩擦运动时的反复作用造成了触点处结构、应力状态的不均匀和应力集中,从而造成裂纹的萌生与扩展,最终使部分表面材料以微粒形式从表面脱落,形成磨屑。

按照上述观点可知,在一部分的滑动摩擦中,疲劳过程是主要的,它比纯滚动接触条件下的接触疲劳磨损要强烈得多。当摩擦副的几何参数、机械性能物理化学特性、环境等参数不同时,滑动摩擦也可以表现出其它形式磨损的特征。

## (三) 影响接触疲劳磨损的主要因素

接触疲劳磨损是通过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

钢中非金属夹杂物的存在易引起应力集中,在这些夹杂物的边缘形成裂纹,从而使疲劳磨损易于发生。

材料的组织状态、内部缺陷等对磨损也有重要的影响。通常晶粒均匀、细小、碳化物细小且分布均匀的组织抗疲劳裂纹产生的能力强。

硬度在一定范围内增加,其抗疲劳磨损的能力增加,因此对轴承钢的表面和传动齿轮啮合面都要求其硬度在HRC60左右,摩擦副各表面的最佳硬度应根据工况和运动方式不同通过实验来确定。对于已磨损的摩擦副的修复,用实验的办法来确定各表面的最佳硬度值,对于多数机修部门来说是有困难的。多数情况下,使修复后各表面的硬与原始值相近,即可认为这种修复方式是可行的。

## 2. 粗糙度

实践表明,在一定范围内降低表面粗糙度是提高抗疲劳磨损能力的有效途径,例如,滚动轴承的表面粗糙度  $R_a$  由  $0.4\ \mu\text{m}$  降低到  $0.2\ \mu\text{m}$  时,使用寿命提高  $2\sim 3$  倍;粗糙度  $R_a$  由  $0.2\ \mu\text{m}$  降低到  $0.1\ \mu\text{m}$  时,使用寿命提高 1 倍, $R_a$  继续减小,对使用寿命的影响较小。

## 3. 其它因素

表面应力状态、配合精度的高低、润滑油的性质等都对疲劳磨损的速度产生影响。通常,表面应力过大、配合间隙过小或过大、润滑油在使用中产生的腐蚀性物质等都会加剧疲劳磨损。

## 四、腐蚀磨损

在腐蚀性环境中,摩擦表面上发生的比单纯机械摩擦损失与单纯腐蚀损失之和多得多的破坏形式称为腐蚀磨损。其主要特点是磨损过程中既有机械摩擦起作用,又有腐蚀破坏起作用,表现出极高的磨损速率。通常是摩擦为腐蚀发生提供了新鲜的金属表面,腐蚀改变了金属表面的性质,使摩擦造成的磨损速度加快。根据腐蚀介质的特性,通常将腐蚀磨损分为氧化磨损和特殊介质中的腐蚀磨损。

### (一) 氧化磨损

在摩擦过程中,摩擦表面在空气中氧或润滑剂中氧的作用下所生成的氧化膜很快被机械摩擦去除的磨损形式称为氧化磨损。

工业中应用的金属绝大多数都会被氧化,在几秒钟内都会生成几十个分子厚度甚至更厚的表面膜,这些氧化膜的性质对磨损有重要的影响。若金属表面生成致密、完整与基体结合牢固的氧化膜,而且膜有很好的耐磨性能,则磨损轻微。若膜的耐磨性不好,当有摩擦存在时,磨损严重,如铝和不锈钢都易形成氧化膜,但铝表面氧化膜的耐磨性不好,不锈钢表面氧化膜的耐磨性好,因此不锈钢具有比铝更强的抗氧化磨损的能力。

### (二) 特殊介质中的腐蚀磨损

在摩擦过程中,环境中的酸、碱等电解质作用于摩擦表面上所形成的腐蚀产物迅速被机械摩擦所除去的磨损形式称为特殊介质中的腐蚀磨损。这种磨损的机理与氧化磨损相似,但磨损速率较氧化磨损高得多。介质的性质,环境温度、构成摩擦副金属的电偶序关系、腐蚀产物的强度、附着力等都对磨损速率有重要影响。这类腐蚀磨损出现的几率很高,如流体输送泵,当其输送带腐蚀性的流体,尤其是含有固体颗粒的流体时,与流体有接触的部位都会受到腐蚀磨损。搅拌器叶片、风机、水轮机叶片、内燃机气缸内壁及活塞等也易发生严重的腐蚀磨损。因此,对于特定介质作用下的腐蚀磨损,可通过控制腐蚀性介质形成条件,选用合适的耐磨材料及改变腐蚀性介质的作用方式来减轻腐蚀磨损速率。

## 第三节 零件磨损的特性

从上述讨论可知,在不同条件下工作的零件,磨损发生的原因及形式各不相同。但它们的磨损量随使用时间的延长呈相似的规律性。图 1-2 是零件磨损量( $W$ )随时间( $t$ )增长的变化曲线——磨损特性曲线。

根据曲线的特征可将磨损分为三个阶段。



## 一、磨合磨损阶段 OA

该阶段的磨损特征是磨损速率下降 ( $\frac{dW}{dt} \downarrow$ )。由于新加工零件表面比较粗糙,因此零件的磨损十分迅速,随着时间的延长,表面粗糙度下降,实际接触面增大,凸起部分磨平所造成的塑性变形导致冷作硬化,所以磨损速率逐渐下降,当达到 A 点时,正常的磨损条件已经建立,磨损速率稳定,且具有最低的数值。可以看出, A 点愈靠近 O 点愈好,这样就可以在短的时间内以最低的磨损量达到磨合的要求。选择合适的磨合载荷、相对运动速度、润滑条件等参数是尽快达到正常磨损的关键因素。

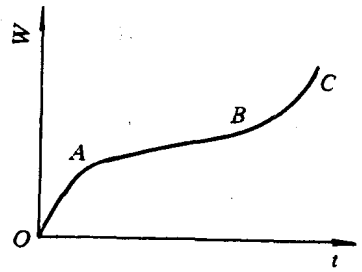


图 1-2 磨损特性曲线

## 二、正常(工作)磨损阶段 AB

正常(工作)磨损阶段的特征是磨损速率小且稳定 ( $\frac{dW}{dt} \approx C$ ),持续时间长。该时间的长短称为零件修理前的使用寿命。一切可以延长该阶段持续时间的措施都有利于减轻零件的磨损,提高零件的使用寿命。合理地使用、保养与维护是延长零件使用寿命的关键。这一阶段的中后期,磨损速率相对较快,但仍可以继续工作一段时间。当增至 B 点时,磨损速率迅速提高,进入强烈磨损阶段。

## 三、强烈磨损阶段 BC

强烈磨损阶段的特征是磨损速率迅速增加 ( $\frac{dW}{dt} \uparrow$ )。这是由于工作条件恶化、零件几何尺寸改变、配合间隙增大、润滑条件改变、并有附加冲击作用存在造成的。在这种情况下,磨损加剧,零件迅速破坏,有可能出现大事故。因此及时发现和修理即将进入该阶段工作的零部件具有十分重要的意义。

## 第四节 减轻磨损的措施

影响磨损的主要因素有:摩擦副的相对运动速度及压力、润滑情况、工作温度、零件材质、表面加工质量及配合间隙等。因此,为了减轻磨损就必须采取措施来保证上述参数在合理的设计和使用范围之内。

在润滑状态良好的情况下,零件相对运动速度愈高愈易形成液体摩擦,磨损越轻微。若润滑不良,速度愈高磨损愈严重,单位压力愈大,磨损也愈严重。因此,避免长时间在高速、过载及有冲击载荷条件下工作,可减轻零件的磨损。

润滑状况的好坏直接影响零件的磨损行为,若能保证零件在液体摩擦状态下工作,则可以不考虑磨损问题。但实际上,零件工作时,绝大多数是介于边界摩擦和液体摩擦之间,因此,改善润滑使摩擦副间形成具有一定厚度和承载能力的油膜,对于促进载荷均匀分布,降低微凸处的单位压力大有好处,从而可以减轻磨损。

工作环境温度对润滑油的油性有明显的影响。温度升高会使油的吸附能力下降,粘度降