



DIANKING JIXIE SHEBEI
GUZHANG ZHENDUAN YU WEIXIU

典型机械设备 故障诊断与维修

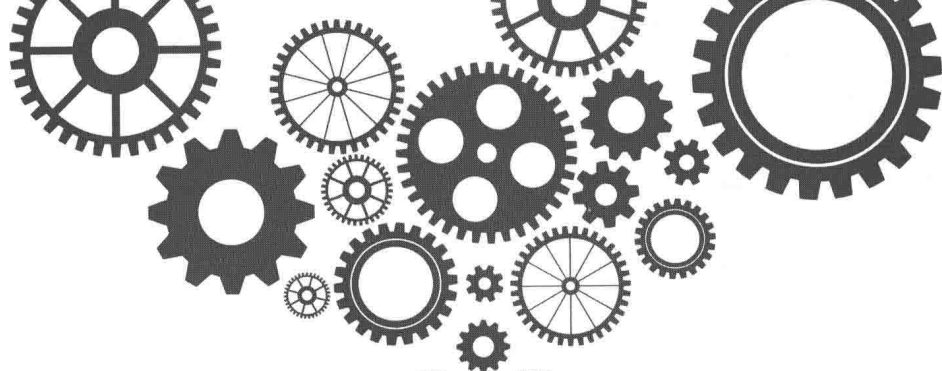
吴 拓 编著



1. 与生产实际联系紧密，详细讲解了生产过程中所需要的各种机械设备维修技术。
2. 内容全面、实用，对维修理论、维修管理、维修工艺、维修技术、监测技术、诊断技术等各方面知识都做了详细阐述。
3. 理论联系实际，列举了大量维修实例以加深读者理解。



化学工业出版社



DIANXING JIXIE SHEBEI
GUZHANG ZHENDUAN YU WEIXIU

典型机械设备 故障诊断与维修

吴 拓 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

典型机械设备故障诊断与维修/吴拓编著. —北京:
化学工业出版社, 2017. 1
ISBN 978-7-122-28395-5

I. ①典… II. ①吴… III. ①机械设备-故障诊
断②机械设备-故障修复 IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 259783 号

责任编辑: 贾 娜
责任校对: 陈 静

装帧设计: 史利平

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: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 19 字数 509 千字 2017 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

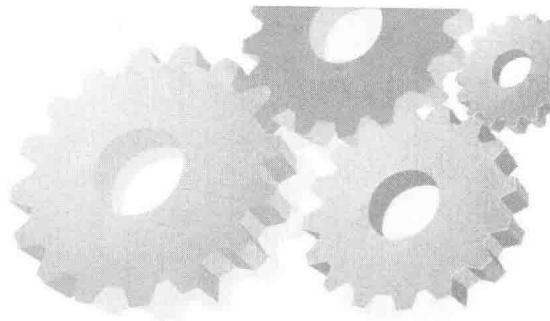
购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

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: 79.00 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

机械设备在人类文明发展进程中发挥着不可或缺的重要作用。随着工业化程度的不断深化,机械设备越来越多,摆在工程技术人员面前的机械设备维修的任务也就随之越来越繁重。

按照设备综合工程学的观点,设备维修具有三大侧面,即技术侧面、经济侧面和经营侧面。技术侧面包括日常保养技术、设备诊断技术、修理技术以及设备的更新与改造等;经济侧面包括维修的经济性评价、维修费用和劣化损失、固定资产的转移和折旧等;经营侧面包括维修的方针和目标、维修组织和人员、维修管理体系等。设备维修的三个侧面之间有着密切的关系,技术侧面是以设备硬件为对象,从“物”的角度控制维修活动;经济侧面是对设备进行的经济价值的考核,是从“钱”的角度控制维修活动;经营侧面是从经营管理等软件的措施方面控制维修活动,即从“人”的角度控制维修活动。三大侧面构成了一个完整的设备维修体系,缺一不可。

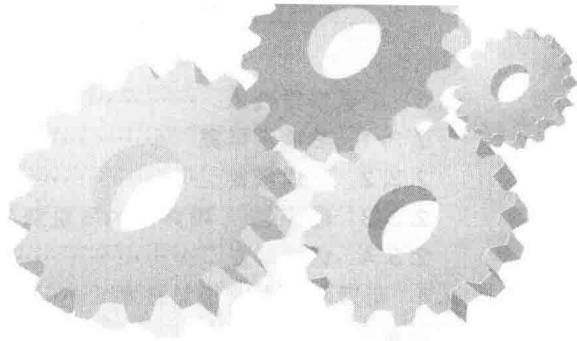
从维修方式上看,机械维修管理的发展大体经历了事后维修、预防维修、可靠性管理引入维修和预知维修四个阶段。工业化生产发展到今天,现代机械设备及其零部件的可靠性要求和及时排除故障的要求越来越高,为此从 20 世纪 60 年代中期开始,人们对设备的动态过程进行了大量的研究工作,寻找各种措施对设备状态和异常进行诊断和监测。到 20 世纪 60 年代末期,便开发成功了设备系统各种故障的监测技术和诊断技术,并开始应用到设备维修活动中。这种应用先进的状态监测技术和故障诊断技术以准确把握设备的实际状态,并依赖计算机系统和软件来记录故障、评估系统和制定维修策略的方法,被称为预知维修。又因为它是状态为基础的维修方式,也被称为状态维修或视情维修。预知维修阶段是设备维修技术发展的高级阶段。

随着机械设备技术的进步,现今的维修人员遇到的多是机电一体化,是集光电技术、气动技术、激光技术和计算机技术为一体的复杂设备,当代的设备维修已经不是传统意义上的维修工所能胜任的工作,必须通过高等院校培养和对在职人员进行补充更新知识的继续教育,才能造就一批具有现代维修管理知识和技术的维修专业人员。

为了帮助维修工程技术人员扩充知识、增强能力、提高技术水平,特编写本书。本书从生产实际出发,讲解了机械设备的故障分析、机械零件的修复技术、典型机械零部件的维修、机械设备故障的诊断技术以及典型机械设备的维修各方面知识,并列举了具体的维修实例,以期读者从中有所启迪、有所受益。

由于水平有限,书中不足之处,祈望广大读者和各位专家同仁不吝批评指正。

编 者



CONTENTS

目 录

1	第 1 章	Page
CHAPTER	机械设备的故障分析	1
1.1	机械设备故障的概念	1
1.1.1	机械设备故障的概念及其判断准则	1
1.1.2	机械设备故障的等级划分	2
1.2	设备故障发生的一般规律	3
1.3	设备故障发生的原因	4
1.3.1	机械零件的失效	5
1.3.2	使用过程中诸多因素的影响	17
1.3.3	设备维护与管理水平的影响	17
1.4	机械设备的极限技术状态	17
1.4.1	确定机械设备极限技术状态的原则	17
1.4.2	动力装置极限技术状态的判别	19
1.4.3	零件和配合副磨损极限的确定原则	19
1.4.4	机械设备极限技术状态的确定方法	20
1.5	机械设备的维修工作	22
1.5.1	设备维修的基本概念	22
1.5.2	设备维修前的准备工作	22
2	第 2 章	Page
CHAPTER	机械零件的修复技术	27
2.1	机械修复技术	27
2.1.1	调整尺寸法	27
2.1.2	镶加零件法	28
2.1.3	局部修换法	29
2.1.4	塑性变形法	30
2.1.5	换位修复法	30
2.1.6	金属扣合法	31
2.2	焊接修复技术	34
2.2.1	钎焊与堆焊修复	35
2.2.2	机械零件的补焊修复	36
2.2.3	有色金属的焊接修复	38
2.2.4	塑料零件的焊接修复	39

2.3	熔覆修复技术	39
2.3.1	热喷涂修复	39
2.3.2	喷焊修复	41
2.3.3	喷涂层、喷焊层的质量测试	42
2.3.4	熔结修复	43
2.4	电镀和化学镀修复技术	45
2.4.1	电镀修复	45
2.4.2	化学镀修复	49
2.4.3	复合电镀修复	50
2.5	粘接与表面粘接修复技术	50
2.5.1	粘接修复	50
2.5.2	粘涂修复	54
2.6	表面强化技术	57
2.6.1	表面机械强化	57
2.6.2	表面热处理强化和表面化学热处理强化	57
2.6.3	电火花强化	58
2.6.4	激光表面强化	59
2.6.5	电子束表面强化	60
2.7	刮研修复技术	61
2.7.1	刮研修复的特点	61
2.7.2	刮研工具和检测器具	61
2.7.3	平面刮研	63
2.7.4	内孔刮研	64
2.7.5	机床导轨的刮研	65
2.8	机械零件修复技术的选择	66
2.8.1	选择修复技术的基本原则	66
2.8.2	选择机械零件修复技术的方法与步骤	68
2.8.3	机械零件修理工艺规程的拟订	69

3 CHAPTER

第3章

典型机械零部件的维修

Page

70

3.1	轴的修理	70
3.1.1	轴的磨损或损伤情况分析	70
3.1.2	轴的修理方法	70
3.2	轴承的修理	72
3.2.1	滚动轴承的修理	72
3.2.2	滑动轴承的修理	74
3.3	孔的修理	76
3.3.1	连杆轴瓦的镗削	76
3.3.2	主轴瓦的镗削	77
3.3.3	镗缸与珩磨	77
3.4	壳体零件的修理	78
3.4.1	气缸体的修理	78
3.4.2	变速箱体的修理	79

3.4.3 机床主轴箱的修理	80
3.5 传动零件的修理	81
3.5.1 丝杠的修理	81
3.5.2 齿轮的修理	81
3.5.3 蜗轮蜗杆的修理	89
3.5.4 曲轴连杆的修理	89
3.5.5 常用传动机构的修理	91

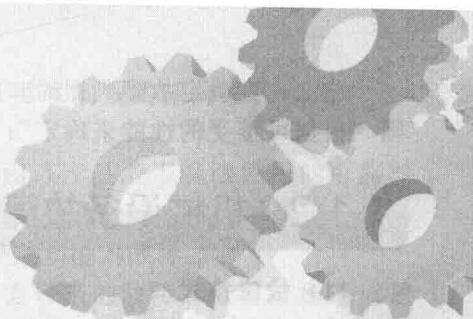
4 **第4章** **机械设备故障的诊断技术** **Page** **95**

4.1 设备故障的信息获取和检测方法	96
4.1.1 设备故障信息的获取方法	96
4.1.2 设备故障的检测方法	97
4.1.3 机械设备故障诊断方法的分类	98
4.2 振动监测与诊断技术	100
4.2.1 振动监测与诊断技术概述	100
4.2.2 机械振动及其信号分析方法	100
4.2.3 振动监测与诊断	101
4.2.4 几种常见机械故障的振动诊断	109
4.3 噪声监测与诊断技术	117
4.3.1 噪声及其测量	117
4.3.2 噪声源与故障源识别	124
4.4 温度监测技术	125
4.4.1 温度测量基础	125
4.4.2 温度监测方法	126
4.5 油液监测与诊断技术	131
4.5.1 润滑剂及其质量指标	131
4.5.2 油液性能分析	133
4.5.3 油液监测与诊断技术	134
4.6 无损检测技术	142
4.6.1 无损检测技术概述	142
4.6.2 超声检测	143
4.6.3 射线检测	148
4.6.4 涡流检测	150
4.6.5 磁粉检测	151
4.6.6 渗透检测	153
4.6.7 声发射检测	155
4.6.8 光学检测	156
4.6.9 无损检测方法的比较	157

5 **第5章** **典型机械设备的维修** **Page** **159**

5.1 普通机床类设备的维修	159
5.1.1 卧式车床的修理	159

5.1.2 卧式铣床的修理	189
5.2 数控机床类设备的维修	198
5.2.1 数控机床关键零部件的特点	198
5.2.2 数控机床的维护与保养	202
5.2.3 数控机床的故障诊断	206
5.2.4 数控机床伺服系统的故障诊断	210
5.2.5 数控机床机械部件的故障诊断	216
5.2.6 数控机床液压与气动传动系统的故障诊断	224
5.3 液压系统的维修	230
5.3.1 设备液压系统的修理内容及要求	230
5.3.2 液压系统主要元件的磨损与泄漏	230
5.3.3 液压系统密封元件的损坏与外泄漏	233
5.3.4 液压元件的修理	233
5.4 工业泵的维修	241
5.4.1 工业泵的分类及主要性能参数	241
5.4.2 泵类设备的故障诊断与监测方法	248
5.4.3 泵的主要零部件的修理	256
5.4.4 泵类设备故障修理案例	263
5.5 压缩机的维修	271
5.5.1 压缩机的分类及主要性能参数	271
5.5.2 压缩机的常见故障及处理方法	272
5.6 减速器的维修	294
5.6.1 减速器的组成及分类	294
5.6.2 减速器的常见故障及处理方法	294
参考文献	296



第1章

机械设备的故障分析

1.1 机械设备故障的概念

1.1.1 机械设备故障的概念及其判断准则

(1) 故障的定义

机械设备在使用过程中,不可避免地会发生磨损、断裂、腐蚀、疲劳、变形、老化等情形,使设备性能劣化而丧失规定的功能甚至生产能力,这种设备性能劣化而丧失规定的功能的现象即“故障”与“失效”。一般情况下,“故障”与“失效”是同义词。但严格来说,按照 GB 3187—1994 规定,“失效是指产品丧失规定的功能,对于可修复产品通常称为故障”。

(2) 故障判断准则

以上已经明确了故障的含义,然而故障不能仅凭直观感觉来判定,必须依据一定的判断准则。

首先,要明确产品保持的“规定功能”是什么,或者说产品功能丧失到什么程度才算出了故障。有些规定的功能很明确,不会引起不同的认识,如发动机缸体损坏,迫使停机修理。有时规定的功能却难以确定,特别是故障的形成是由于功能逐渐降低的这种情况,例如发动机的磨损超过一定的限度,将会加剧磨损,引起功率降低,燃油消耗率增加,出现这种情况,可以算作故障。然而,磨损的限度在使用中难以确定,像上述发动机情况,如果减小负荷,增加润滑油,有一定磨损的发动机,仍然是可以勉强继续使用的,也可以不算作故障,这就需要事先定出标准。

其次,在确定是否是故障,还要分析故障的后果,主要看故障是否影响产品的生产和设备及人身安全。除了以技术参数中的任一项不符合规定的允许极限作为故障判断的准则外,还要考虑若在这种状态下继续工作,是否会发生不允许的故障后果来判别。

因此,在判断产品故障时,不仅取决于产品的“规定功能”,而且还要考虑故障的后果。

一般来说,产品故障是指:在规定条件下,不能完成其规定的功能;产品在规定条件下,一个或几个性能参数不能保持在规定的上、下限值;产品在规定的应力范围内工作时,导致机械零件或元器件出现各种裂纹、渗漏、磨损、锈蚀、损坏等状态。

不同的产品有不同的故障判断标准,并且研究工作的出发点不同,所定义的故障也不同,难以做到统一。但是在同一使用部门之内,则应该有统一的标准。

总之,在确定故障判据时,应遵循以下原则:不能在使用条件下丧失功能;故障判断准则“根据可接受的性能来确定”;不同产品可按该产品的主要性能指标进行衡量。

1.1.2 机械设备故障的等级划分

(1) 故障模式

按 GB 3187—82 规定,故障模式是指产品的“故障(失效)的表现形式”。

故障模式是通过人的感官或测量仪器得到的。

一般研究产品的故障时,往往从产品故障的现象入手,进而通过现象找出故障的原因,因此有必要弄清产品在各功能级别上的故障模式。机械设备及其零部件的故障模式大致可分为以下几种。

- ① 损坏类型——断裂、开裂、裂纹、烧结击穿、短路、弯曲、过度变形、点蚀、熔融。
- ② 退化类型——老化、变质、绝缘劣化、油质劣化、剥落、腐蚀、早期磨损。
- ③ 松脱类型——松动、脱落、脱焊。
- ④ 失调类型——间隙不当、流量不当、压力不当、行程不当、响度不当、照度不当。
- ⑤ 堵塞与渗漏类型——堵塞、粘合、污染、不畅、泄油、渗油、漏气、漏水。
- ⑥ 整机及子系统——性能不稳、功能不正常、功能失效、启动困难、供油不足、怠速不稳、总成异响、刹车跑偏。

(2) 故障分类

在进行机械设备维修管理及故障分析时,应了解、掌握故障的分类,以便明确各种故障的物理概念,进一步分门别类地解决各种类型的故障。

故障的分类法多种多样,随着研究目的不同而异。

① 按故障性质分为自然故障和人为故障。人为故障是由机器使用者有意或无意而造成的故障。

② 按故障部位分为整体故障和局部故障。故障大多发生在产品最薄弱的部位,对这些部位应该重视,予以加强或者改变其结构。

③ 按故障时间分为磨合期、正常使用期和耗损故障期。在产品的整个寿命周期内,产品通常在耗损故障期内发生故障的概率较多。

④ 按故障急慢程度分为突发性故障和渐进性故障。突发性故障是指机件在损坏前没有可以觉察的征兆,机件损坏是瞬时出现的。例如因润滑油中断而使零件产生热变形裂纹;因机器使用不当或超负荷现象而引起机件断裂等。突发性故障产生的原因是各种不利因素以及偶然的外界影响共同作用的结果,它具有偶然性、不可预测性和发生故障的概率与其使用时间无关等特点。渐进性故障是由于机器某些零件的性能参数逐渐恶化,其参数超出允许范围(或极限)而引起的故障,例如机件的配合副磨损超过了允许极限等。大部分机械设备的故障都属于这类故障。产生这类故障的原因与产品材料的磨损、腐蚀、疲劳及蠕变等密切相关,出现故障的时间是在机件有效寿命的后期即耗损故障期,具有可预防性以及故障发生的概率与机械运转的时间有关的特点。

突发性和渐进性故障之间是有联系的。应该说所有的故障都是渐进的,因为事物的变化都是由量变到质变的过程。

⑤ 按故障的相关性分为非相关故障和相关故障。非相关故障是指产品的故障不是由机器其他机件的故障所引起的故障。相关故障则是由机器其他机件的故障所引起的故障。例如发动机的曲轴轴瓦的黏着是由于机油泵不供油的故障引起的,对于轴瓦来说这就属于相关故障;又如发动机配气机构的故障与变速器部件的故障无关,则属于非相关故障。

⑥ 按故障外部特征分为可见故障和隐蔽故障。用肉眼可以发现的故障称为可见故障,如漏油、漏水等,否则为隐蔽故障,如发动机气门断裂等。

⑦ 按故障程度分为完全故障和局部故障。故障程度是用该产品能否继续使用的可能性来衡量的。完全故障是产品性能超过某种确定的界限,以致完全丧失规定功能的故障。局部故障是指产品性能超过某种确定的界限,但没有完全丧失规定功能的故障。

⑧ 按故障原因分为设计方面、生产工艺方面和使用方面带来的故障。这些方面造成故障的原因是:设计或计算错误使产品结构不合理,计算强度或试验方法不合适等;机件的材料质量不合格,加工工艺方法不合理,加工设备精度不够,以及装配未达到技术条件要求等;使用过程中未遵守操作规程,或者未按技术要求进行维修、保养、运输和存放等。

⑨ 按故障后果可分为致命故障、严重故障、一般故障和轻微故障。故障后果的严重性主要是指对总成或系统或整机以及人身安全性的影响程度。致命故障是指危及设备和人身安全,引起主要部件报废,造成重大经济损失或对周围环境造成严重危害的故障;严重故障是指可能导致主要零部件严重损坏,或者影响生产安全,且不能用易损备件在较短时间内排除的故障;一般故障是指使设备性能下降,但不会导致主要部件严重损坏,并可用更换易损件在较短时间内排除的故障;轻微故障是指一般不会导致设备性能下降,不需要更换零件,能轻易排除的故障。

按故障后果还可分为功能故障和参数故障。功能故障是指使产品不能继续完成自己功能的故障,例如使减速器不能旋转和传递动力,发动机不能启动,油泵不供油等故障;参数故障是指使产品的参数或特性超出允许的极限值的故障,例如使机器加工精度破坏,机器最高速度达不到标准值等的故障。

(3) 故障等级的划分

对故障进行定性或定量分析时,必须事先划分故障的等级,只有这样才能判断各机件每个失效模式对系统的影响及其后果如何。实际上,划分故障等级也就是运用故障后果对系统影响这一原则进行故障分类。通常将致命故障划分为Ⅰ级故障,将严重故障划分为Ⅱ级故障,将一般故障划分为Ⅲ级故障,将轻微故障划分为Ⅳ级故障。

划分故障等级所考虑的因素如下。

① 机件产生故障后,造成工作人员或公众的伤亡情况。

② 机件产生故障后,造成产品本身的损坏情况。

③ 机件产生故障后,造成设备不能完成其主要功能或不能执行任务的情况,即对完成规定功能影响的大小。

④ 机件产生故障后,恢复其功能,即排除故障采取措施的费用、劳动量及停机时间的长短,也就是维修的难易和所用维修时间的长短。

⑤ 机件产生故障后,造成设备失去功能而导致经济上的损失,即导致系统的损失情况。

综上所述,故障等级要综合考虑性能、费用、周期、安全性等诸方面的因素,即考虑机件故障后带来的对人身安全、任务完成、经济损失等方面的综合影响。

1.2 设备故障发生的一般规律

通过大量使用和试验数据获知,大多数设备的故障率是时间的函数,如图 1-1 所示,设备的故障率曲线为两头高、中间低,图形有点像浴盆,通常称为浴盆曲线。

由图 1-1 可以看出,设备的故障率随时间的变化,大致可划分为三个阶段,即早期故障期、偶然故障期和耗损故障期。

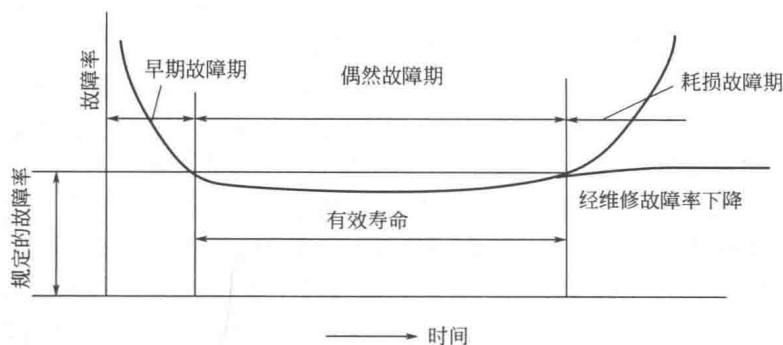


图 1-1 设备的故障率曲线

(1) 早期故障期

早期故障期出现在设备开始工作的较早时间，它的特点是故障率较高，且故障率随时间增加而迅速下降。故障的原因往往是设计、制造的缺陷或质量不佳引起的。对于刚修理过的设备来说，装配不当是发生故障的主要原因。对新出厂的或修理过的设备，可以在出厂前或投入使用初期的较短一段时间内进行磨合或调试，以便减少或排除这类故障，使设备进入偶然故障期。一般不认为早期故障是使用中总故障的一个重要部分。

(2) 偶然故障期

偶然故障期是指设备在早期故障期之后耗损故障期之前的这一时期。这是设备最良好的工作阶段，也称为有效寿命期。它的特点是故障率低而稳定，近似为常数。这一阶段的故障是随机性质的，与机器新旧无关。突发故障是由偶然因素，如材料缺陷、操作错误以及环境因素等造成的。偶然故障不能通过延长磨合期来消除，也不能由定期更换故障件来预防。一般来说，再好的维修工作也不能消除偶然故障。偶然故障什么时候发生是无法预测的。但是，人们希望在有效寿命期内故障率尽可能低，并且持续的时间尽可能长。因此，提高使用管理水平，适时维修以减少故障率，延长设备使用寿命是十分必要的。

(3) 耗损故障期

设备使用后期，故障率随时间的增加而明显增加。这是由于设备长期使用，产生磨损、疲劳、腐蚀、老化等造成的。防止耗损故障的唯一办法就是在设备进入耗损期前后及时进行维修。这样可以把上升的故障率降下来。如果设备故障太多，修理费用太高而不经济，则只好报废。可见，准确掌握设备何时进入耗损故障期，对维修工作具有重要意义。

并不是所有设备都有三个故障阶段，有的设备只有其中一个或两个故障期，甚至有些质量低劣的设备在早期故障后就进入了耗损故障期。

由于机件的工作条件和材质不同，其实际故障规律不尽相同；即使符合典型故障率曲线，但其故障率曲线的长短也不一样，这一点需要维修人员认真探索、研究解决。

上面介绍的浴盆曲线说明了设备的故障规律，按故障率 $\lambda(t)$ 随时间变化，可以归纳出故障有三种类型：递减型、恒定型和递增型。

1.3 设备故障发生的原因

机械设备发生故障的原因，有的来自设备自身缺陷的影响。有设计方面的问题，如原设计结构、尺寸、配合、材料选择不合理等；有零件材料缺陷的问题，如材料材质不匀、内部残余应力过大等；有制造方面的问题，如制造过程中的机械加工、铸锻、热处理、装配、标

准件等存在工艺问题；有装配方面的问题，如零件的选配、调整不合理，安装不当等；还有检验、试车等方面的问题。

1.3.1 机械零件的失效

(1) 机械零件失效的分类

机械零件丧失规定的功能即称为失效。一个零件处于下列两种状态之一就认为是失效：一是不能完成规定功能；二是不能可靠和安全地继续使用。

零件的失效是导致机械设备故障的主要原因。因此，研究零件的失效规律，找出其失效原因和采取改善措施，对减少机械故障的发生和延长机械的使用寿命有着重要意义。

零件失效的基本形式如图 1-2 所示。

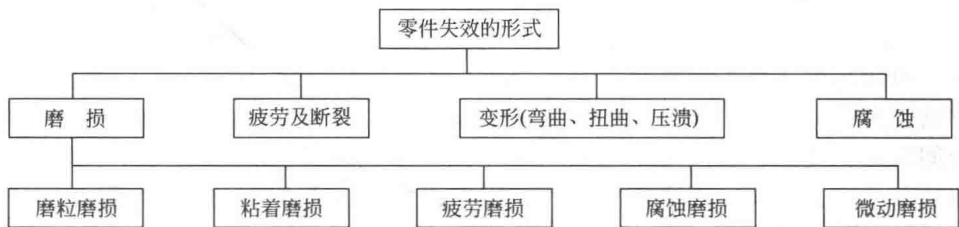


图 1-2 零件失效的基本形式

图 1-2 对零件失效形式所作的归纳和分类虽不够十分严密，但基本上能够概括说明生产实际问题。

机械零件失效的主要表现形式是零件工作配合面的磨损，它占零件损坏的比例最大。材料的腐蚀、老化等是零件工作过程中不可避免的另一类失效形式，但其比例一般要小得多。这两种形式的失效，基本上概括了在正常使用条件下机械零件的主要失效形式。其他形式的失效，如零件疲劳断裂、变形等虽然实际中也经常发生，且属于最危险的失效形式，但多属于制造、设计方面的缺陷，或者是对机器维护、使用不当引起的。

失效分析是指分析研究机件磨损、断裂、变形、腐蚀等现象的机理或过程的特征及规律，从中找出产生失效的主要原因，以便采用适当的控制方法。

失效分析的目的是为制定维修技术方案提供可靠依据，并对引起失效的某些因素进行控制，以降低设备故障率，延长设备使用寿命。此外，失效分析也能为设备的设计、制造反馈信息，为设备事故的鉴定提供客观依据。

(2) 零件的磨损

1) 零件的磨损规律

众所周知，一台机器如汽车、拖拉机，其构成的基本单元是机件，许多零件构成的摩擦副，如轴承、齿轮、活塞-缸筒等，它们在外力作用下以及热力、化学等环境因素的影响下，经受着一定的摩擦、磨损直至最后失效，其中磨损这种故障模式，在各种机械故障中占有相当的比重。因此，了解零件及其配合副的磨损规律是非常必要的。

① 零件的典型磨损曲线 磨损这种故障模式属于渐进性故障。例如气缸由于磨损而产生的故障与风扇皮带的断裂、电容器被击穿等故障不同，后者属于突发性故障，而磨损产生的故障是耗损故障。使用经验表明，零件磨损及配合副间隙的增长是随使用时间的延长而增大的，零件磨损量与工作时间的关系，可用磨损曲线表示，如图 1-3 所示。

由图 1-3 可以看出，零件的磨损过程基本上可以分为 I、II、III 三个阶段。

运转磨合阶段（曲线 OA_1 段）：零件在装配后开始运转磨合，它的磨损特点是在短时间

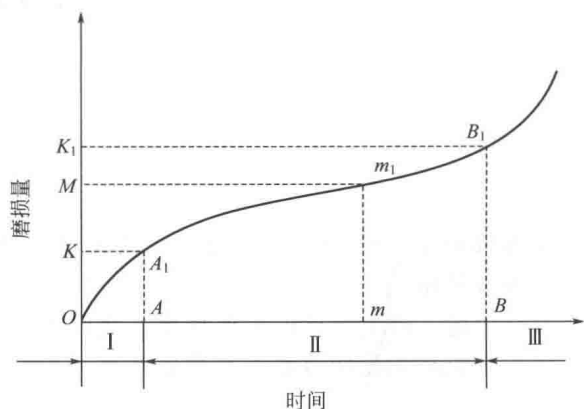


图 1-3 零件的典型磨损曲线

内 (OA 段) 磨损量 (OK) 增长较快, 经过一定的时间后趋于稳定。它反映了零件配合副初始配合的情况。在该阶段的磨损强度在很大程度上取决于零件表面的质量、润滑条件和载荷。随着表面粗糙度的变大以及载荷的增大, 在零件初始工作阶段, 都会加速磨损。零件配合副的间隙也由初始状态逐步过渡到稳定状态。

正常磨损阶段 (曲线 A_1B_1 段): 零件及其配合副的磨损特点是磨损量慢慢增长, 属于自然磨损, 大多数零件的磨损量与工作时间呈线性关系, 并且磨损量与使用条件和技术维护的好坏关系很大。使用

保养得好, 可以延长零件工作时间。

急剧磨损阶段 (B_1 之后的曲线段): 零件自然磨损到达 B_1 点以后, 磨损强度急剧增加, 配合间隙加剧变大, 磨损量超过 OK_1 , 破坏了零件正常的运转条件, 摩擦加剧, 零件过热, 以致由于冲击载荷出现噪声和敲击, 零件强度进入了极限状态, 因此达到 B_1 点后, 不能继续工作, 否则将出现事故性故障。一般零件或配合副使用到一定时间 (到达 B_1 点后) 就应该采取调整、维修和更换的预防措施, 来防止事故性故障发生。

由于零件在整机中所处的位置及摩擦工况不同, 以及制造质量及其功能等原因, 并不是所有零件开始时都有磨合期和使用末期的急剧磨损期, 例如密封件、燃油泵的精密偶件和其他一些零件, 它们呈现不能继续使用的不合格情况, 并不是因为在它们的末期出现了急剧磨损或者事故危险, 而是由于它们的磨损量已经影响到不能完成自身的功能; 另外一些元件, 例如电器导线、蓄电池、各种油管、散热器管、油箱等, 它们实际上没有初始工作磨损较快阶段。

② 允许磨损和极限磨损的概念 由零件或配合副的磨损曲线可以很容易地确定零件或配合副的极限磨损和允许磨损。例如, 修理时测量零件尺寸, 知其磨损量为 OM , 作平行于横坐标的直线, 与曲线交于 m_1 点。相对应时间为 Om 。如果 mB 段等于或大于修理间隔期, 则这时的磨损称为允许磨损。因此, 允许磨损或极限磨损可以定义为: 允许磨损是指磨损零件在修理时不需要修理 (或更换) 仍可继续使用一个修理间隔期的磨损量, 磨损量一般在曲线 A_1B_1 段内; 极限磨损是指零件或配合件由于磨损已经到了不能继续使用或不能使用一个修理间隔期的磨损量, 极限磨损值在曲线 A_1B_1 段的 B_1 点附近。

2) 磨料磨损

磨料磨损也称磨粒磨损, 它是由于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现象。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% 左右, 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, 磨料磨损的形式又分为鏟削式、高应力碾碎式和低应力擦伤式三类。

① 磨料磨损的机理 属于磨料颗粒的机械作用, 一种是磨粒沿摩擦表面进行微量切削的过程; 另一种是磨粒使摩擦表面层受交变接触应力作用, 使表面层产生不断变化的密集压痕, 最后由于表面疲劳而剥蚀。磨粒的来源有外界沙尘、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。

磨料磨损的显著特点是：磨损表面具有与相对运动方向平行的细小沟槽，有螺旋状、环状或弯曲状细小切屑及部分粉末。

② 减轻磨料磨损的措施 磨料磨损是由磨粒与摩擦副表面的机械作用引起的，因而减少或消除磨料磨损的对策可从如下两方面着手。

a. 减少磨料的进入 对机械设备中的摩擦副应阻止外界磨料进入并及时清除摩擦副磨合过程中产生的磨屑。具体措施是配备空气滤清器及燃油、机油过滤器；增加用于防尘的密封装置等；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。

b. 增强零件摩擦表面的耐磨性 一是可选用耐磨性能好的材料；二是对于要求耐磨又有冲击载荷作用的零件，可采用热处理和表面处理的方法改善零件材料表面的性质，提高表面硬度，尽可能使表面硬度超过磨料的硬度；三是对于精度要求不太高的零件，可在工作面上堆焊耐磨合金以提高其耐磨性。

3) 黏着磨损

构成摩擦副的两个摩擦表面，在相对运动时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黏着磨损。根据零件摩擦副表面破坏程度，黏着磨损可分为轻微磨损、涂抹、擦伤、撕脱以及咬死五类。

① 黏着磨损机理 摩擦副在重载条件下工作，因润滑不良、相对运动速度高、摩擦等原因产生的热量来不及散发，摩擦副表面产生极高的温度，严重时表层金属局部软化或熔化，材料表面强度降低，使承受高压的表面凸起部分相互黏着，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。

② 减少黏着磨损的措施

a. 控制摩擦副的表面状态 摩擦表面愈洁净、光滑，表面粗糙度过分小，愈易发生黏着磨损。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，或者温度升高达到 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 时吸附膜也会破坏，这些都容易导致黏着磨损的发生。为了减少黏着磨损，应根据其载荷、温度、速度等工作条件，选用适当的润滑剂，或在润滑剂中加入添加剂等，以建立必要的润滑条件。而大气中的氧通常会在金属表面形成一层保护性氧化膜，也能防止金属直接接触和发生黏着，有利于减少摩擦和磨损。

b. 控制摩擦副表面的材料成分与金相组织 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黏着磨损，这是因为两摩擦副表面的材料形成固溶体或金属间化合物的倾向强烈。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，即应当选用不同材料成分和晶体结构的材料。在摩擦副的一个表面上覆盖铅、锡、银、铜等金属或者软的合金可以提高抗黏着磨损的能力，如经常用巴氏合金、铝青铜等作为轴承衬瓦的表面材料，可提高其抗黏着磨损的能力，钢与铸铁配对的抗黏着性能也不错。

c. 改善热传递条件 通过选用导热性能好的材料，对摩擦副进行冷却降温或采取适当的散热措施，以降低摩擦副相对运动时的温度，保持摩擦副的表面强度。

4) 疲劳磨损

疲劳磨损是摩擦副材料表面上局部区域在循环接触应力周期性地作用下产生疲劳裂纹而发生材料微粒脱落的现象。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。

① 疲劳磨损机理 疲劳磨损的过程就是裂纹产生和扩展、微粒形成和脱落的破坏过程。磨料磨损和黏着磨损都与摩擦副表面直接接触有关，有润滑剂将摩擦两表面分隔开，则这两

类磨损机理就不起作用。对于疲劳磨损,即使摩擦表面间存在润滑剂,并不直接接触,也可能发生,这是因为摩擦表面通过润滑油膜传递而承受很大的应力。疲劳磨损与磨料磨损和黏着磨损不同,它不是一开始就发生的,而是应力经过一定循环次数后发生微粒脱落,以致摩擦副失去工作能力。根据裂纹产生的位置,疲劳磨损的机理有如下两种情况。

a. 滚动接触疲劳磨损 滚动轴承、传动齿轮等有相对滚动摩擦副表面间出现深浅不同的针状、痘斑状凹坑(深度在 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 以下)或较大面积的微粒脱落,都是由滚动接触疲劳磨损造成的,又称为点蚀或痘斑磨损。

b. 滑动接触疲劳磨损 两滑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会使材料表面出现局部强度弱化,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 $0.786b$ 处向表面深处移动,形成滑动疲劳磨损,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 减少或消除疲劳磨损的对策就是控制影响裂纹产生和扩展的因素,主要有以下两方面。

a. 合理选择材质和热处理 钢中非金属夹杂物的存在易引起应力集中,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、内部缺陷等对磨损也有重要的影响。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。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、晶粒细小、均布,避免粗大的针状碳化物出现,都有利于消除疲劳裂纹。硬度在一定范围内增加,其接触疲劳抗力也将随之增大。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。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,以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。

b. 合理选择表面粗糙度 实践表明,适当减小表面粗糙度值是提高抗疲劳磨损能力的有效途径。例如,将滚动轴承的表面粗糙度值从 $Ra\ 0.40\mu\text{m}$ 减小到 $Ra\ 0.20\mu\text{m}$ 时,寿命可提高 $2\sim 3$ 倍;从 $Ra\ 0.20\mu\text{m}$ 减小到 $Ra\ 0.10\mu\text{m}$ 时,寿命可提高 1 倍;而减小到 $Ra\ 0.05\mu\text{m}$ 以下则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,均要求表面粗糙度值要小。

此外,表面应力状态、配合精度的高低、润滑油的性质等都会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。

5) 腐蚀磨损

① 腐蚀磨损的机理 运动副在摩擦过程中,金属同时与周围介质发生化学反应或电化学反应,引起金属表面产生腐蚀物并剥落,这种现象称为腐蚀磨损。它是腐蚀与机械磨损相结合而形成的一种磨损现象,因此腐蚀磨损的机理与磨料磨损、黏着磨损和疲劳磨损的机理不同,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中,更容易发生在有酸、碱、盐等特殊介质的条件下。根据腐蚀介质及材料性质的不同,通常将腐蚀磨损分为氧化磨损和特殊介质中的腐蚀磨损两大类。

a. 氧化磨损 在摩擦过程中,摩擦表面在空气中的氧或润滑剂中的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能被氧化而生成表面氧化膜,这些氧化膜的性质对磨损有着重要的影响。若金属表面生成致密完整、与基体结合牢固的氧化膜,且膜的耐磨性能很好,则磨损轻微;若膜的耐磨性不好则磨



损严重。例如,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,因此不锈钢具有的抗氧化磨损能力比铝更强。

b. 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、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概率很高,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。

② 减少腐蚀磨损的对策

a. 合理选择材质和对表面进行抗氧化处理。可以选择含铬、镍、钼、钨等成分的钢材,提高运动副表面的抗氧化磨损能力。或者对运动副表面进行喷丸、滚压等强化处理,或者对表面进行阳极化处理等,使金属表面生成致密的组织或氧化膜,提高其抗氧化磨损能力。

b. 对于特定介质作用下的腐蚀磨损,可以通过控制腐蚀性介质的形成条件,选用合适的耐磨材料以及改变腐蚀性介质的作用方式来减轻腐蚀磨损速率。

6) 微动磨损

两个固定接触表面由于受相对小振幅振动而产生的磨损称为微动磨损,主要发生在相对静止的零件结合面上,例如键连接表面、过盈或过渡配合表面、机体上用螺栓连接和铆钉连接的表面等,因而往往易被忽视。

微动磨损的主要危害是使配合精度下降,过盈配合部件的过盈量下降甚至松动,连接件松动乃至分离,严重者还会引起事故。微动磨损还易引起应力集中,导致连接件疲劳断裂。

① 微动磨损的机理 微动磨损是一种兼有磨料磨损、黏着磨损和氧化磨损的复合磨损形式。微动磨损通常集中在局部范围内,接触应力使结合表面的微凸体产生塑性变形,并发生金属的黏着;黏着点在外界的小振幅振动反复作用下被剪切,黏附金属脱落,剪切处表面被氧化;两结合表面永远不脱离接触,磨损产物不易往外排除,磨屑在结合表面因振动而起着磨料的作用,所以微动磨损兼有黏着磨损、氧化磨损和磨料磨损的作用。

② 减少或消除微动磨损的对策 实践表明,材质性能、载荷、振幅的大小以及温度的高低是影响微动磨损的主要因素。因而,减少或消除微动磨损的对策主要有以下几个方面。

a. 改善材料性能 选择适当材料配对以及提高硬度都可以减小微动磨损。一般来说,抗黏着性能好的材料配对对抗微动磨损能力也好,而铝对铸铁、铝对不锈钢、工具钢对不锈钢等抗黏着能力差的材料配对,其抗微动磨损能力也差。将碳钢表面硬度从180HV提高到700HV时,微动磨损可降低50%。采用表面硫化处理或磷化处理以及镀上聚四氟乙烯表面镀层也是降低微动磨损的有效措施。

b. 控制载荷和增加预应力 在一定条件下,微动磨损量随载荷的增加而增加,但增大的速率会不断减少,当超过某临界载荷之后,磨损量则减小。因而,可通过控制过盈配合的预应力或过盈量来有效地减缓微动磨损。

c. 控制振幅 实验证明,振幅较小时,磨损率也比较小;当振幅在50~150 μm 时,磨损率会显著上升。因此,应有效地将振幅控制在30 μm 以内。

d. 合理控制温度 低碳钢在0℃以上,磨损量随温度上升而逐渐降低;在150~200℃时磨损量会突然降低;继续升高温度,则磨损量上升,温度从135℃升高到400℃时,磨损量会增加15倍。中碳钢在其他条件不变时,温度为130℃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。

e. 选择合适的润滑剂 实验表明,普通的液体润滑剂对防止微动磨损效果不佳;黏度大、滴点高、抗剪切能力强的润滑脂对防止微动磨损有一定的效果;效果最佳的是固体润滑