

● 机械设计丛书

耐 磨 损 设 计

葛中民 侯虞铨 温诗铸 编

● 机械工业出版社

250504

机械设计丛书

耐 磨 损 设 计

葛中民 侯虞铨 温诗铸 编



机械工业出版社

150504



本书是中国机械工程学会机械设计学会机械设计丛书编辑委员会组织编写的机械设计丛书之一，是国内第一部全面而系统地论述机械耐磨损设计的书。作者从表面状况、接触状态与摩擦磨损现象出发，详细论述了磨损的类型、机理、特征、主要影响因素以及磨损的计算与抗磨对策。在对策中包括油膜厚度的计算、润滑油和添加剂的防磨机理及选择、材料选配与表面强化技术的应用、密封与过滤、表面几何形貌的设计与控制等。并对各类典型和常用零件，例如滑动轴承、滚动轴承、齿轮、蜗轮、导轨、摩擦片与刹车片、刀具以及耕具等分别论述了耐磨损设计方法。本书以设计为中心，兼及检测、监控与工艺等，内容丰富，基本上汇集了国内外几十年来在摩擦学研究与实践方面的主要成果，具有先进性、指导性与实用性。

本书专供从事机械研究、设计、制造和使用管理等方面的工程技术人员使用，也可供高等工科院校教师、研究生及大学生参考。

机械设计丛书 耐 磨 损 设 计

葛中民 侯虞铨 温诗铸 编

*

责任编辑：夏曼苹 版式设计：张伟行
封面设计：方 芬 责任校对：熊天荣
责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $9 \frac{1}{4}$ · 字数 240 千字

1991 年 6 月北京第一版 · 1991 年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,130 · 定价：8.80 元

*

ISBN 7-111-01358-1/TH·230

编辑委员会

主任委员 陈湖

副主任委员 周延佑

委员(姓氏笔划序)

傅梦莲

郭可谦

徐家宗

江斌

任光华

刘存智

刘恒愉

何国伟

陈立周

吴宗泽

辛一行

周勤芝

林东初

郑效忠

徐灏

高庆荣

夏曼苹

黄致甲

曾英

专业编审组

1. 机械设计理论方法专业编审组

组长 周延佑

组员 陈立周 曾英 傅家骥 刘光宁 万耀青

2. 机械结构强度专业编审组

组长 傅梦莲

组员 刘存智 高镇同 丁奎元 周辛庚 张如一

3. 机械零部件设计专业编审组

组长 郭可谦

组员 吴宗泽 林东初 舒森茂 余梦生 姜勇

(其他专业编审组暂缺)

编者的话

当前，国民经济各部门都迫切需要质量好、效率高、消耗低、价格便宜的先进的机械产品。而机械设计工作是决定机械产品质量、水平和经济效益的重要环节。一个机械产品的设计水平如果不高，即使制造得再好，也是一个落后的产品。所以必须加紧提高机械设计水平。

近三十年来，世界上科学技术的发展速度很快，机械设计工作也出现了崭新的局面。由于广泛运用了各学科和各技术领域里的新成就尤其是采用了电子计算机技术，在机械设计领域里，新原理、新方法、新技术与新结构不断涌现，从而，大大提高了设计水平和速度。特别是对于结构复杂、使用条件要求高的产品，改变了因设计难度大而不能设计或设计的质量低、周期长的状况。于是，许多大型、高精密度、高参数的质量高、效率高、消耗低和可靠耐用的各种机械产品，竞相出现。丰富了市场，并不断更新，以满足用户日益增长的需求。

在我国，随着国民经济的迅速发展，新产品的开发和老设备的技术改造工作日益增多，对机械设计工作的要求越来越高，机械设计人员迫切需要运用新的科学技术知识进行设计工作，但苦于缺乏学习和参考的资料。近几年来，一些进行产品研究、设计和教学的同志，一方面结合我国经验进行创新设计，一方面消化国外引进技术，均获得了可喜成果。这些成果也需要总结推广。因此，中国机械工程学会机械设计与传动学会机械设计丛书编辑委员会组织编写了这套机械设计丛书，以飨读者。

这套丛书编写的指导思想是：内容先进、实用。着重介绍新理论、新方法、新技术和新结构；对于传统的设计计算方法，要做总结提高工作。书中注意贯穿整机设计思路。要求阐明本专题

的基本原理，避免繁琐的数学，着重介绍物理概念及设计要点，给出实用的设计方法和计算公式、步骤、实际效果及经国内试验的数据、图表和实例。叙述深入浅出，分析透彻，使具有微积分数学知识的大中专程度的设计人员读得懂、用得上。花较少时间得到较大收获。

由于机械设计涉及面广，本丛书题目的选定，原则上是根据上述指导思想成熟一个定一个，不追求系统和全面。因此，全套丛书编写及出版时间将比较长。将采取分批出版的方式陆续出版。第一批8本将在近两年内出齐。它们是：《价值分析在产品中的应用》、《可靠性设计》、《防断裂设计》、《抗疲劳设计》、《机械零件可靠性设计》、《机械结构设计》和《耐磨损设计》、《联轴器》。

尽管我们朝上述设想作了许多努力，但因缺乏经验，并受水平限制，一定还存在一些缺点和不足之处，欢迎读者提出批评改进意见。

机械设计丛书编辑委员会

前 言

提高机械的可靠性与寿命是现代机械设计与制造的主要问题之一。机械设备高度的可靠性、长寿命和低消耗也日益成为国际市场竞争的主要目标。因此,当前,为了为我国国民经济的技术改造和扩大出口提供先进的技术装备,提高机械产品设计的质量是刻不容缓的。统计分析表明,磨损是缩短机械寿命的主要因素。在机械零件的报废中,由于磨损造成的约占 80%,从整个国民经济来说,造成的直接和间接经济损失是巨大的,因此,机械的耐磨损设计具有很大的技术与经济意义。这一问题在国内外已引起人们普遍的重视,并在实践中取得了显著的效益。鉴于耐磨损设计的重要性以及国内关于这方面的系统论述欠缺,本书尝试为读者提供关于这方面较全面而系统的资料,以便对设计有所补益。

由于磨损是一种复杂的过程,受众多因素的影响,所以耐磨损设计是多学科多因素的综合设计。它与摩擦学的发展密切相关,而关于摩擦磨损的理论在继续深入发展,虽然过去几十年人们在这方面的研究已取得了许多成就,但应该说人们对磨损的认识还是很不够的。尽管如此,把已有的研究成果付诸应用仍具有重要意义。为此,本书尽可能汇集了国内外几十年来在摩擦学研究与实践方面的主要成果,从实用出发,力求简明扼要。限于篇幅,对于已有专著的内容,一律从简,例如关于静压润滑的设计和高速流体动压润滑轴承的稳定性设计等。有的内容,由于国内积累的数据不足,只能提出解决问题的途径与方法,例如,磨损系数问题;有的则提出了发展方向,例如,热弹性流体动压润滑与耐磨损设计的系统工程方法等。本书侧重于设计,也兼及检测、监控与工艺等。

各章编者:第三章及第四章第六节——汕头大学侯虞铨;

Ⅵ

第二章及第四章第一、四、八节以及结束语——清华大学温诗铸，其余由清华大学葛中民编写。本书编写大纲草稿由侯虞铨拟定，全稿统编工作由葛中民负责。

本书承天津大学邱宣怀和卜炎两位教授仔细审阅和指导，谨在此深表谢意。

限于编者水平，书中难免有谬误欠妥之处，深望读者批评指正。

编者

1988年4月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 耐磨损设计的重要性	1
第二节 耐磨损设计的性质及其发展方向	3
第三节 本书的宗旨	4
第二章 各种磨损的特性及磨损计算	6
第一节 磨损过程与磨损分类	6
第二节 磨粒磨损	9
一、磨粒磨损的种类	9
二、主要影响因素	10
三、磨粒磨损机理	11
第三节 粘着磨损	12
一、粘着磨损的种类	12
二、主要影响因素	13
三、粘着磨损机理	14
第四节 接触疲劳磨损	16
一、疲劳磨损的种类	17
二、应力状态与接触疲劳准则	18
三、接触疲劳磨损寿命	21
第五节 腐蚀磨损	22
一、氧化磨损	22
二、特殊介质腐蚀磨损	23
三、微动磨损	23
四、气蚀	24
第六节 磨损计算	24
一、IBM磨损计算方法	25
二、组合磨损计算方法	26
参考文献	29
第三章 磨损的对策	30
第一节 摩擦表面	30

一、表层的结构	30
二、表面外的状况	30
三、表面的接触	32
四、表面的滑动	34
第二节 润滑介质膜——磨损保护膜之一	36
一、润滑介质(润滑剂)膜建立的机理	36
二、流体动压润滑理论	40
三、磨损设计中对油膜厚度的控制	58
四、润滑油的选择	59
五、润滑脂的选择	69
六、润滑剂选择的综合考虑	73
第三节 表面吸附膜——磨损保护膜之二	75
一、吸附膜的形成与破坏	76
二、吸附膜的减摩耐磨机理	77
三、提高吸附膜强度的措施	78
第四节 表面反应膜——磨损保护膜之三	79
一、表面反应膜的形成、破裂与润滑机理	79
二、生成反应膜的添加剂	80
三、使用极压添加剂的注意事项	80
第五节 材料的选配	82
一、对磨粒磨损	83
二、对粘着磨损	87
三、对接触疲劳磨损	89
四、对微动磨损	90
五、对腐蚀磨损	90
六、常用摩擦副材料的性质	90
第六节 表面强化	95
一、表面强化处理的目的及种类	95
二、各种表面强化处理的性能	96
三、强化效果的评定	102
第七节 过滤与密封	103
一、液体中的颗粒及其所引起的磨损	104
二、液体中杂质的控制	106

三、化学污染及其消除方法	110
四、密封及密封件的磨损	112
五、密封件的失效分析	118
六、减轻密封件的磨损	119
第八节 控制表面几何形貌	119
一、表面形貌的含义	119
二、表面形貌的评定参数	121
三、表面形貌对润滑的影响	122
四、表面形貌对磨损的影响	124
五、对表面几何形貌的综合控制	128
参考文献	130
第四章 典型零部件的抗磨损设计	131
第一节 概述	131
第二节 滑动轴承	132
一、轴承类型的选择	133
二、滑动轴承的摩擦状态与磨损	138
三、滑动轴承主要失效形式	140
四、滑动轴承的材料	142
五、边界润滑向心轴承的设计	146
六、液体动压润滑向心轴承	152
七、液体动压润滑推力轴承	164
第三节 滚动轴承	167
一、滚动轴承的滚动与滑动	168
二、滚动轴承的接触疲劳寿命	170
三、滚动轴承润滑状态对轴承寿命的影响	171
四、滚动轴承弹性流体动压润滑设计	172
五、滚动轴承的磨损寿命	180
六、滚动轴承的润滑与密封	184
第四节 齿轮与凸轮机构	194
一、全膜弹流下齿轮传动的润滑设计	194
二、部分膜弹流下齿轮传动的磨损问题	208
三、凸轮机构的润滑设计	216
第五节 蜗轮与螺母	220

一、蜗杆传动的类型与工作特点	220
二、蜗杆蜗轮副材料	223
三、润滑剂与润滑方式	224
四、蜗杆传动的效率与温升控制	225
五、其他抗磨对策	227
六、螺母	229
第六节 导轨与缸套	229
一、影响导轨磨损的因素	230
二、宽(浅)刮导轨	233
三、缸套的磨损问题	238
第七节 摩擦片与刹车片	241
一、摩擦离合器与制动器的工作特点	241
二、摩擦材料	243
三、摩擦面的温升	245
四、摩擦面的磨损	250
五、磨损的控制	252
第八节 刀具与模具	254
一、金属切削的摩擦学特征	255
二、刀具的磨损	258
三、切削热与切削液	261
四、刀具材料	264
五、锻压模具的磨损设计	266
第九节 耕具	269
一、耕具的工作状况与磨损	269
二、土壤特性对耕具磨损的影响	270
三、耕具合理的几何参数	273
四、耕具的材料	274
参考文献	280
结束语	283

第一章 绪 论

摩擦、磨损和润滑是人类社会和自然界中普遍存在的现象，自古就已为人们所注意，并开始在实践中运用它们的一些规律，例如工具的刃磨、摩擦生热、利用滚动摩擦代替滑动摩擦以节省劳力、使用动物油脂润滑以减轻摩擦和磨损等等。随着社会的发展，人们对这种现象的重要性及其规律的认识和应用也不断加深，然而把摩擦、磨损和润滑问题作为一门独立的学科——“摩擦学”(Tribology)，开展系统的研究和实践，却只有二十几年的历史。摩擦学是研究有相对运动时相互作用表面的作用、变化和损伤的理论与实践的一门综合性科学。我们所谓的“耐磨损设计”是指把摩擦学的研究成果应用到工程设计，特别是机械设计当中，以减轻或者防止磨损。

第一节 耐磨损设计的重要性

磨损是缩短机械寿命的主要因素。国外统计 500 种典型零件的报废表明，其中因磨损造成的约占 80%。另据美国保险公司 1950~1970 年间对行星齿轮箱的统计，损坏的零件中属于强度原因的不到 10%，其余绝大部分属于磨损损坏。磨损不仅是机械零部件的一种失效形式，也是引起其他后来的失效的最初原因。磨损碎屑会造成其他零件表面的损伤、润滑油的污染与油路的堵塞。零件配合因磨损而使间隙加大时，会增加机械的振动、冲击和疲劳，同时又加剧磨损，最终导致机械丧失工作能力或遭到破坏。即使不失效，磨损也会使机械性能降低，例如降低机床的精度和产品质量；造成内燃机压缩损失和能量损失，从而降低输出功率；泵和压缩机的主要零件及密封的磨损降低工作效率等等。

磨损造成巨大的经济损失。从一个国家的整个国民经济来

看, 由摩擦磨损所造成的经济损失之巨大是惊人的。H. P. Jost 1966 年向英国政府提出的调查报告认为, 因没有利用已有的摩擦学知识, 英国每年约损失 5.15 亿英镑, 约占当时英国国民经济总产值的 1%。美国 1975 年估计每年损失为 1000 亿美元之巨, 联邦德国 1976 年估计每年约损失 100 亿马克, 苏联机械制造业每年约损失 100~120 亿卢布。磨损比摩擦造成的经济损失要严重得多。除了直接的磨损损失外, 还应考虑间接损失, 例如备件的储存费用、辅助维护费用、停机损失以及产品质量降低的损失等等。一台大型发电机组或联合轧钢机因轴承失效而停产, 每天造成的损失可达几万至几十万元。

耐磨损设计具有很高的经济效益。美国机械工程师学会 1978 年估计在交通运输、发电、透平机械和加工业等四个主要部门中, 在摩擦学研究和发展方面投资 2400 万美元, 每年就可节约美国能源消耗的 11%, 相当于 160 亿美元。英国 1981 年估计, 在构成消耗国家能源 87% 的部门, 有效地应用摩擦学知识, 每年可节约 4.68~7 亿英镑。联邦德国科技部门认为积极开展摩擦学研究和实践可避免 50% 的摩擦磨损损失, 即每年可节约 50 亿马克。日本人也认为每年可节约近 100 亿美元。中国机械工程学会近几年通过对机械、冶金、石油、煤炭、铁道、农机、纺织和交通等八大行业的调查, 初步估计通过摩擦学技术的应用, 到本世纪末, 每年可为国家节约 400 亿元, 约占那时国民经济总产值的 1.2%, 而在这方面的研究与应用的投资只需 1/50。

以上诸统计数字虽然不十分精确, 但仍足以说明其巨大的经济意义。就一个企业来说, 即使它的效率较高, 改善其主要设备的摩擦磨损问题而带来的经济效益也将是很高的, 会远远超过其最初的投资。

抗磨损设计不仅在节约能源和原材料消耗方面, 而且在促进科学技术的发展方面也是很重要的。近代科学技术和生产的发展推动了摩擦学的发展, 同时也对摩擦学的研究和耐磨损设计提出了更迫切的任务。高速、重载、精密、自动化设备以及特殊工况

下工作的机械的发展都离不开耐磨损设计。

机械设备高度的可靠性、长寿命和低消耗已日益成为国际贸易竞争的主要目标。

第二节 耐磨损设计的性质及其发展方向

提高机械的可靠性和寿命是现代机械设计与制造的主要问题之一。单学科的设计已不能满足要求。产品在设计阶段就必须考虑能导致有效地减轻或防止磨损的所有因素。因此,耐磨损设计是综合性的,多学科性的,它需要应用物理、化学、数学、力学、材料学以及润滑技术与工程实际等多方面的知识。

影响磨损的因素很多,最重要的可分为四大方面,即工作参数、材料、几何参数和环境。工作参数包括载荷或压强、速度、使用期限、表面温升和润滑膜厚度等。材料包括摩擦副材料和润滑剂以及它们的有关性质。几何参数包括摩擦副的形体、表面形貌、接触尺寸以及配合间隙和对中性等。环境因素中特别重要的是污染和特殊环境,如真空、高低温和腐蚀等。耐磨损设计的本质就是根据现有的摩擦学知识,去分析了解这些因素的影响,并在设计和使用中采取对策,减轻或消除不利影响,发挥有利影响以达到设计要求的目标。

耐磨损设计是与摩擦学的发展分不开的。关于摩擦磨损的理论在继续发展,润滑理论与技术领域,如流变学和薄膜形成的机理、耐磨材料、表面强化处理技术、表面力学及表面物理化学分析、表面形貌的效应等等都是重要的研究方向。在领域方面,除一般条件外,着重于特殊工况条件下的研究,这与近代科学技术与生产的发展提出的要求密切相关。

摩擦学的研究方法主要向以下四个方向发展:

- 1) 由宏观研究进入微观研究。由于先进测试技术的发展,已能够对表面状况及其变化、表面的微裂纹等等进行分析。
- 2) 由定性研究进入定量研究。为了预测机械及其零部件的磨损寿命,定性分析不可能达到要求,对磨损进行估算是重要

的。为此,研究磨损计算的理论与方法,积累磨损数据,建立数据库是非常必要的。

3) 由静态研究进入动态研究。磨损作为一种过程很少是稳态的,特别是从微观上来看,摩擦副接触表面在摩擦磨损过程中不断地起着机械的、物理的和化学的变化,从而可能引起磨损特征和磨损程度的变化,因而磨损是一个随机过程。研究磨损过程需要采用数理统计的方法。

4) 由单学科(单因素)研究进入多学科(多因素)的综合性研究。磨损是一个复杂过程,受众多因素的影响,不仅受摩擦副介面及其相互作用的影响,也受所属的整个系统的影响;理论和实践证明,对磨损问题,任何“一元论”的方法都可能忽视或遗漏重要的影响因素,从而导致严重错误。当前,系统工程论已经成为解决综合性科学技术问题行之有效的方法,因此对磨损问题也已开始采用系统工程分析的方法。

第三节 本书的宗旨

建国以来,虽然我国机械设计的水平有了很大的提高,但是以当今的观点看,过去好多设备是效能低、耗费大,不能满足生产日益发展的要求,需要更新和开发新品种。随着国民经济的发展,各部门的机械化自动化程度不断提高,节省原材料和能源的问题也日益突出。引进国外的先进科学技术和设备的同时,也需要我们很好地消化和提高技术管理水平。因此,加强耐磨损设计和提高耐磨损设计在产品中的地位是刻不容缓的。

一般,设计人员在设计新产品时,对最重要的零部件必定会进行强度计算,但很少会考虑按具体条件采取最有效的对策来减轻或防止磨损,常常是把磨损作为自然结果而承受下来,或者对付的手段简单,收效不大或无效,甚至起负作用。鉴于摩擦学研究的重要性,在工业先进国家中都建立了摩擦学研究单位,并在高等院校增设了有关摩擦学方面的课程,大力推进摩擦学在工业上的应用,我国也于1986年批准了建立国家重点摩擦学实验室,几

年来全国高等院校和研究单位在这方面所进行的课题研究和人材培养已取得了不少成就。本书的目的是帮助机械设计人员了解系统的减轻或防止磨损的设计知识与方法。从零件的表面状况、接触和摩擦现象，讲到磨损的产生、类别、机理、特征与鉴别，然后着重介绍耐磨损的对策，如润滑设计、润滑剂和添加剂的抗磨机理及选择、材料的选择与匹配、表面强化技术的应用、过滤与密封装置的设计选用、零件表面形貌的合理设计和控制等等。在此基础上，针对机械中常用的典型零件，给予专门的篇幅讨论其有关减轻或防止磨损的设计方法。限于本书篇幅，对于磨损的测试方法、监控技术以及工艺方面的内容，均从略。