

摩擦学 与耐磨性设计

惠文华 刘家浚 编著
朱宝亮 张远明

东南大学出版社

摩擦学与耐磨性设计

Tribology & Wear Resistance Design

惠文华 刘家浚

Hui Wenhua Liu Jiajun

编著



Zhu Baohang Zhang Yuanming

东南大学出版社

Southeast University Press

Nanjing China

(苏)新登字第 012 号

内 容 提 要

本书较系统地论述了摩擦学的基本理论及其应用。着重于基本理论的论证、机理的阐明及主要公式的推导。本书取材新颖,较全面地反映了现代摩擦学近况。

全书共八章,由摩擦学基本理论、材料磨损原理及试验方法、材料表面耐磨性设计三部分组成。

本书可作为机械学、摩擦学及表面工程等专业研究生教材,也可供从事材料及机械产品研究、设计、制造、使用等方面的科技人员以及有关专业的大专院校师生参考。

责任编辑 黄英萍

摩擦学与耐磨性设计

惠文华 刘家浚
朱宝亮 张远明 编著

*

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210018)

河海大学印刷厂印刷

(南京市西康路 1 号,邮政编码 210024)

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 19.375 字数 503 千

1993 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—1000 册

ISBN 7-81023-446-3/TH·26

定价:22.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

前 言

摩擦学(Tribology)是近 20 多年来迅速发展起来的一门新兴边缘学科。它主要包括摩擦、磨损和润滑等研究领域,研究的是摩擦与磨损过程中两个相对运动表面之间相互作用、变化及其有关的理论与实践的一门学科。摩擦是原因,磨损是结果,润滑是减轻摩擦与磨损的一种有效方法。摩擦学的研究将是多学科的综合,涉及物理、化学、数学、流体力学、接触力学、弹塑性力学、断裂力学、表面物理化学、机械学、材料学、冶金学等多个方面。

摩擦与磨损自古以来就存在。人们一直力图控制摩擦,减轻磨损。随着工业的发展,特别是现代工业与技术中,如高速、重载的运转条件,核反应堆,宇宙飞船那样的恶劣工作环境,对摩擦与磨损提出了越来越高的要求,为这门新兴学科的发展提供了强大的动力,使摩擦学的研究获得高速发展。据统计,自摩擦学这个术语提出(1966 年)以来,在这个领域内发表的论文就有 80000 多篇,相当于每年有 5000~6000 篇的摩擦学文献发表。

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,因磨损引起报废的约占其中 80%,美国保险公司 1950~1970 年间对行星齿轮箱的统计表明,损坏的零件中属于体积强度原因的不到 10%,其余绝大部分是磨损破坏。磨损不但是机械零件失效的一种主要形式,也是引起其它后继失效的最初原因。磨屑会造成零件表面损伤,润滑污染及油路堵塞。配合零件因磨损间

隙加大会增加机械的振动、冲击与疲劳,然后又加剧磨损,最后导致机械丧失工作能力或遭受破坏。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,降低输出功率;泵和压缩机的主要零件和密封的磨损,会降低其工作效率等等。

磨损造成的经济损失是巨大的。H. P. Jost 1966 年向英国政府提出的调查报告认为,由于没有利用现有的摩擦学知识,英国每年因摩擦磨损方面造成的损失约为 5.15 亿英镑,约占当时英国国民经济总产值的 1%。美国 1975 年估计在这方面每年要耗资 1000 亿美元之巨。其它发展中国家也有这样的统计数字。其中磨损比摩擦造成的损失要严重得多;除了直接磨损损失外,还要考虑各种间接损失。例如备件储存运输,辅助维修、停机以及产品质量降低等损失。一台大型发电机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。

耐磨性设计具有很高的经济效益。美国 1978 年估计在交通运输、发电、透平机械和加工业四个主要部门在摩擦学研究和发展方面的投资 2400 万美元,每年就可节约美国能源消耗 11%,约 160 亿美元,投入与产出比为 1:667。英国 1981 年估计,在构成消耗能源 87% 的部门,有效地应用摩擦学设计,每年可节约 4.68~7 亿英镑。中国机械工程学会对我国的粗略估计是,投资与收益之比为 1:50。

耐磨性设计在促进科学技术发展方面也是重要的。近代科学技术的发展推动了摩擦学的发展,同时也对它

的研究和应用提出了更高的要求。高速、重载、精密、自动化及特殊工况下工作的机械的发展都离不开耐磨性设计。机械设备的高可靠性、长寿命和低消耗也日益成为国际贸易竞争的主要目标。

本书力图全面地阐述摩擦学整个领域的基本理论、试验、测试与监控,耐磨减磨材料及耐磨减磨表面技术的应用,使读者获得较系统的知识和了解本学科的全貌。

本书所讨论的问题,涉及到诸多不同学科,为了适应不同专业的读者,对一些有关的基本概念力求给予简明的定性说明,力求陈述清楚。但由于笔者水平有限,加之所讨论问题的复杂性,以及其中很多问题的研究正处在不断发展和深入的过程中,书中难免存在缺点或错误,恳请读者批评指正。

编著者

1994年8月

目 录

第一章 摩擦表面特性与表面接触	(1)
第一节 固体表面的几何特性	(1)
一、常用的几个表面粗糙度参数	(2)
二、承载面积曲线	(4)
第二节 固体表面的物理机械特性	(9)
一、表面层硬度和应力	(9)
二、表面层的组织变化	(12)
三、表面层的缺陷	(12)
第三节 固体表面的化学特性	(15)
一、表面偏聚	(15)
二、表面吸附与化学反应	(25)
三、罗斯柯依与里宾德尔效应	(31)
第四节 固体表面的接触	(35)
一、接触力学	(35)
二、接触面积	(46)
三、粗糙表面的接触	(48)
第二章 摩擦	(61)
第一节 摩擦的分类	(61)
第二节 摩擦理论	(63)
一、早期的摩擦理论	(63)
二、焊合、剪切及犁削理论	(65)
三、粘-滑现象的原理	(68)
四、摩擦的能量理论	(69)
第三节 滑动摩擦	(72)
一、滑动摩擦机理	(72)
二、刚体在弹性体上滑动	(74)
三、刚体在刚体上滑动	(77)
第四节 滚动摩擦	(83)

一、滚动摩擦机理	(83)
二、刚体在弹性体上滚动	(87)
第五节 摩擦系数的测量及影响因素	(91)
一、摩擦系数的测量	(91)
二、摩擦系数的影响因素	(93)
第六节 摩擦引起的各种效应	(99)
一、温度效应	(99)
二、冶金效应	(101)
三、化学效应	(103)
第三章 金属的磨损	(106)
第一节 磨损的定义和类型	(106)
一、磨损的定义	(106)
二、磨损的分类	(107)
三、轻微磨损与严重磨损	(111)
四、防止严重磨损的可靠性设计	(113)
第二节 疲劳磨损	(114)
一、疲劳磨损的定义和特征	(114)
二、疲劳磨损的损坏形式	(116)
三、剥层与擦伤	(124)
第三节 粘着磨损	(141)
一、粘着磨损的定义和特点	(141)
二、粘着磨损的分类	(142)
三、粘着磨损方式的表达式	(144)
四、研究粘着磨损的意义	(147)
五、粘着磨损的模型	(148)
六、粘着磨损的主要理论	(155)
第四节 磨料磨损	(165)
一、磨料磨损的特点与定义	(165)
二、磨料磨损的分类	(166)
三、磨料磨损的基本原理	(169)
第五节 腐蚀性磨损	(182)

一、腐蚀对磨损的影响	(182)
二、磨损对腐蚀的影响	(182)
三、电化学腐蚀磨损	(185)
四、腐蚀磨损的影响因素	(187)
第六节 冲蚀磨损与微动磨损	(190)
一、冲蚀磨损	(190)
二、微动磨损	(198)
第四章 润滑理论	(205)
第一节 润滑基础	(205)
一、润滑剂	(205)
二、润滑油的粘度	(206)
三、润滑脂的性质	(208)
第二节 液体动压润滑	(211)
一、Navier-Stoke 方程	(211)
二、Reynold 方程	(216)
三、动压油膜的承载机理	(220)
四、理想径向轴承	(232)
五、无限短轴承	(247)
第三节 液体静压润滑	(251)
一、液体静压润滑简介	(251)
二、流量	(255)
三、主要参数和基本公式	(261)
四、径向油垫	(265)
五、平面油垫	(281)
第四节 弹性流体动压润滑	(284)
一、弹性流体动压润滑机理	(285)
二、线接触弹性流动压润滑的基本方程	(287)
三、恒粘—刚性线接触润滑—Martin 解	(291)
四、压粘—刚性线接触润滑—Gatcombe 解	(296)
第五节 边界润滑	(298)
一、边界膜的形成	(300)

二、边界膜的性能	(301)
三、影响边界膜摩擦磨损特性的因素	(303)
第六节 固体润滑	(308)
一、固体润滑的基本概念	(308)
二、实现固体润滑的方法	(309)
三、常用固体润滑材料	(310)
第五章 摩擦磨损试验、检测与计算	(313)
第一节 摩擦磨损试验	(313)
一、摩擦磨损试验的意义	(313)
二、实验室磨损试验的要点	(314)
三、实验室磨损试验机	(316)
第二节 磨损检测	(325)
一、测定方法	(327)
二、磨损的定量评定	(333)
三、磨损表面的形态分析	(335)
四、磨损状态的检测	(337)
第三节 磨损计算	(338)
一、磨损计算的特点	(339)
二、磨损计算过程的特性	(339)
三、磨损的能量计算方法	(342)
第六章 耐磨性设计与研究	(346)
第一节 耐磨性设计的意义	(346)
第二节 耐磨性设计的性质与发展	(347)
第三节 固体表面性质及影响因素	(348)
一、几何性质的影响	(348)
二、物理性质的影响	(351)
第四节 磨损的影响因素	(352)
一、工作变量对磨损的影响	(352)
二、压强或接触面积	(356)
三、表面形状	(356)

四、装配对中	(357)
五、表面温度与冷却能力	(357)
六、运动与滑动量控制	(358)
第五节 磨损的预测与计算	(358)
一、常用磨损预测方法	(358)
二、磨损预测与设计举例	(366)
第六节 润滑与润滑设计	(368)
一、液体动压润滑	(368)
二、弹性液体动压润滑	(369)
三、流体静压润滑	(370)
四、流体润滑的最小膜厚限	(371)
五、润滑剂的选择	(373)
六、建立边界保护膜	(380)
第七节 材料的选择与表面强化	(382)
一、耐磨材料选择	(383)
二、常用材料的性质	(386)
三、材料的表面强化	(398)
第八节 抗磨损设计的系统分析方法和	
磨损零件的失效分析	(408)
一、抗磨损设计的系统分析方法	(408)
二、磨损零件的失效分析	(426)
第七章 化学和电化学法表面薄膜强化	(440)
第一节 槽镀	(440)
一、金属电沉积的定义	(440)
二、槽镀的应用	(442)
第二节 化学镀	(444)
一、定义与特点	(444)
二、化学镀镍的应用	(445)
第三节 复合镀	(445)
第四节 转化处理	(446)
第五节 刷镀	(448)

一、刷镀的优缺点	(448)
二、刷镀的基本原理	(452)
三、影响镀层性能的因素	(478)
四、一种新的精加工技术-精密刷	
镀 Ni-Fe-W-P 合金	(499)
第八章 超硬化合物表面覆层处理及其它	(530)
第一节 表面处理的标记符号	(530)
第二节 表面热处理	(533)
一、火焰加热表面淬火	(533)
二、感应加热表面淬火	(534)
第三节 表面化学热处理	(536)
一、钢的渗碳	(536)
二、钢的氮化	(540)
三、钢的碳氮共渗	(541)
四、钢的渗硫	(542)
五、钢的渗硼	(543)
第四节 热喷涂	(544)
一、氧—乙炔火焰喷涂与喷熔	(544)
二、等离子喷涂	(545)
三、等离子弧粉末堆焊	(551)
四、其它喷涂技术	(553)
第五节 超硬化合物表面覆层处理	(555)
一、化学气相沉积	(555)
二、物理气相沉积	(558)
三、TD 处理	(569)
第六节 离子注入表面强化处理	(573)
一、离子注入的基本原理	(574)
二、离子注入表面强化处理	(575)
第七节 高能量密度表面热处理	(581)
一、激光淬火(激光相变硬化)	(581)
二、激光表面熔融处理(LSM)	(585)

三、激光合金化	(585)
四、激光熔覆	(586)
五、其它高密度能量表面强化技术	(588)
第八节 涂装	(592)
一、涂装方法	(592)
二、润滑、耐磨涂料	(598)
第九节 表面技术的选择	(600)
一、工件的工作条件	(601)
二、基体材料及其热处理工艺	(602)
三、可行性和成本	(602)

第一章 摩擦表面特性与表面接触

第一节 固体表面的几何特性

固体表面形貌(Surface topography)是指其几何形状的详细图形,尤其着重研究表面凸峰(Asperity)的高度变化。表面形貌又称表面结构(Surface texture),表面粗糙度(Surface roughness)或表面光洁度(Surface finish)等。表面形貌这个名词的含义比较广泛,立意比较全面,因此使用较多。

实际的零件表面不可能是绝对平整光滑的,因为任何零件都是由某种加工方法制造出来的,如:铸造、模压成型、切削、研磨、腐蚀、电镀、喷涂、溅射等等。它们都会造成各种各样的表面粗糙度。

图1-1表示了不同加工方法的表面轮廓曲线。

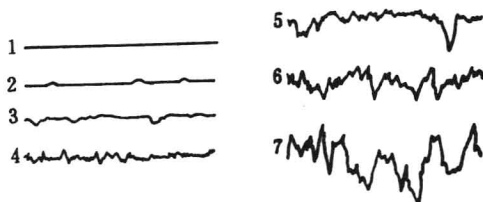


图1-1 不同加工方法的表面轮廓曲线

- 1—理想表面; 2—块规表面; 3—研磨表面
- 4—磨削表面; 5—铣削表面; 6—车削表面
- 7—钻削表面

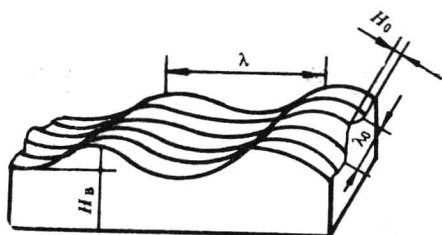


图1-2 表面特征示意图

一、常用的几个表面粗糙度参数

表面轮廓一般可分为三个范畴：几何偏差、波纹度及粗糙度。前者如圆孔出现了椭圆度，圆柱体出现了锥度等，这种偏差往往不被说为是表面形貌的组成部分。波纹度是大体上周期出现的波峰与波谷的分布。其波长 S_w 比波纹的高度 H_w 要大得多，如 $S_w/H_w > 40$ ，(如图 1-2 所示)。这种波纹度经常是由于机加工时不均匀的进刀，不均匀的切削力或机床的振动引起的。粗糙度是在较短的距离内 ($2 \sim 800 \mu\text{m}$) 出现的凹凸不平 ($0.03 \sim 400 \mu\text{m}$)，它是摩擦学研究中最重要的一类表面特征。表示表面粗糙度的参数有很多种，最常用的是以下六种(参看图 1-3)：

(一) 轮廓的算术平均偏差 R_a

描述表面廓形最常用的参数是中线平均值 (Center line average)，用符号 R_a 表示。它是距离表面廓形平均线的平均偏差，因此也称算术平均偏差。

廓形的平均线是一特定的线，它将廓形划分成上下二部分，使线上的面积和线下的面积相等。

中线平均值的数学表达式为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

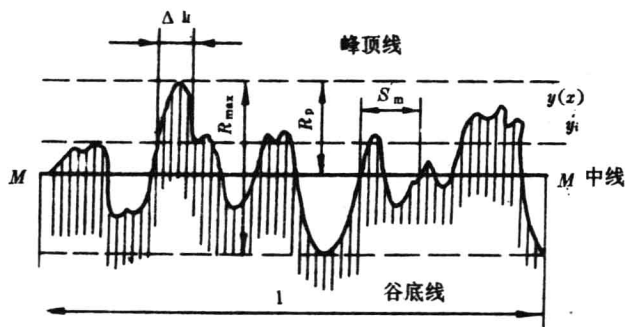


图 1-3 表面粗糙度轮廓示意图

式中: y_i 为以平均线为起点度量出的廓形偏差量, 见图 1-3; n 为在样品长度范围 l 内的度量数目。

用概率统计的表达方式是

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

式中, $y(x)$ 为分布函数 (Distribution function)。

(二) 轮廓的均方根偏差

另一种常用的表面廓形的参数是轮廓的均方根偏差 (Root mean square), 用符号 R_q 表示。其数学表达式为

$$R_q = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)^2 \right]^{1/2}$$

用概率统计的表达式是

$$R_q = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx \right]^{1/2}$$

R_q 比 R_a 能更灵敏地反映离开中线的偏差。

(三) 10 个峰谷高度的算术平均值 R_z

R_z 是指评定长度上 5 个最高峰与 5 个最深谷之差的平均值。这是国际标准化组织 ISO 推荐的参数 (参见 ISO/DIS 4287/1)。

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| - \sum_{i=1}^5 |y_{ni}| \right)$$

式中, y_{pi} 代表最大峰的高度, y_{ni} 代表最大谷的深度。

(四) 最大峰谷距 R_T (或 R_{max})

R_T 是取样长度内最高峰与最深谷之间的高差。这个最高峰与最深谷不一定是相邻的, 但一定是在一个取样长度内。每一取样长度上都有一个 R_{Ti} , 因此, 在每一评定长度上有数个, 依次为 R_{T1} , R_{T2} ..., 其中最大的一个称为 R_T 或 R_{max} 。

(五) 平均凸峰间距 S_m

它是轮廓正斜率(或负斜率)曲线在中线上各交点之间的截距在评定长度内的算术平均值, 这也是 ISO 推荐参数 (ISO/DIS 4287/1)。

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}$$

(六) 承载率 t_r %

承载率是指在某一接触深度上, 各接触峰点的截面总长占整个评定长度的百分比。接触深度可以以最高峰顶为基准, 也可以以中线为基准。使用的形貌轮廓是未经滤波的轮廓。 t_r % 对于接触的应力水平, 润滑与磨损都有着重要的影响。

二、承载面积曲线

表 1-1 列出了对应于各个加工光洁度等级的各种粗糙度的参数。

加工表面的形貌曲线看起来很像尖锐的锯条, 这是高度方向放大倍数远比长度方向大的结果(如 10,000:100)。实际的表面形貌则是另外一个样子(见图 1-4)。