

机械工 程 学 科
研 究 生 教 学 用 书

摩擦学原理

Principles of Tribology

刘正林 主编

高等教育出版社

机械工程学科
研究生教学用书

摩擦学原理

Principles of Tribology

刘正林 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

摩擦学是一门多学科交叉的边缘学科,与载运工具运用工程学科密切相关。本书是机械工程学科研究生教学用书之一,在内容上注重体现表面工程技术在解决摩擦磨损问题的作用,并将纳米摩擦学、环境摩擦学的理念引入传统摩擦学。

本书的基本内容分7章,主要包括:国内外研究状况及将来主要发展方向;表面能、吸附与粘附以及摩擦磨损过程中表面特性的变化;固体表面受载接触过程与特性;古典摩擦定律、摩擦理论、非金属摩擦、滚动摩擦以及纳米摩擦学、环境摩擦学;粘着磨损、磨料磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损等磨损机理;流体动力润滑、弹流润滑、边界润滑原理及其特性、纳米技术在润滑和润滑材料方面的应用;耐磨减摩材料以及表面工程技术在摩擦磨损中的应用;摩擦磨损试验和测试分析技术。

本书可作为高等学校摩擦学课程的研究生教学用书和相关专业师生的教学和科研参考用书,也可供从事摩擦学研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

摩擦学原理/刘正林主编. —北京:高等教育出版社, 2009.2

ISBN 978-7-04-025805-9

I. 摩… II. 刘… III. 摩擦学-研究生-教材
IV. O313.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第213636号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 杜惠萍 封面设计 刘晓翔 责任绘图 尹 莉
版式设计 范晓红 责任校对 殷 然 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 北京新丰印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 14.75

字 数 350 000

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009年2月第1版

印 次 2009年2月第1次印刷

定 价 23.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 25805-00

机械工程学科研究生教学用书专家委员会

主任 高峰
副主任 张以都 赵升吨
委员 (以姓氏拼音为序)
邓兆祥 韩江
黄洪钟 蒋业华
李原 李柏林
刘冲 潘晓弘
潘毓学 史金飞
史铁林 宋锦春
宋轶民 孙文磊
王安麟 吴佩年
夏伟 许立忠
张杰 左敦稳
左正兴
秘书 宋晓

总 序

随着中国高等教育持续发展,研究生教育发生了很大变化,我国已经迅速跨入了世界研究生教育大国的行列。为了满足研究生教育的需求,高等教育出版社组织了若干套丛书作为研究生教学参考用书。其中机械工程学科研究生教学用书是在对全国机械工程学科研究生教育及其教学用书进行全面调研的基础上,由“机械工程学科研究生教学资源建设委员会”组织编写的。组织、编写、出版这套研究生教学用书是一件既有教学价值,又有学术价值的工作。

培养研究生应当特别重视能力的培养。所谓能力,包括自我充实的能力,即独立从一个领域进入另一个领域的的能力,以及解决问题的能力。知识是一个动态的集合:昨天的新知识,今天就可能变成一般的知识,明天也许就要变为需要加以更新的知识。竞争迫使人们不断更新自己的知识和进入新的领域。任何人都不能将他一生中解决问题需要用到的知识都在学校里装进大脑,也不可能年轻时学了就可以用一辈子。因此,如何培养自我充实能力是非常重要的教育课题,特别是在研究生培养阶段。

自我充实主要有三个途径:浏览、读书和实践。在信息技术高度发展的时代,为一个名词搜集几万条信息,往往只是几秒钟的事。因此,需要将浏览和读书作为两个不同的学习方法区分开来。浏览是遍历广泛的信息而可以不甚了了,读书则不同,读书是为了对所描述的领域进行深入的了解。要了解一个领域,并且想进入这个领域,最好的办法就是先找一本这个领域的经典著作,老老实实地读完。不仅要掌握书中阐述的基本概念,还要弄懂书中介绍的基本理论,学好书中采用的基本方法。如果有计算公式,那么最好一个一个地推导,如果有作业,最好一个一个做一遍。读完以后,再依照书和借助其他工具的引导,去浏览可能得到的信息以丰富自己。此时,对于得到的信息,不仅要能够辨别信息的可信程度,而且要估计它的重要性并判断是否需要花时间和需要花多少时间去进一步了解。这样就完成了从不了解到进入一个领域的第一步。一本好书,还应当起到帮助初学者掌握正确的学习方法,和以严谨、科学的治学态度潜移默化地感染读者的作用。

进入一个领域的第二步,也是不可缺少的一步,就是实践。一个人,不论他读了多少书,如果没有亲自做过,他就不可能真正领会很多理论和方法的精髓。当他要用读到的知识去解决问题时,就会觉得没有把握。另外,任何书都不可能完美无缺,经过实践,不仅能够更深入地理解书中正确的方面,更可以发现书中论点和方法的不足之处。读书不是为了做书呆子,而是为了在前人成功的基础上找到自己前进的方向。

从上面的分析可以看到,一本经典著作,对于引领一个人进入一个领域,是多么的重要。可惜现在这样的好书太少了,按照这种要求来写的书太少了。另外,能够这样读书的人也太少了。很多人往往满足于在网络上浏览,或者用对待查手册的态度对待读书。读得也不少,但是越读越理不出头绪。另一方面,没有好书可读也是事实。读文献不等于读书,一篇文献讲的往往是很局部的问题,不可能从一条缝隙中看到一片天;综述文献又太概括,对于还不熟悉这个领域的人,很难从中了解问题的本质。

高等教育出版社组织的若干套研究生教学用书,按照人们的期望,应当走出过去写本科生教材的框框,应当能够向专门的学术著作方向发展,希望其中一部分,能够在一段时间以后成为相应领域中的经典著作。从组织这套机械工程学科研究生教学用书已经确定的选题来看,覆盖了机械工程学科许多非常重要的基础领域,如果能够写好,将会对研究生培养起到重要作用,对于工作在非教育岗位上的同行,也是自我充实的宝贵资源,是继续教育的重要组成部分。从研究生自我充实能力培养的角度出发,这些领域的好书太重要了。研究生不能再靠听课来充实自己,也不能再靠以考试打分去考察他们的能力。这就是为什么人们对这套机械工程学科研究生教学用书寄以殷切期望的原因。

愿它们能够早日与大家见面。

中国工程院 院士 谢友柏
上海交通大学 西安交通大学 教授
2008年6月

前 言

摩擦学是一门多学科交叉的边缘学科,与载运工具运用工程学科密切相关。通过本课程的讲授,可拓宽学生的基础知识结构,加强各学科知识的融合,培养学生独立思考、理论联系实际、开拓创新的能力。

本书的基本内容分7章,主要包括:国内外研究状况及将来主要发展方向,表面能、吸附与粘附以及摩擦磨损过程中表面特性的变化,固体表面受载接触过程与特性(包括力学性能、物理化学性能、接触面积、表面形貌等),古典摩擦定律、摩擦理论、非金属摩擦、滚动摩擦以及纳米摩擦学、环境摩擦学;粘着磨损、磨料磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损等磨损机理,流体动力润滑、弹性流体润滑、边界润滑原理及其特性、纳米技术在润滑和润滑材料方面的应用,耐磨减摩材料(包括纳米材料)以及表面工程技术在摩擦磨损中的应用,摩擦磨损试验和测试分析技术。

本书注重摩擦学的系统依赖性、时间依赖性和多学科、跨学科特性以及理论与实际的有机结合,充分体现表面工程技术在解决摩擦磨损问题时所起到的作用,并将纳米摩擦学、环境摩擦学的理念引入传统摩擦学,注入新内涵。

本书由刘正林制订写作大纲、统稿与定稿,并任主编,参加撰写的人员为刘正林(绪论、第3章、第4章、第6章)、周新聪(第1章、第2章、第7章)、朱汉华(第5章)。本书可作为研究生教学用书或教学参考资料。

全书由周劲南教授与赵新泽教授审阅。在撰写本书的过程得到了周劲南教授和各位同行的大力支持,提出了不少宝贵意见。在此一并表示衷心感谢!

由于学识水平有限,本书肯定有不完善之处,敬请各位读者指正。

编 者

2008年8月于武汉理工大学

目 录

0 绪论	1	2.2.3 理想粗糙表面的接触	51
1 固体的表面特性	6	2.3 塑性接触	54
1.1 表面形貌	6	2.4 变形种类的判据——塑性指数	54
1.1.1 表面形貌	6	3 金属的摩擦	57
1.1.2 表面参数	7	3.1 摩擦的概念与分类	57
1.1.3 表面形貌的测量方法	11	3.2 对古典摩擦定律的评述	58
1.2 洁净的固体表面	11	3.3 摩擦理论	62
1.2.1 金属的晶体结构	11	3.3.1 机械理论(凹凸说)	62
1.2.2 洁净的金属表面	15	3.3.2 分子理论(分子说)	63
1.2.3 表面晶体缺陷及其分布对表面性能的影响	16	3.3.3 分子-机械理论	64
1.3 表面张力与表面能	21	3.3.4 粘着理论	65
1.3.1 表面张力	21	3.3.5 其他摩擦理论	77
1.3.2 表面能	22	3.3.6 摩擦振动(粘-滑运动)	79
1.3.3 影响表面能的主要因素	24	3.4 非金属材料摩擦	80
1.3.4 表面现象热力学	26	3.4.1 弹性体摩擦的一般机理	80
1.4 加工硬化层和表面残余应力	27	3.4.2 塑料(聚合物)的摩擦	86
1.4.1 加工冷作硬化层	27	3.4.3 橡胶的摩擦	90
1.4.2 表面残余应力	29	3.4.4 金刚石的摩擦	91
1.5 吸附与粘附	30	3.5 摩擦时金属表面特性的变化	91
1.5.1 物理吸附膜	31	3.5.1 由摩擦引起的表面几何形状的变化	91
1.5.2 化学吸附膜	31	3.5.2 由摩擦引起的表面结构的变化	92
1.5.3 化学反应膜	32	3.5.3 由摩擦引起的表面成分的变化	94
1.5.4 氧化膜	33	3.5.4 摩擦中表面膜的变化	96
1.5.5 浸润	37	3.6 滚动摩擦	97
1.5.6 粘附	38	3.6.1 弹性范围内滚动	98
1.6 金属表面的实际结构	39	3.6.2 塑性范围内滚动	103
2 固体表面的接触	40	3.7 影响摩擦系数的主要因素	104
2.1 概述	40	3.8 特殊工况条件下的摩擦	106
2.1.1 固体表面接触过程	40	4 磨损原理	108
2.1.2 接触面积	40	4.1 概述	108
2.1.3 接触模型	41	4.2 粘着磨损	111
2.2 弹性接触	42	4.2.1 粘着磨损理论(鲍登-泰勃的粘着磨损理论)	111
2.2.1 静载荷下的弹性接触	42	4.2.2 其他粘着磨损理论	116
2.2.2 动载荷(摩擦载荷)下的弹性接触	48	4.3 磨料磨损	119

4.3.1 磨料磨损及其机理	119	6.1 金属耐磨材料	174
4.3.2 磨料磨损简化的定量关系式	123	6.1.1 材料的耐磨性及其评定指标	174
4.3.3 影响磨料磨损的主要因素和减小 磨损的途径	123	6.1.2 对金属耐磨性材料的一般要求	176
4.4 疲劳磨损	127	6.1.3 耐磨钢	177
4.4.1 最大切应力理论	129	6.1.4 耐磨铸铁	181
4.4.2 油楔理论	131	6.2 滑动轴承合金	186
4.4.3 微观点蚀磨损理论	132	6.2.1 对轴承合金的要求	186
4.4.4 剥层磨损理论	132	6.2.2 滑动轴承合金	186
4.4.5 影响疲劳磨损的主要因素	135	6.3 聚合材料	191
4.5 腐蚀磨损	138	6.3.1 聚合材料简介	191
4.5.1 氧化磨损	138	6.3.2 摩擦副中常用的聚合物	191
4.5.2 特殊介质腐蚀磨损	139	6.3.3 以聚合物为基的复合材料	193
4.6 气蚀	139	6.3.4 应用	194
4.7 微动磨损	139	6.4 表面处理技术	197
5 润滑	142	6.5 纳米表面技术	203
5.1 润滑原理	142	7 摩擦磨损试验和测试分析技术	205
5.1.1 润滑的作用和分类	142	7.1 摩擦磨损试验的分类	205
5.1.2 润滑状态的转化	142	7.1.1 使用试验	205
5.1.3 流体动力润滑	143	7.1.2 实验室试验	205
5.1.4 弹性流体动力润滑	149	7.2 磨损试验的模拟问题和试验 参数的选择	206
5.1.5 流体静力润滑	154	7.3 摩擦、磨损、润滑试验机	208
5.1.6 边界润滑	158	7.3.1 试验机的种类	208
5.2 润滑材料及其应用	160	7.3.2 常用的摩擦磨损试验机	209
5.2.1 润滑剂的分类	160	7.4 摩擦磨损试验中的测试	213
5.2.2 润滑油的主要性能	160	7.4.1 摩擦温度的测量	213
5.2.3 润滑油的添加剂	163	7.4.2 摩擦系数的测量	214
5.2.4 合成润滑油	165	7.4.3 磨损量的测量	215
5.2.5 润滑脂	166	7.5 摩擦表面的近代微观分析法	217
5.2.6 固体润滑剂	169	7.6 磨损微粒的分析技术	220
5.3 纳米材料在润滑中的应用	172	7.6.1 光谱分析法	221
5.3.1 纳米材料及其特性	172	7.6.2 铁谱分析法	221
5.3.2 纳米材料在润滑中的应用	172	参考文献	225
6 耐磨减摩材料及表面处理	174		

0 绪 论

1. 摩擦学定义

摩擦普遍存在于人类的生产和生活中(包括人体内),凡有运动的地方就有摩擦产生,摩擦必然伴随着摩擦面的磨损,它是具有重大影响和作用的一种自然现象。

摩擦学(tribology)是关于作相对运动的相互作用表面的科学技术,包括摩擦、润滑、磨损和冲蚀。它涉及多种学科领域,如物理、化学、工程力学、冶金学、机械工程、材料科学、石油化工等。

2. 摩擦学研究内容

摩擦学研究的内容很广泛,主要包括摩擦、磨损、润滑以及表面工程技术。

(1) 摩擦

摩擦是抵抗两物体接触表面在外力作用下发生切向相对运动的现象。物体表面的相对运动、相互接触、相互作用所发生的各种变化特性,将取决于配对材料的种类及其机械性质、表面的微观几何尺寸(表面粗糙度及加工痕迹)、摩擦表面相对运动的工作条件(滑动速度、压力、温度、润滑状况、环境及周围介质的作用)、表面膜的生成和作用等因素。凡是影响物体接触几何形状和性质的因素都会影响它们的摩擦学特性,因此需要对材料的表面结构和实际接触部分的物理特性和有关影响因素进行研究。

(2) 磨损

磨损着重研究与分析材料和机件在不同工况下的磨损机理、发生规律和磨损特性。对于磨损机理看法很多,其中对磨料磨损、粘着磨损机理的认识比较一致;对于微动磨损、浸蚀磨损、腐蚀磨损、表面疲劳磨损的机理目前仍存在不同的看法。有关磨损机理、磨损规律和磨损失效的研究有待进一步深入。对磨损的研究使我们有可能进行合理的机械设计,合理地选择摩擦副材料及表面处理工艺,节约材料和能源,保证机器及其零部件有足够的使用寿命,且便于制造、维修和管理。

(3) 润滑

润滑研究内容包括流体动力润滑、静力润滑、边界润滑、弹性流体动力润滑等在内的各种润滑理论及其在实践中的应用。近年来流体和弹性流体动力润滑的研究成果解决了机器中许多重要零部件(如齿轮、轴承、凸轮等)的设计问题,如润滑剂性质和作用的研究,尤其是纳米润滑剂的研究也有长足的发展,这对于改善润滑状况、减少摩擦、防止磨损和保证机器的正常运转有着重要的作用。

(4) 表面工程技术

将表面工程技术与摩擦学有机结合起来,解决机器零部件的减摩、耐磨,延长使用寿命的问题,是摩擦学在工程应用的一个重要方面。

随着科学技术的发展,摩擦学的理论和应用必将由宏观进入微观,由静态进入动态,由定性进入定量,成为系统综合研究的领域。

3. 摩擦学发展史

摩擦学是一门年轻而又古老的学科。人类对摩擦现象早有认识,如史前人类的钻木取火。公元前 2000 年左右,我国人民就已经使用古车、轱辘、滑车、木质滑动轴承,公元前 200—300 年已能制造青铜和铁基轴承。在 14 世纪前,我国在轴承、轮轴、齿轮、凸轮、润滑及润滑剂等方面的摩擦学知识一直居于世界前列。

但长久以来,摩擦学的研究进展缓慢,直到 15 世纪,意大利的列奥纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452—1519)才开始把摩擦学引入理论研究的途径。在 15 世纪中叶,他首先认识到摩擦力与载荷成正比,而与名义接触面积无关,并根据试验得出,摩擦力的大小为载荷的 $1/4$ (即摩擦系数 $=0.25$)。他发现:随着载荷的增大,磨损加剧,磨损方向不一定在铅垂方向,而是沿着载荷的主向量方向。为了减少磨损,他研制了一种含 30% 铜和 70% 锡的轴承合金。

对摩擦的系统研究方面,法国的阿蒙顿(Aмонтон, 1699)和库仑(Coulomb, 1785)作出了重要贡献。两人的试验都表明摩擦力 F 和法向载荷 W 成正比(这一比值称为摩擦系数 f);摩擦力 F 与配对表面的材料性质有关,与接触面积大小无关。虽然这些结论现在已被证明是有条件的,但长期以来,一直作为摩擦定律,在物理与力学中被广泛应用。1785 年,库仑用机械啮合概念解释干摩擦,提出了摩擦理论。后来又有人提出分子吸引理论和静电力学理论。1935 年,英国鲍登等人开始用材料粘着概念研究干摩擦,并在 1950 年提出了粘着理论,而苏联科学家克拉盖尔斯基则在 1939 年提出了摩擦的分子-机械学说。

对磨损的研究开展较晚,20 世纪 50 年代提出粘着理论后,60 年代在相继研制出各种表面分析仪器的基础上,磨损研究才得以迅速开展。至此,综合研究摩擦、润滑和磨损相互关系的条件已初步具备,并逐渐形成摩擦学这一新的发展学科。

与磨损相比,润滑的研究比较成熟。1883 年,英国蒸汽机车工程师 B. Tower 发现流体动力润滑现象后,1886 年,英国的雷诺(Reynolds)根据流体力学基本理论,建立了流体动力润滑基本方程式。随后一百多年的流体动力润滑理论与轴承技术的研究都是以求解雷诺方程为基础展开的,成为理论解决工程问题的成功典范。在 1930 年前后,雷诺润滑理论、滚动轴承理论等趋于完善。20 世纪 50 年代,人们发现在滚动轴承、凸轮、齿轮工作表面接触区存在一种极高压力状态下的油膜,建立了弹性流体动力润滑理论。在普遍应用计算机之后,线接触弹性流体动力润滑的理论开始有所突破。

在 1997 年伦敦第一届世界摩擦学大会上,Dowson 全面总结了 19 世纪摩擦、磨损与润滑领域所取得的重要成就。始于 19 世纪初对摩擦的研究,19 世纪中叶对矿物油的提炼,19 世纪下半叶关于滚动摩擦、赫兹(Hertz)接触应力、雷诺润滑方程和倾斜瓦止推轴承的研制是 19 世纪摩擦、磨损与润滑研究领域的最主要成就。

人类进入 20 世纪,Stribeck 通过对轴颈轴承的研究,建立了著名的关于润滑剂粘度、滑动速度、载荷与摩擦系数的关系曲线。随着现代工业的发展及表面科学的迅速崛起,推动了润滑、材料磨损以及摩擦化学的研究和深入,尤其是汽车工业极大地促进了以 Babbitt 合金及 Cu-Pb 合金为主的滑动轴承的发展,促进了润滑剂及润滑添加剂技术的进步。在固体润滑研究方面,以二硫化钼(MoS_2)、石墨、聚四氟乙烯(PTFE)、聚合物、氧化物为代表的固体润滑材料在航空、航天、核工业获得了广泛使用。

20 世纪 80 年代以来,摩擦学已从传统的机械学和力学转向新型润滑与防护材料、磨损及摩

擦化学与物理的研究。摩擦化学、陶瓷摩擦学、摩擦学表面工程等领域获得了飞速发展,而计算机工业、微型机械的发展及纳米技术的出现又推动了微观摩擦学(纳米摩擦学)的研究。美国机械工程学会的调查报告认为,材料摩擦学的研究是摩擦学中的常青树。

4. 摩擦学研究发展趋势

未来科学技术的进步及工业的发展直接决定摩擦学的发展方向。

(1) 微观摩擦学

纳米分析技术的进步促进了微观摩擦学的发展。自1982年Binning(1986年Binning与Rohrer获得诺贝尔物理奖)第一次通过扫描隧道显微镜(STM)获得了三维原子尺度分辨以来,通过对原子力显微镜(AFM)的改进,于1987年测得了纳米尺度上的摩擦力,继而在1991年利用AFM获得了纳米尺度的表面形貌。纳米超薄膜、自组装膜、纳米粒子及纳米整体材料备受青睐,并有望以此而发展多种高性能的润滑防护材料。研究表明,纳米SiC与微米SiC相比可以更有效地降低聚合物材料的摩擦和磨损。

(2) 特殊工况下的摩擦学

随着航空、航天、信息、海洋开发、先进制造等高新技术工业的迅速发展,迫切需要解决重载、高速、高温以及高真空、强辐射等极端条件下的摩擦学问题。与常规系统的摩擦学相比,极端条件下的摩擦学主要有如下特点:①高真空(如 10^{-11} Pa)下缺少氧化膜的润滑作用,易发生冷焊;②高速(如40 000 r/min)、重载(如数千兆帕)、宽温度范围(如 $-269 \sim 2\,000$ °C);③强辐射、空间低轨道($10^{-5} \sim 10^{-7}$ Pa)下原子氧的侵蚀;④低摩擦(如摩擦系数0.01)和摩擦噪声、长寿命(数十年)、高可靠性;⑤高 pv 值、强氧化(如液氧)和强还原(如液氢)介质;⑥模拟试验异常困难。

空间运载工具与飞行器的的工作环境十分复杂,工况极其严酷,而且这类器具性能的先进性和运行的可靠性直接关系到国家的安全。据统计,在1960年到2000年的40年间,在世界范围内,包括哥伦比亚航天飞机在内的空间运载工具和飞行器共发生了11起由于摩擦学问题引起的事故。因此,在发达国家,已将专门研究此领域的摩擦学问题的空间摩擦学独立成为摩擦学的一个重要学科分支,且日益受到重视。

针对我国卫星、火箭、航空等计划和信息技术、先进制造技术等所遇到的多种苛刻工况下的摩擦学问题,开展特殊条件下的摩擦、磨损与润滑的研究势在必行。

(3) 环境友好摩擦学

环境友好摩擦学主要包括环境兼容润滑剂、环境友好润滑技术以及噪声防治技术等。据不完全统计,欧盟每年销售的450万吨润滑油中的大约13%在无控制的状态下进入环境,而泄漏和事故导致的液压油损失达8%。从环境保护和摩擦学而言,环境友好润滑剂及添加剂必须具有生物可降解性、较小的生态毒性和毒性累积性,必须满足油品的性能规格要求。

环境友好润滑剂主要研究领域包括电冰箱压缩机用润滑剂,发动机润滑油,农业、林业、食品加工、采矿、建筑和娱乐业用润滑油及其添加剂,金属加工液及其添加剂,液压油和工艺油等。研究新一代经济性更好的高效、多功能绿色润滑油,比如高水基润滑剂HWBF(high water basic fluid)等取代传统矿物基础油,以减少环境污染。在摩擦噪声防治方面,主要研究对环境产生噪声污染严重的高频尖啸摩擦噪声以及摩擦副表面形貌对摩擦噪声的影响,开发无石棉多纤维混杂无公害摩擦材料等。

(4) 节能摩擦学

人类社会的可持续发展与节能环保紧密相关。摩擦引起的损失包括能源以及零部件的消耗,而能源消耗即意味着污染。据英国 1997 年的调查,英国工业每年仅仅由于磨损就损失 6.5 亿英镑。1999 年,美国能源部披露:美国车辆发动机及传动系统通过减少摩擦、磨损,每年可节约 1 200 亿美元。正是在这种背景下,摩擦学越来越受到工业国家的重视,突出了环境、节能和可持续发展这个主题。

节能摩擦学的主要任务是通过摩擦学设计、润滑技术、表面处理以及材料研制这些技术环节来降低摩擦、磨损引起的能量和材料消耗,提高经济性。节能必然涉及交通领域。汽车是公路交通中量大面广的能量利用、消耗系统,其中发动机和传动装置的机械摩擦损耗占发动机总能耗的 12%,因此要最大限度地降低摩擦,减少燃料消耗,包括使用性能良好的低粘度润滑油和有效减摩添加剂,采用合适的减摩、耐磨涂层以及控制表面结构等摩擦学设计技术来改善发动机的摩擦学性能。近些年来发展的纳米热喷涂、纳米电刷镀、纳米减摩自修复和金属磨损自修复等技术以及纳米陶瓷复合涂层、纳米固体润滑涂层、金属间化合物复合涂层等已成为节能和延寿的重要摩擦学技术。

(5) 生物摩擦学/人体摩擦学

生物摩擦学/人体摩擦学对于提高人类生命质量,促进生物材料与生物医学工程技术的发展以及将生物技术引入到机械工程中都具有重要的意义。

生物摩擦学是研究在生物体内有关生物体自身及其替代物(人工制品)、仿生材料的摩擦学问题,而人体摩擦学则是研究心血管系统、关节、牙、眼、皮肤等天然与人造组织的摩擦学问题。这个领域关系到人类的健康和生命质量。目前研究目标是研制摩擦磨损低、病理反应轻微的如关节、牙齿和人工心脏瓣膜等人工器官。2003 年统计,全世界人工关节置换病例约 200 万人次,当前大量的研究主要集中在金属对金属关节假体(Co-Cr-Mo 合金)的磨损特性与控制、滑液的影响以及整体关节假体的人工关节软骨的选材等方面。对于心脏瓣膜置换术而言,自 1960 年开始以来,至今效果不十分满意,原因是心脏瓣膜材料与血液反复摩擦产生磨损以及疲劳断裂等不良影响。

与一般机械系统相比,生命系统是一个低摩擦或超滑系统,例如关节软骨/滑液的摩擦系数是 0.004,关节软骨/关节软骨的摩擦系数为 0.02~0.001。显然,生物润滑剂和生物润滑系统的研究对于微机电系统和计算机磁盘表面的润滑具有实际意义。与一般机械采用的油基的人造润滑剂不同,水基生物润滑剂是通过化学作用附着在关节软骨表面上,因而润滑效果更好。最近开发的一种计算机硬盘表面,就采用了 2~4 nm 厚的聚合物层,这反映了从生物系统移植水基润滑剂技术的一种趋势。

(6) 摩擦学系统中的表面科学与工程问题

先进的表面工程技术在解决国民经济建设中的摩擦磨损(包括润滑)的失效中发挥了巨大的作用,但一些基础性的研究如纳米薄膜、表面处理层(涂层、复合涂层等)的力学分析、摩擦化学、摩擦磨损机理、结合强度以及表面工程设计标准等研究有待进一步突破。

5. 研究摩擦学的意义

摩擦学是一个充满着高新科学技术、多学科交叉的工程领域,涉及材料、化学、机械、物理和力学等多个领域。摩擦学的发展对航空、国防安全和微纳制造、生物制造、人类健康工程等领域

都有直接的促进和推动作用,对建设资源节约型的社会和实现国民经济的可持续发展产生重大影响。

一般认为,人类一次能源大约 1/3 消耗于摩擦,约有 70% 的设备损坏是由于各种形式的磨损而引起的,节约材料也是节约能源。而德、美、加等国的广泛研究表明:摩擦学科技在工业上所节约的费用可占 GNP 的 1.0% ~ 1.4%,取其平均值 1.2%。根据我国 2007 年 GDP 246 619 亿元估算,2007 年我国工矿企业在摩擦磨损润滑方面的节约潜能约 2 959 亿元。这数字说明,重视摩擦学的研究、应用和管理所产生的效益回报将是十分巨大的。

1) 我国消耗了占世界 30% ~ 40% 的钢、50% 的水泥,GDP 占世界的 4% ,等当量 GDP 能源消耗是美国的 2 倍,欧洲的 3 倍,日本的 4 倍。

2) 据预测,2010 年我国汽车保有量将达 5 000 万辆左右,2020 年将达 1 亿辆。汽车机械能只有 32% 左右输出到车轮上,其余的都消耗于摩擦副。随着汽车的增长,燃油需求量增加,对燃油经济性的要求就越来越迫切。如能改进设计、正确使用,可使汽车燃油指标降低 5% ~ 30%。

3) 国内工业品的能源利用率仅占 32% ~ 34%,比发达国家高出 10 多个百分点。能源和原材料消耗所占成本高达 75% 左右,降低 1% 便可产生经济效益 100 亿元。

4) 我国工矿企业在摩擦、磨损和润滑方面节约潜能巨大,每年约几百亿到上千亿元。

6. 展望

我国是石油消费大国,但石油资源利用效率低,石油消费强度(吨石油/千美元 GDP)大约是日本的 4 倍。石油资源短缺的矛盾在今后的 20 年内将日益突出,这对我国经济、社会的发展和国家安全十分不利,形势严峻。

在全球面临资源、能源与环境严峻挑战的今天,摩擦学在节能、节材、环保以及支撑和保障高新科技的发展中发挥了不可替代的作用。应结合国情,把节能摩擦学、空间摩擦学作为中国摩擦学发展的主要方向,并积极开展微/纳摩擦学、生态/环境摩擦学、人体摩擦学等前瞻性研究。

1 固体的表面特性

固体,如金属材料,由于研究的侧重面不同,可将其分为表面性质和整体(体积)性质。两者无疑是有联系的,它们都会直接或间接地影响摩擦、磨损与润滑过程及其磨损机理。

材料的整体性质一般是指屈服强度、断裂强度、弹性模量、剪切模量、硬度、脆性、热导率、熔点、再结晶温度等。

材料的表面性质一般是指表面粗糙度和波纹度、表面能、化学活性、表面吸附层、氧化层或化学反应层、加工硬化层以及表面残余应力等。

当然,材料的组分和微观结构对摩擦与磨损无疑有着重大的影响。

由于摩擦现象发生在两相对运动物体的表面之间,显然,物体的表面性质将直接影响摩擦、磨损与润滑过程。因此,需先研究物体的表面特性。

1.1 表面形貌

在给定的场合下,除了表面的物理、化学、机械特性,金相组织和润滑状态等对摩擦与磨损有重大影响以外,另有一个极其重要的方面就是表面形貌,特别是表面粗糙度,它对两表面的接触力学性能和摩擦磨损过程与机理的影响极大。因此,首先研究表面形貌构成和特性。

1.1.1 表面形貌

固体表面,即使是光滑的工程表面,在显微镜下观察时,也都好似大地上布满了峡谷、高岗和山岳。这就是说,从微观角度看,任何固体表面都具有不规则的几何形状。通常所说的固体表面几何形状包括微观粗糙度、宏观粗糙度(即波纹度)和宏观几何形状偏差。而摩擦学中关注的主要是表面粗糙度和波纹度,也就是摩擦学中所称的表面形貌,有时又称表面结构,如图 1-1 所示。

图 1-1b 中的 T 和 S 以及 H 和 h 分别表示宏观和微观粗糙度的波距和波高。

摩擦学中常把表面结构中独立的单体称作微凸体。微观粗糙度指的就是这种微凸体几何形状的细节,而宏观粗糙度则表示这些单体(凸体)组合。

粗糙微凸体(微观不平度)高度和间距均很小,它主要是由于加工过程的刀痕、刀具和工件表面的摩擦、切屑分离时的塑性变形、金属撕裂以及工艺系统中存在着高频振动等原因所造成的。根据加工方法的不同,实际的工程表面上的微凸体(微观不平度)高度一般为 $0.05 \sim 50 \mu\text{m}$,而它们之间的距离约为 $0.5 \sim 1\ 000 \mu\text{m}$ 。

表面波纹度(宏观粗糙度)波高和波距较之粗糙微凸体的高度和间距要大得多。它主要是由于切削过程中运动的不均匀性引起的,如机床-工件-刀具工艺系统存在着强迫振动等。从摩擦学观点看,若表面波纹度过大,便会增大摩擦中表面牵引力的切向分量,从而导致磨损率明显增加。表面波纹度的波距一般在 $1 \sim 20 \text{ mm}$ 内变动,其高度相应为数微米到 $40 \mu\text{m}$ 。

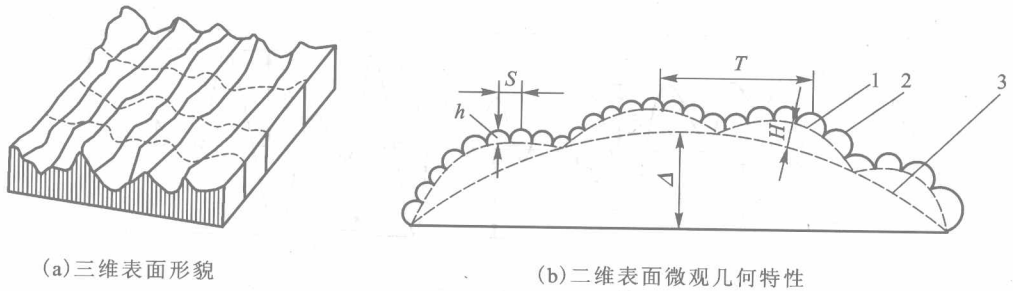


图 1-1 固体表面形貌的组成

1—波纹度;2—粗糙度;3—宏观几何形状偏差; T —波纹度波距
 S —粗糙度波距; H —波纹度波距高; h —粗糙度波高; Δ —形状误差

1.1.2 表面参数

工程上大多数表面几何形貌是随机的(即多数的表面是各向异性的),也就是说表面粗糙高度的分布是不规则的。为了描述一个表面的粗糙特征,国家标准(GB/T 3505—2000)规定采用评定轮廓的算术平均偏差 R_a 、轮廓的最大高度 R_z 、评定轮廓的均方根偏差 R_q 以及轮廓的支承长度率曲线等表面参数来评定。

1. 评定轮廓的算术平均偏差

评定轮廓的算术平均偏差 R_a 是在一个取样长度 l_r 内纵坐标值 $Z(x)$ 绝对值的算术平均值,如图 1-2 所示。其计算式如下:

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z(x) dx \quad (1-1)$$

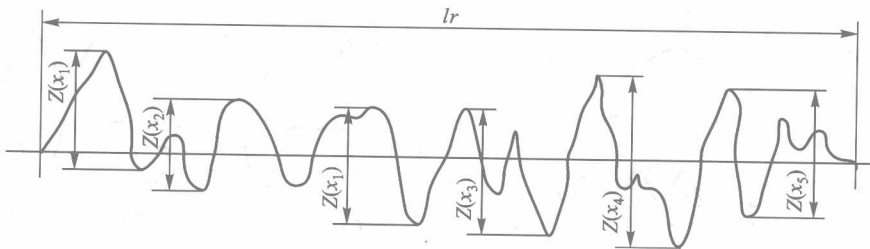


图 1-2 轮廓的算术平均偏差

2. 轮廓的最大高度 R_z

轮廓的最大高度 R_z 是在一个取样长度 l_r 内最大轮廓峰高 Z_p 和最大轮廓谷深 Z_v 之和的高度,如图 1-3 所示。

其计算式如下:

$$R_z = Z_{p_{\max}} + Z_{v_{\max}} \quad (1-2)$$

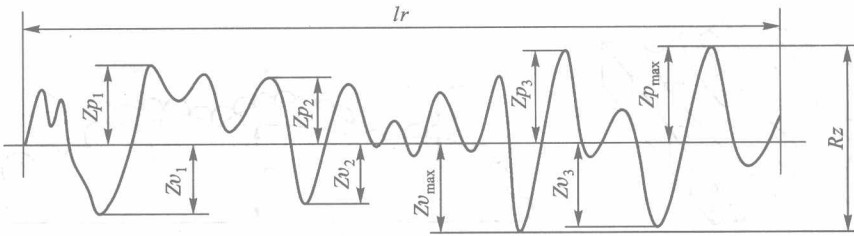


图 1-3 轮廓的最大高度

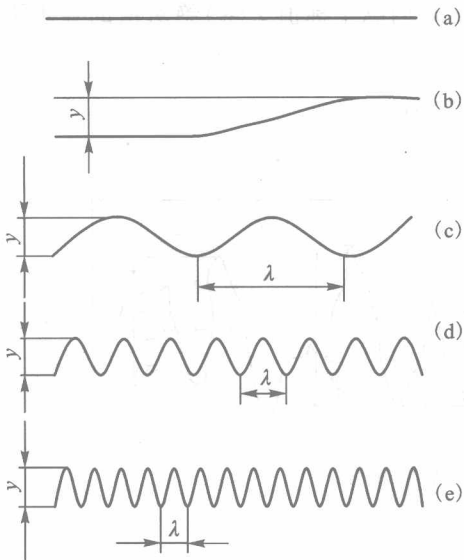
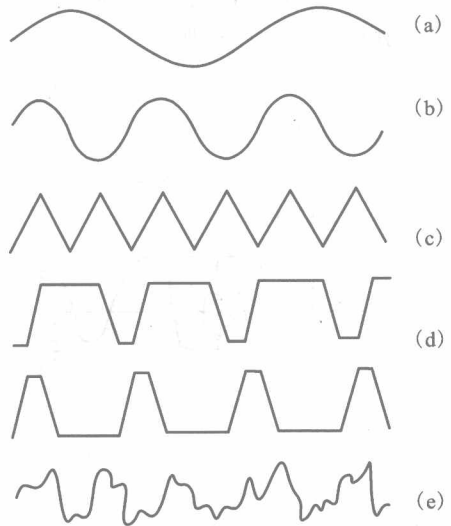
3. 评定轮廓的均方根偏差 Rq

评定轮廓的均方根偏差 Rq 是在一个取样长度 lr 内纵坐标值 $Z(x)$ 的均方根值。

其计算式如下：

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (1-3)$$

无论是评定轮廓算术平均偏差 Ra 或轮廓的最大高度 Rz 等,都是用平面垂直截于工作表面所得的表面形状特性。因此,它只能说明表面粗糙微凸体在某一垂直方向上的轮廓偏差,而不能说明表面粗糙微凸体的斜率、形状和尺寸大小。有时可能会碰到,峰与谷高度相等但波长 λ 不同的轮廓表面却可能得出相同的 Ra 或 Rz 值,如图 1-4 和图 1-5 所示。

图 1-4 峰和谷的高度相等但波长 λ 不同的理想的表面微凸体的迹线图 1-5 具有同样 Ra 值的各种不同表面的

可见, Ra 和 Rz 这些单值参数只是对以同一方法加工的同类表面的分级才是确切有用的。例如,对研磨表面而言,尽管加工用的研磨剂粒度不同,其粗糙度模式还是相同的,从而用一个单值参数就足以表征这些表面的特性。然而,若要更精确地评定表面轮廓,单靠 Ra 或 Rz 值是不够