



基础摩擦学

ИСНУМОСАХИЕ

□ 张 嗣 伟



石油大学出版社

基础摩擦学

张嗣伟 主编

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基础摩擦学 /张嗣伟编著. —东营:石油大学出版社,2000.12

ISBN 7-5636-1450-8

I.基... II.张... III.摩擦-高等学校-教材

IV.TH117

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 55415 号

基础摩擦学

张嗣伟

出 版 者:石油大学出版社(山东东营,邮编 257061)

网 址:<http://sunctr.hdpu.edu.cn/upcpres>

电子信箱:upcpres@sunctr.hdpu.edu.cn

印 刷 者:石油大学印刷厂

发 行 者:石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:339 千字

版 次:2001 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1—1000 册

定 价:18.00 元

前言

1979年中国机械工程学会摩擦学分会正式成立后的第二年,作者应邀为胜利油田先后举办的两期机械工程师培训班开设了《摩擦学基础》讲座,之后,打算在此基础上编写一本摩擦学简明教材。为此,1982—1984年在美国进修期间,在从事高分子材料摩擦学研究之余,着手做编写教材的准备工作。其间,听了密歇根大学鲁德玛(K. C. Ludema)教授开设的“摩擦与磨损”课程;向麻省理工学院拉宾诺维奇(E. Rabinowicz)教授索取了他主讲的“摩擦学”课程的讲稿。此外,还收到弗吉尼亚工学院和州立大学艾斯(N. S. Eiss)教授的“摩擦与磨损”课程的教学大纲。1984年秋回国,第二年初为本科生开设了“摩擦与磨损(摩擦学基础)”课程。1986年应《石油机械》编辑部之约,为该刊“技术讲座”栏目编写了连载的“摩擦学基础知识”讲座。1987年,应石油大学出版社的要求,拟订了《基础摩擦学》教材编写大纲的初稿,此后对该大纲又曾几易其稿。但这10余年来,由于种种原因,1994年才开始动笔,而且时断时续,直到最近才完稿,算是了却了这20年来的心愿。

据不完全统计,到目前为止,国内编写并正式出版的摩擦学教材已有近20种,这正如我在本书绪论中所指出的:“摩擦学是一门学科边界还没有完全界定的新兴学科,它的学科体系还不够完善,学科内容也还在不断发展。”因此,出现各种按照不同观点、从不同侧重面编写的不同风格的教材是十分自然的,这对普及摩擦学的基本知识和促进摩擦学的教学都是有益的。

本书取名“基础摩擦学”,是为了强调它的基础性,并界定了它的内容(基本理论、基本知识和基本方法)。然而作为一本教材,不仅要十分注意把摩擦学的基本部分精选出来,而且更应根据教学规律和教学过程(有别于认识过程)的特点去阐明这些内容。为此,作者总结了近20年来为本科生、研究生和机械工程师进行教学与培训的经验,并分析了美、英等国以及我国几所大学的摩擦学教学大纲和教科书,在此基础上,主持编写了这本教材。

全书共分十二章,在第一章“绪论”中,阐明了摩擦学的研究对象与内容、学科特点和基本框架及基本方法,明确了摩擦学课程的目的要求。从某种意义上说,固体的表面与界面是摩擦学研究的起始点与归宿,它是研究摩擦、磨损与润滑的基础,因而也可以说是摩擦学基础的基础。为此,在第二章“固体表面与界面”中,除了像一般摩擦学教材介绍固体的表面特性之外,特别突出了界面与界面效应的内容。在其余各章内容的选择上,除了着重介绍摩擦学的基础部分外,还注意把学生带到本学科的前沿,并在各章之后提供了较多的参考文献。还专门编写了第十二章“摩擦学的进展与展望”,这都是为了激发学生进行科学探索的热情,并给他们留下更广阔的思考空间,以增强他们的创新意识。

本书可作为高等院校机械类和材料类专业的研究生和高年级本科生的教学用书或教学参考书,也可供一般工程技术人员阅读和参考。

在本书中,有关润滑原理的三章,即第五、六、七章,由罗纬教授编写,第八章“润滑剂与添加剂”由吴芳云教授编写。我本人编写了其余的八章,并负责制定全书的编写大纲和进行了统稿。实际上,从1985年起,本书的主要内容已在华东石油学院历届与西安石油学院1届石油矿场机械专业高年级本科生和石油大学历届石油与天然气机械工程(即后来的机械设计及理论)专业的硕士研究生中,以及6届油田厂矿机械工程师培训班中讲授过。此外,还在河南和新疆等两个油田讲学中讲授过其中的部分内容。

中国科学院院士、清华大学摩擦学国家重点实验室温诗铸教授对本书作了认真的审定,并提出了宝贵意见,特此致谢。

本书的编写参考了美国麻省理工学院拉宾诺维奇教授和密歇根大学鲁德玛教授的部分教学资料,石油大学张怀祖教授精心审阅了第八章。在此,谨向这三位已退休的著名资深教授表示衷心的感谢,同时也向所有被引用的参考文献及图表的作者表示感谢。石油大学朱运民同志协助完成了本书部分的打字工作,对此,作者深表谢意。在本书断断续续的编写过程中,始终得到了石油大学出版社领导和编辑们的关心、支持和理解,为此,谨致以最诚挚的感谢。

摩擦学是一门新兴学科,其学科体系还很不完善,尽管作者参考了某些国内外同类教材,力图吸取其精华,并尽量引入自己的教学实践与科研成果,但限于作者的学识与水平,仍感某些章节的内容不够精炼,取材难免挂一漏万,全书的文笔和风格也还不够统一,所提出的某些观点和概念可能也不够妥当。总之,疏漏与谬误之处在所难免,诚恳地希望广大读者批评指正。

张嗣伟

2000年7月

目 录

前言	(I)
第一章 绪论	
第一节 摩擦学研究的对象与内容	(1)
第二节 课程的目的和要求	(3)
参考文献	(5)
第二章 固体表面与界面	
第一节 固体的表面特性	(6)
第二节 界面力	(9)
第三节 界面效应	(14)
参考文献	(21)
第三章 摩擦原理	
第一节 摩擦的类型	(22)
第二节 滑动摩擦	(24)
第三节 滚动摩擦	(33)
参考文献	(37)
第四章 磨损原理	
第一节 概述	(39)
第二节 粘着磨损	(42)
第三节 磨粒磨损	(45)
第四节 表面疲劳磨损(疲劳磨损)	(48)
第五节 腐蚀磨损(摩擦—化学磨损)	(51)
第六节 微动磨损	(53)
第七节 磨损理论简介	(54)
第八节 研究磨损问题的基本方法——系统分析法	(58)
参考文献	(61)
第五章 流体动压润滑	
第一节 概述	(63)
第二节 Reynolds 方程	(65)
第三节 Reynolds 方程的简化	(70)
第四节 推力轴承	(73)
第五节 径向轴承	(80)
第六节 流体动压的不稳定性及其抑制方法	(86)
参考文献	(89)
第六章 弹性流体动压润滑与混合润滑及边界润滑	
第一节 弹性流体动压润滑	(90)

第二节 混合润滑及边界润滑·····	(111)
参考文献·····	(120)
第七章 流体静压润滑	
第一节 立式推力轴承的分析·····	(121)
第二节 补偿器及设计参数·····	(124)
第三节 静压轴承的优化设计·····	(126)
第四节 气体润滑轴承·····	(129)
参考文献·····	(133)
第八章 润滑剂与添加剂	
第一节 概述·····	(134)
第二节 润滑油的理化性质·····	(134)
第三节 润滑油的分类与质量标准·····	(140)
第四节 润滑脂·····	(152)
第五节 添加剂·····	(156)
参考文献·····	(161)
第九章 表面工程概论	
第一节 概述·····	(162)
第二节 喷丸强化技术·····	(163)
第三节 热喷涂技术·····	(165)
第四节 气相沉积技术·····	(169)
参考文献·····	(174)
第十章 摩擦学设计的基本原理	
第一节 概述·····	(175)
第二节 耐磨材料的选择与表面层设计·····	(177)
第三节 IBM 磨损计算与预测法·····	(180)
第四节 磨损系数与磨损图·····	(185)
第五节 耐磨性结构设计·····	(188)
参考文献·····	(190)
第十一章 现代测试分析技术	
第一节 摩擦表面测试分析技术·····	(191)
第二节 磨损微粒分析技术·····	(200)
参考文献·····	(201)
第十二章 摩擦学的进展与展望	
第一节 摩擦学的发展现状·····	(202)
第二节 摩擦学的发展趋势·····	(204)
参考文献·····	(206)

第一章 绪 论

第一节 摩擦学研究的对象与内容

摩擦学(Tribology)是20世纪60年代中期在英国首先创立的一门新兴学科。它是研究发生在作相对运动的相互作用的表面(界面)上的各种现象产生、变化和发展的规律及其应用的一门科学。它的研究对象是表面(界面)上发生的各种现象,而这种现象的产生只是由于相对运动而引起的表面之间以及表面与环境之间的相互作用。这种相互作用不仅包括力学和物理的作用,也包括化学、热力学、力化学和摩擦化学的作用。因此,在机器设备的静止表面上产生的腐蚀现象以及机器零件内部发生的疲劳损伤均不属于摩擦学研究的对象。

摩擦学研究的基本内容是摩擦、磨损(包括材料转移)和润滑(包括固体润滑)的原理及其应用。大体上可概括为以下几方面:

- (1) 摩擦学现象的机理。
- (2) 材料的摩擦学特性。
- (3) 摩擦学元件(包括人体人工关节)的特性与设计及其摩擦学失效分析。
- (4) 摩擦学材料。
- (5) 润滑材料。
- (6) 摩擦学状态的测试技术与仪器设备。
- (7) 机器设备摩擦学失效状态的在线检测与监控以及早期预报与诊断。
- (8) 摩擦学数据库与知识库。

摩擦与磨损是普遍存在于人类的物质生产和生活中,并具有极其重要影响的自然现象。很难设想,人类能够生存在一个没有摩擦的世界。早在原始社会,人类学会了“钻木取火”,这是人类最早利用摩擦现象的例子。在我国周代的《诗经》中就有“载脂载𧄢”的诗句^[1],𧄢(音狭)就是指车轴两端的金属部分。说明我国早在2000多年前,就已掌握了初步的润滑技术。在14世纪以前,我国在轴承、滑车、齿轮以及润滑材料等方面都居世界前列。

将摩擦现象作为科学研究的对象进行系统的研究,始于15世纪意大利文艺复兴时期的杰出艺术家和科学家达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452—1519年),他在摩擦研究领域中有不少卓越的发现。他研究了摩擦的规律性,并确定了摩擦系数以及滑动摩擦与滚动摩擦等概念,他还研究了摩擦表面上引起的磨损现象。

严格地说,润滑现象作为科学研究对象的历史始于1886年,英国著名水力学家雷诺(Osborne Reynolds, 1842—1912年)在英国皇家学会的论文集上发表的被称为对建立流体润滑理论具有历史意义的论文,即“润滑的理论及比彻姆·陶渥尔(Beauchamp Tower)在试验方面的应用”。这篇论文从理论上阐述了这样一个原理:将润滑油注入圆柱轴承之后,当轴转动时,轴与轴承之间的流体油膜因旋转而发生流体力学性质的压力,支持轴载荷。

然而长期以来,摩擦、磨损和润滑这三种现象被人为地进行相互分割的研究,而且大多数都是从力学或物理学的角度进行研究。其研究成果分散在各个传统的分支学科中,有关知识分散在大学的物理、力学、机械原理和机械零件或机械设计等课程中,而没有综合成一门统一

的学科和课程。这就大大地妨碍了它的发展,从而不能适应 20 世纪经济和科技高度发展的需要。正是在这种背景下,1966 年摩擦学在传统学科的基础上诞生了。

从学科性质上看,摩擦学具有以下三个特点^[2]:

(1) 摩擦学是一门在某些传统学科的基础上综合发展起来的边缘学科。摩擦、磨损和润滑涉及到科学技术的极其广泛的专业领域,包括力学、物理学、化学、热力学、传热学、表面科学以及机械工程和材料科学与工程等多种学科。

(2) 摩擦学是一门具有很强应用背景的横断学科。摩擦学的产生主要是以节约资源、节省能源、提高效益等近代实用性很强的课题为背景。然而,它的应用背景已远远超出了机械行业以及工业和交通运输业的领域,因而产生了生物摩擦学、地质摩擦学和生态摩擦学等新的学科分支。

(3) 摩擦学是一门学科边界还没有完全界定的新兴学科。随着科学技术的发展,摩擦学与一些先进的技术和方法相结合,并且不断地向其他学科渗透,从而又逐步形成新的学科分支,如摩擦化学、摩擦学设计以及陶瓷摩擦学、高分子材料摩擦学、空间摩擦学、核反应系统摩擦学和纳米摩擦学以及计算摩擦学等。

综上所述,摩擦学的基本框架可表示为一个以摩擦学的学科基础、研究内容及其应用目标组成的三维结构图,见图 1—1^[3]。

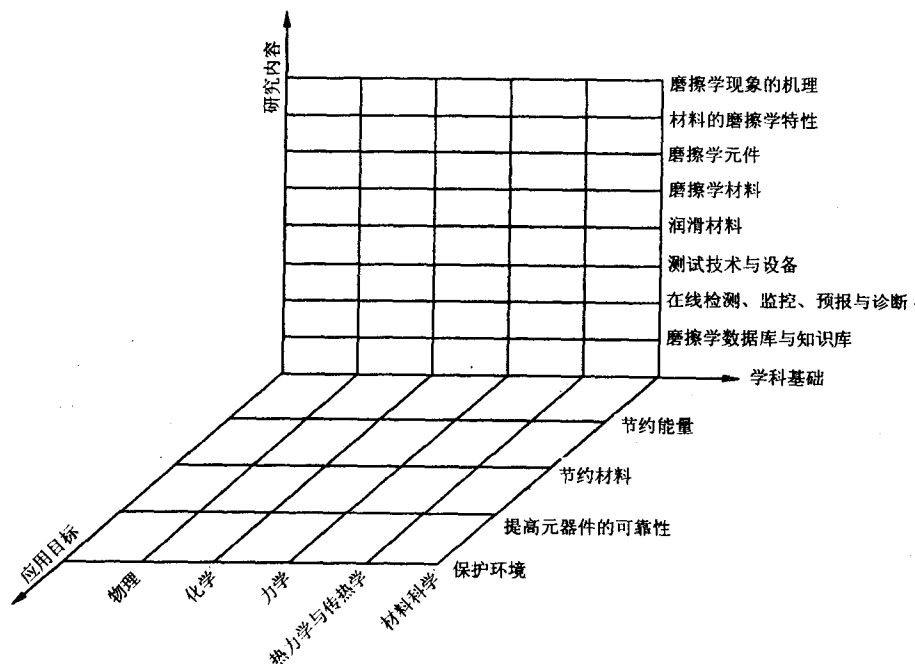


图 1—1 摩擦学的基本框架

自从摩擦学作为一门独立的学科创建以来,它在工业和交通运输业中对国民经济的发展和科技进步所发挥的重要作用及其巨大的经济意义已越来越为人们所认识。然而,摩擦、磨损和润滑是自然界(包括人体)普遍存在的现象,大至宇宙,小至分子、原子,只要有相对运动的界面,这些现象都会发生。因此可以推断,摩擦学将会更广泛的范围内促进其他学科的发展,如天体物理、地球科学、核子物理、医学工程、运动力学等。一旦这一点被人们所充分认识,摩

擦学必将进入一个新的发展阶段。

第二节 课程的目的和要求

本课程的主要目的是通过对本课程的学习,使学生深入、系统地了解摩擦、磨损和润滑的基本原理,并在此基础上初步掌握“控制摩擦、减轻磨损、改善润滑”的主要方法,以及摩擦学研究的某些基本方法。从工程应用来看,摩擦学也可以认为是研究材料的摩擦学性能及其工程应用的一门技术科学。对材料的摩擦学性能的认识和分析,从系统分析的观点看,可以大体上归纳为以下两种基本方法^[4,5]。

1. 黑箱法

只知其输入值和输出值,不知其内部结构的系统称为“黑箱”。而通过对系统输入-输出数据的测量和处理,以建立系统数学模型的方法,即系统辨识方法。因此,用这种方法建立相应的“黑箱数学模型”去解决实际问题的研究方法,可称为“黑箱法”。它是研究结构和机理尚难弄清楚的复杂系统以及不能或不允许打开系统的一种有效的方法。在摩擦学中常用这种方法分析材料的摩擦学性能,即在不了解材料内部的组织结构,或者不考虑其组织结构时,可把材料的内部组织结构看成是一个尚未认识或不能打开的黑箱,而可以从其输入与输出的信息及其之间的传递函数来认识与分析材料的摩擦学性能。

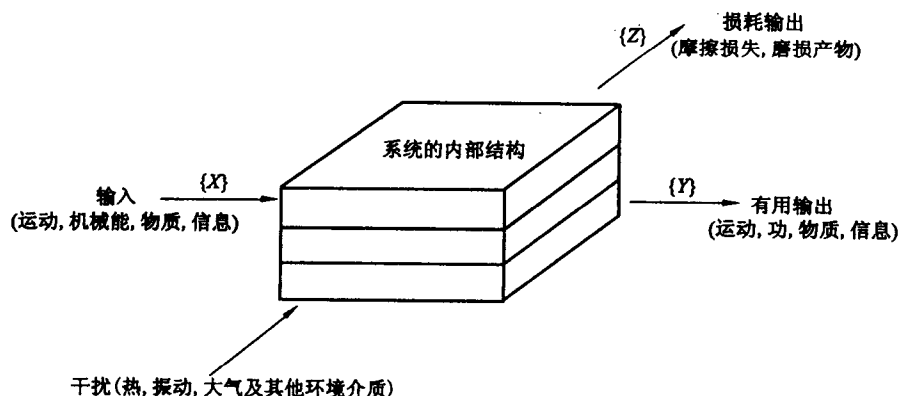


图 1—2 典型摩擦学系统的黑箱

输入与输出信息反映了黑箱与周围环境的联系;而在外部环境恒定条件下将输入信息转换为输出信息的方法或机制(以传递函数表示)反映了黑箱的功能。这种转换可用图表模型(图 1—2)或下列数学模型来描述:

$$\{X\} \xrightarrow{T} \{Y\} \quad (1-1)$$

或

$$Y = TX \quad (1-2)$$

其中, $\{X\}$ 是输入信息 $x_1, x_2, \dots, x_i$ 的集合, $\{Y\}$ 是输出信息 $y_1, y_2, \dots, y_i$ 的集合。而 T 为传递函数, 即

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\} \quad (1-3)$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_i\} \quad (1-4)$$

然而, 对于一个摩擦学系统, 在从输入到输出的转换过程中, 往往伴随有损耗输出, 即摩擦损失与磨损, 并且还受到外界环境的干扰, 图 1—2 给出了一个典型摩擦学系统的黑箱。

2. 相关法

这种方法是在大量试验数据的基础上, 建立材料的摩擦学性能 P_i 与材料表面组织结构参数 S_i 相关性之间的函数关系, 即

$$F(P_i, S_1, S_2, \dots) = 0 \quad (1-5)$$

应用上述函数关系, 可通过各种表面技术改变材料表面的组织结构, 以达到控制材料摩擦学性能的目的。

显然, 上述两种基本方法的基础都是试验。因此, 试验研究是解决摩擦学问题的基本手段。

其次, 通过本课程的学习, 要求学生了解摩擦学主要研究领域的发展动向。为此, 学生应在学习本课程各章内容的同时, 经常浏览国内外摩擦学领域的杂志。

国内公开发行的这类杂志主要有:

- (1) 摩擦学学报, 1981 年创刊, 原名“固体润滑”, 1992 年改名, 季刊;
- (2) 润滑与密封, 1975 年创刊, 原为季刊, 1978 年下半年改为双月刊;
- (3) 中国表面工程, 1988 年创刊, 原名“表面工程”, 1998 年改名, 季刊。

国外公开发行的这类杂志主要有:

- (1) Wear, 1957 创刊, 月刊(瑞士);
- (2) Tribology International, 1968 年创刊, 双月刊(英国);
- (3) Tribology Transactions, 1958 年创刊, 原名“ASLE Transactions”, 季刊(美国), 1988 年改名, 由美国润滑工程师协会出版, 其内容还包括该协会每年春季和秋季会议上发表的论文;
- (4) Journal of Tribology, 1967 年创刊, 原名“ASME Transactions: Section F, Journal of Lubrication Technology”, 季刊, 1984 年改名(美国), 由美国机械工程师协会出版;
- (5) Lubrication Engineering, 1945 年创刊, 原为季刊, 1957 年起改为月刊(美国);
- (6) Industrial Lubrication and Tribology, 原名“Scientific Lubrication”, 1949 年创刊, 双月刊(英国);
- (7) Lubrication Science, 1988 年创刊, 季刊(英国);
- (8) Tribotest, 1994 年创刊, 季刊(英国);
- (9) Journal of Friction and Wear(译自俄文), 1980 年创刊, 双月刊, 由前苏联科学院和白俄罗斯科学院出版;

(10) Japanese Journal of Tribology, 1956 年创刊, 原名“润滑”, 月刊。

此外, 德、法等许多国家都出版这类期刊。

参考文献

- 1 诗经, 邶风, 泉水篇, 第三章
- 2 张嗣伟. 摩擦学的进展与展望. 摩擦学学报, 1994, 14(1): 84 - 88
- 3 张嗣伟. 摩擦学在我国油田设备使用管理与技术改造中应用的展望. 石油矿场机械, 1987, 16(1): 6 - 13
- 4 H. Czichos 著, 刘仲华等译. 摩擦学——对摩擦、润滑和磨损科学技术的系统分析. 北京: 机械工业出版社, 1984
- 5 李建明. 磨损金属学. 北京: 冶金工业出版社, 1990

第二章 固体表面与界面

摩擦学的主要研究对象是作相对运动的相互作用的表面(通常,其中至少含有一个固体表面)上发生的各种现象。因此,深入认识固体表面,特别是固-固界面、固-气界面和固-液界面上的各种现象是了解摩擦学的基础。

第一节 固体的表面特性

从摩擦学的观点来看,在工程实际中所见到的各种固体表面(称为工程表面),一般都具有以下基本特性:①没有绝对平整和光滑的表面;②没有绝对完好的组织结构的表面;③没有绝对“干净”或完全裸露的表面(真空条件下的固体表面除外)。固体的表面特性反映了固体表面的这种“三无”特征。

一、表面几何特征(表面形貌)

任何机械零件的表面,即使是经过精加工的表面,也会程度不同地存在几何形状误差。这种误差体现了固体表面的几何特性,它是固体表面形貌的数量特征,并直接影响到摩擦表面的相互作用。机械零件的几何形状误差主要有以下三种类型^[1]。

1. 宏观几何形状误差

这主要是由于机床精度不高而引起的误差,它是不同于名义几何形状的一种连续而不重复的表面形状偏差,一般用平面度、圆度和圆柱度等误差来表示。这类误差对机械零件的使用性能影响极大,使圆柱面的间隙配合中的间隙不均匀,从而造成圆柱面局部过度磨损,配合性质遭到破坏,使零件的使用寿命下降,甚至完全失效。在平面接触的情况下,这类误差使相互配合的零件的实际支承面减小,从而使其表面变形加大;在产生相对运动时,也会使磨损加剧。

2. 中等几何形状误差

这是由于机床—刀具—工件组成的加工系统在工作时产生振动而引起的误差,它是一种在固体表面周期性重复出现的几何形状误差,一般用波度来表征,其波距一般为1~10 mm。固-固接触表面上存在波度会使机械零件的实际支承表面减小,从而在间隙配合中加剧磨损,对于高速旋转的零件,还会引起振动和噪音。

3. 微观几何形状误差

这主要是由于切削加工的刀痕或切屑分离时工件表面发生塑性变形而引起的误差,一般用表面粗糙度表示。与波度相比,它不仅在数量上更小(其波距一般只有2~800 μm),而且没有明显的周期性。

表面粗糙度对机械零件的使用性能影响很大,因为表面粗糙度越大,则固-固接触表面上的实际接触面积越小,从而使比压增大,磨损也随之增大。而且,如果表面粗糙度越大,在发生相对运动时,在固-固界面上,为了克服粗糙表面上凸峰的剪切变形,会产生很大的摩擦阻力,

使摩擦增大。因此,降低机械零件的表面粗糙度,对于动力机,可以提高其输出功率;对于工作机,可以提高其使用寿命和能量利用率。但是,在固-固界面上没有润滑剂的条件下,过分地降低表面粗糙度,会增大实际接触面积,从而增大固-固界面的粘着,使摩擦和磨损(粘着磨损)增大。此外,粗糙的固体表面,容易聚积腐蚀性杂质,使腐蚀加剧。因此,降低机械零件的表面粗糙度,还可以提高其抗腐蚀的能力。

显然,实际固体工程表面的表面特征往往是以上述三种几何形状误差的组合形式出现(图2—1)。

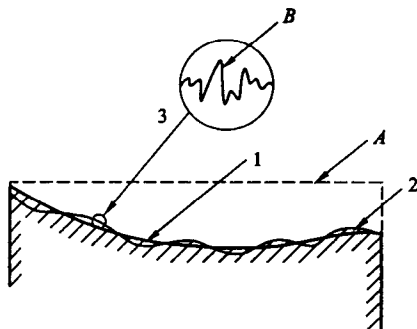


图 2—1 固体的工程表面特征

A—理想表面(物理表面);B—工程表面;1—宏观几何形状误差(平面度);2—中等几何形状误差(波度);3—微观几何形状误差(表面粗糙度)

二、表面组织结构特征(表面晶体结构)

固体一般可分为结晶固体和非晶固体,理想的结晶固体都具有严格的周期性的三维有序结晶结构。根据固体物理学的观点,结晶固体表面是晶体中原子的周期性排列出现大面积突然中止的地方,因而这一表面在结构上将会出现某种程度的变化或重新调整。更何况,实际晶体的结构总是存在各种各样的缺陷,即晶格缺陷或晶体缺陷。这些缺陷会产生能量较高的热力学不平衡状态,从而影响到固体表面的性质(如塑性和强度)。

按缺陷的几何类型,晶格缺陷主要有以下几种^[2]:

1. 点缺陷(Point defects)

这种晶格缺陷在各个方向的延伸都很小,所以也称为零维缺陷。通常它是以空位的形式出现,即晶体点阵中,原来存在一个原子的点阵处失去了原子,而形成原子空位,这种缺陷即空位(图2—2)。杂质原子和间隙原子是点缺陷的另外两种表现形式。

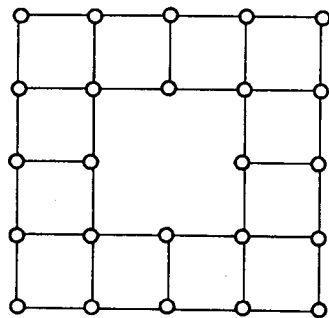


图 2—2 空位示意图

2. 线缺陷(Line defects)

线缺陷只在一个方向上有明显的延伸,而在其他方向的缺陷延伸很小,故称为一维缺陷,表现为晶体中存在各种位错。晶体发生形变时,并不是整体刚性滑移,而是通过局部滑移引起局部变形,并逐步达到晶体的整体变形。因此,位错可以看作

是一部分晶体相对于另一部分晶体的局部滑移而形成的交界,即图 2—3 中原子排列混乱的部分。

由上可见,位错是原子排列的缺陷。从宏观上看,它是线状的。但是严格地说,它是只有一定宽度的管道。在位错的管道内,其原子的平均能量比其他地区大得多,而且晶体中的位错,其末端往往在晶体的表面上或晶界上终止。

已滑移部分滑移的方向和距离可用一个向量表示,此向量称为柏格斯(Burgers)向量或柏氏向量,也可称为滑移向量或位错向量,其数值表示原子从一个平衡位置到另一个平衡位置的距离。

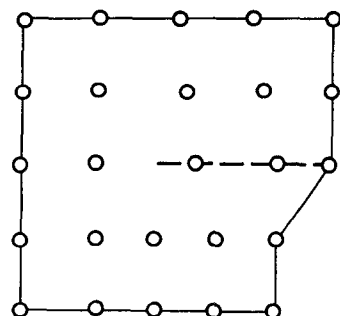


图 2—3 位错示意图

3. 面缺陷 (Plane defects)

在两个方向延伸的缺陷称为面缺陷,也可称为二维缺陷。金属一般是多晶体,它是由许多晶粒组成,因而存在晶粒界面。晶界面就是一种面缺陷。至于单晶体的材料,是由亚晶粒组成。亚晶粒的界面称为亚晶界面,这也是一种面缺陷。此外,由两个不同相之间形成的相界面也是一种面缺陷。

三、金属表面层的结构组成

一般暴露在大气中的金属表面都不会是纯净的表面,即使在机械加工过程中刚刚加工出来的表面,也会立即被氧化或被周围的杂质所污染,而只有在真空中才有可能得到纯净的表面。因此,了解金属实际表面层的结构组成是研究金属材料发生摩擦学现象的基础。

图 2—4 给出了金属表面层的典型结构组成。金属表面层一般由金属表面以上的外表层和金属表面以下的内表层组成^[1]。外表层又是由各种表面膜所组成,在干摩擦的条件下,主要有大气中的水蒸气、油雾或油污染而附着在金属表面上所形成的污染膜(厚度约 5 nm)和吸附膜(厚度约 0.5 nm)以及与大气中的氧发生反应而形成氧化膜(厚度约 0.01~1 μm);而在边界润滑的条件下,这种表面膜主要是由具有极化性能的润滑剂所形成的一种具有润滑作用的吸附膜,或润滑剂中的某些元素(如氯、硫、磷等)与金属表面发生化学反应而生成的化学反应膜。

内表层主要是在加工过程中形成的变形层和冷硬层。变形层是由于表面加工产生的弹性变形和塑性变形,以及局部高温使晶格扭曲变形而形成的一种加工硬化层(厚度约 1~50 μm),而冷硬层,即毕氏(Beilby)层,则是在表面加工(如抛光)时,由于表面分子层熔化和流动而形成的一种非结晶层或具有非常细的一层结晶组织(厚度约 0.1 μm)。

此外,对于合金的内表层,其表面成份一般不同于基体材料整体的平均成分,而会出现所谓的表面偏聚现象,这主要是指溶质原子在表面富集,这种现象一般可扩展到表面以下一个到几百个原子层。

摩擦与磨损使金属表面发生塑性变形,促使大量空位和位错等晶体缺陷的形成,而摩擦热则会使摩擦表面的原子运动加剧,从而进一步促进表面偏聚的形成。

金属表面层的存在,一般可以降低摩擦,减少磨损。因此,表面层的结构组成、性质及其产生、破坏和再生的规律对金属的摩擦学性能有着直接的影响。

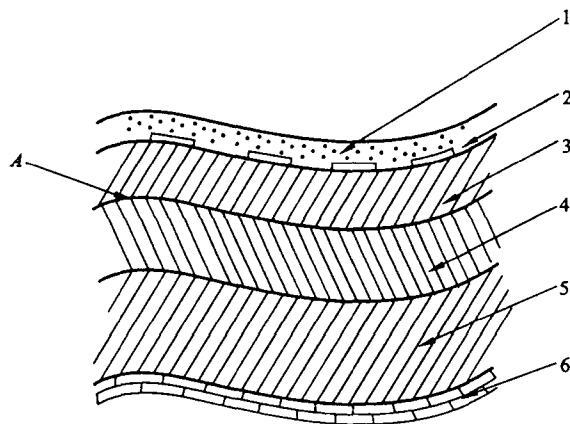


图 2-4 典型的金属表面层

A—金属表面；1—污染膜；2—吸附膜；3—氧化膜；
4—冷硬层；5—变形层；6—基体材料

第二节 界面力

确切地说,通常人们在自然界中所看到的各种固体或液体表面都不是某一物相的表面,而是固体或者液体与气体(大气)这两相之间的界面。只有在真空中,人们才能看到某一物相的表面。因此,深入了解界面上发生的各种力,是认识摩擦、磨损和润滑机制的基础。

一、界面的概念

界面是固、液、气三相中的两个物相之间相接触的交界部分。它不是一个简单的几何平面,而是从某一物相过渡到另一物相的界面区或称界面相(图 2-5)。它具有以下两个基本特征:

- (1) 有一定的厚度(约几个分子厚);
- (2) 有与相邻的本体相完全不同的结构组分和性质。

一般宏观界面有五种类型(图 2-6),由于气体与气体可以完全混合,因而在气体之间一般不存在稳定的界面。

凡有物相存在的地方,也就有界面存在,因此,界面广泛存在于自然界中,但习惯上仍将固-气、液-气界面分别称为固体表面和液体表面。

二、界面力(表面力)的类型

根据统计平均的观点,在物质的本体相中,任何一个微观粒子(分子、原子或离子)的周围都存在一个平衡的力场,因而作用在它上面的合力为零。但在界面相中的粒子,由于两侧本体相中的粒子对它的作用力不相等而处于不平衡的状态,此作用力的合力将垂直于界面并作用在界面相中的粒子上,从而使界面相的粒子具有本体相粒子所没有的附加界面能。因此,界面相的粒子具有吸附其他粒子以使其本身达到平衡状态及降低自身能量的倾向,即产生界面力(也可称为表面力),这是一种微观尺度上的

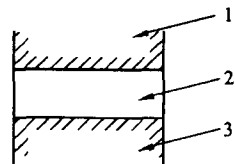


图 2-5 界面相

1—本体相 A;
2—界面相;
3—本体相 B

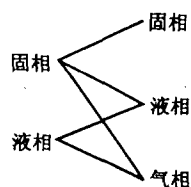


图 2-6 界面的类型

力。

显然,表面力对物体界面的摩擦学特性会产生很大的影响。因此,了解各种表面力是认识表面层形成的机制和各种界面效应以及摩擦、磨损与润滑本质的基础。

按照作用距离或作用势能的大小,通常可将表面力划分为三类,即短程力、分子间引力和长程力。

三、短程力(化学键力)

短程力的作用距离极小,一般约相当于原子尺寸。这种力主要表现为形成表面化学键,即固体表面的分子与被吸引的分子之间的相邻原子,由于产生了电子转移或共用电子而结合在一起以形成稳定结构的一种结合方式。所以,短程力也称为化学键力或化学结合力,或化学吸引力。它具有很强的相互作用的作用势能,约 $(4.2 \sim 8.4) \times 10^5 \text{ J/mol}$, 通常可用库仑势能表示:

$$\epsilon(r) = -\frac{e_1 e_2}{r} \quad (2-1)$$

式中:

r ——分子间距;

e_1, e_2 ——分别为被吸引的气体原子和固体表面原子的电荷。

化学键力依其结合方式(化学键)的不同,可分为离子键力、共价键力和金属键力^[1,3]。

1. 离子键力

离子键力是在两个物体(通常是金属与非金属)相互接触的表面上,带有异性电荷的阳离子与阴离子相互吸引的一种表面力,由这种作用力使原子相互结合在一起的结合方式即离子键,其特点是在原子之间发生了电子转移。例如 NaCl 分子的形成,可用电子式表示如下:



2. 共价键力

当两个相同或性质相近的非金属元素的原子结合成分子时,由于它们的原子核对电子的吸引力相等或相近,因而在这两类原子之间不可能产生电子转移。因此,它们只有通过共用电子对(即两个原子共用一对电子)的方式结合成分子,这种结合方式即共价键,其相应的作用力即为共价键力。

Cl_2 分子的共价键可用电子式表示如下:

