

清华大学学术专著

纳米摩擦学

温诗铸

清华大学出版社

0-12.5
W61

411294



清华大学学术专著

纳米摩擦学

温诗铸

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书取材于国际上纳米摩擦学研究最新进展和作者等人从事该领域研究的成果,系统地阐述纳米摩擦学理论与应用,全面反映纳米摩擦学研究现状。

全书共 9 章,内容涉及纳米摩擦学研究特征、实验仪器、理论分析方法以及表面形态、粘着与接触、微观摩擦、微观磨损与纳米切削、分子膜与边界润滑、薄膜润滑等研究领域。

本书取材新颖,并力求将摩擦学的微观研究与宏观研究相结合,深入揭示摩擦界面的微观行为和动态过程,建立摩擦学现象的构性关系,并说明它们在工程中的应用。

本书可作为机械学专业研究生教材以及高等院校有关专业师生的教学参考书,并可供从事机械设计和研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米摩擦学/温诗铸著. —北京:清华大学出版社,1998

ISBN 7-302-02788-9

I. 纳… II. 温… III. 摩擦,纳米-理论 IV. 0313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 28994 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

因特网地址: www.tup.tsinghua.edu.cn

印刷者:北京通县人民文学印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开本: 850×1168 1/32 印张: 10 字数: 256 千字

版次: 1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-302-02788-9/TH·76

印数: 0001~2000

定价: 26.00 元

Preface

This book is a compilation of the current developments of the nano-tribology research in the world and an outgrowth of the research results of the author and his co-workers. It is a systematic presentation of nano-tribology fundamentals and their application. It also shows the current state of nano-tribology research.

There are nine chapters in the book, which cover the features of the nano-tribology research, experimental facilities, theoretical analysis method and surface textures. It covers a broad scope of research areas of adhesion and contact, micro-friction, micro-wear and nano-cutting, molecular film lubrication, boundary lubrication and thin film lubrication.

This book includes up-to-date materials and enhances to join the micro-tribology research and nano-tribology research, and describes micro-behaviors and the relation of properties with structure of the tribological phenomena in-depth. Also presented is their application in engineering. This book is intended for use as a textbook for senior-level or graduate-level students majoring in mechanology or in the related fields in the universities. It can also be served as a valuable reference for practicing engineers active in machine design and research.

序 言

纳米科学技术是当前国际上最活跃的研究领域之一,它主要研究纳米尺度(如 100 纳米到 0.1 纳米)物质的特性和相互作用,以及利用这些特性设计和制造出具有独特功能、尺寸微小的产品。因此,纳米科学技术使人类认识和改造客观物质世界的能力和手段延伸到原子或分子水平。这不但改变了人们的思维模式,而且将对科学技术与国民经济的发展产生深远的影响,特别在军事应用方面有难以估量的前景。

纳米科学技术的出现无疑是现代科学技术的一个重大突破,由此派生出一系列新的学科,纳米摩擦学便是其中之一。纳米摩擦学是在原子分子尺度上研究物质相互接触,以及在滑动过程中表面的微观摩擦、磨损与润滑行为及其机理。这是摩擦学研究的一个重大拓展和深入。它的出现不但为现代超精密机械与微型机械的设计、制造与运行提供技术基础,也对宏观摩擦学理论的深化有很大促进作用,进而对机械工业水平的提高将产生重大影响。所以纳米摩擦学的研究既有重要的理论意义,也有广泛的应用前景。

温诗铸教授及其所在的清华大学摩擦学国家重点实验室长期从事摩擦学研究,对于推动学科发展和工程应用做出了积极贡献,在国内外享有较高的声誉。近年来,他们在纳米摩擦学研究中又取得了一系列重要成果。

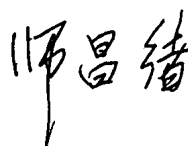
本书是作者在广泛收集国际上最新文献的基础上,总结作者和所指导的研究生在该领域的研究成果,经过系统地分析整理编写而成,完整地反映了当前纳米摩擦学发展全貌。作者还系统地论述了纳米摩擦学相关的基础理论知识、测试仪器与技术,以及理论

计算方法,并在此基础上详细介绍了微观摩擦、磨损与润滑等各个领域的研究进展,还列出很多重要文献,供读者深入研究。本书取材新颖,内容系统。

本书作者注意将基础理论与工程应用相结合。针对微电子学和微机械学的发展需要,研究材料表面的微观摩擦、磨损性能,揭示材料微观结构和宏观性能之间的关系;通过纳米薄膜润滑和表面微观改性处理,达到控制摩擦和减少磨损的目的。本书注意理论与实践相结合,以有利于纳米摩擦学在实践中得到应用。

因此,本书的出版对从事摩擦学研究的科学工作者以及从事实际工作的工程技术专家都有重要参考价值。

中国工程院院士、副院长
中国科学院院士

Handwritten signature of Shi Changjun in black ink.

1997. 11. 4

前 言

1989年在赫尔辛基召开的第五届欧洲摩擦学国际学术会议上,国际著名学者 W. O. Winer 教授在题为“摩擦学未来趋势”的特邀报告中指出,摩擦学未来大有前途的发展是基于原子尺度的摩擦学。在这种微观摩擦学研究中,人们建立了在原子尺度上观察表面的新仪器,以及对于摩擦学系统中表面作用的新的思维方式。这种新的表面观察技术和新的思维方式十分可能导致摩擦学研究的重大突破。Winer 的报告不仅说明纳米摩擦学或称微观摩擦学的兴起是本学科发展的必然趋势,同时也预示了纳米摩擦学研究的重要意义和前景。

近 30 年来,我国摩擦学研究和应用得到迅速发展,在现代化建设中作出了积极的贡献。在科学实践中,我国摩擦学工作者对于本学科的研究方向曾经提出了从宏观到微观、从静态到动态、从单一学科分析到多学科综合研究的观点,而纳米摩擦学的出现正是适应了这一发展趋势。纳米摩擦学作为整个纳米科学技术的组成学科之一,它基于现代表面科学和微观检测技术,从原子分子尺度研究摩擦界面的微观行为和动态过程。通过摩擦学微观研究与宏观研究的结合,必将深入地揭示摩擦磨损与润滑机理,建立摩擦学现象的构性关系和量化准则,以促进摩擦学设计与应用的发展。

我国有关纳米摩擦学研究开始于 80 年代末,基本上与国际摩擦学界同步。经过几年的努力,已经取得十分可喜的进展。

本书是作者在广泛收集国际上最新文献的基础上,总结作者及同事们在纳米摩擦学领域的研究成果,经过系统地分析整理编写而成,本书内容直接取材于国内外期刊上发表的学术论文和研

研究生学位论文。编写本书的目的在于向读者介绍纳米摩擦学研究最新进展,并力求全面反映各个主要领域的学术水平和动态,以达到交流研究经验,推动纳米摩擦学发展的目的。

在本书编写过程中,作者本着理论联系实际的原则,将理论与工程应用相结合,微观研究与宏观研究相结合。针对纳米摩擦学的特点,注意将微观摩擦学与宏观摩擦学对比,说明它们在学科基础、研究目标、测试仪器和理论分析观点等方面的联系和差别。为了使读者能够了解纳米摩擦学的全貌,本书系统阐述了有关的基础知识、实验和理论计算方法,以及微观摩擦磨损与润滑等各个领域的研究进展。

由于纳米摩擦学发展时间较短,其理论体系和应用都有待于进一步完善;同时又受到本书篇幅和作者专业知识所限,因此在取材和论述方面必然存在不少错误,敬请广大读者提出批评指正。

作者在纳米摩擦学领域的研究得到国家自然科学基金和博士点基金的资助。本书编写得到清华大学摩擦学国家重点实验室同仁金元生、陈大融、胡元中、黄平、孟永钢、雒建斌、路新春、史兵、邹茜等以及博士研究生邹鲲、钱林茂、蒋玮等大力协助和热情鼓励,作者向他们以及一切支持这项研究工作的人们致以真诚的感谢。

应当指出,我国在纳米摩擦学方面的研究还处在初创阶段,与国际先进水平相比还存在一定的差距。然而,依靠我国摩擦学工作者的艰苦奋斗精神,一定能够在本学科发展前沿领域作出自己的贡献,以推动我国现代化建设的发展。

温诗铸

1996年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米科学技术的发展	1
1.2 摩擦学发展的历史回顾	4
1.3 纳米摩擦学研究	6
参考文献.....	9
第 2 章 实验测试仪器	11
2.1 表面力仪 SFA	12
2.2 扫描隧道显微镜 STM	18
2.3 原子力显微镜 AFM	20
2.4 摩擦力显微镜 FFM	25
2.5 纳米润滑膜厚度测试技术.....	39
2.6 其它测试仪器.....	53
参考文献	57
第 3 章 分子动力学模拟技术	60
3.1 基本原理与应用.....	60
3.2 平衡态分子动力学模拟.....	62
3.3 宏观特性统计与控制.....	69
3.4 柔性大分子动力学模拟.....	72
3.5 非平衡态分子动力学模拟.....	76
参考文献	79
第 4 章 摩擦表面形态	81
4.1 固体结构与表面特征.....	81

4.2	加工表面的机械性能	85
4.3	表面润湿与吸附	88
4.4	摩擦物理与摩擦化学	91
	参考文献	97
第5章	粘着现象与表面接触	99
5.1	固体粘着现象	100
5.2	界面粘着能与表面力	102
5.3	固体表面接触	107
5.4	有关粘着的其它问题	112
5.5	液体与固体的接触	115
	参考文献	122
第6章	微观摩擦	124
6.1	宏观与微观摩擦	124
6.2	微观摩擦与表面形貌	128
6.3	磁记录装置的摩擦	138
6.4	微观摩擦的影响因素	142
6.5	零摩擦状态	150
	参考文献	156
第7章	微观磨损与纳米加工	159
7.1	微观磨损特征	159
7.2	微观压痕与微硬度	165
7.3	微切削与纳米加工	171
7.4	磁盘-磁头的微观磨损	176
7.5	磁带-磁头的微观磨损	188
	参考文献	209
第8章	分子膜与边界润滑	211
8.1	分子膜静态剪切性能	212

8.2	分子膜动态剪切性能与粘滑现象	217
8.3	物理形态与相变	224
8.4	分子膜摩擦机理	226
8.5	分子膜的流变特性	233
8.6	有序分子膜	244
	参考文献.....	250
第9章	薄膜润滑	253
9.1	弹流润滑研究的启示	254
9.2	薄膜润滑的应用背景	260
9.3	润滑状态转化	262
9.4	薄膜润滑特征与有序化	268
9.5	时间效应与剪应变率效应	277
9.6	混合润滑状态	287
9.7	薄膜润滑数值分析	295
	参考文献.....	301

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Development of nano-science and technology	1
1.2 History of tribology research	4
1.3 Nano-tribology research	6
References	9
Chapter 2 Experimental instruments	11
2.1 Surface force apparatus SFA	12
2.2 Scanning tunneling microscope STM	18
2.3 Atomic force microscope ATM	20
2.4 Friction force microscope FFM	25
2.5 Measuring technology of lubricant film thickness at nanometer scale	39
2.6 Other measuring instruments	53
References	57
Chapter 3 Molecular dynamics simulation method	60
3.1 Basic principles and application	60
3.2 Equilibrium molecular dynamics simulation	62
3.3 Statistics and control of macro characteristics	69
3.4 Dynamics simulation of flexible moleculeae	72
3.5 Nonequilibrium molecular dynamics simulation	76
References	79
Chapter 4 Texture of friction surface	81
4.1 Surface texture of solids	81

4.2	Mechanical properties of machined surface	85
4.3	Wetting and adsorption on surface	88
4.4	Tribo-physics and tribo-chemistry	91
	References	97
Chapter 5	Adhesion and contact of surfaces	99
5.1	Adhesion phenomena of solids	100
5.2	Adhesion energy and surface force at interface	102
5.3	Contact of solids	107
5.4	Other problems concerning adhesion	112
5.5	Contact between solid and liquid	115
	References	122
Chapter 6	Micro-friction	124
6.1	Macro-and micro-friction	124
6.2	Micro-friction and surface topography	128
6.3	Friction in magnetic recording devices	138
6.4	Influence factors of micro-friction	142
6.5	Zero friction state	150
	References	156
Chapter 7	Micro-wear and nano-machining	159
7.1	Micro-wear characteristics	159
7.2	Micro-indentation and hardness	165
7.3	Micro-cutting and nano-machining	171
7.4	Micro-wear of magnetic disk and head	176
7.5	Micro-wear of magnetic tape and head	188
	References	209
Chapter 8	Molecular films and boundary lubrication	211
8.1	Static shear properties of molecular films	212

8.2	Dynamic shear properties of molecular films and stick-slip phenomena	217
8.3	Physic state and phase transformation	224
8.4	Friction mechanism of molecular films	226
8.5	Rheological properties of molecular films	233
8.6	Ordering molecular films	244
	References	250
Chapter 9	Thin film lubrication	253
9.1	Enlightenments of elastohydrodynamic lubrication research	254
9.2	Applicability of thin film lubrication	260
9.3	Transition of lubrication states	262
9.4	Characteristics of thin film lubrication and ordering of moleculeae	268
9.5	Time effect and strain rate effect	277
9.6	Mixed lubrication state	287
9.7	Numerical analysis of thin film lubrication	295
	References	301

第 1 章 绪 论

1.1 纳米科学技术的发展

在当代科技领域中,人们普遍认为,90年代国际上兴起的纳米科学技术(nano-science and technology, Nano-ST)是面向21世纪的新科技。

早在1955年,著名物理学家、诺贝尔奖金获得者 R. P. Feynman 曾经提出这样的设想:如果人类能够用常规的机器制造出比其体积小的机器,而较小的机器又可以制造更小的机器,这样一步步逐级缩小生产装置,以致最后实现按人的意志排布原子,这将对人类的生活创造出奇迹。随后,1977年美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology)的学者认真考虑了现代科技这一发展趋势,认为上述设想可以从模拟活细胞中生物分子的研究开始,并定义为纳米技术(nano technology)。1982年 Binnig 和 Rohrer^[1]发布扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscopy, STM)研制成功,它不仅以极高的空间分辨率(横向可达0.1nm,纵向小于0.01nm)成为揭示原子、分子世界的观察手段,把人们带到微观物质世界;而且由于扫描隧道显微镜可以在表面达到原子尺度的定位精度,通过探针对表面的作用,从而成为在纳米尺度上对表面进行改性和排布原子的工具。经过几年的发展,特别是1985年研制出能在大气压下工作的袖珍式 STM,标志着扫描隧道显微技术的成熟。

STM 开始出现就显示出其独特的优点和广泛的应用前景,很快成为表面科学强有力的研究手段,迅速渗透到物理、化学、生物

等许多领域的微观研究。例如,观察表面形貌,测定表面原子结构;观测表面电子态和电荷密度波;以及研究表面物理化学变化的动态过程,藉以揭示催化、腐蚀、摩擦磨损等表面现象的微观机理等。其中,最引人注目的例子是,1990年 D. M. Eigler 和 E. K. Schweizer 经过 5 年的研究,应用 STM 成功地将 35 个氩原子排布成 IBM 字样,字母的大小仅是一个点号的 50 万分之一。又如,日本电气公司也用半导体硅材料制成金字塔,其高度仅 36 个原子高,共有 18 级台阶,每个台阶为 2 个原子高。在我国,中国科学院化学研究所白春礼等人^[2]应用 STM 在石墨表面刻写出线宽为 10nm 的字符和图案,为制造高密度的存储信息元件和纳米电子元件提供了经验。

1990 年被认为是纳米科技正式诞生的年代。当年 7 月在美国巴尔的摩首次召开了纳米科技的国际学术会议,并随之出版了国际刊物《Nanotechnology》,《Nanobiology》。从此冠以纳米的新学科相继出现,例如,纳米电子学、纳米生物学、纳米材料学等等。其中,纳米机械学(nano mechanics)或称微机械学(micro mechanics)就是一个重要的分支。

纳米科技是现代科学包括(量子力学、介观物理、混沌物理等)以及先进技术包括(微电子技术、电子计算机、扫描隧道显微技术等)相结合的产物。它是在纳米尺度(0.1nm~100nm)上研究自然界现象中原子、分子行为和相互作用规律,旨在深化对客观世界认识的基础上创造出性能独特的产品。纳米科技使得人类在认识和改造自然方面进入到一个新的层次,能够进一步开发出物质的潜在能力,因此,它的发展无疑地将深刻影响国民经济和现代科学技术的未来。

应当指出,纳米机械学的诞生也是现代机械科学技术发展的必然结果。随着现代科技的进步,人们不断追求制造出尺度越来越小,而性能越来越完善的微型装置。特别是在生物、环境控制、医疗

器械、航空航天、数字通信、传感技术以及灵巧武器等领域,机械装置微小型化的要求日益增长,这对现代机械科技的发展起着重要影响。而在另一方面,从20世纪60年代以来,微电子技术渗透到机械工程各个领域,机电一体化已经成为现代机械的重要特征。它为机械装置在系统结构和性能等方面都带来了革命性的变化,从而大大地促进了机械向微小型化的发展。80年代中后期兴起的微型机械(micro machine)或称微型机电系统(micro electro-mechanical system, MEMS)的研究集中地反映了这一发展趋势。在这种形势下,以微型机电系统设计为目标,研究它们的工作原理、结构性能及其设计理论的技术基础学科——纳米机械学随之应运而生,并迅速发展成为机械科学技术中的前沿研究领域^[3]。

应当强调指出,微型机械不可能是传统机械简单地几何缩小。这是由于结构尺寸微小型化以后,构件间的几何误差、接触摩擦、力学特性和构件在环境介质中的行为,以及所受体积力和表面力的相对关系等均发生变化。此外,材料微小型化以后,本身的物理性质及其对环境变化的响应也将有很大的改变。所有这些都远远超出了传统机械学的概念和范畴,因而微型机械是基于现代科学的综合技术,并作为整个纳米科学技术的重要组成部分,采用一种新的思维方式指导下的产物。

微型机械具有体积小、质量轻、能耗低、集成度高和智能化程度高等一系列特点,通常它应是一个独立的智能系统,即将微型机构、微型驱动器、微电源以及微型传感器和控制电路等集于一体的机械电子系统。它的出现无疑将推动国民经济和国防工业许多部门的发展。正如美国国家关键技术委员会于1993年3月向美国总统提交的报告指出的:“微米级和纳米级技术的发展已使人们能开发出一类新的显微级尺寸的器件。这些器件能在诸如环境控制、医学等不同的领域工作。它们的低成本及比现有器件高的灵敏度可能使许多领域会有突破”^[4]。美国国家科学基金委员会的调查报告