



纳米科学与技术

纳米润滑材料与技术

周 峰 王晓波 刘维民 等 编著



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

纳米科学与技术

纳米润滑材料与技术

周 峰 王晓波 刘维民 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

作者在多年从事纳米润滑材料与技术研究工作的基础上,借鉴国内外相关研究成果,对纳米润滑材料与技术的研究和应用进行了较为系统的分析与阐述。

全书共8章,分别介绍了纳米润滑材料与技术所涵盖的主要内容,纳米粒子在润滑油脂中的减摩抗磨原理和应用,几类纳米润滑薄膜如纳米陶瓷薄膜、纳米金属薄膜和纳米碳基薄膜,纳米材料在聚合物复合材料中的应用,纳米晶化的陶瓷、金属和金属间化合物材料,最后对纳米摩擦学和纳米仿生润滑材料进行了简要介绍。

本书适合摩擦学与润滑材料相关专业的研究生和教师、相关企业工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米润滑材料与技术 / 周峰等编著. —北京:科学出版社,2014.3

(纳米科学与技术 / 白春礼主编)

ISBN 978-7-03-039702-7

I. ①纳… II. ①周… III. ①纳米材料-自润滑材料-研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第020429号

丛书策划:杨震 / 责任编辑:杨震 刘冉 张星 / 责任校对:张怡君
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:21

字数:420 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明 封松林 傅小锋 顾 宁 汲培文 李述汤

李亚栋 梁 伟 梁文平 刘 明 卢秉恒 强伯勤

任咏华 万立骏 王 琛 王中林 薛其坤 薛增泉

姚建年 张先恩 张幼怡 赵宇亮 郑厚植 郑兰荪

周兆英 朱 星

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养作出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

前 言

摩擦学是研究相对运动相互作用表面间的摩擦、润滑和磨损以及三者间相互关系的基础理论与实践的一门交叉学科。润滑是摩擦学研究的重要组成部分,是降低摩擦、减少磨损的最主要技术手段。利用合理的润滑可以实现节能降耗、减少排放、降低噪声、延长机械寿命等。2008年中国工程院的调查报告显示,2006年,在八个工业领域由于摩擦磨损造成的损失约占我国GDP(国内生产总值)的1.5%,而如果有效应用摩擦学研究成果,则可节省其中的三分之一左右。

纳米材料在润滑材料技术中的应用要早于纳米概念的提出。近三十年来,纳米科技快速发展,出现了许许多多的纳米材料、技术以及表征手段,发现了许多纳米效应。纳米科技的发展促进了纳米润滑科学与技术的进步,纳米润滑材料在摩擦学领域被提及的频率大幅增加。传统润滑材料与纳米科技相结合是对摩擦学领域的重要发展。

作者认为,纳米润滑材料的研究范畴主要包括两个方面的内容:一是纳米材料在润滑材料与技术中的研究及应用;二是纳米尺度的润滑研究,即从原子分子和纳米尺度探讨润滑机理,对比研究其与传统润滑规律的差异。

本书主要归纳总结了中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室近年来在纳米润滑材料与技术方面的研究工作,涉及润滑材料的多个方面,包括纳米粒子在润滑油脂中的应用、纳米陶瓷薄膜、纳米金属薄膜、纳米碳膜、纳米材料/聚合物复合材料、纳米晶材料的制备与应用等,并对纳米摩擦学和仿生纳米润滑材料进行了简单介绍。在本书的编撰过程中,另外两部摩擦学相关书籍业已出版,包括薛群基、王立平等编著的《类金刚石碳基薄膜材料》(科学出版社),以及钱林茂、田煜、温诗铸编著的《纳米摩擦学》(科学出版社),能够帮助读者更好地了解碳基薄膜摩擦学和纳米摩擦学的研究进展。纳米材料可以在润滑油脂中作为添加剂,在摩擦对偶之间起到隔离、滚珠、修复等作用,从而具有良好的减摩抗磨作用;纳米陶瓷、金属、碳等多种薄膜,可以作为固体润滑抗磨涂层材料,以较低的成本和材料消耗发挥润滑防护作用;纳米材料在聚合物复合材料中、纳米晶相在高温合金材料和金属陶瓷材料中均可以起到增强增韧或自润滑作用;一直以来关于摩擦产生的根源知之较少,而近二三十年来,随着纳米表征技术的进步,人们从原子分子或纳米尺度上对这一问题有了更多的了解;自然界展示了非常神奇的摩擦现象,如关节的超低摩擦系数,其中生物纳米材料发挥了重要作用。以上内容在本书中均有相关论述。

本书共分为八章,由周峰提出构思和组织框架,并对全书进行了审定。固体润滑国家重点实验室多位同事参与了本书的编写,其中第1章由周峰、胡海媛、蔡美荣编写,第2,3章由王晓波、赵改青、刘维民编写,第4章由刘旭庆、周峰编写,第5章由刘维民、石蕾、郝俊英编写,第6章由杨军、刘维民编写,第7章由魏强兵、周峰编写,第8章由周峰、刘建喜编写。此外李斌、林鹏等参与了书稿的校对。

本书汇报的大部分内容得到了科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院相关研究项目的支持,在此表示衷心的感谢!同时,作者也对所有参加编撰本书的同事及参与完成实验工作的全体人员和研究生表示感谢!

由于学识水平所限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米与纳米效应	3
1.2 纳米材料的摩擦学应用	7
1.3 纳米摩擦学	9
1.4 润滑材料分类	10
1.5 纳米润滑材料的表征	12
参考文献	17
第 2 章 纳米添加剂在润滑油中的应用	19
2.1 金属纳米颗粒作为润滑油添加剂	20
2.1.1 一元金属纳米颗粒	20
2.1.2 二元金属纳米颗粒	34
2.1.3 多元金属纳米颗粒	39
2.2 无机化合物纳米颗粒作为润滑油添加剂	42
2.2.1 氧化物纳米颗粒	42
2.2.2 硫化物纳米颗粒	45
2.2.3 稀土金属化合物纳米颗粒	47
2.2.4 硼酸盐纳米颗粒	50
2.2.5 杂多化合物纳米颗粒	52
2.2.6 碳酸盐纳米颗粒	52
2.3 金刚石纳米颗粒作为润滑油添加剂	54
2.4 富勒烯结构纳米颗粒作为润滑油添加剂	59
2.4.1 具有富勒烯结构的 MoS_2 纳米添加剂	59
2.4.2 富勒烯纳米添加剂	62
2.5 聚合物作为润滑油添加剂	68
2.6 机理	70
2.7 小结和展望	74
参考文献	75

第3章 纳米添加剂在润滑脂中的应用	81
3.1 纳米氧化物作为润滑脂添加剂	81
3.2 纳米金属作为润滑脂添加剂	86
3.3 纳米氟化物作为润滑脂添加剂	90
3.4 纳米硫化物作为润滑脂添加剂	98
3.5 纳米非晶合金作为润滑脂添加剂	103
3.6 纳米碳酸钙作为润滑脂添加剂	107
3.7 小结和展望	110
参考文献	111
第4章 聚合物纳米复合润滑材料	113
4.1 聚合物润滑材料的摩擦磨损原理	114
4.1.1 聚合物润滑材料的摩擦学理论	114
4.1.2 聚合物润滑材料的磨损机理	116
4.2 聚合物纳米复合润滑材料的种类	118
4.3 纤维增强聚合物复合材料摩擦磨损性能	135
4.3.1 织物材料的种类	136
4.3.2 纤维织物纳米复合润滑材料的制备工艺流程	137
4.3.3 纤维织物复合润滑材料的界面作用机理和填料	139
4.3.4 纤维复合纳米润滑材料	140
4.3.5 织物复合纳米润滑材料润滑机制	151
4.4 纳米填料的作用机理	152
4.4.1 纳米填料的作用	152
4.4.2 纳米填料的表面修饰对聚合物纳米复合材料的摩擦磨损性能影响	158
4.4.3 纳米填料对转移膜的影响	159
4.5 小结和展望	162
参考文献	163
第5章 纳米无机复合薄膜/涂层的摩擦学性能	169
5.1 溶胶-凝胶纳米陶瓷薄膜	169
5.1.1 溶胶-凝胶技术	170
5.1.2 溶胶-凝胶减摩抗磨薄膜/涂层	170
5.2 电沉积镀层	176
5.2.1 金属多层膜	176
5.2.2 金属基复合镀层	183
5.2.3 纳米晶镀层	189
5.3 有机/无机复合薄膜/涂层	194

5.3.1	溶胶-凝胶法	194
5.3.2	LB膜技术	195
5.3.3	基于化学吸附自组装成膜技术	197
5.3.4	静电沉积技术	200
5.4	碳基薄膜	203
5.4.1	结构与分类	205
5.4.2	制备技术	211
5.4.3	表征技术	214
5.4.4	薄膜性能与应用	218
5.5	小结和展望	220
	参考文献	220
第6章	材料的纳米化与润滑抗磨	230
6.1	金属基纳米材料的摩擦磨损性能	230
6.1.1	力学性能对纳米金属材料摩擦学性能的影响	231
6.1.2	环境条件对纳米金属摩擦学性能的影响	234
6.1.3	晶粒尺寸对纳米金属材料摩擦学性能的影响	236
6.1.4	磨斑亚表层结构对金属材料摩擦学性能的影响	238
6.1.5	金属基纳米复合材料的摩擦学性能	239
6.2	陶瓷基纳米材料的摩擦磨损性能	241
6.2.1	纳米陶瓷的摩擦学性能	241
6.2.2	纳米复合陶瓷的摩擦学性能	242
6.2.3	陶瓷基纳米复合材料的摩擦学性能	245
6.3	小结和展望	248
	参考文献	248
第7章	纳米仿生润滑材料	251
7.1	仿生关节润滑	251
7.1.1	人体关节摩擦学简介	251
7.1.2	人体天然关节润滑	251
7.1.3	仿生关节软骨	254
7.1.4	仿生关节滑液	262
7.2	仿生减阻	265
7.2.1	自然界典型动物的表皮减阻	265
7.2.2	人工仿生减阻	268
7.3	仿生自清洁材料	271
7.3.1	天然超疏水表面	271

7.3.2	超疏水表面的仿生构筑	274
7.3.3	超疏油及超双疏表面	275
7.3.4	仿生超疏水表面的实际应用	277
7.4	仿生黏附	279
7.4.1	脚掌微结构及其黏附机理	279
7.4.2	微结构仿生黏附	280
7.5	小结和展望	284
	参考文献	284
第8章	纳米摩擦学	290
8.1	纳米摩擦学研究的实验测试设备	291
8.1.1	扫描探针显微镜	291
8.1.2	表面力仪	294
8.2	纳米摩擦和薄膜润滑	296
8.3	表面黏附	305
8.4	纳米磨损与纳米加工	308
8.5	分子动力学模拟在纳米摩擦学中的应用	312
	参考文献	316
索引	320