



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

纳米科学与技术

# 纳米摩擦学

钱林茂 田煜 温诗铸 著

 科学出版社



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

纳米科学与技术

# 纳米摩擦学

钱林茂 田 煜 温诗铸 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书取材于国内外纳米摩擦学研究最新进展和作者等从事该领域研究的成果,系统地阐述了纳米摩擦学的理论和应用,全面反映了纳米摩擦学的研究现状和发展趋势。

全书共 16 章,由实验和理论分析装置与方法、摩擦学基础理论、微观摩擦、微观磨损和薄膜润滑、纳米摩擦学的工程应用四部分组成。在阐明纳米摩擦学的研究特征、实验仪器、理论分析方法的基础上,以摩擦表面形态、摩擦物理与摩擦化学、黏着现象与表面接触三章介绍摩擦学基础理论,进而从微观摩擦、微观磨损、分子膜与边界润滑、薄膜润滑、纳米表面工程和纳米粒子添加剂、纳米生物摩擦学六个方面全面阐述纳米摩擦学的理论基础。最后以纳米摩擦学在微机电系统、仿生工程、微纳制造中的应用为例说明其在工程中的实际应用。

本书取材新颖,并力求将摩擦学的微观研究和宏观研究相结合,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实际应用。

本书可作为机械工程专业的研究生教材以及高等院校有关专业师生的教学参考书,也可供从事机械设计和制造的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

纳米摩擦学 / 钱林茂,田煜,温诗铸著. —北京:科学出版社,2013.6  
(纳米科学与技术 / 白春礼主编)

ISBN 978-7-03-037960-3

I. 纳… II. ①钱… ②田… ③温… III. 纳米材料-摩擦-研究 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 132626 号

责任编辑:顾英利 刘志巧 / 责任校对:刘亚琦 桂伟利  
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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

\*

2013 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张: 31 1/4 插页: 4

字数: 630 000

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

## 作者简介

**钱林茂** 1971年6月生,四川彭州人,工学博士,西南交通大学教授。研究方向为纳米摩擦学与纳米制造。1994年于清华大学精密仪器与机械学系本科毕业后,师从温诗铸教授进行纳米摩擦学研究,1999年获清华大学工学博士学位。1999~2002年先后在法国巴黎高等师范学校和香港科技大学进行访问研究,2002年12月起在西南交通大学任教至今。2006年获国家杰出青年科学基金资助;2007年获四川省青年科技奖;2008年享受政府特殊津贴,获教育部自然科学奖二等奖(排名第一);2009年入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选;2010年领导的研究组入选四川省青年科技基金创新团队;2012年获教育部自然科学奖一等奖(排名第四)。现任英国机械工程师学会会刊(J卷)*Journal of Engineering Tribology*等4个国际学术期刊的编委,国际机构学与机器科学联合会(IFToMM)摩擦学技术委员会委员,中国微米纳米技术学会理事,中国机械工程学会摩擦学分会常务理事。



**田煜** 1975年5月生,四川铜梁人,工学博士,清华大学摩擦学国家重点实验室研究员。研究方向为机械表面/界面的行为、机理及控制。1998年于清华大学精密仪器与机械学系本科毕业后,师从温诗铸教授进行电流变机理及应用研究,2002年获清华大学工学博士学位,博士毕业后留校任教至今。2005~2007年在美国加州大学圣巴巴拉分校进行两年博士后研究,2011年在新加坡南洋理工大学进行半年访问研究。获2004年全国百篇优秀博士学位论文、2008年教育部自然科学奖二等奖1项(排名第一),2007年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”,2011年中国机械工程学会青年科技成就奖和2009年中国机械工程学会摩擦学分会首届摩擦学青年学者奖。现任中国机械工程学会摩擦学分会青年工作委员会副主任委员,清华大学摩擦学国家重点实验室副主任。



**温诗铸** 中国科学院院士,1932年11月出生于江西丰城,1955年毕业于清华大学机械制造系,获优秀毕业生金质奖章。留校任教后,历任机械设计教研室副主任、主任。1979年赴英国伦敦帝国理工学院进修。1981年以来,主持清华大学摩擦学学科建设,先后担任清华大学摩擦学研究室主任、摩擦学研究所副所长、摩擦学国家重点实验室主任兼学术委员会副主任。



研究领域涉及润滑理论、摩擦磨损机理与控制、纳米摩擦学及微机械学等学科。所主持的研究项目共获奖24项,包括:国家自然科学基金二等奖1项,国家科学技术进步奖二等奖1项,国家技术发明奖三等奖1项,全国优秀科技图书奖一等奖、二等奖各1项,省部级科学技术进步奖一等奖5项、二等奖11项、三等奖3项,2002年度何梁何利基金科学与技术进步奖等。1999年被选为中国科学院院士。2009年获中国机械工程学会摩擦学分会摩擦学最高成就奖。

## 《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

本书是在温诗铸教授以前出版的《纳米摩擦学》(清华大学出版社,1998)的基础上编写而成的。该书取材于国内外纳米摩擦学研究最新进展和作者等从事该领域研究的成果,系统地阐述了纳米摩擦学的理论与应用,全面反映了20世纪90年代纳米摩擦学的研究现状。该书成书于我国纳米摩擦学研究的初创阶段,是第一本有关纳米摩擦学研究的学术著作,得到广泛引用,对于推动我国纳米摩擦学的基础和应用研究起到了积极作用。

随着纳米科学技术的迅速发展,近年来纳米摩擦学研究的内容和范畴得到了进一步扩展,并取得了许多新的研究成果。例如,人们对于摩擦起因的微观模型和纳米润滑膜特性进行了更加深入的研究,对微观磨损的现象和机理有了更全面深入的认识。同时,纳米摩擦学在应用研究方面也取得了很大进展,如微机电系统中的纳米摩擦学、仿生工程中的纳米摩擦学、纳米摩擦学在微纳制造中的应用、摩擦诱导纳米加工等。

有鉴于此,温诗铸教授于2011年9月,动员两位与他长期从事纳米摩擦学研究的学生钱林茂和田煜负责再版的撰写工作。其中,钱林茂于1994年师从温诗铸教授,1999年获清华大学工学博士学位,在温诗铸教授的指导和引领下长期从事纳米摩擦学和纳米制造的研究工作,2006年获国家杰出青年科学基金资助,现任西南交通大学教授。田煜于1998年师从温诗铸教授,2002年获清华大学工学博士学位,随后留校任教,2004年获全国百篇优秀博士学位论文,在温诗铸教授的指导和引领下长期从事纳米摩擦学和流变学的研究工作,现任清华大学研究员。

本书是在广泛收集国内外最新文献的基础上,总结作者及所在单位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。编写本书的目的在于向读者介绍纳米摩擦学研究的最新进展,并力求全面及时地反映近年来各个主要领域的学术水平和研究动态,以达到交流研究经验,推动纳米摩擦学发展的目的。然而,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,因此本书在取材和论述方面必然存在不少缺点,敬请广大读者提出批评指正。

本书由温诗铸教授组织编写,钱林茂教授负责全书的审定和统稿工作。参加各章初稿撰写的人员如下。清华大学温诗铸教授:第1章;清华大学田煜研究员:第3、6、9、10、11、14章及第2、5章中部分内容;其余各章节均由西南交通大学钱林茂教授撰写。作者在纳米摩擦学领域的研究得到国家自然科学基金的资助。本书

的编写得到清华大学摩擦学国家重点实验室和西南交通大学摩擦学研究所的老师和研究生们的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衷心的感谢。

温诗铸教授于 1991 年在国内率先提出和开展纳米摩擦学的研究,全力推动纳米膜厚测试仪的研制和纳米薄膜润滑性能研究;1995 年 5 月在清华大学组织召开我国首次纳米摩擦学研讨会;1998 年出版《纳米摩擦学》(第一版)的学术专著,对推动我国纳米摩擦学的基础和应用研究作出了积极贡献。成书之际,正值温诗铸教授 80 岁华诞,我们作为温老师的学生并与他长期合作,谨以此书感谢恩师多年的精心培养和谆谆教诲,衷心祝愿温老师生日快乐、健康幸福!

钱林茂 田 煜

2012 年 11 月

# 目 录

《纳米科学与技术》丛书序

前言

## 第一部分 实验和理论分析装置与方法

第 1 章 绪论	3
1.1 纳米科学技术的发展	3
1.2 摩擦学发展的历史回顾	6
1.3 纳米摩擦学研究	7
参考文献	10
第 2 章 实验测试与分析仪器	12
2.1 引言	12
2.2 表面力仪	13
2.3 扫描隧道显微镜	18
2.4 原子力显微镜	21
2.5 非接触式原子力显微镜	23
2.6 摩擦力显微镜	25
2.6.1 摩擦力显微镜的工作原理	25
2.6.2 摩擦力显微镜的载荷和摩擦力标定	26
2.6.3 摩擦力显微镜的应用	29
2.7 纳米压/划痕仪	31
2.7.1 纳米压痕仪	31
2.7.2 纳米划痕仪	34
2.8 纳米润滑膜厚度测量技术	38
2.9 其他分析测试设备简介	41
2.9.1 微观结构分析设备	41
2.9.2 化学成分分析仪器	43
2.9.3 表面三维轮廓仪	45
2.9.4 石英晶体微天平	47
参考文献	48

<b>第 3 章 分子动力学模拟技术</b> .....	52
3.1 基本原理与应用 .....	52
3.2 平衡态分子动力学模拟 .....	55
3.3 宏观特性统计与控制 .....	56
3.3.1 系统控制方法 .....	57
3.3.2 宏观量的统计提取方法 .....	59
3.4 柔性大分子动力学模拟 .....	60
3.5 非平衡态分子动力学模拟 .....	61
参考文献 .....	63

## 第二部分 摩擦学基础理论

<b>第 4 章 摩擦表面形态</b> .....	69
4.1 引言 .....	69
4.2 固体结构与表面特征 .....	69
4.2.1 固体结构特征 .....	69
4.2.2 固体表面特征 .....	72
4.3 接触表面形态 .....	73
4.3.1 金属磨损表面形态特征 .....	74
4.3.2 陶瓷磨损表面形态特征 .....	75
4.3.3 聚合物磨损表面形态特征 .....	76
4.3.4 单晶硅磨损表面形态特征 .....	77
4.4 加工表面的机械性能 .....	78
4.5 表面润湿与吸附 .....	80
4.5.1 黏附能与表面润湿性 .....	80
4.5.2 物理吸附与化学吸附 .....	81
参考文献 .....	82
<b>第 5 章 摩擦物理与摩擦化学</b> .....	84
5.1 引言 .....	84
5.2 摩擦物理 .....	84
5.2.1 物理磨损 .....	84
5.2.2 摩擦闪温 .....	88
5.2.3 摩擦辐射 .....	92
5.2.4 摩擦起电 .....	98
5.3 摩擦化学 .....	102
5.3.1 吸附 .....	102

5.3.2 摩擦扩散 .....	106
5.3.3 摩擦化学反应 .....	108
5.3.4 摩擦膜 .....	111
参考文献 .....	114
<b>第 6 章 黏着现象与表面接触</b> .....	<b>118</b>
6.1 引言 .....	118
6.2 固体黏着现象 .....	118
6.2.1 磨损中的黏着现象 .....	118
6.2.2 黏着摩擦理论 .....	119
6.2.3 摩擦中的黏滑现象 .....	120
6.3 界面黏着能与表面力 .....	122
6.3.1 分子间作用力 .....	122
6.3.2 表面力与表面能、界面能 .....	123
6.4 固体表面接触 .....	124
6.4.1 Derjaguin 近似 .....	124
6.4.2 经典接触模型 .....	124
6.5 有关黏着的其他问题 .....	128
6.5.1 粗糙度对黏着的影响 .....	128
6.5.2 毛细力对黏着的影响 .....	129
6.5.3 液下的固-固黏着 .....	130
6.6 液体与固体的接触 .....	132
6.6.1 宏观液滴与固体的接触 .....	132
6.6.2 液体铺展与聚集 .....	133
6.6.3 固液吸附膜 .....	136
参考文献 .....	137

### 第三部分 微观摩擦、微观磨损和薄膜润滑

<b>第 7 章 微观摩擦</b> .....	<b>141</b>
7.1 引言 .....	141
7.2 从宏观摩擦到微观摩擦 .....	141
7.3 微观摩擦与表面形貌 .....	144
7.4 微观摩擦的影响因素 .....	149
7.4.1 气体吸附的影响 .....	149
7.4.2 犁沟效应 .....	150
7.4.3 材料特性的影响 .....	151

7.4.4	黏着效应	155
7.4.5	载荷的影响	158
7.4.6	速度的影响	160
7.4.7	湿度的影响	163
7.4.8	温度的影响	164
7.4.9	电磁场的影响	166
7.5	黏滑	168
7.5.1	粗糙表面模型	169
7.5.2	与长度相关的模型	170
7.5.3	与速度相关的模型	171
7.5.4	相变模型	171
7.5.5	黏滑的临界速度	172
7.6	零摩擦状态	173
7.6.1	零摩擦的定义	173
7.6.2	多维摩擦系统的零摩擦	173
7.6.3	超滑在原子尺度的观察	175
	参考文献	181
<b>第8章</b>	<b>微观磨损</b>	<b>185</b>
8.1	引言	185
8.1.1	微机电系统与纳米制造中的微观磨损问题	185
8.1.2	微观磨损的研究方法	186
8.1.3	微观磨损的研究进展	187
8.2	纳米压痕与纳米硬度	192
8.2.1	纳米硬度与显微硬度的对比	193
8.2.2	单晶硅的纳米压痕行为	196
8.2.3	其他材料的纳米压痕行为	198
8.3	单晶硅的微观磨损及其损伤机理研究	200
8.3.1	单晶硅的机械磨损	200
8.3.2	单晶硅的摩擦化学磨损	205
8.4	单晶硅的切向纳动	217
8.4.1	单晶硅切向纳动的运行规律	218
8.4.2	单晶硅切向纳动的损伤特征	222
8.4.3	DLC 薄膜对单晶硅的切向纳动防护	226
8.5	径向纳动	228
8.5.1	典型微机电系统材料的径向纳动	228

8.5.2 薄膜表面的径向纳动 .....	229
8.6 镍钛形状记忆合金的微观磨损研究 .....	233
8.6.1 镍钛合金的压痕硬度与微观磨损 .....	233
8.6.2 镍钛合金的切向纳动 .....	239
参考文献 .....	241
<b>第9章 分子膜与边界润滑</b> .....	244
9.1 边界润滑 .....	244
9.2 分子膜的形成 .....	245
9.3 边界分子膜的流变性能 .....	245
9.4 物理形态与相变 .....	247
9.5 有序分子膜 .....	248
9.5.1 LB膜 .....	249
9.5.2 自组装膜 .....	250
9.6 分子膜的摩擦特性 .....	251
9.6.1 自组装膜的摩擦特性 .....	251
9.6.2 磁头/磁盘系统中的分子膜润滑 .....	253
参考文献 .....	255
<b>第10章 薄膜润滑</b> .....	257
10.1 薄膜润滑的提出 .....	257
10.2 润滑状态的转化 .....	258
10.2.1 润滑状态的划分 .....	258
10.2.2 弹流润滑向薄膜润滑的转化 .....	259
10.2.3 薄膜润滑向边界润滑的转化 .....	260
10.3 薄膜润滑的机理 .....	264
10.4 薄膜润滑的特性 .....	265
10.4.1 接触区膜厚曲线的形状 .....	265
10.4.2 润滑剂黏度对薄膜润滑的影响 .....	265
10.4.3 滑滚比对薄膜润滑的影响 .....	266
10.4.4 固体表面能对薄膜润滑的影响 .....	267
10.4.5 薄膜润滑的摩擦特性 .....	268
10.5 薄膜润滑的时间效应 .....	269
10.6 水基乳液润滑下的薄膜润滑 .....	271
10.7 薄膜润滑的理论计算 .....	274
参考文献 .....	275

<b>第 11 章 纳米表面工程和纳米粒子添加剂</b> .....	277
11.1 引言 .....	277
11.2 纳米表面工程 .....	277
11.2.1 纳米硬膜技术 .....	277
11.2.2 纳米薄膜润滑技术 .....	279
11.3 纳米粒子添加剂 .....	282
11.3.1 单质纳米颗粒 .....	283
11.3.2 纳米硫化物与纳米氧化物 .....	285
11.3.3 纳米无机盐 .....	287
11.3.4 纳米微球 .....	288
参考文献 .....	289
<b>第 12 章 纳米生物摩擦学</b> .....	293
12.1 引言 .....	293
12.2 生物材料微观结构与性能的构性关系 .....	293
12.2.1 人体天然组织的构性关系 .....	293
12.2.2 动植物材料微观构性关系 .....	302
12.3 牙齿在磨损过程中的晶粒细化及其损伤自修复 .....	308
12.3.1 人牙牙釉质微观摩擦磨损行为研究 .....	308
12.3.2 纳米划痕前后羟基磷灰石颗粒的尺寸变化情况 .....	312
12.3.3 人工唾液再矿化对受损牙釉质表面 HA 颗粒的修复研究 .....	313
12.4 指甲摩擦学性能的各向异性及其损伤自修复 .....	314
12.4.1 指甲微观结构的机械性能 .....	314
12.4.2 指甲的变形恢复特性 .....	320
12.4.3 角蛋白材料损伤自修复 .....	326
12.5 仿生摩擦学 .....	328
12.5.1 仿生摩擦学概述 .....	329
12.5.2 人体仿生学 .....	329
12.5.3 动植物仿生研究 .....	331
参考文献 .....	333

## 第四部分 纳米摩擦学的工程应用

<b>第 13 章 MEMS 中的纳米摩擦学</b> .....	339
13.1 MEMS 中的纳米摩擦学问题 .....	339
13.1.1 黏着问题 .....	339
13.1.2 摩擦问题 .....	342



13.1.3 磨损问题 .....	345
13.2 MEMS 中的抗磨减摩设计 .....	350
13.2.1 MEMS 的抗黏设计 .....	350
13.2.2 MEMS 减摩耐磨设计 .....	355
13.2.3 MEMS 减摩耐磨进展 .....	358
参考文献 .....	362
<b>第 14 章 仿生工程中的纳米摩擦学 .....</b>	<b>364</b>
14.1 引言 .....	364
14.2 荷叶的超疏水性 .....	364
14.2.1 超疏水现象 .....	364
14.2.2 超疏水理论 .....	365
14.2.3 自清洁理论 .....	366
14.2.4 疏水表面制备 .....	368
14.3 壁虎的超黏特性 .....	369
14.3.1 壁虎卓越的爬行能力 .....	369
14.3.2 基于范德华作用力的壁虎刚毛黏附机理 .....	369
14.3.3 细分原理在壁虎刚毛仿生表面中的应用 .....	373
14.3.4 可控黏/脱附的最新进展 .....	374
参考文献 .....	377
<b>第 15 章 纳米摩擦学在微纳制造中的应用 .....</b>	<b>381</b>
15.1 引言 .....	381
15.2 微纳制造技术及其面临的摩擦学问题 .....	381
15.2.1 微纳制造的发展及应用 .....	381
15.2.2 微纳制造技术中的摩擦学问题 .....	386
15.3 微切削与纳米加工 .....	388
15.4 纳米抛光 .....	391
15.4.1 纳米抛光概述 .....	391
15.4.2 CMP 的组成及其原理 .....	393
15.4.3 典型的 CMP 材料去除模型 .....	396
15.4.4 CMP 的实验和仿真研究进展 .....	399
15.4.5 CMP 的展望 .....	403
15.5 纳米压印与纳米铸造 .....	405
15.5.1 纳米压印与纳米铸造的原理和工艺要素 .....	405
15.5.2 纳米压印与纳米铸造技术新进展 .....	406
15.5.3 纳米压印与纳米铸造的技术挑战与趋势 .....	410