



纳米科学与技术

纳米与介观力学

赵亚溥 著

 科学出版社



纳米科学与技术

纳米与介观力学

赵亚溥 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

《纳米与介观力学》(Nano and Mesoscopic Mechanics)为系统论述纳米、介观和MEMS/NEMS力学的学术专著,所包含的内容均为国际上该领域的热点和难点问题,选题独特、新颖。纳米力学研究的是特征尺度大致在 $1\text{ \AA} \sim 100\text{ nm}$ 的低维物体的力学行为,介观力学作为正在兴起的介观科学的一部分则主要研究特征尺度在 $100\text{ nm} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 的物体的力学行为。因此,纳米与介观力学研究的尺度介于 $1\text{ \AA} \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 量级,是一门典型的交叉学科。

本书由五篇共18章和6个附录组成。第一篇主要讨论纳米和介观力学的理论框架和基础;第二篇主要讨论和MEMS/NEMS相关的黏附接触力学,界面剥离力学等;第三篇为MEMS/NEMS中的三个主要力学问题;第四篇则为近期国际上该领域的研究热点的材料与结构的介观力学和程开甲教授在TFDC理论方面的贡献等。大多数内容为首次系统论述。第五篇为6个附录。

本书可以供应用数学、非线性科学、微纳米力学、凝聚态物理学、纳微系统、机械工程等领域的高等院校研究生、教师,以及科研人员参考并用作教材。

图书在版编目(CIP)数据

纳米与介观力学/赵亚溥著. —北京: 科学出版社, 2014
(纳米科学与技术)
ISBN 978-7-03-041685-3

I. ①纳… II. ①赵… III. ①纳米材料—材料力学—研究②介观物理—研究 IV. ①TB383.01.②O488

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第190435号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 李 影 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

*

2014年8月第 一 版 开本: $720 \times 1000\text{ 1/16}$

2014年8月第一次印刷 印张: 39 插页: 8

字数: 763 000

定价: 198.00 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!

白尚礼

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

纳米力学 (nanomechanics) 研究的是特征尺度大致在 $1\text{ \AA}\sim 100\text{ nm}$ 范围低维物体的力学行为, 介观力学 (mesomechanics) 作为近年来所兴起的介观科学 (mesoscale science) 的分支学科, 则主要研究特征尺度大致在 $100\text{ nm}\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 范围物体的力学行为. 因此, 纳米与介观力学研究的尺度介于 $1\text{ \AA}\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 量级, 是一门交叉学科. 1986 年诺贝尔物理奖得主 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer (1933~2013) 用三个“点”来概括“纳米尺度”: 材料发展其新特性和不同学科发展新研究思路、研究方式乃至新术语的“分岔点 (bifurcation point)”; 宏观和微观尺度结合的“会合点 (merging point)”; 使人类能像自然界一样通过自下而上方式实现功能化的“起点 (starting point)”. 介观尺度则是连续介质力学、纳米力学乃至量子力学汇聚之处. 在介观尺度, 缺陷、界面、非平衡已成为常态. 因此, 构筑自上而下 (top-down) 和自下而上 (bottom-up) 间的桥梁是介观力学的首要任务.

为了明确纳米与介观力学这一学科的任务, 前提是首先了解其显著特点:

(1) 正如 Binnig 和 Rohrer 所指出的, 纳米力学中传感、致动所需的能量在热扰动能 ($k_{\text{B}}T$) 量级, 所对应的作用力则在皮牛量级; 机械本征频率可高达十亿赫兹 (GHz); 扩散时间可缩小至皮秒; 化学能可直接高效地转化为机械能, 等等.

(2) 处于量子力学和连续介质力学的中间地带, “离散与连续的耦合”“随机性与确定性的耦合”是其重要的特点. 纳米与介观力学的任务之一就是链接量子力学和连续介质力学, “跨尺度”是纳米与介观力学的主要任务之一. 由于力学学科的特点, 能“回到宏观”无疑对问题的解决增加了挑战性.

(3) 非线性、复杂性、涨落效应十分突出. 纳米与介观力学研究的对象往往是非线性复杂系统, 其行为一般不再是简单个体行为的线性叠加, 因此如: 涌现 (emergence)、自组织、集体现象、合作效应、相干性等都是组成系统的大量个体在它们的相互作用下所表现出的非平庸现象, 这些现象往往不能通过模型的分解和简单的叠加来解释. 本书中多个章节集中讨论了纳米与介观力学中的分形、分岔、孤立子、混沌、同步、魔鬼楼梯、涌现等丰富的非线性行为.

在现实世界里, 几乎所有层次上都发现了涨落、分岔和不稳定性. 特别是在远离平衡态时, 涨落起着核心的作用. 正是涨落效应决定着动力系统的分岔行为, 而分岔恰恰是对称破缺之源. 分岔不但降低了系统的对称性, 而且还是系统各部分与系统及其环境之间的内禀差别的表现. 涨落、分岔和对称破缺等在纳米和介观力学中表现的更为淋漓尽致.

作者在中国科学院力学研究所多年为博士研究生讲授 Landau 和 Lifshitz 理论物理教程中的《弹性理论》. 本书撰写的原因之一是为课堂适当补充些新的研究进展. 结合听课学生们的研究方向, 本书中的部分内容已经在课程中多次进行补充试讲, 受到了听课学生们的普遍欢迎. 因此, 本书的撰写时间跨度较大.

纳米和介观力学发展十分迅速, 新现象、新结果层出不穷、精彩纷呈, 本书不可能面面俱到. 本书撰写的一条主线是其中和非线性行为相关的难点内容.

本书每章后面的“思考题”一般都来自于相关的重要内容文献, 是各章不可分割的有机组成部分.

固体中联系原子尺度和宏观尺度变形的 Cauchy-Born 准则、流体非平衡运输的 Green-Kubo 关系、基于第一原理和分子动力学的多尺度模拟等内容是纳米与介观力学的重要组成部分, 但由于这些内容均在作者的另外一部专著《表面与界面物理力学》(科学出版社 2012 年出版) 中做了深入阐述, 在本书中将不再讨论.

本书在撰写过程十分注重对所讨论问题的历史溯源, 以使读者能够触摸到所讨论问题的历史脉搏. 如对黏附接触力学问题研究的兴起的撰写过程中, 曾和英国皇家学会会员 K. Kendall 教授、A. D. Roberts 博士、J. A. Greenwood 博士等在该领域做出重要贡献的见证人, 数十次地通邮件, 关于他们当年的博士论文选题和相关历史事件等进行确认. 例如在撰写 Rayleigh-Bénard 或 Bénard-Marangoni 对流的例子时, 曾和英国皇家学会会员 J. R. A. Pearson 博士进行过多次讨论, 等等.

本书中的内容源于作者课题组十余年研究心得的凝练. 十余年来曾得到过不同领域很多前辈和同行学者的鞭策、关怀、鼓励、帮助和指点, 这些宝贵财富都是本书能够出版发行的力量源泉. 作者深表衷心感谢! 也非常感谢课题组成员在相关研究上的贡献, 在涉及他们的贡献章节时, 都一一提到了他们的名字.

本书的出版获得了国家出版基金项目的资助, 同时还获得了国家自然科学基金项目 (11372313)、中国科学院重点部署项目 (KJZD-EW-M01) 和中国科学院装备研制项目 (Y2010031) 的资助.

文章千古事, 得失寸心知. 虽然作者自认为在成书过程中已经尽力了, 但毕竟本书所涉及内容十分广泛, 难免有错误之处, 期待着读者的不吝赐教.

赵亚溥

2014 年 3 月于中关村

目 录

第一篇 基础部分

第 1 章 分子模拟中的应力、表面张力、原子 J 积分描述	3
1.1 宏观作用力的微观来源	3
1.2 连续介质力学在纳米尺度是否仍然适用	4
1.3 Cauchy 应力原理	9
1.3.1 连续介质假设	9
1.3.2 Cauchy 应力原理与基本定理	10
1.3.3 关于 Cauchy 应力的讨论	11
1.4 位力定理与位力应力	12
1.4.1 针对气体压强计算所创立的位力定理	12
1.4.2 纳米力学中的应力 —— 位力应力	14
1.5 连续介质场微观表述的 Irving-Kirkwood-Noll 步骤	15
1.6 微观量和连续介质场的期望值之间的关系	16
1.7 逐点连续介质场的定义	18
1.8 考虑权函数和键函数的宏观 Cauchy 应力	20
1.9 Hardy 应力	21
1.10 Tsai 面力	21
1.11 位力应力的进一步讨论	23
1.12 位力表面张力 (virial surface tension)	24
1.13 原子 J 积分	26
思考题	28
参考文献	29
第 2 章 纳米与介观力学和量子力学、连续介质力学之间的过渡区估计	34
2.1 纳米与介观力学和量子力学的过渡区估计	35
2.1.1 Barenblatt 和 Monteiro 提出的量子效应显现的纳米力学特征尺度	35
2.1.2 有关量子效应显现的特征时间的讨论	37
2.1.3 Bohr 半径 —— 进行标度分析的下限	37
2.1.4 应用 Planck 常数和表面能的关系对量子效应显现尺度的进一步分析	38

2.2 纳米与介观力学和连续介质力学的过渡区估计	38
2.2.1 由表面能和弹性模量得到的特征尺度	38
2.2.2 由表面能和屈服应力得到的特征尺度	38
2.2.3 多晶软磁矫顽力的临界晶粒尺寸	40
2.2.4 Hall-Petch 关系的极限: 位错曲率和晶粒尺寸的竞争	41
2.3 纳米谐振器的量子极限	43
2.4 “Maxwell 妖”和“分子棘轮”在分子机器中的实现	47
思考题	50
参考文献	52
第 3 章 力学相似性和数量级估计	54
3.1 力学相似性方法	55
3.1.1 保守系统与 Poincaré 相空间体积不变性、耗散系统与平庸吸引子	55
3.1.2 力学相似性在保守系统中的应用	59
3.2 力学相似性方法在纳米与介观力学中的应用	61
3.2.1 利用力学相似性导出位力定理	61
3.2.2 力学相似性在液滴铺展前驱膜长度随时间标度关系中的应用	63
3.2.3 力学相似性在动态 Hertz 接触问题中的应用	64
3.2.4 力学相似性在 van der Waals 型碳纳米管谐振器中的应用	65
3.2.5 力学相似性在碳纳米管塌陷多米诺骨牌效应分析中的应用	66
3.3 数量级估计和“封底计算”	68
3.4 “封底计算”在纳米与介观力学中的应用	72
3.4.1 水滴和超疏水基底碰撞接触时间的数量级估计	72
3.4.2 移动表面上原子所需力的数量级估计	73
3.4.3 “皮牛顿力学”中的数量级估计	75
3.4.4 对晶体材料表面能的数量级估计	75
3.5 应用无量纲数确定纳米与介观力学中的某些重要定性关系	76
3.5.1 用 Bond 和 Weber 两个无量纲数来确定昆虫在水面行走的条件限制	76
3.5.2 微小生物在水下的氧气摄取	77
3.5.3 Péclet 数在毛细血管与肾小管中的应用	78
3.6 讨论和结束语	79
3.6.1 有关量纲分析早期在我国的传播	79
3.6.2 有关力学相似性、数量级估计和量纲分析的适用范围	80
思考题	80
参考文献	81

第 4 章 纳米与介观力学中的非线性行为	84
4.1 自相似、自仿射、自相似解	84
4.2 分形	89
4.2.1 Hausdorff 维数	89
4.2.2 基于 Shannon 信息熵的信息维数和 Rényi 熵的广义维数	91
4.3 受限扩散凝聚 (DLA) 模型	92
4.4 分数布朗运动	93
4.5 分岔	95
4.5.1 从液滴的旋转稳定性谈起	95
4.5.2 分岔的主要类型	97
4.5.3 不动点和线性化, 不动点发生分岔的条件	99
4.5.4 鞍结分岔及其在 MEMS、肥皂膜、气泡、胶体稳定性中的应用	101
4.5.5 叉形分岔	111
4.5.6 Hopf 分岔	114
4.6 混沌	122
4.6.1 五十年前 Lorenz 发现混沌的经过	122
4.6.2 奇怪吸引子与 Lyapunov 指数	125
4.6.3 通向混沌的道路之一 —— Feigenbaum 普适常数与倍周期分岔	128
4.7 位错动力学中的混沌 —— 由 Duffing 方程的倍周期分岔通向混沌	131
4.8 同宿、异宿轨道	133
4.9 孤立波与孤立子	135
4.9.1 从 FPU 问题谈起	135
4.9.2 孤立波的发现	137
4.9.3 孤立子中的内禀局域模 (ILMs) 在微系统中的应用	138
4.10 同步现象、微流控中的气泡同步现象	139
4.10.1 同步现象的发现	139
4.10.2 McClintock 效应	140
4.10.3 微流控中的气泡同步现象	141
4.11 公度-非公度相变中的魔鬼楼梯和混沌	141
4.12 涌现	147
思考题	152
参考文献	155
第 5 章 单原子链和单原子接触的物理力学	164
5.1 金单原子链和单原子接触的电导量子、断键力	164
5.2 机械控制劈裂结 (MCBJ) 方法	176

5.3	表面重构与单原子链的形成	177
5.4	普适力涨落 (UFF)	179
5.5	硅单原子链形成的分子动力学模拟	179
5.6	碳纳米管中受限 Si 单原子链的负微分电阻性质	182
5.7	ZnO 双原子链形成的分子动力学和第一原理模拟	184
5.8	碳原子的一维链状物——Carbyne 的力学行为	188
	思考题	189
	参考文献	191
第 6 章	考虑弛豫时间的输运理论和动理学	195
6.1	近平衡态的输运理论	195
6.2	Onsager 倒易关系	196
6.3	考虑弛豫时间的 Maxwell 黏弹性流体模型和 Oldroyd B 模型	197
6.4	考虑弛豫时间的非 Fick 扩散定律	200
6.5	考虑弛豫时间的非 Fourier 热传导定律	201
6.5.1	经典的 Fourier 热传导定律以及 Maxwell-Cattaneo 公式	201
6.5.2	双相延迟热传导模型	203
6.5.3	考虑非局部效应的 Guyer-Krumhansl 公式	204
6.5.4	弹道-扩散传热模型	205
6.5.5	考虑“双相延迟-非局部效应”的传热模型	207
6.6	考虑弛豫时间的细胞黏弹性模型	208
6.7	结束语	208
	思考题	209
	参考文献	209
第 7 章	纳微系统的机械噪声与能量耗散	213
7.1	Langevin 方程	214
7.2	Johnson-Nyquist 噪声, Nyquist 定理, 涨落-耗散定理	216
7.3	NEMS 与 MEMS 中的机械-热噪声与系统精度分析	218
7.3.1	微机械加速度计中的机械-热噪声	218
7.3.2	微机械陀螺仪中的机械-热噪声	220
7.4	微悬臂梁的最小可探测质量 (minimum detectable mass)	221
7.5	热弹性耗散	223
7.5.1	滞弹性的 Zener 耗散模型	223
7.5.2	Euler-Bernoulli 梁的热弹性耗散模型的详细分析	225
7.6	声波-热声子相互作用, Akhiezer 和 Landau-Rumer 阻尼	227
7.6.1	Akhiezer 阻尼 (扩散型)	228

7.6.2 Landau-Rumer 阻尼 (弹道型)	230
7.7 微纳悬臂梁的品质因子和能量耗散	230
7.8 两能级系统 (TLS) 和纳米器件的能量耗散	232
7.8.1 两能级系统 (TLS) 的由来	232
7.8.2 两能级系统 (TLS) 在纳米谐振器能量耗散分析中的应用	233
7.9 基于微悬臂梁的弱力的精密测量	235
思考题	236
参考文献	237

第二篇 纳微黏附接触力学、界面剥离力学与黏附接触滞后

篇首语 黏附接触力学研究大事记	245
参考文献	248

第 8 章 纳微尺度弹塑性黏附接触力学	251
8.1 Feynman 于 1959 年的预言以及 MEMS 中的黏附失效的实验案例	251
8.2 纳微尺度弹性黏附接触理论	253
8.2.1 内聚功、Dupré 黏附功以及 Young-Dupré 方程	253
8.2.2 分子间作用势与黏附功	256
8.2.3 Bradley 理论和 Derjaguin-Muller-Toporov (DMT) 理论	258
8.2.4 Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 理论	259
8.2.5 引入 Tabor 数对 Bradley 和 JKR 理论不一致的分析	260
8.2.6 几种黏附接触力学模型之间的比较	263
8.2.7 黏附数 θ 与芯片键合	268
8.3 纳微尺度塑性黏附接触理论	270
8.3.1 塑性指数与塑性黏附因子	272
8.3.2 塑性黏附接触理论: Maugis-Pollock 和 Chowdhury-Pollock 模型	275
8.3.3 分形粗糙表面的塑性黏附接触模型	277
8.4 有关黏附接触理论的尺度效应和奇异性的讨论	282
8.5 MEMS 结构的黏附判据	284
8.5.1 剥离数的物理意义及导出	284
8.5.2 表面粗糙度对剥离数的修正	288
思考题	290
参考文献	294

第 9 章 薄膜的界面剥离力学	299
9.1 Obreimoff 的云母剥离实验与黏附接触三个基本过程的提出	299

9.2 Rivlin 界面垂直剥离力学模型	301
9.3 Kendall 任意角度薄膜剥离力学模型	302
9.4 薄膜从基底的自发剥离力学模型	304
9.5 脱黏条和鼓包实验中的薄膜剥离力学方程	304
9.5.1 脱黏条实验的薄膜剥离方程	304
9.5.2 二维鼓包实验的薄膜剥离方程	305
9.5.3 轴对称鼓包实验的薄膜剥离方程	306
9.6 薄膜动态剥离方程与剥离中的惯性效应	306
9.7 界面黏附功的剥离速率和温度依赖性, 速率-温度等效性	307
9.8 薄膜剥离界面微结构的产生和形貌演化	310
9.9 藤壶蛋白从石墨基底剥离的分析和 MD 模拟	314
9.9.1 MD 模拟中和拉伸和剥离相关的时间尺度分析	315
9.9.2 藤壶胶蛋白剥离的 MD 模拟	318
9.10 细胞从基底的剥离力学	323
9.11 单个受体-配体键的随机分离与再键合的 Zhurkov-Bell 模型以及多个分子键的协同黏附	325
9.11.1 Zhurkov-Bell 模型	325
9.11.2 单个受体-配体键的随机分离与再键合	327
9.11.3 多个分子键的协同黏附	328
思考题	330
参考文献	330
第 10 章 黏附滞后和接触角滞后	336
10.1 黏附滞后和接触角滞后的基本概念、皮牛顿力学	336
10.2 缺陷对三相接触线的钉扎作用以及接触线的弹性系数	339
10.3 毛细凝聚形成液桥对黏附滞后的影响	342
10.3.1 毛细凝聚的概念	342
10.3.2 应用 AFM 进行毛细凝聚的实验研究	343
10.3.3 毛细凝聚实验结果的理论分析	345
10.4 液滴合并诱发垂直方向的自推进行为	351
10.4.1 研究背景概述	352
10.4.2 理论模型的建立	353
10.4.3 对模型的进一步讨论	356
思考题	358
参考文献	360

第三篇 纳微系统中的残余应力、键合与吸合动力学

第 11 章 纳微系统中的残余应力	365
11.1 薄膜中残余应力的起源	367
11.1.1 残余应力的经典理论	367
11.1.2 程开甲基于表面电子密度差的残余应力理论模型 (TFDC)	368
11.2 薄膜中残余应力的计算	369
11.2.1 Stoney 公式	369
11.2.2 多层薄膜情形	372
11.2.3 薄膜厚度与基底厚度可比时的情形	372
11.2.4 一级近似的薄膜残余应力梯度分布	373
11.2.5 TFDC 理论在薄膜残余应力确定中的应用	374
11.3 薄膜中残余应力的测量	378
11.3.1 基底曲率法	379
11.3.2 X 射线衍射法	380
11.4 残余应力对微结构力学行为的影响	383
11.4.1 残余应力的梯度分布使微悬臂梁翘曲	384
11.4.2 造成微梁屈曲的残余压应力临界值	384
11.4.3 残余应力对黏附的影响	384
11.4.4 残余应力对谐振结构响应频率的影响	384
11.5 结束语	385
思考题	386
参考文献	387
第 12 章 纳微系统阳极键合中的分形图案与树状纳米结构	390
12.1 MEMS 阳极键合以及玻璃/Al/Si 微尺度阳极键合实验实施	390
12.1.1 阳极键合工艺简介	390
12.1.2 玻璃/Al/Si 微尺度阳极键合试件的设计	394
12.1.3 玻璃/Al/Si 微尺度阳极键合试件的加工制作	395
12.2 玻璃/Al/Si 阳极键合中的分形结构 —— 二维 DLA 的典型例子	399
12.2.1 金属 Al 膜厚度对分形图案的影响	399
12.2.2 阳极键合温度和键合电压对分形图案的影响	400
12.2.3 阳极键合金属 Al 膜上分形图案的分形维数	400
12.2.4 阳极键合金属 Al 膜上分形图案的微区分析	405
12.2.5 阳极键合金属 Al 膜上分形图案对键合质量的影响	407
12.3 玻璃/Al/Si 阳极键合中的纳米树状结构	408

12.3.1 玻璃/Al/Si 阳极键合中的耗尽层	409
12.3.2 玻璃/Al/Si 阳极键合中的纳米树状结构	411
12.4 阳极键合试件的拉伸实验	414
12.4.1 拉伸试件断口的显微检视	414
12.4.2 阳极键合电压、温度、膜厚度对键合强度的影响	417
12.5 结论	418
思考题	420
参考文献	421
第 13 章 纳微系统的吸合动力学与同宿、异宿轨道	425
13.1 吸合动力学研究的起源、集总模型	425
13.2 考虑综合效应的吸合模型及其无量纲控制参数	427
13.2.1 考虑综合效应吸合方程的导出、无量纲数	427
13.2.2 基于无量纲数的分析、无量纲吸合阈值电压	429
13.3 考虑分子间力时的吸合稳定性分析、分离长度的提出	430
13.3.1 Van der Waals 力作用下纳米致动器吸合的同宿轨道分岔和分离长度	431
13.3.2 Casimir 力作用下纳米致动器吸合的同宿轨道分岔和分离长度	435
13.4 旋转型纳致动器在分子间力作用下的吸合动力学稳定性	437
13.4.1 无量纲运动方程	437
13.4.2 定性分析	438
13.4.3 在表面力作用下的非线性振动	441
思考题	443
参考文献	445
 第四篇 材料与结构的介观力学行为	
第 14 章 微纳结构褶皱的叉形与倍周期分岔	451
14.1 硬膜-软基底系统的“ruga”力学	451
14.2 硬膜-软基底系统褶皱失稳的叉形分岔	452
14.3 硬膜-软基底系统褶皱失稳的倍周期和四倍周期分岔	456
14.4 硬膜-软基底系统的多层级褶皱: 嵌套自相似性	457
14.5 薄膜-水基的毛细褶皱	459
14.6 拉应力诱导弹性薄片侧向的压缩屈曲	461
思考题	462
参考文献	465

第 15 章 AFM 测试中的非线性动力学行为	468
15.1 应用能量均分定理确定 AFM 微悬臂梁的弹簧刚度	468
15.2 AFM 在状态空间中的动力学方程	469
15.3 AFM 的双稳态	470
15.4 AFM 测试中的混沌	472
15.4.1 噪声极限、Lyapunov 指数与混沌	472
15.4.2 用噪声极限和 Lyapunov 指数方法来判别 AFM 测试中混沌的出现	472
15.4.3 擦边碰撞、擦边动力学、擦边分岔与 AFM 混沌	473
15.5 AFM 测试中的混沌模型	475
15.6 AFM 测试与细胞声学	478
15.7 应用 AFM 研究软物质的熵弹性行为	481
15.7.1 熵弹性	481
15.7.2 应用 AFM 进行蛋白质的去折叠: 单分子力学谱方法	483
思考题	486
参考文献	488
第 16 章 裂纹失稳扩展中的分岔行为	491
16.1 动态断裂中的非线性现象	491
16.2 动态断裂中 Hopf 分岔的实验研究	495
16.3 动态断裂 Hopf 分岔的分子动力学和相场动力学模拟	498
16.4 裂纹失稳的理论解释 —— 局部对称性原理 (PLS)	502
16.5 裂纹动态失稳的理论解释 —— 修正的局部对称性原理 (MPLS)	503
16.6 裂纹动态分岔的位错发射机制	506
思考题	507
参考文献	509
第 17 章 液滴蒸发诱导薄膜干裂介观动力学	513
17.1 血清液滴蒸发残留图案在疾病诊断中的潜在应用	514
17.2 牛血清白蛋白液滴蒸发干裂的动力学实验和分析	516
17.3 不同实验条件下血液液滴蒸发的干裂图案演化	519
17.4 眼泪液滴的蒸发干裂	521
17.5 蒸发干裂时螺旋状裂纹的形成机理	524
17.6 移动接触线诱导的蛋白质薄膜的干裂实验和理论分析	527
17.6.1 实验装置与实验设计	528
17.6.2 裂纹的起源与表面张力作用下薄膜的褶皱	529
17.6.3 移动接触线诱导下的受控裂纹发展	531
17.6.4 无接触线诱导的随机裂纹	535