

INTRODUCTION TO NANOMATERIALS SCIENCE

纳米材料科学导论

陈敬中 刘剑洪 主编

TB383

14

纳米材料科学导论

陈敬中 刘剑洪 主编

高等教育出版社

内容简介

20 世纪末纳米科学和纳米技术的产生,催生了纳米物理学、纳米化学、纳米生物学、纳米材料科学等新型学科。

本书系统介绍了纳米科技;纳米材料结构与物理化学特性;纳米结构组装体系和纳米微粒制备与表面修饰;典型矿物纳米微粒结构及纳米化研究与制备;纳米复合材料、粘土矿物及其纳米复合材料、聚合物-无机纳米复合材料,以及几种高新纳米材料。内容安排符合教学要求,富有启发性,有利于学生素质、能力的培养和提高。理论论证科学,实践性也很强,及时、准确反映了国内外先进成果。

本书适用于材料科学、应用物理、应用化学等专业的本科生和研究生,也可供有关专业的教学和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

纳米材料科学导论/陈敬中,刘剑洪主编. —北京:
高等教育出版社,2006.8
ISBN 7-04-019294-2

I. 纳... II. ①陈...②刘... III. 纳米材料-高等
学校-教材 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 043636 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 刘剑波 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱 静
版式设计 马静如 责任校对 殷 然 责任印制 韩 刚

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京中科印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 8 月第 1 版
印 张	38	印 次	2006 年 8 月第 1 次印刷
字 数	720 000	定 价	52.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19294-00

前 言

20 世纪末,物理学、化学、生物学、材料科学、地质学等学科的发展,促进了纳米科学和纳米技术的产生,催生了纳米物理学、纳米化学、纳米生物学、纳米材料科学、纳米矿物学等新型学科。培养一批社会建设所需求的不同层次的纳米科技、纳米材料专业人才已成为高校的一项重要任务。

2000 年起,本书编者已在本科生、研究生中讲授纳米科技及纳米材料的相关内容。近年来作者对纳米科技和纳米材料进行了认真研究,收集了大量国内外资料、图件和研究成果,编写和整理了这本《纳米材料科学导论》教材。全书共分 12 章:第一章概述了纳米科学与纳米技术的发展现状;第二章从物质结构对称新理论、纳米材料结构介绍了新兴的纳米材料科学;第三章讨论了纳米物质结构及其物理、化学性质;第四章讨论了纳米固体材料的微结构;第五章介绍了纳米结构组装体系;第六章介绍了纳米微粒的制备与表面修饰;第七章以矿物为例,讲述了电气石纳米化制备及其应用研究;第八章介绍了纳米粘土矿物海泡石、坡缕石;第九章到第十一章系统介绍了纳米复合材料、粘土矿物及其纳米复合材料、聚合物-无机纳米复合材料;第十二章以纳米金属微粒准晶材料、富勒烯及其高新纳米材料、纳米碳管及电子器件、纳米芯片、DNA 纳米技术等为例,介绍了几种高新纳米材料。本书是由中国地质大学陈敬中教授与深圳大学刘剑洪教授共同完成的。陈敬中主持编写第一章至第八章和第十二章,刘剑洪主持编写第九章至第十一章,协助参加编写工作的还有工程师胡再云,博士生王芳、韩炜,硕士生陈瀛、胡波、段萌语、刘霞、杨婕。

在本书编写过程中,编者力图使章节层次组织安排合理,符合学生认识了解科学的基本规律;理论论证科学并具较强实践性;及时、准确地反映国内外先进成果。本书适用于大学本科相关专业高年级学生和研究生,也可供从事纳米科学、纳米技术以及纳米材料教学和科研的人员参考。

纳米科学和纳米技术是 21 世纪飞速发展的新兴学科,涉及物理学、化学、生物学、材料科学、地质学等各个学科领域,纳米材料科学已成为该学科中的主力军。希望本书能为纳米科技人才培养做出贡献。

中国地质大学“211”教材建设基金资助本教材编写过程中所需费用,深圳大学资助教材的出版经费,在此一并表示感谢。



由于纳米科学、纳米技术和纳米材料在快速发展,编者水平也很有限,书中定有不足之处,恳请同行和读者批评指正。

陈敬中 刘剑洪
2006年2月于武汉

第一章 纳米科学与纳米技术	1
1.1 纳米世界里的大学	1
1.1.1 人类对自然界的认识	1
1.1.2 纳米科技研究的尺度	1
1.1.3 介观领域中的纳米科技	2
1.1.4 纳米科技的定义	4
1.1.5 纳米材料的特征	6
1.1.6 纳米矿物学	7
1.1.7 纳米科技研究的领域	8
1.1.8 纳米科技的未来	9
1.1.9 纳米科技发展的里程碑	11
1.2 纳米物理学	12
1.2.1 新兴的纳米物理学	13
1.2.2 纳米器件构筑	16
1.2.3 纳米器件的挑战	17
1.2.4 纳米放大器	20
1.2.5 诺贝尔奖与纳米科技	20
1.3 纳米电子学	21
1.3.1 纳米电子器件	22
1.3.2 机器小型化	23
1.3.3 纳米热线	24
1.3.4 分子器件、纳米器件的连接	25
1.3.5 大数定律	26
1.3.6 DNA 计算图像说明	27
1.4 纳米科技与医学	28
1.4.1 磁敏感菌的磁力	29
1.4.2 纳米有机分子量子点的荧光	30
1.4.3 形形色色的复合体	31
1.4.4 纳米生物、纳米医学技术	32
1.4.5 原子力显微镜	35
1.4.6 奇异的有机树形聚合物	36
1.5 微型纳米机器制造	37

1.5.1	微型纳米机器制造技术的未来	38
1.5.2	纳米机器和纳米装配机	39
1.5.3	分子复制机	41
1.5.4	模拟宏观机器的纳米机器	42
1.5.5	超越生物进化	44
1.5.6	纳米科学技术的应用前景	46
1.6	微观世界中的纳米结构	49
1.6.1	纳米结构的提出	49
1.6.2	纳米结构组装体系	50
1.6.3	纳米结构构筑方法	50
1.6.4	微观世界中计算机芯片的建造	52
1.6.5	纳米芯片建造技术	53
1.6.6	操纵原子、分子	57
1.6.7	“从上到下”和“从下到上”	58
1.6.8	纳米结构体系与新量子效应器件	60
1.6.9	纳米结构制造的未来	61
第二章	新兴的纳米材料科学	62
2.1	物质结构对称新理论	62
2.1.1	对称性的哲学定义	62
2.1.2	对称性的范围	63
2.1.3	对称性的尺度	63
2.1.4	简单对称性和复合对称性	63
2.1.5	对称性基本特征及对称性理论新进展	64
2.2	纳米材料科学	69
2.2.1	纳米材料科学的发展	70
2.2.2	纳米材料的维数	72
2.2.3	纳米材料的表征方法	72
2.2.4	纳米级的表面和界面	74
2.2.5	晶体中的缺陷	75
2.2.6	纳米微粒聚集体	75
2.2.7	纳米微粒矿物的开发利用	76
2.2.8	纳米材料科学与其他学科的关系	78
2.2.9	高新科技中的纳米材料	80
第三章	纳米物质的结构及物理、化学性质	81
3.1	纳米物质的结构单元	81
3.1.1	团簇	81
3.1.2	人造原子	82
3.1.3	纳米微粒	83

3.2 纳米微粒的基本理论	84
3.2.1 电子能级的不连续性	84
3.2.2 量子尺寸效应	90
3.2.3 小尺寸效应	91
3.2.4 表面效应	91
3.2.5 宏观量子隧道效应	93
3.2.6 库仑堵塞与量子隧穿	93
3.2.7 介电限域效应	94
3.3 纳米微粒的物理特性	94
3.3.1 热学性能	95
3.3.2 磁学性能	96
3.3.3 光学性能	101
3.3.4 纳米微粒悬浮液及其动力学性质	106
3.3.5 纳米微粒的表面敏感特性	107
3.3.6 光催化性能	107
3.4 纳米微粒的化学特性	111
3.4.1 吸附	111
3.4.2 纳米微粒的分散与团聚	114
3.4.3 流变学	117
第四章 纳米固体材料的微结构	122
4.1 纳米固体的结构特点	122
4.2 纳米固体界面的结构模型	123
4.2.1 类气态模型	123
4.2.2 有序模型	124
4.2.3 结构特征分布模型	124
4.2.4 纳米微粒多重分数维准晶结构模型——一类新型的金属纳米材料	125
4.3 纳米固体界面的研究方法	125
4.3.1 X 射线研究	125
4.3.2 纳米界面结构的电镜观察	126
4.3.3 纳米界面结构的穆斯堡尔谱	127
4.3.4 纳米固体结构的内耗研究	130
4.3.5 正电子湮没	132
4.3.6 纳米材料结构的核磁共振	138
4.3.7 拉曼(Raman)光谱	141
4.3.8 电子自旋共振(ESR)	145
4.3.9 纳米材料结构中的缺陷	153
4.3.10 康普顿轮廓法	158
第五章 纳米结构组装体系	164

5.1	人工纳米结构组装体系	164
5.1.1	超微型开关	164
5.1.2	发光可调制性	165
5.1.3	量子点磁开关	165
5.1.4	纳米结构组装体系	165
5.2	纳米结构自组装和分子自组装合成	165
5.2.1	胶体晶体的自组装合成	166
5.2.2	金属胶体自组装纳米结构	167
5.2.3	多孔纳米结构的自组装合成	169
5.2.4	半导体量子点阵列体系(膜)的合成	170
5.2.5	分子自组装合成纳米结构	170
5.3	厚膜模板合成纳米阵列	171
5.3.1	厚膜模板的制备和分类	172
5.3.2	纳米结构的模板合成方法	173
5.4	介孔固体和介孔复合体的合成	178
5.4.1	介孔固体的合成	179
5.4.2	介孔固体和介孔复合体的荧光增强效应	183
第六章	纳米微粒的制备与表面修饰	192
6.1	纳米微粒的气相制备方法	192
6.1.1	气体冷凝法	192
6.1.2	活性氢-熔融金属反应法	193
6.1.3	溅射法	194
6.1.4	流动液面上真空蒸镀法	194
6.1.5	电加热蒸发法	196
6.1.6	混合等离子法	196
6.1.7	激光诱导化学气相沉积法	197
6.1.8	爆炸丝法	199
6.1.9	化学气相凝聚法和燃烧火焰-化学气相凝聚法	200
6.2	纳米微粒的液相制备方法	202
6.2.1	沉淀法	202
6.2.2	喷雾法	208
6.2.3	水热法(高温水解法)	209
6.2.4	溶剂挥发分解法(冻结干燥法)	210
6.2.5	溶胶-凝胶法(胶体化学法)	210
6.2.6	辐射化学合成法	212
6.3	纳米微粒的固相制备方法	214
6.3.1	热分解法	214
6.3.2	固相反应法	218

6.3.3	火花放电法	219
6.3.4	溶出法	220
6.3.5	球磨法	221
6.4	纳米微粒表面修饰	231
6.4.1	纳米微粒表面物理修饰	231
6.4.2	纳米微粒表面化学修饰	232
第七章	电气石纳米化制备及其应用研究	235
7.1	电气石矿物学研究	235
7.1.1	电气石的提纯制备	235
7.1.2	电子探针分析	235
7.1.3	电气石的晶体化学式的计算	236
7.1.4	电气石的 X 射线分析及晶胞参数的精确测定	236
7.1.5	电气石的主要性质	239
7.2	电气石纳米微粒结构特性	239
7.2.1	电气石纳米微粒结构	239
7.2.2	电气石纳米微粒最佳尺度的确定	264
7.3	电气石纳米化研究与制备	265
7.3.1	纳米微粒的制备方法	265
7.3.2	电气石纳米化的方法	267
7.4	超细纳米化电气石的应用及意义	282
7.4.1	电气石的传统应用	282
7.4.2	电气石新特性的应用及意义	283
7.4.3	超细纳米化电气石的应用前景	287
第八章	纳米粘土矿物——以海泡石和坡缕石为例	289
8.1	纳米矿物海泡石	289
8.1.1	海泡石矿物学	289
8.1.2	海泡石纳米结构特征	295
8.2	纳米矿物坡缕石	300
8.2.1	坡缕石粘土分布	300
8.2.2	坡缕石研究现状	301
8.2.3	纳米坡缕石矿物学	301
8.2.4	坡缕石纳米结构特征	309
8.3	纳米粘土矿物的应用	326
8.3.1	纳米海泡石的应用	326
8.3.2	纳米坡缕石的应用	330
第九章	纳米复合材料——未来材料新世界	338
9.1	自然界的纳米结构	338

9.2 纳米复合材料	338
9.2.1 纳米复合材料	339
9.2.2 纳米效应	340
9.3 聚合物纳米复合体系分类	341
9.3.1 聚合物的分类	342
9.3.2 聚合物纳米复合体系	343
9.3.3 无机纳米材料及纳米前驱体	344
9.3.4 纳米复合材料制备方法	344
9.3.5 聚合物纳米复合材料的优缺点	350
9.4 纳米蒙脱石多功能复合材料	352
9.4.1 蒙脱土的性质	352
9.4.2 蒙脱石资源及其分布	354
9.5 聚合物-粘土纳米复合材料	359
9.5.1 聚合物-层状硅酸盐纳米复合材料	359
9.5.2 聚合物-蒙脱土纳米复合材料	361
9.5.3 纳米前驱体材料与纳米复合材料	361
9.5.4 原位聚合方法	362
9.5.5 聚合物-层状硅酸盐复合物材料分类	364
9.5.6 成型方法	365
9.5.7 插层及层间膨胀的热力学	365
9.6 聚合物-无机纳米复合材料	366
9.6.1 无机纳米微粒及其复合材料	366
9.6.2 控制形态的有机-无机纳米复合材料	368
9.6.3 纳米功能聚合物复合材料	368
9.6.4 纳米敏感复合材料	369
9.6.5 纳米磁性复合材料	370
9.7 生物有机-无机纳米复合材料	370
9.7.1 生物替代材料的性能	370
9.7.2 组装与复合方法	371
9.7.3 纳米复合材料存在的问题	372
9.8 有机-无机纳米复合材料的功能、设计与制备	372
9.8.1 纳米复合材料的功能	372
9.8.2 纳米复合材料的功能设计	373
9.8.3 纳米复合材料的合成设计	373
9.8.4 纳米复合材料的稳定化设计	374
9.9 纳米复合应用展望	375
9.9.1 PLS 纳米复合材料的应用	375
9.9.2 聚合物纳米晶	375

9.9.3 形态可控的纳米催化剂	376
9.9.4 组装或者自组装阵列的纳米级载体	376
9.9.5 纳米添加剂	377
9.9.6 多功能的纳米涂料	377
第十章 粘土矿物及其纳米复合材料	379
10.1 粘土矿物的晶体结构	379
10.1.1 粘土矿物的分类和化学组成	379
10.1.2 主要粘土矿物的晶体构造	380
10.2 粘土矿物的性质及胶体化学	390
10.2.1 粘土矿物的电性	390
10.2.2 粘土的水化作用	394
10.2.3 粘土矿物的吸附特性	396
10.2.4 阳离子固定作用	399
10.2.5 粘土-有机物的相互作用	400
10.2.6 粘土胶体化学	401
10.3 纳米复合的溶胶-凝胶法	411
10.3.1 制备金属纳米颗粒	411
10.3.2 制备纳米稀土	412
10.3.3 制备高分子有机-无机纳米功能材料	413
10.4 插层反应法	414
10.4.1 插层方法的指标与标准	416
10.4.2 层间插入法的要点	419
10.4.3 层间插入型纳米复合材料制法的改进	420
10.4.4 插层交换制备处理土	422
10.5 插层-复合方法	423
10.5.1 层状化合物的插层复合方法	423
10.5.2 插层复合纳米前驱体负载催化剂的制备与应用	427
10.5.3 插层复合纳米前驱体负载聚烯烃催化剂	430
10.6 自组装复合与成型方法	433
10.6.1 挤出成型	433
10.6.2 注塑成型	433
第十一章 聚合物-无机纳米复合材料	435
11.1 聚酰胺-粘土纳米复合材料	435
11.1.1 聚酰胺的单体	435
11.1.2 聚酰胺的催化剂	438
11.1.3 聚酰胺的聚合	439
11.1.4 聚酰胺-蒙脱土纳米复合材料的物化性能	441

11.1.5	尼龙 6 - 粘土纳米复合材料	446
11.1.6	尼龙 6 - 蒙脱土纳米复合材料工业成品的性能	447
11.1.7	NPA6 的纳米结构与性能的关系	449
11.2	环氧树脂 - 粘土纳米复合材料	451
11.2.1	环氧树脂	451
11.2.2	硅酸盐 - 环氧树脂纳米复合材料	458
11.2.3	环氧树脂 - 粘土纳米复合材料的制备及剥离行为的影响因素	460
11.2.4	环氧树脂 - 粘土纳米复合材料的性能	476
11.2.5	环氧树脂 - 高岭土纳米复合材料	483
11.3	聚酯 - 蒙脱土纳米复合材料	485
11.3.1	聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET) - 蒙脱土纳米复合材料	485
11.3.2	聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT) - 蒙脱土纳米复合材料	497
11.3.3	聚酯 - 无机纳米复合材料的应用前景	505
11.4	聚烯烃 - 粘土纳米复合材料	506
11.4.1	聚烯烃及其复合材料	506
11.4.2	聚烯烃催化剂	506
11.4.3	聚烯烃的聚合工艺	510
11.4.4	聚烯烃的纳米复合材料	514
11.4.5	纳米前驱体负载钨金属催化剂制备聚乙烯	519
11.4.6	无机纳米形态与复合材料性能的关系	522
第十二章	纳米高新材料——未来世界的主角	524
12.1	纳米金属微粒准晶材料	524
12.1.1	纳米微粒多重分数维准晶结构模型	524
12.1.2	具有 5 次对称性的准晶结构模型	524
12.1.3	二维准晶结构几何特征	527
12.1.4	二维准晶结构模型	528
12.1.5	准晶结构研究的意义	533
12.2	富勒烯及其高新纳米材料	535
12.2.1	C_{60} 、 C_n 及其衍生物研究现状	535
12.2.2	富勒烯:碳球、碳管、碳洋葱的结构及特性	536
12.2.3	自然界的富勒烯碳球、碳管、碳洋葱的存在性	538
12.3	纳米碳管——电子器件的新秀	540
12.3.1	螺旋状的纳米碳管	540
12.3.2	纳米电路	541
12.3.3	纳米管场发射	542
12.3.4	制备纳米管的三种方法	544
12.3.5	纳米管的其他用途——非电子器件应用	545
12.3.6	碳纳米管的性质——向极限推进	548

12.3.7 高新纳米材料——纳米碳管	550
12.4 纳米芯片	553
12.4.1 第一代纳米芯片	553
12.4.2 计算机全力加速	554
12.4.3 缩小线宽	555
12.4.4 新老结合	557
12.4.5 图像说明	557
12.5 DNA 联姻纳米技术	563
12.5.1 DNA 纳米技术概述	563
12.5.2 分枝状 DNA	565
12.5.3 系列六臂节点组成三维结构的分子晶体	567
12.5.4 棒状条组成立方体 DNA 分子模型	569
12.5.5 稳固的 DNA 序列	570
12.5.6 纳米机械	572
12.5.7 DNA 用作触发器	573
12.5.8 对未来的展望	576
参考文献	577

第一章 纳米科学与纳米技术

1.1 纳米世界里的大科学

纳米科学与纳米技术简称纳米科技,是一项新兴的科学研究。纳米科技值得一搏,但不是每个参入者都有把握赌赢。

1.1.1 人类对自然界的认识

人类对自然世界的认识始于宏观物体又溯源于原子、分子等微观粒子,然而对纳米微粒却缺乏深入细致的研究。

客观世界主要分为两个层次:一是宏观领域,二是微观领域。在宏观领域和微观领域之间,存在着一片有待开拓的介观领域,也称为中等尺度领域。这个领域包括了从微米、亚微米、纳米到团簇尺寸的范围。介观领域中出现了许多奇异、崭新的物理、化学特性,成为当今凝聚态物理学研究的热点。纳米微粒是自然界物质结构的一个层次,它的尺度大于原子簇,一般在 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 之间。纳米微粒属于原子簇与宏观物体交界的过渡区域。由于纳米体系和团簇具有特殊的物理性质,所以是介观领域研究的重点。

1.1.2 纳米科技研究的尺度

纳米尺度范围一般从形式上界定为 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 左右,但并非严格的科学界定,应根据不同研究领域和纳米尺度范围内的物理、化学等特性确定。一些纳米科技涉及的并非纳米尺度,而是微米尺度上的结构,比纳米尺度大了 1000 倍或更多。许多情况下,纳米科技是对纳米结构的基础研究,此类结构至少有一个维的长度是 1 nm 到几百个纳米。

原子是组成物质的基本单位,原子的不同排列方式使自然界多姿多彩。1959年,美国物理学家 R. Feynman 设想在原子和分子水平上操纵和控制物质。纳米科技使人们能够直接利用原子、分子制备出仅包含几十个到几万个原子的纳米微粒,把它作为基本构成单元,适当排列成一维的量子线、二维的量子面、三维的纳米固体。纳米固体有一般晶体材料和非晶体材料都不具备的优良特性,它的出现使凝聚态物理理论受到了挑战。

纳米科技是现代科学和先进技术结合的产物,它不仅可为人类提供新颖的

装置,而且在物理学、化学、生物学、材料学、矿物学等领域中有广阔的发展前景,对基础科学、应用科学研究来说都有重要意义。

早在数十亿年前,大自然就创造出了纳米结构。纳米科技是一个客观世界。

- 1) 纳米大小的炭黑颗粒作为一种增强剂已经在轮胎中使用了 100 多年。
- 2) 一些疫苗常常含有一种或数种纳米尺度的蛋白质,这也属于纳米科技问题。
- 3) 大量病毒都是纳米尺度的,例如天花病毒约 400 nm,艾滋病毒约 100 nm,SARS 病毒约 60 ~ 120 nm。
- 4) 许多天然粘土矿物都具有纳米尺度,其许多特性与纳米科技问题相关。
- 5) 新兴的纳米生物技术、生物克隆技术等都与纳米科技密不可分。

1 nm 有多小? 图 1.1 是从宏观到微观,直到纳米尺度的手背 DNA 的图。以一步 10 倍的比例逐步放大,观察区域逐步缩小,经过几步后就从手背的大小缩减到 1 nm,相当于 DNA 结构单元中一群原子的大小。每幅图的边均相当于下一幅图的边的 10 倍长度,而图内的黑色方框相当于下一幅图的内景。

纳米世界是单个原子和分子的世界与宏观世界之间的神秘的结合部位。前者是量子力学占支配地位,后者则是无数原子的集体行为形成了物质的整体性质。在其小的一端,也就是 1 nm 左右的尺度范围内,纳米尺寸与物质的基本结构单元相近,因此它确定了最小的天然结构,从而成为微型化过程的最终极限值,不可能造出比它更小的结构了。超出 200 nm 的研究问题一般归为微米尺度的问题。

1.1.3 介观领域中的纳米科技

爱因斯坦在其博士论文中,依据糖在水中扩散的实验,计算出一个糖分子的直径大约为 1 nm。1 nm 是 1 m 的十亿分之一,是微观尺度的核心。10 个氢原子一个个并排起来,其宽度就是 1 nm,相当于一个针头大小的百万分之一,一般细菌长度的千分之一。1 nm 恰好也是一个重大科学研究领域——纳米科技的基本尺度。

在爱因斯坦发表这一卓越见解将近 100 年后,纳米尺度在科学研究中的重要性日益显现出来。如果爱因斯坦是今天一位正在寻找其事业方向的博士生,他的导师或许会劝诫他考虑微观的东西:“去搞纳米科技吧,爱因斯坦!”。

1959 年底,物理学家 R. Feynman 在美国物理学会上发表了一篇富有想像力的讲话,题目是《最底下一层大有发展潜力》。他说,“关于操纵和控制原子尺度上的物质的问题……这方面确有发展潜力,可以采用切实可行的方式,进一步缩小器件的尺寸”;“现在我们还没有走到这一步,仅仅是因为我们没有在这方面花足够的时间与精力”。

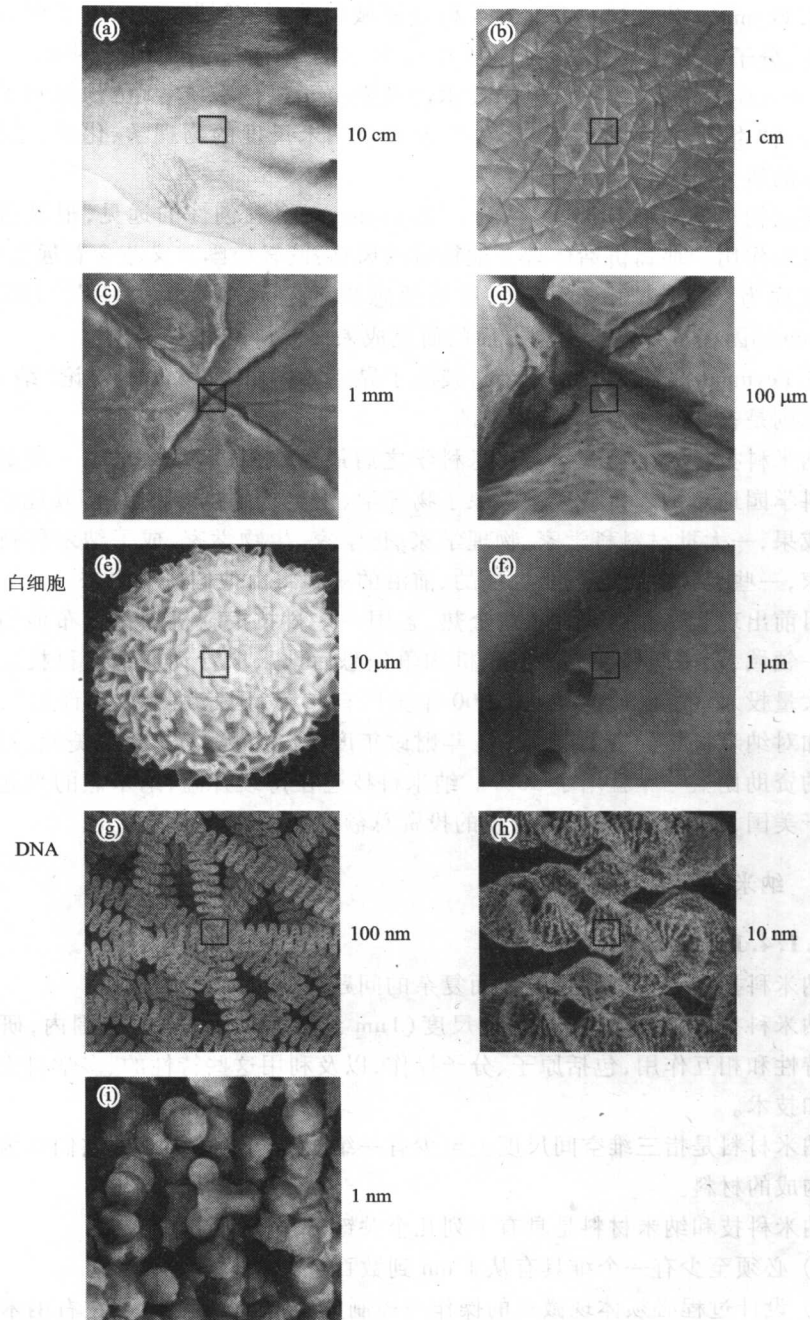


图 1.1 从宏观到微观,直到纳米尺度的手背 DNA 的图