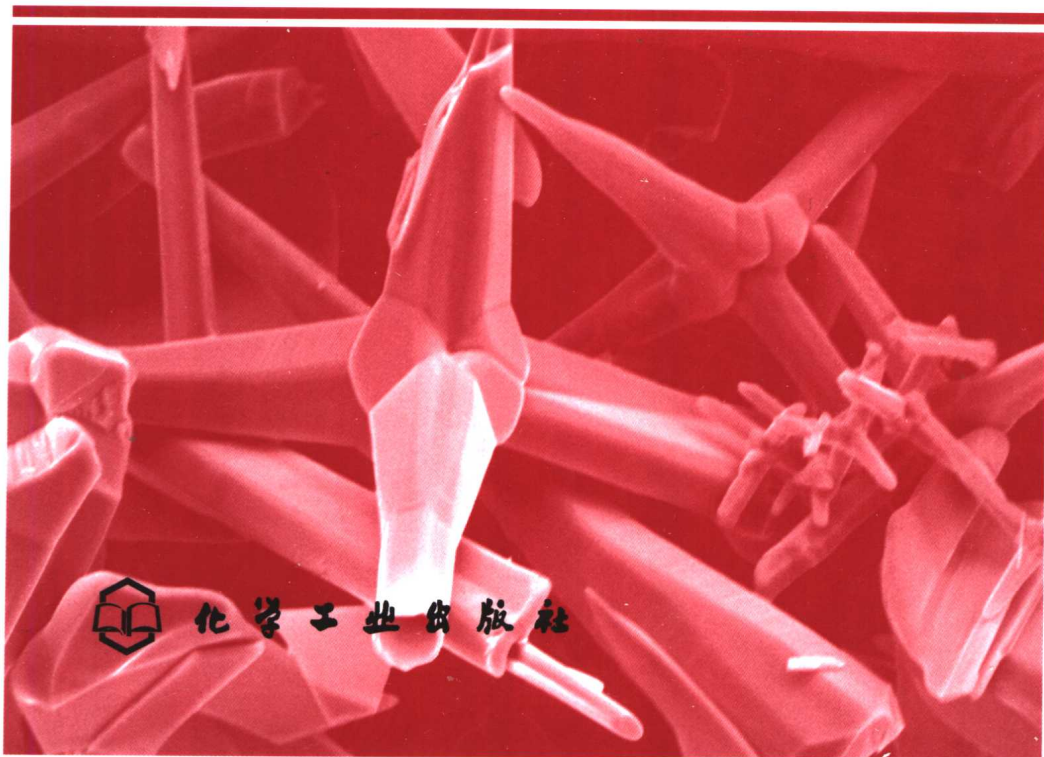


纳米材料及 应用技术

许并社 等编著



化学工业出版社

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米材料及应用技术/许并社等编著. —北京: 化学工业出版社, 2003. 12
ISBN 7-5025-2620-X

I. 纳… II. 许… III. 纳米材料 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 117944 号

纳米材料及应用技术

许并社 等编著

责任编辑: 梁虹 靳星瑞

责任校对: 蒋宇

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

· 发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 29 字数 521 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-2620-X/TQ · 1167

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

本书从原子、分子层次设计与计算机模拟计算电子、原子、晶体结构、表征设备与技术、性能表征、制备技术到应用领域对纳米材料进行了较详细的论述。可供从事纳米材料科学与技术研究及相关专业的研究人员，大专院校教师、学生以及工程技术人员和管理人员阅读。

前 言

纳米技术的发展为新材料开发开拓了一条全新的途径，并注入了新的活力，必将推动信息、能源、环境、生物、农业、国防等领域的技术创新，成为继工业革命以来三次主导技术引发的产业革命之后的第四次浪潮的基础。

纳米技术既包含丰富的科学内涵，又给人们提供了广阔的创新空间，从而成为物理学、化学、材料科学、生命科学以及信息科学发展的新领地。人们正在利用纳米科技在纳米尺度范围内认识和改造自然，通过直接操纵和安排原子、分子而创造新材料。纳米技术的出现标志着人类科学技术已进入一个新的时代——纳米科技时代。纳米技术向各个领域的渗透速度之快，影响面之广，大大出乎人们的意料。在纳米材料中，准零维纳米颗粒材料和纳米粉体材料（粒径小于100nm）是超微粉体材料最富活力的组成部分；纳米管、纳米丝、纳米棒等被称为一维纳米材料；纳米颗粒膜、纳米薄膜和纳米多层膜，属于准二维纳米材料；由纳米颗粒和纳米纤维构成的三维体材料，通常称为纳米块体材料。纳米结构研究将给纳米材料合成和应用带来新的机遇，已引起人们了解和掌握国内外在纳米领域中的新成果、新理论、新观点和新技术的极大兴趣。针对这种需求，我们对国内外近年来发表的有关论文、科研成果以及自己的部分研究工作进行系统总结编写成书，以制备方法、表征以及应用为重点，以最新的资料比较全面和系统地介绍纳米材料的结构、制备、检测和表征方法及应用。

全书共分7章。第1章简要综述国内外纳米材料的发展、研究动态、应用及发展前景，由贾虎生、许并社编写；第2章作者为许并社、王科，重点介绍纳米材料的基本结构单元、性能，并系统介绍了纳米微粒、纳米碳材料、纳米晶体材料以及纳米复合材料的结构和特异性能；第3章简要而全面地介绍纳米材料的现代检测技术、分析仪器、方法、原理与检测实例，由梁伟、许并社编写；第4章作者为韩培德，简要介绍分子模拟技术在纳米材料设计、表征以及性能预测方面的研究进展及应用实例；第5章、第6章由刘旭光、韩培德编写，依次介绍物理法、化学法、球磨法合成纳米材料的技术和溶胶-凝胶、压制、烧结方法在纳米结构材料制备中的应用；第7章作者为卫英慧，系统地介绍纳米材料和纳米结构的应用，列举了纳米材料在机械加工、电子学、生物医学、光学、化学、环保等各领域中的应用及发展前景。全书由许并社统稿。

书中作者自己的研究成果是在国家杰出青年基金(50025103)“洋葱状富勒烯的形成机理及特性研究”、国家自然科学基金重大项目(90306014)“纳米洋葱状富勒烯/金属插嵌物的物理与化学问题”、国家自然科学基金(20271037)“纳米洋葱类物质结构与物性之间关系的研究”、国家自然科学基金(59871032)“GaN基薄膜发光体系界面结构与物性的研究”以及国家基金委资助的对外交流与合作项目“电子束照射下金属/陶瓷纳米微粒的生成及接合机理”支持下取得的,在此敬致诚挚谢意。借出版之机,谨向鼓励、关心和支持本书出版的同仁和工作人员表示衷心的感谢。如果本书能引起广大读者的兴趣,促进纳米科技的进展,我们将感到莫大的欣慰。

由于作者知识有限,加之纳米材料领域发展很快,许多新知识和新成果反映得不可能十分全面,难免存在许多不足之处甚至错误,恳请读者不吝赐教。

许并社

2003年7月于太原

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米科学技术的问世	1
1.2 纳米科学技术引发的产业革命	3
1.2.1 信息产业	3
1.2.2 生物医药技术	4
1.2.3 纳米材料使传统产业升级换代	5
1.3 纳米科学技术的国际态势	6
1.4 我国纳米科学技术的发展	11
参考文献	12
第 2 章 纳米材料的结构与性能	14
2.1 纳米材料的特性及分类	14
2.1.1 纳米材料的特性	14
2.1.2 纳米材料的分类	16
2.2 纳米微粒	17
2.2.1 纳米微粒的结构与形貌	17
2.2.2 纳米微粒的物理特性	17
2.3 纳米碳材料	30
2.3.1 C_{60}	30
2.3.2 纳米洋葱状富勒烯	32
2.3.3 纳米碳管	33
2.4 纳米晶体材料	46
2.4.1 纳米晶体材料的结构	47
2.4.2 纳米晶体材料的性能	56
2.5 纳米复合材料	62
2.5.1 纳米复合材料的分类	62
2.5.2 纳米复合材料的性能	64
参考文献	70
第 3 章 纳米材料测试分析技术	78

3.1 电子显微分析.....	78
3.1.1 透射电子显微分析 (TEM)	78
3.1.2 扫描电子显微分析 (SEM)	102
3.1.3 X 射线能谱仪 (EDS) 和波谱仪 (WDS)	107
3.1.4 电子能量损失谱 (EELS)	112
3.2 扫描隧道显微镜 (STM) 和原子力显微镜 (AFM)	117
3.2.1 扫描隧道显微镜	117
3.2.2 原子力显微镜	120
3.3 X 射线衍射分析 (XRD)	122
3.3.1 X 射线衍射原理	123
3.3.2 X 射线衍射分析方法 (XRD)	123
3.3.3 样品制备	124
3.3.4 X 射线衍射分析 (XRD) 在纳米材料研究中的应用	124
3.4 光谱分析	129
3.4.1 核磁共振谱	129
3.4.2 红外 (IR)、激光拉曼光谱	134
3.4.3 紫外 (UV)、可见 (VIS) 光谱分析	139
3.4.4 穆斯堡尔谱分析	143
3.4.5 原子光谱分析	146
3.4.6 分子荧光光谱分析	156
3.4.7 扩展 X 射线吸收精细结构谱分析	158
3.5 能谱分析	161
3.5.1 俄歇电子能谱分析 (AES)	161
3.5.2 X 射线光电子能谱分析 (XPS)	166
3.5.3 紫外光电子能谱分析 (UPS)	172
3.6 粒度分析	173
3.6.1 粒度分析法	173
3.6.2 粒度分析的样品制备	174
3.6.3 粒度分析在纳米材料中的应用	175
参考文献	179
第 4 章 纳米材料的设计与计算	181
4.1 新材料设计概述	181
4.1.1 计算机模拟的发展	181

4.1.2	纳米材料的分子模拟	183
4.2	纳米材料设计与计算的原理与方法	186
4.2.1	第一性原理方法	186
4.2.2	分子力学方法	188
4.2.3	分子动力学方法	189
4.2.4	分子蒙特卡洛方法 (Monte Carlo method, 简称 MC)	190
4.2.5	实验数据的解析与模拟	190
4.3	纳米材料微观结构、性能与分子模拟	191
4.3.1	X 射线衍射线形精炼方法及结构分析	191
4.3.2	纳米结构的计算机模拟	195
4.3.3	扩展 X 射线吸收精细结构 (EXAFS)	203
4.3.4	分子光谱的模拟	204
4.4	电子结构和性质	205
4.4.1	C ₆₀ 与纳米碳管理论分析	207
4.4.2	纳米碳管的性质	208
4.4.3	纳米洋葱状富勒烯 (Nano Onion-like Fullerenes, NOLFs)	213
4.4.4	表面与界面的理论研究	216
4.4.5	能带-光子晶体	217
	参考文献	220
第 5 章	纳米材料的制备技术	223
5.1	由过饱和蒸气制备纳米团簇和纳米颗粒	223
5.1.1	团簇生成技术	223
5.1.2	团簇组装材料	227
5.1.3	幻数	227
5.1.4	溅射法、热蒸发和激光法制备纳米颗粒	228
5.2	纳米颗粒的化学合成法	235
5.2.1	溶液中的成核与长大	236
5.2.2	细微颗粒稳定与抗聚集长大	236
5.2.3	纳米颗粒	237
5.3	半导体纳米团簇的合成	243
5.3.1	表征方法及合成中的问题	243
5.3.2	胶体/胶束/气泡	245
5.3.3	聚合物	246

5.3.4	玻璃	247
5.3.5	晶型主体和沸石主体	247
5.3.6	单一尺寸团簇	248
5.4	机械研磨法制备纳米结构	250
5.4.1	高能球磨和机械研磨	251
5.4.2	纳米结构形成的现象学	252
5.4.3	晶粒尺寸减小的机理	257
5.5	人工多层材料	258
5.5.1	微观结构	259
5.5.2	加工	260
5.6	纳米碳管的制备	264
5.6.1	纳米碳管的特性	264
5.6.2	纳米碳管的合成	265
5.6.3	定向纳米碳管的制备	270
	参考文献	290
第 6 章	纳米材料的加工	291
6.1	溶胶-凝胶法加工纳米材料	291
6.1.1	引言	291
6.1.2	氧化物的制备	292
6.1.3	凝胶形成的无粉加工	295
6.1.4	凝胶制备中的干燥与脱水	297
6.1.5	固化凝胶: 烧结	298
6.1.6	加工纳米结构材料的基体	299
6.1.7	纳米材料溶胶-凝胶加工前景展望	301
6.2	纳米晶材料的成形与烧结	302
6.2.1	引言	302
6.2.2	纳米晶颗粒的干法成形	302
6.2.3	纳米晶颗粒的湿法成形	304
6.2.4	无压烧结过程中的理想致密化	304
6.2.5	无压烧结过程中的非理想致密化	309
6.2.6	无压烧结过程中的晶粒生长	311
6.2.7	无压烧结过程中孔对晶界的钉扎作用	313
6.2.8	无压烧结过程中晶粒生长的极小化和致密化的极大化	314

6.2.9	加压烧结和烧结锻压	315
6.2.10	其他烧结方法简介	318
6.2.11	结语	320
参考文献		320
第7章 纳米材料的应用		321
7.1	纳米材料在结构件领域的应用	321
7.1.1	纳米复合材料	321
7.1.2	纳米材料在机械工程中的应用	324
7.1.3	纳米材料在汽车工业中的应用	327
7.1.4	纳米碳管与金刚石	328
7.2	纳米材料和纳米技术在电子器件方面的应用	331
7.2.1	纳米磁性材料	331
7.2.2	纳米光功能材料	338
7.2.3	纳米技术在电子器件方面的应用	355
7.2.4	碳材料在电子器件方面的应用	373
7.3	纳米材料在化学化工领域中的应用	375
7.3.1	纳米材料作为催化剂	375
7.3.2	作为增强、增韧和抗腐用的纳米塑料	376
7.3.3	在材料表面防腐及功能化中的应用	385
7.3.4	纳米材料在环保领域中的应用	392
7.3.5	纳米碳管的化学修饰	402
7.4	纳米材料在生物医药和健康卫生等领域的应用	404
7.4.1	常用的生物材料及其特点	404
7.4.2	纳米药物载体	405
7.4.3	应用实例	417
7.4.4	纳米技术在生物材料中的应用	434
7.4.5	碳纳米材料在医学上的应用	435
7.5	纳米材料在纺织品中的应用	436
7.5.1	抗紫外线型化纤	437
7.5.2	反射红外线(含抗红外线)型化纤	438
7.5.3	抗菌、抑菌和除臭型化纤	439
7.5.4	导电型化纤超细粉体材料	442
7.5.5	功能化纤材料	442

7.6 纳米材料在其他领域的应用	443
7.6.1 纳米技术在体育方面的应用	443
7.6.2 纳米技术在农业中的应用	443
7.6.3 纳米技术在能源领域中的应用	444
7.6.4 纳米功能材料在航空航天领域的应用	446
7.6.5 碳纳米材料在其他方面的应用	449
参考文献	450

第 1 章 绪 论

“纳米”是一个长度单位，1 纳米是 1 米的十亿分之一（ $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ）。纳米科学是研究纳米尺度范畴内（ $0.1\sim 100\text{nm}$ ）原子、分子和其他类型物质运动和变化的科学。而纳米技术则是在纳米尺度范畴内对原子、分子等进行操纵和加工的技术。纳米科学技术（Nano-ST）是一门多学科交叉的、基础研究和应用开发紧密联系的高新科学技术。它包括纳米材料学、纳米电子学、纳米机械加工学、纳米生物学、纳米化学、纳米力学、纳米物理学和纳米测量学等若干领域。

20 世纪 80 年代出现的纳米科学技术的出现标志着人类改造自然的能力已延伸到原子、分子水平，标志着人类科学技术已进入一个新的时代——纳米科学技术时代，也标志着人类即将从“毫米文明”、“微米文明”迈向“纳米文明”时代。纳米科学技术的发展将推动信息、材料、能源、环境、生物、农业、国防等领域的技术创新，将导致 21 世纪的一次技术革命。这将是继工业革命以来三次主导技术引发的产业革命后，由纳米技术引发的第四次浪潮。

1.1 纳米科学技术的问世

物质世界的本质是什么，这是一个古老而又不衰的科学命题。人类对物质世界的认识是不断发展的，从用肉眼观察世界到借助各种仪器探索世界，逐渐形成了宏观和微观两个领域，宏观领域包括肉眼看到的物体到宇宙天体，微观领域是分子原子到时间和空间坐标中无限小的领域。在宏观和微观领域存在所谓的介观领域，包括团簇、纳米体系和亚微米体系。由于三维尺寸比较小，出现了量子相干现象，这样就独立出一个 $0.1\sim 100\text{nm}$ 的纳米体系。

微观领域的研究已经很深入，已进入原子核内部，发现了百种以上的基本粒子。随着研究的深入，它所研究的物质世界的时空尺度极小，最小时间以 10^{-15}s 计，尺度空间以 10^{-10}m 以下计。所以在 20 世纪 60 年代关于原子模型的大讨论时，我国著名科学家钱学森博士在一次谈话中，提出了“妙观”的概念，这个提法比较准确地反映了人类对物质世界现今最深层次的探索研究。人类从微观层次到妙观层次对物质世界的大规模研究是从第二次世界大战开始的，它的探索研究极大地推动了科学技术的发展，对人类的生活产生了极大的影响。在这场大规模

研究探索过程中产生的一系列理论、方法、手段、工具以及发现的一系列新现象，大大地加快了人类物质文明的历史进程。由于妙观层次的探究，产生了粒子加速器，对撞机，电子显微镜，原子弹、氢弹，原子能发电，高能辐射技术的广泛应用以及激光的发明等等这些直接关系人类生存和生活的事物。妙观领域的探索研究，除产生上述已为人们熟知的事物及影响外，还会继续发挥它的深远影响。

自从爱因斯坦提出相对论以后，特别是哈勃的宇宙大爆炸理论提出以后，人类对宏观的探索研究也已经走得更加遥远了，已延伸到宇宙深空。所用的时空尺度，更是涵盖了人类目前所使用的一切时空单位，大的单位如“光年”、“亿光年”，小的即妙观领域的时空单位，都在应用；“有”、“无”、“真空”、“湮灭”、“可见物质”、“暗物质”、“反物质”、“反世界”这些玄而又玄的名词是用来描述宇宙世界的常用词语。所以用传统的所谓“宏观”已经难以包容它了。因此，科学家在讨论物质观时提出了“宇观”的概念。用“宇观”研究物质世界非常深奥，而且同“妙观”领域的研究有相互交融回归的趋势。

从微观到“妙观”的探索，太微妙；从宏观到“宇观”的研究，也太空玄。但它们探索研究过程中一系列技术成果已经大大地推动了人类物质文明的进程。同时也为人类进一步认识从原子、分子层次的微观物质世界同一切具体的宏观物质（体）世界的本质联系提供必要的理论、方法和技术手段。

正是由于科学家们对微观领域和宏观领域在“妙观”和“宇观”两个方面的深层次的探索研究所积累的知识、方法和物质技术手段，使得人们发现在 $0.1 \sim 100\text{nm}$ 空间内的物质世界存在许多奇异的物理性质。我们知道构成一切现实宏观物质的基本单元是原子和分子。因此原子和分子是现实宏观物质的微观起点。在 $0.1 \sim 100\text{nm}$ 这样的空间内，存在的原子和分子为数不多，却存在着一块近年来才引起一大批科学家极大兴趣的“处女地”。在这个研究领地，既不同于原子和分子这样的微观起点，又不同于现实宏观物质领域。它正好介于微观和宏观之间，科学家们把它称之为“介观物理”或“介观”。介观物理历经四十多年的发展，已有长足进展。特别是近十几年来的高速发展，已形成了新兴的科学技术，即纳米科学技术（Nano-ST）。

关于纳米科学技术的定义很多，具有如下代表性的说法英国科学家阿尔培特·佛朗克斯教授把纳米技术定义为“在 $0.1 \sim 100\text{nm}$ 尺度范围起关键作用的科学技术领域”。美国“国家纳米技术倡议（NNI）”推荐采用科普作家伊凡·阿莫托在一本小册子中的提法：“纳米科学和纳米技术一般是指在纳米尺度上（从一纳米到几百纳米介观范围内），所从事的工作范畴”。上述两种说法，总的意思是

限定在纳米尺度范围内的物质组成体系的运动规律和研究开发工作。我国科学家，即主张把纳米科学技术的内涵再延伸扩张到由它所引发的可能的实际应用领域的研究开发工作。中国国家重点基础研究计划（973 计划）纳米材料和纳米结构项目首席科学家，中国科学院固体物理研究所张立德研究员作了总结性的定义：“纳米科学技术是研究由尺寸在 0.1~100nm 之间的物质组成的体系的运动规律和相互作用，以及可能的实际应用中的技术问题的科学技术。”这个定义既反应了纳米科学技术的内涵，又体现了科学技术发展规律的要求，也比较符合中国的实际情况。

1990 年 7 月，在美国巴尔的摩召开了首届国际纳米科学技术会议，各国科学家对纳米科技的前沿领域和发展趋势进行了讨论和展望。以后每两年举行一次。1996 年在中国召开了第四届纳米科学技术会议。使得纳米科技成为 21 世纪科技产业革命的重要内容之一。正如 IBM 公司的前首席科学家 Armstrong 在 1991 年曾经预言：“我们相信纳米科技将在信息时代的下一阶段占中心地位，并发挥革命的作用，正如 20 世纪 70 年代初以来微米科技已经起到主导作用那样。”

1.2 纳米科学技术引发的产业革命

纳米科学技术的效益无处不在，它对各个领域的发展、产业的革命带来无限生机。

1.2.1 信息产业

信息产业是 20 世纪的支柱之一，它的基础是半导体集成电路产业。这个产业的基础技术是微米技术，它的技术创新历程一直遵循着摩尔定律。这个定律是 1965 年由戈登·摩尔（Gorden Moore）提出来的。他指出，集成电路里晶体管数量每 18 个月翻一番。26 年来，现实与摩尔定律非常一致。这是在微米尺度上的定律，科学界普遍认为 $0.05\mu\text{m}$ （50nm）是现代半导体工艺的极限，Intel 公司的最新工艺是 $0.13\mu\text{m}$ （130nm），估计将在 10~15 年内达到它的极限。要是继续用微米技术，就很难再前进了，即使能够逼近它的极限，但这就意味着要花近百亿美元，甚至数百亿美元，在经济上是极其不划算的。因此，半导体工艺要走出它的死胡同，非得另谋出路不可。如果借用量子力学上“隧道效应”一词作比喻，那么我们就得在临近胡同底的时候，开始挖掘一条“隧道”出去，利用量子力学波动的隧道效应开辟新的天地。

这个新天地就是纳米技术。所幸的是，新途径已经初露端倪。1998 年，IBM 公司与日本 NEC 公司合作，在实验室里用一根半导体性的纳米碳管制成了场效应晶体管。这只场效应晶体管的性能不错，当栅电压变动时，源极与漏极之

间的电导变化 10 万倍，是一个说得过去的电子开关。在这之后，其他研究单位也纷纷制得在原理或结构上有所不同的晶体管。2001 年 8 月，IBM 又宣布使用纳米碳管制成了输入为“0”时、输出为“1”的“非门器件”。

在信息产业的另一个重要组成部分——存储器件，1998 年美国明尼苏达大学成功制造了量子磁盘，核心部分是纳米钴棒组成的微阵列，每平方英寸包含 $10^{11} \sim 10^{12}$ 根的钴棒，存储密度达到 $465 \times 10^9 \text{ bit/in}^2$ ，存储效率是现有磁盘的 10 万倍，美国还先后研制成功了接近 1000G ($1\text{G} = 10^9 \text{ bit/in}^2$) 的高密度磁盘。

1.2.2 生物医药技术

纳米生物学是 20 世纪 90 年代崭露头角的，在 21 世纪，它的发展前途方兴未艾。

大千世界最奇妙、最复杂的莫过于有机物生命体的生物世界了。从原子和分子的角度看，又是那么简单，这些生灵不过是由碳、氢、氧、氮、钙、磷、硅、硫、铁、钠，再加上一些微量元素所组成，而且它的生、老、病、死、遗传、变异都是在温和的自然条件下静悄悄地进行的，用不着高温、高压、高真空等等的苛刻条件。生物多样性及其复杂性的来源，不是主要决定于组成它的原子和分子，而是决定于这些原子和分子在纳米尺度上的结构，纳米尺度上的生命运动规律。举一个简单的例子。莲花荷叶出污泥而不染，美丽圣洁。荷叶的基本化学成分是叶绿素、纤维素、淀粉等多糖类的碳水化合物，有丰富的一OH、—NH 等极性基团，在自然环境中很容易吸附水分或污渍。而荷叶叶面都具有极强的疏水性，洒在叶面上的水会自动聚集成水珠，水珠的滚动把落在叶面上的尘土污泥粘吸滚出叶面，使叶面始终保持干净，这就是著名的“荷叶自洁效应”。为什么会有这种“荷叶效应”？用传统的化学分子极性理论来解释，是解释不通的。从机械学的粗糙度来解释也不行，因为它的表面根本达不到机械学意义上的粗糙度，用手触摸就可以感到它的粗糙程度。经过两位德国科学家的长期观察研究，在 20 世纪 90 年代初终于揭开了荷叶叶面的奥妙。原来在荷叶叶面上存在着非常复杂的多重纳米和微米级的超微结构。在超高分辨率显微镜下可以清晰看到，在荷叶叶面上布满着一个挨一个隆起的“小山包”，它上面长满绒毛，在“山包”顶又长出一个馒头状的“碉堡”凸顶。因此，在“山包”间的凹陷部分充满着空气，这样就在紧贴叶面上形成一层极薄，只有纳米级厚的空气层。这就使得在尺寸上远大于这种结构的灰尘、雨水等降落在叶面上后，隔着一层极薄的空气，只能同叶面上“山包”的凸顶形成几个点接触。雨点在自身的表面张力作用下形成球状，水球在滚动中吸附灰尘，并滚出叶面，这就是“荷叶效应”能自洁叶面的

奥妙所在。研究表明，这种具有自洁效应的表面超微纳米结构形貌，不仅存在于荷叶中，也普遍存在于其他植物中，某些动物的皮毛中也存在这种结构。

生物学有其自身的宏观规律，生物技术需要对这些规律进行深层次的研究。现在已经深入到细胞质、DNA、基因片段、蛋白质这些构成生命体的基本单元层次。这些基本单元的尺度大多在微米级或以下，其中基因片段、蛋白质即在纳米级。对这么小的生命体基本单元的观察、研究、裁减、拼接、转移，就需要纳米技术的参与。纳米科学技术同生物技术、医药学的交叉互相渗透，已形成纳米生物学（nanobiology），纳米医药学（nanopharmaceutics）。这已经成为纳米科学技术工程应用的热点领域。专家们普遍看好这两个领域，认为纳米技术很可能在这里先挖出“金矿”来。纳米科技的基因工程就是按照人们自己的需要，制造出多种多样的“产品”，农、林、牧、副、渔业也可能因此发生深刻变革，人类的食品结构也将随之发生变化，用生物工程和化学工程合成的食品将极大地丰富人类的食物，解决日益严重的粮食问题。

用原子和分子直接组装成的纳米生物部件和纳米生物机器人，在人类生活中将带来不可限量的变革，比人体红血球小的纳米机器人可以放入血管中，检查身体，治疗疾病，可以打通脑血栓，清除心脏动脉脂肪沉积物。生物芯片植入人脑，可以提高学习效率。等等。

1.2.3 纳米材料使传统产业升级换代

对传统产业来说，企业要在剧烈的市场竞争中立于不败之地，无非是采取两种方法：首先，对于老产品就要不断提高其性能价格比，占据有利的竞争优势，获得尽量多的市场份额；第二是不断创新，以新技术开发出新产品，引领市场潮流，开辟出按技术推动型的新市场。纳米材料及其技术正具有上述两方面的禀赋优势。

这种禀赋优势是来源于纳米材料的小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应。使得纳米材料形成了纳米粉体、纳米陶瓷、纳米工程塑料、纳米功能纤维、纳米涂层和纳米薄膜、纳米催化和光催化技术、高能量密度纳米材料、纳米磁性材料、纳米药物等众多的产业链，他们必将带动传统的产业发生革命。如纳米陶瓷将解决困扰陶瓷产业多年的脆性问题。德国科学家已经研制成功了180°弯曲不产生裂纹的纳米氟化钙和二氧化钛。纳米材料可以使精细化工（油漆、油墨和涂料）产品性能全面升级，还可以设计很多新型的涂料，如自清洁、防老化、抗辐射的新型涂料和智能涂料；在化纤纺织等领域也有重要的应用，如抗菌、卫生加工、防静电、自清洁等新型功能纤维都需要纳米材料和纳米技术提供支持。

1.3 纳米科学技术的国际态势

纳米技术经过 20 世纪 80 年代的理论 and 实践的大量准备, 到 90 年代得到很快的发展。到世纪之交, 2000 年 1 月 21 日美国总统克林顿向国会提出“国家纳米技术倡议 (NNI-National Nanotechnology Initiative)”以后, 很快在世界上掀起纳米技术的热潮。尽管这个热潮没有像 “.com” 网络热那样形成狂潮, 但它受到科学技术界、企业界和各国政府的高度重视。各国政府根据自身的国情制订相应的战略规划, 加大财政拨款投资, 设立专职协调机构, 设立各项或专项计划申请制度, 鼓励大企业投资纳米技术的基础研究和应用研究, 鼓励开展国际合作, 建立各种开放式研究机构。对一般性应用项目放开竞争, 鼓励拥有专项纳米技术的专家创建小型企业, 为社会提供自身专长的产品和服务等等。

美国政府为了保持其纳米科学技术领域在世界上的强势地位, 于 2000 年初由克林顿总统向美国国会提出“国家纳米技术倡议 (NNI)”, 全面部署纳米技术战略规划, 形成了美国纳米科技发展的整体模式。考察美国纳米技术研发的总体印象, 概括起来包括如下 3 条。

① 作为政府行为的 NNI 计划, 主要侧重于战略性、长期性、基础性和社会性。因此, 研究范围广泛, 参与的政府部门、研究所、大学为数众多, 实力雄厚, 经费充足, 总体上处于世界领先水平。尤其在纳米结构的基础研究和纳米结构的各超微器件, 如量子型电子器件, 超微结构的生物传感器, 生物芯片技术, 微机电系统, 纳米探针等都有世界领先的出色表现。

② 在纳米材料方面, 虽然研究开发单位和企业很多, 但还没有具备工业化批量生产的大型生产装置。根据美国比较权威的杂志《化学与工程新闻》2000 年 8 月综合调研分析, 原因有: 其一, 是纳米材料在传统产业中的应用还没有得到重大的突破; 其二, 是纳米材料还没有为广大潜在应用厂商所认识, 价格也太高。现在基本上停留在纳米材料供应商在寻求用户厂商合作阶段。

③ 在纳米材料应用方面完全是市场化的。从报道情况来看, 主要集中在电子信息、生物工程、医学、医药、航空航天、国防等高新尖端领域, 并取得一些骄人的成果。但在传统产业方面的应用, 引人注目的成果不多。虽然这方面的公司不少, 但多数是初创不久的小公司, 没有什么经济实力。多数处在联系客户, 建立合作伙伴的创业阶段。也有比较好的小公司, 或者产品前景比较好, 或因有比较强的研发队伍, 被大公司看上被兼并收购的, 但案例不多。值得注意的是, 大公司在纳米材料应用开发方面的信息披露不多, 据《化学与工程新闻》杂志评论家看法, 大多数大公司都从事纳米材料应用方面的研发, 有的从国家高科技