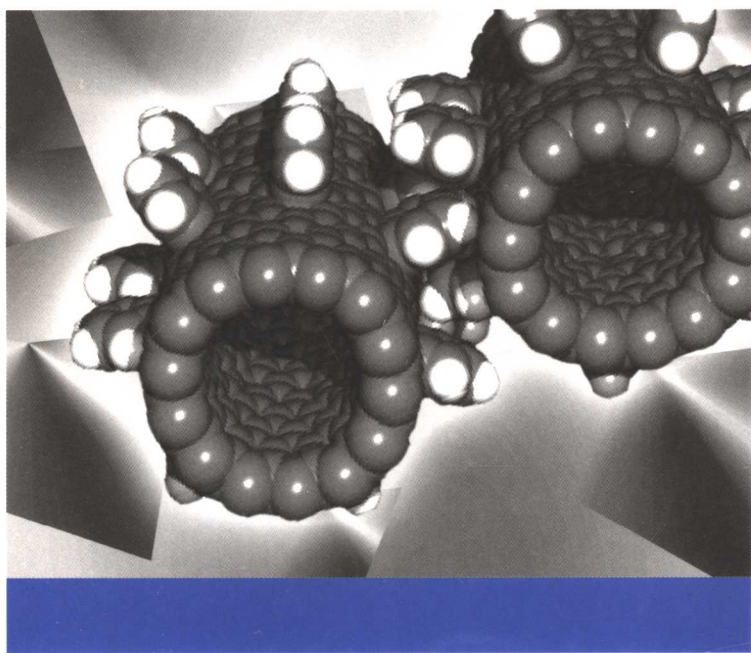


刘焕彬 陈小泉 编著

纳米科学与技术导论



Chemical Industry Press



化学工业出版社
化学与应用化学出版中心

纳米科学与技术导论

刘焕彬 陈小泉 编著



化学工业出版社
化学与应用化学出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米科学与技术导论/刘焕彬,陈小泉编著. —北京:
化学工业出版社,2006.2
ISBN 7-5025-8288-6

I. 纳… II. ①刘… ②陈… III. 纳米材料
IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 013143 号

纳米科学与技术导论

刘焕彬 陈小泉 编著
责任编辑:梁虹 靳星瑞
责任校对:顾淑云 徐贞珍
封面设计:邢震宇

*

化学工业出版社 出版发行
化学与应用化学出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 15¼ 字数 237 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8288-6

定 价: 29.00 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

前 言

在 0.1~100 纳米 (nm) 空间尺度内, 正好介于微观和宏观之间, 科学家们把它称之为“介观”。20 世纪 80 年代末、90 年代初以来, 这一领域吸引了一大批科学家极大的研究兴趣, 如今已形成了新兴的科学技术, 称为纳米科学技术。各领域的科学家、工程技术专家结合本领域的特点, 纷纷进行对本领域纳米尺度的深入观察和试验研究, 极大地推进了纳米科学技术的发展。纳米科学技术已经形成了包括物理学、化学、材料学、生物学、医学和电子学等学科在内的高度交叉和综合的科学技术。它不仅包含以观察、分析和研究为主线的基础学科, 同时还包括纳米科学应用的纳米工程与加工学为主要内容的纳米技术科学。纳米科学与技术是一个融科学前沿和高技术于一体的完整的科学技术实践体系。

1999 年开始, 美国政府决定把纳米科技研究列入 21 世纪前 10 年 11 个关键领域之一, 实施“全美纳米科技计划 (NNI)”。认为纳米技术将与信息技术或生物技术一样, 对 21 世纪经济、国防和社会产生重大影响, 可能引导下一场工业革命。正是由于纳米科技对国家未来战略的重大影响, 美国、德国、法国、日本等发达国家的政府和企业纷纷投入大量人力、物力和财力进行纳米科技的研究和产业化。西方国家的目标在于在基础和应用基础研究领域作前瞻性的部署, 占领战略制高点, 同时与企业结合, 迅速推动已有科研成果走向市场, 获得战略优势。我国从“八五”、“九五”开始启动了有关纳米材料的“攀登计划”项目和“国家重点基础研究”项目。我国的纳米科技研究, 特别是在纳米材料方面取得了重要的进展, 并引起了国际上的关注。

多年来, 我们在进行纳米材料研究和技术开发应用过程中认识到, 基于纳米科学技术的高度交叉和综合的特性, 在高等学校的学生中普及纳米科学与技术的基本概念和知识, 将会有利于推动我国纳米技术的研究和应用。因而, 我们编写出这本名为《纳米科学与技术导论》的教材。书的内容涉及到纳米科学与技术的主要发展历程和一些基本概念、纳米科技的研究方法、纳米材料、纳米器件、纳米生物学和纳米化学, 并列举一些纳米科技的应用实例。目的是为了让读者对纳米科学与技术这一领域有一个较系统的了解。第 1 章介绍纳米科学与技术的发展主要历程和一些基本概念; 第 2 章、第 3 章

介绍纳米科学的主要研究工具与理论建模的基础内容；第4章、第5章和第6章，以及第9章和第10章，属于纳米材料范畴，介绍碳纳米管，纳米无机材料，纳米块体材料和纳米材料涂覆；第7章介绍纳米电子器件和纳米电子学内容；第8章介绍一些与生物有关的粒子与结构；第11章介绍单分子纳米化学；第12章介绍一些纳米科学技术的应用实例。

在本书的编写过程中陈庆今博士参加了第5章、第6章、第7章的编写工作，谢武明博士参加了第8章的编写工作，在此一并表示感谢。

本书作为高等院校教学参考书，适合于材料学、化学、物理学、电子学以及化工、生物、轻工、纺织等工科相关专业的本专科学生、研究生和技术人员选用。

鉴于作者水平所限，文中疏漏在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2005年2月

目 录

1 纳米科学技术的基本概念与发展历程	1
1.1 纳米科学技术发展的历史回顾	1
1.1.1 自然界的纳米结构	1
1.1.2 纳米科技概念的提出与发展	2
1.1.3 纳米科技概念的形成与相关的重要事件	3
1.2 纳米科学技术的定义	4
1.2.1 纳米	4
1.2.2 纳米科学和技术	4
1.3 纳米科技的研究领域	5
1.3.1 纳米材料	5
1.3.2 纳米器件	6
1.3.3 纳米结构的检测与表征	7
1.4 纳米材料的特性	7
1.4.1 小尺寸效应	7
1.4.2 表面效应	8
1.4.3 量子尺寸效应	8
1.4.4 宏观量子隧道效应	9
1.5 纳米科技的深远影响	9
1.5.1 纳米科技将促使人类认知的革命	9
1.5.2 纳米科技将引发一场新的工业革命	10
1.5.3 纳米科技将影响未来人类的生活方式和思维方式	11
1.6 纳米科技的应用展望	11
1.6.1 材料和制备	12
1.6.2 纳米电子学、光电子学、磁学与计算机技术	12
1.6.3 纳米医学和生物学与健康	13
1.6.4 国防科技与国家安全	14
1.6.5 环境保护	15

1.7 发达国家在纳米科技方面研究水平和部署状况	16
1.7.1 发达国家在纳米科技领域内的发展水平	16
1.7.2 发达国家对纳米科技领域的部署	18
1.8 我国纳米科技的发展状况	20
参考文献	23
2 纳米科技研究工具：实验方法和探针	24
2.1 现代科学和技术的进步	24
2.1.1 聚集的粒子束	24
2.1.2 电子显微镜	25
2.1.3 扫描探针电子显微镜	25
2.1.4 二维和三维的纳米结构的操纵	27
2.1.5 平行探针簇	28
2.1.6 原位测定和过程控制	28
2.1.7 纳米结构材料的表征	29
2.2 现有的纳米尺度测定和所获得成就	29
2.2.1 单分子操纵和测定	30
2.2.2 SEM 中的纳米操纵器	32
2.2.3 多功能近场结合和表面力显微	33
2.3 纳米科技未来的发展目标	34
参考文献	37
3 纳米科学与技术的理论、建模和模拟	41
3.1 TM&S 是纳米科学与技术研究的基础	41
3.2 TM&S 领域的研究成就	43
3.2.1 纳米粒子分子计算的计算复杂性尺度和定标（界定）	43
3.2.2 纳米润滑作用	44
3.2.3 碳纳米管模拟	46
3.2.4 量子点的模拟	46
3.2.5 DNA 分子动力学的分子模拟	47
3.2.6 硅纳米晶体中量子限制的模拟	48
3.2.7 压电聚合物的分子动力学模拟	49
3.3 TM&S 的重要发展领域	50
参考文献	52

4 纳米材料的分散和涂覆	53
4.1 产品性能的强化.....	53
4.2 纳米粒子分散与涂覆成功应用所要具备的条件.....	54
4.3 纳米粒子分散和涂覆的应用行业.....	55
4.4 纳米材料分散与涂覆的研究和开发现状.....	56
4.4.1 美国.....	56
4.4.2 欧洲和日本.....	58
4.5 纳米材料的分散与涂覆发展趋势.....	59
参考文献	61
5 高表面积材料	63
5.1 高比表面积纳米结构材料主要用途和制备途径.....	63
5.2 簇团和纳米晶体材料.....	65
5.2.1 纳米结构金属催化剂新的催化性质.....	65
5.2.2 控制至少一维纳米粒子用于工业上具有重要意义的加 氢脱硫反应 (HDS)	67
5.2.3 受控的惰性气体缩合形成钼纳米簇团制备非化学计量 CeO_{2-x} 纳米微晶	67
5.2.4 金属盐的电化学还原.....	68
5.2.5 用催化离解 H_2 来加强能量贮存	68
5.3 具有自组装特征的高表面积材料.....	69
5.3.1 沸石材料.....	69
5.3.2 碳材料.....	71
5.3.3 微孔和密实超薄膜.....	72
5.4 纳米级制备和表征的未来发展.....	73
5.5 总结.....	74
参考文献	74
6 块体纳米材料的性质	76
6.1 结构性纳米材料的力学性能.....	77
6.1.1 弹性性能.....	77
6.1.2 硬度和强度.....	78
6.1.3 延展性和韧性.....	79

6.1.4	超塑性	80
6.2	纳米晶体材料的独特力学性能	81
6.3	强磁性纳米结构块体材料	82
6.3.1	软磁纳米晶体合金	82
6.3.2	永磁材料	83
6.3.3	巨磁阻效应 (Giant Magnetoresistance)	84
6.3.4	其他强磁性纳米晶体材料	84
6.3.5	纳米晶体储存氢材料	85
6.3.6	纳米晶体抗蚀材料	85
6.4	纳米结构块体材料的应用特征	85
6.5	纳米结构性块体材料的发展机遇与挑战	86
	参考文献	87
7	纳米电子器件	90
7.1	微电子晶体管的结构、运行、小型化障碍	91
7.1.1	金属氧化物半导体场效应晶体管的结构和运行	91
7.1.2	FETs 微型化的难点	93
7.2	固态量子效应与单电子纳米电子器件	94
7.2.1	岛、势阱和量子效应	95
7.2.2	谐振隧道器件 (resonant tunneling device)	97
7.2.3	器件类型间的区别: 其他的能量效应	100
7.2.4	纳米电子器件的分类	101
7.3	分子电子学	104
7.3.1	分子电子开关器件分类	105
7.3.2	分子电子学的简要背景	106
7.3.3	分子线	107
7.3.4	量子效应分子电子器件	108
7.3.5	电子机械分子电子器件 (Electromechanical Molecular Electronic Devices)	109
7.4	讨论与结论	114
	参考文献	115
8	与生物相关的纳米粒子、纳米结构材料和纳米器件	128
8.1	纳米技术的构筑基础	129

8.1.1	合成	129
8.1.2	组装	130
8.2	分散体系	132
8.2.1	药物传输系统	132
8.2.2	纳米颗粒在卫生和污染方面的作用	133
8.3	高表面积材料	133
8.3.1	用于生物分离的薄膜	133
8.3.2	细菌细胞表面层作为模板元素	134
8.4	功能纳米结构	134
8.4.1	分子计算	134
8.4.2	光电子器件	134
8.4.3	分子马达	135
8.4.4	应用纳米颗粒进行生物输运的其他形式	135
8.5	生物电子学	135
8.6	增强材料	136
8.7	生物棒状磁体	136
8.8	生物纳米科学技术发展机遇与挑战	137
8.8.1	工程技术与产业化	137
8.8.2	表面相互作用以及生物分子与培养基之间的界面	137
8.8.3	生物分子的活性以及在水溶液中的相互作用	138
8.8.4	组装或者模板制备	138
8.8.5	纳米技术的组合方法	138
8.8.6	仿生学和聚合体-生物聚合体	138
	参考文献	138
9	碳纳米管	142
9.1	富勒碳	142
9.1.1	富勒碳的结构	142
9.1.2	C ₆₀ 的制备和形貌	142
9.1.3	C ₆₀ 的性能和应用前景	143
9.2	碳纳米管的结构与分类	144
9.2.1	碳纳米管的微观结构	145
9.2.2	碳纳米管的分类	146
9.3	碳纳米管的物理化学性质	148

9.3.1	电磁性能	148
9.3.2	力学性能	149
9.3.3	热学性能	149
9.3.4	光学性能	150
9.4	碳纳米管的制备	152
9.4.1	电弧放电法	152
9.4.2	催化裂解法	153
9.4.3	激光蒸发法	154
9.4.4	化学气相沉积法	155
	参考文献	156
10	纳米无机氧化物粉体	160
10.1	纳米二氧化钛	160
10.1.1	纳米二氧化钛的制备	161
10.1.2	纳米二氧化钛的光催化活性	164
10.1.3	纳米二氧化钛的应用	166
10.2	纳米二氧化硅	168
10.2.1	纳米二氧化硅的制备	168
10.2.2	纳米二氧化硅的特性	170
10.2.3	纳米二氧化硅的应用	170
10.3	纳米三氧化二铝	172
10.3.1	纳米三氧化二铝制备方法	173
10.3.2	纳米三氧化二铝的应用	175
10.4	纳米氧化锆	177
10.4.1	纳米二氧化锆的制备技术	178
10.4.2	纳米二氧化锆的应用	180
10.5	纳米氧化锌	182
10.5.1	纳米氧化锌材料的制备方法	183
10.5.2	纳米氧化锌的用途	185
	参考文献	187
11	单分子纳米化学	193
11.1	分子导线	193
11.1.1	π -共轭低聚物分子导线	194

11.1.2 线性碳桥金属有机分子导线·····	195
11.2 分子电子器件·····	203
11.2.1 分子开关·····	203
11.2.2 分子整流器·····	203
11.3 繁枝体大分子化合物 (Dendrimers) ·····	205
11.3.1 基本概念和性质·····	205
11.3.2 繁枝大分子化合物的分类·····	206
11.3.3 繁枝体大分子合成方法·····	208
11.3.4 繁枝体大分子的应用·····	213
参考文献·····	214
12 纳米材料与器件的应用实例·····	219
12.1 工业制造、材料和产品·····	219
12.2 医学与人体·····	220
12.3 农业、水、能源、材料和环境清洁·····	220
12.4 航空·····	222
12.5 国家安全·····	222
12.6 纳米科学技术对未来各行业领域的商业影响·····	222
12.7 纳米技术的一些应用实例·····	223
12.7.1 磁存储应用中的巨磁阻效应·····	223
12.7.2 纳米结构催化剂·····	224
12.7.3 医药·····	225
12.7.4 纳米粒子强化的聚合物·····	226
12.7.5 电子器件两个实际应用例子·····	226
12.7.6 国家安全方面的应用——纳米生物探测·····	227
12.7.7 水纯化和脱盐·····	228
12.7.8 造纸业中的应用·····	228

1 纳米科学技术的基本概念 与发展历程

纳米科学与技术将是构成 21 世纪科学技术新时代的基础。纳米科技是在纳米尺度对物质特性进行研究的基础上，最终利用这种特性来制造具有特定功能的产品，实现生产方式的飞跃。就基础研究而言，纳米科学有着诱人的前景，因为在纳米尺度上物质将表现出新颖的现象、奇特的效应和性质。而作为一门技术，纳米技术将为人类提供新颖并具有特定功能的产品和装置。因此，纳米科学技术充满着机会与挑战。

1.1 纳米科学技术发展的历史回顾

在微米尺度领域，人类取得了无数的重大成果，这些成果涵盖了建筑、陶瓷、涂料、塑料、航天、航空、计算机、电子、信息、金属等几乎所有行业，并且渗透到我们生活的方方面面。微米信息时代创造的财富超过了此前的一切。

沿着微米时代的足迹，人类在向更精密化的方向迈进。为了提高计算机速度及单位信息存储量，科学家对“小型化”与“分子组装”等的追求又在新的层次上展开，很自然地在更小的尺度上开展探索。目前，大部分的研究尺度领域在介观尺度上（0.1~100nm）。

1.1.1 自然界的纳米结构

当回顾自然的结构之时，就会发现自然界中的纳米结构也是难以计数的。在纳米材料中包括了无数的天然纳米结构材料，例如蒙脱石、伊利石、

滑石、凹凸棒石、氟化云母等。

石油化工中应用的催化剂或者载体无论是人工的还是天然的，其具有的颗粒尺度均小于 100nm 或者其具有的孔径小于 50nm。根据国际纯粹与应用化学联合会按孔径大小对材料进行的定义（微孔小于 2nm，中孔 2~50nm，大孔大于 50nm），以上提到的这些多孔材料可称为纳米孔径材料（颗粒尺度在纳米尺度则被称为纳米颗粒材料）。这些纳米孔径材料或者纳米颗粒材料也统称为纳米材料。

自然界中的纳米结构不仅是非生命的，也有许多是生命体内的，人的骨头、牙齿、细胞内部的结构、钠离子通道，植物的叶子、树的组织等无不体现着纳米结构的存在，特别是其神奇的有序性组装等。

1.1.2 纳米科技概念的提出与发展

最早提出纳米尺度上科学和技术问题的是著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼（Richard Feynman）。1959 年，他在一次著名的“在底部还有很大空间”的演讲中提出：如果人类能够在原子/分子的尺度上来加工材料、制备装置，我们将有许多激动人心的新发现。他指出，我们需要新型的微型化仪器来操纵纳米结构并测定其性质。那时，化学将变成根据人们的意愿逐个地准确放置原子的问题，并预言：“当我们对细微尺寸的物体加以控制的话，将极大地扩充我们获得物性的范围。”

1974 年，Taniguchi 最早使用纳米技术（nanotechnology）一词描述精细机械加工。20 世纪 70 年代后期，麻省理工学院德雷克斯勒教授提倡纳米科技的研究，但当时多数主流科学家对此持怀疑态度。

纳米科技的迅速发展是在 20 世纪 80 年代末、90 年代初。80 年代初发明了费曼所期望的纳米科技研究的重要仪器——扫描隧道显微镜（STM）、原子力显微镜（AFM）等微观表征和操纵技术，它们对纳米科技的发展起到了积极的促进作用。与此同时，纳米尺度上的多学科交叉展现了巨大的生命力，迅速形成一个有广泛学科内容和潜在应用前景的研究领域。1990 年 7 月，第一届国际纳米科学技术会议与第五届国际扫描隧道显微学会议在美国巴尔的摩同时举办，“纳米技术”与“纳米生物学”这两种国际性专业期刊也相继问世。一门崭新的科学技术——纳米科技从此得到科技界的广泛关注。

纳米科技的最终目标是直接以原子和分子来构造具有特定功能的产品，因此研究单原子、分子的特性和相互作用以及揭示在纳米尺度上的新现象、

新效应是纳米科技研究的重要前沿方向。

近年来，纳米科技取得了一系列杰出的成就，例如惠普公司利用 STM，通过自组装的方法，成功地获得了锗原子在硅表面形成的“金字塔”形的量子点，该量子点在基底上的跨度只有 10nm，高度只有 1.5nm。

IBM 公司在铜单晶的表面，利用扫描隧道显微镜的针尖逐个地将 48 个铁原子排列成半径为 7.3nm 的圆形栅栏。铜表面的电子气遇到铁原子时，就会被局部反射回去。做此栅栏的目的就是要试图捕获或将一些电子限制在圆形结构中，迫使这些电子进入“量子”态。这个实验的重要意义在于为科学家提供了研究微观体系量子现象的微小实验室。

1959 年，费曼博士所作的“化学将变成根据人们的意愿逐个地准确放置原子的问题”的预言，现在已经可以实现这种操作。科学家利用 STM 将 18 个铯原子和 18 个碘原子拖放在一起。美国康奈尔大学的科学家最近成功地将一氧化碳分子和铁原子组合起来，形成一羰基铁和二羰基铁分子，实验温度为 -260°C 。这项研究不但有助于了解化学键的性质，还有助于制造更为复杂的分子。

这些成就表明，人们在原子、分子水平上对物质控制的能力有了很大的提高，纳米科技走向实用化的步伐又向前迈进了一步。

1.1.3 纳米科技概念的形成与相关的重要事件

以下将纳米材料概念的形成过程按照年代顺序概述如下。

- 早期，石墨、炭黑中的颗粒；
- 近代 (1861)，胶体化学定义胶体为 $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6} \text{m}$ 尺度的悬浮体；
- 1919 年，Mercia 等发现粉体沉淀法硬化铝合金；
- 1959 年，Richard Feynman 称“在物质的底部还有很多空间”。加州伯克利大学设百万美元奖励制备纳米机器人；
- 20 世纪 70 年代，康乃尔大学 C G. Granqvist & R A. Buhrman 小组气相沉积制备纳米粒子；
- 20 世纪 80 年代，联邦德国 Gleiter 首次制备金属纳米，提出纳米材料及其应用；
- 20 世纪 80 年代，日本政府 5 年超细颗粒计划；
- 1981 年，IBM 发明 AFM（原子力显微镜）和 STM（扫描隧道显微镜）推动纳米技术发展；
- 1986 年 11 月，Boston 第一届超细结构粉体会议；

- 1988 年 7 月，美国能源部簇合物及其组装会议；
- 1989 年，美国 Argonne 国家实验室成立纳米相技术公司；
- 1990 年 7 月，BALTIMO 纳米科技会议（NST）；
- 1990 年 10 月，亚特兰大超细微冶金结构会议；
- 1992 年 1 月，第一本“Nanostructured Materials”杂志创刊（后停刊）；
- 1992 年、1994 年、1996 年，连续三届纳米国际会议 Cancun（墨），Stuttgart（德），Hawaii（美）；
- 1993 年，北京 STM 国际会议研讨纳米技术；
- 1996 年、1998 年、2000 年，碳纳米管取得连续突破；
- 1997 年，美国 Nanophase Technologies 公司、Nanocor 公司等成立；
- 1999 年，Richard Smalley 提出“即将有能力造出其长度尽可能小的东西来，大胆地迈进这个新的领域符合我们国家的最佳利益”；
- 2000 年，美国国家纳米计划（NNI）启动；
- 2001 年，中国筹备成立几个国家纳米科技中心；
- 2001 年，世界范围内对纳米科技的关注。

1.2 纳米科学技术的定义

1.2.1 纳米

如果将人类所研究的物质世界对象用长度单位加以描述，我们可以得到人类智力所延伸到的物质世界的范围。目前，人类能够加以研究的物质世界的最大尺度是 10^{23}m （约 10 亿光年），这是我们已观测到的宇宙大致范围。人类所研究的物质世界的最小尺度为 10^{-19}m （ 0.1am ）。

“纳米”是长度单位，是 1mm 的百万分之一（ 10^{-9}m ），相当于 10 个氢原子一个挨一个排起来的长度。原子的直径在 $0.1\sim 0.3\text{nm}$ 之间。人类的遗传物质 DNA 直径小于 3nm 。研究小于 10^{-10}m 以下的原子内部结构属于原子核物理、粒子物理的范畴。

1.2.2 纳米科学和技术

纳米科学和技术是指在纳米尺度（ $1\sim 100\text{nm}$ 之间）上研究物质组成体

系的运动规律和相互作用,以及在实际应用中实现特有功能和智能作用的多学科交叉的科学和技术。

当物质小到 $1\sim 100\text{nm}$ ($10^{-9}\sim 10^{-7}\text{m}$) 时,由于其量子效应、物质的局域性及巨大的表面反界面效应,使物质的很多性能发生质变。呈现出许多既不同于宏观物体,也不同于单个孤立原子的奇异现象。纳米科技的最终目标是直接以原子、分子及物质在纳米尺度上表现出来的新颖的物理、化学和生物学特性制造出具有特定功能的产品。

它从思维方式的概念表明生产和科研的对象将向更小的尺寸、更深的层次发展,将从微米层次深入至纳米层次。纳米技术未来的目标是按照需要,操纵原子、分子构建纳米级的具有一定功能的器件或产品。纳米科学与技术主要包括纳米体系物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米生物学、纳米电子学、纳米加工学、纳米力学等 7 个相对独立又相互渗透的学科以及纳米材料、纳米器件、纳米尺度的检测与表征。纳米材料的制备和研究是整个纳米科技的基础。

1.3 纳米科技的研究领域

纳米科学是由材料、化学、物理学、生物学、医学、电子学及机械学等多种学科相互交叉而形成的新科学。由于纳米科技的多学科交叉性质,因此,纳米科技的研究对象涉及诸多领域,它的基础研究问题又往往与应用密不可分。我们可以根据纳米科技与传统学科领域的结合而细分为纳米材料学(nanomaterials)、纳米电子学(nanoelectronics)、纳米动力学(nanodynamics)、纳米生物学(nanobiology)、纳米药理学(nanopharmics)、纳米化学(nanochemistry)、纳米机械学(nanomechanics)与纳米加工(nanoprocess)等,产生或即将产生许多学科、技术分支。纳米科学技术分类见图 1-1。

这种与学科紧密联系的分类方式,无法简单便捷地勾勒纳米科技的大致轮廓,各类之间又有交叉和重叠。归纳起来,纳米科技中有纳米材料、纳米器件、纳米检测与表征三类功用性很强的研究领域。

1.3.1 纳米材料

纳米材料是纳米科技发展的重要基础。纳米材料是指材料的几何尺寸达到纳米级尺度水平,并且具有特殊性能的材料。其主要类型为:纳米颗粒与