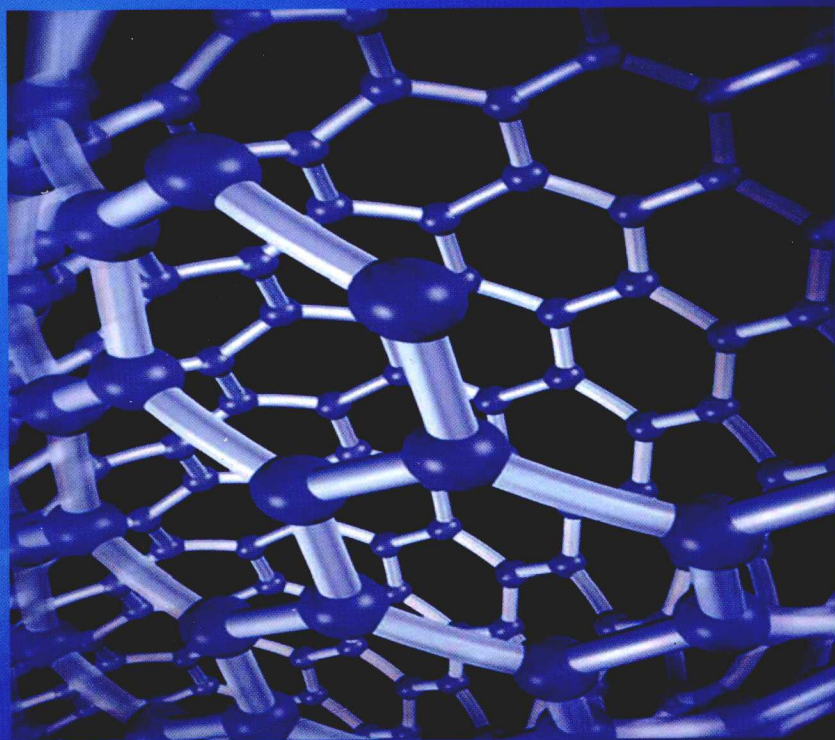


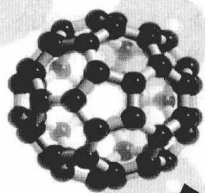


纳米材料概论

卫英慧 主编 韩培德 杨晓华 副主编

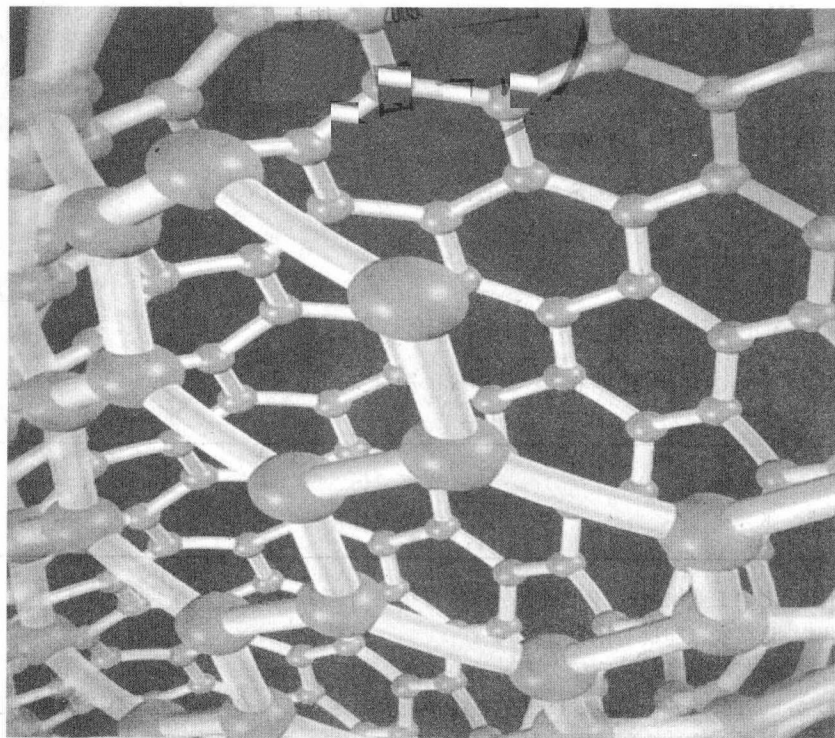


化学工业出版社



纳米材料概论

卫英慧 主编 韩培德 杨晓华 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书结合国内外近年来纳米材料的研究进展编写而成。全书共分 8 章，主要从纳米材料的结构、制备方法、结构表征、物理化学特性、力学性能、应用、未来发展等几个方面进行了系统的论述。本书的主要特点是引用了大量实例，说明纳米材料的制备、表征、性能、应用。本书可作为大专院校有关材料类、化学类、物理类专业及其他相关专业的本科生及研究生的教学用书，也可供从事该领域研究的科研人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米材料概论/卫英慧主编. —北京: 化学工业出版社,
2009. 9

ISBN 978-7-122-06360-1

I. 纳… II. 卫… III. 纳米材料-概论 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 125767 号

责任编辑: 靳星瑞

文字编辑: 陈 雨

责任校对: 郑 捷

装帧设计: 杨 北

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 346 千字 2009 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

前 言

纳米材料是纳米科学与技术最为重要的组成部分，也是国际上竞争的热点和难点。纳米材料一般指在空间有一维尺寸在纳米数量级或者组成微粒尺寸在 $1\sim 10\text{nm}$ 范围内的材料。纳米材料具有表面效应、小尺寸效应和宏观量子隧道效应。因此，在实际使用过程中，它将显示出许多奇异的特性，即它的光学、热学、磁学、力学以及化学方面的性质与粗晶材料相比将会有显著的不同。因此我们编写的主要目的是让学生通过学习，弄清纳米材料的概念、结构、维度、表征方法、性能以及应用。基于这一思路，我们首先介绍了纳米材料的发展历史、研究内容和发展趋势，接着描述了有关纳米材料的制备方法、表征方法以及物理化学性能和力学性能，使学生对纳米材料有一个整体的了解和认识。在此基础上，再讲授纳米材料的应用以及目前研究较为广泛的碳纳米材料，最后对纳米材料的最新研究进展进行了介绍。全书尽量列举一些实际的事例，以使学生易于理解和掌握。

本书第1章和第2章由太原理工大学韩培德教授编写，第3章由太原理工大学侯利锋博士编写，第4章由太原科技大学张敏刚教授编写，第5章由太原理工大学卫英慧教授编写，第6章由福州大学杨晓华教授编写，第7章由太原理工大学张艳博士编写，第8章由山东科技大学谷亦杰教授编写。全书由卫英慧教授、韩培德教授和杨晓华教授负责制定编写大纲，筹划协调和修订稿件。

本书的编写得到了太原理工大学、福州大学、山东科技大学、太原科技大学等有关领导和老师的大力支持和帮助，化学工业出版社的领导及编辑为本书的出版做了大量细致的工作，在此一并向他们表示衷心感谢！由于编者水平、能力有限，书中难免有错漏之处，诚恳希望读者批评指正。

编者

2009.6

目 录

第 1 章 纳米和纳米材料	1
1.1 引言	1
1.1.1 纳米科学技术的兴起	1
1.1.2 纳米材料的发展	1
1.2 纳米技术的学科领域	3
1.2.1 纳米材料学	3
1.2.2 纳米动力学	4
1.2.3 纳米生物学和纳米药物学	4
1.2.4 纳米电子学	5
1.2.5 纳米化学	5
1.3 纳米材料的研究内容	5
1.4 纳米材料的发展趋势	7
参考文献	8
第 2 章 纳米材料制备方法	9
2.1 概述	9
2.1.1 纳米材料制备技术的形成	9
2.1.2 纳米材料制备技术的种类和进展	10
2.2 纳米微粒的制备方法	10
2.2.1 制备纳米粒子的物理方法	10
2.2.2 制备纳米粒子的化学方法	16
2.3 一维纳米材料的制备方法	19
2.3.1 气相法	20
2.3.2 液相法	22
2.3.3 模板法	22
2.4 纳米薄膜的制备方法	23
2.4.1 物理方法	23
2.4.2 化学方法	27
2.5 纳米金属材料的制备方法	30
2.5.1 纳米金属粉末的制备	30
2.5.2 纳米金属复合粉末的制备	33
2.5.3 纳米晶金属块体材料的制备	33
参考文献	36

第 3 章 纳米材料的表征	39
3.1 粒度分析	39
3.1.1 概述	39
3.1.2 粒度分析的方法	39
3.1.3 粒度分析样品的制备	41
3.2 形貌分析	42
3.2.1 概述	42
3.2.2 透射电子显微镜	42
3.2.3 扫描电子显微镜	49
3.2.4 扫描隧道显微镜	54
3.2.5 原子力显微镜	56
3.3 结构分析	57
3.3.1 概述	57
3.3.2 X 射线衍射分析	57
3.3.3 红外 (IR)、激光拉曼 (Raman) 光谱	66
3.4 成分分析	68
3.4.1 概述	68
3.4.2 X 射线光电子能谱	68
3.4.3 俄歇电子能谱	71
3.4.4 电子探针 X 射线微区成分分析	73
3.4.5 电子能量损失谱	75
参考文献	75
第 4 章 纳米材料的物理化学性能	76
4.1 纳米材料的基本效应	76
4.1.1 尺寸效应	76
4.1.2 表面与界面效应	76
4.1.3 宏观量子隧道效应	78
4.2 电学性能	78
4.2.1 介电常数和介电损耗	78
4.2.2 纳米氧化物的介电性能	80
4.3 磁学性能	81
4.3.1 矫顽力	82
4.3.2 超顺磁性	83
4.3.3 饱和磁化强度、居里温度与磁化率	84
4.4 光学性能	85
4.4.1 基本概念	85
4.4.2 纳米材料的光吸收特性	87
4.5 热学性能	90

4.5.1	纳米材料的热学性质及尺寸效应	90
4.5.2	纳米晶体的晶粒成长	94
4.5.3	纳米晶体的点阵热力学性质	98
4.5.4	纳米晶体的界面热力学	99
4.6	化学性能	102
4.6.1	吸附	102
4.6.2	纳米微粒的分散与凝聚	104
4.6.3	流变学	106
	参考文献	110
第5章	纳米晶材料的力学性能	112
5.1	纳米晶金属和合金的力学性能	112
5.1.1	屈服强度	113
5.1.2	延展性	116
5.1.3	应变硬化	118
5.1.4	应变速率敏感性	118
5.1.5	纳米晶材料的蠕变	122
5.1.6	纳米晶材料的疲劳	125
5.2	纳米晶金属和合金的变形机制	128
5.2.1	堆积破坏 (pile-up breakdown)	128
5.2.2	晶粒边界滑动	130
5.2.3	核-幔模型 (core and mantle models)	134
5.2.4	晶粒边界转动/晶粒合并	140
5.2.5	剪切带的形成	140
5.2.6	梯度模型	142
5.2.7	孪晶	143
5.2.8	晶粒边界位错的形成和湮灭	147
5.3	纳米晶金属和合金的断裂	150
5.4	纳米晶陶瓷及复合材料的力学性能	152
	参考文献	153
第6章	纳米材料的应用	160
6.1	纳米陶瓷材料的应用	160
6.1.1	纳米陶瓷颗粒的应用	160
6.1.2	纳米陶瓷线的应用	164
6.1.3	纳米陶瓷薄膜的应用	169
6.1.4	纳米陶瓷的应用及展望	172
6.2	纳米金属材料的应用	174
6.2.1	纳米金属粉末材料的应用	174
6.2.2	纳米金属薄膜材料的应用	177

6.2.3 纳米金属块体材料的应用	178
6.3 纳米高分子材料的应用	179
6.3.1 纳米橡胶	179
6.3.2 纳米塑料	180
6.3.3 复合纤维	182
6.3.4 纳米涂料	183
参考文献	185
第7章 纳米碳材料	186
7.1 碳材料基础	186
7.2 纳米碳材料	188
7.2.1 纳米碳球	189
7.2.2 纳米碳管	199
7.2.3 纳米碳纤维	207
7.3 碳纳米复合材料	217
7.3.1 GICs 的分类	218
7.3.2 GICs 的制备方法	219
7.3.3 GICs 的性质与用途	221
参考文献	224
第8章 纳米材料最新研究进展	231
8.1 纳米材料制造工艺与结构材料研究发展	232
8.1.1 磁性纳米材料的制备及应用新进展	232
8.1.2 纳米二氧化硅复合材料的应用研究进展	233
8.1.3 碳纳米管及其复合材料的制备与性能研究进展	234
8.1.4 纳米复合涂层在航空航天材料中的研究进展	235
8.1.5 纳米分子	236
8.2 纳米材料在食品与农业的研究发展	237
8.2.1 超细微粒和纳米粒子的制备技术	238
8.2.2 微乳化技术和纳米胶囊制备技术	238
8.2.3 分子自组装技术	238
8.2.4 纳米科技在渔业农业和节能环保上的应用	239
8.3 纳米电子材料与计算设备研究发展	240
8.3.1 稀土掺杂纳米发光材料的应用前景和展望	240
8.3.2 氧化锌基纳米发光材料的研究进展	240
8.3.3 CdSe 纳米材料最新研究进展	241
8.3.4 导电聚合物/无机纳米复合材料的研究进展	241
8.3.5 单电子存储器	242
8.3.6 纳米芯片	244
8.4 纳米材料在卫生保健领域的研究发展	245

8.4.1	纳米高分子材料在生物医学领域的研究与应用	245
8.4.2	纳米骨植入材料表面结构及作用机制研究进展	246
8.4.3	金纳米团簇功能化及其在生物医学中的应用	247
8.4.4	纳米给药系统	250
8.5	纳米材料在能源领域和环保领域的研究进展	251
8.5.1	一维纳米材料在锂离子蓄电池中的应用进展	251
8.5.2	纳米结构太阳能电池材料的研究进展	253
8.5.3	纳米催化剂在直接甲醇燃料电池中的研究现状	257
8.5.4	纳米材料在空气净化中的应用研究	258
	参考文献	260

第 1 章 纳米和纳米材料

1.1 引 言

1.1.1 纳米科学技术的兴起

纳米是英文 *nanometer* 的译音，是一个度量单位， $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ，即万分之一头发丝粗细。然而当物质达到纳米尺度以后，大约在 $1\sim 100\text{nm}$ 范围时，物质的性能就会发生突变，出现特殊性能。这种既具有不同于原来组成的原子、分子，又不同于宏观的物质的特殊性能构成的材料，即为纳米材料。如果仅仅是尺度达到纳米，而没有特殊性能的材料，也不能叫纳米材料。过去人们更多关注的是原子、分子或者宇宙尺度，往往忽略纳米尺度这一领域，而这一领域实际上大量存在于自然界，只是未曾发现这个尺度范围内的性能而已。日本科学家在 20 世纪 70 年代用蒸发法制备超微离子，并通过它的性能发现：一个导电、导热的铜、银导体制成纳米尺度以后，就失去原来的性质，表现出既不导电，也不导热。磁性材料也是如此，像铁钴合金，把它制成大约 $20\sim 30\text{nm}$ 大小，磁畴就变成单磁畴，它的磁性要比原来高 1000 倍。80 年代中期，人们就正式把这类材料命名为纳米材料。

科学技术的高速发展必然对材料提出新的要求，元件的小型化、智能化、高集成、高密度存储和超快传输等对材料小尺寸上的要求越来越高；航空航天、新型军事装备及先进制造技术等对材料性能要求越来越高。新材料的创新，以及在此基础上诱发的新技术、新产品的创新是未来发展对社会发展、经济振兴、国力增强最有影响力的战略研究领域，纳米材料将是起到重要作用的关键材料之一。

1.1.2 纳米材料的发展

人类对物质的认识分为宏观和微观两个层次。宏观是指研究的对象尺寸很大，并且下限有限，上限无限（肉眼可见的是最小宏观物质，而上限是天体、星系）。到目前为止，人类对宏观物质结构及运动规律已经有了相当的了解，一些学科领域都已建立，如力学、地球物理学、天体物理学、空间科学等。微观指原子、分子，以及原子内部的原子核和电子，微观有上限而无下限。

19 世纪末到 20 世纪初，人类对微观世界的认识已延伸到一定层次，时间上达到纳秒、皮秒和飞秒数量级。并建立了相应的理论，如原子核物理、粒子物理、量子力学等。

相对而言，对原子、分子与宏观物质的中间领域，人类的认识还相当肤浅，被誉

为有待开拓的“处女地”。已有研究表明，在微观到宏观的中间物质中出现了许多既不同于宏观物质，也不同于微观体系的奇异现象。下面作一简要介绍。

1000年以前，中国人利用燃烧的蜡烛形成的烟雾制成炭黑，作为墨的原料或着色染料，科学家们誉其为最早的纳米材料。中国古代的铜镜表面防锈层是由 SnO_2 颗粒构成的薄膜，然而当时人们并不知道这些材料是由肉眼根本无法看到的纳米尺度小颗粒构成的。

1861年，随着胶体化学（colloid chemistry）的建立，科学家们开始对1~100nm的粒子系统进行研究。但限于当时的科学技术水平，化学家们并没有意识到在这样一个尺寸范围是人类认识世界的一个崭新层次，而仅仅从化学角度作为宏观体系的中间环节进行研究。

20世纪初，有人开始用化学方法制备作为催化剂使用的铂超微颗粒。

1929年，有人用Al、Cr、Cu、Fe等金属作电极，在空气中产生弧光放电，得到了15种金属氧化物的溶胶。并开始对超微颗粒进行X射线实验研究。

1940年，有人首次采用电子显微镜对金属氧化物的烟状物进行了观察。

1945年，Balk提出在低压惰性气体中获得金属超微粒子的方法。

20世纪上半叶的研究特点是，人类已经自觉地把纳米微粒作为研究对象来探索纳米体系的奥秘。

20世纪50年代末，有人预计，在微米、亚微米的细小体系中，一束电子分成两束，以形成不同的位相，重新相遇后会产生电子波函数相干现象，从而导致电导的波动性。20世纪60年代初，有人用实验观察到了电子束的波动性。几乎在同一时期，日本理论物理大师R. Kubo在金属超微粒子的理论研究发现，金属粒子显示出与块状物质不同的热性质，被科学界称为Kubo效应。

1959年，著名物理学家、诺贝尔奖获得者理查德·费曼预言，人类可以用小的机器制作更小的机器，最后变成按照人的意愿，逐个地排列原子，制造产品。

1963年，通过在纯净气体中的蒸发和冷凝过程获得了单个金属微粒的形貌和晶体结构。

20世纪70年代末，美国人发明了激光驱动气相合成数十纳米尺寸的硅基陶瓷粉末（Si、SiC、 Si_3N_4 ），从此，人类开始了规模生产纳米材料的历史。20世纪70年代末到80年代初，人类对纳米微粒的结构、形态和特性进行了比较系统的研究，在描述金属微粒方面可达电子能级状态的Kubo理论日臻完善，在用量子尺寸效应解释超微粒子等特性方面也获得了极大成功。

1982年，科学家发明研究纳米的重要工具——扫描隧道显微镜，揭示了一个可见的原子、分子世界，对纳米科技发展产生了积极的促进作用。

1984年，制备出了具有清洁界面的纳米晶体Pd、Cu、Fe等多晶纳米固体。

1987年，美国用同样方法制备了人工纳米材料 TiO_2 等晶体。

90年代初，采用各种方法制备的人工纳米材料已多达百种，其中，引起科技界极大重视的纳米粒子应属于团簇粒子。团簇的尺寸一般在1nm以下，它由几个到几百个原子构成。

1985年,美国科学家用激光加热石墨蒸发法在甲苯中形成碳的团簇 C_{60} 和 C_{70} 。

1991年,发现了完全由碳原子构成的纳米碳管。

1993年,继1989年美国斯坦福大学搬走原子团“写”下斯坦福大学英文名字、1990年美国国际商用机器公司在镍表面用36个氩原子排出“IBM”之后,中国科学院北京真空物理实验室自如地操纵原子成功写出“中国”二字,标志着我国开始在国际纳米科技领域占有一席之地。

1997年,美国科学家首次成功地用单电子移动单电子,利用这种技术可望在20年后研制成功速度和存储容量比现在提高成千上万倍的量子计算机。

1999年,巴西和美国科学家在进行纳米碳管实验时发明了世界上最小的“秤”,它能够称量十亿分之一克的物体,即相当于一个病毒的重量;此后不久,德国科学家研制出能称量单个原子重量的秤,打破了美国和巴西科学家联合创造的纪录。同时纳米技术逐步走向市场,全年纳米产品的营业额达到500亿美元。

2000年4月,美国能源部桑地亚国家实验室运用激光微细加工技术研制出智能手术刀,该手术刀可以每秒扫描10万个癌细胞,并将细胞所包含的蛋白质信息输入计算机进行分析判断。

2001年纽约斯隆-凯特林癌症研究中心的戴维-沙因贝格尔博士报道了把放射性同位素钷225的一些原子装入一个形状像圆环的微型药丸中,制造了一种消灭癌细胞的靶向药物。

2003年,美国利用超高密度晶格和电路制作的新方法,获得结密度高达 $10^{11}/\text{cm}^2$ 的铂纳米线,另外还利用自行组装的DNA分子制成了支撑蛋白质的纳米级脚手架和金属线;法国利用粉末冶金制成具有完美弹塑性的纯纳米晶体铜;日本用单层碳纳米管与有机熔盐制成高度导电的聚合物纳米管复合材料等。

纵观21世纪纳米科技的研究与发展,在纳米材料、纳米装置、纳米区域的探测与研究等方面都有较大的发展。同时全球纳米科技的研发投入也呈逐年高速增长的趋势,2005年全球纳米科技的研发投入为96亿元,2007年增至120亿元,2008年不完全统计将突破150亿元。

1.2 纳米技术的学科领域

纳米技术的发展使新名词、新概念不断涌现,像纳米材料学、纳米机械学、纳米生物学和纳米药理学、纳米电子学、纳米化学等,而且仍在不断扩大,以下简要介绍。

1.2.1 纳米材料学

观测和研究纳米材料所具有的特殊结构,包括表面粗糙度、表面结构、颗粒大小、缺陷和材料制备。在纳米尺度下,物质中电子的量子力学性质和原子的相互作用将受到尺度大小的影响,从而使其具有许多与传统材料不同的物理、化学性质。科学实验证明1g具有纳米尺寸的微粒,其表面积可达几万平方米,由于表面积增大,活

性就增强；五颜六色的金属，由于吸光能力增加而一律变成黑体，熔点也随之降低。而且纳米铁材料的断裂应力比常规材料高 12 倍；气体通过纳米材料的扩散速度比一般材料快几千倍；绝缘的二氧化硅、晶体等，在 20nm 就开始导电成为导体。人们还发现，纳米颗粒的外形会逐渐变化，粒度越小，变化越强；纳米材料中有大颗粒“并吞”小颗粒的现象，纳米颗粒与生物细胞膜的物化作用很强，因而能被细菌吞噬而产生特殊的生化效应。正由于纳米材料这些奇特的力、电、光、磁、吸收、催化、敏感等性能，而使之具有广泛而诱人的应用前景。如能得到纳米尺度的结构，就可能控制材料的基本性质如熔点、磁性、电容甚至颜色，而不改变物质的化学成分，最终实现根据材料的性能要求，设计、合成纳米复合材料。

1.2.2 纳米动力学

主要是微机械和微电机，或称为微型电动机械系统（MEMS），是集微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路、接口电路、通信和电源于一体的完整微型机电系统。用于有传动机械的微型传感器和执行器、光纤通信系统，特种电子设备、医疗和诊断仪器等。微电子技术在许多领域引发了一场微小型化革命，以加工微米、纳米结构和系统为目的的微米、纳米技术在此背景下应运而生，人们利用精细加工手段加工出微米、纳米级结构，组成 MEMS，将电子系统和外部世界有机地联系起来，它不仅可以感受运动、光、声、热、磁等自然界信号，并将这些信号转换成电子系统可以认识的电信号，而且还可以通过电子系统控制这些信号，进而发出指令，控制执行部件完成所需要的操作。例如尖端直径为 $5\mu\text{m}$ 的微型镊子可以夹起一个红细胞；可以在磁场中飞行的像蝴蝶大小的飞机等。MEMS 技术的发展开辟了技术全新的领域和产业，具有许多传统传感器无法比拟的优点，因此在航空、航天、汽车、生物医学、环境监控、军事以及几乎人们接触到的所有领域中都有着十分广阔的应用前景。

1.2.3 纳米生物学和纳米药理学

DNA 芯片或称为基因芯片实质上是一种高密度的寡核苷酸（DNA 探针）阵列。它采用在位组合合成化学和微电子芯片的光刻技术或其他方法将大量特定序列的 DNA 片段（探针）有序地固化在玻璃或硅衬底上，构成储存有大量生命信息的 DNA 芯片。DNA 芯片有可能首次将人类的全部基因（约 10 万个）集约化地固化在 1cm^2 的芯片上，目前已达到的密度是 40 万种探针/芯片，每种探针间的空间尺度是 $12\sim 20\mu\text{m}$ 。在与待测样品 DNA 作用后，即可检测到大量相应的生命信息，包括：基因识别、鉴定、基因突变和基因表达等。有了纳米技术，还可用自组装方法在细胞内放入零件或组件构成新的材料。药物，即使是微米粒子的细粉，也大约有半数不溶于水；但如粒子为纳米尺度（即超微粒子），则可溶于水。目前，DNA 芯片不作为分子的电子器件，也不作为 DNA 计算机用，主要起生命信息的储存和处理的功能。但正是基于它对生命信息进行平行处理的原理，利用 DNA 芯片可快速、高效、同时地获取空前规模的生命信息，DNA 芯片很有可能成为今后生命科学研究和医学诊断中革命性的新方法。总之，纳米技术在生物学和药理学的深入发展和广泛应用，将开辟一

个生命信息研究和应用的新纪元。

1.2.4 纳米电子学

当前电子技术的趋势要求器件和系统更小、更快、更冷，也就是说空间体积小，响应速度要快，单个器件的功耗要少。基于量子效应的纳米电子器件，纳米结构的光、电性质，纳米电子材料的表征，以及原子操纵和原子组装等为电子技术的发展提供了条件。扫描探针显微镜就是为实现这一目标而诞生的，基于扫描探针显微镜的纳米刻蚀技术，可以实现在纳米尺度上制备产品，应用于微电子的工作介质上就有可能制造出高密度的存储器，其记录密度为目前磁盘的数千倍至上亿倍。

1.2.5 纳米化学

纳米化学是研究物质在原子级水平上的化学问题，是对此范围内的物质合成、纳米物质的表征方法、物质所表现的异常行为及其应用等方面的研究。它包括纳米材料合成方法的研究、纳米复合材料的制备、纳米材料特异性质的尺寸效应及其机理的研究、纳米材料的表征与检测、纳米仿生材料的研究、纳米催化的研究、纳米材料的工业化前途等。如纳米催化剂的性能很大程度上取决于它的表面效应，表面不饱和的性质对它的选择性能有很大的影响。有资料介绍，负载型纳米非晶态合金是较理想的催化加氢材料，用 Ni-B/SiO₂ 非晶态催化剂，催化环戊二烯选择性加氢制备环戊烯反应，其转换率可达 100%，而选择性为 96% 以上。

1.3 纳米材料的研究内容

所谓纳米材料，从狭义上说，就是有关原子团簇、纳米颗粒、纳米线、纳米薄膜、纳米碳管和纳米固体材料的总称。从广义上看，纳米材料应该是三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围或由它们作为基本单元构成纳米尺寸水平的材料。

当然，纳米材料的制备所得材料首先必须是纳米级的。按传统的材料学科体系划分，纳米材料又可进一步分为纳米金属材料、纳米陶瓷材料、纳米高分子材料和纳米复合材料。

若按应用目的分类，可将纳米材料分为纳米电子材料、纳米磁性材料、纳米隐身材料、纳米生物材料等。

为了便于叙述纳米材料的主要研究内容，将从狭义的角度加以介绍。

(1) 原子团簇

原子团是由多个原子组成的小粒子，它们比无机分子大，但比具有平移对称性的块体材料小，它们的原子结构（键长、键角和对称性等）和电子结构不同于分子，也不同于块体。原子团簇的尺寸一般小于 20nm，约含几个到 10⁵ 个原子。原子团簇具有很多独特性质：

- ① 具有硕大的比表面积而呈现出表面或界面效应；
- ② 幻数效应（形状和对称性多种多样）；

③ 原子团尺寸小于临界值时的“库仑爆炸”（自旋状态改变，库仑排斥力增强）；

④ 原子团逸出功的振荡行为等。

目前，研究原子团簇的结构与特性主要有两方面的工作：一方面是理论计算原子团簇的原子结构、键长、键角和排列能量最小的可能存在结构；另一方面是实验研究原子团簇的结构与特性，制备原子团，并设法保持其原有特性压制成块，进而开展相关应用研究。

(2) 纳米颗粒

纳米颗粒是指颗粒尺寸为纳米量级的超微颗粒，它的尺度大于原子团簇，小于通常的微粉，一般在1~100nm之间。这样小的物体只能用高分辨的电子显微镜观察。为此，日本名古屋大学上田良二教授给纳米颗粒下了一个定义：用电子显微镜才能看到的微粒称为纳米颗粒。

纳米颗粒与原子团簇不同，它们一般不具有幻数效应，但具有量子效应、表面效应和分形聚集特性等。纳米颗粒的应用前景，除了光、电、磁、敏感和催化特性外，就是由5~50nm的纳米颗粒在高真空下原位压制纳米材料，或制作纳米颗粒涂层，或根据纳米颗粒的特性设计紫外反射涂层、红外吸收涂层、微波隐身涂层，以及其他的纳米功能薄膜。

(3) 纳米碳球

纳米碳球的主要代表是 C_{60} 。由此可见，60个C原子组成封闭的球形，是32面体，即由20个六边形（类似苯环）和12个五边形构成一个完整 C_{60} 。这种结构与常规的碳的同素异形体金刚石和石墨层状结构完全不同，物理化学性质非常奇特，如电学性质、光学性质和超导特性。

(4) 纳米碳管

纳米碳管是纳米材料的一支新军。它由纯碳元素组成，是由类似石墨六边形网格翻卷而成的管状物，管子两端一般由含五边形的半球面网格封口。纳米碳管直径一般在1~20nm之间，长度可以从纳米至微米量级。纳米碳管有许多特性，有强烈的应用背景，预测它们在超细高强度纤维、复合材料、大规模集成电路、超导线材和多相催化等方面有着广泛的用途。

(5) 纳米薄膜与纳米涂层

这种薄膜具有纳米结构的特殊性质，目前可以分为两类：

① 含有纳米颗粒与原子团簇-基质薄膜；

② 纳米尺寸厚度的薄膜，其厚度接近电子自由程和德布罗依长度，可以利用其显著的量子特性和统计特性组装成新型功能器件。

例如，镶嵌有原子团的功能薄膜会在基质中呈现出调制掺杂效应，该结构相当于大原子-超原子膜材料，具有三维特征；纳米厚度的信息存储薄膜具有超高密度功能，这类集成器件具有惊人的信息处理能力；纳米磁性多层膜具有典型的周期性调制结构，导致磁性材料的饱和和磁化强度的减小或增强。对这些问题的系统研究具有重要的理论和应用意义。

(6) 纳米固体材料

具有纳米特征结构的固体材料称为纳米固体材料。例如，由纳米颗粒压制烧结而成的三维固体，结构上表现为颗粒和界面双组元；原子团簇堆压成块体后，保持原结构而不发生结合长大反应的固体；原子团用高速高压气流带动等。其中，由原子团簇堆压成的纳米金属材料具有很大的强度和稳定性，并有很强的导电能力，这类材料存在大量晶界，呈现出特殊的机械、电、磁、光和化学性质。已经发现，由纳米硅晶粒和晶界组成的纳米固体材料，其晶粒和边界几乎各占体积一半，具有比本征晶体硅高的电导率和载流子迁移率，电导率的温度系数很小，这些特殊性正在被进一步研究。

(7) 纳米复合材料

增强相为纳米颗粒、纳米晶须、纳米晶片、纳米纤维的复合材料称为纳米复合材料。增强相必须是纳米级；基体可以是纳米级，也可以是常规材料。纳米第二相的加入，可提高基体的性能。纳米复合材料包括金属基、陶瓷基和高分子基纳米复合材料。复合方式有：晶内型、晶间型、晶内-晶间混合型、纳米-纳米型等。

1.4 纳米材料的发展趋势

当前纳米材料研究的趋势是由随机合成过渡到可控合成；由纳米单元的制备，通过集成和组装制备具有纳米结构的宏观实用材料与元器件；由性能的随机探索发展到按照应用的需要制备具有特殊性能的纳米材料。纳米材料的未来发展趋势将集中于以下几方面。

① 纳米材料由基础研究向技术应用转化的阶段。从纳米科技的发展程度看，纳米科技还处于基础研究向技术应用转化的阶段，通过政府的政策导向，其学科布局已全面与国家战略目标的实现结合，并正向物理、化学、新材料、信息技术、生物技术、医学、国防、环境、能源、农业与食品等领域渗透，已在众多领域取得了重大进步，一些纳米技术已经投入市场应用。特别是在国家安全、环境健康和未来产业的发展等方面，尤为突出。

② 纳米科技与其他学科的交叉融合加速。从应用发展看，纳米科技在强调多学科交叉的基础上，更加关注科学和技术的融合，以及技术的高度集成。特别是纳米技术向着与生物技术、信息技术和认知科学汇聚的方向发展，纳米科技具有高度跨学科性和综合性，生物技术和信息技术的进一步发展有赖于纳米科技的突破，纳米技术、生物技术和信息技术的联系更加紧密，这些科学技术的研究将汇聚在纳米尺度上。

③ 纳米科技逐渐转向以加工和器件为核心的材料研究。从学科发展看，纳米科技从最初纳米材料为主导的学科分布，逐渐转向以加工和器件为核心和围绕器件加工进行功能材料研究的发展态势，特别是分子开关、分子存储器、单分子整流器等原型分子器件已在实验室研制成功。预计在 20 年内，特殊用途的分子器件将得到实际应用。碳纳米管，尤其是阵列碳纳米管，已经成为一种极具前景的场致电子发射材料。碳纳米管场发射器的成熟产品将被开发出来，并将用于各种纳米电子器件的研发。

④ 纳米材料及其性能向着更加优质的方向发展，从而将有更多性能优越价格低廉的纳米粉末、纳米粒子和纳米复合材料得到更加广泛的应用。纳米材料的可控制备

与生长技术能够规模制备出尺寸、形状、密度、结构、空间位置和性能等可控的纳米材料或纳米结构，能利用微纳米结构模板和自组织生长的原理来构造具有特定功能的微纳米材料或结构。可重复的制备与掺杂等工艺和技术得到发展与完善。

⑤ 纳米材料的发展将深入生物医学领域，对疾病的诊断和治疗产生深远的影响，特别是重大疾病的早期诊断和治疗，包括可植入性和弥补性生物兼容材料、诊断器件、治疗学等，纳米材料将有更多的机会用于药物输运系统、诊断系统和治疗系统。

⑥ 新的纳米材料的集成检测和表征技术的开发。将会有新的表面、界面纳米结构的表征、测量与控制技术问世，如发展实时与原位表征方法，探索空间分辨率达到 0.1nm 的立体表征技术，发展新的单原子、单分子、单光子检测、操纵技术与方法，研制新的检测设备等。

⑦ 纳米能源材料的实际应用。纳米材料将成为化学和能源转化工艺方面具有高度选择性和有效性的催化剂。将在低成本固态太阳能电池用纳米材料与技术，高性能可充电电池（含超级电容器）用纳米材料与技术、温差电池、燃料电池等所用的纳米材料与技术研发方面取得实质性进展。这不仅对能源生产非常重要，而且对能源转换极具经济价值。

⑧ 纳米环境净化材料的推广使用。纳米光催化、净化材料，脱 SO_x 、脱 NO_x 用纳米复合材料和可再生环境净化用纳米吸附材料等的批量制备技术将获得突破，对环境保护极具经济价值。

⑨ 纳米特种功能材料的开发及实际应用。纳米特种功能纤维材料及制品，润滑及防护用纳米材料，高性能稀土纳米功能（光、电、磁性能）材料，环境、安全监测用纳米传感材料及器件，高效轻质阻燃聚合物纳米复合材料，金属、陶瓷及聚合物材料表面纳米功能化技术等获得突破，进入产业化，成为提升传统产业的主力。

⑩ 纳米结构材料的广泛应用。通过材料结构的纳米化和掺杂复合，使结构材料的各种性能得到极大提高，并逐步代替传统结构材料。纳米弥散强化、形变诱导纳米化金属制品及技术，高弹性及高模量纳米复合材料，纳米强韧化陶瓷复合材料和超塑性纳米陶瓷材料的制备与加工等均是未来几年的重点研究方向。

总体来看，纳米技术的研究目前还有许多基础问题需要研究，在纳米尺度上还有大量原理性问题尚待研究，纳米技术目前的发展水平大概相当于计算机技术在 20 世纪 50 年代的发展水平，人类最终进入纳米时代预计还需要 30~50 年的时间，50 年后纳米科技有可能像今天计算机技术一样普及。

参 考 文 献

- [1] 倪星元等. 纳米材料制备技术. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 烨子. 纳米世界. 北京: 中国艺术文化出版社, 2004.
- [3] 施利毅. 纳米科技基础. 上海: 华东理工大学出版社, 2005.