

第 1 篇



功能材料概述

第1章 功能材料的概念及特点

功能材料是指那些具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学、力学、化学、生物医学等功能，特殊的物理、化学、生物学效应，能完成功能相互转化，主要用来制造各种功能元器件而被广泛应用于各类高科技领域的材料。

功能材料是新材料领域的核心，是国民经济、社会发展及国防建设的基础和先导。它涉及信息技术、生物工程技术、能源技术、纳米技术、环保技术、空间技术、计算机技术和海洋工程技术等现代高新技术及其产业。功能材料不仅对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用，还对我国相关传统产业的改造和升级，实现跨越式发展起着重要的促进作用。

功能材料主要有以下特征：

(1) 功能材料的功能对应于材料的微观结构和微观物体的运动，这是最本质的特征。

(2) 功能材料的聚集态和形态非常多样化，除了晶态外，还有气态、液态、液晶态、非晶态、准晶态、混合态和等离子态等。除了三维体相材料外，还有二维、一维和零维材料。除了平衡态，还有非平衡态。

(3) 结构材料常以材料形式为最终产品，而功能材料有相当一部分是以元件形式为最终产品，即材料元件一体化。

(4) 功能材料是利用现代科学技术、多学科交叉的知识密集型产物。

(5) 功能材料的制备技术不同于结构材料用的传统技术，而是采用许多先进的新工艺和新技术，如急冷、超净、超微、超纯、薄膜化集成化、微型化、密积化、智能化以及精细控制和检测技术。

(6) 功能材料中，如仪器仪表材料、航空航天材料、武器装备材料等还具有高性能、多功能、多品种、产量少、附加值高、市场规模小和产品更新快等特点。

目前，现代技术对物理功能材料的需求最多，因此，物理功能材料发展最快，品种多、功能新、商品化和实用率高，在已使用的功能材料中占了绝大部分。

第2章 功能材料的分类及若干基本定义

功能材料种类繁多、用途广泛，正在形成一个规模宏大的高技术产业群，有着十分广阔的市场前景和极为重要的战略意义。

功能材料的分类可以依据材料实质上的差异来划分，也可以从形式上的不同来划分。此外，也可以从材料的应用技术领域来划分。

2.1 按传统材料的分类法分类

基于材料的物质性的分类，即按材料的化学键、化学成分分类。例如，按化学键分类为：金属功能材料、无机非金属功能材料、有机功能材料、复合功能材料。有时还按化学成分、晶体结构、显微组织再进一步细分小类、品种。

基于材料的功能性的分类，即按材料的物理性质、功能来分类。例如，按材料的主要使用性能，将功能材料大致分类为九大类：力学功能材料、声学功能材料、热学功能材料、电学功能材料、磁学功能材料、光学功能材料、化学功能材料、生物医学功能材料和核功能材料。

这些功能材料还可按其功能（效能和作用）再细分小类，即按材料在具体应用中所发挥的有利作用来细分类。如，电功能材料可按功能作用再细分类为：绝缘材料、导电和超导电材料、电阻材料、电容器材料（介电材料）、电热材料和电光材料等。

按功能材料的应用技术领域，可分为：光电材料、电工材料、太阳能材料、储氢材料、生物医学工程材料、仪器仪表材料、传感器材料和反应堆材料等。

2.2 现代功能材料的分类及发展方向

由于现代技术领域在不断变革，功能材料各学科相互交融，各层次的划分是相对的。随着功能材料科技与产业的发展，特别是21世纪信息技术的发展，功能材料分类发生了巨大的变化，也衍生出许多新兴的材料。同时，鉴于功能材料的分类有交叉、混合特点，现代科技也赋予功能材料新的定义、特征及发展方向，结合上述情况可将功能材料分为十类。

2.2.1 纳米功能材料

当物质达到纳米尺度以后，大约在 $1 \sim 100\text{nm}$ 范围内，物质的性能就会发生突变，出现特殊性能。这种既不同于原来组成的原子、分子，也不同于宏观的物质的特殊性能构成的材料，即为纳米功能材料。

发展方向：纳米技术及材料将向着与信息技术、现代生命科学和认知科学融合的方向发展，它们的融合将促进所有科技经济领域的创新和新发现。

2.2.2 新能源材料

新能源材料是指实现新能源的转化和利用以及发展新能源技术中所需的关键材料，它是发展新能源技术的核心和应用基础。从材料学的本质和能源发展的观点看，能储存和有效利用现有传统能源的新型材料也可以归属为新能源材料。主要包括以镍氢电池材料、锂离子电池材料为代表的绿色电池材料，燃料电池材料，太阳能电池材料，发展生物质能所需的重点材料，可燃冰，新型相变材料，节能材料（如 LED 发光材料）以及铀、钚、钍为代表的反应堆核能材料等。

2.2.3 生物功能材料

生物功能材料的研究在于开发生物材料的物理、化学、生物特性的应用。生物功能材料的发展可分为两个方面，即功能生物材料和仿生功能材料。功能生物材料的研究在于开发生物材料的物理、化学、生物特性的应用。仿生材料指模仿生物的各种特点或特性而开发的材料。

2.2.4 磁功能材料

磁功能材料分为软磁体功能材料、永磁材料。软磁体功能材料是指在有限时间内能产生不稳定磁场的功能材料，永磁材料是产生磁场的功能材料。

2.2.5 电功能材料

主要分为压电材料、介电材料、光电材料、热电材料和半导体材料等。

压电材料是受到压力作用时会在两端面间出现电压的晶体材料，可分为细晶粒压电陶瓷、 PbTiO_3 系压电陶瓷、压电复合材料和多元单晶压电体。介电材料又称电介质，是电的绝缘材料。光电材料是指用于制造各种光电设备（主要包括各种主动、被动光电传感器光信息处理和存储装置及光通信等）的材料，主要包括红外材料、激光材料、光纤材料和非线性光学材料等。热电材料是一种能将热能和电能相互转换的功能材料。半导体材料是一类具有半导体性能（导电能力介于导体与绝缘体之间，电阻率约 $1\text{m}\Omega \cdot \text{cm} \sim 1\text{G}\Omega \cdot \text{cm}$ ）、可用来制作半导体器件和集成电路的电子材料。

2.2.6 热功能材料

随着温度的变化,有些材料的某些物理性能会发生显著变化,如热胀冷缩、出现形状记忆效应或热电效应等,这类材料称为热功能材料。主要分为膨胀材料、形状记忆材料、测温材料等。

膨胀材料:热膨胀是指材料的长度或体积在不加外力时随温度的升高而变大的现象。常用的膨胀材料包括低膨胀材料、定膨胀材料和热双金属材料。

形状记忆材料:将该材料制成的具有某种初始形状的制品进行变形后,通过加热等手段处理时,制品又恢复到初始形状。形状记忆材料通常包括形状记忆合金、形状记忆聚合物、形状记忆陶瓷。

测温材料应满足四个基本要求:①材料的某种性质应是温度的单值函数,最好是线性的;②有较强的输出信号;③有较好的测温稳定性和较宽的测温范围;④易于制作成组织性能均匀的丝、片材。对热电偶电极材料,还要求有小的电阻系数和电阻温度系数;对热电阻用感温材料则要求有大的电阻系数和电阻温度系数,受磁场影响小。它包括贵金属热电偶电极材料和热电阻用贵金属感温材料。

2.2.7 光功能材料

光功能材料指在外场(电、光、磁、热、声、力等)作用下,利用材料本身光学性质(如折射率或感应电极化)发生变化的原理,去实现对入射光信号的探测、调制以及能量或频率转换作用的光学材料的统称。按照具体作用机理或应用目的之不同,可把光功能材料进一步区分为电光材料、磁光材料、弹光材料、声光材料、热光材料、非线性光学材料以及激光材料、光导纤维等。

发展方向:①固体激光材料;②光纤,如石英玻璃光纤、多组分玻璃光纤、高双折射偏振保持光纤、单偏振光纤、各种传感器用光纤等;③长余辉发光材料;④光子晶体,如发光二极管、光波导、微波天线、光子晶体光纤、抗手机辐射、光子晶体超棱镜、光子晶体偏振器。

2.2.8 生态环境材料

生态环境材料是指那些具有良好使用性能和优良环境协调性的材料。

其发展方向是:①减少人均材料流量,减少材料集约化程度;②减少寿命周期中的环境负荷,使用生态化的生产工艺;③开发天然能源,使用储量丰富的矿物和天然材料;④避免使用有害物质,使用“清洁”材料;⑤使用长寿命材料,强化再生利用,强化生物降解性等。

2.2.9 功能复合材料

功能复合材料是指除机械性能以外还提供其他物理性能 of 的复合材料。功能复合材料主要由功能体或增强体及基体组成。功能体可由一种或一种以上功能材料组成，多元功能体的复合材料可以具有多种功能，同时还有可能由于复合效应而产生新的功能。多功能复合材料是功能复合材料的发展方向。

2.2.10 其他新型功能材料

智能材料还没有统一的定义。不过，现有的智能材料的多种定义仍然是大同小异。大体来说，智能材料就是指具有感知环境（包括内环境和外环境）刺激，对之进行分析、处理、判断，并采取一定的措施进行适度响应的智能特征的材料。一般说来，智能材料有七大功能，即传感功能、反馈功能、信息识别与积累功能、响应功能、自诊断能力、自修复能力和自适应能力。构成智能材料的基本材料组元有压电材料、形状记忆材料、光导纤维、电（磁）流变液、磁致伸缩材料和智能高分子材料等。

超材料“Metamaterial”是21世纪物理学领域出现的一个新的学术词汇，近年来经常出现在各类科学文献。一般文献中都认为Metamaterial是“具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料”。其发展方向是零折射率超材料，即超材料可吸收所有光线等。

第3章 功能材料的发展简史、现状及趋势

3.1 功能材料的发展历史

功能材料的概念是美国J.A.Morton于1965年首先提出来的。20世纪60年代以来，各种现代技术的兴起，强烈刺激了功能材料的发展。同时，由于固体物理、固体化学、量子理论、结构化学、生物物理和生物化学等学科的飞速发展以及各种制备功能材料的新技术和现代分析测试技术在功能材料研究和生产中的实际应用，许多新功能材料不仅已经在实验室中研制出来，而且已经小批量生产和得到应用，并在不同程度上推动或加速了各种技术的进一步发展。

20世纪七八十年代以来，材料发展出现了新的动向，结构材料与功能材料

的关系发生了根本性的变化。随着电力技术的发展,电工冶金、金属磁功能材料和金属电功能材料已得到较大的发展。50年代随着微电子学技术的发展,半导体电子功能材料迅速发展。60年代出现激光技术,光学材料面貌为之一新。70年代光电子材料,80年代形状记忆合金、储能材料得到迅速发展。90年代电子信息、能源、制造业技术的发展,特别是国防科技及武器装备的发展需要推动功能材料快速发展。20世纪末期到21世纪初期(“九五”“十五”期间),“863”“973”、国家自然科学基金等开辟了计算机材料、稀土功能材料、生物医用材料、超导材料、储氢等新能源材料、金刚石薄膜、高性能固体推进剂材料、红外隐身材料、材料设计与性能预测等功能材料新领域,取得了一批接近或达到国际先进水平的研究成果。

2005—2010年,轨道交通、电子通信、新能源、航空航天发展迅猛,新能源材料、电子信息材料、半导体材料、纤维复合材料、生物功能材料、电磁屏蔽材料、轻质高强铝合金和镁合金等新型功能材料企业及产业化基地逐步建成并投产。

3.2 国外功能材料发展现状及趋势

3.2.1 国外功能材料发展现状

目前,以功能材料为核心的新材料产业已被公认为是全球最重要、发展最快的高新技术产业之一,尤其是新型功能材料,对工业、农业、交通、信息、国防以及其他高新技术产业的发展具有毋庸置疑、不可替代的支撑作用。当前功能材料及其应用技术正面临新的突破,诸如超导材料、微电子材料、光子材料、信息材料、能源转换及储能材料、生态环境材料、生物医用材料及材料的分子、原子设计等正处于日新月异的发展之中,发展功能材料技术正在成为一些发达国家强化其经济及军事优势的重要手段。在全球新材料研究领域中,功能材料约占85%以上,世界各国均十分重视功能材料的研发与应用,它已成为世界各国新材料研究发展的热点和重点,也是世界各国高技术发展中战略竞争的热点。

仅就2014年而言,美国在纳米功能材料、生物功能材料、特种金属功能材料以及非金属材料领域获得多项突破。英国纳米功能材料的石墨烯研究应用依

然领先，其他新型材料研究及应用取得新成果。德国成功研发人造骨髓、离子液体聚合物智能薄膜、钢铝混合化合物等新材料。俄罗斯在世界上首次使用可吸收血管支架，培育出可制造软骨组织的人工材料；开发出具有防窃听功能的复合涂层。法国研制出可吸收污染物的纳米管海绵、高导电性有机金属材料以及一种新结晶形式“冰十六”。加拿大研制出先进“隐形”伪装布料，设计出可显著降耗的纳米光缆。韩国在太阳电池和可穿戴电子装备的可用材料方面取得突破。日本开发出世界上最耐热的生物塑料、高强度医用凝胶和更节省稀土的磁石制造技术。

根据统计，2014年新材料技术产业在世界市场的销售额预计超过10 000亿美元，其中功能材料约占80%。某些特种功能材料就其单项而言，市场也是巨大的。2014年信息功能陶瓷材料及其制品的世界市场销售额已达800亿美元。2014年半导体材料市场规模增长3%，收入增长10%，销售额达443亿美元，其中高温超导电力设备的全球销售额达250亿~260亿美元，到2020年，全球与超导相关产业的产值可能达到1 500亿~2 000亿美元，其中高温超导占60%。2010年全球钕铁硼永磁材料的市场需求量达13.4万t，产值达80亿美元，带动相关产业产值700亿美元。生物医用材料是一个正在迅速发展的高技术领域，2014年全球生物医用材料及制品的产值超过1 000亿美元，美国约400亿美元，是美国经济中五种高技术关键新材料产业之一，近年来生物医用材料一直保持每年20%以上的速率持续增长。随着可持续发展政策被各国政府广泛采纳，生态环境材料的市场需求迅速增加，2015年的社会需求高于800亿美元。可见，在全球经济中，功能材料无论是需求规模，还是需求的增长速度，都相当惊人。

3.2.2 国外功能材料产业发展趋势

1. 美国发布《材料基因组战略规划》

2014年12月美国发布了《材料基因组战略规划》，预计该规划的执行时间在2015—2018年。在资金投入方面，美国联邦政府已投入2.5亿美元用于基础设施研发和创新，预计未来投资将持续加大。《材料基因组计划战略规划》以国家层面最高级规划的形式保证后续实施。其目标是：将发现、发展、生产和部署先进材料的速度提高2倍（由原来的10~20年缩减到5~10年），并将成本

降为原来的一小部分。这个战略规划将协调和指导联邦政府的投资和研发活动，为其的发展指明方向。该战略规划公布了9大材料类别研究领域下的63个重点方向，其中树脂基复合材料、关联材料、电子和光子材料、储能材料以及轻质结构材料这5类材料涉及的37个重点方向对国家安全影响重大。

2. 俄罗斯公布《2030年前材料与技术发展战略》细节

俄罗斯联邦政府所属的军事工业委员会科学技术委员会在2012年批准了全俄航空材料研究院及其他合作研究机构合作制定的《2030年前材料与技术发展战略》，该战略预期执行时间为2014—2030年。从2014年开始实施，5年内总拨款规模约500亿卢布。2014年1月开始，该战略的重点材料发展方向相继公布，主要有18个战略发展方向，包括智能材料、金属间材料、高温金属材料、聚合物材料、纳米结构复合材料和涂层等，战略本身将附带10个主要计划。在18个战略发展方向中，约80%的方向与发动机研制和现代化有关，主要有以下五个方面：单晶耐高温合金发动机叶片、自组织纳米复合材料涂层、高梯度定向结晶技术、真空熔炼技术、发动机材料与国际标准接轨。

3. 欧盟发布石墨烯旗舰计划首份招标公告和科技路线图

2014年2月欧盟发布石墨烯旗舰计划，预期执行时间2013—2020年。资金投入方面分两个阶段进行：初始阶段（2013年10月1日至2016年3月31日）共资助5400万欧元，稳定阶段（2016年4月开始）预计每年资助5000万欧元。2014年2月初，欧盟未来新兴技术(FET)石墨烯旗舰计划发布了首份招标公告和科技路线图，介绍了拟资助的研究课题和支持课题，以及根据领域划分的工作任务，每项课题都涉及多项工作任务。根据路线图，石墨烯旗舰计划将分初始热身阶段和稳定阶段两部分进行，主要包括新兴传感技术与生物学的融合、面向射频应用的无源组件、高频电子学三个重点方向。

4. 欧盟制定“欧洲冶金计划”

2014年9月欧盟制定“欧洲冶金计划”，预期执行时间2014—2020年，预计该计划总经费投入10亿欧元。2014年9月9日，欧洲空间局联合一些知名研究机构和超过180家欧洲公司，在伦敦科学博物馆正式启动名为“欧洲冶金”计划的研究，旨在发展21世纪新型金属及其制造技术，参与该计划的有空客、罗罗、西门子、BAE系统公司等大型公司。“欧洲冶金”计划将围绕13个主题开展研究，

包括用于空间和核系统的新型耐热合金、基于超导合金的高效电源线、可将废热转化为电的热电材料、生产塑料和药物的新型催化剂、用于医疗移植的生物相容性金属以及高强度的磁系统等。

5. 日本最大碳纤维供应商东丽公司制定中远期碳纤维计划“AP-G 2016”

2014年2月日本最大碳纤维供应商东丽公司制定中远期碳纤维计划“AP-G 2016”，预期执行时间2014—2017年。从2014年开始，在三年内投资1800亿日元用于技术开发，另外投资4000亿日元用于资产建设。截至2017年3月，计划实现销售额2.3万亿日元，净利润1800亿日元。

从世界各国关于材料的规划来看，功能材料的研究极为活跃，充满了机遇和挑战，而新技术、新专利层出不穷。发达国家企图通过知识产权的形式在特种功能材料领域形成技术垄断，并试图占领我国广阔的市场，这种态势已引起我国的高度重视。

3.3 我国功能材料产业发展现状和趋势

3.3.1 我国功能材料产业发展现状

功能材料作为新材料领域的核心，历来得到我国各级政府和社会各界的高度重视和大力扶持。自2010年以来，我国功能材料产业规模稳步增长，由2010年5500亿元增长至2014年13000亿元左右。而在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》、“863”“973”“国家自然科学基金”“国家重点支持的高新技术领域”等计划中都将功能材料作为重点发展内容。在“九五”“十五”国防计划中将特种功能材料列为“国防尖端”材料。在“863”计划支持下，开辟了超导材料、平板显示材料、稀土功能材料、生物医用材料、储氢等新能源材料，金刚石薄膜，高性能固体推进剂材料，红外隐身材料，材料设计与性能预测等功能材料新领域，取得了一批接近或达到国际先进水平的研究成果，在国际上占有了一席之地。

近年来，我国也在新型稀土永磁材料、生物医用材料、生态环境材料、催化材料与技术等领域加强了专利保护。虽然从2014年的专利授权总数看我国仅次于美国，但是，我国目前功能材料的创新性研究不够，申报的专利数，尤其是具

有原创性的国际专利存量数与我国的地位远不相称。我国功能材料在系统集成方面也存在不足,有待改进和发展。功能材料是关系到我国能否顺利实现第三步战略目标的关键新材料,在国家政策的引导下,通过采用新的制备技术和学科交叉来提高已有基础性功能材料及器件的技术水平、功能特性和产业规模;跟踪国外技术发展与创新相结合,功能材料的发展和应用已向清洁高效能源技术、环境技术等重要领域扩展,材料的环境适应性和极限使用性能日益受到关注;在新型功能材料、光电子材料与器件、纳米和薄膜材料与器件、智能材料与工程结构技术等方面的研发与产业化已经取得了重要发展。

3.3.2 我国功能材料产业发展趋势

我国作为一个13亿人口的大国,正在实施宏伟的发展战略,这一根本国情加之功能材料在经济社会发展中的重要作用和地位,决定了我国对功能材料的需求将是巨大的。

功能材料不仅是发展我国信息技术、生物技术、能源技术等高技术领域和国防建设的重要基础材料,而且是改造与提升我国基础工业和传统产业的基础,直接关系到我国资源、环境及社会的可持续发展。

我国国防现代化建设一直受到以美国为首的西方国家的封锁和禁运,所以我国国防用关键特种功能材料是不可能依靠进口来解决的,必须要走独立自主、自力更生的道路。如军事通信、航空、航天、导弹、热核聚变、激光武器、激光雷达、新型战斗机、主战坦克以及军用高能量密度组件等,都离不开特种功能材料的支撑。特种功能材料也是我国核电、电子、建筑、造船等领域产业升级的重要功能材料。我国当前已进入重化工业阶段,汽车、机械、石化、航空、航天、军工和铁道等行业迎来快速发展,对高性能特种功能材料的需求量将大幅增长。目前国内大量依赖进口,极大限制了相关行业的发展。高性能特种功能材料行业发展趋势是技术提升、结构调整、品种优化、质量提高、淘汰落后;企业重组、产业集中和产品优化。节约资源、节约能源、保护环境是特种功能材料的发展方向,产品将向特、精、高的方向发展,向深加工、高附加值发展,企业向低成本、高效率、生态型发展;部分不符合市场需求的产品和中小型企业将最终退出市场。随着互联网、移动通信等新一代电子信息技术迅速崛起,作为一大批基础电子元器件技术核心的信息功能材料将日益成为

我国发展相关高技术的需求重点。按照 5% 的世界市场占有率计，2014 年我国信息功能材料及制品的年销售额达 600 亿元，对信息通信产业发展具有举足轻重的作用。

我国能源（超临界、超超临界大型火电机组、大型民用核电站等）、冶金、航空航天、石油化工、煤化工等行业重大装备技术升级，以及电动汽车、物联网等行业的发展，对新能源材料及元件提出了高精度、大容量、长寿命（10 年以上）、大功率充放电等特殊要求。

随着我国人民生活质量的进一步改善和提高，我国潜在的生物医用材料市场将很快转化为充满勃勃生机的现实市场，从而创造出巨大的社会效益，成为国民经济的一个支柱产业。

近年来，功能材料成为材料科学和工程领域最为活跃的部分。每年以 20% 以上的速度增长，相当于每年有近 1.25 万种新材料问世。未来世界需要更多的功能材料，功能材料正在渗透到现代生活的各个领域。

第 2 篇



纳米功能材料

第1章 绪论

1959年，著名理论物理学家、诺贝尔奖获得者费曼曾预言：“毫无疑问，当我们得以对纳微尺度的事物加以操纵的话，将大大地扩充我们可能获得物性的范围”。同时又提出疑问“如果有朝一日人们能把百科全书储存在一个针尖大小的空间并能移动原子，那么这将给科学带来什么？”这就是关于纳米技术“小尺寸大世界”的著名预言。

1991年，IBM的首席科学家Armstrong曾预言：“我们相信纳米技术将在信息时代的下一个阶段占中心地位，并发挥革命的作用，正如20世纪70年代初以来微米技术已经起的作用那样。”

1993年，诺贝尔物理学奖获得者在给江泽民的一封信中提到：“我确信纳米科技已经具有了150年前微米科技所具有的希望和重要意义。150年前，微米成为新的精度标准，并成为工业革命的技术基础，最早和最好学会并使用微米技术的国家都在工业发展中占据了巨大的优势。同样，未来的技术将属于那些明智地接受纳米作为新标准，并首先学习和使用它的国家。”

著名科学家钱学森也预言：“纳米和纳米以下的结构是下一个阶段科技发展的一个重点，会是一次技术革命，从而将是21世纪又一次产业革命。”

这些预言十分精辟地指出了纳米技术的地位和作用。

1.1 纳米科技的兴起

1990年在美国巴尔的摩召开了第一届纳米科技会议，把国际上采用的0.1~100nm的加工技术的公差作为纳米技术的标准，统一了定义。会议正式提出了一系列与纳米材料学、纳米生物学、纳米电子学和纳米机械学相关的术语与概念，从此以后，纳米科技迅速崛起。所谓“纳米科技”，就是在0.1~100nm的尺度上，研究原子、分子和其他类型物质的运动和变化的科学；同时在这一尺度范围内对原子、分子等进行操纵和加工的技术，又称为纳米技术。其基本含义是在纳米尺寸($10^{-9} \sim 10^{-7}$ m)范围内认识和改造自然，通过直接操作原子和分子创制新的物质和器件。

纳米技术是21世纪科技产业革命的重要内容之一，主要包括创造和制备性能优异的纳米材料，制备各种纳米器件和装置，探测和分析纳米区域的性质和现

象。纳米技术可以与工业革命相比拟，是物理、化学、生物学、材料科学和电子学高度交叉的综合性学科，不仅包含以观测、分析和研究为主线的基础学科，还有以纳米工程与加工学为主线的技术科学，所以纳米技术是融前沿科学与高技术为一体的完全体系。

1.2 纳米功能材料的定义

纳米材料是纳米科技领域最富有活力、研究内涵十分丰富的学科分支，在纳米技术出现和飞速发展的几十年期间，纳米材料所具备的优异物理和化学性质使其不断地拓展到材料、生物、农业、能源和国防等众多领域，并伴随着计算机技术、核分析技术、扫描隧道显微镜技术和微电子技术等现代技术的发展，进入了突飞猛进的发展时期，新型纳米材料层出不穷。

我国在国际上率先制定了《纳米材料术语》标准（GB/T 19619—2004），将纳米材料定义为：物质结构在三维空间至少有一维处于纳米尺度，或由纳米结构单元组成且具有特殊性质的材料。其中，纳米尺度是指在 $1 \sim 100\text{nm}$ 范围内的几何尺度；纳米结构单元是指具有纳米结构特征的物质单元，包括稳定的团簇或人造原子团簇、纳米晶、纳米微粒、纳米管、纳米棒、纳米线、纳米单层膜及纳米孔等。

当材料尺寸达到纳米尺度以后，由于组成单元的尺度小，界面占用相当大的成分，物质的性质会发生突变，产生许多奇异现象。例如，当尺寸降到纳米尺度以后，具有良好导电和导热特性的铜和银导电、导热特性消失，铁、钴、镍等磁性材料自发磁化取向完全一致，形成单磁畴。这些由纳米尺寸构成的体系所呈现的特殊性质不同于通常的大块宏观体系，这种具有既不同于原来组成的原子、分子，也不同于宏观物质的特殊性能的材料，即为纳米功能材料。值得注意的是，如果仅仅是尺度达到纳米尺度，而没有呈现出特殊性能的材料，不能叫纳米功能材料，二者缺一不可。

随着材料科学与微加工技术的进步，功能材料已开始由天然物质向人工设计的结构发展，材料组成由单一型向复合型、杂化型转化，颗粒大小由微米级向纳米级过渡，同时也赋予了材料许多功能性特征，为寻找和制造具有特异功能的新材料开辟了道路。

纳米功能材料的研究涉及原子物理、凝聚态物理、胶体化学、固体化学、界面科学等多学科，在不同学科有不同的称谓，在材料学中称之为超微颗粒，在晶体学中称之为微晶，原子分子物理学中称之为团簇，理论物理学中称之为量子点，

胶体化学中称之为胶体微料，生物领域称之为超分子结构。纳米功能材料的研究手段主要是通过纳米合成发展新的纳米材料，通过纳米添加制备纳米复合材料，通过纳米功能化使传统材料进行改性，不断扩大纳米功能材料的应用范围，为诸如陶瓷、晶体、导体、生物医学、建筑行业等注入新鲜血液。

1.3 纳米功能材料的分类

纳米材料的主要特征在于组成单元尺度小，从三维外观尺度上对纳米材料进行分类是最典型的分类方法。纳米材料的基本单元按维数可以分为零维纳米材料、一维纳米材料、二维纳米材料和三维纳米材料。

零维——空间三维尺度均处于纳米尺度范围内，例如纳米粒子 (Nano-particle)、超细粒子 (Ultrafine particle)、超细粉 (Ultrafine powder)、烟粒子 (Smoke particle)、人造原子 (Artificial atoms)、量子点 (Quantum dop)、原子团簇 (Atomic cluster) 及纳米团簇 (Nano-cluster) 等。

典型的零维纳米材料是纳米颗粒，又称纳米尘埃、纳米尘末，指纳米量级的微观颗粒，是一种介于原子、分子与宏观物体之间处于中间物态的固体颗粒材料，它被定义为至少在一个维度上小于 100nm 的颗粒。小于 10nm 的半导体纳米颗粒，由于其电子能级量子化，又被称为量子点。

纳米颗粒具有重要的科学研究价值，它搭起了大块物质和原子、分子之间的桥梁。目前观测到了一些特殊的物理性质，例如：半导体纳米颗粒的量子束缚，一些金属纳米颗粒的表面等离子体共振，磁性材料的超顺磁性。它的形态可能是胶体态、聚合物、陶瓷颗粒、金属颗粒和碳颗粒。纳米颗粒越来越多地应用于医学、防晒化妆品等中。

原子团簇是 20 世纪 80 年代发现的，指几个至几百个原子的聚集体（粒径小于或等于 1nm），代表了凝聚态物质的初始状态，最典型的原子团簇是碳簇 (C_{60} 、 C_{70})。原子团簇有许多特殊的性质，具有超高的化学活性和催化活性，这都源于其结构上的特点——尺寸小、处于表面的原子比例极高。

一维——指在空间上有两维处于纳米尺度范围内，例如纳米线、纳米棒、纳米管、纳米丝等。

一维的纳米纤维指直径为纳米尺度，而长度大的管状、线状或棒状的纳米材料，碳纳米管就是一种典型的一维纳米材料，具有较好的导电性能和导热性能。碳纳米管可以制成透明导电的薄膜，用以代替氧化铟锡 (ITO) 作为触摸屏的材料。

二维——在三维空间上只有一维在纳米尺度范围内，典型的二维纳米材料

有薄膜、多层膜、超晶格材料等。

由单层碳原子构成的石墨烯是典型的二维纳米材料，石墨烯的厚度仅为一个碳原子，具有非凡的电子、热学和力学性能，不仅是迄今为止最薄的一种材料，而且是最为牢固、室温下电子传递速度最快的材料，有可能代替硅用于超级计算机。

富勒烯 C_{60} 、碳纳米管、石墨烯分别是典型的零维纳米材料、一维纳米材料、二维纳米材料，这三种典型碳纳米材料的结构如图 2-1-1 所示。

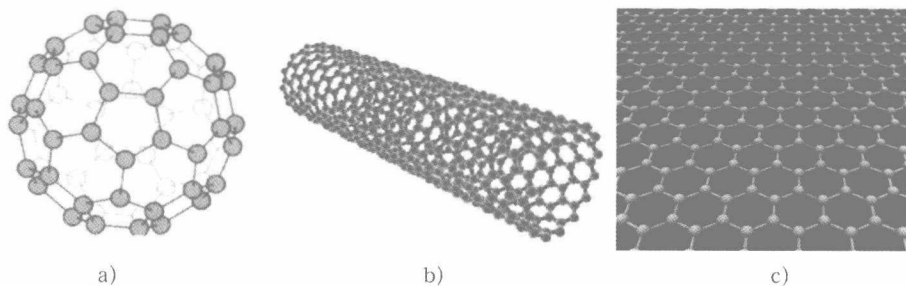


图 2-1-1 三种典型碳纳米材料的结构图

a) 富勒烯 C_{60} b) 碳纳米管 c) 石墨烯

三维——指在三维空间中含有上述纳米材料的块体，如纳米玻璃、纳米陶瓷、纳米介孔材料、纳米金属、纳米高分子等。

三维的纳米块体是将纳米粉末高压成型或控制金属液体结晶而得到的纳米单元聚集体材料，主要用途为超高强度材料、保温隔热材料、智能或特种功能材料等。

典型的三维纳米材料当属纳米陶瓷。纳米陶瓷是指陶瓷材料的显微结构中，晶粒、晶界以及它们之间的结合都处于纳米量级水平，包括晶粒尺寸、晶界宽度、第二相分布、气孔与缺陷尺寸等都是纳米级。纳米晶陶瓷材料不仅保持了传统陶瓷材料的优点，又克服了陶瓷易脆的缺点，其良好的力学性能可与超塑性材料相媲美。

以上提到的纳米颗粒、原子团簇、纳米线、纳米棒、纳米薄膜、纳米管等是指材料本身就是纳米尺度，也就是所谓的狭义的纳米材料，而有些材料是以纳米结构作为单元而构成的，例如纳米复合物、纳米介孔材料、纳米固体等，即具有纳米结构的材料，称为纳米结构材料。

纳米材料还可以按结构分类，可分为纳米微粒、纳米固体、纳米纤维、纳米薄膜等。