

纳米技术及其对科技产业革命的影响

袁俊

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

[摘要] 2000年2月美国制定了“国家纳米技术战略”,引起世界各国的巨大反响,日本、欧洲的工业先进国家先后制定了纳米技术发展规划。纳米科技这一崭新的前沿学科,被视为新一轮材料革命的核心,在航空航天领域将产生重大影响。文章综述了纳米技术的概念、纳米材料及纳米技术的研究情况。

[关键词] 纳米技术; 纳米材料; 研究计划

2000年1月12日,美国时任总统克林顿在国会演讲,提出了发展纳米技术的倡议;2月7日发表了美国国家纳米技术发展战略报告,标题是“面对第二次产业革命”,该报告涵盖了众多技术领域,并将纳米技术视为下一次工业革命的核心,认为发展纳米技术对保持美国科学技术和经济在全世界的领先地位非常重要,并期望纳米技术成为美国新经济时代新一轮革命的助推器。美国全国科学基金会、国防部、能源部、商务部、航空航天局和国家卫生研究中心等机构,正在进行纳米技术的研究开发,2000财年投入资金2.9亿美元,2001财年投资将增加84%,达到4.97亿美元。美国国家科学技术委员会在1999年1月设立纳米技术工作小组,同年9月提出国家纳米技术主导权计划(NINI),2000年7月宣布实施纳米技术创新工程。美国政府已把纳米技术作为最优先考虑的战略。美国的这一举动,震撼了世界。

1 纳米技术的概念

一个原子的大小约为0.1 nm;由10个原子组成的零件,其尺寸为1 nm左右;由这样的零件构成的机器尺寸,在几百纳米之内,就是纳米世界。它是人们熟悉的微米世界的1/1 000,二者的体积则相差 10^9 倍。

纳米是长度计量单位,单位符号是“nm”, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ 。任何材料用技术手段被细化到这一量级,它的物理化学性能即发生巨大的变化,其潜在的巨大原始能量具有极高的活性。纳米材料的强度、硬度、电阻率、比热和热膨胀系数高,密度、弹性模量和热传导率低,扩散性强,可裂性、韧性和软磁性优良,能从“量变到质变”。

纳米技术是在0.1~100 nm空间内,以电子、原子和分子为研究对象,包括纳米材料学、纳米机械学、纳米电子学、纳米显微学、纳米生物学和纳米制造工艺学等。它是20世纪80年代末诞生并崛起的一门崭新的前沿科技。其涵义是在纳米尺寸内认识和改造自然,最终目标是直接操纵安排原子分子来制造具有特定功能的产品,创造新物质;其研究领域是人类过去很少涉及的非宏观非微观事物的中间领域,从而开辟人类认识的新层次和新纪元。

当代高科技领域,多采用微米技术,即产品的指定技术性能是通过基本材料、元件在微米尺寸上的结构设计、加工及装配来实现的。例如超大规模集成电路、电脑芯片等,其联接导线的直径只有十分之几微米。纳米技术是研究电子、原子和分子的运动规律和特性,在纳米尺寸上设计、加工、调整或组装元件的多学科交叉的综合工程技术,其核心是利用纳米材料所具有的特殊性能来实现微米世界

所不能达到的功能和用途。一个原子的大小约为 1 nm 的 1/10, 故纳米技术也就是通过设计、控制单个原子或分子, 并在纳米结构的表面、空间或其内部重新进行原子或分子的排列组合, 以构建超微型的各种装置, 例如分子开关、分子轴承、量子电路、分子马达乃至机器人。这种机器人小到可以进入人的血管去完成各种工作, 能够进入生物体内治疗和修复细胞的超微型分子医疗器械将不再是梦想。目前国外已研制出直径 76.2 μm 的静电马达, 转速 24×10^4 r/min, 最高转速 60×10^4 r/min。

材料制造设备和精密仪器技术的发展, 特别是扫描隧道显微镜 (STM) 问世后, 其分辨率已达 0.1~0.01 nm, 使纳米技术具备了可操纵单个原子的能力。通过电子显微镜、原子显微镜、STM 和纳米扫描探针等, 人们可以直接看见和操纵单个的原子, 以创造出具有新的分子组织结构的材料、装置和生产方法。美国 IBM 公司苏黎世实验室已研制出可以在固体表面控制液体流动的旋转分子。

纳米技术将启动新的工业技术革命, 它将对材料与加工、电子与计算机技术、医药与生物工程技术、环境与能源以及航空航天等领域产生重大影响, 并给人类带来革命性的应用领域并实现梦想。纳米技术作为发现量子效应的人工结构技术, 其本质是用量子论来支配世界, 其物质材料的运动规律受量子理论的主宰。它不只是向小型化迈进, 而是跨进了一个崭新的微观世界。纳米技术将带来信息时代的新一轮技术革命, 其震撼力不会亚于自 20 世纪 70 年代开始的微电子技术。

2 纳米材料、纳米结构及其发展

在纳米领域内, 物质的基本性能是确定的和能够操纵的。纳米材料是纳米技术的基础。继 1991 年发现纳米管后, 相继有纳米硅线、纳米金属线等纳米材料被合成。新一代读写磁头, 利用厚度 2 nm 的金属薄膜材料实现了高性能。纳米技术未来最可能在众多领域取得突破, 并获得重大成就。将会出现强度是钢的 100 倍的材料、具有顺磁性或超导性的材料、透明材料和更高熔点的材料。未来人类还可能开发出模拟生物系统、能够适应环境变化、自动修复磨损和及时对将要出现的破坏发出警报的智能材料, 甚至可以合成自然界中没有的物质材料, 并且这些物质材料的结构具有可设计性。

1985 年以前, 人们知道碳元素有两种同素异

形体——金刚石和石墨。金刚石是立体状结构, 石墨是层状结构。1985 年美国科学家罗伯特·柯尔 (Robert F. Curl)、理查得·斯莫利 (Richard E. Smalley) 和英国科学家哈罗德·可罗托 (Harold W. Kroto) 在一次太空碳分子实验中, 发现了碳元素的新结构——富勒式结构, 称为 C_{60} 。这种新原子结构是一种空心笼状结构, C_{60} 的直径为 0.7 nm, 可以容下任何元素的原子。每个碳分子由 60 个碳原子组成, 60 个碳原子在球面上排列成等边五角形和等边六角形相间的网状。 C_{60} 的发现将促进人类对整个化学和科学技术领域认知的革命, 其影响是巨大的。科学家可将这种结构作为一个“容器”, 当装进不同种类和数量的其他原子, 就可创造出任何元素的原子。

1991 年, 日本科学家饭岛澄在石墨放电中发现了纳米管。纳米管的原子结构像是由碳原子一层层卷成的六角形网状空心管。目前世界上最小的纳米管直径只有 0.4 nm。当纳米管的直径小到 0.4 nm 时, 所有的纳米管都呈金属导电性。由于纳米结构的这一特性, 可以将最小的纳米管抽出来, 做成最小最细的金属导线, 这将成为一个真正的点电子源。同样的结构, 也是一个分子轴承。

纳米管 (也叫布基管) 和碳 60 分子即 C_{60} (也叫布基球) 是纳米技术领域目前发展最快、最有前景的纳米材料。纳米管目前大多由碳分子制成, 所以也称之为纳米碳管。

20 世纪的技术革命, 在很大程度上是靠弄清更加微观的现象并在此基础上发展其支持技术。但是这种基于宏观角度去观察微观世界的传统理论技术, 在很多领域遭遇理论极限。在物质世界, 传统理论无法解释物质结构的某一维度 < 100 nm 的物质运动规律。微米结构按现有技术发展下去, 从理论上讲, 终将达到极限。半导体元器件的极限是 50 nm。以超大规模集成电路为例, 如把电路联接导线的直径变小, 会使电路的绝缘膜厚度变薄, 破坏绝缘效果, 而且还存在电路发热和信息闪烁问题。如果没有与传统技术根本不同的新的科学发现, 技术革命就无法突破和前进。

目前在纳米范围内主要研究领域为^[1]:

1) 纳米物质结构在不改变材料化学成分的条件下, 如何控制物质的基本特性, 如电磁性能、蓄电能力和催化能力, 以及电子与原子交互作用受到变化因素的影响。

2) 纳米材料和生物机制相兼容, 使人类模拟自然的生物系统组织和构造。由于生物细胞和生物膜内存在纳米级的结构, 作为细菌运动器官的鞭毛马达直径约为 20 nm, 把人造组件和装配系统放入生物细胞中, 以构造出分子结构经过设计和调整的新型生物材料。

3) 纳米容器如何实现剂量可控释放。纳米组件具有很大的表面积, 这能使它们成为理想的催化剂和吸收剂, 并在释放电能和向人体细胞输入药剂方面取得突破。

4) 高强度复合材料和超级材料科学。纳米材料由于体积缩小, 具有很高的表面能量, 所以不会产生表面缺陷, 因而其强度和柔韧性空前提高, 有弹性的金属化合物在轻微弯曲后, 还能复原, 对航空航天领域极为有益。

5) 用量子元件代替微电子器件, 用以解决微米结构的极限问题。因为纳米结构由于在各个维度上的量级极小, 互动作用时间短, 可为人类提供更有效的、作为新型电子元器件基础的系统。美国 Rice 大学的计划是在边长为 8.5 mm 的立方体内, 开发有几十亿个纳米晶体管的超微处理器和可以自发为自己编程序的“分子器件”, 并通过 1 000 根输入/输出线与外部相联。

纳米管和碳 60 无疑是最受瞩目和青睐的纳米材料, 纳米管是把碳分子气化, 并用钴和镍处理后得到的长分子串。它的薄壁是单原子层, 碳原子排列成六边形的网状结构, 由于其几何结构特殊, 因而具有一系列特殊的性能, 可以应用到电子、机械、医药、能源、化工等工业技术领域。用纳米管元器件代替芯片, 将引发计算机技术的又一次革命。

在力学性能上, 由于纳米管的完美无缺, 因而具有接近自然界物质材料的理论上的最高强度。纳米管作为结构单元, 产生材料缺陷的机会少, 其强度比钢高 100 倍, 质量只有钢的 1/6, 导热和导电性均优于铜。这一优越性将使纳米管在复合材料领域产生重大影响。纳米管在航空航天领域的应用前景极为广阔, 它将提高喷气发动机的性能, 使涡轮风扇能够自动修复微小的应力裂痕。纳米材料可作为飞机、火箭、空间站使用的轻质、高强度、热稳定的材料。美国国家航空航天局 (NASA) 希望, 航天器使用纳米材料后, 到 2020 年, 发射费用将从目前的 10 000 美元/磅降低到 200 美元/磅, 并

将制造出只有小轿车大小的航天器, 而费用只需 60 000 美元。

纳米管有序自组装复合结构是理想的一维导电材料, 其径向不导电, 纵向导电性比铜好, 使之具有极好的场致电子发射性能, 而成为理想的场发射平面显示器的阴极材料, 用以代替阴极电子管技术。纳米管场发射体将大大提高场发射体的电流密度、发射稳定性和使用寿命, 使壁挂超薄电视机、计算机成为可能。这需要构造出大面积排列的高度定向、分立有序的纳米管阵列。纳米管还可用作能量储存材料。氢是清洁又可再生的能源, 其燃烧的生成物是水, 完全无害。目前汽车尾气排放严重污染着世界上的大城市, 若改用氢燃料驱动, 将变成完全零排放的“绿色汽车”。纳米管在解决这一难题上具有优势。由于纳米管的表面积大, 可大量吸附气体, 使得纳米管和碳 60 找到最为重要的应用——做为能量储存材料, 如储存氢气等。纳米管还可作为固体二氧化钛太阳能电池的材料, 碳 60 可用作充电电池的电极, 它的一些衍生物有望成为良好的抗癌和抗艾滋病药物。

3 纳米技术将引发新的科技产业革命

纳米技术以空前的分辨率为人类揭示了一个可见的原子世界和分子世界。作为 21 世纪技术世界的先导, 它的最终目标是直接以原子和分子构造具有特殊功能的产品, 其突出的特征是对环境友好, 降低能源消耗, 提高人类生存的环境质量。例如一个手指大小的纳米器件存储器, 可存储美国国会图书馆的全部信息。利用纳米处理器使得化学微处理变得容易; 利用低能耗化学过程来分解和破坏有毒物质, 可以保护自然环境。纳米技术还可用于动物和植物基因, 直接对农业的进步做出贡献。

纳米的技术关键是量子效应, 它将会带来又一次技术革命, 包括计算机革命、光学革命、生物工程革命等, 从而引起 21 世纪又一次产业大革命。

纳米技术将彻底改变目前的产业结构, 它是信息和生命科学技术能够进一步发展的共同基础, 其影响力大大超过计算机技术, 对人类未来将产生深远影响, 并且孕育着巨大的商业机会。目前纳米技术在航空制造技术方面的应用开发有: 改进飞机的材料性能 (如隐身性能)、增强信息存储与获得能力、提高发动机推进剂和炸药的燃烧效率等。

未来 20 年内, 纳米技术将使量子元器件代替

微电子器件。纳米晶体管和存储芯片将使计算机的速度和效率提高百万倍，存储容量达到太比特量级。纳米存储器的存储密度可达 $10 \text{ TB}/\text{cm}^2$ 。通过化学和生物学的方法，研制分子计算机和 DNA 计算机，用量子的方法、分子开关和 DNA 开关进行计算。巨型计算机能装入口袋，而且能耗降低到目前的几十万分之一，通信带宽提高几百倍，比可折叠的液晶显示器的亮度提高 10 倍。易碎的陶瓷结构可变成柔韧性更好的材料，生物和非生物的部件将结合成交互作用的传感器和处理器，像处理音频信号那样识别生物系统，使得读取分子特征标记和进行 DNA 分析成为可能。纳米装置和机器人将为药物传输方式和基因样点检测等提供现实的帮助。IBM 公司和巴塞尔大学利用生物学、化学和物理学的有机结合，成功研制出能探测 DNA 和结核杆菌的纳米传感器。新型纳米分析装置将会促进细胞生物学和病理学的基础研究，通过控制物质的纳米结构，获得高性能的生物相容材料，从而延长人造器官的使用寿命。

目前纳米平面显示器的研究已接近产业化，制造三维的纳米结构尚需几年时间，但一维的纳米结构已经上市。例如：美国用作雷达微波集成电路的元件超网络结构的高电子移动性晶体管 (HEML) 和用于光纤数据通信的垂直真空穴选择发射激光器 (VCSEL)。目前美国在新一代纳米磁头及相关技术上已占据了近 500 亿美元的市场。2000 年 12 月 11 日，英特尔公司称，它已成功开发出迄今世界上最小最快的互补金属氧化物 (CMOS) 晶体管，厚度仅为 30 nm。这一突破将使该芯片制造商在未来 5~10 年内生产出具有 4 亿个晶体管、运行速度为 $10 \text{ GHz}/\text{s}$ 、工作电压 $< 1 \text{ V}$ 的新型微处理器。纳米晶体管应用到微处理器中，将使通过报警系统识别别人的面孔的“万能微处理器”成为现实。

纳米技术的应用主要是在纳米材料和纳米器件方面，纳米技术与传统产业结合，使常规材料具有特殊性能。现已广泛用于光学、医学、生物工程、能源、半导体、信息通讯和军事等领域。2000 年全球纳米材料的营业额达 750 亿美元，若包括与微电子器件相关的产品，市场额为 3 750 亿美元。2010 年，纳米技术的市场额将达 14 400 亿美元。

21 世纪科学技术可能取得重要突破的三个领

域：一是生命科学和生物技术，二是从外星球获取能源，第三就是纳米技术。纳米技术将是 21 世纪经济发展的发动机。

为了与美国竞争时获取优势，日本设立了纳米研究中心，把纳米材料列为未来 5 年科技基本计划的研究开发重点。日本政府在 2001 年度预算中列入 380 亿日元（比上一年度增加 25 %）的纳米研究经费，目前正加紧建立国家级的纳米技术研究体制，2001 年 4 月实现国家研究机构的独立行政法人化；通产省还将成立“纳米技术国际材团”，建立大学和企业联合研究体制，从事纳米材料和纳米装置的开发^[2]。德国把纳米技术列为 21 世纪科技创新的战略领域，19 家研究机构已在卡尔斯鲁厄研究中心签署协议，建立一个遍布德国的研究网。英国现已有上千家公司、三十多所大学、七个研究中心进行纳米技术研究。瑞士制定了“TOPNANO21”行动计划。欧盟、瑞典、澳大利亚、韩国、新加坡等都在大力研究开发纳米技术。

美国在纳米机械合成、纳米化学制品、纳米生物科技方面处于世界领先地位，日本在纳米电子器件和纳米材料方面有优势^[3]，欧洲在纳米分散体、涂料和新型测量仪器方面实力较强。

我国纳米技术的研究与世界先进水平同步，个别方面走在世界前沿。为迎接纳米技术挑战，我国已确定在国家层次上制定纳米科技发展战略和规划，不能再像微电子技术那样落后于他国。2000 年 12 月 14 日，朱镕基总理等国务院领导同志在中南海听取中科院关于纳米科技的讲座，朱镕基表示中国政府积极支持纳米科技的发展，将尽快制定纳米技术的相关标准及近期与中长期的发展计划。2001 年 3 月 15 日九届人大四次会议批准的“国民经济和社会发展‘十五’计划纲要”指出：要推进高技术研究，重点攻克纳米材料等一系列高技术。

参考文献

- [1] 纳米技术扩展材料科学领域的前沿[N]. 航空与空间技术周刊, 2000-09-04(16)
- [2] 纳米技术开创未来的全新革命[N]. 日刊工业新闻, 2001-01-01(4)
- [3] 龟井信一. 日美欧在纳米技术上展开霸权争夺[N]. 新经济学家, 2000-08-29(7)

(下转第 92 页)

果,取得了显著的经济效益和社会效益。

为解决丹江口水利枢纽工程混凝土质量问题,50年代末期研制了纯熟料大坝水泥及矿渣大坝水泥、复合外加剂等新材料,在丹江口工程上应用后很快推广全国。研制的低热微膨胀水泥具有国际领先水平,1979年获得国家发明二等奖。

化学灌浆在水电工程中是一种不可或缺的现代工程技术,1958年为解决三峡工程坝基微裂隙的加固补强和防渗处理,开始研究化学浆材及灌浆设备,研制的甲凝、环氧等化学灌浆材料获1978年全国科学大会奖。80年代始开展了湿磨细水泥灌浆材料及灌浆设备的研究,GSM系列高速湿磨机可使水泥磨细达 $10\mu\text{m}$,可灌入 0.2mm 的细裂隙中。90年代以来,又研制了CW环氧系列化学浆材、水泥-化学复合高压灌浆技术和HGB稳压调速变量泵及其配套的密闭储输浆设备,以及CJY-II型灌浆自动记录仪,形成了从浆材到高速搅拌机、高速湿磨机及灌浆自动记录仪等一整套先进的灌浆材料和灌浆设备,已在三峡、葛洲坝、小浪底等多个水电工程中应用。

长科院研制的大型离心机及其试验技术达到国际先进水平,已成功地用于三峡、葛洲坝、隔河岩、万安等多个水电工程及路基工程的土工、结构、围堰的离心机模拟试验。

在深钻孔地应力测量方面,研制了CJS-I型钻孔三向应变计,1984年在三峡坝址创下了我国

307m深孔的地应力测量记录。90年代,采用钻孔套芯解除法等技术监测开挖后地应力的动态变形过程(即地应力释放过程)。

长科院研究的光面爆破、预裂爆破、深孔梯段爆破、孔内微差孔间微差顺序爆破等技术,已广泛应用于丹江口、岩滩、沙溪口、禹门口、万安、葛洲坝等许多水电工程的爆破开挖和围堰拆除。特别是用于葛洲坝大江围堰混凝土防渗墙水下爆破拆除,成本低,安全可靠,受到专家赞誉。

研制和生产的DKT系列交流伺服电机控制式可编程大型水轮机调速器等5个系列20多个品种的水轮机调速器及油压装置,已用于葛洲坝、三门峡近100个水电厂,几乎遍布全国各地,并出口伊朗、东南亚国家,为大中小型水电站的机电设备技术改造与设备更新做出了贡献。

展望新世纪,水利事业面临新的形势、新的任务,水利科技工作者也肩负更大的历史重任。我们必须以“三个代表”的思想为指针,调整治水思路,转变治水方针,从工程水利向资源水利转变,从传统水利向现代水利、可持续发展水利转变。长科院将继续发扬几十年来所形成的优良院风和光荣传统,本着“团结,奉献,科学,创新”的精神,坚持“严谨求实,质量第一,信守合同,提供满意产品,科学创新,促进科技进步”的质量方针,为我国的现代水利和长江水利事业谱写新的篇章。

(cont. form p.85)

Nanometre Technology and Its Influence on the Revolution of Science and Technology

Yuan Jun

(China Aero Polytechnical Establishment, Beijing 100028, China)

[Abstract] In February 2000, U.S.A worked out the strategy of National Nanometre Technology (NT), which evoked worldwide repercussions. Japan and Europe also successively worked out their development program of NT. As a new forward branch of science, NT will become a core driving force of causing a new round of material revolution in the 21st century and exert an immense influence on the field of aerospace. This paper simply introduces the definition of NT, nanometre materials, and the research and development status of NT.

[Key words] nanometre technology; nanometre materials; development program