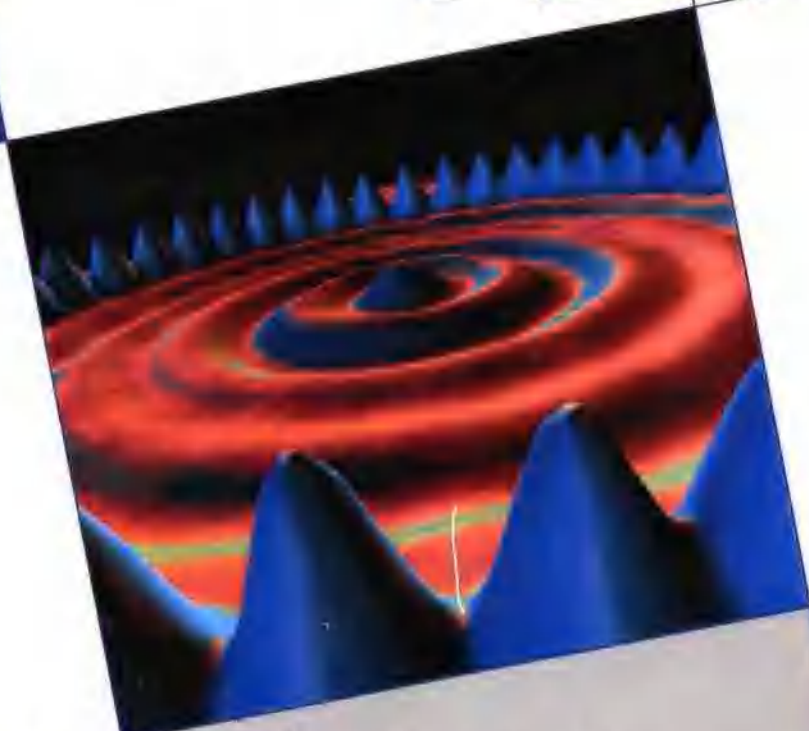


倪星元 沈军 张志华 编著

纳米材料的 理化特性 & 应用



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

第1章 绪 论

1.1 纳米科技的兴起与发展

回顾人类科学发展史在 20 世纪达到了一个辉煌的顶峰，这就是电子信息技术和生命科学。但这辉煌同样遇到了新的挑战，回应这挑战的武器之一就是纳米科技。人类科技发展和纳米技术兴起的经历，可简单归纳于表 1.1 中。

表 1.1 科学的发展及纳米技术的兴起

起始时间	时 代	发明或技术进步
公元前 2200000 年	石器	工具
公元前 3500 年	青铜器	冶金
1764	工业	蒸汽机
1906	—	大规模生产
1946	信息	计算机
1953	基因	基因工程
1991	纳米时代?	纳米一般技术
2020?	组装时代?	纳米分子组装
2050?	生命时代?	纳米生命组装

1959 年，著名的物理学家、诺贝尔奖获得者 Richard Feynman 首先提出纳米技术的概念。Feynman 指出：“我认为，物理学原理并不排斥通过操纵单个原子来制造物质。这样做并不违反任何定理，而且原则上是可以实现的。毫无疑问，当我们得以对细微尺度的事物加以操纵的话，将大大扩充我们可能获得物性的范围。”

事实上在 1981 年，IBM 公司苏黎世研究实验室的 Binning

和 Rohrer 发明了扫描隧道显微镜,使得人类首次在大气及常温下观察到了原子,这为纳米技术的发展奠定了基础。

1990 年另一位叫 Drexler 的科学家对 Feynman 提出的纳米技术概念进行了拓展,指出:“纳米技术的基本思想是在分子水平上,通过操纵原子来控制物质的结构。它使我们可以利用单个原子组建分子系统,制备不同类型的纳米器件。”

这些年来,世界各国都把发展纳米技术作为增强未来竞争力的科技战略。无论是在美国、日本还是其他发达国家对纳米科学和工程的前景至今已无人敢忽视。原美国国家科学基金主任、后任总统科学顾问的 Lane 博士在 1998 年 4 月的一次国会听证会上陈述:“如果有人问我科学和工程的哪一个方面最有可能在未来产生突破性的进展,我将毫不犹豫地说是纳米科技和工程。” C₆₀ 的发现者之一,美国化学家、诺贝尔化学奖获得者 Smalley 在一次给美国参议院科学、技术与空间参议院小组委员会的证词中说:“我们即将有能力制备出长度尽可能小的东西。大胆地迈进这个新的领域符合我们国家的根本利益。” 2000 年 1 月,美国总统克林顿宣布了国家纳米技术计划,即 NNI (National Nanotechnology Initiative) 倡议,正式把纳米技术列入“国家关键技术”的第八项和“2000 年的战略技术”,并在 2001 年的财政年度为此提供 4.97 亿美元的研究开发经费。日本在 1996 年开始实施为期 10 年、耗资 2.25 亿美元的纳米技术研究开发计划。德国在 1993 年提出了今后 10 年重点发展的 9 个领域关键技术,其中 4 个领域涉及纳米技术。欧盟委员会在 1995 年发表的一份研究报告提出,今后若干年内,纳米技术的开发将成为仅次于芯片制造的世界第二大制造业。

在我国,2001 年 3 月全国人大通过的“国民经济第十个五年计划”,明确提出了将发展纳米科技作为“十五”期间科技进步的一项重要任务。随后相继成立了国家纳米科技指导协调委员会,负责组织协调全国纳米科技的研究开发力量,并制定和推出

了“国家纳米发展纲要”。

其实纳米科技也不是空穴来风，人工制备纳米材料的历史至少可以追溯到 1000 多年前。中国古代利用燃烧蜡烛采集的炭黑作为墨的原料以及用于着色的染料，这也许可以算最早的纳米材料；中国古代铜镜表面有一层防锈层，现经检验，这层防锈层为纳米氧化锡颗粒构成的薄膜。当然那个时代的人们还不知道这是由人的肉眼根本看不到的仅有纳米尺度大小的小颗粒构成。大约在 1861 年，随着胶体化学 (colloid chemistry) 的建立，科学家们就开始了直径为 $1 \sim 100\text{nm}$ 的粒子系统即所谓胶体 (colloid) 的研究，当时只是从化学的角度作为宏观体系的中间环节开展研究，并没有意识到就此揭示了人们认识世界的一个新的层次，即我们现在所说的“纳米世界”。

人们自觉地把纳米相材料作为研究对象始于 20 世纪 50 年代，原联邦德国的 Kanzig 等观察到了 BaTiO_3 中的“极性微区”，并将这一微区取名为 Kanzig (极性) 微区，它们的尺寸在 $10 \sim 100\text{nm}$ 之间。后来前苏联的 G. A. Smolensky 推断复合钙钛矿体中的介电弥散就是由于存在“极性微区”导致成分不均匀引起的。从这个意义上说纳米相结构早就存在于铁电陶瓷中，并对电性能产生影响，只是当时人们对此还缺乏足够的认识。

到了 20 世纪 60 年代，著名的物理学家、诺贝尔物理奖获得者 Richard Feynman 首次提出合成纳米粒子的设想。1962 年，久保 (Kubo) 及其合作者针对金属超微粒子的研究，提出了著名的久保理论，也就是超微颗粒的量子限制理论或量子限域理论，从而推动了实验物理学家开展对纳米尺度微粒的探索。

1963 年 Uyeda 及其合作者用气体冷凝法，通过在高纯的惰性气体中的蒸发和冷凝过程获得清洁表面的超微颗粒，并对单个的金属超微颗粒的形貌和晶体结构进行了透射电子显微镜研究。1967 年美国阿贡实验室的 R. W. Sigel 等人通过制备氧化钛多晶体对纳米粒子的制备和结构与性能作了研究。从 1968 年开始瑞

士的 Veprek 小组研究出了在氢等离子体气氛中,利用化学传输法,将纳米硅晶态粒子镶嵌在非晶硅氢网络中的复合薄膜。

1970 年,江崎与朱兆祥就量子相干区域的尺度,首先提出了半导体超晶格的概念。这是按照一定的规则将在一定厚度范围内的纳米薄层人工堆积起来的结构。随后张立纲和江崎等利用分子束外延技术,制备了能隙大小不同的半导体多层膜,在实验中实现了量子阱和超晶格,观察到了极其丰富的物理效应,量子阱和超晶格的研究成为半导体物理学最热门的领域。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初,对一些纳米颗粒的结构、形态和特性进行了比较系统的研究。描述金属颗粒费米面附近电子能级状态的久保理论日臻完善,在用量子尺寸效应解释超微颗粒的某些特性时获得成功。

1984 年,德国萨尔大学的 Gteiter 教授等人首次采用惰性气体凝聚法制备了具有清洁表面的纳米粒子,然后在真空室中原位加压成纳米固体,并提出了纳米材料界面结构模型。随后发现 CaF_2 纳米离子晶体和 TiO_2 纳米陶瓷在室温下出现良好韧性,使人们看到了陶瓷增韧的新的有效途径。

1985 年, Kroto 等采用激光加热石墨蒸发并在甲苯中形成碳的团簇。质谱分析发现 C_{60} 和 C_{70} 的新的谱线, C_{60} 具有高稳定性的新奇结构。这种结构与常规的碳的同素异构体金刚石结构和石墨层状结构完全不同,而且物理性质也很奇特,用碱金属掺杂之后就成为具有金属性的导体,适当的掺杂成分可以使 C_{60} 固体成为超导体。

20 世纪 90 年代初,人们发现了纳米颗粒硅和多孔硅在室温下的光致可见光发光现象。同年 7 月第一届国际纳米科学技术学术会议在美国巴尔的摩召开。会议上科学家们把纳米材料科学作为材料科学的一个新的分支。这次会议标志着纳米材料学作为一个相对比较独立的学科正式诞生,并由此引起了世界各国材料界和物理界的广泛重视和极大兴趣,一个世界性的“纳米热”开始

兴起。

十多年来,各国科学家们对纳米科技和纳米材料的理论研究和实验研究都十分活跃,探索研究的内涵不断扩大并取得了非凡的进展。

1.2 纳米的基本定义

“纳米”(nm)是一个长度单位, $1\text{nm}=0.000000001\text{m}$, 即 10^{-9}m 。

对纳米科技的认识也正如人类对其他科技的认识一样,总是在自身的发展过程中不断完善和深化,并努力将其为我所用。人们将对客观世界的认识通常分为两个领域,一是宏观领域,二是微观领域,这里的宏观领域是指以人的肉眼可见的最小物体作为下限,上至无限大的宇宙天体;微观领域则是以分子原子为最大起点,下限是无限的领域。随着认识的深化,近年来人们怀着极大兴趣探讨起这一块介于宏观领域和微观领域之间有待开拓认识的“处女地”。这是个介于宏观和微观之间,却又不同于宏观和微观的世界,尽管不在微观领域,但在这个领域中的物质的三维尺寸还都很细小,并由此形成了许多奇异的物理性能和化学性能。这个领域包括了从微米、亚微米、纳米到团簇尺寸的客观世界(团簇尺寸的范围从几个原子到几百或上千个原子)。据此这个介于宏观领域和微观领域之间的领域被称为介观领域。

以讨论介观领域中物质的相干量子输运现象为主的介观物理随着认识的发展应运而生,并已成为现今凝聚态物理学的热点。从广义上来说,凡是出现量子相干现象的体系统称为介观体系,包括团簇、纳米体系和亚微米体系。但是,习惯上却只把亚微米级($0.1\sim 1\mu\text{m}$)体系有关现象的研究,特别是电输运现象的研究称为介观领域的研究。这样,纳米体系及团簇就从介观范围独立出来,形成了我们一下讨论的所谓“纳米体系”。

因此我们关于纳米体系，基本定义在 $0.1\sim 100\text{nm}$ 。纳米科技就是研究由尺寸在 $0.1\sim 100\text{nm}$ 之间的物质的制备或组成的方法、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。纳米材料是指颗粒尺寸在纳米量级 $0.1\sim 100\text{nm}$ 的超细粉体材料，厚度在 $0.1\sim 100\text{nm}$ 的薄膜材料也包括孔径尺寸或骨架尺寸在 $0.1\sim 100\text{nm}$ 的多孔材料。这些材料的尺寸一般大于原子团簇而小于通常的微粉、薄膜等，处在原子团簇和宏观物体交界的过渡区域。

纳米体系涵盖了以纳米颗粒、薄膜、骨架以及纳米丝、管等基本单元在一维、二维和三维空间组装排列成具有纳米结构的体系，其中包括纳米阵列体系、介孔组装体系、薄膜嵌镶体系。在纳米体系中纳米颗粒，纳米丝和纳米管可以进行有序地排列。从几何角度来分析，纳米体系还包括以下几个方面：横向结构尺寸小于 100nm 的物体；粗糙度小于 100nm 的表面；纳米微粒与多孔介质的组装体系；纳米微粒与常规材料的复合。

在纳米材料发展初期，纳米材料是指纳米颗粒和由它们构成的纳米薄膜和固体。作为纳米材料，它们还可能具有以下几个特点：①原子畴（晶粒或相）尺寸小于 100nm ；②大部分原子处于晶界环境；③畴之间存在相互作用。

因此，纳米相实际是材料存在的一种状态。纳米相金属、纳米相陶瓷和其他纳米相固体材料跟普通的金属、陶瓷和其他固体材料都是由同样的原子组成的，只不过组成这些原子排列成了纳米级的原子团，成为组成新材料的结构粒子或结构单元。常规材料基本颗粒的直径小到几微米，大到几毫米，包含几十亿个原子，而纳米相材料中的基本颗粒的直径不到 100nm ，包含的原子不到几万个。一个 3nm 的原子团，几乎仅是我们平常书写的英文一个句点的百万分之一，却包含了 900 个原子，这个比例相当于一个篮球场跟整个地球的比例。1g 碳纳米管的长度可达 $4.5\times 10^8\text{m}$ ，若把此碳纳米管的首尾相连，可绕地球赤道 10 圈，

超过了地球到月球的距离。

纳米材料可以将广义地理解为在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的材料。纳米材料的基本单元按维数的概念,可以分为如图 1.1 所示的四类。

① 0 维纳米材料:材料尺寸在三维空间均为纳米尺度,如纳米尺度颗粒和原子团簇等。

② 1 维纳米材料:材料在空间有两维为纳米尺度,如纳米丝、纳米棒和纳米管等。

③ 2 维纳米材料:材料在空间中有一维为纳米尺度,如超薄膜、多层膜、超晶格等。

④ 3 维纳米材料:在三维空间中含有上述纳米材料的块体,如纳米陶瓷和复合体等。

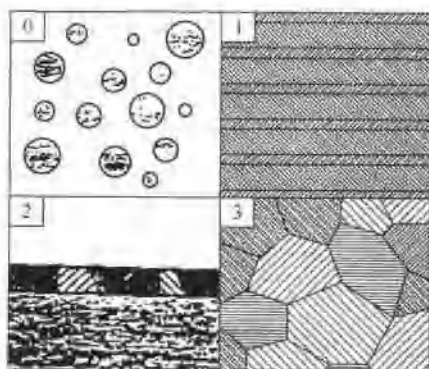


图 1.1 纳米结构材料分类

- 0—零维的原子簇和原子簇的集合; 1——维的多层薄膜; 2—二维的超细颗粒超晶膜;
3—三维的纳米块体材料

由于这些单元往往具有量子性质,所以对零维、一维和二维的基本单元分别又有量子点、量子线和量子阱之称。

按照组成相的数目可以分为纳米相材料 (nanophase materi-

als) 和纳米复合材料 (nanocomposite materials)。纳米相材料是指单相纳米颗粒组成的固体, 纳米复合材料是指两相或多相构成, 其中至少有一相为纳米级的固体材料。纳米复合材料是在研究溶胶-凝胶法制备的陶瓷-金属复合材料时被提出来的, 纳米复合材料涉及面较宽, 可以分为 0 维-3 维、1 维-3 维、2 维-2 维、3 维-3 维等多种复合。0 维-0 维复合是指不同成分、不同相或者不同种类的纳米离子复合而成的纳米固体。0 维-2 维复合是把纳米粒子分散到二维的薄膜材料中, 0 维-3 维复合, 即把纳米粒子分散到三维固体中, 如把纳米陶瓷粒子放入常规的金属、高分子及陶瓷中。

1.3 纳米材料特性研究的主要内容和意义

纳米科技是研究由尺寸在 $0.1 \sim 100\text{nm}$ 之间的物质的制备或组成的方法、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。

纳米科技研究的内容主要包括: ①纳米体系物理学; ②纳米化学; ③纳米材料学; ④纳米电子学; ⑤纳米生物学; ⑥纳米加工学; ⑦纳米测量学。这 7 个部分是互相渗透的, 为了叙述方便才将它们独立开来。

关于物理特性, 纳米体系中电子波函数的相关长度与体系的特征尺寸相当, 这时电子不能被看成处在外场中运动的经典粒子, 电子的波动性在输运过程中得到充分的展现; 纳米体系在维度上的限制, 也使得固体中的电子态、元激发和各种相互作用过程表现出与三维体系十分不同的性质, 如量子化效应, 非定域量子相干, 量子涨落与混沌, 多体关联效应和非线性效应等。对这些新奇的物理特性的探索, 将引导我们重新认识和定义现有的物理理论和规律, 将导致一些全新概念的引入和新规律的建立。

在纳米化学中, 涉及到对表面的化学过程和原子团簇化合物

等的更深入的研究, 如对吸附体系的电学性质和对基底表面结构的影响。纳米材料在催化反应中具有非凡作用, 纳米微粒能以不同的形式在化学反应系统中大大改善和提高催化效果, 纳米微粒做催化剂比非纳米微粒催化剂的反应速度有望成倍或数十倍地增加。纳米微粒对提高催化反应效率、优化反应路径、提高反应速度和定向反应方面的研究是未来纳米化学的最主要的基点之一, 将对各类化学反应工程带来革命性的变革。利用纳米技术进行化学合成, 将有可能创造出许多高性能或特殊性能的新材料。

表 1.2 显示了从纳米材料的基本的物理和化学特性出发将涉及到的研究领域。我们不难从中领悟到纳米材料的研究和开发应用将对人类科技发展的深刻意义。

表 1.2 纳米材料基本物理和化学特性涉及到的研究领域

基 本 性 能	研究和应用领域
电学性能	电极, 超导体, 量子器件, 非线性电子元件, 导电及绝缘浆料等
磁学性能	磁记录存储, 磁流体, 永磁体, 磁探测器, 吸波材料, 磁制冷材料等
热学性能	耐热材料, 隔热保温材料, 热交换材料, 低温烧结材料等
燃烧性能	固体燃料, 推进剂, 液体燃料助燃剂, 阻燃剂等
力学性能	超硬、高强、高韧、超塑性材料等
光学性能	隐身材料, 发光材料, 光控材料, 光通讯, 光存储, 光开关等
敏感特性	湿敏, 温敏, 气敏, 光催化, 热释电等
显示、记忆特性	显示装置, 记忆元件等
催化性能	催化剂, 助剂等
悬浮性能	过滤, 吸附, 高精度抛光液等
流动性	固体润滑剂, 油墨等
生物化学、医学及其他	医用材料(药物载体, 细胞染色或分离, 医疗诊断, 消毒杀菌)能源材料, 环保材料等

我们已经看到了电子学在人类的发展和生活中起了决定性的

作用，在纳米科技时代，纳米电子学必将继续对人类社会的发展起更大的作用。因此，在纳米科技的各个分支学科的研究中，人们将特别关注全新的纳米电子学电性的研究。在纳米电子学中，与电阻相联系的概念已不再是原来的欧姆定律，其他的许多定律也都需要重新认识和修正，特别是在应用上将会有更加宽广的前景有待探索和开发，例如利用相关的纳米技术进行超高密度信息存储、纳米芯片、纳米计算机等的研究。

纳米材料在军事技术中的应用是近年来国内外的主要研究内容。研究及实际应用结果表明，武器能源中引入纳米功能材料后能显著地改变能源材料的燃烧、能量及爆炸性能。在推进剂中加入纳米材料后，可使推进剂的燃烧速度提高，又可提高推进剂的定容燃烧热。纳米材料的深入研究将为武器提供理想的新能量或新能源。通过对纳米材料的复合设计，可以制备出对不同频区电磁波具有良好吸波特性的隐身涂层材料，可广泛用作飞机、导弹、坦克、舰船及车辆等军事器具及目标。

生物医药是 21 世纪最重要的科学研究领域之一，在生物医药领域对纳米材料的研究和应用更是意义深远。利用纳米级蛋白质可制成各种生物分子器件、逻辑信息小单元。利用细菌视紫红质（简称 BR 蛋白质）和发光染料分子制备出具有电子功能的蛋白质分子集成膜，是一种可使分子周围的势场得到控制的新型逻辑元件。在纳米生物学中，除了对细胞、膜、蛋白质和 DNA 的微观研究外，还可将解决人工分子剪裁以及进行分子基因和物种再构。纳米药物在医学领域中的影响将日益显现出来，它们对提高疗效、减少副作用、降低成本都将起到十分关键的作用。纳米材料由于其特殊的功能，已经开始用于人体的器官或组织的修复和替代。可以预期利用纳米技术必将能制造出许多更新的药物和开创更新的治疗手段，为探索生命的奥秘和保障人类的健康做出贡献。

作为纳米科技中的一个重要领域的纳米测量学和纳米加工

学,也将以崭新的方式探索材料的微观结构和进行原子的操纵和纳米尺度的加工以及进行纳米器件的加工和组装,并进一步深入研究材料和器件的奥秘、特性及运行机理。

美国国家科学基金会的纳米技术高级顾问 Mihail Roco 说:“因为纳米技术,我们在今后 30 年中看到的我们这个文明世界发生的变化,将比整个 20 世纪期间出现的还要多。”我国著名科学家钱学森院士也预言“纳米左右和纳米以下的结构将是下一阶段科技发展的重点,会是一次技术革命,从而将是 21 世纪又一次产业革命。”对纳米材料的优异特性的探讨和应用在世界各国都是具有战略性的国策,对人类本身的进步和发展必将产生非常重大的影响。

参 考 文 献

- 1 《纳米科技基础》编写组. 纳米科技基础. 上海纳米科技与应用能力考核办公室, 2003
- 2 曹茂生, 曹传宝, 徐甲强. 纳米材料科学. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2002
- 3 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构. 北京: 科学技术出版社, 2002
- 4 张玉龙, 李长德等. 纳米技术与纳米塑料. 北京: 中国轻工业出版社, 2002
- 5 陈光华, 邓金祥. 纳米薄膜技术与应用. 北京: 化学工业出版社, 2004

第2章 纳米材料的物理和化学特性的基础知识

2.1 元素和原子结构

在古代人们就认识到物质是由一定数目的元素组成，我们的祖先早就提出了金、木、水、火、土五行之说。在古希腊时代，有人提出了元素的概念，并且认为构成物质基本元素是土、火、空气和水，如果这些元素按适当的顺序组合就可以得到各种各样的物质。近代的化学家对具有纳米结构的分子已经研究了150多年。但很遗憾，长期以来人们不能直接看到原子，只能通过其他的方法分析和推测，以期达到了解各类元素的特性和行为的目的。经典的原子理论指出物质都是由109种原子组成的，但过去这仅仅是一个理论。现在我们已可确认这不只是抽象的理论，因为我们可以通过电子显微镜（TEM）确确实实地观察到原子，由此帮助我们确定和加深对各类元素的认识。

每个元素由一种原子构成，古代哲学家认为物质可以无限分割，但当时只能是个假说，没有科学实验结果作为依据。1807年，英国教师道尔顿（1766~1844）在实验的基础上，提出了原子概念和原子理论，认为：

① 元素由不可分割的粒子构成，这些不可分割的粒子称为原子；

② 构成特定元素的所有原子是相同的，而不同元素由不同的原子构成；

③ 原子结合在一起形成化合物，同一种化合物由相同数量

和种类的原子组成；

④ 化学反应时，原子从一种结合状况变成另一种结合状况，原子本身不发生变化。

道尔顿原子理论是化学发展史上的一个里程碑。这个理论的有些部分现在被认为是不正确的，但主要假设至今还在沿用，有关的理论总在不断完善，以解释新的现象。

材料科学家认为，元素是用来构成物质的不同基本结构单元的集合体。我们非常希望能了解所有元素的基本性质及各种结合方法，以及实际应用的意义和可能性。很幸运，元素周期表使我们能够这样去做。在元素周期表里，按照元素的原子量排列时，揭示了同一族元素性质有规则的变化趋势和规律。

元素周期表是根据元素之间相似的性质分类并按照一定的规律排列得到的。任何一个元素都用相应的符号来表示，如 H 表示氢，Ca 表示钙等。元素在元素周期表中的位置是其性质的反映。元素按电子轨道排列的规则，形成元素周期表。周期表以横向排列的每一行称为一个周期，全部元素共排成 7 个周期。元素按纵向排列称为族，同一族中，外层电子相同。由于外层电子对化学反应具有决定性的作用，因此化学性质相近，但随着原子壳层数的增加，化学性质逐渐有所变化。如元素钠 Na 在第一族里，其性质就是第一族里其他元素性质代表。这一族里的元素还有锂 Li、钾 K、铷 Rb、铯 Cs、钫 Fr，这些元素被称为碱金属。有银色光泽、低温下就能熔融的软金属是它们的共同性质。在纳米技术中，这些原子的重要性体现在它们很容易失去一个电子。紧挨着第一族元素的是碱土金属，它们很容易失去两个电子。

周期表中最右边的元素族是惰性气体，由稀有元素构成，性质非常不活泼。在纳米技术中，这些元素常作为保护性元素来应用。与惰性气体相邻的是卤族元素，它们是一些活泼的气体或固体。

在周期表同一族中元素活性随原子量的增加而降低。

周期表中第3族到第12族是过渡金属元素，包括铁 Fe、铜 Cu、银 Ag 和金 Au，它们具有优良的导电性等有用的电性能，也是纳米技术中经常用到的重要元素。第14族元素包括碳和硅，这两种元素是制造纳米碳管和导电纳米器件的重要元素。

当我们知道元素属于哪一族、与哪些元素相邻后，就可以预测该元素的性质。26号铁元素以后，随着原子量的增大，原子核的稳定性开始下降。按照这种思维，我们可以推知，109号以上序号的元素，它一定是极不稳定的。这里所谓元素趋于不稳定，是对它们存在的时间长短的一种评价。

尽管原子很小，但还是可分的。三种主要的基本亚原子粒子是电子、质子和中子。原子由电子和原子核组成，质子和中子构成原子核。除此之外还存在许多其他的亚原子粒子，包括正电子、介子和中微子。电子、质子和中子是我们经常讨论的三种主要基本粒子。电子具有最小的质量 ($9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 或 5.5×10^{-4} 氧单位)，携带单位负电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。质子的质量是 $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (或者 1.00758 氧单位)，为电子质量的 1840 倍，携带单位正电荷。中子的质量比质子稍大 (其质量为 1.00897 氧单位)，不带任何电荷，呈电中性。

原子核很小，其直径仅为 10^{-14} m ，而原子直径则较大，约 10^{-10} m ，因此，原子内部是很空旷的。原子核中的质子数称为原子序数，用 Z 表示，它不仅表明一个完整原子中轨道电子的数目，还界定了该原子所能构成的化学元素。例如，原子序数是 2，表明核中有两个中子和质子，核外有两个轨道电子，且必定是氦元素。天然元素的原子序数 Z 的范围从 1 (氢) 到 94 (钷)。原子序数高于 94 的原子都是通过核反应产生的。

原子是电中性的，拥有相同数量的质子和电子。与道尔顿的最初假设相反，同种元素中的所有原子并不是都具有相同的质量。我们把质子数相同而原子量不同的原子称为同位素，同位素

之间中子数的不同导致了原子量的不同。例如，碳 12 和碳 13 都有 6 个质子（原子序数=6），但中子数分别为 6 和 7。

为了区分不同类型的原子核，我们把质子数（原子序数）写在元素符号的左下角，质子数和中子数之和（质量数）写在元素符号的左上角。 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 表示质子数为 1、中子数分别为 0、1、2 的氢元素。同样， ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^6_3\text{Li}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 分别为含有不同质子数的不同元素。

表 2.1 给出了不同亚原子粒子的性质。原子核是既有自旋又带正电的粒子，因此可把一个原子核看作一个小的磁铁，在磁场中原子沿着磁场或逆磁场排列，原子核的磁性称为核磁矩。只有自旋不为零的原子核才具有核磁矩，是否具有核磁矩取决于质子和中子的比例。如 ${}^1_1\text{H}$ （1 个质子，0 个中子）和 ${}^{13}_6\text{C}$ （6 个质子，7 个中子）的核自旋不为零，有磁矩，但 ${}^{12}_6\text{C}$ （6 个质子，6 个中子）中的质子数和中子数均为偶数，核自旋为零，没有磁矩。利用原子核的磁矩来探测原子核的性质，这一现象就是核磁共振现象。

表 2.1 部分亚原子微观粒子的性质

亚原子粒子	电 荷 数	相对质量	实际质量/g
质子(P)	+1	1	1.673×10^{-24}
电子(e ⁻)	-1	5.45×10^{-4}	9.110×10^{-28}
中子(N)	0	1	1.675×10^{-24}

放射性同位素能自发衰变成另一种元素。92 号元素铀，是最早发现的放射性元素。放射性同位素在自发衰变过程中原子能自发地放射出各种类型的射线，如 α 射线、 β 射线和 γ 射线，这一现象被居里夫人称为放射现象。放射性同位素已经获得实际应用，例如用碳同位素衰变来确定物质存在的年龄和甲状腺癌的化疗。表 2.2 列出了核放射特性。

放射现象是支持原子可再分割观点的关键论据，在某些特定