

杨颖 叶雅杰 赵艳丽 等◆编著



碳纳米管的结构、性能、 合成及其应用

雅杰 赵艳丽 等◆编著



碳纳米管的结构、性能、合成及其应用

图书在版编目(CIP)数据

碳纳米管的结构、性能、合成及其应用 / 杨颖等编
著. -- 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2013. 8
ISBN 978 - 7 - 81129 - 612 - 9

I. ①碳… II. ①杨… III. ①碳 - 纳米材料 - 研究
IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 120346 号

碳纳米管的结构、性能、合成及其应用

TANNAMIGUAN DE JIEGOU XINGNENG HECHENG JI QI YINGYONG

杨 颖 叶雅杰 赵艳丽等 编著

责任编辑 张永生 魏翥然
出版发行 黑龙江大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 720 × 1000 1/16
印 张 20
字 数 269 千
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 81129 - 612 - 9
定 价 36.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

纳米科技对于人类生产和生活方式产生重大的影响,是现代科学研究中最令人兴奋的研究领域之一,并且纳米科技将有可能引发下一场工业革命。20 世纪 80 年代以来,纳米科学的快速发展,很大程度上得益于碳纳米管和石墨烯等碳纳米材料。碳纳米材料是纳米科学研究中最为活跃的研究领域之一。随着研究的不断深入,碳纳米材料在人类生产和生活中显示出越来越多不可替代的重要作用,使得人们对碳纳米材料的研究有了更快的发展,同时也对碳纳米材料提出更新的要求。其中,碳纳米管在力学方面具有非常高的机械强度和弹性;在电学方面具有优良的导体或半导体特性;在光学方面具有优异的非线性光学性质。纳米管这些优良的特性使其在环境方面被广泛应用。

本书集各家之所长,并结合作者的科研实践经验,在大部分章节中介绍了碳纳米材料的一些基础知识和应用,主要有碳纳米材料的分类、发展及普遍的结构分析方法,并简述了新型的二维石墨烯材料的性质、制备及其应用研究。本书聚焦于具有一维管状结构的碳纳米管,内容涵盖近些年来对碳纳米管的结构、合成、纯化、填充和功能化修饰等方面的研究,各章节还集中讨论了碳纳米管在力学性能、电学性能、光催化剂和环境保护方面的应用。某些章节中,融入了作者近年来的观点和理解,并反映了国内最新的研究成果,有些基础内容虽在同类著作中有所涉足,但从理论指导实践的角度来看,这部分内容具有较重要的实际意义。

本书可供化学、化工、材料、环境、纳米科技领域的广大教学、科研、专业技术人员以及研究生和本科生阅读参考。读者可根据不同的需要,选择所需章节详读或简读。此外,某些理论难度较大的章节可作为环境工程、环境科学等学科研究生的学习内容。

参加本书编写的有齐齐哈尔大学杨颖(第1、2、5、10章,约8.5万字),齐齐哈尔大学叶雅杰(第6~8章,约8.5万字),佳木斯大学赵艳丽(第3、4、9章,约10万字)。此外,黑龙江省普通高中考试评价办公室的王妍和齐齐哈尔大学的张转芳也参与了本书的编写工作。由于时间紧迫,作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请专家学者、广大师生和读者批评指正。

目 录

第 1 章 纳米科技与纳米材料	1
1.1 纳米科技的基本概念和内涵	1
1.2 纳米科技的研究进展和趋势	3
1.3 碳纳米材料	6
参考文献	23
第 2 章 碳纳米管的基本概念与性质	24
2.1 碳纳米管的发现	24
2.2 碳纳米管的结构	24
2.3 碳纳米管的基本性质	28
2.4 碳纳米管的合成	47
参考文献	53
第 3 章 碳纳米管的结构分析方法	64
3.1 X 射线衍射分析	64
3.2 红外光谱法	78
3.3 拉曼光谱法	89
3.4 扫描电子显微镜	96
3.5 透射电子显微镜	115
参考文献	132

第 4 章 碳纳米管的力学性质	133
4.1 理论研究方法	134
4.2 碳纳米管的弹性性质	143
4.3 碳纳米管的强度和塑性性质	145
4.4 功能化碳纳米管的力学性能	148
4.5 碳纳米管在力学方面的应用	150
参考文献	150
第 5 章 碳纳米管的电学性能与应用	152
5.1 碳纳米管 - TiO_2 复合材料的电学性能	153
5.2 碳纳米管与其他半导体复合材料的电学性能	155
5.3 碳纳米管在电学方面的应用	158
参考文献	169
第 6 章 碳纳米管在光催化剂方面的应用	171
6.1 碳纳米管光催化的原理	172
6.2 碳纳米管作为光催化剂载体的应用	178
6.3 碳纳米管复合光催化材料	182
6.4 碳纳米管 - 半导体复合材料的制备方法	187
参考文献	195
第 7 章 碳纳米管的化学修饰	196
7.1 碳纳米管的结构和化学性质的关系	198
7.2 碳纳米管的化学修饰	201
7.3 碳纳米管的非共价修饰	212
7.4 碳纳米管化学修饰的展望	218
参考文献	219
第 8 章 碳纳米管在环境保护中的应用	221

8.1 环境中碳纳米材料的来源	221
8.2 碳纳米材料的环境行为	223
8.3 碳纳米管在环境保护方面的应用	230
8.4 碳纳米管在水污染控制中的应用	234
8.5 碳纳米管对水体污染物的吸附机理	236
8.6 碳纳米管对水体中重金属离子的吸附	244
8.7 碳纳米管对水体中非金属离子的吸附	252
8.8 碳纳米管对水体中有机污染物的吸附	253
8.9 碳纳米管在控制大气污染中的应用	259
参考文献	266
第9章 碳纳米管在生物医学中的应用	272
9.1 核酸类物质转载体	273
9.2 生物传感器	275
9.3 生物支架材料	276
9.4 促进神经再生,减少神经组织瘢痕产生	277
9.5 碳纳米管的生物相容性及安全性	277
参考文献	282
第10章 碳纳米管的结构单元——石墨烯	285
10.1 石墨烯的性质	287
10.2 石墨烯的制备	289
10.3 石墨烯的应用研究	293
参考文献	298
附 录	302

第 1 章 纳米科技与纳米材料

1.1 纳米科技的基本概念和内涵

纳米在科学界中比较普遍的定义:它是一种度量的单位,1 纳米等于 10^{-9} 米,即十亿分之一米、百万分之一毫米。1 纳米相当于头发丝直径的十万分之一。把 1 纳米的物质放在一个乒乓球上,就相当于把一个乒乓球放在地球上。而纳米科技实际上就是一种用单个原子、分子制造物质的科学技术,是以纳米科学为理论基础,制造新材料、新器件,研究新工艺的方法。

1974 年,科学家唐尼古奇最早使用“纳米技术”一词描述精密机械加工技术。1982 年,科学家发明了研究纳米科技的重要工具——扫描隧道显微镜,使人类首次在大气中和常温下看见原子,为我们揭示了一个可见的原子、分子世界,对纳米科技的发展产生了积极的促进作用。1990 年 7 月,第一届国际纳米科学技术会议在美国巴尔的摩举办,标志着纳米科学技术的正式诞生。

纳米科技是在 20 世纪 80 年代末至 90 年代初才逐步发展起来的前沿、交叉性新兴学科领域。由于它具有创造新的生产工艺、新的物质和新的产品的巨大潜能,因而它有可能在 21 世纪掀起一场新的产业革命。

纳米科技的发展大致可以划分为三个阶段。

第一阶段(1990 年以前)主要是在实验室探索各种纳米粉体的制

备手段,合成纳米块体(包括薄膜),研究评估和表征测试的方法,探索纳米材料的特殊性能。研究对象一般局限于纳米晶或纳米相材料。

第二阶段(1990~1994年)人们关注的热点是设计纳米复合材料:

- (1)纳米微粒与纳米微粒复合(0-0 复合),
- (2)纳米微粒与常规块体复合(0-3 复合),
- (3)纳米复合薄膜(0-2 复合)。

第三阶段(从1994年至今)是对纳米组装体系的研究。它的基本内涵是以纳米颗粒以及纳米丝、纳米管等为基本单元,在一维、二维和三维空间组装排列成具有纳米结构的体系。

从1999年开始,美国政府就已经把纳米科技列为21世纪前10年的11个关键研究领域之一。美国总统科技助理曾经在致国会的信中称:“纳米技术将与信息技术、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,应把它放在科学技术的最优先地位。”

纳米科技相对于传统科技而言不仅仅是尺度缩小。它的陡然升温是由于纳米科技在推动人类社会产生巨大变革方面具有重要意义。纳米科技的发展,将掀起人类对客观世界认知的革命。在宏观和微观的理论充分完善之后,在介观尺度上有许多新现象、新规律有待发现,这也是新技术发展的源头。纳米科技是多学科交叉融合的集中体现,我们已不能将纳米科技归为哪一门传统的学科领域。在现代科技的发展中创新性突破几乎都是在交叉和边缘领域取得的。正是因为如此,纳米科技充满了发展的机会。对于还比较陌生的纳米世界中尚待解决的科学问题,科学家有着极大的好奇心和探索欲望。一旦在这一领域的探索过程中形成的理论和概念在我们的生产、生活中得到广泛的应用,那么,它就将极大地丰富我们的认知世界,并给人类社会带来观念上的变革。

与此同时,纳米科技推动了产品的微型化、高性能化和环境友好化,将极大地节约资源和能源,减少人类对它们的过分依赖,并促进生态环境的改善。这将在新的层次上为人类可持续发展提供物质和技

术保证。

纳米科技也将促使传统产业“旧貌换新颜”。比如,通过对纳米材料的研究,在化纤制品中加入纳米颗粒,可以除味、杀菌;纳米技术的运用,可以使建筑物外墙涂料的耐洗刷性提高,耐洗刷次数由原来的1 000次提高到10 000多次,老化时间也延长了2倍多。这种对传统材料进行纳米改性的技术,企业投入不大,而且市场前景广阔。

纳米科技的巨大影响还在于纳米尺度上的多学科交叉展现出了巨大的生命力,迅速形成了一个具有广泛学科内容和潜在应用前景的研究领域。该领域大致包括纳米材料学、纳米化学、纳米计量学、纳米电子学、纳米生物学、纳米机械学、纳米力学等七个新生学科。

1.2 纳米科技的研究进展和趋势

纳米时代应是纳米科技像当今信息技术那样对人类生活和生产方式产生广泛而深刻影响的时代。因此说,纳米器件的研制水平和应用程度的高低是人类是否进入纳米时代重要的标志。纳米科技现在的发展水平只相当于计算机和信息技术在20世纪50年代的发展水平。人们研究纳米尺度基本现象的工具和对这些现象的理解水平还只是初步的。要想实现步入纳米时代的目标,尚有很多基础科学问题需要解答,包括对分子自组装如何理解、如何构造纳米器件、复杂的纳米结构系统是如何运作的等等。只有在物理、化学、材料科学、电子工程学以及其他学科均得到充分发展的情况下,才能真正形成一项成熟的纳米技术。美国《Science》杂志引用了一位科学家的话,他认为现在还没有一项真正成熟的纳米技术,这正是基于对纳米技术真正内涵的理解。

当前,纳米科技的研究方法有两种,即所谓的“从上到下”方法和“从下到上”方法。“从上到下”方法的主导思想是通过开发现有宏观工艺与技术潜力,实现材料或器件的微型化,包括光学光刻、电子束光刻、离子束光刻等技术。“从下到上”方法则是通过微观手段控制和操纵一个功能单分子,设计并构造各种新的物质和分子功能器件,包括

分子自组装、Langmuir-Blodgett (LB) 膜、有机分子束外延生长 (OMBE)、AFM/STM 技术等。这两种研究方法都可以用来衡量纳米科技的发展水平。

尽管我们与纳米时代的来临还有一段距离,但并不能武断地认为纳米科技不同方面和不同阶段的所有成果还都只停留在实验室阶段,是科学家自己的事情,与整个社会无关。或者认为当今时代就没有纳米科技的产品,所谓纳米科技的产品都是商业炒作或者欺诈行为。

据国外资料统计,2000 年全球仅纳米材料市场规模就达 750 亿美元,如果包括部分采用纳米技术的与电子元器件相关的产品,那么市场规模可达 3 750 亿美元。这在一定程度上归功于在磁性信息存储领域中巨磁阻现象的发现和应用。在巨磁阻现象被发现后的 10 年内,巨磁阻磁头已完全替代了在 1998 年拥有 340 亿美元市场规模的磁阻磁头。到了 2010 年,纳米材料的市场规模已达到 14 400 亿美元。企业为开拓巨大的潜在市场,正加强技术储备,努力占领战略制高点。由于目前的纳米科技,尤其是纳米材料在改造传统产业方面所表现出的投入少、见效快和市场前景广阔等特点,在以传统产业为主的我国企业内比较容易推广,因此,纳米科技的应用已得到我国企业界的热烈响应,这为纳米科技在中国的发展奠定了重要的动力基础。诺贝尔物理学奖获得者海·罗雷尔在 1993 年就指出:许多人认为纳米科技仅仅是遥远的未来基础科学的事情,而没有什么实际意义。但我确信纳米科技现在已具有与 150 年前微米科技一样的希望和重要意义。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,未来的技术优势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。我们应当记住,微米技术曾同样被认为对于使用牛耕地的农民无关紧要。的确,微米与牛和耕犁毫无关系,但它却改变了耕作方式,带来了拖拉机。

美国一家公司预测,纳米科技的发展将经历如下五个阶段:第一阶段是制备出原子数量准确地控制在 100 个以下的纳米结构物质。

这需要使用计算机设计与制造技术、现有工厂设备、超精密电子装置。这一阶段的市场规模约为5亿美元。第二阶段是生产纳米结构物质。在这个阶段,纳米结构物质和纳米复合材料的制造将达到实用化水平。其中包括从有机碳酸钙中制取的有机纳米材料,其强度将达到无机单晶材料的3 000倍。该阶段的市场规模在50亿~200亿美元之间。第三阶段,大量制造复杂的纳米结构物质将成为可能,超越“量子效应障碍”的技术将达到实用化水平。这要求有高级的计算机设计制造系统、目标设计技术、计算机模拟技术和组装技术等。本阶段的市场规模将达到100亿~1 000亿美元。第四阶段,纳米计算机技术将得以实现。这一阶段的市场规模将达到2 000亿~10 000亿美元。第五阶段,将研制出能够制造动力源且程序自律化的元件和装置,市场规模将高达6万亿美元。

纳米科技将对于人类生产和生活方式产生重大的影响,对促进传统产业的改造和升级意义重大,并且将有可能引发下一场工业革命,成为21世纪经济的新增长点。纳米科技的兴起,对我国提出了严峻的挑战,也为我国实现跨越式发展提供了难得的机遇。

为此,我们应该避免对纳米科技的一些认识误区。杜绝炒作,抓住机遇,发挥优势,突出特色。要加大研究基地的建设力度,改善基础设施条件,增加科技专项资金的投入,同时要重视对知识产权的保护。我国已有一定的纳米科技研究基础,今后的研究应更注重与产业化的结合,尤其是与传统产业结合,积极吸纳企业的参与与投入。纳米器件的研究水平和应用程度体现出一个国家纳米科技的总体水平,与信息产业及社会、经济、国防的关联度最大,需要的投入也最多。而我国在这方面投入较少,应积极组织力量开展研究,以实际应用为长远目标,在近20年内以基础研究和应用研究为主,在重视基础研究和应用研究的同时,兼顾与产业化的结合。

2001年我国通过的《国民经济和社会发展第十个五年规划纲要》明确提出了力争在纳米科技等方面取得新进展的目标,将发展纳米科技作为“十五”期间推动科技进步的一项重要任务。2001年初,国家

成立了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,制定有关发展规划。2001年7月,国务院批准了《国家纳米科技发展纲要(2001—2010)》,由国家科学技术部、国家发展计划委员会、教育部、中国科学院和国家自然科学基金委员会五个部门联合下发。至此,我国的纳米科技发展规划框架已经形成。在国家积极促进纳米科技发展的同时,地方政府亦高度重视纳米科技在本地的应用。据不完全统计,全国有一半的省市将纳米科技作为“十五”期间的发展规划。纳米科技在未来经济发展中将要产生的作用,得到了企业界的普遍关注。从事纳米材料生产和应用的企业如雨后春笋般在全国出现。2000年底,涉及纳米科技的企业达到300余家。

企业对纳米科技高度关注的现象说明纳米科技在满足市场需求方面已经开始崭露头角。推动科技成果产业化的主体是企业,应该积极鼓励企业参与纳米科技的发展。若要使企业界对纳米科技持续关注,一是要将国家目标与市场需求相结合,加强基础研究和应用研究,促使纳米科技的成果源源不断地涌现;二是要重视和加强纳米科技市场的培育,对纳米科技产品的技术标准问题给予高度重视。目前纳米科技产品在社会上出现的混乱状况,根本原因是没有技术标准。在这方面,有关部门应给予充分的重视。

1.3 碳纳米材料

1.3.1 纳米材料的特性

纳米材料是纳米科技的基础和核心,在纳米科技中占有举足轻重的地位。1994年在德国举行的第二届国际纳米材料学术会议上,有2/3的论文与纳米材料的制备有关,这表明了纳米材料的制备在纳米材料研究领域中的重要意义。纳米材料及其制备主要涉及纳米材料学和纳米化学等领域的内容。

20 世纪 90 年代以前,人们一度把粒径在 $0.1 \sim 100 \text{ nm}$ 范围内的粉末材料定义为纳米材料,其制造技术称为纳米技术。事实上,纳米材料是指基本结构单元在三维空间中至少有一个维度处在纳米量级($0.1 \sim 100 \text{ nm}$)的材料,它是由尺寸介于原子、分子和宏观体系之间的纳米粒子所组成的新一代材料。纳米材料按维度可分为:零维的纳米颗粒和原子簇,它们在空间中三维均在纳米尺度内(均小于 100 nm);一维的纳米线、纳米棒和纳米管,它们在空间中有二维处于纳米尺度;二维的纳米薄膜、纳米涂层和超晶格等,它们在空间中有一维处于纳米尺度。因为这些不同维度的纳米材料通常都具有量子特性,所以零维、一维和二维纳米材料又分别被称为量子点、量子线和量子阱。按照化学成分分类,纳米材料可分为:纳米金属、纳米晶体、纳米陶瓷、纳米玻璃以及纳米高分子等。按照材料的物理性质分类,纳米材料可分为:纳米半导体材料、纳米磁性材料、纳米非线性光学材料、纳米铁磁材料、纳米超导材料以及纳米热电材料等。按照应用分类,纳米材料又可分为:纳米电子材料、纳米光电子材料、纳米生物医用材料、纳米敏感材料以及纳米储能材料等。随着纳米材料学的不断发展,纳米材料必将在材料科学领域引发新一轮革命。

当颗粒尺寸进入纳米数量级时,其本身和由它构成的固体便会具有一些特殊的效应,并由此派生出许多传统固体不具备的特性。纳米微粒具有大的比表面积,其表面原子数、表面能和表面张力随粒径的下降急剧增加,因此能够表现出小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应及宏观量子隧道效应等,从而导致其热、磁、光、电特性和表面稳定性等不同于正常粒子,这就使得它具有广阔的应用前景。

1.3.1.1 小尺寸效应

当微粒的尺寸与光波波长、德布罗意波长以及超导态的相干长度或透射深度等物理特征尺寸相当或比它们更小时,晶体周期性的边界条件将被破坏;颗粒尺寸的改变,在一定条件下会引起颗粒性质的改变。由于颗粒尺寸变小所引起的宏观物理性质的变化称为小尺寸效

应。对超微颗粒而言,尺寸变小,同时其比表面积亦显著增加,从而产生如下一系列新奇的性质。

(1) 特殊的光学性质

当黄金被细分到小于光波波长的尺寸时,它即失去了原有的光泽而呈黑色。事实上,所有的金属在超微颗粒状态下都呈黑色。尺寸越小,颜色越黑,银白色的铂(白金)变成铂黑,金属铬变成铬黑。由此可见,金属超微颗粒对光的反射率很低,通常可低于1%,几微米的厚度就能完全消光。利用这个特性可以将金属制成高效率的光热、光电转换材料,高效率地将太阳能转变为热能、电能。此外,这一特性又有可能应用于制作红外敏感元件、红外隐身材料等。

(2) 特殊的热学性质

固态物质的形态为大尺寸时,其熔点是固定的,超细微化后其熔点将显著降低,当颗粒小于10 nm量级时尤为显著。例如,金的常规熔点为1 064 ℃,当颗粒尺寸减小到10 nm时,熔点则降低27 ℃,颗粒尺寸减小到2 nm时,熔点仅为327 ℃;银的常规熔点为670 ℃,而超微银颗粒的熔点可低于100 ℃。因此,采用超细银粉制成的导电浆料可以进行低温烧结,此时元件的基片不必采用耐高温的陶瓷材料制作,甚至可以使用塑料制作。采用超细银粉浆料,可使膜厚均匀,覆盖面积大,既省料又可得到高质量、高性能的产品。日本川崎制铁公司采用0.1~1 μm的铜、镍超微颗粒制成的导电浆料可代替钎与银等贵金属。超微颗粒熔点下降的性质对粉末冶金工业具有一定的吸引力。例如,在钨颗粒中附加0.1%~0.5%(质量分数)的超微镍颗粒后,可使烧结温度从3 000 ℃降低到1 200~1 300 ℃,以至于可在较低的温度下烧制成大功率半导体管的基片。

(3) 特殊的磁学性质

人们发现在鸽子、海豚、蝴蝶、蜜蜂以及生活在水中的趋磁细菌等生物体中存在超微的磁性颗粒,使这类生物在地磁场的导航作用下能辨别方向,具有回归原位的本领。磁性超微颗粒实质上是一个生物磁罗盘,生活在水中的趋磁细菌依靠它游向营养丰富的水底。通过电子

显微镜研究表明,在趋磁细菌体内通常含有直径约为 $2 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 的磁性氧化物颗粒。

小尺寸超微颗粒的磁性与大尺寸材料具有显著的不同。大尺寸的纯铁矫顽力约为 $80 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,而当颗粒尺寸减小到 $2 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 以下时,其矫顽力可增加 1 000 倍,若进一步减小其尺寸,使其小于 $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}$,则其矫顽力反而会降低到零,呈现出超顺磁性。利用磁性超微颗粒具有高矫顽力的特性,已做成高储存密度的磁记录材料,大量应用于磁带、磁盘、磁卡以及磁性钥匙等。利用超顺磁性,人们已将磁性超微颗粒制成用途广泛的磁性液体。

(4) 特殊的力学性质

陶瓷材料在通常情况下呈脆性,然而由纳米超微颗粒压制成的纳米陶瓷材料却具有良好的韧性。因为纳米材料具有大的比表面积,表面的原子排列是相当混乱的,原子在外力的作用下很容易迁移,因此表现出甚佳的韧性与一定的延展性,使陶瓷材料具有新奇的力学性质。美国学者报道,氟化钙纳米材料在室温下可以大幅度弯曲而不断裂。研究表明,人的牙齿之所以具有很高的强度,是因为它是由磷酸钙等纳米材料构成的。处于纳米晶粒状态的金属要比传统的粗晶粒金属硬 3~5 倍。至于金属-陶瓷复合纳米材料,则可在更大的范围内改变其力学性质,其应用前景十分宽广。超微颗粒的小尺寸效应还表现在超导电性、介电性能、声学特性以及化学性能等方面。

纳米微粒的尺度一般在 $0.1 \sim 100 \text{ nm}$ 之间,用它做成的纳米材料会表现出小尺寸效应。图 1-1 为纳米多级结构扁圆形多孔 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的扫描电子显微镜与透射电子显微镜图。由于它的尺寸与光波波长、德布罗意波长以及超导态的相干长度或透射深度等物理特征尺寸相当或更小,因此其声、光、磁、电、热等特性会呈现出小尺寸效应。利用纳米材料熔点降低的性质,我们可以在低温的条件下制备合金,而且也可以将不互溶的金属冶炼成合金。例如钛合金的制备将会更加容易,因为熔点降低,以前没有办法制备的性能更好的合金就会被制备出来,这将会给航天材料的制备技术带来革新,为航天事业的发展带