

纳米材料 及其制备

NAMICAILIAOJIQIZHIBEI

方 华 刘爱东 编著



哈尔滨地图出版社

内 容 简 介

纳米材料具有许多传统材料无法媲美的奇异特性和非凡的特殊功能,将成为 21 世纪新技术革命的主导。本书全面系统地介绍了纳米材料及其合成制备技术。由活跃在纳米材料领域第一线的从事科研和教学的学者撰写而成,全书共分 6 章,主要论述纳米材料的基本概念和基本理论,纳米材料的结构、性能及表征,极端条件、温和条件以及仿生模板方法合成制备纳米材料等。撰写中注意了材料和制备并重、基础和前沿并重、科学和技术并重。

本书适合于从事或有兴趣于纳米科技研究或教学的教师、研究生、本科生、科研工作者和工程技术人员阅读,也可作为大专院校有关材料专业的本科生、研究生的教学用书。

前 言

纳米科技是 21 世纪非常重要的,将对人类的生存和发展产生显著影响的科技领域。“纳米”人才的培养对于纳米科技的发展和我国纳米科技在国际舞台上竞争的胜负起着至关重要的作用。本书是我们在长期的教学和科研实践中,根据国内外近年来发表的有关论文、科研成果和教学的实践经验与心得进行系统总结而写成的。与此同时,我们还吸收了当前国内外在纳米领域中的若干新成果、新理论和新观点,我们力求以最新的内容比较全面和系统地介绍纳米材料及其制备。在撰写中注重材料和制备并重、基础和前沿并重、科学和技术并重,书中不乏对一些科学现象进行生动有趣地描述和对基本原理进行深入浅出的解释。

本书共分 6 章。第 1 章、2 章、3 章、4 章、5 章,第 6 章第 2 节由大庆石油学院方华编写,第 6 章第 1 节由哈尔滨工程大学刘爱东编写。全书由方华负责统稿。

本书适合于从事或有兴趣于纳米科技研究或教学的教师、研究生、本科生、科研工作者和工程技术人员阅读。书中一定有不少我们目前尚未认识的错误和不当之处,敬请读者们批评指正。

作 者
2005 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 材料与材料科学	1
1.1.1 材料	1
1.1.2 材料发展与人类社会进步	2
1.1.3 材料科学的形成与内涵	5
1.2 纳观世界	8
1.3 纳米科技的发展历史	11
第 2 章 纳米材料的基本效应	14
2.1 Kubo 理论	14
2.1.1 Kubo 理论	14
2.1.2 Kubo 理论的修正	16
2.2 纳米材料的基本效应	17
2.2.1 量子尺寸效应	17
2.2.2 小尺寸效应	17
2.2.3 表面效应	18
2.2.4 宏观量子隧道效应	19
2.2.5 库仑堵塞与量子隧穿	20
2.2.6 介电限域效应	21
2.2.7 有关基本效应的若干实例	21
第 3 章 纳米材料的结构、性能及表征	23
3.1 零维纳米材料的结构	23
3.1.1 团簇	23
3.1.2 纳米颗粒	25
3.1.3 纳米颗粒尺寸的评估	27

3.2 一维纳米材料的结构	30
3.2.1 纳米碳管的结构	30
3.2.2 纳米硅线的结构	30
3.2.3 SiC 纳米线的结构	30
3.3 纳米块体的结构	31
3.3.1 纳米块体的分类、基本构成及结构特点	31
3.3.2 纳米块体材料的界面结构	35
3.4 纳米颗粒的性质	42
3.4.1 纳米颗粒的光学性质	42
3.4.2 纳米悬浮颗粒的性质	46
3.4.3 纳米颗粒的分散与团聚	48
3.5 一维纳米材料的性质	49
3.5.1 电学性质	49
3.5.2 场发射性质	49
3.5.3 热学性质	50
3.5.4 力学性质	50
3.6 纳米块体的性质	50
3.6.1 纳米块体材料中的扩散	50
3.6.2 纳米块体材料的力学性能	54
3.6.3 纳米块体材料的热学性质	57
3.6.4 纳米块体材料的电学性质	60
3.6.5 纳米块体材料的磁学性能	65
3.7 纳米科学研究方法	67
3.7.1 量子隧道效应	68
3.7.2 隧道电流	68
3.7.3 STM 工作原理	69
3.7.4 扫描探针显微技术的关键问题	69
3.7.5 STM 针尖的制备	70

第4章 极端条件下合成制备纳米材料	72
4.1 纳米材料合成制备概述	72
4.1.1 纳米材料的合成路线	73
4.1.2 纳米材料合成制备中的实验技术和方法	77
4.1.3 纳米材料合成制备中的分离方法	77
4.1.4 纳米材料合成制备中的结构表征	78
4.1.5 纳米材料的合成制备方法	78
4.2 化学气相沉积	79
4.2.1 引言	79
4.2.2 化学气相沉积的化学反应	82
4.2.3 能源增强	85
4.2.4 化学气相沉积的成核理论模型	87
第5章 温和条件下合成制备纳米材料	93
5.1 引言	93
5.2 软化学原理	95
5.3 沉淀法	99
5.3.1 共沉淀法	99
5.3.2 均相沉淀法	101
5.3.3 络合沉淀法	101
5.4 水解法	101
5.4.1 无机盐水解法	101
5.4.2 金属醇盐水解法	102
5.5 溶胶—凝胶法	106
5.5.1 溶胶的制备	106
5.5.2 凝胶的形成	110
5.6 微乳液法	113
5.6.1 乳状液	113
5.6.2 微乳液	128

5.7 插层和支撑	134
5.7.1 插层	134
5.7.2 支撑和接枝	144
第6章 仿生与模板方法合成纳米材料	148
6.1 仿生合成	148
6.1.1 引言	148
6.1.2 仿生合成的基本原理	149
6.1.3 仿生合成中的控制	151
6.1.4 自组装	157
6.1.5 有机基质调制形核	165
6.2 模板合成	174
6.2.1 引言	174
6.2.2 重要模板概述	175
6.2.3 模板合成方法	178
6.2.4 模板合成的未来发展	181
参考文献	184

第1章 绪 论

1.1 材料与材料科学

1.1.1 材料

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品的那些物质。材料是物质,但不是所有物质都可以称为材料。如燃料和化学原料、工业化学品、食物和药物,一般都不算是材料。但是这个定义并不那么严格,如炸药、固体火箭推进剂,一般称之为“含能材料”,因为它属于火炮或火箭的组成部分。

材料是人类赖以生存和发展的物质基础。20世纪70年代人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。20世纪80年代以高技术群为代表的新技术革命,又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是因为材料与国民经济建设、国防建设和人民生活密切相关。

材料除了具有重要性和普遍性以外,还具有多样性。由于其多种多样、分类方法也就没有一个统一标准。从物理化学属性来分,分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和不同类型材料所组成的复合材料。从用途来分,分为电子材料、航空航天材料、核材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。更常见的两种分类方法则是结构材料与功能材料;传统材料与新型材料。

结构材料是以力学性能为基础,是制造受力构件所用材料,当然,结构材料对物理或化学性能也有一定要求,如光泽、热导率、抗辐射、抗腐蚀、抗氧化等。功能材料则主要是利用物质的独特物理、化学性质或生物功能等而形成的一类材料。一种材料往往既是结构材

料又是功能材料,如铁、铜、铝等。

传统材料是指那些已经成熟且在工业中已批量生产并大量应用的材料,如钢铁、水泥、塑料等。这类材料由于用量大、产值高、涉及面广泛,又是很多支柱产业的基础,所以又称为基础材料。新型材料(先进材料)是指那些正在发展,且具有优异性能和应用前景的一类材料。新型材料与传统材料之间并没有明显的界限,传统材料通过采用新技术,提高技术含量,提高性能,大幅度增加附加值而成为新型材料;新材料在经过长期生产与应用之后也就成为传统材料。传统材料是发展新材料和高技术的基础,而新型材料又往往能推动传统材料的进一步发展。

1.1.2 材料发展与人类社会进步

人类发展的历史证明,材料是社会进步的物质基础,是人类进步程度的主要标志,所以人类社会的进步以材料作为里程碑。纵观人类发现材料和利用材料的历史,每一种重要材料的发现和广泛利用,都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新水平,给社会生产力和人类生活水平带来巨大的变化,把人类的物质文明和精神文明向前推进一步。

1. 石器时代

早在100万年以前,人类开始用石头做工具,使人类进入旧石器时代。大约1万年以前,人类知道对石头进行加工,使之成为精致的器皿或工具,从而使人类进入新石器时代。在新石器时代,人类开始用皮毛遮身。8000年前中国就开始用蚕丝做衣服,4500年前印度人开始种植棉花,这些都标志着人类使用材料来促进文明进步。在新石器时代,人类已经知道使用自然铜和天然金,但毕竟数量太少,分散细小,没有对人类社会产生重要影响。

大约在8000~9000年前,人类还处于新石器时代,就发明了用粘土成型,再火烧固化而成的陶器。陶器的出现,不但用于器皿,而且成为装饰品,是对精神文明的一大促进,历史上虽无陶器时代的名

称,但其对人类文明的贡献是不可估量的。

2. 青铜器时代

在烧制陶器过程中,偶然发现金属铜和锡,当然那时还不明白这是铜、锡的氧化物在高温下被碳还原的产物,进而又生产出色泽鲜艳、又能浇铸成型的青铜,从而使人类进入青铜时代。这是人类较大量利用金属的开始,也是人类文明发展的重要里程碑。世界各地开始青铜时代的时间各不相同,希腊在公元前 3000 年前,埃及在公元前 2500 年前,巴比伦在公元前 19 世纪中叶,印度大约在公元前 3000 年已广泛使用青铜器。中国的青铜器在公元前 2700 年就已经使用了,至今约有 5 000 年的历史,到商周(公元前 17 世纪到公元前 3 世纪)进入了鼎盛时期,如河南安阳出土的达 875 kg 的鼎、湖北随县的编钟、西安青铜车马都充分反映了当时中国冶金技术水平和制造工艺的高超。

3. 铁器时代

公元前 13 ~14 世纪前,人类已开始用铁,3 000 年前铁工具比青铜工具更为普遍,人类开始进入了铁器时代。中国最早出土的人工冶铁制品约在公元前 9 世纪。到春秋(公元前 770—476 年)末期,生铁技术有了较大突破,遥遥领先于世界其他地区,如用生铁退火而制成韧性铸铁及以生铁炼钢技术的发明,促进了中国生产力的大发展,对战国和秦汉的农业、水利和军事的发展起到了推动作用。早在公元 2 世纪中国的钢和丝绸已驰名罗马帝国。生铁技术在公元前 5 世纪即春秋末期已经在黄河、长江流域传播。这些技术于公元 6 ~7 世纪传入朝鲜半岛、日本和北欧,推动了整个世界文明的进步。

随着世界文明的进步,18 世纪发明了蒸汽机,19 世纪发明了电动机,对金属材料提出了更高的要求,同时对钢铁冶金技术产生了更大的推动作用。1854 年和 1864 年先后发明了转炉和平炉炼钢,使世界钢产量有了飞速的发展。如 1850 年世界钢产量为 6 万吨,1890 年达 2 800 万吨,大大促进了机械制造、铁道交通及纺织工业的发

展。随之电炉冶炼开始,不同类型的特殊钢相继问世,如 1887 年高锰钢、1900 年 18-4-1(W 18Cr4 V)高速钢、1903 年硅钢及 1910 年奥氏体镍铬(Cr18Ni8)不锈钢,把人类带进了物质文明的时代。在此前后,铜、铝也得到大量应用,而后镁、钛和很多稀有金属都相继出现,从而使金属材料在整个 20 世纪占据了结构材料的主导地位。

随着有机化学的发展,19 世纪末期西方科学家仿制中国丝绸发明了人造丝,这是人类改造自然材料的又一里程碑。20 世纪初,人工合成有机高分子材料相继问世,如 1909 年的酚醛树脂(电木),1920 年的聚苯乙烯,1931 年的聚氯乙烯及 1941 年的尼龙等,以其性能优异,资源丰富,建设投资少、收效快而得到迅速发展。目前世界三大有机合成材料(树脂、纤维和橡胶)年产量逾亿吨。而且有机材料的性能不断提高,附加值大幅度增加,特别是特种聚合物正向功能材料各个领域进军,显示其巨大的潜力。

陶瓷本来用作建筑材料、容器或装饰品等。由于其资源丰富、密度小、高模量、高硬度、耐腐蚀、膨胀系数小、耐高温、耐磨等特点,到了 20 世纪中叶,通过合成及其他制备方法,能做出各种类型的先进陶瓷,成为近几十年来材料研究领域非常活跃的分子,有人甚至认为“新陶器时代”即将到来。但由于其脆性问题难以解决,且价格过高,作为结构材料没有得到如钢铁或高分子材料一样的广泛应用。

复合材料是 20 世纪后期发展的另一类材料。众所周知,天然材料很多是复合材料,如木材、皮革、竹子等。事实上,人类很早就制造复合材料,如泥巴中混入碎麻或麦秆用以建造房屋,钢筋水泥是脆性材料和韧性材料的复合。近几十年来,利用树脂的易成型和金属韧性好,无机非金属的高模量、高强度、耐高温,做成了树脂基复合材料或金属基复合材料,前者已得到广泛应用,后者以其制作困难、价格高而受到一定限制。为了改善陶瓷的性能,也制成陶瓷基复合材料。碳是使用温度最高的材料(可达 2 500 ℃),为了克服热震性能差,并提高其力学性能而制出的碳—碳复合材料已广泛用于军工领域,并

扩展到民用领域。

以上仅以结构材料为主线,概述了材料的发展历史。可以看出,自19世纪中叶现代炼钢技术出现以后,金属材料的重要性急剧增加,一直到20世纪中叶,人工合成的有机材料、陶瓷材料及先进复合材料迅速发展,金属材料的重要性才逐渐下降,但一直到21世纪上半叶,金属材料仍将占有重要位置。

功能材料自古就受到重视,早在战国(公元前3世纪)时期已利用天然磁铁矿来制造司南,到宋代用钢针磁化制出了罗盘,为航海的发展提供了关键的技术。功能材料是信息技术及自动化的基础,特别是半导体材料出现以后,加速了现代文明的发展,1947年发明了第一只具有放大作用的晶体管,10余年后又成功研制了集成电路,使以硅材料为主体的计算机的功能不断提高,体积不断缩小,价格不断下降,加之高性能的磁性材料不断涌现,激光材料与光导纤维的问世,使人类社会进入了信息时代。因为硅是微电子技术的关键材料,所以有人称“硅片为代表的电子材料时代”到来,再一次说明材料对人类文明起了关键的作用。

1.1.3 材料科学的形成与内涵

“材料”是早已存在的名词,但“材料科学”的提出则是20世纪60年代初的事。1957年前苏联人造卫星首先上天,美国朝野上下为之震惊,认为自己落后的主要原因之一是先进材料落后,于是在一些大学相继成立了10余个材料研究中心。采用先进的科学理论与实验方法对材料进行深入研究,取得重要成果。从此,“材料科学”这个名词便开始流行。

“材料科学”的形成实际是科学技术发展的结果。

固体物理、无机化学、有机化学、物理化学等学科的发展,对物质结构和物性的深入研究,推动了对材料本质的了解;同时,冶金学、金属学、陶瓷学、高分子科学等的发展也使对材料本身的研究大大加强,从而对材料的制备、结构与性能,以及它们之间的相互关系的研

究也愈来愈深入,为材料科学的形成打下了比较坚实的基础。

在材料科学这个名词出现以前,金属材料、高分子材料与陶瓷材料都已自成体系,目前复合材料也获得广泛应用,其研究也逐步深入。但它们之间存在着颇多相似之处,对不同类型材料的研究可以相互借鉴,从而促进学科的发展。如马氏体相变本来是金属学家提出来的,而且被广泛地用来作为钢热处理的理论基础;但在氧化锆陶瓷中也发现了马氏体相变现象,并用来作为陶瓷增韧的一种有效手段。又如材料制备方法中的溶胶—凝胶法,是利用金属有机化合物的分解而得到纳米级高纯氧化物粒子,成为改进陶瓷性能的有效途径。虽然不同类型的材料各有其专用测试设备与生产装置,但各类材料的研究检测设备与生产手段有颇多共通之处。例如,显微镜、电子显微镜、表面测试及物性与力学性能测试设备等。在材料生产中,许多加工装置的原理也有颇多相通之处,可以相互借鉴,从而加速材料的发展。

许多不同类型的材料可以相互替代和补充,能更充分发挥各种材料的优越性,达到物尽其用的目的。但长期以来,金属、高分子及无机非金属材料自成体系,缺乏沟通。由于互不了解,不利于发展创新,对复合材料的发展也极为不利。

尽管从材料发展需要和共性来看,有必要形成一门材料科学,但是由于各类材料的学科基础不同,还存在不小的分歧,特别是无机材料与有机材料之间分歧较大。

材料科学所包括的内容往往被理解为研究材料的组织、结构与性质的关系,探索自然规律,这属于基础研究。实际上,材料是面向实际、为经济建设服务的,是一门应用科学,研究与发展材料的目的在于应用,而材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出具有实用价值的材料来,通过批量生产才能成为工程材料。所以,在“材料科学”这个名词出现后不久,就提出了“材料科学与工程”这一概念。工程是指研究材料在制备过程中的工艺和工程技术问题。许多大学

的冶金系、材料系也就此改变了名称,多数改为“材料科学与工程系”,偏重基础方面的就称“材料科学系”,偏重工艺方面的称“材料工程系”。也有不肯放弃“冶金”而称“冶金与材料科学系”的,如英国的剑桥大学。同时,有关材料科学或材料科学与工程方面的杂志和书籍也应运而生。第一部《材料科学与工程百科全书》由美国麻省理工学院的科学家主编,由英国 Pergamon 自 1986 年陆续出版。它对材料科学与工程下的定义为:材料科学与工程就是研究有关材料组成、结构、制备工艺流程与材料性能和用途的关系的知识的产生及其运用。换言之,材料科学与工程是研究材料组成、结构、生产过程、材料性能与使用效能以及它们之间的关系的学科。因而把组成与结构、合成与生产过程、性质及使用效能称为材料科学与工程的四个基本要素,把四要素连结在一起,便形成一个四面体。

考虑在四要素中的组成/结构并非同义词,即相同成分或组成通过不同的合成或加工方法,可以得出不同结构,从而材料的性质或使用效能都不会相同。因此,我国有人提出一个五个基本要素的模型,即成分、合成/加工、结构、性质和使用效能。如果把它们连接起来,则形成一个六面体。

材料科学与工程五要素模型的特点主要有两个:一是性质与使用效能有一个特殊的联系,材料的使用效能便是材料性质在使用条件下的表现。环境对材料性能的影响很大,如受力状态、气氛、介质与温度等。有些材料在一般环境下的性能很好,而在腐蚀介质下性能却下降显著;有的材料在光滑样品时表现很好,而在有缺口的情况下性能大为下降,特别有些高强度材料表现尤为突出,但凡有一个划痕,就会造成灾害性破坏。因此,环境因素的引入对工程材料来说十分重要。二是材料理论和材料设计或工艺设计有了一个适当位置,它处在六面体的中心。因为这五个要素中的每一个要素,或几个相关要素都有其理论,根据理论建立模型,通过模型可以进行材料设计或工艺设计,以达到提高性能及使用效能、节约资源、减少污染或降

低成本的最佳状态。这是材料科学与工程最终努力的目标。有人设想提出性能指标或使用效能要求,可以通过材料配方,采用最佳工艺,就可制备出符合要求的材料或器件。应该说明,目前国际流行的仍是四要素模型,五要素模型在国际上也有人引用。

根据以上所述,材料科学有三个重要属性:一是多学科交叉,它是物理学、化学、冶金学、金属学、陶瓷、高分子化学及计算科学相互融合与交叉的结果,如生物医用材料要涉及医学、生物学及现代分子生物学等学科;二是一种与实际使用结合非常密切的科学,发展材料科学的目的在于开发新材料,提高材料的性能和质量,合理使用材料,同时降低材料成本和减少污染等;三是材料科学是一个正在发展中的科学,不像物理学、化学已经有一个很成熟的体系,材料科学将随各有关学科的发展而得到充实和完善。

1.2 纳观世界

人类认识外部世界是从“肉眼”开始的,用眼睛观察周围物体,后来借助各种望远镜探测宇宙,借助各种显微镜观察微小世界。随着对客观世界认识的不断深入,人类将自然界划分为两个层次,即宏观体系和微观体系。宏观体系以肉眼可见的最小物体为下限,上至无限大的宇宙天体;微观体系以分子原子为最大起点,下限是无限的领域。然而,直到近些年人们才将目光和兴趣转到宏观体系和微观体系之间的“神秘地带”。

描述人类直接接触环境的参量称为人类感知参量,最小单位是毫米、克、秒。人眼能看到的是可见光(光波长范围为 $320 \sim 760 \text{ nm}$),人耳能听到的是声波(振动频率范围为 $20 \sim 80\,000 \text{ Hz}$),可感触的是环境温度(范围为 $-100 \sim -200 \text{ }^{\circ}\text{C}$)。在人类感知参量中,长度单位是米(m),其千分之一是毫米(mm),毫米的千分之一是微米,微米的千分之一是纳米(nm)。由此可知1纳米等于十亿分之一米。纳

米对于人类来说是一个很小的长度,如果将1 m与1 nm相比,就相当于地球与一个玻璃弹球大小相比。

人的头发在显微镜下观察,可测得直径为50~80 μm 。单个细胞用肉眼看不见,但在显微镜下观察,可测得直径为5 000 nm。氢原子的直径为0.1 nm,一般金属原子直径为0.3~0.4 nm,所以1 nm约等于4个原子的直径。目前,最小的集成电路,每个边长为0.25 nm,在这个电路的表面可包含100万个原子。纳米科学是研究0.1~100 nm范围内物质所特有的现象和功能的科学,是研究在十亿分之一到千万分之一米内,原子、分子和其他类型物质的运动和变化的科学。也就是说,几十个原子、分子或成千个原子和分子“组合”在一起时,表现出既不同于单个原子、分子的性质,也不同于宏观物质的性质。有时这种组合被称为“超分子”或“人工分子”,以区别于正常的原子和分子,这种“超分子”往往具有人们意想不到的性质。天然分子的大小从具有3个原子的水分子到具有几百个原子的蛋白质和具有几百万个原子的DNA分子,都在纳米尺度范围。在纳米量级内,物质颗粒的尺寸已经接近原子,这时量子效应已开始影响到物质的结构和性能。

介于宏观体系和微观体系之间存在一个介观体系。物理学家将描述这个尺寸范围的科学称为介观物理。人类早已认识到物质是由原子构成的,宏观体系是由无穷多个原子组成的,物体增加或减少一小部分原子都不会影响物体的性质,而组成宏观物体的原子、分子和更小的基本粒子构成了微观体系。纳观世界,它通常的尺寸范围为1~100 nm。纳米体系是由有限个原子构成的,它有不同于块体的结构和特性,也有不同于原子的结构和特性。

通常认为头发是很细微的,有时说某人吝啬,形容为“拔一毛立天下,而不为之者”,可见头发是微不足道的。而人的一根头发直径约为80 000 nm,如果一个汉字写入尺寸为10 nm,那么在一根头发丝的直径上就可写入8 000字,相当于一篇较长的科技论文容量,这

种技术对于现代来说是惊人的。纳米科技将会给人类带来很多惊奇。如果考虑将我国 13 亿人的名字登录下来,每个名字平均 3 个字,将近 40 亿个汉字,按现行普通书的容量,若每本 40 万字将是 1 万本书。而用纳米记录技术,在三毛的三根头发上就足够写下 13 亿人的名字。所以说纳米世界对人类是充满惊奇的世界。

最近,威尔斯等人在南太平洋发现小于 120 nm 的海洋胶体粒子的浓度至少是亚微米粒子的 3 倍,而且深度分布奇特,通过对这些纳米粒子的研究,可以了解海洋、生命的起源以及获取开发海洋资源的信息。以前人们认为蜜蜂是利用北极星或通过摇摆舞向同伴传递信息来辨别方向的。最近,英国科学家发现,蜜蜂的腹部存在磁性纳米粒子,这种磁性颗粒具有指南针功能,蜜蜂利用这种“罗盘”来确定其周围环境在自己头脑里的图像而判明方向。当蜜蜂靠近自己的蜂房时,它们就把周围环境的图像储存起来,当它们外出采蜜归来时,就启动这种记忆,实质上就是把自己储存的图像与所看到的图像进行对比和移动,直到这两个图像完全相一致时,它们就明白自己又回到家了。研究生物体内的纳米颗粒对于了解生物的进化和运动的行为是很有意义的。磁性超颗粒子的发现对于了解螃蟹的进化历史提供了十分有意义的科学依据。据生物科学家最近研究指出,人们非常熟悉的螃蟹早先并不像现在这样“横行”运动,而是像其他生物一样前后运动,这是因为亿万年前螃蟹第一对触角里有几颗用于定向的磁性纳米颗粒,就像是几只小指南针。螃蟹的祖先靠这种“指南针”堂堂正正地前进后退,行走自如。后来,由于地球的磁场发生了多次剧烈的倒转,使螃蟹体内的小磁粒失去了原来的定向作用,失去了前后行动的功能,变成了横行。真正利用磁性纳米颗粒导航,进行几万千米长途跋涉的是海龟。美国科学家对东海岸佛罗里达的海龟进行了长期研究,发现了一个十分有趣的现象:这就是海龟通常在佛罗里达的海边上产卵,幼小的海龟为了寻找食物通常要到大西洋的另一侧靠近英国的小岛附近的海域生活,从佛罗里达到这个岛屿