



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

纳米材料及其制备技术

刘漫红 等编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

教育部高等学校化学工程与工艺专业教学指导委员会推荐教材

纳米材料及其制备技术

陈景江 李永强

化学工业出版社



普通高等教育“十二五”规划教材

纳米材料及其制备技术

刘漫红 隋 凝 孙瑞雪 肖海连 编著
于寿山 姜迎静 李桂村

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 提 要

本书共分 10 章,介绍了有关纳米材料的基本知识(基本结构单元、基本效应)及发展,并结合一些具体实例介绍了纳米材料的物理和化学性能,以及制备纳米材料常用的方法,包括物理法、化学气相法、沉淀法、溶剂热法、溶胶-凝胶法、化学还原法、模板法等。

本书可用作高等学校材料学、应用化学、化工、纺织、制药、环境、电子等专业的本科生及研究生教材,也可供有关专业师生、科技人员、技术工人、工程技术人员及企业家参考、阅读。

图书在版编目(CIP)数据

纳米材料及其制备技术 / 刘漫红等编著. —北京: 冶金工业出版社, 2014. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6491-2

I. ①纳… II. ①刘… III. ①纳米材料—制备—高等学校—教材 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 169246 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 李 臻 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6491-2

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版, 2014 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 13.25 印张; 323 千字; 202 页

30.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010)65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

尺度在1~100nm范围内的纳米材料是纳米科技的基石,因其独特的纳米效应,近年来已成为世界科技竞争的热点领域之一。纳米材料是一门涉及知识面广的交叉学科,新概念、新理论、新技术及新方法层出不穷。纳米科技面临着原始创新的机遇与挑战,尤其是纳米科技正在将微制造推向纳制造与纳加工的前沿,各种材料产品正从微尺度向纳尺度悄然转变,新材料、新产品呼之欲出,这将给信息产业、能源、环境检测、生命科学、军事、材料的生产与加工带来一场革命性的变革。因此,了解纳米科技的发展动态,加强对纳米材料的基本概念和基础知识的学习,掌握纳米材料的特性、制备原理及研究方法就显得十分重要。

纳米材料包括无机材料、有机材料、金属材料及生物材料等,其研究范围非常宽广,内涵非常丰富。本书是编者在多年为本科生及研究生讲授“纳米材料”课程的基础上,结合国内外近年来公开发表的文献,进行不断的修改、补充及完善后编写而成的,但由于受到篇幅的限制,本书不可能涵盖上述所有研究内容,因此,只对纳米材料的基本概念、相关基本效应、特殊的物理化学性能及制备方法等进行简要的阐述。本书共10章,第1章主要介绍了纳米科技的基本概念、研究进展及最新成果;第2章涉及纳米材料和纳米效应的相关概念;第3章是关于纳米材料的热学、电学、光学、磁学、力学和化学性能等;第4章重点介绍了纳米材料的物理制备方法;第5章介绍了纳米材料的气相化学制备方法;第6章是沉淀法制备纳米材料;第7章介绍了溶剂热法制备纳米材料;第8章介绍了溶胶-凝胶法制备纳米材料;第9章是化学还原法制备金属纳米材料;第10章介绍了模板法在纳米材料制备中的应用。

编者衷心感谢青岛科技大学给予的经费资助。在编写过程中,作者阅读了相关文献资料,从中获得了许多前瞻性的珍贵信息,特此向书中所引用文献的作者表示深深的谢意。冶金工业出版社对本书的出版提供了大力的支持,在此

一并表示衷心的感谢。同时对关心和支持过本书编写的有关人士表示最诚挚的谢意。

鉴于作者水平有限，编写时间仓促，加之纳米材料领域发展很快，许多新知识和新成果反映得不是十分全面，本书中疏漏和不足之处在所难免，敬请同行和读者批评指正。

编 者

2014 年 5 月于青岛科技大学

目 录

1 绪论	1
1.1 纳米科技的内涵	1
1.1.1 纳米科技研究的尺度	1
1.1.2 纳米科技的内涵	2
1.2 纳米科技的发展	3
1.2.1 纳米科技诞生的历史背景	3
1.2.2 自然界中的纳米材料——纳米科技发展的重要启示	4
1.2.3 纳米科技发展的驱动力	13
1.2.4 纳米科技发展的里程碑	19
1.3 纳米材料在纳米科技中的地位	23
思考题	24
2 纳米材料的基本概念及基本效应	25
2.1 纳米材料的定义	25
2.1.1 纳米材料的定义	25
2.1.2 纳米材料的内涵	25
2.1.3 纳米材料的举例	26
2.2 纳米材料的基本结构单元	26
2.2.1 团簇	26
2.2.2 纳米粒子	31
2.2.3 准一维纳米材料	31
2.2.4 人造原子	32
2.2.5 几个物理概念	34
2.2.6 纳米相材料	35
2.3 纳米材料的基本效应	37
2.3.1 表(界)面效应	37
2.3.2 量子尺寸效应	38
2.3.3 小尺寸效应	39
2.3.4 介电限域效应	39
2.3.5 库仑阻塞与单电子隧穿效应	39
2.3.6 宏观量子隧道效应	41
2.4 纳米材料的发展史及研究内容	41

2.4.1 纳米材料的发展史	41
2.4.2 纳米材料科学的研究对象	42
思考题	42
3 纳米微粒的结构与物理化学特性	43
3.1 纳米微粒的结构与形貌	43
3.2 热学性能	45
3.2.1 纳米微粒的熔点和烧结温度	46
3.2.2 纳米晶体的比热容	50
3.2.3 纳米晶体的热膨胀	51
3.2.4 纳米晶体的晶粒成长	52
3.3 电学性能	56
3.3.1 纳米晶金属电导的尺寸效应	57
3.3.2 纳米金属与合金的电阻	57
3.3.3 纳米材料的介电特性	59
3.4 光学性质	62
3.4.1 宽频带强吸收	62
3.4.2 吸收光谱的蓝移现象	63
3.4.3 吸收光谱的红移现象	64
3.4.4 激子吸收带——量子限域效应	64
3.4.5 纳米颗粒的发光现象	65
3.5 磁学性质	67
3.5.1 纳米材料的磁学特性	67
3.5.2 纳米磁性材料	70
3.6 力学性质	73
3.6.1 Hall-Petch 关系	73
3.6.2 弹性模量	75
3.6.3 超塑性	75
3.7 纳米微粒悬浮液和动力学性质	76
3.7.1 布朗运动	76
3.7.2 扩散	77
3.7.3 沉降和沉降平衡	77
3.8 纳米微粒的化学特性	78
3.8.1 吸附	78
3.8.2 纳米微粒的分散与团聚	79
3.8.3 表面活性及敏感特性	80
3.8.4 催化性能	80

思考题	84
4 纳米材料的物理制备方法	85
4.1 概述	85
4.2 纳米粒子的物理制备方法	86
4.2.1 机械粉碎法	86
4.2.2 纳米粒子合成的物理方法——构筑法	91
4.2.3 纳米相固体的物理制备方法	99
思考题	99
5 化学气相法制备纳米材料	100
5.1 纳米粒子的气相反应法	100
5.1.1 化学气相反应法的类型	100
5.1.2 气相合成纳米粒子的生成条件	102
5.1.3 气相化学反应制备纳米粒子的特点	102
5.1.4 纳米微粒形态控制技术	102
5.1.5 气相化学反应物系活化的方式——几种加热技术	102
5.2 化学气相沉积	105
5.2.1 化学气相沉积技术介绍	105
5.2.2 化学气相沉积的反应类型	106
5.2.3 化学气相沉积装置	110
5.2.4 化学气相沉积的特点	112
5.2.5 化学气相沉积的机理	113
5.2.6 化学气相沉积法制备纳米材料	117
5.2.7 碳纳米管(CNTs)的制备	121
思考题	124
6 沉淀法制备纳米材料	125
6.1 沉淀法的定义	125
6.1.1 沉淀的定义及原理	125
6.1.2 沉淀法的定义	125
6.2 沉淀法的分类	126
6.2.1 单组分沉淀法(直接沉淀法)	126
6.2.2 共沉淀法(多组分共沉淀法)	126
6.2.3 均匀沉淀法	128
6.3 沉淀的过程和机理	130
6.3.1 成核	130
6.3.2 晶核生长	131
6.3.3 晶型沉淀和无定形沉淀形成的条件	132

6.3.4 沉淀的陈化(老化)	132
6.4 沉淀法的操作技术要点和影响因素	133
6.5 沉淀法的特点及缺点	134
思考题	134
7 溶剂热法制备纳米材料	135
7.1 水热法的历史回顾	135
7.2 水热法的基本概念	135
7.3 水热合成中主要反应类型	136
7.4 水热法的基本原理	138
7.4.1 临界状态和超临界状态	138
7.4.2 水热条件下水的状态、性质	139
7.4.3 高温高压水的作用	140
7.4.4 各类化合物在水热溶液中的溶解度	140
7.5 水热合成法中材料的形成机理	140
7.6 水热合成的主要仪器设备	142
7.6.1 反应釜	142
7.6.2 反应控制系统	143
7.7 水热法的优缺点	143
7.7.1 水热法的优点	144
7.7.2 水热法的不足	144
7.8 水热合成技术的扩展——溶剂热法	144
7.8.1 溶剂热法分类	145
7.8.2 溶剂热法的特点	147
7.8.3 溶剂热法常用溶剂	147
思考题	148
8 溶胶-凝胶法制备纳米材料	149
8.1 胶体、溶胶的基本概念	149
8.1.1 胶体的基本概念	149
8.1.2 溶胶的概念	150
8.1.3 溶胶的制备	150
8.2 凝胶的基本概念	152
8.2.1 凝胶的基本概念	153
8.2.2 凝胶的通性和特点	153
8.2.3 凝胶的分类	153
8.2.4 凝胶的结构	154
8.2.5 溶胶转化为凝胶	154
8.2.6 凝胶形成的条件	155

8.2.7 凝胶的制备	155
8.3 溶胶-凝胶法的基本原理	157
8.3.1 溶胶-凝胶法的基本原理	157
8.3.2 溶胶-凝胶法的化学原理	157
8.3.3 溶胶-凝胶法制备二氧化硅	159
8.3.4 溶胶-凝胶法的特点	163
思考题	163
9 化学还原法制备纳米材料	164
9.1 化学还原法的定义	164
9.2 影响粒子形貌的关键因素	165
9.2.1 还原剂	165
9.2.2 溶剂	165
9.2.3 保护剂	169
9.3 制备方法的分类	172
9.4 金属纳米粒子的宏量合成	175
9.5 金属纳米粒子的用途——催化性质	175
9.5.1 硅氢加成	175
9.5.2 非电解金属沉积	176
9.5.3 水解反应	176
9.5.4 光化学反应	176
9.5.5 氢甲酰化反应	176
9.5.6 羰基化反应	176
9.5.7 氢化	177
9.6 负载金属纳米粒子的方法	178
9.6.1 载体吸附的纳米颗粒催化剂	178
9.6.2 在载体上嫁接胶体	179
9.6.3 原位制备负载催化剂	179
9.6.4 配位俘获法及改进配位俘获法	180
思考题	181
10 模板法制备纳米材料	182
10.1 模板法的概念	182
10.2 模板的分类	182
10.3 硬模板法	183
10.3.1 以多孔阳极氧化铝膜为模板合成纳米材料	183
10.3.2 以二氧化硅球为模板合成纳米核-壳结构	186
10.4 软模板法	187
10.4.1 表面活性剂的概念	187

10.4.2 表面活性剂的分子结构特点	188
10.4.3 软模板——表面活性剂的有序聚集体	189
10.4.4 软模板合成纳米材料的实例	194
10.4.5 表面活性剂为模板合成介孔纳米材料	196
10.5 硬、软模板法的特点	198
思考题	199
参考文献	200

1 绪 论

人类对客观世界的认识从直接用肉眼能看到的事物开始,然后不断深入扩展,逐渐发展为两个层次:一是微观领域,二是宏观领域。在微观领域和宏观领域之间,存在着一块近年来才引起人们极大兴趣的介观领域。这个领域包括了从团簇尺寸、纳米、亚微米到微米的范围。介观领域中三维尺寸都很细小,出现了许多奇异、崭新的物理性能,以量子相干输运现象为主的介观物理应运而生,成为当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均可以称为介观体系,包括团簇、纳米体系和亚微米体系。但是,目前通常把对亚微米级($0.1 \sim 1\mu\text{m}$)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。因此,纳米体系和团簇就从这种“狭义”的介观范围独立出来,于是就有了纳米体系。

纳米科学所研究的领域是人类过去从未涉及的非微观、非宏观的中间领域,从而开辟了人类认识世界的新层次,也使人们改造自然的能力直接还原到分子、原子,这标志着人类的科学技术进入了一个新时代——纳米科技时代。以纳米科技为中心的新科技革命必将成为 21 世纪的主导。

1.1 纳米科技的内涵

1.1.1 纳米科技研究的尺度

纳,是科学术语中的十亿分之一,纳米(nanometer),即十亿分之一米, $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ 。纳米同千米、米、厘米一样,是长度计量单位。

1nm 是 $10\text{\AA}$ 。原子的尺寸一般是几埃。DNA 分子的螺旋直径约为 2.5nm 。大量病毒都是纳米尺度的,例如天花病毒的直径约 400nm ,艾滋病毒约 100nm ,SARS 病毒约 $60 \sim 120\text{nm}$ 。生物分子,如红细胞,其直径在几千纳米。

纳米科技是研究尺寸在 $1 \sim 100\text{nm}$ 尺度范围内的材料的科学技术,但这个纳米尺度范围并没有严格的科学界定,应根据不同研究领域和纳米尺度范围内的物理、化学等特性确定。一些纳米科技涉及的并非纳米尺度,而是微米尺度上的结构,比纳米尺度大了 1000 倍或更多。许多情况下,纳米科技是对纳米结构的基础研究,此类结构至少有一维的长度是一到几百纳米。

在这个尺度范围内的物质,与宏观材料相比,其特性截然不同。比如,贵金属金(Au),人们用它来制作首饰,是因为它的性质稳定,不易被氧化。而 Au 一旦达到了纳米量级,即制成纳米尺度的 Au 时,它的性质与宏观尺度上金黄色的 Au 是完全不同的,如十几纳米的金颗粒就是酒红色的,而且它还可以作为催化剂参加反应。因此,纳米尺度范围内的各种物质的特异性质引起了人们浓厚的兴趣。

1.1.2 纳米科技的内涵

纳米科学技术是 20 世纪 80 年代末期刚刚诞生,并正在崛起的新科技。纳米科学是研究纳米尺度范畴内原子、分子和其他类型物质运动和变化的科学,而在同样尺度范围内对原子、分子等进行操纵和加工的技术则为纳米技术。纳米技术是基于物质结构的最基本单元——原子,进行一个原子接一个原子的设计和制造新材料,其目的是通过原子级的操纵来实现超级性能和效益。

纳米科学与纳米技术简称纳米科技(nano-ST),基本含义是在纳米尺寸($10^{-9} \sim 10^{-7}\text{m}$)范围内认识和改造自然,通过直接操作和安排原子、分子创制新的物质,即是指在纳米尺度($1 \sim 100\text{nm}$)上研究物质的特性和相互关系,以及利用这些特性的科学和技术。

纳米科技的深刻内涵不仅是尺度的纳米化,而是纳米科技使人类迈入一个崭新的世界,在此世界中物质的运动受量子原理的主宰。纳米科技所研究的材料和体系,由于处于纳米尺度范围,它们的结构和性能显示出(具有)新奇的物理化学性质以及生物性能,具有特殊的现象和加工性能。

纳米尺度的变化会影响物质的电子与原子间的相互作用。在纳米尺度上操控物质的排列可以控制材料的基本性质(如磁通、电荷容量、催化活性等)而不用改变其化学成分。单个磁畴尺寸的纳米颗粒可以显著改善磁器件的性能。

与传统的粗晶块体材料相比,相同组分的纳米材料的硬度和强度均有很大提高,其塑性变形的力学行为和微观机制目前仍是研究的热点。另外,当纳米晶粒小到一定程度后,晶粒中将不再出现如位错等晶体缺陷,这使得纳米材料非常适合制备超强复合材料。图 1-1 是 Pd 纳米晶粒的高分辨透射电子显微镜的照片。从图中所示的微观区域,可以看到尺寸在几纳米的多个 Pd 晶粒。晶粒尺寸的减少,晶粒间晶界界面的增多,导致了纳米结构金属的强度大大增加。

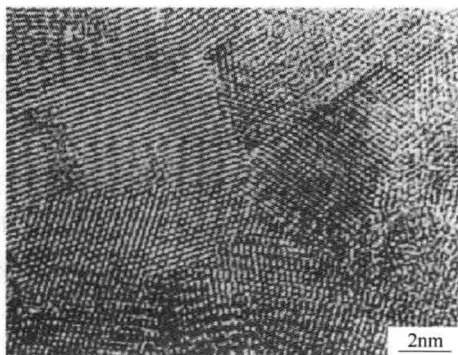


图 1-1 Pd 纳米晶粒的高分辨透射电子显微镜的照片

量子点为纳米尺度的半导体材料。当半导体受光照射后,电子被激发到高能态。当电子回落到基态时,会发射出该材料的特征颜色的光。当半导体中的电子受激发后,它们习惯上与留下的带正电的空穴保持一定的距离,形成电子-空穴对(激子, exciton)。

电子-空穴之间的平衡距离称为激子半径。用于荧光量子点的含镉硫族化合物半导体, 激子半径在 $5 \sim 10\text{nm}$ 。当晶体的整体尺寸小于激子半径时, 量子尺寸限制效应会占主导, 所发射的光的颜色也会向短波长方向移动。这是因为激发量子点所需能量大于体材料, 当电子回落到基态时, 所释放出的光子具有更高的能量。

生物体系的特征是在纳米尺度上组织物质。纳米科技可以在细胞内放入人造组件, 通过模仿自然界的自组装来制造新结构材料与构件。这种新结构材料与构件更具生物相容性。

在纳米尺度范围内, 纳米结构的相互作用速度比微米尺度更快, 可以实现超快、能量效率更高的系统; 此外, 纳米结构具有极高的比表面积, 非常适合制备催化剂、反应系统、吸附剂、药物传递、能源存储等材料。

物质的尺寸降到纳米量级, 会导致许多物质的性质发生变化, 如碳纳米管、量子线和量子点、薄膜、DNA 结构和激光发射体等, 出现许多崭新的现象, 包括小尺寸效应、巨大的界面效应, 以及量子力学效应等。只要我们能够发现并充分利用其基本原理, 控制材料的特征尺寸, 就可以大大改善材料的性能, 增强器件的功能。纳米科技的目的就在于, 通过在原子、分子和超分子水平上更好地控制结构和器件, 从而开发物理、化学和生物学特性得到改善的新颖的结构和器件, 并有效地制造和使用这些器件。

纳米科技是一个融科学前沿和高技术于一体的完整体系, 将大大拓展和深化人们对客观世界的认识, 使人们能够在原子、分子水平上制造材料及器件, 导致信息、材料、能源、环境、医疗与卫生、生物与农业等领域的技术革命。纳米科技将对人类的生产和生活方式产生重大影响, 促进传统产业的改造和升级, 并可能带动下一次工业革命, 成为经济新增长点之一。

1.2 纳米科技的发展

1.2.1 纳米科技诞生的历史背景

早在一千多年以前, 我们的祖先就有了制造和使用纳米材料的历史。如我国古代利用燃烧蜡烛的烟雾制成了炭黑作为墨的原料以及用于着色的染料, 这就是最早的纳米材料; 中国古代铜镜表面的防锈层, 经证实为纳米氧化锡颗粒构成的一层薄膜。但当时人们并不知道这是人的肉眼根本看不到的小颗粒。

约 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。但是当时的化学家们并没有意识到这样一个尺寸范围是人们认识世界的一个新的层次, 而只是从化学的角度作为宏观体系的中间环节进行研究。

直到 1959 年, 理查德·费曼 (Richard P. Feynman) 提出一个令人深思的问题: “在物质的底部还有很大的空间, 如何将信息储存到一个微小的尺度? 令人惊讶的是自然界早就解决了这个问题, 在基因的某一点上, 仅 30 个原子就隐藏了不可思议的遗传信息, 当人类有朝一日能够按照自己的主观意愿排列原子和分子时, 那将创造什么样的奇迹”。

今天, 纳米材料的问世以及它所具有的奇特特性正在对人们的生活和社会的发展产生

重要的影响, 费曼的预言已成为世纪之交科学家最感兴趣的研究热点。

1.2.2 自然界中的纳米材料——纳米科技发展的重要启示

自然界早已有纳米材料的存在, 它们组成特殊的微米或纳米结构, 使生物体具有特殊的功能。向自然学习, 从生物获得启示, 实现微观与宏观的统一, 从而促进纳米科技的发展。

1.2.2.1 天然磁性纳米材料

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。后来, 科学家发现, 蜜蜂的腹部存在磁性纳米粒子, 这种磁性粒子具有指南针功能, 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, 为蜜蜂的活动导航。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了解生物的进化和运动的行为是很有意义的。磁性超微粒子的发现, 为了解螃蟹的进化历史提供了十分有意义的科学依据。据生物科学家研究指出, 人们非常熟悉的螃蟹原先并不像现在这样“横行”运动, 而是像其他生物一样前后运动。这是因为亿万年前的螃蟹, 第一对触角里有几颗用于定向的磁性纳米微粒, 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, 螃蟹体内的小磁粒失去了原来的定向作用, 于是螃蟹失去了前后行动的能力, 变成了横行。

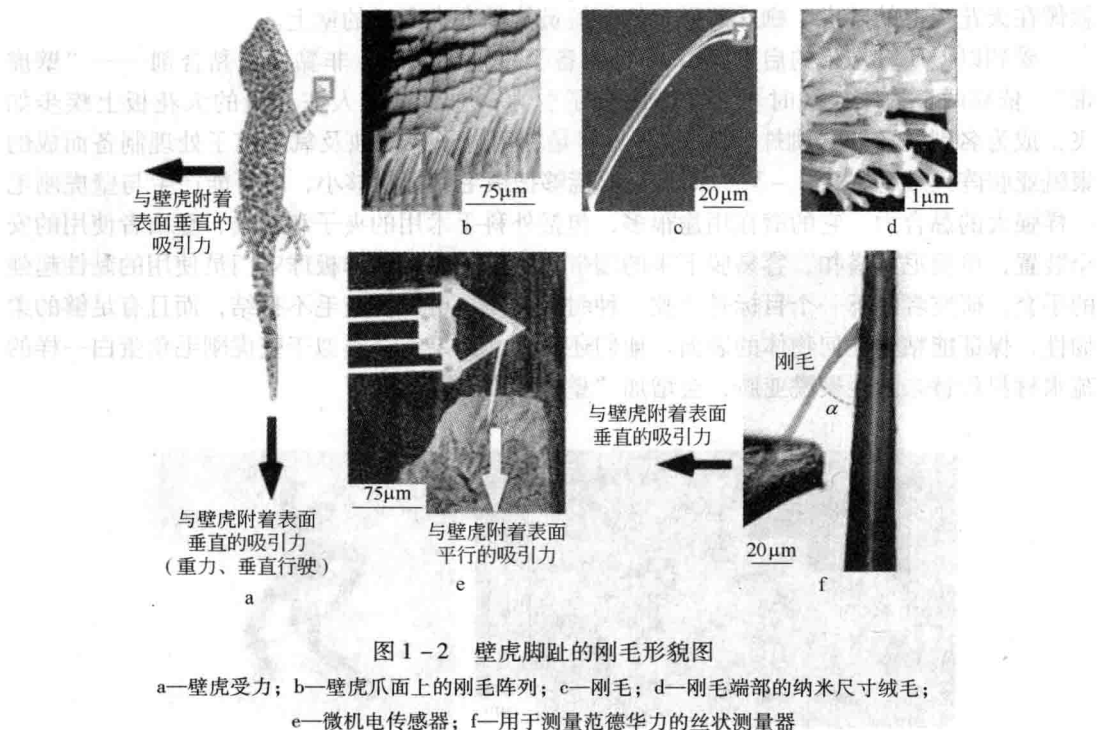
真正利用磁性纳米微粒导航, 进行几万公里长途跋涉的是大海龟。美国科学家对东海岸佛罗里达的海龟进行了长期研究, 发现了一个十分有趣的现象: 海龟通常在佛罗里达的海边上产卵, 幼小的海龟为了寻找食物, 通常要到大西洋的另一侧靠近英国的小岛附近的海域生活, 从佛罗里达到这个岛屿的海面再回到佛罗里达来回的路线不一样, 相当于绕大西洋一圈, 需要 5~6 年的时间, 这样准确无误地航行靠什么导航 (为什么海龟迁移的路线总是顺时针的)? 美国科学家发现海龟的头部有磁性的纳米微粒, 它们就是凭借这种纳米微粒准确无误地完成几万里的迁徙。

这些生动的事例告诉我们, 研究纳米微粒对研究自然界的生物也是十分重要的, 同时生物体内的纳米微粒, 为我们设计纳米尺度的新型导航器提供了有益的依据, 这也是纳米科学研究的重要内容。

1.2.2.2 在墙壁上行走的动物——壁虎

壁虎能在光滑的墙壁上行走自如, 甚至能贴在天花板上。这表明壁虎的脚底与物体表面之间必定存在很强的特殊黏附力, 但这种力量究竟从何而来? 2000 年, 美国加利福尼亚大学伯克利分校的科学家 Full 小组发现, 壁虎的爬行力取决于物理尺寸而不是表面化学特性, 也就是取决于壁虎刚毛的尺寸、形状和密度, 而不在于它是什么材料做成的。这种特殊的黏附力是由壁虎脚底大量的细毛与物体表面分子之间产生的范德华力累积而成的。范德华力是中性分子彼此距离非常近时, 产生的一种微弱的电磁引力。由于这种引力过于微弱, 通常没有人加以注意。将这种分子意义上的作用力与壁虎联系起来似乎有些不可理解。

研究人员对一种生活在东南亚的大壁虎进行了研究,通过电子显微镜观察发现,它的每只脚底部长着大约 50 万根极细的刚毛,每根刚毛约有 $100\mu\text{m}$ 长(相当于人的两根头发的宽度),刚毛末端又有约 400~1000 根更细小的分支。这种精细结构使得刚毛与物体表面分子间的距离非常近,从而产生范德华力。虽然每根刚毛产生的力量微不足道,但累积起来就很可观(图 1-2)。根据计算,如果每根刚毛都充分发挥作用,一只大壁虎的 4 只脚产生的总压强约为 10atm ($1\text{atm} = 101325\text{Pa}$),可以吊起 125kg 的物体。根据计算,一根刚毛能够支撑相当于一只蚂蚁的重量,100 万根刚毛虽然不到一枚硬币的面积,却可以支撑 196N 的重量。如果壁虎同时使用全部刚毛,就能够支撑 1225N 的力。实际上,壁虎只用一个脚趾,就能够支撑整个身体。



此外,壁虎的脚具有抗灰尘能力即自清洁性,表现为,尽管壁虎利用它们具有高黏附力的脚爬来爬去,却始终能够保持脚底的干净。研究者认为,壁虎脚的这种自清洁性,发生在排列整齐的刚毛上。接触力学模型表明,由于黏附力,爬行基底所吸引的灰尘粒子与单个或多个刚毛小分支上所吸引的灰尘粒子存在着不均衡性,从而导致表面的自清洁性。

与壁虎相似, A. B. Kesel 等揭示蜘蛛之所以能倒着爬过几乎任何类型的表面,是由于它利用了范德华力(其他学者的研究成果证实还包括其他形式的力)。他们还计算出这些力可以使蜘蛛携带相当于自身重量 170 倍的物体。这种力不受环境影响,因而,它们可以在潮湿的或光滑的表面行走。利用 SEM 观察一种名为 *E. Arcuata* 蜘蛛的足部,可以发现这种蜘蛛的足部有一簇毛状物,其中每一根毛上又覆盖着几十万根宽度只有几百纳米的小毛。蜘蛛就用这些小毛粘在物体表面上。研究者使用原子力显微镜(AFM)还测出每一