

纳米材料化学

汪 信 刘孝恒 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米材料化学/汪信, 刘孝恒编著. —北京: 化学工业出版社, 2005.12

ISBN 7-5025-8125-1

I. 纳… II. ①汪…②刘… III. 纳米材料-应用化学 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 157917 号

纳米材料化学

汪 信 刘孝恒 编著

责任编辑: 王秀鸾

文字编辑: 李 玥

责任校对: 吴 静

封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 385 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8125-1

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

纳米材料是正在快速崛起的纳米科技的重要物质基础，纳米材料的研究是纳米科技领域中的先导性、支撑性工作。

大量的事实已经充分说明，纳米材料与化学学科的相互交叉和覆盖是全方位的，发展极其迅速。例如，获得 2005 年度诺贝尔化学奖的研究成果似乎只与高分子材料、药物化学、绿色化学有关，实际上，在 20 世纪末，其相关化学原理报道后不久，即被引入纳米材料制备的研究之中。

作者力图把一些经典的、高水平的、时效性强的纳米材料化学的原理和科研成果介绍给读者，这些素材多数来自于世界顶尖级的综合性科学刊物以及材料类、化学类和物理类的第一流刊物，其中既有国外一流研究小组的工作，如与 2005 年诺贝尔化学奖有关的研究成果，也有国内学者的出色研究成果。

与此同时，作者还把自己在纳米材料化学领域中所做的一些工作进行总结、遴选后，编入此书的相关章节。

十多年来，在材料化学专业的本科教学和材料学专业的研究生培养中，作者感到有必要编写一本专门介绍纳米材料与化学相互关联的书籍，通过多方共同努力，这一愿望终于得以实现。然而，作者学识毕竟有限，错误和不当之处在所难免，我们将抱以虚心、诚恳的态度，接受各方的批评和建议。

最后，衷心感谢南京理工大学材料化学实验室陆路德教授、杨绪杰教授以及阚春博士、张丽丽博士、朱俊武博士等多位师生在此书编写过程中给予的支持和帮助。

编著者

2005. 10

目 录

绪论	1
0.1 传统化学的延伸	1
0.2 化学向生命科学的延伸	1
0.3 化学与材料科学的结合	2
参考文献	4
第 1 章 纳米材料无机化学	5
1.1 无机化学反应是诸多纳米材料制备的基本手段	5
1.1.1 无机纳米粒子	5
1.1.2 无机纳米薄膜	6
1.1.3 无机纳米管	9
1.1.4 无机纳米棒和纤维	10
1.1.5 无机纳米复合材料	12
1.2 碳纳米材料	14
1.2.1 C_{60} 研究新进展	14
1.2.2 碳纳米管研究新进展	17
1.3 二元无机化合物中一些重要的纳米材料	26
1.3.1 硫化物和硒化物纳米材料	26
1.3.2 氧化物纳米材料	29
1.3.3 介孔二氧化硅	33
1.4 沸石	36
1.4.1 沸石的结构及性质	36
1.4.2 沸石的制备	40
1.5 钙钛矿类纳米材料	43
1.5.1 钙钛矿的结构及性质	43
1.5.2 钙钛矿型纳米复合氧化物的制备	44
1.6 纳米材料配位化学	46
1.6.1 配合物与纳米材料	46
1.6.2 配合物的设计与纳米结构	47
参考文献	55
第 2 章 纳米材料物理化学	58
2.1 纳米材料结构化学	58
2.1.1 纳米材料的晶体结构及其表征	58
2.1.2 纳米材料的形貌	63
2.1.3 纳米材料的表面结构及其表征	71
2.1.4 纳米材料作为半导体的结构特征	74

2.2	纳米材料光化学	77
2.2.1	太阳能电池	77
2.2.2	光催化降解有害物质	80
2.2.3	光催化分解水制氢气	83
2.2.4	光刻作用	84
2.3	纳米材料电化学	85
2.4	纳米材料热力学	91
2.4.1	结晶热力学	92
2.4.2	自发反应判据与氧化-还原反应	93
2.4.3	纳米材料研究中的一些热力学计算问题	97
2.4.4	统计热力学	100
2.4.5	纳米粒子团聚的自发性	101
2.5	纳米材料动力学	102
2.5.1	纳米粒子结晶、团聚动力学	102
2.5.2	制备纳米材料化学反应的历程	103
2.5.3	纳米粒子生成动力学	104
2.5.4	空气/水界面薄膜生成动力学	105
2.5.5	纳米催化剂光催化动力学	106
	参考文献	109
第3章	纳米材料有机及高分子化学	112
3.1	纳米材料有机化学	112
3.1.1	纳米材料有机金属化学 (I)——纳米团簇和纳米结构	112
3.1.2	纳米材料有机金属化学 (II)——sol-gel 法制备纳米材料	117
3.1.3	穴状有机物	124
3.1.4	分子开关	127
3.1.5	其他涉及有机化学的纳米材料制备问题	132
3.2	纳米材料高分子化学	135
3.2.1	高分子纳米材料	135
3.2.2	利用聚合物或者高分子改性纳米材料	137
3.2.3	利用开环易位聚合制备纳米材料	139
3.2.4	稳定性高分子纳米微球的制备	142
3.2.5	药物输送	143
3.2.6	纳米催化剂引发和催化高分子聚合	147
	参考文献	150
第4章	纳米材料超分子化学	153
4.1	关于超分子化学	153
4.1.1	对超分子概念的全面认识	153
4.1.2	纳米材料研究所关注的超分子化学	154
4.2	自组装	156
4.2.1	无机化合物的自组装	156
4.2.2	有机物小分子的自组装	161

4.2.3	高分子的自组装	163
4.2.4	有机物在无机物界面的自组装	168
4.3	超分子化学在纳米材料领域中的应用	169
4.3.1	小分子化合物稳定纳米粒子	169
4.3.2	高分子化合物稳定纳米表面活性剂胶束	170
4.3.3	高分子化合物稳定无机纳米材料	172
4.3.4	关于纳米金粒子的制备及稳定问题	181
4.3.5	纳米机器	185
	参考文献	187
第5章	纳米材料生物化学	190
5.1	纳米概念在生物化学领域中的渗透	190
5.2	生物分子马达	196
5.3	蛋白质与纳米材料化学	202
5.3.1	关于病毒	202
5.3.2	蛋白质的结合功能	205
5.3.3	蛋白质与生物传感器	211
5.4	核酸与纳米材料化学	213
5.4.1	DNA 作为纳米导线	214
5.4.2	DNA 的纳米构件	214
5.4.3	DNA 作为纳米计算机	216
5.4.4	DNA 的分子识别功能	217
5.4.5	DNA 作为催化剂	218
5.4.6	DNA 作为“纳米机器”	218
5.4.7	DNA 作为纳米器件	220
	参考文献	221

绪 论

化学是研究物质组成、制备、结构、性质和应用的科学，是一门历史悠久、知识体系相对完整的基础学科，随着时间的推移，化学自身在不断发展，同时又和其他学科相互交叉、相互促进，不断形成新的生长点，特别是近十年来，化学学科的发展形成三大特点。

1.1 传统化学的延伸

传统化学的一些领域如今在维持自身特色的同时，不断向新的难度和高度拓展。例如，新型有机化合物的结构设计和合成一直是有机化学家所关心的热点，在复杂手性化合物的合成研究工作中，最近又出现了所谓的“双 π 方向”，即所合成目标产物的结构向着庞大化、复杂化方向发展，每个分子中的原子个数达到或超出 10^4 。相应的合成路线往往也在 10^4 个步骤左右^[1]。图1-1为一合成步骤数目与中间产物、最终产物得率关系的示意图，它显示出当合成线路达到 10^4 余步时，对于一成功的合成而言，产物的最终得率仅为百分之几，通常以毫克单位计算。因而，解决合成化学中的步骤长、过程复杂问题，不仅具有理论意义，而且与其应用和商业价值密切相关。

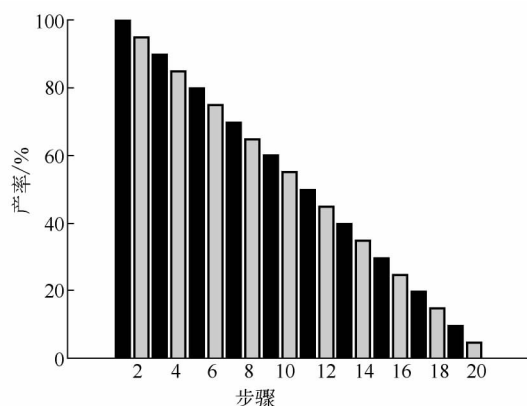


图 1-1 多步骤有机合成的步骤数目与产物得率关系

1.2 化学向生命科学的延伸

生命科学的发展已超出医学、生物领域，与化学、物理、计算机甚至数学等学科紧密结合。化学原理、化学手段在蛋白质、 π - π 等的研究中是必不可少的，近年来，诺贝尔化学奖（如 1997 年）常颁发给在这些领域中作出杰出贡献的科学家。值得关注的是，在传统的四大化学教科书中，仅有有机化学以较少的篇幅介绍了糖类、蛋白质、核酸等内容，这些章节通常也不作为化学基础课中的重点教学内容，显然不能适应化学学科向生命科学延伸的发展趋势。

图 1-2 为一长链 π - π 配合物与 π - π 相互作用的示意图^[2]，尽管多年来， π - π 配合物已用于治疗癌症，但其作用机理一直在探索之中。随着近期基因研究的迅速发展，配合物与 π - π 相互结合，作用的研究已向定量、可控制方向发展。

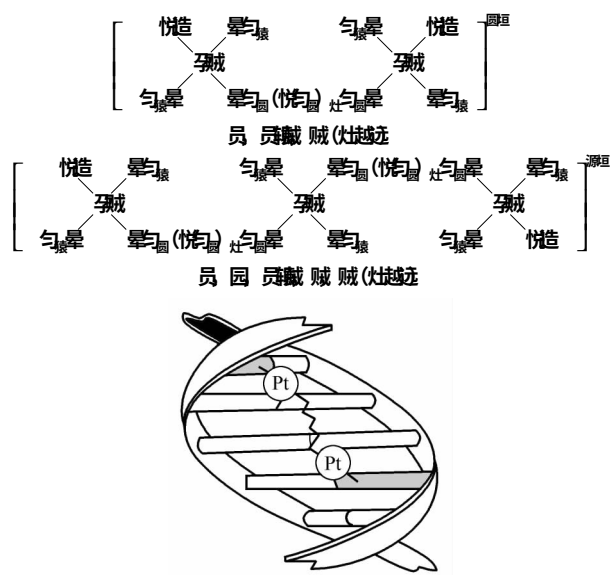


图 1 大环配合物与 18 冠 6 作用示意图
(图上方为配合物具体结构)

1.2 材料化学与材料科学的结合

20 世纪 70 年代,在美国出现了“材料科学与工程”这一学科后不久又创办了《材料科学与工程》杂志和《材料科学与工程》等相关学术刊物。“材料化学”是材料科学与传统化学这两大学科的结合,以基本化学原理和手段去系统地研究各类材料的制备、结构、性质及应用的交叉学科。近 40 年来,材料化学发展迅速,1980 年和 1981 年,美国、英国分别创办了著名的学术刊物《材料化学》和《材料化学》。在国内,近 40 年来,材料化学科研、教育发展也较为迅速,截至 2000 年,已经开办或正积极筹办材料化学本科专业的高等学校已达百余所。

与此同时,另一大类新兴学科——纳米科学与技术也在悄然兴起并快速发展,根据 2000 年英国《自然》杂志中的相关评论,在此可回顾纳米科技发展的里程碑事件及基本轨迹,详见表 1。

表 1 纳米科学与技术发展的主要历程

年份	主要里程碑
1981	美国学者、物理学诺贝尔奖得主 理查德·费曼提出了纳米技术概念的雏形
1985	日本东京大学学者 野岛昭彦等确定了“纳米材料”这一专用术语
1986	瑞士实验室的 宾尼·海登和 格哈德·宾尼希发明了隧道扫描显微镜 (STM)
1990	富勒烯被发现
1991	日本学者 饭岛澄男和 野岛昭彦发明了原子力显微镜 (AFM)
1992	日本学者 野岛昭彦和 野岛昭彦因发明 STM 获诺贝尔物理学奖
1996	美国学者 詹姆斯·D·沃森和 弗朗西斯·克里克因在超分子领域的自组装研究获诺贝尔化学奖
1998	日本 索尼公司的 野岛昭彦等制备出碳纳米管
2000	野岛昭彦等因发现 C ₆₀ 获诺贝尔化学奖
2002	野岛昭彦等因对纳米生物机器的研究获诺贝尔化学奖
2003	野岛昭彦的一个研究小组计划筹建年产 100 吨富勒烯的工厂

纳米科学与技术所追求的目标之一是实现已为人类所普遍使用的宏观、大型机械设备的超微型化^①。与宏观机械设备的制造一样，这些超微型机器设备的制造也必须建立在价廉物美的原材料基础上。如想象中的几何尺寸在微米级的潜水艇可用于治疗人类的癌症等疑难疾病，当此类潜水艇在人体中游弋时，它的动力系统、对癌细胞的探测系统（即超微型计算机）和攻击系统（即超微型导弹）都应是由几何尺寸更小的“纳米器件”构成，这就不难理解纳米科技的前期与基础性工作——纳米材料研究的广泛性与重要性了，因为人类要首先制备出上述潜水艇所需要的纳米芯片、纳米导线、纳米发动机等。图 1-1 为瑞士科学家阿列克桑德等^②新近制备出的一种纳米管道，该管道为高分子物质制成，具有柔性，可注水。

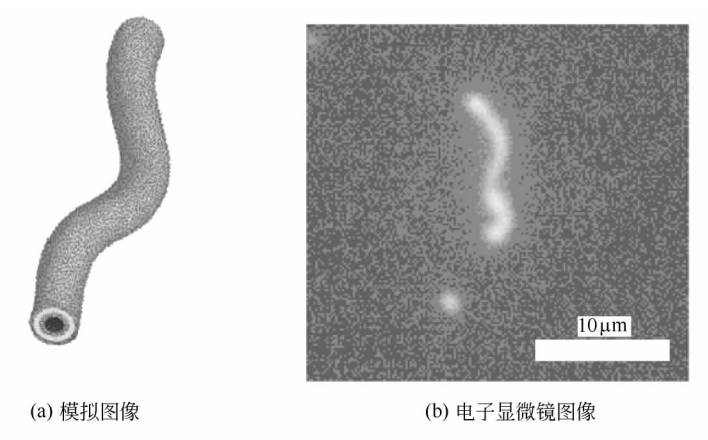


图 1-1 一种新型高分子纳米管

可以预料，类似于金属材料（如钢铁），无机材料（如水泥、陶瓷），高分子材料（如塑料、化纤），大批量、低成本的纳米材料的生产，最终将依靠化学手段解决。因而，研究纳米材料与化学之间的内在联系，归纳化学在纳米材料研究中的基础性作用是极其必要的。

本书选取了近期国内外相关研究成果，并结合自己的研究工作，努力使读者较为全面、深刻地理解化学学科中的各主要分支在纳米材料研究领域中的具体应用。

图 1-2 反映出我们对目前化学发展趋势的思考和编写此书的基本思路，纳米材料研究的迅速崛起有力地推动了化学的发展，纳米材料化学可谓是一门新上加新的学科专业，虽然处

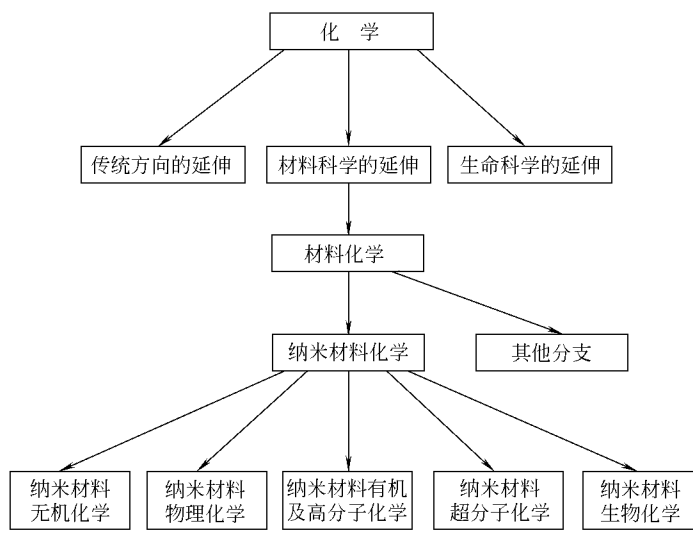


图 1-2 近代化学的发展趋向以及纳米材料在化学中的渗透

第 1 章 纳米材料无机化学

无机化学是纳米材料研究领域极为重要的支撑性学科，因为纳米材料的制备手段很大程度上基于无机化学基本原理，大量纳米材料由无机类物质构成，或者由无机类物质与有机类物质复合而成。另一方面，纳米材料研究的不断深入，也将丰富无机化学的内容，拓展它的知识体系。

无机化学反应是诸多纳米材料制备的基本手段

很多情况下，无机化学反应速率快，不需要加热，反应比较完全且副反应少，同时所需反应装置相对简单，产物易分离，因而很多常规的无机化学反应在各类纳米材料的制备中得到应用。

无机纳米粒子

著名学者 魏 在一篇综述中系统地总结了用常规无机化学手段制备单分散性纳米或超细粒子的工作^[1]，其中一些方法极为简单。例如，在 溶液下通过水溶液中的沉淀反应可制得分散性、均匀性良好，近似立方体的超细 颗粒（图 1-1，立方体的边长约为 100 nm）。

制备超细颗粒——沉淀法

但在许多无机纳米粒子的制备过程中，需要对一些传统的方法加以改进。例如，加入一些特殊介质、助剂以控制目标产物的品质，包括粒子的尺寸、均匀性、分散性、几何形状等。其实人们早在 20 多年前就发现，在制备感光材料——卤化银乳剂时，为防止卤化银的沉淀及团聚，须加入明胶作为控制性介质^[2]。

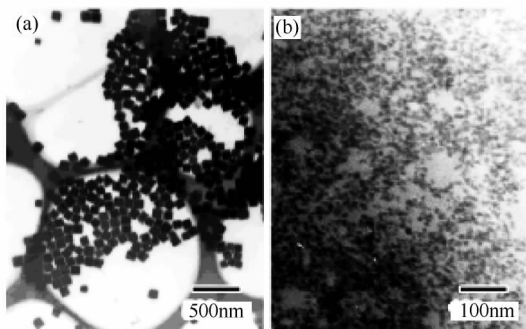


图 1-1 超细颗粒的 TEM 图像
(a) 明胶溶液中得到的；(b) 银盐体系中得到的

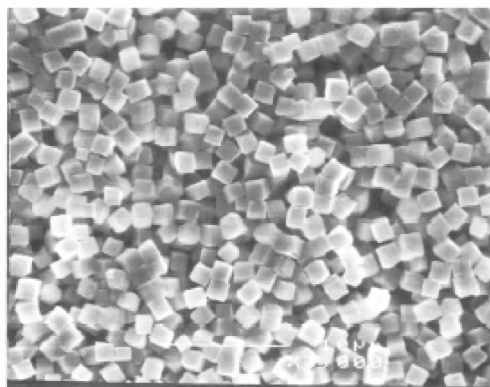


图 1-2 超细颗粒的 SEM 图像

近二十年来，随着纳米材料研究快速发展，采用各类高分子或其他介质控制无机合成得以广泛应用并不断深入。

魏 等分别在明胶的水溶液和新型反胶束体系中（明胶-表面活性剂-银盐）制备了纳米颗粒^[3]，反应为：

银盐 + 明胶 → 银盐-明胶复合物

魏 观察的结果显示，在明胶溶液中得到目标产物 [图 1-3 (a)] 已具有良好的颗粒细度和分散度，而在银盐体系中得到的颗粒细度和分散度又

得到了进一步的提高 [图 员圆 (遭)]。

我们采用硬脂酸作稳定剂,按照特定的化学计量比,将 月葬(韵) 云藻(晕韵) 在(晕韵) 和 悦燥(悦韵) 加入到熔融的硬脂酸中,这些无机反应物发生了分解、水解(制备体系中含有少量的水)、中和等反应,经高温焙烧除去硬脂酸,可得多元复合氧化物——月葬灶悦燥云藻韵的纳米晶(曾越园 园源 园愿 员圆 员源 员远 圆园 圆源)。研究过程中,可采用 载射线衍射(载院) 检测技术确定目标产物的最低结晶温度。结果表明,远益及以上温度得到的产物为纤锌矿结构(图 员源,且随着热处理温度的升高,结晶度逐渐增加,颗粒尺寸也逐渐增大。图 员源(葬 为在 远益下焙烧得到的 月葬灶悦燥云藻韵(曾越园 员源,从该图中可以看出,所得产物有着近似为球形的形貌,具有较好的细度(直径约为 员园) 和颗粒均匀性,而在 愿益下焙烧得到的产物 [图 员源 (遭)] 颗粒直径明显增加,且出现团聚现象。

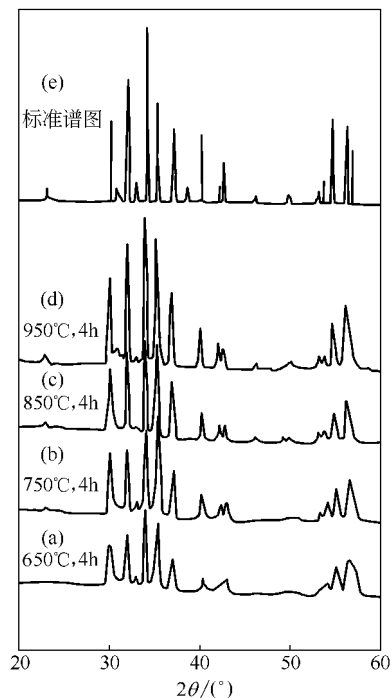


图 员源 月葬灶悦燥云藻韵(曾越园) 的 载院图像

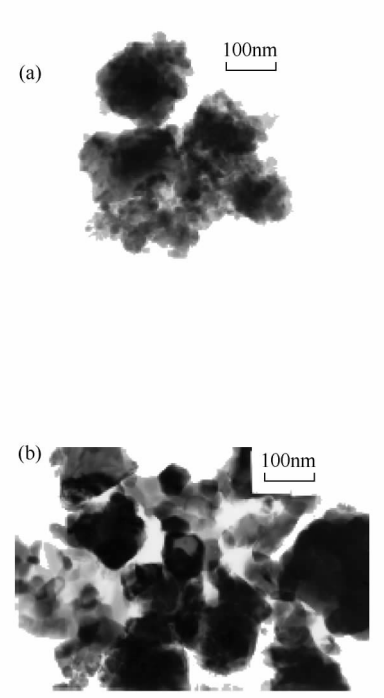


图 员源 月葬灶悦燥云藻韵(曾越园) 的 栽院图像
(葬 远益下焙烧; (遭) 愿益下焙烧

关于 月葬灶悦燥云藻韵的磁学性质,所涉及的参数有特殊饱和磁化值 σ 、矫顽力 H_c 和相对饱和顽磁值 σ_r 。从图 员缘(葬 中可以看出,各样品的特殊饱和磁化值 σ 随着样品的焙烧温度(即样品的平均粒径)成正比。从图 员缘(遭 中可以看出,各样品的矫顽力 H_c 和相对饱和顽磁值 σ_r 随着样品焙烧温度(即样品的平均粒径)的变化呈单峰形,在 愿益附近达到最大。从图 员缘(糟 中可以看出,各样品的矫顽力 H_c 随着样品 悦燥含量的增加,在 员范围内下降明显, 愿范围内变化趋于平缓。而从图 员缘(凿 中可以看出,各样品的相对饱和顽磁值 σ_r 随着样品 悦燥含量的增加,在 员时下降明显, 愿时变化趋于平缓。这些都与样品的矫顽力 H_c [图 员缘(葬)] 变化趋势相似。

无机纳米薄膜

有关无机纳米薄膜的制备方法报道较多,主要包括溶胶凝胶法和化学沉积法等。最近,远

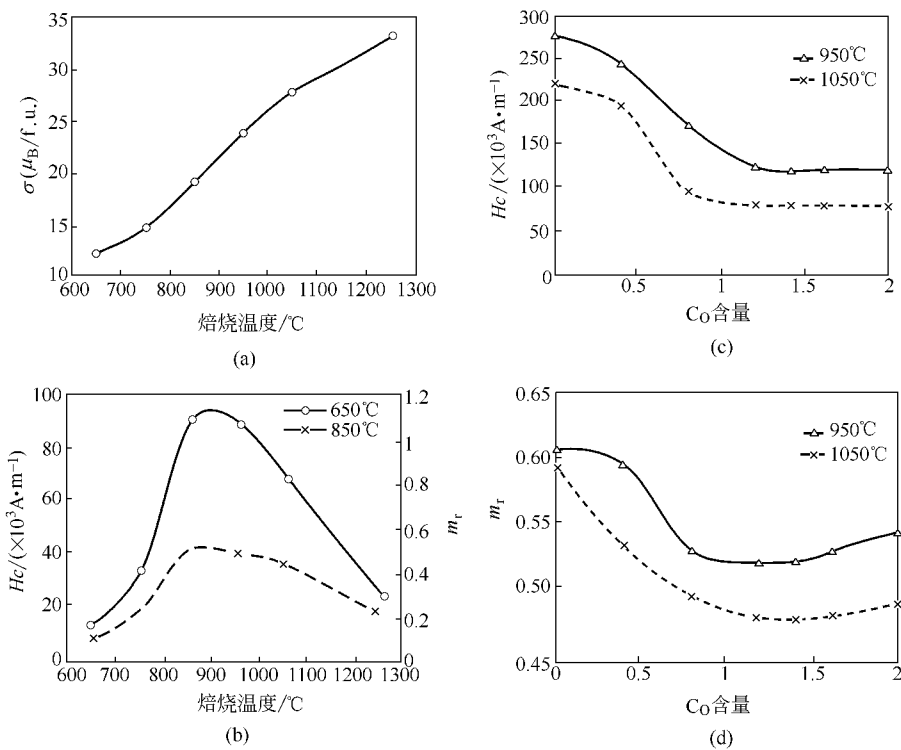
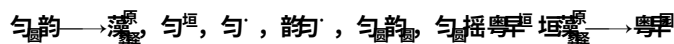


图 5-15 纳米 TiO₂ 薄膜的磁学性质

(a) 特殊饱和磁化值 σ 与样品焙烧温度的关系；(b) 矫顽力 H_c 与相对饱和磁化值 m_r 与样品焙烧温度的关系；
(c) 矫顽力 H_c 与 Co 元素含量的关系；(d) 相对饱和磁化值 m_r 与 Co 元素含量的焙烧关系

曹向群等报道了一种简便但行之有效的超薄 TiO₂ 膜制备方法 (图 5-16)。首先将厚度为 0.5 mm、纯度为 99.99% 的金属钛箔片在燃气喷灯的火焰中分别灼烧 1 min、2 min 和 3 min 后，可得到厚度分别为 0.1 μm 、0.2 μm 和 0.3 μm 膜；或者将上述钛箔片在氧气气氛中以 10 $^\circ C/min$ 的升温速率加热至 1000 $^\circ C$ ，再以 10 $^\circ C/min$ 的速率降至室温，可得到厚度为 0.1 μm 的 TiO₂ 膜。所得到的 TiO₂ 薄膜均为金红石型微晶结构。由于未反应的金属钛成为薄膜的支撑体，薄膜具有优良的力学强度。

王磊等人在空气-水界面制备金属银薄膜 (图 5-17)。通过同步辐射 X 射线辐照 AgNO₃ 溶液，在 X 射线的作用下，溶液表层发生了如下反应：



从上述两个半反应可以看出，由水转化成的 $\cdot OH$ 和 $\cdot OH_2^+$ 等还原性物质可将 Ag⁺ 还原成单质银。制备体系中的少量有机物可支撑此单质银，在空气-水界面形成银薄膜。

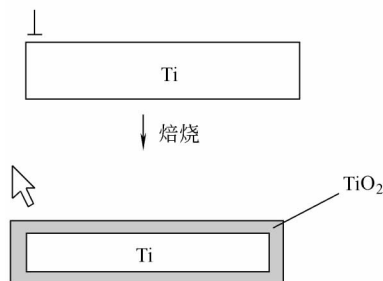


图 5-16 焙烧法制备超薄 TiO₂ 膜

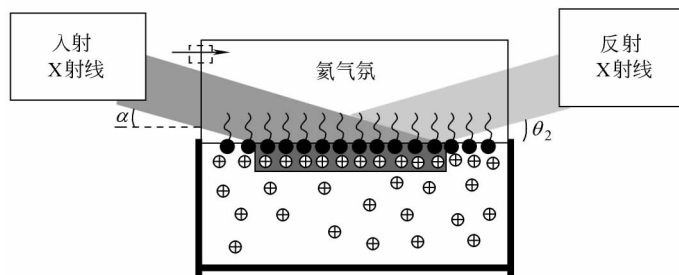


图 5-17 在空气-水的界面制备金属银薄膜

悦阳^原等采用溶胶凝胶法制备出多孔^原的薄膜^原，采用酸化先驱物^原，再将生成的钨酸在^原等介质中脱水，得到目标产物。薄膜的形貌因热处理温度和时间而异（图^原），但都颗粒均匀、分散性良好，可用作半导体材料的薄膜。

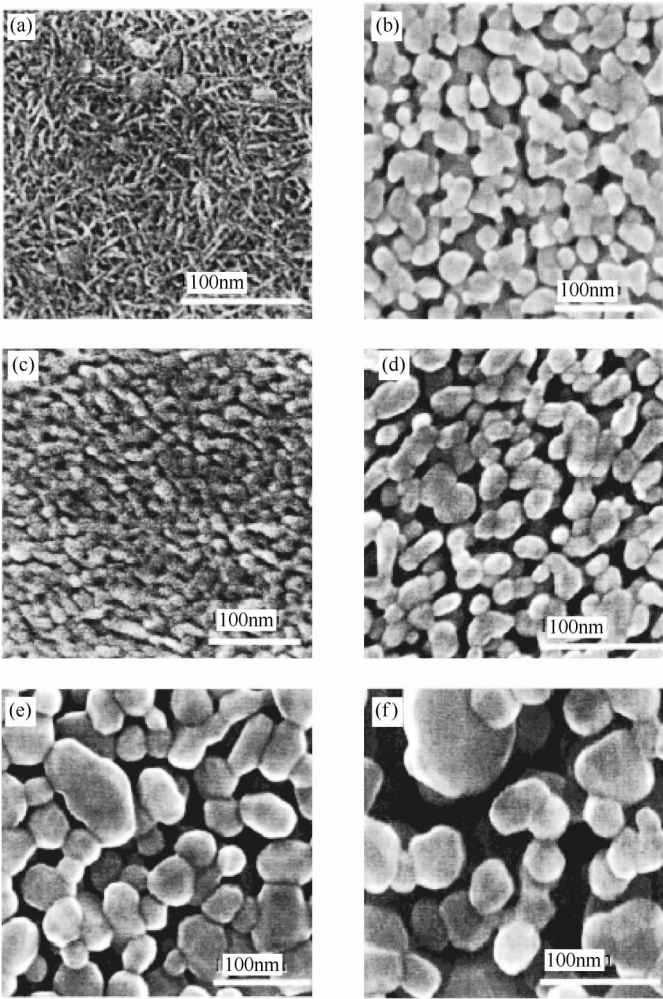


图 1 悦阳^原的薄膜的 SEM 图像

处理条件：(a) 悦阳^原，悦阳^原；(b) 悦阳^原，悦阳^原；(c) 悦阳^原，悦阳^原；(d) 悦阳^原，悦阳^原；(e) 悦阳^原，悦阳^原；(f) 悦阳^原，悦阳^原。

悦阳^原等将锆片基浸入贵金属配位离子（悦阳^原，悦阳^原，悦阳^原）的稀溶液，根据表 1 中的电极电位数据可判断出悦阳^原可与这^原种贵金属配位离子发生置换反应，生成

表 1 悦阳^原三种制备贵金属薄膜的置换反应电极电位

体摇系	氧化还原电位	释义
悦阳 ^原	悦阳 ^原 → 悦阳 ^原	悦阳 ^原
悦阳 ^原	悦阳 ^原 → 悦阳 ^原	悦阳 ^原
悦阳 ^原	悦阳 ^原 → 悦阳 ^原	悦阳 ^原
悦阳 ^原	悦阳 ^原 → 悦阳 ^原	悦阳 ^原

孕纡纡	郢纡→郢纡垣纡 孕纡垣纡→孕纡垣纡 郢纡→郢纡垣纡	原纡垣纡 垣纡垣纡 原纡垣纡
------------	---	----------------------------------

的贵金属沉积在锗片基上，形成如图 1-15 所示的贵金属薄膜，薄膜中的金属粒子分布均匀，并且随着浸入时间的延长，金属粒子逐渐长大，其在锗片基上的生长速度有着明显的差异（贵金属的生长在图 1-15 中未列出）。

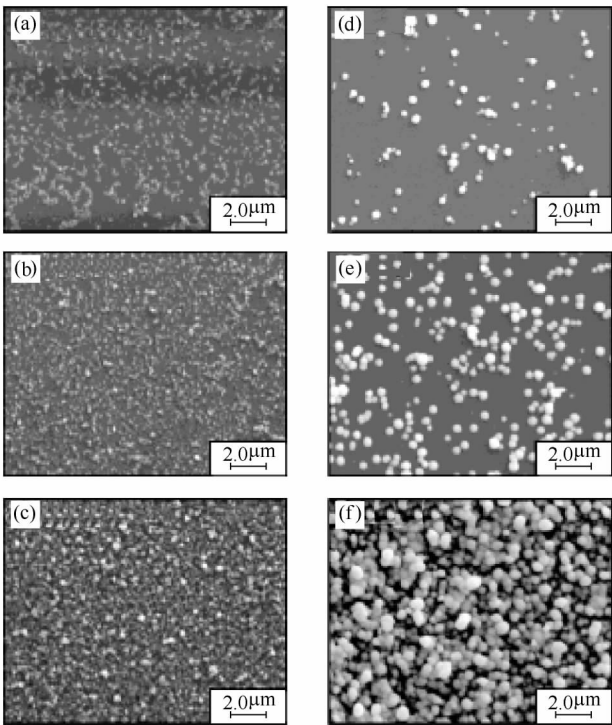


图 1-15 纳米贵金属的生长
(a)、(b)、(c) 分别为 Au、Ag、Pt 在 Ge 片基上的生长；
(d)、(e)、(f) 分别为 Au、Ag、Pt 在 Ge 片基上的生长

本课题组采用与文献 [1] 相似的方法，进一步控制置换反应的时间和反应物浓度，得到的结果十分有趣，沉积在锗片基上的 Au 形成正方形网格结构（图 1-16）。

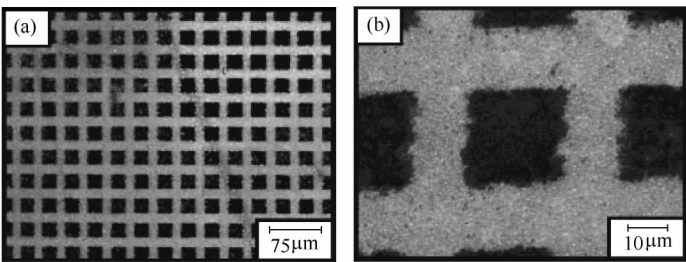


图 1-16 沉积在锗片基上的网格结构 Au 线条

无机纳米管

无机纳米管是无机纳米材料研究中的一个热点，其典型代表为碳纳米管，将在本章的后续章节中进行专门介绍。

本课题组等在十二烷基磺酸钠（SDS）与聚环氧乙烷（PEO）的混合溶液中制备出 PEO 纳米管（图 1-17），离子反应为：



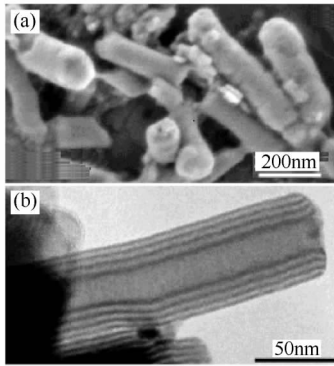


图 5-10 碳纳米管

上述离子反应在特殊的介质中进行, 所生成的 **碳纳米管**并非传统的无机沉淀物。图 5-10 描述了此种纳米管形成过程: 反应生成的 **碳纳米管**可与 **碳纳米管**体系中的 **杂质**相互作用, 形成有序层状结构, 它由 **若干个碳纳米管平面**构成, 该层状结构再逐渐弯曲, 最终成环, 形成了多壁 **碳纳米管**, 见图 5-10 (b)。

在 **1991 年**等将超细 **碳纳米管**粒子通过浸泡沉积在钛箔片上, 然后将箔片浸入 **羧酸**溶液, 反应容器由聚四氟乙烯制成, 密封后在 **150℃**加热一定时间后可得管状 **碳纳米管**。图 5-11 为其 **TEM**图像, 显示出这些 **碳纳米管**的末端有些是开口的 [图 5-11 (a)], 有些末端是密封的 [图 5-11 (b)], 这类似于碳纳米管。这些 **碳纳米管**多壁

纳米管的外径为 **100nm**, 而内径仅为 **10nm**, 层间距大约为 **0.34nm**。虽然图 5-11 (b) 中显示出的纳米管不是很规整, 但这一报道还是丰富了 **碳纳米管**的研究工作。

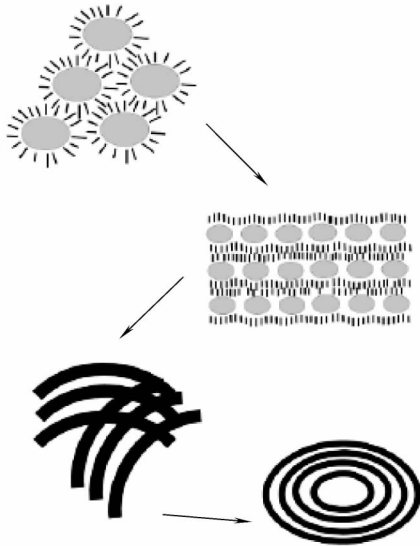


图 5-11 碳纳米管的形成过程示意图

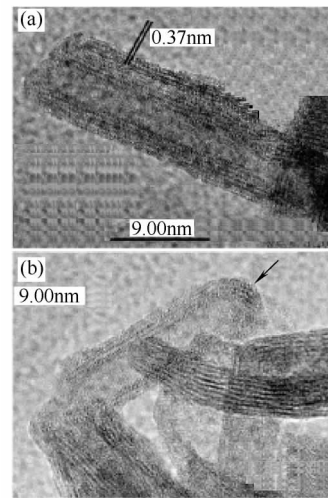


图 5-12 碳纳米管的 TEM 图像

5.1.2 无机纳米棒和纤维

1991 年等在二氯苯体系中加入表面活性剂三辛基氧化膦 (**TPPO**) 等物质, 通过加热回流来分解配合物 **CoCl₂·2H₂O**。该工作的新意在于, 通过改变物料的配比等条件, 可有效控制金属纳米钴的尺寸和几何形状。图 5-12 为所制备的长度不同的丝状、棒状金属纳米钴。钴是一种常见的磁性材料, 研究表明, 很多磁性材料纳米化后, 磁性可明显变化, 故该研究成果具有重要的意义。

一些层状钛酸盐具有晶须状的形貌。我们将钛酸丁酯与强碱的混合物 **NaOH** 或 **KOH** 与 **羧酸**的混合物 **NaOH**, 通过高温煅烧, 分别制得层状 **NaTiO₃** 和层状 **KTiO₃**。图 5-13 为层状 **NaTiO₃** 的 **TEM**谱图, 显示在 **150℃**时, 产物由非晶开始转化成 **NaTiO₃** 的晶体。图 5-14 (a) 为制备过程中加硬脂酸时的产物, 其特征宽度低于 **100nm**, 长度为 **100nm** 左右, 而在无硬脂酸时, 材料长度最高可达 **1000nm**, 如图 5-14 (b) 所示。