

# 纳米材料合成与表征

程 亮

Email: [lcheng2@suda.edu.cn](mailto:lcheng2@suda.edu.cn)

910-408B

2022-09-06

# 纳米材料合成与表征

## 纳米材料合成方法

- 球磨法
- 剥离法
- 化学气相沉积法
- 水热溶剂热法
- 高温液相法
- 溶胶-凝胶法
- 仿生材料合成法

.....



苏州大学  
Soochow  
University

## 纳米材料表征方法

- X-射线粉末衍射
  - 透射电镜
  - 扫描电镜
  - 原子力显微镜
  - X-射线光电子能谱
  - 红外光谱分析
  - 拉曼光谱分析
  - 热失重分析
  - 比表面积分析
- 
- .....

**上课时间与地点：线上/301-1314**

**9/06~12/27 18:30~21:20**

**考试形式：**

**出勤 (20%)**

**期中考试 (40%) 开卷**

**期末考试 (40%) 开卷**

# 1 绪论

- 什么是纳米材料
- 纳米材料性质
- 纳米材料分类
- 纳米材料表征
- 纳米材料应用
- 纳米材料构效关系

# 生活中的“纳米”

- 纳米材料的莲花效应
- 纳米阻燃剂
- 纳米技术电池
- 纳米化妆品
- 纳米塑料
- 纳米衣物

# “纳米科技”重点专项拟立项的2022年度申报指南

## “纳米前沿”重点专项 2022 年度 项目申报指南 (仅国家科技管理信息系统注册用户登录可见)

“纳米前沿”重点专项的总体目标是围绕物质在纳米尺度(1~100 纳米)上呈现出的新奇物理、化学和生物特性，开展单纳米尺度效应和机理、新型纳米材料和器件制备方法、纳米尺度表征新技术等方面的基础前沿探索和关键技术研究，催生更多新思想、新理论、新方法和新技术等重大原创成果。同时，开展纳米科技与信息、能源、生物、医药、环境等领域的交叉研究，提升纳米科技对经济社会发展重点领域的支撑作用。

2022 年度指南将围绕单纳米尺度等前沿科学探索、纳米尺度制备核心技术研究、纳米科技交叉融合创新等 3 个重点任务部署项目，拟支持 39 个项目，拟安排国拨经费 9 亿元。同时，拟支持 12 个青年科学家项目，拟安排国拨经费概算 6000 万元，每个项目 500 万元。

- **新型纳米制备与加工技术**
- **纳米表征与标准**
- **纳米生物医药**
- **纳米信息材料与器件**
- **能源纳米材料与技术**
- **环境纳米材料与技术**
- **纳米科学重大基础问题**





## 白春礼

中国科学院院长

## 纳

米科学是在纳米尺度（从原子、分子到亚微米尺度之间）上研究物质的相互作用、组成、特性与制造方法的科学。它汇聚了现代多学科领域在纳米尺度的焦点科学问题，促进了多学科交叉融合，孕育着众多的科技突破和原始创新机会。同时，纳米科技对高技术的诞生，对我们的生产、生活也将产生巨大的影响。

从上世纪八十年代开始，纳米科技引起了人们的广泛关注。2000年美国率先发布了“国家纳米技术计划（NNI）”掀起了国际纳米科技研究热潮。中国高度重视纳米科技发展，与国际同步进行了布局，于

2000年成立了国家纳米科技指导协调委员会，2003年成立了国家纳米科学中心，在国家中长期发展规划中部署了纳米科技研究计划，同时，基金委和中国科学院也都部署了纳米科技相关研究。这些措施极大地推动了中国纳米科技的发展。

施普林格·自然集团、国家纳米科学中心、中国科学院文献情报中心共同合作，编制了中国纳米白皮书，从高水平文献发表、专利申请、重点发展领域分布、国际合作网络等视角，运用大数据分析和可视化方法，综合专家解读和意见，科学详实地揭示出近年来中国和世界纳米科技的发展态势。文章定性分析与定量分析相结合，主观判断与客观数据相印证。该报告，一方面，让我们看到了过去二十年，纳米科技在世界范围得到了很大的发展，对人类社会生活进步产生了巨大影响；另一方面，我们也看到相关领域的变迁和影响。纳米科学研究和技术应用已经遍布材料与制造、电子与信息技术、能源与环境、以及医学与健康领域。与此同时，纳米技术的迅速发展给社会带来的巨大影响也带来了伦理和安全问题，潜在风险值得关注和研究。

报告显示，中国在纳米科学领域已成为当今世界纳米科学与技术进步重要的贡献者，是世界纳米科技研发大国，部分基础研究跃居国际领先水平。中国纳米科技应用研究与成果转化的成效也已初具规模。在专利申请量方面，中国位于世界前列。这些都与中国在纳米科技领域的持续投入密切相关，同时也展示了中国纳米科技研究正在实现从量的增加到原创以及质的转变，并更加关注纳米科技的产业化应用。

展望未来，纳米科技面临诸多机遇和多方挑战。我们需要实现对于纳米尺度基础研究的突破，需要加快填补基础与应用之间的沟壑，更需要满足更多来自于世界能源、环境与健康领域的重大需求。为此，我们将进一步加大创新人才的培养，加快构建和培育价值链和创新链，开展更加广泛和有效的全球合作。希望通过我们的共同努力，纳米科技在基础前沿领域能实现更多原创性突破，更多应用成果开花结果、落地生根，服务国家、造福人民，为中国早日建成世界科技强国作出应有的贡献。 ■

## 【序】

2017年8月

# 纳米科学 与技术的 过去、现在 和未来

## 纳米技术发展的 里程碑

纳米科学，简而言之，主要研究的是尺度在1到100个10亿分之一米，即1-100纳米之间的极小物体。在此如此的尺度上，材料的物理、化学和生物学特性跟宏观尺度的物体相比，会大相径庭——通常有巨大的差异。比如，低强度或脆性合金会获得高强度、高延展性，化学活性低的化合物会变成强力催化剂，不能受激发光的半导体会变得能够发射强光。纳米尺度级的处理能够改变物质属性，这对大多数的科学、技术、工程和医学领域都具有实用意义。

仅有少数几次的引用。“纳米技术”这个术语直到1974年才出现，由谷口纪男在论文“关于‘纳米技术’的基本概念”里首次提出，他介绍了如何运用离子溅射在硬质表面蚀刻形成纳米结构。

不过，纳米材料的使用可追溯到几个世纪前，例如其在陶瓷釉和有色窗玻璃染色剂中的使用。领先费曼控制单一原子的设计大约一个世纪，英国物理学家、电磁学先驱法拉第(Michael Faraday)已阐述了光的波长相关散射(丁达尔现象)，其研究对象是通过化学方法制备的金胶体悬浮液。他注意到金的胶体悬浮液颜色

会随着金纳米颗粒的大小发生变化，并意识到极小黄金颗粒的存在。

意识到通过控制原子来改造世界的可能性是一回事，如何实现却完全是另一回事。从这个意义上说，开发用于观察和控制物质的工具一直在决定着纳米科学与技术发展的时间表。最先被开发出来的工具是1931年由Ernst Ruska和Max Knoll发



## 国之大器 始于毫末

1985年，美国莱斯大学的Harold Kroto, Sean O'Brien, Robert Curl和Richard Smalley发现了富勒烯( $C_{60}$ )——这是一种完全由碳原子组成的、形如足球并且异常稳定的分子。这打破了碳只有石墨和金刚石两种同素异形体的传统认知，并开启了化学家的想象力，令他们开始思考合成比之前设想要大得多的一系列新型分子结构的可能性。

1991年，饭岛澄男报告合成了碳纳米管——一种具有特殊电子、热学、机械性能的材料，为这种管状纳米结构的广泛应用铺平了道路。随后不久，Charles Kresge及其同事发明了可过滤分子的介孔纳米材料MCM-41和MCM-48，现已广泛应用于石油炼化、污水处理及药物输送。1990年代后半期，Charles Lieber, Lars Samuelsson和Kenji Hiruma领导的团队开发了合成晶状半导体纳米线的技术——为推动纳米技术进入光学和光电学领域又迈出至关重要的一步。2004年，Andre Geim和Konstantin Novoselov实现了单层石墨烯的分离，获得单原子厚度的二维碳原子结构，开启了通向不可限量的未来技术的大门。

超轻、高柔性、高强度、高导电性等特点使得石墨烯被誉为一种新的神奇材料。1990年代末和本世纪初，纳米技术更多地投入使用。1998年电子墨水的发明就是一例，这是一种类似纸张的显示技术，墨水由极小的胶囊组成，现已广泛应用于Kindle等电子阅读器产品。另一个例子是1988年Albert Fert和Peter Grünberg发现的巨磁阻效应，据此开发的磁性读头大幅缩小了电脑硬盘的尺寸，并提高了存储容量。Ekimov, Efros, Brus(及其他众人)发现并开发的量子点也得到了广泛的实际应用，这包括平板电视背光源，以及用于活体细胞和组织内最小结构成像的染色剂。

健康产业。由于具有广泛的社会影响力，纳米技术的快速发展也随之带来伦理和安全问题，需要我们在享用纳米技术预期的成果之前加以解决。

**材料和制造**

纳米技术的优势主要体现在通过控制原子级或分子级的物质所创造的新材料上。由于具备理想的机械、化学、电学、热学或光学性能，这些新型纳米材料被应用于日常用品及工业制造之中。

威尔逊中心曾发起一个关于新兴的纳米技术的项目，根据其中的一份制造商清单估计<sup>2</sup>，市场上有1600多种基于纳米技术的消费产品。纳米材料在健康和健身产品中的应用最广，例如化妆品、个人护理用品和服装等。

普通的电吹风或直发器就有可能使用纳米材料降低重量或延长使用寿命。防晒霜已使用了从皮肤表面上看不到的纳米二氧化钛或氧化锌等防晒成分。纳米工程制备的纤维被用于制造防皱、防沾污的衣物，不仅质轻，甚至还可能防止细菌的滋生。纳米材料还被应用于各类产品中，从轻便、刚性好的网球拍、自行车和箱包，到汽车零件和可充电电池等。

在制造业，纳米结构的材料被用于机器零件的表面涂层或润滑剂中，以减小磨损、延长机器使用寿命。具有纳米结构的合金，由于强度高、耐久、质量轻的特点，是制造飞机和航天航空零部件的理想高性能材料。它们被用于制造机身、过滤材料及其他零部件，带来更强的耐蚀、抗震和防火性能，以及优良的强度-重量比。金属、氧化物、碳和其他化合物的纳米颗粒也是很好的催化剂，在石油精炼、生物燃料等领域有着重要的工业应用。由于出色的表面积-体积比、高催化活性及低能耗的特点，纳米催化具有多种优势，如最优的原料利用率、高能效、最低限度的化学废料排放，以及更高的安全性等。

的材料被用于机器零件的表面涂层或润滑剂中，以减小磨损、延长机器使用寿命。具有纳米结构的合金，由于强度高、耐久、质量轻的特点，是制造飞机和航天航空零部件的理想高性能材料。它们被用于制造机身、过滤材料及其他零部件，带来更强的耐蚀、抗震和防火性能，以及优良的强度-重量比。金属、氧化物、碳和其他化合物的纳米颗粒也是很好的催化剂，在石油精炼、生物燃料等领域有着重要的工业应用。由于出色的表面积-体积比、高催化活性及低能耗的特点，纳米催化具有多种优势，如最优的原料利用率、高能效、最低限度的化学废料排放，以及更高的安全性等。

## 信息技术

纳米技术作为促进信息技术和数码电子行业发展的关键驱动力，进一步提升了诸多电子产品的性能，如电脑、手机和电视等。

英特尔公司的共同创始人Gordon Moore在1965年提出了著名的摩尔定律——集成芯片上的晶体管数量每年就会翻倍(后修改为每两年翻倍)。彼时，纳米技术还在发展的初期。由于纳米技术的进步，集成芯片和晶体管已如摩尔所预测的那样，



**伦理和安全问题**

带来怎样的经济影响和社会巨变，这要求我们对该技术应用的伦理问题进行审慎的判断。

为应对这些担忧，全球许多国家都已采取行动。美国出台了“国家纳米技术计划（National Nanotechnology Initiative）”，其主要目标之一是支持以负责任的方式发展纳米技术。此外，美国还组织了若干工作组，探讨和应对纳米技术所带来的伦理、法律和社会问题。欧盟也与美国合作，建立了一个政策制定的平台，以应对纳米技术发展过程中所产生的问题。中国自2001年就已投入资金研究纳米安全问题，约有7%的纳米技术研究预算用于有关纳米技术潜在的环境、健康及安全问题的科学研究。这些研究也将支持制定标准的方法，以量化相关的环境及健康危害，同时有助于形成监控和管制纳米污染的指导方针。

通过仔细考量其潜在的风险，人们将能有效驾驭纳米技术，让我们的生活和环境变得更加美好。 ■

因此可用在传感器中鉴别有毒物质，这要比传统的现场测试方法更加简单快捷，甚至能在检测的同时去除污染物。

**医疗和健康**

可以说纳米技术最成熟的形式就是生命本身所表现出来的形式。从细胞器一直到底层的核糖体、DNA、ATP，这些生物系统为纳米科学家提供了源源不断的灵感源泉。或者，正如合成生物学家Tom Knight曾说过的那样，“生物学就是在发挥作用的纳米技术！”正因如此，纳米技术对医疗和健康产业的影响日趋显著，并在药物输送、生物材料、造影、诊断、活性植入及其他医疗应用中得到了稳步发展。

纳米技术还可用于水处理和污染物的清理。例如，二硫化钼（MoS<sub>2</sub>）薄膜等纳米材料能以更高效的过滤性促进盐水淡化，而多孔质的纳米材料可以像海绵一样吸收水中的重金属和浮油等有毒物质。纳米颗粒还可通过化学反应清除工业用水中的污染物。此外，纳米纤维能够吸附空气中的微小颗粒，因此可用作净化空气的滤网。

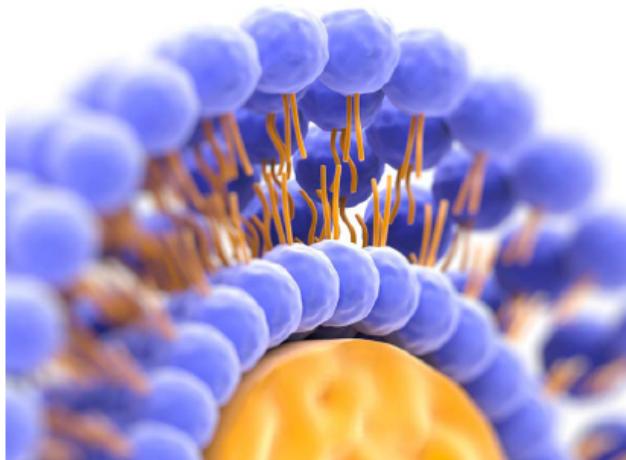
纳米技术在环境治理中的应用还包括空气、水和土壤中污染物的检测。由于其独特的化学和物理特性，纳米颗粒对化学或生物试剂的灵敏度更高，

突破化学、解剖和生理学阻碍，抵达病变组织，提高药物在病灶位置的聚集量，减小对健康组织的损害，较之传统药物具有显著优势。例如，经过精心设计的纳米药物可以经血管渗漏点渗入癌变组织，并在靶点位置积聚，从而提高癌症靶向治疗的精准度。其他的应用还包括用纳米颗粒封装诸如抗体之类的生物活性分子，以促进特定靶向的药物输送。

纳米颗粒因其尺寸微小和特殊的化学性质，在医学造影方面也有独特的应用前景。传统的荧光染色剂是用有机化合物制备的，通常寿命短，其光学性能也很难调制以适应任意的工作波长。利用无机量子点，其工作波长可根据尺寸调制，上述两个不足都能得到了克服。而且，设计起来也更加方便，可以形成在特定组织和肿瘤位置的积聚，从而实现更便捷、更准确的诊断，并提高治疗效果。

纳米科技还应用于生物组织工程。石墨烯、纳米管、二硫化钼等纳米材料可用来制造支架，帮助修复或重塑受损的组织。纳米结构支架能够模仿组织特有的微观环境，促进细胞的附着、繁殖和生长，并诱导正常细胞机能及组织生长。

2. See <http://www.nanotechproject.org/cpi/>



变得越来越小，计算速度却日趋提高，尽管摩尔定律近年来正在逐渐失效。2016年诞生了世界上首个1纳米的晶体管。该晶体管由碳纳米管和二硫化钼，而不是硅制备而成，展示了进一步缩小电子器件尺寸的潜力，使得摩尔定律至少能在一段时间里继续有效。

人们对纳米材料物理特性的深入理解推动了量子器件的发展，其应用遍及光感应、激光和晶体管，实现了更低能耗下的高速数据传输。元器件如采用了纳米级的半导体量子点，就可以感应或发射单个光子，器件在应用到加密系统中之后，就可以

提升信息系统的性能和安全性。量子点或无机半导体纳米晶体的另一个应用领域是显示屏产业。由于纳米技术，电视、计算机和其他重型设备的移动设备的显示屏就可实现超高清、节能、甚至可弯曲，并产生更加逼真的图像。人们在设计新型透明导电材料时采用了碳纳米管或银纳米线，这为开发各种使用柔性屏幕的电子设备开启了大门。

**能源和环境**

纳米技术可促进可替代能源的发展，提高能源使用效率，并为环境治理提供新的解决方案，因此有助于环境保护事业。在传统的能源领域，基于纳米技

除了有助于提高阳光采集效率，纳米材料还可用于废热转化，如将汽车尾气转化为有用的能量。再如，人们开发了可将二氧化碳转化为清洁燃料甲烷的纳米颗粒，以及能提高氢气制备产能的纳米光催化剂，这都提升了发展新的可再生能源的前景。

在能源存储方面，由于纳米结构的电极材料能够支持更多不同的电化学反应，因此可用来提高可充电电池的容量和性能。这不但能增加新一代电池的存储容量，还能减轻电池重量，从而提高电动汽车这类交通工具的效能和续航距离。

纳米技术还可用于水处理和污染物的清理。例如，二硫化钼（MoS<sub>2</sub>）薄膜等纳米材料能以更高效的过滤性促进盐水淡化，而多孔质的纳米材料可以像海绵一样吸收水中的重金属和浮油等有毒物质。纳米颗粒还可通过化学反应清除工业用水中的污染物。此外，纳米纤维能够吸附空气中的微小颗粒，因此可用作净化空气的滤网。

纳米技术在环境治理中的应用还包括空气、水和土壤中污染物的检测。由于其独特的化学和物理特性，纳米颗粒对化学或生物试剂的灵敏度更高，

# 不断崛起的 中国纳米科研

过去二十年，中国的科研产出实现了人类有史以来前所未有的增长速度，这已不是什么秘密。1997年，中国的科研人员参与撰写的科研论文约占科学引文索引（简称 SCI，现由科睿唯安编制）期刊全球所发表的论文数量的2%。目前，中国几乎贡献了全球四分之一的原创论文。其中，最能突出展现这一发展趋势的研究领域几乎非纳米科学与技术莫属了。

为了更好地理解中国纳米科研的兴起，我们将分别从原创科研论文数量、自然科研最新推出的 Nano 数据库收录的科研贡献，以及专利产出情况这几个方面，将中国与世界其他主要科研国家的科研产出进行对比。



## 过去二十年的 论文产出

为了开启这个有关中国纳米研究状况的调查，我们根据 SCI 的扩展数据库，使用与‘纳米科学与技术’相关的关键词进行检索，由此获得全球主要科研强

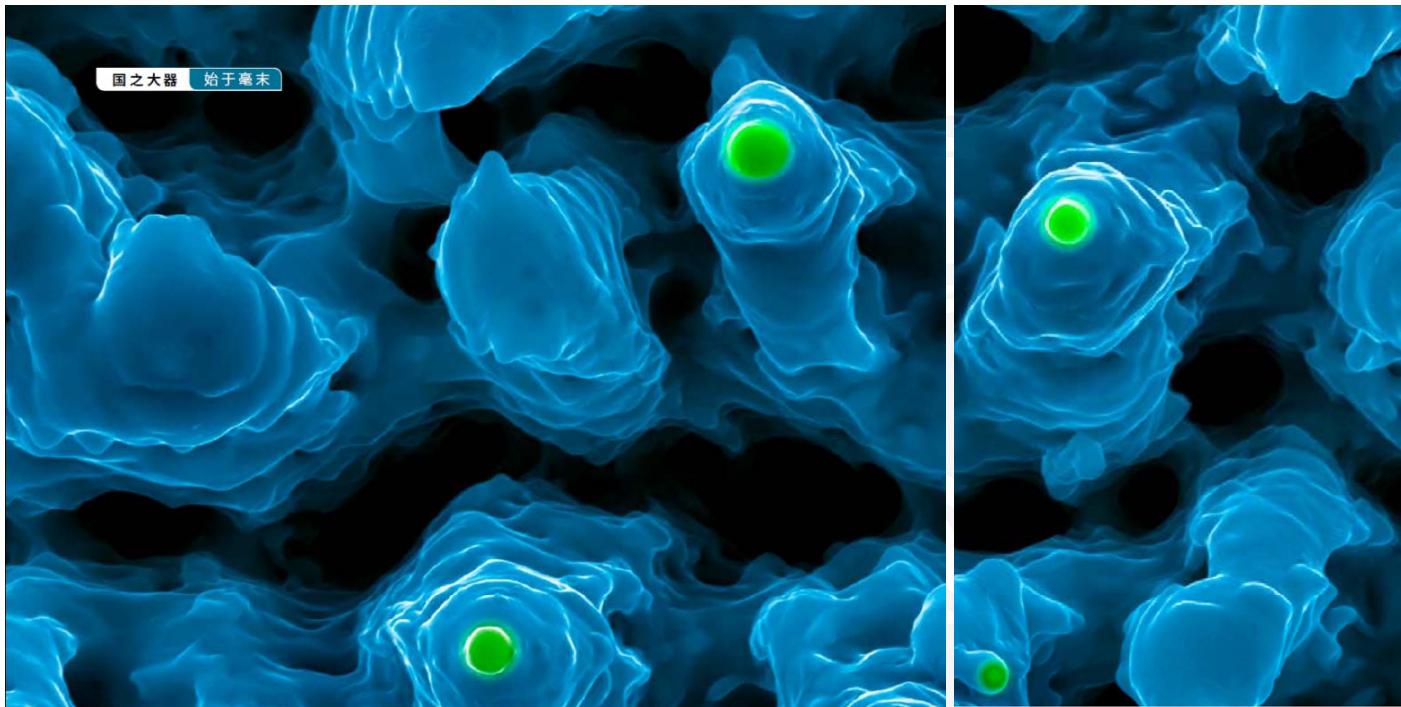
国逐年的论文发表数量。计入的这些论文主题涵盖了诸如‘纳米管’、‘量子点’、‘原子力显微镜’等专业词（详细的研究方法见附录 1）。

1997 年，全球共发表了约 1.3 万篇与纳米科学相关的论文。到 2016 年，

已增至 15.4 万篇，复合年均增长率达 14%，高于所有领域平均 3.7% 的论文复合年均增长率，几乎是其四倍。同期，中国纳米方面的论文产出由 1997 年的 820 篇增至 2016 年的 5.2 万余篇，复合年均增长率达 24%（图 1）。



【中国纳米科学与技术发展状况概览】



# 行业专家展望中国 纳米科技前景

科研产出和专利申请数量的迅速增长，都描绘出中国纳米科学发展的美好前景。不论是传统的强项学科，还是新兴领域，中国的纳米科学都表现出巨大的潜力。但是，机遇与挑战并存。为了对此有更深入的理解，我们采访了中国纳米科研界不同研究方向的专家。

## 机遇

在中国经济持续增长，以及政府大力扶持和倡导科技创新的前景之下，中国的科技投入，尤其是对纳

米科学和技术的投入有望继续增加。

中国政府各部委和相关机构已制定了科研计划，为纳米科学和技术提供持续的经费支持。这包括了科技部、教育部和

自然科学基金委员会等中国主要的科研经费资助机构。最近五年，仅教育部就已为各高校拨付了逾5亿元人民币的纳米科研预算资金。中科院也启动了纳米先导专项，投入了约10亿元人民币。具体来说，大量优质资源被投入纳米材料、表征技术、纳米器件与制造、纳米催化技术与纳米生物医药等领域的基础和应用研究中。在采访中，专家们指出了纳米科学几个最具发展前景的领域。

## 催化

不少受访专家认为，催化技术和纳米催化材料是中国最有发展前景的纳米科学领域。这一观点并不出人意料，因为中国在该领域已拥有丰富的专业知识。以纳米结构为基础的催化剂能够加快化学反应，因此在化学或化工产业及炼油行业有广阔的应用前景。例如，中国科学家最近研发了一种新的双功能催化剂，能将煤气化产生的合成气直接转化为低碳烯烃——生产塑料等

材料的重要原料。他们的方法突破了煤化工业一直沿袭的费托合成的选择性限制，大幅提高了转化效率，并已经成功吸引了多家化工企业，共同开发催化剂制备和工艺过程，将这一原创性成果实现产业化。工业需求的不断增长会继续推动纳米催化剂的发展。中国有望继续保持该领域的领先优势。

## 能源

能源的重要性和发展可再生能源的必要性已被广泛认可，尤其是在中国——日益突出的环境问题已引起了政府的高度重视。中国致力于长期投

“如果问我最想看到什么变化，那就是对纳米技术研发和应用研究的投入应该更大。”

资新能源的研究，这为中国纳米能源的发展带来光明前景。该领域的一位青年专家说：“纳米技术在能源产业的应用有着广阔的前景，我们很可能在接下来的5到10年里就会有重大突破。”据其介绍，太阳能产业的上游在中国，这为做新能源研发的科研人员带来丰富资源，有利于他们挖掘源头。由于中国政府具有强大的资源调动能力，因此开发纳米能源技术和推广可再生能源方面，



苏州大学  
Soochow  
University

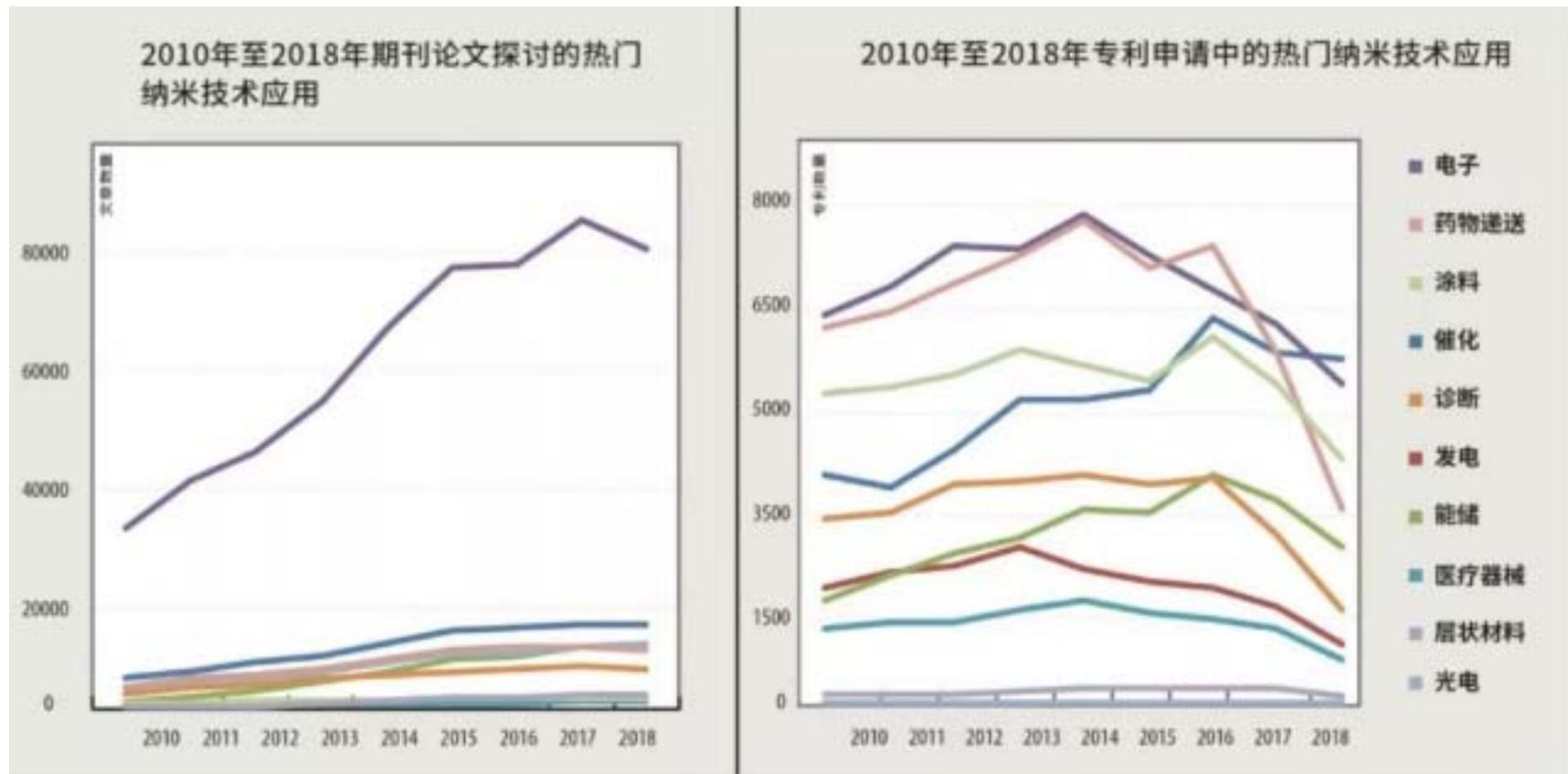
# 纳米科学与技术 现状与展望：2019

前路有光，以微见长



第十三届中国国际纳  
米技术产业博览会

# 2010年至2018年专利申请中的热门纳米技术应用

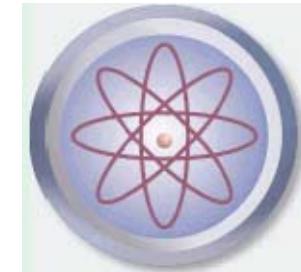
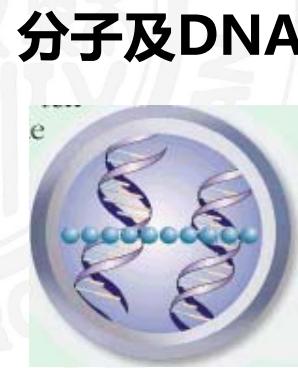
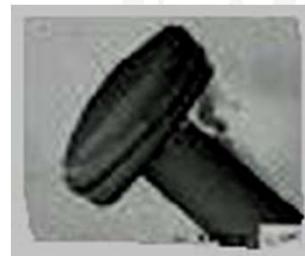
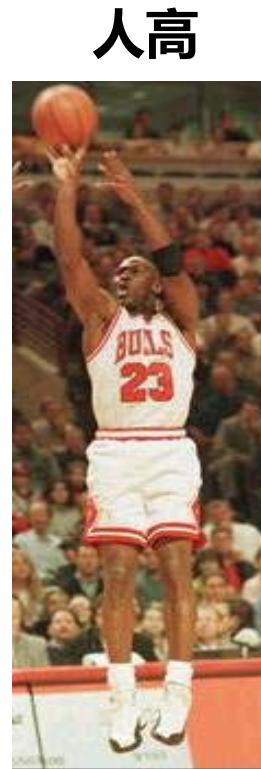


- 纳米合成、纳米表征、纳米器件与信息技术、
- 纳米医学与纳米诊断、纳米技术与能源、绿色纳米技术



# 1 绪论：纳米材料定义

纳米是一个长度计量单位， $1 \text{ 纳米} = 10^{-9} \text{ 米}$



## 1.2 纳米材料及性质

纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围( $10^{-9} \sim 10^{-7}$ m)或由它们作为基本单元构成的材料。

### --纳米材料四大效应

表面  
效应

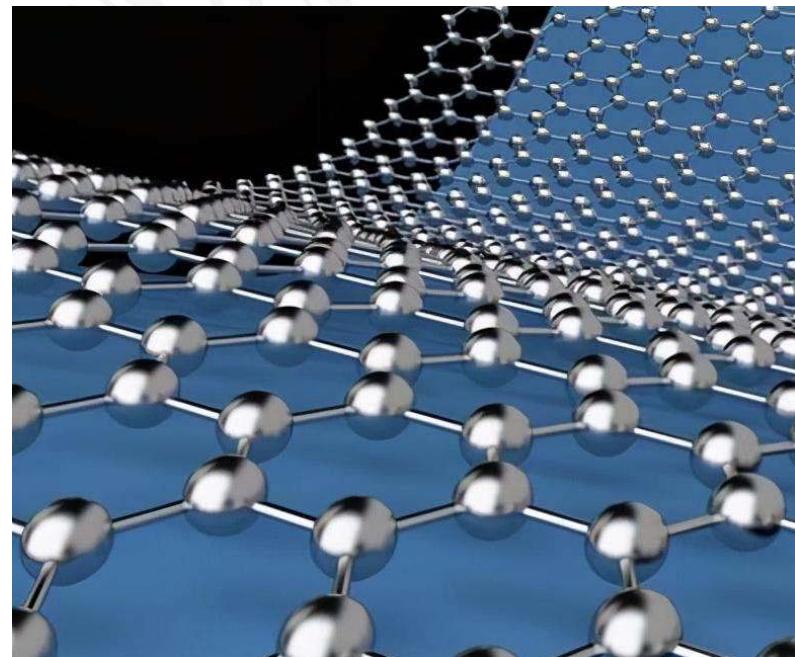
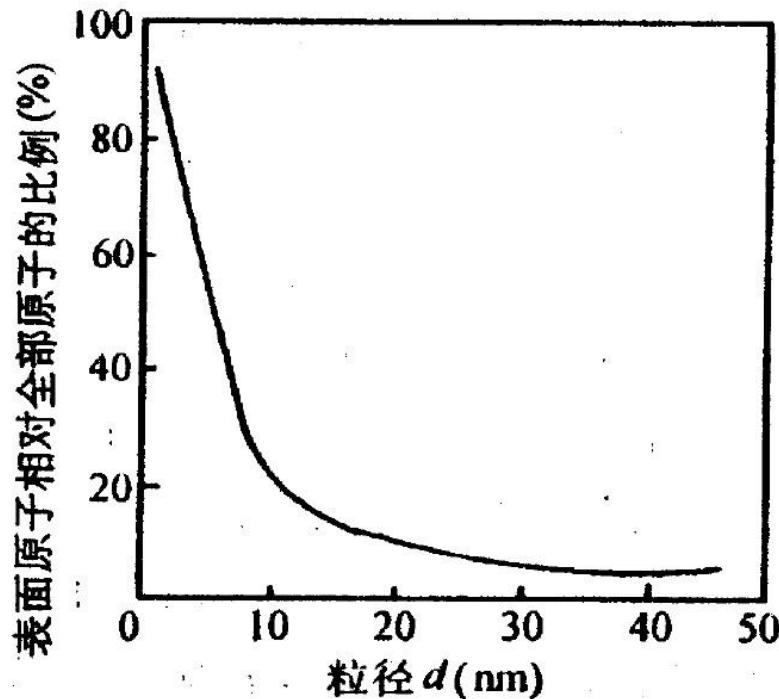
量子尺寸  
效应

小尺寸  
效应

量子隧道  
效应

# 表面效应

- 纳米粒子表面原子数与总原子数之比随粒径的变小而急剧增大后引起的性质上的变化。



表面原子数占全部原子数的比例和粒径之间的关系

## ➤ 量子尺寸效应

- 当粒子尺寸极小时，费米能级附近的电子能级将由准连续态分裂为分立能级的现象。
- 量子尺寸效应可导致纳米颗粒的磁、光、声、电、热以及超导电性与同一物质原有性质有显著差异，即出现反常现象。
- 例如金属都是导体，但纳米金属颗粒在低温时，由于量子尺寸效应会呈现绝缘性。



Bulk Gold = Yellow

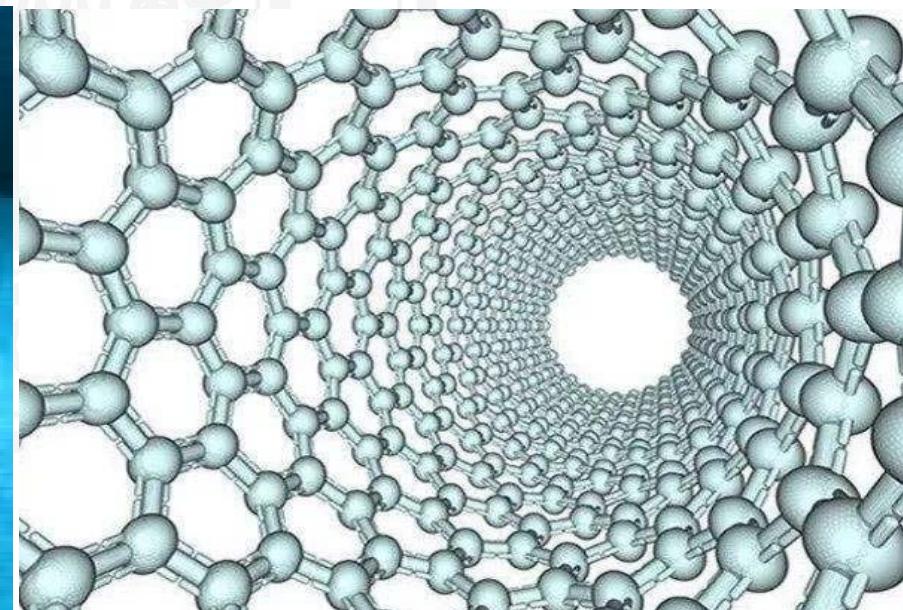


Nanogold = Red



## ➤ 小尺寸效应

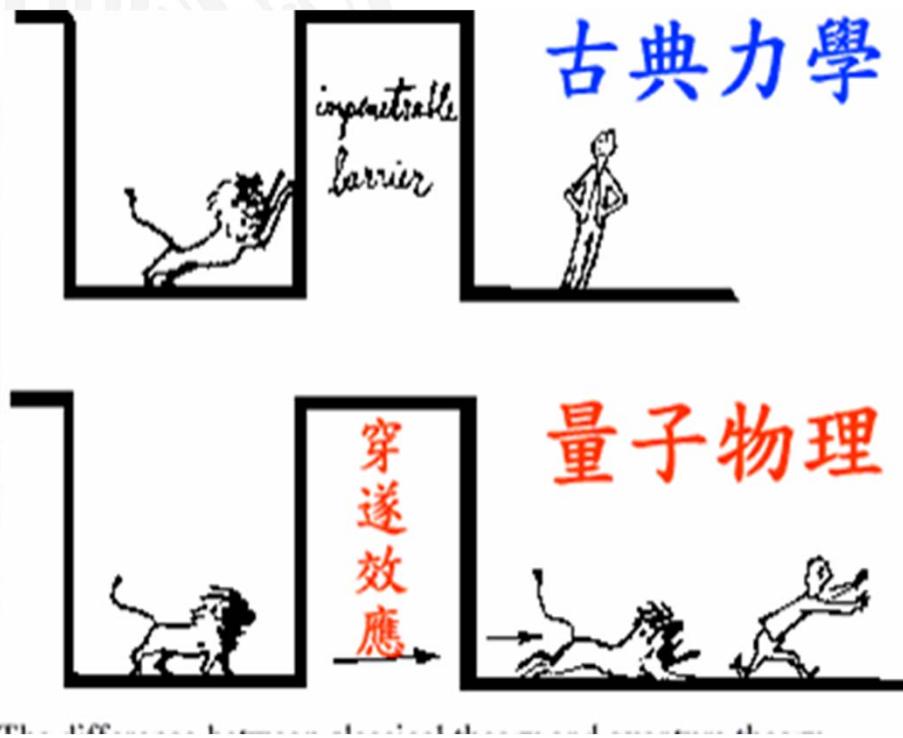
当纳米粒子尺寸与德布罗意波以及超导态的相干长度或透射深度等物理特征尺寸相当或更小时，对于晶体其周期性的边界条件将被破坏，对于非晶态纳米粒子其表面层附近原子密度减小，这些都会导致电、磁、光、声、热力学等性质的变化，这称为小尺寸效应。



# ➤ 量子隧道效应

微观粒子具有穿越势垒的能力称为隧道效应。一些宏观量，例如微粒的磁化强度、量子相干器件中的磁通量等亦具有隧道效应，它们可以穿越宏观系统的势垒而产生变化，称为宏观量子隧道效应。

- 电子既具有粒子性又具有波动性，因此存在隧道效应。
- 量子尺寸效应、宏观量子隧道效应将会是未来微电子、光电子器件的基础，或者说它确立了现存微电子器件进一步微型化的极限，当微电子器件进一步微型化时必须要考虑上述的量子效应。



# 纳米材料的一些奇异特性

- 纳米金属的熔点比普通金属低几百度；
- 纳米磁性材料的磁记录密度可比普通的磁性材料提高10倍；
- 纳米陶瓷的强度和韧性显著提高
- 纳米复合材料对光的反射度极低，但对电磁波的吸收性能极强，是隐形技术的突破；
- 纳米材料颗粒与生物细胞结合力很强。
- 催化活性增强
- 以粒径小于300nm的Ni和Cu-Zn合金的超细微粒制成的催化剂，可使有机物氢化的效率提高到传统镍催化剂的10倍。

## 1.3 纳米材料分类

零维: 纳米颗粒 (nanoparticle)

一维: 纳米棒(nanorod)、 纳米线(nanowire)  
纳米带 (nanobelt) 、 纳米管 (nanotube)

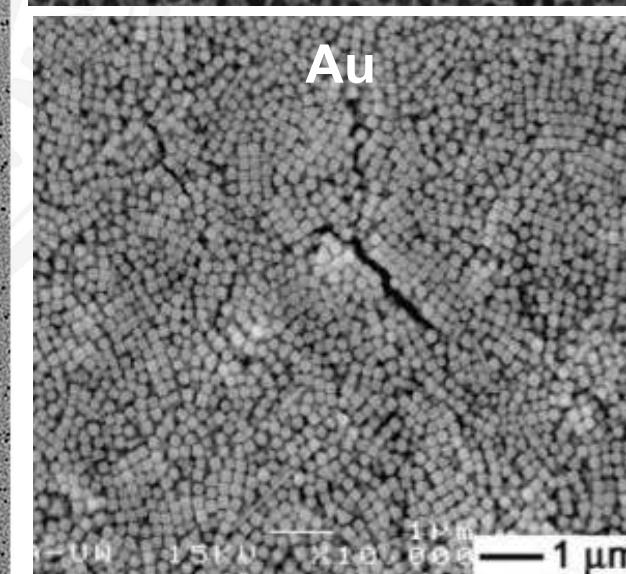
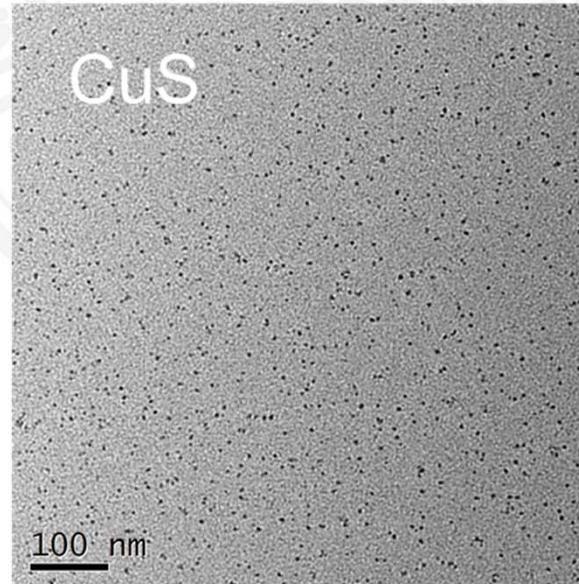
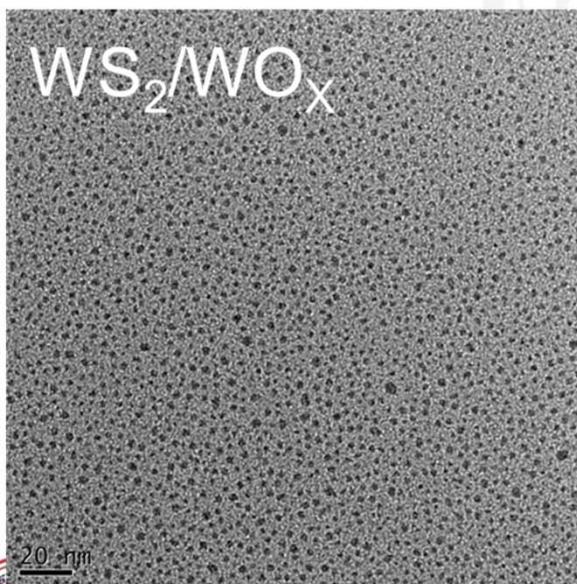
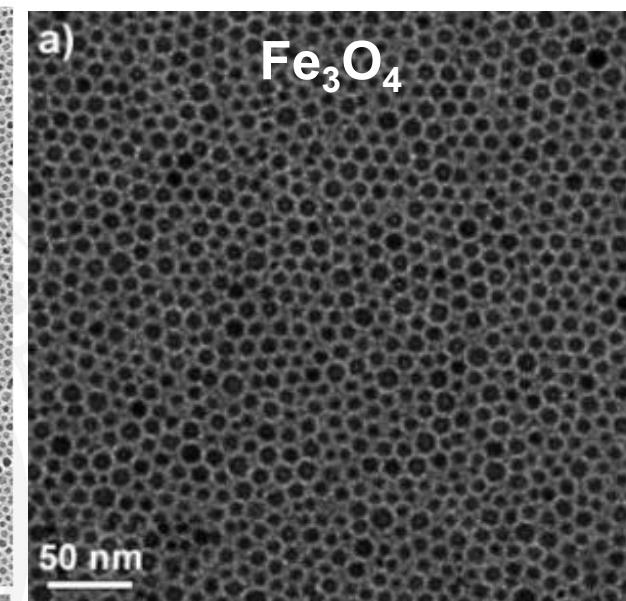
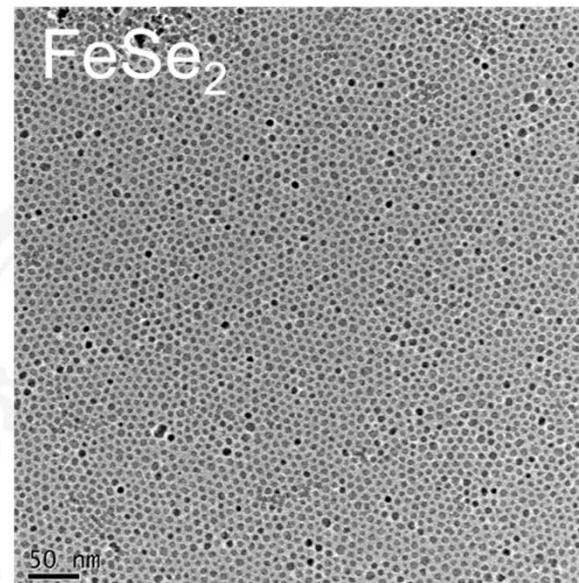
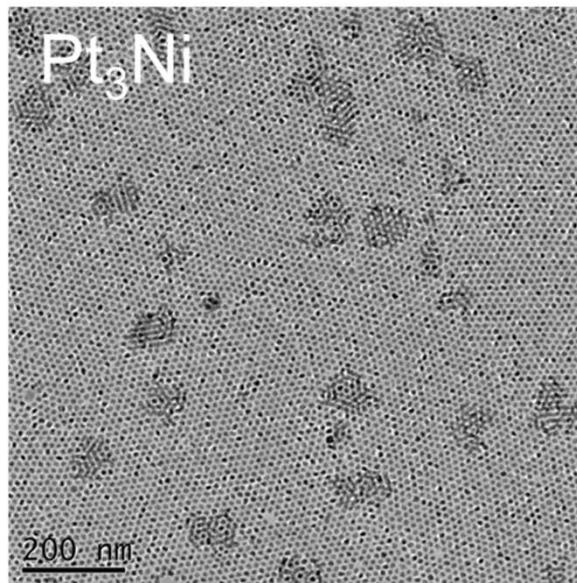
二维: 纳米片 (nanosheet 、 nanoflake)

三维: 纳米立方块等 (nanocube, .....)

# 零维纳米材料

FUNSOM

功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials



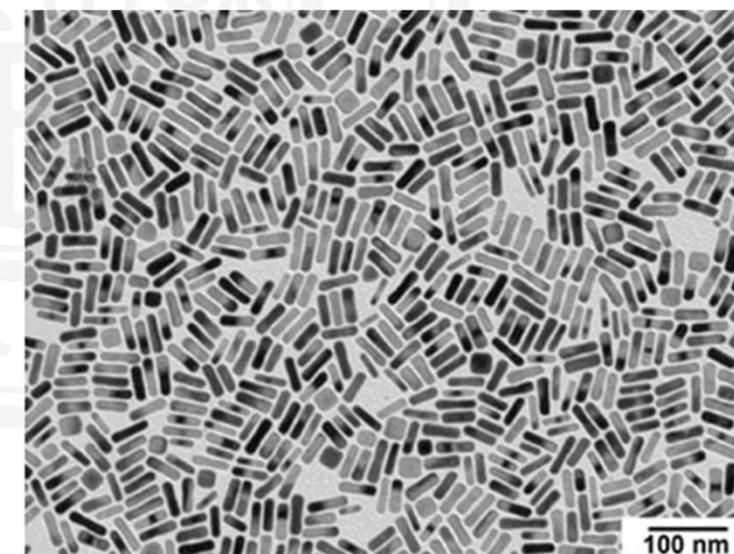
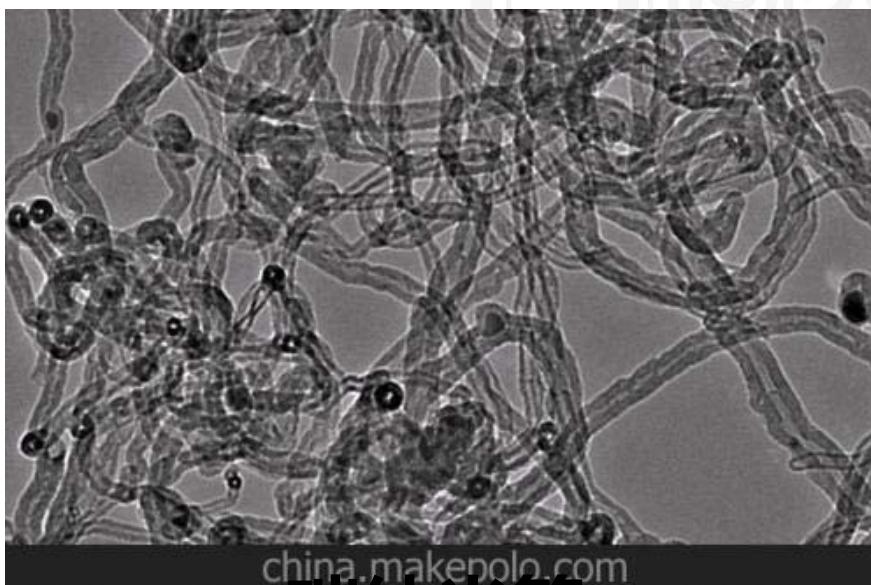
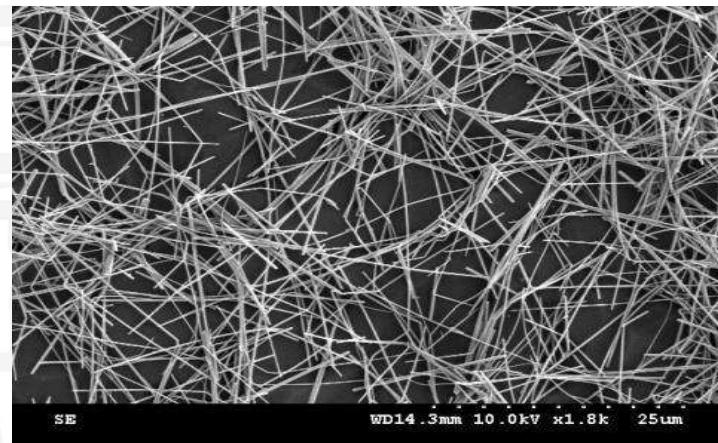
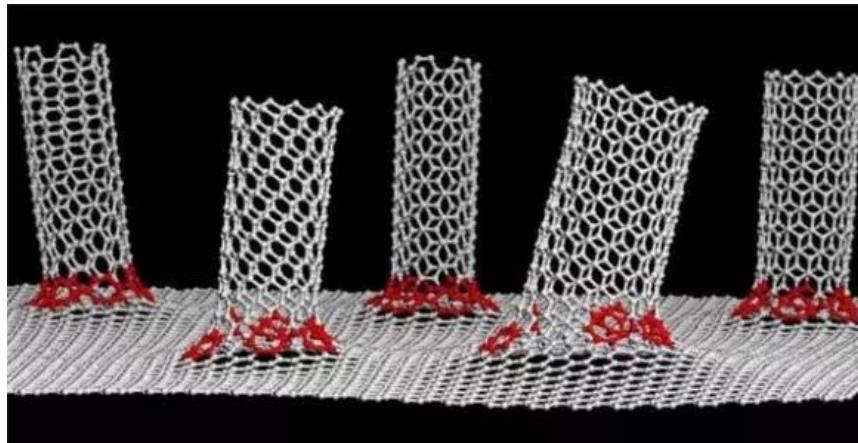
苏州大学  
Soochow  
University

# 一维纳米材料

FUNSOM

功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials

## 银纳米线



## 金纳米棒



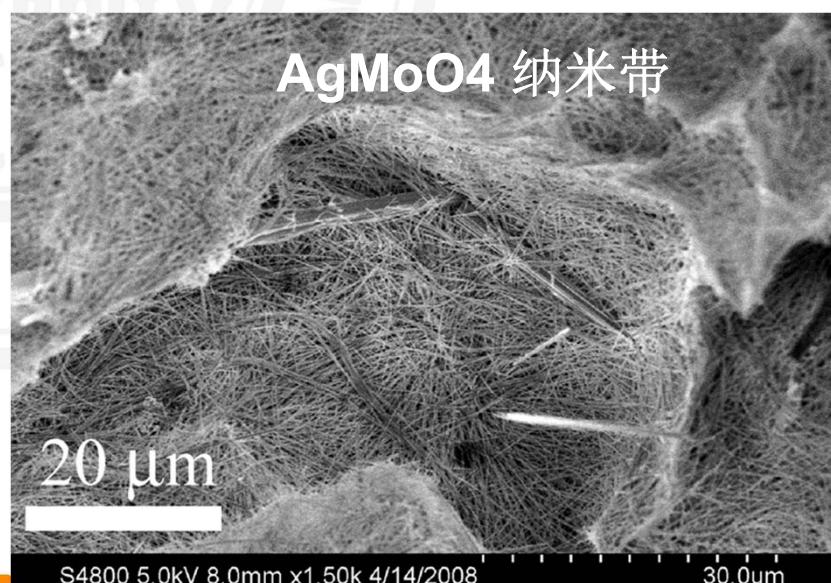
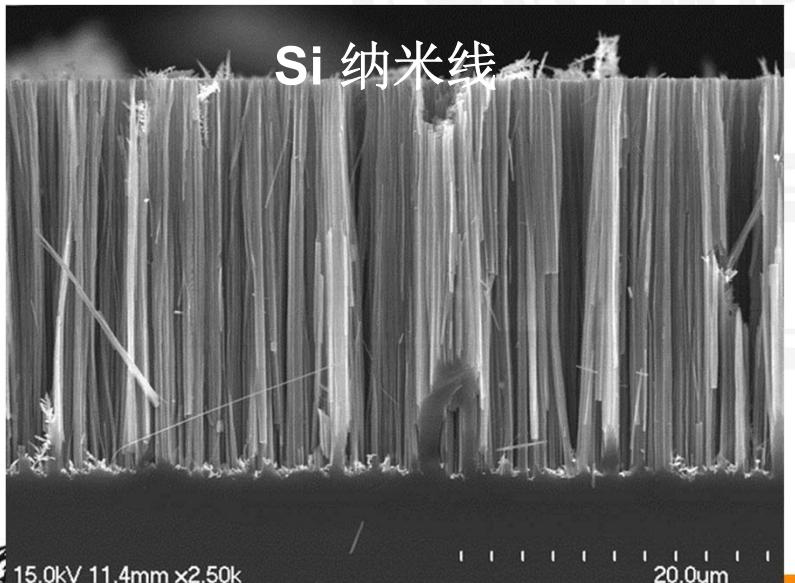
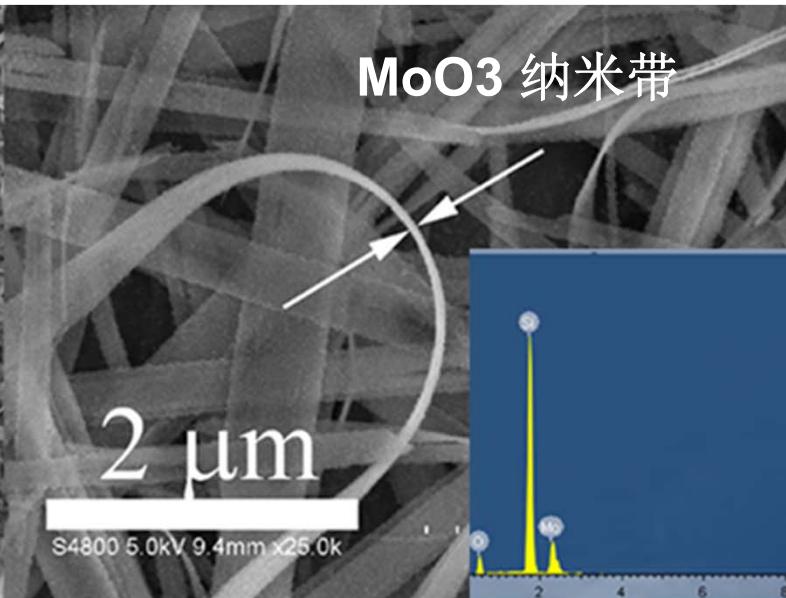
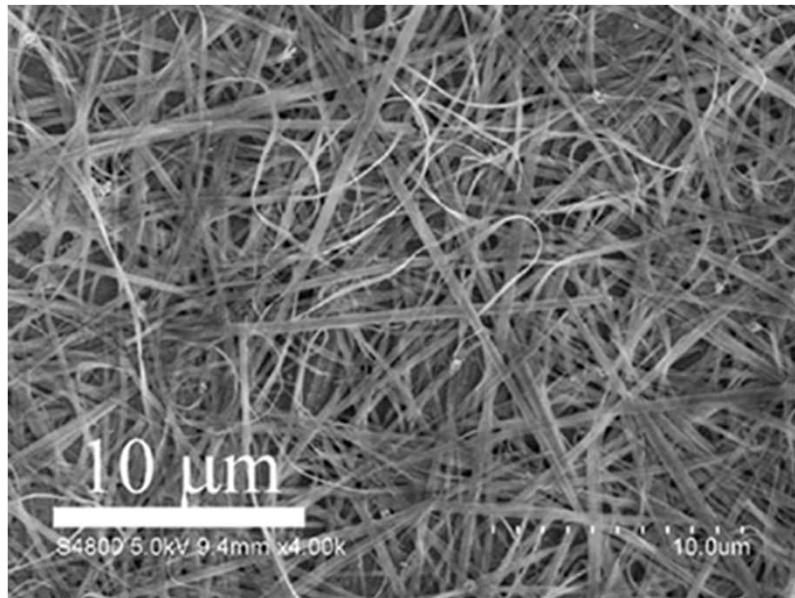
苏州大学  
Soochow  
University

碳纳米管

# 一维纳米材料

FUNSOM

功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials



Soochow  
University

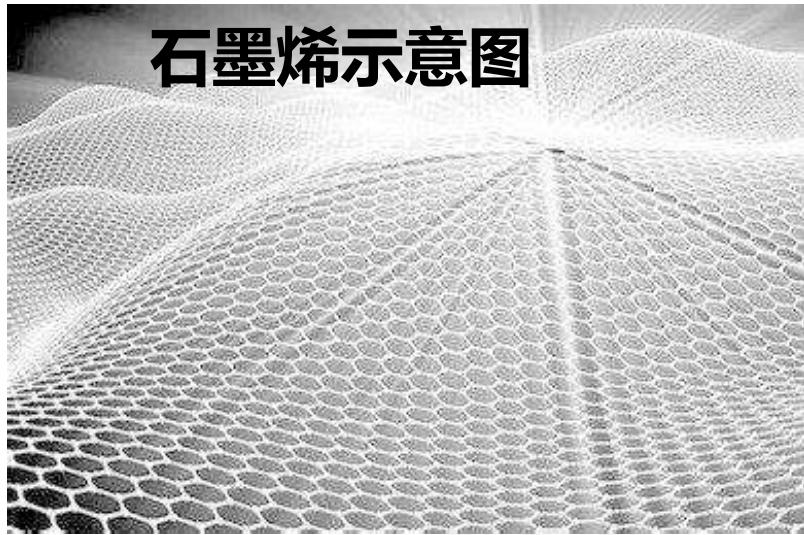
# 二维纳米材料

FUNSOM

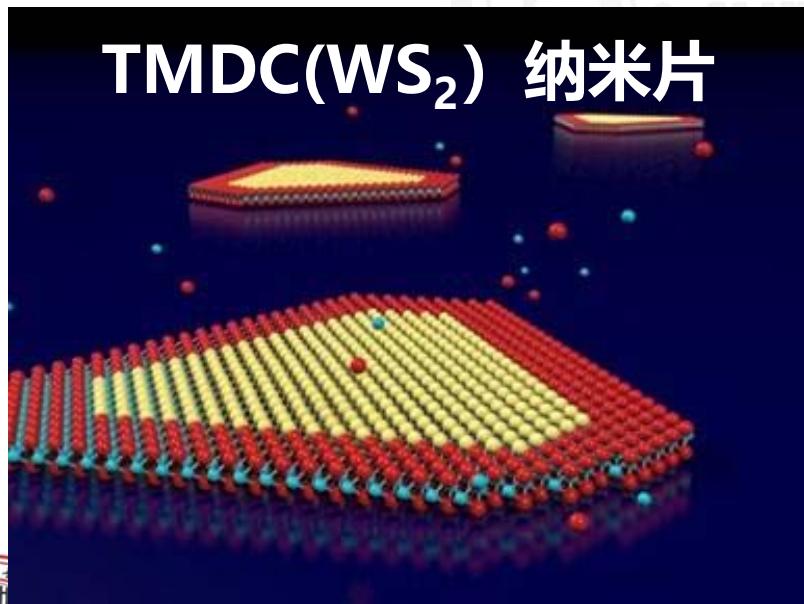
功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials

## Mxene (金属碳化物)

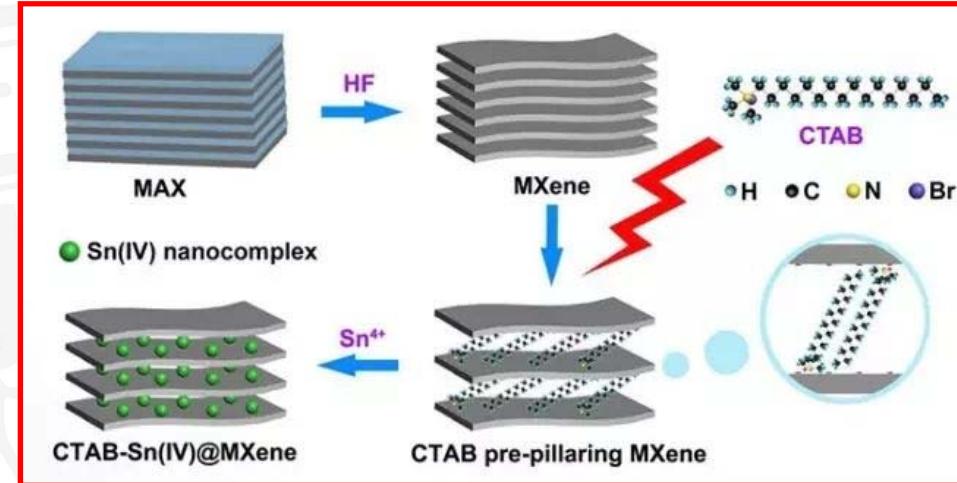
石墨烯示意图



TMDC(WS<sub>2</sub>) 纳米片

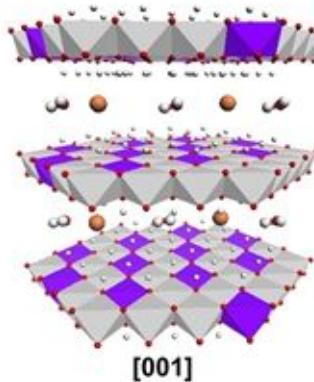


Soochow  
University

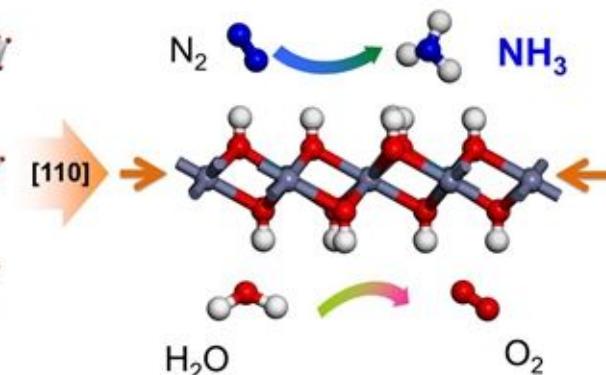


## 水滑石结构 (金属氢氧化物)

Layered double hydroxide nanosheets



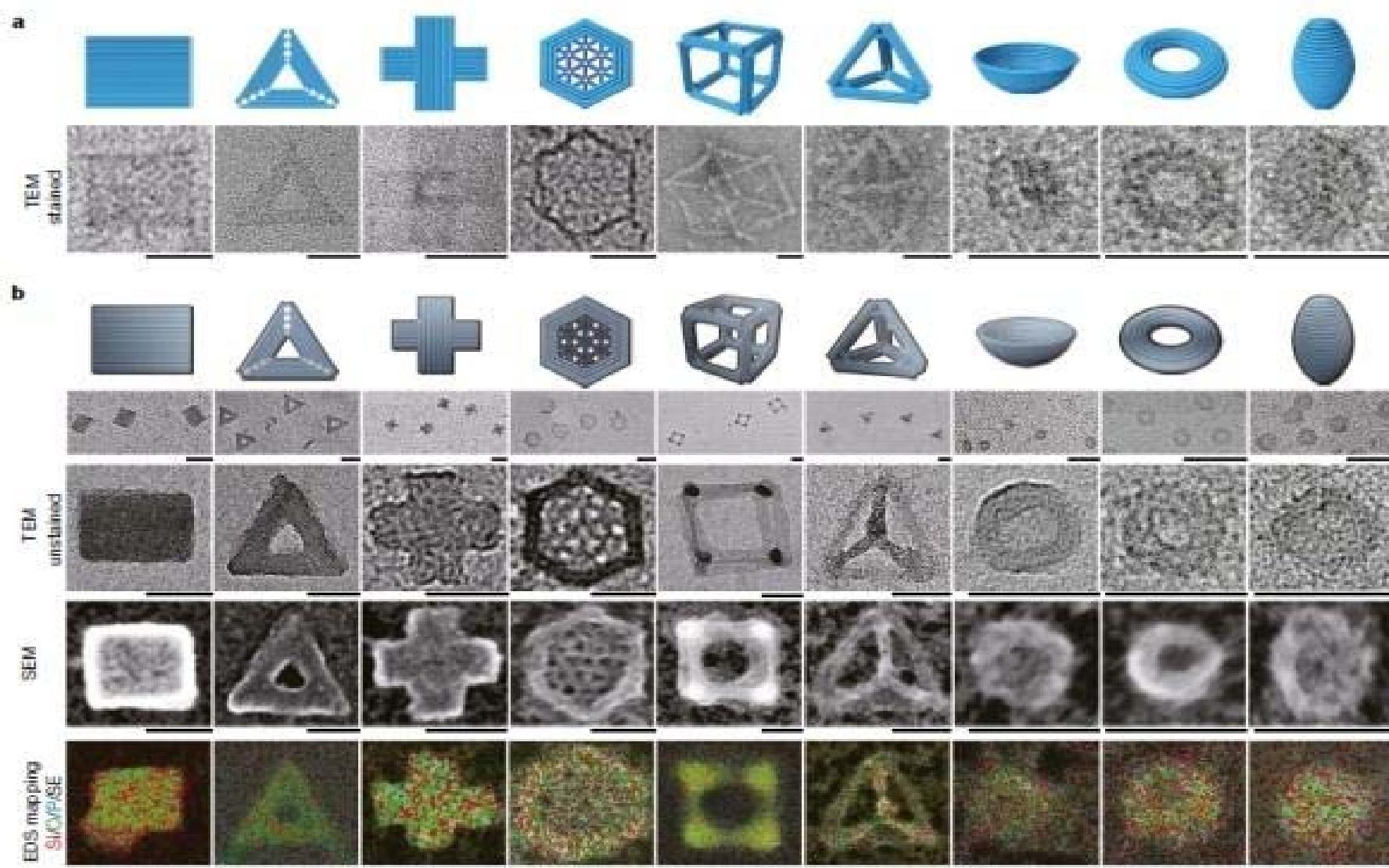
In-plane compressive strain induced by oxygen-vacancies



# 三维纳米材料

FUNSOM

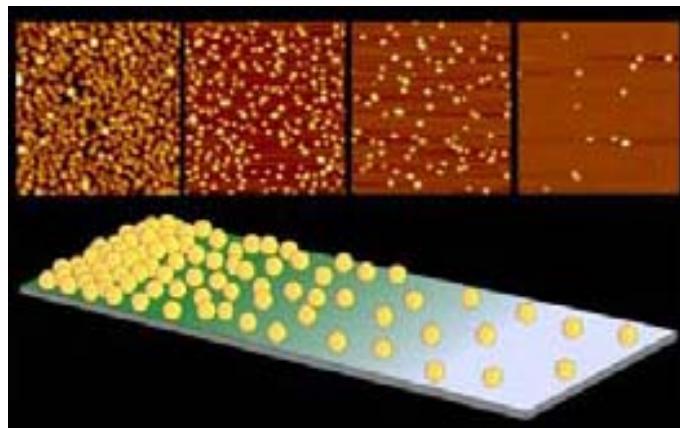
功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials



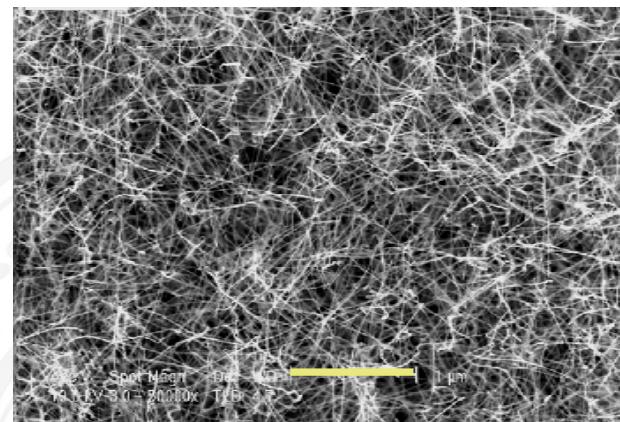
苏州大学  
Soochow  
University

DNA 结构

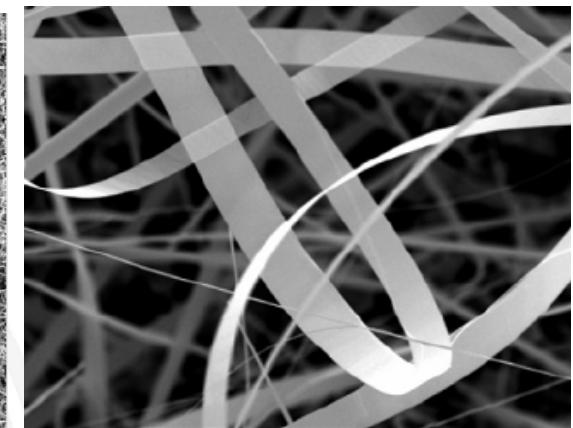
26



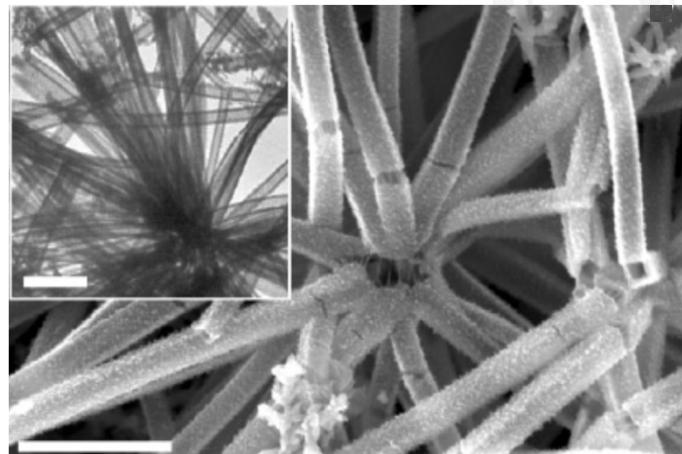
纳米粒子



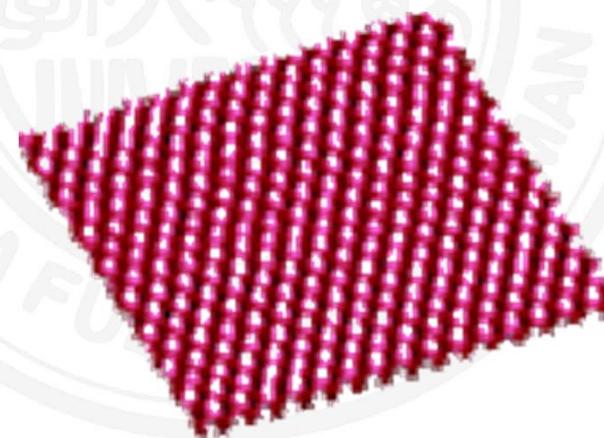
纳米线



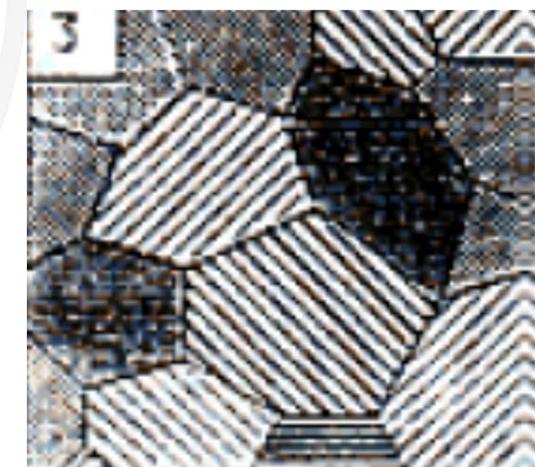
纳米带



纳米管



纳米膜



纳米固体材料



苏州大学  
Soochow  
University

## 1.4 纳米材料表征

表征的内容包括材料的**组成、结构和性质等**。

**组成**: 构成材料的化学元素及其相关关系

**结构**: 材料的几何学、相组成和相形态等

**性质**: 材料的光学、力学、热学、磁学、化学等

**形貌**: 电子显微镜 (TEM、SEM) 等

**结构**: X-射线粉末衍射 (XRD)

**组成**: EDS、XPS等

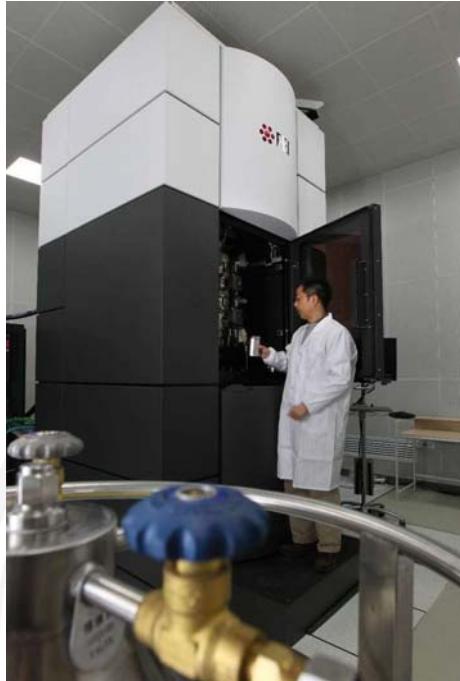
**性能**: 光-紫外、荧光、AFM、拉曼

# 常见的纳米材料表征仪器





球差校正场发射透射电镜  
(Titan G2 60-300, FEI)



冷冻电镜 (浙江大学)



苏州大学  
Soochow University



FEI TITAN TEM 球差透射电镜

# 1.5 纳米材料应用

FUNSOM

功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials

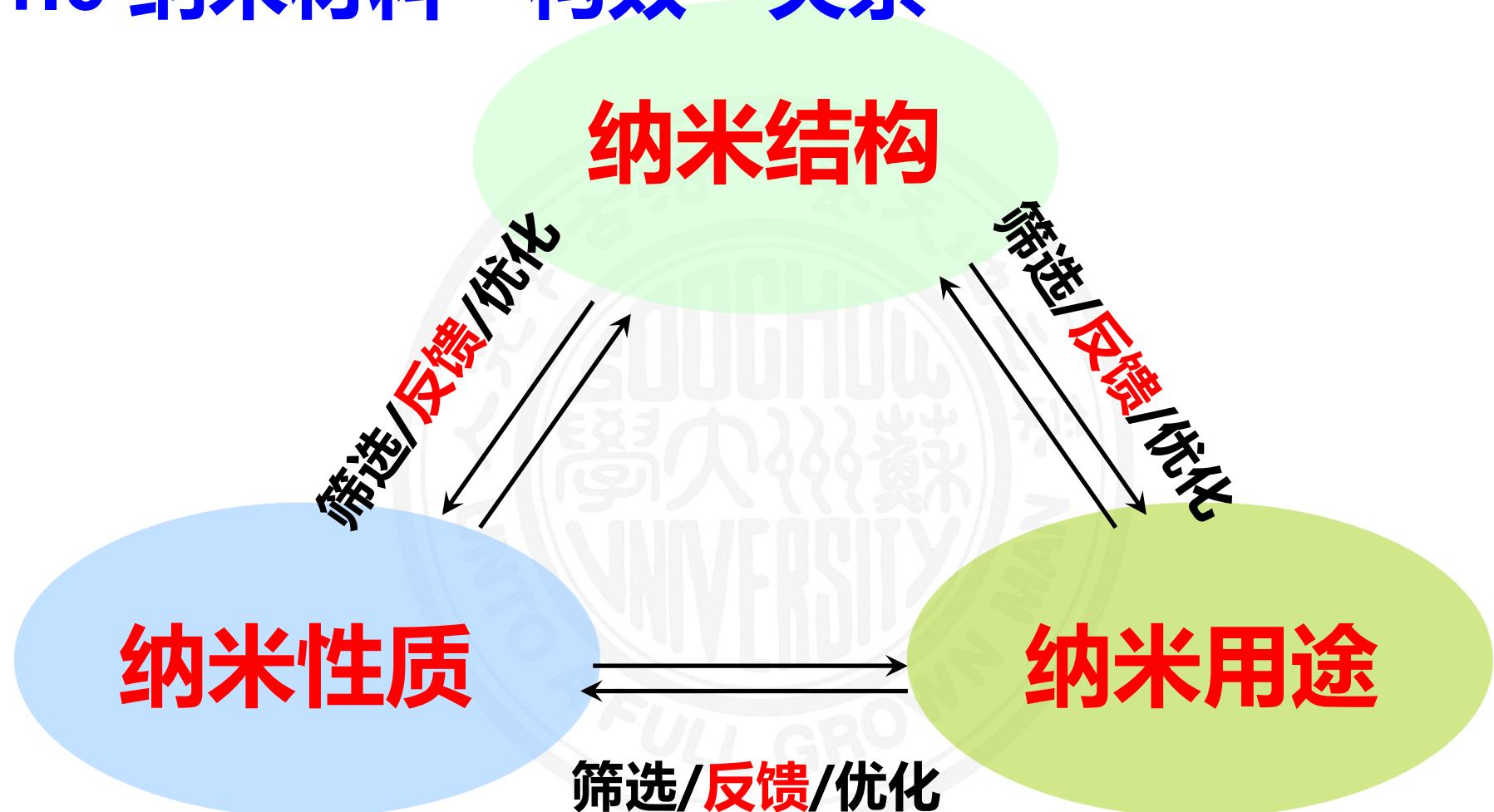


苏州大学  
Soochow  
University

**纳米技术已成功用于许多领域，包括医学、药学、化学及生物检测、制造业、光学以及国防等等**

- 纳米技术在新材料中的应用
- 纳米技术在微电子、电力等领域中的应用
- 纳米技术在制造业中的应用
- 纳米技术在生物、医药学中的应用
- 纳米技术在化学、环境监测中的应用
- 纳米技术在能源、交通等领域的应用
- 纳米技术在农业中的应用
- 纳米技术在日常生活中的应用
- 纳米技术在环境污染防治中的应用

# 1.6 纳米材料“构效”关系

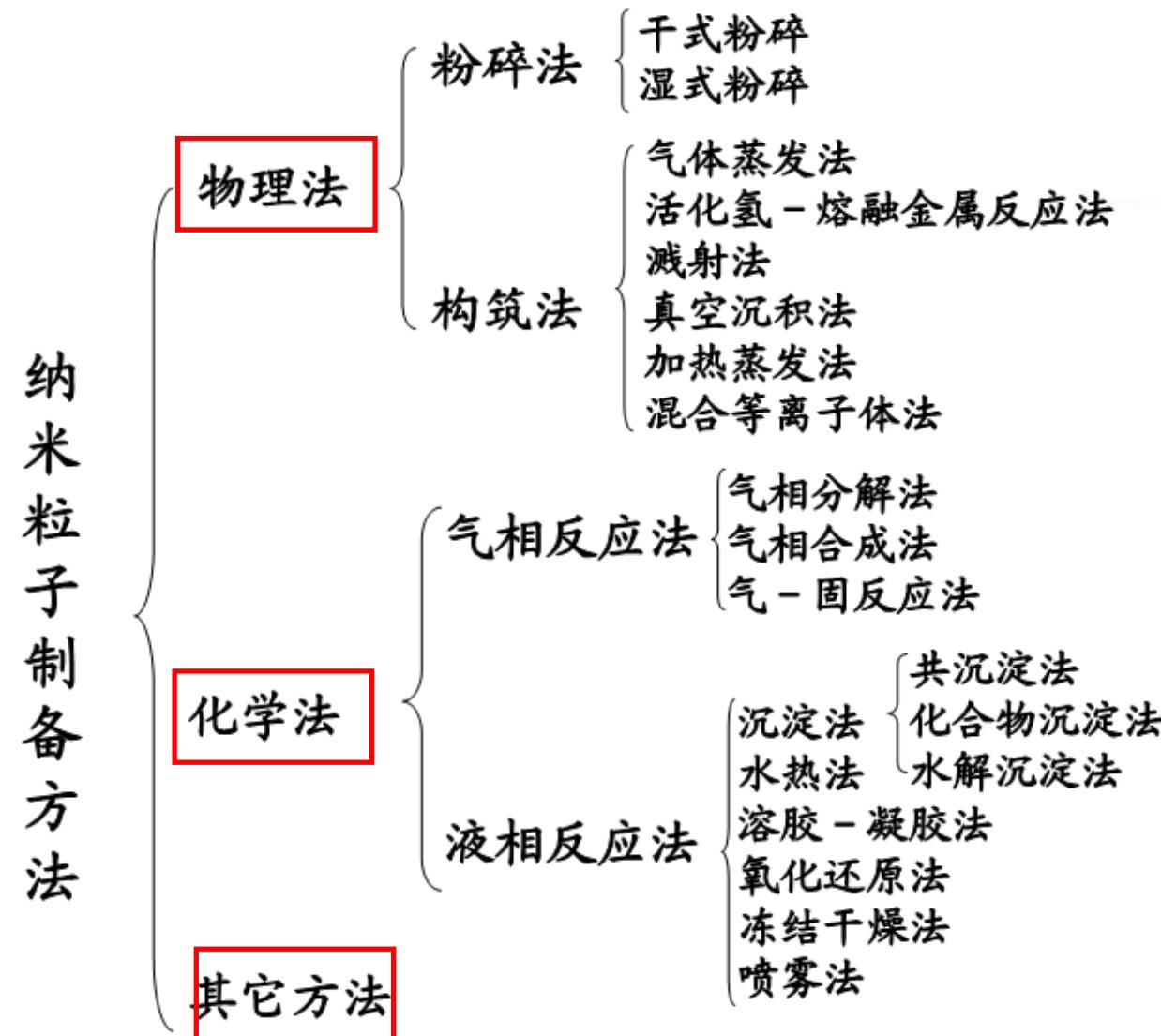


**“结构”决定“性质”，“性质”决定“用途”**

# 2. 纳米材料合成技术

# 纳米材料合成技术分类

## 纳米粒子合成方法分类



# 纳米材料合成制备要求：

- 大小、尺寸可控 (一般小于 100 nm)**
- 组成成分可控 (元素组成成分)**
- 形貌可控 (外形)**
- 晶型可控 (晶体结构、超晶格)**
- 表面物理和化学特性可控 (表面状态)  
(表面改性和表面包覆)**

# 纳米材料合成分类

**自上而下(Top down method)**

从大到小: 固体→微米颗粒→纳米颗粒

**自下而上(Bottom up method)**

从小到大: 原子→团簇→纳米颗粒

# 纳米材料合成方法

## 自上而下

- 球磨法
- 剥离法

## 自下而上

- 化学气相沉积法
- 沉淀法
- 水热溶剂热法
- 高温液相法
- 溶胶-凝胶法
- 微乳液法
- 生物矿化法



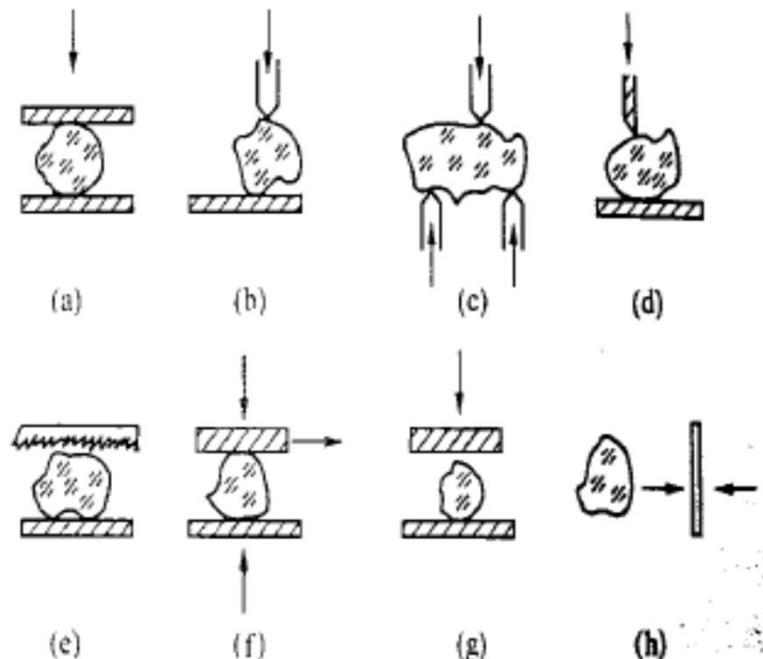
# 自上而下合成法

球磨法

剥离法

## 2 球磨粉碎法

- 高能球磨法是将粗粉体和硬球(钢球、陶瓷球、或玛瑙球)按比例放进球磨机的密封容器内,
- 利用球磨机的转动或振动, 使硬球对原料进行强烈的撞击、研磨和搅拌, 把金属或合金粉末粉碎为纳米级微粒的方法。



粉碎作用力的作用形式

一般的粉碎作用力都是几种力的组合，如球磨机和振动磨是磨碎和冲击粉碎的组合；雷蒙磨是压碎、剪碎和磨碎的组合；气流磨是冲击、磨碎与剪碎的组合。

### 几种典型的粉碎技术：

**球磨、振动球磨、振动磨、搅拌磨、胶体磨、纳米气流粉碎磨**

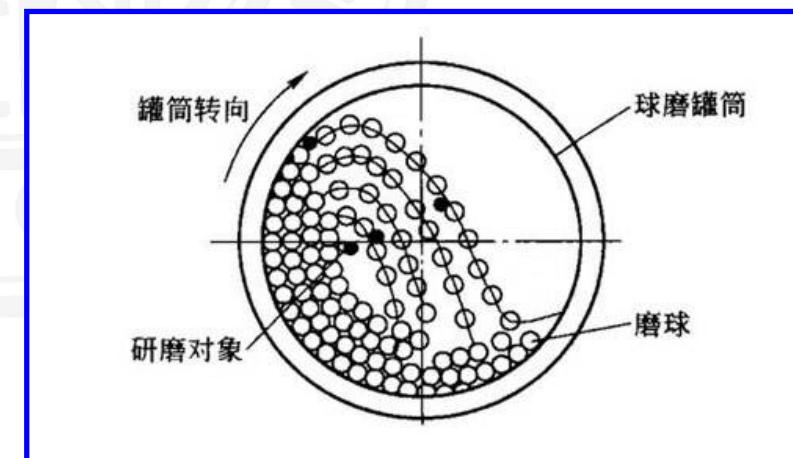
# 球磨机示意图

FUNSON

功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials

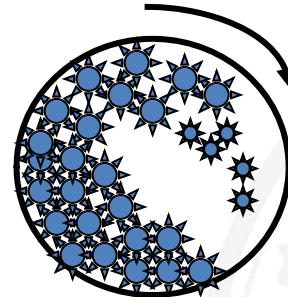


实验室用球磨机

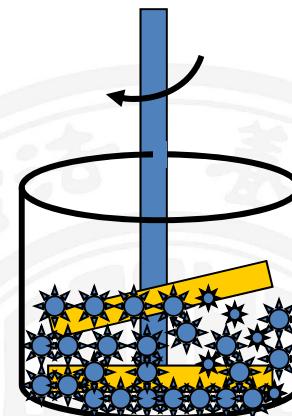


# 机械粉碎(高能球磨)法

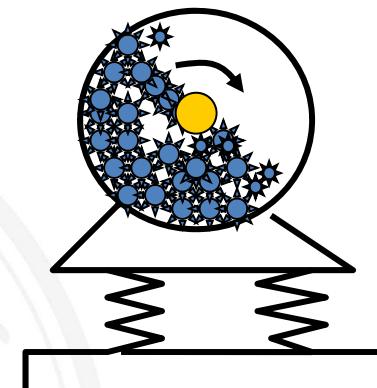
## (1) 球磨方式



滚动球磨



搅拌球磨



振动球磨

## (2) 高能球磨法制备的纳米材料

高能球磨法已成功地制备出以下几类纳米晶材料:

- 纳米晶纯金属
- 互不相溶体系的固溶体
- 纳米金属间化合物
- 纳米金属-陶瓷粉复合材料

物料被粉碎时常常会导致物质结构及表面物理化学性质发生变化，主要表现在：

- ✓ 粒子结构变化，如表面结构自发的重组，形成非晶态结构或重结晶。
- ✓ 粒子表面的物理化学性质变化，如电性、吸附、分散与团聚等性质。
- ✓ 受反复应力使局部发生化学反应，导致物料中化学组成发生变化。

# 高能球磨法制备纳米材料的特点

- 高能球磨法制备的纳米金属与合金结构材料产量高，工艺简单，并能制备出用常规方法难以获得的高熔点的金属或合金纳米材料。
- 晶粒尺寸不均匀，易引入某些杂质。

# 球磨法在材料合成中的应用

 中国知网  
www.cnki.net
主题 
球磨法 



知识元检索 >

总库
中文
学术期刊
学位论文
会议
报纸
年鉴
图书
专利
标准
成果
▼

1536
外文
951
471
98
3
0
3
8

检索范围: 总库 主题: 球磨法  
共找到 1,536 条结果 1/77

全选 已选: 0   
排序: 相关度   
显示: 20

题名	作者	来源	发表时间	数据库	被引	下载	操作
■ 1 球磨法制备纳米零价铁的研究进展 <span style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 2px;">网络首发</span>	王鹏; 王义东; 柳听义	环境化学	2021-09-02 10:18	期刊	50	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	
■ 2 高场磁体Nb <sub>3</sub> Sn超导接头的制备工艺参数研究	孟建利; 王晖; 孙万硕; 程军胜; 王秋良	低温与超导	2021-08-24	期刊	27	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	
■ 3 难降解多环芳烃污染土壤的机械力化学修复 <span style="border: 1px solid orange; border-radius: 10px; padding: 2px;">网络首发</span>	韩含; 王溪; 殷梦秋子; 张其武; 何晓曼	环境工程	2021-07-21 09:29	期刊	101	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	
■ 4 微纳米多孔Si-Ag颗粒掺杂石墨负极材料及其电性能	孙斌; 蔡晓兰; 姚耀春; 周蕾; 王磊 <span style="color: blue;">&gt;</span>	有色金属工程	2021-07-09	期刊	170	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	
■ 5 熔体快淬与高能球磨法相结合制备TbCu <sub>7</sub> 型单相Sm-Fe-Zr-Nb合金(英文)	柳昆; 王书桓; 冯运莉; 赵定国; 张一昆	稀有金属材料与工程	2021-06-15	期刊	10	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	
■ 6 机械化学法修复后的有机污染土壤复垦试验与生态健康风险研究	曾曼; 陈冬; 胡敏; 毛林强; 胡林潮 <span style="color: blue;">&gt;</span>	湖北农业科学	2021-06-10	期刊	42	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	
■ 7 基于石墨的锂离子浆料电池负极浆料的研究	陈申; 杨昆鹏; 袁磊; 杨忠凯; 李涛 <span style="color: blue;">&gt;</span>	现代化工	2021-06-09	期刊	104	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	
■ 8 抹茶超微粉球磨法生产工艺研究与品质分析	唐璇; 雷雨; 童凯; 李洁媛; 李亚兰 <span style="color: blue;">&gt;</span>	茶叶通讯	2021-06-08	期刊	151	<span style="color: blue;">下</span> <span style="color: green;">回</span> <span style="color: yellow;">☆</span> <span style="color: red;">②</span>	

Soochow  
University

49

# 自上而下合成法



**剥离法**

### 3. 剥离法

- ☒ 采用自上而下剥离法制备二维纳米材料的过程中，只需打破三维层状前驱体中二维纳米结构片层之间的弱相互作用力，因此相比于自下而上的合成法，自上而下的剥离法更加节能，操作流程也相对简便。
- ☒ 在自上而下的剥离法中，液相剥离法由于具有成本低、可控性高、易实现规模化制备等优点，已经成为科研界和工业界极为关注和最为看好的制备二维纳米材料的一类方法。
- ☒ 对于液相剥离法，三维层状晶体处于液相环境中，并在物理作用和(或)化学作用下其片层间的弱相互作用力被极大削弱，最后在溶液中形成稳定分散的二维纳米材料。

### 3. 剥离法

常见的二维材料：

- 石墨烯
- 氮化硼
- 黑磷 (BP)
- 二维过渡金属二硫化物
- 二维过渡金属碳/氮化物
- 二维纳米粘土材料
- 层状双金属氢氧化物



### 3 剥离法

➤ 固相剥离法

机械剥离法

➤ 液相剥离法

离子交换法

氧化还原法

直接超声剥离法

插层剥离法

选择性刻蚀法

剪切剥离法



### 3.1 固相剥离法：机械剥离法

- 固相剥离法是使用黏性胶带将其粘在过渡金属硫族化物块状材料上然后撕开，不断地重复这一过程即获得少数层甚至单层过渡金属硫族化物纳米材料。
- 基本原理：利用胶带的黏附力减小过渡金属硫族化合物层与层之间的范德华作用力，从而剥离得到少数层甚至单层的二维纳米材料。

### 3.1 固相剥离法：机械剥离法

- 大多需要涉及精密的操作来施加微小的机械力，研究人员又将它命名为微机械剥离法。
- 利用微机械剥离法获得的TMDs 纳米材料( 如MoS<sub>2</sub>纳米片) 的质量是最好的，且该法操作简单、需耗成本低。
- 但是这种方法无法实现材料的宏量制备且重复性较差，难以满足工业领域的需求。

## 3.2 液相剥离法：离子交换

- 离子交换法是基于外界离子与层状晶体层间离子的离子交换，将水合能力更强水合半径更大的离子引入到层间，以增大层状晶体的片层间距、削弱片层之间的弱相互作用力，从而实现层状晶体的液相剥离，最终获得相应的二维纳米材料。
- 在离子交换法中，实现离子进入材料层间的驱动力主要来源于离子渗透压平衡。
- 最常见的层间带有水合离子的粘土有蒙脱土。在离子交换作用下，这些层状粘土可发生液相剥离，产生相应的二维纳米粘土片层。

- 离子交换法也可用于层状双金属氢氧化物的剥离。层状双金属氢氧化物可看作是一种阴离子粘土，其二维结构片层之间也含有一层水合离子层。
- 与通常所指的粘土不同，双金属氢氧化物的水合离子层中所含的是阴离子。因此，在双金属氢氧化物的离子交换剥离过程中，所涉及的交换离子是阴离子。
- 离子交换法作为液相剥离三维层状晶体制备二维纳米材料的一种常用方法，适用于层间含有可交换离子的层状材料。
- 该方法最突出的优点是剥离过程相当温和，而缺点则是离子交换过程缓慢，因此剥离效率不高。

### 3.3 液相剥离法：插层剥离

- 三维层状晶体是通过相应的二维纳米结构片层以弱相互作用力结合而成，这使得一些分子或离子能够在一定条件下进入层状晶体的层间，**导致层状晶体产生局部应变，使其层间距增大、片层之间相互作用力减弱，导致层状晶体的剥离能(Exfoliation energy)降低**，最终在合适的环境中很容易发生剥离产生相应的二维纳米材料。
- 通常，**超声、搅拌、离心常被用于插层层状晶体液相剥离的辅助手段**。基于插层法制备二维纳米材料的技术，已经被广泛应用于多种三维层状晶体材料，比如石墨、过渡金属二硫化物、层状碳/氮化物等。

✓ 有机锂化合物是一种常用的插层剂，早已被应用于过渡金属二硫化物的插层剥离。其中正丁基锂是最常用的一种。

✓ 在锂离子插层剥离过渡金属二硫化物的过程中，主要涉及两个步骤，首先是锂离子进入层状二硫化物晶体的层间，形成锂离子插层结构。

✓ 由于离子反渗透作用，锂离子插层的二硫化物在水溶液中发生体积膨胀，最终由于液相剥离而产生相应的二硫化物的二维纳米片层。

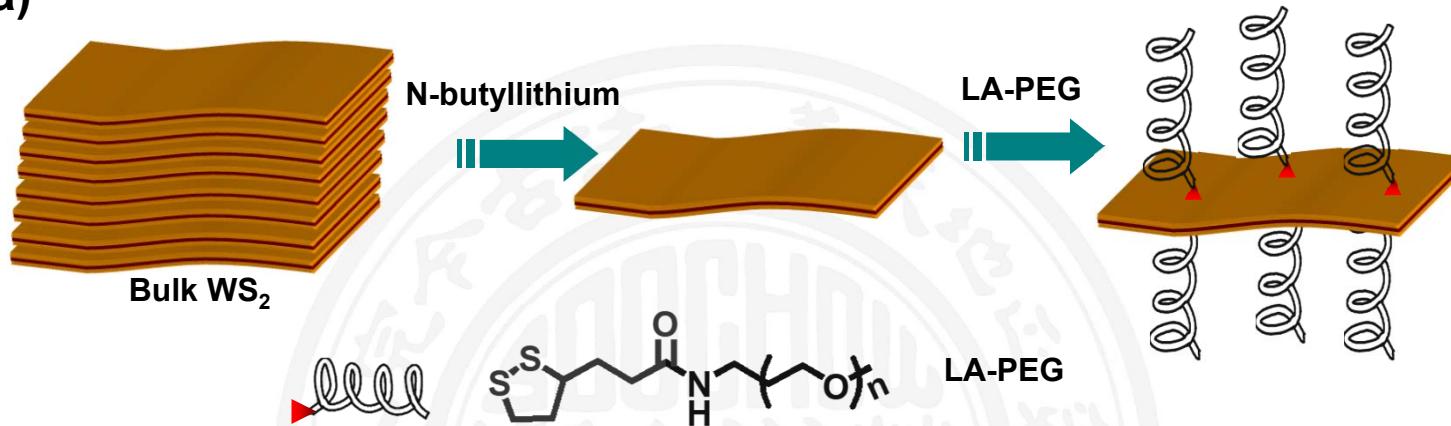
除有机锂之外，一些碱金属有机化合物也可作为过渡金属二硫化物的插层剂。

层状二硫化钼晶体与水合肼(  $N_2H_4$  ) 在水热条件下反应，使  $N_2H_4$  分子进入二硫化钼层间并分解产生气体，导致二硫化钼晶体发生体积膨胀，接着使用氨基碱化合物对膨胀二硫化钼进行二次插层，进一步削弱了片层间的结合力，最终在超声辅助条件下获得了  $MoS_2$  二维纳米片层。

也可以用于其他TMDC 纳米材料合成，比如  $WS_2$ 、 $TiS_2$ 、 $TaS_2$ 、 $NbS_2$ 。

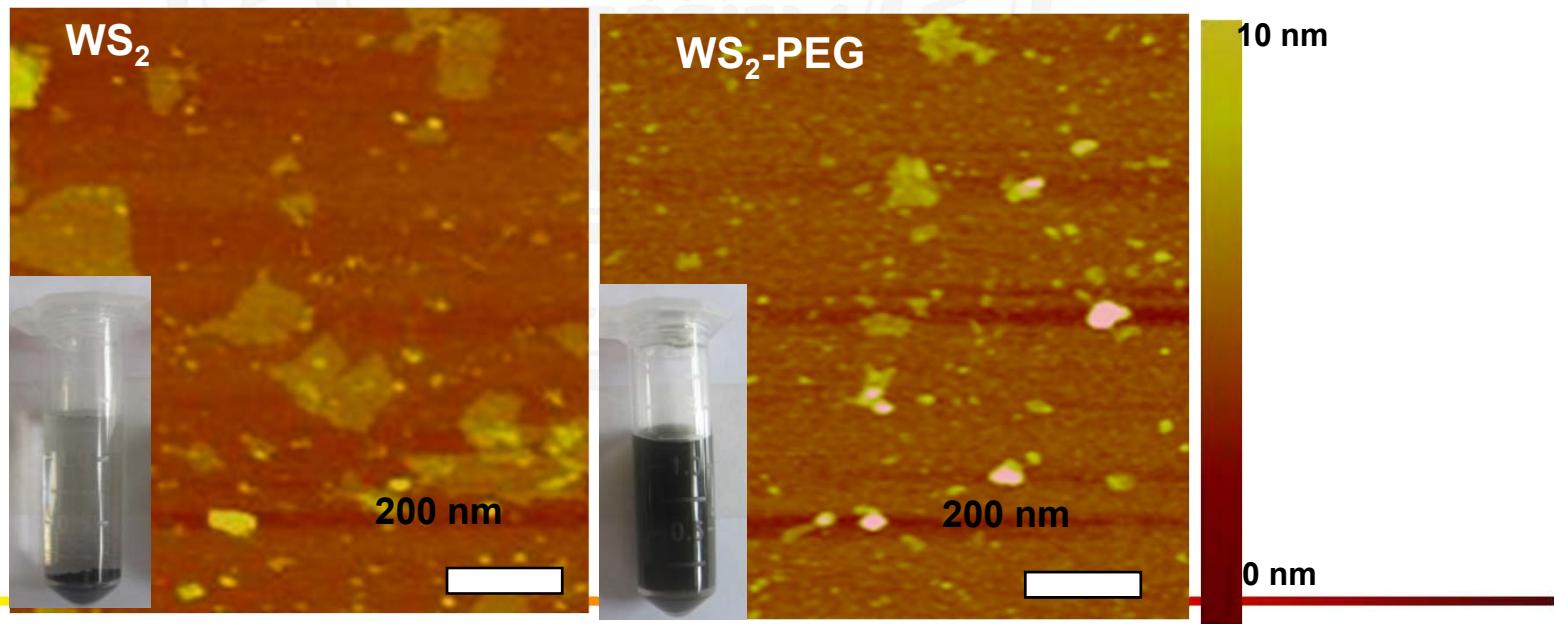
# 正丁基锂辅助剥离得到WS<sub>2</sub>纳米片

(a)

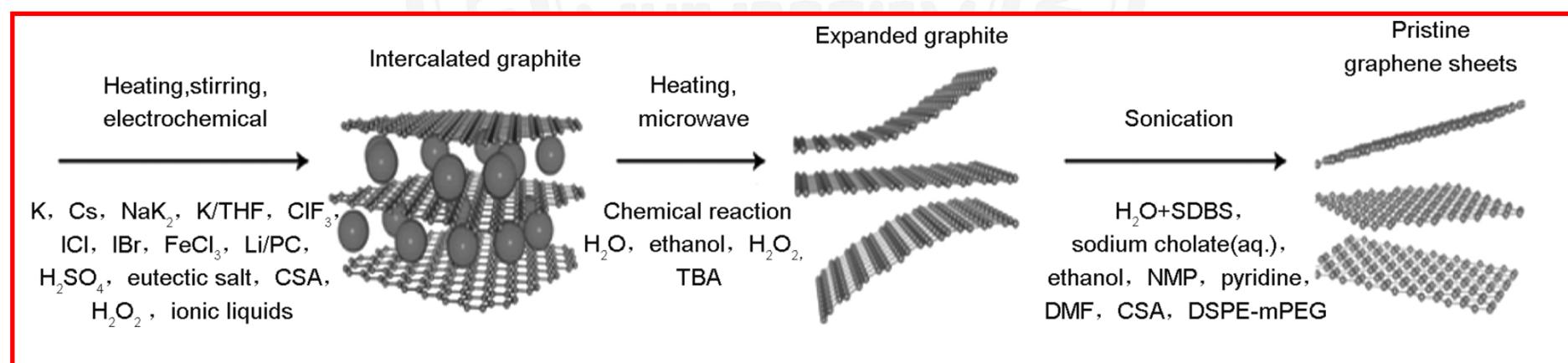


(b)

AFM images



- 插层剥离法也被成功应用于石墨烯的制备。前驱体石墨通过液相插层处理，其层间被引入了某些物质形成了石墨插层化合物，导致石墨片层间相互作用力降低，可在一定条件下轻易地发生剥离产生石墨烯。
- 插层剥离法产生的石墨烯需在超声辅助下且在含有表面活性剂的溶剂中才能稳定分散。



基于插层剥离法制备石墨烯的流程图

# 液相剥离法：插层剥离注意事项

- 插层剥离法最关键一步是利用插层剂对层状材料进行插层的过程，良好的插层剂应有利于插层材料在溶剂中发生剥离。
  
- 剥离过程所使用的溶剂也至关重要，剥离得到的二维纳米片层必须与溶剂之间有良好的相互作用，这样才能有效阻止二维纳米片层的团聚，最终保证二维纳米材料的稳定分散。

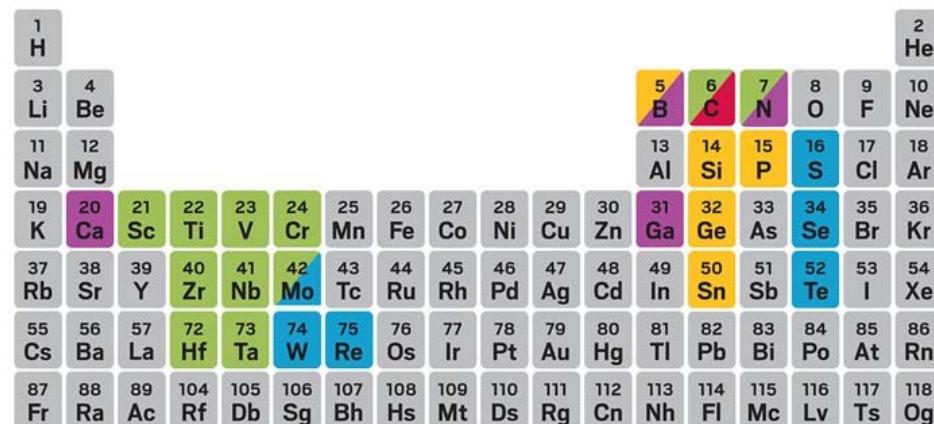
## 3.4 液相剥离法：氧化还原

- 氧化还原法是对层状晶体材料首先进行氧化处理，在其二维纳米结构片层上引入含氧官能团，以减弱片层间的相互作用力使其发生剥离，接着将剥离得到的已被氧化的二维纳米片层进行还原处理，制得层状前驱体材料所对应的二维纳米片层。
- 石墨首先在强氧化剂的作用下被氧化成为氧化石墨( Graphite oxide) , 此时部分水分子也进入石墨层间，其层间距由0.334 nm 增大到1 nm左右，片层间的结合力也随之减弱。

- 氧化石墨可溶于多种溶剂并在其中发生剥离，产生其相应的二维纳米材料--**氧化石墨烯( Graphene oxide)**，氧化石墨烯在被还原之后(如：**热还原、化学还原、光催化还原、电化学还原、溶剂热还原**)可转变为石墨烯。因此，氧化石墨烯也被看成是石墨烯的官能化衍生物。
- 由于基于氧化还原法制得的石墨烯具有较大的结构缺陷，使得该方法所得石墨烯在**能带结构、电学性质、热学性质**等方面都与理想石墨烯相去甚远，虽然结构缺陷和残余官能团使得CMG不具备理想石墨烯的一些优异物理性质，但却赋予了CMG在其它领域的潜在应用，比如：催化、传感等领域。

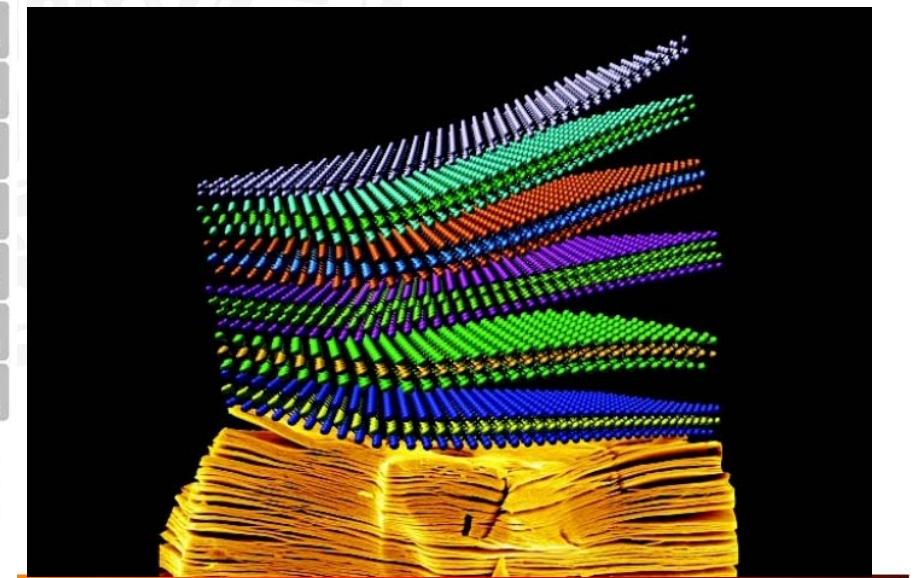
## 3.5 液相剥离法：选择性刻蚀

**选择性蚀刻法是通过有目的地蚀刻掉三维层状晶体中特定原子层，留下目标二维纳米片层结构。目前，选择性蚀刻法已被成功应用于二维纳米材料金属碳/氮化物MXenes的制备，其前驱体是一类被称为MAX相的三维层状晶体，它是一类三元金属碳化物/氮化物。目前有六十多种纯MAX相层状晶体，比如：  
 $Ti_3AlC_2$ 、 $Ti_2AlC$ 、 $Ta_4AlC_3$ 。**



The periodic table highlights several groups of elements relevant to 2D materials:

- MXenes:** Elements in group 13 (B, Al), group 14 (C, Si, Ge, Sn), and group 15 (N, P, As, Sb).
- Xenes:** Elements in group 13 (B, Al), group 14 (Si, Ge, Sn), and group 16 (S, Se).
- Transition metal dichalcogenides:** Elements in groups 13-16, specifically Mo, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, and the transition metals Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, In, Sn, Sb, Te, I, and Pb.



+ MXenes  
 $Ti_3C_2$ ,  $Ta_4C_3$ , and others

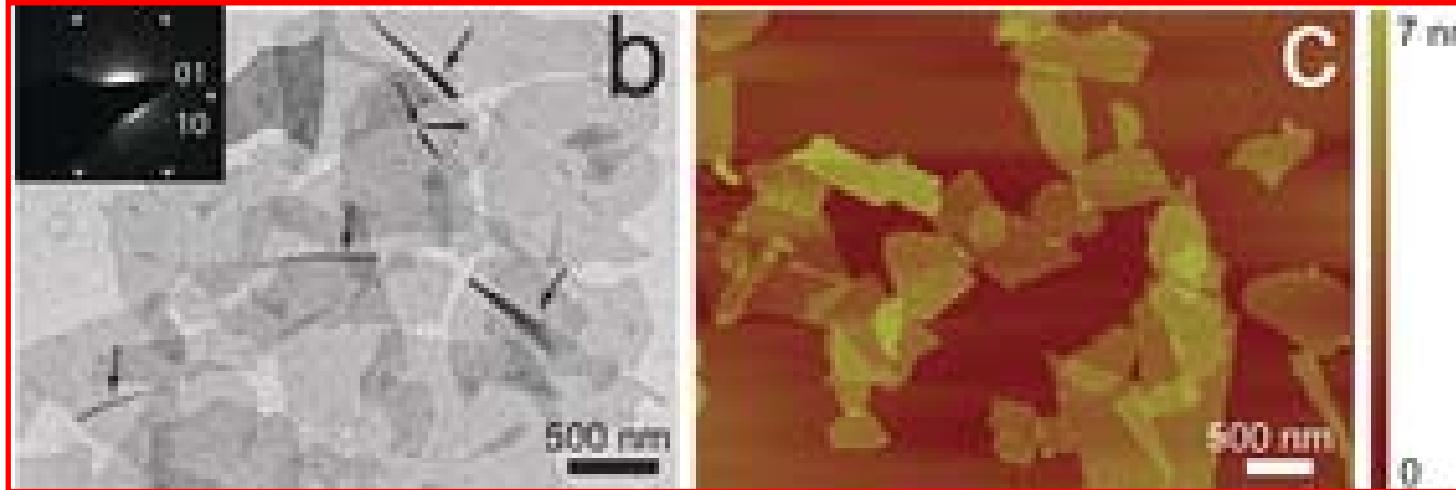
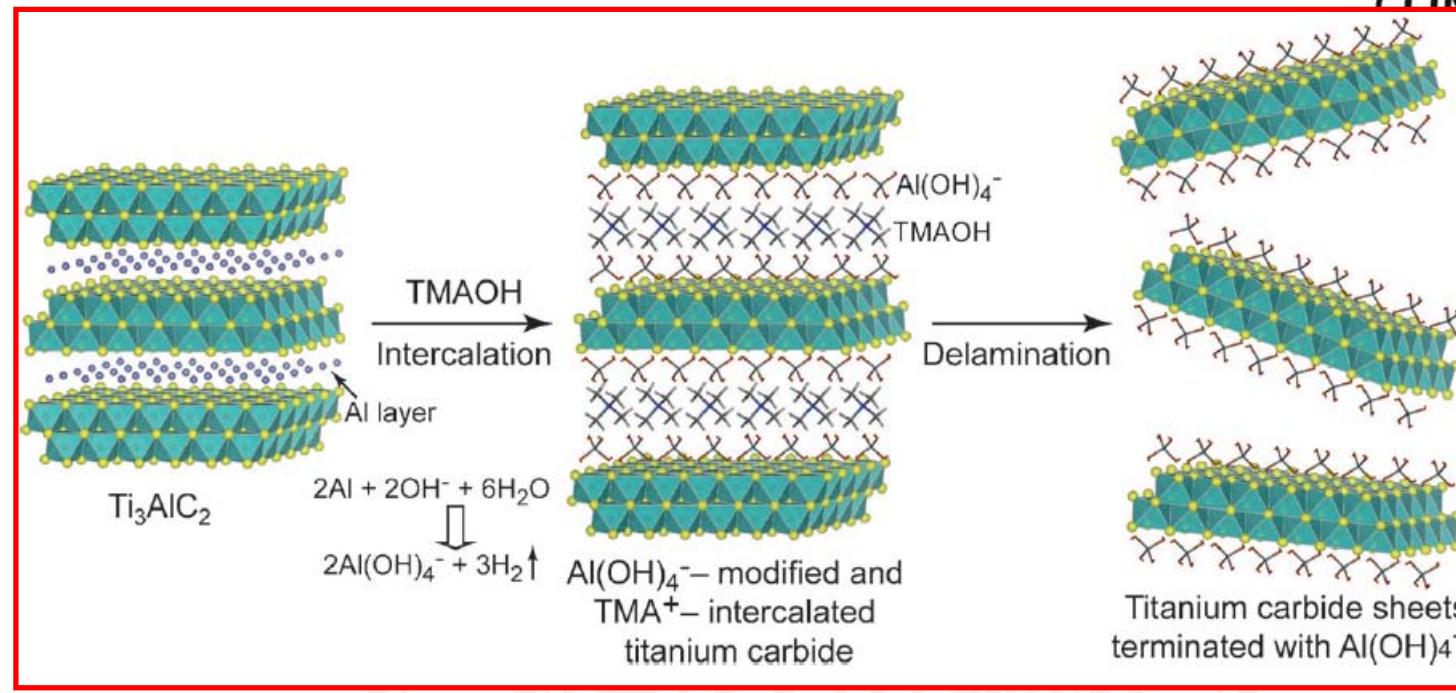
+ Xenes  
 $B$ ,  $Si$ ,  $P$ ,  $Ge$ , and  $Sn$

+ Transition metal  
dichalcogenides  
 $MoS_2$ ,  $WS_2$ , and others

+ Nitrides  
 $GaN$ ,  $BN$ , and  $Ca_2N$   
University

+ Organic materials  
C





Size: 500-1000 nm; Thickness: 1.6-2 nm



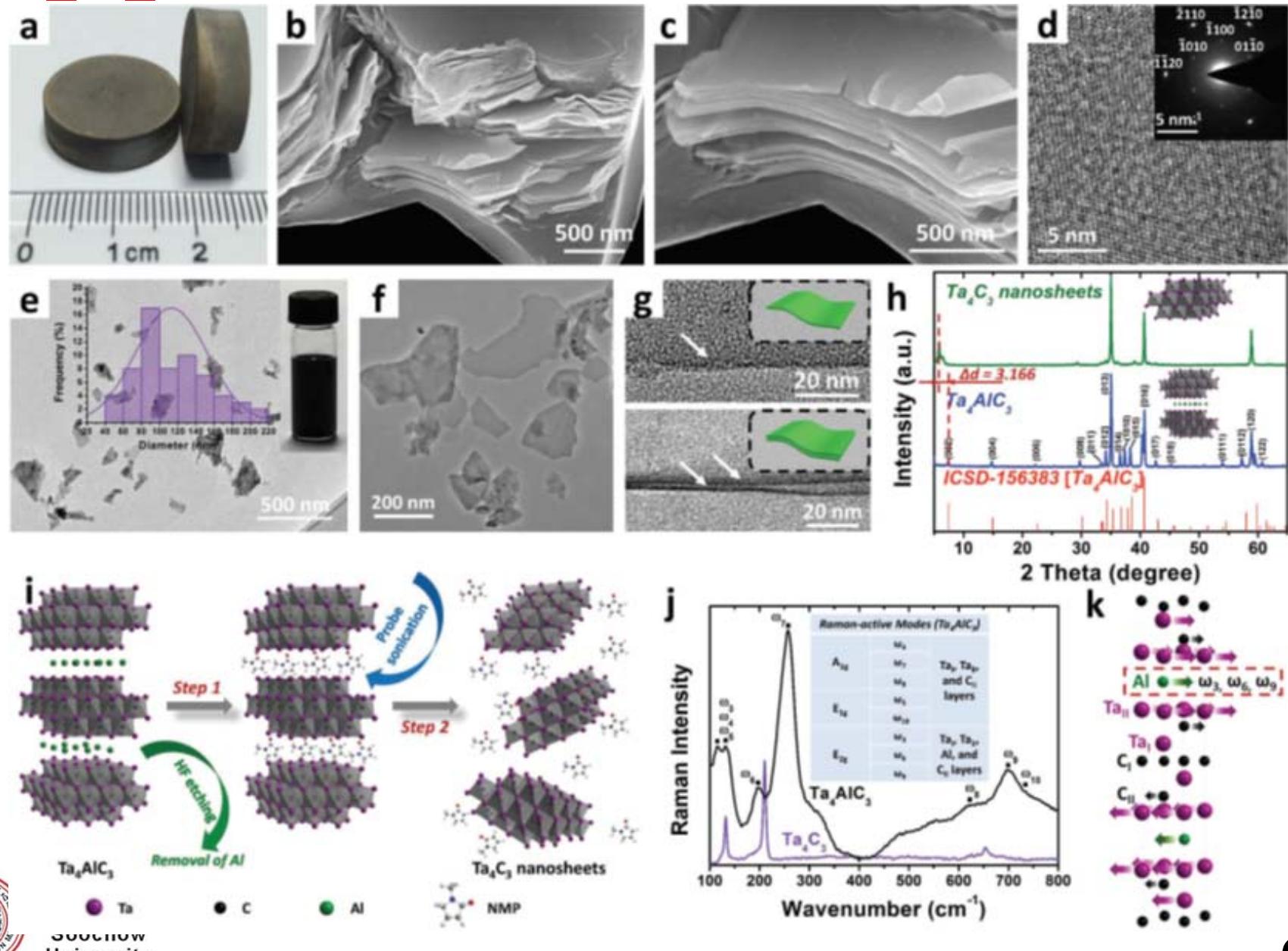
苏州大学  
Soochow  
University

- 在将 $Ti_3AlC_2$ 加入到氢氟酸溶液中进行选择性蚀刻剥离过程中，可观察到气泡的出现，这来源于以上反应过程中产生的氢气。  
**由于整个过程是在一个富含羟基和氟离子的液相环境中进行，因此 $Ti_3C_2$ 上裸露的钛原子很可能被被羟基或/和氟原子继续修饰，这些表面修饰基团被称为终止基团。**
- 基于选择性蚀刻法，同样使用氢氟酸作为蚀刻剂成功地将层状晶体 $Ta_4AlC_3$ 中的Al层蚀刻掉，**剥离得到了二维纳米材料 $Ta_4C_3$**
- 在基于选择性蚀刻法制备二维纳米材料的过程中，最重要的一步便是**合适蚀刻剂的选择，环境友好、无毒绿色、成本低廉的蚀刻剂**才能有效地将选择性蚀刻法推向二维纳米材料的规模化可控制备，最终才能真正发挥二维纳米材料的实际应用。

# Ta<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 纳米片

FUNSOM

功能纳米与软物质研究院  
Institute of Functional Nano & Soft Materials



SOOCHOW  
University

### 3.6 液相剥离法：直接超声剥离

- 超声技术在二维纳米材料的液相剥离制备法中作为一种辅助手段，对层间作用力已大大减弱的层状晶体材料实现完全剥离。
- 直接超声剥离法在N-甲基吡咯烷酮( NMP) 中剥离石墨制得了稳定分散的石墨烯，其中单层石墨烯的产量约为1 wt%。在直接超声剥离中，溶剂的选择至关重要，溶剂表面能与石墨表面能( 70 ~ 80 mJ·m<sup>-2</sup> ) 相匹配才有利于单层石墨烯的获得，相应于溶剂的表面张力应在40 ~ 50 mJ·m<sup>-2</sup>
- 直接超声剥离制备石墨烯的机理被认为是超声波所引发的声空化、声剪切力使得层状石墨晶体发生剥离，声空化过程涉及到机械剪切力，以及微气泡的生成、生长、以及内破裂，声剪切力有利于石墨在溶液中的剥离和石墨烯的分散。

- 针对于石墨的直接超声剥离制备石墨烯，其最常用的有机溶剂有NMP、N, N-二甲基甲酰胺( DMF)。除此之外，人们也陆续发现其他一些溶剂也能用于直接超声剥离以分散石墨烯。如，邻二氯苯、六氟苯、八氟甲苯、五氟苯腈、五氟吡啶等。
- 与氧化还原法制备石墨烯相比，直接超声剥离法获得的石墨烯具有更高完整度的sp2 杂化碳原子结构，这主要由于直接超声剥离法不涉及对石墨烯结构产生较大破坏作用的强氧化处理步骤。
- 在直接超声剥离制备石墨烯过程中，与石墨表面张力相匹配的多为沸点较高且有一定毒性的有机溶剂，因此在操作和使用过程中需要非常小心。

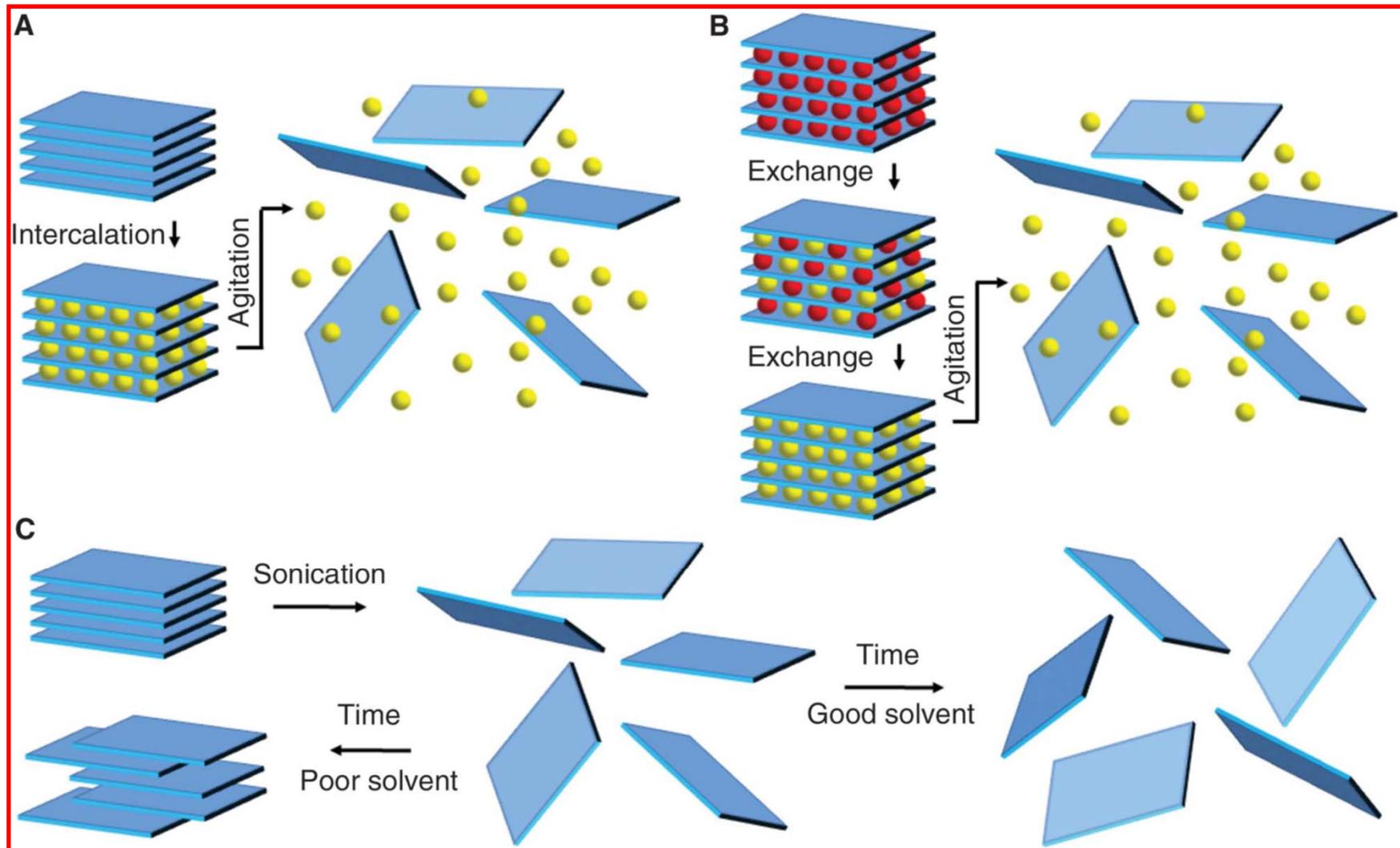
# 直接超声剥离法的缺点主要表现在三个方面：

- 首先，局部高强度的超声会打碎二维纳米片层，使其尺寸减小，边缘缺陷的相对含量也随之增大；
- 其次，较高的超声功率会造成一些稳定性较低的溶剂发生分解，从而产生自由基；
- 最后，该方法制得的石墨烯分散液的浓度通常不高，难以直接应用在某些对浓度要求较高的领域。

### 3.7 液相剥离法：剪切剥离

- 剪切剥离法( Shear exfoliation) 是一种基于剪切力剥离层状晶体制备相应二维纳米材料的液相剥离法。与直接超声剥离法类似，由于在制备过程中只涉及物理作用力，剪切剥离法制得的二维纳米材料同样具有较高质量。
- 在应用剪切剥离法制备石墨烯的过程中，一定量的层状石墨薄片被首先加入到有机溶剂中或含表面活性剂的水溶液中，接着在搅拌器产生的高速剪切作用下石墨发生剥离，最后对剥离产生的悬浮液进行离心处理，可得到含有高品质的单层或几层石墨烯的分散液。

- 剪切剥离法已被成功应用于石墨烯、二硫化钼、二硫化钨、氮化硼等二维纳米材料的制备，有机溶剂或水溶液都可作为剥离产物的分散液。
- 剪切剥离法的优点在于其操作简便、所需剥离装置简单、剥离产物的结构质量良好、易实现二维纳米材料的规模化制备。
- 该方法的缺点在于剥离得到的分散液通常是单层、多层、甚至是少量未剥离层状晶体薄片的混合体系，其中二维纳米片层的尺度分布较宽，一般需要进一步离心分离处理，才能得到片层尺度分布较窄的二维纳米材料分散液。



常见的几种液相剥离示意图

# 各种液相剥离法总结

	Driving forces of exfoliation	Exfoliation products	Exfoliation efficiency	Exfoliation temperature
Ion-exchange method	Ion-exchange,	Two-dimensional clay nanosheets,	High	Tunable
	Reverse osmosis	Two-dimensional double hydroxides		
Intercalation-exfoliation method	Ion-intercalation,	Graphene,	High	Tunable
	Reverse osmosis	Two-dimensional TMDs, MXenes		
Oxidation-reduction method	Chemically modification	Graphene	High	Rigorously
Selectively etching method	Chemically etching	MXenes	Low	Tunable
Direct sonication method	Ultrasonic	Graphene, Two-dimensional TMDs	Low	Tunable
Shear exfoliation method	Shear force	Graphene, BN Two-dimensional TMDs	Low	Tunable



# 本章小结

- 1. 纳米材料的基本概念**
- 2. 机械球磨法的原理及特点**
- 3. 液相剥离法的分类**
- 4. 液相剥离法的特点及注意事项**