

合肥光源在纳米科学中的应用

刘庆华 龙冉 姚涛 关勇

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 230029)

在人类所认知的微观世界中,有一个十分引人注目的微小体系,这就是现在人们所熟知的纳米体系。纳米(nanometer)的“纳”字在希腊语中指的是“矮小”或非常小的东西。纳米是一种计量单位,符号nm,单位 10^{-9} 米,1纳米即十亿分之一米,约是氢原子半径的27倍,相当于人发直径的10万分之一。

纳米科学是制造、表征和利用尺寸约为0.1~100纳米结构的科学,是20世纪80年代初迅速发展起来的一个新的前沿科学研究领域,1990年在巴尔的摩召开了第一届国际纳米科学与技术大会,会上《纳米技术》的正式创办标志着纳米科学的诞生。在纳米科学中,人类可以通过在原子、分子和超分子水平上控制纳米结构来发现纳米材料的奇异特性,并学会有效地利用这些特性,使人类能够根据自己的意愿直接操纵单个原子和分子在纳米尺度上的排列产生具有特定功能的材料,最终模仿和实现自然界一个非常复杂的生态学过程^①。

纳米科学是当今最大的交叉学科之一,经过近半个世纪的发展,纳米科学与众多热点学科,如生命科学、材料科学、信息科学、环境科学、能源科学、仿生学等相互渗透,使得它们在发展中相互促进、相得益彰,衍生出了众多的前沿交叉学科。同时,纳米科学也是合肥同步辐射光源(以下简称“合肥光源”)用户开展的众多研究领域非常重要的一个。借助于强大的同步辐射X射线吸收谱学、衍射、光电子能谱和成像等实验方法,合肥光源用户在纳米颗粒生长动力学、二维纳米片光电化学器件和纳米仿生等等多个前沿研究方向开展了持续深入的探索,取

得了一系列具有国际影响力的重要突破,为我国相关领域的发展和保持在个别领域的国际领先优势起到了重要的推动作用。本文挑选了具有代表性的成果来展示合肥光源在纳米科学中的重要应用。

一、纳米颗粒成核与生长动力学研究

近30年来,纳米材料的合成和研究取得了长足的进展。具有特定形貌和性能的纳米材料的合成是纳米科学技术中的一个重要课题。目前合成纳米材料的方法主要有两种:自上而下的物理法和自下而上的化学液相法。自上而下法的优点是可以大规模合成纳米颗粒。但与自下而上的方法相比,单分散纳米颗粒的形貌难以控制,合成难度较大。目前已成功制备出球形、圆柱形、线形、盒形、片状、花形等多种形貌。纳米粒子的形成基本上分为成核和生长两个过程。这两个过程看似简单,但实际上相当复杂。为了有效地控制纳米晶的形貌和尺寸,有必要从反应动力学和热力学的角度研究成核形貌、生长速度等因素对最终纳米晶形貌和尺寸的影响。金属还原剂的强度和反应温度可以调节纳米晶的生长速率,温度越高,还原性越强,反应越快。然而,原子核往往是由多个原子组成的团簇,很难用电子显微镜来表征。为了实现具有特定形貌的贵金属纳米晶的可控合成,探索形貌控制的要素:(1)基于热力学,通过选择吸附有机分子或离子来调节表面能,稳定高能裸晶表面能,有利于金属

纳米晶形貌的多样化;(2) 在成核初期,控制不同数量和结构的金属纳米团簇的合成。以它们为晶核,结合金属还原动力学的调节,生长出不同形貌的纳米晶;(3) 以预先合成的具有特定形貌的金属纳米粒子为种子,采用外延生长的策略,合成出具有特定形貌的贵金属纳米粒子,还原热扩散和表面接触老化。事实上,纳米合成科学家刚刚开始了解导致纳米材料不同形貌的复杂物理过程。毫不夸张地说,金属纳米晶的化学合成只是一次大规模尝试的定性理解,对其成核和生长过程的基本机理知之甚少。金属前驱体是如何演化成原子、原子核甚至纳米晶体的,目前还没有得到证实。目前已经发展了许多原位方法,如小角散射、X射线衍射(XRD)、紫外-可见光谱、原位电子显微镜等,来研究纳米晶体后期生长过程中的尺寸、形貌和结构的演变^②。

在典型的金属纳米晶合成反应中,前驱体通常被分解或还原为零价原子金属纳米晶的基本单元。根据反应条件的不同,成核将遵循不同的路径。对于分解反应,成核基本上是基于Lamer及其合作者在20世纪50年代提出的爆炸成核机理,在这个过程中,金属原子的含量随着反应的进行和前驱体的分解而逐渐增加。一旦原子含量达到临界饱和值,原子就开始通过自成核聚集成小团簇(即核)。一旦形成,这些核将以很快的速度增长,而金

属原子的含量将迅速下降。如果原子含量迅速降低到最低饱和水平,就不会再发生成核现象。通过前驱体的分解,原子不断地被提供,形成的核将随着尺寸的增大而生长为纳米晶,直到纳米晶表面和溶液中的原子形成平衡状态,然后停止生长。在爆炸成核过程中,几乎所有的核都是同时产生的,因此它们的生长历程几乎是相同的,这为控制尺寸分布提供了可能。对纳米晶成核和生长的动力学机制有一个详细而深入的了解,将指导纳米材料的形成过程,实现对纳米材料尺寸、形貌和结构的精确控制,获得单分散纳米晶。然而,目前对纳米颗粒的初始成核过程还没有很好的认识,对初始成核状态的结构表征还缺乏有效的实验手段。由于同步辐射方法能够有效地检测决定纳米材料行为的量子结构和原子结构特性,同步辐射将在纳米科学领域发挥独特的作用,因此迫切需要建立一种新的原位同步辐射光谱研究方法研究纳米材料的初始成核和生长过程。为了解决这一技术难题,研究人员基于合肥光源,联合北京同步辐射装置和上海光源设计搭建了适合研究液相合成反应的原位时间分辨同步辐射X射线吸收谱学(XAFS)实验装置(见图1),获得了纳米颗粒在成核和生长过程中的一些新的规律,并由此反馈和指导纳米材料的合成^{②-④}。

研究人员针对纳米材料液相反应中的核心科

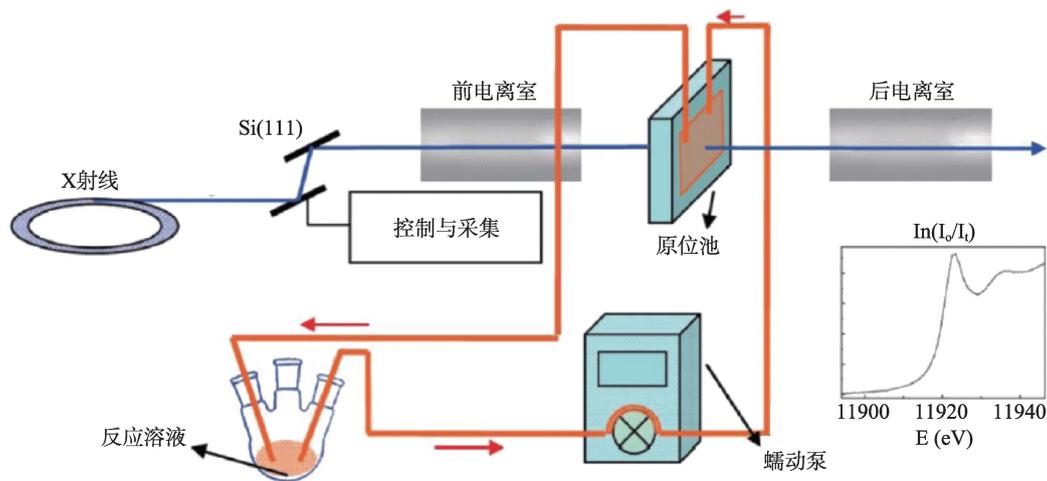


图1 基于同步辐射光源建立的原位液相XAFS实验装置

学问题,依据国家同步辐射实验室二期工程U7C实验站的技术特点,并联合北京同步辐射装置1W1B和上海光源BL14W实验站设计了液相原位同步辐射XAFS实验新方法^③。采用液体间歇式流动的思想,即利用蠕动泵将反应溶液通过毛细管输入样品池光斑处,实现了对化学液相反应进行原位XAFS测量(图1)。利用建立的液相原位XAFS技术监控水溶液中 AuCl_4^- 离子被弱还原剂还原生成Au纳米颗粒的初期成核(团簇尺寸 $<1\text{ nm}$)及后期生长过程(见图2(a))。发现在温和反应条件下初始成核过程中并不是单纯的零价Au原子聚集成Au团簇,而是 AuCl_4^- 离子并没有被完全还原成零价的Au原子,首先是两个 AuCl_4^- 离子被部分还原后形成二聚体,然后再以这种二聚体作为母体聚集生长,因此,研究人员提出了金纳米颗粒在初始成核阶段经历还

原生成 $\text{Cl}_3^- \text{Au}-\text{AuCl}_3^-$ 二聚体,而后形成更复杂的‘ $\text{Au}_n\text{Cl}_{n+3}$ ’团簇的反应路径,否定了在此种情况下完全还原后的成核机理;根据XAFS数据拟合分析和UV-Vis光谱测量,对于Au纳米颗粒的生长过程,研究人员提出了纳米金的初期成核、缓慢生长和最终聚集的三步生长机理(图2(a))。

此外,研究人员还利用建立的原位液相XAFS技术深入地研究了在不同强弱还原剂条件下,铂酸离子被还原生成Pt纳米颗粒的初期成核动力学路径的差别及其对最终形貌的影响^④。首次观察到还原反应中初期成核两种路径:即在弱还原剂条件下形成线性 Pt_nCl_n 多聚体、在强还原剂条件下形成零维零价 Pt_n 团簇;通过操纵这两种路径,可以成功实现Pt纳米晶零维和一维形貌的控制合成(见图2(b))。该研究结果发表在《美国化学会志》(*J. Am.*

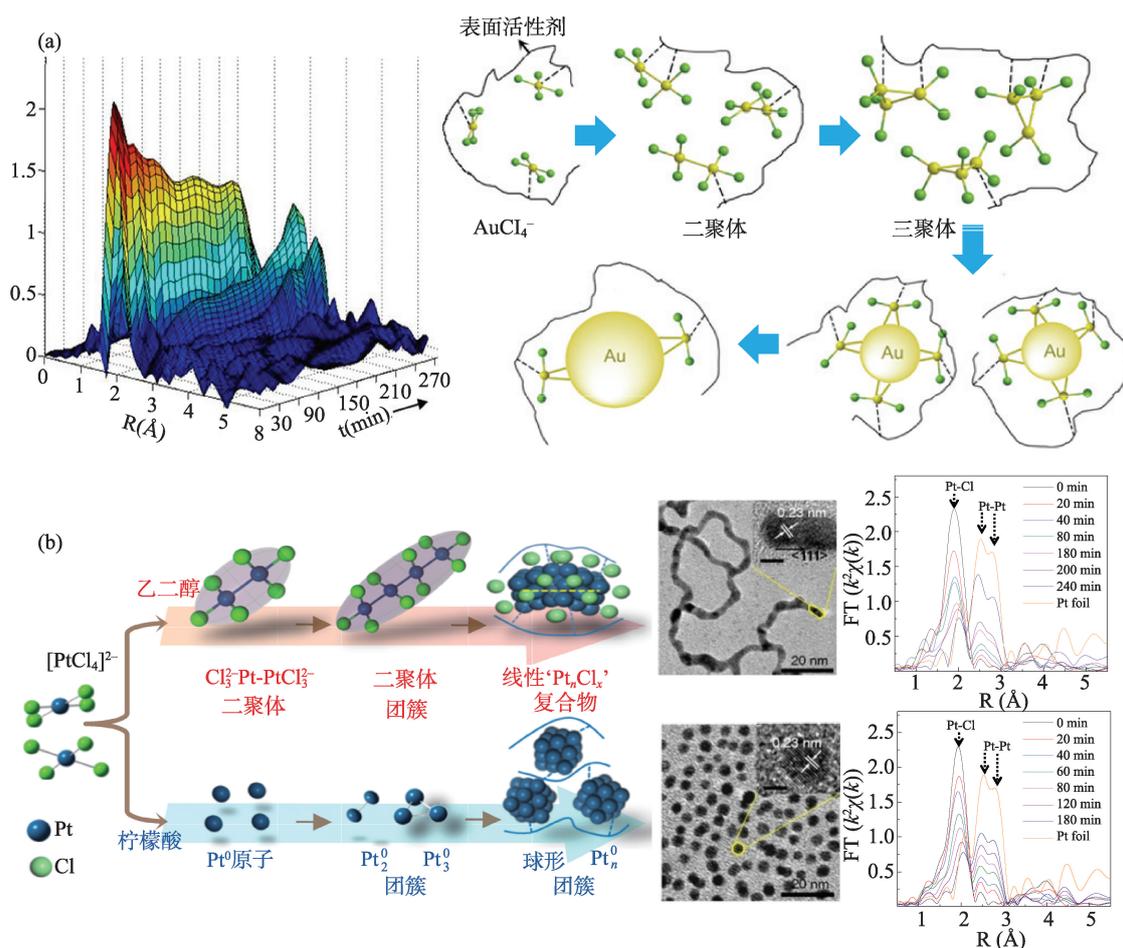


图2 (a) 金纳米颗粒成核和生长过程示意图;(b) 铂纳米颗粒成核路径的操纵和形貌可控合成示意图

Chem. Soc. 2012, 134, 9410–9416; 2012, 134, 17997–18003)上。

贵金属纳米材料体系是目前国际上最热门的研究领域之一,对其成核和生长的研究也很受欢迎。为此,研究人员基于我国的同步辐射光源研制了一种时间分辨的原位 XAFS 实验装置,以更快速度地研究化学反应过程。利用各种原位表征技术,对纳米材料液相合成过程中前驱体还原的演化、核的形成和粒子的生长过程进行了原位实时表征,拓展了不同贵金属和半导体的研究。研究了纳米材料成核和生长两个重要阶段的形貌、尺寸、局域原子结构和电子结构。

二、超薄二维纳米片构效关系研究

超薄二维纳米材料是一类新型纳米材料,具有片状结构,水平尺寸大于 100 nm 或几微米甚至更大,但厚度只有一个或几个原子厚(典型厚度小于 5 nm)。自 2004 年 Novoselov 和 Geim 及其合作者成功地用胶带从石墨中分离出石墨烯以来,二维材料的研究进入了一个快速发展的时期。同时,石墨烯和类石墨烯材料进一步丰富了二维材料家族,如二维过渡金属碳化物或碳氮化物(MXenes)、贵金属、金属有机骨架材料(MOFs)、共价有机骨架材料(COFS)、聚合物、黑磷、硅烯、无机钙钛矿和有机-无机混合钙钛矿。它们与石墨烯结构相似,但组成不同,因此具有丰富的性能。

在材料发生物理或化学变化后,可以获得一些新的性能。由此可知,超薄二维纳米材料将表现出许多超常的物理、电学、化学和光学性质,这是其竞争对手所无法实现的。一般来说,二维材料具有许多独特的优点。首先,由于电子被限制在二维平面内,特别是单层二维材料,增强了电子性质,二维材料是凝聚态物理和电子/光电子器件基础研究的理想材料。其次,强的面内共价键和原子层厚度使其具有优异的机械强度、柔韧性和光学透明性,这对其在下一代器件中的应用具有重要意义。第三,由于二维材料在保持原子厚度的同时具有最大的平

面尺寸,它给了二维材料很大的比表面积。这就极大地吸引了催化和超级电容器表面积相关应用的研究。第四,表面原子的高曝光率通过表面改性/功能化、元素掺杂和/或缺陷、应变、相工程等手段,为材料性能的易调控提供了条件。

对不同性质的需求极大地推动了超薄二维纳米材料制备方法的发展。目前固定的合成方法有:微机械剥离、机械辅助液剥离、离子插入辅助液剥离、离子交换辅助液剥离、选择性蚀刻液剥离、化学气相沉积(CVD)和湿化学法。所有这些方法都可以分为两类:自上而下和自下而上。由于不同制备方法得到的二维材料可能具有不同的结构特征,如不同的物理、电子、化学和表面特性,因此对材料进行深入的表征是非常重要的。了解二维纳米材料的结构特性与性能之间的关系是非常重要的。因此,利用光学显微镜、扫描探针显微镜、电子显微镜、X 射线吸收精细结构光谱(XAFS)、X 射线光电子能谱(XPS)和拉曼光谱等一系列先进技术对这些材料进行了表征。更重要的是,二维纳米材料的这些特性使其在电子/光电器件、催化反应、能量储存和转换、传感器和生物医学等领域具有巨大的应用潜力。二维材料以其独特的结构特点、优异的性能和广阔的应用前景,已成为凝聚态物理、材料科学、化学和纳米技术领域最热门的研究课题。

2.1 超薄二维纳米片催化还原 CO₂ 研究

众所周知,化石燃料的过度使用造成的能源危机和二氧化碳的过度排放造成的温室效应是影响人类可持续发展的两大问题。受植物光合作用的启发,研究人员设计利用人工光合作用,在自然条件下催化二氧化碳转化为碳氢燃料,不仅有助于降低空气中二氧化碳的浓度,还能获得高附加值的碳基燃料。但由于 CO₂ 还原产物的种类和还原产物的还原潜力相似,使得还原产物的选择性无法得到有效控制。以最简单的碳氧化物(CO)和碳氢化合物(CH₄)为例,从热力学角度来看,生成 CO 所需的还原电位(-0.52 V vs. NHE)高于生成 CH₄ 所

需的还原电位(-0.24 V vs NHE),然而,将CO₂还原为CO是一个2电子还原反应,而甲烷的生成是一个8电子的还原反应,因此从动力学上讲,很容易生成CH₄。因此,高选择性地将CO₂还原为CH₄仍然面临着巨大的挑战。

有鉴于此,研究人员设计并构建了一种基于双金属位点的超薄纳米片,以实现二氧化碳还原产物选择性的精确调节⁵。理论模拟和原位红外光谱分析结果表明,低配位的Cu和In位点能与二氧化碳反应生成高稳定性的Cu-C-O-In中间体,这就需要克服在破坏Cu-C键和C-O键形成游离CO分子的同时,C原子加氢生成CHO中间体的反应是放热自发的,这使得它更倾向于获得接近100%的甲烷选择性。光催化实验结果表明,CO₂还原CH₄的选择性接近100%,平均产率为8.7 μmol g⁻¹ h⁻¹。

在这项研究中,研究人员利用合肥光源BL11U催化与表面科学线站紫外光电子能谱技术获得了CuIn₃S₈超薄纳米片能带结构,利用BL03U线站的真空紫外光电离质谱证实了产物来源,综合常规的原子和电子结构表征手段,发现通过构建双金属位点CuIn₃S₈超薄纳米片,改变了关键反应中间体的构型,调节了反应势垒,进而改变了反应路径,最终使得还原产物由CO变为CH₄。这为设计高选择性和高活性的二氧化碳光还原催化剂体系提供了新的

思路,研究结果发表在《自然·能源》(*Nature Energy*, 2019, 4, 690-699)上。

2.2 超薄二维纳米片催化氧化CO研究

众所周知,催化技术是化学工业的支柱。90%以上的化工过程和60%以上的产品与催化技术有关。一般来说,只有催化剂的局部位置才能产生活性,称为活性中心。活性中心可以是原子、团簇、离子、表面缺陷等形式。活性中心的概念是由泰勒于1925年提出的。他认为位于晶体顶部、晶体边缘或结构缺陷处的原子,由于其价态不饱和,即表面自由价态的存在,具有很高的活性。它们可以化学吸附分子,激活分子,然后发生反应。然而,目前对活性中心的认识还没有统一的观点,这主要是由于缺乏理想的结构模型来说明活性中心与催化活性之间的关系。为了了解活性中心与催化活性之间的关系,有必要建立一个含有大量活性中心的结构模型。

针对上述挑战,研究人员首先构建了一种原子尺度的厚CeO₂纳米片结构(图4)⁶。这三个原子层的超薄二维结构可以暴露70%的表面原子,从而提供大量的活性中心。同时,为了进一步了解活性中心不同配位点对催化活性的具体影响,他们在超薄CeO₂纳米片表面人工制造了丰富的凹坑。这些凹坑的存在,不仅可以为活性位点提供较低的配位

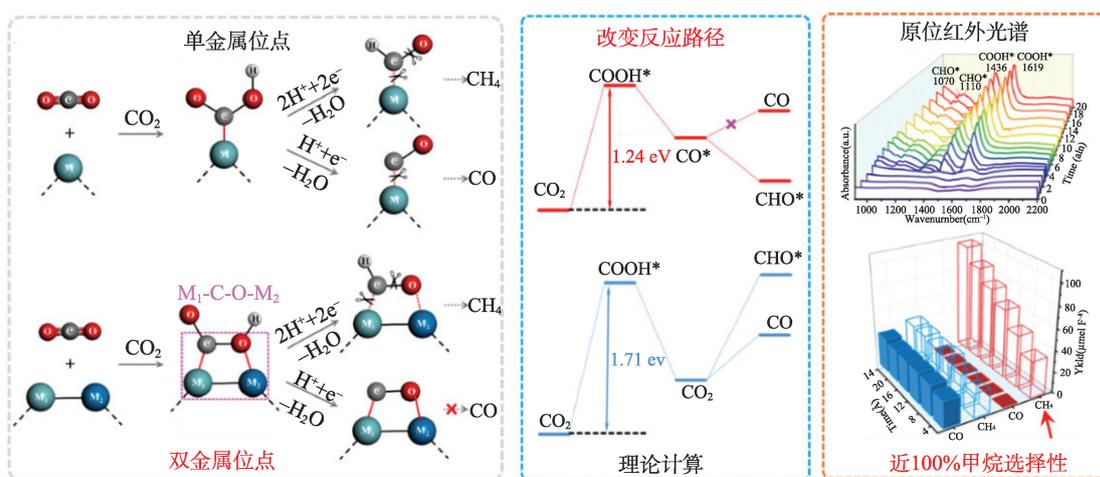


图3 超薄CuIn₃S₈纳米片双金属协同催化还原CO₂的反应路径和机理

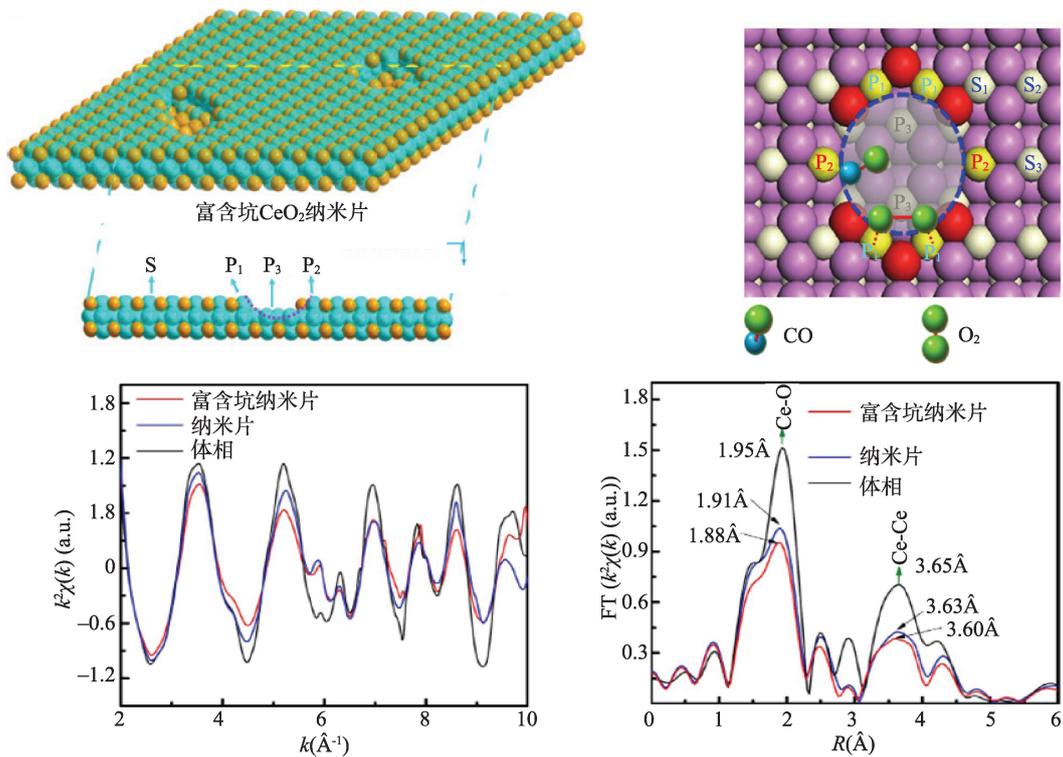


图4 超薄二维CeO₂纳米片表面原子结构表征

数,而且可以为活性位点提供较大的配位数差。利用合肥光源二期工程U7C线站的XAFS对超薄纳米片、完整超薄纳米片和块体材料进行了表征。同步辐射XAFS结果表明,Ce原子在核周围的平均配位数为4.6,明显小于超薄纳米片表面Ce原子(6.5)和块体材料中Ce原子(8)的平均配位数。同时,与超薄纳米片和块体材料表面的Ce原子相比,第一性原理计算表明,坑周围的4和5配位Ce原子具有最大的CO吸附能和最小的O₂活化能。这意味着坑周围的Ce原子不仅有利于CO的吸附,而且有利于O₂的活化,有利于提高CO的催化氧化性能,同时CO和O₂分子倾向于分别吸附在4-和5-配位Ce原子上,从而避免催化剂中毒,从而提高催化剂的催化效率和循环稳定性。此外,对第一性原理的计算表明,凹坑的存在使得超薄氧化铈纳米片在价带顶部的态密度非常明显,有利于CO的扩散和催化性能的提高。由于上述优点,CO催化氧化实验结果证实,在配位不饱和表面上存在大量Ce原子,导致表观活化能从块体的122.9 kJ mol⁻¹降低到超薄纳

米片的89.1 kJ mol⁻¹;同时,存在大量的Ce原子大量的凹坑使超薄CeO₂纳米片的表观活化能继续降低到61.7 kJ mol⁻¹。相应地,CeO₂的100%CO转化温度也从大块材料的425 °C降低到了超薄纳米片的325 °C和富含表面凹坑的超薄纳米芯片的200 °C。上述结果证实了活性中心与催化活性之间的半定量关系,对促进催化领域的研究进展具有重要的科学意义,也为研究超薄二维结构的催化性能开辟了一条新途径。该研究结果发表在《自然·通讯》(*Nature Communications*, 2013, 4, 2899)上。

三、纳米组装仿生材料研究

高度可控的纳米结构受其尺寸限制,很难直接应用于实际生产生活,需要进一步的实现宏观结构的搭建。因此纳米组装材料是纳米结构走向众多应用领域中不可或缺重要的一环。例如固态多级结构锂金属复合负极的构筑、多级有序的层状微纳“砖-泥”结构的模仿与制备、柔性可穿戴电极材料的有序搭建等,都是基于纳米材料的可控组装。对

于纳米仿生组装材料的结构表征一直以来存在较多挑战。常规的扫描电子显微镜、透射电子显微镜、原子力显微镜等常规手段只能获取样品表面或者透射信号,对于三维结构的解析存在明显瓶颈。基于同步辐射装置的软X射线成像(如图5所示),包括显微CT成像、几何放大投影成像、基于波带片的纳米分辨全场成像、相干衍射成像和纳米分辨探针扫描成像弥补了常规表征的不足。跨尺度的多级次结构是纳米组装仿生复合材料的主要特征,因此对该材料跨尺度结构的有效表征是了解三维复杂结构设计原理和材料构建的关键。其中结构表征的难题可以通过先进的同步辐射光源技术攻克。

例如,大气颗粒物是一种组成、形态非常复杂,与人类生活息息相关的物质形态。研究其元素分布对于分析大气颗粒物的形成、演化规律具有重要的意义。研究人员利用合肥同步辐射光源BL07W线站的纳米CT技术,分析了大气中气体颗粒物中Fe元素的分布(*Analytical Chemistry* 2020, 92, 975-982)。通过X射线入射角度的改变,可以重构出颗粒物的三维元素分布(图6)。重构的三维结果揭示了Fe元素主要存在于颗粒物的近表面,这体现了大气颗粒物形成过程中的富集效应^⑦。该工作体现了

合肥光源X射线成像线站在三维复杂结构的解析方面具有巨大潜力,能够充分服务于纳米组装仿生材料的后续研究。

具体到纳米组装仿生材料领域,研究人员在人工合成珍珠母的方法上取得突破性进展(*Science* 2016, 354, 107-110)。天然珍珠母的结构是层状有序的“砖-泥”构架。自然界软体动物形成珍珠母主要分为3步:1)分泌几丁质形成层状框架;2)碳酸钙在框架中富集并矿化;3)碳酸钙逐步填满整个框架结构。因为这种独特的“砖-泥”层状多级结构,天然珍珠母的强度和韧性远远超过纯碳酸钙或几丁质。俞书宏院士课题组开发了“组装与矿化”相结合的合成方法,成功合成了宏观尺度仿珍珠母块体材料。首先,冷冻壳聚糖得到层状结构框架。然后将该框架乙酰化,得到与天然贝壳成分相似度极高的几丁质框架。缓慢循环泵入碳酸氢钙溶液(含有一定量聚丙烯酸和镁离子)。最后,碳酸钙在框架中逐渐矿化生长。矿化后的材料经过丝蛋白溶液浸渍以及热压处理,就可以得到结构、组分、性能高度相似的块状人工珍珠母材料。这种层状仿生人工贝壳的微结构可以用同步辐射X射线成像进行表征,显微CT能够清晰的展现该层状结构^⑧。

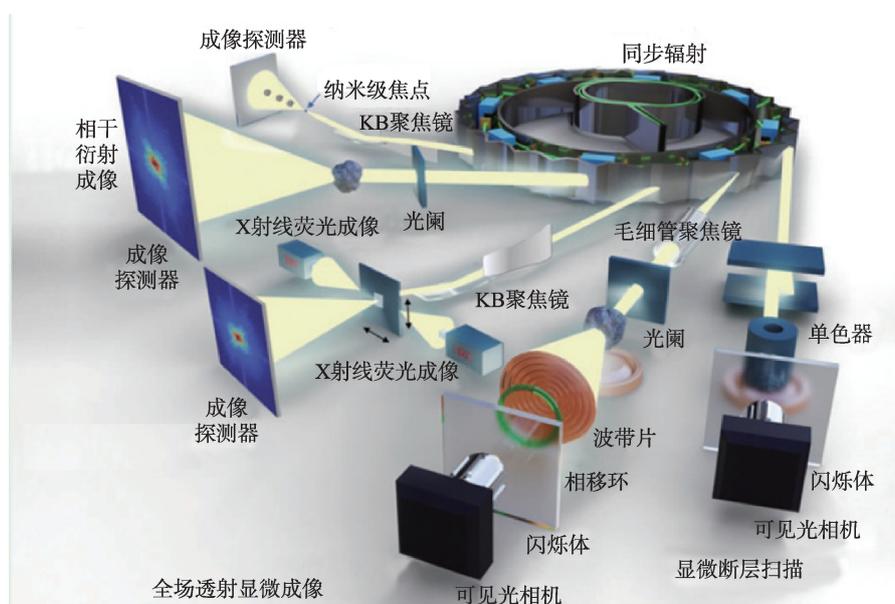


图5 同步辐射X射线成像装置示意图

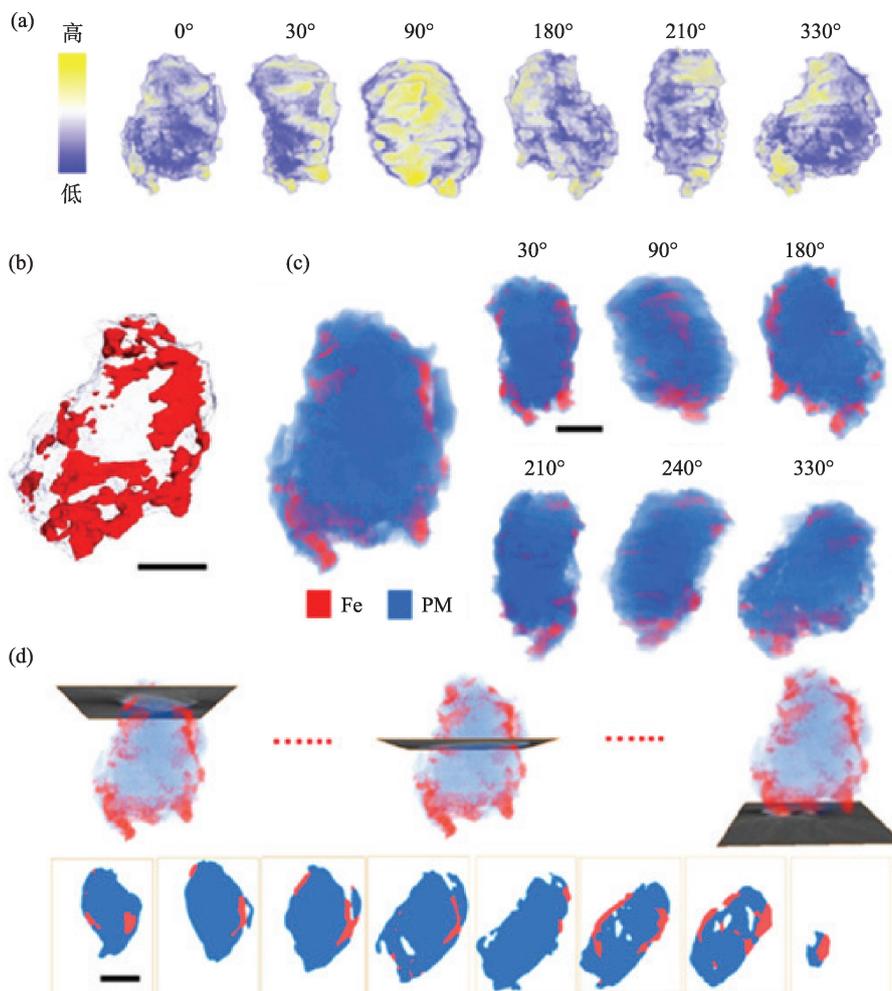


图6 同步辐射纳米CT分析大气颗粒物元素分布示意图

同步辐射 X 射线的成像优势在于三维结构的解析与视觉重构,不仅能够表征二维纳米仿生结构,还能够清晰的重构出复杂的三维取向多孔结构。研究人员发展了一种热固化和冰晶诱导自组装相结合的新技术,成功构建了一系列模仿天然木材孔道结构的人工木材。该系列仿生人工木材以环氧树脂和酚醛树脂为原料,不仅具有类似天然木材的质量轻、强度高特性,还赋予了其耐腐蚀和隔热防火等优点 (*Science Advances* 2018, 4: eaat7223)。X 射线显微成像结果清晰的表明了孔道方向与合成过程中的冷冻方向高度一致,这为三维孔道仿生结构的构建提供了本征信息(图 7)。仿生木材作为一种新型的纳米组装仿生材料,其功能性在多种角度都优于传统的木材,因此有望代替天然木材,有

利于天然雨林的保护。此外,这种合成方法的可控性有助于拓宽纳米组装仿生学科在多种工程领域中的应用^⑨。

高强度、高导电性的柔性可穿戴电极材料一直受到广泛关注,二维石墨烯基材料是该领域的明星材料。迄今为止,对于石墨烯基纤维机械性能的提高,主要通过减小结构缺陷、增加组装纳米单元的宽高比提高轴向排列来实现。由于石墨烯尺寸以及单元排列的限制,机械性能的提升达到了一定的瓶颈。受珍珠层结构设计启发,基于合肥同步辐射光源 BL07W 线站的软 X 射线 CT 成像设备(图 8),科研人员通过引入 N-掺杂碳聚合物物种作为阻力导电连接“桥”、增强剂和粘合剂,实现了二维石墨烯纳米仿生组装成三维纤维的可控构建和精确表征

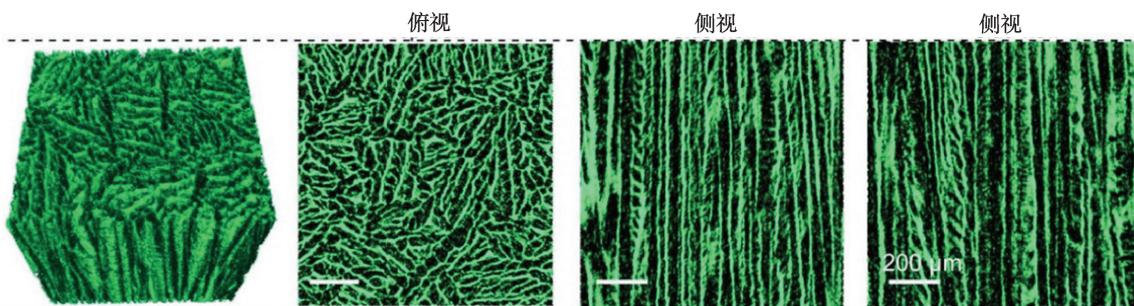


图7 仿生木材的X射线显微成像图

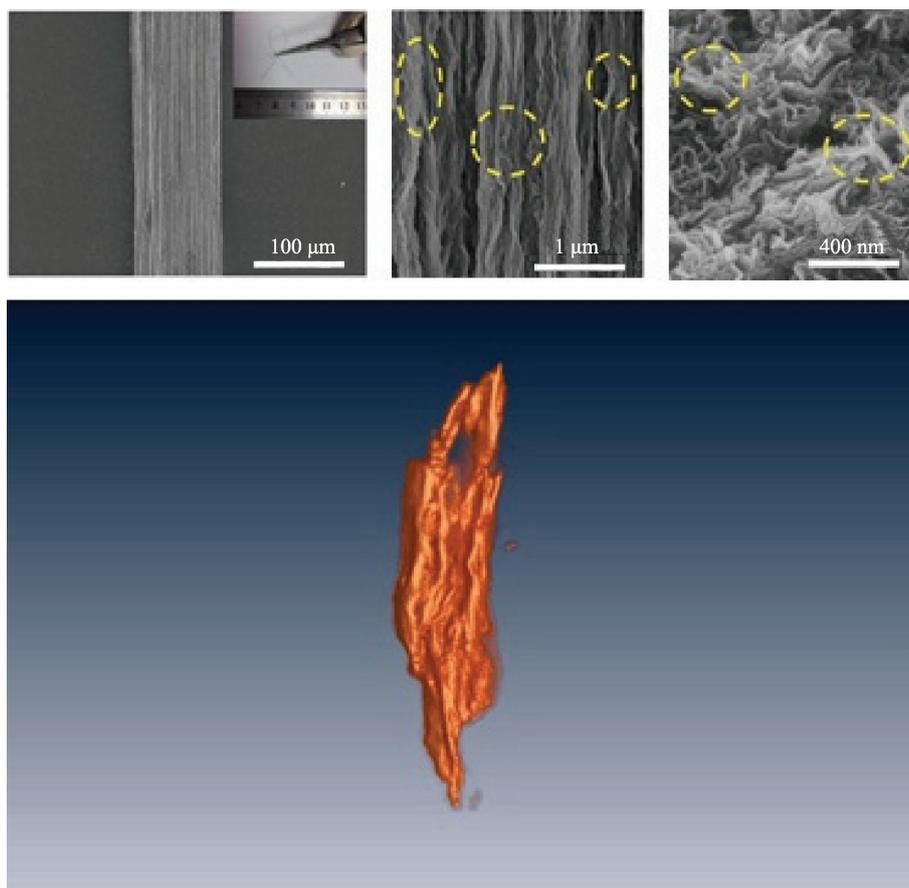


图8 石墨烯有序组装纤维纳米CT示意图

(*Advanced Materials* 2018, 30, 1706435)。这种具有优越性能的石墨烯基纤维,有望在柔性可穿戴电极方面有重要的应用^⑩。

四、总结

当前,纳米科学正蓬勃发展,而随着纳米材料在各个领域的普及,纳米材料也将成为21世纪最有前途的材料。尤其是纳米材料向半导体芯片、癌症

诊断、光学新材料和生物分子追踪等领域的发展突飞猛进,这直接导致新的、重要的科学问题层出不穷。同步辐射为解决这些全新的科学问题提供了重要的条件。合肥光源自开发运行以来为我国纳米科学领域的一系列重要研究成果的研究提供了良好的实验平台。目前,合肥光源正致力于推动我国的纳米科学等各个前沿领域的科学家瞄准国家重大需求,在国际上抢占领域技术制高点做出重大贡献。

参考文献

- ① D. V. Talapin, *et al.*, Prospects of Colloidal Nanocrystals for Electronic and Optoelectronic Applications, *Chemical Reviews* 110, 389 (2010)
- ② 姚涛, 原位 XAFS 新方法及其功能材料动力学研究 [D], 2011
- ③ T. Yao, *et al.*, Insights into Initial Kinetic Nucleation of Gold Nanocrystals, *Journal of the American Chemical Society* 132, 7696 (2010)
- ④ T. Yao, *et al.*, Probing Nucleation Pathways for Morphological Manipulation of Platinum Nanocrystals, *Journal of the American Chemical Society* 134, 9410 (2012)
- ⑤ X. D. Li, *et al.*, Selective Visible-Light-Driven Photocatalytic CO₂ Reduction to CH₄ Mediated by Atomically Thin CuIn₂S₃ Layers, *Nature Energy* 4, 690 (2019)
- ⑥ Y. F. Sun, *et al.*, Pits Confined in Ultrathin Cerium(IV) Oxide for Studying Catalytic Centers in Carbon Monoxide Oxidation, *Nature Communications* 4, 2899 (2013)
- ⑦ L. M. Wang, *et al.*, Single-Particle Analysis for Structure and Iron Chemistry of Atmospheric Particulate Matter, *Analytical Chemistry* 92, 975 (2020)
- ⑧ S. H. Yu, *et al.*, Synthetic Nacre by Predesigned Matrix-directed Mineralization, *Science* 354, 107 (2016)
- ⑨ S. H. Yu, *et al.*, Bioinspired Polymeric Woods, *Science Advances* 4, eaat7223 (2018)
- ⑩ S. H. Yu, *et al.*, A Bioinspired Interface Design for Improving the Strength and Electrical Conductivity of Graphene-Based Fibers, *Advanced Materials* 30, 1706435 (2018)



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜;
她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn, 并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2020 年《现代物理知识》每期定价 10 元,全年 6 期 60 元,欢迎新老读者订阅。

需要过去杂志的读者,请按下列价格付款。

2010~2019 年单行本每期 10 元; 2010~2015 年合订本每本 60 元。

订阅方式

- (1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。
- (2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)
名称:中国科学院高能物理研究所
开户行:工商银行北京永定路支行
账号:0200004909014451557
- (3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;
- (4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;
淘宝购买链接:
<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.3-c.w4002-17748874504.9.3473bd0e1SdzHy&id=520828395681>
微店购买链接:
<https://weidian.com/item.html?itemID=2561726602>
或扫描下方二维码:



淘宝网购刊



微信购刊