

# 中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 120 次

学部工作局学术与文化处 编报  
《中国科学》杂志社

2021 年 12 月 日

---

## “21 世纪化学中的纳米科技前沿”论坛综述

### 一、背景

化学是在分子、原子层次上研究物质的组成、性质、结构与变化规律的自然科学,是人类认识和改造物质世界的主要方法和手段之一。作为自然科学的一门中心学科,它与能源、环境、医药、材料、生物、物理等学科领域的发展互相交叉渗透。而纳米科技作为在纳米尺度上的科学与技术,也与化学科学的发展深度交叉融合。

纳米技术的出现改变了人们对传统科学技术的观念,引领了新的技术变革。世界各国尤其是科技强国将纳米技术提升到国家战略的高度,利用纳米技术探索纳米尺度下的新结构,研制纳米材料与器件,面向新型纳米材料工业化的投入也在不断加大。自 20 世纪 80 年代以来,通过国家各部门的支持和广大科研人员的努力,中国的纳米科技研究水平已经进入国际研发的第一梯队,拥有一批国际水平的研究基地和研究人员,与国际纳米技术同步发展,具备国际竞争的话语权。研究领域不断拓展——从基础研究拓展到与能源、环境、医药、信息、材料等重要应用领域相结合。新型纳米材料、纳米器件、纳米医药等

一批具有自主知识产权的研究成果实现产业化应用。此外，中国在纳米科技方面发表的论文总数在国际上名列第一，论文的被引用频次居世界第二，表明我国纳米科技研发的整体实力处于国际领先水平。现阶段，纳米科技仍处于快速发展期，在未来新兴技术领域具有巨大的潜力和发展空间。

## 二、论坛概况

2021年7月31日至8月1日，“21世纪化学中的纳米科技前沿”论坛在广州举办。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院化学部和学部学术与出版工作委员会承办，《中国科学》杂志社和广东粤港澳大湾区国家纳米科技创新研究院协办。

中国科学院化学研究所朱道本院士、万立骏院士（《中国科学：化学》主编）和国家纳米科学中心主任/广东粤港澳大湾区国家纳米科技创新研究院（以下简称“广纳院”）院长赵宇亮院士为论坛召集人。来自全国50所高校、科研院所和企业界的400余位科研工作者参加了论坛。广东省省长马兴瑞、副省长王曦、广州市委书记张硕辅等省市领导出席了开幕式。

论坛开幕式由万立骏院士主持，他指出，随着化学科学的不断发展，纳米科技也进入了一个新的发展阶段，在医药、信息、半导体等领域有很大的发展空间，期望本次论坛成为化学和纳米科学交叉交流的论坛，不仅对化学研究成果进行展示和展望，也为纳米科技的基础研究及产业化发展注入新的活力。中国科学院学部工作局局长王笃金介绍了“科学与技术前沿论坛”的创办以及与《中国科学》《科学通报》融合发展的历程。广东省副省长王曦在致辞中对参会嘉宾和代表表示欢迎，并介绍了广东省在纳米科技基础研究、技术攻关、成果转化等方面取得的成效及未来发展规划。

本次论坛以主题报告和分报告的形式介绍了化学研究前沿，以及化学与纳米相关领域的研究进展，内容涉及化学与纳米合成、纳米医

药、纳米器件、纳米材料等重点领域。论坛邀请了陈建峰院士、陈学思院士、葛均波院士、彭练矛院士、于吉红院士、俞书宏院士、张锦院士、赵宇亮院士、陈华兵教授、陈永明教授、陈永胜教授、冯霄教授、巩金龙教授、郭玉国研究员、吴长征教授、杨黄浩教授、张晓兵教授、张强教授、钟羽武研究员、周明教授、朱为宏教授共 21 位专家作了精彩报告。《中国科学：化学》副主编李永舫院士、谭蔚泓院士、唐本忠院士、唐勇院士、田禾院士、田中群院士和谢毅院士，编委杨金龙院士，以及特邀嘉宾高松院士、阎锡蕴院士、朱美芳院士、朱世平院士（加拿大皇家科学院）、聂晓伟研究员等参加了研讨。专家报告精彩纷呈，学术讨论气氛热烈。

本次论坛聚焦化学与纳米科技交叉中的最新研究成果和关键科学技术问题，将进一步促进化学科学、纳米科技的发展进步以及产、学、研的深度融合，使化学和纳米科技在“十四五”规划及“碳中和”和“碳达峰”目标的完成等国家战略中发挥更大作用。

### 三、主题报告内容

#### 主题一：化学与纳米科技产业化策略

国家纳米科学中心赵宇亮院士作了主题报告，介绍了纳米科技的重要性、纳米科技成果转化和产业化策略，以及存在的问题。

纳米科学是化学、物理学、生物学、临床医学、电子学、材料学等多学科交叉融合和汇聚的科学。纳米科技是多领域、具有普适性的先进技术，是带动智能技术发展的引擎和支撑制造产业变革的源头。它在新材料、超材料、航空航天、能源环境、纳米医疗、标准安全等方面都起着重要的作用，将深刻影响现代科学技术的发展，已成为世界高新技术战略竞争的前沿。Elsevier 在 2021 年发布的科学报告指出，在过去 20 年里全球共有 960 个 TOP 1% 前沿研究主题，其中 89% 与纳米科技相关。纳米科学与技术是我国的优势学科研究领域，在基础研究和应用基础研究中领跑全球，发表在 *Science*、*Nature* 与子刊等的高

质量基础研究学术成果数量已经超过美国，排名全球第一；纳米科技领域专利量近 31 万件，占全球 45%。从事纳米科技的学者，已有 132 位当选中国科学院院士，44 位当选中国工程院院士，还有 236 位两院院士与纳米科技领域的研究者有过合作，是一支强大的先进科技力量。

尽管我国纳米科技基础研究已处于国际领先地位，但是成果转化率低，不到美国的 1/10。症结在于，我国的科技创新链 1~3 级基础研究、4~6 级成果转化、7~9 级产业商业三者之间脱节。一方面，高新技术投入大、回报周期长；另一方面，科研机构往往无力完成从 1~3 级实验室成果到 7~9 级产业化这一过程中的许多复杂的工程化、系统化工作。目前，国内许多科研院所和企业正在提升科技成果转化能力和努力解决科技创新链中的关键技术和问题。例如，广东粤港澳大湾区国家纳米科技创新研究院聚焦创新链 4~6 级，正在成为集纳米科技核心技术研发基地、纳米科技通用重大基础设施群、纳米科技成果转化与创新产业高地、纳米科技工匠人才培养和汇聚中心、纳米科技国际合作交流平台等功能于一体的院所。报告还介绍了基于研发平台、纳米智能、纳米材料、纳米健康的部分重点项目的情况，如子弥实验室、绿色无机纳米防火材料——纳米防火薄膜、纳米稀土光功能材料与 LED 发光器件等。

## 主题二：化学与纳米科技在碳达峰、碳中和中的机遇与挑战

吉林大学于吉红院士作了主题报告，介绍了分子筛在固碳中的吸附分离作用以及在减碳中的催化作用，并列举了很多工业化实例，提出了该领域存在的机遇和挑战。

分子筛，顾名思义就是可以筛选分子的材料。材料主要是基于硅酸盐和磷酸盐。分子筛具有规则的纳米孔道，是一类无机晶体材料，它的孔径通常小于 2 nm。这类材料有分子尺度的形选和筛分效应，除了具有离子交换的能力、分子的吸附和分离能力之外，还具有非常高的热稳定性和化学稳定性，因而被广泛的应用于石油化工化学工业领

域，每年市场价值达上百亿美元。结合对二甲苯高效合成、流化催化裂化、石油裂解、低碳烯烃制备、乙烯/乙烷分离、烯烃/炔烃分离、二甲苯异构体分离、制氢、二次电池等实例，分别介绍了分子筛在石油资源高效利用、非石油资源高效转化、低能耗高效分离和清洁能源等减碳途径中发挥的重要作用。

在固碳方面，主要体现在分子筛具有吸附分离作用，它可以高效地进行二氧化碳、甲烷的捕获和贮存。分子筛的吸附分离方式主要有四种：第一种是基于它的分子筛分效应，就是根据分子尺寸的不同可以选择性的吸附分离；第二种是基于分子的作用力和骨架的作用力不同，比如说极性的不同会导致作用力的不同进行筛分；第三种是基于分子在孔道的扩散不同的方式进行分离；第四种是基于有人提出的“合页门”效应，所谓“合页门效应”就是对于孔道比较小的，有些作用力比较强的分子可以把“门”踢开钻进去，而另外的分子就排到孔道外面。报告人以  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  的高效吸附分离为例，介绍了分子筛在吸附分离中的具体应用，并介绍了二氧化碳高效捕集与贮存技术和现状。

基于分子筛的催化作用，可实现甲烷和二氧化碳的高效转化，转化为重要的高附加值的化学品。报告从具体实例出发，重点介绍了分子筛在没有二氧化碳排放的过程中，如何提高催化反应的选择性、转化率和稳定性，以及有二氧化碳排放的过程中如何创新反应路径。

报告指出，分子筛在减碳和固碳中仍然存在挑战和机遇。例如，分子筛用于减碳和固碳中关键的因素是高效分子筛催化和吸附分离材料的创制，催化和分离过程中全新反应路线的开发，以及高效分子基储能材料的创制。实现这些需要科研人员在分子层面更加清楚地认识分子筛这样一个神奇的材料，包括分子层次晶化机制、精准的“构效”关系、如何以功能为导向进行结构设计和定向合成的理论和方法，最终实现高效的催化转化和可控的吸附分离。

### 主题三：化学与纳米材料制备

北京化工大学陈建峰院士作了主题报告，介绍了单分散纳米颗粒及有机无机复合材料制备、工程化的关键以及如何应用。

纳米颗粒是构筑纳米体系的基本单元，在纳米催化剂、纳米电极、医药纳米器械、纳米药物领域有重要的应用。纳米颗粒领域目前有三个关键科学技术问题：（1）纳米颗粒的稳定可控制备；（2）纳米颗粒的单分散技术；（3）低成本化宏量工程放大。报告人围绕这三个科学前沿问题，结合其团队取得的进展作了详细报告。

要实现稳定可控的制备，成本最低的科学大规模制备是液相法，但过程非常复杂，该团队实现了在毫秒级内完成分子级均匀混合。此外，传统反应沉淀法制备颗粒的过程存在粒度分布宽、不易可控、工业放大核质量稳定性控制困难等问题，通过分子混合强化方法，可实现纳米颗粒可控宏量制备，报告详细介绍了超重力技术、依靠以上技术研发的反应器以及工业生产线等情况。

单分散纳米颗粒材料在光电信息、能源环境、生命健康和国防军事等领域具有重要应用前景。因此，单分散技术研究成为纳米科技研究前沿。颗粒小而均匀、无团聚，且分散在溶剂中形成具有透明性或丁达尔效应的纳米分散体材料，较传统纳米粉体材料更易于分散应用，展现出更优异的宏观纳米效应性能。“高固含量、高稳定、高透明”单分散纳米颗粒分散体及其低成本规模化可控制备是国际上一个重要的并具有挑战性的科技问题。报告详细介绍了其团队发明的“超重力+”法（超重力反应结晶-改性萃取分离耦合法）制备透明纳米分散体的新技术，以及研制出的高固含量（60%）、高稳定（1年）、高透明（透光率90%以上）的金属、无机和有机三大体系近40种透明纳米分散体，如应用于药物原料/载体纳米颗粒分散体的制备。综合来讲，“超重力+”法具有时间短、单分散、高透明度、合格率高（99%）、颗粒小、分布窄、高固含量、高稳定等优点。

报告还介绍了超重力反应器技术工业化过程中解决的工业难题和创新思路，以及纳米分散体的应用，包括该技术制备的有机无机纳米复合材料在医药、交通、抗菌防腐领域的应用，在纳米催化领域的应用以及在生命健康领域的应用等。最后指出，“超重力+”法制备技术为单分散纳米颗粒材料的工程制备和产业应用提供了一条新途径，纳米分散体具有广阔的应用前景。

**北京大学张锦院士**作了主题报告，介绍了单壁碳纳米管的结构控制生长方法研究。

碳纳米管可看作是由石墨层卷曲而成的无缝管，当石墨层为单层时，对应的为单壁碳纳米管。单壁碳纳米管在原子尺度的结构变化即可导致其电学、光学方面等性质的多样性和非连续的变化——如电学性质上可呈现半导体性或金属性。然而，单壁碳纳米管表现出诸多优异性能的同时，如何实现碳纳米管的结构控制制备仍面临严峻的挑战。报告聚焦在水平方向生长手性可控的碳纳米管领域，特别是其中的催化剂设计方面。首先，使用一端开口的碳纳米管作为种子和催化剂，采用复制的方式继续生长碳纳米管，得到的碳纳米管可完全复制原来碳管的片段。第二，采用对称性匹配策略在碳化物衬底上成功得到(2m, m)结构家族的水平生长的单壁碳纳米管。之所以可以实现特定结构碳纳米管控制生长，主要是由于碳管与催化剂界面处的动力学过程决定于对称性，且生长速率取决于弯折的数目。第三，采用准平衡形核生长模式可以得到不同直径的、拥有(n, n-1)结构的半导体型单壁碳纳米管，这种碳纳米管在电子器件中有广泛的应用，因为碳基电子器件中必须全是半导体型碳纳米管才能正常工作。

#### **主题四：化学与纳米药物、纳米医学**

**中国科学院长春应用化学研究所陈学思院士**作了主题报告，介绍了抗肿瘤纳米药物及其治疗评价。

在应用纳米技术进行新药研发方面，既有通过纳米技术对传统药

物和药物输运系统进行改良，也不乏对全新纳米药物的研发。低毒高效的纳米药物的研发是国际前沿的发展趋势，也是基础科学和应用研究面临的一项重大挑战。报告介绍了抗肿瘤药物高分子载体材料、聚谷氨酸铂纳米药物和血管阻锻纳米药物的研发情况。

化学治疗是肿瘤综合治疗的主要手段之一，但化学疗法存在副作用大、耐药性强从而导致病情恶化、选择性差（如静脉给药到达肿瘤组织较少，不足 0.1%）等瓶颈问题。高分子纳米载体具有保护药物免于降解，改变体内分布，调节释药速度，增加生物屏障的透过性，辅助治疗等独特优势。基于此，报告人详细介绍了国内外研发的抗肿瘤药物高分子载体材料以及临床研发进展。

在纳米药物制备方面，顺铂药物具有抗癌谱宽、临床应用广等优点，但对肾毒副作用大。针对这一问题，报告介绍了解决方案，如通过聚谷氨酸载体担载顺铂，形成纳米药物。该方法增加了粒径，降低了药物肾脏蓄积，降低了毒副作用。报告还详细介绍了聚谷氨酸-顺铂胶束制剂改进策略，以及聚谷氨酸接枝聚乙二醇-顺铂胶束的制备、性能、初步安全性评价等。

肿瘤组织内纳米粒子渗透性差是纳米药物应用的关键问题之一。肿瘤血管阻断疗法是通过肿瘤血管抑制剂，来抑制肿瘤新生血管增生因子 VEGF 的形成，从而诱发血管内皮细胞自然凋亡，破坏肿瘤新生血管网的新方法。报告介绍了目前进入临床试验阶段的小分子血管阻断剂及其存在的问题。存在的问题包括递送效率低、作用时间短、作用可逆、短暂的血管阻断后重新恢复等。随后，介绍了其团队在解决以上问题中的研究进展，如制备 Cisplatin-NPs 与 CA4P 协同作用消除肿瘤中心及周围区域的肿瘤细胞；利用高分子优势，制备高分子血管阻断剂以提升活性药物浓度。PLG-CA4 与其他药物协同作用，也使治愈率显著提升。目前纳米药物 CB-OLG-NPs 已在广纳院进行孵化。

复旦大学附属中山医院葛均波院士作了主题报告，介绍了中国心



血管器械创新与转化情况。

根据 2020 年公布的数据，2019 年中国心血管疾病患者达到了 3.3 亿人，每 5 个成年人中有 1 人患心血管疾病，每 5 例死亡有 2 例心血管疾病，居死因首位，且致死率呈上升趋势，农村的心血管疾病超过了城市，中国人群疾病谱与欧美人群有显著差异。报告分析了可能的原因，并介绍了心血管疾病治疗的“里程碑”，包括 1929 年发明的第一例心导管手术、1977 年发明的冠脉介入治疗，1989 年发明的支架以及 2002 年第一例经皮主动脉瓣膜置入术（TAVI）心脏介入治疗等。

随后，报告介绍了医疗器械的发展情况。目前全球医疗器械市场规模持续增长，2017~2024 年间的复合年均增长率为 5.6%，2020 年全球医疗器械销售规模为 4774 亿美元，预计 2024 年将增至 5945 亿美元。IVD、心血管、影像诊断领域占据前三份额，Top10 医疗器械企业占据近 40% 市场份额，市场呈明显的头部集中趋势。在全球高端医疗器械市场上北美依然是领跑者，但中国、印度、俄罗斯等医疗器械市场和产业的发展速度惊人。2019 年我国医疗器械销售规模为 6341 亿元，复合增速为 20% 左右，远高于全球平均水平，国内医疗器械产业发展空间较大。近些年，医疗器械国产替代率逐年提升，心脏封堵器、硬脑膜、监护仪等领域的国产替代程度大，内窥镜、化学发光、CT 等领域的国产化空间大，在政策支持下，市场发展前景较好。医疗器械产业形成珠江三角洲、长江三角洲和京津环渤海湾三大聚集区。疫情推动了我国医疗器械产业加速发展，疫情相关产品发展空间巨大。同时疫情也凸显出医疗器械产业链中存在的问题。心血管介入器械市场是最大的医疗器械细分市场之一，资本市场对心血管器械投入不断增加。除企业之外，医学院校、科研机构和医疗机构等，是介入器械创新发展的另外一股重要力量。从发文情况看，心血管医疗器械的研究也处于快速上升期。然而我国医疗器械产业与发达国家在持续创新能力建设方面存在巨大落差。

最后，结合中国心血管医生创新俱乐部（CCI）的成立和发展，报告介绍了中国心血管器械的创新研发情况。CCI于2015年9月成立，旨在打造一个以医生为主体的创新研发平台。目前已初步形成了集创新培训、创新传播、创新孵化、创新投资于一体的心血管产业生态系统。6年来，学员累计330余人，巡回10大城市，累积邀请国内外导师近百人次，收集到百余个心血管创新项目，由学员成立的初创公司已达10余家。从模仿到改进到创新，俱乐部先后牵头研发了首个国产完全可降解支架——XINSORB聚乳酸可降解支架、世界首个冷冻球囊肾动脉消融设备——CryoFocus冷冻神经消融导管、ValveClamp原创经导管二尖瓣瓣叶夹合装置、LuX-Valve世界首款非径向支撑三尖瓣瓣膜，合作研发了世界最小口径冠脉血流储备测定导管等，优秀项目不断涌现。

#### 主题五：纳米电子学

北京大学彭练矛院士作主题报告，介绍了后摩尔时代电子学——碳基技术的机遇与挑战。

随着硅基微电子器件尺度进入深亚微米，后摩尔时代非硅电子学的发展备受瞩目。报告首先介绍了碳基电子学的背景，大规模集成电路技术和低K介质现在都进入了饱和状态，需要有新材料、新框架、颠覆性技术才能跳过目前饱和性发展的状态。现在90%以上的芯片都是长效晶体管，但其发展过程中出现了短沟道效应，导致28 nm时SS开始发散，中芯国际花了5年以上时间解决这个问题，希望通过变化结构（工艺），维持晶体管对电流的有效控制，同时抑制短沟道效应。

国际半导体技术路线图（ITRS）委员会2005年明确指出硅基CMOS技术将在2020年左右达到其性能的绝对极限。在可能的下一代技术中，ITRS委员会基于其新材料和新器件工作组的系统研究和推荐，2009年明确向半导体行业推荐碳基电子学，作为可能在未来10~15年显现商业价值的下一代电子技术，并给出了详尽的路线图和碳纳米

管材料的挑战。

碳纳米管是特殊的一维结构，极大压抑了背散射，便于弹道输送且低功耗；其理想的无悬挂键结构使其具有优异的化学稳定性、超洁净的表面，产生高效的栅效率；极高的迁移率，超小的本征电容，使其可快速响应；超小的管径，极好的静电控制，使其无短道沟通效应，性能接近理论极限的亚 5 nm 平面晶体管。目前碳纳米管材料最大的挑战是掺杂挑战，即稳定的碳管掺杂极为困难，也不利于器件性能。

北京大学于 1999 年组建了碳基纳电子材料与器件研究团队，经过 20 余年的努力，在碳基电子器件相关材料和制备工艺的研究中取得系列突破，基本解决了 ITRS 给出的碳管材料挑战，发展了一整套碳管 CMOS 集成电路和光电器件的制备新技术，成为下一代信息处理技术强有力的竞争者。其核心为放弃掺杂，通过控制电极材料达到选择性地向晶体管注入电子或空穴，实现晶体管极性的控制，并首次制备出高性能对称碳管 CMOS 电路。2017 年，首次基于碳管实现了栅长为 5 纳米的 CMOS 器件，证明器件在本征性能和功耗综合指标上相对硅基器件具有 10 倍以上的综合优势，并接近由量子测不准原理决定的电子器件理论极限。相关成果 13 次被写入《国际半导体技术发展路线图》，为我国在此高技术领域抢占一席之地作出了重大贡献。

#### 主题六：化学与纳米材料

中国科学技术大学俞书宏院士作了主题报告，介绍了仿生材料的设计合成与未来。

人们从自然界获得灵感来设计实用材料和应用系统有着灿烂而悠久的历史。在自然界里，存在大量具有有趣形貌和结构的生物矿物，这些矿物通常是由高度组织的有机-无机材料的复合物。诸如珍珠、牡蛎壳、珊瑚、象牙、动物牙齿、细菌中的磁性晶体和人体骨骼，都是典型的生物组织制造出的生物矿物。运用受生物启发的合成路径来制备多尺度复杂结构功能材料一直是无机化学、纳米科学、材料科学和

生命科学等领域的交叉研究前沿的热点。

报告人介绍了其团队近年来在运用仿生理念合成一系列无机/有机纳米复合结构材料和宏观尺度组装体材料方面所取得的研究进展，包括仿生分子模板对无机微纳材料的晶化、生长及形貌与结构的调控作用，建立的人工仿生合成珍珠母、仿生聚合物木材、超弹性抗疲劳材料等系列多级结构材料的合成方法，阐释了其生长机理，发现了无机仿生材料跨尺度合成的新途径。这类跨尺度合成的仿生材料展现了广阔的应用前景，如用作密质骨修复材料、环保仿生板产品、可自然降解的高性能透明薄膜等。

报告还介绍了目前仿生材料在面向实际应用中面临的问题，包括可靠的合成制备技术、如何实现宏量制备及节约化生产。这需要对化学工程及加工工艺技术的探讨和改进以及多领域的协作来解决。

#### 四、分报告内容

为了深入和广泛展示主题部分的研究进展和存在问题，论坛在主报告后，安排了分报告。

##### （一）化学与纳米科技在碳达峰、碳中和中的机遇与挑战部分

清华大学张强教授介绍了碳中和背景下的锂键化学新进展。

我国提出力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和的目标。电化学能源是构筑太阳能-电能-氢能/动力/热能系统的新途径。发展基于金属锂负极的下一代锂电池技术是电化学领域的“圣杯”。深刻理解锂电池中的锂键相关化学对于构建安全高比能的新型锂电池体系十分关键。报告利用密度泛函理论计算和实验手段确定了锂键的几何构型、键级、巴德电荷、偶极迁移等特征，证明多硫化物和富电子给体之间的锂键相互作用实际上是一种偶极-偶极相互作用，而且锂键还可以描述多硫化物和硫载体之间的相互作用。锂键这一概念可以更好地理解锂离子和配位的溶剂分子/阴离子之间的相互作用并解释电解液离子电导和稳定性。锂键较高的键能使得溶

剂化壳层中的分子无法高效地与外部自由溶剂交换，导致离子电导率下降。锂键还能够通过形成离子-溶剂复合物降低溶剂分子 LUMO 能级的能量来促进电解液的分解，因此可以调控电解质溶液的稳定性和性能。锂键在金属锂的相关转化中也有类似的效果，锂沉积和剥离的过程与锂键的演化密切相关。在锂沉积过程中，电解液中的锂离子与溶剂逐渐脱离并在负极表面得到电子，然后与负极框架形成锂键。“锂键”这一有效的理论模型为未来实现锂硫电池正极材料的性能分析、评价测试、合理设计乃至高通量筛选提供了探索方向。

中国科学院化学研究所郭玉国研究员介绍了高比能纳米固态锂电池及其关键材料。

固态锂电池可以引入金属锂或含锂的负极，实现电池能量密度的提升，满足消费者对于高能量密度二次电池的需求，同时提供高的安全性。但是，锂电池固态化道路面临巨大的挑战，如何设计金属锂负极而不产生枝晶？如何解决金属锂负极的体积膨胀问题？如何处理固体电解质与正负极间的界面问题？如何开发与现有电池工业兼容的固态电池生产制造技术？如何开发兼具高能量密度、高功率密度、高安全并且长循环寿命的固态电池等诸多问题一直困扰着人们。这些问题背后的科学问题是什么？技术难点在哪里？具体的策略有哪些？围绕上述问题，报告人介绍了其团队承担的国家重点研发计划“高能量密度纳米固态金属锂电池研究”的最新研究进展，包括：纳米复合结构金属锂负极整体设计、原位纳米无定型 CEI 界面保护设计、多层复合结构固体电解质及其界面问题；兼具高质量能量密度 $>400\text{ Wh/kg}$ 和高体积能量密度 $>800\text{ Wh/L}$ 的固态金属锂电池电芯技术。

## （二）化学与纳米药物、纳米医学部分

中山大学陈永明教授介绍了纳米疫苗加工和递送材料关键技术。

蛋白、多肽、核酸等抗原具有安全性高的优点，但是它们的免疫原性低、难于进入免疫细胞，且易被降解，因而无法直接作为疫苗使

用。将递送材料和抗原形成纳米颗粒疫苗，则可通过引流淋巴快速递送到淋巴结。淋巴结是免疫反应中心区域，存在丰富的各类免疫细胞。抗原到达该区域可为此处丰富的 DC 细胞提供持续的抗原。因此，疫苗靶向输送淋巴结并在淋巴结滞留、可控激活免疫反应成为纳米疫苗的发展趋势。纳米颗粒疫苗还能够通过网格蛋白介导的内吞方式被 APC 内吞，可从溶酶体中逃逸到细胞质内，通过 MHC 交叉呈递使所携带的 MHC I 类多肽和 II 类多肽激活 CD4<sup>+</sup>细胞和 CD8<sup>+</sup>细胞免疫，产生体液免疫和细胞免疫。该报告展示了其团队发展的纳米疫苗两个技术平台：（1）闪快纳米复合技术平台（FNC），解决了纳米颗粒疫苗的高重现和规模化生产的技术转化瓶颈；（2）自主创新的递送材料平台，可用于脂质纳米粒（LNP），具有高效递送核酸抗原性能。应用 FNC 技术，采用 PRR 及细胞因子佐剂配伍重组亚单位抗原，研发的纳米疫苗可高效靶向淋巴结，打破免疫耐受，在动物体内产生显著细胞毒 T 淋巴细胞反应，并形成长期的免疫记忆。在肠道病毒感染导致手足口病、EBV 感染引起鼻咽癌及 HBV 引起慢性乙肝等动物模型上显示出非常显著的免疫功效。

苏州大学陈华兵教授介绍了自组装光治疗纳米药物研究。

报告人通过研发新型光敏剂载体，实现了高效的肿瘤光治疗。合成了多碘和聚乙二醇修饰的 BODIPY 光敏剂，并通过自组装制备成纳米胶束，调控其光转换行为。多碘化及自组装策略有效提高了 BODIPY 光敏剂的光热转换系数和单线态氧量子产率，降低了辐射跃迁，并增强了其肿瘤靶向性。特别是 4 个碘原子的修饰，能诱导 BODIPY 胶束对原位乳腺癌的光动力、光热协同治疗效应，并通过抗转移蛋白（如 Akt、Erk 蛋白）调控、M2 型肿瘤巨噬细胞极化及免疫原性细胞死亡效应等产生显著的抗肿瘤转移作用，对化疗和手术失败后的复发肿瘤也具有显著的抑制作用。自组装多碘化光敏剂胶束可有效增强光治疗对原发、转移及复发性肿瘤的治疗效果。

福州大学杨黄浩教授介绍了新型纳米闪烁体和 X 射线发光成像分析新方法。

X 射线发光在生物分析中具有高灵敏、无自荧光背景、活体穿透深等优势。近年来，纳米晶闪烁体的 X 射线发光特性在分析传感、生物成像和光动力治疗等生物医学领域得到广泛的关注。然而，纳米晶闪烁体的可控制备、表面功能化、发光机制研究仍然是 X 射线发光分析领域亟待解决的关键问题。为此，其团队利用钙钛矿纳米晶体作为一类新的闪烁体，通过离子调控实现了 X 射线彩色发光显示，揭示了纳米晶闪烁体与 X 射线发光效率的构效关系，研制了基于钙钛矿纳米晶闪烁体的 X 射线平板探测器并实现了新一代的高分辨 X 射线成像技术。所制备的高效氟化物纳米晶，通过不同稀土离子的掺杂实现了多色长余辉发光，结合密度泛函理论计算和电子顺磁共振谱以及热释发光曲线分析，阐明了 X 射线与稀土掺杂的氟化物基质晶格作用机制与长余辉光过程，发展了柔性 X 射线成像技术，并成功地开发了多功能的 X 射线发光光谱分析和高分辨 X 射线成像的仪器设备。

湖南大学张晓兵教授介绍了固态发光探针与原位成像。

原位成像检测细胞内生物分子（如各种蛋白酶）具有非常重要的生物医学意义。然而，已有的酶荧光探针大多是基于水溶性荧光染料，与酶作用后产生的荧光信号分子会快速扩散远离酶的反应位点，因此很难捕获细胞内相关酶的原位信息。其团队利用具有分子内质子转移性质的 HPQ 化合物开发了固态发光荧光成像探针，用于蛋白水解酶活性的检测及原位成像研究，开发了新型适用于商业激光共聚焦显微镜的固态发光荧光染料 HTPQ，并构建了酶荧光成像探针 HTPQA，实现了活细胞内碱性磷酸酶活性的原位成像检测。针对细胞膜表面原位成像的特殊要求，开发出强疏水性、弱脂溶性荧光染料 HYPQ，构建了刺激响应型探针，实现了细胞膜表面长时间成像，并利用肿瘤标志物 Cathepsin B 作为靶标，设计具有肿瘤长时间原位成像能力的近红外固

态发光探针 HYPQ-B, 用于长时间手术导航, 指导肿瘤精准手术切除。

东北师范大学周明教授介绍了便携式与可穿戴式全集成体液电子器件。

全集成生物电子器件能够在没有外部附件或设备的情况下实现完整的功能, 被认为是现代生物电子器件设计和构建的最理想和最终目标之一。与非全集成生物电子器件相比, 全集成生物电子器件展现出更加卓越的实用性。然而, 现阶段所报道的生物电子器件大都为非全集成式。报告介绍了其团队将全集成生物电子器件与体液相结合, 构建全集成便携式与可穿戴式全集成体液电子器件方面的探索。一方面, 利用全集成生物电子器件平台全集成性和“创伤性”体液(如血液、脑脊液)“金标样”性的特点, 探索和考察新的分析方法和器件设计用于便携式与“创伤性”检测的可行性; 另一方面, 利用全集成生物电子器件平台的便携性和可穿戴性, 探索“无创性”体液(如汗液)中物质与人体机能状况之间的关系, 探究利用“无创性”体液作为人体机能状况“金标样”的可能性, 有利于利用“无创性”体液实现人体机能状况的实时监测。这不但有利于便携式与可穿戴式全集成体液电子器件的设计、构建与开发, 更有利于关于“无创性”体液与人体机能状况之间关系的某些重要科学问题和科学原理的研究与探索。

### (三) 化学与纳米合成部分

中国科学技术大学吴长征教授介绍了无机表界面合成化学。

无机纳米材料在基础研究和应用研究都取得了突破性进展。近年来, 随着现代表征技术的发展, 人们逐渐深入理解纳米材料表界面结构及其与本征物理性质的关联规律。特别是原子或团簇尺度材料体系, 表界面状态对本征物性有至关重要的影响, 赋予了表界面在合成化学领域前所未有的重大机遇。在原子分子水平上调控无机表界面结构, 合成具有新奇本征物性的新化合物和新材料, 形成了无机表界面合成化学的内涵。报告人总结和展望了其课题组在无机表界面合成化学所



做的探索和思考。基于纳米尺度表面分子反应的化学合成，引入表面基团/分子修饰与吸附、表面缺陷等，产生表面电荷、能量转移以及注入电子/自旋、形成一系列的自旋新结构以及新奇磁电输运行为等，获得了系列新奇电输运行为和非常规超导等新物质新材料。同时通过表界面化学构筑电输运通道，发展氧电化学催化剂并基于开展燃料电池应用。报告还简要介绍了表界面合成化学思路致力于发展新化学合成工艺的相关进展。

**中国科学院化学研究所钟羽武教授**介绍了圆偏振发光有机微纳结构。

光子是一种重要的信息存储和处理的载体，除了发光强度，还可以通过其偏振信号进行记录，增加信息负载量和安全性。近年来，由于其在纳米光子学、手性纳米光电器件、光学传感器等领域的广泛应用前景，圆偏振发光（CPL）活性材料受到了研究人员的关注，成为光化学和光功能材料领域新的研究热点。目前研究难点包括实现高发光效率和不对称因子的 CPL 材料的制备、白光 CPL 有机微纳结构的制备等。其团队通过金属有机铂配合物的手性反转组装实现了手性反转 CPL 有机微纳结构的制备。CPL 发射光谱以及 SEM、TEM、AFM 等显微图片一致表明，该分子体系在不同组装条件下发生了手性反转，为手性功能分子的多态组装以及高效圆偏振发光纳米结构的制备提供重要的参考。此外，通过含吡啶的非手性有机分子与手性樟脑磺酸的原位反应实现全色发光及白光 CPL 活性微纳分子晶体的可控制备，发光不对称因子  $g_{lum}$  为  $10^{-2}$  数量级，荧光量子效率  $\Phi_{FL}$  高达 80%，为手性光电探测、光波导和有机微纳激光等手性纳米光子学应用奠定了重要分子及材料基础。

**天津大学巩金龙教授**介绍了新型烷烃脱氢催化剂与工艺。

丙烯是重要的烯烃类化工原料，具有极为广阔的市场需求。丙烷脱氢制丙烯工艺与传统的裂解等工艺相比，具有生产目标明确、工艺

成本低等优势，国内已建立 10 余套在产装置，日益受到市场的广泛关注。目前，以 Pt 基催化剂或金属氧化物催化剂为基础的商业化工艺仍然受到产量、成本、环境以及催化剂寿命等因素的限制。报告结合 Pt 基催化剂电子和几何结构的理论分析，阐明了 Pt 基催化剂金属间键合作用和配位关系的调控机制，明确了 Pt 基催化剂原子利用率和高温稳定性的提升策略，为进一步优化 Pt 基催化剂的丙烷直接脱氢性能提出指导方案。面向绿色低碳的化工连续生产需求，进一步提出基于化学链工艺的丙烷氧化脱氢制丙烯技术，明确了金属氧化物载氧体物种的优化策略，指出化学链工艺可以突破丙烷直接脱氢的热力学平衡限制，降低系统能耗，提升丙烯产率。化学链丙烷脱氢工艺具有催化剂廉价、节省系统能量和投资的优势，是一种可以替代丙烷直接脱氢工艺的技术手段。

#### （四）化学与纳米材料部分

华东理工大学朱为宏教授介绍了位阻型光致变色染料体系——光控超结构与新型防伪技术。

构造人工光控手性超分子体系一直是材料化学和超分子化学中最吸引人的话题。然而，由于缺少合适的组装砌块一直是一大挑战。该报告主要介绍了苯并二噻二唑位阻型烯桥染料体系，重点放在双稳态、构象异构体及手性异构体的分离等性能的突破，发展了系列不同空间位阻的光致变色染料。首次揭示了该系列光响应分子开环体和闭环体两种光可逆异构体不同模式的聚集诱导发光机制，完美实现了分子内旋转受限（RIR）和分子内振动受限（RIV）两种机制调控，并探讨了空间位阻对光响应性能和 AIE 性能的影响，为发展新型光响应 AIE 单元提供了全新的研究思路和设计准则。同时，该光响应 AIE 单元成功实现了在超分辨荧光成像领域的应用，拓宽了 AIE 材料的应用前景。另外，报告人介绍了该位阻型烯桥的超分子手性金属配位大环构筑、光控协同反应和手性专一性可逆调控，以及在液晶体系的光控超结构

调控、防伪技术中的应用。

**南开大学陈永胜教授**介绍了功能高分子和碳纳米材料在绿色能源器件中的应用研究。

绿色能源技术是未来社会和经济发展的**重要基础**。其中利用功能有机高分子材料的有机太阳能电池和利用碳纳米材料的储能器件方面的研究具有重要的科学意义和应用前景。报告人介绍了近年来这两方面的研究进展：**(1) A-D-A 寡聚物型功能材料的设计、合成及其在柔性有机太阳能电池方面的应用**；**(2) 基于二维石墨烯聚合单元，设计制备三维交联全碳高分子及其作为新型储能材料方面的研究**。在此基础上，对相关领域的未来发展和前景进行了展望。

**北京理工大学冯霄教授**介绍了多孔材料及其薄膜中的传质与分离。

分离过程的能耗约占据整个工业能耗的一半，开发具有高分离效率、低耗能的分离技术对节能减排和可持续发展至关重要。膜分离技术因其高效、易操作、低能耗等优点受到了人们广泛关注。传统聚合物分离膜受制于选择性和渗透性博弈效应的限制，而无机多孔分离膜则受限于质脆、加工成型难度大等挑战，亟需开发先进高效分离膜材料。以共价有机框架材料（COF）等为代表的新型多孔材料，具有高度发达、可精准调控的分子传输通道，为气体、液体分离提供了理想的材料平台。但是这些高度交联的多孔聚合物大多不溶不熔，极大制约了其在膜分离领域的实际应用。报告人团队基于 COF 等多孔材料及其薄膜材料展开了系列研究工作，提出“界面限域聚合”“刚柔并济”“热致相转变-热压法”等策略，克服多孔材料难以加工成型的挑战，成功突破博弈效应的限制，实现了具有高分离性能的气体筛分膜和液体筛分膜的制备，并且利用高度交联的刚性网络结构抑制自由体积的变化，大幅提升其稳定性和抗老化性能。此外，提出通过竞争逆共价连接的策略成功在高取向 COF 膜的直通孔道中构建官能团和亲疏水

梯度，实现超高通量、抗污染膜蒸馏海水淡化。

## 五、共识和建议

纳米科技是多学科交叉融合形成的前沿领域，其发展将深刻影响现代科学技术的发展，已成为世界高新技术战略竞争的前沿。纳米科技是未来新技术发展的重要源泉之一，是提升国家未来核心竞争力的重要手段之一，也是支撑形成新经济增长点的技术之一。由于纳米技术对经济社会的广泛渗透性，使拥有纳米技术知识产权和广泛应用这些技术的国家，未来将在国家经济和国防安全方面处于有利地位。目前，我国纳米科技的发展已经站在一个新的更高的起点上，正处于跨越发展的关键时期，建议从以下方面继续加强。

1. 继续加强基础研究。基础研究是整个科学体系的源头，是所有技术问题的总机关。在继续保持我国纳米领域基础研究成果的体量优势的同时，加大对重点成果领域的支持力度，形成我国纳米领域独特的技术优势，实现我国在本领域中从技术大国到技术强国的转变。建立合理的多学科交叉攻关、研究队伍遴选、分类评价、退出以及容错机制等，激活科研人员的工作热情。

2. 加快科技成果转化。转化研究是连接基础研究和实际产品之间的桥梁，同时也是最耗时费力的研究阶段。针对需要建立稳定队伍、长期研发才可以攻克的已知关键技术，建议对优势团队、领军科学家进行长期稳定支持。

（作者：张学梅，《中国科学》杂志社；赵宇亮，中国科学院院士，国家纳米科学中心研究员；万立骏，中国科学院院士，中国科学院化学研究所研究员）

联系方式：中国科学院学部工作局学术与文化处，010-59358366