

西安交通大学产学研科技成果

一、新型材料领域

项目名称：用于废水中酚及重金属离子脱除的高稳定性液膜技术

技术领域：新型材料

成果详情：化工行业废水中往往含有很多有毒、难处理污染物，如针对煤化工废水中的酚类物质，以及石油化工、电镀行业废水中的重金属物质。这些难处理污染物的分离、脱除问题一直是困扰化工行业废水处理难题。目前萃取技术是处理这类废水的主要技术，但萃取技术存在萃取剂用量大、损失大；萃取相需要进一步反萃才能得到产品，过程操作复杂能耗高。高效低成本的污染物技术研究仍是化工废水处理的亟待解决的关键问题。液膜技术是替代萃取、沉淀等污染物脱出技术的理想膜技术，具有传质速率高、选择性好、试剂用量少等特点，使之成为分离、纯化与浓缩溶质的有效手段。影响液膜过程产业化的最重要因素使其稳定性差。针对改善液膜的稳定性问题，交大化工学院与美国 Ohio 州立大学 Winston Ho 院士合作，开展了带有反萃相分散的液膜技术研究。在接收相中加入分散的液膜有机相，通过有机相的膜表面的吸附-剥离，支撑基膜的液膜层能够得到不断的补充，从而避免了液膜的流失，实现液膜的稳定操作。与传统的支撑液膜相比，其过程稳定性得到了极大提高，解决了制约液膜技术工业化的最大障碍，具有高稳定性、过程简单不需要乳化剂、易于工业化的特点。该技术已经成功在美国巴尔的摩受污染地下水脱除铬离子的应用中实现工业化。对于脱出煤化工废水酚类物质的研究表明：单级膜过程酚脱除、回收率何以达到 99.2%以上。

技术优越性：1) 可以高效低成本脱出水中重金属离子、酚等污染物。可以有效替代原有的萃取等技术。2) 操作简单、设备投资小。3) 过程具有高度稳定性。4) 萃取剂用量小，未发现萃取剂明显损失。

2

项目名称：气体膜分离技术

技术领域：新型材料

成果详情：气体膜分离技术在天然气沼气净化、工业过程有机气体回收、合成氨弛放气氢回收等方面具有广阔的应用前景。与传统的吸收、吸附、低温径流等技术相比，膜分离技术具有操作连续化、设备投资小、能耗低等优点。目前气体膜分离技术已经广泛应用于合成氨的尾气回收行业，而且运行结果表明其设备投资回收期小于 1 年。除合成氨工业外，气体膜分离技术在天然气、沼气净化；工业中有机气体（如聚合工业的烯烃回收、烷烃回收）等方面也具有广阔的应用前景。膜材料设计及合成、分离膜制备、膜组件制备、膜过程设计是影响膜分离过程的重要因素。西安交大化工学院在气体膜分离方面开展了长时间研究。开发了 3 种用于 CO₂ 分离的膜材料；开发出超薄复合膜的制备技术及膜组件的封装技术。针对两组分及 3 组分混合气体，建立了膜分离过程模型，可以准确预测膜分离过程的所需膜面积、关键组分回收率等工艺参数，同时还可以对膜分离过程的能耗进行较好的预测。在该研究领域，目前已经承担国家自然科学基金项目 2 项，

校基金项目 2 项，企业合作项目 1 项。基于以上成果，我们已经开展了针对空气中 CO₂ 分离的膜材料、膜制备以及膜过程研究。开发出水溶性高分子膜材料的合成制备工艺，或国家授权发明专利 1 项。所开发的多组分气体膜分离过程模型对于气体膜分离过程设计具有重要指导意义。

3

项目名称：用于溢油快速吸附的多孔层状 BN 纳米片的制备新技术

技术领域：新型材料

成果详情：快速去除海水中的溢油、有机物等污染物对于环境和水资源的保护非常重要。目前商用的除油吸附剂有活性炭、分子筛、天然纤维等，这些吸附剂均存在着吸附容量小、分离选择性差、难以回收等缺陷。BN 是由 N 和 B 两种原子组成的类似于石墨烯结构，作为吸附剂具有非常高的比表面积和亲油疏水性、对各种有机物均有广泛的吸附能力，另外还具有高的化学惰性和抗氧化性、易于回收使用等优点。BN 是由两种轻元素组成的，因此具有非常高的重量吸收容量，吸油的容量大、速度快，2 min 即可吸油超过自身重量的 20 多倍；它重量较轻，吸油后漂浮在水面，很容易分离；吸油后的 BN 很容易被乙醇、石油醚等溶剂洗脱，洗脱后的 BN 可以反复使用，吸收容量基本不损失。然而，目前商用的 BN 颗粒比表面积只有 80 m² g⁻¹，这就大大限制了其应用。我们课题组开发了一种层状多孔结构的 BN

纳米片，片层上有许多微孔和大孔，这样极大地提高了比表面积和吸附容量，比表面积可以达到 $1200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ，因此，是一种快速、高效的吸附剂用于溢油和其它有机污染物的处理。

4

项目名称：热熔酚醛树脂及其预浸料的制备工艺

技术领域：新型材料

成果详情：酚醛树脂具有原料易得，价格低廉，生产工艺和设备简单，优异的耐热性，机械性能，阻燃性和良好的粘附性，耐寒性，电绝缘性，独特的耐烧蚀性能等，已成为各个工业部门不可或缺的材料。目前酚醛树脂基复合材料制件大都是通过溶液浸渍法制备的。溶液浸渍法生产酚醛树脂预浸料，具有设备简单，通用性大等特点。但是溶剂的使用会增加生产成本，生产过程中产生的溶剂挥发，若直接排放在空气中会产生大气污染。因此需增加设备回收排放物，这势必会增加产品的成本。此外，溶剂的挥发会使成型的制品空隙率增大，会影响树脂基的均匀分布，产品批次稳定性差。因此，在制备复合材料的过程中，预浸胶带的性能好坏及其含胶量的精确控制直接影响复合材料内部结构均一性和稳定性，也是制备高性能的酚醛树脂基复合材料首先要解决的问题。相比溶液浸渍法（湿法），热熔膜法（干法）制备预浸带近年来备受关注。热熔膜法是将树脂融化，然后将树脂均匀地涂覆在离型纸上制成树脂胶膜。最后将碳布嵌入树脂膜中，经过压紧，

冷却即可获得预浸带。热熔胶膜法制备预浸带的优点在于：1) 热熔胶膜法采用无溶剂热熔加工，可减少对环境 and 操作人员的危害。2) 树脂胶膜的厚度是可控制的，因而预浸带中树脂含量可得到精确控制。3) 热熔膜法工艺制备的复合材料孔隙率可得到显著地降低（没使用任何溶剂，大大的降低了树脂中的挥发份含量有利于制成孔隙含量较低、高力学性能的复合材料）。4) 对树脂基体材料配制成的粘稠体或树脂胶膜可随时检查它们的凝胶时间、粘性等技术指标，从而可严格控制预浸料的质量。由此可见，因此采用热熔胶膜法制备预浸料不仅避免了环境的污染和人员的身体伤害，而且可以提高复合材料制品的质量，这无疑也是先进复合材料低成本、高性能化技术的一个重要发展方向。

技术优越性：针对热熔法树脂及其复合材料成型工艺中存在的挑战与机遇，本项目主要通过对酚醛树脂基体的改性，并综合运用实验、计算和模拟的手段，探讨树脂基体、酚醛树脂的固化物结构与其复合材料性质的相关性，基于影响复合材料耐烧蚀性能和力学性能的基本因素研究，获得了具有以下特点的热熔法酚醛树脂：1) 满足热熔工艺；2) 酚醛胶膜可以使用目前湿法酚醛树脂基复合材料的固化工艺；3) 热熔法酚醛树脂基复合材料具备优异的耐热性和阻燃性能；4) 热熔法酚醛树脂基复合材料力学性能得到显著提升。

项目名称：新型无机纳米传感器的工业化构筑技术

技术领域：新型材料

成果详情：目前构筑稳定的高灵敏度传感器以同时实现多种微量待测物的裸眼识别和分离在技术方面存在很大的挑战。本研究设计合成了一系列多功能化的无机纳米粒子包括纳米金，纳米银，纳米三氧化二铁等，并将表面功能化的纳米粒子与光学、磁学和电化学相结合，进一步以界面化学为手段成功将功能性纳米粒子器件化，实现了在复杂体系（工业及生活废水）内裸眼识别与分离微量芳香族化合物、氨基酸、重金属离子等目标分子的目的，为无机纳米传感器的工业化生产与应用提供了新方案。

市场及效益分析：基于申请者的部分研究成果，一个与美国 Agatrix Inc 公司合作开发的可与手机相连的便携式血液成分测试仪（iBGStar）已经问世，目前已经累计销售超过 600 多万台测试仪和 20 亿个微芯片传感器，实现了科学研究到工业成果的有效转化。

6

项目名称：新型骨组织工程材料的构筑技术

技术领域：新型材料

成果详情：骨缺损作为一种临床多发性疾病，可由外伤、炎症、癌症、骨坏死及骨质疏松等多种问题造成，每年涉及骨修复的外科治疗多达数百万人次。传统的骨修复方法（如自体骨移植、以金属、陶瓷或高

分子进行人工骨替代等)虽然恢复了受损骨组织的部分机能,但自体骨存在二次手术创伤和易吸收的缺点,而人工骨材料在力学性能匹配性、使用寿命、易感染和免疫排斥等方面存在缺陷。因此,如何完全修复大范围骨缺损,并使新生组织在结构与功能上都达到天然组织的状态,依然是困扰临床医学的重大问题。大范围骨缺损的修复仍未有效解决,其关键在于目前临床用各种生物医用骨修复材料无法根据缺损骨组织的需要分别为结构和性能迥异的不同局域部位同时构建出特定的仿生成骨微环境,导致其对临床上常见的涉及骨、软骨、以及骨-软骨界面等多种骨组织的大范围不规则骨缺损的修复能力较差。

项目创新性: 构筑含有多种微纳结构和生长因子载体的聚乳酸基支架构筑基元,并通过超分子自组装的方式搭建成形貌、结构与功能均可区域性自由调控的模块化三维支架,从而模拟不同骨组织复杂多样的生理微环境,实现大范围不规则骨缺损的修复。这种“部件”拼接的智能复合支架不仅为再生更加仿生的骨组织提供了可能性,其相关技术理念有望拓展到人体其他组织和器官的修复,使生物材料科学通过与生物学的融合更好地造福与人类。

7

项目名称: 生物医用免疫调节材料的构筑技术

技术领域: 新型材料

成果详情: 人体的免疫微环境与恶性肿瘤的生长与转移、缺损组织的

修复以及艾滋病、红斑狼疮、风湿性心脏病等多种免疫疾病的发病密切相关，因此持续调控免疫微环境被认为是治疗相关疾病的关键。相对于传统的全身给药型免疫调控，基于生物材料的免疫调节治疗具有准确定位、局部调控等优势，具有广阔应用前景，从而受到了越来越多的重视。但是，已有免疫调节生物材料存在作用时效短、治疗能力局限、调控效果需要依赖有副作用的免疫药物等缺陷，无法完全满足临床上对免疫治疗的需要。本项目开发了一种可以在生物体内自发组装成生物降解凝胶的纤维多孔微球材料，通过其对无副作用的生物活性大分子（细胞因子和功能性核酸序列）的长效分段控释以及其类似细胞外基质的多级微纳纤维网状结构，促进免疫细胞（T细胞）快速富集、转化和增殖，从而构筑了一个能够有效调控病变组织周围免疫微环境的微型细胞反应器。申请人已经围绕着材料结构与形状的宏观与微观调控，细胞因子和功能核酸的装载与智能序列控释，材料的多级物理结构与生物活性因子的协同作用对免疫细胞的粘附、生长、增殖和诱导分化的影响等多个关键问题进行了深入的探索，实现了牙周炎等骨免疫疾病的有效治疗。

项目创新性：1) 利用细胞因子的优先释放诱导周边相应的 T 细胞迁移到病损区域，随后通过功能性核酸的转染来诱导 T 细胞定向转化为功能性调节 T 细胞 (Treg)；2) 以微球基凝胶材料模拟细胞外基质结构，实现功能性免疫细胞的有效粘附、生长与扩增，最终实现疾病调节治疗和组织再生的目的。

市场及效益分析：此项研究可为新型免疫调节材料的设计合成提供新

的突破口，使生物材料科学通过与生物学的融合更好地造福与人类。

8

项目名称：一种绿色大规模制备单层石墨烯的方法

技术领域：新型材料

成果详情：石墨烯是由碳原子通过 sp^2 杂化构成的单层蜂窝状二维网络结构，具有超大比表面积、优异机械性能、高热导率、高电子迁移率、超导性及室温量子霍尔效应等。如石墨烯的强度是已测试材料中最高的，达 130 GPa ，是钢的 100 多倍；比表面积高达 $2600\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ ；其电子迁移率达 $1.5 \times 10^4\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，是目前已知的具有最高迁移率的铋化铟材料的 2 倍，超过商用硅片迁移率的 10 倍；石墨烯的热导率可达 $5 \times 10^3\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ ，是金刚石的 3 倍；透光性非常好，几乎是完全透明的，只吸收 2.3% 的光；石墨烯的电阻率是目前为止最低的，比铜或银的更低，电阻率只有 $10^{-6}\ \Omega\ \text{cm}$ 。这些优异的性能使得石墨烯在超级电容器、锂离子电池、晶体管、太阳能电池、传感器、场发射和催化剂载体等领域有着广阔的应用前景。作为目前已知的世上最薄、最坚硬、导电性最好而且拥有强大灵活性的纳米材料，石墨烯将成为制造灵活显示屏、可穿戴设备以及其它下一代电子设备的理想材料，未来在触摸屏、传感器、电池等领域的应用潜力巨大。短短几年时间，已经发现石墨烯在锂电池、超级电容器、LED 行业、生物制药行业、传感器行业以及航空等多个领域具有良好

的市场前景。目前，关于石墨烯的制备方法已有大量的报道，但是每种方法因自身限制不能成为制备石墨烯的理想方法。就市场而言，基本上以氧化石墨烯为主，即使还原石墨烯也以多层为主，而真正的单层石墨烯也主要靠进口。由此可见，单层还原石墨烯的技术难度最大，价值含量最高。本发明提供了一种快速绿色简单制备单层还原石墨烯的方法。

技术优越性：本方法首先通过改良的 Hummers 法将天然鳞片石墨氧化制得氧化石墨，然后，采用微波辅助加热法将氧化石墨层表面的含氧官能团还原，同时，产生的气体膨胀将石墨片层间距打开得到单层石墨烯。通过控制微波加热时间、功率、氧化石墨量等因素控制石墨烯的膨化程度、层数和含氧官能团量。相对于传统的高温热还原法，此方法不仅省时、能耗低、方法简单易实现，而且形成的石墨烯层数较少，因此该方法是一种大规模制备单层石墨烯的工业方法。该方法绿色、环保、零排放、零污染，可以一步实现氧化石墨的剥离与还原，不仅节省时间成本，而且避开使用有毒害的水合肼等还原剂，在剥离氧化石墨的过程中将剥离的基层还原，实现生产过程的节能和成本降低，具有广阔的市场。

市场及效益分析：就石墨烯市场而言，基本上以氧化石墨烯为主，即使还原石墨烯也以多层为主，而真正的单层石墨烯极少。由此可见，单层还原石墨烯的技术难度最大，价值含量最高，而本发明正是一种快速绿色简单制备单层还原石墨烯的方法，能耗低、无污染、环境友好。按照年产 100 公斤的中试规模，投资需要 500 万元，年利润可

达到 3000 万元以上。

技术成熟度：该项技术成果成熟，取得了发明专利，目前可直接进行产业化实施。

合作条件：要求合作方具备化工生产的背景，以及规模化生产的组织经验。厂房及办公面积需求约 500 平米、技术人员 3~5 名。

9

项目名称：安全高效的非病毒基因转染试剂

技术领域：新型材料

成果详情：基因治疗是指将治疗基因通过有效的基因载体导入靶细胞，促使细胞表达特异性蛋白质或者抑制特异性蛋白质的表达，从而治疗包括癌症、遗传性疾病、感染性疾病、心血管疾病和自身免疫性疾病等因基因异常或缺陷而导致的各种疾病。基因治疗过程中最关键的开发有效的基因载体将治疗基因高效地传递进入靶细胞。基因载体可分为两大类：病毒基因载体与非病毒基因载体。病毒基因载体转染效率高，但其潜在的致畸性、高免疫原性、低基因装载能力、高生产成本等限制了其在临床上大规模应用。非病毒基因载体具有高安全性、广泛的结构和性能调节性、高稳定性、易于大规模生产等优点，因而成为临床基因治疗最有前景的载体。然而现有的商业化非病毒基因转染试剂PEI、SuperFect、Lipofectamine、FuGene、Xfect 等高价高昂、转染效率较低、细胞毒性较大、血清耐受性差、制备工艺繁杂以及不

可降解。本项目组具有丰富的非病毒基因载体开发经验，目前已开发出基于多聚赖氨酸(PLL)、壳聚糖(CS)、低分子量聚乙烯亚胺(LMPEI)以及超支化聚(β-氨基酯)(HPAE)等多种高效基因转染试剂，已授权中国发明专利两项，PCT 国际专利一项并成功转让给伦敦上市生物医药公司 Amryt Phar PLC。我们的基因转染试剂在包括原代细胞、干细胞以及神经细胞在内的多种细胞系中显示出极高的基因转染效率，甚至超过 98%，并且未产生明显的细胞毒性。多种动物模型试验进一步表明，我们的基因转染试剂在体内能长时间而高效的调节功能蛋白质的表达，并且不诱导任何炎症反应，我们所开发的基因转染试剂在性能和安全性均优于市场上主流的商业化基因转染试剂包括PEI, SuperFect, Lipofectamine, FuGene, Xfect 等。我们的部分研究工作 2016 年 6 月 24 日被 Science杂志以亮点进行报道。

市场及效益分析：精准医疗正在成为未来发展的趋势，作为癌症、遗传性疾病、感染性疾病、心血管疾病和自身免疫性疾病等最有应用前景的治疗手段，基因疗法已进入快速成长期，《基因治疗行业市场前瞻与投资分析报告》指出，到 2020 年基因治疗相关市场将达到 3000 亿元，关键性的基因治疗技术近两年已取得里程碑式的突破，并在未来两三年内进入大规模临床应用阶段。此外，随着基因编辑技术 CRISPR、CAR-T 细胞免疫治疗等的进一步发展和完善，安全而高效的非病毒基因载体成为各大生物技术公司的首席战略必争之地，将直接决定基因疗法、CRISPR、CAR-T等技术在临床中的市场主导地位。与现有的商业化产品相比，我们所开发的非病毒基因载体材料具有转染

效率高、安全性高、生产工艺相对简单、血清耐受性强、可降解、能广泛适用各类组织细胞等特点，因而将在基因疗法、CRISPR、CAR-T等技术的大规模临床应用中发挥独特的优势，因而具有广阔的市场前景。根据产品开发的成本、工艺及市场上同类商业化产品的价格计算分析，我们所开发的非病毒基因转染试剂的投资回报率在 300%以上。

技术成熟度：该项目技术成果比较成熟，目前可直接进行商业化推广，或进一步开发升级产品。

合作条件：要求合作方具有开展动物细胞实验、活体动物实验、基因转染效率及安全性评价的技术平台及相关经验。

10

项目名称：用于溢油回收的高效亲油疏水应急材料开发

技术领域：新型材料

成果详情：技术创新性和领先性：溢油事故一旦发生，不仅会造成严重的环境污染和经济损失，而且溢油的这种不良影响可能会持续数十年之久，因此，寻求一种高效的可持续发展的溢油处理材料受到了人们的广泛关注。本项目旨在开发具有高亲油疏水性的功能材料，其独特的亲油疏水性可以使其从油水混合物中选择性的快速吸收油品而不吸收水，通过简单的脱附便能回收油品，因此该种功能材料可以有效的应对溢油事故，有助于我国环境保护工作的顺利进行。

项目创新点：本项目通过开发一系列用于溢油控制回收的超疏水亲油

功能材料，实现不同工况下，油水的高效分离。其创新点在于：1) 相对与传统的机械分离、燃烧等处理手段，疏水亲油材料能更快速有效的分离油水，可循环利用且无二次污染。2) 针对一些廉价的亲水材料进行疏水亲油改性，制备工艺简单，油水分离性能优良，为其大规模生产利用提供了可能。

市场及效益分析：溢油事故带来的危害是十分恶劣的，随着人们对环境保护意识的逐渐提高，对优良油水分离材料的需求持续增长，因此低成本高性能的油水分离材料的开发和生产可以有效的缓解这种需求。

11

项目名称：新型粉煤成型粘结剂与交联剂耦合技术的开发与利用

技术领域：新型材料

成果详情：技术创新性和领先性：在现代煤炭开采生产过程中，会伴随产生大量的粉状兰炭颗粒（直径小于 3mm），这些颗粒物作为煤料用于兰炭生产会引起了诸多不便，不仅影响生产效率，还易与低温干馏产品焦油形成胶状物，从而阻塞炉体，使反应炉的效率大为降低。此外，粉末兰炭作为一种非洁净原煤，也具有燃烧效率低，污染环境的实际应用问题。为解决上述关键科学问题，本项目通过粉煤成型技术（开发新型粘结剂将碳质前驱物粘结成型），以煤粉作为碳质前驱物，添加高温焦油、纤维素等粘结剂生产成型炭料的工艺，制备出具有一

定形状和尺寸，易于调变和加工的块煤材料。本项目的研究将为我国粉煤资源的高效清洁利用，提高其燃烧效率，减少环境污染提供科学依据和实验技术，具有重要的科学意义和应用价值。

项目创新点：本项目通过对小粒煤成型的黏结剂、交联剂进行耦合与优选，并通过优化工艺条件，制备出高性能的型煤，使其具有优异的低温和高温机械强度。同时，从微观上深入研究型煤硬度、弹性、塑性和表面物理化学性质等原煤自身性质，以及粒度、烘干温度和成型压力等工艺参数与不同黏结剂作用时型煤微观结构形态及变化规律，进而建立型煤微观结构与宏观性质之间的关联。

市场及效益分析：1) 粉煤成型是把低效原煤转化为高效能源，以取得明显的节煤效果的有效途径。通过特殊的成型工艺，使得煤炭的应用性能得到改善和优化。2) 粉煤成型是把非洁净能源原煤，转化为较洁净能源的可行途径。燃煤是大气污染的主要污染源之一，通过粉煤成型技术可以大大地减少了对环境的污染，达到国家的节能减排要求。3) 成型炼焦是世界型煤技术的重要发展：它利用弱粘结煤炼焦，扩大了炼焦煤来源，提高了焦炉产量和焦炭产量，降低了成本，因此得到了各国的普遍研究和应用。其中以在传统焦炉中配入 30%左右型煤炼焦技术，在世界各国已得到了广泛应用。

12

项目名称：基于天然产物及其衍生物的新型碳质吸附材料的制备及性

能研究

技术领域：新型材料

技术难题：原油从开采、炼化到最终以成品油的形式走向消费市场的过程中，需要经历多次储运装卸过程，这中间难免会造成油品的挥发损耗甚至是泄漏，造成能源浪费、油品质量下降、环境污染乃至安全隐患。根据资料显示，中国汽油每年收发作业过程中挥发损失总量达到 3.24×10^5 吨、直接损失人民币超过 10 亿元，这还不包括罐区储存的呼吸损耗。此外，挥发性油气等典型 VOCs（挥发性有机化合物）是雾霾形成的主要诱因之一。因此，挥发性油气的有效回收与利用已引起了人们的广泛的关注。目前，油气回收的工艺主要有 4 种吸附法、冷凝法、膜分离法及吸收法。其中吸附分离技术作为一种原理成熟并且最为经济高效的储运损耗控制手段，被广泛应用于油气回收，吸附储罐（甲烷、氢气储存）开发和油品的泄漏控制等领域。而该项技术的关键在于吸附剂材料的选择，其直接决定了控制与回收的最终效率。活性炭、吸附硅胶等作为典型的吸附材料，具有价格廉价、原料广、吸附效果好等优点，广泛的应用在农业、国防、交通、医药、环保等领域。尤其是近年来随着环境污染日益严重、及人们的环保意识逐渐增强，使得吸附材料的需求量越来越大。但是活性炭等吸附材料存在以下几个主要缺陷仍限制了其实际工业应用的效果：1）微孔（ $< 2 \text{ nm}$ ）含量高、可有效利用的比表面积小，造成轻烃油气组分（C2-C5）吸附率低；2）疏水性差（吸油气的同时也吸水）；3）循环使用机械寿命短（易粉化）；4）吸附温升大（易燃易爆）；5）脱附真空度高

(5 KPa), 高沸点的苯、甲苯等有机化合物脱附难。因此, 可替代新型吸附剂材料的研究、改进势在必行。而, 将活性炭应用于吸附 VOCs 气体的研发和应用时, 技术的难度主要在于以下三点: 1) 活性炭孔径结构和表面化学性质的调控, 孔径结构的变化对活性炭的比表面积、吸附性能以及吸附热的大小都有着明显影响。2) 成型活性炭机械强度的控制, 活性炭必须经高温活化, 而在高温条件下活性炭易粉化, 机械强度下降明显, 从而直接影响了活性炭的使用寿命以及吸附性能的下降。活性炭的失活, 活性炭在使用过程中一些毒性气体或者杂质占据着活性位点从而使活性炭的性能逐渐下降。如何保持活性炭的清洁性直接影响着活性炭的重复使用性。

成果详情: 针对以上难题, 本项目的研究工作主要分为小试生产、中试放大和性能测试三个单元过程, 每个单元相互支撑, 通过信息反馈, 获取最优的活性炭制备工艺。在小试研发阶段, 首先进行活性炭原料筛选工作, 接着分别利用不同活化技术制备新型活性炭, 着重探索了每种活化工艺中活化温度、活化时间、活性剂用量等因素对活性炭比表面积和孔结构的影响规律。并将小试探索的活性炭制备工艺进行中试放大生产, 实现了百公斤级新型活性炭的宏量制备。在中试生产过程中, 系统的调试了温度、活化时间等参数的对活性炭孔结构的影响。最后, 将中试生产的活性炭产品进行 VOCs 吸附性能测试, 将测定结果分别反馈到小试研究和中试生产研究中, 进一步完善活性炭吸附能力与结构的构效关系, 优化活性炭的制备工艺流程。最终, 本项目所开发的高介孔、强吸附性的疏水活性炭很好的解决了传统活性炭材料

吸附温升大、真空脱附难等问题，并在确保其活性比表面与吸附容量提高的同时，比表面积实现了梯度分布（600-1100 m²/g），活性炭样品丁烷吸附活性达到了 23.88g/100g，丁烷持附量低至 5.45 g/100g。其工作容量明显超过了卡尔冈生产的 WS480，达到了其工作容量的 1.39 倍。此外，本项目制备的活性炭还表现出很高的机械强度（球盘强度≥95%）和疏水性能（其疏水角超过了 130°）。

市场及效益分析：本项目制备的活性炭在保持高性能的同时，还保持了较低的生产成本。经过初步测算，本项目制备的新型疏水碳质工业生产成本远低于卡尔冈活性炭的销售价（超过 35000 元/吨），具有可观的经济价值。

13

项目名称：煤基高值产品的制备及性能研究

技术领域：新型材料

成果详情：中国是世界最大的煤炭生产国，“富煤，贫油，少气”是我国能源资源的基本特征，在未来很长一段时间内煤炭仍将占据能源生产和消费的主要位置，因而实施煤炭资源的清洁、高附加值利用具有重要的战略意义。基于上述研究背景，本项目利用我国丰富的煤炭资源，成功制备具有高附加值的煤基活性炭材料，所制备的活性炭材料具有高比表面积及丰富的内部交联网络，能够提高其活性位点数量和择形选择性，促进吸附、分离效率并保证良好的机械稳定性，将其作

为吸附剂和催化剂材料载体具有重要的应用价值和良好的应用前景。此外，煤的组成较为复杂，将其进行精制及纯化后，可进一步制备泡沫碳、碳纤维、石墨烯等具有高附加值的化工产品，极大地提高了煤炭的高附加利用价值。

市场及效益分析：丰富的煤炭资源使得其生产成本大幅降低，高附加值活性炭等产品的开发使其经济效益得到很好的保障，这种低入高出的生产路线可获得极佳的投资回报。所制备的煤基活性炭产品具有孔道结构丰富、比表面积高等优点，对工业废气及废水的吸附净化效果显著，且产品易回收再生。

技术成熟度：目前已实现煤基活性炭产品的百公斤级生产及评估工作。

14

项目名称：新型光催化体系的构建及其用于光解水制氢反应的研究

技术领域：新型材料

成果详情：随着传统化石能源的大量消耗，寻求可持续发展的新能源及其利用技术具有十分重要的意义。其中，太阳能分解水制氢是大规模生产清洁、可再生氢能的一条重要途径，光催化技术是实现这一途径的有力手段之一。近年来，半导体光催化材料受到了研究者们广泛地关注，但仍存在可见光吸收较弱、光生载流子复合效率高、量子效率低等诸多不足，限制了其规模化应用。本项目通过开发一系列高效的光催化剂，并耦合合适的光催化助剂，构建新型的光催化体系，使

其具有更好的可见光响应能力，并促进光生电子空穴对的有效迁移及分离，降低其复合效率，实现光解水活性的极大提升。且过程中催化剂可循环使用，对环境绿色友好，符合未来新型能源的发展理念，为彻底解决人类能源问题提供了重要途径。

市场及效益分析：所开发的光催化剂合成路线具有原料成本低廉、工艺操作简单、生命周期长等优点，其产品具有可见光响应能力强、循环稳定性好、复合效率低等优点，具备极佳的光解水制氢性能，能产生显著的经济效益。

技术成熟度：目前所制备的催化剂活性已达到国际领先水平，具备产业化生产能力。

15

项目名称：高介孔率、高比表面积活性碳材料的制备及其在 VOCs 上的应用

技术领域：新型材料

成果详情：随着传统化工行业的快速发展，工业废水及废气的排放量增加，这给环境及人类健康带来了很大的影响，其中挥发性有机物气体(VOCs)的影响尤为突出，VOCs 净化处理工作也日益得到人们的关注。在众多的 VOCs 处理技术中，活性炭吸附法因其具有吸附效率高、成本低廉、原料来源广、工艺成熟等优点，受到了广泛的关注。但在实际应用中，VOCs 成分种类复杂，排放浓度高，市场上的活性

碳难以满足应用要求，且普遍存在微孔含量高，选择性差，吸附容量小，真空脱附难，生命周期短等缺点。本项目通过采用简便、廉价的工艺路线对天然产物及其衍生物进行有效处理，提升其比表面积及介孔含量，开发出具有发达贯通孔道结构的活性炭吸附材料，并进一步通过负载功能材料，制备出具有特殊孔道性质的新型吸附材料，拓宽了其在 VOCs 处理领域的应用范围。

市场及效益分析：采用天然产物及其衍生物为原料，保证了原料成本的经济性。所开发的合成路线简单实用，产品性能突出，且生产成本远低于传统商用活性炭及卡尔冈活性炭的售价，具有广阔的市场应用价值。且对常见的 VOCs 气体表现出去除效率高、吸附热小、吸附容量大、易循环再生等诸多优点。

技术成熟度：已经实现工业生产及评估，并完成了 1.5 吨级的试点实验。

16

项目名称：煤基异丁烯的制备技术

技术领域：新型材料

成果详情：异丁烯是一种重要的基本有机化工原料，高纯度的异丁烯可用于制备丁基橡胶、聚异丁烯和甲基丙烯酸酯等多种精细化学品，全世界总需求量已超过 2000 万吨 / 年。目前，异丁烯的生产原料主要来源于石脑油蒸汽裂解制乙烯的副产 C4 馏分、炼厂催化裂化(FCC)

装置的副产 C4 馏分和 Halcon 法环氧丙烷合成中的副产叔丁醇 (TBA)。国内目前主要采用化学法中的醚化裂解技术生产异丁烯,即利用混合 C4 与甲醇醚化生成甲基叔丁基醚 (MTBE), MTBE 进而裂解生成异丁烯。与其他方法相比,该技术具有对设备无腐蚀,对环境无污染、操作条件缓和、产品纯度高、装置规模灵活性大、可以根据市场需求生产 MTBE 或异丁烯等特点。但 MTBE 裂解制备异丁烯过程也还存在需要进一步提高反应活性、优化分离过程,降低生产成本等问题。

项目创新点:利用煤基合成气可制得甲醇,甲醇进而脱水生成二甲醚,二甲醚继续脱水生成低碳烯烃,如乙烯、丙烯等。分离后的丙烯与合成气在铈催化剂的作用下,发生羰基合成反应,得到正丁醇及副产物异丁醛和异丁醇。主产物正丁醇作为工业上的燃料及丁酯增塑剂使用。副产物之一异丁醛经过羟醛缩合反应,生成新戊二醇,可用作工业上重要的溶剂及涂料。而另一副产物异丁醇除了做溶剂和燃料之外,在适当的催化剂作用下,可发生脱水反应,生成 C4 烃(主要是C4 烯烃)混合物。C4 烃混合物经过吸附,精馏等操作,可获得比较高纯度的高碳烯烃异丁烯。

市场及效益分析:开发以异丁醇为原料制备异丁烯的新工艺,可以通过煤化工基本工艺获得传统的石油化学品。这对于改变精细化工对于石油资源的依赖,有效利用碳资源具有重要意义。

项目名称：煤基高分子材料制备技术的研究

技术领域：新型材料

成果详情：以煤作为原料，利用煤炭独特的芳环缩合高分子特征，研发制取煤基高分子合成单体。开发与之相适应的 SCF 分离、选择催化技术，对其进行分离、加工，以制备耐高温高分子材料，导电功能高分子材料，抗静电高分子材料，太阳能电池电极材料、C60、离子交换树脂、吸附剂、煤基聚合物合金材料，碳纤维复合材料等。

市场及经济效益：1) 提取用于合成染料、医药、香料、农药、化工的重要原料，如萘、甲苯、酚、吡啶、噻吩等和煤基塑料、复合材料、功能材料等；2) 同时可以延伸煤炭加工利用的产业链，带动原煤产地的社会经济发展和劳动力就业，提高吨煤产出利润率。每年可以创收上亿的经济效益。

学术意义：1) 可极大地丰富煤焦油的分离、纯化和催化重整的技术内容和相关理论；2) “分子剪裁技术”将会促进煤的分子结构的精确确立和选择性催化技术的进步；3) 可以弥补化工合成原料对于石油资源不足的依赖。

项目名称：环保型剑麻纤维增强摩擦制动材料

技术领域：新型材料

成果详情：摩擦制动材料是一类极重要且极具实际应用意义的多组分复合材料，广泛应用于汽车、火车、建筑以及工程机械等诸多领域。传统的有机石棉摩擦材料因石棉纤维导热率低，摩擦热不易散出，因而导致热衰退和磨损加剧。同时，在生产和使用过程中，石棉粉尘具有污染环境及致癌作用，对人体健康和环境的影响很大，因而在许多工业发达的国家已经开始立法禁止使用，代之以无石棉摩擦制动材料。目前在汽车用摩擦制动材料研究领域，针对石棉纤维代用纤维的研究工作主要集中在非金属矿物纤维、金属纤维、人工合成有机纤维和碳纤维等。虽然些纤维各自都具有一些优异的性能，但是与传统的石棉纤维相比，应用于摩擦复合材料仍有以下缺点：1) 增强纤维与基体的相容性较差；2) 价格较石棉类摩擦材料高昂很多；3) 制成的摩擦材料性能不稳定，综合摩擦制动性能较之石棉摩擦材料还有一定差距。

剑麻纤维 (Sisal Fiber) 取自于剑麻作物 (龙舌兰属) 的叶片，化学组成以纤维素、木质素、半纤维素三大组分及少量提取物为主。在植物纤维中，剑麻纤维具有纤维长、质地坚韧、富于弹性、拉伸强度大、耐磨擦、耐酸碱、耐海水腐蚀以及耐低温等多种优良性能，且属于可再生资源，可自然降解，不会对环境构成污染，价格也比较低廉。

剑麻纤维增强树脂基复合材料，生产工艺简单，拉伸和弯曲性能优良，冲击强度高。采用剑麻纤维增强生产摩擦复合材料，具有以下几方面的特色：1) 生产和使用过程无毒无害，安全环保；2) 制动柔和平稳，摩擦震动小，制动噪音低；3) 摩擦系数稳定，对制动摩擦盘磨耗小

技术先进性：1) 国内首创采用剑麻纤维作为唯一增强纤维制备车辆摩擦制动材料。2) 独特的改性处理工艺，提高了剑麻纤维的热性能，增强了剑麻纤维的摩擦性能及机械性能。3) 独特的混料及成型设备/工艺，可确保高效稳定的制备出组份均匀、性能稳定的摩擦制动材料。4) 该摩擦制动材料对对偶磨损小，摩擦性能热恢复性能优越，摩擦震动噪声轻微，生产和使用过程无毒无害，无环境污染。

市场及效益分析：环保型无石棉摩擦制动材料属于高新技术产品，技术含量高，为国内首创，前国际上也尚未检索到相关的文献报道。其市场发展前景巨大。从发展角度来看，开发投资该产品风险小，技术竞争力显著，收益大。根据有关数据，以年产三百万套无石棉刹车片的规模估算，年产值可以达到 5000-8000 万元。该项目产品关联度大，不但可以应用于汽车刹车片的生产，还可以推广应用到机械、矿山、化工等诸多领域。应用前景广阔。随着各国对环境的日益关注和重视，使天然植物纤维的研究和应用愈来愈受到重视。该项目产品完全符合环保要求，具有显著的社会效益。

19

项目名称：豫铁电单晶材料高性能化研究

技术领域：新型材料

成果详情：弛豫铁电单晶 1997 年发现以来，被认为是压电陶瓷问世半个多世纪以来压电材料取得的革命性突破，大幅度提升了压电材料

的性能和医疗超声的成像分辨率。然而，随着人们对医疗超声系统精度需求的不断提升，如何进一步提高弛豫铁电单晶的压电和介电性能，成为这 20 多年来，国内外科学家广泛关注的重要科学问题。设计并生长了钐掺杂的铌镁酸铅-钛酸铅压电单晶，成功将“增强的局域结构无序性”、“准同型相界”和“工程畴结构”三种高压电效应的起因有机结合，大幅度提高了弛豫铁电单晶的压电和介电性能，压电系数最高达 4000 PC/N（皮库伦每牛顿）以上，介电常数达 12000 以上，较之非掺钐的同组分的铌镁酸铅-钛酸铅压电单晶的性能提高约一倍；同时，利用钐元素在晶体生长过程中的分凝特点，优化了单晶棒性能的均匀性（如图所示），为高频医疗超声探头和高精度与大位移压电驱动器奠定了新的压电单晶材料基础。基于第一性原理计算，研究团队还发现，钐掺杂的铌镁酸铅-钛酸铅晶体相变温度下降很可能是由于钐掺入而随之产生的铅空位所致。这一发现将为今后进一步优化弛豫铁电单晶的综合性能提供理论参考。

20

项目名称：空心碳纳米球负载TiN作为锂硫电池的多功能载体材料

技术领域：新型材料

成果详情：为满足琳琅满目的新型电子设备尤其是动力汽车、智能手机和无人飞机的需求，开发高能量密度和功率密度的二次电池迫在眉睫。锂硫电池具有比传统锂离子电池高五倍的能量密度，且兼具环境

友好和成本低廉等优点，被认为是最有可能代替商业锂离子电池的储能系统之一。然而，锂硫电池的实际应用受到以下因素的制约：1) 硫正极的放电中间产物多硫化锂 (LiPS_n) 易溶于醚类电解液中，在浓差作用下多硫化物会在电池正负极来回移动，引起“穿梭效应”，造成负极腐蚀、低库伦效率和容量快速衰减等问题；2) 活性物质硫、放电产物二硫化锂 (Li_2S_2) 和硫化锂 (Li_2S) 的电子导电性极差，反应动力学缓慢；3) 反应过程中硫的体积膨胀 (大约 80%) 易引起电池内部的极化，活性物质的脱落等问题。因此，开发高性能锂硫电池需要提高硫的利用率和加快氧化还原动力学。因此，科研工作者们开发了多种载体材料 (如：碳基材料、导电聚合物、金属有机框架材料和极性无机金属复合物等) 用于抑制多硫化物的穿梭以及提高电极材料的导电性。其中，以 TiO_2 为代表的金属氧化物可以作为化学捕获剂，通过极性-极性相互作用来吸附多硫化物，从而抑制穿梭效应。然而， TiO_2 的导电性较差，在锂硫电池的氧化还原过程中需要消耗额外的能量用于缓慢的电子转移过程，导致低的硫利用率和缓慢的氧化还原动力学。因此，具有高导电性的金属态化合物 (如 Ti_4O_7 , TiC , TiN) 引起研究者的广泛兴趣。其中， TiN 由于其高电导率 (4000–55000 S/cm) 和非均相催化作用而特别引人关注。但是， TiN 加速硫基物种氧化还原过程机制尚不明确。因此，系统的机理分析，构筑兼具化学吸附和物理阻隔的纳米复合结构，用以提高硫利用率和加快氧化还原动力学是非常重要的。研究人员设计了 CTiN 双壳纳米球作为 Li-S 电池的载体材料。

技术优越性：1) 足够的内部空间提高活性物质硫的负载量，并有效地适应循环过程中的体积变化。2) 多孔的TiN层作为导电的同时亲硫和亲锂载体用于加速电子的快速转移和多硫化物的氧化还原反应。3) CTiN纳米空心球同时具有物理吸附和化学吸附双重功能，并提供更大的活性比表面积以有效改善电化学反应动力学。因此CTiN-S复合材料展现出优异的电化学性能：在 3C 的电流密度下循环 300 次后可逆容量依然达到 453mAh/g。值得注意的是，在 4.2mg/cm² 的高硫负载下，CTiN-S电极的在 0.2C 的电流密度下循环 150 圈的可逆容量依然高达 820mAh/g。更重要的是，作者结合XPS，电化学分析技术和理论计算，对TiN催化多硫化物的反应机理进行了详细的研究。DFT计算表明：TiN可以有效促进长链Li₂S₈ 中的S-S键进行断裂。电化学分析技术表明：在充放电过程中，TiN可以分别有效地催化多硫化物的还原和Li₂S的氧化。该工作为多功能锂硫电池载体材料的开发提供了重要的理论支撑和设计策略。

21

项目名称：采用轧膜工艺制备出高质量的钛酸钡基薄层化陶瓷

技术领域：新型材料

成果详情：作为电能存储方式的一种，陶瓷基介电储能电容器是诸多脉冲功率电子系统，包括电动汽车、配电装置、脉冲功率武器等领域的核心模块。目前，相关军事、民用领域对介电储能电容器提出了小

型化、集成化及低功耗的需求，而开发具有更高储能特性的电介质材料则成为满足当前需求的关键。理想的储能电容器介质材料需要具有高饱和极化、低剩余极化以及高击穿电场。弛豫铁电体因其特有的低滞回、高耐压、耐疲劳等优势，被认为是一种极具潜力的介电储能电容器电介质材料。然而，综合性能优异的材料体系成为制约储能电容器进一步发展和应用的主要问题。科研人员在陶瓷组分设计中提出了“极化失配”理论，即在A位耦合铁电体与B位耦合铁电体的固溶体中，存在A位和B位极化均无法建立的中间组分。该课题组采用轧膜工艺制备了高质量的BT-BMT薄层化陶瓷，其最佳储能密度和效率分别可达 $4.49\text{J}/\text{cm}^3$ （焦耳每立方厘米）和93%，材料性能在 $30\sim 170^\circ\text{C}$ 范围内表现出良好的稳定性，储能密度和效率变化率在5%以内，与目前报道的储能介质瓷料相比具有显著优势，展现出重要的工程应用价值。该课题组制备了BT-BMT大尺寸高压电容器，在50kV（千伏）电压下放电电流可达2.2kA（千安）。

22

项目名称：黑磷烯

技术领域：新型材料

成果详情：黑磷烯（英文名：phosphorene）是一种正在迅速发展的二维材料。黑磷烯在2014年通过机械剥离法首次制备出来后，在材料领域引发了研究热潮。与经典的二维材料石墨烯和过渡金属硫化物相

比，黑磷烯由于其褶皱结构具有更大的比表面积，在传感器应用领域展现出独特的优势。课题组针对黑磷烯在传感器领域的应用，在纳米科学领域权威刊物 Nano Today（影响因子 17.476）在线发表题为“Recent advances in phosphorene as a sensing terial”的综述文章。文章对黑磷烯在传感器领域应用的研究现状进行了系统地总结，包括气体传感、湿度传感、光传感、生物传感以及离子传感五个应用方向，对黑磷烯在传感器领域应用所面临的挑战和潜在解决方案进行了深入分析，并对黑磷烯传感器应用的发展趋势和前景进行了展望。

23

项目名称：新型石墨烯夹层材料

技术领域：新型材料

成果详情：21 世纪以来，能源与环境问题日益凸显，发展绿色、高效的新能源存储技术迫在眉睫。锂硫电池作为一种高比能二次电池，具有价格低廉、储备丰富、环境友好等特点，被誉为锂离子电池之后下一代动力电池体系的发展方向。锂硫电池中多硫化锂的“穿梭效应”是造成电池性能衰退的主要原因，阻碍其进一步实际应用。课题组设计开发了一种具有二维结构 $g-C_3N_4$ /石墨烯保护层的正极材料，获得了长循环寿命的锂硫电池。该工作创造性地设计了一种二维插层结构的 $g-C_3N_4$ /石墨烯夹层，如同在电池正负极之间构建了多层“防鲨网”，

不仅能通过物理和化学双重作用阻挡多硫化物在正负极之间穿梭，还能加快Li⁺的扩散，从而大大提升电池的循环寿命。该论文对提升锂离子电池电化学性能及进一步实现产业化具有理论指导意义。

24

项目名称：体心立方金属

技术领域：新型材料

成果详情：体心立方金属具有高熔点、高强度、抗辐照等优点，被广泛应用于工业界。然而，体心立方金属对微量的碳、氮、氧元素极为敏感，在制备或服役过程中一旦引入少量的碳、氮、氧就会造成显著的硬化和脆化，但其微观机理一直是个谜。以金属铌为例，它作为一种典型难熔金属，具有熔点高、热强性好、密度低（相较于其他难熔金属）、加工性能好等优点，在高温环境下具有广泛的应用前景，被广泛用作航天运载装备的火焰喷嘴等关键受热部件。然而，高温条件下剧烈的吸氧会导致铌发生硬化、脆化和氧化，给铌合金的应用带来了巨大的挑战。研究人员将宏观力学行为研究方法同微纳米尺度原位力学性能分析和原子尺度模拟有效地结合起来，系统地研究了溶质原子氧对铌力学变形行为的影响，阐明了溶质原子氧对金属铌中点缺陷团聚、螺位错运动及永久损伤形核过程的影响，揭示了溶质原子氧造成金属铌硬化和脆化的微观机制，构建了金属铌氧脆的清晰物理图像。研究人员新发现的氧脆微观机理对阐明其它体心立方难熔金属在变

形和辐照中的硬化和脆化行为具有重要的参考价值。

25

项目名称：碳点材料在能量存储与转化方面的应用潜质

技术领域：新型材料

成果详情：碳点材料是一类具有冷发光特征的准零维纳米碳颗粒的统称，是碳纳米材料家族冉冉升起的新星，近年来在国内外受到广泛关注。尽管一些传统的发光材料，如有机染料、半导体量子点和稀土荧光纳米材料已被相继开发，并应用于实际生产生活中（比如节能灯、显示器、发光涂料等），但都在一定程度上存在一些缺陷，如毒性较大、光稳定性不好、价格昂贵等。相比之下，碳点材料的原料来源广泛、价格低廉，保持了碳材料毒性小的优点，而且还具有光稳定性好、无光闪烁、双光子吸收面积大、能带结构可调等优势。利用碳点这些特点和优势，通过尺寸与结晶度调节、表面修饰和异原子掺杂的结构调控策略来设计和制备碳点材料，论述了其在发光二极管、光催化、光电催化、太阳能电池领域的应用。此外，利用碳点丰富的表面缺陷位和灵活的结构可调变性，也评述了碳点在电催化、二次电池和超级电容器方面的应用，为今后碳点材料在能量存储与转化领域的研究工作提供指导。该研究成果近日以《面向能量存储与转化的碳点材料设计及制备》为题，在《化学学会评论》杂志在线发表，并被作为封底文章亮点推荐。

项目名称：铂-非贵金属合金纳米线的新型水相合成策略

技术领域：新型材料

成果详情：超细铂-非贵金属合金纳米线具有尺寸小、比表面积大、导电性好及具有双金属效应等特点，是一类理想的催化剂。截至目前，绝大部分报道的超细铂-非贵金属合金纳米线是在油相体系中制备的，存在合成成本高、非环境友好及强表面封端剂难以有效去除等不足。相比之下，水相合成方法能很好地弥补油相合成方法的这些不足。然而，由于铂盐与非贵金属盐存在较大的氧化还原电位差，难以在水溶液中实现两者的有效共还原。因此，发展形貌、组成和尺寸可控的铂-非贵金属合金纳米材料的水相合成方法依然是研究难点，对于高效铂基催化剂的研发具有重要意义。课题组将化学镀原理引入到贵金属纳米材料的水相合成体系，通过亚硫酸盐的引入有效弥补了金属盐还原电位之间的巨大差异，从而实现了铂盐与非贵金属盐的共还原，成功制备了一系列超细铂-非贵金属合金纳米线（直径约 2.6 nm）。亚硫酸盐的引入还导致了表面硫修饰，在超细纳米线的表面构筑了大量原子级别的Pt/M-S(OH)界面，从而在碱性条件下具有优异的析氢(HER)活性。在 1 M KOH电解液中，含 3 μg Pt的纳米线在 70 mV的过电位下便可得到 75.3 mA cm^{-2} 的活性，为商业铂碳催化剂的 5.1 倍，优于先前报道的催化剂。该类材料有望应用于电解水制氢及氯碱工业，

显著降低这些应用的电能损耗。

27

项目名称：高效率钙钛矿发光二极管普适性新结构

技术领域：新型材料

成果详情：近年来，钙钛矿材料由于其易合成、低成本、高吸收系数、载流子扩散距离长等优势，在光伏领域掀起研究热潮，成为炙手可热的“明星材料”。此外，钙钛矿材料还具有高色纯度、高荧光量子产率以及易于实现全光谱发光等特点，使其同时展现出在电致发光、显示领域的应用优势。目前为止，所有的钙钛矿LED都是沿用了传统的有机电致发光（OLED）和聚合物电致发光（PLED）的器件结构。由于有机发光分子荧光寿命较短，一般在OLED与PLED器件中发光层与空穴、电子传输层间的荧光淬灭可以忽略。然而，一般而言钙钛矿材料的荧光寿命要远远大于传统的有机电致发光小分子和聚合物材料，因而在沿用OLED与PLED的器件结构中，在钙钛矿材料与电子、空穴传输层之间会发生严重的荧光淬灭。更由于钙钛矿材料本身特有的成膜结晶特性，与有机分子薄膜不同，钙钛矿薄膜存在表面粗糙度大，易于出现孔洞等问题，这些问题将引起钙钛矿电致发光器件漏电流升高，热效应明显，导致器件效率降低和器件寿命缩短。因而，寻找一种适合钙钛矿材料的荧光和结晶动力学特性发光特性的发光二极管结构意义重大。团队提出了一种钙钛矿半导体普适的器件结构：“绝缘层—钙

钛矿—绝缘层” (IPI), 即将钙钛矿发光层置于一对超薄LiF绝缘层之间。IPI结构的原理是基于量子力学领域的量子隧道效应。实验表明, 相比于传统电致发光器件结构, IPI结构大大抑制了漏电流, 提高了空穴注入, 增强了辐射复合, 增加了器件效率, 延长了器件寿命。和基于传统器件结构的钙钛矿发光器件相比, 基于IPI结构钙钛矿发光器件的电流效率从 0.64cd/A增加到 20.3cd/A, 外量子效率从 0.174%增加到 5.53%, 器件效率上升了 30 倍。此外, 相比于传统结构器件, 基于全无机钙钛矿的IPI结构器件, 钙钛矿薄膜在经过反溶剂熏蒸后持续点亮时间长达 96 小时, 是传统结构器件寿命的 24 倍。以上结果表明, IPI结构不仅有利于器件效率的提升, 而且有利于器件寿命的延长。论文中表明, IPI结构适合MAPbBr₃、FAPbBr₃, CsPbBr₃ 以及 CsSnBr₃ 等, 有望成为未来钙钛矿发光二极管的通用普适性器件结构。

28

项目名称: 高温有机薄膜电容介质材料

技术领域: 新型材料

成果详情: 有机薄膜电容因其超快的充放电速度、极高的功率密度、高工作电压、低损耗等特点, 成为重要的功率型储能器件, 在智能配网储能、直流输电、新能源汽车交直流变换等领域发挥了重要的作用。随着功率型电力电子设备运行负荷的不断增加以及小型化集成化的发展趋势, 薄膜电容的运行温度将不断升高。开发高储能密度、高储

能效率、高运行温度的有机薄膜电容对于进一步提高电网的稳定性和可靠性具有重要意义。围绕上述需求，国内外学者开展了大量的研究，尽管在性能方面取得了重要突破，不过受制于成本、加工性和稳定可靠性等因素，开发的高性能薄膜电容材料往往难以实现工业化应用。课题组从最常见的易加工、低成本的电介质材料环氧树脂出发，通过研究环氧树脂分子结构特征、宏观电场下极化机制及高温储能性能三者的影响作用机制，创新设计了非对称聚醚胺-脂环胺分子链结构，并基于目前工业应用最广泛的双酚A型环氧树脂合成了耐高温柔性环氧薄膜。该薄膜不仅成本低廉、耐热性能和机械性能优异，同时具备优异的储能性能。环氧薄膜在工作场强 550 MV/m、储能效率 90%下的储能密度达到了 9.12 J/cm³，是目前已知纯聚合物薄膜在相同电场和储能效率下的储能密度最大值。经过充放电循环测试，证明该材料不仅能够在 120℃下长期稳定运行，还具备优异的击穿自愈性能，确保其在工业应用中的稳定性和可靠性。

29

项目名称：钠离子电池正极材料

技术领域：新型材料

成果详情：钠离子电池由于原料丰富和成本低廉在大型储能领域的应用方面极具竞争力。其中，聚阴离子钠离子正极材料氟磷酸钒钠因其具有高工作电位平台、高热稳定性和较大的理论放电比容量，成为世

界各国科研工作者研究的热点。然而，在氟磷酸钒钠材料的结构研究方面一直存在争议。利用原位和非原位XRD及电化学测试等手段，研究了固相合成法和电化学离子交换法中原材料的化学反应机理。结果显示氟磷酸钒钠仅存在两种可合成的结构，分别是四方相 $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$ 和torite-type单斜相 NaVP_2O_7 。该项工作排除了目前科研界对于该材料结构认识上的争议，澄清了诸多科研工作者在该材料上的认识误区，为该材料将来的应用奠定了理论基础。

30

项目名称：贵金属纳米结构设计合成

技术领域：新型材料

成果详情：在贵金属纳米材料的表面可控构筑亚尺度的结构特征有望为材料带来崭新的特性，已经成为贵金属纳米结构设计的新思路。例如，在金银纳米晶的表面制备高密度的岛状结构，可通过耦合效应产生特殊的表面等离子体共振性质，在表面增强拉曼散射（SERS）、生物传感、成像和光催化等领域具有重要的应用价值。然而在单一金属或具有相同晶格常数的金银体系中，晶体生长遵循层状生长模式，不利于亚尺度结构特征的形成。课题组及其合作者通过纳米晶体表面工程，成功克服了这一挑战。他们发现，当金纳米晶表面吸附聚合物并具有较快的生长速率时，其生长模式可从层状生长转变为岛状生长（Island Growth in the Seed-Mediated Overgrowth of

Monometallic Colloidal Nanostructures, Chem, 2017, 3, 678)。为进一步提高纳米岛的形成密度，优化其表面等离子体共振性质，研究人员开发了新型的表面工程策略。他们首先在金纳米晶的表面修饰少量银，然后引入卤素离子吸附于银位点上，从而成功诱导了金纳米晶表面的局域钝化。该途径可有效改变纳米金的生长模式，在其表面形成高密度的金银合金纳米岛状结构。由于其特殊的结构特征，该材料在表面增强拉曼散射中表现出优异的活性，其单颗粒的增强因子可以达到 5×10^6 ，有望应用于高灵敏度的分子检测。

31

项目名称：工程材料

技术领域：新型材料

成果详情：细菌感染是组织工程研究领域最为常见也是最难根除的问题之一。近年来，水凝胶基生物材料在组织再生领域发挥了重要作用，但是水凝胶在植入过程中很容易受到微生物的侵袭导致体内的感染和炎症反应，并在日常使用过程中极易磨损，从而极大地阻碍了其作用的发挥。经过悉心钻研和反复试验，开发了一种仅能由感染部位细菌触发抗菌过程并且能够快速自修复的凝胶，该凝胶能够按照生理需要选择性杀灭多种入侵细菌，对正常组织无毒副作用，能够自发的实现快速修复，且材料成本低安全易得，操作简单，反应条件温和，制备方法适用范围广，几乎适用于所有实验室，能极大地促进抗菌凝胶

的研发。

32

项目名称：纳米铝孪晶变形

技术领域：新型材料

成果详情：纳米孪晶作为一种特殊的微观组织可为金属材料带来诸如高强度、高电导、高稳定性等优异的性能，近年来一直是行业内的研究热点。但迄今为止，相关研究大多局限于具有中、低层错能的金属材料（如铜和银），在具有高层错能的金属（如铝）中则很难形成纳米孪晶组织。尤其是对于工业上广泛使用的铝及铝合金，如果能形成纳米孪晶组织，则有望大幅度提高其强度，从而拓宽其应用范围。有研究人员通过将铝（Al）与低层错能金属银（Ag）复合，制备出Ag/Al纳米多层膜，通过层间共格界面的模板效应，使银层中形成的纳米孪晶越过界面直接生长到铝层中，因此获得了纳米孪晶铝。这种制备方法工艺复杂、条件严苛，同时需要利用低层错能金属作为孪晶源以诱发孪晶生长，其实际应用受到限制。如何能在更加简单的条件下制备纳米孪晶铝目前仍是国际性难题，相关研究具有重要的理论意义与实用价值。采用磁控溅射方法制备了纳米结构的铝/非晶氮化铝（Al/AlN）多层膜，并在铝层中观察到了明显的纳米孪晶和9R相。9R相是一种扩展的非共格孪晶界，具有周期性排列的层错结构。由于在铝中9R相比纳米孪晶更不稳定，其制备难度亦高于纳米孪晶，目前关于铝中9R相

的形成机理和强化效果尚不清楚。在 $\sim 10\text{nm}$ 到 $\sim 200\text{nm}$ 范围内调控Al/AlN纳米多层膜的单层厚度 h ，发现纳米孪晶和 θ 相的形成随 h 变化均表现出明显的尺寸效应：当单层厚度 $h \leq 20\text{nm}$ 时，超过70%的 θ 相贯穿整个Al层厚度；而当 $h > 20\text{nm}$ 时，超过80%的 θ 相从Al/AlN相界面形成后终止于晶粒内，并没有形成贯穿Al层厚度的结构；另一方面，纳米孪晶的含量整体上随单层厚度 h 的增大而增加，但是在 $h \leq 20\text{nm}$ 时纳米孪晶含量较低($< 5\%$)，而当 $h > 20\text{nm}$ 时纳米孪晶含量大幅提高($> 10\%$)。硬度测试结果表明，随 h 降低其硬度逐渐升高(上图c中Regime I)，当 h 达到 $\sim 20\text{nm}$ 以下时硬度出现峰值平台($\sim 3.8\text{ GPa}$ ，上图c中Regime II)，这一峰值硬度约为已报道的纳米铝最高硬度的4倍。传统上用于解释单层厚度为十几个纳米以下金属多层膜硬度峰值平台的理论是界面强度模型(Inteace Barrier Strength, IBS)，但是该模型的预测结果与Al/AlN多层膜Regime II的实测硬度相比低了1GPa以上，这一差别来源于Regime II小层厚范围内 θ 相主要为贯穿Al层厚度的结构，对位错的运动具有强烈的阻碍作用，而在通用的IBS模型中并未考虑这一因素的影响。从硬度性能数据上可以反映出，纳米铝中的 θ 相强化效果非常明显，未来有望成为铝及其合金强化的一种重要手段。结合XPS纵深方向逐层剥离表征技术，提出了基于异质界面物理和界面化学的Al层纳米孪晶和 θ 相形成机理，即AlN非晶层中未成键N原子向Al层中扩散，形成了N原子从界面到层中心的梯度分布，在降低界面处局部层错能的同时，由于梯度作用从界面处诱发了纳米孪晶和 θ 相。由于N原子分布梯度与Al层层厚密切相关，因此

形成了纳米孪晶和 9R相的层厚尺度效应。异质界面及其界面物理/化学将在纳米叠层材料相变以及微观组织演变方面产生重要影响。

33

项目名称：石墨烯量子点白光材料

技术领域：新型材料

成果详情：石墨烯量子点是一种准零维纳米材料，具有独特的物理、化学性质。与传统发光材料相比，石墨烯量子点具有带隙宽度及发光特性连续可调；结构稳定，耐强酸、强碱腐蚀；不含有毒性金属元素，绿色环保等突出优势。近年来，石墨烯量子点材料在发光器件、光电传感器、荧光分析等研究领域得到广泛关注。然而，现有基于石墨烯量子点的发光材料，仍存在光转换效率较低（ $<20\%$ ），发光色彩偏离正白光，热稳定性差等缺点，限制了其实际使用。课题组开发了一种密胺树脂/石墨烯量子点复合微球新型白光发光材料，通过密胺树脂阳离子聚合物与石墨烯量子点的可控聚集，实现石墨烯量子点发光性能的有效调控，制备具有高发光效率、可调发光颜色和良好光、热稳定性的高效固态白光发光材料。制备所得系列白光微球具有均一的粒径($2.0 \pm 0.08 \mu\text{m}$)，其发光CIE色坐标可在(0.28, 0.28)至(0.33, 0.32)范围内连续调控，量子产率 83%-43%，被成功用于白光LED器件的构建。

34

项目名称：新型生物医用植入材料

技术领域：新型材料

成果详情：生物医用植入材料在人体组织替代、修复、再生、功能重建及治疗疾病方面发挥着越来越重要的作用。然而传统的生物医用植入材料包括硅橡胶、钛合金、不锈钢及PEEK等粘弹性弱、不降解、不吸收、功能单一、生物活性差，难以用于理想的组织修复、组织再生、疾病诊疗。开发新型具有内在多功能特性的仿生弹性生物活性植入材料具有重要的研究意义和应用价值。基于生物活性分子柠檬酸设计制备了一种超长硫化铜纳米线增强的聚硅柠檬酸酯杂化医用材料，实现了其弹性/抗菌/抗癌/导电/抗炎等多功能特性。该研究中，超长硫化铜纳米线通过超分子作用如氢键和疏水作用实现与聚硅柠檬酸酯的有效杂化和组装，杂化材料中，硫化铜纳米线有效增强聚硅柠檬酸酯的弹性力学性质、抗菌、光热抗肿瘤及导电能力，聚硅柠檬酸酯赋予植入材料粘弹性、光致发光、抗炎生物活性等功能。该研究为研发具有内在抗感染、抗肿瘤、促组织修复、实时监测等诊断—治疗—组织再生一体化的新型可降解生物材料提供了一种有效的思路和策略。

35

项目名称：柔性磁性薄膜弯曲特性研究

技术领域：新型材料

成果详情：近年来，柔性磁性材料，尤其是高度外延的氧化物磁性薄膜，因其优秀的磁学性质以及在柔性自旋电子器件中的潜在应用得到广泛关注。为了满足新一代柔性集成器件的不同设计需求，研究人员对磁性薄膜的结构与性能也提出了更高的要求。比如可调器件的设计往往需要材料的物性对弯曲形变能有较高的灵敏度，而稳定器件的设计则需要稳定的模块集成，即薄膜的磁性对弯曲不敏感。因此，了解柔性磁性薄膜弯曲的特性及其内在机制成为材料选择与设计中的必不可少的一环。工作室通过将实验与仿真结合的手段，探索了柔性外延铁酸锂纳米结构的微波磁性对弯曲的灵敏度与材料结构的关系。研究表明，弯曲形变导致的晶体取向在空间内的分布变化是引起铁酸锂纳米结构微波磁性随弯曲变化的主导因素。对于在微波铁磁共振测试中体现出强各向异性的铁酸锂(001)晶向外延薄膜而言，弯曲能够极大的调控它的共振场，展现出其在微波可调器件中的应用潜力。另一方面，外延在云母衬底上的铁酸锂纳米阵列则在弯曲过程中体现出良好的稳定性与较高的信噪比，有望进一步应用于稳定模块的集成设计。该项研究对于未来柔性器件设计中，材料的选择与结构设计环节提供了的指导作用。

36

项目名称：曲面褶皱微纳摩擦

技术领域：新型材料

成果详情：表面图案化往往赋予材料独特的力学、物理及化学性能，因此成为了微纳材料/器件制备的一种重要手段。对于平面型硬膜/软基体系，通过对称失稳而自发形成的表面褶皱已成为了高效、便捷的表面图案化方法之一，可实现对其功能性的宽域调控，并逐步得到了广泛的应用。相比之下，如何人为地控制曲面型膜(壳)/基(核)体系的表面褶皱目前仍然是国际上该领域的难题。由于曲面图案表面在生物医学和机器人工程等诸多领域得到了越来越多的应用，例如生物医学上的药物吸附和细胞吸附，以及机器人工程上的末端执行器等，在这些应用中足够的表面微纳摩擦力是保证其功能性能得以实现的必要前提，所以曲面体系的表面褶皱图案化及其摩擦特性的研究具有重要的理论与实际意义。采用溅射方法在聚二甲基硅氧烷(PDMS)微球上制备了金属薄膜褶皱表面，建立了系统的金属褶皱图案相图(包括凹坑型、迷宫型和人字型三种形貌)，发现了褶皱尺寸与微球曲率之间的幂律关系，从而实现了基于微球曲率半径和薄膜厚度耦合调控的金属表面褶皱形貌与尺寸的精确控制。研究结果进一步发现，曲面型膜(壳)/基(核)体系的表面微纳摩擦性能强烈地依赖于褶皱的尺寸、形貌和取向。其中迷宫型褶皱表面的摩擦性能具有各向同性，而人字型褶皱表面的摩擦则表现出明显的各向异性，并对褶皱取向敏感。该研究工作实现了曲面体系上表面褶皱的可控制备，揭示了褶皱特性/参量对表面微纳摩擦性能的影响，为曲面体系褶皱表面的摩擦学设计提供了重要的理论指导。

项目名称：新型二维材料紫磷及紫磷烯

技术领域：新型材料

成果详情：石墨烯的发现引发了二维材料的研究热潮，并获得诺贝尔物理奖。二维磷烯由于弥补了石墨烯没有带隙这一天然缺陷，且具有较高的电荷迁移率，使磷二维材料重新成为研究热点。类似于碳，磷也具有复杂的相图结构，存在多种同素异形体。我们熟悉的在空气中会自燃产生磷光的白磷是磷的最活泼的一种同素异形体，而黑磷一直以来被认为是磷的最稳定的同素异形体。紫磷或者希托夫磷（Hittorf磷）（1985年Hittorf提出）是磷的另一种层状的同素异形体，图尔恩（Thurn）和克雷布斯（Krebs）在1969年给出了紫磷的晶体结构。但是至今都没有可靠的实验数据确定紫磷的合成及其晶体结构，所有的理论研究都以Thurn和Krebs给出的结构为基础进行计算。甚至很多研究者认为紫磷可能只是一种中间结构，根本无法合成出来。实验室合成了宏观尺寸的紫磷单晶，并在实验上确定了紫磷的晶体结构为单斜 $P2_1/n$ ($a=9.210$, $b=9.128$, $c=21.893$, $\beta=97.776$)，单个晶胞有84个原子，同时通过声子谱证明了Thurn和Krebs给出的结构的不合理性。同时发现紫磷结构才是最稳定的磷的同素异形体，其分解温度达到 512°C 以上，比黑磷高出 52°C 。并首次通过机械剥离和液体剥离得到紫磷烯。

项目名称：TMD材料纵向异质结

技术领域：新型材料

成果详情：二维过渡金属硫族化合物（TMD）是一类非常有潜力应用于后摩尔时代电子器件的二维材料。相对于石墨烯、黑磷等其他二维材料，TMD类材料具有一个重要优势，即每个具体TMD都有独特的带隙结构。因此，很容易挑选出具有合适带隙结构的两种TMD，通过堆垛或对接形成特定能带类型的异质结，例如把单层MoS₂和WSe₂堆垛在一起就可以形成具有交错型（staggered）能带的纵向异质结。然而，目前人们对这类TMD纵向异质结在纳米级的局域电子结构的研究仍然比较欠缺。利用扫描隧道显微镜（STM）在5K和80K的温度下测量了利用金属有机化学气相沉积方法（MOCVD）制备的MoS₂-WSe₂样品。该研究发现在5K时材料表面周期性起伏的Moiré图案对材料的能带结构有明显的调制作用，在每一个Moiré图案原胞内的相互作用较强区域，价带顶（VBM）和导带底（CBM）能量附近都产生了新的分立能级，即Moiré图案引起的局域电子态。在80K时，此局域电子结构仍然稳定存在。由于Moiré图案的典型尺寸在8纳米左右，与半导体器件的工艺线宽相仿。这项工作指出当基于TMD纵向异质结的器件的尺寸下降纳米级时，必须考虑这类局域电子态对器件性能的影响。此外，这类局域电子态的周期性阵列可以被看作准量子点阵列，未来可能应用于单光子光源等量子器件。

39

项目名称：钙钛矿缺陷研究

技术领域：新型材料

成果详情：近年来，基于有机-无机杂化金属三碘化钙钛矿材料的太阳能电池器件发展迅猛，其中以甲胺铅碘钙钛矿材料作为光吸收层的电池器件的官方认证量转化效率已突破 22%，是最具潜力的第三代新型光伏器件。甲胺铅碘材料具有低成本、易溶液加工、高光吸收系数、光生载流子双极传输、长程载流子传输、低缺陷态密度以及合适的光学带隙等优点，是理想的光吸收材料。作为一种半导体，钙钛矿材料的光电性能主要由晶相、掺杂类型、杂质、元素组成、晶体结构缺陷等多方面因素决定。因此，对钙钛矿材料晶体中缺陷形成机制的深入理解和对缺陷的高效调控，是进一步获得更高效、稳定的太阳能电池器件的关键。从钙钛矿材料中缺陷的起源、缺陷对钙钛矿材料特性的影响、缺陷的常用表征手段和缺陷的调控工程等方面系统总结了该研究领域的发展历程和最新的研究进展，同时也对该领域未来的重要发展方向进行了展望。

40

项目名称：固态路易斯酸碱

技术领域：新型材料

成果详情:均相受阻路易斯酸碱对(Frustrated Lewis Pairs, FLPs) 催化剂已经被广泛应用在对氢气、二氧化碳等惰性小分子的活化转化方面。相比而言,更加受到实际应用欢迎的多相FLP催化剂目前尚未形成系统性研究。西安交大前沿院瞿永泉、马媛媛课题组前期与化工学院常春然课题组合作,通过表面修饰工程在二氧化铈表面调控氧空穴,构建出含 FLPs 活性位的全固相催化剂 (Nature Communications, 2017, 8, 15266)。这种特殊的活性位点由两个相邻的铈原子 (Lewis酸) 和氧空位相邻的一个氧原子 (Lewis碱) 组成。经理论和实验证实该类固体FLP催化剂对氢气分子的解离活化以及不饱和烃的加氢具有优越的活性 (ACS Catalysis, 2018, 8, 546)。为了进一步设计固态FLP催化剂,在以上前期研究结果基础上,前沿院瞿永泉和马媛媛课题组整理前期文献,着重于解释固态FLP催化剂的概念,总结当前固态FLP催化剂进展,并提出这个领域的可能发展方向,以 TUTORIAL REVIEW形式近日在线发表在 Chemical Society Reviews (影响因子 38.618) 上,论文题目为“Semi-solid and solid frustrated Lewis pair catalysts”。

41

项目名称:响应的材料

技术领域:新型材料

成果详情:综述了国内外基于MOF材料的(外部和内部)响应系统应

用于药物递送的最新研究进展，包括pH、磁性、离子、温度、压力、光、湿度、氧化还原等以及多重响应的药物递送系统。该论文同时提出了此类药物递送系统在临床应用前所面临的问题，最后给出了可能的解决方案和进一步的研究展望。该项工作受到国家自然科学基金、中央高校基本科研业务费专项基金、陕西省自然科学基金面上项目、中国博士后科学基金、陕西省博士后科学基金、以及西安交通大学新教师科研支持计划等项目的支持。

42

项目名称：镁合金防腐蚀新技术

技术领域：新型材料

项目背景：腐蚀防护是镁合金行业的核心课题之一。尽管现有技术可以制备出抗蚀性良好的保护膜层，但这类膜层往往比较脆，容易在服役过程中破碎和脱落。这个项目的目标就是从化学反应的基本原理出发，研发可在镁合金表面长出致密、强韧和牢固的防腐层的新技术。三年前，研究团队去榆林市考察镁的生产工艺时，了解到用来生产金属镁的原材料矿石——碳酸镁本身就是一种高强度、耐腐蚀的物质。在返程的飞机上，单智伟教授提出了在镁合金表面制备纳米级碳酸镁膜来实现腐蚀防护的想法。碳酸镁可以由二氧化碳和氧化镁反应生成，但该反应的发生至少需要 400℃，而多数镁合金很难承受这么高的温度。问题的关键是找到活化二氧化碳的办法，使其更容易与氧化镁发

生化学反应。

成果详情：让二氧化碳在室温下与镁合金表面的原生氧化层或腐蚀产物发生反应，生成一层致密、牢固的纳米级碳酸镁层。实验测试表明，这种纳米膜可使测试样品的腐蚀电流降低约三个数量级，自腐蚀电位降低约一倍。与此同时，长有这种纳米膜的微纳尺度样品的屈服强度提升了近两倍，连续变形能力提升到了五倍，抗氧化温度提升了 200℃。这种方法简单易行、绿色环保，为新型耐腐蚀镁合金的研制提供了全新的技术思路。

43

项目名称：新型高能量密度超级电容器正极材料

技术领域：新型材料

成果详情：新能源需求的快速增长促进了各种新型能源存储或能源转换器件的发展。其中，水系超级电容器因具有极高的安全性，优异的循环性能，超高功率及倍率性能，可作为高功率电源和快充设备用在汽车、电网储能、舰艇和激光武器上。但其能量密度较低，尤其是双电层电容（大多使用多孔碳作为电极）的能量密度通常不高于 10 Wh kg⁻¹。而具有氧化还原反应的赝电容电极材料通常会显示出较高的比容量，同时配合多孔碳或其他负极材料（如铁系）组成非对称超级电容器后会获得比双电层超级电容器（1V）更高的电压（1.4-2V），这对提高器件的能量密度至关重要。然而，赝电容电

极材料因为导电性差、表面/界面/体相结构稳定性差等问题极大地增加了电容器的内阻，影响离子扩散，降低循环性能，最终使其失去超级电容器的诸多优势。因此，优化材料成分和有效构筑功能性界面以提高其赝电容性能对高能量密度超级电容器器件的研究具有重要意义。在前期偏硼酸盐增强 $(\text{Ni, Co}) (\text{OH})_2$ 结构稳定性以提高循环寿命研究工作的基础上，制备出了具有核壳结构的硼化镍/偏硼酸镍复合材料，将其用于非对称超级电容器正极，表现出优良的电容性能。究其原因，一方面是较小的颗粒尺寸有效地提高了材料利用率并降低离子的扩散路径；另一方面，复合材料厚的偏硼酸镍复合材料厚的偏硼酸镍 $(\text{Ni}(\text{BO}_2)_2)$ 壳层，因其 BO_2^- 中 B 原子处于电子不饱和状态，与硼酸显酸性的机理 $(\text{B}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{B}(\text{OH})_4^- + \text{H}^+)$ 类似， $\text{Ni}(\text{BO}_2)_2$ 也容易吸附 OH^- ，这促进了电化学反应动力学，因此，使活性材料拥有了优良的倍率性能和循环性能。向复合材料中加入石墨烯后，进一步提高了导电性，使其表现出更高的比容量和优异的循环性能。

44

项目名称：高性能近红外发光材料

技术领域：新型材料

成果详情：近红外光在光治疗、生物成像、通信以及夜视显示等方面具有特殊应用，在可见光 OLED 快速发展的过程中，最大发射峰波长超

过 700nm 的近红外 OLED 也越来越受到人们的关注。当前，受制于能隙规则以及传统的近红外材料合成方法复杂低效，高性能近红外发光材料非常稀少，绝大部分近红外 OLED 的发光外量子效率都低于 10%。设计合成了一类分子结构简单而发光性能优异的近红外发光材料，并与电信学院吴朝新教授以及材料科学与工程学院马伟教授等团队合作研究了该类材料在近红外 OLED 中的应用性能及其相关机理。研究发现，通过改变分子结构调控分子的静电势强弱以及分布区域，可以增强分子间的相互作用，进而改善材料的发光性能以及载流子传输性能。以该材料为发光分子，采用真空蒸镀方式制备的非掺杂 OLED 表现出非常优异的发光性能，最大发射峰波长为 724 nm，最大外量子效率达到 16.7%。可见光有机发光二极管（OLED）技术正在走进人们的生活，在信息显示如手机屏幕、电视屏幕以及发光照明如室内照明、汽车尾灯等应用场景中不断提高人们的应用体验与生活品质。

45

项目名称：具有连续电偶极旋转的超弹性铁电单晶薄膜

技术领域：新型材料

成果详情：铁电材料是一种具有自发极化，且能够实现机械能和电能转换的功能材料，在磁电互调、机械驱动、压力传感和数据存储等领域具有广泛的应用。柔性电子技术正带来一场智能可穿戴技术革命，而铁电材料将在柔性电子领域将扮演重要角色。由于存在缺

陷、晶界以及氧化物离子键/共价键本身延展性相对较小等问题，块体铁电氧化物表现出一定脆性和刚性。如何克服这些困难，在铁电薄膜中实现超弹性和柔性并将其应用在柔性电子器件中是目前亟待解决的问题。对铁电单晶薄膜材料柔性和弹性的力学行为进行了深入研究，并取得了重大突破。研究采用水溶性的 $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ 作为牺牲层，制备并剥离出大面积的自支撑 BaTiO_3 (BTO)单晶铁电薄膜。实验通过纳米机械臂对其进行原位弯曲实验，发现BTO薄膜能够实现 180° 折叠，其承受的最大弯曲应变高达 $\sim 10\%$ 。同时实验还发现在对其进行大角度压缩后，随着外力撤去，BTO薄膜的形状能够回弹，展现出超弹性行为。采用原子模拟计算发现，BTO薄膜的超弹性可能起源于铁电纳米畴在大应变梯度下a和c铁电畴的可逆翻转。同时在a和c铁电畴之间产生了极化的连续翻转，有效降低了能量势垒，避免了因为畴翻转而可能导致的断裂。另外在弯曲状态下，大应变梯度也将诱导出显著的绕曲电效应，实现基于力电耦合的功能器件一体化，从而进一步加强基于柔性单晶铁电薄膜相关器件的功能性。基于本研究结果，可以预期其他铁电体中也应该存在类似力学行为，为其他铁电单晶薄膜中实现超弹性提供了实验依据。此外，具有超弹性的柔性铁电薄膜也是良好的电场调控介质，将其与柔性铁电薄膜复合，可避免传统多铁薄膜异质结中存在的衬底束缚作用，并显著提高磁电耦合效应，为未来开发新型小电场可调的柔性磁电器件奠定基础。

项目名称：抗 300 度高温蠕变的铝合金

技术领域：新型材料

成果详情：现代科技发展对结构金属材料提出了更加严格的要求，一方面希望材料更轻以满足轻量化需求，另一方面还希望材料耐更高的温度以保证在大动力/大功率时的服役安全。但是通常金属材料的安全服役温度与材料密度呈现反向关系，使得材料的选择往往顾此失彼。特别地，当今航空航天、交通运输等重要领域内的许多部件/构件服役温度逐渐跨越到 250°C-400°C 的范围，但相应的轻质合金材料却难以承受其“高温”。相对于其它轻质金属材料，铝合金是最有希望在该温度范围内使用的轻合金。但是在传统铝合金中，其赖以强化的纳米第二相颗粒在 250°C 以上温度时将会发生严重的粗化，强化效果损失严重。在同时外加应力的高温蠕变情况下，传统铝合金材料将发生快速软化、导致最终的失稳。如何提高纳米第二相颗粒的高温稳定性、进而改善铝合金的抗高温蠕变性能，成为了铝合金甚至是轻合金体系“卡脖子”的难题。基于纳米第二相颗粒界面原子偏聚的微观组织设计思想，通过在原子层次解析不同溶质原子之间的交互作用，借助相关的热力学/动力学分析，选用常见的 Al-Cu 合金并结合 Sc 元素的微合金化作用，实现了 Sc 原子在 Al₂Cu 强化相颗粒界面的高浓度偏聚，相当于给 Al₂Cu 强化相颗粒穿上了一件“外衣”，显著地抑制了该颗粒在高温下的粗化长大。同时还额外析出了稳定的 Al₃Sc 颗粒，使得这两类本来不在相同时效温度范围内

析出的强化相颗粒和谐地共存。这种微观组织结构让普通的Al-Cu合金不再普通，而是具有了超常的抗高温蠕变性能：在 300°C以及大于 30MPa外加应力的苛刻蠕变环境下，可安全服役长达 350 小时以上；如果外加应力在 20MPa以下，蠕变寿命可超过 2000 小时。与前人所报道的铝合金（包括Al-Cu-Mg系、Al-Mg-Si系、Al-Zn-Mg系、Al-Si系和Al-Sc系）和铝合金复合材料（添加陶瓷第二相颗粒如Al₂O₃和SiC）相比，此新型Al-Cu-Sc合金在相同的服役条件下其高温蠕变性能提高了 2-3 个数量级。

47

项目名称：锂离子电池硅负极材料

技术领域：新型材料

成果详情：锂离子电池硅负极具有其它负极材料无法匹敌的比容量，成为科学界与工业界的研究热点。然而，在充放电过程中，硅电极在脱嵌锂时会发生高达 300-400%的体积变化，严重影响硅负极的结构稳定性，且其导电性较差，制约着硅负极的实际应用。基于原位可控凝胶化过程，制备出Cu导电添加剂及碳纳米管增强的多层硅/碳复合结构。其多层结构特征和碳纳米管增韧碳基体可有效释放充放电过程中硅负极体积变化而产生的巨大应力，Cu导电添加剂的引入提升了复合材料的导电性。该复合材料电极在 1A/g的大电流密度下经过 900 次循环后比容量达到 1500mAh/g；在 4A/g的大电流密度下循环展示出

1035mAh/g的比容量，充分表明在硅颗粒巨大体积变化过程中电极材料仍保持优异的结构稳定性。该复合电极材料的Li⁺扩散系数在 10⁻¹¹至 10⁻⁹cm²s⁻¹ 范围内，具有快速充放电特性。该研究工作通过微观组织和界面结构的巧妙设计解决了硅负电极体积效应这一瓶颈问题，有望为新一代高性能锂离子硅负极的开发和应用提供重要参考。研究成果以《原位合成铜颗粒修饰层状碳基复合结构：锂离子电池复合硅负极材料的改性研究》(In Situ Synthesis of Multilayer Carbontrix Decorated with Copper Particles: Enhancing the Performce of Si as Anode for Li-Ion Batteries) 为题在国际知名学术期刊《美国化学学会纳米》(ACS Nano, IF=13.709) 上发表。西安交通大学国家强度重点实验室为该论文的第一作者和第一通讯作者单位。该研究工作是基于材料学院与纳米学院(苏州)联合培养博士生取得的成果。研究工作得到了国家自然科学基金、苏州纳米科技协同创新中心、江苏省自然科学基金的支持。

48

项目名称：金属-多酚配位聚合物探针合成与功能调控

技术领域：新型材料

成果详情：纳米生物传感是生物传感与纳米技术的融合，依赖生物相容性好、合成可控及功能可调的纳米探针，将广泛存在的植物多酚及其衍生物转化为高附加值的功能纳米材料，是目前新材料研究的方向

之一。基于金属配位作用的金属-多酚配合物纳米材料已被合成，并用于生物成像、纳米医学、催化与能源等多个领域。然而，植物多酚易被氧化，且与金属之间存在强配位作用，限制了该类聚合物在分子及纳米尺度上的有效调控。提出一种通用的甲醛辅助金属-配体交联策略，合成了系列金属-多酚配位聚合物胶体球（ $\sim 300\text{nm}$ ）。该方法首先利用甲醛在弱碱性条件下将植物多酚（如tannic acid, TA）预交联成寡聚物（poly tannic acid, PTA），随后加入适量金属离子，通过金属-配体交联，生成金属-多酚配位聚合物胶体球。该合成策略可在分子水平上有效调控金属离子的种类和配比，现已合成包括铁、钴、镍、铜、锌、铝、铈在内的单金属，双金属以及五金属等 11 种新型配位聚合物胶体球。该研究发现，上述组份可调的胶体球与核酸（DNA 和 RNA）的氮杂环或磷酸基团形成金属配位、 $\pi - \pi$ 堆积等多种作用，并揭示了单链核酸吸附、双链核酸解吸附的过程和机制。基于以上发现，制备胶体球-DNA 纳米探针，实现了肿瘤标志物 microRNA 21 的高灵敏检测，对同源家族干扰序列的区分达到单核苷酸水平。此外，该类聚合物胶体球在酸性条件如胞浆、溶酶体等可快速降解并释放金属离子；这些离子极大提高了胞内核酸组装效率与核酶催化活性，并可用于磁共振成像。目前，研究团队仍在进一步调控金属-多酚配合聚合物的物化性质，推进其在生物传感、液体活检、医学成像等方面的应用。

项目名称：范德瓦耳斯分子异质结

技术领域：新型材料

成果详情：利用外延生长薄层材料在传统半导体产业中广泛地应用于制造电子和光电子器件，且能应用在范德瓦耳斯异质结、金属有机骨架材料、有机半导体以及胶体组装等新的领域。范德瓦耳斯异质是由一种二维材料生长在另一种二维材料上所形成的材料，比如层状过渡金属硫化物的层叠（ MoS_2 ， WS_2 等）。多层高质量二维材料的层叠，会导致中间存在较大的晶格失配。对于这种二维材料，常常是以强烈的原子间的成键来保持稳定状态，而非常弱的范德瓦耳斯力则在这个生长过程作用较小。发现了一种新型定向外延生长的范德瓦耳斯分子异质结。与传统的异质结不同，这种异质结组成仅由有机分子组成，内界面以及分子间都以范德瓦耳斯力相互作用组装在一起，这个过程中并未引入任何氢键或者离子键。室温下，在高定向热解石墨（HOPG）表面顺序沉积 C_{60} 和 C_{70} 两种分子，制备出了双层范德瓦耳斯异质层。研究发现常温下HOPG表面 C_{70} 自组装分子层中 C_{70} 分子全部处于自由旋转状态；当引入 C_{60} 分子后， C_{70} 分子的旋转状态会受到引入的 C_{60} 分子的调控，可以选择性的站立或自由旋转，并从分子层面上揭示了这种调控的机理。这种异质结具有两个重要的优点，一是两种分子尺寸均比原子大，但远小于胶体分子。因此本结果可作为一个典型的例子，用于理解成核和生长过程中的尺寸可变性。二是这个发现亦可作为一个典型的例子于研究其他涉及到非球状颗粒系统。

项目名称：分子多铁材料铁性有序耦合机制

技术领域：新型材料

成果详情：多铁材料是指同时具有两种或两种以上铁性有序（包括铁电、磁性、铁弹等）的一类智能材料，已入选 2007 年度美国《科学》杂志公布的凝聚态物理领域的重要热点科学问题。由于铁电和铁磁（或反铁磁）有序在对称性破缺、电子壳层排布等微观机制中互相对立，迄今为止，仅在极少数的单相无机氧化物中发现了多铁性。2009 年，国外科研人员意外在具有类钙钛矿结构的凝聚态金属有机骨架（dense metal-organic frameworks）材料中发现反铁磁和铁电有序共存，这是一类具有分子基团的新型多铁材料。然而，该类材料中多重铁性有序是否存在耦合仍有较大争议，铁性耦合的微观机制仍不明确，这阻碍了该类材料进一步的发展与应用。成功实现了高质量、大尺寸的金属甲酸骨架单晶的制备，并通过超低温粉末 X 射线衍射、拉曼和红外光谱、DSC 热分析、共振超声谱等综合物性表征手段，发现在 $[(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2][\text{Ni}(\text{HCOO})_3]$ 杂化钙钛矿材料中，铁电、弱铁磁、铁弹等多重铁性有序存在由晶格自发应变调制的静态和动态耦合行为，并且在铁电相变附近出现了同传统氧化物钙钛矿截然不同的声学损耗现象。该项工作表明有序-无序铁电相变同晶格应变存在明显耦合，同时在弱铁磁和自旋重取向转变点附近存在自旋-晶格耦合。以上实验证据说明来自磁有序和铁电有序的应变重叠可能会导致强的磁电耦合效应，并且有望通过简便的成膜制备，实现更大的应变调控。该

项发现表明在分子基多铁体系中，通过灵活的离子、分子基团调控，有望实现更强的多重铁性有序耦合效应。同时，该项工作也对传统无机氧化物单相多铁材料、复合多铁材料的磁电耦合与性能调控提供了重要启示。

51

项目名称：低维过渡族金属硫化物纳米材料

技术领域：新型材料

成果详情：二维过渡金属硫族化合物（TMDs）是一种类石墨烯的三明治结构层状材料，由于其单层结构具有的直接带隙、强的自旋轨道耦合、压电性等物理性能，因而成为继石墨烯之后又一具有广阔应用前景的二维晶体材料。目前对于TMDs二维材料的研究中主要集中在其2H相结构。有趣的是，在2H相结构之外，许多TMDs二维材料还存在1T及1T'相结构，并展现出一些优异的物理化学性能（如催化性能），进一步拓展了此类材料的功能应用。然而，目前对于1T及1T'相的相关物理特性及其潜在的应用还缺乏深入的研究。特别地，针对TMDs的1T'的相结构，其最小结构单元可以看作由两个不同的原子单包组合而成，在形成二维材料边缘时会具有多种的边缘原子结构，因此有望诱发TMDs边缘的丰富物理性能。通过第一性原理计算研究，预测了1T'-MoS₂纳米带中一种随着纳米带宽度的晶格单元奇偶数变化而引起的纳米带边缘铁磁性的振荡效应。该效应是TMDs类二维材料中首次

发现的新型效应，只与纳米带的宽度有关。研究人员将此效应命名为纳米带磁性的“gic number”，并基于此效应设计了一种调控纳米带宽度而形成的边缘铁磁替稳定存在的新型自旋电子学器件原型。由于边缘铁磁性稳定存在的最小单位可以为原子尺度的晶格，因此这一器件原型有望用于开发和设计超高密度的磁存储材料（器件），为TMDs二维材料的功能应用提供了新的思路。

52

项目名称：介孔金属氧化物基传感材料

技术领域：新型材料

成果详情：介孔金属氧化物集成了介孔材料高比表面积、丰富的孔道（孔径 2-50 纳米）以及金属氧化物的磁、光、电等性质，在清洁能源、传感、催化等领域有着巨大的应用前景。但是，目前缺乏一种普适的方法合成组分及结构可控的介孔金属氧化物纳米颗粒。植物多酚是一种价格低廉、无毒、已实现工业化生产的天然提取物，广泛用于皮革、墨水等领域。基于植物多酚配位化学的基本原理，以不同的金属-多酚配合物为前驱物，通过控制配合物的热分解过程，得到了一系列不同组成及内部结构的介孔金属氧化物纳米颗粒（如氧化铝、氧化锌、氧化钴、氧化铁、氧化铜）。研究发现，金属会影响有机物（即植物多酚）的热分解过程，比如铝会增强有机骨架的稳定性，铁、铜、钴元素会加速有机骨架的分解。有机物的分解温度和金属氧化物的结

晶温度共同影响介孔金属氧化物的内部结构（如实心或空心结构）。由于介孔金属氧化物具有规则的形貌、高比表面积及高结晶度，这种材料进一步用于构筑气体传感器，可实现酒精气体的高灵敏、高选择性检测。同时这种介孔金属氧化物材料与核酸（DNA, RNA）的磷酸基团有着强的配位作用，可有效吸附DNA探针分子。可进一步构筑介孔金属氧化物基纳米探针，实现核酸的高灵敏、高特异性检测。由于植物多酚可以和不同种类的金属离子形成配位物，这种简单的热分解方法有望用于低成本、大规模制备多种组分介孔金属氧化物，并广泛用于环境催化、清洁能源的存储与转化、气体传感及生物传感等领域。

53

项目名称：Lewis碱催化环丙烷开环反应

技术领域：新型材料

成果详情：Lewis碱催化是现代催化技术的重要组成部分，在有机合成中发挥着举足轻重的作用。Lewis碱催化通常采用 $n-\pi$ 、 $n-\pi$ 和 $n-n$ 三种模式实现底物的活化。目前， $n-\pi$ 活化模式主要涉及有机硅、锡、硫、硒和卤素等杂原子底物，而对于具有重要应用前景的碳碳单键的活化及催化反应研究非常欠缺并存在挑战。针对以上问题，研究团队采用贫电子环丙烷作为底物，借助其极性碳碳键及环张力的结构特点，发展其在Lewis碱催化下以 $n-\pi$ 模式实现碳碳键活化的有机催化反应，近期取得了重要进展。该研究团队首先发展了叔胺催化环丙基酮的

Cloke-Wilson重排反应用于高效合成二氢呋喃化合物，相关研究发表在有机化学权威期刊 *Organic Letters* 上，影响因子 6.579。最近，该团队进一步设计利用叔膦活化贫电子乙烯基环丙烷，发展了一类新颖的扩环重排反应用于构筑合成上具有挑战性的环庚烯酮化合物。研究工作显著拓展了叔膦催化反应的底物范围，同时提供乙烯基环丙烷新的活化模式，具有开创性研究价值。

54

项目名称：一种新型廉价可回收利用自修复形状记忆高分子材料

技术领域：新型材料

成果详情：传统热固性树脂具有高度稳定的共价键交联结构，很难实现再加工利用，因而造成极大的环境污染。相反，具有动态重组性的可逆动态共价键能够赋予交联聚合物良好的可加工性、回收性和其他优异的性能，使其在航空航天、生物医学和建筑等领域拥有更大的应用潜力。针对上述问题，利用二胺与甲醛之间一步缩合反应制备了一种半缩胺醛动态共价网络（HDCN），该反应具有无需催化剂、反应快、100%原子利用率、原料易得且室温即可反应的特点。制备得到的热固树脂采用粉碎-热压的方法可以进行可塑加工，且成型的样品具有良好的形状记忆性能、自修复性能、可循环回收和耐溶剂性。其中，利用 4,4'-二氨基二苯甲烷（MDA）与甲醛制备的HDCN具有较强的力学性能：其杨氏模量和拉伸强度分别为 1.6GPa和 60MPa；其形状回复率

能够达 93.5%，自修复后材料的力学性能能够恢复至修复前的 95%以上。另外，通过向体系中引入不同含量的聚醚胺（PEDA）能够调节材料的力学性能同时改变加工条件。当PEDA的摩尔含量为胺总量的 30%时，其杨氏模量和拉伸强度仍然能保持在 0.8GPa和 35MPa之上；并且，其形状恢复速率较纯MDA体系明显加快：30s内就可以完成形状的恢复，同时形状回复率仍能保持在 95%。

55

项目名称：增强弛豫铁电体性能的新机制

技术领域：新型材料

成果详情：铁电材料是一类重要的功能材料，已经被广泛应用在航空、航天、通信、国防等高科技领域，年产值已达数百亿美元。铁电材料由于发生了从顺电相到铁电相的相变，导致其微观尺度上具有微米铁电畴、宏观尺度上具有铁电性。不同于传统的铁电材料，弛豫铁电材料是一种微观尺度上具有纳米极性微区（PNRs）而宏观尺度上呈现为“顺电相”的材料。由于其与众不同的宏观/微观结构，弛豫铁电材料具有在宽温域下高介电性能和窄滞后电致伸缩等性能，有望在微位移器、传感器、储能器等应用领域引起革命式的变革。然而，由于宏观尺度上表现为单一“顺电相”的特征，迄今为止，人们没有发现一种能有效增强弛豫铁电体性能的机制，使得弛豫铁电体材料的发展研究陷入了瓶颈。提出了一种全新的物理概念——准同型弛豫体边界

(Morphotropic Relaxor Boundary, MRB), 并发现其能够数倍增强弛豫铁电体性能。具体表现为: 在报道的铌酸钾钠—钛酸钡(KNN-BT)弛豫铁电体体系中, 跟非MRB成分相比, MRB成分实现了在超过 100 摄氏度的宽温域范围内, 近 1.5 倍的介电性能增强以及近 3 倍的电致伸缩效应的增强。MRB增强弛豫铁电体性能机制, 类似于传统铁电材料中的准同型相界增强机制。论文作者发现弛豫铁电体虽然宏观上表现为单一“顺电相”的特征, 但是微观尺度上具有不同晶体对称性的PNRs, 即存在四方弛豫铁电体(Trelaxor)和三方弛豫铁电体(R relaxor)。然后, 作者利用的PNRs能够具有不同的对称性, 构建MRB, 从而在MRB成分处实现了增强弛豫铁电体性能的目标。此项成果为开发高性能弛豫铁电体材料提供了新原理和新方法。

56

项目名称: 单分子磁体

技术领域: 新型材料

成果详情: 单分子磁体是一类以单个分子为磁性单元, 表现出经典的磁弛豫与磁量子隧穿共存的新型纳米级磁性材料, 具有非常独特的物理及化学属性, 在面向未来的新材料、新信息载体等领域有广阔的应用前景。但由于分子极小的尺寸, 这类材料的磁弛豫机理较传统磁性材料更为复杂: 高温下以磁各向异性性能主导的奥巴赫过程为主, 但随着温度的降低, 其他的弛豫过程(拉曼、量子隧穿、直

接过程等) 出现并成为主要弛豫过程。这些磁弛豫过程往往互相交错, 无法被单独研究, 致使目前对一些磁弛豫过程的认识存在一定的模糊地带。合成出一例具有 C_{5v} 对称性的稀土基单分子磁体 $[Dy(tBuO)Cl(THF)_5][BPh_4] \cdot 2THF$ 。该单分子磁体能垒较大 (950 K), 且在高温区表现出了线性极好的奥巴赫磁弛豫过程, 因此适合研究在更低温度下的其它磁弛豫过程。通过结合交流磁化率数据及新的直流磁化率测量方法, 该化合物在从 10^{-5} 秒到 10^6 的弛豫时间范围得到了较完整的表征, 从而该单分子磁体的四种磁弛豫过程所处的温度和磁场条件得到了较清晰的阐述, 即: 1、与磁场无关的奥巴赫弛豫过程发生在 40 K 以上; 2、双声子的拉曼过程在 40-20 K 之间起主要作用; 3、量子隧穿效应在低温区 (小于 16 K) 以及磁场较小时 (小于 200 Oe) 较显著; 4、低温下随着外场的增加, 量子隧穿行为得到有效的抑制 (1000 Oe 时抑制效果最佳), 但随着外场大于 1000 Oe, 直接过程发生作用, 隧穿速率加大, 5000 Oe 以上时直接过程为主要弛豫过程。有趣的是, 利用抗磁稀释该研究同时发现内部场 (internal field) 对量子隧穿效应的双重作用, 在外加磁场不足以抑制量子隧穿效应时, 内部场能够减缓量子隧穿过程, 但是内部场又会导致 Kramers 离子产生量子隧穿能隙, 造成量子隧穿效应。为了验证超精细裂分对量子隧穿过程的作用, 郑彦臻课题组与英国曼彻斯特大学的 Chilton 博士等人合作, 利用无核自旋的 ^{164}Dy 同位素取代天然丰度的 Dy 离子, 研究了超精细裂分对该化合物单分子磁体性能的影响, 发现核自旋所产生的超精细相互作用可以打开自

旋为半整数的Kramers离子的隧穿能隙 (tunnelling gap), 但不是导致零场下强量子隧穿效应的主要因素, 从而指向可能的另一种导致Kramers离子产生较大量子隧穿效应的元凶——即分子自身的振动。基于此推论, 该研究工作首次在描述量子隧穿的公式中引入声子碰撞速率的 η^{-1} 项, 并通过拟合, 分析出该化合物的量子隧穿能隙约 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ 。因此, 该工作提出减弱分子振动可有效抑制量子隧穿效应, 在指导未来更高性能的单分子磁体的合成上具有重要的启示意义。

57

项目名称: 纳米台阶样板

技术领域: 新型材料

成果详情: 这是目前国内尺度最小的纳米台阶标准物质样, 填补了国内亚 50nm 台阶高度标准物质的空白, 实现了替代进口, 提高了我国在纳米几何量计量领域的核心竞争力和整体技术水平。在国际上首次提出了基于原子层沉积 (ALD) 的纳米台阶样板制备方法, 实现了台阶高度亚埃米量级的精确控制。成功采用 ALD 技术制备了公称高度为 5nm、10nm、20nm、40nm 的单台阶样板, 并由中国计量科学研究院完成了定值、均匀性、稳定性检验。4 种规格的纳米台阶高度样板可溯源到国家米定义波长基准, 定值结果可靠, 同时具有良好的均匀性和稳定性, 可实现对台阶仪、原子力显微镜、轮廓仪等测量仪器的校准, 并应用

于微电子集成电路与国防军工、先进制造、生物医药等重点产业。

58

项目名称：一种新型的功能化导电聚合物

技术领域：新型材料

成果详情：室温钠离子电池由于原料储量丰富、成本低廉等优势成为新一代高比能储能体系的热门选择，极具发展潜力。然而，钠离子半径比锂离子半径大，已广泛应用的锂离子电池石墨负极由于层间距较小导致其无法应用，因而探寻新的高比容负极材料对于发展下一代低成本、高比能钠离子储能体系尤为关键。一种新型高比容、长寿命钠离子电池负极材料-红磷/硫化聚丙烯腈。该材料具有很高的放电容量（ $\sim 1300\text{mAh/g}$ ）和优异的循环性能（100周容量保持率大于91%）。在该工作中，团队成员设计并制备了一种新型的功能化导电聚合物-硫化聚丙烯腈作为导电基体，不同于普通的碳导电骨架，该导电聚合物富含C-S-S-官能团，可通过简单的球磨方式与红磷形成化学键合（C-S-P）。该化学键的存在能很好地解决在大体积膨胀下活性物质与导电基体脱离的科学难题，极大的提高电极材料的电导率，抑制磷在循环中的体积膨胀，并使得电极材料上形成稳定的固体电解质界面，从而同时改善电极材料的循环稳定性和库伦效率。这项工作所提出的解决策略为高比容钠离子电池负极材料的制备提供了新的思路。

项目名称：碳化硅陶瓷材料的多步反应法制备技术

技术领域：新型材料

项目背景：反应烧结具有工艺温度低、烧结无收缩、尺寸容易控制、不需要烧结助剂等优势，因此反应结合碳化硅陶瓷材料已经得到了广泛的应用，但是残留硅的存在限制了其在高温以及腐蚀环境中的应用，同时也降低了材料的弹性模量。通过多步反应烧结的方法能够制备出单相碳化硅陶瓷可以扩大碳化硅材料的使用范围，同时有利于制备复杂形状的碳化硅陶瓷部件。

成果详情：首先根据碳源与硅的反应程度确定各种碳粉的活性，选取两种以上具有合适差异反应活性的碳作为源材料，与碳化硅粉末混合，将成形的坯体首先在正常的反应烧结温度（1500-1650℃）下进行渗硅使高活性的碳首先进行反应，再在高温下（1700-1800℃）保温使残余的低活性碳与残留硅进行二次反应。虽然增加了二次处理的工艺，但是处理温度还是远低于碳化硅的固相烧结（超过 2000℃）和液相烧结（1850-2000℃以上）的温度，因此通过反应烧结获得残留硅极低的高密度多晶SiC陶瓷材料，实现反应烧结碳化硅材料的高模量、高耐蚀和良好的高温强度，不但具有重要的理论意义，也具有很大的工程应用前景。

应用前景：反应烧结的优势就是形状复杂的高精密碳化硅陶瓷部件，本技术通过反应烧结获得残留硅极低的高密度多晶SiC陶瓷材料，实

现反应烧结碳化硅材料的高模量、高耐蚀和良好的高温强度，不但具有重要的理论意义，也具有很大的工程应用前景，特别是在要求纯碳化硅的场合，比如，卫星反射镜、集成电路光刻机高模量碳化硅部件、热交换器、反应堆燃料棒包壳等。已申请国家发明专利 2 项，发表论文 1 篇。

60

项目名称：基于微观力学的碳纤维增强高分子复合材料低速冲击损伤及剩余强度分析

技术领域：新型材料

项目背景：超轻高强碳纤维增强高分子复合材料的用量已成为飞机先进性的一个重要标志。复合材料使用可靠性和安全性是复合材料能否大量使用的关键。复合材料容易受到各类损伤，尤其是各种低能量物体的冲击，失效模式复杂，有可能是纤维、基体、或者界面；结构受初步损伤以后，损伤扩展较难判断，剩余疲劳寿命估算困难；以上问题对传统复合材料疲劳强度设计理论提出了新的挑战。

成果详情：本项目在国家自然科学基金的支持下，提出了基于组分微观力学失效机理的复合材料疲劳强度表征和寿命设计理论，为复合材料疲劳强度理论和试验研究提供了一个新思路。构建了冲击状态下微观力学失效理论，对复合材料层合板结构的低速冲击损伤机理进行了分析，对组分和界面的冲击强度进行了表征，建立了基于组分微观力学失效

机理的结构冲击损伤、冲击后剩余疲劳寿命评价的方法。本项目已发表SCI论文 2 篇，EI论文 1 篇，会议论文 3 篇，建立了一套复合材料在冲击载荷下损伤机制的分析模型，能够有效预测静载和疲劳载荷下冲击损伤复合材料的剩余强度，为碳纤维增强复合材料冲击损伤分析及剩余强度预测打下理论基础。

61

项目名称：P(VDF-TrFE)压电膜及树脂化学合成技术

技术领域：新型材料

成果详情：聚偏氟乙烯(PVDF)基氟聚合物具有优良的耐候、耐腐蚀、耐酸碱性能，以及优异的介电、铁电、压电、热释电性能，在电子信息、电气系统、新能源等领域被广泛应用。近年来研究表明，此类聚合物具有很高的电能存储能力，在高储能电介质中具有非常诱人的应用前景。同时，其良好的耐腐蚀、耐酸碱及耐候性也为其在新能源(如锂离子电池、燃料电池、太阳能光伏电池等)领域的应用赋予光明前景。然而现有的PVDF压电膜制备工艺苛刻，拉膜工艺难以掌控，产品质量稳定性不好，影响长期工作稳定性。VDF与三氟乙烯(TrFE)的共聚物P(VDF-TrFE)无需拉伸即可获得很好的铁电压电性能，但是，由于TrFE短缺、稳定性差等原因，使得P(VDF-TrFE)难以工业化，成本极高，苏威量产价格依然要 5 万元/kg。

市场前景：与传统的单晶和陶瓷压电材料相比，它具有良好可塑性、

较低的弹性模量，可以通过简单的制备工艺做成各种形状，如薄膜、纤维和块体等。P(VDF-co-TrFE)压电膜主要应用于以下领域：1) 水声传感器和换能器。压电聚合物P(VDF-co-TrFE)水声换能器研究初期均瞄准军事应用，如用于水下探测的大面积传感器阵列和监视系统等，随后应用领域逐渐拓展到地球物理探测、声波测试设备等方面。美国曾把水声与雷达、原子弹并列为三大发展计划。随着潜艇技术的发展，潜艇噪声越来越小，用被动拖曳线阵列声纳探测目标越来越困难。为此，各国海军又把目标投向了主动式探测声纳，开始研制低频主动拖曳线阵列声纳。经过高能射线辐照的P(VDF-co-TrFE)聚合物材料的声阻抗与水数量级相同，使得制备的水听器可以放置在被测声场中，感知声场内的声压，且不致由于其自身存在使被测声场受到扰动。因此是非常理想的主动式声纳传感器材料，目前我国船舶总公司这方面的需求非常迫切。2) 超声传感器和换能器。机器人安装接近觉传感器主要目的有以下三个：其一，在接触对象物体之前，获得必要的信息，为下一步运动做好准备工作；其二，探测机器人手和足的运动空间中有无障碍物。如发现障碍物，则及时采取一定措施，避免发生碰撞，其三，为获取对象物体表面形状的大致信息。超声波因其波长较短、绕射小并定向传播，利用P(VDF-co-TrFE)聚合物制造的超声传感器，使得机器人能够灵活地探测周围物体的存在与距离，该领域蕴藏着巨大的市场潜力。3) 医疗传感器和换能器。PVDF及其共聚物与压电陶瓷相比，其声阻抗(约 4MRayls)与人体组织(约 1.5MRayls)相当，在超声成像方面具有明显的优势。具有宽频响应、强度和稳定性良好的

优点，在超声成像中有助于实现短脉冲响应，提高轴向成像分辨率。利用延时频谱方法可使聚合物传感器的信噪比在 1 到 40MHz 之间不低于 60 到 75 dB。压电聚合物在生物医学领域的应用可以分为探头、超声源和成像系统三类。非介入聚合物探头心肺检测系统可以重复可靠地检测心肺功能。PVDF 薄膜较高的机械损耗使得 PVDF 超声发射源在较宽频率范围内具有比较平坦的发射电压响应，使其在宽带超声频率绝对校准应用中具有优异特性。其超声发射源可以发射频率超过 30MHz 的超声冲击波，在非介入肾结石超声破碎和超声应用中具有良好前景。由其拍摄的甲状腺超声图像大大优于压电陶瓷传感器的结果。采用 P(VDF-co-TrFE) 共聚物，可以进一步增强聚合物的压电效用，由工作频率为 7.5MHz 的 P(VDF-co-TrFE) 传感器获得的超声图像表明，由于采用共聚物，图像质量获得了显著提高。

4) 驱动器。压电/电致伸缩驱动器已成功地应用在精密定位、精密加工、智能结构、生物工程、航空航天、电子通讯、汽车工业、机器人关节、医疗器械等众多技术领域，并已经形成一个巨大的产业。电子束辐照的 P(VDF-co-TrFE) 含氟共聚物具备弛豫铁电体特征，使该材料具备了产生大伸缩应变的能力，最大应变可超过 4%，大大超出传统压电陶瓷材料 0.2% 的应变水平，这一优异特性赋予了该材料在微驱动领域的应用潜力。医疗上的应用主要是人工器官的驱动。例如人工肺(氧合器)、人工心脏(血泵)、人工肾(血液透析器)以及定向给药等，市场前景非常广阔。

技术成熟度：在大规模量生产前较小规模的实验中。目前该项目已完成公斤级中试，压电膜正在工艺升级中。已有知识产权：1) 可提供

P(VDF-TrFE)压电膜；2) 可联合开发、委托开发压电传感器。

62

项目名称：一种超硬非晶碳薄膜的制备装置和工艺

技术领域：新型材料

成果详情：碳基薄膜包括种类很多，例如石墨、金刚石、非晶碳、石墨烯、碳纳米管、碳化硅、碳化钛等，因此碳基材料具有非常丰富的物理化学特性，一直是科学家研究的重点。碳基薄膜中C有四个价电子，可以有包含 sp^3 、 sp^2 和 sp^1 三种杂化方式。在 sp^3 键组态中，碳原子的4个价电子分别与相邻碳原子结合，形成一个正四面体取向的 sp^3 杂化轨道，形成加强的 σ 键；在 sp^2 组态中，4个价电子中的3个与相邻碳原子结合，形成平面三角形的 sp^2 杂化轨道，也是 σ 键，第4个价电子则处在垂直于平面的轨道，形成较弱的 π 键；而在 sp^1 组态中，只有两个价电子形成 σ 键，其它的两个则形成 π 键，根据 sp^3 、 sp^2 和 sp^1 三种杂化方式的组合构成碳基材料的结构和物理特性。当薄膜中以 sp^2 杂化键为主时，呈现出石墨的特性，当薄膜中以 sp^3 杂化键为主时，呈现了金刚石特性，通常称为金刚石或类金刚石膜(DLC)。金刚石薄膜具有高硬度、低摩擦系数、导热、绝缘、吸收紫外、抗辐射损伤、耐腐蚀等诸多优良的物理化学特性一直是科学家研究的热点课题。金刚石薄膜分为单晶、多晶和非晶态材料，单晶和多晶金刚石材料常常是在高温下形成，而DLC是在常温下形成的一种亚稳态的非晶

态材料，可分为含氢类金刚石膜 (hydrogenated amorphous carbon, 简称a-C:H) 和不含氢类 (amorphous carbon, 简称a-C)。一般a-C的sp³ 键含量高于a-C:H, 所以也具有更高的硬度。当a-C中sp³ 键含量达 70%以上, 被称为非晶四面体碳 (tetrahedral amorphous carbon, 简称ta-C)。本项目即为ta-c薄膜制备技术。衡量金刚石薄膜质量的方法主要是看其SP³ 结构含量, 含量越高, 其性质越接近天然金刚石, 如何得到高含量的sp³ 键是科学家们研究的重点。而目前国际上制备的金刚石薄膜以ta-c的SP³ 含量最高, 可以达到 85%以上, 因此其性质最接近天然金刚石。本项目目前达到的水平为: SP³ 结构达到 87%, 薄膜硬度HV \geq 85Gpa, 平整度 0.2nm, 摩擦系数 \leq 0.08, 紫外吸收 97%以上。本技术自从 1991 年由澳大利亚的D. R. Mckenzie和D. Muller研制成功, 目前美国、英国、德国、新加坡、日本、韩国、澳大利亚、以色列、各国科学家都在努力将该技术应用于工业生产中。

技术性优越性: 1) 该技术与市场现有的部分硬质镀膜技术的比较, 该膜层可沉积在金属、陶瓷和介电材料等基体上, 膜厚可从几纳米到几微米, 均匀度误差达 \pm 1%, 是目前其它方法无法达到的。采用该方法镀制的膜层, 其硬度和耐磨性能高于其它方法。表 1 为目前国内常用的一些耐磨损涂层的显微硬度和摩擦系数。通过比较可以看出, ta-c薄膜的特性远远优于目前市场使用的各种涂层。2) 该技术达到的主要技术指标, 装置的技术水平达到国际先进, 制备的薄膜均匀, 重复性好、工艺稳定。制备的非晶碳薄膜SP³ 结构超过 85%以上, 摩擦系数小于 0.1 以下, 并可达到沉积工作条件为常温 (80°C) 以下。可以

根据不同基体设计不同涂层组合的复合涂层结构，并具有良好的附着力、耐磨损、摩擦系数小的良好特性。镀膜的均匀性在 1%。

现有基础：课题组依托电子物理教育部重点实验室，具有人才、测试等方面的优势，每年招收十几个博士和四十几个硕士，具有教授 10 人，副教授 20 余人。具有齐全的薄膜检测设备，供课题使用。目前实验室具有各种镀膜装置 4 台，扫描隧道显微镜一台，电子显微镜和俄歇谱仪各一台，X射线衍射仪一台，椭圆偏光薄膜测试仪一台，四极场质谱分析仪和超净台等设备。电子材料教育部重点实验室具有英国VG公司生产的多用表面分析仪，英国CAMSCAN公司生产的扫描电子显微镜。金属材料国家重点实验室具有透射电子显微镜，X射线衍射结构分析仪等也可使用。拉曼光谱测试可以在西安交大能动学院、理学院和材料学院完成。

应用成果：本课题为赵玉清教授团队经过近十年研究开发，形成了一些列成果包括：1) 离子镀膜装置；2) 离子源技术；3) 薄膜技术。在实验和设备工艺方面具有丰富的实践经验和很高的造诣，先后获的国家和陕西省重大科技专项资助。目前已实现ta-c的部分工业产品的产业化生产。

应用领域：1) 工业领域，本项目也被广州钢铁集团在全国调研 2 年后选中的转型转产的重点项目，目前已为广钢集团研制 6 台设备。2) 医疗领域，义齿、牙托和人造关节涂层及医用不锈钢刀具。3) 切削刀具，本项目不仅可以实现硬质合金金属切削刀具，而且已推广到高速钢刀具金属切削、木材和家具加工的高速钢和碳钢刀具。ta-c刀具

已得到部分单位应用，如：陕西百纳科技，关中工具厂，东方机械厂五分厂，成都光华数控刀具厂，陕西重型汽车有限公司，标准集团股份有限公司，长岭机器有限公司，神龙汽车有限公司。

技术成熟度：技术成熟、可产业化。

获奖情况：1) 陕西省高等学校科技成果一等奖（带电粒子束源系列关键技术及其应用）2008，2) 陕西省科技成果二等奖（带电粒子束源系列关键技术及其应用）2008，3) 2008 年度国际电工技术委员会特别贡献奖（IEC1908 奖），4) 四川省科技成果奖三等奖，RKDZQ270-1A型电子束蒸发源，5) 中国标准创新贡献奖一等奖，（IEC 60519-7:2008 电热装置的安全第七部分对电子枪装置的特殊要求、IEC60703:2008 具有电子枪的电热设备的试验方法）（中国国家标准化管理委员会；中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局），6) 电工行业国际标准化贡献突出奖，中国电器工业协会，2009。

专利列表：

- 1) 赵玉清 沈伯礼 赵鑫 朱克志 李冬梅 专利号： ZL2004 1 0026395.6 一种金属离子源，授权日：2007，3，7（发明专利）
- 2) 赵玉清 专利号：ZL012 47041. 4 一种用于工业省生产中制备超硬薄膜的离子源装置， 授权日：2002，6，26（实用新型）
- 3) 赵玉清 专利号：ZL012 47038. 4 制备超硬薄膜的离子源装置的滤质器 授权日：2002，7，31（实用新型）
- 4) 赵玉清 专利号：ZL012 47042. 4 阴极靶修磨器，授权日：2002，

6, 19 (实用新型)

5) 朱克志, 李东生, 赵玉清, 专利号: ZL012 65913. 4 固体离子源支撑支架, 授权日: 2002, 9, 18 (实用新型)

6) 朱克志, 李东生, 赵玉清 专利号: ZL012 65931. 2 一种用于离子镀膜室的分度回转工作台, 授权日: 2002, 9, 11 (实用新型)

7) 赵玉清等, 硬质合金、高速钢材料表面制备非晶碳复合涂层的方法 (发明专利, 已授权): ZL 2011 1 0136163. 4

8) 赵玉清等: 一种树脂镜片、有机玻璃片表面超硬涂层方法 (发明专利, 已授权时间: 2011, 7, 27)

9) 赵玉清等: 一种医用不锈钢刀锯表面制备非晶碳涂层的方法 (已授权 2011, 7, 27)

63

项目名称: 具有优良稳定性的透明离子导电弹性体

技术领域: 新型材料

成果详情: 一类新型的导电弹性体——离子导电弹性体 (ICE), 且演示了它在透明、柔性触摸传感器上的应用。与电子导体不同, 离子导体 (或名电解质) 采用离子作为载流子, 可以实现电子导体极难甚至是不可能实现的功能, 如同时具有导电性、极高的透明性以及可变形性。研究人员受锂电池聚合物固态电解质的启发, 设计了一种透明的

离子导电的弹性体。将电解质盐双三氟甲磺酰亚胺锂 (LiTFSI) 溶解于聚丙烯酸丁酯 (PBA) 弹性聚合物基体中, 通过离子在聚合物链段之间的传递实现离子电导。由于该材料不含有溶剂, 因此相当稳定, 在空气中既不减重, 也不表现出其弹性、透明度和导电性的衰减。此外, ICE拥有高温稳定性, 分解温度高达 300° C。ICE对普通金属电极不具有腐蚀性, 由于它不含水, 并且从空气中吸收水分(聚合物基体具有疏水性), 从而实现了金属接头的长期稳定性。拥有这些优点, ICE可能是工程离子器件的理想材料。该工作演示了它在柔性触摸传感器上的应用。此外, 研究人员通过在BA单体中引入其他单体共聚可显著提升该透明导电弹性体的离子电导率。其具有高达 1100%的断裂伸长率、92.4%的透光性、超过 300°C的高温稳定性, 优异的空气稳定性、无腐蚀性和高电压稳定性, 以及优异的自粘性和金属粘接性。具有这些优势, 离子导电弹性体可作为工程离子器件的理想材料, 将为柔性电子器件以及软机器等领域提供新的机会。

64

项目名称: 基于有机液态氢载体的循环储放氢技术

技术领域: 新型材料, 节能环保

成果详情: 有机液态氢载体是目前最具经济性和应用前景的供氢燃料体系, 它的储氢密度高且储运安全, 可在现有燃料分发基建基础上用于交通工具的动力替代, 它的应用能够大幅度减少燃料炼制过程和交

通工具使用中的污染物排放，降低环境污染。本项目以 N-乙基咪唑 (NEC) 为氢载体，利用其不饱和双键的加脱氢能力，开发高性能催化剂，提高循环内的储放氢效率，实现氢载体的高效循环。同时，通过揭示杂环芳烃加脱氢的反应机理，可为催化剂设计提供理论支持。本项目设计并制备出系列负载型 Pd 基金属催化剂（如 2.5wt% Pd/rGO、Pd1.2Cu/rGO、Pd1.3Au1/rGO、PdNi/SiO₂、PdCu/SiO₂）催化剂，其脱氢量高达 5.74wt%（完全转化为 5.79wt%），远高于商用催化剂的催化性能。同时，达到国际能源署和美国能源部技术指标的 5.5wt% 脱氢量只需 4.5h，比商用催化剂所需的反应时间缩短了 36%，达到了该领域内先进水平。

市场及效益分析：十二氢-N-乙基咪唑(12H-NEC)和 NEC 组成的可逆储放氢系统，是目前较为理想的有机液体储氢材料，其应用的关键是获得经济高效的脱氢催化剂。本研究制备的复合脱氢催化剂，脱氢量达到美国能源部标准，与商用脱氢催化剂相比，制备成本显著降低，脱氢效率高且可多次循环使用。本研究有助于提升有机液体储氢材料的应用水平与技术竞争力。

技术成熟度：对于 12H-NEC 脱氢反应，本研究已完成相应高效催化剂的设计以及反应机理的研究。所制备的单分散低负载量 Pd/rGO、Pd1.2Cu/rGO、Au1Pd1.3/rGO、PdNi/SiO₂、PdCu/SiO₂ 等系列催化剂，满足有关储氢材料的国际标准，制备方法简便可行，成本较低。

合作条件：要求合作方具备生物医用材料生产的背景与经验。厂房及办公面积约 1000 平米、技术人员 5 名左右、工人 20 名、流动资

金 1000 万元。

65

项目名称：纳米制冷剂水合物相变蓄冷材料的开发和应用

技术领域：新型材料，节能环保

成果详情：气体水合物相变蓄冷技术是一种新型的节能环保蓄冷技术，利用制冷剂水合物相变潜热储存能量，可将富余能量储存起来，然后在用能峰期将能量释放出来，在工业与民用建筑、空调、冰箱的节能中有重要应用价值。此研究项目基于溶液热力学和晶体生长理论，将常压下为液相制冷剂制备为热力学稳定的纳米制冷剂水合物相变蓄冷材料，将改变目前普遍利用机械力或外场等使水相和制冷剂相混合的方法，比传统蓄冷剂具有热力学性质稳定、反应速率快、制备简单、使用方便、蓄冷效率高的优点。

项目创新点：1) 将制冷剂以纳米尺度溶于水中，形成热力学稳定的透明微乳液，通过优化制备方法和组成提高烃类制冷剂在水相中的溶解度，从而避免消耗用于两相混合分散的机械能和外场能，降低了能耗，简化了设备结构。2) 利用功能材料的辅助作用强化传质传热，为制冷剂和水提供更大的传热传质面积和成核点，提高水合反应速率和转化率，减小过冷度和诱导时间。3) 通过调节纳米制冷剂水合物蓄冷工质中的油水体积比、功能材料种类与浓度、操作温度、换热方法等控制相变温度和能量储存功效。

市场及效益分析：该产品制备规模易于调整，常压使用，可适用不同规模的能量储存需求，不需复杂蓄冷设备，可用于电力移峰填谷、建筑节能、蓄冷空调、农产品和生物制品的冷藏保鲜、高低温冷库、冷藏物流（如冷藏集装箱、冷藏车、冷藏船、蓄冷运输箱）以及太阳能有效利用等等领域，具有良好的发展前景和社会经济效益。

66

项目名称：核电关键结构材料环境损伤

技术领域：新型材料，新能源及新能源汽车

成果详情：核电是改善环境和优化能源结构的重要举措。核电结构材料的可靠服役是核电站安全运转的基础。随着核电站的老化，研究核电关键结构材料的环境服役行为对核电站的寿命评估和安全管理至关重要。应力腐蚀开裂是材料在腐蚀环境和载荷交互作用下发生的一种脆性失效行为，是核电结构材料的一种主要环境失效方式，值得重点关注。堆心构件材料在服役中还受到辐照作用，会进一步加速应力腐蚀开裂过程。由于影响应力腐蚀开裂过程的因素很多，对其机理以及应对措施的研究一直是个难题。系统研究了退火处理对堆内构件不锈钢应力腐蚀裂纹扩展行为的影响。发现虽然退火处理可以使中子辐照材料的损伤缺陷以及力学性能得到明显回复，但是材料的裂纹扩展速度在氧化性水环境中并没有明显变化，而只有在还原性水环境中才会随着退火程度的增加而降低。进一步分析表明晶界Si元素的偏析程

度是影响材料应力腐蚀裂纹扩展敏感性和环境敏感性的关键因素。这项工作对理解辐照加速应力腐蚀开裂的机制以及核电站的老化延寿具有重要指导意义。

67

项目名称：第二代电动汽车动力电池用磷酸锰锂材料生产技术

技术领域：新型材料，新能源及新能源汽车

成果详情：第二代电动汽车动力电池用磷酸锰锂材料不仅继承了 LiFePO_4 材料的高安全性、高稳定性、高比容量等优点，且具有更高的嵌锂电位、 LiFePO_4 的放电电位，平均每台约 4.0V，比 LiFePO_4 材料高 20%。

技术指标：本项目采用高温固相法制备出高性能 LiMnPO_4/C 复合材料，0.1C的可逆比容量高于 $140\text{mA} \cdot \text{h/g}$ ，6C倍率下的快速充放电容量仍高于 $100\text{mA} \cdot \text{h/g}$ ，1C下循环 50 次后的容量保持率为 95%，技术水平处于国际先进水平。

市场前景及应用： LiMnPO_4/C 复合材料主要应用于动力型锂离子电池，是各类移动电子设备、电动汽车、电站储能以及航空航天、军事和医学领域中理想的供电电池。目前价格 15 万元/吨，如按照年产 1 万吨规模，产值可达 15 亿元，利润可达 2 亿元。

项目名称：高性能连续纤维增强复合材料 3D打印工艺

技术领域：新型材料

成果详情：本项目以连续纤维增强热塑性聚合物基高性能复合材料零件直接 3D打印为目标，采用连续纤维与热塑性聚合物为原材料，利用复合浸渍-熔融沉积的 3D打印工艺实现高性能复杂结构复合材料构件的低成本一体化快速制造，打印的复合材料零件的拉伸与弯曲强度分别达到 340MPa与 390MPa, 该技术既改进了传统 3D打印零件强度不足的缺点推动了 3D打印技术向工业化应用的进程，又克服了传统复合材料成型工艺成本高、周期长的技术瓶颈促进了复合材料在将来的进一步发展与应用，是一次具有革命性的创新与突破。该技术属于国内首创，获得多项自主知识产权，受到国内外越来越多机构的关注，在国内，本项目得到国家重点研发计划、国家自然科学基金、载人航天等项目的支持，开展关于工艺机理与装备等方面的研究，探索该工艺在航空航天领域的应用前景，在国外，分别与德国、俄罗斯等研究单位合作对该工艺的材料以及结构设计开展研究，研究水平国内外领先。在当今全球 3D打印领域快速发展的形势下，复合材料 3D打印具有巨大的发展前景，据SmarTech预测，至 2026 年全球用于 3D打印的复合材料收入将超过 5 亿美元，未来十年内复合材料将成为 3D打印最主要的市场机遇，目前该项技术已经开发出了成熟的工业设备，形成了成熟的装备-材料-工艺体系，具备了商业化应用的条件，已经初步在复合材料轻质结构等方面得到应用，随着该技术的成熟，将来必将在

航空航天、汽车交通甚至民用领域得到广泛的应用。

合作条件：合作方具有热塑性复合材料界面改性、基体材料开发、复合材料结构设计以及复合材料应用等方面特长。

69

项目名称：一步法聚合成膜工艺制备高储能介电薄膜

技术领域：新型材料

成果详情：高压脉冲电容器具有功率密度高、充放电速度快、优良的交直流高压特性等特点，在光电装备、电磁装备等领域占有不可替代的位置。现有高压脉冲电容器主要是采用陶瓷材质，具有优异的温度特性及交直流高压特性等优势。但是，陶瓷电容器储能密度低，击穿场强低，难以大面积薄膜化制备和柔性化。除了陶瓷电容器外，聚合物金属化薄膜电容器得以高速发展，尤其是聚丙烯（PP）双向拉膜技术及薄膜制备在国内的快速进步，大大促进了双向拉伸聚丙烯（BOPP）薄膜电容器的发展及高性能化。但是该聚合物材料介电常数小、电容器储能密度低等缺点导致其在脉冲电容器中的应用受到诸多限制。我们开发了一种一步法聚合交联成膜工艺制备介电性能优异的高储能介电薄膜材料。

技术先进性：1) 一步法聚合成膜即可制备得到交联的高质量透明薄膜，制备工艺简单易行。2) 原料工艺级，便宜易得，制备过程在空气中进行，无须惰性气氛，生产成本低。3) 聚合物薄膜介电性能优异，

击穿场强及储能密度优异。

产品性能：线性电解质薄膜性能如下：击穿场强： $>700\text{MV/m}$ ，介电常数：2-3，介电损耗： $<0.01@1\text{kHz}$ ，耐热性： 100°C ，储能密度： $>10\text{J/cm}^3$ ，放电效率： $>10\%$ 。

二、生物医药及健康领域

1

项目名称：BP180 相关性疾病治疗方法

技术领域：生物医药及健康

成果详情：BP180 又称XVII型胶原蛋白，是一种存在于真表皮交界处的II型跨膜蛋白，大小约 180-kDa，其作为半桥粒蛋白中的重要组成成分，在维持基底膜带与细胞外基质的紧密连接中起重要作用。BP180 在大疱性类天疱疮（BP）以及遗传性大疱性疾病（JEB）中的作用也表明该蛋白在维持真表皮紧密连接中的作用。除此之外，BP180 是否参与皮肤炎症的病理过程尚不明确。通过建立BP180 基因缺陷小鼠模型 Δ NC16A，发现BP180 功能缺陷可自发形成一种以严重瘙痒、炎症细胞浸润、皮肤屏障破坏及血清IgE升高为主要表现的皮肤炎症反应，并通过体内及体外实验证实该炎症反应的发生及瘙痒的形成并不依赖于T细胞及B细胞介导的适应性免疫的参与，而是通过角质形成细胞分泌的炎症因子介导来完成。这项研究成果不仅为研究BP180 相关性疾病提供了一个可靠的小鼠模型，同时通过大量的实验数据证明BP180 在调控及介导皮肤炎症中发挥的生物学功能，为治疗BP180 相关性疾病提供了可能的治疗靶点。

2

项目名称：原发性肝细胞癌（简称肝癌）治疗方法

技术领域：生物医药及健康

成果详情：原发性肝细胞癌（简称肝癌）是全球最常见的恶性肿瘤之一，每年新发病例数、死亡病例数分列各类癌症的第六位和第二位。我国是肝癌高发国家，全球一半左右的肝癌新发和死亡病例发生在我国。乙肝病毒感染是我国及其他乙肝高流行国家和地区肝癌发病最主要的原因。目前，肝癌治疗效果远不能令人满意，甚至于接受了肝切除手术的早期患者，由于复发率高，其存活时间和生活质量也受到严重影响。核苷（酸）类似物（如恩替卡韦、替诺福韦）抗病毒治疗为改善乙肝相关早期肝癌患者手术治疗效果提供了途径。然而，抗病毒治疗需要长期服药才能见到效果，而长期服药又会造成沉重的经济负担。因此，投入与产出是否平衡是必须考虑的问题，解决此问题将为治疗指南制定提供科学依据。开展卫生经济学评价研究，研究结果证明：我国乙肝相关早期肝癌患者，接受肝切除手术后实施抗病毒治疗是具有成本效果（cost-effective）的策略。该研究成果近期在胃肠和肝病领域国际顶级期刊 *Hepatology*（影响因子 13.246）在线发表。该研究成果不仅为我国乙肝相关肝癌治疗策略制定提供了科学依据，也可被其他国家借鉴。

3

项目名称：骨质疏松症发病机制

技术领域：生物医药及健康

成果详情：骨质疏松症是一种最常见的复杂骨骼疾病，确定人类体内

骨质疏松症的遗传结构，特别是解释潜在的基因组和分子机制是全人类面临的共同挑战。除了在全基因组关联研究中确定的易感位点外，各种组学技术的进展，包括基因组学、转录组学、表观组学、蛋白质组学和代谢组学，都被应用于骨质疏松症的发病机制的剖析。然而，每一种技术都不能单独捕捉疾病病理学的全部信息，无法全面识别潜在的病理分子机制。研究人员对现有各种组学技术对骨质疏松症发病机制的研究进行了综合解读，阐述了每种技术的优势和挑战，并指出整合多组学进行研究已为骨质疏松的分子机制解析和诊疗技术研发带来了新契机，是未来发展的趋势。

4

项目名称：针对不可按压止血的快速止血材料

技术领域：生物医药及健康

项目背景：不可控的出血导致了超过 30%的创伤死亡，其中超过一半是发生在紧急护理到来之前。虽然目前常用的止血剂在肢体表面创伤止血方面表现出优秀的性能，但它们通常对深度创伤出血的止血效果较差。因为这些创伤多呈现不规则形状且难以通过按压止血。

成果详情：使用壳聚糖衍生物和碳纳米管材料制备成具有可注射的形状记忆纳米复合多孔晶胶止血材料。壳聚糖衍生物作为晶胶的主要骨架，可以提供很好的止血性能、促进伤口愈合以及血液触发形状记忆恢复功能。碳纳米管材料作为纳米填料，可以提高晶胶的力学性能、

赋予晶胶良好的导电性以及出色的近红外触发响应性（例如止痛药物缓释、光热杀菌等），同时碳纳米材料也可进一步提高复合晶胶的促凝血性能。该复合晶胶的血细胞和血小板吸附与激活能力使其在小鼠尾部截肢模型和肝脏损伤模型中表现出出色的止血性能。此外，由于该复合晶胶的快速血液吸收性、血液浓缩性能以及快速的血液触发形状恢复作为具有足够机械性能的物理填充屏障，使其在兔子肝脏体积缺损、不可压缩性出血致死模型中表现出优异的止血效果。

成果优越性和应用前景：该形状记忆复合晶胶止血敷料的原料来源广、便宜，制备简便，具有巨大的应用潜力。

5

项目名称：新型多功能水凝胶伤口敷料

技术领域：生物医药及健康

项目背景：皮肤损伤是人体最为常见的损伤之一，不合理的治疗方案常常会危害人体健康，例如引发细菌感染、组织脱水，甚至更为严重的二次创伤等。因此，设计可以加快伤口封闭、促进伤口愈合的新型伤口敷料在现代医学中具有重要的临床意义。水凝胶医用敷料是近年来颇受青睐的一种新型创伤敷料，但目前常见的水凝胶敷料仍然存在缺乏固有抗菌性能从而引发伤口感染、机械性能较弱为病患带来不适感、粘合性能较弱无法贴合皮肤等一系列问题，在治疗效果和使用体验方面都限制了其进一步应用。

成果详情和技术先进性：课题组合成的季胺化壳聚糖(QCS)与芳香醛基功能化的Pluronic F127 三嵌段共聚物(PF127-CHO)进行动态化学键交联，研制出同时具有快速自愈合、良好机械性能、高粘合力、抗菌性能的可注射水凝胶敷料。该水凝胶的原位成胶和组织粘合性能可以快速封闭任意形状的伤口，并与伤口轮廓粘合，为其提供物理屏障并模拟皮肤的湿润环境，其止血性能和抗菌性能可以让伤口快速止血并防止伤口感染。基于动态席夫碱键和共聚物的胶术交联两种作用，水凝胶敷料被赋予与人体皮肤相似的模量，展示出易延展、易压缩的机械性能，极大降低传统敷料捆绑伤口带来的不适感。负载活性药物姜黄素后的凝胶表现出抗氧化性与凝胶本身多种性能结合从而促进全皮层缺损伤口快速愈合。因此，该水凝胶作为生物活性敷料在伤口愈合应用中具有巨大潜力。

6

项目名称：c-Myc诱导的肝细胞肝癌发生机制

技术领域：生物医药及健康

成果详情：肝细胞癌是一种致死性肝癌，对于该癌症的治疗手段十分有限。c-Myc是肝癌发生的一个关键癌基因，但其在肝脏中致癌的具体机制尚不清楚。哺乳动物雷帕霉素靶点复合物2(mTORC2)通过调控多种激酶，尤其是蛋白激酶B(AKT)，与肿瘤发生紧密相关。在肝脏中蛋白激酶B(AKT)具有AKT1和AKT2两种亚型表达。并且AKT2是

活化的磷酸肌醇-3-激酶 (PI3K) 和PTEN缺失后诱导肝细胞癌发生的下游主要靶点, 而且AKT1 在肝细胞癌发生中的确切作用仍然未知。AKT1 和AKT2 在c-Myc诱导的肝细胞肝癌发生中的作用还未有相关研究报道。团队创新性地发现哺乳动物雷帕霉素靶点复合物 2(mTORC2) 在c-Myc驱动的小鼠肝细胞癌中被激活, 导致Akt1 磷酸化激活, 而对Akt2 没有显著作用。mTORC2-Akt1 信号在c-Myc促进肝癌发生过程中具有关键作用。研究证明了对肝脏内哺乳动物雷帕霉素靶点复合物 2 (mTORC2) 主要构成分子Rictor敲除后, 抑制了小鼠体内c-Myc诱导的肝细胞癌形成。另外Akt1 的缺失, 而不是Akt2, 可完全阻止小鼠c-Myc诱导的肝细胞癌形成。在c-Myc 诱导的肝癌细胞系中沉默Rictor 或Akt1 可以抑制磷酸化的叉头框蛋白 1 (Foxo1) 表达, 并在体外强烈抑制细胞生长。在人类肝细胞癌样本中, c-MYC的激活与磷酸化AKT1 的表达密切相关。RICTOR和AKT1 高表达, 与肝癌患者生存期差有关。在c-Myc诱导的小鼠HCC中, 哺乳动物雷帕霉素靶点复合物 1(mTORC1) 抑制剂雷帕霉素在阻止c-Myc驱动的肝癌进展方面效果有限, 但使用mTORC1 和mTORC2 的双重抑制剂MLN0128 后可通过诱导细胞凋亡和坏死有效促进肿瘤的消退。本研究表明mTORC2/Akt1 信号在c-Myc诱导的肝癌发生过程中的重要作用, 本研究提示Akt1 和AKT2 在肝癌的发生发展过程中有不同的功能和作用, 同时靶向于哺乳动物雷帕霉素靶点复合物 1 (mTORC1) 和哺乳动物雷帕霉素靶点复合物 2 (mTORC2) 可能更有效治疗c-Myc扩增或过表达的肝癌患者。

7

项目名称：中空聚多巴胺纳米载体

技术领域：生物医药及健康

项目背景：如何改善肿瘤的缺氧环境，提高耗氧治疗方法（如化疗、放疗、光动力、声动力等）的治疗效果，是肿瘤治疗面临的一大挑战。

声动力疗法（SDT）是利用超声波对生物组织有较强的穿透能力，尤其是聚焦超声能无创伤地将声能聚焦于深部组织，并激活声敏剂产生抗肿瘤效应。但由于肿瘤乏氧微环境的限制，SDT的治疗效果往往受到很大的影响。

成果详情：项目组开发了一种肿瘤微环境响应的铂颗粒嵌入的中空聚多巴胺纳米载体，负载化疗药物阿霉素和声敏剂二氢卟吩（Ce6）并修饰线粒体靶向配体后，用于肿瘤的化疗和声动力联合治疗。

8

项目名称：葡萄糖识别传感机理

技术领域：生物医药及健康

成果详情：葡萄糖作为一种主要生理物质影响着人们日常生活的方方面面，因此在各个领域（如医学、环境监测以及食品分析）中寻求一种快速、可靠和廉价的葡萄糖检测方法极其重要。但糖分子因其结构多样性、高溶剂化能等特性，生理条件下对其识别检测极其困难。继

朱永勇和托尼·沙尔尼克于 1992 年发表第一个硼酸荧光系统之后，托尼·詹姆斯和世治新凯于 1994 年和 1995 年共同撰写了一系列论文，利用光诱导电子转移机理，开发了邻苯氨甲基硼酸荧光探针，成功应用于生理条件下糖分子的检测。这项研究在糖的检测方法上引发了一场革命，被大量应用报道，引发国际社会广泛关注。2003 年，乔治亚州立大学王炳和教授通过理论计算和实验验证，对上述识别机理提出质疑，随后提出电离常数转换机理。2017 年，埃里克·安斯林教授又提出聚集—解聚机理。但以上所有机理论断不能正确或完全解释荧光变化的真正原因。对四类邻苯氨甲基硼酸荧光探针进行了系统研究，借助于核磁共振技术、晶体结构解析、溶剂效应和质子同位素效应等技术手段，成功揭示了糖分子识别的新机理为分子内能量转移，否定了光诱导电子转移和 pKa 转换机理，为相关研究提供正确的理论指导。以上研究成果发表在《美国化学会志》期刊上，被美国化学会志选为热点以《点亮基于硼酸的荧光探针》为题报道。

9

项目名称：高热效、可降解磁性纳米粒子肿瘤热疗系统

技术领域：生物医药及健康

成果详情：磁（感应）热疗是利用磁性纳米粒子在交变磁场下产热来治疗疾病的一种技术，该技术在肿瘤热疗领域有很好的应用前景。磁性纳米粒子的产热效率和能否降解是磁（感应）热疗中非常重要的两

个方面。目前高磁热效率的磁性纳米粒子粒径较大，在体内可能会长期积累造成安全隐患，而容易体内降解的磁性纳米粒子粒径太小，产热效率很低，所用磁热疗设备体积大、价格高、使用功率常超过安全范围。他们首先设计了动物磁热疗专门设备，采用利兹线圈水冷不仅比传统铜管水冷的载流面积更大，且能够更好地控制线圈表面温度，而且设备体积小、价格低、使用功率在人体安全范围。接着在氧化铁磁性纳米粒子中掺杂钴增加其磁晶各向异性常数，从而增大其在小粒径时的产热效率，同时又能保持其体内降解性。再用磁热理论模拟钴铁氧体纳米粒子的产热效率与材料性质的关系，发现采用立方体纳米粒子比球体粒子更接近于实验结果且发热效率最高，解决了目前该领域理论预测效果与实验不符的问题。在此基础上得到了钴铁氧体纳米粒子最佳产热条件，并据此制备了一种兼具高磁热效和可体内降解的立方体钴铁氧体纳米粒子 (CFNPs)，其粒径在 10-13nm 之间，表面修饰小于 1nm 的咖啡酸层以提高其水溶性。实验发现 11.8nm 粒径的 CFNPs 有最高的磁热效 (ILP 值 12.11 nHm²/kg)，其结果远高于报道的同类型磁性纳米粒子。在幅值 33kA/m、频率 115kHz (符合人体安全条件 $H \cdot f < 5 \times 10^9 \text{A}/(\text{m} \cdot \text{s})$) 的磁场下对裸鼠肿瘤进行了磁热疗，发现在安全磁场下 CFNPs 可将肿瘤区域温度升高至 46° C 左右，有效抑制了肿瘤生长。该粒子能以进入血液等方式缓慢离开肿瘤区域。一旦进入血液，64% 的纳米粒子可在 14 天内排出体外，其降解性能接近于核磁造影剂 Feridex，已经达到临床应用标准。

项目名称：易感变异致病机制

技术领域：生物医药及健康

成果详情：复杂疾病是危害人类健康的主要杀手，人类各种常见疾病都属于复杂疾病的范畴。复杂疾病受多基因调控，致病机理复杂。近十年来，各国研究者利用全基因组关联研究（Genome-wide association study, GWAS）已成功鉴定了数万个与数百种复杂疾病相关的易感变异位点。然而，近90%的易感变异位于基因组非编码区，其下游调控机制未知，亟需解析其分子调控机制，才能将GWAS发现最终转化为临床药物靶标。非编码区疾病易感变异机制解析是当前遗传学领域公认的研究热点和难点。课题组以骨质疏松症疾病为切入点，揭开了基因组“暗物质”非编码区 1p36.12 基因座的调控秘密：通过整合基因组、转录组、表观组和三维基因组的系统生物学分析，确立了 1p36.12 区潜在关键功能性调控变异——SNP-rs6426749。结合数据和功能实验，研究发现，该SNP位于一个增强子上，rs6426749-G碱基通过结合转录因子TFAP2A，激活增强子活性，进而通过染色质成环远距离调控位于 600kb以外的长链非编码RNALINC00339 的表达，LINC0339 高表达显著下调CDC42 表达，进而抑制成骨细胞增殖分化，增加骨质疏松症患病风险。该研究首次解析了 1p36.12 非编码区骨质疏松症易感变异的分子调控机制，发现一个全新的骨质疏松症潜在药物靶点，为研究复杂疾病非编码区风险变异调控机制提供了新思路

项目名称：肿瘤治疗与组织再生一体化

技术领域：生物医药及健康

成果详情：乳腺癌是女性最常见的浸润性癌症，也是仅次于肺癌的女性癌症死亡的第二大凶手。目前临床上治疗乳腺癌的策略主要是手术切除含有可检测肿瘤的乳腺组织。然而，乳房切除术通常会导致永久性乳房缺陷，这会导致焦虑、失眠、抑郁等一系列心理综合症。因此在治疗时原位形成足够数量的成熟脂肪组织进而实现乳房重建便极为关键。此外，外科手术通常很难完全切除患者体内的肿瘤细胞，常常需要全身和局部化疗来清除残留的肿瘤细胞。然而，肿瘤细胞的高耐药性和抗癌药物的严重副作用可能导致肿瘤复发和对健康组织/器官的损害，从而给患者带来无尽的痛苦。因此研究者逐渐将焦点转移到具有灵活的操作性、无侵袭性、低毒性、且能有效杀灭肿瘤细胞的光热治疗上，并构筑了一些光热组分负载的支架材料，以期实现肿瘤治疗和组织再生功能。然而，传统的光热治疗对正常细胞与肿瘤细胞没有选择性，在杀灭肿瘤细胞的同时也会损伤周围的正常细胞以及支架内负载的干细胞，因此难以同时实现肿瘤的杀灭及健康组织的再生。课题组采用盐模板法制备聚己内酯（PCL）及丙烯酸-g-聚乳酸（PAA-g-PLLA）聚合物复合支架，并通过肿瘤微环境响应性的饱和酰胺键连接藤黄酸（GA）负载的氧化石墨烯（GO）纳米粒子。在复合支架植入

到肿瘤切除区域后，围微酸性环境诱导响应性键断裂，使GO/GA复合物得以释放。由于氧化石墨烯具有良好的光热特性，而藤黄酸对肿瘤细胞有显著的耐热壁垒降低作用，因此脱落的GO/GA复合物通过内吞作用进入肿瘤细胞后，可以在808nm激光下对肿瘤进行温和有效(45℃)的光热治疗。该支架的上述功能通过与上海交通大学医学院附属第九人民医院共同完成的细胞及动物实验证实。实验结果显示，该支架可杀灭95%以上的人乳腺癌细胞(MCF-7)并有效抑制肿瘤生长，从而大大提高患肿瘤老鼠的生存率。同时，该肿瘤治疗过程对干细胞活性无明显影响。无论近红外照射与否，GO-GA-聚合物支架均能通过上调脂肪相关基因的表达提高诱导ADSCs向脂肪细胞分化的能力，最终显著促进新的脂肪组织的形成。研究表明，该新型肿瘤微环境响应性的GO-GA-聚合物支架具有良好的肿瘤杀伤效果，且对脂肪源性干细胞或周围健康细胞的副作用可忽略不计，是一种很有前途的肿瘤治疗与术后组织再生结合的治疗平台。

12

项目名称：纳米贵金属生物材料介导骨骼肌再生

技术领域：生物医药及健康

成果详情：骨骼肌在人体运动和呼吸中起着重要的作用，大量的肌肉损伤和相关疾病会导致骨骼肌无法实现修复和再生，最终会导致肌肉功能的丧失。目前基于药物和细胞的技术在肌肉修复方面存在各种局

限性，研发新的生物医学工程技术和组织再生生物材料对于骨骼肌再生和功能重建具有重要的学术意义和应用价值。课题组研究发现，在不加药物和生长因子的情况下，纳米金和金银合金纳米粒可以显著介导成肌细胞的肌管形成和促进细胞成肌分化。而进一步的研究发现，纳米合金颗粒可以通过激活p38 α MAPK的信号途径成肌分化相关基因和蛋白的表达，调控骨骼肌的分化。体内骨骼肌缺损动物模型发现，纳米金银合金材料可以显著促进缺损区肌纤维和毛细血管的形成，最终实现骨骼肌的再生。该研究拓宽了纳米贵金属材料在组织再生方面的应用，并揭示了其调控骨骼肌分化的分子生物机制。

13

项目名称：中枢痛觉调控通路研究

技术领域：生物医药及健康

成果详情：在中枢神经系统内，感觉信息从外周神经感觉末梢传入脊髓，进一步上行传递至感觉皮层。而运动信息源于运动皮层，下行直接传递至脊髓。以往的研究并未发现感觉皮层有向脊髓的直接投射。前扣带回（ACC）属于边缘系统的一部分，是与感觉以及相关的情绪、认知功能关系密切的核团。卓敏课题组通过综合利用在体脊髓全细胞膜片钳记录、形态学追踪、免疫电镜以及光遗传学技术等发现ACC存在向脊髓的直接投射，且直接增强脊髓的兴奋性感觉信息传递，从而为感觉皮层下行调控脊髓神经元活性提供了全新的思路。外周的痛觉

强度和人体感受到的疼痛程度往往不一致。比如人很兴奋的时候会忽略身体的疼痛。相反，轻微的可能引发剧烈的疼痛。典型的例子是有些人对于打针若无其事，有些人却疼痛难忍。其原因主要在于脑内存在一个疼痛调控系统，该系统可以对外周传入的痛觉产生抑制或增强的效应，最终使得感觉皮层接收到的疼痛信息被减弱或增强。近 30 年的研究一直认为，脑内的痛觉调控系统仅源自于脑干。然而，目前的研究结果表明，ACC 下行至脊髓的调控通路并不通过脑干的介导。在阻断脑干神经元活性的情况下，ACC 依然能够增强脊髓的兴奋性感觉信息传递。因此，该研究也是对以往脑干—脊髓下行调控，尤其是下行易化调控的重要补充。该研究可能还适用于解释情绪引发的不适感。比如人在焦虑，抑郁时候自觉浑身疼痛，截肢的患者会产生幻肢痛等。这可能是由于与情绪关系密切的 ACC 被激活，从而导致下游的脊髓痛觉相关神经元活化，产生了痛觉信号传入脑内增强的效应。实验室二十多年来的工作证明 ACC 的兴奋性在慢性疼痛的情况下是持续增加的，这种增加，对于慢性痛的维持有非常重要的作用。通过基因学和药理学办法，减少这些兴奋性的话，就可以产生镇痛的作用。而这一工作的意义还在于 ACC 兴奋性的增加，会导致脊髓痛信号传入的增强。也就是说，病痛的病人对疼痛更为敏感，而这种敏感不仅仅是在大脑上实现，也在脊髓上实现。这个工作对未来设计新的治疗方案和新的药物来控制病人的慢性痛有重大的意义。

项目名称：中国社区抗生素监管评估

技术领域：生物医药及健康

成果详情：采用具有盲法特点的模拟顾客法标准化测量工具，分别模拟儿童腹泻和成人上呼吸道感染（简称“成人上感”）患者，对覆盖全国 6 个省份 24 个地市的 133 个县域与 88 个城市辖区的 2423 家社区药店进行了 4846 次模拟顾客访问，在记录抗生素是否凭处方销售的同时，观察和默记药店药师等工作人员的药学服务行为。研究表明，针对以上两种病症，分别有 48.5%和 70.1%的受访药店不凭处方提供了抗生素，而该比例在不同地域、省份和城乡间均存在差异；不凭处方销售情况与有药师在岗执业、药店为连锁药店呈反向关系；药师在岗率仅为 35%，药店提供的药学服务情况令人堪忧。此外，基于课题组 7 年来的追踪调查数据，该研究分析了 2011-2017 年间陕西省社区药店不凭处方销售抗生素的趋势，并总结了 2004 年以来国家层面和省市地方层面的各项干预措施。结果显示：儿童腹泻和成人上感模拟顾客不凭处方获取抗生素的比例分别从 2011 年的 72.3%和 95.8%，下降到 2017 年的 50.2%和 69.5%，药店不凭处方销售抗生素状况持续改善，但从根本上消除此不规范行为仍然任重道远。

15

项目名称：中国肥胖预防和控制

技术领域：生物医药及健康

成果详情：总结了我国肥胖问题及相关预防和控制工作，并对我国今后肥胖的防控和科研工作提出了建议。文章提到建议今后强化政府责任、加强跨部门肥胖防控合作，出台促进健康饮食和致肥胖环境管理的相关政策，营造有利于慢性病防治的社会环境；发挥专业机构优势实施全民健康教育，动员家庭和个人参与健康体重管理和肥胖防控；规范医疗机构的肥胖诊断和临床治疗、促进肥胖患者的自我管理、将肥胖的治疗纳入医疗保险等。关于我国未来的肥胖研究，文章建议今后开展长期、大规模、多层次、多成分的肥胖研究，加强对致肥胖环境风险因素的研究，促进循证政策研究和实施干预研究，坚持和扩大基于学校的干预项目，探索肥胖干预新方法和新的研究方法，加强对肥胖防控政策和干预项目的效果和影响评价的研究，强化肥胖干预项目的成本效益评价以及有效肥胖防控措施的推广研究。

16

项目名称：DNA甲基化与复杂疾病研究

技术领域：生物医药及健康

成果详情：全基因组关联研究（GWAS）是复杂疾病易感基因定位的主要统计遗传学方法之一。既往GWAS研究发现的疾病相关遗传位点很大一部分位于染色体的非编码区域，其在疾病发生发展中的作用往往难以解释。近期研究发现，位于非编码区域的疾病相关遗传位点在基因组功能调控性位点（如甲基化数量性状位点，meQTL）中显著富集，

提示其可能通过调控基因的表达及功能参与疾病的发生和发展。团队创新性地提出将不同生命阶段全基因组meQTL数据和慢性复杂性疾病GWAS数据进行整合挖掘的研究方法。研究人员首先利用真实人群出生、儿童、青少年、生育期和中年 5 个生命节点的全基因组meQTL数据，生成全生命周期共有的meQTL注解数据库，然后利用最新的基因组功能注解数据以及大规模精神疾病公共GWAS数据，分析后发现一组与精神疾病相关的基因和基因通路，其中多个已被既往研究证实与精神疾病相关，验证了研究方法的可靠性。本研究从基因组甲基化的角度为利用GWAS探索慢性复杂疾病遗传机制提供了一种新的研究思路和方法。

17

项目名称：新生儿出生后两周脑白质进入快速增长期

技术领域：生物医药及健康

成果详情：新生儿脑白质在出生后两周进入快速增长阶段。研究团队采用磁共振扩散张量成像，对新生儿全脑白质骨架所受外界环境影响进行探究。结果发现：新生儿脑白质在出生后两周进入快速增长变化期；外界环境首先作用并影响运动、视、听脑白质发育；外界环境对足月儿的影响程度大于早产儿。以上研究提示，临床上评估早产儿脑发育时，常校正其至足月龄再与正常足月儿比较，该做法忽略了外界因素的影响，因此有待完善和改进。该研究对于客观评价新生儿，特

别是早产儿脑发育具有重要意义。该工作得到了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目、教育部新世纪优秀人才计划项目、中国博士后基金面上项目、陕西省自然科学基金青年项目的支持。

18

项目名称：中国人群特有肿瘤克隆结构和演化模式

技术领域：生物医药及健康

成果详情：大数据驱动的肿瘤精准诊疗是恶性肿瘤研究和临床诊疗中划时代的革命性突破，由此带动的肿瘤诊疗创新层出不穷，使得越来越多的癌症患者重获新生。精准诊疗的基础是大数据精细化挖掘和大数据决策支持模型。能不能设计出先进的、适用于中国人群基因特点的数据挖掘方法和决策模型，关乎肿瘤诊疗的大批高精尖技术能不能真正有效地服务市场、服务人民，形成良性互动；更关乎我国能否在攻克癌症这个事关国计民生、人类健康的战略领域，及其带动的全周期健康管理、大健康产业发展和国际竞争中抢占先机。正因为如此，国务院办公厅印发的《关于促进和规范健康医疗大数据应用发展的指导意见》中明确将其列为全面深化健康医疗大数据应用的五大重点任务之一。大数据指导肿瘤精准诊疗不仅是临床应用中的卡脖子问题，由于其计算复杂性，也是近年来国际学术研究的前沿和热点，长期为美英等国垄断，缺少中国声音。西安交大生物信息计算团队通过多年研究，提出了一整套适用于中国人群的肿瘤大数据精准诊疗模型，突

破了多组学数据融合的技术难点和多靶标联合分型的计算瓶颈；在克隆结构相对复杂的肾癌大数据中成功应用，首次绘制出肾癌细胞演化的分子特征的数据画像，复现出其中保留的肿瘤细胞演化中内源性、外源性因素交互作用的历史痕迹，首创了基于复杂克隆模式下分子演化时序路径的预测模型，实现了肿瘤免疫微环境、患者生存期、临床预后等的预测，并由此取得了一系列重要的生物学发现。该研究集中整理了公开数据库中的大队列海量数据，系统地分析比较了中国人、日本人与欧美人的体细胞突变特征图谱，深入挖掘了体细胞突变特征与遗传风险图谱的交互作用，首次在大数据中观测到不同人群在肿瘤演化的不同阶段可能也受到不同内源性因素推动的关键证据。该研究提示，中国人群呈现出特有的肿瘤克隆结构和演化模式，不宜在临床诊疗实践盲从基于欧美人大数据获得的决策标准。

19

项目名称：与阿尔兹海默病相关跳跃基因的异常活跃性

技术领域：生物医药及健康

成果详情：转座子是在原核生物和真核生物基因组中存在着的一段特异性的核苷酸序列片段，可以从原位上单独或断裂下来，环化后插入另一位点，并对其后的基因起调控作用。人类基因组中转座子占 45% 以上，大量研究表明转座子的激活影响基因组的结构、功能和进化。piRNA 缺失导致的转座子的高度活跃是 tau 蛋白病变中神经元死亡的

关键因素，这些疾病的特征是大脑中的tau蛋白的沉积。蛋白病变一共有超过 20 种，阿尔兹海默病是其中一种。研究还发现，拉夫米定——一种被批准用于HIV和乙型肝炎的抗逆转录病毒药物，减少了这种行为，并减少了果蝇大脑中神经细胞的死亡。该研究揭示出了一种潜在的新方法来治疗阿尔兹海默病。

20

项目名称：全国梅毒流行情况进行跨时空分析

技术领域：生物医药及健康

成果详情：2010 年 6 月，卫生部制定了《中国预防与控制梅毒规划（2010-2020 年）》，提出了加强梅毒和艾滋病防治的有效结合。2011 年 2 月，卫生部组织制定了《预防艾滋病、梅毒和乙肝母婴传播工作实施方案》以进一步整合开展预防艾滋病、梅毒和乙肝母婴传播工作。从 1995 年到 2016 年，中国梅毒报告病例数从 11336 例增加到 438199 例。其中，隐性梅毒报告病例数在总报告病例数中的构成比由 14.2% 明显上升到 73.6%，而一期和二期梅毒的构成比分别由 45.5% 和 39.8% 下降到 13.6% 和 11.1%。一期/二期梅毒报告发病率自 1995 年开始缓慢增长，并自 2011 年开始下降。胎传梅毒报告发病率从 2003 年的 7.2/10 万上升到 2011 年的 82.7/10 万，又于 2016 年降至 27.6/10 万。从 2004 年到 2016 年，一期/二期梅毒和胎传梅毒的疾病负担均由沿海省份转移至内陆省份。其中，60 岁以上老年人群的一期梅毒和

隐性梅毒报告发病率都较高。我国隐性梅毒报告病例数构成比的上升，以及胎传梅毒母婴传播发病率的下降表明扩大梅毒筛检在我国已取得显著成效。梅毒疫情在时间、空间上的巨大变化则揭示出其与卫生政策、经济发展等因素之间的复杂关系。

21

项目名称：大肠癌新的免疫分类标准

技术领域：生物医药及健康

成果详情：靶向免疫检测点的肿瘤免疫治疗是当前肿瘤精准医学的新亮点。对肿瘤免疫微环境的深度解析，是了解肿瘤生物学行为、判断肿瘤患者预后，预测肿瘤免疫治疗效果的关键。由美国肿瘤免疫治疗学会（Society for Immunotherapy of Cancer. SITC）组织的国际多中心合作项目，提出了新的大肠癌免疫分类（Immunoscore）系统。传统的判断肿瘤患者预后主要根据肿瘤细胞的分化和扩散程度，忽略了宿主对肿瘤细胞的作用，该研究通过标准化免疫组化染色程序，确定各中心之间免疫染色的一致性，采用数字化病理图像分析，综合分析肿瘤中心和肿瘤边缘浸润CD3+T淋巴细胞和CD8+T细胞的密度，结果显示大肠癌免疫分类可作为传统TNM分期的一个良好补充，以弥补pT、pN分期，淋巴管血管浸润，肿瘤分化和MSI等在判断肿瘤患者预后方面的缺陷。

项目名称：基于大数据绘制癌症遗传风险图谱是癌症遗传风险图谱

技术领域：生物医药及健康

成果详情：恶性肿瘤是一大类复杂的多组学（基因）疾病。现代肿瘤学理论认为，肿瘤的发生、发展是肿瘤患者的内因和外因耦合作用的结果，其内因主要是癌症遗传风险。基于多组学大数据，挖掘癌症遗传风险，不仅是肿瘤研究的前沿领域和热点方向，而且能够广泛应用于肿瘤风险筛查、肿瘤分子预警、肿瘤精准体检和早诊。基于大数据绘制癌症遗传风险图谱是癌症遗传风险图谱研究的热点和难点，风险图谱是临床辅助决策的重要基线之一，也是《关于促进和规范健康医疗大数据应用发展的指导意见》明确的、全面深化健康医疗大数据应用的重点任务中具有重要意义的研究和应用模块。该研究基于 33 种常见癌症类型、共计 1 万多名肿瘤患者的多组学大数据，全面应用了目前最优的生物信息学分析和实验手段，优化设计了面向多组学的数据处理流程，累计分析了超过 14.6 亿个候选基因变异，首次系统性的报道了 871 个罕见易感/疑似易感变异和拷贝数变异，且较大比例的存在与基因表达异常、丧失异质性等体细胞突变的耦合，这为下游研究，特别是遗传变异分类和检测奠定了基础。同时，大数据分析明确展示了不同癌症类型的一些病例具有共同或类似癌症遗传风险的关键证据，这些共性模式及其与体细胞突变的相互作用能够为异癌同治提供临床辅助决策依据。

23

项目名称：孕期微营养素干预对子代青春期智力发育存在长期效应

技术领域：生物医药及健康

成果详情：首次证实孕期微营养素干预对子代青春期智力发育存在长期效应。该研究团队于 2002 年-2006 年在陕西省两个贫困县实施了一项整群随机双盲对照试验：“孕期微营养素干预预防新生儿低出生体重及早产”，对参与该项目的所有孕妇所生育的后代进行了长达 14 年的追踪随访，目前为止，在同类研究中随访时间最长。研究首次证实，与补充铁/叶酸或叶酸相比，母亲孕期补充多种微营养素可显著促进青春期智力发育，存在明显的剂量-反应关系，补充的越早（<12 孕周）、持续时间越久（>180 天）获益越大。对于贫困家庭而言，孕期多维营养素补充可部分补偿由于母亲孕期膳食营养不充分对子代智力发育造成的损害。该研究结果为制定或更新与孕期微营养素补充相关的常规产前保健指南提供了新的证据，对于促进青春期智力发育、提高人口素质具有重要的公共卫生意义，也为世界卫生组织全球孕期微营养素补充策略的修订提供了重要参考。

24

项目名称：全基因组测序普查防治疾病

技术领域：生物医药及健康

成果详情：近年来，基因组测序技术得到快速发展，很多致病风险基因被陆续发现，针对全民进行基因组普查是否能够实现早期预防、早诊早治并具有较高的经济效益是亟待解决的热点问题。基于此，西安交大公共卫生学院张磊教授构建了数学模型，评估了针对澳大利亚18-25岁人群7种疾病进行全基因测序的疾病防治效果和成本效果。该研究将待查的7种疾病分为两组：第一组是乳腺癌、卵巢癌、内膜癌和结直肠癌，测BRCA1/2、MLH1/2等易感基因，反映受试者个体的患病风险，同时给予特定的预防和体检措施以便早诊早治；第二组是囊泡性纤维症、脊髓性肌萎缩症、脆性X综合症，对这些致病基因携带者进行生育规划建议和产前检测，尽可能避免患儿的出生。研究显示，对全民进行全基因筛查与当前仅对高危人群做基因检测相比，可使第一组疾病的发病率和死亡率分别降低28.8%和31.2%，使第二组疾病的发病率降低24.8%。基因组普查具有较高的成本效果，从长期来看基因组普查能节约总成本；每次只检测单基因并不合算，同时检测多基因多病种，成本效果才会大幅提升。上述结果表明在澳大利亚进行全民基因组普查具有较高的经济价值，为卫生部门制定政策提供重要依据，也为其他国家提供了有价值的参考。

25

项目名称：重症患者血压变异

技术领域：生物医药及健康

成果详情：ICU收治的重症患者通常病因复杂，病情变化快，其病理生理机制、对治疗的反应性、转归及预后均具有高度异质性。因此，如何通过数据挖掘，对不同类型ICU患者实施个体化治疗、从而降低死亡率，是国内外重症医学的研究热点。血压变异性指在一个阶段内的血压变化水平，昼夜血压变异主要受到生物节律以及睡眠结构的影响。ICU患者由于受多种病理生理、精神心理及环境因素影响，常出现昼夜变压变异紊乱，而这一现象是否和患者预后相关尚不清楚。利用MIMIC数据库（Medical Information for Intensive Care, <https://mimic.physionet.org/>）对 15000 多名ICU患者平均动脉压的昼夜波动情况进行了深入研究，发现平均动脉压波动率较低的患者具有较高死亡率。这项研究有助于院内重症患者的风险评估，同时也为重症监护室管理水平的进一步提高提供了可靠的理论依据和突破口。

26

项目名称：自然杀伤细胞调控肺癌免疫

技术领域：生物医药及健康

成果详情：自然杀伤（NK）细胞与主要组织相容性I类分子（MHC-I）的相互作用在肿瘤免疫中起重要作用，NK细胞通过与MHC-I类分子相互作用而获得“教育”（education），成为“授权”（licensed）的NK细胞，“授权”的NK细胞具有增强杀伤靶细胞的能力，在肿瘤的发生、

发展中具有重要作用。NK细胞与肺癌的易感性及耐药性密切相关，但NK细胞介导的清除肺癌的机制仍不清楚。揭示了暴露于MHC-I类分子的NK细胞为肺癌的生长和进展提供了显著的免疫屏障，证明基于MHC-I分子的环境背景，NK细胞的NKG2D、NKp46等激活性受体和Ly49C/I等抑制性受体表现出动态可塑性，提示改变NK细胞活化状态有助于控制肺癌。此项研究成果对未来NK细胞用于免疫治疗以及MHC-I类分子在预测癌症患者免疫治疗的疗效中或将有重要作用。该成果以“Modulation of NKG2D, NKp46, and Ly49C/I facilitates natural killer cell-mediated control of lung cancer”为题，发表在国际著名期刊PNAS（影响因子9.66）上。论文第一作者为一附院感染科石磊博士，共同第一作者为肿瘤外科李康博士，西安交大一附院为第一作者单位，美国圣路易斯华盛顿大学、美国弗吉尼亚大学为合作单位。该研究受到了国家留学基金委公派留学基金的资助。

27

项目名称：白血病发病机制及靶向治疗

技术领域：生物医药及健康

成果详情：我国白血病发病率为2.76/10万。在恶性肿瘤死亡率中，白血病居第6位（男性）和第8位（女性），在儿童及35岁以下成人中则居第1位。骨髓增殖性肿瘤（MPN）是一类起源于造血干/祖细胞的异质性克隆性恶性血液肿瘤，目前尚缺乏有效的靶向治疗策略。研究

人员发现，Notch信号通路参与多种肿瘤的发生发展，但在不同肿瘤中的作用具有明显的组织特异性和环境依赖性，这限制了Notch信号通路抑制剂在肿瘤治疗中的应用。前期研究显示，Notch信号通路在急性髓系白血病中具有抑癌基因的作用，过表达Notch对急性髓系白血病具有治疗作用。然而，Notch信号通路在骨髓增殖性肿瘤中的作用及其应用价值尚缺少深入研究。与急性髓系白血病不同，Notch信号通路在骨髓增殖性肿瘤中主要发挥癌基因的作用。研究者利用基因敲入和基因敲除小鼠，在Kras突变体诱导的白血病小鼠模型中抑制Notch信号通路，发现下调Notch信号通路后，小鼠骨髓增殖性肿瘤的发病率显著降低，同时小鼠的生存期显著延长。进一步的机制研究发现，抑制Notch信号通路可以上调ERK信号通路负调节因子DUSP1，进而抑制ERK信号通路的激活。研究还发现，抑制Notch信号通路可以抑制白血病细胞的氧化磷酸化。更重要的是，同时抑制ERK信号通路和氧化磷酸化对白血病细胞具有更好的靶向杀伤作用，这可能是一种骨髓增殖性肿瘤的潜在靶向治疗策略。

28

项目名称：新型生物活性材料用于创面皮肤再生

技术领域：生物医药及健康

成果详情：在遇到大面积烧伤、糖尿病等机体病变、微生物严重感染等情况下，皮肤创面很难完全愈合，并形成慢性创面，大大增加病人

的痛苦和医疗成本。开发具有高度生物活性快速诱导皮肤创面愈合和皮肤再生的新型医用材料具有重要的意义和应用价值。皮肤是非常复杂的系统,既要实现创面愈合又要促进皮肤组织附属器的形成目前仍存在挑战。此前文献报道的生物材料创面修复敷料,存在一定的问题,如成份复杂、生物相容性低、无法再生皮肤附属组织如毛囊/汗腺等。

西安交通大学前沿科学技术研究院雷波研究员课题组设计一种基于细菌分泌的天然聚多肽的仿生杂化皮肤修复组织工程支架材料,该材料不仅具有仿生皮肤的组织弹性,而且具有高效的广谱抗菌活性,可以显著抵抗动物创面细菌感染和促进创面愈合,增强皮肤附属器如毛囊的再生,最终实现皮肤组织再生。该研究成果可能对设计新型具有高生物活性功能的医用材料用于再生医学提供了一种新的策略。此成果以“Biomimetic Elastomeric Polypeptide-Based Nanofibrous trix for Overcoming Multidrug-Resistant Bacteria and Enhancing Full-Thickness Wound Healing/Skin Regeneration”为题,发表在国际著名期刊ACS Nano杂志(影响因子 13.709)上。前沿院为该论文的第一作者和唯一通讯作者单位。此前,雷波课题组在设计新型生物活性材料用于骨组织再生(Biaterials, 2018, 178, 36; Advanced Functional teirals, 2015, 25, 5016)、骨骼肌再生(Biaterials, 2018, 157,40; Biaterials, 2018, 175, 19)、肿瘤诊疗(ACS Nano, 2018, 12, 2017;Biaterials, 2015, 59, 21)已经取得了一系列进展。该研究受到国家自然科学基金面上项目与青年项目、国家自然科学基金重点项目、博士后基金、陕西省颅颌面精准医

学研究重点实验室、西安交通大学分析测试中心等的支持。

29

项目名称：志贺菌吸附及感染机制研究

技术领域：生物医药及健康

成果详情：志贺菌 (*Shigella* spp.) 感染引发的肠道痢疾是人类健康的重要威胁之一，志贺菌如何在自身缺乏吸附装置的情况下有效吸附和感染肠道上皮更是困扰病原微生物学界多年的难题。研究者们花了近 20 年时间通过多种途径搜寻志贺菌表面这种可能的“吸附因子” (adhesin)，然而目前的结果表明，细菌表面没有任何一个因子能“胜任”这个角色。针对这一难题，新近研究发现，具有抗微生物活性的人肠道防御素 (defensin) HD5 能够在体外和体内促进志贺菌的吸附及感染。防御素 (defensins) 是一类在人体内广泛存在的阳离子多肽，对细菌、病毒和真菌等多种微生物有杀伤抑制作用，并因此得名。在微生物大量聚集的人体肠道中，防御素由小肠隐窝 Paneth 细胞分泌，分 HD5 和 HD6 两种，其中以 HD5 对微生物的多种杀伤抑制作用尤为突出，虽然目前的研究还不完善，但现有的防御素研究和理论体系无一例外地将 HD5 描述为人肠道中抵抗微生物的重要保护因子。本课题的研究团队发现，当 HD5 这个被认为会杀伤抵抗微生物的保护因子在生理浓度和条件下接触到志贺菌时，能够帮助志贺菌高效快速地吸附和感染肠道上皮细胞。本研究在细胞水平系统纵向、横向深入研究了 HD5

促进志贺菌吸附感染的时序规律和作用范畴；利用并改造已有的小动物感染模型和离体组织培养模型，在三种动物模型中和人体肠道组织上证实了HD5 促进志贺菌吸附感染的效果及其生理意义；利用结构生物学手段对HD5 的结构功能关系进行了深入解析，筛选出了参与促进吸附的主要氨基酸位点及其作用规律，解析了功能丧失突变体的晶体结构，对HD5 的作用机制进行了细致深入阐述；结合多种研究手段从病原菌和宿主细胞两个方面全方位解析HD5 促感染的作用特征，发现HD5 的存在能够弥补了志贺菌没有吸附装置的“先天不足”，并在此基础上通过基因定点突变体系初步筛选鉴定了HD5 在细菌和宿主细胞上的作用靶点，初步阐明了HD5 的作用规律和特征。这一发现从根本上挑战了对防御素“保卫者”角色的即有认识，可能成为防御素研究中具有转折意义的发现。更重要的是，该发现为研究志贺菌吸附机制提供了新的视角，为解释志贺菌如何在自身缺乏吸附装置的情况下高效地吸附和感染肠道上皮这个长期困扰病原微生物学界的“难解之谜”提供了突破，是志贺菌致病机理研究的重要发展和完善和肠道病原微生物领域的重要研究进展。该研究成果发表于Immunity (《免疫》) 杂志，论文题目“Hun Enteric α -Defensin 5 Promotes Shigella Infection by Enhancing Bacterial Adhesion and Invasion”。该工作主要在美国马里兰大学医学院人类病毒研究所陆五元教授指导下完成，并得到了法国巴斯德所Philippe Sansonetti教授，美国加州大学戴维斯分校Charles Bevins教授，英国思克莱德大学于军博士的合作指导和支持。陆五元教授与西安交通大学前沿科学与技术研究

院邵永平教授为论文的通讯作者，西安交通大学生命科学与技术学院许丹副教授及由其指导的博士生廖崇兵为文章的共同第一作者，西安交大是论文的第一作者单位。该研究工作得到了国家自然科学基金的资助。

30

项目名称：直接作用抗病毒药治疗有效性

技术领域：生物医药及健康

成果详情：研究发现，既往肝癌病史的丙型肝炎基因 1 型亚洲患者接受雷迪帕韦/索磷布韦治疗持续病毒学应答率明显低于无肝癌病史患者，达拉他韦/阿舒瑞韦方案治疗的肝细胞癌和非肝细胞癌患者持续病毒学应答率无差别。研究结果显示，合并肝细胞癌患者较非肝细胞癌患者持续病毒学应答率降低 4.8%，亚洲肝癌患者持续病毒学应答率较非亚洲患者高。基线存在活化肿瘤病灶可导致持续病毒学应答率降低 18.8%。尽管存在激素和免疫抑制剂的使用，肝细胞癌患者移植后接受直接作用抗病毒药治疗较移植前治疗持续病毒学应答率提高 9.8%。而基线肝硬化、既往治疗经历、延长治疗期对持续病毒学应答率无显著影响。研究者认为，存在活化肿瘤病灶是导致持续病毒学应答率明显降低的主要原因，建议直接作用抗病毒药治疗前需要先针对肿瘤进行治疗，提出直接作用抗病毒药治疗失败可能作为疑诊肝细胞癌的线索之一，并对患者进行密切监测。考虑到肝源的可获得性和抗

病毒治疗明显改善患者肝功能和存活，合并肝细胞癌等待肝移植患者抗病毒治疗的最佳时机需要在权衡利弊后根据患者的具体情况确定。

31

项目名称：恒河猴甲亢模型

技术领域：生物医药及健康

成果详情：甲亢，即甲状腺功能亢进症，是一种常见的自身免疫性疾病。由于甲状腺激素释放过多造成机体代谢亢进，往往引发心血管、消化道等其他器官疾病，患者常常表现出易怒、多食、消瘦、心率增快，尤为突出的是甲状腺相关性眼病，表现为双眼球明显凸出，眼裂增宽，球结膜水肿充血，眼外肌明显增粗等，对患者身心危害很大。甲亢的发病率较高，人群的罹患率达到 1%，女性人群高达 1.9%，患者中 80%为中青年女性。近百年来一直沿用的抗甲状腺药物、放射性碘及手术治疗都不是理想的治疗方法，药物治疗疗程长、复发率高、治愈率低，放射性碘治疗很多转化为甲低并有同位素污染，手术并发症较高，亦有复发或甲低的可能。因此，探索甲亢新的防治方法特别是研制人类甲亢疫苗一直是内分泌领域面临的重大课题。2011 年，团队成功制备出小鼠甲亢模型并利用该模型开始了甲亢疫苗的研发工作，但由于小鼠发育性状及遗传背景与人类相差甚远，加之在小鼠身上没有观察到人类甲亢的特征性表现，团队的骨干研究人员王悦博士探索了构建恒河猴甲亢模型的可能性。在云南中科院昆明动物所，伍

丽萍博士和关小燕护士经过四年多的艰辛工作，终于建立了构建恒河猴甲亢模型的完整实验方法，并再次证明利用疫苗可预防甲亢的发病。团队通过比较实验方法证明，注射甲亢疫苗预防率达到 90%以上。大家看到的这只恒河猴，是本次研究中甲亢表现最典型的模型，其意外死亡后我们委托中科院昆明动物所博物馆制作成标本，今天运抵医院，未来将用于教学和科学研究。

32

项目名称：被误诊的合并血性心包积液的缩窄性心包炎：病例报道

技术领域：生物医药及健康

成果详情：缩窄性心包炎是指心脏被致密厚实的纤维化心包所包围，心脏舒张期充盈受限产生一系列循环障碍的临床病症。该病病因起病隐匿、临床症状多样，自然预后差，部分患者因严重心脏并发症、衰竭、多浆膜腔积液而致残或死亡。早期明确诊断并进行及时的心包剥离手术是改善预后的重要手段。虽然目前超声心动图、CT及MRI广泛用于诊断，但其误诊率仍高达 22%~66%，因此在临床中能结合患者症状、体征及辅助检查早期诊断缩窄性心包炎并进行有效治疗显得相当困难。近日，西安交通大学第一附属医院心外科闫炆教授团队对一例被反复误诊的缩窄性心包炎临床病例进行分析。该患者是 1 位 58 岁男性，以双下肢乏力、水肿伴轻微胸闷起病，起病 2 月后考虑神经系统病变就诊于神经内科行头颅磁共振未见异常，心动超声提示中量

心包积液，给与口服利尿剂治疗后症状缓解不明显。4 月后症状加重考虑缺血性心脏病就诊于心血管内科，给与胸腔穿刺引流和冠心病二级预防治疗后症状缓解，但是拔除引流管后积液又快速出现。为进一步治疗转入呼吸内科后，在回顾病人心脏超声和胸部CT时发现增厚的

心包膜，结合病史、症状和体征考虑缩窄性心包炎，在取得患者知情同意后转入心脏外科闫焯教授团队行心包剥脱术，术中可见大量血性心包积液、“绒毛心”和增厚的

心包膜，组织病理活检提示大量慢性炎性细胞浸润和纤维素样坏死。术后患者症状逐消失，术后 1 年随访患者未诉不适，已回归日常生活。

33

项目名称：基于“数字肺”的呼吸系统疾病评价体系与诊断标准研究

技术领域：生物医药及健康

成果详情：该项目总体研究成果达到国际先进水平。项目构建了三万余例超大影像学及临床信息数据库；建立了国人“数字肺”模板及主要呼吸系统疾病的诊断与评价模型，衍生了包括行业规范、国家级项目、高水平SCI、国家发明专利等丰硕的系列学术成果，培养了一批青年优秀人才。专家建议：鉴于国际大数据研究难以进一步同质化、标准化的痛点问题，利用项目海量数据库，深入开展大数据挖掘、人工智能等多领域医工结合研究，提升“数字肺”内涵，从临床需求出发，超越“影像数字肺”，实现“疾病数字肺”。

项目名称：胆管癌样肝细胞肝癌存在机制

技术领域：生物医药及健康

成果详情：肝癌主要包括肝细胞肝癌(Hepatocellular Carcino, HCC)和胆管细胞癌等肿瘤类型。近年来一些研究在HCC患者样本中也发现了表达胆管标志物如CK19 和EPCAM的HCC亚型，这些被称为胆管癌样HCC，然而这种现象存在的机制并未被深入了解。蜗牛家族转录抑制因子 1(SNAI1)是上皮间充质转化(EMT)的重要调控因子，参与了HCC的发生发展过程。然而，SNAI1 在体内肝癌发生中的确切作用尚未得到深入研究。创新性地发现小鼠肝脏内单独过表达SNAI1 很可能发挥着调节肿瘤生长的作用，而并非是直接诱导肿瘤的发生。相关研究论著《在小鼠肝细胞癌模型中SNAI1 促进胆管细胞表型，但不促进上皮间质转化》(SNAI1 promotes the cholangiocellular phenotype, but not epithelial-mesenchyl transition, in a murine hepatocellular carcino model)在《癌症研究》(Cancer Research)杂志上发表。小鼠肝脏内过表达SNAI1 可促进Akt/c-Met诱导的肝癌中胆管细胞表型的产生，但不会促进肝脏肿瘤发生EMT及肿瘤远处转移的形成。而过表达SNAI1 也无法促进c-Myc诱导的肝癌产生胆管细胞表型。在体外细胞系中过表达SNAI1 可引起EMT过程的产生。小鼠肝脏内过表达SNAI1 促进肝癌细胞中胆管细胞表型的产生依赖于Yap信

号的存在与激活。在人肝癌TCGA数据库中，SNAI1 的表达与胆管细胞表型的基因表达有关，而与EMT表型的基因表达无关。该研究揭示了SNAI1 可能通过促进Yap信号发挥了在HCC中促进胆管细胞表型形成的作用。

35

项目名称：艾滋病乙肝梅毒三病联合母婴阻断策略

技术领域：生物医药及健康

成果详情：利用柬埔寨孕产妇人群数据，构建了数学预测模型，评估了该整合干预方案的疾病控制效果和成本效果。该研究成果近日以《整合艾滋病、乙肝、梅毒母婴阻断的三联干预极高效且具成本效果：卫生经济学评价研究》为题，在《国际流行病学》杂志在线发表。若将艾滋病和梅毒干预整合到现有产前保健体系内，能使艾滋病和梅毒的母婴传播率分别降至 6.1%和 4.6%；若给携带乙肝病毒的母亲分娩的婴儿增加乙肝免疫球蛋白注射，能使乙肝母婴传播率降至 5.0%；若针对乙肝高病毒载量孕妇提供抗病毒治疗，能使乙肝母婴传播率降至 3.5%；若同时采取以上两种乙肝母婴阻断措施，能使乙肝母婴传播率降至 3.4%。上述干预措施均具有较高的成本效果，而且整合干预远比分开干预更具经济效益，显示了三病联合母婴阻断策略在发展中国家极具可行性。

项目名称：智能响应型多模态肿瘤治疗

技术领域：生物医药及健康

成果详情：化疗是目前治疗癌症的主要手段之一，但是传统的化疗方法常常“敌我不分”，在杀伤癌症细胞的同时也杀伤了正常细胞，造成其治疗效率低下且毒副作用明显。因此，使用具有肿瘤靶向性和环境响应性的纳米药物载体以改变传统化疗的给药方式，降低抗癌药物对正常组织的毒性，并结合多种新颖的治疗手段（如光热疗法、催化医学等）进行协同治疗，进而提高治疗效果，已经成为当前研究的一大热点。然而目前的光热治疗和催化医学依然缺乏选择性，如何降低治疗过程对体系周围健康组织的损害依然是多模式治疗有待解决的难题。

课题组将响应性药物控释、选择性光热治疗与催化医学相结合，构筑了新型多模式肿瘤治疗微纳平台，成功实现了对多种肿瘤的精准治疗。在前期工作基础之上，本研究进一步提出集成肿瘤微环境响应型药物控释、肿瘤微环境触发的光热治疗和肿瘤微环境敏感型的催化反应，进而构筑多模式协同治疗的智能平台来精准治疗肿瘤的新思路。为了实现该设想，研究团队设计并合成一种半胱氨酸修饰的金纳米粒子以及氨基功能化的介孔二氧化硅纳米粒子，通过引入亚铁离子使金纳米粒子通过配位键键合到二氧化硅表面，实现对介孔内药物的封堵。该纳米载体在肿瘤细胞内低pH下诱导携带亚铁离子的金纳米粒子从载

体表面脱落释放出装载药物，同时脱落的金纳米粒子将进行原位自组装团聚从而能够用于光热治疗。此外，体系内的亚铁离子将催化细胞质内存在大量过氧化氢产生羟基自由基，从而达到光疗-化疗-催化协同治疗的目的。

37

项目名称：超长循环载体肿瘤协同化疗

技术领域：生物医药及健康

成果详情：双载药纳米药物载体系统用于肿瘤协同化疗已引起广泛的关注。然而，大多数双载药纳米药物系统在体内循环时间较短，显著降低了协同化疗药物的疗效和使用效率。长时间的血液循环能够确保纳米药物体系与病灶部位较长的接触时间，增强药物对肿瘤部位的靶向性和药物在肿瘤部位的浓度，从而提高疗效、减少毒副作用。目前提高纳米药物系统血液循环时间的方法主要包括纳米颗粒的表面改性、嵌段共聚物包封药物等。但是这些方法主要运用于单一药物化疗，载药量低和毒副作用大是其主要缺点，对与双载药纳米药物系统长循环肿瘤协同化疗鲜有研究。双载药纳米药物体系在血液中的循环时间决定了其治疗潜力，如何有效延长双载药纳米药物系统的血液循环时间仍是一个挑战，因此，利用新的策略构建高载药、低毒性且超长血液循环的双药纳米药物体系具有重要意义。设计了一种新的策略构建了“棒棒糖结构”（lollipop-like）的超长血液循环双药纳米药物体

系。他们首先将 2 种分子结构中具有大 π 键并有明显协同化疗作用的抗肿瘤药物阿霉素 (DOX) 和棉酚 (Gossypol) 通过 $\pi - \pi$ 堆积组装形成纳米颗粒, 由于阿霉素和棉酚水溶性不同和分子结构的差异, 其 $\pi - \pi$ 堆积不稳定并且其结合部分有大量空隙, 加入小分子多巴胺将空隙填满, 再逐渐聚合形成致密的聚多巴胺结构填补在药物分子之间将药物分子紧密的粘结在一起。这个现象就像砖缝 (药物分子) 之间灌满水泥 (聚多巴胺) 一样。具有极强粘附作用的聚多巴胺作为粘合剂牢固地填充在双药分子之间, 不仅显著增强了纳米颗粒的稳定性, 而且大幅度降低了药物释放的速度, 达到了药物体内超长血液循环的目的。该双药纳米药物体系平均粒径 59.6 ± 9.6 nm 并具有明显的镶嵌结构、载药量高达 91%。毒副作用很低, 小鼠体内最大耐受剂量超过 60 mg/kg, 具有优良的双药治疗效果 (协同指数 0.23, 指数越低协同治疗效果越好)。更为重要的是该体系有超长的体内血液循环时间 (>192h, 比游离药物增加 258 倍, 消除半衰期增加 458 倍)。裸鼠注射 8 天以后在肿瘤部位药物蓄积量仍大于 12%, 用极低的药量可达到较高的抑瘤率 (>90%)。这种设计策略为未来双药纳米药物载体的发展提供了一种新的思路, 为该双药纳米药物载体的临床应用打下了良好的基础。

38

项目名称: 生物医学超声与多模影像团队在声致液滴相变 (ADV) “栓塞-药物释放” 双模肿瘤治疗

技术领域：生物医药及健康

成果详情：该工作基于气体栓塞治疗过程中ADV与多种尺度血管的血管壁相互作用的不同特点，提出一种“栓塞-药物释放”双模肿瘤治疗方法，并采用自主搭建的光声共焦显微高速成像系统在鼠肠系膜微血管系统中观察了ADV动力学过程及ADV与血管壁的相互作用模式，讨论了血管内ADV发生过程、相变微泡栓塞微血管及微血管损伤的物理学机制和特征。结合损伤微血管的组织免疫学分析，该研究阐明了在超声作用下ADV发生和相变微泡运动、振动、融合等过程导致的微血管壁内陷（Invagination）是微血管损伤的主要机制之一。美国物理联合会（AIP）由全球物理界有重要影响的十个物理科学学会组成，其科学报道收到物理界研究人员的广泛关注。AIP的报道指出：ADV在实现肿瘤血管系统的气体栓塞治疗的同时，其在毛细血管网中更易引起血管损伤。因此，该研究工作提出的“栓塞-药物释放”双模肿瘤治疗方法一方面通过栓塞降低肿瘤营养供应，封锁药物；另一方面通过微血管破损增强肿瘤局部药物释放，达到增强治疗效果和降低肿瘤治疗药物副作用的目的。结合该实验室成像团队的空化成像、造影成像和血流成像技术，构建超声监控成像模块，有望推动这一治疗方法进一步在动物实验中实现。随后，美国科学促进会（AAAS）、中国科学网和教育部科技发展中心等多家国内外科技新闻媒体也报道了本研究进展。

项目名称：精神分裂症患者肠道微生物研究

技术领域：生物医药及健康

成果详情：该研究首次在小鼠模型上揭示精神分裂症患者肠道微生物可调节小鼠色氨酸-犬尿氨酸代谢通路，并诱导小鼠出现精神分裂症相关行为。精神分裂症是一种最为严重的精神疾病，普通人群患病率约 1%，复发率和致残率高，不仅严重损害患者健康，也给整个社会带来巨大医疗和经济负担，但到病因和发病机制仍不清楚。肠道微生物与精神疾病的关系近年来受到国内外学者关注。马现仓教授团队于 2016 年启动肠道微生物失调在精神分裂症发病中作用的研究。该研究首次发现移植未经药物治疗的精神分裂症患者肠道微生物后，小鼠的精神运动兴奋性增加，并出现空间学习和记忆损害。再结合 16SrRNA 菌群测序和散弹枪法宏基因组测序技术分析模型小鼠肠道菌群后，鉴定出 55 种与异常行为相关的菌属。与移植健康人群粪便微生物的小鼠相比，接受病人菌群的小鼠外周组织和脑组织中色氨酸降解产物犬尿氨酸-犬尿喹啉酸(kynurenine - kynurenic acid)通路激活，小鼠前额叶皮质多巴胺和海马中 5-HT水平上调。体外实验证实，患者粪菌含有可调节犬尿氨酸代谢过程的活性物质。这些发现揭示了多种参与精神分裂症发生的肠道菌种和犬尿氨酸-犬尿喹啉酸通路，为后续转化研究和临床干预提供了诸多靶点。生物信息分析结果表明两组受体小鼠的肠道菌群和结构存在特征性改变，并富集在 78 种不同功能模块，其中包括色氨酸生物合成功能。此外，两组小鼠间差异富集的 mOTUs大多数与色氨酸或其代谢物，或大脑和血清中的神经递质有显

著的相关性，说明了肠道细菌对色氨酸代谢和大脑中的神经化学物质具有调节作用。本研究成果进一步验证了精神分裂症微生物-肠-脑轴假说，也为未来筛选新的药物靶点及利用调节肠道微生态来改善精神分裂症谱系疾病症状提供了新的思路。Molecular Psychiatry（分子精神病学）是Nature旗下的国际精神疾病领域顶级期刊，最新影响因子为 11.973 分。

40

项目名称：胰腺神经内分泌肿瘤研究

技术领域：生物医药及健康

成果详情：胰腺神经内分泌肿瘤（Pancreatic Neuroendocrine Tumors, pNETs）是源于神经内分泌系统多能干细胞的一类异质性肿瘤。是近年来被人们逐渐深入认识的一类肿瘤。手术切除是pNETs唯一有望根治的手段。较早出现淋巴结转移是患者预后的危险因素。西安交通大学第一附属医院肝胆外科吕毅教授及件正教授等团队在外科手术治疗pNETs实践中发现，淋巴结转移个数可能对患者预后存在一定的影响，且在最新的第 8 版pNETs的AJCCTNM分期对于pNETs淋巴结转移仅仅简单的定义为N0(无淋巴结转移)，N1(有淋巴结转移)；而对于最少应切除的淋巴结个数和阳性淋巴结个数对预后的影响并未给出具体的建议。鉴于此，我院肝胆外科张谓丰教授与美国pNETs相关研究团队合作，基于国际多中心共 854 例行根治性切除的pNETs病

例，应用数理统计方法分析，得出：pNETs手术切除时应至少切除 8 个以上淋巴结，才可获得准确的N分期；依据阳性淋巴结个数，N分期应进一步定义为N0(无淋巴结转移)，N1(1-3 个淋巴结转移)，N2(≥ 4 个淋巴结转移)。该新的分期进一步在全美权威的癌症统计数据库SEER数据库中行手术切除的 2764 例病例中得到有效验证。

41

项目名称：面向脑损伤与渐冻人的脑控康复机器人与语言交互系统

技术领域：生物医药及健康

成果详情：西安交大徐光华教授团队一直致力于脑-机接口及其康复机器人的研究工作。近年来，主持了国家自然科学基金重大研究计划集成项目、国基金面上项目、国家 863 主题项目等多项重点项目，提出了稳态视觉运动诱发电位创新脑机接口、噪声增强的脑电诱发技术，得到国际同行的高度评价。所开发了智能脑控轮椅、脑控下肢主被动协同康复人系统和基于视觉运动诱发的高速中英文拼写系统，获国家自然科学基金委脑机接口大赛一等奖，并得到央视科教频道等报道。目前，面向中风的脑控下肢康复机器人已在第四军医大学西京医院进行临床试验，面向渐冻人的意念控制语言交互系统已在进行渐冻人的系统使用，奠定了良好的产业化基础。

42

项目名称：罂粟基因组及合成原理

技术领域：生物医药及健康

成果详情：破解罂粟基因组是当今科学界亟待破解的世界难题。由于罂粟的基因组存在大量（约 70%）的重复序列，且经历了多次大规模的结构变异，使得解析该基因组异常困难。叶凯团队以英国本土罂粟植物为对象，利用多种前沿基因组测序技术、复杂数学模型、深度挖掘及分析方法成功破译罂粟基因组并揭示其进化历史，首次在国际上完成了罂粟全基因组测序及高质量组装分析。研究显示，罂粟基因组在距今 780 万年发生了一次全基因组加倍事件，在距今至少 1.1 亿年发生基因组片段加倍事件。此外，首次发现罂粟合成止咳那可丁和镇痛类生物碱的 15 个基因在 11 号染色体上形成超级基因簇，该基因簇在根、茎部特异表达且共表达。正是由于罂粟在进化过程中由于经历基因组加倍事件和多次基因片段扩增、丢失、融合和重排等，造成了两种代谢通路基因的聚集和共表达，形成了超级基因簇，从而能够协同高效合成新的次生代谢物，而罂粟中最具药效的类生物碱和那可丁成分均属于罂粟的次生代谢产物。

43

项目名称：个性化PEEK骨科植入物 3D打印技术

技术领域：生物医药及健康

成果详情：对于肿瘤、创伤、疾病等原因造成的骨缺损或骨畸形患者，

由于个体性差异大、病患程度不一等原因，传统规范化的医疗植入物经常无法满足要求。因此，本项目采用生物级聚醚醚酮（PEEK）材料作为原料，利用3D打印技术，快速定制个性化、高性能的骨科植入物，从而满足患者切身需求。

技术先进性：相较于传统金属植入物材料而言，PEEK作为一种半结晶高分子材料，具有质量轻，弹性模量接近原骨，减磨耐磨，生物相容性优异和物化稳定性好等优点，成为目前生物假体植入物的理想材料之一。然而，PEEK材料是一种高熔点（343℃）、大冷却收缩率、半结晶的热塑性材料，采用传统加工方法，具有材料利用率低、成本高、难以直接成形复杂结构等问题。本项目团队研发了一种以控性冷沉积为核心技术的3D打印方法以及智能工艺，可以依据应用需求进行力学性能（如韧性、模量）的调控，实现了高性能聚醚醚酮骨科植入物低成本、高精度的控形控性快速制造。相关技术已经完成了世界首例PEEK肋骨临床应用，在国际、国内都处于领先地位。

市场及效益分析：骨科医疗器械行业属于国家重点扶持的鼓励类行业，《医疗器械科技产业“十二五”转向产业规划》等多项政策将骨修复材料、人工关节和脊柱等骨科植入物列为国家重点开发产品。根据多个调查机构的报告显示，骨科植入物市场，尤其是国内骨科植入物市场快速增长态势气势如虹，2015年市场规模达166亿元人民币，超过日本成为全球第二大骨科市场；2012-2015年复合增长率达18%，预计到2019年市场规模将超过300亿元。可以说，骨科植入物市场，尤其是国内市场前景具有极大的发展潜力。而本项目所研发的PEEK个

个性化骨科植入物 3D打印技术，是一种前沿的创新制造方法，将成为骨科植入物市场的新兴热门方向，具有极大的市场前景。

合作条件：资金支持、技术合作、平台支撑。

三、节能环保领域

项目名称：生物柴油副产甘油与异丁烯醚化合成油品添加剂

技术领域：节能环保

成果详情：生物柴油作为一种清洁可再生的替代能源，既可以缓解能源危机，也能减轻环境污染，近年其产量急剧攀升。生物柴油是动植物油脂（主要成分为甘油三酸酯）与低碳醇发生酯交换反应得到的脂肪酸酯混合物，该过程同时副产约占原料 10 wt%的甘油。甘油因其高黏度、强极性、低溶解度，不能直接加入到油品中燃烧。随着生物柴油的大量生产和应用，甘油也大量累积，打破了原有甘油市场的平衡，开发生物柴油副产甘油的高价利用途径成为研究的热点。与异丁烯或叔丁醇醚化可将甘油转化为性能优良的油品（柴油、生物柴油及汽油）添加剂——叔丁基甘油醚，可以有效地降低柴油燃烧尾气中颗粒物（particulate matter, PM）和温室气体的排放量、提高生物柴油的低温性能及汽油的辛烷值。以酸性阳离子交换树脂为催化剂，使用异丁烯对甘油进行醚化，将目前过剩的甘油转化为高价值的油品添加剂，提高了甘油自身及生物柴油制备工艺的经济性，增加了可再生能源的总量。工艺设计及优化表明该工艺的经济性取决于异丁烯原料的价格，可设计甘油直接与 FCC 轻汽油醚化，一方面降低原料的成本，另一方面通过醚化转化降低 FCC 汽油中烯烃的含量，提高油品的质量和总量。

2

项目名称：生物转化秸秆类生物质的工艺和技术

技术领域：节能环保

成果详情：作为代替不可再生的、稀缺的化石能源，生物质能有着可再生、绿色、低污染等优点。秸秆类生物质是生物质中一种重要的组成部分。其主要组成部分包括纤维素（己糖），半纤维（戊糖）素和木质素。通过预处理技术可以将生物质中的碳源用于生物转化过程生产萜类、酯类、酸类和醇类产品。目前我国大量秸秆类生物质未被充分利用，而是直接焚烧。从而造成环境的严重污染（雾霾）和资源的浪费。如能充分利用秸秆类生物质资源，对实现习近平总书记提出的“五大理念”有着积极地促进作用。结合国际先进的生物质预处理的发展理念和我省生物质秸秆种类的多样化的特点，开发和优化不同生物预处理技术，以实现从不同秸秆中高效的提取发酵糖的目的。通过强化微生物液体生物转化过程，从秸秆中提取的生物质糖可被微生物利用，从而生产可再生的理想产物。在构建和改造基因工程菌的前提下，通过优化关键转化过程参数和技术，可高效的提高秸秆综合利用水平。此研究方向的重点包括预处理技术的研发、基因工程菌、液体生物转化过程的优化等。

3

项目名称：生物法固定甲烷和二氧化碳的关键技术

技术领域：节能环保

成果详情：通过干式厌氧发酵，厌氧微生物可将秸秆类生物质直接分解消耗产生沼气（主要成分为甲烷和二氧化碳等气体）。目前我国大量的沼气利用还是以低品位的热利用为主，主要通过热电联产(CHP)燃烧沼气中 40-60%的甲烷产生热能和电能。然而这种低效利用沼气的方法，不但大大降低沼气的价值，而且燃烧甲烷产生的二氧化碳造成了二次污染。沼气发电工程除了成本过大，所需的产业链条严重不足，严重影响生产运行。通常燃烧 1m³ 沼气最高可产 10kwh 热能，而目前的电能转化效率为 40%，即燃烧 1m³ 沼气约产 4 度电，计民用电¥0.6/度，相当于产值为¥2.5/m³ 沼气。实际上由于气发电运营成本高，造成一度电的生产成本到 1 元，明显高于社会用电的 0.6 元/度。因此随着沼气产量的不断增加，沼气的高端利用途径急需不断扩展和补充。通过本实验室开发的气体生物转化平台，利用基因工程菌可以高效地将沼气中的甲烷和二氧化碳转化为理想产物，如医药中间体(萜类)，生物燃料（酯类）和化工品(醇类)。保守估计可将沼气的价值提升 10 倍以上。此高效地利用沼气的技术和方法，不能能够帮助我国实现 2030 年的节能减排目标，也符合我国的循环经济综合利用和低碳经济发展思路。此研究方向的重点包括合理设计生物气体反应器、构建基因工程菌、气体生物转化过程强化等。

市场及效益分析：该项目可广泛用于生物质秸秆再利用、餐厨垃圾利用，工业尾气回收，企业节能减排，啤酒厂碳排放，垃圾处理，污水处理等领域。

项目名称：车载吸附式天然气储存技术(ANG)开发

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：传统高压储气的方式注定使 CNG 汽车缺乏竞争力，因为 CNG 需要 200 个以上的大气压，会带来一系列问题，比如多级压缩功耗很大、高压充装设备的投资很高、高压储气瓶本身重量较大(影响了汽车载荷及成本的增加)，同时高压储气带来的安全性问题也不容小视。最近发展起来的吸附式天然气储存技术(ANG)受到广泛关注，因为这种技术在低压(35 个大气压，仅为 CNG 的 1/6)下即可获得接近于高压下(200 个大气压)CNG 的存储能量密度，经济性好、使用方便、安全性高。合适的吸附剂是 ANG 技术的关键，也是国内外从事 ANG 技术开发的重点。本项目组多年从新型多孔吸附剂的研究，在金属-有机框架多孔材料方面的研究取得了系列成果，设计合成出多个具有良好甲烷吸附性能的多孔材料，其中在柔性多孔材料用于天然气存储的研究处于国内领先。

市场及效益分析：天然气的主要成分是甲烷，其储量非常巨大，甲烷具有很高的氢/碳比和很低的碳排放，并且燃烧后无粉尘生成，被认为是一种优质的清洁能源。甲烷等清洁能源的广泛使用能减少对化石燃料的依赖，有利于改善环境和缓解温室效应。按每公里里程来算，天然气动力车要比传统的汽油、柴油动力车和新能源车更加省钱，但

CNG 的一些弊端限制了天然气动力车的进一步推广。新发展起来的 ANG 存储技术被认为是一种非常有前途的存储技术，目前全世界对 ANG 技术的研究才刚刚开始，是一个新兴产业，未来有很大的发展空间。理论和实践工作表明，ANG 技术是被广泛看好的一种技术，德国巴斯夫公司已经制造出用 MOF 存储甲烷的概念车。清洁能源汽车未来的增长空间非常巨大，其 ANG 存储技术所需的各种多孔材料也将同步增长，市场供应远未饱和，当前是产业介入的良好时机。

技术成熟度：该项技术成果目前处于实验室研究阶段。

合作条件：要求合作方具备工业生产的背景，以及规模化生产的组织经验。本项目拟提供多种多孔材料的制备技术，双方合作大规模工业生产，共同发展车载吸附式天然气储存技术。

5

项目名称：太阳能光催化技术高效处理煤化工有机废水研究

技术领域：节能环保

成果详情：针对煤化工生产过程中排放的大量有机废水，通过开发新型高效光催化体系，利用以半导体纳米材料为基础的反应平台，提供或在线构造一类特殊微环境的界面，通过与污染物分子的界面相互作用触发该纳米材料特殊的催化或转化效应，活化绿色廉价的氧化剂或还原剂(如 H_2O_2 、分子氧或其它环境友好的电子供体)，安全、高效地降解有机污染物。同时，纳米催化材料本身在反应过程中并不消耗，

而且整个降解反应是在常温、常压下进行，最终将有机污染物降解矿化为 CO_2 和 H_2O ，不会产生二次污染，能实现从根本上解决长期以来煤化工生产过程中无法彻底清除的低浓度 (ppm 甚至 ppb 级)、有毒、难降解污染物的难题。

市场及效益分析：光催化剂的制备廉价、污水处理工艺流程简单，是低投资高回报的高新技术行业，其对于煤化工、印染等高浓度废水处理具有处理效率快、净化彻底、成本廉价等优点。

技术成熟度：目前已完成产品的公斤级生产及评估工作。

6

项目名称：油基钻井液钻屑的油品回收处理技术

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：油基钻井液在使用中会产生大量的含油钻屑，其中含有大量的矿物油，酚类化合物等有害物质，会造成环境污染。化学处理法通常需要使用有毒的或有害的化学药剂，这会使废弃物数量增加，而且会将污染物从固相中转移到液相中，使问题复杂化。本项目采用开关型的极性可控溶剂进行含有钻屑中油品进行回收，通过通入和排出 CO_2 使得溶剂性质发生可逆变化来回收油品，不使用大量的化学剂，减少污染源、又可以重复利用并回收昂贵的基础油。

市场及效益分析：对于石油天然气工业可持续发展，节能减排、保护

生态环境具有重要意义。

技术成熟度：该项技术成果比较成熟，目前可直接进行产业化实施。

合作条件：要求合作方具备催化剂生产基本设备，再与油基钻井行业进行沟通联系，对技术进行推广。厂房及办公面积需求约 1000 平米、技术人员 5~10 名、工人 50 名、流动资金 100~200 万元。

7

项目名称：油脂废水深度处理及回收利用

技术领域：节能环保

成果详情：油脂废水属于高浓度有机废水，采用生化工艺处理效率仅能达到 80%左右，直接排放会造成浪费和环境污染。本项目基于吸附和多相芬顿催化氧化相结合，设计了近中性条件下使用的 SiO_2 包覆磁铁氧体催化剂，可同时实现油品的部分回收和污染物深度处理，此外磁性催化材料还易分离，实现重复多次使用。

8

项目名称：工业尾气中氮氧化物的高效脱除及利用

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：氮氧化物是工业以及机动车尾气排放中的主要污染物。其中， N_2O 作为氮氧化物 NO_x 的主要成分，其

温室效应潜值是 CO_2 的 300 倍左右，且在大气对流层中性质稳定，寿命可达 150 年，因此需要高效无害的方法需要对其进行处理。将其直接催化分解为对环境无害的 N_2 和 O_2 ，是 N_2O 消除的理想方法之一。针对目前常用催化剂普遍存在的贵金属活性温度高和分子筛催化剂热稳定性差的缺陷，研究中设计并制备了以羟基磷灰石 (HAP) 载体，将贵金属与非金属相结合的双金属负载催化剂。研究表明，相比于 SBA-15 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，HAP11 负载双金属催化剂在 250°C 下可达到 97% 的脱除率，T50 和 T70 分别为 205°C 和 223°C ，为机动车尾气的在线催化完全脱除提供了可能。

市场及效益分析：在减少环境污染的同时还能变废为宝，有着较好的应用前景和应用价值。

技术成熟度：该项技术成果比较成熟，目前可先进行催化剂放大中试，再产业化实施，应用到汽车尾气处理上。

合作条件：要求合作方具备催化剂生产基本设备，再与汽车生产行业进行沟通联系，推广到汽车尾气处理上。厂房及办公面积需求约 1000 平米、技术人员 5~10 名、工人 50 名、流动资金 150~300 万元。

9

项目名称：流程工业整厂用能诊断与能量集成优化研究

技术领域：节能环保

成果详情：随着全球变暖和能源危机加剧，节能减排越来越受到关注。

大型流程加工工业能量消耗甚巨，所以对其进行过程用能诊断，找出用能不合理的环节，通过能量集成是同时节约能源和减少排放的有效途径。探讨在过程工业企业等生产过程中如何更有效地利用能源，如何使过程中产生的各种废物和副产品得到最大限度地回收利用，如何使整个生产过程产生最小的污染并把过程对环境和生态的影响降到最小，是本研究项目的主要目标。本项目根据流程加工过程企业实际流程和运行数据，利用 ASPEN PLUS 软件模拟整个过程。根据模拟结果分析系统运行性能和主要设备能量利用率。基于能量平衡与火用分析理论确定系统用能不合理的环节。基于整厂能量集成思想，利用多目标遗传算法（GA）和关联向量机（RSVM）对能量优化利用和变工况操作范围进行探讨。依据分析结果，提出多化工流程、余热回收单元和公用工程管网相耦合的新型节能系统。最后针对改进系统，进行能量优化评价、减排效果评价、改造设计和经济性分析。

市场及效益分析：本课题组在本项目的应用方面，在多家石油化工和化工厂开展了系统用能诊断与能量优化的研究工作，为工厂节能改造提供了优化方案，实现了节能减排增效的目的。适合在石油化工、化工、冶金、造纸等企业应用。根据企业的用能水平，一般通过优化可以节能 10%以上。节能效益极其可观。

10

项目名称：于能量系统优化及余热驱动热泵的煤化工废水蒸发结晶

减排技术

技术领域：节能环保

成果详情：目前煤炭转化利用过程中存在高放热、高耗水、高排放的“三高”特征，其余热利用、降低水耗以及排放废物的有效减排是煤炭高效清洁利用中亟待解决的关键问题。本项目针对煤化工系统的“三高”问题，致力于余热利用、梯级用水和废水处理的系统集成与优化。该项目从煤化工工艺系统出发，采用系统集成方法对能量系统和水系统分别进行集成优化，以实现能量和水的高效梯级利用；将能量系统集成后的余热用于驱动热泵蒸发结晶系统处理高放废水，使废水中无机盐结晶，减少废水排放。该项目将煤化工系统中的能量系统、水系统和废弃物排放系统进行综合集成，可有效降低煤炭转化过程的水耗和废弃物排放，提升过程能效。该项目可用于煤制甲醇、煤制乙二醇、煤制烯烃等煤炭转化过程。

11

项目名称：过程工业系统的用能集成与 CO₂ 减排

技术领域：节能环保

成果详情：过程工业工艺过程是能源利用高度密集和 CO₂ 排放的系统。由于工艺系统能源消费的密集性和复杂性，系统中工艺过程、换热网络和蒸汽动力系统的节能一直备受重视。随着人们对 CO₂ 减排问题认识的逐渐深入，针对过程工业系统能量利用中 CO₂ 减排与控

制的问题也日益显现。如何在提高能源利用效率的同时减少 CO₂ 的排放以及如何在提高能源利用效率的节能技术方案中进一步选优成为亟待解决的关键问题。本项目将采用夹点技术和数学规划技术相结合的方法。夹点技术已成功地在世界范围内取得了显著的节能效果。采用这种技术对新设计而言，比传统方法可节能 30-50%，节省投资 10%左右；对旧系统改造而言，通常可节能 20-35%，改造投资的回收年限一般只有 0.5-3 年。由于夹点技术能取得明显的节能和降低成本的效果。本项目的目的在于为过程工业系统提供系统分析和优化集成的方案。对过程工艺系统的能量利用进行夹点分析，找出能量利用不合理的环节和原因；对各装置提出节能改造的初步方案；对公用工程系统进行分析，找出能量利用不合理的环节和原因；提出解决方案并进行调优；从而提出全能量系统优化和 CO₂ 排放最小的改造方案。

市场及效益分析：本项目能使过程工业系统的能量利用实现按质梯级利用，在现有技术水平上的取得最大的节能和 CO₂ 减排的效果。本项目可应用于化工、石化、冶金等过程工业领域。

12

项目名称：利用膜蒸馏技术实现废水有价成分浓缩结晶和淡水回收

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：我国淡水资源极度匮乏，每年缺水量达 60 亿 m³，水资源环境遭受着严重污染，年排放废水达到 500

多亿吨，水源污染加剧了水资源的短缺。企业排放污水中含有大量可回收的有价成分，通过分离回收不但可以缓解水污染，而且可以实现淡水回用和有价成分的再利用，补充水资源需求缺口，降低成本，使企业排放废水达到国家排放标准要求。膜分离技术是高效、低能耗的分离方法，是解决能源、资源和环境问题的重要手段。膜蒸馏技术是近年来迅速发展的新型膜分离技术，可广泛用于海水、苦咸水淡化、工业水处理、食品浓缩、医药产品浓缩结晶等领域。在低位温差推动作用下实现混合料液的气液分离，可得到淡水和难挥发组分的浓溶液或晶体。操作温度为 $50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，特别适合高沸点、热敏性及高浓度物料的浓缩结晶，可利用低位热能如工厂废余热、地热等来实现能量综合利用，常压操作，设备体积小，占地面积小；易于操作和管理维护，易于实现自动化和在线监测。

项目创新点：（1）该项目对膜蒸馏工艺和膜组件装置进行了创新性改进，大大提高了传质效率，显著降低了设备成本；（2）该项目通过流体在膜面的流动状况，使膜组件具有更强的耐污染性，可模块化使用，膜更换容易，过程操作更加方便；（3）自主研发了方便高效的膜清洗再生方法，大大延长了膜的使用寿命。

市场及效益分析：该项目投资设备费较小，可利用工厂废余热、地热等低品位热能，常压操作，能耗低，无设备腐蚀问题，可根据需要随时灵活调整水处理量，可有效的回收有价成分和淡水，具有显著的社会经济效益。

项目名称：超临界二氧化碳环境中等离子体的产生和应用

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：本项目曾获得日本 COE (Center of Excellence) 项目 “Power of Pulse” 课题资助 (2005.05 - 2007.05)。超临界流体具有独特的流体性能，而等离子体放电时所产生的大量微粒子 (离子，电子和自由基) 具有很高的化学反应活性。这两者的结合必将显著提升化学反应效率或是产生新型化学反应。首先将甘油酯与甲醇溶解于超临界二氧化碳中，并将高压电场置于超临界二氧化碳环境中，在一定的高电压下产生等离子放电。研究表明，经过 20000 次的等离子放电后，甘油酯能够与甲醇发生甲醇解反应，从而产生脂肪酸甲酯，这是一种重要的生物柴油成分，通常是通过酸性或碱性催化剂催化甘油酯与甲醇反应产生。这意味着，在超临界 CO₂ 中产生的等离子体对于甘油酯醇解是一种新型的催化剂，可以取代常规的酸碱催化剂并且没有使用常规催化剂所引发的环境污染问题。

市场及效益分析：该技术可应用于处理油田废水、煤炭炼焦废水废气，是一种先进高效的环保与化工技术。

项目名称：超临界流体技术处理石油、石化危废液的研究

技术领域：节能环保

成果详情：随着石油工业的不断发展，生产过程中排放的废液对环境保护和经济的可持续发展造成明显的负面影响。与石油、石化相关的废液中，多环芳烃及其衍生物和酚类化合物为主要组成成分。这类物质会对土壤表面以及水环境等人类赖以生存的自然资源造成极大威胁。

超临界流体，作为一种超常过程强化技术，已应用于多环芳烃类和酚类有机物及其衍生物的萃取与反应降解，并持续引起研究与企业界的关注。该技术最大的优点是清洁、环保且能大幅减少二次废物的产生。对于有机废液，首先使用超临界二氧化碳进行萃取富集有机物，再使用超临界水对富集的有机组分进行氧化降解，将石化废水中的顽固和高毒性有机物在几秒钟内分解为 N_2 、 H_2 、 CO_2 和 H_2O 等小分子物质。

项目创新点：采用超临界二氧化碳作为萃取剂具有适中且易获得的超临界条件，纯度高且惰性、价廉、无毒，不会产生二次废物。过程效率高，易于实现连续化操作与工业放大。

社会经济效益：对于石油天然气工业可持续发展，节能减排、保护生态环境具有重要意义。

市场及效益分析：减少环境污染的同时还能回收油品，催化剂可重复多次使用，有着较好的应用前景和应用价值。

技术成熟度：该项技术成果比较成熟，目前可直接进行产业化实施。

合作条件：要求合作方具备催化剂生产基本设备，再与工矿行业进行

沟通联系，进行水处理推广。厂房及办公面积需求约 1000 平米、技术人员 5~10 名、工人 50 名、流动资金 100~200 万元。

15

项目名称：有机液体氢化物储氢用高效脱氢催化剂

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：氢能作为一种储量丰富、来源广泛、能量密度高的绿色能源，展现了很好的应用前景。在利用过程中，其储存和运输是关键。近年来，基于化学反应法的液体有机氢化物储氢技术以其储氢量大、能量密度高、液态储运安全方便等优点引起了很多国家的关注。不饱和芳烃与对应氢化物（环烷烃）可以在不破坏碳环的主体结构下加氢和脱氢，从而实现大规模低成本储氢。该过程反应可逆，反应物产物可循环再利用，氢储量相对较高(约 60-75 kg H₂/m³，质量分数为 6-8%)，符合国际能源署和美国能源部(DOE)规定的指标，并以有机液体形式进行长途输送或可解决能源的地区分布不均匀问题。液体有机氢化物储氢过程包括芳烃加氢和环烷烃的脱氢。在环烷烃脱氢过程中，常用贵金属作为催化剂，特别是含铂 Pt、钯 Pd 等贵金属的催化剂具有良好的脱氢效果。但是，铂族金属来源稀少，价格昂贵。而廉价金属虽然也能够作为有机储氢介质的脱氢催化剂，但是转化率比较低。综合以上，寻求一种价格低廉、活性和选择性又高的有机液体储氢介质脱氢的催化剂，对于该术的推广具有重要

意义。

项目的创新点：本技术创新点在于：在尽可能少地使用贵金属（小于 0.1%）的情况下，通过适当配比其他组分比例，采取化学混合与物理混合交叉使用的组合策略，并通过溢流、传递、吸附等作用，活化了反应物，使贵金属快速引发了脱氢反应，最终使各组分之间产生了良好的协同催化作用，从而提高了催化活性。

市场及效益分析：该技术减少了贵金属的使用，降低了有机液体储氢介质脱氢的催化剂的成本，提高了生产效率，有利于推广液体有机氢化物储氢技术、实现大规模低成本储氢。

16

项目名称：生物质与煤共气化的研究

技术领域：节能环保

成果详情：项目意义：面对巨大的能源和环境压力，开发和寻找新的替代能源已成为人类社会急需解决的重大问题之一。在各类可再生能源中，具有广泛使用价值的能源是生物质能。生物质能具有可再生和环境友好的双重属性，使得生物质能源的开发利用成为新能源技术领域研究的重要方向之一。但是由于生物质能源在气化过程中具有流化性差，热值低以及焦油二次污染等缺点，所以煤与生物质共气化成为现在研究的热点问题。煤与生物质共气化可以改善生物质颗粒流化质量，实现气化炉操作的稳定运行。同时，由于生物质灰分中碱性物质

的含量较高，在共气化过程中对煤焦的气化具有促进作用，使气化炉出口有效气(CO+H₂)含量升高，冷煤气效率增大。而且二者存在的协同效应，可以促进焦油的裂解和转化，提高煤气产量和热值。另外，我国的秸秆类生物质种植面积较大，生物质秸秆的产量较多。因此煤与生物质秸秆共气化的研究对能源利用和环境保护都具有重要意义。

项目创新点：本项目将生物质（小麦秸秆）与劣质煤粉混合，对气化过程进行热失重分析。通过混合物的失重曲线和差热曲线来分析生物质与煤共气化过程中存在的协同效应，考察生物质秸秆中的碱性离子（如 K, Ca 等）在共气化过程中对劣质煤的催化促进作用。并针对该过程进行反应动力学分析，探讨生物质秸秆的掺混对改善煤的气化性质的机理，为工业应用过程提供参考。本项目的实施，将为生物质利用以及煤的综合利用，建立可持续发展的能源体系，保证国家的能源安全作出贡献。

17

项目名称：生物发酵低浓度乙醇与轻汽油醚化关键技术

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：FCC 轻汽油醚化技术可在降低汽油烯烃含量的同时，提高汽油的氧含量和辛烷值，并降低汽油的蒸汽压，有利于减少燃烧产物对环境的污染以及对发动机的破坏。现行醚化工艺一般采用甲醇或乙醇对 FCC 轻汽油进行醚化，而甲醇毒性大，乙

醇生产成本高。若采用生物燃料乙醇醚化则需进行萃取精馏、共沸精馏等分离过程。鉴于 FCC 轻汽油中含有大量的 C4~C6 活性烯烃，这些活性烯烃可进行水合醚化反应，生成低蒸汽压和高辛烷值的含氧醇醚类化合物的特点，本项目提出了用生物发酵低浓度乙醇对 FCC 轻汽油进行反应精馏水合醚化的工艺。

项目的创新点：本工艺直接从含水的生物发酵低浓度乙醇出发，水合、醚化耦合进行，使常规高能耗方法要除去的水，变成了有用的油品组分的生产原料，由此而提高了整个过程的原子利用率。此外，反应精馏技术同时实现了醇水分离和 FCC 轻汽油水合醚化的目的，降低了原分离过程能耗，低成本地实现了分离目的，最大限度地实现物质、能量的高效综合利用。而目的产品具有优良的燃烧性能，与汽油有着良好的相容性，在降低 FCC 轻汽油烯烃含量的同时，提高了其辛烷值，增强了抗爆性和稳定性，而且增加了汽油的总量，可使单位体积汽油的生产成本大幅下降。

市场及效益分析：本工艺提出的以反应手段提高原子利用率，并全方位地超越单纯分离功效的新思路，将为其他化工节能新技术的开发带来新的启迪，从而推动行业相关领域的创新。含氧醇醚类化合物为无毒绿色化学品，可以大幅度减少汽油燃烧废气中有害物质的含量，对环境保护起着重要的作用，因此具有良好的社会效益。

项目名称：基于清洁油品生产的高效脱硫、脱氮催化剂

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：随着油品质量标准的日益严格，世界各国的标准已纷纷进入清洁化或超清洁化阶段。为此，世界各国都严格限制燃料油尾气中硫化物和氮化物的排放，这是因为含硫油品在燃烧过程中形成硫氧化物不仅能导致酸雨和机动车尾气净化催化剂中毒，而且这种悬浮颗粒还是大气化学循环中形成臭氧和酸雾的组分之一。油品中氮化物的存在对油品安定性的影响极为严重，是成胶的主要因素之一。而且油品中的含氮化合物会对催化剂在加氢脱硫反应中的活性和选择性产生重要影响。因此，使深度脱硫和脱氮，成为清洁燃料生产的一个重要课题。解决油品的深度脱硫和脱氮可以从工程技术、工艺参数和催化剂选择等方面考虑。开发和应用更高活性及选择性的催化剂可以在不改变操作条件的情况下生产出清洁的油品，因此在成本上有很大的优势。深度加氢脱硫和脱氮催化剂的研究开发主要是从改进活性组分的担载方法、筛选活性更高的组分和寻找更好的载体三方面展开的。

项目创新点：可用于加氢脱硫和脱氮的催化剂有传统的过渡金属硫化物催化体系，通常为氧化铝或氧化硅所担载的 Co-Mo 或 Ni-Mo 催化体系，也包括利用贵金属改性后的这些催化体系。本项目采用过渡金属磷化物为催化剂，开发了具有适宜孔结构、较大的比表面积、良好的热稳定性和较强的机械强度的新载体，并使活性组分的晶粒尺寸减小，显著地改进了催化剂的脱硫脱氮活性和选择性。

市场及效益分析：由于本催化剂在应用过程中不腐蚀反应设备、稳定性高、反应速率快，所以从设备利用率、生产效率以及能耗等几方面来衡量，该催化剂在油品的深度脱硫和脱氮中，具有明显的社会和经济效益。

19

项目名称：多过程耦合的能量转化-传输-耗散规律及协同优化

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：以在有机合成、电子产品加工、燃料添加等领域具有广泛用途的碳酸酯合成为研究对象，根据目前尿素醇解法制备碳酸酯虽然有效利用了醇类与尿素资源，但过程需较高温度和压力，反应条件苛刻，能耗高且收率较低的特点，研究并开发以离子液体、金属氧化物等为催化剂，以丙二醇、乙二醇等为循环剂，以多聚磷酸为吸收剂的碳酸酯合成的反应分离多单元耦合的节能制备新过程。研究如何通过向系统中引入第三组分，改变反应路径，将吉布斯自由能较高的醇解反应，分成吉布斯自由能较低的两步进行，即尿素先与丙二醇或乙二醇反应生成碳酸丙（乙）烯酯与氨，而后，碳酸丙（乙）烯酯再与甲（乙）醇进行酯交换生成碳酸酯和丙二醇或乙二醇；同时研究如何通过将反应生成的氨气，碳酸酯从体系中及时移出，达到进一步突破热力学限制，打破反应平衡，提高目的产品收率的目的。研究催化剂种类、丙二醇或乙二醇尿素摩尔比、甲醇或乙

醇尿素摩尔比、反应温度、催化剂添加量、吸收剂的添加量，对目标产品收率的影响，得出优化的反应工艺条件。通过对上述低品位含能物质（醇）转化为高品位含能物质（酯）的复杂多相反应与分离耦合过程的分析，明确了含能物质品位提升过程强化的机理及策略。明确了如何通过反应吸收，反应萃取、反应精馏等多单元耦合操作而促进反应过程的进行；如何实现能量优化利用与物质的高效转化而最终获得过程强化，实现过程节能的科学策略。

20

项目名称：低品质非食用油合成生物柴油的技术

技术领域：节能环保

成果详情：石油资源的日益枯竭和日益严格的环保要求，使得清洁替代燃料的开发和应用步伐大大加快。其中可再生能源，生物柴油更是得到了各国的广泛重视。目前工业化生产的生物柴油当中，对于富含水或 FFA 的价廉的低品质原料油，则需要复杂的前处理工艺。因此开发一种方便、高效的可采用低品质油合成生物柴油的技术意义重大。蓖麻为世界十大油料作物之一，在我国具有丰富资源，其产量位居世界第三，是优良的替代石油的可再生性“绿色能源”资源。油桐是我国特有的木本油料树种，因其种子含油量高，被列为我国四大木本油料之一。以上述两种非食用油制备生物柴油不仅可以缓解对食用油的需求压力，还可以大力推动此类油品植物的种植业的发展。

项目创新点：本项目开发了一种借助微波外场，使用吸波型及吸波阻水型固体酸催化剂，催化蓖麻油、桐油非食用低品质油合成生物柴油的新工艺。其创新点在于：1) 一般微波强化反应是借助微波能量与反应物分子的相互作用进行的，我们开发的吸波型催化剂，可强烈吸收微波，在催化剂上形成微波热点高温区，强化反应的进行，解决了固体酸催化剂催化效率低的问题。2) 针对富含水、游离脂肪酸的反应体系，开发了吸波阻水型催化剂，利用催化剂载体的疏水性及催化及活性组分的难溶解于水的特点缓解了普通固体酸催化剂由于水的存在而中毒失活。

市场及效益分析：预期的社会效益：我国石油消费维持着较高的增长速度，因此，低成本生物柴油的开发与生产。可以有效缓解巨大能源压力。

21

项目名称：化工工艺与能量系统的集成优化

技术领域：节能环保

成果详情：化工过程是多层次的生产过程，包括反应、分离、能量和质量交换网络、公用工程系统和废物回收处理系统，各层次环环相扣。反应和分离系统互相影响，二者进而影响能量和质量交换网络、公用工程的优化设计、能源资源的消耗，如下图所示。传统的由反应至分离的逐层设计将使系统的能耗物耗增加。为从源头上实现节能减排，

需综合考虑化工过程各层次进行整个系统的集成优化设计和改造。本项目组在国内最早开展了能量系统、水系统、氢系统等方面的集成优化研究和开发工作,具有国内领先的化工过程系统集成、优化设计和改造水准,取得了丰富的理论研究成果。在二十余年间,项目组已将相关研究成果逐步应用于国内大型炼油、石化和化工企业的设计和操作优化中,先后在中石化、中石油、中海油、延长集团、陕煤集团、河南心连心集团、扬子石化-BASF 等三十余家国内大型企业中开展了卓有成效的节能节水改造工作。所提出的优化改造方案使企业节能 10-30%, 水耗降低 10-40%, 氢耗降低 5-15%。

市场及效益分析: 化工生产过程为高能耗、高污染生产过程,消耗大量的自然资源,并排放多种有害物质,造成严重的资源匮乏、环境恶化等问题。对其进行集成和优化可提高能源资源利用率、降低污染物排放。近年以及可以预计的将来,国家对节能和环保要求将日益提高。化工生产系统为达到相关要求,需综合考虑化工过程各层次进行整个系统的集成优化设计和改造,从源头上实现节能减排。项目组的理论是实践工作证明,综合考虑化工生产过程的反应、分离和传热/传质网络,在技术允许的范围内优化反应和分离的设计和操作、改进能量和质量回收系统、对整个系统进行集成和优化,可大幅度降低能耗和水耗、减少污染物(包括 CO₂)的排放。采用该技术使企业节能 10-30%, 水耗降低 10-40%, 风险低、收益高。

技术成熟度: 该项技术成果比较成熟,目前可直接进行产业化实施。

项目名称：喷淋洗涤焦粉技术

技术领域：节能环保

成果详情：延迟焦化工艺在石油炼化领域有着十分广泛应用，主要因其原料可以是残炭及重金属含量很高的重油、渣油甚至是沥青，而且延迟焦化工艺还具有投资少、操作费用低、过程简单、转化效率高等优点。焦化分馏塔是延迟焦化装置中的关键设备之一，塔底结焦和塔顶结盐是焦化分馏塔不可避免的问题。焦粉沉积和结盐将影响塔盘的分离效率和装置的处理能力，严重的结焦和结盐使得装置不得不停工检修，严重地制约了焦化分馏塔长周期运行。因此，近年来随着焦化装置的大量建设，众多研究者都在致力于解决焦化分馏塔中焦粉沉积和结盐问题，以保证装置的长周期运行。在本技术中，利用先进的空塔喷淋技术，在焦化分馏塔底部，洗涤进入主分馏塔的反应油气所携带的焦炭粉末，不仅可以避免焦炭粉末进入塔上段堵塞塔板，降低焦化馏分油中焦粉含量，提高油品质量；而且由于其在塔底将产生强大的扰动，也可以在一定程度上避免焦粉沉积在主分馏塔塔底，减小分馏塔塔底的结焦程度。

市场及效益分析：我国是石油消费大国，我国原油普遍偏重，且含蜡量高，柴油的收率低，国内原油的柴油馏分收率比国外原油平均低5~7 百分点。因此至今我国每年大约进口 $80 \times 10^4 \text{t}$ 柴油，同时不得不出口 $30 \times 10^4 \text{t}$ 汽油，以求国内供需平衡。其次是由于我国炼油

企业二次加工均以催化裂化为主，柴汽比低（延迟焦化 1.94，催化裂化 0.56），因此发展延迟焦化是解决柴汽比供需矛盾，增产柴油的有效办法。但是由于结焦问题导致停工检修，将导致企业产品质量下降，生产被迫中断等，严重影响企业效益。空塔喷淋技术的应用，可减轻结焦现象，提高产品质量，减少停工检修。

技术成熟度：该项技术比较成熟，目前可直接进行工业化应用。

合作条件：要求合作方具备工业生产的背景，最好具有精密机械加工和制造的经验，以及规模化生产的组织经验。

23

项目名称：焦炉烟道气余热回收技术

技术领域：节能环保

成果详情：焦炉加热用的焦炉煤气，由外部管道架空引入。焦炉煤气经预热后送到焦炉地下室，通过下喷管把煤气送入燃烧室立火道底部与由废气交换开闭器进入的空气汇合燃烧。燃烧后的废气经过立火道顶部跨越孔进入下降气流的立火道，再经蓄热室，由格子砖把废气的部分显热回收后，经过小烟道、废气交换开闭器、分烟道、总烟道、烟囱排入大气。对于其中经总烟道进入烟囱的热烟气仍有较大的余热回收价值。

项目创新点：1) 采用热管作为传热元件，整个汽水系统的受热及循环完全和热流体隔离而独立存在于热流体烟道以外，这就使本系统有

别于一般余热锅炉；2) 设备中热管元件间相互独立，热流体与蒸汽发生区双重隔离互不影响，即使单根或数根热管损坏，也不影响系统正常运行，同时水、汽也不会由于热管破损而进入热流体；3) 采用镍基钎焊技术，根据烟气特点，设计采用镍基钎焊翅片，表面具有致密不锈钢合金层，防低温下酸露腐蚀；4) 设计时调节热管两端的传热面积可有效地调节和控制壁温，防止低温酸露点腐蚀。

24

项目名称：低噪音自然对流家用热泵热水技术

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：热泵热水器以其节能、环保等优点，在居民生活热水供应领域拥有广阔的市场前景。目前常见的分体式热泵热水器存在安装复杂、成本高、室外安装危险等缺点。一体式热泵热水器越来越受到青睐，而当前室内一体式热泵热水器普遍存在对室内声音环境的影响和冬季室内降温的影响，致使该产品在市场失去竞争力。本项目对蒸发器和冷凝器均采用自然对流换热方式，可有效解决一体式热泵热水器运行噪音和室内温降的问题，可显著增强该型产品的市场竞争力。

项目特点：1) 本项目针对一体式热泵热水器的换热器创新性地采用自然对流换热的方式，既降低了设备成本的情况下，又解决了机组带来的噪音问题。2) 采用该技术，可发挥热泵热水器较高的 COP 优势，

同时解决了室内较大温降的问题，有利于该设备的推广使用。3) 该项目已开展大量实验，针对家用热泵热水器工作工况进行结构上的优化设计。可对设备定型提供可靠依据，为设备应用提供坚实基础。

市场及效益分析：本项目能体现热泵热水器 COP 比较高的特点，结构相对简单，加工难度低，节能效果显著，同时该技术的应用解决了此前同类设备的限制性缺陷，有利于该设备在家用热水供应领域的推广，有良好的应用前景和社会经济效益。

25

项目名称：流程工业整厂用能诊断与能量集成优化研究

技术领域：节能环保

成果详情：随着全球变暖和能源危机加剧，节能减排越来越受到关注。大型流程加工工业能量消耗甚巨，所以对其进行过程用能诊断，找出用能不合理的环节，通过能量集成是同时节约能源和减少排放的有效途径。探讨在过程工业企业等生产过程中如何更有效地利用能源，如何使过程中产生的各种废物和副产品得到最大限度地回收利用，如何使整个生产过程产生最小的污染并把过程对环境 and 生态的影响降到最小，是本研究项目的主要目标。本项目根据流程加工过程企业实际流程和运行数据，利用 ASPEN PLUS 软件模拟整个过程。根据模拟结果分析系统运行性能和主要设备能量利用率。基于能量平衡与火用分析理论确定系统用能不合理的环节。基于整厂能量集成思想，利用多

目标遗传算法（GA）和关联向量机（RSVM）对能量优化利用和变工况操作范围进行探讨。依据分析结果，提出多化工流程、余热回收单元和公用工程管网相耦合的新型节能系统。最后针对改进系统，进行能量优化评价、减排效果评价、改造设计和经济性分析。本课题组在本项目的应用方面，在多家石油化工和化工厂开展了系统用能诊断与能量优化的研究工作，为工厂节能改造提供了优化方案，实现了节能减排增效的目的。本项目适合在石油化工、化工、冶金、造纸等企业应用。根据企业的用能水平，一般通过优化可以节能 10%以上。节能效益极其可观。

26

项目名称：化工污泥高效无害化处理工艺

技术领域：节能环保

成果详情：技术创新性和领先性：开展石化企业化工污泥掺烧高效无害化处理技术研究，采用最经济的方法实现化工污泥的资源利用与环境保护，以及配套的装备技术，解决化工污泥处理所面临的关键科学技术问题，达到既保护环境，又利用资源的目的。这对于提高企业能量利用率、减少环境污染、增强企业经济竞争性，具有非常重要的现实意义和重要的工程应用价值。本项目根据石化企业污水处理厂污泥来源复杂的特点，提出采用掺烧方法处理的创新工艺技术。该过程将化工污泥以合适形态输入锅炉掺烧实现无害化减量化的目的。充分利

用了有效利用锅炉现有设备和烟气净化设备的条件，避免轻烃组分的挥发损失和干污泥焚烧过程中可能产生的二次污染问题；克服污泥干化昂贵的设备投资和运行成本高的问题；工艺采用喷枪雾化燃烧效果好、污泥处理量大、处理彻底，投资成本低，对环境影响小。

市场及效益分析：已经在扬子石化实现了年处理 3 万吨化工污泥的生产业绩。环境效益显著，社会效益良好，应用前景广阔。

27

项目名称：电化学耦合胺吸收的 H_2S 和 CO_2 的新型高效脱除技术

技术领域：节能环保

成果详情：油气工业中的炼厂气、天然气等均含有 H_2S 和 CO_2 ，往往需要对这些气体进行净化，使其降低至规定标准才能进入下一工序或者按照环保要求排放，否则会产生 H_2S 腐蚀、温室效应等，严重影响油气工业过程的安全环保稳定运行。胺吸收法（胺法）是脱除 H_2S 和 CO_2 典型过程，特别适合我国炼厂气、天然气脱除 H_2S 和 CO_2 ，但由于热力解吸温度较高（383K-393K），解吸需要消耗大量解吸热（蒸汽等），导致能耗成本高达约 6000 亿元/年。因此，急需降低脱除 H_2S 和 CO_2 的能耗。利用电化学方法脱除 H_2S 和 CO_2 的低温解吸低能耗的特点，提出胺法和电化学方法耦合脱除 H_2S 和 CO_2 的新技术（电化学耦合胺吸收的 H_2S 和 CO_2 的脱除技术），可大幅度降低解吸温度从而控制解吸能耗，又能保持高的脱除效率。同时，由于实现了低温

脱除 H_2S 和 CO_2 ，可以回收利用油气工业中的废热实现 H_2S 和 CO_2 的解吸，最终可实现近零能耗的 H_2S 和 CO_2 的脱除。电化学耦合胺吸收的 H_2S 和 CO_2 的高效新型脱除技术，可大幅度降低解吸温度从而控制解吸能耗，能为炼厂气、天然气中的 H_2S 和 CO_2 的高效低成本净化提供新的思路，具有广泛的科研价值和市场前景。

28

项目名称：太阳能水处理

技术领域：节能环保

成果详情：近年来，太阳能热蒸发海水淡化作为一种继反向膜和热电站余热蒸发之后的新型海水淡化技术，具有良好的经济性和可持续性，适用于中等规模的海水淡化厂，成为海水淡化领域的研究热点。目前高效的太阳能热蒸发结构主要集中在自漂浮的全亲水碳基材料上，然而在实际海水淡化过程中，全亲水结构受到海水的浸泡，一方面容易被侵蚀，另一方面水蒸发后容易在表面析出盐分，减弱了光的吸收、阻塞水蒸气逸出通道、降低蒸发效率甚至破坏蒸发结构，这些问题都限制了自漂浮蒸发结构的实际应用。课题组设计了一种疏水/亲水的双层蒸发结构。上层为多孔疏水的吸光材料，实现光热转换、提供水蒸气逸出通道，以及利用疏水效应阻止溶质在表面析出。下层为亲水的滤膜，利用其毛细作用供水以及作为蒸汽产生位点。采用商业化廉价的泡沫作为浮子和绝热层，利用无纺布类似灯芯的毛细作用向上面

双层蒸发结构不断供水。这种双层结构设计同时兼备了全亲水结构蒸发快和全疏水结构阻盐的优点，克服了全亲水结构易受海水侵蚀和全疏水结构蒸发慢的缺点，实现了长期稳定的高盐度海水淡化和含染料重金属细菌污水纯化。该工作中，通过简单的一锅法合成出了疏水的 Cu_2SnSe_3 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ 多级结构微球作为光热转换材料，利用疏水/亲水的双层蒸发结构设计实现了在一个标准太阳下平均 $1.657 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 的水蒸发速率和 86.6%的光热转换效率，并在连续 15 日工作后仍保持性能稳定。渤海、青海湖和茶卡盐湖水经蒸发后，含盐量全部下降到原来的 0.5%以下，污水中的染料、重金属和高浓度细菌经蒸发后全部低于检测限。蒸发后的水质达到WTO的饮用水标准。

29

项目名称：液态金属电池电力储能关键技术及应用

技术领域：节能环保

成果详情：储能技术是构建智能电网的核心要素，其规模应用必将有效提高可再生能源入网，推动电力能源生产与消费的深刻变革。储能电池高效灵活、便于管理，是中小型分布式储能的重要技术选择。但现有电池体系亟待突破储能成本和寿命等难题，才能满足电力储能的应用需求。新型液态金属电池以液态金属和熔盐作为电极和电解质，无需隔膜，储能成本低、寿命长，在中小型分布式储能领域具有广阔应用前景，被美国著名科技期刊《Technology Review》评为“2009

年全球十大突破性技术”。

技术条件：液态金属电池使用的电极材料和电解质均为液态，工作温度为 500~700℃。

技术优越性：1) 可在高倍率电流下运行，应用于大功率的储能装置。由于这种电池的电极材料和电解质均为液态，离子在电极/电解质界面（液/液界面）的交换远快于传统电池的固/固界面；电解质采用中低温熔盐，活性离子在其中的传递速度也远高于传统室温电解质；并且由于电极材料为液态，在电池运行过程中，不会产生枝晶，基于上述理由，液态金属电池可在高倍率的电流密度下运行。2) 成本低，十分适合应用于电网储能领域。由于液态金属电池的电极材料均选用储量丰富、价格便宜的金属材料，并且由于三层液态密度的差异可进行自组装，因此电池组装十分容易。3) 运行寿命长。由于液态金属电池的正负极均为液态，充放电过程仅负极A和正极B体积增加和减少，并无副反应发生，因此可以预计这种新型电池具有很长的运行寿命。

30

项目名称：火箭尾焰污染治理

技术领域：节能环保

成果详情：应用工程热力学经典基础理论，以冰为工程结构材料，研制出了一整套火箭发动机射流尾焰污染处理技术与系统装置，实现对火箭发动机尾焰的主要污染物进行一次性高效无害化处理。科技查新

显示，未见述及采用冰作为固体火箭发动机污染（冷却、降温）处理材料。火箭发动机是太空探索和战略武器装备的基础，但其发射与地面试验对生态环境带来的污染问题一直是困扰业界一大难题。尤其是固体火箭发动机的主要污染有以下 4 个方面，3000K—4000K 的超高温、150 分贝—200 分贝的音爆噪声、氧化铝固体颗粒粉尘以及盐酸雨雾。前两种污染主要是对发射和地面热试车环境、设备有影响。后两种污染主要是对生态环境造成影响。全球仅地面热试车和各种发射活动，每年排空到大气的氧化铝和盐酸等有害物质就高达千吨万吨，对全球生态环境造严重破坏。经过悉心研究发现，冰具有良好的工程材料属性，它既具有一定结构稳定性，又具有水的良好物理化学特性。在反复实验中，科研人员发现尾焰在冰处理通道内剧烈能量交换的主要原因是水在处理通道内发生了化学分解反应，并吸收了尾焰热量的绝大部分，由此得到启发。

31

项目名称：固废热解气化

技术领域：节能环保

成果详情：近年来我国城镇化加速，使得城市面临垃圾围城。北京，每年新增 500 亩填埋场；西安，江村沟垃圾场 9000 吨/天填埋，2021 年饱和。当前生活垃圾处置主要方案为填埋、堆肥、焚烧。热解气化最初用于木材和煤的干馏，垃圾热解气化一般生成产物为含有 H_2 、 CO 、

CO₂、CH₄、C₂H₄等短链烷烃气体以及固体残渣和液体焦油。与焚烧相比，热解气化技术可有效处理生物质、塑料类、橡胶等材料，且燃烧过程无需氧气，反应过程是吸热的过程，主要产生气、油、炭黑，方便贮存或远距离运输，且二次污染较小，适合于处理村、镇、县市等地的生活垃圾。

技术指标：焚烧与热解气化的比较产物分析：1) 大量的热解气含有有机可燃物的垃圾在缺氧条件下经热能作用发生化合键断裂，从大分子的有机物转变为小分子量的CO、CH₄、H₂等可燃气体。每吨垃圾热解净化后可产生 1000m³ 大于 1500Kcal的中热值工业燃气，可以发电自用或上网。日处理 1000t的城市垃圾，每年可得 3.65 亿m³ 工业燃气，约折合 7000 万m³ 天然气；2) 少部分热解焦油；3) 少部分热解焦炭：热解炉进料的 5-10%左右。

应用前景：目前我国的垃圾热解气化项目多处于中试阶段。本项目技术工艺具有多项自主技术专利产权，已经转化应用，如实用新型专利“生活垃圾破袋机”（CN205345542U）、“废塑料薄膜无水清洗装置”（CN205701722U）在广东华慧生环保科技有限公司和云南益吉环境科技有限公司的生活垃圾处理厂的生产工艺中应用。发明专利成果“组合式热解气化炉”（CN105505474A）在河南新密造纸厂的造纸尾渣处置工艺上应用，产生了丰厚的经济效益。通过校企合作与多个国家输出了热解轮胎、塑料、植物热解装置。主持交大帮扶贫困县项目：施甸县固废资源化利用。施甸县通过财政补助的方式，投入 1000 余万元资金，建成并投入使用农村垃圾热解气化炉 45 座，设置大型农村

生活垃圾收储箱 100 个, 入户垃圾桶 700 余只, 配置垃圾清运车 8 辆, 日处理垃圾约 92 吨, 解决了 53 个行政村 14 万群众的垃圾处理问题。

技术成熟度: 产业化

合作目标: 通过采用技术许可和技术入股形式, 签署工程项目设计意向或技术输出意向, 孵化打造 5-8 个标准样板建设项目。努力进一步总结和提升技术先进性空间, 完善项目装备制造和建设标准, 替代传统垃圾处置模式, 营造可持续、低碳环保治理标杆。

32

项目名称: NO_x脱除技术深度集成

技术领域: 节能环保

成果详情: 锅炉脱硝技术是指通过对燃烧过程优化和燃烧烟气净化措施, 实现控制电厂燃煤锅炉NO_x排放的一种技术, 目前主流的NO_x控制技术主要为低NO_x燃烧技术和烟气脱硝技术, 前者虽然可以在一定程度上降低NO_x的生成量, 但无法满足目前日益严格的环保排放要求, 烟气脱硝技术因具有更高的NO_x脱除效率而逐渐得到广泛应用, 但也存在成本较高的局限。NO_x脱除技术深度集成创新致力于炉内燃烧与烟气脱硝技术系统集成的研究开发, 开发出国产化燃煤锅炉烟气脱硝成套核心技术装备, 一方面在最大限度提高了脱硝效率的同时, 较好的解决了成本高的难题, 具有最佳成本优势, 另一方面又打破国外技术在该领域的垄断, 替代进口, 带动上下游产业链的发展, 必将在今

后火电脱硝的主流组合技术。

技术创新性：本技术经过多年的研究开发，已形成以下成果：1) 低温脱硝技术（200℃达到70%以上的脱硝效率）；2) SCR脱硝反应塔的布置与设计；3) SNCR脱硝系统的设计；4) 煤粉再燃、生物质再燃，燃料分级燃烧脱除NO_x设计及关键技术参数的确定；5) 空气分级燃烧脱除NO_x设计及关键技术参数的确定；6) 尿素热解脱除NO_x的技术；7) 低NO_x燃烧器设计的结构和空气动力参数；8) 系统集成优化高效脱除NO_x技术。

应用前景：国家针对敏感地区规定了更严格的大气污染物特别排放限值，即超低排放。面对新的排放标准，一体化的污染物协同减排效率较低。因此该技术采用分布去除的方法，通过炉内燃烧与烟气脱硝技术系统集成的研究开发，实现脱硝与脱汞一体化。

技术成熟度：中试

33

项目名称：城市生活垃圾全资源无害化综合处理技术

技术领域：节能环保

成果详情：我国城市生活垃圾构成主要表现为：有机物增加，可燃物增多，塑料增多，可回收利用物增多，可利用价值增大。当前我国城市生活垃圾种类的多样化，主要构成为：有机物（塑料、厨余、果皮、草木、动物尸体等）、无机物（灰土、砖陶等不可回收物）；废铁、纸

类、金属、织物及玻璃等可回收物；有毒有害废物：电池、废旧电子元件等。生活垃圾主要特点：成分复杂、各种垃圾混合、袋中套袋，难于分类。经过西安交通大学几年来科技攻关，结合当今国际上先进的垃圾处理工艺和我国实际的垃圾处理现状，我们研究总结出一套完整、有效的城市生活垃圾全资源再生利用方案，简单地说就是把上述三种工艺通过我们的技术有机的结合起来，形成一条封闭、安全、环保、有经济效益的处理工艺链，为解决垃圾处理的“资源化”、“无害化”、“减量化”要求，提供了一条切实可行的操作方案。

项目性能优势：西安交通大学垃圾综合处理六大系统：1) 机械化前综合分选处理系统；2) 有机物动态无臭好氧堆肥系统；3) 有机塑料分选、再生循环利用系统；4) 废气、废水净化处理系统；5) 可回收金属、重金属回收系统；6) 可燃有机物无害化裂解系统。垃圾分选，可将垃圾变成均匀流体，采用多相流、异比重分选技术，内置破袋设施(破袋率达99%以上)；破袋后使用鼓风，气固液三相流动进行分选。城市垃圾全资源无害化综合处理技术，该技术有效的解决了城市生活垃圾处理的世界性难题，实现了垃圾资源的回收和最大程度的循环再利用。彻底解决了白色(垃圾塑料)污染对人类造成的危害，实现城市生活垃圾处理的减量化、资源化、无害化和垃圾再利用经济效益最大化。

技术成熟度：处于中试阶段，部分阶段已经实现产业化。

项目名称：油田油泥原油清洁回收与残渣焚烧技术

技术领域：节能环保

成果详情：油田油泥、含聚油泥属于危险废物，产量巨大，泄漏后对环境、生态会造成严重污染。本技术开发了油田油泥以及含聚油泥的热化学转化原油回收以及无害化处理技术。该工艺采用清洁热裂解技术耦合残渣焚烧工艺实现对油泥中原油组分的回收利用。热裂解产生高热值可燃热解气可以作为燃气储备。热裂后产生的固体残渣被送至焚烧炉，并辅以热解气进行焚烧处理，从而达到高效燃烧去除残留污染物的目的，热裂解过程以及残渣焚烧过程全部采用高温除尘技术，完全可以实现气化尾气洁净排放，烟气颗粒物粒径 $<1.5\text{nm}$ 。热裂解过程可回收高品质柴油类产品，残渣中油分含量 $<0.1\%$ 。整个工艺无任何废水产生。

技术创新性：1) 高效热裂解原油回收技术。完全实现含油污泥的深度快速油品回收。2) 裂解残渣的焚烧技术，实现利用油泥自身热量实现热裂解过程的能量供给。3) 高温除尘技术可以实现热解焚烧过程的可燃气体以及烟气的热态净化，大大降低后续处理成本。

应用前景：油田油泥处理，罐底油泥处理、海上油泥处理。

合作要求：1) 有独立承担民事责任能力的企业法人，具有良好的信誉基础和积极向上的事业。2) 有相应的投资能力，并且具备一定的市场开拓能力。3) 有一定的启动资金和市场经验，具备较强的品牌

经营意识。

35

项目名称：二噁英重金属近零排放的生活垃圾气化及飞灰熔融技术

技术领域：节能环保

成果详情：我国每年城市生活垃圾清运量超过 2 亿吨，且每年增长约 8%-10%，到 2020 年预计可达 2.5 亿吨，中国城市生活垃圾无害化处理能力逐年提高，官方数据显示 2016 年大中城市生活垃圾无害化率已超过 90%，但我国农村部分，无害化率仅为 60%。垃圾处理面临占用土地、资源浪费、环境污染等问题。当前我国城市垃圾处理仍然以填埋为主，但以焚烧技术为代表的能源化利用技术增长很快。该技术伴随着设备投资高、产生强致癌剧毒物质、重金属污染、工艺优化不足等缺陷，急需探寻其他方法。该项技术利用气化熔融技术原理，对垃圾进行减容减量处理，处理后体积减小 90%以上，大大降低填埋场的压力。气化熔融技术真正做到垃圾的无害化处理，可以做到二噁英、重金属污染物的超低排放，环保性能大大优于目前的垃圾焚烧技术，消除公众抵触情绪，易于推广。

技术创新性：1) 针对我国垃圾特点：高含水率、成分复杂、热值较低。2) 有机结合垃圾前处理技术：挤压脱水、筛分、分选。3) 充分利用气化熔融过程中产生的余热、余气、余渣，保证处理过程的经济性。4) 过系统工艺优化及多种环保技术相结合，保证处理过程的环

境友好。5) 二噁英排放值 $<0.05-0.005\text{ng-TEQ/Nm}^3$ ，大大低于新国标 0.1 ngTEQ/Nm^3 重金属熔渣重金属浸出率。6) 熔渣重金属浸出率各项指标在国家标准的 $1/10$ 以内。7) 硫、氯、氮等污染物排放均达到国家标准。

应用前景：“十三五”期间我国环保总投资将达到17万亿以上，固废处理行业投资将达4万亿元。根据统计年鉴推算：2018年，全国产生城市垃圾约2.3亿吨；逐年增长速度 $4\%-5\%$ ，以处理规模为 100t/d 的垃圾处理设施为例，垃圾气化熔融装置需求至少在2000套以上。全国668座大中城市，2856个县级单位，假设平均每个城市需要2个垃圾处理设施，平均每个县城需0.5个垃圾处理设施，除去全国已有垃圾处理设施627个，则垃圾处理设施还需2000套以上。假设垃圾处理成本约180元，处理补贴约120元，每吨垃圾的发电量约550千瓦时/吨，电价约为0.65元/千瓦时，装置年运行330天，则日处理量100吨的垃圾气化及飞灰熔融项目可获得年收益约968万元，约4年可收回投资成本，现有垃圾焚烧项目的投资回收期普遍在 $8\sim 10$ 年。而随着装置规模的增大，发电效率和吨单位投资成本会进一步下降，可进一步缩短投资回收期。

技术成熟度：工程样机。本研发团队针对我国生活垃圾资源化利用领域的一系列技术瓶颈问题展开攻关，形成了多项具有自主知识产权的关键技术，目前在本领域已经获得国家发明专利授权19项，国际发明专利授权2项。本团队基于城市生活垃圾流化床气化的实验研究成果，针对我国垃圾特点，自主研发了 12t/d ， 50t/d 的生活垃圾气化及

飞灰熔融技术一体化工艺方案。

36

项目名称：煤/气两用及煤粉锅炉跨负荷低NO_x稳燃燃烧器及系统

技术领域：节能环保

成果详情：团队开发有系列自预热-燃烧相耦合的新型跨负荷低氮稳燃旋流燃烧器及燃烧系统，有效实现煤粉锅炉跨负荷灵活性调节、安全运行、超低负荷低NO_x稳燃、以及天然气/煤粉解耦燃烧。目前该燃烧器及系统已工业应用百余台（单台燃烧器 4.2~56MW），应用于 50 余台锅炉。工业实践应用表明：煤粉炉NO_x原始排放可达 125~200 mg/m³（基准氧含量：9%），燃烧效率 90~94%，同时实现跨负荷（10-110%）灵活性调节、无结渣安全运行、及超低负荷（20%）稳燃。相应研究已获授权国际发明专利 13 项，授权实用新型专利 12 项，发明专利处于实质审查 20 余项。团队现有正教授一名（二级教授）、副教授两名（西安市科协“青年人才托举计划”入选者）及博士/硕士研究生近 20 人，主要从事固体燃料清洁高效燃烧、飞灰等固体废弃物资源化利用、以及低NO_x燃烧器开发研究。

