

# 中国科学院理化技术研究所“一三五”规划

## 季度进展报告

2018 年第二季度

---

突破一	先进激光技术的创新与应用 .....	1
突破二	液氮温区 KJ 制冷技术创新及其应用 .....	1
突破三	大型低温制冷系统技术研发及工程应用 .....	1
突破四	仿生智能超浸润界面材料体系构筑与调控 .....	4
培育一	光化学转换与光化学合成 .....	10
培育二	环境友好材料与绿色生产工艺 .....	16
培育三	激光显示及产业化 .....	18
培育四	分散能源气体液化分离技术与应用 .....	23
培育五	液态金属材料前沿技术 .....	26

## **突破一 先进激光技术的创新与应用**

概述：本方向本季度在研项目 44 项；引进光电领域专家 2 名，引进光学和光学工程专业博士各 1 名，招聘光学和机械设计专业劳务派遣人员 6 名；改造 100m<sup>2</sup> 的科研用房；召开 5 次调度会议。

### **(一) 本方向本季度重要进展**

本季度在大功率固体激光及系统、TJ 固体激光和变频固体激光等方面取得重要进展。（略）

### **(二) 下一步工作计划**

下一步将继续在大功率固体激光和变频固体激光等方面开展相关工作。（略）

## **突破二 液氮温区 KJ 制冷技术创新及其应用**

概述：本方向本季度在研项目 11 项，共召开 6 次调度会议。

### **(一) 本方向本季度重要进展**

本季度在型号用制冷机、小型制冷机和制冷机平台建设等方面取得重要进展。（略）

### **(二) 下一步工作计划**

下一步将继续在型号用制冷机和小型制冷机等方面开展相关工作。（略）

## **突破三 大型低温制冷系统技术研发及工程应用**

概述：本方向本季度在研项目 1 项，即“液氮到超流氦温区大型低温制冷系统研制”项目，是中国科学院国家重大科研装备研制专项

计划实施的项目之一，分为 6 个子方向。

### （一）本方向本季度重要进展

**1.冷箱：**开展新 250W、1000W 相关部件设计，等待招标。

4K 冷箱真空容器到货，完成 2K, 500W 冷箱集成设计。

**2.集成：**依据廊坊现场确定最终集成方案并经过技术委员会会签通过。完成 2500W@4.5K/500W@2K 制冷机用的 10kV 和 380V 电力改造；完成 2500W@4.5K/500W@2K 制冷机用的配套冷却水系统改造；完成 2500W@4.5K/500W@2K 制冷机用手动开关阀门的订购；完成 1000W@4.5K 制冷机的常温气动调节阀门、手动开关阀门的选型与采购；完成 1000L 广口液氦杜瓦方案论证与采购。

**3.流程设计：**完成 2500W 制冷机控制模块的采购以及控制柜和电源柜的设计；完成 1000W 制冷机的控制策略的设计。

**4.冷压缩机：**完成冷压缩机性能测试平台室温泵机组拆箱、查验、就位、安装、布线等。完成冷压缩机第一轮样机（组）蜗壳机械加工工艺设计和加工，完成所有四套冷压缩机样机磁悬浮轴承及传感器、高速电机加工，正在进行冷压缩机的集成组装加工。高速电机测试平台和磁悬浮性能测试平台调试验收由于需要进一步进行试验调试，达到验收指标，延期到下一季度验收。

**5.氦螺杆压缩机：**2500W 雪人压缩机廊坊就位；2500W 油分离系统廊坊就位，并完成活性炭灌装和再生，具备运行条件；新增两个平台的压缩机按计划进行；新增两个平台的滤油器完成

备料和部件成型。

**6.透平膨胀机：**完善 1000W 透平膨胀机的设计，针对膨胀机叶轮强度校核，膨胀机转子动力学分析，展开了相关研究工作；完成了 2500W、1000W、新 250W 的相关的采购或外协合同，具体包括：下蜗壳加工合同、光纤测量仪采购合同、静压氦气体轴承加工合同、主轴及机芯配件加工合同、测速传感器及转速表采购合同等；还配合完成了新 2500W 的流程设计。完成了 250W 制冷系统氦透平膨胀机所有质量文件。

## （二）下一步工作计划

**1.冷箱：**2500W@4K 冷箱现场集成。500W@2K 冷箱集成与相关厂商沟通，确定最终方案。

**2.集成：**完成 2500W@4.5K/500W@2K 制冷机的室温循环泵组氦气测试；完成 2500W@4.5K/500W@2K 制冷机的压缩机小循环组装。完成 200W@4.5K 制冷机的气体管理面板。

**3.流程设计：**完成 2500W 制冷机控制柜和 UPS 电源柜的设计、加工和组装，开展控制程序的编写；完成 1000W 制冷机控制硬件的采购。

**4.冷压缩机：**7 月底开始单个冷压缩机安装测试和常温下的旋转试验。8 月底完成性能测试平台的集成组装和冷压缩机组就位。开始冷压缩机第一轮样机在平台上的性能测试，包括负压换热器、加热器及室温泵性能测试。

**5.氦螺杆压缩机：**豪顿压缩机开箱、验货，测试；新增两个平台

的压缩机生产、测试；新增 250W 平台滤油器完成检漏、活性炭再生、滤芯安装验收；新增 1000W 平台滤油器完成部件过程检验、系统集成准备。

**6. 透平膨胀机：**依据整体进度安排继续完成 1000W 氦透平膨胀机的整机设计和加工工作；完成下蜗壳的验收工作，并将下蜗壳交付于冷箱方向；完成气体轴承实验台的加工和调试工作；继续推进 2500W 制冷系统氦透平膨胀机的设计工作；编写 2500W 制冷系统氦透平膨胀机的工艺文件。

## 突破四 仿生智能超浸润界面材料体系构筑与调控

概述：本方向本季度在研项目 50 项，其中新增 0 项。召开协调会议 2 次。

### （一）本方向本季度重要进展

本季度在仿生超浸润界面材料、仿生纳米孔道，超浸润有机图案化材料与器件、仿生粘附界面材料、仿生微纳米结构的构筑和加工等方面展开了系统深入的研究，取得了一系列原创性研究成果，发表 SCI 论文 14 篇，其中包括 Adv. Mater. 1 篇、Adv. Funt. Mater. 2 篇，代表性研究进展介绍如下：

1. 仿生超浸润界面材料：光子晶体当随外界条件改变发生有效折光率或晶格常数上的改变时，光子晶体结构色会发生变化，实现肉眼可见分辨，可广泛用于快速简便传感器。传统的湿度响应传感器或溶剂响应传感器多是基于液体直接渗入光子晶体的空隙中改变体系有效折光率，或者通过水或有机溶剂对光子晶体骨架内凝胶体系的溶

胀实现晶格常数改变进而改变结构色，实现检测目的。但前者会导致体系折光率比值变小，使光子晶体结构色变淡甚至消失；后者基于凝胶溶胀，具有响应速度慢、重复性差等缺陷。

基于课题组之前在空心球光子晶体方向的基础，将二氧化硅空心球光子晶体进行亲疏水图案化修饰。在动态水蒸汽流中，水蒸汽凝结并填充在亲水区空心球之间的空隙中，形成类似反蛋白石的光学结构。变化过程最快可达 100 ms，光子晶体反射峰最大波长位移可达 63 nm。实验还表明，空心球光子晶体的光响应与相对湿度和蒸汽流速都有关。当样品放入静态的湿度环境下（97.5% 的相对湿度），最大位移不超过 9 nm。而人体自然呵气的气流速度和相对湿度恰好可以使样品产生明显结构色变化，这就为新一代呵气响应式提供了可能，既不会受自然环境的明显影响，又具有简单易得的刺激响应模式。另外，通过不同化学修饰剂对光子晶体样品进行修饰，还可以得到针对不同表面能液体的显色响应（*Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1707246）。

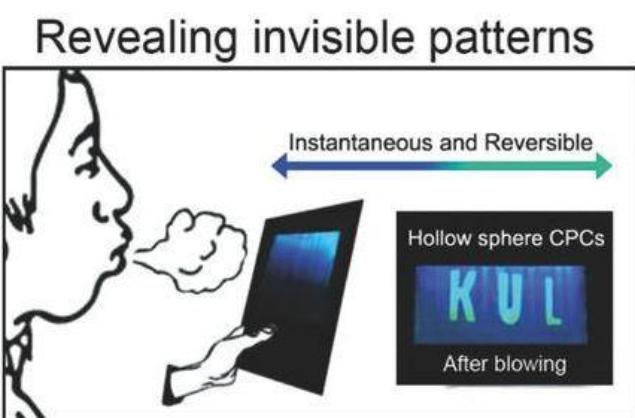


图 1. 空心球光子晶体呵气响应显色示意图

2. 仿生纳米孔道：生物离子通道在物质转移、能量转换和信号传输等多种生理过程中起着重要作用。信号可以基于生物离子通道在

视觉、嗅觉、听觉和触觉等过程中经神经传递到大脑。这些功能高度依赖于具有选择性的生物离子通道的高速离子传输（每个通道每秒  $10^7$  个离子）。这种超快物质传输源于离子通道的特殊性质，例如，小尺寸、独特的结构和表面电荷分布等，从而导致离子和分子以单链形式进行超快传输。从经典热力学角度看，具有化学选择性的纳米通道的物质传输应该是非常缓慢的。然而，在生命体系中，离子和分子的快速传输表现出量子化的超快流体状态。例如，Na、K 通道每次只能容纳一个水合  $\text{Na}^+$  离子；K 通道含有两个相距约 7.5 埃的  $\text{K}^+$  离子，中间有一个水分子；每个 Ca 离子通道也同时结合两个  $\text{Ca}^{2+}$  离子。

江雷院士将生物孔道中离子和分子以单链的量子方式快速传输定义为“量子限域超流体”，并指出限域孔道内离子和分子的有序超流为“量子隧穿流体效应”，该“隧穿距离”与量子限域超流体的周期相一致。结合该课题组近期研究成果（*Adv. Mater.*, 2016, 28, 3345-3350; *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, 129, 5814-5818），发现仿生体系也存在量子限域超流现象，例如人工离子通道和水通道内物质的

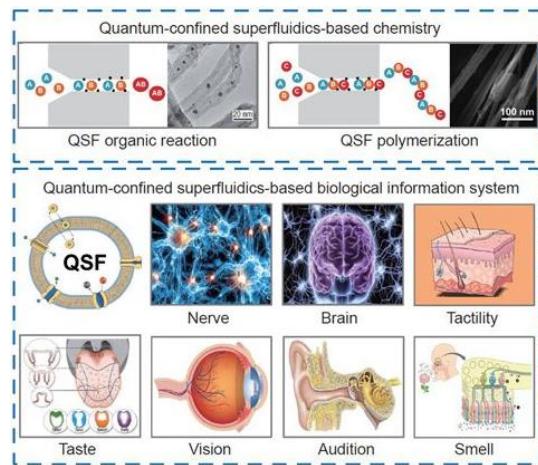


图 2. 引入 QSF 概念到化学和生物学领域

快速传输（每秒~ $10^6$  个离子）。通过把量子限域超流体概念引入化学领域，将引发出精准化学合成，即量子有机、无机、高分子反应等。而引入到生物学领域，将产生量子超流的生物化学、生物物理、生物信息学以及生物医学等。在此基础上，也将产生其他的新科学和新技术。

**3. 超浸润有机图案化材料与器件：**利用不对称浸润性界面诱导，实现了对于有机光电功能小分子单晶纳米结构生长的精确定位、排列和图案化。通过化学修饰实现对界面浸润性的调节，从而控制液体在模板上的去浸润过程，最终实现对于晶体生长的控制。同时基于高质量阵列结构制备了高性能光电探测器，实现了大面积一维钙钛矿单晶阵列及基于该阵列光电检测器的制备。之后，进一步研究了该光电检测器的性能并深入探索了其偏振光响应的特殊功能。在此基础上，进一步制备了半导体聚合物一维阵列，并以此为基础研究了光电检测器的光电性能，同时深入探讨了其中载流子传输机理。

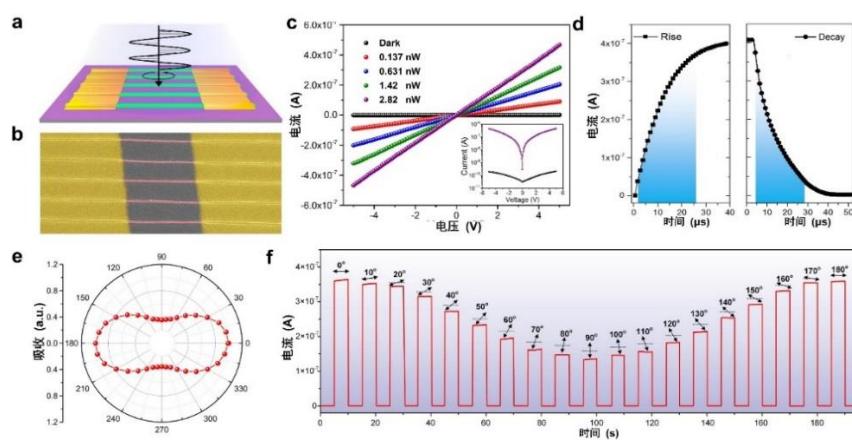


图 3. 高性能偏振响应光电探测器。基于超浸润表面诱导横向液桥的方法操控有机无机卤化物钙钛矿的图案化制备与结晶过程，实现了大面积一维钙钛矿单晶阵列，同时制备了具有偏振光相应的光电检测器

4. 仿生粘附界面材料：随着海上原油泄漏事故的频繁发生以及工业及生活中含油废水的大量排放，水中油污染已经成为危害人类健康及环境安全的重大问题。近年来，基于表面浸润性的膜、海绵等材料被相继开发，并用于分离浮油、分散油甚至是乳化油等，取得了良好的分离效果。然而，从水中分离出微小的油滴往往被人们忽略，这些油滴尺寸通常小于  $20 \mu\text{m}$ ，在水中能长时间稳定存在，传统的分离方法很难将其分开。我们通过油水乳液界面聚合结合纳米粒子界面组装的方法制备了磁性亲水/亲油微球。这些微球具有类似抓手的结构，其凹面亲油、凸面亲水。这些微球能从水中快速分离出微小的油滴，整个分离过程只需 2 分钟，分离效率高达 99%。这种磁性亲水/亲油为开发新型的油水分离材料提供了新的思路，有望应用于工业废水的处理和水净化等领域 (*Adv. Funct. Mater.* **2018**, 1802493)。

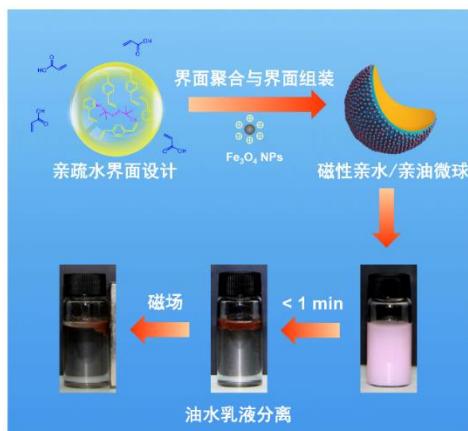


图 4. 磁性亲水/亲油微球实现快速的油水乳液分离

导电聚合物的形貌对其性能的提升有着重要影响，像信号检测，微型驱动器制备和液滴操纵。然而，以往的大多数方法因为其固有的弊端不能满足实际的应用。因此，提出了一种通过调控固液气三相接触线和电化学聚合，用于制备具有精确可控微米吸盘结构的图案化导

电聚合物的普适方法。通过调控铂片和微柱阵列模板之间的距离，微柱顶部聚吡咯吸盘的生长方向从朝上( $+26 \pm 5^\circ$ )变到朝下( $-32 \pm 7^\circ$ )，并且聚吡咯吸盘距离微柱顶部的距离也可以随着固液气三相接触线的调节发生改变。我们系统地研究了影响聚吡咯吸盘生长的因素，比如电聚合时间、电聚合电流的大小、微柱的形状和大小、导电聚合物的种类。进而，由于聚吡咯吸盘对水滴的可控粘附，可以用于水滴转移 (*Adv. Funct. Mater.* **2018**, 1800240)。

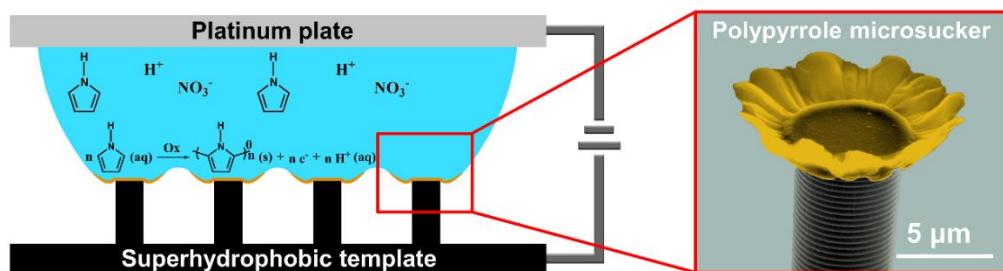


图 5. 调控固液气三相接触线和电化学聚合，制备微米吸盘结构的导电聚合物

5. 仿生微纳米结构的构筑和加工：菲涅尔波带片是一种常用的衍射光学元器件，最早是由 Lord Rayleigh，在 1871 年首次制作实现。菲涅尔波带片 (FZP) 透镜是由一系列同心环组成的衍射透镜，广泛应用于光束聚焦，集成光学，太阳能电池和空间导航。与传统的曲面透镜相比，平面 FZP 透镜重量轻，更薄，更紧凑。我们提出了一种基于 DMD 的无掩模光学投影纳米光刻 (MLOP-NL) 技术，以飞秒激光作为光源，结合高数值孔径物镜，实现了具有跨尺度加工能力(单次曝光面积在百微米以上，曝光精度在几十纳米)的无掩模投影光刻。我们制备的菲涅尔波带片直径为  $85.5 \mu\text{m}$ ，中心圆直径为  $15.5 \mu\text{m}$ ，最外环线宽为  $300 \text{ nm}$ 。当用波长为  $532 \text{ nm}$  的连续激光器激发 FZP 透镜

时,实现了数值孔径 NA 为 0.36 焦距为  $114 \mu\text{m}$  的菲涅尔波带片阵列,测量了 FZP 透镜的焦点半高宽为  $1.57 \mu\text{m}$  ( $1.13\lambda/NA$ ), 具有良好的聚焦特性 (AIP Adv. 2018, 8, 065317, 图 6)。这为新型光电子器件的快速制备打下了技术基础。

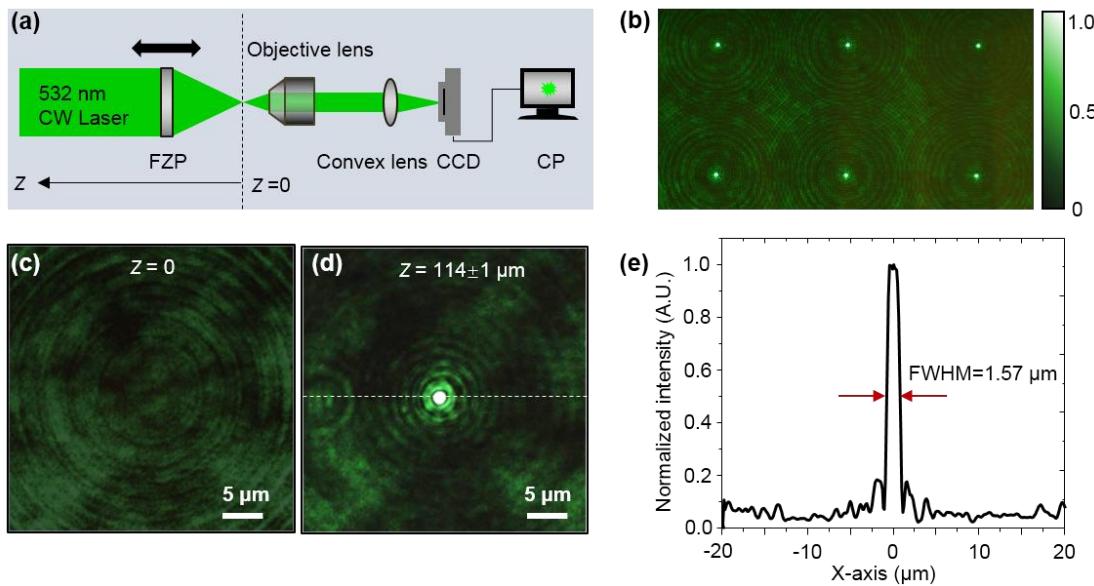


图 6. FZP 透镜的性能表征。(a) 聚焦测量设置示意图。(b) 聚焦光线的透镜阵列。(c) 和 (d) FZP 透镜在  $0$  和  $114\pm1 \mu\text{m}$  位置的聚焦图。(e) 沿  $z$  轴方向收集的强度分布

## (二) 下一步工作计划

1. 围绕仿生超浸润智能界面材料体系: (1)超分子光子晶体用于分子识别; (2)空心球光子晶体用于毒品指纹检测。
2. 围绕仿生离子通道膜材料的应用, 着重从以下几个方面开展研究: (1)仿生功能材料方面: 通过对仿生离子通道的结构与功能化调控, 实现具有多刺激精确可控离子输运的体系构建; (2)能量转换材料方面: 通过对膜材料结构与组成的调控研究, 提升膜材料的能量转换效率。

3. 围绕有机一维微/纳米功能材料的制备与排列,着重从以下几个方面开展研究: (1) 突破无机材料定点定向生长的关键技术。(2) 提高这种制备方法的稳定性, 解决大面积制备均匀单晶阵列的技术问题。

4. 围绕界面粘附材料的设计以及制备,着重从以下几个方面开展研究: (1) 制备晶体粘附阵列; (2) 制备可控的细胞球阵列, 调控细胞粘附与铺展; (3) 利用微纤毛调控物体输运。

5. 围绕仿生多尺度结构的设计和构筑, 着重从以下两个方面开展研究: (1) 研究多尺度结构的快速构筑关键技术。澄清无掩模光学投影曝光技术中的关键技术问题和理论, 为更多跨尺度任意图形的快速制作打下基础; (2) 研究咔唑基光功能材料在微尺度结构构筑中的应用。研究咔唑基化合物作为双光子引发剂在仿生微纳结构制备中的作用, 考察材料和结构对其生物相容性的影响, 为生物组织工程领域提供新材料和新方法。

## **培育一 光化学转换与光化学合成**

概述: 本方向本季度在研项目 17 项。

### **(一) 本方向本季度重要进展**

#### **1、模拟自然界 OEC 中心的铜基类立方烷水氧化催化剂**

光合作用是绿色植物(包括藻类)利用太阳光将二氧化碳和水合成有机物并释放氧气的过程, 是地球上最大规模的能量和物质转换基础。光合作用起始于光捕获体系中叶绿素分子对光子的吸收, 光合系统 II 利用吸收光子产生的空穴在立方烷  $Mn_4CaO_5$  放氧活性中心(OEC)将水裂解为氧气, 为分解水产氢及二氧化碳还原提供电子和质子。这

一耗能的产氧过程涉及多电子、多质子转移以及 O-O 键的形成，始终是实现全解水的瓶颈。向自然界学习和借鉴经验，详细研究催化过程的质子耦合电子转移机理及制约因素，提高体系的稳定性和产氧催化剂的效率显得非常必要且迫切。吴骊珠研究员团队模拟光合系统 II OEC 的结构和功能，首次获得了具有高效产氧功能的类立方烷型  $\text{Cu}_4\text{O}_4$  四核铜配合物，TOF 高达  $267\text{s}^{-1}$ ，是目前人工模拟铜基分子型产氧催化剂的最高值。原位的 EPR 和 Raman 光谱等实验揭示了催化过程中高价中间体  $\text{Cu}^{\text{III}}$  和  $\text{Cu}^{\text{III}}\text{O}\cdot$  的生成。这一研究结果不仅模拟了自然界光合系统 II 的 OEC 结构，而且实现了单步两电子转移的功能，为理解自然界 OEC 的催化机制和设计高效人工模拟水氧化催化剂奠定了基础。相关研究结果发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, 57, 7850 上。

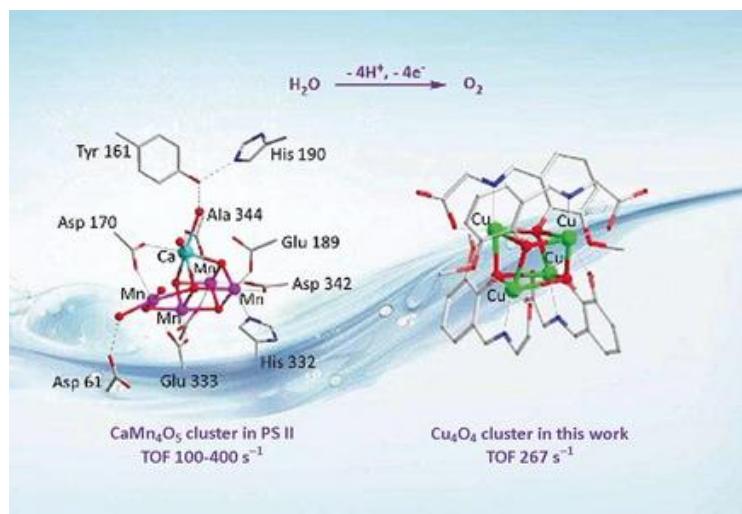


图 7. 模拟自然界 OEC 中心的  $\text{Cu}_4\text{O}_4$  类立方烷型水氧化催化剂

## 2、ZnS 钝化 CdSe 量子点高效光催化产氢

量子点因其具有优异的光学和物理化学特性，而在光催化产氢领域受到了广泛的研究。之前的研究报道显示，量子点自身具有催化质

子还原产生氢气的能力，但是其催化产氢性能非常低，需要与产氢助催化剂结合才能实现高效的光催化产氢。吴骊珠研究员课题组通过在量子点表面修饰部分量的 ZnS 实现了多种量子点在无外加产氢助催化剂条件下的高效光催化产氢。当 CdSe 量子点表面被 46% 的 ZnS 覆盖时，其光催化产氢速率高达  $306.3 \pm 21.1 \mu\text{mol h}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ ，且光照 40 h 的速率基本保持不变，基于 CdSe 量子点的产氢 TON 值为  $(4.4 \pm 0.3) \times 10^5$ 。该值是目前报道的无产氢助催化剂量子点体系的最高值，其结果可以与常见的含有产氢助催化剂的光催化产氢体系相比拟。机理研究表明，一定量的 ZnS 修饰可以钝化 CdSe 量子点表面的缺陷位点，提高光生激子参与光催化氧化还原反应的几率；同时，ZnS 的不完全包裹可以保证表面暴露的 Cd 离子充当反应的活性位点，实现 CdSe 量子点自身高效的光催化产氢。相关研究结果发表在国际材料类知名期刊 *Adv. Funct. Mater.* **2018**, DOI:10.1002/adfm.201801769 上。

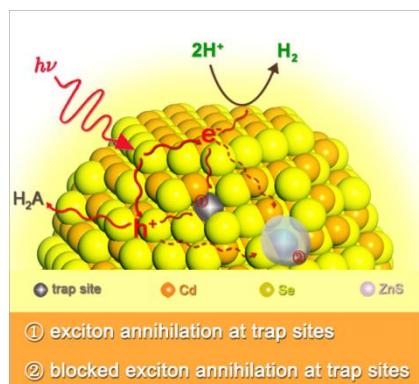


图 8. ZnS 钝化 CdSe 量子点的高效光催化产氢

### 3、钴-水滑石基催化剂用于光热费托反应制备低碳烯烃

低碳烯烃作为许多化学品的合成原料是当今化学工业的基本支柱。通过费-托合成(FTS)将合成气直接转化为低碳烯烃被认为是最实用的方法。Co 基催化剂在 FTS 具有许多优点，比如高选择性的高碳

烃和低选择性的氧化产物，优异的抗氧化和抗烧结性，以及良好的稳定性。在过去的几年中，Co 基催化剂已经被用于制备低碳烯烃，但其性能仍有待提高。张铁锐研究员课题组将 ZnCoAl 层状双氢氧化物纳米片在 300 ~ 700°C 下通过 H<sub>2</sub> 还原，成功制备了一系列不同化学成分的新型 Co 基光热催化剂，并展现出优异的一氧化碳加氢性能，CO 转化率为 15.4 %，低碳烯烃(C<sub>2-4</sub>)选择性为 36.0 %，低碳烯烃/烷烃比为 6.1。通过 X 射线吸收精细结构和高分辨率透射电镜表征研究表明，活性催化剂由 ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 混合金属氧化物负载的 Co 和 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 纳米颗粒组成。理论计算表明，氧化物修饰的金属 Co 纳米颗粒异质结构削弱了烯烃的加氢能力，从而使低碳烯烃的高选择性增加。相关结果发表于国际材料领域知名期刊 *Adv. Mater.* 2018, 30, 1800527 上。



图 9. 钴基催化剂光热费托反应制备低碳烯烃示意图

#### 4、染料敏化 TiO<sub>2</sub> 可见光催化 sp<sup>3</sup> 碳氢键脱羧烷基化反应

均相金属配合物和有机染料作为常见的可见光催化剂，已被广泛应用于合成反应。相比之下，低成本、便操作、易回收的非均相光催化的合成方法在反应多样性和选择性等方面尚有较大拓展空间。丛欢研究员课题组以赤藓红 B 敏化的 P25 型二氧化钛为光催化剂，实现

了可见光驱动的对四氢异喹啉衍生物  $sp^3$  碳氢键脱羧烷基化反应，该反应具有底物范围广、成本低、无重金属、条件温和等优点，初步机理研究表明催化过程涉及自由基中间体。上述进展实现了可见光催化的多种高效绿色合成新方法，确证了小分子敏化半导体光催化策略的可行性，为进一步研究指明了方向。相关结果发表在 Org. Lett. 2018, 20, 3225 上。同时该工作被 CBG 资讯报道，网址 <https://www.chembeango.com/zixun/21776>。

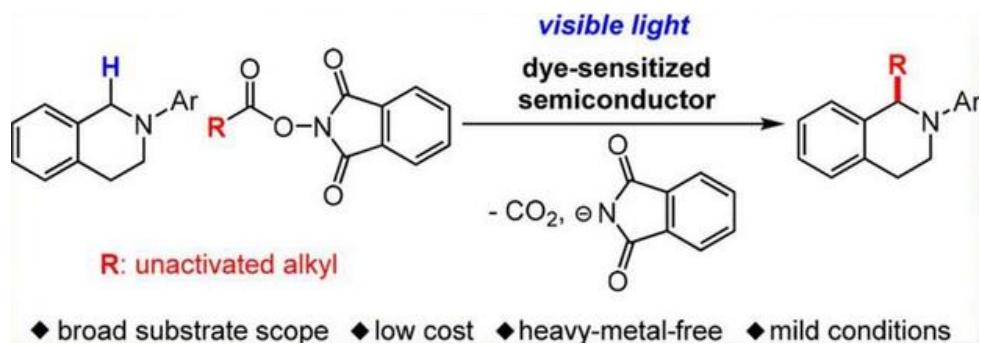


图 10. 染料敏化  $TiO_2$  可见光催化  $sp^3$  碳氢键脱羧烷基化

## 5、金(I)卡宾配合物的超分子组装

高发光量子产率的白光材料对于发展低成本固态发光显示技术非常重要。将发光互补的材料物理混合和将发光互补的化合物嵌入到有机聚合物或者金属有机框架结构中是常见的构筑白光材料的方法，但这些方法存在相分离和制备复杂导致低效率和高成本等问题，因此开发新型、高效、单相的白光材料体系具有重要价值。近来，陈勇研究员课题组利用超分子组装的方法构筑了一系列强发光的金(I)卡宾双盐超分子聚集体。通过系统改变阴离子和阳离子的电子结构，利用阴离子到阳离子电荷转移跃迁 (anion-to-cation charge transfer transition) 对金属-金属间相互作用产生的  $d\sigma^*p\sigma$  跃迁激发态进行调

控, 实现了金(I)卡宾双盐超分子聚集体发光从蓝光、绿光、红光到近红外光的全覆盖; 通过多种阳离子和阴离子共组装或者分步组装(外延生长)的方法, 实现了精确调控金(I)卡宾双盐自组装材料的 CIE 坐标, 获得了强磷光发射的白光材料, 发光量子产率达到 73%。相关研究成果发表在《德国应用化学》(Angew. Chem. Int. Ed. 2018, 51, 6279)。

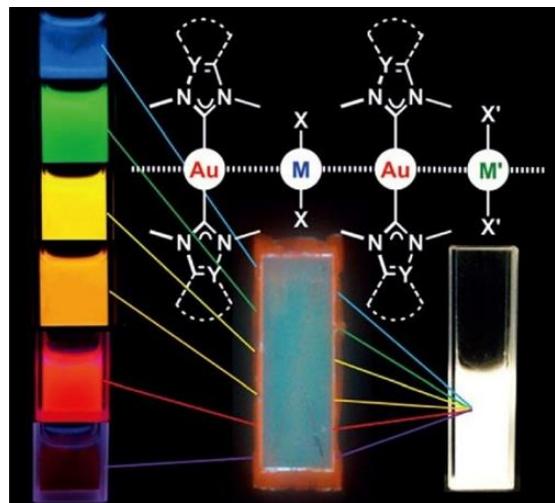


图 11. 金(I)卡宾双盐超分子聚集体发光示意图

## (二) 下一步工作计划

将在前期工作基础上, 继续进行高效、稳定和廉价的太阳能光催化分解水和二氧化碳还原体系的研究, 利用光化学反应新技术以及可见光催化继续开发惰性键活化新反应研究, 推进蒽[4+4]光二聚反应在精确合成碳基纳米材料、互锁超分子等方面的研究。

## 培育二 环境友好材料与绿色生产工艺

概述: 本方向本季度在研项目 3 项; 围绕酶法明胶关键技术和海水降解高分子材料研制分别召开讨论会 2 次和 3 次; 招聘技术工人 1 人。

## （一）本方向本季度重要进展

1. 开展发酵实验，进一步优化了发酵参数，包括溶氧、补料强度、搅拌、PH、温度等条件，为酶的工业发酵生产做充分准备。
2. 收集广西、内蒙古、山东省份的牛、羊、猪骨头各 60 斤，分别来自腿骨、肋骨和其他杂骨，完成全流程处理，脱脂后残油 $\leq 3\%$ ，水分小于 15%。开展 C、N 同位素检测，经过比对发现食物来源种类对动物骨的同位素影响最大，其次是地理位置。该研究对动物骨种类的鉴别和地理追溯将具有重要意义。
3. 开展酶法胶在胶囊制备过程中的工艺研究，通过调整胶囊成型工艺，调节胶囊壁厚和干燥效果，并研究塑性剂对胶囊成型和力学性能的影响，所制备胶囊满足国标对胶囊崩解的要求。
4. 针对浸碱预处理的骨粒开展酶法明胶制备工艺工业实验，总计投料 120 吨，完成工业线初步贯通，目前后处理过滤、去离子、浓缩、蒸发环节的设备衔接和操作参数正在进一步优化中。
5. 在前期生物降解材料的研发基础上，开发一种海水可降解的材料体系。通过聚合物合成改性和共混改性两种方式，向生物降解聚酯体系中引入易水溶和易水解的组分和基团，利用快速和可控水解或水溶过程促进生物降解过程，实现材料在海水中整体快速可控降解，并可满足一定特殊需求。
6. 完成“海水降解包装材料”项目开题，并进行阶段性研究进展汇报。
7. 智能海水可降解材料研制项目参加“率先杯”未来技术创新

大赛，初赛和复赛胜出，正在筹备决赛。

## （二）下一步工作计划

**酶法明胶关键技术方面：**明胶原料骨粒标准的完善及产地追溯同位素分析仪的预处理装置的加工，开展不同地域和物种的同位素检测。开展中药粉和西药的填装工艺研究，找到不同药粉对成型胶囊的影响。酶法明胶工业酶制剂的工业化放量生产。东宝生物骨素酶法明胶生产线连续运行调试。

**降解树脂工艺方面：**技术方案验证；筹备率先杯决赛，争取更多支持，对接更多实际需求。

## 培育三 激光显示及产业化

概述：本方向本季度在研项目3项，包括国家重点研发计划3项，项目进展顺利，研制成功1台100英寸三基色LD激光电视工程样机。

### （一）本方向本季度重要进展

#### 1. 实用化散斑抑制技术取得突破

散斑效应是相干光在粗糙表面激发的子波相干产生的一种光学现象，影响显示的图像质量，一直是激光显示实用化亟待突破的关键技术之一，也是重点研发计划项目亟需突破的关键技术。理化所与光电院、苏州纳米所以及山西大学等单位合作，基于目前高功率激光光源所普遍采用的光纤耦合LD方案，在激光显示系统中引入MEMS扫描微镜，抑制散斑。实验中采用了520nm绿色激光器，将激光散斑对比度降低至~7.5%。若采用RGB三色光源，基于波长多样性消

散斑理论,可将白光散斑对比度进一步降低至 $\sim 7.5\%/\sqrt{3} \approx 4.2\%$ ,达到项目中期散斑对比度的考核指标。将该系统与现有散斑抑制技术相结合,实现了激光波长多样性、偏振多样性、角度多样性和时域叠加独立散斑等多手段协同工作机制,满足了三基色激光显示整机对散斑系统的实用化需求。

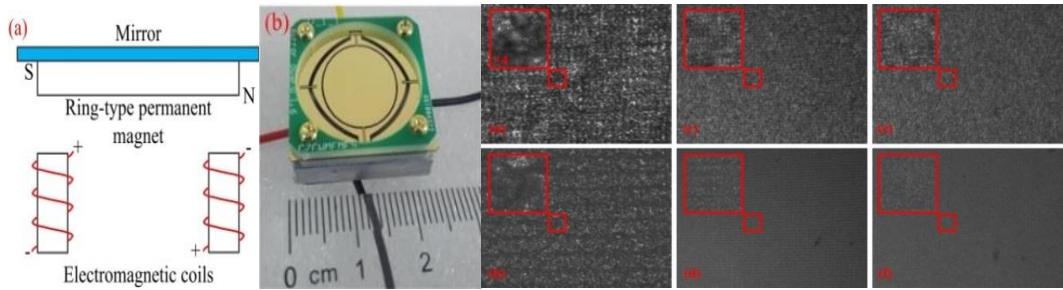


图 12. MEMS 器件及消散斑效果图

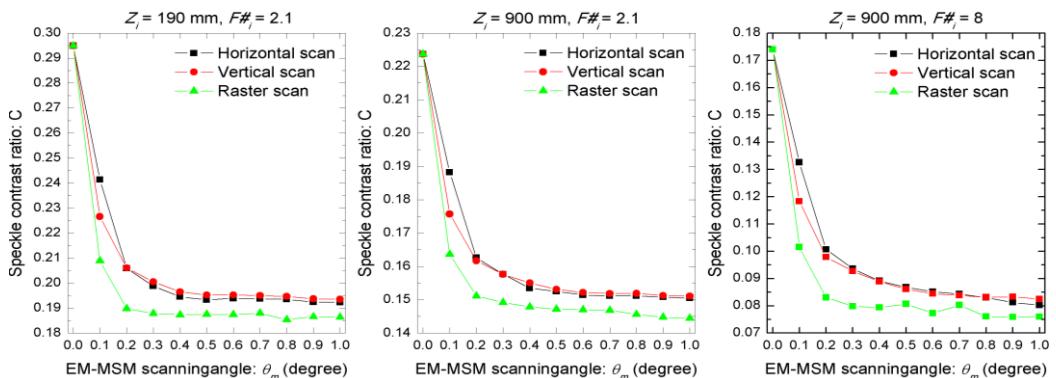


图 13. 基于 MEMS 器件散斑抑制实验结果

## 2. 开发出色温调控与白平衡控制系统

显示光源在长时间使用后亮度变化导致光源白平衡色偏问题,影响画面显示质量。激光显示采用三基色半导体激光器作为显示光源,激光器数量众多,存在个体差异,并且随着使用时间的增长,激光二极管老化导致出光功率下降,这样便使红绿蓝三色配比出现偏差,为了保证激光显示画面长时间稳定显示,亟需突破色温调控与白平衡控制技术。通过 RGB 三色激光输出功率解算、光源反馈信号的精确测

量、激光驱动系统控制参数的精确调节，稳定控制激光显示系统的白平衡及色温。基于 CIE1931 和 1964 标准色度系统的仿真设计，实现了 6500K-9300K 对应的功率配比变化的精确控制。

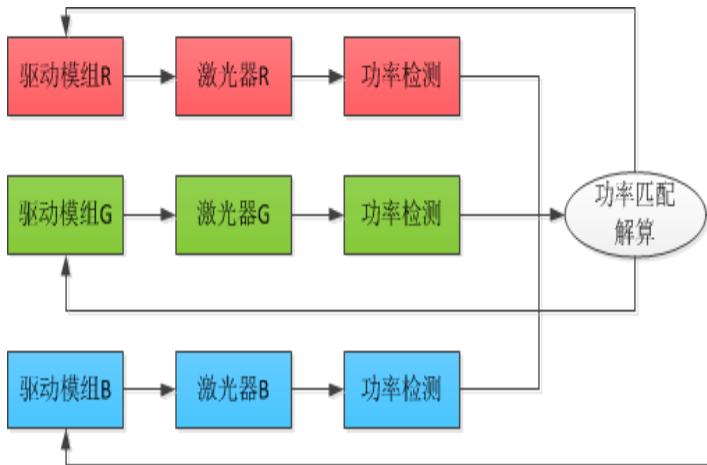


图 14. 白平衡控制系统架构图



图 15. RGB 白平衡控制单元

CIE color space	Color temperature	R、G、B wavelength (nm)	R、G、B power ratio
1931	6500K	635, 532, 445	0.46: 0.32: 0.22
		635, 520, 445	0.48: 0.33: 0.19
	9300K	635, 532, 445	0.39: 0.32: 0.28
		635, 520, 445	0.42: 0.33: 0.24
1964	6500K	635, 532, 445	0.45: 0.31: 0.24
		635, 520, 445	0.48: 0.31: 0.21
	9300K	635, 532, 445	0.40: 0.32: 0.27
		635, 520, 445	0.42: 0.30: 0.27

表 1. 6500K-9300K 对应的功率配比

### 3. 开发出 4K 超高分辨率三基色 LD 激光电视工程样机

基于自主开发的三基色 LD 光源模块、散斑抑制系统、色温调控与白平衡控制系统以及整机一体化设计与控制系统等激光显示关键器件，以第一季度研制成功的原理样机为支撑，开发出了 4K 超高分辨率三基色 LD 激光电视工程样机，在分辨率、高亮度( $>4000$  流明)、大色域( $\geq 160\%$  NTSC) 等技术指标的基础上，又进一步实现了高光效(15lm/W)、轻重量(20Kg)、小体积(58×42×15cm) 高可靠性。

等关键技术指标，向工程化、商品化的方向迈进了一大步。



图 16. 4K 超高分辨率三基色 LD 激光电视工程样机

4. 依托产业示范主体，开发系列化产品，影响力得到大幅提升  
在 2018 年第二季度，理化继续加强激光显示的产业化推进工作，  
依托产业示范主体——杭州中科极光科技有限公司，加大投入开发面  
向市场应用的系列化激光显示产品，并积极参加业内相关大型的展示  
活动，不断提高市场影响力，中科极光也逐渐发展成为三基色激光显  
示领域的领军企业。

2018 年 4 月 11 日，中科极光携自主开发国际首创的 RGB 三色  
纯激光电视、全密封 RGB 三色纯激光一体工程投影机产品以及 RGB  
三色纯激光影院升级解决方案于北京 InfoComm China 2018 展会（中  
国国际视听集成设备与技术展）惊艳亮相！

作为全球首款三色纯激光投影系列产品，中华鼎 V1 系列高亮度  
三色纯激光电视，采用世界领先的 RGB 三色纯激光技术，NTSC 150%  
的超大色域与 100~150 英寸的超大屏幕的结合，给现场观众带来前所  
未有的惊艳和震撼。30,000 小时的超长高质量光源寿命，为用户带来

最舒适最稳定的视觉体验。作为中科极光业内首发可量产的高亮度三色纯激光电视，实现了从 0 到 1 的技术突破。

全密封 **RGB** 纯激光一体工程投影机，是中科极光全新推出的全球首台 **LEP-60X** 纯激光一体工程投影机，基于三芯片 **DLP** 成像技术与 **RGB** 纯激光技术，达到业内领先的 60,000 流明亮度。同时面向特殊应用场景，开展加固性创新设计，实现了机体全密封，可达 **IP54** 级别防水，可以满足户外场所放映及工程演示的特殊要求。内置的光机和 **RGB** 纯激光光源系统恒温控制，保证-20℃~40℃温度范围工作，无惧高温严寒，是国际上首台可直接户外安装使用的高亮度 **RGB** 纯激光投影机。

**RGB** 三色激光影院升级解决方案，是中科极光针对影院提高电影放映质量的需要推出的可个性化定制的 10,000-75,000 流明超高亮度的三色纯激光光源系统，仅 1 套设备即可满足 2D/3D 不同放映模式、不同幕布尺寸的亮度需求。可实现比传统光源省电 50% 以上，30,000 小时超长使用寿命且始终保持稳定高质画面，终身免维护，极大降低了影院的运营成本。

上述产品一经展出，受到了业内外的广泛关注，被人民网专文（<http://industry.people.com.cn/n1/2018/0415/c413883-29926861.html?from=groupmessage>）报道，继央视之后，又一官方大平台媒体将目光投注于 **RGB** 三色纯激光技术，影响力大幅提高。



图 17. 中华鼎 V1 三色激光电视

图 18. 三色激光影院升级解决方案



图 19. RGB 三色激光一体工程投影机

## （二）下一步工作计划

1. 统筹安排重点研发计划激光显示项目，整理各课题研究进展和财务支出情况，迎接即将到来的项目中期验收。
2. 三基色激光显示产品逐渐成为影院、工程投影等商业应用的主流方案，理化所将继续依托中科极光开发系列化商用产品，同时探索市场，支撑激光显示产品在面向消费者领域的应用。

## 培育四 分散能源气体液化分离技术与应用

概述：本方向本季度在研项目 2 项，新增项目 1 项。本季度围绕天然气液化技术研发和拓展应用召开学术交流会议 1 次，邀请领域内印度教授来华交流，做学术报告 3 场，召开协调会议 5 次。

### （一）本方向本季度重要进展

**液化技术方面：**基于安全方面的因素，液化技术的实现，采用氮气液化的形式进行实际操作，其与天然气液化的本质原理类似，研究成果可以相互借鉴。

在液化系统和实验样机方面，通过热力分析与模拟，构建了适用于小型系统和低压气源的氮气液化和空气分离流程，基于此搭建了小型混合工质液氮装置样机，并摸索了氮气载冷循环油分离方法和小型空分塔设计制造与调试方法，经测试瓶装高压氮气进料时液氮产量达  $1.1 \text{ L/h}$ ，常压空气进料时液氮产量达  $0.6 \text{ L/h}$ 。与其他类型的小型装置相比，在大幅降低制造成本的条件下，达到了较好的功耗水平。

在循环流程热力构建和优化方面，通过热力分析与模拟，在多个温区分析比较了混合工质节流制冷循环与纯工质逆布雷顿循环的热力性能，得出了两种循环各自的性能特点和适应范围，并研究了其热力性能的内在机理，分析了  $100 \text{ K}$  左右含氯气混合工质节流制冷循环的性能衰减现象，同时研究了不同热负荷条件下两种循环的性能对比，为实际工程应用中制冷循环构型的选择提供定量的参考。

**余热利用方面：**余热驱动氨吸收式系统制冷，为液化工艺提供预冷。通过实验论证研究，从实验角度研究了基于变温发生的分布式热源结构对吸收式制冷系统的影响。经实验研究，分布式热源可以大幅度增大余热的利用温跨，使得余热利用率提高至  $180\%$ 。与此同时，还详细研究了不同热源分布情况下，分布式

加热结构对系统冷量输出及 COP 的影响。通过优化热源的分布结构，可以将分布式热源对系统 COP 的负面影响控制在 5% 以内。从而在保证增大余热利用率的同时保证系统的使用性能。

余热驱动氨吸收式热泵系统，提出了一种梯级利用烟气余热的燃气吸收式热泵系统，烟气余热依次经烟气预热器和一级蒸发器梯级利用；通过双级蒸发/吸收形式，引入可调参数中间压力，增强了吸收效果和内部回热，改善了低环温下的性能；并利用 Aspen Plus 进行模拟分析，发现系统可以深度利用烟气余热至环境温度；并且系统环温适应性较强，蒸发温度为 -27℃ 时一次能源效率 PEE 和性能系数 COP 仍可达 1.28 和 1.55，较传统系统提高了 20%。

**天然气建站方面：**获得了新的 LNG 项目合同，预计实施后，合计形成 850kNm<sup>3</sup>/d 液化应用规模。

## （二）下一步工作计划

**液化技术方面：**进一步开展 5-10 L/h 混合工质液氮装置的研制和优化，完善空气分离系统，并开发更安全的全不可燃工质气体液化装置，实现含氧气体的安全液化。进一步开展混合工质节流制冷循环在较高温区与复叠式制冷循环等普冷循环的性能比较，完善整个温区的热力性能对比研究，为制冷循环构型的选择提供科学依据。

**余热利用方面：**设计并制造出能实际可靠的利用不同温区的发生器结构，并入现有实验平台进行实验，最终实现基于载热流体连续变温发生的吸收式制冷系统。并为后续规模化使用这种变温发生器结构提供理论及技术支持。将针对所提出的系统进行设备设计和选

型，搭建 50kW 供热量的吸收式热泵实验样机，并进行各种工况下的实验研究。

**天然气液化建站方面：**继续推进天然气液化建站方面的规模应用工作。进一步完善多规格新型高效全工艺链优化建站工艺。

## 培育五 液态金属材料前沿技术

概述：本方向本季度在研项目 12 项，其中新增 3 项；召开协调会议 3 次。

### （一）本方向本季度重要进展

#### 1. 发现液态金属微量氧化润湿金属颗粒形成固液气多相介质

研究表明，除了电刺激和化学刺激导致的“吞噬现象”外，液态镓铟合金在单纯的持续搅拌过程中也可润湿金属颗粒（如镍粉），从而形成有非牛顿流体特性的多相介质，如图 20 所示。前者依靠消除液态金属和金属颗粒表面的氧化膜，在液态金属和金属颗粒之间形成金属键达到润湿效果，而后者是一个纯粹的液态金属氧化后润湿颗粒表面的过程。SEM 扫描图像表明镍颗粒表面的氧化物在搅拌过程中并没有被去除，而 XPS 测试也表明混合介质内部存在液态金属的氧化物，证实了液态金属氧化物在颗粒表面的粘附，如图 21 所示。液态金属与镍粉混合后表现出了可塑性，对各种基底良好的粘附性，可以用来制作可修复的液态金属电路，如图 22 所示。相关研究成果发表于《Advanced Material Interfaces》杂志。



图 20. 液态金属与金属颗粒混合后形成的粘稠多相介质

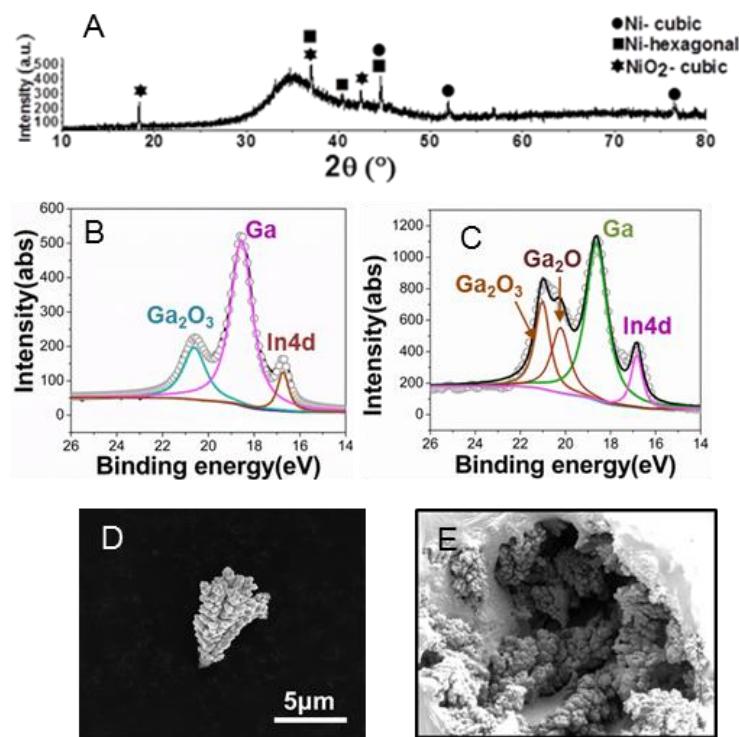


图 21. 证明固体颗粒与液态金属结合方式的证据: (a)XRD 测试结果, 表明镍粉表面的氧化物没有被去除; (b)(c) 两种不同的 XPS 测试结果, 表明混合物内部存在液态金属氧化物; (d)未作任何处理的镍粉形貌; (e) 与液态金属混合后镍粉的形貌

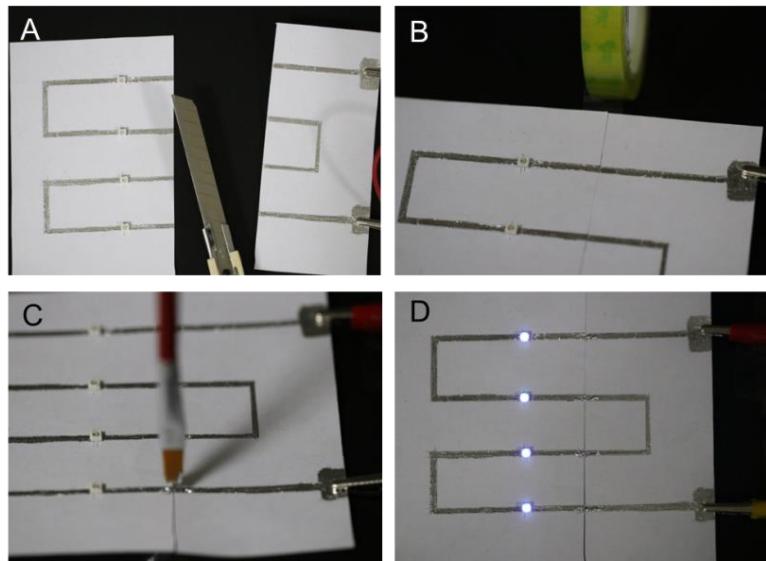


图 22. 纸基液态金属可修复电路：(a) 测试电路被切断 (b) 将电路用胶带简单连接 (c) 在断裂处补充适量液态金属-镍粉混合物 (d) 液态金属-镍粉混合物跨越存在的缝隙使电路导通

## 2. 发现液态金属的自生长蛇形分散效应

在前期研究中，液态金属自驱动机器、Marangoni 流动以及周期性自激振荡效应等现象相继被发现和解释。然而，因为液态金属巨大的表面张力，这种变形更多的是作为一个整体进行改变，更多的变形方式亟待拓展。液态金属自生长蛇形分散效应的发现和突破，实现了分散型的液态金属大尺度变形和蛇形运动，更新了液态金属的运动和变形方式，革新了对液态金属空间构型转换方式的认识，加深了对液态金属物理化学特性的理解，开拓了一种新型的稳定的表面张力调控方式，对仿生液态金属机器的研制进程具有重要的积极意义。

研究发现在酸性铜盐溶液中，一团液态金属可以自发的长出大量细条状的伪足并像蛇一样运动（图 23）。背后的机理主要在于因为置换反应所形成的无数个微小的 Cu-Ga 原电池产生于液态金属和铜盐

溶液界面处。原电池的形成改变了液态金属的表面张力，从而产生不平衡的表面张力和界面压差，最终导致了蛇形运动的发生。

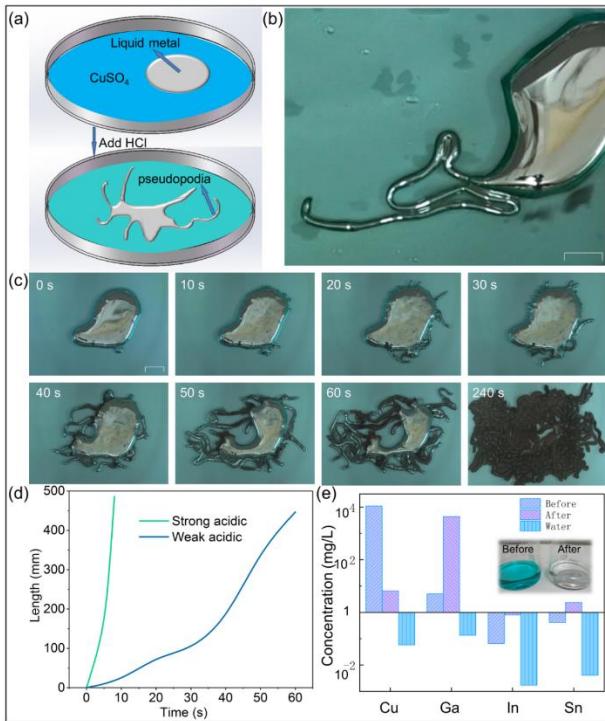


图 23. 液态金属蛇形运动 (a)液态金属蛇形运动的原理示意图；(b)自发生出的伪足鸟瞰图；(c)蛇形运动过程的延时图像；(d)不同酸性条件的生长速度；(e)元素浓度测试结果图

如图 23 所示，置于酸性铜盐溶液中的液态金属会自发的生长出大量的伪足，并且伪足可以像蛇一样不断运动直到所有的液态金属被分散。在这个过程中，溶液的酸性会对这个实验产生巨大的影响。在合适的酸性条件下，可通过调节酸性的强弱去调节液态金属蛇形运动的产生和速度。并且，这种蛇形运动可以被多次激发，大大增加的运动的持久性。研究进一步揭示，酸性铜盐溶液这一独特的环境保证了无数的铜颗粒可以被稳定的析出和吞噬，此类动态平衡是蛇形运动现象得以产生的深层次原因。进一步的，相关的元素浓度分析和电势测

试证实了我们的分析。如图 24 所示，对运动停止后的液态金属进行显微 SEM 测试，证实表面析出的颗粒被成功吞噬到液态金属内部。能谱测试结果表面，吞噬后形成的块状颗粒物含有铜元素。X 射线衍射 (XRD) 测试被采用去证实析出的颗粒结构，测试结果表明析出的颗粒确实是铜单质，这证实了我们的分析。

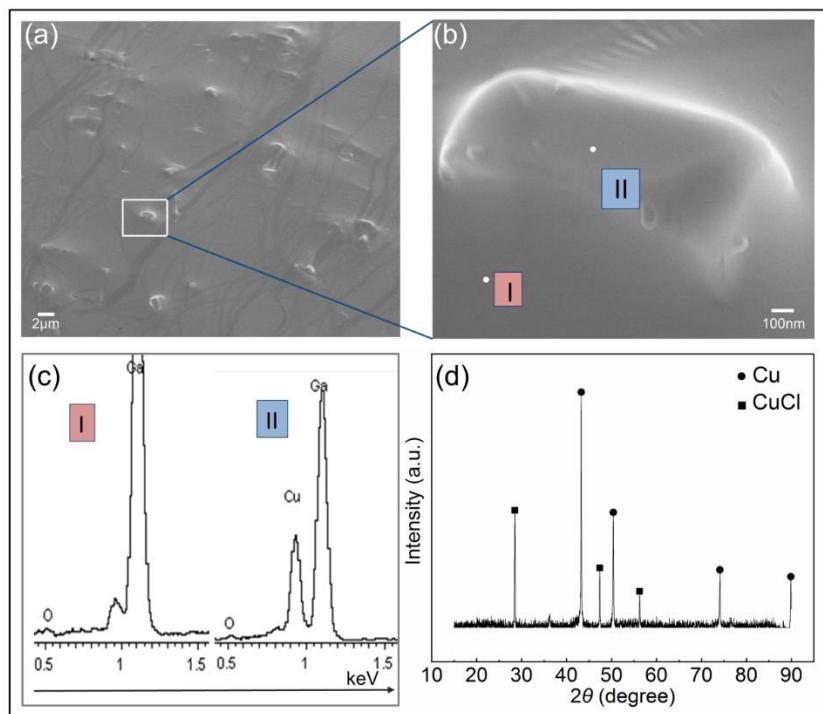


图 24. (a) 运动结束后的液态金属 SEM 图; (b) SEM 的放大图; (c) 不同区域的元素分析; (d) 溶液中析出颗粒的 XRD 谱图

这种新奇现象不同于以往发现的系列液态金属效应，丰富了液态金属物质世界的科学前景，进一步拓展了近年来兴起的液态金属柔性机器的理论与技术内涵，为未来多功能型的液态金属柔性机器的发展提供了新的策略，在柔性机器人领域具有潜在应用潜力。相关研究成果发表于《*ACS Applied Materials & Interfaces*》杂志 (Chen et al., **Self-Growing and Serpentine Locomotion Induced by Copper Ions**,

*ACS Applied Materials & Interfaces*, . 2018, 10, 9203-9210,

**DOI:** 10.1021/acsami.8b07649)。

### 3. 发现液态金属焊接纳米颗粒效应

研究组首次发现, 将包裹有金属纳米颗粒的液态金属小球置于碱性溶液中时, 原本分散的颗粒会以自组织方式被连接成纳米多孔网状结构且易于剥离下来 (图 25)。究其原因, 是在碱性溶液中, 液态金属界面呈还原性, 而铜纳米颗粒表面由于氧化会形成氧化物; 二者在溶液中电化学势不同, 体系于是会发生电化学反应, 由此造成纳米颗粒表面的氧化物被还原, 进而导致新生成的金属铜将周围铜颗粒牢牢粘结到一起。这一过程如同经典的金属焊接一般, 研究小组因此将其命名为“液态金属焊接纳米颗粒效应”。

颗粒网状物具有良好的机械强度, 由此可将其从液态金属表面剥离开来并转移到其它基底上。通过测量这一类特殊的由金属颗粒组成的薄膜多孔材料的导电性, 发现其与普通金属导电材料不同: 体系中存在一种由电场导致的电阻降低特性; 当电压过高时, 测试电阻会突然增大数个量级, 说明过高电压会导致颗粒网的导电性失效。深入研究揭示, 造成电阻降低的原因在于外加电场下静电作用会使部分分开的颗粒网连接到一起增加了导电通路; 而电阻骤升的原因则是大电流下电迁移作用增强, 使得颗粒连接断开而失去导电能力。以上发现促成了利用液态金属编织微米厚度多孔导电颗粒网方法的建立, 由此获得的新材料具有良好的机械强度和独特的电学性能。相关研究成果发表于《*Advanced Materials Interfaces*》杂志 (Tang et al., **Thin, Porous,**

and Conductive Networks of Metal Nanoparticles through Electrochemical Welding on a Liquid Metal Template, *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 1800406).

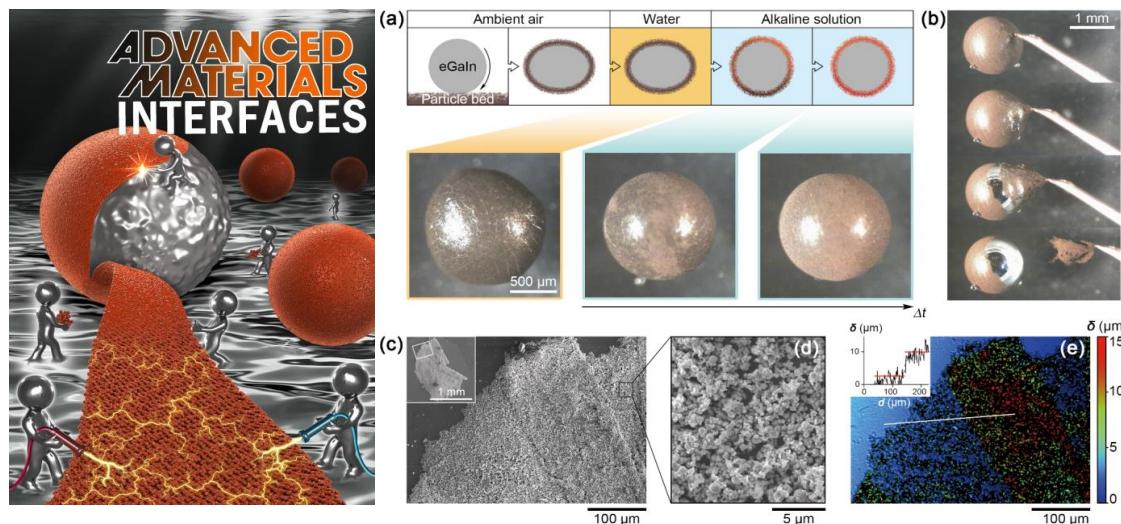


图 25. 期刊封面故事及其反映的由液态金属焊接纳米颗粒效应生成的多孔网状材料

#### 4. 液态金属在肿瘤治疗、柔性电子等方面应用取得系列新进展

近期研究小组在肿瘤治疗、柔性电子等方面开展了一系列液态金属应用探索，并取得重要进展。先后提出肿瘤治疗用液态金属新型生物医学材料（图 26, Wang et al., *Advanced Healthcare Materials*, 2018）、液态金属低成本可穿戴医疗（图 27, 封面文章; Guo et al., *Adv. Eng. Mater.*, 2018）、液态金属可拉伸皮肤电子（图 28, Guo et al., *Science China Technological Sciences*, 2018）以及柔性机器人传感与控制（图 29, Guo et al., *Smart Materials and Structures*, 2018），这些进展有望加速液态金属在肿瘤治疗、可穿戴医疗、柔性电子领域的应用和相关实用技术的开发。

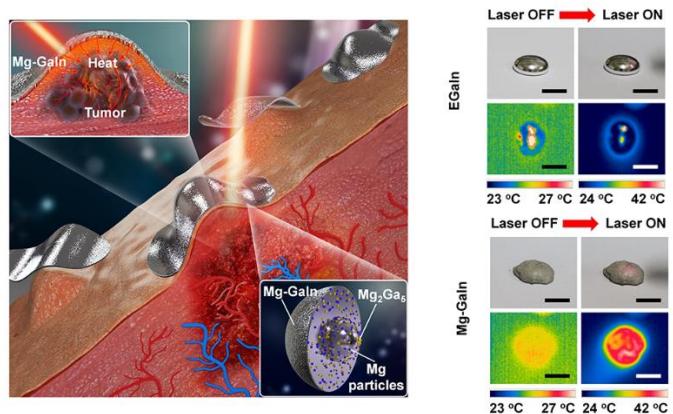


图 26. 镁基液态金属皮肤涂层材料及其用于近红外激光消融治疗肿瘤原理及应用情况

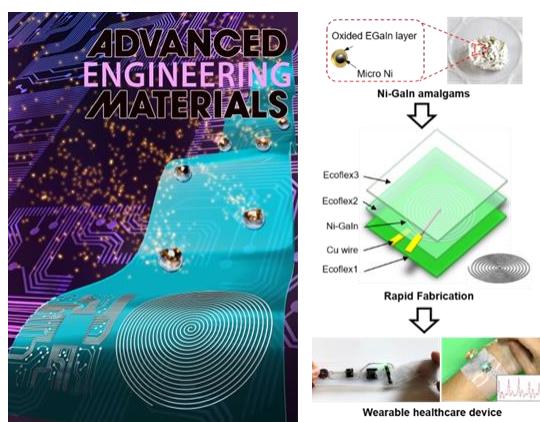


图 27. 期刊封面故事及其反映的用于可穿戴及无线健康监测的液态金属柔性电子



图 28. 基于褶皱结构的高顺应可拉伸液态金属皮肤电子及其健康监测应用情形

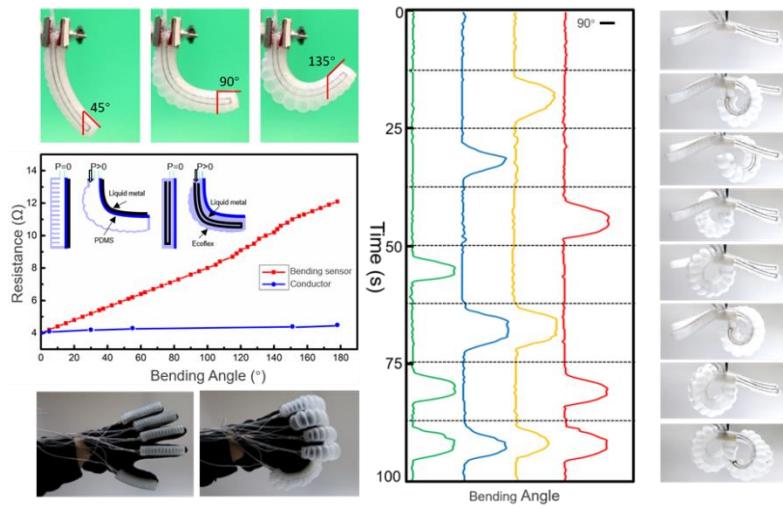


图 29. 用于柔性执行器的液态金属传感器及其响应情况

## (二) 下一步工作计划

1. 研究液态金属与其它金属的界面反应和界面润湿行为，拓展化学键润湿范围，形成液态金属化学键润湿理论。
2. 深入研究液态金属自生长蛇形分散效应的机理并提出相应理论公式并研究影响蛇形运动的具体因素，同时基于液态金属蛇形分散效应进行具体应用的探索。
3. 深入探究液态金属焊接纳米颗粒效应的机理，并开发出新型液态金属焊接纳米颗粒材料规模化制备新工艺。
4. 拓展液态金属在医疗、柔性电子方面的应用研究。