

# 中国科学院理化技术研究所“一三五”规划

## 季度进展报告

2018 年第三季度

---

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 .....	2
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 .....	11
培育二	环境友好材料与绿色生产工艺 .....	19
培育三	激光显示及产业化 .....	21
培育四	分散能源气体液化分离技术与应用 .....	33
培育五	液态金属材料前沿技术 .....	41

## **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 40 项，结题 9 项；引进光学博士 1 名，招聘光学和机械设计专业劳务派遣人员 4 名；改造中关村园区 250m<sup>2</sup> 的科研用房，新增廊坊园区 500m<sup>2</sup> 的科研用房；召开调度会议 5 次。

### **(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**

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，改造廊坊园区 800m<sup>2</sup> 的科研用房；共召开 10 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**

将继续在型号用制冷机、小型制冷机和制冷机平台建设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 2 项，期中新增 1 项。

### （一）本方向本季度重要进展

**1.冷箱：**确定 500W@2K 冷箱集成方案，完成换热器、调节阀等主要部件研制。开展 1000W 冷箱集成设计，开展 1000W 冷箱部件研制、招标，推进 2500W@4K 冷箱集成工作。

#### **2.集成：**

**2500W@4.5K/500W@2K 制冷机：**根据集成设计方案，已完成 2500W@4.5K 制冷机的压缩机小循环的常温管路连接和气体管路面板的集成总装。针对压缩机小循环的常温管路完成检漏、打压测试工作。组织测试专家在合肥对室温真空循环泵组进行了氦气测试，对系统的出口压力、流量、出口温度、噪声等参数进行了现场测量和记录，所有测试指标均满足合同指标。确认兰州近物所 CIADS 的垂测和水平测试运行条件，同步参与兰州近物所 CIADS 的测试系统 PFD 设计讨论。

**多透平与换热器组耦合调控平台：**撰写完成与兰州近物所的相关氦制冷机的合作协议，可以直接服务于兰州近物所的 HFRS 磁体冷却。与兰州近物所对接，确认该平台冷却的热负载要求，已完成该平台的 PFD 设计与相关流程计算，并与兰州近物所的技术研讨确认。

**200W@4.5K 制冷机：**完成 200W@4.5K 制冷机的常温管路连接，完成 200W@4.5K 制冷机的气体管理面板的研制，对焊接

完的管路进行了整体检漏测试，漏率达到  $3.0 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

**3.流程设计：**完成了 2500W 制冷机控制柜和 UPS 电源柜的设计、加工和组装，以及桥架的搭建，准备开展压缩机控制系统调试；完成 1000W 制冷机系统的 PID 设计及阀门、管线设计。

**4.冷压缩机：**冷压缩机（组）第一轮样机部件加工全部完成。完成冷压缩机（组）第一轮样机部件常温集成组装。冷压缩机性能测试平台重要部件全部就位，等待冷压缩机下蜗壳就位，完成冷箱的集成组装。捷克冷压缩机 9 月初到货且直接运往合肥。计划进行了调整，先进行进口冷压缩机在平台上的性能调试，然后再进行自主研制的冷压缩机性能调试。

**5.氮螺杆压缩机：**2500W 雪人压缩机电缆及控制线路连接，做好调试前的准备工作；豪顿压缩机与测试装置连接，测试前的准备工作；新增两个平台的压缩机检漏，测试方案沟通以及测试前的准备工作；新 250W 平台的滤油器已经完成；1000W 平台的滤油器按计划进行。

**6.透平膨胀机：**继续完善 1000W 透平膨胀机的设计，开展 1000W 氦透平膨胀机的整机设计工作；按最新的流程针对新 250W 和新 2500W 透平的初步设计，协助新流程的设计；完成了 2500W, 1000W, 新 250W 的相关的采购或外协合同，具体包括：测速传感器及转速表验收、过滤器加工合同、部分叶轮加工合同等。

## （二）下一步工作计划

**1.冷箱：**2500W@4K 冷箱现场集成，500W@2K 冷箱容器到货、2K 冷箱开展现场集成，开展 1000W 冷箱部件研制、招标，开展 250W

冷箱集成设计。

**2.集成：** 2500W@4.5K/500W@2K 制冷机：开展 2500W@4.5K 制冷机的压缩机小循环调试；液氮/液氦低温传输管线研制；完成 2500W@4.5K 制冷机系统总成。多透平与换热器组耦合调控平台：完成流程评审，完成相关阀门等关键设备的采购。200W@4.5K 制冷机：验收 1000L 液氦杜瓦，开展 200W@4.5K 制冷机的调试试验。

**3.流程设计：** 在与用户应用的基础上，开展 2500W 制冷机的应用模式设计及新 2500W 制冷机的流程设计。

**4.冷压缩机：** 11 月底完成捷克冷压缩机在性能测试平台上的集成组装，12 月初开始试验调试。12 月底更换成自主研制的冷压缩机组再进行试验测试。

**5.氦螺杆压缩机：** 2500W 雪人压缩机开机调试；豪顿压缩机及新增两个平台的压缩机测试验收；1000W 平台的滤油器组装、测试、验收。

**6.透平膨胀机：** 依据整体进度安排继续完成 1000W 氦透平膨胀机的加工工作；完成 2500W 剩余叶轮的加工和验收工作；继续推进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；继续编写 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：本季度在研项目 54 项，其中新增 4 项，组织召开协调会

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 18 篇，其中包括 *Nat. Commun.* 1 篇，*Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1 篇，*Adv. Mater.* 1 篇，*Nano Energy* 1 篇，代表性研究进展介绍如下：

1. 仿生超浸润界面材料：挥发性有机物严重危害环境和人类健康，因此对有机气体的识别和检测具有重要意义。传统荧光气体传感器是利用波长移动型荧光染料来实现对气体的检测，由于荧光分子相互作用较弱，使得传感器具有较低的灵敏度和较差的特异性识别性能。

提出通过结合聚合物和聚集诱导发光（AIE）分子，在不对称浸润性界面上限域构建聚合物/AIE 荧光微米线阵列作为气体传感器，利用聚合物溶胀诱导光强变化实现对有机气体的高灵敏和特异性检测。聚合物/AIE 荧光气体传感器具有稳定性好、响应快、灵敏度高于传统荧光传感器的优势。通过理论计算揭示了荧光传感器对气体检测的机理，并且利用现有商品化聚合物或 AIE 材料构建传感器阵列，实现对不同有机气体的识别，证明方法具有普适性。更为重要的是，通过调控聚合物侧链结构，可特异性识别并准确区分性质相似的有机气体。理论模拟表明聚合物和气体分子之间相互作用大小符合相似相容原理。

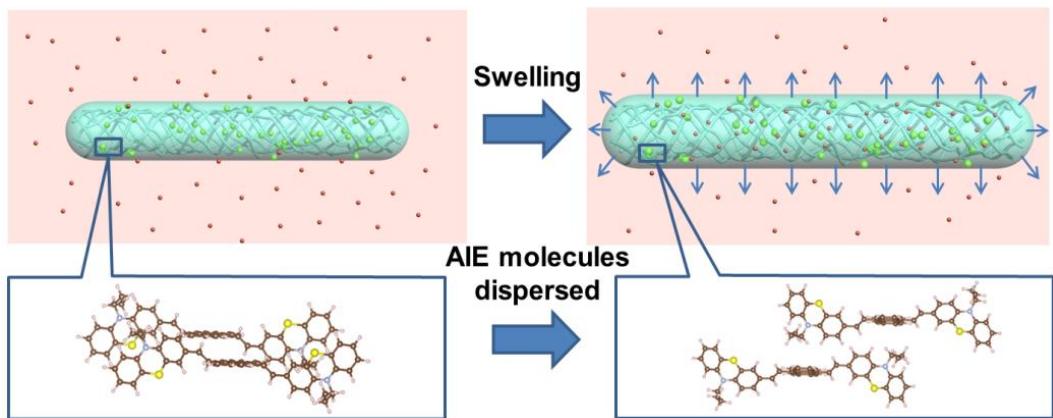


图 1. 一维聚合物/AIE 荧光微米线阵列构建

2. 仿生纳米孔道：在能源危机的背景下，低品位热源( $<100^{\circ}\text{C}$ ，简称为 **LGH**) 作为拥有巨大储量而尚未开发的能源受到越来越多的关注。人体皮肤是一种复杂的感觉系统，其中包含各种感觉器官。每个感受器控制着生物体的一小部分，并将触觉信息编码以动作电位传导至大脑。例如，外部热刺激可以通过在皮肤热感受器细胞中的温敏瞬时受体电位通道（或 **thermo-TRPs**）被转化为一系列动作电位。但是由于生物离子通道的脆弱性限制了这些纳米通道在能量转换等领域中的应用，而仿生智能纳米通道（**BSN**）因其具有良好的可调几何形状和化学性质而越来越多地被开发用于清洁能源捕获。通过使离子流定向运动，**BSN** 在过去的几十年里已被用于来收集盐度梯度能，太阳能和自发过程诱导能。通过使用 **BSN** 来模拟生物热感应过程，在无需外部电源的情况下，系统可以直接进行热电转换。而外界温度刺激可以通过人造离子通道转换成电信号，即热量可以通过 **BSN** 的系统收集。该仿生体系在膜温度梯度（ $\Delta T$ ）为  $40^{\circ}\text{C}$  时，其功率密度理论上可以达到  $88.8 \text{ W m}^{-2}$ 。这种热电转换装置为低品位热收集提供了新的平台，可以扩展电子皮肤领域并在皮肤假体中找到应用。

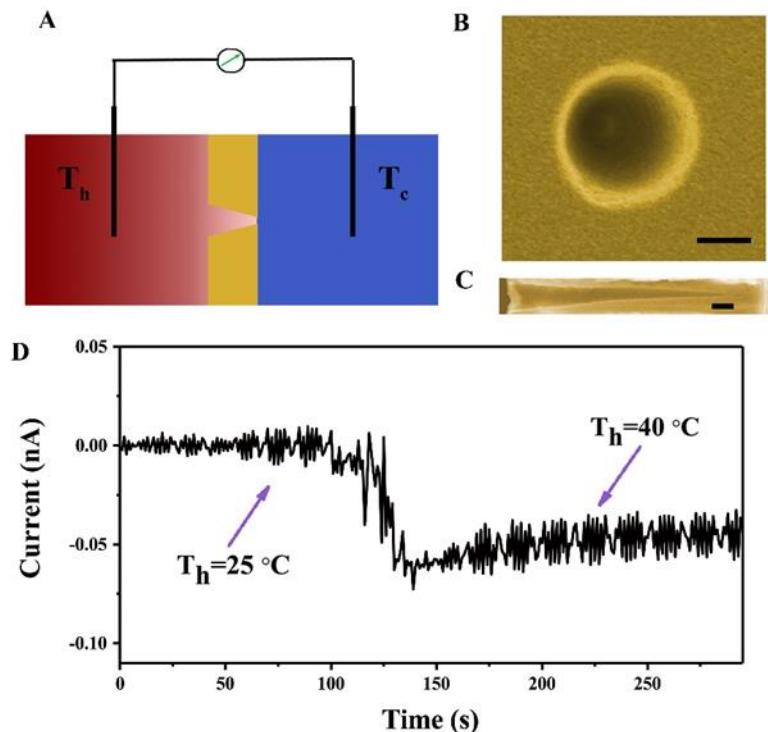


图 2. 仿皮肤的 LGH 收集系统实验装置和热电行为

3. 仿生粘附界面材料：羽毛是鸟类飞翔的主要依靠，也一直是人们所向往的神器。但与蝙蝠和蝴蝶的膜状翅膀不同，鸟类的羽毛具有更强的自我修复能力和抗撕裂能力。自 Hooke 利用显微镜观察并画出羽毛的草图以来，羽毛的结构和性能已引起了人们的广泛关注。然而，目前人们对羽毛结构的认识仍停滞在“hook-groove”模型，而这个模型忽略了羽毛本身的更微观结构，很难解释羽毛的抗撕裂能力和超耐久性。通过利用 X-射线显微镜和显微操作系统对羽毛的精细三维结构及其功能进行了观察，发现了羽毛的羽枝间的一种新型机械互锁体系：级联滑锁系统（由钩子，滑道和滑道端部的背刺组成），并阐明了级联滑锁结构的工作原理，成功揭示了羽毛抗撕裂能力和超耐久性的秘密。这种级联滑锁结构不仅保证了羽枝间较强的粘附力，同时保护了羽枝在分离过程中不受到损坏。实验测试表明，羽毛具有

很好的拉伸性能；并且经过 1000 次的分开/修复实验，羽枝间的粘附力仍能达到初始值的 80% 以上。由此说明，这种结构促成了鸟类羽毛的抗撕裂能力和超耐久性能，使得鸟类能够在恶劣的环境中飞行。同时，这种级联滑锁结构为新型柔性织物和电子器件的设计制备提供了新的思路。该成果发表在 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2018**, *115*, 10046–10051。

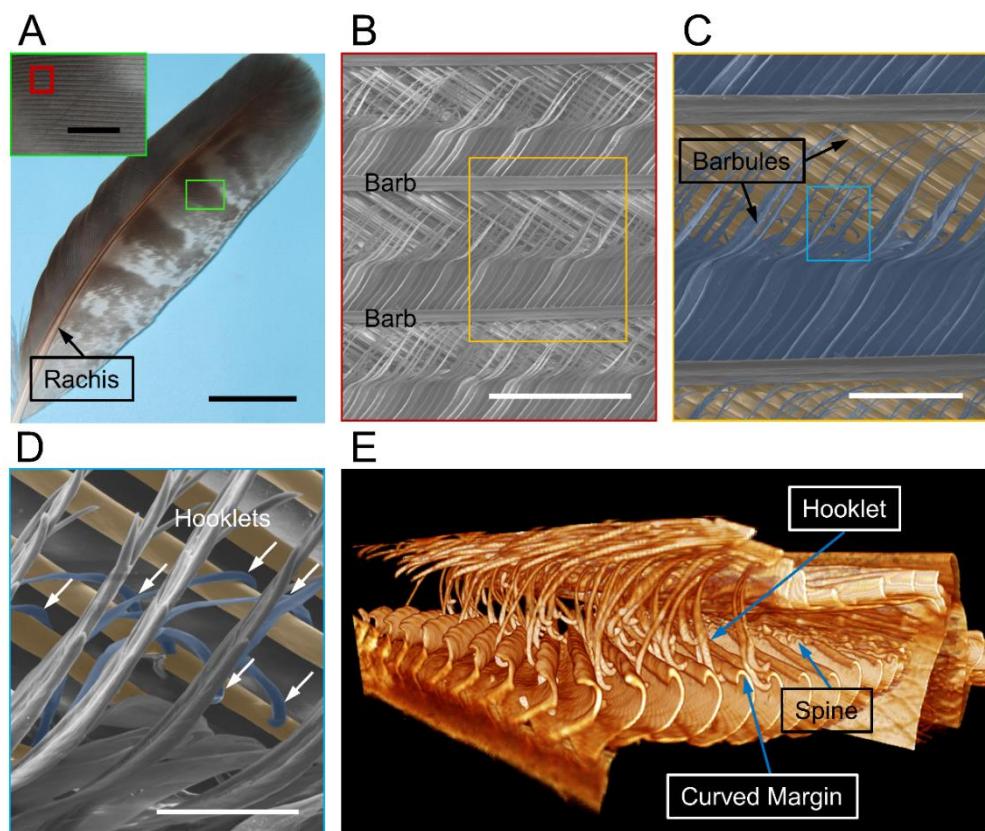


图 3. 鸟类羽毛的级联滑锁结构

高分子多孔材料已广泛地应用于分离领域。传统的高分子多孔材料具有均质的组成或孔隙，例如聚苯乙烯多孔微球，这些材料往往很难从复杂的样品中分离出痕量的目标分子。为了实现选择性分离，通常需要对这些材料表面进行功能基团的修饰。然而，这些修饰仅仅是在分子尺度，往往造成在材料表面的修饰密度低、不均匀等各种问题，

难以消除含量较高的背景分子的非特异性吸附。在临幊上，痕量疾病标志物分子的分离和检测意义重大，例如与阿尔兹海默症（老年痴呆症）紧密相关的内源性糖肽的分离。

我们报道了一种具有亲水/疏水异质纳米孔的聚合物微球，该微球能在不同极性的溶剂中选择性吸附生物分子，进而从复杂样品中高效地分离出痕量的糖肽这种具有亲水/疏水异质纳米孔的微球为开发新型的生物分子分离材料提供了新的思路，有望应用于生物分子分离及后续的临幊诊断等领域。该成果发表在 *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1803299。

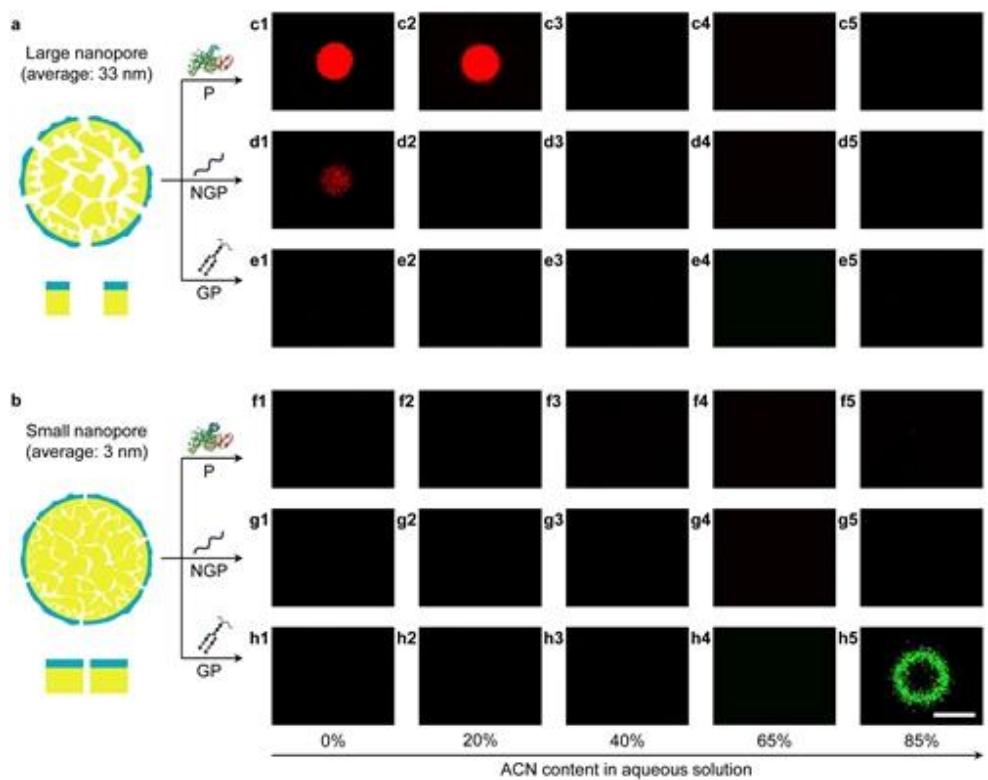


图 4. 基于具有亲水/疏水异质纳米孔的微球实现溶剂转换的生物分子吸附

4. 仿生微纳米结构的构筑和加工：智能水凝胶在生物组织工程、生物医学等领域展现出诱人的应用前景。功能性的水凝胶器件是 MEMS 领域最具有吸引力和挑战性的研究方向之一，其中磁驱动是

实现 MEMS 器件性能的一种有效的驱动方式之一。双光子聚合技术具有高精度、3D 加工能力，已被应用于各种功能器件和结构的加工，在光学微器件、微机电系统、微流控系统等领域显示出独特的优势与应用前景。但当加工一些具有光、电、磁响应的微纳器件时，商业光刻胶无法满足要求。

研发了利用四氧化三铁纳米粒子掺杂的磁性水凝胶光刻胶体系，并用于磁性结构和器件的制备。首先合成了表面改性的四氧化三铁纳米磁性粒子 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs) 并使其分散在光刻胶中，其中纳米粒子的平均尺寸为 7.8 nm，所制备的光刻胶可在紫外光照射下形成一种可被磁场驱动的宏观水凝胶结构。进一步对具有不同  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  NPs 含量的光刻胶的双光子聚合特性进行了详细的研究，采用双光子聚合制备了多种含有磁性纳米粒子的水凝胶微结构与器件，如青岛大学的 logo、磁响应微“棒”和磁响应微“钉”。所制备的微器件在磁场下表现出可逆的响应特性，对于 MEMS 功能器件领域的发展具有重要意义。论文发表在 *Sensors & Actuators: B. Chemical* 2018, 274, 541-550 上。

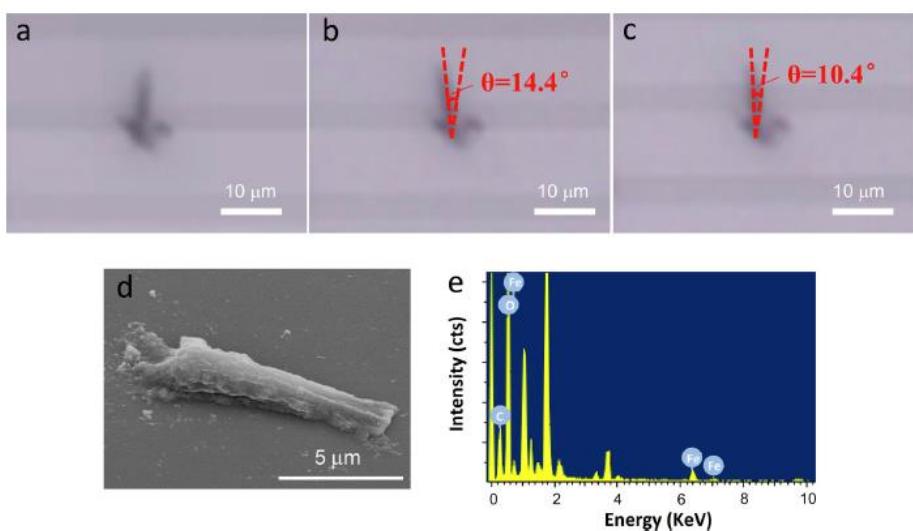


图 5. 外磁场驱动的水凝胶微“棒”结构及其驱动效果展示

## （二）下一步工作计划

1. 围绕仿生超浸润智能界面材料体系：高灵敏聚合物/AIE 荧光气体传感器研究, (1)实现液相检测; (2)拓展至其他导电聚合物复合材料。
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. 围绕界面粘附材料的设计以及制备,着重开展浸润性调控的抗菌敷料研究。
4. 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)继续研究咔唑基类光功能材料在微尺度结构构筑中的应用。研究咔唑基化合物及其复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；(2)深入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。

## 培育一 光化学转换与光化学合成

概述：本季度在研项目 20 项，其中新增 4 项；结题验收 2 项。

### （一）本方向本季度重要进展

#### 1. 精确合成莫比乌斯共轭索烃

莫比乌斯环 (Möbius strip) 有着迷人的空间结构, 是数学拓扑领域中的重要概念。用碳原子骨架构建莫比乌斯环分子显示出独特的分子性质, 在分子合成和芳香性理论基础研究领域具有重要意义。但由于其反常规的结构和亚稳态的构象, 莫比乌斯构象共轭分子的合成与表征一直是合成化学中的难点。而基于莫比乌斯构象共轭分子构建更复杂的超分子复合体, 则更具挑战性。

丛欢研究员团队与厦门大学朱军教授合作, 创新性地利用铜模板法高效合成对苯撑全共轭索烃, 并通过单晶X-射线衍射揭示固态下的该化合物是由两个稳定莫比乌斯构象的共轭碳环嵌套构成。理论计算显示构成索烃的共轭碳环之间存在高达每摩尔84千卡的分子内非共价 $\pi$ - $\pi$ 相互作用, 是稳定分子固态下莫比乌斯构象的关键, 进而通过理论模型确认了该分子 $\pi$ 体系的共轭性和芳香性。这项工作表明合成颇具挑战的对苯撑全共轭索烃不仅可作为互锁超分子结构的组成单元, 同时也可作为一类新型莫比乌斯共轭的分子, 为分子设计以及探索芳香性和成键规律提供了新思路。

相关研究成果于2018年8月2日在Nature子刊《自然-通讯》在线发表 (*Nat. Commun.* **2018**, *9*, 3037) 并被选为编辑推荐亮点文章。同时《中国科学报》、德国Synfacts杂志、新浪网、千人计划网等多家国内外主流媒体对本工作进行了报道。

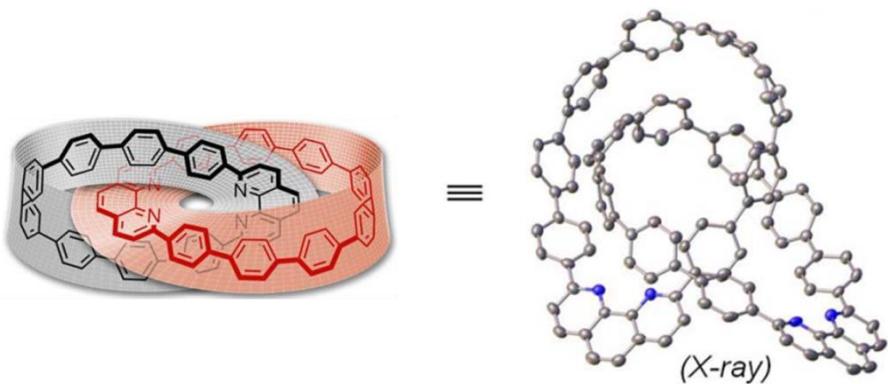


图 6. 精确合成莫比乌斯共轭索烃

## 2. 银硫醇盐介导的银纳米团簇的自上而下演化机制研究

由于其独特的物理化学特性，金属纳米团簇在诸如催化、生物成像、传感等领域具有广泛的应用前景，因此，以原子尺度精确性为目标的金属纳米团簇的合成吸引了研究者的广泛关注。到目前为止，虽然对硫醇保护的 Ag 纳米团簇的合成与结构解析已有多例，其由银硫醇盐前驱体出发的生长演化机制仍不为人所知。因此，揭示这一生长演化机制具有重要的科学意义。

张铁锐研究员团队开发了一种在室温下快速合成硫醇保护的银纳米团簇(尺寸约 1.2 nm)的方法，并重点揭示了一种全新的银硫醇盐介导的银纳米团簇自上而下的演化机制。与经典的从单体出发的自下而上的生长过程不同，作为前驱体的银硫醇盐被还原后生成独立的银硫醇盐团簇，这些中间体团簇中含有几十个不等的银原子与相近个数的硫醇配体。在随后的还原过程中，这些银硫醇盐团簇逐渐失去硫醇配体并最终转化为 Ag<sub>17</sub> 与 Ag<sub>44</sub> 这两种含有不同银原子数的团簇。随后通过对中间体含有的银原子数的分析我们发现，最初形成的银硫醇盐团簇中的银原子个数将决定它的反应路径从而指向不同的最终

产物。这一全新机制的发现大大促进了对硫醇保护的银纳米团簇演化过程的认识，并为合成更多不同尺寸的银纳米团簇提供了坚实的理论基础。相关研究结果发表在 *Nature* 子刊 *Nat. Commun.* **2018**, 9, 2379 上。

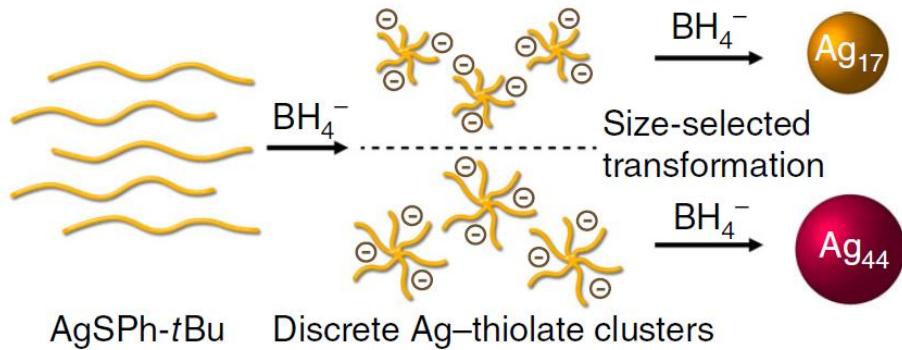


图 7. 银硫醇盐介导的银纳米团簇的自上而下演变过程示意图

### 3. 半导体量子点人工光合成领域的应用综述

光催化分解水产氢是光-化学能转换的重要形式，开发廉价、高效、稳定的催化剂是其中的研究热点之一。近年来集分子和半导体的优点于一身的“人工原子”--量子点，在可见光区有较宽的吸收光谱，较高的摩尔吸光系数 ( $10^5 \sim 10^7 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )，丰富的表面性质及独特的量子尺寸效应，已逐渐成为人工光合成研究领域的新宠。鉴于课题组在量子点光催化材料方面的特色研究工作，吴骊珠研究团队应邀在 *Nature* 子刊《自然-综述：化学》上发表了一篇题为“Semiconducting quantum dots for artificial photosynthesis”的综述文章(*Nat. Rev. Chem.* **2018**, 2, 160-173)。该综述从半导体量子点光分解水原理入手，分别综述了国内外不同研究组如何从尺寸优化、结构改性和表面修饰对量子点进行调控，从而促进量子点的太阳光捕获效率、电荷分离效率以

及量子点到催化中心的电荷迁移效率，并最终构筑了高效、稳定的人工光合成制氢体系。

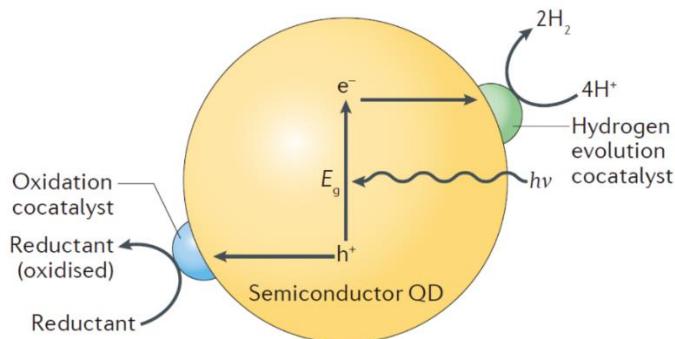


图 8. 半导体量子点人工光合成领域的应用

#### 4. 放氢交叉偶联反应综述

交叉脱氢偶联反应是一个高效的构建新碳碳键、碳杂原子键的合成手段，但传统的交叉脱氢偶联反应必须使用金属催化剂（如钯）和等当量牺牲氧化剂，生成大量废物，后处理繁琐。吴骊珠、佟振合团队 2013 年创新性地提出“光催化放氢交叉偶联”新概念，使用廉价光敏剂和催化剂，室温光照实现碳-氢键直接交叉偶联生成碳-碳键，并放出等当量氢气。该反应具有很好的普适性，避免了底物的预先官能化，缩短了合成路线，实现了原料到产物的直接转化，显著提高了反应的原子经济性和步骤经济性。相关研究引起了国内外同行的广泛关注，2018 年 10 月 3 日应邀在美国化学会旗下刊物《化学研究评述》上发表了一篇题为“Photocatalytic Activation of Less Reactive Bonds and Their Functionalization via Hydrogen-Evolution Cross-Couplings”的综述文章（*Acc. Chem. Res.*, 2018, 51, 2512-2523），系统介绍了本课题组的系列特色研究工作。

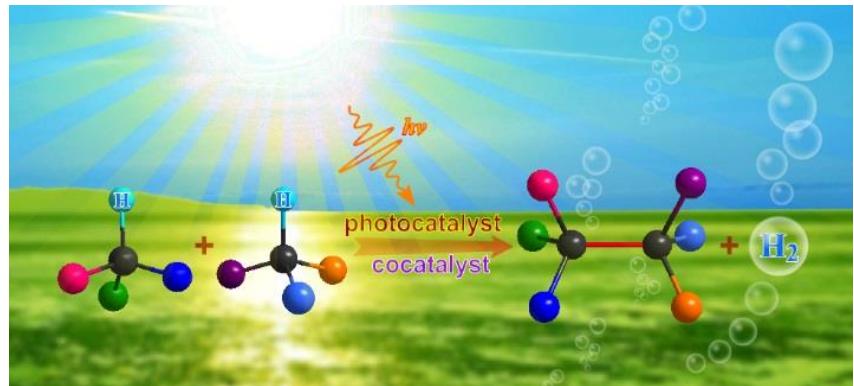


图 9. 光催化放氢交叉偶联

## 5. 铁-水滑石基催化剂用于光催化费托反应制备低碳烯烃

低碳烯烃 ( $C_2-C_4$ ) 作为现代工业中重要的化工原料广泛应用于合成聚合物、药物等其他特殊的化工品。通常低碳烯烃的制备来源于  $CO$  加氢反应 (费托合成) 或者是甲醇的转换。虽然已有报道可以通过两步法实现高选择性低碳烯烃的制备, 但是反应条件苛刻, 因此发展简便高效的一步法下实现低碳烯烃的制备尤为重要。

张铁锐研究员团队通过 **ZnFeAl-LDH** 层状双金属氢氧化物纳米片高温下  $H_2$  还原, 成功制备了一系列不同物相的 Fe 基光催化剂。在 UV-Vis 辐射下, **Fe-500** 光催化剂显示出优异的一氧化碳加氢性能,  $CO$  的转换率为 20.9%, 低碳烯烃的选择性为 42.4% ( $C_2-C_4$  olefin), 并且  $CO_2$  的选择性仅为 11.4%。X 射线吸收精细结构和高分辨透射电镜等表征手段研究表明, 活性催化剂由  $ZnO-Al_2O_3$  混合金属氧化物负载的 Fe 和  $FeOx$  纳米颗粒组成。进一步通过理论计算 (DFT) 表明  $FeOx$  修饰的纳米 Fe 颗粒不利于中间体- $CH_2$  的进一步氢化, 因此 **Fe-500** 具有较高的低碳烯烃选择性, 同时也不利于水煤气的变换因此  $CO_2$  的选择性较低。本工作首次利用太阳能光催化 Fe 基催化剂实现低碳烯烃

的制备，同时具有较低的  $\text{CO}_2$  选择性。相关结果发表于国际材料领域知名期刊 *Adv. Mater.* 2018, 30(36), 1803127 上。

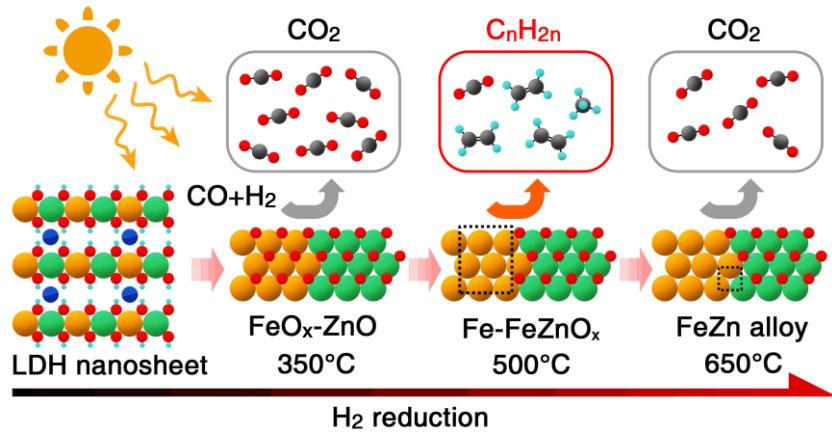


图 10. **ZnFeAl-LDH** 在氢气氛围下结构转化及光催化费托反应示意图

## 6. 超亲水异质多孔 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$ 用于高效电催化全水分解

氢能具有零碳高能量密度的特点，而走进了人们的视野，电催化分解水产氢是一种有效获得氢能的手段，而电催化水分解涉及到阴极产氢和阳极产氧两个方面，阴极的产氢催化剂主要是铂，而阳极的产氧主要是钌铱，而这些都属于贵金属，其昂贵的价格以及地壳储量稀少的缺点限制了其应用。因此开发廉价高效的非贵金属催化剂用于水的全分解更为迫切。基于此，金属有机光化学课题组吕小军副研究员和付文甫研究员团队设计合成了多孔的  $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$  复合纳米材料，并探讨了其在电催化水分解方面的应用。他们通过温和的电沉积和水热方法制备了  $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$  复合物，并且通过 XRD, SEM, 和 TEM 证明了这种催化剂的组成和多孔性结构，这种多孔性结构更有利于反应物水分子的进入以及生成物气体分子的输出，接触角测试也表明了这种复合物良好的亲水性能。电催化分解水产氢产氧性能测试证明了这种催化剂具有良好的催化性能，尤其是产氢时其  $10 \text{ mA cm}^{-2}$  的过电位不

到 100  $\text{Mv}$ , 不同电流密度下的恒电流测试稳定性长达 30 个小时以上。相关研究成果发表在《美国化学会-应用能源材料》(ACS Appl. Energy Mater, 2018, 1, 3929)。

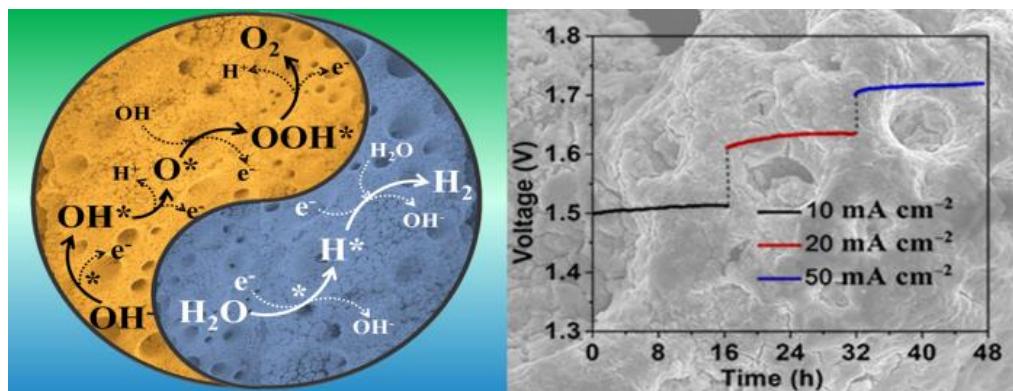


图 11. 异质多孔  $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$  用于高效电催化全水分解示意图

## 7. 异质多孔 $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$ 用于高效电催化尿素全分解

尿素具有高的能量密度 (169  $\text{MJ L}^{-1}$ ), 易于运输和储存的特点, 是一种很有前途的氢储存材料。阳极电解尿素的同时, 可以在阴极释放大量的氢气, 获得氢能, 同时起到净化废水的作用。尿素阳极氧化标准理论电位为 0.37 V vs RHE, 大大低于水氧化的标准电位 1.23 V, 具有很大的优势。然而, 六电子传递过程限制了阳极氧化反应的动力学, 而且目前用于尿素氧化反应 (UOR) 的最常用的电催化剂主要包括 Pt、Rh, 用于产氢反应 (HER) 的催化剂主要是 Pt, 这些都属于贵金属。因此开发廉价高效的非贵金属催化剂用于尿素的全分解更为迫切。基于此, 金属有机光化学课题组吕小军副研究员和付文甫研究员设计合成了多孔性的廉价  $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$  复合催化剂, 分别用于尿素的阳极氧化和阴极产氢, 并进一步将其应用于两电极体系的尿素的全分解, 电化学测试表明这种催化剂的尿素的全分解电压在电流密度 20

$\text{mA cm}^{-2}$  时仅为 1.45 V, 是到目前已知的最小电位。DFT 计算也表明了这种复合催化剂相对与单一催化剂而言, 具有更低的催化活化能。相关研究成果相关研究成果发表在《化学通讯》(Chem. Commun. 2018, 54, 5181)。

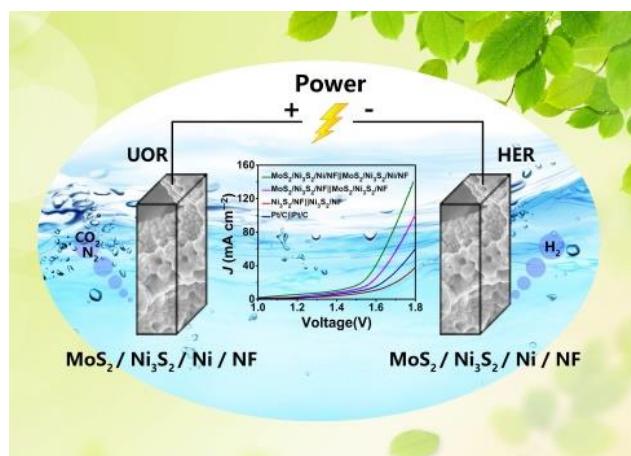


图 12. 异质多孔  $\text{Ni}_3\text{S}_2/\text{MoS}_2$  用于高效电催化尿素全分解示意图

## （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制氢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。

## 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 2 项, 结题项目 1 项, 中科院 STS 重点项目“明胶酶法绿色制造 2.0 工艺研发及应用”顺利结题验收, “生物酶法骨明胶生产技术”获得中国技术市场金桥奖。

### （一）本方向本季度重要进展

1. 基于同位素技术对骨原料进行天然度确定和产地分析研究  
建立和完善了利用同位素比质谱 (IRMS) 测量动物骨原料及饲

料/牧草中碳、氮及氢元素稳定同位素比值的方法。完成了内蒙古、广西及山东三个地区的牛、羊、猪骨原料及三个物种所食用的饲料/牧草的碳、氮、氢三种元素的同位素比值测量，初步建立了三个地区骨原料及饲料/牧草的稳定同位素（ $\delta 13C$ ， $\delta 15N$  和  $\delta 2H$ ）数据库。研究发现 内蒙牛、羊、猪骨原料中  $\delta 2H$  及  $\delta 15N$  值相较于其他两地均有显著差异，产自广西和山东的牛、羊骨原料中  $\delta 12C$  及  $\delta 15N$  值存在一定差别，可根据三种元素稳定同位素比值的综合分析结果初步判断牛、羊骨原料的产地。

## 2. 基于激光剥蚀质谱联用技术对骨原料中重金属进行快速分析研究

建立了基于激光剥蚀质谱联用技术对骨原料中重金属进行快速分析的方法。 使用湿法对样品进行筛选，获得砷、铬、铅含量较低的样品，可用于制备低浓度固体标样。并对内蒙的三个骨原料样品进行了分析，其铅含量差别较大，一个批次样品含量远超过国家标准；而对于铬和砷含量，三种骨原料含量基本相近，铬含量均略高于国家标准，砷含量均低于国家标准。

## 3. 完成两条 3000 吨/年酶法明胶生产线建设

包头 3000 吨酶法明胶生产线已实现全面试车运行，目前正在对生产线的相关辅助系统(污水\供料)进行优化改造。

## 4. 实现酶法胶胶囊规模化连续生产，胶囊产品满足药典 2015 版明胶空心胶囊的要求，产能超过 100 亿粒

通过对浙江地区胶囊厂进行调研，了解酶法明胶生产过程和使用

过程中存在的技术问题。建设了胶囊制备洁净实验室，搭建了胶囊制备和性能测试研究平台，进行了 100 多批次胶囊制备实验。针对明胶原料改变而带来的胶囊生产参数调整进行大量实验，总结出了针对酶法工艺明胶、不同工艺混配明胶的蘸胶参数调整规律，并得到了脆碎和崩解时限合格的胶囊产品。这些制备经验正在用于指导企业进行胶囊生产。截至目前，酶法明胶空心胶囊生产总量达到 100 亿粒以上。

## （二）下一步工作计划

1. 开展酶法明胶用工业酶的准工业化生产制造。
2. 稳定东宝的酶法明胶生产和优化生产条件。
3. 推进污水和固废相关技术的工业化实施。
4. 推动与埃塞俄比亚的酶法明胶项目国际伙伴关系计划。

## 培育三 激光显示及产业化

概述：在研项目 3 项，主要为国家重点研发计划 3 项。目前各项目进展顺利，其中“双高清/大色域激光显示整机研发及表征评估”重点研发计划项目实现了首台 4K 超高清三基色半导体激光(LD)电视的开发，通过了具有资质的第三方检测机构的测试，顺利的通过了重点研发计划中期检查的任务书要求。在产业化工作方面，与杭州中科极光科技有限公司合作，开发出面向家居、影院应用的激光电视、激光数字电影放映机产品，其中数字电影放映机产品实现新增订单超过 500 套，极大的提高了中科院理化所及杭州中科极光在激光显示产业领域的影响力。

## （一）本方向本季度重要进展

## 1. “双高清/大色域激光显示整机研发及表征评估”项目顺利完成中期任务书各项要求

### (1) 与项目单位合作开展 4K 超高清光机系统设计与开发

4K 超高清光机系统包括超短焦镜头、视频图像调制器以及配套的驱动系统。其中超短焦镜头在设计时，随着视场角的增大，各种轴外像差、色差等也急剧变大，并且很难同时校正，表现为非中心视场区域的各色图像是错位的，这样会降低图像的对比度，达不到满意的效果，同时大视场系统畸变也很难矫正，给光学设计带来很大的困难。针对目前超短焦大尺寸显示系统体积大，重量大，成本高，图像的对比度低，画面畸变大等技术难题，需要在超短焦投影镜头的设计方法上有所创新，同时还要考虑到加工以及装配难度便于批量生产制造。设计开发具备小投射比、低成本、超短焦距、大相对孔径、大视场角、高清晰度等技术优点的具有自主知识产权的投影镜头。

本项目中全部采用旋转对称的球面及非球面面型，采用了高折射率低色散玻璃透镜有利于像差校正，同时有效减少了镜片数量，降低了镜头成本和加工难度，将在批量加工制造以及检测方面有重大的产业应用前景，目前已完成镜头光学及机构部分的设计以及成像性能软件仿真，完成镜头各光学元件公差分析及加工工艺可行性验证，实现样机制作与性能测试，原理及光路图如下图：

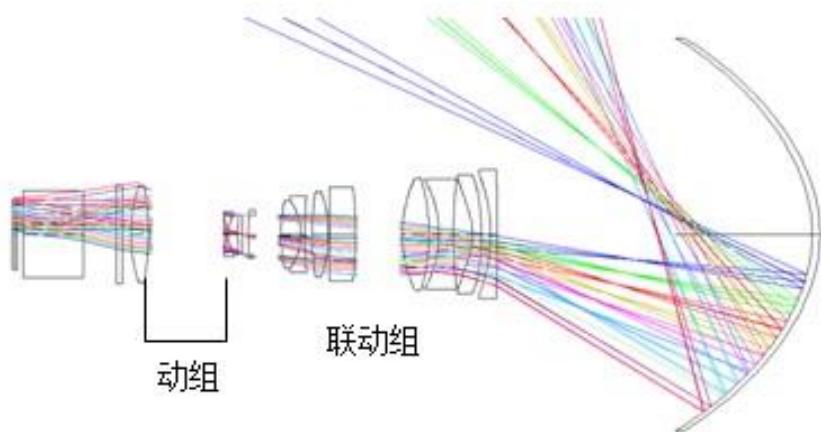


图 13. 高性能光学成像镜头原理示意图

本项目采用的 0.66 吋 TRP DMD，其系统架构如下图所示，基本参数如下：



图 14. DMD 系统架构图

包括分辨率：DMD 有效区域为 2716\*1600 (14.66 x 8.64mm)，通过 TSPActuator 实现 4k\*2k 显示。Pixel: 5.4um。封装: S610(新一代封装)。F1.7@DMD, 17.5° @ DMD。

为了满足项目要求的 3000lm 以上的整机光通量输出，镜头内部采用全玻璃镜片，投射比为 0.22~0.25，实现了在 0.5 米距离内投射出 100 英寸大小的画面并且画面畸变<10mm，同时提出二次成像、3 段式超短焦镜头设计架构，并采用非球面镜片设计技术及自由曲面设

计技术，在实现高分辨力的同时兼顾系统效率和投影画面质量，进而带给用户极佳的视觉享受。

实用化照明系统是实现良好匀场效果的关键技术。本项目的照明系统使用远心照明相结合的方案，可实现亮度与色度均匀照明，常规光机系统设计方案，仅考虑照明整体  $F\#$  和镜头的匹配设计，系统匹配性无法达到最佳状态，通过对 DLP 系统的深入研究，提出差异化光孔匹配技术，对照明系统弧矢和子午的  $F/\#$  分别计算，并与镜头  $F/\#$  进行优化配合设计，使得系统达到最佳的匹配效率。通过该方案的设计，使得光机系统的效率提升约 3%。

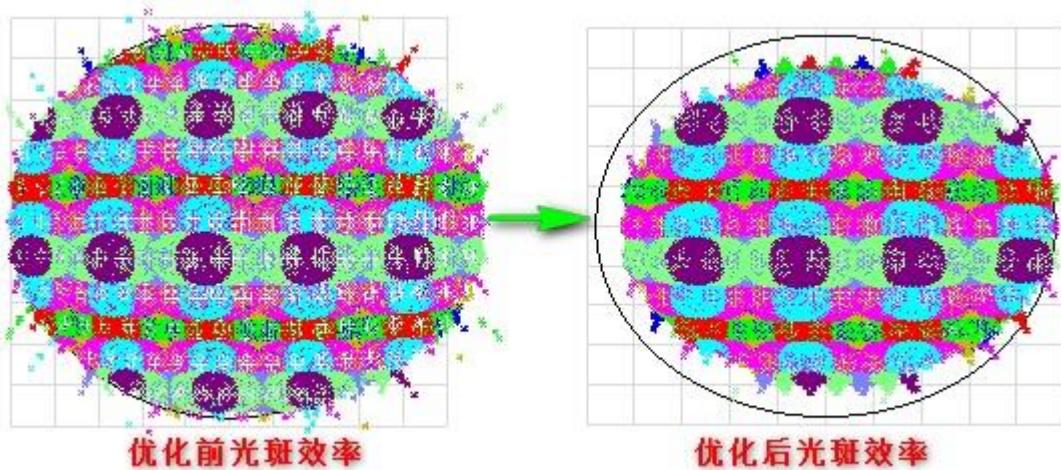


图 15. 优化前后光斑效率对比图

为实现高清分辨力的投影显示，并保证优秀的画面显示质量的超大屏幕尺寸显示终端，该项目系统研究了超短焦投影技术，提出高匀光性、高效率的照明系统架构，系统的照度均匀性高达 90% 以上，处于行业领先地位，效率高达 85%；

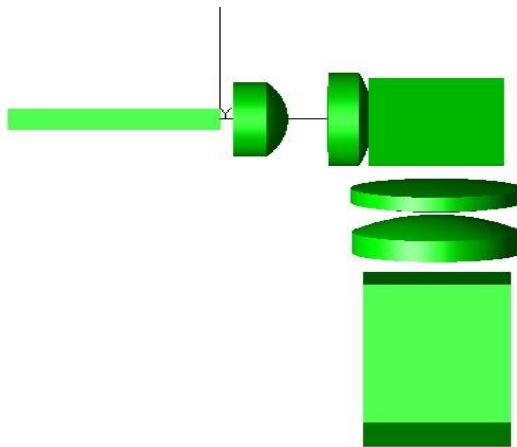


图 16. 高效照明系统设计

## (2) 面向民用消费领域应用的高亮度激光电视整机集成及环境适应性关键技术研究

激光显示属于面向大众消费领域的电子消费类产品，可靠性指标是其能否走向产业应用的核心。项目组根据GJB150通用试验要求，重点研究了激光显示整机及关键部件在冲击、振动、高温、低温等环境适应性条件下的力学、热学分析仿真，对仿真结果中的薄弱点进行研究，采用材料、结构、热管理、密封、减震等加固处理手段。针对激光投影显示整机光机电一体化、结构精密复杂的特点，项目组以紧凑的内部结构设计、紧凑整机体积为目标，既满足外观和功能设计需求，同时也要保证系统的高效散热，从而提高整机的环境适应性和稳定性。

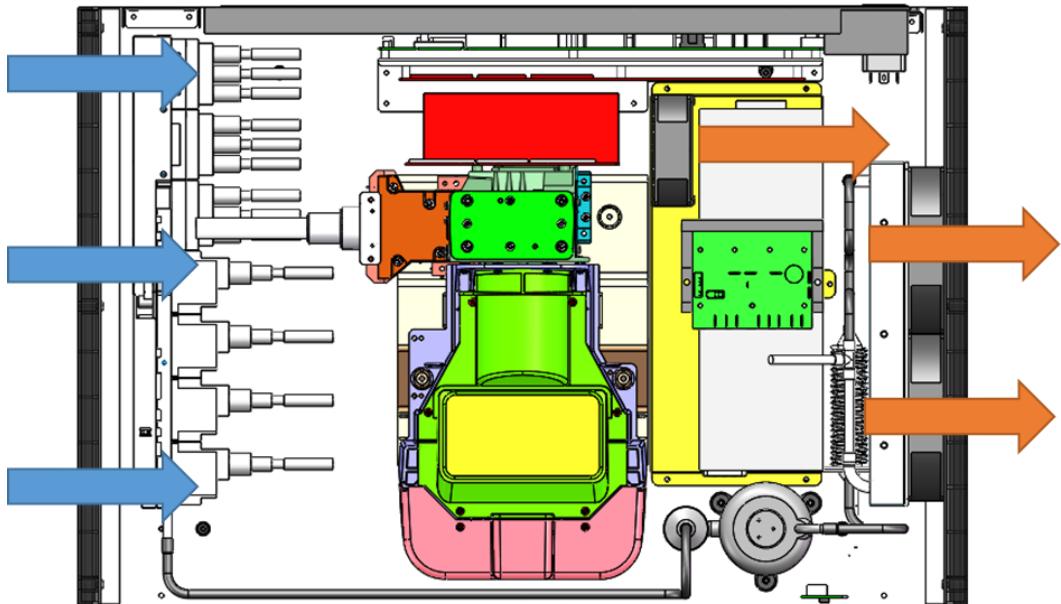


图 17. 高亮度激光显示整机总体集成设计图

### ①温度适应性

激光光源是激光显示系统的核心，属于温度敏感性器件，如何解决高功率激光系统长时间工作下的稳定性是重点研究目标之一。热管理系统的难点主要是要求散热功率大、且要求体积小、结构紧凑，效率高。目前在售的一些大功率的半导体激光器模组中，通常采用水冷和TEC制冷方式，热管理装置笨重、功耗大，不利于整机小型化设计。

根据系统的特点，本课题采用新型的高效能，小型化的冷媒蒸发吸热散热管理系统，采用复合热管理方式，通过高温高效相变吸热、低温自负载与辅助电热方式，适应宽温范围。温控部分引入 PID 算法提高控温精度，构建了整机散热热耗与外部温度协同控制逻辑，实现了激光器的温度控制在  $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  范围内的稳定工作。

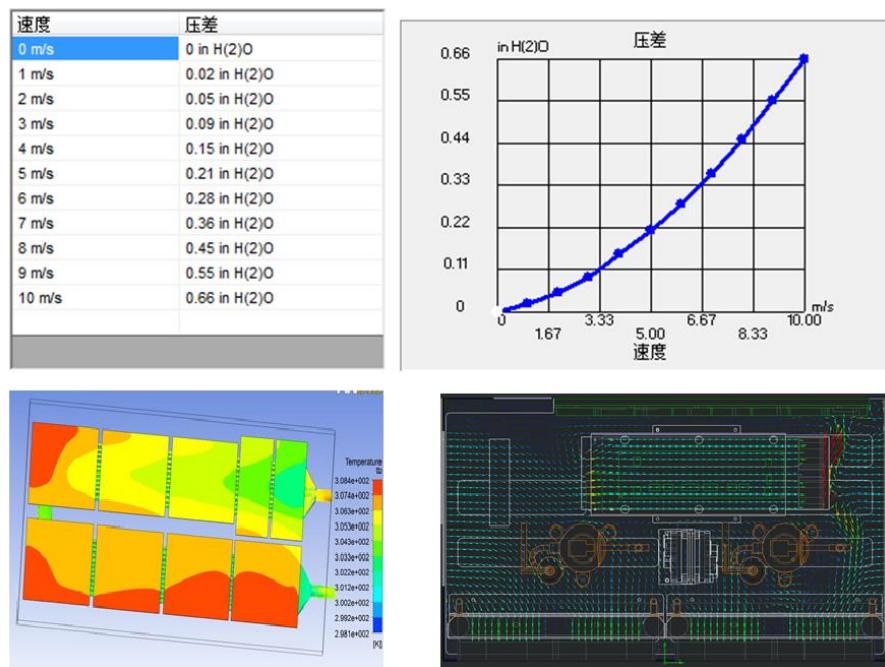


图 18. 热管理系统热仿真分析图

## ②冲击振动环境适应性研究

### ◆ 抗冲击加固设计

针对高强度冲击适应性措施主要是加强结构设计强度，主要采取措施：功能分区，结构模块化，降低各模块间相互关联程度，有助于技术关键解决和失效原因查找；尽可能实现一件多能和一件多用，简化结构，强化可生产性和低成本性，原材料主要立足于国内。

设计过程中需对各部分的结构强度进行计算：成像光学模块与壳体连接强度校核；各部分连接处强度仿真校核；机箱结构强度校核，经计算，各部分设计强度需满足强度要求。

结构设计过程中，对整机机壳施加边界条件和约束，用有限元分析仿真在冲击过程中的应力和位移分布，最大应力需不超过材料屈服强度值。

计算公式为：

$$\frac{1.3F_0}{\frac{\pi}{4}d_1^2} \leq [\sigma], [\sigma] = \frac{\sigma_s}{S_s}$$

式中  $F_0$ ——总载荷, N;

$d_1$ ——螺纹小径;

$[\sigma]$ ——许用应力, MPa;

$\sigma_s$ ——屈服强度;

$S_s$ ——安全因数;

#### ◆ 抗振动加固设计

在整机结构设计方面,针对高强度冲击适应性措施主要是加强结构设计强度,采取了功能分区、结构模块化的设计方案,降低各模块间相互关联程度,有助于技术关键解决和失效原因查找;同时原材料主要来源于国内,降低了整机的成本。

#### ◆ 精密/复杂激光显示整机结构一体化设计与集成制造

在整机设计方面,针对激光投影显示整机光机电一体化、结构精密复杂的特点,项目组以紧凑的内部结构设计、紧凑整机体积为目标,内部结构设计既满足外观和功能设计需求,同时也要保证系统的高效散热。

根据整机亮度和尺寸设计指标,确定激光光源大致方案,进行散热模拟分析和评估并决定激光光源的具体结构,根据此结构再开始具体的光源的光学设计,然后进行详细的热学和噪声测试,对出现的热学问题进行修改。

经过上述可靠性关键技术的突破，实现了高精度模组温度控制（ $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ）、紧凑内部结构、高效散热整机内部风场优化以及商业化整机噪声控制（整机噪声 $<55\text{dB}$ ）。

通过对高亮度激光电视整机的环境耐受性和工作可靠性研究，我们依据 GJB150-2009《军用装备试验环境试验方法》、GJB367A-2001《军用通讯设备通用规范》对整机开展了振动冲击、高低温以及高温储存实验测试：整机在完成振动及冲击试验后外观检查无异常，无损坏和螺钉松动等缺陷；测试系统工作正常，显示图像及视频正常；在高温、低温贮存试验后外观检查无异常，测试系统功能正常；在 $-30^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 下状态稳定，工作正常。



图 19. 整机高低温存储试验

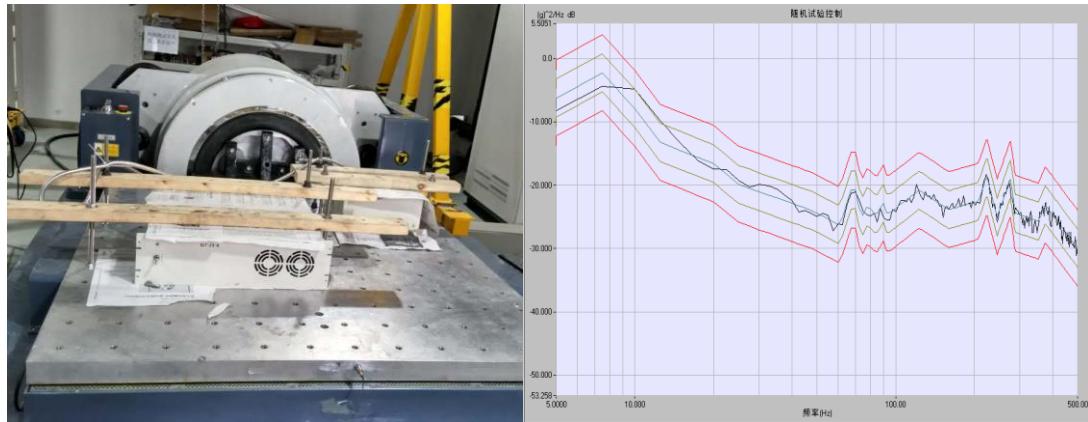


图 20. 整机振动冲击试验

基于双高清/大色域激光显示整机理论,项目组围绕精密/复杂结构整机一体化的设计和制造技术、4K 超高清信号重建技术、高精度的色空间转换和颜色校正等整机关键技术开展攻关,自主研发成功三基色 LD 高清激光家庭影院样机,其中分辨率达到  $3840*2160$  (4K),输出亮度 4050 流明,功耗 310W,电光效率  $13.11\text{m/W}$ ,照明光效 84.9%,色域  $\geq 160\%\text{NTSC}$ ,对比度 3500:1,整机体积  $640\times 430\times 210\text{mm}^3$ ,重量: 22.8Kg,支持 4K/8bit 视频图像编解码,经 1000 小时寿命测试曲线外推整机寿命为 21200 小时。配置多种功能接口,用于 100 英寸投影,显示出色彩绚丽的高画质视频图像开发出的样机显示画面色彩绚丽,观看舒适,功耗仅为同尺寸液晶电视的二分之一。



图 21. 4K 超高清 100 英寸三基色激光显示整机实物图

## 2. 依托产业示范主体，开发系列化产品，其中数字影院产品在第三季度实现超过 500 套的订单，产业化工作进展顺利

在 2018 年第三季度，理化所依托产业示范主体——杭州中科极光科技有限公司，围绕三基色 LD 激光显示及产业化亟需开展相关工作。目前，已开发出 4 种激光显示产品，其中面向数字院线、影院等应用场景的激光数字电影放映机在第三季度得到了市场的认可，在积极参加业内相关大型的展示活动之外，通过相关的竞品测试和展示，击败了多家同类产品，实现了超过 500 套的销售订单，中科极光正逐渐成为三基色激光显示领域的领军企业。



图 22. “三基色 LD 及产业化”项目数字影院产品市场分布

目前，中科极光自主开发的 1-7.5 万流明系列化激光数字电影放映机产品，以“租赁加销售”的商业模式在全国 40 个省、市和地区实现了超过 300 块屏幕的销售，北至吉林长春，南至广东湛江，激光数字电影放映机产品顺利通过了不同使用环境的严苛考验，提高了中科极光在激光显示领域的影响力，同时促进三基色激光显示逐渐成为

院线的主流解决方案，推动了影院产品的升级换代。

同时自主开发的全密封 RGB 纯激光一体工程投影机，可达到业内领先的 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。在大理彩云项目、西安瓮城项目、济南一湖一环项目、三亚山体项目等大型户外灯光秀/文化旅游应用中以高亮度、高可靠性、高画质的显示效果在众多竞争者中脱颖而出，拓展了激光显示项目的应用。



图 23. “三基色 LD 及产业化”项目工程机产品展示

## （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，结合项目结题时指标情况，制定下一步工作计划。
2. 目前激光数字电影放映机市场需求量增加较快，在近期将重点围绕三基色 LD 激光影院、工程投影等应用场景开展产业推广工作。

## 培育四 分散能源气体液化分离技术与应用

概述：2018年第三季度主要在适用于液化技术体系的基础研究、液化核心技术研究、样机开发及现场应用3个层面开展了工作。

### （一）本方向本季度重要进展

#### 1. 基础研究

##### 1.1 传热流动基础研究

针对甲烷、乙烷及其混合物，工况为饱和压力范围1.5-2.5 MPa，质量流率范围99-255 kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>，干度范围0-1，热流密度范围15.2-42.3 kW m<sup>-2</sup>，R50/R170混合物的初始浓度组分比分别为0.27/0.73、0.54/0.46和0.7/0.3。如图24所示为纯质及混合物的传热特性。分析显示无论是纯质还是混合物，随着质量流率的增大以及饱和压力的减小，传热系数增大。另外，分析得到在较低干度区间，混合物的冷凝传热系数受其纯质冷凝传热系数的影响较大；而在较高干度区间，混合物的冷凝传热系数受传质阻力的影响较大。与低干度相比，高干度下混合物传热系数受传质阻力的影响更明显，其衰减更严重。另外，由于在高干度时，气相传热系数占主导地位，则传质阻力对气相传热系数的影响较大。

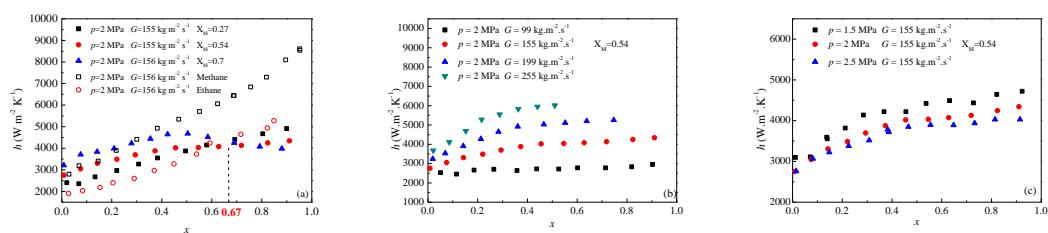


图24. 甲烷、乙烷及其混合物的传热特性

在液化天然气运输过程中，会存在压力损失。精确地预测沿程压降一方面可以为动力设计提供依据，另一方面可以精确获得沿程流体的物性。两相流摩擦压降实验所涉及的工质有纯质甲烷和甲烷乙烷混合物，工况为饱和压力范围 1.5-3 MPa，质量流率范围  $99-255 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，干度范围 0-1，R50/R170 混合物的初始浓度组分比分别为 0.27/0.73、0.54/0.46 和 0.7/0.3。图 25 所示的是不同质量流率下，纯质 R50 和 R50/R170 混合物摩擦压降随干度的变化。干度增大，摩擦压降先明显的增大，但在较高干度区间，增大程度会变得平缓甚至有略微下降的趋势。这是因为干度越大，空隙率越大，更多的液相转换成气相，在一定质量流率下，气相流速会增大，从而导致摩擦压降增大。在较高干度时，纯质 R50 和 R50/R170 混合物的流型大多处于平滑-环状流。该流型液膜较为平滑，流速的增大对汽液相界面湍流度的影响程度减弱，导致摩擦压降在较高干度区间受干度的影响程度减弱。

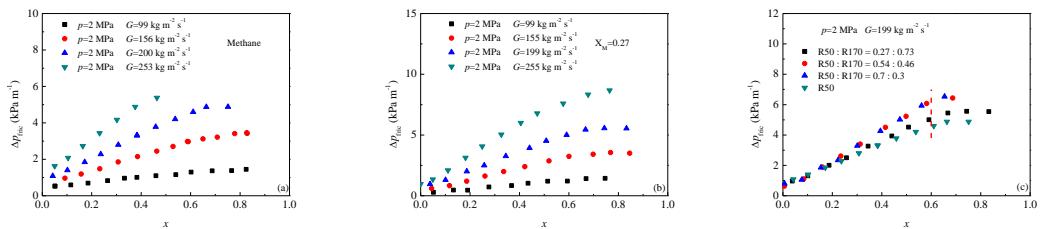


图 25. 甲烷及甲烷乙烷混合物的摩擦压降

## 1.2 氨水吸收式变温发生机理研究

图 26 中 COP 代表系统性能、 $\eta_{sep}$  代表分离效率、 $\eta_{wh}$  代表余热利用率，N 代表加热塔板数量，M 代表加热塔板上部不带加热，仅传质作用的塔板数，k 代表底部塔板的加热量占系统加热

量的比例。结果表明，分布式热源会降低系统的 COP，但是会大幅提高精馏塔分离效率和余热利用率，且随着  $k$  增长至 0.4-0.5 时，系统余热利用率可以达到原有系统的 2 倍多。同时加热塔板数越多，热量分布约均匀时，系统 COP 的降低趋势越缓慢，且在加热塔板上方增加部分不带传热塔板时，可以有效改善 COP。

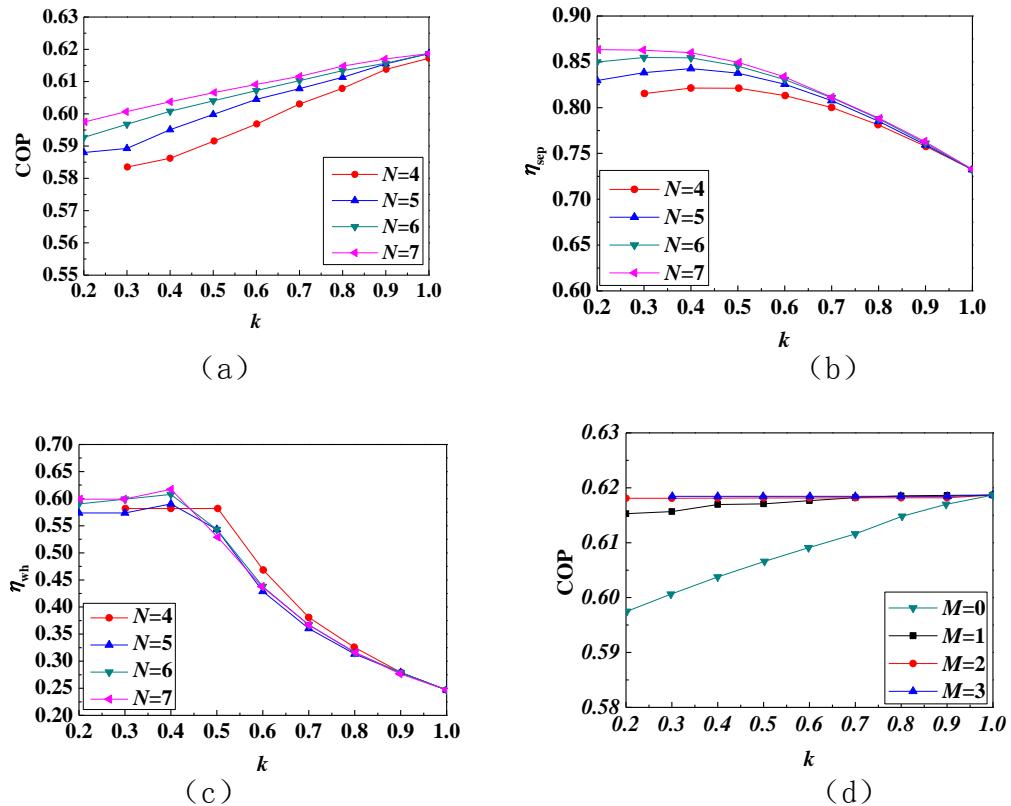


图 26. 模拟工况下各性能参数与发生器加热量占比的关系

### 1.3 混合工质节流制冷循环基础热力学问题

通过研究多温区混合工质节流制冷机 (Mixed-refrigerant Joule-Thomson refrigerator, MRJT) 及其各部分的热力特性，以及对比不同负荷下多温区 MRJT 与逆布雷顿循环 (reverse Brayton cycle, RBC) 的热力性能，获得了新的热力特性规律，用于指导实际应用。

分析结果表明，MRJT 在 80-180 K 温区内以及各自最优的条件下，

一次节流循环构型的熵效率略高于带相分离器的一级分离循环，但二者由中高温区至低温区性能均明显衰减，与其缺乏合适的低沸点工质，回热与节流过程熵损急剧增大有关。在 MRJT 循环内部，压缩机和后冷却器在不同工况和工质配比下熵损失比例变化不大；回热过程熵损失比例最大，且随着制冷温度降低回热器负荷增大而显著增大；节流过程熵损失比例与节流前过冷度或干度密切相关；回热和节流过程在较低制冷温度下由于缺乏合适的低沸点工质（工质中加入 Ne 后）而急剧恶化。该结论为 MRJT 适用温区的确定提供了参考。

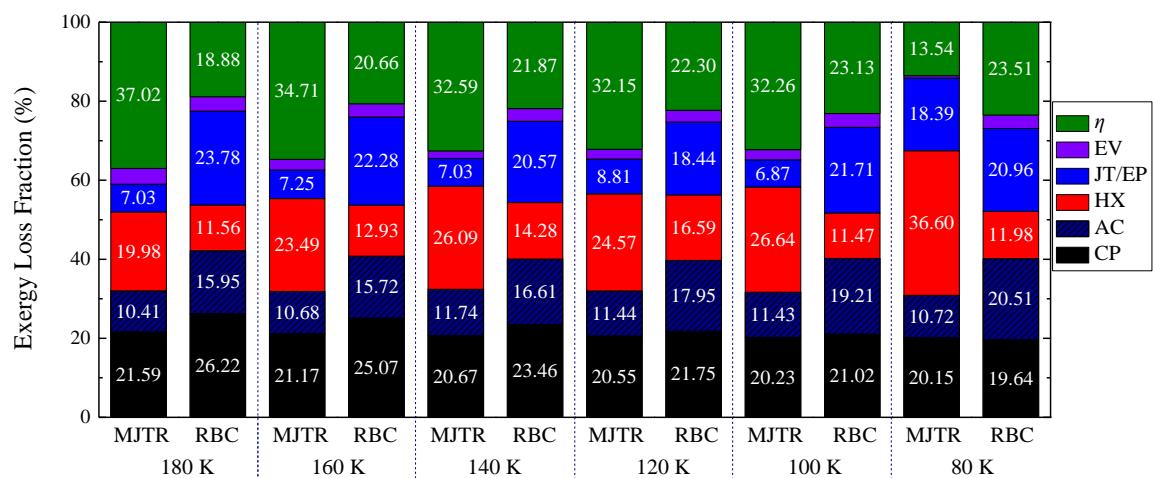


图 27. 固定温度热负荷 80-180 K 温区 MRJT 与 RBC 各部件处熵损失所占比例

## 2. 核心技术研究

### 2.1 换热器技术

低温多股流换热器是天然气液化系统的核心设备。绕管换热器具有温度自补偿、耐高压、易于大型化等优点而被广泛应用，是目前海上天然气液化平台的首选换热器。因此，为进一步掌握

天然气液化技术，运用先前已获得的实验数据，结合数值模拟研究，设计并优化了一套实际工程应用的绕管换热器，如图 28 所示。



图 28. 多股流绕管换热器实物图

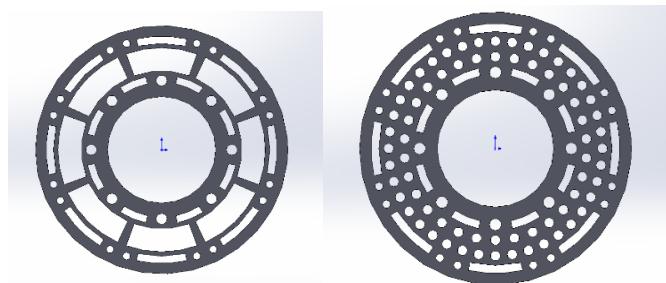


图 29 多孔板布液器及固管板

绕管换热器由 69 根紫铜管缠绕 9 层而成。为确保壳侧液体分布均匀，在壳侧流体入口处布置了如图 29 所示的多孔筛板，换热器的具体结构参数如表 1 所示。

表 1. 多股流绕管换热器结构参数

参数	值	参数	值
传热管外径 mm	2	芯筒外径 mm	30
传热管内径 mm	1	外壳内径 mm	70
轴向间距 mm	2.5	外壳高度 mm	450
径向间距 mm	2.3	绕管长度 mm	3800

## 2.2 液化厂站余热利用技术

提出了一种变温热源驱动的新型氨水吸收式制冷技术，该方案的核心思想是充分利用传统氨水吸收式制冷系统中的不可缺少的组件——精馏塔，通过将余热资源的换热结构从单一的发生扩展到精馏塔的提馏段，来增大系统的对余热资源的利用温跨，从而提高余热利用率。该研究可以利用与孤立气源的天然气站点，这些站点远离电网，目前大多数采用燃烧天然气产生电能，一次供给预冷、主冷单元液化天然气。而采用本方向的研究成果后，可以将燃烧天然气的高温尾气加以利用，供给预冷级，从而减少电能需求，进一步减少了燃烧过程的天然气消耗，如图 30 所示。除此之外，本方向也可利用在绝大多数中低温余热场合，且由于本方向采用改进设备的形式提高了余热利用率，整机的可靠性和成本相较于一般的双级、GAX 系统都具有很大优势。

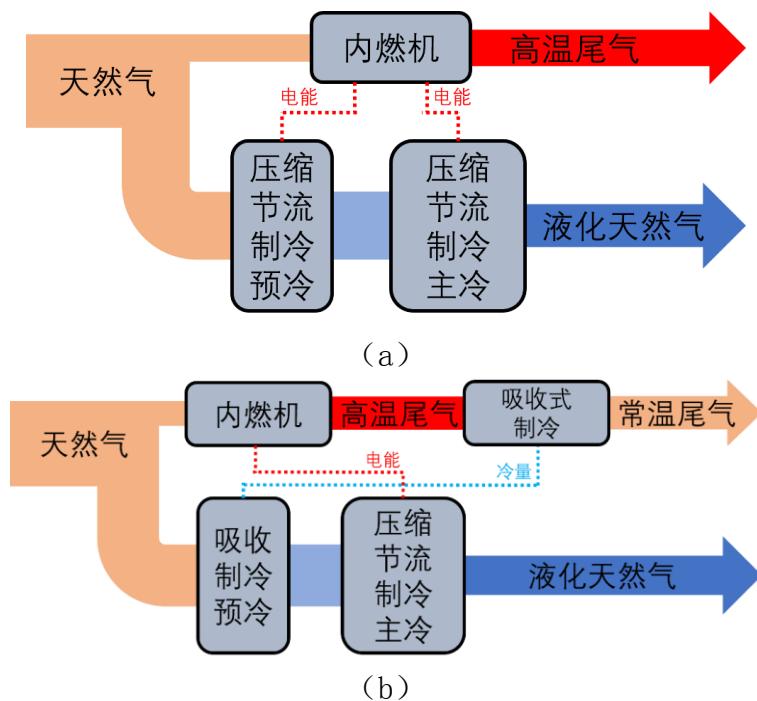


图 30. (a) 传统孤立气源的天然气液化场站 (b) 改进孤立气源的天然气液化场站

具体的实施中，首先开展了模拟研究，采用分段不同温度加热的方式模拟变温热源驱动的热源条件。通过改变热源分布状态、各加热段热量，分析不同发生条件下的系统性能、火用效率、余热利用率等参数。新型发生器的示意图如图 31 (b) 所示。传统发生器结构如图 31 (b) 所示，其主要加热段为塔底，热源的最低出口不得低于塔底温度，相比与此，新型发生器的热源出口温度的限制条件则为温度更低的塔顶温度。

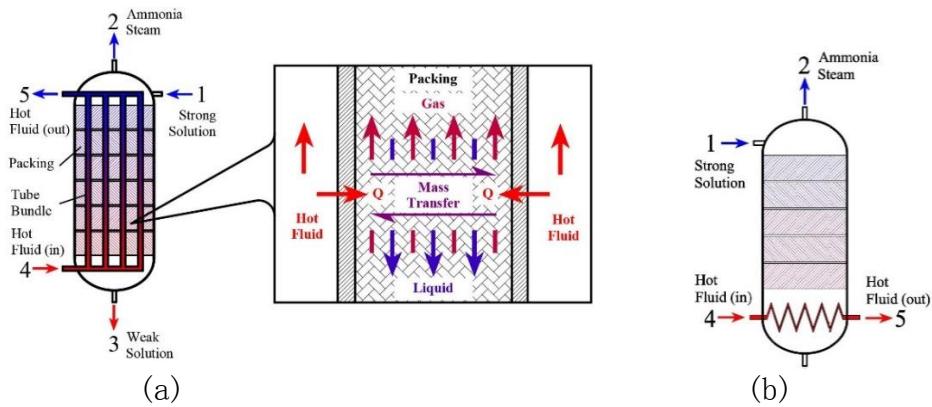


图 31. (a) 新型发生器结构示意图 (b) 传统发生器结构示意图

### 2.3 适用于小型装置和低压气源的气体液化和分离流程

基于提出的液化分离流程，搭建、测试并改进了一套小型全风冷可移动式液氮装置样机。样机的主冷、预冷和氮气载冷循环均采用商用单级油润滑普冷压缩机驱动，且无需冷却水，并可以瓶装氮气或小型商用空压机作为气源，以小型填料空分塔进行氮氧分离。采用组合式除油系统可有效保证氮气载冷循环正常运行。同时对样机进行了性能测试，使用瓶装氮气时比功耗为  $1.79 \text{ kWh L}^{-1} @ 0.8 \text{ MPa}$  (a)，若采用配套的 PSA 作为气源其比功耗估计值为  $2.68 \text{ kWh L}^{-1}$ ；而在使用小型空分塔时系统比功耗为  $4.59 \text{ kWh L}^{-1}$ 。

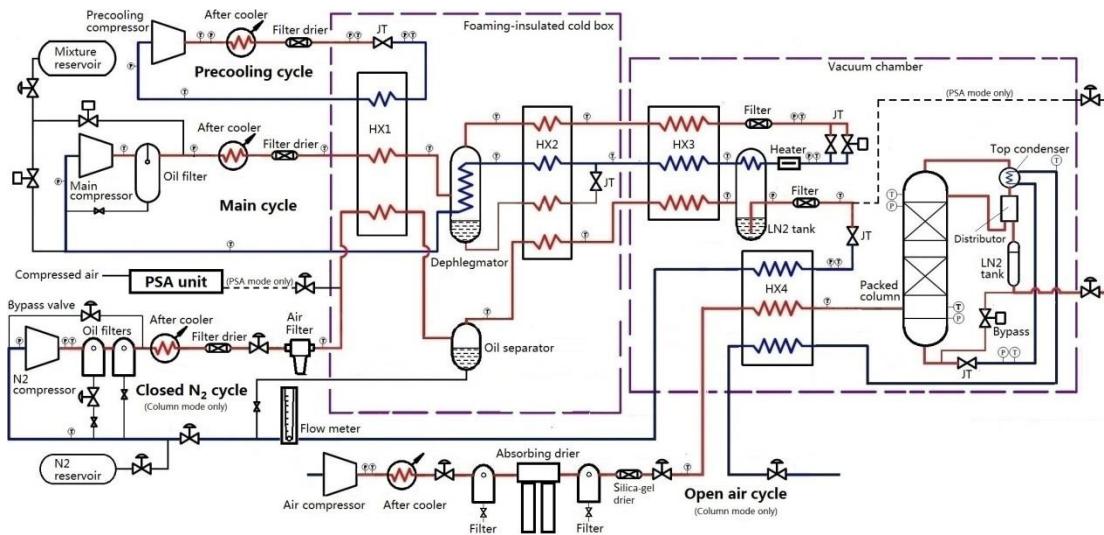


图 32. 小型液氮装置样机流程示意图

### 3. 样机开发及现场应用

陕西榆林 6 万方/天液化项目现场顺利开机达产。获得了新的 15 万方/天、6 万方/天 LNG 项目合同 2 个（由实施单位中科睿凌北京低温设备有限公司具体执行），预计实施后，合计形成 900kNm<sup>3</sup>/d 液化应用规模。



图 33. 陕西榆林 6 万方/天液化项目现场

## （二）下一步工作计划

### 1. 基础研究及液化技术方面

进一步完善混合工质传热和物性方面的研究，测试 LNG 温区工质的综合热流动特性，热物理粘度密度预测机理机制。

5-10 L/h 混合工质液氮装置的技术的完善和优化，完善空气分离系统，探索以全不可燃工质气体为制冷剂的液化装置并进行试验测试，探索含氧气体安全液化技术体系的可行性。

推进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研究，着重整个温区的热力性能对比研究，指出各类制冷循环构型的优缺点和选择方法。

测试变温驱动的发生器，利用升级的实验平台进行实验，实现基于载热流体连续变温发生的吸收式制冷系统。完善氨吸收理论及技术体系。设计搭建 50kW 供热量的吸收式热泵实验样机，为进一步各种工况下的实验研究打好基础。

## 2. 应用方面

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：本季度在研项目 11 项，组织协调会议 3 次。

## （一）本方向本季度重要进展

### 1、发现液态金属焊接纳米颗粒效应

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 34）。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，因此研究小组将其命名为“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在 *Advanced Materials Interfaces*, 2018: 1800406。(封面文章)。

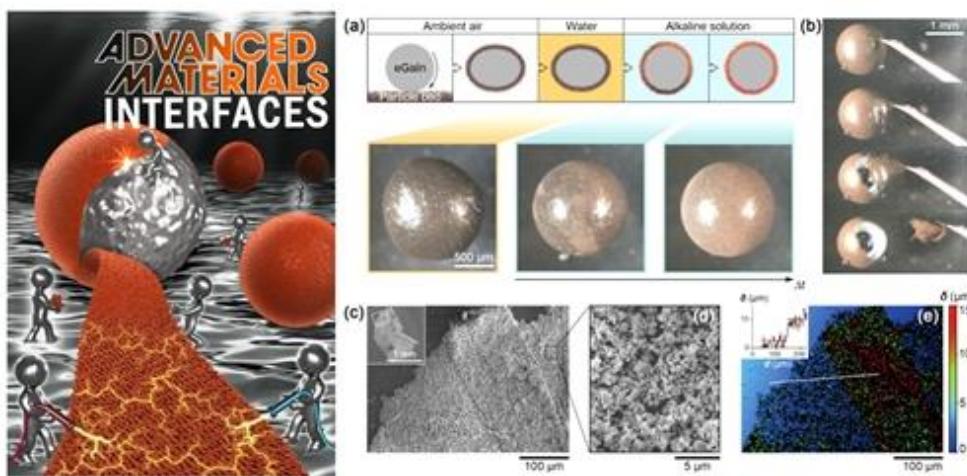


图 34. 期刊封面故事及其反映的由液态金属焊接纳米颗粒效应生成的多孔网状材料

## 2、发现铜离子激发的自生长液态金属蛇形运动

研究组首次发现了一种崭新的自生长液态金属蛇形分散效应。在前期研究中，液态金属自驱动机器、表面 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，这些变形行为更多是作为一个整体呈现。此次发现的效应，则是一种不同于以往的大尺度液态金属离散变形与蛇形运动，革新了人们对液态金属空间构型转换方式的认识。

研究表明，在酸性铜盐溶液中，一团液态金属可以自发生长出大量细条状的伪足并像蛇一样运动（图 35）。此现象背后的机理主要在于，因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，这会改变液态金属的表面张力，从而产生不平衡的界面压差，最终导致了蛇形运动的发生。这里，溶液的酸性对实验结果影响巨大。在合适的酸性条件下，可通过调节酸性的强弱去控制蛇形液态金属的生成和运动速度。而且，此蛇形运动可被多次激发，大大增加了运动的持久性。研究进一步揭示，酸性铜盐溶液这一独特环境保证了无数的铜颗粒可以被持续稳定的析出和吞噬，此类动态平衡是蛇形分散运动现象得以发生的深层次原因。该现象丰富了液态金属物质世界的科学图景，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。相关研究成果发表在 ACS Applied Materials & Interfaces, DOI: 10.1021/acsami.8b07649。

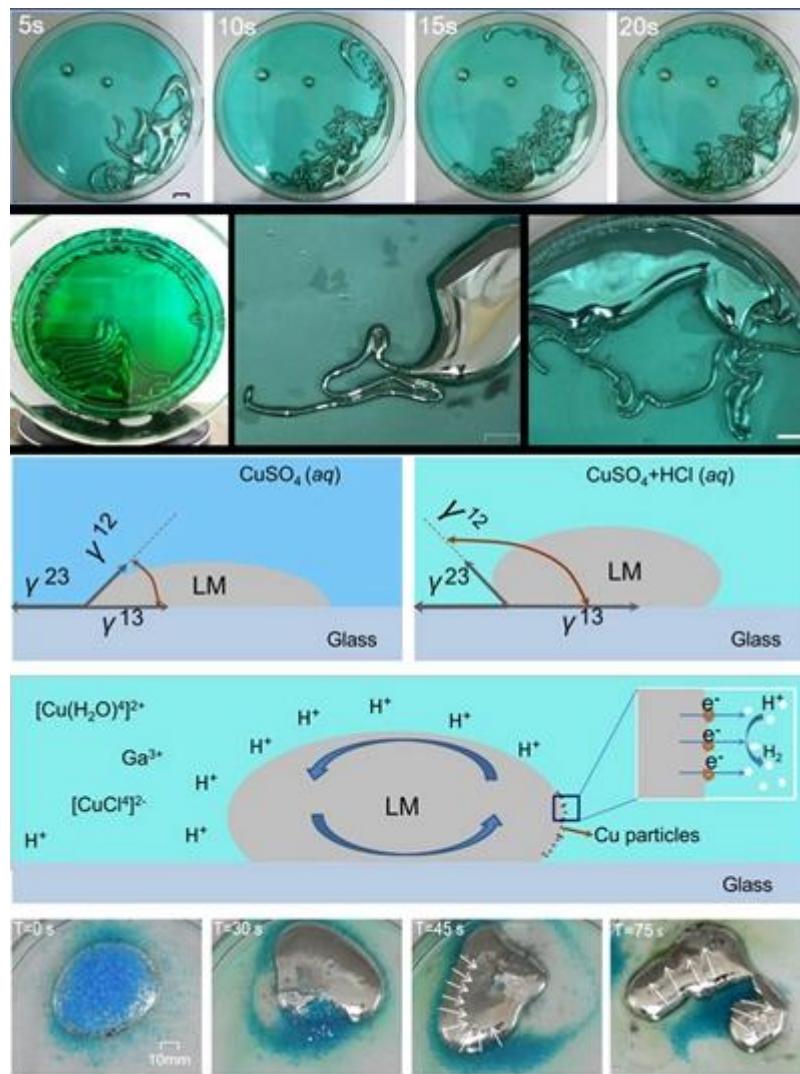


图 35. 自生长型液态金属分散效应、蛇形运动现象及部分机理解析

### 3、开发出系列液态金属先进应用技术

研究小组近期在液态金属先进应用技术研究方面取得系列新进展, 先后针对肿瘤治疗用生物医学新材料(图 36, Wang et al., *Advanced Healthcare Materials*, 2018)、高性能电子墨水(图 37, Chang et al., *Advanced Materials Interfaces*, 2018)、可穿戴医疗(图 38, 封面文章, Guo et al., *Adv. Eng. Mater.*, 2018)、可拉伸皮肤电子(图 39, Guo et al., *Science China Technological Sciences*, 2018)以及柔性机器人传感与控制(图 40, Guo et al., *Smart Materials and Structures*, 2018)等

新兴领域的紧迫现实需求发展出系列重要实用技术。

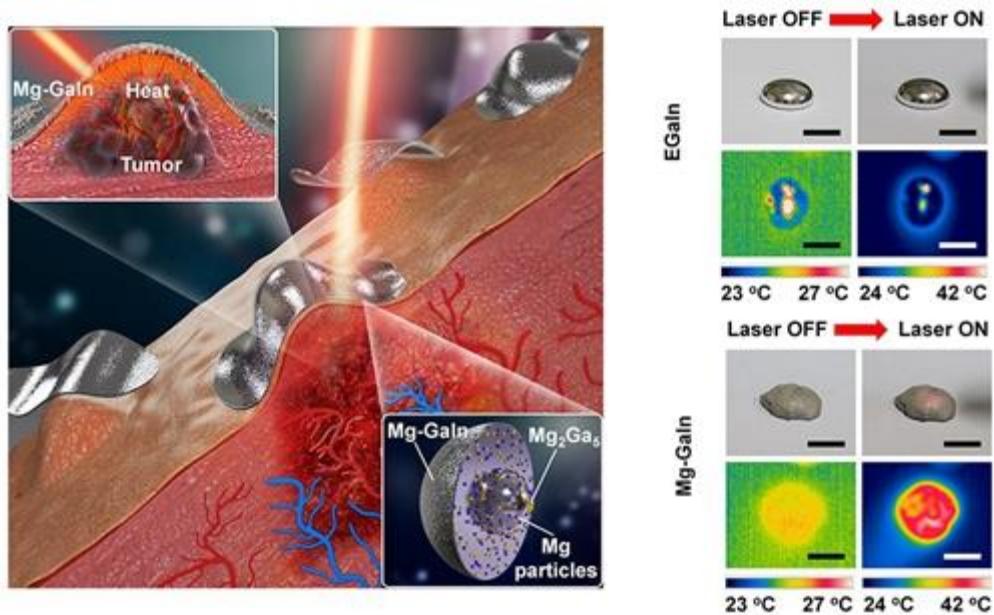


图 36. 镁基液态金属皮肤涂层材料及其用于近红外激光消融治疗肿瘤原理及应用情况

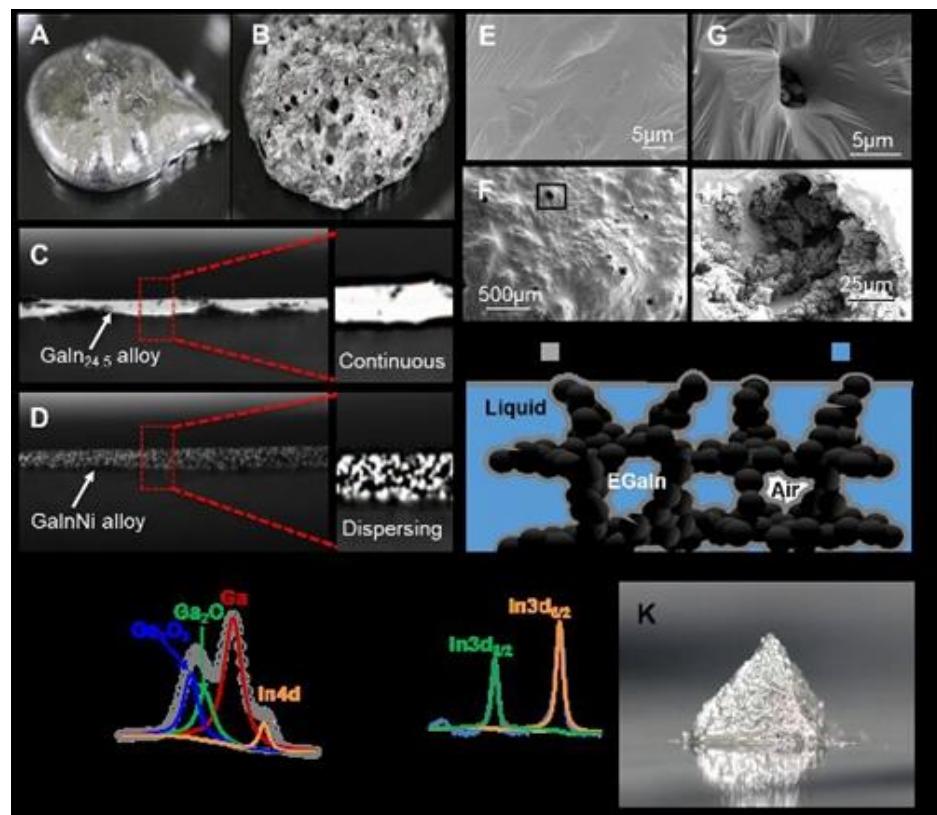


图 37. 具有良好印刷特性的高性能镁基液态金属电子墨水材料

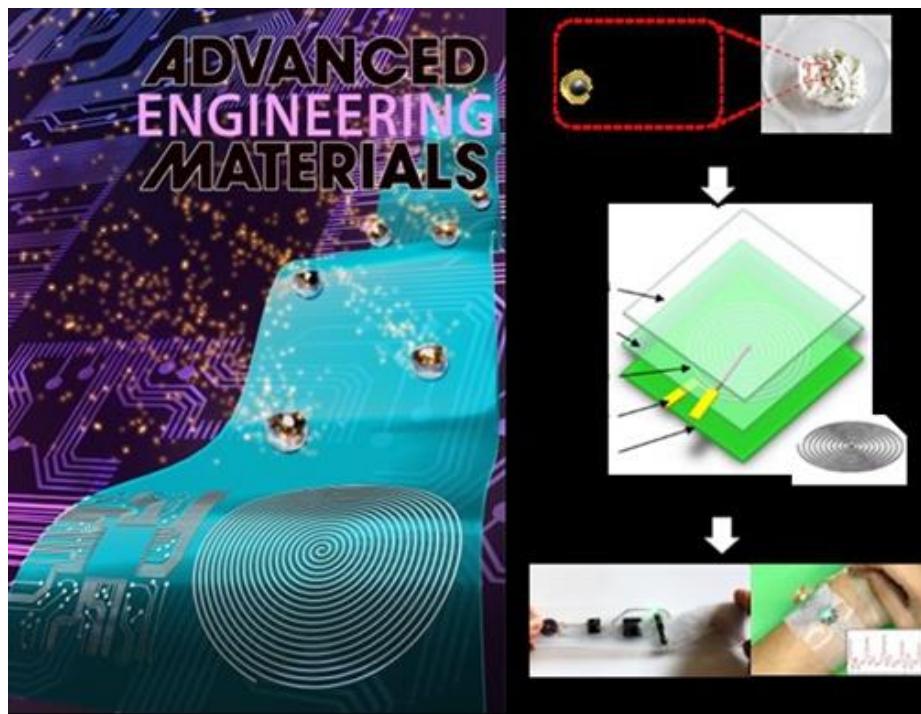


图 38. 期刊封面故事及其反映的用于可穿戴及无线健康监测的液态金属柔性电子

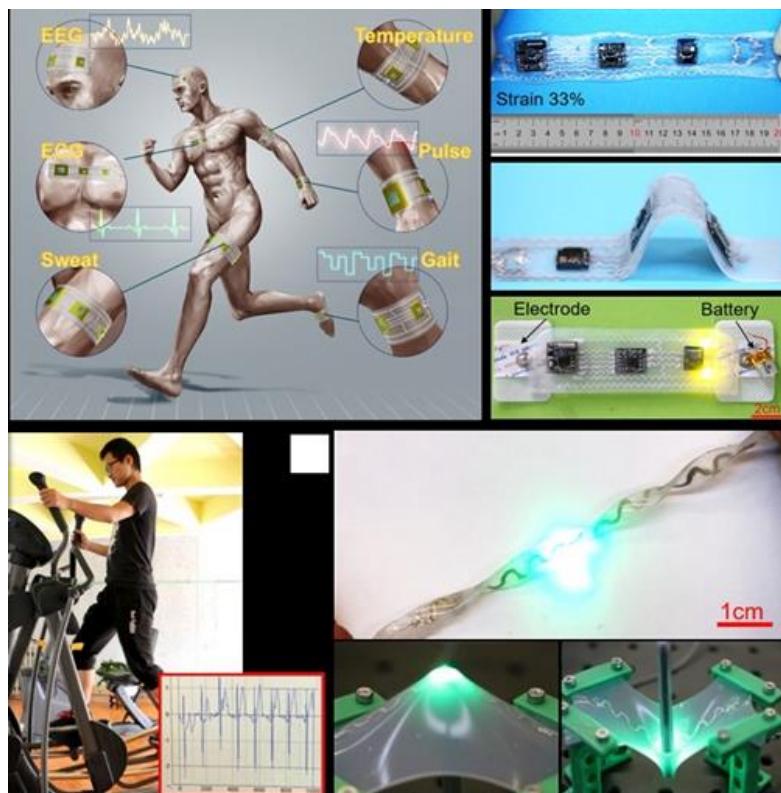


图 39. 基于褶皱结构的高顺应可拉伸液态金属皮肤电子及其健康监测应用情形

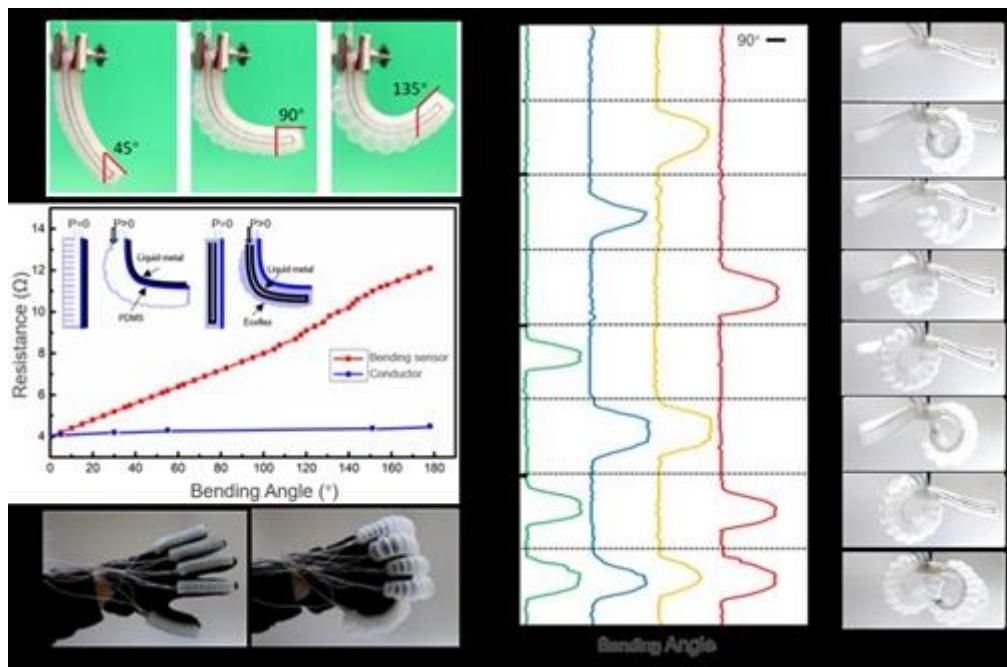


图 40. 用于柔性执行器的液态金属传感器及其响应情况

#### 4. 液态金属/水双流体的非传统流体力学研究取得新进展

镓基液态金属在外场作用下的运动和变形是一种由于表面张力梯度而引起的界面流动；与传统的流体运动不同的是，液态金属在溶液中大尺度运动和变形具有非接触、化学驱动、多场耦合、边界复杂、大尺度变形和大密度差等特点。对液态金属/水混合流的流体力学特性进行定量描述并构建液态金属大尺度可逆变形与运动的基础理论，对于深刻认识液态金属变形机理和构建复杂的多功能液态金属柔性机器至关重要，同时对于液态金属柔性电子打印、液态金属混合流散热、液态金属制氢等领域的发展也将起到积极推动作用。相关研究成果发表在 *Frontiers in Energy*, 2018(4):1-21。

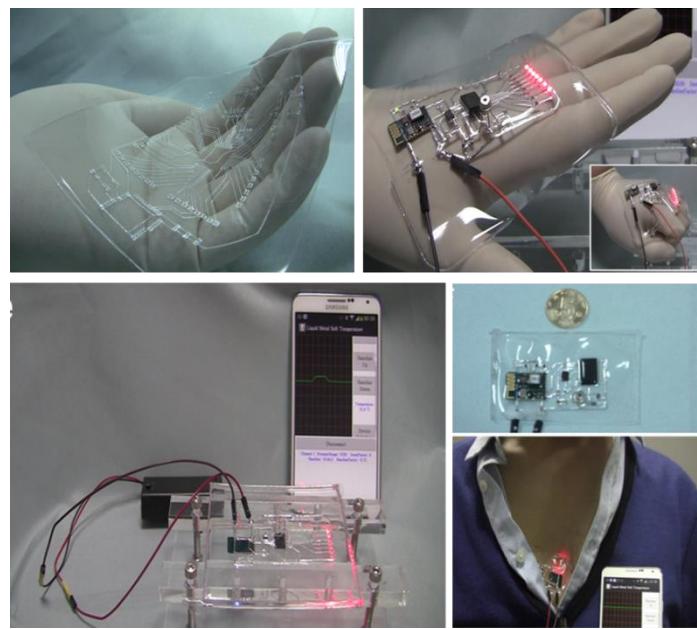


图 41. 利用转印方法打印并集成的柔性可编程腕带及采用手机操控的微型无线红外测温仪

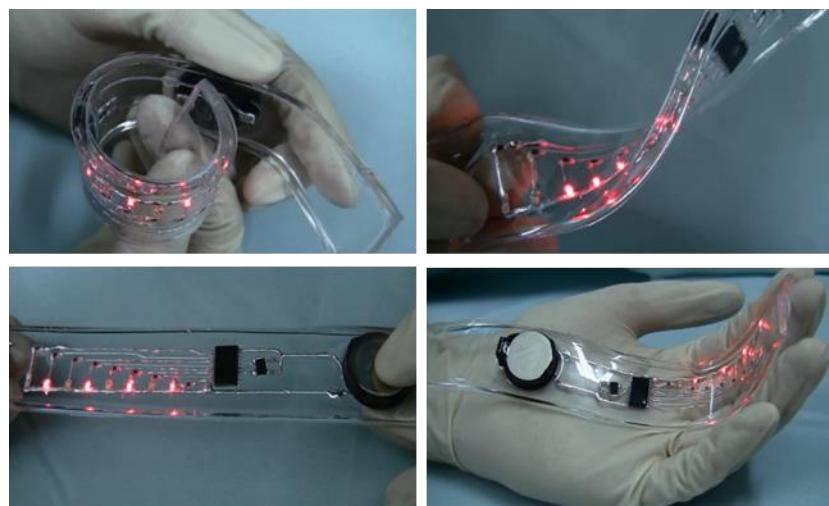


图 42. 基于相变转印效应制备的液态金属柔性电路[29]在卷曲、扭转、拉伸及柔软顺应状态下均能正常工作

5、应邀于国际传热学权威年鉴《传热学进展》发表液态金属冷却技术长篇评述

传热学领域国际权威年鉴《传热学进展》(Advances in Heat Transfer) 在线发表了中科院理化所与清华大学联合小组关于“液态

“金属先进芯片冷却与热管理技术”的长篇评述（*Advances in Heat Transfer*, 2018），文章第一作者为理化所博士生杨小虎，通讯作者为刘静教授。

《传热学进展》是由 Elsevier 出版发行的具有悠久历史的年鉴系列，每 1-2 年刊发一期，每期收录 3-6 篇章节论著。自 1964 年创刊以来，国内仅有数位学者应邀为其撰写过章节。2018 年恰逢《传热学进展》有特殊纪念意义的第 50 卷，由国际传热界著名学者 Ephraim M. Sparrow 院士、John P. Abraham 教授和 John M. Gorman 教授担任编辑，邀请了美国佐治亚理工学院 Yogendra Joshi 教授、日本东京大学 Shigeo Maruyama 教授、美国明尼苏达大学 V. R. Voller 教授以及中科院理化所与清华大学的刘静教授撰写相关章节，内容涵盖反常传热学、数据中心冷却、射流冲击传热、碳基纳米材料传热、液态金属冷却等前沿研究方向。

此次受邀在《传热学进展》发表关于“液态金属先进芯片冷却与热管理技术”的论著表明了国际传热界对中国团队多年来的原创性工作的高度认可。在论著中，作者们全面介绍了液态金属对流冷却技术、低熔点金属相变热控与储能技术、液态金属热界面材料、液态金属双流体冷却技术以及由液态金属引发的组合传热学概念，并系统性阐述了基本传热学理论、数值模型和计算方法、热物性测试技术、热控系统和装置、实验研究策略以及代表性应用等内容，指出了进一步可供探索的途径和新方向。该论著既是对前期研究工作的系统总结，也为推动液态金属冷却技术的持续发展和应用打下坚实基础。未来，随着

越来越多持续不断的研究和应用，液态金属冷却技术将在航空航天、能源系统以及众多民用设备领域的先进冷却与热管理中发挥日益重要的作用。

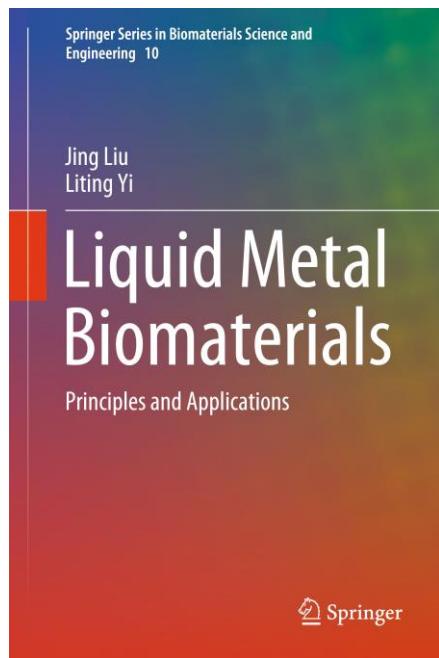
## 6、出版国内外首部《液态金属生物材料学》与《液态金属柔性机器学》学术著作

由刘静研究员带领的中国科学院理化技术研究所与清华大学联合研究组，经数年时间整理和撰写的两部英文学术著作《液态金属生物材料学》与《液态金属柔性机器学》，正式于知名学术出版机构施普林格(Springer)出版。两部著作均系国内外首部，填补了相应学术文献空白。

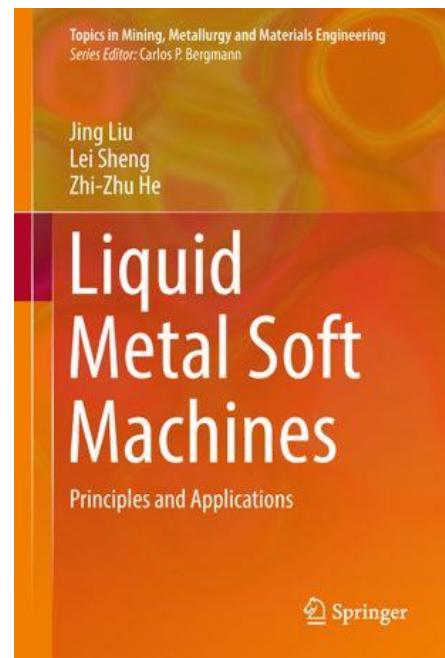
近年来，液态金属研究日益渗透到自然科学与工程技术的多个领域。在生物医学与健康技术领域，独特的液态金属更为此带来观念性变革。针对若干医学难题和技术挑战，联合小组率先开展了一系列有益尝试，有关成果在国际上持续引发重大反响。考虑到液态金属对于发展新兴生物医学技术的重要启示意义，联合小组应邀撰写出版了《液态金属生物材料学》一书，系统构建了液态金属生物材料学领域的理论与技术体系，总结了液态金属作为生物医用材料所呈现的独特优势和应用特点，对国内外在液态金属生物材料学方面的研究概况与典型进展进行了系统归纳和综合评述，并剖析了这一新兴领域面临的科学技术挑战及未来发展方向。

此外，不同于上述主题的是，此次出版的《液态金属柔性机器学》著作，则旨在系统讲解实验室于世界上首次发现的一系列全新的液态

金属机器（液体机器）、自驱动机器、过渡态机器或微型马达、固液组合机器的基本原理乃至构筑各类可变形机器应用技术的全貌。《液态金属柔性机器学》著作的适时出版，可望积极促进国际上相关科学探索和技术研发向纵深发展。



《液态金属生物材料学》著作封面



《液态金属柔性机器学》著作封面

图 43. 著作封面

## （二）下一步工作计划

- 1、研究镍、铁等金属的液态金属焊接纳米颗粒效应，并建立相应的液态金属编织多孔导电颗粒网。
- 2、进一步研究自生长液态金属蛇形运动的机理，实现蛇形运动的可控调节。
- 3、进一步拓展液态金属在医疗、柔性机器、可穿戴电子领域的应用。