

# 中国科学院理化技术研究所“一三五”规划

## 季度进展报告

2019 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 .....	5
培育一 光化学转换与光化学合成 .....	15
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 .....	26
培育四 分散能源气体液化分离技术与应用 .....	29
培育五 液态金属材料前沿技术 .....	40

## **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 38 项；招聘光学博士 2 名，招聘光学和机械设计专业劳务派遣人员 5 名；召开调度会议 12 次；改造中关村园区科研场所 400 平米。

### **(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 9 项；设置赵密广为中心副主任；招聘测试劳务派遣人员 2 名；共召开 18 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、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 1 项，即“液氦到超流氦温区大型

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. 透平膨胀机方向：**完成了 2500W 六个透平膨胀机机芯的组装及厂内调试工作，完成了 2500W 轴承气、透平气过滤器的验收及组装工作，完成了 2500W 制动端的验收及组装工作，完成了 2500W 六个透平膨胀机厂内测试并具备出厂及安装条件，完成了 2500W 所有透平在冷箱上的安装工作并完成了常温升速实验。完成了 1000W 氦透平制动端的验收工作，完成了 1000W 轴承气、透平气的过滤器的验收工作。完成了新 2500W 透平的叶轮三维设计工作及机芯部件的初步设计。完成了富海 400W 和 500W 四个膨胀机的一维设计及机芯部件设计工作。

**2. 冷压缩机方向：**共进行了 5 次冷压缩机第一轮样机在性能测试平台上的实验，对实验数据特别是漏热数据进行了分析讨论，在此基础上，完成冷压缩机正样设计、优化，正在加工，预计 7 月验收。

**3. 冷箱方向：**开展 500 W@2K 冷箱现场集成，开展 1000W 冷箱现场集成，完成新 2500W 冷箱集成现场准备工作。

**4. 集成与调试方向：**2500W@4.5K/500W@2K 制冷机：实现整机系统总装，完成各个焊口进行探伤和打压特检工作，完成特检所的压力管道渗透检测和压力管道使用证的材料上报工作，等待廊坊特检所办结出证；完成制冷机系统的检漏和置气工作；完成所有压

力传感器、安全阀、流量计等的检定，确保在一年有效期内；高压压缩机运抵廊坊至 2019 年 6 月 30 日，已运行累计时长 154 小时；实现压缩机组数据、冷箱真空度、冷水机组数据、气体纯度等的远程传输和存储；实现冷水机组和压缩机组的远程开启和停机；整机调试从 2019 年 5 月 28 日开始，完成压缩机小循环，实现压缩机小循环 6 个气动阀门 PID 参数整定，压缩机组性能测试（除高压大于 15.5bara 以上），完成制冷机系统气体纯化，使水、氮、碳水化合物总含量小于 5ppm，油含量小于 1ppb；依次解决高压压缩机平稳运行中的四次停机故障，完成压缩机组 72 小时测试；完成系统冷箱中循环，透平常温在线测试、气动调节阀 PID 参数整定、实现气体纯化模式和快速降温模式。

多透平与换热器组耦合调控平台（即新 2500W@4.5K 制冷机）：结合兰州近物所的实际用户条件，完成向兰州近物所提供 HFRS 初步设计报告以及三维布局设计方案。

1000W@4.5K 制冷机：与中科富海中山基地确认并完成在中山基地的布局方案和调试计划。

**5. 压机寄滤油方向：**负压压缩机及配套的滤油器按计划进行；豪顿压缩机和冰轮压缩机发货至指定地点。配合集成方向完成 2500W 压缩机的连续运行考核。

**6. 流程设计方向：**完成 2500W@4.5K 制冷机冷箱部分桥架的搭建和布线工作，编写了模拟负载加热电源的 PLC 控制程序和冷水机与 PLC 控制系统的远程通讯程序。

## (二) 下一步工作计划

**1. 透平膨胀机方向:** 依据整体进度安排, 继续完成 2500W 氦制冷机透平膨胀机的低温测试, 开展 2500W 制冷机的透平调试工作; 完成 1000W 氦透平膨胀机机芯的组装及厂内调试工作, 并完成出厂前的全部测试, 根据冷箱集成整体进度, 完成膨胀机的冷箱安装工作。按合同进度要求继续推进富海 400W 和 500W 四个膨胀机的研制工作。

**2. 冷压缩机方向:** 完成自主研制的冷压缩机正样在性能测试平台上的集成组装和调试, 获得了项目任务书要求的性能指标。冷压缩机样机、正样及测试平台搬运回廊坊中试基地, 和 2500W@4.5K 系统集成组装并进行相应的性能实验。

**3. 冷箱方向:** 完成 500 W @2K 冷箱现场集成, 开展新 2500W 和新 250W 现场集成工作, 完成 1000W 冷箱现场集成

**4. 集成与调试方向:** 2500W@4.5K/500W@2K 制冷机: 开展制冷大循环调试实验: 完成气体纯化模式和杜瓦快速降温模式, 完成气动调节阀 PID 参数整定, 完成液化模式和制冷模式, 评估得到 2.5kW@4.5K 制冷能力。完成 500W@2K 系统的组装总成, 检漏、打压和置气工作, 并开展 500W@2K 系统的调试工作。

多透平与换热器组耦合调控平台 (即新 2500W@4.5K 制冷机): 完成兰州近物所的招标工作, 完成向兰州近物所提供工程设计报告, 并进行专家评审。

1000W@4.5K 制冷机: 在中山基地开展制冷机的现场布局设计,

完成现场常温管道连接和 1000W@4.5K 制冷机的组装总成。

**5. 压机寄滤油方向:** 压机滤油方向第三季度计划: 完成负压压缩机及配套的滤油器; 根据集成进度, 配合新 250W 平台、1000W 平台和新 2500W 平台进行压缩机滤油方向的工作。

**6. 流程设计方向:** 开展 2500W@4.5K 制冷机控制系统现场调试, 实现了透平膨胀机的 PID 自动控制, 配合整机系统完成多次现场试验, 证明控制系统完全能够满足 2500W 制冷机实验及调试要求。

## 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。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, 取得了一系列研究成果, 发表 SCI 论文 26 篇, 包括 Chem. Soc. Rev. 1 篇, Nat. Commun. 2 篇, J. Am. Chem. Soc. 1 篇, PNAS 1 篇, Adv. Mater. 2 篇, Adv. Funct. Mater. 2 篇, ACS Nano 2 篇。

### (一) 本方向本季度重要进展

#### 1. 仿生超浸润界面材料

(1) 液体的虹吸效应其本质是利用液面的高度差, 通过一个 η 形的管道, 将液体从开口高的一端转移到开口低的一端。在明朝时期, 我国利用虹吸效应发明了一种瓷制酒杯。此杯内部有一条水位线, 当杯内液体低于水位线时, 这是一个正常的容器; 高于水位线时, 杯内的液体会通过虹吸效应从杯底漏光。如今, 虹吸效应已经广泛应用于人们的生活, 如我们日常使用的意式咖啡壶、洗手池、马桶等。尤其是在利用虹吸效应给鱼缸换水时, 我们通常需要先在

管内加满水，再将其插入缸中；或者对着水管猛嘬一口来实现水的填充。我们似乎已经对这些操作习以为常，但如果能实现自虹吸效应，那么就能轻松解决很多管道流体输送的难题。而实现自虹吸效应的关键在于增强液体在虹吸管中的毛细上升高度与毛细上升速度。在之前的研究当中，我们制备了仿生猪笼草结构成功解决了水的逆重力定向爬升难题。

在之后的研究中，我们惊喜地发现仿生猪笼草结构表面阵列化的倾斜微坑上能够自发地牢牢束缚一层水膜。由于这层水膜的存在降低了液体运输过程中的粘滞阻力，后续滴加的液体的输运速度可以被提升两个数量级。根据这一特性，我们仿生制备了一种内壁具有猪笼草结构的管道，用于大幅增强了水在管道内的毛细上升高度与毛细上升速度，为液体的自虹吸效应打下了坚实的基础。这是因为猪笼草管道内壁束缚的水膜不仅充当润滑层降低了毛细上升时的粘滞阻力，而且在将管壁的浸润性由亲水转变为超亲水的同时还减小了管道的内径。猪笼草管道的神奇之处不止于此。不同于公道杯需要将杯具或管道预先充满水来触发虹吸效应。只需将仿生猪笼草管道进一步弯曲成拐杖形，少量的水就能在增强的毛细上升作用下自发充满整个弯曲的毛细管实现了液体的自虹吸效应。这种依靠内壁结构增强的毛细上升实现的自虹吸效应无需外部能量输入便能对液体进行长距离，高通量，跨重力势垒的连续输运。该研究将激励新一代的流体装置的发展，并且在抽水灌溉、排水防涝、油箱换油等方面具有重要的应用前景（*PNAS*, **2019**, *116*, 12704）。

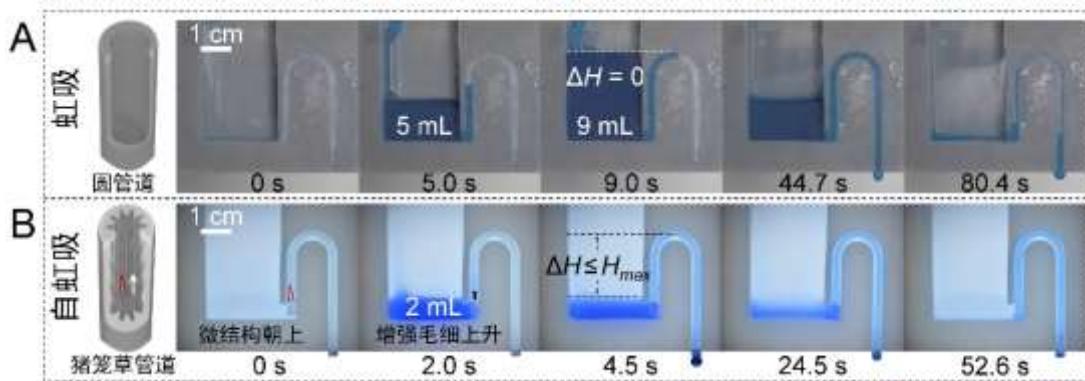


图 1 (A) 光滑圆管触发的虹吸效应 (B) 仿生猪笼草管道触发的自虹吸效应

(2) 传统的 Hodgkin-Huxley 模型认为, 神经信号传输是通过动作电位沿着神经元轴突进行传播, 动作电位是由  $K^+/Na^+$  在  $Na/K$  泵的离子扩散产生的, 而其余大部分  $Na/K$  泵是静止的。这种离子流体是熵驱动的无序流体, 离子扩散过程需要消耗大量能量, 类似于多米诺骨牌效应, 传播速度相对较慢 ( $\sim 1 \text{ m/s}$ ), 不适用于解释神经信号的超快传输。

因此本工作以“Quantum-confined ion superfluid in nerve signal transmission”为题在 Nano Research 发表文章, 提出了基于量子限域离子超流体 (QISF) 的神经信号传输过程, 认为 QISF 是焓驱动的限域有序流体,  $K^+/Na^+$  同时在所有  $Na/K$  泵通道进行快速传输, 离子传输过程没有能量损耗, 并产生沿着神经传输方向超快传播的钠钾离子密度波, 作为神经信号传输的信息媒介。QISF 波和动作电位在传播过程中不相干。同时发现  $K^+$  和  $Na^+$  的德布罗意波长比直径小一个数量级, 但原则上离子的德布罗意波长应远大于离子直径, 表明德布罗意波长公式不适用于描述离子在生物通道中的量子效应。QISF 过程的提出, 不仅为神经和大脑中超快信号传输的合理解释提供了新的视角, 而且对离子、分子和粒子的物质波理论提出了挑战 (Nano Res., 2019, 12, 1219-1221)。

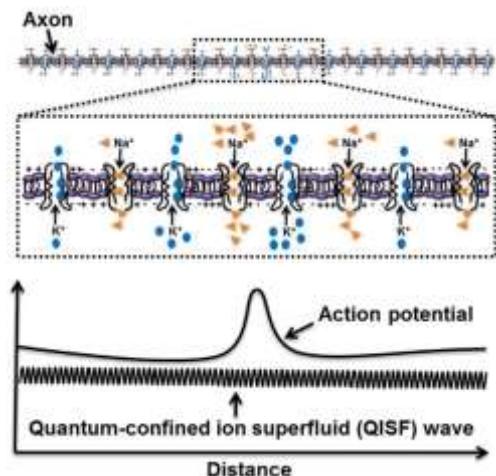


图 2. 神经信号传输中的钠钾离子密度波与动作电位

(3) 随着微纳制造技术的高速发展，微纳材料的性质特点和应用都得到了深入系统的研究。对于胶体颗粒而言，其拓扑学上的结构特点在很大程度上决定了他的性能。单一结构的胶体颗粒在许多领域中无法发挥出最佳效果，限制了其应用，而胶体颗粒的不对称修饰由于结合了不同材料的胶体颗粒的优势，同时有赋予其各向异性的性质，极大的拓展了其应用范围，提高了使用性能。

结合当前各向异性颗粒制备及应用研究领域的特点和问题，我们报道了在水-聚乙烯吡咯烷酮-戊醇体系中生长二氧化硅棒对胶体颗粒进行表面修饰的方法。具体方法为：通过湿化学方法，利用立方体 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 胶体颗粒做种子，通过硅烷前驱体在其表面的不对称水解，得到枝状的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3@\text{SiO}_2$ 复合材料。结果发现，二氧化硅棒状结构只选择性的垂直生长在立方体的各个面心上，我们通过实验和理论分析仔细探讨了其形成原因，提出了基于曲率选择的 spreading-dewetting 理论（如图 2 所示），并且采用了其他两种形状的胶体颗粒对这一理论进行了验证。同时，通过控制水解条件，我们进一步的控制了二氧化硅棒的生长数量，成功的得到了具有特定数量二氧化硅棒修饰的胶体颗粒，这为胶体颗粒的更复杂多元化开启了一条新的道路。该研究工作发表于 *Scientific Reports* 2019, 9, 8591。

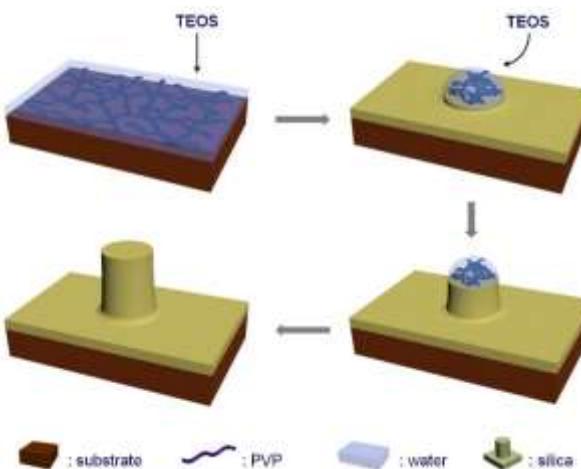


图 3. 二氧化硅棒表面修饰胶体颗粒机理图

## 2. 仿生纳米孔道

(1) 随着社会的发展，环境健康问题引起人们广泛的的关注。生活中的家具、纸张、化妆品、清洁剂等所散发出的甲醛对人体的健康构成重大威胁。例如，甲醛可以强烈刺激人的眼睛和鼻子，损害中枢神经系统，并通过影响 DNA 复制诱发癌症等。因此，对甲醛的高灵敏检测也显得尤为重要。目前检测甲醛的方法存在仪器设备昂贵、样品制备过程复杂、成本高及使用有机溶剂或浓酸等制约因素。所以，开发一款简单、灵敏且经济有效的传感器以检测不同环境中的甲醛是十分有价值的。在生命体中，生物通道对特定的离子或分子表现出非常高的选择性。受此启发，基于机械性能好、尺寸形状可控的固态人工纳米通道体系，通过在纳米通道内表面化学修饰乙二胺，制备了能高灵敏检测甲醛的智能响应平台，并成功应用于细胞培养溶液中的甲醛去除。这项工作为设计和开发具有特殊刺激响应的纳米通道材料提供了思路，在纳流器件、生物传感以及分子过滤器等方面具有潜在的应用价值。相关工作发表在先进功能材料杂志 *Adv. Funct. Mater.* **2019**, 29, 1807953。

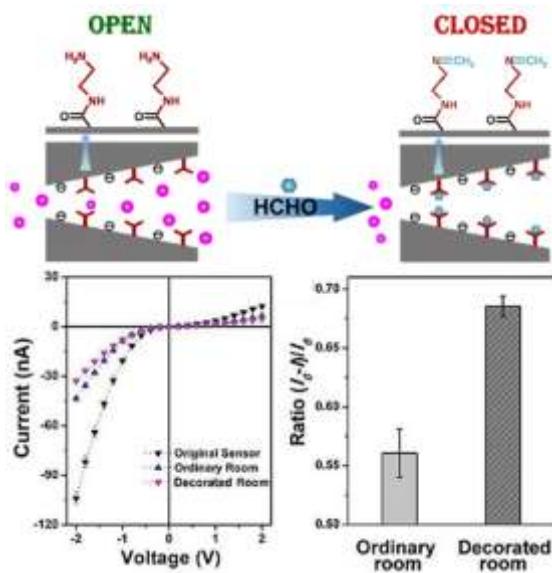


图 4. 基于仿生纳米通道膜材料的甲醛高效检测原理图

(2) 纳米孔/纳米通道在生物体系和人造材料中均普遍存在。基于尺寸限域效应及进一步的界面修饰，纳米孔/纳米通道可以实现多种多样的功能，例如选择性、门控、整流等等，这些功能主要来源于溶液中的离子/分子与纳米孔/纳米通道内壁的多种相互作用。本工作总结了离子/分子在纳米孔/纳米通中传输所涉及的基本原理，即尺寸/形状、浸润性、电荷、识别效应和其他相互作用。围绕这些基本原理从以下四部分介绍了纳米孔/纳米通道体系的典型应用：选择性分离，多响应性门控，能量转换，检测和传感。此外，还讨论了现阶段的典型挑战及某些应用领域中针对这些挑战的可能解决方法。以上结果总结发表在 *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 8658 上。

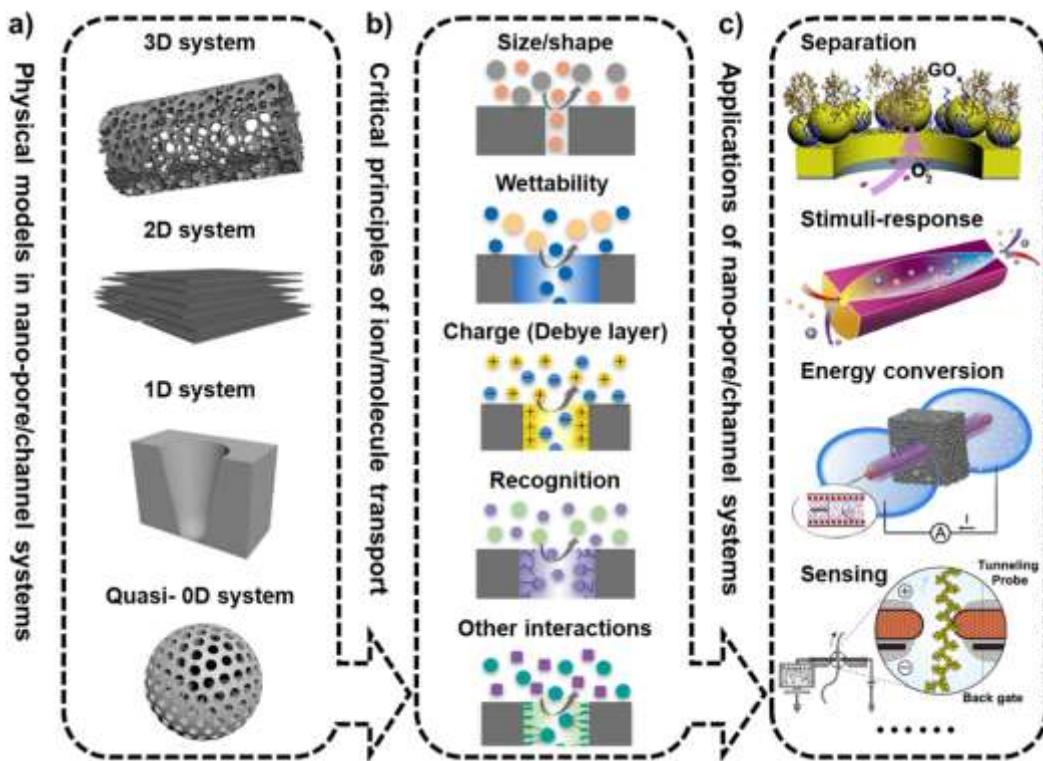


图 5. 离子/分子在纳米孔/纳米通中传输的机理图

### 3. 仿生粘附界面材料

(1) 分离用多孔微球在蛋白组学、蛋白识别、重组蛋白纯化、疾病标志物分子的检测领域具有广泛的应用。然而，传统的均质微球或分子层修饰的微球容易引起非特异性吸附，使得具有相近尺寸的蛋白分离仍然是一个挑战。我们报道了一种异质多孔聚合物微球。通过双乳液界面聚合的方法，在微球的表面及内部孔表面修饰了几十纳米厚的羧酸层，降低了潜在的非特异性吸附，从而实现了相近尺寸的蛋白分离。这种异质微球为生物分子的分离及后续的分析提供了一种新的思路。文章发表在 *Adv. Mater.* **2019**, *31*, 1900391.

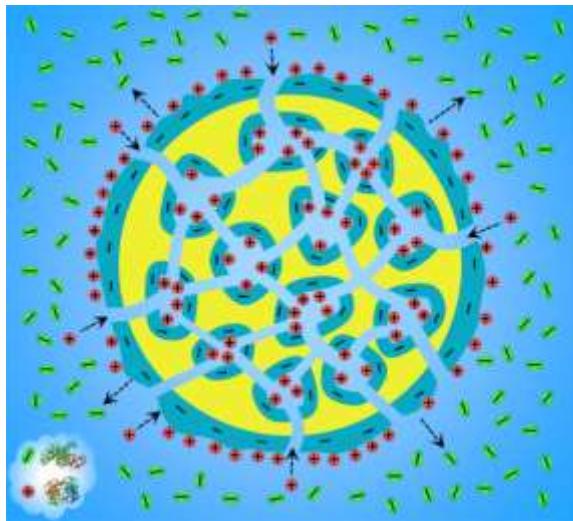


图 6. pH 调控的异质多孔聚合物微球用于相近尺寸蛋白的分离  
4.超浸润有机图案化材料与器件

通过非对称浸润性界面诱导，实现了大面积长程有序全无机钙钛矿  $\text{CsPbI}_3$  纳米线阵列的制备和高性能光电探测器的构筑。通过对硅柱模板的顶端和侧壁进行选择性的化学修饰，实现了对界面的浸润性调控。具有不对称浸润性的界面可以精准的控制钙钛矿前驱液的结晶位点和结晶方向，进而得到高结晶质量的全无机  $\text{CsPbI}_3$  钙钛矿一维纳米线，该纳米线具有单一的结晶导向，低的缺陷密度，长的载流子扩散长度。

此外，通过在钙钛矿前驱液中创造性的引入聚乙烯吡咯烷酮分子（PVP），极大的抑制了室温下立方相  $\text{CsPbI}_3$  ( $\alpha\text{-CsPbI}_3$ ) 钙钛矿的相变问题，大幅度提升了室温下  $\alpha\text{-CsPbI}_3$  的稳定性，使得在环境温度下利用  $\alpha\text{-CsPbI}_3$  变为了现实。基于此纳米线阵列，我们构筑了高灵敏度的全无机  $\alpha\text{-CsPbI}_3$  光电探测器 (*Adv. Funct. Mater.* 2019, **29**, 1808741)。

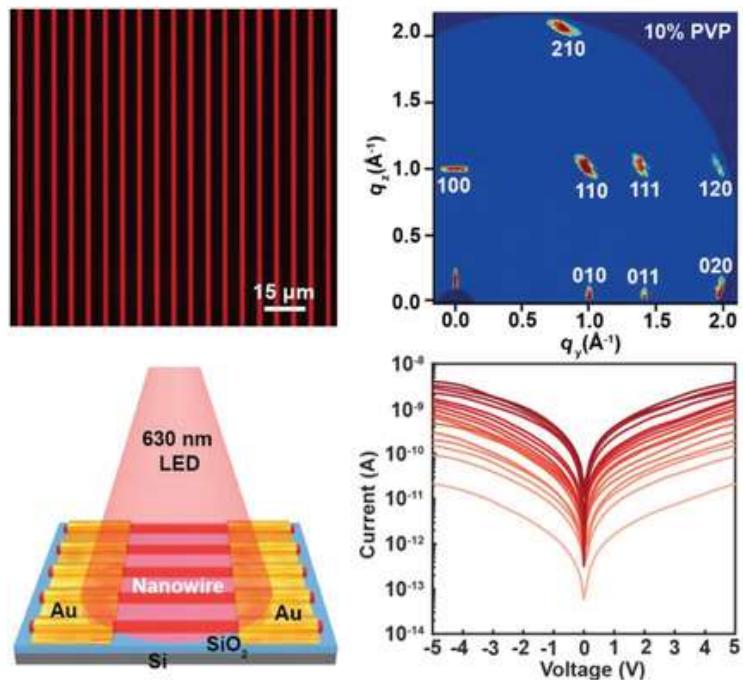


图 7. 基于不对称浸润界面诱导的方法操控全无机卤化物钙钛矿  $\alpha\text{-CsPbI}_3$  的图案化制备与结晶过程，实现了大面积一维钙钛矿纳米线阵列，同时制备了高灵敏度的光电检测器

## 5. 仿生微纳米结构的构筑和加工

(1) 水凝胶材料具有抗菌、生物相容性好、易于加工和可降解等特点，可模拟生物体生长的微环境，并且可以利用光聚合原理对其进行微纳结构构筑。因此，水凝胶材料是今后组织工程上可用作细胞支架的理想型生物材料之一。我们以聚乙二醇丙烯酸酯(PEGDA)作为光刻胶的单体，季戊四醇三丙烯酸(PE-3A)作为交联剂，二苯基乙二酮为引发剂以及 2-苄基-2-(二甲胺基)-4'-吗啡丁苯酮为光敏剂配制了光刻胶，并利用双光子聚合(TPP)实现了多种微纳结构加工。为了保证三维(3D)水凝胶支架的完整性和力学强度，我们通过改变水凝胶中交联剂 PE-3A 的含量，对其力学性能进行了优化，并在此基础上考察 3D 微结构的表面强度差异对细胞的生长状态的影响。为了进一步提高支架的生物相容性，在光刻胶中掺入了透明质酸钠 (SH) 和羧甲基壳聚糖 (Chitosan)且不经过任何化学修饰过程，直接作为细胞支架的制备材料，利用两者优异的生物相容性、生物降解性和药理作用为

细胞粘附、增殖和生长提供更适宜的微环境。

研究发现，当光刻胶中 PEGDA 单体和 PE-3A 质量比为 2:3 时，可以实现复杂精细的 3D 结构的微加工成型，同时具有较高的结构精度。通过调控交联剂 PE-3A 在光刻胶中的含量，对结构的力学性能进行了优化，测试结果显示，交联剂的加入使得结构表面的杨氏模量由 1.40 MPa 提高到 11.90 MPa；当扫描速度为  $6 \mu\text{m}/\text{s}$  时，通过改变激光功率得到光刻胶材料可加工的功率阈值为 2.94 mW。当功率为 6.32 mW，扫描速度为  $97 \mu\text{m}/\text{s}$ ，最细特征线宽为 80 nm；为了进一步研究该材料在细胞培养方面的应用，我们设计并加工了一系列 3D 细胞支架。其中含有 60 wt % PEGDA 和 40 wt % PE-3A 的光刻胶较之其它配比加工得到的细胞支架，更有利于细胞在支架上的黏附且为细胞的铺展延伸行为提供了一个更适宜的环境；以天然高分子材料 SH 和 Chitosan 辅助的光刻胶体系，未经过任何复杂分子修饰直接掺杂，研究结果表明，其对加工聚合特性没有产生影响，进一步改善了支架的生物相容性。

综上所述，直接掺杂 SH 和 Chitosan 等具有优异生物相容性的高分子聚合物可以提高水凝胶材料的生物相容性，该研究为制备具有生物相容性的 3D 水凝胶细胞支架提供了一种简便且有效的实验方案，在仿生和组织工程领域将会具有广阔的应用前景。

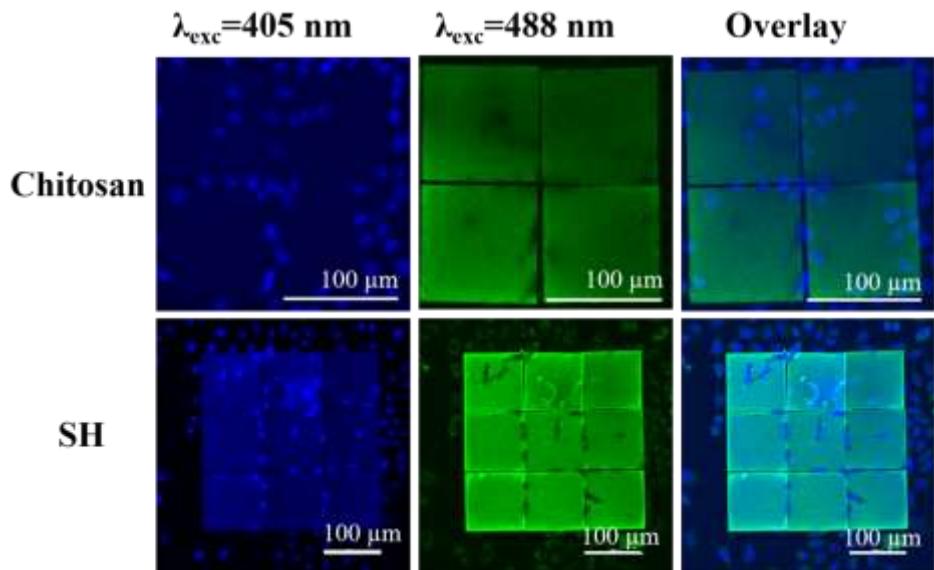


图 8. 壳聚糖和透明质酸掺杂的三维水凝胶细胞支架及细胞行为研究

## (二) 下一步工作计划

- 围绕仿生超浸润智能界面材料体系：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) 纳米通道中液体浸润性；(2) 纳米通道中的流体；(3) 纳米通道中化学反应。
- 围绕仿生纳孔膜材料的离子输运性质及应用，着重从以下两个方面开展研究：(1)通过新材料的筛选与结构调控，进行复合仿生纳孔膜的制备与离子输运性质研究；(2)通过能量转换器件结构优化，结合理论模拟指导反馈，提升盐差发电器件的能量转换效率。
- 围绕界面粘附材料的设计以及制备，着重从 pH 调控相近尺寸蛋白分离的异质多孔聚合物微球方面开展研究。
- 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)继续开展水凝胶仿生细胞支架方面的研究工作，拓展咔唑基类光功能材料在微尺度结构构筑中的应用。考察生物相容性水凝胶材料和结构对细胞生长、黏附、迁移等行为的影响；(2)拟利用飞秒激光加工技术在光刻胶 HSQ 上开展三维无机微纳结构的直写加工，揭示飞秒激光与 HSQ 的相互作用机理，探索 HSQ 的加工分辨率、阈

值加工能量以及形貌与飞秒激光加工参数的关系，研究二维及三维微纳结构的最佳加工工艺参数，在此基础上构筑 2 种以上的微型光学原型器件，并考察其光学性能、热学性能和耐化学腐蚀性能，为新型半导体器件的加工奠定工艺基础。

## 培育一 光化学转换与光化学合成

### (一) 本方向本季度重要进展

#### 1. 光化学合成金属硫化物纳米片

合成具有各向异性结构的纳米材料，尤其是二维纳米片，是材料科学领域研究的关键点。通常具有层状结构的块体金属硫化物可通过剥离获得金属硫化物纳米片，然而非层状金属硫化物纳米片的合成则相对受限。张铁锐研究员团队采用光照断键的方法将层状结构金属烷基硫醇盐转化为金属硫化物纳米片，并成功维持二维形貌。利用该光反应策略合成了二元  $\text{PbS}$ 、 $\text{CdS}$  和  $\text{Cu}_9\text{S}_5$  以及三元纤锌矿  $\text{CuInS}_2$ 、 $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  等纳米片，为合成金属硫化物纳米片提供了新的方法。相关结果发表于国际化学领域知名期刊 *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, 58, 8443-8447 上。

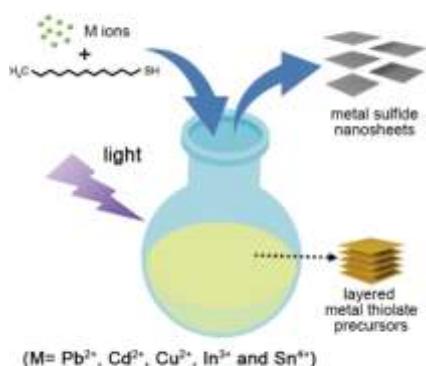


图 9. 光化学合成金属硫化物纳米片

## 2. 黑磷/红磷异相结光催化剂的构筑

黑磷烯作为一种新兴的二维材料，具有层数依赖的直接带隙、宽的光谱响应、高的载流子迁移率、丰富的活性位点等诸多优点，近几年来被广泛用于光催化太阳能转换领域。但是黑磷烯制备条件苛刻，并且光生载流子复合快等问题限制了其在光催化领域的发展。开发温和的制备方法，构建高效的黑磷基光催化体系仍然是极具挑战性的课题。陈勇研究员团队以红磷为原料，温和条件下一步法原位制备了黑磷/红磷异相结光催化剂，并且在不加任何牺牲剂条件下实现了光催化分解水产氢。相关研究成果发表在近期的 *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2019, DOI: 10.1002/anie.201906416 上。



图 10. 一步法原位制备黑磷/红磷异相结光催化剂

## 3. 可见光催化肟酯生成酰基自由基及其应用

酰基自由基在有机合成领域是一类非常重要的活性物种，很容易转化为多种其他官能团，在羰基结构骨架的构筑及一些复杂化合物的修饰上有着许多重要应用。传统生成酰基自由基的方法主要是通过酰基硒化物的均裂，也有一些是通过过氧化物氧化醛或羧酸。吴骊珠研

究员团队发展了一类新型的可见光催化肟酯生成酰基自由基的方法。利用激发态光催化剂与 2,3-二羰基单肟酯的电子转移成功地实现了 C-C 键活化断裂得到烷基及芳基酰基自由基。进而利用生成的酰基自由基，与一系列自由基受体加成，制备了各种含氮杂环骨架或环丁烷骨架。在该串联反应中，光催化剂同时参与了单电子转移及能量传递过程。相关研究结果发表在 *Org. Lett.* **2019**, DOI:10.1021/acs.orglett.9b01338。

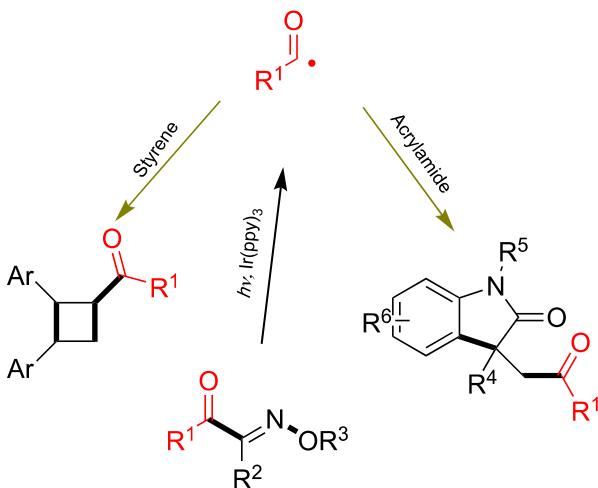


图 11. 可见光催化肟酯生成酰基自由基

#### 4. 光催化 1-四氢萘酮放氢芳构化合成 1-萘酚化合物

1-萘酚化合物是有机化学和化工生产中一类非常重要的化合物，在药物化学、有机染料以及农业化学等领域具有广泛的应用价值。传统工业合成 1-萘酚条件苛刻，酸、碱消耗量大，对设备要求高，反应过程中需额外添加氧化剂或使用贵金属催化剂。吴骊珠研究员团队利用光催化与质子还原催化协同作用，发展了一种新型的 1-萘酚化合物的合成策略，在光催化剂  $\text{QuCN}^+\text{ClO}_4^-$  与钴肟配合物  $\text{Co}^{II}(\text{dmgBF}_2)_2(\text{MeCN})_2$  的作用下，实现了一系列四氢萘酮及其衍生物

放氢芳构化生成 1-萘酚化合物, 反应副产物为等当量的氢气, 反应条件温和, 无需外加氧化剂。进而我们利用微流控技术有效地提高了反应的选择性, 并显著缩短了反应时间。相关研究结果发表在 *Catal. Sci. Technol.* **2019**, 9, 3337-3341 上。

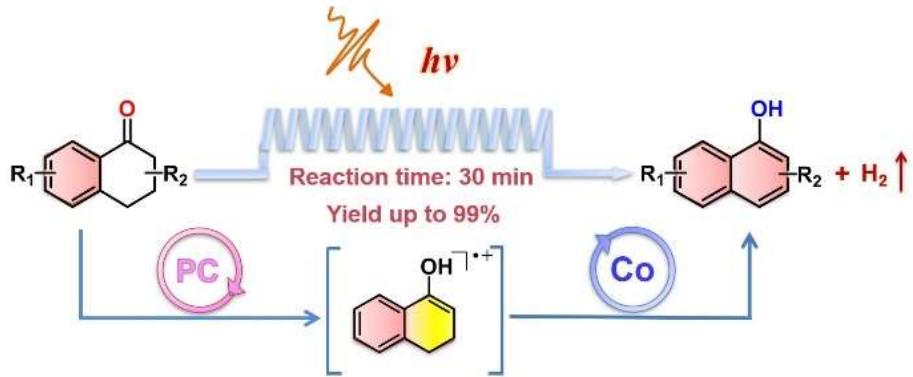


图 12. 光催化合成 1-萘酚化合物

## (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、二氧化碳还原和光催化固氮合成氨体系的研究, 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

### (一) 本方向本季度重要进展

#### 1. 中科院“一带一路”项目

进一步推动中埃联合实验室建设, 办理实验室检测相关设备赠与手续, 由埃方办理免税, 随时准备设备启运; 埃塞 3000 吨明胶厂的一期工程启动, 厂房设计已完成, 合作企业已在当地开始土建工作, 相关生产设备已在中国打包装箱, 由船运至非洲。



图 13. 非洲厂区和部分装备

## 2. 酶法明胶专用特异性重组蛋白酶的准工业化生产制造

在重组酶制剂中试结果的基础上，与相关企业合作开展生物酶制剂放量试验，发酵规模 2 吨，在工厂已有发酵系统的基础上，完成配套压滤装备和超滤设备的选型的安装，从而贯通生产线，完成一次发酵试验，获得纯酶制剂 5 公斤。



图 14. 发酵试验现场

### 3. 酶法明胶制备胶囊技术研究与应用

通过优选胶囊脱模剂，并调整其添加方式，进一步优化胶囊生产蘸胶和烘干工艺参数，基本解决酶法明胶胶囊生产的拔囊困难问题。截至目前，酶法明胶胶囊的碎脆、崩解慢和拔囊困难三个问题已全部解决，本季度在明诺胶囊厂完成连续胶囊生产，产品性能检测中。



图 15. 胶囊试验线

### 4. 羊皮胶原蛋白肽生产技术工业化实施

在实验室小试、中试基础上，2019 年在呼伦贝尔开发区开展 200 吨/年羊皮蛋白生产线建设，配合落地企业完成厂区布局设计，生产车间和化验室平面设计、主体设备定型和采购以及污水和固废环保方案制定。



图 16. 羊皮蛋白项目设计文件

## 5. 具有可控诱导期的降解地膜

PBAT 全生物降解塑料的结晶度大约为 30%，无定形态 PBAT 的比例高达 70%。无定形部分的 PBAT 分子链排布不规整、不紧密，分子间相互作用力较弱，水等小分子容易进入该无定形区域，导致微生物容易在该区域附着，因此这些无定形区域成为地膜最早开始降解的部分。PBAT 膜接触土壤等高微生物含量的物质后，产生大量的微孔和裂纹。如图 17 所示，PBAT 地膜经过 28 天土埋降解后，表面产生了大量的孔洞。这些孔洞的直径在几十到几百纳米之间，成为了水蒸气和小分子气体的通道，导致地膜的保墒性能严重下降，影响地膜在周期内的正常使用。

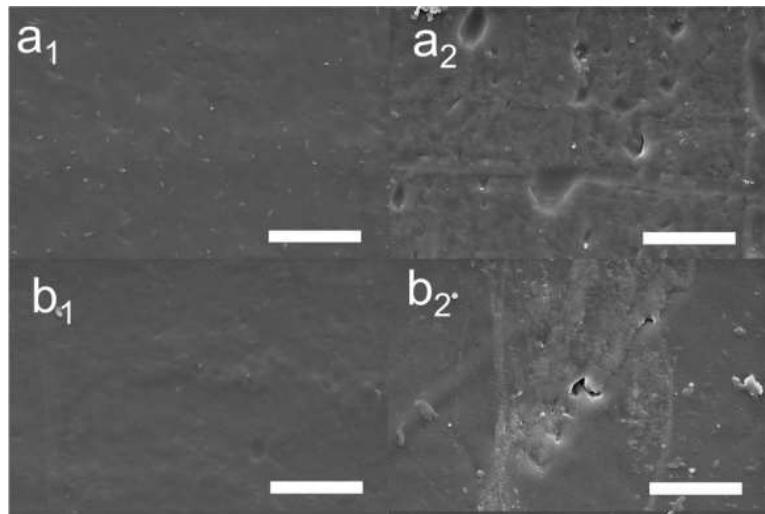


图 17. (a<sub>1</sub>,b<sub>1</sub>) 0 天, 28(a<sub>2</sub>,b<sub>2</sub>)天埋土 PBAT 膜表面形貌图, 图例为 1μm

为了解决上述问题, 我们采用了降解速率调节剂、地膜专用缓释抗菌剂对 PBAT 进行改性开发了一种具有可控诱导期的全生物降解地膜材料。该地膜经实验室检测, 其对水蒸气透过率变化曲线如下:

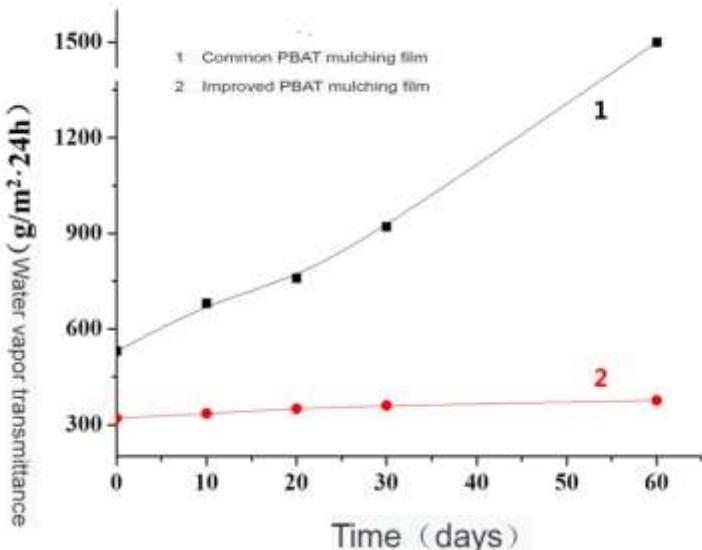


图 18. 普通 PBAT 地膜和可控诱导期 PBAT 地膜水蒸气透过率变化  
1: 普通地膜 2: 项目开发的可控诱导期 PBAT 地膜

经过在新疆建设兵团 2、3、5、6、8 师、山西寿阳农科院旱作基地和海南等地的大田试验, 保墒性能良好。



图 19. 山西寿阳铺膜结果（铺膜时间 19 年 4 月 10 日）

为更好地开展产学研合作，促进科研机构优势学科与企业的紧密结合，中国科学院理化技术研究所、农业科学院农业环境与可持续发展研究所和山东华鑫塑业有限公司达成协议，以山东华鑫塑业有限公司为生产基地，建立全面的、长期的、稳定的合作关系。

可控诱导期降解地膜目前已经在河北省沽源县土达马铃薯种植有限公司应用于二千亩马铃薯生产上，该产品已经列入冬奥会蔬菜供应目录。

## 6. 十万吨级 PBAT/PBS 产业化进展

经和相关企业和地方政府沟通，目前对 PBAT/PBS 产业化感兴趣的地方和企业较多。经所策划部统一部署，和汇金创富基金管理公司签署了成立全生物降解塑料产业化科技专项基金的框架协议，基金筹建工作正稳步推进。和河南鹤壁莱润新材料科技有限公司合作建立 10 万吨 PBAT/PBS 生产线合作框架协议基本就绪，项目组和初步联合对鹤壁莱润公司、相关园区及计划建立生产线的土地、环

境等进行了实地考察。

和中国国民科学研究院、联合国环境署驻华代表处等合作建立全生物降解地膜及其专用树脂项目合作建立了良好的沟通渠道。

## 7. 海南全面禁塑的技术支撑

2018年4月11日《中共中央国务院关于支持海南全面深化改革开放的指导意见要求》(中央12号文件)中要求海南坚持“绿色、循环、低碳”理念，“加快构建绿色产业体系”，“全面禁止在海南生产、销售和使用一次性不可降解塑料袋、塑料餐具，加快推进快递业绿色包装应用”。明确要求海南进行全面禁塑。为此海南进入了禁塑的快车道，我们也积极参与和推进和海南禁塑事业的合作并提供全方位的技术支持。

2019年3月和海南省澄迈县人民政府达成审核战略合作框架协议，双方就合作开展技术研究，工程中心全面支持澄迈创建区块链生物塑料及新材料产业园区，合作培养人才等方面达成共识。2019年4月因海南环保厅邀请参与了《海南省全面禁塑2019年重点工作》和《2019年禁塑工作任务工作明细》等编制，2019年4月海南省生态环境厅向理化所发来了《海南省生态环境厅关于商请选派干部到我厅挂职的函》，经课题组、策划部、人事处商议，并经所长、书记批准，决定派遣降解塑料课题组卢波同志到海南环保厅挂职。2019年5月30日，工程中心和海南省市场监督管理局海南省产品质量监督检验所签署了技术合作框架协议，全面支持海南省降解塑料制品的质量检测、管理和监督。2019年5月海南质检所和工程中心联合向海南

市场监督局提交了《海南省生物材料及降解制品标准化技术委员会》筹建申请，2019年7月海南省市监局下发了《海南省市场监督管理局关于拟成立海南省生物材料及降解制品标准化技术委员会公示及征集委员的通知》。

## （二）下一步工作计划

1. 根据“一带一路”项目任务书制定的2019年中埃联合实验室的工作计划，稳步推进埃塞联合实验室建设，实现埃塞实验室设备到位，安装调试，当地人员培训。同时力争在下一季度完成埃塞工厂一期工程的土建工作，厂房封顶，生产设备运抵埃塞。
2. 将本季度所开发的酶制剂进行酶法明胶生产实验，从工业水平验证所生产酶制剂可靠性。一旦验证合格，将开展20吨级发酵罐的酶制剂生产实验，并在这个水平上优化生产工艺条件。
3. 进一步开展酶法明胶在胶囊生产企业推广，对胶囊生产企业进行酶法明胶胶囊生产技术指导。
4. 力争在下季度完成呼伦贝尔羊皮蛋白生产线的土建共作，并在年底前实现生产线设备到位、安装和调试。
5. 推进十万吨PBAT/PBS生产线建设和产业化科技基金，推动海南禁塑事业，参与海南制品生产和质量监督。

## 培育三 激光显示及产业化

概述：2019年第2季度在研项目3项，包括国家重点研发计划3项，新增广东省重点领域研发计划1项。

### （一）本方向本季度重要进展

## **1. 2019 年广东省重点领域研发计划“三基色激光显示整机产业化关键技术”立项**

广东省面向经济主战场、面向国家和省内重大战略需求，在广东省“十二五”期间实施的印刷显示重大项目基础上，结合国际显示产业技术发展趋势，启动实施“新型显示”重点专项，布局大尺寸高性能激光显示技术等新型显示产业技术，为未来显示产业发展做好技术储备。

理化所作为项目第二负责单位，联合国内激光显示领域优势单位，申报 2019 年广东省重点领域研发计划“三基色激光显示整机产业化关键技术”并获得立项，本项目将开展光纤耦合三基色 LD 激光显示整机设计与集成、相干噪声抑制等整机关键技术研究，开发投影尺寸大于 100 英寸、功耗小于 200W 激光显示整机，围绕高光效三基色激光显示整机设计与集成技术开展研究，重点研发高效率三基色激光显示光学引擎设计，基于视频内容的高效 RGB 激光自适应驱动技术，开展面向 4K 视频源的低功耗编解码技术，探索高效相干噪声抑制机制及器件研究，开展低功耗、高效散热技术研究，及激光显示用材料/器件/整机表征及服役评测技术，开发高效测试系统及测试平台。

## **2. 受科技部委托，理化所牵头张罗筹建“国家新型显示技术创新中心——激光显示创新平台”**

为使我国尽快迈入创新型国家行列，科技部按照“有效整合显示行业优势资源，形成前瞻性和原创性研发能力、核心共性关键技术研发能力、一流的工艺和产业应用技术能力三大能力”总体目标，拟在十三五期间部署建设二十个国家技术创新中心，支撑短期内解决卡脖

予关键技术，中远期形成优势技术体系。新型显示是我国战略性产业，科技部拟筹建“国家新型显示技术创新中心”，建设包括激光显示在内的八个创新平台。基于激光显示在未来新型显示产业中的重要地位，国家已将其纳入“科技创新 2030”重大项目。激光显示创新平台是支撑重大项目落地实施的重要载体，理化所作为本领域优势单位，近年来在激光显示技术创新和产业化方面取得了重要进展，受科技部委托牵头张罗组建本平台。

理化所结合国内外产业发展现状，提出了创新平台建设总方案，将集中激光显示显示领域创新链中现有的优势单位，由理化所牵头，联合国内激光显示骨干企业和科研院所，依托地方政府，以股权和知识产权为纽带，组建利益高度一致“一体化创新平台”（独立法人实体）。集中一体化打造从材料、器件到系统的完整创新链，实现各参与单位的利益一致性、创新链各环节的无缝对接和无障碍沟通协作。平台为利益高度一致的承担主体，力争打破现有的接力棒式的研发模式，培育出激光显示产业的高科技领先企业，切实解决研发和应用“两张皮”的问题。设立管理委员会和技术委员会，实行开放、竞争、协作的运行机制，建立责权分明、科学管理、激励和约束相结合的内部管理体制和机制。筹建方案在 5 月 8 日科技部举办的各创新平台筹建会议上进行了汇报并初步得到认可，理化所将致力打造从关键材料器件、关键技术到整机应用的完整技术创新链，形成激光显示共性关键技术平台和产业平台，作为支撑重大项目落地实施的重要载体。

### 3.三基色激光显示产业化工作进展顺利，市场销售进一步扩大

中科院理化所与杭州中科极光科技有限公司自主开发的面向车载应用的分体式激光显示设备得到了用户单位的高度肯定，目前已完成统型，在 2019 年第二季度新增销售 120 台以上。面向数字院线的激光电影放映机产品在上海、深圳、长春、郑州、西安、青岛、绵阳、杭州等 10 余个城市院线通过租赁和销售的实现商业应用，已经逐渐成为院线的主要解决方案。目前上述两个产品在 2019 年第二季度实现新增销售超过 2000 万元。

## （二）下一步工作计划

加强与地方省、市的合作，积极探索理化所和中科极光激光显示产品应用，如深圳平安大厦灯光秀项目，提高理化所和中科极光的行业影响力。激光显示已进入到快速发展的机遇期，根据奥维网市场统计，2019 年第一季度国内激光显示市场突破 40 亿元。理化所和中科极光也将进一步瞄准市场，开发系列化激光显示产品，从而拓展激光显示产品的商业应用。

## 培育四 分散能源气体液化分离技术与应用

概述：本方向围绕分散能源气体液化分离技术与应用，2019 年一季度在 3 个层面开展了工作，包括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。

### （一）本方向本季度重要进展

#### 1. 基础研究

##### （1）两相流动及传热基础研究阶段性成果

基于如图 20 所示的流动冷凝实验平台，继续围绕纯质 R14 的流

动冷凝及传热开展了系列工作。系列工作的工况范围 1-3MPa, 质量流率范围 100-650 kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 热流密度范围 8.3-28.2 kW m<sup>-2</sup>, 干度范围 0-1。

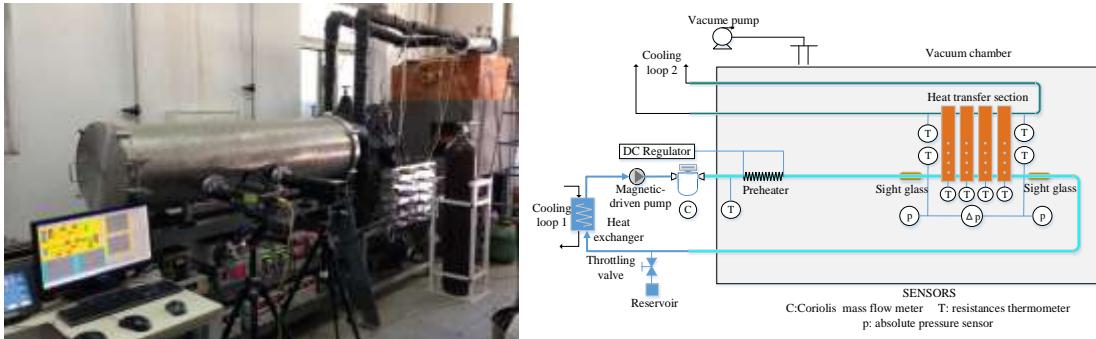


图 20. 流动冷凝实验平台

基于所获取的 R14 流动冷凝传热数据, 通过理论分析和数据拟合分别对环状流和非环状流型发展出了新的流动冷凝传热关联式。

### 1) 环状流传热关联式

边界层方法是耦合了能量方程、动量方程和连续性方程推导出来的一个的传热模型, 被认为是环状流传热关联式中最据理论意义的关联式。但是现有的关联式并没有考虑到气核中的液滴对传热的影响。Dobson et al. 认为边界层模型中的无量纲温度代表着边界层热阻, 它受边界层液膜厚度的影响。然而液膜厚度随气核中液滴的增加而变薄, 进而影响传热性能。本实验室认为在两相流动中表面张力可以很好的维持液膜稳定而减少液滴进入气核。邦德数表征表面张力和重力的比值, 因此将邦德数考虑进新的模型中。

$$h_A = \frac{\lambda_1}{D} \cdot \frac{Pr_1 \cdot Re_1^{0.9}}{T^+} \cdot f(X_{tt})$$

公式中无量纲边界层温度是雷诺数、普朗特数和邦德数的函数, 具体表达形式如下:

$$T^+ = 4.625 Re_1^{0.149} Pr_1^{1.1945} Bd^{-0.1}$$

两相乘子是 Lockhart-Martinelli 数的函数:

$$f(X_{\text{tt}}) = 0.15 \left( \frac{1}{X_{\text{tt}}} + \frac{2.85}{X_{\text{tt}}^{0.476}} \right)$$

## 2) 非环状流传热关联式

本实验室认为水平管内的非环状流动冷凝传热受降膜冷凝和强迫对流冷凝的共同影响。因此非环状流关联式写成降膜冷凝和强迫对流相叠加的形式：

$$h_{\text{NA}} = (h_{\text{film}}^2 + h_{\text{forced}}^2)^{0.5}$$

降膜冷凝：

$$h_{\text{film}} = 0.555 \left[ \frac{\lambda_l^3 \rho_l (\rho_l - \rho_v) g \Delta h_{lv}}{\mu_l D (T_s - T_w)} \right]^{0.25}$$

强迫对流冷凝采用 Dittus–Boelter 方程形式和一个界面粗糙因子，气液相雷诺数比值和邦德数用于表征界面波动对两相传热的强化：

$$h_{\text{forced}} = 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.3} \frac{\lambda_l}{D} f_i$$

$$f = 1 + \left( \frac{Re_v}{Re_l} \right)^{0.728} Bd^{0.066}$$

## 3) 对比实验数据

为了评估当前关联式的预测能力，将新关联式与 R14 流动冷凝传热数据和从 9 篇文献中导出的 1370 个实验数据点进行对比，新关联式对 R14 实验数据预测的平均绝对相对偏差为 6.26% 并且所有数据点的预测偏差均在 30% 以内，如图 21 (a) 所示。另外，从 9 篇文章中获取的实验数据覆盖较宽的试验工况：管径 0.5-14.45mm，质量流率 24-2779 kg/(m<sup>2</sup> s)，饱和温度 140.56-348.07 K，干度范围 0.05-0.99, 10 种工质 (R134a, R22, R12, R125, CO<sub>2</sub>, methane, R1234yf, pentane, R245fa and propane)。新关联式对 1370 个文献数据点的预测偏差为 20.04% 并且 77.61% 的数据点的预测偏差均在 30% 以内。这说明了新关联式可以可靠地预测大范围工况的流动冷凝实验数据。

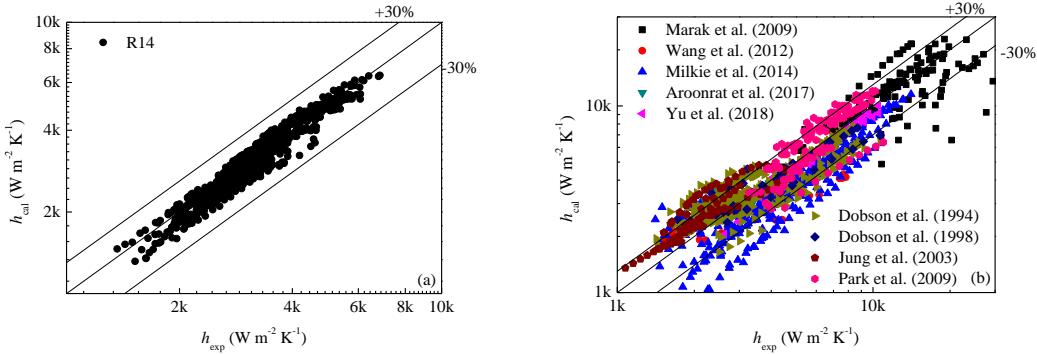


图 21. 新关联式与实验数据的对比: (a)R14 实验数据, (b)文献数据

## (2) 新型氨吸收制冷/热泵循环研究

前期的工作中提出了一种梯级利用余热的新型吸收式制冷/热泵系统。通过 ASPEN 模拟表明, 该梯级余热利用的吸收式热泵系统在低温工况下性能提升明显, 蒸发温度为-15°C时, COP 较传统单效系统提高了近 20%。

基于变温发生的机理, 设计了类降膜式发生器。但在吸收式系统中, 发生器和吸收器的熵损失最大, 因此, 除了发生器结构的优化设计, 在吸收器强化传热传质等方面开展研究也同样重要。通过优化设计吸收器的换热形式, 可以提高吸收效率, 提高系统性能, 降低吸收器的体积。

在吸收器中, 氨与稀溶液混合放热, 通过冷却水将热量带走, 完成氨的持续吸收过程。因此降膜在吸收器的设计中要让液膜薄且均匀, 冷却水与溶液换热充分。吸收器的设计可以参考一种激光焊接冲压鼓包的换热板, 如图 22 所示。该换热板面为溶液侧, 通过合理的设置结构, 液膜自上而下可以均匀分布在表面上, 促进吸收。换热板内走冷却水, 板内流道形成湍流, 强化冷却水的换热。目前该新型吸收器板面正在优化设计中。



图 22. 冲压鼓包换热板面

### (3) 混合工质与逆布雷顿氮气液化流程的对比

逆布雷顿液化流程的效率受膨胀机的绝热效率影响较大，通过对不同膨胀机绝热效率下其与混合工质节流液化流程的熵效率可见，在100 K及以上温区，逆布雷顿流程中即便膨胀机绝热效率达到100%，流程总熵效率仍低于混合工质流程（膨胀功完全回收）。考虑到实际小型液化装置中，一方面膨胀机绝热效率不可能达到100%（一般不超过85%），另一方面膨胀功不能完全回收，甚至被风机等阻尼部件耗散掉。因此对于冷端温度100 K及以上的低压氮气液化流程，混合工质节流制冷循环作为冷量来源更有优势。

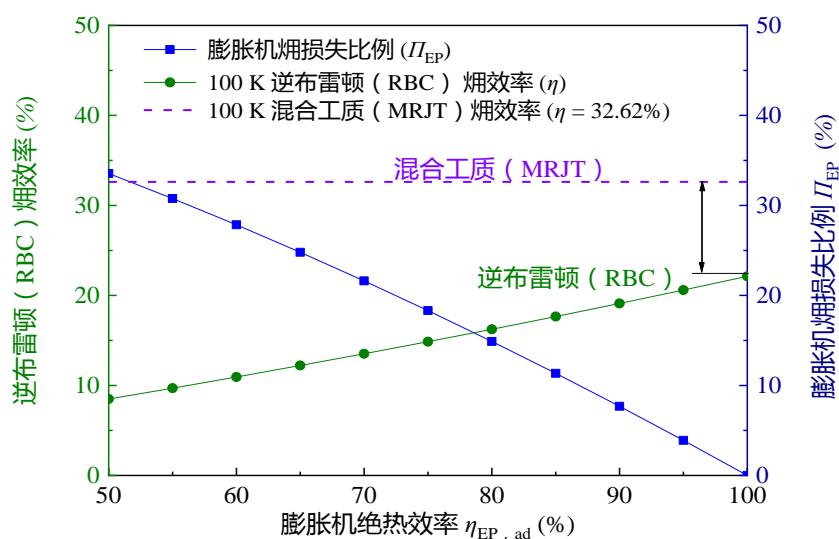


图 23. 冷却 100 K 分布式氮气液化热负荷时膨胀机绝热效率对逆布雷顿流程熵效率和膨胀过熵损失比例的影响

## 2. 核心技术研究

### (1) 变温吸收制冷系统优化分析

前期的模拟工作中，针对 3 万方/天液化天然气站的余热回收，设计了具有连续变温技术的吸收式制冷系统，并探究了发生温度和蒸发温度对系统性能的影响。

考虑到天然气站采用天然气内燃机发电，产生的烟气余热为主要驱动热源。而对于内燃机发电机的套缸水中存在大量的低温余热，因此将低温套缸水的余热回收用于加热来自吸收器的浓溶液，随后再进入溶液热交换器中进行换热。流程优化设计如图 24 所示。

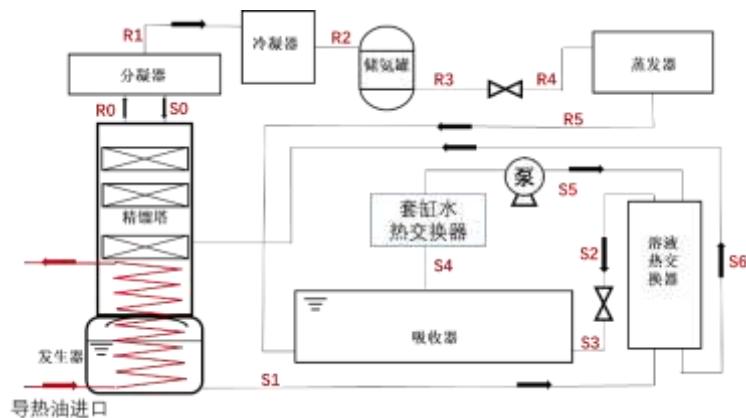


图 24. 350KW 吸收式制冷系统

该系统利用导热油回收烟气余热，并向制冷系统提供热量，通过套缸水换热器回收内燃机套缸水中的低温余热用于加热来自吸收器的浓溶液。计算结果表明，在获取 340KW 冷量的情况下，采用回收套缸水的系统发生热负荷由原来的 603Kw<sub>a</sub> 降至 538.986Kw<sub>a</sub>. 系统性能提升 12%。

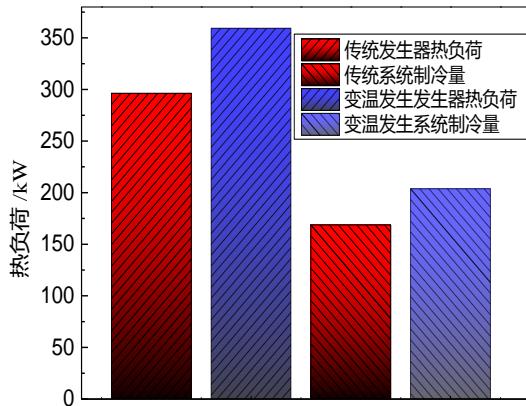


图 25. 相同热源下变温系统和传统系统的余热利用量和制冷量

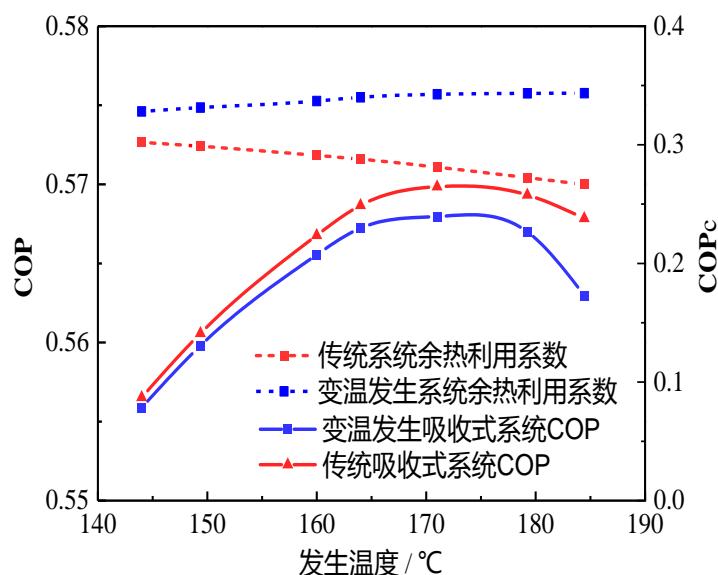


图 26. 变温发生和传统系统余热利用系数和 COP 对比

如图 25 所示, 当吸收/冷凝温度为 40°C 时, 发生温度为 170°C, 对比了变温发生吸收式系统和传统吸收式系统的余热输入量和制冷量。计算结果表明, 采用变温发生吸收式系统, 余热利用总量较传统吸收式系统提升了 23%, 制冷量提升了 22%。这是由于将发生器的加热段扩展至提馏段, 分担了高温发生器的热负荷, 使得发生过程在温度较低的提馏段中进一步完成, 降低了对驱动热源的温度要求, 从而提高系统从余热中抽取余热的能力。通过对比变温发生系统与传统系统的余热利用系数如图 26 所示, 结果表明, 变温发生系统的余热利用系数高于传统系统, 但随着发生温度的降低, 二者开始接近。这主

要是由于发生温度降低意味着传统吸收式系统的余热利用能力增强。此外，对于变温发生系统，发生温度降低，来自塔釜的氨水稀溶液浓度较高，溶液热交换器的换热能力增强，导致精馏塔进料口的温度提高，提馏段温度升高导致变温发生系统的余热利用能力减弱。

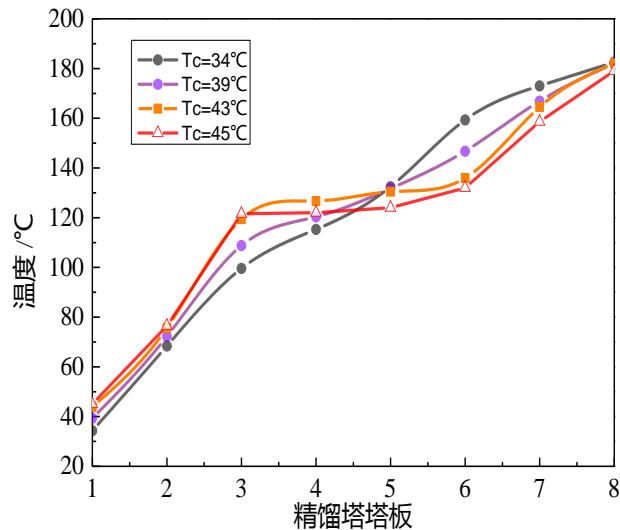


图 27. 冷凝温度对精馏塔塔板温度分布的影响

在吸收式系统中，冷凝温度和吸收温度往往与冷却介质的温度有关。但二者对系统的影响方式是不同的。吸收温度主要影响了系统工作的最优浓度和吸收效果。但冷凝温度决定了吸收式系统的发生压力。吸收温度降低，系统发生压力更低，有利于氨水的解析分离。因此系统效率更高。除此之外，对于变温发生系统，冷凝温度对精馏塔塔板温度分布也会产生影响。

如图 27 所示，随着冷浓温度的升高，提馏段入口温度升高，近进料口各塔板温度变化较小，这就意味着提馏段近精料口的温度变化小，输入的热量也更小。因此对于冷凝温度较高的工况下，提馏段近塔釜的换热量要高于提馏段上部。对于冷凝温度在 35°C 左右工况下工作的系统，各个塔板的温度变化较为均匀，因此，提馏段的换热量较为

均匀，换热器可以均匀布置。探究冷凝温度对塔板温度分布的影响可以为后续的提馏段换热设计提供参考和指导。

## (2) 新型氨吸收大温跨高温系统研究

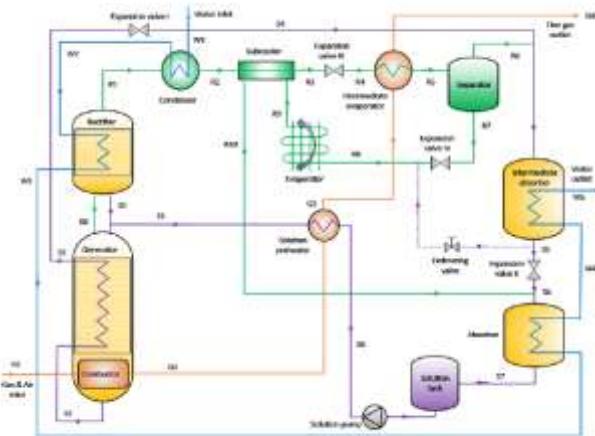


Fig. 1. Schematic diagram of the modified gas-fired AHP hot water system.

图 28. 新型高温热泵系统

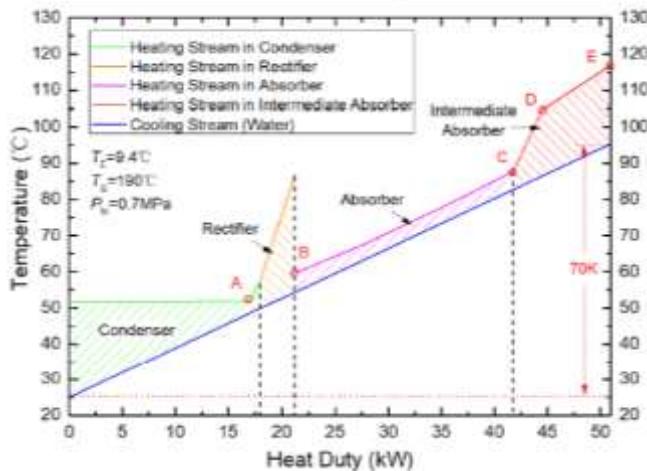


图 29. 新型热泵系统热量温度分配图

基于前期新型吸收式热泵系统的研究工作，针对其制取 90°C 高温热水的工况，对系统进行了改进，系统流程如图 28 所示。探究了系统内部各部件的温度匹配，优化了系统的热量分布，降低系统的㶲损失。

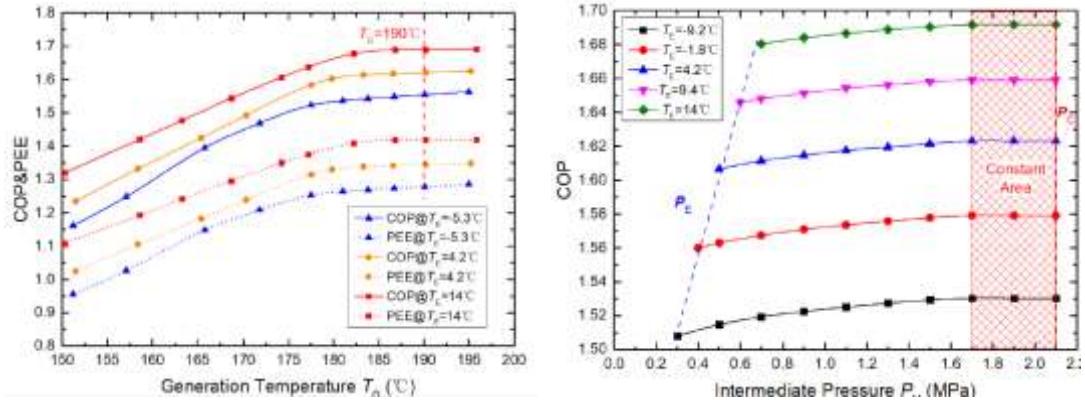


图 30.发生温度对系统性能影响 图 31.中间压力对系统性能影响

该系统中水依次通过冷凝器,整流器,吸收器和中间吸收器加热。除了利用环境中的低品位热量,该系统还可以利用烟道气废热通过中间蒸发器,并且产生的中间压力的氨蒸气在中间吸收器中被吸收,以进一步将水加热到目标温度。探究了发生压力对系统性能的影响,随着发生温度的升高,系统 COP 先增加后趋于平缓。此外,如图 29 所示,系统各部件温度匹配,在实现大温跨加热热水的过程,可以有效降低系统的熵损失。随着中间压力的升高,COP 随着 PM 的增加而增加,直到中间压力达到 1.7MPa,然后 COP 几乎保持不变。这是由于随着 PM 越高,吸收器和蒸发器的熵损失增加,但中间吸收器和蒸发器的熵损失降低更大,系统熵损失降低。当在环境温度为 20°C 时,系统可以将水从 25°C 加热到 95°C,性能系数 (COP),一次能源效率 (PEE) 和火用效率分别为 1.65,1.38 和分别为 52.7%。

### (3) 混合工质空气分离流程的优化

在混合工质空气分离流程中,空气经混合工质制冷机冷却液化后进入空分精馏塔进行分离。液化过程中,液化压力越高越有利于提高制冷机效率,但会恶化精馏过程,降低产量。因此在空气液化后节流再引入空分塔,实现较高的液化压力和较低的分离压力,且存在最优点,不同压力下流程性能如下图所示。但分离压力不可过低,以保证

节流后的塔底液能冷却塔顶蒸气。根据换热器窄点温差的限制，该系统中最低分离压力为 0.387 MPa，且液化压力为 0.64 MPa 时，系统总比功耗最小。

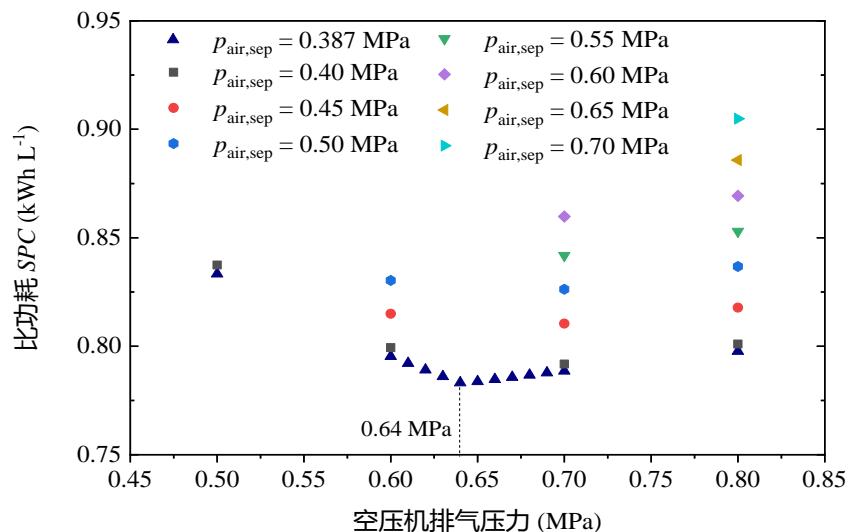


图 32. 混合工质空分流程中不同空压机排气压力和空气分离压力下性能

### 3. 样机开发及现场应用

建设成功陕西榆林 6 万方/天项目，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 1130kNm<sup>3</sup>/d 以上液化应用规模。至 2019 年 5 月实测顺利达产。



图 33. 新建设天液化项目现场

## （二）下一步工作计划

### 1. 基础研究及液化技术方面

在基础研究方面，拓展主要混合工质组元及多元混合实验数据，核心技术方面，提升液化系统的低温性能，进一步研发“LNG 低温液”系统，使系列规格装置更加适应市场需求。从技术系统性角度，完善冷却系统传热换热器流动传热设计、流程设计方法，总结分散能源气体液化系统全流程综合优化设计技术。

混合工质液氮装置的实测验证工作，目前已开发出多套规格装置，下一步将开展系统性的实验工作，验证分散能源气体液化装置的功能性和液化性能指标。

## 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，争取年度内设计出氨吸收式预冷系统，满足分散能源气体液化场站的预冷需求。

## 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 17 项，其中新增 1 项。召开协调会议 3 次。

### （一）本方向本季度重要进展

#### 1. 中国科协沙龙文集《常温液态金属：将如何改变未来》出版

中国科协第 120 期新观点新学说学术沙龙文集《常温液态金属：将如何改变未来》（图 34）于 2019 年 4 月由中国科学技术出版社编辑出版。

2017 年 9 月，中国感光学会与中国科学院老科学技术工作者协会理化研究所分会，在北京举办了题为“常温液态金属：将如何改变

未来”的学术沙龙活动，沙龙由理化所周远院士、北京航空航天大学王浚院士、理化所副所长罗二仓研究员、理化所刘静研究员四位科学家领衔，聚集了学术界、产业界及战略研究等领域的 40 余位专家学者，就常温液态金属的物质科学问题展开了热烈的学术讨论，并参观了理化所液态金属实验室。此次出版的文集忠实记录了专家们在研讨会上及会后参观实验室现场发表的主要观点和发言。

文集除了汇集专家们在材料学、物理学、化学、热学、电子学、生物医学以及柔性机器人、国防应用等方面问题的交流观点和思考脉络外，也展示了经过深入讨论所凝练出的若干个液态金属新概念（如液态金属量子计算机）、新效应（如液态金属类生命现象等）、新观点（如液态金属可变形机器人等）。



图 34. 文集《常温液态金属：将如何改变未来》封面

按照中国科协的要求和程序，此次出版文集在整理和总结沙龙学术成果的基础上，就系列独特的液态金属基础效应、科学现象与创新技术进行了深入剖析，相应观点和建议可望为新兴的液态金属物质科

学与技术的研究和应用提供一定的借鉴和参考。

## 2. 提出柔性液态金属薄膜的自组装方法

针灸是将毫针按照一定的角度插入人体特定深度的穴位，从而达到治疗疾病的目的，这对于医生的技能要求很严格。客观化和精确化是中医现代化发展的趋势，发展针刺响应的超敏深度传感器对于刻画扎针深度的定量化表征有着重要的作用。

为了应对这一挑战，研究组利用自组装沉积法制备出了一种电学各向异性的柔性液态金属薄膜。利用纳米镓铟共晶合金（EGaIn）在纳米纤维素-聚乙烯醇溶液中的密度差和自然蒸发（图 35），可成功制备  $1\text{--}49 \mu\text{m}$  的超薄 Janus 膜。这种膜在正常情况下，双面均不导电；而在垂直集中应力或者剪切摩擦力作用下，薄膜下层液态纳米 EGaIn 颗粒则可实现有效导通，从而传递电信号，值得一提的是，纳米液态金属导通响应时间只需  $2\text{ ns}$ （图 36）。利用纳米 EGaIn 与纳米纤维素-聚乙烯醇复合物制备的深度传感器，不仅具有灵敏的深度探测能力，而且医生在训练过程中可以通过可视化显示灯在第一时间获取扎针的深度信息。这种液态金属薄膜作为一种全新的电子纸，为制造智能微尺度传感器的多层复杂电路提供了一个简便、快速的制造和响应平台（图 37）。

更进一步的，研究团队发现这种液态金属薄膜两面对光的反射效果以及导热性能也有显著性差异，这种特性使其有可能被用作光转化开关和温度调节器（图 38）。这样一种同时具有电学、光学和热学三种特性的两面各异性薄膜，在制备过程中不需要任何复杂的工艺及精

密仪器的辅助，制备过程不仅简单易行，而且并不需要耗费太多时间。

相关研究成果以“Self-assembly Ultrathin Film of CNC/PVA-Liquid Metal Composite as Multifunctional Janus Material”为题发表在Materials Horizons期刊上。(DOI: 10.1039/C9MH00280D)。

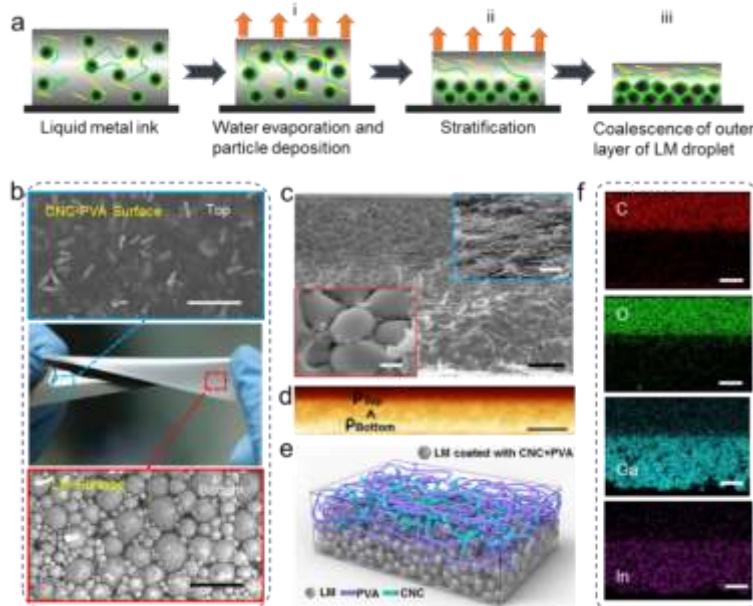


图 35.液态金属纳米纤维素-聚乙烯醇复合的 Janus 柔性薄膜制备及其表征

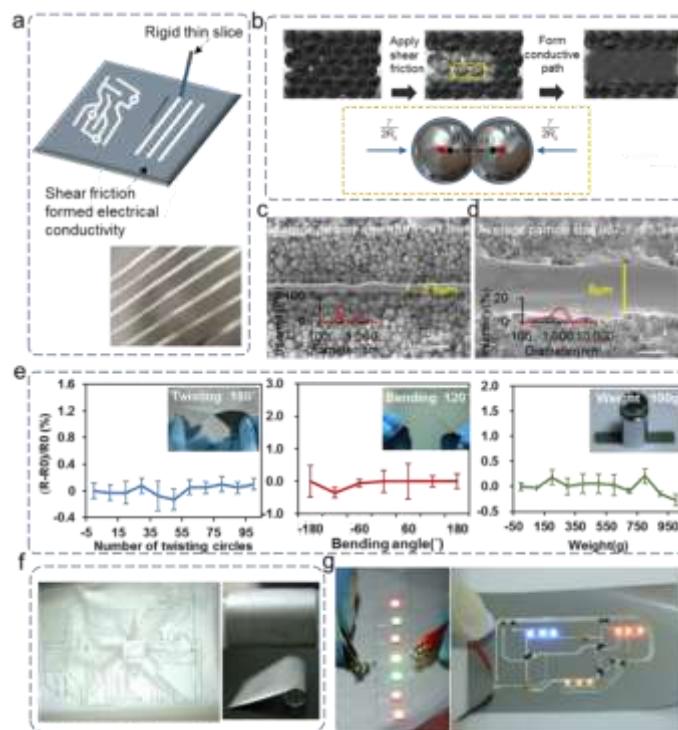


图 36.液态金属薄膜下层导通原理及导电稳定性测试

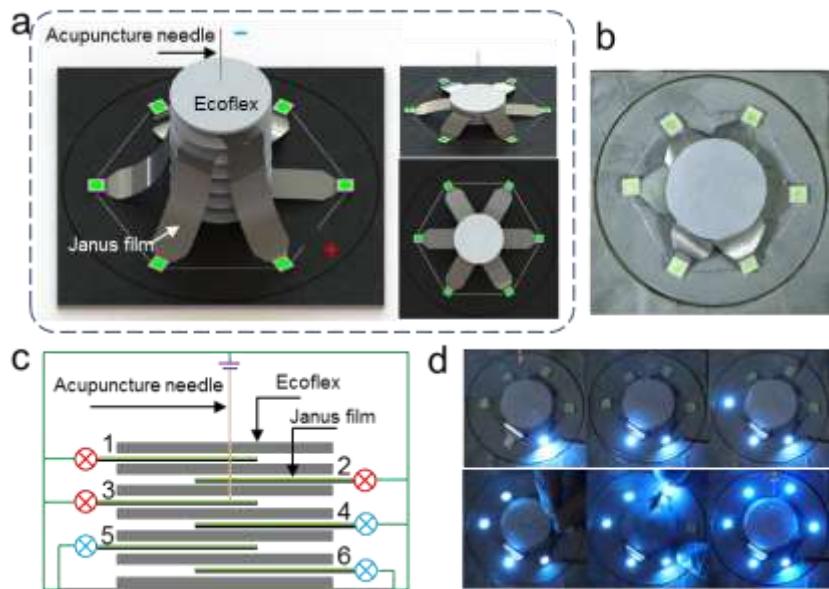


图 37. 液态金属薄膜制备的针灸深度传感器模型

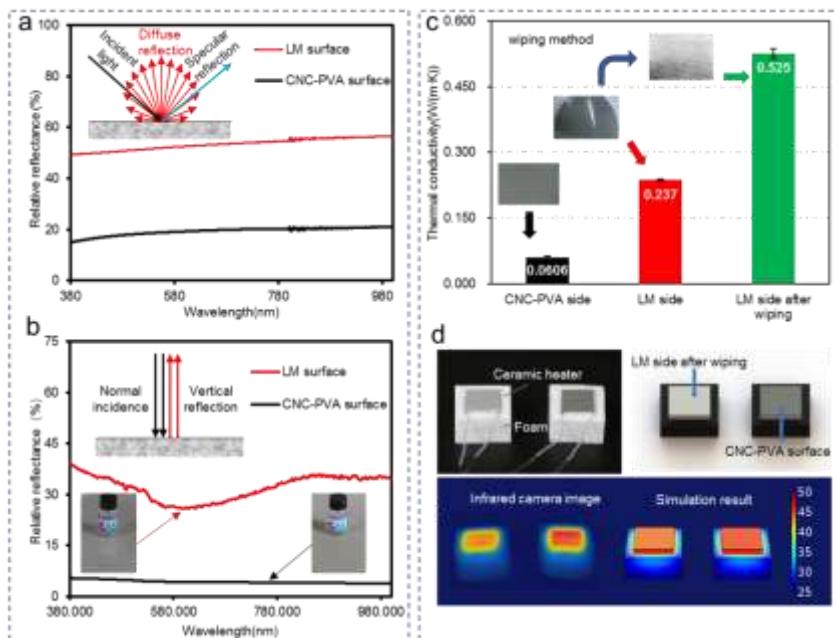


图 38. 液态金属薄膜两面光学和热学特性的差异

### 3. 提出研制未来尖端机器人一般原则：液体集成(I-LIFE)

近期，研究组基于其长期以来对液态金属变形效应、经典流体研究特别是液态金属在柔性机器人领域的基础探索，首次系统地提出了一种旨在研制未来尖端柔性机器人的一般原则，即：液体集成。相应工作以前瞻性论文应邀发表于 Advanced Intelligent Systems 上

(Intelligent Liquid Integrated Functional Entity (I - LIFE): A Basic Way to Innovate Future Advanced Biomimetic Soft Robotic), 并被选为期刊正封面故事 (图 39)。

在此项工作中，作者们指出，自然界众多巧夺天工的水相内环境生命设计策略完全值得充分借鉴和效仿。沿此基本思想，可发展出一系列变革性机器人设计思路，未来柔性机器人体内将拥有一系列如同生命体系那样贯穿全身的液体功能单元，并能以无缝方式将整个机体及功能集成到一起，作者们为此将其命名为智能液体集成功能体 (I-LIFE: Intelligent Liquid Integrated Functional Entity)，其缩略语也取“我·生命(I-LIFE)”之意。

为阐明机器人液体集成理论体系，论文从五方面代表性功能 (图 39)，即：运动、能量供应、结构调控、传感和智能控制等进行了论述，并系统讲解如何将液体系统充分介入到各层面以发挥特定作用。论文进一步列举了可作为 I-LIFE 候选液体的潜在对象，如：磁流变液体、液态金属、离子液体和水等，并解读了对应流体的技术应用特点。最后，对 I-LIFE 引申出的理论与技术挑战进行了剖析，并指出了未来发展的方向。

总的说来，液体集成 (I-LIFE) 的提出，可望促成柔性机器人研制理念的变革，在此方向上今后还有望发展出更多的理论与技术路线，从而为研制接近动物和人体功能的全新一代尖端柔性机器人打下坚实基础。



图 39. 期刊封面故事及智能液体集成单元(I-LIFE)系列典型功能

## (二) 下一步工作计划

- 1、进一步研究制备机械性能优异的 Janus 柔性薄膜，同时探究在 Janus 薄膜上制备纳米级液态金属电路的方法。
- 2、以液态金属为基础，探索研制能够对特定水环境发生响应的液态金属功能材料，以期应用于未来的机器人结构。
- 3、进一步拓展液态金属在医疗、柔性机器、可穿戴电子、印刷电子与 3D 打印、纳米技术、量子计算机领域的应用。