

中国科学院理化技术研究所“一三五”规划

季度进展报告

2019 年第一季度

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	12
培育二 环境友好材料与绿色生产工艺	18
培育三 激光显示及产业化	20
培育四 分散能源气体液化分离技术与应用	22
培育五 液态金属材料前沿技术	34

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 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；设置赵密广和陈厚磊 2 名主任助理，招聘库房管路及检验劳务派遣人员各 1 名；共召开 20 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. 冷箱：完成2500W@4K冷箱现场集成，500W@2K冷箱集成前期部件检验完成，开展现场集成，开展1000W冷箱集成准备工作，完成新2500W集成设计和新250W冷箱设计。

2. 集成：2500W@4.5K/500W@2K制冷机：完成整机系统的常温管线和低温管线组装，实现整机系统总装；完成制冷机系统用冷水机组的升级改造和群控联调；具备对各个焊口进行探伤特检工作的条件。

多透平与换热器组耦合调控平台（即新2500W@4.5K制冷机）：各关键部件的实时监管、验收和整机集成方案设计工作。

200W@4.5K制冷机：与中科富海共同开展200W@4.5K制冷机的再次实验，向中科富海提供相关集成的验收材料，配合韩国公司的现场验收。

1000W@4.K制冷机：与中科富海确认并完成在中山基地的布局方案和调试计划。

3. 流程设计：2500W制冷机控制柜的安装、集成以及控制程序及界面的编写、调试；完成1000W制冷机的控制柜安装；完成新2500W和1000W制冷机控制硬件的采购。

4. 冷压缩机：完成自主研制的冷压缩机第一轮样机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。实验

验证了设计的准确性和可靠性。

5. 压缩机及滤油：豪顿压缩机测试；1000W 平台压缩机发货。

6. 透平膨胀机：完成并收到了 2500W 透平的叶轮及机芯相应加工件，开展了 2500W 六个透平膨胀机机芯的组装及厂内调试工作、2500W 轴承气、透平气过滤器的设计及外协加工工作、2500W 制动端的设计及外协加工工作；1000W 下蜗壳交予冷箱方向进行集成，完成了 1000W 氦透平制动端的设计及外协加工工作、1000W 轴承气、透平气的过滤器设计及外协加工工作；验算并确定了新 2500W 透平的一维设计。着手开始准备富海委托的 400W 和 500W 共计四个透平膨胀机（含一个机芯备件）的设计工作。

（二）下一步工作计划

1. 冷箱：开展 500W@2K 冷箱集成，开展新 2500W 集成准备工作，开展新 250W 冷箱集成准备工作，开展 1000W 冷箱现场集成。

2. 集成：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；完成制冷机系统的置气和纯化工作，对制冷机系统进行首次整机调试实验。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.K 制冷机：在中山基地开展制冷机的现场布局设计和常温管道连接。

3. 流程设计：完成 2500W 制冷机 PLC 系统集成，桥架的搭建和安装，并进行系统集成与调试。

4. 冷压缩机：在实验数据基础上，完成冷压缩机正样设计、优化、加工，并在性能测试平台上进行性能调试。捷克冷压缩机运回 ATEKO 维修，确定下一次现场测试时间。完成磁悬浮平台验收工作。

5. 压缩机及滤油：锡压负压压缩机方案评审并制定进度计划；配合新 250W、1000W 和新 2500W 平台进行压缩机滤油方向的工作。

6. 透平膨胀机：依据整体进度安排，继续完成 2500W 氦制冷机透平膨胀机的整机装配和调试工作，预计四月中旬，2500W 透平膨胀机具备开机条件；开展 1000W 氦透平膨胀机机芯的组装及厂内调试工作，并着手开始整机装配。开展新 2500W 氦透平膨胀机的叶轮三维设计工作。按合同进度要求迅速推进富海 400W 和 500W 四个膨胀机的研制工作。

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 7 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，取得了一系列原创性研究成果，发表 SCI 论文 30 篇，其中包括 Nat. Commun. 1 篇，Angew. Chem. Inter. Ed. 2 篇，Adv. Mater. 1 篇，Adv. Funct. Mater. 1 篇，ACS Nano 1 篇，NPG Asia Mater.1 篇。

（一）本方向本季度重要进展

1. 仿生超浸润界面材料：纳米通道浸润性研究对于解决界面化学和流体力学中遗留的众多挑战性问题至关重要，并广泛应用于物质传输、纳米限域催化、限域化学反应、纳米材料制备、能量储存和转

化、液体分离等领域。纳米通道的尺寸是影响液体浸润性的关键因素，当通道直径小于 10 纳米时，通道内液体由于限域效应出现非连续流体行为；当通道直径大于 10 纳米时，通道为液体提供更大的受限空间，适用于液体传输和纳米材料制备。经过二十多年的发展，纳米通道浸润性研究仍面临许多挑战，其中最大的挑战是探索纳米通道中非连续流体的物理来源。随着纳米材料表征技术的进步，将为理解纳米限域流体浸润性的机理提供有力的实验证据。同时，分子动力学等理论模拟也将从理论上对实验结果提供支持。

围绕“量子限域超流体”，理化所将相关工作发表在《先进材料》上 (Adv. Mater., 2019, 31, 1804508)，文章介绍了“量子限域超流体”概念，并用于解释纳米通道中超快物质传输和非连续流体行为；文章还分别在理论和实验上总结了一维、二维和三维纳米通道浸润性，从分子模拟、液体浸润性、外部刺激（温度和电压）调控浸润性、熔体和液体浸润限域策略、液体传输和限域纳米材料制备等方面对纳米通道浸润性与应用进行论述；最后，文章在展望中指出，“量子限域超流体”概念将为理解纳米通道中非连续流体行为提供新思路，并将引发一场量子限域化学的革命。

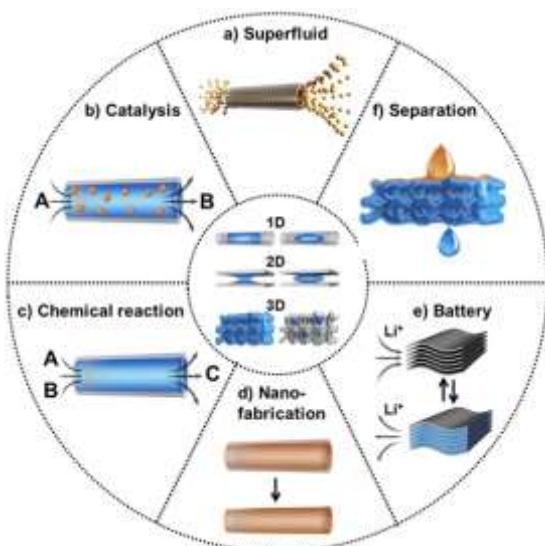


图 1. 纳米通道浸润性与应用

由于驱动器材料在软机器人，人造肌肉，传感器或微型装置等中的潜在应用，它们已成为重要的研究课题。在自然界中，从植物或动物驱动的角度来看，存在许多驱动器材料的实例。例如，捕蝇草在机械刺激下通过亚毫秒的速度关闭其叶片，以将昆虫和其他猎物与随机颗粒（如灰尘）区分开来。野生黄瓜依靠在茎上扭曲的卷须在阳光刺激下向上攀爬。毛毛虫通过身体皮肤的膨胀/收缩来改变皮肤皱纹的形状。受这些天然生物的启发，科学家开发出一系列软驱动材料，将外部刺激（如电，光，热和化学能）转化为机械运动。因此，各种软刺激响应材料如水凝胶，形状记忆聚合物和合成聚合物微驱动器已被探讨，以探测生物有机体的结构和适应性。在所有这些活性材料中，基于橡胶体的弹性和液晶的各向异性的结合，液晶弹性体（LCE）是这些多功能体系的典型代表。当发生各向异性-各向同性转变时，LCE 沿指向失方向表现出宏观收缩并输出驱动力。最近，LCE 已经被描述为人造肌肉的有价值的候选材料，并且在电动机，游泳者，微流体系统，自适应表面，有源光学装置，自清洁表面，响应环境的热伪装皮肤和智能装置中展示了有趣的潜在应用。

为能更好理解液晶驱动材料的研究进展，为制备新型的驱动材料提供重要的资料和见解，我们系统综述了液晶弹性体驱动材料的最新研究进展：包括加工技术，基本驱动结构/机理和相关的潜在应用。特别是，还讨论了由光，热，光热和溶剂/湿度刺激的 LCE 驱动器行为（如图 2）。构建 LCE 驱动器的主要策略包括调节 LCE 的指向失并设计响应分子。LCE 复杂的指向失产生了独特的驱动行为。通过进一步将响应分子引入 LCE，已经获得了具有不同驱动行为的 LCE 驱动器。此外，由其他加工工艺制造的 LCE 驱动器也表现出复杂的 3D 形

状变化。这些 LCE 驱动器在人造肌肉，柔性机器人，传感器等领域具有广阔的应用前景(J. Mater. Chem. C, 2019, 7, 3413-3428)。

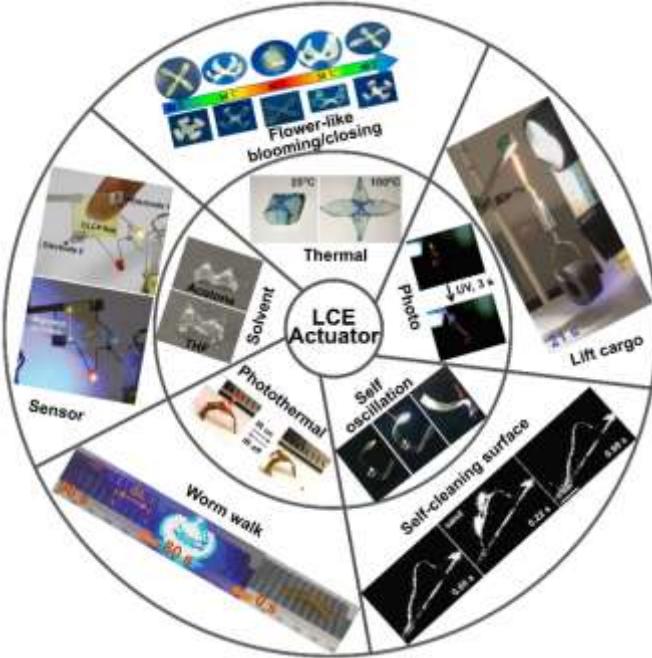


图 2. LCE 材料受到光、热、光热和溶剂/湿度的刺激的驱动行为

传统激光输出波长主要取决于激光介质的本征发射波长，光子晶体激光的输出波长是由激光介质的本征发射和光子晶体光子带隙所共同决定的，因此传统激光的输出波长调谐往往存在依赖外部复杂光路、波长调谐范围窄、调谐速度慢等缺点，而光子晶体激光可通过调节光子带隙波长位置来较容易地实现激光输出波长的调谐。我们通过将单分散高折光率微球表面进行二氧化硅包覆和负电荷基团修饰，或将单分散 Fe_3O_4 微球表面修饰聚吡咯烷酮(PVP)，在水或乙醇中分散，在磁场下获得 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PVP}$ 微球间磁极-磁极作用力与空间排斥力的平衡，形成长程有序排列，即胶体悬浮液光子晶体。改变外加磁场强度，微球颗粒间受力平衡被改变，使微球间距也发生改变，进而引起光子晶体光子带隙波长位置的变化，最终实现激光输出波长的调谐。

相比于传统基于聚合物骨架材料的响应性光子晶体，这种胶体悬浮液光子晶体激光体系具有可电场调控的、响应时间快、稳定性强等优点，对电场调控光子晶体激光的实际应用有重要意义。本工作已实现磁场控制光子晶体激光输出波长的调谐，波长调谐范围达 20 nm。该研究工作发表于 *J. Mater. Chem. C* **2019**, 7, 3740–3743。

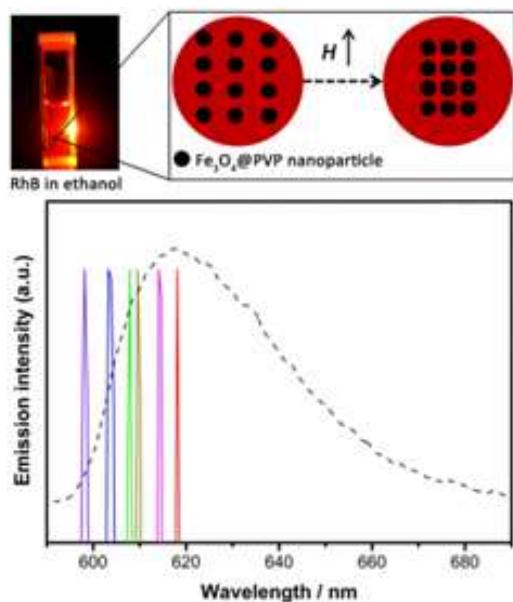


图 3. 光子晶体激光输出波长的磁场调谐

2. 仿生纳米孔道：海水与淡水之间的盐差能是一种巨大的清洁能源。在自然界中，电鳗鱼可转化盐差能为~600 V 的电能用作击晕猎物或避开捕食者，这归因于其细胞膜上大量的生物离子通道控制钾离子(K^+)，钠离子(Na^+)，氯离子(Cl^-) 分别地进入和排出细胞。受大自然启发和在双电层理论的基础上，许多纳米通道膜被开发用于基于反向电渗析方法的盐差发电。但纳米通道膜的规模化制备难题和较低的盐差能转换效率对盐差能的大规模开发利用仍然存在很大挑战。

理化所在限域空间内的离子传输行为及盐差发电方面开展了系列工作，研究人员与吉林大学特塑中心合作利用相转换方法构筑聚醚砜/磺化聚醚砜 (PES/SPES) 纳米通道膜 (功能层厚度<100nm) 用于

盐差发电，在500倍浓度梯度下实现了 2.48W/m^2 的功率密度。所制备的纳米通道膜具有高离子传导率，低成本以及可规模化制备，具有在盐差发电，溶剂分离，物质传输等领域应用的潜力。相关工作发表于Nano Energy (DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.02.056)。

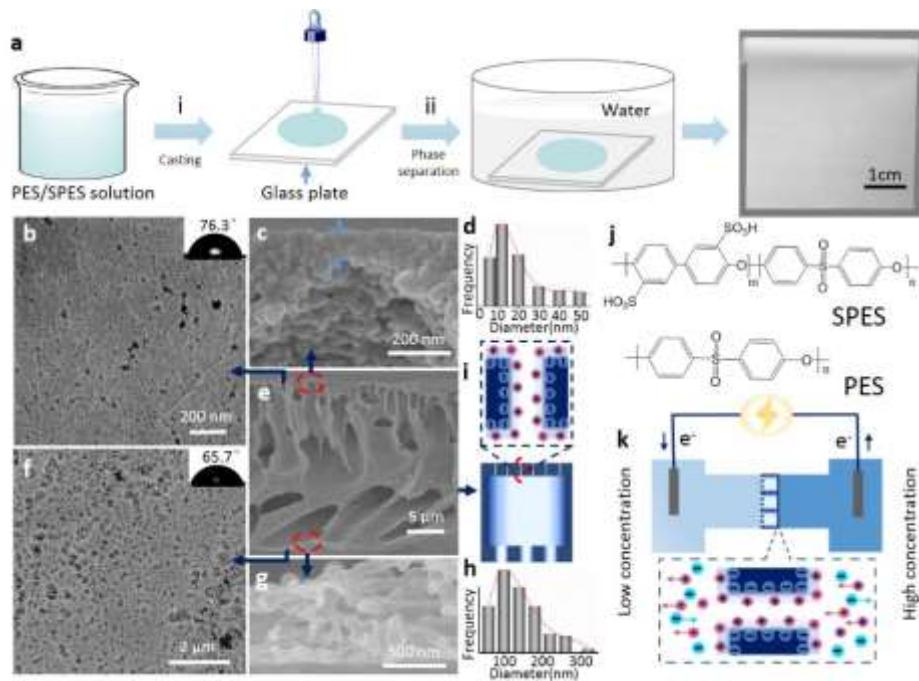


图4. PES/SPES膜的制备、结构及盐差发电示意图

3. 仿生粘附界面材料：尽管生物医用材料具有广泛的全球应用潜力，然而口腔正畸材料如弓丝等，依然面临巨大的挑战。致龋菌的粘附，镍离子的释放以及机械强度的弱点，都会影响它们的生物相容性和使用寿命。我们报道了一种仿生的超疏水Ni-Ti合金弓丝，通过改变弓丝与从表面接触到点接触的细菌悬浮液之间的接触模式，使其具有优异的抗细菌粘附特性，抗镍离子释放特性以及耐腐蚀性的多功能特性。这种生物启发的超疏水设计具有应用于其他牙科设备的潜力，并为开发新型多功能生物材料提供了新思路。该工作发表在Adv. Mater. Interfaces 2019, 6, 1801569，并被选为封面文章。

自组装是生命系统中不可缺少的基本过程。三维细胞聚集体作为体外自组装的模型，常被来研究细胞在体内的行为，如肿瘤发生等。

我们报道了细胞从简单到复杂的细胞聚集物的自组装行为，发现细胞聚集体的组装是由宏观尺度（限域的模板）和纳米尺度（细胞间相互作用）的多级拓扑作用共同诱导的。一方面，宏观限域的模板有利于单个细胞组装成各种形状的简单或者复杂的细胞聚集体；另一方面，这些复杂细胞聚集体的实现也依赖于纳米尺度的细胞间相互作用，这种相互作用表现为相邻前缘细胞伸出的伪足之间的亲密接触以及基于钙粘着蛋白的分子间相互作用的变化。这些发现对于阐明肿瘤发生发展的组织机制、组织工程和再生医学具有重要意义。该工作发表在 *Small* 2019, 15, 1900030, 并被选为封面文章。

4. 仿生微纳米结构的构筑和加工：富含网络结构的水凝胶具有良好的生物相容性，而具有高精细度的三维水凝胶结构能够更好地模拟细胞生长环境，在生物组织工程领域具有巨大的应用潜力。基于非线性光学效应的双光子聚合技术为制备高精细三维仿生水凝胶结构提供了强有力的手段。但由于现有双光子引发剂的水溶性差、双光子聚合引发效率低，需要在加工前驱体材料中加入有机溶剂助溶以提高双光子引发剂含量，所制备的三维水凝胶微结构中易残留有机溶剂，导致较强的细胞毒性，成为其在组织工程领域应用的瓶颈问题之一。

我们从分子结构设计出发，设计合成了具有良好双光子吸收特性的戊基咔唑基双光子吸收材料（分子式如图 5 所示），利用具有相对较大内腔尺寸和良好的水溶性的葫芦脲 7 作为主体对咔唑类衍生物进行包结，设计合成了基于主客体化学原理自组装的水溶性双光子引发剂，所制备的最佳络合比 1:1 的引发剂在提高了水溶性的同时，其双光子吸收截面比客体分子提高了 5 倍。利用这种新型水溶剂引发剂设计了组分简单的水相聚合光敏材料，实现了聚合阈值仅为 4.5 mW、

最细线宽 180 nm 的纯水相高精细仿生水凝胶结构的双光子聚合。

进一步构筑了具有较好结构保真度和力学性能的木堆型光子晶体和 S 型管道、细胞支架结构等三维仿生水凝胶结构，研究了细胞的生长行为，并结合荧光探针标记和显微成像研究，证实了利用该引发剂及纯水相聚合光敏材料具有良好的生物相容性，为水凝胶材料在组织工程领域中的应用提供了新的途径（图 6）。结果发表在 ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 11 (2), 1782-1789。

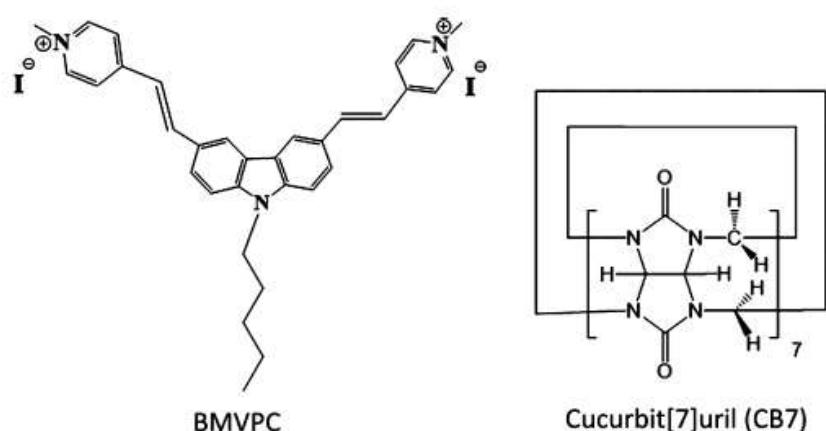


图 5. 吲唑基化合物与葫芦脲的化学结构式

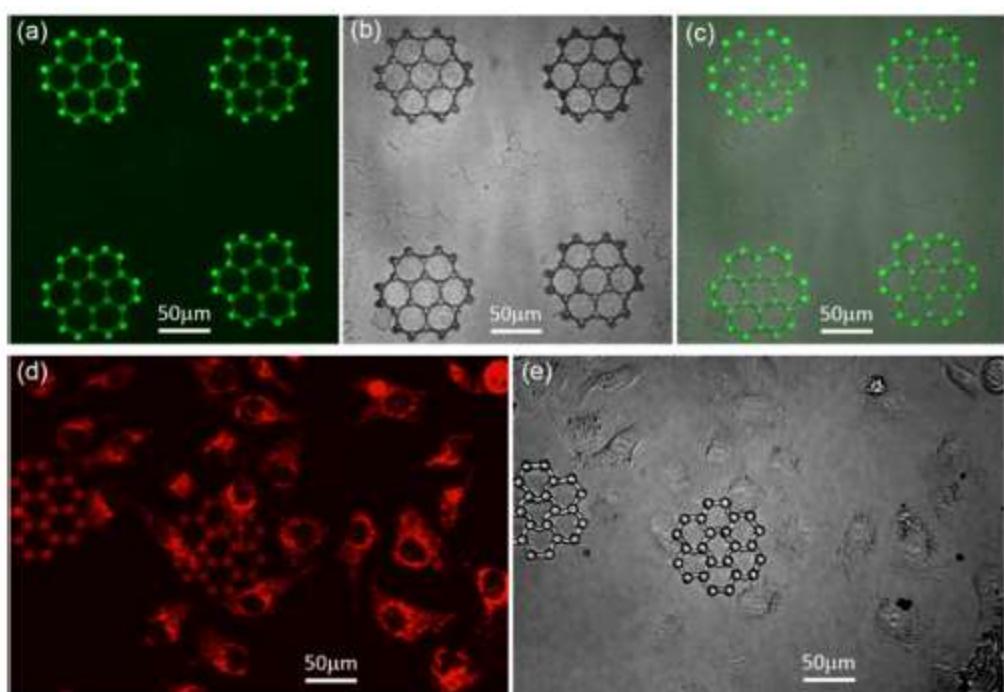


图 6. 水相中双光子聚合构筑仿生三维细胞支架结构

(二) 下一步工作计划

1. 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。
2. 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。
3. 围绕界而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。
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. 可见及近红外光响应的水相有机室温磷光

有机室温磷光 (RTP) 较长的发光寿命和独特的产生机制在光电、

传感及生物等领域具有广阔的应用前景。然而，有机化合物三重激发态生成效率低且辐射跃迁禁阻的特点使通常情况下获取有机室温磷光非常挑战。虽然利用紫外光（UV）激发能够在固态观测到有机室温磷光，但紫外光较强的损伤性和较低的穿透率，以及固体很难分散在水中进入生物体内的缺点，迫切需要发展可见及近红外光激发的水相有机室温磷光。利用 β -二羰基氟硼衍生物优异的光物理性能和组装性能，制备了水中均匀分散的纳米组装颗粒，其在水相及 HeLa 细胞中表现明亮的可见及近红外光响应的有机室温磷光。这是首例将固态紫外光（UV）激发有机室温磷光发展到水相可见及近红外光激发。更为重要的是，通过系统的光谱研究、晶体结构解析以及密度泛函理论计算，首次揭示了组装体高效的有机室温磷光源于激发态的二聚体。这为深入理解有机室温磷光的发光物种提供了一个新模型。相关工作发表于 *J. Am. Chem. Soc.* 2019, 141, 5045–5050。

2. 单原子钴光催化分解水产氢

单原子催化作为沟通多相催化和均相催化的纽带，既保留了多相催化剂稳定性好和易回收的特点，同时也具备了均相催化剂原子利用率高和易于研究催化机理的优点，已经成为当前研究热点和前沿。单原子催化剂容易聚集形成团簇甚至纳米材料，传统方法制备的单原子催化剂负载量通常小于 1.5 wt%，因此制备高负载量的单原子催化剂仍然面临巨大挑战。利用富含氮原子的共轭有机配体和氯化钴作为前体，在热解条件下原位制备了氮掺杂碳材料负载的单原子钴催化剂，负载量最高达到 5.9 wt%。进一步利用 g-C₃N₄ 作为光催化剂、单原子钴作

为助催化剂、三乙醇胺为牺牲剂，实现了高效的光催化分解水产氢，产氢速率达到 $1180 \mu\text{mol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。该工作为制备高负载量的单原子催化剂提供了新的策略。近期以背封面文章的形式发表在*Chem. Sci.* **2019**, *10*, 2585-2591。

3. 三维金属磷化钴催化氨硼烷放氢

近年来，氨硼烷储氢材料的催化制氢引起广泛关注。然而，贵金属催化剂在氨硼烷催化制氢中的高价值消耗是该策略大规模实际应用中的一个重大限制。在此，我们使用双金属-金属有机骨架模板策略，成功地设计了三维多孔磷化钴碳基纳米框架（CoP @ CNFs）作为无贵金属的高效催化剂。存在于 MOF 前体中的 Zn 离子在分离 Co 离子和在热解过程中保持骨架方面起着双重作用。因此，多孔 CoP @ CNF 具有较大的比表面积，分层多孔结构，良好暴露的活性位点和亲水通道，具有高效的催化氨硼烷产氢性能。相关工作发表在 *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 8277-8283。

4. 本征碳缺陷驱动的电催化二氧化碳还原

碳基催化剂因具有资源丰富、导电性好、比表面积大、环境友好等优点而被广泛应用于电催化 CO_2 还原反应中。但是，碳基催化剂电催化 CO_2 还原活性位点尚存在争议，广泛存在于碳基材料中的本征碳缺陷在电催化中扮演的角色仍是未知的。我们设计合成了两种富含本征碳缺陷的催化剂，发现本征碳缺陷浓度与催化活性呈正相关，通过密度泛函理论计算及 X 射线精细结构谱（XAFS）证明了 sp^2 缺陷（八边形和五边形）比边缘缺陷类型具有更好的催化活性。此工作对寻找

高效、稳定的电催化二氧化碳还原催化剂具有重要的指导意义。相关研究结果已发表在 *Adv. Mater.* 2019, 1808276。

5. 通过调控氧缺陷实现高效光催化固氮合成氨

基于二价 Cu 离子特殊的姜-泰勒效应，通过 Cu 在缺陷位点的掺杂实现了对二氧化钛的表面缺陷态的精准调控，从而促进氮气吸附和活化，提高光催化固氮反应效率。6%-TiO₂ 纳米片在 700 nm 处量子产率可达 0.05%，体现稳定优异的催化性能。这项工作为优化材料中氧空位浓度，用于高效光催化合成氨提供了一条新的思路和途径。相关研究工作以通讯形式发表在 *Adv. Mater.* 2019, 1806482。

6. 提高光/电催化合成氨实验中产物检测的准确性和可靠性的方法及准则

近年来，开发新型高效的光/电合成氨的催化剂和反应体系是当前研究的新兴领域，由于反应过程中广泛存在 NHx 来源和一系列对氨检测存在的干扰物，准确测定氨浓度其实是很具挑战性的。我们系统地比较了多种常用的检测方法在水介质中对氨定量的优点和局限性，结果表明，溶液的 pH 值，某些金属离子，牺牲剂和含氮化学物质的存在都会对氨的检测和定量产生不利影响，往往导致报道的氨产量可能不十分准确乃至失去参考意义。因此，基于所提供的数据支持，我们构建了一个流程图，以帮助研究人员选择最佳的氨定量检测方法。该工作将为进入合成氨领域的科研人员提供指导和借鉴，避免许多与氨检测和定量相关的常见误区。同时，该研究将会促进可靠的氨检测技术的改进和开发。相关研究工作发表在 *Adv. Sci.* 2019, 1802109 上。

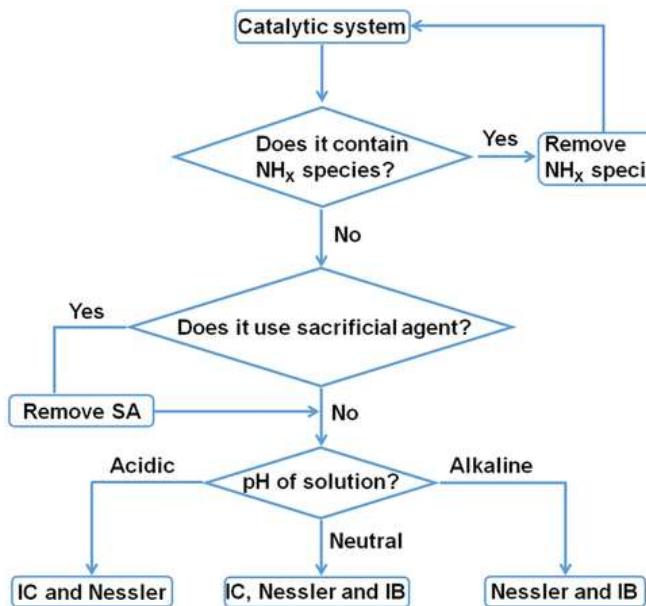


图 7. 氨定量检测方法流程

7. 氮掺杂的石墨烯负载的单原子 Pd 催化剂的制备及乙炔选择性加氢性能

通过催化乙炔选择性加氢到乙烯是目前工业上除去乙烯中残留的少量乙炔的主要方法。通过简单的冷冻干燥协助方法制备的碳材料负载 Pd 单原子催化剂，由于 Pd 组分的原子级分散，同时由于催化剂基底为二维石墨烯，提高了贵金属 Pd 的原子利用率并大大增加了反应的活性位点，实现了乙炔加氢反应在氩灯光照加热条件下的高乙炔转化率、高乙烯选择性以及优异的稳定性。密度泛函理论计算结果表明，原子级分散的 Pd 能够有效抑制乙烯过度加氢至乙烷。该研究成果为设计合成高效的选择性加氢反应催化剂提供了新思路。相关研究成果已发表在 *Adv. Mater.* 2019, 1900509。

8. 可见光催化芳香醇高选择性氧化放氢反应

传统的醇类氧化方法主要采用化学计量的强腐蚀性强氧化性的高价铬、含氯化合物、高价碘、双氧水等强氧化剂，容易产生环境污

染等问题。利用廉价的有机小分子染料曙红作为光敏剂、原位生成的非贵金属镍-巯基丙酸的配合物作为催化剂、绿光 LED 为光源在水相中实现了光催化芳香醇化合物高选择性氧化生成醛酮类化合物。机理研究证实激发态光敏剂首先与镍配合物发生光诱导电子转移。该方法反应条件温和，避免了腐蚀性强氧化剂的使用，唯一副产物为氢气，反应具有很高的原子经济性。为“绿色氧化合成”提供了新途径。相关研究结果发表在 *Green Chem.* **2019**, *21*, 1401。

9. 精准合成五蝶烯衍生的碳纳米双环分子

对苯撑衍生的碳纳米环分子具有独特的几何结构和光电性质，然而由于富含高度弯曲的苯环单元使得此类大张力共轭分子的合成颇具挑战。最近，我们利用光化学合成手段，精确合成了首例五蝶烯衍生的碳纳米双环分子，合成路线中的跨环[4+2]环加成一步在 64 员大环以高效率实现，是目前报道的跨最大环的成键反应。这一兼具五蝶烯和对苯撑共轭结构的大环分子具有较高的荧光量子产率，经过拆分后的具有光学活性的大环分子表现出较好的圆偏振发光性质；单晶结构测试表明该分子可通过非共价作用在固态下呈现砖墙型的有序堆积，并具有长程孔道结构。上述结果显示该分子在多孔材料、光电材料等方面的潜在应用价值。相关结果发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, *58*, 3943，并被中国科学院主页及官方微信号“中科院之声”（《合成碳纳米环研究取得新进展》）、德国学术评论期刊 *Synfacts*（Open and Shut Synthesis of an Oligoparaphenylene Dual Nanohoop, *Synfacts* **2019**, *15*, 367）、X-mol.com（《精准合成五蝶烯衍生的碳

纳米双环分子》)、化学加网(《理化所丛欢研究员团队在精确合成碳纳米环分子方面取得新进展》)等多家媒体和学术网站刊文介绍。

10. 量子点组装体光驱动多电子氧化还原反应的综述

近年来, 可见光驱动的多电子氧化还原反应(如: 光催化质子还原产氢、二氧化碳还原以及水氧化产氧等)可以将太阳能转换为化学能存储, 引起了科研工作者的广泛关注。近日, 我们总结了目前常见的四类构筑量子点组装体的方法, 介绍了量子点组装体在可见光驱动多电子氧化还原反应中的研究进展, 阐明了量子点组装体的优势, 并展望了其在固氮、二氧化碳还原、可见光催化有机转换中的潜在应用, 相关研究成果发表在 *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, doi: 10.1002/anie. 201901267。

(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

“埃塞俄比亚牛羊骨资源调研、分析检测及绿色酶法明胶示范工程”启动实施, 1) 中埃联合实验室建设, 已和埃方协商关于联合实验室建设工作计划和初步实验室设计, 并已完成明胶相关实验室设备的国内采购, 经审批后将运赴埃塞动物制品研究所; 2) 埃塞 3000 吨明

胶厂的一期工程启动，投资约 2000 万建设 20000 吨/年骨粒加工厂，目前已完成厂区设计、启动厂房建设和能源系统建设，相关设备的国内购置已完成，准备启运。

2. 建立酶法明胶骨粒标准及测试方法

完成不同来源地内蒙古、广西、山东三省市牛的骨粒同位素和微量元素分析，经过统计分析，建立多系数拟合方程，得出基于同位素和微量元素的溯源分析方法，在现有数据量的基础上，基于同位素分析方法的地域分类准确率超过 95%；基于微量元素分析方法的地域分类准确率超过 99%。证明两种方法均可用于原料的地域溯源检测。

3. 酶法明胶制备胶囊技术研究

与国内最大的胶囊上市企业黄山胶囊进行技术交流，并就酶法明胶的基本特性和胶囊制备过程中的技术问题进行详细沟通。基于酶法明胶的溶解、发泡、成膜、吸水性质与传统碱法明胶的差别，根据研究所中试所获得的基本认识，提出胶囊制造过程的优化方案，后续将在黄山胶囊生产线进行大规模生产实验。

（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工艺研究。在酶制剂中试结果的基础上，与相关企业洽谈酶制剂放量生产的合作，根据酶制剂生产流程要求和规模，完成给厂家配套相应的过滤装备和部分干燥设备，预计 2019 年二季度开展酶制剂工业生产实验。

2. 酶法明胶生产优化，主要骨原料的预处理方案的调整和优化，以及固液分离过程中系统参数优化和过程控制：1) 以便获得更高的

收率，目标是超过 14%。2) 增加酶法胶透过率，420nm 的透过率超过 85%。

3. 根据“一带一路”项目任务书，根据制定的 2019 年中埃联合实验室的工作计划，并稳步推进埃塞联合实验室建设和明胶技术转移工作。

培育三 激光显示及产业化

概述：2019 年第 1 季度在研项目 3 项，包括国家重点研发计划 3 项。完成 1 项工信部“我国新型显示产业发展研究”战略咨询课题并通过验收。

（一）本方向本季度重要进展

1. “我国新型显示产业发展研究”战略咨询课题顺利通过验收

完成工信部委托理化所牵头开展的“我国新型显示产业发展研究”战略咨询课题，并顺利通过验收。相关建议得到国家科技和产业主管部门认可，文章发表在工信部内刊中。

当前显示产业发展到了“更新换代大洗牌”阶段，多种技术/产业竞相发展，如液晶显示（LCD）、有机发光（OLED）显示、量子点（QD）显示、发光二极管（LED）显示、电子纸（E-paper）显示、三维（3D）显示、激光显示（LDT）等。我国显示产业正处在由大变强的产业转型机遇期，在日益复杂国际形势下显示产业自主可控安全发展，需要全面分析各种新型显示技术特点和发展现状，明确我国显示产业的发展方向，制定相应发展路线图。

基于上述背景，理化所牵头开展了“我国新型显示产业发展研究”

战略咨询课题研究，围绕以 LCD 显示、OLED 显示、激光显示、量子点显示、LED 显示等为代表的我国新型显示技术和产业现状的发展现状、发展需求、技术攻关与产业发展重点开展战略研究，凝练了我国显示产业的发展方向和路线图，形成超过 8 万字的“中国新型显示产业发展研究报告”，以刘韵洁院士、丁文华院士为代表专家组一致认为：“……中国新型显示产业发展研究”报告一份，提出了新型显示产业共性技术和发展政策措施建议，为国家及相关研究机构进行战略规划、技术布局、研发投入和政策制订等工作提供了支撑”，顺利通过验收。

在工信部电子科技委内刊《电子科学技术》（2019 年第 1 期）发表文章《激光显示是我国新型显示技术发展主流》，提出了“以激光显示产业为主要发展方向，同时开拓多种新型显示的特色市场，百花齐放全面发展，圆“十三亿中国人看中国（安全）电视”的中国梦，推动我国显示产业由大变强，成为显示产业强国，为中华民族百年复兴做出应有贡献”的建议，也得到了工信部的认可。

2. 中科极光自主开发的高亮度工程投影设备产品产业化工作进展顺利

中科院理化所与杭州中科极光科技有限公司开发的高流明激光工程投影机产品已在北京、上海、深圳、长春、郑州、西安、青岛、绵阳、杭州等 50 多个典型城市实现商业应用，先后在济南大明湖项目、渭南灯光秀项目、南昌滕王阁投影项目，西安城墙灯光秀项目，杭州智管中心大屏幕采购项目，实现了商业应用，高亮度、广色域、

超高稳定性以及智能化控制系统得到了用户的一致肯定。在 2019 年第 1 季度，在合肥和平广场、哈尔滨中央大街、奥林匹克森林公园等大型商业项目该产品进行了演示，在与国外品牌竞争中完胜，有望打破了国外品牌在该领域的垄断地位，预期实现超过 2000 万的直接经济效益。

（二）下一步工作计划

通过国家重大活动应用的宣传、国家主要科技和产业部门的建议，推动激光显示成为下一代显示产业主流。

1. 拓展激光显示在国家重大活动的应用，提高理化所和中科极光在领域的影响力，例如开展激光显示在北京冬奥会和世园会的应用，包括开幕式/闭幕式、转播厅/中控室/会议室、室外景观照明等。

2. 鉴于激光显示已进入到快速发展的机遇期，将进一步呼吁将激光显示发展成下一代显示产业主流，向工信部、科技部、工程院等权威部门提供建议。

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. 液化技术体系的基础研究

（1）两相流动及传热基础研究

基于图 8 所示的流动冷凝实验平台，测得了纯质 R14 的流动冷

凝传热数据。工况为饱和压力范围 1-3MPa, 质量流率范围 100-650 kg m⁻² s⁻¹, 热流密度范围 8.3-28.2 kW m⁻², 干度范围 0-1。

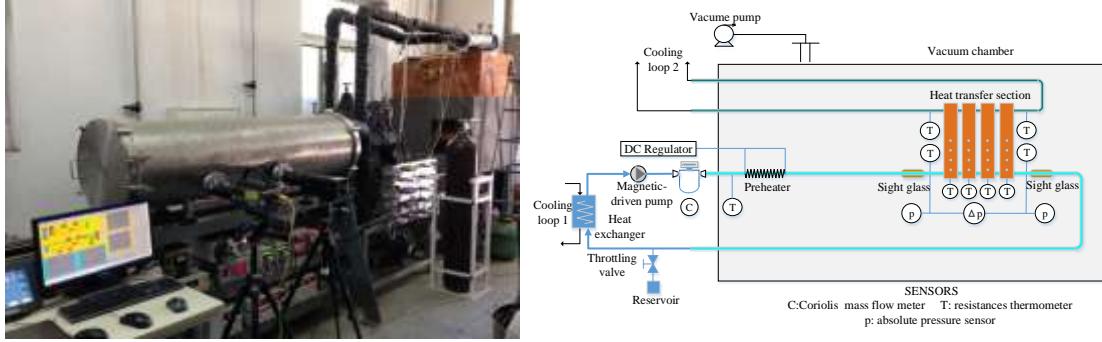


图 8. 流动冷凝实验平台

主要研究了质量流率、饱和压力、干度和热流密度对传热系数的影响。

质量流率对流动传热的影响: 图 9 所示的是不同质量流率下, 纯质 R14 饱和流动冷凝传热系数随干度的变化。

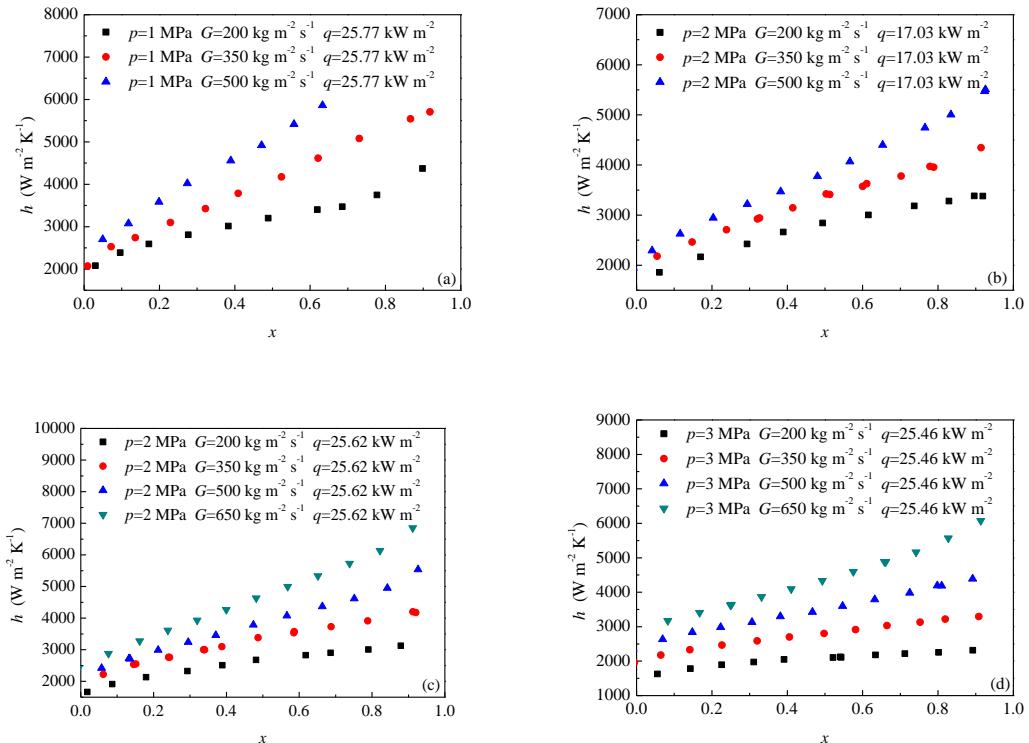


图 9. 质量流率对 R14 流动冷凝传热系数的影响

可以看到, 传热系数随着质量流率的增大而增大, 且随着干度的

增大，质量流率对传热系数的影响越明显。这是因为质量流率越大，气液相流速越大，使得冷凝液膜的湍流度增大，令气液相界面的扰动更为剧烈，从而增强了强迫对流传热作用，导致传热系数增大。另外，干度越大，管底部液膜厚度越小，气相流速也越大，使得强迫对流传热在总传热中的地位越重要。而强迫对流传热主要受流速的影响，因此干度越大，质量流率对传热系数的影响越明显。

饱和压力的影响：图 10 所示的是不同饱和压力下，纯质 R14 饱和流动冷凝传热系数随干度的变化。可以看到，传热系数随着饱和压力的增大而减小，且随着质量流率的增大，饱和压力对传热系数的影响也越明显。饱和压力的影响主要归结于工质物性的变化，如表 1 所示，气相密度随着饱和压力的增大而增大，使得在一定质量流率下气相流速减小，导致液膜湍流度减弱。另外，液相密度会随饱和压力的增大而减小，气液相密度比增大，使得空隙率减小，从而导致液膜厚度增大。以上因素都会造成传热热阻的增大，使得传热系数减小。

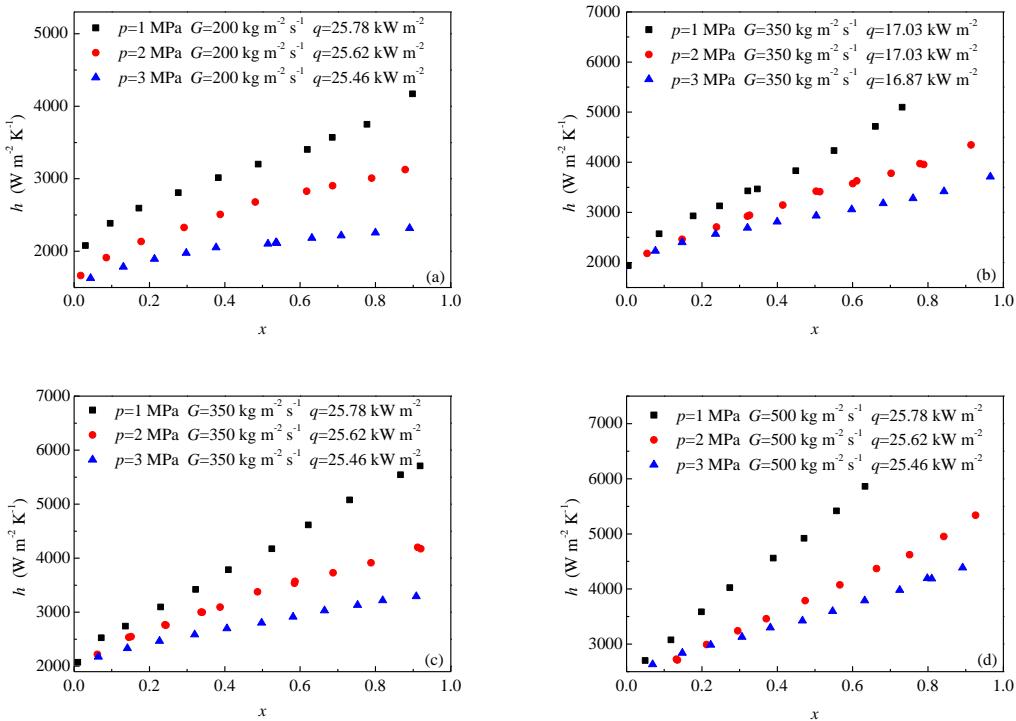


图 10. 饱和压力对 R14 流动冷凝传热系数的影响

表 1 R14 的热力学物性

Fluid	p (MPa)	T (K)	ρ_l (kg/m ³)	ρ_v (kg/m ³)	μ_l (μ Pa s)	μ_v (μ Pa s)	σ (mN/m)	Bd
R14	1.00	188.39	1337.50	69.52	117.39	12.31	4.77	41.73
	2.00	207.32	1172.20	151.52	85.99	14.89	2.10	76.27
	3.00	219.98	998.97	272.10	63.86	18.31	0.62	184.48

热流密度的影响: 图 11 所示的是不同热流密度下, 纯质 R14 饱和流动冷凝传热系数随干度的变化。可以看到, 在本实验工况范围内, 热流密度变化对传热系数的影响不大。热流密度的变化主要通过对管壁上的液膜产生影响来影响传热。随着热流密度的增大, 液膜温度降低, 使得其导热系数增大, 强化换热。另外, 随着液膜温度减小, 其密度和粘度也增大, 使得液相流速减小, 则抑制换热。两者作用相互抵消, 导致热流密度变化对传热系数的影响不大。

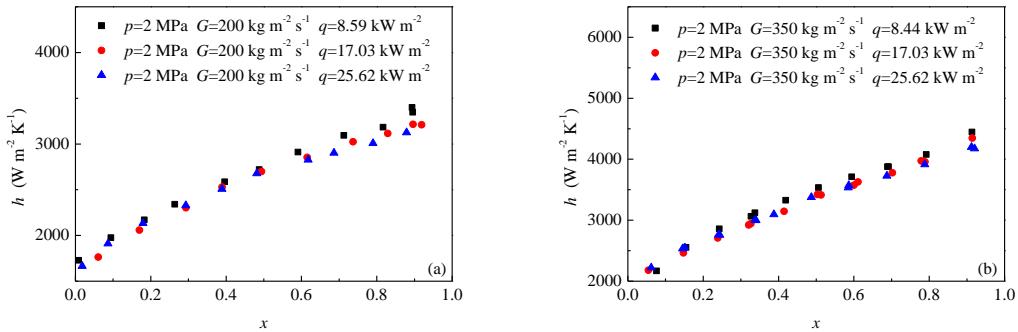


图 11. 热流密度对 R14 流动冷凝传热系数的影响

干度的影响: 图 9 至图 11 展示了干度在不同工况下对纯质 R14 饱和流动冷凝传热系数的影响。可以看到, 传热系数随着干度的增大而增大, 且随着质量流率的增大和饱和压力的减小, 传热系数随干度增大的程度越明显。这是因为干度增大会使得空隙率增大, 导致液膜厚度减小, 则传热热阻减小; 干度增大, 还会使得更多液相转化成气相, 气相流速增大, 增强了液膜的湍流度, 这些因素均会导致传热系数增大。另外, 随着质量流率的增大, 气相流速会增大, 而随着饱和

压力的减小，空隙率会增大。所以，干度对传热系数的增大程度随着质量流率的增大和饱和压力的减小而增大。

(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℃时，COP 较传统单效系统提高了近 20%。

基于该新型热泵循环开展实验研究工作，并优化发生器的结构。设计了三种发生器结构，其中绕管式发生器易于加工，造价低廉，但其结构不够紧凑，体积大，传热系数相对较低。而设计的肋板式发生器其可实现较大热源利用温跨，传热系数高，且体积小，但其加工难度大，造价高且存在热启动困难等问题。综合考虑加工工艺和传热系数，本实验系统采用类降膜式发生器（图 12）。发生器采用压花螺纹管，管内为导热油路，管外为溶液路，发生器壳体与螺纹管之间填装 5mm 散装填料。其中压花螺纹管，能起到双侧强化换热的作用，加剧了近壁面处流体与中心流体的混合，使传热系数增大。散装填料可以强化传热传质。目前该实验台正在进行工质冲注，后续的实验研究可以验证前期模拟结果，并为吸收式热泵集成化设计提供指导意义。

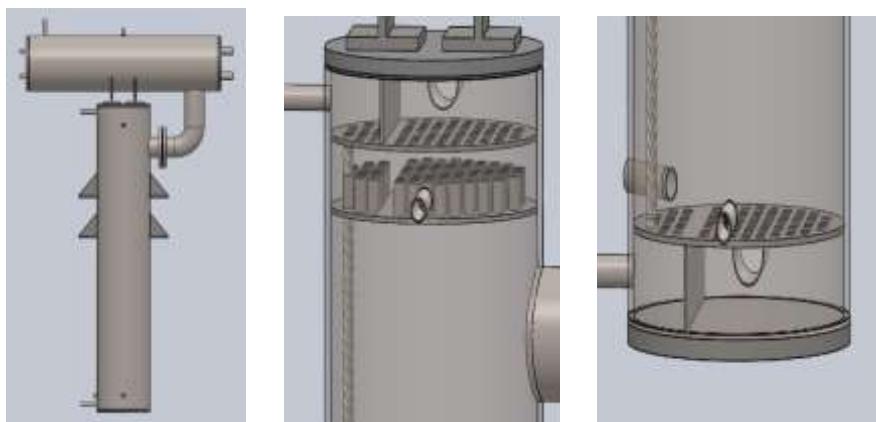


图 12. 类降膜式发生器

(3) 混合工质节流制冷循环基础热力学问题

混合工质回热器内的温度-负荷分布与工质冷热流体的等效热当量有关，而等效热当量由显热和潜热组成。由于工质组元在高压比热（显热）大于低压比热，而低压潜热大于高压潜热，通过调节工质组元配比可实现冷热流体热当量的匹配。某一组元大量释放其潜热的温度区间可认为是其发挥作用的温区，在该温区内该组元大量从液相混合工质转移至气相混合工质。通过计算某一组元在气相混合物中的摩尔流量占其在混合物中的总摩尔流量之比例，得到了该比例剧烈变化的温区，如图 13 所示。然而由于组元间强烈的相互作用和相互溶解，得到的作用温区范围较宽 ($> 50 \text{ K}$)，需要进一步根据回热器内温度-负荷分布曲线的极值点作为划分方法。

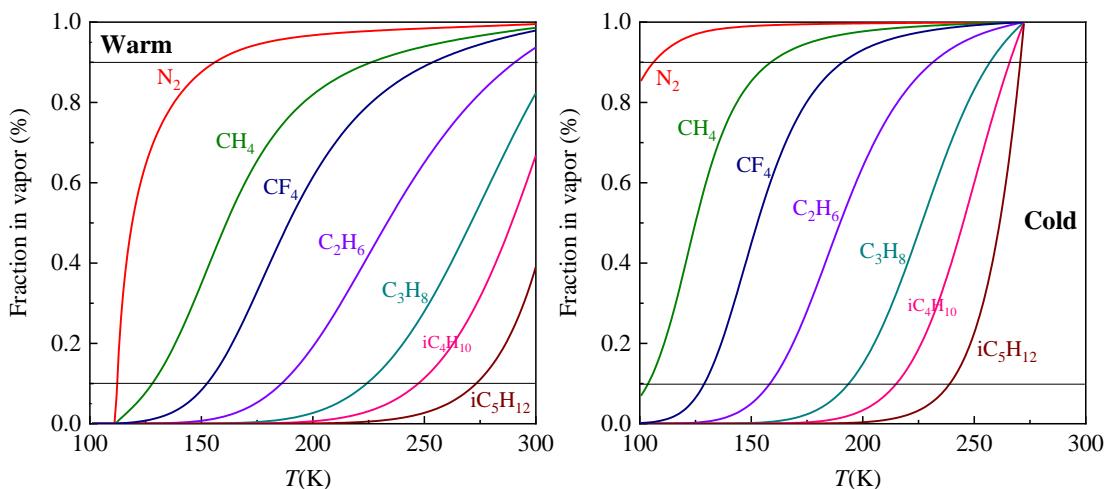


图 13. 以潜热贡献量为依据划分的混合工质各组元作用温区

2. 液化核心技术研究

(1) 变温吸收制冷系统性能分析

“连续变温”技术可以利用有限热容热源获得更多的供热量，使得系统各部分的温度与余热温度实现良好的温度匹配，降低系统熵损失，提高系统效率。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，利用 ASPEN PLUS 进行模拟，

探究其变工况特性，该系统制冷量约 350kw。

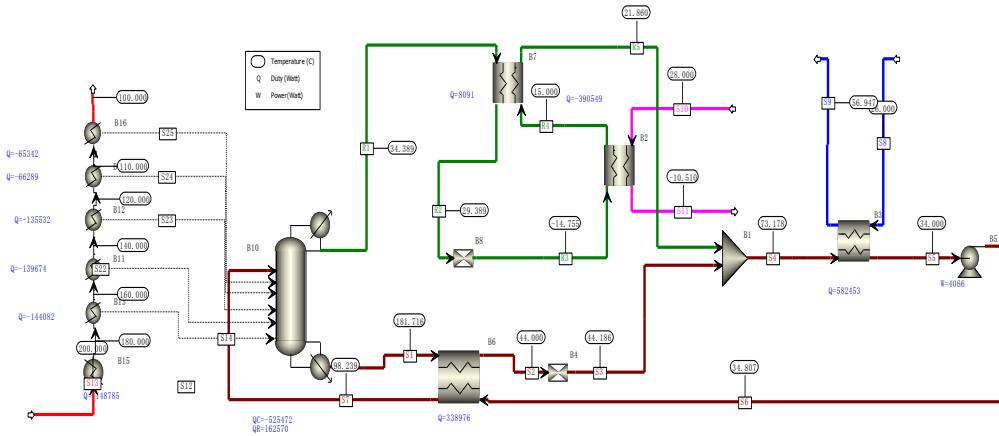


图 14. 350KW 吸收式制冷系统

该系统利用导热油回收烟气余热，并向制冷系统提供热量。导热油温度从 200℃降至 100℃，提高了有限热容的能源利用效率。分析了提馏段加入热量对系统参数的影响，并探究了系统变工况特性，以期为后续的实验系统或者工程样机的参数设置和调整提供指导意义。

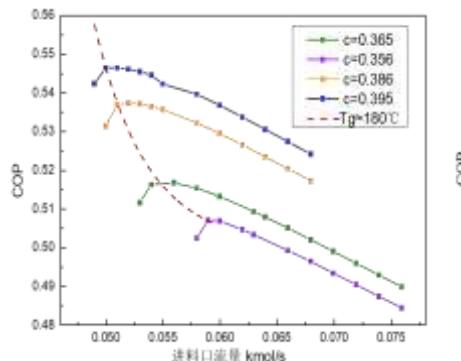


图 15. 系统进料参数优化

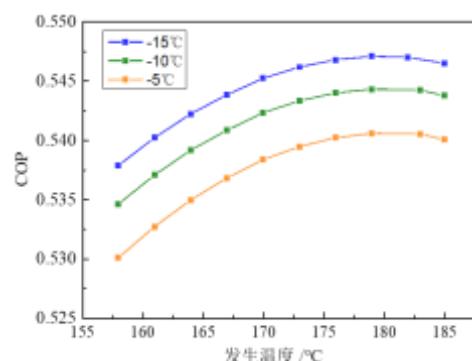


图 16. 系统发生温度优化

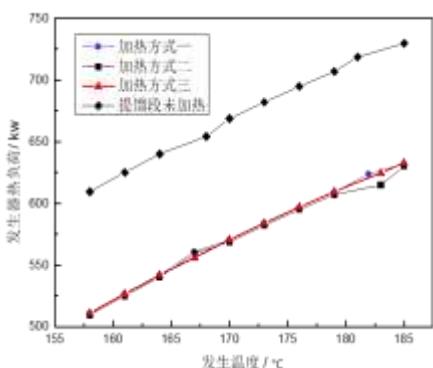
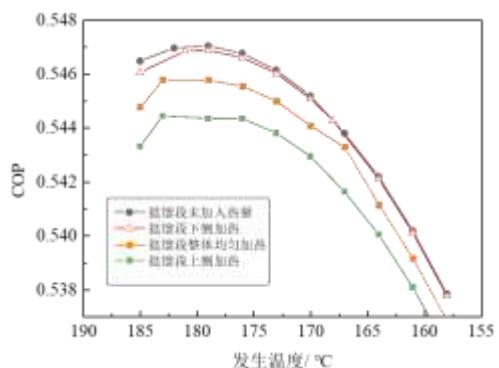


图 17. 不同提馏段加热方式对系统性能的影响

通过调整系统进口流量和浓度优化系统运行参数，改变发生温度探究其对系统性能的影响，确定系统最佳发生温度可设定为 180℃。通过对提馏段上部、中部、和整体均匀加热等方式，优化提馏段加热结构。结果表明，在提馏段加入热量，会使系统性能略有下降。综合考虑能源利用效率和系统运行效率，提馏段建议采用均匀布置的换热结构。

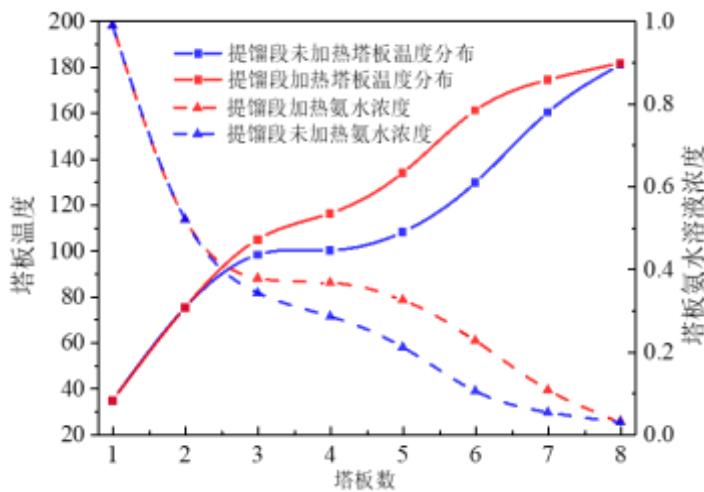


图 18. 提馏段加热对精馏塔的影响

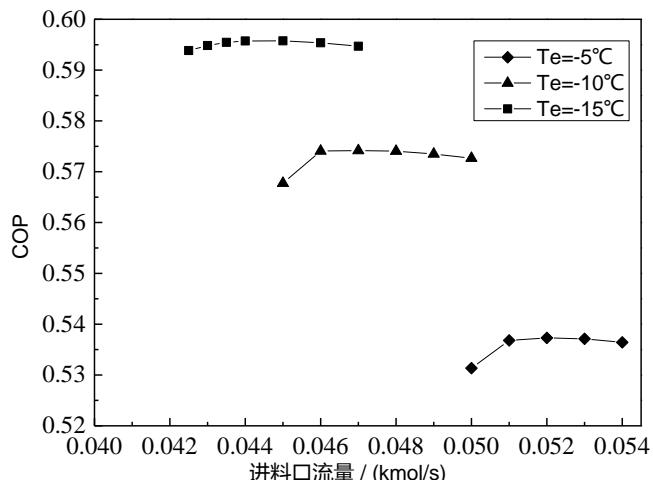


图 19. 发生温度变化对系统性能的影响

探究提馏段加入热量主要影响精馏塔的运行参数，结果表明，提馏段加入热量使得塔板温度有所上升，因此对应塔板的氨水浓度有所升高，不利于氨水的分离。但提馏段加入热量，降低了部分发生器的

热负荷，实现了发生器的大温跨变温余热利用。此外，当蒸发温度升高时，系统运行的最优氨水浓度升高，系统性能升高。当冷凝温度升高时，系统发生压力升高，不利于氨水的解析和分离过程，系统 COP 下降，制冷量下降，需要调整回流比来保证系统精馏组分的浓度。

(2) 氨吸收制冷新型发生器实验研究

基于前期的模拟工作和初步的实验工作，替换试验台提馏段的换热装置。取消原试验台电加热的加热方式，提馏段采用绕管换热器和散装填料。其中缠绕管内侧走导热油路，管外为溶液路，3mm 散装填料来强化导热与与溶液的传热和溶液组分分离的传质过程，进而提高系统效率。



图 20. 新型提馏段内部换热结构局部图及整体图



图 21. 吸收式实验系统实物图

通过改变导热油干流阀门及新型换热结构外侧的旁通阀门，可以实现不同的新型换热结构和塔釜的加热量比值。同时考虑到导热油加热器的加热功率上限和实际精馏塔进料流量较为固定，整机系统的总

加热量也需要固定在一较为稳定的范围内，本实验中，通过在模块显示器上显示导热油流量和导热油进出口温差的乘积来确保各实验工况的实际加热量的稳定。本实验台中，溶液泵采用的是液压隔膜计量泵，可以实现在 0 至满量程之间无级调节，据此展开了下述精馏塔精料流量（循环量）对系统性能的影响。

通过旋转液压隔膜计量泵尾端的冲程结构，使其示数分别为 3,4,5, 和 6 下，即实际流量为 9.3L/h,12.4L/h,15.5L/h,18.6L/h 下进行实验，所得的系统性能数据分别如图所示：

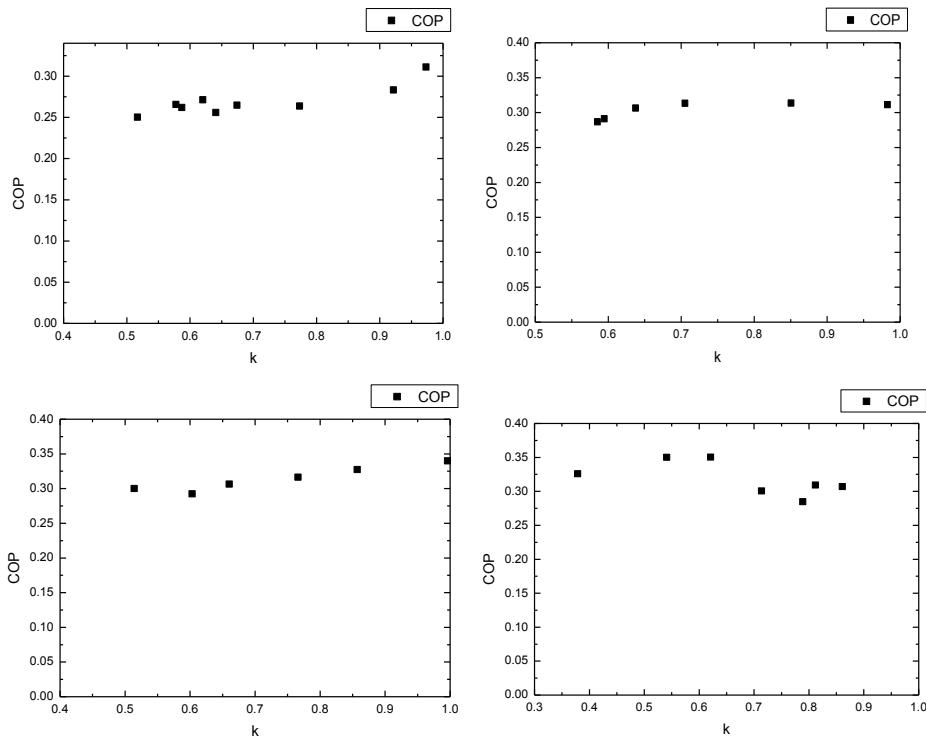


图 22. 不同流量下提馏段热量分布对系统性能的影响

结合图中流量的趋势图可以发现，随着精馏塔精料的增加，新型发生器所带来的 COP 下降平缓，且 COP 略有提高。对于本实验中采用的新型发生结构，在目标制冷工况和特定热源的条件下，在精馏塔精料为 21-25L 时，可以稳定实现 COP 为 0.35 的制冷目标。

(3) 混合工质气体液化流程与原料气膨胀液化流程性能对比

针对低压氮气液化和空气分离两种需求，对比分析了分别依靠混

合工质节流制冷机和原料气膨胀循环为冷量来源的气体液化分离流程，并分析了其各自特点。

通过模拟计算发现，无论是用于低压氮气液化还是低压空气分离，混合工质流程的系统㶲效率均明显优于原料气膨胀流程，且混合工质流程中的压缩机总排气量也明显小于原料气膨胀流程，在实际系统中的压缩机机头更小。相较于混合工质，原料气膨胀流程中氮气/空气绝热指数较大，增压压比较大，排气温度较高，后冷却器㶲损失较大。同时气体膨胀过程不等熵，膨胀功回收困难，膨胀机处㶲损失明显高于混合工质流程的节流过程。

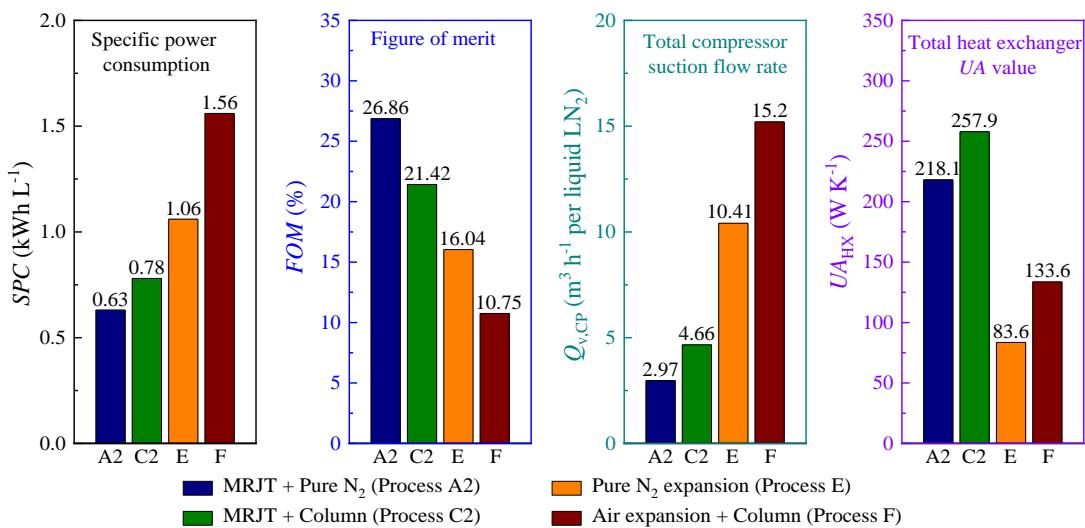


图 23. 混合工质流程与原料气膨胀流程主要性能指标对比

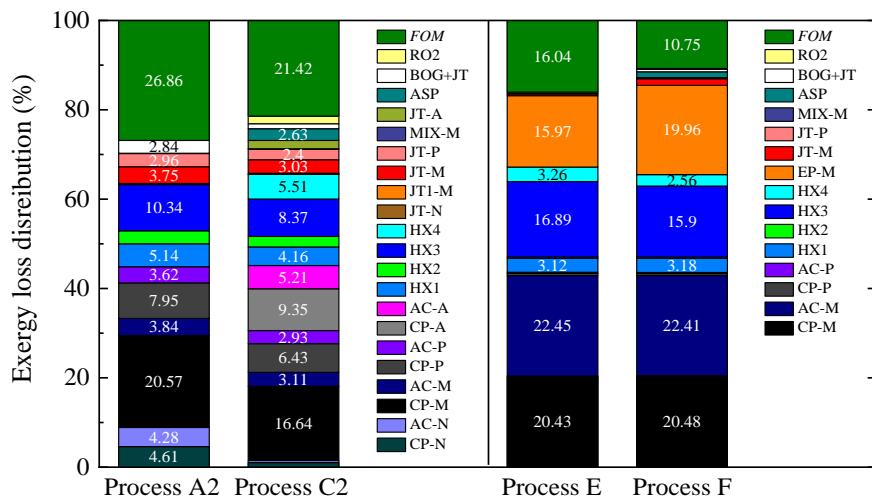


图 24. 混合工质流程与原料气膨胀流程各部件㶲损失分布

3. 样机开发及现场应用

建设成功甘肃庆阳庆城 12 万方/天项目(2 套 6 万方/天装置)。(由实施单位中科睿凌江苏低温设备有限公司具体执行), 预计实施后, 合计形成 1070kNm³/d 以上液化应用规模。2018 年底投产项目, 至 2019 年 3 月实测顺利达产。



图 25. 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

进一步完善基础研究和核心技术开发方面的工作, 完善 LNG 温区流动传热计算、预测方法, 总结分散能源气体液化系统冷箱的设计技术。

多规格 (10L/h 以上规格) 混合工质液氮装置的实测验证工作, 前期计算及方案设计的可行性, 验证分散能源气体液化装置的功能性和液化性能指标。

利用新搭建的氨水吸收式系统,(一套制冷系统和一套热泵系统)开展系统性的实验研究, 完善基于载热流体连续变温发生和吸收式制冷/热泵系统的理论体系, 开展全工况下的实验研究。设计应用于分散能源气体液化场站的氨水吸收式预冷系统方案, 完善设备设计并进

行实验验证，进一步准备现场实施。

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，理论上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 16 项，其中新增 3 项。召开协调会议 5 次。

（一）本方向本季度重要进展

1. 液态金属电子增材制造技术应用及产业化团队荣获北京分院科技成果转化奖特等奖

液态金属电子增材制造技术应用及产业化项目团队在国内外首创了液态金属电子增材制造技术，通过液态金属电子墨水直接快速制造出柔性可拉伸电子电路，且个性化程度高，可实时定制。作为先进制造领域的一种从材料体系到制造系统全过程的全新变革性技术，该技术高度贴合了当前及今后个性化、柔性化电子快速制造及功能器件直接 3D 打印的需求，经过多年坚实的研发积淀，已申请 310 余项核心技术专利，已形成较高的技术壁垒和领先的知识产权布局优势。立足该技术成立的产业化公司“梦之墨”是“国家高新技术企业”、“中关村高新技术企业”，生产的系列化产品已推向市场，在柔性印刷电子学产品中呈现出巨大的市场潜力。

在 2 月 21 日召开的北京分院、京区党委 2019 年度工作会议上，

研究组的液态金属电子增材制造技术应用及产业化项目团队荣获科技成果转化奖特等奖（图 26）。



图 26. 科技成果转化奖特等奖

2. 出版《液态金属物质科学基础现象与效应》著作

以往，由于人类对液态金属在科学与应用方面的价值知之甚少，致使相应探索长期处于沉寂。可喜的是，近年来的大量突破性发现掀开了液态金属的一系列神秘面纱，促成了许多激动人心的应用，直接推动了若干新兴学科前沿的形成和发展。

当前，常温液态金属物质科学已从最初的冷门发展成备受国际广泛关注的重大研究领域和热点，战略价值十分显著。无疑，在几乎所有的探索活动中，对液态金属物质基本属性和规律的认识是其中极为关键的首要环节。可以说，这一领域涌现出的基础性发现，业已成为发展诸多颠覆性技术的核心引擎。然而，遗憾的是，迄今国内外学术界在此领域的论述存在大量空白，制约了进一步拓展的空间。为推动新兴的液态金属物质科学的持续进步，刘静研究员撰写了《液态金属物质科学基础现象与效应》（图 27），由上海科学技术出版社出版，

此书系统总结整理了各有关代表性发现，涉及上百个科学现象与效应。全书注重剖析液态金属较为基础的科学属性、典型现象、奇异地效及突破性应用，可供物理、化学、数学、生物、医学、电子、机械、器件、材料、设计乃至文化创意等领域的读者阅读参考。



图 27.《液态金属物质科学基础现象与效应》著作

3. 一种全新的可编程超大尺度可变形液态金属复合材料

在一些特殊环境下，如救灾过程中，需要机器人能够任意改变形状以适应狭窄的空间环境。但是由于材料和驱动方式的限制，传统的软体机器人很难实现身体各部位的自由变形和运动。液态金属材料具有液体的流动性和金属的导电导热性，是很好的制备软体机器人的材料。

研究组通过在液态金属复合材料中负载液体酒精颗粒，通过其相变产生的体积快速变化，实现了液态金属复合材料的热驱动大尺度自由变形和恢复，其膨胀可以超过其原始高度的 11 倍。液态金属良好的导热性和柔性，极大增强了材料的热响应速度和形变率，使得其每一部分的任意变形成为可能。更重要的是，液态金属良好的电学特性，

使得电磁感应非接触式加热驱动成为现实。因此通过设计可以实现无线控制该材料变形和运动，极大拓展了其应用范围。该材料可以被3D打印成任意形状，研究组利用此材料制备了热响应自由变形的软体章鱼（图28），可以温控定向蠕动的软体动物（图29）以及可以抓取重物的柔性抓手（图30）。另外通过嵌入可编程的加热系统，将会实现持续性变形和运动的非接线机器人。最后通过理论分析得出了热驱动变形的影响因素以及最适宜的材料的比例。这一突破将可编程、可变形液态金属柔性智能机器人研制工作向前推进了一大步。相关成果发表于美国化学学会期刊 *ACS Omega*, 2019, 4 (1), pp 2311–2319, 题为“Large Magnitude Transformable Liquid Metal Composites”。

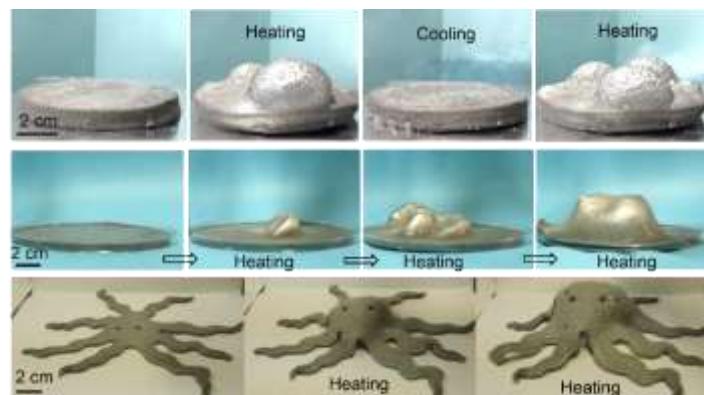


图 28. 热响应自由变形的软体章鱼

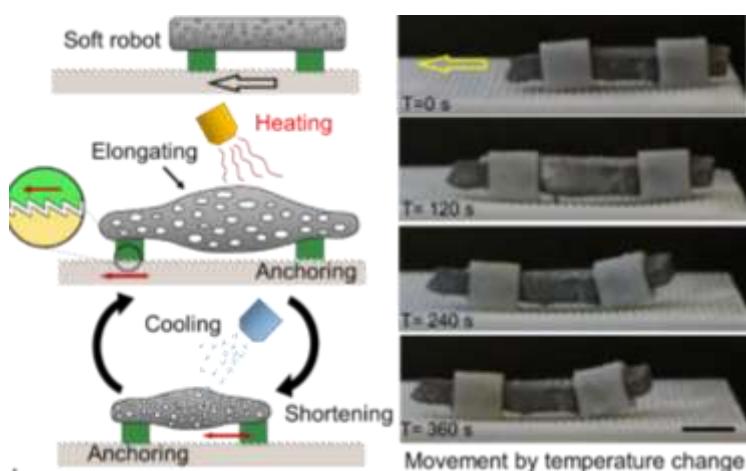


图 29. 温控定向蠕动的软体动物

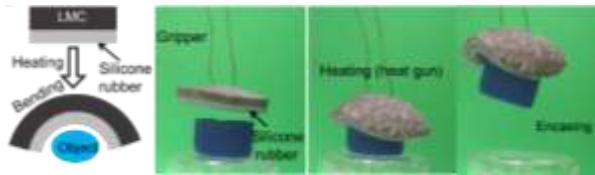


图 30. 抓取重物的柔性抓手

4. 应邀对柔性可变形微纳米液态金属材料发表长篇评述

降低液态金属液滴的表面张力、增加比表面积及缩小物理尺寸对于液态金属在生物医学、印刷电子、界面材料和柔性传感器等领域的应用至关重要。微纳米液态金属显著改变并提升了宏观液态金属的特定物理化学性能，展现出宏观液态金属力所不及的性能。

此外，通过对微纳米液态金属颗粒进行改性和修饰（氧化、表面活化等），能够在微观尺度上对材料功能定向设计，从而拓宽液态金属在微观领域的应用。同时得益于尺寸效应，液态金属微纳米颗粒在电磁光热等方面也展现出了一些异于宏观液态金属的独特性质。与刚性微纳米金属材料相比，柔性微纳米液态金属则表现出更强的顺应性和易于调控等特性（图 31），固液共存的状态使其能够实现刚性纳米材料所无法实现的相变储能等应用。

研究组应邀在 Materials Science and Engineering: R: Reports (IF=24.48) 发表了题为 Transformable Soft Liquid Metal Micro/Nanomaterials 的综述文章，作者全面系统地回顾了微纳米液态金属材料的电学、热学等物理化学性质，细致地总结了当前存在的多种用于制备微纳米液态金属材料的实验手段，着重评述了这种新颖的微纳米功能材料在生物医学、柔性电子、热管理和柔性马达领域的前沿应用（图 32），并总结了目前液态金属微纳米材料所面临的挑战并

展望了液态金属微纳米材在生物成像，热界面材料等领域的潜在应用。

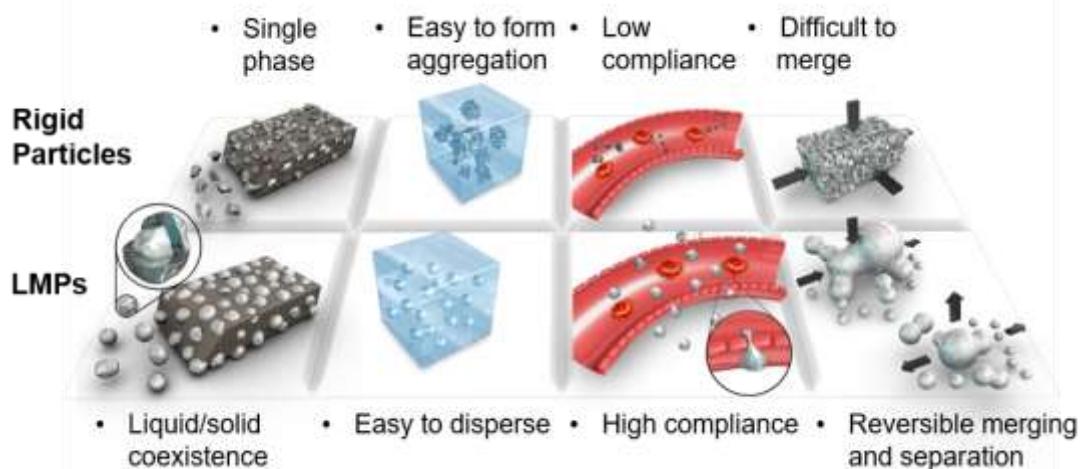


图 31. 微纳米液态金属和刚性微纳米颗粒相比的优势

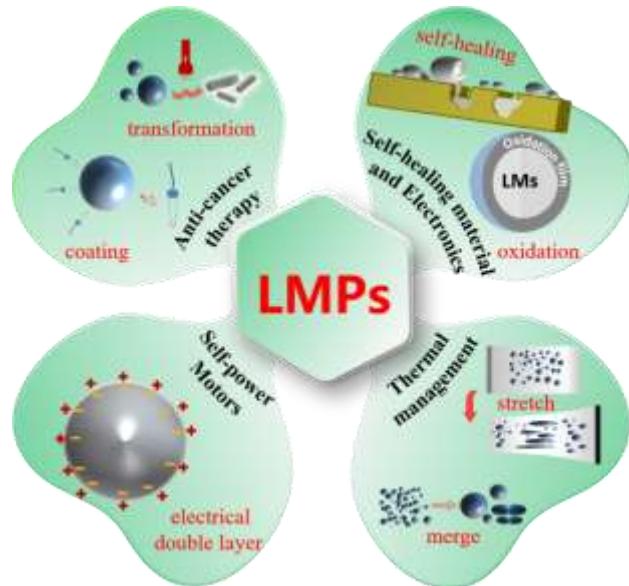


图 32. 柔性可变形液态金属微纳米材料在生物医学、柔性电子、热管理
和软体马达领域的应用

(二) 下一步工作计划

- 进一步对液态金属变形和驱动背后的机理进行定量解释，以期提出普适性的理论并开拓更多的液态金属变形和驱动方式。
- 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。