

理化所一三五季报

2017 年第三季度

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 32 项，其中新增 14 项；引进电子科学技术专业博士 1 名、信号处理专业硕士 1 名、光学和机械设计专业劳务派遣人员 8 名；申请廊坊园区 900m² 的科研用房；召开 10 次调度会议。

（一）本方向本季度重要进展

本季度在大功率固体激光及系统、中红外变频固体激光和钠信标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、钠信标、中红外变频固体激光和钠信标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 5 项；共召开 6 次调度会议。

（一）本方向本季度重要进展

本季度在 20m 制冷机、型号用制冷机和小型制冷机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 20m 制冷机、型号用制冷机和小型制冷机等方

面开展相关工作。(略)

突破三 大型低温制冷系统技术研发及工程应用

概述：本方向本季度在研项目 1 项，即“液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 140b 冷箱改造；完成 250W@4.5K 第一轮冷箱换热器改造，验证了换热器设计方法；进行 2500w@4k、500w@2k 各子部件的设计和加工；完成 500w@2k 超流氦负压换热器平台验收前准备。

2. 集成：完成了 250W@4.5K 制冷机改造后的优化调试试验，获得 317W@4.5K 最大制冷量；完成了 250W@4.5K 制冷机的一周连续运行实验，并顺利通过专家测试验收，整机连续稳定运行 84 小时，制冷能力 280W@4.32K，整机能效比 536W/W，各项指标均优于考核指标，整机性能达到国际先进水平；完成了 250W@4.5K 制冷机整机实验方案、测试大纲和测试报告等质量文件。完成了 2500W@4.5K 制冷机室温真空循环泵组和常温气动调节阀等关键设备的采购，确定了氦气测试室温真空循环泵组实验方案。

3. 流程设计：配合 250W@4.5K 制冷机第二轮改造工程，对制冷机控制系统进行了改进，完成温度计的安装和测试；建立了氦制冷机节流级最佳工作点的计算模型，并在此基础上对前期氦制冷机计算结果进行了验证。

4. 冷压缩机：多轮讨论和修订冷压缩机整机的仿真和设计，完成了整体设计计算和机械制图，等待验收；完成了磁悬浮轴承支撑的

高速电机 60krpm 的试运行，达到设计指标；完成了冷压缩机绝热部件的设计计算，已交付厂家加工；进一步确认了冷压缩机性能测试平台（辅助冷箱）的设计方案，已交付厂家加工。

5. 氮螺杆压缩机：2500W@4.5K 豪顿压缩机采购到货，进行冰轮和雪人压缩机组装集成，进行 2500W@4.5K 油分离系统组装集成。

6. 透平膨胀机：针对 250W@4.5K 制冷机上的透平膨胀机进行了多次性能测试，完成了氦透平膨胀机低温性能实验台升级改造以及气体轴承实验台的部分加工工作；依据 2500W@4.5K 制冷机暂定的流程，对 2500W@4.5K 透平膨胀机进行了相关的热力设计，确定了膨胀机叶轮的基本尺寸。

（二）下一步工作计划

1. 冷箱：围绕 250W@4.5K 更小尺寸换热器性能测试，进行一次冷箱改造和测试；优化 2500W@4k、500W@2k 各子部件的设计和加工，完成 500W@2k 超流氦负压换热器平台验收。

2. 集成：完成 250W@4.5K 制冷机的验收实验，以及液化模式下的性能实验；完成 2500W@4.5K 制冷机室温真空循环泵组的测试验收和冷量测试系统的采购。

3. 流程设计：完成 1000W@4.5K 制冷机/液化器的计算和优化；对 2500W@4.5K 制冷机进行验证和优化。

4. 冷压缩机：完成高速电机测试平台和磁悬浮性能测试平台调试验收；完成冷压缩机第一轮样机（组）的加工，初步完成冷压缩机性能测试平台的搭建。

5. 氮螺杆压缩机：2500W@4.5K 冰轮压缩机和雪人压缩机测试与验收，2500W@4.5K 油分离系统测试与验收。新增平台的氦气压缩机与油分离系统的采购。

6. 透平膨胀机：继续针对 250W@4.5K 制冷系统上的透平膨胀机进行性能测试，在确定了 2500W@4.5K 制冷机流程后，完成 2500W@4.5K 氦透平膨胀机的结构设计及强度设计，完成氦透平膨胀机低温性能实验台的搭建，完成气体轴承实验台的加工和调试工作。

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 55 项，其中新增 5 项。召开协调会议 2 次。本季度在仿生超浸润界面材料、仿生纳米孔道能源材料与能源器件、仿生粘附界面材料、仿生微纳米结构的构筑和加工等方面开展了系统深入的研究，取得了一系列原创性研究成果，发表 SCI 论文 35 篇，其中包括 1 篇 Chem. Soc. Rev.、5 篇 Adv. Mater. 和 1 篇 ACS Nano。

（一）本方向本季度重要进展

1. 仿生超浸润界面材料体系构筑与应用

利用多孔带电聚合物网络超亲离子液体的性质，设计制备了一种透明的高机械强度、高导电的柔性离子液体凝胶薄膜。相比传统的离子液体凝胶，其有如下优点：（1）带电 PAMPS 聚合物网络结构有利于将离子液体锁定在网络内；（2）顺序交联聚合的单组份 PAMPS 双网络结构赋予离子液体凝胶优异的机械性能和大于 95% 的可见光透过率；（3）通过弱静电作用锁定的离子液体在电场作用下可在聚合物网络中自由运动，从而表现出与本体离子液体相当的电导率。因此，利用这种方法制备的离子液体凝胶薄膜在 -70℃ 到 100℃ 的宽温度范

围，以及高真空下都保持很好的机械性能和导电性，可以感知机械手臂的微小运动；将为极端条件下的科考以及外太空研究的柔性传感器、可穿戴设备提供新材料。（Adv. Mater. 2017, DOI: 10.1002/adfm. 201704253）

通过简单的凹槽模板诱导组装法得到了曲面结构的胶体光子晶体。这种半圆形的凹槽曲面光子晶体相比传统平板光子晶体展现出了不同的光学性质，具有各向异性非角度依赖的特点。利用光纤光谱仪和光学显微镜对其性质进行研究，发现这种曲面结构的胶体光子晶体还具备多重反射和几何偏振转换的特性。因此，这种方法为制备新型的光子晶体结构提供了新的思路，在防伪、显示器以及光学器件方面具有重要应用价值。相关工作发表于Science Bulletin期刊并被选为正封面文章。（Science Bulletin, 2017, 62, 938）

2. 仿生纳米孔道能源材料与能源器件

学习和借鉴生命体蛋白质通道的先进功能，从不同形状和不同调节作用两方面入手对其进行深入研究。首先采用非对称化学刻蚀的方法，制备一系列结构可精确调控的仿生固态纳米通道，然后通过对通道内部进行不同类型的功能化修饰，从而制备出具有不同调节作用的功能化纳米通道。根据这种思路利用有机小分子（4'-氨基苯并-18-冠-6-醚）对漏斗形固态纳米通道进行功能化修饰，构筑了钾离子和电压双向调控的纳流控体系，实现了生命体电压响应钾离子通道的仿生制备，并且对钾离子的响应浓度低至1 fM；此外，这种功能化纳米通道还具有很好的可逆性和优异的稳定性，在药物释放和生物传感器

领域有着潜在的应用价值。(Langmuir, 2017, 34, 8463)

3. 仿生粘附界面材料

利用 SD 大鼠骨髓间充质干细胞 (MSCs) 和配套的 SD 大鼠充质干细胞 (MSC) 完全培养基, 研发了一种具有电化学可切换 Ppy 阵列的智能纳米生物界面, 通过动态纳米刺激, 指导 MSC 的分化。通过研究多方面证明, 将纳米尺度的动态物理输入转化为生物输出, 为经典的细胞培养底物提供了替代方案, 可用于调节干细胞命运; 此外, 这项研究也为探索干细胞与刺激反应表面之间的纳米尺度相互作用提供了一种通用的研究策略。(ACS Nano 2017, 11, 5915)

4. 仿生微纳米结构的构筑和加工

系统研究了聚合物材料和纳米粒子在超浸润界面诱导下的自组装过程以及形成微纳结构后的电学性质。利用液桥诱导技术对聚合物的诱导组装形成一维阵列结构, 同时利用材料对光信号的敏感性, 制备了光探测器件。由于液桥诱导组装对于分子排列取向起到诱导作用, 使得形成一维结构分子取向均一有序, 在集成器件过程中更加简单方便, 器件敏感度更高 (Adv. Funct. Mater. 2017, DOI: 10.1002/adfm.201701347)。进一步地将石墨烯材料引入到聚合物材料中, 形成石墨烯表面吸附聚合物的有机-无机复合体系, 既保留了有机材料电学性质, 又很大程度提高了其在空气中稳定性, 还表现出很好的温度耐受性 (Adv. Mater. 2017, DOI: 10.1002/adma201705377)。除聚合物外, 这种液桥诱导组装技术在对无机粒子组装方面也有很好的诱导作用; 液桥收缩会带动粒子逐步相互靠近并有序组装形成超晶格结构,

通过改变微柱形貌可以调控粒子组装形成的图案 (Adv. Mater. 2017, DOI: 10.1002/adma.201703143)。

系统优化了纳-微-宏跨尺度加工平台，将数字面投影无掩模光刻技术与激光扫描光刻技术结合，实现多种多尺度复杂结构的快速制备；并且利用高数值孔径油浸物镜（ $100\times$, N.A. 1.45）的面投影光刻技术实现了大面积厘米量级结构的拼接，以及线间距小于 800 nm 的微纳结构的制备，这为大面积跨尺度结构的制备提供了新平台。进一步地将响应型 BSA 蛋白质分子引入到生物相容性微纳结构的制备中，通过对材料组分进行研究实现对微结构形貌的调控，实现了在不同 pH 微环境中的可逆响应行为。这种对外界刺激产生可逆响应的微结构将为新型可操控的微纳器件的制备提供思路。

另一方面，针对用户对微纳结构加工样机的需求和技术转化的迫切性，理化所与中科院微电子所进行联合技术开发，自主设计搭建了曝光区域精确可控的紫外直写光刻样机，目前已经实现了整套系统的协同控制，下一步待移动台到位之后，将进一步完善其功能，实现更强的加工能力。这为技术转化和微纳加工样机的开发具有重要意义。

（二）下一步工作计划

1. 围绕仿生超浸润智能界面材料体系：聚焦仿生超浸润界面的关键科学问题，着重从以下几个方面开展研究：揭示多尺度（分子、纳米、微米）结构与化学组成对超浸润特性调控的静态微观机制，建立超浸润界面特性的普适性理论模型；阐明通过特异超浸润界面性能组合，创造特殊新功能界面材料体系的协同原理；建立超浸润界面化

学的知识体系；发展超浸润材料性能、界面化学过程表征以及材料规模化制备的技术体系；探索功能性流体，如离子液体、电磁流体等的超浸润基本原理以及功能材料的制备；完善超浸润界面材料表征的新型仪器设备与规模化制备的关键技术和工艺。

2. 围绕新型仿生纳米孔道的构筑及其在能源转换方面的应用，着重从以下几个方面开展研究：（1）构筑结构新颖、性能优异的仿生固态纳米通道，为研究限域空间内离子传输机制及建立新理论模型奠定良好的基础；（2）继续构筑超薄的复合聚合物膜材料，通过控制膜上通道的参数和提高通道的利用率，实现高能量密度的浓差能源转换，以期为盐差发电薄膜打下良好的基础。

3. 围绕仿生粘附界面材料体系，着重从以下几个方面开展研究：（1）研究独特的生命界面体系表面粘附现象，揭示界面粘附的多尺度结构、化学组成与粘附性能的构效关系。为研究和建立多尺度界面粘附模型提供依据；（2）制备仿生粘附可控的界面材料，研究水环境下细胞的动态识别粘附、抗粘附等性质，探索可用于癌细胞分离新技术，以期为恶性肿瘤的治疗提供新途径。

4. 围绕仿生微纳米结构的构筑和加工，着重从以下两个方面开展研究：（1）研究仿生多尺度结构的加工技术。针对仿生结构中同时存在跨尺度和高精度的特点，研究能够兼顾大面积快速加工跨尺度结构的制备技术；拓展半导体硅基衬底上批量化的跨尺度结构制备技术，优化跨尺度结构制备的均匀性和一致性，为更多仿生多尺度结构的制备提供技术支撑；（2）研究生物相容性结构的构筑。研究生物相容性

材料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；（3）利用不对称修饰的手段进一步研究液体在微区退浸润的过程，同时调控不同区域的退浸润速度，实现对有机/无机材料图案化制备的精确调控；（4）利用形成的微纳结构进行集成器件，并对器件的性能进行测试和优化。

培育一 光化学转换与光化学合成

概述：本方向本季度在研项目 12 项，新增科研项目 1 项；召开协调会议 2 次。

（一）本方向本季度重要进展

1. 可见光催化合成氨

模拟光合作用，利用太阳能光催化技术将 N₂ 转化为 NH₃，已被认为是解决未来可再生能源的最佳途径之一。通过简单的共沉淀方法成功制备了一系列 M^{II}M^{III}-LDH (M^{II}=Mg, Zn, Ni, Cu; M^{III}=Al, Cr) 纳米片光催化剂。X 射线吸收精细结构、低温电子顺磁共振和正电子湮灭寿命测量表明，超薄 LDH 纳米片由于富氧缺陷、结构形变和压缩应变，增强了对 N₂ 分子的吸附和光生电子从 LDH 光催化剂转移到 N₂，从而促进了 NH₃ 的有效合成（特别是 CuCr-LDH 纳米片，其在 500nm 处量子产率仍能达到 ~0.10%）。这项研究证明在常温常压和可见光或直接太阳辐射下，基于 LDH 将 N₂ 还原成 NH₃ 是一种极具潜力和希望的新途径。相关研究成果发表在国际材料领域顶级期刊《先进材料》(Adv. Mater., 2017, 1703828)。

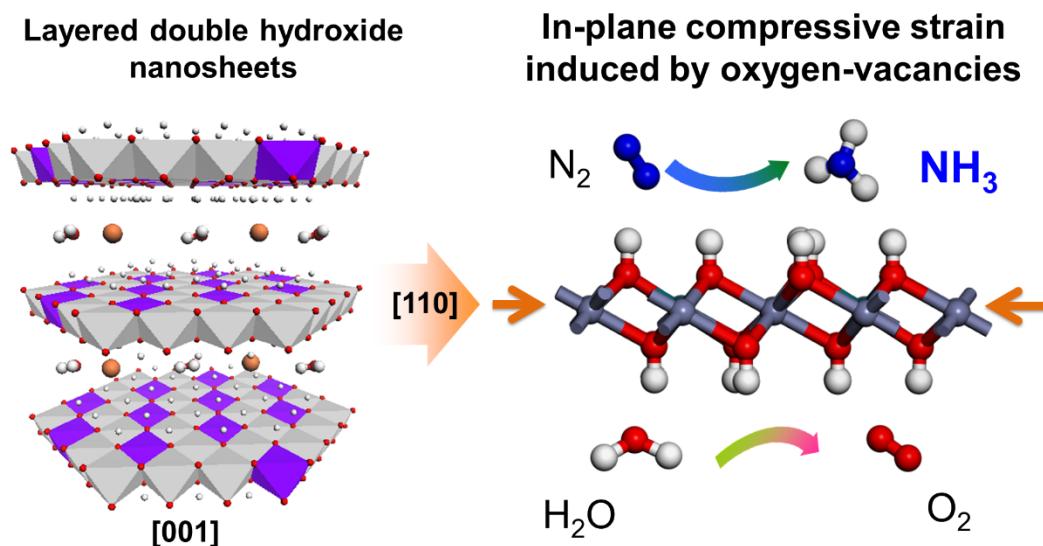


图 1 LDH 超薄纳米片光催化合成氨示意图

2. 铜 (II) 盐光催化碳-氢键官能团化

在可见光照射下利用二价铜盐实现了芳香胺类化合物-碳-氢键官能团化。通过高分辨质谱、紫外-可见吸收光谱、电子自旋共振实验、X-射线吸收光谱并结合理论计算证实二价铜盐与反应底物之间发生电子转移，生成具有可见光响应的反应中间体，该中间体在可见光照射下生成的重态氧使反应底物氧化生成亚胺，亚胺进一步在二价铜盐作用下与亲核试剂反应，高效合成了喹啉，吲哚并喹啉， β -氨基酸和1,4-二氢吡啶等具有一系列生理骨架的衍生物。这项研究工作发展了低廉、原子经济的合成方法，为可见光催化与金属催化结合实现碳-氢键官能团化提供了一种成功的例证。相关研究成果发表在美国科学促进会出版的 Science 子刊 (Sci. Adv. 2017, 3, e1700666)。

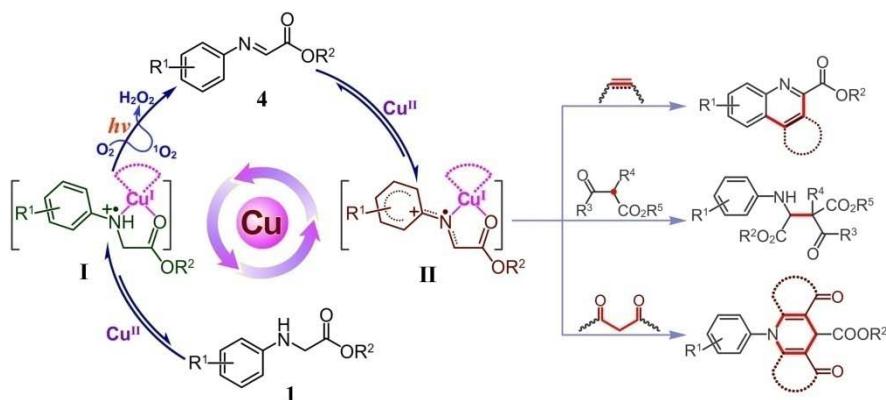


图 2 铜 (II) 盐光催化碳-氢键官能团化

3. 光催化烯烃[2+2]反应

首次利用可见光催化实现了查尔酮和肉桂酸酯衍生物在溶液相中的分子间[2+2]反应，解决了长期以来这两种底物在溶液相反应中低产率和低选择性的问题。该反应只需要 1 mol % 的光催化剂，无需其他任何添加剂，在蓝光照射下实现了高效、高选择性的自身以及交叉二聚反应，构筑取代基多样性的四元碳环。相关研究结果发表在德国应用化学期刊（Angew. Chem. Int. Ed., 2017, doi:10.1002/anie.201708559）。

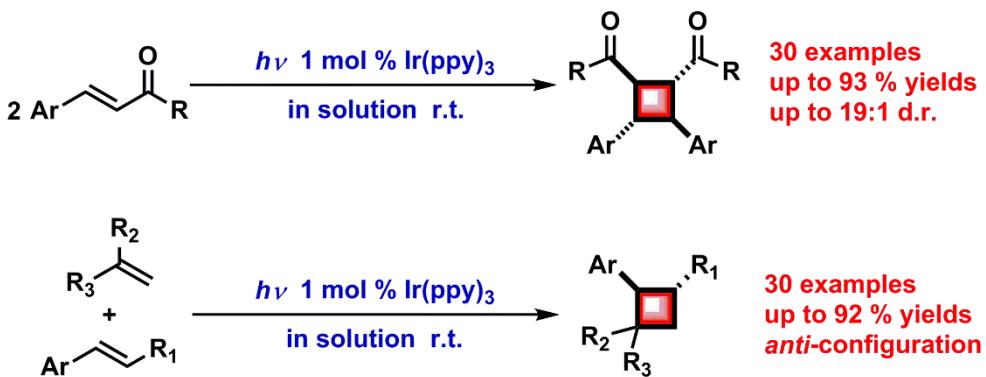


图 3 可见光催化烯烃[2+2]反应

4. 光催化原子转移自由基加成

非均相光催化是发展下一代绿色精准合成的重要策略。烯烃的原子转移自由基加成反应具有 100% 原子经济性，是高效引入多种官能团的重要反应。研究发现商品化的 P25 型二氧化钛在催化量高价碘 (III) 化合物存在下可作为有效的可见光催化剂，在极其温和的条件下高产率实现烯烃原子转移自由基加成反应，并具有广泛的底物范围；而 P25 型二氧化钛或高价碘 (III) 化合物单独使用均不具有光催化活性。这是首次报道不含重金属的绿色非均相原子转移自由基加成反应。相关研究结果已发表 (ChemSusChem 2017, DOI: 10.1002/cssc.201701382)。

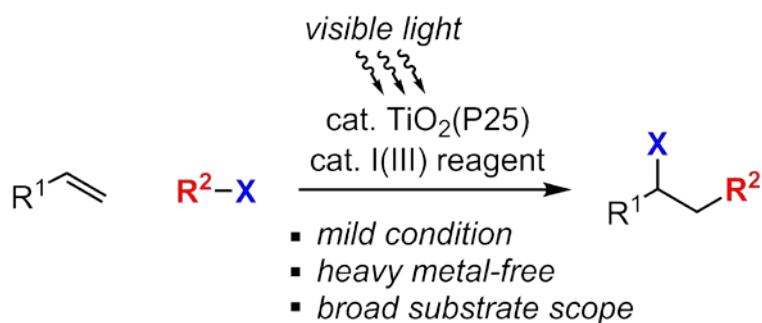


图 4 光催化非均相原子转移自由基加成反应

5. 金属磷化物催化氨硼烷水解放氢

氨硼烷具有极高的氢含量，是一种理想的化学储氢材料，开发廉价、稳定、高效的催化剂在温和条件下将氢气释放出来对于发展“氢经济”非常重要。通过引入不同含量的金属钴，系统调控三组分金属磷化物 Co-Ni-P 的电子结构，促进金属中心到磷元素的电荷转移，增强催化剂与氨硼烷分子作用，同时调控水分子中羟基对氨硼烷分子亲核进攻，使氨硼烷水解放氢速率从 $\text{TOF} = 40.2 \text{ mol}_{(\text{H}_2)} \text{ mol}_{(\text{Ni}_2\text{P})}^{-1} \text{ min}^{-1}$

提高到 150 以上。该研究与西班牙加泰罗尼亚化学研究所 Nuria López 教授合作，从理论上对催化反应机理进行了详细研究。相关研究成果发表在国际能源环境领域期刊 (Energy Environ. Sci., 2017, 10, 1770)。

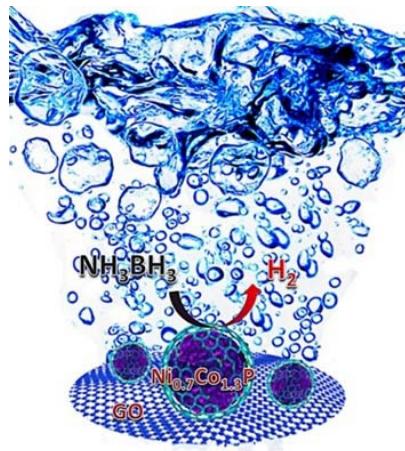


图 5 调节金属磷化物电子结构提高氨硼烷水解放氢反应活性

6. 高电流密度下可充放电式锌空气电池

发展廉价、高效的驱动氧还原反应 (ORR) 和析氧反应 (OER) 的双功能催化剂，对于推动可逆锌空气电池的实际应用具有重要意义。采用“一石二鸟”的策略，充分利用钴氮共掺杂碳载体 (Co,N-CNF) 表面均匀分散的氮缺陷和高比表面积 ($1175.9 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$)，成功构筑了双功能催化剂—NiFe-LDH/ CNF，不仅 OER 性能优于贵金属 IrO_2 ，同时具有优异的 ORR 性能，半波电位与 Pt/C 相当。在 NiFe-LDH/ CNF 为催化剂的锌空气电池充放电测试中，也可体现为放电电压高于贵金属，充电电压低于贵金属，在电流密度为 25 mA cm^{-2} 可稳定工作超过 80 h。相关研究成果发表在国际材料领域顶级期刊《先进能源材料》上 (Adv. Energy Mater., 2017, DOI: 10.1002/aenm.201700467.)。

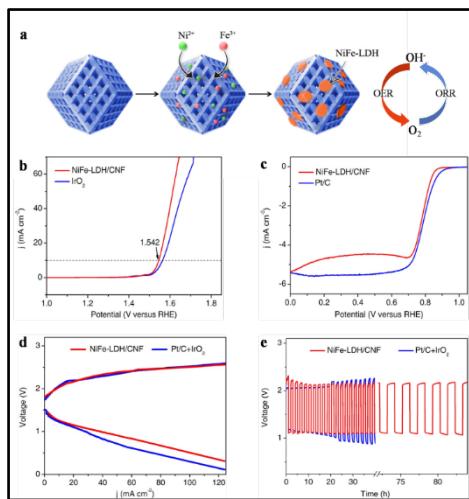


图 6 NiFe-LDH/CNF 的合成路线示意图和电化学性能表征

在上述工作研究基础上，通过氨气气氛下高温煅烧实现了半导体基 NiFe-LDH 向半金属特性的 Ni_3FeN 的转变，有效减轻 Ni_3FeN 在高温合成过程中的团聚问题，其尺寸缩小至 14 nm，从而实现了具有更加优良导电性能的 $\text{Ni}_3\text{FeN}/\text{Co,N-CNF}$ 复合物的制备，可在更高电流密度 (50 mA cm^{-2}) 下长时间稳定工作。这种方法为设计和合成功能催化剂提供了新思路，可广泛应用于金属空气电池、可充放电式燃料电池、全分解水以及其他能源领域。相关研究成果发表在国际材料能源领域顶级期刊《纳米能源》(Nano Energy, 2017, DOI:10.1016/j.nanoen.2017.08.040.)。

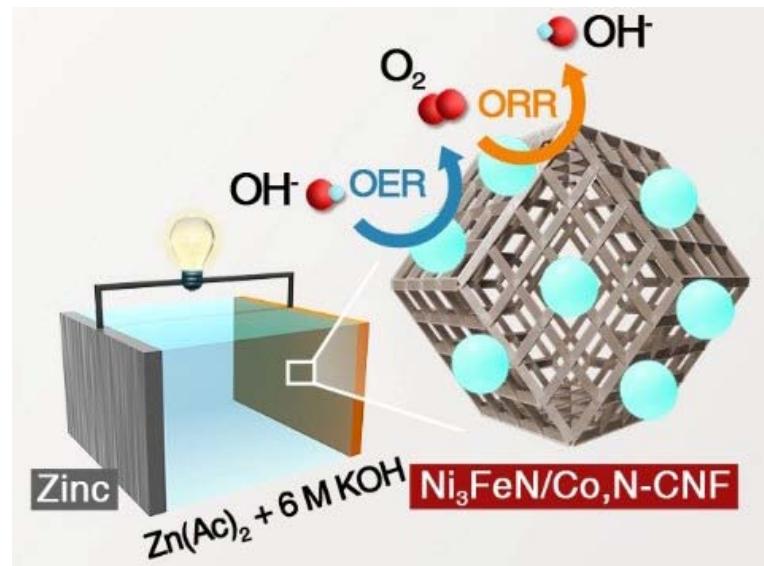


图 7 $\text{Ni}_3\text{FeN/Co,N-CNF}$ 复合物应用于可逆锌空气电池

(二) 下一步工作计划

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；围绕酶法明胶关键技术和降解树脂工艺的讨论会共计召开 3 次；招聘技术工人 1 人。

(一) 本方向本季度重要进展

- 进一步完善酶法明胶工业酶制剂的中试开发工作，着手酶制剂的工业化试产准备工作；制定酶法胶生产污水处理改造计划，目前正在进行整改工作；确认了制取土地肥料的固废综合利用方案，目前正在试验验证；开展酶法胶在胶囊制备过程中的工艺研究，初步完成了明胶硬胶囊的准工业制备，目前开展胶囊崩解、胶囊碎脆等指

标检测，并开展明胶基本结构对胶囊物化性质的研究；进一步对酶法明胶预处理工艺的优化，优选了高效、节能的破碎设备，并进行生产试验；开展酶法胶脱色工艺研究，进一步提高明胶透过率。

2. 与新疆自治区地方政府、上合基金投资方多次沟通和现场考察，确定了可降解塑料及其下游应用制品在当地的产业布局，结合地方需求和实际，初步确定落地及合作方案。

（二）下一步工作计划

下一步将继续围绕酶法明胶关键技术和降解树脂工艺开展相关工作。

培育三 激光显示及产业化

概述：本方向本季度围绕高性能激光家庭影院和大型公共激光显示（含激光电影放映机）等激光显示产品化开发。在研项目 3 项，新增 1 项；召开协调会 3 次。

（一）本方向本季度重要进展

1. 作为课题牵头单位参与 2017 年重点研发计划激光显示项目。

激光显示已被国家列入十三五“战略性先进电子材料”重点研究方向之一，并在 2016 年部署了三项激光显示基础及整机关键技术研究项目，基于“全链条、一体化”组织实施原则，作为激光显示核心技术——三基色 LD 工程化开发亟待重大突破，因此在 2017 年科技部发布了面向激光显示应用的三基色 LD 工程化开发指南。基于前期良

好的研究基础，中科院理化所作为课题牵头单位参与了“高光束质量、低阈值、长寿命、低成本蓝绿光 LD 材料及器件关键技术与工程化研究”项目并获得立项，课题总经费达 944 万元，其中国拨经费 544 万元。在本项目中，理化所将围绕大功率 LD 芯片封装中主要的关键问题开展攻关，采用理论计算和仿真软件相结合，建立热场及温度场模型；同时开展热沉材料与 LD 芯片热应力匹配和补偿技术、蓝、绿光 LD 芯片的高可靠性贴片技术以及低应力焊接技术等关键技术研究，进一步推动三基色 LD 激光显示产业化关键技术攻关。

2. 国际首次开发出 100 英寸三基色 LD 激光投影电视产品，入围香港“中华文明与科技创新展”。

在科技部、中科院等重大项目的支持下，理化所在激光显示技术和产业化方面取得了重大进展：2015 年国际上首次研制出 100 英寸全 LD 激光家庭影院，主要技术指标达到国际领先水平，初步打通了激光电视走向产业化之路；同年联合杭州市地方平台、天使基金等，成立杭州中科极光科技有限公司开展三基色 LD 激光显示系列化产品化的攻关；2017 相继攻克了精密/复杂结构整机一体化的设计和制造、高精度的色空间转换和颜色校正、高性能/低成本三基色激光光源及热管理、独创的匀场照明与散斑消除等产业化关键技术，国际上首次自主研制成功 100 英寸三基色 LD 激光投影电视产品，光通量 3200 流明，几何分辨 2K，色域 150%NTSC，配置多种功能接口，绿色节能，可实现色彩绚丽的高画质视频图像再现。作为国内自主研发的代表创新成果之一，入围 2017 年 9 月在香港举行的“中华文明与科技创新展”并受到高度关注，向香港同胞展示了我国现代科技创新的飞速发展的最新成果，提高了产品的认知度。



图 8 国际首台 100 英寸三基色 LD 激光投影电视



图 9 100 英寸三基色 LD 激光投影电视参展创科博览会

(二) 下一步工作计划

在激光显示投影电视产品的开发成功基础上，将继续围绕高性能 4K 激光家庭影院开展进一步研发，如小型化高性能三基色 LD 激

光模组、高效率控制驱动、高精度分时调制、颜色管理、高效能热管理、匀场照明与散斑消除等关键技术以及各类产品认证工作，力争尽快上市。

培育四 分散能源气体液化分离技术与应用

概述：本方向本季度在研项目 3 项，召开协调会议 5 次。

（一）本方向本季度重要进展

1. 偏远天然气气井方面：根据客户新需求，设计新型 6 万方/天规格装置，使 LNG 供液温度达到 -156℃，在系统能效上进行优化升级；目前已完成方案设计。
2. 液化装置应用方面：新部署陕西榆林地区气液化现场装置开机运行正常，并持续开机工作，同时进行系统性的数据采集，持续调整设备运行工况，行成新的自动控制技术。
3. 余热利用方面：氨吸收式制冷机组已经完成设备组装，目前正在行进先期分系统测试，进一步完善系统流程。

（二）下一步工作计划

下一步拟对新研发的余热驱动型制冷系统进行开机运行测试，最大限度的降低能耗，节能减排；拟建立新型 LNG 系统的装置，开始做好试验测试及准备工作。

培育五 液态金属材料前沿技术

本方向本季度在研项目8项，召开协调会议3次。

(一) 本方向本季度重要进展

1. 发现液态金属冲浪效应

研究发现金属液滴可在同类液态金属表面实现冲浪运动的效应。借助电场触发，处于电解液（如0.25 mol/L NaOH）内的液态金属（如GaIn_{24.5}）可在同类液态金属表面上实现悬浮而不互融，且可随界面的流动而滑移，如同顺着海潮的冲浪现象；若将金属液滴从5 cm高处滴落，当其撞击到金属液池的表面时能够反弹一定高度，之后再次回落到界面上继续保持悬浮状态；一簇金属液滴可以在界面上发生相互碰撞融合，但依然能保持与下部液体相互隔离状态。

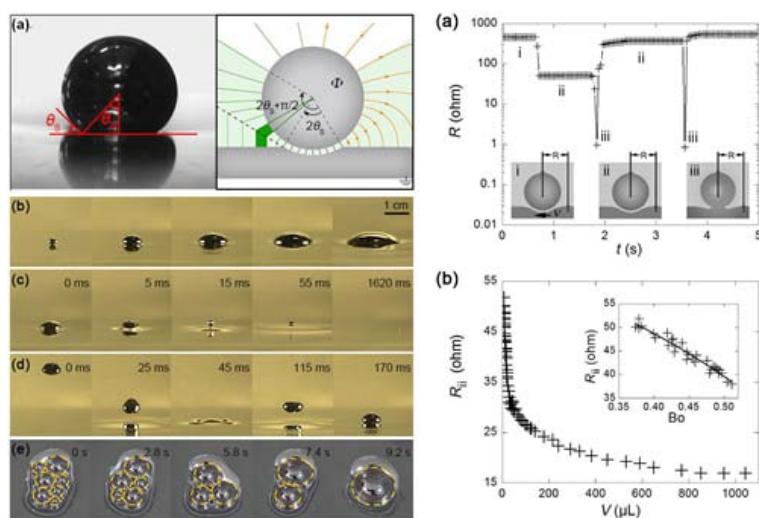


图 10 液态金属冲浪效应及金属液滴-池界面间薄液膜的台阶形电阻响应现象

对这种现象的机制研究发现，由于电势梯度导致的表面张力差可使液态金属-溶液界面产生流动，继而在上部液滴与下部液池之间形

成一层不断更新的极薄电解液膜，将处在界面上的金属液滴托举了起来。被悬浮的金属液滴体积可从 $20 \mu\text{l}$ 到 3 ml ，稳定悬浮时长可超过十分钟。这种金属液滴的冲浪效应可通过加载电压的大小来加以灵活调控，一旦撤去电场，悬浮液滴会立刻与下部的金属液池融合在一起。测量结果表明上部金属液滴与下部金属液池之间的液膜电阻在 $\sim 100 \text{ ohm}$ 量级，借助液膜电阻与厚度关系理论模型，可计算出液膜厚度处于 $\sim 100 \mu\text{m}$ 量级。液态金属冲浪效应的发现开辟了液态金属在液体基底上运动行为的研究，对于深入理解液态金属表面与界面现象，研发全液态可变形电子器件，以及操控液态金属柔性机器等具有重要的科学价值和应用前景。相关研究成果发表于《Applied Physics Letters》杂志（Applied Physics Letters, 111, 101603, 2017）。

2. 发现液态金属颗粒驱动示踪效应

研究发现特定金属颗粒可在润湿液态金属表面后持续诱发其发生大范围流动与变形的效应，并据此建立了一种全新的液态金属流场示踪方法。这种基础现象是在偶然的实验中发现的，即撒落在液态金属表面的铜粉被润湿后能够持续诱发其发生大范围流动与变形，彰显“小颗粒，大作用”。这种现象应被证实为一种表面张力梯度驱动的流动，而表面张力的不均匀分布来自于有着不同表面电荷密度的金属颗粒与液态金属间的耦合作用。对于液态金属这一独特的流体物质而言，即便只与很小的金属颗粒接触，其自身状态也极易发生改变。此外，黏附于液态金属表面且随其流动的金属颗粒在实验观测中清晰可视，创造性的将颗粒引入作为液态金属流动状态的天然示踪粒子，获得了对液态金属流场的可视化和定量化测定，从而揭示了其中的独特对流模式。此前，液态金属由于自身不透明，表面极为光滑，光反射率高，已有的实验技术难以获得其流场信息甚至不能对液态金属内部

是否存在流动做出判断，使得相应问题的研究始终处于停滞状态。该项发现为此建立了一种重要的液态金属表面流动流场示踪技术；同时，利用微小颗粒驱动大尺度流体也为构筑液体表面泵和智能流体系统提供了一种自驱动方案。相关研究成果发表于《Advanced Materials Interfaces》杂志（Advanced Materials Interfaces, 10.1002/admi.201700939, 2017）。

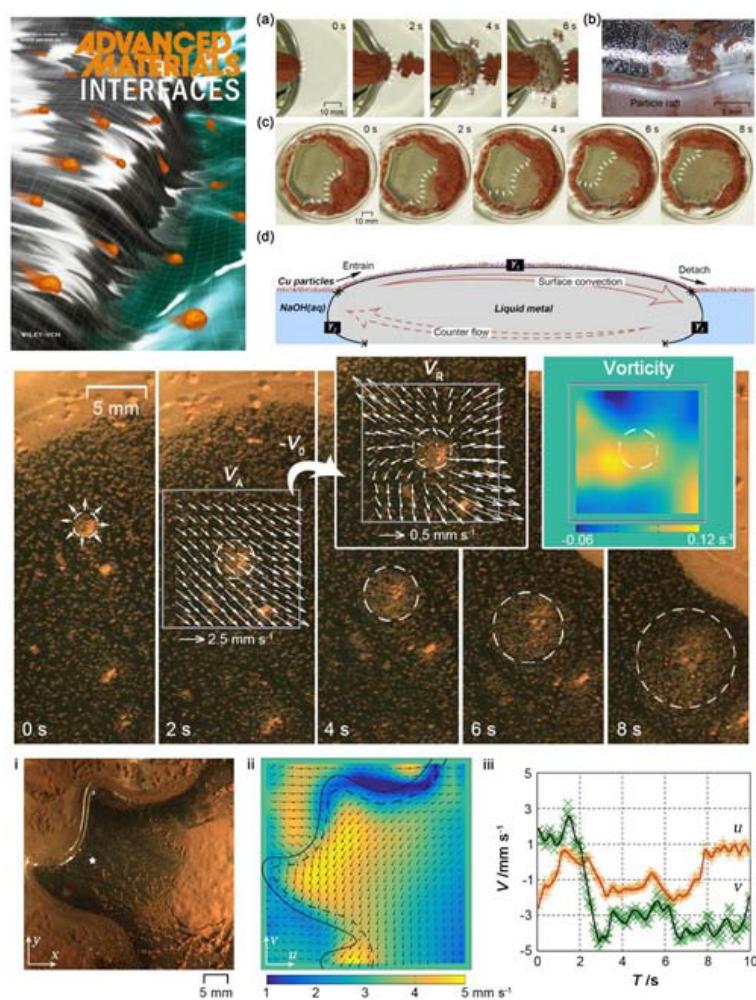


图 11 期刊封面故事及颗粒驱动的液态金属流动及其局部与整体流场可视化结果

3. 研发出系列高性能液态金属功能材料

在前期发现的液态金属胞吞效应基础上，相继研发制备出一系列电学、热学及力学性能可调的高性能液态金属功能材料。

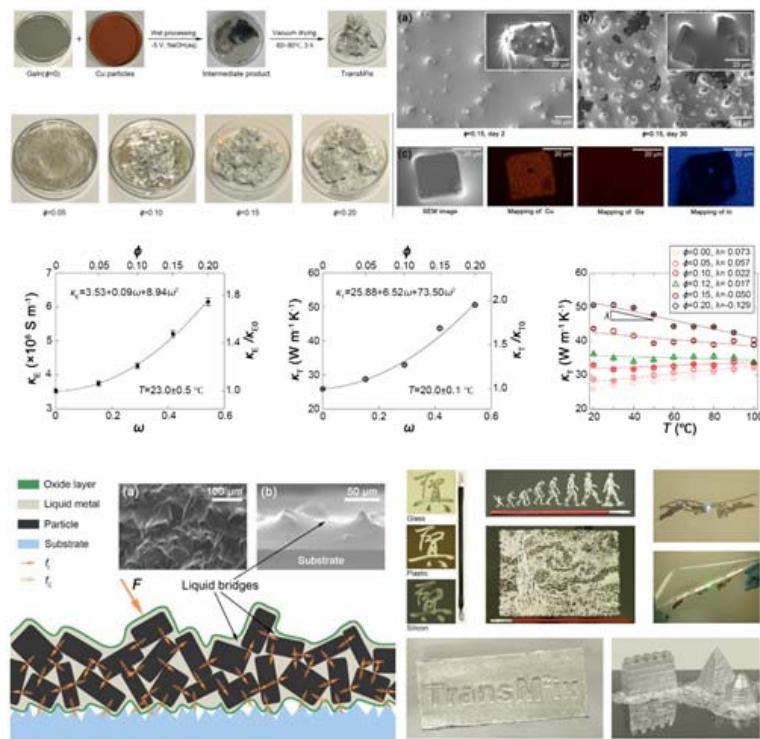


图 12 功能液态金属材料制备、成分与性能表征及印压塑型等系列应用展示

结合液态金属胞吞效应并采用真空干燥的方法快速排除液态金属混合物中的溶液成分，可得到均匀、稳定的功能物质。因此，通过在液态金属中可控性掺入不同比例的铜颗粒，可研发出了一系列介于液体和固体之间的金属混合物。系列测试揭示出这些材料显著的电学、热学及力学性能：在 20% 的颗粒质量掺比情况下，分别可获得相对于液态金属约 80% 的电导率增强和约 100% 的热导率增强。研究还发现，颗粒物的掺入显著提升了材料对各种基底表面的粘附性以及

材料自身的可塑性。这些性质的增强和改变，使得液态金属混合材料在印刷电子电路、3D 快速塑形、增材制造以及界面热管理等领域的应用优势更为突出。同时，这种材料可控增强与设计方法的建立，也使得未来制备用以满足特殊需求的液态金属功能材料成为可能。相关研究成果发表于《ACS Applied Materials & Interfaces》杂志（ACS Applied Materials & Interfaces, DOI: 10.1021/acsami.7b10256, 2017）。

4. 液态金属肿瘤与神经生物医疗电子学研究取得新进展

电化学疗法是一种具有良好疗效的肿瘤治疗途径，借助电解作用及电极周围生成的产物实施治疗。传统电极大多由刚体金属制成，对于较大体积肿瘤，通常需植入多根电极，但大量刚性电极的引入不仅给患者造成很大痛苦，也增加了感染的风险。在室温下呈液态的镓及其合金，拥有良好的导电性、柔性和生物相容性，可望成为一种绝佳的液态柔性电极材料。对比研究发现，在相同电压下液态金属电极组的电流是传统铂电极组的两倍左右，且能通过电解作用分别在阴极和阳极产生更多的治疗性产物。在传输相同量电荷方面，液态金属电极组所需时间只有普通铂电极组的一半。这主要是由于液态金属在非均匀电场作用下，其阴极由于表面氧化层的去除，会使得液态金属与其周围溶液均产生剧烈的扰动，从而让更多的离子参与到电化学的反应中，这就解释了液态金属电极所展示出的更好肿瘤治疗效果以及导致更多肿瘤细胞死亡的机制。相关研究成果发表于《Biomaterials》杂志（Biomaterials, 146, 156-167, 2017）。

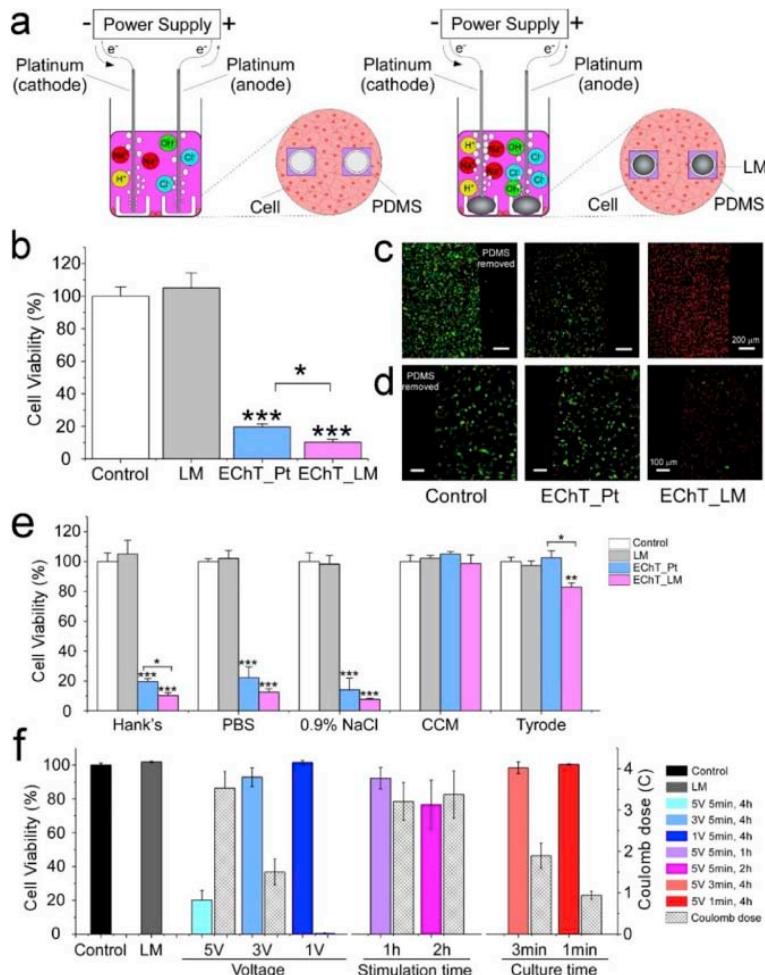


图 13 液态金属电极与铂电极电化学疗法作用下系列离体细胞水平对比试验

液态金属不仅作为肿瘤治疗电极，其在更多挑战性医学问题的解决上也体现出显著优势。近期，制备出的液态金属神经电极阵列借助其自身独特的机械性能和电学性能，解决了植入式神经电极与周围组织力学性能不匹配的难题。不同于传统神经植入式电极的是，这种液态金属电极具有良好的可拉伸性能，且能保持一定的电学稳定性、化学稳定性，其在生理盐水中只产生微量的金属镓溶解物，对细胞没有明显的毒性。作为典型应用展示，将液态金属电极植人到一只死亡牛蛙的坐骨神经处，通过外加电刺激迅速恢复了牛蛙下肢肌肉群的收缩。

运动功能。可以看到，液态金属神经电极代替断裂的坐骨神经，可直接将神经电信号传递给受损神经的远端，甚至让死亡的牛蛙恢复其肢体的运动功能（图 15），其在水中依据控制方式游动的情形，如同活体一般。（Journal of Micromechanics and Microengineering, 27, 104002, 2017）



图 14 液态金属神经微电极及其结构示意图

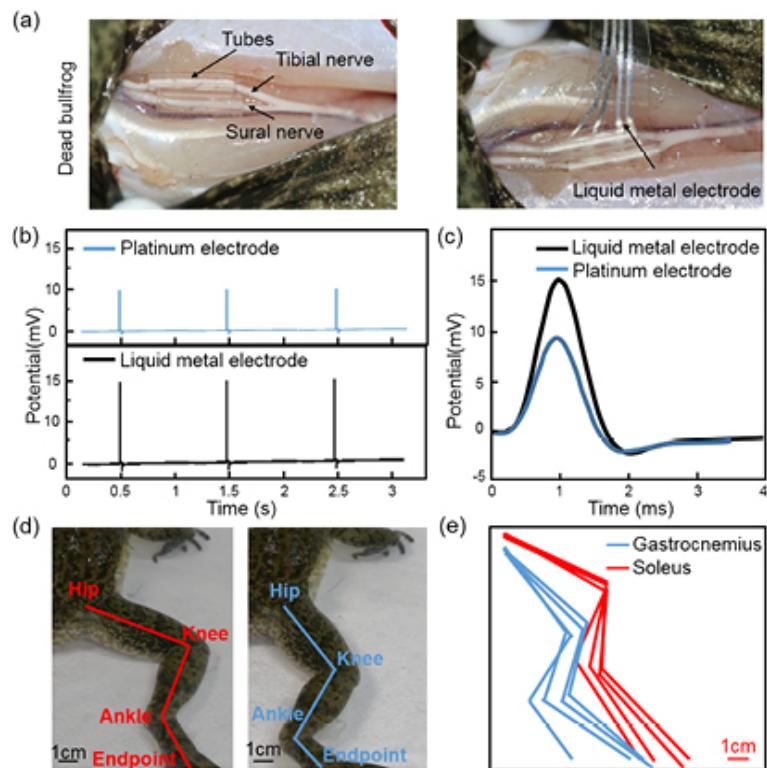


图 15 液态金属微电极修复牛蛙坐骨神经测试结果

(二) 下一步工作计划

1. 高导热、高导电且粘附性可调的液态金属功能材料批量制备及应用拓展。
2. 深入液态金属微电极在传统铂电极很难到达的胃、直肠、结肠、血管等部位的实际应用探索，以及在体植入式神经修复方面的应用。
3. 液态金属可控变形基础原理与应用研究：深入揭示胞吞颗粒的液态金属变形机理、空间构象转换调控机制、液态金属与颗粒相互作用及其力传递规律；进一步揭示液态金属冲浪效应中液态金属液滴、电解液、液态金属液池截面处三者之间质量、能量交换与作用力传递机制；在此基础上研发全液态可变形电子器件，以及操控液态金属柔性机器等。