

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

D19-液态金属材料

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D19. 液态金属材料

分会主席：邓中山、刘宜伟、何志祝、任龙、段良飞

D19-01

液态金属射频开关研究：机遇与挑战

邓中山*

中国科学院理化技术研究所

射频开关是现代通信系统中的关键组件之一，广泛应用于通信、5G 网络、雷达系统等无线技术领域。当前，随着无线通信技术的快速发展，对小型化、高性能、高可靠性的射频开关的需求日益增长。然而，传统射频开关如 PIN 二极管、MEMS 开关和铁氧体开关等，虽然性能优异，但在插入损耗、隔离度、功率容量等方面仍存在局限性，尤其是半导体类射频开关还存在非线性效应。液态金属作为一种新型功能材料，因其独特的物理化学特性，为射频开关的设计提供了新的思路。本报告主要介绍团队围绕液态金属独特的物理化学性质提出的几种不同类型的射频开关，包括基于液态金属润湿触点的高功率机械射频开关、基于低沸点流体驱动的热气动液态金属射频开关、基于液态金属还原诱导氢钨青铜的触发式射频开关以及基于温控的二氧化钒-液态金属射频开关。这些开关利用液态金属的导电性、流动性以及还原性等，结合不同的驱动机制，可实现射频信号的有效控制，并在射频性能方面展现出独特的优势。未来需进一步优化密封性和稳定性，提高响应速度，推进微型化和集成化，以进一步提升开关的性能和可靠性。液态金属射频开关凭借其诸多优势，在柔性电子、可重构天线、高功率微波系统等领域具有很好的应用潜力。

D19-02

液态金属赋能的柔性电子材料与器件技术

孔德圣*

南京大学

柔性电子技术作为下一代信息器件的核心发展方向，致力于实现与生物组织动态兼容、与环境智能交互的可变形功能系统，在健康监测、智能医疗及人机交互等领域具有重要应用潜力。然而，传统柔性导体材料因固态属性的局限，面临拉伸形变能力不足、动态稳定性差等挑战，严重制约复杂场景下的器件可靠性。针对这一难题，本团队长期致力于液态金属基复合材料策略及先进加工技术研究，通过跨尺度材料设计与制造技术创新，近期取得如下进展：（1）揭示了液态金属导体的动态自适应重构机制，提出电学性能调控的新策略，显著抑制大形变下的电阻变化；（2）开发了液态金属基导体的新型直写打印技术，实现二维、三维柔性导体结构的高效可控构筑，为柔性电子器件的自动化制造提供新方法；（3）创新性提出液态金属/离子导体复合透明电极设计，显著遏制了拉伸过程中的欧姆损耗，实现了可拉伸显示器件的高效集成。这些研究利用液态金属赋能柔性电子材料与器件技术创新，为构建高可靠、大形变适应性的功能器件与系统奠定了重要基础。

D19-03

面向兆瓦级直流超充的液态金属电力线

何志祝*

中国农业大学

大功率直流快充技术可显著缩短电动汽车充电时间并提高整车续航能力，但同时面临瞬间热冲击引发的热失控风险。传统的水/油基液冷技术将电流和热量传输过程分离，难以同时实现柔韧可操作性及高效传热。相比之下，新兴的液态金属冷却技术凭借卓越的电导率和热导率，在超高电流快充领域展现出广阔的应用前景。本文提出一种基于高效旋转感应电磁驱动液态金属柔性电力线的“电-热-流”多场协同一体化传

输超充技术。通过载流传导和载热耗散的协同作用，液态金属在承载大电流（>1000A）的同时可有效输运瞬间大热量。本文重点探讨兆瓦级直流快充系统中液态金属协同冷却柔性电力线构建与关键驱动技术突破。

D19-04

液态金属动态催化

唐俊马*

西安交通大学

固体金属催化剂活性位点原子处于相对固定的位置，在催化反应中限制了对反应物及中间体的灵活有效吸附。液态金属表界面原子的动态特性使液态金属在催化领域展现出与固体金属显著的差异，同时带来诸多优势。相比于固体金属催化剂，液态金属原子组分具备液态属性、空间流动性和动态原子结构，展现出突破固体催化剂极限的潜力。本团队的研究工作在原子级别揭示了液态金属和固体金属催化的本质区别，探究了液态金属原子动态自适应性吸附催化机理，并验证了金属溶剂对于原子空间结构以及催化反应路径的影响。同时，通过对液态金属的表界面修饰，实现了对液态金属复合材料的性能调控，并实现了一系列不同应用。

本团队目前主要从事液态金属功能材料及催化相关的研究工作。迄今，分别在 Science, Nature Nanotechnology, Nature Communications, Advanced Materials, ACS Nano 等国际权威期刊发表 10 余篇代表性研究论文。

D19-05

液态金属高精度柔性电路的无损耗刻蚀技术

国瑞*

中国科学院理化技术研究所

针对传统高精度柔性电子制造方法操作复杂、成本较高的问题，提出了一种不同于传统减材和增材制造工艺的新型柔性电子制造方法，其制造过程无材料损耗，可满足高精度（5 微米）、多基底、可拉伸、重复使用和可回收的技术需求，并且具有低成本、大面积制造柔性电路的优势。通过探究有机溶剂调控液态金属与基底粘附性的机制，并设计制造高精度位移装置，操控针尖改变特定位置处液态金属与基底的粘附性，从而实现液态金属在基底上的图案化，实现从微米到厘米的多尺度柔性电路制造。本项目的研究成果可用于制造多种优异性能的柔性电子电路，实现多基底、高精度生物医学信号检测，其高效便捷的制造优势可为柔性电子在生物医学、智能传感器、消费电子等领域的广泛应用奠定基础。

D19-06

基于铜-镓液态金属的室温二氧化碳还原固碳体系构建与性能研究

于超*

江苏科技大学

高效、低能耗地实现二氧化碳（CO₂）资源化转化是碳中和战略的重要组成部分。传统热催化 CO₂还原路径普遍存在能耗高、反应选择性差以及积碳导致催化剂失活等问题，亟需突破性技术加以解决。本研究构建了一种新型铜-镓液态金属（Cu-Ga LM）复合催化体系，首次实现在室温常压条件下将 CO₂ 高效转化为高附加值固态碳材料。该催化体系利用超声辅助方法合成 GaIn-Cu 复合微球，结合 N,N-二甲基甲酰胺（DMF）与乙醇胺（ETA）混合溶剂形成高溶解度反应介质，最大碳产率可达 2598.7 μmol/h，CO₂ 转化效率高达 96%。密度泛函理论（DFT）模拟结果表明，Cu 的引入显著降低了 CO₂ 中 C=O 键的解离能，有效提升了反应速率。此外，借助计算流体力学（CFD）模拟与可视化分析，揭示了气液界面 CO₂ 气泡在反应器中的输运与扩散行为，对反应器设计和传质过程优化具有重要指导意义。本工作展示了非贵金属液态合金在 CO₂ 常温固态还原中的应用前景，为构建高效、可持续的碳资源化利用体系提供了新思路。

D19-07

液态金属催化体系驱动 CO₂ 全周期转化与高值碳材料制备

陈啸*

江苏科技大学

本研究聚焦液态金属催化体系在 CO₂ 捕获与转化中的创新应用，提出两种高效集成化解决方案。针对传统 CO₂ 处理过程能耗高、系统分离的瓶颈，首先构建了基于镓铟液态金属（GaIn）的螺旋管式微反应器（STCM），通过物理吸附-热脱附-催化转化多过程耦合，实现 CO₂ 至固体碳的全周期转化。该系统采用垂直螺旋结构强化气液传质，结合密度泛函理论计算揭示了 DMF 溶剂与 GaIn 界面协同降低 C-O 键解离能（1.3 eV）的机制，在 30.79 GJ/t CO₂ 的低能耗下实现 8658.3 μmol/h 碳产率及 100% 转化效率。进一步开发了室温铜-镓液态金属（Cu-Ga）催化体系，利用 Cu 的强 CO₂ 亲和特性与液态金属的高电子迁移率，在 DMF/乙醇胺复合溶剂中实现 40℃ 下 2598.7 μmol/h 碳产率，转换效率达 96%。通过气泡动力学模拟与计算流体力学分析，阐明活塞流与二次流对 CO₂ 传质强化的作用机制，优化反应器设计。两体系所制备的碳材料具有分级多孔结构，展现优异微波吸收（反射损耗 -42 dB）与光催化降解硝基苯（98%）性能。研究揭示了液态金属在催化活性位点调控、能量循环利用中的核心作用，为工业级 CO₂ 资源化提供了集成化解决方案。

D19-08

基于镓基液态金属的纳米药物探索

汪达伟*

贵州大学 药学院

近几十年来，自顺铂、金诺芬及衍生药物取得成功以来，“金属药物”的概念逐渐得到重视。作为一种具有多靶点药物活性的金属元素，镓在医药科学领域，尤其是在抗菌、抗炎、抗癌、成骨、放射药、分子成像以及更多新兴药物制剂中显示出巨大的潜力。近年来，随着越来越多的研究突破，镓基液态金属的诸多物理化学性质被披露出来，基于镓基液态金属的药物创新剂型也不断涌现，有望为提高活性药物成分（Ga⁰/Ga³⁺）的生物安全性、生物利用度和药物活性带来更广泛的策略。

为此，本报告系统地概述了有前景的镓基药物，重点是典型特征、基本药物活性、代表性药物制剂和实际应用，旨在激发药物发现和进一步研究的创新理念。并针对本人以往研究工作，介绍镓基液态金属纳米药物在药物缓控释、光热/光动力治疗、免疫治疗、抗菌等领域的应用实例，以期对未来镓基药物的学术探索和转化医学提供帮助。

D19-09

基于界面润湿与还原作用的液态金属界面工程学应用

崔云涛*

中国科学院理化技术研究所

室温液态金属是一大类新兴功能材料，具备表面张力大、界面活性强及热导率高等优异特性。特别是镓基液态金属与不同的介质环境（如，固体，液体或气体环境）间呈现不同的界面效应特征，并进一步探知了液态金属的界面润湿能力与氧化还原行为等界面效应背后的基础科学理论，进而发展出室温液态金属在先进散热，氧化还原合成，薄膜材料沉积中非常规的界面工程应用。其中基于液态金属与铜界面间优异的金属键润湿能力，发明了液态金属靶材制备技术，与传统固体靶材烧结或者铸造工艺相比，显著降低了靶材制备温度，开创了多种镓基功能薄膜材料制备的低成本、快速制备新途径。在新材料合成领域，揭示了溶液环境中液态金属界面还原特性和还原机制，开创了液态金属直接还原技术在新材料合成、液相瞬态显示、气体传感、重金属离子检测等新应用场景。

D19-10**压力-超声耦合式柔性印刷电路致密化策略**

曹凌霄、何志祝*

中国农业大学

基于金属微/纳米颗粒墨水的印刷电路因金属本征高导电及可大规模印刷制造,已成为柔性电子制造工艺中极具发展潜力的技术之一。然而,在激活印刷的金属颗粒图案以接近其本征导电性的同时,又不损害柔性基底,尤其是对于高熔点金属而言,仍然面临诸多挑战。在此,我们报道了一种新颖的超声诱导柔性印刷电路致密化策略,即压力约束超声激活(PCSA)工艺。该方法能够在室温空气环境下,以亚秒级的速度在多种柔性基材上激活图案化功能电路,适用于数十种金属(熔点范围从室温至 3422℃)及非金属墨水(如碳纳米管、石墨烯、PEDOT:PSS、PZT 以及热电材料)。此外,该方法可与卷对卷工艺相结合,实现低成本、高速的大规模处理。我们展示了基于 PCSA 方法的 3D 柔性折叠电子器件应用,包括可擦除和折叠的双面电致发光显示器,以及可定制设计和大面积制造的电子织物,表明 PCSA 在柔性电子领域具有广泛的应用潜力。

D19-11**用于解决柔性传感器件中电磁干扰的多功能液态金属电磁波屏蔽和吸收薄膜**

张禧龙、邓中山*、李雷

中国科学院理化技术研究所

电磁干扰(EMI)的存在会导致电流和电压波形失真,从而降低传感器设备的精度和稳定性。柔性电子设备的出现打破了物理空间的限制,因为它们可以随意弯曲和扭曲。然而,这一特性加剧了其内部传感元件之间不必要的耦合,从而导致相互干扰。目前,解决电磁干扰的方法主要是采用电磁屏蔽(EMS),但仅靠这种方法无法解决柔性传感器件内部 EMI。本研究将镓基液态金属(LM)电路印制在 Ecoflex@Fe 薄膜上,设计出兼具 EMS 和吸波功能的可拉伸电磁波屏蔽和吸收(EWSA)薄膜,可有效解决内部和外部 EMI 的影响。结果表明,EWSA 薄膜一侧的屏蔽效能高达 54.5dB,而另一侧的反射损耗则低至-43.5dB。此外,基于 LM 的 EWSA 薄膜在不同方向的拉伸过程中都能保持良好的 EMS 和吸波性能,在拉伸 1000 次后还能有效避免 EMI。总之,基于 LM 的 EWSA 薄膜实现了宽频带的 EMS 和吸波功能,为开发能够消除内部和外部 EMI 的新一代柔性电子皮肤提供了解决方案。

D19-12**液态金属功能薄膜抑制二次电池枝晶**

汪晨阳、曾梦琪*、付磊

武汉大学

电化学能源在取代传统化石能源、减少碳排放、促进社会可持续发展方面发挥着重要作用,尤其是新能源汽车、移动电子设备等领域对高性能可充电电池的需求日益迫切。然而,目前二次电池在电化学循环过程中载流子的不均匀沉积导致的枝晶生长问题尤为突出。枝晶生长不仅会使电池界面不稳定,降低库仑效率,导致容量衰减,甚至还会刺穿隔膜导致电池内部短接,造成热失控引发燃烧爆炸。液态金属兼具液态和金属特性,其金属特性(导电性、表面各向同性、与其他金属良好的亲和性)赋予其调控多种载流子沉积行为的能力,使得电池内部离子流分布均匀,从而抑制枝晶的生长。液态金属的液态特性(自愈、可变形性、快速扩散)确保了持续稳定且可逆的界面稳定作用,避免了传统方法在长期循环状态下性能不稳定的问题。基于液态金属与其他金属的良好亲和性、优异的室温流动变形性、表面各向同性等特性,构筑了液态金属功能薄膜,该薄膜可以与多种金属电极实现超共形紧密接触,包括锂金属和锌金属,进而调控二次电池中载流子沉积行为,均匀界面离子流,抑制了二次电池中枝晶的生长,实现了具有超高安全性和循环寿命的二次电池。

D19-13**在一百万次拉伸循环后保持 $3 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ 电导率的耐用金属凝胶**

李旭嵩¹、王嘉诚¹、王文¹、张韩婷¹、焦一丁¹、陶松林²、王远贞¹、叶婷婷¹、宋杰¹、白辰昱¹、尹皓天¹、卢江¹、李亦冉¹、李方琰¹、何儿¹、栗乾明¹、邹旷怡¹、汪海东¹、曹馨尹¹、王晓亮²、张晔*¹

1. 南京大学现代工程与应用科学学院

2. 南京大学化学化工学院

导电弹性体作为核心材料在可穿戴电子产品和软机器人等新兴领域具有重大需求。理想的导电弹性体需同时具备 10^6 S m^{-1} 的金属级电导率以有效降低器件内阻，并能在经历百万次拉伸循环后依然保持性能稳定，以满足应用场景的需求。目前主流策略是将导电填料掺入聚合物基体形成复合材料，但存在明显缺陷：刚性填料（如金、银纳米线）在拉伸过程中倾向于在聚合物基质中随机迁移，导致循环拉伸后电阻显著增加；而柔性填料（如镓基液态金属）在反复形变过程中则容易在聚合物基体中发生聚集或从内部泄漏，造成电导率大幅波动。为了解决这一挑战，我们从弹性水凝胶的结构中获得启发，设计开发出一种新型金属凝胶，利用静电相互作用将质量分数为 93.60% 的金属流体以连续贯通的结构填充固定在弹性三维聚氨酯网络中。富含动态可逆结构的三维聚合物网络为循环拉伸提供了稳定耐用的力学支撑，静电相互作用作为“锚点”使液态金属连续体能够与聚合物网络同步变形，而液态金属连续体可以在反复变形下保持结构稳定。这种独特的结构设计使得金属凝胶具备了金属般的电学性能与橡胶般的力学性能。其中，平均电子电导率高达 $3 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ ，单轴拉伸量最大可达 1100%，具有与生物软组织匹配的杨氏模量（264 kPa），且具有较高的韧性（ $10.07 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ）。并且经过 100 万次 100% 拉伸量的极端循环拉伸测试后，金属凝胶表现出稳定的电学性能，电阻变化仅为 3.3%。

D19-14**Enhancing the Hermeticity and Load Capacity of Liquid-Vapor Phase Change Soft Actuators via Sandwich-Like Liquid Metal Seals and Fiber-Reinforcement**

Siqi Qiu*

South China University of Technology

Soft actuators based on phase change materials (PCMs) hold great potential for advancing soft robotics through their high energy density and flexibility in design. However, vapor leakage in such actuators undermines their long-term functionality and durability. In this study, we developed a liquid-vapor phase change soft actuator with enhanced hermeticity. We evaluated four sealing strategies using (1) untreated silicone, (2) silicone with hydrophobic surface, (3) silicone/liquid metal (LM) mixture, and (4) sandwich-like silicone-LM-silicone structure, respectively. Among these, the LM sandwich structure exhibited the best hermetic performance, reducing ethanol leakage by approximately two-thirds compared to untreated silicone. The actuator sealed by LM sandwich maintained its flexibility and exhibited improved bending performance, sustaining a large bending angle over extended cycles. The proposed actuators were incorporated into a soft gripper, demonstrating stable and prolonged gripping functionality. Additionally, reinforcing the actuator with fibers further improved both its bending performance and load capacity. These findings offer a promising strategy for developing durable and reliable soft actuators for real-world robotic applications.

D19-15**液态金属反应介质**

吴英鹏*

湖南大学

液态金属不仅具有优异的导电/热性，还具有独特的柔韧性，自修复性和固液相变等特点。其中液态金属的流动性使其可以与其他物质复合，同时其金属特性使其能作为液态的溶剂溶解或分散多种金属或合金。基于此，液态金属能够作为化学反应的介质，使金属催化剂和反应物质在其内部反应。得益于液态金属的流动性，此类反应中的反应物，催化剂等能够均匀混合，甚至能达到原子级混合，进而提高反应的均匀性和反应速度。同时，由于液态金属内部充满电子，与其内部催化剂发生相互作用，提高催化性能。我们的研究展示了液态金属作为一种特殊反应介质的潜力。

参考文献

- [1] Wu, Y*; et al.; Nature Communications, 2021, 12, 7184
- [2] Wu, Y*; et al.; Nature Communications, 2022, 3, 7625
- [3] Wu, Y*; et al.; Advanced Functional Materials, 2022, 2206405
- [4] Wu, Y*; et al.; Advanced Functional Materials, 2024, 2410843
- [5] Wu, Y*; et al.; ACS Materials Letters, 2024, 6, 5266
- [6] Wu, Y*; et al.; Matter, 2025, 8, 101986
- [7] Wu, Y*; et al.; Angew, 2025, e202421020

D19-16

室温液态金属基弹性导电材料与器件

刘宜伟*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

针对智慧医疗健康及人形机器人产业对柔软、共形的弹性电极、电路及传感器的需求，介绍现有刚性电子器件存在的挑战以及室温液态金属基弹性导电材料与器件的优势。针对室温液态金属电极材料的拉伸稳定性及图案化问题，重点汇报高稳定液态金属基弹性导电材料/电极/电路构筑方法、液态金属图案化制备技术、液态金属基弹性生物电极、液态金属基弹性应力/应变传感器及其工程化等方面的工作，并介绍上述弹性导电材料与器件在智慧医疗健康、人机交互等领域的应用案例。

D19-17

Crystal Engineering with Liquid Metal Solvents

Jianbo Tang*

Westlake University

In liquid metals, metallic interactions and disorder dominant. When used as synthesis solvents, these metallic liquids provide a non-volatile, strongly interacting yet highly dynamic environment for crystal growth. This offers new possibilities for growing composition-, phase- and morphology-controlled crystals, many of which are not accessible by conventional solvent growth methods. In this talk, I will introduce our efforts towards developing a liquid metal-based crystal engineering route. It will be shown that a number of experimental configurations can be designed to direct bulk, surface and interface specific crystal growth. Surface and interface effects are found to regulate phase interactions and structural development during crystallization, especially in dilute systems. As a post-growth design approach, dealloying of intermetallic crystals for highly nanoporous metals will be further discussed. The use of the developed materials for catalysis and sensing will be demonstrated.

D19-18

基于液态金属的多功能柔性电子器件

潘绍武*

东华大学

相比传统固体导电材料，高导电、易变形的液态金属材料在柔性可延展电子器件中具有独特的优势。然而，其较高的表面张力导致难以在分子基底上实现连续且高质量的打印。为此，我们引入超分子组装体，制备出具有高稳定性的液态金属墨水，利用超分子组装体动态特性，实现了可打印、无需机械烧结的柔性导电图案。另一方面，构建微米纤维膜与液态金属之间的动态互锁界面，获得具有自封装、高导电性且电阻对应变不敏感的可拉伸导电纤维。最后，探索了这些柔性导电材料在可拉伸显示器、电生理信号检测 and 智能信息交互系统等领域的应用。

D19-19

液态金属基凝胶及功能化研究

李现凯*

青岛大学

液态金属表面张力较大，很难与基体有效复合。本研究通过微纳化处理的方法，利用海洋生物多糖高效分散液态金属微纳液滴，进一步构筑了液态金属基气凝胶和水凝胶，开发了具有智能传感响应的气凝胶和可漂浮的水凝胶，为液态金属基多功能材料的构筑提供了新思路，同时也拓宽了液态金属在可穿戴柔性传感器、能量转换等领域的应用。

D19-20

基于室温液态金属的场发射电推进技术研究

杜邦登*、王林妍、邢宝玉、叶继飞

航天工程大学

以金属场致发射电推力器（FEFP）为代表的静电式微推进技术，以其推力小、比冲高和效率高等优点，成为微小卫星实施姿态调整、轨道修正和阻力补偿等任务优选的动力技术。FEFP 形成推力的关键在于，液态金属可在发射针表面形成良好润湿并在毛细作用下自动从储箱流动至发射针尖；针尖处的液态金属在高压电场作用下形成泰勒锥并进一步电离形成静电喷射。镓基室温液态金属具有良好的润湿流动性，可有效解决金属铟式或铯式 FEFP 储箱加热功耗高、氧化污染重及润湿性差等问题。本文构建了以镓基室温液态金属为基的 FEFP 系统，研究了大气和高真空条件下，镓基液态金属 FEFP 形成静电喷射的击穿电压、束流电流、比冲和推力等性能。实验结果表明，大气环境下，镓基液态金属 FEFP 的发射电压范围为 2375-4675 V，束流电流范围为 0.5-17 μ A，最高比冲约为 383s，最大推力约为 417 μ N；高真空条件下，镓基液态金属 FEFP 的发射电压下降、束流电流增加，其范围分别为 2375- 3750V、0.5-25 μ A。与大气环境相比，高真空下 FEFP 的比冲和推力未发生明显变化。但与大气环境相比，高真空下 FEFP 达到相同推力和比冲所需要的电压更小。研究结果对以镓基液态金属为工质的 FEFP 工况设计提供了数据参考，有利于推动室温液态金属在空间推进技术领域的应用。

D19-21

Electrochemical Manipulation of Liquid Metals

Yahua He*

Deakin University

Over the past decade, gallium-based liquid metals (LMs) have recently received attention due to their simultaneous fluidity and metallic properties at room temperature. With high surface tension ($> 400 \text{ mN m}^{-1}$, the value of which depends on the composition of the metal), LMs favor the formation of droplets and is difficult to be manipulated. The effective tension of the LM (at the metal/electrolyte interface), however, can be lowered to extremely low values through electrochemical oxidation on the surface of the LM. It allows the metal to deform and spread, thereby enabling the electrochemical manipulation of LMs.

Electrochemical manipulation: by applying an anodic potential to LMs within an electrochemical environment, they are able to be electrochemically manipulated to penetrate microporous media (National Science Review 2020). The high surface tension of LMs can be significantly reduced to near-zero due to the voltage-induced oxidation of the LM surface in a solution. As a result, the LMs penetrate through the microporous media under gravity, and the LMs continue to flow down, forming thin threads/wires. Uniform LM wires can be formed using a needle; the electrochemical reactions require an electrical current that flows through the wires, making them susceptible to the magnetic field and easier to be manipulated into unique shapes such as levitated loops and squares (PNAS 2022). Because LM wire is soft, it provides almost no resistance to manipulation via the Lorentz force, and therefore large-scale manipulation of LMs can be realized.

Manipulation producing new knowledge and technology: LMs attached to an anode in an electrochemical cell always move toward the cathode with considerable electrochemical current emerging. This raises the question: what happens when the positively charged LM (anode) approaches the negatively charged cathode? Previous reports suspect they would short circuit. However, our work has demonstrated otherwise (Nature Chemical Engineering 2024, Highlighted article as the editor's pick). When the droplet reaches the cathode, it wraps around the cathode but does not touch it despite the electrostatic attraction between the positively charged LM and the negatively charged cathode. Consequently, the LM continues to flow toward the cathode and surrounds it until finally the metal completely detaches from the anode and transfers to the cathode. This ground-breaking research not only challenges conventional electrochemical principles but also offers promising prospects for the development of shape-reconfigurable conductors and actuators. The ability to avoid short-circuiting has significant implications for electrochemical engineering, particularly in convective transport of electrochemically active species and heat transfer near electrodes.

D19-22

液态金属线圈为柔性电磁传感与致动技术赋能

李楠¹、王磊²、刘静^{*1}

1. 中国科学院理化技术研究所

2. 北京林业大学

柔性机器人和可穿戴电子等领域的快速发展对集成化、高性能、可适应复杂环境的智能材料和器件提出了迫切需求。本系列研究围绕液态金属线圈展开，首先提出并实现了一种突破性的通用制备方法，成功构建了结构密度超越传统漆包线水平的高密度三维弯曲液态金属线圈（HD-LMC）。这种新型柔性线圈展现出卓越的柔性和多功能性，被成功应用于多种环境传感（如压力、温度、距离传感及近场通信）。此外，HD-LMC 显著提升了软体电磁执行器的力和功率密度，并成功应用于仿生游泳和集成传感与驱动的软体机器人。在此基础上，进一步深入探索了液态金属线圈在先进触觉感知中的潜力，受人类指尖的启发，开发了一种基于液态金属线圈的各向异性电感式传感器（AI-LMS），该传感器利用线圈结构特性实现了对空间多轴压力的宽范围、高线性、高稳定性和快速响应检测，并结合深度学习模型实现了有效信号解耦，成功应用于高精度表面扫描和机器人精细抓取行为识别。考虑到实际应用中温度等环境因素的干扰，本研究还创新性地构建了对抗性液态金属结构（ALMA），通过巧妙设计液态金属线圈与磁性颗粒在弹性基质中的相互作用，实现了电感信号对温度响应的精确调控，甚至在特定条件下实现了对温度不敏感的压力传感以及压力与温度的多模态解耦感知。此外，通过引入超疏水表面，显著增强了材料的环境鲁棒性。这些工作系统地展示了液态金属线圈从高效制备到在柔性传感、驱动和智能材料领域的多功能应用潜力，为开发高度集成、高性能、环境适应性的下一代软体系统和柔性电子开辟了新途径。

D19-23

High-performance, Strain-stable Electromagnetic Shielding Materials Enabled by Magnetic Elastic Fiber Networks Pinning Liquid Metal

Qi Zhang, Yuanzhao Wu, Yiwei Liu, Runwei Li*

Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences

Stretchable electromagnetic interference (EMI) shielding materials are critical for the reliability of wearable electronic devices in complex electromagnetic environments. However, achieving compatibility between ultra-thinness, high shielding efficiency (SE), and excellent dynamic stability remains a major challenge in this field. Here, an ultrathin elastic EMI shielding film (TPU/Fe-LM) is developed by leveraging the magnetoelectric synergy effect and a pinning-interlocking mechanism between ferromagnetic elastic nanofiber networks and the embedded liquid metal (LM), achieving high EMI SE and excellent strain stability. The ultrathin film, with a thickness of 85 μm , exhibits an average EMI SE exceeding 70 dB across a broad frequency range of 0.1 MHz to 40 GHz, with only a 2.59% variation under 100% tensile strain. This superb EMI SE per unit thickness ($\text{SSE} = 1225 \text{ dB/mm @ 100\% strain}$) ranks among the highest reported for stretchable EMI shielding films, highlighting the exceptional application potential. As a proof of concept, the EMI shielding film was integrated into a stretchable capacitive strain sensor for dynamic and static force sensing, achieving a 50-fold enhancement in angle resolution for robotic motion monitoring. This research paves the way for stretchable EMI shielding materials and offers valuable guidance for enhancing electromagnetic protection in wearable electronics.

D19-24**镓基液态金属/氧化物的界面调控与柔性光电化学器件应用研究**

祁祥*

湘潭大学

镓基液态金属 (LM) 及其氧化物界面体系因其独特的界面接触特性和载流子转移效率, 在柔性电子领域展现出独特潜力。光电化学型 (PEC) 器件是一种基于光电池构型的新兴传感器件, 其工作原理巧妙融合了半导体物理与电化学过程, 具有自供能、成本低、环境适应性强和制备工艺简单等特点。我们主要围绕液态金属/氧化物的表面微结构、界面调控、PEC 器件构筑及应用等开展研究。在 PEC 器件中, 金属表面氧化物作为光敏层, 液态金属及其合金作为电荷传输层, 准固态电解质作为离子传输层。我们从电极构筑方法及应用场景等角度积极探讨了镓基液态金属/氧化物的功能调控方案、PEC 电极制作工艺, 以及其在光电探测、葡萄糖传感、可拉伸自愈器件和生物创口愈合等的应用。1) 提出“液态金属纳米液滴桥接”策略, 构建三维液态金属/GaOx 海绵电极, 有效提升了其光吸收效率; 2) 基于 Ga-LMs 表面电置换反应, 成功制备窄带隙无定形 VOx 与结晶态 Cu₂O 功能层, 构建可擦除柔性光电探测器及无酶葡萄糖传感器, 其具有选择性高、检测限低及生物相容性好等特点; 3) 开发新型 3D 点胶印刷技术, 构建 Ga-LMs@GaOx-TiO₂ 异质结光响应单元阵列, 有效地提升了其功率效率; 4) 设计制备了 LM@GaOx/VOx 非对称异质结基无线光电电极贴片, 通过光脉冲频率与强度可实现电信号输出的调节, 其在 20 Hz 光脉冲照射下显著促进小鼠伤口愈合; 5) 将多种镓基液态金属/氧化物液滴与由硼砂 (Borax) 改性的聚乙烯醇 (PVA) 网络交联, 得到具有可拉伸自愈特征的 PVA-LM/氧化物-Borax 凝胶, 其在 200% 拉伸状态下仍保持优良的光响应性能。

D19-25**基于液态金属顶部电极的有机光电器件**

黄文超*

武汉理工大学

有机光电器件, 如有机光伏电池 (OPV) 和有机光电探测器 (OPD), 因其质量轻、柔韧性好等优点, 在可穿戴电子设备领域展现出广阔的应用前景。然而, 目前高效的有机光电器件通常依赖于真空沉积工艺来制备顶部电极, 这在一定程度上限制了其大规模工业化生产。为突破这一瓶颈, 本研究提出了一种全溶液法制备有机光电器件的新策略, 采用转印镓基液态金属 (EGaIn) 作为多功能电极, 并通过调控自组装

氧化层的厚度，有效替代传统工艺中的金属电极（如银）和电子传输层，简化了器件结构及制备工艺。基于该电极的有机太阳能电池实现了 17.6% 的光电转换效率，同时该器件还可作为高性能光电探测器，成功应用于脉搏波（PPG）信号的检测。本研究所发展的 EGaIn 转印技术，为实现高性能、低成本有机光电器件的制备提供了关键技术路径。

D19-26

液态金属-锂复合界面限域分布调控及其对低温高比能电池影响

周腾飞*、孟润泽、王启超、杨辰雨

安徽大学

针对高集成度、低温条件下使用的军民两用器械、空天应用器件、极寒深空考察及多功能高功率用电器的储能需求，结合低温低压等现实工况，提出通过镓基液态金属阵列分散于锂金属表面，引导调控电荷通路，抑制枝晶，实现低温稳定锂金属负极制备，提高电解质层离子电导率，实现电池低温适用性、能量密度及安全性协同提升。通过将低凝固点镓基液态金属阵列分散于锂金属表面，引导调控电荷通路，抑制枝晶，实现低温稳定的锂金属负极制备；再通过原位电化学交联耐低温且聚合度可调的聚合物复合锂金属，实现液态金属精准限域，提高电解质层离子导率。最终实现电池低温适用、能量密度以及安全性提升。借助于原位现场表征和低温多物理探针台，研究复合电解质膜中带电粒子的传输机制，理清材料基元-相界面结构-电化学性能三方构效关系。通过表面等离子体强化实现锂金属负极减薄增韧、柔性电解质层构筑以及浆料喷涂等电池诸元优化，手段实现一体化电池制备。

D19-27

态金属复合结构及其智能微纳米机器人的开发和应用

任龙*

上海大学

液态金属材料作为一种新型金属功能材料，兼具优异的导电导热性、可变形性以及独特的流动特性。这种金属性与流动性的协同效应，赋予材料诸多奇异的物理化学性质和智能刺激响应能力，有望突破传统金属功能材料在大尺度形变、自修复性能等方面的应用瓶颈，在柔性可穿戴设备、自修复电子器件、软体机器人等领域展现出广阔的应用前景。本报告将系统介绍团队在液态金属基复合结构设计与制备方面的研究进展，重点阐述其在刺激响应功能、磁/热驱动微米机器人以及化学自驱动纳米机器人等领域的创新应用。最后，将展望液态金属在智能材料研究与软体微纳米机器人技术中的未来发展方向。

D19-28

液态金属/固体材料之间的微纳界面导热规律与调控

张旭东*

中国科学院理化技术研究所

室温液态金属热界面材料由于具有良好的涂刷性和高本征导热系数，逐渐成为高端热界面材料的重要选择。然而，液态金属与陶瓷材料、大部分金属材料、聚合物材料之间以范德华力结合，界面处存在着严重电子/声子输运失配现象，阻碍了界面热输运。如何增强液态金属/固体材料之间的键合力和载热子匹配特性是强化界面传热的关键。本研究对液态金属/固体金属、液态金属/碳化硅、液态金属/聚合物等三种类型的界面体系的导热规律与调控方法进行研究。针对液态金属/固体金属界面，提出了在界面处生成金属间化合物的策略增强界面热输运，该方法能够使界面作用力转变为金属键，载热子转变为电子，以液态镓/铜界面为例，TDTR 测试表明金属间化合物的界面热导比氧化物的界面热导高一个数量级。针对液态金属/碳化硅界面，采用热氧化工艺，在碳化硅表面自生成二氧化硅，大大降低液态金属和碳化硅之间的界面热阻，从 8.7 (mm² K)/W 降低至 2.6 (mm² K)/W。针对液态金属/聚合物界面，提出了一种液体金属和固体

金属协同掺杂的策略用于制备高性能热界面材料，实现了材料的热学性能与力学性能的平衡。以体积分数为 30% 的共聚酯 Ecoflex 为基体，体积分数为 55% 的 100 微米液体金属和 15% 的 5 微米铜粉为填料，制备出的柔性热界面材料的热力综合性能因子为 9，远大于纯固体导热填料或纯液态金属填料掺杂制备的热界面材料。

D19-29

金属基纳米结构生长与物性演化机制研究

程宁燕*

安徽大学

金属基纳米结构因其独特的尺寸效应和表面效应等特性，在催化、光电器件及能源存储等领域展现出广泛应用前景。深入理解其生长动力学和构效关系，对于实现结构可控合成与性能调控具有重要意义。近年来，我们聚焦于兼具金属和流体特性的低熔点镓基液态金属（Ga-LM），其较好的表面重构能力和热传导性能，使其能与一系列固体金属发生溶解、合金、反应、扩散等相互作用。借助于透射电子显微镜及其附属设备，配合原位热学、原位力学等样品杆，我们对基于 Ga-LM 的金属基纳米结构在成核、扩散与生长等过程中的演化行为进行了实时可视化研究。系统探讨了界面反应动力学及热/电场等外场对其结构演变的调控机制，揭示了其微观结构与性能之间的因果联系，为金属基纳米结构的设计与应用提供了理论依据和实验支撑。

D19-30

面向生物医学应用的液态金属复合体系研究

陈森*

南京航空航天大学

为满足多样化的应用需求，单一的液态金属材料面临挑战，液态金属复合体系研究应运而生。本研究聚焦于液态金属复合体系在生物医学中的应用，主要涵盖肿瘤热疗、抗菌抗炎及生物传感。研究开发了可自动控温的液态金属/聚合物复合材料，使其能够实现不依赖外部控制系统的温度自动调控，显著提升了肿瘤热疗的效果；此外，研究还探讨了液态金属与纳米铜颗粒、抗菌肽、万古霉素和共价有机框架材料等多种材料的复合，验证了其优异的抗菌抗炎效果，这些复合材料不仅展现出卓越的抗菌性能，还有效避免了细菌产生耐药性，是一类具有应用前景的柔性抗菌材料；同时，我们研发了液态金属基生物传感材料，在植物传感、肌电传感等实际应用中展示出独特的优势；最后，本报告也将介绍液态金属/溶液复合体系及其在柔性存储器等方向上的应用。通过这些创新，我们旨在为生物医学等领域提供有益的解决方案，推动液态金属基复合材料在生物医学中的实际应用。

D19-31

Study on biotissue like rhythmic hydrous liquid metal agglomerates

Jianye Gao*, Weichen Feng, Xin Liao

Tsinghua University

A hydrous liquid-metal agglomerate (HLMA) was created, demonstrating a series of unique biological tissue-like and organ-rhythm behaviors. This study proposes a strategy for constructing rhythmic biomimetic tissues and organs using two distinct fluids (water and bottom-up assembled liquid-metal materials). Through the synergistic mechanisms of ultrasound-assisted in-situ reduction and electrochemical sintering, the assembled hydrous liquid-metal aggregates maintain structural integrity during their "cell-like" growth, floating, and rhythmic contraction/relaxation processes, reminiscent of the physiological "brain in a vat" scenario described in classical literature. The core mechanism involves electric field-triggered reversible redox reactions that "ignite"

the bio-like rhythmic behaviors of HLMAs. During this process, HLMAs exhibit periodic changes in material composition, structural architecture, and physical properties, accompanied by rhythmic contraction/relaxation movements analogous to biological activities such as cardiac pulsation and alveolar respiration. The research further reveals the synergistic mechanisms among material transformation, energy conversion, and information transmission during HLMA rhythm generation, demonstrating the unique advantages of liquid-phase materials in constructing biological rhythms due to their high spatiotemporal dimensionality and fluidic characteristics. This study establishes a novel material foundation for developing artificial biological tissues, organs, and intelligent entities, while providing a paradigm for creating biological rhythm behaviors using non-living substances.

D19-32

刺激响应液态金属胶囊及生物医学应用

马标、刘宏*

东南大学

液态金属因其优异的流动性、致密性和响应性，为生物分子封装与信息存储提供了全新平台。在近期研究中，我开发了基于刺激响应的液态金属胶囊体系，分别应用于生物分子的稳态保护与按需释放、以及 DNA 信息的集成存储与动态管理。首先，我们利用镓的低熔点与相变特性，实现了 DNA 与酶等生物分子的无溶剂、高密封性封装，封装后的胶囊可通过机械振动实现高效释放，并成功用于“一管式”RPA-CRISPR 病毒核酸检测，具有操作简便、响应快速的优势。进一步地，构建了可热/电响应的液态金属-DNA 存储系统，实现从编码、封装到解封的多级操作，具备可重构性和仿生信息管理能力，支持信息形变、融合、分裂及可视化读取等功能。本次汇报将聚焦这两类液态金属胶囊的设计原理与关键应用，展示其在智能生物系统和信息技术融合中的潜力。

D19-33

基于界面效应的高稳定弹性电容器及其在弹性电路中的应用研究

赵丹¹、杨华礼²、汪鹏君³、李润伟^{*2}

1. 南京邮电大学

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

3. 温州大学

电容器作为电子电路中广泛应用的核心元器件，随着可穿戴设备、电子皮肤等领域的快速发展，其柔弹性化需求日益凸显，然而在机械形变下器件电气性能失稳已成为制约电容器应用的瓶颈。本研究基于动态界面工程设计了一种本征可拉伸的弹性液态金属/聚氨酯电容器。通过重力辅助沉积构建了独特的动态电极/介质界面结构，能够在拉伸过程中通过界面展平有效抑制电极面积的改变；与此同时，液态金属颗粒的梯度分布设计赋予了电极/介质界面在应变条件下的动态迁移能力，从而主动补偿介电层厚度的变化。得益于这种协同的界面稳定机制，所制备的电容器展现出卓越的机械鲁棒性与电容稳定性：在 50%应变下实现了低至 1.29%的电容波动，并能稳定承受超过 1000 次拉伸循环。我们将器件成功集成至弹性 LC 振荡电路中，作为调谐元件实现了在大幅拉伸下频率稳定的近场通讯（NFC）功能，显示出其在可穿戴电子设备及全弹性电子电路领域的巨大潜力。

D19-34

超薄可拉伸液态金属纳米膜的制备与性能研究

李诗颖^{1,2}、刘宜伟^{*1,2}、巫远招^{1,2}、李润伟^{1,3}

1. 中国科学院宁波材料所

2. 中国科学院大学

3. 宁波东方理工大学

高性能的表皮电极对生理电信号的高质量采集至关重要。超薄厚度、高导电性以及与皮肤良好的共形性是一直所追求的目标。液态金属作为理想的候选材料，但其高表面张力以及自发形成的绝缘氧化膜，液态金属超薄导电薄膜的制备仍面临关键的挑战。本研究报道了一种新型的低温沉积方法，成功制备出超薄液态金属导电薄膜。结合基底原位预冷与热蒸发工艺，实现液态金属薄膜的逐层生长，赋予液态金属薄膜初始导电的性能。薄膜厚度最低可至 19 nm，保持极高的初始导电性 (3×10^6 S/m)。基于此，所获得的表皮电极展现出卓越的性能，包括超薄的厚度 (1.1 μm)，极低的界面阻抗 (1 kHz 时为 8.5 k Ω)、优异的动态稳定性，实现了动态复杂环境下肌电信号采集，信噪比高至 26 dB。这一技术不仅为液态金属电子器件的制备铺平了道路，也为下一代可穿戴健康监测系统与先进人机交互界面的发展奠定了坚实基础。

D19-35

辐射增强型液态金属相变热沉性能研究及优化设计

李伟^{1,2}、桑广豪^{1,2}、邓中山^{*1,2}

1. 中国科学院理化技术研究所
2. 中国科学院大学未来技术学院

液态金属相变材料具有高热导率和高体积潜热的优点，有望应对先进电子设备热管理方面日益严峻的挑战。自然对流通常伴随着辐射。对于温度较高或辐射率较高的表面，辐射传热的贡献往往很大，不容忽视。本研究探讨了辐射强化液态金属散热器的传热性能，并且对其进行了优化设计。首先，对带有圆柱形翅片的液态金属相变散热器进行了连续加热和大功率循环加热实验，以研究其传热性能。连续加热实验结果表明，引入高辐射率辐射涂层可有效控制热源表面温度。当加热功率为 120W/240W 时，引入辐射涂层可使热源温度达到 100 $^{\circ}\text{C}$ 的时间分别延长 7.99% 和 10.06%。大功率循环加热实验结果表明，散热器在高温区和低温区都能提供良好的热控制性能。然后，进行了数值模拟，分析了翅片截面形状、翅片旋转角度、小翅片数量和翅片高度对自然对流和辐射传热特性的影响。优化后的相变散热器采用圆柱形翅片，有四个小翅片，翅片旋转角度为 0 $^{\circ}$ ，翅片高度为 45 毫米。最后，经过优化设计，辐射增强型液态金属相变散热器能够在加热功率为 120W 的循环加热实验中保持恒定的热源表面温度，其中每个加热循环持续 90 秒，然后冷却 390 秒。这对于间歇运行的电子设备的热管理具有重要意义。

D19-36

普适性液态金属 3D 打印及泛介质打印体系

冯卫辰¹、单晓晖¹、王雪林³、高建业¹、寮欣¹、刘静^{*1,2}

1. 清华大学
2. 中国科学院理化技术研究所
3. 北京航空航天大学

全面评述了近年来兴起的液态金属 3D 打印工作，系统归纳了不同时期的可在气体、液体、软物质、生物组织乃至刚性介质中工作的液态金属 3D 打印原理及其应用问题，提炼和剖析了液态金属墨水与周围介质之间的相互作用规律与科学问题，特别阐述了通过主动引入周围介质与液态金属间的物理化学作用实现特定功能器件制造的基本路径，继而提出了具有统一意义的普适性液态金属 3D 打印理论框架。进一步地，将打印对象全面扩展到更广范围如各种熔点的金属及复合材料，提出了集合所有液态金属打印技术、墨水材料及介质环境于一体的泛介质 3D 打印体系，构建了有通用性意义的增材制造中心技术框架。

D19-37

液态金属模板法构建碳包覆中空 Ga₂O₃@void@C 用于高性能无负极锂金属电池

李俊凯*

昆明理工大学材料学院

在新能源电池的研究中,电极材料在嵌入离子后的体积膨胀问题一直有待解决。构建中空核壳结构的策略一直以来备受追捧,被证明是有效的,但很难构建定量的弛豫空间。鉴于此,我们利用液态金属辅助构建出了可以定量内部空间的 $\text{Ga}_2\text{O}_3@\text{C}$ 中空核壳结构的锂电负极材料。通过 *comsol* 力学计算表明,内部空间为 25-50%均可以适应 Ga_2O_3 在脱嵌锂离子/钠离子过程而不发生破裂。实验也表明,通过定量设计后的中空 $\text{Ga}_2\text{O}_3@\text{C}$ 电极材料具有比实心 $\text{Ga}_2\text{O}_3@\text{C}$ 更好的电化学性能,且具备高的体积密度。此外,我们的利用液态金属合金化辅助构建中空核壳结构的方法,同样构建出了中空 $\text{Ga}@\text{SiO}_2$ 、 $\text{GaInSn}@\text{TiO}_2$ 、 $\text{Sn}@\text{C}$ 、 $\text{ZnO}_2@\text{C}$,使得该方法不仅可以定量,还可以作为一种通用的策略适应于各种氧化物、纯金属的中空核壳结构的构建。该策略在各类电池的电极材料中定量设计核壳结构提供了前所未有的启示,也为其他领域的应用提供新思路。

D19-38

室温液态金属界面静电性能优化及应用研究

段良飞*

云南师范大学

静电是自然界中一种普遍存在的物理现象,其界面电子转移特性在能源环境、化学工程和材料科学等领域具有广阔的前景。室温液态金属是一类以金属镓(Ga)为主体的新兴合金功能材料,室温下兼有金属和流体等多重属性,特别是表面原子的分散性、润湿性、流动性及多原子协同等在界面静电领域中均展现出独特的性能优势。此外,该体系材料的重要功能和应用与表面性质密切相关,且对组分选择、相变过程和表面原子分布状态等存在决定性的依赖关系。因此,借助室温液态金属丰富和独特的界面性能,系统研究其静电输出性能,并将其应用于低能化学合成。

D19-39

可注射式低熔点金属用于微创骨缺损填充及促骨再生

王雪林*

北京航空航天大学

骨骼作为人体力学支撑与保护的核心结构,虽具备自愈能力,但病理性骨折、创伤性骨缺损及老年性骨质疏松等导致的临床修复仍面临严峻挑战。现有修复材料面临诸多瓶颈:钛合金弹性模量高易产生应力屏蔽;镁/锌基可降解金属降解不可控;PMMA 骨水泥聚合放热。在此,我们创新性的将低熔点铋基合金和临床骨水泥 PMMA 融合在一起,设计了一种可注射式铋基低熔点合金复合材料(BPCs),抗压强度提升 252%,通过微创注射实现骨缺损精准填充,再利用交变磁场激活磁热效应,实现骨肉瘤治疗与促进骨再生。该研究攻克了传统金属内固定物需开放手术植入、及骨水泥产热损伤和功能单一等临床难题,为骨肿瘤切除术后修复提供“治疗-再生”一体化解决方案,创新了骨修复治疗模式。

D19-40

液态金属微流道应变传感器门控结构:灵敏度与线性度调控

姚斌*、朱雅轩、金丰登

西安电子科技大学

柔性应变传感器在人体健康监测、机器人智能皮肤及物体应变监测等领域具有广泛的应用前景。液态金属微流道应变传感器因其优异的高拉伸性、良好的稳定性以及类似皮肤的柔性,逐渐受到广泛关注。然而,现有液态金属传感器普遍存在灵敏度较低(通常低于 5)和线性度差等问题,这限制了其在高精度应变感知中的应用。为了解决这一问题,本研究提出了一种“应变敏感阀门”结构:在液态金属微流道内部嵌入特定形态的绝缘结构,通过拉伸过程中绝缘结构与液态金属微流道之间的形变差异,实现对导电通道的开关调控,显著提升电阻变化率,增强传感器的灵敏度(在 0-120%应变范围内,灵敏度提升至>400)。

进一步地，通过对绝缘结构几何形态的精确调控，实现了灵敏度与线性度的协同调控。在 0-120%应变范围内，传感器表现出较高的灵敏度（ $GF \approx 8$ ）和优异的线性度（ $R^2 = 0.997$ ）。该传感器在人体运动监测和机械手远程控制等应用中表现出良好的性能。本研究为液态金属柔性应变传感器的设计与优化提供了新的思路，并为其在智能穿戴、健康监测和机器人领域的进一步应用提供了技术支持。

D19-41

布基液态金属弹性电路

和子栋、巫远招、刘宜伟、李润伟*

中国科学院宁波材料所

作为织物电子系统中不可或缺的组成部分，弹性布基电路需同时满足优异的稳定性、可靠性以及良好的穿戴舒适性，尤其是在动态使用条件下。然而，现有电路主要采用刚性功能元件与弹性电极的异质互联方式，不仅降低了穿戴的舒适性，而且在软硬界面处容易产生应力集中，严重制约了电路的整体稳定性与服役寿命。为解决上述问题，本研究基于喷印工艺，提出一种通过动态调控液态金属颗粒在三维空间中堆垛与融合密度的方法，实现多种液态金属电子元件的制备与集成。依托一体化成型策略，构建出兼具弹性与功能性的布基电路，并进一步将其应用于人机交互、虚拟现实（VR）等实际场景中，展现出良好的应用前景与系统集成潜力。

D19-42

液态金属/CuGa₂ 复合热界面材料制备及性能研究

桑广豪^{1,2}、崔云涛¹、邓中山^{*1,2}

1. 中国科学院理化技术研究所

2. 中国科学院大学未来技术学院

随着集成度的不断提高，电子器件表面的热流密度越来越高，热性能优良且稳定性好的热界面材料的重要性日益凸显。液态金属是非常有前途的解决方案，但其存在涂敷性差、易泄漏和预氧化处理后热导率不够高等问题。掺混高导热金属微米粉可以一定程度解决以上三个问题，但合金化导致的偏析和硬化会导致其性能恶化。为此，我们提出将不会与镓基液态金属合金化的金属间化合物 CuGa₂ 作为导热填料。在本项工作中，我们首先采用熔融气雾化法制备了 CuGa₂ 微米粉体，进一步制备了镓基液态金属/CuGa₂ 复合热界面材料。结果表明，当 CuGa₂ 的质量占比为 50% 时，该复合材料的热导率最高可达 74.92 W/(m K)，约为镓基液态金属的三倍，同时还能显著降低表面张力（易于涂敷）、减弱流动性（减少泄露风险），相同条件下热阻的测试值约为未添加填料 LM 的 1/7。实验结果还表明，当应用于 LED 灯的散热时，其性能明显优于商业高性能硅脂和 LM 热界面材料。稳定性方面，我们通过 35 天的观察发现，该复合材料未发生成分变化和偏析硬化，成分保持稳定。总的来说，液态金属/CuGa₂ 复合热界面材料具有优秀的导热性能，同时还能长期保持成分稳定，有望为高热流密度散热提供可靠的解决方案。

D19-43

基于液态金属增强电荷分离的光催化微/纳米马达用于抗菌治疗

郭子昌、马星*

哈尔滨工业大学（深圳）

光催化微/纳米马达（MNM_s）因其主动运动能力和多功能特性，在生物医疗与环境应用中备受关注。然而，在光照条件下，光生电子-空穴对的快速复合严重限制了其在燃料催化氧化还原反应中的电荷参与度，进而削弱了马达的驱动效率和功能表现。为解决这一瓶颈问题，本研究提出一种简便有效的方法：通过引入液态金属，构建新型光催化马达体系，以增强光生电荷的分离效率。

所构建的 MNMs 由液态镓 (Ga) 核心组成, 表面包覆石墨相氮化碳 ($g-C_3N_4$) 纳米片, 并在一侧覆盖薄层铂膜, 形成非对称结构。在过氧化氢 (H_2O_2) 溶液中, 马达可实现自驱动运动, 并在光照下表现出更优异的动力学性能。液态金属不仅提供柔性导电界面, 还通过与 $g-C_3N_4$ 形成的欧姆接触显著提升了电子-空穴对的分离效率, 加速电子在界面处的迁移与利用。电化学测试与理论模拟一致表明, 液态金属的引入强化了马达的电荷迁移路径, 促进了 H_2O_2 的光催化还原反应, 显著提升了推进性能。同时, 增强的电荷分离也促进了活性氧 (ROS) 的生成, 使得该马达具备强效的光响应抗菌能力。体内创伤愈合实验也表明, 该马达系统在抑制大肠杆菌等细菌感染方面具有优异的治疗效果。本工作不仅揭示了液态金属在光催化马达中调控电子行为的关键角色, 也为设计新一代具生物学功能的智能微型机器人提供了新思路。

D19-44

面向柔性电子热管理的高取向导热复合膜超声-压力协同制造策略

胡代伟¹、段宇城¹、张旭东²、何志祝*¹

1. 中国农业大学

2. 中国科学院理化技术研究所

合理设计导热网络是提升聚合物基复合材料热导率的有效途径。然而, 现有规模化制备技术 (如静电纺丝) 对填料取向的提升存在局限, 且网络间固有孔隙诱发的界面热阻问题, 迫使工艺依赖高温高压后处理以提升热导率。这严重制约了复合材料的高效、连续化生产。

本研究提出一种创新的压力-超声协同取向策略, 利用超声能量促进分子链与片材振动扭转, 同时借助压力场驱动链段/片层沿预设轴向有序排列, 从而在亚微米尺度实现高精度取向排布与致密化填充。所得复合材料展现出显著提升的面内热导率 ($>12.6 \text{ W/m K}$), 同时保持优异的柔韧性及力学强度 (抗拉强度 $>40 \text{ MPa}$)。

基于此方法, 成功构筑了适形化柔性散热膜, 并在 LED 光电器件及柔性热电转换系统 (极限功率提升 80%) 中验证其热管理效能。成功制备的 $21 \text{ cm} \times 27 \text{ cm}$ 可定制化大面积导热膜, 进一步证实了该策略在柔性电子热管理领域的规模化应用潜力。

D19-45

基于液态金属的无电子柔性致动器

陈刚胜, 马标, 刘宏*

东南大学生物科学与医学工程学院

随着机器人技术逐步拓展至医疗手术、灾难救援等非结构化的复杂应用场景, 传统刚性机器人在环境适应性、人机交互安全性以及任务执行灵活性等方面的局限性日益凸显。液态金属作为一种新兴的智能材料, 凭借其独特的流体特性、导电性及可变形能力, 为柔性致动器的设计提供了全新的解决方案。通过材料和结构创新设计, 实现不依赖传统硬件电子的物理智能如感知-驱动一体化、逻辑决策和行为编程等, 将显著提升柔性致动器在复杂环境中的鲁棒性、动态适应性和多功能灵活性。本研究利用液态金属低温相变、倾斜流动以及电磁自收缩等特性, 构建了可编程磁性软体机器人、重力感知柔性致动器以及多模柔性开关, 并进一步展示其在仿生多模态运动、地形感知、可穿戴逻辑电路等方面的应用。本研究为开发具有环境和任务自适应能力的智能柔性系统提供了新的设计思路和技术路径。

D19-46

稳态和瞬态等离子体协同辐照下液态锂钨复合偏滤器靶板特性研究

叶宗标*

四川大学

聚变堆的现行实验过程仍面临大量的实际运行问题，而面向等离子体材料（PFM）的选择是其中最重要的研究课题之一。PFM 在高密度和高热负荷的等离子体环境中的稳态和瞬态工况的可靠运行，是聚变堆安全稳定服役的重点和难点问题。结合液态金属基面向等离子体部件能够有效避免被等离子体和中子侵蚀带来的持续损伤等一系列功能退化问题等突出优势以及钨材料自身的高热导、低燃料滞留等优势，锂-钨液固方案逐渐成为一个可供选择的偏滤器备选方案。我们利用 3D 打印技术研制了可组装的单元液固靶板，开展了系列的模拟的实验研究，结果表明在稳态等离子体辐照下液固靶板可以产生明显的蒸汽屏蔽效应和靶板温度锁定效应，即使在 400MW/m² 协同辐照下，由于锂的蒸发相变、蒸汽入射屏蔽、飞溅质量损耗等保护作用下，靶板固体组件没有表现明显的结构损伤，展现出一定的抗协同辐照潜力。上述工作为未来聚变装置面向等离子体材料和部件设计研制提供参考。

D19-47

基于热缩管成型与弹性体封装的三维可变形高密度液态金属线圈

陈浩、周杰、李浩南、陈欣怡、黎雄辉、郭为进*

汕头大学生物医学工程系

液态金属（如镓基合金）是一类在常温下保持液态的金属材料，具有熔点低、表面张力大、变形性和流动性强、高导电性和导热性等独特物理化学性质。近年来，在柔性电子领域，PDMS（Polydimethylsiloxane，聚二甲基硅氧烷）和 Ecoflex（高性能硅胶弹性体）常作为封装材料包裹液态金属，形成可拉伸电路。在此，本文介绍了一种可变形的三维弯曲高密度液态金属线圈的制备方法。首先在不同内径的热缩管内注射液态金属充分填充，并加热拉伸，封装制成液态金属导线。然后利用 PDMS 或者 Ecoflex 作为弹性基底构建高密度通道。最后利用制备完成的液态金属导线填充该高密度通道，并采用 PDMS 或者 Ecoflex 进行二次封装形成一种可变形的三维弯曲高密度液态金属线圈。这种方法所制备的三维弯曲高密度液态金属线圈在压力、温度、非接触距离传感以及近场通信方面有着优异的表现。

D19-48

基于纳升电喷雾质谱的银纳米粒子墨水前驱体银胺络合物的气相稳定性研究

李茜*、澤田啓介、塩路浩隆

Toray Research Center, Inc.

1 背景

银纳米粒子墨水 (AgNP inks) 因其低温烧结性和优异导电性，广泛应用于柔性电子与印刷电子等先进制造领域。其中，银胺络合物因可稳定银离子于溶液中，作为常见的前驱体广泛用于墨水配方设计。然而，该类络合物需要在制备阶段具有足够稳定性以避免银离子的过早还原，同时在烧结过程中应具备适当的热解行为以有效释放银而形成导电通路，这对其配体选择与结构稳定性提出了精准要求。因此，建立一套适用于易分解络合物的结构识别与稳定性评估方法，对于前驱体配方优化、材料筛选与性能预测具有重要意义。

2 实验方法

本研究采用纳升电喷雾法 (nanoESI) 作为有机金属络合物的离子化方法。与传统电喷雾法 (ESI) 相比，nanoESI 通过超细喷雾毛细管和低流速离子化条件，显著降低了热诱导解离和电荷冲击^[1]，从而更有效地保持不稳定络合物的完整结构，提升了对原始分子离子的检出能力。

2.1 纳升电喷雾质谱对不稳定金属络合物识别能力的验证

尽管银胺络合物在常规电喷雾质谱 (ESI-MS) 中可部分检测，但为确认 nanoESI-MS 在更广泛易碎金属络合物体系中的适用性，选取三种典型工业用络合物 Zn(BTZ)₂、Fe(acac)₃ 和 Sn(Oct)₂，比较 nanoESI-MS 与传统 ESI-MS 对易分解金属络合物的检测能力。

2.2 银胺络合物的稳定性评估

采用纳升电喷雾质谱 (nanoESI-MS) 结合碰撞诱导解离串联质谱 (CID-MS/MS)，对所测银胺络合物进行能量分段分解，构建其分子离子在不同碰撞能量下的生存率与中心质量能量 (E) 之间的分解图，以半

生存率能量 (E_{50}) 量化其气相稳定性。所研究的络合物包括单齿胺 (正戊胺 PA、十二胺 DA) 及多齿胺 (DETA、TETA、PEHA) 与 Ag^+ 所形成的络合物。同时对于 nanoESI-MS 的稳定性评估结果辅以密度泛函理论 (DFT) 计算, 分析配体与 Ag^+ 之间的结合能 (binding energy), 从理论角度验证实验结果趋势的合理性。

3 实验结果

3.1 纳升电喷雾质谱对不稳定金属络合物识别能力的验证

传统 ESI-MS 在常温与加热 (330 °C) 条件下对目标络合物的检测均存在明显分子碎裂, 无法完整检测其分子离子。而 nanoESI-MS 成功保留了三种络合物的完整结构特征离子, 验证了 nanoESI-MS 在不稳定络合物检测中的显著优势。

3.2 银胺络合物的稳定性评估

银胺络合物在 CID-MS/MS 稳定性评估中表现出以下稳定性差异: 单齿配体中, PA-Ag^+ 在最低碰撞能量 (10 eV) 下即发生明显解离, E_{50} 最低, 表明其气相稳定性最差; DA-Ag^+ 则因其长链烷基可能与 Ag^+ 形成疏水折叠或辅助配位^[2], 表现出优于 PA-Ag^+ 的稳定性。多齿胺络合物 (DETA-Ag^+ 、 TETA-Ag^+ 、 PEHA-Ag^+) 随齿数增加, 生存率曲线趋于平缓, E_{50} 值升高, 呈现良好的气相稳定性, 符合螯合作用增强热力学稳定性的规律。结合 DFT 计算, 络合物结合能大小与 E_{50} 顺序一致, 进一步验证了该方法在定量评价络合物稳定性方面的准确性与可行性。

4 结论

本研究基于 nanoESI-MS 与 CID-MS/MS 建立了一种适用于不稳定金属络合物的结构识别与气相稳定性定量评估方法, 成功应用于银胺络合物体系。相较于传统 ESI-MS, 该方法可在保持分子结构完整性的前提下, 准确获取络合物的解离能特征与稳定性指标, 适用于复杂体系、对热/电敏感材料的分析。通过对银胺络合物的系统评估, 验证了该方法在评估银纳米粒子墨水前驱体材料中的可行性, 为银纳米粒子墨水及其他金属配合物前驱体的筛选与优化提供了可靠的分析手段与理论基础。

参考文献

[1] Davidson KL, Oberreit DR, Hogan CJ, Bush MF. *Nonspecific aggregation in native electrokinetic nanoelectrospray ionization*. Int J Mass Spectrom. 2017;420:35–42. doi:10.1016/j.ijms.2016.09.013

[2] Duez Q, van Huizen NA, Lemaure V, et al. *Silver ion induced folding of alkylamines observed by ion mobility experiments*. Int J Mass Spectrom. 2019;435:34–41. doi:10.1016/j.ijms.2018.10.016

D19-49

Au-P 体系非晶合金的表面合成与结构演化

李亚琦、杜轶*

北京航空航天大学

During the cooling and solidification of liquid metals, crystallization is typically unavoidable due to the extremely low migration energy barriers between metal atoms. To suppress low-temperature crystallization of liquid metals, rapid cooling techniques have been developed, successfully yielding the amorphous alloys. However, even when the bulk state of the amorphous alloys remains disordered, atoms within the several nanometers of the surface crystallize due to their higher diffusion rates. Consequently, the fabrication of large-area, stable two-dimensional amorphous metals/alloys remains an elusive goal. Furthermore, the structures formed by rapid condensation of liquid metals are often highly sensitive to minute variations in elemental composition. Owing to the disordered nature of amorphous alloys, it remains technically challenging to effectively observe and understand such structural transitions. In this report, we successfully synthesized an Au-P amorphous alloy on a noble metal substrate using molecular beam epitaxy and employed scanning tunneling microscopy to observe its crystallization process. This allowed us to elucidate the crystallization pathways and mechanisms of this liquid metal alloy.

墙报

D19-P01

低成本、可扩展的液态金属印刷半导体技术快速制造高透明度的镓掺杂氧化铟锡导电薄膜

宋宇佳^{1,2}、李倩¹、刘静^{*1,2}

1. 中国科学院理化技术研究所
2. 中国科学院大学未来技术学院

液态金属电子墨水 (e-ink)，如由镓、铟、锡、铋或其合金制成的墨水，是很有前途的新一代印刷电子材料。从这一理想平台延伸开来，这种墨水可以进行后处理或装载半导体纳米颗粒，进一步在其表面制成点状、线状和薄膜状的半导体。这样，就可以在室温左右以较低的成本快速制造出所需的目标半导体并将其图案化。这就为直接打印功能器件提供了一种非常规的自下而上的策略。透明导电氧化物 (TCO) 薄膜，尤其是氧化铟锡 (ITO) 薄膜，在广泛的光电应用中至关重要。然而，制造和掺杂 ITO 薄膜的传统方法面临着巨大挑战，包括高温、真空要求、复杂程序和高成本。在此，我们提出了一种低温、一步法液态镓铟锡印刷技术，用于制造掺杂镓的 ITO 纳米薄膜。根据需要，可以合成不同锡含量的铟锡合金，然后掺杂镓形成镓铟锡合金，再将其印刷到目标基底上。综合表征结果表明，印刷的掺杂 ITO 薄膜表现出卓越的性能。具体来说，薄膜的带隙随着掺杂量的增加而增大，甚至达到了 4.81 eV。掺杂 1% Ga 的 ITO 薄膜在可见光谱中的透射率超过 99.82%。虽然掺杂镓会增加薄膜的电阻，但重复多层印刷有效地缓解了这一问题。此外，嵌入 LED 电路中的掺杂 ITO 印刷薄膜还具有出色的导电性。值得注意的是，柔性基板上的薄膜即使在弯曲后仍能保持其导电性，这凸显了它们在柔性电子器件方面的潜力。这种液态金属印刷方法为传统的 ITO 制备提供了一种经济高效的替代方法，为未来大规模光电器件生产带来了巨大前景。

D19-P02

镓基液态金属/氧化物的界面调控及柔性功能器件研究

廖耿程¹、祁祥²、任龙^{*1}、钟建新¹

1. 上海大学
2. 湘潭大学

镓基液态金属 (Gallium-Liquid Metals, Ga-LMs) 及其氧化物界面体系 (Metal Oxides, MOs) 在柔性电子领域展现出独特的应用潜能。报告人围绕柔性器件领域，聚焦于 Ga-LMs@MOs 复合材料在柔性器件中的应用，首先深入剖析了 Ga-LMs 的物理性质及其 MOs 形成的物理机理，为后续研究奠定理论基础。随后详细研究了基于 Ga-LMs@MOs 复合材料柔性电极的几种制备方法，为后续工作提供工艺基础。随后主要围绕液态金属/氧化物界面耦合机制与功能化调控策略，以液态金属耦合其表面氧化物为研究对象 (如 GaOx、VOx、MoOx、MnOx 和 Cu2O 等)，系统开展表面微结构优化、界面调控策略和异质结构设计研究，重点突破了材料体系构建与性能优化两大核心问题：一方面通过异质结构与结晶性调控，显著改善了载流子迁移效率并有效抑制了载流子复合，该设计突出了柔性基底-Ga-LMs 界面和 Ga-LMs-MOs 界面的机械多界面耦合特性，实现了良好的液固接触和高效的界面电荷转移；另一方面通过构建梯度化表面微结构，成功研制出具有三维吸光特性和串联阵列结构的新型柔性光电极，使单位空间内光激发面积提升至传统电极的 2.3 倍，吸光效率较平面结构提高 40% 以上。探索了其在柔性光电探测器及生物传感器的应用研究。

D19-P03

基于热缩管封装的超细柔性液态金属导线

周杰、李浩南、陈欣怡、黎雄辉、郭为进*

汕头大学生物医学工程系

具有液态金属芯的柔性导线是可穿戴设备和智能纺织品的理想选择之一。目前主流的方法是将液态金属封装在空心纤维管中,但这些方法缺乏绝缘性,制造过程复杂,并且在重塑形状时不稳定。在此,我们提出了一种更简洁的方法,即使用聚乙烯(PE)热收缩管进行便捷且可稳定重塑的液态金属封装。首先将液态金属填充进热缩管,在热处理过程中使得它们变形为细线形态。加热过程中使用卷线电机确保其均匀拉伸,从而能够精确控制直径和长度。最终制成的液态金属导线内径最小可达 132 微米,与最新工艺精度相近,而厚管壁则提供了优良的绝缘性能。这些线材在收缩到细的状态后还可以通过加热热缩管使其部分回弹,实现反复拉伸和重塑,非常适合于智能穿戴设备和智能纺织品等应用。我们使用所制成的液态金属导线演示了近场通讯(NFC)、智能手套、压力传感器和距离传感器等应用,体现了其在柔性电子产品和智能纺织品方面的应用潜力。

D19-P04

Liquid metal micrometer fibers with chain-bead structure for precision sewing in smart textiles applications

Feng Xu, Yiwei Liu, Runwei Li*

Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, CAS

Stretchable conductive fibers are essential for lightweight conductors with exceptional electrical conductivity and stability. Gallium-based liquid metal has gained significant interest in this field due to its high electrical conductivity, intrinsic deformability and biocompatibility. Herein, we present a novel approach to fabricate liquid metal micrometer fibers with chain-bead structure (LMFCBs) by high-pressure jetting. These fibers exhibit an extremely fine line width ($\approx 22 \mu\text{m}$) and a periodic chain-bead morphology. Crucially, this unique structure enables precise resistance tuning by varying the density of beads, achieved through controlling the jetting pressure. For instance, increasing the pressure from 0.4 to 1.0 MPa enlarges the bead spacing, elevating the LMFCB resistance from 9.25 to 28.77 Ω . Furthermore, the chain-bead structure significantly enhances the dynamic stability of the fiber resistance under strain. Over a 40% stretching range, LMFCBs exhibit only a 44.54% resistance change, markedly lower than the 96% change observed in fibers lacking this structure. Additionally, a cryogenic freezing process induces a liquid-solid phase transition, dramatically enhancing the mechanical strength of the LMFCBs. This enhanced strength facilitates their seamless integration into elastic fabrics using simple sewing techniques. The LMFCBs not only exhibit excellent conductivity and stability but also conformability, indicating high potential for applications in smart textiles and wearable devices.

D19-P05

基于液态金属印刷工质靶带的透射式激光微推进技术研究

王林妍*、杜邦登、邢宝玉、叶继飞

航天工程大学

激光微推进是通过激光烧蚀工质产生高速反喷的等离子体羽流进行驱动,具有理论比冲高、冲量元小、推力可调范围广等优势,是微小卫星实施姿态调整、轨道控制和阻力补偿等任务优选的动力技术。通过激光烧蚀金属材料能够有效地提高激光推进的比冲,但目前,由于在柔性透明基底上制备金属靶带仍存在困难,采用透射模式烧蚀金属实现激光微推进技术仍存在挑战。

在本研究中,采用新型液态金属印刷技术成功制备了柔性透明的铋锡(Bi-In-Sn)金属带,研究表明,当脉冲激光能量超过 20mJ 时,厚度为 2-10 微米的金属带可被完全烧蚀。Bi-In-Sn 合金金属工质靶带的激光烧蚀比冲范围为 300-400s,单脉冲冲量范围 10-20 $\mu\text{N}\cdot\text{s}$ 。随着金属靶带工质层厚度降低,比冲呈上升趋势,单脉冲冲量呈下降趋势。通过本研究可以解决以金属为工质激光微推进技术中羽流产物易沉积污染激光器镜头的技术难题,为以金属为工质的透射式激光微推力器的研发提供技术储备。

D19-P06**超声辅助磁颗粒在液态金属铸造中的均匀分布**

周建汝、马星、金东东*

哈尔滨工业大学（深圳）

磁性液态金属（MLMs）因其独特的金属导电性与磁响应性组合，在柔性电子、生物医疗器械和微型驱动器等领域有广阔的发展前景。然而，在微尺度模具中由于粒子聚集和流动性差，实现磁性粒子的均匀分散仍是一项重大挑战。本研究提出了一种超声辅助填充技术，采用数字光处理 3D 打印技术制备牺牲模板，成功将 MLMs 填充到复杂的微纳结构中。与传统填充方法相比，该超声方法显著提高了粒子分布的均匀性，这一点通过高分辨率计算机断层扫描成像和定量分析得到了验证。该方法不仅提升了填充效率，还保持了微结构的完整性，为功能性液态金属在微制造应用中的精确结构化提供了一种新的途径，有望推动新一代柔性电子和生物医疗器械的发展。

D19-P07**基于墨水直写的电磁驱动无束缚多模态运动软体机器人**

王云泰、马星、金东东*

哈尔滨工业大学（深圳）

本研究提出了一种基于液态金属-弹性体复合材料的软体机器人多材料集成设计及无束缚驱动策略。通过墨水直写（DIW）技术，实现了三层功能化结构的精准构筑：柔性基底支撑层、液态金属-弹性体（LME）导电复合材料层以及热响应聚合物驱动层。在交变磁场激励下，复合材料层内液态金属网络诱导产生涡流，将电磁能高效转化为焦耳热；该热量通过热传导触发表层热响应材料的可控形变，从而驱动软体机器人的多模态运动。该策略突破了传统软体机器人对嵌入式线缆或外接电源的依赖，实现了非接触式磁-热-机械能量转换。通过调控磁场参数和材料组分，可精确控制局部温升及形变响应速度。所制备的软体机器人展现出优异的可编程变形能力，包括定向弯曲、抓取及爬行运动，进一步拓展了其在生物医学微操作和复杂环境探测中的应用潜力。

D19-P08**基于液态金属的多功能加强折纸结构**

刘彩琳、袁博*

北京航空航天大学机械工程及自动化学院

纸张是人类文字的重要载体，一直被视为人类文明的重要标志。这种重要的材料可以从天然纤维素纤维中获取，具有可降解性、吸湿性和柔韧性等有利特性，因此在艺术、教育、印刷等领域得到广泛应用。纸张的薄厚使其非常易于弯曲、折叠和扭转，从而产生了一种名为折纸的新艺术形式。折纸，又称 Origami，是一种将二维材料转化为三维功能结构的简单高效方法。通过这种方法，人们可以轻松设计和实现与传统材料有所区别的结构，例如智能感应材料、负泊松比材料和可调刚度材料。然而，传统折纸结构通常由单一薄层材料如纸张、聚合物等构成。由于这些材料的力学刚度和电导率较差，折纸结构的应用通常受到限制，特别是涉及到需要高承载能力或多功能的器件。尽管有一些技术可以通过在纸张的原始生产过程中添加其他组分来生产增强纸张，但如何在常见商业纸张上实现综合性能的全面增强，包括热/电导性和刚度可调性，尚未得到深入研究。因此，如何建立一种通用方法，根据应用需求直接增强普通纸张的性能，成为亟待解决的关键问题。这种方法能够大大降低成本、负责任地获取纸张，并简化折纸结构的制备过程。

因此，我们提出了一种基于液态金属对折纸结构进行多功能加强的方式。通过将液态金属集成到传统折纸构型中，实现了结构性能的显著提升与动态功能重构能力。折纸结构利用液态金属的高导电性、流动性及低熔点特性，结合折纸几何的可编程变形能力，可以开发出兼具机械强度、电学功能和形态自适应性

的智能材料系统。此外,由于液态金属增强剂具有较高的内聚力,制备出的增强纸张具有任意组合的能力,这在传统材料中很难实现。液态金属的填充显著提升了结构的抗压强度与能量吸收效率,同时保留了折纸结构的折叠-展开自由度。利用折纸模态设计和液态金属调控,实现了具有可重构折纸模态变化的结构,这在柔性机器人和可重构天线的应用中具有巨大潜力。

D19-P09

新型镓基免疫佐剂及癌症疫苗的构建与应用 研究

许维*

贵州大学

癌症疫苗旨在刺激宿主适应性免疫响应以应对恶性肿瘤,但高效免疫佐剂和强免疫原性肿瘤抗原短缺所引起的低效免疫响应,严重阻碍了其临床应用。为此,结合镓基液态金属在提升抗原利用率和增强免疫刺激效率方面的有益特性,我们提出一种基于镓基免疫佐剂诱导癌症疫苗新策略:将通过系统性的优化设计开发强效镓基免疫佐剂;在细胞、血液、组织及活体水平,阐明其免疫刺激特性、规律及作用机制;再采用转移性癌症模型验证该策略的抗癌疗效,并揭示抗癌免疫响应规律及潜在机制。结果表明,通过结合镓基免疫佐剂的尺寸可调节性、表面可修饰性,可提高 DCs/T 细胞等免疫细胞的激活效率,以增强机体对抗原的免疫应答能力或改变免疫应答类型,进一步逆转肿瘤免疫抑制微环境;通过负载肿瘤细胞释放强免疫原性和吸附能力的肿瘤抗原,可增加免疫细胞对肿瘤细胞的免疫记忆从而提升机体的抗原利用率,以体内途径构建安全高效的癌症疫苗。新型镓基免疫佐剂-肿瘤疫苗,作为一种新型的免疫增强剂,集刺激释放抗原偶联免疫佐剂能力于一体的多功能平台,是当前癌症疫苗领域中内容新颖且富有探索意义的创新尝试,在癌症疫苗的发展中具有较好的发展前景。

D19-P10

用于智能轮胎应变监测的液态金属基柔性传感和无线充电系统

董昊轩、何志祝*

中国农业大学

实时监测轮胎形变对提升车辆行驶安全性、优化燃油经济性及实现紧急工况主动干预具有重要价值。然而,相较于相对静止的车身,在高速旋转且持续变形的轮胎内部集成传感器,并采用传统有线方式进行供能与数据采集面临巨大挑战。本研究提出一种基于柔性液态金属的传感-能量一体化解决方案,首次将微流控技术引入智能轮胎应变监测领域。所设计的液态金属传感器和线圈具有显著的可拉伸性(超过 400% 的拉伸应变)和耐用性(超过 5000 次拉伸循环),有效地解决了长期使用过程中刚性电子界面与轮胎复杂内表面之间的机械失配问题。传感器由多层液态金属传感网络构成,实现了高线性度($R \approx 0.99744$)的周向与轴向微应变同步监测(应变分辨率为 30 μm)。配套开发的无线供电模块通过磁场共振原理为传感器提供持续电能,并结合蓝牙 5.0 协议将传感数据实时传输至定制移动应用,实现了胎面变形波形的动态可视化。实车集成测试表明,该系统在车辆行驶过程中可稳定捕获轮胎应变特征,并成功验证了锂电池的无线充电功能。本研究为下一代智能轮胎的感知系统设计提供了重要实验依据与技术参考。

D19-P11

阵列式温度-应力协同传感智能鞋垫研究

戴梓轩*

中国农业大学

针对现有设备难以同步获取足底温度分布与三向力学参数的瓶颈问题,提出了一种阵列式智能传感鞋垫的温度-应力协同测量策略。该鞋垫通过掺杂液态金属与二氧化硅调控 PDMS 材料热学与力学性能,并

采用温度传感区与应变传感区的分区封装设计,实现了温度与应力测量的机械解耦。其柔性电路集成了 256 通道高精度温度传感器和 26 个三向力磁传感器,基于足底生物力学分布构建了高密度传感阵列,结合改进的零电位法与地址复用技术实现数据采集。通过 PDMS/钕铁硼多孔磁体结构建立了磁场强度-形变映射模型,实现了三向力的高解析度和高灵敏度测量。该鞋垫可根据高分辨率温度云图重建足底轮廓,并利用热-力耦合算法填补接触应力缺失区域。实验结果表明,该鞋垫能够在运动状态下同步捕捉足底温度和应力的变化,为糖尿病足溃疡预警及运动损伤分析提供了有效的技术支持。

D19-P12

用于人体汗液皮质醇的传感器的制备与性能研究

林学武、陈奕韬、和子栋、巫远招、刘宜伟*、李润伟
中国科学院宁波材料所

随着可穿戴健康监测技术的快速发展,实时检测生理标志物及体表温度对相关疾病预警和健康管理至关重要。现有电化学传感器受限于刚性材料,难以适应人体皮肤的动态形变,且存在稳定性不足、多生理信号协同检测困难等问题。针对这些问题,本研究开发了基于柔性基底的皮质醇传感器和温度传感器集成系统,实现了汗液皮质醇与温度的双模态监测。主要研究内容如下:采用液态金属作为电极的粘连剂并对电极进行界面改性和电聚合工艺的优化,实现皮质醇检测的高灵敏度与可重复性。且电极在 2000 次弯曲疲劳下电阻变化率仅为 2%,提高了传感器导电稳定性。优化后 MIP 传感器的检测范围为 0.1pM~5μM,检测限低至 0.086pM,120 次循环后信号衰减小于 3%。且抗汗液中干扰物影响,为可穿戴设备稳定运行提供了保障。

D19-P13

靶向雌激素受体 α 的液态金属光敏降解剂的制备及应用

刘雨昕*
贵州大学药学院

近年来,纳米材料介导的肿瘤光热治疗(PTT)作为一种微创、高效且低毒的新兴肿瘤治疗手段,因兼具抑制肿瘤转移等优势而备受关注。然而,传统光热剂的临床应用受制于高功率密度激光激发需求,其产生的高温在消融肿瘤的同时,常导致周围正常组织损伤及炎症反应。在乳腺癌患者中,约 80% 表现为雌激素受体阳性(ER⁺),ER α 蛋白是乳腺癌精准治疗的关键靶点。尽管以 ER α 为靶点的候选药物已初步开发,但其面临口服生物利用度低下、耐药性产生及潜在转移风险等缺点。针对上述挑战,本研究提出一种靶向降解 ER α 蛋白并兼具低辐照光热效应的新型液态金属纳米材料设计策略。通过多巴胺包被修饰液态金属表面,赋予其光热稳定性及生物功能化修饰能力;进一步偶联 ER α 靶向降解剂,构建具有 ER α 特异性结合能力的液态金属光敏剂。结果表明,在光照条件下可诱导 ER α 蛋白发生氧化损伤与构象折叠,实现对 ER α ⁺ 肿瘤细胞的高效靶向降解。本研究为雌激素受体阳性肿瘤的治疗提供了一种双功能协同的创新策略,为肿瘤精准治疗领域提供新的研究思路与技术路径。

D19-P14

基于镓-海藻酸微凝胶双功能微针贴片的制备及其应用

何婷*
贵州大学药学院

由于药物的理化性质,传统的给药途径,例如口服和肠外途径,通常存在局限性。例如,口服给药与首过代谢有关,这大大降低了生物利用度,降低了所交付疗法的生物利用度。注射是侵入性的,通常由训练有素的人员进行注射,通常很痛苦,并且可能与患者(尤其是儿童)的针头恐惧症有关。相反,微针能够穿透皮肤的最外层(角质层),将生物活性分子局部注入表皮和/或浅表真皮。微针为患者提供了一

种有吸引力的给药方法,因为这种给药方法是无痛的,并且可以自行给药电刺激在伤口治疗方面很有前途,但由于其杀菌效果有限,在治愈感染伤口方面存在局限性。本课题将导电微针与抗菌药物相结合,通过抗菌治疗和电刺激组织修复为感染的伤口开发了一种基于导电药物微针系统,其中电刺激由设计的药物进行。该药物是以金属纳米颗粒为核,天然产物为壳,并在壳上吸附具有良好抗菌效果的金属离子的纳米颗粒,有效消除细菌,并赋予微针贴剂优异的导电性,从而达到促进伤口组织恢复,防止伤口细菌感染等目的。

D19-P15

用于促进感染性伤口愈合的镓-槲皮素共组装纳米药物

陈露迎*

贵州大学药学院

皮肤作为人体免疫系统的第一道防线,一旦受损,极易受到感染。感染后,创面进入炎症期,释放氮自由基(DPPH),过氧化氢(H₂O₂)、羟基自由基(OH•)等杀死细菌。但如果不及时消除创面细菌感染,ROS会过度积累,过量的ROS会引起强烈的氧化应激,破坏蛋白质,导致组织坏死、炎症等有害过程,延缓皮肤创面愈合和损伤组织再生过程。在临床治疗中,大量使用抗生素来控制感染,但这可能导致耐药菌的产生,增加了后续治疗的难度。因此,开发具有重塑创面微环境和优异抗菌性能的纳米材料可以在减少氧化应激损伤的同时消除细菌感染,从而逆转慢性伤口,促进愈合的纳米药物具有重要意义。

镓和镓离子(Ga³⁺)可以通过利用多种抗菌机制来替代抗生素试剂,包括抑制微生物的铁代谢,产生活性氧(ROS),以及制造机械中断等。镓还展现出独特的抗炎特性,可有效清除活性氧,干预免疫细胞功能,促使巨噬细胞从促炎的M1型向抗炎的M2型转化,减少炎症因子释放等。而槲皮素具有抗氧化,抗炎,抗菌等多种功效。

D19-P16

温度响应的聚(异丙基丙烯酰胺)/液态金属核-壳DNA微凝胶的构建及电化学传感

谷青雨、郭玮炜*

南开大学化学学院

镓基液态金属兼具金属优异的导电性和导热性,以及液体独特的流动性和良好的生物相容性,因此在柔性电子、生物传感器及可穿戴生物医学设备等领域展现出巨大的应用潜力。液态金属纳米颗粒(LMNPs)已被证实能够通过诱导自由基聚合反应,在其表面便捷地形成聚合物壳层。通过将聚(异丙基丙烯酰胺)和功能性核酸共聚在LMNPs界面形成核-壳微凝胶结构,不仅能够有效防止LMNPs的聚集,增强其稳定性,还可以赋予微凝胶温度响应特性;在聚合过程中引入的功能核酸,可以使其具有功能可编程性,实现对核酸等生物分子的电化学传感。由于纳米颗粒尺寸的减小和比表面积的增加,其电化学性能也显著提升。而聚(异丙基丙烯酰胺)网络可以在32℃的适中温度条件下,经历可逆的低临界溶液温度(LCST)相变,其状态介于膨胀水合与收缩脱水之间,这一特性使得修饰的DNA结构的功能能够在狭窄的温度范围内得以精确调控。借助温度刺激聚(异丙基丙烯酰胺)网络的膨胀/收缩行为,可以对DNA单元(如适配体)功能进行热调节,从而实现在电极界面处对目标分子的识别,通过电化学信号,实现对目标物的定量分析检测。

1. 聚(异丙基丙烯酰胺)/液态金属核-壳DNA微凝胶的合成与表征

由于液态金属液滴在超声作用下,金属镓具有自由基引发聚合的特性,异丙基丙烯酰胺单体会与液态金属反应,在LMNPs外部形成聚合物壳层。基于此,将丙烯酰胺单体修饰的DNA同时作为交联单元,形成DNA功能化的聚(异丙基丙烯酰胺)/液态金属核壳微凝胶。通过透射电子显微镜表明该材料具有核壳结构,平均尺寸约为95nm,壳层厚度在10-20nm之间。通过Mapping元素分析证明材料中含有C、N、P、Ga、In元素,C、N元素表明聚合物壳层的成功聚合,P元素证明核酸分子的成功修饰。通过红外光谱证明该微凝胶中具有聚(异丙基丙烯酰胺)结构。通过以上表征证明了该材料的成功构建。

2. 聚(异丙基丙烯酰胺)/液态金属核-壳DNA微凝胶的电化学性能

将聚(异丙基丙烯酰胺)/液态金属核-壳DNA微凝胶旋涂在玻碳电极表面,通过循环伏安法和阻抗法测试其电化学性能,结果表明,在铁氰化钾溶液中,相比裸玻碳电极而言,修饰微凝胶材料的电极氧化还原

峰电位差缩小, 电化学阻抗减小, 导电性良好。随后用激光器对其进行加热, 使微凝胶中的聚合物外壳发生相变, 使凝胶层塌陷, 随后进行循环伏安和阻抗测试, 结果表明, 与未发生相变的微凝胶相比, 聚合物壳层塌陷导致其导电性增强, 这可能归因于比表面积的增加, 导致电极面积增加, 导电性增强; 除此以外由于液态金属的等离子体特性, 其表面的热电子效应, 也能使其在加热条件下导电性增强。

3. 聚(异丙基丙烯酰胺)/液态金属核-壳 DNA 微凝胶的电化学传感

为了验证聚(异丙基丙烯酰胺)/液态金属核-壳 DNA 微凝胶的电化学生物传感的功能, 将一段核酸适配体修饰在微凝胶的界面上, 通过激光加热使凝胶层发生皱缩, 从而暴露更多的核酸适配体结合位点, 通过适配体捕获目标分子到电极界面, 最后可通过阻抗法、计时电流曲线法、差分脉冲伏安法对目标物进行电信号检测, 实现定量传感。

参考文献:

1. F. Y. Li, C. Y. Wang, Guo W. W., Adv. Funct. Mater., 2018, 28, 1705876.
2. D. Lee, S. Park, J. Seo, et al., Adv. Funct. Mater. 2024, 34, 2311696.
3. Y. Zhang, C. Wang, M. Yin, et al., Angew. Chem. Int. Ed., 2024, 63, e202311678.

D19-P17

用于癌症药物释放的光热响应性 LM-pNIPAM 水凝胶

秦海洋, 郭玮炜*

南开大学化学学院

可控药物释放能够实现局部给药, 提高药物治疗效果和减少副作用, 在癌症治疗领域具有良好的应用前景^[1]。以温敏性聚合物聚N-异丙基丙烯酰胺 (pNIPAM) 构建的水凝胶材料, 能够通过温度控制实现聚合物网络亲水到疏水转变, 实现可控药物释放过程, 应用较为广泛^[2]。pNIPAM水凝胶本身缺乏光热响应性, 难以实现远程控制。掺入MXene或金纳米颗粒等光热材料可增强响应性^[3], 但这类刚性材料成本高, 且掺杂过多会提高水凝胶模量, 降低其收缩效率。液态金属 (LM) 因其高导热性、优异流动性、良好生物相容性和成本低廉性受到关注。LM纳米颗粒尺寸分布广、形貌不规则, 增强了粒子间的共振耦合和局部场效应, 展现出宽波段等离子体响应, 其自限性氧化层可维持高表面电位, 进一步提升光热转换效率^[4]。基于此, 我们通过使用pNIPAM和高光热转化率液态金属(LM)制备药物载体, 以典型化疗药物阿霉素(DOX)为模型进行了药物释放效果研究, 结果表明, 该材料能够在间断性近红外光刺激下, 有效提高了药物释放效率。

参考文献:

1. Giacco, V. Radioligand cancer therapy comes to the fore. Nat Cancer. 2024; 5, 1782.
2. Roberto Baretta, Gilad Davidson-Rozenfeld, Vitaly Gutkin, Marco Frasconi, and Itamar Willner
Journal of the American Chemical Society 2024 146, 9957.
3. He PP, Du X, Cheng Y, Gao Q, Liu C, Wang X, Wei Y, Yu Q, Guo W. Thermal-Responsive MXene-DNA Hydrogel for Near-Infrared Light Triggered Localized Photothermal-Chemo Synergistic Cancer Therapy. Small. 2022,18, e2200263.
4. Xu, J., Zhang, C., Wang, Y. et al. All-in-one, all-optical logic gates using liquid metal plasmon nonlinearity. Nat Commun 2024, 15, 1726.

D19-P18

金属微纳液滴表界面调控对其高温蒸发行为的作用机制研究

龙淑君 1, 郭思齐 1, 程宁燕 1*, 葛炳辉 1*, 任龙 2,*

1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院
2. 上海大学量子科技研究院

液态金属因其高热导率、润湿性和可变形特性，在微纳器件热管理与功能界面构建中展现出广泛潜力。然而，其高温蒸发行为对表界面状态高度敏感，相关调控机制尚不明晰。本研究围绕液态镓微纳液滴的界面调控问题，构建三类典型表面包覆结构（碳膜、氧化镓、氧化钨），系统比较其在加热过程中的蒸发路径与残留结构演化行为。结果表明，碳修饰液滴呈现中心优先蒸发，形成中空碳壳与 β - Ga_2O_3 颗粒；氧化镓包覆体系整体均匀蒸发，残留完整 Ga_2O_3 ；氧化钨修饰体系则表现出边缘优先崩解，最终形成 WO_3 颗粒。上述行为差异归因于不同界面结构在键能、热膨胀系数与机械稳定性等物理参数上的协同调控效应。本工作展示了通过调节超声介质实现液滴表界面可编程构建与蒸发行为控制，为高温下液态金属界面调控与功能设计提供了理论基础与策略支持。