

中国材料大会 2024  
暨第二届世界材料大会  
**CMC 2024 & WMC 2024**

July 8-11, 2024  
Guangzhou, China

**D19-液态金属材料**  
**D19-Liquid Metal Materials**

**Organized by**

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

## D19.液态金属材料

分会主席：刘静、邓中山、刘宜伟、何志祝、饶伟

### D19-01

#### 液态金属赋能的柔性可拉伸导体材料

孔德圣\*

南京大学

可拉伸电子技术将赋予下一代柔性信息器件可变形的独特形态，有望将传感、刺激和显示功能与人体紧密集成，在生命健康、消费电子和军事领域具有广阔的应用前景。兼具优越机械和电学性能的可拉伸导体，是构建功能器件和互联线路的关键材料基础。当前，固态柔性导体的普遍拉伸范围有限，并且在反复拉伸过程中由于机械疲劳而性能明显下降。与之不同，镓基液态金属材料在室温下呈熔化状态，具有液体的流动性和金属的高电导率，成为构建柔性导体的理想材料组分。本课题组近年来致力于研究液态金属基复合材料和加工工艺，液态金属的引入显著提高了柔性导体的机械拉伸性和稳定性。这些柔性导体被用于构建各种可穿戴和可植入的光电器件，展示了液态金属在下一代柔性电子技术领域的广泛应用前景。

### D19-02

#### Liquid Metal Grown Crystals

Jianbo Tang (汤剑波) \*

School of Chemical Engineering, University of New South Wales (UNSW Sydney)

In liquid metals, metallic interactions and disorder dominant. When used as a special class of solvents, these metallic liquids provide a strongly interacting yet highly dynamic environment for hosting other solute species. During out-of-equilibrium phase transitions (for example, crystallization), this gives rise to surprising phase interactions and structural development that have yet been fully understood. The same is true when it comes to surface and interfacial processes observed in liquid metal systems. Recently, we have shown that liquid metal solvents can be used for synthesizing a number of metal crystals and crystalline patterns [*Nat. Nanotechnol.* 2021, 16, 431; *Science* 2022, 378, 1118; *Nat. Synth.* 2022, 1, 158; *ACS Nano* 2023, 17, 17070]. This talk will briefly go through examples of liquid metal-grown crystals under different growth configurations, i.e., surface, bulk, and interfacial crystal growth. Possible mechanisms that could lead to their distinguishing features of the crystals will be discussed. Combining liquid metal-based crystal synthesis and post-growth design, the concept of leveraging these autonomous processes for scalable fabrication of application-relevant metal fine structures will be demonstrated.

### D19-03

#### 室温液态金属 3D 复杂结构制造与应用

何志祝\*

中国农业大学

室温液态金属具有优异的导热导电、流动性及生物相容性，在柔性电子、软体机器及热管理等方面具有重要的应用价值。室温液态金属的液体属性使其难以形成复杂的三维结构，从而限制了其在三维柔性电子及热管理等领域的应用。本报告介绍了一种基于 3D 打印模板法的复杂三维液态金属结构制造工艺，并通过与弹性体结合实现在柔性液压驱动抓手、液冷热沉及热电制冷方面的应用。

**D19-04****基于相变液态金属的新兴生物医学技术和应用**

孙旭阳\*

北京航空航天大学

近年来，以金属镓及其合金为代表的液态金属新型材料在柔性电子、软体机器人、化学催化、二维材料合成以及生物医学工程等领域展现出独特价值。实际上，液态金属的低熔点特性为研究金属相变及其伴随的生物医学应用提供了一个可行且安全的平台。目前，已经开发出一大类具有可调熔点的功能材料，材料的熔点接近人体体温，有利于实现生物医学治疗。本文将着重介绍液态金属独特的相变特性以及相变过程所赋予的新兴生物医学技术和应用。液态金属可实现双向相变：当环境温度高于其熔点时，金属由固态变为液态。当温度降低时，金属凝固，由液态转变为固态，由此可促成一系列非凡的生物医学过程和应用。

**D19-05****磁性液态金属可控相变智能材料及应用**

汪鸿章\*

清华大学

智能响应软材料作为构建未来智能系统的基础，其设计和应用前景广阔，但如何实现多重刺激响应功能并显示仍是一个难题。尤其是要创造出既具备高度柔韧性又能够对多种刺激做出响应的材料仍然面临着诸多挑战。液态金属同时具有金属流体的双重属性，为解决这一问题提供了新的思路。本报告介绍了一种创新的智能软体架构，该架构利用分散在高弹性硅胶网络中的磁化液态金属颗粒，为智能柔性响应材料的研发提供了新的途径。这些高度过冷的液态金属颗粒在外界刺激下能够可控相变，并释放出大量的潜热。结合热成像和热致变色技术，该材料能够对多种输入信号进行可编程的显示。该材料能够感知多种信息编码的接触性（如机械按压、拉伸、扭转）和非接触性（如磁场）刺激。该技术可以动态感知形变过程中的大面积应力分布和演化过程，并实现红外和光学频段下的可视化。此外，外界刺激还可以诱发智能材料在绝缘体与导体之间可逆切换。基于液态金属弹性体架构的智能软材料，为设计智能软体传感、显示和信息加密系统提供了一个通用平台。随着技术的不断进步和优化，这类材料有望在智能穿戴、健康监测、应力感知、柔性显示等多个领域发挥重要作用。

**D19-06****液态金属智能复合材料设计**

袁博\*

北京航空航天大学

智能材料是一类可以对外界刺激进行感知并根据输入刺激的类型做出识别、判断并进行特征化响应的新型材料，能够将传统系统中彼此独立的感知、控制及反馈功能集成于单一材料中，有着重要的研究价值及广阔的应用前景。针对目前智能材料响应条件单一及基体材料所造成的力学性能不足等局限，针对基于液态金属的智能复合材料设计展开了研究，对液态金属与其他材料的快速复合机理及制备多响应性的复合材料进行了阐述。

**D19-07****磁控溅射液态金属快速制备镓基纳米功能薄膜**

陈雪庆、崔云涛、刘静\*

中国科学院理化技术研究所

近年来，镓基功能薄膜在传感器、紫外探测和功率半导体领域有着广泛的应用前景。然而，镓基液态金属所具有的高表面张力使其难以快速制备纳米功能薄膜。磁控溅射作为高效制备纳米薄膜的工艺而被广泛应用，但固体靶材的浪费和开裂问题需要解决。为了解决这一问题，本文通过液态金属与金属铜之间的浸润性，提出了一种新型的可重复使用的液态金属靶材，并通过磁控溅射技术制备出了两种镓基功能薄膜。一种是纯液态金属膜，电阻率约为  $595.7 \pm 42.2 \Omega \cdot \text{cm}$ ，其最小透射率约为 0.5%，在可见光范围内的反射率达到 70%。另一种是通过 400 °C 退火获得的镓/铜氧化物 n 型半导体薄膜，光带隙为 4.37 eV。同时，基于 Ga/In 氧化物薄膜的半导体属性制备了金属-半导体-金属光电探测器，证实了其对紫外光的响应特性。综上所述，本研究提出了一种低能耗、快速制备镓基功能薄膜的技术，将磁控溅射技术的理论从传统的固体磁控溅射扩展到液体磁控溅射。

## D19-08

### 用于消化道诊疗的磁性液态金属水凝胶胶囊

沈毅锋、杨栩旭\*、李铁风

浙江大学

微型磁性软体机器人在微创医疗和疾病诊断领域上展示出巨大的应用潜力。具有优异医学成像性、生物相容性和柔顺性的镓基液态金属则作为一种多功能基体材料，可以与磁性单元结合以构建液态金属基磁性软体机器人。然而，高流动性和表面的粘性氧化物会使得进入体内的液态金属难以彻底回收。这些金属残留物会对受试者的长期健康带来潜在风险。基于此，高效地封装液态金属则成为了一个可行的解决方案。不过，封装稳定的液态金属微纳米颗粒在诊疗过程中很难实现追踪和操纵，且液态金属弹珠和弹性体复合材料等封装策略则容易在大变形和冲击过程中易发生液态金属泄露。因此，目前亟需开发一种有效地封装策略，以确保液态金属机器人在未来临床中的安全使用。基于此，我们提出了一种简单高效的滚涂封装法。启发于汤圆的制备流程，所得的微米级水凝胶涂层均匀、柔软且坚韧。该涂层能够牢固地封装大量液态金属，并具有出色的抵御大变形和冲击的能力，从而能够有效防止泄露，并确保其适用于生物医学应用。得到地磁性液态金属填充的水凝胶胶囊可以在磁场中实现可控变形、可控移动和无线加热。我们验证了该胶囊在离体猪胃和活体兔模型中高效靶向热消融的可行性，这为未来利用磁性液态金属软体机器人开展临床治疗提供了新思路。

## D19-09

### 低沸点流体驱动的热气动液态金属射频开关

李春苇、王磊、邓中山\*

中科院理化技术研究所

可重构天线中使用的现有的射频开关经常遇到一系列性能问题，例如开关的高插入损耗、低隔离度和非线性效应。为了解决这些问题，本文提出了一种液态金属射频开关，它利用加热的低沸点流体驱动共晶镓铟合金 (EGaIn) 柱塞的运动来实现射频开关的通/断。该开关的工作原理是利用低沸点流体在液气相变时产生的压力差使 EGaIn 柱塞与射频开关的铜电极实现接触或断开。实验分别研究了不同低沸点流体驱动 EGaIn 柱塞时的射频开关的性能，结果表明所有射频开关都具有毫秒级响应时间，接触电阻低至  $0.14 \text{m}\Omega$ 。此外，还实现了良好的射频性能，表现为在 0-2GHz 频段内的插入损耗小于 3dB，隔离度大于 17dB，且无非线性效应。这项研究还验证了所提出的射频开关在折叠单极子天线的频率可重构中的良好性能。

## D19-10

### 面向可延展柔性电子器件的刚度可编程衬底/液态金属三维互连电路一体化 3D 打印

张杰、李光勇\*

宁波大学

与传统刚性电子器件不同,可延展柔性电子器件具有高柔韧性和延展性,在信息技术、医疗健康、软机器人等领域表现出巨大的应用潜力。然而,在大变形过程中,刚性元件和弹性衬底之间的应变尺度不同,会导致刚柔不匹配乃至整个互连电路失效。因此,开发具有有效应变屏蔽能力的刚度可编程衬底已成为研究热点。此外,电子密度的指数增长也对可延展柔性电子器件的制备提出了挑战。鉴于此,本研究利用 3D 打印技术开发了一种具有应变屏蔽能力的高集成度可延展柔性脉搏传感器,该传感器由电子芯片、基于 ESC(Ecoflex 弹性聚氨酯/二氧化硅纳米颗粒复合材料)墨水打印的刚性可编程衬底/封装层和基于 LM(液态金属)的 3D 电路组成,克服可延展柔性电子器件在大变形下易失效的问题。首先,通过对 Ecoflex 进行改性和优化,实现了具备应变屏蔽效果的刚性可编程衬底的制备。其次,优化了 3D 打印参数,提高了打印精度。最后,设计互连电路进行 3D 打印并集成电子元件,制备可延展柔性脉搏传感器,由此制备的可延展柔性脉搏传感器在复杂的 3D 变形(包括弯曲、扭曲和拉伸)下表现出良好的机械和电气稳定性。

#### D19-11

### 液态金属复合结构的可控制备与响应性功能器件的开发

任龙\*

武汉理工大学

液态金属材料具有良好的导电导热性和可变形性,是一种新型的金属功能材料。金属性和可流动性相结合可产生诸多奇异的物化性质和智能刺激响应特性,有望突破传统金属功能材料在大尺度变形、可自修复等应用需求上的瓶颈,尤其在柔性可穿戴设备、可自修复电子器件、软体机器人等领域有着广泛的应用前景。本报告将主要介绍团队在液态金属基复合结构的设计与制备,及其在响应器件和微米机器人等方面开发和应用的进展,并展望液态金属在智能材料研究以及软体微纳米机器人应用中的前景。

#### D19-12

### 液态金属作为反应介质的探索

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一个化学反应的介质,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,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。基于这些特性,我们开展了一系列相关研究。例如,利用金属液化行为的流动性及其反应活性构筑了具有高离子电导率、高模量的致密 SEI 层;利用锂液态金属表面的原子级光滑特性和液体的流动扩散特性,通过原料同步反应-扩散-组装过程构筑电极表面致密稳定 SEI 层;通过调节液态金属电极不同电流体动力学模式,可以控制液态金属内部反应的动力学过程。

#### D19-13

### 液态金属基弹性导电材料与器件

刘宣伟\*

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液态金属基弹性导电材料与器件的优势,重点汇报高稳定液态金属基弹性导电材料/电极/电路构筑、液态金属基弹性应变传感器及其工程化、仿生触觉/痛觉传感器等方面的工作,并介绍上述弹性导电材料与器件在智慧医疗健康领域的应用案例。

**D19-14****基于液态金属的共形电子材料、结构和功能的探索和展望**

国瑞\*

天津大学

共形电子是一种可以稳定附着在其他物体表面的电子设备，具有在可穿戴电子、表皮电子、智能蒙皮和飞行器等领域广泛应用的潜力。液态金属作为一种具有金属级导电性和无限变形能力的材料，在共形电子领域有着广阔的应用前景。然而，现有液态金属共形电子制造方法存在一些问题亟需解决，例如电路在曲面上的稳定性差、制造工艺复杂、成本高等。本报告将针对上述问题，从液态金属的材料特性、共形电路的制造工艺和结构以及液态金属共形电子的应用等三个角度展开讨论，并介绍半液态金属材料在共形电子领域的应用价值和性能优势。最后展示半液态金属材料在三维物体表面的普适性共形技术和其在柔性太阳能电池和电子皮肤领域的应用。

**D19-15****原位 3D 打印液态金属-水凝胶多功能柔性生物电子器件**

胡靛\*

北京航空航天大学

水凝胶具有含水量高、模量低、生物相容性好等优势，被视为生物电子的理想界面材料，也是当下生物电子领域的研究热点。在水凝胶体系中打印液态金属 (LM) 结构的文章虽然已经有报道，但是，有的凝胶体系比较脆，需要将液态金属固化取出再次封装后才能进行后续使用；有的凝胶体系生物相容性较差，大多用于传感领域，不适合用于生物电子学应用。本文报道了一种简单的原位 3D 打印方法来制备液态金属(LM)-凝胶复合结构：明胶-海藻酸盐-氯化钾水凝胶(GSP)作为打印支撑基质，LM 作为打印墨水。LM-凝胶复合结构可以直接用作电子器件或设备，无需进一步封装过程。LM-凝胶复合结构不仅能够对软组织具有良好的机械顺应性，而且在生物电子学应用中显示出巨大潜力。我们采用原位 3D 打印方法成功制备出 LM-凝胶 NFC 标签、LM-凝胶复合电路、多模态压力传感器、用于体外信号记录和体内电刺激的软生物电极。这种方便且几乎高度自动化的原位 3D 打印方法为水凝胶生物电子器件的开发提供了一个通用的、多功能的平台。

**D19-16****室温液态金属的表面管理与工程应用**

段良飞\*

云南师范大学

室温液态金属是一类新兴功能材料，该体系材料是以镓为主体的低熔点合金，兼有金属和流体等多重属性。室温液态金属绝大多数的重要功能和奇异行为与其表面性质密切相关，同时受其组分、结构和空间环境共同影响。探索通过室温液态金属组分的选择与匹配，经液相转变后实现表面原子分布状态的调控，进而实现表面结构和性能的管理。基于室温液态金属表面的多原子协同效应、低能化学反应、表面自生电荷、原子动态及多级演变等特性，结合空间环境的调控实现工程化应用。

**D19-17****The biocompatibility of gallium-based liquid metals with blood and serum**Xinpeng Wang<sup>\*1</sup>, Yudong Wu<sup>2</sup>, Hongzhang Wang<sup>3</sup>, Zhongshi Qi<sup>2</sup>, Yongliang Wang<sup>1</sup>, Yubo Fan<sup>1,4</sup>

1. University of Health and Rehabilitation Sciences

2. Qingdao University

3. Tsinghua University

4. Beihang University

Owing to the unique properties, including biocompatibility, fluidity and conductivity, gallium-based liquid metals have attracted more and more attentions in biomedical engineering, implantable devices, drug delivery and tumor therapy. However, the blood compatibility has not been explored in detail. To promote and expand the application in clinical and biomedical engineering, this study explored the compatibility of three kinds of frequently-used gallium-base liquid metals with blood and serum. The results show that treating blood and serum with gallium-base liquid metals did not cause hemolysis, suggesting that red blood cells are not damaged or ruptured, and treatment had a negligible effect on the amount of components in the blood. In addition, the serum levels of glucose, cholesterol and liver function molecules showed no change after adding liquid metals. By comparing with the control group, we characterized the surface morphology of liquid metals in blood and explored the interface formation of liquid metals to summarize and analyze the changes in the blood. These findings suggest that gallium-based liquid metals have high compatibility with blood and serum and provide support for gallium-based liquid metals to be applied in the fields of biomedical engineering.

**D19-18****液态金属神经电极——大脑与电子设备之间的桥梁**作者 张禧龙<sup>1, 2</sup>, 刘冰心<sup>1, 2</sup>, 桂林<sup>1, 2</sup>, 李雷<sup>1, 2</sup>, 邓中山<sup>1, 2\*</sup>

1. 中国科学院大学未来技术学院
2. 中国科学院理化技术研究所

神经电极是研究神经科学、神经疾病和神经-机器接口的核心部件，它们为脑神经系统和电子设备之间建立了一座桥梁。然而，大多数应用中的神经电极一般基于刚性导电材料制作而成，其在灵活性和拉伸性方面与生物神经组织很难良好兼容。液态金属是一类在室温下呈液态的金属材料，它们都具有良好的流动性、导电性 ( $>10^6$  S/m) 和生物相容性。基于此，我们利用微细加工技术研发了一个基于液态金属的 20 通道神经电极阵列，并采用铂对其信号采集端进行封装。体外实验表明，该电极具有稳定的电性能和与生物组织接近的模量（可以适应弯曲、扭转和拉伸等形变），这使得该电极能与颅骨适形贴合。在体实验还使用液态金属基电极记录了大鼠在浅度和深度麻醉下的脑电信号，以及由声音刺激引发的听觉诱发电位，并使用声源定位技术对听觉激活的皮层区域进行了分析。研究表明，这种 20 通道的液态金属基神经电极阵列能很好满足脑电信号采集的要求，并提供高质量的脑电图信号，支持源定位分析。总的来说，液态金属基柔性电极在脑神经科学研究与临床应用领域具有广阔的前景，有望真正成为连接大脑与电子设备之间的桥梁。

**D19-19****二维材料的可控合成@液态金属**

曾梦琪\*

武汉大学化学与分子科学学院

维度降低带来的量子限域效应使得二维材料表现出优异的物理化学性质，有望在未来的电学器件、光电器件以及集成电路中发挥重要的作用。二维材料的性质对结构变化高度敏感，即使是原子级的层数变化、晶格应变都会导致其性质发生显著改变。因此对于二维材料应用至关重要是建立稳定可靠的合成方法，实现其结构的精确控制。若要真正的可控构筑二维材料，需要从原子、分子层面来进行层数控制、组分控制、晶格调控，这就要求我们对材料生长体系进行精确设计，以调节材料的生长模式和生长行为。液态金属兼具液态的可变形性和金属的良好导热、导电性，对其探索是金属材料发展的一次新的契机与革命。作为一种不同于传统溶液的新型反应体系，液态金属在二维材料可控构筑方面展现出巨大的应用潜能[1]。利用

液态金属表面易于发生层离和表层先固化的特点，将二维材料成核与生长限域在表层，获得了一系列均匀层数的高质量二维单晶，包括 III-V 族半导体单晶[2]、钙钛矿[3]、层状双金属氢氧化物[4]、过渡金属硼化物[5]、二维合金[6]等，为其基础性质探究和器件应用奠定了良好的基础。引入液态金属降低反应过程中的形成能，辅助多种金属元素进入目标晶格，突破组分限制实现了一系列单相结构的高熵金属氧化物的可控合成[7]。控制液态生长界面各向同性的形变，在二维材料生长过程中可控引入均匀的双轴应力改变晶格结构，有望实现具有特定带隙的二维材料的批量生产[8]。

关键词：二维材料；液态金属；层数控制；组分控制；晶格调控

参考文献

- [1] Zeng, M.#; Li, L.#; Zhu, X.; Fu, L.\* *Acc. Mater. Res.* 2021, 2: 669-680.
- [2] Chen, Y.#; Liu, J.#; Zeng, M.#; Lu, F.; Lv, T.; Chang, Y.; Lan, H.; Wei, B.; Sun, R.; Gao, J.; Wang, Z.; Fu, L.\* *Nat. Commun.* 2020, 11: 3979.
- [3] Li, L.#; Yu, Y.#; Li, P.; Liu, J.; Liang, L.; Wang, L.; Ding, Y.; Han, X.; Ji, J.; Chen, S.; Li, D.; Liu, P.; Zhang, S.; Zeng, M.\*; Fu, L.\* *Adv. Mater.* 2022, 34: 2108396.
- [4] Wang, W.#; Wang, Y.#; He, R.; Wang, X.; Shen, Z.; Han, X.; Bachmatiuk, A.; Wen, W.; R ümmeli, M. H.; Liu, P.; Zeng, M.\*; Fu, L.\* *Adv. Mater.* 2022, 34: 2106400.
- [5] Si, J.#; Yu, J.#; Lan, H.#; Niu, L.#; Luo, J.; Yu, Y.; Li, L.; Ding, Y.; Zeng, M.\*; Fu, L.\* *J. Am. Chem. Soc.* 2023, 145: 3994-4002.
- [6] Wei, N.#; He, L.#; Wu, C.#; Lu, D.; Li, R.; Shi, H.; Lan, H.; Wen, Y.; He, J.; Long, Y.; Wang, X.\*; Zeng, M.\*; Fu, L.\* *Adv. Mater.* 2023, 35: 2210828.
- [7] Liang, J.#; Liu, J.#; Wang, H.; Li, Z.; Cao, G.; Zeng, Z.; Liu, S.; Guo, Y.; Zeng, M.\*; Fu, L.\* *J. Am. Chem. Soc.* 2024, 146: 7118-7123.
- [8] Zeng M.#; Liu, J.#; Zhou, L.; Mendes, R. G.; Dong, Y.; Zhang, M.; Cui, Z.; Cai, Z.; Zhang, Z.; Zhu, D.; Yang, T.; Li, X.; Wang, J.; Zhao, L.; Chen, G.; Jiang, H.; R ümmeli, M. H.; Zhou, H.\*; Fu, L.\* *Nat. Mater.* 2020, 19: 528-533.

## D19-20

### 液态金属微纳化及智能化应用

李现凯\*

青岛大学

液态金属由于超高的表面张力和流动性，在使用过程中存在易泄露、易氧化和难以与基底复合等问题。采用微纳化的方法可以制备液态金属微纳材料，不仅可以降低其表面张力，增加其实用性，而且可以通过后续机械烧结和蒸发诱导烧结等方式，恢复其导电性，使其在柔性电子、智能传感等领域有巨大的应用前景。利用液态金属微纳化的方法，通过湿法纺丝，还可以制备功能化液态金属生物纤维，拓宽液态金属在可穿戴智能器件中的应用。

## D19-21

### 液态金属极限材料

王雪林\*

北京航空航天大学

物质文明和技术进步不断推动着人类文明的发展。然而，随着人类取得更多的成就，我们也遇到了更多的瓶颈，从太空探索到单个恶性肿瘤的治疗。突破这些障碍的关键在于发现极限材料，极限材料可以轻松应对现有挑战，并拓展原有技术边界，甚至创造一个与旧系统完全不同的系统。室温液态金属的出现，以及其独特的特性和应用模式，有别于传统的电子，软体及流体材料，有望在极端环境中突破现有瓶颈。尽管目前对液态金属的研究不断增加，但对于其发挥不可或缺作用的真正突破，以及其独特的极端特性的详细阐述尚不充分，特别是在热、电和生物领域突破现有性能和技术极限的显著潜力，并在极端热管理、

普及性电子打印、类组织生物医学金属材料和先进仿生软体机器人技术等方面的应用。本报告旨在介绍液态金属的极端特性，并系统化了其在不同应用场景中的多样化能力，从个人电子制造、热管理、医疗保健系统到类人可变形机器人，液态金属都能满足极端需求。本报告最后将对液态金属极端材料的发展前景和面临的挑战做出讨论，揭示其隐藏的科学和技术问题，以期对人类文明的做出贡献。

## D19-22

### 液态金属在通讯设备散热领域的应用探究

郑金桥\*

中兴通讯股份有限公司

随着通讯技术的发展，通讯产品芯片的功耗逐年增加，热流密度持续攀升，芯片散热问题日趋严峻。导热界面材料是产品芯片散热不可或缺的材料，传统的导热界面材料已逐渐无法满足产品芯片日益增长的散热需求。液态金属由于本体导热系数较高、接触热阻较低，是较为理想的热界面材料，但是液态金属在实际应用的过程中仍然存在一些氧化、腐蚀、溢出泄漏以及浸润性差等亟待解决的问题，直接影响液态金属材料的有效应用。面对上述问题和挑战，本文结合通讯产品的未来发展趋势，将从产品应用角度对液态金属热收益、腐蚀性、氧化性、泄漏以及浸润性等方面进行全面应用评估研究与优化。本文主要包括如下几方面的探究内容，以期推动液态金属的发展及其在高功率芯片散热上的有效应用。

1) 从理论分析和实际测试两个方面全面对比评估液态金属相对于普通导热界面材料的热收益情况，研究有效散热评估方法；

2) 液态金属对铜、铝合金散热器的腐蚀机理研究，探究和评估液态金属散热应用有效的防腐蚀措施；

3) 液态金属应用防泄漏、防氧化的封装方法及其可靠性敏感应力研究，确定有效可执行的封装方案及可靠性评估方法。

## D19-23

### 液态金属薄膜的相变特性及应用

马标\*、刘宏

东南大学

薄膜形态的金属在电子、信息、能源和生物医疗等领域有着广泛的应用前景。目前，人们对固态金属薄膜的物化性质研究较为深入，而对于镓基液态金属这种可在室温附近固液切换的薄膜的特性及其潜在应用，尚缺乏系统探究。在近期工作中，我们开展了镓薄膜的可控制备及表面性质调控的工作，并重点探究了镓薄膜在固液相变时，由于其高表面张力引起的收缩效应。通过对这种收缩效应的利用或者抑制，构筑了一系列新型的温控功能元件、如温控流体阀、自支撑电极、生物分子胶囊等，并展示了这些功能单元在新冠病毒检测、电子皮肤、DNA 存储等领域的一系列应用。上述工作为加深对液态金属薄膜相变认识及应用提供了新的思路。

参考文献：

1. Yi Chen, Biao Ma\* et al. ACS Appl. Mater. Inter., 2023, 15, 44, 50898–50907.
2. Gangsheng Chen, Biao Ma\* et al. Adv. Sci., 2024, 2306129.
3. Yakun Gao, Biao Ma\* et al. Biosens. Bioelectron., 2024

## D19-24

### 旋转磁场调控的液态金属自驱动马达方向反转

周颖欣<sup>1,2</sup>、李楠<sup>1,2</sup>、赵曦<sup>1,3</sup>、刘静\*<sup>1,4</sup>

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

3. 天津理工大学

4. 清华大学

液态金属马达是一种非常规的可变形机器,其运动控制对微流体、药物递送和小型机器人至关重要。没有外场介入时,以铝为燃料的液态金属马达(Al-GaIn10)能够实现自主推进,但方向随机性限制了进一步应用。本研究报告了一个基本发现,即通过旋转磁场实现这种液态金属马达的方向反转。系统性实验揭示,马达克服了不规则布朗运动和无掺磁液态金属液滴在磁控中的体积限制。在不同体积下,马达呈现三种响应模式:小马达朝着旋转磁铁相反的方向运动;中等尺寸时在原地自旋;大马达则与磁铁一同移动。这种现象归因于电磁遥感、电化学反应和流体动力学的相互作用。快速变化的磁场在马达中诱导电流和安培力,限制了化学反应的位置,表面张力梯度和气泡反冲力主导了小马达与磁铁的反向运动。在此基础上,提出了一种微混合器,可用于小通道内混合流体和加快传质。总的来说,当前的发现显著提高了液态金属马达的可控性,并可能对开发未来的小型软机器人产生深远影响。

**D19-25****超弹性、高分辨率的液态金属基电感式应变传感器用于人体运动精准监测**

和子栋、巫远招、刘宜伟\*、李润伟

中国科学院宁波材料所

柔性应变传感器作为电子皮肤的重要组成部分,能够感知人体多种生理活动信号,在健康监测和运动表现评估等领域发挥着重要作用。然而,现有的大部分应变传感器在检测范围上存在局限性,难以精准捕捉人体活动时皮肤的大范围变形和微弱应变。为此,我们提出了一种基于液态金属的超弹性平面电感式应变传感器。该传感器在大应变和小应变下均能正常工作,可承受高达300%的应变,同时可检测0.05%的微小应变。该传感器还具有良好的稳定性,经历超过5000次拉伸循环,其性能仍保持稳定。即使在弯曲和折叠情况下,依然保持较高的检测精度。此外,我们还研究了提高传感器灵敏度的方法,并利用无线传输和信号处理技术开发了基于该传感器的人体运动信号监测系统。该系统可捕捉人体运动时皮肤应变幅度的变化,并应用于监测呼吸、吞咽和关节运动等各种生理活动。这些特性使得该系统在人体健康监测和运动性能评估等领域具有广阔的应用前景。

**D19-26****基于橡皮摩擦法制备的液态金属微/纳米颗粒超疏液涂层用于磁性液态金属机器人**

尹郑州、李光勇\*

宁波大学

摘要:磁性液态金属是磁性颗粒与镓基液态金属利用非常规组合制备而成的,由于其高导电性、流动变形性和可控性在柔性传感器、软体机器人和生物医学工程等领域具有广泛的应用前景。然而磁性液态金属像镓基液态金属一样在空气中易氧化,形成氧化镓薄膜,从而粘附在固体材料表面不易流动,对其可控性提出了挑战。利用具有微/纳结构的超疏液表面可以解决这一问题,然而现有的超疏液表面制备工艺复杂,且为平面的,难以向三维方向拓展,限制了其进一步的应用。基于橡皮摩擦原理,本文提出了一种新颖的面向磁性液态金属的超疏液涂层制备方法,可以简单快速的制备大面积三维非共面液态金属微/纳米颗粒涂层,成功实现了磁性液态金属的驱动及变形。首先探究了软材料摩擦作用下液态金属微/纳米颗粒在不同界面上的生成机制,并对液态金属微/纳米颗粒涂层润湿性能进行表征。附着有液态金属微/纳米颗粒涂层的金属或者非金属三维曲面均能呈现超疏液性。最后在磁场激励作用下,实现了磁性液态金属液滴在液态金属微/纳米颗粒涂层界面上的精确运动与形变控制。实验结果表明基于橡皮摩擦法制备的液态金属微/纳米颗粒超疏液涂层可以进一步拓展磁性液态金属在软体机器人领域的应用。

**D19-27**

### 基于液态金属的应力及应变传感器阵列技术研究

王中豪、董昊轩、赵天恺、郑熠、何志祝\*

中国农业大学

液态金属作为一种新兴材料，因其具有优异的导电性和流动性，在柔性电子领域发挥着越来越重要的作用。本报告介绍了双向结构液态金属柔性应变传感器阵列在智能轮胎应变监测的应用，该传感器具有良好的延展性 (>400%应变) 和可靠性，有效解决了刚性传感器与轮胎内表面的界面不匹配问题，可同时监测轮胎的周向和轴向微应变。此外，本报告还介绍了用于人体健康监测的高分辨率 (187 个传感单元) 足底压力传感器阵列，该传感器由力敏感薄膜和两侧的包覆液态金属的正交导线组成，具有厘米级的分辨率，可达 50kPa 的测量范围和 0.124kPa-1 的灵敏度，可实时监测人体足底压力。本项工作展示了液态金属在高密度和多传感点阵列传感器上的应用，为柔性传感器阵列的发展提供有价值的参考。

#### D19-28

### 用喷印和旋转方法制造嵌入液态金属电极的多层介电弹性体致动器

向文韬、刘静\*

中国科学院理化技术研究所

作为一种高效率电响应材料，多层介电弹性体致动器已被广泛用于制造软体机器人。多层介电弹性体致动器主要由多层电极层和弹性体层组成。在各种电极材料中，液态金属因其高导电性和可忽略不计的刚度，特别适合用作介电弹性体致动器的柔性电极。然而，受目前液态金属印刷技术的限制，以往研究仍未能实现嵌入液态金属电极的多层介电弹性体致动器。为此，本研究提出了一种结合喷雾印刷和高速旋转工艺的简单方法来制造超薄柔性液态金属电极。通过实验研究了旋转速度对液态金属电极表面拓扑结构、机械性能和电学性能的影响，并推荐旋转速度最佳值为 4000 rpm。与纯弹性体相比，嵌入多层液态金属电极的介电弹性体刚度变化可以忽略不计，并显示出相当好的电阻循环行为。最后，我们构建了一个包含六层液态金属电极和七层硅胶介电弹性体的多层圆柱形介电弹性体驱动器，并测量了该装置的驱动效果，从而证明了电极工艺的可行性。这项工作扩展了多层介电弹性体致动器制造方法，并为软机器人技术带来了巨大的前景。

#### D19-29

### 植物可穿戴液态金属基感知技术

渠纯纯、沈芳铭、胡代伟、孙文秀、何志祝\*

中国农业大学

作为一种可对植物信息进行无损、原位、连续监测的新型设备，植物柔性电子在农业领域引起了广泛关注。然而，由于植物的娇嫩性和表面附着物的存在，实现柔性电子设备与植物之间的无缝结合成为亟待解决的问题。本报告介绍了一种基于液态金属的植物电子纹身，可对植物重要生理信息如叶片水分损失和植物电信号进行无损、连续监测。可溶性多孔静电纺丝基底膜及基于转印法的液态金属基蛇形柔性电路的应用使植物电子纹身具备双面导电特性，有效解决了电子设备的刚性界面与娇嫩植物的失配问题。当叶片失水率达到 100% 时，纹身电极仍可紧密贴附于皱缩的叶片上，且工作灵敏度可以达到  $25.4 \text{ k}\Omega \%^{-1}$ 。此外，本报告还介绍了一种用于监测植物微环境的集成式多功能植物可穿戴系统，可对植物微环境温度、湿度进行实时监控。应用可穿戴柔性电子对植物自身生理参数及体外微环境的同步多模在线监测，对于深入了解植物的胁迫响应机制和开发抗性新品种具有重要意义，有望为精准农业的发展提供决策指导。

#### D19-30

### 基于微流道的超薄液态金属电极

叶子\*<sup>1,2</sup>、李倩<sup>1,2</sup>、桂林<sup>1,2</sup>

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

在柔性电子领域，液态金属电极具有很大优势。本研究将液态金属电极与微流控技术结合，实现了一种超薄的柔性电极，成功在 119 $\mu\text{m}$  的 PDMS 薄膜中实现了封装好的复杂液态金属电极结构。该电极是基于微流道结构与软光刻工艺实现的，所以精度能达到微米量级。结合可逆的 PC 膜与 PDMS 键合技术，成功实现了超薄 PDMS 流道结构的脱模。为了进一步提高液态金属电极的复杂度和结构设计自由度，本研究利用飞秒激光在微流道末端通过烧结 PDMS 形成一个小孔，用于在液态金属灌注的过程中排出空气，并依此实现了盲端的液态金属电极结构。除了超薄液态金属电极的制造工艺与评估，本研究还利用所制备的微电极设计了一种柔性可穿戴的应变传感器，展示了其在柔性电子中的实际应用潜力。

### D19-31

#### 液态金属存储器

袁锐治<sup>1</sup>、曹英杰<sup>1</sup>、朱锡宇<sup>1</sup>、单晓晖<sup>1</sup>、王波<sup>2</sup>、冯卫辰<sup>1</sup>、崔紫亮<sup>2</sup>、陈森<sup>1,3</sup>、刘静\*<sup>1,4</sup>

1. 清华大学
2. 北京航空航天大学
3. 南京航空航天大学
4. 中科院理化所

存储器是信息时代的标配，扮演着数据读写的核心角色。从早期电子管到磁性存储再到半导体存储，存储器历经了多个创新阶段，支撑着计算机体系的运行。近年来，随着技术发展，人类社会进入仿生时代，电子设备的智能性和便携性得以显著提升，同时对存储器在柔性、轻便、灵活等方面提出了更高要求。在这一背景下出现的液态金属存储器，以一种全新的氧化还原机制实现数据读写，如同溶液中生物神经和大脑以极化和去极化方式处理信息，成功解决了存储设备在柔性和稳定性之间的矛盾，由此展现出广阔的应用前景，可望为柔性机器人、脑机接口、植入电子及仿生智能等方面带来变革，进而促成相关领域的进步。

### D19-32

#### 同质晶种触发的液态金属弹性体可拉伸刚度调谐

王居、郝阳泰、姚雨辰、李婧怡、宋宇佳、高建业、刘静\*  
中国科学院理化技术研究所

液态金属单元与有机弹性体的混合结构在实现可拉伸和可逆刚度调节方面具有巨大潜力，可以实现诸如机器人外骨骼、柔性电子设备等新型材料设计和功能应用。然而，结构的刚度调整通常是通过冷却材料相变或对磁流变流体施加磁场来完成的，这一过程需要笨重的设备，且受到高能耗的制约。本文通过引入过冷液态金属和同质晶种之间的相互作用来解决上述问题。我们开发了一个由过冷液态金属和弹性体组成的多层系统，当调节机械力促使与同质晶种接触时，过冷液态金属可以跨越能量壁垒，以实现快速结晶和凝固。除促进结晶外，同质晶种还防止了扩散后异质成核剂对体系造成的污染，确保了系统在凝固后能够恢复到过冷状态。这种多层结构可以定制，以满足许多不同的需求。本文通过设计和测试新的形状记忆材料、温度敏感开关和控制电路，进行概念实验，证明了系统的实用价值。总体上看，该研究具有广泛的前景，并有望扩展经典刚度可调材料的理论和技术类别。

### D19-33

#### 可降解多功能凝胶/液态金属基可回收可拉伸柔性智能电子器件

丁梦龙、李光勇\*  
宁波大学

近年来可拉伸柔性电子器件在人机交互、健康医疗、生物传感等领域具有广泛的应用前景。为满足特定应用场景需求，对可拉伸柔性电子器件的智能化（包括可降解、可回收、自粘接和自愈合等性能）提出了更高的要求。器件的智能化主要取决于基材。其中最大的挑战是如何开发出环境友好的多功能柔性基材，使其具有可拉伸，可粘接，自愈合，降解可重构等智能化性能。聚乙烯吡咯烷酮（PVP）是一种合成水溶性高分子材料，具有成膜性、粘接性、吸湿性、增溶和凝聚等作用，且具有优异的溶解性及生理相容性，然而由于其具有硬脆等特性，很难用于可拉伸性柔性智能器件。通过调控其湿度，PVP 可以在玻璃态（脆）-高弹态（弹）-粘流态（粘）之间相互转换。基于这一现象，本文通过在 PVP 中添加蜂蜜填料调控水含量改善其拉伸性能，开发了一款软硬可逆的聚乙烯吡咯烷酮-蜂蜜凝胶多功能柔性基材(PHC)。首先对其拉伸性、自愈合性、可降解性和可回收性等多功能性能进行了表征和机理分析，基于 PHC 凝胶高弹态和粘流态相变机理，开发了一款生物胶带。最后基于 PHC 多功能凝胶/液态金属互连电路，研制了一款可拉伸柔性智能血氧-脉搏传感器，在实现了凝胶-皮肤界面共形黏附的同时，具有高延展和自愈合性能，降解后可以实现液态金属、柔性基材和电子芯片的完全回收并进行重构。

## D19-34

### 辐射传热对自然对流条件下液态金属相变热沉性能的影响

李伟<sup>1,2</sup>、李永<sup>1,3</sup>、邓中山\*<sup>1,2</sup>

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
3. 中国科学院大学

液态金属相变热沉因其具有高导热性和高体积相变潜热等一系列优点有望应对热管理方面日益复杂的挑战。本文使用石墨和氮化硼粉末制备了一种发射率最高可达 0.9298 的辐射涂层材料，并将其涂覆在铋基液态金属（共晶铋钢锡）相变热沉的散热翅片表面，研究了辐射传热对液态金属相变热沉性能的影响。持续加热和自然冷却的实验结果表明，辐射涂层的引入可以使得热源表面温度达到 100℃ 的时间最大延长 9.4%，同时使得相变热沉的性能恢复时间减少了 14.9%。高功率循环加的测试结果表明，高发射率涂层能使得第十个工作循环中的峰值温度降低 16.56℃。随后建立并验证了一个简化的数值模型，以确定相变和辐射传热对整体热控性能的具体影响。所提出的辐射增强型液态金属相变散热器结构简单，无需维护。它有望解决无法使用主动冷却或在空气稀薄环境中运行的电子设备的热管理问题。

## 墙报

## D19-P01

### 基于液态金属的多刺激感知和可视化智能弹性体结构

周颖彤、汪鸿章\*

清华大学

具有多刺激响应性和集成功能的柔性材料因其在机器人、柔性电子、传感器、驱动器和生物医学等领域的应用而受到广泛关注，但传统柔性材料可能只对特定类型的刺激做出响应，例如温度、压力或 pH 值。这种集成性的缺乏也限制了它们在智能系统和机器人技术中的应用。在这，我们设计了一种基于液态金属的多刺激感知和可视化智能弹性体结构，其中大量的磁性液态金属液滴以核壳结构高度分散在可拉伸弹性体网络中。该核壳液态金属及外层弹性体结构可使液态金属处于高过冷状态，在外部磁场刺激下可快速触发其相变并释放大量的潜热。过冷的磁性液态金属液滴可作为微纳潜热储存器，它们的可控相变释放出局部潜热，从而感知各种接触（机械挤压、拉伸、扭转）和非接触（磁场）刺激。此外，通过红外热成像或热致变色成像也可实现动态相变和应力演变过程的可视化。这项工作也为柔性智能传感、显示和信息加密系统提供了一个通用平台。

**D19-P02****高稳定的气液界面液态金属单层无基底共形颗粒膜**

陆幸健、巫远招、和子栋、刘宜伟\*、李润伟

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

镓基液态金属因其优异的导电性、可变形性和生物兼容性，在共形电子器件中受到了广泛的关注。目前，液态金属薄膜的制备方法主要包括印刷，打印等，但均需衬底支撑，共形性受到一定的限制。尤其是在复杂表面上，如何制备大面积、共形的液态金属薄膜还存在着严重的挑战。为此，我们基于气液界面自组装法，将液态金属颗粒在水和空气界面自组装形成颗粒膜，制备出大面积 (>100 cm<sup>2</sup>) 的单层液态金属颗粒膜。并共形转移到复杂物体的表面，如人体皮肤等，实现共形贴附。该方法消除了传统器件衬底所带来的应力干扰，提高了器件的稳定性和共形性，为制备大面积、厚度均匀的共形电子器件提供了一种新方法。

**D19-P03****用于可穿戴传感器 3D 打印的液态金属墨水的制备及调控**

程家浩、张亚斌\*

广西大学

(广西大学，特色金属材料与组合结构全寿命安全国家重点实验室，有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室，中国南宁 530004)

近年来，随着人们对可穿戴电子设备的需求日益增长，开发新型高性能的可穿戴电子材料至关重要。镓基液态金属（简称 LM）以其独特的优势（高导电性、导热性、流动性、无限变形性、低粘度、低毒性等）而备受柔性电子领域的青睐[1]。然而，当其打印到柔性基底上时，由于高的表面张力[2]所产生的差的润湿性，从而极大限制了器件性能的提升和拓展。因此，寻找润湿性可调的方法来拓展这类液态合金在可穿戴电子设备的应用势在必行。

研究发现，微纳米颗粒的掺杂能极大的提高其与基底的润湿性。Cu、Fe、Ag、Ni、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[3]等微米颗粒或纳米颗粒已经被探索。因此探索普适通用的掺杂策略对于调控液态金属的润湿性有极大的提升空间，但目前报道的金属氧化物的掺杂甚少。此外，由于 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 具有优良的磁性能，良好的分散性等优点，与其复合的材料可实现多功能化。针对以上问题，本研究使用溶剂热法合成的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 纳米粒子作为固体填料（1 wt%、3 wt%、5 wt%）通过机械搅拌的方式添加到 Galinstan 中，以形成浆状油墨，并通过 3D 打印-DIW 技术将其打印到不同的基底和织物上。结果显示，掺杂不同比重的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 都能打印在柔性基底上，图案化的分辨率可达到 330 $\mu$ m。其中，掺杂 1 wt% 的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 能连续平滑挤出，牢固附着在基底上；掺杂 5 wt% 的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 在基底上完全铺展开，润湿性得到极大提升。

## Reference

[1] S. Chen, S. Fan, H. Chan, Z. Qiao, J. Qi, Z. Wu, J. C. Yeo, C. T. Lim, Liquid Metal Functionalization Innovations in Wearables and Soft Robotics for Smart Healthcare Applications. *Adv. Funct. Mater.* 2023, 2309989.

[2] Z. Zou, Y. Chen, S. Yuan, N. Luo, J. Li, Y. He, 3D Printing of Liquid Metals: Recent Advancements and Challenges. *Adv. Funct. Mater.* 2023, 2213312.

[3] D. Wu, D. Liu, X. Tian, C. Lei, X. Chen, S. Zhang, F. Chen, K. Wu, Q. Fu, A Universal Mechanochemistry Allows On-Demand Synthesis of Stable and Processable Liquid Metal Composites. *Small Methods* 2022, 2200246.

**D19-P04****液态金属@碳纳米管纳米颗粒改性氟硅橡胶复合材料的制备及性能研究**

何山、任瑞阳、唐自升、王焯、吴畏慰、兰洋、阳龔、谭徕彬\*

介电弹性体在能量回收、传感器、机器人操纵器等领域具有重要意义。相对于离子聚合物和铁电/液晶弹性体，介电弹性体具有反应速度快、应用环境广泛、制造简单等特点，受到科学界和工业界的广泛关注。目前所报道的介电弹性体普遍存在机电耦合不良的问题，极大地限制了其应用。因此，设计开发具有高介电常数、低介电损耗、柔韧性好的复合材料具有极大的紧迫性和必要性。氟硅橡胶（FSR）具有良好的耐高温、耐化学腐蚀、耐老化和优异的机械性能等，是一种性能优异的弹性体。液态金属在常温下是液体，能随着材料一起变形，同时具有高导电、高导热、低毒性和良好的生物相容性等优点。然而，液态金属表面张力大，极易团聚，与氟硅基体间界面相容性差。本工作从改变液态金属表界面性质入手，以  $\gamma$ -巯丙基三乙氧基硅烷（KH-580）为反应媒介，将液态金属（LM）与碳纳米管（CNT）在超声作用下同时反应，制备液态金属@碳纳米管（LM@CNT）复合填料，以限制液态金属的再团聚及泄露，系统研究了反应物比例对 LM@CNT 粒径及分散稳定性的影响。将所得复合填料与氟硅橡胶经溶液混合制得氟硅橡胶复合材料。当复合填料含量为 10vol% 时，所制得的复合材料的介电常数为 54.24 (@ 1kHz)，约为未改性 FSR 的 13 倍，且介电损耗低至 0.45 (@ 1kHz)，同时其拉伸强度为 0.74 MPa，断裂伸长率为 489.58%，体现了良好的力学性能。

\*感谢材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金（2020CL16），五粮液产学研合作项目（CXY2021ZR001），自贡市科技局重点研发项目（2020YGJC12），大学生创新创业训练计划（S202310622036）项目资助。

## D19-P05

### Phase transition liquid metal enabled emerging biomedical technologies and applications

Shang Gao, Xuyang Sun\*

The School of Biological Science and Medical Engineering (BSME), Beihang University

As novel phase change materials, liquid metals possess the advantages of low phase transition temperature and controllability. During the phase transition process, liquid metals change shape, stiffness, adhesion, phase separation, electrical conductivity, and thermal conductivity. These alterations render liquid metals highly promising as stimuli-responsive materials for applications in drug delivery, tumor therapy, electronic skin technology, and other fields. Currently, available methods to regulate the phase transition of liquid metals include utilizing tissue temperatures to induce melting, employing water as a heat or cold source, and applying Joule heating. The distinctive properties of liquid metal phase transition offer transformative opportunities in medicine. Notably, significant variations in stiffness occur during the phase transition of liquid metals, which facilitate their extensive utilization in flexible mechanical joints, exoskeleton braces, bone cement materials, and so on. Moreover, the pronounced shape change exhibited by liquid metal during its phase transition process can cause damage to the surrounding environment thereby promoting a new approach for mechanical destruction treatment of tumors. Furthermore, the endothermic and exothermic processes involved in the phase transition of liquid metals exhibit significant potential for heat exchange and transfer, thereby offering extensive opportunities for advancement in thermal regulation e-skin research.

## D19-P06

### Enhanced Tumor Treatment with Flexible Skin Patch

Yi Liu, Xuyang Sun\*

Beihang University

In the field of epidermal tumor therapy, wearable electronics have made significant progress in recent years, and in particular, skin patch with minimal invasiveness, low side effects and high efficiency has received

extensive attention. In this study, we propose a novel flexible skin patch fabricated by a facile preparation method, which provides an effective solution for non-invasive hybrid thermophysical therapy and adaptive immune function enhancement. The patch possesses high electrical conductivity, stability, and biocompatibility, while exhibiting excellent skin adhesion during cryotherapy and magnetothermal therapy. The skin patch was demonstrated with significant adaptive heating and cooling properties on 4T1 breast cancer model. Magnetic resonance imaging (MRI) results further confirmed the remarkable efficiency of the skin patch in tumor ablation. Notably, the ratios of CD8<sup>+</sup> T cells and CD4<sup>+</sup> T cells in the peripheral blood were relatively stable after treatment compared to the untreated group, indicating that the skin patch could induce an effective anti-tumor immune response. In conclusion, this novel skin patch provides a promising non-invasive method for tumor treatment capable of directly destroying tumor and maintaining anti-tumor immune responses, which has great potential for clinical application.

### D19-P07

#### 具有链珠结构的可缝纫液态金属纤维用于智能纺织

徐凤、巫远招、刘宜伟、李润伟\*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

可拉伸导电纤维对具有良好导电性且稳定的轻质导体至关重要。镓基液态金属由于其高导电性、可变形性和生物相容性在该领域引起了极大的关注。然而液态金属具较大的表面张力,使得制备小尺寸且电学性能稳定的液态金属纤维存在一定的挑战。为此,我们提出了一种高压射流方法制备具有链珠结构的液态金属微米纤维。该纤维具有极细的线宽( $\approx 22\mu\text{m}$ )和均匀分布的链珠结构,并可通过调控链珠结构的密度来调节导电纤维的阻值。同时,链珠结构优化了液态金属纤维的电学性能,拉伸至 40%时纤维电阻变化了 44.54% ( $R=9.25\Omega$ ),而没有链珠结构的纤维电阻变化率为 96%。此外,进一步利用低温冷冻技术,液态金属发生液固相转变,显著提高了纤维的机械强度,可作为可缝纫纤维,集成于弹性织物中,在智能纺织品和可穿戴器件中展示了广阔的应用前景。

### D19-P08

#### Electrochemical fabrication of liquid metal functional material

Cheng Zhong, Xuyang Sun\*

Beihang University

Surface decoration of liquid metals (LMs) is important for LM functionalization. For LM platform represented by metal gallium (Ga), excellent performance can be achieved through doping, hydration photothermal reaction, electroplating etc., to meet a wide range of application requirements. As an useful method of material functionalization, galvanic replacement reaction (GRR) can realize the regulation of material nanostructures and the anchoring of multifunctional groups. It has the advantages of simple process and low cost, thus, attracting wide attention in the fabrication of LM multifunctional composites. GRR usually uses LM as the sacrifice template, and through the reduction potential difference between the precursor and the target product, the replacement occurs at the predetermined reaction site to achieve the construction of composite materials. Starting from the unique properties and principles of LM, this poster summarizes the conditions and influencing factors of LM GRR, introduces the types of reactant substances, and illustrates the promising scenarios of composite materials from an application perspective.

### D19-P09

#### Dynamics of passive filling of liquid metals in a microchannel based capillary porous systems for fusion plasma facing components

Zhe Sun<sup>1,2</sup>, Xinyuan Qian<sup>1</sup>, Xuebing Peng\*<sup>1</sup>

1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences

2. University of Science and Technology of China/ Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences

Controlled nuclear fusion stands as one of the key pathways to ultimately resolving the energy and environmental problems of mankind. However, its development from laboratory research to commercial applications still faces many challenges, most notably the challenge of dissipating the extremely high heat flux from the core plasma. In the context of high-performance magnetic confinement fusion reactor devices, the divertor, which is directly exposed to high-temperature plasma, is often required to withstand ultra-high heat fluxes in the range of 10-20 MW/m<sup>2</sup> in the steady state and 1 GW/m<sup>2</sup> in the transient state, with expectations of even higher values for future reactors. Currently, tungsten is a material frequently selected for divertor components due to its extremely high melting point. However, tungsten exhibits a high ductile-brittle transition temperature (DBTT), which can result in cracking and damage when subjected to high thermal loads. Concurrently, the constrained heat transfer performance of water-cooled systems may result in heavy impurity tungsten melting or even sputtering under extreme heat and particle flux, which may affect plasma performance or even lead to plasma disruption. In light of these challenges, the development of plasma-facing materials with enhanced performance and the exploration of innovative divertor design concepts have become imperative. Against this backdrop, liquid lithium has been proposed as a novel material for plasma-facing components (PFCs) in fusion reactors due to its excellent heat transfer properties and self-healing ability, as well as its great potential to enhance the plasma performance. The introduction of liquid metal is anticipated to provide a solution for the long-term stable operation of fusion reactors.

At present, a number of concepts for liquid metal divertor components have been developed. One notable approach is the utilization of capillary forces to drive the passive replenishment of liquid metal towards the plasma-facing surface (PFS). This methodology is capable of effectively mitigating instabilities at the liquid metal interface and circumventing substantial energy dissipation. Over recent years, the achievement of rapid and efficient liquid metal filling has been a topic of considerable interest, as such optimization can significantly enhance the capabilities of evaporative heat transfer. Responding to this objective, a large number of novel capillary porous system (CPS) designs have been proposed in recent years. Especially, microchannel-based CPSs—such as 3D printed tree-like structures and open channels for laser micromachining—have been demonstrated to have excellent heat flux handling capability. Therefore, it is valuable to understand the flow behavior of liquid metal within microchannels for the design of CPS-based liquid metal divertors.

In this study, for different simple geometries (circular, triangular, hexagonal, etc.) and converging cross-sections of microchannel-based CPSs, we examined the stage characteristics and dynamic evolution patterns of the liquid metal passive filling process both analytically and numerically, with a focus on the capillary and heat transfer performance of microchannel-based CPSs. Specifically, the capillary rise rate of liquid metal in different types of microchannel-based CPSs is derived by solving the momentum equation. The relationships between the capillary flow rate and the passive transport distance are comparatively validated and analyzed based on two-phase flow simulations based on the conservative level set method. Further discussions are presented based on the results of numerical simulations on the interface evolution, oscillation properties and velocity distribution profiles of liquid metals during capillary flow. The objective is to identify the different stages of liquid metal capillary flow within microchannels and to clarify whether a single factor in the fluid properties and microchannel characteristics has an impact on the capillary flow. The results show that the microchannel-based CPS, despite its simple configuration, provides superior capillary performance in terms of replenishment rates to the PFS and delivery distances accompanied by higher porosity compared to mesh, sintered, and other CPSs, which implies that the microchannel-based CPS target has a higher power handling limit and has a unique advantage to withstand transient events. In addition, the heat transfer performance of microchannel-based CPS

targets can be further improved by adjusting the sizes of the cold and hot ends of the CPS. These findings establish a theoretical foundation for optimizing the fast and efficient transport of liquid metal to PFS and offer crucial insights for the systematic design of composite plasma-facing components based on liquid metals, as applied in fusion reactors.

### D19-P10

#### 基于液态合金-去合金策略的多孔纳米结构可控制备及电催化性能研究

冀媛、任龙\*

武汉理工大学

利用去合金化处理制备纳米多孔结构可构筑性能良好的电催化剂。然而，合金的制备需要高温合成且对金属元素具有选择性。在此，采用液态金属镓作为溶剂低温加热构筑固体合金 NiGa<sub>4</sub> 纳米颗粒，再利用简便的方法去除其中的镓元素，并形成独特的纳米多孔合金用于高效电催化剂的制备。研究发现镓基金属间化合物于较低温度下就可完成固体合金结构的转变，另外不同的结构在去合金过程中呈现不同的原子分布，从而影响其电催化的性能和效率，且独特的纳米多孔结构可提供丰富的活性位点和快速传质能力。其中，160°C 热处理后的金属间化合物在去合金处理后展示了优良的析氢性能，其在 100mA/cm<sup>2</sup> 下的过电位仅为 97.5mV，并展示了良好的稳定性。该工作从机理上解释了镓基金属间化合物在低温热处理后结构转变，且完成去合金处理后原子结构分析，为制备大面积纳米多孔催化剂提供了一个有效方案。

### D19-P11

#### Size Dependent Phase Transformation of Liquid Gallium

Jinyun Liu<sup>1</sup>, Yuan-Chao Hu<sup>2</sup>, Jie Shang<sup>1</sup>, Run-Wei Li<sup>\*1</sup>

1. CAS Key Laboratory of Magnetic Materials and Devices, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering (NIMTE), Chinese Academy of Sciences (CAS), Ningbo, Zhejiang 315201, China
2. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523808, China

As the most popular liquid metal (LM), gallium (Ga) and its alloys are emerging as functional materials due to their unique combination of fluidic and metallic properties near room temperature. Meanwhile, the phase transition is crucial not only for the applications based on this reversible transformation process, but also for the solidification temperature at which fluid properties are lost. While Ga has several solid phases and exhibits unusual size-dependent phase behavior. This complex process makes the phase transition and undercooling of Ga uncontrollable, which considerably affects the application performance. We performed extensive (nano-)calorimetry experiments to investigate the polymorph selection mechanism during liquid Ga crystallization. It is surprisingly found that the crystallization temperature and crystallization pathway to either  $\alpha$ -Ga or  $\beta$ -Ga can be effectively engineered by thermal treatment and droplet size. The polymorph selection process is suggested to be highly relevant to the capability of forming covalent bonds in the equilibrium supercooled liquid. The observation of two different crystallization pathways depending on the annealing temperature may indicate that there exist two different liquid phases in Ga.

### D19-P12

#### Liquid metal biomaterials: translational medicines, challenges and perspectives

Hanchi Xu<sup>1</sup>, Xuelin Wang<sup>3\*</sup>, Jing Liu<sup>1,2\*</sup>

1. Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University
2. Beijing Key Lab of Cryo-Biomedical Engineering and Key Lab of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences

### 3. Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, School of Engineering Medicine, Beihang University

Until now, significant healthcare challenges and growing urgent clinical requirements remain incompletely addressed by presently available biomedical materials. This is due to their inadequate mechanical compatibility, suboptimal physical and chemical properties, susceptibility to immune rejection, and concerns about long-term biological safety. As an alternative, liquid metal (LM) opens up a promising class of biomaterials with unique advantages like biocompatibility, flexibility, excellent electrical conductivity, and ease of functionalization. However, despite the unique advantages and successful explorations of LM in biomedical fields, widespread clinical translations and applications of LM-based medical products remain limited. This article summarizes the current status and future prospects of LM biomaterials, interprets their applications in healthcare, medical imaging, bone repair, nerve interface, and tumor therapy, etc. Opportunities to translate LM materials into medicine and obstacles encountered in practices are discussed. Following that, we outline a blueprint for LM clinics, emphasizing their potential in making new-generation artificial organs. Last, the core challenges of LM biomaterials in clinical translation, including bio-safety, material stability, and ethical concerns are also discussed. Overall, the current progress, translational medicine bottlenecks, and perspectives of LM biomaterials signify their immense potential to drive future medical breakthroughs and thus open up novel avenues for upcoming clinical practices.

#### D19-P13

##### 具有重力感知能力的液态金属软机器

陈刚胜、马标、刘宏\*

东南大学生物科学与医学工程学院

植物尽管没有神经和肌肉，但可以借助自身巧妙的组成和结构感知并适应重力方向实现向地性生长，从而最大限度地获取能量。受此启发，我们利用液态金属在其纳米氧化层中的流动性和电热特性，构建具有重力感知能力的智能仿生软体机器。我们在热响应液晶弹性体致动器上打印液态金属线路，通过改变致动器的姿态诱导液态金属的流动，从而调节焦耳热和致动器的变形。在一个双层液晶弹性体致动器中，液态金属的流动同时受致动器倾斜（输入）和弯曲变形（输出）的影响，自建了负反馈回路。因此，该双层致动器可以通过弯曲自主适应不同的倾斜角度，始终保持末端水平。此外，我们还设计了可交互的柔性抓手，通过手动旋转触发其抓取和释放，该抓手在旋转后能够自主保持抓取和释放构型。最后，我们将具有非线性力学的带状弹簧引入重力感知系统中，构建了具有地形感知能力的定向爬行软体机器人。该工作为能够感知重力和加速度的无电子控制自主软体机器人的构筑提供了新的思路。

#### 参考文献：

1. G. Chen, B. Ma, Y. Chen, Y. Chen, J. Zhang, H. Liu, Soft Robots with Plant-Inspired Gravitropism Based on Fluidic Liquid Metal. *Adv. Sci.* 2024, 11, 2306129. <https://doi.org/10.1002/advs.202306129>
2. G. Chen, B. Ma, J. Zhang, Y. Chen, H. Liu, Reprogrammable Magnetic Soft Robots Based on Low Melting Alloys. *Adv. Intell. Syst.* 2023, 5, 2300173. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300173>

#### D19-P14

##### 液态金属填充 PDMS 海绵的制备及其自供电传感性能的研究

杜思宇、陈振可、刘迎丹\*

燕山大学

作为一种新型便携式电源设备，摩擦纳米发电机（TENG）以其优异的便携性、质量轻、尺寸小、输出性能稳定等特点，吸引了广大研究人员的关注。随着研究领域的不断扩大，各种新兴应用对摩擦电材料提

出了新的要求。近年来，液态金属（LM）以其优异的导电性、可塑性、低毒性等特点，被应用于摩擦电材料中，形成一类新型的基于 LM 的摩擦纳米发电机（LM-TENG）。但 LM-TENG 依旧存在 LM 泄露、输出性能低等问题。在本研究中，将液态金属（LM, Ga68.5%/In21.5%/Sn10%）作为填料，均匀地分散在硅橡胶基体（PDMS, Sylgard184）中，通过牺牲糖模板法，成功制备了 LM 填充的 PDMS 海绵（LPPS）。通过毛细作用力改善了 LM 的沉降问题，以 LM-PPDMS 构建的 TENG 器件具有优异的输出性能，响应时间为 15 ms，低频下（1 Hz）下输出功率为 45  $\mu$ W。此外，以 LPPS-TENG 构建的压力传感器具有灵敏的传感特性，可用于监测一系列人体动作。本研究制备的液态金属填充多孔结构弹性体作为自供电传感器在可穿戴柔性电子器件、能量收集、电子皮肤等领域显示出巨大的应用前景。

### D19-P15

#### 基于自限紫外激光烧结液态金属纳米颗粒的超薄柔性电子器件应用

彭子寒、王子儒、杨龙康、王盼盼、叶冬\*

华中科技大学

轻质、可变形和高导电性的导体在电磁干扰（EMI）屏蔽膜等柔性电子设备中颇具吸引力；然而，最常用的金属箔或碳纳米材料受到薄膜厚度或导电性的严重限制。在这里，我们提出了一种简便的方法，可以将喷涂与直接纳秒脉冲紫外（UV）激光烧结相结合，快速制造烧结液态金属亚微米颗粒（LMSPs）薄膜。由于紫外激光的自限穿透深度，制备了高导电、微米级的烧结 LMSPs 薄膜，并且它们的薄层电阻很容易通过激光加工参数调整至少七个数量级。此外，得到了液态金属颗粒是否破裂的粒径和激光能量密度的计算参数图，与实验结果非常吻合。这种激光烧结的 LMSPs 薄膜最终用于制造屏蔽薄膜，其 EMI 屏蔽效率（SE）约为 33 dB，特定 EMI SE 厚度（SSE/t）约为 27500 dB $\cdot$ cm<sup>2</sup>  $\cdot$ g<sup>-1</sup> 以及在 12.9 GHz 和 14.3 GHz 谐振频率下具有 99.9% 以上高吸收率的柔性电磁超材料，显示出其在柔性 EMI 屏蔽和电磁波吸收应用中的巨大潜力。

### D19-P16

#### 原位碳壳封装 GaInSn 液态金属的高性能锂离子电池

李俊凯<sup>1</sup>、王恺钊<sup>1\*</sup>、施锦<sup>1</sup>、王开军<sup>1</sup>、吴家乐<sup>1</sup>、吴军<sup>2</sup>、胡劲<sup>1\*</sup>。

1. 昆明理工大学

2. 中国核电科学研究院

镓基液态金属具备独特的物理化学性质，使其作为传统储能电池和动力电池的研究方兴未艾。由于镓基液态金属在合金化/去合金化的过程中发生巨大的体积膨胀，因此影响电池性能。为了稳定电极结构，我们液态金属纳米化的方法，利用酚醛树脂碳化法把液态金属纳米液滴封装在碳壳中（GaInSn@C），液态金属保留率达到 98.8%，并巧妙留出了 8% 的空隙作为体积膨胀的缓冲。将碳封装的液态金属纳米颗粒制备成锂电电极，测试出，在 0.2、1 和 5C 的电流密度下分别表现出 512、433 和 286 mAh/g 的高容量。并在 5C 的电流密度下，实现了超过 500 次的循环下容量保持率达到 92.8%。利用原位 x 射线衍射和理论计算，深入研究了电极优越性能的原因。我们的合理设计可能为高性能 rtm 液态合金阴极的开发提供前所未有的启示，也为其他领域的应用提供新思路。

### D19-P17

#### 利用金属镓溶剂热法控制氧化镓的形貌

付佳鑫、胡劲\*、王恺钊\*、王开军、张维钧、吴家乐、李俊凯

昆明理工大学

为了填补低成本实现氧化镓形貌控制领域的空白，我们报道了一种利用液态金属镓在不同溶剂下利用水热法制备不同形貌的  $\gamma$ -GA<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的方法。首先将金属镓利用细胞破碎机在溶剂中超声分散，再进行水热。

通过控制溶剂种类, 可以一步法制备大尺寸 GaOOH 单晶和花状  $\gamma$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。其中二维-GaOOH 的最长可达 160 微米。本文为氧化镓半导体形貌控制提供新工艺, 扩大氧化镓半导体在光电材料, 催化领域等方向的应用。

### D19-P18

#### 基于结构设计防止液态金属泄漏的机械烧结诱导导电可自愈 eGaInSn@PDA NDs/TPU 复合材料

吴家乐、胡劲\*、王恺钊\*、李俊凯、付佳鑫

昆明理工大学

室温液态金属是开发柔性和可重构导电复合材料的潜在候选者。然而需要辅助烧结工艺使液态金属纳米颗粒表面的氧化层、有机物改性层破裂以重新激活其导电和流体特性, 从而在复合材料内部形成连续导电路径。然而, 这种破坏性策略导致液态金属泄露, 复合材料完整性被破坏。在这里通过“溶剂挥发策略”利用真空高压环境使热塑性聚氨酯在聚合过程其内部的有机溶剂快速挥发并主动脱气, 形成密集堆积微米空腔。经聚多巴胺改性的 eGaInSn 纳米颗粒均匀分布并锚定在空腔内壁上, 其能够为经受压力而破裂的 PDA@eGaInSn 提供了足够的填充空间。在施加机械压力过程中, 该复合材料从介电状态逐渐转变为导电状态, 并在断裂后能够多次快速自愈恢复导电性。特别的, 即使在施加 8MPa 的高应力后, 复合材料表面也没有出现液态金属泵出泄露问题。此外嵌入高分数 PDA@eGaInSn 的复合材料仍展示出高柔性并拥有卓越的电磁屏蔽和 X 射线衰减能力。

仅发表论文

### D9-PO01

#### 基于“机械力化学”开发新型相变热界面材料

吴蝶\*

成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司

在 5G 时代, 高频通信对电子器件的散热提出了更高的要求, 热管理材料因此显得尤为关键。传统的聚合物材料由于导热系数低而无法满 足热界面材料(TIMs)的要求<sup>[1]</sup>。因此, 设计高导热系数的聚合物材料已成为 TIMs 的发展趋势。铋基液态金属(LMs)是一大类熔点略高于室温的合金, 与汞、钠钾合金和镓基合金等室温 LMs 相比, 它们的封装限制更少, 并且更有可能在自然环境中保持稳定。此外, 它们的低熔点特性使它们易于软化和熔化。铋基合金还可以用金属基、碳基和陶瓷基微纳米颗粒以及聚合物材料进行改性, 以创建一系列新型复合材料, 具有高导电性和导热性, 是新一代热界面材料的理想选择<sup>[2]</sup>。本研究中, 利用研磨、球磨的强剪切机械力化学作用成功使 WO<sub>3</sub> 与 BiInSn 合金形成配位作用, 实现了 WO<sub>3</sub> 在 BiInSn 合金中的良好分散, 从而形成了稳定的复合材料。WO<sub>3</sub> 的加入可以调控复合材料的热功能性。该复合材料的导热系数最高可达 45 W/(m K), 在 40 °C, 40 Psi 下, 200 μm 厚度下, 热阻为 0.03-0.40 cm<sup>2</sup> K/W, 相变潜热为 247 J/cm<sup>3</sup>。此外, 经过 500 次冷热循环后, 复合材料仍保持良好的功能特性。综上所述, 本研究成功制备了性能优异的相变热界面材料, 为热管理提供了新的解决方案。

参考文献:

[1] Jiawei Yang, Wei Yu, et al. Composites Science and Technology.2022, 219,109223.

[2] Xilong Zhang, Jing Liu, et al. Materials Horizons.2024,11, 1369.

### D9-PO02

#### 一种可固化镓基液态金属复合材料, 用于电子设备的高效热管理

李泽龙、郭敬东\*

中国科学院金属研究所

随着电子设备封装密度及功率的不断提升，散热问题逐渐成为制约其进一步发展的主要瓶颈。在高性能计算、数据中心、移动设备等领域，传统的热界面材料已经难以满足日益增长的热管理需求。为了应对这一挑战，镓基液态金属以其卓越的热导率被看作是一种有潜力的散热解决方案。然而，镓基液态金属的低熔点特性使得其在高温下容易“溢流”，这不仅限制了其应用范围，还可能对电子设备造成损坏。为了解决这一问题，本研究提出了一种创新的方法，通过在真空环境下将镓锡合金与球型雾状铜粉混合，成功制备出一种可固化的镓基液态金属复合材料（GaSn-Cu）。通过观察显微组织演化发现 GaSn-Cu 在 75°C 的条件下可以逐步实现固化，而且在 75°C 下固化 192h 左右时达到完全固化。固化显微组织结构表明，GaSn-Cu 的固化是由于金属间化合物  $\text{CuGa}_2$  的生成导致的。此外，为了评估 GaSn-Cu 复合材料的传热性能，利用激光闪射法测定了其完全固化后的热导率。测试结果显示，GaSn-Cu 的热导率可达到  $54.3\text{W}/(\text{m K})$ 。这表明 GaSn-Cu 具备优异的散热能力，GaSn-Cu 的提出为解决液态金属的溢流问题提供了一种解决方案，有望在电子设备的热管理领域得到广泛应用。