



## 镓基液态金属相变过程及其在热管理应用中的研究进展

张学忠 杨燕红 向东 赵春霞 李东 武元鹏

### Development of gallium-based liquid metal phase transition process for thermal management

ZHANG Xuezhong, YANG Yanhong, XIANG Dong, ZHAO Chunxia, LI Dong, WU Yuanpeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250425.002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### Ti基MXene及其复合材料在金属离子电池中的进展

Research progress of Ti-based MXene and its composites in metal-ion batteries

复合材料学报. 2020, 37(12): 2984–3003 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200717.001>

#### MXene基薄膜的有序组装及其在储能和电磁干扰屏蔽中的应用

Ordered assembly of MXene based composite films and their applications in energy storage and electromagnetic interference shielding

复合材料学报. 2021, 38(8): 2404–2417 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210408.001>

#### 空心微珠/金属基复合泡沫制备方法与吸能性能的研究进展

Research progress on preparation methods and energy absorption properties of hollow particles/metal matrix syntactic foams

复合材料学报. 2020, 37(6): 1370–1382 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200302.001>

#### 二维MXene膜的构筑及在水处理应用中的研究进展

Construction of two-dimensional MXene membrane and its research progress of application in water treatment

复合材料学报. 2021, 38(7): 2078–2091 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210330.001>

#### 空气浴条件下三水醋酸钠相变材料的储热性能实验

Experimental study on the thermal energy storage characteristic of sodium acetate trihydrate as phase change material under the air bath condition

复合材料学报. 2018, 35(8): 2208–2215 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170926.003>

#### 基于离子选择性迁移策略的动力/储能电池隔膜的研究进展

Research progress of power/energy storage battery separator based on selective ion migration strategy

复合材料学报. 2021, 38(7): 2025–2037 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210114.002>



DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20250425.002

# 镓基液态金属相变过程及其在热管理应用中的研究进展



分享本文

张学忠\*, 杨燕红, 向东, 赵春霞, 李东, 武元鹏

(西南石油大学 新能源与材料学院, 成都 610500)

**摘要:** 本文对镓 (Ga) 基液态金属 (LM) 的研究进展进行了系统且全面的综述。研究内容广泛, 涵盖了 Ga 基 LM 的组成成分、复杂的相变过程、多元化的应用领域、显著的优势与现存的挑战, 以及有效的改性策略。Ga 基 LM 凭借其独特的物理和化学性能, 在众多领域中备受瞩目。其相变过程极为复杂, 涉及一系列物理化学变化, 在微观层面发生着原子的重新排列与相互作用。该材料具有热导率高、相变潜热大等显著优势, 使其在热管理领域能够高效地传导和存储热量, 为电子设备的散热提供了优良解决方案; 在储能领域, 也展现出巨大的应用潜力, 有助于提升能源存储与转换的效率。然而, Ga 基 LM 的应用也面临着一些挑战, 例如存在腐蚀其他材料的问题, 可能影响与之接触的器件寿命, 同时还存在过冷现象, 限制了其在某些场景的应用。为解决这些问题, 可以通过合金化、复合等改性策略来改善其性能。展望未来, 在微观机制探究、性能进一步优化及新应用领域拓展等方面, Ga 基 LM 有望取得突破性进展, 本综述也将为相关领域的研究与应用提供全面且有价值的参考。

**关键词:** 镓基液态金属; 相变过程; 热管理; 能量存储; 改性策略

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2026)01-0114-13

## Development of gallium-based liquid metal phase transition process for thermal management

ZHANG Xuezhong\*, YANG Yanhong, XIANG Dong, ZHAO Chunxia, LI Dong, WU Yuanpeng

(School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** This paper provides a systematic and comprehensive review of the research progress on gallium (Ga)-based liquid metals (LM). The study covers a wide range of topics, including the composition of Ga-based LM, their complex phase transition processes, diverse application fields, significant advantages, existing challenges, and effective modification strategies. Due to their unique physical and chemical properties, Ga-based LM have attracted significant attention across various industries. Their phase transition process is highly complex, involving a series of physicochemical changes and atomic rearrangements and interactions at the microscopic level. These materials exhibit remarkable advantages, such as high thermal conductivity and large phase change latent heat, enabling them to efficiently transfer and store heat in thermal management applications. They provide excellent solutions for heat dissipation in electronic devices. Additionally, Ga-based LM show great potential in energy storage, enhancing the efficiency of energy storage and conversion. However, their applications also face some challenges, such as corrosion of other materials, which may affect the lifespan of devices in contact with them, and the occurrence of undercooling, which limits their use in certain scenarios. To address these issues, researchers

收稿日期: 2025-02-20; 修回日期: 2025-04-14; 录用日期: 2025-04-22; 网络首发时间: 2025-04-25 17:14:46

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250425.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (52403116); 四川省自然科学基金 (2025ZNSFSC1398); 四川省科技计划资助 (MZGC20240046)

National Natural Science Foundation of China (52403116); Science Foundation of Sichuan Province (2025ZNSFSC1398); Sichuan Science and Technology Program (MZGC20240046)

通信作者: 张学忠, 博士, 讲师, 研究方向为聚合物功能复合材料 E-mail: [xuezhongzhang@swpu.edu.cn](mailto:xuezhongzhang@swpu.edu.cn)

引用格式: 张学忠, 杨燕红, 向东, 等. 镓基液态金属相变过程及其在热管理应用中的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2026, 43(1): 114-126.

ZHANG Xuezhong, YANG Yanhong, XIANG Dong, et al. Development of gallium-based liquid metal phase transition process for thermal management[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43(1): 114-126(in Chinese).

have explored alloying and composite modification strategies to improve their performance. Looking ahead, Ga-based LM is expected to make breakthrough progress in micro-mechanism exploration, further performance optimization and new application areas. This review aims to provide a comprehensive and valuable reference for research and applications in related fields.

**Keywords:** gallium-based liquid metals; phase transition process; thermal management; energy storage; modification strategies

在当今时代, 现代科技呈爆发式增长, 如智能手机、高性能计算机等电子设备不断朝着小型化与高性能化的方向大步迈进<sup>[1-3]</sup>。在这一进程中, 散热和能量存储成为了亟待攻克的关键难题<sup>[4-9]</sup>。电子元件的高度集成使得热量积聚迅速, 若不能有效散热, 设备性能将严重下降甚至损坏; 而有限的空间又对能量存储材料的性能提出了超高要求<sup>[10-13]</sup>。

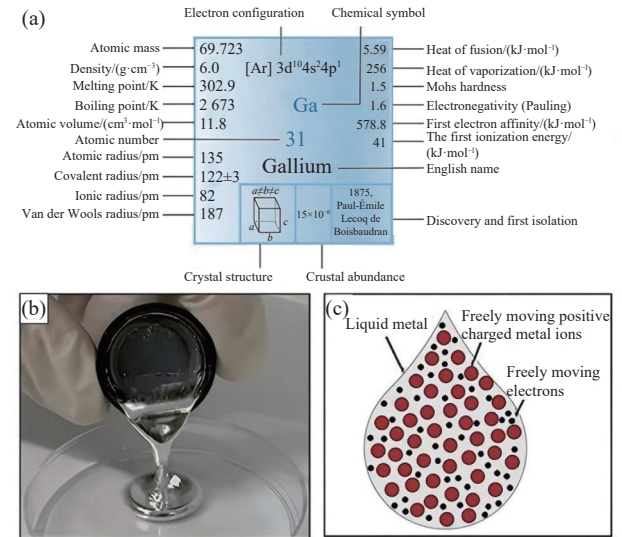
与此同时, 在能源领域, 随着全球对可持续发展的追求, 可再生能源的占比日益增加, 但其间歇性和不稳定性问题突出<sup>[14-16]</sup>。高效的热能存储与转换技术成为了提高能源利用效率、保障能源稳定供应的核心要素。

镓(Ga)基液态金属(LM)恰在此时崭露头角, 其在相变过程中表现出的独特性质, 如高导热性、较大的相变潜热等, 吸引了众多研究者的目光, 成为材料科学领域的焦点<sup>[17-20]</sup>。深入探究 Ga 基 LM 的相变机制及其多元应用, 能够打破现有技术瓶颈, 为材料科学的理论体系注入新活力, 推动能源技术实现跨越式进步, 革新电子工程的散热与储能架构。这不仅有助于解决当前电子设备和能源领域的紧迫问题, 更有望催生出全新的技术范式, 极大地满足社会各行业对高性能材料的急切渴望, 为人类科技发展开辟新的广阔前景。

## 1 镓基液态金属组成

LM 是指熔点低于或接近室温的金属或合金, 在熔融状态下通常表现为无定形固体, 其结构不具备传统的结晶形态。这些金属在液态时展现出与常规固体金属或其他液体物质截然不同的流动性与金属特性, 如高导电性、高热导率以及特殊的流变性质。常见的 LM 包括铷(Rb)、铯(Cs)、铟(In)、汞(Hg)、Ga 及其合金。然而, 金属 Rb、Cs 和 Fr 具有放射性和高化学活性, 这些特性使得它们在实际应用中存在较大的安全隐患。而 Hg 则因其易挥发性和高毒性, 限制了其在许多领域的广泛使用。相比之下, 作为一种低熔点金属, Ga 能够与多种金属(如铟(In)、锌(Zn)、镁(Mg)、

铝(Al)、锡(Sn)、镍(Ni)、金(Au)和铜(Cu)等)形成各种类型的 Ga 基合金, 通过与不同的金属调配, 可以改善 LM 的熔点、力学性能、导电性及热导率等。Ga 位于元素周期表中第 IV 周期第 III 主族, 原子序数为 31 (图 1(a)), 熔点为 29.8℃。Ga 及其合金由于较低的毒性、良好的流动性(图 1(b))和良好的物理化学稳定性, 已成为 LM 研究和应用中的重要选择。常见的 Ga 基 LM 包括共晶镓铟合金(EGaIn, 按质量比为 75% Ga 和 25% In)以及镓铟锡合金(EGaInSn, 按质量比为 68.5% Ga、21.5% In 和 10% Sn), 其中 EGaIn 和 EGaInSn 的名义熔点分别为 15℃ 和 -19℃, 尽管其实际熔点受加工工艺和成分配比的影响而有所变化<sup>[21-24]</sup>。



a, b, and c represent the lengths of the unit cell along the x, y, and z axes

图 1 (a) 元素 Ga 在元素周期表中的序号和相关物理化学参量信息; (b) 液态 Ga 的照片; (c) 液态 Ga 内部键合模型示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 1 (a) The sequence number of element Ga in the periodic table and the related physical and chemical parameter information; (b) Photo of liquid Ga; (c) Schematic diagram of liquid Ga internal bonding model<sup>[13]</sup>

从微观层面来看, Ga 基液态合金的内部结构可视为由长程无序的自由电子和正离子组成的体系(图 1(c))。在这些液态合金的表面, 原子排列结构类似于固态材料。在固-液相变过程中, 由于原子间的键能变化较小, 这些合金表现出较为稳

定的结构特性。因此，Ga基合金的饱和蒸气压极低。从宏观层面来看，尽管Ga基液态合金在室温下呈非晶态结构，其原子的振动能量和频率明显高于固态材料。液态合金中的声子与自由电子之间的相互作用，维持了其较高的热导率。例如，Ga在32℃时的热导率为29.3 W/(m·K)，EGaIn在37℃时的热导率为26.4 W/(m·K)，EGaInSn在37℃时的热导率为25.4 W/(m·K)。此外，液态合金中丰富的自由电子不仅有助于热能的传导，还确保了其优异的导电性能。因此，Ga基液态合金因其特殊的物理特性，在许多领域，特别是相变储能、能源转换和先进制造等方面，具有广泛的应用潜力<sup>[25-28]</sup>。

## 2 镓基液态金属的相变过程

### 2.1 热力学与动力学基础

从热力学角度来看，Ga基LM的相变遵循吉布斯自由能( $G$ )变化规律，在相变过程中，当体系的 $G$ 降低时，相变自发进行。根据公式 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ (其中 $H$ 为焓， $T$ 为热力学温度， $S$ 为熵)，在恒温恒压下，相变的驱动力主要源于焓变和熵变的综合作用。对于Ga的熔化过程，当温度升高到熔点时，体系吸收热量，焓值增加，同时熵值也增大，导致吉布斯自由能降低，从而发生从固态到液态的转变。

在动力学方面，相变过程涉及原子的扩散和重排。以晶体生长为例，在过冷的Ga基LM中，首先会形成微小的晶核，这一过程需要克服一定的能量势垒，即形成能。晶核形成后，原子会不断向晶核表面扩散并沉积，使晶核逐渐长大。晶核生长速率与过冷度密切相关，过冷度越大，原子扩散驱动力越大，晶核生长速率通常也会加快，但当过冷度超过一定限度时，可能会因原子扩散困难等因素导致生长速率下降。

武汉理工大学任龙团队<sup>[29]</sup>采用实验与分子动力学模拟相结合的方法，系统揭示了Ga基合金在固液相变过程中的热力学行为。研究发现，Ga基LM在熔点附近表现出约 $3R$ 的摩尔热容( $R$ 为气体常数)，显著高于传统金属汞(27.92 J/(mol·K)在300 K下)。研究显示，320 K时液态Ga的摩尔热容达27.78 J/(mol·K)，其温度依赖性呈现明显的非线性特征。该团队通过原位同步辐射XRD技术，首次观测到三元Ga基合金在过冷条件下的分级形核机制：其他合金核优先形成，随后诱导Ga

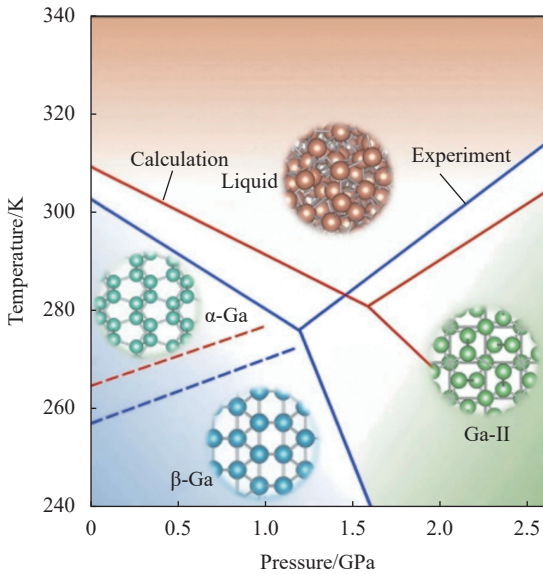
原子定向排列。这一发现突破了传统形核理论的局限性，为高性能储热材料设计提供了新范式。尽管已有研究对Ga基LM的热力学性质进行了深入探讨，但对其在极端条件(如高压、高温)下的热力学行为研究仍显不足，特别是在高压条件下的相变行为和热容变化方面。

### 2.2 镓基液态金属相变过程的影响因素

金属Ga因其独特的物理性质和多样的相态表现，成为材料科学中的一个重要研究对象。Ga的结构复杂，能够以多种相态存在，尤其在常压和高压环境下表现出不同的稳定性和相变特性。如图2所示，常压下，Ga通常以 $\alpha$ -Ga稳定，其结构为正交晶系，其中每个原子与7个相邻原子配位，形成了高度各向异性的原子环境。通过第一性原理的理论研究，发现 $\alpha$ -Ga呈现金属分子晶体的特性，具有强的 $\text{Ga}_2$ 共价键和较弱的分子间作用力。熔化时，Ga仅需克服 $\text{Ga}_2$ 之间的分子间作用力，而沸腾则需要破坏其强共价键，这使得Ga基LM具有低熔点和高沸点。此外，Ga在不同相态间的转换极为复杂， $\beta$ -Ga为单斜晶系，呈方形排列的原子形成平行层。研究发现， $\beta$ -Ga和 $\alpha$ -Ga之间的相变会导致显著的过冷度现象。

合金元素的添加对相变过程也有显著影响。例如，在Ga中加入In元素形成Ga-In合金，会改变合金的熔点和结晶行为。In的加入降低了合金的熔点，使其在更低的温度下即可发生熔化相变。同时，由于In原子与Ga原子半径和化学性质的差异，会影响原子的扩散速率和晶体结构，导致结晶过程中的形核和生长机制发生改变，可能会细化晶粒，提高合金的力学性能和热稳定性。

杂质的存在同样会影响相变过程。微量杂质可能作为异质形核核心，增加形核率，降低过冷度，促进凝固相变的发生。但某些杂质也可能在晶界处偏聚，影响晶体的生长方向和完整性，对合金的性能产生不利影响<sup>[16]</sup>。中南大学杨昭团队<sup>[30]</sup>研究发现，氧化后的Ga基LM呈现出非牛顿假塑性流体特征，黏度随剪切速率的增加而减小，最终趋于稳定值7.27 mPa·s左右，这表明氧化层的存在显著影响了LM的流变行为。当前，学界对于Ga基LM的研究，主要聚焦于氧化层对流变特性的影响。然而，氧化层在LM相变过程中的具体作用机制，尚有待深入探究。此外，杂质对LM相变行为影响机制的研究相对匮乏，尤其缺乏系统性和深入性的分析，这为后续研究提出了

图2 不同温度下 Ga 的固-液平衡相图<sup>[16]</sup>Fig. 2 Solid-liquid equilibrium phase diagram of Ga at different temperatures<sup>[16]</sup>

明确的方向。

### 2.3 镓基液态金属相变过程中的微观结构演变

在熔化过程中, Ga 基 LM 的微观结构从有序的晶体结构逐渐转变为无序的液态结构。原子间的键合方式发生改变, 金属键的方向性减弱, 原子的排列变得更加混乱。以 Ga 晶体为例, 其具有复杂的晶体结构, 在熔化时, 晶格结构瓦解, 原子获得更大的自由度, 能够在液态中自由移动<sup>[31-34]</sup>。

凝固过程则相反, 原子在过冷条件下开始聚集形成晶核, 晶核逐渐生长并相互连接, 形成晶体结构。在这个过程中, 晶体的生长方向和形态受到多种因素影响, 如温度梯度、溶质分布等。在定向凝固条件下, 晶体可能会沿着温度梯度方向生长, 形成柱状晶结构; 而在快速凝固过程中, 由于冷却速率极快, 可能会形成细小的等轴晶结构, 这种微观结构的差异会显著影响材料的性能, 如等轴晶结构通常具有更好的力学性能和均匀性<sup>[35-38]</sup>。尽管既有研究已围绕 Ga 基 LM 微观结构演变开展了深入探讨, 但在极端工况, 即高压、高温条件下, Ga 基 LM 微观结构变化方面的研究, 仍存在较大空白。这一缺失限制了对其特殊条件下性能和行为的全面理解。与此同时, 针对 LM 相变过程动态结构变化的实时观测技术, 尚存在精度、适应性等方面的不足, 亟待进一步提升与完善。这些关键技术与研究方向的缺失, 为未来 Ga 基 LM 领域的研究提出了明确的探索方向。

## 3 镓基液态金属相变特性在热管理中的应用原理

### 3.1 高导热性与热传导效率提升

Ga 基 LM 的热导率显著高于传统导热材料。例如, Ga 的热导率高达  $33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 远高于传统硅脂的  $0.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。这种高导热性主要源于其金属键结构中自由电子的高效热传导机制。当 Ga 基 LM 与发热源接触时, 热量能够通过自由电子的集体运动迅速传递到 LM 内部, 并在短时间内完成长距离传输。

在电子芯片散热领域, Ga 基 LM 作为散热界面材料, 能够显著降低接触热阻。与传统导热硅脂相比, Ga 基 LM 可将界面热阻降低约 18.4%, 从而有效降低芯片的核心温度。例如, 在高功率芯片散华中, 使用 Ga 基 LM 作为热界面材料 (TIM), 相比传统硅脂, 导热效率可提高 3~5 倍。这种高效的热传导能力对于提升芯片的运行频率和延长使用寿命具有重要意义。

### 3.2 相变潜热与热量缓冲

Ga 基 LM 的相变潜热特性使其在热管理中具有显著优势。相变材料在吸收或释放大量的潜热时, 能够有效缓冲温度变化, 从而实现稳定的温度控制。例如, Ga 基合金的相变潜热可达  $80 \text{ kJ}/\text{kg}$  左右, 是同质量材料温度变化  $10^\circ\text{C}$  所吸收显热的 20 倍以上。在功率电子设备中, 负载的剧烈波动常常导致温度快速变化。采用 Ga 基 LM 相变材料后, 当设备温度升高至相变点时, 材料开始熔化并吸收大量热量, 有效抑制温升速率<sup>[39-44]</sup>。

实验表明, 在绝缘栅双极型晶体管功率模块中集成 Ga 基 LM 相变层后, 瞬态工况下的温度波动幅度可减少 40% 以上。这种温度稳定作用对于延长功率器件的疲劳寿命尤为重要, 原因为温度循环是导致焊点失效的主要原因之一。此外, 在电动汽车电池管理系统中, Ga 基 LM 的应用也具有重要价值。通过在电池模组中布置含有 Ga 基 LM 的相变材料单元, 可以有效平抑充放电过程中的产热波动<sup>[45-49]</sup>。

### 3.3 流动性与均匀散热

Ga 基 LM 的流动性使其在复杂散热系统中具有独特优势。与传统的单相流体相比, Ga 基 LM 具有更低的工作压降和更高的热运输能力。其普朗特数 (Pr) 通常小于 0.1, 这意味着热量传递主要依靠导热而非对流, 从而可以获得更加均匀的温

度分布<sup>[50-52]</sup>。

在大型数据中心的散热应用中，Ga基LM冷却系统展现出革命性的潜力。传统的水冷系统需要高达 $3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$  Pa的驱动压力，而Ga基LM在相同热负荷下仅需 $0.5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^5$  Pa的压力即可实现循环。此外，Ga基LM的沸点远高于水，完全避免了相变沸腾带来的局部热点问题。上海超算中心的实测数据显示，采用Ga基LM浸没式冷却后，中央处理器(CPU)温度差异从原来的 $15^\circ\text{C}$ 降至 $3^\circ\text{C}$ 以内，同时冷却能耗降低70%<sup>[53-55]</sup>。

### 3.4 液态金属液-固界面传热

Ga基LM的表面张力特性，对其与固体间的界面传热性能影响显著。东南大学谢一兵团队<sup>[56]</sup>研究表明，Ga基LM表面张力约680~720 mN/m，因内部原子间强相互作用，呈现显著表面收缩现象。

高表面张力致使LM在固体表面润湿性欠佳，接触角大，液滴难以扩展，形成球状或近似球状形态，大幅减少液固界面实际接触面积。依据热传导原理，接触面积减少使界面传热系数降低，相较完全润湿状态，实际传热效率可降低30%~50%<sup>[57]</sup>。同时，表面张力限制LM在固体表面充分铺展，液固界面形成微小空气间隙。空气热导率远低于金属，切断部分热传导通道，使界面热阻增加1~2个数量级。

高温下，LM与氧气反应生成致密氧化物薄膜，其热导率仅为基体金属的1%~5%，大幅增加热传导阻碍。并且，不同材料热膨胀系数的差异，会在高温循环时加剧界面热阻。LM与固体微观结构存在差异，二者晶体结构和表面粗糙度不同，导致热载流子在界面散射、反射。晶格失配程度增加时，界面热流密度显著降低。

综上，Ga基LM的高表面张力，通过液滴形态收缩、微观空气间隙、表面氧化层、微观结构差异等机制，显著降低其与固体间的界面传热性能，对相关工程系统的性能产生重要影响。

## 4 镓基液态金属在热管理领域的应用

### 4.1 热界面材料

图3展示了TIM性能测量系统。在电子设备散热领域，Ga基LM作为TIM具有突出优势。由于其具有较高的热导率(通常在 $20 \sim 30 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以上，远高于传统的有机TIM)，能够高效地将芯片等发热源产生的热量传递出去。在CPU散热应用

中，将Ga基LM涂覆在芯片与散热器之间，能够显著降低热阻，提高散热效率，有效防止芯片因过热而性能下降或损坏<sup>[58]</sup>。

在一些高性能计算服务器中，处理器的功率密度不断增加，传统的散热材料难以满足散热需求。Ga基LM的TIM能够适应复杂的芯片表面形貌，填充微小缝隙，形成良好的热传导通道，确保热量及时散发，维持服务器的稳定运行，提高其可靠性和使用寿命。

### 4.2 相变储能材料

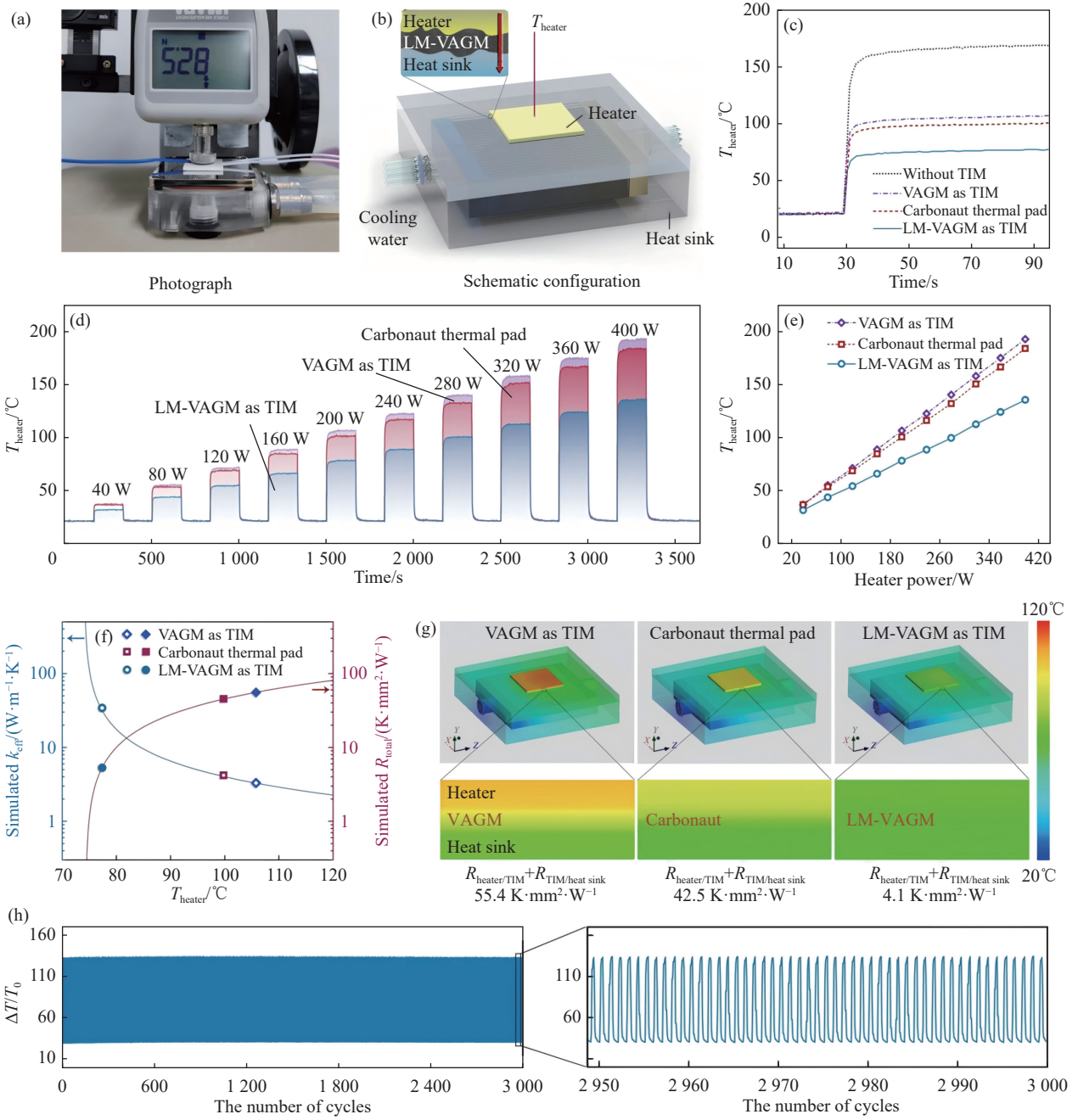
图4展示了液态金属微滴(LMMs)在冷却条件下的形状转变，在太阳能热利用方面，Ga基LM可作为相变储能材料存储太阳能热量。在白天阳光充足时，Ga基LM吸收热量发生相变，将太阳能转化为潜热储存起来；在夜间或阴天等无阳光时段，LM凝固释放热量，可用于供暖、热水供应等。其较大的相变潜热(例如某些Ga基合金的相变潜热可达 $100 \sim 200 \text{ J/g}$ )使其能够储存大量的热量，提高太阳能利用的稳定性和连续性<sup>[59]</sup>。

在工业余热回收系统中，Ga基LM也有应用潜力。工业生产过程中产生的大量余热通常以中高温形式存在，Ga基LM能够在相应温度范围内发生相变，有效回收余热并储存起来，实现能源的二次利用，降低工业生产的能耗，提高能源利用效率，减少对环境的污染。

## 5 镓基液态金属的改性策略

### 5.1 合金化改性

通过添加其他金属元素形成合金是改善Ga基LM性能的常用方法。例如，在Ga中加入少量的Zn元素，可以提高合金的强度和硬度，同时对其熔点和热导率等性能进行微调。在一些需要承受一定机械应力的热管理应用中，这种改性后的Ga基合金能够更好地保持结构完整性，防止在使用过程中发生变形或损坏。添加Sn元素可以进一步降低Ga基LM的熔点，拓宽其应用温度范围。对于一些需要在较低温度下工作的电子设备或需要利用低温热源的热能存储系统，低熔点的Ga-Sn合金能够更好地满足需求，提高系统的能效和可靠性。例如，如图5所示，武汉大学付磊团队<sup>[60]</sup>以“混合焯”为切入点，降低反应吉布斯自由能变，采用兼具负混合焯特性和流动性的LM，实现了温和条件下各类高熵合金(HEA)体系的原子制造。LM(如Ga)与大多数金属间亲和性



$R_{\text{heater}/\text{TIM}}$ —Thermal boundary resistance generated when the TIM is in contact with the heater;  $R_{\text{TIM}/\text{heat sink}}$ —Thermal boundary resistance generated when the TIM is in contact with the heat sink;  $\Delta T/T_0$ —Rate of temperature change

图3 热界面材料(TIM)性能测量系统的实验设置(a)和原理图配置(b);(c)在施加功率为200W时,热源温度( $T_{\text{heater}}$ )的变化与加热时间的关系;((d),(e))热源稳态温度与施加功率的关系;(f)应用TIM的模拟有效热导率( $\kappa_{\text{eff}}$ )和总热阻( $R_{\text{total}}$ )作为热源温度的函数;(g)垂直排列的石墨烯单体(VAGM)、Carbonaut热垫和LM-VAGM作为TIM的模拟温度证明;(h)循环加热/冷却试验中以液态金属(LM)-VAGM作为冷却系统TIM的热循环稳定性<sup>[58]</sup>

Fig. 3 Experimental setup (a) and the schematic configuration (b) of the thermal interface materials (TIM) performance measurement system; (c) Heater temperature ( $T_{\text{heater}}$ ) evolution as a function of heating time at an applied power of 200 W; ((d), (e)) The steady-state  $T_{\text{heater}}$  versus the applied power; (f) Simulated effective thermal conductivity ( $\kappa_{\text{eff}}$ ) and total thermal resistance ( $R_{\text{total}}$ ) of the applied TIM as a function of  $T_{\text{heater}}$ ; (g) Simulated temperature profiles for cases with vertically aligned graphene monoliths (VAGM), Carbonaut thermal pad and liquid metal-modified VAGM (LM-VAGM) as TIMs; (h) Thermal cycling stability of the cooling system with LM-VAGM as TIM in cyclic heating/cooling tests<sup>[58]</sup>

好,混合焓为负值;且流动性良好,可加速传质,促进元素的均匀分散和合金化反应的进行。由此,

在LM反应体系中,可在温和条件下实现HEA的多组元原子混溶,极大拓展了HEA的组分选择

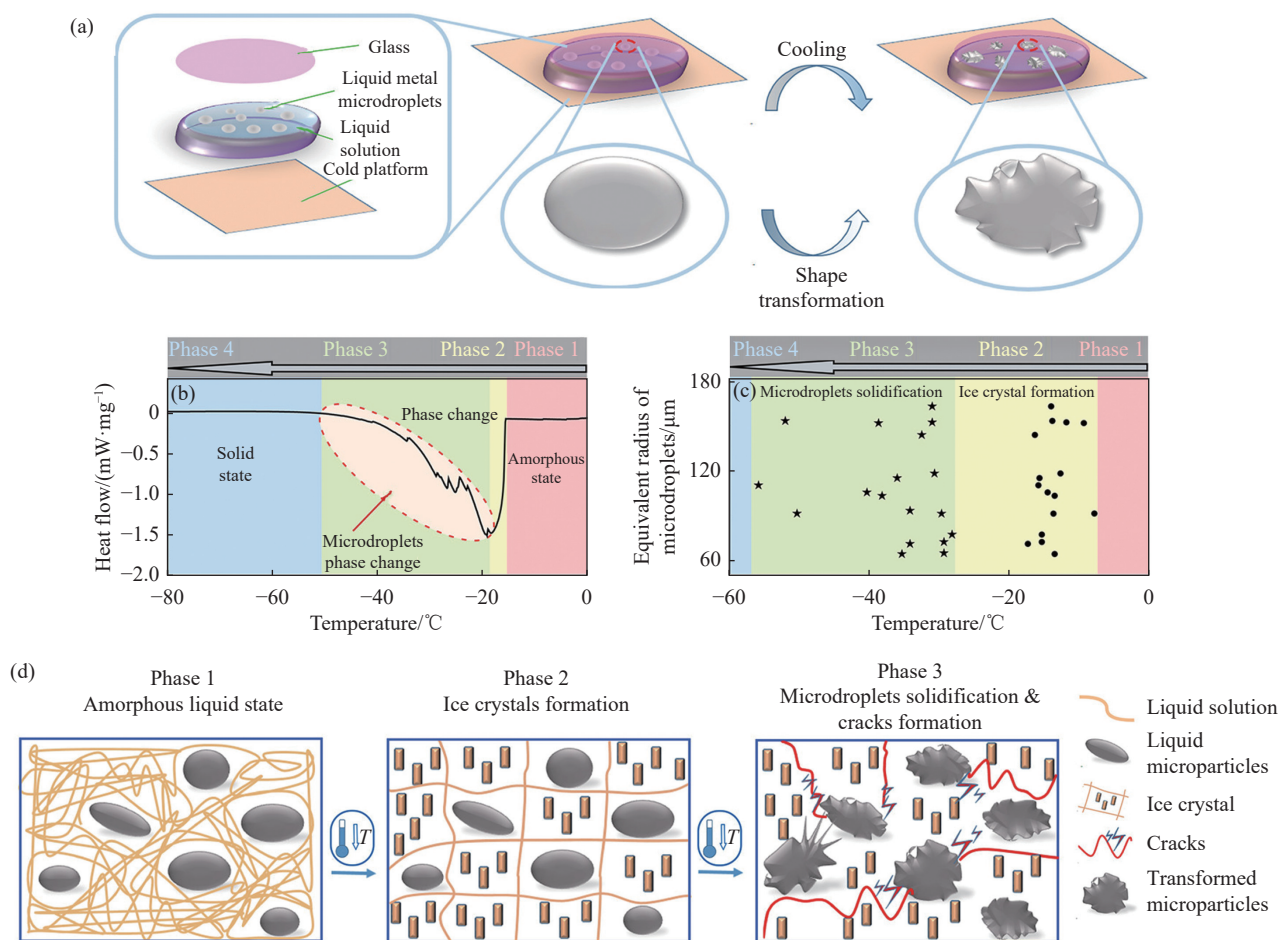


图4 液态金属微滴(LMMs)在冷却条件下的形状转变: (a) 实验装置示意图以及低温刺激下 LMMs 的形状转变; (b) LMMs 和水溶液组成的双流体系统的 DSC 测试; (c) 去离子水(DI水)的 LMMs 等效半径与相应的相变温度以及 LMMs 的形状变化温度之间的关系(实心圆代表冰晶形成, 实心五角星代表 LMM 的形状变化); (d) 双流体系统相变示意图。在低温刺激下, 系统的相分为 3 个: 阶段 1 代表两种流体的无定形液态; 阶段 2 代表冰晶形成状态; 阶段 3 代表 LMMs 的相变状态(DSC 和低温台的冷却过程在 10 °C/min 的冷却速度下进行)<sup>[59]</sup>

Fig. 4 Shape transformation of liquid metal microdroplets (LMMs) under cooling: (a) Schematic illustrations of the experimental setup as well as the shape transformation of LMMs upon low-temperature stimulus; (b) DSC test of the dual fluid system composed of LMMs and aqueous solution; (c) Relationship between the equivalent radius of LMMs and the corresponding phase change temperature for deionized water (DI water) and shape change temperature of LMMs (The solid circles represent the ice crystals formation, while the solid five-pointed stars represent the shape change of LMMs); (d) Schematic illustrations of the phase change for the dual fluid system. The phases of the system are divided into three under low-temperature stimulus: Phase 1 represents the amorphous liquid state of the two fluids; Phase 2 represents the state of ice crystals formation; Phase 3 represents the phase change state of LMMs (The cooling procedure of DSC and cryostage was performed under the cooling speed of 10 °C/min)<sup>[59]</sup>

空间。

合金化改性能显著提升 LM 的强度、硬度和耐腐蚀性, 还可精确调节其熔点、黏度等物理性质, 以满足不同场景的需求。然而, 合金化过程可能导致相分离、偏析等问题, 影响材料的均匀性和稳定性。此外, 合金成分的复杂控制和精确调配难度较大, 增加了生产工艺的复杂性和成本。在产业化方面, 合金化改性对生产设备和工艺控制要求极高, 且部分添加元素价格昂贵, 限制了大规模应用。

## 5.2 复合改性

将 Ga 基 LM 与高导热材料如石墨烯、碳纳米管等复合, 可以显著提高其热导率。石墨烯具有极高的热导率(理论值可达 5 000 W/(m·K) 以上), 将其与 Ga 基 LM 复合后, 能够形成高效的热传导通道, 增强材料的散热能力。在电子设备散热片的制备中, 将 Ga 基 LM 与石墨烯复合后涂覆在散热片表面, 能够大幅提高散热片的散热效率, 降低设备的工作温度。例如, 如图 6 所示, 华南理工大学钟林新团队<sup>[61]</sup>受生物结构中韧带功能的启

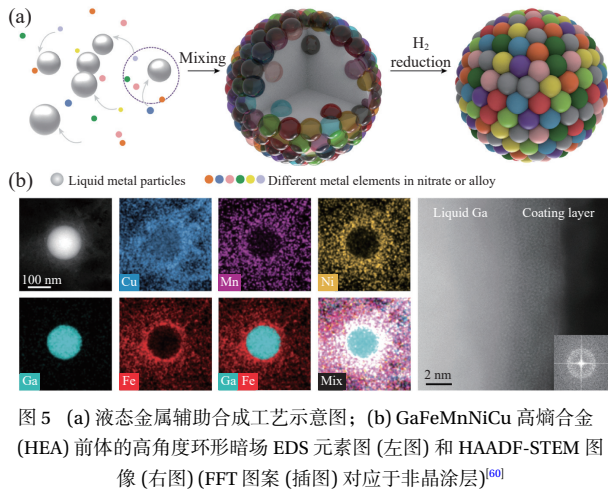


图5 (a) 液态金属辅助合成工艺示意图; (b) GaFeMnNiCu 高熵合金 (HEA) 前体的高角度环形暗场 EDS 元素图 (左图) 和 HAADF-STEM 图像 (右图) (FFT 图案 (插图) 对应于非晶涂层)<sup>[60]</sup>

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the liquid metal-assisted synthesis process; (b) High-angle annular dark-field EDS elemental maps (left panels) and HAADF-STEM image (right panel) for the GaFeMnNiCu high-entropy alloys (HEA) precursor (The FFT pattern (inset) corresponded to the amorphous coating layer)<sup>[60]</sup>

发, 引入氧化石墨烯 (GO) 纳米片来封装 LM 液滴 (LMGO)。GO 纳米片、LM 和聚合物基质之间形成的强相互作用可以形成一个稳定的外壳, 防止 LM 液滴破裂而渗出到聚合物网络中。该柔性 LM@GO 核壳微结构的设计克服了相分离难题, 从而获得了坚韧的水凝胶材料 (P-LMGO), 在 1 240% 的伸长率下其应力可高达 303 kPa。该水凝胶还表现出对缺口不敏感性以及对各种表面的强附着性。

与聚合物复合可以改善 Ga 基 LM 的加工性能和力学性能。例如, 将 Ga 基 LM 与聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 复合, 能够制备出具有一定柔韧性和可加工性的复合材料。这种复合材料在柔性电子领域具有重要应用, 可用于制备可弯曲、可拉伸的电子器件, 同时保持良好的热管理性能, 满足柔性设备对材料的多功能需求。例如, 如图 7 所示, 青岛大学夏延致团队<sup>[62]</sup>通过简单的超声工艺, 在 LM 微纳液滴表面包覆了一层微凝胶壳, 即羧甲基化壳聚糖 (CMCS)。通过双官能团协同锚定策略。所制备的 LM 纳米分散液具有较高的化学稳定性 (> 7 d)。再通过定向冷冻干燥的方法制备出具有 Janus 结构的气凝胶, 该气凝胶具有能量收集和选择性方向识别功能。

复合改性将 LM 与其他材料 (如聚合物、陶瓷、纳米颗粒等) 复合, 实现各组分性能的优势互补, 制备出具有多功能特性的复合材料。但该方法存在界面结合不良的问题, 导致复合材料性能不稳定, 影响实际使用效果。同时, 复合过程中不同

材料的分散均匀性难以保证, 会降低材料性能的一致性。从产业化角度看, 复合体系的设计和制备工艺复杂, 需要精确控制各组分比例和分散状态, 且大规模制备时难以保证产品质量的稳定性, 增加了生产成本和质量控制难度。

### 5.3 表面改性

采用表面涂层技术, 在 Ga 基 LM 表面涂覆一层保护膜, 如 SiO<sub>2</sub>、氮化硼 (BN) 等, 可以有效防止其与周围材料发生化学反应, 提高其化学稳定性和抗腐蚀能力。在与金属容器接触的应用场景中, 表面涂层能够阻止 Ga 基 LM 对容器的腐蚀, 延长材料的使用寿命, 确保系统的安全稳定运行。例如, 如图 8 所示, 四川大学吴凯团队<sup>[63]</sup>采用机械化学方法, 将氮化铝 (AlN) 颗粒嵌入 LM。在不对称机械力作用下, LM 渗透进 AlN 晶格, 形成具有梯度扩散特性的液固界面。该梯度结构促进了热传导, 其表面 LM 外层起到润滑作用, 确保了优异触变性。电子能量损失谱 (EELS) 显示, 金属与 N 原子形成非共价键, 提升了导热性能。

对 Ga 基 LM 表面进行功能化修饰, 如引入亲水性或疏水性基团, 可以改变其表面性质, 使其在特定的应用中具有更好的性能。在微流控芯片应用中, 通过表面功能化修饰使 Ga 基 LM 能够更好地在微通道中流动和控制, 提高芯片的性能和可靠性, 拓展其在生物检测、化学分析等领域的应用。然而, 表面改性层的稳定性和耐久性较差, 在复杂环境下容易失效。此外, 表面改性工艺通常较为复杂, 对设备和技术要求高, 导致生产成本增加。在产业化过程中, 表面改性技术的规模化实施面临挑战, 难以实现高效、低成本的表面处理, 限制了其在大规模生产中的应用。

综上所述, LM 的合金化改性、复合改性和表面改性在提升材料性能方面各有优势, 但也存在诸多劣势。在产业化进程中, 这些劣势转化为技术、成本和质量控制等方面的瓶颈, 阻碍了 LM 的广泛应用。未来, 需加强基础研究, 深入理解改性机制, 开发更加高效、稳定且低成本的改性技术, 突破产业化瓶颈, 推动 LM 在更多领域实现大规模应用。

## 6 镓基液态金属的优势和挑战

### 6.1 优势

Ga 基 LM 的热导率较高, 如前所述, 其热导率通常比传统的有机相变材料高出数十倍甚至上

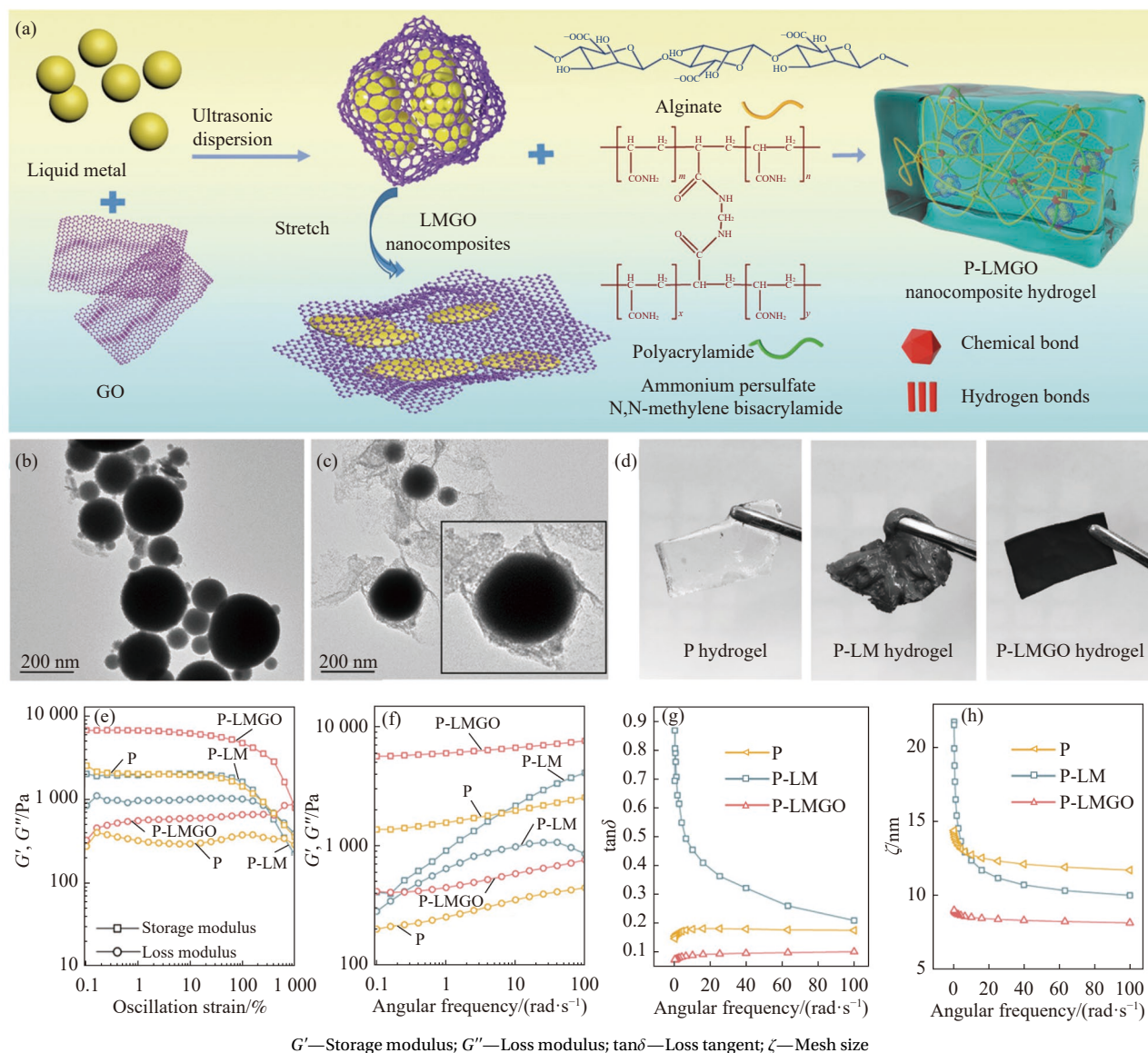


图6 GO封装LM的复合填料引入聚丙烯酰胺/海藻酸钠(PAM/SA)(P-LMGO)的复合水凝胶的制备和流变性能: (a)用LMGO纳米复合填料制备P-LMGO水凝胶的示意图; 液态金属纳米颗粒(b)和LMGO纳米复合材料(c)的TEM图像; (d)P、P-LM和P-LMGO水凝胶的数码照片; 振荡流变测量结果包括应变扫描(e)、频率扫描(f)、 $\tan\delta$ (g); (h)P、P-LM和P-LMGO水凝胶的基质孔径<sup>[61]</sup>

Fig. 6 Preparation and rheological properties of composite hydrogels via introduction of polyacrylamide/sodium alginate (PAM/SA) into GO-encapsulated LM (P-LMGO): (a) Illustration of the fabrication of P-LMGO hydrogel with LMGO nanocomposite fillers; TEM images of liquid metal nanoparticles (b) and LMGO nanocomposites (c); (d) Digital photos of P, P-LM, and P-LMGO hydrogels; Oscillation rheology measurement results include strain sweeps (e), frequency sweeps (f),  $\tan\delta$  (g); (h) Matrix pore sizes of P, P-LM, and P-LMGO hydrogels<sup>[61]</sup>

百倍, 这使得它在热管理和热能存储应用中能够快速传递热量, 有效提高热传递效率, 减少热量积累和温度梯度, 确保系统的高效运行和稳定性。

其相变潜热相对较大, 在相变过程中能够吸收或释放大量的热量, 单位体积的储能能力较强, 在有限的空间内可以存储更多的能量, 对于提高能源存储密度和系统的能量利用效率具有重要意义, 适用于对能量存储密度要求较高的场合, 如小型化的储能设备和紧凑的热管理系统。

Ga基LM具有良好的流动性, 在微通道、多孔介质等复杂结构中能够顺利流动和填充, 能够适应不同形状和尺寸的容器或散热结构, 确保与热源或储能介质充分接触, 实现高效的热交换或能量存储, 为其在微机电系统、小型化电子设备等领域的应用提供了便利。

在一定条件下, Ga基LM具有较好的化学稳定性, 不易与一些常见的材料发生化学反应, 能够在多种环境中保持其性能稳定, 减少材料的损

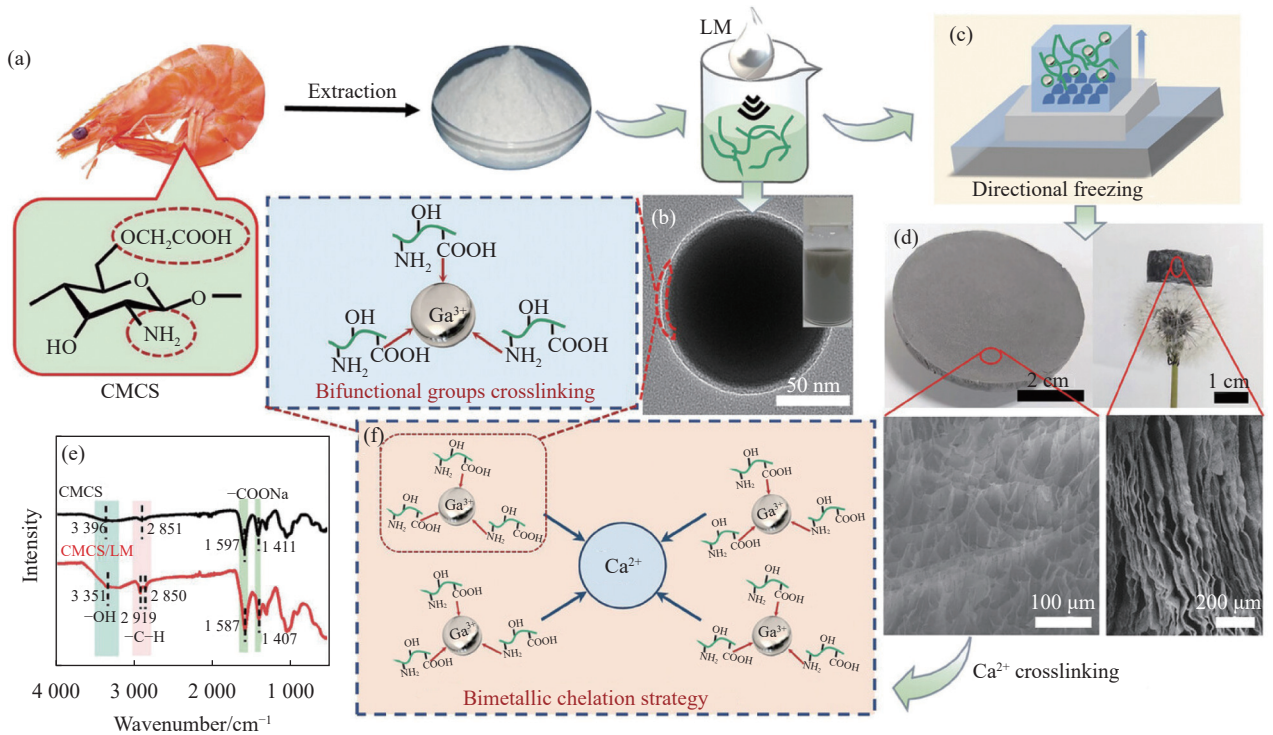


图7 LM气凝胶的制备和机制说明: (a) 羧甲基壳聚糖(CMCS)溶液中LM微纳米液滴的制备过程示意图; (b) 带壳的LM液滴的TEM图像和形成机制; (c) 通过定向冷冻制备LM气凝胶; (d) LM气凝胶的光学和SEM图像; (e) CMCS和LM气凝胶的FTIR光谱; (f) 双金属螯合策略的示意图<sup>[62]</sup>

Fig. 7 Fabrication of LM aerogel and mechanism illustration: (a) Schematic illustration of fabrication process of LM micro-nano droplets in carboxymethyl chitosan (CMCS) solution; (b) TEM image of the LM droplet with shell and formation mechanism; (c) Fabrication of LM aerogel by directional freezing; (d) Optical and SEM images of LM aerogel; (e) FTIR spectra of CMCS and LM aerogel;

(f) Schematic demonstration of bimetallic chelation strategy<sup>[62]</sup>

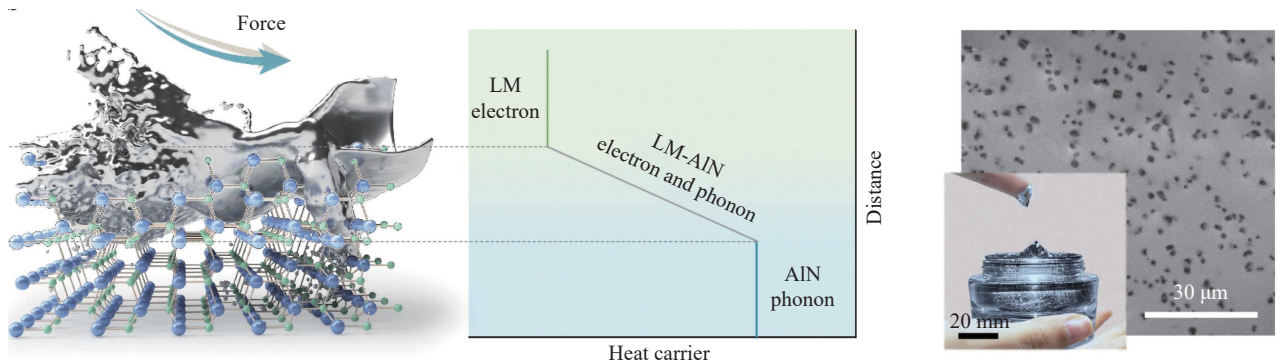


图8 异质AIN-LM界面时的机械化学效应,形成LMs向AIN晶格中的梯度扩散。这种设计促进了AIN-LM异质界面处的液固相互作用,促进了有效的界面热传输<sup>[63]</sup>

Fig. 8 Illustration depicting the mechanochemical effect in designing heterogeneous AIN-LM interfaces, forming a gradient diffusion of LMs into the crystal lattice of AIN. This design facilitates liquid-solid interaction at the AIN-LM heterointerface, promoting efficient interface thermal transport<sup>[63]</sup>

耗和性能退化, 延长材料的使用寿命, 降低维护成本, 有利于在长期使用和复杂化学环境的应用场景中应用。

## 6.2 挑战

Ga基LM在与某些金属材料接触时, 可能会发生腐蚀现象。例如, 与Al、Cu等金属接触时, 可能会形成金属间化合物或导致金属表面的腐蚀

坑, 降低材料的结构强度和性能。这限制了其在一些对材料兼容性要求较高的领域中的应用, 需要采取特殊的防护措施或寻找合适的兼容材料来解决腐蚀问题。

许多Ga基LM存在过冷现象, 即在熔点以下仍保持液态而不发生凝固, 这会影响其相变的精确控制和应用效果。过冷度的大小受多种因素影

响,且难以准确预测和控制,可能导致相变过程的延迟或不稳定,在需要精确控制温度和热量释放的应用中,如精密电子设备的热管理和热能存储系统的充放电过程中,会带来一定的困难。

Ga 的价格相对较高,且资源储量有限,这在一定程度上限制了 Ga 基 LM 的大规模应用。在成本敏感的工业生产和民用领域,如大规模的太阳能热储能系统和普通电子设备散热,较高的成本可能使企业或消费者望而却步,需要探索降低成本的方法,如优化制备工艺、寻找替代材料或提高材料的回收利用率等。

## 7 结论与展望

镓(Ga)基液态金属(LM)在相变过程研究和应用方面取得了显著进展。在组成方面,通过合理调配合金元素,实现了对其物理化学性质的有效调控;相变过程的研究深入揭示了其热力学和动力学机制,以及微观结构演变规律;在应用领域,从热管理到能量存储,从柔性电子到生物医学等多个领域都展现出了巨大的应用潜力;在改性策略上,合金化、复合和表面改性等方法为克服其固有缺陷、拓展应用范围提供了有效途径。

然而,仍有许多问题亟待解决。在基础研究方面,需要进一步深入探究相变过程中的微观机制,尤其是原子尺度的结构变化和动力学过程,以更加精确地掌握其性能变化规律;在应用技术方面,要不断优化改性策略,提高材料的综合性能,降低成本,解决腐蚀和过冷等关键问题;在新应用拓展方面,应积极探索其在新兴领域如量子计算、智能材料系统等的应用可能性,充分发挥其独特性能优势。

未来,随着研究的不断深入和技术的持续创新,Ga 基 LM 有望在更多领域实现大规模应用,为解决能源、电子、医疗等领域的关键问题提供重要支撑,推动相关产业的升级和发展,在材料科学和工程领域发挥更加重要的作用,成为引领未来技术创新的关键材料之一。

## 参考文献:

[1] GUAN P, ZHU R, HU G Y, et al. Recent development of moisture-enabled-electric nanogenerators[J]. *Small*, 2022, 18(46): 2204603.

[2] CHENG L, FENG J C. Facile fabrication of stretchable and compressible strain sensors by coating and integrating low-cost melamine foam scaffolds with reduced graphene

oxide and poly(styrene-b-ethylene-butylene-b-styrene)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 398: 125429.

[3] ZHAO D W, ZHU Y, CHENG W K, et al. Cellulose-based flexible functional materials for emerging intelligent electronics[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(28): 2000619.

[4] LI Y H, ZHU Y F, JIANG G P, et al. Boosting the heat dissipation performance of graphene/polyimide flexible carbon film via enhanced through-plane conductivity of 3D hybridized structure[J]. *Small*, 2020, 16(8): 1903315.

[5] SUN Y, SU Y T, CHAI Z Y, et al. Flexible solid-liquid bi-continuous electrically and thermally conductive nanocomposite for electromagnetic interference shielding and heat dissipation[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 7290-7302.

[6] WANG Y F, ZHANG X B, LIU S, et al. Thermal-rectified gradient porous polymeric film for solar-thermal regulatory cooling[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(26): 2400102.

[7] HU P Y, WANG J, ZHANG P G, et al. Hyperelastic Kevlar nanofiber aerogels as robust thermal switches for smart thermal management[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(3): 2207638.

[8] LIU K K, ZHANG W Y, CHENG H, et al. A nature-inspired monolithic integrated cellulose aerogel-based evaporator for efficient solar desalination[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2021, 13(8): 10612-10622.

[9] YANG H C, HU Z K, WU S W, et al. Directional-thermal-conductive phase change composites enabling efficient and durable water-electricity Co-generation beyond daytime[J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 14(43): 2470191.

[10] GAO S, YANG Y X, FALCHEVSKAYA A S, et al. Phase transition liquid metal enabled emerging biomedical technologies and applications[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(37): 2306692.

[11] TAN J J, XU W L, DU S J, et al. Flexible and robust aramid/octadecane phase change materials from non-aqueous emulsion template towards efficient thermal storage and camouflage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500: 157240.

[12] LIANG C B, QIU H, HAN Y Y, et al. Superior electromagnetic interference shielding 3D graphene nanoplatelets/reduced graphene oxide foam/epoxy nanocomposites with high thermal conductivity[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(9): 2725-2733.

[13] VILLADA C, RAWSON A, VILLADA N N, et al. Copper-magnesium eutectic as phase change material for thermal storage applications: Thermophysical properties and compatibility[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 105069.

[14] YANG X H, TAN S C, LIU J. Numerical investigation of the

- phase change process of low melting point metal[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 100: 899-907.
- [15] SEN S, GANGULY S. Opportunities, barriers and issues with renewable energy development—A discussion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 1170-1181.
- [16] SALYAN S, SURESH S. Liquid metal gallium laden organic phase change material for energy storage: An experimental study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(4): 2469-2483.
- [17] KIM D, JEONG J, CHUNG S K, et al. Magnetic liquid metals: A review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(31): 2311153.
- [18] ZHANG Y Y, GUO Z Z, ZHU H R, et al. Synthesis of liquid gallium@reduced graphene oxide core-shell nanoparticles with enhanced photoacoustic and photothermal performance[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, 144(15): 6779-6790.
- [19] WEI Z C, ZHANG Y X, CAI C Y, et al. Wood lamella-inspired photothermal stearic acid-eutectic gallium-indium-based phase change aerogel for thermal management and infrared stealth[J]. *Small*, 2023, 19(46): 2302886.
- [20] WEI Z C, WANG Y B, CAI C Y, et al. Dual-network liquid metal hydrogel with integrated solar-driven evaporation, multi-sensory applications, and electricity generation via enhanced light absorption and Bénard-Marangoni effect[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(41): 2206287.
- [21] LIN Y L, LIU Y, GENZER J, et al. Shape-transformable liquid metal nanoparticles in aqueous solution[J]. *Chemical Science*, 2017, 8(5): 3832-3837.
- [22] ZHENG R M, PENG Z F, FU Y, et al. A novel conductive-core-shell particle based on liquid metal for fabricating real-time self-repairing flexible circuits[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(15): 1910524.
- [23] FU W C, YAN X, GURUMUKHI Y, et al. High power and energy density dynamic phase change materials using pressure-enhanced close contact melting[J]. *Nature Energy*, 2022, 7(3): 270-280.
- [24] DONG J C, TANG X W, PENG Y D, et al. Highly permeable and ultrastretchable E-textiles with EGaIn-superlyophilicity for on-skin health monitoring, Joule heating, and electromagnetic shielding[J]. *Nano Energy*, 2023, 108: 108194.
- [25] JUNG W, VONG M H, KWON K, et al. Giant decrease in interfacial energy of liquid metals by native oxides[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(48): 2406783.
- [26] DU S J, GUO H, XIE Z G, et al. Unveiling thermal properties and pump-out blocking in diamond/GaInSn composites as thermal interface materials[J]. *Rare Metals*, 2023, 42(12): 3969-3976.
- [27] UMAIR M M, ZHANG Y, ZHANG S, et al. A novel flexible phase change composite with electro-driven shape memory, energy conversion/storage and motion sensing properties[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(46): 26385-26392.
- [28] GE H S, LI H Y, ME S F, et al. Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 331-346.
- [29] 张春小, 崔丹丹, 杜轶, 等. 镓基液态金属的结构与物性[J]. *自然杂志*, 2023, 45(5): 340-354.  
ZHANG Chunxiao, CUI Dandan, DU Yi, et al. Structures and physical properties of gallium-based liquid metals[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2023, 45(5): 340-354(in Chinese).
- [30] 谭力筋, 杨昭, 李斌, 等. 镓基液态金属动态流变行为探究[J]. *稀有金属*, 2024, 48(9): 1255-1262.  
TAN Lijia, YANG Zhao, LI Bin, et al. Dynamic rheological behavior of gallium-based liquid metals[J]. *Rare Metals*, 2024, 48(9): 1255-1262(in Chinese).
- [31] BHAGWAT S, O'BRIEN C, HAMZA A, et al. An on-chip liquid metal plug generator[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(23): 2201469.
- [32] BO G, REN L, XU X, et al. Recent progress on liquid metals and their applications[J]. *Advances in Physics: X*, 2018, 3(1): 412-442.
- [33] CASTILLA L, CHIEN T C C, PANLHURST J R, et al. Modulating the reactivity of liquid Ga nanoparticle inks by modifying their surface chemistry[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, 144(4): 1993-2001.
- [34] DENG Y, JIANG Y, LIU J. Low-melting-point liquid metal convective heat transfer: A review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193: 117021.
- [35] GE H, LIU J. Phase change effect of low melting point metal for an automatic cooling of USB flash memory[J]. *Frontiers in Energy*, 2012, 6(3): 207-209.
- [36] WANG H S, STADLER F J, ZHOU X. Critical review on the physical properties of gallium-based liquid metals and selected pathways for their alteration[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(37): 20113-20142.
- [37] KONG W, WANG Z, WANG M, et al. Oxide-mediated formation of chemically stable tungsten-liquid metal mixtures for enhanced thermal interfaces[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(44): 1904309.
- [38] KUANG H, WU B, WANG J, et al. Enhanced interface heat transfer based on gallium-based liquid metal infiltrated into vertically aligned copper nanowire arrays[J]. *Applied*

- [Thermal Engineering](#), 2023, 233: 121119.
- [39] LEAR T R, HYUN S H, BOLEY J W, et al. Liquid metal particle popping: Macroscale to nanoscale[J]. [Extreme Mechanics Letters](#), 2017, 13: 126-134.
- [40] LIM T, KIM M, AKBARIAN A, et al. Conductive polymer enabled biostable liquid metal electrodes for bioelectronic applications[J]. [Advanced Healthcare Materials](#), 2022, 11(11): 2102382.
- [41] LU H, YANG J, ZHAO M, et al. Temperature-triggered liquid metal actuators for fluid manipulation by leveraging phase transition control[J]. [International Journal of Smart and Nano Materials](#), 2024, 15(4): 730-742.
- [42] QI X, LIU Y, YU L, et al. Versatile liquid metal/alginate composite fibers with enhanced flame retardancy and triboelectric performance for smart wearable textiles[J]. [Advanced Science](#), 2023, 10(29): 2303406.
- [43] REGAN M, TOSTMANN H, PERSHAN P, et al. X-ray study of the oxidation of liquid-gallium surfaces[J]. [Physical Review B](#), 1997, 55(16): 10786-10790.
- [44] SHISHKIN R A, ZEMLYNSKAYA A P, BEKETOV A R. High performance thermal grease with aluminum nitride filler and an installation for thermal conductivity investigation[J]. [Solid State Phenomena](#), 2018, 284: 48-53.
- [45] TANG J, YUAN B, WANG H, et al. Visualizing unleashed latent heat of liquid metal for soft intelligence[J]. [Frontiers in Energy](#), 2024, 18(5): 545-549.
- [46] WANG H, CHEN S, ZHU X, et al. Phase transition science and engineering of gallium-based liquid metal[J]. [Matter](#), 2022, 5(7): 2054-2085.
- [47] WANG H, XING W, CHEN S. Liquid metal composites with enhanced thermal conductivity and stability using molecular thermal linker[J]. [Advanced Materials](#), 2021, 33(43): 2103104.
- [48] WANG Q, YU Y, LIU J. Preparations, characteristics and applications of the functional liquid metal materials[J]. [Advanced Engineering Materials](#), 2018, 20(5): 1700781.
- [49] WANG Y, LU Z, RUAN X. First principles calculation of lattice thermal conductivity of metals considering phonon-phonon and phonon-electron scattering[J]. [Journal of Applied Physics](#), 2016, 119(22): 225109.
- [50] XING S, LIU Y. Functional micro-/nanostructured gallium-based liquid metal for biochemical sensing and imaging applications[J]. [Biosensors and Bioelectronics](#), 2024, 243: 115795.
- [51] XING Z, ZHANG G, GAO J, et al. Turing instability of liquid-solid metal systems[J]. [Advanced Materials](#), 2024, 36(7): 2309999.
- [52] XING Z, ZHANG G, YE J, et al. Liesegang phenomenon of liquid metals on Au film[J]. [Advanced Materials](#), 2023, 35(7): 2209392.
- [53] YANG X H, LIU J. Advances in liquid metal science and technology in chip cooling and thermal management[J]. [Advances in Heat Transfer](#), 2018, 50: 187-300.
- [54] YUAN R, CAO Y, ZHU X, et al. Liquid metal memory[J]. [Advanced Materials](#), 2024, 36(8): 2309182.
- [55] ZHU J, LI J, TONG Y, et al. Recent progress in multifunctional, reconfigurable, integrated liquid metal-based stretchable sensors and standalone systems[J]. [Progress in Materials Science](#), 2024, 142: 101228.
- [56] WANG Y R, XIE Y B. Interfacial interaction-induced superwettability of gallium-based liquid metals: A review[J]. [Journal of Materials Chemistry A](#), 2024, 12(13): 7396-7417.
- [57] WANG D W, WANG X H, RAO W. Precise regulation of Ga-based liquid metal oxidation[J]. [Accounts of Materials Research](#), 2021, 2(11): 1093-1103.
- [58] DAI W, REN X J, YAN Q W, et al. Ultralow interfacial thermal resistance of graphene thermal interface materials with surface metal liquefaction[J]. [Nano-Micro Letters](#), 2023, 15(1): 9.
- [59] SUN X Y, GUO R, YUAN B, et al. Low-temperature triggered shape transformation of liquid metal microdroplets[J]. [ACS Applied Materials & Interfaces](#), 2020, 12(34): 38386-38396.
- [60] CAO G H, LIANG J J, GUO Z L, et al. Liquid metal for high-entropy alloy nanoparticles synthesis[J]. [Nature](#), 2023, 619(7968): 73-77.
- [61] HU Y J, ZHUO H, ZHANG Y, et al. Graphene oxide encapsulating liquid metal to toughen hydrogel[J]. [Advanced Functional Materials](#), 2021, 31(51): 2106761.
- [62] CUI J, LI X K, XIA Y Z. Liquid metal aerogel with Janus architecture for selective direction recognition and high-efficiency moisture energy harvesting[J]. [Advanced Functional Materials](#), 2024, 34(49): 2408998.
- [63] WU K, DOU Z L, DENG S B, et al. Mechanochemistry-mediated colloidal liquid metals for electronic device cooling at kilowatt levels[J]. [Nature Nanotechnology](#), 2025, 20(1): 104-111.