DOI：10.13715/j.issn.2096-644X.20260320.0001
引用格式：龙淑君，程宁燕，葛炳辉．金属微纳液滴表界面调控对其高温蒸发行为的作用机制[J]．湘潭大学学报(自然科学版)，2026，48(4)：126-134.
Citation：Long Shujun，Cheng Ningyan，Ge Binghui. Mechanism of the effect of surface and interface regulation on the high-temperature evaporation behavior of metal micro- and nanodroplets[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)，2026，48(4)：126-134.

金属微纳液滴表界面调控对其高温蒸发行为的作用机制*

龙淑君，程宁燕，葛炳辉

(安徽大学 物质科学与信息技术研究院，安徽 合肥 230601)

摘　要：【目的】液态金属因其高热导率、良好的润湿性和可变形性等特性，在微纳器件热管理与功能界面构建中具有重要的应用潜力．然而，其高温行为对表界面结构高度敏感，相关调控机制尚不明晰．因此，该文旨在探究表界面结构对金属镓（Ga）微纳液滴高温演化行为的影响．【方法】通过构建 3 种表面包覆结构，系统研究不同表面修饰条件下 Ga 纳米液滴的热蒸发行为．重点比较其蒸发路径、结构演化过程以及最终产物，并分析表界面结构相关物理参数的作用机制．【结果】结果表明，不同表面修饰的 Ga 纳米液滴在加热过程中呈现不同的收缩与演变路径，并最终生成不同产物．这一差异主要源于表界面结构的热膨胀系数与机械稳定性等因素的协同调控效应．本研究发现通过构筑差异化的表界面结构，可以改变 Ga 纳米液滴的高温蒸发行为．【结论】该文为液态金属在高温环境下的界面设计与功能应用提供了新的实验依据与调控策略．

关键词：Ga 基液态金属；表界面调控；原位；透射电镜
中图分类号：O469；TB383　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2096－644X (2026) 04－0126－09

Mechanism of the effect of surface and interface regulation on the high-temperature evaporation behavior of metal micro- and nanodroplets

Long Shujun, *Cheng Ningyan*, *Ge Binghui*

(Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: 【Objective】Owing to their high thermal conductivity, wettability and deformability, liquid metals have attracted great attention in thermal management and functional interface construction of micro-nano devices. However, their high-temperature evaporation behavior is highly sensitive to interfacial structures, and the underlying regulatory mechanism remains unclear. Therefore, this study aims to elucidate the influence of interfacial structures on the high-temperature evolution behavior of gallium (Ga) micro/nano droplets. 【Method】Three types of representative surface coating structures were constructed to systematically investigate the behavior of Ga nanodroplets under different surface modification conditions during heating. The evaporation pathways, structural evolution processes, and final products were comparatively analyzed. Furthermore, the roles of key interfacial physical parameters, including bonding energy, thermal expansion coefficient, and mechanical stability, were examined. 【Result】The results

* **收稿日期**：2026－03－20
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目（52201003）
通信作者：程宁燕（1990－），女，安徽池州人，副教授，硕士生导师．E-mail：ningyancheng@ahu.edu.cn

demonstrate that Ga nanodroplets with different surface modifications undergo distinct shrinkage and evolution pathways during heating, ultimately leading to different final products. These differences primarily arise from the synergistic effects of interfacial structures on thermal expansion coefficient and mechanical stability. This work reveals that through constructing distinct interfacial structures can significantly affect the high-temperature evaporation behavior of Ga nanodroplets.【Conclusion】This paper provides new experimental evidence and regulation strategies for the interfacial design and functional applications of liquid metals in high-temperature environments.

Key words: Ga-based liquid metal; surface and interface regulation; in situ; transmission electron microscopy

0　引言

液态金属因集金属和流体特性于一体，且具有导电性强、热导率高等特点，在微纳器件热管理、功能界面构建及能源转化与存储等领域具有较大潜力[1]. 在众多液态金属中，镓基液态金属（Ga-LM）由于液相区宽（熔点 29.76 ℃、沸点2 403 ℃）、饱和蒸气压低、无毒且可以和一系列固体金属发生溶解、合金、反应、扩散等相互作用，而得到了广泛的关注[2-5]. 微纳化处理，即将材料尺寸调控至微米甚至纳米尺度，不仅可以显著提高其比表面积和活性位点数量，还可以改变材料的物理、化学及结构性质. 研究发现，集导电性和流体特性于一体的 Ga-LM 的微纳液滴可以作为“反应器”或“牺牲性还原剂”用于制备多种功能性纳米结构[6-7]. 近些年，大量研究利用超声过程中的机械剪切效应，将块体 Ga-LM 有效剪切为纳米液滴，然后基于纳米液滴与溶液中金属离子或含氧金属阴离子之间的氧化还原电势差，成功诱导电偶置换反应（GRR），制备了一系列液态金属基核壳结构的功能纳米材料[8-10].

然而，当前关于 Ga 基核壳结构的研究大多集中于室温条件下的可控制备，对于其在变温环境，尤其是升温过程中的结构演化行为及热稳定性仍缺乏系统研究[11]. 实际上，表面修饰不仅影响 Ga 纳米液滴在室温条件下的稳定性，还决定其在高温环境中的演化路径及最终产物. 从实际应用角度来看，无论是在柔性电子中作为导电填料，还是在催化体系中作为活性载体，Ga 基纳米材料在实际服役过程中都不可避免地经历温度波动或热循环，其表面修饰层的热响应行为将直接影响材料及器件的性能. 例如，高温可能改变 Ga 纳米液滴的蒸发动力学与润湿行为，并可能诱发其与基底或环境之间的复杂相互作用[12]. 目前已有关于 Ga 纳米液滴热行为的研究多集中于惰性环境中的单一现象，例如纳米尺度 Ga 固-液相共存状态的热稳定性，或氧化镓壳层在加热过程中的结构演变[13-14]. 然而，对于不同化学环境下形成的表面修饰层，其在升温过程中的组成与结构动态变化，以及这些变化如何进一步影响液滴的蒸发行为并最终决定产物的物相与形貌，仍缺乏系统的实验研究与深入的机制理解. 此外，传统的离位表征手段难以捕捉纳米结构在加热过程中的瞬态演化过程，而原位透射电子显微镜（TEM）技术的发展，使得在纳米乃至原子尺度实时观察单个纳米液滴在热场中的结构演化成为可能[15].

基于此，本研究采用水浴超声，通过使用不同超声介质（无水乙醇、纯水、钨酸钠溶液），成功构筑了 3 种具有不同表面修饰层的 Ga 纳米液滴. 通过将 TEM 原位加热技术与高分辨 TEM（HRTEM）、能量色散 X 射线光谱（EDS）与电子能量损失谱（EELS）等表征手段相结合，系统研究了这 3 种 Ga 纳米液滴在加热过程中的形貌与结构演化行为. 研究表明，不同表面修饰层会显著影响液滴的蒸发行为和最终产物. 进一步分析表明，这一差异源于不同表界面结构在热膨胀系数和机械稳定性等方面的协同作用. 本研究为理解表界面修饰对液态金属高

温蒸发行为的影响及其在功能材料设计中的应用提供了依据.

1 实验与方法

1.1 材料与试剂

Ga、二水合钨酸钠（$Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$）和无水乙醇购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司. 所有化学试剂均为分析纯级别，实验中使用的材料与试剂未经说明均是直接使用.

1.2 实验仪器

超声机（JP-040S，超声功率 240 W，超声波频率 40 kHz），台式高速离心机（H1-16K），TEM（JEOL NEOARM，Thermo Fisher Scientific Themis Z），原位热学样品杆（DENS solutions）.

1.3 样品制备步骤

采用水浴超声法制备 Ga 纳米液滴. 分别取 0.1 g Ga 块置于 10 mL 无水乙醇、纯水，以及 10 mmol·L^{-1}、100 mmol·L^{-1}和 1 mol·L^{-1}的钨酸钠溶液中，超声 30 min 得到 Ga 纳米液滴悬浮液. 经钨酸钠溶液超声处理后的 Ga 纳米液滴悬浮液还需通过离心收集所得产物，并用纯水洗涤 3 次. 制备的 3 种样品分别命名为 Ga（ethanol）、Ga（water）和 Ga@WO_x.

1.4 表征与测试方法

将经超声分散后的悬浮液滴于原位加热芯片上，室温下自然干燥后，将芯片安装在加热杆上，随后插入电镜进行观察. 样品的原位实时数据通过 TEM 观察并记录.

2 结果与讨论

2.1 形貌表征

如图 1（a）所示，通过在不同介质中进行水浴超声处理，构建了 3 种具有不同表面修饰层的 Ga 纳米液滴. 图 1（b）～图 1（d）的 TEM 图像显示，Ga（water）样品的表面呈现明显的毛刺状结构，而 Ga（ethanol）与 Ga@WO_x 样品在形貌上未表现出明显差异. 为进一步分析其表面组成，对样品进行了 EDS 元素分布分析. 结果显示 Ga（ethanol）与 Ga（water）外层都有一层氧化层，此外 Ga（ethanol）的表面（见图 1（b））有明显较强的 C 信号，这可能来源于 Ga 表面修饰的乙醇分子. 而在 Ga@WO_x 样品中检测到明显的 W 元素信号，是因为超声过程中 Ga 与钨酸钠之间发生了 GRR 反应，并在液滴表面形成 WO_x 壳层[10].

2.2 原位 TEM 加热及产物表征

为了探究不同表面修饰壳层对 Ga 纳米液滴高温蒸发行为的影响，使用 TEM 原位加热技术实时追踪了 3 种 Ga 纳米液滴在热蒸发过程中的动态演化. 在进行原位加热实验之前，如图 2 所示，对电子束辐照效应进行了评估. 结果表明，即使在束流强度为 943 pA 的条件下连续辐照 43 min，Ga 纳米液滴除了体积略有膨胀外，未出现明显形貌变化，而实际原位观察和图像采集时的辐照电流通常低于 100 pA. 因此，在当前实验参数范围内电子束辐照的影响可以忽略不计.

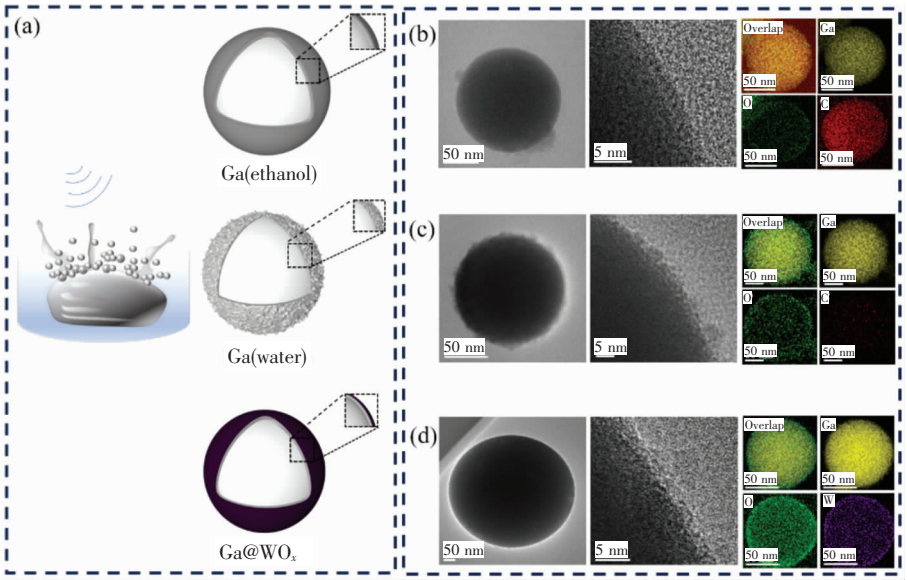


图 1　(a) Ga (ethanol)、Ga (water)、Ga@WO_x 的制备示意图；(b) Ga (ethanol)、(c) Ga (water)、(d) Ga@WO_x 液滴的 TEM 图像、局部 HRTEM 图以及相应的 EDS 元素图

Fig. 1　(a) Schematic diagram illustrating the preparation of Ga (ethanol), Ga (water), Ga@WO_x; TEM image, local HRTEM image and corresponding EDS elemental maps of (b) Ga (ethanol), (c) Ga (water) and (d) Ga@WO_x

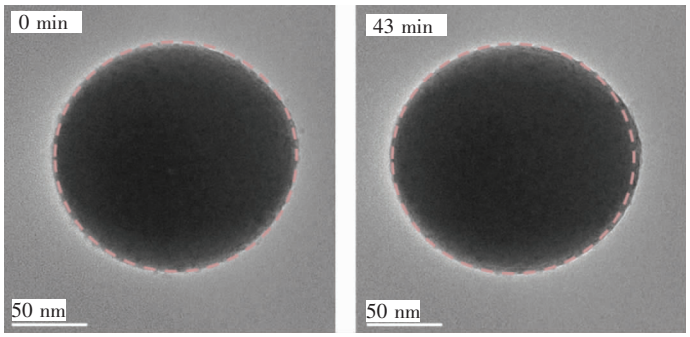


图 2　电子束辐照过程中不同时间点采集的 Ga 纳米液滴低倍 TEM 图像

Fig. 2　Low-magnification TEM images of Ga nanoparticles captured at different time during electron beam irradiation

如图 3 (a) ～ 图 3 (c) 原位实验获得的 TEM 图像所示，随着温度升高，3 种 Ga 纳米液滴逐渐蒸发，其 TEM 图像的衬度也随之降低．根据蒸气压方程 $\lg p = A - \frac{B}{T}$ (其中，p 为蒸气压，T 为温度，A 为与物质熵变相关的常数，B 为与相变焓相关的常数；Ga 的常数 A 为 11.41，常数 B 为 1.384×10^4)[16] 计算可得，在 500 ℃ 条件下，当电镜腔体真空度优于 $10^{-6.49}$ Pa时，Ga 会开始转变为气相，且升高温度会加速该蒸发过程．并且 Li 等[13] 在扫描电镜中观察到，当温度超过 500 ℃时，由于 Ga 和 Ga_2O_3 外壳热膨胀系数不匹配，热应力的积累会导致壳层破裂．因此推测，在图 3 所示的加热过程中，液态 Ga 的蒸发可能是通过 Ga_2O_3 壳层的孔洞进行的．

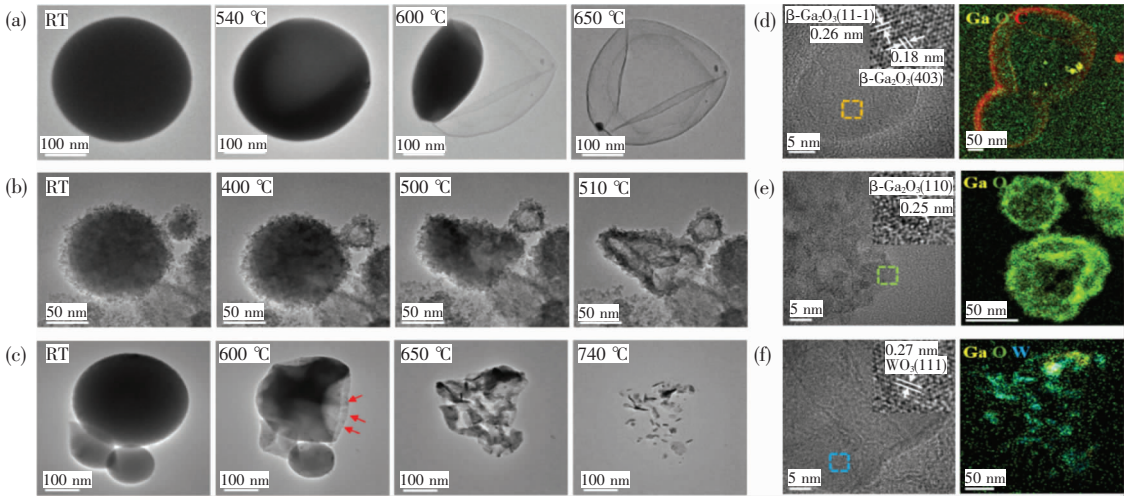


图 3　原位加热过程中（a）Ga（ethanol），（b）Ga（water），（c）Ga@WO_x 的演变；原位加热后（d）Ga（ethanol），（e）Ga（water），（f）Ga@WO_x 的局部 TEM 图和 EDS 图

Fig. 3　Morphological evolution of (a) Ga (ethanol), (b) Ga (water), (c) Ga@WO_x during in situ heating; Local TEM images and EDS elemental mapping of (d) Ga (ethanol), (e) Ga (water) and (f) Ga@WO_x after in-situ heating

进一步分析发现，在升温过程中 3 种 Ga 纳米液滴表现出明显不同的蒸发行为．如图 3（a）所示，Ga（ethanol）在加热过程中内部 Ga 逐渐蒸发，引发壳层轮廓略微收缩并最终形成了均匀的薄膜，薄膜上有少量残余的 β-Ga_2O_3 颗粒（见图 3（d））．Ga（water）在原位加热后均匀蒸发并收缩，剩下一圈坍塌的外壳，外壳上的晶格条纹经 EDS 和 HRTEM 表征（见图 3（e））证实为 β-Ga_2O_3．而如图 3（c）所示，Ga@WO_x 加热至 600 ℃时，Ga 纳米液滴从右侧向内明显塌陷，并在外围出现晶核（如图中红色箭头所示），740 ℃下已观察不到明显的壳层结构，图 3（f）的 HRTEM 图显示晶核最终长成薄片状 WO_3，EDS 图显示还有极少的 Ga_2O_3 颗粒．

为了确定 Ga（ethanol）产物中薄膜的成分和物相，对该位置进行 EDS 和 EELS 分析．EDS 结果（见图 4（a））表明该薄膜为 C 膜，且图 4（b）的 EELS 谱图显示薄膜的峰型与石墨相似[17]，在 284 eV 和 291 eV 处分别出现对应 C 的 π^* 和 σ^* 键的特征峰．HRTEM 图（见图 4（c））也观察到了部分碳膜的晶格条纹，其晶面间距为 0.33 nm，与石墨化碳的（002）晶面间距接近．关于碳的石墨化机制，已有研究提供了重要线索．2009 年，Fujita 等[17]发现非晶碳在 700 ℃时不能直接石墨化，而当液态 Ga 浮在非晶碳膜上并加热至相同温度时，可形成 3 到 5 片厚度约为 1～2 nm 的石墨烯片．2021 年，Saedi 等[18]注意到 Ga 对碳氢化合物的脱氢（例如烷烃转化为烯烃）没有表现出催化活性，而是 Ga^{3+} 离子有效地催化了反应．因此本研究中，石墨化碳的形成应该与 Ga_2O_3 相关．

由于液态金属与表面的范德华相互作用相对于它们的内聚能通常较弱，所以有文献报道通过剥离表面结构可获得 2D 材料．目前已经合成了各种 Ga 基 2D 材料，包括半导体如 GaS、GaN 和 In_2S_3、宽带隙氧化物如 Ga_2O_3 和 SnO，以及压电材料 $GaPO_3$[19]．此外，通过合金化策略，还可使目标金属根据热力学规律选择性富集于液态金属表面．例如，液态金属 Ga 不能溶解铌、钨和钼等金属，在这些情况下，Ga 可以作为材料生长的模板，通过将前驱体输送至液态金属表面，可诱导其发生界面化学反应，从而在 Ga 表层原位生成一层超薄结构．类似

的，石墨烯等 2D 材料也可以在液态金属上生长，以便于转移到其他基底上[20]．本文研究也发现，如图 3 所示，通过在 Ga 液滴表面修饰 WO_x 层，在高温下可获得 WO_3 薄片．

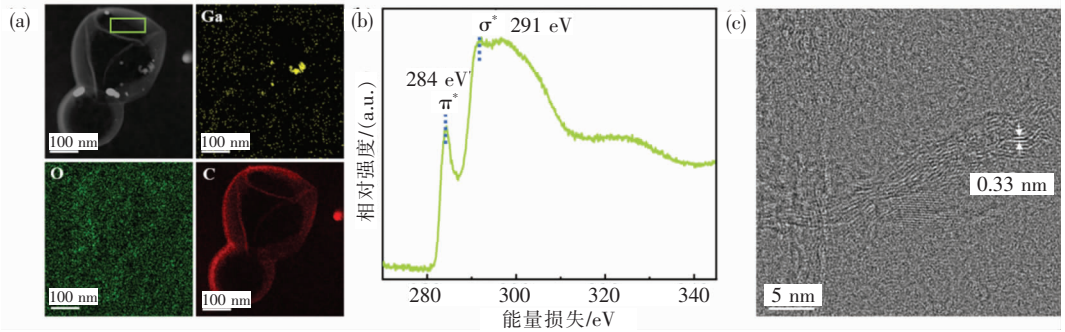


图 4　(a) Ga (ethanol) 演化生成的薄膜的 HAADF 图和 EDS 元素图；(b) (a) 中绿色框区域的 EELS 谱图；(c) Ga (ethanol) 产生的薄膜的 HRTEM 图

Fig. 4　(a) HAADF and EDS images of the membrane produced by Ga (ethanol); (b) EELS spectrum of the region marked by the green frame of (a); (c) HRTEM image of Ga (ethanol) derived thin films

此外，还探究了不同厚度的同一修饰层对 Ga 液滴蒸发行为的影响．如图 5 所示，以 Ga@WO_x 为例，通过调节制备过程中钨酸钠溶液的浓度，在其他反应条件保持不变的情况下，尺寸相近的 Ga 液滴所形成的 Ga@WO_x，其表面 WO_x 层厚度随钨酸钠溶液浓度的升高而增加．然而，采用 10 mmol·L^{-1}和 1 mol·L^{-1}钨酸钠溶液制备得到的 Ga@WO_x 的热蒸发行为及产物（见图 6）与在 100 mmol·L^{-1}钨酸钠溶液中制备得到的 Ga@WO_x 的高温蒸发行为及产物（见图 3（c）和图 3（f））基本一致，表明在本研究范围内，WO_x 层厚度变化对其热蒸发过程的影响并不显著．

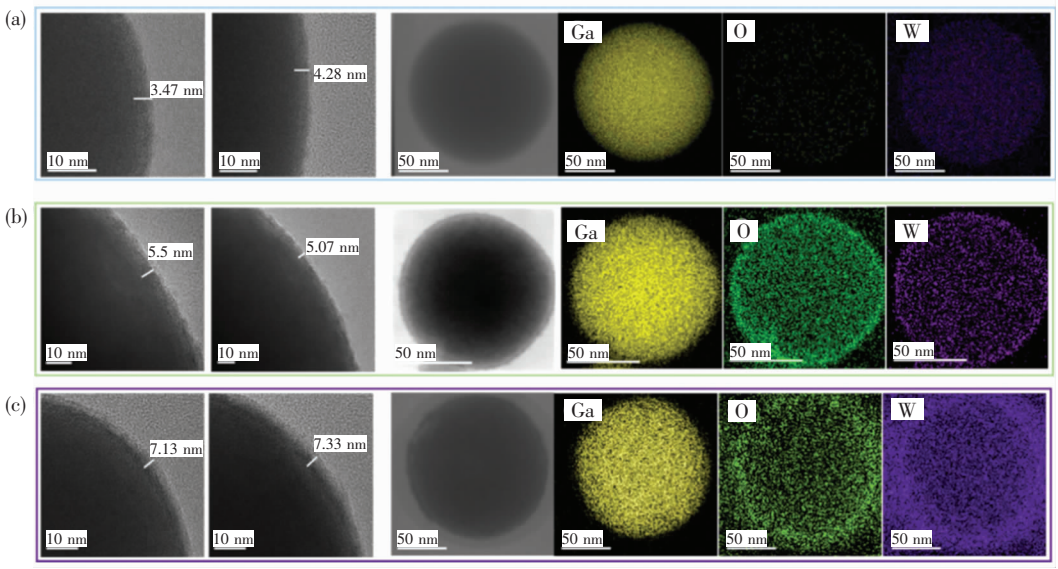


图 5　(a) 10 mmol·L^{-1}、(b) 100 mmol·L^{-1}、(c) 1 mol·L^{-1}钨酸钠溶液中制备 Ga@WO_x 液滴的 TEM 图像以及相应的 EDS 元素分布图

Fig. 5　TEM images of Ga@WO_x synthesized in sodium tungstate solutions with concentrations of (a) 10 mmol·L^{-1}, (b) 100 mmol·L^{-1}, and (c) 1 mol·L^{-1}, along with the EDS elemental maps

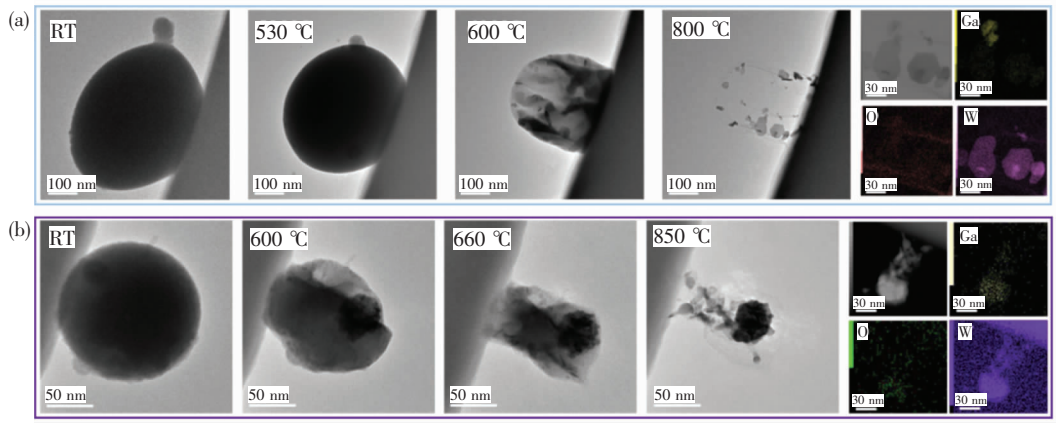


图 6 （a）10 mmol·L^{-1}和（b）1 mol·L^{-1}的钨酸钠溶液中制备的 Ga@WO_x 液滴在原位加热不同阶段获取的 TEM 图像，以及最终产物的 EDS 元素分布图

Fig. 6 TEM images acquired during the in situ heating of Ga@WO_x synthesized in sodium tungstate solutions with concentrations of (a) 10 mmol·L^{-1} and (b) 1 mol·L^{-1}, along with the EDS elemental maps of their final products

2.3 表面修饰调控 Ga 纳米液滴热行为的机理探究

如图 7 所示，在原位加热过程中，3 种经不同表面修饰的 Ga 纳米液滴表现出不同的热演化行为．对于 Ga（ethanol），其整体的变形程度较小，并表现出中心区域优先蒸发的特征，最后产物为石墨化碳和少量 β-Ga_2O_3 颗粒．这可能与乙醇分子修饰所引起的界面润湿性变化有关，从而减小液滴与氮化硅芯片基底之间的有效接触面积，并在加热过程中建立由基底向上的温度梯度．在此条件下，温度梯度诱导的马兰格尼效应可能驱动液滴内部物质由中心向边缘迁移，进而形成中空结构[21]．相比之下，Ga（water）液滴在加热过程中表现出更为明显的形变，并伴随较为均匀的体积收缩．这一行为可能与其表面形成的疏松且相对较厚的氧化层有关．在加热过程中，内部 Ga 的蒸发受该氧化层的限域作用，从而在一定程度上抑制局部快速蒸发，使内部 Ga 趋于整体均匀消耗．同时，非晶氧化层在加热过程中逐渐转变为热力学更稳定的 β-Ga_2O_3 相，最终导致形成空心结构及结晶 Ga_2O_3 壳层．对于 Ga@WO_x 体系，其在加热过程中壳层的 WO_x 会演变成膨胀系数约为 8.9×10^{-6} K^{-1}的 WO_3[22]，而液态 Ga 的热膨胀系数通常约为 4.5×10^{-5} K^{-1}[23]．两者之间的热膨胀系数差异可能在界面处引入较大的热应力，从而诱导壳层发生破裂．随着加热过程的持续，Ga 逐渐蒸发导致内部支撑减弱，同时刚性的壳层发生塌缩．最终生成 WO_3 纳米片和少量由残余 Ga 氧化生成的 Ga_2O_3．

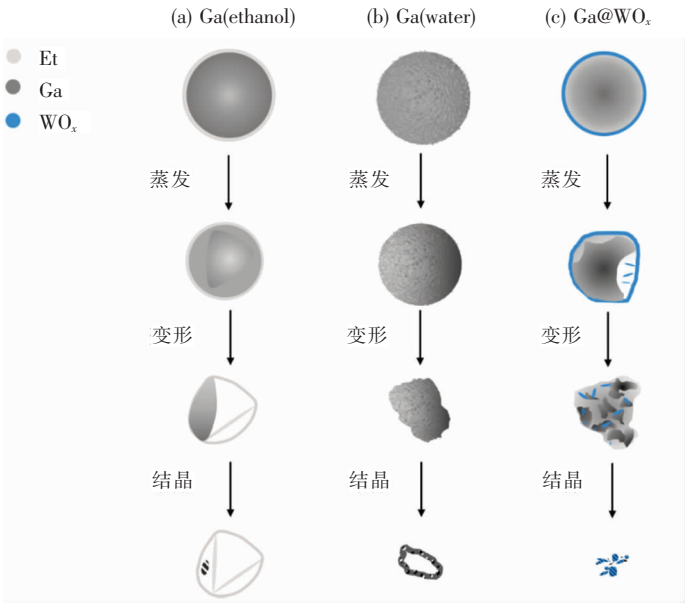


图 7　(a) Ga (ethanol), (b) Ga (water) 和 (c) Ga@WO$_x$ 的热行为演化机制

Fig. 7　Evolution mechanism of thermal behavior of (a) Ga (ethanol), (b) Ga (water) and (c) Ga@WO$_x$

3　结论

本研究通过调控水浴超声介质（无水乙醇/纯水/钨酸钠溶液），构建了具有不同表面修饰层的 Ga 纳米液滴，并借助 TEM 原位加热技术系统研究了其在加热过程中的结构演化行为与热稳定性差异．结果表明，表面修饰层会显著影响 Ga 纳米液滴的蒸发路径、形貌演化及最终产物，体现出对其高温演化过程的关键影响．通过对 Ga 纳米液滴的表面进行修饰，可以实现对液滴热蒸发行为的调控，为液态金属在高温环境下的界面设计与功能应用提供了新的实验依据与调控策略．

参　考　文　献

[1]　Chen X, Sun J, Liang J, et al. Surface and interface engineering in gallium-based liquid metals[J]. Advanced Functional Materials, 2025: e19697.

[2]　沈晨宇，甘雅玲，蒋文溪，等．液态金属微球的微观结构与血管栓塞性能研究[J]. 电子显微学报，2024，43(3)：324-328.

[3]　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.

[4]　Wang D, Wang X, Rao W. Precise regulation of ga-based liquid metal oxidation[J]. Accounts of Materials Research, 2021, 2(11): 1093-1103.

[5]　Daeneke T, Khoshmanesh K, Mahmood N, et al. Liquid metals: fundamentals and applications in chemistry[J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47(11): 4073-4111.

[6]　Ryu G, Park I, Kim H. Liquid metal micro- and nanodroplets: characteristics, fabrication techniques, and applications[J]. ACS Omega, 2023, 8(18): 15819-15830.

[7]　Liu Y, Zhang W, Wang H. Synthesis and application of core-shell liquid metal particles: a perspective of surface engineering[J]. Materials Horizons, 2021, 8(1): 56-77.

[8] Wang X, Wu Y, Wang H, et al. Gallium-based liquid metal composites and the continuous forming methods[J]. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(7): 2302029.

[9] Ming Y, Gao S, Liang X, et al. Morphology control of platinum particles grown on a liquid metal interface [J]. ACS Nano, 2025, 19(50): 42599-42613.

[10] Ren L, Cheng N, Man X, et al. General programmable growth of hybrid core-shell nanostructures with liquid metal nanodroplets[J]. Advanced Materials, 2021, 33(11).

[11] Tian H, Liu J, Zhang W, et al. Recent advances for core-shell gallium-based liquid metal particles: properties, fabrication, modification, and applications[J]. Nanoscale, 2025, 17(19): 11934-11959.

[12] Kozhemyakin G N, Belov Y S, Trufanova M K, et al. Gallium nanoparticles obtained on silicon substrates by thermal evaporation method[J]. Crystallography Reports, 2023, 68(2): 323-328.

[13] Li Z, Zhao R, Liu W, et al. Unique porous oxide shell on liquid gallium nanoparticles[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(11): 17558-17568.

[14] Losurdo M, Suvorova A, Rubanov S, et al. Thermally stable coexistence of liquid and solid phases in gallium nanoparticles[J]. Nature Materials, 2016, 15(9): 995-1002.

[15] Taheri M L, Stach E A, Arslan I, et al. Current status and future directions for in situ transmission electron microscopy[J]. Ultramicroscopy, 2016, 170: 86-95.

[16] 梁英教，车荫昌．无机物热力学数据手册[M]. 沈阳：东北大学出版社，1993.

[17] Fujita J I, Ueki R, Miyazawa Y, et al. Graphitization at interface between amorphous carbon and liquid gallium for fabricating large area graphene sheets[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2009, 27(6): 3063-3066.

[18] Saedi M, Mohseni S M, Groot I M N. Thermodynamic analysis of graphene CVD grown on liquid metal: Growth on liquid metallic gallium or solid gallium oxide skin? [J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 275: 125203.

[19] Kalantar-Zadeh K, Tang J, Daeneke T, et al. Emergence of liquid metals in nanotechnology[J]. ACS Nano, 2019, 13(7): 7388-7395.

[20] Esrafilzadeh D, Zavabeti A, Jalili R, et al. Room temperature CO_2 reduction to solid carbon species on liquid metals featuring atomically thin ceria interfaces[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 865.

[21] Zhao Y, Han B, Shen Z, et al. Melt flow and ripple formation induced by continuous wave laser irradiating of copper foil at 10 Pa[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 161: 109169.

[22] Besozzi E, Dellasega D, Russo V, et al. Thermomechanical properties of amorphous metallic tungsten-oxygen and tungsten-oxide coatings[J]. Materials & Design, 2019, 165: 107565.

[23] Takahashi Y, Kadokura H, Yokokawa H. Laser-flash calorimetry IV. Heat capacity of gallium from 80 to 600 K in two solid phases and liquid phase[J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 1983, 15(1): 65-81.

（责任编辑：胡 丁）