

• 专题一:双清论坛“面向未来的智能材料物质科学” •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025.02.27.0001

液态金属活物质与人工生命体系的构筑*

国瑞** 张淇 刘静**

中国科学院 理化技术研究所,北京 100190

[摘要] 近年来,常温液态金属因一系列类生命现象与基础效应的发现,极大激发了人工生命与智能物质的探索。以这类材料为核心的各类功能体系,为实现超常规智能提供了崭新而富有前景的物质基础。除具备典型金属的基本功能外,液态金属还具有流动性、固液相变等物化性质,能够对外界刺激做出多元化响应,如大尺度可逆形变、逆重力攀爬,甚至展示出各种类生命行为,如自驱动、自组织、自分散、自生长、自修复、呼吸获能、自振荡和胞吞效应等。种种迹象表明,液态金属及其衍生材料、器件与系统正以某种“进化”方式,朝着构筑全新一代智能体系乃至可变形机器人的方向迈进。本文旨在介绍液态金属活物质的基本概念和演化路径,探讨液态金属典型的类生物活物质属性,总结其中的基础科学问题,并解读其对发展人工细胞、仿生器官以及智能机器人等方面提供的科学启示。同时,本文还将剖析研制液体集成型柔性智能机器人的可行途径,以及面临的科学挑战与技术机遇,最后对液态金属人工生命领域的发展前景进行展望。

[关键词] 液态金属;活物质;人工生命;智能体系;液体集成

生命系统是地球上最复杂的现象之一。生物体与外界环境之间实现能量转换、信息传递和编码,同时维持一个动态平衡中的热力学非平衡状态,构成了一个有序的生存环境。在此前提下,生命能够完成生长、发展、新陈代谢并对外部刺激作出响应,以及遗传变异等基本生命活动。这些生命行为的基础是活物质,其尺度涵盖从单一分子到个体水平的复杂生命体系。相较于自然界中复杂的活体物质,人工生命单元在多个尺度上展现出较为简洁的功能特性,这为人造智能体的开发提供了理论基础。人工生命物质需要具备主动行为能力,包括自驱动、自响应、自适应、自组装、自愈合和自复制等功能,以模拟自然界中的生命特性。基于这一需求,人工生命物质能够独立移动、感知并响应多种外部场(如电场、磁场、热场、光场、声场、压力场、气体、化学场、生物场以及混合场),并且在机械强度方面实现了形状变换、复杂运动以及物质运输的基本功能,同时确保了系统的稳定性、可靠性和耐用性。通过有目的地构建功能性活

体物质以及灵活的组合设计方案,人工生命系统有望在适应性方面与自然界中的生物系统相媲美,并在进化过程中突破传统限制。

在物质科学日益演进的历程中,对具有独特性能与行为的材料的探索始终是科学研究的前沿热点。液态金属作为一类特殊的物质形态,以其在常温或稍高于常温下呈液态,同时具备金属的优良导电性、导热性等特性,近年来备受关注^[1-3]。传统对液态金属的研究主要聚焦于其物理化学性质以及在冶金、电子散热等领域的应用^[4]。然而,随着跨学科研究的蓬勃发展,尤其是材料科学与生物学、物理学、化学等学科的深度融合,科学家们开始尝试赋予液态金属更多类似生物的特性与行为。其中,液态金属优异的可扩展性和高掺杂比使其能够通过物理相互作用和化学方法与匹配材料形成合金和复合材料^[5]。借助这些手段,可以控制调整目标液态金属的密度、熔点、杨氏模量、表面张力、黏度、热导率和电导率,这可以显著扩展其结构和功能的复杂性^[6]。丰

收稿日期:2025-02-27; 修回日期:2025-04-16

* 本文根据国家自然科学基金委员会第391期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: guorui@mail.ipc.ac.cn; jliu@mail.ipc.ac.cn

引用格式: 国瑞, 张淇, 刘静. 液态金属活物质与人工生命体系的构筑. 中国科学基金, 2025, 39(3): 398–407.

Guo R, Zhang Q, Liu J. Construction of liquid metal based intelligent materials and artificial life systems. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3): 398–407. (in Chinese)

富的规模、功能和形状为液态金属模仿多彩的自然现象创造了先决条件。

本文从物质基础特性出发,剖析液态金属活物质这一概念,将其从单纯的功能性材料拓展至具有类生物行为的活物质体系,有助于改变对传统材料的固有认知,从而为材料科学探索新的研究路径。总体上,液态金属可望突破传统材料被动响应的局限,能够主动与外界环境进行交互^[7-10],为跨学科研究搭建了桥梁。液态金属活物质是一种具有类生物行为的材料,同时需满足特定的热力学或化学条件。不同于计算机模拟生命的行为由预设的程序规则和算法决定,通过对生命现象的数学建模和逻辑运算来实现,液态金属活物质的类生物行为基于其物理化学性质和对外界刺激的响应,如金属界面的高化学活性。其生命特性主要表现在自推进、自形变、自振动、自适应、自修复、自组织和主动运输等类生物行为,在感知外场方面,表现出趋电性、趋磁性、趋热性等类生物行为。在生物医学领域,由于其良好的生物相容性,液态金属活物质有望成为新型的生物医学材料,用于生物传感、药物递送和组织工程等方面,为解决当前生物医学领域的难题提供新的途径^[11]。在人工智能机器人领域,其独特的自变形和自适应能力,为开发具有高度灵活性和环境适应性的软体机器人提供了可能,推动机器人技术向更加智能化、仿生化的方向发展^[12]。预计液态金属活物质所展现出的巨大应用潜力,有望引发更多相关领域的技术变革。

1 液态金属的基础特性

液态金属通常指的是熔点低于300℃的金属、合金或更多衍生的金属材料。与汞、铯、铷和钠、钾不同,镓具有更高的沸点,并且在室温下几乎没有蒸气压,因此其泄漏通常不会造成危害。本文重点讨论共晶镓铟合金,以下统称为液态金属。液态金属在室温下可以实现多种物理和化学行为,作为功能材料受到越来越多的关注。此类材料集成了多种优良的物理和化学特性,如独特的相态与形态,高导热性与导电性,高沸点与低熔点,金属界面的化学活性以及良好的生物相容性,如图1所示。

1.1 独特的相态与形态

液态金属以其在常温或接近常温下呈现液态的独特相态而区别于常见的固态材料。这种相态赋予了它高度的流动性,使其能够在各种复杂形状的空间中自由流动并填充,展现出类似于流体的行为。与传统液体不同的是,液态金属具有较高的表面张力,这使得它们在没有外力作用时倾向于形成球状或近似球状的形态,维持

相对稳定的结构^[13]。例如,液态金属在空气中会形成一层极薄的氧化膜,这层氧化膜及固化行为有助于保持特定的形态^[14]。这些特点为液态金属活物质在微流控、柔性电子等领域的应用提供了基础。例如,将液态金属作为一种导电墨水注射到微流道中,再从微针中挤出涂覆到基底上,即可实现柔性电路的打印,如图1A所示^[15]。此外,液态金属的高流动性使其具有近乎无限的变形能力,能够轻易地改变外部形态以及在特定方向上产生类似伪足的延伸,这对于发展软体机器人和设备具有重要价值,如图1B所示^[16]。

1.2 高导热性与导电性

液态金属还具有良好的导电性,这源于金属原子结构中自由电子的存在。它们的电导率可与固态金属相媲美,能够在电路中高效地传导电流。这种高导电性使得液态金属在柔性电子电路、可拉伸电极等方面具有广阔的应用前景,为实现电子器件的柔性化和可拉伸性提供了可能。图1C中展示了由液态金属实现的高度可拉伸LED阵列^[17]。同时,液态金属具备卓越的导热性能,其热导率通常远高于许多传统的液体和部分固体材料。以金属镓为例,它的热导率可达到40 W/(m·K),这一数值使其在热管理领域具有显著优势^[18]。在电子设备中,高效的散热是保证其性能稳定和寿命延长的关键,液态金属能够快速地将热量传递出去,有效地降低设备的工作温度,如图1D所示^[19]。

1.3 高沸点与低熔点

液态金属通常具有较低的熔点和较高的沸点,这一特性使其在较宽的温度范围内保持液态。例如,镓的熔点仅为29.76℃,而沸点却高达2 403℃。这种较宽的液态温度区间,使得液态金属在不同的工作环境和应用场景中都能稳定地发挥其液态特性。在一些对温度敏感的电子设备或生物医学应用中,其较低的熔点又保证了在常温或稍高于常温的条件下易于加工和操作。例如,利用液态金属低熔点的特性可以实现室温范围内液态金属电路的刚度调控^[20]。图1E展示了一种由相变的镓实现的可调刚度的深度脑神经探针,在手术室温度(23℃)下保持刚性,但在脑深部注射后,它会软化,以帮助适应正常运动时颅骨内发生的微运动^[21]。而在一些需要在高温环境下工作的热交换系统中,液态金属能够在较高温度下保持液态,实现高效的热传递。例如,通过将镓基液态金属与镁颗粒混合制备而成的Mg-GaIn材料,可耐受激光加热并直接印刷在皮肤表面,用以治疗肿瘤,如图1F所示^[22]。

1.4 金属界面的化学活性

液态金属的金属界面具有较高的化学活性,这是其

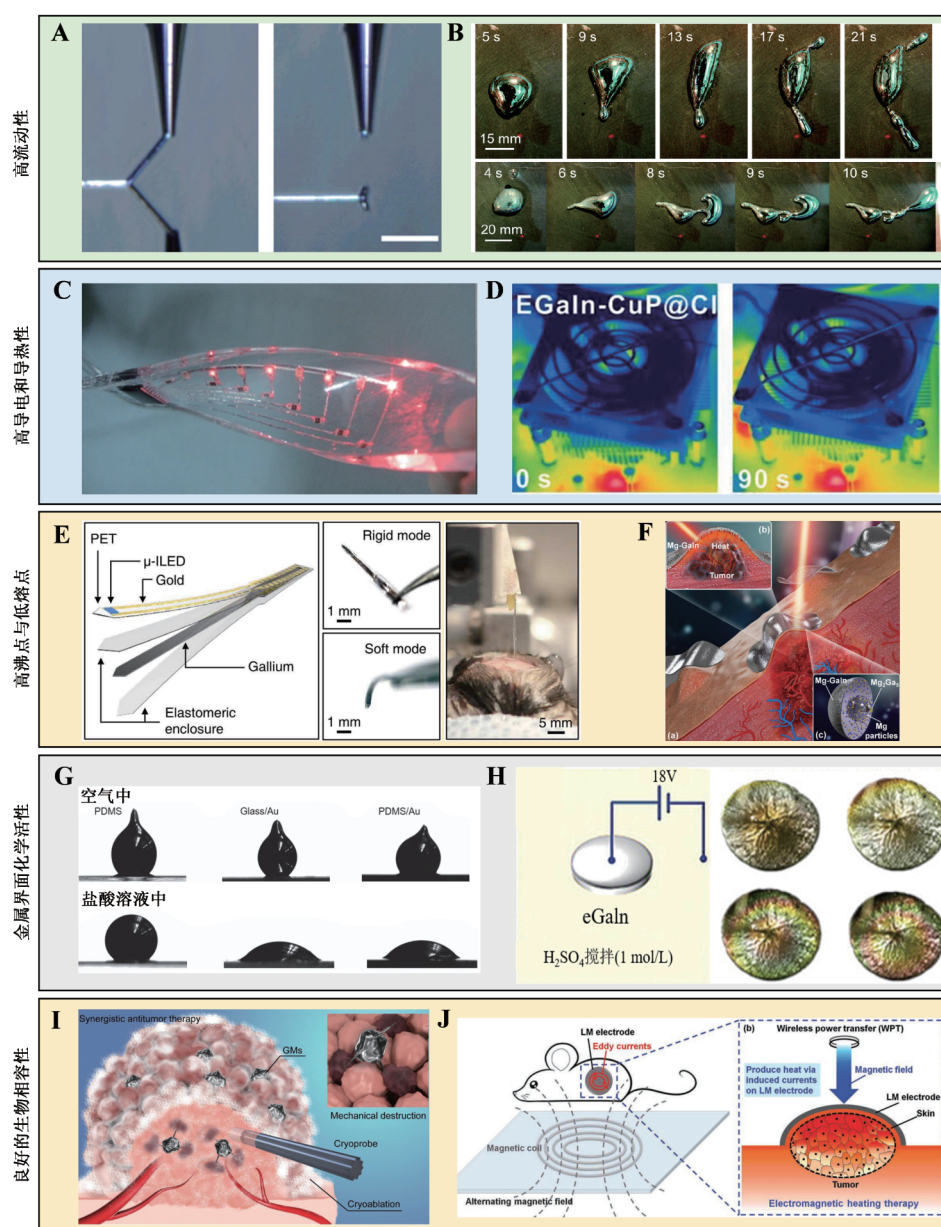


图1 液态金属的基础特性: A. 基于液态金属流动性实现的电路打印; B. 液态金属变形运动; C. 液态金属电路LED阵列; D. 利用液态金属高导热性实现芯片散热; E. 液态金属室温相变型变刚度注射针; F. 激光加热液态金属实现肿瘤热疗; G. 液态金属界面金属润湿; H. 液态金属表面氧化实现的结构色; I. 注射式液态金属微纳颗粒实现肿瘤治疗; J. 液态金属电磁加热实现肿瘤消融

Fig.1 Basic Characteristics of Liquid Metals: A. Circuit Printing Based on the Fluidity of Liquid Metal; B. Deformation Motion of Liquid Metal; C. Liquid Metal Circuit LED Array; D. Utilizing the High Thermal Conductivity of Liquid Metal to Achieve Chip Heat Dissipation; E. Liquid Metal Room Temperature Phase Transformation Variable Stiffness Injection Needle; F. Laser Heating of Liquid Metal for Tumor Hyperthermia; G. Liquid Metal Interface Metal Wetting; H. Structural Color Achieved by Surface Oxidation of Liquid Metal; I. Injectable Liquid Metal Micro Nano Particles for Tumor Treatment; J. Liquid Metal Electromagnetic Heating Achieves Tumor

区别于许多传统材料的重要特征之一。这种化学活性源于液态金属表面原子的不饱和配位状态,使得它们容易与周围环境中的其他物质发生化学反应。液态金属还能与许多金属、非金属元素发生合金化反应,通过控制合金化过程,可以精确调控液态金属的性能,如改变熔点、导电性、力学性能等^[23-25]。液态金属在酸性溶液中与刚性金属可以产生界面润湿效应,使其在刚性金属表面铺展润湿,如图1G所示^[26]。此外,液态金属镓在空

气中会迅速与氧气发生反应,在表面形成半导体薄膜,这在功能器件制造方面有重要用途。液态金属氧化膜可通过电场进行调控^[27],使其产生不同的结构色(图1H),进一步丰富了液态金属人工生命体的形态。

1.5 良好的生物相容性

液态金属活物质在生物医学领域展现出巨大潜力的重要原因之一是其良好的生物相容性。研究表明,许多液态金属,如镓基合金,对生物体的细胞毒性较低,能

够在一定程度上与生物组织和谐共处。这是因为液态金属的化学性质相对稳定,不易释放出对生物体有害的离子或物质。例如,在体外细胞实验中,将液态金属与细胞共同培养,发现细胞的存活率和增殖能力并未受到明显影响。因此,液态金属良好的生物安全性,使其可以广泛应用在生物体内或体表,用于多种疾病的治疗^[28]。近些年来有大量研究将液态金属破碎制备成微纳米颗粒,并对这些液态金属微纳米颗粒的表面进行药物修饰,使其进入人体的微环境中,对病变的生物组织起到特定的治疗效果(图1I),如肿瘤治疗等^[29]。此外,将液态金属涂抹在小鼠皮下肿瘤的表面,在外部电磁线圈作用下,液态金属电极产生的电磁热效应被用于加热肿瘤,并成功抑制了小鼠的肿瘤生长。利用多部位液态金属电极同时加热,进行多部位肿瘤治疗,也具有很好的治疗效果,如图1J所示^[30]。

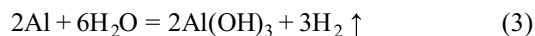
2 液态金属活物质的类生物行为

液态金属展现了许多与生物相似的特性和行为,能够对外部场刺激作出响应,类似于生物体的趋利避害本能。液态金属具有自拉伸能力,能够进行大幅度的自伸展变形运动,类似于细胞或单细胞生物的变形行为,其机制源于电场引起的表面张力不平衡^[31],如图2A所示,这为开发自主变形的软体机器人提供了新思路。表面张力 γ 的大小可以通过杨—拉普拉斯方程计算得到:

$$\gamma = \frac{\Delta P}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (1)$$

式(1)中 ΔP 是液态金属液滴与电解液之间的压力差($\Delta P > 0$), $\frac{1}{R_1}$ 和 $\frac{1}{R_2}$ 是曲面的曲率。

此外,液态金属还表现出自驱动特性,基于趋化反应和表面张力不平衡产生流动^[32],外部场如磁场、电场可进一步增强其运动能力^[33,34],使其在微流控系统中实现高效、选择性的物质运输,类似于生物体的囊泡运输和循环系统;液态金属、铝和氢氧化物构成的一种双极电化学反应,结合反应产生的氢气泡的反冲力共同驱动液态金属活物质自主运动^[35],如图2B所示,当铝与电解质溶液中的液态金属接触一段时间时,铝会牢牢地粘附在液态金属上,因为铝很容易与液态金属混合。此时,液态金属会渗透到铝中,破坏铝表面的氧化层并导致铝的活化,从而引发氧化还原反应。利用反应提供的化学或电化学能,液态金属可以在溶液中产生自驱动现象。该化学反应主要包括以下两个过程:



式(2)为铝的氧化反应,式(3)为铝与水反应生成氢气,生成的氢气也会进一步提升对液态金属的推力,从而使液态金属能够以可变形机器形态长时间高速运动,无需外部电力。

液态金属的自振荡行为则源于化学反应的周期性变化^[36],类似于生物体的周期性行为,如神经元电脉冲和细胞内钙离子浓度变化,通过金属铝的辅助可实现高频自振荡^[37],如图2C所示。同时,液态金属还具有自吸收能力,能够“吞噬”金属粉末,类似于细胞的内吞作用。如图2D所示,液态金属在盐酸溶液中可自主吞噬铜颗粒,并通过表面转变实现能量吸收和转化^[38,39]。液态金属还具备自适应能力,能够对环境变化如酸碱度变化和机械外力作出响应,其流动性和表面活性使其在复杂环境中调整形状、方向和速度^[40],在电场作用下可以在直径小于自身的流道中实现转弯和返回运动^[41],如图2E所示,这种行为类似于生物体的趋利避害本能。此外,液态金属的自修复机制基于其流动性和表面活性,能够在损伤后自动填充空隙并加固修复部位^[42],液—固共存结构的复合材料还可通过液体扩散实现精细再生^[43],最终得以完全恢复,如图2F所示。最后,液态金属的自组织过程涉及物理化学相互作用和外部场的作用,能够形成有序结构如球状、链状和网状^[44],磁性液态金属在磁场中可形成与磁场方向相关的有序图案,类似于细胞的聚集和自组织行为,图2G展示了一个过程,在经过从较大体积分散至较小体积后,铝辅助的液态金属活物质表现出显著的自推进能力。这些液态金属活物质会产生宽广的轨迹运动,其间发生追逐、碰撞、粘附以及反弹等行为,直至最终重新融合为一个完整的实体^[45]。这些特性使液态金属在软体机器人、物质运输、生物医学等领域具有广泛应用前景,并为理解生物体的行为提供了新的视角。

3 液态金属人工生命体系

液态金属活物质所展现的多种类生物行为为其构筑人工生命体系奠定了坚实的基础。以下从不同的生命层次进行展望,探讨其在细胞、组织、器官甚至是生命体层面的构建潜力。

3.1 液态金属多功能生命系统构筑

在生命系统中,传感器发挥着不可替代的作用,是生物体与外部环境紧密相连的纽带。以人类为例,具备视觉、听觉、触觉以及温度感知等多种能力。与之类似,液态金属也能够用于制造具备相应功能的传感器^[46],如图3A所示。这种传感器是通过将液态金属封装在柔

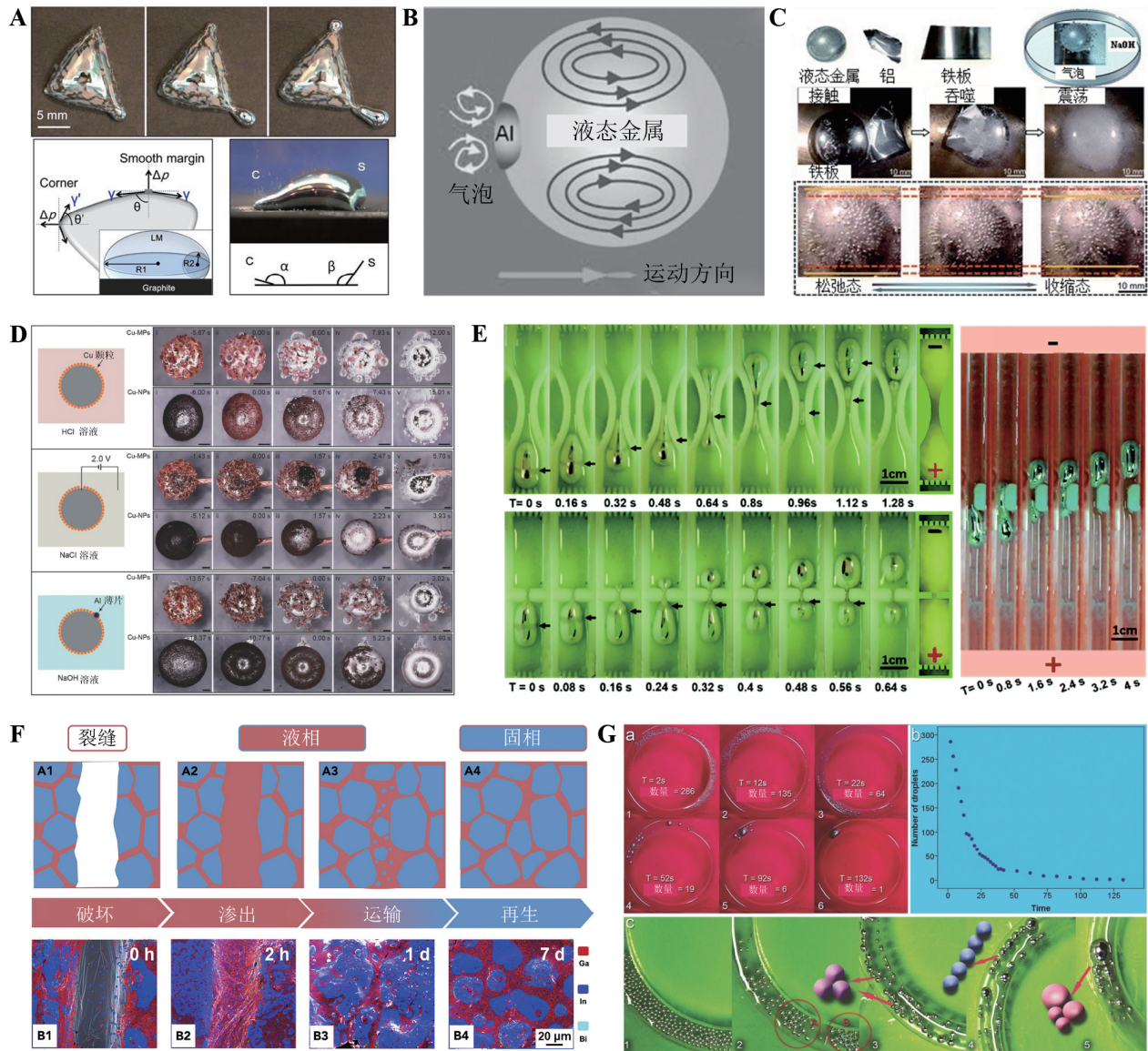


图2 液态金属的类生物行为: A. 自拉伸; B. 自驱动; C. 自震荡; D. 自吸收; E. 自适应; F. 自修复; G. 自组织

Fig.2 Biomimetic Behavior of Liquid Metals: A. Self-stretching; B. Self-driving; C. Self-oscillating; D. Self-absorbing; E. Self-adaptive; F. Self-healing; G. Self-organization

性硅胶通道中制成的,当传感器受到外界刺激,如压力、温度等信号变化时,内部通道的相对空间位置在此过程中会发生变化,这可以准确地反映在电感信号的变化中,赋予了液态金属传感器优异的传感性能。此类液态金属传感器有着较低的杨氏模量,与人体细胞组织相当,且其传感性能能够媲美甚至超越人类皮肤。

生物体的运动依赖于肌肉组织、神经组织以及骨骼组织的协同运作,其中,肌肉组织是最为主要的动力来源。肌肉组织由肌细胞构成,其核心功能为收缩与舒张,进而为生物体的运动提供动力。当肌肉收缩时,会产生作用力,拉动骨骼或其他结构,以此实现身体各部位的运动。与之相对应的是,液态金属能够对电、磁、声、光、热以及化学等各类刺激做出响应并产生运动现

象。图3B展示了液态金属在电场作用下的运动行为^[47],当电解质溶液受到电场作用时,毛细管喷嘴处金属液与氢氧化钠溶液界面上的压力和表面张力之间的力平衡立即被打破,外电场引起的牵引力会促使金属液从毛细管喷嘴喷出,射入电解质溶液中。这些类似于生命的行为特性,为研制新型液态金属致动器提供了重要的启示。液态金属还可作为柔性致动器中的柔性线圈部件,通过电磁力的作用来驱动整个柔性机器^[46],如图3C所示,线圈组用三相交流电通电导致产生扭矩,驱动机器人旋转,直到激发的磁力线与背景磁场之间实现对齐。

在生物体的逻辑处理过程中,大脑发挥着不可替代的关键作用,其功能主要涵盖认知、记忆、学习、适应以

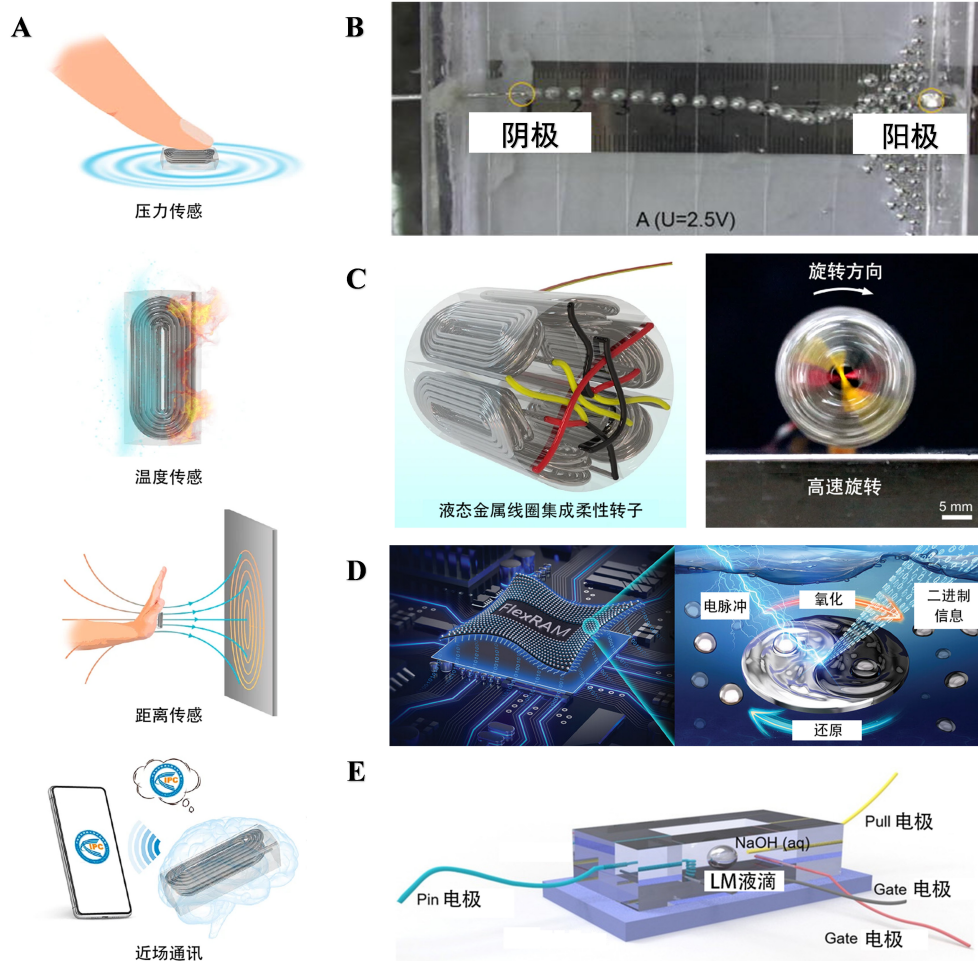


图3 液态金属多功能生命系统构筑: A. 液态金属多功能传感; B. 电场致动; C. 液态金属柔性线圈电磁致动; D. 液态金属忆阻器; E. 液态金属柔性逻辑门

Fig.3 Construction of Multifunctional Life Systems Using Liquid Metal: A. Liquid Metal Multifunctional Sensor; B. Electric Field Actuation; C. Electromagnetic Actuation of Liquid Metal Flexible Coils; D. Liquid Metal Memristor; E. Liquid Metal Flexible Logic Gate

及动态处理等方面。液态金属逻辑处理器件为构建液态金属机器人智能单元开辟了全新思路;液态金属忆阻器(图3D)通过氧化、去氧化机制来实现信息存储^[48],成功突破了传统硅基刚性电路的限制;基于液态金属液滴的柔性逻辑门器件(图3E)则通过电场调控液滴变形的方式实现逻辑运算,据此能够构建全柔性计算执行单元^[49]。更进一步而言,液态金属智能单元有望发展成为具备类似人脑高速信息处理能力与控制功能的智能柔性逻辑元件。这不仅将颠覆传统计算机硬件的固有理念,还将提供一条通往新型智能系统的全新路径。

3.2 液态金属智能机器人

不同于现有的硅基电路和金属关节构筑的刚性机器人,液态金属机器人将是具有颠覆性意义的机器人系统。我们设想液态金属智能机器人以液态金属细胞为基础,利用液态金属在外界电、磁、热、光、声、机械和化学能驱动下产生的类生物行为,实现类似生物体细胞的

复制、运动以及复杂的交互行为。例如,液态金属氢能触发的弹跳机器人是一种结合了液态金属特性和氢能动力的创新性机器人技术。该研究利用化学混合物(如金属铝、水、液态镓和氢氧化钠)在燃料罐中产生氢气,然后将氢气输送到弹性燃烧室^[50],如图4A所示。通过点火装置点燃氢气,产生的爆炸力可以推动机器人弹跳。这种弹跳机器人通过液态金属催化反应产生氢气,无需外部能源供应,同时避免了传统弹跳机器人中复杂的弹簧或连杆结构。其灵活性高,使得机器人能够适应复杂的地形和任务。有研究将液态金属与有机硅弹性体混合,然后与乙醇混溶,可以制备一种可拉伸的液态金属复合材料。它们能够通过无线加热来实现复杂和理想的变形状态,以此原理可以制造一种章鱼机器人^[12],如图4B所示。此外,通过集成液态金属线圈与永磁体,还可制备一种用于水下监测的柔性仿生水母机器人,通过模仿扁球形水母的扩展与收缩过程来运动^[51],

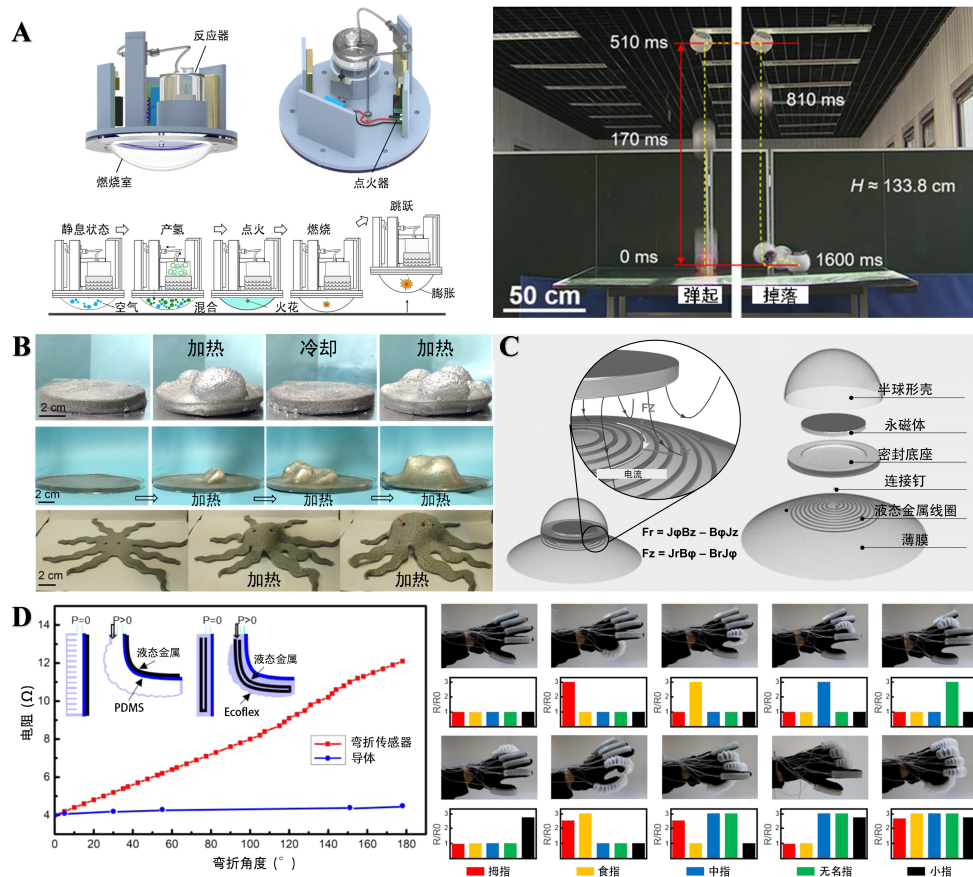


图4 液态金属赋能智能软体机器人: A. 液态金属弹跳机器人; B. 液态金属超大尺度变形材料; C. 液态金属柔性水母机器人; D. 液态金属传感器对气动机器人的运动感知

Fig.4 Liquid Metal Empowers Intelligent Soft Robots: A. Liquid Metal Bouncing Robot; B. Liquid Metal Ultra Large Scale Deformation Material; C. Liquid Metal Flexible Jellyfish Robot; D. Liquid Metal Sensors for Motion Perception of Pneumatic Robots

如图4C所示。这种水母机器人完全由柔性电磁致动器驱动,从而实现了轻柔的运动模式。这项研究有助于拓宽液态金属智能机器人技术在水下的广泛应用。进一步地,结合多种功能材料构筑液态金属复合材料,实现液态金属组织和器官的组装,赋予液态金属生命的功能和结构可扩展性、可替代性和可修复性。此外,液态金属机器人的智能化可依靠液态金属的导电性、流动性和丰富的界面活性来制造基于液态金属的半导体材料、逻辑器件、存储器以及集成芯片,最终实现基于液态金属的计算机系统,用于实现液态金属机器人的智能化。例如有研究将液态金属传感器与气动机器人结合,可实现气动机器人的运动感知^[52],如图4D所示。

4 总结

本文系统综述了液态金属的基本特性和由此实现的类生物行为,并展望了液态金属活物质作为人工生命系统基本功能单元,进一步构筑液态金属细胞、器官以及生命体的基本技术途径。总体上,液态金属一定程度上可以比拟生物物质的功能,并赋予其机械灵活性、快速

响应、多自由度、稳健性和环境适应性等优势。在动物体内的短期和长期实验中,也显示液态金属具有较好的生物安全性。比如将液态金属材料植入动物体内后,在较长时间内观察到组织没有出现严重的炎症反应、坏死或异常增生等不良现象。而且,动物的重要器官如肝脏、肾脏等的功能指标在植入液态金属后也保持在正常范围内,未出现明显的毒性损伤迹象,有望成为人工生命系统构建的重要材料^[53]。液态金属在细胞水平上表现出优异的仿生特性,可通过多种方法组合成具有复杂功能的组织,如图5所示。神经元是神经组织的核心单元,负责信号的收集、传输和处理。液态金属能够感知和处理多维信号,具备构建人工神经元的潜力。液态金属的自振荡行为可模拟神经元细胞高频神经冲动,连接和堆叠液态金属神经元可增强信号传输距离和准确性,形成液态金属神经组织。液态金属因其独特的物理化学特性,在模拟生物器官功能方面展现出巨大潜力。从心脏到骨骼,液态金属能够通过其自适应性和多功能性,为构建新型仿生器官提供创新思路。首先,液态金属的自振荡行为及其伴随的流体泵送能力,为构建液态

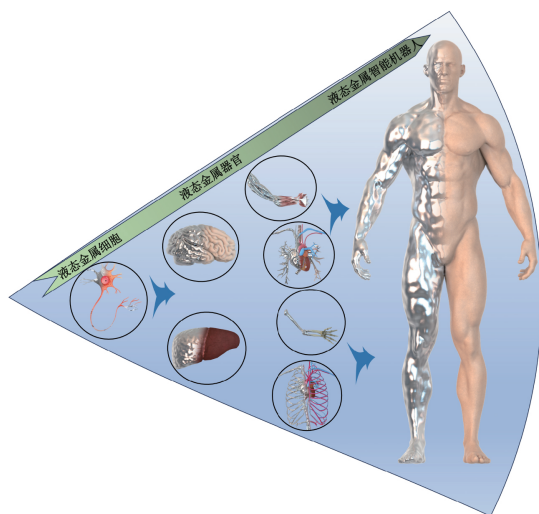


图5 液态金属人工生命体系

Fig.5 Liquid Metal Artificial Life System

金属心脏提供了理论基础。液态金属心脏能够通过调整结构和功能实现更好的生物相容性。结合液态金属可拉伸设备,有望开发出更轻、响应更快且更稳定的液态金属心脏。其次,液态金属的呼吸、气泡和液泡行为模拟了生物肺的工作机制,为设计液态金属肺提供了思路。通过构建多孔结构,液态金属肺能够实现自生长、自修复和有节奏的运动。表面活性剂的引入进一步降低了液态金属表面张力,提高了氧气交换效率和生物安全性,同时抑制了液态金属细胞的融合。液态金属在肌肉、肝脏和肾脏等器官的模拟中也展现出广阔的应用前景。通过协同作用,液态金属肌肉能够驱动仿生鱼游动,其高密度模块化分布为结构和功能的进一步调整提供了可能。液态金属肝脏可通过代谢功能模拟肝小叶的工作,而液态金属肾脏则能够通过肾单位的过滤作用排出代谢废物。最后,基于固液相变特性的骨水泥可以快速成型,通过微创注射补充骨缺损,同时实现高温镇痛。液态金属骨组织的机械性能可通过熔化和重新固化进行动态调整,结合多孔支架和4D打印技术,能够进一步增强其力学性能和生物相容性。

然而,与大自然进化产生的生命系统相比,目前液态金属活物质构建的生命系统仍然存在诸多挑战。例如,生物组织通过复杂的代谢过程,能高效地将化学能转化为各种形式的能量来维持生命活动。而液态金属依靠物理化学反应驱动,其能量转化效率相对较低,例如在实现自推进等行为时,往往需要消耗较多的外部能量。生物组织在遗传信息的精确调控下,展现出极其复杂多样的行为和功能。相比之下,液态金属活物质的类生物行为较为简单,目前主要集中在自推进、自形变、自振动、自适应、自修复、自组织和主动运输等基本行为

上,难以像生物组织那样完成复杂的认知、学习、繁殖等高级行为。生物经过长期进化,能在各种复杂多变的自然环境中生存和繁衍,对环境的适应性很强。液态金属活物质虽然能对一些外场如电场、磁场、热场等产生响应,但在面对复杂的自然环境变化时,其适应能力较为有限,例如在酸碱度、温度、湿度等综合环境因素变化时,可能会影响其物理化学反应,进而影响其类生物行为的表现。生物组织具有自我维持和更新的能力,细胞可以通过分裂、分化等方式不断更新和修复受损的组织。液态金属活物质的自修复等功能往往依赖于特定的外部条件或材料特性,其自我维持和更新的能力相对较弱,在长期使用或受到较大损伤时,可能难以完全恢复到初始状态。

液态金属活物质在结构设计、功能开发、控制策略以及整体协调和平衡方面仍面临严峻挑战,这一领域的研究尚处于初级阶段,存在着大量的验证性工作亟待进一步展开。首先,液态金属活物质内在的理论机制及其精确控制规律仍需进一步认识,这会在很大程度上推动其向更高层次智能发展的进程。当前,液态金属的类生命自驱动行为尚有一定的随机性,在朝向更高自主性智能化运动迈进时需要更多探索。此外,液态金属在多个物理和化学场梯度作用下,其相互作用的调控以及整体行为的集合机制也是十分关键的问题。

参考文献

- [1] Yu Y, Miyako E. Alternating-magnetic-field-mediated wireless manipulations of a liquid metal for therapeutic bioengineering. *iScience*, 2018, 3: 134—148.
- [2] Li JY, Zhao X, Liu J. Biosimilar liquid-metal living matter. *Matter*, 2024, 7(6): 2033—2065.
- [3] Ren HT, Jin H, Shu J, et al. Light-controlled versatile manipulation of liquid metal droplets: A gateway to future liquid robots. *Materials Horizons*, 2021, 8(11): 3063—3071.
- [4] An K, Su ZY, Zhang MM, et al. Liquid metal-based micro/mini-channel heat transfer: Progress, challenges, and opportunities. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 250: 123551.
- [5] Cao LX, Yu DH, Xia ZS, et al. Ferromagnetic liquid metal putty-like material with transformed shape and reconfigurable polarity. *Advanced Materials*, 2020, 32(17): e2000827.
- [6] Maurin V, Chang YL, Ze QJ, et al. Liquid crystal elastomer-liquid metal composite: Ultrafast, untethered, and programmable actuation by induction heating. *Advanced Materials*, 2024, 36(34): e2302765.
- [7] Shu J, Lu YM, Wang EL, et al. Particle-based porous materials for the rapid and spontaneous diffusion of liquid metals. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(9): 11163—11170.
- [8] Ni EL, Song L, Li ZC, et al. Unidirectional self-actuation transport of a liquid metal nanodroplet in a two-plate confinement microchannel.

- Nanoscale Advances, 2022, 4(12): 2752—2761.
- [9] Zhang YX, Jiang SJ, Hu YL, et al. Reconfigurable magnetic liquid metal robot for high-performance droplet manipulation. Nano Letters, 2022, 22(7): 2923—2933.
- [10] Lee W, Lee CE, Kim HJ, et al. Current progress in gallium-based liquid metals for combinatory phototherapeutic anticancer applications. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2023, 226: 113294.
- [11] Shen YF, Jin DD, Fu MM, et al. Reactive wetting enabled anchoring of non-wettable iron oxide in liquid metal for miniature soft robot. Nature Communications, 2023, 14(1): 6276.
- [12] Wang HZ, Yao YY, Wang XJ, et al. Large-magnitude transformable liquid-metal composites. ACS Omega, 2019, 4(1): 2311—2319.
- [13] Wang ST, Zhang Y, Wang JY, et al. Electrically driven heartbeat effect of gallium-based liquid metal on a ratchet. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 10: 1094482.
- [14] Wang HZ, Chen S, Zhu XY, et al. Phase transition science and engineering of gallium-based liquid metal. Matter, 2022, 5(7): 2054—2085.
- [15] Park YG, An HS, Kim JY, et al. High-resolution, reconfigurable printing of liquid metals with three-dimensional structures. Science Advances, 2019, 5(6): eaaw2844.
- [16] Hu L, Zhao X, Guo JR, et al. Electrical control of liquid metal *Amoeba* with directional extension formation. RSC Advances, 2019, 9(5): 2353—2359.
- [17] Wang Q, Yu Y, Yang J, et al. Fast fabrication of flexible functional circuits based on liquid metal dual-trans printing. Advanced Materials, 2015, 27(44): 7109—7116.
- [18] Tang JB, Zhao X, Li J, et al. Gallium-based liquid metal amalgams: Transitional-state metallic mixtures (TransM²ixes) with enhanced and tunable electrical, thermal, and mechanical properties. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(41): 35977—35987.
- [19] Wang H, Xing WK, Chen S, et al. Liquid metal composites with enhanced thermal conductivity and stability using molecular thermal linker. Advanced Materials, 2021, 33(43): e2103104.
- [20] Sun XY, Guo R, Yuan B, et al. Stiffness tunable implanted electrode enabled by magnetic liquid metal for wireless hyperthermia. Applied Materials Today, 2022, 27: 101495.
- [21] Byun SH, Sim JY, Zhou ZN, et al. Mechanically transformative electronics, sensors, and implantable devices. Science Advances, 2019, 5(11): eaay0418.
- [22] Wang XL, Yao WH, Guo R, et al. Soft and moldable Mg-doped liquid metal for conformable skin tumor photothermal therapy. Advanced Healthcare Materials, 2018, 7(14): e1800318.
- [23] Li FX, Shu J, Zhang LR, et al. Liquid metal droplet robot. Applied Materials Today, 2020, 19: 100597.
- [24] Guo LX, Wen R, Zhu YD, et al. Controllable exothermic effect at the contact interface between liquid metal gallium and silver chloride. Materials Chemistry and Physics, 2023, 302: 127728.
- [25] Yuan B, Zhao CJ, Sun XY, et al. Lightweight liquid metal entity. Advanced Functional Materials, 2020, 30(14): 1910709.
- [26] Jeong Y R, Kim J, Xie Z, et al. A skin-attachable, stretchable integrated system based on liquid GaInSn for wireless human motion monitoring with multi-site sensing capabilities. NPG Asia Materials, 2017, 9(10): e443.
- [27] Hou Y, Chang H, Song K, et al. Coloration of liquid-metal soft robots: From silver-white to iridescent. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(48): 41627—41636.
- [28] Yang NL, Li W, Gong F, et al. Injectable nonmagnetic liquid metal for eddy-thermal ablation of tumors under alternating magnetic field. Small Methods, 2020, 4(9): 2000147.
- [29] Sun XY, Cui BX, Yuan B, et al. Liquid metal microparticles phase change mediated mechanical destruction for enhanced tumor cryoablation and dual-mode imaging. Advanced Functional Materials, 2020, 30(39): 2003359.
- [30] Wang XL, Fan LL, Zhang J, et al. Printed conformable liquid metal e-skin-enabled spatiotemporally controlled bioelectromagnetics for wireless multisite tumor therapy. Advanced Functional Materials, 2019, 29(51): 1907063.
- [31] Hu L, Yuan B, Liu J. Liquid metal *Amoeba* with spontaneous pseudopodia formation and motion capability. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7256.
- [32] Ma YB, Gao JY, Guan TZ, et al. Chemotactic biomimetic liquid metallic leukocytes. Matter, 2025, 8(3): 101991.
- [33] Tan SC, Yuan B, Liu J. Electrical method to control the running direction and speed of self-powered tiny liquid metal motors. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, 471(2183): 20150297.
- [34] Tan SC, Gui H, Yuan B, et al. Magnetic trap effect to restrict motion of self-powered tiny liquid metal motors. Applied Physics Letters, 2015, 107(7): 071904.
- [35] Zhang J, Yao YY, Sheng L, et al. Self-fueled biomimetic liquid metal mollusk. Advanced Materials, 2015, 27(16): 2648—2655.
- [36] Yi LT, Wang Q, Liu J. Self-powered gallium-based liquid-metal beating heart. The Journal of Physical Chemistry A, 2019, 123(43): 9268—9273.
- [37] Chen S, Yang XH, Wang HZ, et al. AI-assisted high frequency self-powered oscillations of liquid metal droplets. Soft Matter, 2019, 15(44): 8971—8975.
- [38] Wang YS, Chang H, Rao W. Surface oxidation and wetting synergistic effect of liquid metals. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(19): 24003—24012.
- [39] Tang JB, Zhao X, Li J, et al. Liquid metal phagocytosis: Intermetallic wetting induced particle internalization. Advanced Science, 2017, 4(5): 1700024.
- [40] Wang HZ, Chen S, Li HW, et al. A liquid gripper based on phase transitional metallic ferrofluid. Advanced Functional Materials, 2021, 31(32): 2100274.
- [41] Yao YY, Liu J. A polarized liquid metal worm squeezing across a localized irregular gap. RSC Advances, 2017, 7(18): 11049—11056.
- [42] Wang Y, Duan WD, Zhou C, et al. Phoretic liquid metal micro/nanomotors as intelligent filler for targeted microwelding. Advanced Materials, 2019, 31(51): e1905067.
- [43] Peng Y, Liu HZ, Peng H, et al. Biological self-healing strategies from mechanically robust heterophasic liquid metals. Matter, 2023, 6(1): 226—238.
- [44] Yang XL, Gan TS, Zhong DL, et al. Rapid self-assembly of self-healable and transferable liquid metal epidermis. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 658: 148—155.

- [45] Sheng L, He ZZ, Yao YY, et al. Transient state machine enabled from the colliding and coalescence of a swarm of autonomously running liquid metal motors. *Small*, 2015, 11(39): 5253—5261.
- [46] Li N, Zhou YX, Li YQ, et al. Transformable 3D curved high-density liquid metal coils—an integrated unit for general soft actuation, sensing and communication. *Nature Communications*, 2024, 15: 7679.
- [47] Fang WQ, He ZZ, Liu J. Electro-hydrodynamic shooting phenomenon of liquid metal stream. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(13): 134104.
- [48] Yuan R, Cao Y, Zhu X, et al. Liquid metal memory. *Advanced Materials*, 2024, 36(8): 2309182.
- [49] Li DD, Liu TY, Ye J, et al. Liquid metal-enabled soft logic devices. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(6): 2000246.
- [50] Liu TY, Li DD, Ye J, et al. An integrated soft jumping robotic module based on liquid metals. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(12): 2170050.
- [51] Ye J, Yao YC, Gao JY, et al. LM-jelly: Liquid metal enabled biomimetic robotic jellyfish. *Soft Robotics*, 2022, 9(6): 1098—1107.
- [52] Guo R, Wang HZ, Duan MH, et al. Stretchable electronics based on Nano-Fe GaIn amalgams for smart flexible pneumatic actuator. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(8): 085022.
- [53] Chen S, Zhao RQ, Sun XY, et al. Toxicity and biocompatibility of liquid metals. *Advanced Healthcare Materials*, 2023, 12(3): e2201924.

Construction of Liquid Metal Based Intelligent Materials and Artificial Life Systems

Rui Guo* Qi Zhang Jing Liu*

Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract In recent years, the discovery of a series of bio-similar phenomena and fundamental effects in room temperature liquid metals has significantly stimulated the exploration of artificial life and intelligent matter. Various functional systems centered around these materials are opening a new and promising material foundation for achieving extraordinary intelligence. In addition to possessing the basic functions of typical metals, liquid metals also display physical and chemical properties such as fluidity and solid-liquid phase transition, and can respond to external stimuli in a versatile manner, such as large-scale reversible transformation, anti-gravity climbing, and even exhibiting various types of biomimetic behaviors such as self-propulsion, self-organization, self-dispersion, self-growth, self-healing, energy acquisition through respiration, self-oscillation, and phagocytosis, endowing them with rather rich bio-like attributes. Many advancements indicate that liquid metals and their derived materials, devices, and systems are evolving in some way towards building a new generation of intelligent systems and even transformable robots. This article aims to illustrate the basic concepts and evolutionary routes of liquid metal living matter, explore the typical biology like properties of liquid metal living matter, summarize the fundamental issues involved, and interpret its scientific implications for the development of artificial cells, biomimetic organs, and intelligent robots. Meanwhile, this article will also analyze the feasible approaches for developing liquid integrated soft intelligent robots, as well as the scientific challenges and technological opportunities they face. Finally, the development prospects of liquid metal artificial life will be discussed.

Keywords liquid metal; living matter; artificial life; intelligent system; liquid integration

刘 静 清华大学教授,中国科学院理化技术研究所研究员。长期从事液态金属与工程热物理、生物医学等方面交叉问题研究。发现液态金属诸多全新科学现象,研发的众多液态金属应用系统、高端肿瘤治疗装备康博刀系统及移动医学仪器等在国内外得到广泛应用,相关成果入选中国科学院科技成果在京转化先进团队特等奖。曾获国际传热界最高奖之一威廉·伯格奖、首届全国创新争先奖、CCTV年度十大科技创新人物等奖励和荣誉。

国 瑞 中国科学院理化技术研究所研究员,从事基于液态金属的柔性电子制备方法研究。在基于液态金属的柔性电子制造技术、印刷电子、可穿戴医疗设备等领域取得了一系列研究成果。目前已发表SCI文章40余篇,被引3 000余次。获授权发明专利21项。

(责任编辑 贾祖冰 张 强)

* Corresponding Authors, Email: guorui@mail.ipc.ac.cn; jliu@mail.ipc.ac.cn