

液态金属科技与工业的崛起：进展与机遇

刘静^{1,2}

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 清华大学医学院生物医学工程系, 北京 100084)

摘要: 常温液态金属及其衍生材料是近年来异军突起的新兴功能物质, 该领域取得了一系列突破性发现, 催生出诸多全新的材料创制与应用, 被视为人类利用金属的第二次革命。本文扼要介绍了液态金属物质科学领域涌现出的若干典型进展、基础问题与工业应用范例, 剖析现象背后的科学规律, 具体包括: 芯片冷却与能源利用、印刷电子学与增材制造(3D打印)、生物材料学、柔性智能机器学。在此基础上, 论述了提出“液态金属谷”的时代背景、发展液态金属新工业体系的基本途径, 阐述了推进液态金属材料基因工程研究并构建相应数据库的重要意义。液态金属作为兼具基础探索与实际应用价值的重大科学、技术与工业前沿, 发展前景广阔; 相应研究有望促进人类物质文明进步、优化社会生产和生活方式, 也将深刻影响中国乃至世界寻求新一代变革性科技与工业的进程。

关键词: 液态金属; 新材料; 颠覆性技术; 新工业; 先进冷却; 印刷电子; 生物医学材料; 柔性机器人

中图分类号: K826.1 **文献标识码:** A

Rise of the Liquid Metal Science, Technology and Industry: Advancements and Opportunities

Liu Jing^{1,2}

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The room temperature liquid metal and its allied materials are a class of emerging functional matters with diverse species. Recently, with breakthrough discoveries made on liquid metals, tremendous exciting applications were raised and many new materials that had never been anticipated before were invented. As a result, the latest achievements on liquid metals were ascribed as the second revolution of human beings over the process of utilizing metals. This article briefly summarized typical advancements, fundamental sciences, and key technological and industrial areas thus initiated which include but are not limited to: chip cooling and energy utilization, printed electronics and 3D printing, biomedical materials, as well as smart soft machines. In addition, historic background to propose and establish “The China Liquid Metal Valley” and the basic strategy to mold a brand new industry of liquid metal were outlined. The core values to strengthen future research on liquid metal material genome engineering and thus build up corresponding databases were summarized. Overall, liquid metals are important frontiers for science, technology, and industry integrating both fundamental and practical issues together. Further continuous endeavors would lead to pivotal progress of human civilization and thus reshape social production and lifestyle. Its impact for both China and the world to explore next generation revolutionary science, technology, and industry will be huge.

Keywords: liquid metal; new material; disruptive technology; new industry; advanced cooling; printed electronics; biomaterial; soft robot

收稿日期: 2020-07-12; 修回日期: 2020-08-30

通讯作者: 刘静, 中国科学院理化技术研究所研究员, 清华大学医学院生物医学工程系教授, 研究方向为液态金属;

E-mail: jliu@mail.ipc.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新材料强国 2035 战略研究”(2018-ZD-03); 国家自然科学基金项目(51890893、91748206); 中国科学院前沿项目及院长基金项目

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、常温液态金属物质科学的兴起

人们对液态金属的第一印象，大多来自科幻影片《终结者》，无所不能的机器人正由液态金属制成。当前，随着科学研究的深入和发展，大量液态金属技术以及由此制成的先进装备正在成为现实。在很大程度上可以认为，液态金属就是介乎机器与人之间的尖端功能材料，蕴藏着丰富的科学、技术与应用问题 [1]。现实中的常温液态金属是一大类物理化学行为十分独特的新兴功能物质，典型类型有镓基合金、铋基合金及其衍生材料；具有诸多新奇特性，为新兴科学与技术前沿提供了重要启示和丰富的研究空间。近年来，得益于国内外学者特别是中国研究团队在基础探索 [1] 与工业化实践 [2] 方面的开创性工作，液态金属物质科学已从最初的冷门发展成为备受国际关注的重大科技前沿热点，影响范围甚广。

2011 年诺贝尔化学奖得主、以色列理工学院教授 Dan Shechtman 曾指出：今天技术的最大限制，主要来自材料的限制。液态金属及其衍生材料的出现，打通了许多应用技术的瓶颈环节，促成了众多颠覆传统的产业应用。自 21 世纪初起，中国研究团队在这一重大科技领域发挥了系统性、开创性作用，揭示了液态金属诸多全新科学现象、基础效应和变革性应用途径 [1]；促成了一系列高新技术产业的形成，提出并推动了“液态金属谷”和液态金属全新工业的创立与发展 [2]。近年来，国际上一些科研机构也相继启动液态金属探索，取得可喜进展。液态金属研究与应用渐入佳境，反映了一个重要科技和产业领域的形成和演进态势。

本文旨在对液态金属的基础问题和典型进展予以剖析，阐述这一重要前沿在催生突破性科学与产业方面的价值，重点包括电子信息、能源、先进制造、柔性机器人、生物医药等领域；论述液态金属物质科学在开辟全新工业方面的角色和作用，阐述建设“液态金属谷”以及产业集群的前期实践情况，探讨面临的重大发展机遇，以期为我国新材料产业发展提供前沿参照。

二、经典的液态金属材料及其属性

顾名思义，液态金属指在室温附近或更高一

些的常温下呈液态的金属，又称低熔点金属。典型的有镓基、铋基金属及其合金，因其安全无毒、性能卓越，正成为异军突起的革命性材料；其他如汞、铯、钠钾合金等，虽在常温下也处于液态，但具有毒性、放射性或危险性，在应用上受到很大限制。与低熔点金属形成对比的是，在高温（如 600~700 °C）条件下才能呈现液态的金属或其合金，称为高熔点金属，作为经典冶金材料内容已被广泛研究。

相较而言，在世界范围内，很长一段时间常温液态金属被忽视了。而近年来取得的颠覆性发现和技术突破，更多体现在揭示常温液态金属的基础科学现象与重大应用途径方面。液态金属在常温下可流动、导电性强、热学特性优异、易于实现固液转换，因沸点高（温度高达 2300 °C 时仍处于液相）而不会像水那样沸腾乃至爆炸；可以说仅用单项材料就将诸多尖端功能材料的优势集于一体，有望突破许多传统技术的应用瓶颈，据此打开极为广阔的应用空间。

通常可供直接使用的常温液态金属种类比较有限。自然界中常温下呈液态的纯金属主要有汞、镓、铯，熔点分别为 -38.87 °C、29.8 °C、28.65 °C。鉴于液态纯金属种类稀少，一般在实际中使用的是液态合金材料，需具备以下特点：①物理化学性能优良，如高热导率、电导率、低粘度等；②环境友好、无毒无害、非易燃易爆、易于回收利用，具有较低的蒸汽压和挥发性；③成本宜尽可能低。也因如此，阻碍液态金属快速发展和应用的瓶颈之一就是缺乏足够多的可选材料以及对相应材料属性的认识。为改变这种现状，国内研究团队提出了液态金属材料基因组计划 [3]，旨在发现新的液态金属功能材料，进而解决材料种类短缺的问题。探索和发现更多的液态金属复合材料以满足日益增长的实际需求，这是领域研究的持续方向。

三、液态金属新材料创制

（一）基于外来物强化或改性的液态金属材料

在液态金属新材料创制方面，除采用合金化配制途径之外，还可借助材料之间的相容性来获得更多新材料。实验发现 [4]，金属液滴可在溶液环境中借助电场或化学物质的激励作用将周围颗粒吞入

体内（见图1），类似细胞生物学的胞吞效应，效率极高。这一发现开辟了构筑高性能液态金属材料

除了引入外来物实现功能材料外，液态金属同样可用作添加物对其他材料予以改性。液态金属添加物概念[6]提出后，据此发展出了高导热、电绝缘液态金属材料（见图2），将导热、绝缘两个原本矛盾的属性集成到一起，这实际上成为后续研发液态金属复合材料的开端。

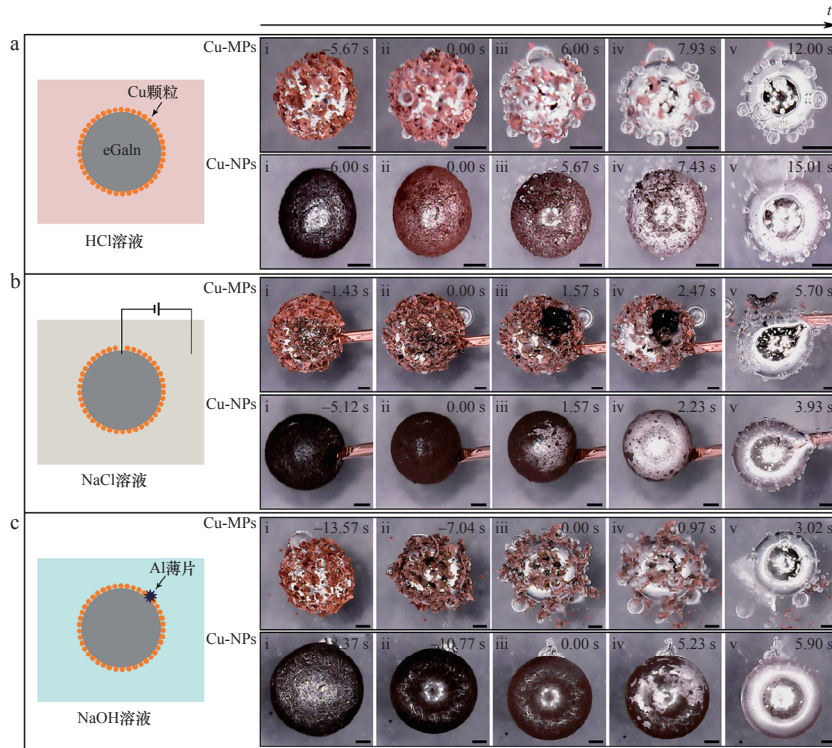


图1 液态金属吞噬颗粒效应及材料创制策略 [4]

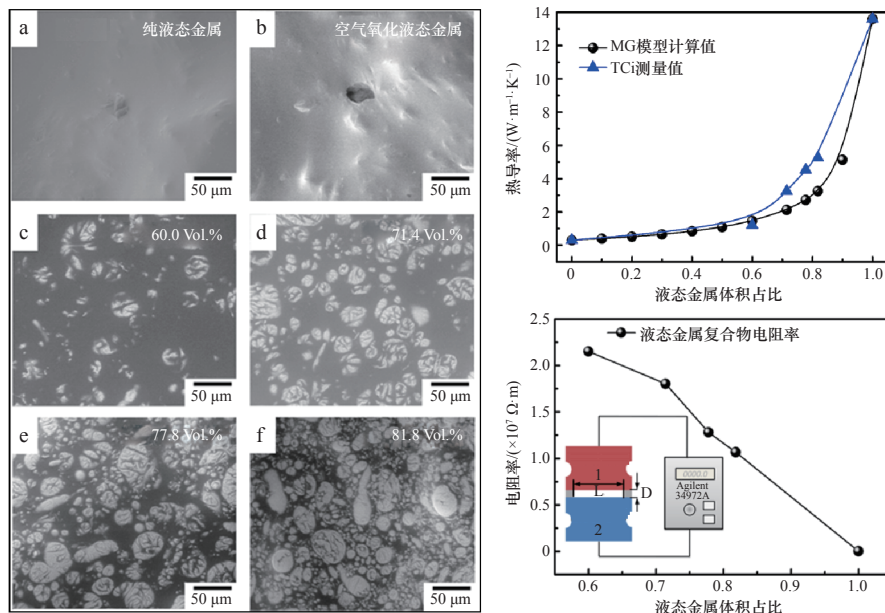


图2 由液态金属添加物制成的高导热电绝缘材料 [6]

(二) 多孔液态金属材料

虽然迄今已有的液态金属大多呈连续介质形式，但是液态金属也可制成多孔物质，由此实现更多奇特功能和行为。研究发现 [7]，在液态金属（如镓铟合金）内加载铁纳米颗粒并引入化学反应机制（见图 3），可快速制造出具有良好导电性和磁性的柔性多孔金属材料；这种材料的孔径大小可灵活调控，经受加热时能够多次重复膨胀（在极限情况下可达 7 倍），膨胀后的多孔金属甚至可携带重物漂浮于水面。

此类材料系首次在自然界被创造出来，所发现的机理将液态金属智能材料与装备的研发推向新的高度。例如，有关特性可用于制造水下变形机器、柔性机械臂、外骨骼、柔性智能机器人等。

(三) 液态金属基导体 - 绝缘体转变材料

高导热且电绝缘，这种看似矛盾的性质还可借助彼此加以调控，进而制成导电绝缘体转变（CIT）材料。有研究发现基于液态金属制备宽温区可调 CIT 材料的通用策略 [8,9]，关键在于利用复合材料内部物质间的相互配合来实现材料的导电绝缘转变功能。典型案例之一是将具有反常体积膨胀率的液态金属与流动性良好的二甲基硅油结合，构造出液态 CIT 材料。由此基本原理出发，可借助不同熔点的液态金属与协同材料，发展出更多宽温区工作的

液态 CIT 材料体系。

液态 CIT 材料依据复合材料内部物质间的相互配合机制，由液态金属液滴和溶剂混合而成（见图 4）。当温度较高时，液态金属为液态并被溶剂分隔开，此时复合材料表现为绝缘态；当温度降低时，金属液滴发生凝固，液态 CIT 材料变为导电态；随着温度的改变，液态 CIT 材料的导电率可相差 9 个数量级，这个过程完全可逆且理论上可以重复无限次。液态 CIT 材料的转变温度仅取决于金属液滴的相变点，因此可找到一系列具有不同相变点的液态合金（如镓基、铋基合金）以获得不同的转变点温度。

(四) 轻量化液态金属材料

常规的液态金属通常密度很高，这会导致制成器件与装备的质量较大，使得能量耗费过多、应用灵活性降低。基于轻质液态金属的基本思想 [10]，以共晶镓铟合金及中空玻璃微珠为代表，可制备出密度仅为水的一半、可漂浮于水面的液态金属复合材料（见图 5）。这种材料保留了纯液态金属的导电性、导热性、力学强度、固液相变等特性，还具有可塑性、可变形性乃至磁性等特征；据此设计各种平面与三维应用场景，如水面电路、水中机器人，还可引入不同封装来实现对材料漂浮行为的调控。

轻质液态金属物质概念具有基础科学意义和普适应用价值，开创了制造新型液态金属功能材料的新途径。结合各类液态金属与对应的轻质改性物质

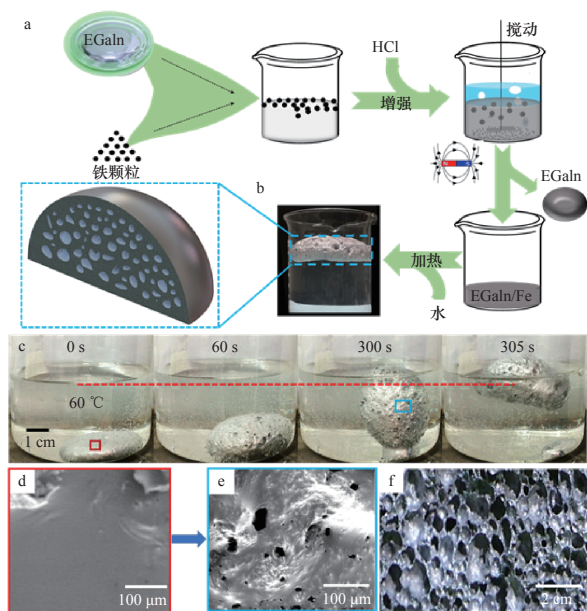


图 3 多孔液态金属材料的制备过程、水中膨胀漂浮过程和内部结构 [7]

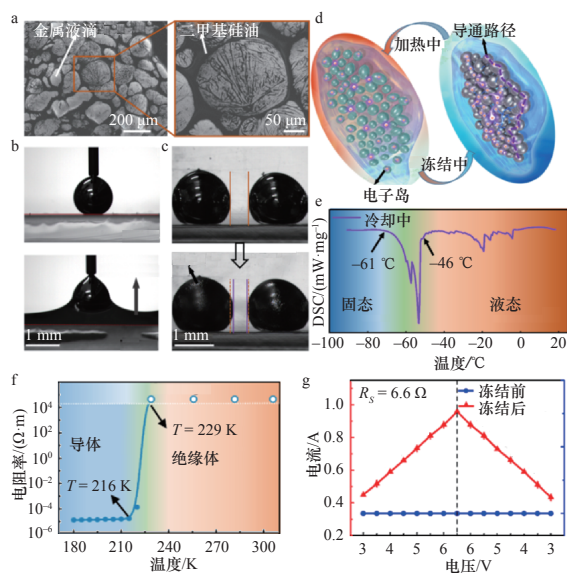


图 4 在宽温区具有导体 - 绝缘体转变特性的液态金属复合材料及其可逆导电绝缘机理 [9]

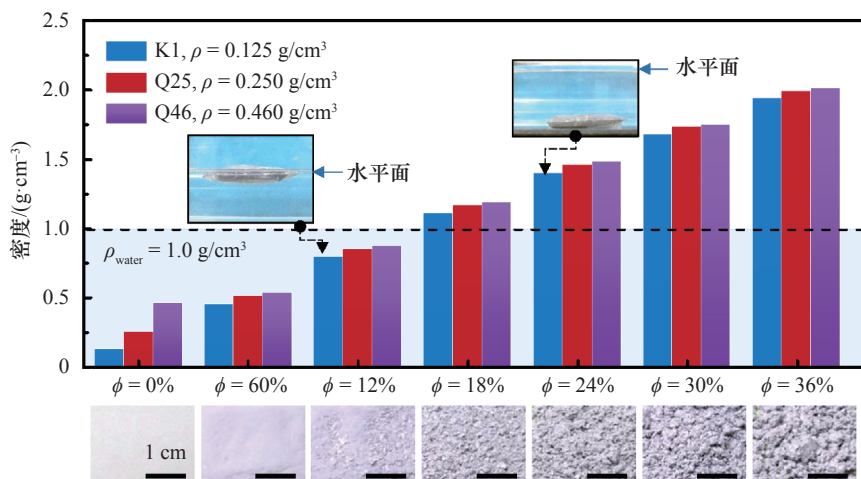


图 5 基于液态金属 - 中空玻璃微珠制成的轻量化复合材料及对应密度 [10]
注: K1、Q25、Q46 为不同规格的中空玻璃微珠。

(如塑料、木材、轻金属以及磁性、光学材料、多孔物质等), 可赋予终端材料更多的目标功能; 能以一种材料形式同时将多类尖端材料的功能(如电、磁、声、光、热、力学、流体、化学等)集于一体, 这是已有材料体系不易具备的性能, 在许多应用场合十分有用。

四、液态金属材料前沿应用

发展至今, 液态金属的应用已渗透到诸多自然科学与工程技术领域, 正在定义和创造新的未来[11]。以下从四方面阐述液态金属衍生出的典型科技与应用方向。

(一) 液态金属先进热控与能源技术

随着微纳电子技术的应用与发展 [12], 高集成度芯片、器件与系统引发的热障问题成为制约各种高端应用的普遍性难题, 突破散热瓶颈被提高到前所未有的层面 [13]。21 世纪初, 在芯片冷却领域引入了低熔点合金流体散热技术 [14], 这一途径成为近年来的国际前沿研究热点, 且成为芯片冷却领域中较具发展前景的新兴产业方向。

经过近 20 年的发展, 常温液态金属冷却领域已建立了相对完备的理论与应用技术体系 [15], 主要涉及: 液态金属强化传热、相变与流动理论, 电磁、热电或虹吸驱动式冷却与热量捕获, 微通道液态金属散热, 刀片散热, 混合流体散热, 无水换热

器, 低熔点金属固液相变吸热, 高导热纳米金属流体及热界面材料等。液态金属除了在高功率密度电子芯片、光电器件、国防装备极端散热等方面有着重要应用价值外, 正在逐步扩展到消费电子、低品位热能利用、光伏发电、能量储存、智能电网、高性能电池、发动机冷却、热电转换等领域。新技术打破了传统模式, 一批成果已规模化应用于工业和商业领域(见图 6): 台式计算机用液态金属散热器, 液态金属热界面材料, 相变散热模块, 液态金属冷却大功率高架灯及发光二极管(LED)路灯, 笔记本电脑用超薄型液态金属散热器, 高性能服务器冷却用液态金属散热器等。

液态金属芯片冷却方法自提出以来, 持续引发业界关注, 有关研究 [16] 曾获国际电子封装领域代表刊物 *ASME Journal of Electronic Packaging* 2010—2011 年度唯一最佳论文奖, 还获得了包括中国国际工业博览会创新奖在内的多个产业奖项。

(二) 液态金属印刷电子与 3D 打印

传统电子制造工艺繁多, 涉及从基底材料制备到形成互连所需的薄膜沉积、刻蚀、封装等环节, 消耗了大量的原料、水、气和能源。为改变这一现状, 我国学者首次提出了液态金属印刷电子学 [17]、室温金属 3D 打印 [18] 等创新思想, 建立了相应的理论与技术体系 [19,20], 研制了系列化的新型设备(见图 7); 通过印刷方式在各种柔性、刚性基材甚至人体皮肤上 [21~23] 直接制造出目标电路、元器

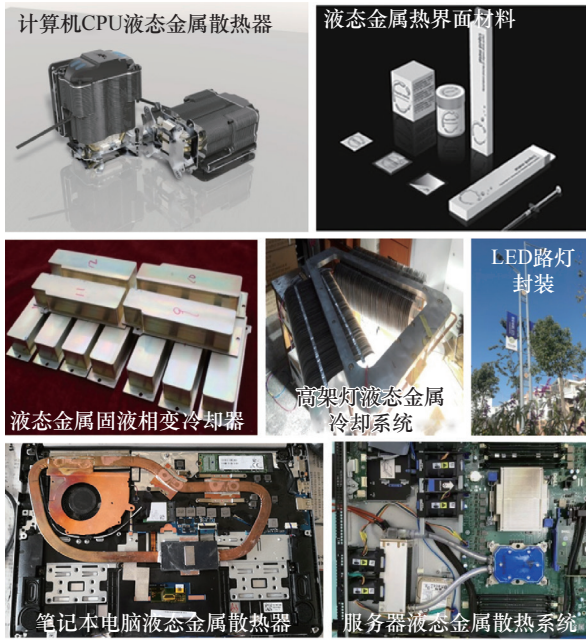


图6 典型液态金属热管理应用产品或使用情形

件、集成电路和终端功能器件（见图8）。相应突破被视为有望改变传统电子和集成电路的制造规则，“所见即所得”的电子直写模式将加速普惠型个性化电子制造时代的到来。

液态金属印刷电子学与室温3D金属打印方法的建立，使得个性化功能器件的快速制造成为可能，降低了高端制造的门槛，有望普及推广到大众百姓。正因如此，相关发明和研制装备获得国内外科技界的高度认可，技术成果得到 *Technology Review*、*IEEE Spectrum*、*Chemistry World* 等科学杂志的专题评介，入围了2015年中国十大科技进展新闻。

（三）液态金属生物医学与健康技术

在生物医学与健康技术领域，独特的液态金属带来了观念性变革。中国研究团队率先将液态金属用于解决一系列重大生物医学难题与瓶颈，系统地提出并构建了液态金属生物医学材料学新领域 [24,25]，研究成果引发国际性反响。其中，液态金属神经连接与修复调控技术 [26] 因其独创性而被视为“令人震惊的医学突破”，由此衍生出了系列化的神经调控技术 [27]；Wang 等创建的液态金属高分辨血管造影术 [28]（见图9），采用相对简单的方法解决了极为复杂的问题，且揭示细节足够丰富。

此外，液态金属栓塞血管治疗肿瘤技术、碱

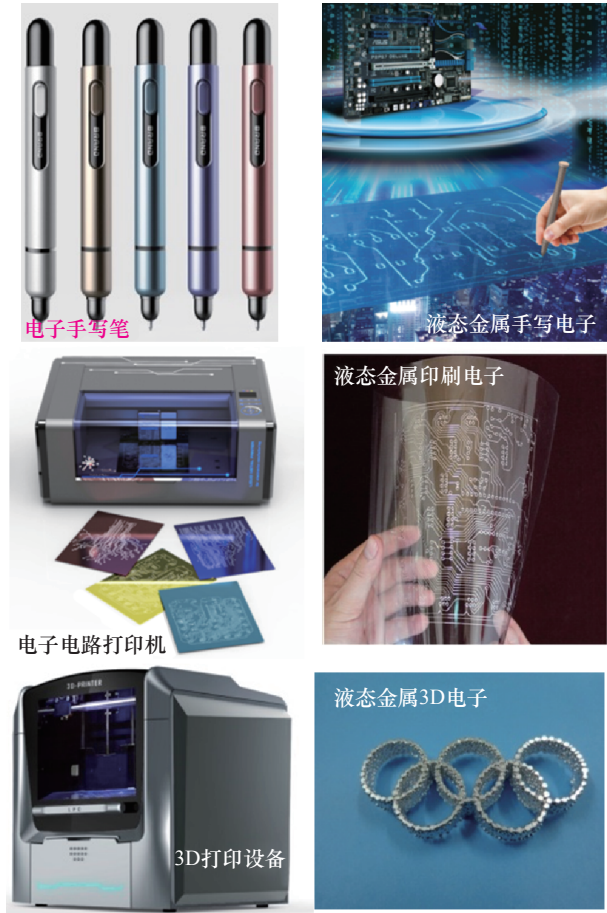


图7 普惠型液态金属功能电子制造（从一维到三维）

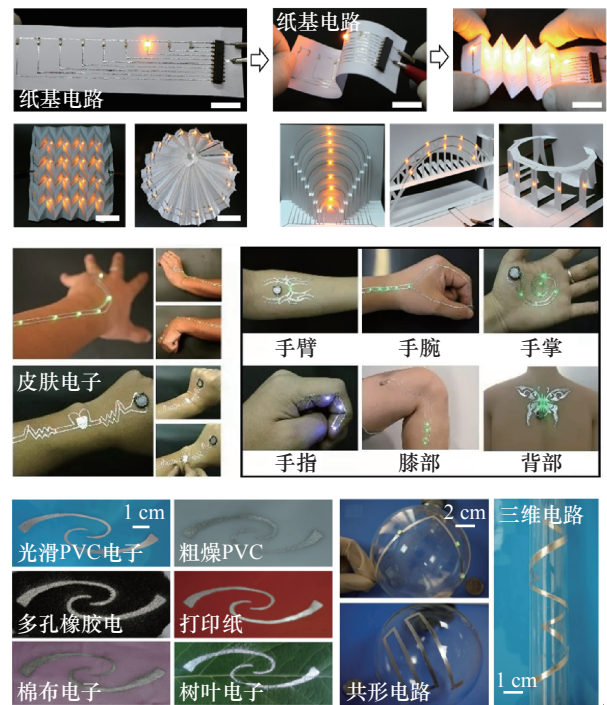


图8 液态金属电子应用场景 [21~23]

注：PVC代表聚氯乙烯。

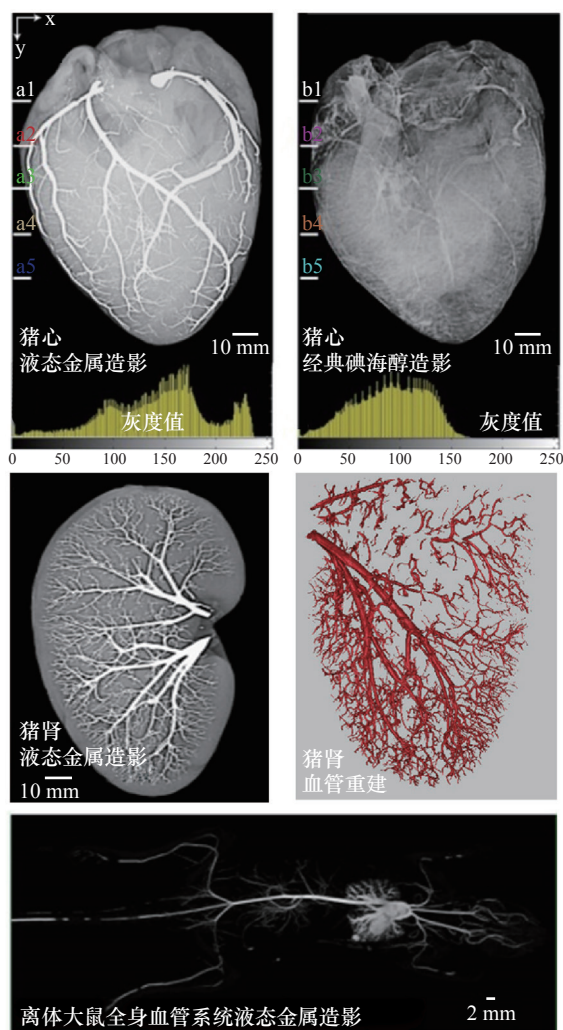


图9 液态金属高分辨血管造影术 [28]

金属流体热化学消融治疗肿瘤法、注射式低熔点金属骨水泥、刚柔相济型液态金属外骨骼、印刷式液态金属柔性防辐射技术、植入式医疗电子在体 3D 打印与注射电子，液态金属皮肤光热转换与电磁学 [29~31] (见图 10)、液态金属医学传感技术 [32] 等，也因崭新学术理念和技术突破性而引起多方重视。

(四) 液态金属柔性智能机器

设计一种能以可控方式在不同形态之间自由转换的柔性机器，用于代替人类执行更为特殊、更为复杂的任务，这是世界科学界和工程界的梦想。例如，在抗震救灾或特殊行动中，此类机器人可根据需要适时变形、穿过狭小空间、重新恢复原形以继续执行任务。学术界普遍认为，软体机器人技术一

旦突破，必将显著影响高端制造、医疗康复、国防装备等领域。相关研发活动如火如荼，2017 年美国国家自然科学基金会支持的软体机器人项目经费达到 2600 万美元。

从构建全新体系的理念出发，中国研究团队开创性提出了不同于传统的液态金属软体机器人技术路径 [33,34]，在材料、器件、系统等方面逐步形成相应理论与技术体系 [35]。其中的标志性进展之一是首次揭示了电场调控下液态金属呈现出的一系列大尺度变形、旋转、定向运动以及合并、断裂-再合并行为 (见图 11) [36]，这成为后续研究液态金属可变形机器人的开端。进一步发现了一种异常独特的现象和机制 [37,38]，即液态金属可通过吞噬微量铝形成自驱动全柔性机器，速度达厘米每秒级、运行时间可达数小时 (见图 11)，实现了无需外部电力的自主运动。这种自驱动液态金属组成的微马达群可在电场中形成高速的协同运动。

以上发现为研制实用化的智能马达、血管机器人、流体泵送系统、柔性执行器乃至更为复杂的液态金属机器人奠定了重要理论基础。结合液态金属与刚性材料，还可实现固液组合机器。采用电控可变形旋转的“液态金属车轮”，可驱动 3D 打印的微型车辆，实现行进、加速以及更多复杂运动。研究还发现了液态金属可在石墨表面以任意形状稳定呈现的自由塑形能力，由此可实现液态金属逆重力攀爬。若将液态机器单元予以分组编程，将建立起可控型柔性智能机器人的可行技术途径 (见图 12)，这将改变传统机器人的技术形态 [39]。

整体来看，液态金属衍生出了全新的可变形机器概念，将显著提速柔性智能机器的研制进程。鉴于这些发现的突破性，相应成果在国际上引发较大反响，先后得到 *Nature*、*Nature Materials*、*Science News*、*New Scientist*、*Chemistry World* 等的评介，且液态金属机器人被列为机器人领域最具发展潜力的十大方向之一。

五、液态金属新工业的崛起

(一) “液态金属谷”与新工业的酝酿发展

液态金属是有着重大工业应用价值的新兴科技前沿材料，打破了传统技术的诸多极限，促成了新工业体系的形成和发展。2008 年前后，国内优势研

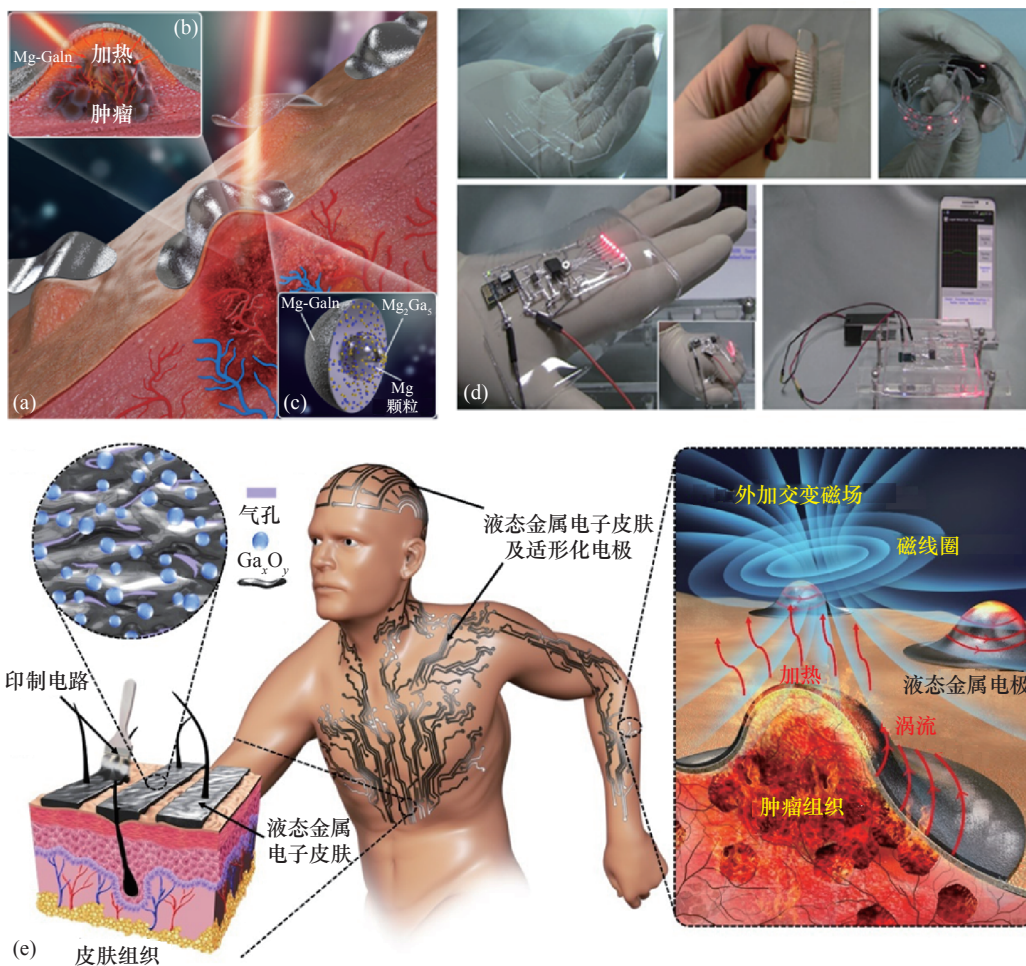


图 10 肿瘤治疗用液态金属皮肤光热涂覆材料与柔性生物医学电子应用 [29]

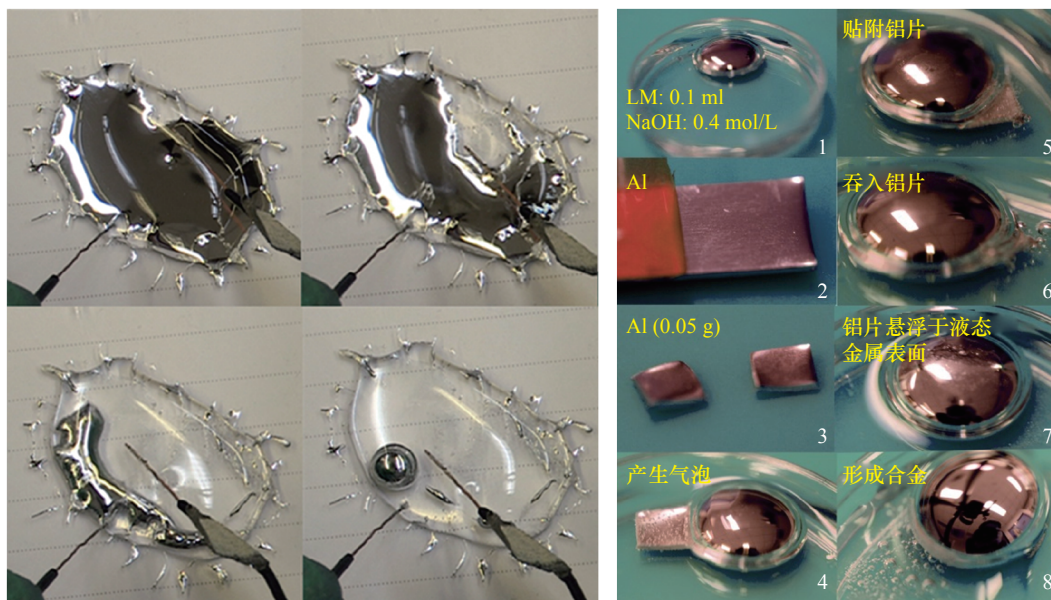


图 11 外场调控的可变形液态金属和可自主运动型液态金属柔性机器 [36,38]

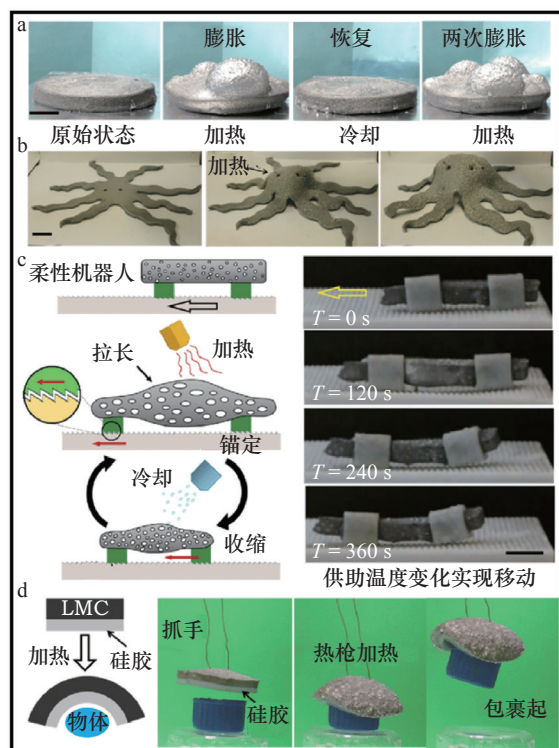


图 12 可大尺度膨胀变形的液态金属复合系统 [39]

研究机构提出了在北京市中关村地区创建中国“液态金属谷”的构想，但推进时机和条件尚不成熟。数年后这一构想在云南省得到实质性推动。

2013年，中国科学院理化技术研究所实施技术转化的液态金属热界面材料、电子手写笔等项目落地云南省宣威市，启动了产业化进程。

2014年，作为云南省“科技入滇”重点项目，液态金属产品在业界产生了重要影响。结合云南省有色金属资源优势，建设中国“液态金属谷”的构想进一步清晰具体。实施产业化的项目公司率先建成了液态金属原材料及产品生产线，年产量为200 t；面向市场需求推出了液态金属导热片、液态金属导热膏、液态金属电子手写笔、液态金属三维手写笔等产品。为推动液态金属新产业的可持续发展，在地方政府和有关企业的支持下，结合多方资源成立了云南科威液态金属谷研发中心。

2015年，首届液态金属产业技术发展高峰论坛在云南省宣威市举办，会议明确提出将宣威市作为中国“液态金属谷”所在地；液态金属科技馆也正式对外开放。广东省、北京市等地的液态金属相关企业逐步开始入驻或接洽合作。

2016年，实施液态金属产业化的项目公司数

量进一步增加。为更好保障液态金属产业发展，省级“五中心一委员会”获批成立：云南省液态金属企业重点实验室、云南省科学技术院科威中宣液态金属研发中心、云南省液态金属制备工程研究中心、云南省液态金属企业技术中心、云南省液态金属产品质量监督检验中心。

2017年，“液态金属谷”建设成果入选云南省十大科技进展，被誉为揭开了液态金属前沿技术的神秘面纱。至此，中国“液态金属谷”的构想和倡议从理想变为现实。

(二) 液态金属产业与研发行动

2016年，液态金属产业列入云南省“十三五”科技发展规划、云南省“十三五”新材料发展规划。以此为依托，2017年1月液态金属列入国家《新材料产业发展指南》中的产业重点扶持方向；2017年6月液态金属列入《重点新材料首批次应用示范指导目录》。2018年5月，由多家产业主体共同发起成立的液态金属产业科技联合体进入中国科学技术协会“产学研融合技术创新服务体系建设项目”名单，标志着我国在推动新兴液态金属产业方面形成共识。

2018年，云南省启动实施了“稀贵金属材料基因工程”科技项目，围绕“创新平台—人才团队—项目统筹、基础研究—关键技术研发—工程化应用”开展产业链布局，以推动稀贵金属材料跨越式发展、促成新材料重大应用和示范。液态金属作为科技项目的三大板块之一，在数据库构建、材料新品研发等方面得到显著加强；借助相图计算、第一性原理、分子动力学等高通量计算和大数据工具，结合高通量实验手段来实现新材料创造。推进科技项目研究，有效缓解液态金属材料种类短缺的现实问题。

六、液态金属产业发展建议

当前，液态金属研发与应用逐渐驶入快车道。在液态金属产业化发展的过程中，“产学研”结合较为紧密，体现了首都的科技研发优势、云南等地的区域资源/地缘优势以及两方面的良好对接，液态金属的产业应用得以在全国乃至世界范围内得到认同。即便如此，相比国际上液态金属研发的热列态势，国内进入这一新兴领域的研发团队和企业还

未形成足够体量，依然有不少机构处于观望态度。这可能是因为，限于传统的技术跟踪模仿惯性导致不愿意开拓新工业应用方向，即便对于液态金属这个在开创性基础发现、应用研究乃至产业推进、工业化验证诸方面均处于世界领先地位的战略性高新科技领域，国内机构和研究团队依然持保守认识。为此，针对我国液态金属产业提出以下发展建议。

(1) 科技支撑对产业可持续健康发展不可或缺。宜准确把握历史性机遇，在“人、财、物”和产业政策等方面给予进一步支持，打造世界级的液态金属科学与应用中心；着力完善相应工业应用技术体系，以示范应用带动产业链发展。

(2) 在规模化产业市场培育方面，围绕“液态金属谷”及相应产业，适时设立国家和地方性的产业基金与扶持政策；加快液态金属产业集群部署，推进各有关制造业转型升级和跨越式发展；引导液态金属新产品推广应用，保持前沿技术研发、新产品试错及新兴市场融合乃至形成良性互动。

(3) 液态金属为诸多前沿科技的变革性发展创造了重大机遇，带动性极强。宜在宏观研究层面开展系列化的软课题和战略研究，科学预测这一新兴材料对于能源、电子信息、先进制造、国防装备、柔性智能机器人、生物医疗健康等领域的关键作用，推动国家前沿科技进展，促进新工业体系发展。

参考文献

- [1] 刘静. 液态金属物质科学基础现象与效应 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.
Liu J. Fundamental phenomena and scientific effects of liquid metal matter [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019.
- [2] 刘静, 杨应宝, 邓中山. 中国液态金属工业发展战略研究报告 [M]. 昆明: 云南科技出版社有限责任公司, 2018.
Liu J, Yang Y B, Deng Z S. Research report on the developmental strategy of China liquid metal industry [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press Co., Ltd., 2018.
- [3] Wang L, Liu J. Liquid metal material genome: Initiation of a new research track towards discovery of advanced energy materials [J]. *Frontiers in Energy*, 2013, 7(3): 317–332.
- [4] Tang J B, Zhao X, Li J, et al. Liquid metal phagocytosis: Intermetallic wetting induced particle internalization [J]. *Advanced Science*, 2017, 5(4): 1–6.
- [5] Tang J B, 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 [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9 (41): 35977–35987.
- [6] Mei S F, Gao Y X, Deng Z S, et al. Thermally conductive and highly electrically resistive grease through homogeneously dispersing liquid metal droplets inside methyl silicone oil [J]. *ASME Journal of Electronic Packaging*, 2014, 136(1): 1–7.
- [7] Wang H Z, Yuan B, Liang S T, et al. PLUS-material: Porous liquid-metal enabled ubiquitous soft material [J]. *Materials Horizons*, 2018, 5(2): 222–229.
- [8] Wang H Z, Yao Y Y, He Z Z, et al. A highly stretchable liquid metal polymer as reversible transitional insulator and conductor [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(23): 1–10.
- [9] Chen S, Wang H Z, Sun X Y, et al. Generalized way to make temperature tunable conductor–insulator transition liquid metal composites in a diverse range [J]. *Materials Horizons*, 2019, 6(9): 1854–1861.
- [10] Yuan B, Zhao C J, Sun X Y, et al. Lightweight liquid metal entity [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(14): 1–10.
- [11] 中国科学技术协会学会学术部. 常温液态金属: 将如何改变未来 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2019.
Department of Academic and Societies Affairs, China Association for Science and Technology. Room temperature liquid metal: How to change the future [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2019.
- [12] 刘静. 热学微系统技术 [M]. 北京: 中国科技出版传媒股份有限公司, 2008.
Liu J. Thermal micro-system technology [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2008.
- [13] 刘静. 微米/纳米尺度传热学 [M]. 北京: 中国科技出版传媒股份有限公司, 2001.
Liu J. Micro/nano scale heat transfer [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2001.
- [14] 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.
- [15] Liu J. Advanced liquid metal cooling for chip, device and system [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 2020.
- [16] Deng Y G, Liu J. Design of a practical liquid metal cooling device for heat dissipation of high performance CPUs [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2010, 132(3): 31009–31014.
- [17] Zhang Q, Zheng Y, Liu J. Direct writing of electronics based on alloy and metal ink (DREAM Ink): A newly emerging area and its impact on energy, environment and health sciences [J]. *Frontiers in Energy*, 2012, 6(4): 311–340.
- [18] Zheng Y, He Z Z, Yang J, et al. Direct desktop printed-circuits-on-paper flexible electronics [J]. *Scientific Report*, 2013, 3: 1–7.
- [19] 刘静, 王倩. 液态金属印刷电子学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.
Liu J, Wang Q. Liquid metal printed electronics [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 2019.
- [20] 刘静, 王磊. 液态金属3D打印技术: 原理及应用 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.
Liu J, Wang L. Liquid metal 3D printing: Principles and applications [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 2019.

- [21] Guo R, Sun X Y, Yao S Y, et al. Semi-liquid-metal-(Ni-EGaIn)-based ultraconformable electronic tattoo [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(8): 1–15.
- [22] Guo R, Tang J B, Dong S J, et al. One-step liquid metal transfer printing: Towards fabrication of flexible electronics on wide range of substrates [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(12): 1–10.
- [23] Zhang Q, Gao Y X, Liu J. Atomized spraying of liquid metal droplets on desired substrate surfaces as a generalized way for ubiquitous printed electronics [J]. *Applied Physics A*, 2014, 116: 1091–1097.
- [24] Yi L T, Liu J. Liquid metal biomaterials: A newly emerging area to tackle modern biomedical challenges [J]. *International Materials Reviews*, 2017, 62(7): 415–440.
- [25] Liu J, Yi L T. *Liquid metal biomaterials: Principles and applications* [M]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2018.
- [26] Zhang J, Sheng L, Jin C, et al. Liquid metal as connecting or functional recovery channel for the transected sciatic nerve [EB/OL]. (2014-04-20)[2020-05-15]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1404/1404.5931.pdf>.
- [27] Guo R, Liu J. Implantable liquid metal-based flexible neural microelectrode array and its application in recovering animal locomotion functions [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(10): 1–11.
- [28] Wang Q, Yu Y, Pan K Q, et al. Liquid metal angiography for mega contrast X-ray visualization of vascular network in reconstructing in-vitro organ anatomy [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2014, 61(7): 2161–2166.
- [29] Wang X L, Yao W H, Guo R, et al. Soft and moldable Mg-doped liquid metal for conformable skin tumor photothermal therapy [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2018, 7(14): 1–9.
- [30] Wang X L, Fan L L, Zhang J, et al. Printed conformable liquid metal e-skin-enabled spatiotemporally controlled bioelectromagnetics for wireless multisite tumor therapy [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(51): 1–15.
- [31] Wang Q, Yang Y, Yang J, et al. Fast fabrication of flexible functional circuits based on liquid metal dual-trans printing [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27: 1–12.
- [32] Guo R, Wang X L, Yu W Z, et al. A highly conductive and stretchable wearable liquid metal electronic skin for long-term conformable health monitoring [J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(7): 1031–1037.
- [33] Wang X L, Guo R, Liu J. Liquid metal based soft robotics: Materials, designs and applications [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(2): 1–8.
- [34] Xu S, Yuan B, Hou Y, et al. Self-fueled liquid metal motors [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(35): 1–15.
- [35] Liu J, Sheng L, He Z Z. *Liquid metal soft machines: Principles and applications* [M]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte. Ltd., 2018.
- [36] Sheng L, Zhang J, Liu J. Diverse transformation effects of liquid metal among different morphologies [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(34): 6036–6042.
- [37] Zhang J, Yao Y Y, Sheng L, et al. Self-fueled biomimetic liquid metal mollusk [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(16): 2648–2655.
- [38] Sheng L, He Z Z, Yao Y Y, et al. Transient state machine enabled from the colliding and coalescence of a swarm of autonomously running liquid metal motors [J]. *Small*, 2015, 11(39): 5253–5261.
- [39] Wang H Z, Yao Y Y, Wang X J, et al. Large magnitude transformable liquid-metal composites [J]. *ACS Omega*, 2019, 4(1): 2311–2319.