



液态金属研究的超学科性、泛学科交叉性及其工程学启示

刘静^{1,2}

1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 未来技术学院, 北京 100049

摘要: 液态金属, 如镓基、铋基合金及其衍生材料, 可在常温下实现液态与固态、柔性与刚性的可逆转换。凭借丰富的物态和高度可调的属性, 这类材料正推动物理、化学、生物医学、电子工程、机器人以及数据中心冷却、先进能源等领域的深刻变革, 催生出一系列前沿交叉学科与战略性新兴产业。本文回顾液态金属物质科学的发展脉络, 总结了其突破过程中偶然性与必然性交织的规律, 以及颠覆式与渐进式协同创新的特点; 并以液态金属芯片冷却、印刷电子与半导体、生物医学材料及柔性可变形机器人等方向为例, 阐释了液态金属所具有的超学科与泛学科交叉特性及其演进路径, 剖析了其中基础科学与工程学协同进化的研究范式。通过与现有学科及工业类别的深度融合, 进一步提炼出对应的交叉学科群。同时探讨了如何利用人工智能加速创新, 并赋能非传统领域人才的培养模式。总体而言, 液态金属兼具微观基础科学属性与宏观工业应用价值, 学科跨度广泛。相关研究工作可为新兴研究方向的合理研判、预测与培育提供有益参考, 有望推动更多底层创新, 进而促进交叉学科的创立与发展。

关键词: 液态金属; 物质科学; 交叉学科; 超学科; 研究范式; 工程学

中图分类号: G301

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)04-0438-14

引言

当前, 人类社会正步入科技大爆发的时代^[1], 机器革命甚至推动部分文明水平呈现指数级增长^[2]。半导体、量子科技、超导、人工智能、脑机接口、人形

机器人以及具身智能等新兴领域不断涌现, 学科边界日渐模糊, 跨学科与超学科探索日益成为基础研究中科技突破的核心源泉^[3]。纵观各学科的起源与演进, 一部分领域呈现出从零星萌芽走向日益繁荣的模式, 如计算机软硬件系统; 另一部分则经历涨落起伏, 在

收稿日期: 2026-05-14; **修回日期:** 2026-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91748206)

作者简介: 刘静 (1969—), 男, 博士, 研究员、教授, 研究方向为液态金属物质科学、工程热物理与生物医学工程学。E-mail: jliu@mail.ipc.ac.cn

引用格式: 刘静. 液态金属研究的超学科性、泛学科交叉性及其工程学启示[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(4): 438-451. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260061. CSTR: 32282.14.JES.20260061

LIU J. The Transdisciplinarity and Broad Interdisciplinary Nature of Liquid Metals Studies and Its Engineering Implications[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(4): 438-451. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260061. CSTR: 32282.14.JES.20260061

爆发、停滞与复苏的循环中螺旋式上升。以人工智能为例，其早在 20 世纪 50~60 年代便已诞生，虽数次掀起研究热潮，却因基础理论与硬件能力的限制而屡入沉寂；如今，随着芯片技术、先进算力、大数据与网络技术的成熟，它又以爆发之势再度席卷全球。还有一些学科虽长期备受重视并持续获得大量投入，却始终局限于高门槛的工业领域。半导体正是如此——这一资本、人才与技术高度密集的制造业，数十年来极大推动了全球科技进步与人类文明发展，但其主流材料及器件的制造仍主要依赖高温、高真空、高能耗与复杂工艺。这些难以逾越的高技术壁垒，使其不易普及至个体应用层面。

打破这类应用瓶颈，唯有依靠物质科学与技术的底层创新。计算机从大如楼宇的庞然大物演变为轻便可携的掌上终端，正是晶体管、芯片与光刻等技术持续突破的成果。将不可能变为现实，关键在于找到突破口。在此背景下，一类在人类文明中长期存在、却几乎被忽视，直至 21 世纪初才逐渐显现的物质——常温液态金属，如镓基、铋基合金等^[4]——因其电、磁、热、流体、力学与化学等综合性能卓越^[5-7]，得以在常温下实现固液转换、成型制造与实际应用，从而突破了金、银、铜、铁等传统金属需数百乃至上千摄氏度熔点的限制；同时，其安全无毒的属性也避免了水银、钠钾合金、铷、铯、钫等传统液态金属的使用局限，极大拓展了应用范围（表 1）。近二十年的发展不断表明，液态金属是一个学科高度密集、交叉性强、充满机遇的重大科技领域，相关研究与应用的涌现点亮了生机勃勃的科技之树，并正成长为参天大树（图 1）。事实上，人类文明始终与液态金属相伴：从春秋战国时期的生铁冶炼，到秦始皇陵中以水银象

征江河湖海，皆为其例。只是今日的液态金属已远非昔比，功能更为强大丰富。该领域所呈现的跨学科特性与广泛交叉性，正深刻影响诸多基础科学、工程学与新兴产业，其作用不止于简单助力，更带来了传统理念与应用瓶颈的底层革新。相关发现不断冲击人们对物质科学的经典认知，引发了从科学研究到技术范式的深刻转变。

这种深度交叉使液态金属独树一帜，跨学科与超学科现象在其中比比皆是。相较之下，许多经典学科各有侧重：生命科学着眼于生命本质并服务于医疗健康，计算与信息科学聚焦信息的生成、传播与处理，能源科学关注能量的获取与利用，航天科技则致力于飞行器的发射、运行与维护。液态金属与绝大多数领域均存在千丝万缕的联系，甚至成为破局的关键。例如，液态金属印刷电子与半导体技术的出现，使电子制造变得触手可及，为快速成型电子电路、功能器件乃至集成电路与终端芯片，开启了前所未有的非光刻路径^[5]。这类方法既可实现大面积批量生产，又能根据个性化需求将单件制造成本降至与批量生产相当的水平，其独特而显著的优势正为半导体制造业注入新的活力。

液态金属催生的新兴科技亦遵循此理：液态金属神经连接与修复技术的提出，为重大疾病治疗带来颠覆性医学方案；可变形液态金属量子科技正在突破传统认知的边界；最早的超导现象发现于水银（又称汞），如今液态金属的重新引入又为超导材料探索提供了新思路^[6]；而液态金属进入星际领域，则有望推动未来太空科技的发展^[7]。以当前备受瞩目的人形机器人为例，类似科幻电影《终结者》中的液态金属可变形机器人，正不断挑战业界对传统刚体机器的固有

表 1 液态金属典型分类
Table 1 Typical classification of liquid metal

分类	典型代表	熔点	使用安全性
经典高熔点金属	金、银、铜、铁	金(1064.63℃)、银(961.93℃)、铜(1083.4℃)、铁(1538℃)	生物相容性优异、性能稳定，但制造成型需借助高温
传统常温液态金属	水银、钠钾合金、铷、铯、钫	水银(-38.86℃)、K ₇₈ Na ₂₂ (-11℃)、铷(38.89℃)、铯(28.44℃)、钫(27℃)	或有毒性，或遇水爆炸，或有一定放射性
新兴常温液态金属	镓、镓基合金、铋基合金	镓(29.76℃)、镓基合金(熔点可低至 10℃以下)、铋基合金(熔点可低至 50℃以下)	安全无毒，常温下可作流体及固体使用且易于切换相态

认知。与以往观念不同的是, 液态金属在柔性机器人领域展现出全方位的应用潜力^[8], 覆盖柔性传感、执行器、电池、逻辑器件、电气系统、可变形骨骼、局域网系统及多种仿生机构。这些新型液态金属单元有望显著提升现有机器人技术水平, 为未来人形机器人实现更高智能、更强安全性与更佳灵巧性铺平道路。

总的来说, 液态金属材料科学已从昔日的冷门领域, 跃升为当今世界科技与工业的前沿热点。其崛起历程与纳米技术、石墨烯、超导、人工智能等新兴领域有相似之处, 但液态金属独特的广泛可扩展性尤为罕见: 从宏观宇宙物质到微观量子材料, 从前沿产业到太空科技, 从电子制造到生物医学, 从极端高温冷却到低温超导, 从常规流体到千变万化的功能材料乃至机器人组装, 液态金属均展现出巨大潜力与独特支撑作用。自 21 世纪初以来, 持续演进与拓展的液态金属已展现出一幅宏大的科技画卷 (图 1)。本文将系统梳理其发展历程、总结变革规律, 这对于新兴学科的正确研判、合理布局与培育, 乃至推动人类科技整体进步与文明发展, 都具有重要意义。文章还将围

绕液态金属的跨学科交叉性及工程学启示展开分析, 并对其未来前景进行展望。

1 液态金属研究与应用的历史回眸

人类对液态金属的认知与应用大致经历了三个阶段: 古典时期主要表现为高温冶炼中的熔融金属, 其间偶有汞的出现与使用; 近现代以 20 世纪用于核反应堆冷却的汞及钠钾合金为代表; 进入 21 世纪后, 逐步过渡到镓基、铋基合金以及由此衍生出的众多复合功能材料。纵观人类文明史, 高温熔融金属往往最先引起关注, 而常温下呈液态的金属却长期被忽视或边缘化, 本文所探讨的正是后者。

金属往往给人以冰冷、坚硬且泛着光泽的印象。所谓液态金属, 即处于液态的金属。金、银、铜、铁等常见金属大多需要在千摄氏度以上的高温下才能熔化, 其制品渗透在社会生活的方方面面; 而它们的熔炼与加工水平, 更折射出冶炼技术的高度, 标志着青铜时代、铁器时代等文明阶梯。然而, 正因其熔点极

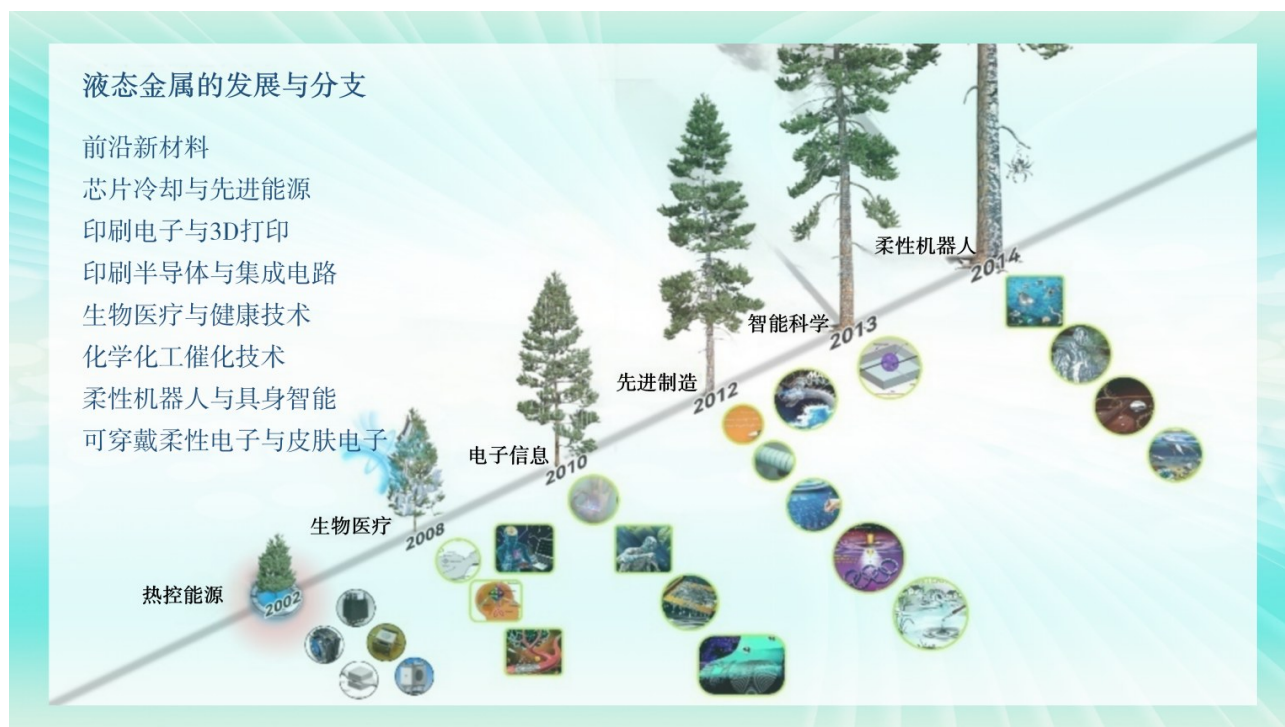


图1 21 世纪初以来常温液态金属逐步点亮的科技树及其发展态势图

Figure 1 Technology tree of room-temperature liquid metals gradually illuminated since the early 21st century, along with development trends

高,这类金属的制备与研究长期局限于专业及工业领域。与之相对,大自然也赋予了在常温下即为液态的金属,人类与之相伴的历史同样悠久。

在古代东西方的炼丹术与医药实践中,利用汞(Hg,熔点 -38.86°C)及其化合物用于制药的记载屡见不鲜^[9-10]。20世纪中叶,伴随工业时代的鼎盛,汞的应用达到空前规模^[11],广泛用于温度计、血压计、核反应堆及太空能源等领域。然而,随着对其毒性认识的加深,汞的使用逐渐受到严格限制^[12]。与汞长达千年的使用历史不同,同为常温液态的钠钾合金(如 $\text{K}_{78}\text{Na}_{22}$,熔点 -11°C)则是20世纪技术飞跃的产物^[13],主要用作地面与太空核反应堆的冷却剂。这类合金虽使用较为便利,但遇水易爆,危险性极高,其应用场合因此受到很大限制^[14]。在漫长的历史进程中,液态金属的应用几乎完全集中于汞与钠钾合金;这些或具剧毒、或具高风险的物质,构成了20世纪以前人们对液态金属的主要认知。

或许正是汞与钠钾合金留下的隐患,使得另一类安全可靠、常温下呈液态的“绿色”金属材料——如镓基与铋基合金(表1,熔点通常介于数摄氏度至数十摄氏度之间)——尽管早被发现,却长期“藏在深山人未识”。除保险丝及少数特殊半导体等零星用途外,业界曾对其知之甚少。然而,正是这类非传统液态金属,展现出近乎全能的优异特性:在常温下可实现固液相互转换,兼具流动性、高导热性与高导电性,且易于与各类先进材料结合,从而构建出功能卓越的复合材料,大幅简化制造流程。这为其开辟了广阔的研究空间,引发了全球范围的探索热潮^[15],并正推动液态金属新工业日趋繁荣、蓬勃发展^[16]。随着液态金属芯片冷却、印刷电子学与半导体、生物医学材料^[17]以及柔性机器人等新兴领域的快速发展,液态金属正从昔日的“配角”华丽转身,成为本世纪的关键前沿技术,续写自己的传奇。

2 21世纪常温液态金属——人类利用金属的第二次革命

常温液态金属的引入,在很大程度上重塑了既有

的科学、技术与应用范畴,其发现与发明被誉为“人类利用金属的第二次革命”。这一领域已成长为国际重大科技前沿与热点,推动了一系列新兴交叉学科的涌现与繁荣。与此同时,相关基础研究也催生了新工业的崛起,“液态金属谷”的创立^[4]使中国成为这一战略性新兴产业的策源地。审视液态金属业已形成的学科脉络,可以揭示其内在的发生与发展机制。

21世纪初,为突破高端芯片普遍面临的“热障”难题,液态金属芯片冷却技术应运而生^[18],带来了热管理观念上的重大变革。液态金属的导热率远超传统流体工质数十倍,展现出显著的综合优势,一举打破了工业界沿用数十年的风冷、水冷及热管散热模式,极大地消除了制约芯片发展的技术瓶颈与冷却极限,推动了高功率密度器件与系统的实用化,并带动了常温液态金属热物理研究的繁荣及相关产业发展。同时,不断推陈出新的液态金属复合材料,作为现有常温液态物质中导热率最高的材料之一,以及性能卓越的热界面材料,已在全球工业界得到广泛应用。在先进算力与人工智能应用对尖端散热需求日益紧迫的背景下,液态金属热管理技术不可或缺的价值愈加凸显。此外,中国空间站上首次开展的铋基流体散热与固液相变多模式传热试验,更为液态金属的太空应用开辟了新机遇。

在先进电子制造技术与装备领域,液态金属印刷电子学/半导体技术的提出^[5,19],被视为对传统电子与集成电路制造规则的重要变革^[20-22]。与经典光刻蚀减模式不同,这类被称为“梦之墨”(其名称源于Direct wRiting of Electronics based on Alloy and Metal ink的英文缩写DREAM Ink^[5],并获业界共识^[23])的电子增材制造技术,显著降低了能耗、水耗及制造成本,现已成为全球研发热点^[24-25]。中国作为该领域的提出者与倡导者,率先研制出世界首台液态金属桌面电子电路打印机^[26-27]、可在任意材质表面实现电子制造的喷印方法^[28-29],以及低温相变转印^[30]、选择性黏附智慧印刷^[31]、金属液相3D打印^[32]、半导体与集成电路复合打印^[33]等一系列核心装备与技术,部分成果已实现工业化规模应用,并逐步服务于国内外产业与市场。

为突破传统重大疾病治疗面临的严峻挑战,液态

金属的引入也推动了临床医学技术的深刻变革^[34], 促使液态金属生物材料学从无到有逐步建立, 一系列基础研究与应用技术同样展现出广泛的价值。在典型成果中, 针对世界性医学难题发展出的液态金属神经连接与修复技术, 被业界誉为“令人震惊的医学突破与科学突破”; 液态金属高分辨血管造影、液态金属栓塞肿瘤血管治疗技术、液态金属内外骨骼、液态金属注射电子等一系列全新方法, 也已成为国际前沿热点, 部分成果甚至已进入临床应用阶段。

值得指出的是, 液态金属作为基础科学前沿, 在长期探索中揭示了一系列发人深省的新现象与新效应^[35], 持续引发全球广泛关注^[36]。其中尤以液态金属自驱动机器效应、电控多变形现象以及胞吞效应等为代表; 这些发现在一定程度上改变了科学界对传统物质、流体及刚体机器的既有认知, 被认为“预示着柔性机器人新纪元”, 并催生了液态金属可变形机器人这一全新领域。在新材料创制方面, 液态金属物质科学领域涌现出众多新概念材料, 如液态导体-绝缘体转换材料、多孔液态金属、水相液态金属、轻量化液态金属、彩色荧光液态金属、高导热-电绝缘界面材料, 乃至可用于组装复合功能体的仿生液态金属细胞等, 均成为该领域的新知与生长点。综合这些创制理念, 具有普遍意义的液态金属组合材料学^[37]的提出, 更为新一代功能材料的创制奠定了统一性理论基础。

3 液态金属的超学科性

《道德经》有言:“水利万物而不争, 而万物莫能与之争。”此句既喻示人的格局, 亦揭示出深刻的物质内涵——水对世间万物具有根本的利他性。类似地, 常温下如水般流动的液态金属, 同样具备此种属性: 其刚柔并济、润物无声的特质, 蕴含着深刻的材料研发与应用理念。液态金属利万物的特性, 恰与《道德经》“道生一, 一生二, 二生三, 三生万物”的宇宙生成论形成绝妙呼应, 对应了“液态金属组合材料学”的深刻内涵^[37]。该理论将各类金属与非金属材料体系纳入其中, 为品类繁多、功能各异的新型材料研发指明了基本的技术路径。

这种液态衍生机制与“水利万物”异曲同工: 通过协同金属基体、表面化学物质、离子作用以及与其他物质间的深层物理、化学与生物效应, 能够充分发掘并融合这些机制, 从而按需设计与制备目标功能材料, 满足多样化的应用需求。在元素周期表的118种元素中, 金属元素多达96种, 其中仅有镓等极少数元素在常温下呈液态, 但借助合金化、材料基因组学^[38]及物态调控等手段, 可以创制出多种多样的复合材料。由此, 超导体^[6]、高性能高熵材料^[39-40]以及更多特殊材料的制备也能从中受益: 利用常温液态金属溶液处理难熔高温金属颗粒, 并辅以特定的后处理程序, 即可快速生成目标产物, 显著降低优质材料的发现与制备难度。

液态金属组合材料学^[37]具有普遍适用性, 涵盖几乎所有物相与结构形态, 包括液相、固相、气相及其组合。该理论包含八条基本材料创制路径: ①多组分合金化; ②微/纳米材料介导; ③结构化; ④表面修饰; ⑤多孔化; ⑥微/纳米填料改性; ⑦低维化; ⑧多模式组合。基于这些策略, 可从看似无定形的液态金属中快速设计与制备出大量“有形”功能材料, 它们既保留了液态金属的典型特征, 又被赋予多种可调谐性能, 如优异的热学与电学性质、丰富的电化学及生物医学特性、协同行为乃至多场响应功能等。构建材料的基本单元从微观到宏观皆不受限, 这些广义特征意味着液态金属组合学蕴藏着持续的材料发现机遇, 其应用亦可自然延伸至众多产业领域。

一旦物质的固有属性可以被重新定义, 许多技术应用的瓶颈便不再构成制约, 进而可能引发工程领域的重大变革, 甚至催生新的业态。我们知道, 物质通常表现为固态、液态和气态三种相态, 而一切制造过程都涉及原材料在不同物态与形态之间的转换^[15]。如果这一环节能在常温下完成, 许多制造和应用模式将发生根本性转变。以电子电路、半导体器件乃至集成电路与芯片为例, 其传统制造方式通常依赖高温、高能耗和复杂工艺; 若能在常温下直接印刷成型, 将带来显著优势与竞争力, 足以对产业界产生颠覆性影响。

更进一步, 液态金属还可向自然界中最为独特的功能物质——生命学习, 由此催生出类生命活物质与

智能物质的创制。生命体作为地球上神秘而复杂的存在,其生长发育、新陈代谢、遗传变异以及对外界刺激响应,均依赖于活性物质。出于对自然的敬畏与好奇,人类从未停止过对人工活物质以及碳基生命之外可能生命形式的探索与设想。通过有目的的设计与灵活的物质组合方案,人造生命有望部分复现漫长的生物进化历程。液态金属凭借其天然的柔顺性与流体特质,为发展类生物智能传感器提供了全新的技术途径,正为生物医学与可穿戴传感^[41]、功能增强与感知^[42]、人与物体运动监测^[43-44]、人机交互^[45]、闭环控制系统、自适应响应与自修复乃至灵巧机器人发展等诸多紧迫现实需求注入新的活力。

液态金属兼具高度综合的物理、化学与生物学性质,可通过氧化还原或电化学作用与多种物质结合,形成形态与功能各异的复合体。其良好的生物安全性、环境相容性及类生命智能,使其能够主动或被动响应多种外场刺激^[46]。尺度、功能与形态的千变万化,为人工模拟多彩的自然生命创造了先决条件。通过充分挖掘液态金属的超常潜力,有望逐步构建覆盖细胞、组织、器官乃至完整功能体的液态金属仿生系统。这可能引发一场从基础研究到功能实现、从单一物质到复合材料体系、从微观到宏观科学的飞跃。基于上述底层要素,液态金属物质科学正成为最具交叉特色的学科领域之一。

4 液态金属的泛学科交叉特性与工程学意义

业界曾以主导材料为人类文明断代,将历史划分为石器时代、青铜时代、铁器时代、水泥时代、钢时代、硅时代乃至新材料时代^[47],可谓“一类材料,一个时代”。其深层逻辑在于:每个时代的尖端技术得以发挥作用,根本上依赖于核心材料性能的保障;换言之,制约技术发展的关键,也在于材料本身。若将液态金属与各类典型材料并列,并系统评估其物理化学属性,便会发现:液态金属集金属的导电性、导热性、液体的流动性、可赋予磁性、生物或化学特性、易于成型及大范围刚度调控能力,以及在室温下快速制造半导体与功能材料等优异性能于一身,而常规材料通常难以同时兼顾如此全面多元的性能优势。

从这个层面看,液态金属堪称地球上维度最高的物质之一。它既能以固态存在,也能以液态呈现;既能导电,经特殊处理还可转变为半导体甚至绝缘体,并能被赋予磁性。集多种材料优势于一身,这使液态金属具备了强大的功能适应性:它既能作为冷却计算机芯片的工质,也能用作印刷电路的电子墨水^[48],还能承担生物体内神经信号连接的液态导体职责,甚至可为研发如科幻电影《终结者》中那般灵活多变的液态金属机器人提供现实材料基础。凭借这些跨学科特性,液态金属有望在众多关键领域发挥重要作用。目前,它正被迅速应用于高功率器件冷却^[49]、半导体及集成电路制造、柔性机器人构建等方向。随着对这类物质及其衍生材料的持续开发,人类在面对各种高维度挑战时将愈加从容。

液态金属昭示了诸多科学与工程学科前沿领域的发展方向^[15]。相较于各类热门材料,液态金属展现出卓越的多材料协同与跨学科融合能力,对众多领域均产生赋能效应,尤其有助于推动一系列新兴学科的建立与发展。依据国务院学位委员会、教育部2022年9月发布的《研究生教育学科专业目录》,本文对液态金属可能催生的交叉领域内容进行了提炼,并将其归纳总结于图2,从中可见液态金属具备超学科特质:不仅交叉范围广泛,且能与绝大多数学科形成融合协同。例如,数学、物理、化学、天文、地理、生物等基础学科中,本就存在不少与液态金属相关的交叉点;而在工程学科中,无论是电子、机械、流体、能源,还是信息通信、生物医学工程等领域,近年来也已不断涌现液态金属的应用。甚至对哲学学科而言,液态金属通过吞食铝获取动力这一惊人现象的发现,也促使学界重新思考生命的本质,并引发诸如“是否存在金属基生命”及“能否以无机物创造生命”等哲学追问。面对液态金属在各交叉方向的蓬勃兴起,予以充分重视并适时加以引导,对于加速培育新兴工业具有重要意义。

从实践角度看,液态金属工程学也正快速推进。如前文所述,基于多重原因,液态金属未来可能形成的应用版图远非当前所能穷尽。因此,主动布局、深入研判,乃至引入人工智能全面探索新兴方向,将有助于推动关键领域的先行确立与可持续发展。在与现

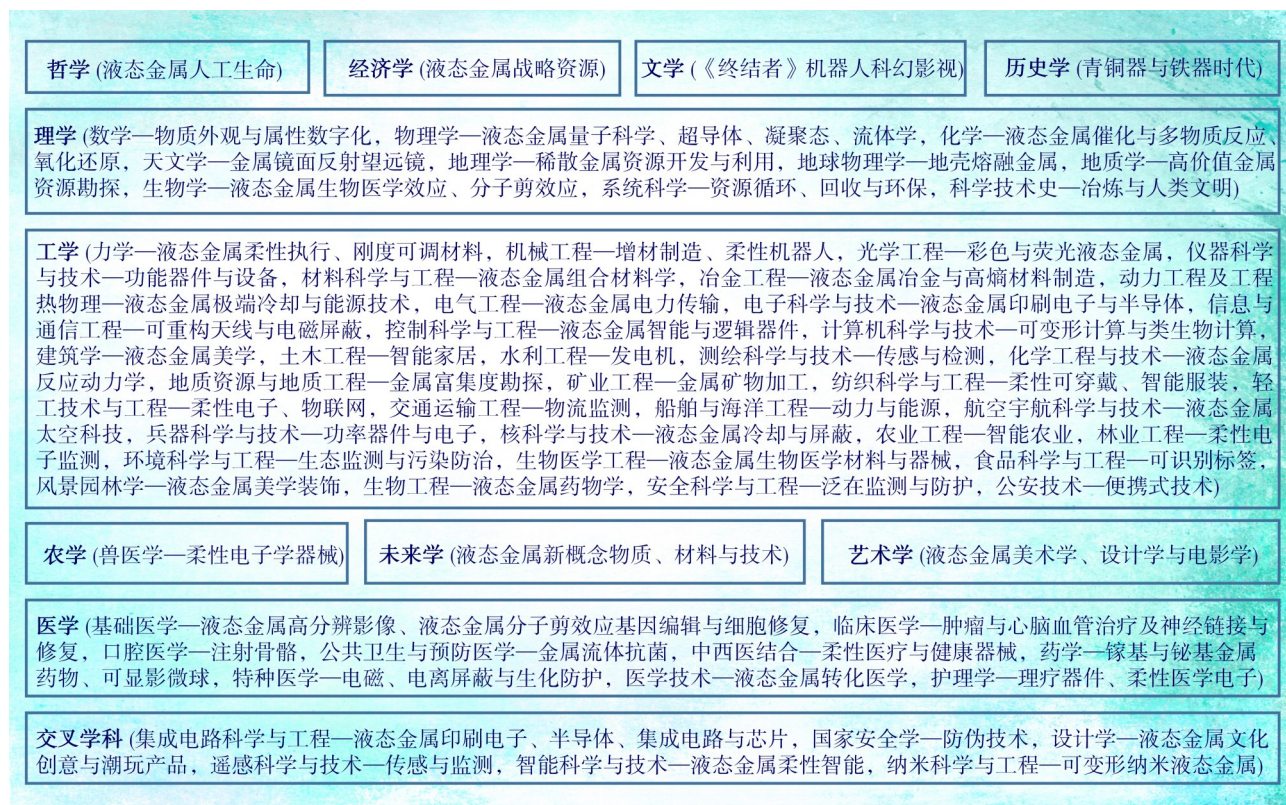


图2 液态金属研究的超学科性、泛学科交叉性的特点及其有关融合范畴

Figure 2 The transdisciplinary and pan-disciplinary cross-cutting characteristics of liquid metals studies and their associated categories of integration.

有工业体系融合方面, 液态金属的应用可大致分为以下三大领域:

(1) 液态金属轻工业与重工业: 液态金属进入传统轻、重工业, 有望革新多项制造与加工流程。(2) 液态金属战略性新兴产业: 以液态金属为驱动的新一代信息技术、新材料、生物技术、新能源、航空航天、海洋工程及空天技术等领域, 已展现出巨大潜力。(3) 液态金属装备制造业: 该领域涵盖基础制造、精密仪器与通用装备、能源与动力装备、高端装备^[50]、环境与安全装备等多个方向。

可以肯定, 液态金属在几乎所有上述领域均能发挥重要作用, 甚至带来根本性变革。图3归纳了液态金属与当前科技热点及研发方向的部分结合点, 由此可对其前沿性略窥一斑。在这些方向上, 液态金属均具有独特而新颖的作用。值得欣喜的是, 部分分支方向已获业界重视并迅速发展, 例如液态金属前沿新材料、液态金属AI芯片冷却、液态金属电子信息、先

进传感、低温生物医学^[51]、液态金属具身智能机器人等; 另一些分支则仍处于酝酿或培育阶段, 如液态金属太空科技、生物医疗产业等。持续推动相关研发, 将助力实现新的产业突破与跃升。

5 液态金属交叉学科形成的偶然性与必然性

液态金属的超学科性和泛学科交叉特质, 折射出新兴领域的内在活力与发展规律, 对前沿基础科学、工程学科进步、创新创业乃至人才培养具有重要启示。该领域既包含已成规模的热点前沿, 也孕育着许多尚处萌芽阶段的潜力方向。针对热点前沿, 应集中优势力量攻克关键理论与技术难题, 从而引领工业化进程; 而对“无人区”的科技探索, 虽充满不确定性, 也需主动投入、前瞻布局。科学发现与发明, 往往是由量变到质变、必然与偶然交织的过程。在具有潜力的方向上长期坚守、甘坐“冷板凳”, 机遇常会

5.4 重视偶然发现对科技创新的独特价值

在科学技术进步中,偶然性往往发挥着不可替代的作用。液态金属柔性机器人研究大门的开启,便带有一定的偶然色彩:它最初源于研究团队在开展液态金属神经连接与修复实验时,受电学诱发金属液滴旋转现象的启发,进而推动了一系列电控多变形效应的探索。这一过程不仅催生了液态金属机器人的提出,也带来了后续诸多基础性发现,从而开辟出全新的柔性机器人领域。该案例表明,科学进程常常难以预先设计,重大发现却往往孕育于偶然的观察之中。充满机遇的液态金属物质科学,有望继续激发更多创新与突破。

6 液态金属不同时期颠覆式创新与渐进式创新特点

创新,本质上是一条不断创造新事物、实现新发现与新发明的演进之路。在领域萌生之初与成熟阶段,创新的难度与机遇显然不同^[52]。液态金属的早期工作多属于从无到有的颠覆式创新,涌现出大量前所未有的概念、发现与发明。随着该领域逐渐进入业界视野并受到广泛关注,研发活动日益活跃,但相较于早期,此阶段的工作更多体现为对已有成果的渐进式创新,仅间或出现零星标志性进展。所幸,液态金属的内涵与外延极为广阔,已有工作只是其科技与工业发展进程中的冰山一角,未来仍将持续呈现渐进式创新与颠覆式创新交相演进之势。若能深刻把握其中关键,仍可不断取得重大突破,乃至推动工程应用实现长足发展。

变革究其本质,乃是研究者观念与认知维度的跃迁,可称之为“思维相变”。正如物理学中的相变依赖于物质种类、相变点与外部能量三者缺一不可,作为创新主体的科技工作者要实现突破,同样取决于其知识储备(知识体质)、创新阈值与外部信息刺激。充满机遇的液态金属领域,正为这类创新提供了丰富的外部刺激与条件。以物理学的均相成核与异相成核为例,异相成核虽更易触发,却带有随机性;而在大尺寸体系中,外部能量的注入会抹平微观个体相变行

为的涨落。类似地,个体的创新常常因其自身有限却独特的经验及外部偶然事件而触发,充满不确定性;而对整个时代与人类群体而言,科学发展的必然性将展现为壮阔的创新浪潮。以当今人工智能领域的突破为例,即便不在当前场景出现,也终将在别处涌现;在人工智能的推动下,创新甚至可能呈现指数级增长。未来,随着人工智能的广泛应用,个体创新或将部分让位于以AI为代表的、强力的主动式群体创新——这对科研个体、企业机构乃至国家创新体系而言,均是值得深思并需适时调整应对的趋势。

从学科早期与创新群体的布局来看,资源投入与统筹兼顾尤为必要。液态金属领域的早期创新多表现为个别独立实验室的突破,这说明新兴学科在发轫之初的发现往往源于个体,再逐渐扩展至群体,因而对初期的个体研发活动给予必要的资金支持十分关键。随着人工智能工具日益强大,部分不确定性较高的创新将逐步让位于机器主导的主动探索。但在可预见的未来,个体创新与群体智能创新仍将并存,只是后者会逐渐占据主导地位。然而,即便机器的创新能力持续加速增强,其运行仍依赖于人,最终的操作与反馈也须回归于人。不同认知维度的个体,所获创新成果自然千差万别。归根结底,人是所有创新的最终主体。因此,仍需着力培育个体与群体的创新能力,促进二者之间的协同互动。无论何时,液态金属交叉学科作为一片美丽富饶的科技绿洲,始终为创新提供充满机遇的源泉与土壤。

7 结论

常温液态金属的出现具有鲜明的超学科性与广泛学科交叉特点,在很大程度上改变了人们对于传统物质、流体机器与刚体材料的既有认识,一系列基础科学发现与底层技术发明的取得,促成了液态金属全新工业的提出和创建,所引发的全球范围接二连三的突破正在影响着科技与工业的格局。众多态势表明,自21世纪初以来液态金属点亮的科技树已呈现出旺盛的生命力,为物质科学与工程学打开了广阔的发展空间,也为交叉学科领域创新人才的培养提供了丰厚沃土。本文通过回顾液态金属从冷门领域迈向全球研发

热潮的发展历程,系统梳理了其点亮科技树、催生新兴产业的演进路径,得出以下结论。

在新材料创制方面,液态金属基因工程与组合材料学的提出,探明了整合液态金属与各类金属或非金属颗粒、液态溶液乃至气态物质的协同创新路径,由此衍生出大量物理化学性质可按需设计调控的先进功能材料,从而极大满足方方面面的特定需求;与此同时,由于常温液态金属溶液的引入,使得相关材料的合成与制造变得快捷而高效,典型者如高熵合金、超导材料以及类生物活物质等的制备乃至半导体、终端功能器件的直接印制等等。

在应用层面,液态金属的引入,为诸多关键领域经典技术难题的解决带来了新曙光,可以说是物质科学带给 21 世纪人类工程学前沿的珍贵礼物:一系列尖端 AI 芯片及高功率密度器件面临的热障瓶颈正被打破,相应的运行会由于液态金属的强力冷却而不再严重受阻;一度只在科幻电影中出现的柔性可变形机器人的研发,由于可编程液态金属物质、电控可变形效应以及自驱动液态金属机器现象等的发现,成为十分具象而现实的科研目标;全球面临的一系列重大医学挑战如神经修复、癌症治疗、心脑血管医学等由于颠覆性液态金属生物材料学的诞生,带来全新的希望;低温生物医学领域的经典难题如复杂组织器官的

低温保存瓶颈正由于液态金属介入传热理论与技术的提出得以打破,“终结者”材料可望终结传统低温保存技术中乃至活体冻存面临的诸多不可能。

在先进制造领域,液态金属印刷电子、半导体及集成电路乃至泛介质 3D 打印技术的到来,正将“人人可以成为电子工程师”的愿景变为现实,未来,无处不在、无所不能打印的液态金属功能器件的制造将变得触手可及。可以说,如今的研究和应用从地面到太空,从电子、机械、化工到生物学,从自然科学到人文领域,正在越来越多见到其身影。

总之,液态金属兼具材料属性广泛可拓性及固态与液态的维度切换特性,极大地引发了基础研究理念与应用范式的深刻变革,为大量前沿科技领域提供了丰富的创新机遇;对其所蕴藏的无尽可能加以主动布局 and 探索,将加速更多交叉学科、关键技术与产业集群的形成。与此同时,面对新兴领域尤其是“科技无人区”的不确定性与挑战性,研究者须具备“敢为天下先”的勇气、远见与毅力,才能不断超越。在创新意识、内在动力与外部激发的协同引导下,科研探索可望步入良性循环和螺旋式上升。不难预见,随着更多富有创新精神、勇于实践、敢于探索的人才队伍的持续涌现,液态金属物质科学与工程学必将迎来更多的突破与辉煌。

致谢

本文图 1 制作得到中国科学院理化技术研究所郭明晖同志的帮助,谨以致谢。

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会,中国科学院. 未来 10 年中国学科发展战略(21 本)[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Discipline Development Strategy for the Next 10 Years (21 Volumes)[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 埃里克·布莱恩约弗森,安德鲁·麦卡菲. 第二次机器革命: 数字化技术将如何改变我们的经济与社会[M]. 蒋永军, 译. 北京: 中信出版社, 2014.
Brynjolfsson E, McAfee A. The Second Machine Age: Work Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies[M]. New York: W. W. Norton & Company, 2014.
- [3] 罗伯特·弗罗德曼. 牛津跨学科手册(第二版)[M]. 詹泽慧, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2025.
Frodeman R. The Oxford Handbook of Interdisciplinarity[M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2017.
- [4] 刘静, 杨应宝, 邓中山. 一个全新工业的崛起: 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, 2018.

- Liu J, Yang Y B, Deng Z S. Research Report on the Developmental Strategy of China Liquid Metal Industry: Rise of A Brand New Industry[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press Co., Ltd., 2018.
- [5] Zhang Q, Zheng Y, Liu J. Direct writing of electronics based on alloy and metal (DREAM) ink: A newly emerging area and its impact on energy, environment and health sciences[J]. *Frontiers in Energy*, 2012, 6(4): 311-340.
- [6] Hua C, Liu J. Tree model machine learning to identify liquid metal-based alloy superconductor[J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(28): 11857-11877.
- [7] Shi J H, Xing Z R, Guo M H, et al. Liquid metals for the booming of space exploration[J]. *Cell Press Blue*, 2026, 1(2): 100011.
- [8] Li N, Yuan X H, Li Y Q, et al. Bioinspired liquid metal based soft humanoid robots[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(35): 2404330.
- [9] Wujastyk D. Histories of mercury in medicine across Asia and beyond[J]. *Asiatische Studien - Études Asiatiques*, 2015, 69(4): 819-830.
- [10] 赵匡华. 我国古代“抽砂炼汞”的演进及其化学成就[J]. *自然科学史研究*, 1984, 3(1): 11-23.
- Zhao K H. Evolution and chemical achievements of "pumping sand to smelt mercury" in ancient China[J]. *Studies in the History of Natural Sciences*, 1984, 3(1): 11-23.
- [11] Nriagu J O. Legacy of mercury pollution[J]. *Nature*, 1993, 363(6430): 589.
- [12] Clarkson T W, Magos L. The toxicology of mercury and its chemical compounds[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2006, 36(8): 609-662.
- [13] Leonchuk S S, Falchevskaya A S, Nikolaev V, et al. NaK alloy: Underrated liquid metal[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(43): 22955-22976.
- [14] Gorse-Pomonti D, Russier V. Liquid metals for nuclear applications[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, 353(32-40): 3600-3614.
- [15] 刘静. 液态金属: 无尽的科学与技术前沿[J]. *科学(上海)*, 2022, 74(2): 14-18.
- Liu J. Liquid metal: Endless frontier of science and technology[J]. *Science*, 2022, 74(2): 14-18.
- [16] 邓中山. 蓬勃发展的液态金属新工业[J]. *科学*, 2022, 74(2): 31-34.
- Deng Z S. Liquid metal: A booming new industry[J]. *Science*, 2022, 74(2): 31-34.
- [17] Mao J B, Kim J H, Seo S. Current status and outlook of low-melting-point metals in biomedical applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(31): 2307708.
- [18] 刘静, 周一欣. 以液体金属镓或其合金作流动工质的芯片散热用散热装置: CN1223919C[P]. 2005-10-19.
- Liu J, Zhou Y X. Heat dissipation device for chip cooling using low-melting-point metal or alloy as working fluid: CN1223919C[P]. 2005-10-19.
- [19] Zheng Y, He Z Z, Gao Y X, et al. Direct desktop printed-circuits-on-paper flexible electronics[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1786.
- [20] Handwerk B. Printing electronics just got easier[N]. *National Geographic New*, 2013-05-09.
- [21] Gibbs W W. How to brew your own conductive ink[J]. *IEEE Spectrum*. Dec 25, 2013.
- [22] Chen S, Liu J. Pervasive liquid metal printed electronics: From concept incubation to industry[J]. *iScience*, 2021, 24(1): 102026.
- [23] 马卓敏. 神笔马良将梦想变现实[N]. *中国科学报*, 2015-12-21(006).
- Ma Z M. Ma Liang's magic brush turns dreams into reality[N]. *China Science Daily*, 2015-12-21(006).
- [24] Jiang C J, Li W Q, Wu Q S, et al. Shape-adaptive electronics based on liquid metal circuits printed on thermoplastic films[J]. *Nature Electronics*, 2026, 9(1): 45-58.
- [25] Gao S, Cui Z L, Wang X L, et al. Liquid metal E-tattoo[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(6): 1551-1575.
- [26] Zheng Y, He Z Z, Yang J, et al. Personal electronics printing *via* tapping mode composite liquid metal ink delivery and adhesion mechanism[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4588.
- [27] 喻思变. 我国研制出世界首台液态金属电子电路打印机[N]. *人民日报*, 2014-04-17.
- Yu S L. China develops world's first liquid metal electronic circuit printer[N]. *People's Daily*, 2014-04-17.
- [28] 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(3): 1091-1097.
- [29] Emerging Technology from the arXiv. Liquid metal printer lays electronic circuits on paper, plastic, and even cotton[J]. *MIT Technology Review*, Nov. 19, 2013.
- [30] Wang Q, Yu Y, Yang J, et al. Fast fabrication of flexible functional circuits based on liquid metal dual-trans printing[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(44): 7109-7116.
- [31] Guo R, Yao S Y, Sun X Y, et al. Semi-liquid metal and adhesion-selection enabled rolling and transfer (SMART) printing: A general

- method towards fast fabrication of flexible electronics[J]. *Science China Materials*, 2019, 62(7): 982-994.
- [32] Wang L, Liu J. Liquid phase 3D printing for quickly manufacturing conductive metal objects with low melting point alloy ink[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 57(9): 1721-1728.
- [33] Li Q, Lin J, Liu T Y, et al. Printed flexible thin-film transistors based on different types of modified liquid metal with good mobility[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(10): 202403.
- [34] 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.
- [35] 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. Basic Phenomena and Effects of Liquid Metal Materials Science[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019.
- [36] 中国科协学会学术部, 中国科协学会服务中心. 常温液态金属如何改变未来[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2019.
- Academic Department of the China Association for Science and Technology, Service Center for Societies of China Association for Science and Technology. How Room-Temperature Liquid Metals Reshape the Future[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2019.
- [37] Wang D W, Ye J, Bai Y L, et al. Liquid metal combinatorics toward materials discovery[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(52): 2370372.
- [38] 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.
- [39] Liang J J, Cao G H, Zeng M Q, et al. Controllable synthesis of high-entropy alloys[J]. *Chemical Society Reviews*, 2024, 53(12): 6021-6041.
- [40] Yuan B, Liu C L, Tang S L, et al. Liquid metal enabled metallurgy for high-entropy alloys[J]. *Soft Science*, 2026, 6(1): 24.
- [41] Li G Q, Liu S H, Xu Z W, et al. Recent advancements in liquid metal enabled flexible and wearable biosensors[J]. *Soft Science*, 2023, 3(4): 37.
- [42] Qi J, Yang S J, Jiang Y Z, et al. Liquid metal—polymer conductor-based conformal cyborg devices[J]. *Chemical Reviews*, 2024, 124(5): 2081-2137.
- [43] Zhan F, Li N, Zhan R H, et al. A liquid metal dynamic wetting strategy for spatiotemporal monitoring of hand movements[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 98.
- [44] Dong H X, Wang Z H, Yang C, et al. Liquid metal-based flexible sensing and wireless charging system for smart tire strain monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(2): 1304-1312.
- [45] Xin Y M, Zhou B, Shao H Y, et al. Solid-liquid two-phased gallium-stannum binary metals enabled flexible and stretchable electronic circuit for interactive electronic devices[J]. *Science China Technological Sciences*, 2026, 69(5): 1500111.
- [46] Cao L X, Yu D H, Xia Z S, et al. Ferromagnetic liquid metal putty-like material with transformed shape and reconfigurable polarity[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(17): 2000827.
- [47] 杨英健, 张邦维. 人类社会物质文明发展的六个时代[J]. *华南理工大学学报(社会科学版)*, 2011, 13(6): 101-109.
- Yang Y J, Zhang B W. On dividing development stages of human substance civilization into six ages[J]. *Journal of South China University of Technology (Social Science Edition)*, 2011, 13(6): 101-109.
- [48] Liang S T, Yang J, Li F J, et al. Recent progress in liquid metal printing and its applications[J]. *RSC Advances*, 2023, 13(38): 26650-26662.
- [49] Zhang X, Deng Z S. Roadmap towards new generation liquid metal thermal interface materials[J]. *Science China Technological Sciences*, 2023, 66(6): 1530-1550.
- [50] Liu C K, Li M L, Hu D W, et al. Liquid metal-enabled synergetic cooling and charging of superhigh current[J]. *Engineering*, 2025, 47: 117-129.
- [51] Hou Y, Wang X H, Zhang J, et al. Liquid metal cryoprotectants for scalable biosamples cryopreservation[J]. *Matter.*, 2026: 102764.
- [52] 克莱顿·克里斯坦森. 创新者的窘境[M]. 胡建桥, 译. 北京: 中信出版社, 2020.
- Christensen C M. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail[M]. Boston, MA: Harvard Business School Press, 1997.

The Transdisciplinarity and Broad Interdisciplinary Nature of Liquid Metals Studies and Its Engineering Implications

LIU Jing^{1,2}

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

2. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Highlights

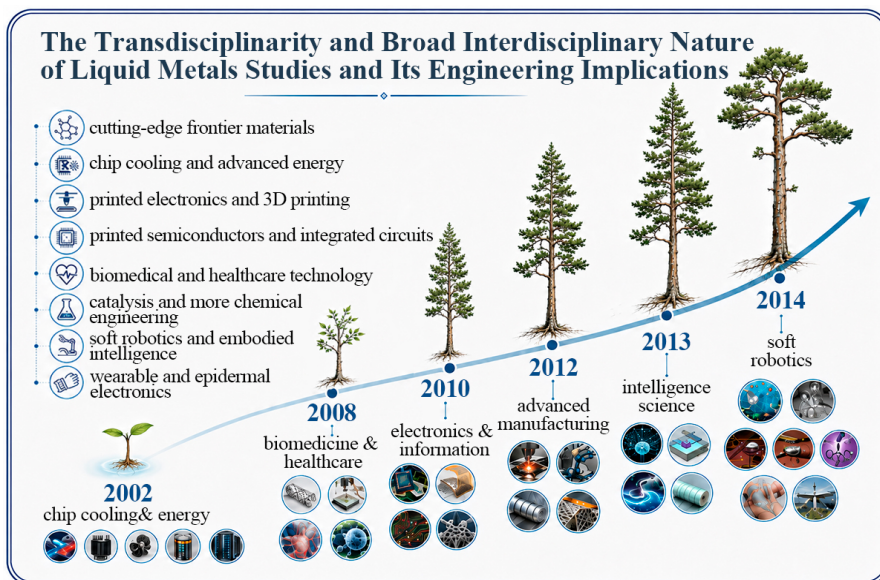
Profile science and technology tree progressively illuminated by room temperature liquid metals since the beginning of this century.

Elucidate enabling characteristics of liquid metals for diverse materials, their functional scalability and vast development potential.

Outline transdisciplinarity and broad interdisciplinary nature of liquid metals and distill clusters of cross-disciplines thus enabled.

Summarize breakthrough features of liquid metal sciences and forecast emerging directions and ever diverse cross-disciplines.

Graphical Abstract



Abstract: Liquid metals such as gallium- or bismuth-based alloys, along with their derived materials, can achieve reversible transitions between liquid and solid states as well as between flexible and rigid states at room temperature. Owing to their plentiful outstanding tunability in physical state and intrinsic properties, these materials are driving profound transformations across rather wide fields such as physics, chemistry, biomedicine, electrical engineering, robotics, data center cooling and advanced energy *etc.*, giving rise to a wide range of cutting-edge interdisciplinary frontiers and strategic emerging industries. Consequently, research and development in the area has evolved from a previously niche topic into a remarkable surge of scientific and technological focus. To better advance the revolution of this cutting edge frontier, it is crucial to identify and interpret the developmental natures of the liquid metal science, technology and industry, prospect their future trends and propose solid ways to speed up the innovation activities.

In this article, we begin by interpreting the material demands driven by representative technological advances in modern and contemporary human history, thereby introducing the development landscape of room-temperature liquid metals in the 21st century and the sequential emergence of the science and technology tree they lighted up and the evolutionary trends. Then, we review the history of liquid metal research and applications, dividing it into several stages: High-melting-point metals such as gold, silver, and copper that bridge classical and modern times; Traditional toxic and highly reactive liquid metals like mercury and sodium-potassium alloys; and Currently prominent highly safe room-temperature liquid metals, including gallium and bismuth-based alloys. On this basis, we highlight the foundational discoveries and typical technological breakthroughs of room-temperature liquid metals, which have been hailed as "The Second Revolution in Human Utilization of Metals". Based on a discussion of the liquid metal genome and combinatorial materials, we elucidate the exceptional enabling characteristics of liquid metals for various materials, as well as their functional scalability and vast development potential. Using liquid metal chip cooling, printed electronics and semiconductors, biomaterials science, and transformable robotics as illustrative examples, we outline the transdisciplinary and pan-disciplinary cross-fertilizing nature of liquid metals and their advancement styles. We

interpret the typical paradigms over the fundamental researches and engineering practices. And through deep integration with established subjects and industries, we distill a corresponding cluster of cross-disciplines enabled from liquid metals. Furthermore, we also explore AI pathways for accelerating innovation and empowering talent cultivation in unconventional areas. Through an overview of the development trajectory of liquid metal science, we outline both accidental and inevitable breakthrough features during their evolution, as well as the characteristics of disruptive versus incremental innovations in the area.

The emergence of room-temperature liquid metals is characterized by a pronounced transdisciplinary nature and extensive interdisciplinary integration, which has largely reshaped conventional understandings of traditional materials, fluid machines, and rigid matter. The technology tree illuminated by liquid metals has exhibited vigorous vitality, opening up vast development spaces for materials science and engineering, while also providing fertile ground for cultivating innovative talent in interdisciplinary fields. The liquid metals profoundly trigger fundamental and practical research paradigm shifts and game changing industries, offering abundant innovation opportunities across many frontier scientific and technological fields. Proactively exploring and harnessing the boundless possibilities embedded in liquid metals will accelerate the formation of more interdisciplinary fields, key technologies, and industrial clusters.

Overall, liquid metal science and technology bridges both microscopic fundamental sciences and macroscopic industrial applications, exhibiting a breadth of scope that is rarely seen among most of today's fields. This article deepens the understanding of the general liquid metal sciences, engineering and interdisciplinary subjects and offers guiding insights for the evaluation, forecasting and incubation of emerging directions, and is expected to foster more bottom-up innovations and promote the establishment of ever diverse cross-disciplines.

Keywords: liquid metals; material science; interdisciplinary research; transdisciplinarity; research paradigm; engineering