

既有流体特性又兼具金属特性

液态金属：打开传统技术的变革大门

前沿材料观察②

◎本报记者 崔爽

近日，清华大学与中国科学院理化技术研究所的联合研究小组首次创制出一种水相液态金属物质，展示了一系列独特的类生物组织与器官的节律行为，为人工生物组织的创制提供了全新的物质基础。相关成果发表在《物质》杂志上。

在由工信部和国务院国资委联合发布的第一批前沿材料产业化重点发展指导目录中，液态金属位列其中。“随着室温液态金属的一系列革命性应用，这类以往只被零星研究或在特殊领域引发关注的材料逐渐进入公众视野。液态金属促成了若干新科学发现，也打开了传统技术的变革大门。”文章通讯作者、清华大学教授、中国科学院理化技术研究所研究员刘静表示。

集两种截然不同的性质于一身

“金属是地球上最丰富也是最重要的材料之一。在元素周期表中，118个元素中超过90个是金属元素。大部分金属具有较高的熔点，在室温下呈固态。但在元素周期表中，还存在着一些特殊的金属，它们的熔点比较低，如铷(Rb)、铯(Cs)、钫(Fr)、汞(Hg)和镓(Ga)，这类熔点在室温附近的金属或合金材料被称为室温液态金属。”中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员李润伟对科技日报记者解释，铷、铯、钫的放射性和高化学活性以及汞的易挥发性和高毒性，限制了它们在实际生活中的应用。镓基/铋基/铟基/锡基金属及其合金等，是目前研究和应用最为普遍的液态金属材料。

李润伟表示，液态金属在室温下既展现出像水一样的可变形、可重构的流体特性，同时又表现出高导电、导热性能优异的金属特性，是一类物理化学性质十分新奇的新型功能材料，在基础科学研究和前沿技术开发中都拥有极为丰富的探索空间。他进一步解释，以镓为例，其具有极宽液相区（熔点29.76℃、沸点2403℃）、极低饱和蒸气压、无毒以及较好生物相容性等特点。

此外液态金属有巨大的表面张力，例如镓基液态金属的表面张力约为水的10倍，巨大的表面张力使液态金属倾向于缩成球形液滴。镓基液态金属的另外一个重要属性是极易氧化并形成纳米级氧化物表皮，表面氧化层“皮肤”一旦形成，其表面张力会大幅降低，而氧化层一旦被去掉，高表面张力又会立刻恢复。通过电或化学的手段，调节液滴表面张力，可以实现液滴大尺度变形、定向运动、渗透等。此外氧化层“皮肤”赋予镓基液态金属流体性质的同时，还赋予其一定的机械性能，并使其润湿和黏附行为发生改变，为实现液态金属电子器件的图案化创造了条件。



科研人员展示液态金属的流动性。

带动新技术应用体系构建

如今，液态金属正带动新一代信息技术、新能源、先进制造、生物医学等领域的创新发展。中国科学院理化技术研究所液态金属中心主任邓中山介绍，2002年，中国团队首次提出将低熔点金属，特别是镓基液态金属流体用于芯片冷却，从此开启了这类高安全性室温液态金属的基础与应用研究。此后，我国又相继开创了液态金属在功能材料、热控与能源、印刷电子与3D打印、生物医学、可变形机器人等多个领域的研究，系统建立了相应方向的理论与应用技术体系，创建了全新的液态金属工业，并推动其发展，使液态金属从最初的冷门领域发展成为备受瞩目的重大科技前沿。

据邓中山介绍，液态金属作为同时兼具流动性、高导热性、高体积相变潜热的材料，为先进散热技术带来了颠覆性变革。例如，液态金属通过浸润改性后制备的热界面材料，其热阻远低于现有硅脂基热界面材料；将液态金属作为流体散热介质，其换热系数远高于现有液冷技术能达到的换热系数；将液态金属（低熔点合金）作为相变热控材料，其具有传热迅速、单位体积相变潜热大、相变材料内温度梯度小、相变前后体积变化小等显著优势。

“由于兼具各种综合优势，液态金属有望成为理想的超高功率密度散热材料，并带动构建崭新的技术应用体系。”邓中山评价。

同时，由于液态金属是一种液体导电材料，因此可以利用印刷（涂布）工艺将其制造为柔性化、薄膜轻质化、表面共形化电子线路及器件，并有望与规模化生产方式相结合。液态金属还可与其他材料结合应

用在“刚柔相济”的机器人上，构建全新概念的先进机器人技术。

产业化进入快速发展阶段

“当前，世界科技正处于革命性变革的新阶段，液态金属堪称催生突破性发现和技术变革的‘科技航母’。”刘静介绍。

李润伟表示，凭借新奇的特性，液态金属在众多领域展现出广泛的应用前景，成为具有重大工业应用价值和国家战略意义的新材料。虽然早在2000年以前，美国和日本就开始了液态金属的研究，但研究主要集中在汞、钠钾合金等材料，旨在解决特殊领域如核反应堆散热等问题。

液态金属同时也是我国资源禀赋比较突出的材料。如镓基合金、铋基合金等的研究和大规模应用都发端于中国，自本世纪初开始，该材料的应用已陆续推进到我国热控能源、电子制造、生物医疗、柔性机器人、化学化工、机械加工等几乎所有的工业领域。“目前我国在液态金属及其器件应用方面已经形成了较为完备的布局，建立了完善的基础研究、应用研发和产业推广体系。”李润伟说。

邓中山表示，近年来，我国在液态金属产业化方面进入快速发展阶段，居国际领先水平，已孵化出一系列在世界上处于领先地位或填补空白的液态金属高新技术企业。

李润伟同样提到，随着云南液态金属谷产业集群的建立，以及北京梦之墨、宁波初和科技等企业的涌现，我国液态金属在工业化验证、国家标准建立、弹性传感器等领域已经形成特色。这些企业和研究机构的努力，使液态金属在工业化和商业化应用方面取得了重要的进展，为我国在液态金属应用领域的发展注入了新的动力。

石油基炭材料将带动形成千亿级新兴产业链

◎本报记者 宋迎迎

日前，中国科协发布2023年十大产业技术问题，“石油基炭材料高端化技术如何发展”在列。作为一类由石油衍生而来的高价值材料，石油基炭材料在能源、环保、化工等领域具有广泛的应用前景。

“未来，随着技术的进步和应用领域的拓展，石油基炭材料将发挥更加重要的作用。”中国石油大学（华东）化学化工学院教授刘东接受科技日报记者采访时表示，实现石油基炭材料高端化需要高校院所和企业持续不断地探索与创新，推动科技成果转化，从原料精制、生产工艺、产品质量等方面入手，打通高端石油基炭材料的生产流程。

应用前景广阔但大规模生产仍面临挑战

石油基炭材料是一类由石油或石油衍生物制备的炭材料，具有易石墨化、高结晶度、高热稳定性和优异的导电性等特性。这些独特的物理化学性质，使其

在诸多领域展现出巨大的应用价值。

如何利用石油重质组分的高碳氢比特性来制备石油基炭材料，是目前该类材料研究的热点。刘东告诉记者，利用热转化或催化转化等工艺，可以将石油原料中的烃类和非烃类化合物转化为高碳含量且具有特定功能或结构特性的固体材料。他表示，石油基炭材料的特性使其在航空航天、新能源、电动汽车、信息电子、轨道交通、机械装备、冶金化工等多个领域和产业中得到广泛应用。

“石油基炭材料具有高导热导电性和出色的力学性能，是优异的结构与功能一体化材料。这是其他材料无法媲美的。”刘东介绍。

随着科技的发展和需求的增加，石油基炭材料在各个领域的应用前景将更加广阔。在冶金和储能领域，石油基炭材料已广泛用于制备超高功率石墨电极和高性能锂离子电池的负极材料；在核工业领域，石油基炭材料可以制备用于核反应堆的各向同性石墨。

石油基炭材料还可制备沥青基炭纤维和复合材料。沥青基炭纤维具有出色的轻量高模性能、导电导热性能、抗疲

和耐腐蚀性能，已经广泛应用于航空航天、车体制造等领域；石油基炭材料也常用作先进碳/碳复合材料的增强体，提高复合材料的强度和硬度等性能。

石油基炭材料正成为全球争相研究和开发的热点。然而，如何提高其性能、降低制备成本并实现可持续生产，是当前科研人员和有关企业等面临的主要挑战。刘东解释说，石油基炭材料的研发、生产需要大量专用设备投入，设备不断更新就会出现高折旧率及相应维护费用。另外，石油基炭材料的研发和商业化应用的不确定性比较高，研发和商业化的开销也较大。且石油基炭材料进入市场之前，需经过理论层面的突破及应用层面的反复验证。即使通过理论实验或示范生产阶段，仍可能因设备、工艺等因素的限制无法进入大规模生产阶段。

高端化技术发展需促产学研用深度融合

近年来，中国已经成为世界上最大的石油基炭材料生产国之一，相关企业已经超过千家，并在常州、无锡、青岛和深圳等地形成了产业集群。历经多年艰苦攻关，我国在石油基炭材料的研究和应用方面不断涌现出令人瞩目的创新成果。

比如在高功率和超高功率石墨电极材料方面，我国相关企业已经相继建成并投产了年产超过10万吨的高品质针状焦生产线，针状焦关键性能指标热膨胀系数达到了国外同类产品水平，满足了我国高功率和超高功率石墨电极的基本需求；在高性能石油基炭纤维方面，近几年我国实现了强度大于2.0吉帕、模量大于600吉帕以及导热率大于800瓦/米·度高性能碳纤维国产化，

在一定程度上解决了高性能碳纤维的自主保障问题，使我国成为继日本、美国之后第三个掌握高性能石油基炭纤维技术全流程核心技术的国家。

石油基炭材料高端化技术的发展，将有效解决一些当前的能源和环境问题。刘东表示，其首先会直接影响处于上游的炼化产业。“石油基炭材料的高端化，不仅可推动石油实现由燃料属性向材料属性的转变，促进炼化产品结构优化，推进炼油‘油转特’转型升级，还可以将碳原子固定在炭材料中，实现源头减排。”刘东说。

此外，下游的新兴炭材料产业也将受到影响。随着高端石油基炭材料精细化发展，其种类和数量逐渐丰富，性能水平也将不断提升，可满足新能源、航空航天、冶金等领域的不同应用，从而带动整个产业链的发展。“可以说，未来石油基炭材料将带动形成千亿级的新兴产业链。”刘东表示。

实现石油基炭材料高端化技术的发展是一项长期且艰巨的任务。刘东认为，应以绿色低碳发展为总体原则，基于我国石油基炭材料上游产业基础和下游需求制定技术规划和产业发展规划，组织相关高校院所与企业协同攻关。

“科研人员和企业应持续不断地探索和创新，促进产学研用深度融合，弥补石化企业产业链短板。同时要与下游应用企业紧密联合，推动科技成果转化。”刘东表示，在这个过程中，科研人员和企业要进一步研究和改进炭化工艺，从而提高材料的导电性和机械性能等。

石油基炭材料产业的进步，也离不开政策护航。刘东建议，要健全知识产权保护制度，制定严格的产品标准和质量控制体系，进一步推动石油基炭材料高端化技术的发展和材料的广泛应用。

寻材问料

我国成功研发玻璃固化焦耳炉关键炉衬材料

科技日报讯（记者孙瑜）记者11月26日从中国建筑材料科学研究总院有限公司获悉，该院所属瑞泰科技股份有限公司（以下简称瑞泰科技）成功自主研发玻璃固化焦耳炉用高性能熔铸耐火材料。这是我国首次攻克核废料高放废液玻璃固化焦耳炉炉衬材料关键技术和工艺，对推动我国核能源工业的安全和可持续发展具有重大意义。

放射性废物处理是核能安全利用的最后一环，也是核工业实现闭式循环的关键一环。目前国际上最先进的废液处理方式是在1100℃或更高温度下，将放射性废液和玻璃原料进行混合熔

解，冷却后形成玻璃体。玻璃体浸出率低、强度高，能够有效包容放射性物质并形成稳定形态。焦耳炉是高放废液玻璃固化工程技术的核心工程设备，其内衬的熔铸耐火材料的制造一直是玻璃固化技术国产化的技术壁垒，严重制约我国核废料处理工程技术进步。

据悉，瑞泰科技此次研发的熔铸耐火材料熔铸熔铸刚玉产品以铝-铬固溶体为主晶相，具有良好的化学稳定性和优异的抗硼硅酸盐玻璃液侵蚀性能。产品具有完全自主知识产权，将为我国核废料处理工程技术进步提供重要材料支撑。

新型复合膜有助实现高效盐湖提锂

科技日报讯（记者颜满斌）11月26日，记者从兰州大学获悉，该校稀有同位素前沿科学中心陈照萌教授、李湛研究员团队，在盐湖卤水战略元素膜分离研究中取得系列新进展。相关研究成果先后在《美国化学会志·金》和《纳米快报》上发表。

锂作为重要的不可再生资源，在我国新能源、先进制造等领域具有重要地位。我国的锂资源主要存在于盐湖卤水中。目前，传统盐湖提锂技术仍存在二次污染、成本高、回收率低、选择性差等问题。

自2020年开始，陈照萌团队致力于开发一种从卤水到高纯锂、再到锂同位素的连续分离提取工艺。研究团队成功设计出一种全新结构的二维异质膜复合膜（以下简称二维膜）。该膜利用二维膜层间的选择性限域传输过程，成功实现了在真实盐湖环境中对

锂及相关战略元素的分离提取。

据介绍，该类二维膜的通道允许小尺寸水合离子的快速通过，同时阻止了较大尺寸水合离子在二维膜层间的快速传输，进而实现了混合体系中多离子之间的高选择性尺寸筛分，具有较好的工业化应用前景。“二维膜层间同时存在两种结构，金属有机框架材料/石墨烯异质结构的存在显著提高了膜的选择性，而聚合物/石墨烯异质结构的存在改善了膜的机械强度和稳定性，进而大幅提升了膜的实际应用潜力。”陈照萌说。

李湛介绍，该技术实现了二维膜材料对于复杂体系中多离子之间的筛分，研究还解析了多种离子在二维膜层间的尺寸限域筛分机理。研究成果不但为先进二维膜材料的设计与构筑提供了新思路，也为复杂体系中相似物质之间的高效分离提供了新技术，同时为盐湖卤水中锂离子的高效分离提取开辟了一条新路线。

超材料技术已在多领域产生颠覆性效应

◎本报记者 叶青

日前，中国科学院院士褚君浩现场展示利用特殊材料实现“隐身术”的一则视频火了。“未来，随着‘隐身’技术和超材料的逐渐成熟，科幻作品里的隐身畅想将逐渐走向现实。”视频中，褚君浩表示，“相信未来还会有更多‘隐身’装备改变我们的生活。”

褚君浩所提到的超材料，目前已应用到电磁、声学、力学、热学和量子等领域。超材料的概念起源于20世纪60年代，但直到21世纪初才被人们真正关注。所谓超材料，指的是一种通过人工微结构在亚波长尺度内精确调控物理场的复合材料。科研人员通过对微观结构的精确设计和控制，可使超材料形成全新的功能结构。

随着超材料技术的飞速发展，研究人员已将其应用于各种先进装备，由此衍生的相关技术也已在多个领域产生了颠覆性效应。“在过去的20年时间里，前一阶段是在做基础研究，后一阶段是整个行业‘集中火力’，推动超材料从实验室进入到工程化阶段。”光启技术股份有限公司（以下简称光启技术）董事长刘若鹏认为，经过近10多年的发展，超材料技术已经成为新型装备研发和制造领域不可或缺的主流技术。如在航空航天装备领域，超材料可用于制造轻质、高强度的航天器材料，提高太空探测器和卫星的性能。在医疗领域，可以利用超材

料的声学特性，实现更高分辨率的医学影像。

“如今超材料出现了三个新变化。一是超材料应用面和功能性不断增强，从最初的边缘技术或者新兴技术变成了当前的主流技术；二是超材料技术实现了从第三代到第四代的更新迭代，并开始进入到大规模应用环节；三是超材料的应用量呈现数量级变化。”刘若鹏说。

日前，工信部、国务院国资委联合发布了第一批前沿材料产业化重点发展指导目录，超材料被列入该目录中。“这几年我们最主要的工作是努力实现超材料第四代技术产品的规模化量产。”刘若鹏介绍，第四代超材料技术颠覆了以往的技术认知。目前第四代超材料技术已取得重大突破，进入到应用阶段。预计今年底或明年初交付的一些产品，将会应用到第四代超材料技术。

近年来，我国新材料产业发展迅速，产业规模不断壮大。然而，由于前沿材料生产的技术门槛高、研发周期长，因此其在应用方面还有待进一步挖掘。“客观来看，超材料行业的发展空间非常大，它的发展将会影响到更多的行业。但如果要继续深入研究超材料，还需要对之有比较清晰的界定和定义。在一个学科发展越繁荣的时期，就越需要冷静和谨慎。”刘若鹏强调，任何一个新技术从实验室走向产业化都有共同规律，要尊重其共性和规律。



由辐射制冷超材料制作的能降温的钓鱼伞。

本版图片由视觉中国提供