

2026 年 8 月 24 日-2026 年 8 月 30 日

索引：

- 1、反常无电荷的连续域束缚态的观测
- 2、基于折纸机械比特的自锁非易失编码超表面
- 3、利用双稳态超材料中的非线性波实现任意机械记忆编码
- 4、各向异性键合 CsAg_2I_3 中涡量诱导短程有序化导致热绝缘
- 5、分层激光诱导石墨烯-液态金属复合热界面材料界面扩散和体渗流实现超低热阻
- 6、各向异性变形机器人材料实现多样化的集体行为

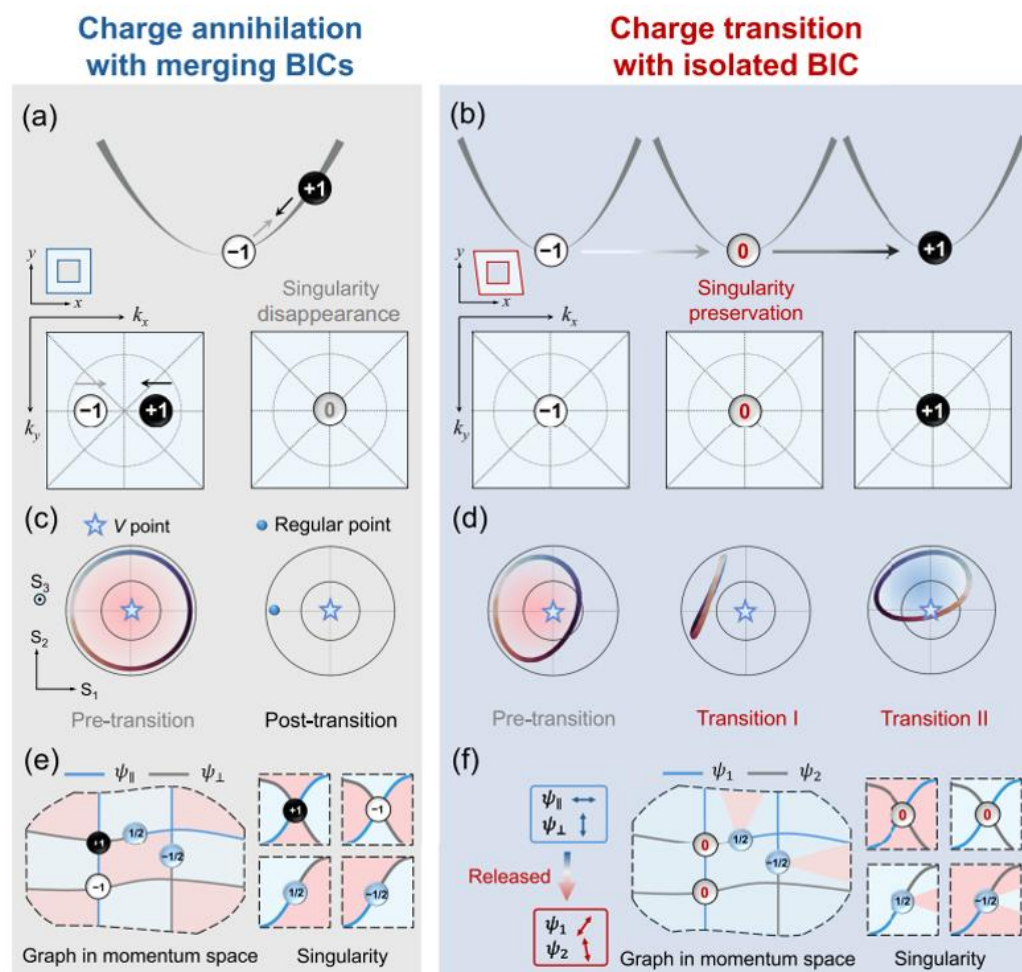
1、反常无电荷的连续域束缚态的观测

连续域束缚态 (BICs) 是一类嵌入辐射连续谱、却能够保持非辐射特性的特殊本征态，因其理论上可具有无限品质因子，并伴随稳定的动量空间偏振奇点，已成为拓扑光子学中的重要研究对象，在激光、传感、非线性光学和光力调控等方向具有广泛应用。传统认识通常将 BIC 与其周围远场偏振涡旋紧密联系：虽然 BIC 本身对应偏振不可定义的 V 点，但围绕该奇点的偏振态往往在庞加莱球赤道附近形成闭合轨迹，并环绕 S3 轴，由此产生非零量子化拓扑电荷。因此，BIC 的存在很大程度上被默认与这种偏振绕转结构相伴。然而，一个更基础的问题仍缺乏回答，即当偏振轨迹不再环绕 S3 轴，甚至拓扑电荷降为零时，BIC 是否仍然能够存在。与此同时，已有 BIC 拓扑电荷转变通常依赖多个奇点之间的产生、湮灭或合并，单个孤立 BIC 能否在保持自身存在的同时完成拓扑电荷改变，也有待进一步探索。

近日，清华大学的宋清华副教授研究团队通过对光子晶体结构施加连续剪切形变，打破面内镜面对称性，使原本具有旋转对称性的晶格逐渐演化为单斜结构，并由此连续调控 BIC 周围的远场偏振纹理。结果表明，随着结构形变，庞加莱球上的偏振闭合轨迹可由赤道附近逐渐倾斜，并经历极点穿越，在无需与其他奇点发生合并或湮灭的情况下，使单个孤立 BIC 的拓扑电荷在 -1、0 和 +1 之间连续转变。尤其在拓扑电荷为零时，BIC 仍保持与辐射连续谱解耦，表明环绕 S3 轴并非 BIC 存在的必要条件，从而揭示了一类超出传统偏振涡旋图景的“无电荷 BIC”。在此基础上，该研究进一步将 BIC 的形成机制从两种正交偏振态的节点线交叉，推广至任意两种不同偏振态之间的节点线交叉，并建立了能够依据节点线偏振状态预测庞加莱球绕转轨迹的半解析几何模型。实验制备的剪切变形硅光子晶体也观测到了与数值模拟一致的零拓扑电荷偏振分布。该工作由此拓展了 BIC 的拓扑描

述框架，并为动量空间偏振工程、结构光、偏振调控、拓扑激光及非线性光子学提供了新的设计自由度。

该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/wylv-cc97>

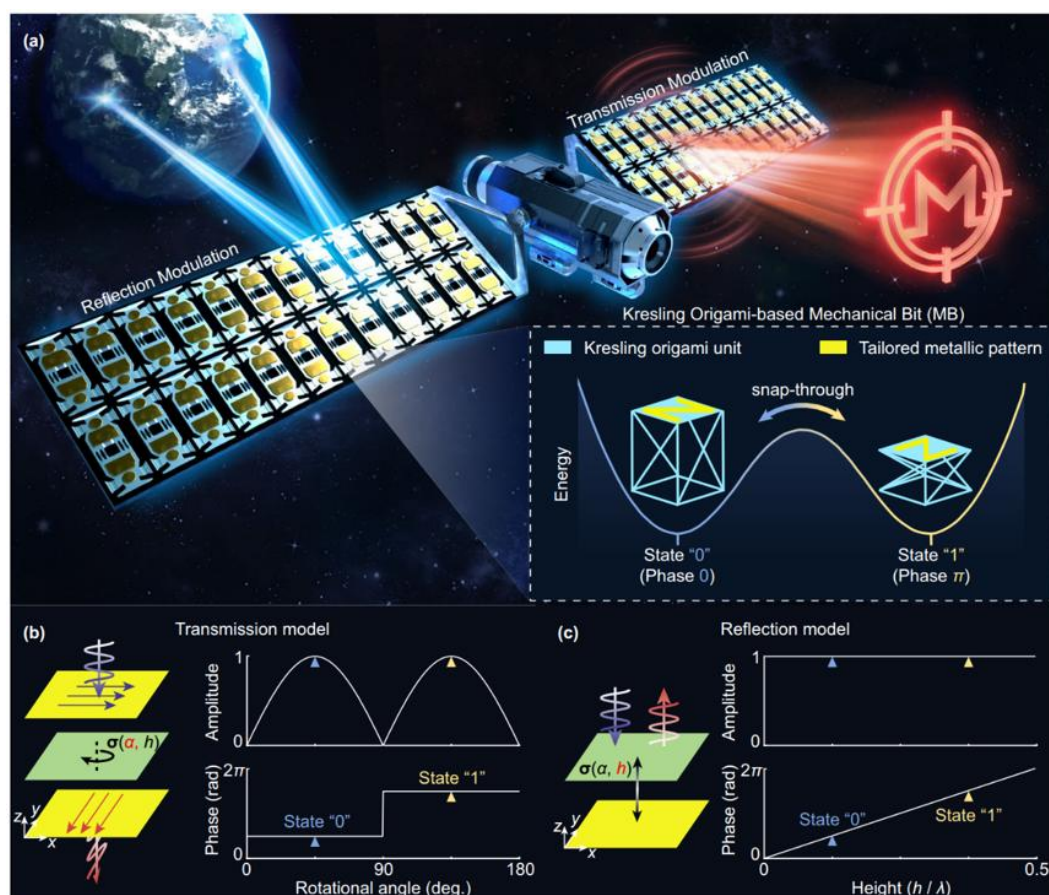
2、基于折纸机械比特的自锁非易失编码超表面

数字编码超表面通过调控独立超原子的电磁响应，为波束赋形、信息映射、可重构全息和衍射神经网络等功能提供了灵活平台。然而，现有电调编码超表面通常依赖 PIN 二极管、变容二极管及复杂偏置网络，需要持续供电维持编码状态，因此存在明显的“易失性”，限制了其在低功耗和能源受限场景中的应用。机械调制可通过结构形变改变电磁特性，为非易失调控提供新的路径，但传统拉伸、折纸、剪纸或旋转式结构多依赖连续形变，缺乏内禀状态锁定能力，容易受到环境扰动和执行误差影响。多稳态机械结构具有离散稳定构型和内禀能垒，可在无需持续能量输入的情况下保持状态。已有相关电磁结构主要集中于可切换吸波等整体响应，尚难实现信息编码所需的独立像素级相位控制，因此，将机械双稳态转化为可靠的数字电磁“比特”具有重要意义。

近日，浙江大学的景利乔研究员、陈红胜教授、王作佳研究员研究团队，提出一种基于 Kresling 折纸机械比特的自锁非易失编码超表面，将单元的两个机械稳定状态映射为二进制电磁相位。研究利用 Kresling 结构耦合的压缩与扭转自由

度，建立适用于透射和反射调制的理论模型，并设计两类 1-bit 超原子。多材料 3D 打印使折纸单元兼具轻量化、双稳态和环境适应能力，其状态可在零静态功耗下保持，并能抵抗小幅机械扰动。实验中，透射型超表面通过独立切换像素状态实现近场全息成像，反射型超表面则通过不同空间编码实现镜面反射、双波束和多波束调控。该工作将机械逻辑中的“比特”概念引入电磁信息处理，使结构本身同时承担调控、存储与锁定功能，为低功耗、高鲁棒和非易失可重构超表面提供了新的设计范式，并为多比特编码、自适应控制和复杂环境下的智能通信系统奠定基础。

该研究发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-77313-6>

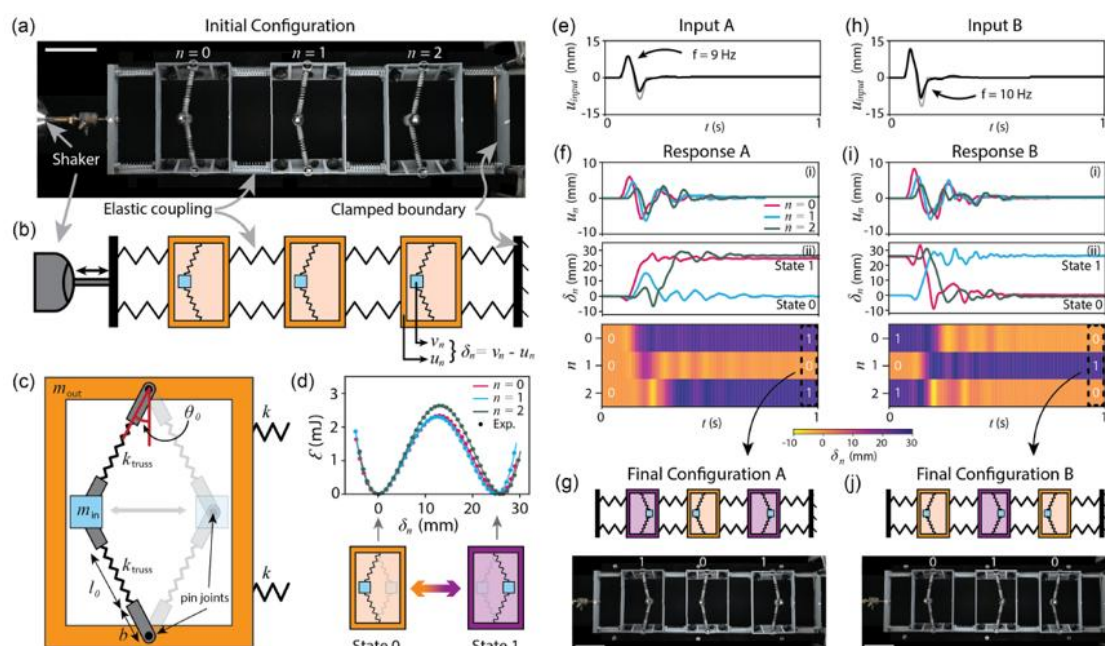
3、利用双稳态超材料中的非线性波实现任意机械记忆编码

机械超材料具有非常规且可调的力学性质，可在外界刺激下实现能量俘获、波导与滤波及形状变换等功能。引入具有多个稳定构型的多稳态单元后，其功能进一步拓展至耗散介质中的长距离脉冲稳定传播、力学性质切换和形状重构。特别是，双稳态单元的离散稳定状态可对应数字比特，因此适用于机械记忆，并已用于信息存储、逻辑门和计数器，为嵌入式机械智能、智能材料及机械计算提供了新的可能。尽管机械超材料的存储能力难以媲美传统计算机，但其具有低能耗及抗强电磁场等独特优势。实现机械记忆的关键在于可控写入各单元状态。已有方法包括逐单元局域驱动、通过设计单元耦合预编程特定序列、利用全局旋转驱动实现任意状态转换，以及借助类似“多米诺效应”的跃迁波前依次切换单元状态。然

而，现有方案仍存在操作繁琐、灵活性受限等问题。

近日，哈佛大学 Katia Bertoldi 教授团队，提出了一种双稳态“质量-质量”型机械超材料，通过在结构边界施加非线性动态激励，实现任意机械记忆模式的写入。该超材料由一维弹性耦合质量单元阵列构成，每个单元内部包含一个具有两种稳定状态的双稳态元件。结合实验与数值模拟，作者证明，经过精确设计的动态输入能够选择性触发结构内部特定双稳态单元的状态跃迁，从而以确定性的方式写入任意空间分布的机械记忆比特。此外，研究还考察了单元内部质量分布对系统响应的影响，发现通过优化质量配置可以提高空间控制能力，并降低系统对输入扰动的敏感性。该波驱动机制为机械超材料中的信息写入与存储提供了一种新的实现范式。

相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/pkk5-dykb>

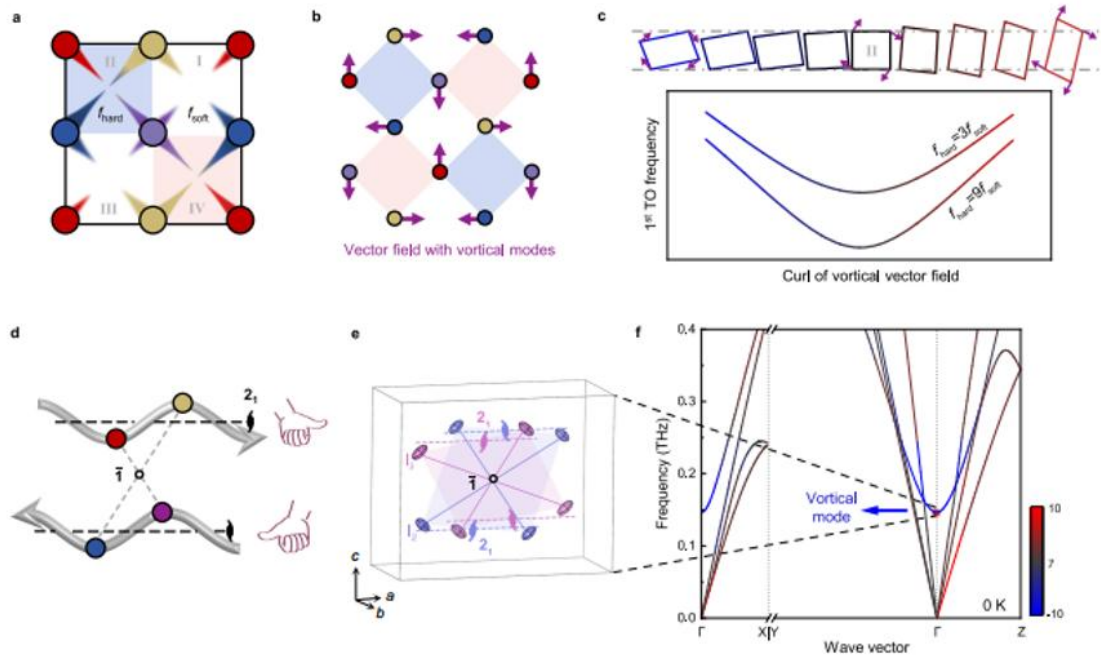
4、各向异性键合 CsAg_2I_3 中涡量诱导短程有序化导致热绝缘

在全球能源利用过程中，大量一次能源最终以废热形式耗散，如何减少热量在储存、运输和能量转换过程中的无效损失，是能源材料研究的重要课题。对于以声子为主要热载流子的晶体材料，降低晶格热导率通常可以从降低声速或缩短声子寿命入手。然而，直接削弱原子间化学键虽然能够降低声速，却往往同时牺牲材料的力学性能，因此，利用低频光学声子增强声子散射、在不显著破坏晶格稳定性的情况下抑制热输运，逐渐成为构筑低热导晶体的重要思路。笼状化合物中的“rattling”振动、银离子快速运动以及晶格扭转模等均表明，低频光学模式能够与声学声子发生强烈相互作用，增加声子散射通道。相比之下，原子在晶体中的涡旋式集体振动（vortical motion）及其对热输运的作用长期缺乏研究。如何利用真实晶体的化学键各向异性和晶体对称性产生这种特殊晶格动力学，并进一步将其转化为强声子散射机制，为超低热导晶体的设计提供了一个新的物理方向。

近日，同济大学裴艳中教授、陈志炜教授与上海交通大学马杰教授团队，研究以

各向异性成键的 CsAg_2I_3 单晶为对象，结合同步辐射 X 射线漫散射、非弹性中子散射、拉曼光谱、第一性原理计算以及大尺度分子动力学模拟，揭示了一种由晶格涡旋振动诱导动态短程有序并强烈抑制热运输的新机制。研究发现，I 原子的高度各向异性热振动以及特定 Wyckoff 位点上的手性对称操作能够形成亚晶胞尺度的涡旋振动，并产生低至约 0.15 THz 的横向光学声子模式；这些涡旋模式进一步诱导尺度约为两个原胞的二维动态短程有序结构，为声子提供大量纳米尺度散射中心。与此同时，低频涡旋光学模与声学支的交叉显著拓展三声子和四声子散射相空间，最终使 CsAg_2I_3 单晶沿 a 轴的室温热导率降低至仅 $0.08 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，展现出优异的晶态隔热性能。该工作将“各向异性化学键—晶格涡旋振动—动态短程有序—增强声子散射—超低热导率”建立为一条完整的物理链路，并指出由特定 Wyckoff 位点离散旋转对称性产生的涡旋声子可能并非 CsAg_2I_3 所独有，为在更广泛的各向异性晶体中通过晶格对称性设计实现超低热导和高效隔热提供了新的材料设计范式。

相关内容发表于《Nature Communications》上。(张琰炯)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-76794-9>

5、分层激光诱导石墨烯-液态金属复合热界面材料界面扩散和体渗流

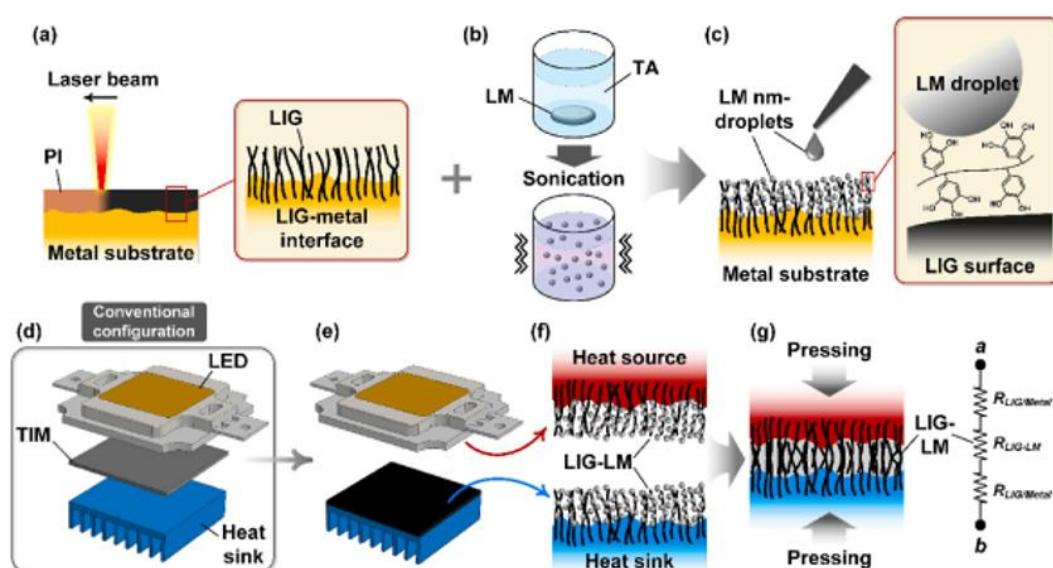
实现超低热阻

随着人工智能、高性能计算以及 5G/6G 通信持续推动芯片功率密度攀升，电子器件的散热瓶颈正从“材料本体”逐渐转向“界面”。即使采用液冷、微通道、均热板等先进散热技术，热量仍必须从芯片经过热界面材料 (TIM) 传递到散热器，而传统 TIM 通常以独立垫片或导热膏的形式夹在两种固体表面之间，不可避免地引入两个机械接触界面。表面粗糙度、空气间隙以及界面润湿不足会产生显著热接触电阻，使得单纯提高 TIM 自身热导率难以进一步提升整体散热性能。聚合物基导热复合材料虽然具有较好的柔顺性，但厚度方向热导率有限；液态金属具有

较高热导率和良好变形能力，却面临高表面张力、氧化、泄漏和腐蚀等问题。更重要的是，提高填料含量、降低键合层厚度和降低界面热阻之间往往相互制约。因此，如何从根本上减少甚至消除机械接触界面，将 TIM 从“插入式中间层”转变为与器件表面直接结合的连续热传输通道，成为突破高功率电子器件界面散热极限的重要方向。

近日，香港科技大学张楷浩教授团队提出一种基底一体化激光诱导石墨烯-液态金属（LIG-LM）热界面材料：首先在 Al、Cu、Si、SiC 等目标基底表面直接激光热解聚酰亚胺，原位生长多孔 LIG 网络，并利用激光诱导碳扩散形成梯度化、牢固结合的 LIG-基底界面；随后将单宁酸稳定的亚微米 EGaIn 液态金属微滴渗入 LIG 孔隙，在约 10–12 kPa 的低压力下使微滴壳层破裂并相互融合，形成贯穿多孔石墨烯骨架的连续金属渗流网络。这种设计同时优化了两个关键环节：梯度碳-金属界面降低声子反射，而连续液态金属网络增强电子导热并消除传统 TIM 的第二个机械接触界面。最终，LIG-LM 体系获得约 $0.80 \pm 0.32 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 的超低界面热阻，比商业 TIM 降低 85% 以上；在 12 kPa 压力和约 60 μm 键合层厚度下，总热阻仅为 $7.38 \pm 0.57 \text{ mm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ，明显优于 HY710 和 7950SP 等商业产品。同时，该结构可承受超过 2000 次、温差约 200 $^{\circ}\text{C}$ 的热冲击循环，并在 100 次装配/拆卸后保持稳定性能；高功率 LED 测试也显示出优于多种商业导热材料的散热能力。该工作将热界面从传统“独立中间层”重新定义为器件基底的连续延伸，为高功率芯片和下一代电子器件构筑低热阻、高可靠热界面提供了新的设计范式。

相关内容发表于《Carbon》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2026.121874>

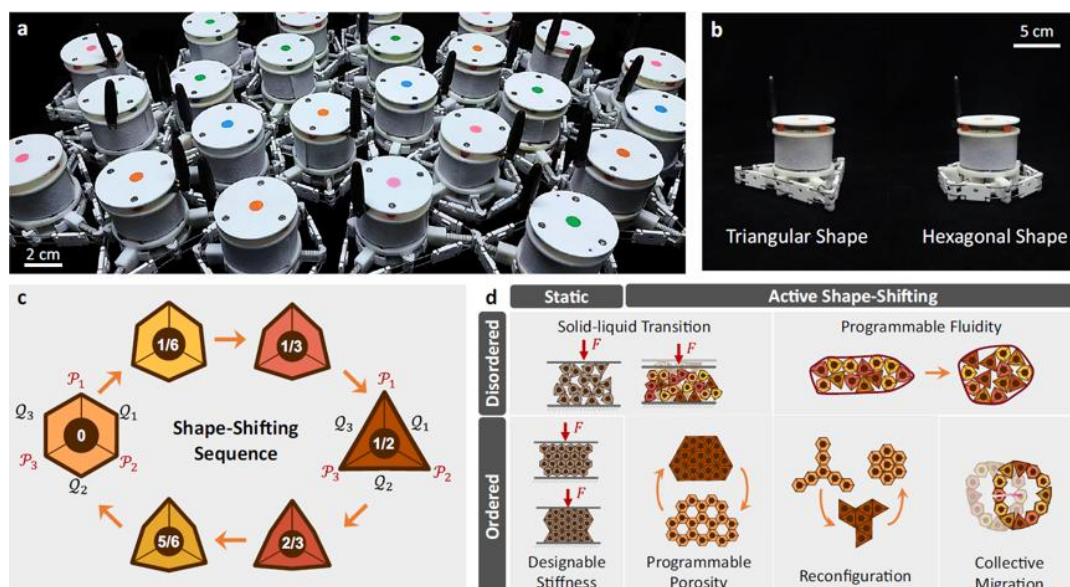
6、各向异性变形机器人材料实现多样化的集体行为

局域相互作用能够在自然系统、活性物质和机器人集群中产生复杂的涌现集体行为，如相变、聚集、自组装、运动和重构。然而，现有机器人集群通常针对少数预设功能设计，适应性和功能多样性受到限制。“机器人材料”概念通过融合材料的物理特性与机器人的运动、自组织及重构能力，为解决这一问题提供了新思

路。其中，形变单元可通过改变自身形状和单元间相互作用，产生丰富的集体行为。已有研究表明，连续晶格、松散耦合及非对称形变单元均可实现一定程度的集体运动和重构，但分别受到拓扑约束、外部刺激依赖或交互复杂度增加等限制。因此，如何利用简单的形变机制和局域相互作用，在保持系统简洁性的同时实现多样、可编程的集体功能，仍是机器人材料领域的重要挑战。

近日，清华大学的李曙光副教授团队，提出了一种最小驱动机器人单元 TriHex，可通过单电机驱动相邻顶点的反向运动，在六边形与三角形之间实现各向异性形变。每个单元的形变过程由统一的相位参数描述，并通过磁耦合形成有序和无序两类集体构型：有序构型具有固定的顶点-顶点或边-边连接关系，无序构型则具有更松散、多样的接触方式。基于这一平台，系统能够展现丰富的涌现集体行为。在无序构型中，主动形变可诱导固-液状态转变，并通过不同形变策略调控流动性；在有序构型中，静态铺展结构可实现可编程刚度，而协同形变进一步实现可调孔隙率、结构重构和集体迁移。TriHex 的特点在于以简单的欠驱动机制在单元层面引入方向相关的相互作用各向异性，并通过组装构型与形变相位两个系统级参数，实现比传统机器人材料更丰富的集体功能。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-76768-x>

（来源：两江科技评论）