

# 超材料前沿研究一周精选



2026年3月23日-2026年3月29日

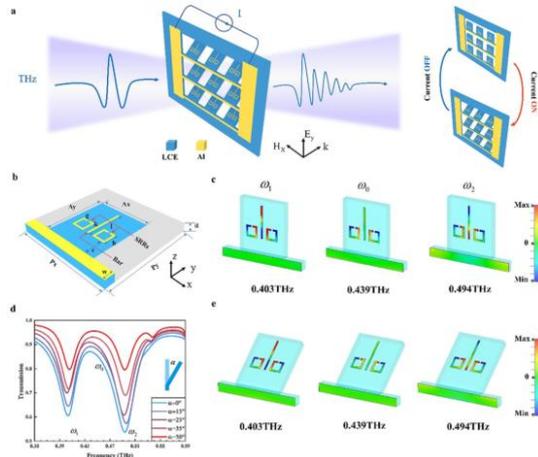
索引:

- 1、由液晶弹性体单元阵列构成的电可重构太赫兹超表面
- 2、纳米光子铌酸锂中的拓扑孤子频率梳
- 3、石墨烯中 Floquet 诱导能隙的观测
- 4、用于智能热辐射调控的像素化电可重构超表面
- 5、紫外激光编码驱动形状记忆合金超结构光热变形
- 6、磁耦合驱动软超材料中的随机突跳转化为有序序列
- 7、阳极保护实现  $Mg_3(Sb, Bi)_2$  在潮湿环境实现热电冷却
- 8、纳米尺度相干化学波动驱动空位优化延性  $AgCu(S, Se, Te)$  的卓越热电性能

## 1、由液晶弹性体单元阵列构成的电可重构太赫兹超表面

太赫兹超表面由人工设计的二维单元阵列构成，可在 0.1 - 10 THz 范围内灵活调控电磁波的相位、振幅与偏振。传统器件功能固定，而可重构超表面通过半导体、相变材料、液晶等有源介质实现动态调控，但电导率调制常引入欧姆损耗，降低性能。MEMS 超表面借助三维形变可避免此问题，并扩展调控自由度。液晶弹性体 (LCE) 因兼具高弹性、软驱动、可编程取向和易加工等优势，成为柔性太赫兹 MEMS 超表面的理想基底。现有 LCE 超表面多依赖整体弯曲或拉伸，单元间强耦合，难以实现独立寻址和高空间分辨调控；且主要采用光照或机械刺激，电控方式仍未实现，限制了其在动态波束操控、信息加密、可编程波前整形等方面的发展。

近日，南方科技大学罗丹教授、天津大学谷建强教授团队提出了一种基于像素化液晶弹性体 (LCE) 单元阵列的可重构太赫兹超表面平台，通过电驱动加热实现各单元的统一致动。研究中将由金属条与开口谐振环 (SRR) 构成的等离激元诱导透明 (PIT) 超原子及其驱动电路共同集成到阵列化 LCE 基底上，并利用直流电产生焦耳热，使 LCE 超原子发生明显弯曲形变。借助数值仿真，作者完成了 LCE 基 PIT 超原子的结构设计；进一步结合紫外光刻、金属沉积和激光切割等工艺制备出超表面样品。通过太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 实验，验证了 LCE 超原子机械弯曲引起的 PIT 共振调制效应。此外，研究还揭示了驱动电流与超原子温度之间的关系，并展示了该结构形变响应具有良好的重复性与稳定性。相关工作发表在《Advanced Materials》上。(刘帅)



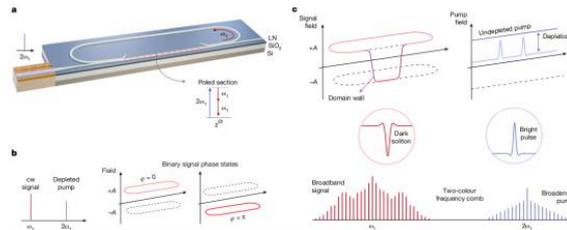
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202519564>

## 2、纳米光子铌酸锂中的拓扑孤子频率梳

光频梳技术的出现深刻改变了精密测量、光谱学、通信与量子科学等多个领域。当前，芯片级频梳源的主流方案主要依赖具有三阶 Kerr 非线性的高 Q 值微腔，通过克尔腔孤子的形成，在泵浦频率附近产生宽带、相干的梳状谱，甚至可实现跨越八度的频谱展宽。近年来，随着薄膜铌酸锂等二次非线性纳米光子平台的快速发展，集成电光频梳作为新型芯片级频梳源也受到广泛关注。此类方案通常基于 Pockels 效应，通过电光调制实现边带生成，为高效、可编程的宽带频梳产生提供了新途径。此外，将电光调制器与激光器或谐振腔集成，也为中红外等特殊波段的片上频梳发展开辟了新的可能。

尽管如此，Kerr 非线性仍然是当前孤子型频梳的主要物理机制。相比之下，具有强二次非线性的谐振腔实际上能够支持另一类本质不同的孤子态，并为片上频梳提供独特优势。这类二次非线性孤子不仅可以在低 Q 值谐振腔中形成，而且对色散符号不敏感，无需依赖高速调制器，因而有望覆盖传统激光源和常规 Kerr 微梳难以触及的光谱范围。虽然近年来二次孤子微梳已在块体腔和部分混合平台中展现出良好前景，但相关实现仍多依赖二次谐波增强结构或体系中固有的 Kerr 效应，距离真正完全集成化的片上光源仍有一定距离。

近日，加州理工学院 Nicolas Engleburt、Alireza Marandi 教授和 Almería 大学 Pedro Parra-Rivas 教授联合团队构建了一种基于铌酸锂纳米光子电路与半导体激光器混合集成的片上频梳光源。团队在具有强二次非线性、低精细度的片上简并光参量振荡器中，实验观测到了时间拓扑孤子的形成。这类孤子本质上是信号频率处两个相差  $\pi$  的连续波稳态之间的相位缺陷，而该信号频率正对应于输入泵浦频率的一半。与传统 Kerr 腔孤子不同，这种拓扑孤子不依赖特定色散区域，因此具有更强的适用性和鲁棒性。借助片上互相关测量技术，团队进一步在约  $2 \mu\text{m}$  波段直接表征了短至 60 fs 的拓扑孤子脉冲，结果与广义参量驱动 Ginzburg-Landau 理论吻合。除基础物理观测外，该工作还完成了混合集成拓扑频率梳光源的概念验证，表明这种方案有望实现对色散符号不敏感、且无需高 Q 谐振器和高速调制器的片上频梳源，并拓展至包括中红外在内的难覆盖光谱区域。该工作不仅推动了二次非线性集成光子学的发展，也为片上高性能频梳源的实现开辟了新的方向。相关内容发表于《Nature》上。（金梦成）



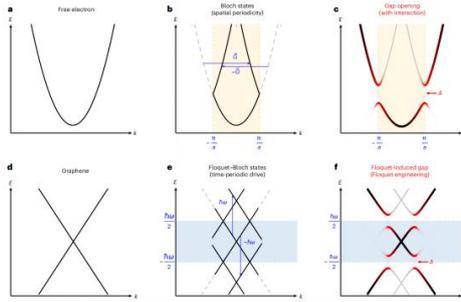
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10292-2>

### 3、石墨烯中 Floquet 诱导能隙的观测

能隙是决定物质量子态性质的核心要素。在经典固体物理中，空间周期势会将自由电子的色散关系折叠成具有动量周期性的布洛赫能带，但真正改变电子性质的，并不是这种“折叠”本身，而是不同能带在相互作用下发生杂化，并在布里渊区边界打开能隙。正是这些能隙，将半导体、绝缘体与金属区分开来。时间周期性驱动将这一思想推广到非平衡体系中。对于受到周期驱动的布洛赫电子，时间调制会在能量维度引入额外周期性，从而形成 Floquet - Bloch 能带。与静态晶体中的布洛赫能带类似，关键并不只是 Floquet 边带的出现，而在于驱动场能否通过相干光 - 物质耦合使不同 Floquet 能带发生混合，并在 Floquet 布里渊区边界形成杂化开隙。这样的光诱导能隙，正是 Floquet 工程最具标志性的谱学特征。

石墨烯因其二维狄拉克锥色散，长期以来被视为研究 Floquet 工程的理想平台。理论上，人们早已预言光场可以在石墨烯中打开 Floquet 能隙，并进一步诱导反常霍尔效应，这一图景也被看作是哈尔丹模型的光学实现。此后，Floquet 工程在光子晶格、超冷原子等高度可调体系中相继得到验证。然而，在真实固态材料中，耗散、多体相互作用以及实验分辨率等因素始终使这一过程面临挑战。尽管此前实验已经在石墨烯中观察到与 Floquet 相关的输运响应和边带特征，但作为 Floquet 能带工程核心证据的 Floquet 诱导能隙，一直缺乏直接的光谱学观测。

近日，清华大学周树云教授团队利用时间角分辨光电子能谱，在石墨烯中成功观测到 Floquet 效应诱导的杂化能隙。研究团队通过提升样品质量、优化驱动场参数并提高实验分辨率，使这一长期期待的关键谱学特征得以清晰呈现。实验表明，该能隙出现在 Floquet 能带交叉位置，并伴随着 Floquet 边带的形成；同时，能隙还表现出显著的动量各向异性：沿光偏振方向逐渐减小直至消失，而在垂直偏振方向达到最大值。这一结果直接反映了驱动体系的时空对称性特征，也表明光场并非仅仅“复制”能带结构，而是真正重塑了电子能谱。这项工作为石墨烯中的 Floquet 能带调控提供了清晰而直接的实验证据，也为在真实量子材料中实现光场驱动的新型非平衡量子相奠定了基础。相关内容发表于《Nature Materials》上。（金梦成）

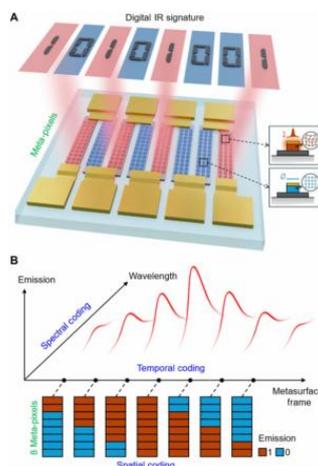


文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02549-y>

#### 4、用于智能热辐射调控的像素化电可重构超表面

热辐射普遍存在于一切高于绝对零度的物体中，决定了材料的热红外特征，并在热管理、能量收集、红外成像、生化健康传感和热伪装等领域具有重要作用。然而，热辐射天然具有宽带、发散和非相干等特性，限制了其应用性能，因此亟须实现对其光谱、角度和时间特性的精确调控，尤其是在尺寸、重量、功耗和成本受限的场景下。超表面因其在尺寸、重量、功耗、成本上的优势和对光子模式的灵活调控能力，成为实现热辐射调控的重要平台。为获得动态可调性，研究者提出了温度调控和发射率调控两类策略，其中相变材料因其大光学反差、非易失性和快速响应而尤为突出。但现有热红外调控多局限于单向相变，纯电驱动下仍面临晶化丝化、电迁移以及像素级独立连续控制不足等关键挑战。

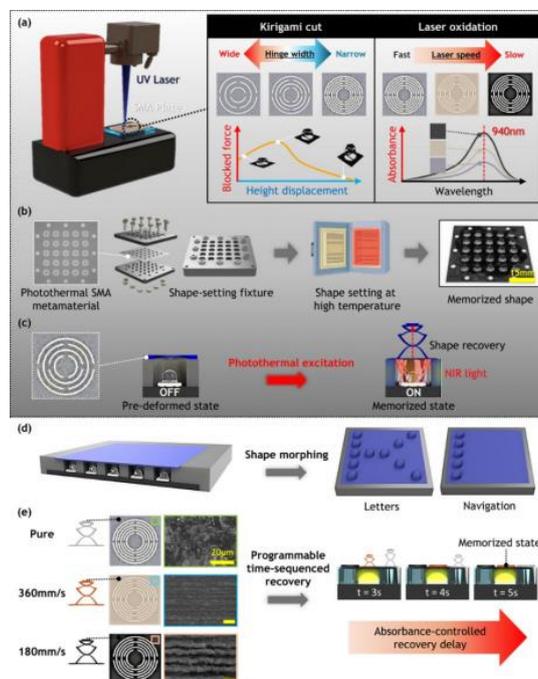
近日，卡内基梅隆大学 Sheng Shen 和 Gianluca Piazza 团队提出并实验实现了一种基于 GeTe 相变材料的电可编程超表面，通过引入可重构超像素，实现了中红外波段的多级可调控。不同于传统依赖 GST 亚稳中间态切换的方案，该研究采用叉指式微加热器设计，在超像素内部诱导非均匀相变，从而构建出像素化的电可重构超表面，实现对热辐射的智能调控。在结构设计上，超薄 GeTe 层被直接集成到具有强场局域能力的等离激元超原子中，使极小体积的相变材料也能产生显著的窄带数字对比度。同时，GeTe 较高的结晶温度提升了器件在高温工作环境下的状态保持能力和数据稳定性，为热光子器件的实际应用提供了重要优势。相关工作发表在《Science Advances》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aeb2016>

## 5、紫外激光编码驱动形状记忆合金超结构光热变形

形状记忆合金，尤其是镍钛合金，凭借其高能量密度、大驱动应变及良好的生物相容性，在软体机器人、人工肌肉、触觉界面及可展开结构等领域展现出巨大潜力。传统形状记忆合金驱动器依赖焦耳热触发，需有线电气连接与复杂的片上电路，严重限制了无缆软体系统的灵活性与可扩展性。光热驱动作为无线远程操控的替代方案，可将光能转化为热刺激，成为驱动无缆软体机器人与可重构超材料的重要技术路径。然而，原始镍钛合金表面在近红外波段具有高反射率，导致光热转换效率低下，现有的解决策略通常依赖在表面涂覆聚合物、石墨烯或无机薄膜等吸光层，但这些涂层在反复的热机械循环下易发生剥离、增加热质量降低响应速度，且多步骤的加工流程复杂，难以兼顾几何构型与光学性能的协同设计。近日，韩国科学技术院 Il-Kwon Oh 教授课题组提出了一种单片式紫外激光编程策略，在单一镍钛合金薄片体系内，同步实现了剪纸力学架构与光子吸光性能的双重编码，无需任何外源涂层即可构建光热驱动的形状记忆合金形变超结构。该研究通过紫外激光微加工精准定义剪纸单元的核心几何参数，实现对驱动器形变幅度、输出力等力学性能的确切性调控，并建立了完整的几何参数-力学性能设计图谱，为不同应用场景的性能匹配提供了量化指导。同时，激光诱导氧化形成的微纳多孔氧化钛层，在不依赖外部涂层的情况下显著增强了近红外光吸收率。研究进一步对氧化程度进行空间图案化设计，在均匀光照下实现可预测的时序驱动，将光子逻辑直接嵌入材料本身。基于该一体化平台，研究团队成功构建了纯光输入驱动的多通道 3D 形变与触觉显示阵列，验证了该技术的可扩展性与应用潜力，为自适应表面、交互式触觉系统、光子软体机器人等领域的发展开辟了全新路径。相关内容发表于《Advanced Science》上。（孙嘉鹏）

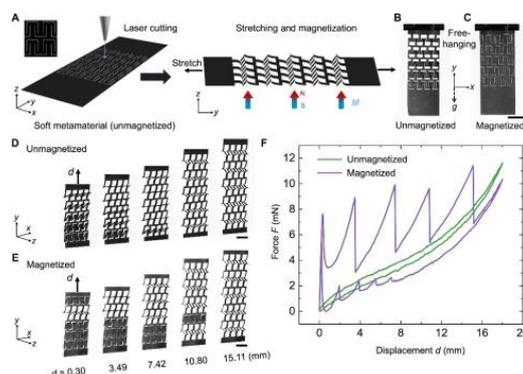


文章链接: <http://dx.doi.org/10.1002/adv.74930>

## 6、磁耦合驱动软超材料中的随机突跳转化为有序序列

力学超材料通过其独特的微结构单元设计，能够实现传统材料所不具备的非常规变形模式。在均匀载荷下，由相同单元组成的结构通常发生同步变形，导致响应路径单一、可调性有限。而通过触发单元间的顺序失稳，则可以解锁多步、可编程的力学响应，极大地拓展了超材料的静、动态性能调控空间。在众多实现这种顺序响应的力学机制中，结构屈曲失稳因其能够引发单元突破能量势垒、产生快速的形状改变和面外突跳行为而备受科学界关注。这一特性已被广泛应用于设计多稳态结构、能量吸收装置、动态波控制以及软体机器人等前沿领域。然而，屈曲失稳对制造过程中引入的几何或材料缺陷高度敏感，使得超材料的突跳序列在实际测试中往往呈现出随机性而非可控的确定性。这种内在的随机行为成为设计确定性可重构超材料的一个核心挑战。为解决这一问题，研究人员尝试通过几何参数调控或引入材料性能差异来改变失稳阈值，然而大多数主动超材料仍依赖于持续施加的外部刺激。相较之下，由硬磁微粒与弹性体复合而成的磁性软超材料，提供了一个尚未被充分发掘的研究方向，即便在外加磁场消失后，结构单元之间仍能维持内在的磁相互作用，从而有望在不依赖外部场的情况下引导变形路径，实现更为自主的序列控制。

近日，美国北卡罗来纳州立大学尹杰教授课题组联合雪城大学张腾教授，提出了一种基于剪纸结构启发的软磁超材料设计策略，利用层内与层间磁相互作用的协同效应，实现了对弹跳序列的编程与调控。在该研究中，单层结构在拉伸过程中，单元间因层内磁耦合而发生顺序弹跳，但序列本身仍受随机缺陷主导，呈现样本依赖性；而在双层或多层堆叠结构中，层间磁相互作用则触发类似链式反应的定向传播，显著压制了缺陷带来的随机性，使弹跳顺序趋于确定。通过理论建模与有限元仿真，研究团队揭示了磁耦合力与弹性变形之间的非线性、非局域耦合机制，并进一步验证了该机制在提升能量耗散方面的潜力。此外，通过落锤冲击实验，研究团队证实了这种内部磁相互作用机制能够显著提升轻质网状超材料的动态能量吸收与阻尼衰减能力。相关内容发表于《Science Advances》上。（孙嘉鹏）



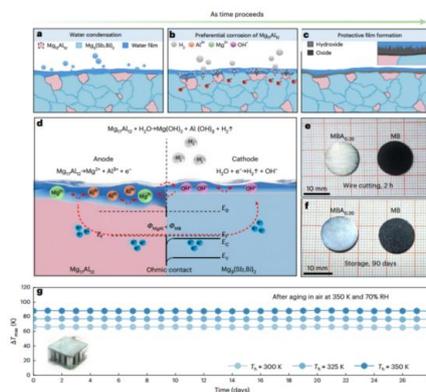
文章链接: <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.aec3182>

## 7、阳极保护实现 $Mg_3(Sb, Bi)_2$ 在潮湿环境实现热电冷却

对于以  $Mg_3(Sb, Bi)_2$  为代表的新一代热电制冷材料，尽管其具有低成本、轻量化、高强度以及优异的室温热电性能，被认为有望替代传统  $Bi_2Te_3$  体系，但其在潮湿环境中的快速失效严重制约了工程应用。研究表明，在空气中普遍存在的纳米尺度水膜会诱发表面电化学腐蚀反应， $Mg_3(Sb, Bi)_2$  由于其较低的平衡电位（约-0.8至-0.9 V），在水膜作用下极易发生析氢腐蚀，生成疏松的

MgO/Mg(OH)<sub>2</sub> 腐蚀产物，这些产物不仅无法形成有效保护层，还会在气泡作用下不断剥落，导致材料持续腐蚀与性能衰退。因此，尽管近年来已有研究尝试通过涂覆聚合物保护层等方式延缓腐蚀，但这些外加涂层往往存在渗透、脱落和老化等问题，难以在材料制备、储存及服役全过程中提供稳定保护。相比之下，从材料本征出发提升抗腐蚀能力，成为实现热电材料实际应用的关键突破方向。如何在牺牲热电性能的前提下，同时实现高稳定性与高性能，成为当前热电领域亟待解决的核心科学问题。

针对这一难题，哈尔滨工业大学隋解和教授、郭逢凯教授和南方科技大学刘玮书教授等合作提出了一种全新的“阳极保护”材料设计策略，在热电材料领域首次引入“牺牲阳极阴极保护”机制，实现了 Mg<sub>3</sub>(Sb, Bi)<sub>2</sub> 在潮湿环境下的高稳定性与高性能协同突破。研究团队通过 Al 掺杂，在材料内部原位构建均匀分布的 Mg<sub>1-7</sub>Al<sub>1-2</sub> 阳极第二相，该相具有更低的电极电位（约-1.99 V），在腐蚀环境中优先发生溶解，形成局域微电池，从而保护作为阴极的 Mg<sub>3</sub>(Sb, Bi)<sub>2</sub> 基体。进一步地，阳极相腐蚀过程中生成的 Mg<sup>2+</sup> 和 Al<sup>3+</sup> 与 OH<sup>-</sup> 反应形成致密的氢氧化物/氧化物复合保护层，不仅显著抑制腐蚀反应，还具备自修复能力。实验结果显示，该策略使材料在空气中的腐蚀速率降低约 92%，在水中的腐蚀速率降低约 86%，表现出优于传统未保护材料的稳定性。更重要的是，该方法并未牺牲材料的热电性能。通过进一步优化载流子浓度，研究团队实现了室温 zT ≈ 0.80 的性能，并构建了 Mg<sub>1-7</sub>Al<sub>1-2</sub>/Mg<sub>3</sub>(Sb, Bi)<sub>2</sub>/Mg<sub>1-7</sub>Al<sub>1-2</sub> 热电模块，其制冷性能在 300 K 下可媲美商业 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 器件，在 325 K 和 350 K 下甚至实现超越，同时在 350 K、70%湿度环境下连续老化 28 天后性能几乎无衰减。此外，该策略还可推广至 Mg<sub>2</sub>(Sn, Ge) 等其他水敏材料体系，展现出良好的普适性。该工作为未来高性能热电器件以及其他环境敏感材料的稳定性调控提供了全新思路与范式。相关内容发表于《Nature Materials》上。（张琰炯）



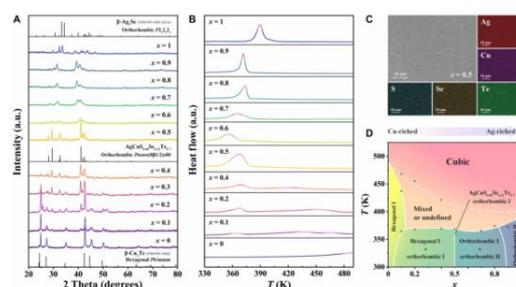
文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02563-0>

## 8、纳米尺度相干化学波动驱动空位优化延性 AgCu(S, Se, Te) 的卓越热电性能

长期以来高性能热电材料与机械柔性之间存在根本矛盾：以 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>、PbTe 为代表的经典无机热电材料虽然具有优异的热电优值 (zT)，却普遍脆性大、难以变形；而有机材料虽具柔性，却往往导电性差、热稳定性不足，难以满足实际应用需求。近年来，一类“可延展无机热电半导体”逐渐兴起，例如 (Ag, Cu)<sub>2</sub>

(S, Se, Te)多组元硫族化物体系，它们在保持较好电输运性能的同时，还具备类似金属的塑性变形能力，为柔性热电器件提供了新的材料基础。但与此同时，这类多组元体系也带来了新的科学问题：复杂的成分组合和缺陷结构会导致局域化学不均匀、相分离以及多尺度缺陷的出现，而这些微结构如何协同调控声子与载流子输运，仍缺乏清晰认识。尤其是在追求高  $zT$  的过程中，如何同时实现低晶格热导率与优良电输运性能，成为当前热电领域的关键挑战之一。传统策略多依赖纳米结构、能带工程或高熵设计，但这些方法往往难以精确调控缺陷与微结构之间的耦合关系。因此，从“化学涨落”和“缺陷工程”角度理解热输运机制，成为推动柔性热电材料性能突破的重要方向。

针对这一问题，上海交通大学史迅教授、朱敏教授和赵琨鹏研究员，提出并证实了一种“纳米尺度相干化学涨落”驱动的热电性能优化新机制。研究团队在  $(Ag, Cu)_2(S, Se, Te)$  体系中首次观察到：尽管材料整体保持单一晶体结构，但在纳米尺度上存在成分起伏的“相干化学涨落区域”，其尺寸约为 1 - 3 nm，密度高达  $10^{15} \text{ m}^{-3}$  量级。这些纳米尺度化学非均匀结构不会破坏晶格连续性，却能够在原子尺度引入质量与应变场的强烈波动，从而对不同波长声子产生多尺度散射效应，使晶格热导率降低至接近玻璃态水平（最低约  $0.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ）。与此同时，通过精确调控 Ag/Cu 比例及阳离子空位浓度，团队实现了载流子浓度的有效调节，使电导率与 Seebeck 系数达到优化匹配，显著提升功率因子。在二者协同作用下，材料在 360 K 实现了  $zT \approx 0.98$  的峰值性能，刷新了 Ag 基延展型无机热电半导体的纪录。此外，显微结构表征还揭示出材料中广泛存在位错和孪晶界，这些结构不仅进一步增强声子散射，还为塑性变形提供滑移通道，使材料在压缩应变下可达 80%，并可轧制成厚度约  $61 \mu\text{m}$  的柔性薄片，展现出优异的力学性能与器件加工潜力。该研究首次将“化学涨落”从传统高熵材料概念拓展为可调控的功能设计手段，实现了热输运与力学性能的协同优化，为柔性热电材料的发展提供了全新的微结构设计范式，也为理解复杂多组元体系中“缺陷—结构—性能”之间的耦合关系提供了重要理论依据。相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）



文章链接：<https://doi.org/10.1126/sciadv.aec0728>

（来源：两江科技评论）