# 超材料前沿研究一周精选

2026 年 11 月 1 日-2026 年 11 月 8 日

索引：

1、量子几何诱导的 Haldane 相 Kekulé超导态

2、磁性拓扑范德华界面中的巨轨道塞曼效应

3、瞬态吸收光谱揭示半导体中电子与空穴的非对称冷却过程

4、实现电磁-热耦合的可打印结构化多孔陶瓷超材料

5、基于强化学习的可编程多模态热响应多材料超材料自主发现

6、超薄单晶 PbI2 纳米片的极低热导

7、自由空间“扭转电子学”：基于莫尔结构光的光学超拓扑

8、跨尺度双重解耦实现手性张拉整体超材料的力学与运动学调控

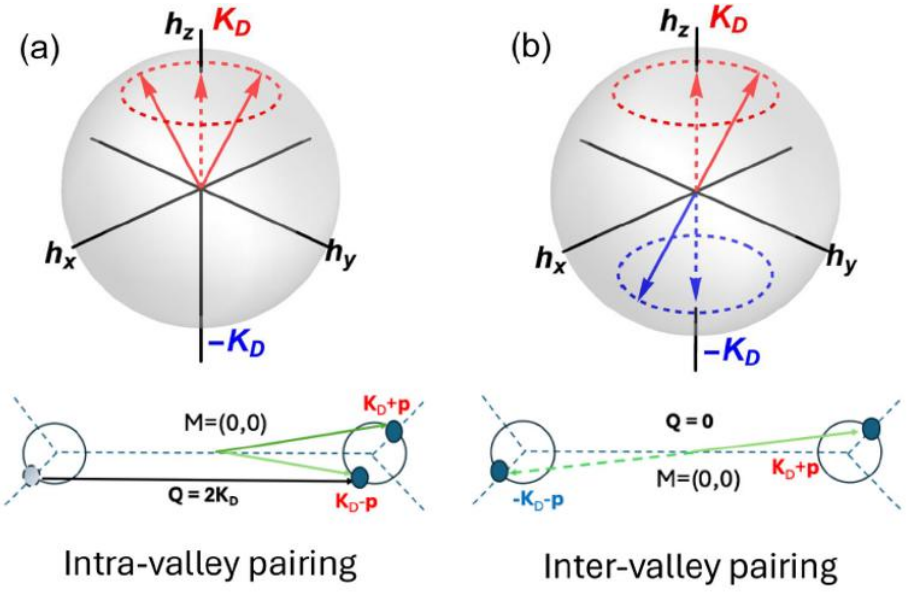
9、块状六方金刚石

## 1、量子几何诱导的 Haldane 相 Kekulé超导态

非常规超导态的形成机制及其与拓扑能带之间的联系，是凝聚态物理领域的重要研究方向。近年来，扭转二维材料中的超导现象引起了广泛关注，但莫尔超晶格的存在使得能带投影相互作用与拓扑能带本征机制之间的区分变得复杂。相比之下，菱方堆垛多层石墨烯能够在不依赖莫尔超晶格的情况下形成具有非平庸拓扑性质的陈能带，并展现出丰富的超导行为，为研究拓扑与超导之间的内在联系提供了新的平台。在此类体系中，Haldane 相能够通过打破时间反演对称性，同时保持反演对称性，形成具有非零陈数的量子反常霍尔能带。传统超导理论通常认为，零质心动量的谷间配对更容易发生，而有限动量配对往往需要强关联效应或特殊的晶格相互作用。然而，拓扑能带中的布洛赫波函数具有独特的量子几何结构，可能从根本上改变不同配对通道的竞争关系。因此，揭示量子几何如何影响配对不稳定性，并探索弱耦合条件下有限动量超导态的形成机制，成为研究者们关注的核心问题。

近日，**美国内华达大学里诺分校的 Yafis Barlas 副教授研究团队**以手征二维电子气中的 Haldane 相为对象，发现拓扑能带中的赝自旋结构能够增强有限动量的同谷配对，同时抑制零动量的谷间配对，从而在弱耦合条件下诱导晶格尺度的配对密度波，形成具有 Kekulé 空间调制的手性超导态。进一步结合纵向声学声子介导的有效吸引相互作用，研究构建了不同陈数奇偶性及载流子密度下的超导相图。对于偶数陈数体系，低密度下形成手性 Kekulé 超导态，高密度下则转变为 s 波 Kekulé超导态；对于奇数陈数体系，还可出现谷三重态手性超导态及

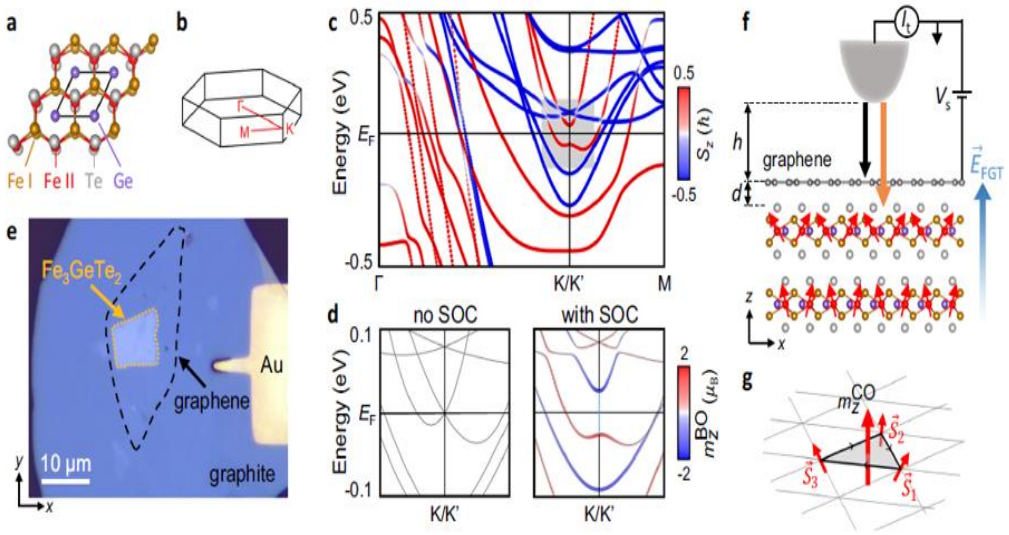
常规谷单态 s 波超导态。该研究揭示了由拓扑量子几何驱动有限动量超导配对的新机制，为理解菱方石墨烯中的非常规超导现象，以及在其他手性陈能带材料和 Kagome 金属中探索新型超导态提供了理论依据。
该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）




文章链接：https://doi.org/10.1103/k5r2-q11w

## 2、磁性拓扑范德华界面中的巨轨道塞曼效应

拓扑能带与磁性的耦合为探索新型量子物态提供了重要方向。这种结合既可通过向拓扑材料引入磁性实现，也可存在于本征磁序与非平庸能带拓扑共存的材料中。范德华异质结构可通过层间轨道杂化和电荷转移调节电子结构，界面内建电场还能诱导 Rashba 自旋轨道耦合及 Dzyaloshinskii－Moriya 相互作用，改变局域磁矩排列并形成新型二维磁态。然而，这类界面磁性“中间相”虽被视为自旋电子学的潜在平台，其微观磁电子效应仍缺乏直接谱学证据。Fe3GeTe2 兼具铁磁性与拓扑节线能隙，能隙附近的能带杂化可产生较大贝里曲率和轨道磁矩，与石墨烯结合后可为探究拓扑能带与界面磁性的相互作用提供合适体系。
近日，**德国于利希研究中心的 Felix Lüpke 博士研究团队**结合扫描隧道显微镜/谱学与密度泛函理论，在石墨烯/Fe3GeTe2 界面观测到巨大且不对称的塞曼效应，有效朗德因子最高约 230。利用石墨烯费米能级附近的非弹性声子隧穿能隙，研究得以探测埋藏的 Fe3GeTe2 界面。磁场作用下，能隙内两个谱峰既发生分裂，又向同一能量方向移动，表明单一能带轨道磁矩不足以解释实验现象。研究将该效应归因于带轨道磁矩与手性轨道磁矩的耦合：前者源于拓扑能隙附近的能带杂化，后者则由界面电场诱导的 Rashba 效应和 Dzyaloshinskii－Moriya 相互作用使铁局域磁矩倾斜而产生。通过改变探针与样品间距调节界面电场，研究进一步实现了对谱峰位置的调控，并分析了界面电场的屏蔽行为。该发现揭示两类轨道磁矩存在超越简单叠加的直接耦合，为电场调控界面磁性及发展自旋电子学、轨道电子学器件提供了新思路。
该研究发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



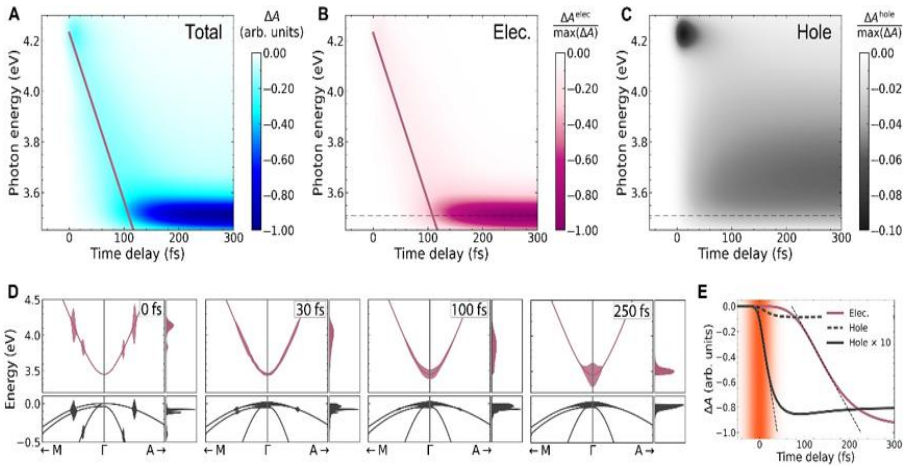

文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-026-78016-8

## 3、瞬态吸收光谱揭示半导体中电子与空穴的非对称冷却过程

半导体中光激发载流子的超快弛豫过程，是理解光电器件性能及能量转换机制的重要基础。受到超短激光脉冲激发后，电子与空穴偏离热平衡态，形成具有较高能量的热载流子，并通过载流子与声子的相互作用逐渐向导带底和价带顶弛豫。这一冷却过程通常发生在飞秒至皮秒时间尺度，直接影响半导体中的能量输运与转换效率。飞秒泵浦-探测技术能够实时追踪载流子的非平衡动力学，但常用的瞬态吸收光谱同时包含电子与空穴的响应，难以直接区分二者的独立贡献。尤其是电子与空穴在能带结构、有效质量及声子耦合强度方面存在差异，可能表现出显著不同的冷却行为。因此，如何从瞬态光学响应中区分电子与空穴的冷却过程，并揭示其微观物理机制，是理解半导体超快载流子动力学的重要问题。

近日，**美国加州理工学院 Ivan Maliyov、意大利米兰理工大学 Marco Bernardi 和 Giulio Cerullo 等研究人员**，结合高时间分辨飞秒瞬态光谱与第一性原理计算，研究了氮化镓（GaN）和砷化镓（GaAs）中电子与空穴的非对称冷却行为。研究团队利用宽带瞬态吸收光谱追踪 GaN 中光激发载流子的弛豫过程，并通过实时玻尔兹曼输运方程模拟载流子与声子的散射动力学，实现了瞬态光学信号中电子与空穴贡献的分离。结果表明，GaN 的瞬态吸收响应主要由电子冷却主导，其特征时间约为 100-200 fs，而空穴冷却比电子快约一个数量级，对光学信号的贡献也明显较弱。理论分析发现，这种非对称性主要源于电子与空穴在有效质量及声子耦合强度方面的差异，同时价带的多重简并使电子对光学跃迁产生更强的泡利阻塞效应。进一步结合 GaAs 的瞬态反射实验与理论计算，该团队发现了类似且更为显著的非对称冷却特征，表明这一机制并不局限于特定半导体材料。该研究揭示了半导体中电子与空穴超快冷却的不同光谱特征，为区分非平衡载流子动力学及理解半导体中的能量弛豫过程提供了新的研究思路。

相关成果发表于《Science Advances》。（赵泓远）



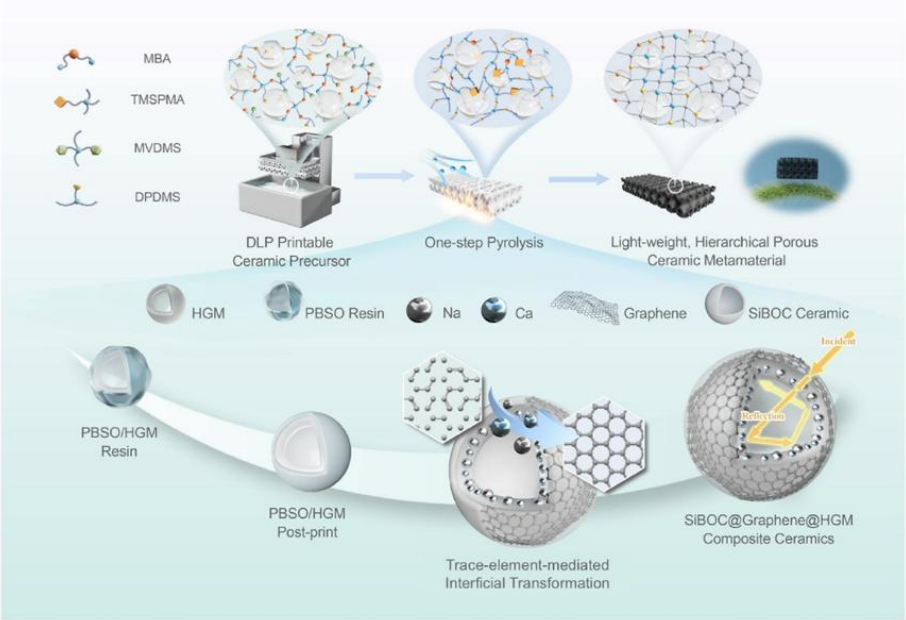

文章链接：https://doi.org/10.1126/sciadv.aeh6002

## 4、实现电磁-热耦合的可打印结构化多孔陶瓷超材料

随着航空航天和先进电子设备的快速发展，能够同时满足电磁防护与热管理需求的轻质功能材料受到广泛关注。在复杂服役环境中，微波吸收对于降低雷达散射截面、抑制电磁干扰和保障通信安全具有重要意义，而热防护则是维持设备及结构稳定运行的关键。然而，现有电磁吸收材料与隔热材料大多只能实现单一功能，难以兼顾宽频电磁吸收和高温隔热性能。传统吸波材料受到阻抗匹配及带宽限制，而依赖聚合物基体的 3D 打印超材料又难以承受长期高温环境。尽管聚合物衍生陶瓷具有良好的耐热性能，但其相对致密的微观结构限制了隔热能力，传统造孔工艺也难以与高精度光固化打印相结合。因此，如何通过材料组分与结构设计的协同调控，实现高孔隙率、宽频吸波、有效隔热及高温稳定性的统一，成为多功能陶瓷超材料亟待解决的问题。

近日，**西北工业大学的孔杰教授、邢瑞哲副教授和西北工业大学宁波研究院的于震博士**提出了一种基于空心玻璃微球（HGM）的多孔硅硼氧碳陶瓷（SiBOC）超材料制备策略。通过将 HGM 引入紫外光固化聚硼硅氧烷前驱体，结合数字光处理（DLP）3D 打印与高温热解，成功制备出具有层级孔隙结构的陶瓷超材料。其中，HGM 不仅作为造孔模板和结构支撑单元，还通过释放的 Ca、Na 微量元素促进局部碳石墨化，在界面形成 SiBOC@Graphene@HGM 层级结构，从而增强介电损耗与界面极化。进一步结合 Schwarz P 型三周期极小曲面结构，通过多尺度孔隙与周期性拓扑设计延长电磁波传播路径，增强多重反射与散射，同时抑制热传导。最终，该材料在 2 - 40 GHz 范围内实现了 35.58 GHz 的有效吸收带宽，最小反射损耗达到-59.71 dB，热导率仅为 0.208 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$，密度低至 0.313 $g \cdot cm^{-3}$。此外，该材料在 800℃下仍保持良好的微波吸收性能，并兼具一定的力学强度。该研究将界面催化、层级孔隙与宏观拓扑结构设计相结合，为兼具电磁防护、热管理和轻量化特征的高温多功能陶瓷材料提供了新的设计思路。

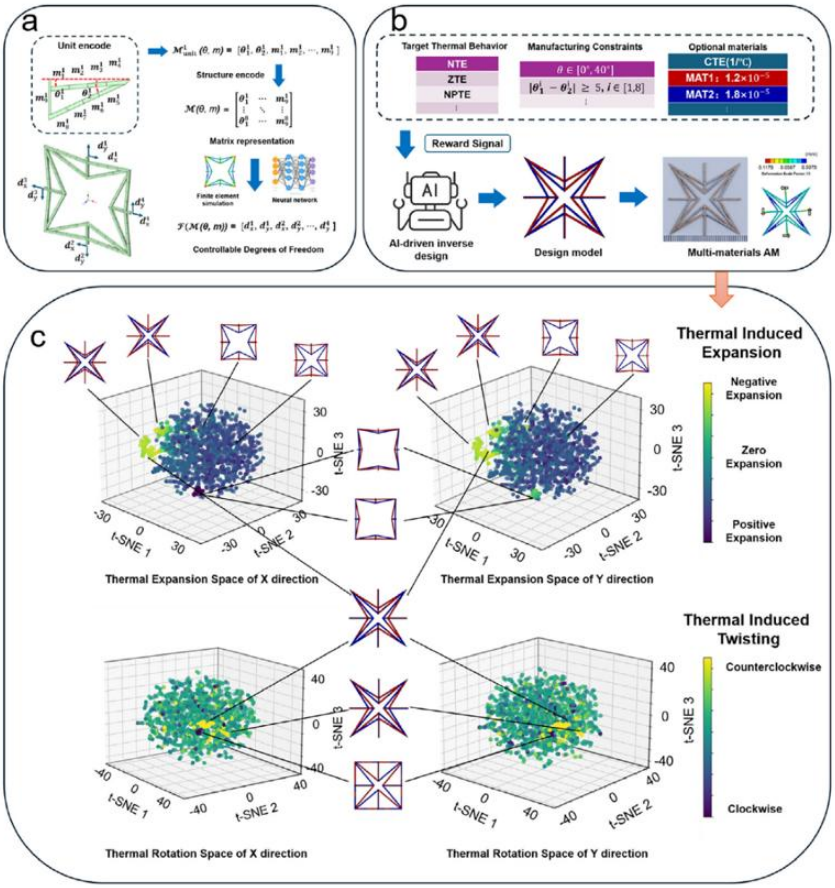
该研究发表于《Advanced Functional Materials》。（刘梦洋）




文章链接：https://doi.org/10.1002/adfm.79451

## 5、基于强化学习的可编程多模态热响应多材料超材料自主发现

随着增材制造技术的发展，超材料通过微观结构设计突破了传统材料在力学、热学及声学性能方面的限制，展现出负热膨胀和近零热膨胀等特殊功能，在高精度光学系统、卫星结构及微机电系统等领域具有重要应用价值。然而，现有热响应超材料的设计仍主要依赖弯曲、拉伸等经典变形机制，通常需要结合物理直觉与反复试错确定结构构型，难以实现复杂热变形行为的自主编程。多材料增材制造虽然拓展了材料组成与空间分布的设计自由度，但也增加了结构设计的复杂性。与此同时，现有深度学习方法通常依赖大规模训练数据，且主要局限于已有数据分布内的设计，难以探索全新的结构。因此，如何在有限数据条件下实现多材料超材料的自主逆向设计，并兼顾性能与制造可行性，成为该领域亟待解决的问题。近日，**中国科学院宁波材料技术与工程研究所的韦超研究员和日本东北大学的 Muhammad Aziz 教授研究团队**，提出了一种融合 Transformer 编码器与强化学习的多材料超材料逆向设计框架。通过建立包含几何参数、材料分布及制造约束的结构模型，结合有限元仿真与代理预测模型，实现对高维设计空间的自主探索与迭代优化。该方法仅需约 600 组初始仿真数据，便能够探索已有训练数据分布之外的新型结构，并实现负热膨胀、近零热膨胀、各向异性热膨胀等多种热响应。进一步地，通过调节不同目标对应的奖励权重，实现了热诱导扭转与热膨胀等多种变形模式的组合与调控。最终，研究利用多材料增材制造完成结构制备及实验验证，证实了设计方法的有效性。该研究为复杂多材料超材料的自主逆向设计提供了新的思路，也为具有定制化功能的智能超材料开发拓展了新的方向。
该研究发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）



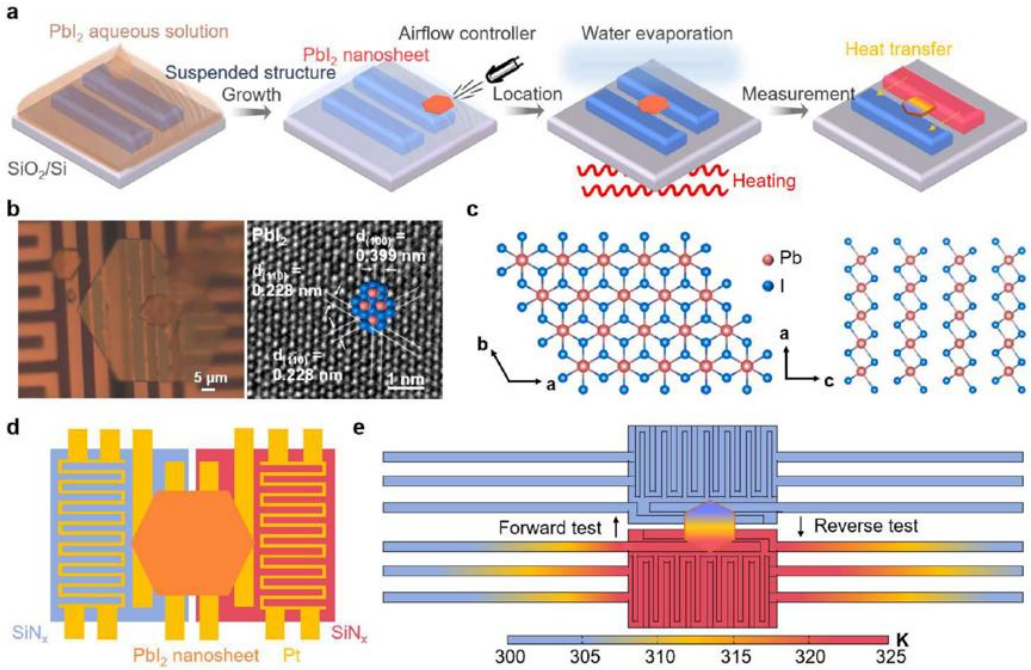

文章链接：https://doi.org/10.1002/adma.75546

## 6、超薄单晶 PbI2 纳米片的极低热导

超低热导率材料在热绝缘、柔性电子器件及微纳尺度热管理等领域具有重要应用价值。传统低热导材料通常通过引入结构无序、晶格缺陷或复杂界面增强声子散射，但这些结构特征也增加了热输运机制分析的复杂性。相比之下，单晶材料具有明确的晶格结构，是研究本征声子输运行为的理想平台。近年来，部分块体单晶已表现出接近非晶材料的超低热导率，但其较大的尺寸和有限的柔性限制了在微纳器件中的集成应用。将超低热导率拓展至纳米厚度单晶体系，不仅有助于揭示低维材料中声子输运的尺寸依赖规律，也为新型柔性热管理材料提供了可能。然而，超薄单晶通常具有较高的机械脆弱性，传统探针转移和微纳加工过程容易引入裂纹、应力及界面污染，使其本征热导率的准确测量面临困难。因此，建立低损伤的超薄单晶热输运测试方法，并阐明极低热导率的微观起源，是低维热输运研究亟待解决的问题。

近日，**东南大学集成电路学院、微机电系统教育部重点实验室聂萌教授、尹奎波研究员、孙立涛教授团队**提出集原位生长、气流定位与悬浮热桥测量于一体的实验方法，实现了超薄 $PbI_2$ 单晶纳米片的低损伤转移与热导率表征。通过对 37 个不同厚度样品的系统测量，发现随着纳米片厚度由 120.4 nm 减小至 7.9 nm，其室温热导率由 0.81 W $m^{-1}K^{-1}$ 下降至 0.24 W $m^{-1}K^{-1}$，在保持单晶结构的同时实现了极低的热导率。结合拉曼光谱与第一性原理计算，研究人员发现，$PbI_2$ 中低频弯曲声学声子色散显著平坦化，导致声子群速度较低，同时较短的声子寿命进

一步抑制热传输。随着层数减少，低频晶格振动进一步软化，使声子携热能力持续降低。此外，团队利用原位电子束辐照实现热导率调控，使其由 0.34 $Wm^{-1}K^{-1}$ 提高至 1.22 $Wm^{-1}K^{-1}$，并将这一变化与碘流失及富铅区域形成联系起来。该研究为超薄单晶中超低热导率的实验实现与微观机制研究提供了重要依据，也为低维材料热输运的精确表征和可控调节开辟了新的途径。
研究成果发表在《Nature Communications》上(张琰炯)。



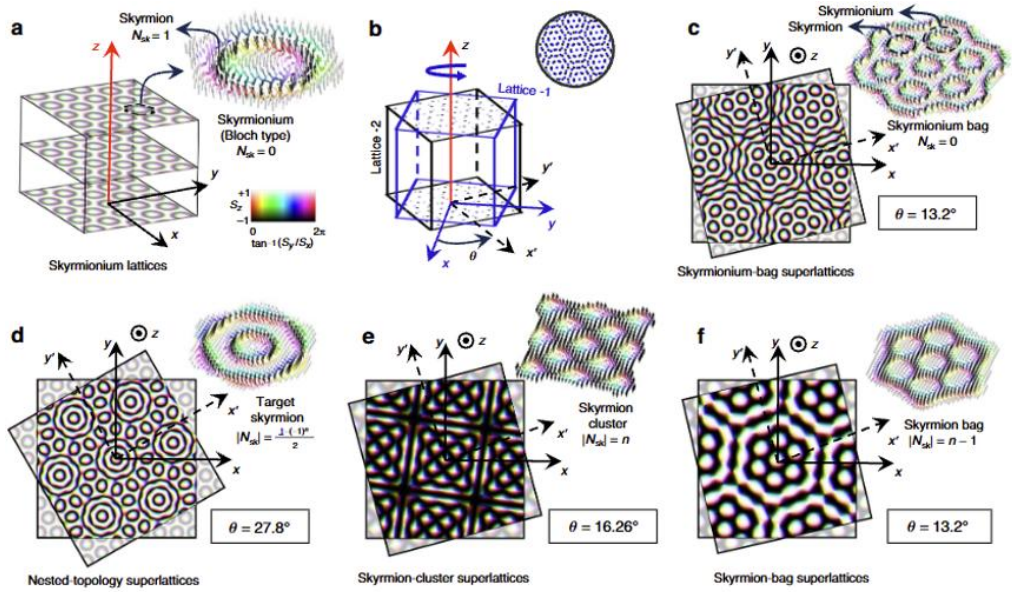

文章链接：https://doi.org/10.1038/s41467-026-79261-7

## 7、自由空间“扭转电子学”：基于莫尔结构光的光学超拓扑

两种周期性晶格以一定角度相互扭转并发生干涉，可形成独特的莫尔超晶格，这一现象被称为“扭转电子学”。近年来，扭转双层及多层二维材料中的莫尔效应受到广泛关注，通过调节晶格间的扭转角度，能够诱导超导、关联绝缘态、自旋极化及平带等新奇物理现象。特别是在特定的“魔角”条件下，材料的电子与光学性质可发生显著变化。相关研究已拓展至范德华异质结构、光子晶体、双曲声子极化激元及表面等离激元等体系，为光场局域与拓扑结构调控提供了新途径。然而，现有莫尔体系大多依赖静态材料结构，相关物理现象主要局限于近场及低维界面，在高维、动态、可重构体系中的研究仍较为有限。与此同时，斯格明子、霍普夫子及其他复杂拓扑结构因其独特的拓扑性质，在鲁棒信息传输与可重构光场调控等领域展现出重要潜力。因此，探索突破材料界面限制的高维莫尔光场及其新型拓扑结构，具有重要的科学意义。
近日，**南洋理工大学申艺杰助理教授研究团队**，将“扭转电子学”概念拓展至自由空间传播的结构光场，提出了“光学超拓扑”概念，为复杂光学拓扑结构的灵活构筑与调控提供了新平台。通过将两组拓扑光学晶格以可调扭转角度相干叠加，利用莫尔效应实现了斯格明子包、斯格明子簇及其超晶格、拓扑准晶等多种复杂拓扑结构。在特定公度扭转角下，光场可形成具有周期性排列的拓扑超晶格。与传统依赖材料结构的扭转体系不同，该方法利用数字化编程灵活调节光学晶格及

其相对扭转角度，无需重新制备物理样品，即可实现不同超拓扑结构之间的动态切换。此外，研究表明，所构筑的光学超拓扑结构能够在自由空间中实现长距离无衍射传播，同时保持其几何尺寸与拓扑特征，并在受到障碍物遮挡等强扰动后表现出显著的拓扑鲁棒性与自修复能力，为高维光信息传输与拓扑光场调控提供了新思路。

相关工作发表在《Light: Science & Applications》上。（刘帅）



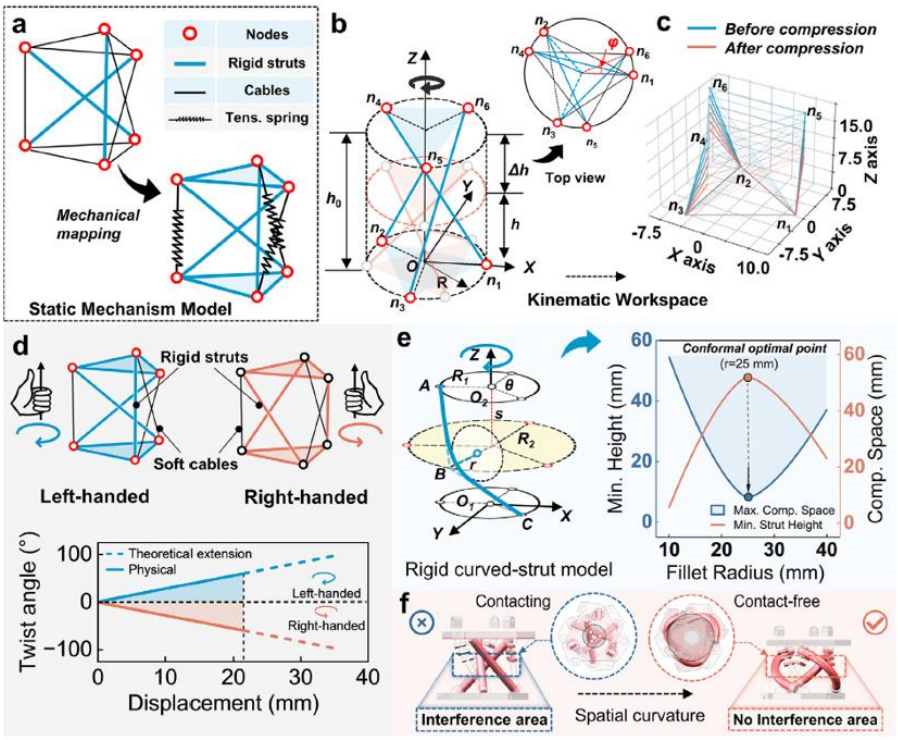

文章链接：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02533-w

## 8、跨尺度双重解耦实现手性张拉整体超材料的力学与运动学调控

机械超材料通过人工设计微观结构与拓扑构型，能够实现传统材料难以具备的特殊力学响应，其中压缩－扭转耦合超材料利用结构手性，将轴向压缩转化为旋转运动，在柔性机器人、智能驱动及可重构机械系统等领域展现出重要应用潜力。然而，现有压缩－扭转超材料仍面临大变形能力、结构刚度和疲劳耐久性难以兼顾的问题。传统刚性结构在大变形过程中容易产生局部应力集中与构件干涉，柔性结构则可能面临承载能力不足和结构失稳等限制。此外，压缩过程中产生的端面旋转难以与旋转受限的工程接口兼容，而结构制造完成后的力学性能通常缺乏灵活调节能力。因此，如何在保证结构稳定性与耐久性的同时，实现大幅度压缩－扭转变形、力学性能可编程调控及外部运动约束兼容，成为该领域亟待解决的重要问题。

**长春工业大学张美玲副教授、孙建伟教授联合吉林大学张志辉教授团队**，提出了一种基于手性三杆张拉整体单胞的跨尺度双重解耦设计策略。在单胞尺度，研究团队结合刚柔异质结构与空间曲杆设计，将宏观大变形转化为刚性杆件的运动学位移及柔性网络的低应变变形，实现宏观变形与局部材料应变的力学解耦。实验中，单胞在 50%压缩应变下实现了 97° 的扭转角，经过 10000 次循环加载后，Level 3 构型的峰值载荷仅下降 4.87%。通过引入几何互锁重构机构，还实现了结构刚度与压缩－扭转响应的制造后可编程调节。在组装尺度，研究团队进一步利用异手性单胞的旋转抵消效应，将扭转运动限制于结构内部，使外部接口保持纯平移运动，实现运动学解耦，为高耐久、可重构机械超材料在受限空间机器人

系统中的应用提供了新思路。
相关工作发表在《Advanced Materials》上。（刘帅）



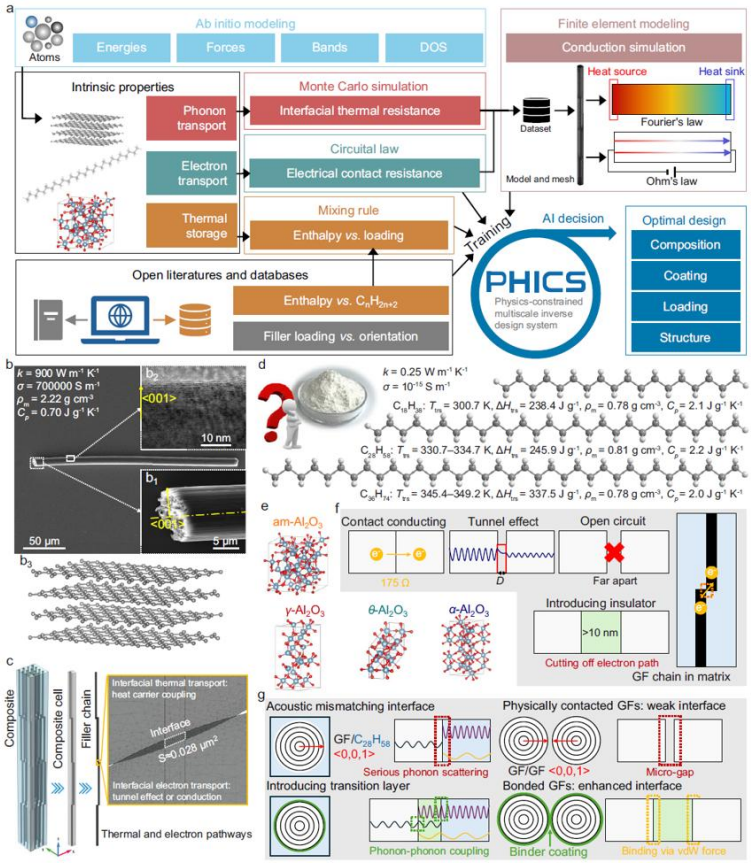

文章链接：https://doi.org/10.1002/adma.75656

## 9、块状六方金刚石

随着高功率电子器件不断向小型化、高集成度方向发展，局部热量积累对器件运行稳定性和使用寿命提出了严峻挑战。复合相变材料能够利用相变潜热吸收瞬态热量，并通过导热填料构建热传输通道，在电子器件热管理领域展现出重要应用潜力。然而，材料的导热性能、储热能力与电绝缘性能之间往往存在相互制约：增加高导热填料含量虽然能够提高热导率，却会降低相变储热容量，并可能形成导电网络，影响器件的电气安全。与此同时，复合材料的宏观性能受到原子尺度载流子输运、纳米尺度界面热阻及介观导热网络等多尺度因素共同影响，传统依赖经验和反复试验的材料开发方法难以实现多性能协同优化。近年来，机器学习为材料设计提供了新的技术途径，但常规数据驱动模型缺乏明确的物理约束，难以揭示不同结构参数与性能指标之间的因果联系。因此，将多尺度物理机制引入机器学习，实现导热、储热与电绝缘性能的协同逆向设计，是发展高性能温控材料的重要研究方向。
近日，**香港中文大学许建斌教授、丁栋梁博士、北京大学邹敏豪、中国科学院深圳先进技术研究院曾小亮研究员组成的联合研究团队**提出物理约束逆向设计框架 PHICS，通过有向无环图将第一性原理计算、声子与电子输运、界面热阻及宏观热电性能建立物理关联，并结合多目标遗传优化算法，实现复合相变材料的跨尺度设计。研究发现，非晶 $Al_2O_3$ 界面层能够同时发挥声子传输桥梁和电子输运势垒的双重作用，在增强界面声子耦合的同时阻断导电通道。基于模型预测，团队构筑了由定向石墨纤维骨架、非晶 $Al_2O_3$ 界面层和正二十八烷组成的复合相

变材料。实验结果表明，该材料热导率达到 7.80 W $m^{-1}K^{-1}$，较未引入氧化铝界面层的对照材料提高 36.1%，电导率则降低 48.0%，同时保持 238 J $g^{-1}$ 的储热容量。该研究实现了高导热、储热与电绝缘性能的协同优化，为结合物理机制与人工智能开展多功能热管理材料设计提供了新方法。

相关内容发表于《National Science Review》上。（张琰炯）




文章链接：https://doi.org/10.1093/nsr/nwag503

（来源：两江科技评论）