

2026 年 9 月 1 日-2026 年 9 月 6 日

索引：

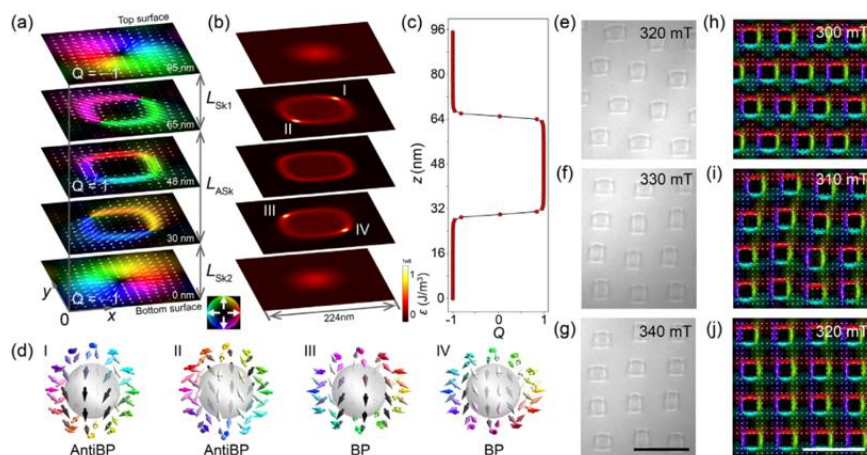
- 1、层依赖符号反转的三维拓扑自旋织构相互作用调控晶格对称性
- 2、莫尔转角增强块状范德华晶体的拉伸塑性
- 3、各向同性手性超材料中的 spin-1 Weyl 点
- 4、 TlCu_5Se_3 中强非谐性驱动的波状热传输和高热电性能
- 5、基于超材料反应器的电气化热化学反应工程

1、层依赖符号反转的三维拓扑自旋织构相互作用调控晶格对称性

磁性斯格明子与反斯格明子因其拓扑稳定性、非易失性以及可通过较低能耗进行操控，被认为是自旋电子学信息载体的重要候选。早期研究主要聚焦二维薄膜，并通常将斯格明子之间的相互作用视为均匀排斥，或将三维斯格明子近似为内部结构不随厚度变化的刚性管状对象。近年来，随着三维磁成像技术的发展，研究发现斯格明子串、Hopfion 及斯格明子-反斯格明子混合结构等具有丰富的厚度方向内部构型，其中 Bloch 点可作为连接不同拓扑自旋结构的奇点，使拓扑电荷沿厚度发生局域变化。然而，三维织构内部不同层之间的相互作用是否具有本质差异，以及这种表面与体相结构竞争如何进一步决定多体晶格的稳定性和对称性，仍缺乏系统理解。因此，揭示层分辨拓扑结构、Bloch 点运动与宏观晶格对称性之间的联系，是理解和调控三维拓扑磁结构的重要问题。

近日，北京大学的侯仰龙教授和彭丽聪研究员研究团队以三维混合斯格明子-反斯格明子串为对象，结合洛伦兹透射电子显微镜实验与微磁模拟，揭示了一种沿厚度方向发生符号反转的层依赖相互作用机制。结果表明，结构表面的斯格明子层之间主要表现为排斥作用，而内部反斯格明子层则呈现吸引作用，二者之间的转换位置与 Bloch 点所在层相对应。随着磁场及材料参数变化，Bloch 点发生垂直迁移，使表面斯格明子与内部反斯格明子所占厚度比例重新分配，从而改变吸引与排斥作用之间的竞争关系，并驱动晶格在三角形和正方形构型之间可逆转变。进一步引入厚度平均拓扑电荷后发现，该量能够有效表征不同拓扑片段的相对占比，并在多组磁参数条件下稳定刻画晶格相变边界。该工作突破了将三维拓扑织构视为刚性整体、相互作用沿厚度均匀的传统描述，强调表面与体相差异及内部拓扑奇点在三维磁结构集体行为中的关键作用，为利用内部层结构调控晶格对称性、霍尔响应及三维自旋电子器件功能提供了新的物理机制。

该研究发表于期刊《Advanced Materials》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.74896>

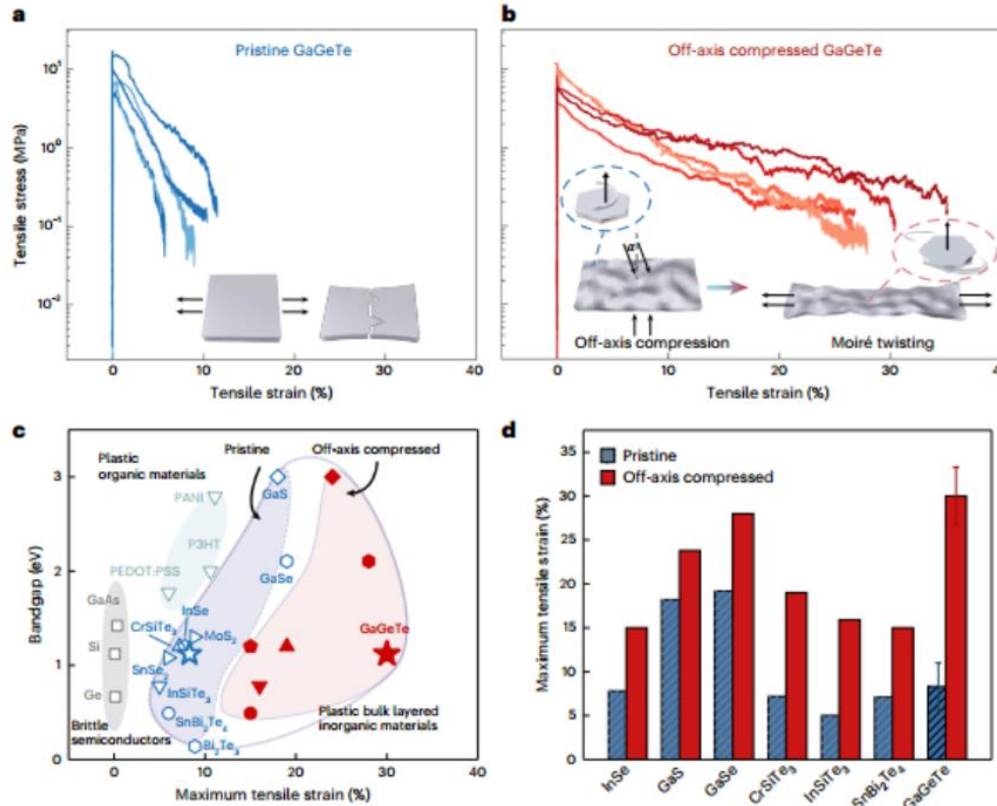
2、莫尔转角增强块状范德华晶体的拉伸塑性

二维及层状范德华材料凭借层间较弱的范德华作用和层内较强的共价或离子键合，在电子、光电子、热电以及柔性器件等领域展现出重要应用潜力。然而，这种特殊的键合特征也带来了一个长期存在的矛盾：层内强键有利于获得优异的电学性能，却往往使块体晶体在拉伸载荷下表现出明显脆性，容易发生突发断裂。目前少数具有室温塑性的块体层状材料，其变形机制主要依赖层间/层内滑移及位错运动，室温拉伸延伸率通常仍低于 12%，如何在保持高载流子迁移率等功能特性的同时进一步提升其宏观拉伸塑性，仍是柔性无机材料领域的重要挑战。另一方面，由相邻二维层之间相对旋转形成的莫尔结构近年来已成为调控层状材料物性的有力工具。扭转能够打破原有晶体对称性，并已被广泛用于调控非常规超导、关联绝缘态等量子现象，但已有研究主要关注其电子结构和量子性质。事实上，范德华层间较弱的相互作用意味着层间旋转所需能量较低，这种“扭转自由度”同样可能在外部机械载荷下参与应力释放，从而成为区别于传统位错和层间滑移的新型塑性变形机制。如何在宏观块体晶体中可控引入莫尔扭转，并进一步利用扭转角演化改善材料力学性能，仍缺乏系统的实验验证与物理机制认识。

近日，上海硅酸盐所张家伟研究员与史迅研究员、浙江大学余倩教授研究团队以块体层状 GaGeTe 单晶为代表，提出一种简单的偏轴预压缩策略：通过约 5° 偏轴方向施加预压缩，在非均匀应力产生的力矩和剪切作用下主动诱导层间莫尔扭转，并获得约 $1 - 21.4^\circ$ 的宽范围扭转角分布。随后进行面内拉伸时，莫尔结构进一步由小角度向 13.1° 和 21.4° 等大角度演化，通过持续的层间扭转重排与滑移有效释放机械能和局部应力集中。这一机制使 GaGeTe 的室温最大拉伸应变由原始晶体的约 8.3% 提高至 30% 以上，提升约 360%，表现出此前块体范德华材料中十分突出的拉伸塑性。第一性原理计算进一步表明，莫尔扭转可使层间滑移能垒降低约两个数量级，而解理能基本保持不变，从能量学上解释了材料为何能够优先通过扭转和滑移耗散机械能而非发生脆性断裂。更重要的是，这种扭转主要发生在层间，对层内电子结构影响有限，变形后的 GaGeTe 在室温下仍保持约 $587 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空穴迁移率；该策略还成功拓展至 InSe、GaS、GaSe、CrSiTe₃、InSiTe₃ 和 SnBi₂Te₄ 等多种块体范德华晶体。该研究由此建立了“偏轴预压缩—莫尔扭转—扭转角演化—层间滑移—宏观塑性增强”的新型变形机制，为兼顾优

异电子性能与高机械延展性的柔性、可变形无机半导体材料提供了新的莫尔工程设计思路。

相关内容发表于《Nature Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02731-2>

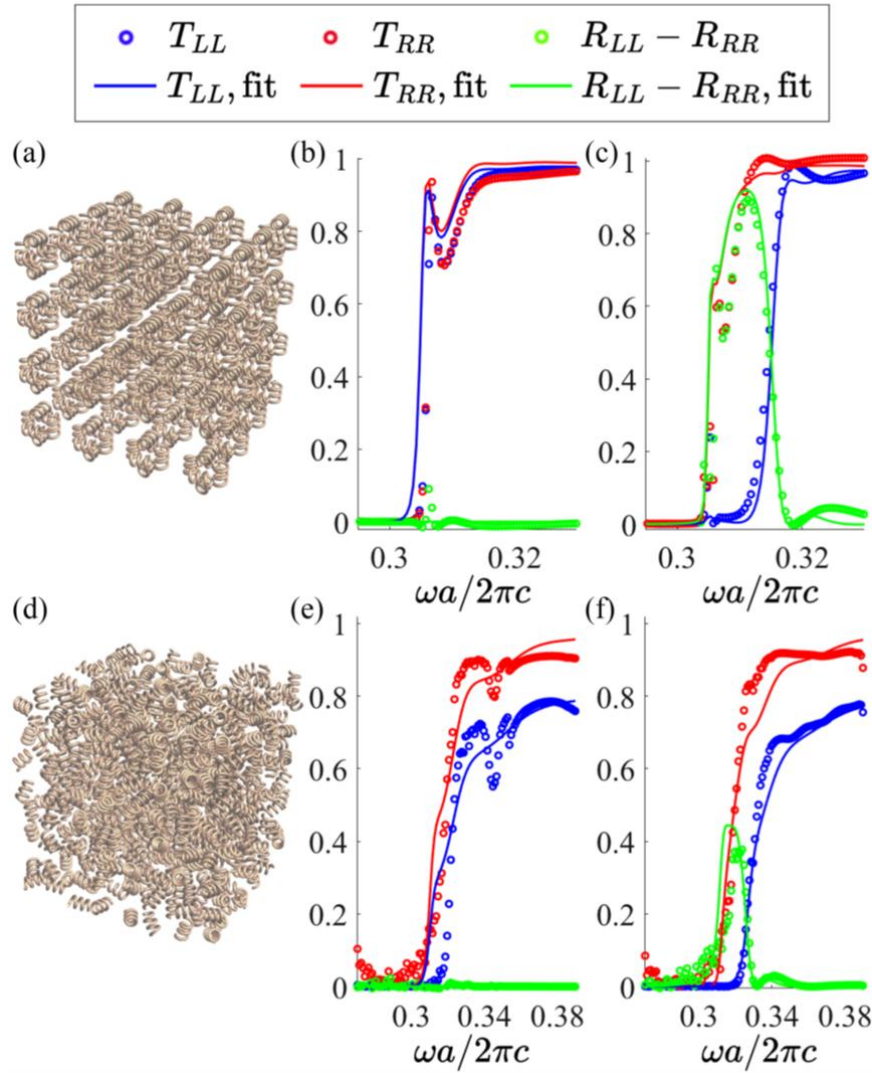
3、各向同性手性超材料中的 spin-1 Weyl 点

Weyl 点是电子与光子拓扑体系中的重要能带简并点，具有拓扑保护特性，可视作为动量空间中 Berry 曲率的“磁单极子”。在电子材料中，Weyl 点能够形成 Weyl 半金属，并产生手性表面态和异常输运等现象；在光子体系中，则可支持鲁棒表面模、反常折射等新颖波传播行为，并在大面积激光器和可控光传输等领域展现应用潜力。目前，光子 Weyl 点主要通过两类体系实现：一类是在精心设计的三维周期光子晶体中构造 Weyl 点，但其在光学波段的三维微纳加工仍具有较大技术难度；另一类是在由有效介电常数和磁导率张量描述的均匀介质或超材料中实现，例如磁化等离子体和三维手性超材料。然而，已有这些体系的电磁响应通常具有明显的各向异性，因此，如何在各向同性电磁体系中实现 Weyl 点成为值得探索的问题。

近日，斯坦福大学 Shanhui Fan 教授研究团队，提出了一类能够在波矢为零的 Γ 点、任意频率处支持 spin-1 Weyl 点的各向同性三维超材料。与此前报道的 Weyl 超材料体系不同，该体系的有效介质模型具有完整的 $SO(3)$ 旋转对称性，即宏观各向同性。作者从理论上证明，在电磁波体系中，各向同性与空间反演对称性破缺共同作用，可以保证 Γ 点处 spin-1 Weyl 点的存在。进一步地，由于三维超材料可由大量超原子组装而成，其宏观性质主要由超原子的特性决定，因此理论表明，只要由手性超原子构成的三维体系整体保持各向同性，就能够普遍在 Γ 点

产生 Weyl 点。作者通过对周期排列和随机排列的手性超原子体系进行数值计算，均获得了 spin-1 Weyl 点的证据，从而显著拓展了可用于研究 Weyl 点物理的超材料体系范围。

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

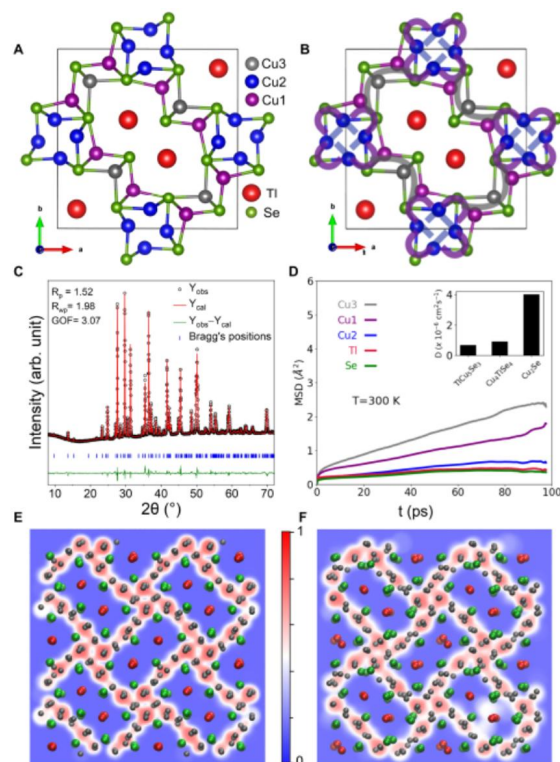


文章链接: <https://doi.org/10.1103/7ty7-d15f>

4、 TlCu_5Se_3 中强非谐性驱动的波状热传输和高热电性能

在全球能源转型和高效利用背景下，热电材料因能够直接实现热能与电能之间的相互转换，在工业余热回收、分布式发电和固态制冷等领域具有重要应用前景。衡量热电性能的核心指标是无量纲优值 zT ，其提升需要同时获得较高的电输运性能和尽可能低的晶格热导率。然而，在常规晶体中，热量通常由具有明确动量和寿命的“粒子型”声子传播，想要将晶格热导率压低至接近极限往往需要引入强无序、弱键合或离子动态，但这些因素又可能破坏电输运和结构稳定性。近年来，Wigner 输运理论提出，在强非谐、复杂晶格体系中，声子不同能带之间可以发生相干耦合，热传输由传统粒子式传播逐渐转向“波动型”相干隧穿。如何在稳定晶体中构建这种强非谐环境，使波动型声子成为主要热载流机制，同时保持良好的电输运性能，是突破热电材料性能上限的重要科学问题。

近日，印度贾瓦哈拉尔·尼赫鲁先进科学研究中心 Kanishka Biswas 教授研究团队发现， TlCu_5Se_3 具有复杂的三维“结状”晶体骨架，其中 Cu 亚晶格表现出被结构通道限制的局域动态无序，而 Tl 原子则产生显著的 rattling 振动，两者共同引入强烈晶格非谐性。第一性原理、机器学习分子动力学及 AIMD 模拟表明，Cu 离子虽然存在局域扩散式运动，但并不会像超离子导体那样发生长程迁移，因此既能够增强声子散射，又避免严重的结构失稳。更关键的是，Wigner 统一热输运计算揭示，大多数声子寿命已低于 Wigner 极限，不同声子支之间的能量间隔与线宽相当，使强烈的带间相干耦合成为可能；在较高温度下，波动型声子热输运甚至超过粒子型贡献并占据主导，从而使 TlCu_5Se_3 在 294 – 673 K 范围内始终保持约 $0.3 - 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的超低晶格热导率。在此基础上，材料本征 zT 在 673 K 达到约 1.42；进一步通过引入少量 Cu 空位提高空穴浓度和电导率，在 $\text{TlCu}_{4.93}\text{Se}_3$ 中将功率因子提升至约 $11.5 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ ，最终获得约 1.7 的峰值 zT 。该工作建立了“局域动态无序—强非谐性—带间声子相干—波动型热输运—超低热导率”的完整物理图像，说明无需依赖完全液态化的离子扩散，也可在稳定晶体中实现波动主导的极低热输运，为高性能热电材料的结构设计提供了新的方向。相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）



文章链接: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aeh9096>

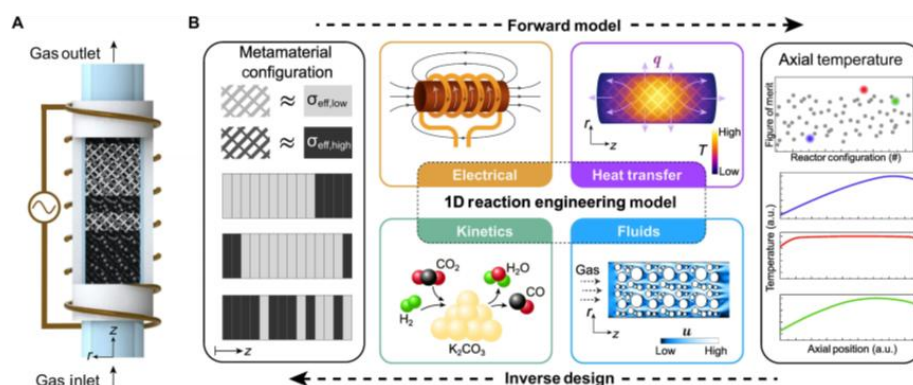
5、基于超材料反应器的电气化热化学反应工程

热化学反应是化学工业中的核心过程之一，反应器内部的温度分布和传热速率直接影响热力学转化率、反应动力学以及能量传递。不同反应对温度场的要求不同，从适用于简单吸热反应的等温分布，到用于抑制副反应、提高选择性的特定非均匀温度分布。传统燃烧炉和换热网络虽然技术成熟，但在空间温度调控方面存在局限。为改善温度场，研究者发展了多级反应器、微反应器和结构化反应器等方

案，但仍受制于系统复杂性、成本和规模化能力。近年来，反应器电气化为热化学过程提供了新的加热方式，可利用电流或电磁波直接对内部电阻体或感受体进行体积加热。其中，电磁感应加热具有非接触、高效率 and 空间可调等优势。现有研究主要集中于纳米颗粒、金属管及均匀多孔结构的感应加热，但大多采用轴向均匀加热。因此，如何针对反应过程定制轴向加热及温度分布，以进一步提高反应器性能和化学转化效率，仍是值得深入研究的问题。

近日，斯坦福大学 Jonathan A. Fan 教授团队提出了一种超材料反应器，通过对轴向定制的超材料挡板进行高频磁感应加热，实现可调控的轴向加热分布。挡板由两种具有不同加热特性的晶格结构按特定顺序组合构成，并可根据反应器的反应工程特性进行逆向设计，从而针对不同反应类型、流动条件和最高温度获得所需的温度分布。作者将该超材料反应器应用于逆水煤气变换反应的填充床流动反应器中，在不同最高温度和流量条件下均提高了反应器内部的温度均匀性，并相较于均匀加热系统实现了更高的化学转化率。该工作表明，通过将电气化供能与化学反应及传热过程协同设计，可以利用空间可控加热进一步提升热化学反应效率。（刘帅）

相关工作发表在《Science Advances》上。



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aeg7217>

（来源：两江科技评论）