

超材料前沿研究一周精选



2026 年 9 月 14 日-2026 年 9 月 20 日

索引:

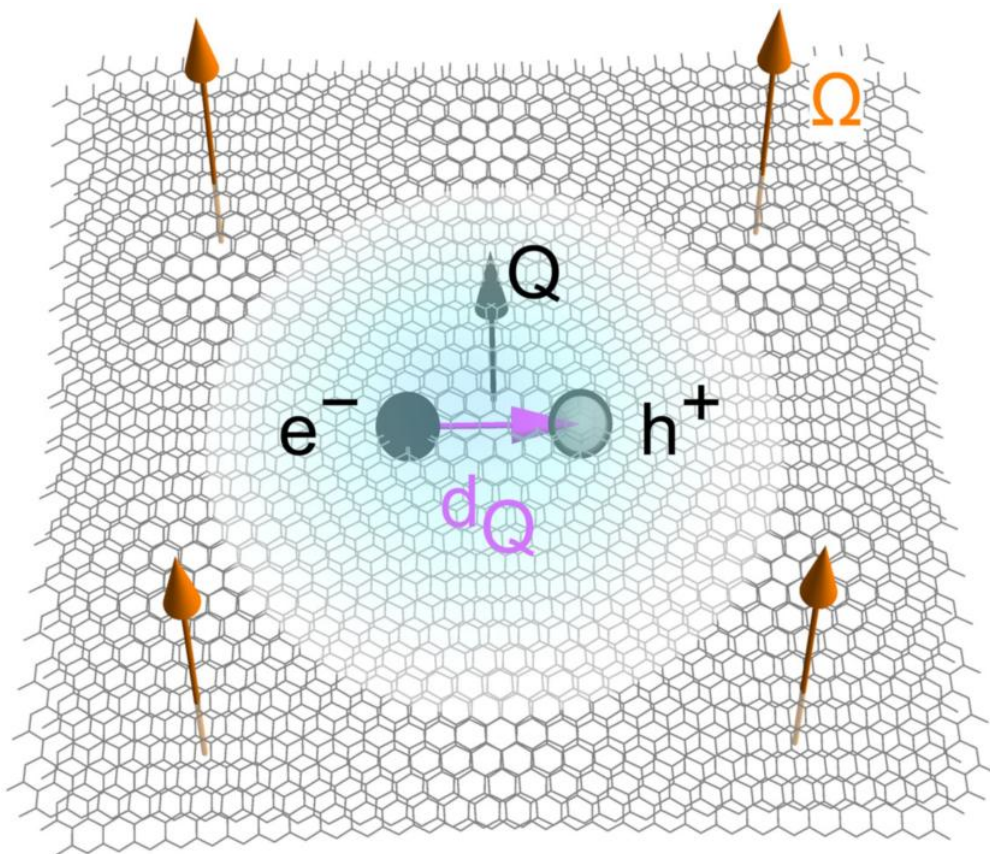
- 1、平坦陈能带中由贝里曲率产生的巨型螺旋激子偶极矩
- 2、重构 SnSe 孤对电子活性实现高性能 n 型热电材料
- 3、刚性层状杂化钙钛矿的极低热导率
- 4、厚度可编程纳米多孔超构织物实现按需热调控
- 5、可调超晶格势 Rashba 体系中的拓扑平带与分数陈绝缘体
- 6、面向无束缚人机交互的超材料赋能无电池无线传感网络

1、平坦陈能带中由贝里曲率产生的巨型螺旋激子偶极矩

激子是由电子与空穴形成的电中性准粒子，但其内部电荷分离可产生电偶极矩，并显著影响载流输运、光学响应及多体相互作用。在范德华异质结构和耦合量子阱中，层间激子因电子与空穴分居不同层而天然具有面外偶极矩；相比之下，构造较大的面内激子偶极矩更具挑战。理论上，若面内偶极矩与激子动量耦合，可形成具有特定纹理的偶极分布和各向异性相互作用。磁激子中，垂直磁场可通过洛伦兹力使电子与空穴产生横向位移，而在零磁场条件下，贝里曲率也可提供类似的几何机制。然而，许多拓扑能带中电子与空穴对应能带的贝里曲率符号相反，导致偶极贡献相互抵消。莫尔材料中的平坦陈能带为解决这一问题提供了新途径：当电子和空穴能带具有同号贝里曲率并在莫尔布里渊区内高度平坦时，激子可协同采样两条能带的量子几何性质，从而形成巨大的面内偶极矩，并有望通过能带拓扑实现其可调控性，进一步产生新的多体相互作用和太赫兹光学现象。

近日，华盛顿大学曹霆副教授、肖笛教授与许晓栋教授团队，研究了具有相同陈数的两条平坦陈能带之间形成的面内激子偶极。研究表明，当激子以质心动量运动时，陈能带的贝里曲率会使电子和空穴产生方向相反的异常速度，从而形成垂直于激子动量的电偶极矩，并在动量空间呈现螺旋纹理。以扭转角为 2.1° 、空穴填充因子为 1 的扭转双层 MoTe_2 为例，计算发现莫尔布里渊区内集中的贝里曲率可使激子偶极矩达到约 $150 D$ 。通过增大面外位移场，还可驱动激子由弗伦克尔型向万尼尔型转变，从而实现偶极矩大小及螺旋手性的调控。此外，巨大的激子偶极会产生强烈且具有各向异性的吸引型偶极—偶极相互作用，其强度甚至超过激子带宽，并可能形成具有面内四极矩的光学活性双激子。该研究表明，莫尔材料为调控太赫兹频段激子偶极及其多体相互作用提供了新的平台。

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



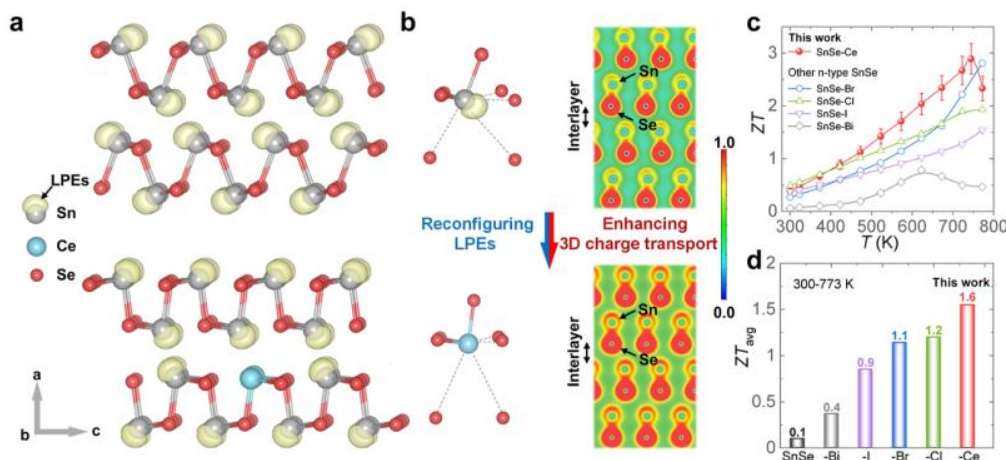
文章链接: <https://doi.org/10.1103/5w7l-8mcv>

2、重构 SnSe 孤对电子活性实现高性能 n 型热电材料

热电材料能够实现热能与电能之间的直接转换，为工业余热回收和高效能源利用提供了重要技术路径。热电转换效率通常由无量纲热电优值 ZT 衡量，其提升依赖电导率、Seebeck 系数与热导率之间的协同调控，但传统能带工程、缺陷调控和多尺度声子散射等策略正逐渐面临进一步提升的瓶颈。层状硒化锡（SnSe）由储量相对丰富的元素组成，是近年来最具代表性的高性能热电材料之一，其单晶在 n 型和 p 型体系中均表现出优异性能。与许多依赖纳米结构和缺陷工程实现性能优化的热电材料不同，SnSe 优异的电热输运性质与其本征晶体和电子结构密切相关，而其中一个重要物理起源正是具有立体化学活性的 Sn $5s^2$ 孤对电子（LPEs）。孤对电子的不对称空间分布能够驱动 Sn 原子偏心和 SnSe₇ 局域配位畸变，形成高度非谐的成键环境和软化声子，从而显著抑制晶格热输运；另一方面，SnSe 还具有独特的“二维声子输运—三维电荷输运”特征，使其面外方向同样能够获得优异热电性能。然而，相较于孤对电子对晶格非谐性和低热导率的作用，人们对于其如何影响层间轨道杂化以及三维载流子输运仍缺乏深入认识。因此，能否跳出传统“调控载流子浓度或增强声子散射”的思路，从孤对电子这一更本征的电子结构自由度出发，同时改善电输运和热输运，成为进一步突破 SnSe 热电性能的重要科学问题。

近日，北京航空航天大学赵立东教授、常诚教授团队提出了一种不同于传统载流子掺杂的“孤对电子重构”策略：通过引入不具有立体化学活性孤对电子的微量 Ce^{3+} ，重构 SnSe 中 Sn $5s^2$ 孤对电子的集体活性。Ce 不仅能够优先取代 Sn 位、作为高效施主提高电子浓度，同时还能补偿 Sn 空位并降低载流子散射，使 SnSe 获得稳定而强烈的 n 型输运。更重要的是，Ce 掺杂削弱了孤对电子诱导的局域配位畸变，提高局域结构对称性，并增强面外方向 Sn $5p$ 与 Se $4p$ 轨道杂化和层间电荷重叠，从而强化三维电荷输运；与此同时，导带谷间能量差进一步缩小，高温下趋于简并，在提高态密度有效质量的同时维持较高载流子迁移率。值得注意的是，尽管孤对电子活性减弱理论上可能削弱晶格非谐性并提高热导率，但 Ce 与 Sn 之间显著的质量和离子半径差异引入了强烈点缺陷声子散射，反而进一步降低晶格热导率，实现电、热输运的协同优化。最终， $\text{Sn}_{0.99}\text{Ce}_{0.01}\text{Se}$ 单晶在 745 K 获得约 3.0 的峰值 ZT，300 – 773 K 平均 ZT 达到约 1.6，并在约 500 K 温差下实现约 10.4% 的最大热电转换效率。该研究将孤对电子从传统意义上的“低热导率来源”拓展为可主动调控电荷输运的电子结构自由度，为 SnSe 以及 SnS、 PbSnS_2 、GeSe 等含孤对电子热电材料的性能优化提供了新的设计范式。

研究成果发表在《Journal of the American Chemical Society》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1021/jacs.6c15566>

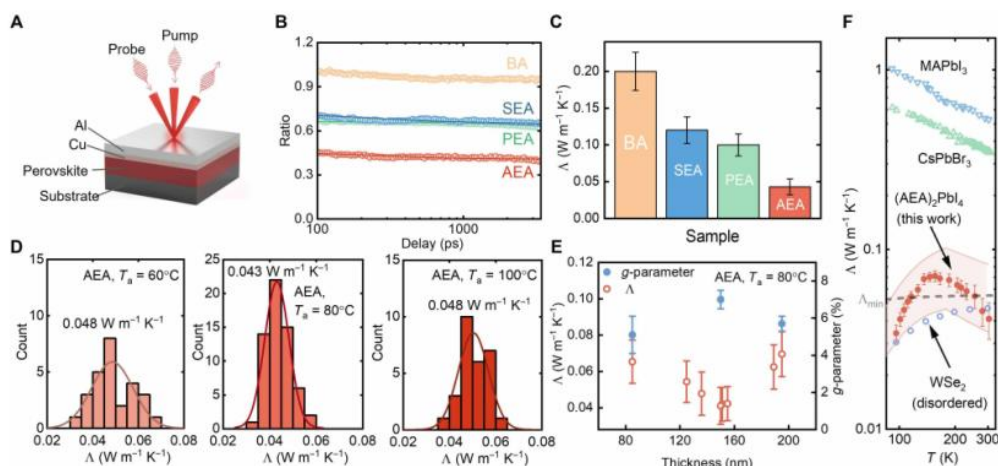
3、刚性层状杂化钙钛矿的极低热导率

超低热导率材料在热绝缘、余热利用以及能源转换与存储等领域具有重要应用价值。对于高热流密度光伏器件、燃料电池、制氢装置以及高能量密度电池而言，有效抑制寄生热传输不仅能够减少能量损失，还可以缓解局部热应力与热失控问题。然而，材料的隔热性能与机械刚度往往存在难以兼顾的矛盾：泡沫、气凝胶等多孔材料可借助大量空气孔隙获得接近空气的超低热导率，却通常具有较低的弹性模量；金刚石、SiC 等高刚度晶体由于原子间强键合作用，又往往具有较高的热导率。尤其对于完全致密的固体，在保持较高机械强度的同时将室温热导率降低至 $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 以下极具挑战。层状有机-无机杂化钙钛矿 (HOIPs) 为突破这一传统权衡关系提供了新的材料平台：强键合的无机骨架能够维持晶体结构和机械刚度，而层间有机阳

离子的分子振动、取向涨落及局域无序则能够显著抑制热量传输。已有研究表明，层状 HOIPs 的面外热导率可降低至 $0.1 \sim 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 量级，但如何进一步利用分子结构设计，在致密晶体中同时获得接近空气的隔热能力和较高机械刚度，仍是热传输与热管理材料领域的重要科学问题。

近日，美国北卡罗来纳州立大学 Dali Sun 教授、Jun Liu 教授和南京师范大学周俊教授以及北卡罗来纳大学尤为教授研究团队从有机阳离子分子工程出发，通过引入具有双芳香环结构的有机阳离子，在提高分子刚性的同时调控层间振动耦合和结构无序。TDTR 测试显示，约 150 nm 厚的 $(\text{AEA})_2 \text{PbI}_4$ 薄膜室温面外热导率仅为 $0.043 \pm 0.011 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，最低测量值接近 $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，仅比空气的 $0.026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 高约 60%，达到完全致密固体中的极低水平。更为关键的是，该材料并非依赖传统多孔结构实现隔热，其弹性模量仍达到 $7.67 \pm 2.47 \text{ GPa}$ ，高于多数塑料、泡沫和气凝胶，实现了超低热导率与较高机械刚度的协同。结合 GIWAXS 表征、温变热输运实验及热阻网络模型，研究进一步揭示：AEA 有机阳离子诱导的随机层间堆垛无序与双芳香环二面角扭转共同削弱层间热接触，并使振动能量发生强烈散射和局域化，是异常低热导率的关键来源。该工作表明，通过有机阳离子分子结构设计，可以在不牺牲固体机械刚度的前提下将热传导推向极低水平，为柔性多层器件、热障涂层以及新型能源转换与热管理材料的设计提供了新的思路。

相关内容发表于《Science Advance》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aee5269>

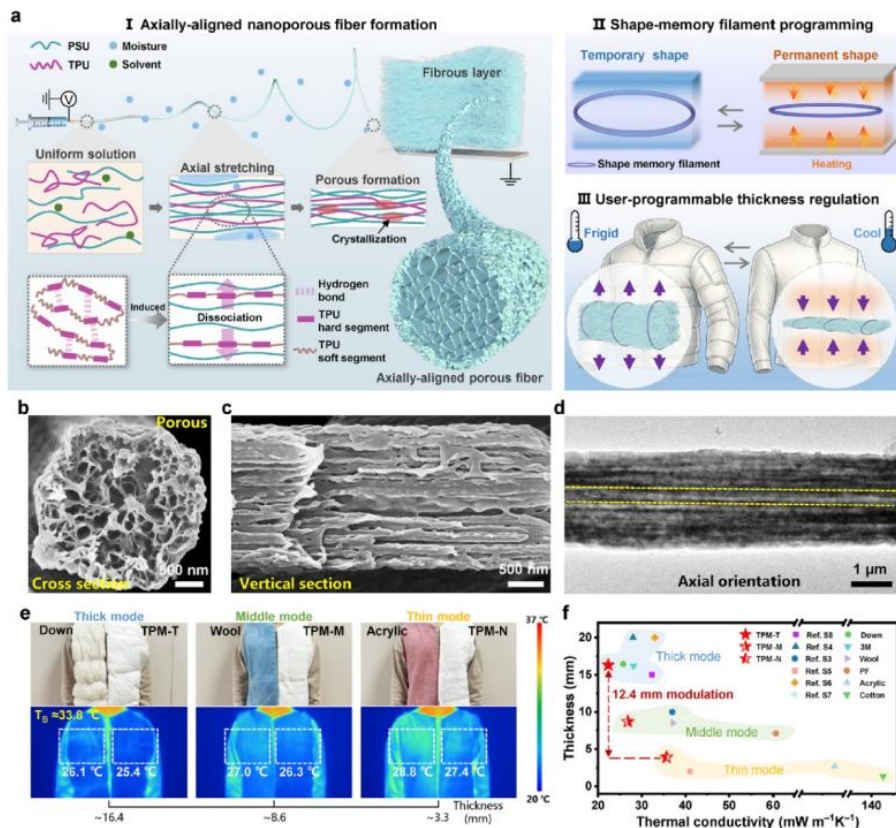
4、厚度可编程纳米多孔超构织物实现按需热调控

在寒冷环境中，保暖织物需要减少人体与外界之间的热交换，而减小纤维直径、构筑细尺度孔隙是提升隔热性能的重要途径。冻干、气流纺丝和静电纺丝等技术已被用于制备高孔隙率纤维材料，其中静电纺丝能够获得较细的连续纤维和丰富的纳米孔结构，具有较好的隔热潜力。然而，传统保暖材料通常依赖固定的纤维直径、密度和孔隙率，其热阻在制备完成后基本确定，因此容易出现严寒条件下保暖不足、较温和环境中过度保暖的问题。近年来发展的自适应热管理材料虽然能够通过温度、湿度或磁场等刺激改变结构，但多数仍主要在“保温”与“散热”两种状态之间切

换，难以根据不同寒冷程度连续匹配人体的实际热需求。因此，如何在保持较高隔热能力的同时主动调节织物厚度，使材料在多种结构状态下均具有有效且可控的保暖性能，成为个人热管理领域亟待解决的问题。

近日，东华大学的田昱城博士、丁彬教授研究团队，构建了一种厚度可编程纳米多孔超构织物，将轴向排列的纳米多孔纤维层与形状记忆纤维相结合，形成“隔热层—驱动器”耦合体系。通过聚砜与热塑性聚氨酯的协同作用，利用氢键解离、纺丝过程中的轴向拉伸以及限域诱导结晶，在单根纤维内部形成稳定的轴向通道型多孔结构，使材料兼具超高孔隙率、低密度和良好的结构稳定性；进一步引入形状记忆纤维，实现纤维层的反复压缩与释放，使织物厚度能够在较宽范围内按需设定。不同厚度状态下，材料可分别适应严寒、中等寒冷和轻度寒冷环境，并在较薄状态下仍通过纳米孔对气体传热的抑制保持有效隔热。实验表明，该织物能够在约-6.1至20.8℃的环境范围内维持人体热舒适，并在相近厚度下表现出优于羽绒、羊毛和腈纶等典型保暖织物的隔热性能，同时兼具透气、透湿和循环使用能力。该研究将微纳尺度的热传输调控与宏观可编程结构相结合，使保暖性能由传统的“制造时确定”转变为“使用时可调”，为智能服装、个体微环境调节及低能耗热管理提供了新的材料设计思路。

该研究发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）



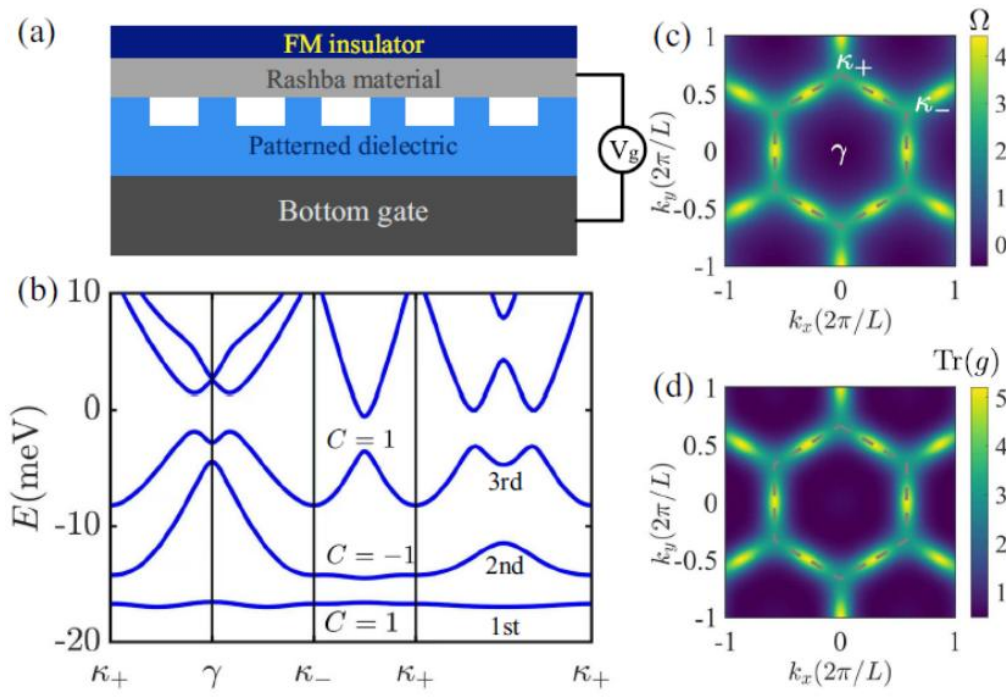
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.75001>

5、可调超晶格势 Rashba 体系中的拓扑平带与分数陈绝缘体

分数陈绝缘体是分数量子霍尔效应在晶格体系中的对应物，能够在无外加磁场条件下依靠电子间强相互作用形成具有分数化准粒子激发的拓扑多体态。其稳定存在通常要求能带同时具备非平庸拓扑、较小带宽、较大带隙以及接近 Landau 能级的量子几何性质。近年来，二维范德华异质结构和莫尔超晶格为实现分数陈绝缘体提供了重要平台，并已在石墨烯和过渡金属硫族化合物等体系中获得实验进展。然而，这类体系往往面临电荷、自旋和谷自由度竞争，同时容易受到无序、应变及晶格弛豫等因素影响，从而削弱分数陈绝缘态的稳定性。特别是在部分莫尔体系中，低温下还可能出现其他竞争拓扑相。因此，寻找更加洁净、能带结构更易控制，同时能够获得孤立单组分拓扑平带的平台，是进一步研究强关联拓扑物态及其分数化激发的重要方向。

近日，中国科学技术大学的秦维教授研究团队将 Rashba 自旋轨道耦合二维材料与磁性近邻效应和可调电势超晶格相结合。Zeeman 场解除 Rashba 能带简并，在低能区域形成近似平坦的色散，并通过打开折叠能带中的 Dirac 点产生 Berry 曲率；周期性超晶格势则进一步通过能带折叠和 Bragg 散射将这一平坦区域与其他色散能带分离，最终获得陈数为 1 的孤立拓扑平带。参数分析表明，该平带可在较宽范围内同时保持较小带宽和较大带隙。进一步的多体精确对角化计算显示，在 $1/3$ 和 $2/3$ 填充下均出现三重近简并基态、有限激发能隙及具有分数量子霍尔特征的磁通谱流，并且在考虑能带混合、势能涨落、磁性不均匀和库仑相互作用屏蔽后仍保持较好的稳定性。研究还通过尺度分析给出了多种候选 Rashba 材料及相应器件条件。相比制备完成后参数相对固定的莫尔体系，该方案能够借助外加电场动态调节超晶格势，为构筑可调控的拓扑平带和强关联分数拓扑态提供了更具灵活性的实现路径。

该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



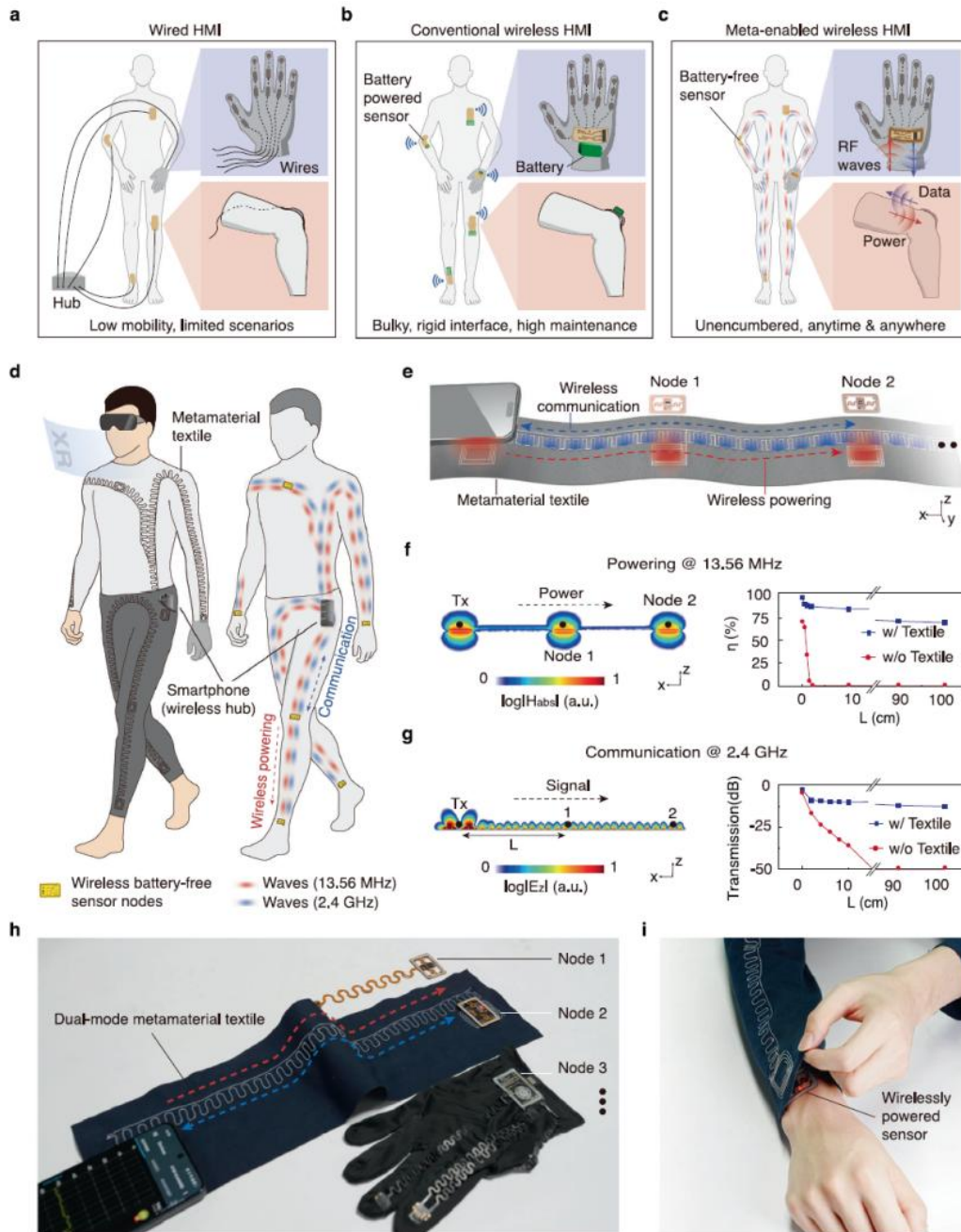
文章链接: <https://doi.org/10.1103/z4g8-2kwj>

6、面向无束缚人机交互的超材料赋能无电池无线传感网络

人机界面正广泛应用于机器人、医疗健康及虚拟/增强现实等领域，其发展趋势是实现更加自然、无束缚、连续的人机交互。可穿戴传感网络能够提供高密度、多模态的人体信息，是实现这一目标的重要基础。然而，分布式传感器需要在全身范围内实现轻量、可靠且无感的互联。传统有线系统虽能保证稳定供电和数据传输，却限制人体运动；无线模块则通常依赖刚性、笨重的电池，影响佩戴舒适性并需要频繁更换。因此，无电池无线体域传感网络受到关注。现有近场和远场无线供能方案仍存在距离损耗大、对发射端位置依赖强等问题。近年来，基于 NFC 手机、超材料织物和 NFC 织物的方案可为可穿戴传感器供能并实现无线通信，但通常只能侧重高速通信或高效能量传输，难以兼顾二者。因此，亟需一种能够同时实现高效无线供能和高吞吐数据传输的集成织物平台，以支撑真正无束缚、连续的人机交互。

近日，清华大学深圳国际研究生院的田曦助理教授、丁文伯副教授团队与深圳北理莫斯科大学的何田依依副教授、胡希平教授团队合作，提出一种基于双模超材料织物的无电池无线体域传感网络，用于实现无束缚、直观且连续的人机交互。通过构建具有电磁调控能力的导电织物，在人体尺度上形成超宽带传输通道，可同时实现 13.56 MHz 高效无线供能和 2.4 GHz 高速数据通信。系统以智能手机作为中心节点，为分布式无电池传感器无线供电并采集多模态信号，从而避免有线连接和笨重电池对人体运动与佩戴舒适性的影响。超材料织物采用液态金属纤维数字刺绣制备，相较现有近场服装可将数据吞吐量提升 37.8 倍，并使无线供能效率提高约一倍。基于该平台，研究进一步实现了智能手势识别、人机协作、虚拟与增强现实交互，以及全身运动数字孪生，展示了其在轻量化、无电池、全身分布式人机交互系统中的应用潜力。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-77600-2>
 (来源: 两江科技评论)