

# 超材料前沿研究一周精选



2026年4月12日-2026年4月19日

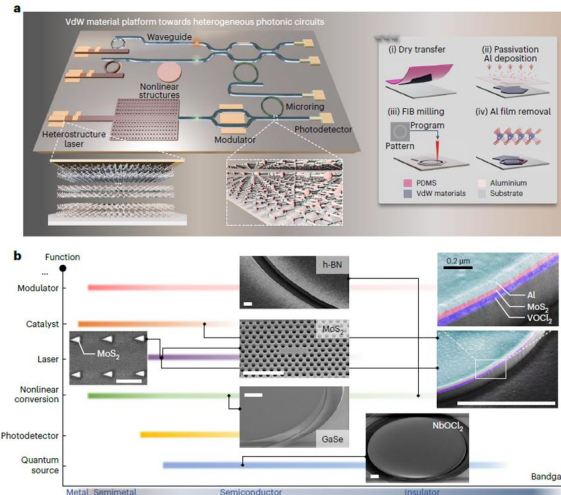
索引：

- 1、用于低损耗非线性光子学的全范德华微腔
- 2、声电耦合调控光电各向异性以实现可重构偏振测量
- 3、双极声子拖曳控制半金属石墨的霍尔热导率
- 4、基于可编程叉指换能器阵列的声表面波多维调控
- 5、菱方堆垛多层石墨烯中的非阿贝尔陈带
- 6、准晶实空间拓扑表征的张量网络方法
- 7、具有卓越的振动适应性的 Janus 结构热界面材料
- 8、4D 打印自旋交叉超材料实现大尺度可编程正负热膨胀

## 1、用于低损耗非线性光子学的全范德华微腔

范德华材料由层间弱相互作用结合的原子级薄层组成，自石墨烯被成功剥离以来，已成为材料科学和纳米光子学的重要研究平台。过去二十年中，这类材料凭借优异的光学、电学、热学和力学性质，在基础研究与器件应用中展现出巨大潜力。尤其在光子学领域，范德华材料具有强光学非线性、显著激子共振和可调折射率等优势，已推动发光、频率转换、光调制、极化激元、光探测和光谱学等方向的发展。与此同时，集成光子学正持续追求将多种光学功能集成到单芯片上。范德华材料表面原子级平整、散射损耗低，并天然适合异质集成和垂直堆叠，因此为片上光子学提供了丰富而灵活的材料库。不过，现有研究大多仅将其作为传统平台上的功能覆层或嵌入层，其作为核心结构材料的潜力仍有待进一步释放。

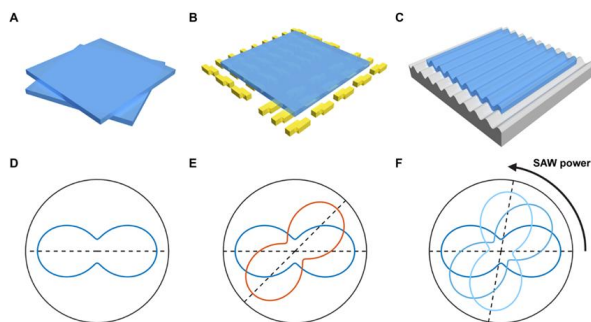
近日，北京大学物理学院肖云峰教授团队与芬兰阿尔托大学 Zhipei Sun 教授团队合作，证明范德华材料可作为低损耗非线性光子学的可行平台。作者提出一种结合铝钝化的聚焦离子束纳米加工策略，可对多种范德华材料及其异质结构实现高分辨率图案化，并高质量制备光子晶体、超表面和微盘等关键器件。所制备微腔支持品质因子超过  $10^6$  的回音壁模式，工作波段覆盖通信到可见光范围。依托高 Q 共振与材料本征强非线性，器件在连续波激发下实现了高效二次谐波、和频及光参量放大，其中二次谐波归一化转换效率较已有范德华体系提升四个数量级，并可在一个自由光谱范围内连续调谐。该工作为片上非线性光子学提供了新设计范式，表明范德华材料有望从辅助功能层发展为高性能光子电路的基础平台。相关工作发表在《Nature Materials》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41563-026-02574-x>

## 2、声电耦合调控光电各向异性以实现可重构偏振测量

光的偏振作为继强度与波长之外的重要自由度，在光通信、成像与环境感知等领域承载着丰富信息。然而，传统偏振测量体系通常依赖分束器、偏振片等离散光学元件，通过时分或空分方式解析偏振态，导致系统结构复杂且难以集成。近年来，低对称性的二维材料因其本征各向异性响应，为片上偏振探测提供了新路径，但其光电响应严格受限于晶体对称性，通常呈现固定的双折射型角度依赖关系，无法区分镜像对称的偏振态，从而限制了偏振信息的完整提取。尽管通过堆叠异质结构或引入人工超结构可以打破对称性，但这些方法往往在器件制备后即被“锁定”，缺乏动态调控能力。因此，如何在保持器件紧凑性的同时，实现对光电各向异性的连续可调与原位重构，成为发展新型集成偏振探测技术的关键问题。近日，复旦大学的修发贤教授、张成研究员研究团队提出了一种基于声电耦合的动态调控机制，通过在压电基底上传播的声表面波与二维各向异性半导体之间的相互作用，实现光电响应的连续重构。具体而言，声表面波在传播过程中携带的机械与电场耦合效应，可驱动光生载流子发生声拖曳运动，从而显著增强光伏响应，并使其随声波功率变化而动态调节。更为关键的是，这一过程不仅改变响应强度，还使偏振响应的对称轴在二维材料晶格取向与基底晶体取向之间连续旋转，实现对光电各向异性的主动调控。实验与模拟进一步表明，该效应源于光致温升引起的声波衰减及材料参数调制，而偏振依赖性则由基底晶体对称性主导。在此基础上，通过引入正交传播的双声波通道并结合随机森林算法，可在单一平面器件中实现光强与线偏振角的解耦测量，显著拓展了集成光电探测的功能维度。这一策略突破了传统由静态结构决定响应特性的限制，将声学自由度引入光电器件设计，为可重构、多参数耦合探测提供了全新范式。该研究发表在《Science Advances》。（刘梦洋）



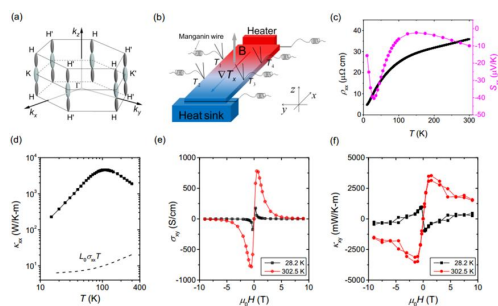
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aec4337>

### 3、双极声子拖曳控制半金属石墨的霍尔热导率

近年来,热霍尔效应作为电霍尔效应在热输运中的对应形式,逐渐成为理解量子材料中多种准粒子输运行为的重要窗口。传统观点认为,在金属中横向热输运主要由电子贡献,并满足维德曼-弗朗兹定律,即热输运与电输运之间存在简单比例关系。然而,近年来的研究表明,声子、磁振子甚至更复杂的准粒子也可以产生显著的热霍尔响应,使这一经典图景不断被修正。尤其是在同时具有高迁移率载流子和强声子输运的体系中,不同热载流子之间的耦合作用可能带来远超预期的热霍尔信号。作为典型的补偿型半金属,石墨同时拥有等密度的电子与空穴以及极高的晶格热导率,为研究多载流子与声子耦合下的热输运提供了理想平台。然而,其横向热导率长期未被系统研究,一个核心问题亟待回答:在这样的体系中,热霍尔效应究竟由谁主导,是电子、声子,还是它们之间的协同作用?

华中科技大学李小康副教授与朱增伟教授,以及巴黎市工业物理化学学校的 Kamran Behnia 研究员在高取向热解石墨中系统测量了热霍尔、电霍尔及热电输运性质,首次发现其热霍尔电导率远超电子贡献预期:在低温下实测值比维德曼-弗朗兹定律预测高出两个数量级,对应的霍尔洛伦兹数达到约 67 倍自由电子值,创下金属体系最高纪录。同时,热霍尔信号随温度出现符号反转,并与纵向热导率的温度行为显著不同,排除了纯声子机制的可能。通过结合能斯特效应与塞贝克效应的系统分析,研究团队提出“正负载流子协同的声子拖曳”(ambipolar phonon drag) 机制:在该框架下,电子与空穴通过与声子交换动量,使本应主要沿纵向传输的声子热流获得横向分量,从而显著放大热霍尔响应。进一步分析表明,不同温区中电子与空穴对声子拖曳的主导作用发生转变,直接导致热霍尔信号的符号翻转。这项工作不仅揭示了石墨中异常巨大的热霍尔效应来源,也表明在多载流子体系中,电子-声子耦合可以突破传统输运定律的限制,为理解复杂量子材料中的热输运提供了全新视角。

相关内容发表于《Physical Review Letters》上。(张琰炯)



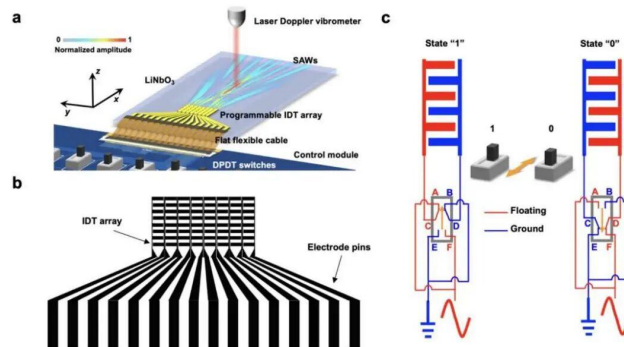
文章链接: <https://doi.org/10.1103/v7z6-bztz>

#### 4、基于可编程叉指换能器阵列的声表面波多维调控

声表面波作为沿固体表面传播并在深度方向快速衰减的机械波,自其被发现以来,已在传感、滤波、微流控以及颗粒操控等领域展现出重要应用价值。传统声表面波器件通常依赖固定几何结构的叉指换能器实现波的激发,这种设计虽具有高稳定性与成熟工艺基础,但其波场形态在生成后难以动态调控,难以满足复杂应用场景对灵活性与可重构性的需求。现有调控方法主要通过引入超结构或改变换能器几何设计实现波前调制,前者存在能量衰减显著且制造复杂的问题,后者虽提升了效率但在可编程性方面仍受限。同时,多输入通道驱动的可编程方案虽具备一定灵活性,却因系统复杂度高与同步控制困难而制约实际应用。因此,发展一种兼具高效能量转换、低系统复杂度以及多维调控能力的声表面波生成与调制策略,成为该领域亟需解决的关键问题。

近日,南方科技大学的刘言军教授研究团队提出了一种基于可编程叉指换能器阵列的多维声表面波调控方法,通过构建由多个独立单元组成的换能器阵列,并结合外部编码电路,实现对每个单元相位的独立控制。具体而言,每个换能单元通过开关实现二值相位翻转,从而在整体上实现波前的可编程叠加调控。在此基础上,引入啁啾结构的换能器阵列以拓展频率响应范围,并结合时分复用技术,实现多频声表面波的时域编码与叠加,从而构建具有扩展焦深的声场结构。实验中成功生成了如艾里型声表面波及可调焦驻波等复杂波形,并通过编码序列的调整实现了二维平面内焦点位置的精确操控。同时,多频叠加策略使焦点沿传播方向连续展开,形成类似“声针”的长焦深结构,显著提升了声场调控自由度。该方法在保证结构简洁与低能量损耗的前提下,实现了空间与频谱双维度的协同调控,为可重构声场设计提供了新的实现路径,并在微流控操控、可调谐超材料及多频传感等领域展现出广阔应用前景。

该研究发表于《Nature Communications》。(刘梦洋)



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-71772-7>

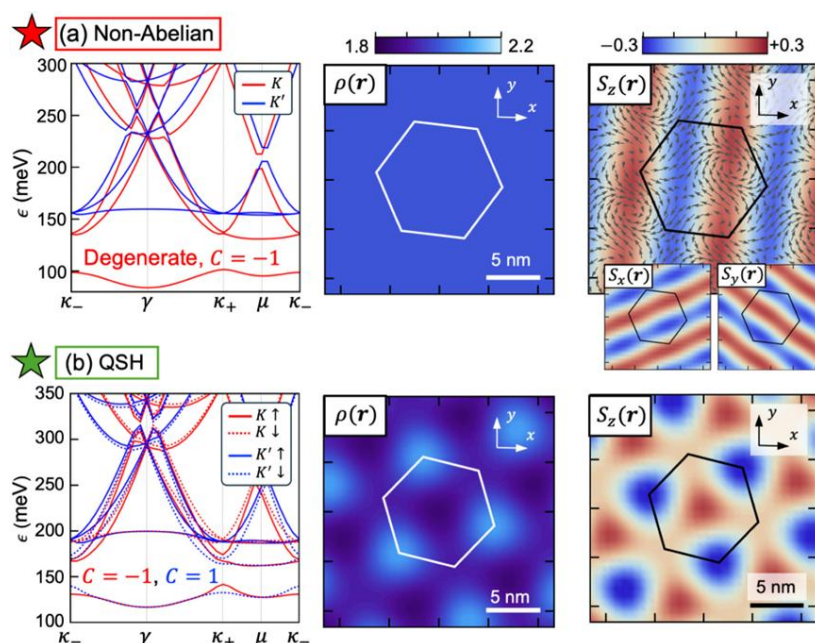
#### 5、菱方堆垛多层石墨烯中的非阿贝尔陈带

近年来,人们在莫尔体系中对拓扑物态的研究取得了迅速进展,其中已观察到整数和分数量子反常霍尔态。由于具有平带结构,并且在位移场作用下电子关联效应显著增强,菱方堆垛多层石墨烯已成为研究这类现象的极具前景的平台。尤其是在填充因子  $\nu=1$  时,该体系中的量子霍尔晶体态被认为孕育了丰富的新型关

联与拓扑现象，且这些现象甚至可以在不存在六方氮化硼衬底莫尔势的情况下出现。通常，这类体系中的陈带表现为具有非零贝里曲率的孤立单能带，其在动量空间中的积分对应整数陈数。更一般地，贝里曲率的概念还可推广到简并能带，此时其具有由  $SU(N)$  等规范群描述的非阿贝尔性质。尽管非阿贝尔陈带在理论上极具吸引力，但在真实固体材料中的实现仍然十分罕见，目前实验上主要只在超冷原子气体等高度人工设计的平台中得到展示。

近日，大阪大学 Taketo Uchida 等人，发现在菱方堆垛三层、四层和五层石墨烯中，当填充因子  $\nu = 2$  时，可自发形成一个双重简并、总陈数  $|C|=1$  的非阿贝尔陈带，且这一现象不依赖于是否存在六方氮化硼衬底。通过自洽平均场计算，作者给出了体系随位移场和电子周期变化的相图，并从解析上说明交换作用能够驱动自发对称性破缺并产生非阿贝尔贝里曲率。进一步地，这种非阿贝尔拓扑可由穿过布里渊区不可收缩回路的  $SU(2)$  规范通量来表征，从而产生整体性的非阿贝尔几何相位结构。该工作揭示了一类由相互作用驱动的新型非阿贝尔拓扑相，有别于量子反常霍尔相和分数陈相。

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



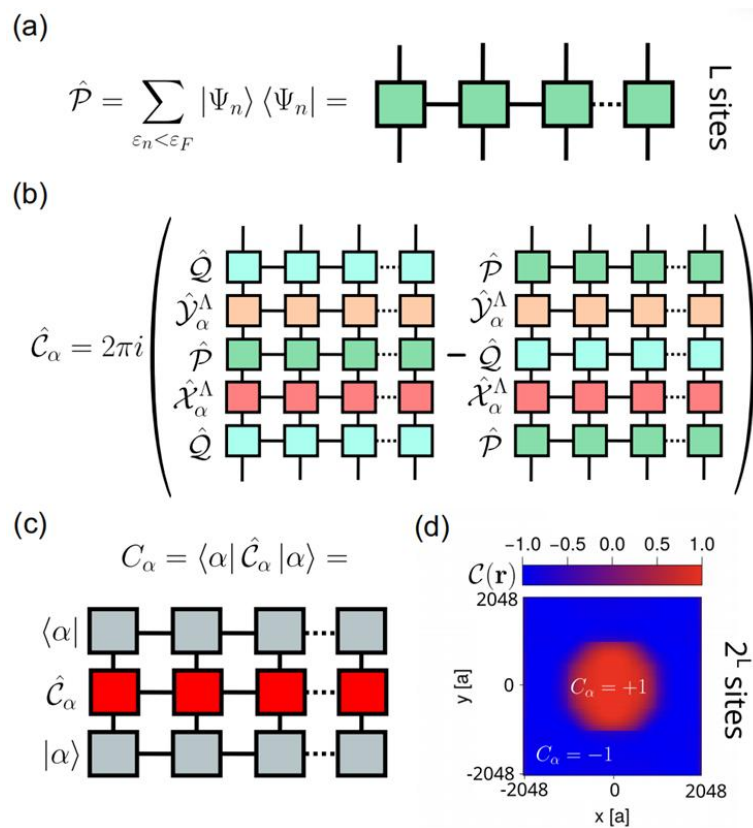
文章链接: <https://doi.org/10.1103/6fxy-6drm>

## 6、准晶实空间拓扑表征的张量网络方法

拓扑相通常以陈数等全局不变量来表征，但在缺乏平移对称性的体系中，拓扑性质也可以局域出现，也可由准晶中的跨维度现象引发。陈标记正是刻画这类局域拓扑结构的重要工具，可用于描述所谓的“陈标记”：即在莫尔体系中，局域陈数在实空间中交替分布形成的拓扑图样。近年来，这类拓扑镶嵌结构已在扭转石墨烯多层体系中被实验观测到，局域探针揭示了陈数为+1和-1交替分布的微米尺度畴区。类似的拓扑特征还预期会出现在莫尔准晶体系中，例如  $30^\circ$  扭转双层石墨烯、扭转三层石墨烯、扭转过渡金属二硫属化物双层体系以及其他具有准晶性或临界特征的平台。不同局域陈标记区域之间的界面预计会承载手性边缘态，从而形成连接局域拓扑结构与宏观功能的陈网络。

然而，在超大尺度体系中计算这类局域拓扑不变量始终是一项重大挑战，因为这通常需要处理极其庞大且稠密的投影算符或密度矩阵。传统方法面对这类问题往往很快受到系统尺寸的限制。近年来，张量网络方法不断突破其在量子多体问题中的传统应用边界，逐步拓展到机器学习、复杂动力学、超精细函数表示以及超大规模电子结构计算等方向，展现出处理巨大数据结构和高维问题的独特优势。近日，阿尔托大学的研究团队提出了一种用于计算实空间局域拓扑标记的张量网络方法，并以准晶陈绝缘体为例验证了其有效性。该方法基于将实空间紧束缚电子模型映射为多体赝自旋模型，再结合张量网络核多项式方法进行求解，从而避免了对超大哈密顿量进行显式存储的困难。借助这一框架，研究人员成功计算了具有 C8 和 C10 对称调制的  $\pi$  通量准晶晶格中的局域陈标记，清晰展示了整个实空间中陈标记结构的形成。相比以往方法，这一工作显著突破了有限尺寸的计算瓶颈，可处理多达 2.68 亿个格点的超大体系，为研究准晶、超莫尔体系及其他非周期量子材料中的局域拓扑序提供了有力工具。该方法不仅有助于理解复杂实空间拓扑结构的形成机制，也为探索由陈网络引发的新型宏观输运现象奠定了基础。

相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上，并被选为 Editors' Suggestion。  
(金梦成)



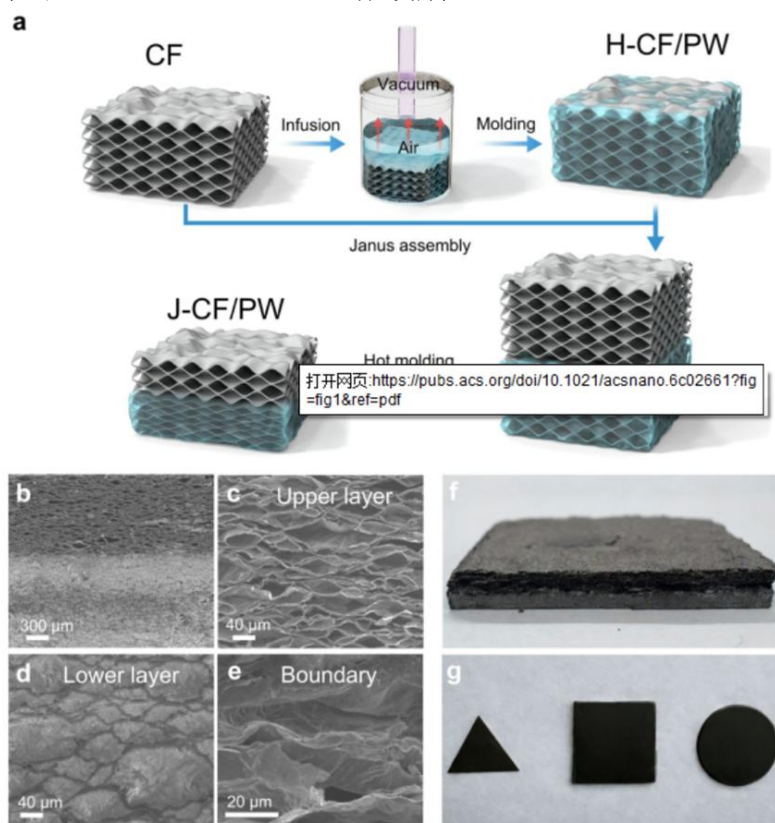
文章链接: <https://doi.org/10.1103/hhdf-xpww>

## 7、具有卓越的振动适应性的 Janus 结构热界面材料

近年来，随着电子器件不断向高功率密度、小型化和高集成度发展，界面热管理问题日益凸显。作为连接芯片与散热器之间的关键环节，导热界面材料（TIMs）直接决定了器件的散热效率与长期可靠性。然而，在实际应用中，器件往往并非

处于理想稳态工况，而是同时经历瞬态热冲击与复杂机械振动，例如航天器中的高频热载荷、电动汽车中的持续振动环境等。在这种动态条件下，传统 TIMs 往往面临结构疲劳、界面失配甚至热性能迅速衰减的问题。一方面，高导热填料可以提升热导率，却容易牺牲材料的柔顺性和循环稳定性；另一方面，相变材料虽然具备优异的热缓冲能力，但在多次循环和振动条件下易出现泄漏与结构失效。因此，如何在单一材料体系中同时实现高效导热、热冲击缓冲与机械稳定性，成为当前热管理领域亟待突破的关键科学与工程问题。

针对这一挑战，浙江大学高超教授等研究团队设计并构建了一种“Janus 结构”导热界面材料 J-CF/PW，通过将高弹性三维碳泡沫与浸渗高熵石蜡的复合层非对称集成，实现导热与力学性能的协同优化。其中，上层纯碳泡沫构建连续导热网络并提供优异的机械缓冲能力，下层相变复合结构则在热冲击过程中吸收潜热，实现温度调控。实验结果表明，在仅 7.7 wt% 填料含量下，该材料在垂直与水平方向的热导率分别提升 2363% 与 15742%，同时仍保持约 90% 以上的潜热储能能力。在力学性能方面，材料在 30% 压缩应变下经过 1 万次循环仍保持约 95% 的应力保持率，并可在 50 Hz 高频振动条件下维持稳定结构与界面接触性能。在实际器件散热测试中，该材料显著降低芯片工作温度，并在热冲击循环中表现出优异的温度稳定性。该研究不仅为动态环境下热管理材料设计提供了新的结构范式，也为高功率电子器件、航天系统及新能源汽车等领域的可靠散热提供了重要技术支撑。相关内容发表于《ACS Nano》上。（张琰炯）

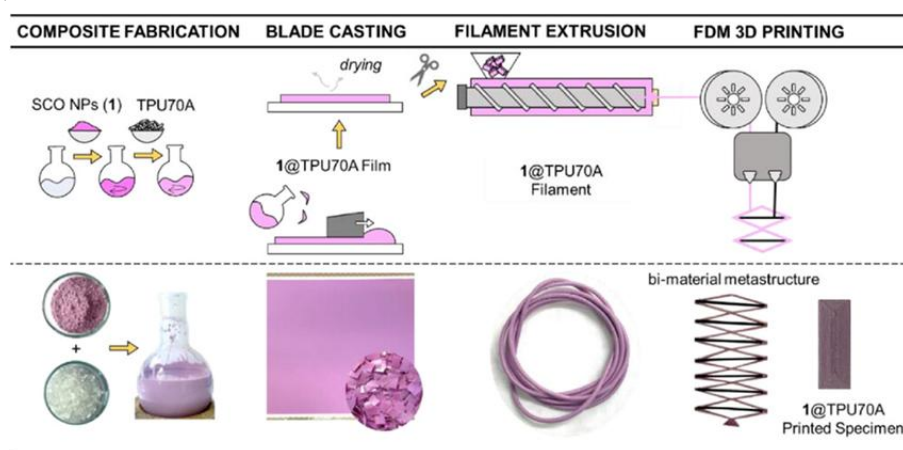


文章链接: <https://doi.org/10.1021/acsnano.6c02661>

## 8、4D 打印自旋交叉超材料实现大尺度可编程正负热膨胀

热响应材料热膨胀系数的精准调控，在航空航天、光学仪器等高端领域具有关键

技术需求。然而传统热响应材料本征性能的局限使其难以将均匀的温度变化转化为定向、显著且可编程的机械变形。现有 3D 打印超材料虽可通过几何设计实现热膨胀系数的调控，但其仅依靠材料间本征热膨胀失配产生形变，正/负热膨胀系数幅值普遍偏低。4D 打印技术的兴起，为热响应材料的制备提供了新路径，现有研究多聚焦于形状记忆聚合物等传统活性材料，还难以同时兼顾热响应材料的超高形变幅度、正负双向可编程性与规模化制备能力。其中，自旋交叉分子材料具备热致可逆的自旋态相变，伴随显著的体积与刚度突变，是理想的热驱动活性单元，但面临高负载打印成型难、打印过程中相变功能易受损、难以与超结构设计协同实现形变放大等瓶颈，无法在宏观器件中充分发挥其本征性能优势。近日，法国国家科学研究中心与图卢兹大学的 Lionel Salmon 与 Azzedine Bousseksou 教授课题组，开发了一种基于熔融沉积成型技术的 4D 打印新策略，构建了一类可编程正负热膨胀特性的自旋交叉超材料体系。该研究首先将具有热诱导低自旋-高自旋相变的高长径比棒状自旋交叉纳米颗粒均匀分散于热塑性聚氨酯基体中，制备出自旋交叉热塑性聚氨酯复合丝材；采用熔融沉积建模双材料打印技术，将该复合材料与纯热塑性聚氨酯共同构筑成金刚石型双材料菱形单胞超结构。通过调整活性复合材料与被动聚合物在单胞中的相对排布，即可在同一结构模板下实现热致形变方向与幅度的可编程调控。实验结果表明，该 4D 打印超材料的峰值热膨胀系数分别可达+14400 ppm/°C 与-11400 ppm/°C，性能较已有 3D 打印同类结构提升 10 倍以上。该研究通过有限元分析验证了结构设计的可预测性，一维与二维超结构均表现出优异的多循环可逆形变稳定性。该工作将分子尺度的相变、复合材料的力学匹配与宏观胞格几何放大效应统一于同一体系中，使局域体积变化转化为大尺度方向性运动，为节能型软体驱动器、自适应可重构结构、智能热调控系统等领域的发展开辟了全新方向。相关研究发表于《Advanced Materials》上。（孙嘉鹏）



文章链接：<http://dx.doi.org/10.1002/adma.202522073>

（来源：两江科技评论）