

# 超材料前沿研究一周精选



2026年1月12日-2026年1月18日

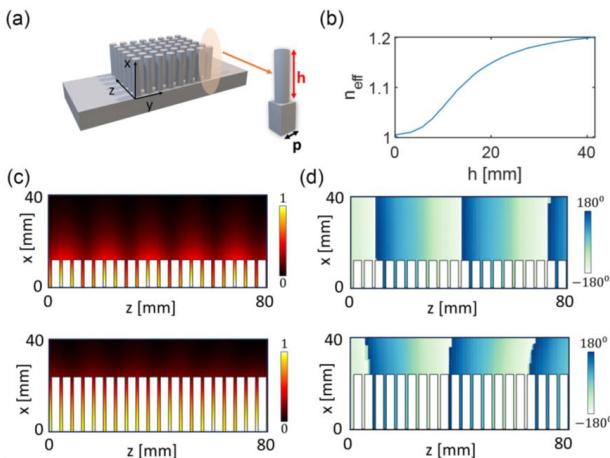
索引：

- 1、超对称等相位声学势
- 2、利用声学拓扑实现液晶缺陷的动态控制
- 3、可重构超表面中的可编程极化子通道化
- 4、分级共组装实现具有优异热物理性能的形状可编程全氮化硼单晶
- 5、金属θ相氮化钽的热导率是铜的三倍

## 1、超对称等相位声学势

声波的产生、调控与探测在众多技术领域中具有基础性意义，得益于其在多种介质中具备低损耗、无损传输等优势。相关应用涵盖水声探测与水下通信、生物医学成像（如超声与光声成像）等，在复杂环境中展现出良好的穿透能力。近年来，声学超材料的发展为声波调控提供了全新手段，使得宽带阻抗匹配、声波准直、声俘获、超分辨成像及隐身等功能成为可能。与此同时，将拓扑物理、宇称—时间对称性等量子物理概念引入经典波系统，为通过直接设计系统哈密顿量实现精确波动调控开辟了新路径。尽管相关思想已在声学中得到广泛研究，超对称这一重要理论工具在声学领域尚未实现。作为现代物理中的通用方法，超对称在量子力学、凝聚态物理和光学中展现出强大的结构设计能力，其在声学中的引入有望带来全新的波动调控机制。

近日，宾夕法尼亚大学冯亮教授研究团队，将超对称变换首次引入声学体系，提出并实现了一类超对称等相位声学势。理论上，基于声波方程框架中的等谱超对称变换，构建了一类在透射与反射幅值及相位上完全一致的等相位声学势，从而实现散射特性的严格保持。实验上，设计并搭建了一种可重构声学超材料平台，通过调控结构参数实现所需等效声学势分布，并在宽频范围内验证了超对称诱导的等相位散射特性。该方法为构造在声学探测中不可区分、但内部结构连续可调的声学系统提供了通用设计策略，展示了超对称声学在水声探测与声隐身等领域中的重要应用潜力。相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）

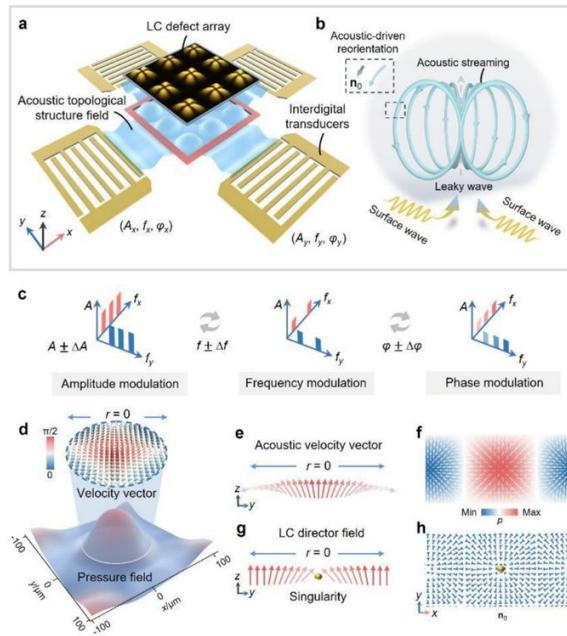


文章链接: <https://doi.org/10.1103/7dqk-h2pg>

## 2、利用声学拓扑实现液晶缺陷的动态控制

拓扑软物质系统依靠可控的缺陷结构来编码功能，是材料科学中的新兴范式。液晶因其长程取向序和对物理场的敏感性，成为构筑可编程拓扑结构的理想平台。然而，实现对其缺陷的大规模、可重构动态操控仍面临挑战。传统的界面工程方法受限于静态边界条件，而基于电磁场的方法则依赖材料特定的介电或光学特性，且存在调控灵活性、成本及应用范围受限等问题。因此，探索一种通用、高效且与材料属性无关的操控机制具有重要意义。声场作为一种机械刺激，能够通过流动介导的动量传递与分子取向场耦合，为动态调控软物质拓扑结构提供了一条颇具潜力但尚未充分探索的途径。

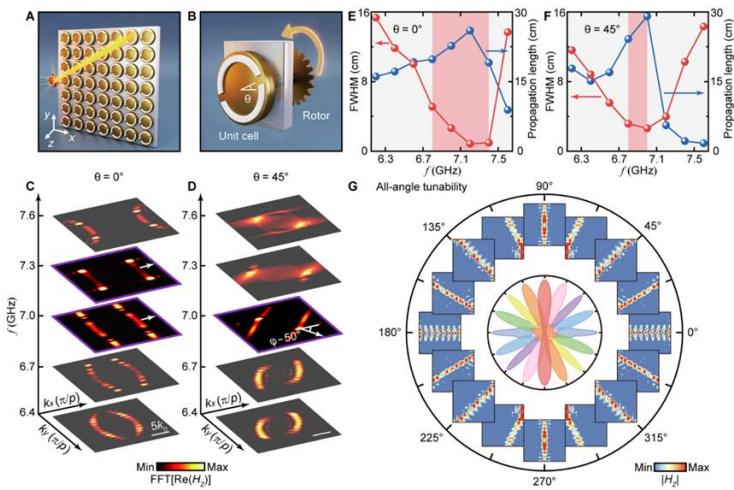
近日，厦门大学的陈鹭剑教授、胡学佳助理教授、李森森副教授研究团队，提出并实现了一种基于表面声波的声学拓扑平台，用于对液晶缺陷阵列进行动态与可编程操控。通过相干叠加多个表面声波，研究在压电基底上构建了驻波场，该场具有非平凡拓扑结构并能诱导稳定的声流涡旋。该声学拓扑场与液晶的指向矢场相互作用，驱动了拓扑缺陷的可重构形成。研究证明，通过精确调控声波的振幅、频率、相位和波矢等参数，可以实现对缺陷密度、对称性、形态及空间位置的动态调制，并能驱动缺陷阵列进行有序的集体平动。该平台不依赖于材料的光学或介电特性，具有优异的可重构性、空间均匀性和热稳定性，为在软物质中实现可编程拓扑结构提供了一种通用的声学驱动策略。这不仅深化了对非平衡态软物质拓扑物理的理解，也为可重构光子器件、活性物质系统及微尺度操控等领域带来了新的可能性。该研究成果发表于《Nature Communications》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-68001-y>

### 3、可重构超表面中的可编程极化子通道化

极化激元作为光子与物质中偶极激发之间的集体振荡，在亚波长尺度电磁场调控中展现出重要潜力。近年来，通过扭转范德瓦尔斯层产生光魔角，可实现极化激元色散的拓扑转变，进入所谓的“通道化”区域。在该区域中，极化激元能够以高度准直、无衍射且低损耗的方式传播，为亚波长能量操控、超分辨成像与光子集成等应用提供了新途径。然而，传统基于扭转多层结构的极化激元通道化一旦器件制备完成，其传播方向即被固定，缺乏原位动态可调性，这严重限制了其在需按需调控的实际场景中的应用。因此，实现极化激元通道化方向的动态、全角度可编程操控，成为该领域一个亟待解决的关键挑战。近日，同济大学的郭志伟副教授、北京理工大学的段嘉华教授研究团队，通过设计一种可重构的单层超表面，成功实现了磁性极化激元通道化方向的动态全角度编程。该超表面由周期排列的双开口环谐振器单元构成，每个单元连接至电机驱动转子，可通过电路控制其开口方向角度。研究表明，通过调整单元的取向角度，可在不改变结构的前提下，连续调控极化激元通道化的面内传播方向。实验与模拟结果均证实，在不同开口角度下，极化激元均能保持无衍射、低损耗的准直传播特性。进一步，通过在不同区域设置不同的单元角度，该研究还演示了基于通道化极化激元的折射透镜、分束器及波导等多功能光学元件，并成功在指定位置生成定制化的近场图案，为基于极化激元通道化的亚波长信息显示方案提供了概念验证。该工作不仅克服了传统扭转结构需要重复制备的局限，实现了通道化极化激元的原位动态调谐，也为集成光子学、近场能量路由与信息传输等领域的发展开辟了新道路。本研究成果发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



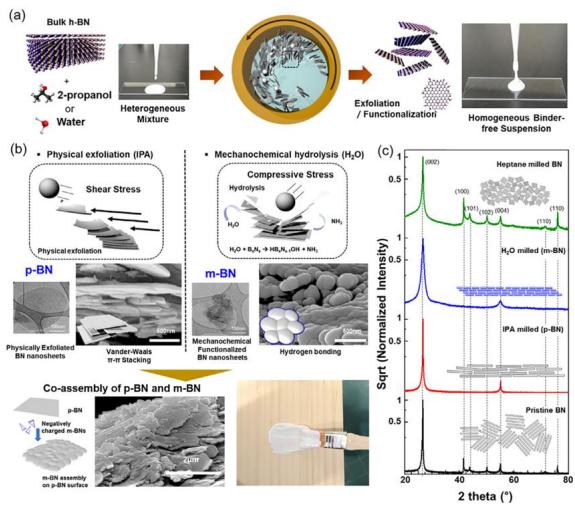
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aea0072>

#### 4、分级共组装实现具有优异热物理性能的形状可编程全氮化硼单晶

在现代材料科学中，如何平衡形态可控性与热稳定性，尤其是对高性能、精确形态控制的需求，始终是工程领域的难题之一。传统的陶瓷材料，尽管在结构保护和耐高温方面表现出色，却因其高熔点、硬度和脆性，难以制成单体结构。为了克服这一挑战，通常需要加入金属或聚合物添加剂来降低加工温度，或赋予其流变学可调性，从而便于直接铸造成型。然而，这种方法往往牺牲材料的优异功能性能，比如热传导、相变等，尤其在高温环境下会产生热蠕变或相变问题，这对于高性能应用来说是不可接受的。为了解决这一问题，范德华材料（van der Waals materials）因其易于分解为低维度成分并重新组装为互联结构而备受关注，尤其是六方氮化硼（h-BN），作为能够在多层片状结构间广泛互联的范德华材料，显示出了极大的潜力。它不仅化学稳定性强、机械性能优越，而且具有显著的高平面热导率和中子吸收能力，广泛应用于热保护、散热和中子屏蔽等领域。然而，尽管氮化硼具备优异的物理特性，现有的制备方法往往依赖于溶剂分散、外加粘合剂等方式，导致其优异性能受到影响。特别是在面对高浓度氮化硼悬浮液的加工中，如何在不牺牲材料性能的前提下，控制形态和流变学，仍然是亟待解决的难题。

近期，由韩国 KAIST（韩国科学技术院）Yeon Sik Jung 教授团队主导的研究中，课题组通过层次共组装的策略，成功实现了无粘结剂氮化硼单体材料的可调性加工，并为高效热管理与辐射防护提供了新解法。研究者采用了高浓度球磨（HCBM）法，在不添加任何粘结剂的情况下，结合物理剥离的高纵横比氮化硼薄片（p-BN）与机械化学功能化的小尺寸氮化硼颗粒（m-BN），在流变学可调性的基础上，成功生产出具有优异热传导性能、抗辐射性和力学性能的氮化硼单体结构。通过精确控制 p-BN 与 m-BN 的比例，最终制备出的氮化硼薄膜展现出了 19 倍的粘合能提升（ $3.8 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ）， $40.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  的平面热导率，以及  $28.3 \text{ cm}^{-1}$  的中子吸收系数，在航天、核能及光电系统等极端环境下的应用前景十分广阔。通过这一创新性方法，研究团队克服了传统加工方法中常见的悬浮液稳定性问题，并利用 m-BN 颗粒的氢键网络增强作用，不仅使得氮化硼薄膜的热导率大幅提高，还实现了材料的高强度和可编程流变性，从而为各类高温热管理和辐射防护系统提供了更加可靠的材料基础。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张

琰炯)



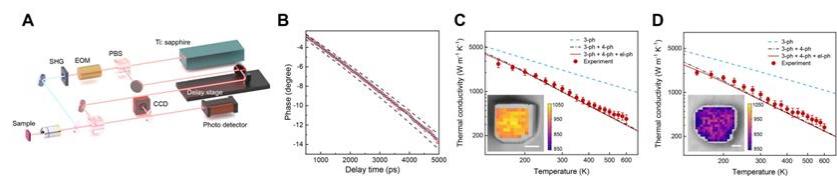
文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.202518432>

## 5、金属 $\theta$ 相氮化钽的热导率是铜的三倍

在现代电子设备的设计中，如何高效地管理热量一直是一个挑战，尤其是对于高性能计算机芯片、人工智能加速器等对散热要求极高的系统。近年来，随着电子元件的尺寸不断减小，热管理问题变得愈发复杂。特别是高热导率材料的寻找，成为了推动高效散热技术和提高系统稳定性的关键之一。铜，作为目前最常用的金属热沉，其热导率约为  $400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，长期以来被广泛应用于各种电子设备和热管系统中。然而，尽管铜的热导率已经接近金属材料的上限，但这一上限的物理机制一直未被完全突破，尤其是金属材料中电子与声子相互作用的限制使得热传导一直无法进一步提高。事实上，过去一个世纪的研究表明，金属材料的热导率受到电子-声子相互作用、声子无序和晶格的限制，难以达到更高的热导率，这使得要进一步突破这一局限，发现新的材料具有非常大的挑战。

然而，近期加利福尼亚大学洛杉矶分校胡永杰教授领导的团队完成的研究突破了这一瓶颈，揭示了一个被长期忽视的金属材料—— $\theta$  相钽氮化物 ( $\theta$ -TaN)，具有前所未有的高热导率。 $\theta$ -TaN 是一种过渡金属氮化物，理论预测其热导率可能超过铜，接近钻石甚至砷化硼的水平。通过高压合成和高质量单晶  $\theta$ -TaN 的表征，团队首次实现了这一材料的实验证，测得的室温热导率高达  $1100 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ，是铜的三倍之多。更重要的是，这一发现不仅突破了金属热导率的上限，还揭示了金属材料中超高热导率的全新物理机制。通过同步辐射无机 x 射线散射实验和超快光谱技术，研究团队发现  $\theta$ -TaN 的独特声子带结构和极低的电子-声子耦合特性，正是其高热导率的根本原因。具体而言， $\theta$ -TaN 的声子带结构中存在一个大约  $8 \text{ THz}$  的声-光声子带隙，这一带隙有效抑制了声子之间的散射。此外， $\theta$ -TaN 展现出了显著的声子聚集效应，这使得横向和纵向声子模式在整个布里渊区内保持紧密的能量间隔，从而显著减少了声子散射的相位空间。这些声子特性表明， $\theta$ -TaN 在热传导过程中，主要由声子主导，而电子-声子相互作用几乎可以忽略不计。通过超快光谱实验，团队进一步证实了  $\theta$ -TaN 中的电子-声子耦合极其微弱，热量的传输主要依赖于声子的长寿命，而非电子的贡献，这一现象与传统金属中电子主导热传导的机制完全不同。这一发现不仅推翻了传统理论对

金属热导率上限的认识，还为未来高性能热管理材料的设计提供了崭新的方向。相关内容发表于《Science》上。（张琰炯）



文章链接：<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aeb1142>  
(来源：两江科技评论)