

2026 年 9 月 7 日-2026 年 9 月 13 日

索引:

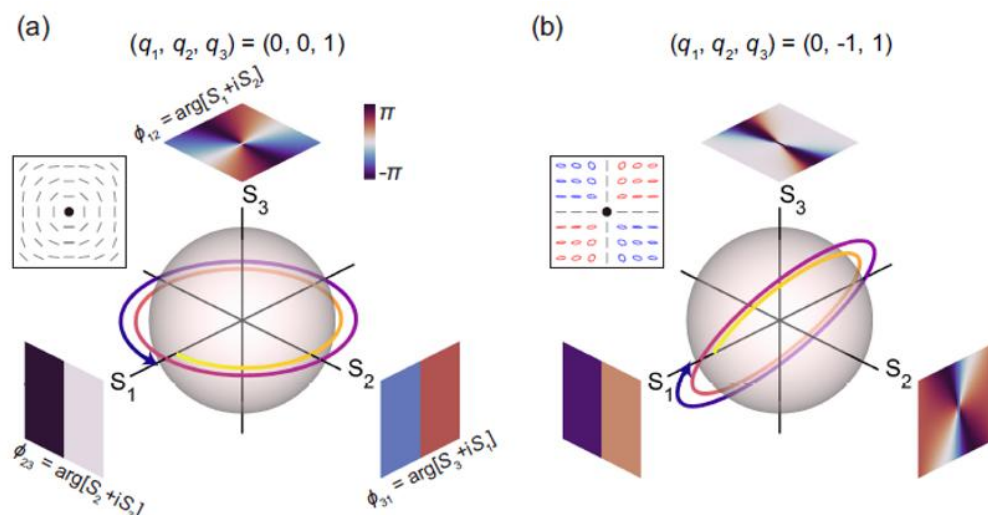
- 1、具有矢量拓扑荷的连续域束缚态
- 2、用于克服下一代节能电子产品热瓶颈的 MoS₂ 应变工程
- 3、铁电向列相流体中的混合拓扑缺陷
- 4、BiSbSe₃ 热电材料中固有缺陷引起的费米能级钉扎和扩散介导的热传输
- 5、受挫近晶相液晶弹性体作为多功能机械超材料
- 6、仿生梯度界面刚柔一体化材料实现高效能量耗散

1、具有矢量拓扑荷的连续域束缚态

拓扑光子学通过精确设计光学结构实现非平凡光子态，并利用拓扑保护提高系统对抗扰动的鲁棒性。连续域束缚态（BIC）与动量空间偏振奇点之间的联系，为涡旋光产生、低阈值激光等应用提供了新的调控途径。BIC 具有拓扑保护的整数拓扑荷，在系统参数变化时只能通过奇点的分裂或合并重新分配；不同对称性破缺还可使其转化为半整数拓扑荷的圆偏振 C 点、单向导模共振或具有非对称辐射的 Janus BIC。近年来，BIC 研究进一步扩展至描述上下辐射不对称性的赝偏振奇点。然而，现有 BIC 偏振涡旋主要表现为线偏振 V 点，其拓扑描述通常只关注偏振方向角的绕转，属于标量拓扑荷，难以完整刻画包含椭圆偏振的复杂偏振纹理。因此，如何建立能够同时描述偏振方向和椭圆度变化的矢量拓扑表征，是理解和调控 BIC 复杂偏振奇点的重要问题。

近日，中山大学陈晓东副教授和董建文教授研究团队，将矢量拓扑荷（vectorial topological charge, VTC）的概念应用于连续域束缚态（BIC），通过刻画庞加莱球上（S₁, S₂, S₃）三个轴对应的完整绕转数集合，克服了传统标量拓扑描述的根本局限。以双层光子晶体薄板为模型体系，揭示了在扰动参数空间中，BIC 所产生的赝偏振奇点可以表现出非平凡的矢量拓扑荷。更为有趣的是，这种 VTC 进一步将 BIC 与上下辐射通道中反向旋转的相位奇点联系起来，而这一现象在标量拓扑框架下是无法揭示的。此外，VTC 所具有的多分量特性使得 BIC 在对称性破缺后会分裂为多对半整数赝偏振奇点，而不仅仅形成一对圆偏振赝偏振态，这突破了传统拓扑荷演化规律的认识。该研究揭示了 BIC 中更加丰富的矢量拓扑结构，为超越标量描述、实现对 BIC 的进一步调控提供了新的途径。

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



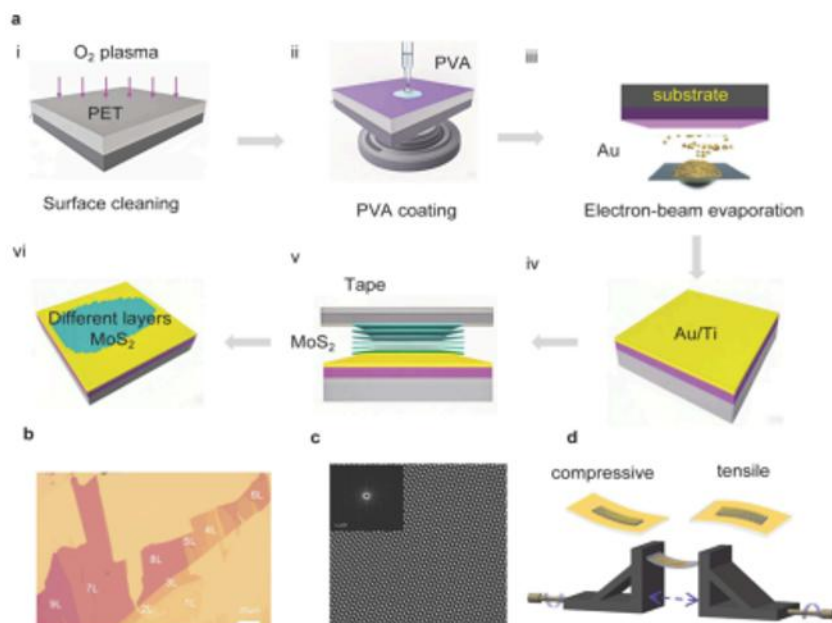
文章链接: <https://doi.org/10.1103/5lrk-ct88>

2、用于克服下一代节能电子产品热瓶颈的 MoS₂ 应变工程

随着传统硅基半导体逐渐逼近摩尔定律的物理极限，器件特征尺寸向亚 3 nm 节点持续缩小，量子隧穿引起的漏电流增加以及载流子迁移率下降等问题日益突出。以二硫化钼 (MoS₂) 为代表的二维过渡金属硫族化合物具有原子级厚度、优异的电学性能和良好的集成兼容性，被认为是下一代高性能电子器件的重要候选材料。然而，随着器件集成密度和功率密度不断提升，局域热流密度急剧增加，散热已成为制约二维电子器件性能与可靠性的关键瓶颈。相比石墨烯和六方氮化硼等高热导二维材料，MoS₂ 的热导率相对较低，而掺杂、缺陷工程和功能化等常见调控手段往往还会进一步削弱其热输运能力。应变工程能够直接调控晶格结构及声子输运，为改善二维材料热管理提供了新的可能。已有研究发现，拉伸应变通常会降低 MoS₂ 的面内热导率；理论上压缩应变有望强化热输运，但二维材料极薄的结构使其在面内压缩过程中极易发生面外屈曲和褶皱，由此引入额外的声子散射，使“压缩增强热输运”的效应长期难以在实验中真正实现。因此，如何抑制压缩过程中的结构失稳，实现均匀、可控且有效的面内压缩应变传递，成为利用应变工程突破二维材料散热瓶颈的关键科学问题。

近日，清华大学张兴教授课题组提出了一种基底约束的无褶皱压缩应变调控策略，利用 Au 支撑层与 MoS₂ 之间的范德华耦合作用限制材料面外位移，在柔性基底弯曲过程中实现均匀的单轴面内压缩，并通过拉曼面扫描验证了应变传递的空间均匀性。在此基础上，团队建立了考虑 Au 层横向热扩散及部分激光吸收的修正多层传热模型，结合稳态拉曼测温实验发现：4 层和 6 层 MoS₂ 的无应变热导率分别约为 60 ± 13 和 $59 \pm 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；1.7% 的拉伸应变使热导率下降约 20%，而仅 0.84% 的压缩应变即可使热导率提升约 40%，呈现出与传统二维材料压缩后热导率下降截然不同的行为。分子动力学模拟进一步表明，基底通过范德华耦合有效抑制 MoS₂ 褶皱和屈曲，使其承受的稳态压缩应力达到自由悬空状态的约 4 倍；第一性原理计算则揭示，压缩应变能够提高低频声学声子的群速度，并显著延长 0 - 4 THz 范围内的声子寿命，从微观层面解释了热导率增强的物理起源。该工作突破了“二维材料压缩必然因褶皱而削弱热输运”的传统认识，为利用基底约束与应变工程主动调控声子输运提供了新的实验路径，也为下一代高集成、低功

耗二维电子器件的热管理与高热导材料设计提供了重要思路。
研究成果发表在《Nano Letter》上(张琰炯)。



文章链接: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6c00716>

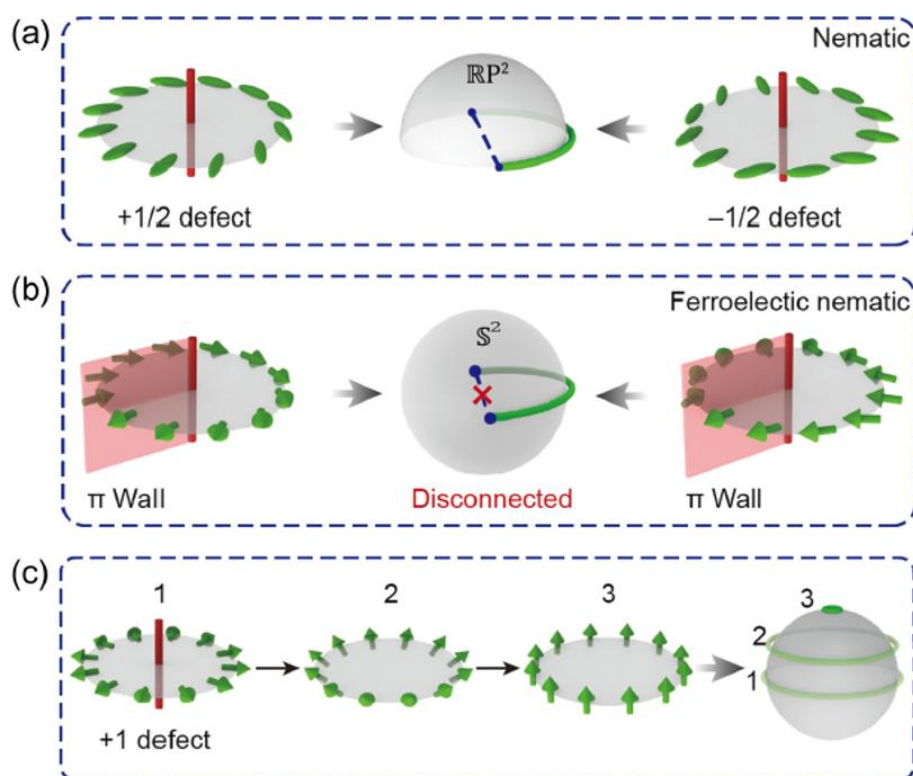
3、铁电向列相流体中的混合拓扑缺陷

拓扑缺陷是有序介质发生对称性破缺时产生的重要结构,广泛存在于宇宙学、超流体、铁性材料和液晶体系中。Kibble-Zurek 机制揭示了连续对称性破缺过程中缺陷的形成规律,而进一步的理论预测指出,当体系经历连续与离散对称性的级联破缺时,不同维度的拓扑缺陷可能相互缠结,形成混合拓扑结构。然而,这类混合缺陷的实验观测十分有限。传统向列相液晶具有头尾等价的非极性取向序,而新近发现的铁电向列相液晶在降温过程中还会进一步产生自发极化,使反演对称性被打破。由此,体系的基态流形由实射影平面转变为球面,并改变缺陷所受的拓扑约束。尽管理论上已提出铁电向列相中可能形成混合拓扑缺陷,但其具体形成机制、结构类型以及与反演对称性破缺之间的关系仍缺乏直接实验验证。因此,阐明非极性向列相缺陷在铁电相变中的演化规律,是理解极性流体拓扑结构形成机制的关键问题。

近日,南方科技大学的韦齐和教授研究团队利用光取向技术在向列相中预设不同拓扑电荷的位错构型,并结合偏振光学观测与数值模拟,系统追踪其跨越向列相至铁电向列相转变后的演化。结果表明,反演对称性破缺会通过两类基本机制重塑原有缺陷:孤立半整数位错在极性相中受到拓扑禁止,而整数位错则具有拓扑不稳定性。由此形成三类代表性的混合拓扑缺陷,包括由表面半整数位错终止的畴壁、由磁单极子装饰的畴壁,以及通过 meron 连接的表面半单极子与磁单极子复合结构。这些结构将点缺陷、线缺陷和畴壁等不同维度的拓扑对象耦合在一起,同时在相变过程中保持整体拓扑电荷守恒。研究进一步指出,这些缺陷并非特殊边界条件下的偶然产物,而是级联连续与离散对称性破缺所导致的普遍结果,可视为铁电向列相中的广义 Kibble 机制。对混合缺陷进行光图案化可为按需构筑复杂极化纹理提供新途径,并有望拓展至结构光调控、非线性光学及量子光学等

方向。

该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/jrrk-n8wr>

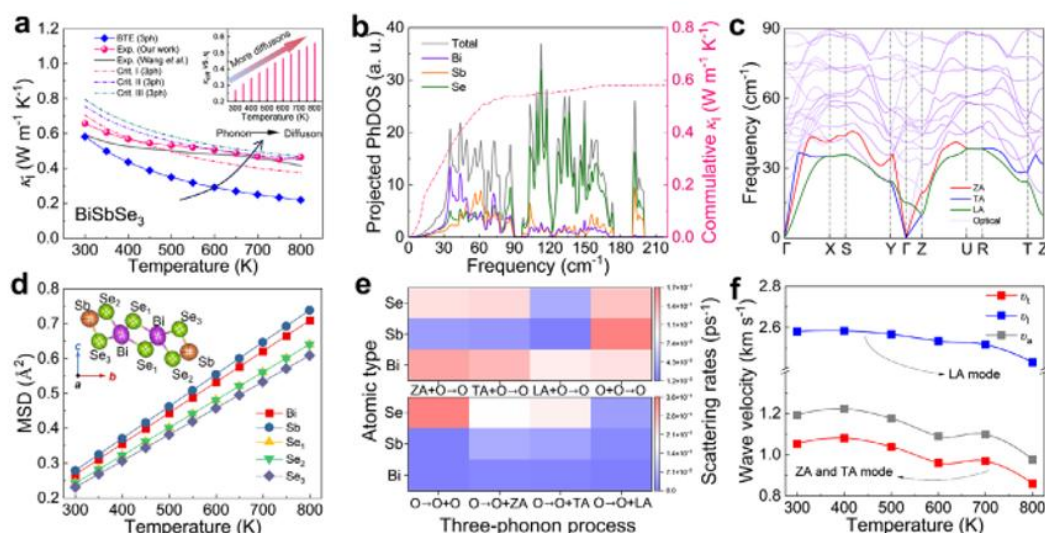
4、BiSbSe₃ 热电材料中固有缺陷引起的费米能级钉扎和扩散介导的热

传输

热电材料能够实现热能与电能之间的直接转换，在工业余热回收、固态制冷和能源转换等领域具有重要应用前景。其性能通常由无量纲热电优值 ZT 衡量，而获得高 ZT 需要同时兼顾较高的功率因子与较低的热导率。然而，载流子浓度、电输运与热输运之间存在复杂耦合，使热电性能的协同优化长期面临挑战。具有孤对电子、重元素和复杂晶格结构的硫族化合物因其软化声子模式、强非谐性和本征低晶格热导率而受到广泛关注。其中，无 Te 热电材料 BiSbSe₃ 具有畸变的正交晶格、不同的 Bi-Se 和 Sb-Se 配位环境、本征超低晶格热导率以及可通过电子掺杂激活的多导带谷，被认为是具有潜力的中温热电候选材料。然而，一个值得关注的问题是，超低热导率并不必然意味着优异的热电性能。已有研究虽然通过卤素掺杂、共掺杂、缺陷工程和织构调控等方式改善了 n 型 BiSbSe₃ 性能，但提高载流子浓度往往伴随着迁移率下降；与此同时，稳定的 p 型输运又极难实现。更为关键的是，这种异常的载流子类型偏好究竟源于何种本征缺陷，以及作为有序晶体的 BiSbSe₃ 为何能够呈现超低且弱温度依赖的晶格热导率，其微观物理机制仍缺乏统一认识。

近日，北京航空航天大学赵立东教授、文熠副教授研究团队从本征缺陷化学—晶格振动—载流子输运三个层面揭示了 BiSbSe₃ 热电性能受限的内在机制。首先，

电子显微分析结合第一性原理计算表明，Se 空位及阳离子占据 Se 位的反位缺陷具有较低形成能，可作为本征施主稳定 n 型输运，并通过空穴补偿将费米能级钉扎在远离价带顶的位置，从而解释了 BiSbSe₃ 长期难以实现稳定 p 型输运的根本原因。在热输运方面，研究发现 Sb-Se 近带边强轨道杂化及反键特征会削弱原子间作用力并软化 Sb 主导的低频光学声子，增强声学—光学声子耦合及散射。随着温度升高，部分振动态逐渐突破传统传播声子的描述，热输运由相干声子输运向类扩散子（diffuson-like）输运跨越，由此解释了 BiSbSe₃ 超低且对温度不敏感的晶格热导率。此外，团队进一步指出，n 型 BiSbSe₃ 的性能瓶颈并非载流子浓度不足，而是高施主浓度下严重的载流子迁移率和平均自由程衰减；相比之下，若能够抑制本征施主补偿并解除费米能级钉扎，BiSbSe₃ 潜在的高简并价带结构可被充分利用，理论预测其 p 型材料在 300 – 800 K 范围内的平均 ZT 可达到约 1.4。该工作将本征缺陷、费米能级调控与非传统扩散子热输运联系起来，为理解“超低热导率材料为何未必具有高热电性能”提供了新的物理图景，并为无 Te 高性能热电材料的化学设计与电子—声子协同调控提供了重要思路。相关内容发表于《Advanced Materials》上。（张琰炯）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.74931>

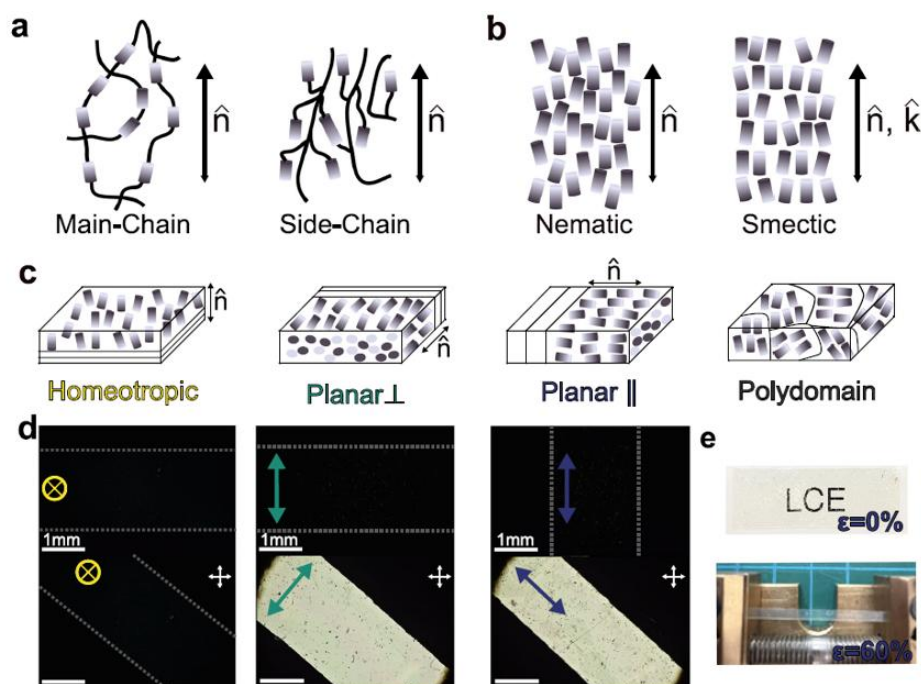
5、受挫近晶相液晶弹性体作为多功能机械超材料

超材料能够表现出自然材料中少见的特殊物性，其中拉胀材料具有负泊松比，在拉伸时横向膨胀，因而具有良好的抗冲击、抗分层和抗撕裂性能。传统拉胀材料多依赖多孔蜂窝结构，难以实现微纳尺度加工和大规模制造。液晶弹性体（LCE）兼具液晶有序性与弹性体的柔性，其中向列相 LCE 被发现具有分子尺度拉胀效应，同时具备透明、可调、可缩放及易制造等优势。然而，其负泊松比通常需要超过约 50% 的较大应变才能出现，而近晶相 LCE 通常在 20% – 30% 应变时即发生失效，因此长期被认为难以实现拉胀行为。

近日，利兹大学的 Stuart R. Berrow 团队，报道了一类近晶相液晶弹性体（smectic LCEs），将已知的合成分子拉胀材料拓展到了第二类材料体系。所制备的 LCE 以丙烯酸酯为基础，采用较低交联度（约 8 mol%），并在前驱体混合物的向列相中进行聚合。所得近晶 A 相（SmA）LCE 的相关长度仅为几个分子

长度，表明其内部存在近晶层受挫；研究进一步证实，这种受挫结构的形成遵循 de Gennes 于 1975 年提出的机制。在所研究的材料中，有三种 LCE 在应变超过约 40% 后表现出负泊松比，首次证明了近晶相 LCE 能够产生拉胀行为。对平面取向和平面法向取向的 LCE 进行剪切振荡测量发现，其剪切模量具有显著的各向异性，由此导致黏附性能也呈现很强的方向依赖性，不同取向之间的黏附性能理论上可相差高达约 20 倍。室温黏着测试进一步显示，不同取向之间的黏附性能存在约 31% 的差异。此外，在垂直取向条件下，向列相 LCE 与近晶 A 相 LCE 的剪切模量相近，与该类体系的理论预测一致。

相关工作发表在《Nature Communications》上。（刘帅）



文章链接: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-76776-x>

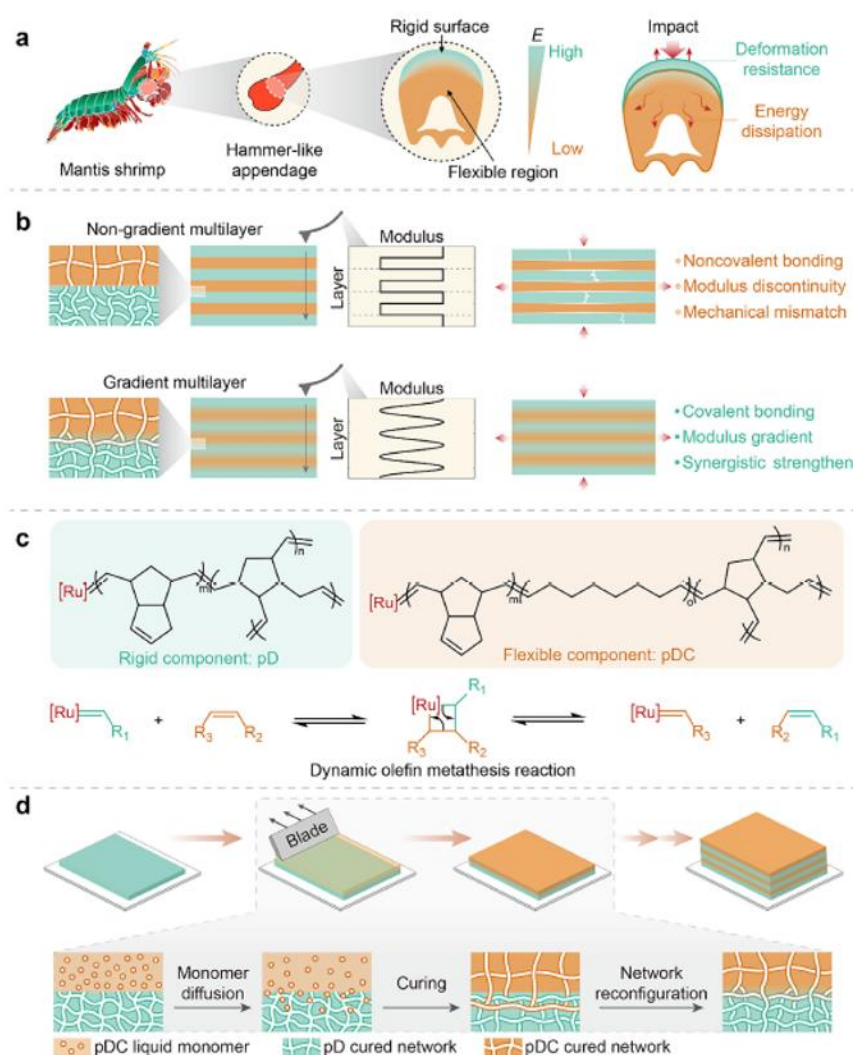
6、仿生梯度界面刚柔一体化材料实现高效能量耗散

高性能抗冲击材料广泛应用于国防、航空航天、电子设备和交通运输等领域，但材料的高强度与高韧性往往难以兼得。高模量材料能够凭借较强的抗变形能力承受冲击，却容易因能量耗散不足而产生脆性破坏和二次损伤；柔性材料虽然可以依靠大变形吸收能量，却难以抵抗高速冲击和穿透。自然界中的螳螂虾锤状附肢等结构通过从刚性外层向柔性内部连续过渡，实现了承载、应力传递与能量耗散的协同，为人工抗冲击材料设计提供了重要启发。然而，现有刚柔复合材料多依赖胶黏剂或非共价作用连接不同组分，刚柔层之间突变的模量差异容易造成应力集中，并在动态载荷下诱发界面脱层和失效。因此，如何同时构筑连续的模量梯度和牢固的共价界面，成为提升刚柔复合材料结构完整性与抗冲击性能的关键问题。

近日，西安交通大学的张彦峰教授和中国科学技术大学的马丽副研究员研究团队，提出了一种结合单体扩散与聚合物网络重构的仿生梯度界面构筑策略，以刚性聚双环戊二烯与柔性共聚物形成多层刚柔一体化结构。高迁移性的柔性单体首先向预成型刚性网络中扩散，建立连续的组成梯度，随后通过聚合及动态共价键交换

实现不同网络之间的共价整合，从而形成约 60 微米厚的连续模量梯度过渡区。荧光示踪和纳米压痕实验进一步揭示了单体扩散过程及界面力学性能的渐变特征。优化后的七层梯度材料兼具较高强度和大变形能力，其梯度界面能够有效分散局部应力、促进刚柔组分协调塑性变形，并显著抑制界面脱层。准静态拉伸、高应变率冲击及弹道冲击测试均表明，该结构的能量耗散能力明显优于无梯度层状材料及其他对照体系；在 133 J 弹丸冲击下仍可保持整体结构完整。该研究表明，将宏观多层结构与微观梯度界面协同设计，可有效缓解聚合物材料中长期存在的强度与韧性矛盾，为高性能防护材料和抗冲击聚合物的设计提供了新的通用思路。

该研究发表于《Advanced Materials》。（刘梦洋）



文章链接: <https://doi.org/10.1002/adma.74952>

(来源: 两江科技评论)