

基于声学拓扑绝缘体的压电振动能量收集综述

温雪昀, 石子健, 郭佳敏, 顾仲明, 陈亚枫, 祝捷

(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 压电振动能量收集技术可以将环境中广泛存在的振动转换成电能, 为设计先进自供电传感器提供了可靠方案, 在工业物联网与无线传感网络自供能以及结构健康监测领域具有重要的应用价值。其中, 压电能量转换效率显著依赖于基体结构对振动的俘获能力。声学拓扑绝缘体支持能量高度局域化且鲁棒的拓扑态, 具有优异且稳健的振动能量俘获特性。近年来, 发展基于声学拓扑绝缘体的压电振动能量收集技术引起了研究人员的广泛关注。本文综述了近期该领域取得的研究进展, 重点介绍了基于拓扑边界态、高阶拓扑角态与连续体束缚态等强局域化机制的压电振动能量收集技术, 以及面向宽频响应的多模态协同振动能量收集策略和基于大面积拓扑态的高通量振动能量收集等方面代表性工作。最后, 对现阶段该领域研究面临的挑战作了简要讨论, 并展望了未来可能的研究方向。

关键词: 声学拓扑绝缘体; 声学超材料; 压电振动能量收集; 能量局域

中图分类号: O482.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)07-2272-13

网络出版时间: 2026-06-04



随着物联网(internet of things, IoT)与无线传感器网络(wireless sensor networks, WSNs)的发展, 如何为数以亿计的微型节点提供持久、独立的电源已成为制约其发展的关键瓶颈^[1-2]。传统电化学电池因寿命有限、维护成本高及环境污染等缺陷, 已难以满足现代需求。为此, 能够捕获环境机械能并转化为电能的振动能量收集(vibration energy harvesting, VEH)技术应运而生, 成为实现自供电电子设备最具潜力的方案之一^[3]。在实现振动能量转换的各种手段中, 利用电磁、静电和压电换能的方法尤其受到关注。其中, 压电 VEH 系统凭借能量密度高、结构简单且易于微型化等优势, 成为将机械能转换成电能的重要途径。

压电 VEH 系统的能量转换效率高度依赖于压电材料内部激发的应变场强度, 即应变场越强, 机电转换效率越高。因此, 提升该系统效率的一个核心策略在于设计支持能量高度局域化共振模式的基

体结构, 能够有效俘获声波或弹性波振动能量, 并在特定区域形成高应变。然而, 传统结构往往难以支持具有高品质因子的共振模式, 导致振动能量的局域化能力有限, 无法在压电振子处产生充足的应变, 进而制约了系统整体的能量收集效率^[4]。为了突破这一局限, 研究人员开始采用声学超材料——这种具有奇异波动特性的人工结构来构建振动能量捕获系统。通过在声学超材料中构建局域共振态^[5-6]、点/线缺陷态^[7-8]、梯度折射率^[9-11]等机制, 可以实现声波和弹性波的高效局域化, 进而有效提升压电振动能量转换效率。然而这些机制对材料缺陷、加工误差及环境杂质极为敏感, 缺乏工程应用所需的鲁棒性(robustness), 即在面对异常、干扰或环境变化时保持稳定运行的能力。这导致 VEH 系统在实际复杂环境中的性能难以保持稳定, 为工程应用带来了严峻挑战。

近年来, 声学拓扑绝缘体(acoustic topological

收稿日期: 2026-03-25。 修订日期: 2026-04-15。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1404400, 2022YFA1404403); 国家自然科学基金(92263208, 12547521, 12304494); 中央高校基本科研业务费专项资金。

第一作者: 温雪昀(2002—), 女, 博士研究生。

通信作者: 祝捷(1976—), 男, 博士, 教授;

陈亚枫(1991—), 男, 博士, 副教授;

顾仲明(1989—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2026-03-25. Revised date: 2026-04-15.

First author: WEN Xueyun (2002—), female, Doctoral candidate.

E-mail: 2411377@tongji.edu.cn

Correspondent author: ZHU Jie (1976—), male, Ph.D., Professor.

CHEN Yafeng (1991—), male, Ph.D., Associate Professor.

GU Zhongming (1989—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: jiezhu@tongji.edu.cn; yachen@tongji.edu.cn; zhmg@tongji.edu.cn

insulators, ATIs)的发现为解决上述难题提供了思路。通过模拟凝聚态物理领域拓扑绝缘体的构建原理,多种不同机制的 ATIs 被提出^[12]。通过打破时间反演对称性,研究人员设计了基于量子霍尔效应(quantum hall effects, QHE)的 ATIs^[13–15]。但是由于需要引入环形流,这种系统较为复杂,限制了其实际应用潜力。随后,研究人员通过模拟 Su-Schrieffer-Heeger (SSH)模型^[16]、量子谷霍尔效应(quantum valley hall effects, QVHE)^[17–18]以及量子自旋霍尔效应(quantum spin hall effects, QSHE)^[19],在不需打破时间反演对称性的被动结构中构建了 ATIs。这些 ATIs 遵从体-边界对应准则,支持受拓扑保护的拓扑边界态。此外,通过突破传统体-边界对应准则,支持多维度拓扑态的高阶 ATIs 也被成功实现,即二维高阶 ATIs 支持有能隙的拓扑边界态,并在边界态能隙中支持拓扑角态^[20–24]。同时,通过多种设计手段,支持大面积拓扑界面态与大面积拓扑角态的 ATIs 也已被实现^[25–27]。随后,He 等^[28]在实验中实现了三维声拓扑绝缘体,将拓扑波局域特性从二维平面成功拓展至三维空间。Wang 等^[29]建立了准晶体系中拓扑角模的低能有效模型,揭示了面内塞曼场诱导质量扭结并产生分数拓扑角态的物理机制。Qi 等^[30]在实验中证实了声学非阿贝尔高阶拓扑绝缘体的存在。此外, Ma 等^[31]首次实验实现了双层弹性波拓扑绝缘体,并借助层自由度实现了高容错的层间转换与波束分离。这些工作表明,拓扑声学正在由传统二维体系进一步拓展到三维体系、准晶体系以及更复杂的高阶拓扑相。为了直观展示这些机制,图 1 归纳了几类应用于 VEH 的典型 ATIs(包括边界态、角态、混合态及大面积态等)的代表性工作^[25, 32–39]。

研究表明,拓扑边界态和角态具有高效的能量束缚性,而且由于受拓扑保护,它们可以免疫结构缺陷与杂质,展示出优异的鲁棒性。因此,声学拓扑绝缘体在设计高效且稳健的压电 VEH 方面具有广阔的应用前景。本文系统回顾了基于 ATIs 的压电 VEH 技术研究进展。首先,梳理了基于拓扑边界态的 VEH 技术,涵盖空气声与弹性波体系中的宽频能量收集、彩虹捕获等相关研究。其次,总结了基于高阶拓扑角态以及连续体束缚态等强局域化模态的 VEH 技术,展现了 ATIs 在高效能量收集方面的潜力。随后,回顾了基于多模态耦合的 VEH 技术,以及基于该机制实现的彩虹捕获与工作频带拓宽。之后,讨论了基于大面积拓扑界面态的高通量 VEH 技

术。最后,对现阶段该领域面临的挑战作了简要讨论,并展望了未来可能的研究方向。

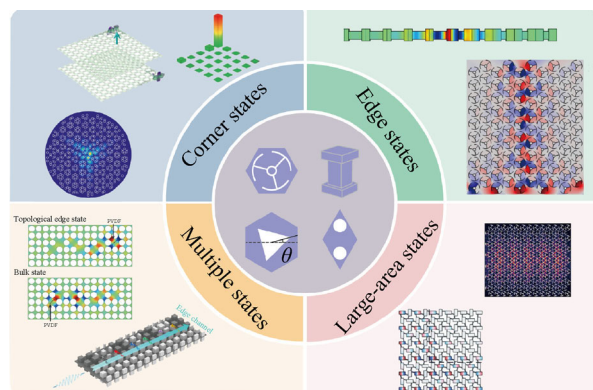


图 1 基于不同物理机制的 ATIs^[25, 32–39]

Fig. 1 ATIs based on different physical mechanisms^[25, 32–39]

1 基于拓扑边界态 VEH 研究

1.1 一维系统

ATIs 在能量收集领域的应用经历了快速的发展。早期的研究主要聚焦于一维系统中的拓扑界面态来实现鲁棒的声能传输与收集。Fan 等^[32]提出了一种基于一维 ATIs 的声能收集装置,如图 2a 所示。该装置由具有周期性交替横截面积的长方体波导组成,通过对波导几何参数的设计,可以改变体带的 Zak 相,实现能带反转,构造出两种具有不同拓朴性质的声子晶体(C_1 和 C_3),从而保证了这两个声子晶体之间界面态的存在。当界面态对应频率的声波入射时,声能量会被局域在界面处,如图 2a 下图所示。在此基础上就可通过界面处的压电悬臂板实现压电 VEH。图 2b 数值模拟的结果表明这一装置可实现 66 倍的声压增益。随后, Ma 等^[40]设计了一种支持一维拓扑界面态的 ATIs,用于局域弯曲波能量,如图 2c 所示。该装置由具有周期性凹槽的弹性梁构成,通过调节凹槽的几何参数可以实现弯曲波模式对应的能带反转,从而构建出 2 种具有不同拓朴性质的声子晶体(Crystal 1 和 Crystal 2)。将 2 种声子晶体组合在一起,可以观察到能量集中在界面处的拓扑界面态,如图 2c 下图所示。在界面处贴附压电片,即可将界面处的弹性波能量转换为电能,从而实现压电 VEH。该装置所收集到的实测电压如图 2d 所示,可以观察到其输出电压远高于非拓朴结构的输出电压。

除此之外, Lan 等^[41]提出了一种利用局部共振 ATI 进行低频 VEH 的理论模型。Zhao 等^[42]基于一维赫姆兹共振器阵列构造了拓扑界面态,用于亚

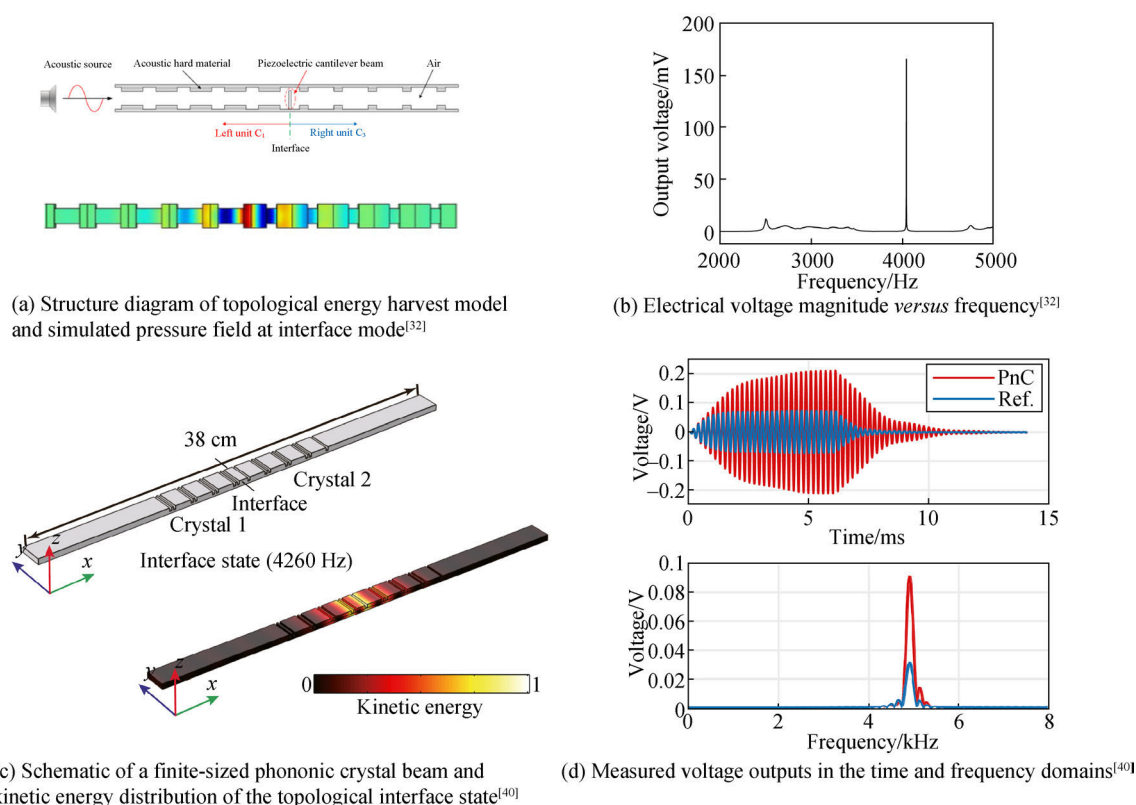


图2 基于一维 ATIs 的 VEH
Fig. 2 VEH based on one-dimensional ATIs

波长尺度的低频声能量收集。Liu 等^[43]基于 SSH 模型设计了由嵌入环氧树脂基体中的压电柱散射体组成的一维 ATI，通过调节电感实现了频率可调的压电能量收集。Chaplain 等^[44]通过数值模拟展示了基于梯度弹性超表面与 SSH 模型实现的拓扑彩虹捕获(topological rainbow trapping)现象，即在空间梯度调控下，不同频率的振动可依托设计后的拓扑波导被局域在不同位置。Bu 等^[45]采用钢和铝组成的 SSH 模型，实现了超过 15 kHz 的宽频带彩虹捕获，将彩虹捕获效应拓展到了板波领域。然而，上述工作大多仍停留在理论分析与数值仿真层面，缺乏系统的实验验证与可工程化的器件实现。

1.2 二维系统

相较于一维 ATIs 支持零维界面态，二维 ATIs 则支持一维拓扑边界态。近年来，更多基于 ATIs 的压电 VEH 结构被陆续提出。Li 等^[33]基于 QVHE 设计了一种由多谐振腔声子晶体组成的 ATIs，并与压电声能俘获器件进行集成，进而对空气声中的振动能量进行俘获并转换成电能。该装置基体结构由具有 3 个谐振腔的六角晶格声子晶体组成，通过调节散射体的转角，可以实现能带反转，并在此基础上构造不同的拓扑谷霍尔相，如图 3a 所示。将拓扑

性质不同的声子晶体拼接后可形成二维拓扑边界态，使声能量局域在界面传播，并表现出对缺陷的较强鲁棒性，如图 3b 所示。图 3c 展示了将声能量转换为压电信号并进行能量收集的实验装置。为实现高效声能收集，可将拓扑性质不同的声子晶体拼接成三角形区域以汇聚声能，如图 3d 上图所示。由图 3d 下图可见，当入射声波频率为 718 Hz 时，输出电压达到峰值，最大电压振幅为 132.5 mV，验证了该器件的压电 VEH 的可行性。

之后，Tang 等^[46]通过拓扑耦合界面实现了空气声的宽频彩虹能量捕获。其声学模型为正方晶格的声子晶体，如图 4a 所示。绿色区域表示圆形的声学散射体，浅蓝色区域对应空气。该二维声子晶体具有 4 个反转中心，根据晶体周期性，可以得到四类声子晶体原胞(PC₁, PC₂, PC₃ 和 PC₄)，且这四类原胞对应同样的能带图。根据布里渊区内 X 点和 Y 点的声压场分布的对称性质，可以得到 4 种原胞对应的 Zak 相($\theta_x^{\text{Zak}}, \theta_y^{\text{Zak}}$)，分别为(π, π), ($0, \pi$), ($\pi, 0$) 和 ($0, 0$)。当 2 个具有不同拓扑相的声子晶体相邻放置时，其界面支持拓扑界面态。图 4b 展示了由 1 个 PC₂ 原胞嵌入 10 个 PC₃ 原胞构成的超胞结构；由于两种原胞的拓扑性质不同，在其接触位置形成了

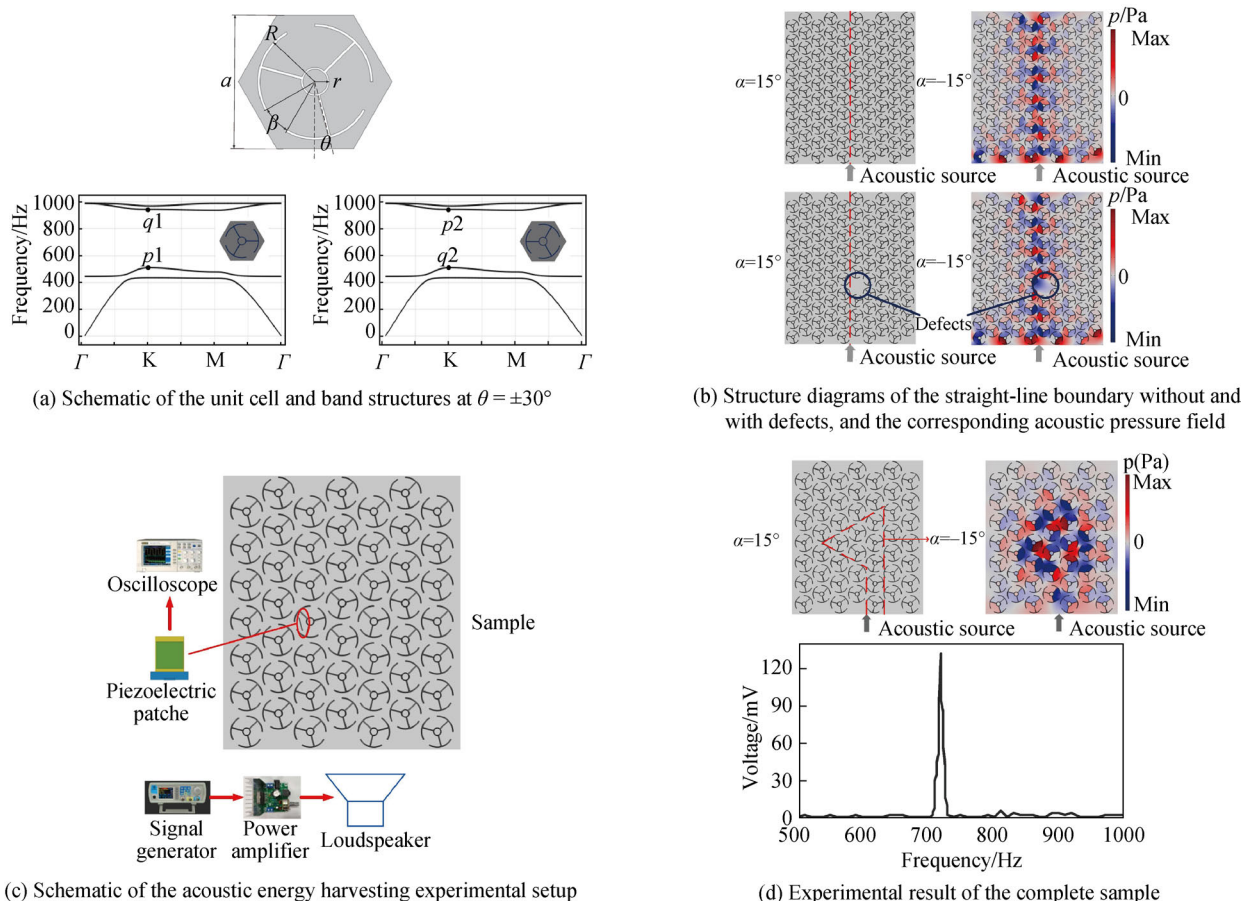
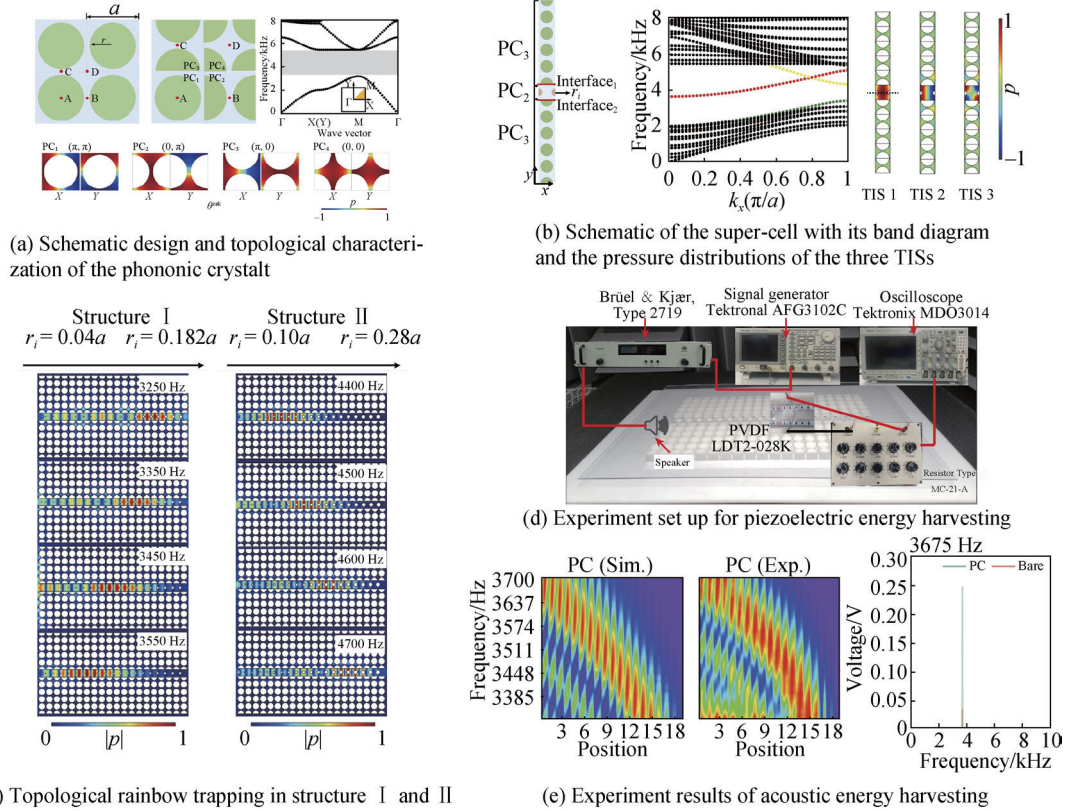
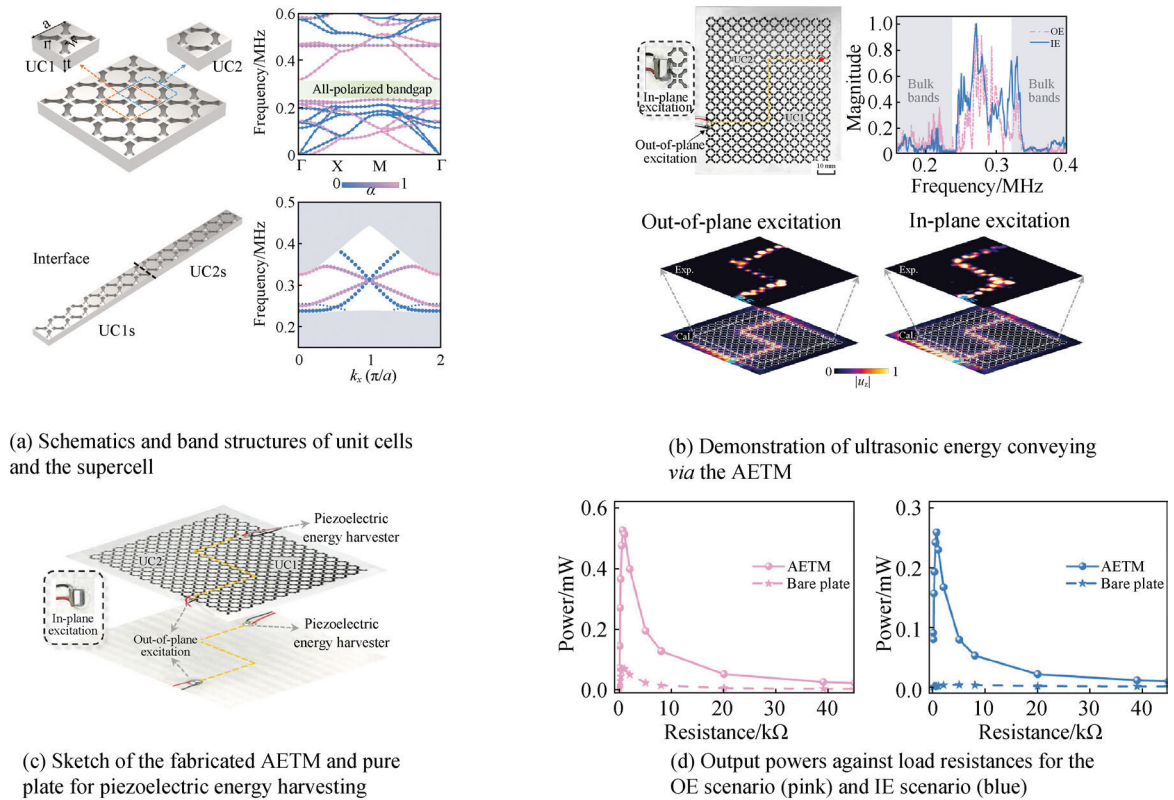


图 3 基于二维 ATIs 的空气声波压电 VEH^[33]
Fig. 3 Airborne sound piezoelectric VEH based on two-dimensional ATIs^[33]

2 个耦合的拓扑界面。超胞对应的能带结构表明带隙中出现了 3 种边界态模式(TS1, TS2 和 TS3), 其中对称模式 TS1 和 TS2 被选用于彩虹声能捕获。与传统的拓扑界面相比, 耦合拓扑界面具有多模态和宽频带的优势, 有利于实现多模态彩虹捕获和宽频带 VEH, 并且耦合界面区域提供了足够的空间来容纳用于能量转换的压电结构或材料。最为关键的是, 通过调节 PC_2 圆柱(散射体)的半径 r_i , 可以有效调控耦合拓扑界面态的色散关系与群速度分布, 从而改变其截止频率(零群速度点)的位置。随着 r_i 增大, TS1 的截止频率向低频移动, 而 TS2 向高频移动, 进而实现不同频率声波在不同空间位置的局域化。如图 4c 所示, 声子晶体结构 I 和 II 分别对应于 TS1 和 TS2, 其中沿耦合界面的散射体半径 r_i 沿 +x 方向线性增加, 可以将不同频率的声波局域在不同的空间点, 从而实现声波的拓扑彩虹捕获。将该结构与压电薄膜聚偏氟乙烯(PVDF)进行集成后, 即可将捕获在不同位置的能量转换成电能, 如图 4d 所示。图 4e 的实验结果验证了声波在该结构中的彩虹局域化

现象, 并表明由于拓扑彩虹捕获效应增强了局域声压, 该结构的输出电压明显高于对照器件。

除了对空气声中的振动能量开展 VEH, 研究人员同时对弹性波系统下基于 ATIs 的 VEH 开展了研究。Chen 等^[47]提出了一种全极化弹性拓扑超材料(all-polarized elastic topological metamaterial, AETM), 其同时支持面内和面外极化模式拓扑态, 可以对全极化弹性波模式开展局域化调制。如图 5a 所示, 该设计利用具有 C_{4v} 及滑移对称性的原胞, 通过空间平移构成具有两种拓扑相的单胞(UC1 和 UC2), 在 0.238~0.322 MHz 范围内形成了全极化带隙。将 UC1 和 UC2 组合在一起形成超胞, 其投影能带结构表明, 在界面处同时存在面外和面内极化模式的拓扑边界态, 且受滑移反射对称性保护, 在 $k_x = \pi/a$ 处呈现出简并特征。如图 5b 所示, 该装置展示了卓越的超声能量传输特性。在面外(out-of-plane excitation, OE)激励和面内(in-plane excitation, IE)激励下, 频响曲线在边界态频率范围内均表现出显著增强。扫描得到的位移场 $|u_z|$ 证实, 超声波能够被高度局

图 4 基于多拓扑模式耦合的宽频 VEH^[46]Fig. 4 Broadband VEH based on multi-topological mode coupling^[46]图 5 AETM 的能带特性、超声传输及能量收集性能验证^[47]Fig. 5 Bandgap properties, ultrasonic energy conveying, and harvesting performance of the AETM^[47]

域在界面处。将该结构与压电能量收集器集成后即可将局域在界面处的能量转换成电能, 用于超声能量 VEH, 如图 5c 所示。图 5d 的实验结果显示, 在 OE 激励场景下, AETM 的最大输出功率比纯铝板高出约 7.5 倍; 而在 IE 激励场景下, 由于其对面内波具有更强的捕获与转化能力, 输出功率增益达到了 86 倍。

除此之外, Wu 等^[48]设计了一种基于 QVHE 的 ATI, 并数值分析了其在表面波 VEH 方面的应用。该工作以土壤为基底、混凝土柱为结构单元, 将 ATIs 引入地面振动衰减与能量回收的双重功能设计中, 表明宏观混凝土超结构在地震波/表面波调控方面具有潜在应用价值, 但其实际工程应用仍有待进一步实验验证。

2 基于拓扑局域态的 VEH 研究

除了利用拓扑边界态将能量局域在一维界面处, 近年来的研究进一步发现, 高阶 ATIs 在边界交汇处还可支持拓扑角态^[20, 23, 49], 可将能量局域于零维边界(即角)处, 实现更强的能量局域效应, 因此在高效能量捕获方面具有潜在优势。Fan 等^[50]利用二维穿孔超表面构造了局部共振诱导的二阶 ATI, 实现了双频拓扑角态, 角点处的能量高效局域

化有助于 ATI 在亚波长弹性波捕获和能量采集等领域的应用。Zhou 等^[51]提出了一种基于二维拓扑线性谐振子模型拓扑角态的彩虹能量捕获方法。此外, Liao 等^[34]通过声子晶体的平移形变, 提出了一种合成维度的声学高阶 ATI, 并基于该结构, 在深亚波长尺度下实现了彩虹声能捕获效应。Wen 等^[35]设计了一种基于拓扑涡旋的零维空腔, 并基于其局域化特性数值研究了其 VEH 性能。Guo 等^[36]提出了一种基于合成维度的弹性拓扑超材料, 利用其支持的连续体中的高阶拓扑束缚态(higher-order topological bound states in the continuum, HOTBICs)实现了高频超声压电能量采集。该结构晶格紧束缚理论模型如图 6a 左图所示。如图 6a 右图所示, 在给定合成维度参数下, 连续体本征谱中存在两个双重简并的 HOTBIC, 其能量分布呈现出明显的角局域性。为实现该紧束缚模型的实验映射, 研究中设计了一种弯曲波超晶体(图 6b 左图)。通过调节结构参数, 可将其弯曲能带映射到理论紧束缚模型。对应的仿真本征场如图 6b 右图所示, 能量主要汇聚于边缘的两个角点处。在此基础上, 通过将该结构与压电能量收集器进行集成, 进一步开展了压电能量收集实验, 实验装置如图 6c 所示。实验结果如图 6d 所示, 在 HOTBIC 对应的特征频率处可获得显著增强的电压

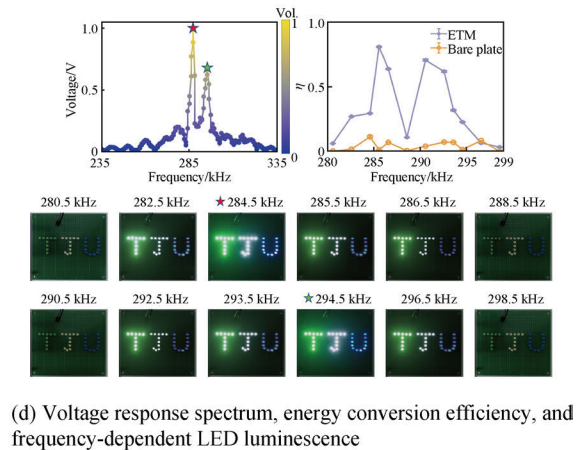
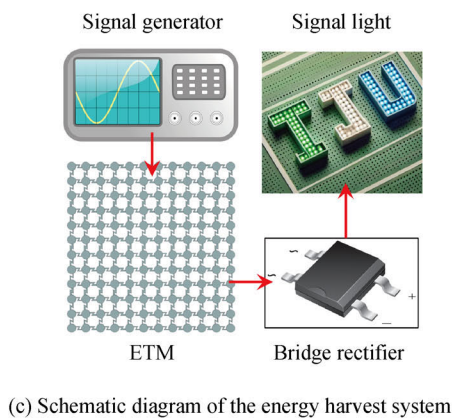
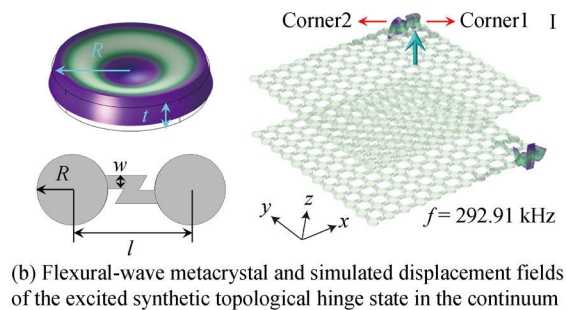
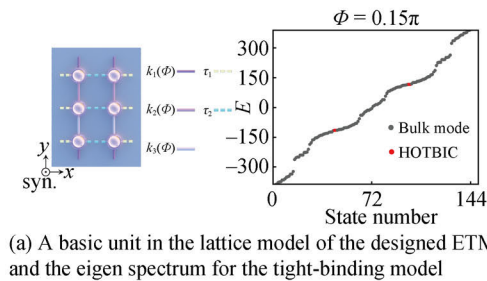


图 6 弹性拓扑超材料中基于 HOTBIC 的超声压电能量采集^[36]
Fig. 6 Ultrasonic piezoelectric energy harvesting based on HOTBIC in the ETM^[36]

输出。相较于相同尺寸的纯板结构,该结构的能量转换效率明显提高,且在对应频率下 LED 发光更强。该结果表明, HOTBIC 实现的角点能量局域能够有效提升压电 VEH 性能,并为频率选择性的自供能器件设计提供了新思路。最近, Zhang 等^[52]在基于蜂窝点阵的高阶拓扑绝缘体中引入了磁致伸缩材料(Terfenol-D),通过外加磁场改变材料模量,实现了对拓扑角态频率的主动动态调控,进而拓宽了能量采集器的频率范围。

3 基于多模态协同的 VEH 研究

上述研究多聚焦于单一模式的拓扑态,因而在能量汇聚范围与频率可调性方面仍受限制。相比之下,多模态协同策略通过不同模式拓扑态的互补作用,可更灵活地重构能量传输路径,并进一步拓宽器件的工作频率范围与有效带宽。

Chen 等^[37]提出了一种用于弹性波彩虹能量捕获与收集的拓扑超构器件。如图 7a 所示,该结构由

5 个区域(I–V)组成,其中区域 I 为拓扑平庸单胞(UCT),区域 II–IV 为三类几何构型不同的拓扑非平庸单胞(UCNT1–UCNT3),其中 UCT 和 UCNT_i 的具体构造如图 7b 所示。在区域 I 与区域 II–IV 的交界处形成三对角点(C1–C2、C3–C4、C5–C6),可支持不同频率的拓扑角态,如图 7c 所示。区域 V 由沿竖直方向具有非平庸拓扑性质的单胞(UCV)构成,使其与区域 I 的水平界面可支持拓扑边界态,如图 7d 所示。通过调控 UCV 参数,使边界态频率范围覆盖各角态频率,从而使沿界面传播的不同频率弹性波可通过边界态与角态的耦合被选择性俘获到不同角点,如图 7a 所示。通过在超构器件的六个角位点(C1–C6)的基板上分别贴附压电能量收集器件(如图 7e 的实验装置所示),可以将捕获的振动能量转化为电能。实验结果显示,得益于拓扑角态极强的能量局域化特性,该器件展现出显著的电能放大效应:在不同激励频率下,角位点 C1–C6 收集到的电信号最高电压分别达到 1.219、0.534、0.391、

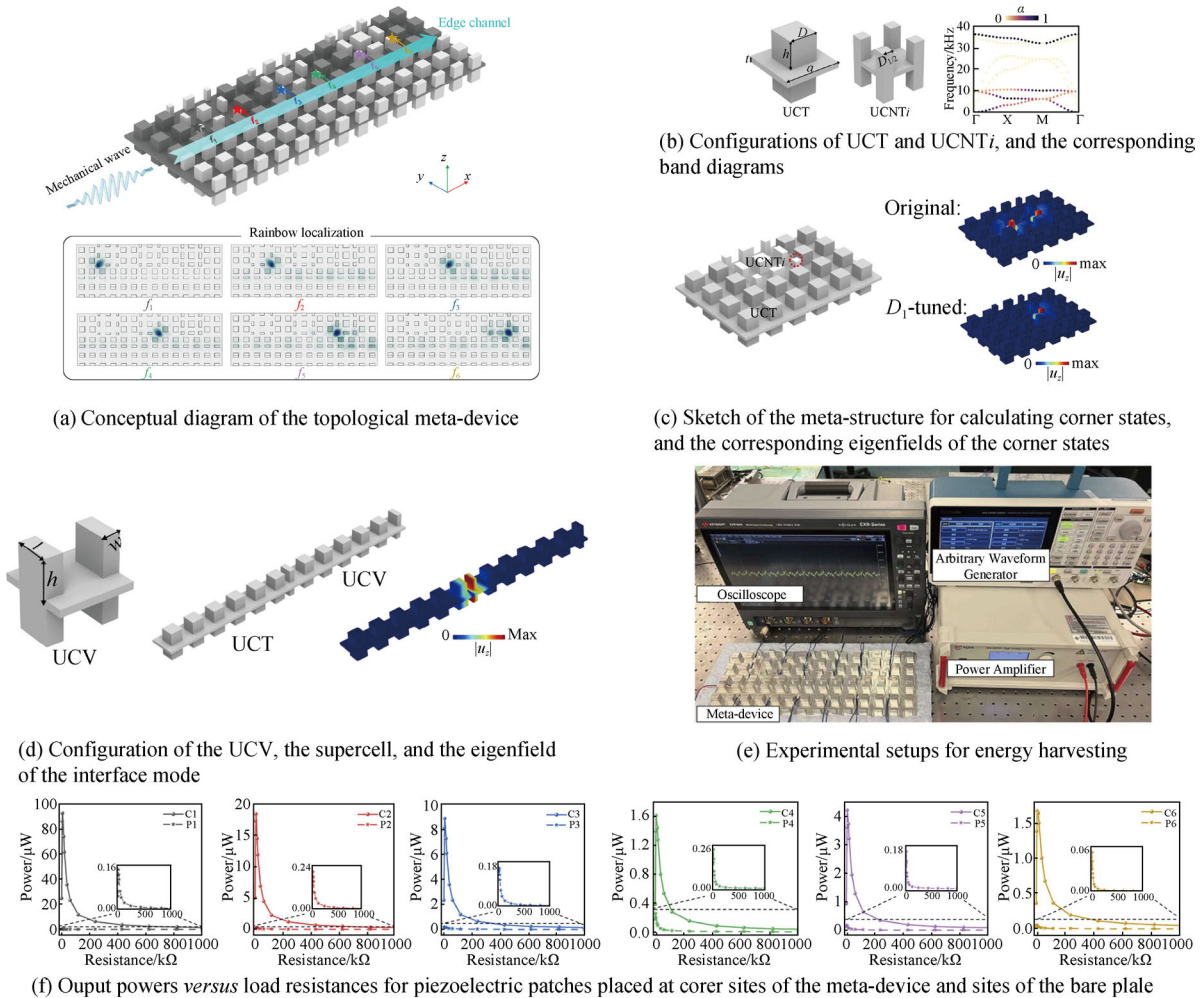


图 7 基于拓扑边界态和角态耦合的压电 VEH^[37]

Fig. 7 Piezoelectric VEH based on the coupling of topological edge and corner states^[37]

0.190、0.289 V 和 0.218 V。与相同激励响应条件下无拓扑结构设计结构板(P1~P6)相比,其最大输出电压被放大了约 4.42 倍~22.3 倍。如图 7f 所示,当负载电阻达到 8 k Ω 的最佳匹配阻抗时,角位点 C1~C6 的峰值输出功率最高可达 93.31 μ W。与纯板结构相比,其峰值功率分别实现了约 497.3 倍、72.08 倍、51.55 倍、19.54 倍、69.06 倍和 112.57 倍的提升,充分证实了基于拓扑角态的超构器件在压电 VEH 效率上的优势。

同时,Tang 等^[38]提出了一种基于拓扑声子共振腔链的新型结构,通过拓扑边界态和体态的协同作用,实现了声波的多模态和宽频带能量收集。该

器件由呈方形晶格排列于空气背景中的散射体组成,其单胞构型与能带结构如图 8a 所示。如图 8b 所示,可以通过移除超胞中心的散射体构造声子共振腔,这些共振腔能够支持类似四极子(quadrupole, QP)和高阶单极子(higher-order monopole, MP)的腔模式,从而引起了声能的增强。如图 8c 所示,当声子晶体腔靠近时,两个腔之间会发生耦合。横向耦合腔(lateral coupled cavities, LCCs)和对角耦合腔(diagonal coupled cavities, DCCs)分别对应着两种耦合强度 γ_L 和 γ_D ,并且实验表明 $\gamma_D > \gamma_L$ 。基于 SSH 模型以及上述耦合方式,可以进一步设计出一维声子共振腔链。通过调节相邻声子腔之间的距离,可

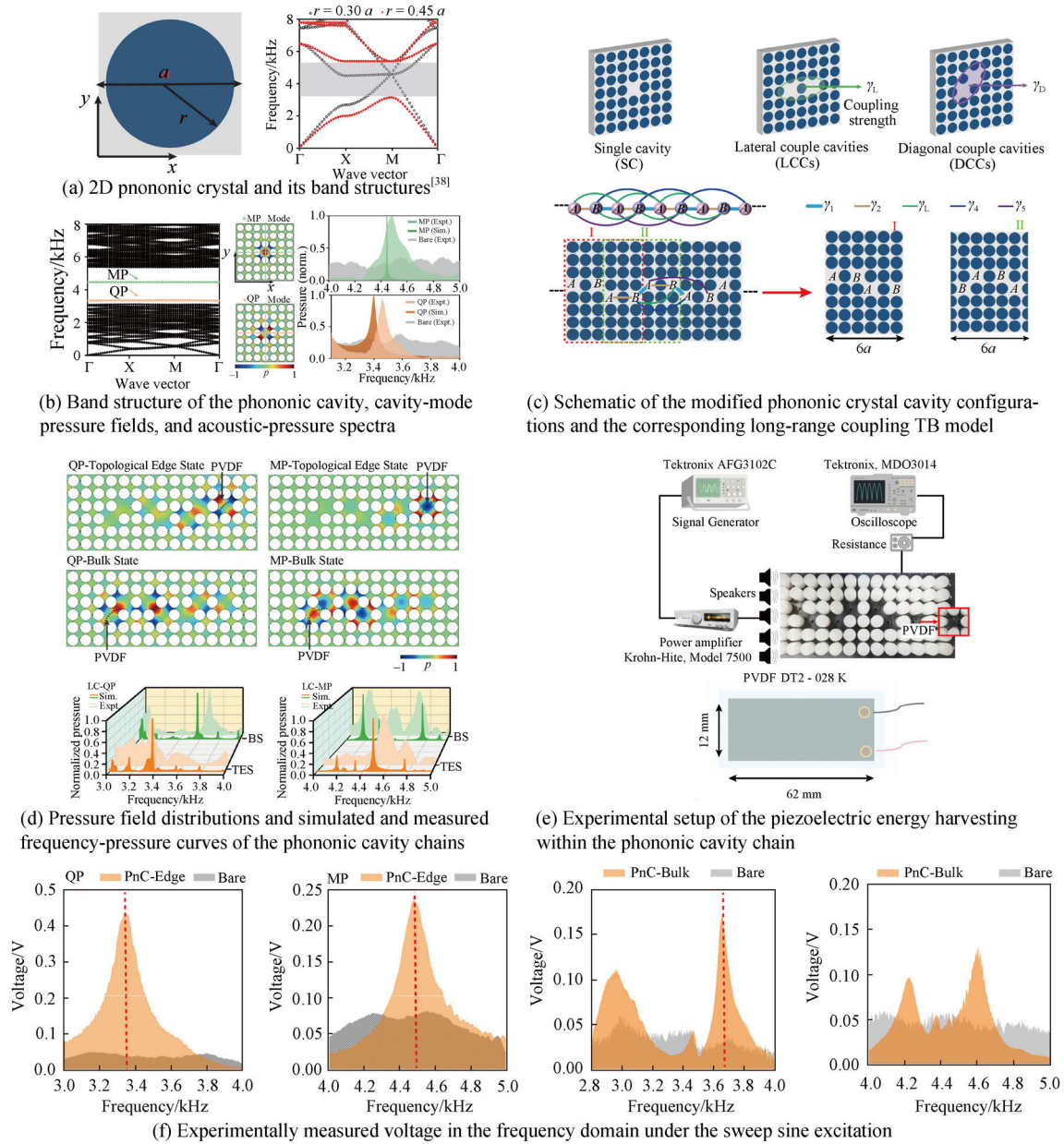


图 8 基于拓扑边界态和体态耦合的压电 VEH^[38]

Fig. 8 Piezoelectric VEH based on the coupling of topological edge and bulk states^[38]

以精确改变胞内和胞间的耦合强度,进而促使系统发生拓扑相变,在带隙中激发出拓扑边界态,并在带隙外形成宽频体态。同时,由于超胞 I 和超胞 II 对应的缠绕数(winding number)分别为 1 和 0,超胞 I 在截断时会产生 QP 和 MP 模式的拓扑边界态和拓扑体态。其中,边界态仅在带隙内的离散频率下被激发,其声压场高度局域于链的两端,而体态则在带隙外的连续频谱中被激发,能量分布于整个链的主体区域中,并表现出多个连续的共振峰,如图 8d 所示。通过体态和边界态之间的协同相互作用,2 个腔链可以在连续谱(体态)和离散谱(边界态)之间

进行声波能量俘获与收集,相对带宽超过 23%。图 8e 展示了压电能量收集的实验装置。图 8f 的实验结果表明,无论是 QP 还是 MP 模式,其频率-电压响应曲线均明确展示出对应于拓扑边界态的谐振峰。该拓扑超构器件的输出电压相较于无拓扑结构的参考装置至少提升了 2.5 倍。与此同时,在对应于 QP 和 MP 模式体态的连续频率区间内,曲线中亦涌现出多个突出的电压峰值。这一实验现象不仅证实了体态对带隙外声波能量的有效汇聚,也直观地展现了边界态与体态在拓扑共振腔链中实现宽频能量捕获的协同工作机制。

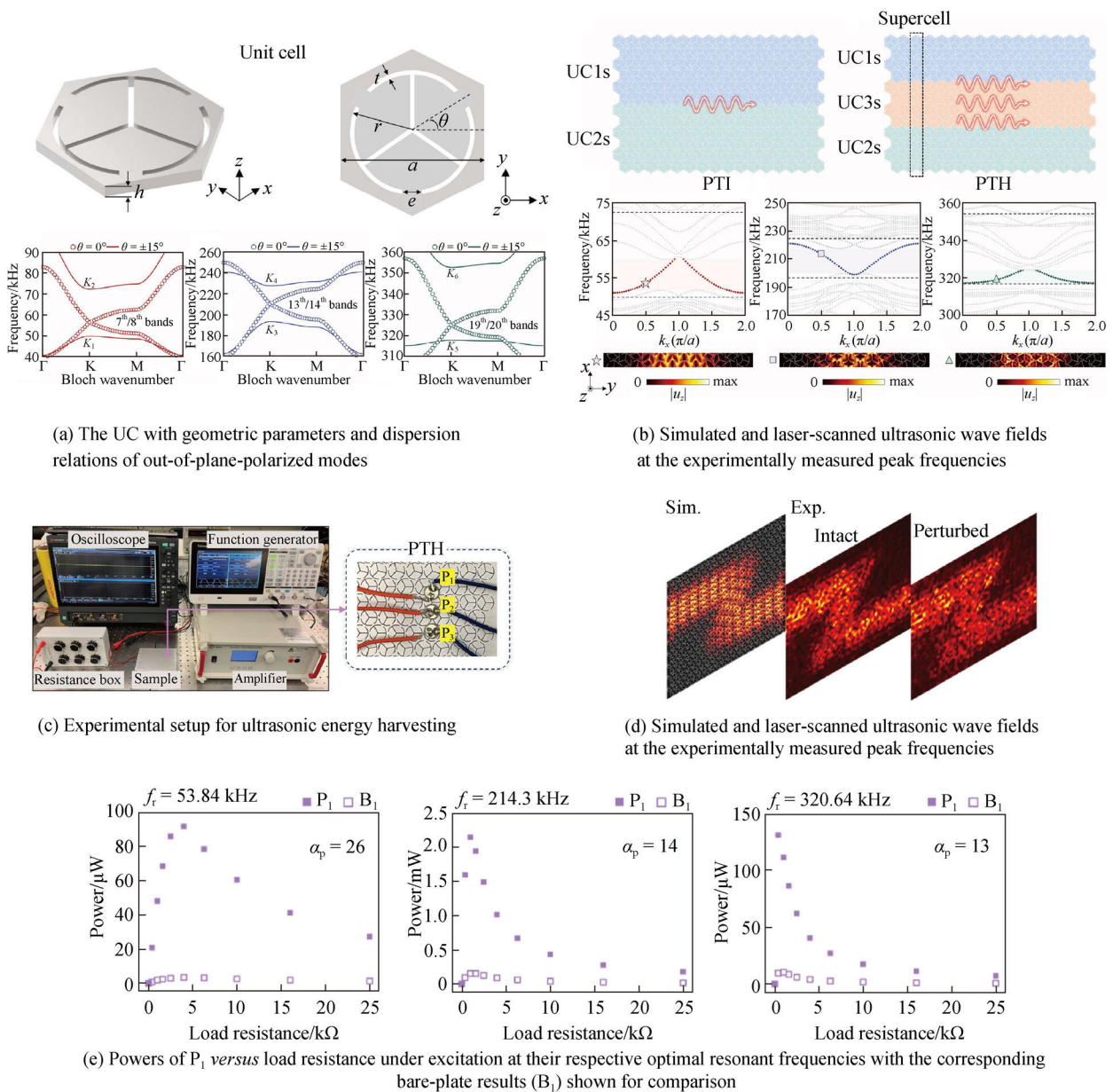


图 9 基于多带声子拓扑异质结构的大面积压电 VEH^[53]

Fig. 9 Large-area piezoelectric VEH based on multiband phononic topological heterostructures^[53]

4 基于大面积拓扑界面态的 VEH

在基于 ATIs 的能量收集研究中, 边界态的鲁棒性和强局域增强效应已被广泛验证。然而, 这类拓扑态往往局域于狭窄边界处, 导致有效能量作用的体积受限, 从而限制了能量收集面积、压电单元布局自由度及器件总体输出效率。为突破这一瓶颈, 近年来, 研究人员开展了基于支持大面积拓扑界面态 ATIs 的能量收集研究, 在保持拓扑保护优势的同时, 实现更高效、更稳定的压电能量收集。

Wang 等^[54]提出了基于 QVHE 的声学拓扑异质结构, 实现了大面积声能调控。此后, 不同系统中的拓扑异质结构被相继提出。Fan 等^[53]在此基础上提出并证明了一种基于 QVHE 的多带弹性拓扑异质结构。该结构的基本单元为带有 C_3 对称性通孔的六角形铝板, 如图 9a 所示。当内部开孔的旋转角度

$\theta = 0^\circ$ 时, 该模型在 3 个不同的超声频段呈现狄拉克点, 具有能带闭合的性质。通过将旋转角度调节至 $\theta = \pm 15^\circ$, 可打破空间反演对称性, 原本闭合的能带会被打开, 同时引发拓扑相变。通过将无带隙的狄拉克锥原胞层($\theta = 0^\circ$)作为中间区域, 并将其夹在 2 种具有相反拓扑相的带隙原胞层之间构建支持大面积拓扑界面态的 ATIs, 如图 9b 所示。这种大面积拓扑界面态由于结合了谷边界态和体态的特征, 使得超声能量能够在较宽的区域内进行高通量传输。图 9d 展示了该结构对于多频段大面积超声能量调控的实验结果, 表明该结构可以免疫外部扰动, 展示出较强的鲁棒性。进一步, 通过利用大面积拓扑波导区域的空间优势, 同时将 3 个压电能量收集器阵列化放置于波导区域, 如图 9c 所示, 以将局域在波导区域的振动能量转换成电能。在大面积拓扑界面态的局域增强作用下, 被俘获的振动能量

表 1 现有代表性工作的关键性能指标对比

Table 1 Comparison of key performance indicators of existing representative works

Ref.	Topological state	Structure	Operating frequency/Hz	Max output voltage/mV	Max output power/ μ W	Area power density/ (μ W $\cdot$ cm $^{-2}$ ·Pa $^{-2}$)	Energy conversion efficiency	Max amplification factor
[28]	1D edge state	1D phononic crystal tube	4.045×10^{-3}	163	2.6			66 (Pressure)
[40]	1D edge state	1D elastic beam	4254(intact); 4181(defective)		0.083			
[29]	2D edge state	Multi-resonator phononic crystal	718 (intact); 707 (defective)	132.5 (intact); 96.5 (defective)				8.5 (Power)
[46]	2D edge state	Gradient phononic crystal	3300–3800 (Structure I); 4350–4900 (Structure II)		3.5 (4550 Hz, 14 k Ω)			9 (Voltage)/ 91 (Power)
[47]	2D edge state	All-polarized elastic topological metamaterial	3.27×10^{-5} (OE); 3.18×10^{-5} (IE)	1.002×10^{-3} (OE); 649 (IE)	525(OE); 0.258(IE)			
[32]	Topological BIC	Synthetic-dimensional higher-order topological insulator	2.845×10^{-5} ; 2.945×10^{-5}	424; 431	4.118×10^{-4} ; 3.073×10^{-4}		0.8; 0.7	
[33]	Edge-corner state coupling	High-order topological meta-device	1.650×10^{-4} , 1.631×10^{-4} , 1.600×10^{-4} , 1.579×10^{-4} , 1.540×10^{-4} , 1.531×10^{-4}		93.31, 18.5, 8.94, 1.61, 4.22, 1.68			22.3 (Voltage)
[34]	Edge-bulk state coupling	Topological resonator chain	Edge state: 3.325×10^{-3} , 4.492×10^{-3} ; Bulk state: 3.625×10^3 , 4.600×10^{-3}			0.009 33		10 (Voltage)
[53]	Large-area	Multi-band elastic topological heterostructure	5.16×10^{-4} – 5.98×10^{-4} ; 1.993×10^{-5} – 2.172×10^{-5} ; 3.173×10^{-5} – 3.242×10^{-5}	830; 2.1×10^{-3} ; 1.22×10^{-3}	176; 2.14×10^{-3} ; 467			10.5 (Voltage) / 109 (Power)

被高效转换为电能,如图 9e 所示。同时,测量结果表明,相较于纯铝板,分布于异质结构上的压电能量收集器在 3 个超声频段下的最大输出功率实现了 3.6 倍~260.0 倍的显著提升,有效验证了该高阶拓扑异质结构在多频段、大容量声波能量收集方面的优势。

5 结论

本文介绍了近年来基于 ATIs 的 VEH 研究进展。文章从不同维度的物理机制出发,分别介绍了基于拓扑边界态在空气声和弹性波体系中实现的 VEH、基于高阶拓扑角态与连续体束缚态等零维局域态引起声场增强效应实现的 VEH,以及面向宽带与多频响应的多模态协同 VEH 机制,并进一步延伸至基于大面积拓扑界面态的高通量 VEH。这些研究表明,基于 ATIs 的系统在兼顾高能量转换效率与强鲁棒性的同时,展现出极高的设计潜力。通过引入结构调控与多模态耦合等策略,构筑拓扑彩虹捕获效应,可以突破传统器件的带宽限制。在此基础上,借助大面积拓扑波导态显著提升了能量传输通量,实现了高效、宽频、大容量的综合性能优化。然而,现阶段基于 ATIs 的 VEH 研究也存在一些不足。首先,相关研究主要集中于中高频范围,而低频(≤ 100 Hz) VEH 仍大多停留在理论探索阶段。考虑到日常环境中的振动往往以低频成分为主,面向低频振动的能量收集研究仍有待进一步加强。其次,如表 1 的汇总结果所示,目前该领域对能量转换效率的评估尚缺乏统一的规范体系。各研究报告的电学输出指标(如最大电压、输出功率或放大倍数)受限于不同的实验测试基准,难以直接互为参考,这也是未来 VEH 研究亟待解决的挑战之一。与此同时,多数器件目前仍停留在原理验证阶段,距离实际工程化和工业化应用仍有一定距离。值得注意的是,尽管拓扑态为能量传输提供了相对稳健的平台,现有关于能量收集稳定性的研究大多仍局限于结构缺陷、几何扰动等情形,而对于温度、湿度、负载变化及长期使用条件等实际环境因素对拓扑结构性能的影响,仍缺乏系统讨论。

尽管如此,除本文讨论的几类拓扑态之外,近年来涌现的多种新型拓扑物理概念为未来 VEH 构架的设计提供了更广阔的探索空间。通过引入可控的增益与损耗效应,非厄米拓扑态有望打破传统被动结构的限制,实现更强的能量汇聚与稳定的输出性能。同时,三维声学拓扑绝缘体将波局域特性拓

展至三维空间,有望推动多自由度压电 VEH 器件的发展,从而实现对复杂环境中多维振动能量的有效收集。不仅如此,利用准晶拓扑绝缘体中独特的非周期旋转对称性,可进一步激发更丰富的多频带及高密度拓扑角态;而非阿贝尔高阶拓扑态的引入,则为设计具有多通道、可编织特性的智能能量收集网络提供了全新思路。这些新兴机制有望突破现有体系的维度与自由度限制,实现能量收集效率与环境适应性的跨越式提升。另一方面,相较于空气介质,水中的声能量密度更高,因此水声环境中的拓扑能量收集有望获得更高的转换效率,并为水下无线通信等应用提供新的实现路径。

参考文献:

- [1] YANG Z B, ZHOU S X, ZU J, et al. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications[J]. *Joule*, 2018, 2(4): 642–697.
- [2] 于家豪, 陶凯. 振动俘能技术在可穿戴领域的应用[J]. *机械工程学*, 2022, 58(20): 46–71.
YU Jiahao, TAO Kai. *J Mech Eng*, 2022, 58(20): 46–71.
- [3] LI Y J, TAO K, GEORGE B, et al. Harvesting vibration energy: Technologies and challenges[J]. *IEEE Ind Electron Mag*, 2021, 15(1): 30–39.
- [4] HU G B, TANG L H, LIANG J R, et al. Acoustic-elastic metamaterials and phononic crystals for energy harvesting: A review[J]. *Smart Mater Struct*, 2021, 30(8): 085025.
- [5] LI J F, ZHOU X M, HUANG G L, et al. Acoustic metamaterials capable of both sound insulation and energy harvesting[J]. *Smart Mater Struct*, 2016, 25(4): 045013.
- [6] GONELLA S, TO A C, LIU W K. Interplay between phononic bandgaps and piezoelectric microstructures for energy harvesting[J]. *J Mech Phys Solids*, 2009, 57(3): 621–633.
- [7] JO S H, YOUN B D. A phononic crystal with differently configured double defects for broadband elastic wave energy localization and harvesting[J]. *Crystals*, 2021, 11(6): 643.
- [8] LV H Y, TIAN X Y, WANG M Y, et al. Vibration energy harvesting using a phononic crystal with point defect states[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(3): 034103.
- [9] TOL S, DEGERTEKIN F L, ERTURK A. 3D-printed phononic crystal lens for elastic wave focusing and energy harvesting[J]. *Addit Manuf*, 2019, 29: 100780.
- [10] ZAREEI A, DARABI A, LEAMY M J, et al. Continuous profile flexural GRIN lens: Focusing and harvesting flexural waves[J]. *Appl Phys Lett*, 2018, 112(2): 023901.
- [11] TOL S, DEGERTEKIN F L, ERTURK A. Phononic crystal Luneburg lens for omnidirectional elastic wave focusing and energy harvesting[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, 111: 013503.
- [12] XUE H R, YANG Y H, ZHANG B L. Topological acoustics[J]. *Nat Rev Mater*, 2022, 7(12): 974–990.
- [13] YANG Z J, GAO F, SHI X H, et al. Topological acoustics[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114(11): 114301.
- [14] FLEURY R, SOUNAS D L, SIECK C F, et al. Sound isolation and giant linear nonreciprocity in a compact acoustic circulator[J]. *Science*, 2014, 343(6170): 516–519.

- [15] NI X, HE C, SUN X C, et al. Topologically protected one-way edge mode in networks of acoustic resonators with circulating air flow[C]// 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Shanghai, China. IEEE, 2016: 804.
- [16] LI X, MENG Y, WU X X, et al. Su-Schrieffer-Heeger model inspired acoustic interface states and edge states[J]. Appl Phys Lett, 2018, 113(20): 203501.
- [17] LU J Y, QIU C Y, KE M Z, et al. Valley vortex states in sonic crystals[J]. Phys Rev Lett, 2016, 116(9): 093901.
- [18] LU J Y, QIU C Y, YE L P, et al. Observation of topological valley transport of sound in sonic crystals[J]. Nat Phys, 2017, 13(4): 369–374.
- [19] HE C, NI X, GE H, et al. Acoustic topological insulator and robust one-way sound transport[J]. Nat Phys, 2016, 12(12): 1124–1129.
- [20] XUE H R, YANG Y H, GAO F, et al. Acoustic higher-order topological insulator on a kagome lattice[J]. Nat Mater, 2019, 18(2): 108–112.
- [21] SERRA-GARCIA M, PERI V, SÜSSTRUNK R, et al. Observation of a phononic quadrupole topological insulator[J]. Nature, 2018, 555(7696): 342–345.
- [22] XUE H R, GE Y, SUN H X, et al. Observation of an acoustic octupole topological insulator[J]. Nat Commun, 2020, 11: 2442.
- [23] NI X, WEINER M, ALÜ A, et al. Observation of higher-order topological acoustic states protected by generalized chiral symmetry[J]. Nat Mater, 2019, 18(2): 113–120.
- [24] ZHANG X J, WANG H X, LIN Z K, et al. Second-order topology and multidimensional topological transitions in sonic crystals[J]. Nat Phys, 2019, 15(6): 582–588.
- [25] ZHOU L J, ZHANG Z W, XIONG W, et al. Observation of a large-area topological hybrid corner state in acoustic heterostructures[J]. Phys Rev B, 2026, 113(2): L020101.
- [26] WANG J Q, ZHANG Z D, YU S Y, et al. Extended topological valley-locked surface acoustic waves[J]. Nat Commun, 2022, 13: 1324.
- [27] CHEN Y F, LAN Z H, FAN L, et al. Realization of broadband ultrasonic chiral Landau levels in an elastic metamaterial[J]. Phys Rev B, 2025, 111(18): 184303.
- [28] HE C, LAI H S, HE B, et al. Acoustic analogues of three-dimensional topological insulators[J]. Nat Commun, 2020, 11(1): 2318.
- [29] WANG C T, LIU F, HUANG H Q. Effective model for fractional topological corner modes in quasicrystals[J]. Phys Rev Lett, 2022, 129(5): 056403.
- [30] QI Y J, HE Z J, LI J, et al. Experimental realization of non-Abelian higher-order topological insulators in two-dimensional phononic crystals[J]. Phys Rev B, 2025, 111(13): 134113.
- [31] MA C Z, SONG Z W, CHENG Z Y, et al. Realization of a bilayer elastic topological insulator[J]. Adv Sci, 2026, 13(21): e23416.
- [32] FAN L, HE Y, CHEN X A, et al. Acoustic energy harvesting based on the topological interface mode of 1D phononic crystal tube[J]. Appl Phys Express, 2020, 13(1): 017004.
- [33] LI B S, CHEN H, XIA B Z, et al. Acoustic energy harvesting based on topological states of multi-resonant phononic crystals[J]. Appl Energy, 2023, 341: 121142.
- [34] LIAO D W, LIU Y X, ZHANG Z W, et al. Synthesizing topological acoustic rainbow trapping at deep-subwavelength corners[J]. Sci Bull, 2023, 68(16): 1744–1747.
- [35] WEN Z H, JIN Y B, GAO P L, et al. Topological cavities in phononic plates for robust energy harvesting[J]. Mech Syst Signal Process, 2022, 162: 108047.
- [36] GUO J, GU Z, FAN L, et al. Synthetic topological device for advancing elastic energy harvesting[J]. Phys Rev Appl, 2026, 25(5): 054020.
- [37] CHEN Y F, FAN L, ZHU J, et al. Rainbow energy harvesting using a high-order topological meta-device[J]. Nano Energy, 2024, 127: 109722.
- [38] TANG X L, LIU Y D, ZHANG X Q, et al. Broadband acoustic energy harvesting via topological edge and bulk states in phononic cavity chains[J]. Phys Rev Appl, 2025, 24(4): 044048.
- [39] FAN L, LAN Z H, CHEN Y F, et al. Dual-band flexible large-area ultrasonic energy conveying via elastic chiral Landau levels[J]. Mater Horiz, 2025, 12(16): 6334–6341.
- [40] MA T X, FAN Q S, ZHANG C Z, et al. Flexural wave energy harvesting by the topological interface state of a phononic crystal beam[J]. Extreme Mech Lett, 2022, 50: 101578.
- [41] LAN C B, HU G B, TANG L H, et al. Energy localization and topological protection of a locally resonant topological metamaterial for robust vibration energy harvesting[J]. J Appl Phys, 2021, 129(18): 184502.
- [42] ZHAO D G, CHEN X C, LI P, et al. Subwavelength acoustic energy harvesting via topological interface states in 1D Helmholtz resonator arrays[J]. AIP Adv, 2021, 11: 015241.
- [43] LIU C, TIAN Y P, ZHANG Y Q, et al. Tunable topological edge states and energy harvesting of piezoelectric-inductance phononic crystals based on Su-Schrieffer-Heeger model[J]. Phys Lett A, 2024, 506: 129470.
- [44] CHAPLAIN G J, DE PONTI J M, AGUZZI G, et al. Topological rainbow trapping for elastic energy harvesting in graded su-Schrieffer-Heeger systems[J]. Phys Rev Appl, 2020, 14(5): 054035.
- [45] BU X Z, HUANG H B, CHEN J J, et al. Topological rainbow trapping of plate-mode waves based on 1D gradual phononic crystal slabs[J]. Phys Status Solidi RRL, 2025, 19(1): 2400205.
- [46] TANG X L, ZHANG X Q, MA T X, et al. Topological rainbow trapping and broadband piezoelectric energy harvesting of acoustic waves in gradient phononic crystals with coupled interfaces[J]. Appl Acoust, 2025, 233: 110630.
- [47] CHEN Y F, FAN L, ZHU J, et al. An all-polarized elastic topological metamaterial for ultrasonic energy conveying and harvesting[J]. Adv Funct Mater, 2025, 35(3): 2413285.
- [48] WU X Y, JIN Y B, KHELIF A, et al. Topological surface wave metamaterials for robust vibration attenuation and energy harvesting[J]. Mech Adv Mater Struct, 2022, 29(26): 4759–4767.
- [49] CHEN Z G, XU C Q, AL JAHDALI R, et al. Corner states in a second-order acoustic topological insulator as bound states in the continuum[J]. Phys Rev B, 2019, 100(7): 075120.
- [50] FAN L, CHEN Y F, AN S W, et al. Local-resonance-induced dual-band topological corner states of flexural waves in a perforated metaplate[J]. Phys Rev Appl, 2023, 19(3): 034065.
- [51] ZHOU L Y, YU W J. Visualization of rainbow trapping effect in higher-order topological insulators[J]. Phys Rev B, 2023, 107(17): 174105.
- [52] ZHANG G, FU S Y, GAO Y W. Energy harvesting based on corner states with tunable elastic higher-order topological insulators[J]. Acta Mech Sin, 2026, 42(5): 425476.
- [53] FAN L, CHEN Y F, ZHU J, et al. Multiband large-area ultrasonic energy conveying and harvesting via a phononic topological heterostructure[J]. Nano Energy, 2025, 145: 111433.
- [54] WANG M D, ZHOU W Y, BI L Y, et al. Valley-locked waveguide

transport in acoustic heterostructures[J]. Nat Commun, 2020, 11: 3000.

作者贡献声明:

温雪昀: 论文构思、调查研究、分析/综合数据并推导结论、绘制图表、撰写初稿

石子健: 审阅与修订

郭佳敏: 审阅与修订、绘制图表

顾仲明: 审阅与修订、监督指导

陈亚枫: 论文构思、监督指导、审阅与修订

祝捷: 提供资源、获取资助、项目管理、监督指导

Piezoelectric Energy Harvest Based on Acoustic Topological Insulators

WEN Xueyun, SHI Zijian, GUO Jiamin, GU Zhongming, CHEN Yafeng, ZHU Jie
(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Extended Abstract

Piezoelectric vibration energy harvesting (VEH) technology, which converts ubiquitous ambient vibrations into electrical energy, provides a reliable solution for designing advanced self-powered sensors. It holds a significant application value in self-powered systems for the Internet of Things (IoT), Wireless Sensor Networks (WSNs), and structural health monitoring. The efficiency of piezoelectric energy conversion depends heavily on the host structure's capability to capture vibrations. Acoustic topological insulators (ATIs) support highly localized and robust topological states, exhibiting superior and stable vibration-trapping characteristics. Consequently, the development of piezoelectric VEH technology based on ATIs has attracted recent attention. This review represents recent progress in the field, focusing on piezoelectric VEH technologies based on strong localization mechanisms (*i.e.*, topological boundary states, higher-order topological corner states, and bound states in the continuum (BICs)). Furthermore, this review highlights representative work on multi-modal collaborative VEH strategies for broadband response and high-throughput VEH based on large-area topological states. Finally, some related challenges are briefly discussed, and potential future research directions are envisioned.

Summary and prospects This review introduces recent progress on the field of VEH based on ATIs. It respectively introduces VEH implemented in airborne sound and elastic wave systems based on topological edge states. VEH is realized due to the field enhancement effects induced by zero-dimensional localized states such as higher-order topological corner states and BICs. The multi-modal collaborative energy harvesting mechanisms orient toward broadband and multi-frequency responses, further extending to high-throughput VEH based on large-area topological interface states. These studies demonstrate that ATI-based systems exhibit remarkable design flexibility, while maintaining both high energy conversion efficiency and strong robustness. The topological rainbow trapping effect is excited and the bandwidth limitations of conventional devices are overcome *via* introducing strategies such as structural modulation and multimodal coupling. On this basis, large-area topological waveguide states are used to substantially enhance energy transmission throughput, ultimately achieving comprehensive performance optimization in terms of high efficiency, broad bandwidth, and large capacity. However, the existing research on ATI-based VEH still has several limitations. First, the existing studies mainly focus on the medium- and high-frequency range, whereas low-frequency (≤ 100 Hz) VEH remains largely at the stage of theoretical exploration. The vibrations in everyday environments are predominantly low-frequency, a further research on low-frequency energy harvesting is still needed. Second, the evaluation of energy conversion efficiency in this field still lacks a unified standard framework. The electrical output metrics reported in previous studies, such as maximum voltage, output power, or amplification factor, are constrained *via* differing experimental testing benchmarks and therefore cannot be directly compared, which remains one of the key challenges to be addressed in the future VEH research. Meanwhile, most of the existing devices are still at the proof-of-concept stage and remain some distance away from practical engineering implementation and industrial application. Although topological states provide a relatively robust platform for energy transport, the existing studies on the stability of energy harvesting systems are still largely limited to structural defects and geometric perturbations. Systematic investigations into the effects of real environmental factors (*i.e.*, temperature, humidity, load variation, and long-term operating conditions) on the performance of topological structures are still lacking.

Keywords acoustic topological insulators; acoustic metamaterials; piezoelectric vibration energy harvesting; energy localization