

引用格式:何流,刘薛峰,熊顺康,等.面向智能响应的多功能机械超材料设计与应用[J].材料工程,2026,54(2):28-39.  
HE Liu, LIU Xuefeng, XIONG Shunkang, et al. Design and applications of multifunctional mechanical metamaterials for intelligent response[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(2): 28-39.

# 面向智能响应的多功能机械超材料设计与应用

何 流,刘薛峰,熊顺康,邓 畅,杨 磊\*,闫春泽,史玉升

(华中科技大学 材料成形与模具技术全国重点实验室,武汉 430074)

**摘要:**机械超材料通过结构单元拓扑设计、多材料配合与尺度协同设计,使材料在宏观层面获得超越天然材料的力学性能调控能力,为突破自然材料约束提供了新思路,在航空航天、深海探测和智能装备等领域具有广阔的应用前景。近年来,随着物理原理创新、设计方法优化和制造方法升级,机械超材料正由单一性能设计,向多功能集成、可编程响应与外场调控方向演进。多功能机械超材料不局限于实现低频减振、负泊松比、各向异性等单一性能,还能通过结构重构实现力-位移曲线、泊松比和波传播行为的动态调节,打破了机械超材料设计后性能固定的局限性。本文系统回顾了面向智能响应的多功能机械超材料的研究进展与发展趋势,重点聚焦准零刚度、负泊松比、带隙调控等功能的机械超材料实现可编程设计与外场驱动多模态的研究现状,并对该项技术的未来发展趋势提出了设想,包括研究应聚焦于高效集成的单胞设计、多物理场耦合下的原位调节模拟与精确设计,基于新型物理机制、智能材料与先进制造技术推动机械超材料从被动设计走向主动智能,实现其在复杂工况下的广泛应用。

**关键词:**机械超材料;多功能设计;可编程超材料;多模态;多物理场耦合;准零刚度

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000338 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000338

**中图分类号:** TB34;TB381 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)02-0028-12

## Design and applications of multifunctional mechanical metamaterials for intelligent response

HE Liu, LIU Xuefeng, XIONG Shunkang, DENG Chang, YANG Lei\*, YAN Chunze, SHI Yusheng

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Mechanical metamaterials achieve extraordinary mechanical properties beyond those of natural materials by leveraging structural topology, multi-material integration, and multiscale design. These artificial systems offer promising solutions to overcome the intrinsic limitations of conventional materials, enabling their application in demanding fields such as aerospace, deep-sea exploration, and intelligent equipment. In recent years, driven by innovations in physical mechanisms, design strategies, and manufacturing techniques, the field has rapidly evolved from focusing on single-function materials to multifunctional, programmable, and stimuli-responsive systems. Unlike traditional metamaterials with static and singular mechanical responses such as low-frequency vibration isolation, negative Poisson's ratio, or directional stiffness, multifunctional mechanical metamaterials enable dynamic control of force-displacement behavior, Poisson's ratio, and wave propagation through structural reconfiguration. This review summarizes recent advances in the design and application of multifunctional mechanical metamaterials with intelligent responsiveness. We focus on the development of quasi-zero stiffness structures, auxetic systems, and bandgap-tunable lattices, emphasizing their programmability and multimodal responses under external fields. Finally, future perspectives are discussed, including the need for highly integrated unit cell designs, *in-situ* adaptive modeling under multiphysics coupling, and the exploration of novel physical principles, smart materials, and advanced manufacturing technologies. These

efforts aim to shift the paradigm of mechanical metamaterials from passive architectures to active, intelligent systems suitable for complex service environments.

**Key words:** mechanical metamaterial; multifunctional design; programmable metamaterial; multimodal; multiphysical coupling; quasi-zero stiffness

随着航空、航天、深海探测等高端装备的快速发展,服役环境日益复杂苛刻,结构构件需在低质量、高载荷、多场耦合作用下稳定运行。这对材料提出了前所未有的多重性能要求,如高比强度、高能量吸收、各向异性调控及多功能响应等<sup>[1-2]</sup>。然而,自然材料的微观结构是固定的,在需要同时满足结构性能和功能响应等多维耦合需求的特殊工况下,其性能调控空间受到限制,逐渐暴露出能力瓶颈<sup>[3]</sup>。为了实现复杂构件在性能、形态与功能上的进一步提升,需要建立一种具备高度设计自由度的人工材料体系,突破自然材料的固有限制。在此背景下,机械超材料从结构设计角度出发,作为一类通过拓扑设计获得特定力学性能的人造材料体系,近年来迅速崛起<sup>[4]</sup>。其核心思想是通过精细设计单元结构,实现对宏观力学行为的精准调控,使材料在力学性能上超越自然材料的限制<sup>[5-6]</sup>。进入21世纪以来,微纳加工与增材制造技术的迅猛发展打破了传统制造在制造复杂结构上的限制,使机械超材料的制造和实验验证可以更方便、更高效地实现<sup>[7]</sup>。选区激光熔化<sup>[8]</sup>、数字光处理<sup>[9]</sup>及多材料3D打印<sup>[10]</sup>等方法的出现,使从微米级单元到宏观构件的复杂结构设计成为现实,推动了设计-制造-性能一体化路径的形成。

在早期研究中,轻质高强是机械超材料研究的热门方向,通过优化结构单胞的形状、连接方式与几何参数,实现在低相对密度下的刚度和强度最大化,从而接近或超越天然材料在力学性能上的理论极限<sup>[11]</sup>。迄今为止,这类研究已经提出了大量优秀设计,例如,面向高比强度应用的八面体点阵结构<sup>[12]</sup>、通过弯剪耦合提升刚度的剪切强化超材料<sup>[13]</sup>,以及拓扑优化驱动的轻质高强结构<sup>[14]</sup>。另一类研究则聚焦于实现反常规力学行为,如负泊松比<sup>[15-16]</sup>、负体积模量<sup>[17]</sup>、非对称机械波传播<sup>[18]</sup>等。这些反常规性拓宽了超材料的应用边界,为解决工程中“轻量化与强度”、“刚度与隔振”之间的固有矛盾开辟了新的解决思路<sup>[19-20]</sup>。经过几十年的研究,实现反常规力学行为的功能机械超材料的技术已相对成熟,其创新方式一般可归纳为物理原理创新<sup>[21]</sup>、设计方法优化<sup>[14,22-23]</sup>与制造方法升级<sup>[24-25]</sup>,这些创新带来了各式各样的独特结构(图1左所示)。目前,功能性机械超材料的研究已不满足于实现单一的力学性能,为了满足机械系统多工况下的

不同需求<sup>[26-28]</sup>,机械超材料正向多功能化、器件化、集成化的方向快速发展。如图1右所示,新一代的机械超材料研究涉及可编程的力学响应结构设计<sup>[29]</sup>,以及在磁、电、热等多种外场驱动下实现结构重构和功能切换<sup>[30-31]</sup>。这类面向智能响应的多功能超材料在制备完成后能够响应环境变化并手动或自动调整性能状态,具备在多工况、多任务场景下执行力学与功能双重角色的潜力。例如,在智能隔振平台中,材料可在振动频率变化时自适应调整隔振性能;在柔性电子或航天展开结构中,也可通过外场触发实现可控变形与性能重构。本文综述了国内外面向智能响应的多功能机械超材料的发展现状,分别介绍了经典单功能超材料的设计原理、多功能超材料的可编程力学响应调控策略以及通过力、热与电磁场等外场驱动变形的性能调控策略,并在此基础上讨论了该领域的主要挑战与未来方向。

## 1 单功能机械超材料近期取得的重要进展

### 1.1 准零刚度超材料

在高精尖装备的服役过程中,如何有效抑制低频振动,是影响系统稳定性与可靠性的关键问题之一。大多数被动减振方法通常采用基于弹簧-质量-阻尼系统的线性隔振器,但此类方案受限于阻尼减振机制:阻尼系统只能在固有频率约 $\sqrt{2}$ 倍以上的频段内有效减振,而若需降低固有频率,则势必牺牲结构刚度,从而难以兼顾承载能力与低频隔振性能。

准零刚度(quasi-zero stiffness, QZS)结构作为一类非线性隔振超材料,突破了传统线性隔振器隔振频段与承载性能之间的矛盾<sup>[32]</sup>。图2<sup>[33]</sup>为QZS结构特性与典型模型示意图,如图2(a)所示,QZS结构的力-位移曲线中通常包含一段“平台段”,该区间内的动态刚度(即力-位移曲线上点的切线斜率)接近零,而静态刚度(由与原点连线斜率决定)仍可维持在较高水平。这种“低动态-高静态”刚度的非线性特性使得结构在维持高承载能力的同时,具备极低的固有频率,从而实现有效抑制低频振动的有效抑制。QZS结构的一般构造原理为将正刚度与负刚度元件并联,其中负刚度组件可通过斜置弹簧、屈曲梁等形式实现。图2(b),(c)展示了实现QZS结构的经典三弹簧模型以及对应的结构设计。早期的

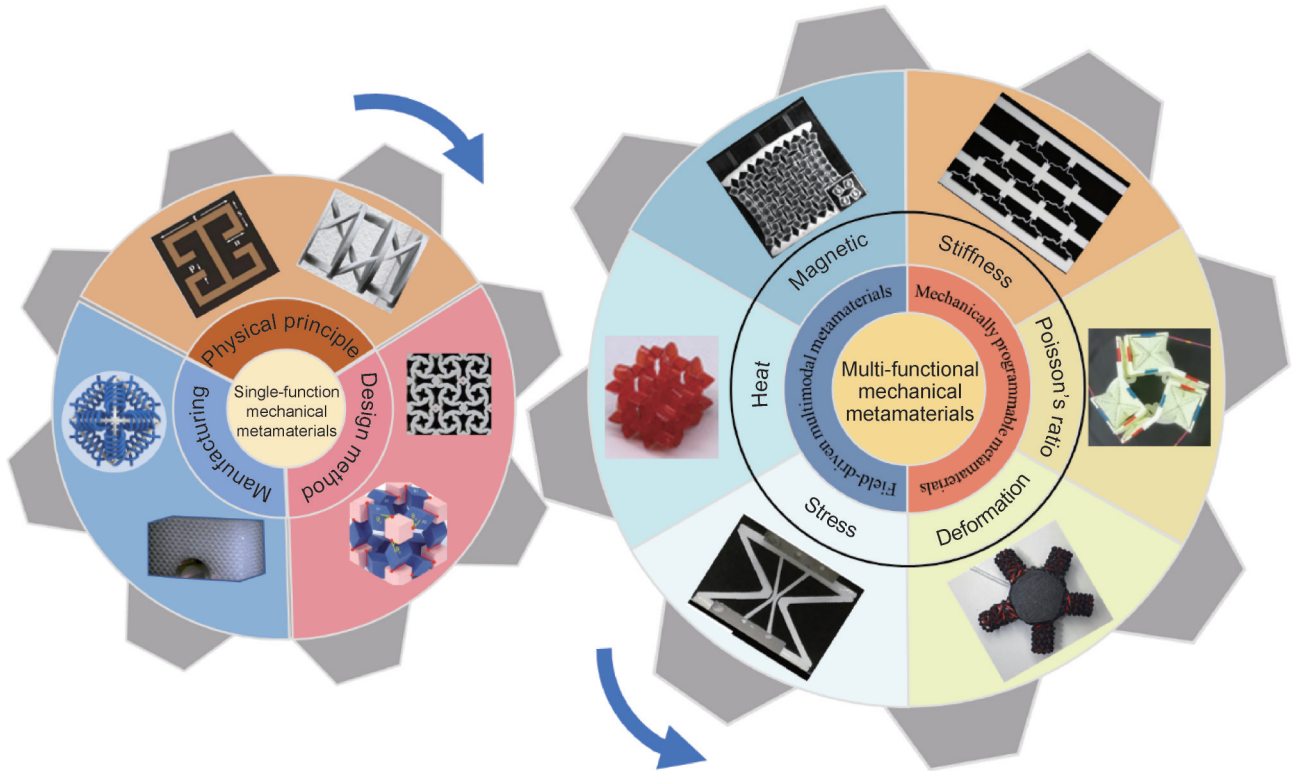


图1 机械超材料的发展趋势与研究热点

Fig.1 Development trends and research hotspots of mechanical metamaterials

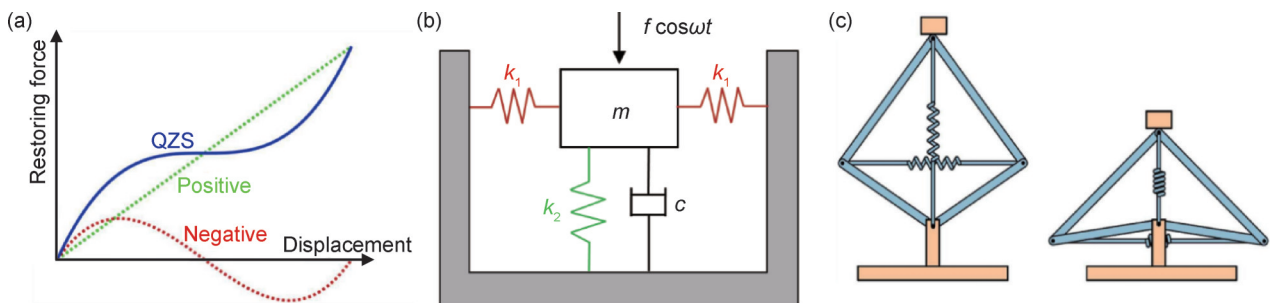


图2 QZS结构特性与典型模型示意图<sup>[33]</sup>

(a)应力平台;(b)经典三弹簧模型;(c)简单三弹簧式QZS结构设计

Fig.2 Characteristics and typical models of QZS structures<sup>[33]</sup>

(a)force plateau;(b)classical three-spring model;(c)simplified three-spring QZS structural design

QZS结构由于需要正负刚度结构并联,存在体积大的问题。近年来,Liu等<sup>[34]</sup>受柔性机构启发,通过对弯曲梁进行优化设计,可直接定制QZS结构的非线性力学行为,由于避免了单独设计正负刚度结构,显著简化了QZS结构的构造复杂性。然而这种弯曲梁的设计相对复杂,难以高效率地根据所需应力平台设计具备相应曲线的弯曲梁,因此有研究者将增材制造与机器学习方法相结合,提出了一种基于力-位移响应平台特征的数据驱动型设计策略,可以大大提升QZS超材料的设计效率<sup>[35]</sup>。

### 1.2 惯性放大减振超材料

基于波动控制原理的机械超材料近年来受到广泛关注,尤其是以声子晶体为代表的一类周期性结

构。声子晶体因其固有的带隙特性,能够在特定频段内对弹性波实现有效的反射与隔离<sup>[17,36-37]</sup>。其带隙形成的主流机制包括局域共振与布拉格散射。局域共振机制依赖于主体与内部谐振子在振动过程中的相反运动,从而产生相消干涉,其宏观上表现为等效负密度或负模量,而布拉格散射机制则源于弹性波波长与结构周期之间的关系:当波长为结构周期的整数倍时,结构内部的反射波发生干涉叠加,从而形成传播带隙。然而,为了实现低频带隙,局域共振型超材料往往需降低刚度或增加质量,布拉格散射型则需要放大单胞尺度,这导致这两种类型的超材料都存在低频减振与轻质高强不兼容的缺点。

惯性放大机制作为一种独立于上述两种机制的设计原理,为减振机械超材料提供了新的路径。其通常通过在周期结构中引入杠杆系统或多连杆机构,使结构在整体受到微小扰动时,局部结构获得显著加速度,从而放大等效质量。这种“动态惯性增强”使得超材料即使在轻质高强的前提下,也能展现低频带隙特性。尽管如此,早期研究多局限于理想化的离散弹簧模型,这些模型将超材料简化为晶体结构中的“原子”与“键”,仅考虑平移自由度,忽略了旋转等更复杂的运动形式,因此在带隙下限方面的突破受到限制。图 3<sup>[21,38]</sup>展示了间排手性结构惯性的放大原理,如图

3(a),(b)所示,Bergamini等<sup>[21]</sup>发现,采用不同取向的手性结构,通过引入压缩-扭转耦合的机制,可实现显著的惯性放大效应,并形成类似于电磁波中汤姆逊散射的波动行为。当振动通过具备压-扭耦合特性的手性单元时,将被分解为平移和旋转两个模式,若相邻两个手性单元具有相反“自旋”方向,便可在传播路径中形成相消干涉。这一机制可有效放大动态惯性,实现低频宽带带隙的形成(图 3(c))。Ding等<sup>[39]</sup>将这种类似于汤姆逊散射的机制推广到了压缩-横向位移结构,使得这种间排手性超材料的设计变得更加多样化。

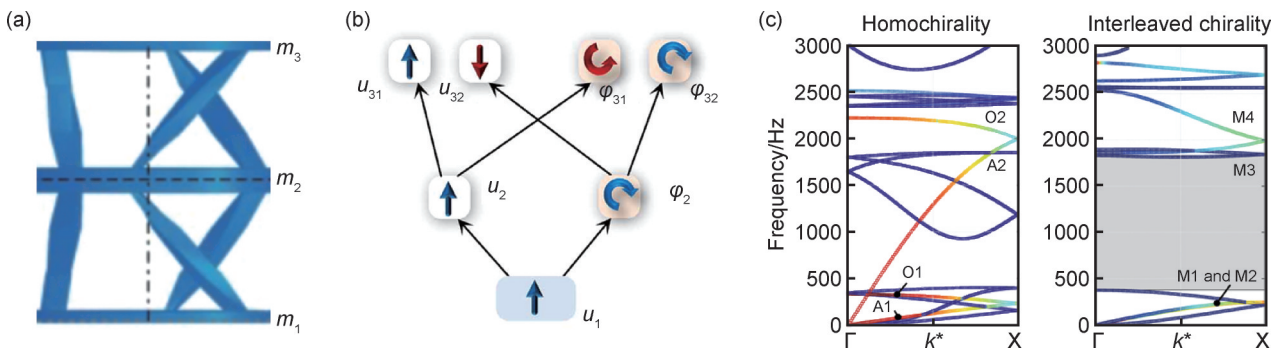


图 3 间排手性结构惯性放大原理

(a)间排手性结构<sup>[21]</sup>;(b)间排手性结构相消干涉原理<sup>[38]</sup>;(c)同性(左)与间排手性(右)带隙性能对比<sup>[21]</sup>

Fig.3 Inertia amplification mechanism of staggered chiral structures

(a)staggered chiral structure<sup>[21]</sup>;(b)destructive interference mechanism of staggered chirality<sup>[38]</sup>;

(c)bandgap performance comparison between homogeneous chirality (left) and staggered chirality (right)<sup>[21]</sup>

### 1.3 负泊松比超材料

在高精度控制和极端环境服役条件下,传统单一材料所能提供的本构响应往往难以满足装备对结构变形、各向异性响应、高能量吸收等需求<sup>[40-42]</sup>。如何实现材料响应的按需调控,已成为机械超材料设计的最重要的研究方向之一。以负泊松比结构为典型的超材料表明基于几何设计来实现所需机械响应的方法已经成为一种结构代替性能的新范式<sup>[15]</sup>。

负泊松比超材料作为最具代表性的非传统响应结构之一,其特征在于受拉或受压时在垂直方向同步伸长或收缩,从而展现出独特的变形行为和优异的能量吸收能力。这一特性使其在航空航天领域缓冲防护外壳和软体机器人中的柔性驱动等应用中展现出广阔前景。负泊松比源于单胞几何结构的特殊设计,在受力过程中可通过旋转、铰接或折叠展开等变形方式实现宏观上的负泊松比。近期,Gao等<sup>[11]</sup>提出了一种基于拉伸主导变形机制的新型负泊松比结构。研究表明,相较于以弯曲为主的传统结构,拉伸主导机制能够显著提高结构刚度。受此启发,有研究人员利

用连续碳纤维增强复合材料制备二维负泊松比结构,并通过互锁组装构建三维结构<sup>[43]</sup>。由于连续纤维增强复材具有显著的各向异性,可增强结构的拉伸主导变形模式,从而在保持高刚度的同时提升断裂伸长率,使负泊松比结构获得更高的能量吸收。这一新兴的制造路径推动了负泊松比结构高性能化与工程应用。

此外,Zhang等<sup>[44]</sup>将旋转单元的构型思路进一步拓展,提出了一种基于可分离接头与结构自桥接的新型负泊松比超材料。这类结构在设计时预留狭缝,当结构受压时狭缝发生接触并改变拓扑连接关系,从而实现泊松比的突变调控。该机制突破了传统理论对结构泊松比的上限约束,使得结构表现出超大正泊松比或通过非对称构型产生非互易泊松响应,在设计层面上极大拓展了机械超材料的泊松比设计自由度与功能表现空间,为许多可编程响应的变泊松比材料设计开拓了思路。

### 1.4 五模超材料

在三维弹性理论中,材料的力学响应可由一个对称的 $6 \times 6$ 弹性张量表征。一般而言,该弹性张量具有

6个特征向量及对应的特征值,分别对应材料在6种独立变形模式下的响应能力。材料的应力-应变关系可转化为这6个特征向量与特征值乘积之和的形式,物理上等价于将任意变形过程视为这6种基本变形模式的叠加。如果某一特征值为零,则意味着材料无法承受对应方向上的变形。五模材料是一类具有5个零特征值的机械超材料,表现为仅能有效承受体积压缩而几乎不具备剪切承载能力,其等效力学性能近似于流体,因此也被称为“金属水”。这种液体般的力学行为使五模材料具有体积波与剪切波的解耦特性,最具代表性的应用便是应力隐身斗篷,即通过调控材料刚度分布实现对弹性波的空间重构与屏蔽<sup>[45]</sup>。五模单胞

通常由细长梁按照特定角度构成,通过调控其细长比和连接角度实现等效模量比的调节<sup>[46]</sup>。为实现体积波与剪切波的近似解耦,需要极高的长径比,得益于增材技术和微纳制造技术的发展,五模结构由理论变为现实。图4展示了异种互模结构,如图4(a),(b)所示,传统设计多依赖于菱形晶格结构<sup>[47]</sup>。Li等<sup>[48]</sup>基于基结构方法系统挖掘出24类新型五模晶格,涵盖各向同性和正交各向异性等类型,显著拓展了五模材料的设计空间。图4(c)的力学性能模拟结果表明,相比传统菱形晶格,这些新结构在保持五模特性的同时可实现更高的等效体积模量,从而提升材料的抗压能力。

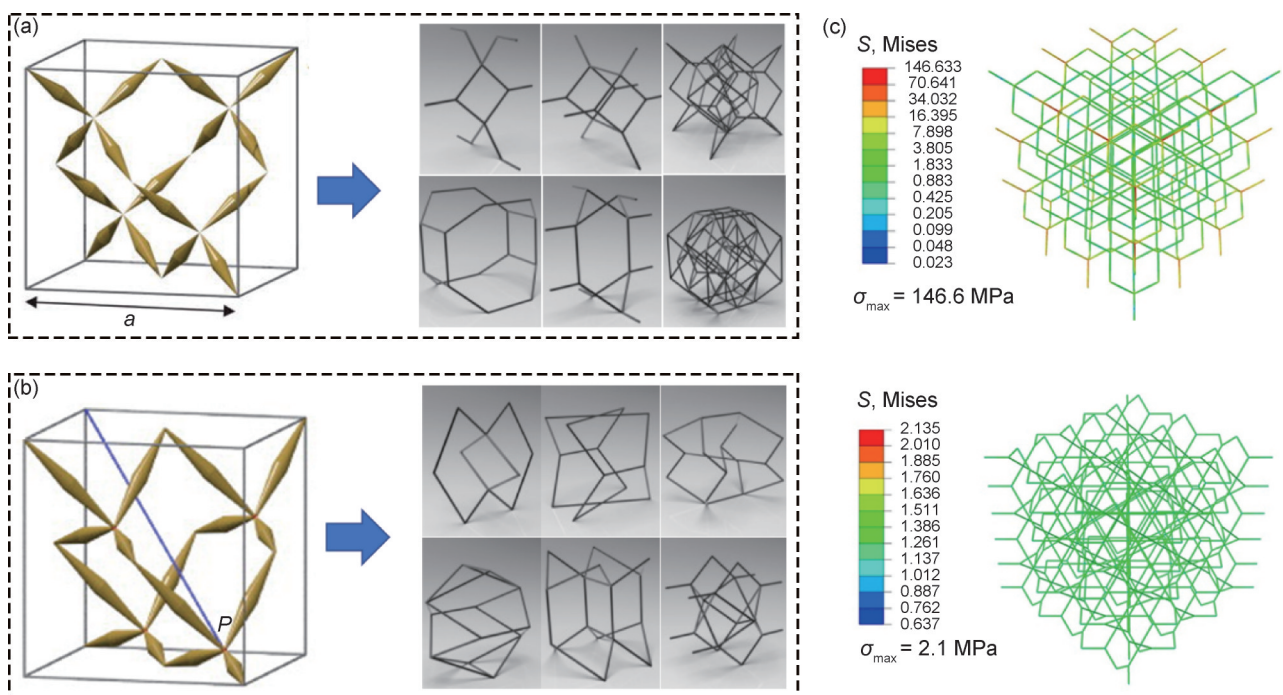


图4 异种五模结构

(a)经典菱形单胞各项同性(左侧)和各向异性(右侧)五模结构<sup>[47]</sup>; (b)异种各向同性(左侧)和异种各向异性(右侧)五模单胞<sup>[48]</sup>;

(c)各向同性菱形与异种五模结构力学性能对比<sup>[48]</sup>

Fig.4 Heterogeneous pentamode structures

(a) classic diamond-shaped isotropic(left) and anisotropic(right) pentamode unit cell<sup>[47]</sup>; (b) heterogeneous isotropic(left) and anisotropic(right) pentamode unit cell<sup>[48]</sup>; (c) mechanical performance comparison between isotropic diamond and heterogeneous pentamode structures<sup>[48]</sup>

在工程应用中,由于实际结构往往为有限周期,He等<sup>[49]</sup>研究发现边界单胞在不对称受力作用下易产生表面弯曲模态,显著影响其对弹性波的调控效果,并在此基础上提出了一种基于应变能的边界单胞优化设计方法,有效减弱了表面弯曲波对隐身能力的干扰。

综上所述,随着研究者对反常规机械超材料的持续探索,越来越多新颖的物理机制被提出,用以突破传统结构中承载与功能之间的固有矛盾。同时,

拓扑优化、机器学习等先进设计策略的引入<sup>[3]</sup>,不仅显著拓展了超材料结构的设计空间,也大幅提升了性能定制的效率与精度。随着制造技术的不断进步,尤其是高性能增材制造技术以及微纳制造技术的发展,具有复杂跨尺度几何构型与各向异性的高性能超材料从概念走向实际成为可能。值得指出的是,这些研究进展也为可编程结构、多稳态超材料这类智能响应超材料的发展奠定了基础,促成了机械超材料从静态性能优化向可编程响应与智能控制范

式的转变,为高端装备与柔性智能系统提供关键技术支撑。

## 2 可编程响应的机械超材料

大多数机械超材料虽然能展现负泊松比、负刚度等奇特静态性能,但响应行为通常是预设的、不可变的,难以适应复杂多变的应用环境。相比之下,形状记忆合金等智能材料虽具刺激响应性,但是变形路径固定、缺乏灵活性。因此,研究人员提出了一种可编程响应的机械超材料(programmable mechanical metamaterials)。其核心设计理念是通过多模态的机械逻辑单元或特定可变形结构(铰链、折纸等)使超材料在成形后仍然能够手动切换形状,实现对力-位移曲线、泊松比、变形行为等力学性能的动态调控,使材料展现出多样化的响应行为和功能模式。这种可编程性是推动超材料从静态结构向智能器件演进的重要方向之一<sup>[50-52]</sup>。

### 2.1 可编程力-位移曲线

力-位移曲线是表征结构弹性模量、能量吸收等关

键力学特性的核心曲线。通过构建双稳态结构形成机械单元并进行模块化堆叠,是实现材料力-位移响应定制的重要方法之一。该思路可与 QZS 结构相结合,形成多个应力平台,以满足多工况下的减振需求。

图 5 描述了一种基于楼梯策略构建的可编程 QZS 结构,可以实现三个可定制的应力平台阶段,每个阶段对应不同的减振功能。如图 5(a), (b) 所示, Lin 等<sup>[53]</sup>提出了一种结合双稳态与 QZS 特性的机械单元,具有一高一低两个应力平台,可分别对应“1”和“0”双模态。在此基础上,他们采用了“楼梯策略”来定制目标应力-应变曲线。“楼梯策略”是指用多个阶跃函数逐层逼近目标力-位移响应,每一次阶跃对应整层的单元完成充分变形,阶跃值由该层单元的加权应力决定。有研究通过串联与并联这些基础构建模块,实现了具有多个稳定应力平台的复合力-位移曲线(图 5(c))<sup>[54]</sup>,并在此基础上发展出三级构建策略,构建具有可调载荷平台数量与力学属性的多功能超材料<sup>[55]</sup>。同时,研究者还提出了两种可逆机制,可在不同构型之间灵活切换,实现图 5(d)<sup>[55]</sup>中的多模式振动隔离能力。

除减振功能外,类似的模块化思路也被拓展到其

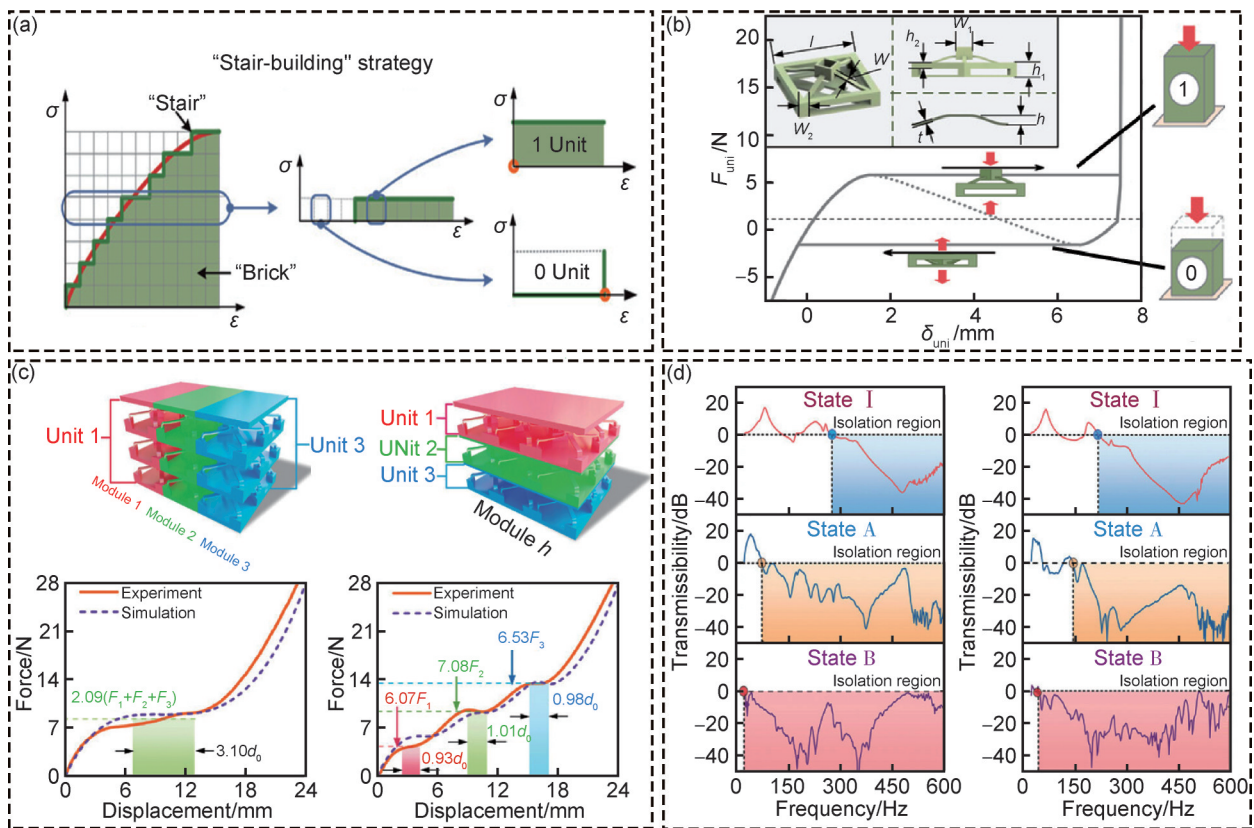


图 5 可编程 QZS 结构

(a) 楼梯策略<sup>[53]</sup>; (b) 具有双稳态的机械单元<sup>[53]</sup>; (c) 串联与并联 QZS 结构<sup>[54]</sup>; (d) 可编程 QZS 结构的多模式振动隔离能力<sup>[55]</sup>

Fig.5 Programmable QZS structures

(a) staircase strategy<sup>[53]</sup>; (b) bistable mechanical unit<sup>[53]</sup>; (c) series and parallel QZS structures<sup>[54]</sup>;

(d) multi-mode vibration isolation capability of programmable QZS structure<sup>[55]</sup>

他类型的功能性机械超材料设计中。例如,有研究设计了一种基于模块化手性单元的可编程超材料,通过特殊的夹具连接,在压缩过程中可实现多种可定制的弹性应变阶段,包括扭转、收缩和高度调节等,每种变形阶段对应不同的承载能力<sup>[56]</sup>。

## 2.2 可编程泊松比

可编程泊松比超材料是指在外力作用下,其泊松比可根据应力或应变状态实现主动调控与可逆切换,从而在一个结构中实现区域性差异或时序性演化的响应行为<sup>[57-58]</sup>。与传统材料固定泊松比相比,这类结构具备更强的形变调控能力与功能适应性。

图6为固定泊松比结构与可编程变泊松比结构的对比。目前,单一泊松比结构的设计理论已经较为成熟。如图6(a),(b)所示,有研究者将拓扑优化与3D打印技术相结合,成功实现了在 $-0.8\sim 0.8$ 之间任意定制泊松比,并能在高达20%甚至更大变形范围内保

持几乎恒定的泊松比<sup>[59]</sup>。然而,可编程泊松比超材料的研究仍处于发展初期,相关设计理论和工程实现尚有广阔空间。

从设计角度出发,Hu等<sup>[60]</sup>基于折纸结构提出了一种超大负泊松比连续可调的超材料。其核心思路在于将具有不同刚度与弹性特性的板块进行组合(图6(c)),并根据组合结构的各向异性可进一步组成一种变形模式可调的环形单元,该单元可在0和 $-1$ 泊松比之间实现可调切换(图(d))。如图6(e),(f)所示,通过周期性排列这些功能单元,构建出的超材料可以在 $-0.219\sim -1.853$ 范围内连续微调负泊松比。此外,还有研究基于截断正八面体张拉结构设计出一种具有连续可编程的正负可调泊松比的机械超材料。通过调控结构的初始扭转角以及弦与棒的刚度比,该结构的泊松比能够在较宽范围内实现正负方向( $-0.2\sim 0.33$ )的动态调节<sup>[61]</sup>。

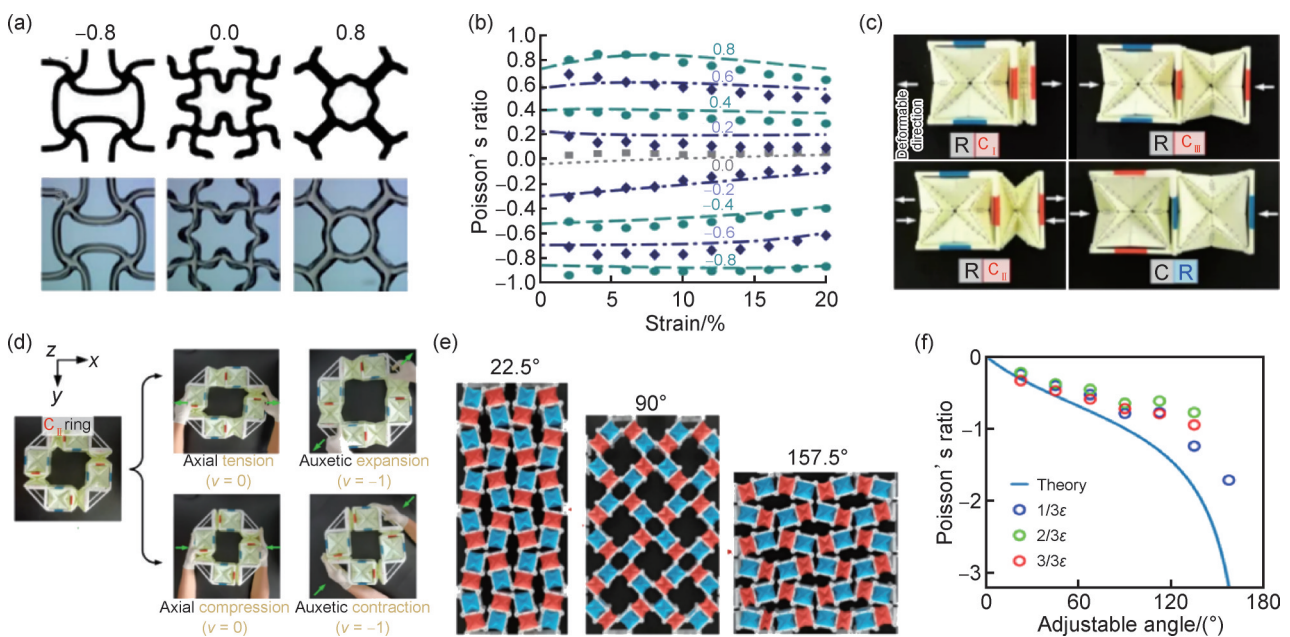


图6 可编程泊松比超材料

(a),(b)静态泊松比结构及其压缩过程中泊松比变化<sup>[59]</sup>;(c)折纸超材料弹性与刚性单元<sup>[60]</sup>;  
(d)折纸超材料负泊松比实验原理<sup>[60]</sup>;(e)可编程泊松比折纸材料<sup>[60]</sup>;(f)单元夹角与泊松比关系<sup>[60]</sup>

Fig.6 Programmable Poisson's ratio metamaterials

(a),(b)static Poisson's ratio structures and Poisson's ratio variation during compression<sup>[59]</sup>;(c)origami metamaterials with elastic and rigid units<sup>[60]</sup>;(d)experimental principle of negative Poisson's ratio in origami metamaterials<sup>[60]</sup>;  
(e)programmable Poisson's ratio origami materials<sup>[60]</sup>;(f)relationship between unit cell angle and Poisson's ratio<sup>[60]</sup>

## 2.3 可编程变形

可编程变形是实现软体机器人智能响应与多功能复杂行为的关键技术之一,常见于触手机器人的抓取、软体爬行机器人的蠕动爬行等应用中<sup>[62-63]</sup>。其核心在于通过结构设计和材料响应,实现对变形路径、幅度与模式的精准调控。这类超材料通常融合了非线性

性几何构型、局部各向异性单元以及多尺度结构协同机制,以实现高度的变形可编程性和功能可集成性。为应对多样化场景下的功能需求,研究者提出了多种富有创造性的结构设计思路,推动了这一领域的发展。

在结构设计层面, Lee等<sup>[64]</sup>提出了一种基于支柱支撑的拉胀结构,他们利用3D打印制造出软硬材料

协调分布的拉胀结构,通过调节几何构型、密度、配位数等多重设计参数,该结构的变形具有高度可编程性。这种结构-功能深度耦合的拉胀超材料,为三维软体机器人提供一种自适应解决方案。而Lee等<sup>[65]</sup>受折纸结构启发,开发出一种具有弯曲折痕的折纸超材料。该结构具备高度可控的可逆变形能力,同时表现出显著的超弹性响应特性,在外力作用下几乎可以完全压缩而无永久形变。这种性能突破了传统蜂窝结构与直线折纸拓扑的变形极限,为可重复使用的智能结构提供了新路径。

得益于新的制造工艺,可编程变形超材料可以实现更精细的局部响应调控,Xin等<sup>[66]</sup>利用4D打印技术制备了一种基于“机械像素阵列”设计的拉伸-扭转耦合超材料,以螺旋微结构的形式实现了模块化像素单元的构建与组合。这种结构的可编程形变范围高达60%,还支持多种复杂力学行为的集成调控,为未来区域可定制、动态可重构的多功能智能结构提供了重要的设计基础。Wenz等<sup>[62]</sup>则是利用多材料3D打印技术使用不同硬度的有机硅油墨得到硬度可调的软体纤维,最终制造出具有编程变形模式的超材料结构。这种超材料具备类似生物肌肉的特性,能够实现可编程的收缩、膨胀与扭转运动,并展现出超过其自重50倍的抓取能力。

综上所述,可编程响应机械超材料通过结构序构设计、多模态拓扑构型与外部指令驱动控制,突破了传统超材料性能固化的瓶颈,赋予结构可调节的力学性能或多模态切换的响应能力,从而实现在制备后可主动调节力学行为以适应不同的需求。可编程响应机械超材料的兴起表明,超材料正从被动静态结构向主动、自适应、智能化方向演进。这种兼具功能性与集成性的新型超材料体系,正在深刻影响软体机器人、柔性电子以及下一代智能装备的发展路径<sup>[67]</sup>。例如,在软体抓取器中,利用结构可编程特性可以根据目标物体的形状和刚度进行自适应变形,实现对多种物品的稳定夹持,大幅提升柔性机械手的适应性与抓取效率。

### 3 外场驱动的多模态超材料

为实现力学性能的可调与多样化,另一类策略是引入外部激励以构建多模态响应行为。外场驱动型多模态超材料依赖其组成材料对特定物理场的响应特性,引入场致应变、相变或物性变化等机制,实现刚度调节、结构重构、波传播调控等多种功能的主动切换。该类超材料的显著优势在于响应快速、可远程操

控,与可编程超材料相比更强调连续的性能调节以及原位调节能力。常见的外场类型包括力场、热场与电磁场等,它们作为机械系统中广泛存在的驱动形式,各具独特的作用机制与耦合方式,可赋予超材料丰富的多模态实现路径与应用潜力。

#### 3.1 力场驱动的多模态超材料

力场驱动作为一种直接、高度可控且无需复杂设备的加载方式,在多模态超材料的形状重构与性能调控中发挥着核心作用。近年来,研究者围绕结构非线性、构件自接触<sup>[68]</sup>、失稳演化<sup>[69]</sup>等物理机制,开发出一系列基于力致响应的智能超材料。

一类型研究利用构件间自接触或屈曲引发拓扑转变,赋予材料可定制的非线性刚度响应与多稳态行为<sup>[68-70]</sup>。通过剪切、拉伸或压缩等外部力场诱导结构重构,实现了从波浪形态到规则阵列、从单稳态到多稳态、从连续响应到跳跃式转变等多种模式切换,显著拓宽了超材料在力学调谐、变形路径规划等方向的设计空间。同时,力驱动还被用于构建可控的多尺度三维形态重构平台。例如通过弹性基底上的时序加载,诱导出微米至毫米尺度的非线性屈曲变形组合,突破了传统制造方法的形貌与尺度限制,为微电子器件、柔性构件等场景提供了全新的形态构建策略<sup>[71]</sup>。此外,研究者通过结合应变调控机制与结构功能性设计,也制备了一批具备负泊松比行为与可调节带隙特性的新型压力响应超材料。典型结构如嵌套式正弦波形的负泊松比结构,在不同压缩状态下展现出可调谐带隙和应变调控性能,为多频段振动隔离奠定基础<sup>[72]</sup>。

总体来看,基于力驱动构型转变的可重构超材料体系正逐步从“结构可变”走向“功能可编”,为工程自适应、复杂工况适配与多目标性能整合提供了新的思路。

#### 3.2 热场驱动的多模态超材料

热场作为自然界中最常见且易于获取的物理场之一,因其驱动过程稳定、控制精度高、适用于多尺度系统,正逐渐成为多模态机械超材料中重要且实用的调控手段。特别是随着多材料增材制造和4D打印技术的发展,热响应结构的精细构建与多功能集成能力显著提升,不仅拓宽了热驱动超材料的设计空间,也极大增强了其在实际工程中的制造可行性与应用落地性<sup>[73]</sup>。

一类研究聚焦于热力学性能可调。例如,Fang等<sup>[74]</sup>通过在光固化前驱体中引入热响应性动态共价键实现4D打印,赋予材料对温度变化的灵敏力学响应,为构建热致编程承载能力结构提供新途径。Tao等<sup>[75]</sup>则利用形状记忆聚合物的相变行为,设计出一种4D打印的多稳态超材料。其变形和恢复可控、力学性

能可调,有效刚度可在50~70℃的温度范围内变化数十倍。在材料构筑策略上,Mueller等<sup>[76]</sup>利用多材料打印技术制备出一种由两种不同玻璃化转变温度的聚合物材料组成的超材料,并表现出可调节的机械响应,包括刚度、泊松比和变形模式,在23~100℃的温度范围内实现了刚度(44.52~3.73 MPa)与泊松比(+0.05~-0.5)的可逆调控,进一步拓展了热驱动机制在应变响应与结构性能调控中的功能边界。

另一类设计着眼于热致变形机制,重点关注结构形态与热致驱动力大小的调控。Zhang等<sup>[77]</sup>开发的热响应金属条结构,在加热5 s内可实现设计应变的70%~80%,最大热应变达30%,相较于传统双金属结构提升了100~200倍。同时,该结构可输出相当于自重26倍的热致驱动力,并在宽频范围内实现带隙调控,表现出优异的热致力学与波动响应调节能力。Gu等<sup>[78]</sup>构建了一种双金属折叠单元,融合了折纸结构的协同运动与材料热膨胀差异,根据此双金属折叠单元设计的手性结构可实现 $(-2354.3\sim 3006.7)\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 的超宽热膨胀范围,并随之改变结构的带隙范围,构建出具备高精度热响应调节能力的超材料。

综上,热致可编程超材料正以其结构响应的可逆性、广谱性与功能多样性,为未来温控结构、热触发装置与环境响应型系统的构建提供坚实支撑,并加速多物理场智能结构的跨尺度集成演进。

### 3.3 电磁驱动的多模态超材料

电磁场作为一种非接触、高精度且具远程操控能力的外部激励手段,正在多模态超材料的研究中展现出独特优势<sup>[79]</sup>。凭借其对结构响应的即时调控能力,电磁驱动机制不仅扩展了超材料在结构重构、性能切换和波动控制方面的功能边界,也为智能系统的远程感知与操控奠定了基础。

在力学响应调控方面,Macrae等<sup>[80]</sup>构建的磁-力耦合超材料通过采用非对称硬磁性材料接头设计,使用硬磁软活性材料,实现了磁场方向依赖的弯曲与折叠双模态响应,在机械刚度和声学带隙等特性上实现了极大的可调性。进一步地,Carlos等<sup>[81]</sup>在这种磁-力耦合超材料中引入永磁体阵列,通过磁矩方向的空间编程,实现了结构响应在静态加载和冲击下的可逆调控与能量耗散增强,展示出电磁调控在复杂力学行为中的高度灵活性与定制性。

在其他功能调节方面,Sim等<sup>[82]</sup>实现了二维超材料在磁场作用下进行可控稳定的形态重构。这类结构在不同磁场强度下呈现出不同结构对应不同频率范围的带隙。Wang等<sup>[83]</sup>提出融合双稳态梁结构与电

磁吸收层的超材料体系。该结构不仅可通过磁驱动实现多稳态间的可逆切换,还依赖宏/微观尺度能量耗散机制获得了宽频段的电磁波吸收能力。结合数字编码策略,该设计可以实现在两个可切换的频率范围内高达90%的吸收率,为智能隐身、信号调控等复杂电磁环境下的应用提供了新思路。

综上所述,力场、热场与电磁场等外场驱动方式在多模态超材料中的应用各具特色,分别展现出结构调控的实时性、响应模式的多样性以及外部操控的便捷性。力场驱动凭借其直接性和工程适配性,广泛应用于多稳态结构与非线性刚度的调控;热场响应则借助材料内部热致相变与热膨胀机制,赋予超材料显著的变形能力与功能可重构性;而电磁场作为远程非接触调控手段,则推动了可重构超材料在多尺度领域的突破与拓展。典型如磁场驱动的声学超材料可应用于可调声屏障系统,通过调整磁场强度改变材料带隙范围,从而根据周围环境噪声的频率变化自动调整隔声性能,满足复杂交通场景下的动态降噪需求。未来,随着多物理场耦合机制的进一步发展,结合先进制造与智能材料技术,多模态外场驱动超材料将在柔性电子、微机电系统、自适应结构等前沿工程领域展现出更为广阔的应用前景与变革潜力。

## 4 未来发展趋势

机械超材料因其可通过结构设计实现超越传统材料限制的力学性能,如负泊松比、极高比强度、各向异性刚度调控等,备受研究人员关注。它们能够满足现代机械系统在轻质高强、定向刚度、抗冲击与多场耦合响应等方面的性能需求,因此被视为航空航天、智能机器人和生物医疗器械等领域的新型材料解决方案。然而,随着该领域的发展,以实现单一力学功能为目标的机械超材料研究逐渐趋于饱和,在面对复杂应用环境中对多功能协同响应与自适应调节能力的需求时,传统机械超材料已难以胜任。因此,研究者正逐步将目光转向具备外场响应、可编程行为与集成化的多功能机械超材料,以期推动机械超材料由被动响应向主动智能演化。因此,本文对机械超材料提出以下几点研究展望:

(1)智能化设计范式的转型。过去数十年,机械超材料的设计多依赖研究者的直觉与经验,结合有限的几何构型库进行探索,这种“经验驱动”模式虽在单一反常性能的开发上取得了丰富成果,但在多任务场景下逐渐显现不足。随着拓扑优化、进化算法和机器学习等智能化逆向设计方法的兴起,超材料设计正加

速向数据驱动、算法主导的范式演进。这些方法可在性能约束下自动生成复杂构型,显著拓展设计空间。然而,目前大多方法仍局限于单功能优化,难以直接应对多功能耦合与可变性能调控的需求。未来,智能化设计应突破单目标限制,迈向多功能协同优化与自适应设计,从而满足多功能机械超材料的设计需求。

(2)制造瓶颈与多尺度构筑。制造能力仍然是制约超材料走向工程化的瓶颈。近年来,多材料增材制造、微纳尺度加工与4D打印的发展,极大拓展了超材料在复杂拓扑、极端几何形貌及多相集成上的可实现性。与此同时,原子级制造(如分子束外延、原子层沉积及扫描探针操控等)作为精度最高的路径,开始在超材料中展现潜力。它能够在原子或分子尺度调控晶格应变、界面能带和缺陷分布,为力学性能优化与多场响应集成提供了新的可能。未来,实现从宏观结构构型到原子级微结构的多尺度协同构筑,将成为突破超材料制造瓶颈的关键方向。

(3)可编程超材料的机遇。可编程超材料通过结构重构或逻辑单元实现性能的主动切换,为材料提供了超越静态响应的动态可控性。但现有结构往往依赖大量辅助单元来实现模式间切换,造成在单一模态下的性能冗余,降低了紧凑性与效率。未来的突破在于构建更加轻量化、高利用率、机制巧妙的可编程超材料,使其能够在不同模态下高效发挥作用,并在集成化层面实现真正意义上的“材料即器件”。

(4)多物理场调控与多学科融合的挑战。外场驱动为超材料性能的动态调节与多模态响应提供了新手段,具备非接触、远程操控与快速响应等优势。然而,当前研究多停留在“先变形、后测试”的模式,真正能够在服役过程中实现原位精确调控的案例仍较有限。复杂多物理场耦合下的响应延迟、精度不足与可靠性问题仍是难点。未来的进展需要材料科学、力学、信息科学、物理与化学等学科的深度融合,推动实现高效、精确、可集成的多场调控,为智能化超材料的实际应用奠定基础。

总体而言,多功能机械超材料作为机械超材料领域的发展方向,已逐步展现出强大的性能集成能力与广泛的应用潜力。在构建复杂系统和智能装备日益迫切的需求驱动下,从结构设计到响应机制,从单场调控到多物理场耦合,其研究不断突破传统材料功能单一、响应静态的局限。随着材料设计方法、制造技术及设计策略的持续演进,多功能机械超材料将在工程应用与前沿科技领域发挥日益重要的作用。

## 参考文献

- [1] QIAN C, KAMINER I, CHEN H S. A guidance to intelligent metamaterials and metamaterials intelligence[J]. *Nature Communications*, 2025, 16:1154.
- [2] SURJADI J U, GAO L B, DU H F, et al. Mechanical metamaterials and their engineering applications [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(3):1800864.
- [3] MUKHOPADHYAY T, NASKAR S, DEY S. On machine learning assisted data-driven bridging of FSDT and HOZT for high-fidelity uncertainty quantification of laminated composite and sandwich plates[J]. *Composite Structures*, 2023, 304:116276.
- [4] BAUER J, MEZA L R, SCHAEGLER T A, et al. Nanolattices: an emerging class of mechanical metamaterials[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(40):1701850.
- [5] ZHOU X L, REN L Q, SONG Z Y, et al. Advances in 3D/4D printing of mechanical metamaterials: from manufacturing to applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 254:110585.
- [6] GAO J, CAO X F, XIAO M, et al. Rational designs of mechanical metamaterials: formulations, architectures, tessellations and prospects [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2023, 156:100755.
- [7] FAN J X, ZHANG L, WEI S S, et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends[J]. *Materials Today*, 2021, 50:303-328.
- [8] ZHANG L, SONG B, LIU R J, et al. Effects of structural parameters on the Poisson's ratio and compressive modulus of 2D pentamode structures fabricated by selective laser melting[J]. *Engineering*, 2020, 6(1):56-67.
- [9] ERGIN T, STENGER N, BRENNER P, et al. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths [J]. *Science*, 2010, 328(5976):337-339.
- [10] SURJADI J U, AYMOUN B F G, CARTON M, et al. Double-network-inspired mechanical metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2025, 24(6):945-954.
- [11] GAO Y, WU Q Q, WEI X Y, et al. Composite tree-like reentrant structure with high stiffness and controllable elastic anisotropy [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 206:170-182.
- [12] ZHONG H Z, DAS R, GU J F, et al. Low-density, high-strength metal mechanical metamaterials beyond the Gibson-Ashby model [J]. *Materials Today*, 2023, 68:96-107.
- [13] BERGER J B, WADLEY H N G, McMEEKING R M. Mechanical metamaterials at the theoretical limit of isotropic elastic stiffness [J]. *Nature*, 2017, 543(7646):533-537.
- [14] CARLEO G, CIRAC I, CRANMER K, et al. Machine learning and the physical sciences [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2019, 91(4):045002.
- [15] LI X, PENG W T, WU W W, et al. Auxetic mechanical metamaterials: from soft to stiff [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(4):042003.
- [16] LANG J P, JIANG W, TENG X C, et al. Assembled mechanical metamaterials with transformable shape and auxeticity [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 378:131181.
- [17] SUGINO C, LEADENHAM S, RUZZENE M, et al. On the

- mechanism of bandgap formation in locally resonant finite elastic metamaterials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120 (13) : 134501.
- [18] WU L L, WANG Y, CHUANG K, et al. A brief review of dynamic mechanical metamaterials for mechanical energy manipulation [J]. *Materials Today*, 2021, 44: 168-193.
- [19] BARRI K, JIAO P C, ZHANG Q Y, et al. Multifunctional meta-tribomaterial nanogenerators for energy harvesting and active sensing [J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106074.
- [20] JIAO P C. Mechanical energy metamaterials in interstellar travel [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 137: 101132.
- [21] BERGAMINI A, MINIACI M, DELPERO T, et al. Tacticity in chiral phononic crystals [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4525.
- [22] QIAN C, ZHENG B, SHEN Y C, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6) : 383-390.
- [23] SUN Y C, SONG K Y, JU J, et al. Curved-creased origami mechanical metamaterials with programmable stabilities and stiffnesses [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 262: 108729.
- [24] LEE J H, SINGER J P, THOMAS E L. Micro-/nanostructured mechanical metamaterials [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(36) : 4782-4810.
- [25] ÁLVAREZ-TREJO A, CUAN-URQUIZO E, BHATE D, et al. Mechanical metamaterials with topologies based on curved elements: an overview of design, additive manufacturing and mechanical properties [J]. *Materials & Design*, 2023, 233: 112190.
- [26] ZHELUDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11) : 917-924.
- [27] SINHA P, MUKHOPADHYAY T. Effective elastic properties of lattice materials with intrinsic stresses [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 173: 108950.
- [28] GHUKU S, MUKHOPADHYAY T. On enhancing mode-dependent failure strength under large deformation; the concept of anti-curvature in honeycomb lattices [J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116318.
- [29] FARZANEH A, PAWAR N, PORTELA C M, et al. Sequential metamaterials with alternating Poisson's ratios [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1041.
- [30] CUI H C, HENSLEIGH R, YAO D S, et al. Three-dimensional printing of piezoelectric materials with designed anisotropy and directional response [J]. *Nature Materials*, 2019, 18(3) : 234-241.
- [31] JIAO P C, MUELLER J, RANEY J R, et al. Mechanical metamaterials and beyond [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6004.
- [32] LIU C R, ZHANG W, YU K P, et al. Quasi-zero-stiffness vibration isolation: designs, improvements and applications [J]. *Engineering Structures*, 2024, 301: 117282.
- [33] HUA X D, WANG S L, ZHANG J C, et al. Miura-origami inspired quasi-zero stiffness low-frequency vibration isolator [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2025, 295: 110283.
- [34] LIU W L, ZHANG Q, WU L L, et al. Design of quasi-zero stiffness metamaterials with high reliability *via* metallic architected materials [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 198: 111686.
- [35] KIM H, TAWFICK S H, KING W P. Modeling and design of zero-stiffness elastomer springs using machine learning [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(12) : 2200225.
- [36] CAI R C, JIN Y B, RABCZUK T, et al. Propagation and attenuation of Rayleigh and pseudo surface waves in viscoelastic metamaterials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(12) : 124903.
- [37] BIGONI D, GUENNEAU S, MOVCHAN A B, et al. Elastic metamaterials with inertial locally resonant structures: application to lensing and localization [J]. *Physical Review B*, 2013, 87(17) : 174303.
- [38] DING W, CHEN T N, CHEN C, et al. Description of bandgaps opening in chiral phononic crystals by analogy with Thomson scattering [J]. *New Journal of Physics*, 2023, 25(10) : 103001.
- [39] DING W, CHEN T N, YU D W, et al. Isotacticity in chiral phononic crystals for low-frequency bandgap [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 261: 108678.
- [40] ZHU S W, WANG B, TAN X J, et al. A novel bi-material negative stiffness metamaterial in sleeve-type *via* combining rigidity with softness [J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113381.
- [41] XIANG X M, LU G, YOU Z. Energy absorption of origami inspired structures and materials [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107130.
- [42] HU N, BURGUEÑO R. Buckling-induced smart applications: recent advances and trends [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(6) : 063001.
- [43] ETEMADI E, ZHANG M, LI K D, et al. Load-bearing characteristics of 3D auxetic structures made with carbon fiber reinforced polymer composite [J]. *Composite Structures*, 2023, 319: 117206.
- [44] ZHANG J H, XIAO M, GAO L, et al. Self-bridging metamaterials surpassing the theoretical limit of Poisson's ratios [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 4041.
- [45] BÜCKMANN T, THIEL M, KADIC M, et al. An elastomechanical unfeelability cloak made of pentamode metamaterials [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4130.
- [46] WU S H, LUO Z, LI Z Y, et al. Topological design of pentamode metamaterials with additive manufacturing [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2021, 377: 113708.
- [47] KADIC M, BÜCKMANN T, SCHITTNY R, et al. On anisotropic versions of three-dimensional pentamode metamaterials [J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(2) : 023029.
- [48] LI Z Y, LUO Z, ZHANG L C, et al. Topological design of pentamode lattice metamaterials using a ground structure method [J]. *Materials & Design*, 2021, 202: 109523.
- [49] HE L, YANG L, CAI X, et al. Composite pentamode metamaterials for enhanced wave manipulation by asymmetric surface structure [J]. *Small Structures*, 2025, 6(9) : 2500112.
- [50] REN Z W, JI L T, TAO R, et al. SMP-based multi-stable mechanical metamaterials: from bandgap tuning to wave logic gates [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 42: 101077.
- [51] SINHA P, MUKHOPADHYAY T. Programmable multiphysical mechanics of mechanical metamaterials [J]. *Materials Science and Engineering; R: Reports*, 2023, 155: 100745.
- [52] LIANG K, WANG Y G, LUO Y J, et al. Programmable and multistable metamaterials made of precisely tailored bistable cells [J]. *Materials & Design*, 2023, 227: 111810.
- [53] LIN X, PAN F, YANG K, et al. A stair-building strategy for tailoring mechanical behavior of re-customizable metamaterials [J].

- Advanced Functional Materials, 2021, 31(37):2170276.
- [54] ZHANG Q, GUO D K, HU G K. Tailored mechanical metamaterials with programmable quasi-zero-stiffness features for full-band vibration isolation [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(33):2101428.
- [55] ZENG C J, LIU L W, HU Y Q, et al. Stair-stepping mechanical metamaterials with programmable load plateaus [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(49):2408887.
- [56] ZHAO T, DANG X X, MANOS K, et al. Modular chiral origami metamaterials [J]. Nature, 2025, 640(8060):931-940.
- [57] ZHANG J T, LIU H T, WANG L Y. 3D multidirectional anisotropic metastructure with programmable thermal expansion, Poisson's ratio, and Young's modulus [J]. Advanced Engineering Materials, 2025, 27(10):2500686.
- [58] TAN X J, CHEN S, WANG B, et al. Real-time tunable negative stiffness mechanical metamaterial [J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 41:100990.
- [59] CLAUSEN A, WANG F W, JENSEN J S, et al. Topology optimized architectures with programmable Poisson's ratio over large deformations [J]. Advanced Materials, 2015, 27(37):5523-5527.
- [60] HU X Y, TAN T, WANG B L, et al. A reprogrammable mechanical metamaterial with origami functional-group transformation and ring reconfiguration [J]. Nature Communications, 2023, 14:6709.
- [61] YIN X, GAO Z Y, ZHANG S, et al. Truncated regular octahedral tensegrity-based mechanical metamaterial with tunable and programmable Poisson's ratio [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 167:105285.
- [62] WENZ F, SCHMIDT I, LEICHER A, et al. Designing shape morphing behavior through local programming of mechanical metamaterials [J]. Advanced Materials, 2021, 33(37):2008617.
- [63] SCHAFFNER M, FABER J A, PIANEGONDA L, et al. 3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures [J]. Nature Communications, 2018, 9:878.
- [64] LEE H J, JANG Y, CHOE J K, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics [J]. Science Robotics, 2020, 5(45):eaay9024.
- [65] LEE T U, CHEN Y, HEITZMANN M T, et al. Compliant curved-crease origami-inspired metamaterials with a programmable force-displacement response [J]. Materials & Design, 2021, 207:109859.
- [66] XIN X Z, LIU L W, LIU Y J, et al. 4D pixel mechanical metamaterials with programmable and reconfigurable properties [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(6):2107795.
- [67] MOHAMMADI A, TAN Y, CHOONG P, et al. Flexible mechanical metamaterials enabling soft tactile sensors with multiple sensitivities at multiple force sensing ranges [J]. Scientific Reports, 2021, 11:24125.
- [68] WAGNER M A, SCHWARZ F, HUBER N, et al. Deformation-induced topological transitions in mechanical metamaterials and their application to tunable non-linear stiffening [J]. Materials & Design, 2022, 221:110918.
- [69] RAFSANJANI A, AKBARZADEH A, PASINI D. Snapping mechanical metamaterials under tension [J]. Advanced Materials, 2015, 27(39):5931-5935.
- [70] WU L, PASINI D. In situ activation of snap-through instability in multi-response metamaterials through multistable topological transformation [J]. Advanced Materials, 2023, 35(36):2370254.
- [71] FU H R, NAN K W, BAI W B, et al. Morphable 3D mesostructures and microelectronic devices by multistable buckling mechanics [J]. Nature Materials, 2018, 17(3):268-276.
- [72] HU J Y, GONG Z, LI Y L, et al. Design and optimization of a mechanical metamaterial featuring dual tunability in auxeticity and bandgap modulation [J]. Composite Structures, 2025, 360:119050.
- [73] PARK H, KWON H, AN Y S, et al. Mechanical metamaterials with thermoresponsive switching between positive and negative Poisson's ratios [J]. Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters, 2018, 12(5):1800040.
- [74] FANG Z Z, SONG H J, ZHANG Y, et al. Modular 4D printing *via* interfacial welding of digital light-controllable dynamic covalent polymer networks [J]. Matter, 2020, 2(5):1187-1197.
- [75] TAO R, XI L, WU W W, et al. 4D printed multi-stable metamaterials with mechanically tunable performance [J]. Composite Structures, 2020, 252:112663.
- [76] MUELLER J, LEWIS J A, BERTOLDI K. Architected multimaterial lattices with thermally programmable mechanical response [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(1):2105128.
- [77] ZHANG Y, JIANG W Z, PAN Y, et al. Temperature-responsive metamaterials made of highly sensitive thermostat metal strips [J]. Science Advances, 2024, 10(49):eads0892.
- [78] GU Y Q, WEI Z B, WEI G W, et al. Kirigami-inspired three-dimensional metamaterials with programmable isotropic and orthotropic thermal expansion [J]. Advanced Materials, 2024, 36(50):2411232.
- [79] GALEA R, DUDEK K K, FARRUGIA P S, et al. Reconfigurable magneto-mechanical metamaterials guided by magnetic fields [J]. Composite Structures, 2022, 280:114921.
- [80] MONTGOMERY S M, WU S, KUANG X, et al. Magneto-mechanical metamaterials with widely tunable mechanical properties and acoustic bandgaps [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(3):2005319.
- [81] PEREZ-GARCIA C, ZAERA R, ARANDA-RUIZ J, et al. Reprogrammable mechanical metamaterials *via* passive and active magnetic interactions [J]. Advanced Materials, 2025, 37(24):2412353.
- [82] SIM J, WU S, DAI J Z, et al. Magneto-mechanical bilayer metamaterial with global area-preserving density tunability for acoustic wave regulation [J]. Advanced Materials, 2023, 35(35):2303541.
- [83] WANG G, LI D W, LIAO W H, et al. Multifunctional metamaterial with reconfigurable electromagnetic scattering properties for advanced stealth and adaptive applications [J]. Advanced Materials, 2024, 36(40):2408216.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52235008)

收稿日期:2025-06-10;录用日期:2025-09-01

通讯作者:杨磊(1988—),男,副教授,博士,主要研究方向为轻量化/功能结构增材制造,联系地址:湖北省武汉市洪山区华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室(430074),E-mail:yangleihust@hust.edu.cn

(本文责编:齐书涵)