

# 2021年机械超材料热点回眸

吴玲玲<sup>1</sup>, 田小永<sup>1</sup>, 李涤尘<sup>1</sup>, 周济<sup>2\*</sup>

1. 西安交通大学制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049

2. 清华大学材料学院, 北京 100084

**摘要** 近年来, 受益于3D打印先进制造技术和机器学习设计方法的快速发展, 机械超材料的研究取得了卓越的成果, 实现了一系列自然界罕见甚至不存在的反常规、反直觉的力学性能。与自然材料不同, 机械超材料的性质主要来源于人工结构而非材料本身化学组分, 故而具有巨大的设计空间。2021年, 机械超材料领域涌现出了一批非常优秀的工作。从机械超材料的特异力学性能、智能化设计方法和基于增材制造的加工工艺3个方面回顾了2021年度的相关研究热点, 重点关注了机械超材料与机器学习、模块化设计和3D打印制造工艺的融合。

**关键词** 机械超材料; 机器学习; 3D打印

随着超材料(metamaterials)在电磁学领域的蓬勃发展, 它已不再局限于对某一特定器件的设计, 而是成为一种探索新奇性能的设计思路, 通过人工构筑单元的内部结构, 实现对超材料整体性能的调控。

在诸多超材料研究领域<sup>[1-2]</sup>, 机械超材料(mechanical metamaterials)是一个备受瞩目的方向<sup>[3]</sup>。与自然材料不同, 机械超材料并不依赖组分的化学成分, 而是严格受控于其内部的单元结构。因此, 机械超材料的设计自由度远远广于自然材料。而正是对单元结构的巨大可操作性, 机械超材料打开了一个探索特异力学性能的大门, 大大拓展了新材

料的设计空间, 催生了一系列反常规甚至反直觉的力学特性, 例如负泊松比<sup>[4-6]</sup>、负热膨胀<sup>[7-8]</sup>、超高强度和超低质量密度<sup>[9-10]</sup>、多稳态<sup>[11-14]</sup>等。因此, 机械超材料的推广应用, 对于基础研究、工程应用和人们的日常生活都有着重要的研究意义, 打破了人类对传统材料力学属性的认知局限。

基于机械超材料还可以实现可编程<sup>[15]</sup>、自决策<sup>[16]</sup>、逻辑运算<sup>[17-18]</sup>等自然材料不具备的特性。随着人类对太空、深海、核辐射等极端环境的探索不断深入, 对一种甚至多种特异力学性能的需求也愈发迫切。机械超材料已然成为探索力学世界的先行者以及促进力学与其他学科交融的催化剂。

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2021-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52003203)

作者简介: 吴玲玲, 副教授, 研究方向为具有特异力学性能的机械超材料及其智能设计, 电子信箱: lingling.wu@xjtu.edu.cn; 周济(通信作者), 教授, 中国工程院院士, 研究方向为超材料, 电子信箱: zhouji@tsinghua.edu.cn

引用格式: 吴玲玲, 田小永, 李涤尘, 等. 2021年机械超材料热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 161-167; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2022.01.010

2021年国内外对机械超材料的研究取得了非凡的成就,本文将从机械超材料的新奇力学性能、智能设计方法和增材制造工艺3个方面(图1)对2021年的相关热点工作和重要进展进行回顾,受篇幅所限,本文未能总结所有创新性成果,只筛选了部分代表性工作进行介绍。

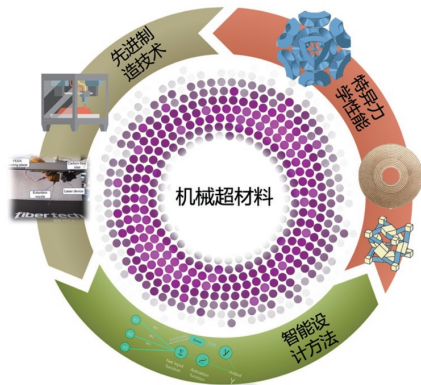


图1 机械超材料的新奇性能、智能设计方法和先进制造技术

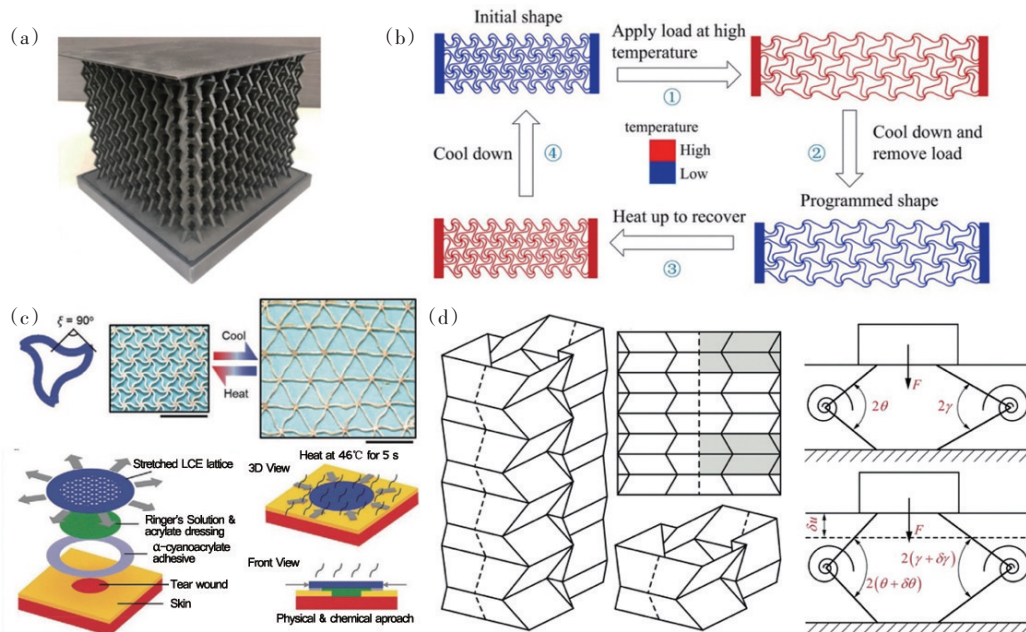
## 1 机械超材料的特异力学性能

早期的机械超材料参考电磁超材料的设计思路,通过人工设计等效力学参数,实现了可控制声波传输的声学超材料<sup>[19]</sup>,从而获得类似于电磁超材

料领域的声隐身<sup>[20-22]</sup>、声学超透镜<sup>[23]</sup>等功能。声学超材料所呈现的新奇力学性能本质上源自对其等效模量和质量密度的自由操控。事实上,除了模量和质量密度,可被人为干预的力学参数还包括等效刚度<sup>[24]</sup>、泊松比<sup>[25]</sup>、热膨胀系数<sup>[8]</sup>等,从而引发了一系列针对反常力学参数的研究。此类机械超材料往往具有一个或多个反常的等效力学参数值<sup>[4,25-26]</sup>,例如负/零刚度<sup>[24]</sup>、负泊松比和负热膨胀系数<sup>[27]</sup>等,在生物医疗、精密仪器、吸能隔振等领域都有着广泛的应用价值。

### 1.1 反常力学参数

与电磁超材料类似,反常力学参数的实现往往需要复杂的结构和多种材料的结合,采用传统的制造工艺很难实现。随着先进制造技术的发展,制造问题逐步得到解决,有关反常力学参数的超材料研究也相继从理论探索走向工程应用(图2<sup>[28-30]</sup>)。例如,采用3D打印制造工艺得到的三维负泊松比超材料可用于吸收冲击能量,从而有效提升飞行器的防撞击能力,如图2(a)<sup>[28]</sup>所示。将负泊松比结构与形状记忆材料相结合,可以实现超材料形状在制作之后的人工调整,呈现出具有特定记忆性能的4D打印效果,如图2(b)<sup>[29]</sup>所示。



(a) 可用于吸收冲击能量的三维负泊松比超材料;(b) 具有形状记忆效果的二维拉伸结构;  
(c) 负热膨胀液晶弹性体医用贴片;(d) 基于Tachi-Miura类型折纸结构的准零刚度隔振超材料

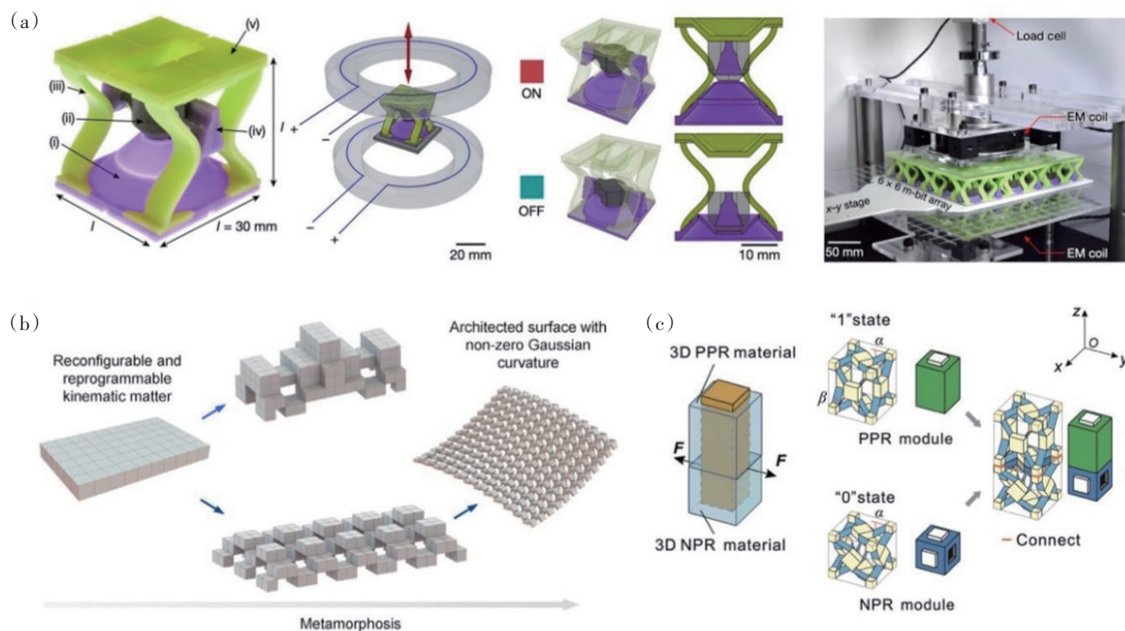
图2 具有反常力学参数的机械超材料

与负泊松比类似,负热膨胀也是反常力学参数的典型代表。采用热膨胀性能不同的2种材料相结合的方法,可以实现热膨胀系数可人工调控的机械超材料<sup>[31]</sup>。近日,清华大学研发了一种具有双轴热收缩特性的液晶弹性体负热膨胀超材料,并与医用敷料相结合,用作防护伤口的医用贴片,具有透气性强、避免疤痕生成的优点,如图2(c)<sup>[32]</sup>所示。

基于机械超材料,还可以操控结构整体的等效刚度,获得负刚度、或接近于零<sup>[33]</sup>甚至绝对等于零<sup>[24]</sup>的等效刚度,此类结构可被广泛用于工程中对低频或超低频机械振动的屏蔽,有效保护人员和精密仪器不受振动的影响。例如,采用Tachi - Miura origami折纸结构,并将其与正刚度的弹性元件结合,可以便捷地实现准零刚度隔振器,展现出了优良的低频隔振性能和灵活的可设计性,如图2(d)<sup>[30]</sup>所示。

## 1.2 可重复编码

超材料最大的特点是其单元性能可被人工调控,从而在空间分布上呈现各向异性特征。在机械超材料领域,很多形状或力学参数可被人工编码<sup>[34-35]</sup>且可重构的机械超材料相继被报导<sup>[29,36-37]</sup>。例如,瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员提出了一种具有稳定记忆性能的机械编码存储超材料,采用双稳态单元表征数据中的0和1,如图3(a)<sup>[38]</sup>所示,可以将信息存储在阵列排布的机械结构中,实现类似电子计算机的硬盘读写功能。这种机械存储方法具有安全性高、可重复擦写、能耗低等特点。形状可重构的功能也可以通过类似剪纸结构来实现,如图3(b)<sup>[37]</sup>所示。天津大学陈焱团队开发了一种具备多种变形方式的可重构单元,并以“搭积木”的方式构建三维机械超材料,实现了泊松比在 $(-\infty, +\infty)$ 范围内的独立编码,如图3(c)<sup>[39]</sup>所示。



(a) 具有稳定记忆的可重复编程机械存储超材料;(b) 受剪纸结构启发的形状可重构折纸超材料;

(c) 具有多变形路径且泊松比可人工编码功能的机械超材料

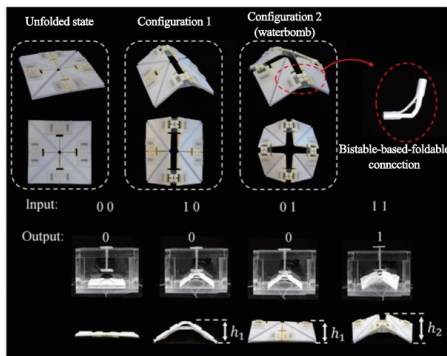
图3 可重复编程的机械超材料

## 1.3 机械计算

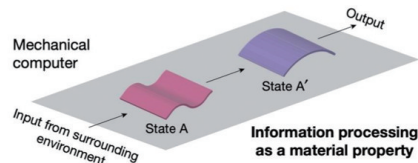
采用机械超材料可以实现具有运算和自决策能力<sup>[40]</sup>的智能结构,在太空探索和非电驱的极端环境下有着广泛的应用价值。而机械计算的基础是

基本逻辑门<sup>[17]</sup>的构筑。目前,已经有很多相关的研究成果被报道,大多基于双稳态或多稳态结构<sup>[18,41-42]</sup>,例如,采用可翻转的双稳态剪纸结构,可以实现与门(AND)、或门(OR)、非门(NOT)等基本

逻辑门的构建,如图4(a)<sup>[18]</sup>所示。基于此类机械逻辑门单元,可以实现计算模块的整合,实现机械计算体系。未来的机械超材料将被赋予信息处理和逻辑运算的能力,如图4(b)<sup>[40]</sup>所示。



(a) 采用双稳态可折叠结构实现基本逻辑门构建

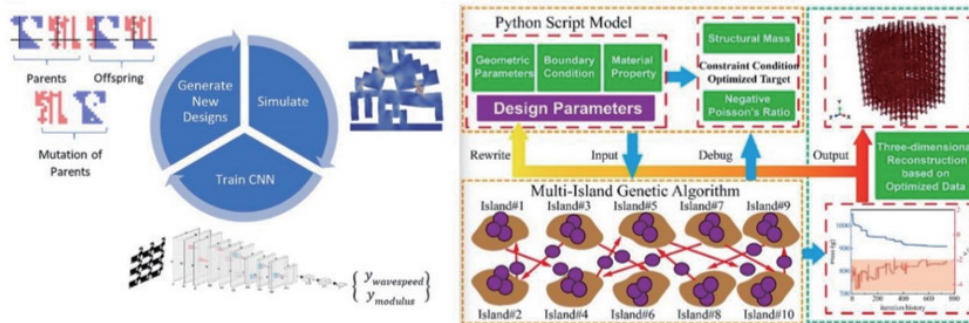


(b) 信息处理作为一种基本的材料属性服务于机械运算体系

图4 机械运算

## 2 机器学习与机械超材料

机械超材料的研究包含设计和制造2个环节。



(a) 将神经网络和遗传算法相结合

实现多目标下的最优力学性能

(b) 采用遗传算法自动搜索负

泊松比机械超材料最优参数

图5 采用机器学习算法实现机械超材料智能设计

## 3 3D 打印与机械超材料

正如前文所述,机械超材料的核心是通过人工控制内部微结构实现整体特异力学性能,因此,往

其中,设计问题是超材料的核心问题。传统的超材料设计思路需要依靠科技工作者坚持不懈的努力和灵光一现的智慧,或大规模的结构优化计算来趋近目标性能。基于设计者主观的试错法随机性较强,无法保证效率和设计可靠性,且过程冗长而枯燥;而结构优化法则常出现搜索盲区,且得到的内部结构往往过于复杂,难以实现批量生产。因此,寻求多功能超材料的自动化、模块化设计至关重要<sup>[43]</sup>。

所谓的自动化实现,即指定超材料的目标性能,以自动化的方式、快速地给出易于制造的微结构布局,这对机械超材料在工业界的推广和应用极有意义。而机器学习的迅猛发展,恰为超材料的自动化设计提供了便捷的工具,尤其是在目标功能多样化的情况下<sup>[44]</sup>,机器学习高效便捷的优势就更为明显。例如,将神经网络和遗传算法相结合<sup>[44]</sup>可以同时实现弹性模量的最大化和波速最小化的双目标功能,并可以兼顾超材料的可制造性。得到的机械超材料在冲击作用下表现出最优化的力学性能,如图5(a)<sup>[44]</sup>所示。同样,将机器学习算法引入到负泊松比超材料的设计中,可以有效搜索出最优参数,实现超材料的快速智能设计,如图5(b)<sup>[45]</sup>所示。

往具有复杂的内部结构,所以很难用传统的制造工艺实现。所以,制造问题曾一度成为机械超材料发展的重要阻碍。随着先进制造技术的快速发展,尤其是3D打印技术的不断推广,机械超材料的晶格

结构也经历了从宏观尺度不断向微米甚至纳米尺度发展的“小型化”过程,许多具有精细设计的微结构功能材料不断地涌现出来。这些结构往往都具有轻量化、高强度、一体化成型的优点,为其在工业中的广泛应用奠定了基础。

目前,3D打印已经成为三维复杂机械超材料的主流制造方法<sup>[12,43,46]</sup>。例如,采用3D打印可以实

现具有热膨胀系数可正可负的陶瓷机械超材料<sup>[47]</sup>,性能可人工调控的张拉结构<sup>[48]</sup>以及软硬可控的连锁超材料<sup>[49]</sup>等,如图6所示。随着3D打印制造工艺的不断成熟和完善,可打印的材料也越来越全面,一些长期止步于理论研究的复杂超材料开始逐步迈向应用。

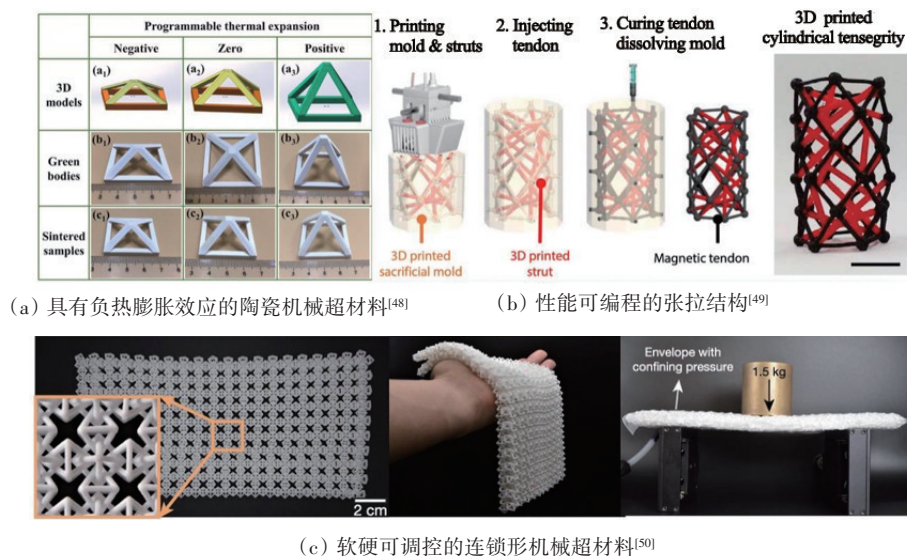


图6 采用3D打印制造工艺实现复杂机械超材料的轻量化、一体化快速成型

## 4 结论

机械超材料不仅仅是常规自然材料的补充,它已经逐步成为新材料领域的主角,被赋予了更加丰富的功能特性,包括可重构、可编程、自决策及机械运算等。未来,自然材料的功能属性将逐渐淡化,更多情况下将以原材料的形式作为功能性超材料的组分。结合人工智能、机器学习算法以及3D打印先进制造工艺,机械超材料则可以充分发挥其优势:巨大的可设计性和灵活的人工调控能力。

最重要的是,机械超材料的新奇性能往往与尺度无关,从而保证了在微观尺度下制作出来的机械超材料依然具备与宏观尺寸同样的机械性能。因此,当机械超材料的内部结构过于复杂、超出现有先进制造工艺的加工能力时,研究人员可以先对机械超材料的宏观单元进行设计,并通过实验验证后,再进一步推广到微观尺度,从而允许人们在宏

观尺度上对机械超材料的新奇功能进行大胆的想法和设计。

## 参考文献 (References)

- [1] Kadic M, Buckmann T, Schittny R, et al. Metamaterials beyond electromagnetism[J]. Reports on Progress in Physics, 2013, 76(12): 126501.
- [2] Wegener M. Metamaterials beyond optics[J]. Science, 2013, 342(6161): 939-940.
- [3] Yu X L, Zhou J, Liang H Y, et al. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review[J]. Progress in Materials Science, 2018, 94: 114-173.
- [4] Grima J N, Caruana-Gauci R, Attard D, et al. Three-dimensional cellular structures with negative Poisson's ratio and negative compressibility properties[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 468: 3121-3138.

- [5] Bertoldi K, Reis P M, Willshaw S, et al. Negative Poisson's ratio behavior induced by an elastic instability[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(3): 361–366.
- [6] Babae S, Shim J, Weaver J C, et al. 3D Soft Metamaterials with Negative Poisson's Ratio[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25: 5044–5049.
- [7] Guo X G, Ni X Y, Li J H, et al. Designing mechanical metamaterials with kirigami-inspired, hierarchical constructions for giant positive and negative thermal expansion[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33: e2004919.
- [8] Ha C S, Hestekin E, Li J H, et al. Controllable thermal expansion of large magnitude in chiral negative Poisson's ratio lattices[J]. *Physica Status Solidi*, 2015, 252: 1431–1434.
- [9] Zhang Z, Zhang L, Song B, et al. Bamboo-inspired, simulation-guided design and 3D printing of light-weight and high-strength mechanical metamaterials[J]. *Applied Materials Today*, 2021: 101268.
- [10] Schaedler T A, Jacobsen A J, Torrents A, et al. Ultralight metallic microlattices[J]. *Science*, 2011, 334(6058): 962–965.
- [11] Korpas L M, Yin R, Yasuda H, et al. Temperature-responsive multistable metamaterials[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(26): 31163–31170.
- [12] Liu F, Jiang X H, Wang X T, et al. Machine learning-based design and optimization of curved beams for multistable structures and metamaterials[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 41(29): 101002.
- [13] Librandi G, Tubaldi E, Bertoldi K. Programming nonreciprocity and reversibility in multistable mechanical metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 3454.
- [14] Melancon D, Gorissen B, Garcia-Mora C J, et al. Multistable inflatable origami structures at the metre scale[J]. *Nature*, 2021, 592: 545–550.
- [15] Florijn B, Coulais C, van Hecke M. Programmable mechanical metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(17): 175503.
- [16] Qing R, Wang X T, Li D C. Multimodal soft jumping robot with self-decision ability[J]. *Smart Materials & Structures*, 2021, 30: 085038.
- [17] El Helou C, Buskohl P R, Tabor C E, et al. Digital logic gates in soft, conductive mechanical metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1633.
- [18] Meng Z Q, Chen W T, Mei T, et al. Bistability-based foldable origami mechanical logic gates[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 43: 101180.
- [19] Cummer S A, Christensen J, Alù A. Controlling sound with acoustic metamaterials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1: 16001.
- [20] Cummer S A, Schurig D. One path to acoustic cloaking[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(3): 45.
- [21] Zhu X F, Liang B, Kan W W, et al. Acoustic cloaking by a superlens with single-negative materials[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(1): 014301.
- [22] Munteanu L, Chiroiu V. On three-dimensional spherical acoustic cloaking[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(8): 083031.
- [23] Kaina N, Lemoult F, Fink M, et al. Negative refractive index and acoustic superlens from multiple scattering in single negative metamaterials[J]. *Nature*, 2015, 525: 77–81.
- [24] Wu L L, Wang Y, Zhai Z R, et al. Mechanical metamaterials for full-band mechanical wave shielding[J]. *Applied Materials Today*, 2020, 20: 100671.
- [25] Lakes R, Wojciechowski K W. Negative compressibility, negative Poisson's ratio, and stability[J]. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*, 2008, 245(3): 545–551.
- [26] Gatt R, Grima J N. Negative compressibility[J]. *Physica Status Solidi (RRL): Rapid Research Letters*, 2008, 2(5): 236–238.
- [27] Ai L, Gao X L. Metamaterials with negative Poisson's ratio and non-positive thermal expansion[J]. *Composite Structures*, 2017, 162(suppl 1): 70–84.
- [28] Wang T, An J H, He H, et al. A novel 3D impact energy absorption structure with negative Poisson's ratio and its application in aircraft crashworthiness[J]. *Composite Structures*, 2021, 262(3), 113663 .
- [29] Wan M Q, Yu K Q, Sun H Y. 4D printed programmable auxetic metamaterials with shape memory effects[J]. *Composite Structures*, 2022, 279: 114791 .
- [30] Liu S W, Peng G L, Jin K. Design and characteristics of a novel QZS vibration isolation system with origami-inspired corrector[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021, 106: 255–277.
- [31] Chen J X, Xu W T, Wei Z Y, et al. Stiffness characteristics for a series of lightweight mechanical metamaterials with programmable thermal expansion[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 202/203: 106527.
- [32] Wu J, Yao S L, Zhang H, et al. Liquid crystal elastomer metamaterials with giant biaxial thermal shrinkage for enhancing skin regeneration[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33: e2106175.
- [33] Anvar V, Alexey Z, Artem T. Study of application of vi-

- bration isolators with quasi-zero stiffness for reducing dynamics loads on the foundation[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 176: 137–143.
- [34] Silverberg J L, Evans A A, McLeod L, et al. Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials[J]. *Science*, 2014, 345(6197): 647–650.
- [35] Coulais C, Teomy E, de Reus K, et al. Combinatorial design of textured mechanical metamaterials[J]. *Nature*, 2016, 535: 529–532.
- [36] 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.
- [37] Li Y B, Yin J. Metamorphosis of three-dimensional kirigami-inspired reconfigurable and reprogrammable architected matter[J]. *Materials Today Physics*, 2021, 21(6): 100511.
- [38] Chen T, Pauly M, Reis P M. A reprogrammable mechanical metamaterial with stable memory[J]. *Nature*, 2021, 589: 386–390.
- [39] Liu W, Jiang H, Chen Y. 3D Programmable metamaterials based on reconfigurable mechanism modules[J/OL]. *Advanced Functional Materials*, 2021, doi: 10.1002/adfm.202109865.
- [40] Yasuda H, Buskohl P R, Gillman A, et al. Mechanical computing[J]. *Nature*, 2021, 598: 39–48.
- [41] 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.
- [42] Song Y P, Panas R M, Chizari S, et al. Additively manufacturable micro-mechanical logic gates[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 882.
- [43] Wu L L, Liu L, Wang Y, et al. A machine learning-based method to design modular metamaterials[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 36: 100657.
- [44] Garland A P, White B C, Jensen S C, et al. Pragmatic generative optimization of novel structural lattice metamaterials with machine learning[J]. *Materials & Design*, 2021, 203: 109632.
- [45] Wang L, Liu H T. Parameter optimization of bidirectional re-entrant auxetic honeycomb metamaterial based on genetic algorithm[J]. *Composite Structures*, 2021, 267: 113915.
- [46] Fan J, Zhang L, Lei S W, et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends [J]. *Materials Today*, 2021, 50: 303–328.
- [47] Zhang K Q, Wang K Y, Chen J X, et al. Design and additive manufacturing of 3D-architected ceramic metamaterials with programmable thermal expansion[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102338.
- [48] Lee H, Jang Y, Choe J K, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(45): eaay9024.
- [49] Wang Y, Li L, Hofmann D, et al. Structured fabrics with tunable mechanical properties[J]. *Nature*, 2021, 596: 238–243.

## Memorable sounds in mechanical metamaterial field in 2021

WU Lingling<sup>1</sup>, TIAN Xiaoyong<sup>1</sup>, LI Dichen<sup>1</sup>, ZHOU Ji<sup>2\*</sup>

1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Inspired by electromagnetic metamaterials, mechanical metamaterials have been a focus in various fields. In recent years, benefited from the rapid development of 3D printing and automated machine learning designing methods, the mechanical metamaterials study has achieved a series of excellent results, enabling metamaterials to have unconventional and counter-intuitive mechanical properties that are rare or even non-existent in nature. Unlike common materials, the properties of mechanical metamaterials are mainly derived from artificial structures rather than chemical components, which permits a huge designing space. This article reviews some relevant research highlights of mechanical metamaterials of 2021 in terms of unusual mechanical properties, intelligent design methods and additive manufacturing-based fabrication technology, in which the fusion of mechanical metamaterials and machine learning, modular design and 3D printing is focused and discussed.

**Keywords** mechanical metamaterials; machine learning; 3D printing ●



(责任编辑 祝叶华)