DOI: 10.3901/JME.2020.19.002

基于机构运动的大变形超材料*

陈焱^{1,2}

(1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300350;

2. 天津大学机械工程学院 天津 300350)

摘要: 超材料是一类新型人工复合材料或复合结构,特殊的微观或宏观内部结构设计使它们具有自然材料不具备的超常物理性质。超材料的发展经历了二维电磁超表面到三维机械、热学、声学、光学超材料的发展之后,正进入可编程、可调控的阶段,近年来涌现出各种各样具有大变形能力的超材料,以实现物理性能的设计预期与主被动适应。对大变形超材料的设计、功能、制造等方面的发展现状进行了简要的综述,分析这类超材料研究当前存在的主要问题与发展趋势,为多功能超材料的编程与调控研究提供借鉴与参考。

关键词: 超材料; 超结构; 可编程性; 可调控性; 大变形; 机构运动

中图分类号: TH112

Review on Kinematic Metamaterials

CHEN Yan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300350;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350)

Abstract: Metamaterials are man-made materials or structures whose internal constituents and topologies allow them to have unusual emergent properties which are not available among the conventional materials. Initially proposal of metamaterial started on the 2D negative-indexed electromagnetic metamaterials followed by the 3D metamaterials in the fields of optical, acoustic, mechanical engineering in last 100 years. The current research trend on metamaterial has entered a stage to incorporate the programmability where the properties can be adjustable through selection of design parameters, and tuneability, an ability for the material's properties to be tuned through deformation controlled by the embedded actuation or external stimuli. This brief review focuses on the state-of-art research, major challenge and future development about the design, functionality, manufacture of the metamaterials with large deformation, which hopefully could be able to provide an inspiring reference for programmability and tuneability of new generation metamaterials.

Key words: metamaterials; meta-structures; programmability; tuneability; large deformation; mechanical kinematics

0 前言

超材料是一种新型人造结构型复合材料,在不违背基本的物理学规律的前提下,通过多种结构上的设计来突破自然规律的限制,从而获得天然材料

所不具备的超常物理性能。这些性能不仅仅是由构成材料的本征特性决定的,而是主要由内部人工结构的拓扑与变形特征来决定的^[1-3]。超材料的基本组成单位称为胞元,胞元的平面排布构成了超表面或二维超材料,其空间排布则构成三维超材料。随着超材料胞元尺寸的增大和胞元数量的减少,由单一或几个胞元构成的大尺寸超材料最近也被称为超结构^[4-5]。超材料/超结构已经在热防护航天结构、战斗机电磁隐身蒙皮、潜艇消声覆盖层等多个重要领域有着不可替代的应用(图 1)。《Science》杂志将超

* 国家自然科学基金资助项目(51825503, 51721003)。20200630 收到初稿, 20200810 收到修改稿

材料列入 21 世纪前 10 年的 10 项重要科学进展之一^[6], 美国国防部更是将其列为“六大颠覆性基础研究领域”之一^[7], 在我国超材料被列入国务院印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》^[8]。超材料的设计思想和方法已经成为发掘结构材料新功能、引领产业新方向, 提高材料综合性能、突破稀缺资源瓶颈的有力手段, 把功能材料的设计和开发带入一个崭新的天地, 引发了信息技术、国防工业、新能源技术、微细加工技术等领域的重大变革, 并成为各国竞争的焦点^[9-10]。

图 1 超材料在热防护航天结构、战斗机电磁隐身蒙皮、潜艇消声覆盖层的应用

超材料是一个高度跨学科的、高度交叉的研究领域, 涉及物理学、通信、材料、数学、力学、机械等多学科。其研究最早可以追溯到 19 世纪末期, 为了改变电磁波的正常传播方式从而全面控制电磁波, 科学家最先研究了具有负折射率的电磁超材料 (Electromagnetic metamaterials)^[11-12]。针对太赫兹、红外光与可见光这些波段, 形成了电磁超材料的一个子集——光学超材料 (Optical metamaterials)^[13]。电磁超材料的应用非常广泛, 例如高性能天线^[14-15], 光电探测^[16], 太阳能光伏发电^[17], 以及可以用于隐身衣和隐形飞机的隐身材料^[18]。另外一大类超材料是机械超材料 (Mechanical metamaterials)——通过材料的内部结构而非成分来决定其机械性能。典型的机械超材料包括负泊松比超材料、声学波动超材料 (也称为力学超材料)、负热膨胀超材料、轻质结构超材料等。波动超材料能够在不同的频率范围内分别表现出类似固体和流体的物理性质, 从而为控制声波、弹性波和地震波提供可能性^[19-20]。声学超材料可以对声波产生负折射率, 从而实现对声波的有效控制^[21], 其应用范围包括亚波长声波成像^[22], 具有超高分辨率的超级透镜^[23], 以及隐身衣^[24]。负热膨胀超材料通过材料内部的特殊结构拓扑和多种材料的匹配实现负的热膨胀系数^[25-27]。为了实现机械和热学领域复合需求, 出现了同时具有负热膨胀和负泊松比特性的超材料, 即双负超材料^[28-30]。零/负热膨胀系数的超材料在许多受温度波动影响较大的高精度工程结构中有广泛的应用, 例如热变形和自适应结构^[31-32]、微机电系统^[33]、热适配器和驱动器^[34-35]、天基反射镜和卫星天线^[36-37]的支撑等。

结构超材料可以通过三维微结构^[38]、手性结构^[39]、折纸结构^[40-43]等来设计材料的内部拓扑, 得到轻质高强的新型材料, 在结构承载构件^[44-45]、能量吸收^[46-47]、热交换材料^[48-49]、生物材料^[50-51]中都有很大的应用价值。

1 大变形超材料的研究现状

超材料具有自然材料不具备的超常物理性能, 这是由超材料内部结构的几何拓扑及其基础材料的性质共同决定的, 随着相关应用的发展, 超材料的设计从定性地获得特殊物理性能发展到定量地确定性能, 即可编程性 (Programmability)——在超材料设计过程中, 通过几何拓扑参数和基本材料参数的选取, 直接获得预期的物理性能^[40]。同时, 这些特殊的物理性能往往是超材料本身固有的, 并不能在外界激励下主动调控, 更无法随着外界应用环境的变化而被动地自适应, 即可调控性 (Tuneability)——在超材料使用过程中, 通过拓扑的主动或被动变化来调控超材料的物理性能。为了满足超材料的可调控性, 出现了越来越多具有大变形能力的超材料^[52]。它们的设计利用了折纸结构的折叠变形或者二维或三维胞元结构的非线性形变、失稳来获得整体结构的大变形, 并在电磁、机械等超材料方面实现了定性、定量的性能调控, 有着广泛的工程应用潜力。

现有的大变形超材料主要基于两种结构类型: 折纸结构和模块化拓扑结构。折纸结构在面内的折叠变形使其非常适合拉胀材料的设计, 因此各种折纸折痕单元在负泊松比超材料中有着大量的应用^[53-55] (图 2)。单层或多层折纸构建的二维和三维超材料在力学性能和电磁性能方面都有非常好的表现^[56]。在电磁学方面, WANG 等在刚性的 Miura 折纸图案上印刷开环谐振器以实现周期性排列的超原子, 通过 Miura-ori 结构的变形来控制该电磁超材料的手性^[57] (图 3a)。同样基于 Miura-ori 折纸结构, NAUROZE 等结构折叠线上放置的偶极子谐振元件可以形成频率选择面 (FSSs), 结构的折叠运动特性使得超材料可以根据不同规格 (多波段、宽带/窄带带宽、宽入射角抑制) 进行实时重构, 实现连续可调的频率响应^[58] (图 3b)。ZHANG 等将折纸与弹性超材料结合起来, 将可调控扭转折纸结构引入到亚波长谐振腔设计中, 提出了一种具有低频动态性能的三维波动超材料^[59]。BOATTI 等用折纸结构研发了热膨胀系数可调谐的超材料, 通过改变不同位置折纹和面的刚度使该超材料具有负、零和正热膨胀系数^[60]。

图2 基于各种折纸折痕单元的负泊松比超材料

图3 基于 Miura-ori 的折纸电磁超材料

为了实现超材料的可编程性,刚性折纸被普遍采用^[61]——这类折纸通过沿预定折痕的折叠实现在不同折叠状态之间的连续运动,其成型过程中变形只发生在折痕区域,而主体板面不发生扭曲或拉伸等变形,使成型后的结构最大限度地保持材料本

身刚性,并且使得几乎所有传统的片状材料可以用于生产这样的超材料^[62-64]。只要建立弯曲能量和铰接能量之间的关系,就可以设计出多种稳定且可编程的超材料^[64-65](图4)。同时,刚性折叠的过程使超材料具有大变形的能力,为性能调控提供了可能。

例如, 将参数不同的折痕堆叠起来形成刚度渐变的机械超材料^[66-67], FILIPOV 等则将不同管状折叠结构耦合在同一个结构中, 获得了可以重构的超材料来主动调控刚度^[68]。另外, 非刚性折纸单元的多种折叠路径或稳态也可以用于超材料可调控性的设计。例如, SENGUPTA 和 LI 通过双稳态的折纸单元在两个稳定状态之间切换来实现被动的刚度自适应功能^[69]。可见, 折纸结构在各种超材料中都有着较好的应用潜力, 但是目前的绝大多数研究都集中

在 Miura-ori 这种相对简单的折痕上, 这是因为它是一个单自由度的刚性折痕, 它的折叠变形过程可以通过简单的数学推导很容易地获得。然而在折纸中还存在着大量其他的折痕, 例如 square-twist、Resch pattern、diamond pattern、waterbomb 等, 由于对它们的折叠刚性和运动特征缺乏深入的认识, 只有个别超材料试探性地用到这些折痕^[70-71], 而它们丰富的折叠行为, 必将为折纸超材料的设计带来更多创新的途径。

图 4 基于刚性折纸的大变形超材料

大变形超材料的设计中还采用了二维模块化拓扑结构,包括反蜂窝结构、孔洞结构、失稳的桁架和双稳态梁结构。它们的非线性形变、失稳为整体结构提供了规律的大尺度变形,并在此基础上将二维结构拓展到三维空间,形成大变形胞元,进而通过空间排布构建三维超材料(表 1)。最早出现的负泊

表 1 拓扑结构胞元构建的二维和三维超材料

	2D 超材料	3D 超材料
反蜂窝结构	文献[71]	文献[75]
孔洞结构	文献[76]	文献[79]
失稳桁架结构	文献[80]	文献[81]
双稳态结构	文献[86]	文献[87]

松比超材料就是以反蜂窝(反六边形)结构为基本单元的^[72-73],具有面内拉胀的特性,KHAN 等在传统蜂窝网格的基础上设计出具有可调控的正、负和零泊松比的超材料,并加入压电材料,实现泊松比和机电特性耦合可调节^[74],YANG 等将这类结构拓展到三维空间,得到可三维压缩的负泊松比超材料^[75]。基于拓扑优化的孔洞拓扑单元不仅可以产生负泊松比,而且可以对结构的刚度进行编程和调控^[76-78],同样通过拓扑优化,LIN 等研究了三维孔洞结构,使其力学性能表现为各向同性^[79]。另外,在二维和三维桁架结构中预设屈曲变形也是设计大变形超材料的一个重要手段^[80-82]。BABAEE 等^[83]利用屈曲特性设计了镂空图案的弹性球壳结构,在压缩载荷下横向收缩,产生三维负泊松比。手性结构的引入将斜杆轴向压缩(或拉伸)转化为扭转的手征机制,开发了压扭机械超材料,具有负泊松比及较高的能量吸收效率^[84-85](图 5a)。大部分屈曲变形

的刚度不可控,而双稳态结构则提供了一种准零刚度胞元,可以用于设计二维和三维多稳态和可重构的大变形超材料^[86-87]。例如,CAI 等则利用二维屈曲梁即负刚度结构来有效地抵消折叠梁的正刚度,产生理想准零刚度特性的同时,实现了超低的局部共振带隙,服务于波动超材料^[88]。PAN 等^[89]提出了以多稳态吸管结构为基本模块的机械平面像素阵列,可以调整阵列中机械像素的高度来形成和重新配置其三维形态,有效提高了其力学性能可编程性、形状可重构性和适应性以及可重复使用的抗冲击性。由于其大变形发生在像素阵列的高度方向,实际上属于“2.5 维”的超材料(图 5b)。另一方面,基于二维结构正交排布的三维结构的多稳态特性往往在各个方向上不相关^[90],COULAIS 等则是利用模块的变形模式的耦合嵌套,通过正交排布,实现与载荷平面垂直的其他平面的可编程形变。到目前为止,鲜有研究提出真正意义上的模块化多稳态的三维超材料。

图 5 模块化超材料

除了特殊拓扑的胞元结构,胞元间的连接方式对超材料的大变形行为也有着决定性的作用,但是大多数设计仅仅是把相同的胞元在平面或空间固结在一起,为了获得大变形,GRIMA 等将正方形的胞元顶点连接产生柔性铰链,从而使正方形直接可以发生相对转动,获得负泊松比二维超材料^[91]。在此基础上,COULAIS 等将顶点柔性铰链的刚度进行分类调整,并去除了部分正方形胞元,设计了自我引导、多级重构的超材料^[92],但是由于整体结构的等效自由度太多,其变形过程难以准确控制,出现了与预设形变差别很大的变形模式(图 6a)。KADIC 等设计的三维桁架结构采用了接近理想铰链极限的尖端连接(图 6b),使得节点处的剪切模量与体积模量之比接近零,该材料能抵抗各向同性压缩,但抗剪切性非常差,表现出流体相似的特性,故用于波动模数超材料^[93]。OVERVELDE 等基于正交四边 snapology 的可重构机械超材料则是利用了方管折叠变形来实现结构拓扑的改变^[94],同样由于正交的三维结构自由度不为 1,重构的过程难以同步控制(图 6c)。可见,胞元的铰链连接方式将

为大变形超材料带来更多创新设计的机会,但是尚未开展系统全面的研究。

图6 胞元间通过柔性铰链连接的大变形超材料

2 挑战与展望

超材料的发展经历了二维电磁超表面到三维机械、热学、声学、光学超材料,目前已经开始了对可编程、可调控超材料的探索阶段,涌现出各种各样具有大变形能力的超材料,以实现物理性能的设计预期与主被动适应。然而这类新兴超材料的设计、加工与应用都面临诸多挑战。

首先,在超材料的功能设计方面,研究人员对物理性能的调控提出了越来越丰富的需求,因此首要的任务是把这些物理性能的调控需求转化为相对应的结构拓扑变化设计,即确定结构的大变形方式。建立拓扑构型与物理性能的解析关系是超材料可编程设计的关键难题,在此基础上,才能讨论结构形变与性能调控之间的内在联系。

下一步则是根据变形需求进行具体的拓扑设计。前面提到的胞元设计大多采用折纸单元或者拓扑优化的方法。实际上,无论是刚性折纸结构,还是铰链连接胞元构成的超材料,从理论上都可以等效为机构或机构的组合^[95-97],在大变形方面展示出巨大的潜力和优势,但目前的工作都是从结构设计角度出发来研究超材料的构建,期待得到预期的大变形模式。由于构成机构系统的多自由度特性、等效机构存在的分叉行为、胞元间形变传递随能量损耗的衰减、以及结构失稳对外部激励与加工误差的高度敏感、驱动控制的复杂性等不可避免的因素^[52, 98],很多这类超材料无法实现预设的形变,进而无法达到相应的性能调控和编程的需求,形成大

变形超材料研究中的主要瓶颈。

借鉴机构可动网格^[99-105]、刚性折纸^[106-110]等领域研究成果(图7),我们发现少自由度尤其是单自由度机构系统在实现运动路径的确定性方面有着天然的优势。因此大变形超材料的设计可以从机构运动出发,以平面或空间机构为胞元,使其具备所需的变形特征,并将系统研究胞元之间的链接,使胞元的运动变形特征在整体超材料中得以保持和协调,从而实现超材料通过大变形来连续调控物理性能^[57-58],或者特地引入运动变形的不协调性,实现超材料物理性能的阶跃性调控^[66, 71]。

当这些机构组合以超材料的连续拓扑形式出现时,它们则属于机构中的柔顺机构^[111-113]。这种超材料一方面具有较为稳定的变形模式,即理想机构的运动模式;另一方面,对于多机构网格的超材料,当驱动作用于单个或少数胞元时,会存在不用程度的胞元间运动传递的衰减^[114]。我们可以从机构设计的角度,优化驱动的位置和机构的运动传递的机械效益,以减少运动传递衰减。而更有效的解决方案则是采用同步驱动的模式,使每个相同胞元在同样的驱动下产生同样的形变,达到超材料整体调控的目的。显然,不可能采用传统机械的办法对超材料中成百上千甚至更多胞元进行同步驱动,只能寄希望于基于智能材料的驱动模式或者柔顺机构中的恒力设计。

图7 机构可动网格与刚性折纸

通常情况下,超材料的特殊物理性能主要是由内部人工结构的拓扑与变形特征来决定的,而基础材料的本征特性不起决定性的作用。考虑到结构的大变形能力和柔顺机构的特征,更倾向于高弹塑性的材料,而非硬脆材料。当我们将胞元机构的驱动与材料相结合,则要选取对外部磁场、电场、热场、应力场等环境刺激会产生变形响应的新型智能材料

作为超材料的基础超材料或者嵌入到超材料的基础材料中去。例如, ZHANG 等利用 3D 打印的热缩性聚合物来实现二维超材料在热场中的拓扑变换及相对应的带隙特性^[115]; KOTIKIAN 等通过 3D 打印构建热响应液晶弹性体超材料, 在热场作用下液晶弹性体产生大变形, 实现了二维结构到三维结构或不同三维拓扑结构之间的转换^[116] (图 8a), WONG 等以离子凝胶为原料通过 3D 打印制造可拉伸传感器, 在应力场的作用下超材料在结构上呈现拉涨的特性, 同时电信号发生改变, 可用于应变传感器和可穿戴柔性电子器件^[117]; GIBERT 等将具有变形顺应性的摩擦起电纳米发电机嵌入到可以产生大变形的梁阵列和双圆孔超材料中, 使得这种多功能机械超材料既继承了作为基体的大变形超材料可调的力学性能, 又具有能量收集和自供电传感的功能^[118] (图 8b)。由此可见, 具有驱动能力的智能超材料与大变形拓扑设计相结合将会极大地丰富超材料非常规的物理特性及其调控空间。

图 8 基于智能材料的超材料

解决了大变形超材料的设计与驱动之后, 迎面而来的一大难题是这类超材料的加工制造^[119]。目前, 3D 打印技术能有效加工三维复杂结构, 但是其精度有限, 无法对微米纳米级别的胞元进行准确的加工, 同时这项技术所能打印的材料并无法涵盖全部超材料所需使用的常规和智能基础材料, 并且所制备的三维全介质结构承载能力较差, 不能满足实际应用的工况, 现有的成果大多数属于实验室技术, 不可能在工业制造中进行大尺度、大批量生产和推广。房丰洲教授提出的原子及近原子尺度制造 (ACSM) 技术直接作用于微观尺度粒子, 可望实现对微观粒子和结构的精准操控和修复, 从而优化超材料微观结构, 最大限度地开发材料性能, 为超材料结构的制造和新材料的开发提供了新的思路^[120]。同时, 研究人员将 MEMS 加工技术和折纸、剪纸艺术相结合, 通过对二维薄膜结构的加工和驱动来构建三维单层超材料, 不但可以构建较为复杂的三维结

构, 也可以实现微米级别的超材料胞元的加工^[121-122], 但是由于基础材料的选择范围非常有限, 无法满足三维大变形超材料的需求。因此, 急需研究可以大尺度、大批量生产细微胞元超材料的制造方法与工艺。

另一方面, 人们对胞元尺寸大、数量少的超材料开展了大量的研究, 由于整体结构所包含的胞元数量非常少, 甚至整个结构就是一个胞元, 这类结构也称为超结构 (Meta-structure)^[123-125]。显然, 这样大尺寸超结构并没有上述加工瓶颈, 而大变形设计可以通过传统的机构机械系统容易地实现, 因此在多个重要领域已经取得了长足的发展, 例如可重构相控阵天线^[126], 零热膨胀航天结构^[127]。

综上所述, 大变形超材料是可编程、可调控超材料研究的重要研究方向, 对于拓展超材料的物理性能有着重要作用。目前的探索性研究表明, 基于机构及其网格的设计方法对于超材料的大变形精准控制有明显优势, 进一步将智能材料作为超材料的基础材料会全面提升该类超材料的性能调控, 相应的超材料加工制造方法是当前亟需研究的瓶颈问题, 为了避免加工困境, 超结构则是大变形超材料中一个另辟蹊径的重要方向。

参 考 文 献

- [1] DUDLEY R A, FIDDY M A. Engineered materials and metamaterials: Design and fabrication[M]. SPIE, 2017.
- [2] KADIC M, MILTON G W, HECKE M, et al. 3D metamaterials[J]. Nature Reviews Physics, 2019, 1(3): 198-210.
- [3] ZHELUDEV N I. The road ahead for metamaterials[J]. Science, 2010, 328(5978): 582-583.
- [4] SONG W, ZHOU Z, WANG L, et al. Constructing repairable meta-structures of ultra-broad-band electromagnetic absorption from 3D printed patterned shells[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(49): 43179-43187.
- [5] CHO S J, KIM B S, MIN D K, et al. Honeycomb-shaped meta-structure for minimizing noise radiation and resistance to cooling fluid flow of home appliances[J]. Composite Structures, 2016, 155: 1-7.
- [6] SERVICE R F, CHO A. Strange new tricks with light[J]. Science, 2010, 330(6011): 1622.
- [7] BAKER B. DoD Science & Technology Priorities[R]. 2014.
- [8] 国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规

- 划的通知[R]. 2016.
- State Council. State Council notice on printing and distributing the national thirteenth five-year plan for national science and technology innovation[R]. 2016.
- [9] 彭训文. “暗战”超材料, 中国如何胜出[N]. 人民日报海外版, 2015-05-02(8).
- PENG Xunwen. “Dark War” metamaterials, how China wins[N]. People’s Daily Overseas Edition, 2015-05-02(8).
- [10] TUCKER P. The multiple applications of the military’s mad science projects[N]. <https://www.defenseone.com/technology/2014/05/four-darpa-projects-could-be-bigger-internet/84856/>.
- [11] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability[J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [12] SHELBY R A. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [13] SREEKANTH K V, ZENG S, SHANG J, et al. Excitation of surface electromagnetic waves in a graphene-based Bragg grating[J]. Scientific Reports, 2012, 2: 737.
- [14] ALICI K B, ÖZBAY E. Radiation properties of a split ring resonator and monopole composite[J]. Physica Status Solidi(b), 2007, 244(4): 1192-1196.
- [15] WU B I, WANG W, PACHECO J, et al. A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2005, 51: 295-328.
- [16] LI W, VALENTINE J. Metamaterial perfect absorber based hot electron photodetection[J]. Nano Letters, 2014, 14(6): 3510-3514.
- [17] VORA A, GWAMURI J, PALA N, et al. Exchanging Ohmic losses in metamaterial absorbers with useful optical absorption for photovoltaics[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4901.
- [18] GAO L, KIM Y, VAZQUEZ-GUARDADO A, et al. Negative index materials: Materials selections and growth conditions for large-area, multilayered, visible negative index metamaterials formed by nanotransfer printing[J]. Advanced Optical Materials, 2014, 2(3): 255-255.
- [19] PAGE J. Metamaterials: Neither solid nor liquid[J]. Nature Materials, 2011, 10(8): 565-566.
- [20] LAI Y, WU Y, SHENG P, et al. Hybrid elastic solids[J]. Nature Materials, 2011, 10(8): 620-624.
- [21] GUENNEAU, SÉBASTIEN, MOVCHAN A, et al. Acoustic metamaterials for sound focusing and confinement[J]. New Journal of Physics, 2007, 9(11): 399-399.
- [22] ZHU J, CHRISTENSEN J, JUNG J, et al. A holey-structured metamaterial for acoustic deep-subwavelength imaging[J]. Nature Physics, 2010, 7(1): 52-55.
- [23] LI J, FOK L, YIN X, et al. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens[J]. Nature Materials, 2009, 8(12): 931-934.
- [24] FARHAT M, ENOCH S, GUENNEAU S, et al. Broadband cylindrical acoustic cloak for linear surface waves in a fluid[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(13): 126-129.
- [25] TAKENAKA K. Negative thermal expansion materials: Technological key for control of thermal expansion[J]. Science & Technology of Advanced Materials, 2012, 13(1): 013001.
- [26] WU L, LI B, ZHOU J. Isotropic negative thermal expansion metamaterials[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(27): 17721-17727.
- [27] PARSONS E M. Lightweight cellular metal composites with zero and tunable thermal expansion enabled by ultrasonic additive manufacturing: Modeling, manufacturing, and testing[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110656.
- [28] RAMINHOS J S, BORGES J P, VELHINHO A. Development of polymeric anepectic meshes: Auxetic metamaterials with negative thermal expansion[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(4): 045010.
- [29] AI L, GAO X L. Three-dimensional metamaterials with a negative Poisson’s ratio and a non-positive coefficient of thermal expansion[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 135: 101-113.
- [30] LI X, GAO L, ZHOU W, et al. Novel 2D metamaterials with negative Poisson’s ratio and negative thermal expansion[J]. Extreme Mechanics Letters, 2019, 30: 100498.
- [31] THILL C L, ETCHES J, BOND I, et al. Morphing skins[J]. The Aeronautical Journal, 2008, 112(1129): 117-139.
- [32] BERTAGNE C L, COGNATA T J, SHETH R B, et al. Testing and analysis of a morphing radiator concept for thermal control of crewed space vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124: 986-1002.
- [33] CHEN B C, SILVA E C N, KIKUCHI N. Advances in computational design and optimization with application to

- MEMS[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 52(1-2): 23-62.
- [34] TOROPOVA M M, STEEVES C A. Bimaterial lattices as thermal adapters and actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(11): 115030.
- [35] BAXEVANIS T, PARRINELLO A F, LAGOUDAS D C. On the driving force for crack growth during thermal actuation of shape memory alloys[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 89: 255-271.
- [36] TOROPOVA M M, STEEVES C A. Adaptive bimaterial lattices to mitigate thermal expansion mismatch stresses in satellite structures[J]. Acta Astronautica, 2015, 113: 132-141.
- [37] ZHENGCHUN D, MENGRI Z, ZHIGUO W, et al. Design and application of composite platform with extreme low thermal deformation for satellite[J]. Composite Structures, 2016, 152: 693-703.
- [38] JANG D, MEZA L R, GREER F, et al. Fabrication and deformation of three-dimensional hollow ceramic nanostructures[J]. Nature Materials, 2013, 12(10): 893-898.
- [39] YU H, WU W, ZHANG J, et al. Drastic tailorable thermal expansion chiral planar and cylindrical shell structures explored with finite element simulation[J]. Composite Structures, 2019, 210: 327-338.
- [40] 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.
- [41] LIU B, SILVERBERG J L, EVANS A A, et al. Topological kinematics of origami metamaterials[J]. Nature Physics, 2018, 14(8): 811-815.
- [42] HAGIWARA I. Current trends and issues of origami engineering[J]. Communications in Computer and Information Science, 2012, 326: 259-268.
- [43] MA J, YOU Z. Energy absorption of thin-walled beams with a pre-folded origami pattern[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 73: 198-206.
- [44] ZHENG X, LEE H, WEISGRABER T H, et al. Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials[J]. Science, 2014, 344(6190): 1373-1377.
- [45] VALDEVIT L, JACOBSEN A J, GREER J R, et al. Protocols for the optimal design of multi-functional cellular structures: From hypersonics to micro-architected materials[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94: s15-s34.
- [46] SCHAEGLER T A, RO C J, SORESENSEN A E, et al. Designing metallic microlattices for energy absorber applications[J]. Advanced Engineering Materials, 2014, 16(3): 276-283.
- [47] MALONEY K J, ROPER C S, JACOBSEN A J, et al. Microlattices as architected thin films: Analysis of mechanical properties and high strain elastic recovery[J]. Apl Materials, 2013, 1(2): 022106.
- [48] VALDEVIT L, PANTANO A, STONE H A, et al. Optimal active cooling performance of metallic sandwich panels with prismatic cores[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2006, 49(21-22): 3819-3830.
- [49] MAOQIANG L, XIN S. Microstructure and thermal conductivity of flexible and micro-porous calcium silicate insulation material[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2007, 36(8): 575-578.
- [50] BAUDIS S, NEHL F, LIGON S C, et al. Elastomeric degradable biomaterials by photopolymerization-based CAD-CAM for vascular tissue engineering[J]. Biomedical Materials, 2011, 6(5): 055003.
- [51] ARCAUTE K, MANN B K, WICKER R B. Fabrication of off-the-shelf multilumen poly (ethylene glycol) nerve guidance conduits using stereolithography[J]. Tissue Engineering Part C Methods, 2010, 17(1): 27-38.
- [52] BERTOLDI K, VITELLI V, CHRISTENSEN J, et al. Flexible mechanical metamaterials[J]. Nature Reviews Materials, 2017, 2: 17066.
- [53] DIELEMAN P, VASMEL N, WAITUKAITIS S, et al. Jigsaw puzzle design of pluripotent origami[J]. Nature Physics, 2020, 16(1): 63-68.
- [54] PENG R, MA J, CHEN Y. The effect of mountain-valley folds on the rigid foldability of double corrugated pattern[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 128: 461-474.
- [55] PRATAPA P P, LIU K, PAULINO G H. Geometric mechanics of origami patterns exhibiting Poisson's ratio switch by breaking mountain and valley assignment[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(15): 155501.
- [56] HAGIWARA I. From origami to origamics[J]. The Japan Journal, 2008, 5(3): 22-25.
- [57] WANG Z, JING L, YAO K, et al. Origami-based reconfigurable metamaterials for tunable chirality[J]. Advanced Materials, 2017, 29(27): 1700412.1-1700412.7.
- [58] NAUROZE S A, NOVELINO L S, TENTZERIS M M,

- et al. Continuous-range tunable multilayer frequency-selective surfaces using origami and inkjet printing[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115 (52): 13210-13215.
- [59] ZHANG M, YANG J, ZHU R. Flexural wave control via origami-based elastic metamaterials[C]// *Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIII. International Society for Optics and Photonics*, 2019: 109720Q.
- [60] BOATTI E, VASIOS N, BERTOLDI K. Origami metamaterials for tunable thermal expansion[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(26): 1700360.
- [61] WANG K, CHEN Y. Folding a patterned cylinder by rigid origami[J]. *Origami*, 2011, 5: 265-276.
- [62] YOU Z. Folding structures out of flat materials[J]. *Science*, 2014, 345(6197): 623-624.
- [63] FUCHI K. An origami tunable metamaterial[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(8): 1-7.
- [64] SCHENK M, GUEST S D. Geometry of Miura-folded metamaterials[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(9): 3276-3281.
- [65] MA J, HOU D, CHEN Y, et al. Quasi-static axial crushing of thin-walled tubes with a kite-shape rigid origami pattern: Numerical simulation[J]. *Thin Walled Structures*, 2016, 100: 38-47.
- [66] MA J, SONG J, CHEN Y. An origami-inspired structure with graded stiffness[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 136: 134-142.
- [67] LIU K, TACHI T, PAULINO G H. Invariant and smooth limit of discrete geometry folded from bistable origami leading to multistable metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4238.
- [68] EVGUENI T, FILIPOV, TOMOHIRO, et al. Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(40): 12321-6.
- [69] SENGUPTA S, LI S. Harnessing the anisotropic multistability of stacked-origami mechanical metamaterials for effective modulus programming[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(14): 2933-2945.
- [70] WANG L C, SONG W L, ZHANG Y J, et al. Active reconfigurable tristable square — twist origami[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020: 1909087.
- [71] MUKHOPADHYAY T, MA J, FENG H, et al. Programmable stiffness and shape modulation in origami materials: Emergence of a distant actuation feature[J]. *Applied Materials Today*, 2020, 19: 100537.
- [72] ZHANG J, LU G, WANG Z, et al. Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 92-101.
- [73] LAKES R. Foam structures with a negative Poisson's ratio[J]. *Science*, 1987, 235: 1038-1041.
- [74] KHAN K A, AL-MANSOOR S, KHAN S Z, et al. Piezoelectric metamaterial with negative and zero Poisson's ratios[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2019, 145(12): 04019101.
- [75] YANG L, HARRYSSON O, WEST H, et al. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2015, 69-70: 475-490.
- [76] FLORIJN, BASTIAAN, COULAIS, et al. Programmable mechanical metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 113(17): 175503.
- [77] WANG H, ZHANG Y, LIN W, et al. A novel two-dimensional mechanical metamaterial with negative Poisson's ratio[J]. *Computational Materials Science*, 2020, 171: 109232.
- [78] ZHANG Y, LI B, ZHENG Q S, et al. Programmable and robust static topological solitons in mechanical metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5605.
- [79] LIN S, XIE Y M, LI Q, et al. A Kirigami approach to forming a synthetic buckliball[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33016.
- [80] ZHANG H, CHENG X, YAN D, et al. A nonlinear mechanics model of soft network metamaterials with unusual swelling behavior and tunable phononic band gaps[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 183: 107822.
- [81] PAULOSE J, MEEUSSEN A S, VITELLI V. Selective buckling via states of self-stress in topological metamaterials[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(25): 7639.
- [82] SHIM J, PERDIGOU C, CHEN E R, et al. Buckling-induced encapsulation of structured elastic shells under pressure[J]. *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(16): 5978-5983.
- [83] BABAE S, SHIM J, WEAVER J C, et al. 3D soft metamaterials with negative poisson's ratio[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(36): 5044-5049.
- [84] FRENZEL T, KADIC M, WEGENER M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist[J]. *Nature*, 2017, 548(7466): 1072-1074.
- [85] WANG Q, YANG Z, LU Z, et al. Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression[J]. *Materials & Design*, 2019, 186: 108226.
- [86] ZHAKATAYEV A, KAPPASSOV Z, VAROL H A. Analytical modeling and design of negative stiffness honeycombs[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(4): 045024.
- [87] COULAIS C, TEOMY E, DE REUS K, et al. Combinatorial design of textured mechanical metamaterials[J]. *Nature*, 2016, 535(7613): 529-532.
- [88] CAI C, ZHOU J, WU L, et al. Design and numerical validation of quasi-zero-stiffness metamaterials for very low-frequency band gaps[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111862.
- [89] PAN F, LI Y, LI Z, et al. 3D pixel mechanical metamaterials[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(25): 1900548.1-1900548.8.
- [90] HAGHPANAH B, SALARI-SHARIF L, POURRAJAB P, et al. Multistable shape-reconfigurable architected materials[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(36): 8065-8065.
- [91] GRIMA J N, EVANS K E. Auxetic behavior from rotating squares[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(17): 1563-1565.
- [92] CORENTIN, COULAIS, ALBERICO, et al. Multi-step self-guided pathways for shape-changing metamaterials[J]. *Nature*, 2018, 561(7724): 512-515.
- [93] KADIC M. On the practicability of pentamode mechanical metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(19): 1-4.
- [94] OVERVELDE J T B, DE JONG T A, SHEVCHENKO Y, et al. A three-dimensional actuated origami-inspired transformable metamaterial with multiple degrees of freedom[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10929.
- [95] O'ROURKE J. How to fold it: The mathematics of linkages, origami and polyhedra[M]. Cambridge Univ. Press, 2011.
- [96] ROCKLIN D Z, ZHOU S, SUN K, et al. Transformable topological mechanical metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-9.
- [97] CHEN Y, PENG R, YOU Z. Origami of thick panels[J]. *Science*, 2015, 349(6246): 396-400.
- [98] SILVERBERG J L, NA J H, EVANS A A, et al. Origami structures with a critical transition to bistability arising from hidden degrees of freedom[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(4): 389-393.
- [99] YOU Z, CHEN Y. Motion structures: Deployable structural assemblies of mechanisms[M]. Taylor and Francis, 2011.
- [100] CHEN Y, YOU Z, TARNAI T. Threefold-symmetric Bricard linkages for deployable structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2005, 42(8): 2287-2301.
- [101] CHEN Y, YANG F, YOU Z. Transformation of polyhedrons[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 138: 193-204.
- [102] SONG X, GUO H, LIU R, et al. Mobility analysis of the threefold-symmetric Bricard linkage and its network[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2020, 12(1): 011013.
- [103] WANG J, KONG X. A novel method for constructing multimode deployable polyhedron mechanisms using symmetric spatial compositional units[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics* 2019, 11(2): 020907.
- [104] ZHANG X, CHEN Y. Mobile assemblies of Bennett linkages from four-crease origami patterns[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2018, 474: 20170621.
- [105] SONG X, DENG Z, GUO H, et al. Networking of Bennett linkages and its application on deployable parabolic cylindrical antenna[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 109: 95-125.
- [106] CHEN Y, PENG R, YOU Z. Origami of thick panels[J]. *Science*, 2015, 349(6246): 396-400.
- [107] CHEN Y, LV W, PENG R, et al. Mobile assemblies of four-spherical-4R-integrated linkages and the associated four-crease-integrated rigid origami patterns[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 142: 103613.
- [108] AVILA A, MAGLEBY S P, LANG R J, et al. Origami fold states: Concept and design tool[J]. *Mechanical Sciences*, 2019, 10: 91-105.
- [109] PENG R, MA J, CHEN Y. The effect of mountain-valley

- folds on the rigid foldability of double corrugated pattern[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 128: 461-474.
- [110] TACHI T, HULL T C. Self-foldability of rigid origami[J]. Journal of Mechanisms & Robotics, 2017, 9(2): 021008.
- [111] HOWELL L L. Compliant mechanisms[M]. Wiley-Interscience, 2001.
- [112] CHEN G, MA F, HAO G, et al. Modeling large deflections of initially curved beams in compliant mechanisms using chained beam-constraint-model[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2018, 11: 1.
- [113] HAO G, YU J, LI H. A brief review on nonlinear modeling methods and applications of compliant mechanisms[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2016, 11(2): 119-128.
- [114] HOWELL L L. Handbook of compliant mechanisms[M]. Hoboken: Wiley, 2013.
- [115] ZHANG Q, YAN D, ZHANG K, et al. Pattern transformation of heat-shrinkable polymer by three-dimensional (3D) printing technique[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8936.
- [116] KOTIKIAN A, TRUBY R L, BOLEY J W, et al. 3D printing of liquid crystal elastomeric actuators with spatially programmed nematic order[J]. Advanced Materials, 2018, 30(10): 1706164.1-1706164.6.
- [117] WONG J, GONG A T, DEFNET P A, et al. 3D printing ionogel auxetic frameworks for stretchable sensors[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(9): 1.
- [118] TAO H, GIBERT J. Multifunctional mechanical metamaterials with embedded triboelectric nanogenerators[J]. Advanced Functional Materials, 2020(1): 2001720.
- [119] 周济, 李龙土. 超材料技术及其应用展望[J]. 中国工程科学, 2018, 20(6): 69-74.
- ZHOU Ji, LI Longtu. Metamaterial technology and its application prospects[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2018, 20(6): 69-74.
- [120] 房丰洲. 原子及近原子尺度制造——制造技术发展趋势[J]. 中国机械工程, 2020, 31(9): 1009-1021.
- FANG Fengzhou. Atomic and near-atomic manufacturing-the development trend of manufacturing technology[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(9): 1009-1021.
- [121] ZHANG Y, YAN Z, NAN K, et al. A mechanically driven form of Kirigami as a route to 3D mesostructures in micro/nanomembranes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(38): 11757.
- [122] YAN Z, ZHANG F, WANG J, et al. Controlled mechanical buckling for origami—Inspired construction of 3D microstructures in advanced materials[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(16): 2586-2586.
- [123] BODAGHI M, SERJOUEI A, ZOLFAGHARIAN A, et al. Reversible energy absorbing meta-sandwiches by 4D FDM printing[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 173: 105451.
- [124] XU W, YU D, WEN J. Simple meta-structure that can achieve the quasi-perfect absorption throughout a frequency range of 200–500 Hz at 350 °C[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(4): 047001.
- [125] YANG H, ZHAO H, YIN J, et al. Hybrid meta-structure for broadband waterborne sound absorption[J]. AIP Advances, 2019, 9: 125226.
- [126] LEE Y, WANG P, CHEN T, et al. A mechanically pattern reconfigurable array[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(3): 1386-1390.
- [127] WEI K, PENG Y, WANG K, et al. Three dimensional lightweight lattice structures with large positive, zero and negative thermal expansion[J]. Composite Structures, 2018, 188: 287-296.
-
- 作者简介: 陈焱, 女, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机构学、折展结构、超材料的基础理论及其在航空航天结构、机器人、医疗微结构中的工程应用。
- E-mail: yan_chen@tju.edu.cn