

# 基于超材料的自适应变体结构技术研究进展



王铖玉<sup>1</sup>, 王志刚<sup>1,2</sup>, 王惠添<sup>1</sup>, 杨宇<sup>2</sup>, 殷莎<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学, 北京 100191

2. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065

**摘要:** 可变体技术可以提高航空载运工具的气动效率并扩展航程, 是航空领域的颠覆性技术之一。以往机体的变形只能通过机构完成, 增加了系统的复杂性和总体重量。自身具有可变形能力的超材料既能够精准调控结构的可变形能力, 又具有较高的轻量化水平和智能化潜力, 有望推动可变体技术的运用。本文总结了几种可变形超材料及其在自适应变体结构技术领域的应用探索, 阐述了超材料由于其较强的可设计性而在变体结构/驱动/结构承载一体化设计中显示出巨大的应用潜力, 并对未来发展趋势进行了展望。

**关键词:** 可变体飞行器; 超材料; 智能结构材料; 微结构设计; 可制造性

中图分类号: V214.9

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.05.004

航空器的外形在极大程度上决定了其在飞行状态下的气动力, 因此飞行器的自适应变体技术(根据飞行环境和飞行任务需求, 在飞行过程中通过改变机翼几何构型等方式, 使飞行状态始终保持最优的技术)一直是航空技术的重要探索方向<sup>[1-3]</sup>。当前的可变体技术主要基于机械机构, 通过变展长<sup>[4]</sup>、变弯度<sup>[5-6]</sup>、变翼面外倾角<sup>[7]</sup>等变形形式实现, 可靠性及稳定性强, 但存在重量(质量)大、易磨损、较难实现复杂变形等缺点<sup>[8]</sup>。而可变形超材料的出现有望推动可变体技术的新一轮发展。

超材料/超结构一般具有周期性的微结构, 因其极强的可设计性而具有超越传统材料性能的优势。通过超材料的微结构设计, 减振降噪、冲击防护等功能都可以实现。可变形超材料, 是一类具备大变形能力的超材料, 同时通过设计, 这种材料还能够兼顾承载能力、智能响应及驱动能力等多功能特性。借助可变形超材料, 研究人员能够设计出可控大变形、高承载、轻量化、智能化的可变体飞行器, 具有可观的应用潜力<sup>[8]</sup>。

可变形超材料种类繁多庞杂, 其展现出的不同特性在可变体飞行器中具备多样化的应用空间。且由于其复杂的微结构, 可变形超材料的制造难度较大, 目前相关研究通常

只能借助3D打印来实现, 并止步于实验室的探索阶段。

本文聚焦于可变体飞行器及其所需的自适应变体结构技术, 总结了目前主要的几种可变形超材料/超结构设计, 并介绍了它们在相关领域的应用; 接着总结了可变形超材料中的智能驱动技术; 最后综述了目前对可变形超材料在工程领域中的大规模、大尺寸可制造性所做的探索。

## 1 可变形的超材料/超结构设计

超材料的自适应变形能力与其微结构紧密关联, 甚至可以通过微结构设计来定制变形行为。下面介绍几类可以实现大变形行为的超材料。

### 1.1 泊松比可调的超材料

某些泊松比可调制的特殊蜂窝结构, 可通过累计单个蜂窝壁的弹性变形实现整体结构变形<sup>[9]</sup>。蜂窝结构本身具有重量轻、可设计、任意变形等特点, 可应用在机翼结构中<sup>[10]</sup>。

自然界中许多植物可以进行自适应外形改变<sup>[11-15]</sup>。Pagitz等<sup>[16]</sup>以植物变形为启发, 介绍了一种新颖的变形结构。将具有定制五边形或六边形横截面的棱柱形胞元连接

收稿日期: 2023-11-03; 退修日期: 2024-01-22; 录用日期: 2024-03-15

引用格式: Wang Chengyu, Wang Zhigang, Wang Huitian, et al. Advances on metamaterial based adaptive morphing structural technology [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(05): 45-59. 王铖玉, 王志刚, 王惠添, 等. 基于超材料的自适应变体结构技术研究进展[J]. 航空科学技术, 2024, 35(05): 45-59.

起来,可以得到在一定的压力下变形为指定外形的结构。将其应用于变形机翼证实这种设计概念的潜力,如图1所示。Tong Liyong等<sup>[17]</sup>提出了带有空隙和压力单元的蜂窝结构的最佳设计并进行了结构分析。Vos等<sup>[18]</sup>阐述了压力自适应蜂窝的力学、分析模型和试验测试数据,并在92cm弦长的NACA 2412翼段尾部35%的位置放置这种压力自适应蜂窝。低速风洞试验表明,压力自适应蜂窝可成功用于改变翼段的气动特性。

美国国防部预先研究计划局(DAPPA)、美国空军研究实验室(AFRL)、美国国家航空航天局(NASA)联合发起的DAPPA/AFRL/NASA智能机翼项目<sup>[19]</sup>,研制了一种变后缘机翼结构,机翼后缘采用蜂窝自适应支撑结构,如图2所示。其具有较低面内刚度,同时还具有厚度方向的足够刚度来承担气动载荷,与柔性蒙皮配合可以降低结构变形对驱动力的需求。

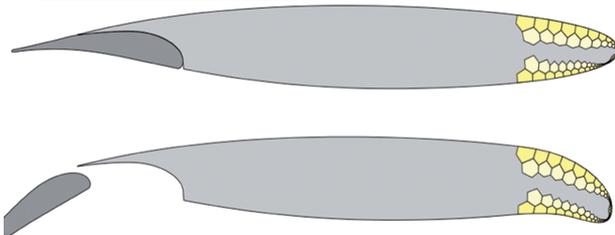


图1 受植物变形启发的类蜂窝结构变形机翼<sup>[16]</sup>

Fig.1 Morphing wings inspired by plant morphing<sup>[16]</sup>

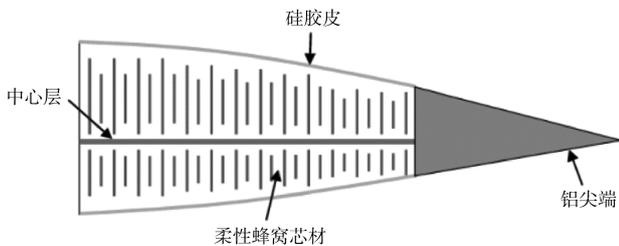


图2 蜂窝自适应支撑结构及其变后缘机翼<sup>[19]</sup>

Fig.2 Variable trailing edge wing based on honeycomb adaptive structure<sup>[19]</sup>

Bubert等<sup>[20]</sup>研制了一种可变展长的变形机翼结构,如图3所示。其中包含零泊松比柔性表皮和零泊松比蜂窝支撑结构,翼展长变形量可达100%。零泊松比蒙皮和蜂窝支

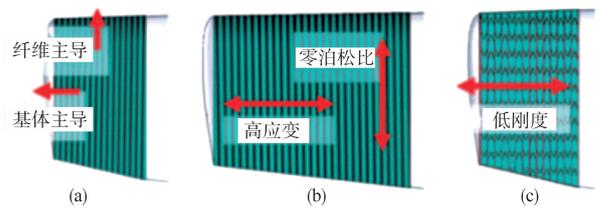


图3 零泊松比变形机翼<sup>[20]</sup>

Fig.3 Zero Poisson ratio morphing wing<sup>[20]</sup>

撑结构的配合,可解决由于两者泊松比不同带来的变形不协调问题。

宾西法尼亚大学Barbarino等<sup>[21]</sup>研制了可变弦长的直升机旋翼,如图4所示,其弦长变形量高达30%。蒙皮为硅橡胶柔性蒙皮,采用蜂窝支撑结构可以提高面外刚度,满足变形蒙皮变形与承载的要求。

Boston等<sup>[22]</sup>研发了一种由蜂窝超材料填充进NACA0012翼型的点阵机翼。这种结构具有多种稳定的形状,它允许大的弹性变形同时保持其承载力,点阵机翼升力可提高21%。

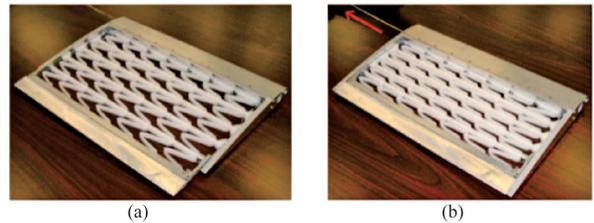


图4 由蜂窝支撑结构组成的变形旋翼样件<sup>[21]</sup>

Fig.4 Morphing wing sample composed of honeycomb structure<sup>[21]</sup>

## 1.2 双稳态超材料

双稳态超材料具有两种稳定状态,通过施加载荷,使其从一种稳定状态变换至另一种稳定状态。在其变形过程中可捕获弹性变形能,且可通过外部输入能量恢复至初始形状,实现能量存储与转换。利用其变形形式及材料内部多个胞元的空间排布与组合,可实现多种特定的变形模式调控,有望用于飞行器变体技术研究中。

Shan Sicong等<sup>[23]</sup>揭示了可以捕获外界能量的双稳态结构变形机制,如图5所示。图5(a)为弹性梁在轴向受压时发生屈曲,卸载后完全恢复到初始形状。图5(b)为受约束的倾斜弹性梁,当其一端垂直移动时,梁会在两个稳定构型之间切换;在这种情况下,结构在卸载时保持其变形的形状。在加载过程中施加给结构的大部分能量作为阈值能量被保存在系统中,而当外界向系统提供比阈值能量大的能量时,它们的初始构型可以恢复。

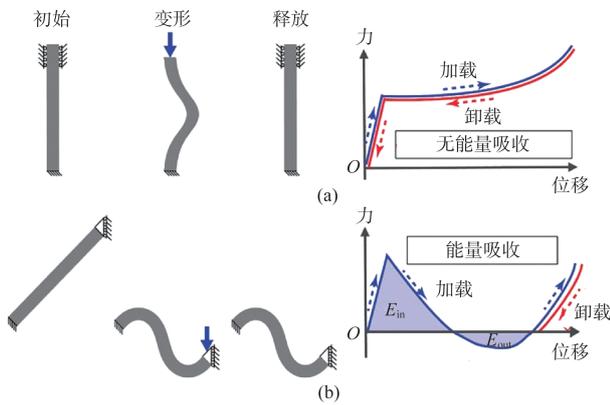


图5 双稳态弹性梁的变形机制<sup>[23]</sup>

Fig.5 Energy absorption of bistable elastic beam<sup>[23]</sup>

Haghpanah 等<sup>[24]</sup>提出了一种从一维基元到三维的双稳态材料构筑方法,可实现复杂的变形模式,其形状变形如图6所示。图6(a)所示为一个从左到右的设计序列:一个双稳定的三角形结构,具有不同角度运动范围的有效多稳定铰链机构,二维和三维多稳定线性延伸单元以及一个样本的周期性形状可重构结构。图6(b)所示为一种拉伸比固定的可重构平面结构的不同变形构型,包括o形、v形、x形、全收缩、i形和全展开构型。图6(c)所示为一种高度膨胀单元及其变形前后示意图。图6(d)为由相同基元组成的不同稳定形态的三维结构示意图。

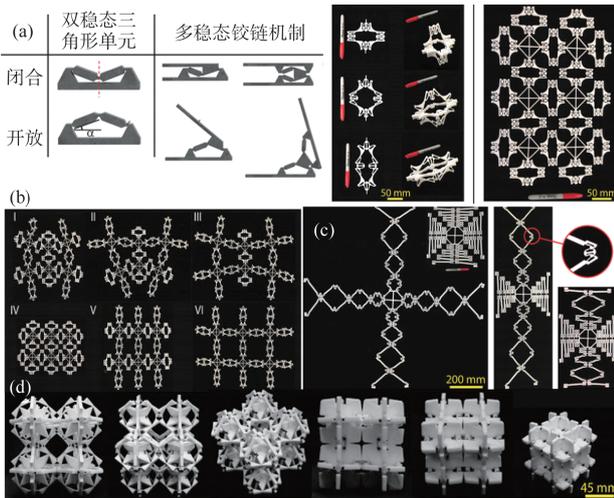


图6 多稳态构型演示<sup>[24]</sup>

Fig.6 Multistable configuration demonstration<sup>[24]</sup>

通过巧妙的结构设计可以定制不同维度变形构型,以满足不同的变形需求。Meng Zhiqiang 等<sup>[25]</sup>提出了一个可折叠单元胞的合理设计、制造和编程框架策略,使机械超材料能够进行可逆、可展开和多步转换。图7(a)所示单元胞

可以在没有外部约束的情况下,通过拉伸与释放获得不同的稳定模式。由图7(b)、图7(c)可知,通过对单元胞在一维至三维空间的排列组合,可以获得不同的变形形式,并且通过对单元胞变形模式与空间排布的综合考虑,可以得到不同的转换路径的分叉,进而可以实现不同的加载路径。

Zhang Hang 等<sup>[26]</sup>利用折纸微观结构的弹性拉伸、压缩不对称性设计了一类可伸缩的x形三稳态结构,如图8(a)所示。图8(b)、图8(c)利用这些结构作为构件元素,设计和演示了具有一维圆柱几何形状、二维方形晶格和三维立方、八面体晶格分级机械超材料,它们具有扭转多稳定性或独立控制的多向多稳定性能力。力学超材料的稳态数随胞数的增加呈指数级增长。

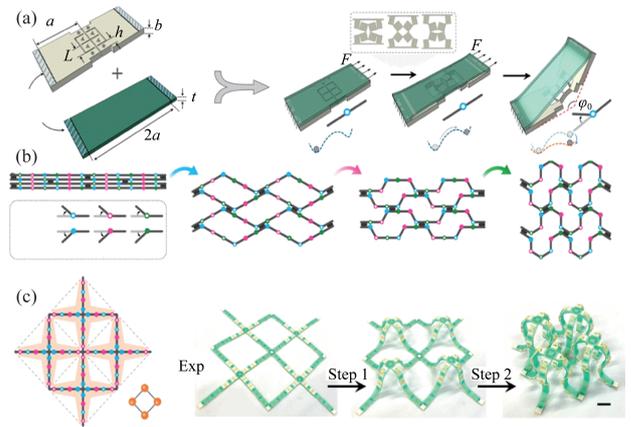


图7 双稳态铰链组成的多步多模式超材料<sup>[25]</sup>

Fig.7 Multistep multimode mechanical metamaterial composed of bistable hinge<sup>[25]</sup>

对于需要可调功能和适应不同环境的智能结构,具有大变形幅度的快速形状重构能力至关重要。Pan Fei 等<sup>[27]</sup>提出了一类具有大展开比和快速形状重构响应的二维和三维手性超材料,如图9所示。通过合理设计和制造基本单元,有效地利用了预应力壳体的双稳态性和能量转换能力,以兼容的方式实现了自发的形状重构。在变形幅度与响应速度等方面具有明显优势。

大多数研究为平面双稳态结构,Giri 等<sup>[28]</sup>则研究了圆柱形双稳态结构,如图10所示。改变每层梁的厚度可控制双稳态圆柱的能量吸收和变形顺序。

双稳态变形一般在压缩载荷下实现,但Rafsanjani 等<sup>[29]</sup>设计了两个中间夹紧弯曲的平行梁,可以实现拉伸载荷作用下的双稳态作用。如图11所示,当沿着y方向拉伸,结构会从最初的波状模式,经历几个亚稳态,直到完全延伸。

Shim 等<sup>[30]</sup>提出了一种受玩具启发得到的基于连续壳

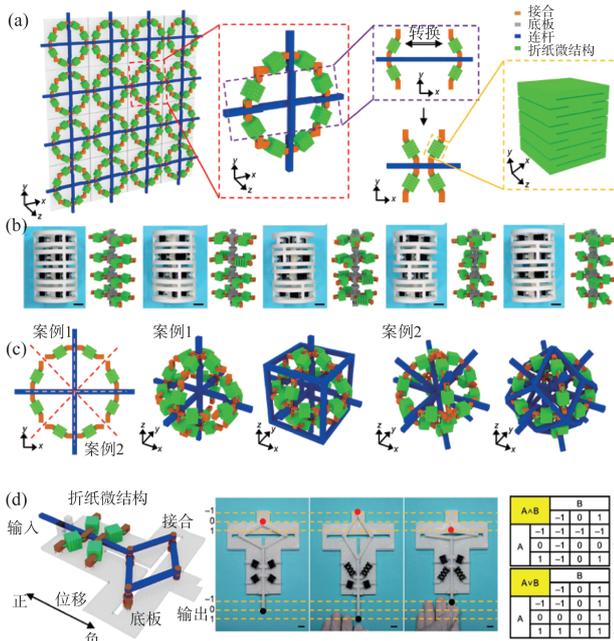


图8 折纸微结构多稳态构型演示<sup>[26]</sup>

Fig.8 Demonstration of multistable configuration of origami microstructures<sup>[26]</sup>

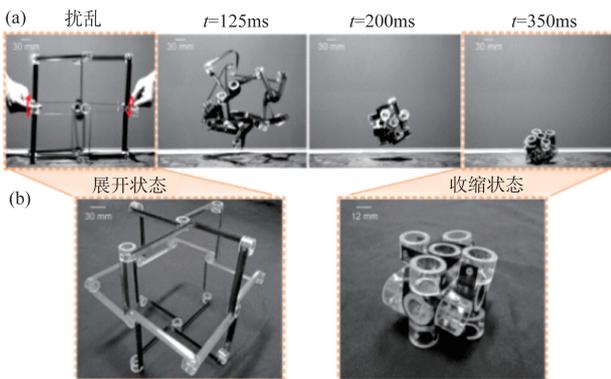


图9 三维超材料的快速形状重构过程<sup>[27]</sup>

Fig.9 Rapid shape reconstruction of three-dimensional metamaterials<sup>[27]</sup>

的双稳态结构,其几何结构包括一个带有规则的圆形空隙阵列的球壳,可在压力载荷作用下经历屈曲而引起结构外形变化,如图12所示。为了使屈曲引起模式转变,这些空洞的数量和排列被限制在5种特定的构型中。在临界压力下,会产生稳态构型的转变。

折剪纸是一种高效构建可变形机构的方法。Rafsanjani等<sup>[31]</sup>提出了一类具有可切换的可膨胀性的平面超材料,如图13所示,通过改变基本切割剖面的几何形状,可以方便地控制超材料的可扩展性、刚度和双稳态性,该策略可用于设计可展开结构、柔性设备及具有可调力学性能

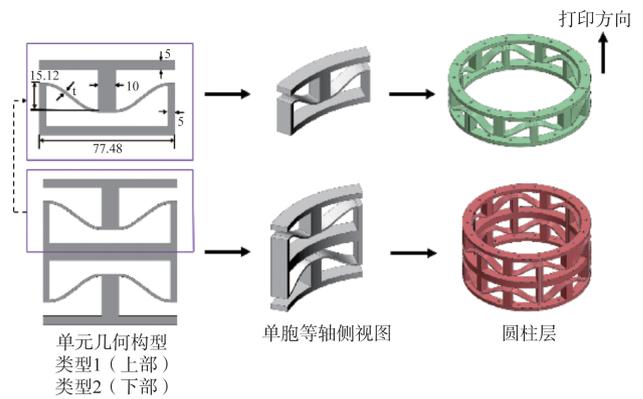


图10 多稳态圆筒结构<sup>[28]</sup>

Fig.10 Multistable cylinder structure<sup>[28]</sup>

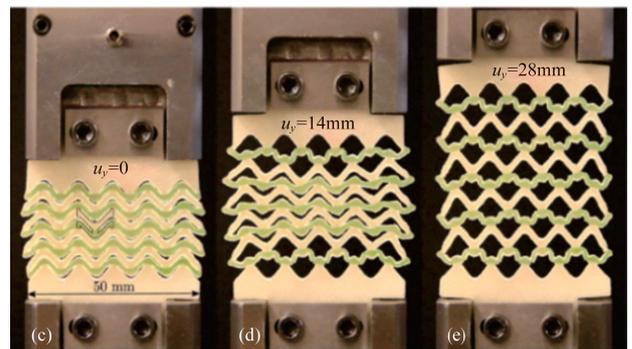
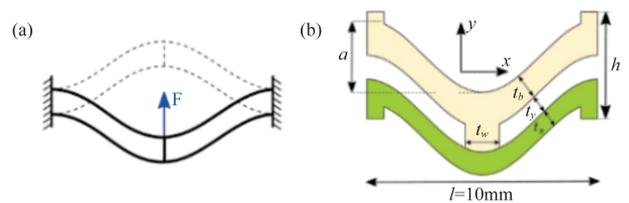


图11 拉伸双稳态结构<sup>[29]</sup>

Fig.11 Tensile bistable structure<sup>[29]</sup>

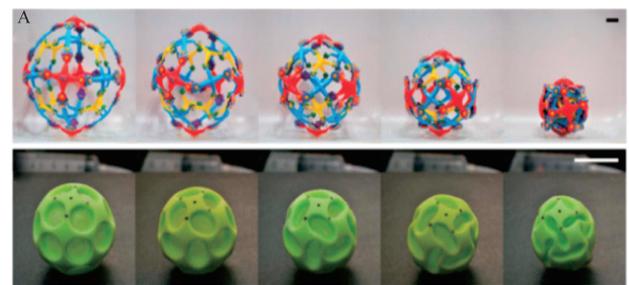
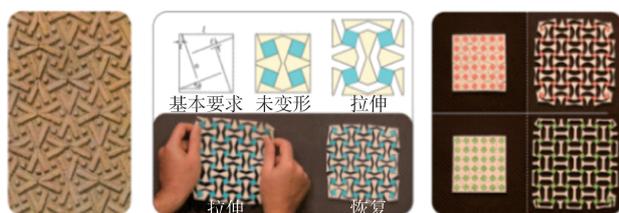


图12 逐渐变形的单胞<sup>[30]</sup>

Fig.12 A gradually deformed unitcell<sup>[30]</sup>

的可穿戴皮肤传感器。

哈佛大学Melancon等<sup>[32]</sup>以折纸艺术为灵感,研制了具有多稳态的刚性壁可展开结构。将双稳态折纸形状库中的单元进行组合,建造出米级的功能结构,如拱门和紧急避难

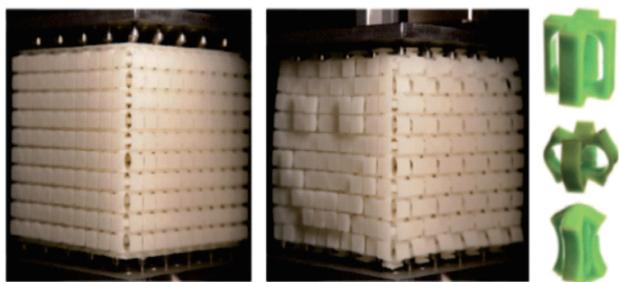
图13 双稳态拉胀超材料<sup>[31]</sup>Fig.13 Bistable expansion metamaterial<sup>[31]</sup>

所,为建造大型可展开系统提供有效途径。蠓的翅膀有一个精致的自然折叠系,在飞行过程中通过双稳态锁定机制保持打开,并且在没有肌肉驱动的情况下可快速自我折叠。这种机制依赖于蠓翅膀上富含蛋白的关节。Faber等<sup>[33]</sup>受生物翅膀启发,建立了一个弹簧折纸模型,表现出不寻常的自锁、快速变形和几何容错的性能。

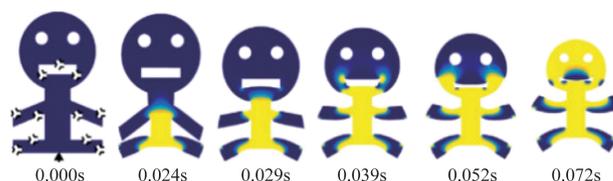
此外,具有双稳态特性的复合材料及结构,因其可变形性而可应用于航空航天领域。哈尔滨工业大学戴福洪等<sup>[34]</sup>提出了一种基于双稳态复合管的轻质可重构天线,其所设计的天线结构可以在无外部支撑的情况下稳定在展开和装载状态;他们还提出了一种由一根预压缩主梁和一对支撑梁组成的新型双稳态结构,激光加热残余应力引起主梁与支撑梁之间的变形差,使主梁在两根支撑梁的约束下发生屈曲,具有双稳态特性<sup>[35]</sup>。除此之外,具有初始曲率的双稳态复合材料壳体,在固化过程中产生的热残余应力可引起扭转变形,戴福洪等<sup>[36]</sup>提出了一种通过引入可调节角度来控制扭转变形的方法,为无扭转双稳态复合材料结构的设计提供了指导。

### 1.3 其他形式变体结构

变体结构的排布一般为均匀周期性排布,Coulais等<sup>[37]</sup>介绍了一种通过使用各向异性变形的体素进行组合的新策略用于设计非均匀超材料。图14所示为1000个具有各向异性变形性质的体素单元,通过多种方式组合在一起,使其在单轴压缩下,呈现出想要的变形。

图14 非周期组合设计<sup>[37]</sup>Fig.14 A periodic combination design<sup>[37]</sup>

合理利用缺陷可以实现目标变形行为。Jin Lishuai等<sup>[38]</sup>的研究表明,缺陷的存在可以重定向或引导变形。通过局部改变基本元素的形状或刚度,并利用过渡锋面与晶格缺陷的相互作用来精确控制过渡波的方向、形状和速度,可实现可预测和可编程的强非线性超材料变形,如图15所示。

图15 可预测变形示意图<sup>[38]</sup>Fig.15 Predictable deformation indication<sup>[38]</sup>

由超材料组成的变体结构在外界刺激下表现出预期变形行为,然而大多数设计只能在机械载荷下很好地工作。韦凯等<sup>[39]</sup>结合拓扑优化实现了具有不同泊松比和热膨胀系数的双功能超材料,如图16所示,可在力学载荷及环境载荷作用下有效地控制结构变形。

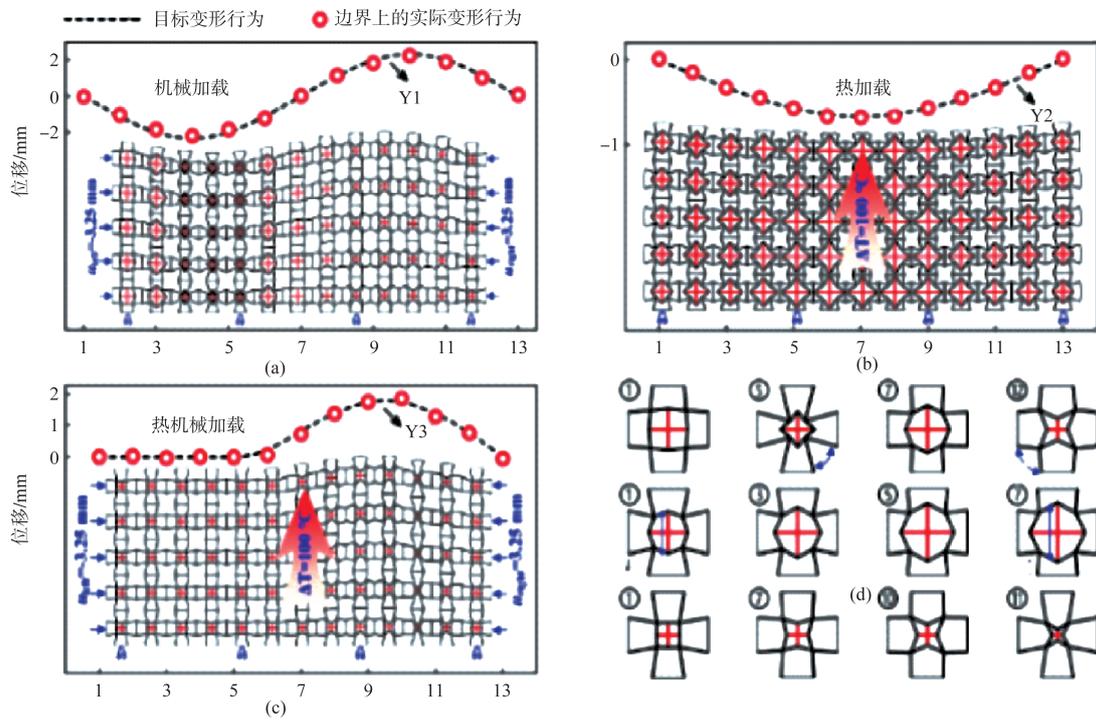
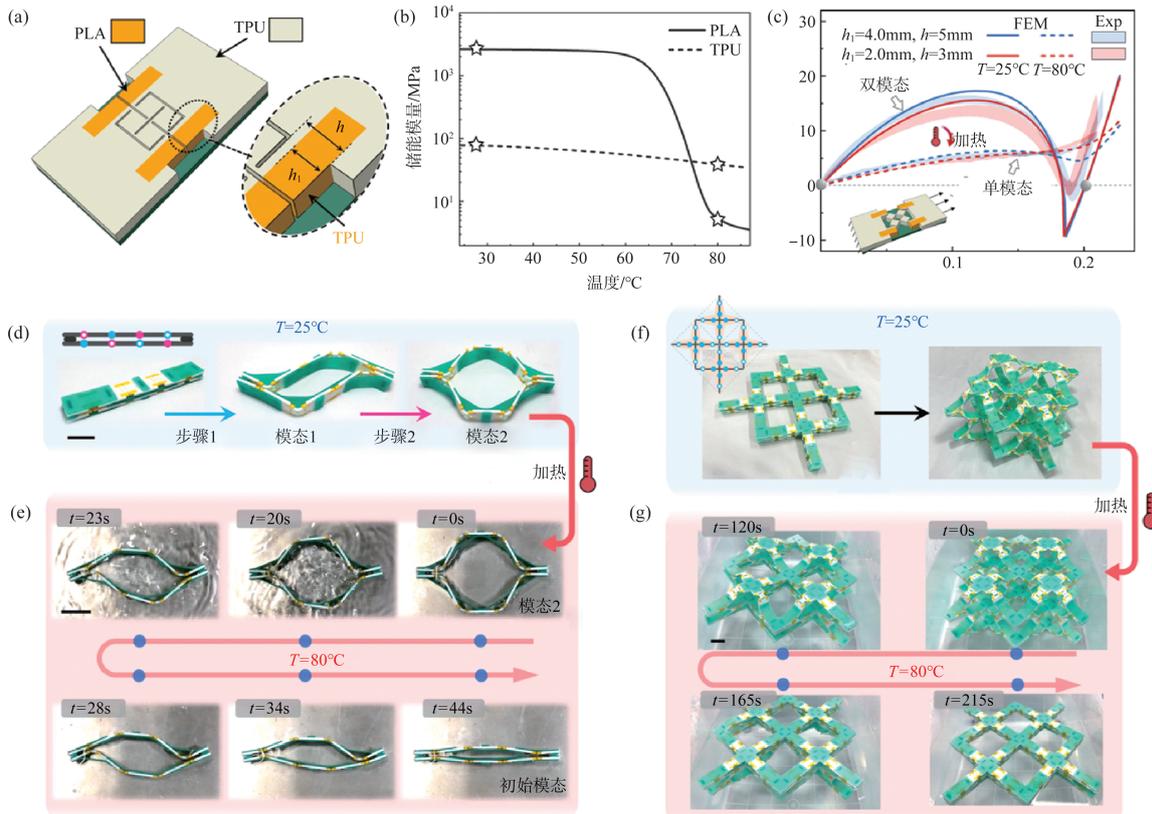
## 2 集成智能驱动的超材料/超结构设计

除了上述通过单一的微结构设计来实现自适应变体外,将智能材料/智能驱动器与超材料/超结构相结合也可以实现自适应变体技术,下面将展开介绍。

### 2.1 智能材料与超材料/超结构相结合

智能材料与超材料/结构相结合可以实现多物理场刺激下的多路径、多特性、多功能的自适应构型转变。引入温感材料可以实现多路径变形形式。清华大学 Meng Zhiqiang等<sup>[25]</sup>在结构中引入温度感应材料,可以在原来多路径机械加载的基础上,获得更多加载路径的结构转换形式,并且得到的结构可以通过温度进行驱动,除去了繁琐的机械加载装置,更有利于轻量化目标的实现。图17(a)所示为加入温度感应材料后单元胞的结构形式。图17(b)为探索温度感应材料的结构尺寸对驱动力的影响,可以得到具有不同驱动能力的单元胞。图17(d)~图17(g)为温度感应材料导致的不同加载路径。他们通过对多步变化超材料加设微控制器、驱动器等组件,制作了一种在感知到临界速度时可以自主展开的机器人。Meng Zhiqiang等<sup>[40]</sup>开发了一种多稳定的超材料,可以根据不同的温度进行自主恢复和可编程变形。

智能材料与超结构相结合也可实现自折叠变形。Manen等<sup>[41]</sup>研制了一种具有多功能性的自折叠技术,如图

图 16 基于重入双功能超材料设计的变形结构<sup>[39]</sup>Fig.16 Shape morphing structures basing on the re-entrant bi-functional metamaterials<sup>[39]</sup>图 17 基于温度响应超材料的可恢复转换<sup>[25]</sup>Fig.17 Recoverable transformations of metamaterials using temperature-responsive polymers<sup>[25]</sup>

18所示。打印样品在高温刺激下可以由最初的平面结构变形为预期的三维形状,从而将表面相关功能与复杂的三维形状相结合。Felton等<sup>[42]</sup>提出了一种能够在毫米尺度变形的自折叠结构,其特征尺寸范围为0.5~40mm。可以通过一个全局热源来激活同时折叠。

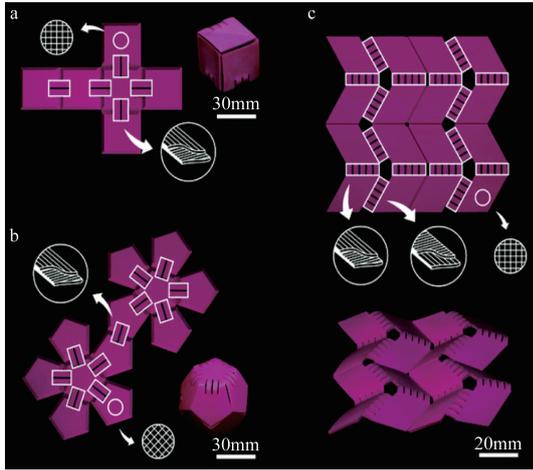


图18 自折叠变形示意图<sup>[41]</sup>

Fig.18 Self-folding deformation schematic<sup>[41]</sup>

智能材料与超结构的结合还可实现膨胀特性的多样调控。多数天然材料受热后向各个方向均匀膨胀,而超材料可通过微结构调控其热膨胀特性。Ni Xiaoyue等<sup>[43]</sup>提出利用具有微米特征尺寸的双材料蛇形晶格作为力学超材料系统的基元,该系统能够支持正与负、各向同性与各向异性、均质与非均质热膨胀特性,并具有不同寻常的剪切、弯曲和梯度热膨胀模式的附加特性。图19(a)所示为单胞结构示意图。图19(b)所示为实物拍摄图。图19(c)所示为其变形模式图片。

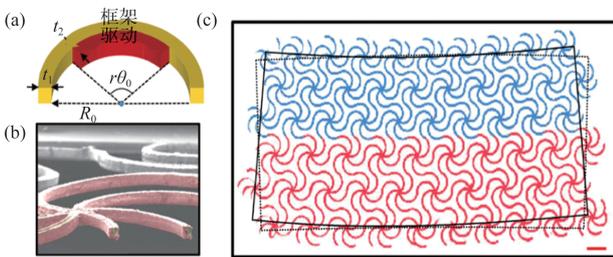


图19 具有可调热膨胀的二维超材料的设计<sup>[43]</sup>

Fig.19 Design of 2D mechanical metamaterials with tunable thermal expansion<sup>[43]</sup>

引入形状记忆聚合物还可实现泊松比和带隙可调节的超结构。Yang Qingsheng等<sup>[44]</sup>以具有特殊热力学性能的形状记忆聚合物为基础,利用基于弯曲梁的形状记忆聚合物,

设计了一种带隙可调的手性超材料,如图20所示。用理论和有限元方法研究了手性超材料的弹性模量、泊松比和晶格参数之间的关系。研究结果表明根据几何参数与带隙的关系,可以定制所需的超材料性能<sup>[45]</sup>。

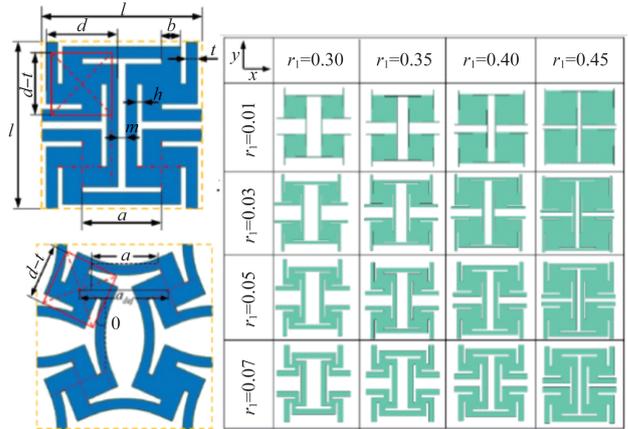


图20 设计的手性超材料<sup>[44]</sup>

Fig.20 The designed chiral metamaterial<sup>[44]</sup>

受植物根据环境刺激自主改变形态和功能启发, Jiang Yijie等<sup>[46]</sup>使用能对不同环境刺激做出反应的基于聚二甲基硅氧烷和水凝胶的材料,设计并用三维打印技术制造出了能够进行简单逻辑运算的自致动结构系统,并控制了对多种刺激做出反应的致动时间,如图21所示。

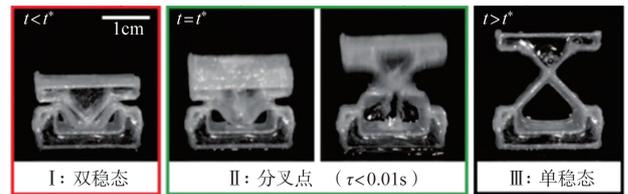


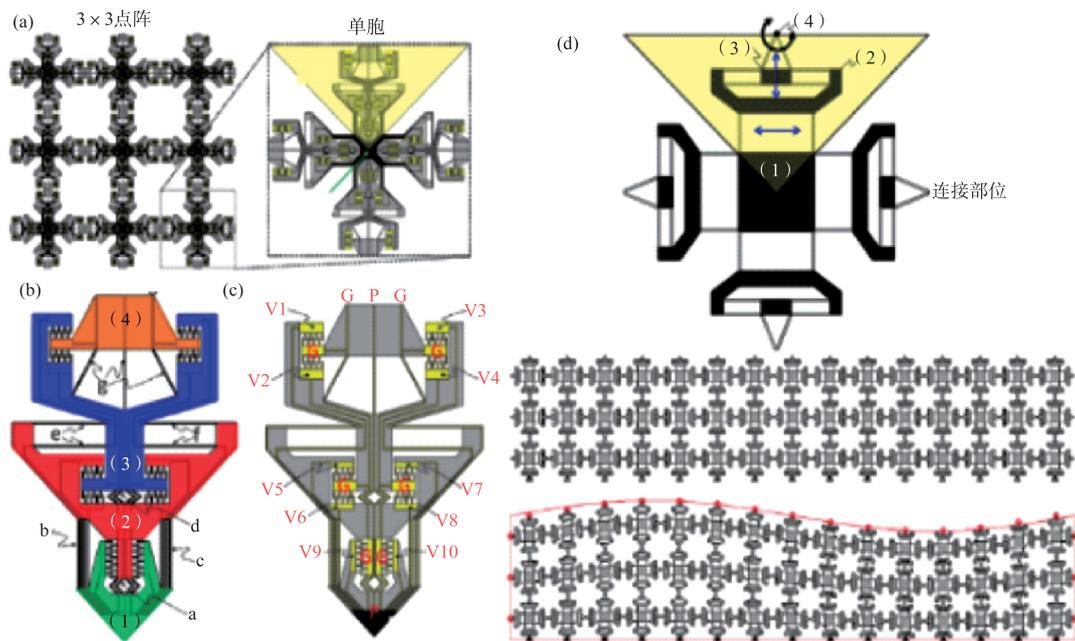
图21 自致动结构系统驱动示意图<sup>[46]</sup>

Fig.21 The transition from bistable to monostable<sup>[46]</sup>

引入磁场感应材料可以实现超结构的面积密度可调性。Sim等<sup>[47]</sup>研制了一种磁力双层超材料,展示了面积密度可调性和面积保持能力。双层超材料由两个具有不同磁化分布的磁性软材料阵列组成。在磁场作用下,每一层的表现各不相同,这使超材料可以将其形状重新配置为多种模式,并在不改变其整体尺寸的情况下显著调整其面积密度,可进一步用作主动声波调节器,以调整带隙和波的传播。

## 2.2 机械驱动与超结构的结合

机械驱动与超结构的结合可实现快速可控的自适应构型转变。Shaw等<sup>[48]</sup>介绍了一种利用主动控制通过柔性元件的变形来改变其形状的结构,如图22所示。该控制策略利用线性和封闭形式的分析工具快速计算所需的最佳内部

图 22 由重复单元胞组成的二维形状变形微结构<sup>[48]</sup>Fig.22 Two-dimensional morphing microstructure composed of repeating unit cells<sup>[48]</sup>

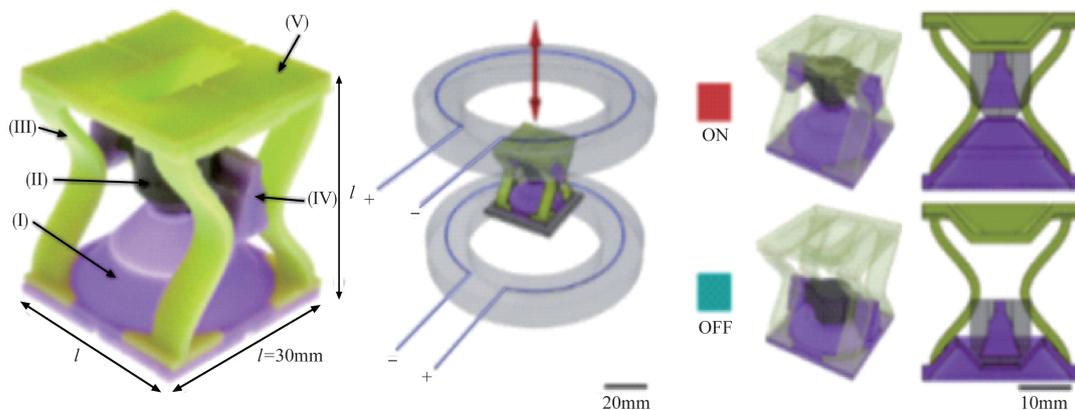
驱动力以实现变形。适合高精度应用,利于通过少量可重复的单元快速可控改变形状的材料。

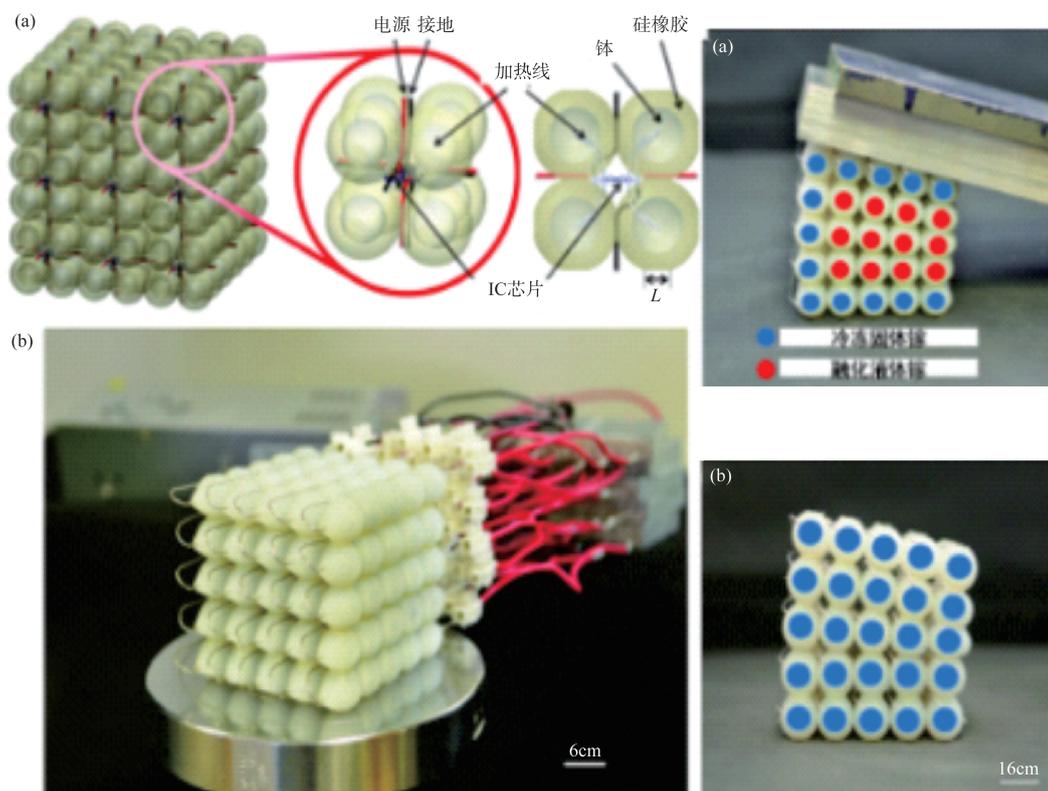
传统的机械超材料通过单元微结构拓扑优化实现目标泊松比形状转换等功能。以一种不可更改的方式被编程到超材料的布局中,不能根据实际需要实时写入或读取。Chen Tian 等<sup>[49]</sup>设计了一个包括物理二进制元素数组的结构,如图 23 所示。类似于数字位具有清晰的写入和读取阶段,每个元素都可以通过磁驱动独立且可逆地在结构两个稳态间进行切换,并且可以在系统被重新编程之前进行可逆循环。

Ferrand 等<sup>[50]</sup>制造了一种双稳态器件,它们可以被动地过滤机械输入,将其转化为电信号,通过外部磁场复位到原

始传感状态。试验证明了此种元器件的滤波能力和快速被动响应。在机器学习算法的帮助下,这种智能结构可以在机器人、交通和医学等领域被训练成以自主方式感知、交流、计算和驱动,且能耗较低。

超材料的刚度特性还可通过自适应结构设计来实现。Hopkins 等<sup>[51]</sup>研制了一种可调刚度特性的超材料,如图 24 所示。通过将镍铬线穿过含镓硅橡胶球的宏观立方晶格,施加电流熔化镓核,降低晶格刚度。模拟结果表明,随着核尺寸的缩小,液化、固化速度加快,从而快速实现超材料刚度控制。通过液化的晶格内指定镓核,并重新固化,还可实现形状重新配置。

图 23 包括物理二进制元素数组的超材料设计<sup>[49]</sup>Fig.23 Metamaterial design including arrays of physical binary elements<sup>[49]</sup>

图24 可调谐刚度特性的超材料<sup>[51]</sup>Fig.24 Metamaterials with tunable stiffness characteristics<sup>[51]</sup>

### 3 考虑制造工艺的超材料/超结构设计

制造工艺对于自适应变体结构技术的落地应用具有至关重要的作用,而增材制造技术为结构的可设计性提供了保障。

NASA与麻省理工学院(MIT)的科研人员合作,设计实现了一种超轻可变形机翼,如图25所示。将点阵材料用于飞翼布局无人机设计,成功地实现机翼可变形。通过电机施加外部载荷时产生相应的扭转和弯曲变形,机翼能够在不同的稳态间切换变形,并且每个稳定状态都具有一定的承载能力,不需要持续的能量输入。这是一种保证未来变体飞行器具有轻量化和低能耗特性的理想结构<sup>[52]</sup>。合理的结构设计,通过增材制造一体式打印或基元装配式打印技术,得到基于超材料的可变形飞行器设计与制造方法。

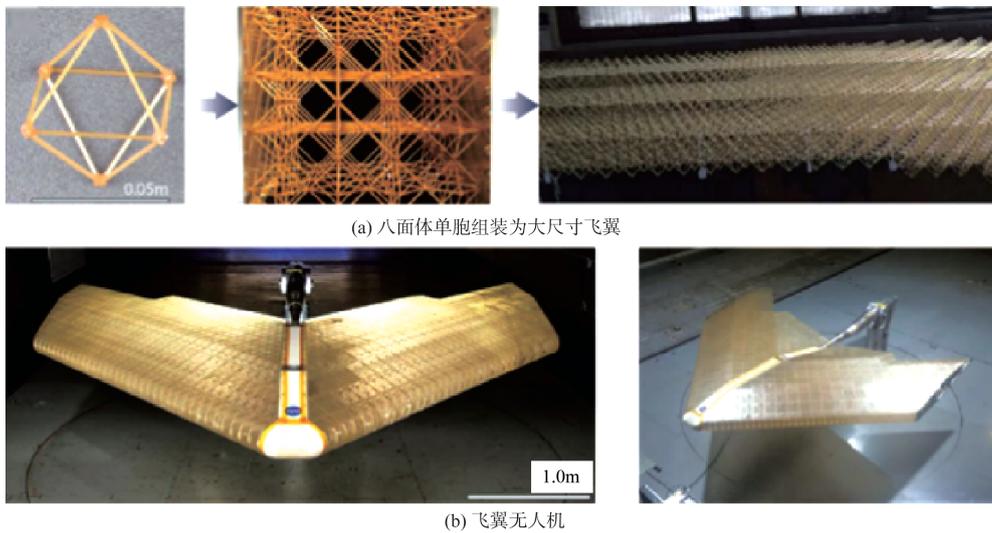
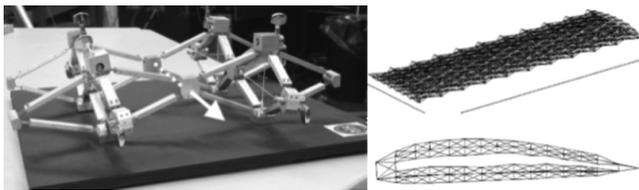
宾夕法尼亚大学Lesieutre等<sup>[53]</sup>研制了一类以“肌腱”作为驱动方式的空间桁架结构,如图26所示。为了降低各单元之间的弯矩传递,需要通过柔性铰链连接桁架结构的节点,以便于实现结构变形。不同节点之间连接的绳索被称为“肌腱”,可以通过调节绳索的张力、长度驱动变形。释放不同位置绳索的张力可以改变这种自适应支撑结构的刚

度,降低变形时的应变能,降低驱动力需求。

多材料3D打印为制造可展开结构创造了新的机会。Chen Tian等<sup>[54]</sup>设计了可逆的、可展开的平面结构,如图27所示。选择承载力、变形形态已知的稳态单胞作为基元,可组合形成展开后的三维多层次结构。其中执行器的激活力由接头材料与长度来表示。

Ma Li等<sup>[55]</sup>提出了一种基于多材料嵌锁装配方法的双稳态单元设计策略。实现了具有负刚度效应的完全对称双或多稳态特性,并且具有良好的可重构性、零泊松比及可恢复变形大等优势。采用几何梯度和材料梯度设计控制确定性变形序列,具有丰富的可编程性。可实现一维到三维多稳定超材料的正、零、负各向同性或各向异性可调变形,如图28所示。

虽然以3D打印为代表的增材制造工艺实现了复杂变体结构的制造,但目前3D打印设备能够一体打印的最大尺度一般在1m左右,无法胜任更大尺寸产品的生产,这在一定程度上限制了超材料结构的实际工程运用。为了解决这一问题,基元装配式技术应运而生。批量生产超材料单元,并将成千上万的超材料基元装配在一起,便可以实现现在较

图25 基于点阵材料的可变形飞翼无人机<sup>[52]</sup>Fig.25 Deformable flying wing UAV based on lattice material<sup>[52]</sup>图26 由“肌腱”作为驱动方式的空间桁架结构<sup>[53]</sup>Fig.26 Space truss structure with "tendon" as the driving mode<sup>[53]</sup>

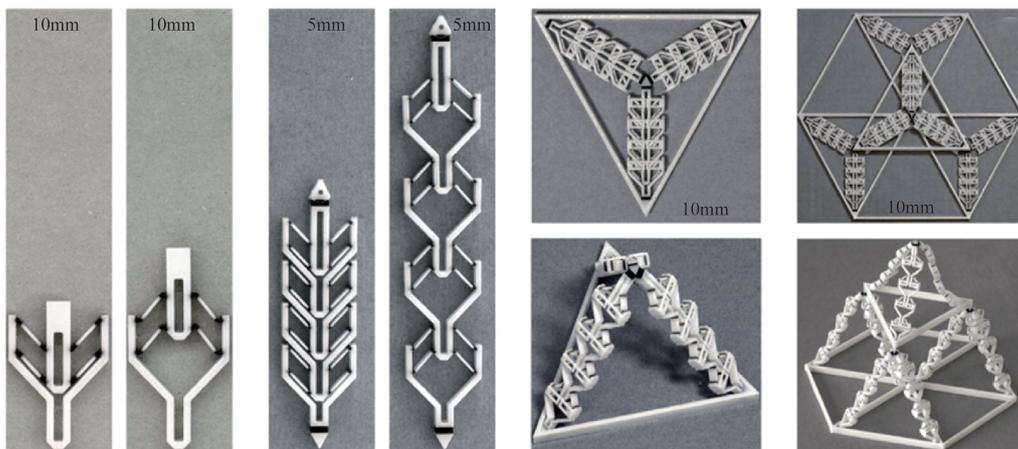
短的时间内制造出大尺寸的基于超材料的产品。

基于这一思想, Cheung 等<sup>[56]</sup>提出了一种由平面单元组装的点阵结构,如图29所示。将相同形状的碳纤维增强复合材料制造得到的平面单元,通过一定的排布方式可以组成八面体点阵结构,并能够通过增加新平面单元不断扩展三个

维度的尺寸。

MIT的Jenett<sup>[57]</sup>提出了一种组装点阵设计元素——“体素”。通过螺栓连接将不同几何形状的二维片材组装成不同的“体素”,进而将“体素”组装成完整的点阵结构,如图30所示。通过设计不同几何结构的二维片材,组装得到的“体素”能够实现负泊松比、压扭等多种超常力学行为,具有高度的可设计性。

将点阵材料应用于实际目标外形,常常存在点阵与曲率外形不匹配等问题。Liu Yabo 等<sup>[58]</sup>提出了一种考虑不同特征的零件轮廓的共形晶格结构映射设计方法。参照有限元法中的等参数单元,将几何变换引入点阵设计,可以从规

图27 由单个多稳态基元组成的平面结构以及展开后形成的三维多层次结构<sup>[54]</sup>Fig.27 The planar structure composed of a single multi-stable primitive and the three-dimensional multilevel structure formed after expansion<sup>[54]</sup>

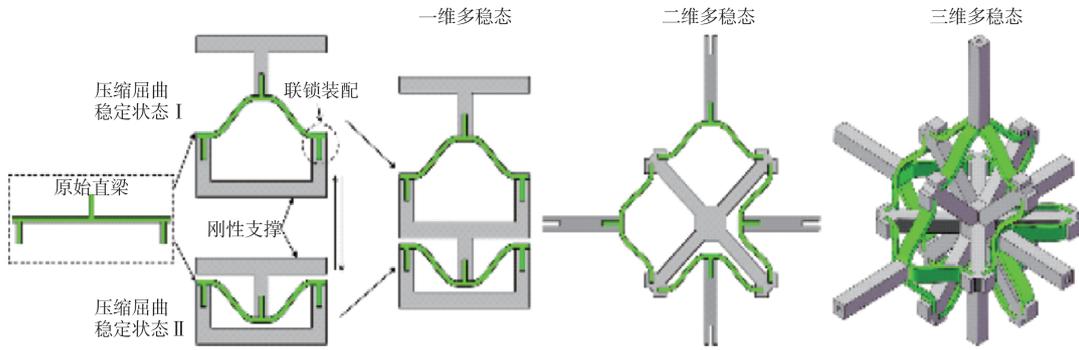


图28 一维至三维多稳态结构<sup>[55]</sup>

Fig.28 One-dimensional to three-dimensional multi-stable structures<sup>[55]</sup>

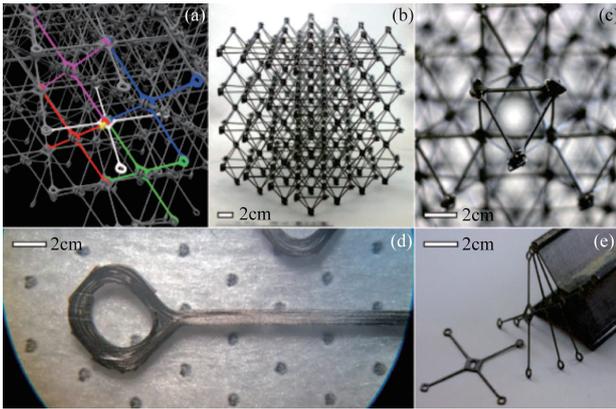


图29 由重复的平面单元组装而成的八面体点阵结构<sup>[56]</sup>

Fig.29 An octahedral lattice structure composed of repeated planar elements<sup>[56]</sup>

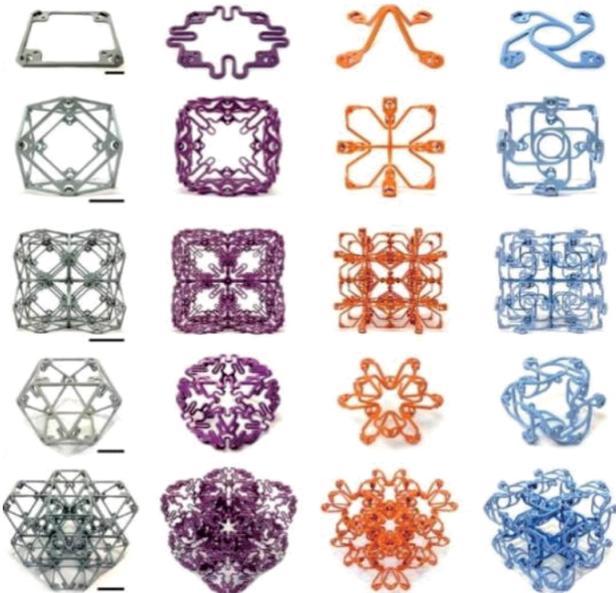


图30 多构型“体素”形成的组装点阵结构<sup>[57]</sup>

Fig.30 An assembled lattice structure formed by multi-configuration “voxels”<sup>[57]</sup>

则点阵映射得到不规则点阵。图31所示为其映射示意图。

除点阵结构之外,其他类型的超材料结构也可以通过增材制造的思想制造。Xu Rui等<sup>[59]</sup>在3D针雕玩具的启发下,利用卡扣结构设计了一种可在二维平面内扩展尺寸并可重复使用的能量吸收结构,如图32所示。小球的冲击试验证明了此种结构对冲击具有显著的吸收和捕获作用。

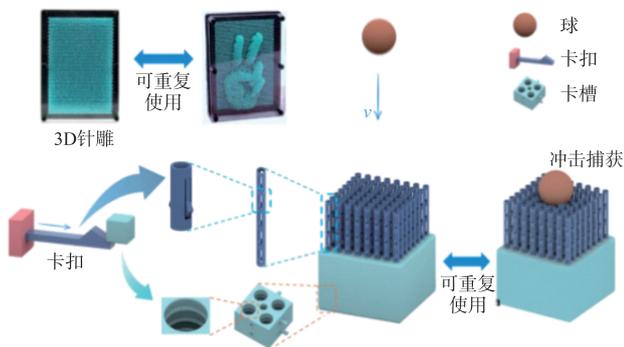
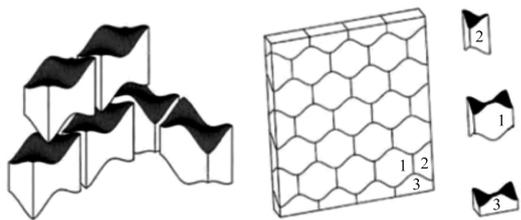
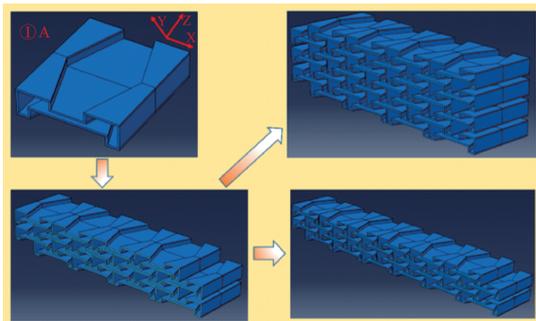
初始体积 (红色) 初始体积 (绿色)	目标体积	几何映射
A-1	A-2	A-3
B-1	B-2	B-3

图31 3D共形结构的例子<sup>[58]</sup>

Fig.31 Examples of 3D conformal structures<sup>[58]</sup>

如图33所示,拓扑互锁结构可以在二维面内通过周期性重复实现扩展,并在组装后实现三个正交方向的互锁,从而形成大体积的整体结构。部分拓扑互锁结构如骨形单元已在建筑领域有所应用<sup>[60-61]</sup>。

与互锁结构类似,Zhao Yang等<sup>[62]</sup>提取折纸中的设计元素设计了一种在 $x, z$ 方向可自锁的结构,如图34所示。通过单元的堆叠,此种结构可在三个方向上扩展,从而组成任意尺寸的能量吸收结构。

图32 可重复使用的卡扣组装超材料<sup>[59]</sup>Fig.32 Reusable snap-fit metamaterial<sup>[59]</sup>图33 拓扑互锁结构<sup>[61]</sup>Fig.33 Topological interlock structure<sup>[61]</sup>图34 受折纸启发的自组装周期性板晶格结构材料示意图<sup>[62]</sup>Fig.34 The schematic of self-assembly periodical plate-lattice structural material inspired by origami<sup>[62]</sup>

## 4 发展趋势分析

可变体是未来飞行器发展的重要方向之一。人工超材料的力学性能及功能特性可通过微结构设计得以调控,因此基于超材料/超结构的变体结构技术,可作为一种柔性结构技术以其更强的可设计性而展现出更多的潜力与优势。本文总结了当前基于超材料的自适应变体结构技术,并对其发展趋势进行了总结与展望:

(1)微结构设计理论欠缺。目前,大变形能力主要可依靠双稳态变形来实现。兼具承载与变形功能的超材料,对微结构的变形机制特别是大变形能力具有较高要求,且需

要在任意外载作用下能保持结构的机械完整性,因此如何设计微结构具有较大的挑战。

(2)驱动方式有限。机械驱动是当前较为理想的可实现大变形的驱动方式,但是其占体积空间且重量较重的问题也不容忽视。如何开展其他驱动方式的探索以及驱动与结构材料一体化设计,具有重要的科学价值及工程应用价值。此外,飞行器空间较大,驱动器一般数量较多,且空间分布复杂。如何对驱动器精确控制,需要特定的算法研究,以最终实现精确的变体功能。

(3)考虑制造工艺的可行性。基于超材料的变体结构技术强调微结构的设计技术,但是如何能够低成本制造,是最终能否实现应用的关键。因此,在设计及性能评估过程中,应该充分考虑结构的制造工艺,结合工艺可行性开展材料/结构设计,具有极其现实的意义。

超材料为飞行器的可变体技术带来了更大的潜力及想象空间。对微结构设计理论、智能材料及驱动一体的结构设计方法进行深入探索,以及考虑制造工艺约束的关键技术突破,有望进一步提升未来飞行器的可变体技术水平。

AST

## 参考文献

- [1] 马野,宋盛菊,刘焱飞. 飞行器新结构技术展望[J]. 航空科学技术, 2023,34(11):63-74.  
Ma Ye, Song Shengju, Liu Yanfei. Prospect of new structure technology for flight vehicle[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023,34(11):63-74. (in Chinese)
- [2] 冉茂鹏,王成才,刘华华,等. 变体飞行器控制技术发展现状与展望[J]. 航空学报, 2022,43(10):432-449.  
Ran Maopeng, Wang Chengcai, Liu Huahua, et al. Development status and prospect of control technology for variant aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10):432-449. (in Chinese)
- [3] 韩传东,梅守保. 变体飞机技术应用前景与装备谱系研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(3):10-15.  
Han Chuandong, Mei Shoubao. Research on application prospect and equipment ancestry of morphing aircraft technology[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(3): 10-15. (in Chinese)
- [4] Ajaj R M, Friswell M I, Bouchak M, et al. Span morphing using the gnatspar wing[J]. Aerospace Science and Technology, 2016,53:38-46.

- [5] Woods B K S, Friswell M I. Preliminary investigation of a fishbone active camber concept[C]. ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2012,45103:555-563.
- [6] 李扬, 陈小雨, 张凯航, 等. 考虑几何非线性的变弯度机翼鱼骨结构分析研究[J]. 现代机械, 2021(4):7-13.  
Li Yang, Chen Xiaoyu, Zhang Kaihang, et al. Analysis of fishbone structure of variable curvature wing considering geometric nonlinearity [J]. Modern Machinery, 2021(4): 7-13. (in Chinese)
- [7] Tian Yun, Wang Tao, Liu Peiqing, et al. Aerodynamic/mechanism optimization of a variable camber fowler flap for general aviation aircraft[J]. Science China Technological Sciences, 2016,60(8):1144-1159.
- [8] 吴斌, 杜旭朕, 汪嘉兴. 变体飞机智能结构技术进展[J]. 航空科学技术, 2022,33(12):13-30.  
Wu Bin, Du Xuzhen, Wang Jiaying. Progress of intelligent structure technology for variant aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33 (12):13-30. (in Chinese)
- [9] 陈以金. 变体飞行器柔性蒙皮及支撑结构性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Chen Yijin. Research on flexible skin and support structure performance of variant aircraft [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 冷劲松, 孙健, 刘彦菊. 智能材料和结构在变体飞行器上的应用现状与前景展望[J]. 航空学报, 2014, 35(1):29-45.  
Leng Jinsong, Sun Jian, Liu Yanju. Application status and prospect of smart materials and structures on variant aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35 (1):29-45. (in Chinese)
- [11] Burgert I, Fratzl P. Actuation systems in plants as prototypes for bioinspired devices[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, 2009,367(1893): 1541-1557.
- [12] Harrington M J, Razghandi K, Ditsch F, et al. Origami-like unfolding of hydro-actuated ice plant seed capsules[J]. Nature Communications, 2011,2(1):337.
- [13] Braam J. In touch: Plant responses to mechanical stimuli[J]. New Phytologist, 2005,165(2):373-389.
- [14] Vincent O, Weisskopf C, Poppinga S, et al. Ultra-fast underwater suction traps[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2011,278(1720):2909-2914.
- [15] Poppinga S, Hartmeyer S R, Seidel R, et al. Catapulting tentacles in a sticky carnivorous plant[J]. PLoS One, 2012,7(9): e45735.
- [16] Pagitz M, Lamacchia E, Hol J M. Pressure-actuated cellular structures[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2012, 7(1): 016007.
- [17] Luo Quan, Tong Liyong. Adaptive pressure-controlled cellular structures for shape morphing I: Design and analysis[J]. Smart Materials and Structures, 2013,22(5):055014.
- [18] Vos R, Barrett R. Mechanics of pressure-adaptive honeycomb and its application to wing morphing[J]. Smart Materials and Structures, 2011,20(9):094010.
- [19] Bartley-Cho J D, Wang D P, Martin C A, et al. Development of high-rate, adaptive trailing edge control surface for the smart wing phase 2 wind tunnel model[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016,15(4):279-291.
- [20] Bubern E A, Woods B K S, Lee K, et al. Design and fabrication of a passive 1d morphing aircraft skin[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010,21(17):1699-1717.
- [21] Barbarino S, Gandhi F, Webster S D. Design of extendable chord sections for morphing helicopter rotor blades[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(9): 891-905.
- [22] Boston D M, Phillips F R, Henry T C, et al. Spanwise wing morphing using multistable cellular metastructures[J]. Extreme Mechanics Letters, 2022,53:101706.
- [23] Shan Sicong, Kang S H, Raney J R, et al. Multistable architected materials for trapping elastic strain energy[J]. Advanced Materials, 2015,27(29):4296-4301.
- [24] Haghpanah B, Salari-Sharif L, Pourrajab P, et al. Multistable shape-reconfigurable architected materials[J]. Advanced Materials, 2016,28(36):7915-7920.
- [25] Meng Zhiqiang, Liu Mingchao, Yan Hujie, et al. Deployable mechanical metamaterials with multistep programmable transformation[J]. Science Advances, 2022,8(23):5460.
- [26] Zhang Hang, Wu Jun, Fang Daining, et al. Hierarchical mechanical metamaterials built with scalable tristable elements for ternary logic operation and amplitude modulation[J]. Science Advances, 2021,7(9):1966.

- [27] Liu Yizhe, Pan Fei, Xiong Feng, et al. Ultrafast shape-reconfigurable chiral mechanical metamaterial based on prestressed bistable shells[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023,33(25):2300433.
- [28] Giri T R, Mailen R. Controlled snapping sequence and energy absorption in multistable mechanical metamaterial cylinders[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 204: 106541.
- [29] Rafsanjani A, Akbarzadeh A, Pasini D. Snapping mechanical metamaterials under tension[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27 (39):5931-5935.
- [30] 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.
- [31] Rafsanjani A, Pasini D. Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2016,9:291-296.
- [32] Melancon D, Gorissen B, Garcia-Mora C J, et al. Multistable inflatable origami structures at the metre scale[J]. *Nature*, 2021, 592(7855): 545-550.
- [33] Faber J A, Arrieta A F, Studart A R. Bioinspired spring origami [J]. *Science*, 2018,359(6382):1386-1391.
- [34] Guo Xiangwei, Lin Shu, Dai Fuhong. A metal hybrid bistable composite tube for multifunctional and reconfigurable antenna [J]. *Composites Science and Technology*, 2023,233:109887.
- [35] Pan Diankun, Wu Zhangming, Dai Fuhong, et al. A novel design and manufacturing method for compliant bistable structure with dissipated energy feature[J]. *Materials & Design*, 2020,196:109081.
- [36] Li Yanqi, Li Ming, Dai Fuhong. Twisting control strategy of bistable composite shell with initial curvature[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022,181:110021.
- [37] Coulais C, Teomy E, De Reus K, et al. Combinatorial design of textured mechanical metamaterials[J]. *Nature*, 2016,535(7613): 529-532.
- [38] Jin Lishuai, Khajetourian R, Mueller J, et al. Guided transition waves in multistable mechanical metamaterials[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020,117(5):2319-2325.
- [39] Han Zhengtong, Wang Zhonggang, Wei Kai. Shape morphing structures inspired by multi-material topology optimized bifunctional metamaterials[J]. *Composite Structures*, 2022, 300: 116135.
- [40] Meng Zhiqiang, Qin Wenkai, Mei Tie, et al. Bi-material sinusoidal beam-based temperature responsive multistable metamaterials[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023,277:112343.
- [41] Van Manen T, Janbaz S, Zadpoor A A. Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers[J]. *Materials Horizons*, 2017,4(6):1064-1069.
- [42] Felton S M, Becker K P, Aukes D M, et al. Self-folding with shape memory composites at the millimeter scale[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015,25(8):085004.
- [43] Ni Xiaoyue, Guo Xiaogang, Li Jiahong, et al. 2D mechanical metamaterials with widely tunable unusual modes of thermal expansion[J]. *Advanced Materials*, 2019,31(48):e1905405.
- [44] Wei Yuling, Yang Qingsheng, Tao Ran. Smp-based chiral auxetic mechanical metamaterial with tunable bandgap function [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 195: 106267.
- [45] Wang Jiaxin, Liu Xia, Yang Qingsheng, et al. A novel programmable composite metamaterial with tunable poisson's ratio and bandgap based on multi-stable switching[J]. *Composites Science and Technology*, 2022,219:109245.
- [46] Jiang Yijie, Korpas L M, Raney J R. Bifurcation-based embodied logic and autonomous actuation[J]. *Nature Communications*, 2019,10(1):128.
- [47] Sim J, Wu Shuai, Dai Jize, et al. Magneto-mechanical bilayer metamaterial with global area-preserving density tunability for acoustic wave regulation[J]. *Advanced Materials*, 2023,35(35): e2303541.
- [48] Shaw L A, Hopkins J B. An actively controlled shape-morphing compliant microarchitected material[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2016,8(2):021019.
- [49] Chen Tian, Pauly M, Reis P M. A reprogrammable mechanical metamaterial with stable memory[J]. *Nature*, 2021, 589 (7842): 386-390.
- [50] Le Ferrand H, Studart A R, Arrieta A F. Filtered mechanosensing using snapping composites with embedded mechano-electric

- trical transduction[J]. *ACS Nano*, 2019,13(4):4752-4760.
- [51] Poon R, Hopkins J B. Phase-changing metamaterial capable of variable stiffness and shape morphing[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019,21(12):1900802.
- [52] Cramer N B, Cellucci D W, Formoso O B, et al. Elastic shape morphing of ultralight structures by programmable assembly [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019,28(5):055006.
- [53] Ramrakhyani D S, Lesieutre G A, Frecker M, et al. Aircraft structural morphing using tendon-actuated compliant cellular trusses[J]. *Journal of Aircraft*, 2005,42(6):1614-1620.
- [54] Chen Tian, Mueller J, Shea K. Integrated design and simulation of tunable, multi-state structures fabricated monolithically with multi-material 3D printing[J]. *Scientific Reports*, 2017,7:45671.
- [55] Yang Hang, Ma Li. 1D to 3D multi-stable architected materials with zero poisson's ratio and controllable thermal expansion [J]. *Materials & Design*, 2020,188:108430.
- [56] Cheung K C, Gershenfeld N. Reversibly assembled cellular composite materials[J]. *Science*, 2013,341(6151):1219-1221.
- [57] Jenett B, Cameron C, Tourlomousis F, et al. Discretely assembled mechanical metamaterials[J]. *Science Advances*, 2020, 6(47):9943.
- [58] Liu Yabo, Qu Zhipeng, Li Yongfeng. Design method of the conformal lattice structures[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022,24(8): 2101423.
- [59] Xu Rui, He Yulong, Li Xin, et al. Snap-fit mechanical metamaterials[J]. *Applied Materials Today*, 2023,30:101714.
- [60] Wang Ziqi, Song Peng, Isvoranu F, et al. Design and structural optimization of topological interlocking assemblies[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2019,38(6):1-13.
- [61] 习会峰,黄丽琴,余同希,等. 拓扑互锁结构研究现状及展望 [J]. *应用力学学报*, 2023, 40(2):241-252.
- Xi Huifeng, Huang Liqin, Yu Tongxi, et al. Current status and prospects of topological interlocking structures [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023, 40(2): 241-252. (in Chinese)
- [62] Zhao Yang, Chen Liming, Li Weiguang, et al. Energy absorption characteristic of origami-inspired self-assembly periodical plate-lattice structural material[J]. *Materials Letters*, 2023,337:133903.

## Advances on Metamaterial Based Adaptive Morphing Structural Technology

Wang Chengyu<sup>1</sup>, Wang Zhigang<sup>1,2</sup>, Wang Huitian<sup>1</sup>, Yang Yu<sup>2</sup>, Yin Sha<sup>1</sup>

1. *Beihang University, Beijing 100191, China*

2. *Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China*

**Abstract:** Morphing technology, as one of disruptive technologies for aircraft, can improve aerodynamic efficiency and increase range. Generally, aircraft morphing is realized through mechanical mechanism, which limits the freedom of deformation and increases the weight of the system. Morphing metamaterials that can precisely regulate the deformability of structures, possessing a high level of lightweight and intelligent potential, are expected to promote the development of morphing technology. This paper reviews several types of deformable metamaterials and their corresponding application exploration for adaptive structures, explicating their significant potential in the integrated design for morphing/actuation/load-bearing structures. Furtherly, the authors give a prospective outlook on future development trends of morphing technology.

**Key Words:** morphing aircraft; metamaterials; smart structure materials; microstructure design; manufacturability