

可调控热膨胀力学超材料设计制备与表征评测研究进展

赵淳铮 王昕 李振 李秉洋 金峰 王鹏飞 卢天健 张瑞

Research progress in the design, manufacturing, characterization, and evaluation of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials

ZHAO Chunzheng, WANG Xin, LI Zhen, LI Bingyang, JIN Feng, WANG Pengfei, LU Tianjian, ZHANG Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240826.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合材料负泊松比格栅结构设计及力学性能评价

Structural design and mechanical characterization of an auxetic advanced grid structure composite

复合材料学报. 2021, 38(4): 1107–1114 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200623.002>

聚合物基电磁屏蔽复合材料的结构与性能研究进展

Research progress of structure design and performance of polymer-based electromagnetic shielding composites

复合材料学报. 2021, 38(5): 1358–1370 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201208.003>

零泊松比超材料设计的多评价点功能基元拓扑优化方法

Functional element topology optimization method based on multiple evaluation points for metamaterial design with zero Poisson's ratio

复合材料学报. 2020, 37(12): 3229–3241 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200306.001>

增材制造钛基复合材料体系与组织结构设计

Composition and architecture design in additive manufacturing of titanium matrix composites

复合材料学报. 2024, 41(4): 1633–1652 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231027.003>

Ti₃C₂T_x基复合电磁屏蔽材料的结构与性能研究进展

Progress in the structural design and properties of Ti₃C₂T_x-based electromagnetic shielding composites

复合材料学报. 2024, 41(7): 3404–3426 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231220.004>

仿真模拟主动调节负泊松比力学超材料

Modeling active adjustment of negative Poisson's ratio mechanical metamaterials

复合材料学报. 2024, 41(1): 467–476 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230516.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240826.002

可调控热膨胀力学超材料设计制备与表征 评测研究进展



分享本文

赵淳铮¹, 王昕^{*2}, 李振², 李秉洋², 金峰¹, 王鹏飞², 卢天健^{3,4}, 张瑞^{*5}

(1. 西安交通大学复杂服役环境重大装备结构强度与寿命国家重点实验室, 西安 710049; 2. 中国航天科技创新研究院先进材料与能源中心, 北京 100088; 3. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016; 4. 南京航空航天大学多功能轻量化材料与结构工信部重点实验室, 南京 210016; 5. 武汉纺织大学纺织新材料与先进加工技术国家重点实验室, 武汉 430200)

摘要: 我国太空探测事业的蓬勃发展对航天装备的可靠性提出了诸多挑战。在温度急剧变化的环境下, 精确控制大型空间结构、精密探测设备和微电子封装等材料与结构的热变形成为亟待突破的瓶颈问题。因此, 发展具有可调控热膨胀系数的力学超材料具有重要意义。本文针对可调控热膨胀力学超材料设计制备与表征评测等方面的研究现状与进展进行了概述, 系统整理了可调控热膨胀力学超材料的设计方法, 总结了热膨胀与刚度、泊松比等力学参数的协同调控策略, 探讨了可调控热膨胀力学超材料拓扑优化方法, 介绍了热膨胀可调控力学超材料制备工艺与性能评测方法。本文还对可调控热膨胀力学超材料的发展趋势进行了展望, 为其在航天装备中的深入应用提供指导与借鉴。

关键词: 可调控热膨胀; 力学超材料; 结构设计; 性能表征; 拓扑优化

中图分类号: TB330.1; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)09-4589-17

Research progress in the design, manufacturing, characterization, and evaluation of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials

ZHAO Chunzheng¹, WANG Xin^{*2}, LI Zhen², LI Bingyang², JIN Feng¹, WANG Pengfei²,
LU Tianjian^{3,4}, ZHANG Rui^{*5}

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Center for Advanced Materials and Energy, China Academy of Aerospace Science and Innovation, Beijing 100088, China; 3. National Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 4. MIIT Key Laboratory of Multifunctional Lightweight Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 5. State Key Laboratory of New Textile Materials and Advanced Processing Technologies, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: The vigorous development of China's space exploration industry has posed numerous challenges to the reliability of aerospace equipment. In environments with drastic temperature changes, precise control of thermal deformation in materials and structures such as large-scale space structures, precision detection equipment, and microelectronic packaging has become a bottleneck issue that urgently needs to be broken through. Therefore, it is of great significance to develop mechanical metamaterials with tailorable thermal expansion coefficients. This article provides an overview of the current status and progress of research on the design, preparation, and characterization of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials. It systematically sorts out the design methods of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials, summarizes the collaborative control strategies of thermal

收稿日期: 2024-06-20; 修回日期: 2024-07-30; 录用日期: 2024-08-10; 网络首发时间: 2024-08-26 14:05:01

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240826.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (12302187); 湖北省自然科学基金 (2023AFB092)

National Natural Science Foundation of China (12302187); Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (2023AFB092)

通信作者: 王昕, 博士, 工程师, 研究方向为先进超材料设计与制造 E-mail: wxtj_9449@163.com;

张瑞, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料力学性能研究 E-mail: zr19950122@163.com

引用格式: 赵淳铮, 王昕, 李振, 等. 可调控热膨胀力学超材料设计制备与表征评测研究进展 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4589-4605.

ZHAO Chunzheng, WANG Xin, LI Zhen, et al. Research progress in the design, manufacturing, characterization, and evaluation of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4589-4605(in Chinese).

expansion, stiffness, Poisson's ratio, and other mechanical parameters, explores the topological optimization methods of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials, and introduces the preparation techniques and performance evaluation methods of thermally tailorable mechanical metamaterials. This article also looks into the development trends of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials, providing guidance and reference for their in-depth application in aerospace equipment.

Keywords: tailorable thermal expansion; metamaterials; structure design; performance characterization; topological optimization control

随着太空探测事业的快速发展, 携带精密光学仪器和微电子器件的探测设备面临着日益严峻的空间环境挑战^[1-2]。如图 1(a) 所示, 登月探测器在月球表面着陆后, 需抵御 300°C 以上的昼夜温差^[3]。如图 1(b) 所示, 常规固体材料在温度升高时, 原子间距会由于原子发生的非简谐振动而增大, 宏观尺度上会产生热膨胀变形。常见工程材

料热膨胀系数见图 1(c), 大多体现出热胀冷缩的正热膨胀性能。由于探测设备内不同材料的热膨胀性能不匹配, 材料间的相互约束使其不能完全自由胀缩并产生应力, 从而降低探测设备的稳定性和可靠性^[4]。因此, 在温度变化巨大的太空环境中, 发展具有可调控热膨胀系数的材料具有重要意义。

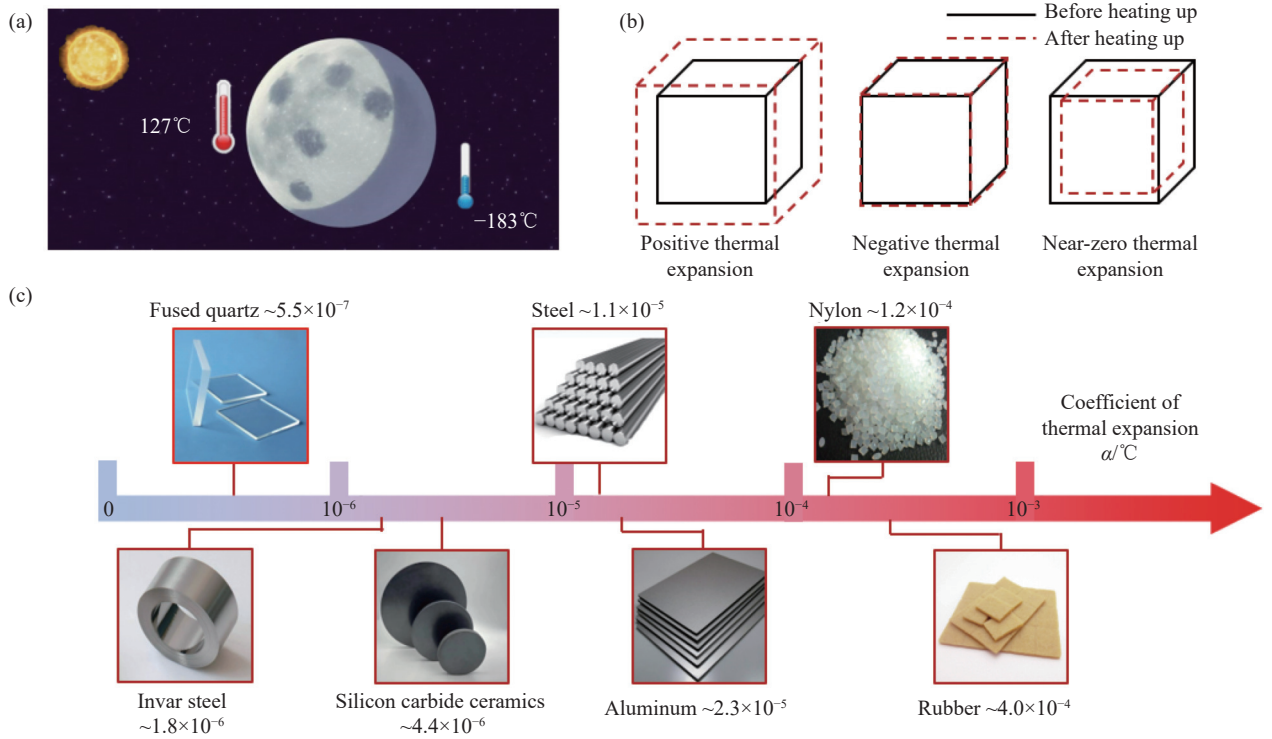


图 1 (a) 月球表面温差; (b) 材料热膨胀示意图; (c) 常见工程材料热膨胀系数

Fig. 1 (a) Temperature difference on the lunar surface; (b) Schematic diagram of material thermal expansion; (c) Thermal expansion coefficients of common engineering materials

超材料是一类快速发展的新材料, 因其内部结构经过人为设计而具有超常的物理性能。其概念最早起源于电磁学, 用于描述对电磁波调控能力极强的人工材料^[5-6]。目前超材料的概念已拓展到力学学科, 例如负泊松比材料就是一种典型的力学超材料, 具有在单轴拉伸作用下发生横向膨胀的独特性质, 因此也被称为“拉胀”材料^[7]。因力学超材料在承载、能量吸收以及抗断裂拓展

等领域较传统材料更具优势, 因此在医疗、国防以及航空航天等领域具有广泛的应用前景^[8]。

近些年来, 研究人员通过微结构胞元调控, 已使力学超材料具有“近零热膨胀”或“负热膨胀”的反常性能, 因此可以被定义为可调控热膨胀力学超材料^[9]。可调控热膨胀力学超材料在人造卫星、太空高精密光学设备等航天装备中具有广泛的应用前景, 得到了研究人员的关注, 已逐

步成为研究领域的前沿热点。本文针对可控热膨胀力学超材料设计制备与表征评测等方面的研究现状与进展进行了概述,系统整理了可控热膨胀力学超材料的设计方法,总结了热膨胀与刚度、泊松比等力学参数的协同调控策略,探讨了可控热膨胀力学超材料拓扑优化方法,介绍了可控热膨胀力学超材料制备工艺与性能评测方法。本文还对可控热膨胀力学超材料的发展趋势进行了展望,为其在航天装备中的深入应用提供指导与借鉴。

1 可控热膨胀力学超材料设计方法

人们所知的绝大部分材料具有正热膨胀系数,即常说的“热胀冷缩”,材料的体积在升温时变大,降温时变小。通过选取合适的材料组合及几何特征得到的可控热膨胀超材料,可以实现由负到正的热膨胀系数调控。按照热膨胀系数的调控机制,可以将可控热膨胀超材料分为拉伸主导型和弯曲主导型。

1.1 拉伸主导型可控热膨胀力学超材料

拉伸主导型可控热膨胀力学超材料由具有不同热膨胀系数的杆或梁通过桁架结构等连接在一起。如图 2(a) 所示, Miller 等^[10]发现对于双材料三角结构,由于其几何结构为等腰三角形,因此该双材料单胞在升温前后各边分别满足几何关系:

$$y^2 = a^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2 \quad (1)$$

和

$$(y + \delta y)^2 = (a + \delta a)^2 - \left(\frac{b + \delta b}{2}\right)^2 \quad (2)$$

式中, δa 、 δb 和 δy 分别表示边 a 、 b 和三角结构在 y 方向上的热变形量。材料在 y 方向上的热膨胀系数 α_y 可以表达为

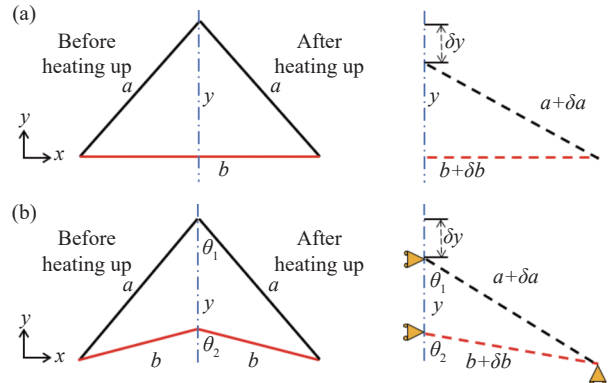
$$\alpha_y = \frac{\delta y}{y \delta T} \quad (3)$$

其中, δT 表示环境温度的变化值,代入式 (1) 和式 (2) 可得:

$$\alpha_y = \frac{4a^2\alpha_a - b^2\alpha_b}{4a^2 - b^2} \quad (4)$$

式中, α_a 、 α_b 分别为两种材料的热膨胀系数。从式 (4) 中可以看出,通过调整两边材料热膨胀系数与两边长度,可以完成对单胞 y 方向上热膨胀系数的调控。当 a 边材料的热膨胀系数比 b 边更

小时,适当调整两边宽度可以使得单胞在 y 方向上的热膨胀系数为负。进一步将此等腰三角形作为单胞,通过旋转、对称与平移阵列,就可以得到在面内两个方向均具有负热膨胀率的超材料。



a, b —Length of cell edge; $\delta a, \delta b$ and δy —Deformation of cell along a, b edges and y direction after temperature changes; θ_1, θ_2 —Structural angle

图 2 拉伸机制主导的可控热膨胀力学超材料: (a) 三角结构^[10]; (b) 凹角结构^[11]

Fig. 2 Stretching mechanism-dominated tailorable thermal expansion mechanical metamaterials: (a) Triangular structure^[10]; (b) Re-entrant structure^[11]

此外,由四边形铰链组成的凹角 (Re-entrant) 结构^[11](图 2(b)),单胞在 y 方向上的热膨胀系数与应变之间的关系有

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T \quad (5)$$

其中, ε_y 为单胞在 y 方向上的应变,满足 $\varepsilon_y = \frac{y}{\delta y}$, δy 可以写作凹角结构内角度 θ_1 和 θ_2 的函数:

$$\delta y = \left[\left\{ a(1 + \alpha_a \Delta T) \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_1}{1 + \alpha_a \Delta T} \right) - a \cos \theta_1 \right\} - \left\{ b(1 + \alpha_b \Delta T) \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_2}{1 + \alpha_b \Delta T} \right) - b \cos \theta_2 \right\} \right] \quad (6)$$

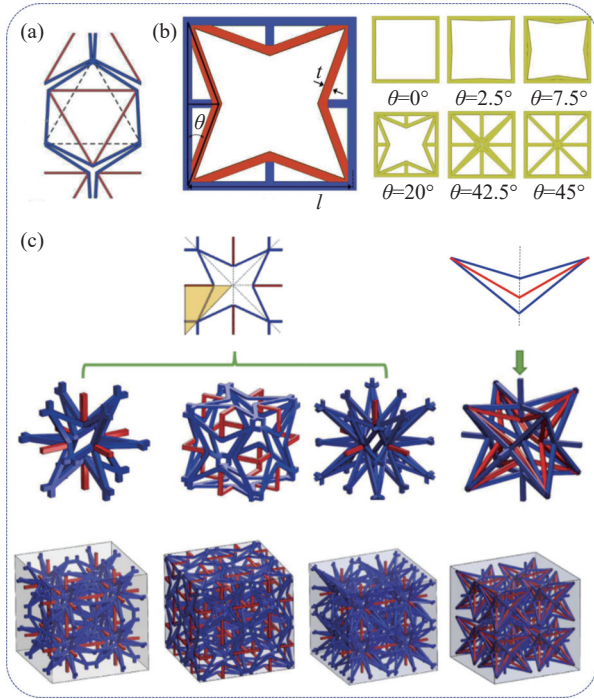
由结构几何关系 $y = a \cos \theta_1 - b \sin \theta_2$, 可以得到单胞在 y 方向上的热膨胀系数 α_y 为

$$\alpha_y = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{\left\{ (1 + \alpha_a \Delta T) \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_1}{1 + \alpha_a \Delta T} \right) \right] - \cos \theta_1 \right\}}{\cos \theta_1 - \left(\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \right) \cos \theta_2} - \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \left\{ (1 + \alpha_b \Delta T) \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_2}{1 + \alpha_b \Delta T} \right) \right] - \cos \theta_2 \right\} \right] \quad (7)$$

从上式可以看出,通过调整凹角结构内两个角度 θ_1 和 θ_2 , 以及两种材料的热膨胀系数,可以对单胞在 y 方向上的热膨胀系数进行调控。但与

等腰三角形不同，可在凹角结构基础上设计出兼具负泊松比和负热膨胀率的超材料。

目前，研究人员所提出的大部分拉伸型可控热膨胀力学超材料均基于三角形与凹角这两种基础结构。如图 3(a) 所示，Berger 等^[12] 通过将不同材料组成的三角形结构旋转平移，得到的 2D 点阵超材料可在单个方向实现可调的热膨胀系数。而 Li 等^[13] 则设计出了星形凹角双材料点阵(图 3(b))，并探究了改变点阵中凹角角度 θ 和材料厚度 t 对材料性能的影响。研究表明，改变凹角角度不仅可以改变材料的热膨胀性能，而且可以改变泊松比，进而实现了泊松比和热膨胀系数的双调控。



l —Length of cell edge; t —Thickness of cell edge

图 3 拉伸机制主导的 2D、3D 可控热膨胀力学超材料

Fig. 3 2D and 3D tailorable thermal expansion mechanical metamaterials dominated by stretching mechanism-dominated

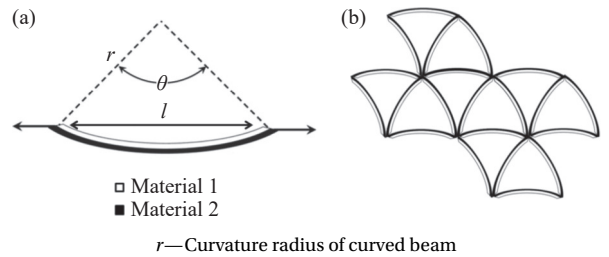
在之前提及的 2D 超材料的基础上，通过空间旋转、对称或平移等方法即可得到 3D 可控热膨胀力学超材料^[14-19]。如图 3(c) 所示，Ai 和 Gao^[14] 将热膨胀系数不同的两种材料组成的两种 2D 超材料沿对称轴或某一点旋转复制多次，得到同样具有热膨胀率可调性能的 3D 超材料，再以此为单胞通过阵列形成 4 种 3D 热膨胀系数可调超材料。研究表明这 4 种超材料的热、力学性能都具有良好的可调性，这为扩展 Ashby 的材料图表提供了

一条途径，也为工程应用提供了更多的材料选择。研究人员在设计这些单胞时，由于结构过于复杂难以通过理论计算直接求解，因此往往利用有限元仿真计算其在各方向的热膨胀系数。

1.2 弯曲主导型可控热膨胀力学超材料

区别于拉伸主导型可控热膨胀力学超材料中的直梁，弯曲主导型超材料由曲梁构建，且单根梁通常包含热膨胀系数不同的两种材料。如图 4(a) 所示，Lakes^[20] 发现由两种材料组成的双材料梁受到温度载荷 ΔT 的作用后发生弯曲，如果假设两种材料完全粘贴不发生相对位移，则曲率 κ 为

$$\kappa = 6(\alpha_2 - \alpha_1)\Delta T \times \frac{\left(1 + \frac{h_1}{h_2}\right)^2}{(h_1 + h_2) \left(3 \left(1 + \frac{h_1}{h_2}\right)^2 + \left(1 + \frac{h_1 E_1}{h_2 E_2}\right) \left(\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^2 + \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} \right) \right)} \quad (8)$$



r —Curvature radius of curved beam

图 4 典型弯曲机制主导的可控热膨胀力学超材料^[20]

Fig. 4 Typical tailorable thermal expansion mechanical metamaterials dominated by bending mechanism^[20]

式中， α 、 h 和 E 分别代表双材料梁中每种材料的热膨胀系数、梁厚度及弹性模量。梁单元在水平方向上的长度 l 可以写作曲梁的曲率半径 r 和角度 θ 的函数：

$$l = 2r \sin \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

温度变化所引起的水平应变 ε 可以写作：

$$\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (10)$$

因此，梁单元在水平方向上的热膨胀系数可以写作：

$$\alpha = \frac{r\theta}{(h_1 + h_2)} \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1) \left(1 + \frac{h_1}{h_2}\right)^2}{3 \left(1 + \frac{h_1}{h_2}\right)^2 + \left(1 + \frac{h_1 E_1}{h_2 E_2}\right) \left(\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^2 + \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} \right)} \left(\frac{1}{2} \cot \frac{\theta}{2} - \frac{1}{\theta} \right) \quad (11)$$

从式 (11) 中可以看出, 调整双材料梁中各组分材料、圆弧角度 θ 以及每种材料厚度, 均可以对梁单元在水平方向上的热膨胀系数进行调控。在此基础上, 如图 4(b) 所示, Lakes 等设计了由上述曲梁组成的三角形点阵材料, 使其兼具热膨胀率可调和一定的结构刚度。

如图 5(a) 所示, Xu 等^[21] 将弯曲双材料梁对称复制并沿一点旋转得到单胞, 并通过阵列进一步得到热膨胀率可调的 2D 力学超材料。将单胞中一条边的热膨胀系数视为该单胞的热膨胀系数, 这种理论假设的正确性得到了有限元仿真计算的验证, 但这种梁与梁之间不发生滑动的理想连接很难在现实中实现。目前, 研究人员试图将不同梁与节点粘接以形成手性材料, 例如 Yu 等^[22] 使用双材料梁与曲梁和节点设计出了三手性、四手性和六手性以及对应的反手性材料, 并同样利用取单胞内一条曲梁的热膨胀系数代表整个单胞的方法计算了每种单胞的热膨胀性能。除理论验证外, 研究人员还在实验室中制备出了弯曲主导型可控热膨胀力学超材料^[23-24], 例如 Ha 等^[24] 使用 P675 R 双金属片和 PVC 节点制作了如图 5(b) 所示的手性材料, 实验表明材料的等效热膨胀率可达 $-3.5 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

1.3 可控热膨胀力学超材料调控范围

图 6 总结了可控热膨胀力学超材料的几种典型构型及其可实现的最大负热膨胀系数, 详细内容总结在表 1 内^[10-11, 16, 18-19, 21-22, 25]。拉伸主导型可控热膨胀三角形单胞可以达到的负热膨胀系数为 $-6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 而凹角单胞的性能更为优异, 可

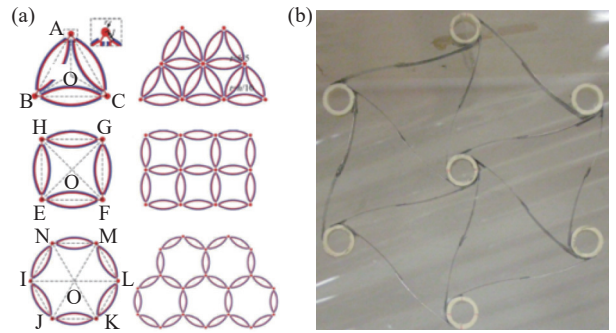


图 5 弯曲机制主导的可调控热膨胀力学超材料

Fig. 5 Lattice structure with tailorable thermal expansion mechanical metamaterials dominated by bending mechanism

以达到 $-2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。通过几何阵列、旋转得到的 2D、3D 三角点阵则可以达到比凹角点阵材料更大的负热膨胀系数; 其中, 2D 三角点阵的负热膨胀系数可以达到 $-7.7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。而弯曲主导型热膨胀可调超材料可以达到的负热膨胀系数则相对较小, 2D 弯曲双材料梁单胞的负热膨胀系数为 $-2.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 而 2D 手性点阵的负热膨胀系数则可以达到 $-3.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

1.4 多稳态型可控热膨胀力学超材料

目前, 研究人员开发出了基于双稳态材料的可调控热膨胀力学超材料^[26]。该超材料利用材料模量随温度变化引起的变形不匹配实现从一稳定状态至另一种稳定状态的模式转变, 在力-热循环过程中同样表现出了负热膨胀系数效应。如图 7(a) 所示, 当初始构型受到外力 F 作用时结构展开, 即在外力作用下从初始稳态进入另一种稳态。随后升高环境温度, 材料模量 E 在温度作用下发生改变, 引起的模量不匹配导致结构从展开的新稳

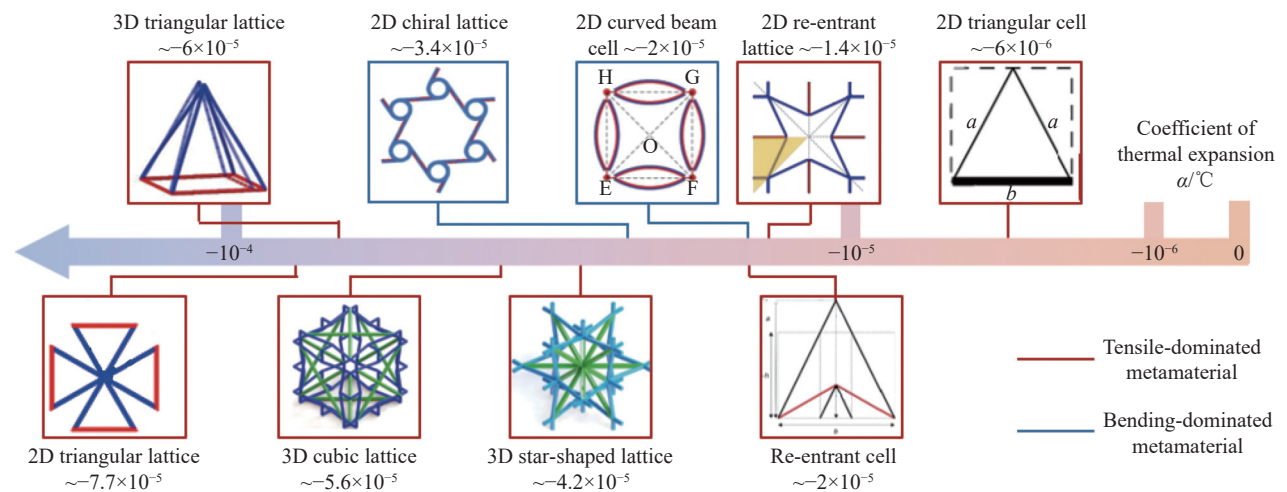


图 6 两类可控热膨胀力学超材料的热膨胀系数可实现的最大负热膨胀系数

Fig. 6 Tailorable range of the thermal expansion coefficient for two types of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials

表 1 几种典型可调控热膨胀力学超材料及其最大负热膨胀系数

Table 1 Several typical tailorabe thermal expansion mechanical metamaterials and their maximum negative thermal expansion coefficients

Metamaterial structure	Maximum negative thermal expansion coefficient $\alpha/^\circ\text{C}$	Design mechanism	Research method	Ref.
2D triangular cell	-6.0×10^{-6}	Tensile-dominated	Theoretical calculation	[10]
2D re-entrant lattice	-1.4×10^{-5}	Tensile-dominated	Simulation	[25]
2D curved beam cell	-2.0×10^{-5}	Bending-dominated	Theoretical calculation + Simulation	[21]
2D re-entrant cell	-2.0×10^{-5}	Tensile-dominated	Theoretical calculation + Simulation	[11]
2D chiral lattice	-3.4×10^{-5}	Bending-dominated	Simulation	[22]
3D star-shaped lattice	-4.2×10^{-5}	Tensile-dominated	Simulation	[19]
3D cubic lattice	-5.6×10^{-5}	Tensile-dominated	Simulation	[19]
3D triangular lattice	-6.0×10^{-5}	Tensile-dominated	Theoretical calculation	[16]
2D triangular lattice	-7.7×10^{-5}	Tensile-dominated	Theoretical calculation + Simulation	[18]

态再次返回至初始稳态，进而得到了“热缩”的负热膨胀性能。类似的，图 7(b) 中当结构的初始稳态为展开构型时，通过与前文类似的外力加载后的升温过程，可以使结构由收缩的新稳态转变回展开的初始稳态，该超材料具有变形过程快的优势。

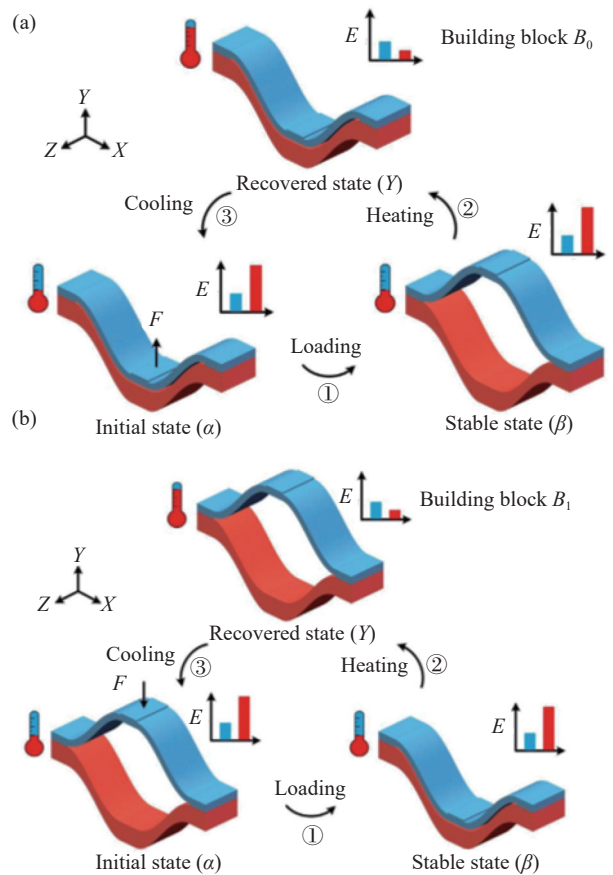
2 可调控热膨胀力学超材料的多功能调控

2.1 刚度-热膨胀双调控

在人造卫星或空间站等应用场景中，理想的承载结构不仅要求具有较低的热膨胀率，更需要有较高的刚度。目前具有热膨胀系数可调性能的结构设计一般以牺牲结构承载性能为前提，即结构的比刚度和比强度都会有所下降。据此，Xu 和 Pasini^[17] 将 4 组单向负热膨胀三角形组成一个四面体结构，再以该四面体为单胞组成 3D 力学超材料，通过调整结构角度以实现热膨胀性能从负到零再到正的变化，同时保证结构具有较高的压缩刚度与强度。

相比于基于弯曲机制所设计的可调控热膨胀力学超材料，基于拉伸机制设计的双材料三角形单胞经过对称得到的菱形超材料具有更高的结构刚度^[27-28]。Xu 等^[29] 利用分形思想，将菱形的各边由均质材料替换为分级点阵，研究发现材料热膨胀性能的绝对值会随着分层级数的增大而增大，而比刚度则会减小(图 8(a))。如图 8(b) 所示，Li 等^[30] 利用相同的双材料三角形单胞设计出了一种 3D 超结构，并利用 3D 打印技术制备出了样件，通过将这种超材料与传统结构进行了对比，发现该材料具有更广泛的热膨胀性能可调范围与更为优异的比刚度。

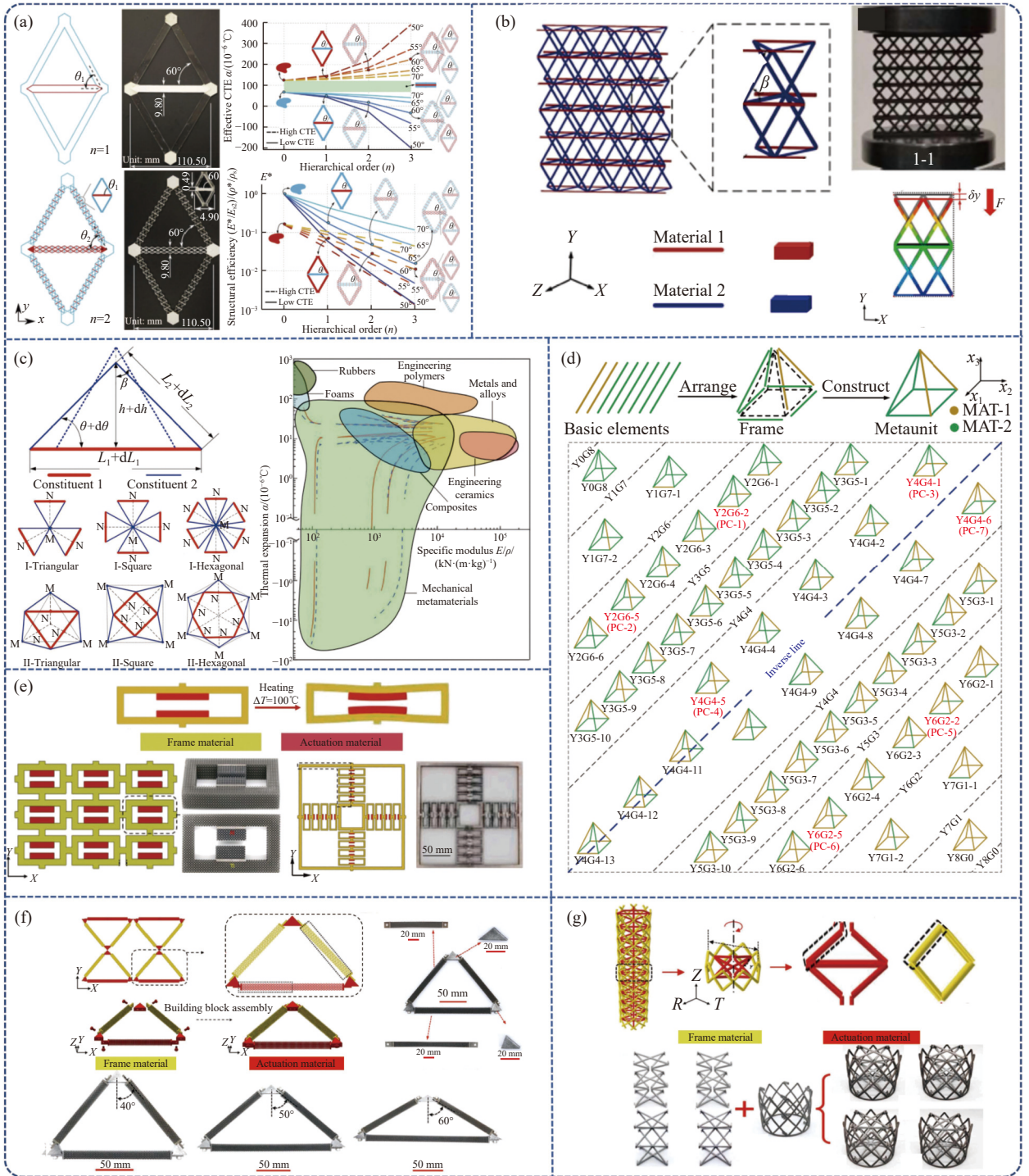
针对三角形双材料单胞，湖南大学的 Wei 等^[31-32] 对其刚度、强度等力学性能以及大变形下的失效模式开展了系统研究：Wei 等^[31-32] 利用理



F—Force exerted on metamaterials; E—Young's modulus of material
图 7 具有双稳态的高分子可调控热膨胀力学超材料^[25]

Fig. 7 Polymer tailorable thermal expansion mechanical metamaterials with shape memory effect^[25]

论计算得到了不同可调控热膨胀力学超材料的等效刚度，如图 8(c) 所示，并将材料的失效模式分为拉伸、压缩下的塑性屈服以及压缩载荷下的屈曲失效，得到了材料的失效相图^[33-34]。结果发现这些超材料的热膨胀系数可调节范围大，质量轻，不仅具有较高的刚度，而且可由铝合金、钛合金、不锈钢等常见的金属材料构成^[31-35]。最近，Wang



CTE—Coefficient of thermal expansion; Δy —Deformation of cell along y direction after temperature changes; β —Structural angle; L —Length of cell edge; dL —Deformation of cell edge after temperature changes; h —Height of cell; dh —Change of height after temperature changes; θ —Structural angle; $d\theta$ —Change of structural angle after temperature changes; ΔT —Change of temperature

图 8 刚度-热膨胀双调控力学超材料

Fig. 8 Dual-tailorable mechanical metamaterial with stiffness and thermal expansion coefficient

等^[35]进一步将这种 2D 超材料转化为如图 8(d) 所示的四面体 3D 超材料, 并通过调整每个边所采用的材料种类设计出具有不同性能的单胞, 通过阵列和旋转对称的方式得到大尺寸、轻量化、负

(零) 热膨胀以及高比刚度的超材料。

类似的, 北京理工大学的 Yu 等系统研究了弯曲机制主导的可调控热膨胀力学超材料的力学性能。如图 8(e) 所示, Yu 等^[36-37]提出了一种基于弯

曲机制的可调控热膨胀力学超材料,其基本单元由两个双材料梁和与之相连接的两个侧梁组成。双材料梁由结构材料(黄色)和驱动材料(红色)组成,当温度改变时,两种材料不同的热膨胀性能会导致双材料梁发生水平方向的膨胀或收缩,进而实现整体结构的热膨胀性能可调,还具有一定的承载性能。如图 8(f) 所示, Yu 等^[38]将这种思路应用于基于拉伸机制的三角形可调控热膨胀力学超材料单胞,该三角形单胞的两个腰为结构材料(黄色,较低的热膨胀系数),而底边为驱动材料(红色,较高的热膨胀系数),并通过调整三角形单胞顶角的角度可以对材料的热膨胀系数进行调节。进一步的, Yu 等^[39]将这种三角形单胞组成如图 8(g) 所示的 3D 圆柱型超材料,不仅可以实现较低的热膨胀性能,而且在剪切和压缩载荷下具有较高的比刚度。

2.2 泊松比-热膨胀双调控

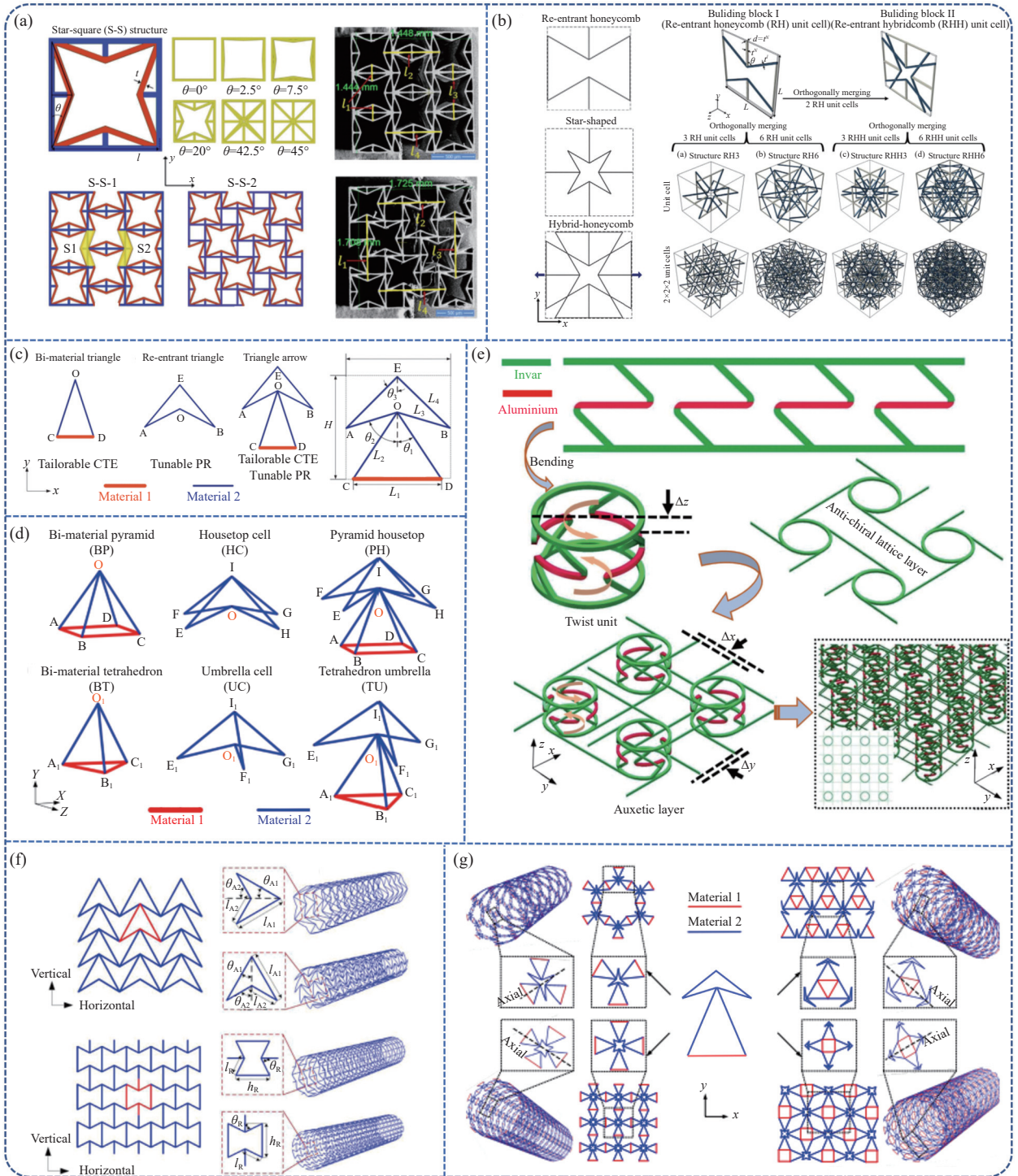
目前,在单胞中设计凹角是研究人员得到负泊松比超材料的主要方法,而双材料的凹角结构还具有热膨胀率可调节特性,这使得同时调节热膨胀率和泊松比的超材料成为可能。香港城市大学的 Li 等^[13]研究了如图 9(a) 所示的双材料星形单胞,其中红色部分材料具有较低热膨胀性能和较高的杨氏模量,而蓝色部分材料则具有较高的热膨胀性能和较低的模量。通过改变单胞内两种材料的热膨胀系数、星形点阵夹角大小以及阵列策略,可以同时调控热膨胀性能与泊松比。新里斯本大学的 Raminhos 等^[40]也利用这种星形单胞实现了负泊松比和负热膨胀性能的双调控,并总结了可调整的几何参数。进一步,河北工业大学的 Xu 等^[41]通过空间旋转得到了热膨胀性能-泊松比双调控的 3D 力学超材料。德国伍珀塔尔大学的 Peng 等将多种单胞混杂,并研究了不同混杂组合下单胞的热、力学性能。如图 9(b) 所示, Peng 等^[42]将内凹双材料单胞、星形双材料单胞以及两个内凹双材料单胞正交组合得到的混合单胞进行了比较。结果发现在选取合适的几何和材料参数时,3 种超材料的热膨胀性能和泊松比都可以实现由负到正的大范围调节;其中,混合单胞还具有比另外两种单胞更好的结构刚度,具有更高的工程应用前景。进一步, Peng 等^[43]以内凹单胞和星形单胞为基础,分别设计出了四种 3D 力学超材料。通过研究发现,这四种各向同性超材料的等效泊松比可以实现从-1 到 0 的调控范

围,而等效热膨胀系数可以达到所用基材的十几倍。北京工业大学的 Li 等^[44]发现改变组分材料时,近可以实现材料热膨胀系数从正到负的调整,而通过改变单胞几何参数则可以同时对泊松比和热膨胀系数进行调控。

如图 9(c) 所示, Wei 等^[45]将双材料三角形与单材料凹角单胞相结合,形成了箭形凹角(Triangle arrow, TA)力学超材料,这种超材料同时具备了在 y 方向上的热膨胀性能和泊松比可调的功能。该单胞具有 7 个几何参数,包括 $L_1 \sim L_4$ 4 个梁长度参数和 3 个角度参数 $\theta_1 \sim \theta_3$ 。Wei 等^[45]发现,通过调整 θ_1 和结构高度比可以调整整体单胞的热膨胀性能,而通过改变 θ_2 和 θ_3 则可以实现整体单胞泊松比性能的调整。Peng 等^[46]将这种 TA 超材料通过空间旋转得到了对应的 3D 超材料,如图 9(d) 所示,借理论计算和有限元模型证明该 3D 超材料不仅均可同时具有负热膨胀系数和负泊松比,并可通过调整几何参数同时调节热膨胀系数和泊松比。

手性单胞也常用于设计负泊松比材料^[47-48]。Ha 等^[24]将手性单胞的各边换为由两种不同热膨胀系数材料组成的双材料梁,并基于弯曲主导型机制设计出了一种同时兼具负泊松比和近零热膨胀性能的力学超材料。Li 等^[49]基于压缩/热弯曲耦合机制,并结合反手性单胞特殊的变形机制设计出了一种同时具有负泊松比和负热膨胀性能的 3D 超材料。如图 9(e) 所示,超材料由多层平面反手性点阵组成,不同平面单元间由另一种材料制成的弯曲节点连接,这种双材料单胞可由铝合金(红色部分)和因瓦钢(绿色部分)制成。由于手性材料的特殊几何结构,当材料受到面外压缩载荷时会发生面内收缩变形,同时由于单胞由两种材料组成,因此也具有负热膨胀性能。

如图 9(f) 所示, Ling 等^[50]将六边形凹角和箭形凹角结构通过卷曲相连,得到了 3D 管状材料,并发现在轴向载荷作用下具有负泊松比效应。进一步研究还发现,改变圆柱形结构在圆周方向上的单胞数量,可以改变材料在轴向载荷作用下的变形模式,当圆周上方向的单胞数量足够多时,3D 管状材料的泊松比会接近对应的 2D 超材料^[51]。Wei 等^[52]将这种负泊松比材料设计思路和双材料负热膨胀材料相结合,实现了管状材料热膨胀和泊松比的双调节。如图 9(g) 所示,4 种管状材料均可具有可调范围广的负热膨胀和负泊松比性能。当



PR—Poisson's rate; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ —Deformation of cell along x, y and z direction after temperature changes

图9 泊松比-热膨胀双调控力学超材料

Fig. 9 Dual-tailorable mechanical metamaterial with Poisson's ratio and thermal expansion coefficient

圆周上单胞的数量足够多时，3D 力学超材料的热膨胀系数和泊松比都会接近对应的2D 力学超材料。

2.3 可控热膨胀力学超材料的刚度/泊松比调控范围与存在的问题

图 10(a) 中对比了可控热膨胀力学超材料与

常见工程材料的比模量。从图中可以看出，使用三角形胞元单胞组成超材料是保证刚度的关键。可控热膨胀力学超材料的比模量普遍要高于橡胶和部分工程塑料(如聚氯乙烯)，经过合理设计后的可控热膨胀力学超材料的比刚度甚至高于

钢材和铝材。

热膨胀系数-泊松比双调控超材料所能达到的最大负泊松比如图 10(b) 所示。从图中可以看出, 3D 手性单胞可达到的负泊松比最小, 在结构中添加凹角单胞是提升泊松比可调范围的普遍设计方法。而由凹角单元和双材料三角形单元组成的箭形凹角单胞则可以具有较大的负泊松比, 其中 3D 箭形凹角结构单胞最大泊松比可达到 -8, 而对应的 2D 单胞的泊松比在理论上甚至可以达到 -30。虽然可调控热膨胀力学超材料可以实现较大范围的双功能调节, 但其也存在相当多的问题。由于两种超材料的发展思路基本相同, 因此二者存在的问题具有很强的共性, 包括:

根据现有研究可以发现, 在单胞类型上, 可

调控热膨胀力学超材料单胞的设计主要以拉伸型单胞与弯曲型单胞为基础, 经过阵列、旋转和串联, 再对不同单胞进行排列组合混杂, 实现了由 2D 到 3D 的发展。然而随着几何结构愈发复杂, 设计方法已从理论推导转变为数值模拟。对于拉伸型超材料单胞, 由两个基本单元相串联构成的单胞的热膨胀性能可以通过单元的热变形进行线性相加而获取^[45], 其余复杂单胞的热膨胀性能则需要通过有限元仿真计算才能得出^[13-14]。对于弯曲型超材料单胞而言, 可以用中心对称的方法来获得单胞的热膨胀性能^[21-22], 但非中心对称单胞的热膨胀性能依旧需要借助数值计算来确定^[49]。需要注意的是, 经验设计配合仿真计算是一种较为低效的设计方法, 不利于面向应用中的特定需求。

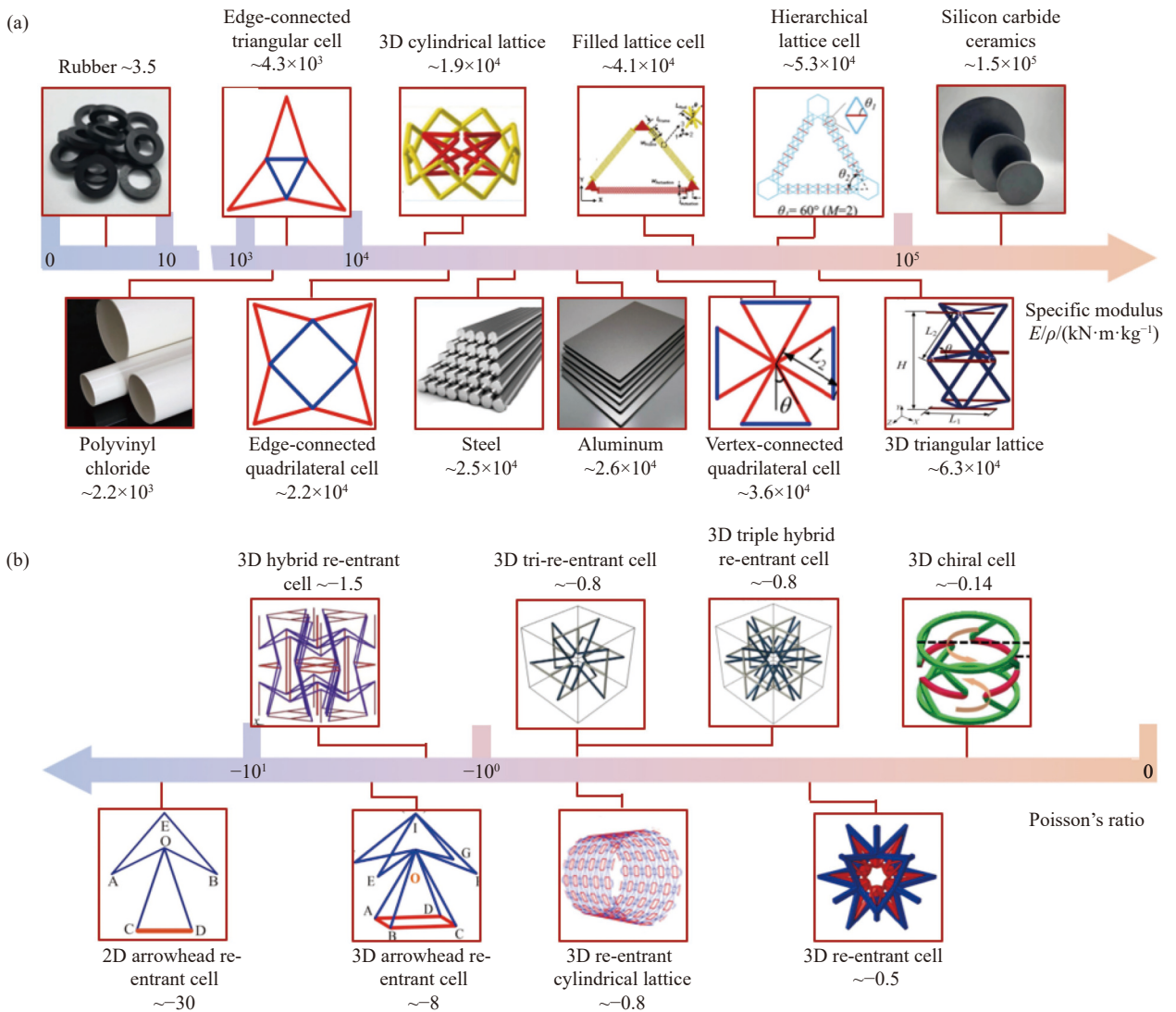


图 10 可调控热膨胀力学超材料的刚度和泊松比可调控范围

Fig. 10 Tailorable range of stiffness and Poisson's ratio of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials

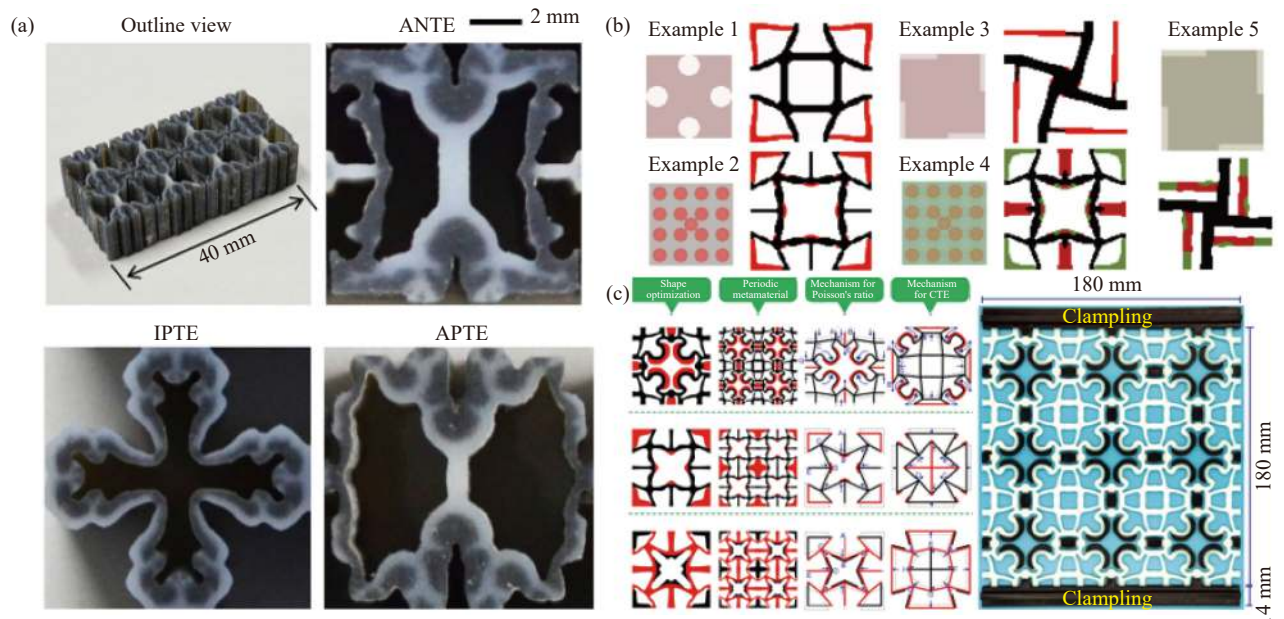
在力学参数上, 尽管可控热膨胀力学超材料在单位质量下可具有更高的刚度^[17, 33-34], 然而其具备较高的孔隙率^[14], 这导致单位体积内的超材料在承受载荷作用时可能出现较大的变形量。因此, 需要进一步研究超材料的孔隙率变化对热膨胀系数的影响, 从而帮助设计轻、巧、承力的可控热膨胀力学超材料。在强度方面, Chen等^[33-34]研究了2D拉伸型单胞在拉伸、压缩载荷作用下的失效机制, 然而大部分超材料尤其是弯曲线超材料的失效研究仍是空白, 更未考虑可控热膨胀力学超材料在空天环境下可能发生的热力耦合失效。

3 可控热膨胀力学超材料拓扑优化研究

已有学者关注了可控热膨胀力学超材料的拓扑优化设计问题。Takezawa等^[53]借助实体各向同性材料方法 (Solid isotropic material with penalization, SIMP) 与3D打印技术制备出了如图11(a)所示的各向异性负热膨胀系数 (Anisotropic negative thermal expansion, ANTE)、各向同性正热膨胀系数 (Isotropic positive thermal expansion, IPTE)、各向异性正热膨胀系数 (Anisotropic positive thermal expansion, APTE) 等三种超材料。Zhang等^[54]进一步利用立连续映射 (Independent continuous mapping, ICM) 算法完

成了拓扑优化, 得到了热膨胀系数-声子晶体带隙双调节的力学超材料。

湖南大学的Han等^[55-56]开发了多种多材料拓扑优化算法, 以得到具有可控热膨胀性能的力学超材料。如图11(b)所示, Han等^[55-56]借助交替相场&目标 (Alternating Active Phase & Objective algorithm, AAPO) 算法完成了可控热膨胀力学超材料的拓扑优化, 即将单胞的热-力学性能设定为多目标函数, 其次通过拓扑优化得到符合要求的单胞结构。在结构的优化迭代过程中, 拓扑优化利用MATLAB软件实现, 而力-热学性能则是在ABAQUS软件中计算得到的。通过这一方法, Han等设计出了同时具有负热膨胀系数和负泊松比的3种凹角超材料单胞 (Example 1、2和4) 以及两种手性超材料单胞 (Example 3、5)。值得注意的是, 前文中所提到的超材料均为双材料体系, 而通过拓扑优化可得到三材料单胞 (Example 4、5), 体现出拓扑优化算法的优势。进一步的, Han等^[57]基于B样条曲线构建了超材料形状优化设计方法 (图11(c)), 并得到了同时具有热膨胀-泊松比可调性能的凹角-手性双材料超材料, 同时利用3D打印技术制备出了形状优化后的样件, 实验结果与设计、仿真结果间具有良好的一致性, 验证了这套拓扑-形状优化算法的可靠性。



ANTE—Anisotropic negative thermal expansion; IPTE—Isotropic positive thermal expansion; APTE—Anisotropic positive thermal expansion

图 11 拓扑优化得到的可控热膨胀力学超材料

Fig. 11 Topologically optimized tailorable thermal expansion mechanical metamaterials

4 可控热膨胀力学超材料制备工艺研究

根据本文的介绍, 可控热膨胀力学超材料均由两种甚至两种以上材料组成。研究人员在进行材料选择时, 因瓦钢作为一种热膨胀系数明显低于常见金属的合金材料, 被广泛的应用于热膨胀可调超材料的制备中。除材料的选择外, 如何设计不同材料间的连接方式也得到了研究人员的关注, 如图 12(a) 所示, Wei 等^[32] 使用电火花切割的方式将铝和因瓦钢切割为三角形的底边和腰, 并通过钻孔和螺栓固定的方式完成不同边的连接。此外, 研究人员在材料两侧分别切割出凸角和凹槽, 这种设计使得不同胞元可以通过凸角和凹槽形成锁扣, 从而完成结构的制备 (图 12(b))^[31]。除了采用因瓦钢材料外, Parsons^[58] 和 Toropova 等^[59] 还利用钛合金和铝合金制备出了如图 12(c) 和 12(d) 所示的不同热膨胀可调超材料, 二者在双材料间的连接方式上具有不同的选择。前者是在钛-铝复合材料板上直接通过电火花切割的方式得到双材料点阵, 而后者则是通过螺栓连接的方式将外侧钛合金六边形和内侧铝合金

三角形组合^[59]。除此之外, 胶粘也是连接两种不同金属材料的常见工艺之一 (图 12(e))^[60]。

以上超材料的制造过程中, 均先采用火花切割等传统减材制造工艺, 再通过粘接或互锁的方式连接固定。而目前增材制造技术以其“自由制造”的工艺特性, 越来越广泛地应用于由聚合物或陶瓷材料组成的可控热膨胀力学超材料中。例如 Zhang 等^[61-62] 利用光固化增材制造技术制备出了 2D 和 3D 双材料陶瓷基热膨胀可调超材料。如图 12(f) 所示, 通过调整几何参数, 二氧化锆和氧化铝陶瓷组装的双材料 3D 结构可以实现热膨胀从正到负的调整。已有学者初步利用多材料 3D 打印技术实现了可控热膨胀超材料的一体化制备, 如图 9(g) 和 9(h) 所示, 通过熔融长丝制造和面投影微立体光刻技术将尼龙、聚乙烯醇以及 ABS 树脂等打印为双材料高分子可控热膨胀力学超材料^[40, 63]。但遗憾的是, 相关作者未对多材料 3D 打印的技术细节进行详尽论述, 也均没有对超材料的内部界面连接形式与相关界面强度进行详细讨论。

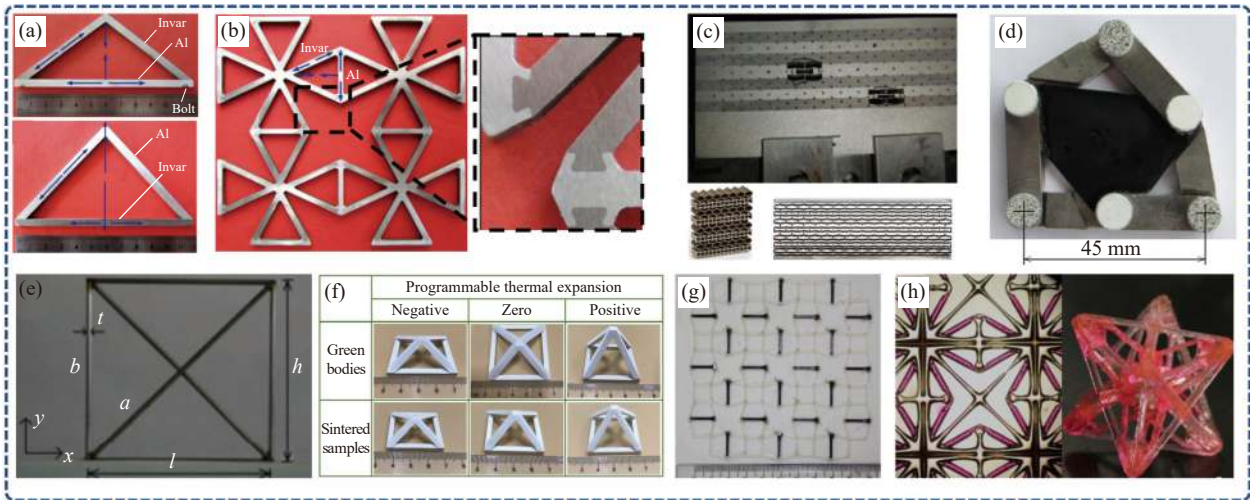


图 12 可控热膨胀力学超材料的制备方法

Fig. 12 Fabrication methods for tailorable thermal expansion mechanical metamaterials

在金属多材料打印过程中, 不同材料间热物理性能差异所产生的界面熔合问题会引起界面强度的不足, 因此目前还未有研究通过增材制造工艺加工金属可控热膨胀力学超材料, 但已有研究报道了增材制造工艺得到的因瓦钢材料的热膨胀、力学性能。例如, Yang 等^[64] 研究了选择性激光熔融技术 (Selective laser melting, SLM) 制备得到的因瓦钢材料的微观结构和热膨胀性能, 电子背散射衍射 (Electron backscattered diffraction,

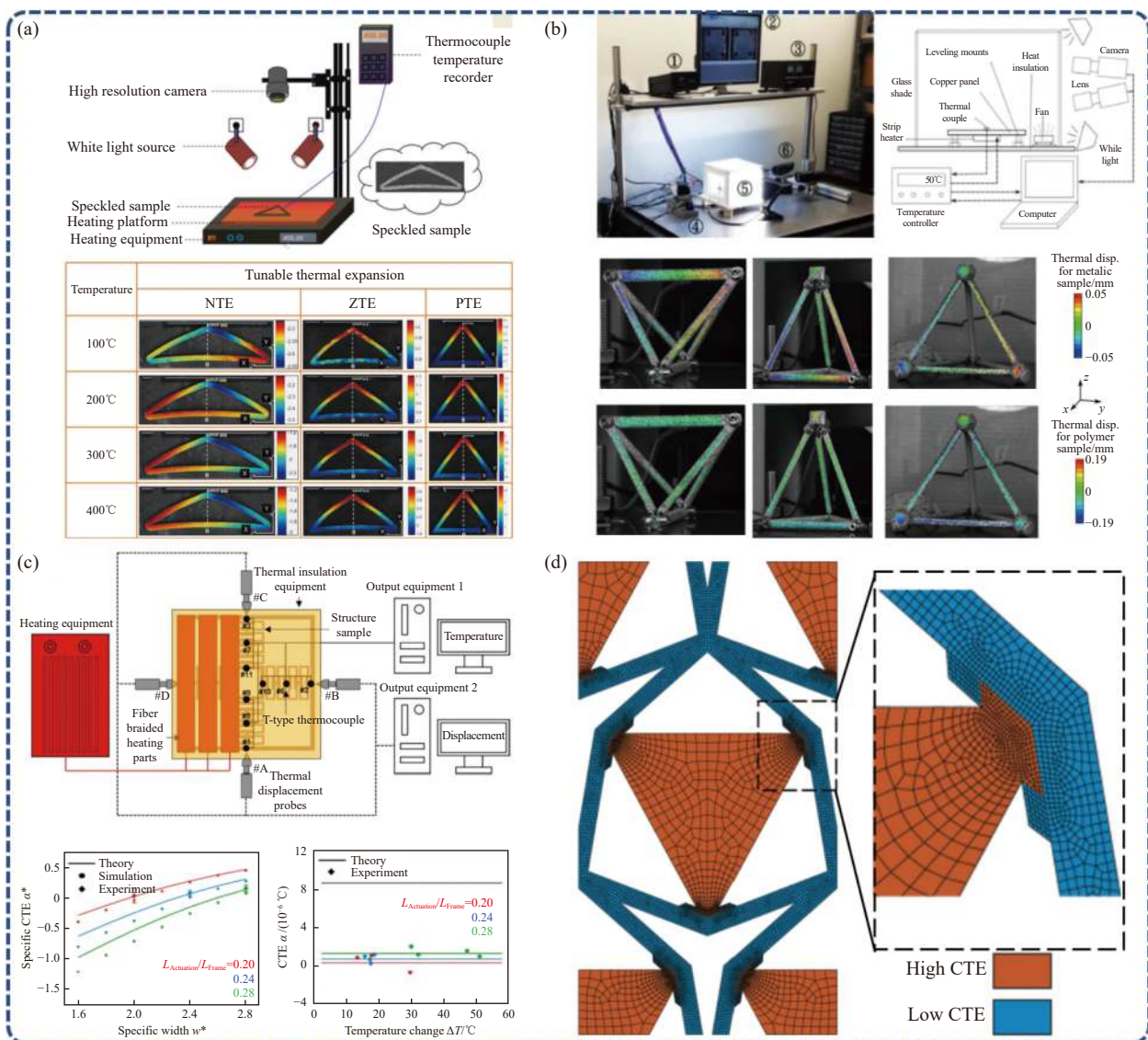
EBSD) 和光学显微镜观察的结果表明: 使用 SLM 制备的因瓦钢具有和传统精炼工艺相同的微观结构, 但不同孔隙度和镍元素在制备过程中的蒸发, 使得 SLM 制备的因瓦钢具有比传统因瓦钢稍低的热膨胀性能。进一步的, Wei 等^[65] 测试了利用 SLM 方法制备的因瓦钢材料的力学性能, 并发现材料拉伸极限强度和制备时的激光能量密度成正比, 和拉伸测试时温度成反比。同时, Yang 等^[66] 测试了激光粉末床熔融 (Powder bed fusion, PBF-LB)

技术制备出的因瓦钢样件力学性能。测试结果表明制备过程中产生的匙孔气孔则是可以被忽略的缺陷,而材料未熔融所产生的空隙会对材料性能产生很大的影响,这种空隙的边缘会存在高应力集中,这会为裂纹的扩展提供更多路径。

5 可控热膨胀力学超材料性能表征方法

为了探究所设计的可控热膨胀力学超材料性能,研究人员开发了多种实验方法对材料的热膨胀性能进行直接测量。然而,所采用的测试系统均为实验室内搭建组成,并没有成熟的测试标准和专用的实验设备。为了校准实验设备,需要

首先对一些常见材料的热膨胀系数进行测量和对比,确保测量结果的准确性。图 13(a) 中所展示的,是一种常用的测试超材料热膨胀性能的测试方法,主要包含施加温度载荷的升温装置和非接触式 DIC 全场应变测量系统^[31, 62, 67],并通过在样件上布置多个热电偶元件的方式检测样件内的温度变化。为了保证热量可以均匀地传递到样件内,需要在加热板上额外增加一块铜板^[59, 68]。当涉及到 3D 力学超材料时,为了使样件在加热过程中均匀受热,需要在加热平台外侧加装如图 13(b) 所示的透明舱室,并在加热舱内部粘接了多个热电偶确保舱内温度的均匀^[17, 29, 60, 69-70]。Palumbo 等^[60]



$L_{Actuation}$ —Length of actuation material; L_{Frame} —Length of frame material; NTE—Negative thermal expansion; ZTE—Zero thermal expansion; PTE—Positive thermal expansion; Disp.—Displacement

图 13 可控热膨胀力学超材料的性能测试方法

Fig. 13 Testing methods for the performance of tailorable thermal expansion mechanical metamaterials

通过将低热膨胀系数的石英棒插入加热舱中，使其一端与样件接触，而一端与舱室外的千分表相连以测量样件的热变形。区别于将样件放置于加热板上的方式施加温度载荷，而 Yu 等^[56]使用了玻璃纤维加热带对样件进行加热，在样件上设置了 12 对热电偶元件以测量样件温度，同时还布置了位移探头测量材料在升温过程中的变形(图 13(c))。

除采用实验仪器对超材料性能进行直接测量外，研究人员通常利用商用有限元软件(例如 Abaqus 或 ANSYS)中自带的力-热耦合分析^[11, 22, 25, 67](图 13(d))，完成温度载荷下超材料的热变形仿真分析。如图 13(d)所示，由于可调控热膨胀力学超材料通常为点阵结构，因此可以通过建立代表体积单元(Representative volume element, RVE)并施加周期性边界条件的方法建立有限元模型。需要注意的是，现有研究中针对超材料中双材料的边界通常使用单元网格共节点或认为材料间不发生滑移的方式进行处理^[67]。然而由于超材料制备过程中不同材料间连接方法较为复杂，这种简化对预测精度的影响需要进一步研究。此外，目前超材料的仿真中缺乏基于大变形理论与多物理场耦合得到的本构模型，这限制了研究人员对超材料多种物理性能的精确描述和对材料失效断裂的预测能力。综上，以上传统数值计算方法具有计算量大、需要输入的参数多以及难以根据要求进行反设计的缺点，研究人员还可以利用目前广泛应用的机器学习算法，快速预测超材料的多种性能或根据设计目标得到结构尺寸参数。

6 结论

可调控热膨胀力学超材料具有多材料、多尺度的物理与几何特征。近些年来，受航空航天领域与高端装备中极端温度变化的影响，在力学超材料的基础上，围绕可调控热膨胀力学超材料的热变形设计方法、调控策略、拓扑优化以及制造与性能表征等方面取得了开创式的进展。然而，仍需重点关注以下工程与科学问题：

(1) 热膨胀性能的高效设计方法研究

传统的直接设计法，往往先根据经验设计出单胞结构，再分析阵列后超材料的热-力学性能，最后分析某一参数对结构性能的影响。而实际的工程应用场景中往往对材料的热膨胀性能提出特定要求，因此亟需提升材料的设计效率。利用算法辅助设计(例如拓扑优化和人工智能技术)结合

仿真预测方法，可以更精确地优化超材料的结构设计，提高其热膨胀系数的调控范围和结构稳定性，并降低制造成本。

(2) 一体化超材料多功能可调耦合机制与环境耐久性研究

实际服役场景要求力学超材料在具有热膨胀可调的性能外同时集成轻量化、高刚度、泊松比可调等性能。如何实现多目标协同优化设计是影响可调控热膨胀力学超材料发展的另一个关键科学问题。还可以引入其他物理特性(如导电性、电磁性等)，实现超材料的多功能集成，以满足更复杂的应用需求。因此，发展多物理场耦合下多尺度的高效计算方法是快速构建功能特性优化模型的关键。此外，空天结构的耐久性与可靠性要求对可调控热膨胀力学超材料的材料选择与结构设计提出诸多挑战，有必要针对特定的空天环境进行相应的材料研发与耐久性实验。

(3) 大尺寸复杂异形材料制备和表征评测方法

可调控热膨胀力学超材料在应用于对温度敏感的空天结构(如卫星天线、航天器外壳及精密仪器系统)时，大尺寸曲面异型的可调控热膨胀力学超材料的制造问题与超材料内部多材料界面的连接问题对现有制造技术提出了挑战，而开发相应的多材料一体化增材制造技术是解决这一问题的有效途径。现有研究中 2D 超材料多，3D 超材料少；多局限于理论和数值模拟，而实验制备与测试较少。仿真模拟中往往对边界条件过于简化，缺少基于大变形、多物理场耦合所开发的本构模型，难以根据设计需求进行反向结构设计。另外，急需发展高低温交变条件下超材料热膨胀性能的一致性测试手段，建立多物理场环境下超材料多功能特性表征方法。

参考文献：

- [1] 刘宇峰, 张中伟, 许正辉, 等. 空间高稳定碳/碳蜂窝夹层结构制备及性能 [J]. 宇航学报, 2020, 41(8): 1067-1075.
LIU Yufeng, ZHANG Zhongwei, XU Zhenghui, et al. Preparation and properties of carbon/carbon honeycomb sandwich panels for space ultra-stable structures [J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(8): 1067-1075(in Chinese).
- [2] 丁勇, 薛明德, 王新堂. 大型空间结构热弹性非线性有限元分析 [J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1162-1167.
DING Yong, XUE Mingde, WANG Xintang. Thermal structural finite element analysis of large space structure considering geometric non-linearity [J]. *Journal of Astro-*

- navitics**, 2006, 27(6): 1162-1167(in Chinese).
- [3] 邓启文, 韦庆, 李泽湘. 大时延力反馈遥操作系统的PID控制[J]. **宇航学报**, 2006, 27(2): 153-156, 200.
DENG Qiwen, WEI Qing, LI Zexiang. PID control of force-reflecting teleoperation system with large time-delay[J]. **Journal of Astronautics**, 2006, 27(2): 153-156, 200(in Chinese).
- [4] 崔铎. 负热膨胀材料及其增强铝基复合材料的制备与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
CUI Duo. Preparation and properties of negative thermal expansion materials and reinforced aluminum matrix composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020(in Chinese).
- [5] 孔祥鲲, 孔令奇, 姜顺流, 等. 电磁超材料在超宽带雷达隐身微小卫星设计中的应用[J]. **宇航学报**, 2021, 42(6): 775-782.
KONG Xiangkun, KONG Lingqi, JIANG Shunliu, et al. Application of electromagnetic metamaterials in design of ultra-wideband radar stealth microsatellite[J]. **Journal of Astronautics**, 2021, 42(6): 775-782(in Chinese).
- [6] 樊海涛, 段鹏飞, 袁成. 航空颠覆性技术初探[J]. **航空学报**, 2024, 45(5): 16-32.
FAN Huitao, DUAN Pengfei, YUAN Cheng. A preliminary study on disruptive technologies in aviation[J]. **Acta Aeronautica et Astronautica Sinica**, 2023, 42(5): 1-16(in Chinese).
- [7] 于相龙, 周济. 力学超材料的构筑及其超常新功能[J]. **中国材料进展**, 2019, 38(1): 14-21, 41.
YU Xianglong, ZHOU Ji. Mechanical metamaterials: Architected materials and unexplored properties[J]. **Materials China**, 2019, 38(1): 14-21, 41(in Chinese).
- [8] 任鑫, 张相玉, 谢亿民. 负泊松比材料和结构的研究进展[J]. **力学学报**, 2019, 51(3): 656-687.
REN Xin, ZHANG Xiangyu, XIE Yimin. Research progress in auxetic materials and structures[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2019, 51(3): 656-687(in Chinese).
- [9] 武亚卓. 热膨胀可控多孔超材料制备及实验表征[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
WU Yazhuo. The fabrication and characterization of porous metamaterials with adjustable thermal expansion[D]. Changsha: Hunan University, 2020(in Chinese).
- [10] MILLER W, MACKENZIE D S, SMITH C W, et al. A generalised scale-independent mechanism for tailoring of thermal expansivity: Positive and negative[J]. **Mechanics of Materials**, 2008, 40(4-5): 351-361.
- [11] NG C K, SAXENA K K, DAS R, et al. On the anisotropic and negative thermal expansion from dual-material re-entrant-type cellular metamaterials[J]. **Journal of Materials Science**, 2017, 52: 899-912.
- [12] BERGER J B, MCMEEKING R M. Mechanical characterization of a bonded tailorable coefficient of thermal expansion lattice with near optimal performance[J]. **Journal of Materials Research**, 2018, 33(20): 3383-3397.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] WANG K, LIN F, CHEN J, et al. Three-dimensional hierarchical metamaterials incorporating multi-directional programmable thermal expansion[J]. **Mechanics of Materials**, 2021, 163: 104095.
- [16] 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.
- [17] XU H, PASINI D. Structurally efficient three-dimensional metamaterials with controllable thermal expansion[J]. **Scientific Reports**, 2016, 6(1): 34924.
- [18] WEI K, XIAO X, XU W, et al. Large programmable coefficient of thermal expansion in additively manufactured bi-material mechanical metamaterial[J]. **Virtual and Physical Prototyping**, 2021, 16(sup1): S53-S65.
- [19] SARVESTANIHY, AKBARZADEHAH, THERRIAULTD, et al. Engineered bi-material lattices with thermo-mechanical programmability[J]. **Composite Structures**, 2021, 263: 113705.
- [20] LAKES R. Cellular solid structures with unbounded thermal expansion[J]. **Journal of Materials Science Letters**, 1996, 15: 475-477.
- [21] XU W, XIAO X, CHEN J, et al. Program multi-directional thermal expansion in a series of bending dominated mechanical metamaterials[J]. **Thin-Walled Structures**, 2022, 174: 109147.
- [22] 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.
- [23] WU L, LI B, ZHOU J. Isotropic negative thermal expansion metamaterials[J]. **Applied Materials & Interfaces**, 2016, 8: 17721-17727.
- [24] HA C S, HESTEKIN E, LI J, et al. Controllable thermal expansion of large magnitude in chiral negative Poisson's ratio lattices[J]. **Physica Status Solidi (B)**, 2015, 252(7): 1431-1434.
- [25] AI L, GAO X L. Metamaterials with negative Poisson's ratio

- and non-positive thermal expansion[J]. *Composite Structures*, 2017, 162: 70-84.
- [26] YANG H, D'AMBROSIO N, LIU P, et al. Shape memory mechanical metamaterials[J]. *Materials Today*, 2023, 66: 36-49.
- [27] STEEVES C A, DOS SANTOS E LUCATO S L, HE M, et al. Concepts for structurally robust materials that combine low thermal expansion with high stiffness[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007, 55(9): 1803-1822.
- [28] LEHMAN J, LAKES R S. Stiff, strong, zero thermal expansion lattices via material hierarchy[J]. *Composite Structures*, 2014, 107: 654-663.
- [29] XU H, FARAG A, PASINI D. Multilevel hierarchy in bi-material lattices with high specific stiffness and unbounded thermal expansion[J]. *Acta Materialia*, 2017, 134: 155-166.
- [30] LI J, LIU H T, ZHANG Z Y. Stiffness characteristics for bi-directional tunable thermal expansion metamaterial based on bi-material triangular unit[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 241: 107983.
- [31] WEI K, CHEN H, PEI Y, et al. Planar lattices with tailorable coefficient of thermal expansion and high stiffness based on dual-material triangle unit[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2016, 86: 173-191.
- [32] WEI K, PENG Y, WEN W, et al. Tailorable thermal expansion of lightweight and robust dual-constituent triangular lattice material[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2017, 84(10): 101006.
- [33] CHEN J, WANG H, WANG K, et al. Mechanical performances and coupling design for the mechanical metamaterials with tailorable thermal expansion[J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 165: 104176.
- [34] CHEN J, XU W, WEI Z, 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.
- [35] WANG K, CHEN J, HAN Z, et al. Synergistically program thermal expansional and mechanical performances in 3D metamaterials: Design-Architecture-Performance[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 169: 105064.
- [36] YU H, LIANG B, ZHAO Z, et al. Metamaterials with a controllable thermal-mechanical stability: Mechanical designs, theoretical predictions and experimental demonstrations[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 207: 108694.
- [37] YU H, WANG H, LIANG B, et al. Metamaterials with remarkable thermal-mechanical stability and high specific modulus: Mechanical designs, theoretical predictions and experimental demonstrations[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 49: 101436.
- [38] YU H, WANG H, GUO X, et al. Building block design for composite metamaterial with an ultra-low thermal expansion and high-level specific modulus[J]. *Composite Structures*, 2022, 300: 116131.
- [39] YU H, WANG H, WANG X, et al. The cylindrical mechanical metamaterial with high-level thermal-mechanical stabilities and high dynamic stiffness[J]. *Mechanics of Materials*, 2023, 186: 104799.
- [40] 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: 045010.
- [41] XU N, LIU H T. A novel 3D structure with tunable Poisson's ratio and adjustable thermal expansion[J]. *Composites Communications*, 2020, 22: 100431.
- [42] PENG X L, BARGMANN S. A novel hybrid-honeycomb structure: Enhanced stiffness, tunable auxeticity and negative thermal expansion[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 190: 106021.
- [43] PENG X L, BARGMANN S. Tunable auxeticity and isotropic negative thermal expansion in three-dimensional lattice structures of cubic symmetry[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 43: 101201.
- [44] LI J, YANG Q, WEI Y, et al. A synergistic design of composite metamaterial with drastically tailorable thermal expansion and Poisson's ratio[J]. *Composite Structures*, 2021, 275: 114446.
- [45] WEI K, PENG Y, QU Z, et al. A cellular metastructure incorporating coupled negative thermal expansion and negative Poisson's ratio[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 150: 255-267.
- [46] PENG Y, WEI K, MEI M, et al. Simultaneously program thermal expansion and Poisson's ratio in three dimensional mechanical metamaterial[J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113365.
- [47] 王雪松, 刘卫东, 刘典. 新型反四手性蜂窝结构的内拉伸弹性[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(8): 4849-4861.
- WANG Xuesong, LIU Weidong, LIU Dian. In-plane tensile elasticity of a novel anti-tetrachiral cellular structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(8): 4849-4861(in Chinese).
- [48] 刘旭畅, 李爽, 杨金水. 一种新型手性负泊松比结构的减振性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(1): 477-484.
- LIU Xuchang, LI Shuang, YANG Jinshui. Damping performance of a new chiral negative Poisson's ratio structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(1): 477-484(in Chinese).

- [49] LI J, YANG Q, HUANG N, et al. A novel mechanical metamaterial with tailorable Poisson's ratio and thermal expansion based on a chiral torsion unit[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(11): 115004.
- [50] LING B, WEI K, WANG Z, et al. Experimentally program large magnitude of Poisson's ratio in additively manufactured mechanical metamaterials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 173: 105466.
- [51] LING B, WEI K, QU Z, et al. Design and analysis for large magnitudes of programmable Poisson's ratio in a series of lightweight cylindrical metastructures[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 195: 106220.
- [52] WEI K, XU W, LING B, et al. Multi-functional cylindrical metastructures to simultaneously program both thermal expansion and Poisson's ratio[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 43: 101177.
- [53] TAKEZAWA A, KOBASHI M. Design methodology for porous composites with tunable thermal expansion produced by multi-material topology optimization and additive manufacturing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 131: 21-29.
- [54] ZHANG X, YE H, WEI N, et al. Design optimization of multi-functional metamaterials with tunable thermal expansion and phononic bandgap[J]. *Materials & Design*, 2021, 209: 109990.
- [55] HAN Z, WANG Z, WEI K. Shape morphing structures inspired by multi-material topology optimized bi-functional metamaterials[J]. *Composite Structures*, 2022, 300: 116135.
- [56] HAN Z, WEI K. Multi-material topology optimization and additive manufacturing for metamaterials incorporating double negative indexes of Poisson's ratio and thermal expansion[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 54: 102742.
- [57] HAN Z, XIAO X, CHEN J, et al. Bifunctional metamaterials incorporating unusual geminations of Poisson's ratio and coefficient of thermal expansion[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(44): 50068-50078.
- [58] 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.
- [59] TOROPOVA M M, STEEVES C A. Robust lightweight multi-functional thermally tailored lattices[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(3): 035011.
- [60] PALUMBO N M A, SMITH C W, MILLER W, et al. Near-zero thermal expansivity 2D lattice structures: Performance in terms of mass and mechanical properties[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(6): 2392-2403.
- [61] ZHANG K, WANG K, CHEN J, et al. Design and additive manufacturing of 3D-architected ceramic metamaterials with programmable thermal expansion[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47: 102338.
- [62] ZHANG K, WEI K, CHEN J, et al. Stereolithography additive manufacturing of multi-ceramic triangle structures with tunable thermal expansion[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(4): 2796-2806.
- [63] HOPKINS J B, SONG Y, LEE H, et al. Polytope sector-based synthesis and analysis of microstructural architectures with tunable thermal conductivity and expansion[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2016, 138(5): 051401.
- [64] YANG Q, WEI K, YANG X, et al. Microstructures and unique low thermal expansion of Invar 36 alloy fabricated by selective laser melting[J]. *Materials Characterization*, 2020, 166: 110409.
- [65] WEI K, YANG Q, LING B, et al. Mechanical properties of Invar 36 alloy additively manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2020, 772: 138799.
- [66] YANG Q, WEI K, QU Z, et al. In-situ X-ray computed tomography of high-temperature tensile behavior for laser powder bed fused Invar 36 alloy[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 83: 104072.
- [67] BERGER J, MERCER C, MCMEEKING R M, et al. The design of bonded bimaterial lattices that combine low thermal expansion with high stiffness[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2011, 94: s42-s54.
- [68] STEEVES C A, MERCER C, ANTINUCCI E, et al. Experimental investigation of the thermal properties of tailored expansion lattices[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2009, 5(2): 195-202.
- [69] XU H, FARAG A, PASINI D. Routes to program thermal expansion in three-dimensional lattice metamaterials built from tetrahedral building blocks[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 117: 54-87.
- [70] WEI K, XIAO X, CHEN J, et al. Additively manufactured bimaterial metamaterial to program a wide range of thermal expansion[J]. *Materials & Design*, 2021, 198: 109343.