

一种具备可调热膨胀系数的可展开结构的力学特性研究

王艳丽, 沙振东, 余崇民

RESEARCH ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE DEPLOYABLE STRUCTURE WITH ADJUSTABLE THERMAL EXPANSION COEFFICIENT

Wang Yanli, Sha Zhendong, and She Chongmin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-24-429>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

折纸结构和折纸超材料动力学研究进展

ADVANCES IN THE DYNAMICS OF ORIGAMI STRUCTURES AND ORIGAMI METAMATERIALS

力学学报. 2022, 54(1): 1-38

折纸超材料折展稳态特性研究

STUDY ON FOLDING STABILITY OF ORIGAMI METAMATERIALS

力学学报. 2022, 54(10): 2726-2732

考虑非线性本构的非刚性折纸结构动力学建模与分析

DYNAMIC MODELING AND ANALYSIS FOR NON-RIGID ORIGAMI STRUCTURE CONSIDERING NONLINEAR CONSTITUTIVE RELATION

力学学报. 2022, 54(9): 2552-2566

TMP折纸防护的双稳态软体机器人

A TMP ORIGAMI-SHELL REINFORCED BISTABLE SOFT ROBOT

力学学报. 2023, 55(10): 2331-2343

基于径向积分边界元法的周期性复合材料面内等效热弹性参数分析方法

A METHOD FOR COMPUTING THE EFFECTIVE IN-PLAN THERMOELASTIC PROPERTIES OF PERIODIC COMPOSITES BASED ON THE RADIAL INTEGRATION BOUNDARY ELEMENT METHOD

力学学报. 2024, 56(8): 2294-2303

聚类分析-神经网络-贝叶斯优化联合识别复合材料参数研究

RESEARCH ON PARAMETER IDENTIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS BY COMBINATION OF SELF-CONSISTENT CLUSTER ANALYSIS, NEURAL NETWORK AND BAYESIAN OPTIMIZATION

力学学报. 2024, 56(11): 3333-3350



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

一种具备可调热膨胀系数的可展开结构的力学特性研究¹⁾

王艳丽* 沙振东*,^{†,2)} 余崇民**,³⁾

* (西安交通大学航天航空学院, 复杂服役环境重大装备结构强度与寿命全国重点实验室, 西安 710049)

[†] (西安交大-成兴国投无序新材料实验室, 西安 710049)

** (南京航空航天大学航空学院, 南京 210016)

摘要 在航空航天等领域, 结构不仅需要具备精确调控热膨胀系数的能力, 以确保在极端温度变化下保持热稳定性, 还要具备高效的空间部署能力, 以应对受限工作环境中的各种挑战. 具备可调特性的点阵复合材料正逐步在工程领域中得到应用. 文章结合折纸技术和双材料三角形结构, 提出了一种能够实现空间展开、可调热膨胀性能及轻量化的三角形联合可展开结构. 通过使用非零厚度面板和调整铰链位置, 该结构可以在两侧施加拉力, 将理想折纸模型转变为具备承载能力的等效三维结构. 进一步通过调整几何参数和材料组合, 实现了热膨胀系数从正值到负值的可调性, 并能够调节刚度. 研究结果表明, 增大角度 (三角形单元的斜边与对称轴的夹角) 和减小厚度比 (低、高热膨胀系数材料的厚度比) 能有效降低结构的热膨胀系数, 同时减小弹性模量. 增大单胞比 (支撑面与底面的单胞数量比) 可以降低结构热膨胀系数并增加弹性模量, 但同时会在结构中增加更多易变形的连接部位, 从而导致屈服强度下降. 减小角度、厚度比和增大单胞比均有利于实现结构的轻量化. 结构在承载方向上的等效热膨胀系数的理论值与有限元模拟结果吻合良好.

关键词 空间展开能力, 折纸, 点阵复合材料, 可调热膨胀

中图分类号: TB331

文献标识码: A

DOI: 10.6052/0459-1879-24-429

CSTR: 32045.14.0459-1879-24-429

RESEARCH ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE DEPLOYABLE STRUCTURE WITH ADJUSTABLE THERMAL EXPANSION COEFFICIENT¹⁾

Wang Yanli* Sha Zhendong*,^{†,2)} She Chongmin**,³⁾

* (State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[†] (Laboratory for Novel Disorder Materials, Xi'an Jiaotong University and Taixing Chengxing State Assets Management & Investment Co., Ltd., Xi'an 710049, China)

** (College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

2024-09-04 收稿, 2025-01-16 录用, 2025-01-19 网络版发表.

1) 国家自然科学基金资助项目(12372116).

2) 通讯作者: 沙振东, 教授, 主要研究方向为无序合金应用研究及装置 (污水预处理、血管支架). E-mail: zhendongsha@mail.xjtu.edu.cn

3) 通讯作者: 余崇民, 副研究员, 主要研究方向为先进材料结构与强度和结构损伤容限设计. E-mail: cmshe@nuaa.edu.cn

引用格式: 王艳丽, 沙振东, 余崇民. 一种具备可调热膨胀系数的可展开结构的力学特性研究. 力学学报, 2025, 57(3): 701-711

Wang Yanli, Sha Zhendong, She Chongmin. Research on mechanical properties of the deployable structure with adjustable thermal expansion coefficient. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, 57(3): 701-711

Abstract Control of thermal expansion coefficients (TECs) is critical for structural systems in specialized fields such as aerospace, where extreme temperature variation environments necessitate high thermal stability. Meanwhile, such systems also require efficient space deployment capabilities to address the challenges posed by limited working spaces. Lattice composite structures with tunable properties are gradually being applied in the engineering field. In this study, we propose a triangular combined deployable structure that incorporates space deployment, adjustable thermal expansion, and lightweight properties through an origami-based design utilizing bi-material triangles. By introducing panels with non-zero thickness and strategically adjusting the hinge positions, the idealized origami model is transformed into a three-dimensional load-bearing configuration when tensile forces are applied to both sides of the structure, allowing it to support loads effectively. The TEC of the structure can be engineered to exhibit either positive or negative values by strategically adjusting the geometrical parameters and material combinations, which also allows tuning of structural stiffness. The results show that increasing the angle (the angle between the symmetry axis and the hypotenuse of the triangle) and reducing the thickness ratio (the ratio of material thicknesses with low and high TECs) can effectively lower the TEC of the structure and simultaneously diminish its elastic modulus. Elevating the cell ratio, which is the ratio of the number of cells on the supporting surface to those on the base surface, decreases the TEC and enhances the elastic modulus of the structure. However, it also introduces more deformable connection regions within the structure, leading to a decrease in yield strength. Additionally, the results indicate that greater improvements in lightweight properties can be achieved by reducing the angle and thickness ratio, as well as increasing the cell ratio. The theoretical values of the equivalent TEC in the load-bearing direction of the structure align well with the results from finite element simulations.

Key words space deployment capability, origami, lattice composites, adjustable thermal expansion

引 言

在航空航天等领域中,复杂的工作环境和极端的温度变化对结构的功能、安全和热稳定性提出了高要求^[1-3]。为了适应有限空间和复杂的环境条件,工程中广泛采用空间可展开结构的解决方案^[4],以增强系统的适应性和功能性。

1896 年法国物理学家 Guillaume^[5]发现了一种 Fe-Ni 合金,在室温附近具有近零热膨胀系数,称为因瓦合金。金属和合金在一定温度范围内具有非常低的热膨胀系数的现象被称为因瓦效应。此后,学者们发现多种具有因瓦效应的合金体系,如 Fe-Pt^[6]和 Fe-Mn^[7]。这类材料能有效保持热稳定性并降低热应力。然而,传统因瓦合金力学性能较差、温度范围窄、制备困难,且不能满足轻量化需求。点阵复合材料具有良好的功能设计性。通过在单胞尺度上复合两种不同热膨胀材料,可以实现宏观等效零膨胀的二维复合材料。具有可调热膨胀的结构主要分为拉伸主导型^[8-11]和弯曲主导型^[12]。拉伸主导型是通过杆件的轴向拉压变形调控热膨胀系数,最初由 Miller 等^[8]引入,他们使用双材料三角形进行热膨胀系数的调控。Wei 等^[9]提出了三角形单胞的平面晶

格设计方法和稳态固定节点方法,并验证了其有效性。弯曲主导型最早由 Timoshenko^[13]引入,他研究了加热时双金属带的弯曲行为,指出由于两种金属热膨胀系数不匹配导致了结构曲率变化,从而引起弦长方向的长度变化。根据这一原理,众学者设计了多种新型结构,如手性与反手性弯曲结构^[14-16]、双层肋多边形点阵结构^[17-19]等。Ai 等^[20]设计了双材料星型重入平面结构,具有负泊松比和负热膨胀系数。Chen 等^[21]考虑了双材料三角形晶胞和弯曲梁的热应力问题,设计了一种具有低热应力的可调热膨胀材料。然而,这些多是平面点阵复合材料,刚度低且在特殊工作环境下会受到限制。

空间可展开结构在航空航天和机器人等特殊领域被广泛采用^[22-26]。它可以从折叠状态变换到复杂的三维形状,在封装比、模块化及结构复杂度等方面具有优势^[4,26]。航空航天领域已采用刚性蜂窝板结合弹簧驱动铰链连接的可展开太阳翼^[23]。嫦娥四号中继星配备了伞状可展开天线,能够适应在轨运行阴影期-230℃的极端低温环境^[24]。折纸技术因其可设计性和折叠变形特性^[27],近年来为可展开结构提供了创新的方向。例如,刚性折纸 Miura 是周期性平行四边形图案,通过结构衍生设计,它能够展现可调

刚度^[28]、多稳态^[28]、可调热膨胀^[29]、自折叠^[30]和自锁^[31]等性能,已应用于人造肌肉^[25]、太阳能电池^[32]等领域中. Van Manen 等^[30]设计了一种适用于微观尺度的自折叠折纸结构,通过外部拉伸实现顺序自动折叠,展示了在微小尺度上通过物理激励实现复杂结构动态配置潜力. 刘杰等^[33]设计了一种采用 Tachi-Miura 多面体折纸的双稳态软体机器人,其通过快速储存和释放能量驱动软体机器人快速运动. 可见,具备展开能力的结构不仅可以节省空间并减轻质量,还能提供独特且可设计的力学性能.

工程实践中,设备仪器不仅需要控制热膨胀系数,还需要具备空间展开能力以适应紧凑环境. 本工作设计了一种双材料三角形联合可展开结构,并通过理论推导和有限元仿真研究了该结构的可调热膨胀特性与力学性能,综合分析了其轻量化性能,以期具备可调热膨胀特性的空间可展开结构提供设计参考.

1 结构设计

1.1 折纸模型

折纸是一种理想的实现力学可设计超材料的方式,通过合理设计折痕可将二维平面转化为三维几何图案. 本文设计了一种三角形联合可展开结构,其折纸模型的原理如图 1(a) 所示,其中 θ 为面板 I 与承载方向的夹角. 该结构从平面状态开始,通过两侧施加拉力展开,直至底部折纸层对齐并位于同一平面,最终形成完全展开的三维状态. 结构基本构件包括长方形刚性平面 I 和 II,这些平面组合成三角立方体,进而多个立方体联合构成整体的可展开结构. 当结构完全展开后,面板 I 充当支撑结构,而面板 II 组合后充当顶部和底部.

1.2 可调热膨胀结构原理

本文采用拉伸主导型双材料三角形^[8]作为基本单元,底边组件 L_1 使用高热膨胀系数 (thermal expansion coefficient, TEC) 材料,斜边组件 L_2 选用低热膨胀系数材料. 如图 1(b) 所示,当温度升高时,三角形在 x 轴方向膨胀,在 y 轴方向收缩. 此时,双材料三角形在 y 轴向表现出负热膨胀效应. 图 1(c) 展示了建模过程中双材料三角形的各项几何参数, c 表示内三角形的高度 BF , β 为三角形单元斜边与对称轴的夹角, t_1 和 t_2 分别为高、低热膨胀组件在

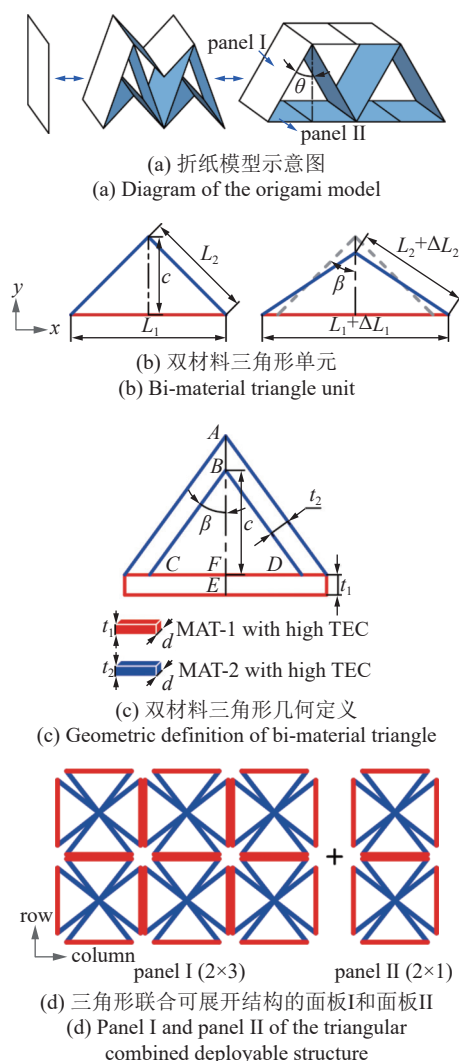


图 1 理论模型示意图

Fig. 1 Diagram of the theoretical model

面内的宽度, d 为三角形单元的面外厚度. 如图 1(d) 所示,将双材料三角形单元进行周期旋转变换,形成四重旋转对称性单胞,再将单胞在行列两个方向上阵列,组成了三角形联合可展开结构的可调热膨胀支撑面 (面板 I) 和底面 (面板 II).

1.3 可调热膨胀结构的厚偏移板模型

在应用中,折纸结构通常需从理想零厚度模型转变为具有厚度的结构. 通过将刚性平面替换为面板,将折痕替换为铰链,该设计形成了运动学等效的三维模型. 为防止面板厚度的相互干涉,铰链需合理布局在面板不同位置. 如图 2(a) 所示,本文将面板折痕视为铰链,并设计面板 I 为 Z 字形偏移板,以补偿折叠状态下面板 II 的厚度. 为确保结构在完全展开时的水平稳定性,本文在面板 I 的上下部分添加了额外部分. 该部分通过在 CATIA 中使用 DMU 运动

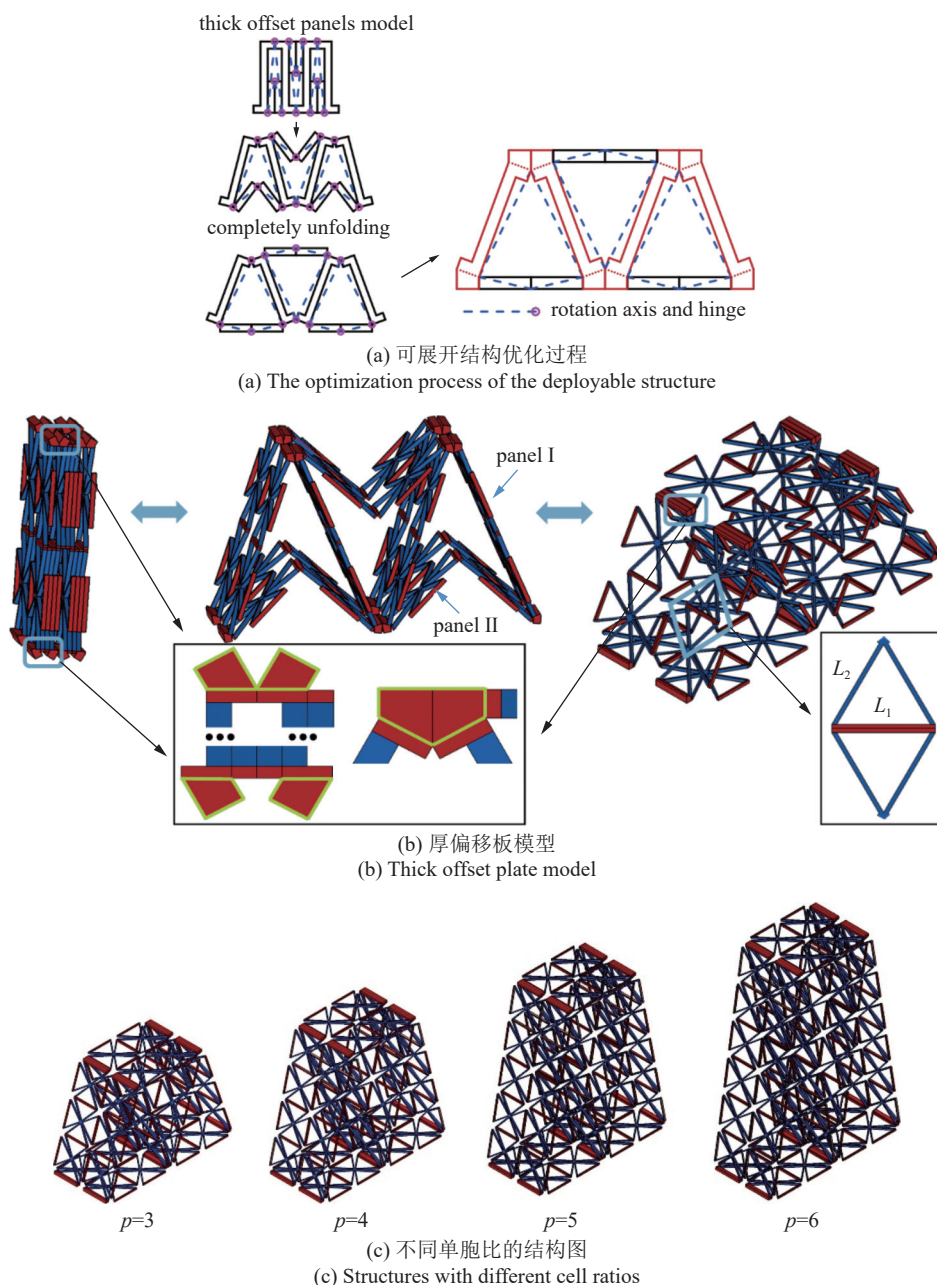


图2 三角形联合可展开结构的三维模型图

Fig. 2 The 3D model diagram of the triangular combined deployable structure

机构模块建立运动关系,当相邻的两个面板 II 位于水平方向时停止展开.随后,通过几何投影方法在面板 I 上添加额外部分,确保展开状态下水平方向的结构处于同一水平面,同时该部分使用高热膨胀系数材料,如图 2(b) 中绿色框所示.

结构的几何参数直接影响其在展开状态下的热膨胀性能和力学性能.本文将分析角度(β 为三角形单元斜边与对称轴的夹角)、厚度比($n = t_2/t_1$ 为低、高热膨胀系数材料的厚度比)、单胞比(p 为支撑面与底面的单胞数量比)和材料热膨胀系

数比(α_1/α_2 为高、低热膨胀系数之比)对结构承载方向上的热膨胀系数、弹性模量和屈服强度的影响.在本研究中,几何参数设定为 $c = 40 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$ 和 $t_1 = 2 \text{ mm}$.不同单胞比 p 的结构模型如图 2(c) 所示.

为满足结构对可调热膨胀性和承载能力的需求,选材策略应侧重于高弹性模量且热膨胀系数不同的材料组合.为深入分析组件热膨胀系数比对结构性能的影响,本研究选择了多种材料组合,详细材料及其属性见表 1.

表 1 材料参数

Table 1 Material properties					
Material	Modulus of elasticity, E/GPa	Thermal expansion coefficient, $\alpha/(10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	Temperature, $T/^{\circ}\text{C}$	Density, $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Poisson's ratio, ν
aluminium alloy (7075)	71	23.9	25 ~ 125	2800	0.33
magnesium alloy (ZE41)	45	27	20 ~ 100	1840	0.35
stainless steel (440C)	214	10.2	20 ~ 100	7800	0.283
alloy steel (4J33)	139	6.3	20 ~ 300	8270	0.37

2 有限元模型

图 3 给出了三角形联合可展开结构的有限元模型. 该模型在 CATIA 中建立, 并导入 COMSOL

Multiphysics 的三维固体力学模块进行仿真模拟. 热膨胀性能分析设定了 20 °C ~ 120 °C 的均匀温度变化范围, 同时通过准静态压缩模拟获得承载方向上的应力应变曲线, 以评估结构的力学性能.

承载方向为 z 方向, 图 3(a) 为准静态压缩模拟的边界条件: 限制结构下表面 z 方向自由度, 固定点 M 和 N 的所有自由度, 并在上表面施加 z 方向的压缩位移. 力学有限元分析时, 材料的本构关系为线弹性本构关系, 服从广义胡克定律, 同时考虑了几何非线性效应.

有限元模型采用六面体和三角形棱柱单元进行网格划分, 利用二次多项式形函数对单元内的位移场进行插值. 为确保结果可靠性, 进行了网格无关性验证, 图 3(c) 显示了不同网格数量下的计算结果, 随着网格数量的增加, 应力-应变曲线变化很小. 综合考虑计算效率, 最终确定使用包含 37464 个单元的模型, 其中宽度和高度方向至少配置 2 个单元, 长度方向则至少配置 14 个单元. 两种材料固接在一起. 网格划分如图 3(b) 所示.

3 结构的等效参数

3.1 等效热膨胀系数

3.1.1 基本单元的轴向等效热膨胀系数

如图 1(b) 所示, 在双材料三角形单元部分, 为简化分析, 理想情况下不考虑双材料三角形组件的厚度, 而是将其抽象为理想的三角形. 定义三角形单元的对称轴方向为轴向, 并基于此来分析各结构的轴向等效热膨胀系数. 随后, 通过温度变化前后三角形的几何关系进行分析

$$c^2 = L_2^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2$$

(1)

$$(c + \Delta c)^2 = (L_2 + \Delta L_2)^2 - \left(\frac{L_1 + \Delta L_1}{2}\right)^2$$

(2)

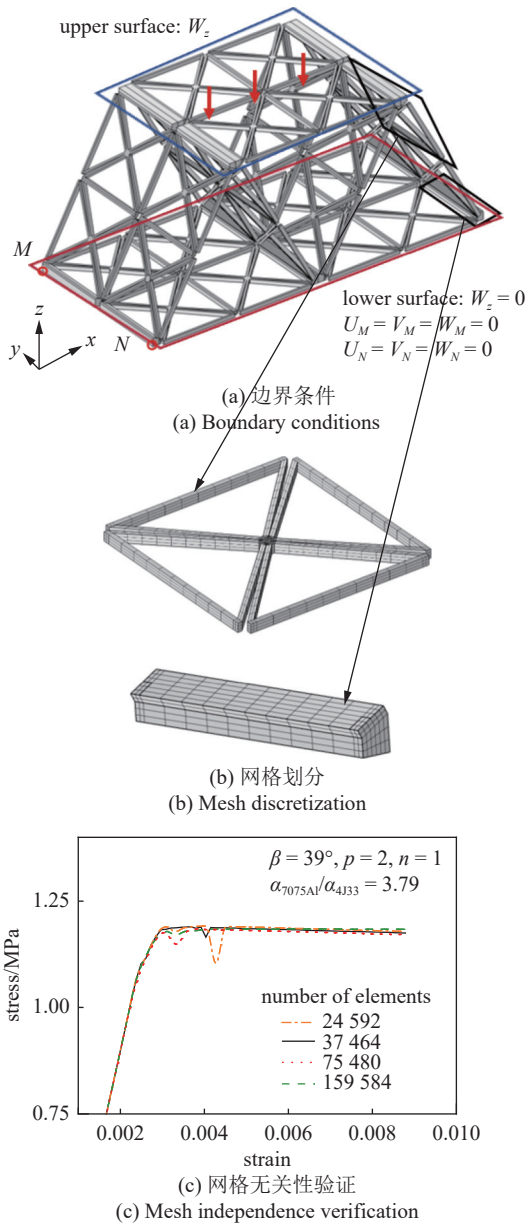


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \Delta T} \quad (3)$$

式中, α 为热膨胀系数.

得到双材料三角形轴向等效热膨胀系数公式

$$\alpha_{\text{axial}} = \frac{\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \sin^2 \beta\right) \alpha_2}{\cos^2 \beta} \quad (4)$$

在实际应用中, 组件的厚度对结构性能有显著影响. 根据图 1(c) 所示模型, 推导考虑组件厚度时结构轴向的等效热膨胀系数公式

$$\alpha_{AE} = \frac{\Delta L_{AB} + \Delta L_{BF} + \Delta L_{FE}}{L_{AE} \Delta T} = \left[\frac{\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \sin^2 \beta\right) c}{\cos^2 \beta} + t_1 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \frac{t_2}{\sin \beta} \right] \alpha_2 \left/ \left(c + t_1 + \frac{t_2}{\sin \beta} \right) \right. \quad (5)$$

3.1.2 结构承载方向的等效热膨胀系数

如图 2(c) 所示. 由于结构的面板是由基础单元双材料三角形构成, 并且这些三角形在结构中是独立不相互影响的, 因此面板 I 和面板 II 的轴向等效热膨胀系数可以近似与双材料三角形的轴向热膨胀系数相同

$$\alpha_{\text{panel-I}} = \alpha_{\text{panel-II}} = \alpha_{AE} \quad (6)$$

面板 I 的长度为

$$L_{\text{panel-I}} = 2pL_{AE} = 2p \left(c + t_1 + \frac{t_2}{\sin \beta} \right) \quad (7)$$

对于完全展开的结构, 需要简化 z 字形连接处带来的微小角度影响, 因此将可展开结构支撑面板 I 与承载方向的夹角定义为

$$\theta = \arcsin \frac{1}{p} \quad (8)$$

完全展开状态下, 结构承载方向的等效热膨胀系数公式定义为

$$\alpha_Z = \frac{\alpha_{\text{panel-I}} L_{\text{panel-I}} \cos \theta + 2\alpha_1 d}{L_Z} = \frac{\alpha_{\text{panel-I}} L_{\text{panel-I}} \cos \theta + 2\alpha_1 d}{L_{\text{panel-I}} \cos \theta + 2d} \quad (9)$$

得到理论公式为

$$\alpha_Z = \left[\frac{\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \sin^2 \beta\right) c}{\cos^2 \beta} + t_1 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \frac{t_2}{\sin \beta} \right] p \alpha_2 \cdot \cos \left(\arcsin \frac{1}{p} \right) + d \alpha_1 \left/ \left[p \cos \left(\arcsin \frac{1}{p} \right) \cdot \left(c + t_1 + \frac{t_2}{\sin \beta} \right) + d \right] \right. \quad (10)$$

式中, $0^\circ < \beta < 45^\circ$, $0.5 \leq n \leq 2.5$, $2 \leq p \leq 6$.

3.2 等效密度

根据几何关系, 图 2(c) 中结构完全展开后体积为

$$V = \frac{(4c + 8c)2pc \cos \theta}{2} \cdot 4c = 48pc^3 \cos \theta \quad (11)$$

结构各个杆件的总质量为

$$m = (8p + 12)(4L_1 t_1 d \rho_1 + 8L_2 t_2 d_1 \rho_2) \quad (12)$$

式中, ρ_1 和 ρ_2 为两种材料的密度, 展开结构的等效密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\left(\rho_1 \tan \beta + \frac{\rho_2}{\cos \beta} \frac{t_2}{t_1} \right) (2p + 3)}{300p \cos \left(\arcsin \frac{1}{p} \right)} \quad (13)$$

结构的轻量化性能由相对密度表示, 结构相对密度^[15] 定义为

$$\bar{\rho} = \sqrt{\frac{2\rho^2}{\rho_1^2 + \rho_2^2}} \quad (14)$$

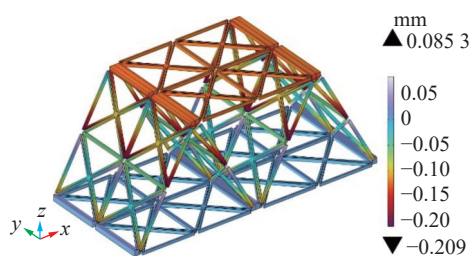
式中, 自变量范围为 $0^\circ < \beta < 45^\circ$, $0.5 \leq n \leq 2.5$, $2 \leq p \leq 6$.

4 结果与讨论

4.1 热膨胀特性

4.1.1 结构热变形模拟

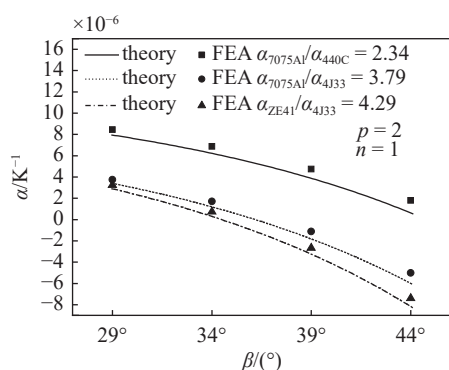
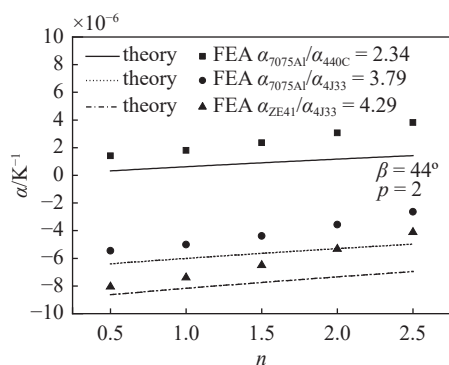
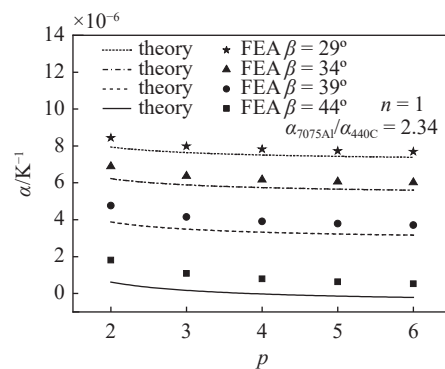
图 4 展示了在特定参数下的结构热膨胀模拟结果, 温差 $\Delta T = 100 \text{ K}$, 角度 $\beta = 44^\circ$, 单胞比 $p = 2$, 厚度比 $n = 1$, 材料为镁合金 ZE41 和合金钢 4J33, 变形尺度因子为 30. 模拟结果显示, 结构在承载方向上收缩, 表现出负热膨胀特性.

图 4 结构 z 方向热变形位移云图Fig. 4 Cloud diagram of thermal deformation displacement in z direction of the structure

4.1.2 不同参数对结构热膨胀系数的影响

本小节研究了几何参数角度 β 、厚度比 n 、单胞比 p 和材料热膨胀系数之比 α_1/α_2 对完全展开结构承载方向的等效热膨胀系数的影响。如图 5 所示, 理论值与仿真值吻合良好, 点为有限元仿真结果, 曲线为理论计算结果。

如图 5(a) 所示, 随着 α_1/α_2 增大, 结构热膨胀系数减小。可展开结构由双材料三角形组成, 两个材料热膨胀系数差距越大时, 结构的协调变形也会越大, 等效热膨胀系数减小。随着 β 增大, 结构热膨胀系数单调递减。由于三角形给定的内角变化需要相对较长边的长度变化, β 增大使底边膨胀更显著, 导致轴

(a) 结构热膨胀系数随角度变化的关系
(a) TEC as a function of angle(b) 结构热膨胀系数随厚度比变化的关系
(b) TEC as a function of thickness ratio(c) 结构热膨胀系数随单胞比变化的关系
(c) TEC as a function of cell ratio图 5 结构 z 向等效热膨胀系数的仿真值与理论值, 其中曲线代表理论值, 点代表仿真值Fig. 5 Simulation and theoretical values of the equivalent TEC in z direction of the structure, with curves representing theoretical values and dots denoting simulation values

向等效热膨胀系数减小。

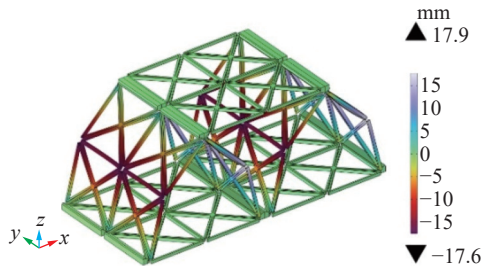
如图 5(b) 所示, 随着厚度比 n 增大, 结构热膨胀系数单调递增。三角形底面通过对称边界条件连接, 限制了旋转和沿对称轴的变形。而较大的拉伸变形有助于降低热膨胀。随着 n 增大, 斜边刚度提高, 导致在相同温度增量下热变形减少, 结构轴向等效热膨胀系数增大。如图 5(c) 所示, 随着单胞比 p 的增大, 结构热膨胀系数单调递减, 但幅度较小, 表明 p 对结构热膨胀系数影响不大。

在结果中, 理论值普遍低于模拟值。理论分析是基于铰接, 通过变形前后的几何关系进行公式推导, 忽略了两种材料实际是固接在一起, 升温时不同热膨胀会导致结构协调变形, 在连接处产生内应力, 组件出现弯曲变形, 使轴向等效热膨胀略小于理论值。此外, 三维模型中三角形单元顶角连接处也会带来误差。

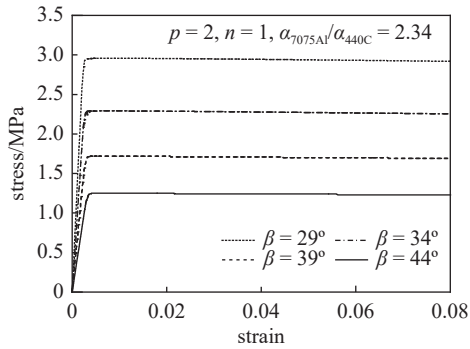
4.2 力学性能

4.2.1 准静态压缩变形

图 6(a) 展示了准静态压缩下的 z 方向位移云图, 模拟参数为: 压缩位移 6 mm, 角度 $\beta = 44^\circ$, 单胞比 $p = 2$, 厚度比 $n = 1$, 材料为 7075 铝合金 (7075Al) 和 440C 不锈钢。图 6(b) 展示了不同角度下准静态压缩结构的等效应力应变曲线, 用于评估结构在承载方向上的力学性能。结果显示结构在弹性变形阶段持续时间较短, 迅速进入塑性变形。主要由于细长杆件组成易发生屈曲失稳, 弯曲首先出现在两个三角形单元的结合处。



(a) 结构z方向压缩位移云图
(a) Cloud diagram of compression displacement in z direction



(b) 不同角度下结构的应力应变曲线
(b) Stress-strain curves at different angles

图6 结构准静态压缩模拟结果

Fig. 6 Quasi-static compression simulation results of the structure

4.2.2 几何参数对结构力学性能的影响

图7给出了参数与结构弹性模量和屈服强度之间的关系。图7(a)显示,随着角度 β 增大,结构弹性模量和屈服强度递减;而随着厚度比 n 增大,结构弹性模量和屈服强度单调递增。选取支撑面板中两个三角形单元进行理想受力分析,单元位置如图2(b)局部放大图所示。假定单元中杆件拉压变形主导,如图8所示,施加压力 F_N 后,分析表明杆1处于受拉状态(T),而杆2是受压状态(C)

$$F_1 = F_N \tan \beta \text{ (T)} \quad (15)$$

$$F_2 = \frac{F_N}{2 \cos \beta} \text{ (C)} \quad (16)$$

杆件中的轴向应力为

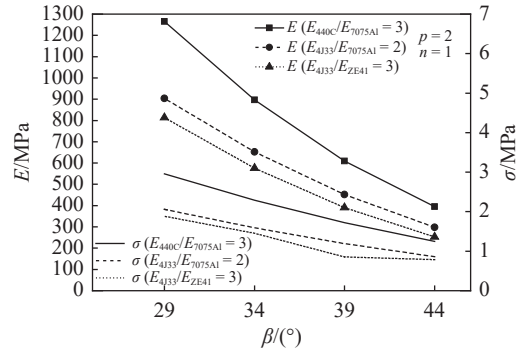
$$\sigma_1 = \frac{F_N \tan \beta}{A_1} = \frac{F_N \tan \beta}{t_1 d} \quad (17)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_N}{2A_2 \cos \beta} = \frac{F_N}{2t_2 d \cos \beta} \quad (18)$$

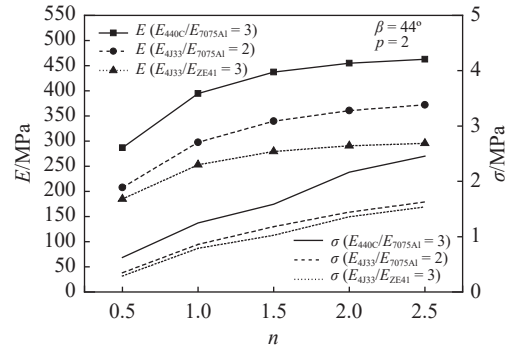
从式(17)和式(18)可知,保持 F_N 不变,随着角度 β 增加,杆1和杆2的应力增大,意味着杆件更易

达到破坏极限,结构刚度降低。相反,图7(b)显示,当厚度比 n 增加(t_2 增大),杆2应力减小,结构刚度提高。因此,减小角度和增加杆件厚度可以提高结构的抗变形能力,增强整体刚度。

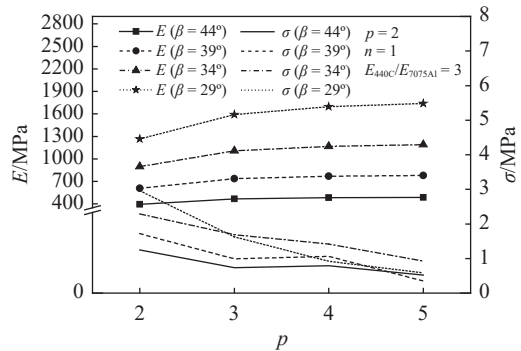
如图7(c)所示,随着单胞比 p 增大,结构弹性模量增加,而屈服强度降低。单胞比的增加导致结构支撑面之间的角度减小,因此弹性变形阶段结构的弹



(a) 结构弹性模量和屈服强度随角度的变化关系
(a) Elastic modulus and yield strength as functions of angle



(b) 结构弹性模量和屈服强度随厚度比的变化关系
(b) Elastic modulus and yield strength as functions of thickness ratio



(c) 结构弹性模量和屈服强度随单胞比变化的关系
(c) Elastic modulus and yield strength as functions of cell ratio

图7 几何参数对结构力学性能的影响

Fig. 7 Effect of geometric parameters on the mechanical properties of the structure

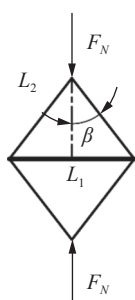


图 8 受力分析

Fig. 8 Force analysis

性模量增大. 由于结构中连接处使用的低热膨胀材料弹性模量较低, 这些连接处更容易变形. 随着单胞比增大, 易变形的连接处增多, 结构更易失稳, 因此屈服强度降低.

4.3 热膨胀系数与弹性模量的耦合分析

本节分析了结构热膨胀系数和弹性模量的耦合效应, 其中高热膨胀材料选用 7075 铝合金 (7075Al), 低热膨胀材料为不锈钢 440C, 单胞比 $p = 2$. 图 9 为不同几何参数下的结构热膨胀系数和弹性模量. 结果显示, 结构的弹性模量和热膨胀系数通常同步变化, 均随角度减小而增大, 随厚度比增加而增加. 此外, 厚度比对结构弹性模量的影响较为显著.

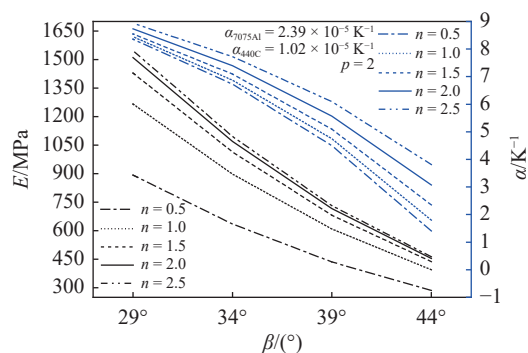


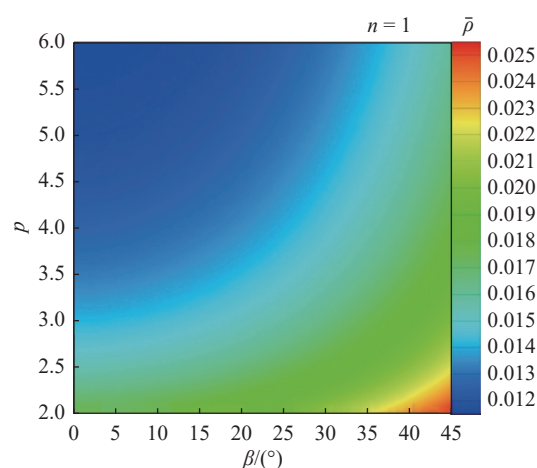
图 9 结构热膨胀系数和弹性模量随角度和厚度比变化的关系

Fig. 9 TEC and elastic modulus as functions of angle and thickness ratio of the structure

当角度 β 减小时, 三角形的底边长度减小, 使结构更有效地沿高度方向传递力, 提高垂直载荷的承载能力. 厚度比的增加不仅提高了弹性模量, 还降低了三角形单元在升温过程中的拉压变形程度, 从而提高了结构的热膨胀系数.

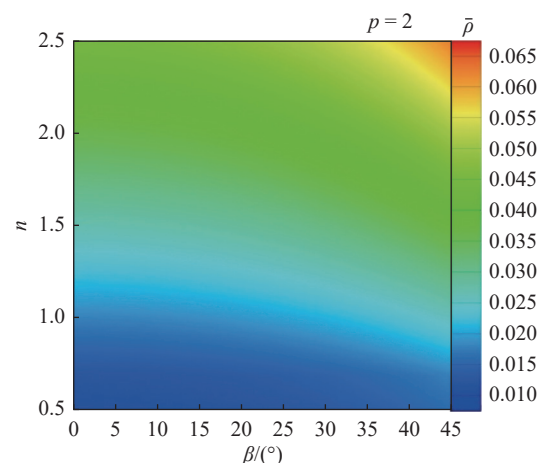
4.4 轻量化性能

图 10 展示了结构相对密度随参数 β , n 和 p 的变化情况, 其中高热膨胀材料选用 7075 铝合金



(a) 结构相对密度随角度和单胞比变化的关系

(a) Contour plot of the relative density versus angle and cell ratio



(b) 结构相对密度随角度和厚度比变化的关系

(b) Contour plot of the relative density versus angle and thickness ratio

图 10 结构相对密度

Fig. 10 Relative density of the structure

(7075Al), 低热膨胀材料为不锈钢 440C. 如图 10(a) 所示, 厚度比 $n = 1$ 时, 较大的单胞比 p 与较小的角度 β 结合时, 结构的轻量化性能更为显著, 结构相对密度最大为 2.5%. 在给定的几何构型下, 减小角度会减少基础三角形单元的周长, 有助于减少结构的总材料使用量, 降低结构相对密度.

图 10(b) 显示, 单胞比 $p = 2$ 时, 较小的厚度比 n 结合较小的角度 β 同样利于提高轻量化性能, 结构相对密度最大为 6.5%. 降低厚度比会减少结构中的材料用量, 从而降低结构相对密度.

5 结论

结合空间展开能力和可调热膨胀特性, 本文提出了一种三角形联合可展开结构. 利用理论推导和

数值模拟的方法,研究了结构在完全展开状态下的热膨胀性能、力学性能和轻量化性能,详细分析了几何参数和材料组合对结构性能的影响.本文得到主要结论如下.

(1) 增大角度、单胞比、热膨胀系数比和减小厚度比均能扩大这种协调变形,进一步降低结构的热膨胀系数.通过调整这些参数,结构可实现正负热膨胀系数的调节.

(2) 在单胞比不变的情况下,减小角度和增加厚度比可以提高杆件的承载能力,从而提升结构的弹性模量、屈服强度和热膨胀系数.增大单胞比虽然能提高弹性模量,但也会在结构中引入更多易变形的连接处,导致屈服强度下降.

(3) 减小角度和厚度比,增大单胞比,可以有效提升结构的轻量化性能.

参 考 文 献

- Du Z, Zhu M, Wang Z, et al. Design and application of composite platform with extreme low thermal deformation for satellite. *Composite Structures*, 2016, 152: 693-703
- 马健, 张宏宇, 闫亮等. 卫星桁架结构跨尺度热-力耦合优化设计与分析. *中国空间科学技术*, 2015, 35(4): 30-36 (Ma Jian, Zhang Hongyu, Yan Liang, et al. Thermal-mechanical optimizing analysis on multi-scale numerical model for composite structure of satellite. *Chinese Space Science and Technology*, 2015, 35(4): 30-36 (in Chinese))
- 李博宏, 罗健, 丘敏艳等. 引力波探测望远镜超低热变形桁架支撑结构设计技术. *光电工程*, 2023, 50(11): 22-35 (Li Bohong, Luo Jian, Qiu Minyan, et al. Design technology of the truss support structure of the ultra-low thermal deformation gravitational wave detection telescope. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(11): 22-35 (in Chinese))
- Wang B, Zhu J, Zhong S, et al. Space deployable mechanics: A review of structures and smart driving. *Materials & Design*, 2024, 237: 112557
- Guillaume CE. Invar and its applications. *Nature*, 1904, 71(1832): 134-139
- Sumiyama K, Shiga M, Kobayashi Y, et al. Strong ferromagnetism in Invar type Fe-Pt alloys. *Journal of Physics F: Metal Physics*, 1978, 8(6): 1281-1289
- Schneider T, Acet M, Rellinghaus B, et al. Antiferromagnetic Invar and anti-Invar in Fe-Mn alloys. *Physical Review B*, 1995, 51(14): 8917-8921
- Miller W, Mackenzie DS, Smith CW, et al. A generalised scale-independent mechanism for tailoring of thermal expansivity: Positive and negative. *Mechanics of Materials*, 2008, 40(4-5): 351-361
- 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. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2016, 86: 173-191
- Zhang Q, Sun Y. A series of auxetic metamaterials with negative thermal expansion based on L-shaped microstructures. *Thin-Walled Structures*, 2024, 197: 111596
- Zhang Q, Sun Y. Anisotropic thermal expansion based on a novel metamaterial. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 268: 109024
- Wang K, Chen J, Han Z, et al. Synergistically program thermal expansional and mechanical performances in 3D metamaterials: Design-architecture-performance. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 169: 105064
- Timoshenko S. Analysis of Bi-metal thermostats. *Journal of the Optical Society of America*, 1925, 11(3): 233
- Yu H, Wu W, Zhang J, et al. Drastic tailorable thermal expansion chiral planar and cylindrical shell structures explored with finite element simulation. *Composite Structures*, 2019, 210: 327-338
- Lu F, Lin B, Ling X, et al. Controllable design of bi-material metamaterials with programmable thermal expansion and Poisson's ratio. *Composite Structures*, 2023, 322: 117417
- Cho MW, Ko K, Mohammadhosseinzadeh M, et al. Inverse design of Bézier curve-based mechanical metamaterials with programmable negative thermal expansion and negative Poisson's ratio via a data augmented deep autoencoder. *Materials Horizons*, 2024, 11(11): 2615-2627
- Zhang YC, Liang YJ, Liu ST, et al. A new design of dual-constituent triangular lattice metamaterial with unbounded thermal expansion. *Acta Mechanica Sinica*, 2019, 35(3): 507-517
- Xu W, Xiao X, Chen J, et al. Program multi-directional thermal expansion in a series of bending dominated mechanical metamaterials. *Thin-Walled Structures*, 2022, 174: 109147
- 王炳达, 杨子豪, 张永存. 考虑刚度特性的零热膨胀复合材料高许用温变设计. *复合材料学报*, 2021, 38(1): 279-286 (Wang Bingda, Yang Zihao, Zhang Yongcun. Design of higher allowable temperature range for zero thermal expansion composites considering stiffness characteristic. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2021, 38(1): 279-286 (in Chinese))
- Ai L, Gao XL. Metamaterials with negative Poisson's ratio and non-positive thermal expansion. *Composite Structures*, 2017, 162: 70-84
- Chen J, Wei K, Wang Z, et al. Metamaterials with modulated coefficient of thermal expansion and ultra-low thermal stress. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 269: 109072
- 刘建, 赵海奇. 大型空间可展开天线结构设计与技术分析. *无线互联科技*, 2022, 19(9): 7-9 (Liu Jian, Zhao Haiqi. Structural design and technical analysis of large space deployable antenna. *Wireless Internet Science and Technology*, 2022, 19(9): 7-9 (in Chinese))
- Jones PA, Spence BR. Spacecraft solar array technology trends//1998 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 98TH8339): Vol. 1. Snowmass at Aspen, CO, USA: IEEE, 1998:

- 141-152
- 24 陈国辉, 王波, 华岳等. 嫦娥四号中继星伞状可展开天线关键技术研究. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(2): 166-174 (Chen Guohui, Wang Bo, Hua Yue, et al. The key technologies for radial rib deployable antenna of Chang'e-4 relay satellite. *Scientia Sinica: Technologica*, 2019, 49(2): 166-174 (in Chinese))
- 25 Li S, Vogt DM, Rus D, et al. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(50): 13132-13137
- 26 邵派, 秦建军, 曹钰等. 一种被动展开球形机器人的设计分析与实现. *机械传动*, 2024, 48(2): 75-82 (Shao Pai, Qin Jianjun, Cao Yu, et al. Design analysis and implementation of a passive expansion spherical robot. *Journal of Mechanical Transmission*, 2024, 48(2): 75-82 (in Chinese))
- 27 Wang X, Qu H, Zhao K, et al. Kresling origami derived structures and inspired mechanical metamaterial. *Smart Materials and Structures*, 2024, 33(7): 075030
- 28 Filipov ET, Tachi T, Paulino GH. Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(40): 12321-12326
- 29 Boatti E, Vasios N, Bertoldi K. Origami metamaterials for tunable thermal expansion. *Advanced Materials*, 2017, 29(26): 1700360
- 30 Van Manen T, Janbaz S, Ganjian M, et al. Kirigami-enabled self-folding origami. *Materials Today*, 2020, 32: 59-67
- 31 Ye H, Liu Q, Cheng J, et al. Multimaterial 3D printed self-locking thick-panel origami metamaterials. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1607
- 32 Tang R, Huang H, Tu H, et al. Origami-enabled deformable silicon solar cells. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(8): 083501
- 33 刘杰, 李志勇, 何俊峰等. TMP 折纸防护的双稳态软体机器人. *力学学报*, 2023, 55(10): 2331-2343 (Liu Jie, Li Zhiyong, He Junfeng, et al. A TMP origami-shell reinforced bistable soft robot. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(10): 2331-2343 (in Chinese))