



形状记忆Kresling折纸结构设计及智能折展行为研究

王玉新¹, 尹明磊¹, 危敏¹, 张云策², 陈晓宇¹, 陶强^{1*}

1. 青岛大学机电工程学院, 青岛 266071

2. 哈尔滨理工大学建筑工程学院, 哈尔滨 150080

*联系人, E-mail: taoqiang@qdu.edu.cn

收稿日期: 2026-05-13; 接受日期: 2026-06-09; 网络出版日期: 2026-09-08

国家自然科学基金(编号: 12202222)、特种环境复合材料技术国家级重点实验室开放基金(编号: JCKYS2024603C012)和山东省自然科学基金青年基金(编号: ZR2022QA104)资助项目

摘要 空间展开结构通常要求在发射阶段具有良好的轻量化收纳能力, 入轨工作后具有可靠的展开能力与形状稳定性. 为满足空间展开结构在轻量化收纳、可控展开与高刚度定型等方面的综合需求, 本文提出了一种形状记忆Kresling折纸结构, 该方案以柔性Kresling折纸为基本构型, 引入形状记忆复合材料作为驱动与增强单元, 从而实现结构的智能折展行为与力学性能增强. 采用数值仿真与实验相结合的方法, 对比分析了形状记忆网格增强条的配置方式对折纸结构折展行为、型面精度以及承载性能的影响. 研究结果表明, 当增强条与Kresling折痕夹角处于 40° – 50° 区间时, 结构具有较优的折叠固定性能; 展开后, 网格增强条能够有效提升Kresling折纸的型面精度和结构的承载能力. 在不同的布置方式中, 谷折痕增强方式在结构的折展行为与承载能力方面均优于峰折痕增强方式. 研究结果可为柔性可展结构的设计提供参考.

关键词 Kresling折纸, 形状记忆复合材料, 网格结构, 智能折展

PACS: 46.70.-p, 62.20.fg, 81.05.Qk, 46.35.+z

1 引言

随着深空探测技术的飞速发展, 航天器的演进对空间可展开结构提出了近乎苛刻的要求^[1,2]. 大型空间可展开结构(如太阳能帆板、通信天线等), 在轨服役时面临一对本质的工程矛盾: 在发射阶段, 为了契合运载火箭极其有限的包络空间, 结构必须实现物理极

限上的轻量化与高折叠比收纳; 而在入轨展开后, 面对空间环境中的复杂扰动, 结构又必须具备足够的面内刚度与形状稳定性^[3–5]. 传统的空间展开方案多依赖于电动机、弹簧机构以及复杂的金属铰链系统. 然而, 随着结构尺度向数十米甚至百米量级跨越, 传统机械机构的复杂性呈指数级增长. 因此, 寻求一种能够摒弃笨重铰链、实现材料能够自主变形的柔性结

引用格式: 王玉新, 尹明磊, 危敏, 等. 形状记忆Kresling折纸结构设计及智能折展行为研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 114624

Wang Y, Yin M, Wei M, et al. Design and intelligent folding-deployment behavior of shape memory Kresling origami structures (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2026, 56: 114624, doi: [10.1360/SSPMA-2026-0360](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2026-0360)

构, 已成为当前航天结构力学领域的研究热点^[6].

折纸科学的兴起为这一难题提供了革新性的几何解法^[7-9]. 通过预设的折痕分布, 折纸结构能够将三维空间的连续变形约束在特定的运动路径上, 实现极高的折展比. 在众多的折纸构型中, Kresling构型因其独特的力学特性脱颖而出. 不同于传统的平面折纸, Kresling构型由一系列三角形面板交错拼接而成, 然而, 作为一种典型的螺旋折纸, Kresling构型在折展演化过程中伴随显著的轴向运动与周向扭转^[10]. 这种独特的轴向与周向运动耦合特性, 使其在折展过程中必须经历复杂的空间大变形弯曲, 这正是导致该类结构展开型面精度难以控制、极易发生局部面外翘曲的根本几何原因. 同时, 以形状记忆聚合物为代表的智能柔性材料, 凭借其轻质、受热自驱动、大应变恢复等物理特性, 为空间结构剔除笨重且易卡滞的传统机械铰链、实现轻量化自主驱动提供了新的技术途径^[11,12].

近年来, 国内外学者在智能材料与折纸结构的交叉融合领域开展了部分探索. 为了实现折纸结构的智能化展开, 现有的主流柔性驱动方案主要集中于两种策略: 在分布式柔性驱动上, Chen等人^[13]提出了基于弹性折纸与分布式的形状记忆聚合物(SMP)驱动器的自主展开方案, 将形状记忆聚合物或其他智能材料全局覆盖、层压于柔性薄膜表面, 形成具有整体驱动能力的复合层板结构; 在局部刚度增强与主动铰链设计上, Liu等人^[14,15]研制了基于SMP复合材料的智能铰链, 将智能铰链局部固定于折纸的折痕处充当主动铰链, 通过局部的弯曲驱动力带动整个多面体结构的展开. 在复合材料网格与折纸融合的探索中, Tao等人^[16,17]提出了将复合材料网格应用于折纸结构. Hu^[18]将这一思路引入Miura折纸, 初步验证了形状记忆复合材料网格驱动折纸结构展开及优化方面的可行性. 这些探索在理论上验证了智能材料驱动可展结构的可行性.

现有的柔性驱动方案在工程应用与力学机制上具有一定的矛盾^[19]. 一方面, 若将形状记忆聚合物全局覆盖于薄膜, 不仅极大增加了系统的附加质量, 更严重削弱了薄膜折纸极致轻量的核心优势; 另一方面, 若仅在折痕处进行局部驱动, 由于薄膜面板中心区域缺乏有效的物理支撑, 结构在受热展开与降温定型时极易发生局部的面外翘曲与位移失稳^[20,21]. 针对上述

在实现轻量化收纳与展开后高刚度维型之间存在的工程矛盾, 本文提出了一种形状记忆Kresling折纸结构设计, 通过对环氧树脂进行共混改性^[22], 将其与薄膜折纸进行融合. 同时, 对多组形状记忆Kresling折纸结构的折展行为进行了分析, 系统验证了该方案的展开性能, 为大型空间展开结构的设计提供了参考.

2 形状记忆Kresling折纸结构的设计及实验方法

2.1 形状记忆Kresling折纸结构的设计

本文所提出的形状记忆Kresling折纸结构设计, 是将形状记忆复合材料以离散网格的形式与Kresling薄膜折纸有机融合, 本质上是一种连续柔性基底与骨架的复合构型. 如图1所示, 该结构主要由两部分构成: 底层的聚酰亚胺薄膜作为柔性载体, 负责维持三维折纸的形态与宏观承载面; 形状记忆复合材料以离散网格的形式被布局于结构的特定区域.

该设计面向了空间可展结构的服役周期: 在发射与收纳阶段, 利用SMP在常温玻璃态下的储能模量, 实现大曲率折叠状态下的可靠自锁; 入轨工作时, 通过施加热激励使SMP跨越玻璃化转变温度进入高弹态, 材料软化释放内部储能, 驱动薄膜结构平稳展开; 展开完成并随环境降温后, 再次发生玻璃化硬化, 重塑并锁定展开后的构型, 从而赋予结构有效的工作型面与抗扰动刚度. 为了准确分析该结构的折展演化规律, 从驱动基体的材料机制出发, 建立其时温等效本构与线黏弹性有限元分析模型.

2.2 SMP的黏弹性本构关系

时温等效原理是表征高分子材料黏弹性动态响应的核心基础. 该原理指出, 温度与加载时间对聚合物分子链段的松弛行为具有等效作用; 通过平移时间尺度,

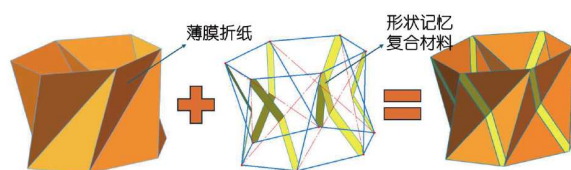


图1 (网络版彩图)形状记忆Kresling折纸结构示意图
Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the shape memory Kresling origami structure.

可将不同温场下的散点力学数据归一化至统一的参考时域中^[23], 大幅简化了材料长期力学演化的预测过程. 为精准刻画聚合物在玻璃化转变温度附近的黏弹性变化, 本文引入经典的WLF (Williams-Landel-Ferry)方程, 以表征材料弹性模量与黏度随温度的非线性变化规律. 其标准数学表达式^[24]为

$$\log\left(\frac{\eta(T)}{\eta(T_0)}\right) = -\frac{C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)}, \quad (1)$$

其中, $C_1 = \frac{B}{f_g}$, $C_2 = \frac{f_g}{\alpha_f}$, f_g 为材料进入玻璃化转变温度时的自由体积分.

$$\alpha_f = \alpha_r - \alpha_g = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_r - \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_g, \quad (2)$$

其中, $\left(\frac{dV}{dT} \right)_r$ 为材料处于橡胶态时的热膨胀系数, $\left(\frac{dV}{dT} \right)_g$ 为材料处于玻璃态时的热膨胀系数.

智能复合材料的形状记忆过程, 本质上是高分子聚合物的黏弹性行为. 在折叠和展开时, 材料会产生明显的应力松弛和蠕变现象. 为了在有限元仿真中准确模拟这种随时间变化的特性, 本文采用了广义Maxwell线黏弹性模型. 它是描述聚合物黏弹性最常用的方法. 它由一个独立弹簧和多个Maxwell子模型并联而成. 这种多分支结构能精确反映材料在不同时间下的松弛过程^[25]. 其弹性松弛模量表达式如下:

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^{n_E} E_i e^{-t/\tau_i^R}, \quad (3)$$

其中, E_∞ 为材料的长期弹性模量, E_i 为第*i*个Maxwell分支的松弛弹性模量, τ_i^R 为第*i*个分支的松弛时间, $\tau_i^R = \eta_i / E_i$, η_i 为阻尼器的黏度, η_E 为Maxwell子模型总数. 当 $t = 0$ 时, 可以得到材料的瞬态弹性模量 $E_{(0)}$:

$$E_{(0)} = E_\infty + \sum_{i=1}^{n_E} E_i. \quad (4)$$

在三维空间的三向应力状态下, 有限元分析通常需要将弹性模量转化为体积模量 $K_{(t)}$ 和剪切模量 $G_{(t)}$ 进行求解, 相应的体积松弛模量和剪切松弛模量表达式为

$$K_{(t)} = K_\infty + \sum_{i=1}^{n_K} K_i e^{-t/\tau_i^K}, \quad (5)$$

$$G_{(t)} = G_\infty + \sum_{i=1}^{n_G} G_i e^{-t/\tau_i^G}. \quad (6)$$

将各阶松弛模量与瞬态松弛模量作商, 引入相对松弛模量, 即Prony级数参数 $e_p^i = E_i / E_{(0)}$. 结合弹性模量 E 、体积模量、剪切模量和泊松比 μ 间的线弹性转换关系, $K_{(0)} = \frac{E_{(0)}}{2(1+\mu)}$, $G_{(0)} = \frac{E_{(0)}}{3(1-2\mu)}$, 黏弹性材料本构关系最终可表达为归一化的Prony级数形式:

$$K_{(t)} = K_{(0)} - \sum_{i=1}^{n_K} k_i \left(1 - e^{-t/\tau_i^K} \right), \quad (7)$$

$$G_{(t)} = G_{(0)} - \sum_{i=1}^{n_G} g_i \left(1 - e^{-t/\tau_i^G} \right). \quad (8)$$

为准确描述材料超过玻璃化转变温度时的黏弹性变形行为, 本文有限元模型采用WLF方程表征其时温等效特性, 材料的应力松弛特性通过Prony级数进行拟合与定义, 具体参数如表1和2所示.

2.3 形状记忆复合材料网格增强折纸结构的制备

基于改性混合树脂与固化工艺, 本节制备了网格增强折纸实验样件. 如图2所示, 核心制备流程依次为材料配制、基底装配与阶梯固化. (1) SMP基体溶液配制: 以E-51环氧树脂为基体, 将其置于70°C恒温水浴中加热以降低树脂黏度, 按预定比例引入柔性固化剂正辛胺与芳香族固化剂间苯二甲胺进行共混改性. (2) 网格定位与原位浸润: 将芳纶纤维织带一侧固定于聚酰亚胺薄膜预定位置处, 将混合溶液均匀涂于织带另一侧并静置30 min, 以保证树脂在纤维孔隙间充分浸润. (3) 程序化阶梯固化: 将完成浸润的装配体移入控温箱, 执行两阶段固化. 首先以1°C/min的速率升温至80°C, 恒温1 h, 随后以相同速率升温至120°C, 恒温2 h. 固化结束后, 样件随箱自然冷却至室温, 释放组装与固化过程中产生的残余热应力, 最终获得复合材料增强折纸实验样件.

3 形状记忆Kresling折纸结构的折展性能分析

3.1 形状记忆Kresling折纸结构的折展过程分析

Kresling折纸由德国学者Biruta Kresling于20世纪90年代提出, 该构型主要由一系列三角形面板交错拼

表 1 WLF方程参数

Table 1 WLF equation parameters

玻璃化转变温度	C_1	C_2
60°C	15.6	32.6

表 2 Prony级数中各级松弛模量与松弛时间

Table 2 Relaxation modulus and relaxation time for each term in the Prony series

序号	相对剪切模量	相对体积模量	松弛时间 (s)
1	0.478	0	6.89
2	0.344	0	0.65
3	0.052	0	0.1
4	0.057	0	0.03
5	0.04	0	0.013
6	0.028	0	0.097

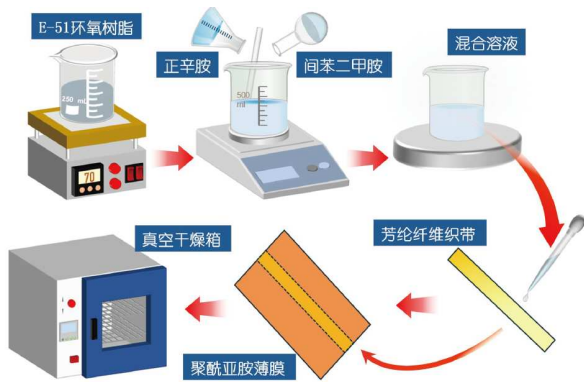


图 2 (网络版彩图)形状记忆复合材料网格增强折纸结构的制备流程

Figure 2 (Color online) Preparation process of the shape memory composite mesh-reinforced origami structure.

接而成, 兼具卓越的结构稳定性与轻量化特征. 因具有独特的变形方式和良好的力学性能, 这种折纸结构在航天可展开机构、柔性机器人和生物医疗等领域应用广泛. Kresling折纸的设计涉及多个几何参数, 这些参数决定了折纸的几何形态、力学行为和变形能力^[26]. 如图3所示, Kresling的平面结构可由4个参数刻画: Kresling包含的基本正多边形单元的边数 N 、顶部或底部多边形边长 n 、峰折痕与谷折痕间其中一个夹角 α 及高度 h . 本文所选取的Kresling构型为 $N = 6$ 的六棱柱结构, n/h 取4.5, α 为30°.

在商业有限元分析软件ABAQUS中建立厚度为0.1 mm的Kresling折纸结构模型, 采用S4R型网格划分,

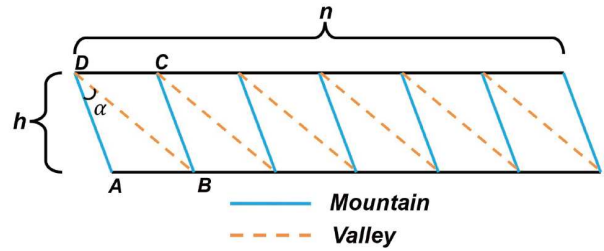


图 3 (网络版彩图)平面Kresling折纸示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the 2D planar Kresling origami.

网格尺寸约为0.2 cm, 在折痕处使用连接器代理Kresling折纸结构的折痕. 随后建立形状记忆复合材料模型, 采用S4R型网格划分, 网格尺寸约为0.05 cm, 在完成Kresling薄膜折纸与形状记忆复合材料的建模后, 对两者进行整体装配. 为了保证它们在后续的折叠和展开过程中不发生滑移或分离, 采用绑定约束, 选取折纸结构为主面, 复合材料为从面, 将复合材料固定在薄膜折纸的表面. 为了分析智能复合材料在热-力耦合中的非线性大变形与形状记忆演化规律, 本研究将有限元分析划分为4个黏性分析步.

整个仿真过程分为如图4所示的4个连续阶段. (1) 升温折叠: 在120°C的预定义温度场中, 对形状记忆Kresling折纸结构的底部施加完全固定的边界条件, 对结构的非固定端施加向下的位移使其折叠. (2) 降温定型: 保持边界条件不变, 将温度场逐步降至20°C, 完成结构的降温定型. (3) 卸载定型: 保持20°C的温度场不变, 卸载位移载荷, 此时结构维持折叠状态. (4) 加热展开: 将温度逐步升至120°C, 形状记忆复合材料受热后驱动薄膜自主展开, 完成整个折展过程.

通过观察形状记忆Kresling折纸结构的受热折展过程, 可以看出折纸结构在升温折叠过程中折痕周围的应力迅速增加并出现应力集中, 同时单胞面板发生皱曲, 这是由于此时复合材料处于高弹态, 在Kresling构型特殊的几何约束下, 折痕区域被迫发生大角度旋转. 为了协调这种大变形, 薄膜面板通过面外屈曲来释放面内压应力, 在折叠完成后, 应力达到最高值. 在降温定型阶段, 随着环境温度降至玻璃化转变温度以下, 聚合物分子链段被冻结, 复合材料转变为高刚度的玻璃态. 在此过程中, 材料发生应力松弛与重新分布, 折叠产生的弹性应变能被有效锁定在结构内部, 此时结构应力逐渐减小. 在卸载阶段, 外部约束消失

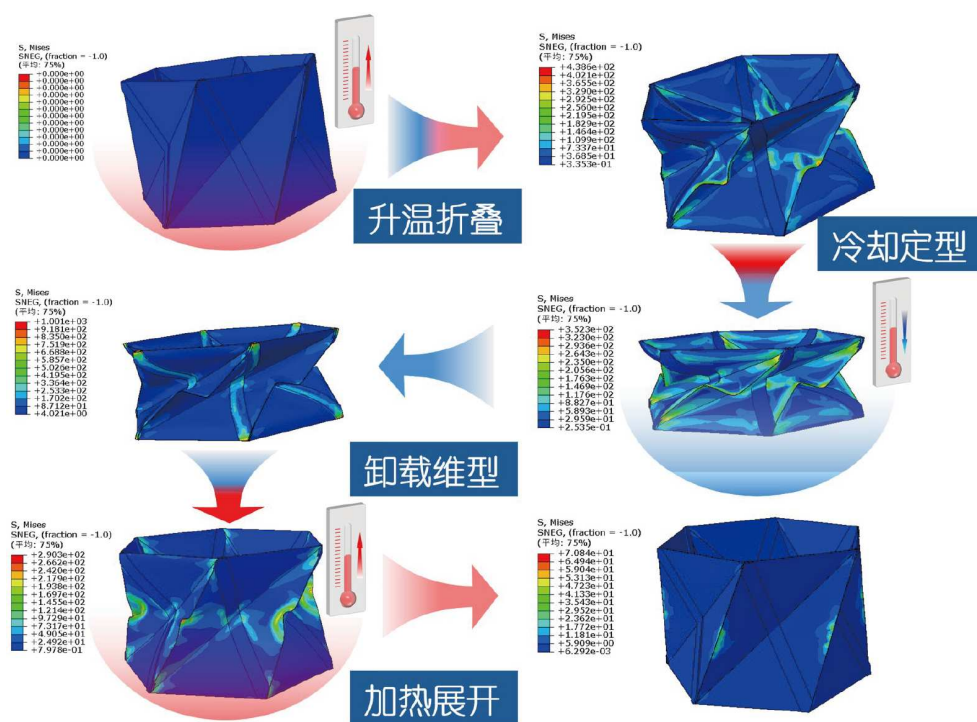


图 4 (网络版彩图)形状记忆Kresling折纸结构的折展过程

Figure 4 (Color online) Folding-deployment process of the shape memory Kresling origami structure.

后, 折纸结构积聚的部分残余弹性应变能会发生瞬间释放, 产生回弹, 此时应力会瞬间减小, 产生突变. 加热展开时, 复合材料受热软化, 冻结的分子链重新活跃, 释放储存的应变能, 结构应力逐渐减小, 转化为宏观回复驱动力, 驱动Kresling结构恢复至初始状态, 但由于折痕区域在折叠态承受了局部大应变, 高弹态下的黏弹性变形无法做到绝对释放, 从而在折痕处残留了一定的应力.

3.2 形状记忆Kresling折纸结构的展开性能分析

为了得到形状记忆复合材料的位置对Kresling薄膜折纸结构的影响, 本文以结构上表面初始位置为零基准面, 建立向下折叠方向为Z轴正方向的全局坐标系. 通过改变形状记忆复合材料相对于Kresling薄膜折纸折痕之间的夹角 θ , 得到5组不同角度的形状记忆Kresling复合材料网格增强折纸. 当 θ 过小时, 增强条走向趋近于与折痕重合, 导致增强条在折痕交点处极易发生剥离脱黏及折叠干涉; 当 θ 过大时, 其布置路径趋近于周向水平, 两端脱离Kresling单胞上下六边形端面的有效固定区域, 使其在轴向压缩工况下, 外部载荷

无法通过上下端面有效传递至增强条. 因此, 角度的选取要符合以上两个条件, 选取了 30° – 70° 区间、间隔 10° 的5组角度, 进行形状记忆Kresling折纸结构的展开性能分析.

如图5所示, 5组结构在完成整个形状记忆过程后均具有较好的形状记忆回复效果, 在卸载后均产生了一定高度的回弹, 当增强条与折痕夹角为 40° 时产生的回弹最少, 增强条与折痕夹角为 30° 与 60° 时产生的回弹较大, 当温度达到玻璃化转变温度后开始加热展开, 夹角为 30° 时展开效果最好, 加热展开后几组结构全部恢复至初始状态.

在空间展开结构中, 太阳能帆板的宏观型面精度直接决定了其光电转换效率. 为定量评估形状记忆折纸结构的展开能力, 本文提取了有限元仿真中最终展开构型的节点坐标, 并通过计算其与初始坐标点之间的空间位置偏差来精确表征结构的型面精度. 在形状记忆Kresling折纸结构的一个折痕面上选取40个关键点, 如图6所示, 基于这些关键点在x、y、z轴方向上回弹后的坐标与初始理论坐标的差值, 采用均方根误差来表示型面精度的高低, 均方根误差越小, 表示回弹

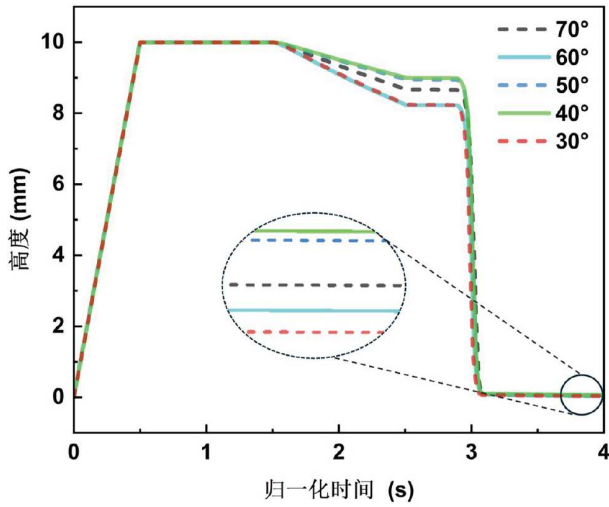


图 5 (网络版彩图)不同 θ 角度对Kresling折展过程的影响
Figure 5 (Color online) Effect of different θ angles on the folding-deployment process of the Kresling origami.

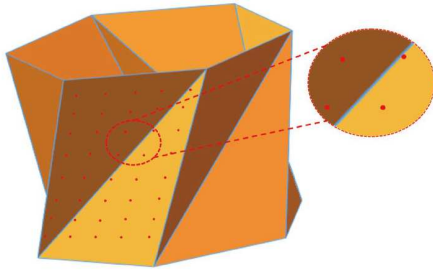


图 6 (网络版彩图)型面精度选点图
Figure 6 (Color online) Measurement point selection for surface profile accuracy.

后的型面精度越高. 直角坐标系 x 、 y 、 z 轴均方根误差公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2 + (\Delta z_i)^2]}. \quad (9)$$

如图7所示, 在不同偏移角度下, 结构展开后的均方根误差均控制在0.05 mm以内, 表明该形状记忆网格增强设计整体上赋予了结构较好的形状回复能力, 验证了网格驱动结构这一设计思路的合理性, 当偏移角逐渐增大时, Kresling折痕面板的面内刚度分布更合理, 均方根误差逐渐减小, 型面精度逐渐升高.

峰折痕是指在折纸结构中, 折叠区域凸向外部, 形成一个尖顶状态的折痕. 谷折痕是指在折纸结构中, 折叠区域向内部凹陷, 形成一个凹形状态的折痕. 为了探究形状记忆复合材料不同布置方式对Kresling薄膜折

纸结构的影响, 将形状记忆复合材料分别布置于薄膜折纸的峰折痕与谷折痕上, 如图8所示, 将增强条完全布置于薄膜折纸的每个峰折痕面上, 同时选取 θ 角度为70°谷折痕完全布置方式, 将其减少一半增强条作为谷折痕的间隔布置方式, 将这三组不同的布置方式进行对比.

如图9所示, 在降温卸载的定型阶段, 峰折痕增强方案在卸载后曲线产生了明显的下降, 表明发生了较大的卸载回弹; 而谷折痕方案曲线下降较小, 卸载后的平台段明显高于峰折痕方案, 对回弹展现出较好的抑制作用, 形状固定效果更佳. 在受热展开阶段, 不同布置方式的折纸结构在达到玻璃化转变温度时曲线再次下降, 表面结构开始加热展开. 展开后峰折痕方案的最终展开位移与初始零基准面存在更大的残余高度差, 回复效能较差. 峰折痕增强方式在折叠过程中, 增强条呈向外凸起的正曲率弯曲折叠, 随结构屈曲折叠

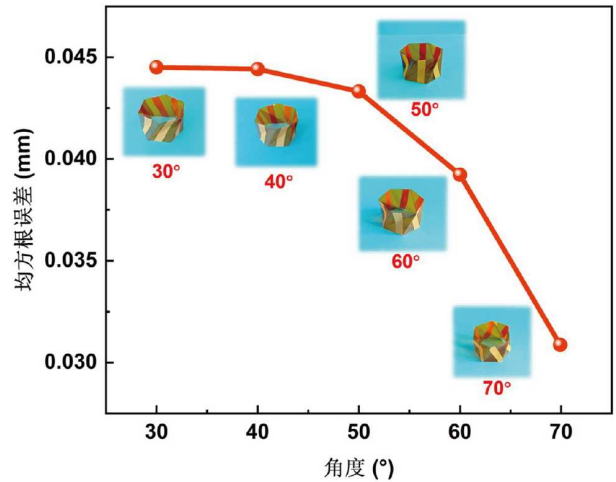


图 7 (网络版彩图)不同 θ 角度下的型面误差
Figure 7 (Color online) Surface profile errors at different θ angles.

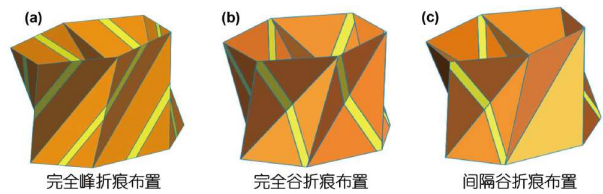


图 8 (网络版彩图)不同布置方式下的形状记忆Kresling折纸结构
Figure 8 (Color online) Shape memory Kresling origami structures with different arrangement configurations.

Figure 8 (Color online) Shape memory Kresling origami structures with different arrangement configurations.

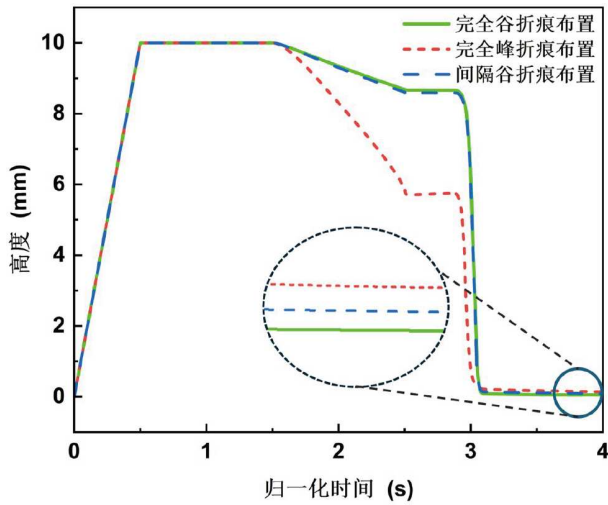


图 9 (网络版彩图)不同布置方式对Kresling折展过程的影响

Figure 9 (Color online) Effect of different layout configurations on the folding-deployment process of the Kresling origami.

时与薄膜之间产生较大剥离应力. 相反, 布置在谷折痕处时, 向内挤压的负曲率变形模式与薄膜具有更好的协同变形能力, 在折叠过程中产生的应力显著低于峰折痕的增强方式, 因此, 峰折痕增强方式降温后其内部锁定了更多的残余应变能. 这种高应力状态也解释了为什么峰折痕构型在卸载后具有更强的回弹趋势. 值得注意的是, 即使将谷折痕处的形状记忆材料缩减 50%, 其卸载后的固定效果及最终的展开效果依然优于满铺状态的峰折痕方案. 仿真结果表明, 在沿折痕布局的方案中, Kresling外表面谷折痕增强机制在全周期的热力学响应中显著优于峰折痕机制.

4 实验验证与讨论

基于前文提出的形状记忆Kresling折纸结构的设计构想, 对该结构的可行性与折展过程进行实验验证, 本节通过对实物样件的测试与数值仿真对比, 验证有限元模型在全周期热力学响应中的可靠性.

形状记忆回复率是评估智能复合材料折纸结构热-力耦合演化特性的核心指标. 该参数定量表征了智能复合材料折纸结构在经历大曲率折叠与应变冻结后, 受热释放内部储能并重构至初始无应力构型的能力. 在空间可展开结构的设计语境下, 回复率直接决定了系统能否达到预想的理论工作面积, 是界定智能

网络驱动效能与最终展开精度的决定性基准. 形状记忆回复率公式表达为

$$R_r = \frac{H_{\max} - H_i}{H_{\max}} \times 100\%, \quad (10)$$

其中, R_r 是形状记忆回复率, $H_{\max}$ 是初始未折叠高度, H_i 是形状记忆回复后与初始状态间的高度差.

形状记忆固定率是表征智能复合材料在经历玻璃化转变后, 有效锁定临时折叠构型能力的核心指标. 在空间工程语境下, 该参数决定了可展开结构在初始阶段的收纳包络体积. 在环境温度降至室温并撤除外部约束载荷的瞬态卸载阶段, 由于聚合物基体内部残余弹性应变能的释放, 结构不可避免地会产生微小的回弹现象. 因此, 高固定率是确保折纸结构维持稳定收拢态的必要前提.

$$R_f = \frac{H_{\text{fixed}} - H_f}{H_{\text{fixed}}} \times 100\%, \quad (11)$$

其中, R_f 是形状记忆固定率, H_f 是卸载后回弹高度, H_{fixed} 是进行折叠的最大高度.

实验流程如图10所示, 首先将各组固化成型的复合材料样件置于高温环境中加热, 使聚合物基体进入高弹态, 随后维持环境温度不变, 对样件进行折叠, 保持加载及外部约束不变的前提下, 冷却至室温, 待体系热力学平衡后撤去外载, 测量其回弹量, 随后进行加热展开, 所有样件在实验中均展开至初始形态, 展开率均

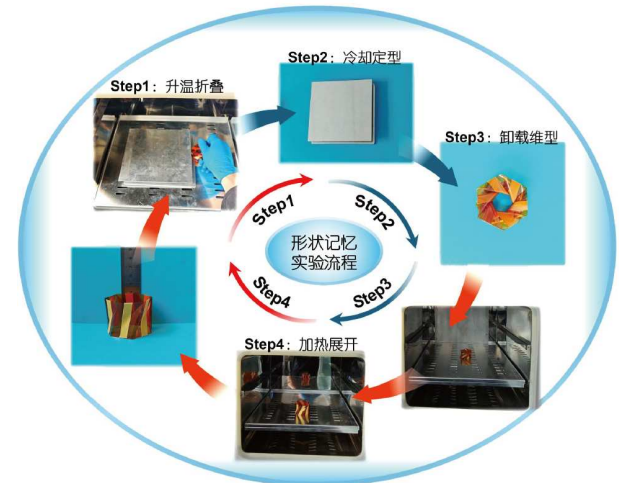


图 10 (网络版彩图)形状记忆Kresling折纸结构实验流程

Figure 10 (Color online) Experimental process of the shape memory Kresling origami structure.

在98%以上, 与仿真拟合较好. 下文对差异较大的固定率进行验证.

图11表示几组Kresling卸载回弹及加热展开后的高度, 利用式(10)和(11), 计算其回复率与固定率, 如图12所示, 仿真与实验曲线拟合较一致, 固定率与回复率最大偏差在10%以内, 整体偏差不得超过5%, 所有样件在实验中均具有较好的回复效果, 从曲线中可以看出, Kresling固定率随着角度增大, 不是简单的线性关系, 由于Kresling构型的折叠本质上是发生了复杂的非线性扭转屈曲及一定量的面内弯曲^[27], 因此, 卸载后的回弹并非单纯的轴向伸长, 而是一种三维空间解扭行为. 可以看出, 当 θ 处于40°~50°时, 结构处于较优锁定区间, 此时增强条的走向与Kresling达到了更优的几何匹配. 而当 θ 增大到70°时, 增强条趋于横向跨越折痕, 几何路径恰好跨越Kresling单胞的上下几何节点, 此时增强条为连接上下端面的对角斜撑, 形成了一种符合Kresling单胞的特定几何构型, 这种对角支撑布局在宏观上形成了更高刚度的受力斜撑, 在加热展开阶段会产生额外的回复阻力, 但在卸载后能更好地抑制回弹,

因此在70°时固定率出现了一定程度的上升.

三组峰谷折痕对比结果如图13所示, 样件的测试结果与前文有限元仿真规律一致, 实验与仿真偏差整体不超过10%. 观察实验现象可知, 不同布置方式下的样件均具有较好的回复效果, 回复率均在98%以上. 但在卸载阶段, 峰折痕样件发生了显著回弹, 而谷折痕样件则展现出更优的锁型能力. 实验直观地证实了仿真的结论, 即在沿外表面折痕布局的策略中, 谷折痕增强机制优于峰折痕机制.

采用WDW-100J型号万能材料拉伸试验机进行轴向压缩承载实验, 如图14所示, 试样放置在上压头中心, 控制上压头向下移动实现加载, 设定上压头压缩速率为5 mm/min, 并采用相机对实验过程进行记录.

将上述三种构型的形状记忆Kresling网格增强薄膜与纯聚酰亚胺薄膜进行对比, 得到如图15所示曲线, 可以看出, 不同增强条布置方式下的承载能力相较于纯薄膜均有较为明显的提升, 峰折痕增强条布置方式的承载能力在压缩2.5 mm左右时最大, 是纯薄膜的10倍, 而完全谷折痕增强条布置方式则将纯薄膜承载能

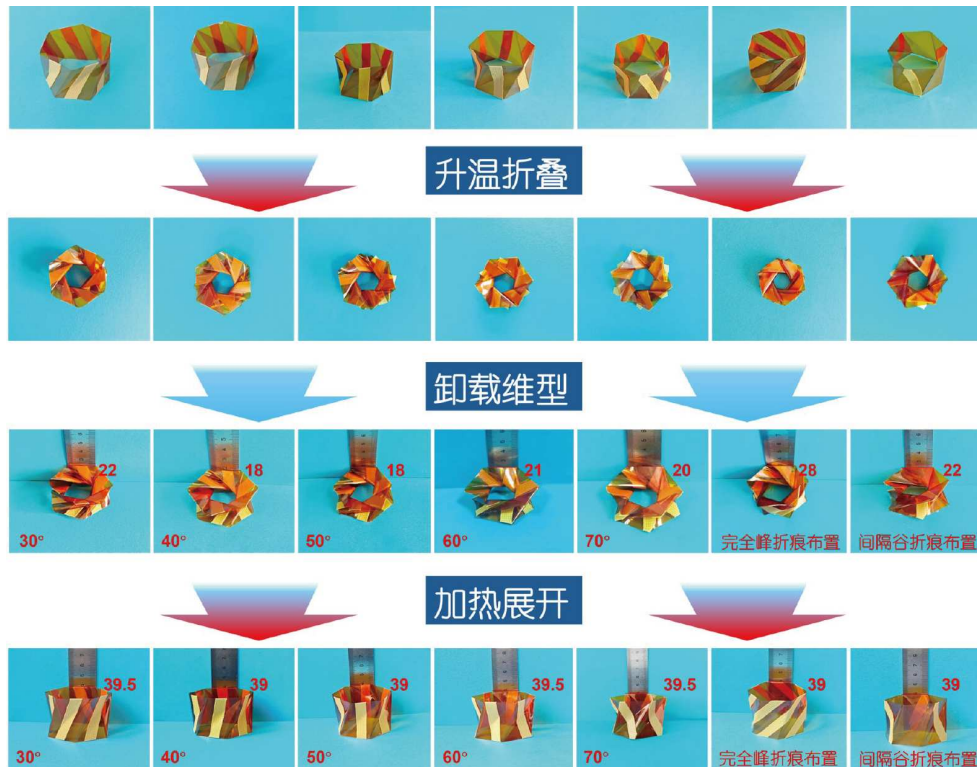


图 11 (网络版彩图)测量Kresling折纸结构卸载回弹及加热展开高度

Figure 11 (Color online) Measurement of the height of the Kresling origami structure after unloading and heat-induced deployment.

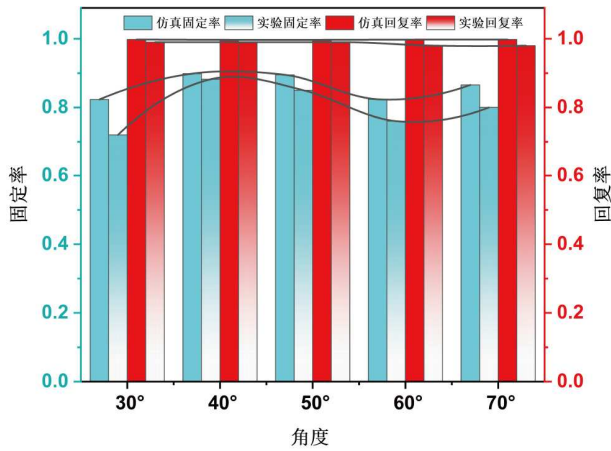


图 12 (网络版彩图)不同 θ 角对Kresling折纸结构固定率与回复率的影响

Figure 12 (Color online) Effect of different θ angles on the shape fixity ratio and recovery rate of the Kresling origami structure.

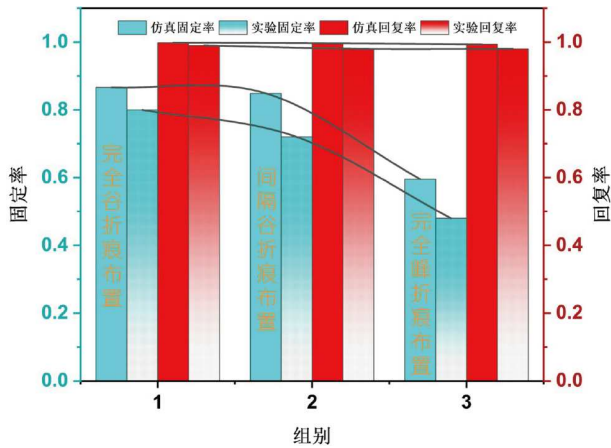


图 13 (网络版彩图)不同布置方式对Kresling折纸结构固定率与回复率的影响

Figure 13 (Color online) Effect of different layout configurations on the shape fixity ratio and recovery rate of the Kresling origami structure.

力提高了25倍左右, 减少了一半增强条之后的谷折痕布置相较于每个面都布置的方式承载能力也降低了约一半, 但承载能力仍高于完全峰折痕布置。可以看出, 谷折痕的布置方式明显比峰折痕的布置方式具有更好的承载能力。

5 结论

本文针对空间可展开结构轻量化收纳与高刚度维

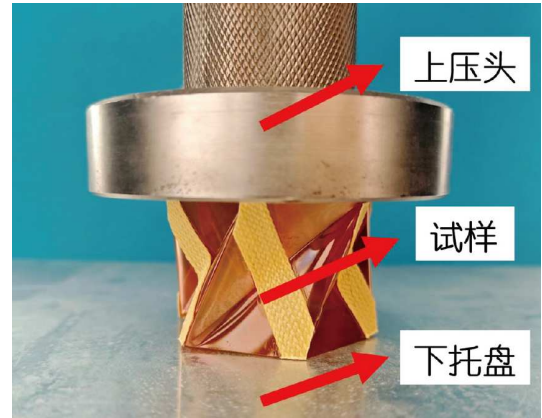


图 14 (网络版彩图)形状记忆Kresling折纸结构压缩实验

Figure 14 (Color online) Compression test of the shape memory Kresling origami structure.

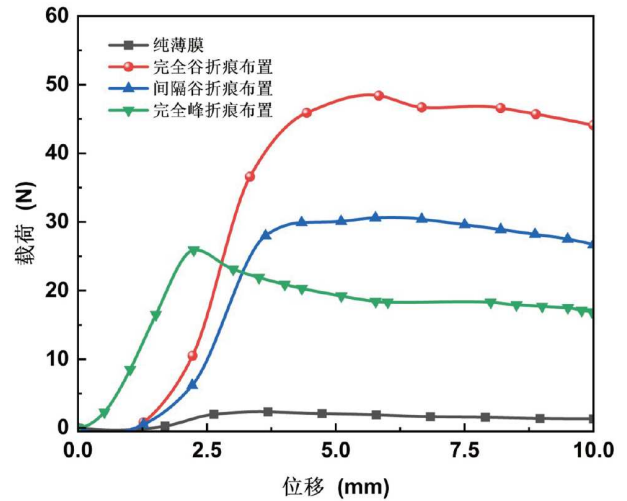


图 15 (网络版彩图)不同构型下的载荷位移曲线

Figure 15 (Color online) Load-displacement curves for different configurations.

型的需求, 提出了一种形状记忆Kresling折纸结构。通过对环氧树脂进行混合改性, 制备了形状记忆复合材料, 进行了黏弹性有限元建模及仿真以及实验验证与压缩实验, 研究了不同的网格布置方式对结构折展性能的影响。主要结论如下:

(1) 所提出的网格增强折纸结构具有较好的形状记忆固定与回复效果。其固定率随折痕夹角呈非线性变化, 最优角度区间为40°–50°, 该区间内增强条与单胞几何匹配度最佳, 处于较优锁定状态, 且结构的最终展开型面精度随夹角的增大而逐渐提升。

(2) 明确了最佳布置方式为谷折痕增强, 在峰、谷

折痕对比中, 谷折痕机制在抑制卸载回弹与加热展开回复方面都优于峰折痕. 即使将形状记忆材料用量减半, 在谷折痕处间隔布置, 其卸载定型效果与最终展开精度依然优于完全布置的峰折痕方案.

(3) 轴向压缩承载实验表明, 相比于纯薄膜, 网格增强结构实现了承载性能的显著提升, 完全布置的谷折痕增强结构可提升承载能力25倍左右, 且谷折痕增强结构承载性能明显优于峰折痕增强结构.

参考文献

- 1 Liu Y, Du H, Liu L, et al. Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: A review. *Smart Mater Struct*, 2014, 23: 023001
- 2 Zeng C, Liu L, Du Y, et al. A shape-memory deployable subsystem with a large folding ratio in China's Tianwen-1 Mars exploration mission. *Engineering*, 2023, 28: 49–57
- 3 Leng J S, Lan X, Liu Y J, et al. Shape memory polymer composites and their applications in space deployable structures (in Chinese). *J Astronaut*, 2010, 31: 950–956 [冷劲松, 兰鑫, 刘彦菊, 等. 形状记忆聚合物复合材料及其在空间可展开结构中的应用. 宇航学报, 2010, 31: 950–956]
- 4 Zhang D, Liu L, Xu P, et al. World's first application of a self-deployable mechanism based on shape memory polymer composites in Mars explorations: Ground-based validation and on-Mars qualification. *Smart Mater Struct*, 2022, 31: 115008
- 5 Leipold M, Eiden M, Garner C E, et al. Solar sail technology development and demonstration. *Acta Astronaut*, 2003, 52: 317–326
- 6 Melly S K, Liu L, Liu Y, et al. Active composites based on shape memory polymers: Overview, fabrication methods, applications, and future prospects. *J Mater Sci*, 2020, 55: 10975–11051
- 7 Meloni M, Cai J, Zhang Q, et al. Engineering origami: A comprehensive review of recent applications, design methods, and tools. *Adv Sci*, 2021, 8: 2000636
- 8 Liu W Q, Ma J Y, Chen Y. Reconfigurable modular origami metamaterial for full-spectrum programmable Poisson's ratio (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2026, 56: 114612 [刘伟奇, 马家耀, 陈焱. 泊松比全谱编程的可重构模块化折纸超材料. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 114612]
- 9 Liu S Y, Wang L W. Application and development of origami technology in space structures (in Chinese). *Spacecraft Recovery Remote Sens*, 2020, 41: 114–128 [刘世毅, 王立武. 折纸技术在空间结构中的应用和发展. 航天返回与遥感, 2020, 41: 114–128]
- 10 Xia Y, He Y, Zhang F, et al. A review of shape memory polymers and composites: Mechanisms, materials, and applications. *Adv Mater*, 2021, 33: 2000713
- 11 Huang W M, Ding Z, Wang C C, et al. Shape memory materials. *Mater Today*, 2010, 13: 54–61
- 12 Nguyen T D, Jerry Qi H, Castro F, et al. A thermoviscoelastic model for amorphous shape memory polymers: Incorporating structural and stress relaxation. *J Mech Phys Solids*, 2008, 56: 2792–2814
- 13 Chen T, Bilal O R, Lang R, et al. Autonomous deployment of a solar panel using elastic origami and distributed shape-memory-polymer actuators. *Phys Rev Appl*, 2019, 11: 064069
- 14 Liu Z, Lan X, Bian W, et al. Design, material properties and performances of a smart hinge based on shape memory polymer composites. *Compos Part B-Eng*, 2020, 193: 108056
- 15 Lan X, Liu L, Pan C, et al. Smart solar array consisting of shape-memory releasing mechanisms and deployable hinges. *AIAA J*, 2021, 59: 2200–2213
- 16 Tao Q. Research on the Load-Bearing and Failure Behaviors of Composite Grids and Their Reinforced Structures (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. 29–30 [陶强. 复合材料网格及其增强结构的承载与失效行为研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. 29–30]
- 17 Tao Q, Wang C, Wang K, et al. Mixed-mode bending of a smart reconfigurable lattice structure with bi-directional corrugated core. *Int J Mech Sci*, 2020, 185: 105848
- 18 Hu H T. Design and Deployment Characteristics Analysis of Smart Composite Grid-Reinforced Origami Structures (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 2024 [胡浩田. 智能复合材料网格增强折纸结构设计及展开特性分析. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024]

- 19 Filipov E T, Tachi T, Paulino G H. Origami tubes assembled into stiff, yet reconfigurable structures and metamaterials. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 12321–12326
- 20 Xia Z M, Wang C G, Tan H F. Quasi-static unfolding mechanics of a creased membrane based on a finite deformation crease-beam model. *Int J Solids Struct*, 2020, 207: 104–112
- 21 Shangguan Y, Chen F, Jia E, et al. New insight into time-temperature correlation for polymer relaxations ranging from secondary relaxation to terminal flow: Application of a universal and developed WLF equation. *Polymers*, 2017, 9: 567
- 22 Kang H J. Preparation and Properties of Toughened Amine/Epoxy Shape Memory Resin System (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 13–15 [康红军. 胺/环氧形状记忆树脂增韧体系的制备及性能研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 13–15]
- 23 Ferry J D. Viscoelastic Properties of Polymers. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1980
- 24 Zhang Y, Liu T, Lan X, et al. A compliant robotic grip structure based on shape memory polymer composite. *Compos Commun*, 2022, 36: 101383
- 25 Yap Y L, Yeong W Y. Shape recovery effect of 3D printed polymeric honeycomb. *Virtual Phys Prototyp*, 2015, 10: 91–99
- 26 Yan P, Huang H, Meloni M, et al. Mechanical properties inside origami-inspired structures: An overview. *Appl Mech Rev*, 2025, 77: 011001
- 27 Wang X, Qu H, Li X, et al. Multi-triangles cylindrical origami and inspired metamaterials with tunable stiffness and stretchable robotic arm. *Proc Natl Acad Sci USA Nexus*, 2023, 2: pgad098

Design and intelligent folding-deployment behavior of shape memory Kresling origami structures

WANG Yuxin¹, YIN Minglei¹, WEI Min¹, ZHANG Yunce², CHEN Xiaoyu¹ & TAO Qiang^{1*}

¹ College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China

² School of Architecture and Civil Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

*Corresponding author (email: taoqiang@qdu.edu.cn)

Space deployable structures require excellent lightweight and high-folding-ratio stowage capabilities during launch, alongside reliable deployment and shape stability on-orbit. To meet the comprehensive requirements of lightweight stowage, controllable deployment, and high-stiffness shape retention, a shape memory Kresling origami structure is proposed. Here, flexible Kresling origami serves as the base configuration, and shape memory composites act as driving and reinforcing units, realizing intelligent folding-deployment behavior and enhanced mechanical performance. Simulations and experiments were conducted to analyze how the layout configurations of shape memory mesh reinforcing strips affect the structure's folding-deployment behavior, surface precision, and load-bearing performance. Results indicate that an off-axis angle of 40° to 50° between the reinforcing strips and Kresling creases yields superior shape fixity. After deployment, the mesh effectively improves the origami's surface precision and load-bearing capacity. Moreover, the valley-crease reinforcement configuration significantly outperforms the mountain-crease configuration in folding-deployment behavior and load-bearing capacity. These findings provide a valuable reference for designing flexible deployable structures.

Kresling origami, shape memory composite, mesh structure, intelligent folding-deployment behavior

PACS: 46.70.-p, 62.20.fg, 81.05.Qk, 46.35.+z

doi: [10.1360/SSPMA-2026-0360](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2026-0360)