

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.003

4D打印克鲁斯林折纸结构的形状记忆性能

胡浩田^{1,2,3}, 陈济航^{1,2,3}, 王骏^{1,2,3}, 张亚辉^{2,4}, 谷小军^{1,2,3}, 朱继宏^{2,4}, 张卫红^{2,4}(1. 西北工业大学无人系统技术研究院, 西安 710072; 2. 陕西省空天结构技术重点实验室, 西安 710072;
3. 无人飞行器技术全国重点实验室, 西安 710072; 4. 西北工业大学机电学院, 西安 710072)

摘要:智能折纸结构是融合传统折纸几何的可折叠特性与智能材料可控响应特性的创新结构体系。该类结构既保留了折纸结构高效折叠与展开的核心优势,又能在外界刺激下实现自适应驱动与形态重构,在航空航天、智能装备等工程领域展现出巨大应用潜力。其中,克鲁斯林结构作为典型折纸构型,因轴向位移自由度灵活、力学性能优异,为变体机翼等动态结构设计提供了新思路,本文围绕克鲁斯林智能折纸结构的设计、制备与性能展开系统研究。首先,定义克鲁斯林单元核心结构参数并提出芯子设计方法,采用4D打印技术,使用聚乳酸(PLA)作为实验载体并打印折纸基本单元,验证其形状记忆变形特性。而后,基于ABAQUS有限元软件,引入Prony级数与Williams-Landel-Ferry(WLF)方程,利用结构的黏弹性力学特性与时温等效特性模拟结构的形状记忆行为,并针对克鲁斯林芯子设计偏动式与全动式变形模式。最后,结合材料冷却定型特性,对芯子结构开展常温下的压缩试验。结果表明,打印单元形状记忆行为良好,100℃下恢复时间较80℃缩短22.3%,循环次数增加会延长恢复时间并降低最大恢复角度;对结构的形状记忆模拟中,发现结构升温加载时应力应变骤升,冷却定型后应力微降、应变稳定,再次升温恢复形状时产生残余应力应变,且芯子的两种变形模式均能实现出色形状记忆驱动。平压试验显示,II型克鲁斯林芯子比I型在比吸能、平均压溃力、弹性段峰值力及弹性段行程分别提高了30.3%、32.45%、64.38%和46.65%。为智能克鲁斯林结构工程应用提供数据支撑。

关键词:折纸结构;克鲁斯林;4D打印;形状记忆效应;有限元模拟;吸能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0018-13

Shape memory properties of 4D-printed Kresling origami structure

HU Haotian^{1,2,3}, CHEN Jihang^{1,2,3}, WANG Jun^{1,2,3}, ZHANG Yahui^{2,4}, GU Xiaojun^{1,2,3}, ZHU Jihong^{2,4}, ZHANG Weihong^{2,4}

(1. Unmanned System Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Aerospace Structures, Xi'an 710072, China; 3. National Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Smart origami structures are an innovative class of structures that integrate the deployable characteristics of traditional origami geometry with the programmable responses of smart materials. These structures not only retain the core advantages of efficient folding and deployment of origami but also enable adaptive actuation and morphological reconfiguration under external stimuli, underscoring their broad potential in aerospace and advanced equipment. The Kresling structure, as a representative origami configuration, provides a novel approach for the design of dynamic structures like morphing wings owing to its flexible axial displacement degrees of freedom and superior mechanical performance. The structural parameters of the Kresling cell were first defined, and a design methodology for the Kresling core was proposed. Subsequently, 4D printing with polylactic acid (PLA) was employed to fabricate the origami unit, and its shape memory deformation behavior was verified. Numerical analyses were then conducted using the finite element software ABAQUS, in which the Prony series and the Williams-Landel-Ferry (WLF) equation were introduced to describe the viscoelastic behavior and time-temperature superposition characteristics of the structure, thereby

基金项目: 国家自然科学基金项目(12372156, 12372123, 12272305)

通信作者: 王骏, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能材料与结构表征建模、变体结构与优化

收稿日期: 2025-12-25

引用格式: 胡浩田, 陈济航, 王骏, 等. 4D打印克鲁斯林折纸结构的形状记忆性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 18-30.

HU Haotian, CHEN Jihang, WANG Jun, et al. Shape memory properties of 4D-printed Kresling origami structure[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 18-30.

enabling simulations of the shape memory response of both the unit cell and the Kresling core. In addition, partially actuated and fully actuated deformation modes were designed for the Kresling core. Finally, by considering the cooling-induced shape-fixing characteristics of the material, compression tests were performed at room temperature. Results show that the printed units exhibit favorable shape memory behavior. The recovery time at 100 °C is 22.3% shorter than that at 80 °C. However, an increase in cycle number prolongs the recovery time and reduces the maximum recovery angle. Simulations indicate that stress and strain rise rapidly during heating and loading. After cooling and shape fixing, the stress decreases slightly while the strain remains stable, and during reheating for shape recovery, residual stress and strain are generated. The simulations validate the proposed approach, demonstrating that both deformation modes of the Kresling core achieve excellent shape memory actuation. The compression tests demonstrate that the specific energy absorption, average crushing force, peak force of the elastic section and stroke of the elastic section of type II Kresling core have increased by 30.3%, 32.45%, 64.38% and 46.65% respectively compared with type I, providing a quantitative basis for the engineering application of smart Kresling structures.

Keywords: origami structure ; Kresling ; 4D-printing ; shape memory effect ; finite element simulation ; energy absorption

主动变体结构是由主动材料驱动、能在外界刺激(如温度、电场、磁场、光照等)作用下发生可逆形态变化的结构,它的核心是主动响应和可变形态。在过往的研究中,主动变体结构设计往往集中在骨肋型结构(Ribbed structure)^[1-2]、手性结构(Chiral structure)^[3-4]、柔顺机构(Compliant structure)^[5]等。这些典型结构的变形机制与力学特性进行对比见表1,可以看出,骨肋型结构虽承载能力强,但变形与承载强耦合,导致其难以被低应变的主动材料有效驱动,驱动方式上更适合与能提供较高驱动力的系统配合;手性结构与柔顺机构虽具备较好的变形能

力,但前者力学性能有限,其更适用于以功能实现为核心的应用场景,后者则因过度依赖材料大应变弯曲而导致载荷传递路径不清晰。总体而言,这些结构在追求主动响应与可变形态的过程中,往往较难兼顾高效的驱动效率与优异的力学性能。随着数学、力学等多学科的交叉融合,研究者通过对折纸结构(Origami structure)^[6]的精准设计与调控,使得该类结构展现出自然界难以获得的物理特性,进而催生出“折纸超材料”的新研究方向^[7-9],折纸结构具有位移自由度的同时兼具较好的力学性能,为设计具有可编程力学响应和智能结构提供了新思路。

表1 主动变体结构的力学设计协同性比较

Tab. 1 Comparison of mechanical design synergy in active morphing structures

Types	Deformation mechanism	Deformation and mechanical performance	Assessment
Ribbed structure	Global buckling of structural members	Strong coupling between deformation and load bearing; high load capacity but difficult to actuated	High load-bearing capacity, but unsuitable for low-stress shape-memory-driven actuation
Chiral structure	Rotation of unit cells and bending at connections	Clear deformation pathway but limited load-bearing capacity; deformation mainly governed by rotation	Difficult to serve as primary load-bearing structures
Compliant structure	Overall bending of compliant segments	Large deformation capability, but deformation mainly relies on material compliance; load paths are not well defined	Easy to actuate, but challenging to simultaneously achieve high mechanical performance
Origami structure	Rotation along crease lines with small deformation in panel	High mechanical programmability; deformation and load-bearing performance can be balanced, enabling tunable configurations and stiffness design	Highly suitable for active morphing structures, owing to its mechanical programmability

增材制造技术的进步使得复杂折痕结构一体化制造得以实现^[10-12],4D打印技术进一步将智能材料与结构几何设计深度融合,使变形特性从传统的“外置执行器”转变为“材料即驱动”的内生机制^[13-14]。这类结构不仅能在外界刺激下能够实现自主的形态变化,同时还可继承折纸结构良好的力学承载特性,这进一步凸显了智能折纸结构在工程结构设计与应用中的潜在优势^[15-16]。然而,智能折纸结构设计也存在一定的挑战,其关键在

于如何利用4D打印技术将形状记忆材料的状态切换与折纸结构的几何非线性相结合,从而在实现自主变体并保持结构在外部载荷作用下具有良好稳定性^[17-18]。在此背景下,Xin等^[19]利用4D打印技术为薄片折纸结构设计了蜂窝芯子,该三明治夹心结构兼具较好的力学性能以及自主变形的能力,形状固定率和形状恢复率分别达到了98%和99%。Lu等^[20]通过引入扭转自由度设计了一种压缩扭转耦合机械超材料并命名为“CTCMMs”,其

基于4D打印技术设计的四维CTCMMs结构通过整合时间功能特性,借助热致形状记忆材料实现结构刚度与冲击响应的持续可逆调节,进而应用于无人机边缘的包装防护。这使得结构不仅能自主完成形态演变,更能在不同服役状态下实现变形特性与力学性能的按需调控,充分体现了4D打印智能结构在“驱动与力学协同”方面的设计张力^[21]。变体机翼作为飞行器主动变体结构中极具代表性的结构形式之一,其通过内部驱动实现外形变化进而改变翼面、展弦比或厚度等关键参数,不仅能提高飞行器在不同速度、高度和机动状态下的综合性能,同时还能降低能耗、减小噪音^[22]、增强机动灵活性^[23-24]等。为了实现这一目标,变体机翼发展在结构设计^[25-26]、材料选择^[27]、驱动控制^[28]、气动优化^[29]和制造与可靠性^[30]等诸多方面均提出设计需求。由于机翼的主动变体行为需要在多种飞行状态下进行大范围或局部形变,而任何形变都必然承载并分配外力、内力以及环境载荷,这使得结构与材料的协同设计成为首要且关键的环节。因此,寻找一种兼具多模态变形能力、可编译力学性能以及良好承载稳定性的结构单元,成为实现变体机翼“结构—材料协同设计”的核心突破口。在众多折纸构型中,克雷斯林折纸结构凭借其轴向压缩、扭转等多种变形模式,且其等效刚度、稳定性力学可编译性强等特点^[31],使其在折纸超材料体系中表现出突出的力学可设计性。基于此,本文以克雷斯林管为基础构型,并借鉴传统蜂窝结构单元的设计理念,提出一种具备主动变形能力的新型克雷斯林芯子结构。

首先,定义克雷斯林单元结构参数并给出克雷斯林芯子设计方法;而后,通过4D打印技术使用聚乳酸(PLA)制备折纸基本单元,验证材料自身具备形状记忆循环特性;进一步地,基于ABAQUS有限元软件,引入Prony级数和WLF方程描述结构的黏弹性力学行为与时温等效特性,进而模拟折纸单元和克雷斯林芯子的形状记忆行为;最后,基于打印材料自身的冷却定型特性,对克雷斯林芯子结构在常温环境下进行平压试验。通过对克雷斯林芯子结构的创新设计、形状记忆性能测试和平压测试,可为主动变体结构提供一种轻量化、可驱动且具有优异力学性能的设计方案。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA:未来8200黑色树脂,深圳市未来工场科技有限公司。硬度为78~85 Shore D,拉伸模量2 649~2 731 MPa(参数为厂家提供)。

1.2 仪器及设备

动态热机械分析(DMA)仪:TAQ800,美国TA仪器公司;

万能试验机:ETM504C,深圳万测试验设备有限公司;

全自动离子溅射仪:GVC-1000,北京格微仪器有限公司;

超高分辨率场发射扫描电子显微镜:JSM-7610F Plus,日本电子株式会社;

电热鼓风干燥箱:立式101-2BS,浙江省天宇智能科技有限公司;

量角器:0°~180°,温岭市宇刃工具有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 DMA 样件

使用DMA仪测量黏弹性材料的力学性能与时间、温度或频率的关系。用于进行DMA的测试样件及后续的折纸结构均由深圳市未来工场科技有限公司加工与制备,成型工艺为SLA立体光固化,鉴于4D打印工艺参数对材料的形状记忆性能具有显著影响^[3],因此,样件制备过程中对打印参数需要进行严格控制。具体设置为打印层厚为0.1 mm,固化时间约为50 min,打印过程中曝光光强处于工业级SLA常用范围(50~100 mW/cm²),打印过程中光源输出功率保持稳定,系统会通过调节单层曝光时间或扫描参数,实现等效曝光剂量的自动匹配。后续打印的折纸单胞和克雷斯林芯子结构与DMA测试样件的工艺参数相同。DMA测试样件的尺寸为30 mm×4 mm×2 mm的长方体试样。

1.3.2 折纸单胞

复杂折纸结构往往由多个折痕单元构成,因此,对折痕单元的研究是探索复杂折纸结构力学行为的基础和关键。图1为折纸单胞示意图,如图所示,对试件中部折痕区域进行挖槽处理,可在一定程度上避免结构在弯曲折叠过程中非折痕区域发生的自干涉。

通常,克雷斯林管的尺寸定义通常需要给定平面折痕示意图、平面单元尺寸与夹角以及空间构型

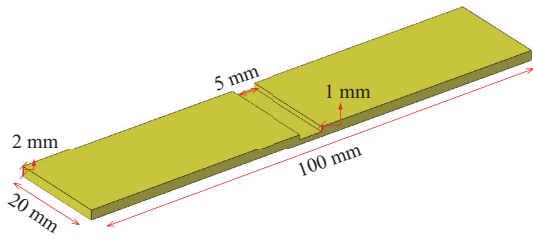


图1 折纸单胞示意图

Fig. 1 Schematic of origami cell

的高度及二面角来确定结构在空间的几何构型^[32]。图2为克鲁斯林管单元结构示意图,采用对克鲁斯林管直接进行空间尺寸定义的方法,几何参数包括多边形外接圆直径(D)、结构高度(H)、上方多边形与下方多边形其对应顶点的顺时针旋转角(θ)、多边形边数(N)、结构厚度(T)。给定克鲁斯林管的单胞几何参数后,通过轴向旋转阵列和轴向镜像阵列的方法分别生成I型克鲁斯林管单元和II型克鲁斯林管单元,阵列9次,则两种类型的克鲁斯林管层数(M)均为10。图3为克鲁斯林管结构示意图,左侧旋转阵列的为I型克鲁斯林管,右侧镜像阵列的为II型克鲁斯林管。

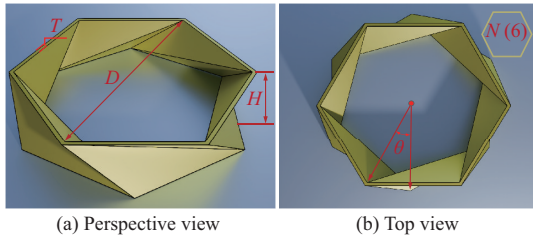


图2 克鲁斯林管单元结构示意图

Fig. 2 Schematic of Kresling cell

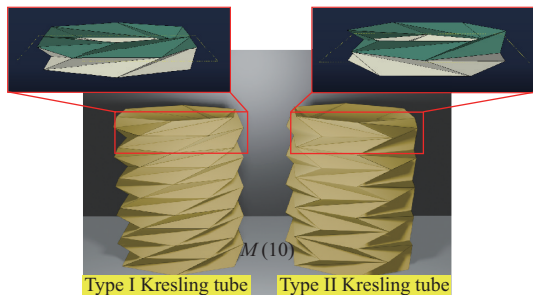
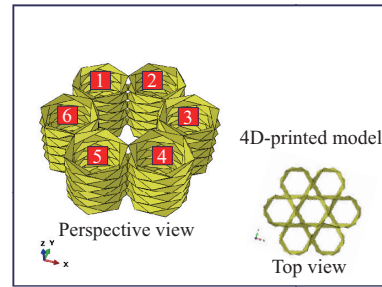


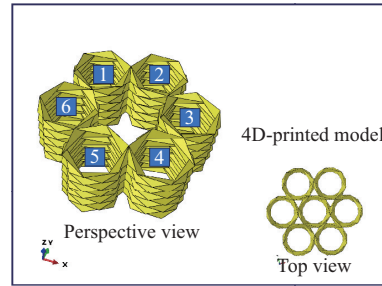
图3 克鲁斯林管结构示意图

Fig. 3 Schematic of Kresling tube

使用参数化建模脚本在建模软件中快速生成克鲁斯林管芯子模型。该结构由6个克鲁斯林管环形阵列组成,图4a、图4b分别为I型、II型克鲁斯林管芯子结构模型示意图与4D打印模型,管单胞的各项参数见表2、表3,其中 N 均为6, M 均为10。



(a) Type I kresling tube



(b) Type II kresling tube

图4 克鲁斯林管芯子模型及4D打印实物

Fig. 4 Model and 4D-printed sample of Kresling core

表2 I型克鲁斯林管芯子模型基本参数

Tab. 2 Parameters of type I Kresling tube core

Number	D/mm	H/mm	$\theta/(^\circ)$	T/mm
1	50	5	-30	2
2			30	
3			-30	
4			30	
5			-30	
6			30	

Notes: numbers is the structure labels; D is diameter of the circumscribed circle; H is distance between the two polygons; θ is clockwise rotation angle between the corresponding vertices of the two polygons; T is thickness.

表3 II型克鲁斯林管芯子模型基本参数

Tab. 3 Parameters of type II Kresling tube core

Number	D/mm	H/mm	$\theta/^\circ$	T/mm
1-6	50	5	-30	2

1.4 测试与表征

1.4.1 动态力学行为测试

根据 GB/T 33061.1-2025, DMA 测试在 20~150 °C 的温度范围内进行,测量方式为单悬臂,升温速率为 5 °C/min,加载频率 1 Hz。鉴于 PLA 样件对湿度较为敏感,湿度变化可能对 DMA 测试结果产生影响,因此在测试前需保证试件处于相对干燥状态。将测试样件置于 45 °C 的鼓风干燥箱中干燥 2 h,以去除样件中可能吸附的水分且不改变试件几何形态,避免其对 DMA 测试结果的干扰。

1.4.2 形状记忆行为测试

以PLA材料为代表的形状记忆聚合物,其完整的形状记忆变形流程分为4个步骤,分别为升温加载、冷却定型、卸载维型、升温恢复四个阶段。

(1)升温加载。结构在常温下表现为玻璃态,此时模量较高,将其放置于高于材料自身玻璃化转变温度的环境下(80℃),结构逐渐变软,待其进入橡胶态后可以对其施加外载,折痕左端面板固定,折痕右端面板加载位移为沿折痕转动180°。

(2)冷却定型。保持结构的外载不变,降低温度(80℃)至室温(20℃),结构的模量逐渐升高并变回玻璃态。

(3)卸载维型。当结构重新变回玻璃态后,此时卸除外载,结构会维持在外载作用下的临时构型。

(4)升温恢复。将临时定型的结构重新放置于高于材料自身玻璃化转变温度的环境下(80℃),结构由临时构型重新恢复至初始形状。图5为结构在折叠与展开过程的角度测量方法示意图。

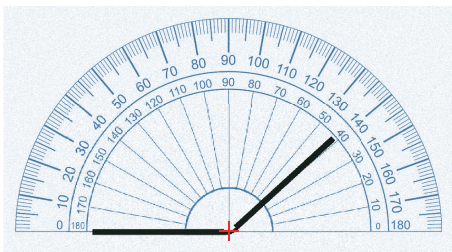


图5 角度测量方法

Fig. 5 Angle measurement method

1.4.3 克鲁斯林芯子吸能测试

室温下使用电子万能试验机对折纸芯子结构进行准静态压缩实验。图6为压缩实验照片,克鲁斯林芯子上端表面平行于压板,加载速度为3 mm/min,对实验所得的力与位移曲线进行记录。



图6 克鲁斯林芯子压缩实验

Fig. 6 Compression test of Kresling core

2 结果与讨论

2.1 材料黏弹性力学特性

通过对材料进行的DMA测试,从而获得材料

黏弹性特性,所得曲线如图7所示。取损耗角曲线的峰值温度作为玻璃化转变温度,得到PLA材料的玻璃化转变温度约为54℃。储能模量代表材料的弹性响应,当温度升高时,分子链段的运动能力增强,材料逐渐变软,其抵抗变形的能力逐渐减弱,刚度降低。损耗模量代表材料的黏性响应,其表现为先短暂升高,而后下降的过程,这是因为温度升高初期,分子链段的局部运动被逐渐激活,内部开始产生微小的黏性摩擦,当温度继续升高时,PLA材料进入橡胶态而后变为黏流态,其分子链段已经松弛,分子链可以进行更为自由的运动,进而表现为黏流态时PLA材料的损耗模量相较于玻璃态降低两个数量级,在140℃时,储能模量约为11.82 MPa。

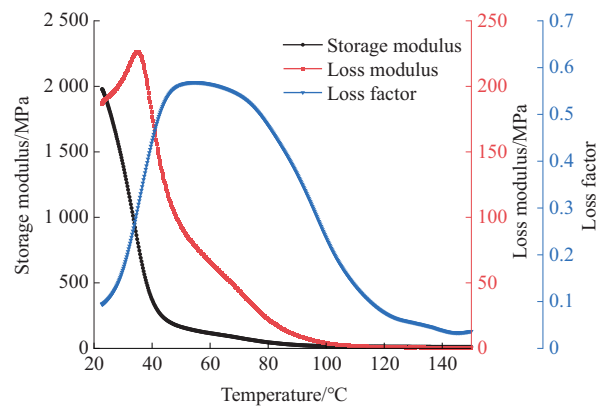


图7 DMA曲线

Fig. 7 DMA curves

2.2 折纸单胞形状记忆行为测试

图8为PLA折纸单胞的一次完整形状记忆循环流程图。首先,将结构放置于80℃的温箱内,经过2 min后,折纸单胞受热变软,此时通过外力将其折叠并放置于设计的夹具内进行室温冷却,夹具上下内表面间距为5 mm,静置10 min,结构完全冷却后撤除夹具,此时,结构已经可以自发地维持于折叠形态,将折叠的折纸单胞再次放置于80℃温箱内,可以观察到,在经历了较短时间内,结构即开始自发展开,大约83 s后,结构完全展开至初始形态。

2.3 环境温度对形状记忆性能的影响

由于PLA材料的形状记忆性能受温度影响敏感,因此,需着重考察温度对形状记忆恢复速率的影响。分别将PLA折纸单胞置于80、90、100℃,观察结构恢复的时间,每种温度条件下对三个有效样件分别进行性能测试,将最大恢复时间和最小恢复时间以误差带的形式进行表达,散点为三个样件恢复时间的平均值。

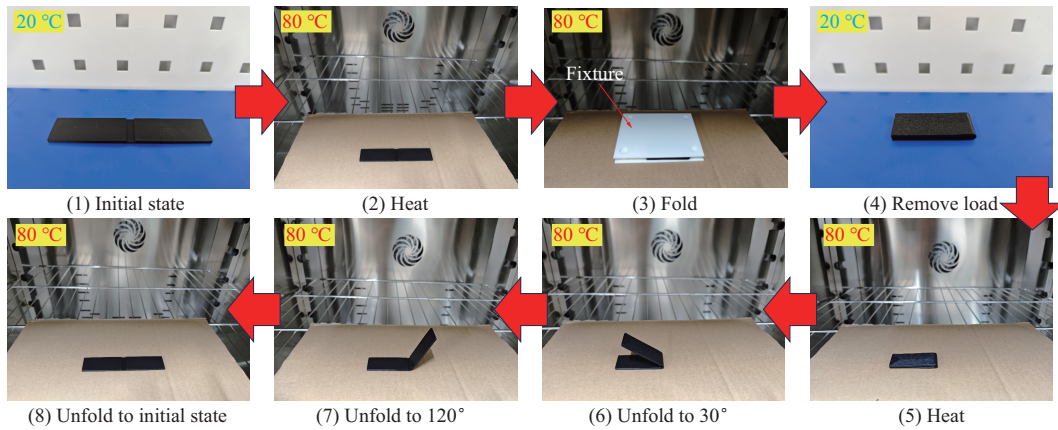


图8 折纸单胞形状记忆循环测试

Fig. 8 Cyclic shape memory testing of origami cell

不同环境温度对形状记忆速率的影响如图9所示,随着温度的提升,折纸结构的恢复时间随之缩短。这是因为以PLA为代表的形状记忆聚合物其恢复过程是一个典型的受热激活的动力学过程。根据自由体积理论,当环境温度超过玻璃化转变温度时,聚合物内部的自由体积显著增加,伴随着内部分子热运动加剧,链段间的平均距离扩大,为链段的运动提供了更大的空间^[33]。根据经典的Doolittle方程,聚合物的黏度与自由体积分数呈指数反比关系,见式(1)。这意味着自由体积分数的增加会诱发体系黏度的指数级下降,极大地降低了链段重排过程中的内摩擦阻力^[34]。

$$\eta = A \exp\left(\frac{B \cdot V_0}{V_f}\right) \quad (1)$$

式中: η 为宏观黏度; V_f 为自由体积; V_0 为分子自身固有体积; A 和 B 均为材料特定常数。

同时,形状记忆恢复行为的本质是分子链段克服黏性阻力回到初始态的过程,而运动过程需要时间,根据时温等效原理^[35],升高温度与延长时间对分子运动是等效的,升温显著缩短了分子链的特征松弛时间,加速了内应力的释放过程,使得分子链段能更迅速地从受迫取向态恢复到初始的高熵态。实验结果显示,100°C下结构恢复时间相较于80°C下减少约22.3%。

进一步分析恢复曲线的斜率可知,形状记忆恢复过程可分为三个典型阶段。初始阶段(30°~60°)恢复速率较慢,这主要归因于材料与环境间的热平衡过程,此时自由体积尚未完全扩张,链段运动受限。中间阶段(60°~150°)表现为近乎线性的快速恢复,说明在此阶段的稳定热场使体系中存储的内应

力进入释放平稳期。末端阶段(150°~180°)的恢复速率再次降低,表现为曲线斜率增大。随着变形接近完全恢复,分子链逐步靠近热力学平衡态,驱动恢复过程的自由能持续衰减。同时,当驱动力衰减至与体系内在的黏性阻力处于同一量级时,分子链段的动力学响应明显变缓,导致末端恢复过程呈现出显著的减速特征。在较低环境温度条件下,末端恢复速率减弱的现象会更加明显。

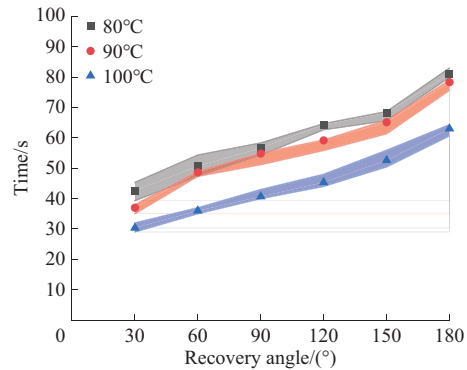


图9 不同环境温度对形状记忆速率的影响

Fig. 9 Effects of different ambient temperatures on the recovery rate

2.4 循环次数对形状记忆性能的影响

形状记忆循环次数是影响结构性能可靠性的重要因素之一,将PLA折纸单胞置于在80°C的环境下对其进行多次形状记忆循环测试以评估其形状记忆性能。如图10所示,对三个试样进行25次形状记忆循环测试,每隔2次记录恢复时间和角度,从实验现象与得到的结果来看,3个样件的恢复时间在前十三次附近的形状记忆循环中较为平稳,但随着形状记忆循环测试的进一步进行,结构恢复时间展现出增加的趋势。

鉴于实际工程应用中通常需要经历多次形状

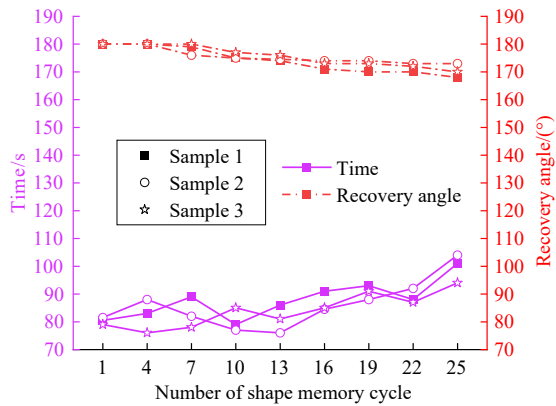


图10 不同形状记忆循环次数时样品的恢复时间和角度

Fig. 10 Recovery time and angle of the samples at different shape memory cycle times

编程与恢复循环,其形状记忆循环性能对结构长期服役性能具有关键影响。因此,需重点分析形状记忆性能逐步减弱的内在机理。总体而言,该现象可从理论层面、微观结构层面以及宏观结构层面进行理解。

从理论层面,形状记忆聚合物的恢复过程本质上是分子链段从低熵态向高熵态的转变,在进行形状编程时,相当于在材料内部存储了一定的能量用于后续形状记忆恢复。随着形状编程与恢复循环次数的增加,分子链段发生不可逆的滑移与结构松弛,使得原本存储的构象能量产生耗散现象,导致恢复力降低。

从微观层面,形状记忆聚合物材料在形状编程与恢复过程中,多次的循环变形行为会使得大变形区域发生应变诱导结晶^[6],这些结晶导致分子链段需要克服额外产生的结晶从而运动,进而宏观上表现为在多次形状记忆循环后,松弛恢复时间变长。使用SEM观察循环后的材料,图11为折痕处上下表面的SEM照片。可以看出,折痕处上表面出现明显的褶皱。该现象主要源于大弯曲变形过程中,上表面位于中性层以上,主要表现为压缩应变。多次形状记忆循环加载导致压缩应变在折痕区域不断累积,最终引发局部材料发生屈曲失稳,从而在表面形成致密的褶皱结构。相比于上表面以压缩褶皱为主的变形模式,折痕处下表面为中性层以下的受拉区域,该部分出现了明显的微裂纹特征,如图11b所示。这些微裂纹主要起源于表面,并沿垂直于拉伸方向扩展,表明多次循环加载后导致拉伸应

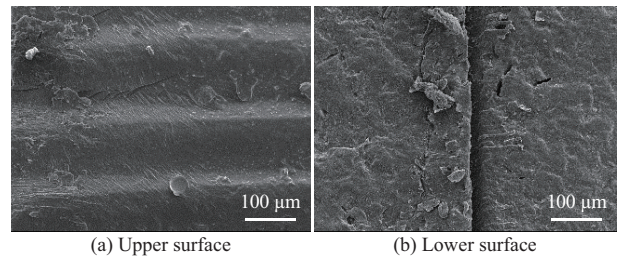


图11 样品微观尺度结果(25次循环后)

Fig. 11 Mesoscopic morphology of the sample (after 25 cycles)

变逐步在下表面累积,微裂纹不断萌生并扩展,形成了不可逆的裂纹损伤。

从宏观层面,4D打印折纸结构在形状编程与恢复过程中会不可避免地在折痕区域产生应力集中。循环次数的增加使得大变形区域更易发生局部损伤与微裂纹累积,这在物理层面阻断了分子链段运动的连续性。如图12所示,红圈处的折痕表现出结构多次形状记忆循环后出现了明显的力学损伤,相较于初次形状记忆循环,第二十五次循环后,结构的折痕区域存在明显的屈曲变形。

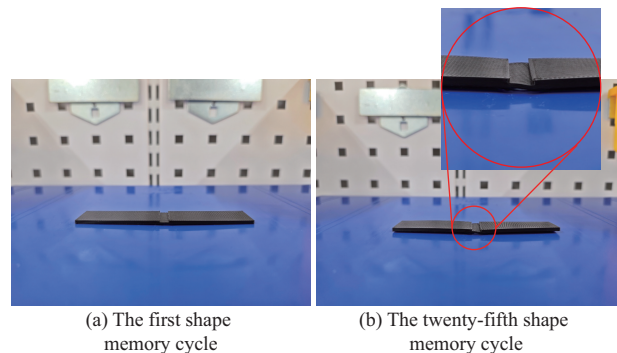


图12 多次形状记忆循环的结构对比

Fig. 12 Comparison under different shape memory cycles

2.5 形状记忆有限元模拟研究

由于PLA属于典型的黏弹性高分子材料,其力学行为表现出弹性固体的即时恢复特性和黏性流体的时间依赖性流动,选择广义Maxwell模型描述材料从瞬时弹性响应到长期松弛的力学过程。如图13所示,广义Maxwell模型由一个线性弹簧(红色)和多个Maxwell单元并联而成,每个Maxwell单元由一个线性弹簧和一个黏壶(蓝色)构成。

广义Maxwell模型在时域上表达式见式(2)。

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\tau_i^R} \quad (2)$$

式中: $E(t)$ 为模量松弛函数; E_{∞} 为长期模量; n 为Prony级数项数; E_i 为第*i*个Maxwell单元的模量; t 为时间; τ_i^R 为第*i*个Maxwell单元的松弛时间。

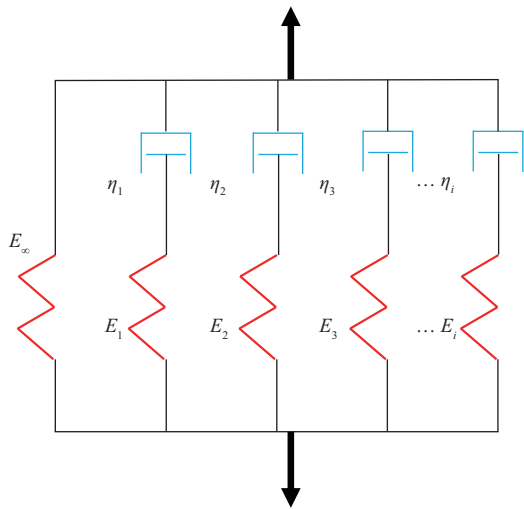


图 13 广义 Maxwell 模型

Fig. 13 Generalized Maxwell model

PLA 的力学松弛行为在高温短时间和低温长时间可表现出相同的结果,利用时温等效模型可实现对 PLA 材料形状记忆行为作进一步合理的预测。通过适当的平移和缩放时间尺度,将材料的性能数据在不同温度下的行为合并到一个统一的时间尺度上以便进行比较。

利用 ABAQUS 对形状记忆聚合物进行变形循环模拟时,需要将 DMA 所得到的实验曲线拟合为 Prony 级数形式,利用 Matlab 程序采用非线性二乘法对应力松弛曲线进行拟合,拟合原理请参考文献^[37]。具体而言,基于 DMA 实验获得的时间与储能模量数据,首先对模量进行归一化处理;随后构建 Prony 级数松弛模型,并以残差平方和最小为目标函数,结合系数和为 1 的等式约束以及参数上下界约束,采用 fmincon 中的 SQP 算法对各项相对模量系数及松弛时间进行优化识别;最终获得的 Prony 参数通过实验曲线与拟合曲线对比进行验证,并用于后续有限元黏弹性模拟分析。需要注意的是,在实验数据的基础上,还需要引入一个远场边界点 (10 000 s, 1 Pa),该点的物理意义在于表征材料在长时高温尺度下的渐进松弛行为,即模量最终会趋于一个极小值,如图 14 所示。假定材料其压缩过程中体积保持不变且该性质不随时间而变化,则其体积模量默认为零,得到的 Prony 级数各项级数可用于描述材料黏弹性力学行为,具体数值见表 4。拟合结果显示确定系数 R^2 达到了 0.928 8,这一数值表明 Prony 级数模型能够解释材料约 92.88% 的黏弹性行为变化。考虑到高分子材料松弛行为的复杂性,该

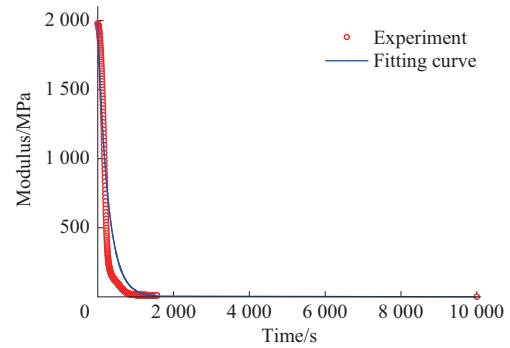


图 14 Prony 拟合曲线

Fig. 14 Results of Prony fitting

表 4 Prony 级数各项系数

Tab. 4 Coefficients of each term in the Prony series

Series	G_i	K_i	τ_i^R
1	0.000 928	0	0.01
2	0.000 928	0	0.1
3	0.000 928	0	242.1
4	0.067 944	0	264.86
5	0.927 343	0	264.65
6	0.000 928	0	752.89

Notes: G_i is relative shear modulus; K_i is relative bulk modulus; τ_i^R is relaxation time.

拟合精度已足以捕捉材料的核心力学特征,这为后续的形状记忆循环模拟提供了可靠基础。

WLF 方程作为经典的时间-温度转换模型,是基于大量非晶态聚合物时间-温度等效实验规律所总结提出的,其表达式见式(3)。

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (3)$$

式中: α_T 为温度平移因子; T 为材料所处的实际温度; T_r 为基准温度; C_1 和 C_2 分别为 WLF 方程的材料常数,可由实验拟合获得。

取普通常数对 PLA 材料的时温等效特性进行模拟,在有限元模拟中, WLF 方程所需输入的材料参数仅为玻璃化转变温度以及 C_1 和 C_2 ,数值见表 5,其中,玻璃化转变温度已由 DMA 实验测得。事实上, WLF 方程中的 C_1 和 C_2 取值对仿真过程中的应力应变影响较小,笔者曾对 WLF 方程取值不同时进行仿真结果的讨论,可参考文献[38]。

表 5 WLF 方程参数

Tab. 5 Parameters of the WLF equation

$T_g/^\circ\text{C}$	C_1	C_2
54	17.4	51.6

Notes: T_g is the glass transition temperature; C_1 and C_2 are the material constants in the WLF equation.

综合考虑PLA折纸单胞的网格数量、计算精度和计算时间的平衡,且由于结构的中心区域发生弯曲大变形和大转动,因此网格划分采取分区的形式,图15为所采用的划分策略。折痕区和面板区的网格类型为S4R,折痕区域的网格尺寸为0.25 mm,面板区的网格尺寸为2 mm,二者之间采用过渡网格划分,网格类型为S3。

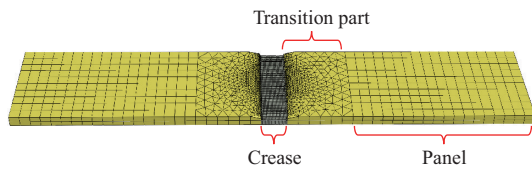


图15 网格划分策略
Fig. 15 Mesh plan

利用Abaqus黏性求解器对结构形状记忆循环行为进行模拟。由于形状记忆流程分为:升温加载、临时定型、卸载维型、加热恢复四个阶段,因此,有限元分析全流程的边界条件设置如图16所示。

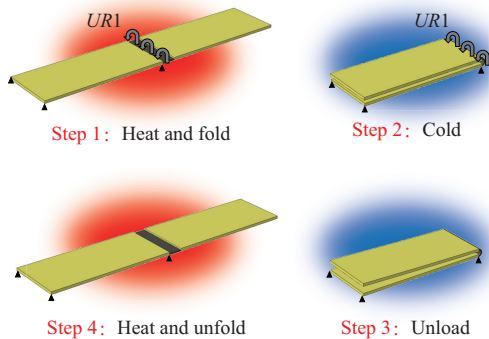


图16 边界条件设置
Fig. 16 Boundary conditions setup

根据拟合的材料参数等各个设置条件,对折纸单胞进行形状记忆行为模拟,图17为模拟结果。在整个形状记忆循环中,折纸结构的应力主要集中在中间的折痕区域,峰值应力出现在卸载维型阶段,约为1 209.7 MPa,并且有限元模型准确捕获了结构在撤除外载后的回弹行为。该方法较好地描述了形状记忆流程,可在一定程度上模拟实验过程,为实验设计提供参考。

由于折痕处发生最大程度的变形,因此,在折痕中心区域取点,对其应力应变特性进行分析。如图18所示,在第一阶段,克鲁斯林芯子结构在80 °C下进行加载,由于此时结构已经处于高弹态,应力和应变迅速增加;升温加载结束后进入第二阶段临时定型,此时,温度从80 °C下降到20 °C,结构逐渐

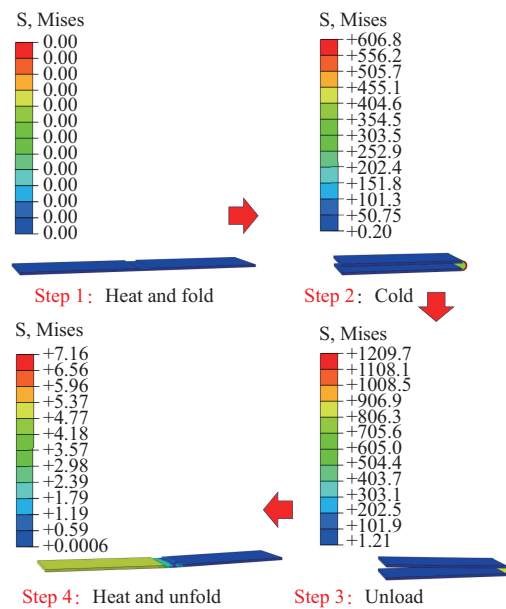


图17 折纸单元形状记忆模拟

Fig. 17 Shape memory simulation of origami cell

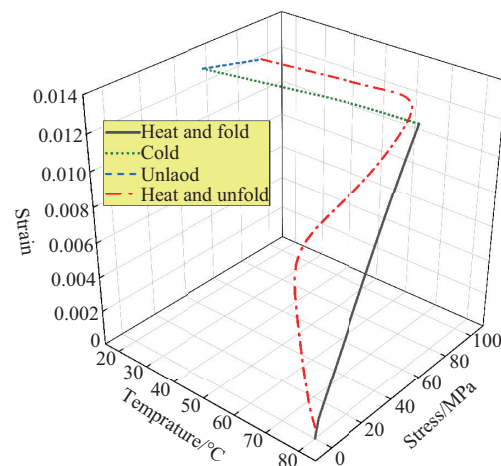


图18 形状记忆模拟中力与位移曲线

Fig. 18 Stress and strain curves in shape memory simulation

由高弹态至玻璃态,应力略有降低;第三阶段,在20 °C环境下撤除外载,结构产生轻微回弹趋势,应变降低而应力升高,此时结构的外在构型基本维持不变;在最后阶段,随着温度重新升高至80 °C,结构应变迅速释放,其形状恢复至初始形态,但实际试验中,其分子链运动的滞后性导致内部分子排列需要一定时间,在仿真中表现为黏弹松弛尚未完全完成,因此仍存在一定的残余应力与残余应变,通过延长第四阶段的分析步时间,或适当提高该阶段的温度场水平,可进一步促进应力释放。这两种处理方式在物理本质上是等效的,均符合时温等效原理,即通过延长等效松弛时间来加速黏弹响应的完成。

在整个形状记忆循环过程中,应力始终主要集

中于折痕区域,这与结构折叠过程中非线性大变形高度局部化的特征一致。折痕处较高的局部应变水平导致其对温度变化和等效时间尺度更为敏感,从而成为应力与残余应变的主要集中区域。

基于前文对折纸单元的形状记忆行为模拟,进一步模拟克鲁斯林芯子结构的形状记忆行为。边界条件设置为将芯子结构下底面固定,上侧施加位移,其中,克鲁斯林芯子结构的临时记忆形状可分为偏动式、全动式两种,偏动式即在芯子结构的某个管进行位移加载,即偏心加载;全动式则对所有管进行位移加载,进而提升或降低结构整体高度。

图 19 为 I 型克鲁斯林芯子结构有限元形状记忆循环过程,黄色箭头 U 代表结构在该管的轴向进行位移加载,大小为 20 mm。红框为偏动式拉伸,蓝框为全动式拉伸,两种加载类型的结构在进行完一次完整的形状记忆流程后均可恢复原状,但结构内部仍然存在一定程度的应力,这是因为仿真分析中的时间步长设置时间较短,当时间没有覆盖很长的时间尺度时,表现为材料在有限时间内不会完全松弛到零应力。综合来看,该有限元模拟方法均有效地模拟了折纸结构的形状记忆行为全流程,并可为形状记忆折纸结构的设计与验证提供一定支撑。

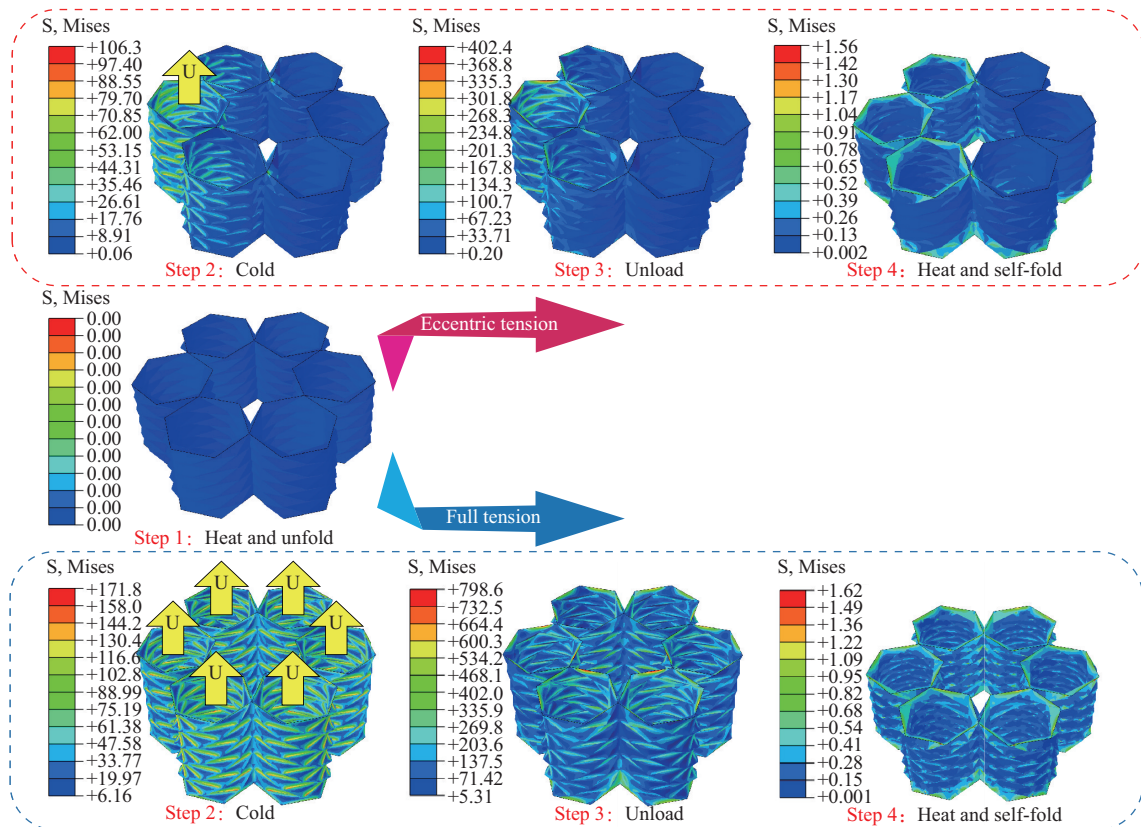


图 19 克鲁斯林芯子形状记忆模拟

Fig. 19 Shape memory simulation of Kresling core

2.6 克鲁斯林芯子吸能特性

高低温变化会引发材料的形状记忆行为,而持续低温会引发材料的冷却定型特性。因此,在低温条件下通过万能试验机对两种克鲁斯林芯子结构进行平压试验,竖直位移为 25 mm,并利用 Abaqus 显示动力学对结构平压试验进行模拟,图 20 为模拟设置示意图,模拟中上下板均为刚性,下侧板固定上侧板向下运动。

将试验测得的力与位移曲线和仿真结果进行统一处理,得到 I 型和 II 型克鲁斯林芯子结构平压过

程的力与位移曲线(图 21),试验曲线主要分为两个阶段,第一阶段为弹性变形阶段,此时的力与位移呈线性上升的趋势。第二个阶段为塑性变形/结构坍塌阶段,该阶段能量吸收主要通过材料塑性变形、微结构断裂等机制,是吸能的核心阶段,具体表现为结构在压缩方向发生屈曲,各个单胞面之间表现为塑性凹陷变形,折痕区域产生扭转塑性变形并伴随一定程度的结构断裂。II 型芯子结构其弹性阶段的峰值力为 8 668.77 N,相较于 I 型芯子结构的 5 273.49 N 提升 64.38%。仿真结果较好地对比试验结

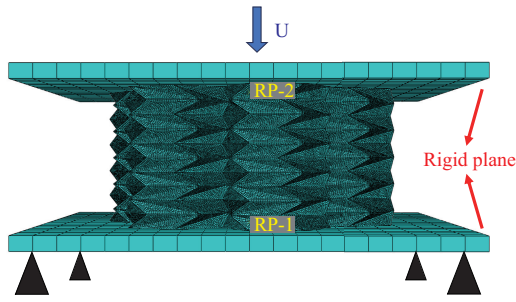


图20 平压试验模拟设置

Fig. 20 Compression simulation setup

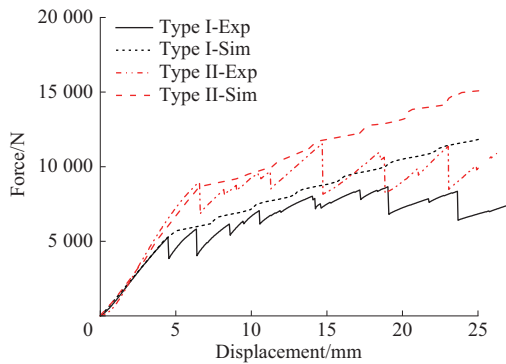


图21 平压测试力与位移曲线

Fig. 21 Force-displacement curves of compression

果进行了模拟,然而,由于模型中未引入渐进损伤与失效本构关系,在第二阶段的塑性变形与结构坍塌过程中,数值模拟未能再现试验中观察到的阶梯式压溃特征,但并不影响弹性阶段内结构受压行为的预测精度。综合试验与仿真结果可知,II型克鲁斯林芯子结构在吸能性能方面均明显优于I型芯子结构。

基于所得的力与位移曲线,进一步对克鲁斯林芯子结构的力学性能进行定量评估。共选取六个评价指标,分别为总吸能 E_A 、比吸能 e_A 、平均压溃力 F_m 、压溃效率 η_c 、弹性段峰值力 F_p 、弹性段行程 S_c ,具体定义如下。

总吸能,即力与位移曲线所围成的总面积,具体表达式见式(4)。

$$E_A = \int_0^x F(x) dx \quad (4)$$

比吸能,即单位质量吸能大小,具体表达式见式(5)。

$$e_A = \frac{E_A}{m} \quad (5)$$

平均压溃力,即压缩位移过程中力的平均值,

反映结构持续吸收能量的能力,具体表达式见式(6)。

$$F_m = \frac{E_A}{x} \quad (6)$$

压溃效率,即平均压溃力与最大压溃力的比值,用于评价压缩位移过程中的稳定性具体表达式见式(7)。

$$\eta_c = \frac{F_m}{F_{\max}} \quad (7)$$

弹性段峰值力和弹性段行程,即结构在弹性变形阶段(未发生塑性屈服前)所能承受的最大力和位移对应值,具体为力与位移曲线中弹性段的末段端点,可直接通过曲线观察得到。

I型与II型克鲁斯林芯子结构的性能雷达图如图22所示,除压溃效率两类结构接近以外,其余指标II型均优于I型克鲁斯林芯子结构,II型克鲁斯林芯子比I型在比吸能(+30.3%)、平均压溃力(+32.45%)、弹性段峰值力(+64.38%)及弹性段行程(+46.65%)上均显著提升。

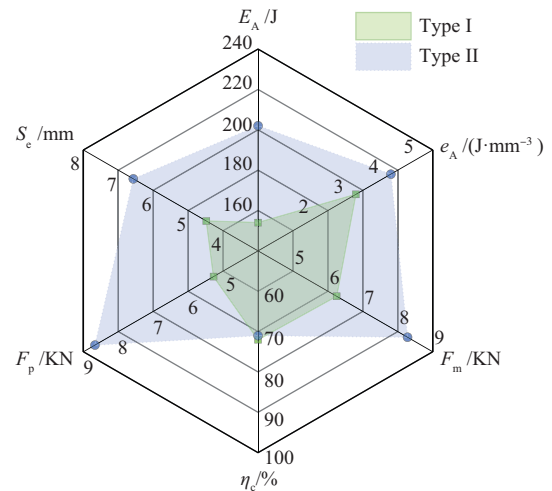


图22 I型和II型克鲁斯林芯子力学性能比较

Fig. 22 Comparisons of mechanical behaviors for type I and type II Kresling core

3 结论

(1)PLA折纸单元具备稳定的热致形状记忆响应,其恢复速率对环境温度敏感;在100℃条件下,其恢复时间相较80℃显著缩短(约22.3%)。

(2)多次的材料形状记忆循环行为会导致其内部发生微裂纹与力学疲劳的叠加,结构的恢复性能会随着记忆循环次数的增加降低,恢复时间增加且最大恢复角度减小。

(3)形状记忆聚合物的“升温加载—冷却定型—

卸载维型一再升温恢复”的全过程模拟揭示,升温加载阶段应力与应变迅速增长;冷却定型后应力轻微松弛而应变基本保持;卸载阶段出现小幅回弹,表现为应变降低、应力上升;再升温恢复过程中应变释放驱动形状回归,但仍可能残留一定应力/应变,且残余程度与分析步时间尺度相关。

(4)偏动式与全动式克鲁斯林芯子均可在形状记忆变形中恢复至初始形态,设计方案为变体机翼的翼梢和翼展等主动变形设计提供了新思路。

(5)从力学性能方面,II型克鲁斯林芯子结构相较于I型克鲁斯林芯子结构表现出更优的能量吸收与承载能力,其比吸能、平均压溃力、弹性段峰值力及弹性段行程分别提高了30.3%、32.45%、64.38%和46.65%。

本文研究结果不仅揭示了4D打印克鲁斯林结构的力学响应机理,也为其在复杂工程场景中的应用提供了理论参考。工程应用方面,该结构有望作为变体机翼的内部芯子,利用主动响应特性产生预设形变,通过偏动式变形或全动式变形实现变翼尖、变翼展等需求,实现飞行器外部空气动力学布局的调节。此外,在缓冲防护领域,II型克鲁斯林结构凭借其出色吸能特性,可作为无人飞行器降落时的主要承力吸能部件。在其弹性变形范围内利用形状记忆效应,通过热激励即可驱动其恢复初始构型。未来工作将进一步探索复杂多变工况下智能折纸结构的力学可靠性,实现其在航空航天及智能装备领域的深度工程化应用。

参考文献

- [1] YANG J N, ZHANG Y H, GU X J, et al. Bi-direction and flexible multi-mode morphing wing based on antagonistic SMA wire actuators[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(12):373-387.
- [2] 李明彬. 大型天线罩结构变形仿真分析与验证[J]. 科技与创新, 2026(1):149-151.
LI Mingbin. Simulation analysis and verification of structural deformation of large radome[J]. Science and Technology & Innovation, 2026(1):149-151.
- [3] ZHENG Q, ZHU W J, ZHI Q, et al. Genetic algorithm optimization design of gradient conformal chiral metamaterials and 3D printing verification for morphing wings[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(1). DOI:10.1186/s10033-024-01132-3.
- [4] SUN J, GAO H L, SCARPA F, et al. Active inflatable auxetic honeycomb structural concept for morphing wingtips[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12). DOI: 10.1088/0964-1726/23/12/125023.
- [5] CAMPANILE L F, SACHAU D. The belt-rib concept: A structronic approach to variable camber[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 11(3):215-224.
- [6] MISSERONI D, PRATAPA P P, LIU K, et al. Origami engineering [J]. Nature Reviews Methods Primers, 2024, 4. DOI: 10.1038/s43586-024-00313-7.
- [7] SILVERBERG J L, EVANS A A, MCLEOD L, et al. Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials [J]. Science, 2014, 345(6197):647-650.
- [8] KAMRAVA S, MOUSANEZHAD D, EBRAHIMI H, et al. Origami-based cellular metamaterial with auxetic, bistable, and self-locking properties[J]. Scientific Reports, 2017, 7. DOI:10.1038/srep46046.
- [9] YANG H Y, LIU Y H, LU H B, et al. 3D-printable Kresling-embedded honeycomb metamaterials with optimized energy absorption capability[J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33(12). DOI:10.1088/1361-665X/ad8c04.
- [10] LIN Z W, NOVELINO L S, WEI H M, et al. Folding at the microscale: Enabling multifunctional 3D origami-architected metamaterials[J]. Small, 2020, 16(35). DOI:10.1002/smll.202002229.
- [11] YE H T, LIU Q J, CHENG J X, et al. Multimaterial 3D printed self-locking thick-panel origami metamaterials[J]. Nature Communications, 2023, 14. DOI:10.1038/s41467-023-37343-w.
- [12] 张雨萌, 李洁, 夏进军, 等. 4D打印技术: 工艺、材料及应用[J]. 材料导报, 2021, 35(1):212-223.
ZHANG Yumeng, LI Jie, XIA Jinjun, et al. 4D printing: Technologies, materials and applications[J]. Materials Review, 2021, 35(1): 212-223.
- [13] 张宪超, 刘少岗, 王鹏飞, 等. 4D打印结构参数对负泊松比蜂窝结构PLA材料形状记忆性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6):96-102.
ZHANG Xianchao, LIU Shaogang, WANG Pengfei, et al. Effects of 4D printing structural parameters on shape memory performance of PLA materials with negative Poisson's ratio honeycomb structure[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6):96-102.
- [14] 刘灏, 陈思敏, 余创, 等. 4D打印形状记忆聚合物的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(6):161-169.
LIU Hao, CHEN Simin, YU Chuang, et al. Research progress in 4D printed shape memory polymers[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(6):161-169.
- [15] ZHANG X, KANG X, LI B. Origami-inspired design of a single-degree-of-freedom reconfigurable wing with lockable mechanisms [J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2024, 16(7). DOI: / 10.1115/1.4063456.
- [16] 岳晓奎, 朱明珠, 耿浩华, 等. 折纸超材料及其在航空航天领域的应用与展望[J]. 航空学报, 2025, 46(6):232-265.
YUE Xiaokui, ZHU Mingzhu, GENG Haohua, et al. Origami metamaterials and their applications and prospects in aerospace

- field[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(6): 232–265.
- [17] LIU Y, ZHANG W, ZHANG F H, et al. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed laminated Miura-origami structures subjected to compressive loading[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 153:233–242.
- [18] 杨庆生, 粘向川, 张婧, 等. 智柔超材料及其力学性能的研究进展[J]. *固体力学学报*, 2024, 45(2):145–169.
- YANG Qingsheng, NIAN Xiangchuan, ZHANG Jing, et al. Recent research progress on intelligent flexible mechanical metamaterials and their properties[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2024, 45(2):145–169.
- [19] XIN X Z, LIU L W, LIU Y J, et al. Origami-inspired self-deployment 4D printed honeycomb sandwich structure with large shape transformation[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(6). DOI:10.1088/1361-665X/ab85a4.
- [20] LU Y F, FENG X D, FU S, et al. Multidimensional twisted mechanical metamaterials with programmable stiffness for adaptive impact protection[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 306. DOI:10.1016/j.compositesb.2025.112848.
- [21] LIU T Z, LIU L W, ZENG C J, et al. 4D printed anisotropic structures with tailored mechanical behaviors and shape memory effects[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 186. DOI: 10.1016/j.compscitech.2019.107935.
- [22] BASHIR M, LONGTIN-MARTEL S, BOTEZ R M, et al. Optimization and design of a flexible droop-nose leading-edge morphing wing based on a novel black widow optimization algorithm: Part I [J]. *Designs*, 2022, 6(1). DOI:10.3390/designs6010010.
- [23] DI LUCA M, MINTCHEV S, HEITZ G, et al. Bioinspired morphing wings for extended flight envelope and roll control of small drones[J]. *Interface Focus*, 2017, 7(1). DOI: 10.1098/rsfs.2016.0092.
- [24] AJANIC E, FEROSKHAN M, MINTCHEV S, et al. Bioinspired wing and tail morphing extends drone flight capabilities[J]. *Science Robotics*, 2020, 5(47). DOI:10.1126/scirobotics.abc2897.
- [25] SANTOS P D R, SOUSA D B, GAMBOA P V, et al. Effect of design parameters on the mass of a variable-span morphing wing based on finite element structural analysis and optimization[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 80:587–603.
- [26] 胡启华, 聂瑞, 张超, 等. 可调负泊松比蜂窝结构在变面积机翼上的应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2024, 56(8):24–33.
- HU Qihua, NIE Rui, ZHANG Chao, et al. Application of adjustable negative Poisson's ratio honeycomb structure on variable-area wing[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(8):24–33.
- [27] ZHILYAEV I, KRUSHINSKY D, RANJBAR M, et al. Hybrid machine-learning and finite-element design for flexible metamaterial wings[J]. *Materials & Design*, 2022, 218. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110709.
- [28] 随涛, 徐志伟. 柔性蒙皮变体机翼多电机分布式驱动系统研究[J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(9):1 551–1 558.
- SUI Tao, XU Zhiwei. Study on multi-motor distributed driving system of morphing wing with flexible skin[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(9):1 551–1 558.
- [29] 陈树生, 贾苜梁, 刘衍旭, 等. 变体飞行器变形方式及气动布局设计关键技术研究进展[J]. *航空学报*, 2024, 45(6):1–47.
- CHEN Shusheng, JIA Muliang, LIU Yanxu, et al. Deformation modes and key technologies of aerodynamic layout design for morphing aircraft: Review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(6):1–47.
- [30] GU X J, YANG K K, WU M Q, et al. Integrated optimization design of smart morphing wing for accurate shape control[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(1):135–147.
- [31] ZANG S X, MISSERONI D, ZHAO T, et al. Kresling origami mechanics explained: Experiments and theory[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2024, 188. DOI: 10.1016/j.jmps.2024.105630.
- [32] ZHAI Z R, WANG Y, JIANG H Q. Origami-inspired, on-demand deployable and collapsible mechanical metamaterials with tunable stiffness[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(9):2 032–2 037.
- [33] LENDLEIN A, KELCH S. Shape-memory polymers[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2002, 41(12):2 034–2 057.
- [34] HANZON D W, LU H B, YAKACKI C M, et al. Influence of mechanically-induced dilatation on the shape memory behavior of amorphous polymers at large deformation[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2019, 23(1):1–21.
- [35] 樊鹏玄, 陈务军, 赵兵, 等. 基于广义 Maxwell 模型的形状记忆聚合物力学本构[J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(8):969–975.
- FAN Pengxuan, CHEN Wujun, ZHAO Bing, et al. The mechanical constitutive model of shape memory polymer based on generalized Maxwell model[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2018, 52(8):969–975.
- [36] HOSSAIN M J. Fatigue behavior of 4D printed materials: A review [J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2025, 10(1):775–782.
- [37] HU H T, XIA Z M, TAO Q, et al. Self-unfolding properties of smart grid-reinforced membrane origami[J]. *Journal of Composites Science*, 2024, 8(2). DOI:10.3390/jcs8020064.
- [38] 胡浩田. 智能复合材料网格增强折纸结构设计与展开特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- HU Haotian. Structural design and unfolding characteristics of smart composites grid-reinforced origami[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.