

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.06.013

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

张宪超, 刘少岗, 王鹏飞, 王心悦, 邱丹丹

(天津科技大学机械工程学院, 轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300457)

摘要: 随着3D打印技术和智能材料的完善,使得4D打印技术快速发展。采用熔融沉积成型(FDM)技术制备聚乳酸(PLA)和碳纤维增强聚乳酸复合材料(CF/PLA)负泊松比蜂窝结构工件,利用材料的热响应机制,使用模具对工件施加弯曲变形,然后通过改变结构单元的个数奇偶性排列、壁厚尺寸、角度以及工件弯曲变形程度,探索结构参数对工件形状记忆性能的影响规律,并进一步建立起结构参数与负泊松比蜂窝结构相对密度的关系,进而揭示负泊松比变化对工件4D形状记忆性能的影响规律。结果表明,结构单元奇偶个数的不同会导致弯曲变形点位置不同,进而导致形状记忆性能发生变化,当弯曲变形发生在负泊松比结构长边时,工件的形状恢复率较高,形状恢复速度较快;随着结构单元壁厚的增加,结构相对密度增大,负泊松比减小,导致工件形状恢复率降低,形状恢复时间也相应地延长;随着结构单元角度增加,工件的形状恢复率变化范围较小,但由于结构相对密度减小,负泊松比增大,形状恢复率依然表现出升高的趋势,形状恢复时间缩短;弯曲变形程度增大,导致工件形状恢复率降低,形状恢复所用时间增加。保持各结构参数不变的情况下,PLA的形状恢复率相较于CF/PLA更高,但形状恢复时间更长。

关键词: 4D打印; 负泊松比; 聚乳酸; 碳纤维增强聚乳酸复合材料; 形状恢复率; 形状恢复时间

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)06-0096-07

Effects of 4D printing structural parameters on shape memory performance of PLA materials with negative Poisson's ratio honeycomb structure

ZHANG Xianchao, LIU Shaogang, WANG Pengfei, WANG Xinyue, QIU Dandan

(Key Laboratory of Integrated Design and On-line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment,
School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract : With the improvement of 3D printing technology and intelligent materials, 4D printing technology has developed rapidly. Using fused deposition modeling (FDM) technology, polylactic acid (PLA) and carbon fiber reinforced PLA composite (CF/PLA) workpieces with negative Poisson's ratio honeycomb structure were prepared. The thermal response mechanism of the material was used to apply bending deformation to the workpieces through the mould. Then the influences of structural parameters on the shape memory performance of the workpieces was explored by varying the parity arrangement of structural unit quantities, wall thickness dimensions, angles, and the bending deformation degree of workpieces. The relationship between structural parameters and the relative density of the negative Poisson's ratio honeycomb structure was further established, thereby revealing the influence of negative Poisson's ratio change on the 4D shape memory performance of the workpieces. The results show that the difference in the odd or even number of the structural units leads to variations in the locations of bending deformation points, thereby inducing changes in shape memory performance. When bending deformation occurs along the long side of the negative Poisson's ratio structure, the workpieces demonstrate higher shape recovery rate and faster recovery speed. As the wall thickness of the structural unit

基金项目: 天津市自然科学基金项目(18JCQNJC05200, 23JCYBJC00900)

通信作者: 刘少岗, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为3D打印、公差优化设计等

收稿日期: 2025-04-21

引用格式: 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.

increases, the relative density of the structure increases and the negative Poisson's ratio decreases, resulting in the decrease of the shape recovery rate and the corresponding prolongation of the shape recovery time. As the structural unit angle increases, the shape recovery rate changes within a small range, but due to the decrease of relative density of the structure and the increases of negative Poisson's ratio, the shape recovery rate still shows an increasing trend, and the shape recovery time is reduced. The increase of the bending deformation degree leads to the decrease in shape recovery rate and the increase in the time required for shape recovery. When the structural parameters remain unchanged, PLA has the higher shape recovery rate than CF/PLA, but the shape recovery time is longer.

Keywords : 4D printing ; negative Poisson's ratio ; polylactic acid ; carbon fiber reinforced polylactic acid composite ; shape recovery rate ; shape recovery time

3D打印技术已广泛应用于多个市场领域,如复杂几何形状组件的生产^[1-2]、新产品设计^[3]、生物技术与生命科学^[4]以及娱乐文化创意产品制造^[5]等。在当前的技术水平下,3D打印技术已在新产品的原型制作方面呈现出快速成型和成本低等优势,但现有技术仍局限于只能生产静态组件,无法生产具有动态功能性的产品^[6]。

目前,4D打印形状记忆聚合物智能结构已成为工程研究的前沿方向,形状记忆聚合物(SMPs)的应用开发以及与智能结构的结合运用目前备受关注^[7]。SMPs因在玻璃化转变温度(T_g)以上或以下的力学性能存在差异,故而具备形状恢复和形状固定等特性,通过与3D打印技术结合可开发出新型3D打印产品^[8]。其中,聚乳酸(PLA)是一种可生物降解的热响应型SMPs,通常采用纤维增强、无机填料填充、化学改性以及与其他弹性材料共混等方法对PLA进行改性,使PLA获得更优异的性能,这些改性PLA材料也可以通过在高于 T_g 时施加外部应力进行编程变形^[9]。

另外,超结构由于具有独特的有序排列,表现出自然界中罕见的物理特性^[10-13],可通过对超结构进行独特的设计和排列来实现相应材料力学性能的主观调控^[14]。其中,负泊松比结构是超结构的代表之一,具有该类结构的材料与常规材料的变形行为相反,在受到纵向拉伸时,横向会膨胀,反之发生收缩。该结构材料具有优异的抗剪切性和抗冲击性,常应用于缓冲材料、防护装备和航空航天等领域。Takezawa等^[15]研究了具有能量吸收的智能夹层结构,采用熔融沉积成型(FDM)打印方法,利用PLA设计了六边形和方形马蹄形夹层结构,用于可逆能量吸收应用,如耐撞应用或个人防护设备,以最大限度地减少可能造成严重伤害的危险;王玮婧等^[16]设计了一种参数可调的新型负泊松比结构,很大程

度上提高了吸能效果;Zhang等^[17]使用两种材料设计了一种各向同性双稳态增生块组成的3D机械超结构,对其吸能效果等进行了探究。学者们对具有负泊松比以及其他智能结构材料的研究多聚焦于静态力学性能的表征,而对该类材料4D特性与智能结构的关联性探讨不足。因此笔者将4D打印的动态响应特性与负泊松比结构相结合,探索结构参数对PLA及碳纤维增强PLA复合材料(CF/PLA)负泊松比蜂窝结构工件形状记忆性能的影响规律,构建出具有可编程变形能力的新型智能材料体系。这种材料体系在柔性电子(可变形电路)、软体机器人(自适应驱动)、生物医学器件(智能植入体)及航空航天(可展开结构)等前沿领域具有广阔的应用前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA 丝材:直径 1.75 mm $\pm$ 0.03 mm,密度 1.24 g/cm³,深圳市创想三维科技有限公司;

CF/PLA 丝材:直径 1.75 mm $\pm$ 0.02 mm,密度 1.20 g/cm³,碳纤维质量分数 15%,珠海市三绿实业有限公司。

1.2 主要仪器及设备

FDM 3D 打印机:A3S,深圳市极光尔沃科技有限公司;

计时秒表:YS-801,精度 0.01 s,广东中正计量检测技术有限公司;

镀铬游标量角器:测量范围 0°~360°,上海量具刃具厂。

1.3 负泊松比蜂窝结构工件的制备

首先,使用 Caxa Cad 软件建立负泊松比蜂窝结构工件的结构单元,尺寸如图 1a 所示(图 1a 中 t 为结构单元壁厚, θ 为结构单元角度);然后,使用 Solid-Works 软件,基于周期性排列的原理,将结构单元按照规律进行排列,如图 1b 所示,并结合工件的具体

参数构建其三维模型,如图1c所示;完成建模后,将模型保存为STL格式,以确保工件模型数据的完整性和切片软件的兼容性;将STL格式的模型导入至Creality Slicer软件中,并根据实际打印的精度要求,并对各项参数进行设置(打印温度205℃、底板温度60℃、打印速度30 mm/s、打印层高度0.2 mm);最后,将生成的打印程序传输至FDM 3D打印机,按照预设的路径逐层打印,最终完成工件的制备。

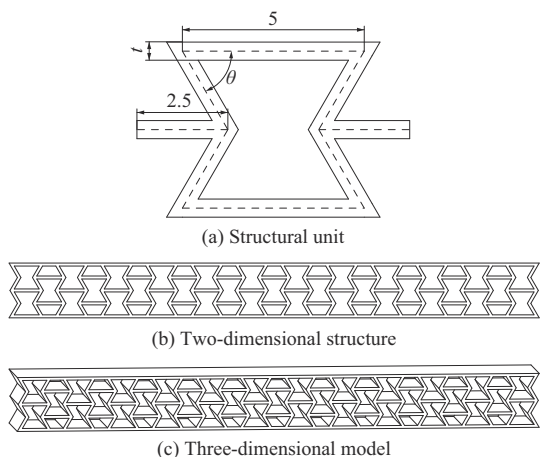


图1 负泊松比蜂窝结构工件的结构单元、二维结构和三维模型

Fig. 1 Structural unit, two-dimensional structure and three-dimensional model of workpiece with negative Poisson's ratio honeycomb structure

1.4 测试与表征

整个测试原理包括3步:首先,将工件放入温度超过 T_g 的水浴当中,等待30 s;随后,迅速将工件取出,将其放入V形模具中进行弯曲赋形,固定1 min以上达到临时形状后使工件在室温下冷却30 min以上,对临时形状进行冷却固定;最后,当工件再次放入温度高于 T_g 的水浴中时,由于热响应的驱动使得工件逐渐恢复到初始形态,恢复原理如图2所示。

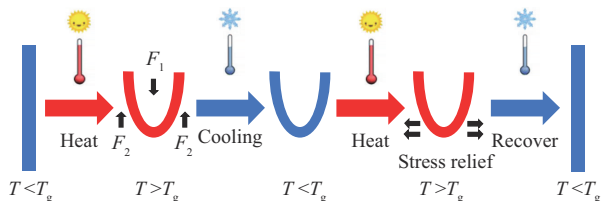


图2 形状恢复原理图

Fig. 2 Shape recovery schematic diagram

实验结束后使用游标量角器测量样品形状恢复完成后的残余角度,进行多次实验求取平均值,最终通过V型模具的赋形弯曲角度与形状恢复完成后的残余角度计算出工件的形状恢复率,具体计算公式见式(1),形状恢复时间则通过计时秒表得出。

$$R_r = \left(1 - \frac{\theta_r}{180^\circ}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: θ_r 为恢复后的残余角度; R_r 为形状恢复率。

2 结果与讨论

本次实验围绕负泊松比结构参数对工件形状记忆性能的影响,从2个方面展开探究:第一方面,调节结构的关键参数,包括结构单元个数的奇偶性(对应工件上的弯曲变形点)、结构单元角度、结构单元壁厚尺寸以及工件弯曲变形程度(以弯曲角度进行表征)等,通过单因素结构参数的变化,使蜂窝工件结构相对密度发生变化,从而导致负泊松比发生变化,进而研究这种变化对形状记忆性能的影响;第二方面,对比分析PLA和CF/PLA两种负泊松比结构材料在不同结构参数条件下的形状记忆性能。

2.1 结构单元个数奇偶性排列对形状记忆的影响

不同的弯曲变形点会改变结构的几何形态与应力分布,从而影响整体结构的功能表现。当结构发生弯曲变形时,若能够控制变形点的位置(例如通过模具在中间区域施加压缩力),结构单元个数的奇偶性排列便成为关键因素:当结构单元个数为奇数时,变形点可精确控制在如图3所示的B点;反之,则可将变形点控制在如图3所示的A点。这样就将结构单元个数奇偶性排列转化为弯曲变形点对负泊松比结构形状记忆性能的影响。图3所示的两处弯曲变形点A和B分别对应正梯形结构短边和负泊松比结构长边。

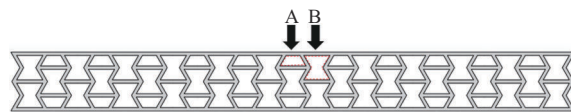


图3 弯曲变形点

Fig. 3 Bending deformation point

固定结构单元壁厚为0.5 mm、结构单元角度为60°、弯曲角度为90°,探讨弯曲变形点对工件形状恢复率和形状恢复时间的影响,实验结果如图4和图5所示。由图4和图5看出,两种材料都表现出大致相同的结果,弯曲变形发生在B点时,相较于发生在A点,最终的形状恢复率均得到明显提高,且形状恢复时间更短,其中PLA工件的形状恢复率更高。因为负泊松比结构在弯曲时,由于拉胀效应,应力分布更均匀,有效地避免了局部应力集中;而正梯形结构在弯曲时应力集中于棱角以及连接处。并且负泊松比结构的几何特性能够在变形过程中保持更高的刚度与回弹能力,从而使工件在受到热刺激

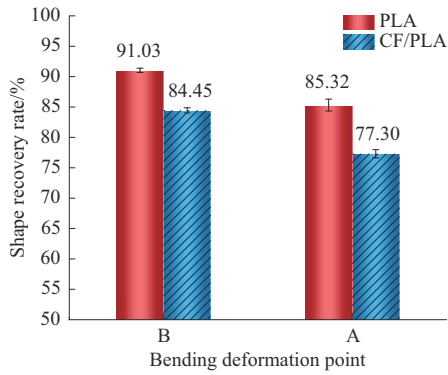


图4 弯曲变形点对工件形状恢复率的影响

Fig. 4 Effect of different bending deformation point on shape recovery rate of workpieces

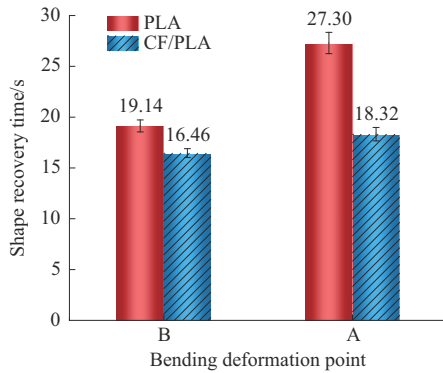


图5 弯曲变形点对工件形状恢复时间的影响

Fig. 5 Effect of bending deformation point on shape recovery time of workpieces

后能够快速恢复原状。后续讨论其他结构参数时, 均将弯曲变形点设在B处。

2.2 结构单元壁厚对形状记忆的影响

结构单元壁厚是实现蜂窝结构轻量化的关键, 壁厚的优化能够有效提升结构的强度、刚度、稳定性, 进一步实现工件力学性能与材料用量的最佳平衡。对于结构单元周期结构来说, 相对密度是评价结构力学性能的重要参数^[18], 对于二维周期结构而言, 相对密度表示为结构单元壁厚所占面积与结构单元表征面积比值的百分数, 见式(2), 具体到实验采用的负泊松比蜂窝结构的相对密度, 可表示为式(3)。

$$p_c = \frac{S_a}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: p_c 为结构相对密度; S_a 为结构单元壁厚所占面积; S_0 为结构单元表征面积。

$$p_c = \frac{1}{2} \frac{t}{L_2} \frac{(L_1/L_2 + 2)}{\cos \theta (L_1/L_2 + \sin \theta)} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中的 L_1 , L_2 , θ 如图6所示, t 如图1所示。

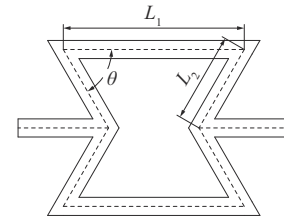


图6 结构单元几何参数示意图

Fig. 6 geometric parameter schematic diagram of structural unit

因此通过对比5种不同结构单元壁厚(0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 mm)的工件, 分析讨论了壁厚对负泊松比蜂窝结构工件形状记忆性能的影响规律(结构单元角度固定为60°, 弯曲角度固定为45°), 实验结果如图7和图8所示。由图7看出, 两种材料都表现出大致的变化趋势, 壁厚为0.50 mm时, 工件的形状恢复率最高, PLA的为97.20%, CF/PLA的为96.70%, 并随着壁厚的逐渐增大, 形状恢复率明显降低。同时由图8可以看出, 随着壁厚的增大, 形状恢复时间也相应地延长。

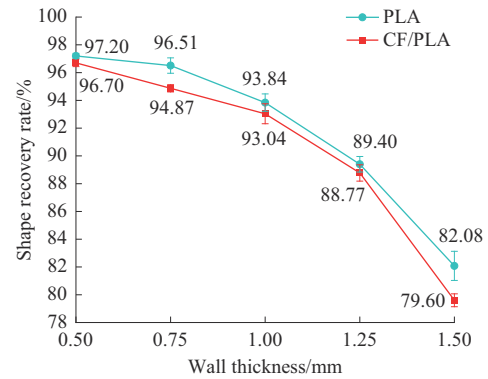


图7 壁厚对工件形状恢复率的影响

Fig. 7 Effect of wall thickness on shape recovery rate of workpieces

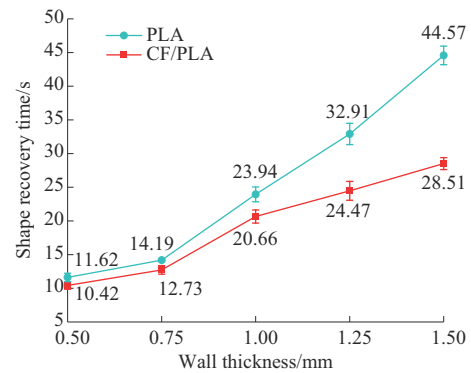


图8 壁厚对工件形状恢复时间的影响

Fig. 8 Effect of wall thickness on shape recovery time of workpieces

负泊松比越大, 拉胀效应越显著, 且该特性有助于工件在形状记忆过程中储存更多的弹性应变能, 从而当工件再次受到热刺激时, 会形成更强的

恢复驱动力,进而提高形状恢复率。负泊松比 ν 可表示为式(4),式(4)中的 α 可表示为式(5)。

$$\nu = \frac{\sin^2 \theta}{(\alpha + \cos \theta) \cos \theta} \frac{1 - (t/L_2)^2}{1 + \tan^2 \theta (t/L_2)^2} \quad (4)$$

$$\alpha = L_1/L_2 \quad (5)$$

式(4)中,为了避免蜂窝壁板变形后相互层叠,应满足 $\alpha \geq 2\cos\theta$ 。

由式(3)计算可得,在该负泊松比蜂窝结构中,随着壁厚的增大,相对密度增大,如图9a所示。由式(4)可得,随着壁厚的增大,负泊松比相应减小。进一步而言,相对密度升高使得结构负泊松比减小,从而抑制了结构再次受到热刺激时弹性应变能的释放,导致形状恢复率下降。

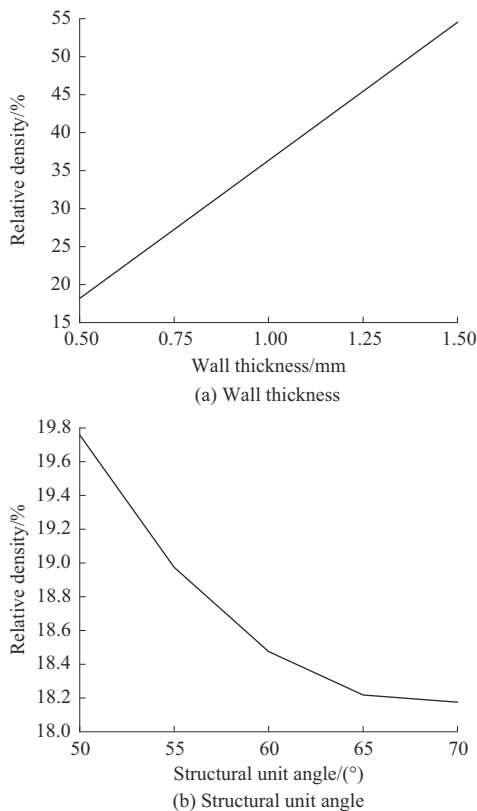


图9 负泊松比蜂窝结构相对密度与结构参数的关系

Fig. 9 Relationship between relative density of honeycomb structures with negative Poisson's ratio and structural parameters

2.3 结构单元角度对形状记忆的影响

结构单元角度是影响结构负泊松比的关键因素,不同的角度设计可以实现不同的负泊松比结构特性,影响着整个结构的力学性能。但结构单元角度不是结构具有负泊松比特性的充分条件,只有当结构单元角度满足式(6)的条件时^[19],形成了具有内凹特征的结构才会产生负泊松比效应。

$$L_1 \geq 2L_2 \cos \theta \quad (6)$$

因此实验探究了结构单元角度为 $50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ$ 以及 70° 时工件的形状记忆性能(结构单元壁厚固定为 0.50 mm ,弯曲角度固定为 45°),实验结果如图10和图11所示。从图10可以看出,随着结构单元角度的增大,工件形状恢复率也逐渐增加,但增长幅度较小,在 70° 时PLA工件形状恢复率高达 99.19% ;从图11可以看出,随着结构单元角度增大,形状恢复所用时间也相应变短。

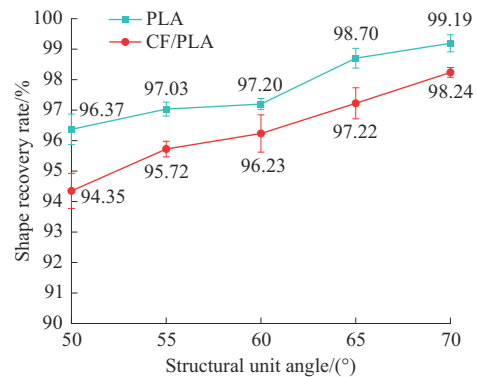


图10 结构单元角度对工件形状恢复率的影响

Fig. 10 Effect of structural unit angle on shape recovery rate of workpieces

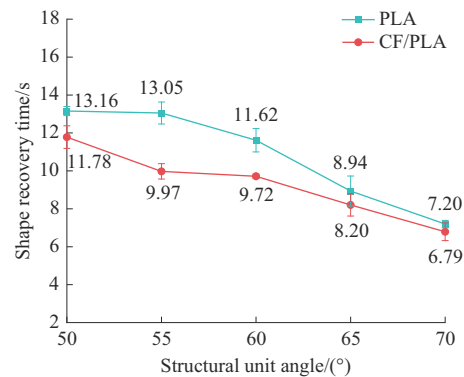


图11 结构单元角度对工件形状恢复时间的影响

Fig. 11 Effect of structural unit angle on shape recovery time of workpieces

由式(3)计算可得,结构单元角度的增大,引起结构相对密度小幅度减小,如图9b所示,且导致负泊松比也发生小幅度的增加,增加的负泊松比意味着结构在变形时能通过横向或纵向膨胀储存更多的弹性应变能,这些能量会驱动工件更快地达到形状恢复,这表明,虽然结构单元角度对形状恢复率的影响较小,但也使形状恢复率得到一定程度增加;同时,结构单元角度的增大使得工件孔隙率提高,增加了工件与热水浴的接触面积与渗透效率,导致了形状恢复时间的缩短。上述结果也间接说

明了在实验设计的结构下,负泊松比越大形状恢复率越高,形状恢复时间越短。

2.4 弯曲变形程度对形状记忆的影响

弯曲变形程度(以弯曲角度表征)是检验结构在外力作用下性能的关键指标之一,这项参数不仅是结构的安全性评估和功能性要求的直接体现,也是材料选择和优化设计的重要依据。保持其他结构参数不变(结构单元壁厚为0.5 mm,结构单元角度为60°),如图12所示,利用4种弯曲模具探究了负泊松比蜂窝结构在4种不同弯曲角度(45°,60°,75°和90°)下的形状恢复性能,获得的实验结果如图13和图14所示。

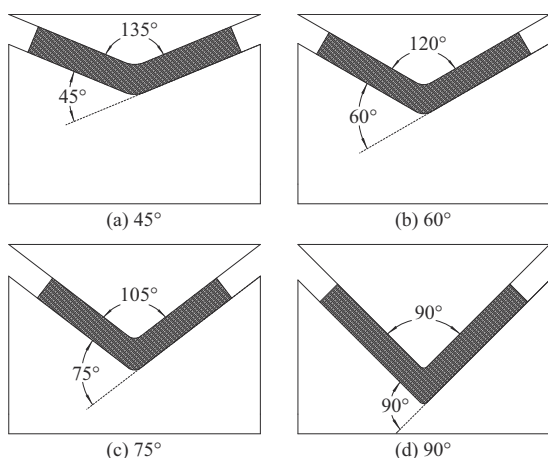


图12 4种不同弯曲角度的弯曲模具

Fig. 12 Four types of bending dies with different angles of curvature

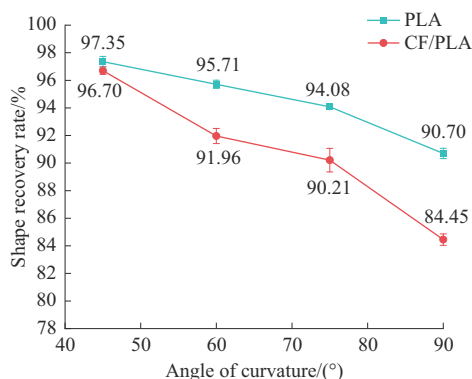


图13 弯曲角度对工件形状恢复率的影响

Fig. 13 Effect of angle of curvature on shape recovery rate of workpieces

由图13和图14可以看出,随着弯曲角度的增大,工件的形状恢复率降低,CF/PLA下降更为明显,从弯曲角度45°的96.70%下降到弯曲角度90°的84.45%,总体下降了12.67%,PLA则下降了6.83%,并且两者完成形状恢复所用的时间都相应的延长。虽然工件的弯曲变形温度高于 T_g 以上,此时材料处

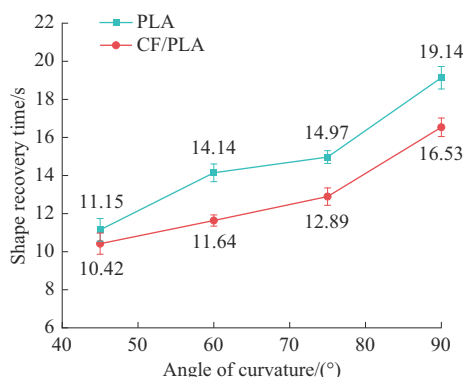


图14 弯曲角度对工件形状恢复时间的影响

Fig. 14 Effect of angle of curvature on shape recovery time of workpieces

于高弹态允许大变形,但是随着弯曲角度的增大,局部应力超过了材料的弹性极限,导致小部分的塑性变形或结构损伤,这些变形或损伤在冷却后固定,使工件再次被加热时无法恢复到原有的几何形态。同时,较大的弯曲变形会引入更高的残余应力,从而使材料需要克服更高的能量壁垒才能恢复到原状,因此导致了形状恢复率的降低和形状恢复时间的延长。

2.5 PLA和CF/PLA工件形状记忆性能对比

在实际应用中,材料的选择至关重要,不同的使用场景和需求对材料的性能各不相同。由上述各结构参数对工件形状记忆性能的影响分析结果可以看出,相较于CF/PLA,PLA工件的形状恢复率更高,但形状恢复时间更长。这是因为对于CF/PLA,碳纤维的引入,虽然显著增加了材料的刚度和强度,但同时限制了PLA分子链的运动,导致形状恢复阻力增大,形状恢复率降低。另外,CF和PLA基体的线膨胀系数不同,这使得在打印过程中材料内部容易出现较大的内应力,而这些内应力会在形状恢复阶段与热刺激所引发的驱动力相互作用从而产生干扰,这也导致了CF/PLA工件较低的形状恢复率。但CF/PLA在形状恢复时间上的表现更为突出,所需时间更短。这是因为碳纤维具有导热增强效应,碳纤维的导热系数远高于PLA基体,加热时,碳纤维作为快速传热通道,能够迅速将热量传递至PLA基体的各处,使材料整体更快达到 T_g ,从而触发分子链段的协同运动,加速形状恢复。

3 结论

(1)当弯曲变形发生在负泊松比结构长边而非正梯形短边时,具有负泊松比结构的PLA和CF/PLA工件形状恢复率提升,且形状恢复时间也相应缩短。

(2)随着结构单元壁厚的逐步增加,工件的形状恢复率呈下降趋势,形状恢复时间也相应延长。

(3)随着结构单元角度的增大,工件的形状恢复率也逐渐增加,完成形状恢复的时间缩短。

(4)弯曲变形程度即弯曲角度的增大,使得工件的形状恢复率下降,同时形状恢复时间有所延长。

(5)单因素结构参数发生变化,若引起结构相对密度减小,会使结构负泊松比增大,从而导致形状恢复率增大,反之形状恢复率减小。

(6)相较于CF/PLA,PLA工件表现出了更高的形状恢复率,但CF/PLA在恢复形状时所需时间比PLA更短。

参考文献

- [1] KYOBULA M, ADEDEJI A, ALEXANDER M R, et al. 3D inkjet printing of tablets exploiting bespoke complex geometries for controlled and tuneable drug release[J]. *Journal of Controlled Release*, 2017, 261:207–215.
- [2] PALMER C. 3D printing advances on multiple fronts[J]. *Engineering*, 2020, 6(6):590–592.
- [3] LIU L, WANG X, GUO P. Influences of three-dimensional printing to product innovation design thinking[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 100. DOI:10.1051/mateconf/201710003032.
- [4] 李述军,侯文韬,郝玉琳,等.3D打印医用钛合金多孔材料力学性能研究进展[J]. *金属学报*, 2023, 59(4):478–488.
LI Shujun, HOU Wentao, HAO Yulin, et al. Research progress on the mechanical properties of the biomedical titanium alloy porous structures fabricated by 3D printing technique[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2023, 59(4):478–488.
- [5] 刘洋子健,夏春蕾,张均,等.熔融沉积成型3D打印技术应用进展及展望[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(3):130–133.
LIU Yangzijian, XIA Chunlei, ZHANG Jun, et al. Application progress and prospect of fused deposition molding 3D-printing[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(3):130–133.
- [6] MAINIK P, SPIEGEL C A, BLASCO E. Recent advances in multi-photon 3D laser printing: Active materials and applications[J]. *Advanced materials*, 2024, 36(11). DOI:10.1002/adma.202310100.
- [7] 曾好.热致形状记忆聚合物及其复合材料的热力学性能研究[D].南京:南京航空航天大学,2020.
ZENG Hao. Research on the thermomechanical properties of thermally induced shape memory polymers and their composites[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [8] 张宪超,刘少岗,王鹏飞,等.4D打印PLA和CF/PLA蜂窝结构参数对形状记忆性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(3):112–117.
ZHANG Xianchao, LIU Shaogang, WANG Pengfei, et al. Effects of 4D printing PLA and CF/PLA honeycomb structure parameters on shape memory performance[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(3):112–117.
- [9] KAYNAK C, VARSAVAS S D. Performance comparison of the 3D-printed and injection-molded PLA and its elastomer blend and fiber composites[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2019, 32(4):501–520.
- [10] 宋伟强,刘箫华,王宏森,等. PBAT/PLA 共混物薄膜的辐射效应及形状记忆研究[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(12):27–31, 37.
SONG Weiqiang, LIU Xiaohua, WANG Hongsen, et al. Study on radiation effects and shape memory of PBAT/PLA blend membrane [J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(12):27–31, 37.
- [11] 任正鹤,何圳,陈少军.形状记忆聚合物在4D打印技术中的应用进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2023, 39(11):182–190.
REN Zhenghe, HE Zhen, CHEN Shaojun. Application progress of shape memory polymer in 4D printing technology[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2023, 39(11):182–190.
- [12] 黎晋玮,张明康,刘畅,等.4D打印成型智能软体机器人的研究进展[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(6):24–35, 49.
LI Jinwei, ZHANG Mingkan, LIU Chang, et al. A review on intelligent soft robot manufactured by 4D printing[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(6):24–35, 49.
- [13] BERTOLDI K, VITELLI V, CHRISTENSEN J, et al. Flexible mechanical metamaterials[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2. DOI:10.1038/natrevmats.2017.66.
- [14] 熊继源,戴宁,叶世伟,等.力学超材料柔性后缘设计技术[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(12):81–87.
XIONG Jiyuan, DAI Ning, YE Shiwei, et al. Design techniques for flexible trailing edges of mechanical metamaterials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(12):81–87.
- [15] 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.
- [16] 王玮婧,张伟明,郭孟甫,等.内凹-星型三维负泊松比结构设计及冲击吸能特性[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(6):75–83.
WANG Weijing, ZHANG Weiming, GUO Mengfu, et al. Design and impact energy absorption characteristics of concave-star three dimensional negative Poisson's ratio structures[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(6):75–83.
- [17] ZHANG B J, MENG Z Q, WANG Y F. 3D auxetic metamaterials with tunable multistable mechanical properties[J]. *Mechanics of Materials*, 2025, 201. DOI:10.1016/j.mechmat.2024.105217.
- [18] 姚永永.内凹负泊松比蜂窝的静动态力学性能研究[D].太原:太原理工大学,2021.
YAO Yongyong. Study on static and dynamic mechanical properties of re-entrant negative Poisson's ratio honeycomb[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [19] 沈鲁豫,温垚珂,董方栋,等. TPU 材料负泊松比结构缓冲性能研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2024, 45(2):291–299.
SHEN Luyu, WEN Yaoke, DONG Fangdong, et al. Study on buffer performance of TPU material with negative Poisson's ratio structure[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(2):291–299.