

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.015

4D打印PLA和CF/PLA蜂窝结构参数对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打印技术的完善及其与智能材料和智能结构的合理结合, 4D打印技术快速发展, 4D打印形状记忆聚合物智能结构已成为工程研究的前沿。其中, 蜂窝结构以其轻质高强、隔热缓冲等优势, 广泛应用于航空航天、建筑、汽车等领域。将蜂窝机械结构与熔融沉积成型(FDM) 3D打印工艺相结合, 通过4D打印制备聚乳酸(PLA)以及碳纤维增强聚乳酸(CF/PLA)蜂窝结构样件, 对样件实施弯曲变形, 探索蜂窝结构参数对两种样件形状记忆性能的影响。结果表明, 样件弯曲变形时, 应力施加在蜂窝结构的不同位置会使形状恢复率相差约8%, 形状恢复时间相差8~10 s; 随着蜂窝结构胞元壁厚的降低, 形状恢复率逐渐增大, 形状恢复时间逐渐减少; 弯曲变形程度的增大导致形状恢复率降低, 形状恢复时间增加; 随蜂窝胞元角度增加, 形状恢复率先升高后降低, 形状恢复时间先减少后增加, 且当胞元角度为60°时形状恢复性能最好; 在相同条件下PLA的形状恢复率比CF/PLA更高, 但CF/PLA形状恢复时间相较于PLA更短。上述结果为进一步探索PLA蜂窝智能结构与3D打印技术的结合以及PLA材料4D打印的深入研究提供一定的借鉴。

关键词: 4D打印; 蜂窝结构; 聚乳酸; 碳纤维增强聚乳酸; 形状记忆; 形状恢复率

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0112-06

Effects of 4D printing PLA and CF/PLA honeycomb structure parameters on shape memory performance

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 the reasonable combination of the 3D printing with intelligent materials and structures, 4D printing technology develops rapidly, and shape memory polymer intelligent structures with 4D printing become the frontier of engineering research. In these structures, honeycomb structures are widely used in aerospace, construction, automotive and other fields due to their advantages such as lightweight, high strength, thermal insulation and cushioning. Combining the honeycomb mechanical structure with fused deposition modeling (FDM) 3D printing process, polylactic acid (PLA) and carbon fiber reinforced polylactic acid (CF/PLA) samples with honeycomb structure were prepared by 4D printing, the effects of honeycomb structure parameters on the shape memory performances of the two samples were explored through bending the samples. The results show that, during the bending deformation of the samples, the application of stress to different positions of the honeycomb structure results in a difference of approximately 8% in the shape recovery rate and a shape recovery time discrepancy of 8–10 s. With the decrease of the wall thickness of honeycomb unit cell, the shape recovery rate gradually increases and shape recovery time decreases gradually. The increase in the degree of bending deformation leads to a decrease in the shape recovery rate and increase in the shape recovery time. With the increase of the cell angle, the shape recovery rate first increases and then decreases, and the shape recovery time first decreases and then increases, and the shape recovery performances are the best when the cell angle is 60°. Under

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

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: 2025-01-15

引用格式: 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.

the same conditions, the shape recovery rate of PLA is higher than that of CF/PLA, but the shape recovery time of CF/PLA is shorter than that of PLA. Above-mentioned results provide certain reference for further exploring the combination of PLA honeycomb intelligent structures and 3D printing technology, and future research on 4D printing.

Keywords : 4D printing ; honeycomb structure ; polylactic acid ; carbon fiber reinforced polylactic acid ; shape memory ; shape recovery rate

4D打印技术是在3D打印技术基础上发展起来的新兴智能增材技术,其智能特性使打印产品具备应激自动响应特性,可在不同激励条件下实现相应的形态及性质上的演变,是一种“动态”产品^[1]。研究人员针对4D打印技术开展了较为广泛的研究,并逐步形成较为成熟的“3D打印”+“智能材料”+“智能结构”理论体系^[2]。

目前,3D打印技术发展迅速,已构建起包含多种成型工艺的制造体系,如熔融沉积成型(FDM)、电子束成型(EBM)、墨水直写成型(DIW)以及选择性激光烧结(SLS)等^[3],已经能够实现聚合物、金属和陶瓷的复杂精细结构的成型制造,极大促进了制造业的发展。

智能材料是一种在受到外界不同因素激励时,可依靠自身响应机制自发演变调整性能或形态的材料^[4]。其中,形状记忆聚合物(SMPs)是一种能够在外界激励条件下,实现变形功能并能恢复到原始形状的高分子材料,是智能材料的一个重要分支^[5],聚乳酸(PLA)、热塑性聚氨酯(TPU)、聚己内酯(PCL)、水凝胶等都可用作SMPs。其中,PLA作为一种生物衍生聚合物,不仅具有高度的生物降解性与可堆肥特性^[6],还具备良好的形状记忆性能,能够快速实现形状恢复,具备短恢复时间和高恢复速率的优势,在众多领域展现出较为广泛的应用前景。

“3D打印”和“智能材料”是实现4D打印产品智能演变的前提,而合理地运用“智能结构”则是实现“动态”产品可控智能的关键。一些材料的力学性能是由其结构设计决定的,而不是材料固有的性能^[7]。在众多材料结构中,机械超结构表现出特殊的物理行为,通常在自然界中不可获得。机械超结构中的蜂窝结构在4D打印中展现出轻质高强、可编程变形、多功能集成等独特优势,使其在各个领域具有广泛的应用潜力。例如在航空航天领域,用于制造可变形的机翼,提升飞机性能和空间利用率;在生物医学领域,用于开发可植入的支架、药物传递的软体机器人等;在智能建筑领域,将不同功能的材料融入蜂窝结构中,可进一步优化建筑能耗

和隔热保温性能。

在过去的几年里,国内外研究人员对蜂窝结构的性能进行了探究,例如不同的形变性^[8-10]、负刚度以及负泊松比等^[11-12]。徐岩松等^[13]基于PLA的力学性能,设计了不同胞数蜂窝结构的血管支架模型,这一结构对于临床上的新型血管支架具有重要参考价值。Habib等^[14]研究了3D打印传统蜂窝在不同壁厚的面内单轴载荷下的吸能能力和压缩断裂性能。沈鲁豫等^[15]针对当前防弹头盔泡沫衬垫吸能不足的问题,将结构替换为负泊松比蜂窝结构胞元,比能量吸收相较于替换前提高了4.88倍。

目前针对蜂窝智能结构材料的研究主要集中在力学性能方面,而针对4D打印技术与智能结构材料形状记忆性能之间的关联性研究数据仍较为匮乏。笔者采用FDM 3D打印工艺,聚焦于蜂窝机械结构,选用PLA和碳纤维(CF)/PLA两种材料制成蜂窝结构样件,开展两者的形状记忆性能对比实验。通过改变蜂窝结构的弯曲应力点、壁厚、胞元角度以及变形程度研究PLA和CF/PLA 4D打印样件结构的形状记忆性能变化情况,实验全程以样件的形状恢复率与形状恢复时间作为评判指标^[16],以此衡量不同条件对实验结果的影响,为今后蜂窝结构在4D打印领域的应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA丝材:直径 $1.75\text{ mm}\pm 0.03\text{ mm}$,密度 1.24 g/cm^3 ,玻璃化转变温度(T_g) $63\text{ }^\circ\text{C}$,熔融温度 $164\text{ }^\circ\text{C}$,深圳市创想三维科技有限公司;

CF/PLA丝材:直径 $1.75\text{ mm}\pm 0.02\text{ mm}$,密度 1.20 g/cm^3 ,含碳量15%, T_g $68.58\text{ }^\circ\text{C}$,熔融温度 $168.6\text{ }^\circ\text{C}$,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;

镀铬游标量角器: $0^\circ\sim 360^\circ$,上海量具刃具厂;

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。

1.3 试样制备

胞元结构的几何参数对于材料整体结构性能起着决定性作用。图1a为蜂窝结构胞元,壁厚为 t ,胞元角度为 θ 。基于周期性排列原理,将胞元有序排列,形成初始的二维结构,如图1b所示。

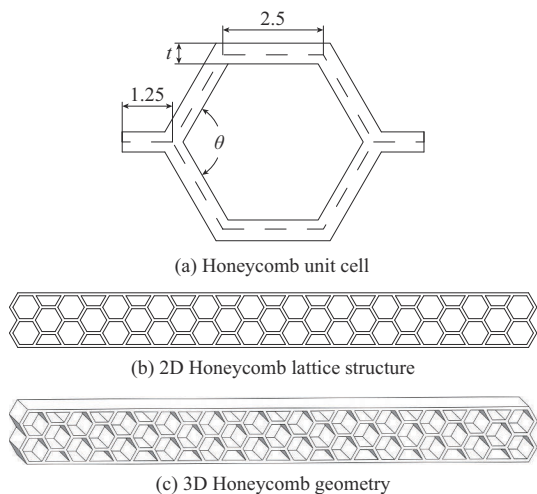


图1 蜂窝结构样件示意图

Fig. 1 Schematic drawing of sample with honeycomb structure

使用SolidWorks软件,依据实验样件的各项参数构建其三维模型,如图1c所示;完成建模后,将模型以STL格式进行保存,确保模型数据的完整性与兼容性;将STL格式模型导入至Crealty Slicer软件,依据实际打印需求精度设置各项参数,如打印速度、打印温度和填充密度等;最后,将生成的程序传输至FDM 3D打印机,使其读取程序并按照预设路径对实验样件进行逐层打印,最终完成样件的制备。

1.4 测试与表征

实验样件的形状恢复原理如图2所示。打印模型样件后,将样件放入温度超过PLA以及CF/PLA的 T_g 的热水中,使其加热软化;并利用模具施加应力 F_1 和 F_2 将样件弯曲到预定角度,完成临时形状的改变,弯曲模具模型如图3所示;随后移除热源使样件冷却到 T_g 以下并保持1 min以上,达到临时形状,并使样件在室温下再次冷却保持30 min以上;当样件再次被加热时,应力释放使得样件逐渐恢复到初始形状。最终通过测量样件恢复后的角度,计算出样件的形状恢复率 R_t ,形状恢复时间通过计时秒表得到。

形状恢复率的计算公式见式(1)。

$$R_t = (1 - \frac{\theta_s}{180}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: θ_s —形状恢复后的角度。

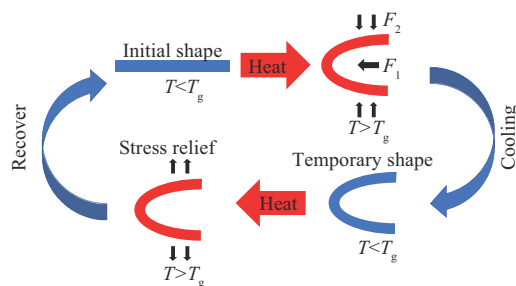


图2 形状恢复原理图

Fig. 2 Shape recovery schematic diagram



图3 自制弯曲模具

Fig. 3 Homemade bending die

2 结果与讨论

笔者聚焦于结构参数对蜂窝模型形状记忆性能的影响,从两个维度入手展开探究:一方面,对结构的关键参数进行调控,包括弯曲应力点(梯形边A/蜂窝边B,如图4所示)的位置、胞元角度、壁厚尺寸以及变形程度(以弯曲角度表征,即样件模型在弯曲赋形后相对于初始形状的弯曲角度);另一方面,引入PLA和CF/PLA两种材料对比分析,来共同探究在不同结构条件下蜂窝结构形状记忆性能的影响机制,为进一步探索智能结构在4D打印工艺领域的应用提供依据、方法以及实验支撑。实验结构参数见表1。

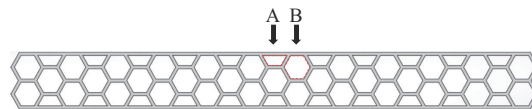


图4 弯曲应力点

Fig. 4 Bending stress point

表1 蜂窝样件结构参数

Tab. 1 Honeycomb sample structure parameters

Section in this paper	Bending stress point	Cell angle/(°)	Wall thickness/mm	Angle of curvature/(°)
2.1	A/B	60	0.5	90
2.2	A	50~70	0.5	60
2.3	A	60	0.5~1.5	45
2.4	A	60	0.5	45~90

对于FDM 3D打印样件来说,当打印结构确定后,打印参数便成为决定样件质量与性能的核心要素。无论是打印温度、基板温度、打印速度还是填充率等都直接关乎样件质量。适当的打印温度可

避免材料降解或挤出不均,而100%的填充密度能保证结构的力学性能和形状恢复能力。对于蜂窝结构这种较为广泛应用的结构形式,其打印参数应在不同场合的需求下进行调整^[17]。综上,实验所选取的打印参数见表2。

表2 蜂窝样件主要打印参数

Tab. 2 Honeycomb sample main print parameters

Print temperature/°C	Substrate temperature/°C	Print speed/(mm·s ⁻¹)	Layer height/mm	Filling density/%
205	60	30	0.2	100

2.1 弯曲应力点对形状恢复的影响

弯曲应力点对样件形状恢复率和形状恢复时间的影响如图5和图6所示。蜂窝结构最外层在承受弯曲变形的情况下,若弯曲变形优先发生在梯形边A,相较于优先发生在蜂窝边B,其最终的形状恢复率高出约8%,且完成形状恢复所需的时间也相应缩短了8~10 s。其原因在于梯形与蜂窝几何结构的差异,在蜂窝正六边形的几何形状中,相邻单元之间的角度和边长关系固定,在受到弯曲变形时,这种规则的结构会使得变形相对较为均匀地分布在多个相连的单元上,能量均匀地被整个蜂窝结构吸收,当外力消失再次加热后,应力的释放也需要

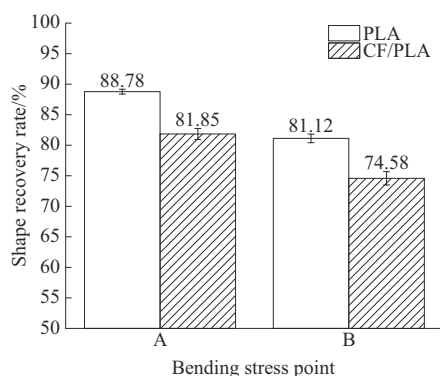


图5 弯曲应力点对样件形状恢复率的影响

Fig. 5 Effect of bending stress point on shape recovery rate of samples

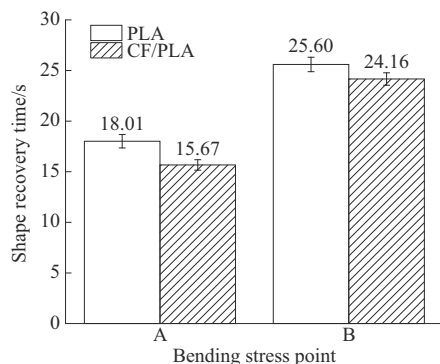


图6 弯曲应力点对样件形状恢复时间的影响

Fig. 6 Effect of bending stress point on shape recovery time of samples

整个结构的协同作用,这种能量的吸收和释放过程相对比较平缓,这也是蜂窝结构具有较好吸能特性的关键;而梯形结构不对称,其几何形状导致在弯曲变形时力的分布不均匀,当外力消失再次加热后,这些集中存储的能量在局部区域快速释放,并在弹性势能的辅助下,能够使形状更快地恢复。

由此可见,蜂窝结构在特定的应用场景下,例如运用4D打印技术对蜂窝结构进行压缩储存时,合理选择弯曲应力点至至关重要。当弯曲模具能够对变形位置加以控制,使应力作用在中间区域时,蜂窝胞元个数的奇偶性便凸显出关键作用,即当蜂窝胞元个数为偶数时,便能有效地控制弯曲应力点发生在A处。

2.2 胞元角度对形状恢复的影响

为了研究胞元几何参数对蜂窝结构形状恢复性能的影响,保持其他结构参数不变(见表1),考察了不同胞元角度(50°,55°,60°,65°,70°)对样件形状恢复率和形状恢复时间的影响,结果如图7和图8所示。可以看出,形状恢复率随胞元角度的增加先增大后减小,当胞元角度为60°时,PLA和CF/PLA样件的形状恢复率分别达到峰值,为95.60%和91.85%;同时样件完成形状恢复所用时间随胞元角度的增加先减少后增加,在胞元角度为60°时所需时间最短,分别为11.11 s和8.00 s。当蜂窝结构受到外力时,从结构力学的角度来看,正六边形的蜂窝结构在三维空间中能够形成稳定的空间框架;另外60°的胞元角度使胞元所受到的力能够均匀地分散到相邻边和相邻胞元,从而避免了应力集中,使能量主要以弹性势能的形式均匀地存储在蜂窝壁之中。因此当样件再次浸入高温环境时,这些存储的弹性势能能够有效地驱动结构恢复原状,表现出更高的形状恢复率以及较低的形状恢复时间。

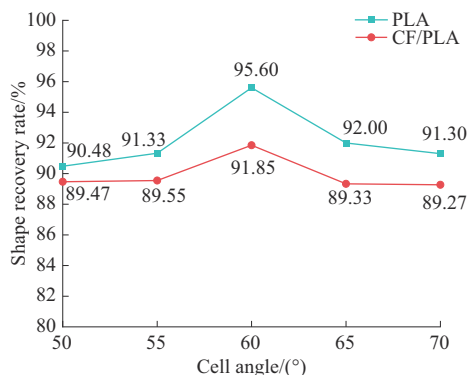


图7 胞元角度对样件形状恢复率的影响

Fig. 7 Effect of cell angle on shape recovery rate of samples

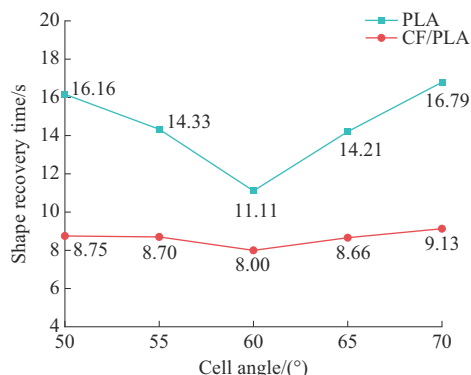


图8 胞元角度对样品形状恢复时间的影响

Fig. 8 Effect of cell angle on shape recovery time of samples

2.3 壁厚对形状恢复的影响

蜂窝结构由于其独特的性能优势,在众多领域都有广泛的应用。在这些应用中,蜂窝结构的刚度是其发挥卓越性能的关键之一。从材料力学的角度来看,刚度大的材料在相同的外力作用下变形较小,对于蜂窝结构来说,其刚度与壁厚的三次方成正比^[18]。壁厚的变化也会直接引发蜂窝结构孔隙率改变,进而影响蜂窝结构的渗透性、保温性等。因此,研究壁厚对蜂窝结构样品形状记忆性能的影响,可完善蜂窝的结构参数,推动蜂窝结构在4D打印中的深入应用。

讨论了5种胞元壁厚(0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 mm)对样品形状记忆性能的影响,其他参数见表1,结果如图9和图10所示。可以看出,随着壁厚的增加,样品的形状恢复率呈下降趋势。且当壁厚大于1.00 mm时,CF/PLA的形状恢复率表现出更为显著的下降趋势;与之相比,PLA的形状恢复率随着壁厚的增大下降较为平缓。另外,随着壁厚的增加,样品完成形状恢复所用时间呈增加趋势。这是因为在打印过程中,较大的壁厚尺寸会产生更大的温度梯度,导致内部应力分布不均匀,热量从内部

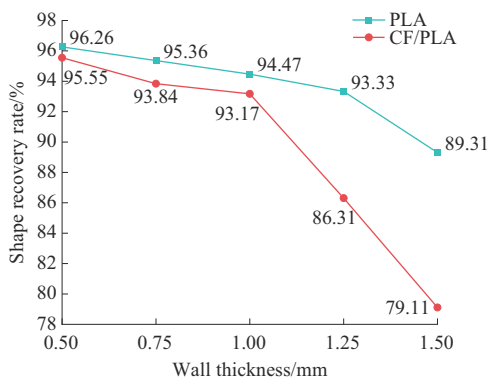


图9 壁厚对样品形状恢复率的影响

Fig. 9 Effect of wall thickness on shape recovery rate of samples

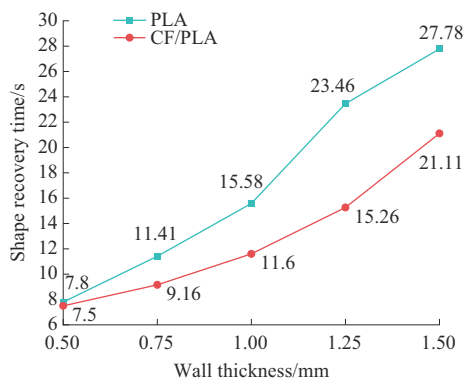


图10 壁厚对样品形状恢复时间的影响

Fig. 10 Effect of wall thickness on shape recovery time of samples

向外散发需要经过更长的路径,当样品被赋形后,这些内部应力会与恢复形状的驱动力相互作用,导致形状恢复率的降低以及恢复时间的延长。

2.4 变形程度对形状恢复的影响

蜂窝结构的中空特性使其在受到冲击时,能够起到良好的缓冲作用,具有优异的吸能减震性能。笔者为进一步探究蜂窝结构变形程度对其形状恢复性能的影响,以样品模型在弯曲赋形后相对于初始形状的弯曲角度来表征变形程度,使用PLA以及CF/PLA两种材料,讨论了4种弯曲角度(45°, 60°, 75°, 90°)对蜂窝结构形状记忆性能的影响,其他参数设置见表1,实验结果如图11、图12所示。在受到45°弯曲变形时,PLA和CF/PLA形状恢复率分别达到96.11%和94.63%,在90°弯曲变形时形状恢复率最低,分别为88.99%和82.78%。两种材料都显示出大致相同的规律,样品变形程度的增大导致其形状恢复率降低,因为在这一过程中,随着变形程度的增加,样品内部的破坏程度也逐渐增大,储存的应力与弹性势能减少,同样导致样品的弯曲变形程度越大,所需要的形状恢复时间也相应地延长。

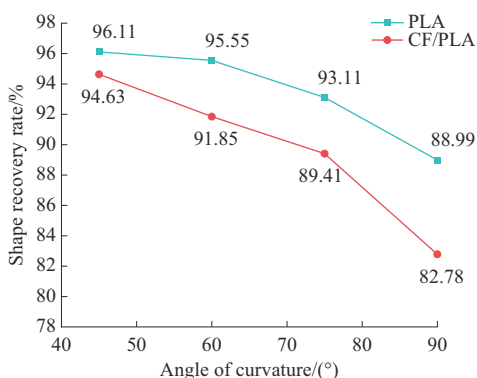


图11 变形程度对样品形状恢复率的影响

Fig. 11 Effect of deformation degree on shape recovery rate of samples

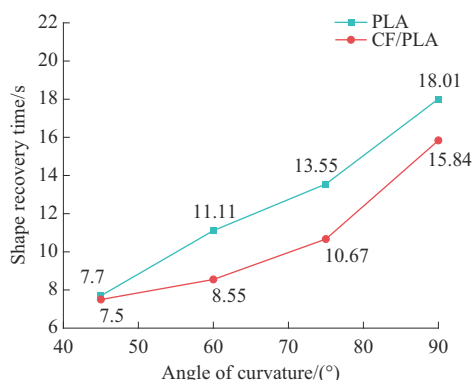


图12 变形程度对样件形状恢复时间的影响

Fig. 12 Effect of deformation degree on shape recovery time of samples

2.5 PLA与CF/PLA形状记忆性能对比

对比图5~图12可以发现,与PLA相比,CF/PLA的形状恢复率更低,但形状恢复时间更短。这是因为,CF与PLA基体的线膨胀系数存在差异,在打印过程中材料内部会产生较大的内应力,这些内应力在形状恢复过程中与热刺激产生的驱动力相互干扰,导致PLA相较于CF/PLA表现出了更高的形状恢复率,但CF/PLA在形状恢复时间上比PLA更具优势,所需时间更短。因此,在实际应用中,可依据不同的使用场景与需求,有针对性地合理选择材料,以实现最佳的使用效果。

3 结论

(1)在蜂窝结构发生弯曲变形的过程中,当应力作用在梯形边而非蜂窝边时,PLA和CF/PLA蜂窝结构样件最终的形状恢复率会显著提升。以弯曲变形90°为例,两者的形状恢复率相差约8%;同时,形状恢复时间也会相应缩短,恢复时间相差8~10 s。

(2)PLA和CF/PLA蜂窝结构样件的形状恢复率随胞元角度增加先增大后减小,形状恢复时间随胞元角度增加先减少后增加。当胞元角度为60°时,蜂窝样件的形状恢复率达到最高,且形状恢复所需的时间达到最短。

(3)胞元壁厚的增加使得PLA和CF/PLA蜂窝结构样件的形状恢复率降低,形状恢复时间也相应延长。

(4)随着弯曲角度即变形程度逐步增大,PLA和CF/PLA蜂窝结构样件的形状恢复率呈下降趋势,同时形状恢复时间有所延长。

(5)通过对PLA以及CF/PLA的形状记忆性能对比分析发现,PLA的形状恢复率高于CF/PLA,但形状恢复所需时间更长。

参考文献

- [1] KUANG X, ROACH D J, WU J T, et al. Advances in 4D printing: Materials and applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(2). DOI:10.1002/adfm.201805290.
- [2] 王林林,冷劲松,杜善义. 4D打印形状记忆聚合物及其复合材料的研究现状和应用进展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 227-244.
WANG Linlin, LENG Jinsong, DU Shanyi. 4D printing of shape memory polymers and their composites: Research status and application progress[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6):227-244.
- [3] 史玉升,伍宏志,闫春泽,等. 4D打印——智能构件的增材制造技术[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(15):1-25.
SHI Yusheng, WU Hongzhi, YAN Chunze, et al. Four-dimensional printing—The additive manufacturing technology of intelligent components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(15): 1-25.
- [4] 邱婧,吴国栋,赵凤艳,等. 新材料在军事可穿戴设备中的应用[J]. *军民两用技术与产品*, 2020(10):41-45.
QIU Jing, WU Guodong, ZHAO Fengyan, et al. Application of new materials in wearable military equipment[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2020(10):41-45.
- [5] 冯韬,孟正华,郭巍. 4D打印智能材料及产品应用研究进展[J]. *数字印刷*, 2022(3):1-16.
FENG Tao, MENG Zhenghua, GUO Wei. Research progress on 4D printing intelligent materials and product applications[J]. *Digital Printing*, 2022(3):1-16.
- [6] BARLETTA M, GISARIO A, MEHRPOUYA M. 4D printing of shape memory polylactic acid (PLA) components: Investigating the role of the operational parameters in fused deposition modeling (FDM) [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 61: 473-480.
- [7] REN L Q, WU Q, LI J Y, et al. 4D printing of customizable and reconfigurable mechanical metamaterials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 270. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2024.109112.
- [8] DE JONGE C P, KOLKEN H M A, ZADPOOR A A. Non-auxetic mechanical metamaterials[J]. *Materials*, 2019, 12(4). DOI:10.3390/ma12040635.
- [9] REN X, DAS R, TRAN P, et al. Auxetic metamaterials and structures: A review[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(2). DOI:10.1088/1361-665X/aaa61c.
- [10] BALAN P M, MERTENS A J, BAHUBALENDRUNI M V A R. Auxetic mechanical metamaterials and their futuristic developments: A state-of-art review[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 34. DOI:10.1016/j.mtcomm.2022.105285.
- [11] LI H, LI Y C, LI J C. Negative stiffness devices for vibration isolation applications: A review[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(8):1 739-1 755.

(下转第126页)