

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.016

4D打印参数对三层结构聚合物形状恢复性能的影响

王鹏飞, 刘少岗, 张宪超, 刘泽鹏

(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: 形状记忆聚合物(SMPs)是一种能够根据外界刺激而产生形变的智能材料,因其自适应、自修复特性而被广泛应用于4D打印中。通过4D打印技术对不同聚合物进行三层结构打印,分析了填充图案、弯曲程度以及打印速度3个参数对多层结构聚合物形状记忆性能的影响。用4D打印将模件打印出来进行弯曲恢复实验,将模件的形状恢复率作为评价标准。实验采用了T-P-T[即第一层为聚氨酯(TPU),第二层聚乳酸-碳纤维(PLA-CF),第三层为TPU]和P-T-P[即第一层为PLA-CF,第二层TPU,第三层为PLA-CF]两种打印结构。结果表明,最外层材料很大程度上决定了打印件的形状恢复性能,随着夹层TPU层数的增加,模件P-T-P的形状恢复率呈逐渐增加的趋势,而模件T-P-T中夹层PLA-CF的层数超过10层后其形状恢复率开始出现下降的趋势;填充图案对打印模件形状恢复率的影响在于:填充图案为内六角时模件的形状恢复率最高,而填充图案为网格时模件的形状恢复率最低;随着弯曲程度的增加,两种打印模件T-P-T和P-T-P的形状恢复率都逐渐下降,弯曲程度由135°增加到180°时,打印模件P-T-P的形状恢复率下降最快,而三个弯曲角度(90°, 135°, 180°)下打印模件T-P-T的形状恢复率都在90%以上;P-T-P打印模件的形状恢复率随着打印速度的增大而减小,模件T-P-T的形状恢复率随着打印速度的增大呈现出先增大后减小的趋势;与T-P-T相比,打印参数对模件P-T-P形状恢复率的影响更大。上述结果对进一步分析三层结构与4D打印技术结合的深入研究提供了一定借鉴。

关键词: 形状记忆聚合物;4D打印;三层结构;形状恢复率;形状记忆性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0122-07

Effect of 4D printing parameters on shape recovery properties of three-layer polymers

WANG Pengfei, LIU Shaogang, ZHANG Xianchao, LIU Zepeng

(Tianjin 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 : Shape memory polymers (SMPs) are smart materials that can deform according to external stimuli, and are widely used in 4D printing because of their adaptability and self-healing. The three-layer structure of different polymers was printed by 4D printing technology, and the effects of three parameters, namely filling pattern, bending degree and printing speed, on the shape memory performance of multilayer polymers were analyzed. The module was printed out by 4D printing for bending recovery experiment, and the shape recovery rate of the module was used as the evaluation criterion. In the experiment, the three-layer printing structure of T-P-T which included the first layer of polyurethane (TPU), the second layer of polylactate-carbon fiber (PLA-CF), and the third layer of TPU and P-T-P which included the first layer of PLA-CF, the second layer of TPU, and the third layer of PLA-CF were adopted. The results show that the shape recovery performance of the printed parts is largely determined by the outermost material. With the increase of the number of interlayer TPU layers, the shape recovery rate of the module P-T-P increases gradually, while the shape recovery rate of the module T-P-T begins to decrease after the number of interlayer PLA-CF layers exceeds 10 layers. The influence of the filling pattern on the shape recovery rate of the printed module is that the shape recovery rate of the module is the highest when the filling pattern is the inner hexagon, and the shape recovery rate of the module is the lowest when the filling pattern is the grid. With the increase of the bending degree, the shape recovery rate of the two printing modules T-P-T and P-T-P gradually

通信作者: 刘少岗,副教授,主要从事公差优化设计、3D打印等研究

收稿日期: 2025-05-20

引用格式: 王鹏飞,刘少岗,张宪超,等.4D打印参数对三层结构聚合物形状恢复性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(8):122-128.

WANG Pengfei, LIU Shaogang, ZHANG Xianchao, et al. Effect of 4D printing parameters on shape recovery properties of three-layer polymers[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 122-128.

decrease. When the bending degree increases from 135° to 180° , the shape recovery rate of the printed module P-T-P decreases the fastest, while the shape recovery rate of the printed module T-P-T at three bending angles of 90° , 135° , 180° is more than 90%. The shape recovery rate of P-T-P decreases with the increase of printing speed, and the shape recovery rate of modular T-P-T increases first and then decreases with the increase of printing speed. Compared with T-P-T, the printing parameters have the great influence on the shape recovery rate of the modular P-T-P. The above results provide the reference for further analysis of the combination of three-layer structure and 4D printing technology.

Keywords : shape memory polymer ; 4D printing ; three-layer structure ; shape recovery rate ; shape memory performance

3D打印又被称为增材制造^[1],是一种层层堆积材料形成所需物体的三维技术^[2],被广泛应用于各个领域。近年来随着工业的发展,普通的3D打印产品越来越难以满足“动态”的要求^[3]。4D打印在3D打印的基础上增加了时间维度^[4],用3D打印将材料打印成模件,给其一个特定的外部刺激,它的性能、形状、功能随时间而发生改变^[5-6]。形状记忆聚合物(SMPs)^[7]是具有形状记忆能力的智能材料,是目前4D打印中应用最广泛的材料^[8]。目前研究较多的聚合物主要包括环氧树脂、氰酸酯^[9]、热塑性聚氨酯(TPU)^[10]、聚乳酸(PLA)^[11]、丙烯酸叔丁酯-脂肪族聚氨酯二丙烯酸酯^[12]等,其中PLA和TPU材料最受欢迎^[13]。TPU具有弹性高、柔性好的性能,PLA在熔融沉积成型(FDM)技术中应用最广,具有较好的生物相容性和加工性能等^[14-16]。碳纤维(CF)具有密度大、韧性好等优点,将CF与PLA融合会形成一种力学性能和生物相容性良好的PLA/CF复合材料^[17]。SMPs一般由FDM进行3D打印^[18]。FDM因具有设备成本低、操作简单、维修方便、材料适用性广等优势,被广泛应用于生产小型零件、模具等^[19]。

打印参数是影响多层结构聚合物形状恢复性能的重要因素。国内外的研究学者对多层结构方面进行了深入研究。Kechagias等^[20]制备了多个夹层结构的打印件,在打印过程中改变了夹层结构的材料,研究表明夹层结构的拉伸强度和拉伸弹性模量有了很大的提升,核心材料可以3D打印成轻质图案,从而实现打印件轻量化。Wang等^[21]开发出一种独特的多层结构,该结构基于静电纺丝碳纳米纤维。研究表明这种结构不仅在充放电过程中实现了电子/离子的双连续传输,还为离子吸附提供了较大的表面积,显著提高电容性能。Wang等^[22]研究了不同夹层尺寸和高度对蜂窝夹层结构压缩性能影响,研究表明这种结构材料的抗压能力和能量吸收率最高可达到38.1 MPa和25.4 kJ/kg。

综上所述,虽然国内外的学者对多层结构进行

了一系列的研究,但主要研究集中在了力学性能和电化学性能,对于3D打印多层结构聚合物的参数与形状记忆性能之间的研究尚不充分。因此,笔者采用FDM打印技术,用PLA/CF和TPU作为实验材料,两种材料分别作为打印件的基板与夹层,通过调整多层结构聚合物的FDM打印参数,包括填充图案、弯曲程度以及打印速度,以探究其对打印件形状恢复性能的影响,实验中分析模件的形状恢复率作为评价的标准。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA/CF丝材:直径为 (1.75 ± 0.02) mm,密度为 (1.2 ± 0.05) g/cm³,CF质量分数为15%,珠海市三绿实业有限公司;

TPU丝材:直径为 (1.75 ± 0.02) mm,密度为 (1.23 ± 0.05) g/cm³,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熔融沉积3D打印机,深圳市极光尔沃科技有限公司;

镀铬游标量角器:测量角度为 $0^\circ\sim360^\circ$,上海量具刃具厂;

计时秒表:833金属秒表,亚速旺(上海)商贸有限公司。

1.3 试样制备

使用Solid Works软件,按照设计好的各项参数进行三维建模,建立完成后以STL格式保存,将文件导入至Creality Slicer软件中进行切层分析,为每一层进行打印程序设计,最后将程序导入到FDM 3D打印机中,对模件打印时进行参数设置。最后,打印机读取程序对模件进行层层堆积打印。打印完成的模件尺寸为52.5 mm×10 mm×2 mm的哑铃状物体(打印件总层数为20层)。打印件模型如图1所示。实验中采用了T-P-T和P-T-P两种三层结构。其中,T-P-T三层结构为:夹层部分是PLA-CF材料,最外层的基板部分是TPU材料;P-T-P三层结构为:

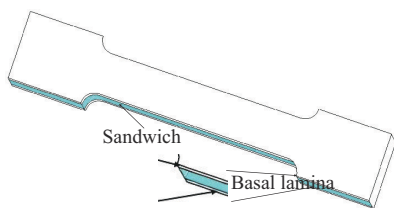


图1 样件模型

Fig. 1 Sample model

夹层部分是TPU材料,最外层的基板部分是PLA-CF材料。为方便以下实验过程,采用各材料的首字母为简称。

1.4 试验设计

为探究打印参数对三层结构模件形状恢复性能的影响,选择了填充图案、弯曲程度、打印速度3个参数以分析其对三层结构模件形状恢复性能的影响。实验样件形状恢复原理如图2所示。将打印完成的模件置于室温下,采用水浴加热刺激的方式,将模件放置于高于玻璃化转变温度的水中1 min,使其加热软化,利用模具使其固定好临时形状1 min,之后撤去外力静置10 min,最后将模件放置在热水中直至形状恢复到不再变化。

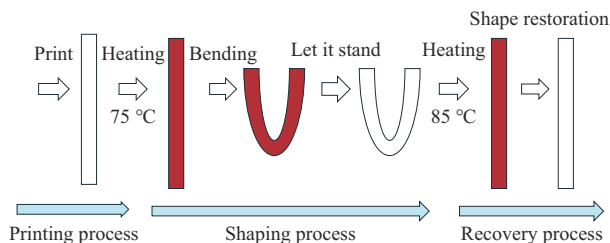


图2 三层结构模件形状恢复原理图

Fig. 2 Schematic diagram of shape restoration of three-layer structure module

1.5 测试与表征

试验结束后使用游标量角器测量形状恢复后打印件的角度,恢复后的角度 θ 如图3所示。实验数据采取多次实验求取平均值以确保实验精度,减少误差。通过恢复后的角度 θ 来测量打印件的形状恢复率 R_f ,见式(1)。

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

式中: θ 为样件恢复后的角度。

图3 模件恢复后的角度 θ Fig. 3 Angle θ after module recovery

2 结果与讨论

2.1 不同材料夹层层数对模件形状恢复性能的影响

实验讨论了TPU和PLA-CF作为夹层部分时,不同材料夹层层数对模件形状恢复性能的影响。保持设定的固定参数(打印速度60 mm/s,打印图案网格,弯曲程度180°,填充率100%,赋型温度75 °C,恢复温度85 °C)。不同材料夹层层数对TPU/PLA-CF模件形状恢复性能的影响如图4所示。当层数为0~10层时,打印件T-P-T的形状恢复率无太大波动,打印件P-T-P的形状恢复率随着夹层TPU层数增加而缓慢升高;当层数超过10层后,T-P-T样件的形状恢复率开始逐渐降低,而P-T-P样件的形状恢复率上升的程度比较快。当0~16层时,打印件T-P-T的形状恢复率高于打印件P-T-P的形状恢复率;当超过16层后,后者的形状恢复率高于前者。从实验结果可以看出,最外层材料很大程度上决定了打印件的形状恢复性能。因为TPU弹性大、储存应力较多,PLA-CF中因有较多含量的CF存在,CF热膨胀系数比较低且具有一定的刚度,模件形变时会抑制其形变过程,从而减少应力。另外较多含量的CF还会阻碍聚合物分子链的运动,这会导致在恢复过程中影响了部分应力的释放。这就使得PLA-CF所释放的应力减少,从而降低形状恢复性能^[23-24]。在10层时,两种打印件的形状恢复率和韧性能力都比较高,所以选取夹层层数为10层左右的打印模件T-P-T和P-T-P。为探究打印参数对三层结构模件形状恢复性能的具体影响,下面实验将选择改变打印参数来展开深入研究。

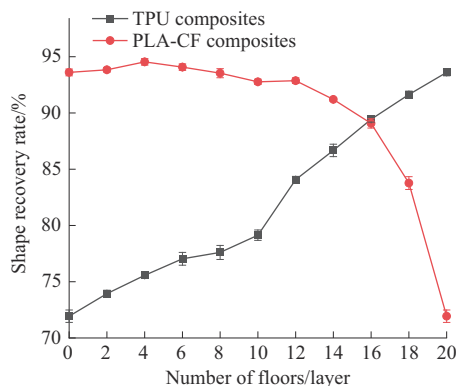


图4 不同材料夹层层数对打印件形状恢复性能的影响

Fig. 4 Influence of number of sandwich layers of different materials on shape recovery performance of prints

2.2 填充图案对三层结构形状恢复性能的影响

填充图案是指打印模件内部设置的打印路径。讨论了3种填充图案(网格、同心圆、内六角)对打印模件形状恢复性能的影响,固定其他的参数不变(打印速度 60 mm/s,弯曲程度 180°,填充率 100%,赋型温度 75 °C,恢复温度 85 °C)。3种填充图案如图 5 所示。

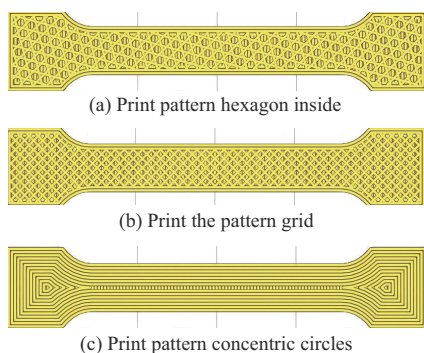


图5 三种模件填充图案

Fig. 5 Three types of modular filling patterns

图 6 和图 7 分别为填充图案对打印模件 P-T-P 和 T-P-T 形状恢复性能的影响。由图 6 和图 7 可看出,打印图案为内六角的模件形状恢复率最高,而打印图案为网格模件形状恢复率最低。打印图案为同心圆和内六角的模件 P-T-P 的形状恢复率随夹层层数增加而增长的比较缓慢,两种打印模件的形状恢复率相差不到 1%,即恢复后的角度相差不到 2°。当打印图案为同心圆和内六角时,夹层 TPU 层数增加对形状恢复率无太大的影响。而当模件 T-P-T 填充图案为三种图案时,随着夹层 PLA-CF 层数增加都呈现出比较明显的下降趋势。由于在打印过程中,打印图案的不同导致丝材在不同方向有不同的拉伸,模件在不同方向上的应力也不同,这就使得打印件形状恢复性能也有所不同。打印图案为网格时因不同方向上力学性能差异比较大,应力集中在了节点处,引起局部产生裂纹,且应力集中的填充图案,容易造成材料结合面脱黏、裂纹等,会永久削弱界面恢复性能,导致形状恢复性能降低。填充图案为同心圆时,模件有较高的径向弹性势能,但每层之间的结合比较弱。打印图案为内六角时,应力分布均匀且此结构具有较高的存储应力能力,因此具有较高的恢复率。内六角的夹角为 120°,而网格内的夹角为 90°,这就使得网格要承受高弯曲应力,易引发裂纹或节点处剪切错位,因此内六角的形状恢复率高于网格的形状恢复率。

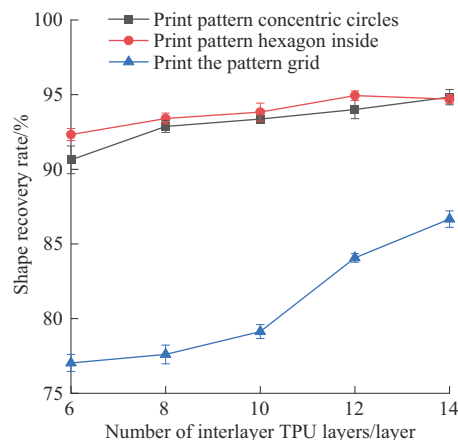


图6 填充图案对打印模件 P-T-P 形状恢复性能影响

Fig. 6 Effect of filling pattern on shape recovery performance of printed module P-T-P

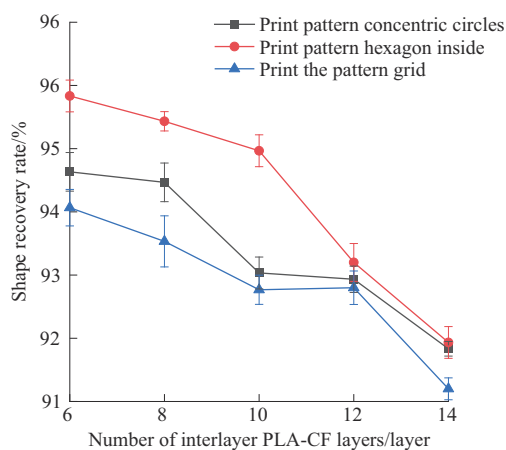


图7 填充图案对打印模件 T-P-T 形状恢复性能影响

Fig. 7 Effect of filling pattern on shape recovery performance of printed module T-P-T

2.3 弯曲程度对三层结构形状恢复性能的影响

弯曲程度是指赋予临时形状的弯曲角度。实验时保持其他参数不变(打印速度 60 mm/s,打印图案网格,填充率 100%,赋型温度 75 °C,恢复温度 85 °C)。讨论了弯曲程度为 90°,135°,180°时打印模件的形状恢复性能,结果如图 8 和图 9 所示。由图 8 和图 9 可以看出,随着打印件弯曲程度的增加,形状恢复率呈下降趋势。打印件 P-T-P 弯曲角度从 135°增加到 180°时,形状恢复率下降最快,在夹层 TPU 层数为 6 层时,其恢复率下降最快,从 92.86% 下降到 77.03%。而打印模件 T-P-T 随着弯曲程度增加其形状恢复率虽有下降的趋势,但下降的程度比较小,三个弯曲角度的打印模件 T-P-T 的形状恢复率都在 90% 以上。这是因为随着弯曲程度的增加,打印件对内部结果破坏程度逐渐增大,减少了其应力的存储能力,这就导致了形状恢复性能的降低^[25]。

弯曲角度的增大还会使材料黏结层间滑移从而导致恢复性能降低。当最外层材料为TPU时,由于TPU柔性好、弹性高,弯曲程度增加对其损害程度较小,所以三个弯曲角度打印模件T-P-T的形状恢复率无太大差距。

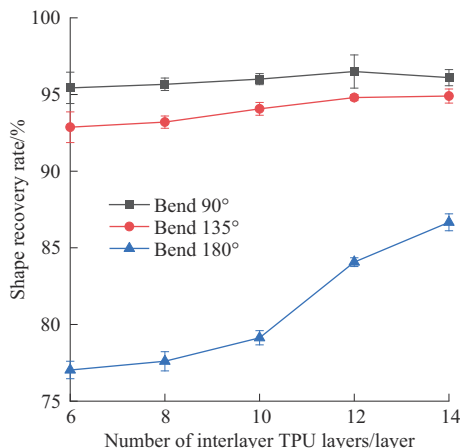


图8 弯曲程度对打印模件P-T-P形状恢复性能的影响

Fig. 8 Effect of bending degree on shape recovery performance of printed module P-T-P

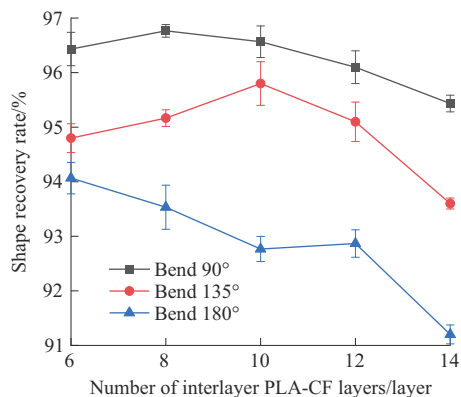


图9 弯曲程度对打印模件T-P-T形状恢复性能的影响

Fig. 9 Effect of bending degree on shape recovery performance of printed module T-P-T

2.4 打印速度对三层结构形状恢复性能的影响

打印速度指在打印过程中喷嘴在平台上移动的快慢程度。讨论了50, 60, 70 mm/s三个打印速度对打印模件形状恢复性能的影响,保持其他参数不变(打印图案网格,填充率100%,赋型温度75℃,弯曲角度180°,恢复温度85℃),结果如图10和图11所示。随着打印速度的增加,P-T-P的形状恢复率逐渐下降,夹层层数6~12层时,50 mm/s与60 mm/s两种打印速度下模件的形状恢复率相差较大;而夹层数为14层时,60 mm/s与70 mm/s打印速度下模件的形状恢复率相差较大。模件T-P-T的形状恢复率随着打印速度的增加呈现出先增长后下降的趋势,

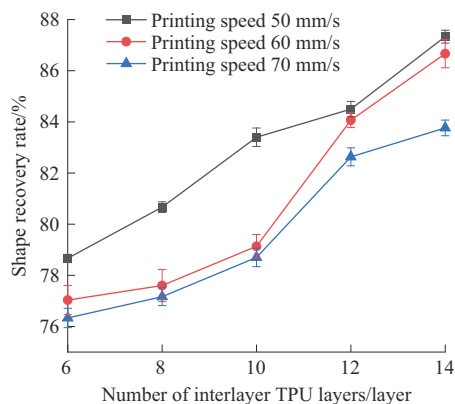


图10 打印速度对打印模件P-T-P形状恢复性能的影响

Fig. 10 Effect of printing speed on shape recovery performance of P-T-P printed specimens

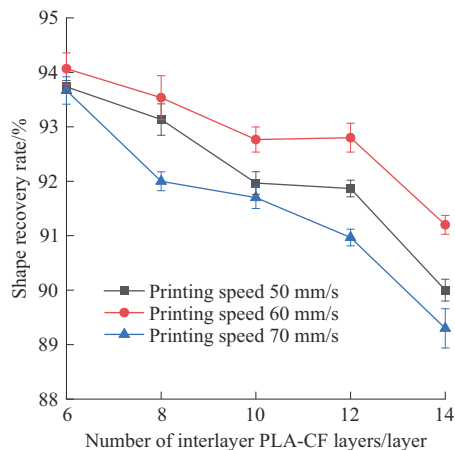


图11 打印速度对打印模件T-P-T形状恢复性能的影响

Fig. 11 Effect of printing speed on shape recovery performance of T-P-T printed specimens

当打印速度为60 mm/s时,模件T-P-T的形状恢复性能最好。在材料被挤到打印平台上时对材料有一个拉伸的过程,当最外层材料为PLA-CF时,打印速度的提高会使熔融长丝拉伸过快,导致拉丝不均匀,从而造成界面孔隙、缺陷增多,使得样品层间连接变差,存储应力减少,形状恢复率从而降低^[26]。另外,高速打印导致材料间结合较弱使得在弯曲实验时层间更容易发生滑移。而当最外层材料为TPU时,TPU弹性高且在拉伸的过程中会产生一些内应力,当打印速度过高时,层间结合不紧密从而导致形状恢复率降低。

2.5 模件T-P-T与P-T-P的形状恢复性能对比

图12为模件形状变化对比图。如图12所示,上方为填充图案对形状恢复性能的影响,中间为弯曲程度对形状恢复性能的影响,下方为打印速度对形状恢复性能的影响。由图12可知,模件T-P-T形状恢复率无明显变化,而P-T-P形状恢复率变化比

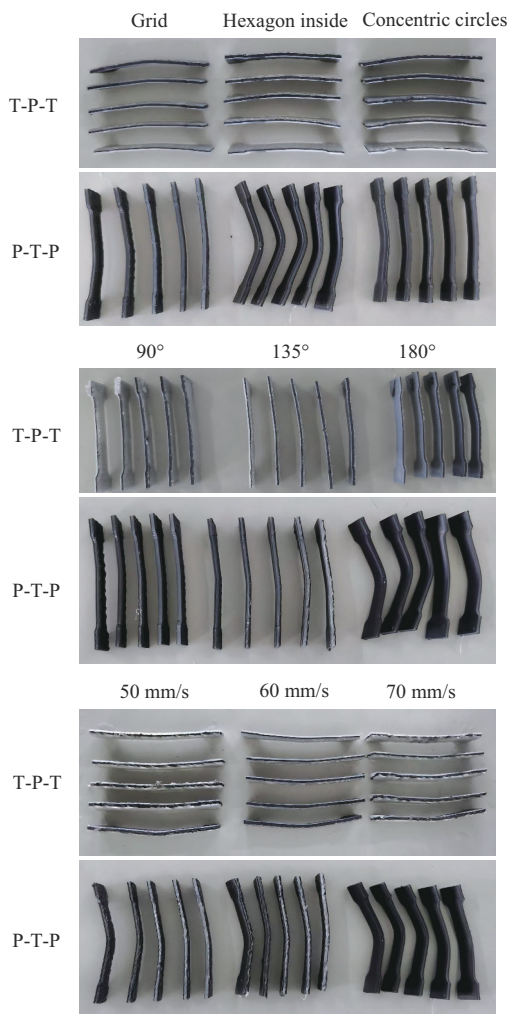


图12 模块形状变化对比图

Fig. 12 Comparison of shape change of module

较大。在相同条件下,与模块T-P-T相比,P-T-P的形状恢复率易受打印参数影响且形状恢复率高于T-P-T;当打印参数为填充图案和弯曲角度时,形状恢复率变化趋势一致,对两种模块的形状恢复性能有相似的影响。刚性的填充图案会造成节点处产生应力集中,导致材料黏结面结合强度较低,从而导致形状恢复性能降低。当弯曲角度过大时,会对模块内部造成损坏,层间会产生裂纹,导致层间黏合性有缺陷,从而导致形状恢复率降低。当打印速度过快时,会造成材料黏结面的孔隙、缺陷增多,这些都会削弱模块的形状恢复性能。TPU和PLA-CF基体的线膨胀系数存在较大的差异,会在材料打印时产生较大的内应力,这些内应力会增强材料的恢复性能,当最外层材料为PLA-CF时,模块恢复率较低且易受参数的影响。

3 结论

(1)最外层的材料在一定程度上影响了打印件的形状恢复性能,当夹层层数在0~10层时,打印模块T-P-T的形状恢复率无太大波动,而打印模块P-T-P形状恢复率缓慢上升。当层数超过10层后,模块T-P-T形状恢复率开始下降,模块P-T-P的形状恢复率增长得十分明显。

(2)当填充图案为内六角时,模块形状恢复率最高,而填充图案为网格时形状恢复率最低。填充图案为同心圆和内六角的模块P-T-P随着夹层TPU层数增加,其形状恢复率无太大波动,而三种填充图案的模块T-P-T的形状恢复率都随着夹层PLA-CF层数增加呈现出明显的下降趋势。

(3)随着弯曲程度的增加,两种打印模块T-P-T和P-T-P的形状恢复率都逐渐下降,弯曲程度由135°增加到180°时,模块P-T-P的形状恢复率相差最大,在三种弯曲角度下,模块T-P-T的形状恢复率均呈现下降趋势,但恢复率值均高于90%。

(4)随着打印速度的增加,模块P-T-P的形状恢复率逐渐下降,在打印速度为50 mm/s时形状恢复率最好;而T-P-T的形状恢复率呈现出先升高后降低的趋势,打印速度为60 mm/s时形状恢复率最好。

(5)通过P-T-P与T-P-T的形状恢复率对比分析可以看出,P-T-P的形状恢复性能易受打印参数的影响,当打印参数为填充图案和弯曲角度时,对P-T-P与T-P-T形状恢复性能的影响相同。

参考文献

- [1] 王瑞晨,刘秀军,张静,等.刺激响应形状记忆材料的4D打印及其研究进展[J].功能材料,2021,52(10):10 069-10 074.
WANG Ruichen, LIU Xiujun, ZHANG Jing, et al. Recent progress in 4D printing of stimulus-responsive shape memory materials[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(10): 10 069-10 074.
- [2] 楼航飞,陈文刚,张伟,等.基于增材制造的仿生吸能结构研究现状与展望[J].复合材料科学与工程,2025(3):147-156.
LOU Hangfei, CHEN Wengang, ZHANG Wei, et al. Current status and prospects of additive manufacturing in biomimetic energy absorbing structures[J]. Composites Science and Engineering, 2025 (3): 147-156.
- [3] SHINDE S, MANE R, VARDIKAR A, et al. 4D printing: From emergence to innovation over 3D printing[J]. European Polymer Journal, 2023, 197. DOI:10.1016/J. EURPOLYMJ. 2023. 112356.
- [4] 祁忻,李昊,陈文刚,等.4D打印刺激响应形状记忆智能材料的研究现状与展望[J].功能材料,2023,54(3):3 071-3 078.
QI Xin, LI Hao, CHEN Wengang, et al. Research status and prospect of 4D printing stimuli-responsive shape memory smart materi-

- als[J]. *Journal of Functional Materials*, 2023, 54(3):3 071–3 078.
- [5] 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.
- [6] ISLAM R, MAPARATHNE S, CHINWANGSO P, et al. Review of shape-memory polymer nanocomposites and their applications[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(5). DOI:10.3390/AP15052419.
- [7] DIXIT G, PANDEY P M. Experimental investigations of temperature-sensitive shape memory polymer composites for 4D printing[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2025, 38(2):537–563.
- [8] 冯茹,许雅惠,韩慧,等. 4D打印形状记忆高分子的打印方法、驱动原理、变形模式和应用[J]. *材料导报*, 2021, 35(5):5 147–5 157.
- FENG Ru, XU Yahui, HAN Hui, et al. Printing method, driving mechanism, deformation mode and application of 4D printing shape memory polymers[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(5):5 147–5 157.
- [9] LUO L, ZHANG F H, LENG J S. Shape memory epoxy resin and its composites: From materials to applications[J]. *Research*, 2022, 2022. DOI:10.34133/2022/9767830.
- [10] WANG F, JIANG M, PAN Y, et al. 3D Printing photo-induced lignin nanotubes/polyurethane shape memory composite[J]. *Polymer Testing* 2023 119. DOI: 10.1016/J. POLYMERTESTING.2023.107934.
- [11] SESSINI V, SALARIS V, OLIVER-CUENCA V, et al. Thermally-activated shape memory behavior of biodegradable blends based on plasticized PLA and thermoplastic starch[J]. *Polymers*, 2024, 16(8). DOI:10.3390/POLYM16081107.
- [12] ZHANG B, LI H G, CHENG J X, et al. Mechanically robust and UV-curable shape-memory polymers for digital light processing based 4D printing[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(27). DOI: 10.1002/adma.202170210.
- [13] 陈彦君,赵冬梅,乌日开西·艾依提. 3D打印CAF/TPU复合材料的工艺参数优化[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(1):98–104.
- CHEN Yanjun, ZHAO Dongmei, AIYITI Wurikaixi. Optimization of process parameters for 3D printing CAF/TPU composite materials[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(1):98–104.
- [14] SOLOMON I J, SEVVEL P, GUNASEKARAN J. A review on the various processing parameters in FDM[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37:509–514.
- [15] 陈庆来. 3D打印技术在塑料工业中的应用[J]. *塑料科技*, 2019, 47(2):91–94.
- CHEN Qinglai. Application of 3D printing technology in plastics industry[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(2):91–94.
- [16] CORAPI D, MORETTINI G, PASCOLETTI G, et al. Characterization of a Polylactic acid (PLA) produced by Fused Deposition Modeling (FDM) technology[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2019, 24:289–295.
- [17] 胡家荣. 3D打印连续碳纤维增强热塑性复合材料弯曲性能研究[J]. *塑料科技*, 2019, 47(11):40–43.
- HU Jiarong. Study on bending properties of 3D printing continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(11):40–43.
- [18] 李久振,战丽,李莞,等. FDM成型工艺对PEEK/CGF复合材料翘曲变形的影响[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(1):64–69.
- LI Jiuzhen, ZHAN Li, LI Wan, et al. Effect of FDM forming process on warpage deformation of PEEK/CGF composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(1):64–69.
- [19] 王世橦,朱家威,张鹏,等. 基于FDM成型技术的打印强度和成型速率研究进展[J]. *中国塑料*, 2025, 39(1):112–117.
- WANG Shilin, ZHU Jiawei, ZHANG Peng, et al. Research progress in printing strength and molding rate based on FDM molding technology[J]. *China Plastics*, 2025, 39(1):112–117.
- [20] KECHAGIAS J D, ZAOUTSOS S P. An assessment of PLA/wood with PLA core sandwich multilayer component tensile strength under different 3D printing conditions[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131:1 240–1 249.
- [21] WANG Guangpei, HU Guodong, LAN Jing, et al. Rational design of one-dimensional skin-core multilayer structure for electrospun carbon nanofibers with bicontinuous electron/ion transport toward high-performance supercapacitors[J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2024, 653:148–158.
- [22] WANG Fuji, WANG Hongquan, WANG Gongshuo, et al. Effects of internal configurations and its processing quality on compressive performance for 3D printed continuous fiber reinforced composites honeycomb sandwich[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024. DOI:10.1016/J.TWS.2024.112046.
- [23] 李怡文. 基于形状记忆聚合物材料的变泊松比点阵结构设计及研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- LI Yiwen. Design and research of programmable Poisson's ratio lattice structure baseon shape memory polymer materials[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2020.
- [24] 张晓萌,姚占勇,张硕,等. 应力松弛对PET/炭黑/碳纤维复合材料影响规律分析[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(4):99–103.
- ZHANG Xiaomeng, YAO Zhanyong, ZHANG Shuo, et al. Sensibility influence analysis on PET/carbon black/carbon fiber composite due to stress relaxation[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(4):99–103.
- [25] YOUSUF M H, ABUZAID W, ALKHADER M. 4D printed auxetic structures with tunable mechanical properties[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35. DOI:10. 1016/j. addma. 2020. 101364.
- [26] NAM S, PEI E. The influence of shape changing behaviors from 4D printing through material extrusion print patterns and infill densities[J]. *Materials*, 2020, 13(17). DOI:10.3390/ma13173754.