

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.016

4D打印参数对TPU/PLA形态可控单元变形结果的影响

郭银强¹, 李端玲^{1,2}

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 西安 710000; 2. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

摘要: 4D打印技术近年来在智能结构领域展现出巨大潜力,其通过工艺参数编程调控智能材料,以实现外部刺激下的单元可控变形。为系统探究4D打印关键工艺参数对多材料制备的单元模型变形调控的影响,基于熔融沉积成型工艺,本文以热塑性聚氨酯作为控制相,聚乳酸作为驱动相制备了形态可控单元。通过设计驱动相打印速度、打印平台温度、驱动相与控制相厚度比及控制相打印方向实验,结合热刺激响应下的动态变形过程,以单元变形角度及变形响应时间为评价指标,揭示了工艺参数对形态可控单元变形行为的影响规律。实验结果表明,驱动相打印速度的增加会促进预应力的累积,从而导致形态可控单元的变形角度增大,但其变形响应时间并未发生显著变化;随着打印平台温度的升高,聚乳酸材料更易发生应力松弛,致使残余应变能储备下降,形态可控单元的变形角度减小,同时层间结合更为致密,变形响应时间则相应延长。在驱动相与控制相厚度比小于1时,单元变形角度随厚度比的增大而增加,变形响应时间亦随之增长;在厚度比大于1时,继续增大厚度比反而会导致变形角度减小。此外,不同控制相的打印方向也可以影响形态可控单元的变形角度及变形方式。

关键词: 4D打印技术;聚乳酸;热塑性聚氨酯;熔融沉积成型;形态可控机构

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0122-07

Effect of 4D printing parameters on deformation results of morphologically controllable TPU/PLA units

GUO Yinqiang¹, LI Duanling^{1,2}

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710000, China;

2. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract : 4D printing technology has demonstrated significant potential in the field of smart structures in recent years, enabling controllable deformation of units in response to external stimuli through the programming and regulation of smart material properties via process parameters. This study systematically investigates the influence of key process parameters in 4D printing on the deformation control of unit models during multi-material fabrication. Based on the fused deposition modelling process, thermoplastic polyurethane serves as the control phase and polylactic acid (PLA) acts as the driving phase, morphologically controllable units is produced. Through experiments manipulating the printing speed of the driving phase, the printing platform temperature, the thickness ratio between the driving and control phases, and the printing orientation of the control phase, combining with the dynamic deformation process under thermal stimulation, the deformation angle and deformation response time were employed as evaluation metrics. Experimental findings indicate that increasing the printing speed of the driving phase promotes the accumulation of pre-stress, thereby increases the deformation angle of morphologically controllable units, their deformation response time remains largely unchanged. As the printing platform temperature rises, PLA becomes more prone to stress relaxation, leading to a reduction in residual strain energy reserves and a decrease in the deformation angle of morphologically controllable units. Concurrently, inter-layer bonding becomes more compact, correspondingly prolonging the deformation response time. When the thickness ratio between the driving phase and control phase is less than 1, the unit deformation angle increases with this ratio, and the deformation response time also lengthens. When the ratio exceeds 1, further increasing it paradoxically reduces the deformation angle. Furthermore, differ-

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175019)

通信作者: 李端玲, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为机构学与机器人学

收稿日期: 2025-09-17

引用格式: 郭银强, 李端玲. 4D打印参数对TPU/PLA形态可控单元变形结果的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 122-128.

GUO Yinqiang, LI Duanling. Effect of 4D printing parameters on deformation results of morphologically controllable TPU/PLA units[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 122-128.

ent printing orientations of the control phase can also influence both the deformation angle and deformation mode of the morphologically controllable unit.

Keywords : 4D printing technology ; polylactic acid ; thermoplastic polyurethane ; fused deposition modeling ; shape-controllable mechanism

4D打印的概念最初是由美国麻省理工学院的Tibbitts教授在2013年的TED大会上提出^[1],该技术是通过在3D打印中引入智能材料^[2]与结构设计,使构件能够在外部刺激下实现可控形状演变^[3-4],近年来在柔性机器人、自适应医疗器械及航空航天可变结构等领域展现出广阔前景^[5-8]。其中,形状记忆聚合物(SMP)因其可编程的临时形状与自发恢复特性,成为4D打印的核心材料体系^[9-10]。

现有研究大多尝试通过改变工艺参数调控单一SMP材料打印过程以影响所制备结构的变形结果。例如,Zhang等^[11]指出聚乳酸(PLA)驱动层的冷却速率显著影响残余应力释放;Wang等^[12]发现适当提高喷嘴温度可缩短PLA模型的形状变形时间;Saptaji等^[13]进行相关实验分析得出,PLA模型厚度对其形状变形角度有着显著影响。刘少岗等^[14]发现PLA模型厚度的增加使得其变形时间有增长趋势。然而,单一SMP材料往往难以平衡驱动变形能力与结构稳定性,通过多材料的组合打印,可以使驱动相与控制相产生良好的协同作用,成为提升4D构件性能的关键途径^[15]。如Li等^[16]提出了一种对PLA层和热塑性聚氨酯(TPU)层的厚度比进行编程的方法,以实现双层结构的温度驱动可控变形。Zhang等^[17]提出一种基于聚氨酯(PUR)弹性体和热收缩型聚氯乙烯(PVC)双层结构的4D打印策略,通过控制PUR厚度及宽度参数实现可编程变形。可见,多材料组合制备的4D打印结构能有效增强其变形结果的可编程性。但目前系统性探究多种4D打印工艺参数下多材料制备的单元模型变形规律的内容较少,其中不同材料厚度比与打印方向对结构弯曲刚度及应力协同的规律,很大程度影响复杂变形结构的可控制备^[18]。所以4D打印工艺参数对多材料制备的形态可控单元变形结果影响规律还需要进一步地扩充实验验证。

而在多材料组合的4D打印中,PLA^[19]因其在打印过程中预拉伸存储的应变能可在热激励下释放产生驱动力,常被用作驱动相,而TPU凭借稳定的拉伸弹性模量可有效约束驱动相的预应变释放成为控制相的理想选择^[20]。针对上述问题,本文以

TPU和PLA为典型多材料体系,探究4D打印工艺参数对TPU/PLA形态可控单元变形结果的影响机制,通过设计四组关键实验[驱动相打印速度实验(30~150 mm/s),打印平台温度实验(30~100 °C),驱动相与控制相厚度比实验,控制相打印方向实验],结合热刺激响应下的动态变形过程,以单元变形角度及变形响应时间为评价指标,系统揭示了4D打印工艺中关键参数对由TPU和PLA制备而成的形态可控单元热致变形行为的具体影响规律,为利用熔融沉积成型(FDM)4D打印技术制备具有高精度、可预测变形行为的复杂形态可控机构提供了关键的参数优化依据和设计指导,同时为推动智能变形结构在工程领域的实际应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA丝材:卷丝,直径1.75 mm,密度为1.20 g/cm³,上海复志信息科技股份有限公司;

TPU丝材:卷丝,直径1.75 mm,密度为1.20~1.24 g/cm³,上海复志信息科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

打印机:Raise3D E2 3D打印机,上海复志信息科技股份有限公司;

恒温水浴箱:LICHEN-HH4恒温水浴锅,浙江力辰科技公司。

1.3 试样制备

使用Solid Works软件对形态可控单元模型进行三维构建,随后将STL格式的三维模型文件导入到打印机配套的ideamaker软件以完成对三维模型的切片分层,为每一层创建相应的喷头工艺参数设置。打印机根据切片生成的路径代码,控制喷头移动并挤出材料,逐层堆积成型。使用封闭式Raise3D E2 3D打印机对模型进行制备,该3D打印机以FDM技术为基础,配有打印机架、左右两个直径0.4 mm的打印喷嘴和内置加热板的打印平台。实验所用基础形态可控单元模型规格为长100 mm、宽10 mm、高1.2 mm的长方体(驱动相与控制相厚度比1:1),以便观察模型各个方向上的变化。此外,实验模型中的驱动相与控制相厚度比也是本研

究进行探究的一个重要参数,故另设计驱动相与控制相厚度比分别为1:5,1:2,2:1,5:1的模型进行打印,以便探究模型不同驱动相与控制相厚度比对形态可控单元变形结果的影响机制。各单元模型形状如图1所示。

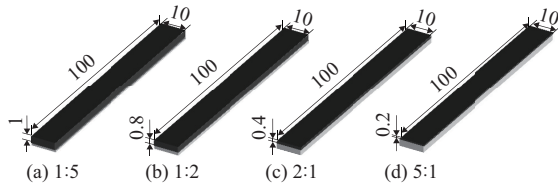


图1 不同驱动相与控制相厚度比的各单元模型图

Fig. 1 Model diagram with different thickness ratios of driving phase to control phase

1.4 实验方案

如图2所示,根据TPU与PLA的动态热机械分析(DMA)试验结果,以储能模量变化及损耗因子变化关系,选择PLA材料作为驱动相,通过打印过程预拉伸存储应变能,在热激励下释放该预变能提供单元进行形状恢复的驱动力。在试验温度范围内,TPU表现出稳定的弹性模量,可有效约束驱动相PLA的预应变释放,将TPU材料作为控制相。通过系统实验,探讨了驱动相打印速度、打印平台温度、驱动相与控制相厚度比以及控制相打印方向对4D

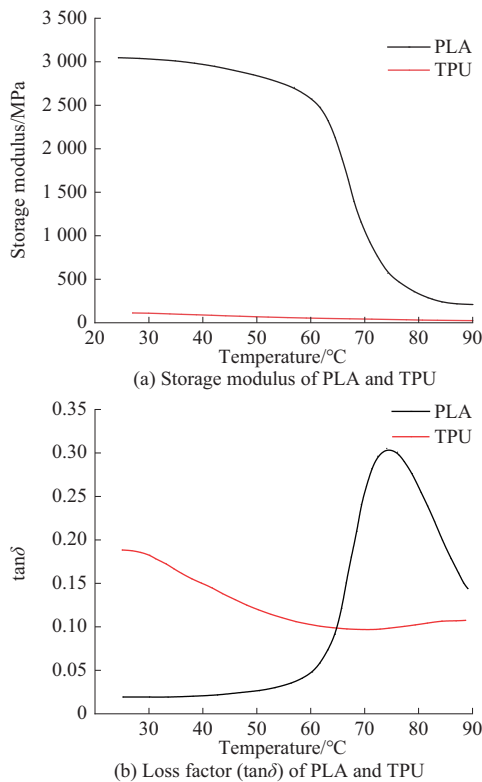


图2 PLA和TPU的DMA分析结果

Fig. 2 DMA analysis results of PLA and TPU

打印TPU/PLA形态可控单元的变形行为影响。并以变形角度和变形响应时间为评价指标,结合热刺激响应下的动态变形过程,为4D打印形态可控机构的工艺参数优化提供了实验依据与方法支持。实验所用模型均通过Raise3D E2 3D打印机制备,选择的固定打印参数见表1,其余打印参数根据实验要求而定,其中驱动相PLA打印方向始终与模型长度方向一致。

表1 固定打印参数

Tab. 1 Fixed printing parameters

Parameter name	Values
Nozzle temperature	TPU: 225 °C PLA: 215 °C
Filling method	Linear filler
Filling rate	100%
Layer thickness	0.2 mm

根据图2a储能模量变化曲线可知,PLA的玻璃化转变开始温度(T_g)为61 °C,而其玻璃化转变结束温度(T_h)为73 °C,结合损耗因子曲线,确定材料的玻璃化转变温度(T_g)为66 °C。并且为保证实验的稳定进行,使用LICHEN-HH4型水浴系统提供驱动相PLA所需的热响应激励,并将实验热激励温度设为(66±0.5) °C。

实验将模型放置在(66±0.5) °C的热激励中并开始计时,刺激模型发生变形,当模型不再产生肉眼可见的明显变形迹象时停止计时,再将其从水中取出进行冷却,并测量模型变形角度,实验过程如图3所示,为保证实验结果的可靠性,对每项工艺参数的研究均进行了3组变形实验。

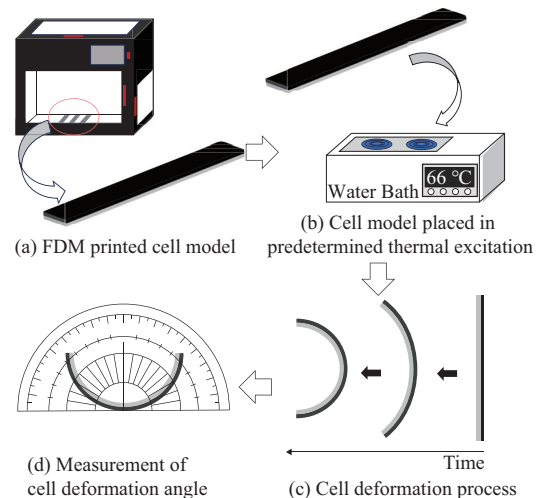


图3 变形实验流程图

Fig. 3 Deformation experiment flow chart

1.5 测量和表征

利用量角器分别测量单元模型变形完成后的左、右侧角度 θ_1 和 θ_2 ,如图4所示,并计算平均值得出该单元模型的变形角度 θ ,计算公式见式(1)。

$$\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad (1)$$

为减小误差,对每次实验结果测量三次后再取均值;利用计时秒表对单元模型变形过程的用时进行计时。

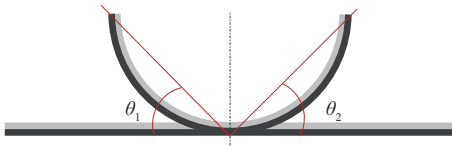


图4 测量示意图

Fig. 4 Measurement schematic

2 结果与讨论

2.1 驱动相打印速度的影响

在探究驱动相打印速度工艺参数对形态可控单元变形结果的影响实验中,保证其他工艺参数不变的基础上,设置单元模型驱动相PLA与控制相TPU呈垂直方向打印,打印平台温度为30℃,使用驱动相与控制相厚度比为1:1的单元模型,并设置30,60,90,120,150 mm/s五个梯度的打印速度。实验结果表明,随着驱动相打印速度的逐渐增大,单元模型的变形角度 θ 显著增大,如图5和图6所示,当打印速度由30 mm/s增大到150 mm/s时, θ 增幅达142.2%,究其原因是随着打印速度的增加,打印喷嘴移动速度与熔体挤出速率产生失配,打印出的线条更易被拉伸,使得驱动相PLA能得到更多的定向预应变并在冷却过程中被冻结,形成更多的残余

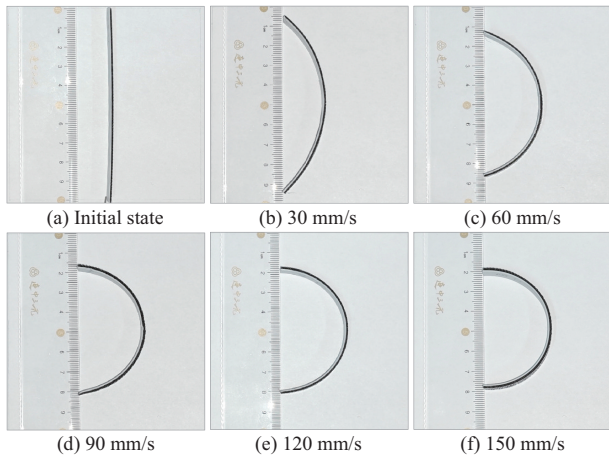


图5 不同驱动相打印速度的单元模型变形图

Fig. 5 Deformation diagrams of cell model with different driving phase printing speeds

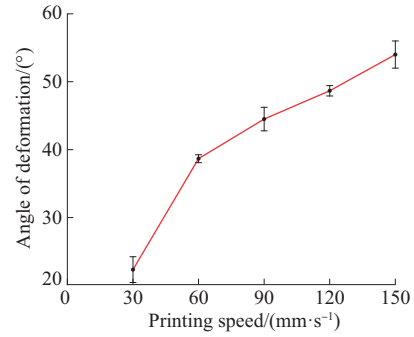


图6 不同驱动相打印速度下变形角度结果图

Fig. 6 Graph of angle of deformation results with different drive phase printing speeds

应变能储存在打印纤维中。在预定热激励下各纤维中的应变能释放转化为变形驱动力,并且随着打印速度增加,其变形角度也越大,但各单元变形响应时间始终稳定在(8.4±0.4) s范围内,基本保持不变,如图7所示。

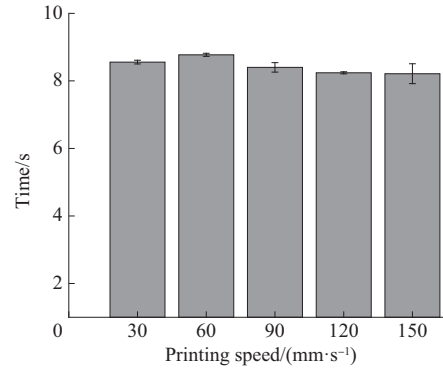


图7 不同驱动相打印速度下变形响应时间结果图

Fig. 7 Graph of deformation response time results with different driving phase printing speeds

2.2 打印平台温度的影响

在探究打印平台温度工艺参数对形态可控单元变形结果的影响实验中,保证其他工艺参数不变的基础上,设置单元模型驱动相打印速度为150 mm/s,控制相TPU与驱动相PLA呈垂直方向打印,使用驱动相与控制相厚度比为1:1的单元模型,并设置30,50,70,90,100℃五个梯度平台温度。实验表明,随着打印平台温度的升高,单元模型的变形角度 θ 由54°递减至趋近于0°,在打印平台温度为90℃与100℃时,单元模型在预定热激励下几乎未产生变形,如图8和图9所示。究其原因是单元模型由打印喷嘴进行逐层堆积打印而成,而随着打印平台的温度逐渐升高,至接近PLA的玻璃化转变温度范围时,打印出的PLA在高温平台上容易产生应力松弛现象,导致驱动相残余应变能储备衰减,使

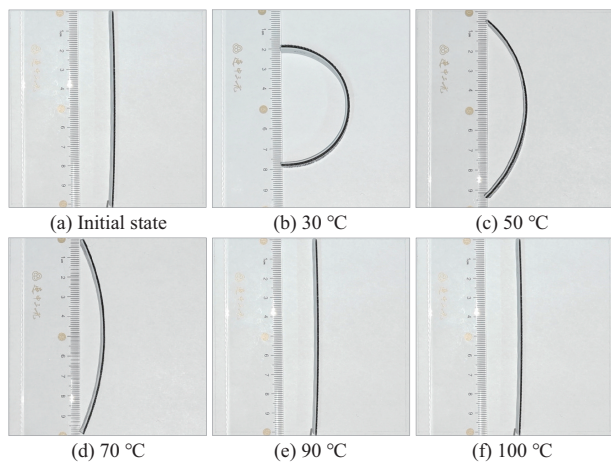


图8 不同打印平台温度的单元模型变形图

Fig. 8 Deformation diagrams of cell models at different printing platform temperatures

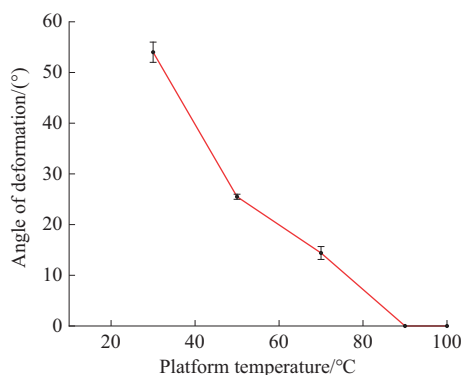


图9 不同打印平台温度下变形角度结果图

Fig. 9 Graph of angle of deformation results at different printing platform temperatures

得在预定热激励下提供单元模型进行变形的驱动力减少,故而单元模型的变形角度显著减小,而在90~100 °C时驱动相残余应变能储备趋近于零,从而无法提供有效变形驱动力,单元模型变形角度为0°。实验还表明,在平台温度为30~70 °C的打印平台上打印完成的单元模型,预定热激励下的变形响应时间随着温度的升高也产生了小幅度的升高,究其原因随着打印平台温度的逐渐升高,提升了驱动相PLA层间分子链扩散能力,使层间结合更致密,单元模型的表面粗糙度显著下降,更致密的表面结构减少了与水的接触面积,延缓了热吸收速率,导致达到PLA玻璃化转变温度所需的激活时间延长,而相比之下,低温平台打印的单元模型各层间存在微间隙及较高粗糙度增大了驱动相的热交换效率,使得变形响应时间缩短,如图10所示。

2.3 驱动相与控制相厚度比的影响

在探究驱动相与控制相厚度比工艺参数对形态

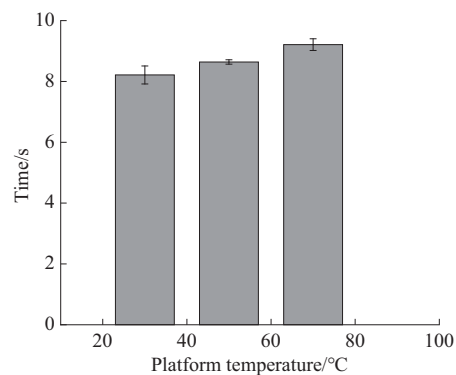


图10 不同打印平台温度下变形响应时间结果图

Fig. 10 Graph of deformation response time results at different printing platform temperatures

可控单元变形结果的影响实验中,保证其他工艺参数不变的基础上,设置驱动相打印速度为150 mm/s,控制相TPU与驱动相PLA呈垂直方向打印,打印平台温度为30 °C,并设置驱动相与控制相厚度比为1:5,1:2,1:1,2:1,5:1五个梯度比例,并将比例小于1称为正向驱动阶段,比例大于1称为反向抑制阶段。如图11和图12所示,在正向驱动阶段,随着驱动相PLA层数的逐渐增多,打印完成后的单元模型中储存的应变能增多,变形驱动力增加,形态可控单元变形夹角逐渐增大,如图11b和图11c所示,在厚度比为1:1时形成的力矩平衡最优,单元的变形角度 θ 达到最大(54°),如图11d所示。在反向抑制阶段,该阶段控制相TPU层数逐渐减少(厚度比为5:1时仅0.2 mm),其约束能力逐渐降低,但驱动相PLA层过厚导致弯曲刚度显著增加,单元变形被抑制,使得形态可控单元变形夹角减小,如图11e和图11f所示。而单元变形响应时间因驱动相PLA

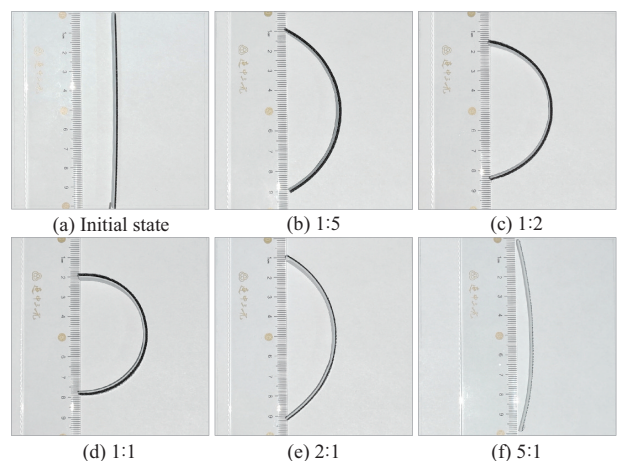


图11 不同驱动相与控制相厚度比的单元模型变形图

Fig. 11 Deformation diagrams of unit models with different thickness ratios of driving phase to control phase

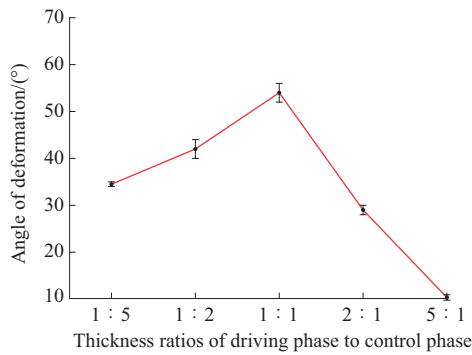


图12 不同驱动相与控制相厚度比下变形角度结果图

Fig. 12 Graph of angle of deformation results with different thickness ratios of driving phase to control phase

层厚增加延长了热传导路径而增加,但当厚度比达到5:1时,单元模型因驱动相PLA层过厚致使结构刚度显著提升,限制宏观变形幅度,引发微变形的特性,并打破了变形响应时间正相关规律,如图13所示。

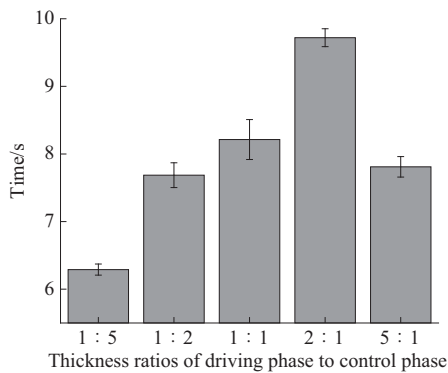


图13 不同驱动相与控制相厚度比下变形响应时间结果图

Fig. 13 Graph of deformation response time results with different thickness ratios of driving phase to control phase

2.4 控制相打印方向的影响

在探究控制相打印方向工艺参数对形态可控单元变形结果的影响实验中,保证其他工艺参数不变的基础上,设置单元模型驱动相打印速度为150 mm/s,使用驱动相与控制相厚度比为1:1的单元模型,打印平台温度为30 °C,以驱动相PLA打印方向为基准,设置控制相TPU打印方向分别呈0°,45°,90°,45°+135°(即相邻层夹角呈90°)的四组实验。实验表明,当控制相TPU打印方向呈0°,即与驱动相PLA打印方向平行时,单元模型因驱动相PLA与控制相TPU相接层的结合质量差,在预定热激励下,控制相TPU无法有效控制驱动相PLA的变形过程且在两者结合界面发生大面积剥离,导致模型失效,如图14b所示;当控制相TPU打印方向呈45°时,

单元模型在预定热激励下沿控制相打印方向上发生轻微螺旋的变形,如图14e所示;当控制相TPU打印方向呈90°和45°+135°时,单元模型皆发生横向弯曲,但因控制相TPU打印方向呈45°+135°时,其展现的抗弯能力稍大于打印方向呈90°的控制相TPU,故而45°+135°型单元变形角度较90°型单元稍小,如图14c和图14d所示。在不考虑控制相TPU打印方向为0°而变形失效的单元模型时,其余单元变形响应时间都始终稳定在(8.4±0.4) s范围内,基本保持不变,如图15所示。

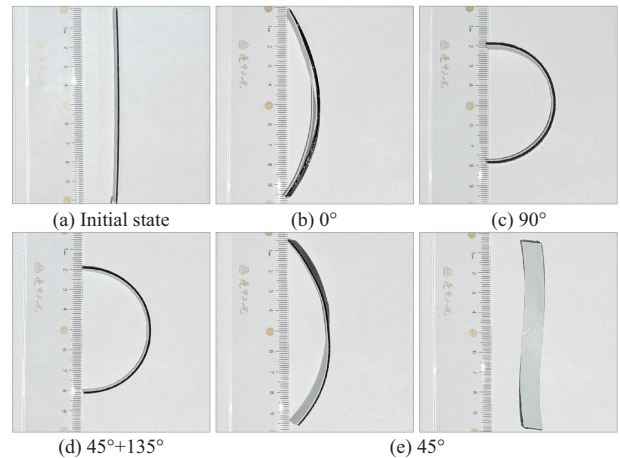


图14 不同控制相打印方向的单元模型变形图

Fig. 14 Deformation diagram of cell model with different control phase printing directions

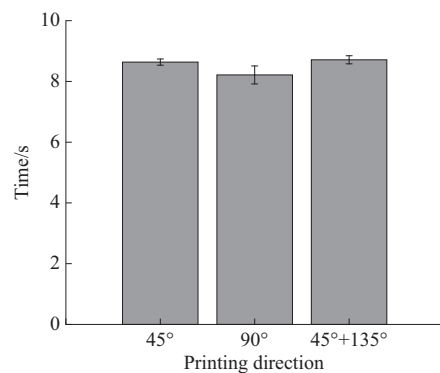


图15 不同控制相打印方向下变形响应时间结果图

Fig. 15 Graph of deformation response time results with different control phase printing directions

3 结论

通过系统实验,研究了4D打印关键工艺参数对TPU/PLA形态可控单元热致变形行为的影响,以变形角度和变形响应时间为评价指标,得出以下结论。

(1)驱动相打印速度是调控变形幅度的关键参数。随着打印速度增加,因喷嘴移动与熔体挤出失

配导致驱动相PLA定向预应变增大,冷却后储备更多残余应变能,使变形角度显著提升142.2%,且变形响应时间稳定在 (8.4 ± 0.4) s。

(2)打印平台温度通过影响材料的热力学状态决定了残余应变能的储备与热传导效率。打印平台温度的升高会加剧驱动相PLA的应力松弛现象,削弱其残余应变能,导致变形角度从 54° 锐减至近 0° (90°C 及以上基本失效);同时高温打印使驱动相PLA层间结合更致密,延缓了热吸收速率,使得变形响应时间小幅延长。

(3)驱动相与控制相的厚度比对形态可控单元的变形行为影响呈现阶段性特征。厚度比 ≤ 1 时,随PLA层厚增加,预存应变能增大,变形角度递增,在1:1时达峰值 54° ;厚度比 >1 时,TPU约束减弱,但因PLA层厚增加,其整体刚度剧增,变形角度锐减。响应时间随厚度比增大而延长,但厚度比为5:1时因PLA过厚出现微变形,打破该趋势。

(4)控制相TPU打印方向对单元模型的变形模式与刚度具有显著调控作用。当采用 0° 打印方向时,易引发层间剥离现象而发生变形失效;采用 45° 打印方向时引起单元模型螺旋变形; 90° 正交打印方向与 $45^\circ+135^\circ$ 打印方向的单元结构均表现为横向弯曲,但呈 $45^\circ+135^\circ$ 交叉打印的TPU产生各向同性增强效应,其整体刚度略高于 90° 打印的TPU控制相,故而单元模型变形角度略小,但两者变形响应时间稳定在 (8.4 ± 0.4) s范围内。

此外,根据实验结论各工艺参数存在显著的耦合效应。打印速度与平台温度共同作用于残余应力,高速打印配合较高平台温度能部分抵消因速度提升所带来的预应变积累,从而影响最终变形能力;不同材料厚度比与打印方向则共同影响结构的整体刚度与各向异性,决定了模型最终的变形模式与幅度。因此,在利用FDM 4D打印技术设计与制备形态可控机构时,必须综合考虑上述参数的协同调控作用,通过多参数协同优化,才能实现高精度、可预测的复杂变形行为。

参考文献

- [1] TIBBITS S. 4D printing: Multi-material shape change[J]. Architectural Design, 2014, 84(1):116–121.
- [2] 高一聪,曾思远,冯毅雄,等.支持4D打印的可控变形结构设计研究进展[J].机械工程学报,2020,56(15):26–38.
GAO Yicong, ZENG Siyuan, FENG Yixiong, et al. Review of design of programmable morphing composite structures by 4D printing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(15): 26–38.
- [3] 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.
- [4] 王煜雯,龙云瑞,邢倩,等.聚乳酸形状记忆材料研究进展[J].高分子材料科学与工程,2021,37(8):165–173.
WANG Yuwen, LONG Yunrui, XING Qian, et al. Progress of polylactide-based shape memory materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(8):165–173.
- [5] ZHAO W, YUE C B, LIU L W, et al. Research progress of shape memory polymer and 4D printing in biomedical application[J]. Advanced Healthcare Materials, 2023, 12(16). DOI: 10.1002/adhm.202201975.
- [6] 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 shapememory performance[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3):112–117.
- [7] OU X C, HUANG J Q, HUANG D T, et al. 4D-printed snake-like biomimetic soft robots[J]. Bio-Design and Manufacturing, 2025, 8(1):55–67.
- [8] 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.
- [9] 徐良文,吴章平,陈守军,等.FDM工艺参数对PLA试件力学性能的影响[J].塑料工业,2020,48(10):92–96.
XU Liangwen, WU Zhangping, CHEN Shoujun, et al. Effects of FDM 3D Printing parameters on tensile properties of polylactic acid [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(10):92–96.
- [10] 白鹤,苏亚辉,王核心,等.FDM 3D打印工艺参数对PLA制件力学性能的影响[J].工程塑料应用,2020,48(1):68–71.
BAI He, SU Yahui, WANG Hexin, et al. Influence of FDM 3D-printing process parameters on mechanical property of PLA sample[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):68–71.
- [11] ZHANG Q, ZHANG K, HU G K. Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1). DOI:10.1038/srep22431.