DOI: 10.3901/JME.2021.15.255

高速连续光固化 3D 打印工艺与树脂 打印件性能研究*

叶淑源 周习远 苑景坤 劳长石 陈张伟
(深圳大学增材制造研究所 深圳 518060)

摘要: 受传统光固化工艺的分层打印原理的限制, 液态树脂光固化 3D 打印的打印速度与打印质量一直无法获得突破。连续液面成型 3D 打印技术(CLIP)在一定程度上避免了物理分层的存在, 进而可以缓解传统光固化打印过程中打印速度与打印质量相互制约, 不能两全的问题, 为高速高精度高质量树脂增材制造提供可能。详细研究了在高速打印模式下(300~1 500 mm/h)CLIP 3D 打印工艺与打印速度对打印件质量的影响规律, 并分析讨论了树脂黏度对 CLIP 打印速度和打印件质量的影响。结果表明: 受树脂黏度影响, 在高速打印模式下随着打印速度的不断增加, 无层打印又逐渐向分层打印转变, 打印件的性能也因此受到影响。较低速度的连续打印不仅能够获得较优的表面质量($S_a=1.98\ \mu\text{m}$), 同时还能够获得较高的拉伸强度(45.6 MPa), 且结果均优于 DLP 打印。

关键词: 光固化; 高速连续打印; 树脂; 黏度; 打印件性能

中图分类号: TH164

Study on High-speed Continuous Photopolymerization 3D Printing Process and Properties of Printed Resin Parts

YE Shuyuan ZHOU Xiyuan YUAN Jingkun LAO Changshi CHEN Zhangwei
(Additive Manufacturing Institute, Shenzhen University, Shenzhen 518060)

Abstract: Limited by the layered printing principle of traditional stereolithography process, the printing speed and printing quality of liquid resin stereolithography 3D printing have been unable to get a breakthrough. Continuous liquid interface production 3D printing technology (CLIP) avoids the existence of physical layer of the printing parts to some extent, which can alleviate the trade-off between printing speed and printing quality in the traditional stereolithography 3D printing process, thus providing the possibility for resin additive manufacturing of high speed, high precision and high quality. In this paper, the 3D printing process and the influence of printing speed on the quality of the printing parts of CLIP in high-speed printing mode (300-1 500 mm/h) are studied in detail. The results show that under the influence of resin viscosity, the layerless printing gradually changes to the layered printing with the increase of printing speed in the high-speed printing mode, and the performance of the printing part is also affected. Ordinary resin can not only obtain the best surface quality ($S_a=1.98\ \mu\text{m}$), but also obtain the best tensile strength(45.6 MPa) at a relatively low print speed, and the results are better than DLP printing.

Key words: photopolymerization; high-speed continuous 3D printing; resin; viscosity; properties of printed parts

0 前言

传统液态树脂光固化 3D 打印技术主要包括立

体光刻技术(Stereolithography, SL)和数字光处理技术(Digital light processing, DLP)^[1-2]。相对于 SL 的线扫描打印方式, DLP 的面投影打印速度更快, 近年来逐渐成为主流光固化 3D 打印技术。由于 DLP 3D 打印技术采用逐层固化的方式进行打印, 打印过程是一个不连续的过程, 包括复位、打印、分离和等待四个基本步骤, 四个步骤完成一层打印, 不断

* 广东省激光与增材制造重大专项(2020B090924003)、广东省自然科学基金面上(2020A1515011549)和深圳市基础研究(JCYJ20190808144009478)资助项目。20200809 收到初稿, 20210311 收到修改稿

重复直至打印完成。每一层打印都需要几秒甚至几十秒的时间,打印速度基本限制在 30 mm/h 以内。此外 DLP 3D 打印样件存在明显的阶梯效应,切片越厚,阶梯效应越大^[3-4],同时力学性能越差且各向异性越明显^[5-6]。而减小模型切片厚度则会成倍降低打印速度。因此,DLP 3D 打印技术在打印速度与打印质量之间存在一个此消彼长的相互制约关系,无法同时实现高速度高质量打印,这成为阻碍 DLP 光固化 3D 打印技术发展与应用的一大障碍^[7]。

连续液面成型 3D 打印技术(Continuous liquid interface production, CLIP)^[8]是一种新型液态树脂光固化 3D 打印技术。其打印速度比传统 DLP 3D 打印技术可提高近百倍,且打印质量也得到大幅提升,在一定程度上避免了传统光固化 3D 打印技术中打印速度与打印质量相互制约的问题,为实现高速高质量光固化 3D 打印提供可能。此外,CLIP 3D 打印技术的出现也为微纳尺寸结构制造^[9]、生物医疗^[10-11]、形状记忆功能材料^[12]、等前沿科技问题提供了新的解决方案。

目前,对 CLIP 3D 打印技术打印工艺与打印件性能的研究报道较少。北卡罗来纳大学教堂山分校 RIMA 对低速(<40 mm/h)CLIP 3D 打印件性能进行了研究^[13],结果表明 CLIP 3D 打印技术可以有效地解决打印件的阶梯效应问题,打印件的拉伸强度与杨氏模量表现为各向同性,且模型的切片厚度不影响打印件质量。但并未对高速(>300 mm/h)CLIP 打印工艺与打印件质量做系统性研究。虽然 CLIP 技术理论上能实现超高速 3D 打印,但其打印速度还是受到两个因素的限制,即树脂的临界曝光能量越高,或者树脂的回流速度越慢都会限制打印速度的提高。树脂临界曝光能量限制 CLIP 打印速度已有相关研究报道^[8],但树脂黏度对 CLIP 打印的影响研究较少。

本文使用一款商业标准光固化树脂,对高速(300~1 500 mm/h)CLIP 3D 打印的打印工艺与打印件质量做了详细研究,同时部分结果也与 DLP 打印结果做了对比分析。并详细讨论了树脂黏度对打印速度与打印质量的影响。

1 原理、材料、设备与方法

1.1 CLIP 3D 打印技术原理

如图 1 所示,与 DLP 3D 打印技术所不同的是 CLIP 3D 打印技术只有复位与打印两个步骤,只需要执行一次复位即可连续完成打印。如图 1c 所示,

CLIP 3D 打印技术巧妙地利用了氧气对自由基树脂在光固化过程中的阻聚作用(即氧阻聚效应)^[14-17],在树脂料槽底部与已固化树脂之间稳定的维持一层未固化区的存在。这一未固化区是以固化梯度的方式存在,未固化区中存在部分已固化的树脂,未固化区自下而上固化效应越来越明显^[8, 13]。已固化部分在未固化区上方不断的从树脂料槽拉出时会产生负压,负压使得周围的树脂可以不断地补充进来,确保了打印过程的连续性。未固化区的存在使得树脂固化、打印平台上升与树脂回流这 3 个原本分散的打印步骤可同时进行,将光固化 3D 打印从断续的分层打印过程转变为连续打印过程,从而极大的提高了液态树脂光固化 3D 打印的速度。此外,由于 CLIP 3D 打印是一个连续的过程,打印模型不存在阶梯效应,因此不存在由于打印方向和切片厚度引起的各向异性问题,在一定程度上消除了传统 3D 打印技术中打印速度与打印质量之间此消彼长的相互制约关系。

图 1 DLP 3D 打印与 CLIP 3D 打印过程对比

1.2 材料与设备

本研究所用的树脂为诺瓦智能的透明蓝光固化标准树脂,临界曝光强度为 14.37 mJ、透射深度为 378.7 μm 、黏度为 30.4 mPa·s。

试验设备为:深圳长朗智能的 SkyLine DLP 3D 打印机和课题组自研的高速 CLIP 3D 打印机。CLIP 打印机树脂槽底部采用杭州包尔得新材料科技有限公司生产的 BD Film-KYN300 全透明有机硅薄膜(PDMS)。PDMS 薄膜下方设有氧气仓(图 2),PDMS 薄膜良好的氧气透过性保证了在打印过程中氧气可以持续透过薄膜并通过氧阻聚效应在树脂料槽最下方形成一层稳定的未固化区,从而避免打印件已固化部分与树脂料槽底部的粘连,保证打印的连续性。

图2 高速 CLIP 3D 打印机树脂槽

1.3 CLIP 高速打印策略分析

CLIP 3D 打印技术最大的特点就是打印过程的连续性即切片投影的连续性。实现切片的连续投影关键要确定每层切片的曝光时间。单层切片投影时间计算公式为

$$T=D/V \quad (1)$$

式中 T —— 单层切片曝光时间(ms);

D —— 切片厚度(μm);

V —— 打印速度($\mu\text{m}/\text{ms}$)。

例如当打印速度 $V=600 \text{ mm/h}$ 、切片厚度 $D=50 \mu\text{m}$ 时, 单层切片的曝光时间 T 为 300 ms。

其他打印速度与切片厚度下单层切片的投影时间计算过程相同。

光机的光能量强度由电流大小控制, 实际打印过程中将电流细分为 255 份, 使用紫外光伏辐照计可测量出光机各电流细分所对应的光能量密度。根据 Lambert-Beer 定律和光机的光能量密度表可计算出打印所需的光能量密度 E_d 以及所对应的光机电流值。当切片厚度为 $50 \mu\text{m}$ 时各个打印速度对应的单层曝光时间与光机电流值如表 1 所示。打印过程中只需根据每层曝光时间来控制光机连续无间隔的投影模型切片以及打印机 Z 轴模組的运动速度即可实现连续打印。

表 1 切片厚度为 $50 \mu\text{m}$ 时各个打印速度所对应的单层曝光时间与光机电流值

速度 $V/(\text{mm}/\text{h})$	单层曝光时间 T/s	光机电流值(%)
300	600	40/255
450	400	48/255
600	300	60/255
750	240	75/255
900	200	94/255
1 050	172	118/255
1 200	150	148/255
1 350	133	182/288
1 500	120	220/255

1.4 透氧膜对 CLIP 3D 打印的影响

PDMS 薄膜的氧气透过量为 $6.863 \times 10^4 (\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})$, 虽不及进口 Teflon AF 2400 薄膜, 但足以实现氧阻聚层的形成, 且 PDMS 薄膜价格便宜适用于大量试验。但其缺点是刚性较差易受外力作用变形。薄膜在打印的初始阶段受底部氧气仓压力、树脂重力与打印平台压力的综合作用, 处于动态平衡状态。如图 3 所示, 在打印初始阶段, 当氧气仓内压力过大时薄膜上凸, 当树脂重力与打印平台压力过大时薄膜下凹。薄膜的上凸与下凹将会对打印模型的底部产生不同的影响, 因此需要研究薄膜不同形态状态对打印件质量的影响并进行工艺优化, 采取必要措施将影响最小化。

图3 PDMS 薄膜不同形态位置示意图

1.5 CLIP 打印速度与打印件表面质量关系

为了研究 CLIP 3D 打印技术在高速打印模式下打印样件的表面质量, 分别使用 300 mm/h , 450 mm/h , 600 mm/h , 750 mm/h , 900 mm/h , $1 050 \text{ mm/h}$, $1 200 \text{ mm/h}$, $1 350 \text{ mm/h}$, $1 500 \text{ mm/h}$ 的打印速度打印 CLIP 样件, 使用激光共聚焦显微镜(基恩士 VK-X250K)测量不同打印速度下 CLIP 打印样件的表面粗糙度。同时使用 DLP 3D 打印机打印相同样件并进行粗糙度测量, 与 CLIP 打印样件测试结果进行对比。试验中所用的模型为长 $\times$ 宽 $\times$ 高= $6 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的长方体, 打印方向为高度方向, 模型切片厚度为 $50 \mu\text{m}$, DLP 打印速度为 12 mm/h 。

1.6 CLIP 打印速度与打印件力学性能关系

为了研究 CLIP 3D 打印技术在高速打印模式下打印样件的力学性能, 根据 GB/T 1040.1 — 2018 《塑料拉伸性能的测定》, 分别使用 300 mm/h , 600 mm/h , 900 mm/h , $1 200 \text{ mm/h}$, $1 500 \text{ mm/h}$ 的打印速度打印拉伸标准测试件, 拉伸试样的尺寸如图 4 所示。使用电子万能试验机(MTS E44 UTM)测试各打印速度下拉伸试样的拉伸强度。同时使用 DLP 3D 打印机打印拉伸试样并进行拉伸强度测试,

将结果与 CLIP 拉伸试样测试结果进行对比分析。模型切片厚度为 50 μm , DLP 打印速度为 12 mm/h。

图 4 拉伸标准件模型尺寸

2 结果分析

2.1 透氧膜对 CLIP 3D 打印的影响

为研究 PDMS 薄膜上凸对 CLIP 打印样件底部的影响, 选用如图 5a 所示的镂空球模型进行试验。调节氧气仓压力使其略大于大气压, 此时薄膜上凸, 打印初始阶段 PDMS 薄膜始终保持贴近打印平台, 两者之间仅含有一层很薄的树脂。此时虽然打印平台在持续提升, 但 PDMS 薄膜与打印平台之间并未及时释放相应的空间, 树脂无法回流。所以此阶段打印的样件全部粘在打印平台上, 打印件底部出现堆积现象(Z0), 如图 5b 所示。当打印平台提升距离与 PDMS 薄膜凸起高度相当时, 打印平台与 PDMS 薄膜开始分离并释放打印空间, 打印恢复正常。若逐次上调打印平台原点的 Z 轴高度(Z2.5 即将打印平台原点 Z 轴位置调高 2.5 mm), 打印样件的底部堆积情况逐渐改善直至消失(Z2.8), 如表 1 所示。

(b) 打印件底部堆积现象随 Z 轴高度的不断增加而逐渐改善 (仅打印模型的 1/5)

图 5 打印件底部堆积现象

表 1 不同原点位置打印件底部堆积现象

Z 轴原点/mm	底部堆积情况
Z0	严重
Z1	严重
Z2	较严重
Z2.5	轻微
Z2.6	轻微
Z2.7	良好
Z2.8	良好
Z2.9	打印失败
Z3.0	打印失败

为研究 PDMS 薄膜下凹对打印样件的影响, 设计如图 6a 所示的模型, 底部为厚 0.3 mm 的底板, 底板上方为一下部开有梯形口的斜板。调节氧气仓压力与大气压相等, 此时在树脂重力与打印平台压力作用下 PDMS 薄膜下凹, 薄膜与打印平台间距过大。若直接打印, 模型无法粘上打印平台导致打印失败。若增大光强打印, 虽然打印件底部前几层无法粘上打印平台而是漂浮在薄膜和平台之间, 但随着打印的继续, 在模型切片投影的连续处光能量持续积累导致打印件底部被穿透而粘上打印平台, 打印模型出现底部穿透现象。如图 6b 所示(由于增大光强打印, 打印件底部边缘出现热翘曲现象), 打印模型底部投影连续处粘上打印平台, 投影不连续处可插入 0.5 mm 的塞规。

图 6 打印件底部穿透现象

由于 PDMS 薄膜形态位置的不确定性以及氧气仓内压力难以精准控制, 若直接对设计模型进行打印则打印件底部会产生缺陷。为了消除 PDMS 薄膜形态位置变化导致的打印件底部堆积或穿透问题, 在此提出一种解决方法: 在模型的设计阶段为模型增加 3~5 mm 的扩展支撑, 将打印件底部堆积或穿

透现象转移到模型的扩展支撑处, 打印结束后再将打印件的扩展支撑去除, 如图 7 所示。试验结果表明此方法可以有效避免打印件底部缺陷。

图 7 打印模型底部添加扩展支撑

2.2 CLIP 与 DLP 打印件表面质量对比

将 CLIP 300 mm/h 打印样件与 DLP 打印样件进行对比分析。如图 8a 所示, DLP 3D 打印样件表面可清晰地观察到分层现象, 这是由 DLP 3D 打印技术的逐层打印策略所决定的。如图 8b 所示, 由于 CLIP 3D 打印技术采用连续打印策略, 所以打印样件表面不存在分层现象, 但打印件在高速拉出树脂池时表面产生类似水波纹路。如图 8c 所示, CLIP 打印件与 DLP 打印件的表面粗糙度测试结果表明, 前者的表面质量 ($Sa=1.98 \mu\text{m}$) 远高于后者 ($Sa=6.98 \mu\text{m}$)。

图 8 打印件表面形貌对比

2.3 CLIP 打印速度与打印件表面质量关系

CLIP 在 300~1 500 mm/h 的速度下打印件的表面形貌如图 9 所示。

图 9 CLIP 不同打印速度样件表面形貌

可以发现随着打印速度的提高, CLIP 打印件表面逐渐出现分层现象, CLIP 由原本的连续无层打印转变为连续分层打印, 这一现象在之前的研究中均未提及。与 DLP 打印件表面的等厚度分层所不同的是, 随着 CLIP 打印速度的进一步提高, CLIP 打印样件表面分层厚度也逐渐加大, 如图 10 所示。

图 10 高速打印下 CLIP 不同打印速度打印件的分层厚度

CLIP 3D 打印技术树脂回流的机理是打印件已固化部分不断从未固化层上方拉出时产生负压使周围的树脂不断补充进来。随着打印件已固化部分拉出的速度不断提高产生的负压越来越大, 树脂得以快速补充, 但当树脂的黏度达到一定值时其回流速度将会受到限制。

本研究所用的光固化标准树脂黏度为 30.40 mPa·s, 树脂流动性一般。在高速打印下光机以较高的光能量密度持续投影, 在较短的时间内 (120~172 ms) 就可将未固化区以上, 已固化区以下的树脂固化。与此同时, 已固化部分向上拉升产生的负压将吸引周围树脂快速补充进来。但由于树脂的流动性不足以匹配较高的打印速度, 树脂固化与

树脂回流两个原本同时进行的打印步骤之间会产生一定的时间滞后,导致打印件出现分层现象。若树脂的黏度更大或者打印速度更高则这两个打印步骤之间的滞后将会进一步扩大导致打印失败,这正是树脂黏度限制 CLIP 打印速度的原因。

此外,随着打印速度的提高即光能量密度的提高未固化区厚度会降低,而打印平台的初始位置是不变的,因此未固化区所减少的厚度将会被一起固化。如图 11 所示,假设打印速度为 300 mm/h 的单层固化厚度为 h_s (h_s 的值应等于切片厚度与 300 mm/h 所对应未固化区厚度的减小量之和),则 1 050 mm/h 所对应的单层固化厚度为 h_s+h_0 , 1 200 mm/h 所对应的单层固化厚度为 $h_s+h_0+h_1$,以此类推。因此,随着打印速度的不断提高,分层厚度逐渐增加。

图 11 不同打印速度下未固化区厚度的变化

高速打印模式下 CLIP 3D 打印技术不同打印速度下打印件的表面粗糙度测量结果如图 12 所示。当打印速度在 1 200 mm/h 以内时,CLIP 打印件的表面粗糙度稳定在 2~4 μm 之间,当打印速度高于 1 200 mm/h 时 CLIP 打印件的表面质量开始下降,随着打印速度进一步提高,CLIP 打印件表面质量急剧下降,基本与 CLIP 高速打印下打印件分层现象相符合。结合图 9 与图 12 可以发现,虽然打印件在 900 mm/h 时就可观察到分层现象,但在 900~1 200 mm/h 速度区间打印件的表面粗糙度基本没有变化。这是因为打印速度低于 1 200 mm/h 时,虽然已经产生了打印滞后,但打印滞后较小,对打印件的表面质量几乎不产生影响,当打印速度高于 1 200 mm/h 时,打印滞后增大开始对打印件的表面质量产生较大影响,且影响随打印速度提高而进一步扩大。与 DLP 打印件表面粗糙度对比可以发现,当 CLIP 打印速度低于 1 200 mm/h 时,CLIP 打印件

的表面质量优于 DLP 打印件的表面质量。

图 12 高速打印模式下不同打印速度 CLIP 3D 打印技术打印模型的表面粗糙度

因此,CLIP 打印技术相较于 DLP 打印技术其打印件的表面质量具明显的优势,只有当打印速度较高,打印件分层现象较严重以至影响其表面粗糙度时,打印件的表面质量才比 DLP 打印件低。

由以上分析可知,树脂黏度限制 CLIP 打印速度的机理是使树脂固化与树脂回流这两个原本同时进行的打印过程过程产生滞后。当滞后较小时打印件出现分层,连续无层打印将转变为连续分层打印;当滞后进一步扩大时将导致打印失败。为了使 CLIP 技术可以在更高的打印速度下打印出无层的样件就需要提高树脂的回流速度,一方面可从树脂配方入手,配制光能量密度和黏度更低的树脂;另一方面可从机械结构入手,改进树脂槽结构使其更有利于树脂回流。

2.4 CLIP 与 DLP 打印件力学性能对比

如图 13 所示,将 CLIP 3D 打印拉伸测试样件 (300 mm/h) 与 DLP 3D 打印拉伸测试样件沿打印方向剪开,可以看到 CLIP 打印样件内部致密不存在分层现象,而 DLP 打印样件内部与表面相似也存在分层现象。

图 13 内部形貌对比

CLIP 打印样件与 DLP 打印样件拉伸测试结果如图 14 所示,CLIP 打印样件的拉伸强度比 DLP 打印样件的拉伸强度平均提高 42.4%,CLIP 打印样件的拉伸应变比 DLP 打印样件的拉伸应变平均提高

126.1%。此外,从两个不同的样件打印方向来看,CLIP 打印样件的拉伸强度在两个打印方向上表现为各向同性,DLP 拉伸样件在两个方向的拉伸强度表现为各向异性。

(a) CLIP 打印件与 DLP 打印件拉伸强度对比

(b) 拉伸应变对比

(c) 拉伸测试件的两个打印方向

图 14 CLIP 打印样件与 DLP 打印样件拉伸测试结果

CLIP 与 DLP 打印拉伸测试件断口与断面照片如图 15 所示,由图 15b 可以看到 DLP 打印的拉伸测试样件在分层处发生断裂。如图 15c 所示,由断面电镜照片可以看到 CLIP 拉伸测试件断面分布有较多的卷曲隆起,说明断裂部位的树脂是正常进行交联聚合固化的,CLIP 打印件的交联聚合固化是连续一体的。如图 15d 所示,DLP 拉伸测试件断面较平整无卷曲,说明断裂部位的树脂未正常发生聚合交联固化,这是因为 DLP 拉伸测试件的断裂处恰好处在模型分层处,而模型分层处也是树脂交联聚合固化的分层处,是模型力学性能的最薄弱的环节。

图 15 CLIP 和 DLP 打印件断口照片和断面电镜照片

如图 16 所示,DLP 打印件树脂的交联固化因离散的打印步骤而分层,CLIP 低速打印件树脂交联固化是连续一体的,CLIP 高速打印件树脂交联固化因原本同时进行的打印步骤间出现滞后而分层。因此 DLP 打印样件不仅拉伸强度低于 CLIP 打印样件,且打印样件的韧性更是远远不及 CLIP 打印样件。

图 16 DLP 与 CLIP 交联聚合固化示意图

2.5 CLIP 打印速度与打印件力学性能关系

分别在 300 mm/h、600 mm/h、900 mm/h、1 200 mm/h、1 500 mm/h 的打印速度下 CLIP 打印件的力学性能测试结果如图 17 所示。在高速打印模式下随着打印速度的提高,CLIP 打印样件的拉伸强度逐渐降低。

导致 CLIP 打印件的拉伸强度随打印速度的提高而降低的原因是 CLIP 打印件随着打印速度的提高会出现分层现象(图 9),其本质原因是在分层处原本连续一体的树脂交联聚合固化被破坏,导致其力学性能降低。前面提到,随着打印速度提高,两个

打印步骤间的滞后越大,树脂交联固化的破坏程度就更强,就会导致打印件的力学性能进一步降低。如前所述本研究中所使用树脂打印件分层现象在 900 mm/h 的打印速度下才开始被观察到,但从打印件的拉伸强度与打印速度的关系分析中可以推断当打印速度介于 300~900 mm/h,打印过程中树脂固化与回流步骤间已出现无法被观察到的较小滞后,此较小滞后虽然不影响打印件表面质量,但影响了树脂连续一体的交联固化,进而影响打印件的力学性能。

图 17 CLIP 打印件拉伸强度随打印速度的变化

3 结论

(1) 高速打印模式下初始阶段 PDMS 薄膜的形态位置处于动态变化中,打印件底部会出现堆积或穿透现象。为确保打印件的完整性,需在打印件下方添加 3~5 mm 的扩展支撑,将底部堆积或穿透现象转移到扩展支撑处,从而消除其对打印样件本身影响。

(2) 在低速打印时树脂的回流速度与打印速度匹配较好,此时打印件无分层,力学性能与表面质量最佳。随着打印速度的提高树脂回流速度无法跟上打印速度,树脂固化与回流这两个原本同时进行的步骤间将会产生滞后,此时打印件会出现分层现象,力学性能降低,表面质量亦发生降低。当打印速度进一步提高时会使滞后过大而导致打印失败。该现象与树脂黏度和向上拉升时产生的负压有关。因此,在现有情况下较小的打印速度(如 300 mm/h)能够同时获得最优的表面质量和拉伸强度,且结果均优于普通 DLP 打印。

综上所述,CLIP 虽能实现高速打印,但树脂黏度较高导致的回流速度与打印速度不匹配限制了其打印速度与质量的进一步提升,需深入研究予以解决。

参 考 文 献

- [1] 李东方,陈继民,袁艳萍,等. 光固化快速成型技术的进展及应用[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(12): 1769-1774.
LI Dongfang, CHEN Jimin, YUAN Yanping, et al. Development and application of stereo lithography apparatus[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(12): 1769-1774.
- [2] 邵中魁,姜耀林. 光固化 3D 打印关键技术研究[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 180-184.
SHAO Zhongkui, JIANG Yaolin. Key technologies of SLA 3D printing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 180-184.
- [3] KIM G D, OH Y T. A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222(2): 201-215.
- [4] MOHAN P P, VENKATA R N, DHANDE S G. Slicing procedures in layered manufacturing: A review[J]. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(5): 274-288.
- [5] CHEAH C M, FUH J Y H, NEE A Y C, et al. Characteristics of photopolymeric material used in rapid prototypes Part II. Mechanical properties at post-cured state[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 67(1): 46-49.
- [6] CHOCKALINGAM K, JAWAHAR N, CHANDRA-SEKHAR U. Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(2): 106-113.
- [7] OROPALLO W, PIEGL L A. Ten challenges in 3D printing[J]. Engineering with Computers, 2016, 32(1): 135-148.
- [8] TUMBLESTON J R, SHIRVANYANTS D, ERMOSHKIN N, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. Science, 2015, 347: 1349-1352.
- [9] TARBOX T N, WATTS A B, CUI Z, et al. An update on coating/manufacturing techniques of microneedles[J]. Drug Delivery and Translational Research, 2018, 8(6): 1828-1843.
- [10] BLOOMQUIST C J, MECHAM M B, PARADZINSKY M D, et al. Controlling release from 3D printed medical

- devices using CLIP and drug-loaded liquid resins[J]. *Journal of Controlled Release*, 2018, 278: 9-23.
- [11] DENG X, HUANG B, HU R, et al. 3D printing of robust and biocompatible poly(ethylene glycol)diacrylate/nano-hydroxyapatite composites via continuous liquid interface production[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2021, 9(5): 1315-1324.
- [12] HUANG B, HU R, XUE Z, et al. Continuous liquid interface production of alginate/polyacrylamide hydrogels with supramolecular shape memory properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 231: 115736.
- [13] JANUSZIEWICZ R, TUMBLESTON J R, QUINTANILLA A L, et al. Layerless fabrication with continuous liquid interface production[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113: 11703-11708.
- [14] CAUDILL C L, PERRY J L, TIAN S, et al. Spatially controlled coating of continuous liquid interface production microneedles for transdermal protein delivery [J]. *Journal of Controlled Release*, 2018, 284: 122-132.
- [15] DENDUKURI D, PANDA P, HAGHGOOIE R, et al. Modeling of oxygen-Inhibited free radical photopolymerization in a PDMS microfluidic device [J]. *Macromolecules*, 2008, 41(22): 8547-8556.
- [16] O'BRIEN A K, BOWMAN C N. Modeling the effect of oxygen on photopolymerization kinetics [J]. *Macromolecular Theory and Simulations*, 2006, 15(2): 176-182.
- [17] JOHNSON A R, CAUDILL C L, TUMBLESTON J R, et al. Single-step fabrication of computationally designed microneedles by continuous liquid interface production[J]. *Plos One*, 2016, 11(9): e0162518.

作者简介: 叶淑源, 男, 1995 年出生。主要研究方向为高速光固化增材制造。
E-mail: 1810293031@email.szu.edu.cn

周习远, 男, 1995 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为高速光固化增材制造。

E-mail: gmasonzhou@gmail.com

劳长石, 男, 1979 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为增材制造。

E-mail: cslao@szu.edu.cn

陈张伟(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为增材制造。

E-mail: chen@szu.edu.cn