

《先进制造》专栏

[编者按]制造业是国民经济发展的基础性、战略性支柱产业,是科技创新的主战场,是立国之本、兴国之器、强国之基。制造技术与信息技术、材料科学、纳米科学、生命科学的交叉融合催生了数字制造、增材制造、纳米制造、生物制造等新的领域。制造业需要聚焦前瞻性、引领性和颠覆性科学技术,加强基础研究、前沿交叉研究和基础关键共性技术研发,提升高端制造业发展的核心竞争力,实现“中国制造”到“中国创造”的转变,推进制造业与新能源开发深度融合,实现绿色低碳可持续发展。

从本期开始,本刊推出《先进制造》专栏。本期专栏的4篇文章涉及“生物制造”“增材制造技术”“精密热压技术”“先进涂层工艺”“高性能密封件”等方面,在一定程度上反映了本领域所关心的关键科学技术问题和前沿进展。

本期专栏负责人简介:

胡永乐,工学博士,长沙理工大学教授,曾在国防科工委、解放军原总装备部某基地从事相关工程技术研究,主要从事极端环境下高性能金属材料多尺度设计和制备、加工、成型的性能控制,强动载作用下损伤断裂与破坏机理的科研与教学工作。主持原总装备部和军委科技委科技创新项目、国家自然科学基金等国家和国际合作项目(CTBTO项目)10余项,发表学术论文100余篇,获发明专利授权15项。获得国家科技进步一等奖1项,军队科技进步一等奖1项、二等奖3项、三等奖5项,研究成果在国防科研试验和相关型号产品中得到成功应用,社会经济效益显著。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.001

文章编号:1672-9331(2022)04-0001-08

引用格式:何超凡,贺永.基于投影式光固化的高精度生物3D打印策略综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):1-8.

Citation: HE Chaofan, HE Yong. High-precision 3D bioprinting strategy based on projection-based light curing[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 1-8.

基于投影式光固化的高精度生物3D打印策略综述

何超凡¹, 贺永^{1,2,3}

(1. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 癌症中心, 浙江 杭州 310058;
3. 郑州大学 材料加工与模具重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要:【目的】探讨投影式光固化3D打印(projection-based 3D printing, PBP)在打印生物材料时影响打印精度的因素,研究高精度生物3D打印策略。【方法】分析生物材料相比于传统聚合物的不同特性。结合PBP技术的特点,从材料体系、打印工艺、曝光参数和设备开发4个方面探讨并总结提高打印精度的方法。【结果】明确了生物材料打印精度不佳的主要因素,总结了可行的高精度生物3D打印策略。【结论】生物3D打印的精度上限取决于光学精度,然而还有诸多因素共同决定了其精度下限,例如曝光参数、打印工艺、材料体系和光学系统畸变等,因此,综合考虑这些因素对实现高精度生物3D打印至关重要。

关键词:投影式光固化3D打印;高精度;生物3D打印;生物材料;增材制造

中图分类号:TH161

文献标志码:A

0 引言

增材制造也称为3D打印、快速原型制造。作为一种新兴的制造技术,增材制造相比于传统的

减材或等材制造,能够生产复杂的内部结构和高度定制化的模型^[1-3]。因为这些独特的优点,增材制造技术在近年来得到了迅速发展。

光固化3D打印技术通常使用光敏材料作为单体或低聚物,通过离子或自由基进行光聚合。

收稿日期:2022-10-03;修回日期:2022-10-13;接受日期:2022-10-15

基金项目:国家重点研究开发计划(2018YFA0703000);国家自然科学基金资助项目(T2121004、U1909218)

通信作者:贺永(1979—)(ORCID:0000-0002-9099-0831),男,教授,主要从事生物3D打印方面的研究。

E-mail:yongqin@zju.edu.cn

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

立体光刻(stereolithography, SLA)是最早的光固化3D打印技术,其基本原理是将激光束聚焦在光敏材料表面,由点到线,由线到面,再由面形成三维实体,如图1(a)所示。

投影式光固化(projection-based 3D printing, PBP)已经成为一种新流行的光固化3D打印技术,其基本原理是紫外光被数字微镜器件(digital micromirror devices, DMD)芯片调制形成特定图案,并将其投射到光敏材料上,以固化被照射到的材料区域,再通过成型平台的Z轴移动以形成三维结构。PBP在打印中单次曝光就能形成整个的二维平面,因此打印效率相比于SLA提升了很多,如图1(b)所示。

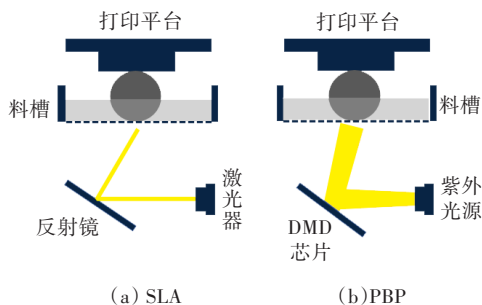


图1 光固化3D打印技术原理

Fig.1 Principles of photo-curing 3D printing technology

目前,投影式光固化技术被广泛地应用到了生物3D打印领域,例如载细胞打印^[4]、微器件^[5]、牙齿模型^[6]及多孔支架^[7]等。基于PBP的3D打印技术从原理上讲具有很高的分辨率,其光学精度主要由DMD芯片和光学成型系统决定。DMD芯片是一种反射式光调制器^[8],主要用于高速、准确和可靠的空间光调制。它由微米尺寸的微镜阵列组成,每个微镜代表一个DMD像素,并且可以单独控制开关状态以生成调制光图案。目前,DMD芯片的规格可按解析度分为 640×480 、 800×600 、 $1\,027 \times 768$ 、 $1\,280 \times 1\,024$ 和 $1\,920 \times 1\,080$ 等。PBP打印机中常用的DMD芯片规格为 $1\,920 \times 1\,080$ 。这意味着在一次曝光过程中同时生成大约200万个像素,这也正是PBP高效率的根本原因。每次曝光中的特征配置可以根据光学系统缩放到非常小的尺寸。单次曝光时,越小的曝光面积意味着单个像素的尺寸越小,从而精度也就更高。

光学精度决定了PBP打印理论精度的上限。然而在实际打印过程中,打印精度还受到许多因素

的制约,例如曝光参数、打印工艺、材料体系及光学系统畸变等因素。这些因素在生物3D打印时的影响尤为明显。由于生物材料必须具有良好的生物相容性,因此通常具有含水量高、质地软脆及官能化程度低等特点。此外,生物墨水也不能像传统打印墨水那样添加流平剂、稀释剂等化学添加剂。诸多因素的综合影响决定了PBP生物3D打印的精度下限,而如何精准调控各种参数对实现PBP的高精度生物3D打印至关重要,投影式光固化3D打印的精度如图2所示。

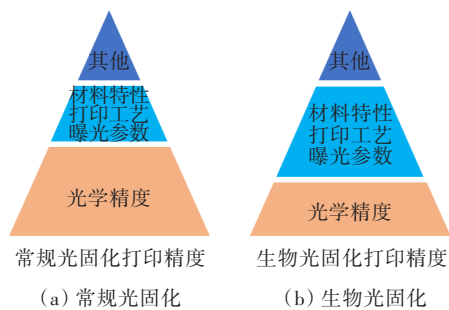


图2 投影式光固化3D打印的精度

Fig. 2 Resolution of projection-based 3D printing

1 投影式光固化高精度生物3D打印策略

目前已有一些学者从材料体系、打印工艺、曝光参数、设备开发等各个方面着手研究,致力于提高投影式光固化生物3D打印的打印精度。

1.1 材料体系

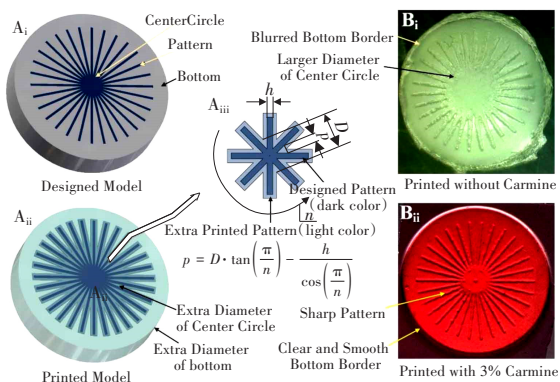
一般来讲,基于光固化的生物3D打印墨水通常包含光敏生物材料、生物活性因子、细胞、光引发剂、光吸收剂以及溶剂等。不同的材料体系对打印精度有着非常重要的影响,因此,如何调控各组分的配比是保证打印精度的基础。在材料性能方面,对于强度比较高的树脂等光敏材料^[9],精确控制打印参数较为容易,但对于含水量高、弹性好、易变形的生物软材料却极难调控打印参数。以常用的生物材料甲基丙烯酸酯化明胶(methacrylate gelatin, GelMA)为例^[10],它是一种由天然聚合物改性而成的光固化水凝胶,已证明具有非常好的生物相容性,可在可见光下数秒内交联,已经被广泛应用于组织工程和再生医学领域。但由于GelMA是一种由各种官能团组成的复杂混合物,在反应过程中会产生复杂的交联反应,总体上被归类为自由基引发的链式交联反应^[11],但很难确定反应的程

度。此外,明胶分子链比交联基团大得多,很难描述为小分子单体的聚合。再者,常用于提高传统光敏材料打印精度的添加剂,如稀释剂和流平剂等化学添加剂不具有生物相容性,也不能应用于水凝胶的打印中。可以看出,生物材料的打印仍然是一项重要且困难的任务。因此,有研究建立了水凝胶的光交联理论^[12],通过加入一定量的吸光剂来控制交联深度,以此建立使用不同参数对打印分辨率进行定量评价的标准化方法,并且通过改变水凝胶浓度、取代度和光交联时间,精确地调节了打印样品的力学性能与结构保真度^[13],PBP打印精度评价模型如图3(a)所示。

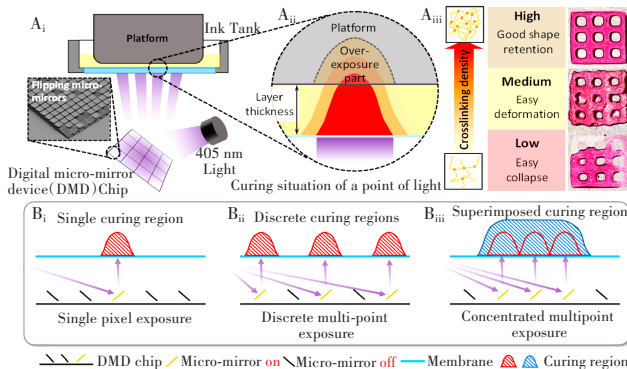
此外,也有研究针对生物材料的可打印性进行了系统的探讨^[14],沿着墨水配制-参数优化-量化评价-打印规范化的工艺路线,探讨了如何提升投影式光固化生物3D打印的质量,建立了可打印性评价标准,构建了打印过程模型。该研究也基于生

物材料交联过程中的流变-交联度特性,总结出了不同应用场景下最优的材料配比,并对PBP打印过程中的误差来源进行了分析和调控,如图3(b)所示。

PBP在制备复杂的细胞三维结构时具有优越的速度、分辨率和适应性,需要光引发剂(photo initiator, PI)和紫外线吸收剂(ultraviolet absorbent, UA)的组合,后者在生物墨水的光聚合过程中起着关键作用。然而,PI和UA的组合针对生物打印的场景需要特殊优化。有研究比较了细胞生物打印中最常用的PI和UA^[15],以优化组合。对PI的交联时间和打印适应性进行了评估,最大限度地减少制造过程中紫外线照射对细胞的损害。另一方面,合理调控UA能够防止焦点外的过固化和光散射。对体系内光场的时空精确调控是实现水凝胶生物材料理想的交联性和高分辨率以创建复杂的3D细胞结构所必需的,PI和UA对打印精度的影响如图4(a)所示。

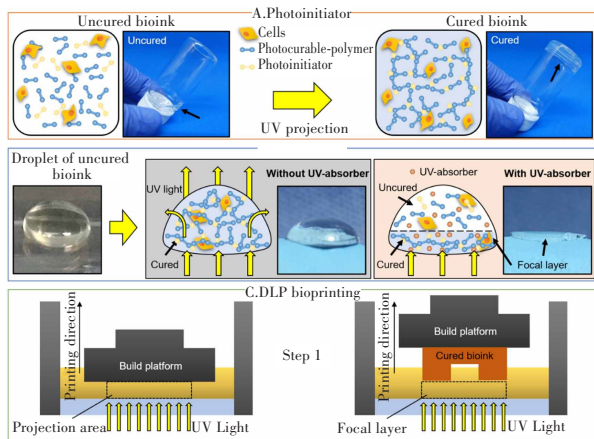


(a) PBP打印精度评价模型^[13]

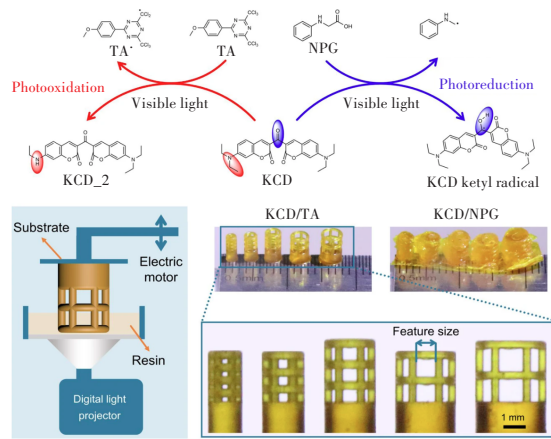


(b) PBP打印过程的误差来源分析^[14]

图3 生物墨水可打印性分析
Fig.3 Printability analysis of bio-ink



(a) 生物光固化打印中光引发剂与光吸收剂对打印精度的影响^[15]



(b) 新型光引发剂设计^[17]

图4 光引发剂/吸收剂对打印精度的影响

Fig.4 Effect of photo-initiator/absorber on printing resolution

除了对常用的光引发剂进行分析,也有研究开发新型光引发剂。传统的PBP打印过程中,目标区域的材料固化后,额外的紫外光能量进入光固化材料并在聚合物层发生折射和散射,很可能在后续层的打印过程中引发不需要的横向光聚合,从而导致打印分辨率降低,甚至干扰下一层的固化。因此,总是需要相当数量的非反应性光吸收剂(例如苏丹橙、柠檬黄)。然而,这种改进是以牺牲打印速度为代价的,因为大量光能被非反应性光吸收剂消耗,而不是由光引发剂消耗^[16]。因此有研究开发了一种新型的光交联材料,能够同时充当光引发剂和光吸收剂^[17],该材料在光聚合过程中充当光引发剂,同时在可见光曝光时充当光吸收剂,前者引发快速的光聚合和高打印速度,而后者通过限制光的散射来确保高打印分辨率,新型光引发剂设计如图4(b)所示。

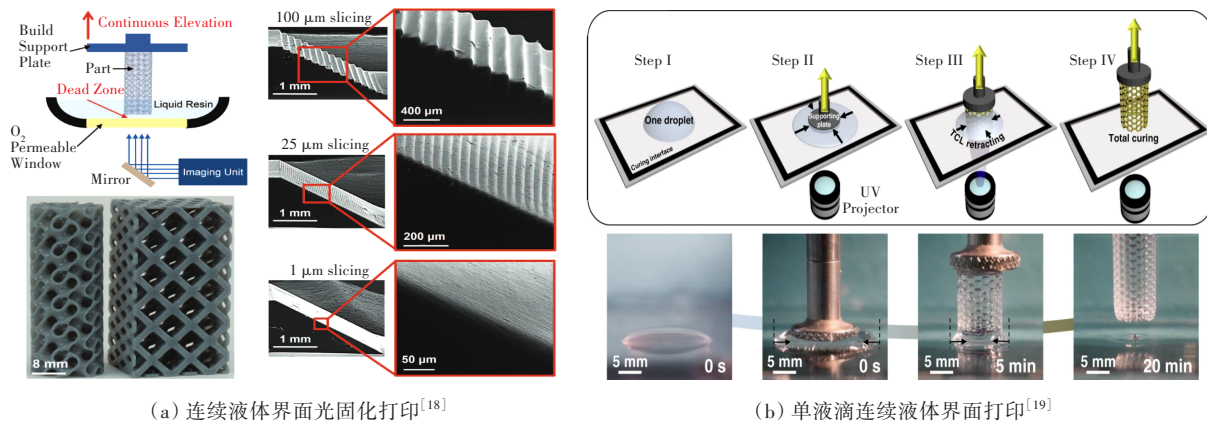
1.2 打印工艺

在打印工艺方面,传统的投影式光固化打印中,使用较薄的切片打印模型虽然能够减少台阶效应,提高Z向精度,但会导致总打印时间较长,显著降低打印效率。因此近几年有研究提出了用连续固化代替逐层固化过程的连续打印的概念。DESIMONE等开发了连续液界面法(continuous

liquid interface production, CLIP)^[18],在紫外图像投影面下方设置透氧窗口。由于氧气能够抑制材料的聚合,该窗口创建了一个称为“死区”的永久性液体界面,以实现连续打印,如图5(a)所示。而后又有学者提出了单液滴连续打印技术^[19],如图5(b)所示。该技术利用液滴的三相接触线(three-phase contact line, TCL)的退缩特性,从单一液滴制备可控的3D结构,从而将液体残留量降至最低。

CLIP打印作为一种快速高效的光固化打印方法,非常符合生物3D打印的需求。因此有学者使用CLIP技术制造离子交联型海藻酸盐和共价交联型聚丙烯酰胺形成的双网络水凝胶^[20],并构造了具有形状记忆特性和导电性的水凝胶。此外,除了利用透氧层形成“死区”,也有研究通过润滑剂亚层形成恒定的油膜来实现连续打印^[21]。该方法由于需要使用额外的润滑剂亚层,在生物相容性方面有待进一步研究,目前并未应用于生物3D打印。连续PBP打印过程通过在每个打印周期内精确控制光固化材料的固化厚度和打印平台的上升速度,有效地减小了台阶效应,提高了Z轴方向的打印精度。

也有研究将单次曝光拆分成两次^[22],在第二次曝光前,将打印平台横向移动一小段距离,使得



(a) 连续液体界面光固化打印^[18]

(b) 单液滴连续液体界面打印^[19]

图5 连续打印工艺

Fig. 5 Continuous printing process

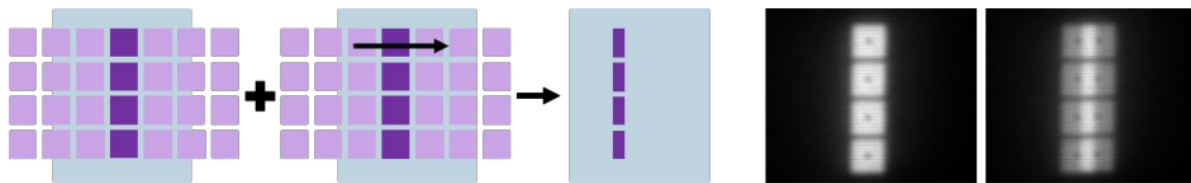
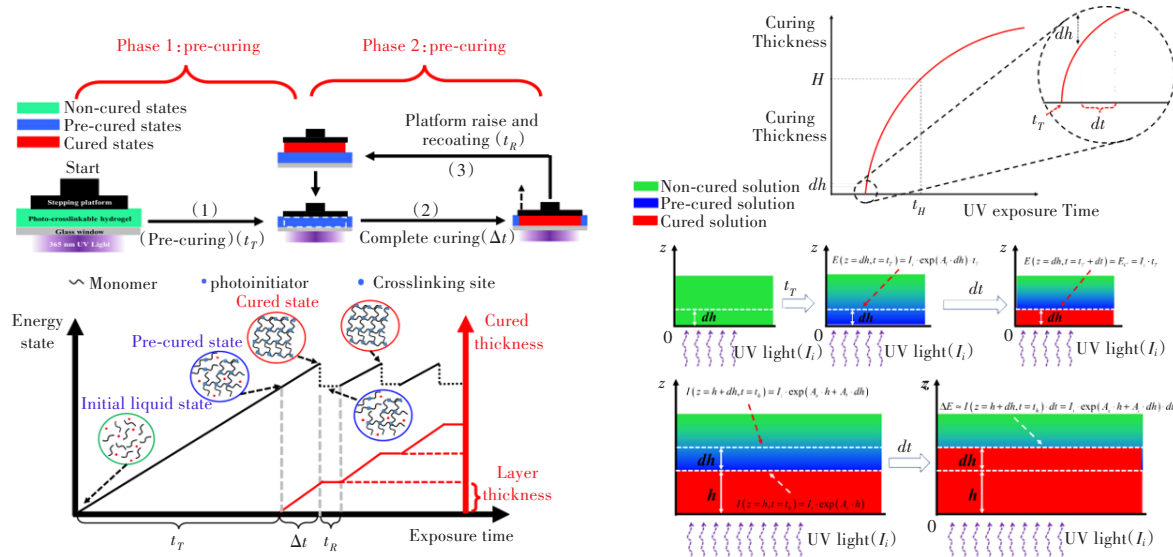


图6 二次曝光构建亚像素结构方法^[22]

Fig. 6 Method of constructing sub-pixel structure by secondary exposure^[22]

图7 水凝胶的雅各布工作曲线模型以优化曝光参数^[23]Fig. 7 Jacob working curve model of hydrogel to optimize exposure parameters^[23]

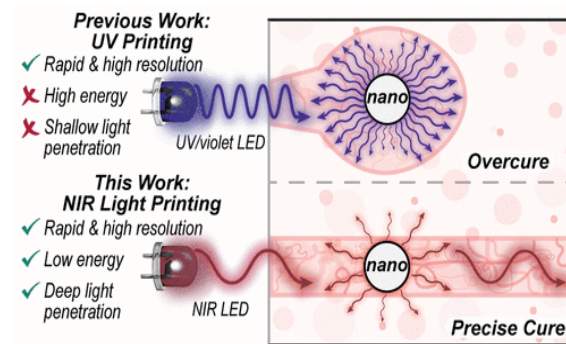
两次曝光仅重叠一小部分。而一次曝光的能量很低不足以固化材料,仅在两次曝光的重叠区域中,才实现完全固化。通过这样的方式来构造亚像素结构也能够一定程度上提高打印精度,如图6所示。

1.3 曝光参数

有研究通过建立理论模型来预测光固化材料在PBP打印过程中的雅各布工作曲线^[23-24]。通过对单层固化过程的微分分析,根据固体和液体的吸光度和某一光固化材料的凝胶化时间,得到了雅各布斯工作曲线以确定紫外光曝光时间与各层固化厚度之间的关系。基于准确的雅各布工作曲线,提出了一种可调预光固化打印方法^[23],并将光固化溶液的固化过程分为预固化和进一步固化两个子过程。在预固化过程中,由于在随后的打印期间连续的UV曝光,光固化溶液最初被预固化并保持在预凝胶状态。然后,在每个打印周期中快速固化预固化的光固化溶液以形成设计的厚度。此外,将紫外线吸收剂添加到光固化水凝胶溶液中,以调节预固化过程。使用10 μm 切片进行打印,可调预固化打印的总打印时间约为传统打印的5.6%,10 μm 切片可调预固化打印方法显著消除了表面的阶梯效应,从而获得了更好的打印精度,如图7所示。

目前的光固化技术主要依赖紫外光(波长 $\lambda \leq 400 \text{ nm}$)进行聚合。将光源扩展到可见光或近红外光($\lambda \geq 780 \text{ nm}$)可以拓展打印窗口。由于可见

光/近红外光能量低的特性,非常适合载细胞打印。而由于可见光/近红外深穿透的特性^[25],能够降低含细胞生物墨水等复合材料结构的打印精度,见图8。

图8 紫外光与近红外光打印的区别^[25]Fig. 8 Difference between UV and near-infrared printing^[25]

1.4 设备开发

PBP打印机通常分为上投影式和下投影式两种^[26-29]。两种方式的投影镜头分别位于材料槽的上方和下方。在下投影式的打印机中,料槽底部是透光透氧材料,通常是氟化乙烯丙烯共聚物(fluorinated ethylene propylene, FEP)薄膜。光线透过FEP薄膜照射在光敏材料表面进行固化,在固化完一层后工作平台向上移动一个层高的距离进行下一次固化。由于料槽底部离光源更近,因此需要FEP薄膜拥有良好的透氧性以抑制底部的聚合反应,从而避免材料聚合后粘在薄膜上影响下

一次固化。这种方式的优点是料槽不需要存放很多的材料,且工件垂直方向的尺寸不受料槽高度限制;其缺点是由于FEP薄膜是弹性材料,受到液体重力和表面张力影响会发生变形,从而导致单次曝光材料固化的厚度不均匀;此外,变形的薄膜还会导致光线的折射从而进一步影响打印精度。与之相对的,上投影式PBP打印机则是将投影镜头放在料槽上方,打印平台和工件浸没在材料中,与下投影一样的是,上投影式也需要FEP薄膜来确定打印界面和每一层的层高;由于薄膜在液体的上方只受到液体表面张力的影响,因此上投影式打印机产生的变形会小很多,更有利于提高打印精度。一般来讲,下投影式PBP打印机的精度上限大约是50~200 μm ,而上投影式的PBP打印机可以实现2~10 μm 的打印精度,因此在精度要求很高时,通常采用上投影式打印机。

在上投影式PBP打印过程中,光固化溶液的重新涂覆过程是必不可少的步骤,通常也需要一段时间让液体流平。在低于20 μm 精度的PBP打印过程中液体流平时间影响并不显著,但在微米级的打印中流平时间至关重要,这是因为光学系统将单次投影光进行高倍缩放导致景深变得很小,液体由于表面张力形成的拱形表面会导致曝光区域偏离光学系统焦点位置,从而对打印精度带来非常严重的影响,并且当实现更薄的切片以获得更高的打印精度时,流平时间就更加关键。

由于生物材料相比于常规材料具有更大的单体分子量和更高的黏度,并且也无法添加流平剂来调节液体黏度,因此流平时间的控制与相应的误差调控更为关键,但是目前并没有关于流平时间的具体研究,通常是根据经验设定一个大概的范围,这种基于经验的方法高度依赖操作者的熟练度,这也导致PBP生物打印的精度无法进一步提高。过短的流平时间导致打印精度降低,过长的流平时间则会严重影响打印效率。因此需要建立一套黏性液体流变特性模型,以适应不同材料的高精度PBP打印需求,预测不同黏度液体需要的流平时间。同时,由于液体无法完全流平,投影光照射在拱形液面时不可避免地会发生折射和散射,通过黏性液体流变特性模型确定液体表面形貌后,反向对DMD芯片调制光图案进行误差补偿,建立基于光场折射、散射和畸变的误差补偿模型也有助于进一步提高PBP打印的精度,如图9所示。

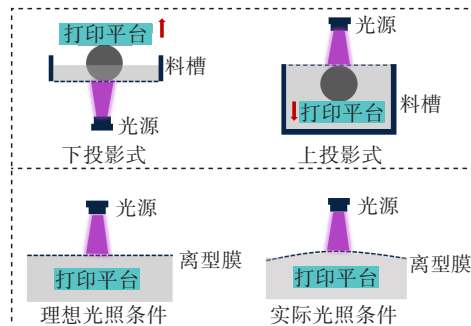


图9 不同投影方式及液体表面张力的影响

Fig. 9 Effects of different projection methods and liquid surface tension

2 讨论

基于投影式光固化的生物打印技术提供了比典型的基于挤压的生物打印方法更高的空间分辨率,可以更好地模拟生物组织的复杂结构。并且还可以制造自由形式的三维和平面结构,这是其他3D打印方法无法轻易实现的。随着光固化技术的发展,常规光敏树脂的打印精度研究已经趋于完善,但很少有人关注细胞兼容生物材料的打印精度,限制了这一有前途的技术在生物医学领域的发展。如何兼顾生物活性的同时提高打印精度仍然是一大挑战。此外,打印结构的设计对打印精度也有很大的影响,在生物3D打印中常常需要设计多孔细胞支架,因此合理的设计拓扑结构有助于达到理想的打印效果,但目前并无相关的生物3D打印设计软件。

3 结论

投影式光固化3D打印的打印精度与光学精度有一定的关系,但并无决定性的关系。对于常规的硬质材料,较高的光学精度能将打印精度提升一个档次,但对于质地较软的生物材料而言,光学精度的高低只是其打印精度的基础,更多的要依靠材料性能、打印工艺、曝光参数和设备研发的共同提高才能实现理想的打印效果。

[参考文献]

- [1] 刘桐,鹿宪珂,刘琪,等.增材制造在材料专业教学与实践中的应用探讨[J].教育教学论坛,2021(21):77-80.

- LIU Tong, LU Xianke, LIU Qi, et al. Discussion on application of additive manufacturing in teaching and practice of material engineering major[J]. Education and Teaching Forum, 2021(21):77-80.
- [2] 陈雪. 增材制造技术的应用与挑战[J]. 广东科技, 2021,30(5): 79-81.
CHEN Xue. Application and challenge of additive manufacturing technology[J]. Guangdong Science & Technology, 2021,30(5):79-81.
- [3] 周明. 建设增材制造技术应用(3D打印)专业的探索研究[J]. 工业和信息化教育, 2021(5):55-58,62.
ZHOU Ming. Exploration and research on building the specialty of additive manufacturing technology application (3D printing) [J]. Industry and Information Technology Education, 2021(5):55-58,62.
- [4] 何希文,王疏影,张楚,等. DLP高精度3D打印系统搭建及其在细胞打印中的应用[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(3):216-222. DOI:10.13250/j.cnki.wndz.2020.03.008.
HE Xiwen, WANG Shuying, ZHANG Chu, et al. Construction of DLP high-precision 3D printing system and its application in cell printing[J]. Micronanoelectronic Technology, 2020, 57(3): 216-222. DOI:10.13250/j.cnki.wndz.2020.03.008.
- [5] FIEDOR P, ORTYL J. A new approach to micromachining: high-precision and innovative additive manufacturing solutions based on photopolymerization technology[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(13): 2951. DOI:10.3390/ma13132951.
- [6] KIM S Y, SHIN Y S, JUNG H D, et al. Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques[J]. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 2018, 153 (1):144-153. DOI:10.1016/j.ajodo.2017.05.025.
- [7] SHIN C S, CHANG Y C. Fabrication and compressive behavior of a micro-lattice composite by high resolution DLP stereolithography[J]. Polymers, 2021, 13(5):785. DOI: 10.3390/polym13050785.
- [8] 熊峥. 基于DMD的数字光刻技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
XIONG Zheng. Research on DMD-based digital photolithography[D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [9] 齐剑峰,张远明,郭小锋,等. 单层曝光时间对DLP光敏树脂3D打印成型精度的影响[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(6):10-13,21. DOI:10.13416/j.ca.2019.06.003.
QI Jianfeng, ZHANG Yuanming, GUO Xiaofeng, et al. Effect of single-layer exposure Time on the accuracy of DLP photosensitive resin 3D printing[J]. China Adhesives, 2019, 28(6): 10-13, 21. DOI: 10.13416/j. ca. 2019.06.003.
- [10] YUE K, TRUJILLO-DE SANTIAGO G, ALVAREZ M M, et al. Synthesis, properties, and biomedical applications of gelatin methacryloyl (GelMA) hydrogels[J]. Biomaterials, 2015, 73: 254-271. DOI: 10.1016/j. biomaterials.2015.08.045.
- [11] WATTS D C. Reaction kinetics and mechanics in photo-polymerised networks[J]. Dental Materials, 2005, 21 (1):27-35. DOI:10.1016/j.dental.2004.10.003.
- [12] OTSU T, YOSHIDA M. Role of initiator-transfer agent-terminator (iniferter) in radical polymerizations-polymer design by organic disulfides as iniferters[J]. Makromolekulare Chemie-Rapid Communications, 1982, 3(2):127-132. DOI:10.1002/marc.1982.030030208
- [13] SUN Y, YU K, JING N, et al. Modeling the printability of photocuring and strength adjustable hydrogel bioink during projection based 3D bioprinting[J]. Biofabrication, 13(3): 035032. DOI: 10.1088/1758-090/aba41310.3791/60545.
- [14] YU K, ZHANG X J, SUN Y, et al. Printability during projection-based 3D bioprinting[J]. Bioactive Materials, 2022, 11: 254-267. DOI: 10.1016/j. bioactmat. 2021.09. 021.
- [15] HUH J, MOON Y W, PARK J, et al. Combinations of photoinitiator and UV absorber for cell-based digital light processing (DLP) bioprinting[J]. Biofabrication, 2021, 13 (3): 2021May24;13(3). DOI:10.1088/1758-5090/abfd7a.
- [16] DOLINSKI N D, PAGE Z A, CALLAWAY E B, et al. Solution mask liquid lithography (SMaLL) for one-step, multimaterial 3D printing[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2018, 30(31): e1800364. DOI: 10. 1002/adma.201800364.
- [17] ZHAO X Y, ZHAO Y, LI M D, et al. Efficient 3D printing via photooxidation of ketocoumarin based photopolymerization[J]. Nature Communications, 2021, 12:2873. DOI:10.1038/s41467-021-23170-4.
- [18] TUMBLESTON J R, SHIRVANYANTS D, ERMOSHKIN N, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. Science, 2015, 347(6228): 1349-1352. DOI: 10. 1126/science.aaa2397.
- [19] ZHANG Y, DONG Z C, LI C X, et al. Continuous 3D printing from one single droplet[J]. Nature Communications, 2020, 11: 4685. DOI: 10.1038/ s41467-020-18518-1.
- [20] HUANG B X, HU R, XUE Z H, et al. Continuous liquid interface production of alginate/polyacrylamide hydrogels with supramolecular shape memory properties [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 231: 115736. DOI: 10. 1016/j.carbpol.2019.115736.
- [21] BHANVADIA A A, FARLEY R T, NOH Y, et al. High-resolution stereolithography using a static liquid constrained interface[J]. Communications Materials, 2021, 2: 41. DOI:10.1038/s43246-021-00145-y.
- [22] BAUCKHAGE Y, HEINRICH A. Curing subpixel structures for high-resolution printing of translucent materials using standard DLP-projectors[C]//SPIE OPTO. Proc SPIE 11294, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XII, San Francisco, California, USA. 2020, 11294: 36-43.

- [23] LI Y, MAO Q J, YIN J, et al. Theoretical prediction and experimental validation of the digital light processing (DLP) working curve for photocurable materials[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37: 101716. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101716.
- [24] LI Y, MAO Q J, LI X K, et al. High-fidelity and high-efficiency additive manufacturing using tunable pre-curing digital light processing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100889. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100889.
- [25] STEVENS L M, TAGNON C, PAGE Z A. "Invisible" digital light processing 3D printing with near infrared light[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14 (20): 22912–22920. DOI: 10.1021/acsami.1c22046.
- [26] 赵光华, 刘志涛, 李耀棠. 光固化3D打印: 原理、技术、应用及新进展[J]. 机电工程技术, 2020, 49(8): 1–6, 65. ZHAO Guanghua, LIU Zhitao, LI Yaotang. Stereolithography: principle, technologies, applications and novel developments[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(8): 1–6, 65.
- [27] 沈韬. 基于面曝光的3D打印机系统研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2017. SHEN Tao. Research of 3D printer system based on DLP [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2017.
- [28] 周璇, 王志明. 基于DLP原理的3D打印机设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2018(4): 37–40. DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2018.04.005. ZHOU Xuan, WANG Zhiming. Design and realization of 3D printer based on the principle of DLP[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(4): 37–40. DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2018.04.005.
- [29] 王阜超, 陈继民, 晏恒峰. 面曝光固化3D打印机打印速度发展[C]//特种加工技术智能化与精密化: 第17届全国特种加工学术会议论文集(摘要). 广州, 2017: 222. WANG Fuchao, CHEN Jimin, YAN Hengfeng. Development of printing speed of surface exposure curing 3D Printer[C]//Special Machining Technology Intellectualization and Precision: Proceedings of the 17th uangzhou, 2017: 222.

High-precision 3D bioprinting strategy based on projection-based 3D printing

HE Chaofan¹, HE Yong^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Cancer Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. Key Laboratory of Materials Processing and Mold, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract:[Purposes] This paper aims to discuss the factors that affect the printing resolution of projection-based 3D printing (PBP) in bio-materials and study the high-precision 3D bioprinting strategy. [Methods] The different properties of biomaterials compared with traditional polymers were analyzed. Based on the characteristics of PBP, the methods to improve the printing resolution are discussed and summarized from four aspects: material system, printing process, exposure parameters and equipment development. [Findings] The main factors of poor printing resolution of biomaterials were identified, and feasible high-precision 3D bioprinting strategies were summarized. [Conclusions] The upper limit of the resolution of bioprinting depends on the optical resolution. However, many factors synergetic determine the lower limit, such as exposure parameters, printing process, material system, optical system distortion, etc. Therefore, it is essential to comprehensively consider these factors to achieve high-precision 3D bioprinting consider these factors to achieve high-precision 3D bioprinting.

Key words: projection-based 3D printing; high-precision; 3D bioprinting; biological material; additive manufacturing

Manuscript received: 2022-10-03; **revised:** 2022-10-13; **accepted:** 2022-10-15

Foundation item: Project (2018YFA0703000) supported by the National Key Research and Development Program of China; Projects (T2121004, U1909218) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: HE Yong (1979—) (ORCID: 0000-0002-9099-0831), male, professor, research interest: 3D bioprinting. E-mail: yongqin@zju.edu.cn

(责任编辑: 赵冰; 校对: 刘平; 英文编辑: 田湘)