

连续液面成型 3D 打印技术及建筑模型制作

林宣成¹ 刘华刚^{2*}

¹西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055

²中国科学院福建物质结构研究所国家光电子晶体材料工程技术研究中心, 福建 福州 350002

摘要 提出了一种新型的高透气薄膜元件实现连续液面成型 3D 打印技术的方案并进行了实验验证。连续液面成型 3D 打印技术采用下入光结构, 在光源与打印平台之间引入一个透明的透气薄膜元件, 氧气可以通过薄膜元件渗透进入光固化成型表面, 由于氧阻聚效应在光固化成型表面与透气薄膜之间产生一层液态未固化层。利用这一未固化层, 3D 打印平台可以连续不间断上移, 实现了高速的连续光固化 3D 打印, 纵向打印速度超过 650 mm/h。由于连续液面成型 3D 打印技术较高的打印精度和效率, 利用该技术进行建筑模型的制作, 并将其应用于建筑模型的风洞测试研究。

关键词 材料; 3D 打印; 光固化; 连续液面成型; 透气薄膜

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0816002

Continuous Liquid Interface Production 3D Printing Technology and Its Application in Fabrication of Architecture Models

Lin Xuancheng¹ Liu Huagang²

¹ School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

² The National Engineering Research Center for Optoelectronic Crystalline Materials, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract In this paper, a technique to realize continuous liquid interface production 3D printing is presented by taking advantage of a new excellent gas permeable film, and is also demonstrated experimentally. The continuous liquid interface production 3D printer is constructed in a bottom-up schematic. A transparent and permeable film is introduced and placed between a light source and a 3D printing platform. In the process of printing, oxygen is injected into the printer and it permeates to the surface of photo-polymerizing layer through the permeable film. As a result of oxygen inhibition, an uncured liquid resin layer is generated between the permeable film and the lower surface of photo-polymerizing layer. Thanks to this uncured layer, the printing platform can be moved up continuously without interruption, achieving a high-speed continuous photo-polymerizing 3D printer with the maximum speed up to 650 mm/h in the longitudinal direction. Since the continuous liquid interface production 3D printer has various advantages such as high accuracy and efficiency, it is applied to fabricating architecture models for the experiments of wind tunnel test.

Key words materials; 3D printing; photo-polymerizing; continuous liquid interface production; permeable film

OCIS codes 160.5335; 350.3390; 110.6895

1 引言

光固化快速成型工艺是 3D 打印领域中应用最早,也是当前工业加工中应用最广泛的一种快速成型技术,而传统的立体光固化成型(SLA)技术采用逐层固化、层层累积的方式构造三维物体^[1-2],层与层之间需要中断光固化过程,重新敷设精密的液态树脂层,因此 SLA 技术存在系统复杂、打印速度慢、难以规模化应用

收稿日期: 2016-07-15; 收到修改稿日期: 2016-07-26

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA09020301)、福建省科技重大专项(2013HZ0003)

作者简介: 林宣成(1994—),男,本科生,主要从事建筑设计与模型制作方面的研究。E-mail: 1824380811@qq.com

* 通信联系人。E-mail: liuhg@fjirms.ac.cn

等诸多问题。2015年3月,Science期刊封面报道了一种基于氧阻聚效应的连续液面成型(CLIP)技术^[3],该技术利用美国杜邦公司发明的一种特氟龙薄膜(Teflon AF2400)和氧气来构造一层液态“盲区”(dead zone),实现了快速的连续光固化3D打印,最高速度达到500 mm/h。该项革命性的技术比传统SLA技术快100倍以上,有望广泛应用于三维物体的批量化加工制造。因此CLIP技术引起了科技界以及产业界的高度关注并成为增材制造领域新的研究热点,谷歌、福特等公司为此追加投入数亿美元巨资以加快该技术的产业化进程。但是由于所采用的特氟龙材料价格极其昂贵,且透气率较低,限制了CLIP技术的推广应用以及打印速度的提高。寻找性能优越的透气薄膜材料就成为了进一步提高CLIP技术打印速度的关键。

本文利用一种新型的透明透气薄膜元件和氧阻聚效应实现了CLIP 3D打印技术和工艺,并获得了更高的打印速度。所采用薄膜元件透气率达到157格雷秒(格雷秒是指1.22 kPa压强下100 mL氧气通过1 inch²隔膜所用的时间,1 inch=2.54 cm),比杜邦公司的特氟龙材料高一个数量级以上。利用此透气薄膜元件实验验证了高速CLIP打印工艺,获得了最高650 mm/h的打印速度,并将该3D打印技术应用于建筑模型的制作以及风洞试验。

2 实验与应用

基于CLIP技术的3D打印机系统结构如图1(a)所示。一个特制的透明透气薄膜元件作为窗口位于打印平台与光源之间,并固定于液态光敏树脂槽的底部,打印原液为自由基光敏树脂。打印平台为一个由电机控制,可上下移动的工作台。3D打印过程开始前打印平台浸入液态树脂中并紧贴于透气窗。系统以405 nm激光二极管(LD)作为光源,经过滤波和整形后获得平顶光束,由3D模型分层驱动自下而上透过透气窗口投影到打印平台的下表面上。在光源照射的同时,通入氧气作为固化抑制剂,同时工作台连续匀速向上抬升,则工作台与透气窗之间的光敏树脂在光的照射下开始固化,但由于自由基光敏树脂的氧阻聚效应^[4],在透气窗和固化区域之间形成一层几十微米厚的液态未固化层,即固化盲区,如图1(a)所示。该固化盲区的存在使得固化区域与透气窗能轻松无损分离。随着打印平台的连续上升,固化层逐渐增厚,在打印平台与透气薄膜窗口之间形成固化的三维物体,从而实现了连续无间断的3D打印过程,从树脂槽中“生长”出一个三维物体。3D打印机的样机照片如图1(b)所示。

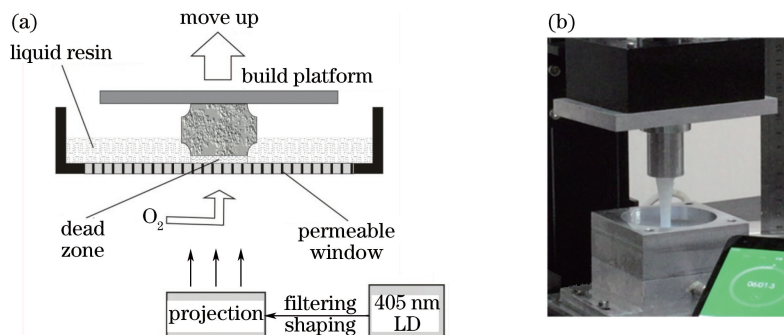


图1 连续液面成型3D打印。(a)结构示意图;(b)样机照片

Fig. 1 Schematic and photo of the CLIP 3D printer. (a) Schematic of CLIP 3D printing; (b) photo of the printer

在未通入氧气的条件下测量了光敏树脂固化厚度与光照能流之间的关系,如图2(a)所示。图2(a)给出了获得一定的固化厚度所需的光照能流数据,同时也表明光敏树脂的固化厚度随光照能流的增大而增大,通过增大光照的功率可以增加光固化的厚度。为验证透气薄膜的作用,首先通入氮气进行实验,在光源照射下树脂发生固化,固化层牢牢粘连在透气薄膜上,表明在氮气条件下氧气被隔绝,没有形成固化盲区。当通入氧气时,氧阻聚效应形成了一层薄的未固化液态层,固化层与透气薄膜可以轻松分离。实验还测量了不同光照强度下(单位面积光子数)的固化盲区厚度,如图2(b)所示。氧阻聚效应形成了不同厚度的固化盲区,可使已固化区域与透气薄膜很容易地分离,证明在合适的光照强度下,实现CLIP 3D打印工艺是完全可行的。另外,固化盲区的厚度随光照强度的变化具有明显的变化趋势,实测盲区厚度随着光照强度的增大而减小,因此通过增大光照强度来提高光敏树脂固化速度的方式是有限制的,在固化盲区接近零时就不能再继续提

高。因为实验采用的透气薄膜具有更高的透气率,可以产生更大的固化盲区厚度,最大可超过 $140\ \mu\text{m}$,大于采用特氟龙薄膜所产生的盲区厚度^[3],该 3D 打印系统可以支持更大的打印速度,在 6 min 内可打印出高度为 66 mm 的三维物体,如图 3(a)所示,最大速度超过 650 mm/h,比国际同类 3D 打印设备快约 30%。

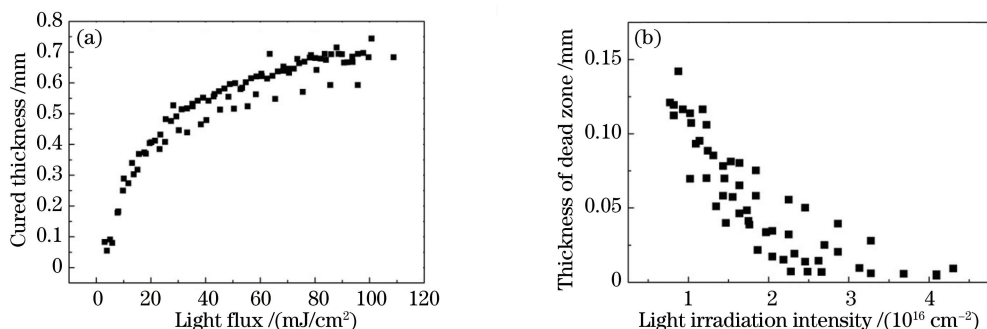


图 2 实验测量树脂固化厚度与盲区厚度。(a) 树脂固化厚度与光照能流之间的关系;(b) 盲区厚度与光照强度之间的关系
Fig. 2 Experimental data of the cured thickness and the dead zone thickness. (a) Relationship between the cured thickness and the light flux; (b) dead zone thickness versus different light irradiation intensities

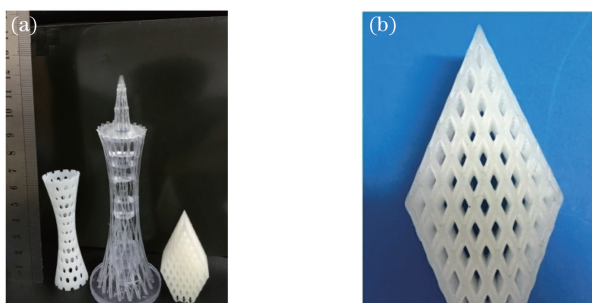


图 3 3D 打印样品

Fig. 3 Samples of 3D printing

由于 3D 打印技术几乎可以制作任意形状模型,且具有制作周期短、成本低、仿真度高等优势,近年来成为制作风洞实验模型的热门选择,大量应用于建筑设计和航空航天领域^[5]。据报道^[6],2022 年卡塔尔世界杯体育场在设计期间,就采用 3D 打印技术制作出模型,然后在风洞中测试体育场模型的空气动力学特性,以帮助设计师实现建筑物的最佳设计。基于 CLIP 技术的光固化 3D 打印机成型精度可达 $20\ \mu\text{m}$,比普遍使用的熔融挤出成型(FDM)技术高出 5~10 倍,可制作出置信度高、更加逼真的立体建筑模型,因此更适用于对精度要求较高的建筑模型风洞测试研究。图 4 为用 CLIP 3D 打印技术制作的电视塔模型,在风洞中模拟大气风场,借助激光粒子图像测速仪(PIV)和传感器,开展了电视塔和体育场等模型在不同风速和风向角下的风荷载初步测量实验,并测量了空气流动和温度分布。这些实验有助于验证和测试高层建筑的抗风设计的正确性和可靠性,优化复杂结构建筑的通风设计和空调布局。由于采用了 CLIP 3D 打印技术,单个建筑模型的打印时间由几十小时甚至几天缩短为几十分钟,打印精度也得到了提高。

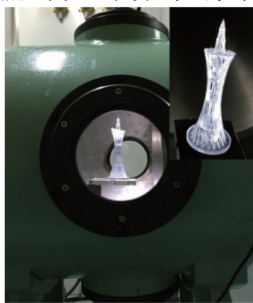


图 4 3D 打印建筑模型的风洞测试照片

Fig. 4 Wind tunnel test photo of an architecture model by 3D printing

3 结 论

提出了利用一种新型的高透气薄膜元件和氧阻聚效应实现 CLIP 3D 打印工艺的技术方案,实验测试了在氧气条件下的氧阻聚效应形成的固化盲区厚度以及实现 CLIP 工艺的条件,并验证了技术可行性。实现了高速 CLIP 3D 打印技术,最高纵向速度超过 650 mm/h,超过国外同类设备 30%。将这种高速的 3D 打印技术应用于建筑模型的制作上,可使建筑模型的制作时间缩短为几十分钟。

参 考 文 献

- 1 Melchels F P W, Feijen J, Grijpma D W, *et al.* A review on stereo lithography and its applications in biomedical engineering[J]. *Biomaterials*, 2010, 31(24): 6121-6130.
- 2 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.
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.
- 3 Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, *et al.* Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1349-1352.
- 4 Dendukuri D, Panda P, Haghgooie R, *et al.* Modeling of oxygen-inhibited free radical photo-polymerization in a PDMS microfluidic device[J]. *Macromolecules*, 2008, 41(22): 8547-8556.
- 5 Wang Chao, Zhang Zhengyu, Yin Guofu, *et al.* A design method of the static aeroelastic aircraft model based on stereolithography for wind tunnel test[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*. 2014, 35(5): 1193-1199.
王 超, 张征宇, 殷国富, 等. 一种基于光固化快速成型的飞机静弹性风洞实验模型设计方法[J]. *航空学报*, 2014, 35(5): 1193-1199.
- 6 Tess. 3D printed models and wind-tunnel technology optimize stadium designs for 2022 FIFA World Cup in Qatar[OL]. (2016-06-13) [2016-07-01]. <http://www.3ders.org/articles/20160613-3d-printed-models-and-wind-tunnel-technology-optimize-stadium-designs-for-2022-fifa-world-cup-in-qatar.html>.