

引用格式: WANG Quan-dai, LIANG Min, CHENG Lin-kai, *et al.* Influence of Micro-feature parameters of Substrate on Light Transmittance in Constraint Surface Projection Stereolithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1):0124001
王权岱,梁民,程林凯,等. 约束面投影成型室基底微观特征对透光性的影响[J].光子学报,2020,49(1):0124001

约束面投影成型室基底微观特征对透光性的影响

王权岱,梁民,程林凯,杨明顺,李鹏阳,李言

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

摘 要:为了探明约束成型室基底微观孔隙特征对固化光源传播特性的影响规律,从而对光固化成型精度进行分析和预测,采用时域有限差分软件对成型室约束基底引入微孔特征条件下的透光性及在固化区光能量分布特性进行了数值模拟,并通过实验对模拟结果进行了验证.结果表明,约束基底引入微孔的形状、尺寸以及周期等微观几何特征影响基底的透光性及其透过基底在成型区的光强分布;相对于基底微孔形状,其尺寸和周期的影响更显著,减小微孔尺寸和周期有利于透光性以及光强在成型区分布的均匀性;微孔直径小于半波长、微孔边缘间距与微孔直径的比值小于 1 : 1 时可以显著减小微孔的负面影响;微孔直径远大于半波长时,基底上的微孔将在成型零件表面形成不期望的附加特征,从而影响成型精度.研究结果可以为基底制备提供工艺改进的方向和理论依据.

关键词:透光性;光强分布;时域有限差分法;基底微观特征;约束面投影

中图分类号:O435.1; TH692

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204901.0124001

Influence of Micro-feature parameters of Substrate on Light Transmittance in Constraint Surface Projection Stereolithography

WANG Quan-dai, LIANG Min, CHENG Lin-kai, YANG Ming-shun, LI Peng-yang, LI Yan

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To find out the influence rule of micro-pore geometric characteristics in the confined forming chamber on the propagation properties of the curing light source, and then analyze and predict the manufacturing accuracy in stereolithography process, numerical study was done using FDTD software to obtain the light transmittance of the substrate machined micro-pore array and the characteristics of light energy distribution in the curing zone. The simulation results were verified by experiments. The research results show that the shape, size and period of the micro-pore formed in the constrained substrate affect the light transmittance and the light intensity distribution in the forming area. Compared with the shape of the micro-pore on the substrate, the size and period of the micro-pore show a more significant effect, in which, reducing the size and period of the micro-pore facilitate the light transmittance and the light intensity uniformity improvement. If the diameter of micro-pore is less than half wavelength and the ratio of micro-pore edge spacing to micro-pore diameter is less than 1 : 1, the negative effect of micro-pore can be reduced significantly. When the diameter of micro-pore is much larger than half wavelength, an undesirable additional feature on the surface of the fabricated part will be formed due to the micro-pore in constrained substrate and thus affecting the manufacturing accuracy. The results can provide direction and theoretical basis for the improvement of substrate preparation process.

Key words: Constrained-surface projection; Curing chamber substrate; Light transmittance; Uniformity

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51775431, 51675422, 51375381)

第一作者:王权岱(1969-),男,教授,博士,主要研究方向为 3D 打印、机械表面科学. Email: quandaiw@163.com

通讯作者:杨明顺(1974-),男,副教授,博士,主要研究方向为 3D 打印、生产过程控制. Email: yangmingshun@xaut.edu.cn

收稿日期:2019-08-02;录用日期:2019-09-12

<http://www.photon.ac.cn>

of light intensity; Finite difference time domain method

OCIS Codes: 240.0310; 080.2720; 040.7190; 070.7345; 220.4241

0 引言

由产品原型快速制造向功能零件大规模直接制造是 3D 打印技术发展的趋势.面投影光固化 3D 打印一次成型一个零件截面轮廓^[1-3],其打印效率适应直接制造的需求.约束面投影相对于自由面投影工艺具有节约材料、变形小、固化效率高等优点,但其主要工艺问题是固化层在反复从作为成型约束壁面的树脂槽底剥离过程中会发生剥离失效,造成打印失败,从而降低了工艺的可靠性^[4-6].

解决打印固化层-基底界面粘附引起的工艺可靠性问题的常规方法主要包括:延长固化时间使树脂过固化以增加层间的结合强度^[7];采用具有低表面能的离型膜层减小固化层在基底的粘附力^[8-10];优化工艺,如采用两通道系统,使得界面分离所需要克服的法向固相界面间的粘结力转换成的侧向剪切力^[11-12],或者通过倾斜剥离使界面分离过程由面分离转变为线分离^[13-14].上述方法在一定程度上解决了固化层的粘附问题,但同时存在各自的不足:过固化方法存在曝光时间延长制约打印速度,以及变形影响成型精度的问题;采用中间功能膜层方法主要问题是功能膜在基底附着强度不足;优化的剥离方式在减小粘附力的同时附加了多余的动作,从而降低了成型效率.连续液面成型(Continuous Liquid Interface Production, CLIP)工艺利用氧气阻止光固化反应发生,在固化层和树脂槽底面间形成通常称为“阻聚区”的液态树脂区域,从而大大减小粘附力^[15].CLIP 工艺是目前解决固化层在基底粘附问题最为有效的方案,已经得到一定的应用^[16-18],但是该技术采用非晶氟树脂透氧窗,成本高,是规模化应用的障碍.采用核孔膜等代替非晶树脂作为透氧窗在一定程度上可以解决成本问题^[19],但是膜的变形影响成型精度.

针对形成阻聚区所需的透氧基底成本和基底变形问题,本文提出一种多孔石英玻璃+聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)膜低成本实现阻聚区的成型室约束基底方案,通过石英玻璃刚性支撑解决膜的变形问题,通过石英玻璃的微孔和 PDMS 实现透氧.为了探究支撑基底上微孔的引入如何影响透光性及光强分布,从而影响成型精度,对基底表面微孔几何特征对透光性特别是对固化成型区光强分布的影响规律进行了模拟和实验研究.

1 成型基底方案及阻聚区形成机理

1.1 成型室约束基底方案

提出用于形成阻聚区的成型室基底方案如图 1 所示,采用具有较好的氧气渗透性的 PDMS 膜作为面投影光固化成型过程中的约束成型基底^[20-21],为了解决 PDMS 柔性薄膜变形大的问题,采用多孔石英玻璃作为支撑体.利用多孔玻璃和 PDMS 的氧气渗透性形成透氧窗以形成阻聚区,减小固化层从基底剥离的粘附力,从而提升打印速度和工艺可靠性.

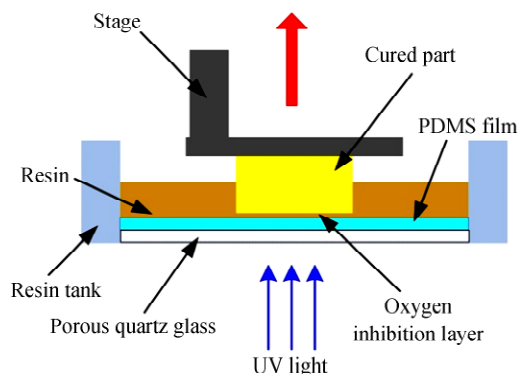


图 1 CLIP 工艺中阻聚区形成原理示意图

Fig.1 Schematic diagram for the principle of oxygen inhibition layer formation in CLIP process

1.2 阻聚区形成机理及影响因素

氧的阻聚又称氧的抑制,其基本机理是在聚合反应中,氧气与自由基结合生成比较稳定的过氧化物,造

成了自由基的消耗,降低了聚合反应的速率.自由基与氧气的反应速率比与单体分子的聚合反应速率快 $10^4 \sim 10^5$ 倍,因此,当存在氧气时,自由基与氧气会快速反应,从而抑制了聚合反应的发生.氧气通过透氧基底扩散到树脂中,树脂中的氧气浓度随着离基底的距离而衰减,直至氧气的抑制能力弱于自由基的聚合能力,树脂的聚合反应才开始^[22-24].在消耗所有氧气并且自由基仍然存在的临界距离处,树脂开始完全固化,而这一临界距离就是阻聚区的厚度 H ,即^[15]

$$H = C \left(\frac{\phi_0 \alpha_{PI}}{D_{e0}} \right)^{-0.5} \quad (1)$$

式中, ϕ_0 为单位时间单位面积入射的光子数量; α_{PI} 为光引发剂浓度和波长相关吸收率的乘积; D_{e0} 为树脂的反应活性; C 为比例常数.

从式(1)中可以看出,基底的透光性是影响阻聚区的主要因素之一.在 PDMS 膜与多孔支撑体构成的约束基底条件下,多介质及复杂界面是固化光源的传播路径,固化光源在约束基底的透光率以及通过约束基底后的光强分布特征影响固化效率和精度,因此需要对微观孔隙特征影响光传输特性的规律进行研究.

2 基底微观特征对基底透光性能影响的仿真

基底微观结构将影响阻聚区形成的主要因素之一——透光性,特别是透氧窗的孔隙特征影响固化光源透光基底后在成型区的光强分布,从而影响成型零件的精度.因此通过时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)法对基底微观特征影响透光性能的规律进行了仿真计算,旨在为基底制备提供理论指导.

2.1 计算模型

建立的成型室基底透光性能计算模型如图 2 所示,为了与实验条件对应,光源采用平面光源,按照光传播方向,介质依次包括多孔石英玻璃、PDMS 膜、光固化树脂.模型上方特定位置添加光强监视器,用来采集不同波长的光透过基底后在该位置平面的光强分布,并设置数据采集点为 1 000.石英玻璃上有不同特征的微孔,光源包括了实验过程中使用的波长为 405 nm 紫外光源.

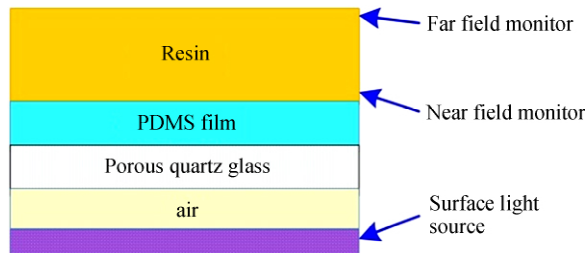


图 2 计算模型

Fig.2 Numerical calculation model

2.2 求解计算相关说明

采用 FDTD Solutions 软件进行仿真计算,石英玻璃折射率为 2.1,PDMS 膜折射率为 1.3,光固化树脂折射率为 1.8.微孔特征尺寸以固化光源波长为基础在一定范围内取值,其它尺寸参数:多孔玻璃和 PDMS 厚度均为 600 nm,近场监视器距 PDMS 膜上表面 50 nm,远场监视器距 PDMS 膜上表面 1 100 nm.本文所建模型无复杂结构,故选用默认的网格划分.模型边界选用周期性边界条件,用微小单位的透光性能模拟整个约束基底.

2.3 仿真结果及分析

2.3.1 微孔几何形状对透光性的影响

建立了基底具有三角形、方形和圆形三种不同微孔阵列的模型进行了仿真,研究基底微孔几何形状对透光性的影响.其中圆孔直径 $D=200$ nm,三角孔和方形孔的数量和微孔面积率与圆孔相同,除微孔形状外其他参数均一致.结果如图 3 所示,其中透过率是光经过约束基底后在固化成型区的光强与初始光强的比值.

从图 3 可以看出,微孔的形状影响基底透光性,但是影响并不显著.相对来说圆形孔的透光性更好,在实验所用的波长 405 nm 的紫外光条件下,三角孔、方孔、圆孔的约束基底的透光率依次为 80.8%、81.6%、86.2%.此外,从制备可实现性考虑,由于圆孔较其它形状的孔更易加工,故应选择圆形孔.随后的仿真和实验

均采用圆形孔.相对于微孔形状,微孔特征尺寸与波长的相对大小关系对基底透过率影响更大.根据瑞利散射理论,为了增强透光性,微孔特征尺寸应降低到波长的一半以下^[25],这对制备工艺提出了更高的要求.

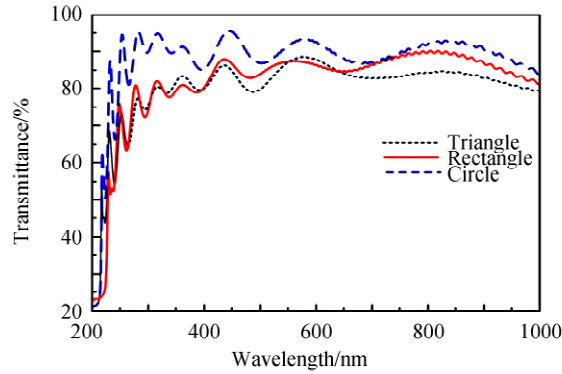


图3 不同形状微孔的约束基底的透光率

Fig.3 Light transmittance of constraint substrate formed micro-pores with different shapes

2.3.2 微孔尺寸及周期对不同波长光透过基底后光强分布均匀性的影响

对于约束面投影光固化 3D 打印,每层固化的截面形状是由经过基底的光源投影决定的,如果基底引入的微孔影响固化区的投影图案,则必然会对成型精度甚至形状产生影响.因此,研究了基底微孔对固化区光强分布的影响规律,主要研究了微孔直径和疏密程度的影响.为了方便起见,定义参数 $r_{dw} = D/W$ 表达微孔的疏密程度,其中 D 为圆孔直径, W 为孔边缘之间的距离.对波长为 400~700 nm 的光透过基底后在固化层的光强分布进行了仿真,其中,基底含有不同周期的孔径为 200 nm 与 400 nm 圆孔,结果如图 4 所示.

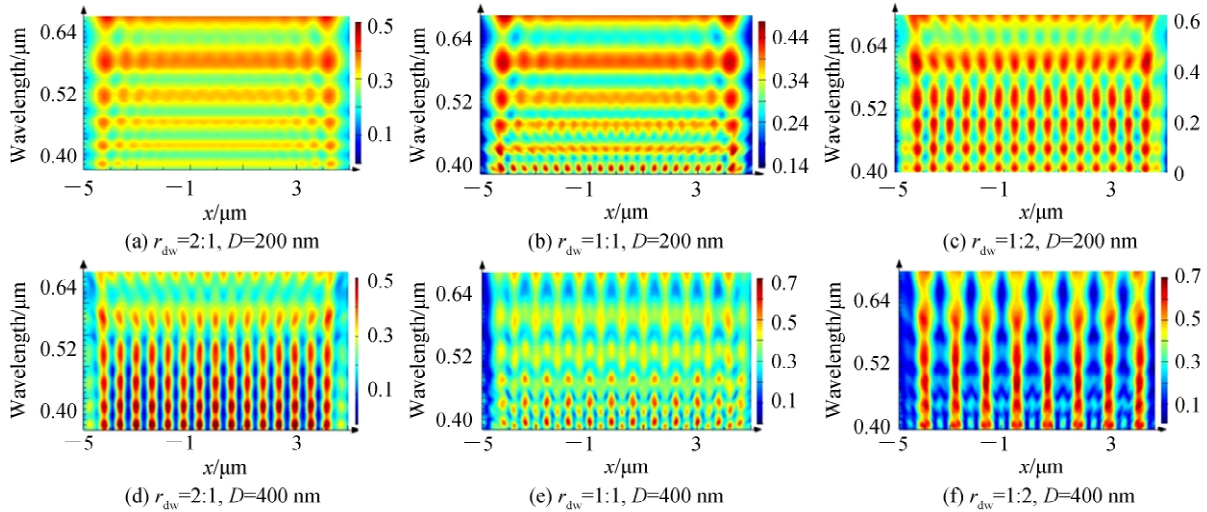


图4 微孔尺寸及周期对不同波长光在固化区光强分布均匀性的影响

Fig.4 Effect of the size and period of micro-pores on light intensity distribution uniformity with different wavelength in curing zone

从图 4 可以看出,微孔直径为 200 nm,且微孔密度较大($r_{dw} \geq 1:1$)时,固化光源在固化区的光强分布基本均匀,如图 4(a)和(b)所示;微孔直径增加到 400 nm,或者微孔直径为 200 nm 但是孔较为稀疏($r_{dw} = 1:2$)时,固化区形成明显的明暗光斑,如图 4(c)~(f)所示;微孔直径为 200 nm、 $r_{dw} = 1:1$ 时,波长为 400 nm 的固化光源已在固化区形成了明暗光斑.这些明暗光斑将会产生相应的成型形状以外不期望的结构.因此,微孔直径、微孔尺寸和疏密程度均影响固化区光强分布的均匀性,减小微孔尺寸和增加孔密度有利于减小基底微孔对成型精度和形状的影响,微孔直径小于半波长且 $r_{dw} \geq 1:1$ 时,微孔阵列的影响基本可以忽略.

2.3.3 微孔尺寸对特定波长光源透过基底光强分布特征的影响

石英基底纳米尺度微孔阵列加工对制备工艺提出了很高的要求,为了降低基底微孔阵列加工难度,探索了大孔径微孔阵列作为透氧窗在约束投影光固化成型应用的可能性.采用三维计算模型,研究不同尺寸微孔

条件下,在固化区的光强分布特征,仿真计算中以实验采用的波长为 405 nm 的紫外光作为光源,计算基底微孔直径分别为 0 nm (即无孔石英玻璃)、200 nm、400 nm、800 nm、1 600 nm 时,光源透过基底在成型区一侧的光强分布特征.通过对比不同孔径条件下光强分布与无孔基底光强分布,分析基底微孔尺寸对成型质量的影响,结果如图 5 所示.

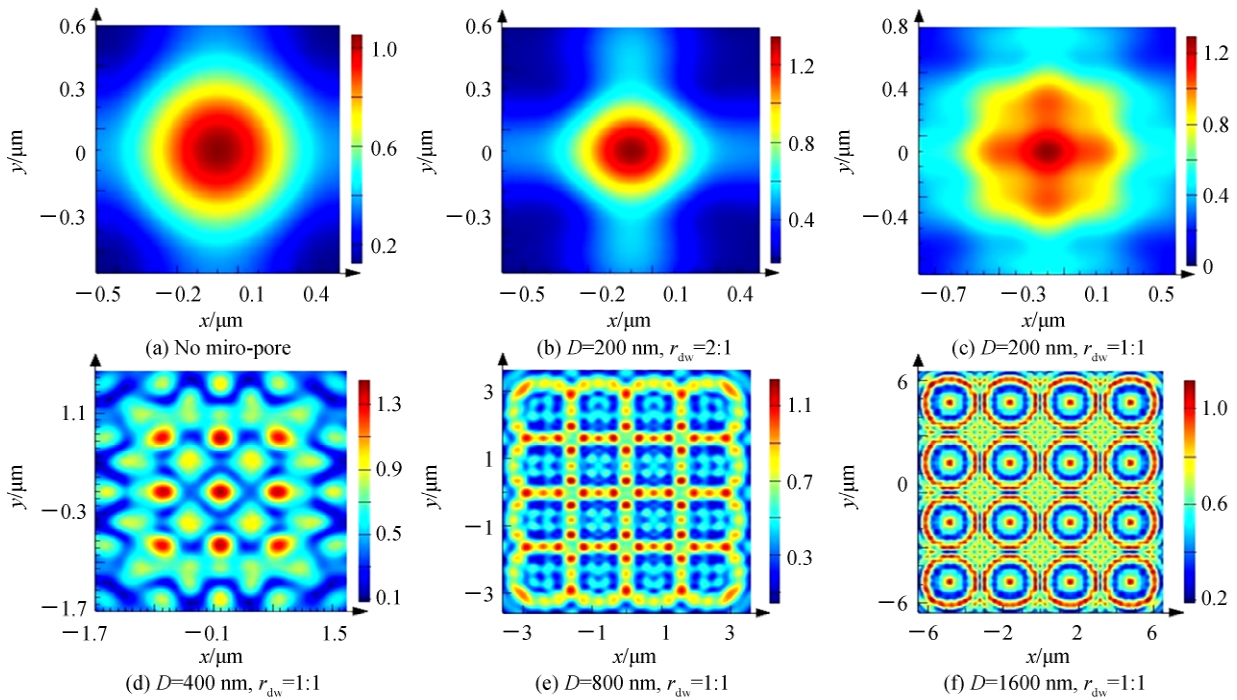


图 5 不同孔径微孔基底条件下 405 nm UV 光源在固化区的光强分布特征

Fig.5 Light intensity distribution characteristics of 405 nm UV light in curing zone with different size micro-pores

从图 5 可以看出,当微孔直径小于光源半波长 ($D=200\text{ nm}$) 时,透过基底后的光强分布与无孔基底类似,特别是孔密度比较大时(图 5(b) $r_{dw}=2:1$);随着孔径增大,光源透过基底微孔后在固化区的投影成像逐渐清晰;微孔直径远大于半波长(图 5(f) $D=1\ 600\text{ nm}$)时,在固化区会形成清晰的图案阵列,这些图案将在成型零件上形成附加结构,从而影响成型精度甚至形状;微孔投影图案与微孔的尺寸和周期有关,减小微孔尺寸、增加微孔密度有利于降低引入微孔的影响,但是同时也对制备工艺提出了更高要求.另外,由仿真结果发现,由于基底微孔的存在而在固化区形成的投影图像与微孔形状并不一致,如图 5(f) 中图形,这为通过在基底构造微观结构固化成型特定微结构图形阵列提供了一种思路.

3 实验

制备了多孔石英玻璃支撑基底和 PDMS 膜,并通过搭建的约束投影式光固化成型装置进行了实验研究,通过对固化层表面微观形貌的表征分析和与仿真结果的对比,验证了仿真结果的正确性.

3.1 实验装置及实验方法

采用自行研制的约束面投影光固化成型装置进行实验,实验装置如图 6 所示,主要包括工程投影仪、Z 向驱动平台和树脂槽等,投影仪采用以德州仪器(TI) DLP 芯片为核心的光机(Pro4500,UV405nm,北京闻亭泰科技发展有限公司);Z 向驱动系统采用精密电动平移台(北京科盈创拓科技发展有限公司);树脂槽底部为多孔玻璃支撑的 PDMS 膜.

玻璃基底的微孔阵列采用纳秒激光加工方法制备,PDMS 薄膜的制备采用液态浇铸法,主要工艺流程包括聚合物(PDMS 胶)的浇铸、真空去气泡、加热固化等.将 PDM 膜粘附在多孔玻璃表面作为约束基底进行实验,并采用 Leica DCM 3D 型共聚焦干涉显微镜对固化成型件的表面进行观测.

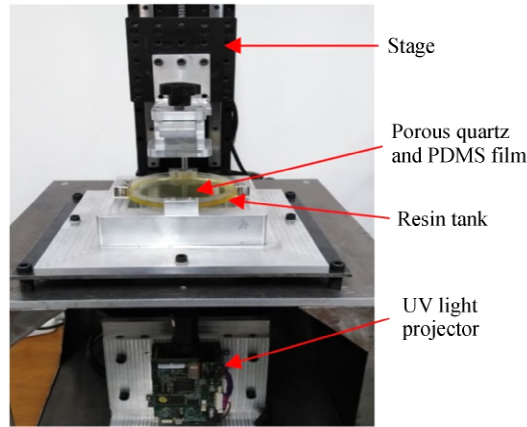


图 6 约束面投影光固化成型装置

Fig.6 Setup of constrained-surface projection-based stereolithography

3.2 实验结果与讨论

受制备工艺条件的限制,玻璃基底的微孔较大,微孔直径为 $400\ \mu\text{m}$,制备结果如图 7 所示.

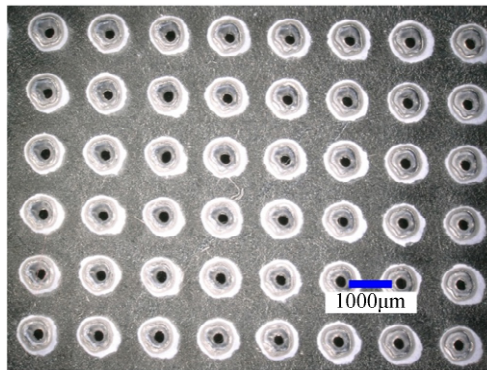
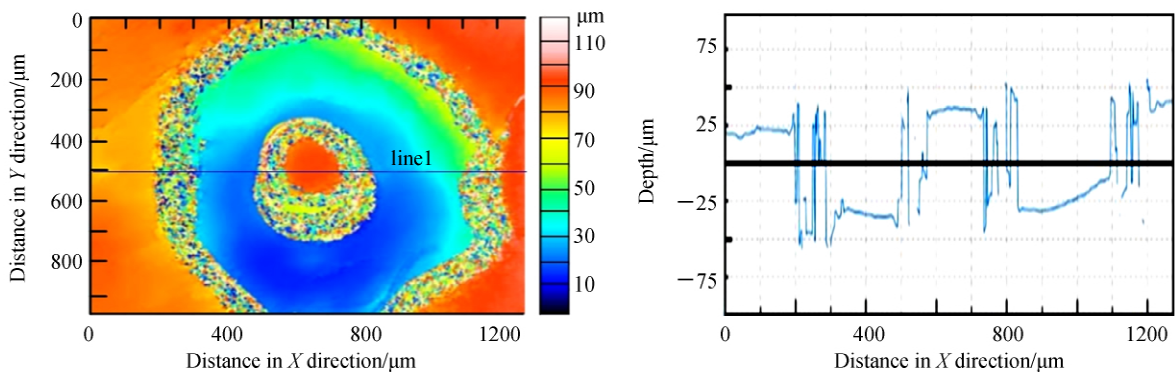


图 7 通过激光加工在石英玻璃基底上制备的微孔阵列

Fig.7 Micro-pore array on quartz substrate fabricated through laser etching

采用共聚焦干涉显微镜观测结果如图 8 所示.实验发现,由于基底微孔的存在,固化层表面出现了规则分布的环形凹坑,成型的图案与玻璃基底微孔形状并不相同,但是与仿真结果的图 5(f)吻合很好,验证了仿真结果的正确性;实验和图 5(f)仿真结果中微孔尺寸均远大于半波长,说明基底微孔尺寸远大于半波长时,光源透过制备有微孔阵列的基底在固化区光强明暗分布,会在固化结构表面生成额外不期望的结构,从而破坏成型精度和形状.因此,为了减小基底微孔对成型精度的影响,应尽量减小微孔尺寸(理想情况是将微孔直径控制在半波长以下),当然,这样也对制备工艺提出了更高要求,实际应用中需要根据具体精度要求,在提高成型精度和降低基底制备工艺难度之间进行平衡.



(a) Characterization of cured feature with confocal interference microscope (b) Measurement results of cured feature along line 1 in Fig.8(a)

图 8 微孔固化成型图案共聚焦显微镜表征结果

Fig.8 Cured pattern characterization result of micro-pore through confocal interferometric microscope

4 结论

本文针对形成阻聚区所需的透氧基底成本以及基底变形问题,提出了一种多孔透明支撑板+PDMS膜的低成本实现阻聚区的方案,并围绕支撑基底上微孔对透光性及固化区光强分布的规律进行了数值模拟和实验研究.结果表明,相对于基底微结构形状,其尺寸和周期对基底的透光性及其透过基底在成型区的光强分布的影响更显著;微孔直径小于固化光源半波长时对光强分布的均匀性影响有限,而当微孔直径远大于半波长时,将在固化区形成规则明暗图形阵列,在固化层形成不期望的附加结构,从而降低制造精度甚至形状;为了减小基底微孔对成型精度的影响,应将基底所制备的微孔直径控制在半波长以下;为了降低对制备工艺的要求,在实际应用中应根据精度要求在成型精度和工艺难度之间进行平衡.实验与仿真结果吻合较好,说明了仿真结果的正确性,研究结果可以为基底制备提供工艺改进的方向和理论依据.

参考文献

- [1] JEFFREY W S, MIKE J I. 3D printing with polymers: challenges among expanding options and opportunities[J]. *Dental Materials*, 2016, **32**(1):54-64.
- [2] EMAMI M M, BARAZANDEH F, YAGHMAIE F. Scanning-projection based stereolithography: method and structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, **218**:116-124.
- [3] LAN Hong-bo, LI Di-chen, LU Bing-heng. Micro-and nanoscale 3D printing[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, **45**(9):919-940
兰红波,李涤尘,卢秉恒. 微纳尺度 3D 打印[J]. *中国科学:技术科学*, 2015, **45**(9):919-940.
- [4] PAN Y Y, HE H Y, XU J, *et al.* Study of separation force in constrained surface projection stereolithography[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, **23**(2), 353-361.
- [5] ZHOU C, YE H, ZHANG F. A novel low-cost stereolithography process based on vector scanning and mask projection for high-accuracy, high-speed, high-throughput, and large-area fabrication[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2015, **15**(1):011003.
- [6] LIRAVI F, DAS S, ZHOU C. Separation force analysis and prediction based on cohesive element model for constrained-surface stereolithography[J]. *Computer-Aided Design*, 2015, **69**:134-142.
- [7] HUANG Y M, JIANG C P. On-line force monitoring of platform ascending rapid prototyping system[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **159**(2):257-264.
- [8] PAN Y Y, ZHOU C, CHEN Y. A fast mask projection stereolithography process for fabricating digital models in minutes[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2012, **134**(5):051011-1-9.
- [9] CHEN Y, ZHOU C, LAO J Y. A layerless additive manufacturing process based on CNC accumulation[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2011, **17**(3):218-227.
- [10] PAN Y Y, CHEN Y, ZHOU C. Fast recoating methods for the projection-based stereolithography process in micro- and macro-scales[C]. *Proceeding of solid freeform fabrication symposium*, Austin, Texas, August 8-10, 2012:846-862.
- [11] HANG Y, ABHISHEK V, SONJOY D, *et al.* Investigation of separation force for constrained-surface stereolithography process from mechanics perspective[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, **23**(4):696-710.
- [12] ZHOU C, YONG C, YANG Z G, *et al.* Digital material fabrication using mask-image-projection-based stereolithography[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, **19**(3):153-165.
- [13] SRIVATSAN T S, SUDARDHAN T S. Additive manufacturing: innovations, advances, and applications[M]. New York:Taylor & Francis Group, 2016.
- [14] WANG Yi-qing, JIA Zhi-yang, ZHAO Wan-hua, *et al.* The key technology and research status of mask projection stereolithography[J]. *Machine Design and Research*, 2009, **25**(2):96-100.
王伊卿,贾志洋,赵万华,等. 面曝光快速成形关键技术及研究现状[J]. *机械设计与研究*, 2009, **25**(2):96-100.
- [15] TUMBLESTON J R, SHIRVANYANTS D, ERMOSHKIN N, *et al.* Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, **347**(6228):1349-1352.
- [16] 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.
- [17] 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 of the United States of America*, 2016, **113**(42):11703-11708.
- [18] LIAN Qin, YANG Fei, XING Hua, *et al.* Oxygen-controlled bottom-up mask-projection stereolithography for ceramic 3D printing[J]. *Ceramics International*, 2017, **43**(17):14956-14961.
- [19] LIN Wen-xiong, LIU Hua-gang, HUANG Hai-zhou, *et al.* Enhanced continuous liquid interface production with track-etched membrane[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, **25**(1):117-125.

-
- [20] LAMBERTI A, MARASSO S L, COCUZZA M. PDMS membranes with tunable gas permeability for microfluidic applications[J]. *RSC Advances*, 2014, **4**:61415-61419.
- [21] ALESSANDRA V, MARZIA Q, ANGELICA C, *et al.* Oxygen-inhibition lithography for the fabrication of multipolymeric structures[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(37):4560-4565.
- [22] SAMUEL C L, BRANISLAV H, HARALD W, *et al.* Strategies to reduce oxygen inhibition in photoinduced polymerization[J]. *Chemical Reviews*, 2014, **114**:557-589.
- [23] AMIT S J, FEI D, APARNA B, *et al.* Modeling effects of oxygen inhibition in mask-based sterelithography[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2011, **17**(3):168-175.
- [24] EWA A. Photopolymerization kinetics of multifunctional monomers[J]. *Progress in Polymer Science*, 2001, **26**:605-665.
- [25] LI Y F, ZHANG J H, YANG B. Antireflective surfaces based on biomimetic nanopillared arrays[J]. *Nano Today*, 2010, **5**: 117-127.