

约束成型基底微观特征对阻聚区及黏附力的影响

王权岱, 梁民, 史卜辉, 李鹏阳, 李言

引用本文:

王权岱, 梁民, 史卜辉, 等. 约束成型基底微观特征对阻聚区及黏附力的影响[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 923–932.

WANG Quan-dai, LIANG Min, SHI Bo-hui, et al. Effect of microscopic characteristics of constrained substrate on the inhibition zone and adhesion[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 923–932.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0923>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高性能电加热玻璃3D打印与微转印复合制造工艺

Three-dimensional printing and micro-transfer composite manufacturing process for high performance glass heaters

光学精密工程. 2019, 27(4): 820–831 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192704.0820>

可穿戴柔性电子的快速制备与医疗应用

Rapid preparation and medical application of wearable Flexible electronics

光学精密工程. 2019, 27(6): 1362–1369 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192706.1362>

微机电火工品薄膜结构换能元

Film structure energy conversion components for MEMS initiators

光学精密工程. 2018, 26(9): 2319–2325 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182609.2319>

2m大口径RB-SiC反射镜的磁控溅射改性

Surface modification of 2 m RB-SiC substrate by magnetron sputtering

光学精密工程. 2016, 24(7): 1557–1563 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162407.1557>

基于应变梯度理论的光栅铝膜本构关系表征及纳米压痕实验

Characterization of constitutive relationship for grating aluminum based on strain gradient and its nano-indentation

光学精密工程. 2015, 23(10): 2843–2851 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152310.2843>

文章编号 1004-924X(2020)04-0923-10

约束成型基底微观特征对阻聚区及黏附力的影响

王权岱, 梁 民, 史卜辉, 李鹏阳*, 李 言

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:为了减小约束投影快速 3D 打印工艺中黏附力对工艺可靠性及打印速度的影响,提出了一种多孔透明支撑板+PDMS 膜低成本实现阻聚区的方案,并围绕阻聚区形成的两个关键因素-基底透光性和气体渗透性及其影响阻聚区和黏附力的规律进行研究。通过激光加工方法制备了具有微孔阵列的石英玻璃基底,通过对基底透光性、透氧性以及氧阻聚区厚度的实验测量,研究了基底微观几何特征及光照强度、氧气浓度等工艺要素对阻聚区厚度的影响规律,并通过 3D 打印试验,初步研究了不同基底条件下固化层在基底的黏附力。结果表明,基底微孔影响基底的透光率以及透氧性能,所制备的具有不同几何特征微孔的基底透光率均大于 84%;通过调控氧浓度、光照强度以及基底微结构特征可以控制氧阻聚区的厚度;基底及供氧条件影响阻聚区的厚度从而影响剥离力。采用本文制备的约束基底打印零件过程中可以形成阻聚区,从而显著减小剥离力,在本文的实验条件下,固化层从基底的平均剥离力由 26.4 N 降至 5.4 N。

关键词:连续液面成型;约束基底;透光性;透氧性;阻聚区;黏附力

中图分类号: O435.1; TB133 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0923

Effect of microscopic characteristics of constrained substrate on the inhibition zone and adhesion

WANG Quan-dai, LIANG Min, SHI Bo-hui, LI Peng-yang*, LI Yan

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

* Corresponding author, E-mail: lipengyang@xaut.edu.cn

Abstract: To reduce the influence of adhesion on the process reliability and printing speed in constrained projection fast 3D printing processes. A low-cost constrained substrate scheme was presented with porous transparent support plate and PDMS film for inhibition zone realization. It focused on substrate light transmittance and gas permeability and their influence on the inhibition zone formation and adhesion. The quartz glass substrate with a microporous array was prepared using a laser processing method. The light transmittance, oxygen permeability of the substrate, and thickness of the oxygen inhibition zone were measured experimentally. The influence of the microscopic geometrical characteristics of the substrate on the light transmittance, oxygen permeability, and oxygen inhibition thickness was investigated. 3D printing experiments and a preliminary investigation of the adhesion of the cured layer on the substrate under different substrate conditions were conducted. The results indicate

收稿日期:2019-08-27;修订日期:2019-10-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51775431, No. 51675422, No. 51375381)

that the micro-pores on the substrate affect the light transmittance and oxygen permeability. The transmittance of the prepared micropores with different geometric features is found to be greater than 84%. The thickness of the oxygen inhibition zone can be controlled by adjusting the oxygen concentration, light intensity, and microstructure of the substrate. The oxygen supply conditions of the substrate affect the thickness of the inhibition zone and subsequently the cured layer peeling force. Adopting the prepared constrained substrate enables the formation of the inhibition layer during printing of the parts and significantly reduces peeling force. The average peeling force of the cured layer from the substrate reduces from 26.4 N to 5.4 N under the experimental conditions in this study.

Key words: continuous liquid interface production; constrained substrate; light transmission; oxygen permeability; oxygen inhibition zone; adhesion

1 引言

3D 打印技术由产品原型快速制造向功能零件大规模直接制造的发展趋势对打印效率提出了更高的要求^[1-2]。光固化成型作为 3D 打印体系中最先实现商业化应用的工艺具有成型精度高、成型速度快的特点^[3-4]，近年来，随着陶瓷树脂等复合光敏树脂的不断丰富，展现出更为广泛的应用潜力^[5-7]。光固化成型技术可以分为扫描式和面曝光式成型工艺，与扫描式成型工艺相比，面曝光成型工艺一次曝光完成零件一个剖面的固化，显著提升了成型效率。根据光源投影方向的差异，面曝光成型工艺可以分为自由式和约束式面曝光，与自由面曝光相比，约束面曝光具有材料浪费少、成型分辨率高、成型速度快的优势^[8-10]。约束面曝光成型主要工艺问题是固化层与约束基底之间存在黏附力，固化层反复从约束基底剥离时产生的过大应力可能会导致打印零件发生变形、断裂以及约束基底的损坏^[11-14]。

为了解决上述工艺问题，国内外学者已经进行了大量的研究^[15-17]。主要解决方案包括延长固化时间使树脂过固化以增加层间的结合强度^[10]、采用具有低表面能的离型膜层减小固化层在基底的黏附力^[11-13]以及通过优化固化层剥离方式，比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黏结力转换成的侧向剪切力^[14-15]，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^[16-17]。过固化方法延长了曝光时间从而降低了打印速度，同时变形增大影响成型精度；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；优化的剥离方式附加了

多余的动作，因而降低了成型效率。

连续液面成型(Continuous Liquid Interface Production, CLIP)技术^[18]利用氧的阻聚反应^[19-20]，在固化层与约束基底之间形成一层未固化的液态薄层，称之为阻聚区或者“死区”，从而使固化层与约束基底的剥离形式由固-固分离转变为固-液分离，使分离力显著减小，从而极大地提高了打印速度，采用该技术比传统立体光刻(Stereolithography, SLA)技术快 25~100 倍以上^[18,21-22]。然而该技术中应用的特氟龙薄膜(Teflon AF2400)昂贵的价格是工程化应用的障碍。为此，本文提出一种采用多孔玻璃+PDMS 膜为约束基底低成本实现阻聚区的方案，利用具有较好的透氧性和透光性的 PDMS 膜代替 AF2400，解决成本问题；采用石英玻璃作为支撑体提高基底刚性；为了保证基底的透氧性，通过激光加工在石英玻璃基底上制备了微孔阵列。本文在探讨 CLIP 工艺中阻聚区形成机理的基础上，围绕基底微观特征影响透光性及阻聚气体透过率从而影响阻聚区形成的规律展开研究，并通过 3D 打印实验得出了氧阻聚区厚度对固化层与约束基底剥离时剥离力大小的规律，验证了该约束基底的在减小粘附力方面的效果。

2 约束投影快速 3D 打印工艺中阻聚区形成机理

CLIP 技术利用了氧的阻聚效应，在固化层与约束基底之间形成一层薄的未固化液态区域，即氧阻聚区。由于该区域的存在，在不影响传统约束面曝光成型质量的同时，将固化层约束基底剥离形式从固-固分离转化为固-液分离，

从而极大地减小了分离力,解决了剥离力过大导致的工艺可靠性问题,为提高打印速度提供了条件。

图 1 为 CLIP 技术工艺示意图。首先,DLP 投影仪将零件二维切片图形投影至约束基底上表面,同时氧气被通入氧气仓,并通过扩散效应扩散至约束基底上的光敏树脂中。氧气在树脂中的浓度随着进入树脂的距离而减小,当氧气对自由基的抑制能力弱于自由基聚合能力时,聚合反应开始。在氧气被完全消耗完且自由基仍存在的阈值距离处,树脂完成固化,该阈值距离就是氧阻聚区厚度 H 。

$$H = C \left(\frac{D_{c0}}{\varphi_0 \alpha_{PI}} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

式中: φ_0 为单位时间单位面积入射光子数量, α_{PI} 为光引发剂浓度和波长相关吸收率乘积, D_{c0} 为树脂反应活性, C 为比例常数。

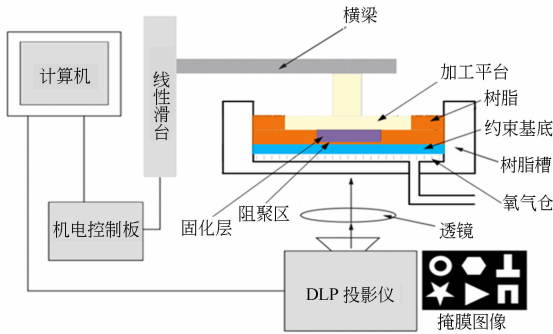


图 1 CLIP 技术工艺示意图

Fig. 1 Sketch of continuous liquid Interface production

由式(1)可知,阻聚区厚度 H 与入射光子数量,光引发剂浓度和波长相关吸收率乘积以及树脂反应活性有关,其中树脂反应活性只取决于所选的树脂类型。降低透光率可以减小 φ_0 ,阻聚区厚度增加;增强透过约束基底的氧气浓度可以减小 α_{PI} ,阻聚区厚度增加。即 CLIP 技术在选择特定树脂后,通过调节约束基底的透光性和透氧性来控制氧阻聚区的厚度。

在本文提出的多孔玻璃与 PDMS 膜构成的约束基底条件下,多介质及复杂界面既是固化光源的传播路径,也是阻聚气体的传质通道,基底微观孔隙特征必然影响阻聚层的形成,因此需要对微观孔隙特征影响阻聚层的规律进行研究。

3 实验材料、设备和试验内容

3.1 实验材料和主要设备

采用创想三维的 UV 光敏树脂(黄色);对于均匀介质 PDMS 膜的透光性采用双光束紫外光分度计(UV4800,尤尼柯(上海)仪器有限公司)测量,其波长范围为 190~1 000 nm,波长准确度为 ± 0.5 nm,光度准确度可达 ± 0.002 Abs;对于非均质的多孔玻璃采用照度计(TES1339,台湾泰仕的照度计)测量,照度计精度 0.02 Lux;基底透氧性采用便携式氧气检测仪(PLT-BX-02,深圳市普利通电子科技有限公司),氧气检测仪精度:0.01%。

氧阻聚区厚度影响黏附力大小,黏附力测量所采用的 3D 打印试验平台如图 2 所示,包括图像单元、Z 轴滑台、加载单元、树脂槽等。图像单元采用以德州仪器(TI) DLP 芯片为核心的光机(Pro4500,UV405 nm,北京闻亭泰科技发展有限公司),投影幅面:131.2 × 82 mm,畸变 < 0.8%;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),其重复定位精度为 4 μ m;加载单元通过拉压力传感器(斯巴拓 SBT970TX,广州斯巴拓电子科技有限公司)将 Z 向驱动装置与打印托板连接起来,进行黏附力的在线测量,传感器测量范围:0~50 kg,采样频率:50 Hz,测量精度大于 ± 0.2 %。

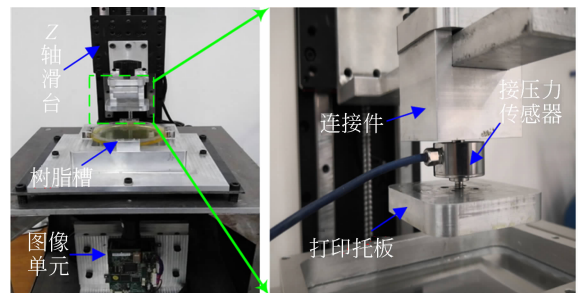


图 2 3D 打印试验装置

Fig. 2 3D printing setup

3.2 实验内容

由于基底透光性、透氧性都影响着氧阻聚区厚度以及黏附力大小,因此首先对不同约束基底条件下的透光性和氧气渗透性进行实验测量。在此基础上,采用差厚的方法测量了两种因素影响

下氧阻聚区的厚度,并通过 3D 打印实验测量了不同基底条件影响阻聚区从而影响剥离力大小的规律。

3.2.1 基底透光性测量

为了研究薄膜的厚度对约束基底透光率的影响规律,本文采用液态浇铸法制备了不同厚度的 PDMS 薄膜,采用双光束紫外光分度计分别测试了厚度为 1、2、3、4 mm PDMS 膜的透光率。

对于多孔玻璃非均质表面,由于各点局部透光性并不相同,采用双光束紫外光分度计测量结果难以反映多孔玻璃基底的透光性。因此,在研究微孔特征对透光性的影响时,采用照度计进行测量。多孔支撑板为边长 60 mm、高为 2 mm 的多孔玻璃。如图 3 所示, D 为圆孔直径, W 为孔间距,圆孔的疏密程度用 D/W 表示。试验中采用微孔孔径分别为 400、600 μm 和 800 μm 、不同疏密程度的孔,微孔面积率 δ 为 0.031 4、0.014、0.007 85 和 0.005 02。

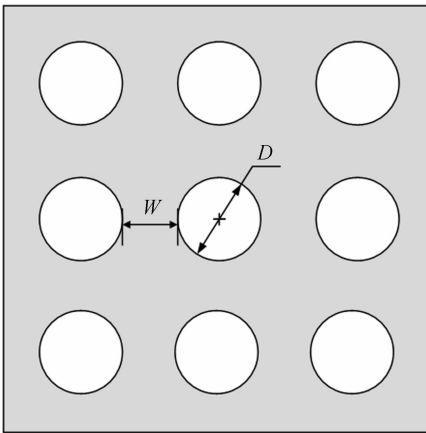


图 3 微结构分布示意图

Fig. 3 Schematic for microstructure Distribution

3.2.2 基底透氧性测量

氧浓度是影响阻聚区厚度的主要因素之一,本文对透氧性测量的方法如图 4 所示,上方气腔通过排气孔 1 与大气相通,使上方气腔压力稳定在 0.1 MPa,进气孔与氧气瓶连接,排气孔 2 主要用于实验过程中下方气腔气体的排出。实验中,为了防止 PDMS 膜由于气体压力过大而发生变形,将 PDMS 膜放置于多孔支撑板的下方。实验时,关闭排气孔 2,打开排气孔 1,接通氧气瓶通入氧气,通过调整压力阀使得通入

氧气的压力在 0~6 KPa 范围内变化,用便携式氧气检测仪记录实验过程中上方气腔的氧浓度变化。实验中供氧流速 8 L/min,微孔参数与 3.2.1 节相同。

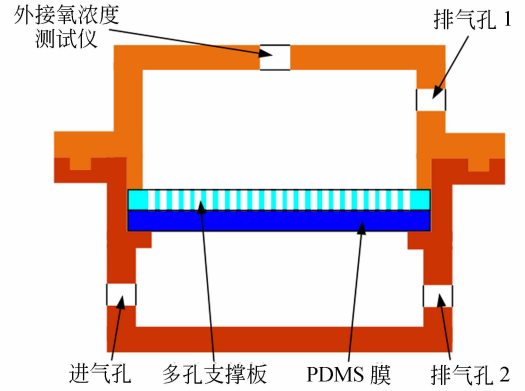


图 4 透氧性能测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of oxygen permeability measurement

3.2.3 氧阻聚区厚度测量

在约束基底两侧对称位置分别放置厚度为 1 mm 的有机玻璃垫片,在垫片上方放置和基底等尺寸的玻璃板。实验时液态树脂填充于玻璃板与约束基底之间的缝隙中,使固化树脂位于约束基底的中央位置,测量方法示意图如图 5 所示。

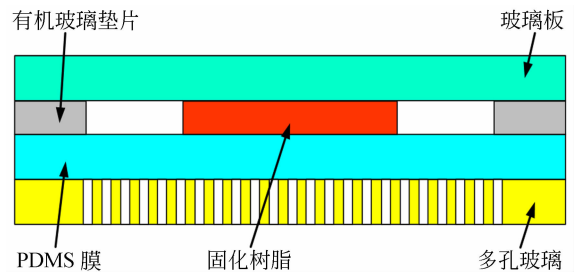


图 5 阻聚区厚度测量方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of thickness measurement method in the inhibition zone

测量阻聚区厚度时的主要实验参数: $\delta = 0.014 0$, $D = 400 \mu\text{m}$, 多孔玻璃厚度为 2 mm, PDMS 膜厚 4 mm, 固化截面形状为半径 1 mm 的圆。进行光照强度对阻聚区厚度的影响实验时,通入氧气流速为 8 L/min;进行氧气浓度对氧阻聚区厚度的影响实验时,光照强度为 207.8 Lux。为使测量数据更加准确,每组实验随机选取 5 个

位置测量阻聚区,采用数字千分尺进行测量,并取平均值。实验时,设置固化时间为 40 s,固化后用酒精浸泡的无尘布擦去未固化的树脂,然后利用差厚的方法测量阻聚区厚度,即:

$$h' = (h_{\text{玻璃板}} + h_{\text{垫片}}) - (h_{\text{玻璃板}} + h_{\text{固化厚度}}) \tag{2}$$

3.2.4 剥离力的测量

为验证本文所设计的约束基底的性能,在通入氧气的情况下,实验测量了采用本基底时剥离力的大小。实验测力原理为:拉力传感器置于打印托板与连接件之间,固化层开始剥离前拉力传感器清零,以消除打印托板的重力对所测剥离力的影响。传感器在固化层剥离过程中所记录的力的变化曲线即为固化层的剥离力曲线,剥离力曲线中的最大值即为固化层剥离所需的剥离力。主要实验参数: $D=400 \mu\text{m}$, $\delta=0.0314$,多孔石英玻璃厚度 2 mm,PDMS 膜厚度 4 mm,光照强度 280 Lux,固化层厚度 $100 \mu\text{m}$,剥离速度 5 mm/s,固化圆形截面半径 10.0 mm。为研究氧阻聚区厚度与剥离力之间的关系,采用通氧流速分别为 2,4,6,8 L/min 以得到不同厚度的阻聚区,测量了剥离力的大小变化。

4 实验结果与讨论

4.1 基底微观特征对透光性的影响

PDMS 膜厚度为 1,2,3,4 mm 时的透光率测

试结果如图 6 所示。可以看出,薄膜的透光率随着厚度的增加而降低,但是膜厚对透光率影响不大,在本文所采用的波长为 405 nm 的紫外光源条件下,透光率最大为 93%,最小为 88%。

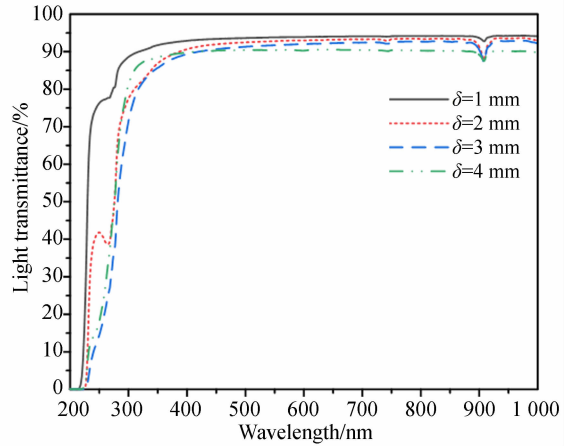
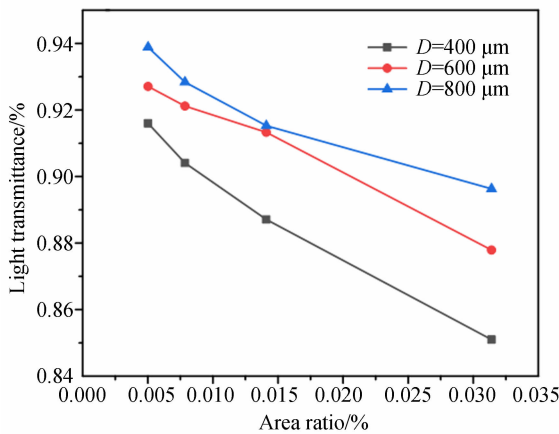


图 6 不同厚度 PDMS 膜的透光率

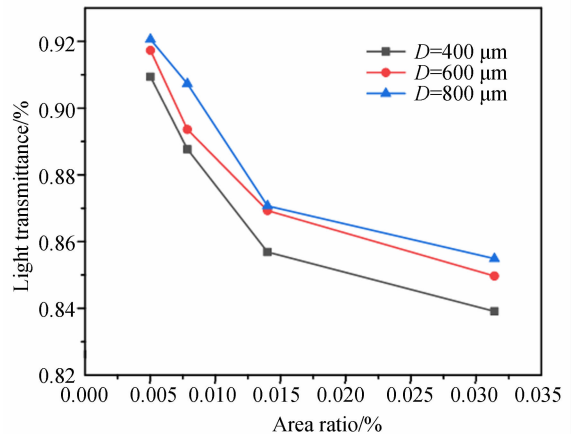
Fig. 6 Transmittance of PDMS films of different thicknesses

采用照度计对多孔玻璃的透光性及多孔玻璃+厚度为 2 mm 的 PDMS 膜组成的约束基底的透光性进行了测量,结果如图 7 所示。从图中可以看出,同一面积率时,孔径越大,透光率越高;同一孔径时,面积率越高,透光率越低。综合分析上述测量结果,可以认为透光性主要受孔边缘的影响,因为玻璃基底微孔是通过激光加工而成的,孔的边缘透光性较差。因此,基底加工微孔阵列情



(a) 无 PDMS 约束基底透光率

(a) No PDMS constrained substrate transmittance



(b) 有 PDMS 约束基底透光率

(b) PDMS constrained substrate transmittance

图 7 PDMS 膜对约束基底透光率的影响

Fig. 7 Effect of PDMS film on transmittance of constrained substrate

况下,控制微孔加工过程中的边缘效应可以提高透光率。不同微孔的基底透光率有所不同,但是本文所制备基底条件下透光率均在 85% 以上。虽然基底微孔的存在从透光率的角度对光固化成型影响并不显著,但是由于微孔会影响成型区局部固化特征,因此微孔阵列对于成型精度的影响也将是今后进一步深入研究的内容。在加工了微孔阵列基础上,涂覆 PDMS 膜后,基底透光率有所下降,对比图 7(a)与图 7(b)可知,存在 PDMS 膜时透光率最大下降 4.46%,最小下降 0.66%,但透光率均在 84% 以上,可以满足光固化 3D 打印要求。PDMS 膜厚、微孔孔径及分布特征均影响透光性,通过有限差分法计算结合试验研究各个因素对透光性综合影响的机理也是课题目前正在研究的内容。

4.2 基底微观特征对透氧性的影响

对具有不同面积率和孔径的约束基底的透氧性进行了测量,结果如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可以看出,孔径相同,约束基底的透氧性能随面积率的增大而增大,上方气腔的氧浓度稳定值在面积率为 0.031 4 时最大。相同孔径情况下,随着基底微孔面积率的增加,扩散区域增大,气体可以更多地扩散进入上方气压腔室,因此达到平衡后气体浓度高于低面积率基底。由图 9 可以看出,面积率相同时,在氧气扩散初期,孔径对透氧性能并无规律性影响,当浓度达到平衡后,孔径为 400 μm 时上方气腔的氧浓度值最大,孔径为 800 μm 时上方气腔的氧浓度最小,说明面积率相同的条件下,小孔径的孔有利于氧气的渗透。其原因可以根据伯努利方程解释,因为当压力一定时,孔径越小,流速越大,氧气渗透的距离越大,最终导致氧气扩散至阻聚区的浓度增加。

4.3 基底微观特征对阻聚区厚度的影响

分别改变光照强度和氧气供氧流速,对氧阻聚区厚度进行了测量,结果如图 10 所示。

从图 10(a)可以看出,阻聚区厚度随着光照强度的增强而下降(其中通入氧气流速为 8 L/min)。在其他工艺条件不变的情况下,光照强度的增强缩短了固化时间,但阻聚区的厚度下降,固化层剥离力增加。由图 10(b)可以看出,阻聚区厚度随着供氧流速的增加而增加(其中光照强度为 207.8 Lux),当供氧流速为 10 L/min 时,氧阻聚区厚度达到 101 μm 。实际应用中可以根据具

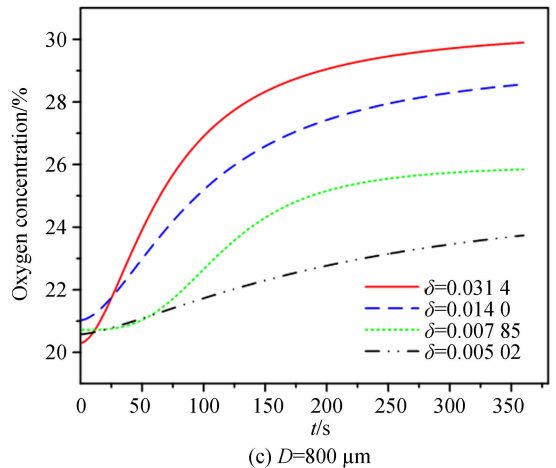
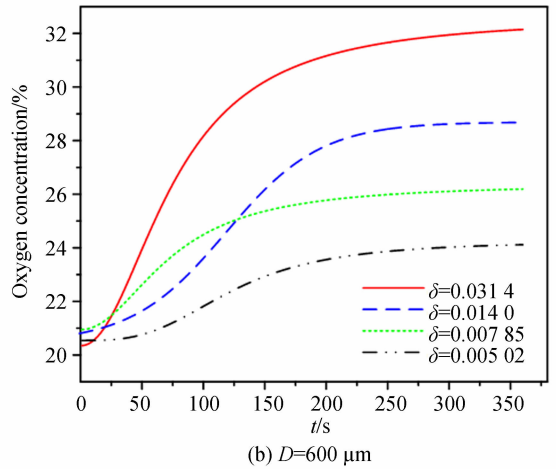
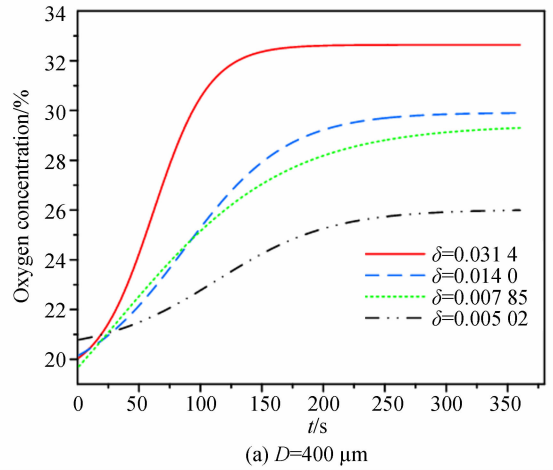


图 8 面积率对约束基底透氧性能的影响

Fig. 8 Effect of area ratio on oxygen permeability of constraint surface

体工艺要求通过调整光照强度和供氧量对阻聚区厚度进行控制。当供氧流速为 0 时,即约束基底底部无氧气通入,此时的阻聚区厚度为 16 μm ,这是因为 PDMS 膜本身具备一定的氧渗透能力。

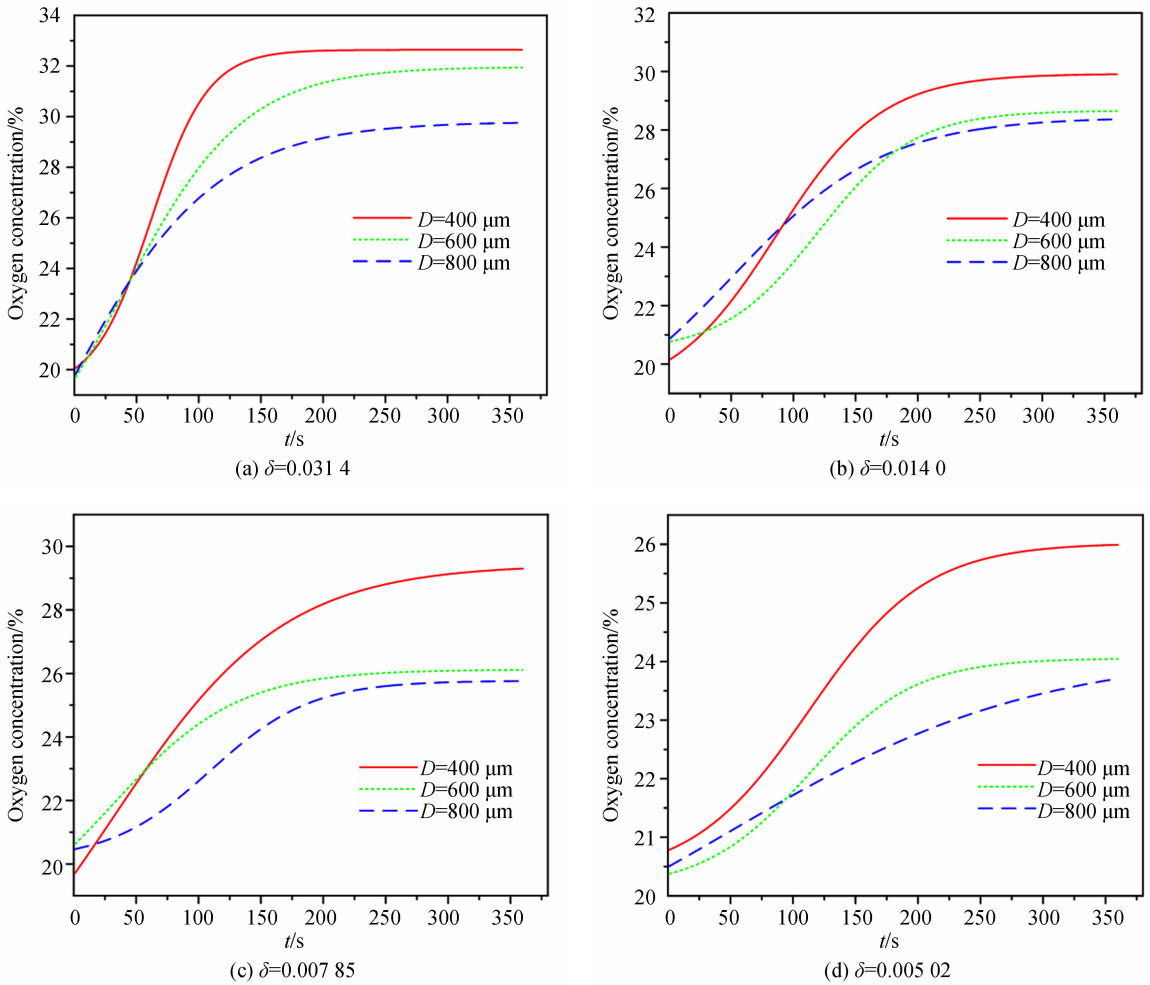


图 9 孔径对约束基底透氧性能的影响

Fig. 9 Effect of pore size on oxygen permeability of constrained substrate

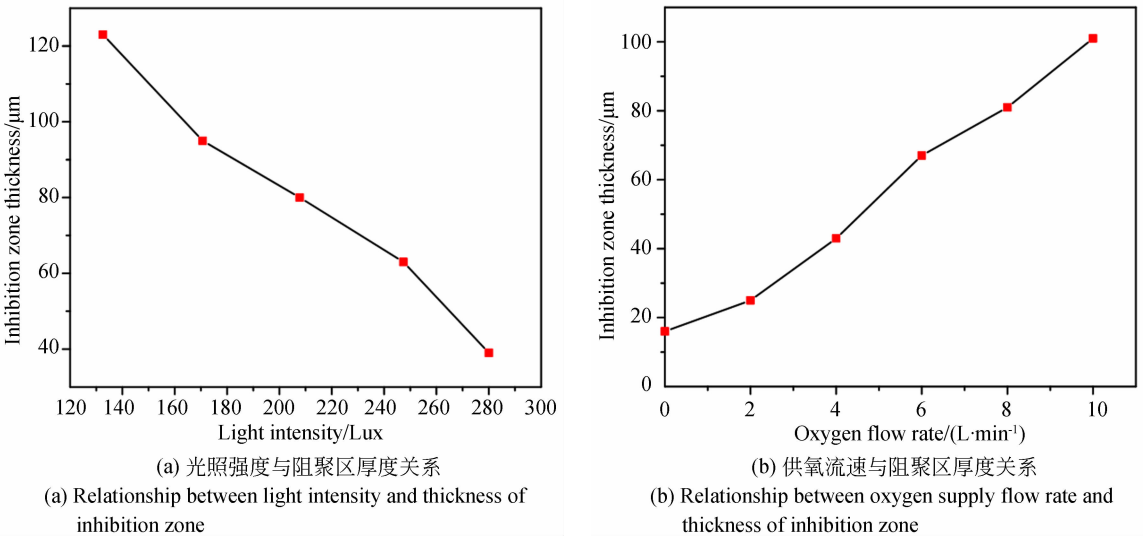


图 10 光照强度及供氧流速对氧阻聚区厚度的影响

Fig. 10 Effect of light intensity and oxygen flow rate on thickness of oxygen inhibition zone

4.4 不同阻聚区厚度条件下的剥离力的影响

为了对比阻聚区对减小固化层剥离力效果,采用普通基底和透氧基底进行了对比实验,结果如图 11 所示,为了提高对比效果,光照强度提高到 280 Lux。可以看出,当通入氧气时,由于氧阻聚区存在,使得固化层与约束基底的剥离力显著减小,剥离过程中最大的力从 24.7 N 降至 5.6 N。

通过控制供氧流速得到不同阻聚区厚度并测量在此条件下的剥离力,研究阻聚区厚度对剥离力的影响规律,结果如图 12 所示。供氧流速 2, 4, 6, 8 L/min 对应的阻聚区厚度分别为 21, 25, 31, 46 μm 。可以看出氧阻聚区厚度越大,剥离力越小,当氧阻聚区厚度为 46 μm 时,剥离力仅为 2.6 N。由于固化光源需透过阻聚区在阻聚区上方形成固化层,阻聚区厚度过大时,成型精度降低。因此,保持适当的氧阻聚区厚度可以兼顾成型精度

的同时减小固化层剥离时的剥离力,提高工艺可靠性。

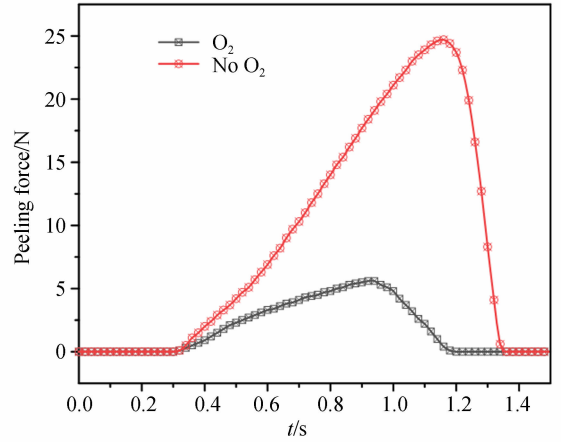
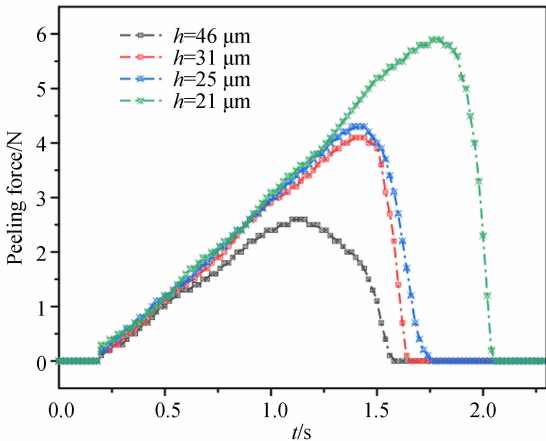


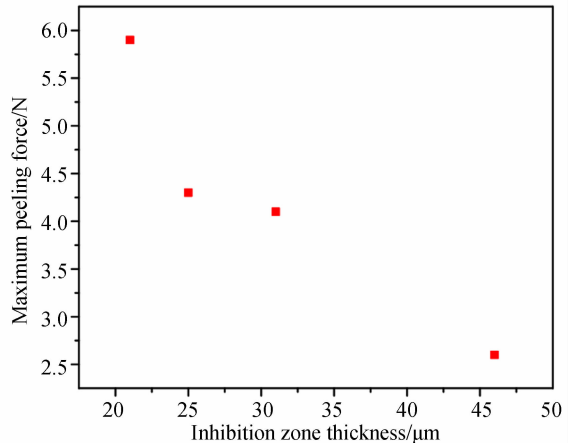
图 11 有无氧气时的剥离力对比

Fig. 11 Comparison of peel force with or without oxygen



(a) 不同阻聚区厚度下固化层剥离力

(a) Peeling force of cured layer at different thicknesses of barrier inhibition zone



(b) 最大剥离力与氧阻聚区厚度的关系

(b) Relationship between maximum peel force and thickness of oxygen inhibition zone

图 12 氧阻聚区厚度对固化层剥离力的影响

Fig. 12 Effect of thickness of oxygen inhibition zone on peeling force of cured layer

5 结 论

本文针对约束投影快速 3D 打印工艺中粘附力影响工艺可靠性以及目前氧阻聚区解决方案高成本问题,提出了一种采用多孔玻璃支撑板+PDMS 膜低成本实现阻聚区的方案,并对基底微观特征影响基底透光性、气体渗透性、阻聚区厚度和粘附力的规律进行了系统的实验研究。结果表

明,基底微观特征影响透光性,通过调控基底微孔几何特征及 PDMS 的厚度可以调整透光率,本文所制备的约束基底透光率可达 84% 以上,能够满足光固化 3D 打印的要求;约束基底的微观特征影响透氧性能,影响透氧性的主要因素是面积率,透氧性随面积率的增大而增大;基底微孔孔径大小影响阻聚气体流场的流动特性从而影响透氧性,面积率相同的条件下,小孔径有利于透氧性提高;光照强度与氧气浓度影响氧阻聚区厚度,从而

影响剥离力的大小,在本文提出的约束基底条件下,通过调整光照强度和氧气浓度可以生成的阻聚厚度可达 100 μm 以上;氧阻聚区的存在使剥离力大幅度减小,剥离力大小随氧阻聚区

厚度增加而减小;阻聚区厚度过大时,成型精度降低,保持适当的氧阻聚区厚度可以兼顾成型精度的同时减小固化层剥离时的剥离力,提高工艺可靠性。

参考文献:

- [1] WOHLERS T. Wohlers report: 3D printing and additive manufacturing state of the industry[R]. Fort Collins: Wohlers Associates, 2016.
- [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] 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.
LAN H B, LI D CH, LU B H. Micro-and nanoscale 3D printing[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 45(9):919-940. (in Chinese)
- [4] VAEZI M, SEITZ H and YANG S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5):1721-1754.
- [5] 杨建军,李红珂,朱晓阳,等. 高性能电加热玻璃 3D 打印与微转印复合制造工艺[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4):820-831.
YANG J J, LI H K, ZHU X Y, et al.. Three-dimensional printing and micro-transfer composite manufacturing process for high performance glass heaters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4):820-831. (in Chinese)
- [6] CHEN Z W, LI Z Y, LI J J, et al.. 3D printing of ceramics: A review[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39:661-687.
- [7] 王翔,赵钢,马德盛,等. 微细光成型固化工艺条件优化[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4):453-459.
WANG X, ZHAO G, MA D SH, et al.. Optimization of micro-light forming curing process conditions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4):453-459. (in Chinese)
- [8] 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):011003-1-8.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] SRIVATSAN, T S and SUDARDHAN, T S. *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications*[M]. New York: Taylor & Francis Group, 2016.
- [17] 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.
WANG Y Q, JIA ZH Y, ZHAO W H, et al.. The key technology and research status of mask projection stereolithography [J]. *Machine Design*

- and Research*, 2009, 25(2):96-100. (in Chinese)
- [18] TUMBLESTON J R, SHIRVANYANTS D, ERMOSHIN N, *et al.*. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, 347(6228):1349-1352.
- [19] 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.
- [20] SAMUEL C L, BRANISLAV H, HARALD W, *et al.*. Strategies to reduce oxygen inhibition in photoinduced polymerization [J]. *Chemical Reviews*, 2014, 114:557-589.
- [21] 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.
- [22] JANUSZIEWICZ R, TUMBLESTON J R, QUINTANILLA A L, *et al.*. Layerless fabrication with continuous liquid interface production [J]. *PNAS*, 2016, 113(42):11703-11708.

作者简介:



王权岱(1969—),男,山西临汾人,博士,教授,硕士生导师,2009年于西安交通大学获得博士学位,主要从事3D打印、微纳制造及机械表面科学等方面的研究。E-mail: quandaiw@163.com



李言(1960—),男,陕西彬县人,博士,教授,博士生导师,1995年于西北工业大学获得博士学位,主要从事难加工材料及深孔加工、新型加工原理与成形技术等方面的研究。E-mail: ly-jyxy@xaut.edu.cn