

基于我国人眼数据的人工晶体模型及其三维打印技术研究

王丹琦^{1**}, 袁群¹, 殷长俊², 高志山^{1*}, 李新华^{1,3}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²江苏省中医院, 江苏 南京 210029;

³金陵科技学院视光工程系, 江苏 南京 211169

摘要 针对人眼个性化差异, 建立符合我国人眼数据的晶体光学模型, 并实现相应的数字化加工工艺, 具有十分重要的价值与意义。三维打印技术可根据晶状体的三维数字模型进行加工制造, 步骤简单, 成本低廉。依据实测角膜参数、眼内间距、各介质折射率以及人眼像差, 重构晶体光学模型, 建立以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚乳酸(PLA)为材料, 1 mm 厚的渐变折射率晶体模型, 和以光敏树脂为材料, 1 mm 厚的单一折射率晶体模型。利用光固化成型(SLA)工艺打印单一折射率晶体模型, 熔融沉积成型(FDM)工艺打印渐变折射率晶体模型。结果表明: FDM 工艺打印的渐变折射率晶体模型台阶效应严重; SLA 工艺打印的单一折射率晶体模型, 应力大小为 87.9 nm/mm, 焦距与理论值偏差 4.98%, 表面粗糙度达 120 nm 量级。

关键词 视觉光学; 人工晶体; 三维打印技术; 人眼模型

中图分类号 R778

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.213301

Intraocular Lens Model and Its Three-Dimensional Printing Technology Based on Human Eye Data in China

Wang Danqi^{1**}, Yuan Qun¹, Yin Changjun², Gao Zhishan^{1*}, Li Xinhua^{1,3}

¹*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;*

²*Jiangsu Province Hospital of Chinese Medicine, Nanjing, Jiangsu 210029, China;*

³*Ophthalmic Engineering of Department, Jinling Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211169, China*

Abstract Aiming at the individual differences of human eye, it is important to establish a lens optical model that is consistent to human eye data in China and implement the corresponding digital processing technology. According to the three-dimensional(3D) digital model of the lens, 3D printing technology can print the lens model with simple steps and low cost. Based on the measured corneal parameters, intraocular distances, refractive index of each medium, and eye aberration, the lens optical model is reconstructed. We establish a 1 mm-thick gradient refractive index lens model with polymethylmethacrylate (PMMA) and polylactic acid (PLA) as materials, and a 1 mm-thick single refractive index lens model with photosensitive resin as the material. The single refractive index lens model is printed by stereo lithography appearance (SLA) technology and the gradient refractive index lens model is printed by fused deposition molding (FDM) technology. The results show that the gradient refractive index lens model printed by FDM technology has serious step effects. The single refractive index lens model printed by SLA technology has a stress of 87.9 nm/mm. The difference between the focal length of the lens model and the theoretical value is 4.98% and the roughness of the surface is about 120 nm.

Key words vision optics; intraocular lens; three-dimensional printing technology; lens model

OCIS codes 330.7326; 170.0110; 220.3620

收稿日期: 2020-01-05; 修回日期: 2020-02-19; 录用日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(U1931120)、中央高校基本科研业务专项(30917011107,30918014115-004,30919011277)

* E-mail: zhishgao@njjust.edu.cn; ** E-mail: 773746890@qq.com

1 引言

目前大部分人工晶体的参数来源局限于西方人眼模型,经典的人眼模型有:Gullstrand 眼模型、Navarro 眼模型、Liou 眼模型^[1]等。由于存在人种差别,我国人眼参数与西方人眼参数存在差别。我国人眼模型前房深度较厚、晶状体中心厚度稍小,整个眼轴长度较短。基于临床实测数据,根据现有研究报道可知,在所建立的我国人眼模型中,将西方人眼模型中角膜后表面的球面面型改为椭球面面型,晶状体后表面的抛物面面型改为双曲面面面型,并且我国人眼模型中晶状体前表面曲率半径较大。孔梅梅^[2]通过测量 50 组正视眼的角膜地形、眼内间距以及人眼像差,建立了基于我国人眼数据的光学模型,用连续的公式法来表示晶状体内部的折射率分布。针对人眼的个性化差异,建立基于我国人眼数据的人工晶体光学模型,并实现相应的工艺数字化加工制造,具有十分重要的价值和意义。

临床解剖学研究证明,人眼晶体内部折射率分布是渐变的,目前临床使用的人工晶体由一种材料构成,为单一折射率,人工晶体植入术主要解决病人屈光不正或白内障病人复明问题,没有顾及晶体渐变折射率分布会消除人眼像差,人工晶体材料主要有聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、硅胶和丙烯酸^[3]。现有的人工晶体制作步骤较为复杂,成本昂贵,需根据晶体的前后表面参数制作模具^[4],批量生产,并且目前临床使用的人工晶体无法满足人眼晶体的个性化要求。三维(3D)打印技术是一种增材制造技术^[5],将三维数字模型通过打印机自带的软件分层切片,使用离散和数控成型系统,利用热熔喷嘴、激光器等方式将金属、陶瓷、工程塑料、光敏树脂等特殊材料进行逐层堆叠粘合,最终叠加成型,制造出实体产品。3D 打印技术制作步骤简单易快捷,无需制作模具,可实现工艺数字化。周楚建等^[6]将 3D 打印技术应用到人工角膜的制备中,针对人眼角膜的差异,定制个性化人眼角膜。基于 3D 打印技术的特点与优势,结合已有的案例,3D 打印技术具备开展人工晶体个性化加工的巨大潜力。但目前仍没有将 3D 打印技术应用到人工晶体的制备中,本文将重点探索人工晶体的设计与 3D 打印的可行性。

本文依据我国人眼角膜前后表面面型、眼内间距、各介质折射率以及人眼像差,重构满足我国人眼特征的人工晶体光学模型,研究不同工艺的打印手段,检验人工晶体的 3D 打印效果。本文描述的晶

体模型的建立方法具有个性化特点,适用于单个人眼晶体模型的建立。

2 人工晶体制备的基本原理

2.1 晶状体的光学结构

目前,眼科测量手段并不能获得晶状体面型和内部折射率分布,因此,晶状体光学模型的建立是模型眼研究的一大难点。对于晶状体的模拟,主要分为两个部分:晶状体的面型和折射率分布。

现有的各种人眼模型中,大都采用旋转对称的二次曲面方程来表示晶状体前后表面的面型^[7]。但存在不足之处,相关研究报道发现,人眼散光不仅与角膜散光有关,还与晶状体表面曲率不等有关。因此,提出用双二次曲面来表示晶状体前后表面的面型,

$$z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x)c_x^2 x^2 - (1 + k_y)c_y^2 y^2}}, \quad (1)$$

式中:表面的顶点为坐标原点,光轴为 z 轴,弧矢面在平面 xoz 内,子午面在平面 $yoiz$ 内; c_x 和 c_y 分别表示弧矢面和子午面内顶点的曲率, $c_x = \frac{1}{R_x}$, $c_y = \frac{1}{R_y}$, 分别称 R_x 和 R_y 为弧矢半径和子午半径; k_x 和 k_y 分别表示晶状体在弧矢面和子午面内的二次曲面系数。

复杂的新旧晶状体纤维结构使晶状体内部折射率分布不均匀:以晶状体核为对称中心,该部分的折射率最大,约为 1.40 ~ 1.41,离开中心处时折射率逐渐减小,到前后皮质部分的折射率约为 1.375。现有的人眼模型中,晶状体的折射率分布主要分为两种:1)晶状体作为一个折射率均匀的元件,折射率是一个定值,不随轴向和径向位置的改变而改变;2)梯度渐变折射率,折射率在径向和轴向方向上从中心向两侧逐渐减小。

2.2 3D 打印设备及材料的选取

目前使用较为广泛的打印工艺主要有:熔融沉积成型(FDM)、光固化成型(SLA)和选择性激光烧结(SLS)等^[8]。人工晶体内部的渐变折射率,通过折射率不同的材料来实现,在打印过程中需要更换材料,FDM 3D 打印机比较符合这一要求。采用 Raise 3D N2 Plus 工业级高精度 3D 打印机,打印层厚为 0.01 mm。SLA 工艺获得的产品表面质量好,打印耗材为光敏树脂,适合打印单一折射率晶体模

型,本文选择的 SLA 光固化 3D 打印机型号为 Formlabs Form 2,打印层厚为 0.1 mm。

目前用于制造人工晶体的材料主要有 PMMA、硅胶和丙烯酸材料^[3]。由于硅胶、丙烯酸材料刚性太小^[9],无法通过 3D 打印工艺成型,会产生变形弯曲等现象,不可作为 3D 打印材料,因此目前市场上人工晶体材料只有 PMMA 可以用于 3D 打印工艺。在可用于 3D 打印的材料中,聚乳酸(PLA)材料使用广泛,熔化后易附着延展,不易脱落。晶状体呈双凸透镜状,内层采用 PMMA($n=1.49$)材料打印,外层采用 PLA($n=1.40$)材料打印,来简单模拟折射率渐变。同样,由于光敏树脂具有良好的透光性,并且

表 1 我国人眼光学模型的初始结构参数

Table 1 Initial structural parameters of the human eye model in China

Surface number	Surface type	Radius /mm (meridian/sagittal plane)	Conic (meridian/sagittal plane)	Thickness /mm	Index
1	Biconic	7.95/7.79	-0.15/-0.16	0.52	1.380
2	Biconic	6.62/6.20	-0.14/-0.13	3.22	1.336
3(STO)	Standard	Infinity	0	0	1.336
4	Biconic	—	—	1	—
5	Biconic	—	—	19.09	1.336
6	Standard	-12.30	0	—	—

3.2 模型建立的步骤

首先,构造我国人眼光学数字化模型的初始结构。参照表 1,将实测的角膜面型的前后表面曲率半径和二次曲面系数,眼内间距的数值以及各介质的折射率输入 Zemax 光学设计软件中。晶状体前后表面型采用双二次曲面,前后表面曲率半径和二次曲面系数参考文献[2]所建立的东方人眼光学模型中的晶状体参数,折射率根据所选择的材料来设置。

然后设置变量,建立评价函数,进行系统优化。

表 2 晶状体单一折射率眼模型的光学参数

Table 2 Optical parameters of a single refractive index lens eye model

Surface number	Surface type	Radius /mm (meridian/sagittal plane)	Conic (meridian/sagittal plane)	Thickness /mm	Index
1	Biconic	7.95/7.79	-0.15/-0.16	0.52	1.380
2	Biconic	6.62/6.20	-0.14/-0.13	3.22	1.336
3(STO)	Standard	Infinity	0	0	1.336
4	Biconic	33.33/34.33	-21.75/-22.754	1	1.510
5	Biconic	-10.99/-11.73	-8.69/-9.69	19.09	1.336
6	Standard	-12.30	0	—	—

该人眼光学系统的点列图如图 1(a)所示。 0° 视场 RMS 半径值为 $1.758 \mu\text{m}$, 5° 视场 RMS 半径值为 $1.474 \mu\text{m}$ 。

人眼视网膜的视神经能够分辨的两个物体在视网膜上成像的两个像点之间最小的距离应间隔一个

由光敏树脂制成的产品质量较好^[10]。打印单一折射率晶体模型时可选用光敏树脂作为晶体材料。

3 我国人眼光学数字化模型

3.1 人眼的初始结构参数

眼模型的初始结构参数如表 1 所示(其中 STO 为孔径光阑)。人眼晶状体的实际厚度约为 4 mm,但是考虑到白内障超声乳化术的手术切口不能过大,否则会导致眼睛术后恢复周期长以及产生术后闪光,所以目前临床医学所用的人工晶体厚度约为 1 mm^[11],因此本文建立的晶体模型厚度为 1 mm,玻璃体的厚度调整为 19.09 mm。

将晶状体前后表面曲率半径、二次曲面系数设为变量,以最小化点列图均方根(RMS)半径为目标进行优化。从而得到晶状体前后表面曲率半径和二次曲面系数。

3.3 单一折射率晶体模型的建立

如 2.2 节所述,单一折射率晶体模型选择光固化 3D 打印机,光敏树脂作为 3D 打印材料。光敏树脂的折射率约为 1.51,获得的人眼模型光学参数如表 2 所示。

视神经细胞,至少等于两个椎体细胞的直径 0.006 mm ,因此人眼调制传递函数的空间截止频率为

$$\omega = \frac{1}{6 \times 10^{-3}} \approx 160 \text{ lp/mm}. \quad (2)$$

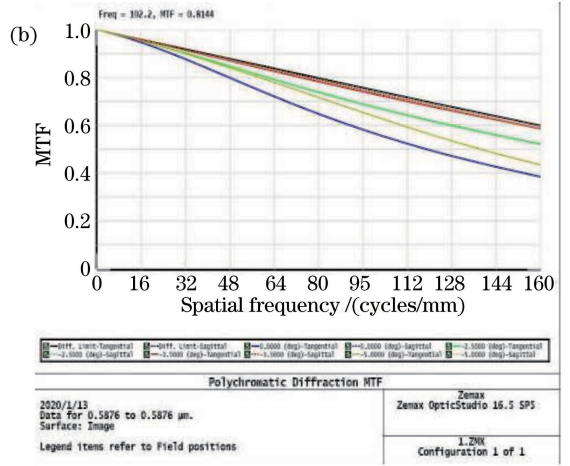
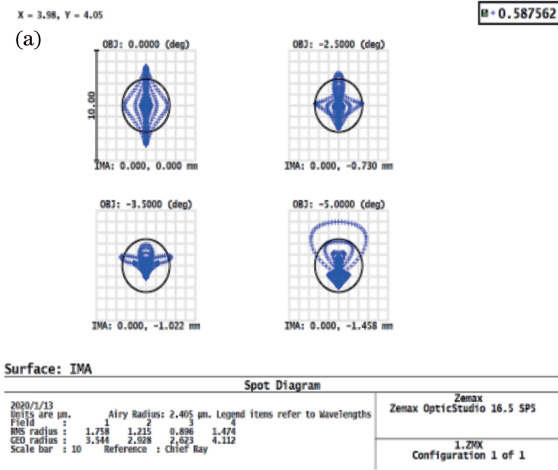


图 1 晶状体单一折射率人眼光学系统。(a)点列图;(b)MTF 曲线

Fig. 1 Human eye optical system with single refractive index. (a) Point diagram; (b) MTF curves

该调制传递函数 (MTF) 曲线分析中, 选择 160 lp/mm 为最大频率。从图 1(b)中可以看出, 在截止频率为 160 lp/mm 时, 四个视场的 MTF 值均大于 0.4。

3.4 渐变折射率晶体模型的建立

如 2.2 节所述, 折射率渐变模型选择熔融沉积型 3D 打印机, PMMA 和 PLA 为 3D 打印材料。将晶状体分为三层, 包括四个面, 来简单模拟折射率渐变。如图 2 所示, 内层材料选择 PMMA, 折射率最大, 为 1.49, 两侧材料选择 PLA, 折射率为 1.40。

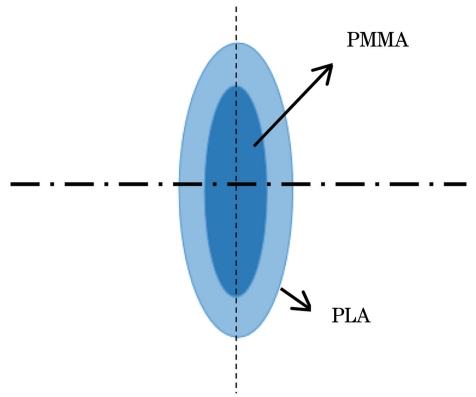


图 2 晶状体折射率渐变模型图

Fig. 2 Diagram of gradient refractive index lens model

优化得到的晶状体折射率渐变的人眼模型的光学参数如表 3 所示, 第 4、7 个面为晶状体的前后表面, 5、6 面为晶状体折射率分层的两个中间面。晶状体厚度分别为 0.4、0.3、0.3 mm。

该系统的点列图如图 3(a)所示, 0°视场 RMS 半径值为 1.362 μm , 5°视场的 RMS 半径为

1.978 μm , 明显小于人眼视锥细胞大小。晶状体渐变折射率人眼模型轴上视场 RMS 半径小于晶状体单一折射率人眼模型, 体现了渐变折射率的优越性。该系统的 MTF 曲线如图 3(b)所示, 四个视场在 160 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.4。

表 3 晶状体折射率渐变眼模型的结构参数

Table 3 Structural parameters of eye model with gradient refractive index

Surface number	Surface type	Radius /mm (meridian/sagittal plane)	Conic (meridian/sagittal plane)	Thickness /mm	Index
1	Biconic	7.95/ 7.79	-0.15/-0.16	0.52	1.380
2	Biconic	6.62/6.20	-0.14/-0.13	3.22	1.336
3(STO)	Standard	Infinity	0	0	1.336
4	Biconic	10.14/11.09	-6.58/-5.58	0.40	1.400
5	Biconic	109.80/110.79	-2/-2	0.30	1.490
6	Biconic	-32.12/-33.12	-2/-2	0.30	1.400
7	Biconic	-5.473/-5.56	-3.17/-3.49	19.09	1.336
8	Standard	-12.30	0	—	—

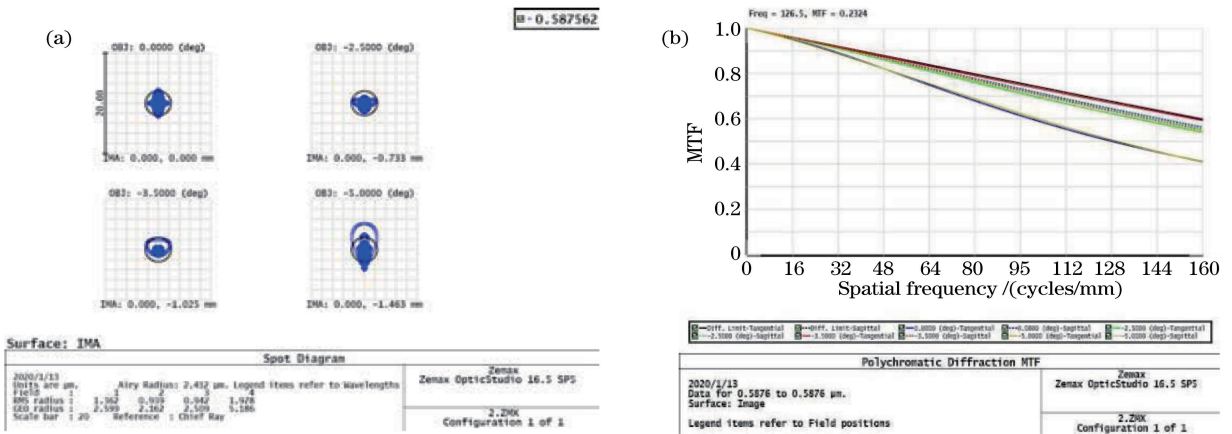


图 3 晶状体折射率渐变人眼光学模型。(a)点列图;(b) MTF 曲线

Fig. 3 Human eye optical system with gradient refractive index. (a) Point diagram; (b) MTF curves

4 3D 晶体实体模型的打印及测试

4.1 3D 晶体实体模型的打印

通过 SLA 打印机,以光敏树脂为材料获得的单一折射率晶体实体模型如图 4(a)所示;通过 FDM 打印机,以 PLA 和 PMMA 为材料获得的渐变折射率晶体实体模型如图 4(b)所示。

从图 4 中可以看出,利用 FDM 打印工艺获得的晶体模型分层现象严重,形成了一定厚度的多级台阶,表面粗糙度很差、影响正常透光,SLA 打印工艺获得的人工晶体表面质量较好。由 2.2 节可知,本文所选择的 FDM 打印机每层打印的层厚

为 0.01 mm,SLA 打印机每层打印的层厚为 0.1 mm,FDM 打印机精度更高,因此不是打印机本身的精度问题。在 FDM 打印过程中,实体模型是一层一层堆积而成的,每层之间会产生台阶,并且打印过程中喷头沿着一定的轨迹挤出材料进行打印,使得内部结构不均匀。SLA 则采用光固化成型技术,通过激光照射到光敏树脂表面,使其固化,表面质量较好,不会像 FDM 打印工艺产生分层现象,因此 SLA 工艺更加适合于制作人工晶体。下文对于晶状体实体模型的各项光学参数的测量,主要是针对光敏树脂制成的单一折射率晶状体模型。

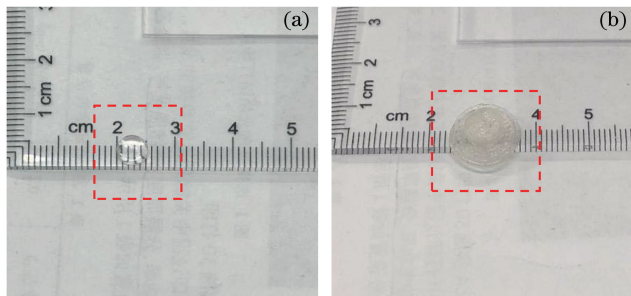


图 4 三维实体晶体模型。(a)单一折射率晶体模型;(b)渐变折射率晶体模型

Fig. 4 Three-dimensional lens model. (a) Single refractive lens model; (b) gradient refractive lens model

4.2 实体晶体模型的应力测量

本文所设计的测量晶体模型应力双折射的原理图如图 5 所示^[12],主要由起偏器 P_1 , 1/4 波片 (QWP)和检偏振器 P_2 组成。放入被测晶体和 1/4 波片前,转动检偏器,使起偏器与检偏器偏振轴正交,视场最暗;放入 1/4 波片并绕光轴旋转,使视场又恢复最暗,此时 1/4 波片的快慢轴分别与起、检偏器的偏振轴平行;放入被测晶体模型,激光经过起偏器成为线偏振光,经过被测晶体后成为椭圆偏振光,

只要被测晶体的快慢轴 x,y 方向与起偏器偏振方向呈 45° ,则经被测晶体后的椭圆偏振光的长、短轴 X,Y 之一必与 P_1 平行;再通过 1/4 波片后,椭圆偏振光变为线偏振光,其振动方向与 P_1 方向夹角为 $\gamma = \frac{\varphi}{2}$, φ 为被测晶体双折射相位差;只需逆时针转动检偏器至被测晶体的被测点产生消光现象时,检偏器转过的角度就等于 $\varphi/2$ 。被测点总的双折射光程差 δ 表示为

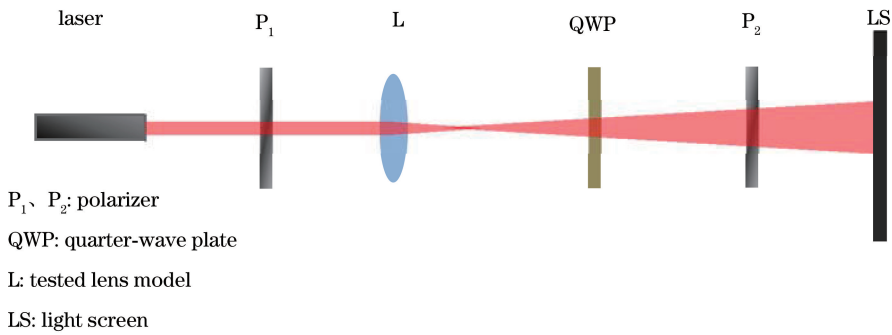


图5 晶体模型应力测量原理图

Fig. 5 Schematic of lens model stress measurement

$$\delta = \frac{\varphi}{2\pi}\lambda = \frac{\gamma}{\pi}\lambda. \quad (3)$$

检偏器旋转前读数为 52° , 旋转后检偏器读数为 77° . 因此检偏器转过的角度 $\gamma = 25^\circ$, 使用的激光器波长为 632.8 nm , 则该晶体模型双折射光程差 $\delta = 87.9 \text{ nm}$, 单位厚度的光程差为 87.9 nm/mm , 存在一定的应力分布。

实际临床使用的人工晶体一般采用模压工艺, 并给予时效时间, 属各向同性体, 各个方向的折射率相同, 并不存在应力, 但是在 3D 打印过程中, 光敏树脂材料经过加热和冷却, 内部会产生应力, 各向同性的性质遭到破坏, 从而导致折射率发生变化。

4.3 实体晶体模型的焦距测量

以光敏树脂为材料, 厚 1 mm 的单一折射率晶体模型焦距为 16.25 mm , 用放大率法测得该晶体模型的焦距为 15.44 mm , 与理论值相差 4.98% . 因为本文所选择的 SLA 打印机 XYZ 轴存在一定的定位精度, 在打印过程中, 前后表面曲率半径以及晶体的厚度都会与设计值产生一定的偏差, 从而致使打印获得的晶体模型的焦距与设计值有所偏差。

三维形貌参数精密检测的难点是, 晶体的面形为非球面, 激光干涉检测需要制作零位补偿器, 周期较长。目前仅使用美国 Veeco 公司的白光干涉显微镜, 对其面形进行了非接触测量, 根据其三维形貌, 经拟合得到其曲率半径, 并与设计结果进行了比较, 存在偏差。同时, 经与眼科临床医生讨论, 病人屈光不正或白内障病人复明问题亟待解决, 在选择人工晶体时, 屈光度是患者考虑的首要因素。

4.4 实体晶体模型表面粗糙度的测量

利用白光显微干涉仪测量晶体模型的表面粗糙度, 晶体模型前表面粗糙度如图 6 所示。打印获得的晶体模型表面粗糙度达 120 nm 量级。

临床使用的人工晶体表面粗糙度约为几纳米,

光学抛光零件表面粗糙度约为 250 nm 。目前人工晶体通过制作模具获得, 表面粗糙度较好, 而通过 3D 打印获得实体晶体模型后, 需要对模型进行打磨等后续的加工工艺, 因此通过 3D 打印技术获得的人工晶体表面粗糙度大于临床人工晶体。

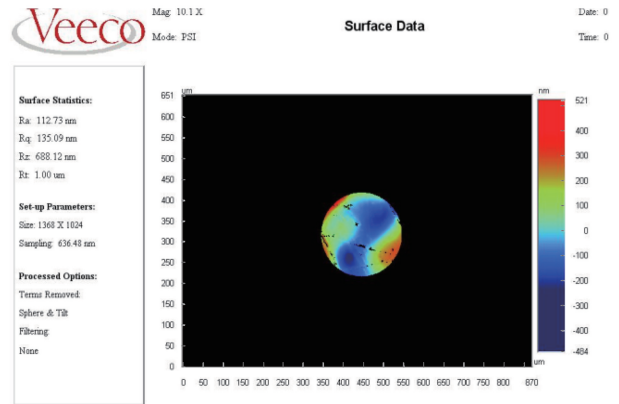


图6 实体晶体模型前表面粗糙度

Fig. 6 Surface roughness of the lens model

5 结 论

根据所选择的适用于晶体的 3D 打印材料, 建立了以光敏树脂为材料、 1 mm 厚的单一折射率晶体模型和以 PMMA、PLA 为材料、 1 mm 厚的渐变折射率晶体模型。利用 SLA 工艺打印单一折射率晶体模型, FDM 工艺打印渐变折射率晶体模型。结果表明, FDM 打印工艺获得的三维晶体模型台阶效应严重; SLA 工艺打印的单一折射率晶体模型, 屈光度在晶体使用范围内。若想获得应力更小的晶体模型, 可以选择打印层厚更加精细的 3D 打印机; 若想提高晶体模型的表面质量, 可以提高后续处理的加工工艺。

参 考 文 献

- [1] Navarro R. The optical design of the human eye: a

- critical review [J]. *Journal of Optometry*, 2009, 2 (1): 3-18.
- [2] Kong M M. Research of the crystalline lens model in human eye optical system based on zemax interface technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43 (12): 1222002.
孔梅梅. 基于 Zemax 接口技术的人眼晶状体模型研究 [J]. *光子学报*, 2014, 43(12): 1222002.
- [3] Bozukova D, Pagnoulle C, Jérôme R, et al. Polymers in modern ophthalmic implants: Historical background and recent advances [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2010, 69(6): 63-83.
- [4] Zheng Y R. Development and clinical application of hydrogel soft prosthetic eye [J]. *Railway Medical Journal*, 2000, 28(2): 101-102.
郑一仁. 水凝胶软性义眼的研制与临床应用 [J]. *铁道医学*, 2000, 28(2): 101-102.
- [5] Chen J M, Zhang C Y, Zeng Y, et al. 3D printing technology in orthopedics and its application [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55 (1): 011412.
陈继民, 张成宇, 曾勇, 等. 骨科数字化 3D 打印技术及应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011412.
- [6] Zhou C J, He Z G, Yuan W H. Research on 3D printing technology in artificial cornea preparation [J]. *Value Engineering*, 2018, 37(4): 146-147.
周楚建, 何志国, 原伟浩. 3D 打印技术在人工角膜制备中的研究 [J]. *价值工程*, 2018, 37(4): 146-147.
- [7] Birkenfeld J, de Castro A, Ortiz S, et al. Contribution of the gradient refractive index and shape to the crystalline lens spherical aberration and astigmatism [J]. *Vision Research*, 2013, 86: 27-34.
- [8] Yang Y, Qian B, Liu C, et al. Progress in 3D laser printing of glass [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011409.
杨玥, 钱滨, 刘畅, 等. 激光 3D 打印玻璃研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011409.
- [9] Jung G B, Jin K H, Park H K. Physicochemical and surface properties of acrylic intraocular lenses and their clinical significance [J]. *Journal of Pharmaceutical Investigation*, 2017, 47(5): 453-460.
- [10] Zhang H, Xu L, Hu Z H. Research progress of photosensitive resin for UV-curable 3D printing [J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2015, 32(4): 81-84.
张恒, 许磊, 胡振华. 光固化 3D 打印用光敏树脂的研究进展 [J]. *合成树脂及塑料*, 2015, 32(4): 81-84.
- [11] Cao J H, Zhu H X, Su Z P. Design of intraocular lens based on multifocal freeform-Fresnel surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55 (8): 082202.
曹晶辉, 朱华新, 苏宙平. 基于多焦点自由曲面菲涅耳人工晶状体设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 082202.
- [12] Zhou T H. Measuring method of stress in glass [J]. *Glass & Enamel*, 2001, 29(6): 44-47, 57.
周天辉. 玻璃应力的测定方法 [J]. *玻璃与搪瓷*, 2001, 29(6): 44-47, 57.