

小口径双非球面硫系玻璃镜片精密模压成型实验研究

唐 昆¹,孔明慧¹,朱勇建²,陈逢军³,毛 聪¹,张明军¹

- (1. 长沙理工大学 工程车辆轻量化与可靠性技术湖南省高校重点实验室,湖南 长沙 410114;
2. 浙江科技学院 机械与汽车工程学院,浙江 杭州 310023;
3. 湖南大学 机械与运载工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:为实现小口径双非球面硫系玻璃镜片的精密模压成型制造,通过正交模压成型实验,研究了相关工艺参数对成型镜片质量的影响规律。首先,介绍了模压成型过程和用于实验的 PFLF7-60A 型多工位模压成型机床,并根据非球面曲线公式设计了目标镜片。然后,选定了一种环保型硫系玻璃 IRG205,通过 VFT 方程拟合了玻璃粘度与温度之间的关系,确定了模压温度,并对各工位实验参数进行了设置。最后,利用无镀膜模具及球形预形体进行了正交模压成型实验,分析了实验条件下模压温度、加压载荷及保持压力等成型工艺参数对镜片成型质量(形状精度 PV 、表面粗糙度 Ra 及轮廓偏移量)的影响规律,并获得了优化的成型工艺参数。结果显示:在优化的工艺参数下,成型镜片 ASP1 和 ASP2 的 PV 值分别为 129.2 nm 和 174.8 nm, Ra 值分别为 19.6 nm 和 25.6 nm,轮廓偏移量分别为 0.614 μm 和 2.682 μm ,基本满足镜片高精度应用的要求,为小口径双非球面硫系玻璃镜片的高精度批量制造提供了参考和依据。

关键词: 硫系玻璃; 小口径双非球面; 模压成型; 模压温度; 加压载荷; 保持压力

中图分类号: TG376.2; TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0418006

Experimental study on precision molding of small dual aspherical chalcogenide glass lens

Tang Kun¹, Kong Minghui¹, Zhu Yongjian², Chen Fengjun³, Mao Cong¹, Zhang Mingjun¹

- (1. Key Laboratory of Lightweight and Reliability Technology for Engineering Vehicle, Education Department of Hunan Province, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to realize the precision molding of small dual aspherical chalcogenide glass lenses, the influence of the relevant process parameters on the quality of molded lenses was studied by orthogonal molding experiment. Firstly, the molding process and the PFLF7-60A multi-station molding machine were introduced, the target lens was designed according to the aspheric curve formula. Secondly, an environmentally friendly chalcogenide glass IRG205 was selected, and the relationship between the viscosity and temperature of the glass was fitted by the VFT equation, then the molding temperature was

收稿日期:2017-11-19; 修订日期:2017-12-22

基金项目:国家自然科学基金(51405034);湖南省自然科学基金(2015JJ3014);湖南省教育厅项目(15C0039);湖南省高校重点实验室开放基金(2017kfjj06)

作者简介:唐昆(1980-),男,讲师,硕士生导师,博士,主要从事超精密加工、精密热压成型及仿真方面的研究。Email:tangkun@csust.edu.cn

determined, and the experimental parameters of each station were also established. Finally, the orthogonal molding experiments were conducted with no-coated mold and spherical preform, the regular influence of molding process parameters such as molding temperature, pressing load and maintenance force on the lenses' molding quality (form accuracy PV , surface roughness Ra and profile deviation) were analyzed, and the optimized molding process parameters were obtained. The results have demonstrated that the values of PV for ASP1 and ASP2 are 129.2 nm and 174.8 nm, the values of Ra are 19.6 nm and 25.6 nm, and the values of profile deviation are 0.614 μm and 2.682 μm , respectively. The results can satisfy the requirements for high-precision applications of lenses, and provide reference and basis for the high-precision mass production of small dual aspheric chalcogenide glass lenses.

Key words: chalcogenide glass; small dual aspherical; molding; molding temperature; pressing load; maintenance force

0 引言

近年来,随着红外热成像技术的广泛应用,及其对成像系统小型、轻量以及高质量成像的要求,各类小口径非球面红外光学镜片的需求日益增加。传统的红外光学镜片采用单点金刚石精密车削工艺,对单晶锗、硒化锌等晶体材料切削加工而成,成本高、效率低,且无法满足大批量生产的要求。而硫系玻璃作为一种非晶态材料,在 2~15 μm 范围的红外波段内具有较高的透过率,光学性能与单晶锗材料相当,消热差性能优良,原材料成本相对较低,且适于模压成型工艺以进行光学镜片的批量制造^[1-2]。目前,硫系玻璃已逐渐替代其他红外材料成为新一代红外光学系统核心镜片材料,并成为红外光学业界研究的热点,而各类小口径非球面硫系玻璃镜片已广泛应用于军用装置、移动设备和医疗器械等的红外镜头或传感器中^[3-4]。

虽然硫系玻璃可以通过模压成型工艺生产出所需形状的目标镜片,但相比于普通透光玻璃,其模压成型过程存在以下问题^[5-6]:(1) 硫系玻璃易碎,如模压工艺参数设置不当,难以制造出所需形状的光学镜片甚至碎裂;(2) 对加压载荷和温度较为敏感,成型质量难以控制;(3) 成型镜片与模腔之间易发生粘连。虽然存在工艺难度,但是模压成型工艺仍然是批量制造非球面硫系玻璃镜片成本最低的方法之一^[7]。国内外学者对非球面硫系玻璃的模压成型进行了相

关研究,Cha Du Hwan 等^[8-9]研究了模压温度和玻璃预形体形状对中口径非球面硫系玻璃镜片形状精度和表面粗糙度的影响;Chien Hsi Hsin 等^[6]研究了在球形硫系玻璃预形体上镀氧化铝膜对成型结果的影响,实验表明预形体镀膜可以有效减小小口径非球面镜片与模腔之间的粘连;汪志斌等^[10]利用有限元仿真分析了硫系玻璃预形体形状对非球面成型镜片填充效果的影响,并利用加工出的模具和玻璃预形体模压出了双非球面镜片。文中选择一种环保型硫系玻璃 IRG205($\text{Ge}_{20}\text{Se}_{60}\text{Sb}_{12}$)进行了小口径双非球面镜片的正交模压成型实验,研究了模压温度、加压载荷以及保持压力等工艺参数对镜片成型质量(形状精度 PV 、表面粗糙度 Ra 及轮廓偏移量)的影响,并据此得到优化的工艺参数,该参数下模压成型出的双非球面镜片基本满足其高精度应用的要求,为小口径双非球面硫系玻璃镜片的高精度批量制造提供了依据。

1 实验准备

1.1 模压成型机床

小口径双非球面硫系玻璃镜片精密模压成型实验采用日本 SYS 公司的 PFLF7-60A 型模压成型机床(图 1),该机床为多工位连站式机床,由模造室、工位控制器、加热系统、冷却系统等部分组成。其模压温度最高可达 750 $^{\circ}\text{C}$,加压载荷最大可调至 1 MPa,成型模具直径范围 16~60 mm,可满足最多

八套模具同时加工,成型效率高。



图 1 PFLF7-60A 型模压成型机床

Fig.1 Glass molding machine PFLF7-60A

该机床的成型过程如图 2 所示。将放有硫系玻璃预形体的组合模具置于机床输送带上,由推送机

构推至成型室,再由移送机构将其从第 1 工位逐步移至第 7 工位,待模具冷却后脱模即可获得成型镜片。主要成型步骤包括^[11]:加热(第 1、2、3 工位)、加压(第 4 工位)、退火(第 5 工位)和冷却(第 6、7 工位)、成型室外脱模。在加热阶段,将玻璃预形体放入模具模腔中,通过推送机构推至成型室,上加热板缓慢下移到模具上方 3 mm,模具内玻璃预形体在上、下两加热板之间逐步加热至模压温度并浸润;在加压阶段,模具在保持模压温度的条件下,上加热板向下施加一恒定载荷并保持一定时间,使玻璃预形体完全填充模腔;在退火阶段,上加热板向下施加一保持压力,避免成型镜片在高温下发生变形;在冷却脱模阶段,组合模具逐步冷却至室温,然后将镜片从模具中取出。整个模压过程中,模造室须通入氮气以去除空

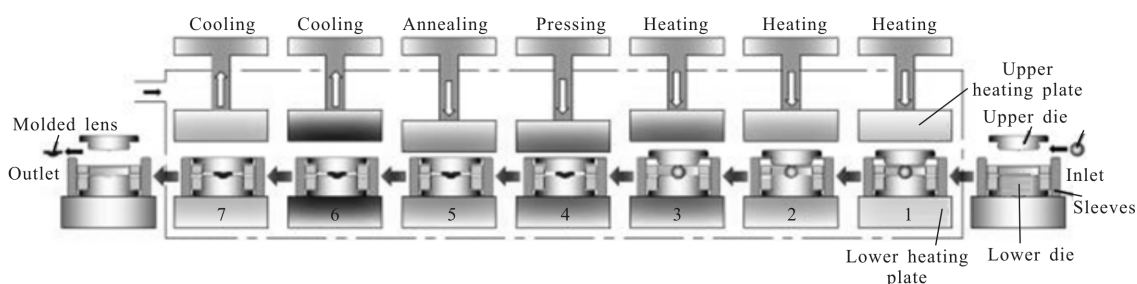


图 2 PFLF7-60A 模压成型机床的成型过程示意

Fig.2 Schematic of the molding process for molding machine PFLF7-60A

气,保护模具和镜片。

1.2 模压成型镜片及模具

成型镜片包括非球面凹面(ASP1)及凸面(ASP2),两者形状曲线由公式(1)确定^[12]:

$$z = \frac{x^2}{R(1 + \sqrt{1 - (1+k)x^2/R^2})} + A_4 \cdot x^4 + A_6 \cdot x^6 + A_8 \cdot x^8 \quad (1)$$

式中: R 为非球面曲线顶点处曲率半径; k 为圆锥常数; A_4, A_6, A_8 为非球面系数。式中各非球面曲线参数的取值如表 1 所示,镜片为月牙形,直径 6 mm,ASP1 和 ASP2 的有效口径分别为 1.8 mm 和 3.5 mm,镜片中心厚度 1.86 mm,如图 3 所示。

表 1 非球面曲线参数

Tab.1 Parameter values of aspheric curves

	R/mm	k	A_4	A_6	A_8
ASP1	-3.2	0.71	-0.042 9	-0.020 9	-0.013 5
ASP2	-2.4	0.16	0.001 6	-0.000 9	0.000 04

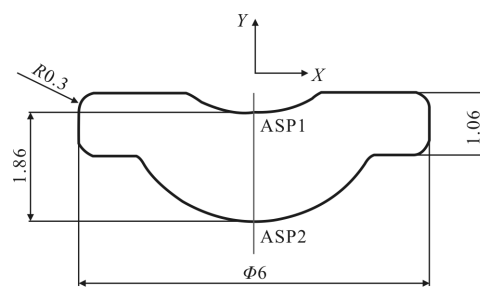


图 3 镜片设计图

Fig.3 Schematic of the designed lens

实验用硫系玻璃材料采用湖北新华光信息材料有限公司生产的 IRG205($Ge_{23}Se_{60}Sb_{12}$),该种材料中三元 Ge-Sb-Se 结构较为稳定,且不含 As 等有害物质,其热力学性能如表 2 所示^[13-15]。实验用玻璃预形体采用经抛光但未镀膜的球形毛坯,直径为 4.16 mm。模压成型模具采用日本住友电工硬质合金株式会社生产的 AF312 超硬合金制造(图 4),模具无镀膜,其

热力学性能见表 2。经误差补偿后,ASP1 和 ASP2 对应的模腔非球面形状精度 PV 和表面粗糙度 Ra 值如表 3 所示。综上所述且考虑国内外研究人员在非球面硫系玻璃镜片模压成型上的研究,为满足镜片高精度应用的需求,实验要求模压成型后镜片 ASP1 和 ASP2 的精度满足: $PV \leq 0.2 \mu\text{m}$, $Ra \leq 0.03 \mu\text{m}$, 轮廓偏移量不超过 $1 \mu\text{m}$ ^[9,16]。

表 2 IRG205 及 AF312 的热力学性能

Tab.2 Thermo-mechanical properties of IRG205 and AF312

Property	Value(IRG205)	Value(AF312)
Density $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	4.68	14.3
Thermal conductivity k $/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$	0.25	29
Specific heat $C_p/\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$	0.33	-
Young's modulus E/GPa	21.9	560
Thermal expansion α/C	14×10^{-6}	5.7×10^{-6}
Transition temperature T_g/C	285	-

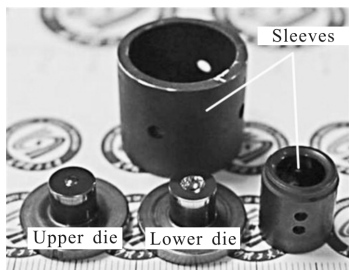


图 4 模具
Fig.4 Mold

表 3 补偿后的模腔表面形状精度和粗糙度值
Tab.3 Form accuracy and roughness of the fabricated mold cavity surface after compensation

	ASP1	ASP2
Form accuracy PV/nm	137.3	188.5
Roughness Ra/nm	14.4	28.9

1.3 成型镜片检测

成型镜片质量由镜片的形状精度 PV 、表面粗糙

度 Ra 及轮廓偏移量表征。其中, PV 、 Ra 值采用英国 Taylor Hobson 公司生产的非球面轮廓测量仪 Form Talysurf PGI 840 测量。成型镜片轮廓偏移量示意图如图 5 所示, 该偏移量为成型镜片与设计镜片的轮廓在半径方向的高度差^[16], 由退火、冷却阶段温度下降引起的成型镜片收缩而产生, 为区别偏移情况, 成型镜片非球面轮廓高于设计值称之为偏移或正偏移, 低于设计值称之为负偏移^[17], 较大的正、负轮廓偏移量都将导致成型镜片无法满足光学设计的要求。将非球面轮廓测量仪中导出的成型镜片非球面曲线数据与设计镜片的非球面曲线进行比较, 即可获得成型镜片的轮廓偏移量。以 0.025 mm 为间距, 分别分析了不同参数下非球面 ASP1、ASP2 由中心点沿半径方向 0.9 mm 、 1.75 mm 内的轮廓偏移量。此外, 采用 MSD-VHX1000 超景深三维数码显微镜对成型镜片及模腔表面的粘连现象进行观测。

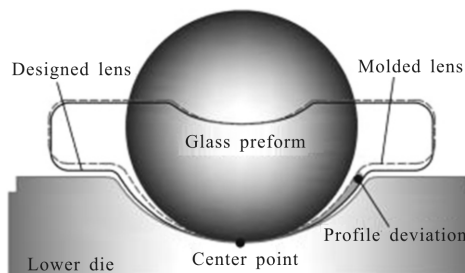


图 5 成型镜片轮廓偏移量示意图
Fig.5 Schematic of lens profile deviation

1.4 模压成型实验参数

通过高温粘度计测量硫系玻璃应变点、退火点、软化点以及屈服点这几个温度的粘度值后, 采用公式(2)中 Vogel-Fulcher-Tammann(VFT)方程即可拟合模压温度和玻璃粘度之间的关系^[18-20]:

$$\log \eta(T) = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 T_0 为常数。在模压温度范围内, 玻璃的粘度通常处于 $10^8 \sim 10^{16} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 范围内^[20]; 取 $A=2.9$, $B=535$, $T_0=206.5$, 可拟合出硫系玻璃 IRG205 的粘度随温度变化的曲线如图 6 所示。根据拟合结果, 硫系玻璃 IRG205 的模压温度取值范围为 $310 \sim 350 \text{ C}$ 。由于硫系玻璃对模压温度敏感, 故选择温度差为 5 C 的三个模压温度进行模压成型实验。

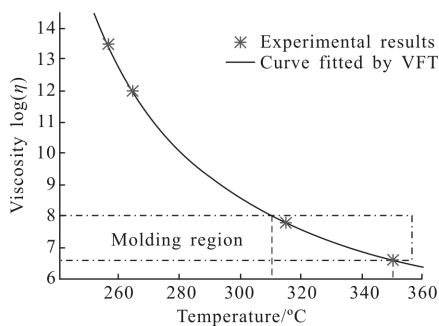


图 6 IRG205 粘度随温度变化的拟合曲线

Fig.6 Temperature-dependent viscosity of IRG205

在模压成型实验中,各工位实验参数的设置如表 4 所示,其中 T_m 、 P_p 、 P_m 分别为模压温度、加压载荷以及保持压力,采用正交实验研究这三个参数对成型镜片质量的影响,其取值如表 5 所示。其中,模压温度 T_m 的取值范围可由玻璃的粘度确定。每组模压实验前,采用氧化铝悬浊液对模腔进行清洁和保养,清除模腔表面残留的粘连物。

表 4 模压成型实验参数

Tab.4 Molding experiment parameters

Condition	Station						
	1	2	3	4	5	6	7
	+	+	+	↓	→	-	-
Upper heating plate Temperature/°C	285	315	T_m	T_m	275	200	Rapid cooling to room temperature
Lower heating plate temperature /°C	285	315	T_m	T_m	275	200	temperature
Pressing load /MPa	0	0	0	P_p	P_m	0	0
Beat time/s	75	75	75	75	75	75	75

表 5 T_m 、 P_p 、 P_m 取值

Tab.5 Values for T_m , P_p , P_m

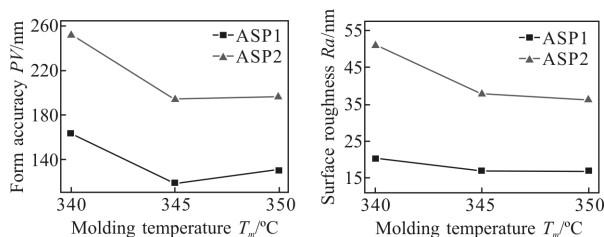
Parameter	Value	
Molding temperature/°C	T_{m1}	340
	T_{m2}	345
	T_{m3}	350
Pressing load/MPa	P_{p1}	0.05
	P_{p2}	0.10
	P_{p3}	0.15
	P_{m1}	0
	P_{m2}	0.01
Maintenance force/MPa	P_{m3}	0.02
	P_{m4}	0.03

2 实验结果与分析

2.1 模压温度对成型镜片质量的影响

首先分别将 P_p 、 P_m 固定在 P_{p1} 、 P_{m1} 水平上,与 T_m 的三个水平进行搭配实验,即 $T_{m1}P_{p1}P_{m1}$, $T_{m2}P_{p1}P_{m1}$, $T_{m3}P_{p3}P_{m3}$ 。

图 7 为实验后模压温度对成型镜片 PV 和 Ra 的影响,如图所示,在文中实验的模压温度范围内,成型镜片 ASP1 和 ASP2 的 PV 值随模压温度的增加呈现先减后增的趋势,345 °C 时 PV 值最小;而其 Ra 值随模压温度的增加呈现减小的趋势,但在 345 °C 之后减小趋势不明显。分析认为,由于接触传热是模具向模腔内玻璃预形体传热的主要热量来源,模压温度越低,硫系玻璃的流动性相对越差,在同样的时间和压力下,玻璃预形体不易填充模腔;且模压温度越低,玻璃粘度越大,易与模具发生粘连,故成型镜片 PV 和 Ra 值较大。而随着模压温度不断升高,硫系玻璃中的挥发性元素(如 Se)扩散并沉积在模腔表面,导致成型镜片 PV 值增大。此外,成型镜片非球面 ASP2 的 PV 和 Ra 值均大于 ASP1,这与模压实验前下模模腔的 PV 值和 Ra 值较大有关,如表 3 所示。以上实验结果说明硫系玻璃 IRG205 的模压温度可以选在 345~350 °C,最优模压温度为 $T_{m2}=345$ °C。



(a) 模压温度对 PV 的影响 (b) 模压温度对 Ra 的影响

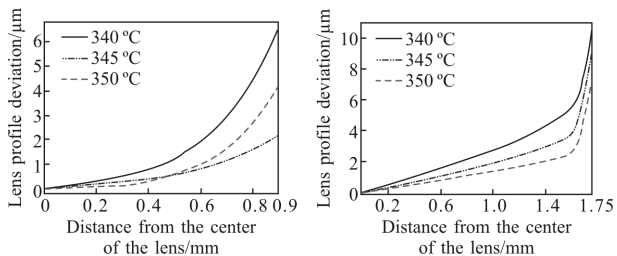
(a) Effect of molding temperature on PV (b) Effect of molding temperature on Ra

图 7 模压温度对镜片 PV 和 Ra 的影响

Fig.7 Effect of molding temperature on lenses PV and Ra

图 8 为模压温度对成型镜片轮廓偏移量的影响。由图可知,随模压温度升高,成型镜片轮廓偏移量呈现下降的趋势,这同样与模压温度升高引起的流动性增强有关。同时,由于模压温度越高,玻璃预形体在变形过程中,玻璃中各组成成分的分子之间达到新平衡状态的时间越短,成型镜片应力较小,在

退火和冷却阶段镜片表面的热收缩量减小, 镜片的轮廓偏移量相应减小。此外, 在镜片重力分布与热收缩的影响下, 成型镜片的轮廓偏移量由中心向边缘增大。



(a) 模压温度对 ASP1 的影响 (b) 模压温度对 ASP2 的影响
(a) Effect of molding temperature on ASP1 (b) Effect of molding temperature on ASP2

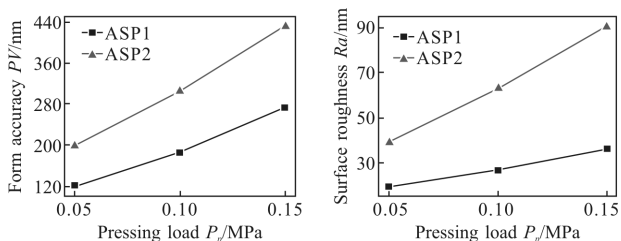
图 8 模压温度对成型镜片轮廓偏移量的影响

Fig.8 Effect of molding temperature on lenses profile deviation

2.2 加压载荷对成型镜片质量的影响

根据 2.1 节, 将 T_{m2} 、 P_{m1} 固定, 再与 P_p 的三个水平进行搭配实验, 即 $T_{m2}P_{p1}P_{m1}$, $T_{m2}P_{p2}P_{m1}$, $T_{m2}P_{p3}P_{m1}$ 。

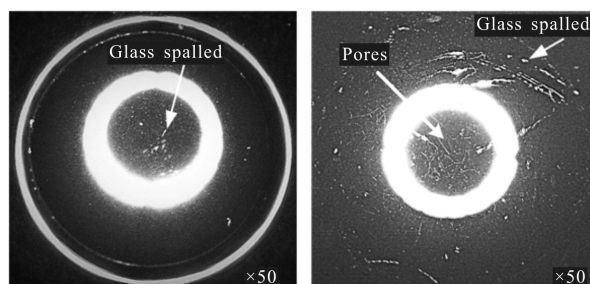
图 9 为实验后加压载荷对成型镜片 PV 和 Ra 的影响, 如图所示, 在实验的加压载荷范围内, 随加压载荷的增加, 成型镜片 ASP1 和 ASP2 的 PV 和 Ra 值显著增大。如图 10 所示, $T_{m2}P_{p3}P_{m1}$ 实验下, ASP1、ASP2 表面出现多处材料剥落的痕迹, 与之对应的模腔表面亦出现明显的因粘连产生的玻璃残留物, 这是上述 PV、Ra 值过大的主要原因。因为玻璃在模压温度下是粘性流体, 加压载荷越大, 玻璃预形体越容易与模具粘连。此外, 从图 10(b) 可见分布有大量微小气孔, 因此粘连还与硫系玻璃预形体中的挥发性元素在高温下扩散到模腔有关^[5]。



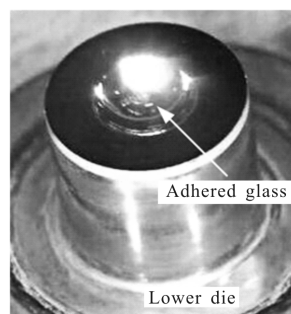
(a) 加压载荷对 PV 的影响 (b) 加压载荷对 Ra 的影响
(a) Effect of pressing load on PV (b) Effect of pressing load on Ra

图 9 加压载荷对镜片 PV 和 Ra 的影响

Fig.9 Effect of pressing load on lenses PV and Ra



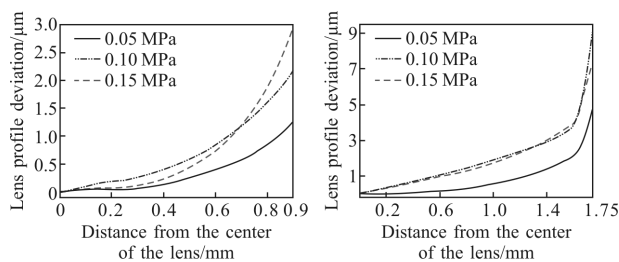
(a) ASP1 图像 (b) ASP2 图像
(a) Image of ASP1 (b) Image of ASP2



(c) 下模模腔
(c) Lower die cavity

图 10 0.15 MPa 下, 成型镜片显微镜放大图像及下模模腔照片
Fig.10 Microscope images of molded lens and photograph of lower die cavity under the condition of 0.15 MPa

图 11 为加压载荷对成型镜片轮廓偏移量的影响。随加压载荷的增加, 镜片轮廓偏移量呈现增大的趋势。这是因为在实验过程中, 随加压载荷的增加, 预



(a) 加压载荷对 ASP1 的影响 (b) 加压载荷对 ASP2 的影响
(a) Effect of pressing load on ASP1 (b) Effect of pressing load on ASP2

图 11 加压载荷对成型镜片轮廓偏移量的影响

Fig.11 Effect of pressing load on lenses profile deviation

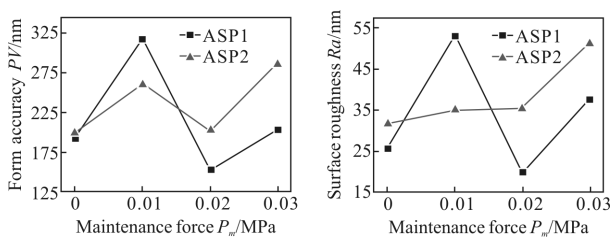
形体成型时间减少; 当加压载荷为 0.05、0.1、0.15 MPa 时, 预形体成型时间分别为 22.6、17.8、10.2 s。成型时间越短, 玻璃预形体应变率越大, 短时间内成型镜片

应力释放越少,残余应力越大,在相同的退火与冷却条件下,镜片内部达到平衡需释放更多的应力,因结构松弛使得镜片体积收缩量增大,所以轮廓偏移量越大。此外,加压载荷越大,玻璃预形体在加压变形时与模腔贴合更紧密,成型镜片能更好的复制模腔形状,导致轮廓偏移量随加压载荷增大的趋势不明显。综上所述,最优加压载荷为 $P_{p1}=0.05\text{ MPa}$ 。

2.3 保持压力对成型镜片质量的影响

根据 2.2 节,将 T_{n2} 、 P_{p1} 固定,再与 P_m 的四个水平进行搭配实验,即 $T_{n2}P_{p1}P_{m1}$, $T_{n2}P_{p1}P_{m2}$, $T_{n2}P_{p1}P_{m3}$, $T_{n2}P_{p1}P_{m4}$ 。

图 12 为实验后保持压力对成型镜片 PV 和 Ra 的影响,如图所示,在实验的保持压力范围内,成型镜片非球面 ASP1 和 ASP2 的 PV 和 Ra 值随保持压力的增加总体呈增大的趋势,且在保持压力为 0.02 MPa 时 ASP1 和 ASP2 的 PV 和 Ra 值较小。分析认为,当保持压力较小时,成型镜片在退火阶段的回弹变形力大于保持压力,此时保持压力无法保证成型镜片与模腔表面贴合,导致 PV 和 Ra 值增大;当保持压力较大时,会影响逐渐固化的镜片表面形状,导致成型镜片 ASP1 和 ASP2 的 PV 和 Ra 值又开始增大。为验证保持压力为 0.02 MPa 时得到结果的准确性,将 $T_{n2}P_{p1}P_{m3}$ 进行了一次重复实验,发现检测结果没有明显的差别。



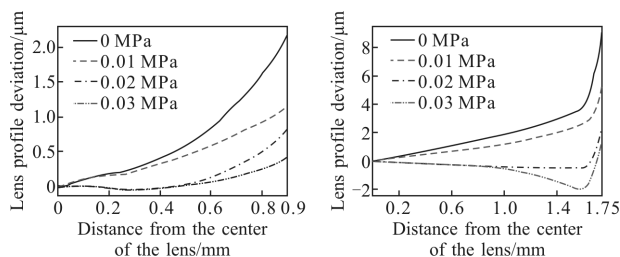
(a) 保持压力对 PV 的影响 (b) 保持压力对 Ra 的影响
(a) Effect of maintenance force on PV (b) Effect of maintenance force on Ra

图 12 保持压力对镜片 PV 和 Ra 的影响

Fig.12 Effect of maintenance force on lenses PV and Ra

图 13 为保持压力对成型镜片轮廓偏移量的影响。由图可知,成型镜片轮廓偏移量随保持压力增大而减小,这是因为退火阶段较大的保持压力能保证成型镜片表面与模腔贴合的更为紧密,成型镜片不易发生变形和回弹,成型镜片变形量较小。不施加保持压力下,成型镜片 ASP1 和 ASP2 边缘的轮廓偏移

量较大,分别达到 $2.17\ \mu\text{m}$ 和 $9.09\ \mu\text{m}$ 。如图 13(b)所示,当施加保持压力达到 0.03 MPa 时,出现了明显的轮廓负偏移。可见,只有适当的保持压力对成型镜片的轮廓偏移有较好的抑制作用。综上所述,最优保持压力为 $P_{m3}=0.02\ \text{MPa}$ 。



(a) 保持压力对 ASP1 的影响 (b) 保持压力对 ASP2 的影响
(a) Effect of maintenance force on ASP1 (b) Effect of maintenance force on ASP2

图 13 保持压力对成型镜片轮廓偏移量的影响

Fig.13 Effect of maintenance force on lenses profile deviation

由图 8、11 及 13 可知,相同实验条件下,在据镜片中心 0.9 mm 内,成型镜片 ASP1 的轮廓偏移量均大于 ASP2。这是因为 ASP1、ASP2 及球形毛坯顶点处的曲率半径分别为 3.2、2.4、2.08 mm,ASP1 曲率半径较大,由玻璃预形体变形成 ASP1 的曲率变化量也大,在相同的模压条件下,较大的曲率和曲率改变量导致成型镜片在退火冷却阶段产生较大的轮廓偏移量^[16]。此外,在不同实验条件下,成型镜片 ASP2 的轮廓偏移量在距镜片中心约 1.6 mm 后开始急剧增大,出现明显“翘边”现象。取下模模腔和成型镜片 ASP2 的轮廓偏移量进行比较(图 14),下模模腔在据中心 1.65 mm 范围内基本没有偏移,但在 1.65 mm 后偏移量迅速增大,两者变化特征相近,说明下模模

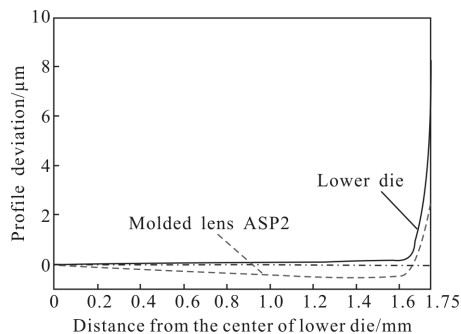


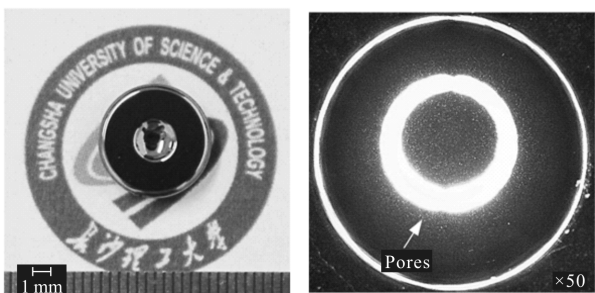
图 14 下模模腔和成型镜片 ASP2 的轮廓偏移量

Fig.14 Profile deviation of lower die cavity and ASP2

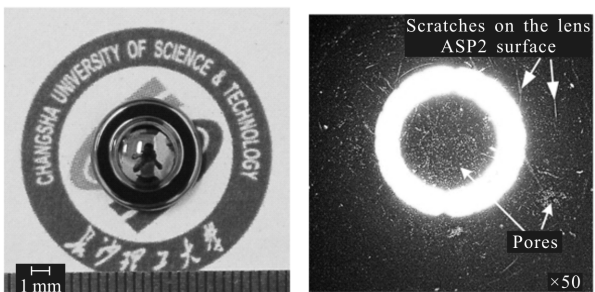
腔因模具加工产生的轮廓偏移是导致成型镜片 ASP2“翘边”的主要原因。

2.4 工艺参数优化

对比实验结果, 可得到 $T_{m2}P_{p1}P_{m3}$ 为所选取的最佳水平组合, 得到实验条件下硫系玻璃 IRG205 模压成型的优化工艺参数: $T_{m2}=345\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{p1}=0.05\text{ MPa}$, $P_{m3}=0.02\text{ MPa}$ 。如图 15 所示, 成型镜片 ASP1、ASP2 的外观良好, 且粘连情况有所减轻。超景深显微镜下, ASP1 表面材料剥落及微小气孔大为减少, ASP2 表面剥落减少但出现多条因模腔损伤而导致的压痕。图 16 是优化工艺参数下成型镜片 ASP1、ASP2 的形状精度 PV 及轮廓偏移量, ASP1、ASP2 的 PV 分别为 129.2 nm、174.8 nm, Ra 分别为 19.6 nm、25.6 nm, 轮廓偏移量最大值分别为 0.614 μm 和 2.682 μm , 且 ASP2 轮廓偏移量在距镜片中心约 1.65 mm 内保持在 0.5 μm 以下, 基本满足 2.2 节镜片高精度应用的要求。

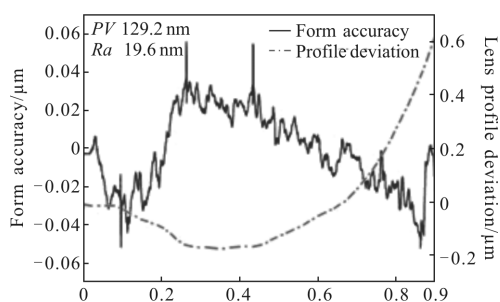


(a) ASP1 照片 (b) ASP1 放大图像
(a) Photograph of ASP1 (b) Microscope image of ASP1

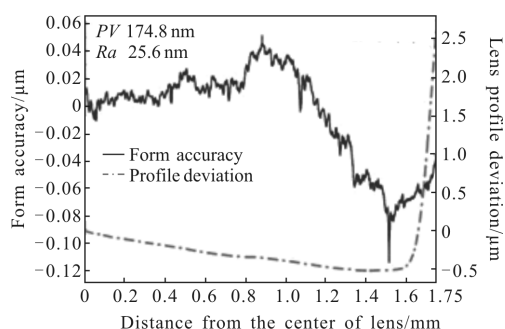


(c) ASP2 照片 (d) ASP2 显微镜放大图像
(c) Photograph of ASP2 (d) Microscope image of ASP2

图 15 优化工艺参数下成型镜片照片及显微镜放大图像
Fig.15 Photographs and microscope images of the molded lenses which used the optimized process parameters



(a) ASP1 结果图
(a) Result graph of ASP1



(b) ASP2 结果图
(b) Result graph of ASP2

图 16 工艺参数优化后成型镜片面形精度及轮廓偏移量
Fig.16 Surface accuracy and profile deviation of molded lenses which used the optimized process parameters

3 结论

文中进行了小口径双非球面硫系玻璃镜片的精密模压成型实验, 研究了模压温度、加压载荷及保持压力对成型镜片质量的影响, 并优化了工艺参数, 得出以下结论:

(1) 在文中实验条件下: 随模压温度的增加, 小口径硫系玻璃 IRG205 镜片的非球面 ASP1 和 ASP2 的 PV 值呈现先减后增的趋势, Ra 及轮廓偏移量呈下降的趋势; 随加压载荷的增加, 上述双非球面的 PV、Ra、轮廓偏移量值均呈增大的趋势; 随保持压力的增加, 上述双非球面的 PV 和 Ra 值随保持压力的增加总体呈增大的趋势, 轮廓偏移量则呈减小的趋势; 适当的保持压力对轮廓偏移量有较好的抑制作用, 但过大的保持压力也将显著增大 PV 和 Ra 值, 同时导致成型镜片出现明显的轮廓负偏移, 降低了镜片的精度。

(2) 在文中实验条件下, 获得了硫系玻璃 IRG205

进行小口径双非球面镜片模压成型的优化工艺参数： $T_{m2}=345\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $P_{p1}=0.05\text{ MPa}$ ， $P_{m3}=0.02\text{ MPa}$ ；该工艺参数下，成型镜片 ASP1 和 ASP2 的 PV 值分别为 129.2 nm 和 174.8 nm，Ra 值分别为 19.6 nm 和 25.6 nm，轮廓偏移量分别为 0.614 μm 和 2.682 μm ，基本满足镜片高精度应用的要求。

参考文献：

- [1] Shi Gunagwei, Zhang Xin, Wang Linjie, et al. Application of the new chalcogenide glass in design of low cost thermal imaging systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 615–619. (in Chinese)
- [2] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 847–852. (in Chinese)
- [3] Wang Jing, Wu Yuehao, Jiang Bo, et al. Application of chalcogenide glass in designing a long wavelength infrared athermalized wide-angle lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(12): 1211003. (in Chinese)
- [4] Lu Yajing, Song Baoan, Dong Wei, et al. Application of chalcogenide glass in car night-vision system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2815–2818. (in Chinese)
- [5] Ma K J, Chien H H, Huang S W, et al. Contactless molding of arrayed chalcogenide glass lenses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, 357(2011): 2484–2488.
- [6] Chien H H, Kuo C H, Huang S W. Molding of Al_2O_3 -coated chalcogenide glass lenses [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(3): 033401–033407.
- [7] Cogburn G, Symmons A, Mertus L, et al. Molding aspheric lenses for low-cost production versus diamond turned lenses [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7660(20): 1–6.
- [8] Cha D H, Kim H J, Park H S, et al. Effect of temperature on the molding of chalcogenide glass lenses for infrared imaging applications [J]. *Applied Optics*, 2010, 49 (9): 1607–1613.
- [9] Cha D H, Kim J H, Kim H J. Experimental study of the fabrication of chalcogenide glass lenses by using precision glass molding [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2014, 65(10): 1675–1681.
- [10] Wang Zhibin, Li Junqi, Zhang Feng, et al. The design of mold with simulation for chalcogenide glass precision molding [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(5): 53–58. (in Chinese)
- [11] Zhou Tianfeng, Xie Jiaqing, Liu Yang, et al. Simulation and experimental study on the molding process for microgrooves on optical glass [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 24(10): 446–453. (in Chinese)
- [12] Braunecker B, Hentschel R, Tiziani H. Advanced Optics Using Aspherical Elements Understanding Fiber Optics [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2011. (in Chinese)
- [13] Wang Xunsi, Chen Qiong, Fan Xinye, et al. Far infrared spectral studies of Ge–Sb–Se glasses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1): 81–85. (in Chinese)
- [14] Hubei New Huaguang Information Materials CO., LTD (China). Optical glass [DB/OL]. (2017–04–06)[2017–08–10]. <http://www.hbnhg.com/down/data/9494829706.pdf>. (in Chinese)
- [15] Lee J H, Lee W H, Park J K, et al. Thermal properties of ternary Ge–Sb–Se chalcogenide glass for use in molded lens applications [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, 431: 41–46.
- [16] Ananthasayanam B, Joseph P F, Joshi D, et al. Final shape of precision molded optics: Part I—Computational approach, material definitions and the effect of lens shape [J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2012, 35(6): 550–578.
- [17] Zhou J, Li M J, Hu Y, et al. Numerical evaluation on the curve deviation of the molded glass lens [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136 (051004): 1–11.
- [18] Tian Yingliang, Sun Shibing. New Glass Technology [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [19] Yan J W, Zhou T F, Masuda J, et al. Modeling high-temperature glass molding process by coupling heat transfer and viscous deformation analysis [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(2): 150–159.
- [20] Aylord S, Ananthasayanam B, Tincher B, et al. Thermal and structural property characterization of commercially moldable glasses [J]. *J Am Ceram Soc*, 2010, 93(8): 2207–2214.