

文章编号 1004-924X(2018)10-2475-09

光学玻璃离心熔铸过程中成型热历史对反射镜的影响

张心明, 田 爽, 付为杰*, 赵立新

(长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为了研究离心熔铸反射镜制造技术中热历史状态(成型温度及冷却速度)对成型效果的影响,采用有限元分析软件 Abaqus 对不同的成型温度及冷却速率进行仿真分析,确定成型温度为 950 °C、冷却速率为 1 °C/s 时可以完成反射镜在模具中的充模和成型;之后进行离心熔铸试验并对成型结果进行测量。在冷却速度大于 1 °C/s 时,反射镜由于冷却后局部残余应力过大,导致其发生碎裂。同时通过对仿真结果、理论计算结果以及试验结果的分析对比,得到反射镜边缘的轴向高度与理论值相差 10.12 mm,具有较大的面型误差,产生面型误差的原因是由于在高温成型冷却后反射镜体积收缩导致面型发生变化。

关键词:离心熔铸;反射镜;数值分析;Abaqus

中图分类号:TB24 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182610.2475

Effects of thermal history on reflector formation in an optical glass centrifugal casting process

ZHANG Xin-ming, TIAN Shuang, FU Wei-jie*, ZHAO Li-xin

(College of Mechanical Engineering, Chuangchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: 396100190@qq.com

Abstract: This study investigates the influence of thermal history (molding temperature and cooling rate) on the mirror forming process for spin-cast aspheric mirrors. Abaqus finite element analysis software using different molding temperature and cooling rate of simulation analysis to determine the Spin-cast temperature is 950 °C and the cooling rate of mirror is 1 °C/s which can be completed in the mold filling and mirror forming. The spin-cast experiment was executed, and the forming results were measured. When the cooling rate is more than 1 °C/s, the mirror is fragmented owing to the excessive local residual stress after cooling. Additionally, the axial height of the mirror edge differs from the theoretical value by 10.12 mm, and there is a large surface figure error. This surface figure error is attributable to the volume change on cooling.

Key words: spin-cast; reflector; simulation analysis; Abaqus

收稿日期:2017-12-25;修订日期:2018-01-24.

基金项目:吉林省科技厅自然科学基金资助项目(No. 20150101024JC)

1 引言

非球面反射镜的制造不仅是先进光学制造领域的难题,也是制造业中重要技术之一。传统非球面光学镜的加工方法具有材料成本高,加工周期长等缺点^[1-2]。现有的非球面光学元件加工方法有很多,并已经应用到实际生产中,如计算机控制单点金刚石车削、应力盘加工法以及光学透镜模压成型技术等,但这些方法主要被应用于中小型非球面零件,并且都是直接对材料进行加工,加工后的材料一般存在下表面破坏层,导致应力集中,出现玻璃炸裂的现象^[3-7]。

1983 年加拿大保尔希克森等人通过旋转盛有水银的圆盘,建造了口径 2.7 m 的旋转水银面望远镜;1900 年,美国发明者使用高聚物材料通过离心熔铸的方式制成抛物面非球面镜;1968 年莱顿博士将高聚物材料换成玻璃,生产出直径 30 mm 的非球面镜;1987 年查森为大型天文望远镜制造出直径 1.8 m 的抛物面反射镜;随后于 2006 年制造出直径 8.4 m 的超大镜片,此镜片成为世界上最大的一体望远镜镜片^[8-10]。因此在对于非球面反射镜的成型加工过程中,离心熔铸的方式具有其他加工方法难以替代的优势。

离心熔铸反射镜工艺可以分为 4 个步骤:加热匀热、离心旋转、退火冷却和脱模取材。将选定的光学玻璃放置在模具内,并对两者进行加热,在此过程中,模具保持静止状态,当玻璃和模具达到预定的成型温度后进入离心旋转阶段。在离心旋转过程中,利用垂直方向为旋转轴的机械转台带动模具旋转,高温玻璃熔体在离心力的作用下产生流动,在此过程中,熔铸炉内保证温度恒定。当玻璃熔体达到稳定状态时,进入退火冷却阶段。在退火阶段,保持原转速恒定同时停止加热,通过退火冷却保证反射镜内残余应力在允许范围内,确保反射镜的完整。

成型过程中的热历史状况是指,反射镜在加工过程中所经历的温度变化过程。离心熔铸反射镜的过程中,其温度变化过程主要体现为以下两个方面:在离心成型时熔铸炉内的温度(即成型温度)以及进行退火冷却时熔铸炉内温度的变化速率(即冷却速率)。玻璃的热历史状况直接影响其内部的组织结构^[11],成型温度影响玻璃的流动

性,温度越高,流动性越强且成型时间越短;冷却速度越快,玻璃的内部结构越难以调整使其保持高温下的结构状态,导致冷却后玻璃内部具有较高的残余应力。因此,研究成型温度和冷却速率对反射镜成型效果的影响具有重大意义。

2 离心熔铸抛物面镜成型原理

模具以等角速度 ω 绕其竖直轴 z 轴旋转,当玻璃熔体达到平衡状态时,熔体各质点与模具具有相同的角速度 ω 。玻璃熔体离心旋转时受力情况如图 1 所示,点 A 表示玻璃熔体表面上任意一点,到旋转轴距离为 r ,当玻璃熔体达到平衡时,A 处玻璃熔体质点受到的作用力由两个部分组成,分别为竖直向下的重力以及水平方向上的离心力^[12-13]。

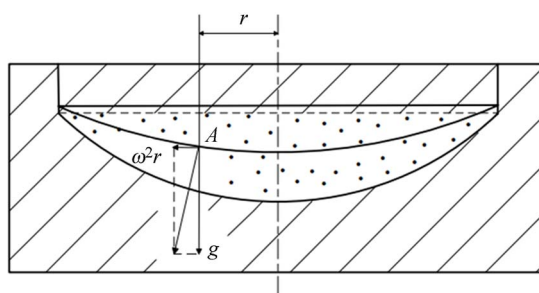


图 1 玻璃熔体某点所受加速度

Fig. 1 Acceleration a point in glass melt

若 α 为上表面任意一点处合加速度方向与旋转轴方向上的夹角,则有:

$$\tan \alpha = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (1)$$

当上表面达到离心平衡状态时,A 处玻璃熔体质点合加速度方向始终与该点处切线方向垂直,则此点切线方向与水平方向的夹角的大小等于 α 。由导数的几何意义可得:

$$\frac{dz}{dr} = \tan \alpha = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (2)$$

将式(2)变换积分得:

$$z = \frac{\omega^2}{2g} r^2 + C \quad (3)$$

令 $C=0$,则式(3)变为:

$$z = \frac{\omega^2}{2g} r^2 = \frac{2\pi^2 n^2}{g} r^2 \quad (4)$$

由式(4)可知,高温熔体玻璃在离心旋转达到

稳定状态时,上表面呈抛物面面型;且转台转速决定了抛物线型状。如,转台转速为 90 r/min 时,离心旋转所形成抛物线应为 $z=0.004\ 527\ 4r^2$ 。

3 仿真模型及边界条件

3.1 玻璃材料特性

从理论上讲,任何光学玻璃均可用来离心熔铸成为旋转抛物面镜。但是,对于软化点高的玻璃,由于其成型温度高,易与模具材料发生反应,导致内部有气泡产生^[14],因此考虑到模具的使用寿命以及透镜的光学要求,同时考虑到高温状态下玻璃的流动性和材料的成本,本试验材料采用 H-K9L 光学玻璃,特征温度如表 1 所示。

表 1 K9L 光学玻璃特征温度

Tab.1 K9L optical glass characteristic temperature (°C)

特征温度	温度值
应变温度	511
退火温度	547
转变温度	560
软化温度	714

当温度在转变温度以下时,玻璃为固体,无法进行离心旋转成型;当玻璃的温度处于转变温度与软化温度之间时,玻璃熔体同时具有弹性及黏性,属于黏弹性体,此时玻璃在模具中主要为滑塌变形,不能得到理想的抛物面面型;当温度高于软化温度时,玻璃行为比较像液体,易于离心成型,因此所选择的成型温度要高于软化温度。

3.2 模具几何形状

模具与熔体玻璃实际模型的沿轴剖面图,如图 2 所示。由于氧化铝在 1 000 °C 时化学性质仍能保持稳定,不与玻璃熔体发生反应,因此模具材料选用 99% 氧化铝,模具几何尺寸如图 3 所示。

本文用 ABAQUS 软件进行不同温度下离心过程及退火冷却过程的有限元仿真,建立的对应模型如图 4 所示。

3.3 热边界条件

光学玻璃在熔铸炉中有 3 种方式进行加热:模具的热传导;空气的热对流;电阻丝热辐射。由于玻璃是透明体,因此热辐射可以忽略不计^[15]。

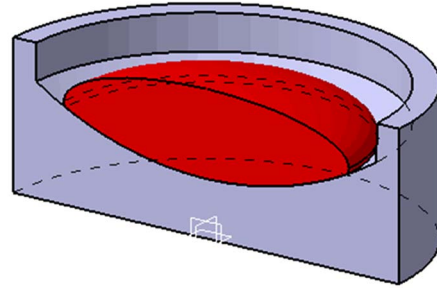


图 2 模具与熔体玻璃初始状态的三维图

Fig.2 Mold and melt glass three-dimensional map of initial state

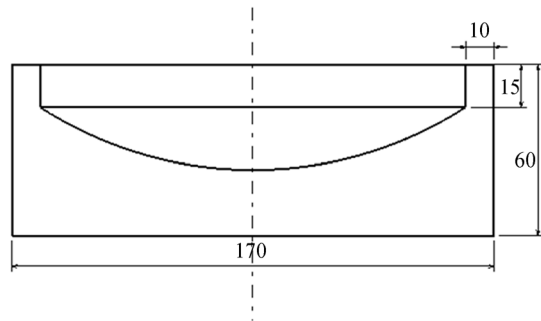


图 3 模具几何尺寸

Fig.3 Mold and melt glass three-dimensional map of initial state

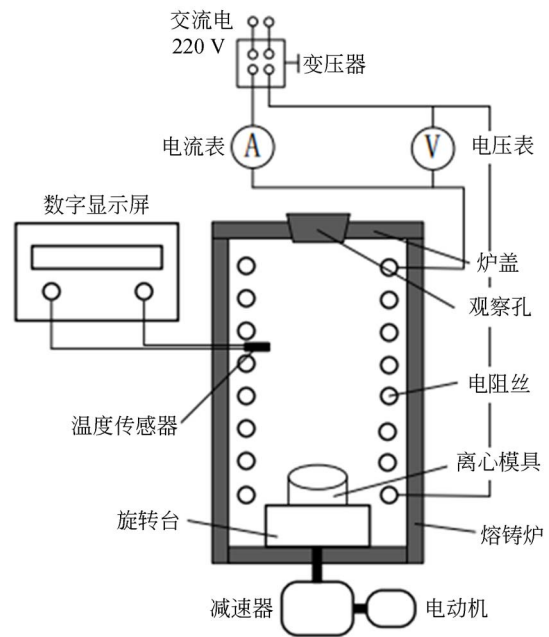


图 4 离心系统模型

Fig.4 Centrifugal system model

在离心旋转阶段,玻璃、模具及空气已经达到相同的温度,因此可以认为没有热量传递^[16]。此时,热边界条件为:

$$\begin{aligned} -K \frac{\partial T}{\partial n} &= h_M(T - T_M), \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} &= h_N(T - T_N) \end{aligned}, \quad (5)$$

式中: K 为玻璃导热率, h_M 为模具与玻璃传递系数, T 为玻璃表面温度, T_M 为模具温度, h_N 为玻璃与气体传递系数, T_N 为气体温度。其中, h_M 与接触面压力、接触面温度、摩擦系数等因素有关; h_N 与气体的流动速度、流动方向、型腔几何形状等因素有关。通常取 h_M 为 $2\ 800\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, h_N 为 $20\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[17]。

玻璃内部的热传递方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T, \quad (6)$$

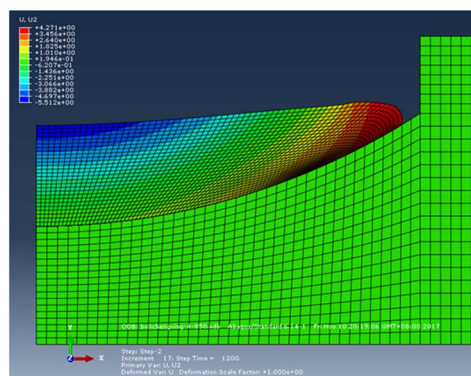
式中: ρ 为玻璃密度; C_p 为玻璃比热; T 为加热时间。

4 仿真结果分析

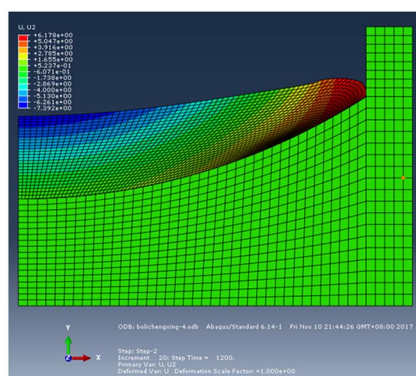
4.1 成型温度的确定

选择成型温度时应考虑以下几个因素:保证玻璃熔体旋转后上表面成型效果良好;离心熔铸温度不能低于玻璃的软化温度;温度过低时玻璃熔体不具有流动性,无法旋转成型;成型熔铸温度不能过高,过高会导致熔体与模具黏结,无法脱模^[18]。因此选取转速 $90\ \text{r}/\text{min}$,成型温度分别为 $850\ ^\circ\text{C}$ 、 $900\ ^\circ\text{C}$ 、 $950\ ^\circ\text{C}$ 时进行仿真对比,由于玻璃熔体从开始旋转到稳定状态所需时间较长,因此选取开始旋转后 $20\ \text{min}$ 为时间节点对不同温度下玻璃熔体成型情况进行仿真对比,对比结果如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。

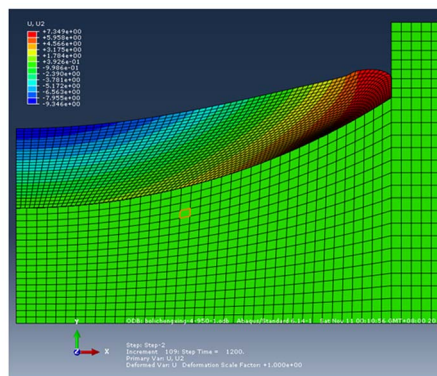
由图 5 对比分析可知,成型温度为 $850\ ^\circ\text{C}$ 时,玻璃熔体边缘与模具有较大缝隙,没有充满型腔;成型温度不断升高到 $900\ ^\circ\text{C}$ 时,玻璃边缘与模具之间缝隙缩小;当温度达到 $950\ ^\circ\text{C}$ 时玻璃熔体与模具达到了预期的充型效果。玻璃材料随着成型温度的升高,玻璃内部分子键断裂,玻璃材料的流动性增强,黏度逐渐降低,使离心成型时间逐渐减小^[19]。因此玻璃熔体能够完全充型的最低成型温度在 $900\sim 950\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内,在进行加工时应选择高于 $950\ ^\circ\text{C}$ 的温度进行加工。



(a) $850\ ^\circ\text{C}$



(b) $900\ ^\circ\text{C}$



(c) $950\ ^\circ\text{C}$

图 5 转速为 $90\ \text{r}/\text{min}$ 时旋转 $20\ \text{min}$ 时不同温度下玻璃熔体位移云图

Fig. 5 Rotation $20\ \text{min}$ at speed of $90\ \text{r}/\text{min}$ different temperature glass melt displacement cloud

图 6 为离心转速为 $90\ \text{r}/\text{min}$ 时,旋转 $20\ \text{min}$ 后不同温度下数值模拟玻璃熔体上表面面形结果与理论曲线值之间的对比。当相同转速,旋转时间相同的情况下,玻璃熔体温度越高,其上表面曲线与理论面形曲线越接近,所需成型时间越短,成型效果越好。

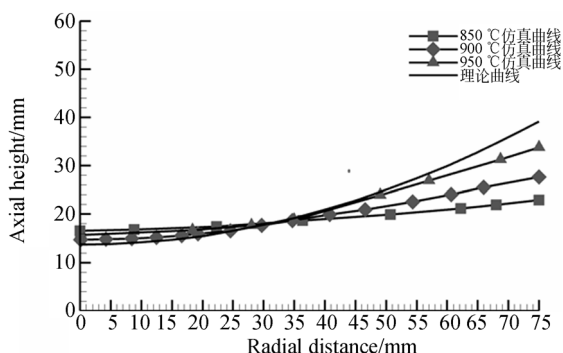
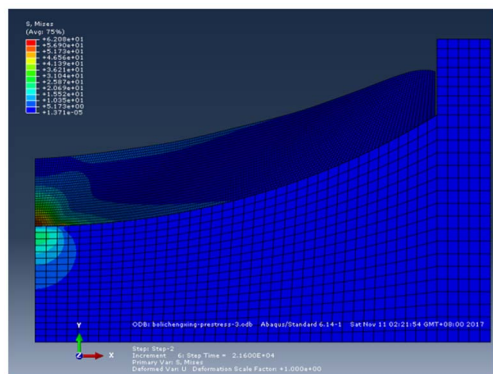


图 6 转速为 90 r/min 时不同温度玻璃熔体上表面仿真结果与理论值对比

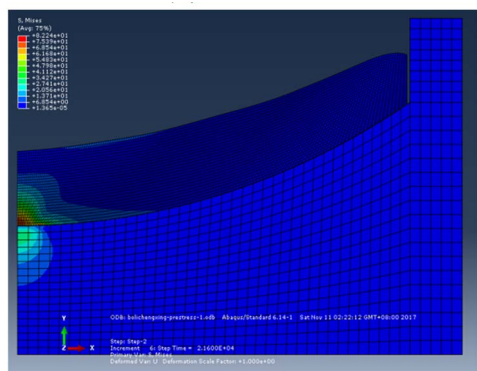
Fig. 6 Comparison of free surface simulation results of glass melt with different temperatures at the speed of 90 r/min

4.2 退火冷却速率的确定

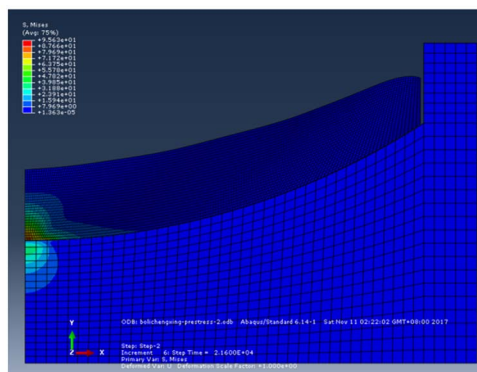
为了探究冷却速率与残余应力的影响,设定了 3 组不同的冷却速率 1 °C/s、2 °C/s 和 3 °C/s,在同一离心转速 90 r/min、同一离心温度 950 °C 下进行仿真,得到冷却后脱模前的残余应力云图如图 7 所示。



(a) 1 °C/s



(b) 2 °C/s



(c) 3 °C/s

图 7 玻璃以不同冷却速率冷却后残余应力云图
Fig. 7 Residual stress cloud after glass cooling at different cooling rates

由图 7 可知,退火冷却之后残余应力主要集中在反射镜底部中心位置,这是由于高温玻璃熔体在退火冷却过程中会沿模具表面发生收缩现象,因此残余应力云图会在反射镜底部出现明显的高亮区域。

不同冷却速率下仿真结果如表 2 所示,随着降温速率的增加,残余应力平均水平呈上升趋势,这主要是因为退火冷却过程中,高温玻璃发生结构松弛以及应力松弛,退火冷却速率越小,应力松弛的时间越长,残余应力则越小^[20];对于在实验中采用的 H-K9L 光学玻璃其抗拉强度为 68 MPa,而冷却速度在 2 °C/s 及 3 °C/s 时均超过了光学玻璃的抗拉强度,使反射镜表面产生裂痕,由此确定试验中冷却速率为 1 °C/s。

表 2 不同冷却速度下最大残余应力仿真结果

Tab. 2 Average cooling rate of different residual stress simulation results

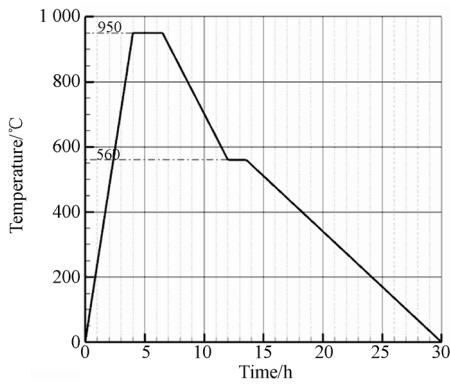
冷却速度/(°C · s ⁻¹)	残余应力/MPa
1	62
2	82
3	95

5 试验及检测

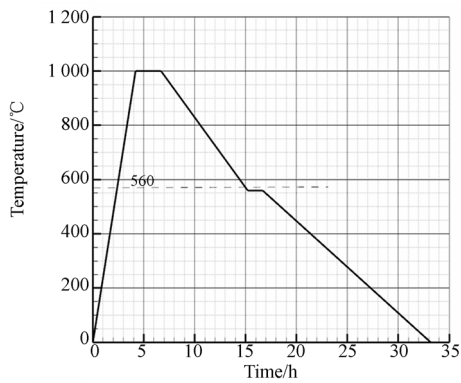
根据上述仿真模拟确定的成型温度及冷却速率,对 K9L 光学玻璃离心熔铸试验,在离心铸造过程中分别选择成型温度 950 °C 和 1 000 °C 进行

加工,以判断在高于 950 °C 进行加工后反射镜面型的差异。

离心过程中热历史状况如图 8 所示,首先将熔铸炉内温度以最快升温速率升高至预设成型温度(950 °C 及 1 000 °C),并保温 0.5 h,然后开始离心旋转,此过程需持续 2 h,最后以 1 °C/s 的冷却速率将熔铸炉内温度降至退火点,玻璃最终成型结果如图 9 所示。



(a) 成型温度 950 °C 时材料热历史状况
(a) Material thermal history at 950 °C



(b) 成型温度 1 000 °C 时材料热历史状况
(b) Material thermal history at 1 000 °C

图 8 离心熔铸材料热历史状况

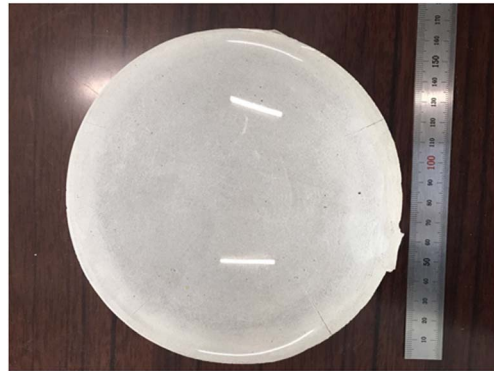
Fig. 8 Centrifugal casting material thermal history

利用德国 WENZEL xoplus 三坐标测量机对试验所得两个反射镜含轴截面的表面曲线进行坐标测量。在该曲面上每间隔 100 μm 取一点进行检测,共检测 1 500 个坐标点,因采用离心熔铸的方式加工的反射镜为回转体,从检测的坐标值中每间隔 100 个坐标点选取 1 个点记为 B₀ ~ B₁₅,将这些点的测量坐标值汇总,汇总结果分别如表 3、表 4 所示。



(a) 成型温度 950 °C 试验成型玻璃

(a) Molding temperature 950 °C experimentally formed glass



(b) 成型温度 1 000 °C 试验成型玻璃

(b) Molding temperature 950 °C experimentally formed glass

图 9 试验成型玻璃

Fig. 9 Experimental glass molding

表 3 成型温度 950 °C 反射镜表面点坐标值

Tab. 3 Molding temperature 950 °C reflector surface coordinates (mm)

B _i	(x _i , y _i)	B _i	(x _i , y _i)
B ₀	(0.013, 13.908)	B ₈	(40.295, 20.239)
B ₁	(5.102, 14.404)	B ₉	(44.998, 21.411)
B ₂	(9.985, 14.984)	B ₁₀	(50.205, 22.667)
B ₃	(14.325, 15.648)	B ₁₁	(54.968, 24.007)
B ₄	(20.003, 16.398)	B ₁₂	(60.452, 25.432)
B ₅	(25.698, 17.231)	B ₁₃	(65.012, 26.942)
B ₆	(30.145, 18.149)	B ₁₄	(70.531, 28.536)
B ₇	(36.022, 19.152)	B ₁₅	(74.923, 30.215)

表 4 成型温度 1 000 °C 反射镜表面坐标值

Tab. 4 Molding temperature 1 000 °C Reflector surface coordinates (mm)

B_i	(x_i, y_i)	B_i	(x_i, y_i)
B_0	(0.010, 14.688)	B_8	(40.384, 19.396)
B_1	(5.104, 14.764)	B_9	(45.347, 20.625)
B_2	(9.801, 14.965)	B_{10}	(50.134, 21.944)
B_3	(14.362, 15.284)	B_{11}	(54.344, 23.214)
B_4	(20.219, 15.868)	B_{12}	(60.295, 25.112)
B_5	(25.227, 16.525)	B_{13}	(65.074, 26.913)
B_6	(30.052, 17.295)	B_{14}	(70.614, 29.084)
B_7	(36.744, 18.586)	B_{15}	(75.212, 31.019)

现将检测点拟合成曲线,得到成型温度 950 °C 拟合曲线方程为,成型温度 1 000 °C 拟合曲线方程为;将得到的拟合曲线进行对比,对比结果如图 10 所示。

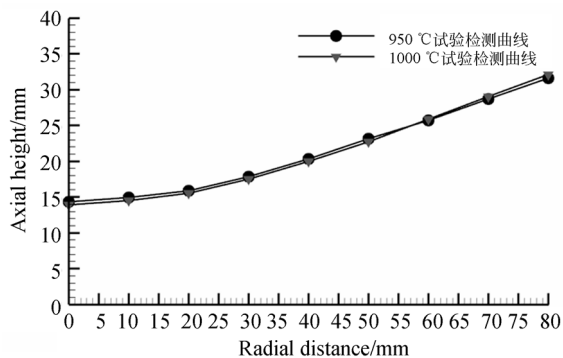


图 10 不同成型温度检测点拟合曲线对比

Fig. 10 Comparison of different molding temperature test point fitting curve

由对比结果可知,成型温度 950 °C 及 1 000 °C 的离心熔铸试验得到反射镜表面曲线十分相近;成型温度越高,所需的冷却时间越长,因此为了缩短加工周期,选择 950 °C 作为成型温度。将理论曲线、950 °C 仿真曲线及 950 °C 试验检测曲线进行对比,结果如图 11 所示。

由图 11 各曲线对比结果可知实际成型曲线与理论曲线差值较大。通过分析误差的原因是由于玻

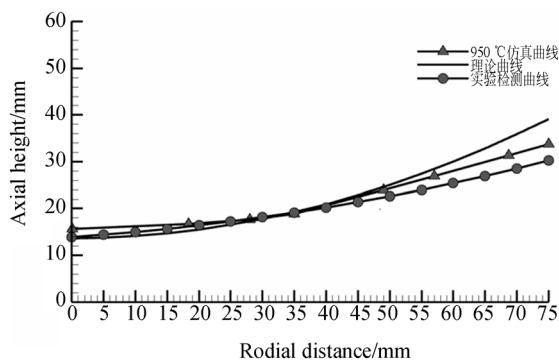


图 11 拟合曲线、仿真曲线及理论曲线对比结果

Fig. 11 Fitting curve, simulation curve and theoretical curve comparison results

璃的成型温度为 950 °C,当玻璃从该温度降到室温时,具有很大的温度跨度,由于材料自身的收缩,导致了理论面型和实际面型之间的差值。为了消除误差,应进一步对成型过程中的面型进行补偿研究。

6 结 论

本文对离心熔铸反射镜离心旋转过程及退火冷却过程进行了分析,确定了离心熔铸数学模型以及边界条件,并进行了有限元分析以及试验验证,通过结果对比可知:

(1)通过对玻璃熔体在离心旋转过程的运动分析,确定采用离心熔铸方法制成的反射镜为抛物面镜;

(2)在相同转速下,温度越高成型效果越理想,并确定能够使玻璃熔体完成充型的最低成型温度在 900~950 °C 这一范围内,因此成型温度应高于 950 °C;

(3)离心熔铸反射镜的残余应力分布主要集中于反射镜底部中心位置,平均残余应力随冷却速率增加而增大;

(4)采用 950 °C 作为成型温度得到的反射镜面型曲线的镜面边缘轴向高度与理论值相差 10.12 mm。

参考文献:

[1] 庞长涛,罗松保. 非球面加工先进技术[J]. 航空精密制造技术, 2011, 37(3):1-5.

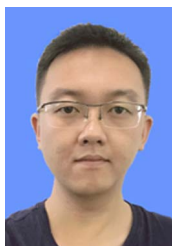
PANG CH T, LUO S B. Advanced technology of aspheric processing [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2011,37(3): 1-5. (in Chinese)

[2] 姜波,吴越豪,戴世勋,等. 大口径疏系玻璃内部缺

- 陷检测物镜设计及实验验证[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7):172-178.
- JIANG B, WU Y H, DAI SH X, *et al.*. Design and experimental verification of objective detection of large-caliber chalcogenide glass internal defects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (7): 172-178. (in Chinese)
- [3] 辛企明. 光学塑料非球面技术的发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 46(12):11-16.
- XIN Q M. Development trend of optical plastic aspheric technology [J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2010, 46 (12):11-16. (in Chinese)
- [4] 尹韶辉, 曾宪良, 范玉峰, 等. ELID 镜面磨削加工技术研究进展[J]. 中国机械工程学报, 2010, 21(6): 750-755
- YIN SH H, ZENG X L, FAN Y F, *et al.*. Research progress on mirror grinding of ELID [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 21 (6): 750-755. (in Chinese)
- [5] 王勤, 余景池, 胡祖元. 非球面复制成型技术的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(1):121M-123
- WANG Q, YU J CH, HU Z Y. Study on aspheric copy molding technology [J]. *Optics Technology*, 2006, 32 (1):121-123. (in Chinese)
- [6] 郭永祥, 李永强, 廖志波, 等. 新型离轴三反射光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2):546-550.
- GUO Y X, LI Y Q, LIAO ZH B, *et al.*. Design of a new off-axis three-reflection optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (2): 546-550. (in Chinese)
- [7] 徐乐, 张春雷, 代雷, 等. 高精度非回转对称非球面加工方法研究[J]. 中国光学, 2016, 9(3):364-370.
- XU L, ZHANG CH L, DAI L, *et al.*. High precision non-rotational symmetric aspheric processing method [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9 (3): 364-370. (in Chinese)
- [8] CHENG A Y S, ANGEL J R P. Steps toward 8M honeycomb mirrors VIII: design and demonstration of a system of thermal control[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1986, 628:536-544.
- [9] ANGEL J R P, HILL J M. Manufacture of large glass honeycomb mirrors [J]. *Physica Scripta*, 1982, 332(12):298-306.
- [10] HILL J M, ANGEL J R P. Casting the first 8.4-m borosilicate honeycomb mirror for the large binocular telescope[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1998, 3352.
- [11] 李峰, 刘尧龙. 浅析热历史在玻璃成型中的作用[J]. 中国玻璃, 2015(3):7-8.
- LI F, LIU Y L. A brief analysis of the role of thermal history in glass forming [J]. *China Glass*, 2015 (3): 7-8. (in Chinese)
- [12] DAS A, MONDAL SC, THAKKAR J J, *et al.*. A methodology for modeling and monitoring of centrifugal casting process[J]. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2015, 32(7):718-735.
- [13] BONA E F. Liquid mirrors[J]. *Scientific American*, 2004, 270(2):76-81.
- [14] XU X L, ZHANG X M. Centrifugal processing on aspheric mirror blank of optical glass material[J]. *Key Engineering Materials*, 2017, 744(4): 404-408.
- [15] YAN J, ZHOU T, 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.
- [16] JAIN, ANURAG. Experimental study and numerical analysis of molding process for manufacturing precision aspherical glass lenses [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 13(2):65-69.
- [17] ANANTHASAYANAM B. Computational modeling of precision molding of aspheric glass optics [J]. *Dissertations & Theses - Gradworks*, 2008: 3349809.
- [18] 周茶, 曹艳丽, 吴知方, 等. 玻璃对耐火材料侵蚀机理研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 5(1):99-102.
- ZHOU N, CAO Y L, WU ZH F, *et al.*. Erosion

- mechanism of blast furnace slag glass on refractory [J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 5 (1): 99-102. (in Chinese)
- [19] 苏英,贺行洋. 石英玻璃的结构弛豫及其影响因素 [J]. 材料导报, 2007, 21(8):11-14.
SU Y, HE X Y. Structural relaxation of quartz glass and its influencing factors [J]. *Materials And Information*, 2007, 21(8):11-14. (in Chinese)
- [20] 张景超,李贺光,闰奎. 玻璃退火的应力分析[J]. 燕山大学学报,2012,36(3):235-240.
ZHANG J CH, LI H G, REN X. Stress analysis of glass annealing [J]. *Journal of Yanshan University*, 2012, 36 (3): 235-240. (in Chinese)

作者简介:



付为杰(1991—),男,吉林省珲春市人,博士研究生,主要研究方向为光学加工、精密与超精密加工。E-mail: 396100190@qq.com



田爽(1992—),女,吉林长春人,博士研究生,研究方向为精密、超精密加工、检测及装备。E-mail: 646627033@qq.com

导师简介:



张心明(1967—),男,黑龙江龙江县人,研究员,1990年、2003年于长春理工大学分别获得学士、博士学位;机电工程学院院长,博士生导师,主要研究方向为精密、超精密加工、检测及装备;E-mail: zxm@cust.edu.cn。