

文章编号 1004-924X(2018)07-1719-09

离心熔铸非球面镜镜胚 面形偏差工艺参数的敏感性研究

张心明^{1*}, 徐鑫莉^{1,2}, 蔡 鹏³, 于 阳⁴, 赵立新⁵

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 吉林工商学院 工学院, 吉林 长春 130507;

3. 中国第一汽车集团公司 智能网联开发院, 吉林 长春 130000;

4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

5. 吉林省留学回国人员和专家服务中心, 吉林 长春 130022)

摘要:离心熔铸技术在大口径非球面镜镜胚的制造方面具有独特优势。本文通过自行研制的缩比模型实验机进行试验, 深入研究了离心熔铸工艺及成型镜胚质量, 详细介绍了模具涂层的制备、离心熔铸的加热及冷却等工艺过程, 制备了非球面镜镜胚模型。采用数值模拟与试验研究相结合的方法, 对所得镜胚面形偏差工艺参数的敏感性进行了研究。分析了模具的热膨胀系数、镜胚冷却速率、直径及加热温度对面形偏差的影响, 得到了偏差工艺参数的敏感性规律。通过对面形偏差进行两次迭代补偿, 面形偏差值从 $-84\ \mu\text{m}$ 降到 $33\ \mu\text{m}$, 补偿后的结果满足设计要求。采用离心熔铸技术, 可以制备满足上表面垂直偏差在 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 范围内的非球面镜镜胚。

关键词:离心熔铸; 非球面镜镜胚; 工艺; 面形偏差; 迭代补偿

中图分类号: O439; TH171.65 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182607.1719

Study on sensitivity of surface deviation for aspheric mirror blank on centrifugal melting casting

ZHANG Xin-ming^{1*}, XU Xin-li^{1,2}, CAI Peng³, YU Yang⁴, ZHAO Li-Xin⁵

(1. Changchun University of Science and Technology,

College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun 130022, China;

2. Jilin Business And Technology College, Engineering Institute, Changchun 130507, China;

3. China FAW Group Corporation Intelligent Network
Development Institute, Changchun 130000, China;

4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

5. Returned Overseas Personnel and Expert Service Center Jilin Province, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: zxm@cust.edu.cn

Abstract: Centrifugal melting casting technology has unique advantages in the manufacture of large

收稿日期: 2017-11-01; 修订日期: 2018-01-20.

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目 (No. 20150101024JC)

aspheric mirror blanks. In this paper, the centrifugal casting process and the quality of the mold embryo were studied in depth by using a self-developed shrinkage model experiment machine. In order to obtain the required mirror blank, the processes of preparing the coating, heating, cooling and preserving the heat of the mold were introduced in detail. The influencing factors of shape deviation in the mirror blank production were studied by comparing simulation values with experimental results. The influence of the coefficient of thermal expansion, cooling rate, diameter, and heating temperature on the surface deviation was analyzed, and a mathematical expression relating these parameters to the deviation was derived. The compensation of the deviation was then calculated in two iterations, thus reducing the surface deviation from 84 to 33 μm . The compensation results met the design requirements. Using centrifugal casting technology, the aspheric mirror embryo can be prepared to meet the vertical deviation specifications of its upper surface in the range of 30~40 μm .

Key words: centrifugal melting casting; aspheric mirror blank; process; surface deviation; compensation

1 引言

在空间科学和天文领域,大口径非球面镜的应用越来越广泛。天文望远镜的主镜尺寸已经由起初的 1 m 量级逐渐发展到 10 m 量级,欧洲建造的 VISTA 望远镜主镜直径达到 4.1 m^[1],美国建造的 LBT 望远镜主镜是 8.4 m,建于夏威夷岛的 Keck 望远镜的主镜直径是 10 m^[2],空间探索和科研使大口径非球面镜的需求急剧增加,大口径非球面也因此获得了非常广阔的应用前景。各发达国家纷纷进行大口径非球面镜的加工工艺研究,由美国亚利桑那大学主导的 11 个国际合作伙伴已经承诺将投资 5 亿美元建造新一代巨型麦哲伦望远镜,建成后巨型麦哲伦望远镜有望成为世界上最大的光学望远镜。

大口径非球面镜的镜胚不易制备如果采用传统的加工方法,镜胚直径的大小会受到限制;加工耗时并且切削量大,动辄就是几吨,产生原料的浪费;研磨、抛光的废水、废渣等会对环境产生污染;元件的稳定性、应力大小也难以保证。

离心熔铸对于加工大口径非球面镜有其独到的优势,配以相应的后加工技术,就可以得到所需要的表面精度。该工艺具有净成型、效率高,特别是制造大而深的非球面反射镜,此工艺具有无污染,环境友好等一系列优点。

离心熔铸技术的基本工艺过程是,首先将玻璃块放入模具同时加热,待玻璃块熔化后,以一定的转速旋转模具,并保持一段时间,在离心力场的作用下,玻璃熔体绕中心轴旋转,转出凹面面形,

待到冷却至室温,镜胚便可以从模具中取出来。它主要的优点在于适合于大深口径非球面反射镜毛坯的制造,解决了上表面模具制造的困难,完全依靠自由表面成型,是实现大口径非球面镜加工的最有效方法之一。

国内在离心熔铸非球面镜技术方面还未展开系统性的研究,所以针对该技术存在着很多问题和挑战,例如离心熔铸设备研制、面形精度的保证、内部应力的释放。由于国外的研究还处于保密阶段,所以急需对其进行研究。本文通过加热和冷却工艺开展实验研究,分析离心熔铸工艺过程,开展了离心熔铸镜胚面形偏差的工艺参数敏感性研究,探索降低面形偏差的技术手段,为离心熔铸技术提供理论基础。

2 非球面镜离心熔铸工艺及模拟试验

2.1 工艺及镜胚制备

实验中采用化学稳定性好、热膨胀系数满足要求、价格低廉的 H-K9L 玻璃。材料的主要特征温度见表 1。为了研究直径为 12 m 的非球面镜离心熔铸工艺,本文设计了 1:80 相似比的模具,直径为 150 mm,模具截面尺寸如图 1 所示。为了防止玻璃与模具在高温条件下发生反应,通过煅烧高强度石膏粉的方式制作氧化钙涂层,反复实验,确定了比较理想的涂层制备工艺。具体的工艺过程是:将水和石膏粉以 1:2.8 的比例混合成浆料,均匀地涂抹在模具表面^[3],烘干后在 1200 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧 0.5 h,自然冷却到室温便完成了表面涂层的制备。

将大小不一的玻璃块堆放在模具中,并开启缩比试验机的加热功能。根据热载荷作用下玻璃的破裂行为^[4],在玻璃温度从室温(20 ℃)升到屈服点温度(630 ℃)的过程中,采用 10 ℃/min 的升温速率。在 630~1 200 ℃ 的过程中,采用 40 ℃/min 的升温速率。在实际的加热过程中,玻璃从室温升高到 1 200 ℃ 的过程,总耗时为 123 min。

表 1 H-K9L 参数表

Tab. 1 Parameters of H-K9L (°C)

应变点 T_i	转变点 T_g	屈服点 T_s	软化点 T_f
530	560	630	720
永久应力与暂时应力的分界点	可较快地消除应力	体积最大	高弹态与粘流态分界点

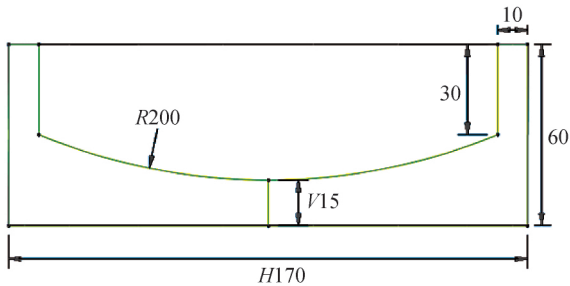


图 1 模具截面尺寸图

Fig. 1 Sectional dimension of mould

当模具温度达到 720 ℃ 时,玻璃外边缘的位置开始熔化,如图 2(a),此时炉子以 6 rad/s 的转速旋转。当温度到达 900 ℃ 时,玻璃迅速变软,如图(b)。当到达 1 200 ℃ 时,玻璃黏度容易成型,如图(c)。炉子恒温旋转 2.5 h 后,熔体中的气泡几乎排尽。熔体清澈透明,上表面呈抛物回转弯,如图(d)。在退火阶段,温度从 1 200 ℃ 降到 560 ℃,以打开炉盖的方式对熔体上表面进行快速冷却。当熔体上表面降到 560 ℃ 时,炉子停止旋转,关闭炉盖。红外热成像仪和热电偶的检测结果显示,经过 160 min,玻璃熔体温度场变为均匀的 560 ℃。为了消除玻璃中的永久应力,需要对玻璃熔体进行保温。打开炉子保温功能,在 560 ℃ 保温 9 h。



(a)玻璃表层塌陷
(a)Surface of glass was collapsed

(b)迅速熔化
(b)Melts rapidly



(c)成型及排气泡过程
(c)Forming and exhaust bubble process

(d)成型结束
(d)Forming end

图 2 镜胚的成型过程

Fig. 2 Forming process of mirror blank

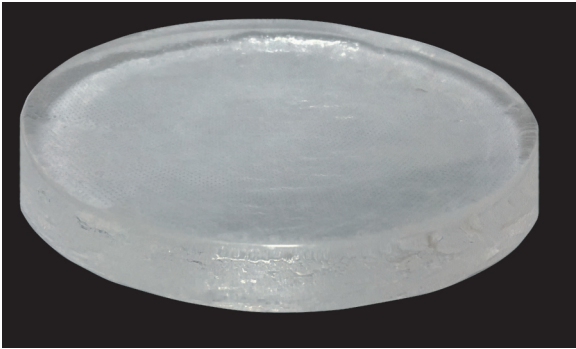


图 3 常温后取出玻璃效果图

Fig. 3 Take out mirror blank after normal temperature

根据光学玻璃精密退火规程^[5],为了消除残余应力,从 T_g 冷却到 530 ℃(黏度低于 $10^{13.6}$ Pa/s)的过程中需要进行缓慢的退火,采用 0.04 ℃/min 的冷却速率。在应变点温度(530 ℃)以下,玻璃处于弹性状态,温度梯度消失后,应力也会一同消失。因此可以在这个阶段,增加冷却速率,选择 0.4 ℃/min 的速度进行冷却。在熔体温度从 200 ℃ 降到 20 ℃ 的过程中,玻璃自然冷却。当温度冷却到室温时,得到的镜胚如图 3 所示。

通过离心熔铸缩比试验机制得了非球面镜镜胚,其成型质量主要是由镜胚表面的面形偏差决定的,下面对实验结果进行检测和分析。

2.2 面形检测

采用泰勒霍普森表面轮廓仪 PGI 1240 对面形进行检测,由于选取转速为 6 rad/s,镜子的焦距 F

为 0.136 m。得到面形偏差 RT 为 $91.3918\ \mu\text{m}$,如图 4 所示,表面粗糙度 R_a 为 $7.3\ \text{nm}$,如图 5 所示。

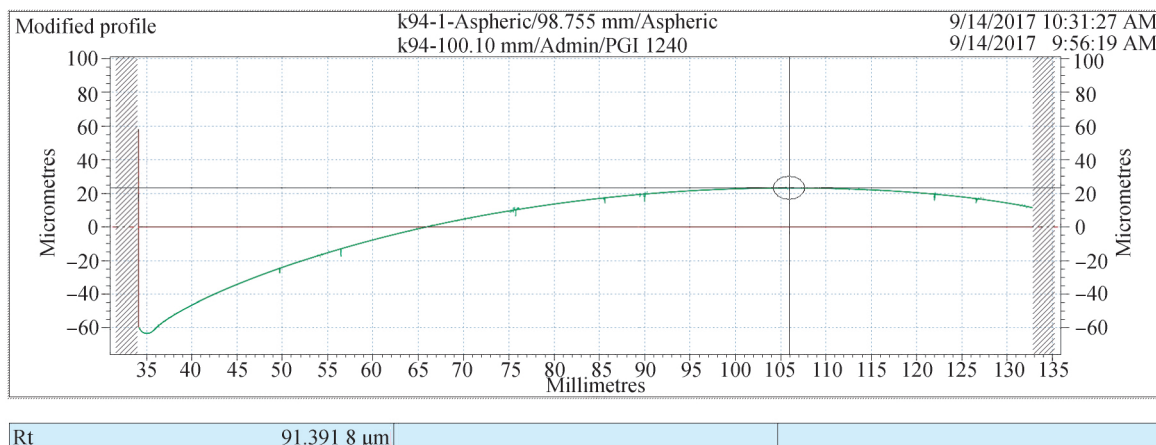


图 4 面形偏差情况

Fig. 4 Deviation of surface shape

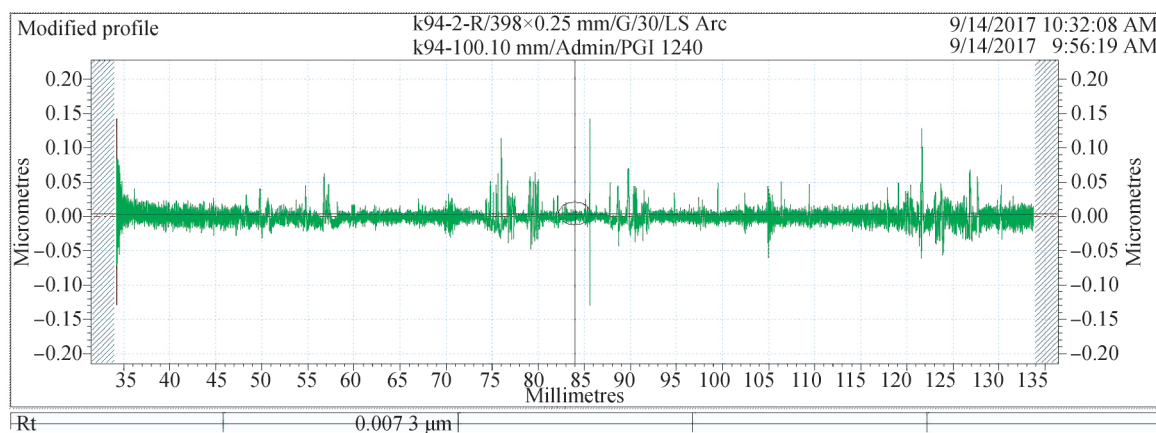


图 5 粗糙度情况

Fig. 5 Roughness condition

3 镜胚面形偏差工艺参数敏感性研究

面形偏差是表征成形质量主要参数,由文献[6]可知,玻璃后续精磨、抛光的加工余量应为 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 之间,所以离心熔铸非球面镜胚面形偏差要控制在这个范围之内,以便后续进行精加工。

面形偏差研究的意义在于通过预测偏差^[7-11],在设定工艺条件之初,根据偏差进行补偿设计,以便成品符合预期设计要求。

面形偏差定义为镜胚实际曲线和理论曲线上

离中心相同距离的点在高度方向上的坐标差值,由离心运动规律^[12]推导出面形计算公式为:

$$r^2 = 2gz/\omega^2. \quad (1)$$

可以看出,离心熔铸工艺中的非球面镜的上表面是一个旋转抛物面,以该面最低点作为原点, z 为半径 r 处的玻璃上表面坐标, ω 是转速。

在转速为 6 rad/s 的条件下,得到理论曲线的方程:

$$r^2 = 0.54z. \quad (2)$$

通过有限元仿真,在仿真结果中提取镜胚上表面各点坐标并绘制成上表面轮廓曲线,将仿真结果曲线与理论曲线进行对比,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,镜胚的面形偏差在半径方向上不断增大,最大偏差值约为 $-87\text{ }\mu\text{m}$,与实测值接近。为了缩短试制周期、降低费用、优化工艺、减少废品率,通过数值模拟与试验研究相结合的方法对其进行研究。

离心熔铸的镜胚表面形状主要是受到冷却过程的影响,在冷却过程中,所涉及到的工艺参数有模具的热膨胀系数,镜胚的冷却速率、直径,熔铸的温度等,他们的大小可能会影响镜胚最终的面形偏差。研究镜胚面形偏差工艺学参数的敏感性,一方面是为了尽可能优化工艺参数来减小面形偏差,另一方面是为了提高生产效率。下面将分别研究这几种参数的工艺学敏感性进行研究。

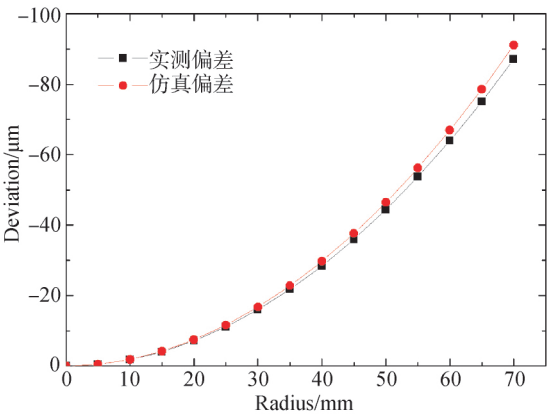


图 6 镜胚的面形偏差

Fig. 6 Surface deviation of mirror blank

3.1 模具的热膨胀系数

采用铸铁、刚玉莫来石坩埚、石英陶瓷坩埚 3 种不同材料的模具进行仿真对比,热膨胀系数分

别为 $1.2\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.88\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。除模具材料不同外,工艺均相同,冷却成型后玻璃的表面形状实测偏差与仿真偏差的对比见表 2,为了更清晰的看出差异,本文把数据画成对比关系如图 7。

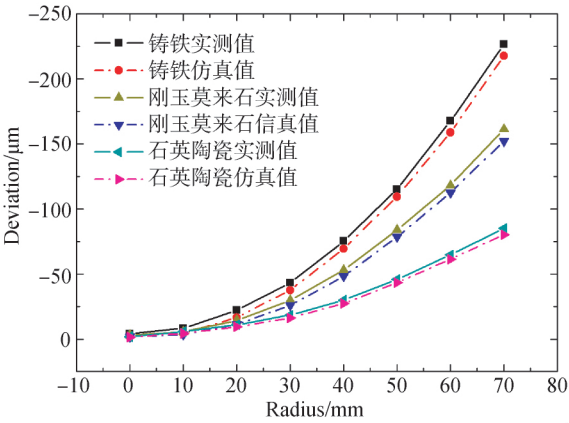


图 7 不同材料模具对镜胚偏差的影响

Fig. 7 Influence of different mould on deviation

从图 7 中可以看出,实测值和仿真值较为接近,总体趋势完全一致,模具的热膨胀系数越小,镜胚的面形偏差越小,最小的是石英陶瓷坩埚。产生以上现象的原因是模具热膨胀系数越大,冷却过程中产生的变形就越大,冷却过程中模具收缩,在玻璃还未凝固的情况下液态玻璃会流向模具收缩的位置进行补缩,进而影响成型形状,最终冷却至室温时面形偏差越大,所以尽量选择热膨胀系数小的材料以减小模具热膨胀对面形偏差所产生的影响。

表 2 不同模具材料和偏差的关系

Tab. 2 Relationship between material of mould and deviation

偏差/ μm	半径/mm	0	10	20	30	40	50	60	70
$\Delta Z_{\text{铸铁}}$	实测值	-3.98	-8.34	-21.98	-43.24	-75.15	-115.13	-167.48	-226.54
	仿真值	-1.28	-4.36	-16.56	-37.54	-69.34	-109.37	-158.79	-217.59
$\Delta Z_{\text{刚玉莫来石坩埚}}$	实测值	-2.94	-5.51	-14.29	-29.71	-53.06	-83.79	-118.01	-161.24
	仿真值	-1.61	-3.41	-11.27	-25.85	-48.19	-78.45	-112.46	-152.16
$\Delta Z_{\text{石英陶瓷坩埚}}$	实测值	-1.85	-5.58	-10.86	-18.49	-29.94	-45.92	-64.76	-84.95
	仿真值	-1.52	-4.32	-9.31	-16.26	-27.25	-43.28	-61.37	-80.24

3.2 冷却速率对面形偏差的影响

为分析冷却速率对面形偏差的影响,本文采用 5 °C/min、3 °C/min、1 °C/min 3 种冷却速率,通过数值模拟计算出了镜胚的体积变化如图 8 所示。

由图 8 可知,冷却速率越大,转变温度就会越高。当玻璃处于转变区间时(720~560 °C),冷却速率越快,体积的改变越小,偏差也随之减小。这是由结构松弛导致的,当温度处于应变点(536 °C)以下时,玻璃为固态,其结构基本上固定,体积不改变。选择上述 3 种冷却速率进行对比实验,得到了 3 组不同的偏差值,见表 3。为了更清晰地看出差异,本文把数据画成柱状图,如图 9 所示,冷却速率越大,偏差越小。

由于玻璃材料的特殊性,如果冷却速率过快,应力得不到充分的释放,会导致玻璃产生龟裂。在离心熔铸非球面镜的过程中,本文既关注玻璃的面形也关注玻璃内部的应力,因此需要选择合适的冷却速率来平衡面形偏差和应力的关系。

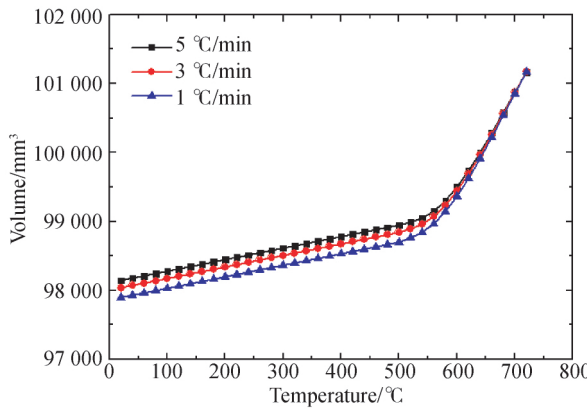


图 8 不同冷却速度下的体积
Fig. 8 Volume at different cooling rates

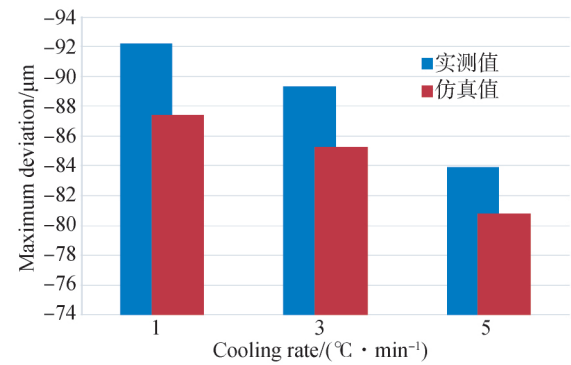


图 9 冷却速率和最大偏差的关系
Fig. 9 Relationship between cooling rate and maximum deviation

表 3 冷却速率和最大偏差的关系

Tab. 3 Relationship between cooling rate and maximum deviation

冷却速率/(°C · min ⁻¹)		1	3	5
最大偏差 /μm	实测值	-92.21	-89.34	-83.94
	仿真值	-87.46	-85.29	-80.79

3.3 直径对面形偏差的影响

为了研究直径对面形偏差的影响,将非球面镜模型简化为盘形圆柱,在能量密度一定的情况下,可用体积代表镜胚能量,体积除以散热面积正比于散热时间,即 $\frac{V}{S} \propto t$ 。假设圆柱直径为 d ,厚度为 h ,可以得到:

$$\frac{V}{S} = \frac{h}{2+2h/d} \tag{3}$$

从公式(3)可知,增大直径 d ,散热时间 t 增加。采用相同的材料,经过相同的加热和冷却工况,计算熔铸后镜胚厚度为 15 mm、直径变化范围为 80~150 mm,间隔 10 mm,比较实测与仿真偏差值,相应数据如表 4 所示,折线图如图 10 所示,直径越大,偏差越大。产生上述现象的原因是在最高温度打开炉盖迅速降温的过程中,当镜胚表面温度迅速降低到 T_g 时,关上炉盖保温,让玻璃内部温度场逐渐均一化。直径越大,热量越多,关上炉盖后所需要的散热时间也就越长,由于玻璃内部处于转变区间,结构松弛的时间也就变长,冷却速率变慢,体积变化越多,从而偏差越大。

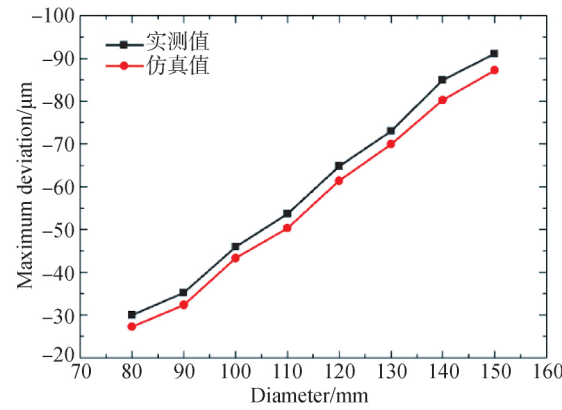


图 10 直径和最大变形量的关系
Fig. 10 Relationship between diameter and maximum deviation

表 4 直径与最大偏差的关系
Tab. 4 Relationship between diameter and maximum deviation

偏差/ μm	直径/mm	80	90	100	110	120	130	140	150
$\triangle Z$	实测值	-29.94	-35.17	-45.92	-53.64	-64.76	-72.99	-84.95	-91.08
	仿真值	-27.25	-32.34	-43.28	-50.31	-61.37	-69.95	-80.24	-87.19

表 5 加热温度和最大偏差的关系
Tab. 5 Relationship between heating temperature and maximum deviation

最大偏差/ μm	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$										
	1 000	1 110	1 120	1 130	1 140	1 150	1 160	1 170	1 180	1 190	1 200
实测	-81.94	-82.72	-82.97	-83.17	-83.49	-83.78	-84.46	-85.14	-86.13	-87.56	-89.31
仿真	-80.76	-81.56	-81.71	-81.96	-82.21	-82.51	-82.86	-83.26	-83.76	-84.21	-85.05

3.4 加热温度对面形偏差的影响

由上文理论计算得到转速为 6 rad/s,设置不同的最高加热温度进行仿真。由于玻璃边缘处存在收缩情况,测量不到具体偏差值,所以本文取半径 $r=70\text{ mm}$ 处的最大偏差的实测值和仿真值如表 5 所示,相应的折线图如 11 所示。

非球面偏差随最高加热温度的增大而增大,自镜胚中心到边缘面形偏差越来越大。产生这种现象的原因与上表面和内部温差有关,加热温度越高,则打开炉盖迅速降温后表面与内部的温差越大,此后采取关上炉盖的操作,内部向表面传递的热量就会越多,处于粘弹性温度范围的玻璃冷却时间越长,也就是结构松弛的时间越长,面形偏差就会变大,所以在熔铸过程中,可在熔铸允许温度范围内选择相对低的温度来减少偏差。

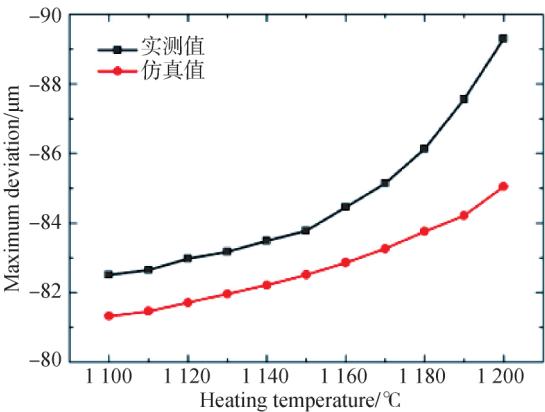


图 11 加热温度和最大偏差量的关系

Fig. 11 Relationship between heating temperature and maximum deviation

3.5 镜胚面形偏差的补偿

由上文可知在 $r=70\text{ mm}$ 处测的抛物回转面上表面的偏差可以达到 $-84\text{ }\mu\text{m}$,为了便于后续精加工处理,镜胚需要有 $30\sim40\text{ }\mu\text{m}$ 的加工余量,需要对偏差进行补偿^[9-10],使补偿后的实际偏差落在加工余量允许范围内。

首先将仿真得到的偏差加上加工余量,这里取加工余量为 $35\text{ }\mu\text{m}$,为修正这 $119\text{ }\mu\text{m}$ 的偏差,需要增加模具的旋转速度,使离心旋转时的表面曲率大于设定值,借助公式(1)计算此时的转速应为 6.064 rad/s ,计算得到第一次补偿后的面形偏差为 $-30\text{ }\mu\text{m}$,如图 12 所示。

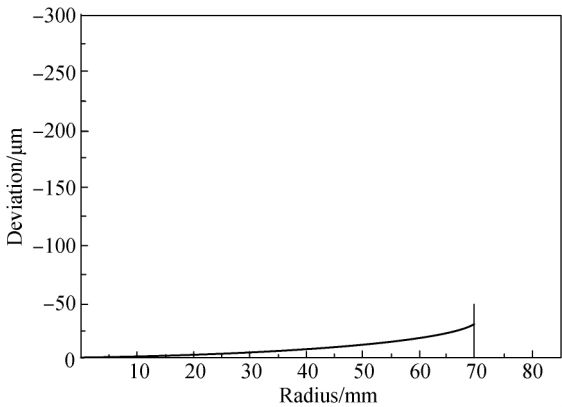


图 12 第一次补偿

Fig. 12 First compensation

再次重复上述过程,计算出二次补偿的转速应为 6.089 rad/s,再次仿真,此时最大偏差已经降到 33 μm ,这意味着后续镜胚的精加工有 33 μm 的余量。经过两次转速的迭代补偿计算,最终的偏差量已经相对初始偏差下降了 61%,由负转正,如图 13 所示。

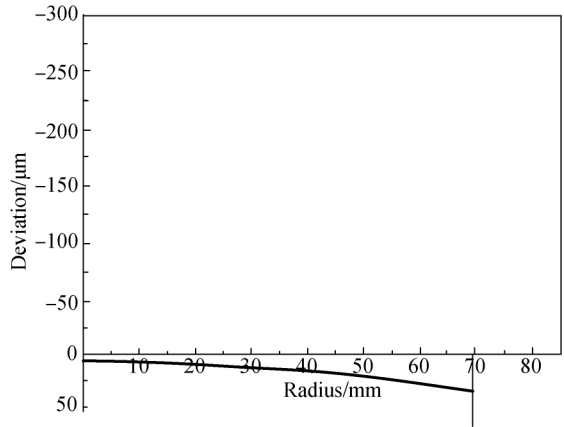


图 13 第二次补偿

Fig. 13 Second compensation

采用以上偏差补偿,计算厚度为 15 mm,对直径不同的镜胚进行计算,并对其进行模拟实验。两次补偿的仿真及最终偏差的实测值如表 6 所示。从表 6 可以得知补偿前后的面形偏差,为了直观的观察补偿前后偏差的改变规律,绘制成直方图来表示,如图 14 所示。补偿后面形偏差均有所减小,最终的面形偏差结果都控制在了目标加工余量范围内。

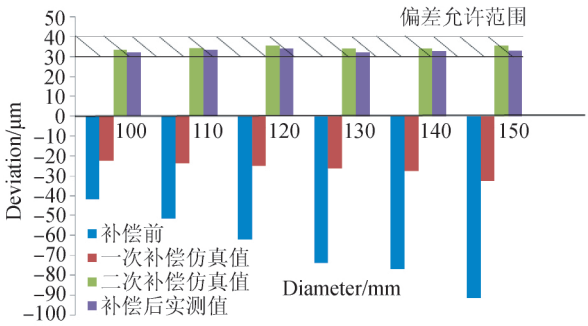


图 14 镜胚补偿前后的面形偏差

Fig. 14 Surface deviation before and after compensation

表 6 两次补偿仿真值与实测值

Tab. 6 Simulation value and measured value after two compensations

偏差/ μm	直径/mm	100	110	120	130	140	150
ΔZ	补偿前	-41.78	-51.64	-62.04	-73.99	-77.03	-91.39
	一次补偿后	-22.39	-23.58	-25.15	-26.43	-27.51	-32.5
	二次补偿后	33.27	34.31	35.67	33.95	34.04	35.64
	补偿后实测值	32.04	33.49	33.94	31.97	32.78	32.94

4 结 论

本文通过自行研制的缩比模型实验机进行了非球面镜镜胚的离心熔铸成型工艺研究。为了研究非球面镜镜胚的成型质量,对面形偏差进行了研究,得到了面形偏差工艺学参数的敏感性,通过研究我们得到以下结论:

分析了模具的热膨胀系数、镜胚的冷却速率、直径及加热温度对镜胚面形偏差的影响,得到了

偏差工艺参数的敏感性规律。即模具热膨胀系数越小,冷却过程中产生的变形就越小;冷却速率越快,体积的改变越小,偏差越小;直径越大面形偏差越大;加热温度越高,面形偏差就会变大。研究了面形偏差的补偿,对转速进行了两次迭代补偿计算,最终的偏差量已经相对初始偏差下降了 61%,由 -84 μm 补偿到了 33 μm 。最终的面形偏差结果都控制在了许用加工余量范围(30~40 μm)内,为后续大口径非球面镜的研究提供理论指导和技术支持。

参考文献:

[1] Abdulkadyrov, M1 and M2 Mirrors Manufactur-

ing for VISTA Telescope[J]. Proc. SPIE, 2016,94 (54): 374-381.

[2] KECK website[OL]. <http://planetquest.jpl.nasa>.

- gov/Keck/keck_index.html.
- [3] 冯苏鹏. 艺术铸造石膏模具的制作[J]. 铸造设备与工艺, 2015, 22(4): 63-64.
FENG S P. Manufacture of plaster mold for art casting [J]. *Casting equipment and technology*, 2015, 22(4): 63-64. (in Chinese)
- [4] 张毅. 热荷载作用下浮法玻璃和低辐射镀膜玻璃破裂行为研究[J]. 中国科学技术大学, 2010.
ZHANG Y. Study on fracture behavior of float glass and Low-E coated glass under thermal load [J]. *University of Science & Technology China*, 2010. (in Chinese)
- [5] 干福熹. 光学玻璃[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
GAN F X. *Optical Glass* [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)
- [6] 邬烈恭. 光学玻璃加工破坏层研究及粗磨、精磨、抛光工序加工余量的合理匹配[J]. 光学技术. 1996, 8(2): 30-35.
WU L G. Optical glass processing research of destruction layer of coarse grinding, fine grinding and polishing machining allowance matching [J]. *Optical Technology*, 1996, 8(2): 30-35. (in Chinese)
- [7] 范晓明, 等. 光学非球面三坐标测量中的像散补偿[J]. 光学精密工程, 2016, 12(15): 3012-3019.
FAN X M, *et al.*. Astigmatism compensation in optical aspheric three coordinate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 12(15): 3012-3019. (in Chinese)
- [8] 薛栋林, 等. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程, 2008, 12(15): 2491-2496.
XUE D L, *et al.*. Inspection of large aperture silicon carbide material convex aspheric mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 12(15): 2491-2496. (in Chinese)
- [9] 李杰. 接触式大型非球面镜面形测量中测量点分布的确定[J]. 光学精密工程, 2012, 15(4): 727-732.
LI J. Determination of the distribution of measuring points in contact lens measurement of large aspheric surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 15(4): 727-732. (in Chinese)
- [10] ZHANG X B. Annealing simulation of aspherical lenses based on structural relaxation theory [J]. *Materials science and engineering*, 2013, 18(9): 19-22.
- [11] ALEXMARKOVSKY T F S. An Efficient and Stable algorithm to calculate fictive temperature [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 67(14): 10-14.
- [12] 林柏年. 特种铸造[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2004.
LIN B N. *Special Casting* [M]. Zhejiang: Zhejiang University press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



张心明(1967—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,研究员,博士生导师,1990年、2003年、2009年于长春理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事精密、超精密加工检测及装备等方面的研究。E-mail: zxm@cust.edu.cn



徐鑫莉(1987—)女,吉林辽源人,博士,讲师,2010年于山东理工大学获得学士学位,2013年、2017年于长春理工大学获得硕士、博士学位,主要从事精密、超精密加工检测及装备的研究。E-mail: 455855261@qq.com