

基于 1:80 缩比实验机的离心熔铸模拟实验研究

徐鑫莉^{1,2}, 张心明¹, 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. 长春工程学院, 吉林 长春 130012;
3. 中国第一汽车集团有限公司, 吉林 长春 130011; 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: 在实验室环境下进行非球面镜离心熔铸实验, 研究大口径非球面镜的离心熔铸技术, 并验证研究方法的可行性。通过对大口径非球面镜离心熔铸工艺的温度场相似准则和缩比模型参数匹配方法的研究, 设计 1:80 离心熔铸环境相似缩比实验机, 进行物理模拟实验。测量了缩比实验的温度场、应力场以及最终的镜胚面形偏差。实验结果与仿真结果对比显示, 温度场测量结果与仿真结果的相对误差在 1.0% ~ 1.4% 之间。非球面镜在转变温度附近采取适当保温工艺后, 最大压应力降为 0.98 MPa。通过轮廓仪检测制得的非球面镜面形偏差为 $-83.823\ 3\ \mu\text{m}$, 与仿真结果相符。采用仿真联合缩比实验的方法对离心熔铸工艺中的不可观测量进行研究, 为离心熔铸工艺提供了理论参考依据和实验指导。

关键词: 非球面镜; 离心熔铸; 相似性准则; 缩比模型; 温度场

中图分类号: TG249.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2018)08-1601-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.08.017

Simulation Experiment of Centrifugal Casting Based on 1:80 Scale Reduction Experimental Machine

XU Xin-li^{1,2}, ZHANG Xin-ming¹, CAI Peng³, YU Yang⁴, ZHAO Li-xin⁵

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;
2. Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, Jilin, China; 3. China First Automobile Works Group Co., Ltd.,
Changchun 130011, Jilin, China; 4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, Jilin, China; 5. Returned Overseas Personnels and Expert Service Center Jilin Province, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: The centrifugal casting technology of large aperture aspherical mirror is studied for the centrifugal casting experiment of aspherical mirror in the laboratory environment, and the feasibility of the method is verified. A 1:80 scale experimental machine was designed by studying the similarity criterion of temperature field and the matching method of scaled model parameters in the centrifugal casting process of large aperture aspherical mirror, and the physical simulation experiment was carried out. The temperature field, stress field and final surface shape deviation of mirror were measured. The experimental results are compared with the simulated results. The relative error between the measured and simulated temperatures of temperature field is between 1.0% and 1.4%. The maximum compressive stress is reduced to 0.98 MPa when the aspherical mirror is properly insulated near t_g . The measured surface shape deviation of

收稿日期: 2017-12-12

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20150101024JC)

作者简介: 徐鑫莉(1987—), 女, 讲师。E-mail: 455855261@qq.com

通信作者: 张心明(1967—), 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: zxm@cust.edu.cn

aspherical mirror is $-83.823\ 3\ \mu\text{m}$, which is consistent with the simulated result. The non-observable parts in the process of centrifugal casting can be studied through simulation and experiment.

Key words: aspherical mirror; centrifugal casting; similarity criterion; scaled model; temperature field

0 引言

天文望远镜的主镜尺寸已经由最初的 1 m 数量级发展到 10 m 数量级,传统加工方法已很难直接加工出如此大口径的非球面镜镜胚。离心熔铸巧妙地借助离心力和重力进行自由表面的旋转成型,是实现大口径非球面镜镜胚制造的最有效方法。

由于国外对其研究还处于保密阶段,国内在离心熔铸非球面镜技术方面急需开展系统性研究。离心熔铸非球面镜技术存在着很多问题和挑战^[1],大口径非球面镜镜胚的离心熔铸设备体积庞大,工作温度高于 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$,在如此苛刻的温度环境下直接进行实验是十分困难的^[2-3],如温度场测量、应力场设备的选型及测点布置都存在困难,时间和材料成本是十分巨大的。

相似理论的研究与应用为以上问题提供了有效解决方案。本文以相似理论研究离心熔铸工艺中温度场的相似准则和参数匹配方法为理论基础,进行缩比模型实验机的研制。基于缩比实验机进行实验研究,旨在为大口径非球面镜离心熔铸技术的提供理论参考和工程指导。

1 温度场的导热数学模型研究

1.1 温度场的相似准则

光学玻璃对温度具有高度依赖性,因此对温度场分布的研究十分重要。温度场相似准则的核心是把测量单位转换成相对单位,以获得温度场相似准则。通过能量守恒定律和傅里叶定律^[4-5]得到导热微分方程。玻璃为各向同性的连续介质,其导热系数 λ 、比热容 c 和密度 ρ 均为已知,玻璃熔体不通电,也不外加任何电磁场,因而无内热源。基于上述各项假设,在柱坐标系中,从进行导热过程的玻璃熔体中分割出一个微元体,如图 1 所示。

根据能量守恒与转化定律,对微元体进行热平衡分析,设模具任意高度内表面、外表面均为理想圆形,在开始旋转及开始冷却时模具的温度场均一。加热和冷却时,对模具外侧表面进行温度控制,导热过程的相似准则推导过程如下。

1.1.1 模具导热微分方程的建立

在柱坐标系中,选取如图 1 所示模具六面体微

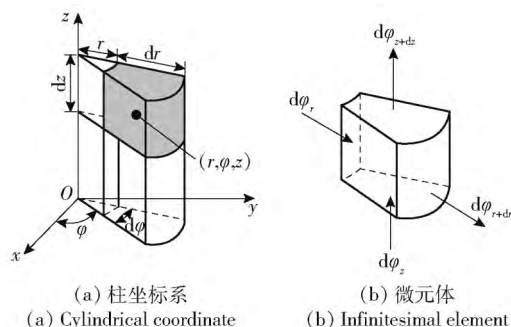


图 1 模具六面体微元

Fig. 1 Hexahedron element of mould

元进行研究。在模具导热过程中,微元热流量等于导入微元热流量 $d\Phi_r$ 与导出热流量 $d\Phi_{r+dr}$ 的差,即

$$\begin{aligned} d\Phi_{\lambda r} &= d\Phi_r - d\Phi_{r+dr} = \\ &= q_r r d\varphi dz - q_{r+dr} (r + dr) d\varphi dz, \quad (1) \\ q_{r+dr} &= q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr + \frac{\partial^2 q_r}{\partial r^2} \frac{dr^2}{2!} + \dots \approx q_r + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr, \quad (2) \end{aligned}$$

式中: q_r 为导热热流密度。

根据傅里叶定理,可得

$$d\Phi_{\lambda r} = \left[\lambda \frac{\partial t}{\partial r} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right] dr d\varphi dz, \quad (3)$$

式中: t 为温度。

令模具导热系数 $a = \lambda / (\rho c)$, 可得

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

式中: τ 为时间。

1.1.2 模具导热微分方程边界条件和无量纲化

为了描述离心熔铸工艺中的模具导热过程,定义 a_0 、 λ_0 、 h_0 分别为导热系数、模具导热系数、模具表面对流换热系数的测量单位,温度测量单位为 $\theta_0 = t_0 - t_f$, t_0 为初始温度, t_f 为测量温度。长度和时间测量单位分别为模具内径 r_0 和 r_0^2/a_0 , 无量纲化导热微分方程为

$$\begin{aligned} \frac{\theta_0}{r_0^2/a_0} \frac{\partial (\theta/\theta_0)}{\partial (a_0\tau/r_0^2)} &= \\ a_0 \frac{a}{a_0} \left[\frac{1}{r_0} \frac{1}{1/r_0} \frac{\theta_0}{r_0} \frac{\partial (\theta/\theta_0)}{\partial (r/r_0)} + \frac{\theta_0}{r_0^2} \frac{\partial^2 (\theta/\theta_0)}{\partial (r/r_0)^2} \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

令

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_0}, A = \frac{a}{a_0}, R = \frac{r}{r_0}, \quad (6)$$

式中: Θ 、 A 和 R 均为无量纲量,模具物性参数恒定,

即 $A = 1$, 那么有

$$\frac{\partial \Theta}{\partial (a_0 \tau / r_0^2)} = \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial R^2}. \quad (7)$$

边界条件为

$$\frac{\partial \Theta}{\partial R} = \frac{h_0 r_0}{\lambda_0} \Theta, \quad (8)$$

式中: $a_0 \tau / r_0^2$ 和 $h_0 r_0 / \lambda_0$ 为无量纲量, 分别为模具导热的傅里叶数 F_0 和毕渥数 Bi . F_0 、 Bi 和 R 均为定型准则。 Θ 中含有未知温度 t 是非定型准则, 是关于傅里叶数 F_0 、毕渥数 Bi 和 R 的函数, 即

$$\Theta = f(F_0, Bi, R). \quad (9)$$

1.2 模具与环境对流换热相似准则

冷却过程中的热传递包含模具内部的热传导、模具与通风冷却气流之间的热对流换热两方面。如果 F_0 、 Bi 和 R 能够对应相等, 就可确保缩比实验结果与真实结果相似。 Bi 准则中包含表面对流换热系数 h [4-6]。为了得到理想的对流换热系数 h , 需研究 h 的影响因素。

1) 对流换热系数 h 受冷却气流速度 u 、动力黏度 μ 、定压比热 c_p 、介质密度 ρ 、导热系数 λ 、风道直径 d 的影响。

2) 表面对流换热系数影响因子量纲分析。

用不定函数公式表示对流换热系数 h :

$$f(u, \mu, c_p, \rho, \lambda, d, h) = 0. \quad (10)$$

根据量纲分析理论, 等式两侧量纲应该一致。

用基本量表示 (10) 式可得

$$\text{Dim} u = l \tau^{-1}, \quad (11)$$

$$\text{Dim} \mu = m l^{-1} \tau^{-1}, \quad (12)$$

$$\text{Dim} c_p = l^2 \tau^{-2} t^{-1}, \quad (13)$$

$$\text{Dim} \rho = m l^{-3}, \quad (14)$$

$$\text{Dim} \lambda = m l \tau^{-3} t^{-1}, \quad (15)$$

$$\text{Dim} d = l, \quad (16)$$

$$\text{Dim} h = m t^{-1} \tau^{-3}. \quad (17)$$

由 (11) 式 ~ (17) 式可看出, 只需质量 m 、温度 t 、时间 τ 、长度 l 等 4 个基本量纲就可表示 7 个物理量的量纲。选取长度相关变量 d 、速度相关变量 u 、传热相关变量 λ 、动力学相关变量 μ , 则有 3 个无量纲 π 参数:

$$\begin{cases} \pi_1 = c_p d^{a_1} u^{b_1} \lambda^{c_1} \mu^{d_1}, \\ \pi_2 = \rho d^{a_2} u^{b_2} \lambda^{c_2} \mu^{d_2}, \\ \pi_3 = h d^{a_3} u^{b_3} \lambda^{c_3} \mu^{d_3}, \end{cases} \quad (18)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i ($i = 1, 2, 3$) 为待求参数。

经计算可得

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{\mu c_p}{\lambda} = Pr, \\ \pi_2 = \frac{\rho u d}{\mu} = Re, \\ \pi_3 = \frac{h d}{\lambda} = Nu. \end{cases} \quad (19)$$

由 (19) 式可看出, 努塞尔数 Nu 中含有待确认的变量 h , 故 Nu 是非定型准则, Nu 可用 Re 和 Pr 表示为不定函数:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (20)$$

得到温度场的相似准则为

$$\Theta = f(F_0, Bi, R, Re, Pr). \quad (21)$$

1.3 温度场缩比实验相似条件的匹配

采取和原型类似的模型进行缩比实验, 只需满足缩比实验与真实实验的同名准则相等, 即 $F_0 = F_0'$, $Bi = Bi'$, $R = R'$, $Re = Re'$, $Pr = Pr'$. 选择同种空气作为冷却介质, 普朗特数 Pr 一定相等。因此, 只需满足如下相似关系:

$$\begin{cases} \frac{a_0 \tau}{r_0} = \frac{a_0' \tau'}{(r_0')^2}, \frac{h_0 r_0}{\lambda_{s0}} = \frac{h_0' r_0'}{\lambda_{s0}'}, \\ \frac{r}{r_0} = \frac{r'}{r_0'}, \frac{\rho_f u d}{\mu} = \frac{\rho_f' u' d'}{\mu'}, \end{cases} \quad (22)$$

式中: λ_{s0} 为缩比导热系数 λ_s 的测量单位; ρ_f 为测量密度。

定义导温系数、时间、尺寸、对流换热系数、热物性参数、速度的相似常数分别为 C_a 、 C_τ 、 C_l 、 C_h 、 C_{λ_s} 、 C_u , (22) 式可转化为

$$\frac{C_a C_\tau}{C_l} = 1, \frac{C_h C_l}{C_{\lambda_s}} = 1, C_u C_l = 1. \quad (23)$$

在 Pr 和 Re 相似条件下, Nu 相似, $C_h C_l = 1$. 为了满足 $Bi = Bi'$, 模具热导系数满足 $C_{\lambda_s} = 1$.

离心熔铸工艺中, 得到了温度场相似条件:

- 1) $C_a C_\tau = C_l^2$, 用于匹配缩比尺寸与时间关系;
- 2) $C_u C_l = 1$, 用于匹配缩比风速与尺寸关系;
- 3) $C_h C_l = 1$, 用于匹配缩比换热系数与尺寸关系;
- 4) $C_{\lambda_s} = 1$, 要求缩比导热系数与真实一致。

2 离心熔铸环境相似缩比实验机研制

2.1 离心熔铸系统的主体装置

考虑到实验室的空间条件及离心旋转机构、加热装置和保温装置的空间需求, 离心熔铸工艺缩比实验中采取的模具尺寸不能太大。但模具尺寸也不宜太小, 原因在于测温热电偶本身也具有一定尺寸,

若模具尺寸太小,则模具温度场会受到热电偶的影响。考虑缩比实验装置的物料成本和制作难度,最终制作了直径 150 mm 的缩比实验模具,可 1:80 模拟直径 12 m 非球面镜的离心熔铸工艺过程。此时的各项相似常数如表 1 所示。

表 1 相似常数

Tab.1 Similarity constants

相似常数	相似比例尺
尺寸相似常数 C_l	1/80
时间相似常数 C_τ	1/6400
速度相似常数 C_u	80
密度相似常数 C_ρ	1
动力黏度相似常数 C_μ	1
导热系数相似常数 C_{λ_s}	1
定压比热相似常数 C_{c_p}	1

实验机采用立式结构,上面部分为升降炉,下面部分为旋转机构,如图 2 所示。图 2 中,高辐射率的 Ocf 27A17Mo2 铁铬电热合金电阻丝镶嵌在炉膛内,炉膛采用圆柱形耐高温碳化硅材料密封隔热,硅酸铝纤维毡、珍珠岩、耐火砖做保温层。炉膛可升降,且在升起时可绕升降杆为中心自由转动,方便放入和取出玻璃。炉盖上开有直径 50 mm 的观察孔,便于对炉内情况进行实时监控。在转炉上、下两部分交界处,设置有采用隔热棉制成的环形风道,导入外部气源的气流进行冷却阶段温度的控制,系统参数如表 2 所示。

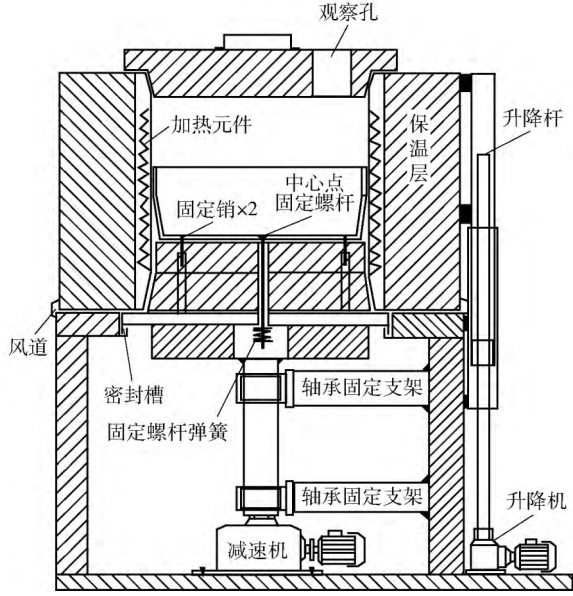


图 2 非球面镜离心熔铸系统的主体装置

Fig.2 Main body of centrifugal casting system

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

参数	数值
最大加热温度/℃	1 200
炉温均匀度/℃	±2
旋转速度/(r·min ⁻¹)	0~120,连续可调
加热炉升降高度/mm	700
炉膛尺寸/mm	φ260×460
工作台尺寸/mm	φ160×150
外形尺寸/mm	650×650×1 100

3 离心熔铸工艺模拟实验研究

采用稳定性好、热膨胀系数满足要求、性价比高的 H-K9L 光学玻璃,其主要特征温度如表 3 所示。

表 3 H-K9L 参数表

Tab.3 Parameters of H-K9L

特征温度点	温度/℃	特征
应变温度 t_1	530	永久应力与暂时应力的分界点
转变温度 t_g	560	可较快地消除应力
屈服温度 t_s	630	体积最大
软化温度 t_f	720	高弹态与黏流态分界点

镜胚成型过程如图 3 所示。

如图 3(a) 所示,将大小不一的玻璃块堆放在模具中加热,当玻璃温度达到 800 ℃ 时,可较明显地看到玻璃从外边缘的位置开始融化,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 3(b) 所示。温度到达 1200 ℃ 时,玻璃黏度低易成型,此时熔体中有一些小气泡,炉子恒温旋转待气泡几乎排尽,液面上表面呈现出抛物面,如图 3(c) 所示。温度从 1 200 ℃ 降到 560 ℃ (t_g),打开炉盖,对熔体上表面进行快速冷却。当熔体上表面温度降到 560 ℃ 时,炉子停止旋转关闭炉盖。为了消除玻璃中的永久应力,对玻璃熔体在转变温度 560 ℃ 进行保温 9 h。根据光学玻璃精密退火规程^[4],为了消除残余应力,从 t_g 冷却到 530 ℃ (t_1) 过程中,采用 0.04 ℃/min 的速率缓慢退火。在 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。以 0.4 ℃/min 的速度快速冷却,当温度至室温时,镜胚如图 3(d) 所示。

4 缩比实验结果与分析

4.1 温度场实验分析

由于玻璃熔体在高温环境中很难用常规传感器



(a) 玻璃塌陷
(a) Collapsed glass



(b) 迅速熔化
(b) Rapidly melting



(c) 成型结束
(c) Forming end



(d) 常温后取出玻璃效果图
(d) Glass taken out at room temperature

图 3 镜胚成型过程

Fig. 3 Forming process of mirror

测量液面温度,通过红外热成像仪非接触测温得到熔体上表面中心 A 点和边缘点 B 点温度,如图 4 所示。

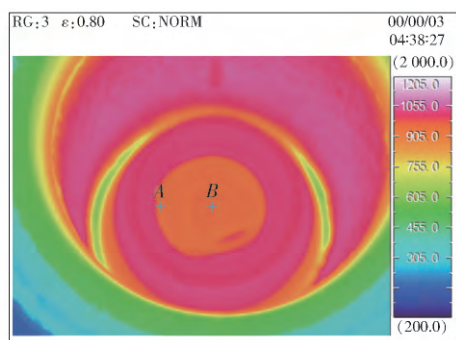


图 4 红外热成像仪测得的温度云图

Fig. 4 Nephogram of temperature measured by infrared thermal imager

玻璃温度随着炉温升高存在滞后现象,由于熔体在升温过程中温度测量存在困难,为了精确掌握熔铸过程中熔体温度变化,通过有限元 Abaqus 软件进行温度场仿真。其他工况都相同情况分析单一变量,选取 500 ℃、600 ℃、700 ℃、800 ℃、900 ℃、1 000 ℃、1 100 ℃、1 200 ℃ 8 种温度, A 点、 B 点温度场的实测结果与仿真结果趋势一致,相对误差在 1.0% ~ 1.4% 之间。测试结果比较如表 4 所示。

表 4 测试结果比较

Tab. 4 Comparison of test results

设定温度	A 点		B 点	
	实测温度	仿真温度	实测温度	仿真温度
500	405	410	502	505
600	501	503	591	592
700	562	570	705	706
800	633	635	799	796
900	664	660	901	902
1 000	803	804	998	998
1 100	946	947	1 097	1 095
1 200	1 000	990	1 202	1 210

4.2 应力场检测与分析

残余应力影响着非球面镜后续加工及使用,对镜胚中心点 A 点、 $1/2$ 半径处 B 点、镜胚外边缘位置 C 点进行研究。在相同半径处分别选择 10 个点进行测量,采用 LSM-7002 电脑全自动玻璃应力仪,结果如表 5 所示。

表 5 应力测试结果

Tab. 5 Stress test results

测点	不同点残余应力									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	0.52	0.56	0.53	0.55	0.52	0.49	0.51	0.48	0.49	0.50
B	0.81	0.84	0.79	0.75	0.76	0.79	0.74	0.73	0.76	0.77
C	1.03	0.98	0.99	0.96	0.96	0.98	1.05	0.94	0.93	0.98

由表 5 可知:

1) 边缘点的应力比中心点大,在实际实验过程中玻璃总会在边缘附近破裂。

2) 边缘最大压应力为 0.98 MPa。通过应力光学常数和光程差的计算,许用应力为 0.77 ~ 1.92 MPa,缩比实验所得镜胚满足光学玻璃精密退火内应力设计要求。

4.3 表面轮廓检测与分析

表面轮廓为评价非球面镜质量的另一个重要指标。采用 PGI 1240 泰勒霍普森表面轮廓仪对非球

面镜镜胚的上表面进行检测。检测结果显示: 镜胚面形偏差为 $-83.823\ \mu\text{m}$, 如图 5 所示; 表面粗糙度 $R_a = 7.3\ \text{nm}$, 如图 6 所示。

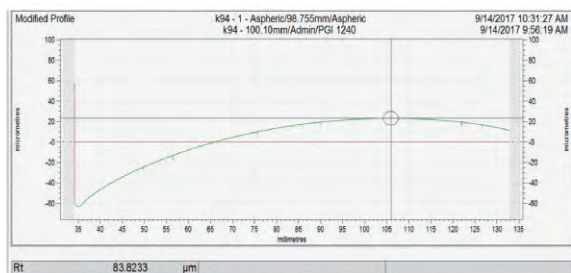


图 5 面形偏差情况

Fig. 5 Deviation of surface shape

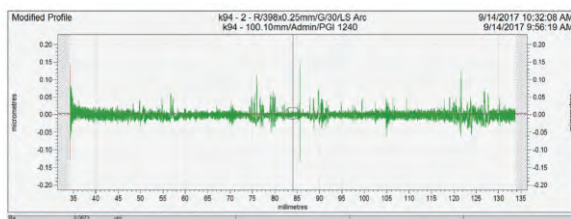


图 6 粗糙度情况

Fig. 6 Roughness

图 7 所示为实测偏差与仿真偏差的对比, 二者基本吻合。说明有限元仿真可较为精确地预测偏差, 为离心熔铸过程提供必要的理论支持。

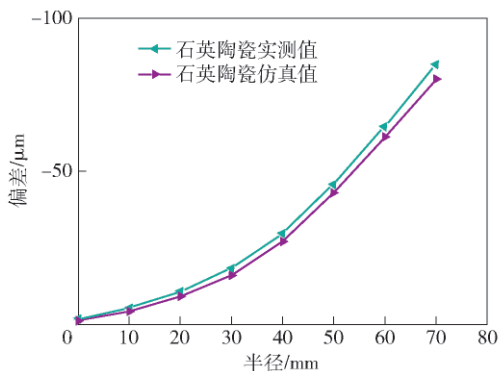


图 7 面形偏差实测值与仿真值

Fig. 7 Measured and simulated values of surface shape deviation

5 结论

本文对离心熔铸技术进行了研究, 得到如下

结论:

- 1) 通过能量守恒、傅里叶定律, 建立了导热微分方程, 求得边界条件并进行了无量纲化。
- 2) 根据量纲分析理论, 求得温度场的相似准则为 $\Theta = f(F_0, Bi, R, R_2, Pr)$ 。
- 3) 得到了离心熔铸温度场相似条件。
- 4) 制作了直径 150 mm 的缩比实验模具, 根据 1:80 的相似比率, 可模拟直径 12 m 的离心熔铸工艺过程。
- 5) 温度场的仿真结果与实测结果趋势一致, 实测结果与仿真结果相对误差在 1.0% ~ 1.4% 之间。
- 6) 镜胚边缘点的残余应力比中心点高。在转变温度附近保温, 可有效释放应力。实验制得镜胚的最大压应力为 0.98 MPa, 符合设计要求。
- 7) 通过表面轮廓仪测得的表面曲线得到实际偏差, 与仿真得出的偏差基本吻合。

参考文献 (References)

- [1] 李含健, 刘洁, 任慧, 等. 微纳结构铝热剂薄膜的旋涂制备及其燃烧性能 [J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 267-272.
LI Han-jian, LIU Jie, REN Hui, et al. Spin-coating preparation of micro and nano-thermite films and their combustion performances [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 267-272. (in Chinese)
- [2] Hill J M. The large binocular telescope [J]. Applied Optics, 2010, 49(16): 115-122.
- [3] Li C, Strachan A. Molecular simulations of crosslinking process of thermosetting polymers [J]. Polyme, 2010, 51(25): 6058-6070.
- [4] 苏亚欣. 传热学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
SU Ya-xin. Heat transfer [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [5] 冯苏鹏, 郭会敏. 艺术铸造石膏模具的制作 [J]. 铸造设备与工艺, 2015(4): 63-64.
FENG Su-peng, GUO Hui-min. Manufacture of plaster mold for art casting [J]. Foundry Equipment and Technology, 2015(4): 63-64. (in Chinese)
- [6] Green A E. Thermoelasticity without energy dissipation [J]. Journal of Elasticity, 1993, 31(3): 189-208.
- [7] 干福熹. 光学玻璃 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
GAN Fu-xi. Optical glass [M]. Beijing: Science Press, 1982. (in Chinese)