

光学玻璃精密模压成形设备密封设计

李康森, 张灿滨, 王小权, 龚峰

(深圳大学 机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: **目的** 研究高温情况下光学玻璃精密成形设备加热系统的密封性能。**方法** 通过数值模拟分析, 得到加热系统的温度场分布以及密封圈的温度变化规律, 利用热电偶及红外测温仪对加热系统加热性能及安全性进行检测, 在此基础上, 对加热系统进行改进。**结果** 随着加热时间和功率的增加, 密封圈的温度随之上升。模压温度过高, 橡胶圈存在破坏的可能。**结论** 通过对密封处进行改良, 橡胶圈在安全工作范围内, 加热效率得到了改善。在机械泵和分子泵的共同作用下, 模压腔内的真空度达到 1 Pa 以下。

关键词: 玻璃模压成形设备; 密封; 数值模拟; 温度场

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.009

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)04-0052-07

Sealing Design of Glass Precision Molding Machine

LI Kang-sen, ZHANG Can-bin, WANG Xiao-quan, GONG Feng

(College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

ABSTRACT: The paper aims to study sealing performance of the heating system of optical glass precision molding machine. The temperature distribution of heating system and temperature variation rules of seal rubber were obtained by finite element analysis. And the actual temperature of heating system was measured by thermocouple and infrared thermometer. On this basis, the heating system was improved to fulfill the safety and sealing performance of machine. The temperature of seal rubber increased with the increase of power and heating time. If the temperature was too high, the seal rubber may be burned. By improving the sealing, the seal rubber can be in safe working temperature range, and the efficiency of heating system is improved. Under the combined action of mechanical pump and molecular pump, the vacuum of molding cavity can be up to 1 Pa.

KEY WORDS: glass precision molding machine; seal; simulation; temperature field

光学玻璃非球面透镜是手机镜头、摄相机、投影仪、望远镜、红外探测器、武器瞄准系统、内窥镜等光学系统产品中的关键部件。传统的玻璃非球面透镜经过复杂的冷加工而成, 工序繁琐, 耗时长, 价格昂贵, 对技术工人要求较高。玻璃精密模压成形技术是将软化的玻璃放入高精度的模具中, 在高温加压和无氧条件下, 一次性直接模压成形光学零件, 如小口径透镜、非球面透镜、透镜阵列、衍射光学元件、自由

曲面、红外透镜等^[1-5], 大大简化了工艺, 降低了成本。1974 年玻璃模压技术在美国申请了专利, 莱特巴斯、柯达、康宁等公司已掌握玻璃模压成形技术。美国克莱姆森大学研制的 DTI—GP5000HT^[6]模压机, 可以进行商业和科研实验, 连续 3 d 工作, 模压产品的形貌偏差为 0.55 μm, GP-5000HT 内部结构见图 1。美国穆尔集团纳米技术公司开发型号为 140GPM 的玻璃模压机见图 2, 可在真空或者充满惰性气体的环

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 深港创新圈联合研发 (SGLH20150213170331329)

作者简介: 李康森 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学玻璃模压成形。

通讯作者: 龚峰 (1982—), 男, 副教授, 主要研究方向为光学玻璃模压成形和金属塑性微成形。

境下进行，最大模压力为 25 kN，最高加热温度为 800 °C。日本的大原、保谷、欧林巴斯等公司对玻璃模压成形也有深入研究，日本武内制作所研发的型号为 MVP-2010 的玻璃模压成形机见图 3，该设备常用的模压行程为 80 mm，常用的工作温度限定在 500~700 °C，模压力范围为 0~5 kN。日本东芝研制的 GMP 系列模压机是目前市场大多数的选择，可加工工件面型精度小于 0.5 μm，Ra<5 nm，GMP 系列玻璃模压机及原理见图 4。国内高校和企业也对该技术也有所研究，不过起步较晚。玻璃精密热压成形过程主要分为 3 个阶段，第 1 阶段为抽真空及玻璃坯料加热，第 2 阶段是保温热压，第 3 阶段为退火冷却。模压成形过程中温度过低，会导致模压力过大，甚至会破坏模具的结构，影响模压透镜的精度；温度过高，玻璃会在重力的作用下自由流动，不容易控制，而且过高的温度会导致模压完成后，玻璃和模具表面粘结在一起，影响玻璃表面的成形质量^[7]，因此，加热系统对模具和玻璃坯料的加热效果，对玻璃透镜的成形过程有重要的影响。文中主要针对自主研制的光学玻璃精密模压成形设备加热系统中的密封机构进行研究，通过数值模拟分析，得到加热系统的温度场分布以及密封圈的温度变化情况，利用热电偶以及红外测温仪对加热系统的加热性能以及安全性进行检测，然后通过实验验证其可行性，最后对模压机密封处进行改进。



图 3 MVP-2010 玻璃模压成形机
Fig.3 MVP-2010 glass molding machine

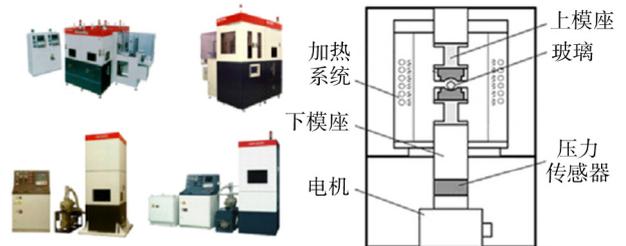


图 4 GMP 系列玻璃模压机及原理
Fig.4 Glass precision molding machine of GMP series

1 光学玻璃精密模压成形设备加热系统研制

为了实现玻璃坯料加热的要求，需要提供热源及支撑热源的炉体结构；为了提高整个工艺过程的加热效率、减少热量的散失，需要进行密封隔热处理；为了保证玻璃表面成形质量，需要进行抽真空，真空度要求在 1 Pa 以下。为了保证真空度，需要进行密封设计。静密封是与被密封面静态接触，且与其他表面没有相对滑动，直接在压力的作用达到密封效果^[8-9]。静密封一般可以分为轴向密封和径向密封。动密封则相反，被用在存在机械运动的表面，机械运动可以是往复运动或者振荡运动。轴向静密封通过压缩或挤压密封件上下 2 个表面，来达到密封的效果。往复动密封被用来密封内表面和外表面轴向的往复运动，加热系统工作状态见图 5。设备中密封圈选用 O 型圈以及 Y 型圈对模压腔室进行密封^[10-11]。密封材料选择橡胶，密封圈在工作时还受到加热系统的热辐射及退火冷却气路、水路的影响，因而在设计密封圈时，还要综合考虑温度和使用环境对密封圈密封性能的影响，选用氟橡胶，工作温度在 250 °C 以下。光学玻璃精密成形装置的工作状态见图 5，加热系统安装在机架上面的模压室内，加热系统的结构相对于上下模座呈轴对称。内部零部件见图 6，主要由定心浮动机构、水冷密封件、隔热垫、模具等组成。玻璃精密模压成形机加热系统装配见图 7。

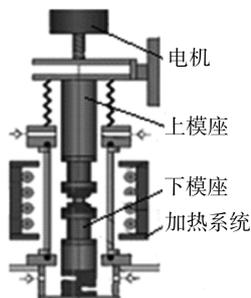


图 1 GP-5000HT 内部结构
Fig.1 A schematic view of the internal structure of GP-5000HT



图 2 穆尔公司的 140GPM 玻璃模压成形机
Fig.2 Moore's 140GPM glass molding machine

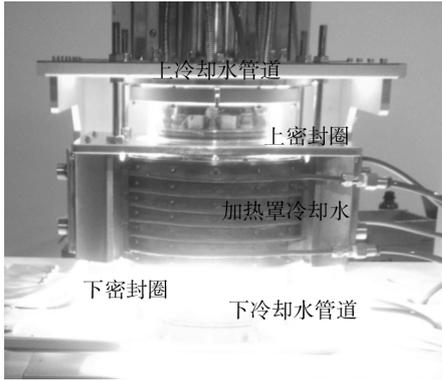


图5 加热系统工作状态
Fig.5 Working state of heat system

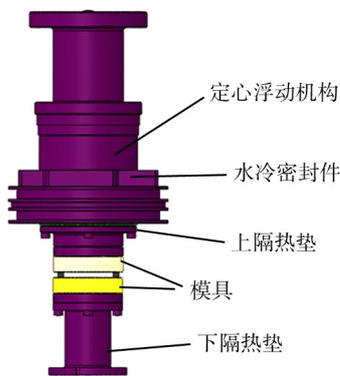


图6 加热系统内部零部件
Fig.6 Internal parts of heating system

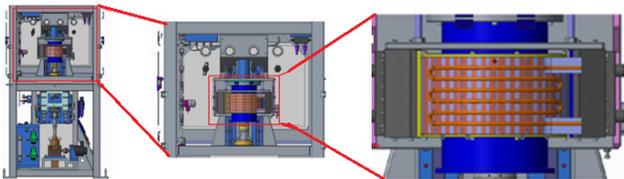


图7 玻璃精密模压设备加热系统装配
Fig.7 Assembly diagram of heating system of glass precision molding machine

2 热传递分析模型

热传导加热通常是通过发热体产生高温,再由发热体将能量传递至玻璃坯料,从而使玻璃受热。热对流是由于流体的宏观运动而引起的流体各部分之间发生相对位移,冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。低温气体由外界驱使通过高温发热体后,变成高温气体,该高温气体再接触到低温物体时,能把热量传递至低温物体^[12-14]。

$$K \frac{\partial T}{\partial t} = h_m(T - T_m) \quad (1)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial t} = h_a(T - T_\infty) \quad (2)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T \quad (3)$$

式中: K 为玻璃的热导率; h_m 为玻璃与模具间的传热系数; h_a 为氮气热对流系数; T_m 为模具的温度; ρ 为玻璃密度; c 为玻璃比热容; ∇^2 为拉普拉斯算子。

根据辐射传热理论^[15],物体的辐射力主要和物体的温度有关,红外发热管有良好的热惯性,在空间各个方向上的辐射强度认为是相等的。

$$Q_1 = \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} (E_{b1} - J_1) A_1 \quad (4)$$

$$J_1 = \varepsilon \sigma T_1^4 + (1 - \varepsilon_1) \sum_{i=1}^n J_i \varphi_{1,i} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n \varphi_{i,j} = 1 \quad (6)$$

$$h_R = \sigma \varepsilon_1 (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad (7)$$

式中: ε 为热辐射吸收系数; σ 为辐射常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A 为辐射面积。加热系统模型中的材料物理参数见表1,各参数将用于热力学仿真,从而得到不同材料零件加热后的温度分布情况。

表1 模型中材料的物理参数
Tab.1 Physical parameters of the material

材料	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^\circ$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)	热导系数/ ($\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{C}^{-1}$)	发射率
金	132.3	19 320	30.1	0.15
不锈钢	163.3	8030	12.1	0.22
碳化钨	314	14 650	38	0.8
玻璃	1100	2550	1.126	0.94
铜	380	7400	56	0.4
橡胶	1900	1230	2.5	0.7
钛合金	545	4820	6.9	0.3

3 数值仿真与实验分析

加热系统结构总体呈轴对称,为了快速得到仿真结果,仿真模型采用二维轴对称热传递模型。未改进前的模型见图8,模型中有4处需要密封处理,其中

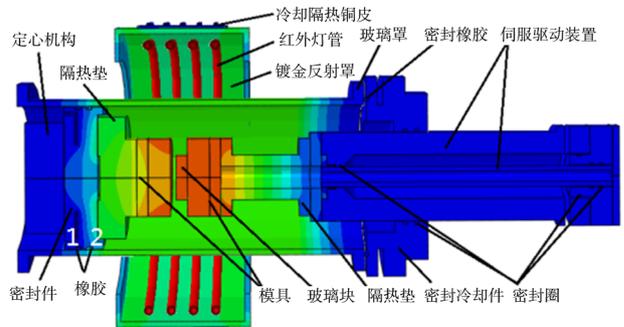


图8 未改进前仿真模型

Fig.8 The simulation model of no improvement
密封处利用水冷降温。1—2 处为动密封橡胶,可能存在破坏的危险。为了降低加工精度的同时保证模压

机的同轴度，采用了定心浮动机构，其工作温度要求在 100 °C 以下，在密封件处进行水冷处理，作用是隔热和冷却橡胶，保证机器正常工作。

该模型在功率 4.8 kW 加热 2000 s 后的温度分布见图 9，加热装置中一根红外灯管加热的最大功率为

1.5 kW，通过 PID 调节控制温度升降。随着加热时间的增加，中心坯料处温度随之上升。480 s 时中心坯料温度为 420 °C 左右，由于施加功率载荷相对较低，同时采用了水冷，中心坯料处的升温速率逐渐缓慢，升至 550 °C 左右时基本停止增长。

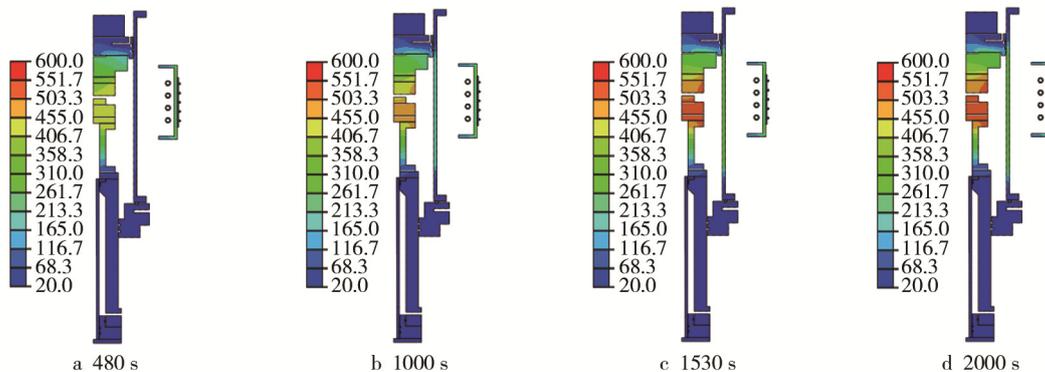


图 9 未改进前使用 4.8 kW 功率 2000 s 内的温度分布(°C)

Fig.9 The temperature distributions of 4.8kW heating power within 2000 s before no improvement

加热系统内零部件的局部温度见图 10，此时中心坯料处温度为 527 °C，升温速率较慢。当中心坯料温度升至 550 °C 左右，动密封处橡胶的温度变化曲线见图 11，动密封 1 处的温度达到了 170 °C 左右，动密封 2 处达到了 100 °C 左右，橡胶圈处于正常工作温度。

为了验证动密封 1, 2 处的热稳定性能以及红外加热系统的加热速率，将加热系统中 8 根灯管全开，以 83.3% 的功率(10 kW)进行仿真分析。功率 10 kW 时加热 2000 s 后的温度分布见图 12，经过 513 s 中心温度快速升至 700 °C 左右，当加热 1014 s 时，中心温度为 762 °C，升温速率开始下降，1414 s 时，中心温度在 800 °C 左右。此时由于中心温度太高，密封圈存在被破坏的危险。其中与玻璃罩接触的动密封 1, 2 危险性最大。10 kW 下加热系统局部温度见图 13，虽然玻璃罩没有直接吸收红外光，但是由于热对流和热辐射，玻璃罩温度也到达了 300~350 °C 的高温，与玻璃罩接触的橡胶圈温度变化见图 14，动密封圈 1 处橡胶温度高达 260 °C 左右，此时密封圈已经被破坏，严重影响热密封性能。由于水冷作用，浮动定心机构处温度还在 100 °C 以下，可保证对心精度。下模驱动装置是由几个零件装配组合成的，共有 4 处需要进行密封，如图 8 所示，为了保护密封圈正常工作，4 处密封圈都进行了水冷，密封处温度在 30 °C 左右。为了操作安全，对加热辐射罩也进行了局部水冷处理，水冷处温度在 30 °C 左右，但是远离水冷处温度较高，最高局部温度达到 200 °C 左右。如果采用玻璃精密模压成形装置模压成形的玻璃温度在 550 °C 左右，未改进的成形装置依然可以正常工作。当玻璃精密模压成形装置处于最高温度 800 °C 时，密封圈则存在破坏的危险，因而有必要对加热系统进行改进。

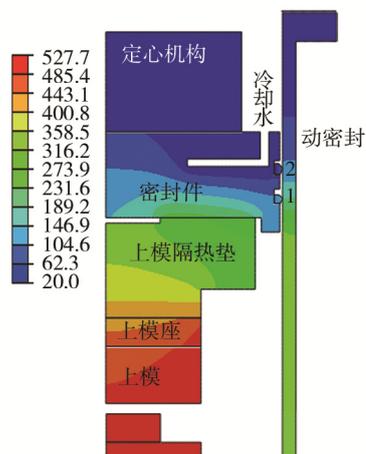


图 10 局部温度(°C)

Fig.10 Local temperature distribution of heating system

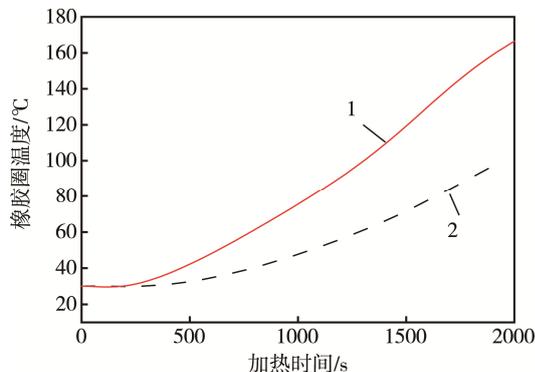


图 11 动密封处橡胶的温度变化曲线

Fig.11 Temperature change of seal rubbers

对未改进前的玻璃精密模压成形装置加热系统外部零件进行温度测试实验，分别使用接触热电偶和红外测温仪对加热系统外部温度进行测量。测量点见图 15，此时加热系统使用的功率在 4.8 kW 左右，模具内部热电偶显示温度为 550 °C。对不同位置温度进行测量提取，不同部位温度数据见表 2，由于测量误

差, 红外测温仪和热电偶测量的温度有区别, 尤其是红外测温仪, 不同材料设置的参数一样, 存在一定的温度误差。从表 2 可以看出, 当红外加热系统中心模

具处温度为 550 °C 时, 水冷效果明显, 此时的密封圈都处于正常工作温度范围内。

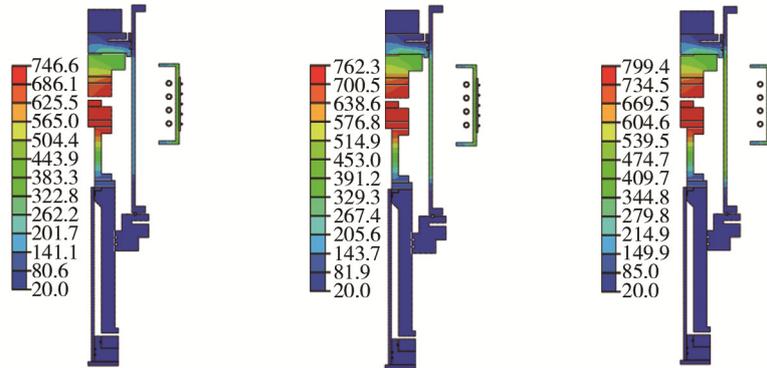


图 12 未优化前 10 kW 功率 2000 s 内的温度分布(°C)

Fig.12 The temperature distributions of 10 kW heating power within 2000 s before no improvement

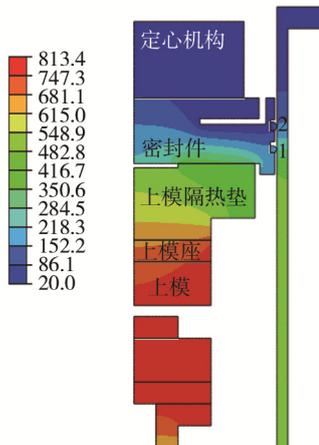


图 13 10 kW 下局部温度(°C)

Fig.13 Local temperature under 10 kW

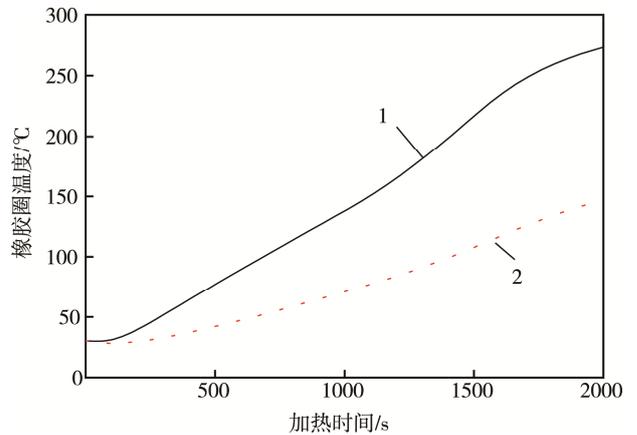


图 14 动密封处橡胶的温度变化

Fig.14 Temperature change of seal rubbers

表 2 不同部位温度

Tab.2 The temperature measurement of different points

°C

测量位置	1玻璃罩 固定部件	2上动密封 圈玻璃罩	3下动密封 圈玻璃罩	4加热罩 上端部	5隔热冷 却铜皮	6玻璃罩 下端部	7下端密封 冷却密封件
热电偶测量温度	40	146	200	98	30	223	34
红外测温仪测量温度	42	153	195	113	28	278	32

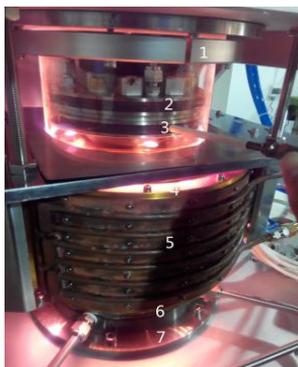


图 15 测量温度点

Fig.15 The temperature measurement points

4 改进设计分析

未改进前的玻璃精密模压成形装置在 800 °C 工作时, 密封圈 1 处存在破坏的危险。为了提高光学玻璃成形机的性能并保证密封效果, 对玻璃精密模压成形装置的加热系统进行改进。优化后温度场分布见图 16, 优化后密封圈装配见图 17, 对动密封件进行了冷却, 避免玻璃与密封圈接触过大, 在玻璃罩上端部分也进行水冷处理, 有效降低玻璃罩的温度。同时, 减小上模隔热垫与密封件的接触面积, 减小热传导面积。当玻璃精密模压成形装置加热系

统以 10 kW 的功率加热 2000 s 时，密封圈处橡胶温度变化见图 18，最高温度在 150 °C 左右，处于安全工作范围。改进后的设计满足要求，提高了加热系统的性能。对 BK7 玻璃模压成形温度场进行仿真，其温度分布见图 19，改进后的玻璃精密模压成形装置共有 5 处位置需要水冷处理，实验和仿真证明，密封圈在正常工作范围内。

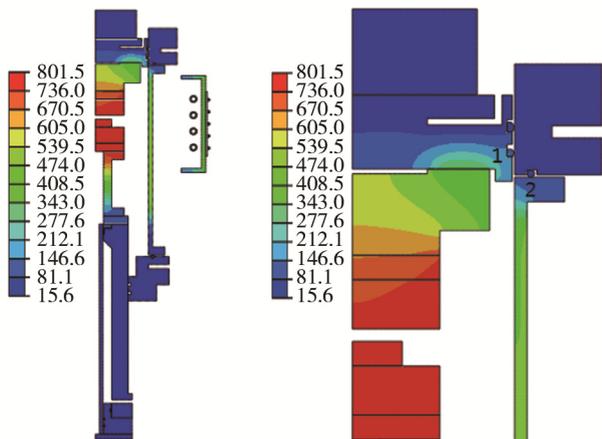


图 16 优化后温度场分布(°C)
Fig.16 Temperature distributions after improvement

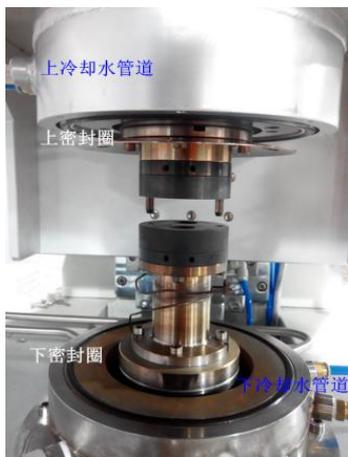


图 17 优化后密封圈装配
Fig.17 Seal ring assembly after improvement

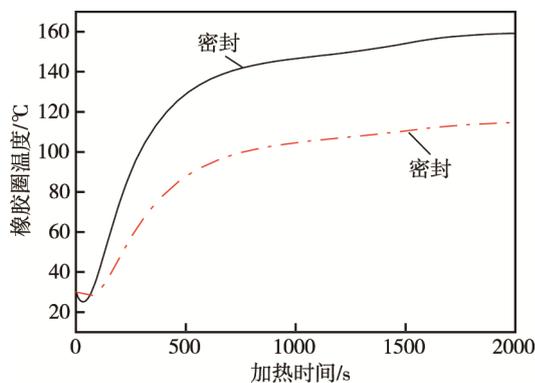


图 18 动密封处橡胶的温度变化
Fig.18 Temperature change of seal rubbers

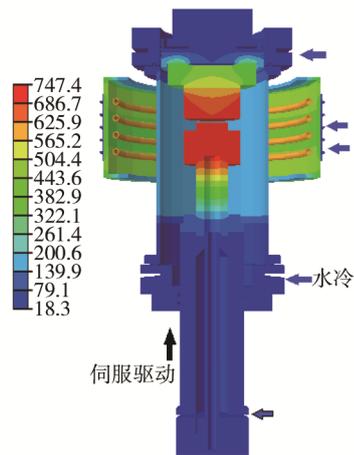


图 19 BK7 玻璃模压成形温度分布(°C)
Fig.19 Temperature distribution of BK7 glass molding

5 结论

1) 玻璃精密模压成形装置以 4.8 kW 功率快速升至 550 °C 时，橡胶圈在正常工作范围内，但随着加热时间的增加，由于玻璃罩会吸收少量的红外能量，造成局部温度过高，密封圈处于临界温度。

2) 未进行改进前，当玻璃精密成形设备加热至最高温度 800 °C 时，橡胶圈被破坏。

3) 由于上模密封结构离冷却水处较近，所以当温度升至一定温度后，温升速率会慢很多。为了提高加热效率，减小上模垫与冷却密封的接触面积可以很好地提高热效率。

4) 对密封处进行优化改良后，橡胶圈在安全工作范围内。通过机械泵和分子泵的共同作用下，模压腔内的真空度可达到 1 Pa 以下。

参考文献：

- [1] KLOCKE F, DAMBON O, YI A Y, et al. Process Chain for the Replication of Complex Optical Glass Components[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 119—132.
- [2] FIRESTONE G C, YI A Y. Precision Compression Molding of Glass Microlenses and Microlens Arrays an Experimental Study[J]. Applied Optics, 2005, 44(29): 6115—6122.
- [3] ZHOU T, YAN J, MASUDA J, et al. Investigation on Shape Transferability in Ultraprecision Glass Molding Press for Microgrooves[J]. Precision Engineering, 2011, 35(2): 214—220.
- [4] HE P, WANG F, LI L, et al. Development of a Low Cost High Precision Fabrication Process for Glass Hybrid Aspherical Diffractive Lenses[J]. Journal of Optics, 2011, 13(8): 85703.
- [5] YI A Y, HUANG C, KLOCKE F, et al. Development of a Compression Molding Process for Three-dimensional

- Tailored Free-Form Glass Optics[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(25): 6511—6518.
- [6] WACHTEL P, MOSADDEGH P, GLEASON B, et al. Performance Evaluation of a Bench-top Precision Glass Molding Machine[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, 2013(2013): 761—776.
- [7] RIESER D, SPIEB G, MANNS P. Investigations on Glass-to-mold Sticking in the Hot Forming Process[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(12): 1393—1397.
- [8] 吴琼, 索双富, 刘向锋, 等. 丁腈橡胶 O 形圈的静密封及微动密封特性[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(11): 5—11.
WU Qiong, SUO Shuang-fu, LIU Xiang-feng, et al. Static Sealing and Pseudo-sealing Characteristics[J]. *Lubrication Engineering*, 2012, 37(11): 5—11
- [9] 吴琼, 索双富, 廖传军, 等. 丁腈橡胶 O 形圈往复密封性能实验研究[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(2): 29—33.
WU Qiong, SUO Shuang-fu, LIAO Chuan-jun, et al. Experimental Study of Reciprocating Sealing Performance of Nitrile Rubber O-ring[J]. *Lubrication Engineering*, 2012, 37(2): 29—33.
- [10] 胡殿印, 王荣桥, 任全彬, 等. 橡胶 O 形圈密封结构的有限元分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(2): 255—260.
- HU Dian-yin, WANG Rong-qiao, REN Quan-bin, et al. Finite Element Analysis of O-ring Seal Structure[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(2): 255—260.
- [11] 湛彪, 张赞牢, 杨建勇, 等. 静密封条件下 Y 形橡胶密封圈有限元分析[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(3): 72—75.
CHEN Biao, ZHANG Zan-lao, YANG Jian-yong, et al. Finite Element Analysis on Rubber Sealing Y-ring in the Condition of Static Seal[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(3): 72—75.
- [12] COLEMAN B D, MIZEL V J. Thermodynamics and Departures from Fourier's Law of Heat Conduction[J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1963, 13(1): 245—261.
- [13] LEPRI S, LIVI R, POLITI A. Thermal Conduction in Classical Low-dimensional Lattices[J]. *Physics Reports*, 2001, 377(1): 1—80.
- [14] BONETTO F, LEBOWITZ J L, REYBELLET L. Fourier's Law: a Challenge for Theorists[J]. *Physics*, 2000: 374—379.
- [15] SIEGEL R, HOWELL J R. *Thermal Radiation Heat Transfer*[J]. 2011.