

文章编号 1004-924X(2018)06-1380-12

玻璃精密模压成形的研究进展

龚 峰*, 李康森, 闫 超

(深圳大学 机电与控制工程学院 广东省微纳光机电工程技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 玻璃精密模压成形是一种高效率、绿色环保的先进光学元件制造技术, 近年来得到了飞速发展。本文首先介绍了光学元件的需求与种类, 提出玻璃精密模压成形技术存在的问题。综述了国内外近年来精密模压成形光学透镜的重要研究进展, 其中包括光学玻璃材料、模具材料与涂层、模具加工、模压过程仿真以及各种参数对透镜质量的影响。阐述了光学模压成形元件的坯料、镀膜技术和冷加工技术、成形元件的残余应力分布以及折射率、模具与玻璃间摩擦效应、模具的补偿技术、成形透镜质量的预测、模压技术的其他应用等。最后, 对未来光学玻璃精密模压成形趋势进行了预测。

关键词: 玻璃精密模压成形; 模具; 模拟仿真; 光学玻璃

中图分类号: TB133 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1380

Progress on precision glass molding

GONG Feng*, LI Kang-sen, YAN Chao

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Micro/Nano Optomechatronics Engineering,
College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding author, E-mail: gongfeng186@163.com

Abstract: Precision glass molding is a high-efficiency and green optical component manufacturing technology that has seen rapid development in recent years. First, the types of optical components and their demand were discussed, and the problem associated with glass precision molding technology was described. Then, research and development of molded optical components in recent years were reviewed. This research included studies of optical glass materials, a constitutive model of glass material, mold materials, coatings, ultraprecision machining, numerical simulation, and the influence of various parameters on the quality of a molded lens. This research also covers technology for the precision molding of optical components, cold-machining technology, coating technology for molds, stress distribution and refractive index of molded components, friction between molds and glass, mold compensation, molded-lens quality prediction, and applications of molding technology. Finally, the future development of precision glass molding was predicted.

Key words: precision glass molding; mold; simulation; optical glass

收稿日期: 2017-09-25; 修订日期: 2017-11-06.

基金项目: 深港创新圈联合研发项目 (No. SGLH20150213170331329)

1 引言

光学元件是实现光学功能的桥梁,在国防、民用和科研上发挥着重要作用,如卫星监控系统、红外夜视成像、激光辐射、光纤通信等技术上都采用了各式各样的光学元件。近几年,全球的光学元件市场年均增长率保持在20%以上,达到了上百亿美元的规模。光学元件的应用极其广泛,几乎涉足了当今人类生活的所有领域,如照相机、变焦镜头、投影仪、红外光角地平仪、光驱、内窥镜、渐进镜片、显微镜等。这些仪器不仅要成像质量好,而且要求小型化、结构简单、适宜各种环境,对光学元件的物理化学性能、口径、加工精度、加工效率、成本等方面提出了更高要求。玻璃精密模压成形技术克服了传统精密磨削、超精密车削、磁流变复合抛光^[1-2]等精密加工技术在成本、加工效率、批量化生产等方面的缺陷以及树脂注塑成型透镜在折射率、热稳定等性能的不足,具有高精度、低成本、高效率、大批量、净成形、无污染等优点。

目前,掌握玻璃精密模压成形技术的有 Corning、Nikon、Hoya、Ohara、Panasonic、Zeiss、Philips 等知名企业。采用该技术可以制造出直径为100 μm 的微形透镜阵列,批量加工出直径为2~60 mm,厚度为0.4~25 mm,公差为±0.01 mm,曲率半径可达5 mm,表面粗糙度可达10 nm 以下,折射率控制在 $\pm 5 \times 10^{-4}$,双折射小于0.01λ/cm 的非球面光学元件。虽然该成形技术具有净成形、高效率、对环境友好等优势,但同样存在诸多挑战,一是在成形过程中玻璃和模具间出现黏附力及摩擦力,玻璃的流动成形性能变差,导致透镜质量降低;二是在退火冷却过程中,玻璃元件的尺寸收缩、轮廓偏差、折射率变化和残余应力同样影响成形件的光学性能;三是由于高温效应、流动摩擦特性以及脱模力等因素,模具涂层寿命受到很大的影响。为了克服这些困难,仍需要对模压成形技术进行深入研究。

美国俄亥俄州立大学的 Yi 团队^[3]较早地进行了精密模压成形的实验和仿真工作,对玻璃材料的应力松弛和结构松弛等特征参数、残余应力、折射率变化、形状偏差等问题展开了深入研究。美国克莱姆森大学的 Ananthasayanam 等^[4]也对玻璃材料的特征参数、摩擦系数、模压设备、形貌

偏差、工艺参数等进行了研究。日本的东北大学、群馬大学、信州大学在光学玻璃元件的热压微成形^[5]上也有相应的研究。丹麦科技大学 Sarhadi 等^[6]对模压成形过程中的温度场分布、摩擦系数、阵列透镜等进行了深入研究。德国 Fraunhofer 研究所^[7]对模压成形的模具加工和涂层、粘黏力、非等温成形等方面做了相关研究。中国台湾国立交通大学、国立清华大学在模压过程仿真^[8]、模压技术应用^[9]、模具涂层^[10]等方面开展了相关研究。湖南大学尹韶辉课题组对模压成形过程仿真^[11]、模具加工^[12]等方面也进行了研究。中国科技大学沈连娟课题组对透镜折射率变化、残余应力、模压仿真、摩擦系数、形貌偏差等^[13-14]方面展开了研究。浙江理工大学、苏州大学、长春理工大学、北京理工大学等高校相继展开了模压成形实验与仿真^[15]的相关研究。

本文主要阐明了玻璃精密模压成形研究的背景及意义,介绍了光学元件的先进制造技术,分析了光学玻璃精密模压成形技术的优点以及存在的挑战,并对国内外研究现状进行了总结,包括玻璃材料、模压过程仿真研究、模压成形透镜的残余应力、折射率变化、形貌偏差、玻璃与模具间摩擦机理研究以及模具加工和涂层研究等,最后探讨了玻璃精密模压成形未来的发展趋势。

2 用于精密模压的玻璃材料

2.1 玻璃材料

光学玻璃成分主要包括 SiO₂、BaO、CaO、K₂O、Na₂O、ZrO₂、ZnO、Sb₂O₃、SO₃、Cr₂O₃ 等氧化物^[16],其中含量最高的是 SiO₂,但随着各族氧化物成分比的不同,玻璃的光学性能、机械性能、热学性能都有较大的差异^[17]。

玻璃材料可分为低熔点玻璃、高透光玻璃、硫系玻璃和石英玻璃等^[18]。玻璃透镜质量的评价指标有折射率和阿贝数与标准的允许偏差、光学均匀性、应力双折射、条纹度、气泡度等。玻璃材料成分不同其物理特性有很大差别,用于精密模压成形的玻璃材料一般要有如下特点:较好的折射率和阿贝数;转变点温度较低;化学稳定性要好,具有耐酸、耐水等能力;抗热炸性能好,防止模压过程中温度变化幅度大,玻璃热膨胀系数过大而破损。目前,日本和德国在光学玻璃材料的研

究上较为成熟,其中肖特(SCHOTT)、豪雅(HOYA)、住田(SUMITRA)、小原(OHARA)等处于领先地位。肖特生产的玻璃样品如图 1 和图 2 所示。中国成都光明和湖北新华光信息材料股份公司虽然起步较晚,但在光学玻璃材料上也取得了较大进展。现在广泛用于精密模压的玻璃牌号有 P-SK57、L-BAL35、D-ZK3 等玻璃材料,一些高校机构也将 As-Se 等牌号的硫系玻璃用于精密模压成形的研究。



图 1 光学玻璃材料

Fig. 1 Optical glass material



图 2 模压成形的非球面透镜

Fig. 2 Molded aspherical lens

在进行模压成形之前,需要制备用于模压的玻璃毛坯样品。样品一般是经过冷加工(切割、研磨、抛光等)的球状型料、圆柱型料、椭球状型料,或者熔融的滴料。模压成形的样品需要有光洁的表面、小的粗糙度和精确的体积。

2.2 玻璃材料热力学模型

玻璃材料特性对温度有很大的依赖性,玻璃在高温条件下呈黏弹性^[19-20],玻璃材料特性长期以来一直是研究的重点,玻璃材料高温条件下的力学特性主要表现为应力松弛和结构松弛两个方面。Narayanaswamy^[21]根据玻璃内部的结构变

化滞后于外部温度变化,建立了 TNM 模型,常用于表征玻璃材料的结构松弛特性。Jain 和 Yi^[22-23]在玻璃转化温度区域通过玻璃圆柱压缩实验得到玻璃的高温黏弹性特征参数,使用布里渊光散射技术测量出玻璃高温下的弹性模量,并将数据输入到数值模拟中。Zhou 等^[24-25]分别用 Maxwell、Kelvin、Burgers 3 个黏弹性模型进行模拟仿真与实验分析,并得到应力松弛模量和黏弹性参数。接着,通过模拟与实验的方法对硫系玻璃 $Ge_{22}Se_{22}As_{20}$ 的黏弹性模型以及热力学性能进行了深入研究。Ananthasayanam 等^[26]根据 TRS 模型以及 TNM 结构松弛模型通过模压实验得到 LBAL-35 的应力松弛参数以及结构松弛参数。Sarhadi 等^[27]利用玻璃圆环压缩实验通过参数迭代来拟合实验和仿真中的蠕变位移曲线,得到了 LBAL-42 的应力松弛参数。同样利用压缩实验,Zhou 等^[28]修正了摩擦行为对计算的影响,推算出了 As_2S_3 在转变区间的应力松弛参数。

在一定的温度区间,黏度为 $10^{13} \sim 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 可以用 Arrhenius 公式^[29]表达:

$$\eta = A_{\eta} \exp(E_{\eta}/RT), \quad (1)$$

其中: A_{η} 为常数, H_{η}/R 为活化能与气体常数之比。

当温度很高时,玻璃材料为流体状态,可用 VFT 公式表示其黏度曲线:

$$\ln \eta = A_{\text{VFT}} + \frac{B_{\text{VFT}}}{T - T_0}, \quad (2)$$

其中 A_{VFT} , B_{VFT} , T_0 都是拟合系数, T_0 一般低于玻璃转化点温度。

其剪切应力表达式为:

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\tau) \frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} d\tau + G(t)\epsilon(0). \quad (3)$$

黏弹性的力学特性随温度变化,不同温度下的应力松弛^[26]特性可以用 TRS 模型表达,可用 WLF 公式表示:

$$\log \left(\frac{t}{\tau_{\text{ref}}} \right) = \frac{-C_1(T - T_{\text{ref}})}{C_2 + (T - T_{\text{ref}})}, \quad (4)$$

其中: T_{ref} 为参考温度, C_1 , C_2 为拟合系数。

当玻璃在转化区间内平衡状态,温度突然从 T_1 降到 T_2 ,其体积松弛^[30]函数如下:

$$M_v(t) = \frac{T_1(t) - T_2}{T_1 - T_2}, \quad (5)$$

其中 T_i 为假想温度。利用 TNM 模型表示结构松弛^[21]有:

$$\tau_v = \tau_{v,ref} \exp \left\{ -\frac{\Delta H}{R} \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{x}{T} - \frac{1-x}{T_f} \right] \right\}, \quad (6)$$

其中: $\tau_{v,ref}$ 是参考温度下的结构松弛时间, x 为非线性常数, $\Delta H/R$ 是材料活化能与气体常数之比。

3 模具与涂层

3.1 模具材料

模压成形的光学元件是在高温高精度的模具中复制成形,对模具材料性能要求非常高。用于精密模压的模具材料要有良好的耐高温性能、耐磨性和化学稳定性,具有很高的硬度和弹性模量,较小的热膨胀系数,优良的热导性能,不易与玻璃产生反应或发生粘黏,常温下与黏结剂的相互溶解要小,能够研磨成光滑无气孔的光学表面^[31]。目前,广泛用于玻璃精密模压的材料主要为碳化钨(WC),也有少部分使用 SiC、Si₃N₄ 等模具材料。WC 硬质合金主要由碳化钨,以钴、镍等金属为黏结剂在 1 400 °C 高温下于氢气中烧结而成,其耐磨性和耐高温性非常优异。Zhou 等^[32]在成形玻璃微槽成形采用了化学沉积 Ni-P 作为模具材料, Ni-P 材料具有良好的机加工性能。

3.2 模具涂层

为了改良模具表面的性能,提高模具的使用寿命以及光学元件的表面质量,不少学者对涂层材料及其磨损机理展开了研究。

Rieser 等^[33]对热成形过程中不同类型玻璃与模具之间的黏性做了实验研究,通过无涂层与 Cr、TiAlN、AlN 涂层对比实验得到, Cr 等涂层能够有效地减低黏结效应。Lin^[10]等在 WC 模具上做 CrWN 涂层(如图 3 所示),分析发现在碳化钨模具上涂 CrWN 可以提高模具的硬度和降低表面粗糙度。Chang^[34]等对 NiP、CrN、NiP/CrN 多层膜和 NiP/CrN 混合涂层进行了表征,实验得到 CrN 单层膜和 NiP/CrN 多层膜抗氧化性、抗黏性等性能较优异,更适于磷酸盐玻璃的模压成形。Chen^[35]等对 Cr-W-N 涂层进行了模压分析,结果表明 Cr₃₇W₃₁N₃₂和 Cr₂₄W₄₆N₃₀在进行 1 000 次以上的热压实验后仍然保持优异的机械性能和很低的表面粗糙度,而 Cr₈W₆₉N₂₃和 Cr₄W₈₂N₁₄性能不太理想。Chao 等^[36]在对模具镀贵金属保护膜

实验研究中发现,高温下钴元素会扩散到模具涂层中,从而引发玻璃与保护涂层间产生反应, WC 中 Co 含量越高反应越明显, Pt/Ir 混合涂层比 Pt/Ir 叠加涂层的抗黏性能更好。Zhu 等^[37]对 Re-Ir 做单层涂层和多层涂层的对比实验中发现, Re 和 Ir 的单层涂层的抗黏性和硬度等性能都优于 Re/Ir 叠加的多层涂层,如图 4 所示。Sakurai 等^[38]利用旋转式喷射装置(L-350S-C, Canon ANERVA)制作 6 组镀 Pt-Zr-Ni 薄膜合金模具,通过测试其抗黏性、再结晶温度、机加工性能、线性膨胀系数等性能,结果发现 Pt₅₀Zr₃₆Ni₁₄ 最适合做模具涂层材料。Franhofer-IDT 研究所 Kleer^[39]使用了陶瓷硬质合金、氮化物、氧化铝叠加成多层膜镀在模具表层,有效降低了模压成形时模具的磨损。Klocke 等^[40-41]为了研制出经济性、可延长模具寿命的涂层,在型号为 CTN01L 的碳化钨模具上镀了 CrN、TiAlN、PtIr 三种不同涂层,并在不同温度下进行比较,得到 PtIr 比其他两种涂层的抗氧化性更好,且在 700 °C 以上依然没有影响,抗粘黏性也较好。然后,对退火时贵金属 PVD 涂层与热压玻璃接触区域的磨损机理进行了实验研究(如图 5 所示)。在经过几百次模压实验后,利用 SEM/EDX 检测发现, Ni 薄膜会扩散出去然后被氧化, W、Co 内部氧化同时逸出气体,贵金属 PtIr 涂层慢慢局部碎裂,接着涂层与 WC 模具的黏结性降低,涂层出现脱落,最后 WC 模具产生磨损。

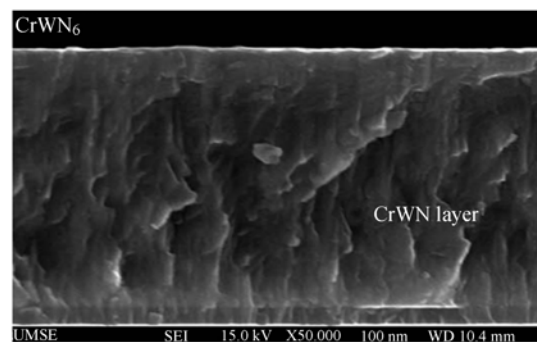


图 3 CrWN₆ 涂层^[10]

Fig. 3 CrWN₆ coatings

3.3 模具加工

模具光学曲面加工技术主要有单点金刚石车削、超精密磨削、超精密研磨抛光、微细电火花、高精度超光滑斜轴镜面磨削、斜轴磁性复合流体抛光等^[42]。

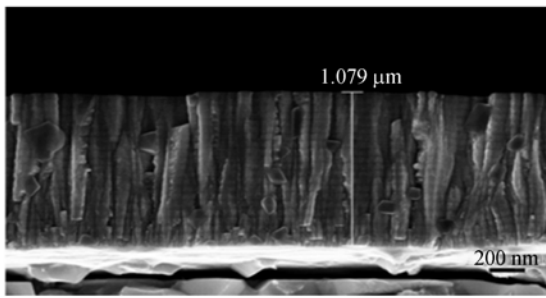


图 4 Re/Ir 多层膜 SEM 截面图^[37]

Fig. 4 SEM image of cross-section of Re/Ir multilayer coating

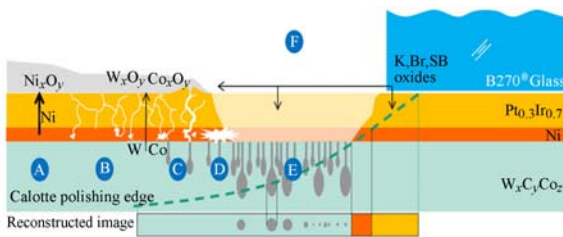
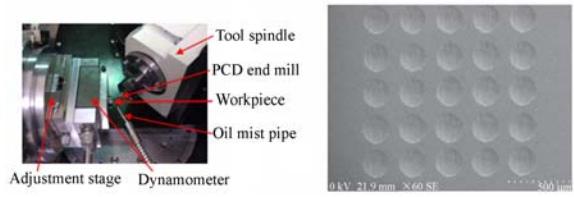


图 5 涂层磨损机理分析图^[40]

Fig. 5 Degradation model for PtIr-Ni coatings

Yan 等^[43-45]利用单点金刚石车床微细切削镀 Ni-P 模具材料,切削材料的边缘流动使微槽产生飞边,刀具上残留切削材料引起模具温度的升高和切削力的增大,最后成形的微槽结构加工误差在 1~10 μm 内。同样利用单点金刚石车削技术车削 RB-SiC 模具,在 72 μm/rev 大进给速度下,模具的表面粗糙度可以达到 23 nm。Zhang 等^[46]利用多晶体金刚石端铣刀加工非球面微电极(如图 6 所示),采用微细电火花技术加工的 WC 模具的表面粗糙度为 2 nm,直径为 401.2 μm,与设计值 400 μm 非常接近,可实现阵列透镜的加工成形。He 等^[47]利用单点金刚石车床对 Si 模具进行光学曲面微加工,然后采用 CVD 方法在模具表面镀类金刚石薄膜,这种方法相比 WC 磨削更灵活、更快,成本更低。Yi 等^[48]利用配备 4 个独立轴的超精密金刚石机床在低伺服进给速度下加工了 5×5 的阵列透镜,其表面达到光学表面,面形精度也非常高。尹韶辉等^[12]利用超精密平行磨削技术结合形状误差补偿技术对直径为 10 mm 的 WC 模具进行加工,获得的表面粗糙度为 5.98 nm,形状精度峰谷为 113 nm,均方根值为 23 nm。



(a)超精密磨削机床 (b)阵列微凹模^[46]
 (a) Experimental setups for micro end milling (b) SEM micrographs of machined micro-dimple array

图 6 多晶体金刚石端铣刀加工非球面微电极

Fig. 6 Aspherical microdimple fabricated by polycrystalline diamond tools

4 透镜成形过程研究

玻璃透镜模压成形主要包括:加热和保温、热压、冷却、脱模这几个阶段,如图 7 所示。首先把模压室里的空气抽空,充入少量氮气防氧化,接着用红外加热装置将玻璃毛坯和模具加热到模压温度,恒温一段时间让玻璃受热均匀,然后施加压力合模,将玻璃模压成形,保持压力一段时间,充入氮气慢速冷却,降低一定温度,快速冷却,最后脱模取样。

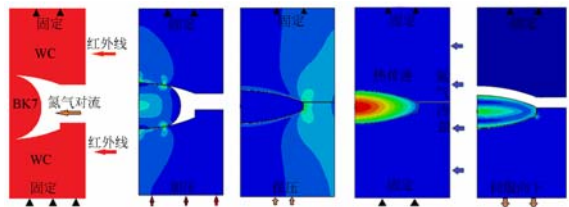


图 7 玻璃模压成形过程
 Fig. 7 Process of glass molding

建立精确的模压仿真模型,对模压过程中各种工艺参数进行分析比较,用于预测模压透镜的质量和指导实际模压实验。近年来,国内外学者展开了一系列的仿真研究工作,主要包括加热阶段传热模型、热压过程热-位移耦合模型、预测模压成型透镜的质量以及玻璃与模具接触摩擦模型。

4.1 模压成形过程残余应力研究

残余应力是影响模压成形透镜的光学性能以及使用寿命的关键因素之一。Yi 等^[49-50]通过实验和仿真研究了不同冷却速率下玻璃内部的残余

应力分布,并利用双折射方法辅助有限元仿真,结果表明实验和仿真较为吻合,并得到冷却过程中温度梯度差越大,残余应力越大,玻璃透镜中的残余应力对光学性能有很大的影响。Tao等^[51-52]通过圆偏光器以及Mach-Zehnder干涉仪分别测量退火前后的残余应力和折射率偏差,并采用有限元方法计算圆柱透镜以及非球面透镜中的残余应力,实验与仿真可知退火工艺可以改善玻璃的光学性能。Sarhadi等^[53]利用三维有限元模型模拟了晶片级微透镜阵列的成形过程,全面考虑了玻璃的应力松弛和结构特性进行了圆环压缩实验,分析了冷却速率和热压温度对晶片残余应力的影响。尹韶辉等^[54-55]采用MSC.MARC软件对非球面透镜模压成形进行了数值分析,得到模压温度越高残余应力越小,玻璃内部的平均残余应力随着模压速率的增大而增大,模压后的残余应力分布为中心小边缘大,退火速度增加,退火应力不断增加。玻璃透镜内部出现残余应力是不可避免的,当前的研究重点是如何减小残余应力对透镜质量的影响,如何利用玻璃透镜内部的残余应力去改变透镜光学性能还有待进一步研究。

4.2 模压成形过程尺寸偏差研究

在冷却过程中,玻璃内部不单产生残余应力,还出现尺寸收缩现象,这对透镜的尺寸精度有较大影响。Jain和Yi等^[30,56]在没有考虑应力松弛及结构特性的情况下,仿真了非球面的形貌偏差,加工直径为25 mm,最大形貌偏差约为5 μm ,实验与仿真吻合得较好。接着,计算了结构松弛对冷却过程中玻璃透镜体积和形貌偏差变化的影响,验证了结构松弛对仿真的重要性,并且得到不同冷却速率对形貌偏差的影响不大。Zhou等^[57]分析脱模温度、冷却速率和保压力对形貌偏差的影响,并研究了透镜和模具的形貌偏差以及它们之间的关系。Su等^[58]提出了一种综合考虑形貌偏差和折射率变化的模具补偿算法,利用有限元方法辅助补偿程序去修正几何偏差以及折射率变化,有效地提高了光学透镜的光学质量。Mahajan等^[59]运用迭代方法很大程度优化透镜表面结构,经过四次迭代后,可以将等温模压中的非球面偏差从5.7 μm 降到0.02 μm ,非等温模压从2.2 μm 减到0.04 μm 。如何利用形貌偏差规律指导模具修正加工从而达到光学精度要求是模压工艺比较重要的一环。

4.3 模压成形过程中折射率偏差研究

光学透镜的折射率是模压成形工艺的研究重点之一。Su等^[60-61]利用有限元分析不同冷却速率下透镜内部的折射率变化,并利用Shack-Hartmann波前探测器的测量结果与仿真进行对比,验证有限元仿真的可行性,得到折射率变化的分布情况以及冷却速率与折射率变化的关系。根据密度指数关系研究了冷却阶段热膨胀系数对折射率变化的影响,指出不同温度热膨胀系数的精确度对准确预测折射率变化的重要性。Tarkes等^[62-63]利用CFD建立玻璃模压 N_2 冷却阶段的数值模型,得到了模具及玻璃退火温度场变化图,利用PST技术测量了玻璃的残余双折射率,并仿真得到透镜的残余双折射率分布图。接着,利用数字光弹性测量了成形冷却后的P-SK7透镜。Zhao等^[13,64]利用CT技术获取透镜的三维折射率场分布信息,根据FBP算法重建了透镜的折射率场,得到透镜的三维折射率场分布。随后,研究了影响透镜折射率场偏差的主要因素,得到了折射率场的分布规律。折射率是光学性能的重要指标之一,如何利用折射率场分布规律修正透镜光路设计还有待进一步研究。

4.4 模压成形过程中摩擦系数和脱模的研究

在玻璃透镜成形的过程中,玻璃预形体与模具在高温下接触后模压成形,两者间的摩擦及脱模力对透镜成形有一定的影响。

Sarhadi等^[27]利用玻璃圆环压缩实验得到L-BAL-42的黏弹性数据与不同温度区间的玻璃和模具间的摩擦系数。Mosaddegh等^[65-66]设计了一台用测试玻璃模压摩擦系数的设备(如图8所示),用BK7玻璃做实验时发现在577 $^{\circ}\text{C}$ 就发生了黏滑运动现象。在接近转化温度时,抛光的WC模具与N-BK7接触的摩擦系数大约为0.6,改变玻璃与模具的表面温度可以改变黏弹性和摩擦的反应。Fischbach等^[67]通过实验设计研究了模压过程中各个参数对玻璃与模具间粘黏力的影响,实验表明模压时间、冷却时间、模压力对粘黏力有影响,表面粗糙度和基底则没有影响。Pt-Ir涂层的抗黏性能优于TiAlN涂层。Dukwen等^[68]通过摩擦磨损分析与数值分析对融石英玻璃的模具寿命进行预测,发现接触力和滑动速率决定了碳模具表面的磨损情况。Ikeda等^[69]制造了测试玻璃与模具脱模力的装置(如图9所示),

反复实验表明在转化温度区间内,冷却速率对脱模力的影响非常大,同时模具的杨氏模量对脱模力也有较大影响,杨氏模量较小,脱模力也相应变小。Ananthasayanam 等^[70]通过玻璃圆环模压试验研究了玻璃与模具间的高温摩擦特性,计算得到摩擦系数小于 0.3,并验证了摩擦系数对透镜轮廓的影响较小。

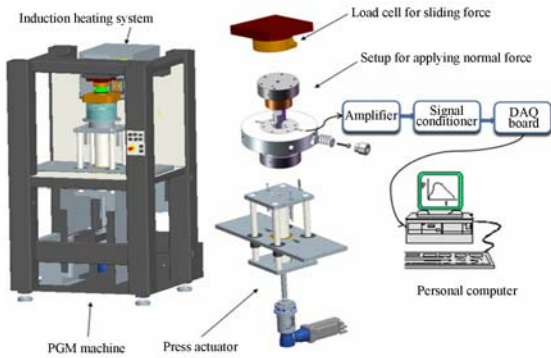


图 8 玻璃与模具间摩擦系数测量设备^[65]

Fig. 8 Apparatus for high temperature friction measurement

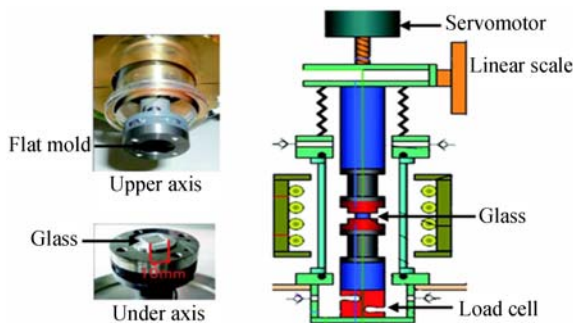


图 9 评估脱模力的设备图^[69]

Fig. 9 Glass molding machine for evaluations of demolding force and demolding point

4.5 模压成形过程非等温成形研究

由于模具在高温条件下急热急冷,模具以及模具涂层容易受损,寿命很短。为了延长模具寿命,提高模压效率,节省能源,非等温模压则显得很有意义。

Zhou 等^[71]采用了非等温模压的方法大大提高了生产效率、延长了模具寿命,但是成形误差相比传统的恒温模压大一点。非等温模压成形透镜的残余应力比等温模压的大。Holger 等^[72-73]利用非等温模压技术压制出了复杂曲面的 LED 玻璃透镜,研究了非等温模压参数对成形精度、双折射率、粗糙度的影响,并对成形过程进行了优化。

5 模压技术的其他应用

模压成形技术结合其他技术可以缩短产品的成本和周期,提高产品的精度与性能,同时大大地扩展了模压技术的应用范围。Li 等^[74]采用局部快速加热的方法对硫系玻璃进行模压,延长了模具的寿命并提升了效率。Xie 等^[75-77]采用超声辅助波热压方法去成形微槽元件,仿真和实验证明超声波能降低玻璃的动态粘黏性,均匀应力分布,提高微槽的精度和表面光滑度,并对微槽表面的形态演变进行了研究。Chen 等^[78]在研制微小透镜阵列上采用以模压和热回流的方法,先用玻璃碳模具将 P-SK57 压制阵列圆柱,接着通过热回流将圆柱变成球面,利用针表面光度仪测得阵列透镜的直径为 $150 \mu\text{m}$,弧形为 $2.89 \mu\text{m}$ 。Huang 等^[79]将玻璃模压技术应用到生物芯片上,实验和仿真得到了最优工艺参数,在 SiC 模具上模压出超精密的玻璃生物芯片。

6 玻璃精密模压成形的发展趋势

玻璃模压成形是一项涉及光学、热力学、物理学、材料科学等多学科交叉的成形技术。未来的研究工作主要集中在设备的改良、模压工艺的优化、高性能模具表面涂层的制备等方面,成形出高精度的光栅、微纳阵列透镜、非球面透镜等光学元件。虽然现有技术存在一些问题,但仍然具有广阔的应用前景。如果一些技术问题能够解决,玻璃模压成形将会得到更大范围的应用。玻璃精密模压成形的未来趋势可总结为以下几个方面:

(1) 较高的玻璃模压温度对模具使用寿命的影响较大,研制新型玻璃材料是玻璃模压成形技术的发展趋势之一。低熔点玻璃材料比较适合模压成形,如小原光学 L-BAL42、肖特 K-PG325、成都光明 D-ZK3 等。因此,未来仍需要研究低熔点玻璃的材料成分配比,以获得更低的熔点和更好的光学性能。此外,硫系玻璃透镜在红外光学系统中占有重大的作用,降低硫系玻璃材料成本有利于红外镜头批量精密模压成形。

(2) 模具涂层对模具的使用寿命和光学元件的精度影响较大,现在应用较广的是贵金属涂层,但是其寿命一般仅为数百次到上千次。研制结合

力强、硬度高的涂层材料是不可或缺的条件之一。利用物理气相沉积或化学气相沉积构筑高结合力、致密均匀、强韧化与耐高温功能一体化涂层,研究玻璃精密模压成形过程中玻璃与模具界面的摩擦特性,减小玻璃与模具界面的摩擦磨损,提高模具的服役寿命是未来精密模压成形的发展趋势之一。

(3) 建立精确的仿真模型对玻璃模压过程进行分析,研究光学坯件在加热阶段的宏观热分布规律;研究光学透镜在模压阶段的宏观形貌复制规律,即模压温度、模压速度、黏度、接触界面滑移对透镜结构成形的影响规律;研究冷却阶段玻璃材料特性转变对热压精确成形的影响规律,即折射率变化、残余应力、轮廓偏差;揭示透镜形貌偏差机理,建立尺寸修正模型,提出合理的缺陷控制方法,利用仿真技术进步一提高精密模压成形质量。

(4) 玻璃模压常用的模具材料为 WC,其硬度高、加工困难、成本高。透镜的精度很大程度是由模具决定的。利用超精密切削技术、研抛技术

对其光学曲面进行精密加工,完成微结构自由曲面等复杂曲面的加工,根据仿真得到的形貌偏差规律对模具光学自由曲面进行误差补偿,也是保证透镜形貌质量的重要一环。

(5) 非等温精密模压技术可以提高模压效率,延长模具寿命,节省能源。因此,非等温精密模压机的研发也是未来的一个发展趋势。非等温模压成形工艺很多方面并不成熟,其工艺的进一步研究也是很有必要的工作。利用不同加热方式如局部加热、感应加热、电阻加热、石墨烯加热等技术,结合光学玻璃精密模压成形设备进行优化改良,能够提高能量的利用率。

(6) 玻璃精密模压成形技术与超声波技术、浇注技术、光刻技术等技术的联合应用,能够增大玻璃透镜的充型率,减小模压力和均匀残余应力分布等,从而提高成形透镜质量。未来更多光学元件将由精密模压成形技术加工完成,如光栅、微小阵列元件、非球面透镜、LED 透镜、3D 手机曲面屏等,可以节省冷加工过程,降低光学元件的加工成本。

参考文献:

- [1] 王慧军,张飞虎,赵航,等. 超声波磁流变复合抛光中几种工艺参数对材料去除率的影响[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1583-1588.
WANG H J, ZHANG F H, ZHAO H, *et al.*. Effect of several processing parameters on material removal ratio in ultrasonic magnetorheological compound finishing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1583-1588. (in Chinese)
- [2] 侯晶,王洪祥,陈贤华,等. 大口径平面光学元件的磁流变加工[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 3054-3060.
HUO J, WANG H X, CHEN X H, *et al.*. Magnetorheological processing for large aperture plane optical elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12):3054-3060. (in Chinese)
- [3] YI A Y, CHEN Y, KLOCKE F, *et al.*. A high volume precision compression molding process of glass diffractive optics by use of a micromachined fused silica wafer mold and low Tg optical glass [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2006, 16(10):2000-2005.
- [4] 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.
- [5] SAOTOME Y, IMAI K, SAWANOBORI N. Microformability of optical glasses for precision molding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140(1): 379-384.
- [6] SARHADI A, HATTEL J H, HANSEN H N. Three-dimensional modeling of glass lens molding [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2015, 6(2): 182-195.
- [7] KLIOCKE F, DAMBON O, LIU G, *et al.*. Analysis of wear of fused silica moulding using glassy carbon moulds[J]. *Production Engineering*, 2016, 10(4):367-374.
- [8] TSAI Y C, HUNG C, HUNG J C. Glass material model for the forming stage of the glass molding process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(1): 751-754.
- [9] HUANG C Y, KUO C H, HSIAO W T, *et al.*. Glass biochip fabrication by laser micromachining and glass-molding process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(3): 633-639.

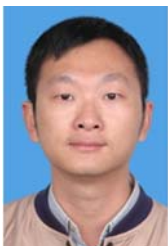
- [10] LIN C H, DUH J G, YAU B S. Processing of chromium tungsten nitride hard coatings for glass molding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(3): 1316-1322.
- [11] 尹韶辉, 王玉方, 朱科军, 等. 微小非球面玻璃透镜超精密模压成型数值模拟[J]. *光子学报*, 2010, 39(11):2020-2024.
YIN SH H, WANG Y F, ZHU J K, *et al.*. Numerical simulation of ultra-precision glass molding for micro aspherical glass lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(11):2020-2024. (in Chinese)
- [12] 尹韶辉, 唐昆, 朱勇建, 等. 小口径玻璃透镜热压成形模具的超精密微细磨削加工[J]. *中国机械工程*, 2008(23): 2790-2792.
YIN SH H, TANG K, ZHU Y J, *et al.*. Fabrication of micro glass lens mould by using ultra-precision micro-grinding process [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008(23):2790-2792. (in Chinese)
- [13] ZHAO W, CHEN Y, SHEN L, *et al.*. Investigation of the refractive index distribution in precision compression glass molding by use of 3D tomography[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(5):055109.
- [14] ZHOU J, HE P, YU J, *et al.*. Investigation on the friction coefficient between graphene-coated silicon and glass using barrel compression test[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2015, 33(3):031213.
- [15] 周天丰, 解加庆, 刘洋, 等. 光学玻璃微沟槽模压成形仿真与试验研究[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s): 446-453.
ZHOU T F, XIE J Q, LIU Y, *et al.*. Simulation and experimental study on the molding process for microgroveson optical glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s):446-453. (in Chinese)
- [16] YAMAMOTO H, NAITO T, NAMEKAWA T, *et al.*. Glass material: US, US20040170797A1 [P]. 2004.
- [17] 聂兰舰, 王玉芬, 向在奎, 等. 高性能光学合成石英玻璃的制备和应用[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2916-2924.
NIE L J, WANG Y F, XIANG Z K, *et al.*. Preparation and application of high-performance synthetic optical fused silica glass[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12):2916-2924. (in Chinese)
- [18] 花宁, 李怀阳, 王友军, 等. 石英玻璃晶圆的加工工艺[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 96-100.
HUA N, LI H Y, WANG Y J, *et al.*. Processing techniques of quartz glass wafer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2):96-100. (in Chinese)
- [19] RICHTER F, HOFFMANN H J. Comment on "viscosity measurement by cylindrical compression for numerical modeling of precision lens molding process" by A. Jain, G. C. Firestone, and A. Y. Yi[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(9):3017-3018.
- [20] MEINHARD H, FRNZEL W, GRAU P. Viscosity of glass below the transformation temperature [J]. *Glass Science and Technology -Frankfurt am Main-*, 2001, 74(1):6-16.
- [21] NARAYANASWAMY O S. A model of structural relaxation in glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1971, 54(10): 491-498.
- [22] JAIN A, FIRESTONE G C, YI A Y. Viscosity measurement by cylindrical compression for numerical modeling of precision lens molding process [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(9): 2409-2414.
- [23] JAIN A, YI A Y, XIE X, *et al.*. Finite element modelling of stress relaxation in glass lens moulding using measured, temperature-dependent elastic modulus and viscosity data of glass[J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2006, 14(3): 465-477.
- [24] ZHOU T, YAN J, MASUDA J, *et al.*. Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(9): 4484-4489.
- [25] ZHOU T, ZHOU Q, XIE J, *et al.*. Elastic-viscoplasticity modeling of the thermo-mechanical behavior of chalcogenide glass for aspheric lens molding[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2017, 9(2):252-262.
- [26] ANANTHASAYANAM B, JOSEPH P F, JOSHI D, *et al.*. Final shape of precision molded optics: Part II—validation and sensitivity to material properties and process parameters[J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2012, 35(7): 614-636.
- [27] SARHADI A, HATTEL J H, HANSEN H N. Evaluation of the viscoelastic behaviour and glass/mould interface friction coefficient in the wafer based precision glass moulding [J]. *Journal of*

- Materials Processing Technology*, 2014, 214(7): 1427-1435.
- [28] ZHOU J, YU J, LEE L J, *et al.*. Stress relaxation and refractive index change of As_2S_3 in compression molding[J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2016, 8(3):255-265.
- [29] LIU W D, ZHANG L C. Understanding the formation mechanism of residual stress during precision glass moulding[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 626:182-186.
- [30] JAIN A. Finite element modeling of structural relaxation during annealing of a precision-molded glass lens[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 128(3):683-690.
- [31] KEAR B H, MCCANDLISH L E. Chemical processing and properties of nanostructured WC-Co materials[J]. *Nanostructured Materials*, 1993, 3(1):19-30.
- [32] ZHOU T, YAN J, LIANG Z, *et al.*. Development of polycrystalline Ni-P mold by heat treatment for glass microgroove forming[J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 25-30.
- [33] RIESER D, SPIE 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.
- [34] CHANG K C, YANG H W, HSIAO Y C, *et al.*. Microstructure evolution and surface characteristics of NiP and CrN composite coatings under phosphate glasses molding process[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(5): 1225-1228.
- [35] CHEN Y I, CHENG Y R, CHANG L C, *et al.*. Chemical inertness of Cr-W-N coatings in glass molding[J]. *Thin Solid Films*, 2015, 593:102-109.
- [36] CHAO C L, HUO C B, CHOU W C, *et al.*. Study on the design of precious metal based protective films for glass moulding process[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 231: 567-572.
- [37] ZHU X Y, WEI J J, CHEN L X, *et al.*. Anti-sticking Re-Ir coating for glass molding process[J]. *Thin Solid Films*, 2015, 584:305-309.
- [38] SAKURAI J, HATA S, YAMUCHI R, *et al.*. Searching for Pt-Zr-Ni thin film amorphous alloys for optical glass lenses molding materials[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(3):431-439.
- [39] KLEER G, DOELL W. Ceramic multilayer coatings for glass moulding applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 94(97): 647-651.
- [40] KLOCKE F, DAMBON O, ROHWERDER M, *et al.*. Model of coating wear degradation in precision glass molding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1):1-7.
- [41] KLOCKE F, DAMBON O, GEORGIADIS K. Comparison of nitride and noble metal coatings for precision glass molding tools[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 438:9-16.
- [42] 尹韶辉, 陈逢军, 龚胜, 等. 小口径非球面光学玻璃透镜模具超精密数控复合机床的研发与应用[J]. *世界制造技术与装备市场*, 2016(4): 24-29.
- YIN SH H, CHEN F J, GONG SH, *et al.*. Research and application of micro aspherical glass lens mould by using ultra-precision composite machine[J]. *World Manufacturing Engineering & Market*, 2016(4):24-29. (in Chinese)
- [43] YAN J, OOWADA T, ZHOU T, *et al.*. Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(10):4802-4808.
- [44] YAN J, ASAMI T, HARADA H, *et al.*. Fundamental investigation of subsurface damage in single crystalline silicon caused by diamond machining[J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4): 378-386.
- [45] YAN J, ZHANG Z, KURIYAGAWA T. Mechanism for material removal in diamond turning of reaction-bonded silicon carbide[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(5):366-374.
- [46] ZHANG Z, PENG H, YAN J. Micro-cutting characteristics of EDM fabricated high-precision polycrystalline diamond tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 65(65):99-106.
- [47] HE P, LI L, LI H, *et al.*. Compression molding of glass freeform optics using diamond machined silicon mold[J]. *Manufacturing Letters*, 2014, 2(2):17-20.
- [48] YI A Y, LI L. Design and fabrication of a micro-

- lens array by use of a slow tool servo[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13):1707-1709.
- [49] CHEN Y, YI A Y, SU L, *et al.*. Numerical simulation and experimental study of residual stresses in compression molding of precision glass optical components[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(5):051012.
- [50] YI A Y, TAO B, KLOCKE F, *et al.*. Residual stresses in glass after molding and its influence on optical properties [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 19(1): 402-406.
- [51] TAO B, SHEN L, YI A, *et al.*. Reducing refractive index variations in compression molded lenses by annealing[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2):118-121.
- [52] TAO B, HE P, SHEN L, *et al.*. Annealing of compression molded aspherical glass lenses [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 136(1):011008.
- [53] SARHADI A, HATTEL J H, HANSEN H N. Three-dimensional modeling of glass lens molding [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2015, 6(2): 182-195.
- [54] 尹韶辉, 霍建杰, 周天丰, 等. 小口径非球面透镜模压成形加热加压参数仿真[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(1):35-39.
- YIN SH H, HUO J J, ZHOU T F, *et al.*. Simulation of the heating and pressing parameters of micro-aspheric lens molding process[J]. *Journal of Human University: Natural Sciences*, 2011, 38(1):35-39. (in Chinese)
- [55] 张小兵, 尹韶辉, 朱科军, 等. 基于结构松弛理论的非球面透镜退火模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(5):1-5.
- ZHAN X B, YIN SH H, ZHU K J, *et al.*. Annealing simulation of aspherical glass lenses based on structure relation theory[J]. *Ordance Material Science and Engineering*, 2013, 36(5): 1-5. (in Chinese)
- [56] YI A Y, JAIN A. Compression molding of aspherical glass lenses-A combined experimental and numerical analysis[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(3):579-586.
- [57] ZHOU J, LI M, HU Y, *et al.*. Numerical evaluation on the curve deviation of the molded glass lens [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(5):051004.
- [58] SU L, WANG F, HE P, *et al.*. An integrated solution for mold shape modification in precision glass molding to compensate refractive index change and geometric deviation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 53(2):98-103.
- [59] MAHAJAN P, DORA P T, SANDEEP T S, *et al.*. Optimized design of optical surface of the mold in precision glass molding using the deviation approach[J]. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2015, 16(1):53-64.
- [60] SU L, CHEN Y, YI A Y, *et al.*. Refractive index variation in compression molding of precision glass optical components[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10):1662-1667.
- [61] SU L, HE P, YI A Y. Investigation of glass thickness effect on thermal slumping by experimental and numerical methods [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(12):1995-2003.
- [62] DORA P T, RAMESH K, MAHAJAN P, *et al.*. Numerical modeling of cooling stage of glass molding process assisted by CFD and measurement of residual birefringence[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 99(2):470-483.
- [63] PALLICITY T D, VU A T, RAMESH K, *et al.*. Birefringence measurement for validation of simulation of precision glass molding process[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, 100(10): 4680-4698.
- [64] ZHAO W, CHEN Y, SHEN L, *et al.*. Refractive index and dispersion variation in precision optical glass molding by computed tomography[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(19): 3588-3595.
- [65] MOSADDEGH P, ZIEGERT J, IQBAL W, *et al.*. Apparatus for high temperature friction measurement [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(3):473-483.
- [66] MOSADDEGH P, ZIEGERT J C. Friction measurement in precision glass molding: An experimental study[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, 357(16):3221-3225.
- [67] FISCHBACH K D, GEORGIADIS K, WANG F, *et al.*. Investigation of the effects of process parameters on the glass-to-mold sticking force during precision glass molding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205(2):312-319.

- [68] DUKWEN J, FRIEDRICH M, LIU G, *et al.*. Tribological wear analysis and numerical lifetime prediction of glassy carbon tools in fused silica molding[J]. *Wear*, 2016,364:144-153.
- [69] IKEDA H, KASA H, NISHIYAMA H, *et al.*. Evaluation of demolding force for glass-imprint process[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2014, 383(1):66-70.
- [70] ANANTHASAYANAM B, JOSHI D, STAIRIKER M, *et al.*. High temperature friction characterization for viscoelastic glass contacting a mold [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2014, 385(2):100-110.
- [71] ZHOU T, YAN J, YOSHIHARA N, *et al.*. Study on nonisothermal glass molding press for aspherical lens[J]. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, 2010, 4(5):806-815.
- [72] KREILKAMP H, VU A T, DAMBON O, *et al.*. Replicative manufacturing of complex lighting optics by non-isothermal glass molding[J]. *Polymer Optics and Molded Glass Optics: Design, Fabrication and Materials*, 2016.
- [73] VU A T, KREILKAMP H, KRISHNAMOORTHY B J, *et al.*. A hybrid optimization approach in non-isothermal glass molding [C]. *Esaform 2016: Proceedings of the International Esaform Conference on Material Forming*, 2016:040006.
- [74] LI H, HE P, YU J, *et al.*. Localized rapid heating process for precision chalcogenide glass molding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 73:62-68.
- [75] XIE J, ZHOU T, LIU Y, *et al.*. Mechanism study on microgroove forming by ultrasonic vibration assisted hot pressing[J]. *Precision Engineering*, 2016, 46:270-277.
- [76] ZHOU T, XIE J, YAN J, *et al.*. Improvement of glass formability in ultrasonic vibration assisted molding process [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, 18(1): 57-62.
- [77] XIE J, ZHOU T, RUAN B, *et al.*. Effects of interface thermal resistance on surface morphology evolution in precision glass molding for microlens array[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(23): 6622-6630.
- [78] CHEN Y, YI A Y, YAO D, *et al.*. A reflow process for glass microlens array fabrication by use of precision compression molding[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(18):55022.
- [79] HUANG C Y, KUO C H, HSIAO W T, *et al.*. Glass biochip fabrication by laser micromachining and glass-molding process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(3):633-639.

作者简介:



龚峰(1982—),男,湖南澧县人,副教授,2004年于湘潭大学获得学士学位,2010年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光学玻璃模压成形和金属塑性微成形的相关研究。E-mail: gongfeng186@163.com



李康森(1994—),男,广东湛江人,硕士研究生,2015年于肇庆学院获得学士学位,主要从事光学玻璃模压成形工艺仿真与试验研究。E-mail: 2251221891@qq.com