

玻璃光学元件精密模压成形技术

刘光宇, 房丰洲*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 微纳制造实验室, 天津 300072

摘要 介绍了玻璃光学元件精密模压成形技术的原理、玻璃材料、模具制造、模具表面镀膜、结合有限元仿真的模压工艺优化和模压成形设备等核心技术的最新研究进展,并讨论了当前存在的问题。通过探讨玻璃模压成形技术在自由曲面、微结构、衍射结构表面和晶圆阵列等光学元件中的应用现状,对玻璃元件精密模压成形技术的发展趋势和挑战进行了展望。

关键词 光学设计; 光学玻璃; 非球面透镜; 自由曲面透镜; 超精密加工; 玻璃精密模压; 微结构制造

中图分类号 O43

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221906

1 引言

玻璃透镜是光学系统中最基本的光学元件之一,常见的有球面、非球面、自由曲面、微结构、衍射结构透镜等,广泛应用于光学成像、照明系统、光通信等领域。以数码相机、车载雷达、医疗内窥镜、投影仪等为代表的众多民用产品以及以光刻机、遥感卫星、激光通信器件、光电仪器等为代表的众多工业装备均广泛使用玻璃透镜^[1-5]。

铣磨、研磨和抛光等传统的制造工艺已经非常成熟,在批量制造高精度的玻璃球面透镜方面具有显著优势。然而,由于球面单透镜存在像差的问题,一般需使用球面透镜组来校正像差,这使得光学系统体积庞大,不利于光学产品的集成化和轻量化^[6]。相比之下,非球面单透镜对像差校正极具优势,对精简光学系统十分有利^[7-8],但因其表面为高次曲面,采用超精密磨削抛光等传统工艺加工难以实现批量化生产,故在精密模压成形技术普及以前,玻璃非球面透镜相对昂贵很多^[9-13]。

玻璃精密模压成形(PGM)是一种基于热压成形原理的净成形加工技术,即玻璃预制件在高温和压力条件下变形,复刻模具表面形状,从而实现复杂曲面透镜的制造^[14]。模压成形技术的出现使得玻璃非球面透镜的制造技术发生变革,实现从冷加工到热加工的转变。目前该技术已经成为制造玻璃非球面透镜的主流技术,并逐步推广到自由曲面、微结构和衍射结构透镜的制造^[15-18]。玻璃精密模压成形技术具有众多优点,如成本低、污染少、效率高等,但该技术本身仍存在众多科学及工程问题亟待解决。近年来,围绕玻璃材料、

模具加工及镀膜、工艺优化、透镜表面质量及模压设备等方面,学术界和工业界开展了广泛的研究和实践工作。

玻璃透镜模压成形方法最早可追溯到 1916 年, Eader^[19]提出了玻璃透镜热压成形的技术方法。20 世纪 40 年代左右,以 Eastman Kodak 为代表的光学企业纷纷进行了玻璃模压技术的探索,并申请相关专利^[20-23]。从 20 世纪 80 年代开始,以豪雅(Hoya)、小原(Ohara)、住田(Sumita)、尼康(Nikon)、佳能(Canon)、奥林巴斯(Olympus)为代表的企业开始探索模压用低熔点光学玻璃材料和模压工艺,同时东芝(Toshiba)公司开发了第一台商业化的 GMP 系列玻璃模压机和 ULG 系列模仁超精密加工机^[24-25]。此后以玻璃非球面透镜为主线产品的模压成形工艺进入了商业化发展阶段。

在理论研究方面,美国俄亥俄州立大学 Yi 课题组^[26-29]从 2004 年开始对玻璃模压成形技术开展研究,并在玻璃材料黏弹性力学行为、数值模拟、实验设备开发、微透镜等复杂结构透镜模压等方面做了大量研究工作。美国克莱姆森大学 Joseph 课题组^[6, 30-34]在玻璃材料特性分析、模压过程摩擦系数测量、数值模拟、镜片面形评价,以及镜片碎裂分析等方面取得众多研究成果,为模压工艺优化提供指导。日本东北大学 Zhou 等^[15, 35-37]在玻璃黏弹性本构模型、模压过程热传导,以及镜片面形和微结构模压等方面开展了深入研究,在镍磷合金(NiP)模仁微结构加工方面也取得了突出进展。德国夫琅禾费生产技术研究所 Dambon 等^[38-42]在面形误差预补偿、数值模拟镜片碎裂、模具镀膜及玻璃-模具界面黏附等方面开展了相关研究工作。丹麦

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2023-02-01; 录用日期: 2023-02-26; 网络首发日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(52035009)

通信作者: *lzfang@tju.edu.cn

技术大学 Sarhadi 等^[43-46]在玻璃-模具界面摩擦系数标定、数值模拟等方面开展研究工作。近年来,国内各大高校也开展了广泛的研究工作,中国科学技术大学胡杨等^[47-51]对模压过程的工艺参数优化、残余应力、玻璃折射率变化等问题开展研究,并搭建了精密热压成形试验机。湖南大学 Yu 等^[52-56]基于数值模拟开展工艺优化和残余应力预测等工作,并针对微结构模压需求开发了超声辅助模压设备并探索了相关工艺。北京理工大学 Zhou 等^[57-61]在微结构模具的加工、微结构模压数值模拟、微结构模具镀膜、红外硫系玻璃透镜表面质量评价等方面开展了大量的研究工作。深圳大学 Li 等^[62-64]搭建了模压实验设备,并针对非等温模压技术、玻璃-非晶碳涂层摩擦行为和模压温度场等开展研究。天津大学近年来从碳化钨(WC)模具加工机理到应用开展了一系列研究工作,提出了激光辅助车削加工模具的新工艺,研制了成套的激光辅助加工设备,大大提高了模具加工效率,同时在模压工艺方面也开展了数值模拟、模具预补偿、模具镀膜等研究工作^[65-70]。此外,浙江理工大学、苏州大学、长春理工大学等院校也相继开展了相关研究工作^[71-75]。

本文回顾了玻璃透镜精密成形技术的背景和发展历程,重点介绍玻璃材料、模具制造、模具表面镀膜、结合有限元仿真的模压工艺优化和模压成形设备等核心

技术的研究进展,总结了当前存在的问题与挑战,并进一步对玻璃模压成形技术在自由曲面、微结构、衍射结构表面和晶圆阵列等光学元件中的应用进行讨论,最后对未来发展趋势进行展望。

2 玻璃材料及本构模型

2.1 精密模压成形原理

玻璃精密模压通过热压成型的方式,在高温工况下对软化的玻璃施加一定载荷,使其发生变形并复制模具表面形状,冷却后便可获得期望特征的透镜。如图 1 所示,模压成形过程大体可分为 4 个阶段:加热、模压、冷却、脱模。加热阶段,一般将玻璃预制件放置在模具中,通过红外辐射或加热板与模具接触传热等方式快速加热到预定温度,然后保温,使玻璃预制件芯部充分升温,直至玻璃内部基本达到热平衡,以降低热应力的影响;模压阶段,将一定的载荷施加于模具外部,载荷大小或加载速率根据玻璃材料和透镜的几何特征确定,同时通过套筒控制透镜中心厚度;冷却阶段,在一定的保压载荷下,依靠外部氮气对流换热或冷却板与模具接触传热等方式逐步冷却,一般采取先缓冷后急冷的工艺策略;脱模阶段,待透镜冷却至室温即可脱模,至此完成单件透镜的模压成形。

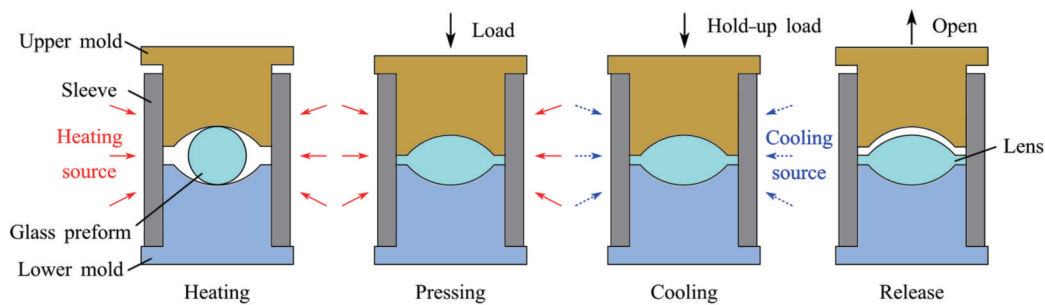


图 1 玻璃精密模压成形原理图

Fig. 1 Schematic diagram of precision glass molding

2.2 模压用玻璃材料

光学玻璃和树脂是当前制造透镜的主要材料,其中玻璃材料相对具有更好的力学性能、热稳定性以及更高的光学折射率,因而玻璃透镜的环境适应性更强,对保持光学系统稳定性更具优势。

光学玻璃是一种非晶态材料,其主要成分有二氧化硅(SiO_2)、氧化硼(B_2O_3)、氧化铝(Al_2O_3)、氧化钙(CaO)、氧化锌(ZnO)、氧化钠(Na_2O)、氧化钾(K_2O)等,其中 SiO_2 比重最大,其他氧化物的相对比重根据不同牌号玻璃的光学性能等要求调整。玻璃的形成基于大量无机物熔体的迅速冷却,以至于无机物熔体来不及向热力学平衡状态的结晶相转变,直接固化形成玻璃,微观结构上呈现出短程有序、长程无序的无规则网络结构^[76]。在精密模压成形工艺中,常见的玻璃有

低熔点玻璃、硫系玻璃和石英玻璃。

低熔点玻璃是指玻璃转变点 T_g 低于普通玻璃,大多在 $300\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$,因此能够在相对较低的温度下进行模压,延长模具材料和模压机的使用寿命,该材料多用于可见光波段,是玻璃模压中使用最多的一类材料。日本豪雅、小原、住田和德国肖特(Schott)等光学玻璃公司对低熔点玻璃材料的研制起步较早,目前可为模压工艺提供百余种玻璃滴下球或研磨球预制件,其中不乏住田公司研制的成型温度最低的K-PG325玻璃(成型温度 $T_g=288\text{ }^\circ\text{C}$)及高折射率的K-PSFn214P玻璃(折射率 $n_d=2.144$)等为代表的高性能玻璃材料^[77]。中国成都光明光电股份有限公司、湖北新华光信息材料股份有限公司等光学玻璃公司也相继推出低熔点玻璃材料,常见的牌号有D-K9、D-ZK3、D-LaK6

等,具有一定的市场占有率。

硫系玻璃是以元素周期表中氧族元素中的硫(S)、硒(Se)、碲(Te)元素与砷(As)、锑(Sb)、锗(Ge)等元素构成的双组元或多组元化合物玻璃,是一种红外波段的窗口材料^[78-79]。常见的硫系玻璃类型包括:Ge-As-S、Ge-As-Se、Ge-Sb-Se、Ge-Se-Te,其中Ge-As-Se和Ge-Sb-Se玻璃由于Se活跃的反应性质,制备难度更低,因此使用最广泛^[61,80]。美国Amorphous Materials公司AMTIR系列、德国Vitron公司IG系列、法国Umicore公司GASIR系列、中国成都光明光电股份有限公司HWS系列和湖北新华光信息材料股份有限公司IRG系列等均提供了种类丰富的硫系玻璃^[74,81]。

石英玻璃是一种非晶态的二氧化硅,微观上是由二氧化硅四面体组成的网络结构。相比于普通玻璃,石英玻璃在紫外到近红外波段(180 nm~3.5 μm)均具有较高的透过率,同时具有较高的硬度、极小的热膨胀系数和较高的激光损伤阈值,是激光系统应对复杂载荷工况的理想光学材料^[82-83]。但是,石英玻璃的转变温度较高(约1300 °C),过高的成形温度对模具材料和模压设备耐热性提出很大的挑战,也使得该技术以往进展缓慢。近年来,随着耐高温玻璃碳材料制造技术的成熟^[84],德国夫琅禾费生产技术研究基于玻璃碳材料模具开展石英玻璃模压实验^[83],同时日本东芝公司开发了适用于石英玻璃模压的商用模压机GMP-207HV^[85],未来石英玻璃模压技术应用将会加速发展。

2.3 本构模型

本构模型是用来描述物质宏观性质的数学模型,进而确定材料在外界因素作用下的内力状态和变形规律^[86]。对于玻璃模压而言,就是要建立起应力-应变-温度-时间的相互关系。如图2所示,区别于晶体材料,玻璃在冷却过程中由过冷液体连续过渡到非晶固体,其中在转变区间(温度范围为 $T_L \sim T_U$, T_L 和 T_U 分别表示转变区间下限温度和上限温度)内呈非线性变化,将线性变化的高温区($>T_U$)与低温区($<T_L$)直线延长,二者相交便得到玻璃的转变温度点 T_g , T_g 温度点是判断玻璃固态-液态转变的重要依据。另一方面,如图3所示,根据玻璃的黏度定义玻璃的应变点(S_p ,黏度为 $10^{13.5}$ Pa·s)、退火点(A_p ,黏度为 10^{12} Pa·s)、软化点(S_s ,黏度为 $10^{6.65}$ Pa·s)等是判断玻璃变形难易程度和消应力的重要依据,其中软化点时玻璃可容易地在自重下变形。在玻璃模压工艺中,为实现玻璃模压变形,同时通过尽可能利用低温成形来延长模具和机器寿命,成形温度一般设定在 $T_g \sim S_p$ 区间,此时玻璃呈现固态的弹性变形和液态的黏性流动复合特征,也就是黏弹性特征。显然,玻璃黏弹性特征对模压工艺至关重要,因此本构模型研究工作也围绕黏弹性本构模型展开。

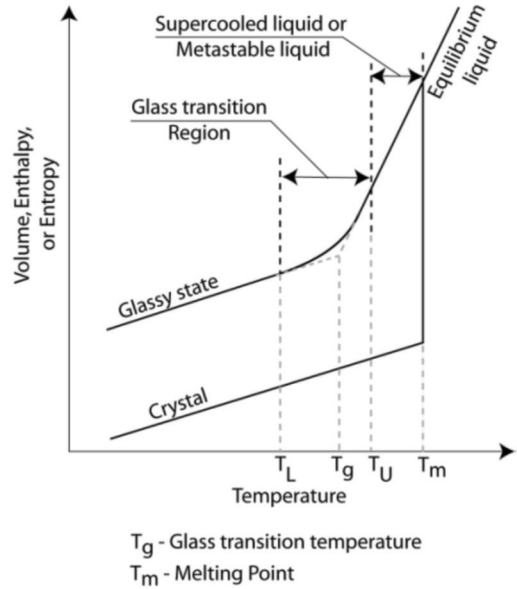


图2 晶体与玻璃在降温过程中体积、焓变、熵变的对比^[6]
Fig. 2 Comparison of volume, enthalpy change, and entropy change of glass with that of crystal during cooling^[6]

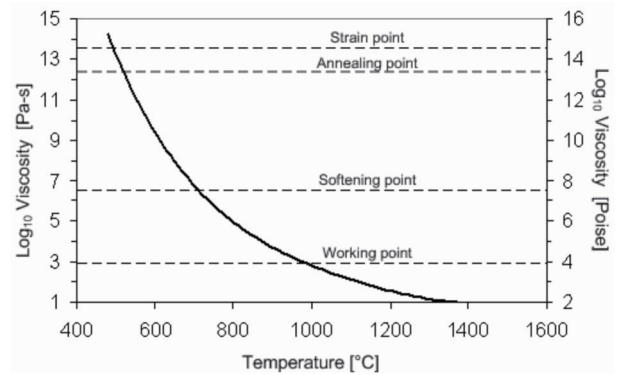


图3 钠钙硅酸盐玻璃的典型黏度-温度曲线^[29]
Fig. 3 Typical viscosity-temperature curve for soda-lime-silicate glass^[29]

如图4所示,蠕变和应力松弛一般用来描述玻璃线性黏弹性力学行为,即在一定温度下,通过对玻璃试件开展单轴压缩实验,在恒定的应力或阶跃应变作用下,相应地获取玻璃的应变或应力随时间的响应,其数学表达式为

$$\epsilon(t) = \sigma_0 C_s(t), \quad (1)$$

$$\sigma(t) = \epsilon_0 M_s(t), \quad (2)$$

式中: ϵ 为应变; σ 为应力; σ_0 为恒定应力; ϵ_0 为阶跃应变; C_s 为蠕变柔量; M_s 为松弛模量; t 为时间。

基于响应数据,利用离散的弹性单元(弹簧)和黏性单元(黏壶)组合来构建多种形式的微分型本构模型,常用的模型有Maxwell模型、Kelvin模型、Burgers模型、广义Maxwell模型等,如图5、图6所示,其数学表达式分别如式(3)~(6)所列^[35,86]。其数学表达式^[35,86]分别为

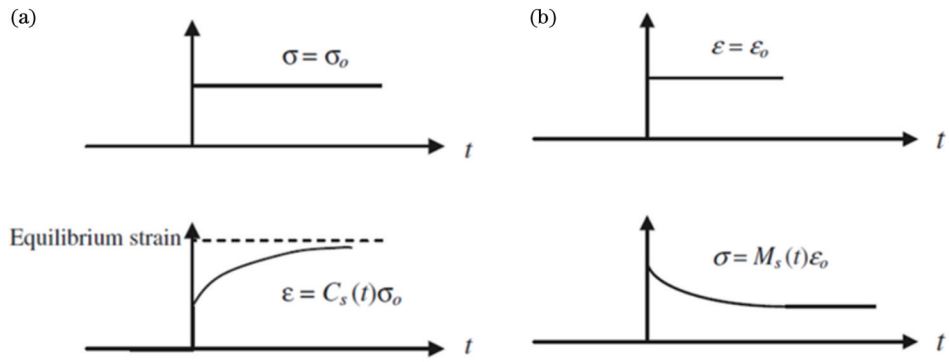


图 4 黏弹性响应^[87]。(a)蠕变;(b)应力松弛
Fig. 4 Viscoelastic response^[87]. (a) Creep; (b) stress relaxation

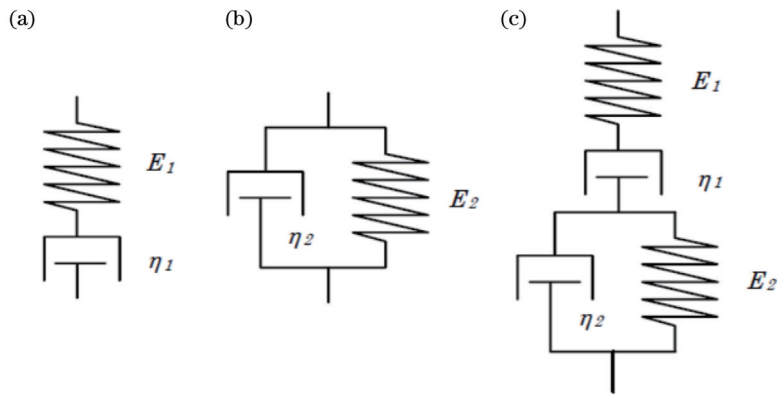


图 5 玻璃本构模型^[35]。(a) Maxwell 模型;(b) Kelvin 模型;(c) Burgers 模型
Fig. 5 Glass constitutive models^[35]. (a) Maxwell model; (b) Kelvin model; (c) Burgers model

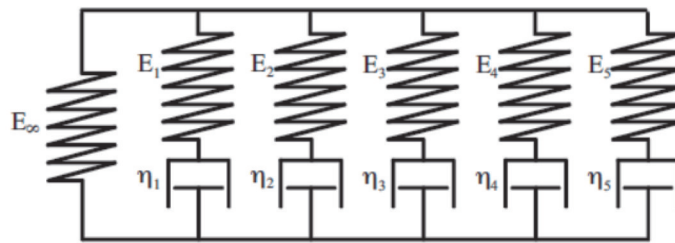


图 6 广义 Maxwell 模型^[15]
Fig. 6 Generalized Maxwell model^[15]

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t, \quad (3)$$

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right], \quad (4)$$

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left[1 - \exp\left(\frac{-E_2 t}{\eta_2}\right) \right], \quad (5)$$

$$E(t) = E_0 \sum_{i=1}^n \omega_i \exp\left(\frac{-E_i t}{\eta_i}\right) + E_\infty, \quad (6)$$

式中： E 为弹性模量； E_0 为短期弹性模量； ω_i 为相对模量系数； E_∞ 为长期弹性模量； E_i 为弹性模量； η_i 为黏性系数； $i=1, 2$ 。

Jain^[29]从 2004 年便基于应力松弛实验拟合

Maxwell 本构模型，并率先开展基于 MSC. Marc 软件的模压透镜有限元仿真工作。Zhou 等^[15,35,37]在 东芝 GMP211 模压机上对小原 L-BAL42 玻璃圆棒开展蠕变和应力松弛实验，对比了 Maxwell 模型、Kelvin 模型和 Burgers 模型的拟合精度，研究认为 Burgers 本构模型的拟合蠕变精度最高，通过在有限元软件 Deform 中模拟复现实验，验证了使用 Burgers 本构模型仿真的误差为 6.9%，但由于 Burgers 模型求解难度大，描述应力松弛过程更建议使用 Maxwell 模型或广义 Maxwell 模型。鉴于蠕变测试中摩擦对实验结果产生的干扰，Zhang 等^[54]提出微小单轴蠕变实验法，如图 7 所示，通过微米级蠕变来减小截面变形，从而降低摩擦干扰，并基于热机械测量仪(TMA)开展硼硅玻璃蠕变实验，建

立了 6 阶广义 Maxwell 本构模型, 所得数值模拟结果与实验结果具有较高的一致性。Yu 等^[53]也关注了摩擦的影响, 并基于实验摩擦系数提出弱化摩擦的蠕变测试法, 提高了本构模型精度。

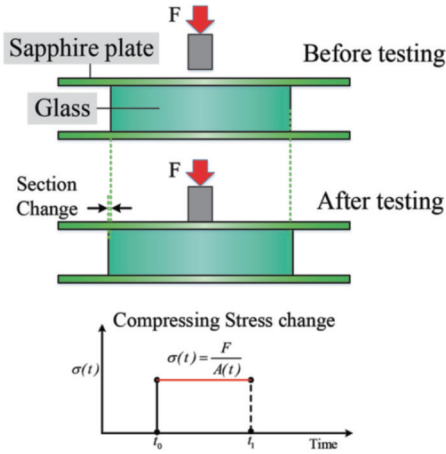


图 7 微小单轴蠕变实验法^[54]

Fig. 7 Minimal uniaxial creep testing (MUCT) method^[54]

应力-应变-时间的本构关系已经建立, 但并未考虑温度这一关键因素, 实际上对于玻璃的同一个松弛行为既可以在较高的温度、较短的时间下产生, 也可以在较低的温度、较长的时间下产生, 也就是说时间尺度和温度尺度具有一定的等效性, 即时温等效原理^[86]。据此, 将玻璃视为热流变简单材料, 如图 8 所示, 通过计算不同温度松弛曲线的时间转移因子 $A(T)$, 即可计算任意温度的松弛函数。在玻璃转变温度以上, 转移因子 $A(T)$ 的计算方法有 William-Landel-Ferry (WLF) 经验方程和 Narayanaswamy 公式, 分别为

$$\lg[A(T)] = \frac{-C_1(T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)}, \quad (7)$$

$$\lg[A(T)] = \frac{\Delta H}{2.303R} \left(-\frac{1}{T_R} + \frac{x}{T} + \frac{1-x}{T_f} \right), \quad (8)$$

式中: C_1 、 C_2 为 WLF 经验方程系数; T_R 为参考温度; T 为温度; ΔH 为活化能; R 为气体常数; x 为非线性系数; T_f 为假想温度。Narayanaswamy 公式进一步考虑

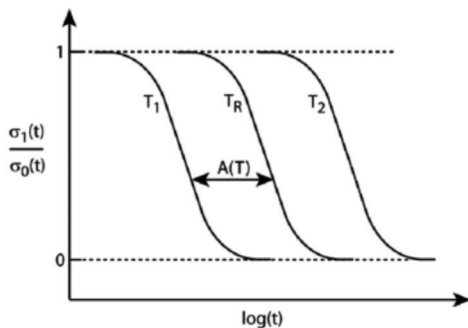


图 8 玻璃热流变简单行为^[6]

Fig. 8 Thermo-rheologically simple (TRS) behavior of glass^[6]

了玻璃的结构松弛和非线性特征^[48]。

综上所述, 当前对于玻璃材料黏弹性本构模型的建模方法和实验技术研究比较成熟, 但受外界实验条件的影响, 仍存在很多因素干扰本构实验, 导致模型精度不足, 同时模型拟合过程需要大量数学计算, 较为繁琐。下一步需要以提高模型精度、提高模型拟合效率为目标, 探索模型修正方法, 开发新的本构实验技术。

3 模具的制造

模具是玻璃透镜模压工艺的关键环节, 主要体现在高温高压工况下对模具性能和质的要求。首先, 模具材料至少在 700 °C 以下具有小热膨胀系数、大导热系数、高弹性模量、高硬度、高耐磨性且具有良好的化学稳定性; 其次, 模具材料要具有良好的可加工性, 能够实现高质量高表面完整性的光学表面加工, 一般表面粗糙度 R_a 要求优于 5 nm, 且无刀纹、划痕、麻点、气孔等明显外观缺陷。最后, 为防止高温时模具与玻璃发生粘连, 模具光学表面还要通过镀膜加以保护。

3.1 模具材料

目前玻璃模压的模具主流材料是碳化钨(WC), 其中无粘结相碳化钨(Binderless Tungsten Carbide)加工表面质量最好。粉末冶金法是制造无粘结相碳化钨的常用方法, 日本 Fujilloy 公司和 NJS 公司基于该方法研制了细粒度(晶粒尺寸 $< 0.2 \mu\text{m}$) 且不含微小气孔的碳化钨材料, NJS 公司还开发了先进的放电等离子体烧结(SPS)技术, 从原料粉末内部快速加热烧结, 使得材料致密度进一步增大。典型的碳化钨牌号有 J05、JF03、M78 等, 使用这些材料制成的模具表面缺陷少、质量好, 在模压行业得到广泛应用^[88-89]。

其他材料如硅(Si)、碳化硅(SiC)、玻璃碳(GC)、镍磷合金(NiP)等在全类模压工艺中也较为常见^[90]。表 1 对比了几种典型材料的性能, 其中 WC 的硬度最高且热膨胀系数适中, 综合性能最好, SiC 与其性能相近, 目前两者都广泛应用于非球面模具的制造。其余材料的刚度和硬度都略低, 会影响模具的寿命, 但低硬度更有利于微细结构的加工, 例如 NiP 材料就广泛应用于微结构模具制造, Zhou 等^[57, 91-92]此前在不锈钢等基材上通过化学镀的方法制备 100 μm 左右的 NiP 镀层, 并对其力学性能、磨损机理、微沟槽结构加工等方面开展了大量研究。热膨胀方面, NiP 材料表现最差, 这会严重影响镜片面形精度; 热导率方面, GC 和 NiP 热导率较低, 这会降低模压过程导热效率; 耐热性方面, 所有材料都能满足常规模压工艺温度需求 ($< 700 \text{ }^\circ\text{C}$), 其中 GC 材料耐温性尤为突出, 能够承受 1360 °C 左右的高温, 因此也是模压石英玻璃时最佳的模具材料选择^[83, 93], 目前日本 Tokai Carbon 公司和 NTT-AT Nanofabrication 公司均能提供玻璃模压用 GC 材料^[94-95]。

表 1 模具材料性能对比
Table 1 Comparison of mold material properties

Material	Elastic modulus / GPa	Hardness /HV	Thermal expansion / (10 ⁻⁶ °C)	Thermal conductivity / (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Maximum molding temperature /°C
Silicon (Si)	168	1150	2.6	148	~700
Silicon carbide (SiC)	350	2100	3.7	48	~850
Tungsten carbide (WC)	570	2600	4.9	63	~730
Glassy carbon (GC)	32.4	230	2.1	5.8	~1360
NiP alloy (NiP)	150.1	769.2	12	8	~790

3.2 模具制造方法

模具制造主要是指光学表面的超精密制造, WC 等材料属于典型的难加工硬脆材料, 使得高精度高表面完整性的模具加工难度较大, 基于超精密机床的磨削、切削等技术仍是模具加工的主流方法, 同时激光辅助车削等多能场复合加工技术、反应离子刻蚀等特种加工技术也逐渐兴起。

3.2.1 超精密磨削

利用超精密磨削加工 WC 等硬脆材料已经发展得非常成熟, 其加工原理是基于材料的脆塑转变, 通过材料的塑性流动进行延性域磨削加工^[96], 加工过程如图 9 所示, 基于超精密机床的多轴联动, 使用超硬的金刚石砂轮对模具表面进行磨削。常见的非球面模具超精密磨削方法有垂直磨削、倾斜磨削、平行磨削和砂轮法向磨削。

垂直磨削是将砂轮轴竖直, 且与工件主轴垂直, 但该方法在加工小口径深凹面模具时容易发生干涉, 适用于加工较大口径模具。为了解决砂轮轴与模具的干涉问题, 早在 1998 年 Suzuki 等^[97]就提出砂轮 45° 倾斜磨削的方法, 使砂轮轴与模具间留有更大空间, 使用 1200# 树脂结合剂金刚石砂轮加工 0.8 mm 口径的 WC 非球面模具, 形状精度峰谷值 (PV) 优于 0.1 μm, 表面粗糙度 R_{max} 优于 0.03 μm。

平行磨削是将砂轮轴水平放置且与工件轴呈一定夹角, 通过机床 X 轴与 Z 轴联动进行磨削, 由于砂轮表

面的一段圆弧参与磨削, 砂轮使用寿命有所延长, 但砂轮形状误差对模具成形精度的影响较大, 难以用于高精度模具加工。为了减小砂轮形状误差的影响, 砂轮法向磨削被广泛采用, 即砂轮边缘始终与工件表面垂直, 形成点接触磨削。Tohme^[98]通过对比各类磨削方法, 发现砂轮法向磨削可以有效避免将砂轮形状误差传递到工件上, 这有利于提高加工精度, 但该方法需要将砂轮边缘调整到与 B 轴中心重合, 调整过程复杂, 通过在 Moore Nanotech 450 UPL 机床上磨削口径为 2.1 mm 的凹面非球面模具, 得到了面形 PV 值为 0.051 μm 的表面。

此后, 研究工作主要集中在磨削轨迹规划、加工误差补偿等方向^[99-101]。Chen 等^[102-103]分析了对刀误差、砂轮磨损和模具离线测量重复装夹等因素引入的面形误差, 并提出在机测量模具补偿面形的方法, 开展测量路径和算法的研究, 通过 2~3 次补偿即可实现模具 PV 值优于 0.2 μm。Yan 等^[65]提出了离轴螺旋磨削方法加工非回转对称类阵列结构, 并基于在机测量补偿模具的加工误差, 实际加工非球面微透镜阵列 (4 个口径为 2 mm 的子透镜, 间距为 2.5 mm), 形状精度 PV 优于 0.3 μm, 表面粗糙度 S_a 优于 10 nm。综上, 通过磨削方法改进和磨削轨迹补偿, 结合在机测量减小重复装夹误差, 可快速实现模具面形补偿。应当指出, 虽然超精密磨削可以稳定地获得高质量模具表面, 但其加工效率较低, 这对模具大批量生产形成阻碍。

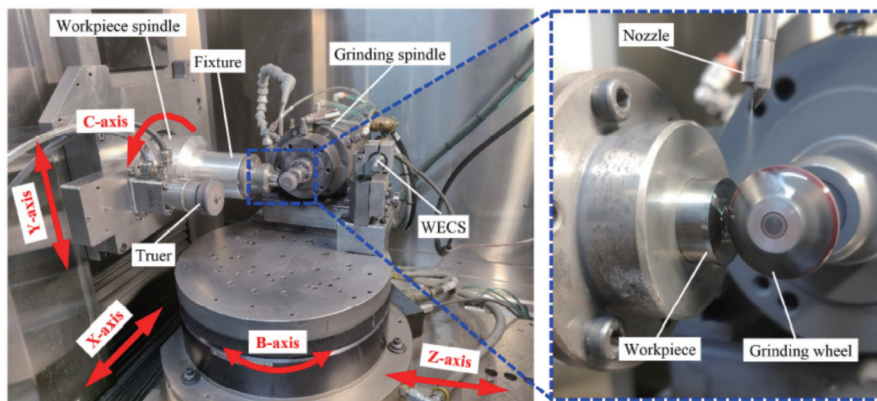


图 9 超精密磨削碳化钨模具^[65]

Fig. 9 Ultra precision grinding tungsten carbide mold^[65]

3.2.2 超精密切削

超精密切削一般包括单点金刚石车削、微铣削、飞切及其衍生的多能场辅助切削技术。对于 NiP 等质地较软的材料,需要加工复杂面形或微结构时,采用上述超精密切削技术最为合适。但对于 WC 等硬脆材料而言,金刚石刀具切削时会产生严重的磨损,必须通过外部能场介入来延长刀具寿命,目前实际加工效果较好的方法是激光辅助切削和超声椭圆振动切削。

微沟槽切削是加工 NiP 微结构的常用方法,如图 10 所示, Yan 等^[92]使用锋利的 V 形金刚石刀具在 NiP

平面上加工深度为 5 μm 和 10 μm 的微沟槽和微金字塔阵列,并提出两步切削加工的方法,即第一刀采用大切深(9 μm)、第二刀采用小切深(1 μm),解决了由于材料侧向流动产生的毛刺问题,在 387 $^{\circ}\text{C}$ 下模压 K-PG375 玻璃能够精准复刻微结构形状。进一步地,基于更小的亚微米尺度衍射结构制造需求, Zhou 等^[104]提出轴向进给飞切加工的方法,如图 11 所示, V 形金刚石刀具在飞切的同时进行轴向进给,加工出特定间距的沟槽,形成衍射结构,结构的特征尺寸由特定的图像色彩转换算法确定。

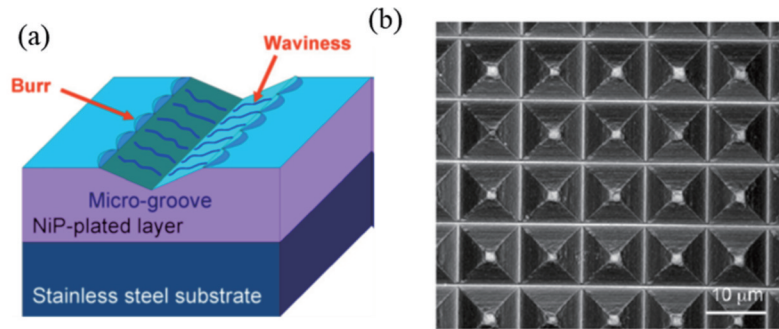


图 10 微沟槽切削 NiP 微金字塔阵列^[92]。(a)切削后残留的毛刺;(b)表面形貌 SEM 图

Fig. 10 NiP micropyramid array machined by micro-groove cutting^[92]. (a) Residual burrs after cutting; (b) SEM diagram of surface morphology

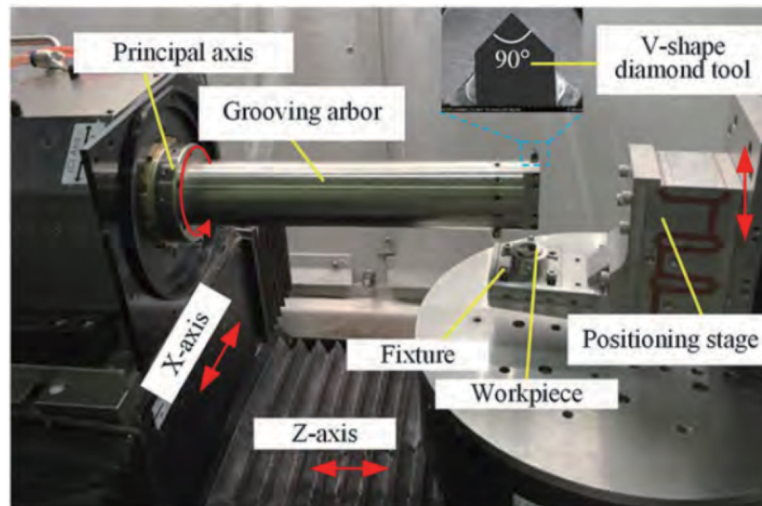


图 11 轴向进给飞刀切削^[104]

Fig. 11 Axial-feed fly cutting^[104]

激光辅助切削是一种基于材料热软化效应的切削方法,如图 12(a)所示,通过激光辐照切削区使硬脆材料局部软化,从而实现延性域切削加工,该方法具有提高表面质量、减小刀具磨损等优势。Micro-LAM 公司基于激光在线加热辅助车削原理,开发了 Optimus 系列微激光辅助加工系统,并开展了碳化钨模具切削工艺实验,实际切削 10 mm 口径模具,获得粗糙度 S_a 为 2.74 nm 的表面^[105-106];在刀具磨损方面,一把刀具可以切削口径为 40 mm 的凹面模具表面 5 次,每次加工时长为 200 s,加工效率和刀具寿命得到提高^[107];在表面

缺陷方面,通过对比不同晶粒度的 WC 切削后表面质量,发现晶粒尺寸小于 0.4 μm 更适合通过切削获得高质量表面^[108]。天津大学微纳制造实验室基于自研的激光辅助切削系统,开展 WC 激光在线加热辅助车削实验,如图 12(b)所示,切削口径为 1.62 mm 的凹面模具,获得粗糙度 S_a 优于 3.26 nm 的表面^[109],并在切削仿真、表面创成机理、亚表面损伤、加工残余应力等方面做了大量研究工作^[67];该实验室还针对激光在线加热辅助车削(In-LAT)加热效率低、刀具粘屑等问题,提出了新的高效激光加热辅助车削(HE-LAT)方法,

新方法达到与 In-LAT 法相同的加热效果,激光输出功率仅需 In-LAT 方法的一半,同时表面粗糙度 S_a 提高到 0.97 nm,残余应力降低 40%,这表明 HE-LAT 对 WC 加工质量具有重大提升^[66]。目前,激光辅助切削尚未得到大范围工业应用,其主要原因在于加工稳定

性有待提高,刀具粘屑以及刀具磨损问题有待更好地解决。然而,不容忽视的是切削相对于磨削具有明显的加工效率优势,因此该技术的推广将会对工业生产带来巨大效益。

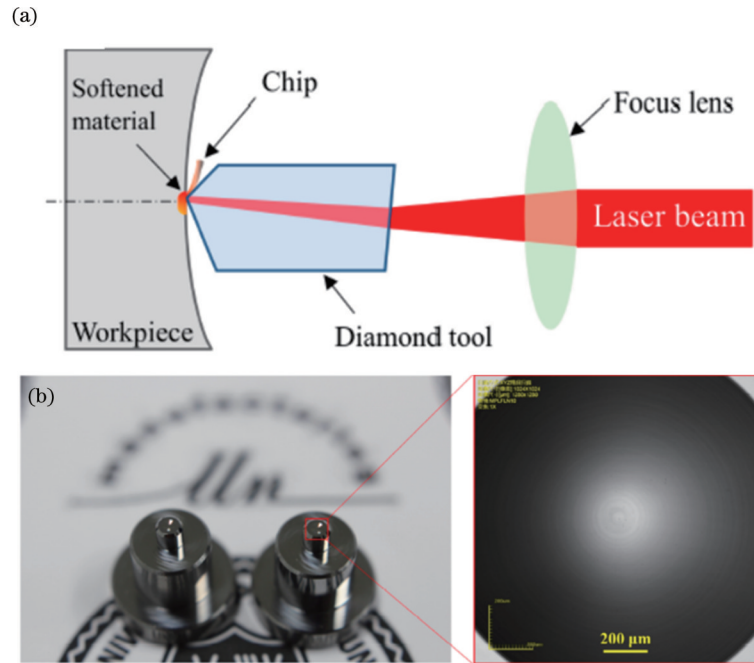


图 12 激光辅助切削^[109]。(a)激光在线加热辅助车削;(b)碳化钨模具加工表面

Fig. 12 Laser assisted cutting^[109]. (a) In-process-heat laser assisted turning (In-LAT); (b) finished surface of WC mold

超声椭圆振动切削是指通过控制金刚石刀具以超声频率沿椭圆轨迹振动,从而实现切削过程中刀具和工件高频次的完全分离,其加工过程如图 13 所示,该技术能够显著抑制刀具磨损^[110]。如图 14 所示,Suzuki 等^[111]基于频率为 38.65 kHz、双边振幅为 4 μm 的超声椭圆振动设备加工了棱镜、球面镜、V 沟槽阵列的钨合金模具,切削距离 50 m 以内的表面粗糙度 R_a 优于 100 nm,加工后未观察到明显的刀具磨损。Zhang 等^[112]对不同晶粒尺度、不同粘结相的 WC 材料超声椭圆切削加工效果展开对比研究,发现较小的晶粒尺寸和粘结相的存在有利于防止切削时材料脆性断裂的产生,并实际加工了图案化的微沟槽、微凹坑阵列等结构,获得了无缺陷高质量表面。天津大学微纳制造实验室对 WC 材料超声振动切削开展大量研究,使用频率为 64.7697 kHz 的超声设备切削 WC 时发现存在刀具微崩刃和让刀现象^[113];为了抑制刀具破损,该实验室提出通过离子注入改性超硬的 WC 表面,使切削层强度降低,再开展超声椭圆振动切削,并结合分子动力学仿真对其切削机理进行阐释,实验发现超声椭圆振动切削改性的 WC 对降低刀具微崩刃磨损具有明显效果,切削距离为 20 m 以内时可实现 WC (YG6) 加工表面粗糙度 S_a 优于 6 nm^[114-115]。综上,该技术能够提高加工表面质量并减少刀具磨损,但为了实现刀具和工件

的完全分离,切削速度往往被限制在很低水平(约 4 m/min 以下),而要提高切削速度就势必要增大超声设备的频率和振幅,这对稳定实现切削过程提出了挑战,因此该技术由于加工效率过低,尚未应用到工业生产中。

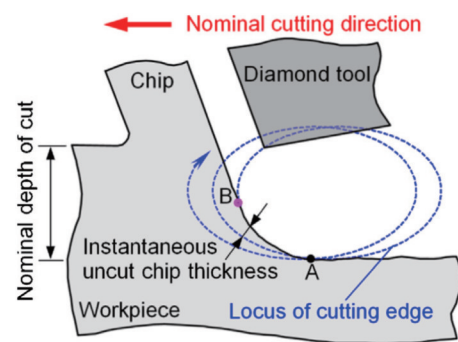
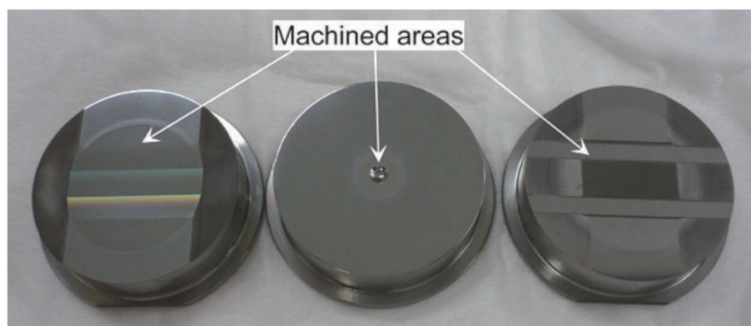


图 13 超声椭圆振动切削过程^[112]

Fig. 13 Ultrasonic elliptical vibration cutting process^[112]

3.2.3 特种加工技术

特种加工技术一般用于制造微结构模具,常用的方法有干法刻蚀、湿法刻蚀、电铸、激光诱导加工等。其中干法刻蚀一般采用聚焦离子束(FIB)、反应离子刻蚀(RIE)、电感耦合等离子体(ICP)刻蚀等方法,面向材料主要是玻璃碳(GC)等。2005年,Takahashi

图 14 超声椭圆振动切削加工的模具^[111]Fig. 14 Molds machined by ultrasonic elliptical vibration cutting^[111]

等^[84]使用 30 kV 的 Ga 离子束在 GC 表面加工 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ 的微沟槽结构,刻蚀表面粗糙度 R_a 优于 20 nm,实际模压 Pyrex 玻璃和石英玻璃形状复刻结果良好。如图 15 所示,Prater 等^[116]基于反应离子刻蚀方法在 GC 表面制造衍射结构,特征尺寸为 $2\ \mu\text{m}$,在温度为 $555\ ^\circ\text{C}$ 下模压 L-BAL42 玻璃 50 次,模具未见明显磨损。进一步地,Hans 等^[117]对比了光刻胶、铝、钛等不同掩模对刻蚀选择性、刻蚀速率和表面质量的影响,其中铝和钛相比于 GC 都具有更低的刻蚀速率,刻蚀精度更高,并实际刻蚀倾斜角为 79° 、深度为 $506\sim 738\ \text{nm}$ 的衍射结构。此外,He 等^[118]基于 RIE 法在 Si 基底上也成功刻蚀了微凹槽阵列,Tamura 等^[119]基于电子束直写和 RIE 法在 SiC 模具上刻蚀出 250 nm 的锥形减反射周期结构,使得模压的玻璃透镜在 530 nm 波长下的表面反射率仅为 0.2%。Zhou 等^[120]将单点金刚石车削与 ICP 刻蚀相结合,首先在 6H-SiC 模具基体上涂覆 SU8 光刻胶,再通过单点金刚石切削胶层形成微透镜阵列形貌,最后利用 ICP 刻蚀 6H-SiC 基体复刻胶层形貌,加工后模具面形精度 PV 可达 $0.22\sim 0.51\ \mu\text{m}$ 。湿法刻蚀一般在液体环境中进行,其工艺稳定性略低于干法刻蚀,Albero 等^[121-122]分别在酸性和碱性液体条件下,在 Si 基底上制备了球面微透镜阵列,该方法可用于制造数值孔径为 $0.02\sim 0.4$ 、焦距从数十微米到几毫米不等的微透镜。电铸方法一般与光刻工艺相结合,通常在模具基底预涂光刻胶,先利用光刻使胶层生成微结构型腔,再通过电铸在型腔内生长三维微结构。Yasui 等^[123]在 Incoloy909 合金基底上电铸 $2\ \mu\text{m}$ 厚的 Ni-W 微沟槽,并实际模压 D263 玻璃,但经过 26 次模压后玻璃微结构高度一致性变差,模具寿命有待提高;Kasztelanic 等^[124]基于 Ni 材料开展了更为复杂的衍射二元光栅结构模具电铸研究。此外,飞秒激光诱导加工周期性表面结构也是一种极具潜力的微结构制造方法,其加工过程几乎不受到热影响,可制造亚微米及更小尺度微结构,但加工成本较高。Hasegawa 等^[125]使用氮化 AISI420 马氏体不锈钢平板作为模具基底,通过飞秒激光诱导加工宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 、高度为 $4\ \mu\text{m}$ 的疏水周期结构,模压后玻璃表面亲水角从 56° 增大到

114° ,疏水性能显著提高;Wang 等^[126]进一步使用柱面镜聚焦飞秒激光提高加工效率,并在 Si 基底上制备了直径达 8 cm 的波纹结构表面。

总体来看,当前微结构模具制造仍处于发展阶段,加工效率和精度仍有待提高,同时针对批量化生产需求,WC 等具有高强度、高耐磨性的超硬材料微结构加工技术仍有待进一步探索。

3.2.4 抛光技术

高表面质量的光学元件对模具外观有着较高的要求,即超精密磨削或切削生成的模具表面刀纹、缺陷等需经过抛光去除,以免模压后复刻到光学元件表面,影响其光学性能。根据模具几何特征和材料去除难易程度,可采用的抛光方法有:小磨头抛光、气囊抛光、磁流变抛光、超声振动辅助抛光等。小口径非球面 WC 模具常采用小磨头抛光,具有高效率、低成本等特点,颜晓强等^[127]将聚酯纤维弹性绒布包裹在球形抛光头上,以金刚石颗粒为磨料抛光口径为 11.2 mm 的非球面 WC 模具,基于 XZB 三轴联动抛光机抛光 60 min 后模具表面粗糙度 R_a 由 8.7866 nm 降低至 3.6932 nm,面形 PV 由 303.1 nm 降至 149.5 nm,进一步提出了小球头磁流变抛光等组合抛光技术。Lee 等^[128]将刚性球形抛光头改进为气囊抛光头,从而增大了抛光接触面积,使得抛光时无需根据非球面轮廓规划轨迹进行,降低了抛光运动的复杂度,抛光后模具表面粗糙度 R_a 从 5 nm 降低至 2 nm,模具面形 PV 值则始终保持在 $0.16\ \mu\text{m}$ 。Wang 等^[129]设计了圆柱形永磁体抛光工用于开展小型凹面模具的磁流变抛光,通过对 8 mm 口径的 WC 非球面模具抛光 120 min,表面粗糙度 R_a 由边缘 4.7 nm 和中心 2.6 nm 均降低至约 1 nm,同时初始磨削表面的中频误差显著降低。尹韶辉等^[130]将斜轴磨削与磁流变抛光相结合,模具在斜轴磨削后无需二次装夹,直接进行斜轴磁流变抛光,提高了加工效率,基于自研的小口径非球面超精密复合加工机床,加工口径为 6.6 mm 的非球面 WC 模具,面形 PV 为 221 nm,表面粗糙度 R_a 为 0.7 nm。Suzuki 等^[131]基于大数值孔径的微型非球面模具的抛光需求,开发了二维超声振动抛光系统,实际抛光口径为 2 mm、矢高为

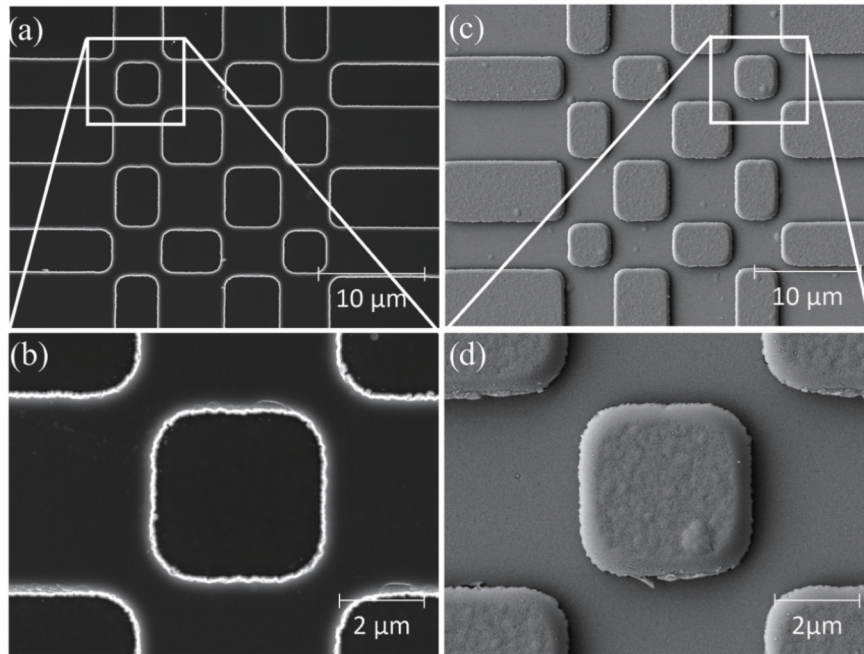


图 15 GC 模具及模压后的玻璃表面 SEM 图^[116]。(a)(b)模具表面；(c)(d)玻璃表面

Fig. 15 SEM diagrams of GC mold and molded glass surface^[116]. (a)(b) Mold surface; (c)(d) glass surface

382 μm 的 WC 凹面模具,当材料去除深度约为 0.5 μm 时,面形变化约为 0.1 μm ,表面粗糙度 R_a 下降至 8 nm。进一步地,Guo 等^[132]利用磁致伸缩材料开发了振动抛光装置,该装置具有体积小、低压驱动等优势,实际抛光口径为 2 mm 的 WC 微型非球面模具,面形 PV 从 0.18 μm 降低至 0.09 μm ,表面粗糙度 R_a 降至 3.3 nm。Zhang 等^[133]基于剪切增稠抛光原理,设计了带有阻尼涂层的抛光头,同时使用化学增强非牛顿超细流体磨料,采用非接触抛光的方式抛光 NiP 非球面模具,表面粗糙度 S_a 为 0.54 nm,面形 PV 为 600 nm。Kaku 等^[134]基于电流变液辅助抛光方法,将微型抛光头和模具分别作为电极,利用电场变化调节电流变抛光液的黏度,从而将磨料聚集在抛光头表面,实际抛光 3 min 即可将 WC 模具表面粗糙度 R_a 从约 100 nm 降至 40 nm。

上述各种抛光方法均能实现模具残留刀纹的去除,同时降低表面粗糙度、减小中频误差,基本保证原始表面的面形精度。这些方法的区别在于技术的实施难度和成本,其中小磨头抛光在工业生产中最具优势,

可满足大部分非球面模具的抛光需求,但面向更大数值孔径的微型非球面模具或对模具表面质量要求更高的场景,磁流变、超声振动辅助等抛光方法会取得更好的效果。此外,抛光自由曲面时,可能还需采取更为精准的抛光方式,以保证其面形精度,例如基于超精密抛光运动的柔性垫抛光工艺等^[135]。未来,面向更高精度和复杂表面形状的模具抛光技术仍有待探索。

3.3 模具表面镀膜

为了阻止玻璃与模具接触界面发生热粘、保护模具表面、提高玻璃光学表面质量,通常在模具表面镀有保护膜。膜层一般要求摩擦系数小、耐磨性好、热稳定性好且对玻璃具有化学惰性。常见膜层材料分为三个系列:1)碳基系列,如类金刚石(DLC)等;2)贵金属系列,如 Pt-Ir、Ir-Re 等;3)陶瓷系列,如 CrWN、TiAlN 等。表 2 对几种典型的膜层材料进行了对比。近年来的研究主要集中在膜层设计、镀膜方法和膜层磨损机理等方向。

表 2 典型膜层材料对比

Table 2 Comparison of typical film materials

Material	Substrate	Deposition technique	Molding temperature / $^{\circ}\text{C}$	Cost	Oxidation resistance	Life time
DLC (Ta-C)	WC	Filtered cathodic vacuum arc deposition	~ 450	Low	Low	Short
Pt-Ir	WC	Magnetron sputtering	~ 700	High	High	Long
CrWN	Si, WC	Ion beam assisted deposition	~ 600	High	Moderate	Moderate

DLC 膜是指含有 C 原子且以金刚石结构(sp^3 杂化键)和石墨结构(sp^2 杂化键)为主体形成的非晶态物质,其中 sp^3 杂化键数量占比高于 70% 的四面体非晶

碳膜(Ta-C)是模压行业中应用最多的膜系,具有高硬度、与 WC 基材结合力强、摩擦系数小等优势,但在温度高于 450 $^{\circ}\text{C}$ 以上容易发生石墨化^[136],因此寿命较

低,但其镀膜成本低廉,对于低温模压工况最具优势。常规的溅射工艺制成的 Ta-C 膜层 sp^3 杂化键数量占比低于 40%,Bernhardt 等^[137]基于改进的磁控溅射离子镀 (MSIP) 在 WC 晶圆模具上镀出 sp^3 杂化键数量占比为 60% 的 300 nm 的 Ta-C 膜层,提高了膜层硬度。新加坡 Nanofilm 公司开发的过滤阴极弧 (FCVA) 镀膜系统,可在温度低于 80 °C 下镀膜,膜层 sp^3 杂化键的数量占比高达 85%,硬度高达 40 GPa,膜层表面致密光滑,动摩擦系数约为 0.1^[138];Lee 等^[139]对 FCVA 方法的镀膜厚度展开研究,发现厚度为 100 nm 的膜的抗断裂性能最好,实际模压 2500 件玻璃透镜未见膜层出现明显破损。为提高 Ta-C 膜的热稳定性,Jang 等^[140]在 Ta-C 膜中采用磁控溅射的方法掺入 Si 元素,形成的 Si-Ta-C 膜在 600 °C 时仍保持热稳定性,进一步提高了耐热性。

贵金属膜具有优良的热稳定性和化学惰性,能够有效地延长模具寿命,但其成本非常昂贵。Zhu 等^[141]利用磁控溅射法在含 Co 的 WC 基材上制备 Re 薄膜、Ir 薄膜以及 Ir-Re 复合薄膜,相比单一成分薄膜,Ir-Re 复合涂层具有高硬度 (24.5 GPa),在各膜层与高温 (631 °C) D-ZK3 玻璃的接触角实验中,其接触角最大为 168.1°,抗黏附性最好,进一步提出 Ir 与 Re 的晶界强化膜层力学性能、阻碍接触界面原子扩散的观点^[142]。Klocke 等^[40]对比了贵金属膜 Pt-Ir 和几种陶瓷薄膜的抗氧化能力以及与玻璃的高温接触角,其中 Pt-Ir 膜在 700 °C 以下没有发生氧化现象,抗氧化性最好;如图 16 所示,同温度下玻璃对 Pt-Ir 膜的黏附作用更小,玻璃内部挥发或界面反应产生气泡程度不同,表明不同成分玻璃对同一膜层的黏附行为存在差异。

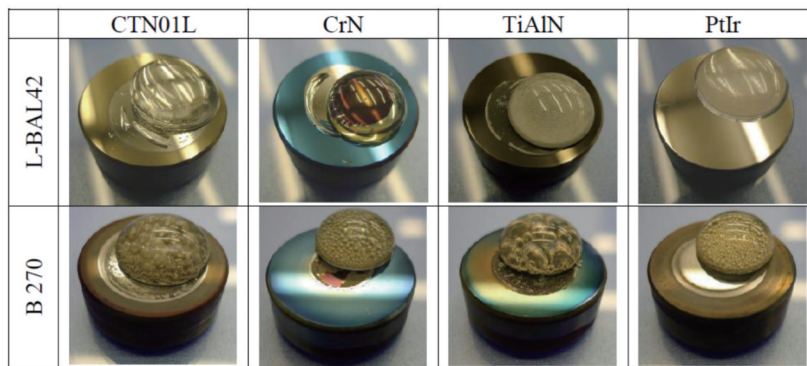


图 16 玻璃与模具接触角外观图^[40]

Fig. 16 Appearance of contact angle of glass and mold^[40]

对于 Pt-Ir 膜层退化机理,Klocke 等^[42]基于实验结果提出膜层退化模型,如图 17 所示,中间层 Ni 向膜层扩散,导致基底内部氧化并有气体析出,这一过程降低了膜层与基底的结合力,使得膜层退化剥落。Peng 等^[143-144]对以 Ni 和 Cr 为中间层的 Pt-Ir 膜退化机理进行进一步研究,基于原子探针断层扫描 (APT) 和扫描透

射电子显微镜 (STEM) 表征结果从元素互扩散的角度进一步证实了 Klocke 提出的退化模型,Cr 或 Ni 沿 Pt-Ir 晶界扩散到表面,Pt-Ir 的纳米柱状晶结构提供了许多快速且更短的扩散。Friedrichs 等^[145]进一步对不同膜系寿命进行测试,发现厚度为 600 nm 的 Pt-Ir 膜和厚度为 20 nm 的 Cr 中间层结合,膜层的寿命最佳。

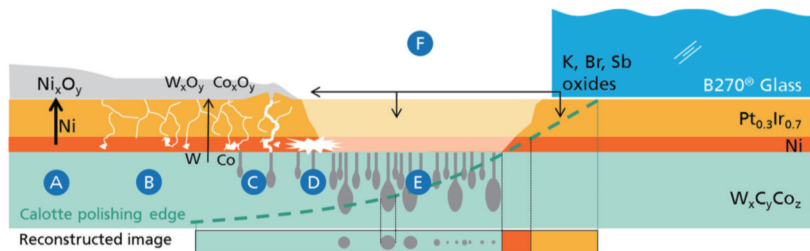


图 17 Pt-Ir 膜层退化模型^[42]

Fig. 17 Pt-Ir film degradation model^[42]

陶瓷膜系在工业界的应用相对较少,虽然其耐磨性较好,但表面容易形成氧化物,使得表面质量变差。Lin 等^[146]在 2006 年对 CrWN 膜层氧化测试时发现表面出现 Cr_2O_3 ,钨含量较低时抗氧化性增强;Chen 等^[147]通过实验发现 $Cr_{37}W_{31}N_{32}$ 和 $Cr_{24}W_{46}N_{30}$ 组分的涂层呈现 FCC 相,具有更好的化学惰性,且在 270~600 °C 条件

下可稳定完成 1000 次热循环测试;Huang 等^[148]通过等离子体增强磁控溅射的方法制备 CrWN 膜层,发现随着 W 含量的增加, WO_3 相的体积分数增加使膜层粗糙度变大。进一步地,Guo 等^[149]利用真空退火扩散和均化非均匀分布的 W 和 Cr 过饱和固溶体,达到膜层时效强化的效果;Feng 等^[150]将 CrWN 涂层与 Pt-Ir 涂层复

合,有效提高了抗氧化性,表面粗糙度 R_a 从 13.8 nm 降至 4.75 nm。天津大学微纳制造实验室提出以 WC 为基底材料,以 TiN、Ti(C,N) 和 Ti(C,O) 为中间结合层,在模具表面镀 α - Al_2O_3 膜层,并开展了 D-ZK3 玻璃及硫系玻璃 IRG206 与膜层的高温接触角测试和模压抗黏附测试,研究发现,相比于贵金属 Ta 膜对硫系玻璃的黏附和碳基 DLC 膜的高温石墨化现象, α - Al_2O_3 膜层对两种玻璃材料均表现出良好的抗黏附性^[70]。

应当指出,膜层的寿命与模具材料、玻璃材料和模压工况息息相关,相关研究结果并不具备普适性;针对各类膜层,一般性的膜层退化机理仍有待深入研究,同时也需开发延长膜层寿命的方法和技术。

4 数值模拟

玻璃模压过程信息难以通过实验技术获取,此前模压工艺参数(温度、压力、速度等)只能通过工程师反复试错来确定,导致玻璃成形过程、热膨胀变化、内部残余应力分布等状态难以表征。基于有限元技术的模压过程数值模拟以可视化的形式对应力、应变、温度等变量进行分析,为模压工艺的优化提供重要依据。

4.1 基于有限元模型的模压过程分析

随着商用有限元分析软件的发展,近年来使用 Deform、Ansys、Abaqus、Marc 等软件进行玻璃模压数值模拟的研究逐渐增多,其中使用最多的是 Abaqus 和

Marc。Moghaddas 在研究硫系玻璃 $As_{40}S_{60}$ 的模压过程中,对比了两种软件的建模、分析和计算效率等,如表 3 所示,相比之下,Abaqus 在计算速度、界面操作上更具优势,但对于黏弹性材料导入更为麻烦,必要时需要通过材料子程序实现,而 Marc 的最大优势就在于强大的黏弹性材料输入界面,可直接输入 Narayanaswamy 等玻璃结构松弛参数,这使得在以往研究中 Marc 的使用频率更高^[151]。表 3 中 \checkmark 代表有该种能力或优势, \times 代表无该种能力或优势。

表 3 Abaqus 和 Marc 软件的对比^[151]
Table 3 Comparison of Marc and Abaqus^[151]

Property	Abaqus	Marc
Capability to reach overall dimension	\checkmark	\checkmark
Capability to reach desired curvature	\checkmark	\checkmark
Capability to predict residual stress	\checkmark	\checkmark
Capability to introduce material properties	\times	\checkmark
Calculation time	\checkmark	\times
Visualization capability	\checkmark	\times
Being user-friendly	\checkmark	\times

为了提高计算效率,建模时往往将回转对称的三维模型简化成二维轴对称模型,如图 18 所示,进一步对模压过程开展温度场、应力场分析和工艺参数优化。

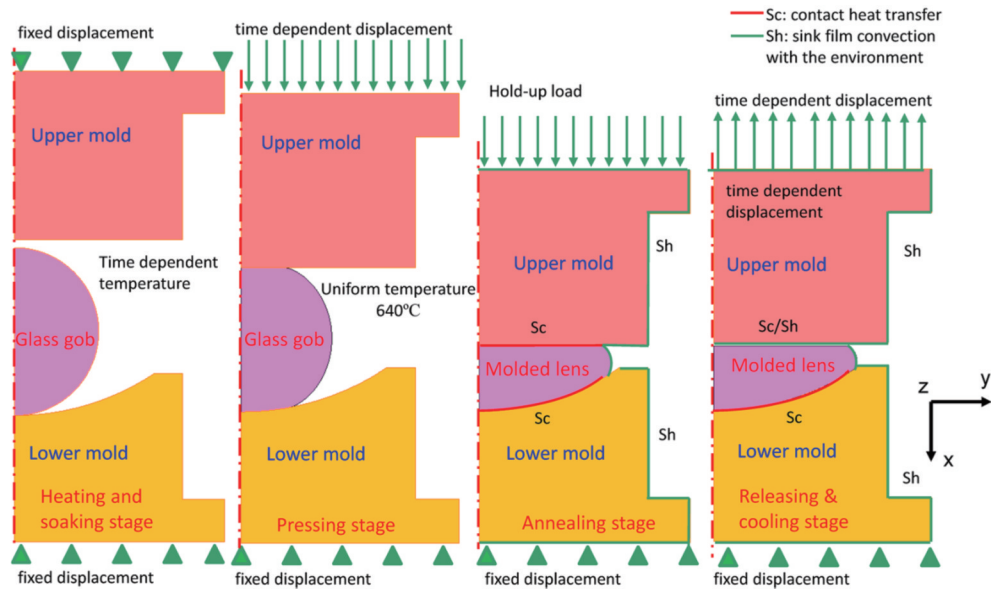


图 18 不同模压阶段的边界条件^[152]

Fig. 18 Boundary conditions of different molding stages^[152]

4.1.1 温度场分析

温度场研究关注模压过程的升温 and 降温两个阶段,升温过程涉及传热方式、传热效率、玻璃的热均匀性等关键问题,降温过程涉及折射率变化、冷却效率、镜片收缩等问题。Yan 等^[36]基于 Deform 软件分析了玻璃圆柱的加热过程,在充分考虑材料模型、热传导

模型的基础上,模拟的最短加热时间与实验结果一致。如图 19 所示,Xie 等^[153]研究了温度、压力和表面粗糙度对接触界面热阻的影响,通过仿真计算了 WC 和耐热不锈钢模具的升温效率,显然后者的效率更高。Zhou 等^[152]对降温过程的温度场开展研究,发现仿真模型中接近接触间隙差异对玻璃内部温度均匀

性影响较大,如图 20 所示,调节接触间隙到 0.1 mm 后,玻璃内部温差从 10 °C 降到 4 °C,因此合理设置接近接触间隙非常重要。Li 等^[62]通过玻璃圆柱温度场仿真发现玻璃内部较大的温度梯度会影响最终的形状和光学性能,降低成像质量。Su 等^[154]基于有限元模

型预测了冷却速率对玻璃折射率的影响,发现冷却速率越高,玻璃折射率变化越大,且镜片边缘区域变化大于中心区域,仿真结果与 Shack-Hartmann 传感器测得的实验结果相比存在偏差,但能够反映折射率变化趋势。

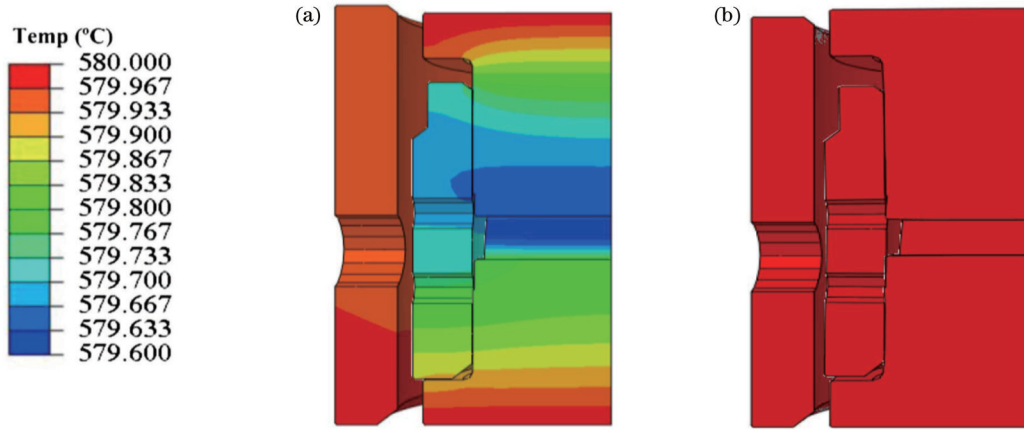


图 19 加热 180 s 后 WC 模具和耐热不锈钢模具温度分布^[153]。(a) WC 模具;(b)耐热不锈钢模具

Fig. 19 Temperature distributions of WC mold and heat-resistant stainless steel mold after heating for 180 s^[153]. (a) WC mold; (b) heat-resistant stainless steel mold

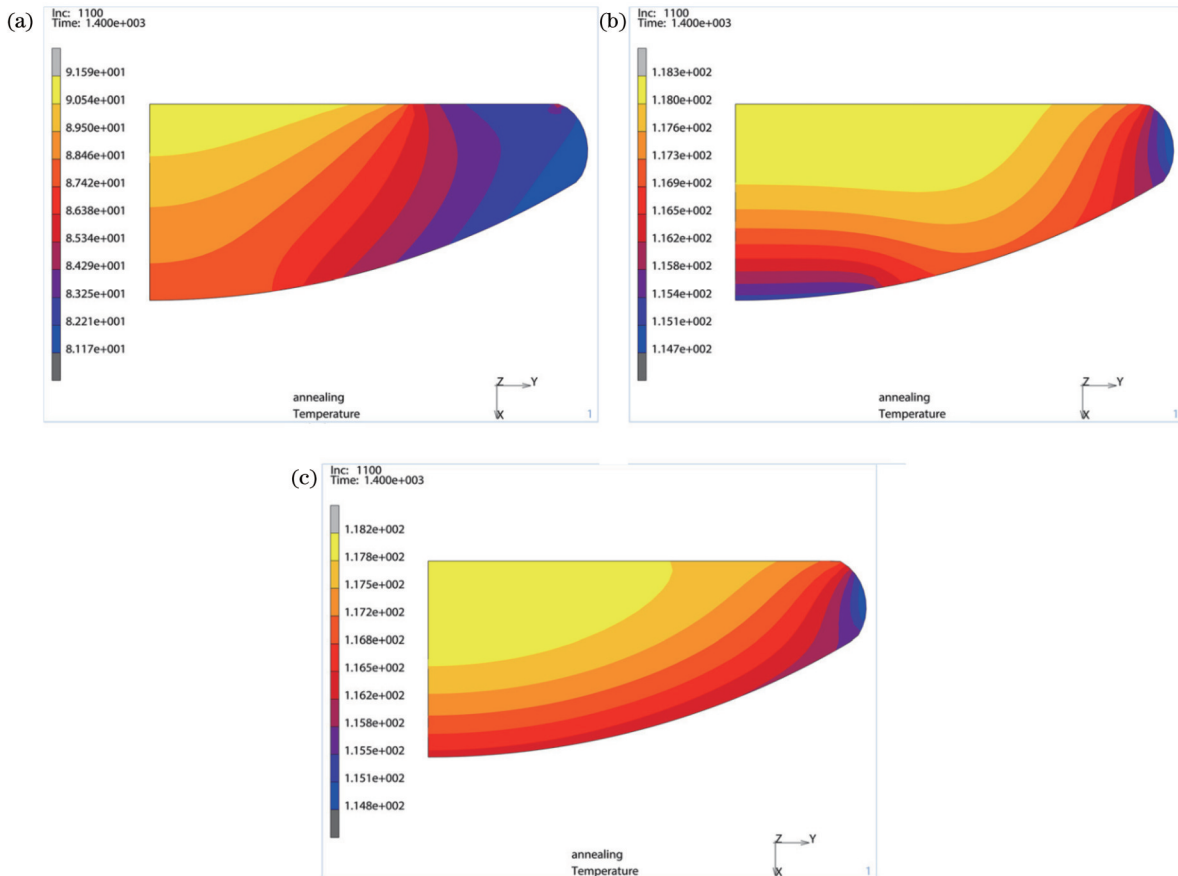


图 20 接近接触间隙对温度分布的影响研究^[152]。(a)无接近接触;(b)接触间隙为 0.1 mm;(c)接触间隙为 0.2 mm

Fig. 20 Influence of near contact gap on temperature distribution^[152]. (a) No near contact; (b) contact gap of 0.1 mm; (c) contact gap of 0.2 mm

4.1.2 应力场分析

应力场分析主要关注模压过程的应力大小和分布以及模压后镜片的残余应力,这对判断模压后透镜是否存在碎裂风险、指导工艺和模具结构优化具有重要

意义。Jain 等^[155]最先使用 Marc 软件对 BK-7 玻璃模压工艺进行优化,研究发现随着模压速度的增大,透镜内部残余应力呈增大趋势,仿真结果如图 21 所示。

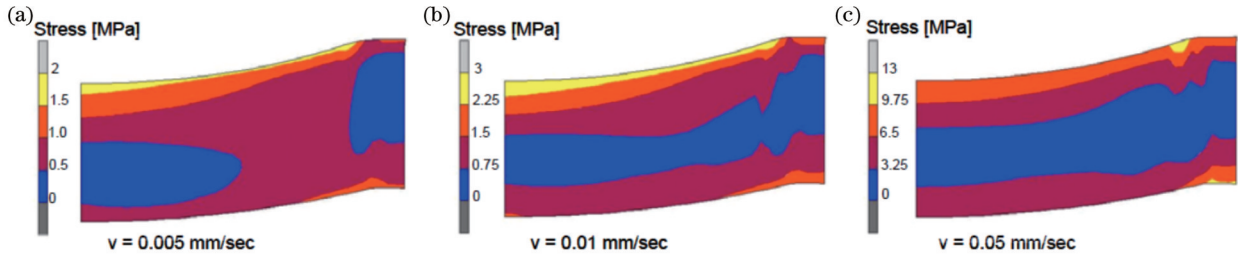


图 21 预测不同模压速度成形透镜的残余应力^[155]。(a) 0.005 mm/s; (b) 0.01 mm/s; (c) 0.05 mm/s

Fig. 21 Predicted residual stress distributions inside molded lens for different molding velocities^[155]. (a) 0.005 mm/s; (b) 0.01 mm/s; (c) 0.05 mm/s

Sarhadi 等^[43]基于 Abaqus 软件对模压后玻璃晶圆残余应力进行分析,发现冷却过快或成形温度较高都

会产生较大的残余应力,使得晶圆的成形尺寸出现较大偏差,部分仿真结果如图 22 所示。

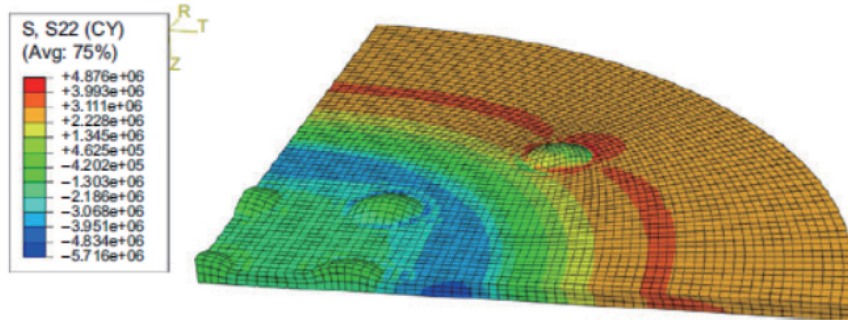


图 22 玻璃晶圆残余切应力^[43]

Fig. 22 Residual tangential stress inside glass wafer^[43]

Liu 等^[73]通过镜片的残余剪切应力分布来判断镜片的碎裂,图 23 展示了镜片截面剪应力的分布,研究发现模压时长、压力、温度都是镜片产生中心放射状碎

裂的关键影响因素,工艺实验验证了仿真结果的可靠性,但仿真并未考虑玻璃与模具的界面摩擦和黏附行为随工艺参数的变化。

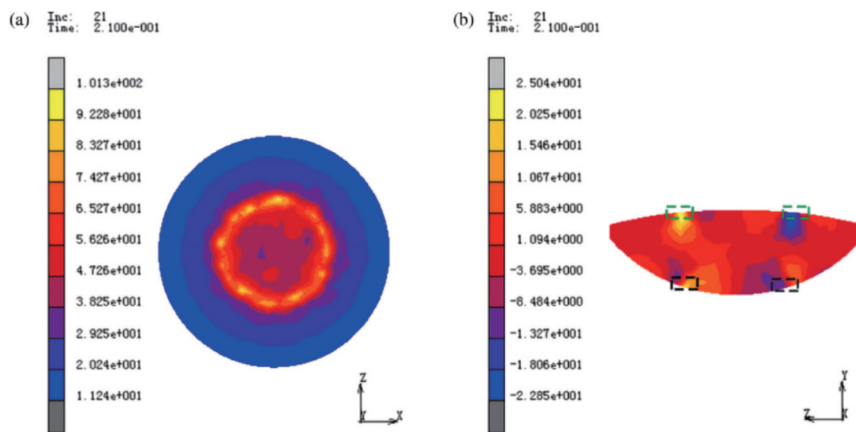


图 23 预测的残余应力分布^[73]。(a) 透镜表面等效应力; (b) 截面剪切应力 σ_{yz}

Fig. 23 Predicted residual stress distributions^[73]. (a) Equivalent stress on lens surface; (b) shear stress σ_{yz} in cross section

4.2 摩擦系数

玻璃与模具的界面摩擦是影响数值模拟准确性的

关键因素,如何获取准确的摩擦系数也是目前研究的热点问题。圆环压缩实验是标定摩擦系数的一种实验

方法,如图 24 所示,通过对玻璃圆环进行单轴压缩,测量压缩后玻璃圆环的内外径与厚度尺寸变化,再与图 25 中的标准摩擦系数曲线进行比对,从而标定出当前实验条件的摩擦系数。Sarhadi 等^[45-46]通过有限元方法标定出 L-BAL42 玻璃在不同温度下的标准摩擦曲线,实验发现随着玻璃温度从 548 °C 升高到 578 °C,摩擦系数从 0.08 增大到 0.4,摩擦系数的增大主要是玻璃黏度的降低所致。Ananthasayanam 等^[156]进一步探讨了圆环压缩实验细节,研究发现当玻璃黏度在 $10^7 \sim 10^{11}$ Pa·s 时,摩擦系数标定曲线对不同的玻璃材料具有普适性,只有当摩擦系数高于 0.3 时,材料属性差异、实验加载速率、外径表面接触状态等影响因素才会凸显,这表明摩擦系数标定曲线在一定条件下具有通用性。



图 24 不同界面状态下的圆环压缩实验结果^[156]

Fig. 24 Results of ring compression test for different interfacial conditions^[156]

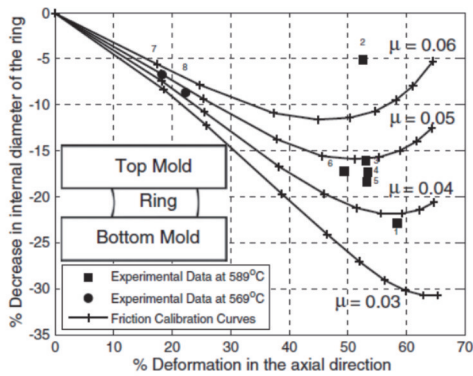


图 25 L-BAL35 玻璃仿真摩擦标定曲线与实验数据对比^[156]

Fig. 25 Comparison of friction calibration curves from simulations with experimental data for L-BAL35 glass^[156]

与圆环压缩实验类似,另一种标定摩擦系数的方法是圆柱压缩实验。通过评定轴向压缩量和圆柱鼓形外径尺寸,将有限元模拟结果与实验结果进行对比,标定摩擦系数,如图 26 所示,圆柱测试件显然比圆环测试件制样更为简单,但更少的评定参数也会使得标定精度降低。Chang 等^[157]利用该方法标定了 K-PBK40 玻璃在不同温度下的摩擦系数;Zhou 等^[158]标定了石墨烯涂层与 BK7 玻璃的摩擦系数;Yu 等^[53]通过数学计算分别标定了 570 °C 温度下 L-BAL42 玻璃与熔石英、碳化钨和镍界面的摩擦系数,分别为 0.56、0.24、0.07,

显然玻璃与镍界面的摩擦系数最小。此外,通过测量摩擦力和正压力也能计算出库仑摩擦系数,这便是剪切力测试法。Mosaddegh 等^[30]基于该原理开发了专用测量系统,并标定了 TiAlN-CrN-S4 涂层表面与 N-BK7 玻璃的高温摩擦系数。

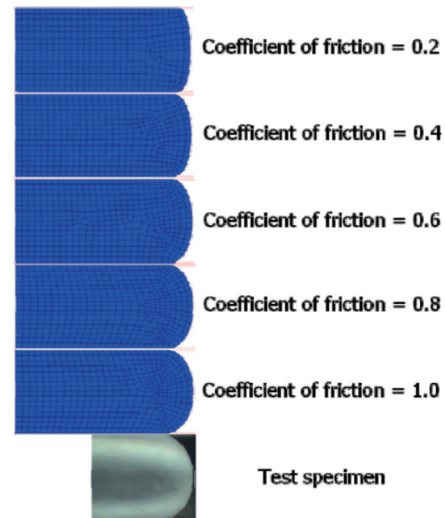


图 26 玻璃圆柱压缩仿真结果^[157]

Fig. 26 Simulation results of glass cylinder compression^[157]

4.3 面形偏差补偿

玻璃及模具材料在高温时存在不同程度的热膨胀,导致模压透镜冷却收缩后偏离模具形状,产生较大的面形误差,严重影响透镜面形精度。预测和控制透镜面形误差是模压工艺的关键技术,准确地获取面形偏差量是前提,将偏差量补偿到模具的加工轮廓是常用方法,补偿后模压透镜恰好收缩到理论轮廓要求的精度范围内。传统的试错法通过反复模压、面形分析和多次模具补偿加工来实现面形收敛,存在成本高、效率低等劣势;相比之下,基于数值模拟预测面形偏差量则具有显著优势,通过将数值解直接用于模具补偿,可实现模具的快速补偿。

Jain^[29]最早基于 Marc 和 Deform 有限元软件开展球面、非球面透镜面形计算,并分析了膨胀系数、模压速度、温度、冷却速度对面形的影响,预测结果与实测结果基本一致。Ananthasayanam 等^[33,159]进一步发现玻璃弹性模量、热流变简单行为参数、应力/结构松弛参数、热导率、热膨胀系数、摩擦系数、受力状态、网格细分程度等因素都会对面形结果产生影响,并基于非球面弯月镜和双凸面镜开展实验研究,部分结果如图 27 所示。

德国夫琅禾费生产技术研究 Dambon 等^[38,160]基于 Ansys 软件建立非球面模压有限元模型,并基于镜片面形偏差(PV)对模具进行补偿修正,将面形偏差为 12 μm 和 5.5 μm 的镜片分别修正到 2 μm 和 1.5 μm,提高了镜片的面形精度。德国 Schott 公司的 Sellier 等^[161]提出了更高精度的面形补偿方法,基于 Abaqus 软件开展透镜面形仿真,将面形结果导入迭代算法中,

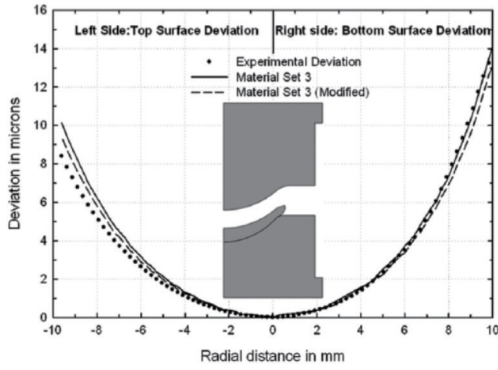


图 27 玻璃应力松弛参数变化对面形的影响^[159]

Fig. 27 Influence of glass stress relaxation parameters on surface profile^[159]

求解后多次补偿模具,得到的面形精度优于 $1\ \mu\text{m}$ 。此后, Klocke 等^[162]又基于 Ansys 和 Abaqus 软件内核二次开发了模压仿真专用 GUI 界面 SimPGM, 该界面可以实现图形化快速建模、面形预测、工艺优化等多种功能,可应用于多种形状非球面透镜乃至晶圆阵列透镜

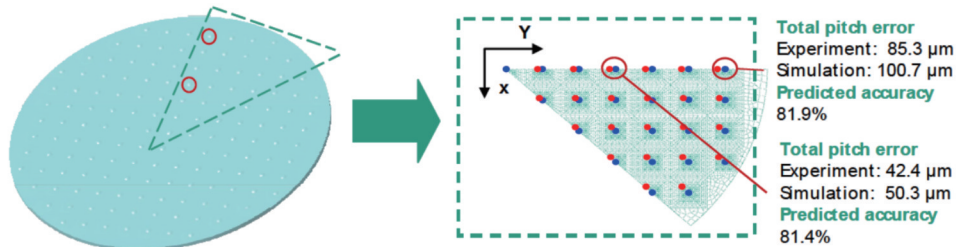


图 28 预测晶圆玻璃透镜位置的精度^[162]

Fig. 28 Accuracy of predicted position of glass wafer lens^[162]

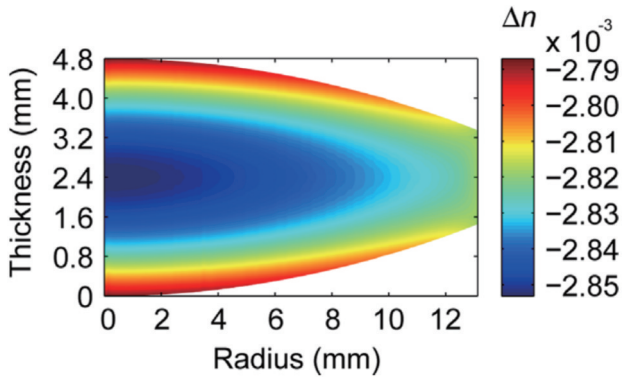


图 29 模压透镜折射率分布的预测^[163]

Fig. 29 Predicted refractive index distribution in molded lens^[163]

5 精密模压成形设备

5.1 模压设备基本构成

温度和压力是玻璃模压成形的基本条件,因此模压设备的基本功能就是控温和加载,模压设备基本构成如图 30 所示,根据各部件的功能可将模压机分为下述 3 个子系统。

1) 温度子系统。温度子系统以升降温部件为基

础,温度传感器为反馈、控制系统为依托而构成。升温一般采用加热板接触传热或红外辐射传热等,降温一般采用冷水板接触降温或冷气吹扫对流换热等。温度传感器一般为热电偶。控制系统多为基于可编程逻辑控制器(PLC)的比例积分微分(PID)控制。

2) 载荷子系统。载荷子系统一般由加载部件、反馈部件和控制系统组成。加载部件可选用气缸或伺服电机,反馈部件一般为力传感器和位移传感器,控制系统为上位机、驱动器、控制器等。

3) 其他系统。其他系统包括成形腔室结构件、外部结构件,模具搬送部件,强电、弱电线路,压缩空气、冷却水监测及其过滤系统,报警、保护系统,用户操作系统等,部分设备还配有真空系统。

的模压过程模拟,模块化的仿真界面大大提高了仿真效率。如图 28 所示,使用 SimPGM 预测模压晶圆的子透镜位置偏差,预测精度在 80% 以上,工业界对 SimPGM 的用户体验也反馈良好。

在此基础上, Su 等^[163]提出了一种关联透镜折射率变化的面形补偿方法。如图 29 所示,基于有限元方法同时模拟透镜内部折射率分布和面形变化,在保证透镜光学性能的前提下寻找模具的最优补偿量,补偿后模压透镜面形偏差(PV)优于 $1.5\ \mu\text{m}$ 。

在过去的十几年里,玻璃透镜模压过程的数值模拟技术取得了较多进展,已经成为玻璃模压制造行业有力的辅助工具。然而,数值模拟仍有提升空间:一是面向高精度的透镜数值模拟精度问题,部分非球面透镜要求面形 PV 值优于 $0.5\ \mu\text{m}$,当前的模拟技术存在精度不足的问题;二是仿真效率的问题,精细的网格划分必然会导致时间成本增加,需要进一步的算法优化,同时当前的设计、仿真、制造三个环节仍处于割裂状态,缺少彼此间数据交互,所以未来亟需开展高度集成化的仿真平台以提高效率。

5.2 商用模压设备

模压设备起初为单站式,即设备只有一个成形室和工位,依次完成镜片成形的各个步骤,具有设备简单、成形精度高等特点,尤其适用于大口径镜片和晶圆阵列的模压。为了提高生产效率,多站式模压机被研制推出,一般拥有 7~12 个工位,每个工位专门负责加热、均热、成形、冷却等任务,呈流水线式生产,可使用多套模具并

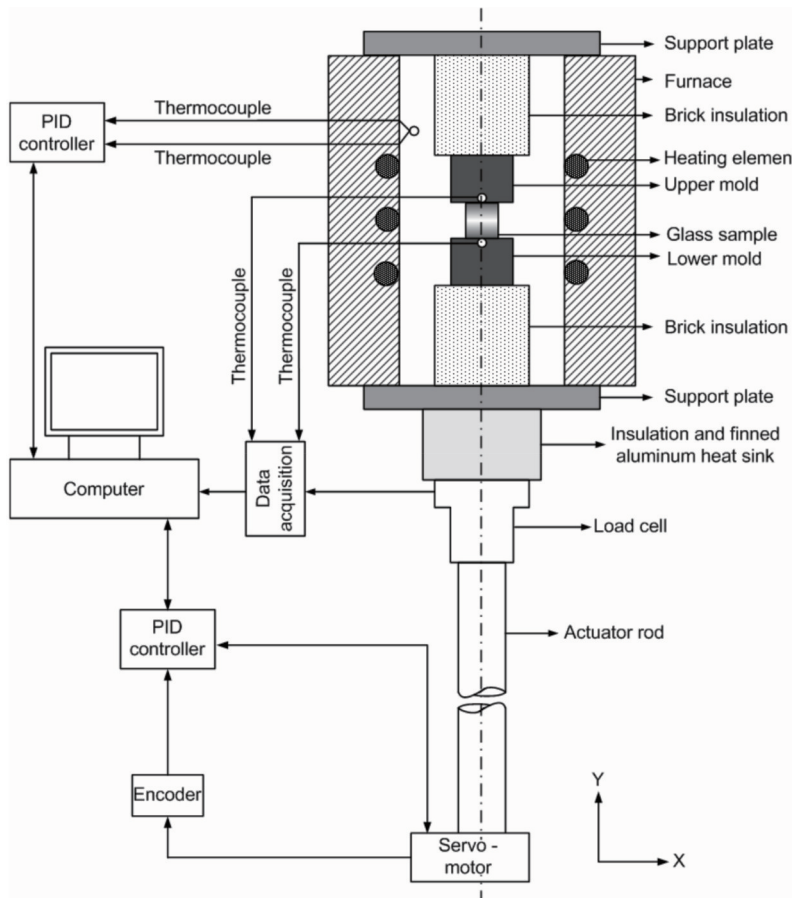




图 30 模压机基本结构示意图^[29]

Fig. 30 Schematic diagram of basic structure of molding machine^[29]




行模压,以大幅提高生产效率。近年来,以日本东芝公 商纷纷推出了单站式、多站式商用模压机,极大地推动
司和美国纳米技术(Nanotech)公司为代表的国内外厂 了玻璃模压产业的发展,主要设备对比如表 4 所示。

表 4 商用玻璃模压机对比

Table 4 Comparison of commercial glass molding machine

Manufacturer	Model	Machine	Feature
Toshiba (Japan) ^[85]	GMP-311V		<ul style="list-style-type: none"> •Single-workstation; •Infrared heating, nitrogen gas controlled cooling; •Maximum mold size: 65-110 mm; •Ultimate vacuum molding: 0.6 Pa or less than 0.6 Pa; •Large diameter lens and multi-layout molding
Nanotech (USA) ^[164]	Nanotech 170GPM		<ul style="list-style-type: none"> •Single-workstation; •Infrared heating, nitrogen gas controlled cooling; •Chamber size: $\varnothing 170$ mm; •Ultimate vacuum molding: 0.6 Pa; •Controller & Software for industrial reliability

续表

Manufacturer	Model	Machine	Feature
Toshiba (Japan) ^[85]	GMP-54-7S		<ul style="list-style-type: none"> •Multi-workstations : 2 heating stations, 2 press stations, 2 gradual cooling stations, 1 steep cooling station; •Infrared heating, temperature preservative plate cooling; •Mass production for small/medium diameter lens
KingDing (China) ^[165]	MD8-65		<ul style="list-style-type: none"> •Multi-workstations: 8; •Mold size: diameter of 20-65 mm, height of 15-45 mm; •Maximum working temperature: 700 °C
AIX-TECH (China) ^[166]	ATM-ASP-11S		<ul style="list-style-type: none"> •Multi-workstations: 11; •Maximum mold size: $\varnothing 65$ mm; •Maximum working temperature: 750 °C; •Maximum pressure: 7060.788 N; •Thermal parallelism: $\leq 30''$

5.3 超声振动辅助模压设备

传统的商用模压设备多用于模压非球面玻璃透镜,而对于微结构的模压实际上存在诸多问题,其中对于V形沟槽、金字塔结构、菲涅耳结构等具有尖锐峰谷和大深宽比的表面,玻璃的流动和变形受阻,存在填充率不足的问题,导致透镜光学性能下降。传统的模压工艺很难克服这一问题,因此,为了解决填充率问题,近年来超声振动辅助模压技术应运而生。

尽管超声振动对于玻璃材料和接触界面的作用机理尚不明确,但超声振动对于降低成形压力、减小接触界面黏附力、提高玻璃填充变形能力的作用非常显著,并在微结构模压方面已初步取得成效。2013年,Hung等^[167]设计了超声振动辅助模压机,该设备将超声振动器放置在模压机顶部,纵向振动频率为 (35 ± 0.5) kHz,振幅为 $3 \mu\text{m}$,并设计了热保护防止高温影响超声工作,实际模压玻璃菲涅耳表面验证发现填充率有所提升。2016年,Xie等^[168]自研了实验用超声振动辅助模压机,如图31所示,在下模板底部放置超声

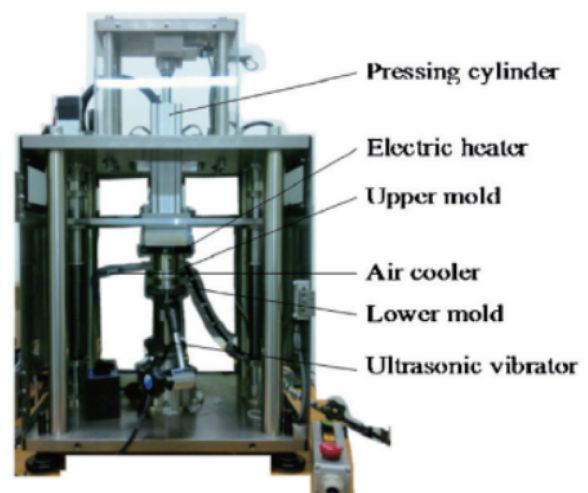


图 31 超声振动辅助玻璃模压机^[168]

Fig. 31 Ultrasonic vibration assisted glass molding machine^[168]

振动器,纵向振动频率为 20 kHz,幅值为 $7.5 \mu\text{m}$,实际用树脂和玻璃模压沟槽,填充率提升明显。2020年,

Yu 等^[169]考虑了高温对超声变幅杆工作频率的影响,通过预调整变幅杆长度保持高温工况频率,进一步提高了设备的稳定性,设备结构如图 32 所示。综上,超

声振动辅助模压设备仍处于研制阶段,未来随着成形机理和设备硬件的日趋完善,该设备将在玻璃微结构模压中发挥更大作用。

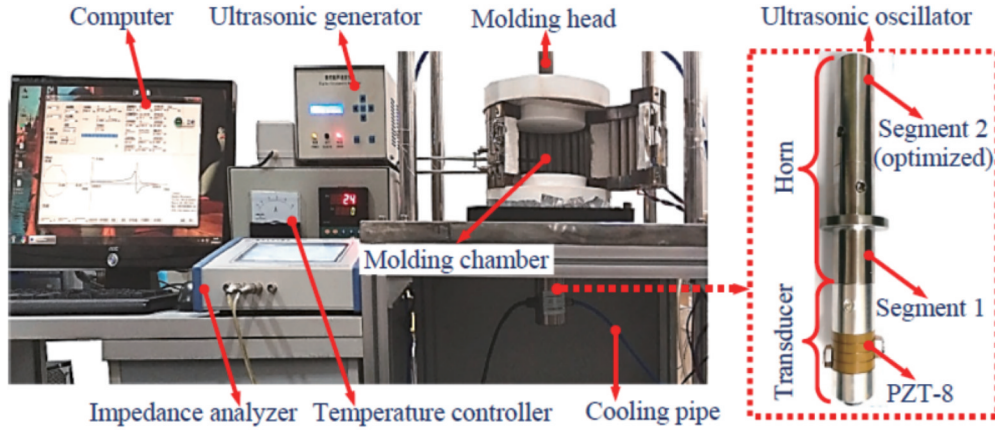


图 32 预调整变幅杆的超声振动辅助玻璃模压机^[169]

Fig. 32 Ultrasonic vibration assisted glass molding machine with pre-adjusted horn^[169]

6 复杂表面光学元件模压成形

6.1 光学自由曲面

光学自由曲面是一类高自由度、非回转对称的光学表面,具有设计自由度高、大幅缩减光学系统体积、灵活校正光学系统误差等突出优势,在光束整形、太阳能集光、LED 照明等现代光学产品中应用广泛^[170-171]。然而,复杂的面形特征给自由曲面的加工和检测都带来了极大挑战,超精密车削、磨削抛光等方法仅限于小批量制造高精度的自由曲面,且加工复杂狭窄表面另需旋转磁流变抛光等特种加工技术^[172],大批量生产仍需借助光学注塑、玻璃模压等技术,其中光学注塑生产

自由曲面镜片已日趋成熟,但材料综合性能更好的玻璃自由曲面元件模压成形却刚刚起步。

2016 年, Vu 等^[173]基于非等温模压技术成功模压了最大口径为 30 mm 的全内反射(TIR)玻璃透镜,该透镜由两个非球面、斜面和外部自由曲面构成,具有聚光准直的作用,如图 33 所示,模压后的透镜面形 PV 达 $3.11 \mu\text{m}$ 。2017 年, Chenard 等^[174]利用一片模压的自由曲面硫系玻璃 $\text{As}_{40}\text{Se}_{50}\text{S}_{10}$ 透镜代替中红外量子级联激光器中原有的两片快慢轴准直镜,将激光器光学系统精简化。2018 年, Gurganus 等^[16]基于 ECO-550 玻璃模压了大尺寸 Alvarez 透镜,其孔径为 45 mm,径厚比为 16:1,总矢高为 $329 \mu\text{m}$,虽获得粗糙度 R_a 为 2 nm 的光

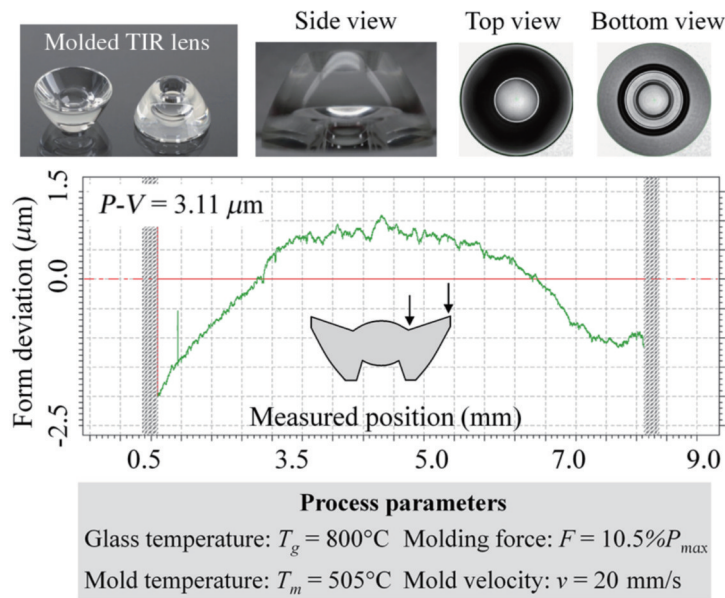


图 33 模压全内反射透镜^[173]

Fig. 33 Molded total internal reflection lens^[173]

滑镜片表面,但由于模具面形偏差 PV 为 10 μm ,镜片面形精度较低,且边缘变形严重;为了解决这些问题,对模具进行再设计,并实际模压硫系玻璃 BD6 ($\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$),获得粗糙度 S_a 为 7 nm 的光滑表面,解决了边缘变形问题,模压后的镜片如图 34 所示^[17]。2019 年, Yan 等^[175]提出基于慢刀伺服运动的砂轮法向磨削法,加工光学复曲面形式的自由曲面,实际加工 WC 模具可实现高精度模压,模压后镜片面形 PV 为 404 nm,镜片中心区域的粗糙度 S_a 为 3.95 nm。

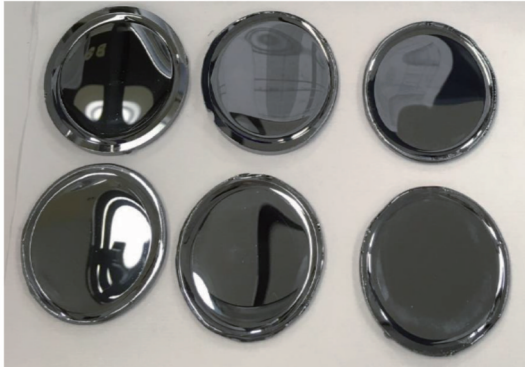


图 34 模压硫系玻璃自由曲面透镜^[17]

Fig. 34 Molded chalcogenide freeform lenses^[17]

当前,自由曲面模压仍不成熟,尤其是模压口径较大的镜片时存在镜片不同区域非对称收缩、面形精度低等问题,同时自由曲面模具制造、面形评价等方面也存在诸多困难,相关技术有待进一步发展。

6.2 微结构表面

随着制造技术的变革性发展,可实现的加工尺度越来越小,制造技术逐步向制造的新范式(即制造 III)的核心使能技术——原子及近原子尺度制造(ACSM)迈进^[176-178],更小尺度的结构给光学元件的发展带来新的契机。为了使透镜实现特定的光学功能,在光学表面加工规律分布的凸起或凹槽等微结构是一种有效的方法,其结构尺度从亚微米到数百微米不等,如衍射环结构、V 沟槽阵列、复眼阵列、菲涅耳环结构等,其中有的能够校正色差、实现波前调控,有的则可以扩大视场、提高照明或成像质量,总之微结构光学元件的应用既有利于光学系统集成化,又能充分提高光学系统性能,是未来光学元件的发展趋势之一^[179]。

Zhou 等^[57-58,180]基于 NiP 模具模压了大量微沟槽及衍射结构阵列,对模具加工、成形机理等方面均进行深入研究,并通过退火等工艺设法提高 NiP 模具的表面硬度,延长模具寿命; Zhang 等^[181]基于 CuNi 基底、NiP 镀层模具模压了衍射结构,如图 35 所示,冷却脱模时,模具材料的热膨胀系数大于玻璃,形成一定间隙,使得脱模更加顺畅,模压后玻璃表面粗糙度 S_a 为 2 nm,玻璃与模具的轮廓偏差小于 0.05 μm 。Zhang 等^[182-183]近年来基于 Si 材料,使用光刻结合等离子体刻蚀技术,制造微柱阵列模具,使用单点金刚石车削制造微透镜阵列模具,并基于常压化学气相沉积技术(APCVD)在模具上沉积纳米石墨碳涂层,该膜层与玻璃微结构间具有更小的黏附力,提高了微结构的充型能力,轮廓偏差在 $\pm 100 \text{ nm}$ 之内。

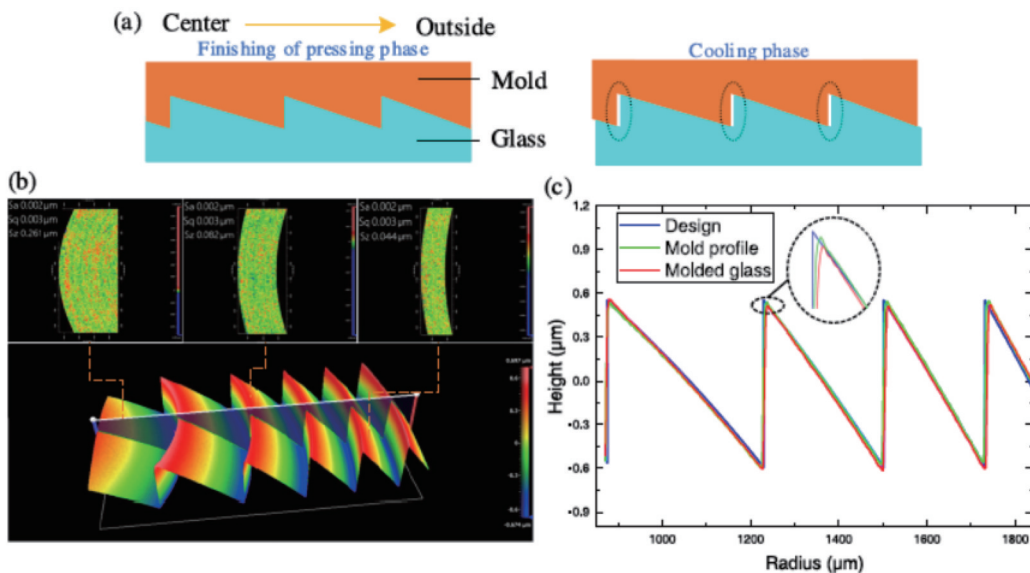


图 35 模压的玻璃衍射结构^[181]。(a)模具与玻璃间收缩;(b)玻璃表面质量;(c)轮廓偏差

Fig. 35 Molded glass diffractive structure^[181]. (a) Contraction between mold and glass; (b) glass surface quality; (c) profile deviation

玻璃微结构的模压制造仍存在诸多问题,目前尚未实现产业化,主要存在以下问题:1)模具材料问题,基于前文提及 WC 等性能良好的模具材料难以加工微

结构,而 NiP、Si 等材料性能较差和寿命较短;2)成形精度问题,沟槽等微结构阻碍了玻璃模压变形,导致结构填充率不足;3)脱模问题,微结构加剧了模具与玻璃

表面的黏附,造成脱模困难,同时镜片表面质量难以保证。基于上述问题,仍需深入研究高质量的玻璃微结构模压技术。

6.3 晶圆透镜阵列

为了进一步提高玻璃透镜的生产效率、节约能源、降低成本,2012年德国夫琅禾费生产技术研究所 Hüntten 等^[184]提出晶圆级模压的方法,如图 36 所示,单次在玻璃晶圆上模压透镜阵列,再将晶圆分割成多片透镜应用于光学系统,显然该方法可大幅提高生产效

率。该团队对晶圆模压过程开展有限元分析,并通过偏心磨削法制造了口径约为 100 mm 的 WC 晶圆模具,包括 150 个子透镜型腔,但实际模压后发现冷却收缩导致的镜片位置偏差超过 200 μm ,精度较低,分析发现这是由模具与玻璃的热膨胀系数不匹配以及较差的模压工艺导致,相关技术有待完善。此后, Sarhadi 等^[43]进一步开展了晶圆级模压数值模拟工作,对应力分布、工艺优化等开展了详细分析。

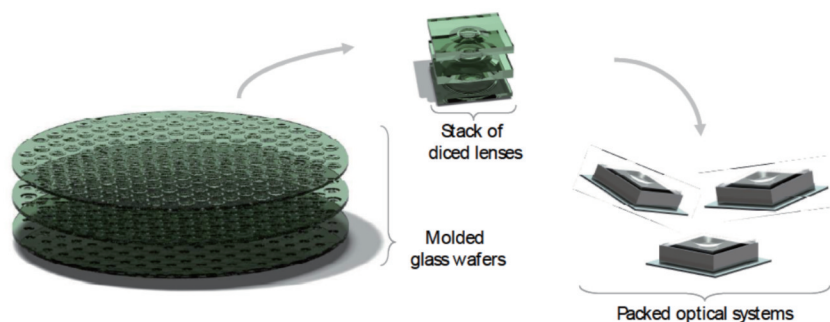


图 36 晶圆级玻璃透镜模压^[184]

Fig. 36 Wafer level glass lens molding^[184]

应当指出,对大尺寸的玻璃晶圆实施可控的模压过程仍有以下难度:1)模具制造难度大;2)子透镜位置、面形控制难度大;3)保证各子透镜的一致性难度大;4)温度、应力分布不均等因素都会对透镜质量带来较大影响。随着对上述问题的深入研究和解决,晶圆级模压技术也将具有更大的发展潜力。

7 总结与展望

从玻璃模压成形的关键技术切入,详细介绍了玻璃材料及其本构模型、模具制造、数值模拟、模压设备等方面的发展,并从复杂表面光学元件模压发展的角度对未来模压技术发展作展望。

7.1 研究现状总结

玻璃透镜模压成形技术的发展已经相对成熟,可实现中小口径透镜的批量化生产,但同时仍存在很多技术难题有待解决。

在玻璃材料方面,相当丰富的商用低熔点玻璃可用于模压,同时硫系玻璃、石英玻璃的应用也在快速发展;对于玻璃材料本构模型,目前虽具备成熟的本构测试方法和数学模型,但受客观实验条件等因素的影响,模型预测精度并不高。

在模具制造方面,可用于模压的高性能模具材料实际并不多,主要依赖于碳化钨、碳化硅等难加工材料,通过超精密磨削加工光学表面。但是磨削加工的效率相对较低、成本较高,且难以加工表面微结构,实际加工能力有限。激光辅助切削和超声椭圆振动切削虽具备加工该类模具的能力,但技术有待进一步发展并在生产中普及。此外,模具的镀膜技术已相对稳定,

类金刚石碳膜成本低但耐温性差,贵金属膜耐温性好但成本高昂,但总体上能够选择一种膜系在常规模压温度(700 $^{\circ}\text{C}$ 以下)对模具进行有效保护。

在数值模拟方面,对模压过程、应力场、温度场、摩擦系数标定、面形精度等具体问题的模拟已经发展得较为成熟,并已经成为工业生产中工艺优化的辅助工具;数值模拟精度仍然有限,对于面形 PV 值优于 0.5 μm 的透镜轮廓很难实现精准预测,同时仿真效率低也是非常明显的弊端。

在模压设备方面,商用设备已经普及,高精度多功能的单站模压机可用于大口径镜片和晶圆阵列的模压,流水线式的多站模压机可使用多套模具并行模压,生产中小口径镜片效率极高。同时,为了解决微结构透镜高精度模压难题,超声辅助模压机也已处于研制阶段。

在复杂表面模压方面,以自由曲面、微结构、晶圆阵列为代表的复杂表面模压仍存在很大难度,其中模具制造难、玻璃成形不充分、模压后的镜片面形精度低等方面的问题仍然突出。

7.2 未来展望

复杂表面光学元件的需求日趋增加,给玻璃模压成形技术带来更多的发展契机。复杂表面光学元件模压是建立在非球面模压的技术基础之上,目前复杂表面光学元件模压发展可以反映出玻璃模压领域众多问题,基于此对该技术的发展有以下展望。

1)玻璃性能提升。低熔点玻璃的出现直接推动了玻璃模压产业化,目前低熔点玻璃以转变温度为 300~700 $^{\circ}\text{C}$ 居多,对模具、膜层材料的耐热性仍具有很高的

要求。如果能够将玻璃的转变温度进一步降到 300 °C 以下,并且玻璃具有较高的化学稳定性和较小的热膨胀系数,则模具和膜层的寿命都将延长,同时对模压复杂的微结构表面也非常利好,因此研制高性能的玻璃材料尤为重要。

2) 模具性能提升。一方面,研制晶粒尺寸小、耐热性好、热膨胀系数小且易于切削加工的模具材料;另一方面,提高现有 WC 等硬脆材料的可加工性和效率,采取切削等更为灵活的加工方法,使其能加工更为复杂的表面。激光辅助切削、超声椭圆振动切削、等离子体刻蚀等技术已初步凸显优势,但刀具磨损和加工精度低等问题亟待解决,类似的能场辅助等特种加工工艺是未来的发展方向之一。此外,研究模具膜层的磨损机理并提出改善措施,研制耐高温、耐磨损、化学惰性强的膜层材料也是提高模具性能的关键。

3) 高精度集成化数值模拟。针对数值模拟精度问题,要从材料本构模型、网格划分、摩擦系数标定、传热系数标定等方面继续开展研究,明确透镜轮廓偏差的产生原理,提出相应的修正方法;针对数值模拟效率低的问题,要从模型简化、求解算法等方面开展研究,进一步可通过构建设计、仿真、制造于一体的集成化平台,提高模压全过程的迭代速度。

4) 多能场辅助模压工艺。为解决复杂表面模压的填充率低、面形精度低、脱模困难等问题,突破传统的模压工艺,引入超声等外部能场辅助模压是一种有效的方式,类似的复合能场加工技术具有发展前景。未来,从能场的作用机理、设备开发等方面开展研究,将会对模压工艺带来实质性提高,更多复杂表面的玻璃光学元件可通过模压成形技术实现。

高性能玻璃材料的性能提升,模具超精密加工、模压工艺过程数值模拟和外场辅助模压等技术的快速发展,有望能够更好地解决复杂表面光学元件模压工艺性差、模具制造难度大和模压精度低等问题,使得玻璃模压技术更广泛地应用于更多复杂表面光学元件的批量化制造。

致谢 感谢南京迈得特光学有限公司在玻璃模压设备、工艺及实验条件方面的大力支持。

参 考 文 献

- [1] Wang Y Q, Liu W Q, Meng X X, et al. Development of an immersive virtual reality head-mounted display with high performance[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6969-6977.
- [2] Chen C C A, Tang J C, Teng L M. Effects of mold design of aspheric projector lens for head up display[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7788: 778806.
- [3] Cha D H, Park H S, Hwang Y, et al. Experimental study of glass molding process and transcription characteristics of mold surface in molding of aspheric glass lenses[J]. *Optical Review*, 2011, 18(2): 241-246.
- [4] McGuire J P, Jr. Manufacturable mobile phone optics: higher order aspheres are not always better[J]. *Proceedings of SPIE*,

- 2010, 7652: 76521O.
- [5] Hong Y G, Bowron J W. Novel optics for high-performance digital projection systems and monitors: current and future[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5002: 111-122.
- [6] Ananthasayanam B. Computational modeling of precision molding of aspheric glass optics[D]. Clemson: Clemson University, 2008.
- [7] 小倉磐夫, 郑锦陵. 最近非球面光学系统的生产技术[J]. *光学技术*, 1991, 17(6): 8-15.
Hirofu K, Zheng J L. Recent production technology of aspheric optical system[J]. *Optical Technique*, 1991, 17(6): 8-15.
- [8] 辛企明. 小非球面零件制造技术的最新进展[J]. *光学技术*, 1993, 19(6): 2-5.
Xin Q M. Latest progress in technique for producing small aspherical element[J]. *Optical Technique*, 1993, 19(6): 2-5.
- [9] Lee E S, Baek S Y. A study on optimum grinding factors for aspheric convex surface micro-lens using design of experiments [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(3/4): 509-520.
- [10] Chen G H, Moore D T. Aspherical surface polishing with a ring polisher[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(4): 559-562.
- [11] Peng Y F, Shen B Y, Wang Z Z, et al. Review on polishing technology of small-scale aspheric optics[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(4): 965-987.
- [12] Walker D D, Brooks D, King A, et al. The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. *Optics Express*, 2003, 11(8): 958-964.
- [13] 中野智允. 非球面透镜的制造[J]. *仪器仪表通讯*, 1972(2): 32-40.
Nakano T. Manufacture of aspheric lens[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1972(2): 32-40.
- [14] 泉谷徹郎, 石灰勲夫, 広田小慎一郎, 等. 非球面透镜的高精度模压[J]. *光学技术*, 1987, 13(1): 7-9.
Churo T, Yukio S, Hiroda K, et al. High precision molding of aspheric lens[J]. *Optical Technique*, 1987, 13(1): 7-9.
- [15] Zhou T F, Yan J W, Masuda J, et al. Investigation on shape transferability in ultraprecision glass molding press for microgrooves[J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(2): 214-220.
- [16] Gurganus D, Owen J D, Davies M A, et al. Precision glass molding of freeform optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10742: 107420Q.
- [17] Gurganus D, Novak S, Symmons A, et al. Process evaluation and optimization for freeform precision glass molding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11487: 1148710.
- [18] 朱秀席. 非球面衍射光学透镜玻璃粘弹性检测及模压成型仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
Zhu X X. Viscoelastic testing and simulation for aspheric diffracted optical glass lens molding[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [19] Eader W H. Method of forming lenses: US1180383[P]. 1916-04-25.
- [20] Webb J H. Apparatus for molding lenses: US2410616[P]. 1946-11-05.
- [21] Paul G. Die for molding or casting optical lenses: US2253697 [P]. 1941-08-26.
- [22] Tillyer E D. Method and apparatus for making lenses: US2304217[P]. 1942-12-08.
- [23] Luce R W. Molding apparatus: US17357737A[P]. 1941-02-25.
- [24] Fumiyasu T, Hisataka S, Fusao N. Apparatus for forming optical glass lens: JP22129392A[P]. 1994-03-08.
- [25] Kichizo K. Press forming device for optical glass parts: JP781791A[P]. 1992-08-27.
- [26] 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.
- [27] Zhang L, Zhou L Y, Zhou W C, et al. Design, fabrication and

- testing of a compact large-field-of-view infrared compound eye imaging system by precision glass molding[J]. Precision Engineering, 2020, 66: 87-98.
- [28] Jain A, Yi A Y. Numerical simulation of compression molding of aspherical glass lenses[C]. AIP Conference Proceedings, 2004, 712(1): 239-244.
- [29] Jain A. Experimental study and numerical analysis of compression molding process for manufacturing precision aspherical glass lenses[D]. Columbus: The Ohio State University, 2006.
- [30] Mosaddegh P, Ziegert J C. Friction measurement in precision glass molding: an experimental study[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011, 357(16/17): 3221-3225.
- [31] Joshi D. Thermo-mechanical characterization of glass and its effect on predictions of stress state, birefringence and fracture in precision glass molded lenses[D]. Clemson: Clemson University, 2014.
- [32] Gaylord S, Tincher B, Petit L, et al. Viscosity properties of sodium borophosphate glasses[J]. Materials Research Bulletin, 2009, 44(5): 1031-1035.
- [33] 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.
- [34] Joshi D, Mosaddegh P, David Musgraves J, et al. Thermo-mechanical characterization of glass at high temperature using the cylinder compression test. Part I: viscoelasticity, friction, and PPV[J]. Journal of Rheology, 2013, 57(5): 1367-1389.
- [35] Zhou T F, Yan J W, Kuriyagawa T. Evaluating the viscoelastic properties of glass above transition temperature for numerical modeling of lens molding process[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6624: 662403.
- [36] Yan J W, Zhou T F, 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.
- [37] Zhou T F, Yan J W, 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.
- [38] Dambon O, Wang F, Klocke F, et al. Efficient mold manufacturing for precision glass molding[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2009, 27(3): 1445-1449.
- [39] Liu G, Vu A T, Dambon O, et al. Glass material modeling and its molding behavior[J]. MRS Advances, 2017, 2(16): 875-885.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Klocke F, Dambon O, Rohwerder M, et al. Model of coating wear degradation in precision glass molding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1): 43-49.
- [43] 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.
- [44] Sarhadi A, Hattel J H, Hansen H N, et al. Thermal modelling of the multi-stage heating system with variable boundary conditions in the wafer based precision glass moulding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(8): 1771-1779.
- [45] Sarhadi A, Hattel J H, Hansen H N. Precision glass molding: validation of an FE model for thermo-mechanical simulation[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2014, 5(3): 297-312.
- [46] 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.
- [47] 胡杨.精密玻璃热压成型的若干关键技术研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2017.
- Hu Y. Investigation of several key technologies in precision glass molding[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [48] 周剑.精密玻璃透镜热压成型技术中的关键问题研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2015.
- Zhou J. Study on several major issues in precision glass compression molding[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [49] 施添翼.精密玻璃透镜热压成型炉结构及温度曲线设计[D].合肥:中国科学技术大学, 2014.
- Shi T Y. The structure & temperature process design of a hot-pressing furnace for precision glass lens molding[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [50] 赵玮.精密热成型光学玻璃透镜的折射率场偏差及矫正方法研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2009.
- Zhao W. Research of refractive index variation and its correction in precision molded glass optics[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- [51] 陶波.热压玻璃透镜里的残余应力研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2013.
- Tao B. Study of residual stresses in compression molding of precision glass lenses[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [52] Yu J W, Luo H, Nguyen T V, et al. Mechanism study on microformability of optical glass in ultrasonic-assisted molding process[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2019, 10(1): 103-114.
- [53] Yu J W, Luo H, Zhang Y Y, et al. A comprehensive study on frictional dependence and predictive accuracy of viscoelastic model for optical glass using compression creep test[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(11): 6606-6617.
- [54] Zhang Y Y, Yin S H, Liang R G, et al. New testing and calculation method for determination viscoelasticity of optical glass[J]. Optics Express, 2020, 28(1): 626-640.
- [55] 朱科军.光学玻璃透镜模压成形的数值仿真和实验研究[D].长沙:湖南大学, 2013.
- Zhu K J. Experimental study and numerical simulation of glass molding process for optical glass lens[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [56] 罗红.微结构玻璃元件超声振动模压成型机理与关键技术研究[D].长沙:湖南大学, 2020.
- Luo H. Research on the mechanisms and key technologies in ultrasonic-assisted molding of microstructured glass elements [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [57] Zhou T F, Yan J W, Liang Z Q, et al. Development of polycrystalline Ni-P mold by heat treatment for glass microgroove forming[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 25-30.
- [58] He Y P, Zhou T F, Dong X B, et al. Diffraction manipulation of visible light with submicron structures for structural coloration fabrication[J]. Optics Express, 2021, 29(6): 9294-9311.
- [59] 解加庆.玻璃微结构阵列模压成形及界面微摩擦研究[D].北京:北京理工大学, 2018.
- Xie J Q. Study on the glass microstructure array molding and the interface micro friction[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [60] Zhou T F, He Y P, Wang T X, et al. A review of the techniques for the mold manufacturing of micro/nanostructures

- for precision glass molding[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2021, 3(4): 042002.
- [61] Zhou T F, Zhu Z C, Liu X H, et al. A review of the precision glass molding of chalcogenide glass (ChG) for infrared optics[J]. Micromachines, 2018, 9(7): 337.
- [62] Li K S, Xu G, Huang X F, et al. Temperature effect on the deformation and optical quality of moulded glass lenses in precision glass moulding[J]. International Journal of Applied Glass Science, 2020, 11(1): 185-194.
- [63] Li K S, Xu G, Wen X B, et al. High-temperature friction behavior of amorphous carbon coating in glass molding process [J]. Friction, 2021, 9(6): 1648-1659.
- [64] 李康森. 光学玻璃精密模压成形数值模拟与试验基础研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
Li K S. The basic research on numerical simulation and experiment of optical glass precision[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018.
- [65] Yan G P, Zhang Y, You K Y, et al. Off-spindle-axis spiral grinding of aspheric microlens array mold inserts[J]. Optics Express, 2019, 27(8): 10873-10889.
- [66] You K Y, Fang F Z. High effective laser assisted diamond turning of binderless tungsten carbide[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 302: 117505.
- [67] You K Y, Fang F Z, Yan G P. Surface generation of tungsten carbide in laser-assisted diamond turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 168: 103770.
- [68] You K Y, Liu G Y, Fang F Z. Investigation of surface integrity on laser pre-heat assisted diamond turning of binderless tungsten carbide[J]. Procedia CIRP, 2022, 108: 566-570.
- [69] Zhang Y, Yan G P, Li Z X, et al. Quality improvement of collimating lens produced by precision glass molding according to performance evaluation[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5033-5047.
- [70] Zhang Y, Yan G P, You K Y, et al. Study on α - Al_2O_3 anti-adhesion coating for molds in precision glass molding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 391: 125720.
- [71] 倪佳佳. 玻璃模压成型的有限元仿真研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
Ni J J. Study on finite element simulation of glass molding process[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2013.
- [72] Liu Y, Xing Y T, Yang C, et al. Simulation of heat transfer in the progress of precision glass molding with a finite element method for chalcogenide glass[J]. Applied Optics, 2019, 58(27): 7311-7318.
- [73] Liu Y, Xing Y T, Li C, et al. Analysis of lens fracture in precision glass molding with the finite element method[J]. Applied Optics, 2021, 60(26): 8022-8030.
- [74] 戚超伟. 硫系玻璃楔形棱镜试验件的精密模压制造研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
Qi C W. Fabrication of test pieces of wedged chalcogenide glass prism with precision compression molding[D]. Suzhou: Soochow University, 2014.
- [75] 马韬, 余景池, 王钦华. 小口径薄型玻璃透镜精密模压制造[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 87-90.
Ma T, Yu J C, Wang Q H. Precision glass molding process of small aperture thin lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 87-90.
- [76] Demkina L I. 光学玻璃生产的物理化学原理[M]. 李荣生, 张福初, 译. 北京: 科学出版社, 1983: 33-51.
Demkina L I. Physical and chemical principles of optical glass production[M]. Li R S, Zhang F C, Transl. Beijing: Science Press, 1983: 33-51.
- [77] 王丽荣. 用于精密模压的低熔点玻璃[J]. 玻璃与搪瓷, 2012, 40(3): 29-32, 43.
Wang L R. Low T_g glass for precision molding[J]. Glass & Enamel, 2012, 40(3): 29-32, 43.
- [78] 杨振, 王栋洋, 靳慧敏, 等. 硫系玻璃集成光子器件综述(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20220152.
Yang Z, Wang Y F, Jin H M, et al. Review of chalcogenide glass integrated photonic devices (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20220152.
- [79] 成虎. 硫系玻璃原料提纯及模压成型工艺研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
Cheng H. Study on the purification and molding technology of chalcogenide glass[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017.
- [80] 黄国雅, 杨睿, 陈超, 等. Ge-Se-Te 硫系玻璃非球面精密模压工艺研究[J]. 玻璃, 2021, 48(8): 8-13.
Huang G Y, Yang R, Chen C, et al. Research on precision molding process of Ge-Se-Te chalcogenide glass aspheric lens [J]. Glass, 2021, 48(8): 8-13.
- [81] 吴海清. 基于硫系玻璃的大视场红外光学系统无热化设计[J]. 红外, 2021, 42(7): 1-8.
Wu H Q. Athermalized design of infrared optical system with large field-of-view based on chalcogenide glass[J]. Infrared, 2021, 42(7): 1-8.
- [82] 吴悠. 碳化硅高温模压石英玻璃接触界面的多尺度力学仿真研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
Wu Y. Multiscale mechanical simulation of contact interface during silicon carbide high temperature molding fused silica[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [83] Dukwen J, Friedrichs M, Liu G, et al. Tribological wear analysis and numerical lifetime prediction of glassy carbon tools in fused silica molding[J]. Wear, 2016, 364/365: 144-153.
- [84] Takahashi M, Sugimoto K, Maeda R. Nanoimprint of glass materials with glassy carbon molds fabricated by focused-ion-beam etching[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44 (7S): 5600-5605.
- [85] Shibaura Machine. High precision optical glass molding press machine GMP series[EB/OL]. [2022-10-10]. <https://www.shibaura-machine.co.jp/en/product/nano/lineup/gmp/>.
- [86] 杨挺青, 罗文波, 徐平, 等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 6-37, 231.
Yang T Q, Luo W B, Xu P, et al. Viscoelastic theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2004: 6-37, 231.
- [87] Gutierrez-Lemini D. Engineering viscoelasticity[M]. New York: Springer, 2014: 7-9.
- [88] NJS. Cemented carbide products[EB/OL]. [2022-10-17]. http://www.njs-japan.co.jp/e_carbide.html.
- [89] Fujillo. Material property[EB/OL]. [2022-10-17]. <https://www.fujidie.co.jp/products/>.
- [90] Asgar M A, Kim J, Haq M R, et al. A comprehensive review of micro/nano precision glass molding molds and their fabrication methods[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 812.
- [91] Masuda J, Yan J W, Tashiro T, et al. Microstructural and topographical changes of Ni-P plated moulds in glass lens pressing[J]. International Journal of Surface Science and Engineering, 2009, 3(1/2): 86-102.
- [92] Yan J W, Oowada T, Zhou T F, 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.
- [93] Grunwald T, Wilhelm D P, Dambon O, et al. Influence of glassy carbon surface finishing on its wear behavior during precision glass moulding of fused silica[J]. Materials, 2019, 12 (5): 692.
- [94] Tokai. Fine carbon[EB/OL]. [2022-10-17]. https://www.tokaicarbon.co.jp/en/products/fine_carbon/.
- [95] NTT-AT. Nanoimprint mold[EB/OL]. [2022-10-17]. https://www.ntt-at.com/product/Nanoimprint_Mold/.
- [96] Bifano T G, Dow T A, Scattergood R O. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials[J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113(2): 184-189.
- [97] Suzuki H, Kodera S, Maekawa S, et al. Study on precision

- grinding of micro aspherical surface: feasibility study of micro aspherical surface by inclined rotational grinding[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1998, 64(4): 619-623.
- [98] Tohme Y E. Grinding aspheric and freeform micro-optical molds [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6462: 64620K.
- [99] Brinksmeier E, Mutlugünes Y, Klocke F, et al. Ultra-precision grinding[J]. CIRP Annals, 2010, 59(2): 652-671.
- [100] Yan G P, You K Y, Fang F Z. Ultraprecision grinding of small-aperture concave aspheric mould insert with tilt axis method[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 505-510.
- [101] Hwang Y, Kuriyagawa T, Lee S K. Wheel curve generation error of aspheric microgrinding in parallel grinding method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 1929-1933.
- [102] Chen F J, Yin S H, Huang H, et al. Fabrication of small aspheric moulds using single point inclined axis grinding[J]. Precision Engineering, 2015, 39: 107-115.
- [103] Chen F J, Yin S H, Huang H, et al. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 480-486.
- [104] Zhou T F, He Y P, Wang T X, et al. Algorithm of micro-grooving and imaging processing for the generation of high-resolution structural color images[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2020, 3(3): 187-198.
- [105] Shahinian H, Zaytsev D, Navare J, et al. Micro laser assisted machining (μ -LAM) of precision optics[C]//Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT), June 10-12, 2019, Washington, DC. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2019: OT1A.5.
- [106] Kang D, Navare J, Su Y, et al. Observations on ductile laser assisted diamond turning of tungsten carbide[C]//Optical Design and Fabrication 2019 (Freeform, OFT), June 10-12, 2019, Washington, DC. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2019: JT5A.11.
- [107] Micro-LAM. Tungsten-Carbide-Apps[EB/OL]. [2022-10-18]. <https://www.micro-lam.com/wp-content/uploads/2021/10/Tungsten-Carbide-Apps.pdf>.
- [108] Kode S K, Ellis J D, Mohammadi H. Laser assisted diamond turning of tungsten carbide and the material properties required to obtain optical surface finish suitable for lens molds[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12219: 1221906.
- [109] You K Y, Fang F Z, Yan G P, et al. Experimental investigation on laser assisted diamond turning of binderless tungsten carbide by in-process heating[J]. Micromachines, 2020, 11(12): 1104.
- [110] Guo J, Zhang J G, Pan Y N, et al. A critical review on the chemical wear and wear suppression of diamond tools in diamond cutting of ferrous metals[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(1): 012001.
- [111] Suzuki N, Haritani M, Yang J, et al. Elliptical vibration cutting of tungsten alloy molds for optical glass parts[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 127-130.
- [112] Zhang J G, Suzuki N, Wang Y L, et al. Fundamental investigation of ultra-precision ductile machining of tungsten carbide by applying elliptical vibration cutting with single crystal diamond[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2644-2659.
- [113] 李占杰. 超精密切削黑色金属的工艺及机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
Li Z J. Investigation on the processes and mechanisms of diamond cutting ferrous metals[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [114] Wang J S, Fang F Z, Yan G P, et al. Study on diamond cutting of ion implanted tungsten carbide with and without ultrasonic vibration[J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2019, 2(3): 177-185.
- [115] 王金石. 脆性材料纳米切削机理及高效加工技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
Wang J S. Nanometric cutting mechanism and high-efficient machining technique of brittle materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [116] Prater K, Dukwen J, Scharf T, et al. Micro-structuring of glassy carbon for precision glass molding of binary diffractive optical elements[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(11): 3407-3416.
- [117] Hans L E, Prater K, Kilchoer C, et al. Wafer-level microstructuring of glassy carbon[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8974: 89740Y.
- [118] He P, Li L, Yu J F, et al. Graphene-coated Si mold for precision glass optics molding[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2625-2628.
- [119] Tamura T, Umetani M, Yamada K, et al. Fabrication of antireflective subwavelength structure on spherical glass surface using imprinting process[J]. Applied Physics Express, 2010, 3(11): 112501.
- [120] Zhou T F, Xu R Z, Ruan B S, et al. Fabrication of microlens array on 6H-SiC mold by an integrated microcutting-etching process[J]. Precision Engineering, 2018, 54: 314-320.
- [121] Alberio J, Nieradko L, Gorecki C, et al. Si moulds for glass and polymer microlenses replication[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6992: 69920A.
- [122] Alberio J, Nieradko L, Gorecki C, et al. Fabrication of spherical microlenses by a combination of isotropic wet etching of silicon and molding techniques[J]. Optics Express, 2009, 17(8): 6283-6292.
- [123] Yasui M, Kaneko S, Takahashi M, et al. Property variation of Ni-W electroformed mold for micro-press molding[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(11S): 11NJ05.
- [124] Kasztelaniec R, Kujawa I, Stepień R, et al. Development of diffraction binary grating using hot embossing processing with electroformed nickel mold for broadband IR optics[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 107: 103293.
- [125] Hasegawa T, Aizawa T, Inohara T, et al. Hot mold stamping of optical plastics and glasses with transcription of super-hydrophobic surfaces[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 15: 1437-1444.
- [126] Wang L, Chen Q D, Cao X W, et al. Plasmonic nano-printing: large-area nanoscale energy deposition for efficient surface texturing[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(12): e17112.
- [127] 颜晓强, 王晗, 张嘉荣, 等. 小口径非球面小球头接触式抛光及磁流变抛光组合加工[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 274-287, 323.
Yan X Q, Wang H, Zhang J R, et al. Combined process of small ball-end contact polishing and magnetorheological polishing for small aperture aspheric surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 274-287, 323.
- [128] Lee H, Kim J, Kang H. Airbag tool polishing for aspherical glass lens molds[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 153-158.
- [129] Wang Y Q, Yin S H, Hu T. Ultra-precision finishing of optical mold by magnetorheological polishing using a cylindrical permanent magnet[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(9): 3583-3594.
- [130] 尹韶辉, 龚胜, 何博文, 等. 小口径非球面斜轴磨削及磁流变抛光组合加工工艺及装备技术研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 205-211.
Yin S H, Gong S, He B W, et al. Development on synergistic process and machine tools integrated inclined axis grinding and magnetorheological polishing for small aspheric surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 205-211.
- [131] Suzuki H, Hamada S, Okino T, et al. Ultraprecision finishing

- of micro-aspheric surface by ultrasonic two-axis vibration assisted polishing[J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 347-350.
- [132] Guo J, Morita S Y, Hara M, et al. Ultra-precision finishing of micro-aspheric mold using a magnetostrictive vibrating polisher [J]. *CIRP Annals*, 2012, 61(1): 371-374.
- [133] Zhang P F, Li L G, Yang Z, et al. Achieving sub-nanometer roughness on aspheric optical mold by non-contact polishing using damping-clothed tool[J]. *Optics Express*, 2022, 30(15): 28190-28206.
- [134] Kaku T, Kuriyagawa T, Yoshihara N. Electrorheological fluid-assisted polishing of WC micro aspherical glass moulding dies[J]. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2006, 9(1/2): 109-119.
- [135] Mishra V, Burada D R, Karar V, et al. Investigations on flexible pad polishing for nano-finishing of freeform optics mold [J]. *Journal of Micromanufacturing*, 2020, 3(2): 99-112.
- [136] Wang D Y, Chang C L, Ho W Y. Oxidation behavior of diamond-like carbon films[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 120/121: 138-144.
- [137] Bernhardt F, Georgiadis K, Dolle L, et al. Development of a ta-C diamond-like carbon (DLC) coating by magnetron sputtering for use in precision glass molding[J]. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2013, 44(8): 661-666.
- [138] Nanofilm. NTI TAC-ON Brochure[EB/OL]. [2022-10-19]. <https://www.nti-nanofilm.com/resources/brochures>.
- [139] Lee W Y, Choi J H. Application of ta-C coating on WC mold to molded glass lens[J]. *Tribology and Lubricants*, 2019, 35(2): 106-113.
- [140] Jang Y J, Kim J I, Kim W S, et al. Thermal stability of Si/SiC/ta-C composite coatings and improvement of tribological properties through high-temperature annealing[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 3536.
- [141] 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.
- [142] Wei J J, Zhu X Y, Chen L X, et al. High quality anti-sticking coating based on multilayer structure[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 362: 72-77.
- [143] Peng Z R, Rohwerder M, Choi P P, et al. Atomic diffusion induced degradation in bimetallic layer coated cemented tungsten carbide[J]. *Corrosion Science*, 2017, 120: 1-13.
- [144] Peng Z R, Rohwerder M, Friedrichs M, et al. Degradation mechanism of molds for precision glass molding[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2017, 23(S1): 698-699.
- [145] Friedrichs M, Peng Z R, Grunwald T, et al. PtIr protective coating system for precision glass molding tools: design, evaluation and mechanism of degradation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125378.
- [146] 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(3/4): 1316-1322.
- [147] 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.
- [148] Huang X F, Xie Z W, Li K S, et al. Microstructure, wear and oxidation resistance of CrWN glass molding coatings synthesized by plasma enhanced magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2020, 174: 109206.
- [149] Guo F, Huang X F, Xie Z W, et al. Understanding the age-hardening mechanism of CrWN coating[J]. *Thin Solid Films*, 2020, 711: 138298.
- [150] Feng C, Huang X F, Li K S, et al. Tailoring growth structure and oxidation performance of CrWN glass molding coating via Pt and Ir doping[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(8): 10574-10578.
- [151] Moghaddas M A. Comparison of computational modeling of precision glass molding of infrared lenses[D]. Columbus: The Ohio State University, 2014.
- [152] Zhou J, Li M J, 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.
- [153] Xie J Q, Zhou T F, Ruan B S, 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.
- [154] Su L J, 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.
- [155] Jain A, Yi A Y. Viscoelastic stress analysis of precision aspherical glass lens forming process using finite element method [J]. *Precision Machining*, 2004, 1: 1-4.
- [156] 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: 100-110.
- [157] Chang S H, Lee Y M, Jung T S, et al. Simulation of an aspheric glass lens forming behavior in progressive GMP process [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 908(1): 1055-1060.
- [158] Zhou J, He P, Yu J F, et al. Investigation on the friction coefficient between graphene-coated silicon and glass using barrel compression test[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2015, 33(3): 031213.
- [159] 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.
- [160] Wang F, Chen Y, Klocke F, et al. Numerical simulation assisted curve compensation in compression molding of high precision aspherical glass lenses[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, 131(1): 011014.
- [161] Sellier M, Breitbach C, Loch H, et al. An iterative algorithm for optimal mould design in high-precision compression moulding [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2007, 221(1): 25-33.
- [162] Klocke F, Wang F, Wang Y, et al. Development of a flexible and reliable numerical simulation for precision glass molding of complex glass optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8416: 841603.
- [163] Su L J, 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: 98-103.
- [164] Nanotech. The Nanotech 170GPM[EB/OL]. [2022-10-21]. <https://nanotechsys.com/170gpm/>.
- [165] 金鼎光学. 非球面模压机[EB/OL]. [2022-10-21]. <http://www.kdomgd.com/product.asp>. Kingding. Aspheric molding machine[EB/OL]. [2022-10-21]. <http://www.kdomgd.com/product.asp>.
- [166] 亚琛科技. 玻璃非球面模压成型机[EB/OL]. [2022-10-21]. <http://aix-tech.com/aix-tech/products.html>. Aachen. Glass aspheric molding machine[EB/OL]. [2022-10-21]. <http://aix-tech.com/aix-tech/products.html>.
- [167] Hung J C, Tsai Y P, Hung C. Development of a new apparatus for ultrasonic vibration-assisted glass hot embossing process[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(1): 222-227.
- [168] Xie J Q, Zhou T F, Liu Y, et al. Mechanism study on microgroove forming by ultrasonic vibration assisted hot pressing [J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 270-277.
- [169] Yu J W, Luo H, Nguyen T V, et al. Eigenfrequency characterization and tuning of Ti-6Al-4V ultrasonic horn at high temperatures for glass molding[J]. *Ultrasonics*, 2020, 101: 106002.

- [170] Fang F Z, Zhang X D, Weckenmann A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. CIRP Annals, 2013, 62(2): 823-846.
- [171] Kumar S, Tong Z, Jiang X Q. Advances in the design and manufacturing of novel freeform optics[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2022, 4(3): 032004.
- [172] Kumar M, Das M, Yu N. Surface roughness simulation during rotational-magnetorheological finishing of poppet valve profiles [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2022, 5(3): 259-273.
- [173] Vu A T, Kreilkamp H, Dambon O, et al. Nonisothermal glass molding for the cost-efficient production of precision freeform optics[J]. Optical Engineering, 2016, 55(7): 071207.
- [174] Chenard F, Alvarez O, Yi A. Chalcogenide molded freeform optics for mid-infrared lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10181: 101810U.
- [175] Yan G P, Fang F Z. Fabrication of optical freeform molds using slow tool servo with wheel normal grinding[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 341-344.
- [176] Fang F Z. The three paradigms of manufacturing advancement [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 504-505.
- [177] Fang F Z. Atomic and close-to-atomic scale manufacturing: perspectives and measures[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2020, 2(3): 030201.
- [178] Wang J S, Fang F Z, Li L. Cutting of graphite at atomic and close-to-atomic scale using flexible enhanced molecular dynamics [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2022, 5(3): 240-249.
- [179] Zhang L, Yi A Y, Yan J W. Flexible fabrication of Fresnel micro-lens array by off-spindle-axis diamond turning and precision glass molding[J]. Precision Engineering, 2022, 74: 186-194.
- [180] Yu Q, Zhou T F, He Y P, et al. Annealed high-phosphorus electroless Ni-P coatings for producing molds for precision glass molding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 262: 124297.
- [181] Zhang Y Y, Liang R G, Spires O J, et al. Precision glass molding of diffractive optical elements with high surface quality [J]. Optics Letters, 2020, 45(23): 6438-6441.
- [182] Zhang L, Yan J W. Study on nano-graphitic carbon coating on Si mold insert for precision glass molding[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 448: 128893.
- [183] Zhang L, Yan J W. Amorphous carbon coated silicon wafer as mold insert for precision glass molding[J]. Procedia CIRP, 2022, 108: 525-530.
- [184] Hüntten M, Hollstegge D, Klocke F. Wafer level glass molding [J]. Key Engineering Materials, 2012, 523/524: 1001-1005.

Precision Molding for Glass Optical Components

Liu Guangyu, Fang Fengzhou*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Laboratory of Micro/Nano Manufacturing Technology (MNMT), Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract

Significance As one of the important optical components in optical systems, lenses are widely used in products for imaging, illumination, and optical communications. In general, lenses can be divided into spherical, aspheric, freeform, and microstructure surfaces according to different surface shapes. Among them, the spherical lens is the simplest optical component in terms of design and manufacturing, but the aberration problem exists when a single lens is used, and the bulky lens assembly has to be used for compensation. In contrast, aspheric and freeform lenses have more flexible surface shapes, and the specific optical performance of lenses can be improved by such methods as aberration correction, beam shaping, and field of view expansion, which are beneficial for realizing high precision and integration of optical systems.

Optical glass and plastic are the main raw materials for lens manufacturing. Plastic is more economic and lighter, but glass has better mechanical properties, higher thermal stability, and higher refractive index, which meets the demanding requirements of optical performance and stability for most products. High-precision glass spherical lenses have achieved mass production by grinding and polishing, but aspheric, freeform, and microstructure lenses can only be processed one by one with the traditional subtractive manufacturing methods for their complex and irregular shapes. In some cases, even several non-traditional polishing methods such as magnetorheological finishing (MRF) and ion beam polishing (IBP) have to be used to produce high-precision surfaces, which is time-consuming and costly. Therefore, an effective and low-cost processing method is required for the mass production of such lenses.

Molding is a classical processing method to produce parts by replicating the mold shape. However, conventional fused silica glass was not friendly to the mold life for its high transition temperature (about 1300 °C), which limited the development of glass molding. Until the 1980s, glass with a low transition temperature emerged, and it could be molded at 300–700 °C, which promoted the rapid development of glass molding. Nowadays, precision glass molding (PGM) has become a main technology to realize the mass production of glass optical components and the manufacturing of numerous aspheric lenses and partial freeform and microstructure lenses, which only takes a few minutes for one lens. PGM has significant advantages over traditional manufacturing technologies, such as low costs, low pollution, high efficiency, and net shapes, which presents superior development potential.

PGM is a complex process affected by factors such as glass material properties, mold manufacturing, process parameters, and molding machines. As higher requirements for shape complexity and quality of lenses are posed, many problems have been exposed and aroused the interest of researchers. There are many advances in glass, molds, machines, and numerical simulations. Therefore, it is important to summarize the current progress and prospect the development trend and challenges of PGM.

Progress This study introduces the principle of PGM for glass optical components and elaborately summarizes the recent progress in glass material development, mold manufacturing, molding process optimization combined with finite element simulation, and molding machines.

Firstly, various glass materials and glass constitutive models including the Maxwell model, Kelvin model, Burgers model, and generalized Maxwell model are introduced (Figs. 5 and 6), and the modeling methods of creep and stress relaxation are analyzed.

Secondly, the properties of various mold materials are compared, among which tungsten carbide has the best overall performance (Table 1). Ultra-precision grinding, cutting, etching, and polishing are the main methods to produce high-precision molds. The newly developed off-spindle-axis spiral grinding method is employed to fabricate the aspheric micro-lens array (Fig. 9), and an effective laser-assisted turning method is proposed to achieve the rapid mold machining (Fig. 12). Subsequently, the typical film materials for molds are compared (Table 2), and the high-hardness Ta-C film is deposited on the mold by the filtered cathodic vacuum arc method, which shows low friction and wear. The degradation mechanism of the noble metal Pt-Ir film and its optimized structure are presented (Fig. 17).

Thirdly, numerical simulation is applied to analyze temperature, stress, friction, and surface shape accuracy in molding. Various molding machines including the single-workstation machine, multi-workstation machine, and ultrasonic vibration-assisted glass molding machine are introduced, and it is found that the multi-workstation machine is more suitable for mass production. The profile accuracy of microgroove molding by the ultrasonic vibration-assisted machine is also improved (Fig. 31).

Finally, the pioneering studies on molding lenses with flexible and complex surfaces such as freeform and microstructure lenses, as well as lens wafer arrays are summarized.

Conclusions and Prospects In summary, PGM has been widely employed to produce lenses with aspheric and various flexible surfaces. Technologies in the field of glass material, mold manufacturing, numerical simulation, and molding machines have developed comprehensively and made great progress. However, as the demand of freeform components as well as microstructure and wafer array lenses is increasing, it still faces many challenges in molding complex surfaces in mass production. In the future, these difficulties will be gradually solved, and PGM will become more advanced with high-performance glass and mold materials, effective mold manufacturing technologies, integrated numerical simulation, and external energy field-assisted molding technologies.

Key words optical design; optical glass; aspheric lens; freeform lens; ultra-precision machining; precision glass molding; microstructure manufacturing