

湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划 项目 申 报 表

项目名称: 小口径镗系玻璃镜片精密热压成型仿真与实验				
学校名称	长沙理工大学			
学生姓名	学 号	专 业	性 别	入 学 年 份
李明	201621030222	机制设计制造及其自动化	男	2016
张浪	201621030211	机制设计制造及其自动化	男	2016
陈驰	201621030231	机制设计制造及其自动化	男	2016
陈旭鸿	201621030216	机制设计制造及其自动化	男	2016
金程	201621030208	机制设计制造及其自动化	男	2016
指导教师	唐昆, 李河清	职称	讲师, 副教授	
<p>学生曾经参与科研的情况</p> <p style="text-indent: 2em;">项目组成员李明参加了长沙理工大学大学生科技项目《FSAE 制动液压管道布局优化设计》，项目组成员张浪参加长沙理工大学大学生科技项目《FSAE 赛车悬架立柱设计与优化》，主要负责实验开展和实验数据整理等工作。</p>				
<p>指导教师承担科研课题情况</p> <p style="text-indent: 2em;">以项目负责人身份分别主持国家自然科学基金项目、湖南省教育厅项目、湖南省自然科学基金项目、工程车辆轻量化与可靠性技术湖南省高校重点实验室开放基金项目各一项。</p>				

项目研究和实验的目的、内容和要解决的主要问题

一、项目研究和实验的目的

近年来，伴随各类光电产品小型化、精密化的发展趋势，高精度、高性能小口径玻璃镜片的需求与日俱增。该类镜片多采用非球面面型，可有效修正影像的畸变、色差、彗差，改善成像质量、提高系统鉴别能力及简化仪器结构。同时，在各类玻璃材质中，镧系玻璃具有高折射率、低色散的特性，因此广泛应用于军用与民用光电系统中。目前，对于小口径镧系玻璃镜片的批量、精密制造，主要采用精密热压成型技术，相比传统研抛法，该技术具有工序少，成本低，工艺参数可控，环境友好等优点，可获得高尺寸及面形精度、低表面粗糙度的玻璃镜片。

然而，由于镧系玻璃脆而易碎，直接通过成型实验来确定最优工艺参数的方法耗时长、成本高，且易导致昂贵的精密模具出现损伤。因此，本项目拟将有限元仿真分析技术运用于镧系玻璃的精密热压成型，通过模拟不同工艺参数条件下镜片的应力、温度分布及轮廓偏移量等，对实验条件下成型镜片的表面质量进行预测，以此获得优化的工艺参数，并采用优化参数进行模压成型实验，以验证仿真分析模型及分析结果的有效性。通过项目的开展，可提高小口径镧系玻璃镜片热压成型工艺的可靠性，并降低其成本。

二、研究内容

1、通过对镧系玻璃应力松弛、结构松弛及热传递模型的分析，根据玻璃及模具的材料热力学性能参数，并结合模压工艺实验参数，建立起镧系玻璃镜片热压的有限元模型；

2、通过对热压成型过程五个阶段，即加热升温、高温浸润、加压变形、去应力退火和冷却固化的连续仿真，获得不同工艺参数条件下镜片的应力、温度分布及轮廓偏移量等，并对成型镜片的表面质量进行预测，以此获得优化的工艺参数；

3、采用优化参数进行小口径镧系玻璃镜片的模压成型实验，对镜片精度进行检测，以验证有限元模型及仿真分析结果的可靠性。

三、拟解决的主要问题：

- 1、镧系玻璃材料高温热力学性能参数的获取；
- 2、基于应力松弛、结构松弛及热传递模型的镧系玻璃镜片热压有限元模型的建立；
- 3、镧系玻璃镜片热压过程的五阶段连续仿真及对仿真模型的修正。

国内外研究现状和发展动态

早在 20 世纪 50 年代，模压成型的雏形开始展现。当时在制造玻璃毛坯时，把重量达到规定要求的玻璃块用电炉加热到软化状态，然后将其放入常温的压型机内压制成形，俗称二次压型或再加热压型。最早在 1960 年，美国的康宁(Coming)公司就开始采用连续焙炼工艺来生产玻璃眼镜片。而最近几年我国在模压成型领域也取得了一系列的成果，积累了一定的研究经验，能够得到较高精度的光学元件。近年来，湖南大学由尹韶辉教授带领的研究小组对光学玻璃模压成型进行了一系类的研究，其中王玉芳等利用非线性有限元软件对非球面光学玻璃透镜模压成形进行了数值模拟分析，研究发现成形透镜和模具的最大残余应力随着模压速率的减小而减小，随着模压温度的升高而减小。北京理工大学的周天丰教授为了实现光学玻璃微沟槽的高精度模压成形制造，改进了玻璃-模具界面摩擦模型并通过模压成形有限元仿真与试验，揭示玻璃微沟槽模压成形中材料高温形变规律，提高了微沟槽的成型精度。另外，西安工业大学在刘卫国教授的领导下对为了对红外玻璃的精密模压工艺进行仿真分析，利用热机械分析方法，对红外玻璃在高温下的粘弹性进行了研究。并进行实验表明，玻璃在高温下会呈现出典型的粘弹性属性，其弹性模量在较长的时间后会下降 5 个数量级。选择微米结构进行仿真的结果表明，当模压时间超过 13 min 后，时间对模具腔体的填充率的影响不大。

日本东北大学的 Saotome 等对两种光学玻璃在 T_g 点到 $T_g+30^{\circ}\text{C}$ 的温度范围条件下进行模压成形实验，得到不同温度下真实应力与应变率的关系，证实了该温度区间玻璃可视为牛顿粘滞流。日本东北大学 Yan 等主要研究了玻璃在转变温度以上时的粘弹性行为，讨论了高温玻璃的不同蠕变模型，对非球面和微结构玻璃元件的模压成形技术进行了探讨分析，使得玻璃模压成型精度达到一个新的高度。德国贺利氏石英公司的 Haken 等研究了假想温度在热处理过程中对磁性玻璃折射率分布的影响。德国肖特公司的 Fotheringham 等在 Tool Narayanaswamy

Moynihan 模型的基础上研究了玻璃模压成型中透镜折射率下降的现象,并对该规律进行了总结,进一步完善了模压成型后所得到玻璃透镜的缺陷。

美国俄亥俄州立大学的 Allen Yi 等开展了比较系统的研究工作,其中包括玻璃透镜模压成形的数值仿真,成形过程中的残余应力与应力松弛的预测、工艺优化分析以及折射率改变等问题。同时,美国贝莱姆森大学的 Ananthasayanam 对结构松弛进行了深入研究,讨论了粘弹性理论、结构松弛理论及模压成形工艺参数对轮廓偏移量的影响并对 L-BAL35 型玻璃进行实验,讨论得出玻璃预形体受热越均匀,模压速率越小,模压后得到的玻璃透镜轮廓偏移量越小。以及美国贝莱姆森大学的 Scott Gaylord 对玻璃的结构松弛进行了研究,采用光束弯曲和平行板技术来测量玻璃粘度,分别使用加热速率和等温膨胀测量来确定玻璃化转变温度 T_g 以及转变区以下的膨胀特性。进行差示扫描热法测量并使用 Tool-Narayanaswamy-Moynihan (TNM) 模型进行曲线拟合以进行结构松弛,并从这些计算中确定转变区域中的动力学玻璃性质响应。结果表明,不能使用简单的线性热膨胀模型,并且必须实施结构松弛,以便在通过玻璃化转变区域快速冷却时精确地限定玻璃膨胀性能,大大提高了玻璃模压成型的面型精度以及成型质量。

参考文献:

- [1] 朱科军. 光学玻璃透镜模压成形的数值仿真和实验研究. 湖南大学, 2013年.
- [2] 尹韶辉; 王玉芳. 微小非球面玻璃透镜超精密模压成型数值模拟. 光子学报, 2010 年 11 期.
- [3] 周天丰; 解家庆. 光学玻璃微沟槽模压成形仿真与试验研究. 光学精密工程, 2016 年 10 期
- [4] 刘卫国; 沈萍. 硫系玻璃的粘弹性及模压工艺的仿真. 红外与激光工程, 2012 年 3 期
- [5] Jain A. Experimental study and numerical anlysis of compression molding process for manufacturing precision aspherical glass lens: [dissertation]. The Ohio State University, 2006, 14-56
- [6] Balajee Ananthasayanam. COMPUTATIONAL MODELING OF PRECISION MOLDING OF ASPHERIC GLASS OPTICS. Clemson University, 2008,12
- [7] Scott Gaylord. Thermal and Structual Properties of Candidate Moldable Glass Types. Clemson University, 2008,8

本项目学生有关的研究积累和已取得的成绩

项目团队成员来自长沙理工大学汽车与机械工程学院 2016 级机械设计制造及其自动化专业。本专业涉及的知识面广、信息量大，注重机械制造、CAD/CAE/CAM 和实际动手能力的培养，使学生具有很强的适应能力、创新能力、分析和解决问题的能力。

通过前期基础课的学习、专业基础课及 CAE 软件的自学，项目组成员系统掌握了机械原理与机械设计、机械制造、有限元分析等专业知识，对镧系玻璃镜片热压成型的基础理论和工艺流程有了一定程度的了解，玻璃材料热压过程的有限元分析也做了前期探索。不仅如此，我们小组成员本身就对机械设计与制造有着浓厚的兴趣，且小组成员各有所长，善于沟通交流，有组员擅长 CAE/CAM 仿真与建模，有利于加速项目的推进。

我们相信在前期的工作基础上，通过唐昆、李河清老师的精心指导，充分发挥我们组的聪明才智和专业特长，能够圆满地完成“小口径镧系玻璃镜片精密热压成型仿真与实验”的项目开展。

项目的创新点和特色

1、基于玻璃的应力松弛、结构松弛及热传递模型，建立起镧系玻璃镜片热压成型过程的有限元分析模型：本项目通过精密热压成型机测试玻璃材料的热-机械特性，并通过试验建立热压成型过程的热粘弹性本构模型，分析玻璃粘度随温度变化的规律，测试玻璃和模具的热传导和热膨胀特性，并将试验获得的高温热力学参数输入到仿真计算模型中修正模具参数，获得最优的热压成型条件，再通过模压成型机加工玻璃镜片。由实验到仿真然后回归实验，并由同一台成型机完成玻璃性能测试和镜片的加工，本项目在热压成型技术的研究方法上具有一定的创新。

2、采用热压过程的五阶段连续仿真实理论与方法：将成型过程的加热软化、高温浸润、加压成型、去应力退火和冷却固化五个阶段分阶段仿真实现，并且又将五个阶段依次串联起来，结合实验获得的参数，更加真实的逼近实验过程，仿真精度更高，对光学加工的计算机仿真具有一定的创新。

项目的技术路线及预期成果

一、项目的技术路线

本项目技术路线如下图 1 所示：

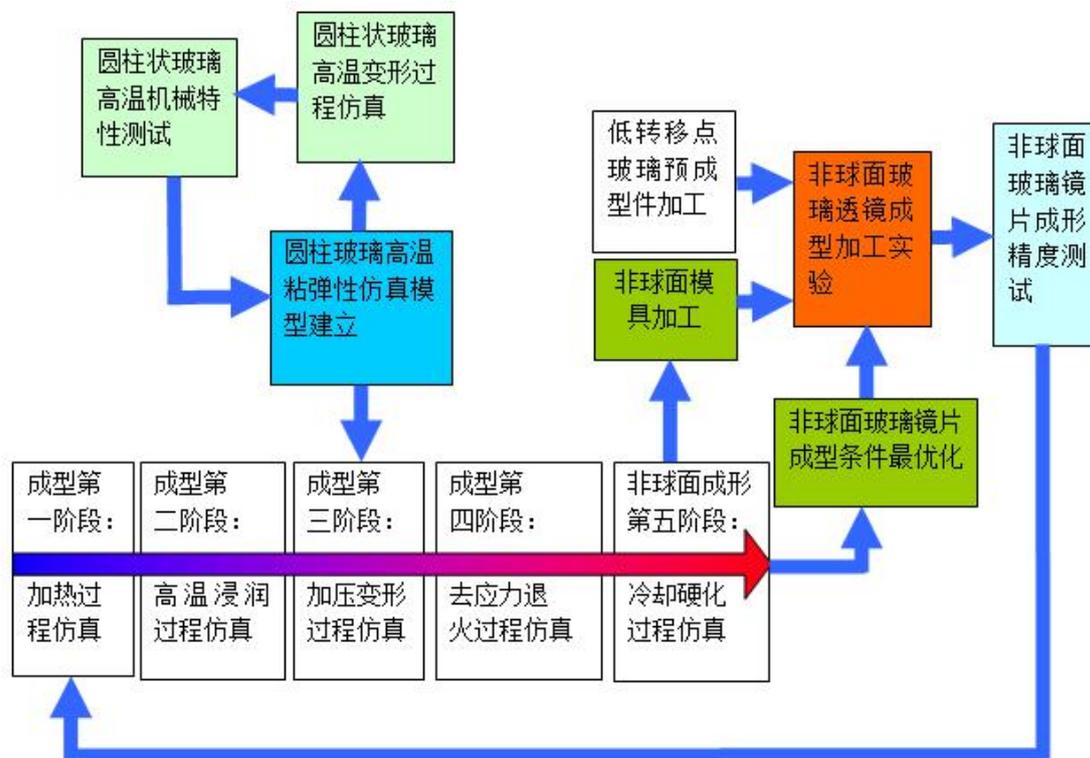


图 1 项目的技术路线图

图 1 所示的技术路线具体可分解为：

1、镧系玻璃高温热力学性能参数的实验获取和理论本构模型的建立

玻璃成型的高温热力学性能参数包括玻璃的粘度、表面张力、热膨胀特性和热传导特性等。在仿真计算中，玻璃的机械特性，尤其是玻璃粘度随温度变化的特性，玻璃和模具的热传导和热膨胀特性至关重要。通过模压机中的加热板对圆柱形光学玻璃加热到成型温度，再对圆柱形玻璃进行压缩实验。将压缩时的拉力或压力通过力传感器采集，建立起拉力或压力、变形位移与时间的关系。通过变形位移可计算圆柱变形后横截面面积，以此计算出圆柱体玻璃变形的工程拉应力或者压应力和工程应变，这样就可建立玻璃材料的应力和应变关系曲线，通过曲线拟合，即可得玻璃材料的本构模型。利用本构模型，再反向计算出压缩实验过程中的压力变化，检验玻璃本构模型的正确性和精度，并适当调整相关参数。其

中曲线拟合可采用的粘弹性模型通常有 Maxwell 模型, Kelvin 模型和 Burgers 模型, 如图 2 所示。

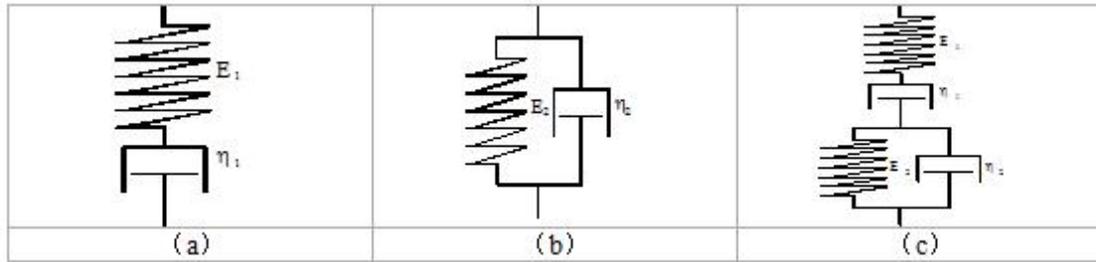


图 2 粘弹性 (a) Maxwell 模型, (b) Kelvin 模型, (c) Burgers 模型

2、镧系玻璃非球面镜片的热压成型工艺参数的优化

非球面玻璃镜片的热压成型仿真拟采用大型非线性通用仿真软件 MSC.Marc 进行建模、计算和处理。MSC.Marc 可以进行各种线性和非线性求解计算, 能够对热传导和机械变形实现耦合计算, 并支持全自动二维网格和三维网格重划, 用以纠正过渡变形后产生的网格畸变, 确保大变形分析的继续进行。其中, 模块 Pre-state, 可以将前一个阶段的计算结果导入后一个计算模型中, 作为后一个计算模型中的初始条件。利用这个功能, 可以将玻璃非球面镜片成型的五个阶段有效的串联起来, 如图 3 所示。

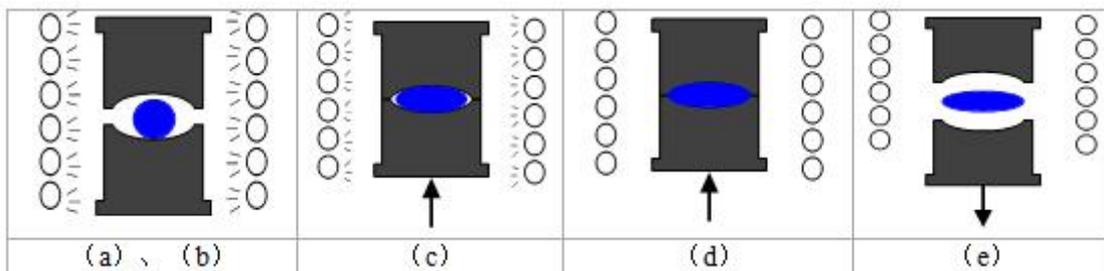


图 3 玻璃镜片热压成型的五个阶段

(a)、(b): 加热升温, 高温浸润; (c) 加压变形; (d) 去应力退火; (e) 冷却固化

首先, 将第一阶段 (a) 与第二阶段 (b) 的加热过程和高温浸润过程在同一模型中进行连续仿真分析, 分析结果导入第三阶段 (c) 的加压变形模型中, 于是热变形引起的误差就被累计到第三阶段。加压变形中, 玻璃的本构方程采用实验测试出的粘弹性模型, 并将前一阶段计算出的热膨胀应变、应力等作为初始变形条件, 将误差累加到加压变形中来, 更加真实的反映玻璃的变形过程。接着, 将合模后玻璃变形后的应力、应变计算结果导入第四阶段 (d) 的初应力退火中, 计

算退火温度和退火时间等参数。最后，将上述结果作为第五阶段（e）的初始条件，计算出冷却收缩量，并最终获取成型后的玻璃非球面镜片的形状。

比较仿真获得的玻璃镜片的形状和设计的形状，计算出两者之间的偏差，即获得模具的修正量，将模型中的模具减去这个偏差得到模具的理想形状，并重新计算一遍，检验是否获得理想的非球面玻璃镜片形状。在获得理想的模具形状参数后，改变仿真中设定的实验条件，如成型温度、模压速度、保压时间、模压压力等加工参数，计算出最低的成型温度和最大模压速度。成型温度越低，模具的寿命就越长；模压速度越快，成型效率就越高。在保证镜片形状精度的前提下，以此为标准，不断优化加工参数，反复仿真计算，获取最优加工参数。

3、小口径镧系玻璃镜片的成型实验

热压成型实验在精密热压成型机上完成。利用模压成型机，既可以测试玻璃高温状态下的高温热力学特性，为有限元仿真提供可靠的实验模型数据；又可以模压玻璃镜片，验证有限元模型的可靠性。根据 2 中的仿真结果得到的优化参数来设定镜片的成型实验条件。通过加热软化、高温浸润、加压成型、除应力退火和冷却固化五个阶段，将圆球形玻璃坯料加工成设计的镜片。最终测试成型加工得到的镜片表面轮廓，并和设计轮廓做比较，验证仿真模型和仿真结果的正确性和可靠性。

二、预期成果

1、完成小口径镧系玻璃镜片精密热压成型过程的建模与动态、可视化仿真，获得优化的工艺参数；

2、基于优化的工艺参数完成镜片热压成型实验，并结合成型镜片的检测数据对仿真模型的可靠性进行验证；

3、针对镜片成型仿真与实验，撰写国家发明专利申请说明书一份；

4、撰写“大学生创新性实验计划项目”总结报告一份。

年度目标和工作内容（分年度写）

2018.4 - 2018.7 镧系玻璃应力松弛、结构松弛及热传递模型的分析，玻璃材料高温热力学性能参数的获取；

2018.8 - 2019.1 镧系玻璃镜片精密热压成型过程的建模与动态、可视化仿真，优化工艺参数；

2019.2 - 2019.4 镧系玻璃镜片的精密热压成型实验，及仿真模型的验证；
2019.5 - 2019.6 撰写总结报告，申请国家发明专利。

指导教师意见

该项目充分运用机械制造与材料成型交叉学科专业知识，将仿真与实验相结合，以获得小口径镧系玻璃镜片精密热压成型的最优工艺参数，可提高镜片热压成型工艺的可靠性，并降低其加工成本，具有一定创新性；同时，项目的开展，可充分培养学生的探索精神与实践能力，建议优先资助与支持。

签字：

日期：

注：本表栏空不够可另附纸张