

分类号: TQ171.34

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110144



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 精密光学元件模压成型工艺优化

及其在车载 HUD 曲面屏的应用研究

论 文 作 者 田照伟

指 导 教 师 黄胜洲副教授

学 科 (专 业) 机械

研 究 方 向 精密模压

论文提交日期: 2025 年 05 月 20 日

分类号：TQ171.34

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110144

精密光学元件模压成型工艺优化及其在车载 HUD 曲面屏的
应用研究

OPTIMIZATION OF PRECISION OPTICAL COMPONENT
MOLDING PROCESS AND ITS APPLICATION IN
AUTOMOTIVE HUD CURVED SCREEN

学生姓名：_____田照伟_____

指导教师：_____黄胜洲副教授_____

校外导师：_____杨阳_____

专 业：_____机械_____

研究方向：_____精密模压_____

论文答辩日期：_____2025 年 05 月 09 日_____

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

何思伟

日期：2025 年 5 月 13 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

何思伟

指导教师签名：

黄胜洲

日期：2025 年 5 月 13 日

日期：2025 年 5 月 13 日

精密光学元件模压成型工艺优化及其在车载 HUD 曲面屏的应用研究

摘 要

精密模压成型技术凭借快速成型、高效生产和形状稳定性等优势，在光学元件制造领域获得广泛应用。然而，精密光学元件在模压成型过程中，由于内部残余应力等多种因素的影响，往往会引发较大的形貌偏差。针对该问题，本文基于玻璃材料粘弹性理论，建立热-固耦合有限元理论模型，探究工艺参数对成型质量的影响机理，并结合智能算法优化策略，系统开展了模压成型工艺优化及在车载中控曲面屏的工业应用研究。主要内容总结如下：

(1) 深入探讨玻璃材料粘弹性理论，分析玻璃在熔融状态下的应力松弛和结构松弛过程特性，并详细阐述广义麦克斯韦模型的普适性。同时，建立光学玻璃元件模压成型热-固耦合有限元理论模型，并对其成型机理进行深入研究。

(2) 基于光学玻璃元件模压成型机理，采用正交实验方法，分析摩擦系数、保压力、保压时间、退火时间和退火温度等关键工艺参数的敏感性。随后，利用遗传算法-反向传播神经网络进行优化，获取最小形貌偏差为 $2.5\mu\text{m}$ ，并通过迭代优化方法，最终将形貌偏差降低至 $1.9\mu\text{m}$ 。

(3) 基于光学玻璃元件模压成型工艺优化方法，构建车载中控曲面屏的热-固耦合有限元仿真模型，分析了合模间隙、预热温度、热压时间和退火温度等工艺参数，对曲面屏成型形貌偏差和内部残余应力的影响，并通过实验验证，证实了仿真形貌偏差的变化规律与实验结果 PV 变化趋势是相符合的。

(4) 以残余应力和峰谷值作为评价玻璃模压成型的质量指标，建立响应面分析模型，分析不同工艺参数影响下的变化趋势，再通过非支配序列遗传算法与反向传播神经网络的优化，预测点应力优化了 1.53Mpa，PV 优化了 41.3nm。

本文通过理论与应用的相结合，证实了精密光学元件模压成型工艺优化方法的可行性，为车载中控曲面屏模压成型技术的工业应用提供重要的理论支撑。

关键词：精密模压，光学玻璃元件，形貌偏差，反向传播神经网络，非支配序列遗传算法

OPTIMIZATION OF PRECISION OPTICAL COMPONENT MOLDING PROCESS AND ITS APPLICATION IN AUTOMOTIVE HUD CURVED SCREEN

ABSTRACT

With the advantages of rapid prototyping, efficient production and shape stability, precision molding technology has been widely used in the field of optical components manufacturing. However, in the molding process of precision optical components, due to the influence of internal residual stress and other factors, it often leads to large shape deviation. To solve this problem, based on the viscoelastic theory of glass materials, this paper establishes a thermal solid coupling finite element theoretical model, explores the influence mechanism of process parameters on the forming quality, and combined with the intelligent algorithm optimization strategy, systematically carries out the molding process optimization and the industrial application research in the vehicle central control curved screen. The main research contents are summarized as follows:

(1) The viscoelastic theory of glass materials is deeply discussed, the characteristics of stress relaxation and structural relaxation process of glass in the molten state are analyzed, and the universality of the generalized Maxwell model is described in detail. At the same time, the thermal solid coupling finite element theoretical model of optical glass component molding is established, and its molding mechanism is studied in depth.

(2) Based on the molding mechanism of optical glass components, the sensitivity of key process parameters such as friction coefficient, holding pressure, holding time, annealing time and annealing temperature was analyzed by orthogonal experiment. Then, the genetic algorithm back propagation neural network was used to optimize, and the minimum morphology deviation was 2.5 μm . finally, the morphology deviation was reduced to 1.9 μm by iterative optimization method.

(3) Based on the molding process optimization method of optical glass components, the thermal solid coupling finite element simulation model of the vehicle central control curved screen was constructed. The effects of process parameters such as clamping gap, preheating temperature, hot pressing time and annealing temperature on the forming morphology deviation and internal residual stress of the curved screen were analyzed. Through experimental verification, it was confirmed that the variation law of the simulation morphology deviation was consistent with the experimental results.

(4) The residual stress and peak valley value were used to evaluate the quality of glass molding, and the response surface analysis model was established to analyze the change trend under the influence of different process parameters. Through the optimization of non dominated sequence genetic algorithm and back propagation neural network, the predicted point stress was optimized by 1.53Mpa, and the PV was optimized by 41.3nm.

Through the combination of theory and application, this paper confirmed the feasibility of the molding process optimization method of precision optical elements, and provided important theoretical support for the industrial application of the molding technology of vehicle central control curved screen.

KEY WORDS: precision molding, optical glass components, shape deviation, vehicle central control curved screen, back propagation neural network, non-dominated sequence genetic algorithm II

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 精密模压技术发展及现状	2
1.2.1 模压成型工艺有限元仿真研究	3
1.2.2 模压成型元件的残余应力研究	5
1.2.3 模压成型元件的形貌偏差研究	5
1.3 研究目的及内容	6
第 2 章 基于粘弹性理论的光学玻璃元件模压成型机理研究	9
2.1 光学玻璃元件有限元理论模型构建	9
2.1.1 仿真软件介绍	9
2.1.2 模压工艺过程分析	10
2.1.3 三维模型构建	10
2.1.4 网格模型构建	11
2.2 光学玻璃元件粘弹性特性分析	12
2.2.1 粘度特性	12
2.2.2 粘弹性特性	13
2.2.3 热流变特性	15
2.3 光学玻璃元件有限元仿真成型机理研究	16
2.3.1 光学玻璃元件形貌偏差的理论计算	16
2.3.2 摩擦系数对模压成型形貌偏差的影响	17
2.3.3 保压阶段对模压成型形貌偏差的影响	18
2.3.4 退火速率对模压成型形貌偏差的影响	20
2.4 本章小结	23
第 3 章 基于 GA-BP 算法的光学玻璃元件形貌偏差优化研究	24
3.1 基于光学玻璃元件成型工艺参数的正交实验设计	24
3.1.1 正交实验表设计	24
3.1.2 正交实验结果分析	25
3.1.3 仿真实验验证	26
3.2 基于光学玻璃元件成型工艺参数的 BP 神经网络设计	26
3.2.1 BP 神经网络构建	27

3.2.2 形貌偏差预测.....	28
3.3 基于 GA-BP 神经网络算法的成型工艺参数优化	29
3.3.1 GA-BP 神经网络算法优化结果.....	30
3.3.2 光学玻璃元件形貌偏差补偿方法.....	30
3.4 本章小结.....	31
第 4 章 基于精密模压成型技术的车载曲面屏应用研究	32
4.1 基于热固耦合的车载曲面屏有限元仿真模型构建	32
4.2 车载 HUD 曲面屏精密模压成型工艺研究.....	35
4.2.1 预热阶段.....	35
4.2.2 热压阶段.....	37
4.2.3 退火及保压阶段.....	38
4.2.4 冷却阶段.....	39
4.3 车载 HUD 曲面屏有限元仿真成型关键工艺参数研究.....	39
4.3.1 车载 HUD 曲面屏仿真目标需求	39
4.3.2 车载 HUD 曲面屏基准工艺参数确定	40
4.3.3 合模间隙对 PV 及应力的影响.....	41
4.3.4 预热温度对 PV 及应力的影响.....	42
4.3.5 热压时间对 PV 及应力的影响.....	43
4.3.6 退火温度对 PV 及应力的影响.....	45
4.4 车间实验验证.....	46
4.4.1 车间实验基本条件.....	46
4.4.2 车间实验验证结果.....	47
4.5 本章小结.....	50
第 5 章 基于 NSGA-II 算法的车载曲面屏多目标参数优化研究	51
5.1 车载 HUD 曲面屏初始工艺参数分析	51
5.2 基于车载 HUD 曲面屏成型机理的响应面模型建立	51
5.2.1 设计变量及优化目标建立.....	51
5.2.2 响应面模型构建及变异数分析	53
5.2.3 响应面及等高线分析.....	55
5.3 基于 BP 神经网络的 NSGA-II 算法多目标工艺参数优化.....	58
5.3.1 基于 BP 神经网络算法的预测与误差分析	58
5.3.2 NSGA-II 算法优化原理.....	59
5.3.3 基于 NSGA-II 算法的车载 HUD 曲面屏的多目标参数寻优	60
5.4 本章小结.....	61

第 6 章 总结与展望.....	63
6.1 总结.....	63
6.2 展望.....	64
参考文献	66

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

精密光学元件具有高精度、高性能等优点，被广泛应用于各种领域，如激光系统、通信技术、医疗设备、天文观测以及科学研究等^[1]，如图 1-1 所示。精密光学元件的制造和设计需要极高的精度和严格的质量控制^[2]，以确保其光学性能达到预期效果^[3-5]，而这些精密光学元件的制造离不开先进光学制造技术的发展。



图 1-1 几种典型的精密光学元件

先进光学制造技术的发展，带来了许多技术的突破，也提高了工业对玻璃的要求。为了更好更全面的满足工业需要，吸引了越来越多的人去研究先进光学玻璃制造技术，更多的人力投入与资本进入，为玻璃表面超精密的制造奠定了良好的基础^[6]。先进制造技术一般主要由机械成型、精密抛光系统、控制与检测系统、加工环境控制系统以及辅助设备及单元系统五部分组成^[7]，如图 1-2 所示。机械成型主要是通过传统机械手段将玻璃制造成光学元件，精密抛光系统是利用车床等加工手段继续加工玻璃直至满足光学性能，控制与检测系统是针对玻璃样件成品进行一系列性能检验，加工环境控制系统是通过超声波等辅助手段提高玻璃在成型过程中的光学性能，辅助设备及单元系统旨在运用自动化、集成化技术提高玻璃成型的效率与一致性。

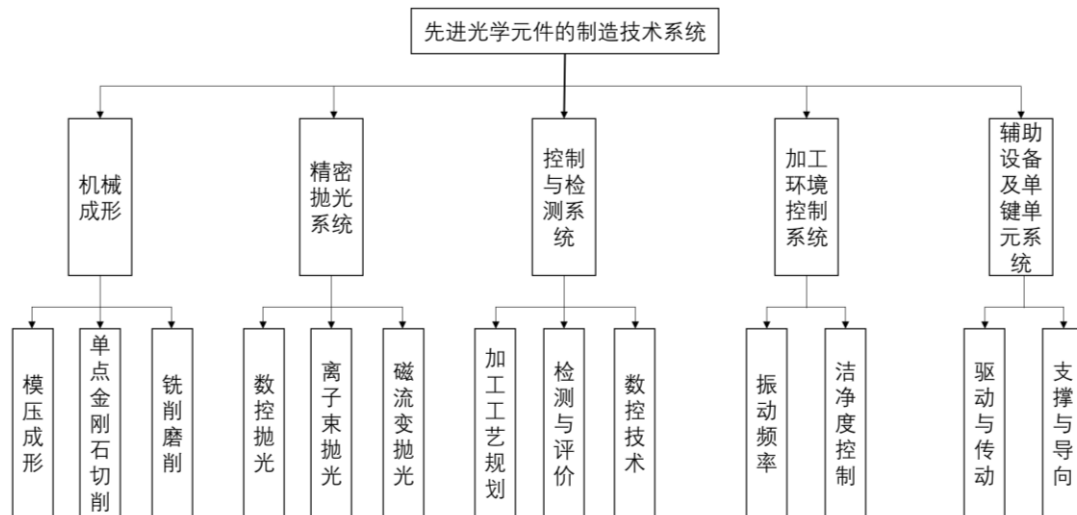


图 1-2 光学元件的制造技术系统^[7]

当前，主流光学制造技术体系^[8]主要涵盖四大类工艺：单点金刚石切削技术^[9]、精密研磨抛光技术^[10]、光学塑料注塑成型技术^[11]与光学玻璃精密热压技术^[12]。单点金刚石切削与精密研磨抛光，是利用传统机械手段将玻璃材料打造成高精密光学元件。虽然满足了性能需求，但其效率低下，并不能适应工业化量产。而光学塑料注塑成型技术虽然效率高，但往往受杂质等因素的影响，其成型效果差、良率低，并不能作为主要的工业技术手段。光学玻璃模压成型技术凭借其在大批量制备中展现的工艺稳定性、几何精度保持性及成本效益等优势，已成为非球面玻璃元件制造领域最具竞争力的解决方案，尤其是国内外众多学者不断地优化有限元仿真预测，通过改变工艺参数的影响，不断减小玻璃内部残余以达到精确成型质量，近年来备受工业界关注^[13]。

1.2 精密模压技术发展及现状

玻璃材料与其它材料不尽相同，在常温下表现出脆硬性^[14]，但是当温度升高，玻璃进入熔融状态时，玻璃便表现出粘弹性。光学玻璃材料初期广泛采用磨削^[15]和抛光^[16]相结合的加工技术，该加工技术应用范围较小，只适用于普通球面透镜与平面光学玻璃元件，在精度方面达到了要求，但是在效率上十分低下，对于微结构阵列玻璃透镜和非球面自由曲面透镜而言，该加工技术远远达不到生产需求^[17]。

于是在 20 世纪 80 年代，玻璃模压技术便开始兴起^[18]。玻璃模压技术是一种具有低成本、成型精度优异、无污染等诸多优点的技术，其利用高精度模具

对软化熔融状态的玻璃进行模压，经历加热、热压、保压、冷却四个步骤，已成为应用最广泛的先进光学元件制造技术之一^[19]。

1.2.1 模压成型工艺有限元仿真研究

玻璃模压成型工艺是热-固耦合的过程，当温度上升，玻璃逐渐转变为熔融状态，呈现软化现象，此时玻璃的性质由脆硬性转为粘弹性^[20]。目前主流技术手段是通过有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)^[21]模拟玻璃热压的成型过程，从而实现对玻璃形貌偏差的预测，并通过模具预补偿的手段修正模具，改善工艺参数以获取超高精度玻璃透镜。其研究过程及主要应用如图 1-3 所示。

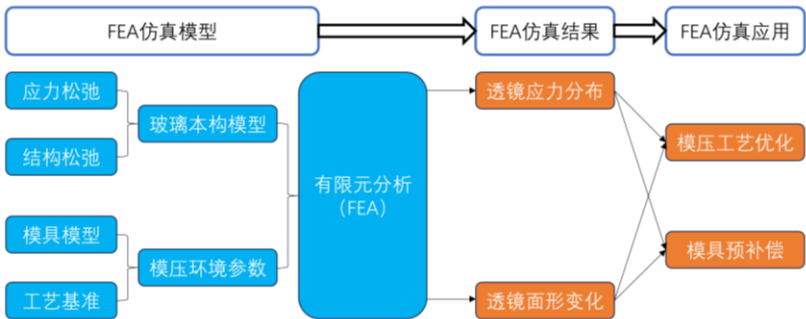


图 1-3 玻璃热压有限元分析及其应用^[20]

玻璃本构模型的精确构建，直接影响预测结果的准确性。模压过程中玻璃表现出粘弹性，一方面，玻璃的粘弹性应力松弛行为表现为其应力应变关系对温度 and 时间的依赖响应；另一方面，玻璃的体积与温度 and 时间的非线性关系称为结构松弛^[22]。关于玻璃本构有限元模型以及玻璃模压工艺过程的有限元仿真，国内外早有大量的学者进行研究。

1976 年美国天主教大学的 Moynihan^[23]等人通过差示扫描量热法对处于过渡区的玻璃比热容进行测量，发现在相同升温速率和热历史下，不同玻璃相变区的热容量曲线可以叠加在相同的还原图上，证明了所有玻璃的结构弛豫函数形状是相同的。

1993 年天津大学的张义同^[24,25]等人针对粘弹性材料提出了变温松弛曲线的概念,利用材料的一组恒温松弛曲线即可得到材料沿任意一条温度历史的变温松弛曲线。1994-1998 年，法国圣戈班研究所的 Duffrene^[26-29]等人针对钠钙硅玻璃的粘弹性本构模型进行了大量的研究，通过动力学实验研究了玻璃在玻璃化转

变温度上下的剪切行为，验证了使用简单热流变模型描述玻璃流动的正确性，并使用广义麦克斯韦模型对其粘弹性应力松弛进行了表征，很好的补充了玻璃粘弹性本构模型的理论。

2004-2008 年，美国俄亥俄州立大学的 Yi^[30,31]带领的团队针对玻璃高温粘弹性本构模型和 FEA 仿真进行了大量理论和实验研究。2005 年 Anurag^[32]等人使用商业有限元软件 MSC.MARC 对玻璃热压的整个过程进行了仿真，采用广义 MAXWELL 模型对玻璃应力松弛特性进行数值模拟，并将预测结果与实验数据进行了成功的对应。2006 年 Anurag^[33]等人研究了玻璃结构松弛对玻璃热压冷却过程中透镜体积和面形的影响，证明了考虑结构松弛对 FEA 的重要性。

2008 年德国夫琅禾费生产技术研究室的 Klocke^[34]等人利用 FEA 仿真模拟热压过程，认为数值模拟可以帮助预测热压透镜的最终形状，从而缩短甚至消除耗时、费钱的迭代周期。2009 年 Dambon^[35]等人通过 FEA 模拟和模具预补偿成功实现了热压透镜面形误差的优化。2009 年 Wang^[36]等人建立了一套完整的数值模拟方案来预测玻璃热压非球面透镜的曲线变化，仿真结果与实验结果差异小于 2 μm ，利用模具预补偿的方法将面形误差从 12 μm 减小到 1 μm 以内。2011 年尹韶辉^[37-40]等人利用 FEA 仿真了不同热压温度下玻璃的填充率、最短热压时间以及热压速率对透镜残余应力的影响。相继，2013 年该课题组^[41,42]又研究了不同玻璃预形体对异形非球面透镜热压的影响，利用 FEA 对球形预形体和圆柱预形体进行了热压仿真，得出了圆柱玻璃预形体更适合于异型非球面透镜热压的结论。

2017 年余剑武^[43]等人建立了 V 形、矩形、梯形和圆弧形槽体的二维 FEA 模型，分析了热压速率对微槽填充率和残余应力分布的影响。2022 年张营营^[5]等利用 FEA 对玻璃成型仿真进行了温度场和应力场的研究，在减小玻璃内部的残余应力的同时，也改善了玻璃模压成型后的形貌偏差，也证实了玻璃内部的残余应力会显著影响成型形貌偏差。2023 年刘光宇^[2]等详细的分析了近些年来光学玻璃元件模压成型技术的发展，指出了高度集成化的数值模拟是未来模压成型技术的主要方向之一。

1.2.2 模压成型元件的残余应力研究

玻璃模压原理是将玻璃升温至软化点，从而在模具的影响下产生形变，但是由于自然环境中模具的温度场不均匀，在冷却时导致玻璃不能均匀冷却，会产生大量残余应力，进而影响了玻璃的折射率与成像精度。

Allen Yi^[44]等通过仿真软件分析了不同冷却速率时成形透镜内部滞留的残余应力，使用东芝 GMP221 热压机，采用双折射方法分析成形玻璃透镜的残余应力变化规律，结果表明 BK7 玻璃冷却至 520°C 以下后冷却速率对透镜内部残余应力影响较小，并指出在成形工艺中适当的冷却速率能够很好地控制透镜的成形精度。Tao^[45]等利用仿真与实验结合解释了工艺参数与残余应力之间的关系，并采用圆偏光器以及 Mach-Zehnder 干涉仪分析了透镜内部残余应力与折射率变化之间的规律。Sarhadi^[46]等利用圆环压缩实验验证了三明治模型，接着建立三维玻璃晶片热力耦合模型，分析三种不同冷却速率下玻璃晶片残余应力的变化情况。尹韶辉^[39]等人对玻璃微结构进行仿真分析，发现在仿真过程中残余应力的大小是随着工艺参数的变化而变化，适当调整工艺参数是能够减小残余应力的。

1.2.3 模压成型元件的形貌偏差研究

光学玻璃元件精密模压成型技术，主要包括加热、热压、保压、冷却四个阶段。在各个阶段由于温度场的不均匀性，玻璃内部存在着残余应力，进而影响光学玻璃透镜的成像效果。Zhao^[47]等在研究热处理后玻璃透镜折射率场时，结合了 CT 技术，利用 Mach-zehnder 干涉仪得到热处理后玻璃样品的干涉条纹相位信息的变化，通过算法处理，获得透镜三维折射率场分布。Su^[48]等利用 Shack-Hartmann 波前探测器对精密热压成形透镜的内部折射率进行评估，结果表明冷却速率过快，折射率偏差越大。Tarkes^[49]等在玻璃精密热压成形仿真过程中，利用 CFD 辅助分析退火阶段应力变化规律，研究不同氮气流速下玻璃透镜内部的残余应力分布。接着，同样利用数字光弹性测量两种不同冷却速率下 P-SK57 平凸透镜的双折射率，提出了一种适用于任何形状透镜折射率的计算仿真方法。Sugimoto 等^[50]提出一种折射率测量方法，修正形状误差导致的偏差，较为精确地计算出透镜的折射率分布。

大量研究证明了玻璃的形貌偏差严重影响了玻璃透镜的成像精度即折射率。Zhou^[51]等利用有限软件分析了热压成形工艺参数与成形透镜的形貌偏差之间的关系，并分析了平凹透镜不同有效直径、垂直比、中心厚度比存在的形貌偏差规律，从而指导透镜的设计。Su^[52]等为了修正形貌偏差和折射率变化，提出一种通过结合仿真结果修改模具尺寸的方法，综合补偿透镜的形貌偏差与折射率变化。Puncet^[53]等分别对等温热压成形和非等温成形的非球面透镜的形貌偏差进行仿真分析，为了减小偏差值，经过数次迭代计算可以明显地减小形貌偏差。Vu^[54]等在非等温热压成形透镜优化中，运用了神经网络与遗传算法对成形工艺进行优化，优化后的玻璃形貌偏差减小到 6 μm 。

综合以上文献，随着玻璃模压成型技术的发展，众多学者开始利用有限元技术预测玻璃模压成型，通过改变相关的工艺参数以达到降低残余应力及形貌偏差的目标。近年来，也有学者将目光转向智能优化算法，利用算法更进一步的优化工艺参数组，从而继续降低内部残余应力和形貌偏差。但是玻璃仍然具有较大的形貌偏差，没能将传统统计方法与智能算法进行比较与结合，没有运用智能算法的优化参数进行迭代修型及多目标分析，从而精准分析工艺参数对形貌偏差及应力的影响规律。

1.3 研究目的及内容

本文的研究工作得到了学校与某集团联合研发项目《HUD 自由曲面玻璃热压有限元模拟分析》的资助。研究分为理论和应用两个阶段。在理论阶段，本文重点研究了 P-SK57 玻璃模压成形的形貌偏差，通过研究保压时间、退火时间、摩擦系数、保压压力和退火温度这五个工艺参数对形貌偏差的影响。从获得的数据中进行了正交实验，以测量每个单独过程参数的变化范围，并分析了过程参数的敏感性。基于神经(BP, Back Propagation)网络，使用遗传算法 (GA, Genetic Algorithm)优化模压成型工艺参数，最终实现了模具的迭代修型。

在应用阶段，将理论方法应用于车载中控抬头(HUD, Head-up-Display)曲面屏玻璃的生产。结合 PSK57 光学玻璃元件理论有限元模型，建立了车载 HUD 曲面屏有限元模型，根据企业提供的基准工艺参数，探索了可能的工艺参数最优范围。从获得的工艺参数取值范围中建立了关于应力和形貌偏差的响应面分

析，并获得了相应的适应度函数。然后，使用基于 BP 神经网络的非支配序列遗传算法 (NAGA-II, Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) 对应力和形貌偏差进行了优化。本文共分为六章，具体内容如下：

第 1 章：绪论。简要阐述了本研究的课题背景及研究意义，介绍先进光学玻璃元件制造的前沿技术及问题所在，深入的分析了玻璃模压技术的研究现状。同时，重点对国内外相关研究进展进行了综述，涵盖了玻璃模压成型的数值模拟分析、成型过程中产生的残余应力以及透镜表面形貌偏差等方面的研究成果。基于上述分析，本章最后明确了本文的核心研究内容与研究方向。

第 2 章：基于粘弹性理论的光学玻璃元件模压成型机理研究。详细分析玻璃的粘弹性理论，建立了 PSK57 玻璃元件的有限元模型，阐述了最终结果指标，并探索了摩擦系数、保压阶段的保压力和保压时长，以及退火速率对理论光学玻璃元件形貌偏差的影响。

第 3 章：基于 GA-BP 算法的光学玻璃元件形貌偏差优化研究。根据第 2 章所得的工艺参数范围，建立了正交实验，并进行了敏感性分析。根据正交实验数据表，对成型玻璃的形貌偏差进行了 GA-BP 神经网络算法优化。在优化的基础上，进行了迭代修型，以达到降低形貌偏差的目标。

第 4 章：基于精密模压成型技术的车载曲面屏应用研究。根据第 2 章建立的理论玻璃元件有限元模型，建立了企业产品车载 HUD 曲面屏的有限元模型，并根据第 2 章的方法及理论，对车载 HUD 曲面屏玻璃模压关键工艺参数（合模间隙、预热温度、热压时间和退火温度）进行了研究。

第 5 章：基于 NSGA-II 算法的车载曲面屏多目标参数优化研究。结合第 4 章车载 HUD 曲面屏玻璃的成型规律研究，建立了响应面分析模型，对玻璃的残余应力和形貌偏差峰谷值 (PV) 进行了分析。随后，结合第 3 章的 BP 神经网络方法，对残余应力和 PV 进行了多目标 NSGA-II 算法优化，获取了最佳结果。

第 6 章：总结与展望。总结本文的理论与实验，归纳创新点，阐述实验的不足之处，对未来的工作进行展望。

如图 1-4 所示，为本文的总体技术路线图，其将理论与实践相结合，为企业生产应用提供足够的理论支撑。

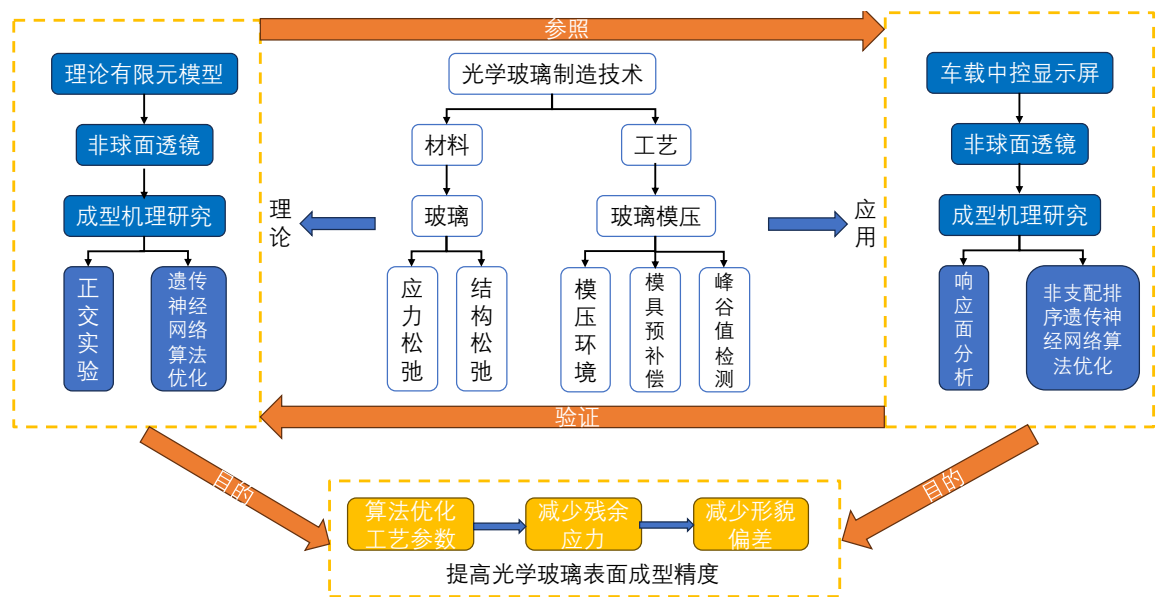


图 1-4 总体技术路线图

第 2 章 基于粘弹性理论的光学玻璃元件模压成型机理研究

2.1 光学玻璃元件有限元理论模型构建

2.1.1 仿真软件介绍

本研究运用 Abaqus 这一专业有限元分析工具开展数值模拟工作。该软件由法国达索公司于 1978 年收购，经过多年发展已成为工程仿真领域的重要工具。Abaqus 具备强大的计算分析功能，可有效处理各类工程问题：从基础的线性静态分析到复杂的非线性动态响应，从简单的热传导问题到多物理场耦合分析，均能获得可靠的计算结果。该软件展现出显著优势，其分析精度和计算稳定性得到了广泛验证，为本文的仿真研究提供了可靠的技术支持^[55]。如图 2-1 所示，Abaqus 有限元分析过程主要包括三个步骤：前处理、模拟分析计算和后处理。由于本研究涉及的工艺参数较多，拟采用控制变量法，针对各工艺参数设置不同组仿真条件，通过调整仿真输入的各参数变量，对比观察各组分析结果。

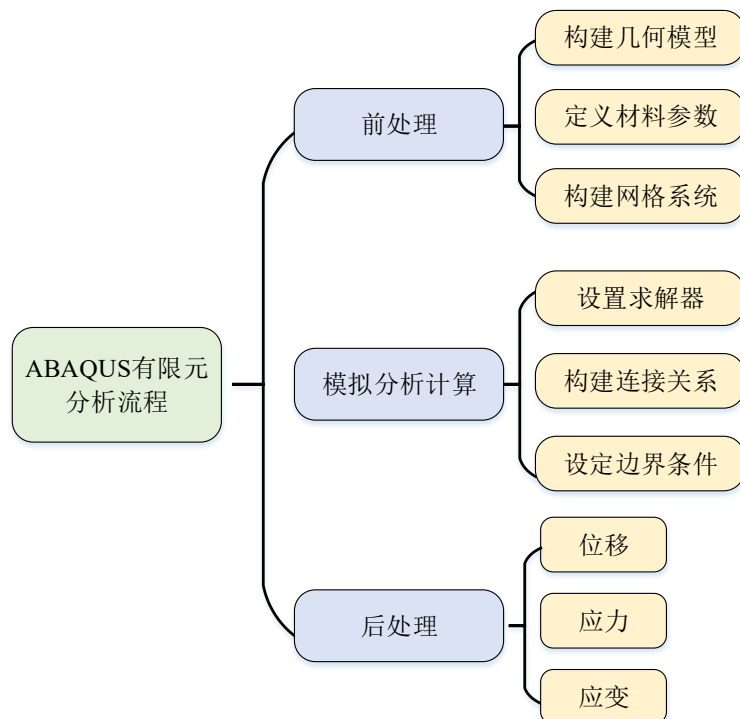


图 2-1 Abaqus 有限元分析流程

2.1.2 模压工艺过程分析

本文采用经典的模压方式，运用热-固耦合有限元分析方法。所谓的热-固耦合有限元分析，即玻璃在模压过程中不仅受到温度等热载荷的影响，还受到了机械载荷的影响。该方法具体分为四个阶段：预热阶段、下压阶段、保压阶段和退火阶段，即在预热阶段加热使玻璃升温软化，在下压阶段缓慢施加压力挤压玻璃成型，在保压阶段稳定玻璃成型形貌，在退火阶段缓慢退火以去除内部残余应力。如图 2-2 所示，展示的是模压成型工艺的四个阶段^[56,57]。

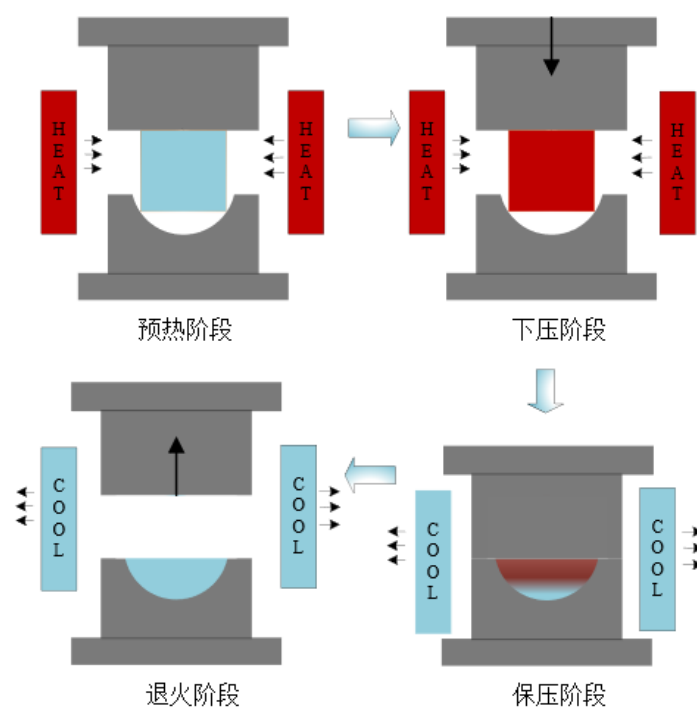


图 2-2 模压成型工艺四个阶段

2.1.3 三维模型构建

有限元法是一种数值计算技术，它通过将连续的物理问题离散化为有限数量的小单元，然后对这些单元进行分析以解决工程和物理问题，而在仿真软件中建立一个合适的有限元模型是进行后续有效分析的基础^[58,59]。鉴于本文接下来将针对企业的实际项目需求，利用 Abaqus 来建立玻璃坯料和模具的三维模型，如图 2-3 所示，分为上模具、下模具以及玻璃三部分。上模具为简单对称的正方体，用于压合玻璃，而玻璃则为椭圆体，下模具是中间带有半椭圆体凹槽的正方体。

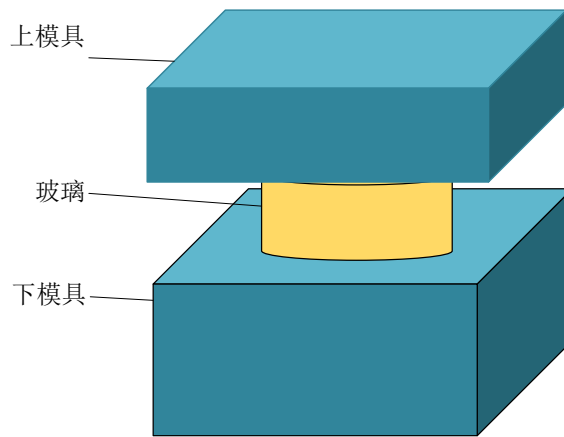


图 2-3 玻璃坯料和模具的三维模型构建

2.1.4 网格模型构建

由于上述三维模型是一个对称的旋转体，且它是一个理论模型，为了提高计算效率，本文对该模型进行了简化处理，采用二维模型来进行计算。本研究充分考虑了热压过程中材料的大变形特性，采用前沿网格生成技术对玻璃部件进行离散化处理，将其划分为 520 个四节点四边形单元。对于模具系统的网格划分，根据几何特征进行了差异化处理：上模具与玻璃接触的平面区域采用 162 个四边形单元进行离散；下模具由于存在半圆形曲面和尖角等复杂几何特征，其接触区域可能对仿真结果产生显著影响，因此需要特别关注该区域的网格划分质量。下模具采用三角形网格划分方法，以防止过度接触面的挤压导致网格畸变，随后再逐步转化为四边形网格。故本模型共有 1019 个网格，网格分布如图 2-4 所示。

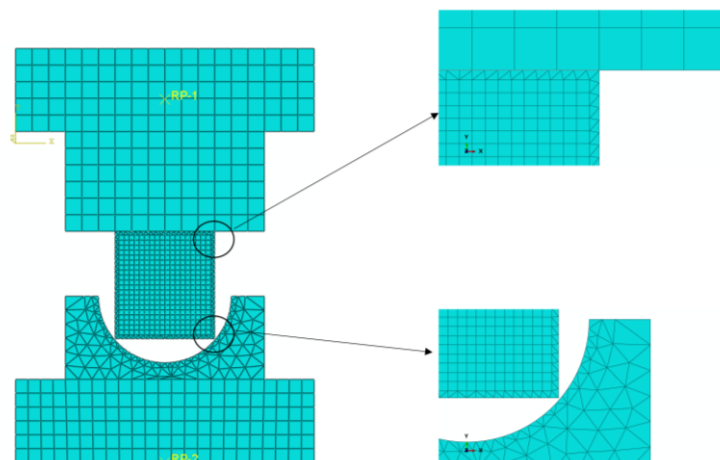


图 2-4 模型网格划分

2.2 光学玻璃元件粘弹性特性分析

本研究选用 P-SK57 光学玻璃作为研究对象，其具体材料参数详见表 2-1。考虑到碳化钨（WC）模具在高温下的变形量远低于玻璃材料^[60]，在建模时将上、下模具简化为具有导热特性的刚性体，而玻璃样品则定义为粘弹性变形体。

表 2-1 WC 和 P-SK57 玻璃参数

材料	碳化钨模具	P-SK57 玻璃
杨氏弹性模量 E(GPa)	690	93
泊松比 ν	0.22	0.249
密度 ρ (Kg/m ³)	15800	3010
热导率 Kc (W/m.°C)	63	1.1
比热容 Cp(J/Kg.°C)	314	858
热膨胀系数 (/°C)	5.5E-06	5E-06
转换温度 (°C)		494

粘弹性变形体是指玻璃材料在高温条件下呈现独特的粘弹态特性。这种介于固态与液态之间的物理状态，使其能够通过模具压缩实现精密成型。对于光学玻璃而言，其应用场景往往要求材料具备优异的光学性能，包括高透光率、良好的热稳定性以及精确的光学常数^[61]。同时，在精密模压制造工艺中，玻璃材料的化学稳定性（如耐酸碱腐蚀性）也成为重要的考量因素^[62]。

基于实际生产需求，考虑到高温环境下玻璃与模具材料间的化学惰性，业界普遍选用低熔点（<600°C）光学玻璃进行模压成型，这种材料特性有利于光学元件的批量化制造。目前，国内外多家知名企业，包括 Gonnva、Corning、成都光明和信义玻璃等，都在积极开展低熔点精密热压玻璃的研发工作，重点聚焦于材料制备工艺优化和关键性能参数的精确测定。这些研究为光学玻璃的产业化应用奠定了重要基础。

2.2.1 粘度特性

粘度是表征流体流动阻力的重要物理参数，反映了流体内部各流层间相对运动时产生的切向摩擦。玻璃材料在受热过程中会经历三个特征状态转变：固态、粘弹态和粘流态。在固态区间，玻璃表现出典型的弹性特征，即在外力作

用下产生可逆变形；进入粘弹态后，玻璃的力学行为呈现时间依赖性，主要表现为蠕变和应力松弛等粘弹性现象；当温度超过软化点时，玻璃转变为粘流态，此时主要表现为粘性流动特性^[63]。

在模压成型工艺中，加工温度通常控制在玻璃转化点与软化点之间，这一温度区间使得玻璃同时具备弹性固体和粘性流体的双重特性。因此，在分析热压过程中的玻璃变形行为时，需要同时考虑材料的弹性模量和粘度参数，以准确描述其复杂的力学响应^[64]。这种粘弹性特征对成型工艺参数的优化和最终产品质量的控制都具有重要影响。

学者最早是用“平行板粘度计”的方法来估算处 $10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s} \sim 10^8 \text{ Pa}$ 范围的粘度值，具体步骤是用一对平行板压缩圆柱状玻璃样品，根据玻璃实时变形尺寸来估算瞬时粘度，公式如下：

$$h_{\text{no-slip}} = \frac{2pFh^5(t)}{3Vh(2ph^3(t) + V)} \quad (2-1)$$

$$V = A_0 h_0 = \pi r^2(t) h(t) \quad (2-2)$$

其中， F 为施加的压力， $h(t)$ 为玻璃样品的瞬时高度， h 为圆柱状玻璃的轴向应变率，即 dh/dt ， V 为玻璃样品的体积， $r(t)$ 为样品瞬时的半径。上述公式中的 F 与 h 均为瞬时值， V 为恒定值，即认定玻璃为不可压缩实体，体积保持恒定不变。但实际升温过程中的玻璃会发生热膨胀，体积会有增大，因此后续有学者修正了平行板粘度法的公式，如下：

$$h = \frac{2pF(h + \Delta h)^5}{3(V + \Delta V)h[2p(h + \Delta h)^3 + (V + \Delta V)]} \quad (2-3)$$

其中， Δh 和 ΔV 分别为膨胀增加的高度和体积。

当温度升高使得玻璃样品呈流体状态，可使用估算粘度范围更广的 Vogel Fulcher-Tammann (VFT) 公式：

$$\log h = A + \left[\frac{B}{T - T_0} \right] \quad (2-4)$$

其中 A, B, T_0 均为常数， h 为 T 时刻的粘度。

2.2.2 粘弹性特性

在自然界中，所有材料都表现出弹性和粘性的性质，尤其是在玻璃材料上，温度变化对其物理性质有显著影响。在常温条件下，玻璃材料呈现出硬脆性，但随着温度升高，玻璃材料会在转变温度和软化温度之间展现出一种不同于一般材料的物理性质^[63]。该物理性质具有弹性固体和粘性流体的特征，在理论上被称为粘弹性。在这个温度范围内，玻璃材料所表现出的性质为蠕变和应力松弛。

在施加并保持恒定应力的情况下，粘弹性材料的性能随着时间的推移而增加的现象称为“蠕变”。图 2-5 (a) 中描述的 Kelvin-Voigt 模型经常用于描述这种蠕变。它包括一个并联的弹簧和一个阻尼器，它们的特性由图 2-6 (a) 所示的功能表示。

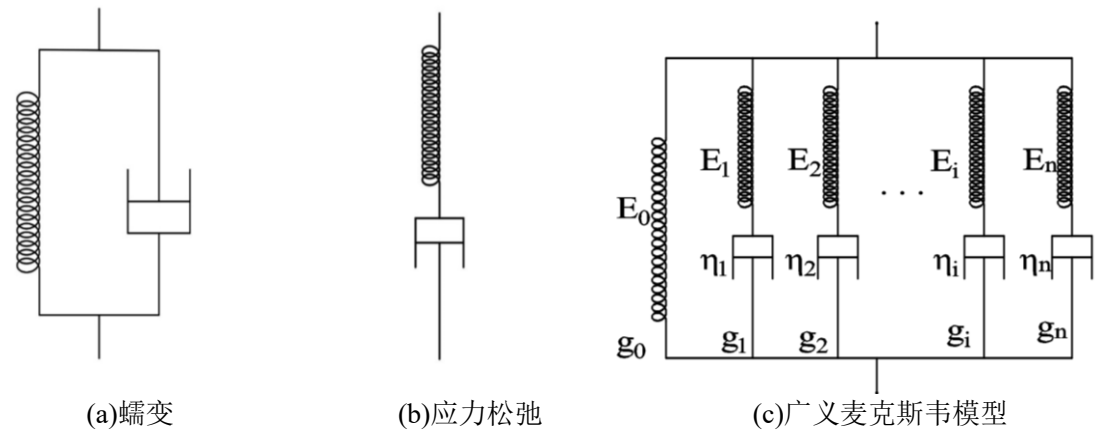


图 2-5 粘弹性表征模型

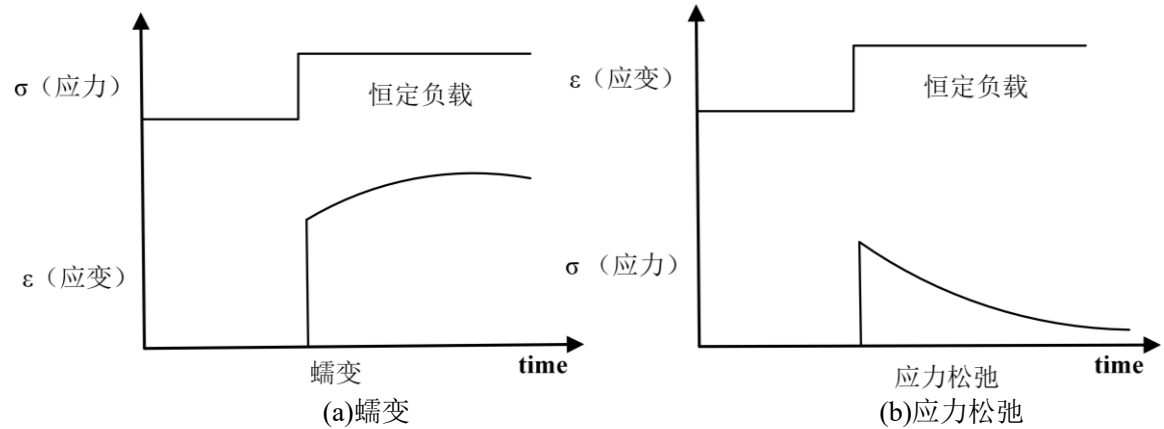


图 2-6 熔融状态下玻璃粘弹性应力应变

施加恒定应变并保持恒定时，粘弹性材料的应力随时间减小的特性称为“应力松弛”。表征应力松弛的常用物理模型是麦克斯韦模型，如图 2-5 (b) 所示。它由串联的弹簧和阻尼器组成。其特性由图 2-6 (b) 所示的函数表示。然而，

Kelvin-Voigt 模型无法表征应力松弛，而 Maxwell 模型无法表征蠕变。因此，开发了一种基于 Maxwell 模型的新模型，该模型由一个弹性单元和多个并行的 Maxwell 模型组成。如图 2-6 (c) 所示，该模型称为广义麦克斯韦模型，可以更好地表征玻璃材料的粘弹性，因此应用广泛^[65-66]。

粘弹性材料中剪切应力的特征表达式 $\sigma(t)$ 如下所示。

$$s(t) = \int_0^t G(t-t) \frac{dt(t)}{dt} dt + G(t)e(0) \quad (2-5)$$

在上式中， $G(t)$ 表示剪切应力松弛模量函数， $G(t-t)$ 表示应力松弛函数。

然而，广义 Maxwell 模型并非绝对适用于玻璃材料的结构松弛现象。这包括由于内应力或材料疲劳引起的玻璃结构变形和尺寸变化。随着时间的推移，玻璃材料的温度从高温冷却到玻璃化转变温度^[67]。因此，它的体积松弛功能可以表述如下。

$$M(t) = \frac{V(t) - V_2(\infty)}{V_2(0) - V_2(\infty)} = \frac{T_f(t) - T_2}{T_1 - T_2} \quad (2-6)$$

其中， T_f 是假设的温度，结构松弛由 TNM 模型表示。

$$T_f = T + \int_{T_1}^{T_2} M(t-t_v) \frac{dT}{dt_v} dt_v \quad (2-7)$$

$$\tau_v = \tau_{v,ref} \exp \left\{ -\frac{\Delta H}{R} \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{x}{T} - \frac{1-x}{T_f} \right] \right\} \quad (2-8)$$

$$M(t) = \sum_{i=1}^N w_i \exp(-t/t_{vi}) \quad (2-9)$$

其中 $t_{v,ref}$ 是参考温度下的结构弛豫时间， x 是一个非线性常数， $\frac{\Delta H}{R}$ 是材料的活化能与气体常数的比值， w_i 是重量因子，其中 $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ 。

2.2.3 热流变特性

玻璃材料的物理特性随温度而变化。在不同的温度水平下，相应的大应变弛豫特性可以用简单的热流变模型来表示^[68]。如图 2-7 所示，通过对数时间轴上移动一定温度下的应力松弛曲线（ T_{ref} ）可以获得不同温度下的应力松弛

曲线，并且该模型不需要改变曲线的形状。在研究基本聚合物材料（如玻璃）时，经常使用 Williams-Landel-Ferry（WLF）方程来描述它们的性质^[69]。

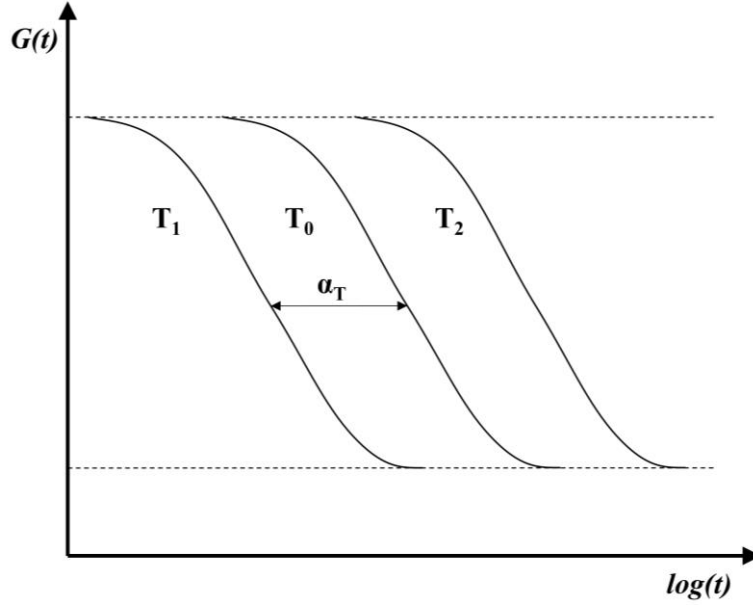


图 2-7 热流变理论曲线

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_{\text{ref}})}{C_2+(T-T_{\text{ref}})} \quad (2-10)$$

在方程中， T_{ref} 表示特定的参考温度， C_1 、 C_2 是拟合系数。WLF 方程可以有效地分析在较宽温度范围内测量传统玻璃模压成型的过程。

2.3 光学玻璃元件有限元仿真成型机理研究

2.3.1 光学玻璃元件形貌偏差的理论计算

光学玻璃成型质量的优化，在很大程度上取决于热压工艺参数的控制。传统实验方法，主要依赖试错法来评估各工艺因素对成型结果的影响，但该方法存在明显得局限性：一方面研究效率低下，另一方面只能在实验结束后才能获得结果反馈，难以实时观察成型过程^[70]。有限元数值模拟技术的引入，为工艺优化研究提供了新的解决方案。研究者能够灵活调整热压温度、界面摩擦系数、保压时间和热压力等关键工艺参数，从而准确预测光学玻璃的最终成型形貌，并深入分析各参数对成型质量的影响规律^[71-72]。这种数值模拟方法不仅提高了研究效率，还为工艺优化提供了可靠的理论指导。

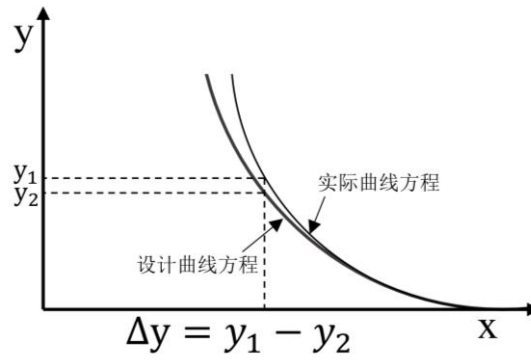


图 2-8 理论形貌偏差计算原理

图 2-8 为本文理论有限元模型设计的形貌偏差原理，因本文所使用理论模型是二维模型，以 x 轴为定位基准，将有限元分析结果后的点位带入设计曲线方程，计算理论上 y 值。最后将实际测量的点位 y_1 值减去理论上的 y_2 值，即为形貌偏差，其理论设计曲线方程如公式 2-11 所示。

$$y = 9 - [16 - (x - 9)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2-11)$$

2.3.2 摩擦系数对模压成型形貌偏差的影响

界面摩擦系数是精密模压成型工艺中的关键控制参数，其对成型质量具有多重影响。首先，摩擦系数直接影响玻璃材料在受压过程中的流动行为，可能导致产品尺寸精度偏差和局部应力集中现象^[73]。这种影响不仅会提高成型过程的能耗和载荷需求，延长生产周期，还会对大规模生产的经济性产生不利影响。

本文以单因素控制变量法为基础，通过改变单因素摩擦系数，来观察摩擦系数影响形貌偏差的变化，并为下一步正交设计参数提供数据支持。本文设置 0.1、0.3、0.4 和 0.6 摩擦系数下成型误差的影响，其他参数保持不变，参数设置如表 2-2 所示。

表 2-2 摩擦系数影响下仿真基本参数

序号	摩擦系数	保持力 (Mpa)	保压时间 (s)	退火时间 (s)	退火温度(°C)
1	0.1	0.03	100	100	490
2	0.3	0.03	100	100	490
3	0.4	0.03	100	100	490
4	0.6	0.03	100	100	490

基于上述四组参数，得到了相应的四组数据，每组取玻璃轮廓点 25 个，带入上述的计算公式，得到理论轮廓偏差和实际轮廓偏差之差，如图 2-9 所示。

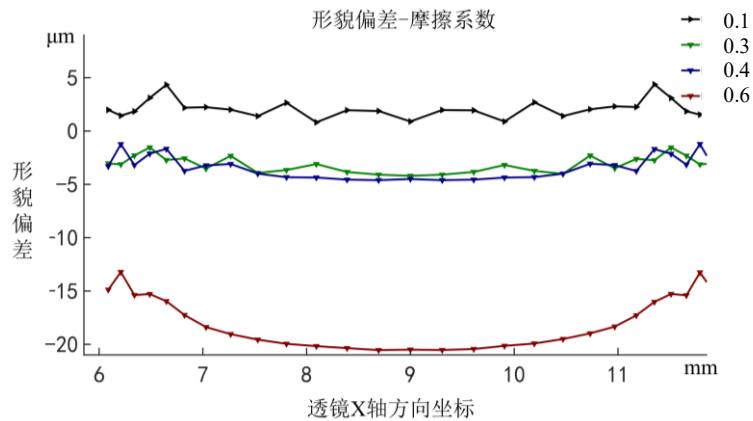


图 2-9 形貌偏差与摩擦系数关系

根据图 2-9 所示，在其它因素保持不变的情况下，当摩擦系数为 0.1 时，轮廓误差表现为正值，这表明在最终冷却之后，玻璃与模具之间存在细微的过度粘合现象。随着摩擦系数的逐渐增大，误差也随之逐渐向负值方向增加。摩擦系数的增加导致软化的玻璃在模具中的移动变得更加困难，玻璃与模具之间的空隙也逐渐增大。因此，摩擦系数在 0.1 至 0.3 之间可能存在一个更为理想的数值。

2.3.3 保压阶段对模压成型形貌偏差的影响

保压阶段是指玻璃在经过加热达到软化状态并与模具紧密贴合之后，通过维持一定的压力，来确保玻璃能够均匀地冷却并定型于模具的形状。这一阶段对最终产品的质量至关重要，因为它决定了玻璃的成型精度和应力分布情况^[74]。在保压阶段，玻璃已经软化并开始与模具接触，此时必须防止玻璃内部产生应力，否则在冷却过程中可能会导致玻璃炸裂或变形。为了达到这一目标，保压阶段通常会维持一个适当的温度，并保持一定的压力，以确保玻璃能够均匀地减少其内部应力。

(1) 保压力对模压成型形貌偏差的影响

在模压工艺的保压阶段，保压压力的应用旨在确保玻璃在模具内均匀成型，并减少冷却过程中由于温度梯度而产生的内部应力。保压阶段的压力控制至关重要，必须足够高以保持玻璃与模具的良好接触，但又不能过高，以免导致模

具损坏或玻璃炸裂。通过单因素控制变量法，以探究保压压力的影响趋势，并提供一个合适的压力区间，为后续的正交设计提供数据支持。本文研究了在 0.01 Mpa、0.3 Mpa、0.4 Mpa 和 0.6 Mpa 工况下的保压压力对成型误差的影响，参数设置如表 2-3 所示。

表 2-3 保持力影响下仿真基本参数

序号	摩擦系数	保持力 (Mpa)	保压时间 (s)	退火时间 (s)	退火温度(°C)
1	0.3	0.01	100	100	490
2	0.3	0.03	100	100	490
3	0.3	0.04	100	100	490
4	0.3	0.06	100	100	490

基于上述四组保压压力参数，得到了相应的四组数据，每组取玻璃轮廓点 25 个，带入上述的计算公式，得到理论轮廓偏差和实际轮廓偏差之差，如图 2-10 所示。从图中可以看出随着压力的逐渐增加，形貌偏差从间隙的存在逐渐转变为过度压缩。然而，无论是过度压缩还是间隙的存在都是不可接受的。因此，接近于 0 刻度线的绝对值是最佳选择。只有当压力保持在 0.04Mpa 时，其数值才能大部分接近于 0。因此，将压力维持在 0.04Mpa 左右的区间是一个最优选择。

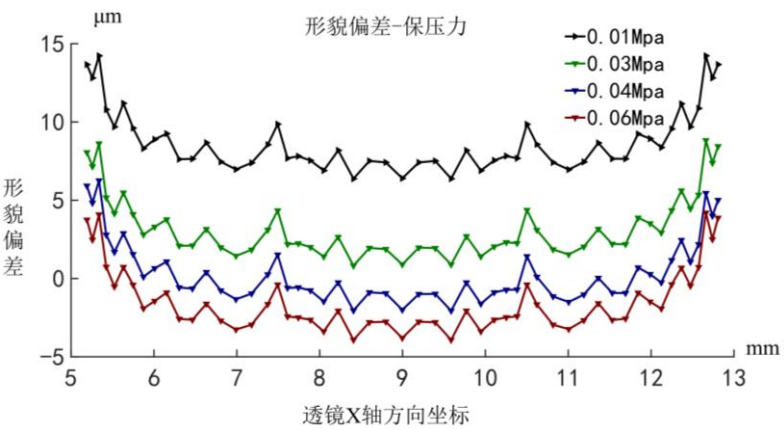


图 2-10 形貌偏差与保压力关系

(2) 保压时长对玻璃模压成型形貌偏差的影响

保压阶段的持续时间对玻璃成型质量有着显著影响。在玻璃达到软化状态并开始贴合模具后，保压时间指的是保持一定压力的时间。这个阶段的主要目的是确保玻璃能够均匀定型，同时减少内部应力并防止产品出现缺陷。在整个

保压阶段中，保压时间需要足够长，以确保玻璃熔体在模具内充分填充，避免因填充不足而导致的内部缺陷。适当的保压时间有助于减少玻璃的收缩，从而降低内部应力和变形的可能性，进而改善玻璃制品的表面质量。然而，如果保压时间过长，可能会导致玻璃过度压实，引起模具磨损或玻璃表面出现压痕。本文采用单因素控制变量法，设置如表 2-4 所示，保持其他因素不变，以探索保压时间的影响趋势，并提供一个合适的区间范围，为后续的正交设计提供数据支持。

表 2-4 保压时间影响下仿真基本参数

序号	摩擦系数	保持力 (Mpa)	保压时间 (s)	退火时间 (s)	退火温度(°C)
1	0.3	0.03	50	100	490
2	0.3	0.03	75	100	490
3	0.3	0.03	100	100	490
4	0.3	0.03	150	100	490

基于上述四组参数，得到了相应的四组数据，每组取玻璃轮廓点 25 个，带入上述的计算公式，得到理论轮廓偏差和实际轮廓偏差之差，将所得数据化为图像，如图 2-11 所示。从图中可以看出，保压时间在 50s 至 150s 时，计算所获得的值相差较小，区别不是非常明显，但是不难看出，随着保压时间的减小，所得数值也在不断减小。

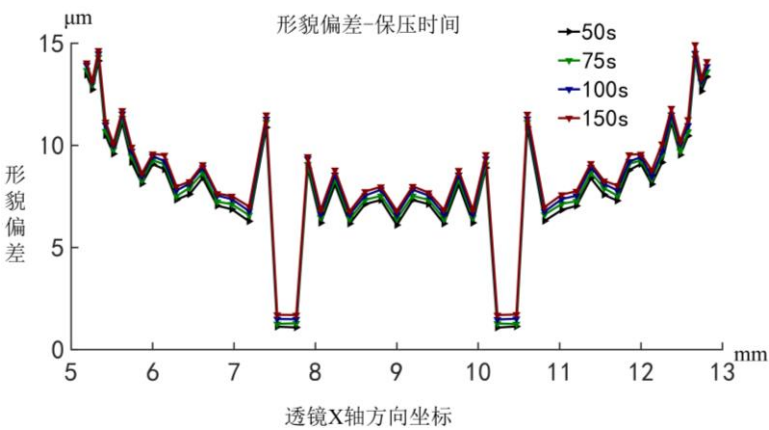


图 2-11 形貌偏差与保压时间关系

2.3.4 退火速率对模压成型形貌偏差的影响

退火速率，即玻璃在退火过程中的冷却速度，其对玻璃成型质量具有重要

的影响。适宜的退火速率可减少玻璃在冷却过程中因温度梯度产生的内部应力，从而防止玻璃炸裂或变形^[75]。退火速率还影响玻璃在冷却过程中的尺寸变化，过快的冷却可能导致玻璃表面出现压痕或内部产生应力，而适当的冷却速率能保持玻璃制品尺寸的稳定性。如果退火速率过快，玻璃的内应力急剧增高，严重影响玻璃的成像精度；反之，退火速率过慢，则可能降低生产效率并增加能源消耗。在实际生产中，退火速率的设定需根据玻璃的成分、厚度、形状以及所需的产品质量要求进行精确控制，并主要通过调整退火时长和退火温度来不断优化。

(1) 退火时长对玻璃模压成型形貌偏差的影响

退火时间是玻璃制品在退火过程中的关键参数之一，它直接影响到玻璃制品的应力消除和最终质量。在退火过程中，玻璃制品被加热到一定的温度，使内部的应力得以松弛和重新分布^[76]。退火时间足够长，可以确保应力得到充分消除，防止在后续使用中因应力集中而导致破裂。从仿真模拟时间来看，退火时间的长短直接影响计算时长，过长的退火时间会增加模拟计算的周期；而时间过短则可能导致应力消除不彻底。通过单因素控制变量法，研究保压时间的影响趋势，以提供合适的区间范围，为下一步的正交设计提供数据支持，数据如表 2-5 所示。

表 2-5 退火时间影响下仿真基本参数

序号	摩擦系数	保持力 (Mpa)	保压时间 (s)	退火时间 (s)	退火温度(°C)
1	0.3	0.03	100	50	490
2	0.3	0.03	100	100	490
3	0.3	0.03	100	150	490

基于上述四组参数，得到了相应的四组数据，每组取玻璃轮廓点 25 个，带入上述的计算公式，得到理论轮廓偏差和实际轮廓偏差之差，将所得数据化为图像，如图 2-12 所示。

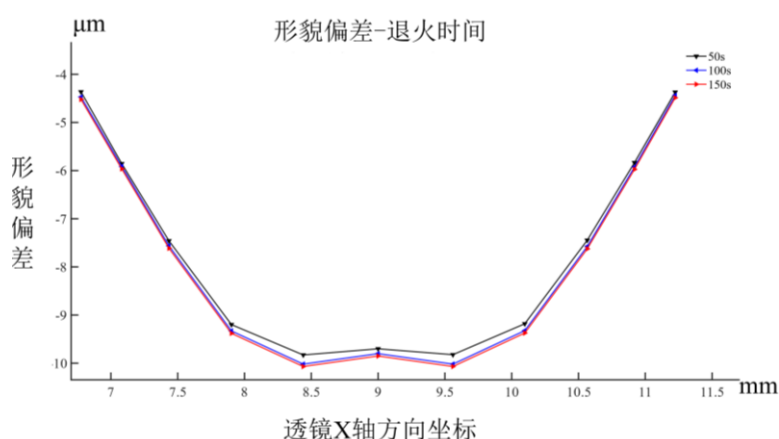


图 2-12 形貌偏差与退火时长关系

从图中观察得出，随着退火时间的增大，形貌偏差的数值也逐渐变大，说明了该温度下退火时间的增大，对于玻璃的成型偏差有着较坏的影响，故应该减少退火时间。

(2) 退火温度对玻璃模压成型形貌偏差的影响

玻璃的退火温度通常是指在退火过程中玻璃需要加热到的温度，该温度低于玻璃的转变温度附近的一个特定值。退火可以提高材料的结晶度，从而增大晶粒的尺寸和提高其均匀性。这有助于提升玻璃在成型过程中的机械性能和变形能力，从而减少成型过程中的变形和偏差^[77]。通过采用单因素控制变量法，以探索保压时间的影响趋势，并提供了合适的区间范围，参数设置如表 2-6 所示，为后续的正交设计提供了数据支持。

表 2-6 退火温度影响下仿真基本参数

摩擦系数	保持力 (Mpa)	保压时间 (s)	退火时间 (s)	退火温度(°C)
1	0.3	0.03	100	440
2	0.3	0.03	100	460
3	0.3	0.03	100	480
4	0.3	0.03	100	500

基于上述四组退火温度参数，得到了相应的四组数据，每组取玻璃轮廓点 25 个，带入上述的计算公式，得到理论轮廓偏差和实际轮廓偏差之差，如图 2-13 所示。从图中可以看出，随着退火温度的升高，形貌偏差逐渐减小。P-SK57 玻璃的软化温度为 494°C（玻璃材料数据见表 2-1）。退火温度低于 494°C 可能会导致玻璃过早固化，导致内应力释放不足，无法达到预定形状，导致较大的

形貌偏差。过高的退火温度可能会导致玻璃仍然软化，从而导致玻璃形貌无法稳定成型。所以退火温度的参考值设定在 500℃，这是玻璃即将凝固但尚未完全凝固的状态，导致形貌偏差较好。

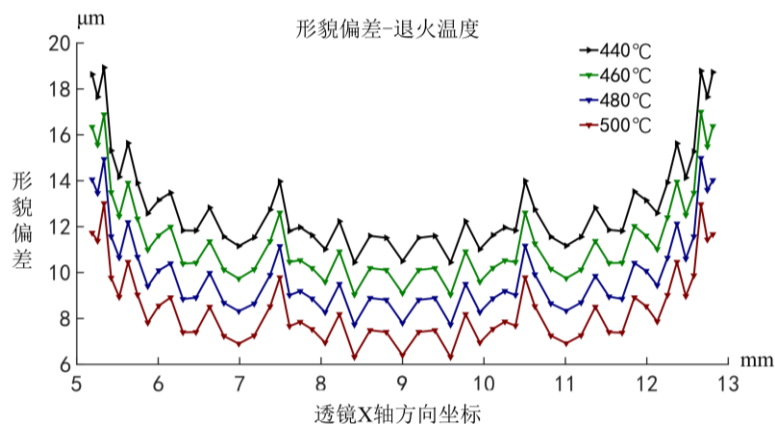


图 2-13 形貌偏差与退火温度关系

2.4 本章小结

本章深入研究了基于粘弹性理论的光学玻璃元件模压成型机理。从玻璃的粘弹性理论出发，使用 Abaqus 软件建立有限元仿真模型，划分网格，并设定热压环境的工艺参数。在设定材料参数的同时，本章也介绍了玻璃的应力松弛和结构松弛特性，分析了玻璃粘弹性理论的相关特点，这些为第 4 章企业 HUD 玻璃的仿真模型建立提供了理论模型参考。接着，本章研究了光学玻璃元件有限元仿真的成型机理，采用单因素变量法，探索了摩擦系数、保压阶段的时长与压力及退火速率对玻璃成型的影响，为第 3 章工艺参数数据优化提供了取值范围。

第 3 章 基于 GA-BP 算法的光学玻璃元件形貌偏差优化研究

3.1 基于光学玻璃元件成型工艺参数的正交实验设计

正交实验设计是一种统计方法，用于确定在多个因素影响下各因素对实验结果的影响程度及其最优水平组合。它通过使用正交表来减少需要执行的实验次数，同时确保实验结果的有效性和代表性^[78]。本文目标是通过正交设计确定哪种因素对玻璃变形的影响最大，并在获取结果后，找到最佳参数组以达到最终的优化目标^[79]。

3.1.1 正交实验表设计

本文采用保压时间、退火时间、摩擦系数、保温压力和退火温度 5 个参数设计了正交实验。根据上一章获得的每个参数的最佳变量范围，正交实验中因子的水平如表 3-1 所示。正交实验的具体运行如表 3-2 所示。

表 3-1 五水平五因素正交实验表

	退火温度(°C)	保压力(Mpa)	摩擦系数	退火时间 (s)	保持压力(s)
Level 1	460	0.02	0.05	50	50
Level 2	470	0.025	0.1	75	75
Level 3	480	0.03	0.15	100	100
Level 4	490	0.035	0.2	125	125
Level 5	500	0.04	0.25	150	150

表 3-2 正交实验具体参数表

序号	退火温度 (°C)	保压力 (Mpa)	摩擦系数 (N)	退火时间 (s)	保持压力 (s)	最大形貌偏差 (μm)
1	460	0.02	0.05	50	50	-3.8
2	460	0.025	0.1	75	75	-4.4
3	460	0.03	0.15	100	100	-4.66
4	460	0.035	0.2	125	125	-4.66243

5	460	0.04	0.25	150	150	-4.8
6	470	0.03	0.1	50	125	-3.2278
7	470	0.035	0.15	75	150	3.21431
8	470	0.04	0.2	100	50	4.90004
9	470	0.02	0.25	125	2	-3.5
10	470	0.025	0.05	150	100	-4
11	480	0.04	0.15	50	75	-4.23391
12	480	0.02	0.2	75	100	-4.4376
13	480	0.025	0.25	100	125	-4.37004
14	480	0.03	0.05	125	150	-4.063
15	480	0.035	0.1	150	50	-4.0200
16	490	0.025	0.2	50	150	-3.861
17	490	0.03	0.25	75	50	-3.6614
18	490	0.035	0.05	100	75	-4.0397
19	490	0.04	0.1	125	100	-3.876
20	490	0.02	0.15	150	125	-3.2000
21	500	0.035	0.25	50	100	-3.6235
22	500	0.04	0.05	75	125	-3.876
23	500	0.02	0.1	100	150	-2.900
24	500	0.025	0.15	125	50	-3.5
25	500	0.03	0.2	150	75	-3

3.1.2 正交实验结果分析

表 3-3 正交实验结果

	退火温度(°C)	保压力(Mpa)	摩擦系数	退火时间 (s)	保持压力(s)
K1	-4.4646	-3.5675	-3.9554	-3.7493	-3.9763
K2	-3.7684	-4.0263	-3.6848	-3.9180	-3.8947
K3	-4.2243	-3.7821	-3.7618	-4.1741	-4.1196
K4	-3.7278	-3.9120	-4.2323	-3.9198	-3.8674
K5	-3.4401	-4.3374	-3.9909	-3.8640	-3.7672
R	-1.0245	-0.7699	-0.5475	-0.4248	-0.3524

表 3-3 中所示数据为正交实验模拟结果，各个参数最佳数值在表中用黑色加粗标注，可以发现工艺参数对形貌偏差的影响大小为：退火温度 > 保持压力 >

摩擦系数 > 退火时间 > 保持时间。根据标注的数值，确定的最佳条件是：退火温度为 500℃，退火时间为 50s，摩擦系数为 0.1N，保压为 0.02Mpa，保压时间为 150s。

3.1.3 仿真实验验证

根据上节所得数据，进行仿真模拟计算，具体参数设置如表 3-4 所示。最后，仿真计算结果如下图 3-1 所示，仿真所得曲线与模具边缘存在细细的白色间隙，其中以两端顶部最为明显，原因是受摩擦系数的影响，玻璃在模压过程中，两端受摩擦力和重力的影响，并不能按照模具曲线完美拟合。将轮廓曲线带入上章所述的方程中进行计算，所得最大形貌偏差数值为 2.9μm。

表 3-4 正交实验优化后工艺参数组

摩擦系数	保持力 (N)	保压时间 (s)	退火时间 (s)	退火温度 (℃)
0.1N	0.02Mpa	150s	50s	500℃

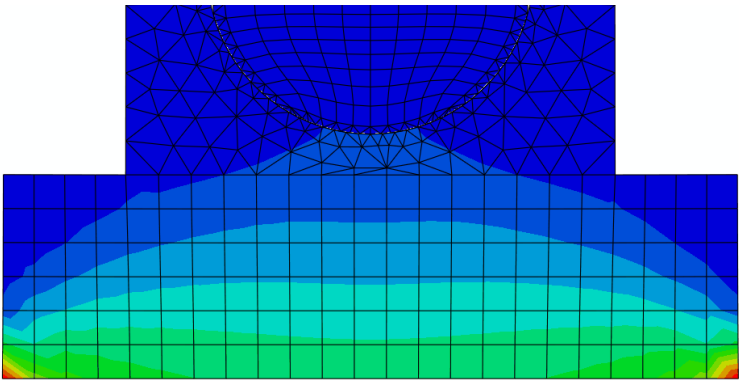


图 3-1 正交设计最佳参数组形貌偏差仿真结果

3.2 基于光学玻璃元件成型工艺参数的 BP 神经网络设计

BP 神经网络（Backpropagation Neural Network，反向传播神经网络）是一种常用的人工神经网络模型，广泛应用于模式识别、函数逼近、数据分类和预测等领域，其核心特点是利用误差反向传播算法（Backpropagation Algorithm）来调整网络参数，从而实现对复杂非线性关系的建模^[80]。

BP 神经网络通常由输入层、隐藏层（可以有多层）和输出层组成。每一层由多个神经元（节点）构成，神经元之间通过权重连接。输入层接收外部数据，

隐藏层负责特征提取和转换，输出层生成最终结果^[81]。

3.2.1 BP 神经网络构建

本文构建了一个神经网络模型结构，如图3-2所示。该模型将研究的五个因素作为输入，其中包括保压时间（ S_b ）、退火时间（ S_t ）、摩擦系数（ f ）、保持压力（ P_m ）和退火温度（ T_t ），表示为输入层的5个神经元。中间设置10组神经元，用来反映输入层与输出层之间的关系，输出层为优化目标-形貌偏差。因此，该神经网络结构为5-10-10-1型^[82]。

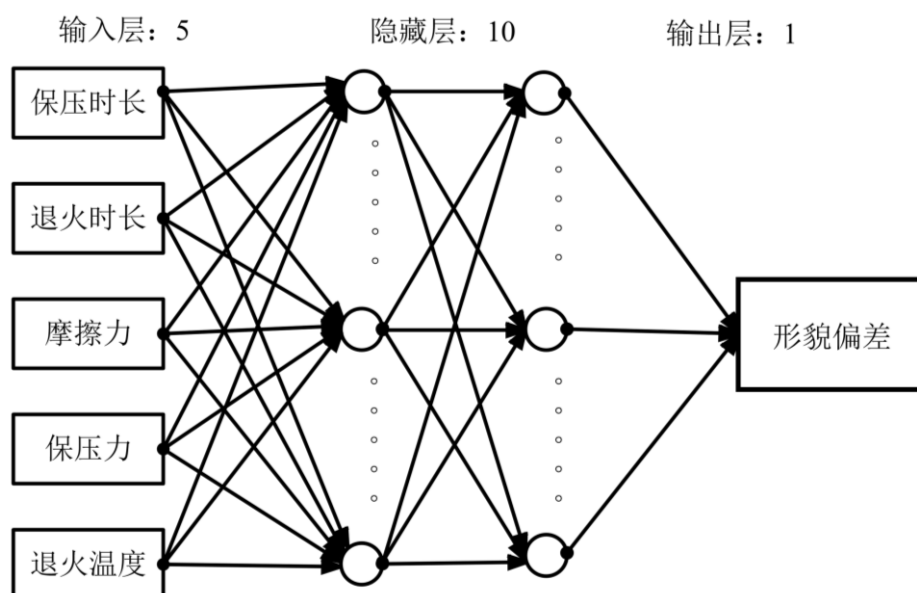


图 3-2 BP 神经网络结构图

本文以形貌偏差为优化目标，设置工艺参数为保压时间、退火时间、摩擦系数、保持压力、退火温度为决策变量，优化数学模型如下：

$$\text{决策变量: } X = [S_t, S_b, f, P_m, T_t]$$

$$\text{最小化: } \alpha f^n$$

式中： D_m 为形貌偏差； α 为优化目标最大形貌偏差的优化权重矩阵； f^n 为归一化函数； S_b 、 S_t 、 f 、 P_m 、 T_t 为玻璃模压成型的工艺参数。

本次 BP 神经网络使用表 3-2 数据，其中前 80% 为训练样本。BP 神经网络模型是使用 MATLAB 软件开发的^[83]。本研究中，BP 神经网络选择的参数如表 3-5 所示。

表 3-5 BP 神经网络参数

神经网络参数	参数特性
拓扑结构	输入、隐式、输出层
培训方法	共轭梯度算法
训练误差	0.000000005
学习率	0.7
迭代次数	50

3.2.2 形貌偏差预测

根据表 3-5，对建立的 BP 神经网络配置了相关参数^[84-85]，分别获得预测回归图和误差预测图，如图 3-3 和 3-4 所示。图 3-3 中横轴表示真实值，纵轴表示预测值。理想情况下，点应分布在一条 45 度直线上，从 R 值的数据表明，训练样本值和测试样本值之间的相关性普遍高于 0.94，这表明两者之间存在很强的相关性。而图 3-4 中的预测样本与预测结果误差较小，均方根误差仅为 0.086006，证明该 BP 神经网络模型具有良好的准确性。

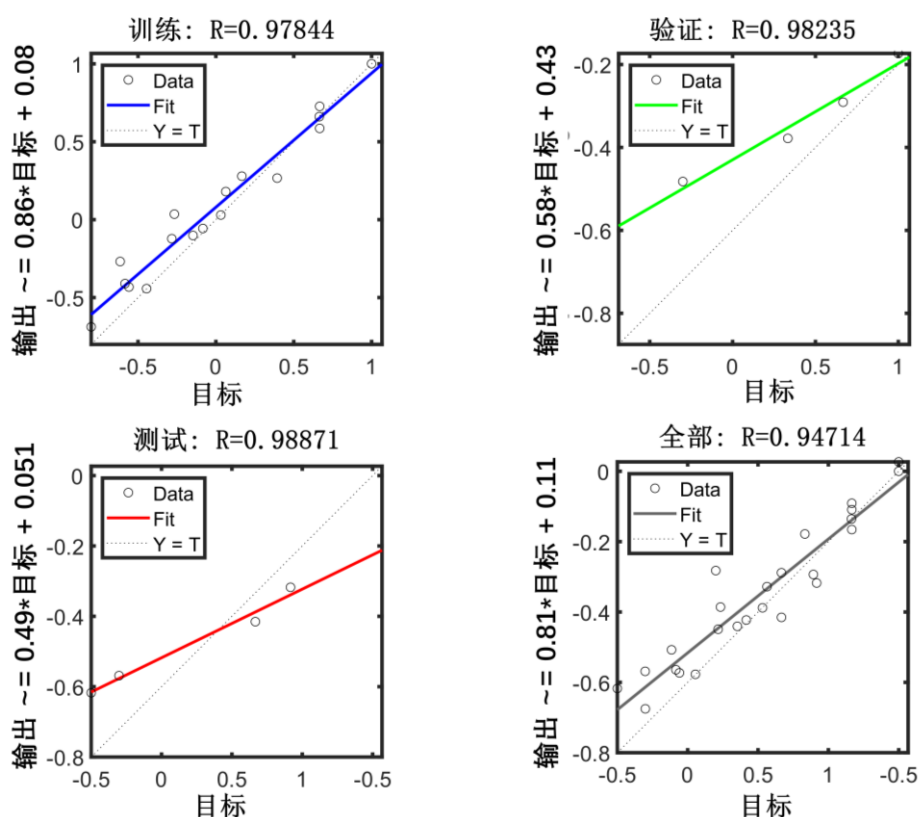


图 3-3 BP 神经网络预测样本与训练样本相关性

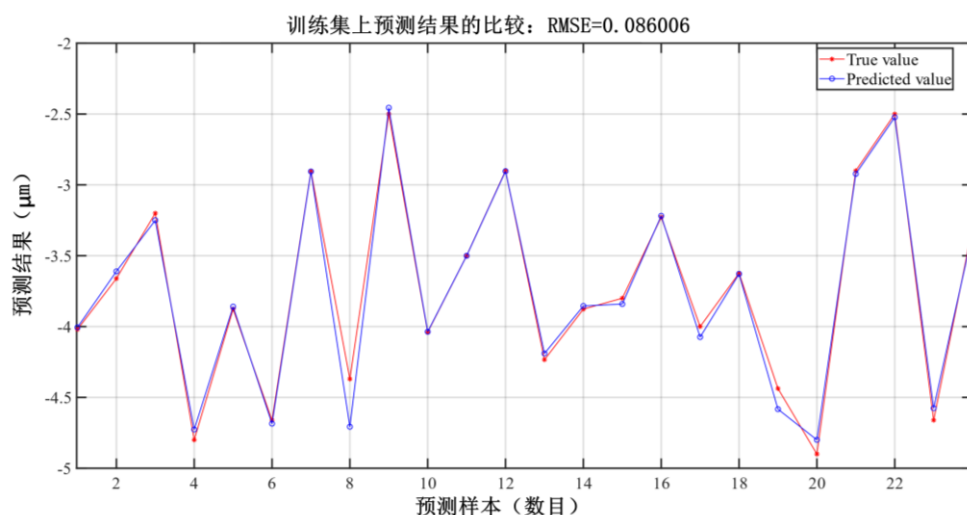


图 3-4 BP 神经网络预测样本与训练样本误差

3.3 基于 GA-BP 神经网络算法的成型工艺参数优化

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是一种基于自然选择和遗传机制原理的全局优化搜索算法, 由 John Holland 于 1975 年提出, 它模拟生物进化过程中的选择、交叉 (杂交)、变异等操作, 通过迭代优化寻找问题的最优解^[86-87]。其具体流程如图 3-5 所示。

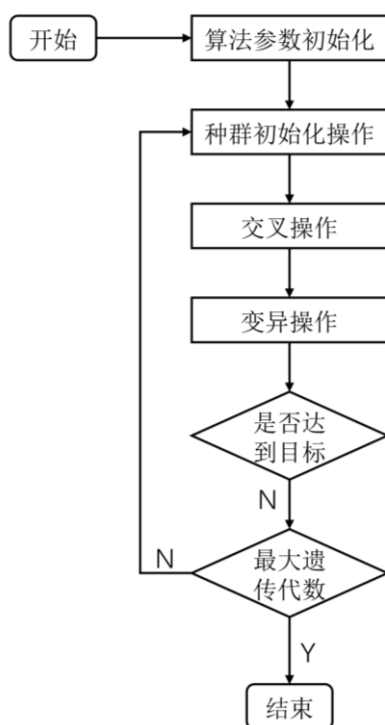


图 3-5 遗传算法流程图

3.3.1 GA-BP 神经网络算法优化结果

基于上述 BP 神经网络，使用 MATLAB 软件实现 GA 以优化模型的仿真结果。GA 参数设置如下：30 代进化，种群规模为 300，交叉概率为 0.01，突变概率为 0.01。模拟实验开始并记录平均适应度，如表 3-6 所示。GA 得到的最优数据为：退火温度为 499.0999℃，退火持续时间为 52.1855s，摩擦系数为 0.0773N，保压为 0.0211Mpa，保压时间为 95.1983s。将这些值应用于模拟计算后，确定最大形貌偏差为 2.5 μm 。

表 3-6 通过遗传算法得到的最优参数组

	退火温度(℃)	保持力(Mpa)	保压时长 (s)	退火时间 (s)	摩擦系数 (N)
结果	499.099	0.0211	95.1983	52.1855	0.0773

3.3.2 光学玻璃元件形貌偏差补偿方法

由于在玻璃透镜中，中心区域需要达到最高精度。因此，在本研究中对模具的中心部分进行了调整，以最小化零件位置与原始设计函数方程式所确定的位置之间的偏差。首先，将 GA 模拟计算得到的结果用于确定中心区域的坐标，如图 3-6 所示。接着，这些结果被代入到原始的设计函数方程中。此外，由于模型是中心对称结构，因此只取其一半进行模具修改，以简化计算过程。修改后的模具数据坐标与设计函数方程得出的数据坐标之间的最大偏差为 1.9 μm ，如图 3-7 所示。

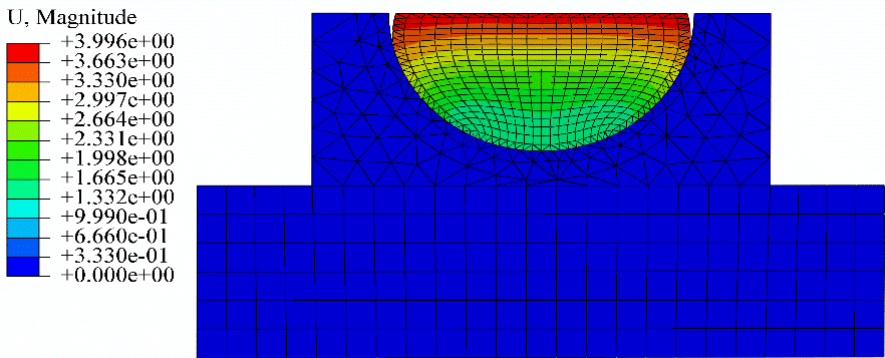


图 3-6 GA-BP 优化后参数组形貌偏差仿真结果

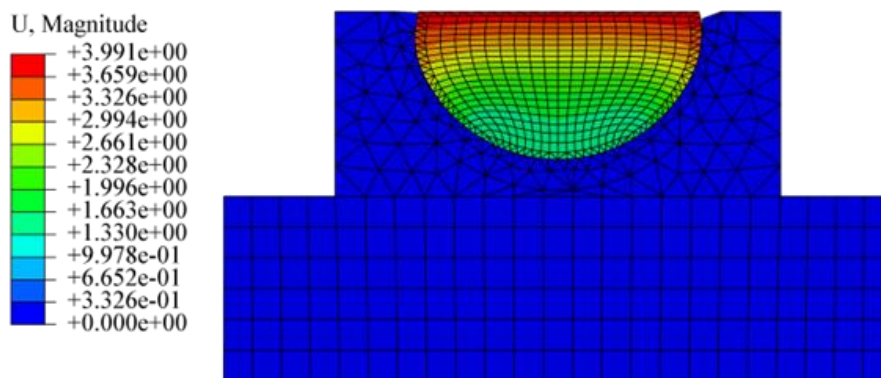


图 3-7 基于 GA-BP 优化参数组形貌偏差仿真的补偿修型

结果显示，经过三次修复后，玻璃的形貌偏差已经成功减少，使其更接近原始设计函数方程所确定的理想位置。修复后的模具结果显示误差进一步降低，表明修复过程在提高精度和减少错误方面是有效的。如图 3-8 所示，三次模具修复后的错误结果得到了显著改善。因此，本文提出的方法可以有效提升玻璃透镜的成型精度，并减少修复次数。

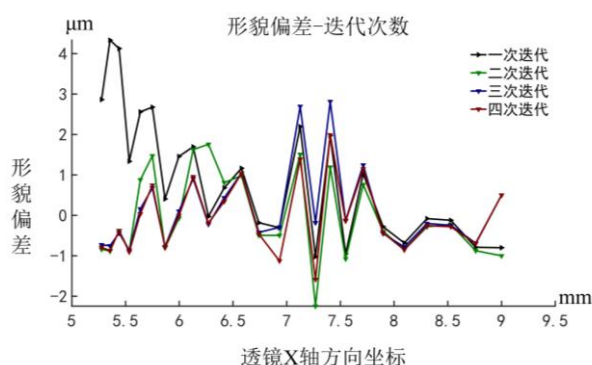


图 3-8 模具补偿修型结果

3.4 本章小结

本章首先阐述了正交实验方法的优势，通过第 2 章对光学玻璃元件成型机理的研究，确定了正交实验表中的因素及其水平范围，并通过计算获得了最佳参数组。然后，将优化后的工艺参数组反馈至仿真工艺中，结果显示仿真成型误差为 $2.9\ \mu\text{m}$ 。随后，基于 GA-BP 神经网络算法对工艺参数组进行了优化，最终通过优化得到了一组最佳参数组。将该参数组反馈至仿真过程中，结果显示仿真成型误差降至 $2.5\ \mu\text{m}$ 。最后，基于神经网络算法优化后的参数组进行迭代修型，经过三次迭代优化，最终将成型误差成功控制在 $1.9\ \mu\text{m}$ 。这充分证明了神经网络算法在优化参数组方面的优越性，并为第 5 章提供了理论依据。

第 4 章 基于精密模压成型技术的车载曲面屏应用研究

4.1 基于热固耦合的车载曲面屏有限元仿真模型构建

HUD，即抬头显示系统（Heads Up Display），是一种先进的车载显示技术，它能够将车辆的关键信息直接投影到驾驶员前方的透明介质上，如挡风玻璃或其他显示介质，从而减少驾驶员因低头查看仪表盘而带来的安全隐患^[88]。HUD 目前分 3 种类型：C-HUD，W-HUD，AR-HUD，目前主流最先进的为 AR-HUD，其优点是增强过后的显示信息可以直接投射在用户视野角度的道路上，将显示信息可以和交通状况进行融合^[89]。然而 AR-HUD 目前是高端车型所使用的显示系统，其造价昂贵，并非占据市场主要地位。本文所研究的为具有普遍车型所代表的 W-HUD，显示效果如图 4-1 所示，其虽然没有 AR-HUD 那般融合周围路况增强显示，但是其支持更大的成像区域以及更远的成像距，具有良好的使用性能。



图 4-1 W-HUD 显示效果

本次仿真基于企业的实际需求进行，仿真和实际测试均使用 Glanova 化学强化超薄玻璃，其材料属性如表 4-1 所示。模具材料的选择应当遵循三点要求：(1)模具材料表面无瑕疵，光滑平整，通过 CNC、研磨抛光等手段依然能够保持高精度表面。(2)在高温情况下，材料性能稳定，不会与玻璃发生化学反应。(3)在高温情况下，模具表面不会发生氧化反应，表面不产生瑕疵。(4)具有较高的熔点、硬度及强度。根据以上四点要求，选择了 WX-7 石墨模具，其材料特性如表 4-2 所示。

表 4-1 Glanova 玻璃材料特性

Glanova 玻璃属性	参数值
热导率 (W/(mm·K))	2.06
密度 (g/mm ³)	2.48E-09
杨氏弹性模量(GPa)	73100
泊松比(v)	0.23
热膨胀系数(/°C)	9E-06
比热容(J/g·°C)	753120000
软化点(°C)	730
应变点(°C)	500
退火点(°C)	540

表 4-2 WX-7 石墨模具特性

WX-7 玻璃属性	参数值
热导率 (W/(mm·K))	94.58
密度 (g/mm ³)	1.82E-09
杨氏弹性模量(GPa)	73100
泊松比 (v)	0.23
热膨胀系数(/°C)	9E-06
比热容(J/g·°C)	753120000

由于企业工程中心所提供的模具三维模型本身并不能直接使用，因为它包含了许多细微的结构和线条。这些在网格划分过程中会产生网格畸变，导致网格计算报错，因此需要进行优化和去除。此外，模型中还包含大量的定位块，以及为了防止工人在生产过程中受伤而设置的倒角和倒圆。去除这些元素的原则是在不影响分析结果的前提下，对模具进行修改。在导入模型之后，Abaqus 提供了丰富的材料属性设置，可以为各个部件设定材料参数。建立上模具、下模具以及玻璃的装配体，设置接触条件，根据不同的工艺阶段设置分析步，并建立温度场。然后，根据不同的分析步设置不同的温度场，进行网格划分，设置边界载荷条件，最后完成分析计算，得出结果。最后，通过分析结果读取玻璃各点位的数据。进一步地将这些数据导入 CloudCoMpare 软件中进行三维点云拟合，与基准匹配，计算 PV (Peak to Valley) 值大小。具体的仿真流程如图 4-2 所示。

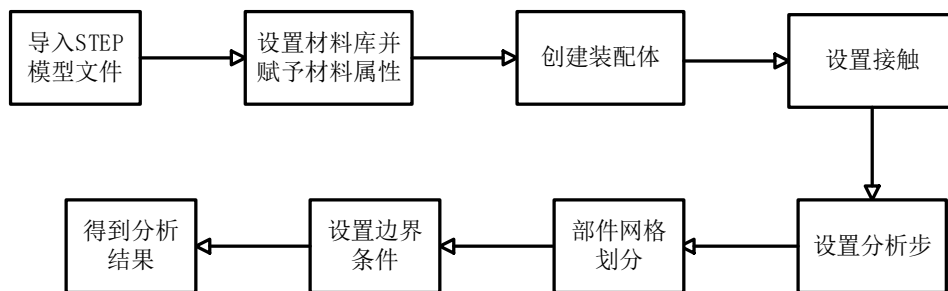


图 4-2 Abaqus 仿真流程

在 Abaqus 中导入部件模型后，它将以独立部件的形式呈现，需要在装配体模块中进行装配，随后对装配体进行网格划分，如图 4-3 至 4-6 所示。网格模型构建具体步骤如下：(1)网格划分，确定划分网格的大小。由于玻璃作为易变形的部件，主要关注其应力大小及 PV 值。因此，玻璃的网格划分越细，计算出的数值越精确，更能反映其变化情况。(2)网格类型确定。Abaqus 网格类型分为六面体(HEX)、六面体与楔形单元(Hex-dominated)、四面体(Tet)、三角形(Wedge)四种。其中，HEX 网格计算精度最高，但对电脑配置要求较高，计算时间也最长。Wedge 网格计算时间最短，但与 HEX 网格相比，计算精度较低^[90]。鉴于本次仿真的设备限制，为了保证计算顺利进行并减少计算时间，本文选择了 Wedge 网格进行划分。(3)网格属性设置。玻璃的模压成型仿真分析属于热固耦合分析类型，因此在设置网格属性时，也需将其设置为 Coupled temperature-Displacement。

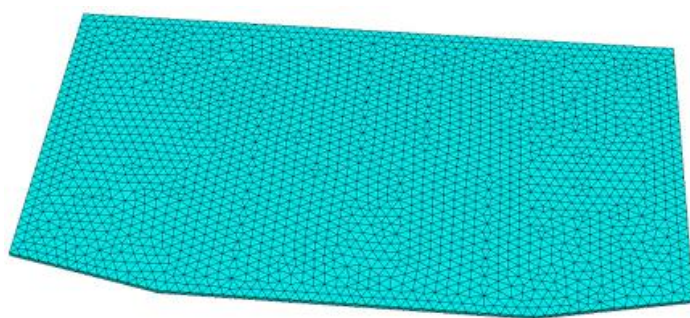


图 4-3 玻璃网格划分

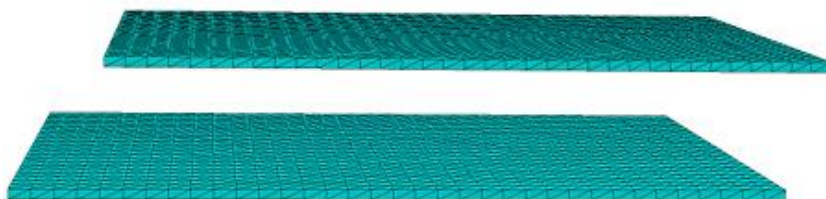


图 4-4 上下加热板

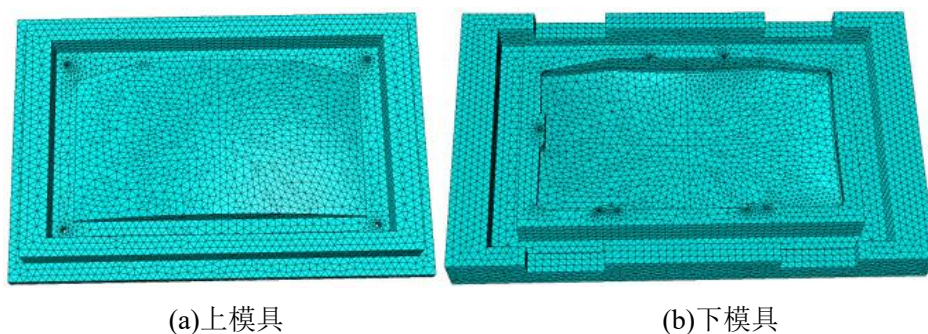


图 4-5 上模具与下模具网格划分

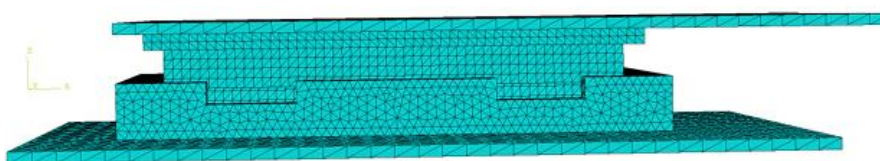


图 4-6 模具仿真网格模型

4.2 车载 HUD 曲面屏精密模压成型工艺研究

4.2.1 预热阶段

在模压成型仿真过程中，应在模型的预热阶段添加边界条件。在实际测试中，整套模具在机器预热阶段过程中保持不变，因此在仿真模拟过程中，整套模型应保持静止，持续受热。因此，在加载载荷约束中，应对下加热板以及下模具进行全固定约束，确保其在 X、Y、Z 三个方向上均不会产生位移。同时，在上下加热板上设置均匀的温度场，假设上下加热板是加热棒的集合体，它们将持续给模具加热。

根据企业提供的温度指标，预热阶段结束后，玻璃的温度应稳定在 620℃。企业工程师设定预热阶段为 2300 秒，但根据实际测温结果和对机器实时温度的观察，机器内部温度在预热阶段中期便达到了设定温度，甚至超出 5 到 10℃。在玻璃模压仿真过程中，将预热阶段的 2300 秒分为两个部分，如表 4-3 所示。

表 4-3 预热工艺温度

预热阶段	时间（s）	温度(℃)
第一阶段	0-1000	20-630
第二阶段	1000-2300	630-620

第一个阶段，将上下加热板的温度从室温升至 630℃。然而，这仅仅表明加热板的温度，玻璃的受热还需通过模具进行热传递。考虑到相当大的热损失，因此设置了第二个阶段。

第二个阶段，考虑到了模具与玻璃之间的传热速率，以及需要起到的保温作用，以确保玻璃受热的均匀性。根据企业工程师提供的测温数据，控制了整个模型中最大温差在 35℃左右。为了贴近实际情况，模拟控制的温差也应保持在 35℃左右。最后的预热阶段温度分布结果如图 4-7 和图 4-8 所示。

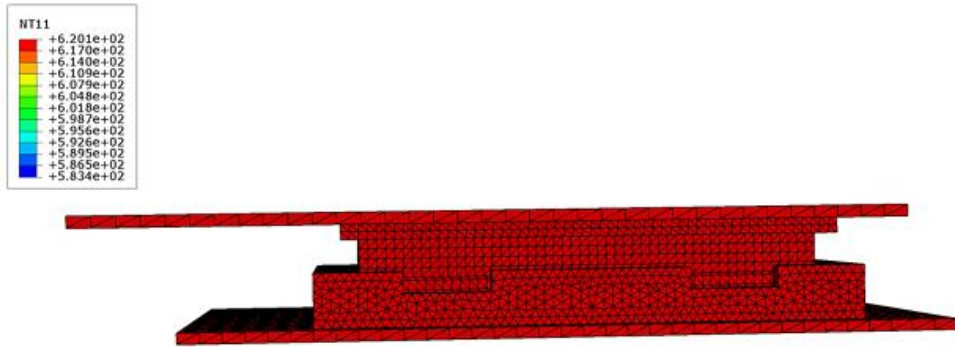


图 4-7 整套模具仿真温差

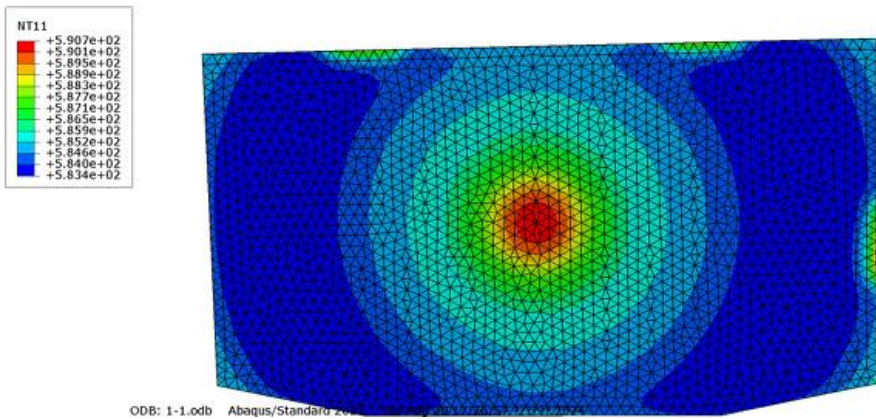


图 4-8 玻璃仿真温差

由于上下加热板与模具紧密贴合，传热效率得以提高。再加上 WX-7 石墨本身就是一种优秀的导热材料，温差控制在 7℃左右是可行的。然而，玻璃只有四角与模具中心直接接触进行传热，其余部分则主要依赖于热辐射。由于玻璃的导热效率不高，其温度差异较大。不过，总体的最大温度差控制在 35℃范围内，这符合实际企业工程师的测温需求。

4.2.2 热压阶段

在完成预热阶段后，并未直接进行热压，而是考虑到温度的不均匀性，尤其是玻璃的温度差异会直接影响成型后的应力大小和PV值。因此，尽可能地减小玻璃的温度差异显得至关重要。因此，工程师们在热压结束后会开始降温，以释放部分应力，并将热压阶段的加热板温度控制在 550°C 。由于玻璃在模具内部不易散热，这使得玻璃在这个过程中能够获得更加均匀的温度分布，如图 4-9 所示。从图中可以看出，热压初始阶段玻璃表面的温度差异约为 5°C ，而预热阶段的玻璃表面温度差异达到了 7°C ，显示出明显的改善。在缓慢的热压过程中，温度差异进一步减小，直至热压过程结束时温度稳定在 550°C ，如图 4-10 所示，达到了温度均一化。

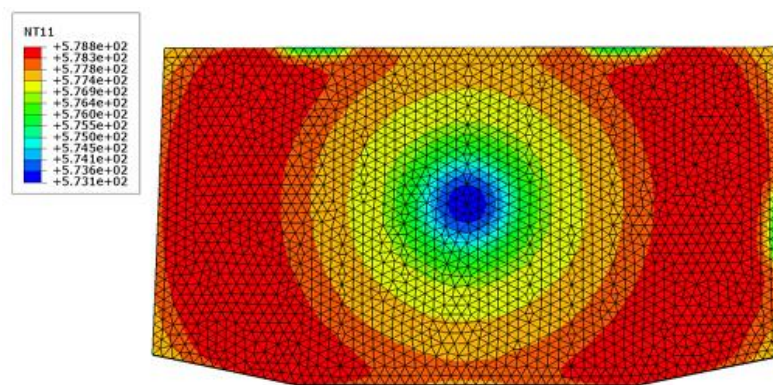


图 4-9 热压阶段玻璃温度扩散

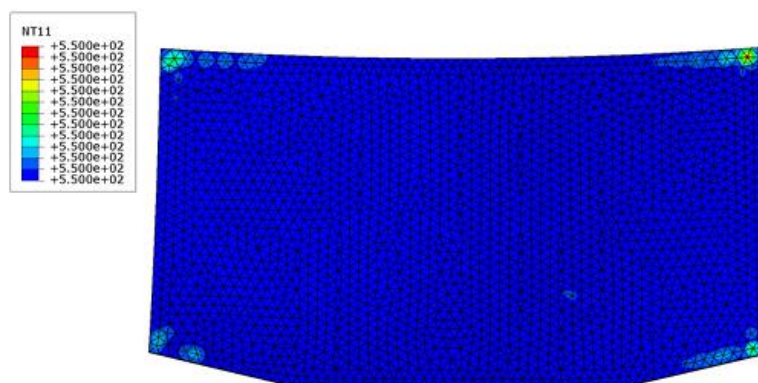


图 4-10 热压阶段玻璃温度均匀

在模型约束方面，热压阶段顾名思义是上模具对玻璃进行挤压。因此，在约束中，解除了预热阶段对上模具在 Z 轴方向的固定，并对上模座施加了一个 Z 轴向下位移的约束，如图 4-11 所示。这样做的目的是使上模具在热压阶段能够完成规定的位移，从而挤压玻璃，使其变形至预定的形状。



图 4-11 玻璃模压阶段位移

4.2.3 退火及保压阶段

在退火阶段，成型的曲面 HUD 玻璃缓慢降温，内部发生结构松弛，开始释放应力，这对 PV 曲面轮廓的精度有显著影响。因此，为了防止热压结束后玻璃形状的潜在不稳定性，会在退火前施加一个保压阶段，通过持续加压，这对于改善模具的 PV 性能是至关重要的。在保压阶段结束后，再开始退火阶段。值得注意的是，在热压阶段结束以后，为了防止玻璃的回弹，应保持上模具在 Z 轴方向停在当前位置，XY 轴方向持续锁定位移，依靠上模具的自身重力持续给玻璃施加压力，使其保持预定形状。

在退火阶段，由于玻璃已经被压合，紧密地贴着上模具和下模具，通过与上下模具的贴合进行传热散热，所以传热速率较高，散热速率快。直至整个退火阶段，玻璃表面温度都非常均匀。从玻璃退火的温度变化趋势来看，中心部分的温度散热较慢，边缘部分的温度比中心部分散热快。但在贴近模具的一侧，由于上下模具的双重影响，最边缘地区散热反而最慢，如图 4-12 所示。为了保证退火阶段应力释放的均匀，在退火结束后再次进行一个保压阶段，保证玻璃在退火阶段释放应力结束后，不会发生非常大的回弹。

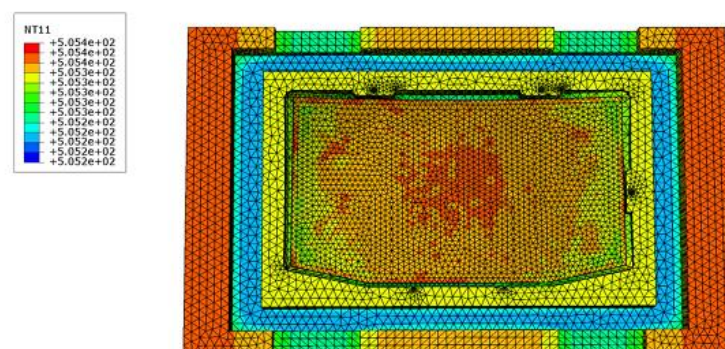


图 4-12 下模具及玻璃退火阶段温度分布

4.2.4 冷却阶段

保压阶段结束后，由于曲面 HUD 玻璃透镜的整体温度已下降至退火点以下，并且以持续保压一段时间，因此应对玻璃进行快速降温处理。需要注意的是，该机台是半封闭式的，如果等待机台正常回温至室温，所需时间过长，严重影响生产效率。经过多次测试，工程师们发现该款玻璃在 400℃时不会发生任何变化，趋于稳定。因此，将冷却阶段的温度降低至 400℃，而非降至室温。随后使用真空泵将玻璃吸出，放置在工作台上自然冷却。这一方法不仅提高了生产效率，也保证了产品的良率，同时确保了机台始终保持在 400℃，有利于下一次测试预热阶段的温度加热。

因此，在模拟仿真的时候，只需要将温度降至 400℃即可视为完成冷却阶段。工程师们在这个冷却阶段并没有将上模具抬起完成开模，而是继续保持着压合状态。因此，在模拟过程中，冷却阶段并未设置开模步骤，而是持续压合。最后结果如图 4-13 所示，温度中间高，边缘温度逐渐下降，但是由于贴合着模具，所以最边缘区域反而呈现温度高的情况。

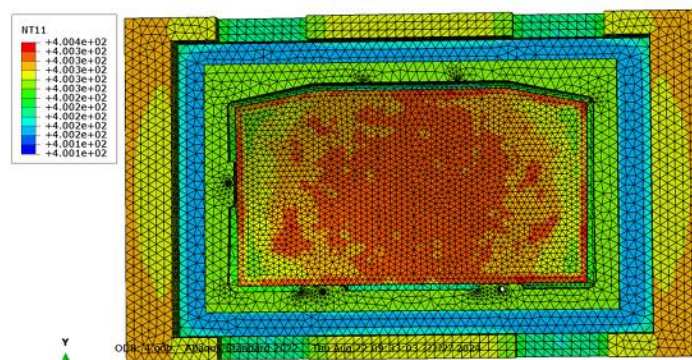


图 4-13 下模具及玻璃冷却阶段温度分布

4.3 车载 HUD 曲面屏有限元仿真成型关键工艺参数研究

4.3.1 车载 HUD 曲面屏仿真目标需求

(1)回弹应力。普通玻璃在成型和退火过程中，由于冷却速度的不同，内部会形成一定的应力分布。这种应力分布通常是不均匀的，可能会导致玻璃的局部强度降低。内部应力分布的不均匀性也可能引起光的折射和反射不均，从而影响玻璃的光学性能，如清晰度和透明度。而在玻璃的下压变形过程中，回弹

应力的大小决定了玻璃在完成预定形变后能否恢复原状，也是玻璃内部残余应力的主要体现。这一参数可通过仿真结果中的 S33 图直接观测。

(2) PV。“PV”通常指的是“Peak to Valley”，即峰谷值，它描述的是在取样范围内（基于 2D 轮廓线或 3D 数据地图），去除基准面之后，最高点和最低点之间的高度差。而前文所述的形貌偏差是玻璃表面理论曲线方程到实际点位的高度差，二者都衡量着玻璃表面成型精度。对于普通玻璃而言，PV 值的大小直接影响其表面平整度和光滑度。PV 值越小，表示玻璃表面越平整，这对于需要良好光学性能的玻璃产品尤为重要。

由于 PV 值的大小无法直接在 Abaqus 中查看，需要结合 CloudCoMpare 软件来实现。首先在 Abaqus 中提取点云坐标，具体的是将玻璃的凹面（企业主要参数指标）点云与上模具热压表面（参考面）点云进行提取，随后在 CloudCoMpare 软件中进行点位的比较，最后得出最大距离。

4.3.2 车载 HUD 曲面屏基准工艺参数确定

企业的技术需求主要是基于单因素变量的趋势变化。因此，仿真的基础是在基准工艺参数下，对某一个单一变量进行若干组数据的仿真模拟，而保持其他参数不变。通过比较结果的 PV 值和应力大小，可以观察到趋势变化。目前所采用的基准是企业工程师经过调试得出的最佳数据，以此作为基准工艺参数。具体设置如表 4-4 所示。另外，由于玻璃的厚度为 2mm，所以最适宜的合模间隙为 2.02mm，摩擦系数为 0.3。

表 4-4 基准工艺参数

工艺阶段	时间（s）	温度（℃）
预热阶段	1000	400-630
保压阶段	1300	630-620
降温阶段	1320	620-550
热压阶段	730	550-550
保压阶段	700	550-550
降温阶段	1500	550-500
保压阶段	700	500-500
冷却阶段	1800	500-400

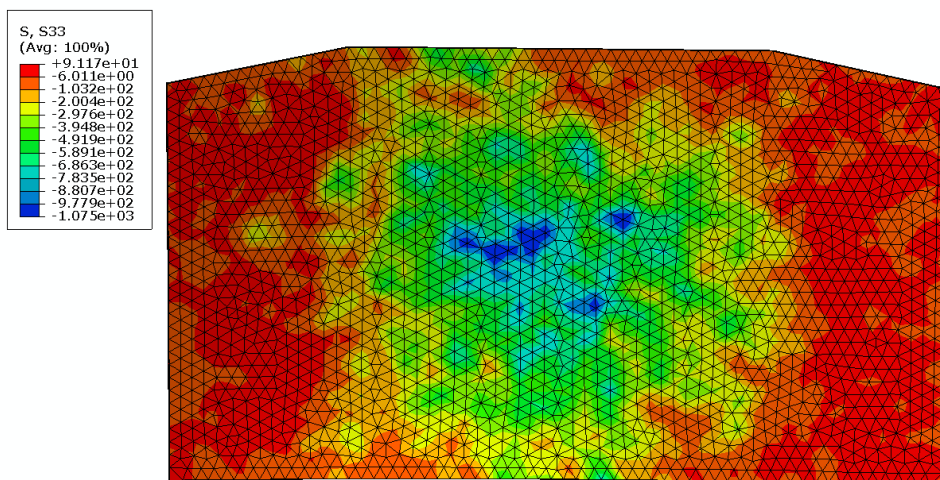


图 4-14 玻璃垂直方向应力

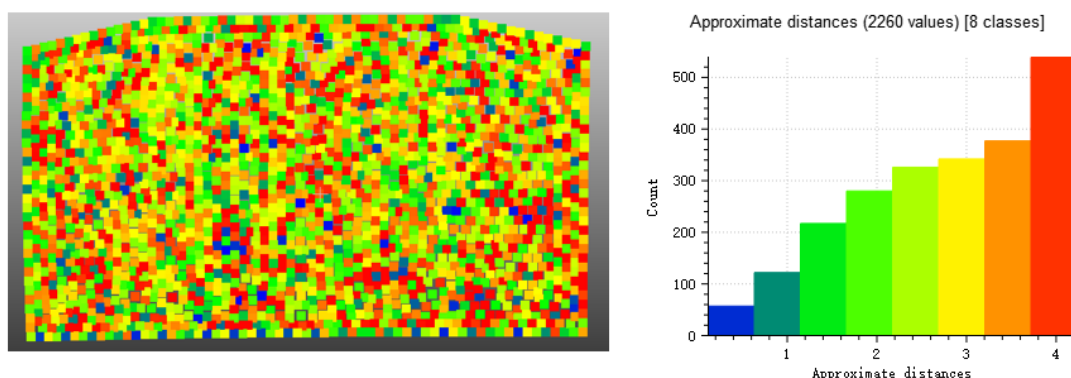


图 4-15 玻璃 PV 值

将参数带入有限元 Abaqus 中进行计算，分别得出应力与 PV 结果，如图 4-14 和图 4-15 所示。图 4-15 是在 CloudCoMpare 中拟合的点云图，其中柱状图的横坐标代表点位的 PV 值，最大值为红色标记的 4.2336 μm 。不同 PV 值的点位数量则作为柱状图的纵坐标。

表 4-5 基准模型仿真结果

	应力(Mpa)	PV(μm)
基准	91.17	4.2336

4.3.3 合模间隙对 PV 及应力的影响

合模间隙是指在模压成型过程中，上模具与下模具表面之间的距离。如果模具间隙过小，会导致玻璃过度压合。尽管在退火过程中，玻璃由于压合的紧密性会在回弹过程中展现出更理想的预定形状，但由于与上模具的充分接触，玻璃表面可能会出现麻点等缺陷。因此，在正常的模压过程中，不建议采用过

度压合。

根据企业提供的数据，在实际生产过程中，当合模间隙为2.02mm时，可以获得最佳效果，为此，仿真设置了不同水平的参数组，即合模间隙分别为 2mm、2.01mm、2.02mm、2.03mm、2.04mm、2.05mm。分析结果如图 4-16 所示。

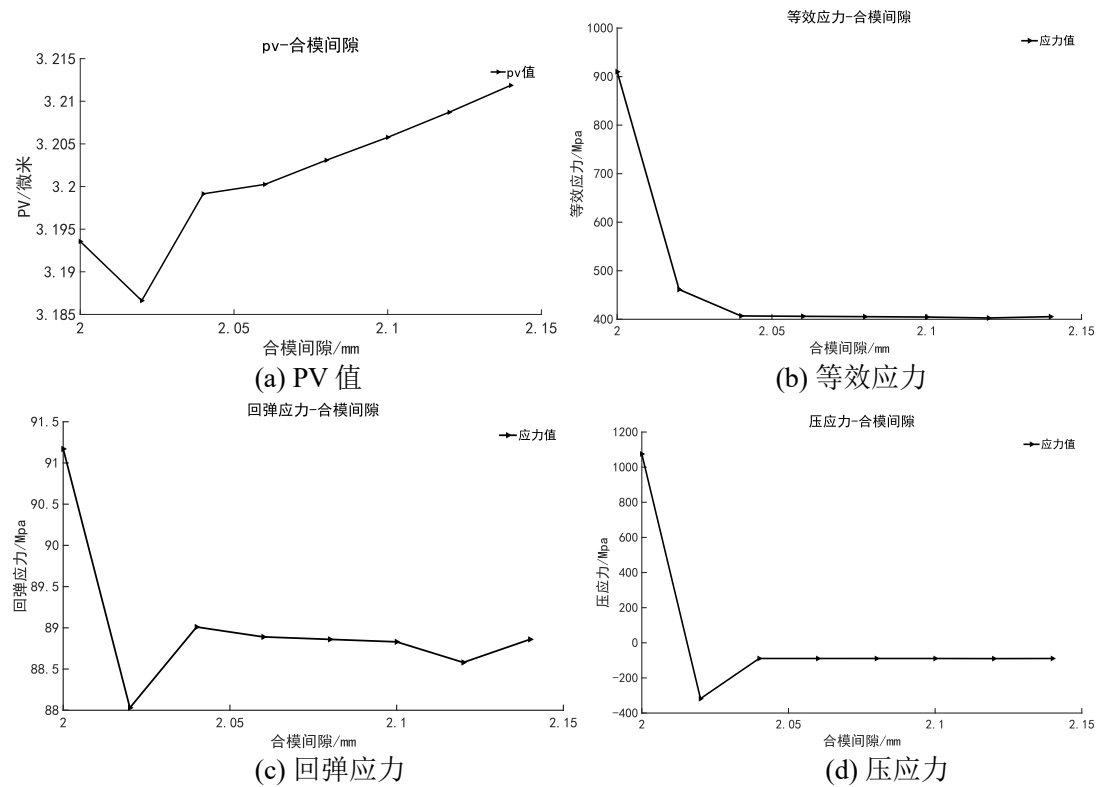


图 4-16 合模间隙影响下玻璃的仿真结果

从等效应力来看，整体呈现下降趋势，当合模间隙达到2.04mm时，达到了最低点。压应力则缓慢下降，其在合模间隙2.04mm时趋于稳定。相比之下，回弹应力在合模间隙约为2.02mm时降至最低。通过观察PV图，可以发现当合模间隙约为2.02mm时，PV值达到最小。最后，结合企业的实际测量数据，证实了当合模间隙为2.02mm时，效果确实最佳。

4.3.4 预热温度对PV及应力的影响

预热温度在模压过程中起着至关重要的作用，它直接影响到玻璃模压成型的品质与效率。预热的主要目的是使玻璃均匀受热，减少温度梯度，避免在后续模压过程中产生过大的应力。如果预热温度设置不当，可能会导致一系列问题，例如玻璃在模具内破裂、表面出现麻点、翘曲等。在本次仿真分析中，

设置了五个不同的预热温度参数组，分别为 590℃、600℃、610℃、620℃、630℃，进行仿真模拟计算。最终得到的结果如图 4-17 所示。

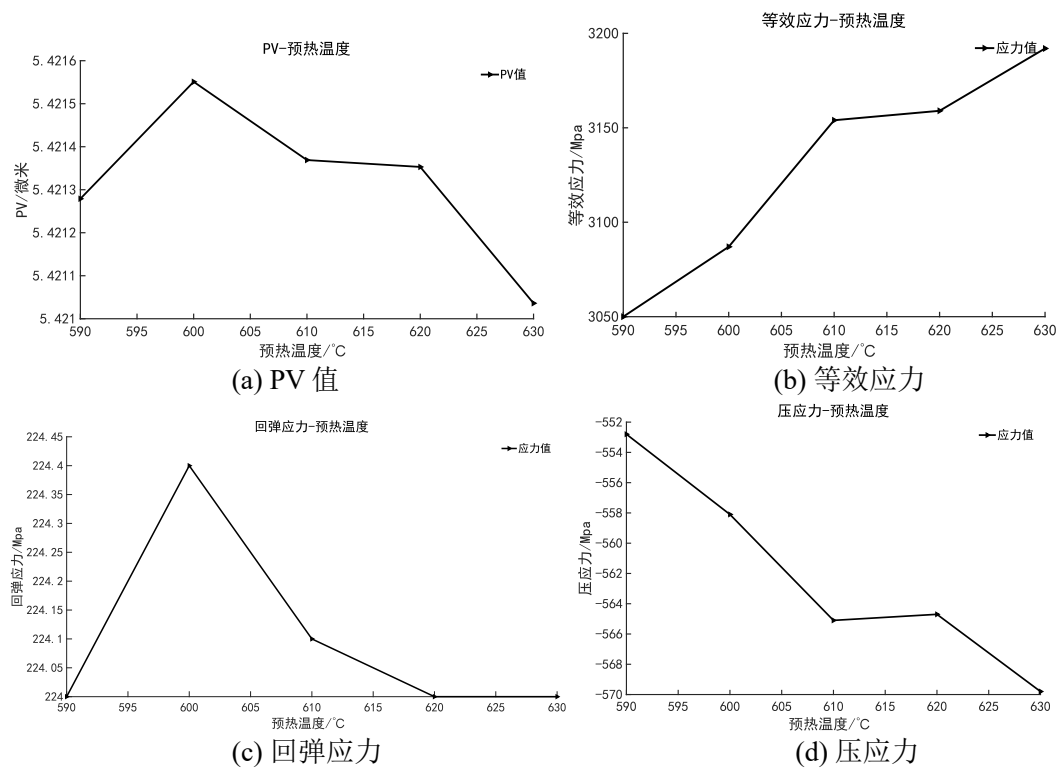


图 4-17 预热温度影响下玻璃的仿真结果

从应力来看，随着热压温度的上升，压应力和等效应力逐步增大，但是回弹应力在 620℃达到最低值，不在发生变化。虽然 590℃时 PV 和回弹应力都表现良好，但是呈逐步上升趋势，但是从在 620℃时，确实呈下降趋势。所以综合考虑，应该取 620℃-630℃较为良好，这与工程师们所提供的基准数据匹配，验证 620℃-630℃温度最佳。

4.3.5 热压时间对 PV 及应力的影响

热压速率是指在热压阶段中，上模具对软化状态下的玻璃预形体施加下压的时间长度。如果热压时间过短，透镜的热压速率将变得过高，导致其内部无法及时释放残余应力，这将使得玻璃的 PV 值增大。同时，过高的热压速率意味着需要对上模具施加更大的压力，这会加速模具的损耗。反之，如果热压时间过长，则整个热压过程的周期会延长，从而降低生产效率。因此，确定一个合理的热压速率是至关重要的。

在不同热压速率条件下对模压成形过程进行了仿真分析，并在分析结束后

统计了最大等效应力。本次单因素分析共设计了 12 组实验，分别为 500 秒、600 秒、700 秒、800 秒、900 秒、1000 秒、1100 秒、1200 秒、1300 秒、1400 秒、1500 秒和 1600 秒。由于在模压过程中，最大的压力通常施加在 Z 轴方向，因此统计了 Z 轴的应力（即压力）和反弹应力，以便进行观察。接着，提取各个点位的坐标并进行点位轮廓拟合计算，以得出 PV 值。最终的结果如图 4-18 所示。

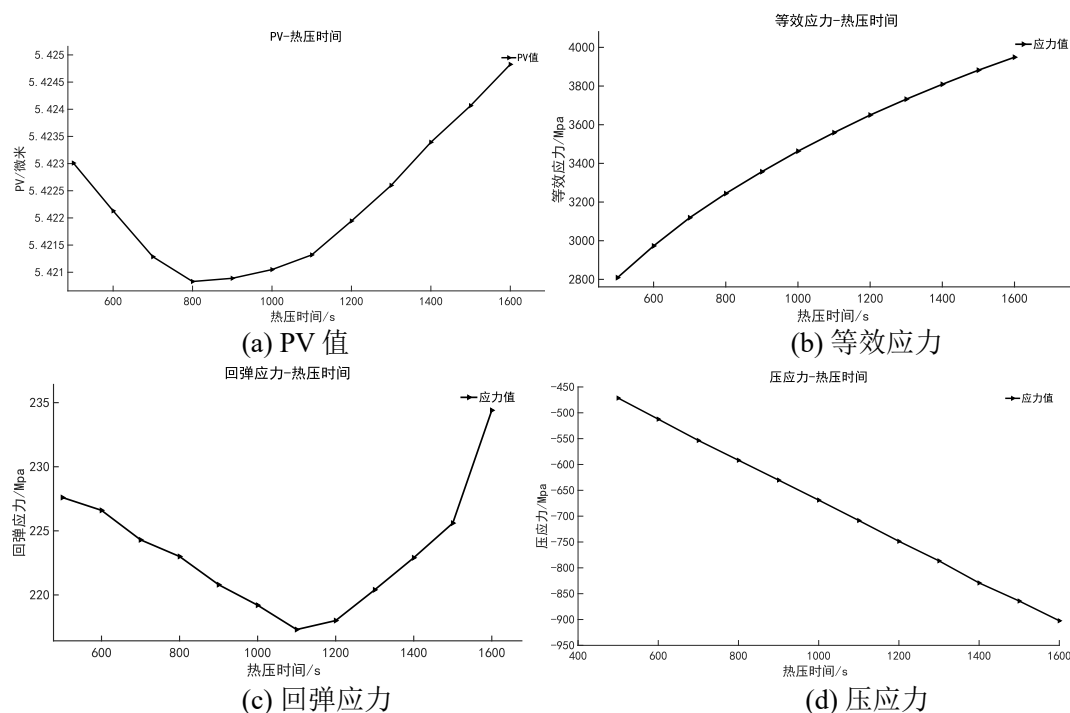


图 4-18 热压时间 500s-1600s 影响下玻璃的仿真结果

从压应力的角度来看，随着热压时间的延长，所受压力逐渐增大，从 600 秒时的 400 多 Mpa 持续增加至 800Mpa，因此热压时间越短越好。从反弹应力的视角出发，在 600 秒至 1100 秒之间，反弹应力逐渐减小，最终在 1100 秒时达到最小值，随后又逐渐增大。从等效应力的分析来看，随着热压时间的增长，等效应力也逐渐增大，在 1600 秒时达到最大值。从 PV 的观察来看，随着时间的推移，PV 一直在下降，在 800 秒时达到最低值。企业的最终目标是降低 PV，但在确定 PV 时，也必须关注应力状态。根据上述分析，PV 在 700 秒至 900 秒之间存在一个最优值，应力状态也较为良好。为了进一步确定最佳取值范围，进一步缩小了范围，设置了 19 组水平参数组，分别为 710s、720s、730s、740s、750s、760s、770 秒、780 秒、790 秒、800 秒、810 秒、820 秒、830 秒、840 秒、850 秒、860 秒、870 秒、880 秒、890 秒。结果如图 4-19 所示。

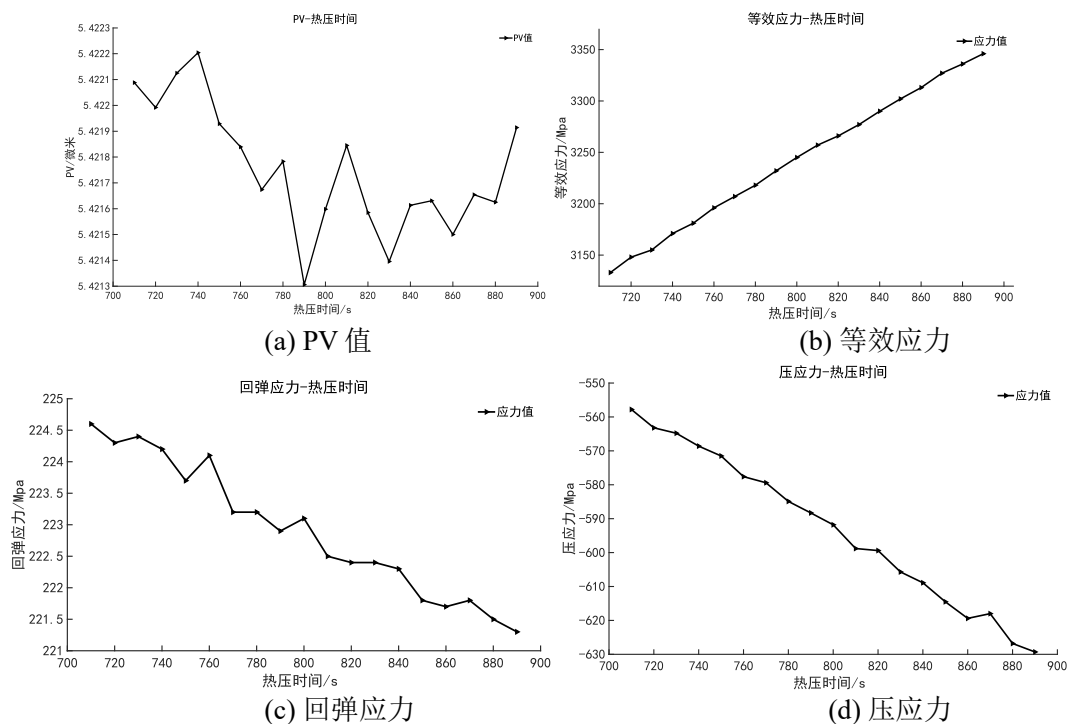


图 4-19 热压时间 790s-830s 影响下玻璃的仿真结果

从应力的角度分析，等效应力和压应力均随时间的增加而增大。然而，回弹应力却随时间的增加而减小。结合 PV 曲线图，最优值出现在 790s 和 830s 附近。

4.3.6 退火温度对 PV 及应力的影响

退火温度在模压过程中对材料的组织结构和力学性能有着显著的影响。对于不同的材料，适宜的退火温度范围可能会有所不同。在模压工艺中，退火阶段的主要目的是最大可能减少玻璃在热压过程中产生的残余应力，以防止玻璃翘曲。

在退火阶段，设置了 7 组不同的退火温度水平，分别为 470℃、480℃、490℃、500℃、510℃、520℃、530℃，并保持其他模压成型条件不变。在这些不同退火温度条件下对模压成型过程进行了仿真分析。分析结束后，对所得的数据进行了统计计算，从而得到了球面透镜的 PV 值。结果如图 4-20，从应力的角度来看，等效应力和压应力保持不变，而回弹应力则经历了一小幅度的下降。在压力-体积 (PV) 方面，随着退火温度的逐渐升高，玻璃的 PV 值持续下降，呈现出明显的下降趋势。然而，一旦退火温度超过 500℃，表面可能出现由氧化引起的麻点等问题，因此企业工程师们并不主张无限制地提高退火温度，

而是将退火温度设定在 500℃。

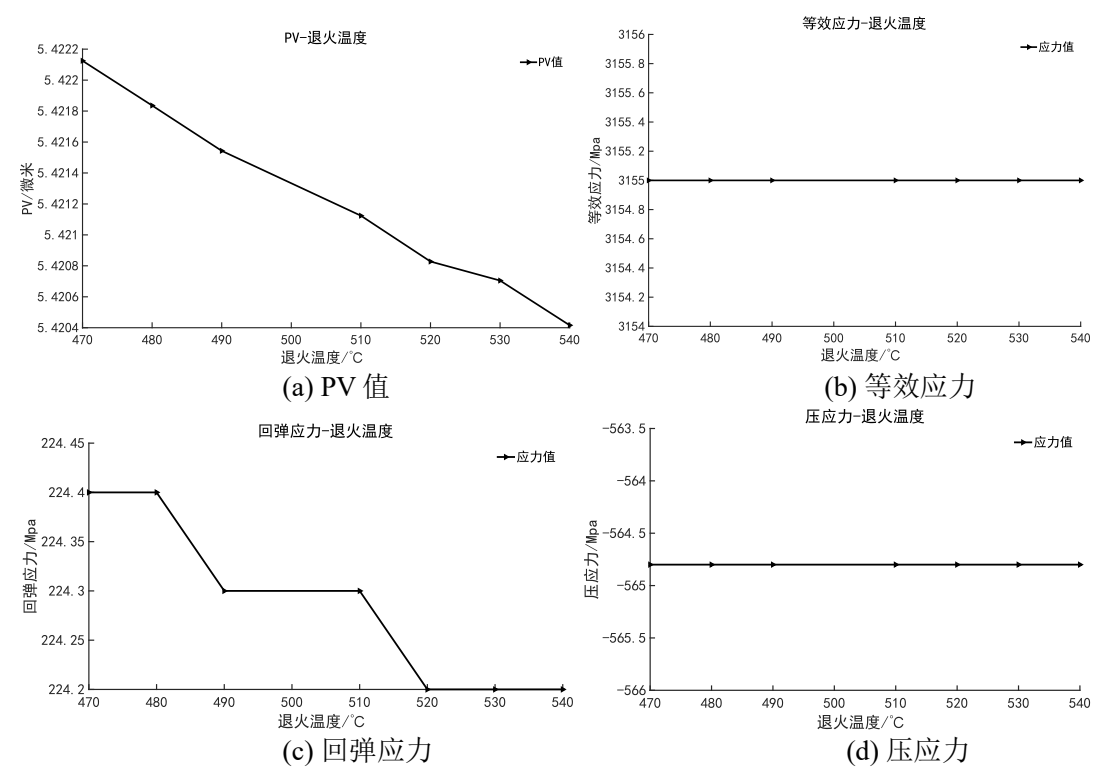


图 4-20 退火温度影响下玻璃的仿真结果

4.4 车间实验验证

4.4.1 车间实验基本条件

本次研究是针对某集团研发中心的具体需求而进行的，采用企业研发工程师提供的 C-R135c001 车载 HUD 玻璃进行仿真模拟研究。该款玻璃主要适用于 W-HUD，能够满足企业的实际项目需求，直接供应给汽车制造商，玻璃实物如图 4-21 所示。根据 C-RD135c001 型号玻璃的尺寸，企业工程中心提供了生产模具如图 4-22 所示。实际测试的机台是由企业工程中心自主研发设计的三工位模压机，如图 4-23 所示。

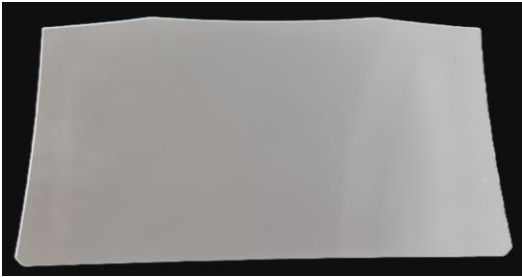
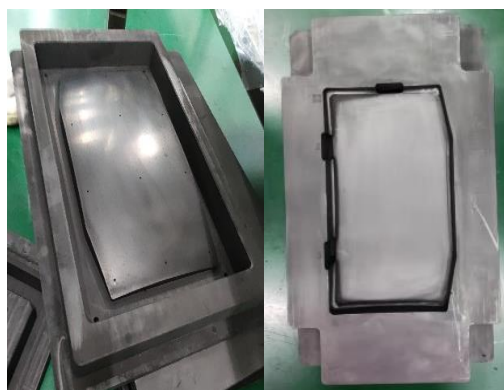


图 4-21 C-RD135c001 玻璃实物



(a)上模具 (b)下模具

图 4-22 实际生产模具



图 4-23 模压机台设备

所谓的三工位指机台有三个停顿平台，该机台具有控制加热板温度与时间，实时加温及监控模具位置，并在热压阶段对上模具施加扭矩，以达到下压热压的目的，具体流程如图 4-24 所示。

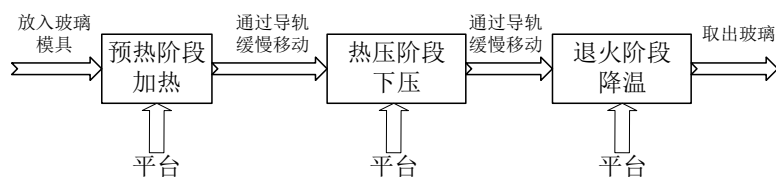


图 4-24 机台工作工艺流程

4.4.2 车间实验验证结果

本次研究数据主要来自于企业工程师所提供，针对这个项目他们已经研究三年有余，所以企业工程师们已经有着充足的实验数据，但是对理论上面仍然存在着严重的缺乏。本次工艺参数中的合模间隙，企业工程师们已经用多次实

验数据证明在玻璃厚度为 2mm 时，2.02mm 的合模间隙为最佳距离，而仿真数据反向证明了企业工程师们总结的正确性。

而预热温度和退火温度，受机台的影响，企业工程师也无法准确的测量玻璃的实时温度，机台所显示的温度仅为加热板的温度，所以仿真数据只是从侧面给他们提供了参考的数据以及隐隐符合企业工程师们的猜想。但是热压时间却是十分容易证明的，在实验过程中所有的工艺参数按照基准工艺参数进行设定，企业工程师们提供了基准工艺参数的实际结果。

3D Comparison error distribution

Item	Value	Unit	Item	Value	Unit
Comparison PV	213.440	um	RMS	41.170	um
Remove power			Upper limit	57.870	um
Lower limit	-155.570	um	Shrink size	0.0	mm
Sample interval	0.8	mm	Cursor interval	25	mm

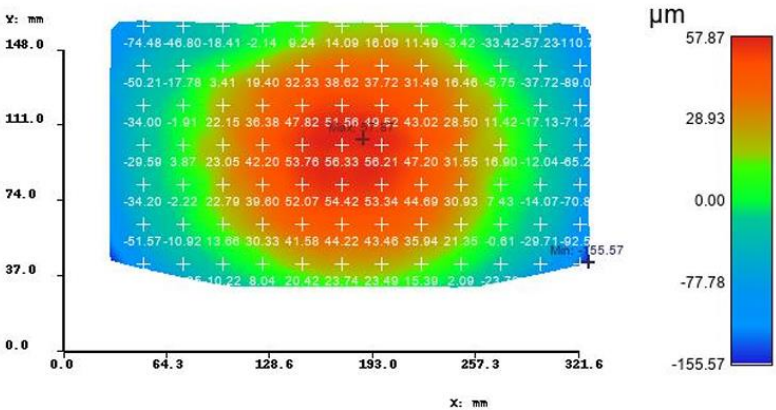


图 4-25 基准工艺参数实验结果

图 4-25 显示玻璃 PV 为 213.440µm，该数据通过苏州瑞霏光电科技有限公司所生产的瑞霏 FF3000 测试仪测量获得，设备如图 4-26 所示。



图 4-26 瑞霏 FF3000 PV 测试仪

在热压仿真结果中，结合PV和内部残余应力图4-19，本文发现该工艺热压时间在 790 秒与 830 秒存在更为良好的玻璃表面精度，所以将数据提供给工程师们进行实验验证，得到实验结果如图 4-27 所示。

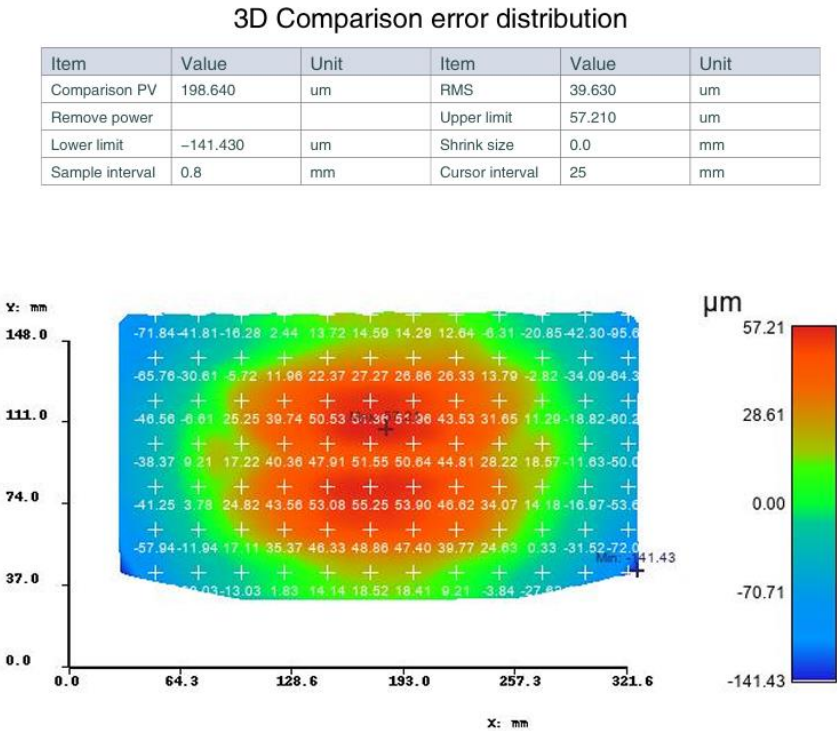


图 4-27 热压时间在 790 秒时实验结果

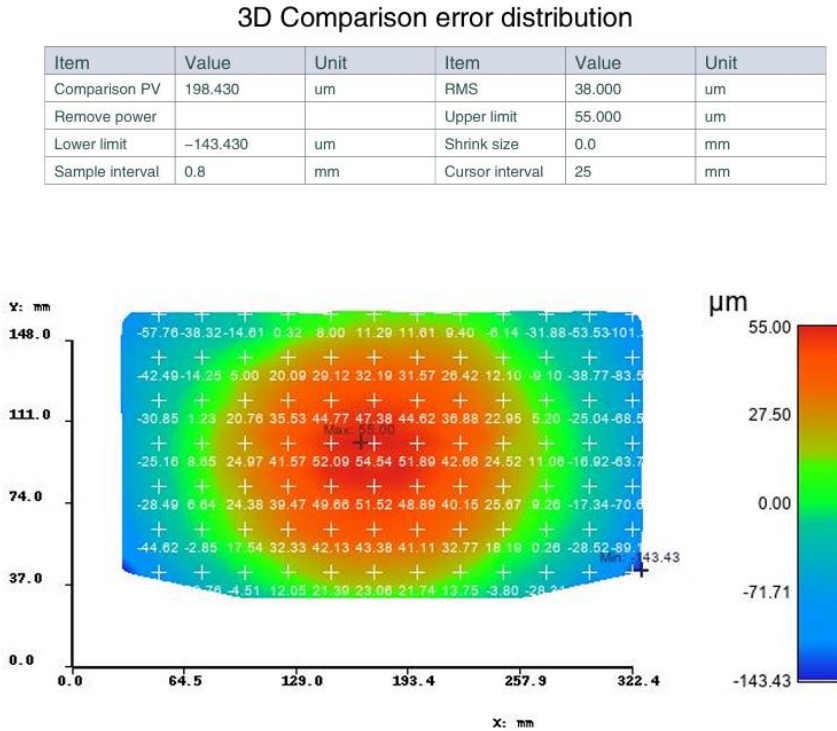


图 4-28 热压时间在 830 秒时实验结果

图4-27为热压时间为790秒结果，图4-28为热压时间为830秒时热压结果。在PV上，二者的基本没有太大的差距，这一点也在PV仿真结果上有所体现。但是随着时间的增加，热应力上升，回弹应力等内部残余应力开始下降，玻璃受热温度越来越均匀，内部残余应力也慢慢减小，面型也会更加精细。所以热压时间在830秒时与玻璃的面型790秒时，面型更加优异，这一点符合了仿真结果。

基准工艺参数的热压时间为730秒，在仿真结果中图4-19中显示与790秒和830秒存在较为大的差异，而实验验证结果也显示了，热压时间在790秒与830秒的PV远远优于730秒的PV结果，符合仿真结果规律。

4.5 本章小结

本章首先介绍了企业需要模拟的玻璃实物图纸及其相关设备。根据第2章的理论模型，构建了HUD的有限元仿真模型，并依据企业提供的热压环境参数进行了相应的设置。接下来，详细阐述了HUD曲面玻璃的成型过程。通过研究HUD曲面玻璃的成型机理，讨论了合模间隙、预热温度、热压时间、退火温度对135HUD玻璃成型PV的影响，并确定了这些参数的取值范围，这些数据将为第5章NSGA-II算法的优化提供支持。最后将仿真结果交予实验验证，证明了仿真结果的准确性。

第 5 章 基于 NSGA-II 算法的曲面屏多目标参数优化研究

5.1 车载 HUD 曲面屏初始工艺参数分析

在第 4 章中，本文对车载中控曲面屏的有限元成型关键工艺参数进行了研究，单因素的分析了四个工艺参数的理论最佳值，选取仿真结果最佳值与基准工艺参数组成初始工艺参数组，如表 5-1 所示，并对其进行仿真模拟，得出应力与 PV 结果，如图 5-1 所示，为建立响应面分析提供工艺参数数据，也为智能算法优化提供了比对参考数据。

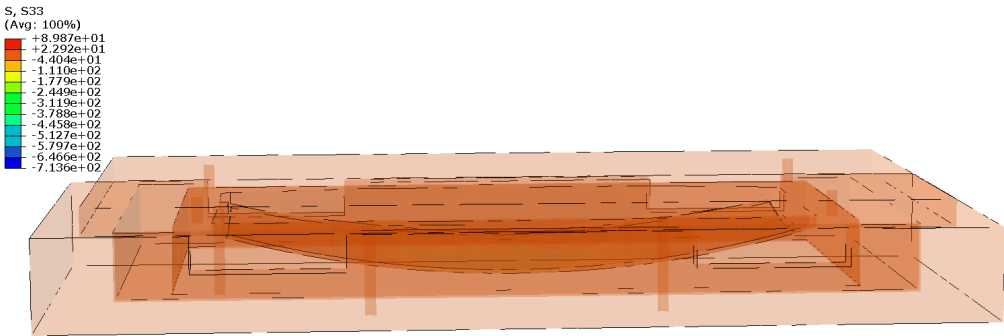


图 5-1 基准工艺参数下玻璃仿真结果

表 5-1 基准工艺参数表

	预热温度	退火温度	合模间隙	热压时间	应力	PV
参考模型	620℃	510℃	2.01mm	790s	89.87Mpa	3.7043μm

5.2 基于车载 HUD 曲面屏成型机理的响应面模型建立

5.2.1 设计变量及优化目标建立

响应面曲面设计(BOX-Behnken) 试验设计方案具有试验次数少、计算周期短等特点，在因素水平相同时，其准确性远高于正交实验。因此，本文以退火温度、预热温度、合模间隙、热压时间作为优化变量，将等效应力和 PV 作为优化目标进行响应面分析，数据参照初始工艺参数组选择，实验因素及其水平如表 5-2 所示^[91]。

表 5-2 响应面分析设计表			
因素		水平	
预热温度(°C)	590	610	630
退火温度(°C)	470	505	540
合模间隙(mm)	2	2.025	2.05
热压时间(s)	700	800	900

根据 BBD 试验设计结果，设计了 29 组试验，分别在 Abaqus 中对每组数据进行了模拟，将模拟结果记录在表 5-3 中。

表 5-3 响应面分析数据表						
	预热温度 (°C)	退火温度 (°C)	合模间隙 (mm)	热压时间(s)	应力 (Mpa)	PV(μm)
1	610.00	540.00	2.05	800.00	88.96	3.707743
2	610.00	505.00	2.02	800.00	88.37	3.702234
3	610.00	505.00	2.02	800.00	88.37	3.702234
4	610.00	505.00	2.02	800.00	88.37	3.702234
5	590.00	470.00	2.02	800.00	88.03	3.702277
6	630.00	505.00	2.02	900.00	88.07	3.702295
7	630.00	540.00	2.02	800.00	88.31	3.702295
8	610.00	505.00	2.02	800.00	88.37	3.702234
9	610.00	540.00	2.02	700.00	88.23	3.702245
10	590.00	505.00	2.00	800.00	91.21	3.705593
11	610.00	540.00	2.00	800.00	91.37	3.705985
12	630.00	505.00	2.00	800.00	91.17	3.705593
13	590.00	505.00	2.02	700.00	88.05	3.702212
14	630.00	505.00	2.02	700.00	88.51	3.702256
15	590.00	505.00	2.02	900.00	88.06	3.702190
16	610.00	540.00	2.02	900.00	88.14	3.702295
17	590.00	505.00	2.05	800.00	88.98	3.707754
18	610.00	470.00	2.02	700.00	88.23	3.707745
19	590.00	540.00	2.02	800.00	88.06	3.702317
20	610.00	505.00	2.00	900.00	91.09	3.705964
21	610.00	470.00	2.05	800.00	88.96	3.707743
22	630.00	470.00	2.02	800.00	88.34	3.702234

23	610.00	505.00	2.05	700.00	88.94	3.702259
24	630.00	505.00	2.05	800.00	88.96	3.707759
25	610.00	470.00	2.02	900.00	88.14	3.702295
26	610.00	505.00	2.02	800.00	88.37	3.702234
27	610.00	470.00	2.00	800.00	91.37	3.705985
28	610.00	505.00	2.05	900.00	88.98	3.707733
29	610.00	505.00	2.00	700.00	91.37	3.705993

5.2.2 响应面模型构建及变异数分析

根据表 5-4 所示的响应面分析应力结果，等效应力分析中所选用的模型为二阶模型，表中的 F 值和 P 值是两个关键的衡量指标，F 值越高表示所选模型的显著性越强，P 值用于衡量对照组和实验组之间的差异，当 P 值小于 0.1 时，表明两组结果的差异非常显著^[92]。响应面应力分析模型中的 F 值为 14.71，说明显著性良好，同时，P 值小于 0.0001 显示该模型的准确性受到误差影响的几率很低。

表 5-4 响应面分析应力结果表

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	41.00	14	2.93	456.14	< 0.0001	极显著
A-预热温度	0.026	1	0.026	4.05	0.0638	
B-退火温度	2.671E-003	1	2.671E-003	0.42	0.5294	
C-合模间隙	20.66	1	20.66	3217.99	< 0.0001	
D-热压时间	1.036E-003	1	1.036E-003	0.16	0.6940	
AB	9.000E-004	1	9.000E-004	0.14	0.7137	
AC	1.000E-004	1	1.000E-004	0.016	0.9025	
AD	0.051	1	0.051	7.88	0.0140	
BC	-3.872E-012	1	-3.872E-012	-6.031E-010	1.0000	
BD	-3.872E-012	1	-3.872E-012	-6.031E-010	1.0000	
CD	0.026	1	0.026	3.99	0.0657	
A ²	0.083	1	0.083	12.98	0.0029	
B ²	0.027	1	0.027	4.21	0.0593	
C ²	21.91	1	21.91	3412.48	< 0.0001	
D ²	0.073	1	0.073	11.32	0.0046	

残余	0.090	14	6.421E-003
不合适	0.090	10	8.989E-003
错误	0.000	4	0.000
合计	41.09	28	

表 5-5 响应面分析 PV 结果表

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1.591E-004	14	1.137E-005	12452.31	< 0.0001	极显著
A-预热温度	6.601E-010	1	6.601E-010	0.72	0.4094	
B-退火温度	8.501E-010	1	8.501E-010	0.93	0.3509	
C-合模间隙	9.360E-006	1	9.360E-006	10253.50	< 0.0001	
D-热压时间	5.603E-010	1	5.603E-010	0.61	0.4464	
AB	1.103E-010	1	1.103E-010	0.12	0.7334	
AC	6.250E-012	1	6.250E-012	6.847E-003	0.9352	
AD	9.303E-010	1	9.303E-010	1.02	0.3299	
BC	8.132E-020	1	8.132E-020	8.908E-011	1.0000	
BD	8.132E-020	1	8.132E-020	8.908E-011	1.0000	
CD	1.323E-010	1	1.323E-010	0.14	0.7092	
A ²	1.279E-009	1	1.279E-009	1.40	0.2563	
B ²	3.907E-009	1	3.907E-009	4.28	0.0576	
C ²	1.385E-004	1	1.385E-004	1.517E+005	< 0.0001	
D ²	1.568E-010	1	1.568E-010	0.17	0.6848	
残余	1.278E-008	14	9.128E-010			
不合适	1.278E-008	10	1.278E-009			
错误	0.000	4	0.000			
误差	1.592E-004	28				

类似地，表 5-5 为响应面分析 PV 模型分析结果，其中所选的数据模型均显著，F 值为 12452.31，显著性优异，模型的 P 值小于 0.0001，这表明该模型的准确性受到误差影响的几率很低。

响应参数与优化目标之间的关系可以通过多项式形式来表达。根据表中的数据分析结果，构建的等效应力二阶响应曲面模型均可靠，其方程为：

$$\begin{aligned}
PV = & 33.974 - 5.74e^{-5} * A - 2.46e^{-5} * B - 29.906 * C \\
& - 1.0027e^{-5} * D + 7.5e^{-9} * AB + 2.49e^{-6} * AC + 7.62e^{-9} * AD \\
& - 1.7e^{-17} * BC - 2.36e^{-22} * BD + 2.3e^{-6} * CD + 3.51e^{-8} * A^2 \\
& + 2.003e^{-8} * B^2 + 7.392 * C^2 + 4.92e^{-10} * D^2
\end{aligned} \tag{5-1}$$

$$\begin{aligned}
\text{应力} = & 12142.68 + 0.38 * A + 0.0663 * B - 11987.39 * C \\
& - 0.014 * D - 2.14e^{-5} * AB + 0.01 * AC - 5.62e^{-5} * AD \\
& + 7.75e^{-14} * BC + 6.75e^{-19} * BD + 0.032 * CD - 0.00028 * A^2 \\
& - 5.272e^{-5} * B^2 + 2940.67 * C^2 - 1.058e^{-5} * D^2
\end{aligned} \tag{5-2}$$

5.2.3 响应面及等高线分析

图 5-2 展示了应力响应的情况。从图中可以观察到，合模间隙是所有工艺参数中对玻璃内部应力影响最显著的因素。如图 5-2（a）所示，尽管预热温度和退火温度各自的单因素影响对玻璃应力的影响不明显，但它们的相互作用对玻璃应力产生了显著影响，这在等高线的明显弯曲中体现出来。如图 5-2（b）所示，合模间隙的单因素影响十分显著，当合模间隙为 2.02mm 时，应力达到最佳值。这一发现已在上一章节的仿真实验中得到证实：随着合模间隙的增大或减小，应力逐渐增大。预热温度对应力的影响不大，但在与退火温度的相互作用下，等高线出现了弯曲。图 5-2（c）表明，预热温度和热压时间的相互作用对玻璃内部应力产生了显著影响，但单个因素的影响并不明显。图 5-2（d）揭示了退火温度的影响相对较小，但合模间隙的单因素影响效果显著，而两者的相互作用对应力的影响不显著。图 5-2（e）显示，热压时间和退火温度的单因素影响不显著，但在相互作用下，等高线呈现出椭圆形，影响非常显著。最后，从图 5-2（f）可以看出，合模间隙与热压时间的相互作用对玻璃内部应力的影响不显著。

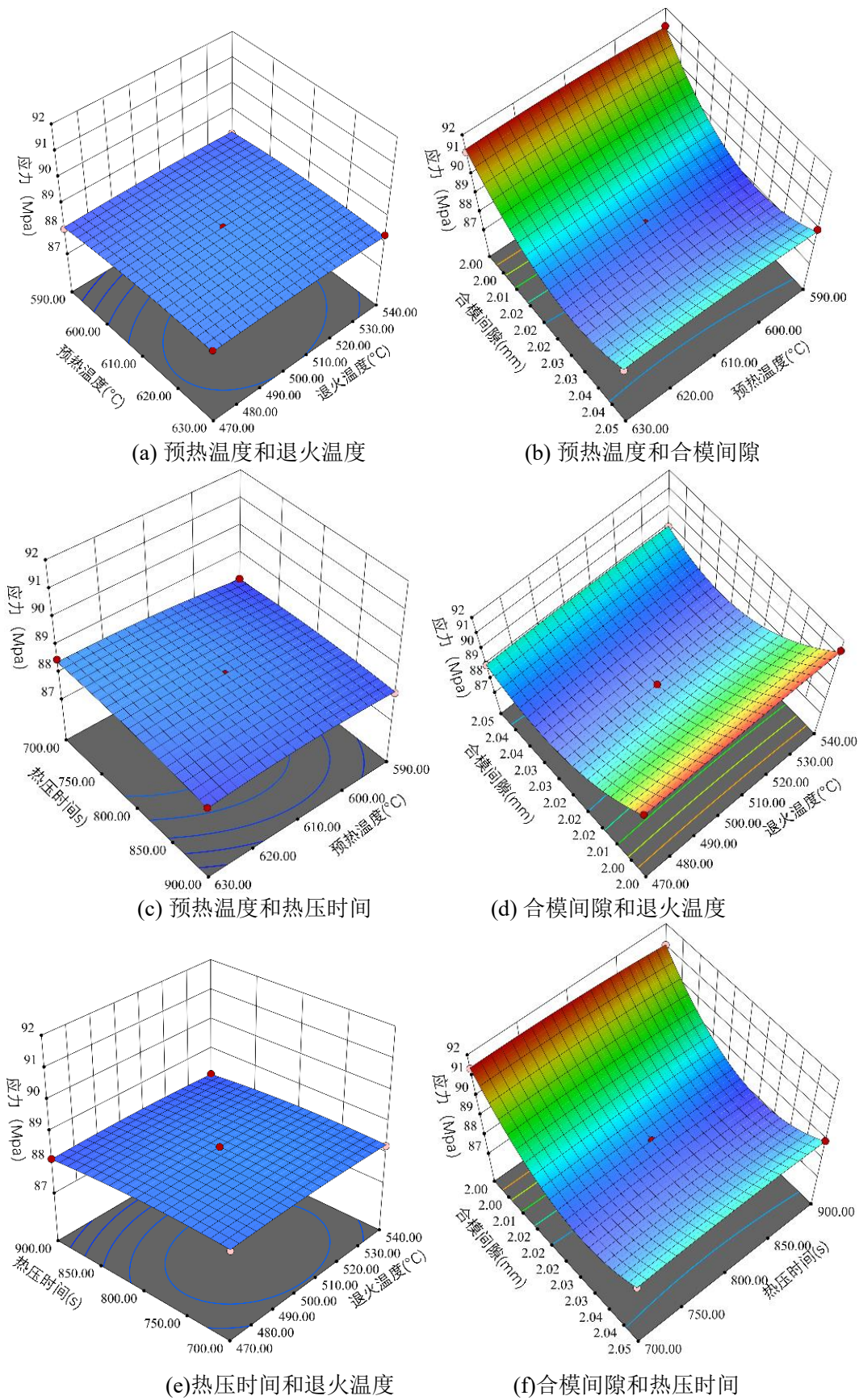
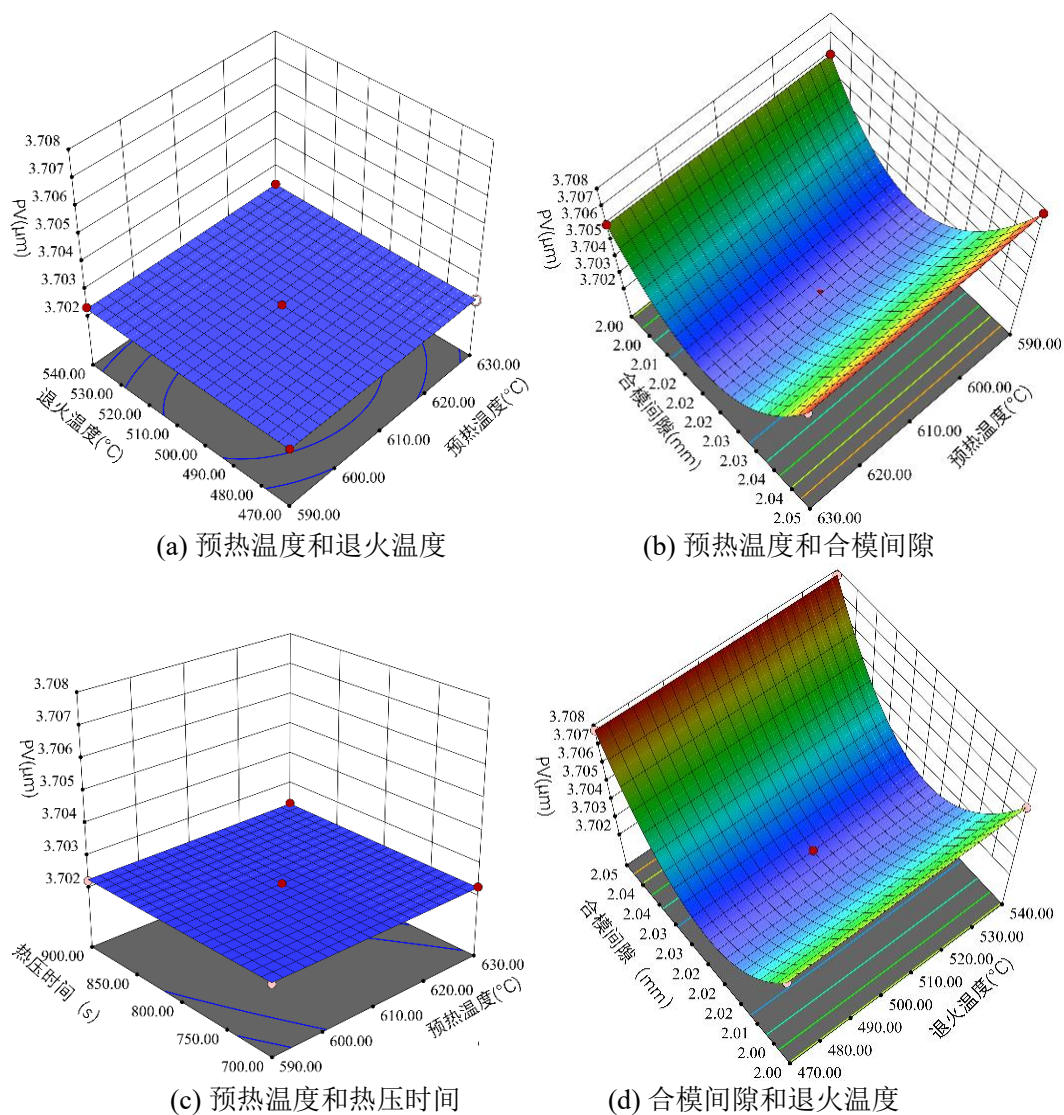


图 5-2 回弹应力三维响应曲面

图 5-3 展示了 PV 的响应情况。从该图中可以明显观察到，合模间隙是所有工艺参数中对 PV 影响最显著的因素。图 5-3(a)与图 5-3(e)的对比显示，退火温度、预热温度以及热压时间的单因素对 PV 的影响并不显著。然而，预热温度与退火温度、热压时间与退火温度的交互影响对 PV 的影响极为显著，这种交互作用在等高线图上表现为椭圆形。图 5-3(b)、5-3(d)、5-3(f)进一步表明，单因素合模间隙对 PV 的影响同样显著，其影响规律已在前文章节中详细阐述。然而，无论是合模间隙与预热温度、合模间隙与退火温度，还是合模间隙与热压时间的相互作用，其影响效果均不显著，等高线接近于直线。最后，图 5-3(c)显示，热压时间与预热温度无论是单因素影响还是二者相互作用，其影响效果均不显著。



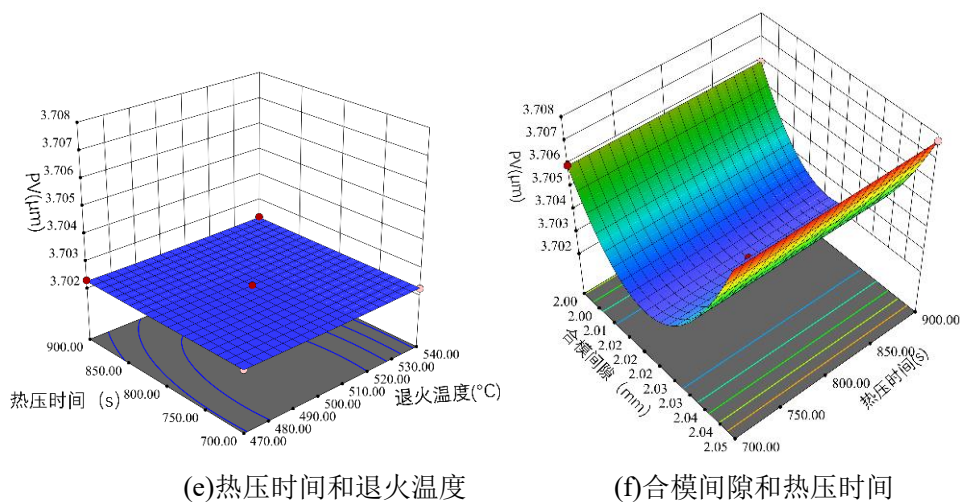


图 5-3 PV 值三维响应曲面

5.3 基于 BP 神经网络的 NSGA-II 算法多目标工艺参数优化

5.3.1 基于 BP 神经网络算法的预测与误差分析

BP 神经网络是一种利用误差反向传播的、包含输入层、输出层和隐含层的人工神经网络，可以用于解决分类和预测问题，具体的 BP 神经网络介绍已在第 3 章进行阐述^[93]。采用 BP 神经网络预测玻璃热压最优工艺参数，输入层输入为预热温度、退火温度、热压时间、合模间隙，输出层为玻璃内部应力以及 PV。

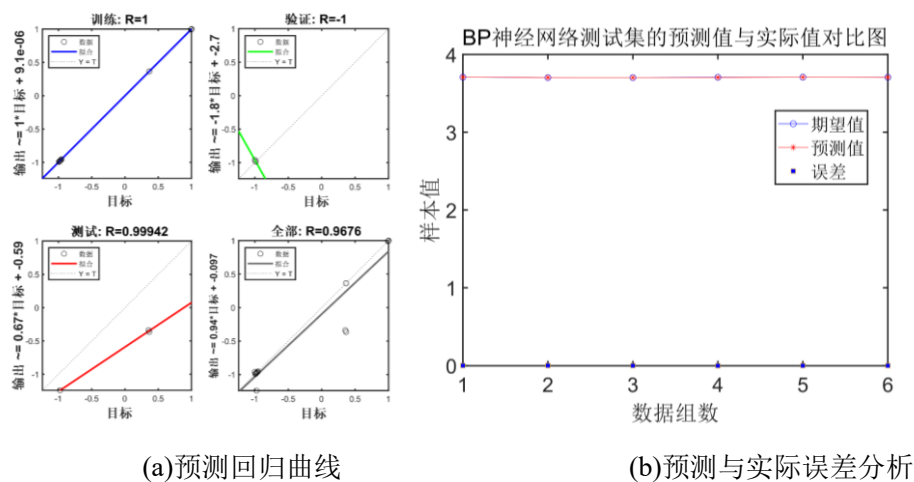


图 5-4 BP 预测结果

结果如图 5-4(a)所示，预测回归曲线上所有的点位都在 45° 直线附近，且训练、测试、验证回归曲线误差均在 0.96 以上，这表明三者之间存在很强的相

关性。如图 5-4(b)所示玻璃内部应力的预测与实际值的误差基本在一条直线上，误差基本为 0，说明经过训练的 BP 神经网络在预测玻璃内部应力和 PV 方面具有很高的精度。

5.3.2 NSGA-II算法优化原理

NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, 带精英策略的快速非支配排序遗传算法) 是一种基于 Pareto 最优概念的多目标优化算法。它是对 NSGA 算法的改进，通过引入快速非支配排序、拥挤度比较算子和精英策略，显著提高了算法的计算效率和优化结果的准确性，流程图如图 5-5 所示^[94]。其核心思想是通过模拟生物进化过程（选择、交叉、变异）来搜索 Pareto 最优解集。与单目标优化不同，多目标优化问题通常存在一组 Pareto 最优解，这些解在目标空间中相互非支配，即在不使任何一个目标函数变差的情况下，无法进一步优化其他目标函数。

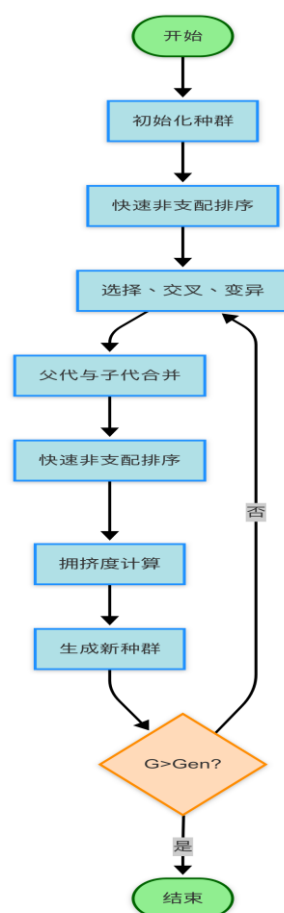


图 5-5 NSGA-II 算法流程图

5.3.3 基于 NSGA-II算法的车载 HUD 曲面屏的多目标参数寻优

通过第 3 章第 2 小节基于光学玻璃元件成型工艺参数的 BP 神经网络设计的研究，已经成功构建了一个能够准确描述预热温度、退火温度、热压时间、合模间隙与应力及 PV 值之间关系的神经网络模型。为了进一步优化工艺参数，找到使应力和 PV 值最小的最优解，本文采用 NSGA-II 算法对内部残余应力和 PV 进行多目标优化。在本文中，使用 NSGA-II 方法进行多目标优化时，采用了实数编码方式，设置了算法的种群大小为 60，进化代数为 500，交叉概率为 0.9，变异概率为 0.05，如图 5-6 所示，得到了帕累托前沿图，该图展示了所有最优解的集合。

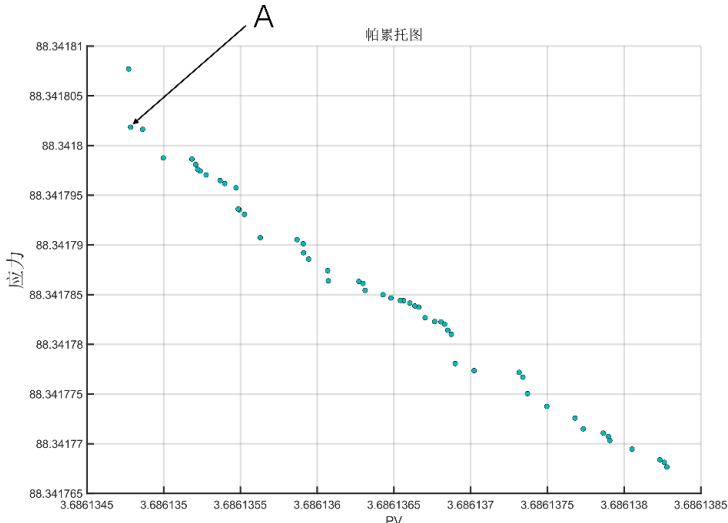


图 5-6 帕累托图

由于两个优化目标函数存在冲突，随着应力的减小，PV 逐渐增大，因此无法同时实现两个目标的最优化，只能在两者之间进行权衡。根据前文的研究，企业在实际项目中更关注玻璃成型表面的 PV 影响，因为这直接关系到图像在 HUD 曲面屏上的清晰度。因此，在本文中将重点放在 PV 问题上。

如图 5-5 所示，大部分点位呈现出线性关系，但在 A 点位置，存在一个转折点，即随着 PV 的增大，应力急剧下降。读取该点的变量信息如表 5-6 所示。

表 5-6 A 点工艺参数表

	预热温度	退火温度	合模间隙	热压时间	PV
A 点参数	591.749℃	479.667℃	2.047mm	703.694s	3.681μm

将 NSGA-II 的预测点工艺参数组，提交至 Abaqus 软件进行有限元分析，比对仿真结果与预测结果误差。有限元软件模拟的结果如图 5-6 所示，而优化目标的相对误差则如表 5-7 所示。

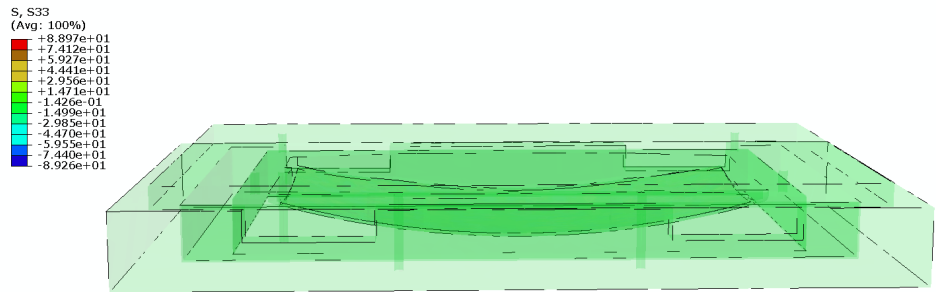


图 5-7 A 点工艺参数仿真结果

表 5-7 A 点工艺参数下仿真结果与预测结果、参考模型对比

	预热温度	退火温度	合模间隙	热压时间	应力	PV
A 点预测值	591.749℃	479.667℃	2.047mm	703.694s	88.34Mpa	3.681μm
A 点仿真值	591.749℃	479.667℃	2.047mm	703.694s	88.97Mpa	3.663μm
相对误差	\	\	\	\	0.71%	0.49%
参考模型	620℃	510℃	2.01mm	790s	89.87Mpa	3.7043μm
优化率	\	\	\	\	1.73%	1.113%

从表 5-7 中可以看出，NSGA-II 算法预测的内部残余应力与仿真结果计算误差仅为 0.71%，而 PV 的误差为 0.49%。极小的误差证明了有限元仿真结果与预测结果基本一致，因此 NSGA-II 所构建的算法模型是有效的，且适用于该玻璃模压成型仿真。

相对于本章开始确定的初始参考模型，通过 NSGA-II 算法优化后，应力优化了 1.53Mpa，PV 优化了 41.3nm。在多目标优化中，非支配序列遗传算法能同时考虑 PV 和应力这两个因素，这是统计方法所不能实现的。由此可见，采用多目标遗传算法对玻璃成型工艺进行优化是成功的，其求解结果满足了各种工艺需求。

5.4 本章小结

本章首先基于第 4 章车载中控曲面屏成型机理的研究，确定了响应面分析的因素及其水平，并设计了响应面分析表。接着，构建了响应面模型和变异数

分析，并分析了应力及三维响应曲面和等高线，从而得出各个因素之间的相互作用结果。根据第 3 章中神经网络算法的验证，确定了神经网络算法的优越性。直接采用响应面分析表，对基于 BP 神经网络算法的 NSGA-II 算法进行了优化，最终得出预测结果：应力为 88.34Mpa，PV 为 3.681 μm 。而实际仿真结果分别为应力 88.97Mpa，PV 为 3.663 μm ，应力的相对误差为 0.71%，PV 为 0.49%，误差较低。相对于本章开始确定的初始参考模型，应力优化了 1530000Pa，PV 优化了 41.3nm。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

随着成型显像技术的快速发展，对高性能光学元件的需求也在不断提高。在精密模压成型技术方面，最大的挑战在于难以进一步降低光学玻璃元件的 PV 值和成型后的内部应力。因此，探索高效、大面积、高精度、低成本的加工技术成为当前及未来的重要研究方向。精密模压成型技术是光学玻璃元件领域的一项关键技术，具有广泛的应用前景，但其成型精度受限的问题一直十分突出。因此，本文基于精密模压成型技术开展了一系列研究，旨在降低玻璃模压成型后的 PV 值和内部残余应力。以下是主要的研究工作：

(1) 本文详细介绍了超精密模压成型技术的发展历程，归纳了光学玻璃热压技术在工业生产的优势。通过诸多学者对玻璃热压有限元仿真模型的研究，证明了该方法能够更好地预测和改善玻璃成型后的残余应力及形貌偏差。

(2) 对光学玻璃模压成型的有限元理论进行了深入研究，并解释了如何划分有限元网格以及玻璃的粘弹性特性。基于此，对光学玻璃热压有限元模型进行了成型机理研究，分析了形貌偏差的理论计算方法。然后，采用单因素控制变量法，对模型的摩擦系数、保压时间、保压力、退火温度和退火时间进行了研究，为第 3 章的算法优化提供了数据支持，并为第 4 章的车载 HUD 曲面屏玻璃有限元模型的建立奠定了理论基础。

(3) 基于光学玻璃元件有限元成型仿真成型机理的研究，设计了正交实验，分析了相关工艺参数的敏感性，并获得了最优参数组。通过仿真，得到了形貌偏差为 $2.9\mu\text{m}$ 的结果。随后建立了 BP 神经网络，并分析了预测误差。接着，进行了 GA-BP 神经网络算法优化，得到了形貌偏差为 $2.5\mu\text{m}$ 的结果，证明了神经网络算法优化的优越性。最后，基于优化结果，进行了形貌补偿，经过三次迭代后，形貌偏差降至 $1.9\mu\text{m}$ 。

(4) 基于第 2 章的光学玻璃有限元仿真理论模型，建立了车载 HUD 曲面屏的有限元仿真模型，并对企业的相关设备、技术需求及技术目标进行了介绍。

本文分析了车载 HUD 曲面屏的工艺研究，并对有限元模型进行了成型机理研究，采用单因素控制变量法分析了合模间隙、预热温度、热压时间和退火温度对 PV 值、压应力、回弹应力及等效应力的影响，为第 5 章提供了数据支持。

(5) 基于第 3 章的实验结果，证明了神经网络算法的优越性。选取了第 4 章的最佳参数组作为初始工艺参数组，并建立了响应面分析模型进行变异数分析，阐述了不同参数影响下的响应曲面，并分析了等高线。最后，基于响应面分析构建了 BP-NSGA-II 神经网络算法，得到了帕累托图，并获得了预测点。预测结果显示应力为 88.34Mpa，PV 为 3.681 μm ，而实际仿真结果为应力为 88.97Mpa，PV 为 3.663 μm ，应力的相对误差为 0.71%，PV 的相对误差为 0.49%，误差较低。相对于初始参考模型，应力优化了 1.53Mpa，PV 优化了 41.3nm。

论文的创新点如下：

(1) 针对工艺参数进一步优化的问题，提出了先进行传统统计方法选取数据，再进行智能算法筛选最佳参数组的方法。先构建正交实验分析，进一步对参数组数据进行筛选，再进行 GA-BP 神经网络算法优化，取得最佳工艺参数组后，进行迭代修型，成功将形貌偏差降低至 1.9 μm 。

(2) 针对准确构建车载中控曲面屏仿真模型的问题，提出了先建立简单的理论有限元模型，后扩展延伸的方法。通过仿真和实验相结合的方式，参照理论有限元模型，构建了 135 车载 HUD 曲面屏有限元模型，并运用相同的单因素变量法对成型机理进行研究，最后结合响应面分析以及基于 BP 的 NSGA-II 算法优化，得到预测参数，较初始工艺参数组应力优化了 1.53Mpa，PV 优化了 41.3nm，提高了玻璃模压成型的精度。

6.2 展望

由于企业现有的实验条件和本人的研究时间以及知识储备、研究能力等多方面因素的影响，本研究仍存在问题需要进一步深入研究和分析。基于目前的工作基础，接下来的改进工作需集中在以下几个方面：

(1) 受实际实验条件限制，本文采用的样本数量不是很多，导致优化效果提升不是很明显。因此，后续应丰富扩大样本数量并构建相应的数据模型。

(2) 实验结果验证较少，在选取工艺参数时没有充分考虑到实际实验机台的影响，仿真模拟过程中有些设置进行了简化处理，不能更准确的进行数据支撑，只能提供仿真数据规律。

(3) 第 3 章中提出了模具的迭代修型方法，在理论模型上进行了详细的研究，但是在实际工业生产中，模具迭代修型是要对模具进行修模抛光，而这对于几万甚至十几万的精密模具来说是一次不可逆的损伤，后期正式拓展应用到车载曲面的上还需通过充分的理论和实验验证。

(4) 第 3 章及第 5 章所使用的算法本质上都属于同一类型智能优化算法，在后续的工作中，应当继续使用其他类型的算法进行智能优化，验证其他算法优化工艺参数的效果性，是否能够更进一步的减小形貌偏差。

参考文献

- [1] 王龙飞,胡雨旺,张泽光,等. 非球面光学元件的快速制造技术 [J]. 光电工程, 2024, 51 (01): 3-34.
- [2] 刘光宇,房丰洲. 玻璃光学元件精密热压成形技术 [J]. 光学学报, 2023, 43 (08): 194-221.
- [3] 兰红波,李涤尘,卢秉恒.微纳尺度 3D 打印[J].中国科学: 技术科学, 2015, 45(09): 919-940.
- [4] 舒成松,董浩,尹韶辉,等.高精度微结构玻璃光学元件阵列模压技术研究进展[J].光学精密工程,2020,28(09):1967-1985.张营营. 光学玻璃元件精密热压关键技术理论与实验研究 [D]. 湖南大学, 2022.
- [5] 龚峰,李康森,闫超. 玻璃精密热压成形的研究进展 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (06): 1380-1391.
- [6] 郭隐彪. 先进光学元件微纳制造与精密检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 30-34.
- [7] 布郎尼克, 亨沙, 弟子阿尼,等. 非球面光学元件的先进制造和应用技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2011: 7-11.
- [8] 李荣彬, 孔令豹, 张志辉, 等. 微结构自由曲面的超精密单点金刚石切削技术概述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 144-155.
- [9] 程灏波, 王英伟. 纳米精度光学非球面研磨、抛光技术[J]. 航空精密制造技术, 2004, 40(1): 6-9.
- [10] 何佳东.注塑工艺对微结构制品光学性能影响研究[D].北京化工大学,2023.
- [11] 陈志君.3D 超薄玻璃热压成形加工机理及其工艺优化研究[D]. 郑州轻工业大学, 2020.
- [12] Hecke M, Schomburg W K. TOPICAL REVIEW: Review on micro molding of thermoplastic polymers[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2004, 14(3): 1-14.
- [13] 阎继旺, 于骏一. 脆性光学材料超精密加工技术[J]. 物理, 1996, 23(2): 97-102.
- [14] Yan G, Fang F . Fabrication of optical freeform molds using slow tool servo with wheel normal grinding[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 341-344.
- [15] Klocke F, Gruentzig A, Hollstegge D, et al. Polishing-grinding—an innovation for manufacturing of high precision optics [C]. Proceedings of ASPE Annual Meeting, 2008: 408-411.
- [16] Chen M, Zhao Q, Shen D, et al. The critical conditions of brittle–ductile transition and the

-
- factors influencing the surface quality of brittle materials in ultra-precision grinding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 168(1): 75-82.
- [17] 陈璠, 王伟. 低熔点玻璃精密热压技术概况[J]. *市场周刊(理论研究)*, 2010, 9: 109-110.
- [18] Yin S, Jia H, Zhang G, et al. Review of small aspheric glass lens molding technologies[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(1): 66-76.
- [19] Zhang L, Liu W. Precision glass molding: Toward an optimal fabrication of optical lenses[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(1): 3-17.
- [20] Hong Y, Wang Z, Zhang Y, et al. Precision glass molding technology for low T_g glasses[C]. 第二届光子学与光学工程国际会议暨第八届西部光子学会议. 中国陕西西安: SPIE, 2017: 102563N
- [21] 杨挺青. 黏弹性理论与应用[M]. 科学出版社, 200
- [22] Moynihan T, Easteal J, Tran C, et al. Heat capacity and structural relaxation of mixed-alkali glasses[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1976, 59(3-4): 137-140.
- [23] 张义同, 严宗达. 变温粘弹性的一般理论[J]. *力学学报*, 1993, (06): 45-56.
- [24] 张义同. 变温粘弹性蠕变型本构方程[J]. *固体力学学报*, 1995, (2): 152-156.
- [25] Duffrène L, Gy R, Burlet H, et al. Generalized Maxwell model for the viscoelastic behavior of a soda-lime-silica glass under low frequency shear loading[J]. *Rheologica Acta*, 1997, 36(2): 173-186
- [26] Duffrène L, Gy R, Burlet H, et al. Viscoelastic behavior of a soda-lime-silica glass: inadequacy of the KWW function[J]. *Journal of non-crystalline solids*, 1997, 215(2-3): 208-217
- [27] Duffrène L, Gy R. Viscoelastic constants of a soda-lime-silica glass[J]. *Journal of non-crystalline solids*, 1997, 211(1-2): 30-38
- [28] Duffrène L, Gy R, Masnik E, et al. Temperature dependence of the high-frequency viscoelastic behavior of a soda-lime-silica glass[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1998, 81(5): 1278-1284.
- [29] Jain A, Yi A. Numerical simulation of compression molding of aspherical glass lenses[C]. *Proceedings of AIP Conference*, 2004, 712: 239-244
- [30] Firestone G, Jain A, Yi A. Precision laboratory apparatus for high temperature compression molding of glass lenses[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(6): 063101.

-
- [31] Jain A, Firestone G, Yi A. 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.
- [32] Jain A, Yi A, 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.
- [33] Klocke F, Dambon O, Pongs G, et al. Finite element analysis of glass moulding[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222(1): 101-106.
- [34] 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.
- [35] 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): 011-014.
- [36] 尹韶辉, 靳松, 朱科军, 等. 非球面玻璃透镜模压成型的有限元应力分析[J]. 光电工程, 2010, 37(10): 111-115.
- [37] 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
- [38] 尹韶辉, 霍建杰, 周天丰, 等. 小口径非球面透镜热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
- [39] 尹韶辉, 朱科军, 余剑武, 等. 小口径非球面玻璃透镜热压成形[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 182-192.
- [40] 尹韶辉, 王锋, 朱科军, 等. 玻璃预制件形状对异形非球面透镜成型的影响[J]. 光电工程, 2013, 40(5): 133-137.
- [41] 张小兵, 尹韶辉, 朱科军, 等. 非球面透镜模压成型仿真技术[J]. 光学技术, 2013, (3): 204-211
- [42] 余剑武, 李婵, 谢望清, 等. 微槽结构光学玻璃元件热压成形数值仿真分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(1): 14-18
- [43] 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.
- [44] Tao B, Shen L, Yi A, et al. Reducing Refractive Index Variations in Compression Molded Lenses by Annealing[J]. *Optics & Photonics Journal*, 2013, 03(2): 118-121
- [45] 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.
- [46] 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 & Technology*, 2009, 20(20): 551091-551098..
- [47] 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.
- [48] Dora Pallicity 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*, 2015, 99(2): 470-483.
- [49] Sugimoto T. Nondestructive measurement of the refractive index distribution of a glass molded lens by two-wavelength wavefronts[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 8116-8125
- [50] Zhou J, Li M J, Shen L G. FEM Analysis of Glass Lens Molding Press[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 652-654: 1961-1965.
- [51] 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 & Lasers in Engineering*, 2014, 53(2): 98-103
- [52] Mahajan P, Tarkes D P, 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 & Mechanics*, 2015, 16(1): 53-64.
- [53] Vu A T, Kreilkamp H, Krishnamoorthi B J, et al. A hybrid optimization approach in non-isothermal glass molding. *International Esaform Conference on Material Forming*[C]. Esaform. 2016. Esaform: AIP Publishing LLC, 2016: 376-390.
- [54] 李树栋.Abaqus 有限元分析从入门到精通[M].机械工业出版社:202206.437.
- [55] Yan J, Zhou T, 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.
- [56] Liu Y, Xing Y, Fu H, et al. Deformation analysis of the glass preform in the progress of

-
- precision glass molding for fabricating chalcogenide glass diffractive optics with the finite element method[J]. *Micromachines*, 2021, 12(12): 1543.
- [57] Zhou T, He Y, Wang T, 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.
- [58] Zhang S, Zhou Y, Zhang H, et al. Advances in ultra-precision machining of micro-structured functional surfaces and their typical applications[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 142: 16-41.
- [59] Sun S, Li K, Chu W, et al. Tungsten carbide molds for precision glass molding process: Mechanism of high-temperature degradation[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, 105: 105841.
- [60] Ming W, Chen Z, Du J, et al. A comprehensive review of theory and technology of glass molding process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107: 2671-2706.
- [61] McMartin D W .Tungsten Carbides: Advances in Research and Applications[M].Nova Science Publishers, Inc.:2023-11-16.
- [62] 汪志斌,李军琪,张峰,等.硫系红外玻璃精密模压模具有限元仿真设计[J].*光电工程*,2016,43(05):53-58.
- [63] Zhilin A A, Kanchiev Z I, Tatarintsev B V, et al. Measuring the surface tension of glass in the temperature region of softening and viscous flow[J]. *Journal of Optical Technology*, 2003, 70(12): 888-891.
- [64] Fulcher G S. Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1925, 8(6): 339-355.
- [65] Scherer G W. Relaxation in glass and composites[M]. John Wiley & Sons, 1986.
- [66] 孟政, 刘树江, 沈建兴, 等. 玻璃粘度与温度关系研究发展现状[J]. *山东陶瓷*,2010, 33(003): 9-13
- [67] 朱科军. 光学玻璃透镜模压成形的数值仿真和实验研究[D]. 中国湖南长沙: 湖南大学, 2013
- [68] Liu W, Shen P, Jin N. Viscoelastic properties of chalcogenide glasses and the simulation of their molding processes[J]. *Physics Procedia*, 2011, 19: 422-425.

-
- [69] Chen Y, Yi A, 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.
- [70] 刘卫国,沈萍.硫系玻璃的粘弹性及模压工艺的仿真[J].红外与激光工程,2012,41(03):569-574.
- [71] 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].深圳大学,2018.
- [72] 李逸群,舒成松,尹韶辉.曲面复眼玻璃透镜模压过程仿真研究[J].激光与光电子学进展,2023,60(05):238-245.
- [73] 陈津平.红外硫系玻璃衍射面的模压成型技术仿真与实验研究[D]. 长春理工大学, 2023.
- [74] 付航.AR 中的非球面透镜模压成型技术研究[D]. 长春理工大学, 2022.
- [75] 贾豪杰.3C 玻璃面板热弯成形技术研究及其能耗分析[D]. 郑州轻工业大学, 2021.
- [76] 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]. 湖南大学, 2020.
- [77] 樊朋煜,翟鹏远,黄国雅,等.基于正交试验的 Ge-Se-Te 硫系玻璃模压成型工艺参数优化研究[J].新技术新工艺,2024,(12):70-74.
- [78] 陈艳艳,刘兵.基于 CAE 与正交试验的汽车玻璃升降器钢丝绳支架注塑工艺参数优化[J].机械工程师,2021,(02):131-133.
- [79] 王光明,王爱平.遗传算法优化 BP 神经网络的非线性函数拟合研究[J].赤峰学院学报(自然科学版),2014,30(22):29-32.
- [80] 湛凯.基于 BP 神经网络的动态惩罚函数研究[D].天津理工大学.2023.001486.
- [81] 罗和喜,李康森,周志文.基于神经网络和遗传算法的 BK7 玻璃精密模压成形多目标优化[J].机电工程技术,2023,52(01):119-125.
- [82] 刘光亚.MATLAB 遗传算法在函数优化问题中的应用[J].船电技术,2022,42(12):50-53.
- [83] 李忠群,丁鹏,刘鸿,等.基于自适应遗传算法的轮廓误差补偿研究[J/OL].制造技术与机床,1-15[2025-03-22].
- [84] Asadi P, Aliha M R M, Akbari M, et al. Multivariate optimization of mechanical and microstructural properties of welded joints by FSW method[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 140: 106528.
- [85] Huang S, Jiang C, Tian Z, et al. Optimization of precision molding process parameters of viscoelastic materials based on BP neural network improved by genetic algorithm[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 106149.

-
- [86] Huang S, Jiang C, Tian Z, et al. Mechanism Study of Ultrasonic Vibration-Assisted Microgroove Forming of Precise Hot-Pressed Optical Glass[J]. Micromachines, 2023, 14(7): 1299.
- [87] 朱培培, 邵丽青, 吴硕, 王焰孟. AR-HUD 技术发展与产业化进程分析[J]. 汽车文摘, 2024, (12): 14-20.
- [88] 刘春勇, 夏欢, 张圣恒, 等. HUD 发展研究及 AR-HUD 方案设计概述 [J]. 汽车知识, 2024, 24(02): 41-44.
- [89] AGC Inc.; Patent Issued for Curved Surface Cover Glass, Method For Manufacturing Same, And In-Vehicle Display Member [J]. Journal of Engineering, 2020.
- [90] 丁耀, 罗雪芳, 刘定富. 基于 Box-Behnken 试验设计的电沉积 Ni-W-B 合金镀层添加剂的制备[J]. 表面技术, 2022, 51(12): 178-187.
- [91] 李振军, 陈妮, 李亮, 等. Box-Behnken 试验设计法分析激光诱导金刚石石墨化后材料去除深度研究[J]. 工具技术, 2020, 54(04): 10-14.
- [92] 陈岁繁, 王世杰, 戴光明, 等. 基于 GA-BP 模型与 NSGA-II 算法的工艺参数优化方法[J/OL]. 中国有色金属学报, 1-20[2025-03-23].
- [93] 洪健. 基于 NSGA-II 的精冲工艺参数优化的仿真研究[D]. 南华大学, 2018.

攻读硕士专业学位期间学术成果

一、论文发表情况

- 1、A precise method for compensating shape deviation of hot-pressed glass based on neural network algorithm optimization (收录 sci4 区 老师一作本人二作)
2. 一种 DMD 光刻设备用高稳定反光镜 (实用新型专利授权 老师一作本人二作)

二、论文发表情况

1. 一种 DMD 光刻设备用高稳定反光镜 (实用新型专利授权 老师一作本人二作)

三、参与相关课题情况:

- 1、基于光学光滑微透镜阵列的超快三维打印关键技术研发与应用，
2022a05020008，安徽省重点研究与开发计划项目。
- 2、面型可控光滑微透镜阵列大面积数字光刻机理及动态调控方法研究。
2308085MF210,安徽省自然科学基金项目

四、实习情况:

- 1.2024 年 1 月 19 日-11 月 31 日: 长信科技集团研发中心-HUD 车载玻璃曲面屏
仿真

致谢

当我写到这里的时候，我的内心百感交集，时光荏苒，一晃眼三年过去了，悠然记得当年考研的一路艰辛，又想起了刚进入安徽工程大学的意气风发，也想起了第一次开组会的期待，回忆最多的莫过于科研路的艰辛，在这里我要像这三年来帮助过我的朋友、老师、领导致以最真诚的感谢。

首先感谢我的老师黄胜洲对我谆谆教诲，他是我这三年的科研路上的领路人，在我迷茫无所适从的时候，我的老师一次又一次地给我指引方向，在我论文无从下笔的时候，老师辛勤的帮我改写论文，老师对我的帮助，对我的硕士读书生涯，是无比至关重要的。

其次我要感谢我的朋友们，感谢大师姐谢芳琳在我研一的时候给予了我日常的帮助，感谢师兄蒋铖伟为我提供的科研资料，感谢任博文和唐远卓两位同门在日常学习中给予我的帮助，感谢师弟吴东杰和师妹潘佳妮、高玉洁平日里帮我送文件，感谢我的室友们张旭阳，严翥然，任思源，三年来的互相帮助，感谢闫涛涛、卢赤辉、孙翔、杨正昊、张梦雅、刘翔主管、程胜总监在我实习的时候对我的照顾，感谢他们的一路帮助，使我三年科研生活更加的顺顺利利。

最后感谢我的父母和兄弟姐妹给予我生活上的关爱、物质上的帮助和精神上的鼓励，是他们让我感受到了亲情的价值、生活的温暖。同时还要感谢我的女朋友麻玉霞对我的关心、尊重和支持。

最后，真挚的感谢各位评审专家和答辩组的各位老师，感谢您们付出的辛勤工作，为我的论文提出宝贵的建议。

尚德敏学 唯实惟新

