

分类号: TQ171.73

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120117



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 光学微结构精密热压成型
关键技术研究

论 文 作 者 蒋铨玮
校 内 导 师 黄胜洲(副教授)
校 外 导 师 杨阳(高级工程师)
专业学位类别 机械
研究方向(领域) 光学加工

论文提交日期: 2024 年 4 月 11 日

分类号: TQ171.73

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120117

光学微结构精密热压成型关键技术研究

RESEARCH ON KEY TECHNOLOGY OF PRECISION THERMOFORMING FOR OPTICAL MICROSTRUCTURES

学生姓名: 蒋铖玮

指导教师: 黄胜洲(副教授)

校外导师: 杨阳(高级工程师)

专 业: 机械

研究方向: 光学加工

论文答辩日期: 2024 年 5 月 27 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：蒋铖玮

日期：2024 年 5 月 27 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。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：蒋铖玮

指导教师签名：黄胜洲

日期：2024 年 5 月 27 日

日期：2024 年 5 月 27 日

光学微结构精密热压成型关键技术研究

摘 要

相较传统光学元件，微结构光学元件因其特殊的光学功能而被广泛应用于军事、医疗等领域。传统研磨、抛光等加工方式无法满足各领域需求，而精密模压成型技术在批量生产方面具有巨大潜力。本文针对光学玻璃模压关键技术进行系统研究，聚焦玻璃模压工艺现存关键问题，从玻璃本构模型出发，建立了玻璃精密热压过程的热-结构耦合有限元模型。针对目前热压技术中存在的残余应力大、材料填充不够充分等问题，提出了利用特种能场辅助成型和智能算法优化工艺参数的方法来优化成型质量。为复杂光学微结构元件实现低成本、高质量以及批量化生产提供了理论依据。本文主要研究内容如下：

(1) 基于黏弹性材料基础理论，针对高温玻璃黏弹性蠕变以及松弛特性进行了系统的分析总结。以 P-SK57 玻璃为典型材料，对光学玻璃微槽结构的模压过程进行了有限元建模，根据微槽填充率和应力分布等成型评价指标，归纳了模压温度、摩擦系数、模压时间等关键工艺参数对产品成型质量的影响规律。

(2) 针对热压过程中玻璃在微槽内的流动受阻、玻璃材料内部应力过大等问题，本文引入了特种能场(超声场)来辅助玻璃微结构的热压成型。基于静态与动态黏弹性理论模型，进行了玻璃微结构常规热压和超声振动热压数值模拟，动态展示了玻璃在模具中的流变充型过程。其结果表明，该手段能够有效改善玻璃的应力分布，大幅降低了

玻璃的应力，使玻璃的成型效果更好。并且，本研究还设计了其它光学微结构验证超声辅助手段的有效作用。

(3) 在正交实验以及实际生产所获得数据的基础上，建立并训练了反向传播(Back Propagation, BP)神经网络。在此基础上，利用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对 BP 神经网络进行了优化。最后，以玻璃微结构的残余应力与填充率两个指标对精密玻璃成型的多个工艺参数进行了优化。优化结果表明，玻璃的材料填充率提高，而同时成型应力降低，表明利用智能算法来对精密模压成型工艺流程进行参数优化是切实可行的。

本研究针对超精密玻璃微结构光学元件模压的实际需求，结合生产中亟待解决的关键问题，从多角度逐步提升光学微结构元件的成型质量，为制造同时具有良好几何精度和光学性能的光学微结构元件提供了理论依据和技术支撑。

关键词：微结构元件，精密成型，特种能场，工艺参数，神经网络

RESEARCH ON KEY TECHNOLOGY OF PRECISION THERMOFORMING FOR OPTICAL MICROSTRUCTURES

ABSTRACT

In contrast to conventional optical components, micro-structured optical components have applications in military, medical and other fields due to their special optical functions. The demand for micro-structured components in various fields cannot be met by conventional grinding, polishing and other processing methods. Precision molding has great potential for mass producing micro-structured optical components. In this paper, the thermal-structural coupling finite element model of the glass precision hot-pressing process is established from the glass intrinsic model by systematically studying the key technology of optical glass molding, focusing on the existing key problems of the glass molding process. It provides a theoretical basis for the realization of low-cost, high-quality, high-volume production of complex micro-structured optical components.

(1) Based on the basic theory of viscoelastic materials, the viscoelastic stress relaxation and structural relaxation characteristics of glass at high temperature are summarized. In this study, P-SK57 glass was used as a typical material. Finite element modelling of the forming process of the optical glass microgroove structure was carried out. The influence laws of

key process parameters such as molding temperature, friction coefficient and molding time on the molding quality of the product are summarized according to molding evaluation indices such as microgroove filling rate and stress distribution.

(2) This paper introduces a special energy field (ultrasonic field) to support the hot pressing of glass microstructures, aiming at problems such as obstruction of glass flow in the micro-tank during the hot-pressing process and excessive internal stress in the glass material. Numerical simulations of conventional hot pressing and ultrasonic vibratory hot pressing of glass microstructures were performed to dynamically demonstrate the rheological filling process of glass in molds, based on static and dynamic viscoelastic theoretical models. The results show that this agent is effective in improving the stress distribution in the glass, which significantly reduces the stress in the glass and makes it easier to form. In addition, other optical microstructures were designed in this study to verify the effective role of the ultrasound-assisted means.

(3) A back-propagation (BP) neural network was constructed and trained. It was based on orthogonal experiments and real production data. On this basis, the BP neural network was optimized using Genetic Algorithm. Finally, several process parameters of precision glass forming were optimized using two indicators: glass microstructure residual stress and filling rate. The results show that the filling rate of the glass increases

while the forming stress decreases, and it is practical to use intelligent algorithms to optimize the parameters of the precision molding process.

This thesis combines with the actual demand of precision glass molding and the key problems in production, aimed to improve the molding accuracy from multiple aspects. The study provided the theoretical basis and technical support for the production of the molded lenses with good geometric accuracy and optical properties.

KEY WORDS: Micro-structured Components, Precision Molding, Special Energy Field, Process Parameters, Neural Network

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 微结构光学元件加工技术研究现状	3
1.3 精密热压成型技术研究现状	5
1.4 研究内容及目的	10
第 2 章 模压用光学玻璃材料黏弹性特性分析与建模	12
2.1 模压用光学玻璃材料黏弹性特性分析	12
2.1.1 黏度特性	13
2.1.2 蠕变和应力松弛特性	14
2.1.3 结构松弛特性	15
2.2 模压用光学玻璃材料本构模型构建	17
2.2.1 黏弹性本构模型	17
2.2.2 时温等效模型	19
2.3 黏弹性特性验证	21
2.4 本章小结	22
第 3 章 玻璃材料精密热压成型仿真分析	23
3.1 玻璃材料精密热压成型过程分析	23
3.2 玻璃精密热压成型过程有限元模型建立及仿真	24
3.3 热压成型阶段关键工艺参数对成型质量的影响规律	29
3.3.1 模压温度对玻璃微结构成型的影响规律	29
3.3.2 摩擦系数对玻璃微结构成型的影响规律	33
3.3.3 模压时间对玻璃微结构成型的影响规律	36
3.4 本章小结	37
第 4 章 光学玻璃微结构超声振动辅助成型研究	39
4.1 基于正交实验法的无超声最佳工艺参数组合	39
4.2 超声辅助条件下对光学微结构热压成型质量的影响	42
4.3 超声辅助成型参数对热压成型质量的影响规律	44
4.4 超声辅助其它典型光学微结构成型仿真分析	45
4.5 本章小结	49

第 5 章 基于 GA-BP 算法优化的光学玻璃微结构热压成型工艺参数研究.....	50
5.1 神经网络结构.....	50
5.2 遗传算法理论.....	51
5.3 基于光学微结构成型工艺参数的 BP 神经网络模型构建.....	53
5.3 基于 GA-BP 算法优化的光学微结构元件工艺参数研究.....	55
5.4 本章小结.....	57
第 6 章 总结与展望.....	58
6.1 全文总结.....	58
6.2 展望.....	59
参考文献.....	61
攻读学位期间发表的学术论文目录.....	71
致谢.....	72

第1章 绪论

1.1 课题背景及意义

随着光电信息产业的不断发展,光学微结构元件的功能也日益多样化,光学微结构元件在光学、光电子学等领域的应用也变得越来越重要^[1-4]。如光学传感、光学计算、光纤通信等领域中均采用了各种各样不同的光学微元件。微结构光学元件(Micro-structured Optics Components, MOC)由于其独特的光学功能和出色的机械性能,在光电通信、医疗成像等领域得到了广泛的应用^[5],如图 1-1 所示。

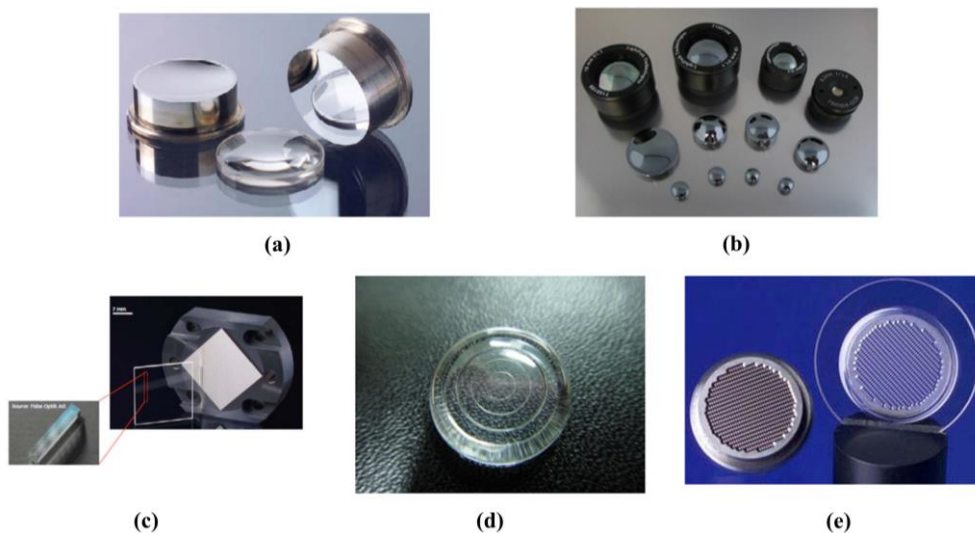


图 1-1 玻璃热压成型技术的应用 (a)非球面透镜; (b)红外玻璃透镜; (c)微透镜阵列; (d)衍射光学器件; (e)晶片级别光学器件

从 20 世纪 70 年代开始,一些国家就已经开始研究军用激光装置、热成像设备、光电导航系统等各式光电系统设备^[6, 7]。这些光电系统设备的研究和应用在军事领域起到了重要的作用,提高了军事操作的效率和精确性。在光电通信领域,微结构光纤因其独特的结构和传导机理,不仅可作为信息传输媒介,还可用于高性能测量仪器和其他设备^[8-10]。在现代医学领域,微创甚至无创治疗是现代医学发展的趋势^[11-13],而微结构光学透镜其体积小、重量轻的优点^[14],在内窥镜、渐进镜^[15]等医疗设备中的应用为微创治疗提供了现实可能。在生活中,微结构光学元件则被广泛应用于常见的光电设备中,如显示屏的背光薄膜、VR 眼镜、手机闪光灯等^[16, 17],如图 1-2 所示。

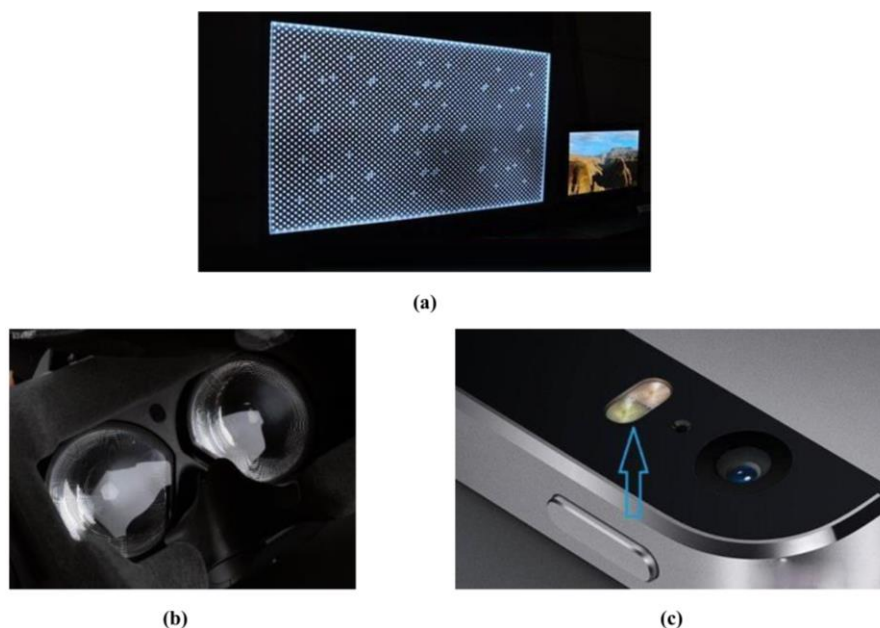


图 1-2 常见的光学微元件 (a)液晶显示屏的微结构阵列背光薄膜；(b) VR 眼镜里的菲涅尔透镜；(c) 手机摄像头闪光灯里的菲涅尔透镜

光学微结构的处理通过材料的流动和变形来再现模具上微结构的形状,这种制备方法广泛应用于光学和光电行业中,用于制造精密的光学元件和光学设备。作为一种典型的二元微光学元件,微槽的特征尺寸和周期尺寸小于光波长,具有良好的成像性能和较高的衍射效率^[18]。

在生物芯片中,微结构光学元件可以用来创建微流体通道或流体开关。这些微小的通道可以用于精确控制液体或生物样品的流动,实现生物分析、细胞培养和药物筛选等应用。通过设计合适的微结构形状和尺寸,可以实现高效、精确的液体操纵和分析。在太阳能发电领域,微结构光学元件可用于硅板涂层或表面改良,以提高太阳能电池的效率。通过在硅板表面加入微结构,可以调节光线的折射、散射和反射,从而增加光线与材料的相互作用,提高光吸收效率。这可以帮助太阳能电池在光谱范围内更有效地转换太阳能为电能。

微结构光学元件的表面通常呈现微米级的拓扑结构,根据其表面形状可分为微槽、微透镜和锥形^[19]。微结构光学元件之所以具有独特的优势,是由于其表面具有各种不同的几何形状,能够引起光学效应的多样化反射、衍射和折射。这些优势使得微结构光学元件在光学设计和应用中具备更大的自由度和灵活性。尺度的微型化和光学系统的集成化为微结构光学元件开辟了新的可能性,通过微细加工技术和微纳米制造工艺,可以将多种功能的微结构元件集成到单一的光学系统

中,实现复杂的光学功能。传统的透镜系统在处理光线时可能会面临色差和色散等问题,即不同波长的光线经过透镜后会聚焦在不同位置,导致图像失真和色彩偏移。而衍射光学元件,例如衍射光栅、光子晶体等,可以通过控制光的干涉和衍射效应来调节光线的传播和波前形状。将衍射元件与折射透镜结合起来,对色差和色散进行补偿。这种色差补偿系统通常用于一些对色差和色散要求较高的光学系统,比如高性能摄影镜头、显微镜、望远镜等。它们可以提供更准确和清晰的图像,改善光学系统的性能。

微结构元件以其独特的折射、衍射等光学性能成为现代光学工程中重要的光学元件。当今我国在光学微结构制造技术方面还不够成熟,难以实现微结构阵列的高效低成本加工。采用精密模压成型技术可有效解决微结构阵列制造的效率问题。本课题拟采用玻璃精密模压技术制造光学微结构,通过建立高温场下热-结构耦合的精密玻璃元件热压成型模型,开展多种提高微结构成型质量的工艺方案的研究,促进精密成型技术发展,推动我国在超精密光学制造领域的进步。

1.2 微结构光学元件加工技术研究现状

随着各领域对微结构光学元件的需求增加,选择适合的制造方法对于实现高精度、多功能和低成本的生产至关重要。在制造领域,加工方法按成型方式一般划分为增材、减材、变形加工^[5]。这三种精密加工方法在微纳制造领域都有广泛的应用,具体选择哪种方法取决于所需结构的复杂性、材料性质、制造成本和生产效率等因素。不同的加工方法可以互补使用,以实现更复杂、更精密的微结构制造。

增材加工是通过逐层添加材料的方式来构建三维结构。这种方法使用的材料通常是粉末、液体或线材,通过控制添加材料的位置和形状,可以逐渐构建出所需的微结构。目前应用较为广泛的包括激光烧结、激光直写、光固化成型等^[20]。激光烧结技术是一种利用激光束将粉末颗粒或其他材料在高温下瞬间加热、熔融并结合的工艺。由于激光束的扫描区域内会经历剧烈的温度变化,其成品容易产生裂纹、气孔等缺陷。由于光学元件对质量要求较高,该技术在光学微元件领域^[21]应用不多。

激光直写是一种高精度的微纳加工技术,利用激光束直接在材料表面进行加工和写入,实现微米甚至纳米级的图形和结构。这种技术通常使用光刻胶或者薄

膜作为目标材料，通过控制激光束的焦点位置和强度来实现对材料的局部加工、刻蚀或者改变其性质^[22]。激光直写技术非接触、高分辨率、高精度等特点，被广泛应用于微电子器件、光学元件等领域的制造和研究中^[23]。

目前，制造微结构光学元件的新技术是将光固化成型与压印技术^[24]结合起来。首先，将光敏性材料涂覆在需要制造微结构的基板表面上。使用紫外光照射通过模具表面的部分，使其固化。然后将模具与光固化的材料接触，并施加一定的压力，以确保材料完全填充模具的微结构。经过压印后，再次使用紫外光对材料进行固化，最后脱模取出^[25]。光固化成型技术可以实现复杂的微结构形成，而压印技术则能够将这些微结构快速且精确地转移到目标材料上。这种组合方法在光学微元件的制造中得到了广泛应用，并取得了显著的成果。但应用面受限，仅适用于光敏材料^[26]。

减材加工是通过去除材料的方式来制造微结构。这种方法使用的工具可以是刀具、光束、电子束等，通过切削、磨削、蚀刻等方法将材料逐渐去除，形成所需的微结构。光刻技术分为无掩膜式和投影式，近期研究中以数字微镜装置(Digital Micromirror Device, DMD)为基础，提出了光刻压印复合技术来加工光学微元件。传统的光刻技术在微纳米尺度的加工中存在一定的分辨率限制，这种复合技术可以实现更高的分辨率和更小尺寸的微结构加工，从而提高光学微元件的性能和功能，并且降低了生产成本，提高了效率^[27]。高能束是指具有高能量和高强度的粒子束或电磁辐射束，主要有激光束、离子束、电子束三种。激光束加工广泛应用于各种材料的微纳加工中^[28]，其聚能高，热影响区域小，可辅助其他加工技术。离子束^[29, 30]和电子束^[31, 32]是用高能粒子对靶材进行轰击加工出所需结构。对比传统技术，该工艺流程简单，聚光能量可控，加工精度高^[33]。

特种能场加工技术是一种高级加工方法，利用特定的能场作用于材料表面或内部，实现对材料的加工、改性或结构调控。这些能场可以包括激光、离子束、电子束、声波等。这些能场能够提供高能量密度、高加工精度和非接触加工等优势，使其在微纳制造、材料加工、表面改性、纳米结构制备等领域得到广泛应用。其中，超声辅助成型可以与其他微结构加工技术结合起来，解决材料表面残余材料难去除、尺寸效应等问题。如超声辅助电火花复合加工，超声辅助车削工艺，超声辅助热压成型等^[34-36]。

由于微型元件独特的功能，各领域对超精密元件的需求也在不断增长。作为最先进的加工技术之一，超精密加工(Ultra-Precision Machining, UPM)可以生产出精度更高的零部件，对解决生产需求问题产生了重大影响。目前，UPM 有主要包括超精密切削、超精密磨削、超精密抛光和超精密非传统加工四种，可为高科技产品的微尺度部件提供卓越的表面质量。超精密加工技术包括超精密车削、铣削和复合加工等，其切削工具由物理和化学性质优异的材料制成，典型的是金刚石。单点金刚石加工(Single-Point Diamond Turning, SPDT)是实现纳米级切削精度的主要技术。在 SPDT 中，刀具材料是具有小直径切削刃的单晶金刚石。单晶金刚石具有非常高的硬度和耐磨性，能够在高速旋转的切削过程中保持较长的寿命。其小直径切削刃能够实现高精度的切削，并且能够在制造过程中保持几乎不变的形状，从而确保制造出精密的表面形貌。另一种超精密切割技术是快速工具伺服金刚石切割，用于在复杂的非球面表面和微结构上获得高精度，以及带有平衡装置的快速工具伺服切割，可减少表面粗糙度和表面深度误差^[37]。

超精密加工尤其是单点金刚石加工是现在制造透镜阵列、衍射元件等最常见的手段^[38]。随着刀具材料和机床伺服系统的不断发展，超精密加工技术能够实现亚微米甚至纳米级别的高精度加工，同时获得极高的表面质量，使得加工件具有优异的形状和表面光洁度^[39, 40]。

无论是传统机械加工技术还是新的技术，都能制造高精度光学玻璃元件，但加工侧重点和技术特征不同。传统机械微加工方式在尺寸控制上有一定优势，但其加工效率和加工精度受到限制；高能束加工能够达到纳米级精度，但其技术难度和加工成本高；增材加工和热塑成型方式对材料的利用率更高，但存在着玻璃收缩率高、透光度不足等问题。玻璃精密模压技术是一种在考虑材料利用率、精度和效率等因素的情况下，更加优异的制造方式。

1.3 精密热压成型技术研究现状

20 世纪 40 年代，Eastman Kodak 公司提出了一种批量生产透镜的精密模压成型技术，但由于精度等问题当时未被重视，直到 30 年之后，精密玻璃模压技术才开始被广泛应用于生产制造中。1974 年，Blair G 等人提出了将玻璃坯料在模具中加热再压制所需结构的方法^[41]，为制造复杂玻璃结构提供了一种有效和准确的解决方案。这种方法在玻璃光学元件制造中有着广泛的应用，并为实现

高性能和高精度的光学元件提供了可行的制造途径。此后，精密玻璃成型 (Precision Glass Forming, PGM) 成为一个新的研究领域，越来越多的学者投身于这一领域。

精密热压成型技术从上世纪 80 年代兴起，该工艺具有净成型、效率高、对环境友好无污染等明显优势，适合大规模生产各种光学微元件，如非球面透镜、透镜阵列和衍射元件等。这项技术可以高效率地制造高精度的光学微元件，适用于大规模生产，极大地推动了光学微结构器件在各领域的应用。但是该工艺同样存在很多技术挑战，在高温和压力下，光学材料可能发生热膨胀和形变，导致最终成型的透镜尺寸与设计尺寸产生偏差；高温和压力造成的材料变形和冷却过程中的非均匀性可能导致成型件中存在残余应力；高残余应力导致冲压后的形状变化，冷却后玻璃与模具表面产生的粘附现象^[42,43]，热压成型过程中，由于材料的结晶状态、化学组成的变化或温度梯度，材料的折射率可能发生变化以及模具寿命等关键问题。为了克服这些困难，需要对该工艺进行深入研究。

俄亥俄州立大学 Allen. Yi 的课题组很早就开展了精密热压成型的相关工作，加工出非球面透镜^[44]、透镜阵列^[45]、衍射器件^[46]等，对成型过程中的残余应力^[47] (见图 1-3)、形貌偏差^[48]和折射率变化^[49, 50]等问题进行了深入研究。同时美国的克莱姆森大学也开展了一系列关于玻璃材料的黏弹性参数测量^[51]、摩擦系数测量^[52,53]，和透镜形貌评估^[54]等方面的研究工作。德国的弗劳恩霍夫生产技术研究所则进行了关于模具加工和镀膜^[55-57]、光学元件加工^[58]和成型过程仿真等方面的工作。丹麦科技大学 Ali Sarhadi 带领的团队对热压过程中的温度、摩擦系数^[59]和透镜阵列成型仿真^[60]等方面展开研究。另外，日本的东北大学、信州大学和台湾国立大学也开展了成型过程仿真等相关方面的工作^[61-63]。Anh-Tuan Vu 介绍了一种新开发的非等温玻璃成型技术，它能在很短的工艺周期内生产出形状复杂的光学器件^[64]。另外，一些学者也将玻璃碳模具应用于精密玻璃成型^[65]。

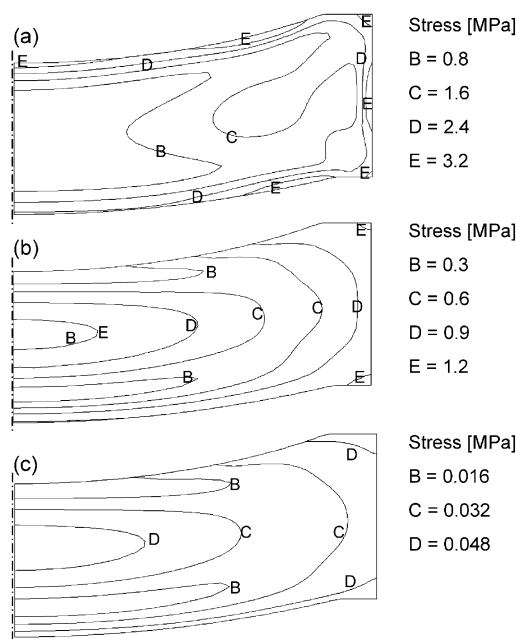


图 1-3 冷却过程中不同阶段成形透镜内部的等效力分布 (a)684°C; (b)200°C; (c)20°C

密苏里科技大学 Luo^[66]的课题组提出了玻璃丝材熔化的新工艺。该工艺采用电机将玻璃丝材送入 CO₂ 激光束照射区域实现熔化，再控制恒温工作台实现熔融态玻璃的打印，制造出各类具有高致密度和高透明度的玻璃元件。该工艺的优点在于它能够通过激光熔化玻璃丝材，实现高质量的玻璃元件制造。与传统的玻璃制造方法相比，这种方法具有更高的生产效率和更好的制造质量控制能力。此外，使用激光熔化玻璃丝材的方法也可以实现对复杂结构和微小特征的制造，扩展了玻璃制造的应用领域，如图 1-4 所示。

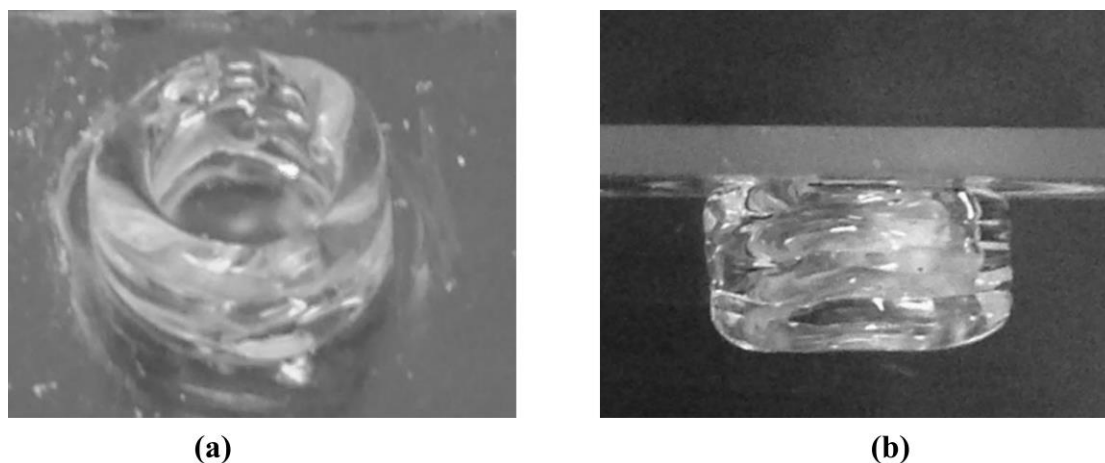


图 1-4 打印的熔融石英圆柱体 (a)斜视图; (b)侧视图

麻省理工学院的 John Klein^[67]及其团队采用电熔炉将钠钙玻璃熔融，然后利用重力作用，工作平台上的喷嘴快速移动，实现了熔融玻璃的连续挤出和分层沉

积(图 1-5(a))。该团队利用该技术制造出一系列具有高透明度的复杂结构玻璃元件(见图 1-5(b))。

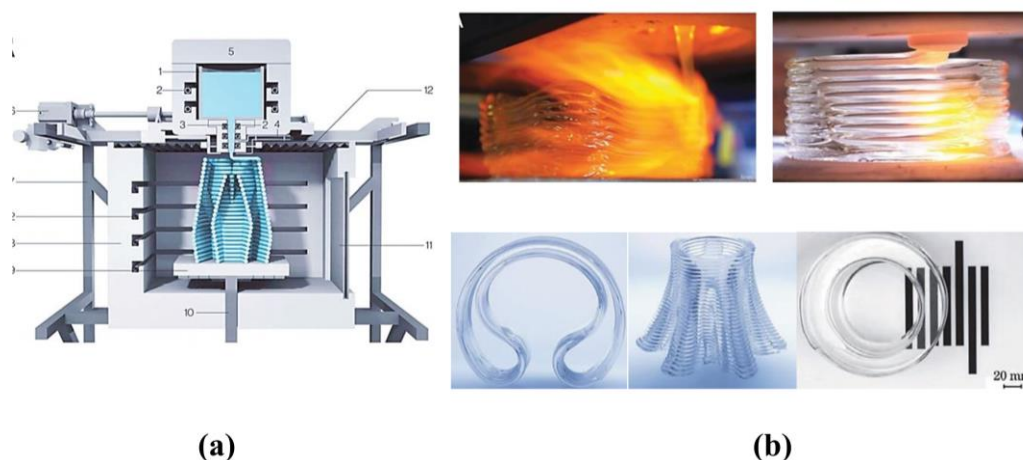


图 1-5 玻璃增材加工及范例 (a)玻璃连续沉积制造原理；(b)熔融沉积过程及成型玻璃元件

国内也陆续开展了玻璃材料精密热压成型的相关研究。周天丰^[68]及其团队进行了一项关于利用玻璃来模压成型非球面透镜的试验，他们用 Maxwell 模型、Kelvin 模型和 Burger 模型三种力学模型与实际试验结果进行拟合。其研究结果表明，Maxwell 模型能够更准确地反映黏弹性材料在高温下的蠕变与松弛行为。并利用该理论模型进行了有限元建模仿真，得到了玻璃在 590℃ 时的应力云图，如图 1-6 所示。

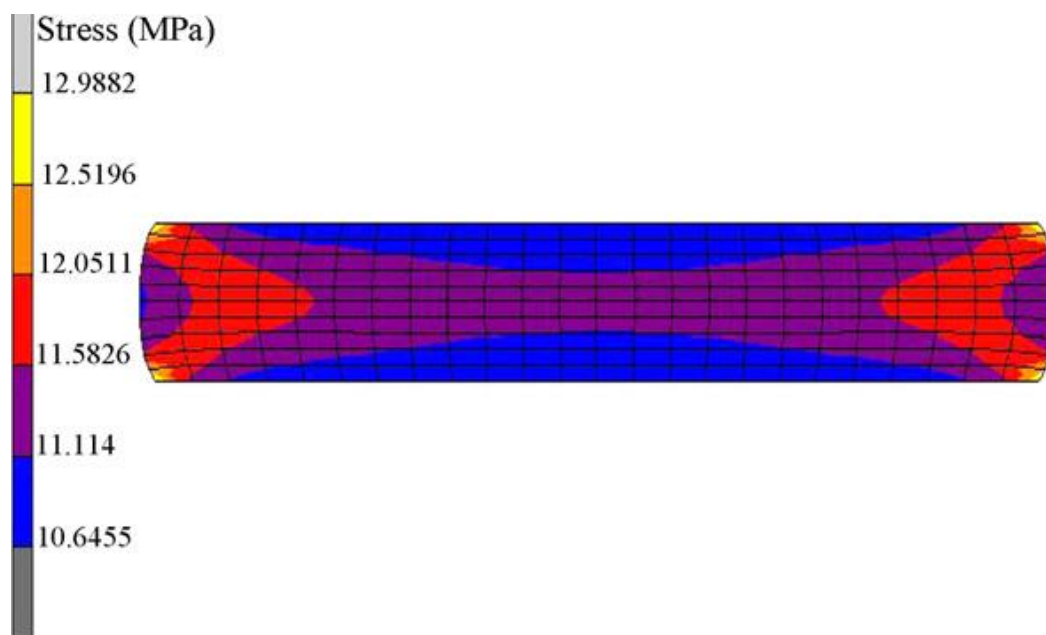


图 1-6 590℃时应力分布的有限元模拟结果

章亮炽等人讨论了 PGM 工艺中的一些核心问题，并提供了一种基于制造链

考虑的方法，从模具材料选择、光学玻璃的性能和变形表征到工艺优化^[69]，如图 1-7 所示。湖南大学尹韶辉带领的课题组则对模压过程^[70,71]、模具加工^[72]等方面进行了研究。中国科技大学沈连娟课题组对折射率^[73,74]、残余应力^[75,76]、模压仿真^[77,78]、摩擦系数^[79]以及透镜形貌偏差^[80]等方面展开了一系列研究。浙江理工大学、苏州大学等高校在模压实验与仿真^[81-83]方面进行了相关的研究。

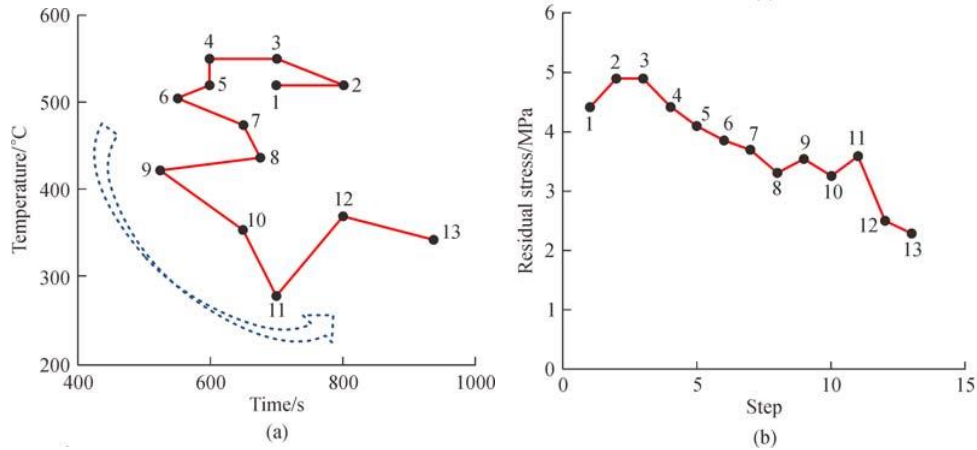


图 1-7 优化冷却曲线 (a)优化路径；(b)相应的残余应力

而另一群学者从材料与模具界面摩擦的角度进行了研究。Jun Masuda^[84] 则从模具与材料接触界面的角度，观察冷热交替实验后对模具材料表面的影响。他们在磷化镍表面分别镀了铱-铱和铱-铂两种镀层，研究了两种镀层在加热时的扩散现象，如图 1-8 所示。研究表明，磷化镍中的镍元素容易在铱-白金镀层模具受热时向镀层表面扩散，导致其表面光滑度变差。而铱-铱金镀层的稳定性更高，模具的耐久性更好，使用寿命更长。

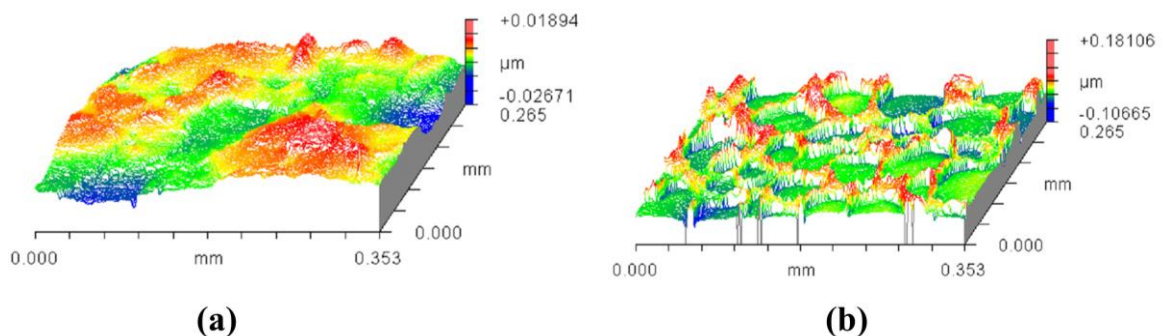


图 1-8 Ni-P 晶粒的 Ir-Pt 涂层模具的表面形貌 (a)加热前；(b)570°C加热 1 小时

魏俊俊等^[85]则利用射频磁控溅射技术，在 WC 基材表面制备了不同膜系的涂层，包括铱单层膜、铱-铱复合膜和铱-铱复合膜。那之后，为了评估涂层的质量和

性能，他检测了所制备涂层的表面形貌和力学性能，验证贵金属镀层是否能够有效地改善玻璃和模具之间的黏附性，并防止元素的扩散。

综合生产效率和生产成本，玻璃精密热压成型技术是现在批量制造光学微结构最为优越的技术。但由于光学微结构阵列周期尺度小、结构尖锐、精度要求高，该技术在加工过程中存在着材料残余应力过大、玻璃不能完全填充等问题。加工过程涉及到材料学、工程力学、检验测试等多个领域，是近年来国内外微纳加工领域的研究热点。

1.4 研究内容及目的

本文基于前期工作，对光学玻璃精密热压成型技术进行研究。以常用的材料(P-SK57 玻璃)为主要研究对象，在有限元软件中复现玻璃精密成型工艺流程，充分考虑玻璃的流变特性、黏弹性特性、界面接触等因素，通过引入特种能场辅助成型技术以及优化成型过程中的工艺参数的方式，优化光学玻璃精密模压成型工艺。

本论文共分为六个章节，各章节内容安排如下：

第1章：绪论。阐述本文的背景和研究意义，对目前研究现状进行调研，分析精密热压成型的优势和存在的问题，包括热压成型技术在光学元件制造中的应用、工艺过程的有限元仿真、模具的镀膜研究等。最后，指出本论文的研究目的和各章节安排。

第2章：黏弹性材料特性理论研究。从黏弹性材料在工作温度下表现出来的黏度、蠕变和应力松弛以及结构松弛特性，介绍了几种用来表征玻璃黏弹性特性的理论模型，为后续有限元模型的建立以及分析提供理论参考。

第3章：玻璃材料精密热压成型仿真分析。首先根据现有工艺流程，在有限元软件中建立模具以及受压材料的有限元模型，设置约束条件之后，并进行现有工艺流程的仿真复现。然后，对玻璃材料在热压阶段的变形进行系统研究，研究所需模压温度、摩擦系数和模压时间对光学微结构最终成型结果的影响，主要从应力的分布及玻璃材料在模具中的填充率这几个关键指标来衡量。

第4章：光学微结构超声振动辅助成型优化研究。针对复杂光学微结构元件特征多、材料变形难、成品要求高，单纯依靠模具施加载荷的成型方法难以进行的问题，分别研究了在无超声波振动和有超声波振动的压制条件下微槽的形成效

果。通过正交实验来分析超声振幅和振动频率对于微结构成型的影响，探究了超声波场辅助成型的内在机理。最后，根据实际工业应用情况，设计了不同形状的光学微结构元件，探究了微槽形状对于成型效果的影响，验证了超声辅助手段对于成型效果的优化作用。

第 5 章：基于 GA-BP 算法优化模压成型工艺方法研究。本章在以上所获得的数据基础上，考虑到工艺参数对于微结构成型的非线性影响，利用反向传播(BP)神经网络以及遗传(GA)算法对工艺参数进行了优化，通过与未优化前的应力以及填充率对比验证了该方法的有效性。

第 6 章：总结与展望。本章对所做工作进行了总结，归纳总结了本文的创新点，并对下一步的工作进行了展望。

下图 1-9 为本文整体研究路线：

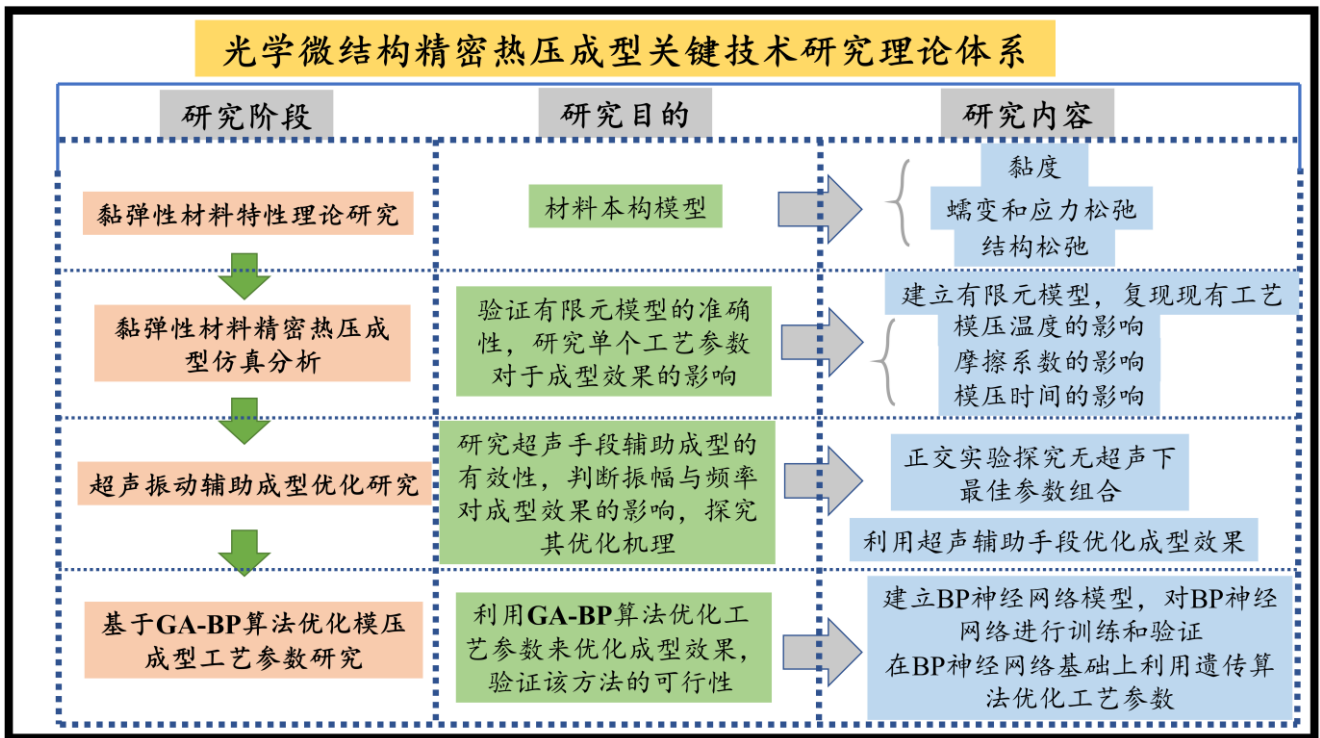


图 1-9 论文整体研究路线

第2章 模压用光学玻璃材料黏弹性特性分析与建模

2.1 模压用光学玻璃材料黏弹性特性分析

光学玻璃因其优异的光学性能被广泛用于光学器件制造。在升温过程中，玻璃的热膨胀系数、黏度等热力学参数都会随着温度而变化。在常温下，玻璃呈现玻璃态，即不具备规则的晶体结构。在这种状态下，玻璃的分子排列紧密但无序排列，呈现出固体的刚性和脆性特性。

随着温度的升高，玻璃的分子能量增加，分子振动增强，导致分子间的相互作用逐渐减弱。这会使得玻璃的黏度(粘滞性)降低，即材料更易变形且流动性增加。玻璃开始变得柔软，漏斗等实验现象也能观察到。当温度继续升高，玻璃经过玻璃化温度(T_g)，温度达到一定程度时，玻璃开始逐渐软化，达到玻璃软化温度(T_s)，黏度急剧降低，其分子开始实现更大的位移并互相滑动。此时，玻璃已进入玻璃转变区域，呈现出黏弹性行为，同时具备固体和流体的特点。进一步升高温度，超过玻璃转变区域，玻璃会逐渐融化成液体，变成熔融态。在熔融态下，玻璃分子间的相互作用被完全打破，分子自由运动，并形成一個流动性较高的液体状态。

在加热过程中，当玻璃处在 $T_g \sim T_s$ 温度区间时会表现出不同于其他材料的力学行为，我们把处于这种状态的玻璃称为黏弹态。玻璃的转化温度 T_g 一般用差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)确定。DSC 用于测量物质在温度变化过程中吸放热量的变化。

在 DSC 实验中，样品首先被加热到高温，然后通过控制恒定的加热速率进行冷却。同时，在实验中还使用一个参比物(通常是不发生相变的材料)，以便对比样品的热量变化。通过比较样品和参比物的热量变化，可以获取样品的比热容-温度曲线。在这条曲线上，玻璃态转变为液态过程中有一个交点，该点所对应的温度即为转化温度。玻璃的转化温度并非定值，会随着冷却速率而稍微变化。

玻璃材料的黏弹性与温度存在着强相关性，工作温度下的材料会同时表现出固体和流体的特性，其主要表现形式为蠕变和应力松弛。随着温度逐步降低，玻璃的内部结构变化会落后于温度变化，发生结构松弛。本章从黏弹性材料在工作温度下表现出来的黏度、蠕变和应力松弛以及结构松弛，介绍了几种用来表征玻

璃黏弹性特性的物理模型，为有限元模型的建立以及分析提供理论指导。

2.1.1 黏度特性

黏度又称为黏滞系数。黏度是物质的一种性质，用于描述流体内部阻力的大小。它可以理解为流体的黏性或粘度，表示了流体抵抗剪切的能力。黏度是流体内部分子间相互作用和运动的结果。在一个流体中，分子之间的相互作用会产生内部的摩擦力，使得流体具有黏性。黏度的大小取决于分子间的吸引力和流体分子的排列方式。玻璃的黏度随着温度的变化不断变化，玻璃在升温的过程中会由固态转变为黏弹态再转变为黏流态。玻璃在固态下受力会呈现出弹性反应，即外力解除后，可以恢复原本形状；而在黏弹态下受力会表现为黏弹性行为，表现出蠕变(Creep)现象和应力松弛(Stress Relaxation)现象；当温度提高至玻璃软化点温度以上时，材料完全熔融，表现为纯黏性反应。在实际生产中，会将玻璃升温至转换点温度和软化点温度之间。

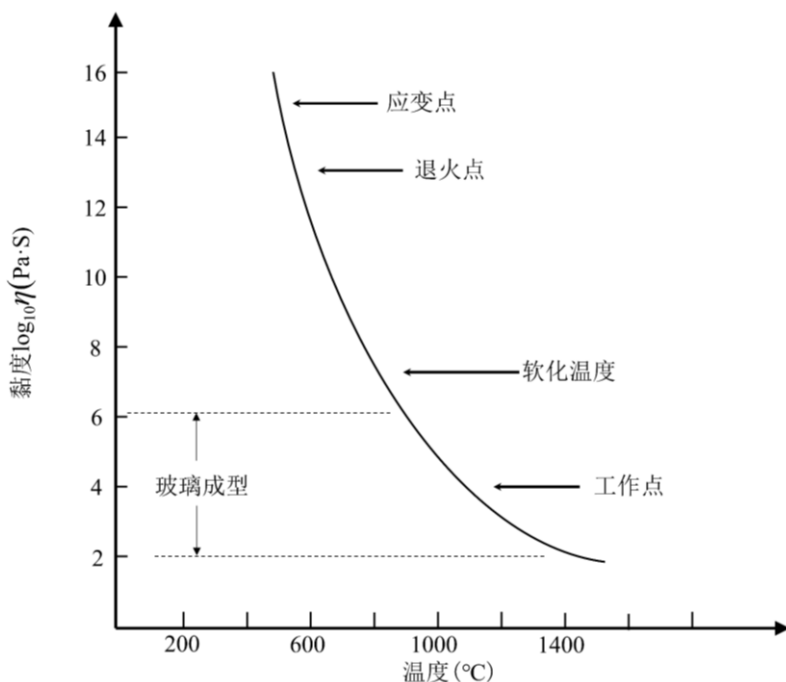


图 2-1 玻璃的黏度-温度曲线

图 2-1 为玻璃的黏度-温度曲线，从图中可以看到，该曲线中定义了几个参考点。其中应变点的黏度为 $10^{13.5}\text{Pa}\cdot\text{S}$ ，在该温度点时玻璃的内部应力在几个小时内缓慢释放。退火点的黏度为 $10^{12}\text{Pa}\cdot\text{S}$ ，在该温度点时玻璃内部应力可以在几分钟内快速释放。软化点的黏度 $10^{6.6}\text{Pa}\cdot\text{S}$ ，旋转球法(Rotating Sphere Method)是一种常用的玻璃软化点测试方法。该方法通过测量玻璃样品中一个悬挂的小球在

不同温度下的旋转速度来确定玻璃的软化点。

首先，从待测的玻璃样品中制备出一个球形样品，通常直径约 2-10mm。确保样品表面没有明显的缺陷或污染。然后，用细线或螺丝钉将玻璃样品悬挂在实验装置中。将装置升温至所需的测试温度范围，在样品达到目标温度后，开始测量球体的旋转速度。随着温度的升高，球体的旋转速度会逐渐增加。将测得的旋转速度与相应的温度数据记录下来，并绘制成粘度-温度曲线。粘度-温度曲线上，软化点通常是旋转速度急剧增加的温度点，这表示玻璃开始流动和软化。工作点即玻璃达到工作温度时的黏度为 $10^3 \text{Pa}\cdot\text{S}$ ，在该温度时玻璃适合被压制和拉制。

在一个有限的温度区间(黏度为 $10^9 \sim 10^{13} \text{Pa}\cdot\text{S}$)，黏度和温度的关系可以用 Arrhenius 公式来表达：

$$\eta = A_{\eta} \exp(E_{\eta} / RT) \quad (2-1)$$

其中 A_{η} 是常数， E_{η} / R 是活化能与气体常数之比。

当玻璃熔融为流体时，其黏度通常呈现非常高的值，且与温度呈现复杂的关系，使用 Vogel-Fulcher-Tamman (VFT) 方程可以更好地拟合该温度区间的黏度曲线。

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

其中 A_{VFT} 、 B_{VFT} 、 T_0 是拟合系数， T_0 一般比玻璃转化点温度 T_g 低。VFT 公式在描述非晶态材料的黏度行为时显示出较好的拟合能力。它能够很好地适应温度接近玻璃转变温度附近的黏度曲线，并在高黏度区间提供较好的预测性能。VFT 模型的一个关键特点是在接近绝对温度的某一临界温度(Vogel 温度)时，黏度将趋于无穷大，即流动性消失，这反映了非晶态材料在接近玻璃转变温度时出现的凝聚态行为。

2.1.2 蠕变和应力松弛特性

玻璃在转化区间表现为黏弹态，在这个温度范围内，玻璃材料发生结构转变，从刚性的玻璃态转变为柔软的橡胶态。图 2-2(a)、(b) 是玻璃材料的蠕变和应力松弛曲线。蠕变特性是指在恒力作用下，黏弹性材料应变随着时间的推移逐渐增加到一个稳定值。蠕变过程通常分为三个阶段：初级蠕变(Primary Creep)、次级蠕

变(Secondary Creep)和稳定蠕变(Steady-state Creep)。

在初级蠕变阶段,蠕变应变随时间迅速增加,呈现出一个较陡峭的曲线斜率,这是由于分子结构的调整和重新排列导致的初始变形。在次级蠕变阶段,蠕变应变增加速度逐渐减慢,曲线斜率变得较缓。此时,材料的分子结构和微观变形发生更加稳定的变化。在稳定蠕变阶段,蠕变应变逐渐达到一个稳定值,曲线基本上呈现水平状态。材料的分子结构和变形达到了动态平衡,维持在一个稳定状态。

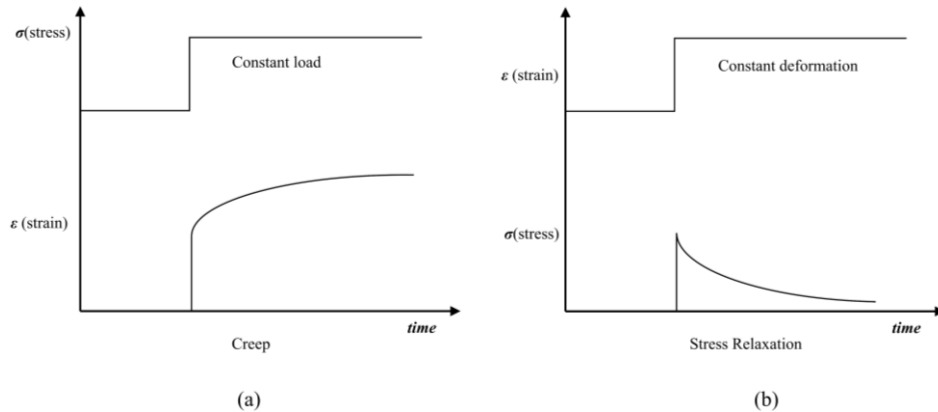


图 2-2 蠕变与应力松弛特性 (a)蠕变; (b)应力松弛

加载恒定应变时,黏弹性材料内部的应力不会逐渐衰减,而是会出现一种时间依赖的应力变化,这被称为应力松弛。在黏弹性材料中,维持一定应变状态时,初始施加的应力会逐渐减小,直到稳定在一个较小的值。

应力松弛的原因是黏弹性材料内部存在着分子、链段或结构的重排和重新分布。在应变施加后,材料的分子会发生移动和重新排列,这个过程需要一定的时间。随着时间的推移,材料内部的应力逐渐减小,直到达到一个平衡状态。这种时间依赖的应力变化特性可以通过应力松弛实验来研究。

2.1.3 结构松弛特性

应力松弛常用于表达材料的应力随时间的变化,但是这种线性黏弹性模型无法充分表征黏弹性材料的结构松弛现象,对于这类材料而言,需要使用更复杂的非线性模型来更准确地描述材料的时变性质。结构松弛,又称结构弛豫,是指在适当温度下,玻璃态结构逐渐变化的过程。这种结构状态的变化与时间密切相关,是玻璃内部某些原子或分子局部重新排列的结果。结构松弛是一种普遍现象,存在于各种玻璃态物质(包括有机、无机氧化物和非氧化物)中,在玻璃的形成、热处理以及使用和保存中都会发生。

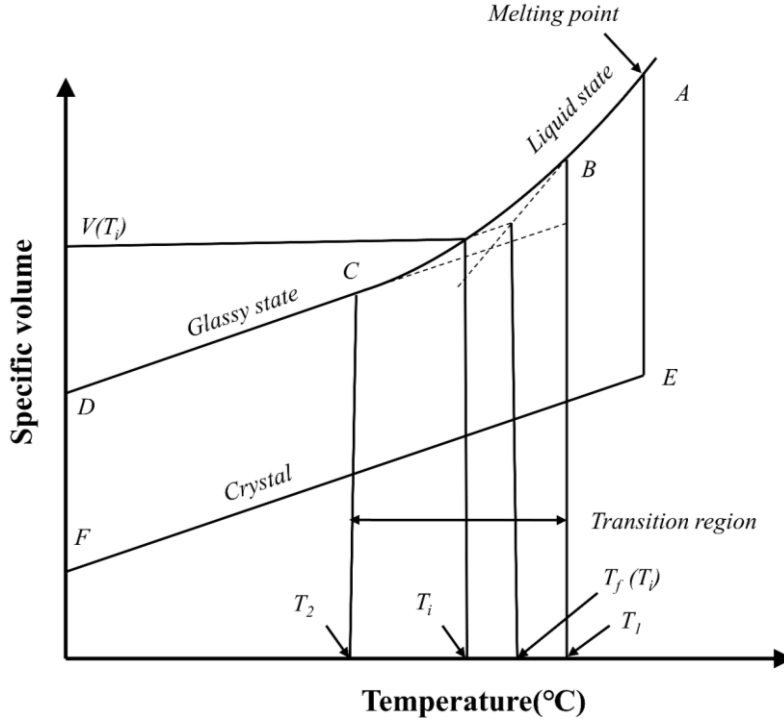


图 2-3 黏弹性材料结构松弛特性

图 2-3 为黏弹性材料结构松弛特性曲线，当玻璃处于转化区间(Transition Region)附近时处于平衡状态。材料温度从 T_1 降到 T_2 的过程中，玻璃的体积变化比温度变化慢，其体积松弛函数 $M_v(t)$ 为：

$$M_v(t) = \frac{V(T_2, t) - V(T_2, \infty)}{V(T_2, 0) - V(T_2, \infty)} = \frac{T_f(t) - T_2}{T_1 - T_2} \quad (2-3)$$

其中 T_f 是一个假想温度，用来描述材料内部结构落后于平衡状态的程度。 $M_v(t)$ 还可改写为如下级数形式：

$$M_v(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_v}\right)^\beta\right] = \sum_{i=1}^n w_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_{vi}}\right) \quad (2-4)$$

其中 τ_v 和 τ_{vi} 是结构松弛时间， w_i 为结构松弛时间分量权重，其和一般约为 1。

目前，一般用 Tool-Narayanaswamy-Moynihan(TNM)模型来体现结构松弛：

$$T_f = T + \int_{T_1}^{T_2} M(t - \tau_v) \frac{dT}{d\tau_v} d\tau_v \quad (2-5)$$

$$\tau_v = \tau_{v, ref} \exp\left\{-\frac{\Delta H}{R} \left[\frac{1}{T_{ref}} - \frac{x}{T} - \frac{1-x}{T_f}\right]\right\} \quad (2-6)$$

其中， $\tau_{v, ref}$ 是参考温度下的结构松弛时间， $\Delta H / R$ 是材料活化能和气体常数的比， x 是非线性常数。以本研究中采用的 P-SK57 玻璃为例，结构松弛参数如表 2-

1 所示。

表 2-1 P-SK57 玻璃结构松弛参数

材料属性	P-SK57 玻璃
非线性系数 x	0.789
活化能/气体常数之比 $\Delta H/R(K)$	84396.5
权重 w_i	1.0
参考温度下的结构松弛时间	100.7

2.2 模压用光学玻璃材料本构模型构建

2.2.1 黏弹性本构模型

图 2-4(a)是用来表征蠕变特性的 Kelvin-Voigt 模型,由弹簧和阻尼并联而成,其应力 $\sigma(t)$ 与应变 $\varepsilon(t)$ 随时间的变化为:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (2-7)$$

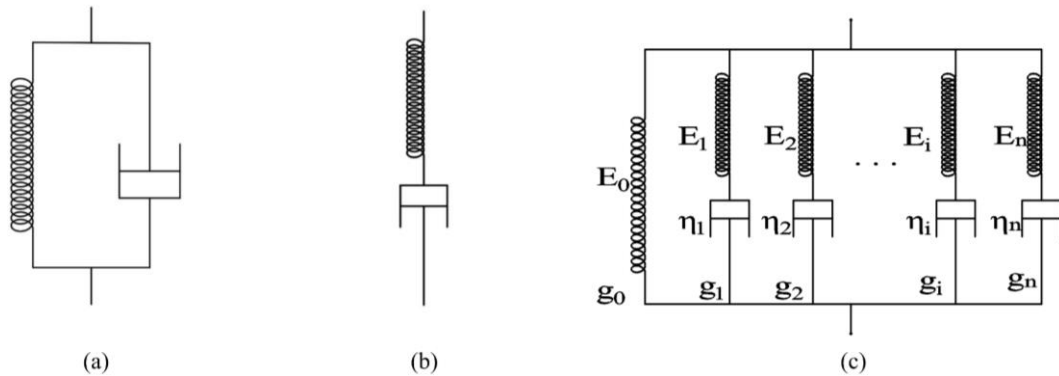


图 2-4 三种黏弹性材料力学模型(a) Kelvin-Voigt 模型; (b)Maxwell 模型; (c)广义 Maxwell 模型

当加载恒定载荷 σ_0 时, 应变 $\varepsilon(t)$ 会逐渐逼近 σ_0 / E , 其公式为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2-8)$$

其中 $\lambda = E / \eta$ 是蠕变时间。

表征应力松弛特性用的力学模型是 Maxwell 模型(见图 2-4(b)), 其应变 $\varepsilon(t)$ 与应力 $\sigma(t)$ 随时间的变化如下所示:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{\sigma(t)}{\eta} \quad (2-9)$$

当应变量为恒值 ε_0 时，应力 $\sigma(t)$ 会随着时间衰减，表达为：

$$\sigma(t) = E\varepsilon_0 \exp(-t/\tau) \quad (2-10)$$

其中 $\tau = \eta/E$ 是松弛时间。

Kelvin-Voigt 模型不能充分表征应力松弛特性 Kelvin-Voigt 模型是一种理想化的线性粘弹性模型，它将材料的应力响应分解为弹性和粘性两个部分，其中弹性部分由弹簧表示，粘性部分由阻尼器表示。这个模型假设材料在受力后会立即产生弹性变形，并且阻尼器会立即耗散能量，从而导致应力松弛非常迅速。然而，在实际材料中，应力松弛往往表现出更为复杂的行为。材料的粘性部分可能会导致松弛时间的延长，而不是立即耗散能量。此外，材料的应力松弛行为可能会受到温度、应变速率等因素的影响。这些复杂的现象无法被 Kelvin-Voigt 模型所捕捉。

而 Maxwell 模型则不能表征更复杂和长时间尺度的蠕变行为。该模型所受载荷为恒定应力时，所预测的应变会随着时间呈线性变化，并不收敛。因此，为了能够同时表征这两种特性，必须建立新的模型。在本文中采用的是现在应用最为广泛的广义 Maxwell 模型(Generalized Maxwell model)^[86]，见图 2-4(c)。广义 Maxwell 模型由多个并联的弹簧阻尼系统组成，图中 g_i 是模型中的第 i 个分支； E_i 是第 i 个弹簧的杨氏模量； η_i 是第 i 个阻尼器的黏度。

其 N 维 Maxwell 广义模型中的应变-应力关系如下：

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_i}{dt} = \frac{d\sigma_i}{dt} \frac{1}{E_i} + \frac{\sigma_i}{\eta_i}; \sigma = \sum_{i=0}^n \sigma_i \quad (2-11)$$

其中， ε 和 σ 分别为模型的总应变和总应力， ε_i 、 σ_i 分别为第 i 个分支的应变和应力， E_i 以及 η_i 分别为第 i 个分支的弹性模量和黏度。而当 $\eta_0 \rightarrow \infty$ 时，给定一个恒定的应变 ε_0 ，模型的整体应力响应可以由上式推导为：

$$\sigma = \sum_{i=0}^n E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \varepsilon_0 = E(t) \varepsilon_0 \quad (2-12)$$

其中 $\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$ ， $E(t)$ 表示随时间变化的弹性模量模型的模量，即等效刚度，通常以

Prony 级数的形式表示，如下所示：

$$E(t) = E_{int} \sum_{i=0}^n g_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (2-13)$$

其中 E_{int} 为初始弹性模量， g_i 为第 i 个分支的权重，其权重之和为 1，即 $\sum_{i=0}^n g_i = 1$ 。

对于黏弹性材料来说，其剪切应力 $\sigma(t)$ 表达式为：

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t-\tau) \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau + G(t)\varepsilon(0) \quad (2-14)$$

其中 $G(t)$ 是剪切应力松弛模量函数，在广义 Maxwells 模型中以 Prony 级数的形式表示如下：

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2-15)$$

其中 G_i 是剪切分量， τ_i 是松弛时间分量， G_{∞} 是无限长时间下的剪切模量值，且

$$G(0) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^N G_i。$$

材料的黏弹性特征通过实验测得，需要对应力松弛曲线或蠕变曲线进行拟合才能得到相关参数。根据蠕变测试实验数据，采用 Origin 数据分析软件拟合得到的 Prony 级数如表 2-2 所示。

表 2-2 Prony 级数参数拟合

α_i	τ_i
0.585	13.93
0.41	50.3
0.005	10331.9

2.2.2 时温等效模型

本文中热压模具使用的材料是碳化钨(WC)。由于其在高温下的低热膨胀和高抗压强度，它是用于玻璃成型的相对成熟的材料。选择的玻璃材料为 P-SK57 玻璃，两者的一些材料参数见表 2-3^[87,88]。在压缩成型过程中，材料在工作温度下的弛豫时间与温度具有强相关性。与较低的温度和较长的时间相比，在较高的温度和较短的时间下可以实现相同的弛豫行为。很容易看出，延长弛豫时间或提高温度可以等效地影响分子运动，这种特性被称为时-温等效性。时-温等效性是

指在一定条件下,不同时间和温度组合下的各种材料性能或反应行为可以通过一个等效时间和等效温度来表征或预测,具有该特性的材料被称为热流变材料。不同温度条件下松弛模量与时间对数曲线的形状并未改变,但在水平方向上有不同的偏移(见图 2-5)。其中 T 是实际玻璃温度, T_0 是参考温度, $\alpha(T)$ 是传递系数。热流变特性通常由 Williams-Landel-Ferry(WLF)方程表征^[89, 90]。

$$\log[\alpha(T)] = \log \frac{\tau_i(T)}{\tau_i(T_0)} = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (2-16)$$

其中, $\tau_i(T)$ 表示第 i 个分支的温度相关弛豫时间, C_1 与 C_2 是拟合系数。WLF 方程是一种用于描述黏弹性材料(例如高聚物)中分子运动温度依赖性的数学模型,常被用于拟合黏弹性材料在 $T_g \sim T_g + 100^\circ\text{C}$ 温度区间内的应力松弛特性。 C_1 与 C_2 作为经验参数取决于材料特性,当取参考温度为转变温度 T_g 时, C_1 与 C_2 存在普遍适用的经验值 $C_1=17.44$, $C_2=51.6$ 。

表 2-3 碳化钨模具(WC)与 P-SK57 玻璃材料参数

材料属性	碳化钨模具	P-SK57 玻璃
杨氏弹性模量 E (GPa)	710	93
泊松比 ν	0.22	0.249
密度 ρ (Kg/m ³)	14650	3010
热传导系数 K_c (w/m.°C)	63	1.1
比热容 C_p (J/kg.°C)	314	760
热膨胀系数 ($1/^\circ\text{C}$)	4.9×10^{-6}	5×10^{-6}
转化温度 ($^\circ\text{C}$)	-	494

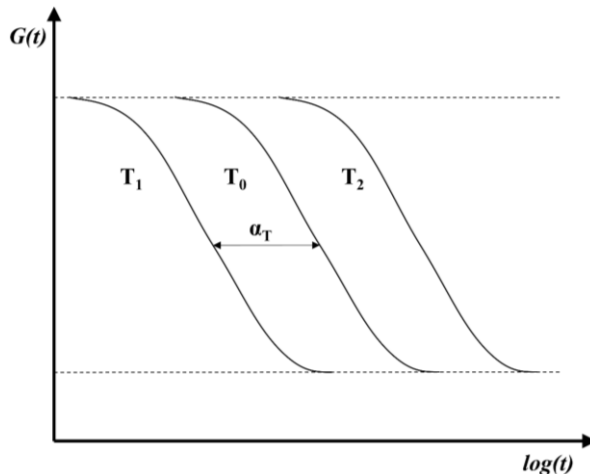


图 2-5 材料的简单热流变曲线

2.3 黏弹性特性验证

玻璃在工作区间表现出的蠕变与松弛特性是两个紧密相关的过程,有限元仿真中可以根据蠕变曲线或者应力松弛试验的数据拟合广义麦克斯韦模型的参数。对蠕变测试试验中获得的曲线进行 Prony 级数拟合,导入到有限元仿真中,模拟蠕变试验过程,验证本构模型拟合数据的精度。由于仿真宏观玻璃的形变过程,且单位时间变形量小,压头和玻璃的接触摩擦系数对仿真结果影响不大,因此选择摩擦系数为 0.1,建立蠕变仿真有限元模型,见图 2-6 所示。

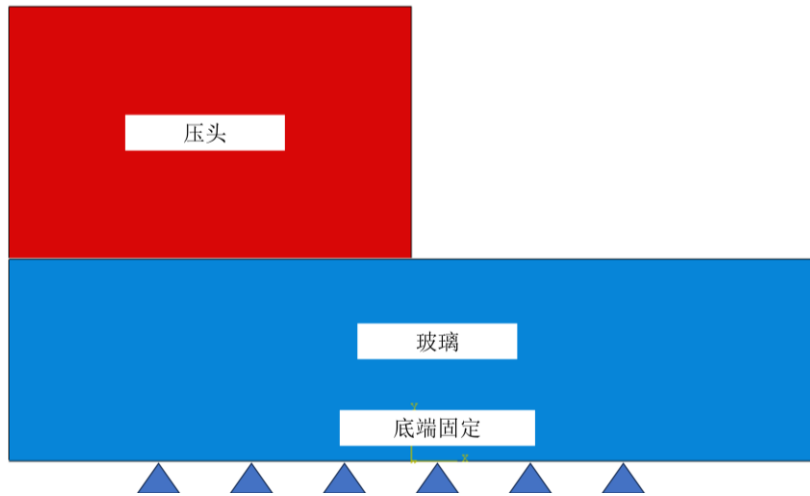


图 2-6 黏弹特性验证有限元模型

仿真中玻璃参数使用上述表 2-1、2-2、2-3 中的参数,10min 后的仿真得到的应力云图如图 2-7 所示,仿真结果与周剑^[78]的试验结果吻合较好,证明黏弹性本构模型参数拟合的准确性。当温度提高超过工作范围,试验中玻璃被压穿,而有限元仿真中,由于变形太大,造成材料划分网格发生畸变,无法计算完全,后续仿真计算中,将考虑引入新的算法。

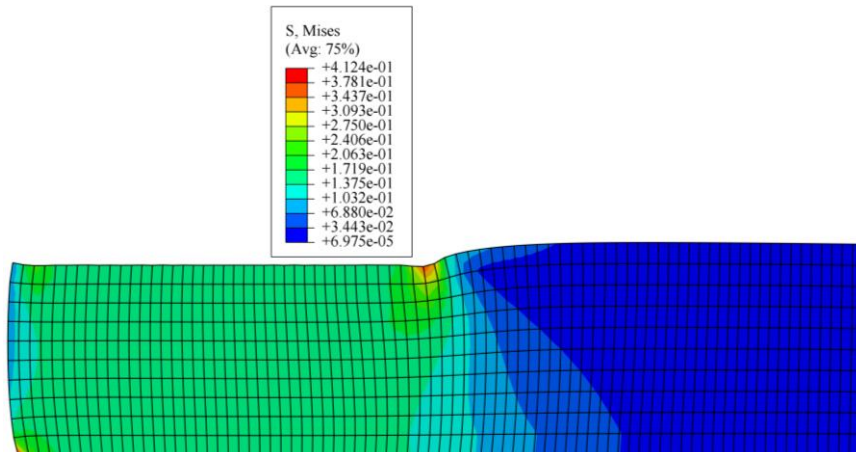


图 2-7 有限元仿真验证应力图

2.4 本章小结

材料在高温受压下的力学行为直接关系到产品成型质量,研究黏弹性材料特性,将材料特性准确无误的输入有限元分析软件中才能更加贴近实际情况下的玻璃变形情况。

本章分别阐述了黏弹性材料的黏度、黏弹性特性以及结构松弛特性,分析了材料对于温度的高度依赖性;介绍了几种用来表征黏弹性特性的理论力学模型及其方程,采用广义 Maxwell 模型来表征黏弹性材料特性。由 WLF 公式计算出的拟合系数输入到有限元软件中能建立起准确的材料模型,还验证了有限元软件中建立模型的准确性。

第3章 玻璃材料精密热压成型仿真分析

3.1 玻璃材料精密热压成型过程分析

如图 3-1 所示为光学微结构精密热压成型技术的完整工艺流程，包括以下几个阶段：

(1) 加热阶段：首先，经过预处理的玻璃被放置在下模具上。然后，加热设备被用来将玻璃加热到预设的温度。在这个阶段，控制加热的速度和温度梯度对于获得高质量的成型透镜至关重要。

(2) 保温保压阶段：在玻璃达到预设温度后，开始保温保压阶段。保温保压的目的是让玻璃内部的温度和压力达到均匀分布，以保证成型的准确性和一致性。在此阶段，常常需要通入保护性气体，如氮气，以防止设备内部在高温下氧化。

(3) 模压阶段：在保温保压的时候，上模具开始向下移动，使得玻璃样品流动变形，达到所需的形状。通过控制压力和时间，以及上下模具的形状和尺寸，可以获得精确的光学微结构。

(4) 冷却阶段：完成模压后，开始冷却过程。通过控制保护性气体的流动速率，使得玻璃冷却至目标温度。这有助于减小内部温度的梯度，并保持玻璃透镜的形状稳定。

(5) 脱模阶段：最后，成型透镜冷却至室温，并进行脱模操作。上下模具分开，取出成型元件。在这个阶段，需要小心地处理以避免潜在的损坏。

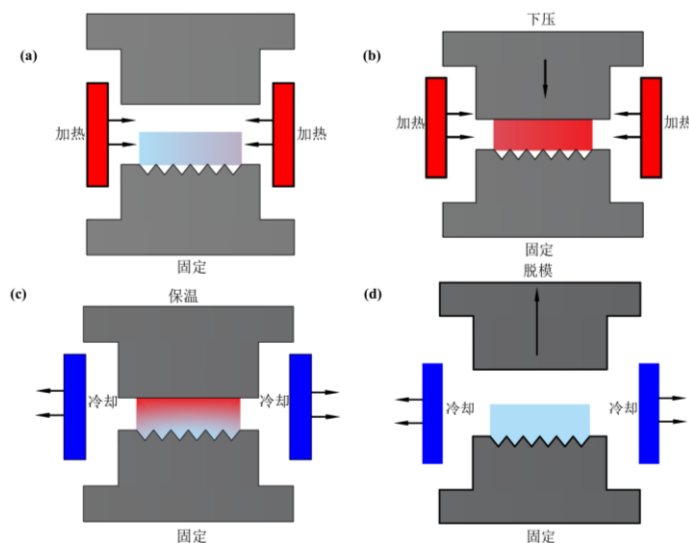


图 3-1 精密热压工艺流程

工艺曲线如图 3-2 所示。模具和材料在一定时间 t_s 内从起始温度 T_s 加热到所需温度 T_h ，然后进入成型阶段。成型阶段结束时 t_m 进入保温阶段，温度逐渐下降。在 t_h 时刻，温度下降到 T_a 时开始冷却，并在 t_c 时刻恢复到起始温度。

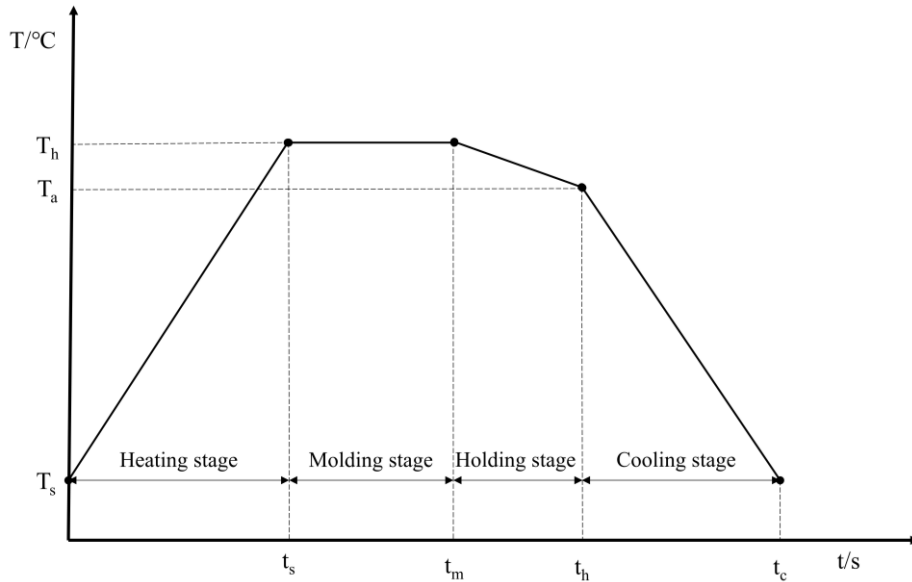


图 3-2 模压过程工艺曲线图

3.2 玻璃精密热压成型过程有限元模型建立及仿真

有限元分析法是将复杂问题离散化为有限数量的元素，并对每个元素求解，从而得到整个问题的近似解。有限元分析过程主要包括前处理、求解和后处理三个步骤。建立正确的有限元模型对于保证结果的可靠性至关重要。这需要对工程问题的物理特性和边界条件进行适当的建模，并选择合适的网格划分和材料参数。此外，还需要进行验证和验证，比较有限元分析结果与实验数据。通过这些步骤，可以确保有限元分析在实际工程应用中的有效性和可靠性。

前处理阶段涉及建模、网格划分、材料属性定义、条件设置等工作。几何建模可通过计算机辅助设计软件进行，将实际结构转化为几何模型。网格划分则将几何模型划分为若干个离散的小单元，以便进行数值计算。材料属性和加载条件的定义是指定材料的力学性质和施加在结构上的边界条件，例如加力、约束等。

求解阶段是核心步骤，其中运用数值计算方法对离散化后的问题进行求解。这通常涉及线性代数方程组的求解，可以使用迭代法或直接法来获得所需解。这个阶段的核心是建立和解决有限元离散化后的数学模型，以获得结构的应力、位移、应变等相关信息。

后处理阶段用于分析和展示计算结果。在此阶段，可以通过可视化工具将数值结果转化为图形图像，还可以提取结构的重要信息，如应力分布、变形图、位移云图等。这些结果可以用来评估结构的性能以及进行后续的优化和决策。Abaqus 软件分析流程如下图 3-3 所示。

Abaqus 是由 Dassault Systèmes 公司开发的商业有限元分析软件。它提供了广泛的功能和强大的求解能力，包括求解动态、静态、热以及点响应问题，其中求解非线性问题更擅长，具有优异的分析能力和可靠性。Abaqus 软件提供了一个广泛的单元库和材料模型库，可用于模拟各种复杂结构和实际工程中常见的材料，包括复合材料、高分子聚合物、金属、混凝土等。Abaqus 软件不仅可以解决结构的应力和位移问题，同时还能应用在其他领域，如热学、声学、流体和质量扩散等工程问题。

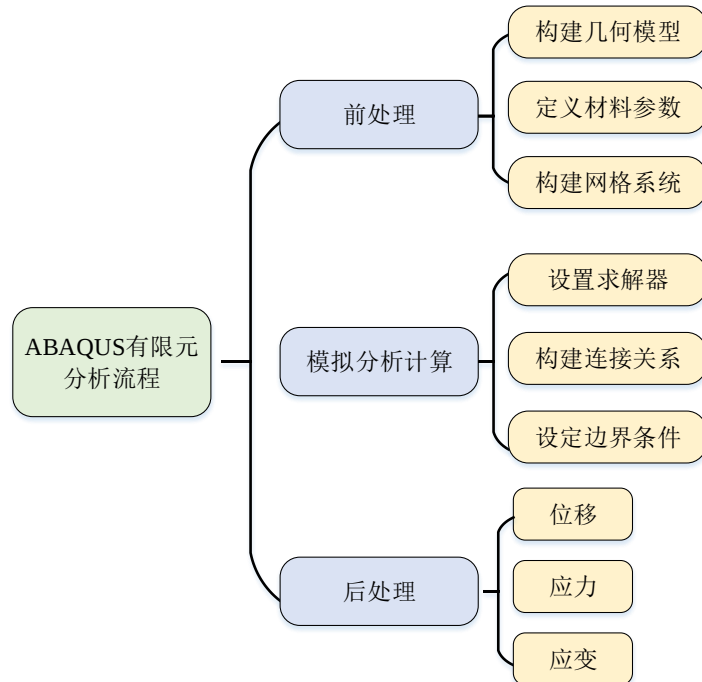


图 3-3 Abaqus 有限元分析流程

(1) 前处理

本研究使用 P-SK57 玻璃作为制作光学微槽的成型材料，使用 WC 作为模具材料。本文中在 Abaqus 软件中建立了模具与玻璃胚料的三维模型(见图 3-4)。经过分析，三维模型中模具的微槽阵列以及玻璃材料在高温下的非线性行为会导致后续分析的工作量巨大，求解时间长、工作效率低。因此，本研究建立了一个二维模型(见图 3-5)，该模型能够准确地复现实际工艺流程。本研究中采用的方式

是上模具向下移动进行模压成型，下图展示了上下模具以及受压玻璃材料的尺寸和相对位置：

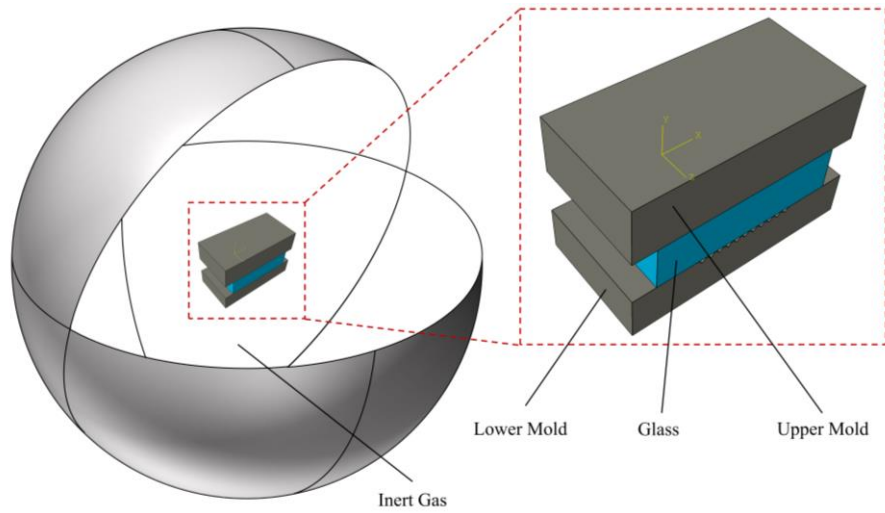


图 3-4 V 型槽有限元三维模型

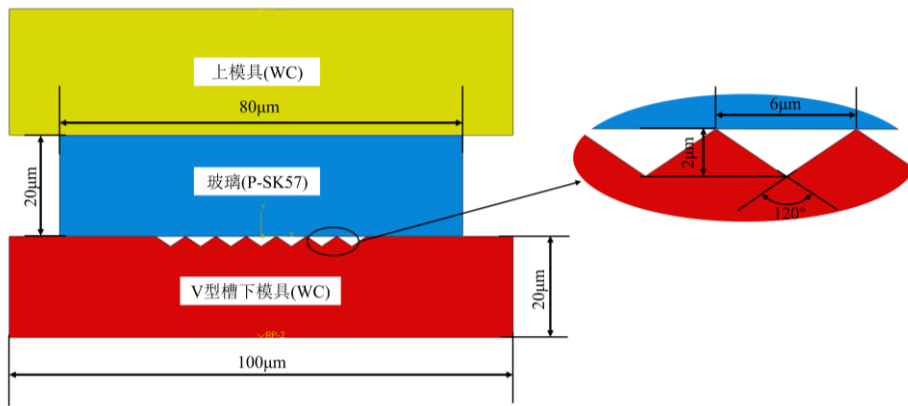


图 3-5 V 型槽有限元二维模型

如图 3-5 所示，模具和加压材料都被置于惰性气体中并加热到指定温度。在本例中，下模具上的微槽角度为直角，深度为 $2\mu\text{m}$ 。压制材料为 $80\times 50\times 20\mu\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的矩形体。为了模拟真实的成型过程，必须建立各工艺参数和边界条件与实际情况相匹配的模型，以确保各模型计算结果的可比性。

有限元模型的网格划分和单元类型对求解至关重要，在分析玻璃成型质量时更为关键。考虑到玻璃在模压成型时会发生较大的变形，本研究将其划分为 80000 个四边形单元。而下模具与材料接触的区域是 V 型槽，其过于尖锐的接触部位会影响有限元分析的收敛，需要特别关注和处理。传统的网格划分方法很难准确地捕捉到尖锐的接触特征，可能会导致不准确的应力和形变分布。为了解决

这个问题,可以考虑使用精细的网格划分或特殊的网格技术,如自适应网格方法或局部加密网格。然而,使用过大的网格可能会导致在填充微槽时出现严重的畸变。网格过大时,在填充过程中可能无法准确地捕捉到细微的形变和应力变化。这会影响到模拟结果的准确性;过小的网格会导致有限元模型的自由度增加,从而增加求解方程组的规模,会显著增加计算资源的需求并降低分析效率。因此,需要再对网格进行局部细化以达到平衡。

在下模具的 V 形槽区域,特别容易出现网格穿透的问题,尤其当玻璃受到快速挤压时表现得更为突出,这可能导致分析结果不准确甚至出错。本节中将 V 槽划分为长为 0.16mm 的网格,而其余部分划分为 0.4mm 的网格。经过这样的网格布局调整,总网格数被控制在 23675 个,以保证分析的准确性和效率(图 3-6)。

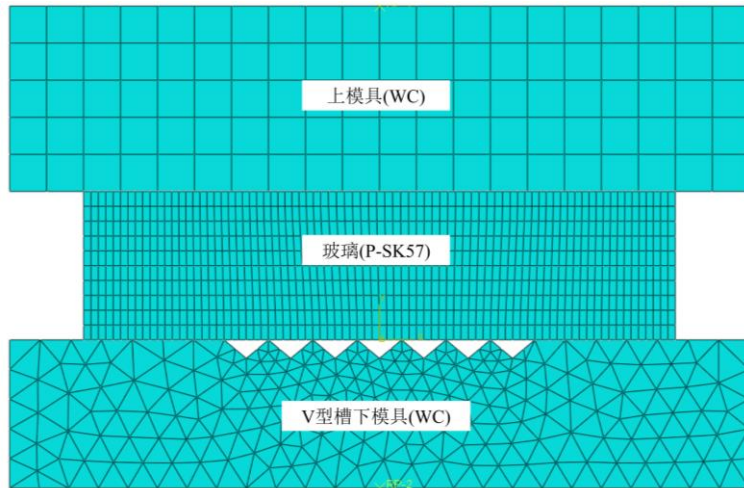


图 3-6 有限元模型网格划分

网格绘制完成后,为了检查绘制的网格是否为良好的有限元网格,需要在 Abaqus 中进行检查。查阅相关标准可知,六面体单元网格长宽比应小于 5.0,内角范围在 40°~135°。网格质量检查结果如表 3-1 所示,对比标准可知网格划分质量良好。

表 3-1 网格单元质量检查结果

零件	单元格 数量	平均长 宽比	最坏长 宽比	平均最小 角度(°)	最坏最小 角度(°)	平均最大 角度(°)	最坏最大 角度(°)
上模具	15000	1.04	1.04	90	90	90	90
玻璃	80000	1	1	90	90	90	90
下模具	23675	1.80	3.79	77.64	49.64	103.91	136.12

(2)模拟分析计算

由于涉及的工艺参数较多,本次研究中采用控制变量法,通过调整各参数的值,对各组仿真结果进行分析。实际生产过程中 WC 模具的变形量远小于玻璃,因此本研究玻璃定义为变形体,将模具定义为可传热的刚体,其实际约束条件如图 3-7 所示。

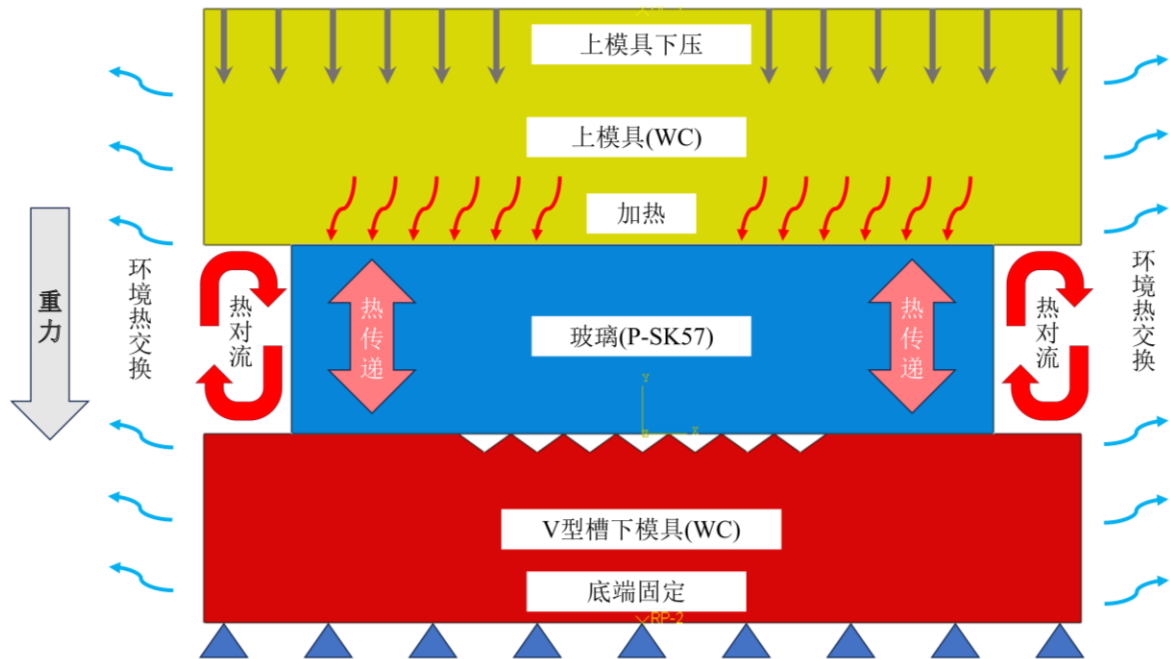


图 3-7 有限元模型约束条件

玻璃模压设备是通过红外加热的方式实现能量的传输,由于红外辐射的特性,能量可以准确地控制和定向,以实现所需的加热效果。此外,红外辐射可以在较快的时间内加热玻璃材料,提高生产效率。在模具和受压材料的热传递过程中,主要有热传导、热对流、热辐射三种。这三种热传递方式在整个工艺流程中起到不同的作用。在实际应用中,需要综合考虑热传导、热对流和热辐射的影响,选择合适的加热方式和参数,以实现有效的热传递和控制温度。

为了更加贴近实际生产状况,模具以及材料跟环境之间的热交换也得考虑。为了减小模具的高温氧化,在加热阶段开始前,模压腔利用真空泵作去氧处理,再填充保护性气体(一般为氮气)。因此,在该仿真中将与环境的对流传热系数设置为 $0.02\text{kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,玻璃与模具之间的传热系数为 $2.8\text{kW}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。

在加热阶段,红外热源的温度升高会导致其辐射能量的增强。在此过程中,玻璃和模具表面吸收能量,从而升温。由于模具对红外辐射的吸收效率高于玻璃,

所以模具的升温速率通常比玻璃更快。一旦模具升温，它们会向接触的玻璃传递热量。这个过程主要通过热传导来实现，其中热能从高温的模具向低温的玻璃传递。热传导是通过固体之间的分子振动传播热量，使得玻璃和模具之间的温度逐渐趋于一致。

此外，周围存在的高温气体(通常是氮气)的流动会对玻璃和模具的热交换产生影响。热对流是通过流体来实现的，通过热对流的方式，流动的高温气体可以将热量传递给玻璃和模具。在冷却阶段，冷却系统对模具进行降温。同时，提高氮气流速，使材料和模具快速冷却。这种冷却过程通常利用冷却系统提供的冷空气或其他冷却介质来降低结构件和玻璃的温度。

3.3 热压成型阶段关键工艺参数对成型质量的影响规律

模压工艺参数影响着光学玻璃微结构的产品质量，传统的研究方法只能通过实验来探究工艺参数对产品成型结果的影响规律。这种方法只能根据玻璃成型的结果来推测各个参数对成型质量的影响，效率太低而且成本高昂。而有限元分析法的使用，大大方便了研究者研究工艺参数与最终成型质量之间的影响规律。热压成型过程中的加热温度、模压时间、模具与材料接触面之间的摩擦系数等参数，直接影响了材料在模具中的填充率和材料内部的应力变化。因此，需要定量研究这些关系，获得更好的热压工艺参数，提高光学玻璃模压成型过程的效果，以此指导工艺的改进和优化。本节通过建立的有限元模型，根据实际工艺在 Abaqus 中设置相关条件仿真复现，探究光学玻璃微结构成型的规律。

3.3.1 模压温度对玻璃微结构成型的影响规律

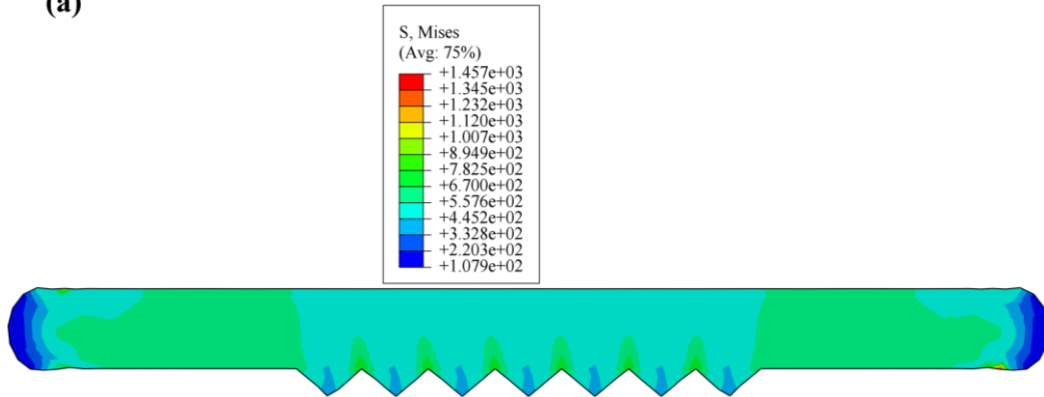
由第二章可知，玻璃与温度之间具有很强的依赖性，在加热、冷却等存在热量传递的工艺流程中，温度是其中的关键因素，需要根据玻璃材料的几个特征温度来确定这些工艺过程的温度。

模压温度的提高可以增强熔融玻璃的流动性，使其更容易填充微槽。较高的温度可以减小玻璃的粘度和表面张力，促进玻璃材料在微槽中的流动，从而提高微槽的填充率和均匀性。模压温度的选择会影响微槽中的残余应力分布。较高的温度可以减小残余应力的生成，减少破裂风险。

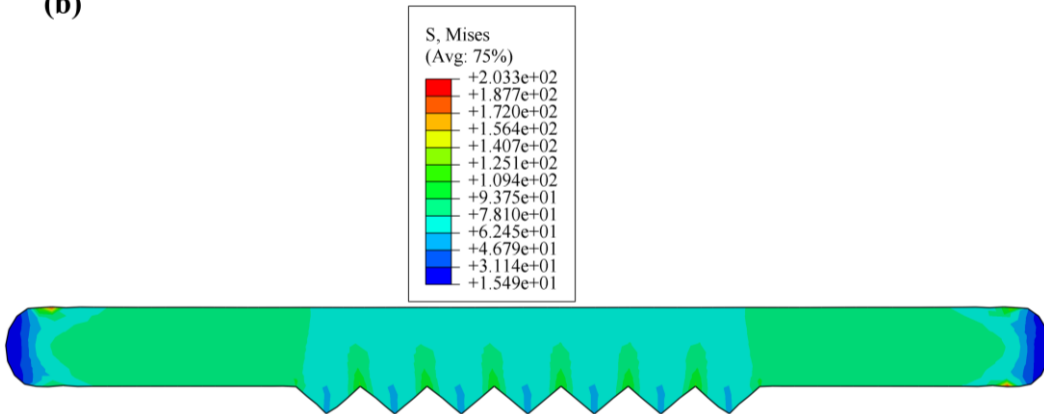
通常情况下，适当提高模压温度可以使残余应力分布更加均匀，降低应力聚集的区域，有助于改善微槽的强度和稳定性。较高的模压温度可以改善微槽的表

面光洁度。熔融玻璃在较高温度下具有较好的流动性,可以填充微槽的细微细节,从而提高表面的平滑度和光洁度。模压温度直接影响玻璃微槽的形状控制。较高的温度可以改变玻璃的表面张力和表面扩散速率,从而实现更准确的微槽形状控制,确保所需的尺寸和形态。为了确定合适的模压温度,参考玻璃 494°C 的转化点温度 T_g , 本文基于有限元模型探究模压温度在 540°C、560°C、580°C、600°C 以及 620°C 对微槽结构残余应力及其填充率的影响。

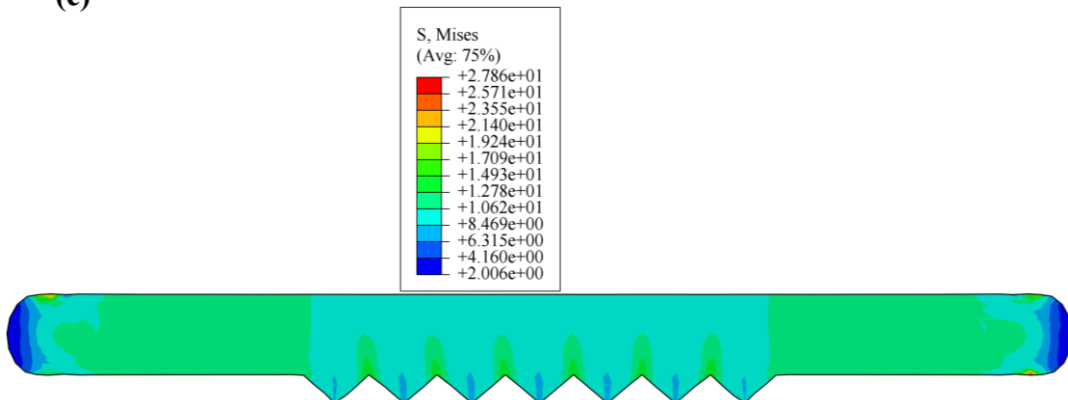
(a)



(b)



(c)



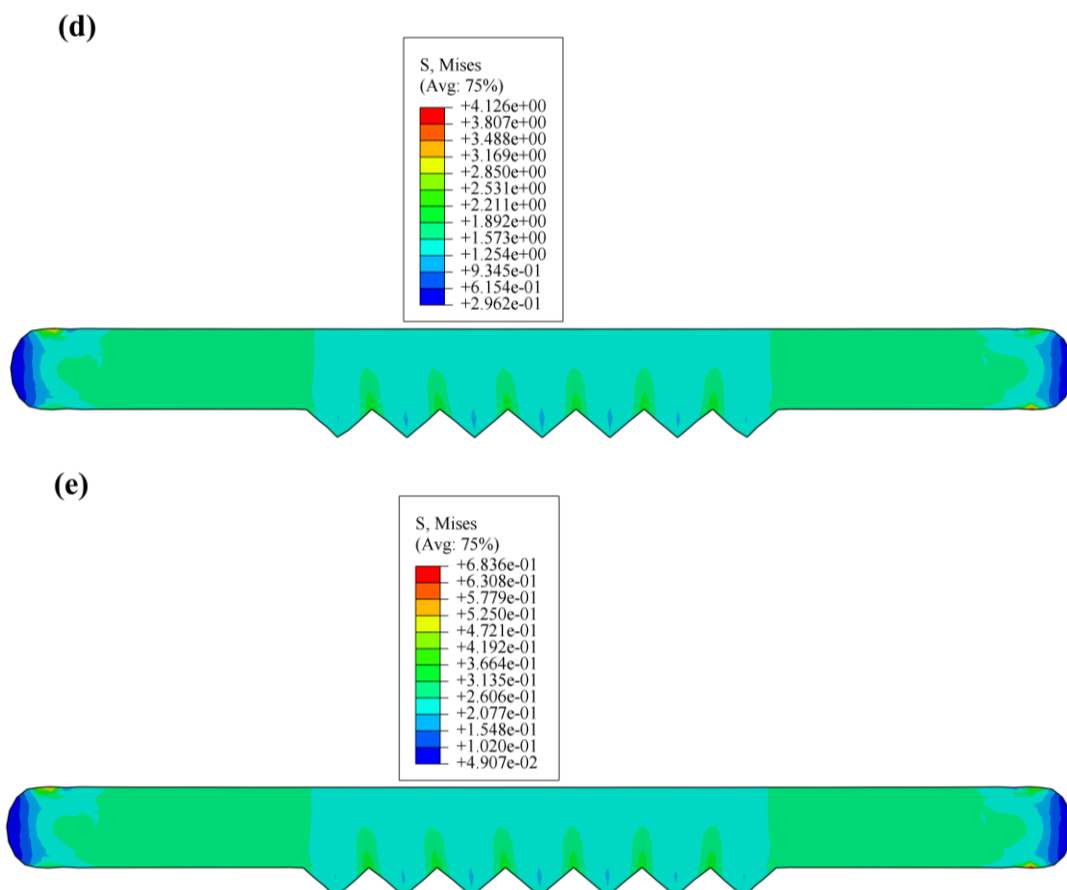


图 3-8 不同模压温度下应力对比图 (a)540°C; (b)560°C; (c)580°C; (d)600°C; (e)620°C

图 3-8 为微槽在不同温度下的应力分布。温度处于 540~560°C 时，应力集中在材料往外延伸的区域。而在 570~590°C 的温度范围内，应力主要集中在于微槽与模具之间的受压区域。

在较低温度范围下，应力主要聚集在未软化的区域。而在超过 570°C 的较高温度范围内，材料整体软化程度提高，导致应力主要集中在中间的受压区域。因此，为符合实际生产需求，建议选择模压温度在 570°C 以上。这样可以使得应力主要集中在微槽与模具中间的受压区域，减少其他区域的应力聚集，有助于降低破裂风险并提高微槽的填充率。

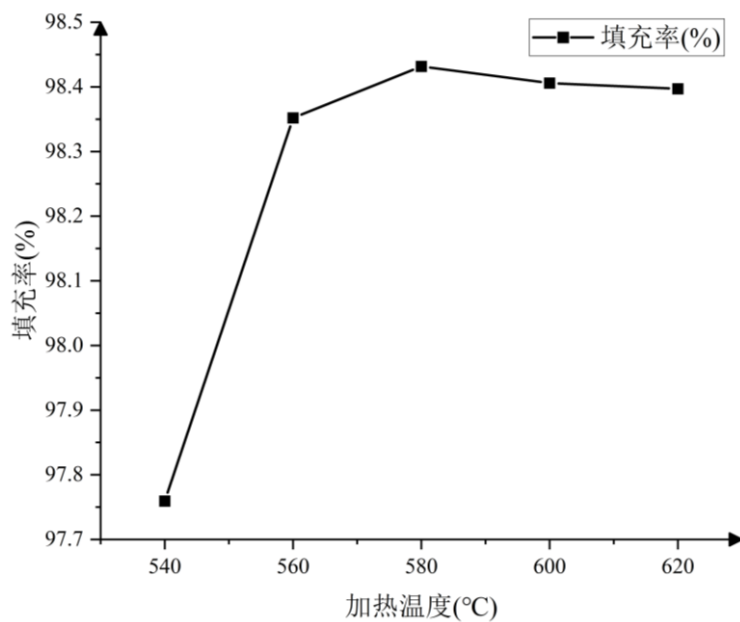


图 3-9 不同模压温度下填充率

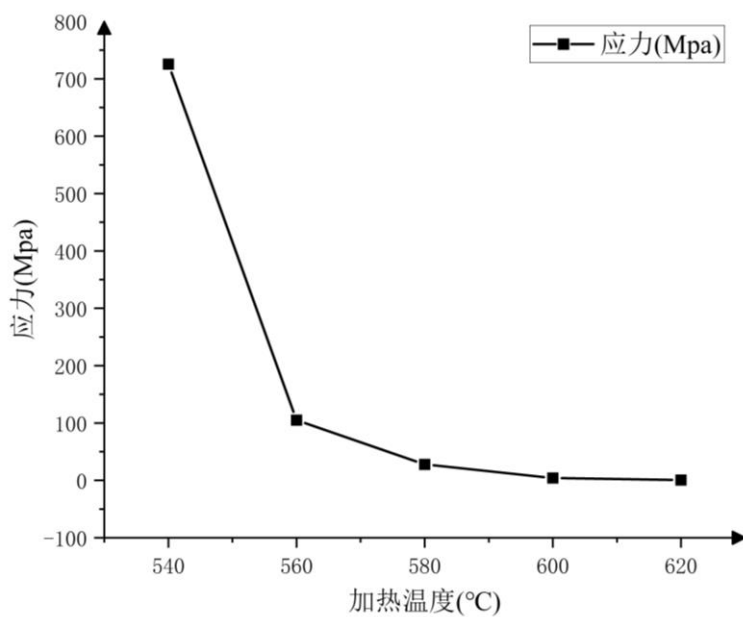


图 3-10 不同模压温度下应力

图 3-9 与图 3-10 分别为不同模压温度下填充率及残余应力变化。温度在 540°C~590°C 时，残余应力随着温度上升而快速下降；在 580°C~620°C 时，随着温度上升而残余应力下降趋势减缓。同时，随着温度的逐渐升高，玻璃的填充率出现下降趋势。这是由于温度逐渐过高，超出了材料规定的工作范围，这将会导致材料的性质出现变化，不能满足实际成型需要。因此，适当提高温度使玻璃更加软化提高成型质量是可行的，但是不能超出玻璃的工作范围。

比较残余应力和填充率曲线的变化可以发现,在较低的温度下,玻璃微槽的残余应力过大,存在破裂的风险。通过提高模压温度,可以增加材料的流动性和减小黏度,从而促进玻璃在微槽内的填充行为。这样可以降低残余应力的生成,并减少破裂风险。此外,提高模压温度还可以改善材料与模具表面之间的接触情况。温度的增加可以减小接触界面的摩擦阻力,使得玻璃材料更容易在微槽内流动,从而实现更好的填充效果。

然而,一旦温度超过 590°C ,提高温度对填充率的影响并不明显。对于模压工艺来说,温度的控制非常重要。一方面,过高的温度会导致玻璃熔融与模具表面产生粘连。这会使得模具在模压过程中很难与玻璃分离,产生粘连现象可能导致模具损坏,并需要进行清洁、修复或更换,增加生产成本和停工时间。另一方面,过高的温度需要更长的加热保温时间和冷却时间来达到所需的工艺条件。加热保温时间延长会导致能耗增加,而冷却时间的延长则会降低生产效率。通过优化温度参数,可以实现更高效、更稳定的模压成型过程,从而提高生产效率和产品质量。综合应力和填充率,本研究选择 590°C 作为模压温度。

3.3.2 摩擦系数对玻璃微结构成型的影响规律

玻璃模压成型仿真涉及到高温玻璃材料的非线性大变形问题,在有限元求解计算中,常常面临各种非线性问题:

材料非线性: 材料的力学性质在应力或应变较大时可能出现非线性行为,例如弹塑性行为、本构关系的非线性、材料损伤和断裂等。这些非线性行为需要在有限元分析中考虑,通常通过使用非线性材料模型来描述。

几何非线性: 当结构变形较大时,几何非线性会变得重要。这包括大位移、大变形和接触状态等情况。在几何非线性问题中,刚体运动、接触面变形等因素都需要考虑。

边界条件非线性: 在某些情况下,边界条件可能随着结构的变形而发生变化,例如结构接触、边界约束随时间变化等。这会导致非线性方程组的求解。

非线性方程组: 在有限元分析中,通常需求解非线性方程组。这些方程组来源于材料和几何非线性,以及约束条件等。非线性方程组的求解可能涉及迭代方法,例如牛顿-拉夫逊方法或弦截法等。

多物理场耦合: 在某些问题中,不同物理场之间可能存在耦合,如结构与热

场、电磁场、流体场等的耦合。这种耦合通常引入了非线性项，并且需要在有限元求解计算中考虑。接触问题是一种高度非线性行为，接触面的变形、相互接触区域的接触状态的变化等因素会导致计算过程中的非线性方程组的解的收敛困难。

在精密模压成型过程中，模具和工件表面之间的摩擦是一个关键因素。摩擦力的大小会影响材料在受压变形时的状态，对成型尺寸和形状产生影响。具体地说，摩擦力会导致额外的应力集中和变形尺寸的偏差，这会使元件成型所需能耗增加、成型周期延长，对制造成本和批量生产造成不利影响。如果摩擦系数较高，较大的摩擦力会对玻璃材料的流动产生较大的阻碍。这可能导致材料在流动过程中更难通过模具界面，使得成型过程中形状变得更加复杂。相应地，部分玻璃材料可能会在流动过程中聚集在一些区域，产生应力集中和形状非均匀等问题。相反，如果摩擦系数较低，摩擦力相对较小，玻璃材料的流动在模具界面上受到较小的阻碍。这可以使玻璃材料更容易通过模具界面并均匀地分布在整個成型区域，从而实现更加均匀和一致的成型形状。因此，通过调整摩擦系数可以影响玻璃材料在成型过程中的流动和形状变化。选择适合的模具材料、优化表面涂层或调整成型条件等措施，以降低摩擦系数，是实现更好成型效果和减小形状差异的一种方法。

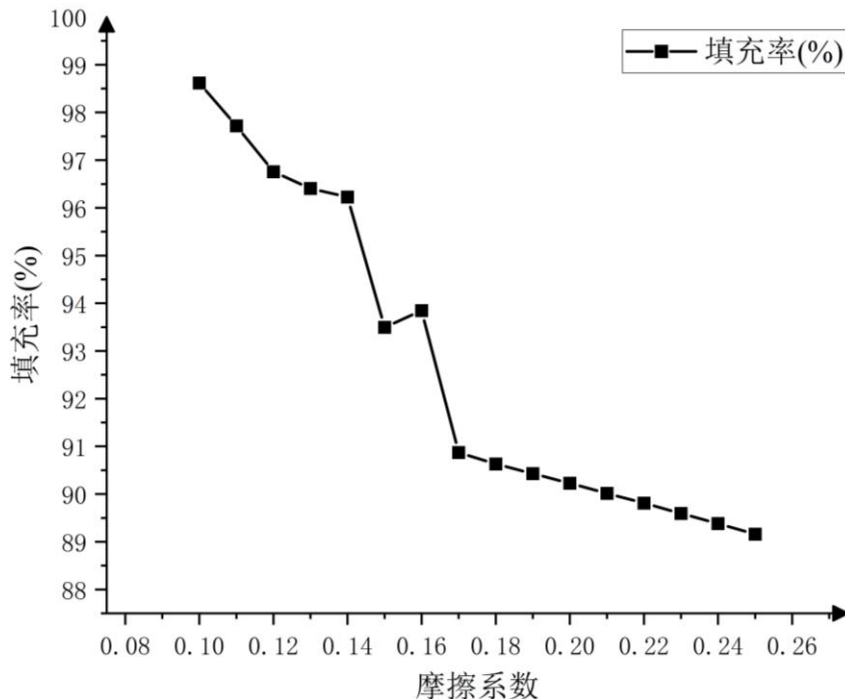
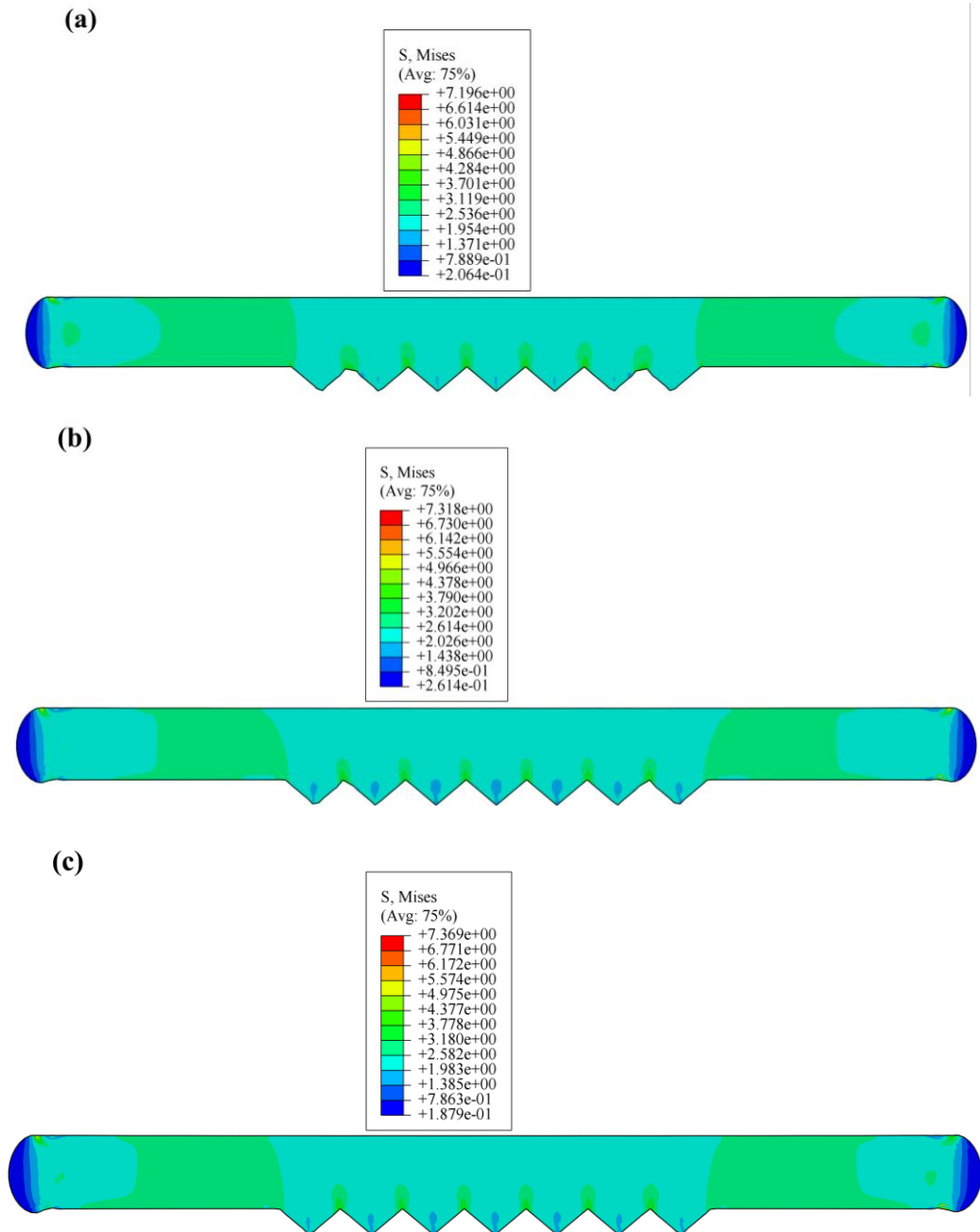


图 3-11 不同摩擦系数下玻璃填充率

图 3-11 为不同摩擦系数下玻璃的填充率变化，从图中可以看出，随着摩擦系数的增大，填充率逐渐降低。判断是模具与玻璃之间逐渐增加的摩擦系数阻碍了黏弹态玻璃的流动。在材料的变形流动过程中，会往阻力更小、能耗更低的方向进行。摩擦系数是影响材料流动的重要原因，尤其在高温下黏弹态的玻璃材料中。由于摩擦系数的存在，材料流动沿着模具界面时会受到不同的阻碍。根据摩擦力的大小以及其在材料流动方向上的作用，玻璃材料的流动模式和最终成型形状可能会出现差异。



(d)

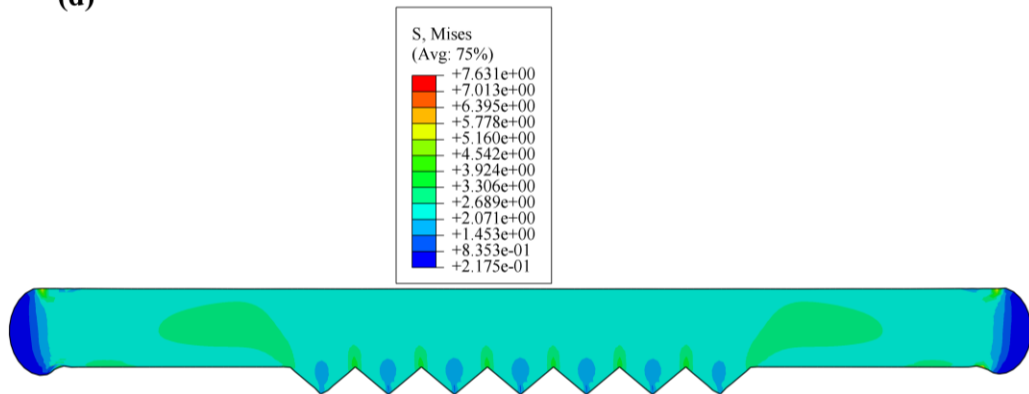


图 3-12 不同摩擦系数下玻璃应力对比 (a)0.14; (b)0.16; (c)0.18; (d)0.25

图 3-12 为不同摩擦系数下玻璃热压过程后应力分布图，其中图 3-12(a)摩擦系数为 0.14，图 3-12(b)的摩擦系数为 0.16，图 3-12(c)摩擦系数为 0.18，图 3-12(d)摩擦系数为 0.25。从图中可以观察到，上模具-玻璃摩擦系数的增加会导致玻璃在与模具接触面逐渐堆积，并增加了应力集中区域。这是由于较高的表面摩擦系数抑制了熔融材料向外侧的延伸，使玻璃在靠近上下模具端面的区域堆积并受到较大的应力。因此，模具与玻璃材料表面的摩擦系数越小，其成型效果越好。

3.3.3 模压时间对玻璃微结构成型的影响规律

模压时间是热压过程中的一个关键参数，对于微槽的残余应力和填充率会产生影响。较短的模压时间可能导致较高的残余应力，因为在短时间内施加高温和高压载荷，材料可能没有足够的时间来形变和释放应力。较长的模压时间可以使材料有更充分的时间进行调整和释放应力，从而减小残余应力的产生。模压时间的长度也会影响微槽的填充率。较短的模压时间可能导致材料填充不完全，形成不完整的结构。较长的模压时间可以增加材料的流动性和填充能力，有助于获得更完整、更精确的微槽结构。

为了确定合适的模压时间，本文基于有限元模型探究模压时间分别在 200s, 250s, 300s, 350s, 400s, 450s, 500s, 550s, 600s, 700s, 800s, 900s, 1000s 对微槽结构的残余应力影响。

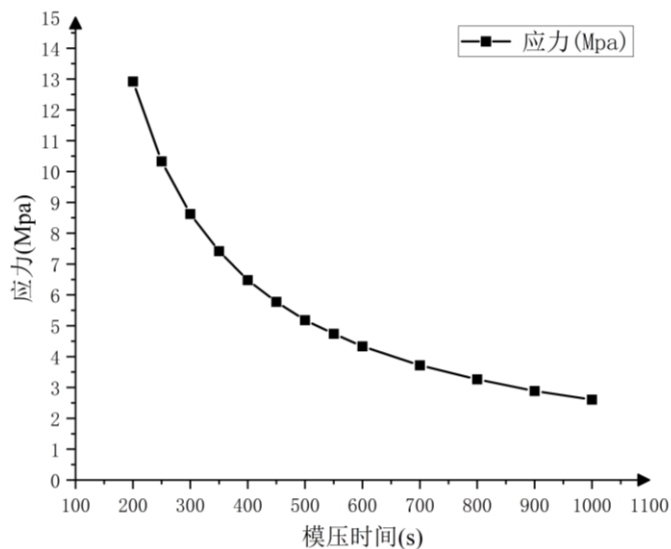


图 3-13 不同模压时间下玻璃最大残余应力

图 3-13 为不同模压时间下最大残余应力曲线。从图 3-13 中可以看出，模压时间在 200s~450s 时间段内，随着模压时间的延长，残余应力迅速降低；而模压时间在 450s~1000s 范围时，最大残余应力减小速率降低。图 3-13 说明适当的延长模压时间有助于减小玻璃的内部残余应力，使其在冷却过程中减小热胀冷缩带来的应力变形，得到一个更好的成型效果。但因为材料的应力松弛滞后，模压时间延长到一定程度，由于分子之间的相互作用和限制，玻璃内部不能充分松弛，从宏观角度看来就会表现为残余应力减小速率放缓。从填充率的变化情况分析，残余应力的积累会使面型精度降低、成品成型质量不佳，甚至会导致成型件的碎裂。但在实际生产中需要考虑到生产效率的问题，不能无限延长模压时间。因此，综合时间效率、填充率以及应力大小三个因素，本研究选取 450s 作为模压时间。

3.4 本章小结

本章在现有玻璃模压工艺的基础上，在 Abaqus 软件中对模具材料以及玻璃材料建立了有限元模型，依照实际生产中的约束以及边界条件进行模型的前处理，对现有工艺流程进行了仿真模拟。对热压过程中包括模压温度、摩擦系数以及模压速度在内的多个工艺参数进行了研究，探明它们对最终成型效果的影响。热压成型过程的有限元仿真可以用于预测热压成型过程中的温度分布，这有助于确定加热和冷却措施，并优化加热参数以实现所需的温度分布，准确的温度分布预测可以确保产品性能的一致性和稳定性；可以提供在热压成型过程中的应力和应变分布，这有助于了解材料在成型过程中的变形行为，评估材料的可行性和确定适

当的工艺参数；可以模拟热压成型过程中材料的热历史。这包括热量传递、温度升降和冷却速率等因素，通过分析热历史，可以优化加热和冷却过程，改善产品质量和性能；可以评估材料在热压成型中的刚度和变形情况，这有助于预测和控制产品的形状保持和尺寸一致性，以满足设计要求；可以用于优化热压成型的工艺参数，如温度、压力和时间等。通过模拟不同的工艺参数组合，可以评估和比较不同方案的效果，以获得最佳的成型结果。

第 4 章 光学玻璃微结构超声振动辅助成型研究

超声辅助成型技术始于上世纪 50 年代^[91]，当时两位奥地利学者在实验中发现，施加高频振动材料的变形应力会显著降低。超声辅助成型现在已经广泛应用于多个领域，包括金属、陶瓷、玻璃、聚合物、复合焊接、减材制造和塑性成型等领域。这项技术利用超声波的能量和振动特性，在材料的成型和加工过程中提供了许多便利。

由于超声辅助成型技术应用范围逐渐扩大，一些学者将其引入到精密模压成型领域中来。Tsai 和 Hung 开发了一种用于超声波振动成型玻璃的特殊设备。他们使用该设备对 K-PSK100 玻璃的微凹槽和菲涅尔透镜进行了热压试验。实验结果表明，超声振动在制造高精度微结构方面具有巨大潜力^[92,93]。随后，Nguyen 等人研究了基于超声热效应的超声辅助热压工艺。结果表明，超声振动会提高 K-PSK100 玻璃的温度，表现出明显的热效应，其最终成品的成型压力显著降低，玻璃微结构的成型精度显著提高^[94]。

另一方面，周天丰和解加庆基于超声波机械效应研究了超声波辅助玻璃成型工艺(UGMP)的机理。研究结果表明，超声可以缩短树脂与模具的接触时间，使已形成的凹槽内应力均匀分布^[95]，改善成型质量。此外，还测试了 UGMP 中玻璃(K-PG375)填料的摩擦机理，并提出了一些减少摩擦和改善流动性的方法。研究结果还证实了超声振动的机械效应对玻璃成型性的影响，并简要介绍了超声振动的热效应。目前，利用超声波辅助制备微结构是一种非常普遍的方法，但在热压领域，主要采用树脂等低熔点材料制备微结构，对玻璃材料的研究并不多。

4.1 基于正交实验法的无超声最佳工艺参数组合

玻璃在热压过程中会受到如温度、压力、位移等多种因素的影响。为了找到最佳的工艺参数组合，本研究决定采用正交实验法进行模拟研究。正交实验法是一种有效的实验设计方法，可以在较少的试验次数内系统地研究多个因素对结果的影响。它通过选择一组正交的试验方案，使得各个因素之间相互独立，从而能够避免因素的相互干扰。

在正交实验中，选择了加热温度(HT)、下压位移(PD)、热压时间(HPT)、压

缩时间(CT)、一次冷却时间(PCT)、二次冷却时间(SCT)和下模具表面摩擦系数(LMFC)等七个参数进行正交实验。为了显示参数之间的工艺敏感性,选择了三个不同水平的七个工艺参数来设计正交实验。表 4-1 是正交实验的水平因子表。

表 4-1 无超声情况下正交实验三水平七因素表

因素	加热 温度 (°C)	位移 (mm)	热 压时 间 (s)	保持 时间 (s)	一次冷 却时间 (s)	二次冷 却时间 (s)	下模具表 面摩擦系数
水平 1	580	0.008	350	200	200	80	0.15
水平 2	590	0.01	400	250	250	90	0.17
水平 3	600	0.012	450	300	300	100	0.19

在本研究中,应力和填充率是衡量产品质量的重要指标。表 4-2 是正交实验结果中凹槽中玻璃位移的范围结果分析,其中 K_1 、 K_2 和 K_3 各因素得到的实验指标之和, $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 和 $\bar{K}_3$ 是它们的平均值。

对比表 4-2 中的数据,HT、PD、HPT、CT、PCT、SCT 和 LMFC 的最佳水平分别为 600°C、0.012mm、400s、250s、300s、100s 和 0.17。比较范围的大小,可以发现 $R_{PD} > R_{HT} > R_{LMFC} > R_{HPT} > R_{PCT} > R_{SCT} > R_{CT}$, 即下压位移对玻璃成型效果的影响最大,其次是加热温度。但从应力的极差分析,HT、PD、HPT、CT、PCT、SCT 和 LMFC 的最佳水平分别为 600°C、0.008mm、450s、300s、250s、90s 和 0.15。HT 更为重要。最后,确定最佳组合分别为 600°C、0.012mm、450s、250s、300s、100s 和 0.15。为了更好地体现这种成型效果,本研究采用填充率作为衡量标准。填充率用下模具微凹槽中玻璃所占体积(V_g)与模具微凹槽体积(V_m)之比来表示,即:

$$Filling\ rate = \frac{V_g}{V_m} \times 100\% \quad (4-1)$$

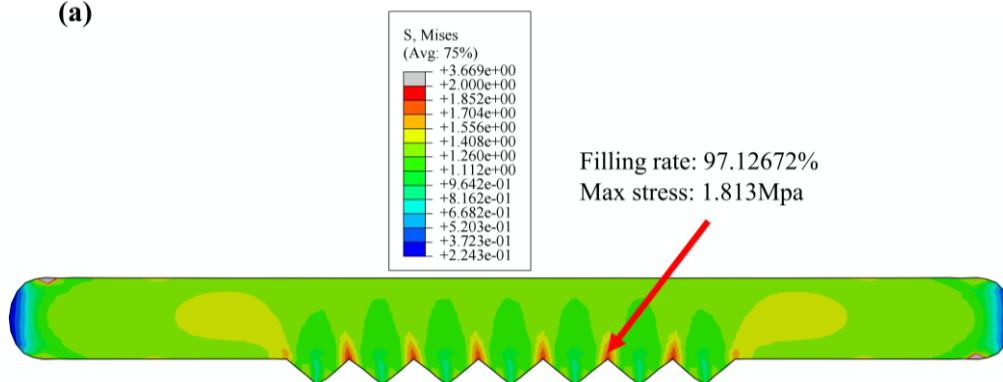
图 4-1(a)为最大位移应力云图,图 4-1(b)为最小位移应力云图,图 4-1(c)为最佳组合应力云图。图 4-2 是不同参数组合下最终成型效果的剖面对比。基于应力的最佳组合产生了 0.766 MPa 的最低应力,但其填充率仅为 78.88615%。最终选定的参数组合实现了 97.11919%的填充率,也与最佳填充率相差无几,且形态轮

廓基本重合。但应力仅为 1.648MPa，比最佳填充率结果低 9.1%。

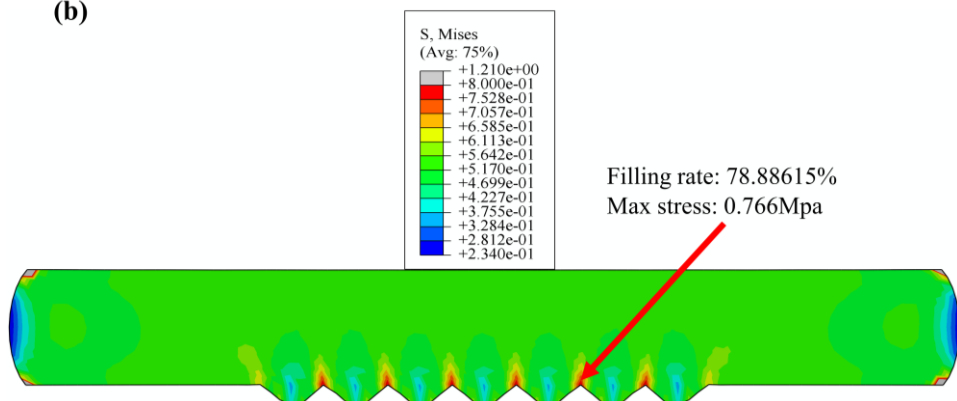
表 4-2 超声条件下正交实验均差分析

因素	加热温度 (°C)	位移 (mm)	热压时间 (s)	保持时间 (s)	一次冷却 时间 (s)	二次冷却 时间 (s)	下模具表面摩擦系数
K_1	10549.5973	9471.731	10553.4702	10553.0023	10552.4242	10552.5476	10551.0993
K_2	10553.9958	10536.054	10554.4337	10554.2177	10553.1137	10553.0033	10555.6882
K_3	10556.2817	11652.0898	10551.9709	10552.6593	10554.2784	10554.3284	10553.0873
$\bar{K}_1$	1758.266	1578.622	1758.912	1758.834	1758.748	1758.758	1758.517
$\bar{K}_2$	1759	1756.009	1759.072	1759.036	1758.852	1758.834	1759.281
$\bar{K}_3$	1759.38	1942.016	1758.662	1758.777	1759.046	1759.055	1758.848
均差	1.114	363.394	0.41	0.259	0.298	0.297	0.764
R							
敏感性	加载位移 > 加热温度 > 下模具摩擦系数 > 热压时间 > 一次冷却时间 > 二次冷却时间 > 加载时间						

(a)



(b)



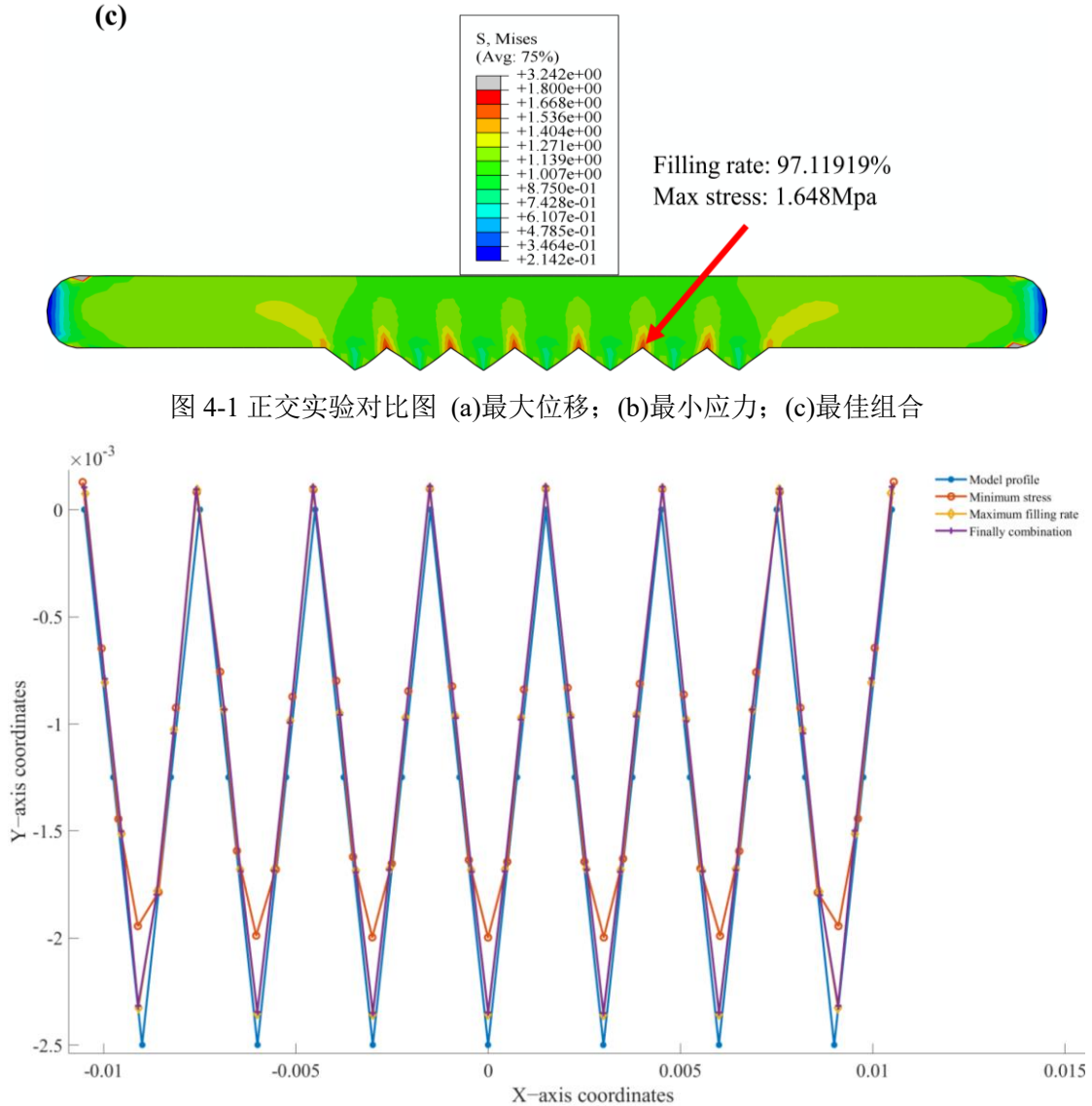


图 4-2 不同参数组合的成型效果

4.2 超声辅助条件下对光学微结构热压成型质量的影响

根据正交实验的结果，在有限元软件中该实验的最优组合进行仿真分析。为了更仔细地探究超声波振动玻璃产生的应力，本次仿真只选取了玻璃在热压步骤中的应力线图。图 7 是成型效果的应力分布对比图，图 4-3(a)是未进行超声辅助的热压玻璃的应力云图，其最大应力为 1.648Mpa。图 4-3(b)是施加超声振动后玻璃的应力分布云图，其最大应力为 1.04e-4Mpa。

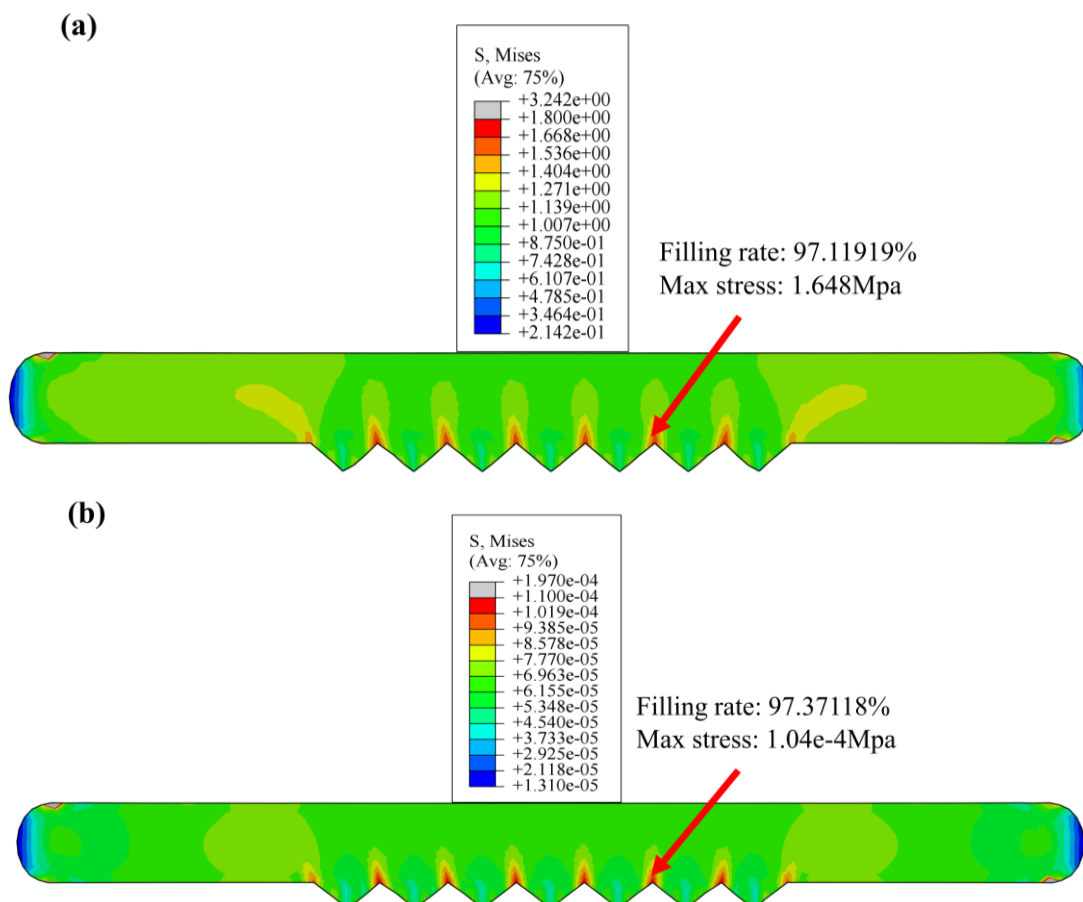


图 4-3 玻璃应力云图 (a)无超声波玻璃的热压应力云图；(b)有超声波玻璃的热压应力云图

在本实验中，超声波频率、振幅和加载时间分别为 30000Hz、0.001mm 和 400s。为了更接近实际情况，本次模拟将玻璃预制件和上下模具都设置为可变形体。从图 4-3(a)和(b)中不难看出，在超声波振动的帮助下，不仅玻璃预制件的应力分布得到了改善，而且玻璃的变形应力也大大降低。在超声波加载后应力大大降低的同时，玻璃预制件与模具的连接也更加紧密。

为了更直观地了解超声波振动对玻璃成型的优化作用，图 4-4 是加载超声波后得到的玻璃最大应力图。可以看出，与借助超声波的最佳参数组合相比，玻璃的应力大大降低。

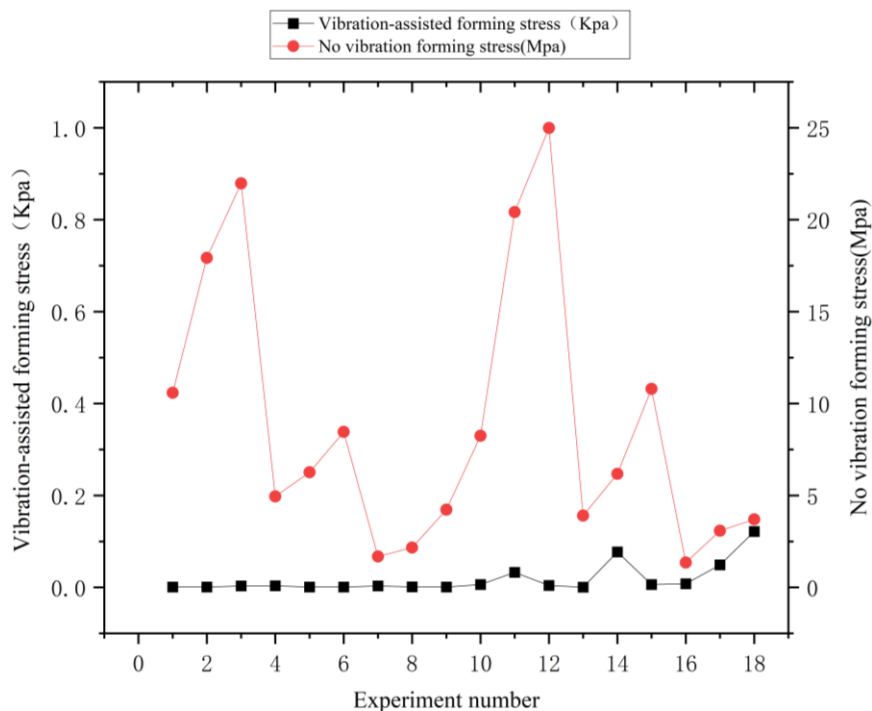


图 4-4 有超声和无超声情况下玻璃成型最大应力对比

4.3 超声辅助成型参数对热压成型质量的影响规律

为了进一步观察超声波辅助在玻璃热压过程中的效果, 仿真过程中最终选取超声频率(UF)、振幅(A)和加载时间(LT)三个参数设计了一个正交实验, 并根据正交实验进行了仿真。表 4-3 是该正交实验的水平因子表。

表 4-3 超声辅助下三水平三因素正交表

因素水平	频率(Hz)	振幅(μm)	加载时间(s)
Level 1	20000	1	200
Level 2	25000	2	300
Level 3	30000	5	400

表 4-4 列出了超声频率、振幅和加载时间三个参数的模拟结果。其中, K_1 、 K_2 、 K_3 和 K_4 是表 4-3 中各因素得到的实验指标之和, $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$ 、 $\bar{K}_3$ 和 $\bar{K}_4$ 为它们的平均值。从表 4-4 中的数据可以看出, 有 $R_{LT} > R_{UF} > R_A$ 。也就是说, 超声加载时间对应力的影响最大。

表 4-4 超声正交试验均差分析

因素	频率(Hz)	振幅(nm)	加载时间(s)
K_1	893.4145	893.8931	1674.317
K_2	893.8633	893.4341	984.684
K_3	893.9441	893.7873	577.08
K_4	893.6181	893.7255	338.759
$\bar{K}_1$	223.354	223.473	418.579
$\bar{K}_2$	223.466	223.359	246.171
$\bar{K}_3$	223.486	223.447	144.27
$\bar{K}_4$	223.405	223.431	84.69
均差 R	0.132	0.114	333.889
敏感性	加载时间 > 频率 > 振幅		

4.4 超声辅助其它典型光学微结构成型仿真分析

根据不同的应用需求，需要设计出具有特定尺寸和形状的微槽，以实现所需的光学功能。在实际应用中，常见的微槽结构包括 V 型槽、矩形槽、梯形槽和半圆形槽等，这些微槽结构在不同的应用场景中具有各自的特点和优势。为了研究不同形状的微槽结构对成型效果的影响以及验证超声振动辅助手段的有效性，本研究中建立了不同形状的微槽阵列模型，其微槽结构尺寸如图 4-5 所示。

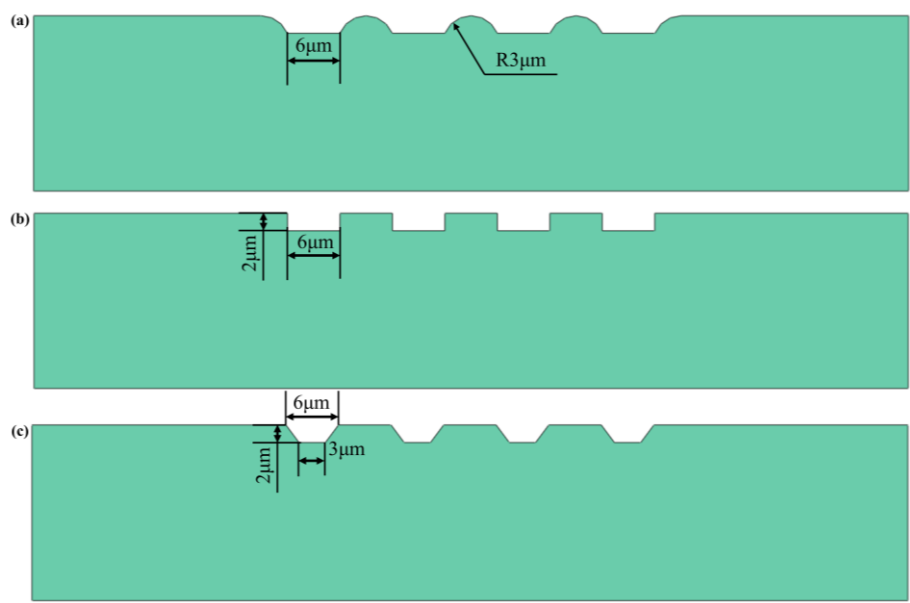


图 4-5 不同微槽形状的下模具模型 (a)半圆形；(b)矩形；(c)梯形

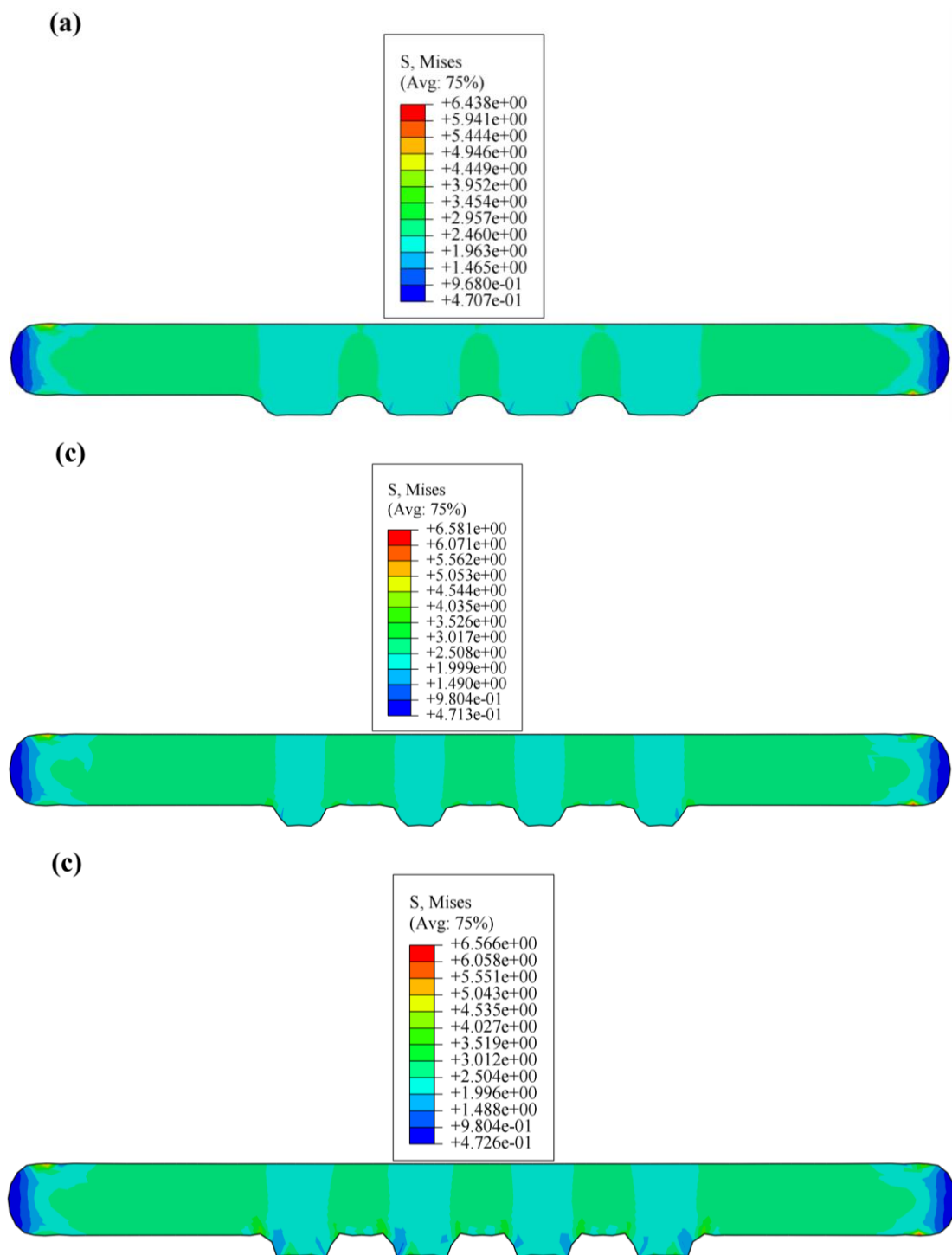


图 4-6 不同微结构应力分布 (a)半圆形；(b)矩形；(c)梯形

图 4-6 为不同光学微结构的热压成型效果，从该图中可以看出所有的微结构应力都集中在材料与模具的成型区域，而且可以观察到半圆形微槽结构中其应力分布更加均匀，而矩形与梯形成型区域的应力更加集中。推测是由于材料与模具接触部位之间过渡不够平滑，这种不平滑的过渡会导致应力无法均匀分布，而集中在某些局部区域，从而增加了脱模时玻璃微结构产生裂纹的风险。

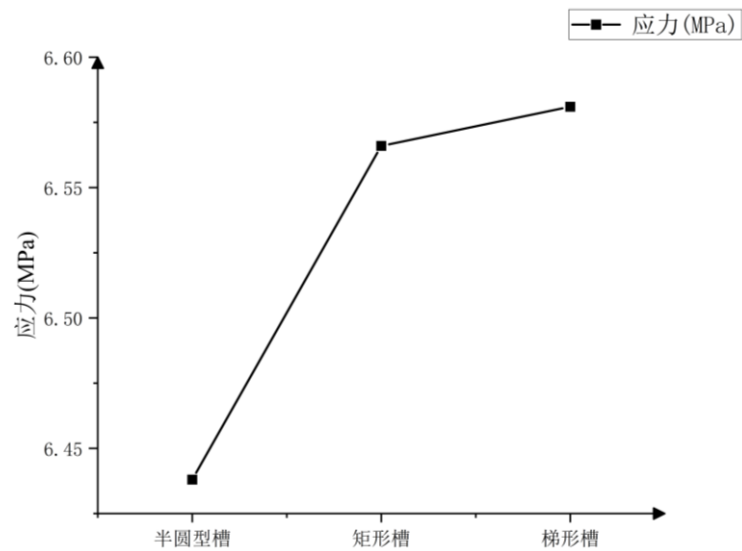
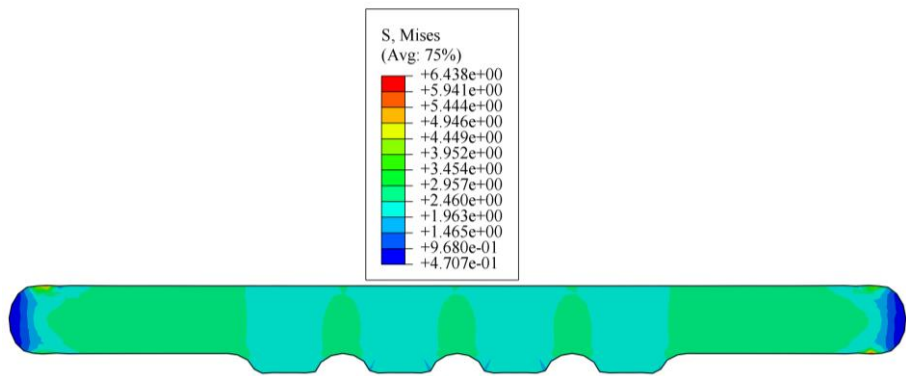


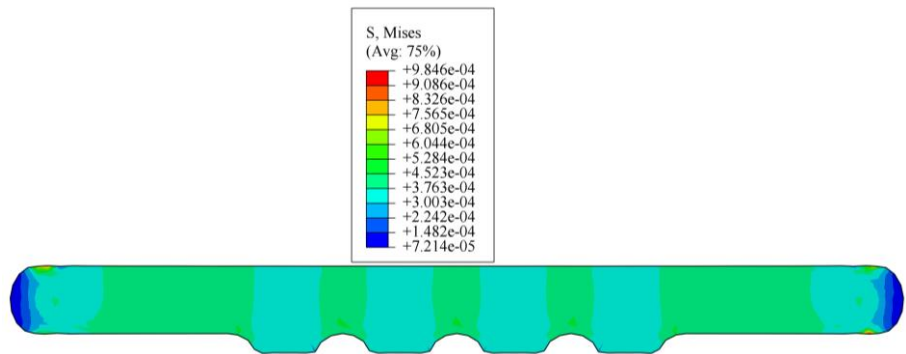
图 4-7 不同光学微结构应力大小对比图

图 4-7 为不同光学微结构应力大小的对比，可以看到半圆形槽、矩形槽、梯形槽的最大应力逐渐增大。猜想玻璃的内应力与槽壁与水平面夹角以及微槽的过渡区域有关，其内部空间越小，被挤压进入的材料内应力越大；而过于尖锐的过渡区域会使应力更加集中，适当设计微槽的倾斜程度和过渡区域，可以有效控制玻璃的内部残余应力。

(a)



(b)



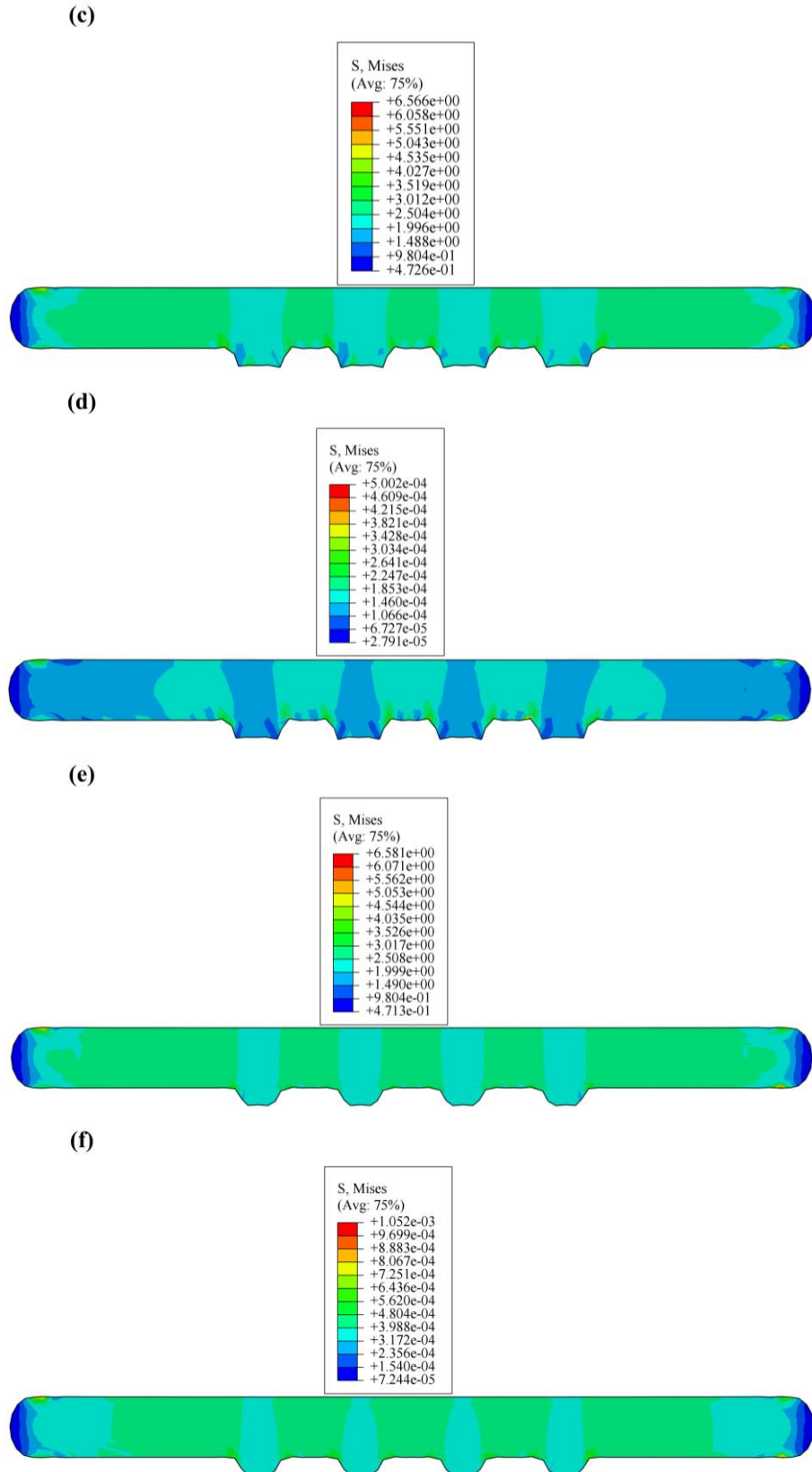


图 4-8 不同光学微结构有无超声辅助应力大小对比图 (a)半圆槽无超声；(b)半圆槽有超声；(c)梯形槽无超声；(d)梯形槽有超声；(e)矩形槽无超声；(f)矩形槽有超声

上图 4-8 分别为半圆形、矩形、梯形微槽结构在加载超声前后的应力分布云图。图 4-8 (a)、(b)分别为半圆槽有无加载超声后的结果，图 4-8 (c)、(d)分别为梯形槽有无加载超声后的结果，图 4-8 (e)、(f)分别为矩形槽有无加载超声后的结果。从图中可以看出，加载了超声手段之后，材料在热压阶段的应力分布更加均匀，并且其应力大幅下降，这将会大大减小冷却阶段因热胀冷缩带来的应变，其最终成品的质量与数量将会得到提高。

4.5 本章小结

本章在建立的光学微结构精密成型有限元模型的基础上，分别研究了在无超声振动和有超声振动的压制条件下微结构元件的成型效果。通过超声振动辅助成型与传统成型方式的对比，结果表明光学微结构元件的最终成型质量得到了显著提高。此外，在超声振动的辅助下，玻璃的应力分布也得到了明显改善，玻璃与模具表面之间的附着力更好。最后，根据调研的实际工业应用情况设计了不同形状(V 型槽、矩形槽、梯形槽等)探究了微槽形状对于成型效果的影响，验证了超声辅助手段对于成型效果的优化作用。

第5章 基于 GA-BP 算法优化的光学玻璃微结构热压成型工艺参数研究

由于神经网络具有强大的非线性建模和学习能力,能够处理复杂的数据和任务,目前已经在各个领域引起了广泛的关注和应用,如机器视觉、医疗影像、工艺参数优化等。Parviz Asadi 等人将这种技术应用于优化焊接工艺参数^[96,97],而在注塑工艺参数的优化方面神经网络技术的应用更多。近年来,一些团队也将这种技术引入,用于 PGM 的工艺参数优化研究^[98,99]。

然而,目前大多数学者的研究都集中在一个或几个参数的影响上,对更多参数综合影响的研究还不够全面。工艺参数对其最终成品的影响是一个复杂的非线性过程,受到多种因素的影响。本研究对玻璃精密成型进行了有限元分析。在有限元分析的基础上获得了所需的数据。并在利用遗传算法(GA)对反向传播(BP)神经网络进行优化。最后,对精密玻璃成型的多个工艺参数进行了多目标优化。结果表明,玻璃的材料填充率提高,而同时有效降低了成型应力。

5.1 神经网络结构

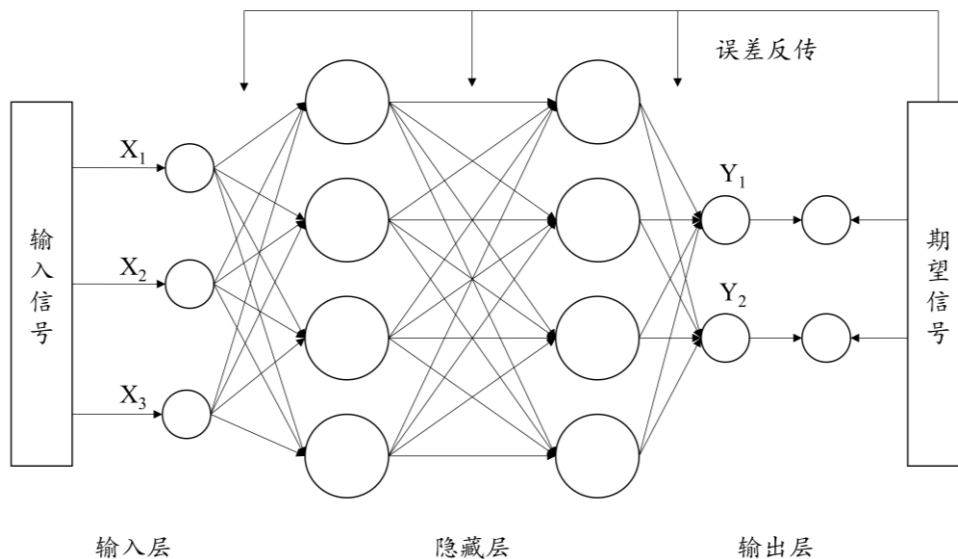


图 5-1 BP 神经网络结构

BP 神经网络一般由输入层、隐藏层(可以有多个隐藏层)和输出层组成。每个神经元与下一层的所有神经元相连,而神经元之间的连接权重决定了它们之间的影响力。BP 神经网络通过反向传播算法来训练,通过不断调整连接权重,以最

小化输出误差,从而实现模型的拟合和学习,在工程中被广泛用于处理非线性复杂系统^[100]。BP 神经网络有信号前向传播和误差反向传播两个过程。在前向传播过程中,输入信号通过神经网络的各个层,层层传递,并经过激活函数的作用,最终到达输出层。每个神经元都与上一层神经元相连,对输入信号加权求和。这个加权和作为输入,经过激活函数处理后,生成输出。经过逐层传播,信号最终到达输出层,输出预测结果。

然后,在误差反向传播中,输出误差会从输出层开始反向传播,逐层传播到每个神经元,以更新神经网络的权重和偏置。这样,每个神经元都能获得关于其输出误差的信息。

BP 神经网络利用误差反向传播算法来更新网络的权重和偏置,使得网络的输出误差沿着梯度方向逐步减小。梯度下降法是 BP 神经网络中常用的算法。通过迭代调整权重的过程,网络逐渐减小误差,提高对输入数据的拟合能力。经过多次学习和训练,当网络收敛并停止训练时,权重和阈值最终确定,模型如图 4 所示。数学描述表达如下:

$$y_i = f(\sum w_{ij}x_j - \theta_i) \quad (5-1)$$

$$O_i = f(\sum T_{ii}y_i - \theta_i) \quad (5-2)$$

其中, x_j 是输入层输入, w_{ij} 是输入层和隐含层权重, θ_i 是隐含层阈值, y_i 是隐含层输出; T_{ii} 是隐含层和输出层权重, θ_i 是输出层阈值, O_i 是输出层输出。

其中, 隐含层的激活函数为 “Log-Sigmoid” :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (5-3)$$

其中, 输出层的激活函数为 “Pureline ” :

$$f(x) = kx \quad (5-4)$$

BP 神经网络是应用面最广的神经网络之一,有出色的拟合、学习、预测能力。然而,BP 神经网络确实存在一些问题,如局部最小值和过拟合等。此外,其训练和预测能力与训练样本选择的好坏直接相关,这就要求我们对 BP 神经网络进行优化。

5.2 遗传算法理论

遗传算法的全局优化能力很好,因此可以用来提高 BP 神经网络的预测精度。遗传算法是一种模拟自然进化过程的优化算法,其灵感来源于生物学中的遗传和进化理论。它通过模拟生物的优胜劣汰和基因传递的过程,来优化解决问题的范围和结果。它能够在大规模解空间中搜索全局最优解、对问题没有特定的假设和要求、适用于离散和连续问题

根据"自然选择"原理,遗传算法中的种群个体通常通过染色体进行编码。根据不同的要求,可以采用不同的编码方式。选择合适的编码方式能够更好地表示问题的解空间,并便于进行选择、交叉和变异等遗传操作。编码种群根据适应度函数并通过选择、交叉和突变等遗传操作来选择个体^[101]。遗传算法是目前机械加工研究中应用最广泛的优化加工参数的搜索算法之一,适合用于多元复杂的工程优化问题的算法,不需要对目标函数、约束条件有过多的限制。

遗传算法在数据信息处理方面性能强大,该算法中反复重复交叉变异的数学表达如下:

$$m(H, t+1) \geq m(H, t)(N(H) / FAV)[1 - P_c(\delta(H) / (L - 1)) - 0(H)P_m] \quad (5-5)$$

其中, $m(H, t)$ 和 $m(H, t+1)$ 表示某一代 t 和其下一代 $(t+1)$ 的群体数量。 N 代表染色体适应度, FAV 是平均适应度, $N(H) / FAV$ 表是交叉比例, L 是染色体长度。

遗传算法有选择、交叉、变异三种操作。这三种操作是遗传算法的核心组成部分,它们通过选择、交叉和变异过程不断改进和优化种群中的个体,使其在优化目标函数中找到更好的解。这些操作的选择方式、参数设置以及适应度函数的设计都会对遗传算法的性能产生影响,因此需要根据具体问题进行调整。

在遗传算法中,适应度函数(Fitness Function)是用来评估个体在解决问题中优劣程度的函数。适应度函数基于问题的特定要求和目标,根据个体的染色体表达和对应的解,计算出一个适应度值。

适应度值反映了个体对问题的解决方案的质量或优劣程度。在遗传算法的进化过程中,适应度值起着关键的作用。适应度好的个体更有可能被选择、交叉和变异,从而将其有利的基因传递给下一代,进而改进整个种群的性能。每一代都比上一代优越,通过设置迭代次数,每一代都会产生一个新的群体循环往复,直

到满足条件为止。利用 GA 优化 BP 神经网络主要分为两大部分，具体过程如图 5-2 所示：

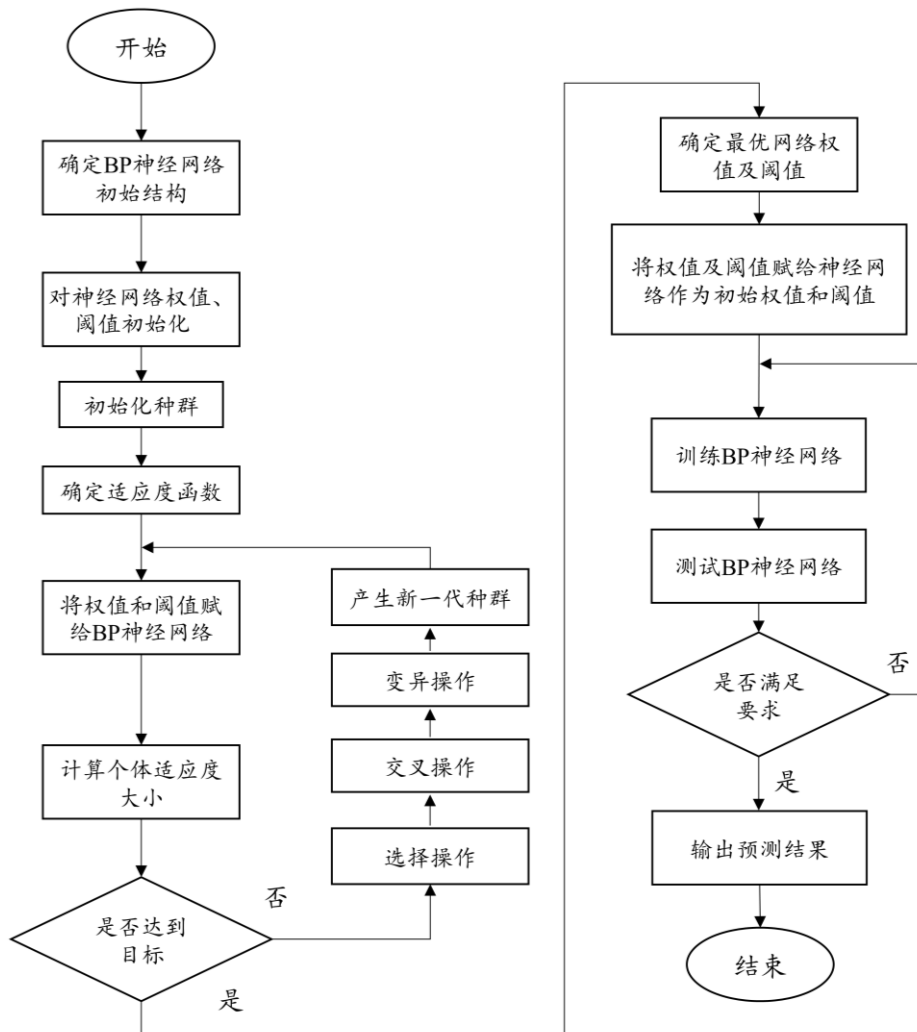


图 5-2 GA 优化 BP 神经网络流程

5.3 基于光学微结构成型工艺参数的 BP 神经网络模型构建

本研究建立了一个三层 BP 神经网络来模拟材料表面的几个参数与最终成型效果之间的关系，其中加热温度等七个工艺参数作为输入，填充率与残余应力作为输出。

本研究采用 BP 神经网络模型对选取的正交实验结果进行了分析。为了进行模型的训练和评估，本研究中将数据分为两个部分：前 20 条作为训练集，余下的作为测试集。BP 神经网络的部分参数设置如下表 5-1 所示。在建立 BP 神经网络模型后，我们将数据导入模型进行训练。BP 神经网络的训练误差达到了 $4.82e-9$ ，表明模型在训练过程中较好地拟合了数据。图 5-3 展示了 BP 神经网络的训练

适配性曲线。通过该曲线，我们可以观察到模型在训练过程中的逐步改进，逐渐提高与训练样本的拟合程度。**R 值(R-value)**是一种统计量，用于衡量两个变量之间的线性相关性的强度。本文中训练样本和测试样本的 **R 值为 0.96634**，表明两者之间具有良好的相关性。这些结果表明，所建立的 **BP 神经网络模型**在对数据进行训练后表现出良好的适配性，并且能够在一定程度上预测新的测试数据。这为进一步分析和应用提供了可靠的基础。需要注意的是，**BP 神经网络**的训练过程可能需要根据具体问题进行参数调整和优化，并且模型的性能还可以通过进一步实验和验证进行进一步提升。

表 5-1 BP 神经网络参数选取

神经网络参数名称	参数
拓扑结构	输入层，隐含层，输出层
训练方法	共轭梯度算法
训练误差	0.0000004
学习率	0.1
迭代次数	100

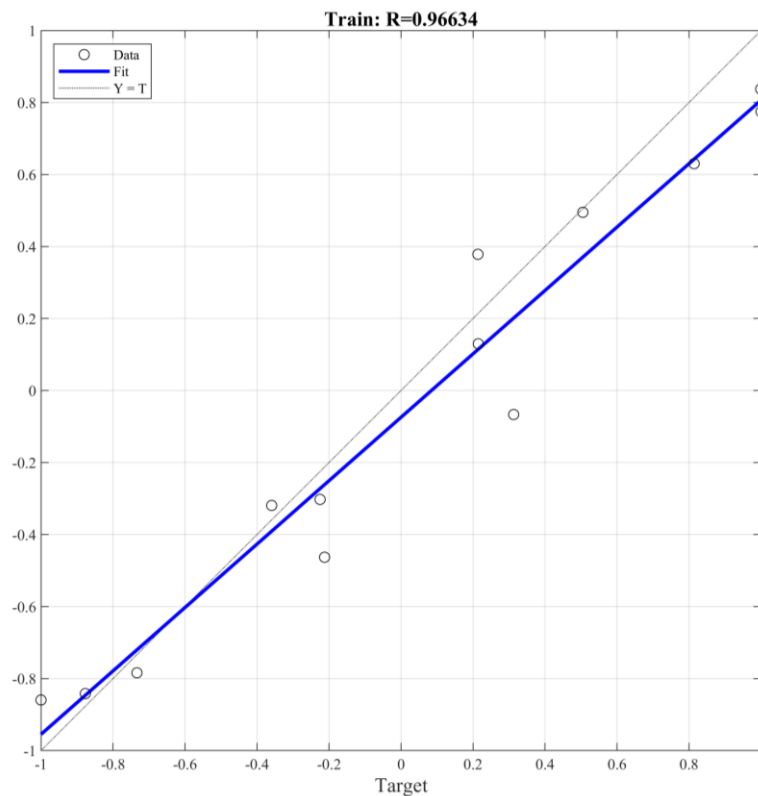
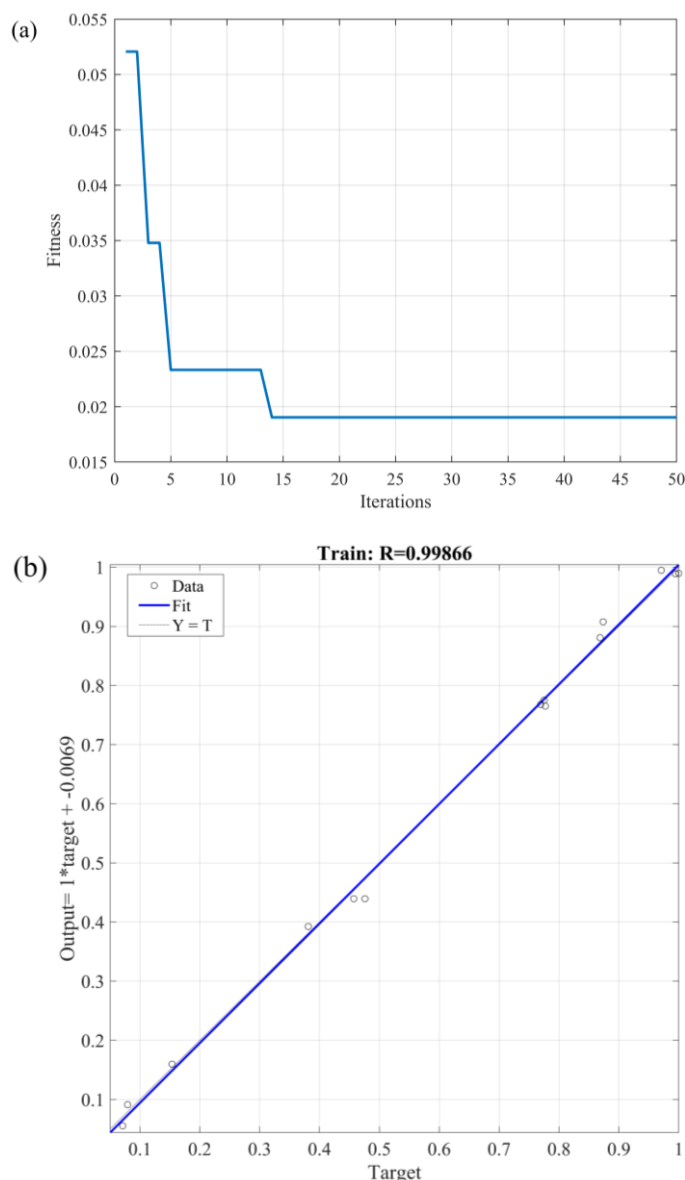


图 5-3 BP 神经网络训练适应曲线图

5.3 基于 GA-BP 算法优化的光学微结构元件工艺参数研究

在建立的 BP 神经网络上，用 Matlab 建立了 GA 优化的 BP 神经网络预测模型。GA 部分参数设置如下：最大演化数为 30，种群规模为 100。交叉概率的设置是为了找到全局解，但过高的交叉概率会搜索不必要的空间，因此在参考了一些研究后，本研究将交叉概率设置为 0.6。相比之下，变异是解决方案的局部可利用能力。个体变异取决于变异概率，设定较低的变异概率意味着每次迭代中只有少量的个体会发生基因突变，有助于保持种群的多样性，避免算法陷入局部最优。然而，较高的变异概率可能导致搜索空间中的随机探索增加，可能导致算法收敛速度较慢。本研究根据以往的研究，将变异概率设定为 0.01。经过选择、交叉和变异操作后，得到最优权重阈值并分配给 BP 神经网络进行预测。



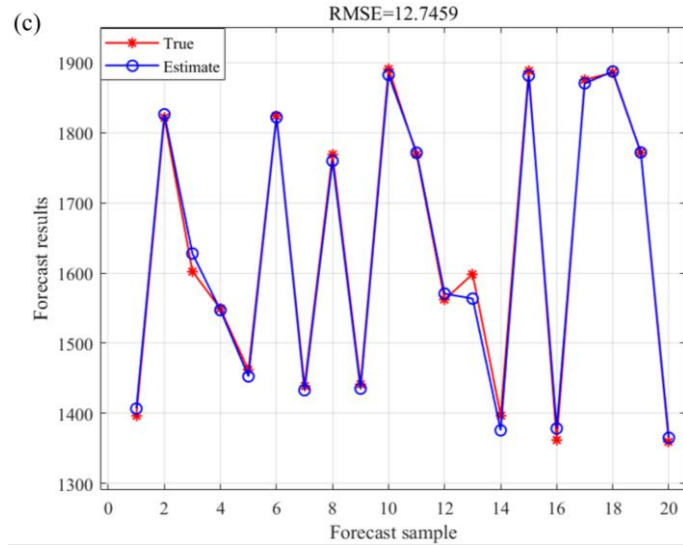
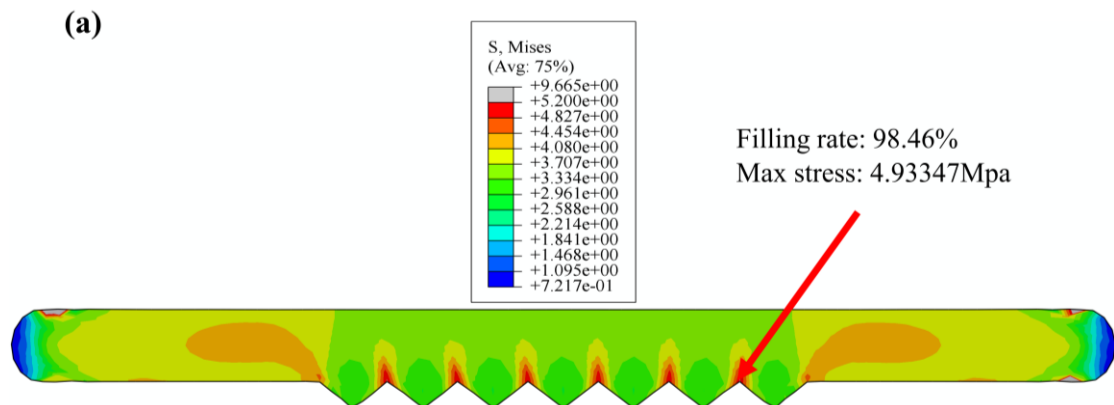


图 5-4 遗传算法改进神经网络的优化过程 (a)平均适应度曲线；(b)遗传算法优化后的适应性曲线；(c)均方根误差曲线

如图 5-4(a)，经过约 14 次迭代后，最佳适应度达到最小。图 5-4(b)显示适应度达到 0.99906，优于 BP 神经网络的结果。图 5-4(c)为均方根误差曲线，从图中可以看出其拟合效果良好。其对应的工艺参数加热温度、下压位移、热压时间、保压时间、一次冷却时间、二次冷却时间和下模具摩擦系数分别为 594.5193℃、0.0127mm、394.5231s、369.1506s、285.8774s、92.5113s、0.1883。图 5-5 和图 5-6 分别显示了正交最佳结果和遗传算法最佳结果的最佳组合应力云图和填充率。将上述参数带入仿真得到的结果，填充率为 99.987%，最大应力为 3.27815Mpa，比正交实验最佳组合低 33.55%。



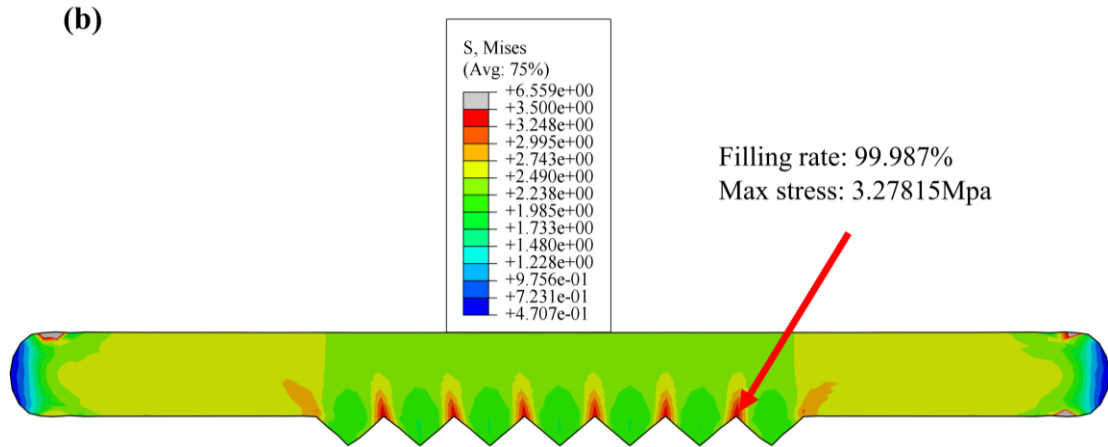


图 5-5 神经网络算法优化前后的应力云图对比 (a)正交最佳结果的优化组合；(b)遗传算法最佳结果的优化组合

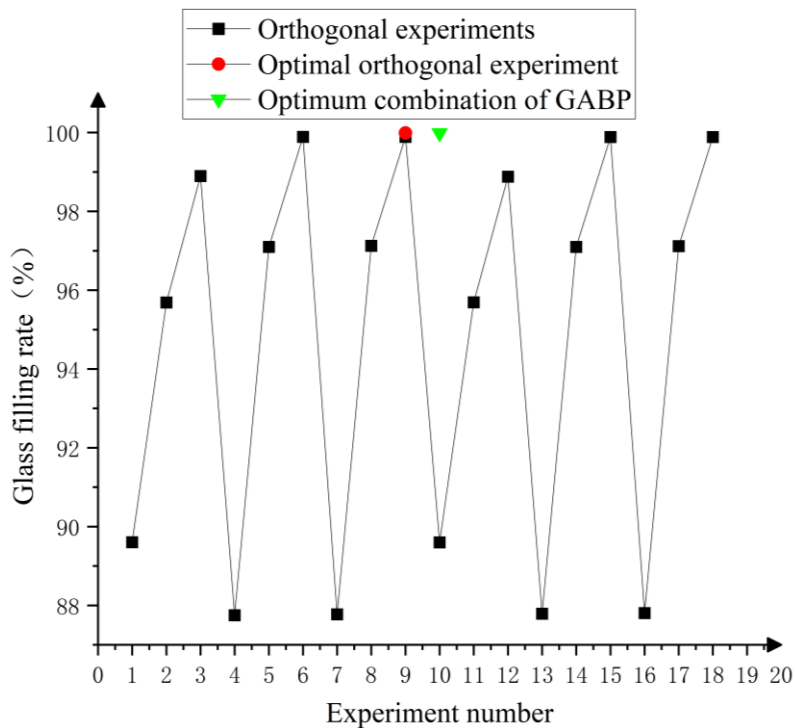


图 5-6 不同工艺参数的玻璃填充率

5.4 本章小结

目前大多数学者的研究都集中在一个或几个参数的影响上,对更多参数综合影响的研究还不够全面。光学微结构玻璃元件精密成型工艺参数的优化是一个复杂的非线性过程,受到多种因素的影响。本章对玻璃精密成型工艺进行了有限元仿真,在此基础上获得了所需的数据。在仿真与实际获得数据的基础上,利用 GA 对 BP 神经网络进行优化,得到了玻璃精密成型的最佳工艺参数。通过该方法的优化,玻璃材料在模具中的填充率提高,同时材料在成型过程中的残余应力降低。

第 6 章 总结与展望

6.1 全文总结

微结构光学元件的独特功能,使得各个领域对其的需求也在不断增加。因此,如何高效、低成本地制造微结构元件是当前面临的重要问题。微结构光学元件的应用对于精密加工技术(如离子束刻蚀、纳米压印)的发展起到了重要推动作用。在这些技术中,精密模压成型技术相对于传统的机械加工技术具有更高的效率、更低的成本以及更高的面型精度等优势。然而,该技术还面临着如微结构成型精度不高、表面质量差以及产生裂纹等问题,这些质量问题严重阻碍了光学元件的发展。因此,如何在现有技术的基础上优化光学元件的成型效果成为一个紧迫的问题。为了解决这些问题,一种方法是通过引入特种能场辅助微结构成型,可以大幅降低材料的残余应力。特种能场可以通过加热、电场、磁场等方式施加在材料上,从而调控材料的流动性和形态。通过适当的能场调控,可以减少材料的残余应力,提高微结构的成型精度,并减少产生裂纹的风险。

此外,优化工艺参数对于提高光学元件的产品质量和延长模具寿命非常重要。工艺参数包括模具温度、压力、速度等,通过合理地调节这些参数,可以有效控制材料的流动行为,改善微结构的成型质量。同时,适当地优化工艺参数还可以减少模具磨损,并延长模具的使用寿命,从而降低生产成本。本文所做的主要工作总结如下:

(1) 详细介绍了微结构光学元件的几种加工技术,并分析了各自的优缺点,通过对比总结了精密热压成型技术的优势。

(2) 对黏弹性材料特性进行了理论研究,从材料的黏度、蠕变、应力松弛特性以及结构松弛特性进行分析,分析了材料对于温度的高度依赖性;介绍了几种用来表征黏弹性特性的力学模型,并介绍了玻璃材料的简单热流变特性,为后续有限元模型的建立提供了理论基础。

(3) 基于现有玻璃微结构光学元件模压工艺,在 Abaqus 软件中对模具材料及玻璃材料建立了有限元模型,依照实际生产中的工艺流程进行了仿真模拟。对热压过程中包括模压温度、摩擦系数以及模压速度在内的多个工艺参数进行了研

究, 探明它们对最终成型效果的影响。最优参数组合得到的模拟结果表明, 玻璃的最大应力为 1.648Mpa, 填充率达到 97.11919%。该结果优于正交实验中的任何参数组合, 表明通过正交实验得到的参数组合确实是最佳的。

(4) 在建立的光学微结构精密成型有限元模型的基础上, 引入了特种场辅助成型, 分别研究了在无超声波振动和有超声波振动的压制条件下微槽的成型效果。玻璃在成型过程中的平均变形位移达到 1947.561nm, 最大填充率为 97.37118%。热压过程中的平均最大应力仅为 1.04e-4Mpa, 与正交实验中的最佳参数组合相比, 应力明显降低。结果表明, 在超声辅助下, 玻璃的残余应力大幅度降低。而且玻璃填充率也优于没有超声的情况。随着超声能量的传播和吸收, 分子和原子之间的相对运动会产生局部热量, 这种热效应会导致玻璃刚度(抗变形能力)降低, 从而使玻璃在相同的成型条件下产生更大的变形。此外, 超声波的机械效应增强了玻璃在黏弹性状态下的流动性, 玻璃在模具上的分布更加均匀, 这不仅改善了玻璃的应力分布, 降低了玻璃的应力, 而且使成型效果更好, V 型槽中的填充率更高。也就是说, 最终产品的表面形状与模具的形状更加吻合。

(5) 本文以光学微槽元件为研究对象, 基于 Abaqus 和 Matlab 软件对精密玻璃成型过程进行仿真, 并对工艺参数进行优化, 从而获得成型效果最佳的成型工艺参数。建立了正交实验, 利用极差分析方法确定了工艺参数的敏感性, 其中模具欠压位移对成型效果影响最大, 并根据正交实验得到了最佳参数组合。

(6) 本次研究建立了神经网络模型, 利用收集到的数据得到的数据进行训练, 其拟合状况良好。在此基础上, 利用遗传算法对 BP 神经网络进行优化, 得到最优权值阈值, 进一步得出最佳工艺参数组合, 并利用 Abaqus 软件进行仿真。仿真结果表明, 玻璃热压阶段的填充率达到 99.987%, 最大应力为 3.27815Mpa, 比正交实验的最优组合低 33.55%, 优于其上的任何一组工艺参数。

6.2 展望

玻璃精密热压成型技术制造光学微结构元件最为一种高精度低成本的加工方法, 具有大批量生产的优势, 在微纳加工制造中具有广阔的应用前景。研究光学微结构制造中存在的问题, 促进其在光学超精密加工领域的推广, 有利于推动相关制造业的发展, 具有迫切的现实需求和社会经济效益。未来可以进一步研究一下几个方面:

(1) 玻璃因其独特的黏弹性特性，在微观尺度中表现出来的力学行为与一般材料不同。本文所建立的有限元模型只能在宏观上去观察玻璃在各个阶段的变化，无法深入微观结构。下一步可以利用分子动力学及其相关仿真软件(如 Lammmps、Materials Studio 等)建立更小尺度的热压模型，进行微观尺度下的分子动力学研究，从微观的角度阐释机理。

(2) 仿真分析多用于产品、模具的结构优化设计，在工艺参数设置方面的研究与应用局限性较大。仿真分析通过理想的数学方程，能够低成本地给出熔体在模具中流动、冷却成型过程的直观解释，而目前的优化技术较多地利用仿真数据，实际成型的工艺数据量明显小于仿真数据，导致工艺优化依赖经验，尚需进一步完善仿真分析与实际成型结合优化的内容。

(3) 在实际生产过程中，影响光学微结构元件成型质量的因素众多，本文的研究因素并不完善，同时在进行工艺参数的优化时，只运用了 BP 神经网络和遗传算法来优化工艺参数，方法较为单一，在未来的研究工作中可以考虑增加多种方法对比分析(如 PSO 粒子群算法、卷积神经网络等)用来对更多优化目标和更加多样的工艺参数进行优化。

参考文献

- [1] BERNARDESCHI I, ILYAS M, BECCAI L. A Review on Active 3D Microstructures via Direct Laser Lithography [J]. Advanced Intelligent Systems, 2021, 3(9) : 2100051.
- [2] HOSSAIN M M, GU M. Fabrication methods of 3D periodic metallic nano/microstructures for photonics applications [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 8(2): 233-249.
- [3] KOTZ F, QUICK A S, RISCH P, et al. Two-Photon Polymerization of Nanocomposites for the Fabrication of Transparent Fused Silica Glass Microstructures [J]. Advanced Materials, 2021, 33, 2006341.
- [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.
- [5] 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.
- [6] 杨元华, 程凯, 孙西芝. 超精密机械加工技术在微光学元件制造中的应用 [J]. 航空精密制造技术, 2005 (4): 10-12.
- [7] 赵清亮, 郭兵. 微结构光学功能元件模具的超精密磨削加工技术 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 177-185.
- [8] LIU Y-G, LIU X, MA C-J, et al. Micro-structured optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 41: 168-172.
- [9] WANG E, CHENG P, LI J, et al. High-sensitivity temperature and magnetic sensor based on magnetic fluid and liquid ethanol filled micro-structured optical fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102161.
- [10] XU Y, LU P, CHEN L, et al. Recent Developments in Micro-Structured Fiber Optic Sensors [J]. Fibers, 2017, 5(1): 3.

- [11] CHENG S-H, LIN Y-T, LU H-T, et al. The Evolution of Spinal Endoscopy: Design and Image Analysis of a Single-Use Digital Endoscope Versus Traditional Optic Endoscope [J]. *Bioengineering*, 2024, 11(1): 99.
- [12] KARLAS T, PETROFF D, FEISTHAMMEL J, et al. Endoscopic Bariatric Treatment with Duodenal-jejunal Bypass Liner Improves Non-invasive Markers of Non-alcoholic Steatohepatitis [J]. *Obesity Surgery*, 2022, 32(8): 2495-2503.
- [13] VARKEY J, JONSSON V, HESSMAN E, et al. Diagnostic yield for video capsule endoscopy in gastrointestinal graft- versus -host disease: a systematic review and metaanalysis [J]. *Scandinavian Journal of Gastroenterology*, 2023, 58(8): 945-952.
- [14] YE H, CAO Z, LI M. Rapid fabrication of semiellipsoid microlenses using 3D-printing and roll-to-roll imprinting process [J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(8): 3437-3441.
- [15] LOUISSON S, BLANC J, PALLOT C, et al. Visual outcomes and complications of congenital cataract surgery [J]. *Journal Français d'Ophtalmologie*, 2019, 42(4): 368-374.
- [16] 常宏. 导光板棱锥形微结构飞秒激光加工技术与光学性能研究 [D]. 青岛理工大学, 2021.
- [17] 王佳佳. 导光板微结构设计及光固化微压印成型研究 [D]. 北京化工大学, 2021.
- [18] XIE J, ZHOU T, LIU Y, et al. Mechanism study on microgroove forming by ultrasonic vibration assisted hot pressing [J]. *Precision Engineering*, 2016, 46: 270-277.
- [19] 任智斌. 折射型微透镜及微透镜阵列光学性质与制作技术的研究 [D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2006.
- [20] 康鹏. 基于光固化成型的微结构增材制造技术研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2017.
- [21] 赵华, 祖成奎, 刘永华等. 增材制造硫系玻璃光学元件的前景分析与探讨 [J]. *材料导报*, 2017, 31(A01): 113-116.
- [22] 楼益民. 基于激光直写技术的微光学器件的研究 [D]. 苏州大学, 2011.
- [23] VON FREYMAN G, SCHOENFELD W V, RUMPF R C, et al. Fabrication and

- characterization of micro-structures created by direct laser writing in multi-layered chalcogenide glasses [M]. *Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VIII*. 2015, 9374: 7-15.
- [24] 刘颖, 敬鹏生, 吴大鸣等. 压印成型条件对微透镜结构影响的模拟 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2013, 29(10): 164-168.
- [25] 赵长松, 贺建芸, 谢鹏程等. 光固化微压印制备光扩散膜研究 [C]. *中国感光学会辐射固化专业委员会第十九届中国辐射固化年会论文报告集*, 2018: 5.
- [26] 赵长松, 贺建芸, 李嘉维等. 光固化微压印制作微结构阵列成型工艺 [J]. *塑料科技*, 2019, 47(01): 48-52.
- [27] 刘玉环, 赵圆圆, 董贤子等. 数字掩模投影光刻的极限分辨率研究 [J]. *量子电子学报*, 2019, 36(03): 354-359.
- [28] 杨涵, 于希辰, 吴一帆等. 飞秒激光在微加工领域的研究进展及其应用 [J]. *应用激光*, 2019, 39(02): 346-354.
- [29] 王永刚, 肖正航, 王鹏. 光学元件离子束抛光去除特性研究 [J]. *航天制造技术*, 2013, 3: 8-11.
- [30] 周林, 解旭辉, 戴一帆等. 光学平面镜面离子束修形中速度模式的实现 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(07): 152-156.
- [31] C Y X, S A B P, C C W, et al. Direct electron beam writing of kinoform micro-axicon for generation of propagation-invariant beams with long non-diffracting distance [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2007, 9(4): 329-334.
- [32] CHEONG W C, AHLUWALIA B P S, YUAN X-C, et al. Fabrication of efficient microaxicon by direct electron-beam lithography for long nondiffracting distance of Bessel beams for optical manipulation [J]. *Applied Physics Letters*. 2005, 87(2): 024104.
- [33] 任振洲. 三维光学微结构聚焦离子束铣削加工技术研究 [D]. 华中科技大学, 2019.
- [34] HAN H, WANG C, CHENG L, et al. Effects of ultrasonic vibration on filling behaviours in micro-embossing processes [J]. *Ferroelectrics*, 2019, 546(1): 25-32.
- [35] YU J, 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, 2018, 10(1): 103-114.
- [36] 程凯. 片状电极超声辅助电火花加工装置及仿真与实验研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [37] ZHENG G, DEHONG H, ZENGYUAN N, et al. A novel long-stroke fast tool servo system with counterbalance and its application to the ultra-precision machining of microstructured surfaces [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 173: 109063.
- [38] 王盛, 赵清亮, 王生等. 蓝宝石复杂表面光学元件精密-超精密磨削机理及关键技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(09): 69-80.
- [39] 乔政, 吴言功, 刘玉涛等. 辊筒模具微透镜阵列的慢刀伺服成形加工 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(01): 146-155.
- [40] 孙豪. 辊筒模具微结构阵列超精密加工机理和方法的研究 [D]. 广东工业大学, 2020.
- [41] BLAIR G C C. Method for molding glass lens [J]. US Patent, 1974, 3833347.
- [42] BOLOTOV S, KOBAYASHI R, SHIMADA K, et al. Fabrication of Precision Micrograting on Resin Substrate Utilizing Ultrasonic-Assisted Molding [J]. International Journal of Automation Technology, 2015, 9(1): 43-50.
- [43] ZHANG L, NAPLES N J, ZHOU W, et al. Fabrication of infrared hexagonal microlens array by novel diamond turning method and precision glass molding [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2019, 29(6): 065004.
- [44] 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.
- [45] FIRESTONE G C, YI A Y. Precision compression molding of glass microlenses and microlens arrays—an experimental study [J]. Applied Optics, 2005, 44(29): 6115-6122.
- [46] HE P, LI L, YU J, et al. Graphene-coated Si mold for precision glass optics molding [J]. Optics letters, 2013, 38(14): 2625-2628.
- [47] JAIN A, YI A Y. Numerical Modeling of Viscoelastic Stress Relaxation During Glass Lens Forming Process [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2005,

88(3): 530-535.

- [48] JAIN A, YI A Y. Finite Element Modeling of Structural Relaxation During Annealing of a Precision-Molded Glass Lens [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(3): 683-690.
- [49] 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.
- [50] SU L, YI A Y. Investigation of the effect of coefficient of thermal expansion on prediction of refractive index of thermally formed glass lenses using FEM simulation [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2011, 357(15): 3006-3012.
- [51] JOSHI D, MOSADDEGH P, DAVID MUSGRAVES J, et al. Thermo-mechanical characterization of glass at high temperature using the cylinder compression test. Part II: No-slip experiments, viscoelastic constants, and sensitivity [J]. Journal of Rheology, 2013, 57(5): 1391-1410.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] BURGE J H, KLOCKE F, FÄHNLE O W, et al. A complete qualification methodology for coatings of precision glass molding tools [M]. Optical Manufacturing and Testing IX. SPIE, 2011, 8126: 228-239.
- [56] 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 Processing, Measurement, and Phenomena, 2009, 27(3): 1445-1449.

- [57] KLOCKE F, BOUZAKIS K D, GEORGIADIS K, et al. Adhesive interlayers' effect on the entire structure strength of glass molding tools' Pt-Ir coatings by nano-tests determined [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(7): 1867-1872.
- [58] SCHOENFELD W V, HUENTEN M, WANG J J, et al. Wafer level glass optics: precision glass molding as an alternative manufacturing approach [M]. Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics IV. SPIE, 2011, 7927: 94-100.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] ARAI M, KATO Y, KODERA T. Characterization of the Thermo-Viscoelastic Property of Glass and Numerical Simulation of the Press Molding of Glass Lens [J]. Journal of Thermal Stresses, 2009, 32(12): 1235-1255.
- [62] TSAI Y C, HUNG C, HUNG J C, et al. Finite element prediction of the lens shape of moulded optical glass lenses [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(2): 224-234.
- [63] 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.
- [64] 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): 071207-071207.
- [65] 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.

- [66] GU B, HELVAJIAN H, PIQUÉ A, et al. Additive manufacturing of glass for optical applications [M]. Laser 3D Manufacturing III. SPIE, 2016, 9738: 123-131.
- [67] KLEIN J, STERN M, FRANCHIN G, et al. Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass [J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2015, 2(3): 92-105.
- [68] ZHOU T, YAN J, MASUDA J, et al. Investigation on the viscoelasticity of optical glass in ultraprecision lens molding process [J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(9): 4484-4489.
- [69] ZHANG L, LIU W. Precision glass molding: Toward an optimal fabrication of optical lenses [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2017, 12(1): 3-17.
- [70] 尹韶辉, 王玉方, 朱科军等. 微小非球面玻璃透镜超精密模压成型数值模拟 [J]. 光子学报, 2010, 39(11): 2020-2024.
- [71] 尹韶辉, 朱科军, 余剑武等. 小口径非球面玻璃透镜模压成形[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 182-192.
- [72] 尹韶辉, 唐昆, 朱勇建等. 小口径玻璃透镜热压成形模具的超精密微细磨削加工 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(23): 2790-2792+2811.
- [73] WEI Z, YANG C, LIANGUAN S, et al. Refractive index and dispersion variation in precision optical glass molding by computed tomography [J]. Applied optics, 2009, 48(19): 3588-3595.
- [74] 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(5): 055109.
- [75] BO T, YE Y, XINLIN Z, et al. An integrated solution for compression-molded glass lenses [J]. Optical Design and Testing Vii. SPIE, 2016, 10021: 79-84.
- [76] TAO B, SHEN L, YI A, et al. Reducing Refractive Index Variations in Compression Molded Lenses by Annealing [J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3(2): 118-121.
- [77] ZHOU J, SHI, T., HU, Y., JI, Y., LI, M., & SHEN, L. Numerical simulation in compression molding of glass lens [J]. IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2013: 669-674.

- [78] 周剑. 精密玻璃透镜热压成型技术中的关键问题研究 [D]. 中国科学技术大学, 2015.
- [79] ZHOU J, HE P, YU J, et al. Investigation on the friction coefficient between graphene-coated silicon and glass using barrel compression test [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2015, 33: 031213.
- [80] ZHOU J, LI M, HU Y, et al. Numerical Evaluation on the Curve Deviation of the Molded Glass Lens [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136(5): 051004.
- [81] CHAOWEI Q, TAO M, FAN C. Precision compression molding of chalcogenide glass optical elements [J]. *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Imaging and Processing Technology*. SPIE, 2013, 9045: 453-458.
- [82] JIAQING X, TIANFENG Z, BENSHUAI R, 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.
- [83] 倪佳佳, 范玉峰, 陈文华. 非球面光学玻璃透镜的模压仿真研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(03): 151-158.
- [84] MASUDA J, YAN J, ZHOU T, et al. Thermally induced atomic diffusion at the interface between release agent coating and mould substrate in a glass moulding press [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(21): 215302 (12pp).
- [85] 魏俊俊, 朱小研, 陈良贤等. 碳化钨模仁表面沉积 Re-Ir 抗高温黏连涂层研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(01): 227-231.
- [86] RENAUD F, DION J-L, CHEVALLIER G, et al. A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized Maxwell model [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(3): 991-1010.
- [87] FÄHNLE O W, ZHU Y, NA J, et al. FEM analysis of hot-pressing process of aspheric glass P-SK57 lens [M]. *Optical Manufacturing and Testing X*. SPIE, 2013, 8838: 259-264.
- [88] SHENGDI S, KANGSEN L, WENYAN C, 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.
-
- [89] DUDOWICZ J, DOUGLAS J F, FREED K F. The meaning of the “universal”
-
- WLF parameters of glass-forming polymer liquids [J]. The Journal of chemical
-
- physics, 2015, 142: 014905.
-
- [90] YANG Y-J, HUANG C-C, TAO J. Application of ultrasonic-assisted injection
-
- molding for improving melt flowing and floating fibers [J]. Journal of polymer
-
- engineering, 2016, 36(2): 119-128.
-
- [91] ALERS G A. Ultrasonic Attenuation in Zinc Single Crystals While Undergoing
-
- Plastic Deformation [J]. Physical Review, 1955, 97(4): 863-869.
-
- [92] TSAI Y-P, HUNG J-C, YIN L-C, et al. Ultrasonic vibration-assisted optical glass
-
- hot embossing process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing
-
- Technology, 2011, 60(9-12): 1207-1213.
-
- [93] 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.
-
- [94] NGUYEN L P, HAO K C, SU Y H, et al. Modeling the Embossing Stage of the
-
- Ultrasonic-Vibration-Assisted Hot Glass Embossing Process [J]. International
-
- Journal of Applied Glass Science, 2014, 6(2): 172-181.
-
- [95] XIE J Q, ZHOU T F, LIU Y, et al. The Effects of Ultrasonic Vibration in Hot
-
- Pressing for Microgrooves [J]. Materials Science Forum, 2016, 4214(861-861):
-
- 121-126.
-
- [96] ASADI P, AKBARI M, BESHARATI GIVI M K, et al. Optimization of AZ91
-
- friction stir welding parameters using Taguchi method [J]. Proceedings of the
-
- Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and
-
- Applications, 2015, 230(1): 291-302.
-
- [97] PARVIZ A, M.R.M. A, MOSTAFA A, et al. Multivariate optimization of
-
- mechanical and microstructural properties of welded joints by FSW method [J].
-
- Engineering Failure Analysis, 2022, 140: 106528.
-
- [98] SHENG Q, FANWEI M, LIAOYUAN C, et al. Parameter optimization of

- ultrasonic vibration polishing K9 optical glass based on ultrasonic atomization[J].
Ceramics International, 2022, 48(14): 19944-19953.
- [99] VOGEL P-A, VU A T, MENDE H, et al. Machine learning-based predictions of
form accuracy for curved thin glass by vacuum assisted hot forming process [M].
Proceedings of the 18th IMEKO TC10 Conference on Measurement for
Diagnostics, Optimisation and Control, 2022, 10: 20-25.
- [100] XIAO R, LI K, SUN L, et al. The Prediction of liquid holdup in horizontal pipe
with BP neural network [J]. Energy Science & Engineering, 2020, 8(6): 2159-2168.
- [101] FORREST S. Genetic Algorithms [J]. ACM computing surveys (CSUR), 1996,
28(1): 77-80.

攻读学位期间发表的学术论文目录

一、论文发表情况

- [1] 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: 106149. (SCI) 导师第 1, 本人第 2
- [2] 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. (SCI) 导师第 1, 本人第 2
- [3] Huang S, **Jiang C**, Xie F, et al. An efficient and low-cost compensation method for exposure uniformity based on digital oblique scanning lithography[J]. Applied Physics Express, 2022, 15(7): 076506. (SCI) 导师第 1, 本人第 2

二、参与项目情况

- [1] 安徽工程大学研究生教育创新基金资助项目(实践与创新), YJS2023CX004, 基于热-结构耦合的精密玻璃元件热压成型关键技术研究, 主持

致谢

在硕士论文即将完成之际，也意味着我将踏上新的旅途，回首这几年的硕士生涯，心中感慨万千。三年的求学历程接近尾声，三年的抗疫也迎来了胜利，这三年，我学到了知识，也收获了诚挚的友谊；这一路，我认识了很多优秀的人，也遇到了许多良师益友。他们不仅在学业上给予了我很大帮助，让我学会如何运用科学严谨的思维方法去研究和解决专业问题，还教会了我一些处人处事的道理和原则，让我在今后的生活中和职场中能更好地待人接物。在此谨向硕士期间给予我关爱、帮助和支持的老师、朋友、同学和家人表示衷心的感谢。

特别感谢我的导师黄胜洲老师，虽然很年轻，但黄老师在光刻、微结构光学元件精密热压成型领域却有很深的造诣。从研一入学的那年起，黄老师就督促我们尽快进入研究课题，黄老师会经常给我发一些文献，给我介绍该领域的相关知识。在研究进行困难时，黄老师鼓励我不要怕，跟我一起解决问题。本次毕业论文也是在黄老师悉心指导下完成的。黄老师精益求精的工作作风、严谨求实的学术态度是我一生学习的榜样。

感谢学院领导、老师在我学习和生活上的指点和帮助，我很幸运，研究生三年，得到了众多老师的关心和支持，在此，谨向老师们致以崇高的敬意。

作者：蒋铖玮

2024 年 5 月 27 日

尚德敏学 唯实惟新

