

分类号: TQ320.66

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120108



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 汽车后座椅下围中护板结构
及其成型工艺参数优化

论 文 作 者 杨凯

校 内 导 师 唐铃凤教授

校 外 导 师 王菲（高级工程师）

专业学位类别 机械

研究方向（领域） 智能制造

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号: TQ320.66

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120108

汽车后座椅下围中护板结构及其成型工艺参数优化

Optimization of the Structure and Forming Process Parameters of
the Middle Protection Plate Under the Rear Seat of Automobile

学生姓名: _____ 杨凯

校内导师: _____ 唐铃凤(教授)

校外导师: _____ 王菲(高级工程师)

专 业: _____ 机械

研究方向: _____ 智能制造

论文答辩日期: 2024 年 5 月 18 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：杨凯

日期：2024年5月31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：杨凯

指导教师签名：

唐铁凤

日期：2024年5月31日

日期：2024年5月31日

汽车后座椅下围中护板结构及其成型工艺参数优化

摘 要

随着汽车行业的快速发展,能源消耗和汽车尾气污染问题成为当前亟待解决的难题。在新能源汽车电池技术和发动机燃油技术的研究遇到瓶颈的情况下,为了提高汽车的动力性、减少燃料消耗和汽车尾气排放污染,利用结构轻量化和材料轻量化技术对汽车各部件进行研究,以达到减轻汽车重量的目的。以塑料件代替金属件成为实现轻量化的主要途径,将 CAE 技术模拟制件注塑成型的过程作为指导,通过改进模具和制件的结构以及注塑成型的工艺参数来减少制件成型时产生的翘曲和体积收缩,提高产品注塑成型的品质。

本文以汽车后座椅下围中护板为研究对象,利用惩罚函数法对护板进行结构轻量化设计,设计了汽车后座椅下围中护板注塑成型模具并进行了传热分析,采用 BP 神经网络和鲸鱼算法优化了汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数,得到最佳注塑成型工艺参数组合。

本文主要内容如下:

(1)完成了汽车后座椅下围中护板结构轻量化。在满足护板强度的条件下,以护板重量最小为目标函数,利用惩罚函数法建立汽车后座椅下围中护板结构优化数学模型,运用 Matlab 求解优化模型,根据优化结果并结合实际的注塑生产出最终的制件,较原有制件减重达到了 13.9%左右,实现了护板的轻量化。

(2)设计了汽车后座椅下围中护板注塑成型模具系统。结合汽车后座椅下围中护板结构特点,设计其注塑成型模具的凹模、凸模、抽芯机构、顶出机构等,确定了在护板侧面的 1 浇口为最佳浇口方案,设计了汽车后座椅下围中护板注塑过程中的浇注系统,绘制了汽车后

座椅下围中护板注塑成型模具的装配图。

(3)运用热力学相关理论对汽车后座椅下围中护板注塑成型模具进行传热分析。通过对塑料熔体、模具和冷却系统之间传热形式的研究，推导出汽车后座椅下围中护板冷却时间的理论计算式，利用 ANSYS 软件对模具进行热分析。

(4)确定了工艺参数对评价指标的影响程度。选取模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间和冷却时间注塑工艺参数作为试验因素，以体积收缩率和翘曲量作为试验的评价指标，设计并完成了拉丁超立方试验，结合方差分析、Pareto 图分析、主效应图和交互效应图分析得到了各个因素之间的交互效应和各个因素对评价指标的影响程度。

(5)优化了汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数。利用 MATLAB 搭建了以工艺参数为输入、评价指标为输出的 BP 神经网络，通过鲸鱼算法优化神经网络结构的权值和阈值，建立了预测精度更高的 WOA-BP 神经网络，并利用该模型预测得到最优工艺参数组合，结合模拟仿真进行验证。

关键词：后座椅护板，结构优化，惩罚函数法，模具设计，BP 神经网络，鲸鱼算法，注塑成型参数。

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE AND FORMING PROCESS PARAMETERS OF THE MIDDLE PROTECTION PLATE UNDER THE REAR SEAT OF AUTOMOBILE

ABSTRACT

With the rapid development of the automobile industry, the problem of energy consumption and automobile exhaust pollution has become an urgent problem to be solved. In the case of the bottleneck of the research of new energy vehicle battery technology and engine fuel technology, in order to improve the power of the vehicle, reduce fuel consumption and vehicle exhaust emissions pollution, the use of lightweight structure and lightweight material technology to study the various components of the vehicle, in order to achieve the purpose of reducing the weight of the vehicle. Replacing metal parts with plastic parts has become the main way to achieve lightweight, CAE technology to simulate the process of injection molding of parts as a guide, by improving the structure of the mold and parts and the process parameters of injection molding to reduce the defects such as warping and volume shrinkage produced during the molding of parts, improve the quality of product injection molding.

The main contents of this dissertation are as follows:

(1) In this dissertation, the car rear seat lower casing center plate was taken as the research object, the penalty function method was used to carry out structural lightweight design of the car rear seat lower casing center plate injection molding mold was designed and heat transfer analysis was carried out. BP neural network and whale algorithm were used to optimize the injection molding process parameters of the car rear

seat lower casing center plate, and the best injection molding process parameter combination is obtained.

(2) Designed an injection molding mold system for the lower middle guard plate of the rear seat of the car. Based on the structural characteristics of the lower middle guard plate of the rear seat of the car, the concave mold, convex mold, core pulling mechanism, and ejection mechanism of the injection molding mold were designed. The optimal gate scheme was determined as the first gate on the side of the guard plate. The pouring system during the injection molding process of the lower middle guard plate of the rear seat of the car was designed, and the assembly diagram of the injection molding mold for the lower middle guard plate of the rear seat of the car was drawn.

(3) The heat transfer analysis of the injection molding die for the middle protection plate under the rear seat of an automobile was carried out by using the theory of thermodynamics. Through the study of the heat transfer between plastic melt, mold and cooling system, the theoretical calculation formula of the cooling time of the rear seat lower casing was derived, and the thermal analysis of the mold was carried out by ANSYS software.

(4) The influence degree of process parameters on the evaluation index was determined. Mold temperature, melt temperature, holding pressure, holding time and cooling time injection molding process parameters were selected as test factors, and volume shrinkage rate and warpage amount were taken as evaluation indexes. The interaction effect between each factor and the influence degree of each factor on the evaluation index were obtained by combining the analysis of variance, pareto graph, main effect graph and interaction effect graph.

(5) The injection molding process parameters of car rear seat lower

girth were optimized. A BP neural network with process parameters as input and evaluation index as output was built by MATLAB. The weight and threshold of the neural network structure were optimized by whale algorithm, and a WOA-BP neural network with higher prediction accuracy was established. The optimal combination of process parameters was predicted by this model and verified by simulation.

KEY WORDS : Rear seat guard, Structure optimization, Penalty function method, Mold design, BP neural network, Whale algorithm, Injection molding parameters.

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义与背景	1
1.2 汽车结构轻量化技术国内外研究现状	2
1.3 注塑成型工艺优化国内外研究现状	5
1.4 本文主要研究内容	7
第 2 章 汽车后座椅下围中护板结构优化设计	9
2.1 汽车后座椅下围中护板结构设计	9
2.2 汽车后座椅下围中护板结构优化模型	10
2.2.1 设计变量	10
2.2.2 目标函数	11
2.2.3 约束条件	11
2.2.4 优化模型	12
2.3 汽车后座椅下围中护板结构优化模型求解	13
2.3.1 模型初始点	14
2.3.2 惩罚因子初值	14
2.3.3 缩减系数	14
2.3.4 收敛条件	15
2.3.5 优化结果	15
2.4 汽车后座椅下围中护板静力学分析	16
2.5 本章小结	17
第 3 章 汽车后座椅下围中护板模具结构设计	18
3.1 汽车后座椅下围中护板模具材料选择	18
3.2 汽车后座椅下围中护板模具浇注系统	19
3.2.1 浇口位置及数量设计	19
3.2.2 主流道分流道设计	21
3.3 汽车后座椅下围中护板模具成型系统	23
3.4 汽车后座椅下围中护板模具抽芯机构	25
3.5 汽车后座椅下围中护板模具顶出机构	26
3.6 汽车后座椅下围中护板模具模架	28
3.7 本章小结	29
第 4 章 汽车后座椅下围中护板模具传热研究	31
4.1 汽车后座椅下围中护板注塑模具的传热分析	31
4.1.1 理论分析过程	31
4.1.2 模具温度对成型周期的影响	32
4.1.3 模具温度对成型材料的影响	32
4.2 汽车后座椅下围中护板注塑模具的传热方式	33
4.2.1 热传导理论	33
4.2.2 热对流理论	33

4.2.3 热辐射理论	34
4.3 汽车后座椅下围中护板模具传热研究	34
4.3.1 塑料熔体与模具的热传导	35
4.3.2 模具与冷却系统的对流换热	35
4.3.3 模具与周围环境的热交换	36
4.4 汽车后座椅下围中护板模具传热模型	36
4.4.1 注塑成型模具冷却时间计算	37
4.4.2 注塑成型模具热分析	37
4.4.3 注塑成型模具冷却时间对比分析	37
4.5 本章小结	38
第 5 章 基于 OLHD 的汽车后座椅下围中护板注塑成型主次因子分析	40
5.1 最优拉丁超立方	40
5.2 汽车后座椅下围中护板注塑成型试验因素和评价指标	41
5.3 汽车后座椅下围中护板注塑成型拉丁超立方试验设计与结果	42
5.4 汽车后座椅下围中护板注塑成型主次因子分析	43
5.4.1 评价指标的方差分析	43
5.4.2 评价指标的 Pareto 图分析	43
5.4.3 注塑工艺参数对评价指标的交互效应图与主效应图分析	44
5.5 本章小结	48
第 6 章 基于鲸鱼算法的 BP 神经网络汽车后座椅下围中护板注塑工艺参数优化	49
6.1 BP 神经网络的研究	49
6.1.1 BP 神经网络概述	49
6.1.2 BP 神经网络的建立	50
6.1.3 BP 神经网络模型的验证	53
6.2 WOA-BP 神经网络的搭建	54
6.2.1 鲸鱼优化算法	54
6.2.2 WOA-BP 神经网络的建立	54
6.3 基于 WOA-BP 的汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数优化	57
6.4 本章小结	58
第 7 章 总结与展望	60
参考文献	62
附录 I OLHD 试验设计表及仿真数据	70
攻读硕士学位期间获得的成果	73
致 谢	74

第 1 章 绪论

随着计算机辅助工程技术（CAE）的快速发展，传统的生产加工技术难以满足企业发展的需求，各企业为降低开发成本、提升零件加工生产效率，利用 CAE 技术辅助工厂零件生产、制造和装配，通过 CAE 技术不仅可以在实际工况下分析零件的强度、刚度，优化其结构，也能模拟零件的成型过程，预测零件的缺陷和使用寿命，从而改进相对应的结构和成型参数。目前，国内外大量学者针对零件轻量化和注塑成型工艺参数进行了研究，通过轻量化技术对零件结构进行优化，利用注塑成型 CAE 技术优化成型工艺参数。

1.1 研究意义与背景

随着经济水平的不断提高和汽车制造技术的改革与创新，我国已成为世界上最大的汽车产销国之一，对汽车零部件生产制造的企业比比皆是，汽车零部件的销售市场的激烈竞争，使得我国对汽车行业的研究和开发飞速发展^[1-2]。与此同时，汽车工业生产和汽车尾气排放带来的环境污染越来越严重，国内汽车行业和专家学者们开始了对新能源汽车、先进发动机、汽车轻量化技术的研究，以提高燃油燃烧效率来降低油耗和排放量^[3-6]。国内的新能源汽车制造工业经历了几十年的迅猛发展，在国民经济中已经占据了一席之地。对于目前新能源汽车发展遇到瓶颈和汽车发动机技术提升困难的情况下，发展汽车轻量化技术是节能、环保、降耗的最佳途径^[7]。汽车的轻量化设计是在保证其性能不受影响的前提下，通过优化结构和用低密度的塑料代替零部件，以达到为汽车减重的目的，提高汽车的燃油经济性和操控性^[8]。众多企业开始研究能满足性能要求的轻质材料，其中碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料等低密度的塑胶材料在汽车零部件的应用中越来越多^[9]。

随着科技的快速发展，模具工业在国内冉冉升起，计算机辅助技术（CAE、CAM）已经进入大众企业的视野，模具行业涌出大量人才，使得模具技术快速发展，规模越来越大。虽然规模达到了一定的程度，但国内的加工制造水平远远还未达到其他国家的水平，生产出的制件质量有待提升。制件的质量会影响寿命，

因此，对模具的材料要求、生产质量以及精度等方面也提出了更高、更全面的要求^[10]。

现如今，模具生产技术能够体现出国家基础制造业水平^[11-13]。塑料模具已经成为工业生产发展中必不可少的一种技术手段，它与塑料成型机配套使用，可制造出完美造型和精确尺寸的塑胶制件。注塑模具成型技术不仅能够生产一些结构复杂的零部件，而且可以快速、高效、大批量的生产塑料制件，但在注塑过程中，制件的质量受模具设计、零件设计、材料和工艺参数等多个因素的影响^[14]，其中注塑工艺参数是最重要的影响因素之一。工艺参数的设置，将会对制件注塑成型的质量产生严重的影响，导致出现翘曲、体积收缩、熔接痕等缺陷。传统依靠经验、反复试模的生产加工技术已经不能满足市场发展的需求^[15-16]。因此，有必要通过注塑成型 CAE 技术模拟制件注塑成型过程，优化制件结构、模具结构设计方案和注塑成型的工艺参数，降低翘曲量、熔接痕等成型缺陷，提高产品的质量^[17]，通过软件模拟法能够大大降低加工成本并且极大程度地减少产品开发周期。

1.2 汽车结构轻量化技术国内外研究现状

汽车轻量化技术一直是汽车工业的重要研究领域之一，在满足原有的强度刚度、耐冲击、碰撞吸能及动态疲劳等使用性能前提下，对汽车零部件的结构、材料、工艺进行优化，以减少车辆的重量，提高燃油经济性和减少环境影响。

结构轻量化是根据一定的约束条件和受力情况对结构进行优化设计，减少不必要的材料使用或对材料重新分布，到达满足结构强度和刚度的同时减轻重量的目标^[18-19]。对结构的优化通常采用先进的计算机辅助设计和仿真技术，可以在不影响车辆安全性能的前提下减少重量^[20]。虽然结构拓扑优化理论成熟，但也存在计算量过大造成结构强度降低、成本增加等情况。而对于材料轻量化则是使用轻量、高强度的材料替代传统的钢铁材料，对高强度钢材、铝合金、镁合金、碳纤维增强复合材料等材料进行研发和应用，不断推动轻量化技术的发展^[21]。制造工艺的优化则是通过改进汽车制造工艺，采用先进的焊接、铆接、粘接等连接技术，减少组装中的材料损失和浪费。使用轻量化材料时，制造工艺的改进尤为重要，以确保零部件的质量和耐久性。总而言之，对于汽车轻量化的研究都是在保证其安全性、动力性和操作性的同时尽量减少重量和生产成本。

张步峰^[22]通过有限元分析法对汽车轮毂进行静力学和模态分析,得出轮毂的真实磨损状态和受力状态下位移的变化,采用具有优良力学性能的铝合金代替原有的钢铁材料,利用 ANSYS 软件对轮毂进行拓扑优化,得出最终的轮毂结构和尺寸,其重量减轻了 21.42kg,验证了优化后轮毂的强度,使其在减轻质量的同时保持车轮的可靠性。孙莹^[23]以主减速器壳体为研究对象,采用逆向设计法获取其点云数据,运用 GeomagicWrap 进行点云处理,GeomagicdesignX 对模型重构,对重构后模型进行有限元分析,降低固定法兰受力较小区域的壁厚,通过力学分析验证了其可靠性,满足强度的同时,减速器壳体重量减轻了近 3.14kg。王超^[24]将机械式变速器齿轮齿数、模数和螺旋角等主要参数作为设计变量,以变速器最大传动比和中心距作为约束条件,内部齿轮体积和重合度作为目标函数,通过 Matlab 进行多目标求解,优化后的变速器体积减小了 9.2%,总重合度提高了 6.24%,达到平衡汽车轻量化设计与可靠性的目的。单喜乐^[25]针对车架的质量和疲劳寿命进行研究,通过对车架纵横梁和加强板厚度的设计,建立出车架的抗疲劳轻量化模型,采用多目标遗传算法对该模型进行优化设计,优化后的车架质量降低了 4.4%,且疲劳寿命有所提高,优化效果良好。

司敬庭^[26]为了对汽车门锁进行优化,运用静力学分析确定各零部件的薄弱位置和可优化区域,采用变密度法对各部件的结构单元相对密度进行设计,建立出结构柔度最小的拓扑优化模型,利用横纵向载荷实验验证锁紧机构的优化效果,实验验证了优化后锁紧机构的强度达到了规定的要求。

T Heggemann^[27]等人使用纯复合材料代替原有的金属材料以达到减轻汽车重量,研究了由纤维金属层压板制成的深冲零件制造工艺和材料设计的开发,将高强度钢合金和 CFRP 预浸料结合在一种特殊的混合材料/纤维金属层压板(FML)中,通过深拉等成形技术进一步加工。在实际进行成型和固化组合工艺之前实施预固化工艺,能够大大提高了深冲零件的形状和尺寸精度。通过定义金属板顶层与填充材料之间的间隙,改善了半径区域的厚度分布,FML 杯的厚度散射减少了 73%,半径区域的厚度偏差减少了 51%,有效地降低了汽车重量。KJ Kim^[28]以 5 座汽车悬架(FCD600)材料为研究对象,采用有限元分析,计算了采用抗拉强度 310 MPa 级 AA6061 铝合金材料的轮架减重设计工艺。通过对比发现,铝合金材料制成的轮架的安全系数值与使用 FCD600 材料制成的轮架在所有负载

条件（Bump、PHB、KS、RKS）下的安全系数值相近。通过增加材料厚度来防止由于材料变化而导致刚性的下降。轮架采用 FCD600 材料制成时，重量为 5.0 公斤，经过设计变更以改善主要易损区域，采用 6061 铝合金材料时，达到 2.43 公斤，重量降低了 50%以上。WANG^[29]等结合分析目标级联（ATC）研究了新开发的多材料电动客车车身结构的轻量化设计，通过提出一种基于 ATC 的两级优化策略，将原有的轻量化设计问题分解为系统级优化模型和结构模态频率约束的质量最小化 3 个相关子系统级，并通过实验模态检验验证了有限元模型的准确性。运用顺序二次规划算法解决优化问题，以实现有效收敛。优化后车身的扭转刚度提高了 17.5%，其质量减少了 49 kg，通过强度分析验证了优化后的结构。Dengfeng Wang^[30]等人为了实现白车身（BIW）结构的轻量化，提出了一种混合优化方法，该方法集成了白车身结构的子空间划分、相对敏感性分析、相关性分析、多目标遗传算法（NSGA-II）结合响应面法（RSM）代理模型，以及实验设计（DOE）与 E-TOPSIS（熵权技术）和 E-TOPSIS（通过与理想解的相似性对偏好进行排序）相结合，提高优化效率的同时，解决了非线性耐撞性优化问题，实现了白车身线性基本性能与非线性碰撞安全性能的解耦，优化后白车身结构的质量减少了 17.0 kg。Xu Hu^[31]等人提出悬架系统布局设计阶段轻量化设计的设计框架，以电动轮车高度调节系统（VHAS）设计为例，对螺旋弹簧、主动电机和悬架下臂组成的系统总质量进行轻量化设计，以 VHAS 的布局参数和三个组件的设计参数为设计变量，根据设计变量和各组件性能分别设置尺寸约束条件和性能约束条件。将所得设计结果与 4 种常规布局进行了比较。对比结果验证了该框架的有效性，从所提出的框架中获得的布局比合格的传统布局轻约 36%。

综上所述，国内外学者对于轻量化技术的研究大多通过有限元软件对制件进行结构分析并利用拓扑优化改进制件模型，这种方法虽然便捷，但也存在过优化现象，从而导致制件结构强度降低、成本增加等情况。一些学者以性能和尺寸参数作为约束，建立相关的结构优化模型，通过对优化模型的求解来改进制件的结构，该方法求解模型计算量过大、优化效率低，运用人工智能算法能够改善这一弊端。

1.3 注塑成型工艺优化国内外研究现状

注塑成型工艺是一种常用的塑料加工方法，广泛应用于汽车、医疗卫生、家用电器等各个行业。对注塑成型工艺的研究通常从模具设计、成型材料开发、工艺过程优化、注塑成型过程模拟等方面进行研究^[32-35]。模具设计是注塑成型的关键环节，国内外研究者在模具材料、结构设计、表面处理等方面进行了深入研究，提高了模具的寿命和生产效率。在注塑成型材料方面，开发了多种新型塑料材料，如高性能工程塑料、生物可降解塑料、导电塑料、树脂基复合材料等，以满足不同行业对材料性能的需求^[36-38]。通过对注塑成型工艺参数和冷却系统的优化，提高注塑成型的工艺效率和产品质量、性能。传统的注塑成型工艺都是通过经验进行反复试模，获取较为合理的工艺参数组合，但这种方式盲目性和对经验的依赖性比较大，无法保证注塑成型产品的成型质量，且试模时间长，不符合现代注塑成型短周期生产的要求^[39-40]。因此，国内外学者借助计算机仿真技术模拟注塑成型过程，实现快速试模，优化注塑成型工艺和模具结构以及对于材料的合理选择，从而提高注塑成型产品质量，缩短生产周期、降低生产成本^[41-42]。运用 **Moldflow** 软件可以模拟真实的注塑过程，得到充填时间、冷却时间、体积收缩率、翘曲量等分析结果，通过对分析结果的评判，得出合理的工艺参数组合以及最佳的浇口位置，从而减少翘曲变形、熔接痕等成型缺陷的产生^[43]。但注塑成型模拟前的工艺参数设定也需要依赖相关经验，根据材料属性和注塑经验设定工艺参数进行仿真分析。为了获得最佳的成型工艺参数，提高产品成型质量、减少对加工人员经验的依赖，国内外研究学者将人工智能算法运用到工艺参数的寻优中。通过分析大量的试验数据，建立相关的数学模型，利用数学模型来寻找最优的工艺参数组合。

Kitayama 等^[44]以翘曲变形和循环时间为评价指标，采用径向基函数的顺序近似优化对可变填料压力分布和四个工艺参数进行多目标优化，通过数值模拟和实验验证了该方法对减少翘曲变形和循环时间的有效性。**Mukras** 等^[45]针对模具温度、冷却时间、注射速度、保压压力和熔体温度等参数进行设计，以翘曲变形和体积收缩率为评价指标，采用面心中心复合设计法设计并完成了试验，建立工艺参数和评价指标之间的克里金模型，采用遗传算法进行多目标优化，得到最佳工艺参数组合，通过仿真模拟验证，优化后的结果降低约 7%。**Chauhan** 等^[46]以

翘曲变形为评价指标,采用田口实验设计和 Moldflow 模拟相结合的方法对压缩时间、熔体温度、模具温度和压力进行优化,利用方差分析对试验数据进行分析,研究出各参数对翘曲变形的影响程度,通过信噪比分析确定了最佳工艺参数。

Lin 等^[47]提出了一种系统的优化方法,将均匀设计实验、Kriging 插值、折衷规划和广义降阶非线性优化相结合,对具有两个优化目标的注塑成型砂轮的工艺参数进行优化。优化后塑料轮的最大翘曲量和顶出时间分别提高了 7.7%和 11.91%。Silva,H.M 等^[48]介绍了随形冷却通道(CCC)的制造、设计、模拟和优化以及计算机辅助技术(CAD、CAE 和 FEM)的耦合方法,提出了模拟退火算法(SA)、响应面法(RSM)、人工神经网络(ANN)和粒子群(PSO)四种保形冷却通道相关优化的优化算法。通过对直式冷却通道和随形冷却通道进行比较,得出在注塑成型过程中,使用随形冷却通道可以获得比传统通道更好的冷却性能。

郭富城^[49]以翘曲量作为衡量翼子板成型质量的评价指标,设计并完成了正交实验,利用极差和方差对数据进行分析,研究出各工艺参数对翼子板成型质量的影响程度,初步确定了翼子板成型的工艺参数,通过仿真模拟得到优化后翼子板的翘曲量为 4.025mm,为了进一步提高翼子板注塑成型质量,运用 BP 神经网络和遗传算法对翼子板成型的工艺参数优化,将优化后的结果导入到 Moldflow 中进行验证,得出优化后的翼子板翘曲量为 3.897mm,比正交实验的最优结果减少了 3.1%。李姝^[50]以汽车左侧前保险杠为研究对象,体积收缩率和翘曲量作为衡量汽车左侧前保险杠成型质量的评价指标,采用熵权法确定评价指标的权重,对工艺参数进行多目标优化,优化后的体积收缩率为和翘曲量分别为 10.36%和 3.286mm,优化效果分别降低了 15.9%和 4.7%。孙政^[51]等运用 Moldflow 软件模拟空调外罩注塑成型过程,通过信噪比分析和方差分析确定影响产品质量的主要参数,基于梯度增强型 Kriging(GEK)理论建立出质量指标预测的多目标优化模型,采用多目标差分进化(MODE)算法以质量缺陷和周期时间最小化为目标搜寻全局最优解,优化后空调外罩的翘曲量、体积收缩率和周期时间分别降低 0.88%、4.68%和 14.81%,优化效果较好。颜志勇^[52]等以 PLC 控制器端子为研究对象,通过最优拉丁超立方试验获得实验数据并搭建了克里金代理模型,利用粒子群多目标优化算法对工艺参数进行优化,验证结果表明,优化后制件的成型质量最好,较未优化前体积收缩率以及制件翘曲变形量分别减小 0.57%和 0.0443mm。王常

晶^[53]等以浇口直径和工艺参数作为设计变量对检测仪外壳注塑成型的翘曲量和体积收缩率进行研究,通过建立深度神经网络模型并结合 NSGA-II 算法对检测仪外壳的成型工艺参数进行优化,优化后检测仪外壳的体积收缩率和翘曲量分别为 6.236%和 0.3684mm,优化效果分别达到 39%、67%。

综上所述,国内外学者对于注塑成型技术的研究大多通过 Moldflow 软件模拟制件的注塑成型过程,利用极差、方差和信噪比分析确定最佳工艺组合,通过这些方法只能针对单个评价指标进行优化,无法同时优化多个目标,优化的局限性较大。一些学者则是以模拟数据中的工艺参数作为输入,翘曲量和体积收缩率等评价作为输出搭建多目标优化模型,利用多目标智能优化算法预测最佳的工艺参数组合,这种采用智能优化算法能够在全局范围内搜索最佳组合,避免局部最优。

1.4 本文主要研究内容

以汽车后座椅下围中护板为研究对象,通过机械优化设计方法中的罚函数法对护板模型结构进行轻量化设计,根据优化后的模型设计相应的注塑成型模具,并对汽车后座椅下位中护板注塑成型模具的传热系统进行研究,利用最优拉丁超立方方法设计试验并模拟护板注塑成型过程,研究注塑成型工艺参数的影响程度,运用鲸鱼算法和 BP 神经网络模型对汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数优化,提高产品注塑成型的质量。

第 1 章主要概括了汽车轻量化和注塑成型技术的发展背景和研究意义,介绍了实现轻量化技术的途径和国内外的研究现状,以及提高产品注塑成型质量的影响因素和方法,探究了国内外注塑成型工艺参数优化的优化算法。

第 2 章运用惩罚函数法对汽车后座椅下围中护板结构进行优化设计,选取了尺寸参数作为设计变量,根据制件实际装配要求确定设计变量的参数范围,以护板的强度和尺寸范围作为约束条件,制件质量最小作为目标函数搭建优化模型,通过 Matlab 软件进行求解,根据得出的结构对模型进行二次建模,并利用 ANSYS 软件对制件静力学分析。

第 3 章主要概述了汽车后座椅下围中护板注塑成型模具的设计过程,通过 Moldflow 软件对制件进行浇口分析,寻找最佳的浇口位置并设计浇注系统,根

据汽车后座椅下围中护板结构特点设计出相对应的注塑成型模具的凹凸模、抽芯机构和顶出机构，绘制了汽车后座椅下围中护板模具的二维图。

第 4 章主要对汽车后座椅下围中护板模具的传热系统进行研究，分析了模具在注塑成型时的热量传递，研究了模具温度对于汽车后座椅下围中护板材料和注塑成型周期的影响，根据热力学理论搭建模具的传热模型，推导出制件在注塑过程中达到顶出温度时的冷却时间模型，利用 ANSYS 软件对模具进行热分析。

第 5 章确定汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数和评价指标，采用拉丁超立方试验设计，运用 Moldflow 软件模拟汽车后座椅下围中护板模型注塑成型过程，对得出的仿真数据进行方差分析、Pareto 图分析和交互效应和主效应分析以确定注塑成型参数的主次因子。

第 6 章利用 BP 神经网络模型搭建汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数与评价指标之间的模型，通过鲸鱼算法优化 BP 神经网络模型的权值和阈值，建立 WOA-BP 神经网络模型对汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数进行优化。

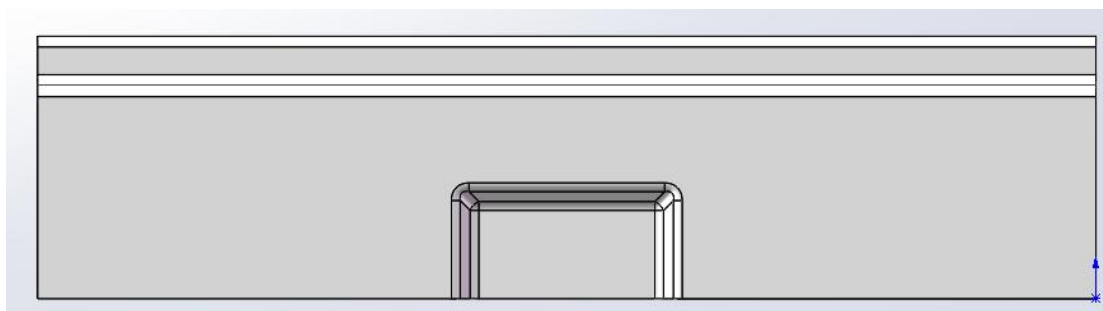
第 2 章 汽车后座椅下围中护板结构优化设计

座椅作为汽车上与用户接触最多、最为紧密的部件，其安装在汽车上的稳定性、可靠性、安全性和重量是衡量座椅系统好坏的重要因素。因此，座椅系统上的零部件受到众多研究人员和汽车企业的关注，在满足零部件使用的安全性和可靠性的前提下，通过减少零部件质量以达到对汽车的轻量化。本章通过对汽车后座椅下围中护板的结构进行设计，在保证强度的同时，运用机械优化方法对结构进行优化设计，以达到减轻重量的目标。

2.1 汽车后座椅下围中护板结构设计

汽车后座椅下围中护板一般由横梁和纵梁组成，形成一个稳定的保护框架，用于保护后座乘客免受车辆后部碰撞时的伤害，因此中护板通常是由高强度和硬度的钢或铝合金制作而成的。高强度的钢铁和铝合金由于其密度较高，生产出的制件重量比较大，对于汽车能耗、碰撞缓冲和尾气排放等性能有一定的影响，为了降低汽车重量，在保证强度的同时采用低密度材料来代替原有的钢铁材料，塑料制件能够提供更好的碰撞缓冲效果，以吸收碰撞能量并减轻乘客的伤害。

对于汽车后座椅下围中护板结构的设计，既要保证强度又要尽可能的降低零件的质量，同时考虑到乘客的舒适性和空间利用率，中护板的形状和尺寸需要适应车辆后座的设计，尽量不占用过多的空间。根据主机厂提供的周边数据，建立初始的护板三维数据模型简图，如图 2-1 所示，模型的总体结构尺寸为 $238 \times 963\text{mm}$ ，为了便于对模型总体结构进行优化，暂时忽略模型周边安装点的孔洞、圆角及一些局部复杂形状等。



(a)

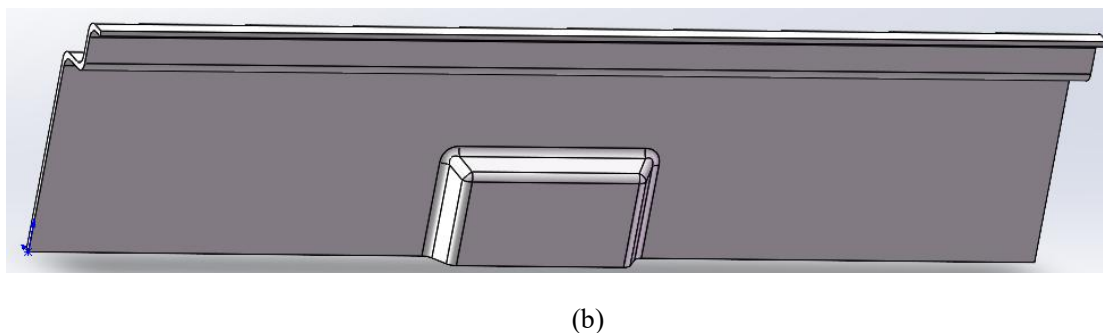


图 2-1 初始汽车后座椅下围中护板模型

2.2 汽车后座椅下围中护板结构优化模型

为了建立汽车后座椅下围中护板结构优化模型，需要确定结构优化模型的设计变量、约束条件以及目标函数。通过对汽车后座椅下围中护板结构进行分析，确实优化的设计变量和目标函数，利用设计变量的参数范围和护板结构强度作为约束条件，搭建出汽车后座椅下围中护板结构优化模型。

2.2.1 设计变量

在优化设计中，设计变量的确定是极其关键的一步，对优化算法的效果和结果的准确性有一定的影响。在建立优化设计的数学模型时，需要确定设计变量的影响程度，选取影响程度较大的参数作为设计变量，避免对不重要参数的选取，减少设计变量的个数，提高算法计算效率的同时又保证了优化的效果和精确性。

如图 2-2 为汽车后座椅下围中护板模型二维图，选取尺寸参数作为设计变量来描述汽车后座椅下围中护板的外形尺寸和厚度，制件的总体外形尺寸长度和宽度是根据汽车后座椅的尺寸大小来确定的，不可作为设计变量进行优化设计。因此对汽车后座椅下围中护板的优化需要对其内部的结构尺寸进行设计，内部的结构尺寸包含护板下方凹面宽度 $X1$ 和长度 $X2$ 、上方横面宽度 $X3$ 和中间斜面斜度 $\alpha1$ 和宽度 $X4$ 、厚度 $X5$ ，其中 $X1$ 的变化决定凹面的宽度大小， $X2$ 的变化决定了凹面的长度， $X3$ 的变化决定了 $L4$ 和 $L5$ 线段的左右移动， $X4$ 的变化决定了 $L7$ 和 $L8$ 线段的上下移动， $\alpha1$ 的变化决定了 $L1$ 和 $L6$ 线段的旋转角度， $X5$ 为护板的厚度。即设计变量为式(2-1)。

$$X = (X1 \ X2 \ X3 \ X4 \ \alpha1 \ X5) \quad (2-1)$$

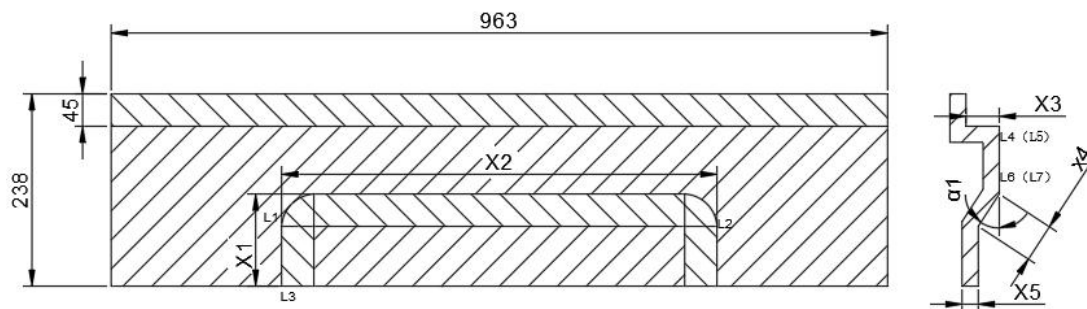


图 2-2 汽车后座椅下围中护板模型二维图

2.2.2 目标函数

为了解决汽车后座椅下围中护板结构的优化问题,需要寻找一个数学模型来描述设计变量与优化问题之间的关系,该数学模型是以优化问题中要最小化或最大化的量来建立出的目标函数。针对汽车后座椅下围中护板结构的优化,在保证尺寸条件约束和强度条件约束的情况下,尽可能地降低护板的重量。因此,将护板总重量最小作为目标函数。建立出的汽车后座椅下围中护板结构优化的目标函数为式(2-2)。

$$F(x) = \rho_p [963(238 + x_3) - x_1 x_2 + (x_1 - x_4 \cos \alpha)(x_2 - x_4 \cos \alpha) + (2x_2 + x_3)x_4] x_5 \quad (2-2)$$

式中, ρ_p —PP 材料的密度(g/cm^3),其数值为 0.91×10^{-3} ;

x_1 —下方凹面宽度(mm);

x_2 —为下方凹面长度(mm);

x_3 —上方横面宽度(mm);

x_4 —中间斜面宽度(mm);

α —中间斜面斜度($^\circ$);

x_5 —护板厚度(mm)。

2.2.3 约束条件

约束条件分为尺寸约束和性能约束,所谓尺寸约束即为根据设计要求,设计变量必须满足的某些几何条件以及只对设计变量的取值范围加以限制的那些约束,根据制件实际装配要求,汽车后座椅下围中护板结构的尺寸约束条件为式(2-3)。

$$S.t \begin{cases} g_1(x) = 80 - x_1 \leq 0 \\ g_2(x) = 460 - x_2 \leq 0 \\ g_3(x) = 20 - x_3 \leq 0 \\ g_4(x) = 40 - x_4 \leq 0 \\ g_5(x) = \alpha - 90^\circ \leq 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

性能约束是指满足特定工作性能而建立的约束条件，根据 GB15083—2019 国家标准及认证实施要求解读^[54]，对汽车后座椅下围中护板质心处施加一个载荷大小为护板质量 20 倍的力，即其大小为 146N，方向为垂直护板向内，以此校核护板的弯曲强度。汽车后座椅下围中护板的弯曲强度可通过式(2-4)计算。

$$\sigma_{\max} = C \frac{F}{l^2} \quad (2-4)$$

式中，C—矩形平板系数，其数值为 0.0611，PP 材料的许用弯曲强度为 $[\sigma] = 40\text{MPa}$ ，强度要求为式(2-5)。

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (2-5)$$

汽车后座椅下围中护板的强度约束条件为式 (2-6)。

$$g_6(x) = \sigma_{\max} - [\sigma] \leq 0 \quad (2-6)$$

2.2.4 优化模型

本文针对汽车后座椅下围中护板结构进行优化，以 2.2.2 节中的式(2-2)为汽车后座椅下围中护板结构优化的目标函数，2.2.3 节中的式(2-3)和式(2-6)为尺寸约束条件和强度约束条件，利用惩罚函数法对模型进行求解。建立出的汽车后座椅下围中护板结构优化数学模型为式(2-7)。

$$\begin{cases} F(x) = 9.1 \times 10^{-3} \left[963 (238 + x_3) + (x_4 \cos \alpha)^2 - (x_1 + x_2)x_4 \cos \alpha + (2x_2 + x_3)x_4 \right] x_5 \\ g_1(x) = 80 - x_1 \leq 0 \\ g_2(x) = 460 - x_2 \leq 0 \\ g_3(x) = 20 - x_3 \leq 0 \\ g_4(x) = 40 - x_4 \leq 0 \\ g_5(x) = \alpha - 90^\circ \leq 0 \\ g_6(x) = C \frac{F}{x_5^2} - 40 \leq 0 \end{cases} \quad (2-7)$$

惩罚函数法是将约束条件引入目标函数中,通过对违反约束的程度进行惩罚,将原始的约束优化问题转化为无约束的优化问题,该函数具有良好的灵活性,可以对目标函数与限制条件进行随机修改^[55]。算法在迭代过程中,逐步减小惩罚项的系数,使得在优化过程中约束条件得到满足,通过求解新目标函数的无约束极小值,以得到原问题的约束最优解。惩罚函数法的数学模型如为式(2-8)。

$$\begin{cases} \min F(x) \\ s.t. g(x) \leq 0 \\ F(x, r) = F(x) - r \sum_{j=1}^m \frac{1}{g_j} \end{cases} \quad (2-8)$$

式中, r —惩罚因子,当其趋于 0 时,求得在约束边界上的最优解;

$\sum_{j=1}^m \frac{1}{g_j}$ —障碍项,对违反约束条件进行惩罚,限制参数迭代的区域。

惩罚函数法结构优化模型求解流程如图 2-3 所示。

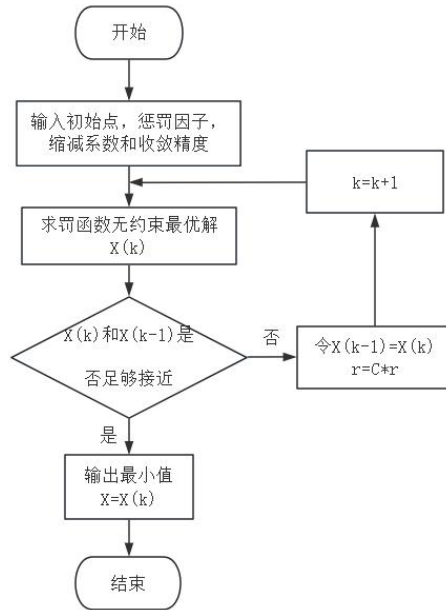


图 2-3 惩罚函数法结构优化模型流程图

2.3 汽车后座椅下围中护板结构优化模型求解

利用惩罚函数法建立出汽车后座椅下围中护板结构优化模型后,对模型求解前需要确定算法迭代的初始条件,主要包括模型的初始点、惩罚因子、缩减系数和收敛精度。初始条件的选取会严重影响到算法的迭代和结果的精确性,合理的选择初始参数能够减小迭代的次数,提高计算效率和优化结果。

2.3.1 模型初始点

模型初始点的选取会影响算法的计算效率和收敛性,选取的点必须要满足约束条件,尽量在远离约束边界的范围选取,避免障碍项过大影响函数的模型,不利于惩罚函数法的迭代,选取的汽车后座椅下围中护板优化模型的初始点为 $X^0=[X_1 X_2 X_3 X_4 \alpha_1 X_5]^T=[100 \ 480 \ 30 \ 60 \ 60^\circ \ 4]^T$ 。

2.3.2 惩罚因子初值

惩罚因子作为平衡障碍项和原目标函数大小的参数,直接严重影响到算法迭代的结果。惩罚因子过大会导致障碍项变大,使得其在搭建的模型中起到支配作用,不利于算法的迭代和汽车后座椅下围中护板优化模型的求解。选取的惩罚因子过小,会导致迭代过程中约束条件的违反程度较大,影响算法的数值稳定性。对于惩罚因子的选取一般采用试算法选确定初值为 1,通过迭代的结果调整初值的大小,也可以通过经验公式来确定,惩罚因子初值计算的经验公式为式(2-9)。

$$r^0 = \left| \frac{F(x^0)}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{g_j(x^0)}} \right| \quad (2-9)$$

2.3.3 缩减系数

惩罚因子会随着迭代的进行不断改变,通过缩减系数来控制惩罚因子的变化,其变化规律为递减至 0 的数列,因此,缩减系数为[0 1]区间内的一个数。缩减系数的选择会影响算法的收敛性和迭代过程中约束条件的严格程度,较小的缩减系数会使得惩罚因子缩减得更慢,对约束条件的惩罚也会持续较长时间,导致算法收敛速度较慢。较大的缩减系数则会使得惩罚因子缩减得更快,对约束条件的惩罚也会逐渐减小,加快算法的收敛速度,但可能导致在迭代过程中对约束条件的违反程度较大。迭代过程中惩罚因子缩减的大小通过式(2-10)来计算。

$$r^k = cr^{k-1} (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2-10)$$

式中, c —惩罚因子的缩减系数, 本文取缩减系数 $c=0.5$ 。

2.3.4 收敛条件

内点法的收敛条件为式(2-11)和式(2-12)。

$$\frac{F(x^*(r^k), r^k) - F(x^*(r^{k-1}), r^{k-1})}{F(x^*(r^{k-1}), r^{k-1})} \leq \varepsilon_1 \quad (2-11)$$

$$\|x^*(r^k) - x^*(r^{k-1})\| \leq \varepsilon_2 \quad (2-12)$$

式(2-11)表示当第 k 次和第 k-1 次惩罚函数法的值之间的变化非常小时，函数已经收敛到最优解。式(2-12)表示第 k 次和第 k-1 次的惩罚函数解的变化极小，即无约束目标函数的最优解逼近原目标函数的解。为了保证算法能够在合理的时间内收敛到最优解，收敛条件的选取既不能过大也不能过小，汽车后座椅下围中护板惩罚函数法结构优化的收敛精度 ε 取 10^{-4} 。

2.3.5 优化结果

通过编写惩罚函数法程序，并在 Matlab 软件中运行。算法迭代前，设置初始点 $X^0 = [100 \ 480 \ 30 \ 60 \ 60^\circ \ 4]^T$ ，缩减系数 c 为 0.5，收敛条件 ε 为 10^{-4} ，惩罚因子为 1，将参数值带入到程序中进行求解，得到的结果矩阵为 $X = [125 \ 516.6475 \ 26.9107 \ 42.5904 \ 22.39^\circ \ 1.91]^T$ ，为了保证护板质量，将护板厚度设置为 2.5mm，并且将得到的参数圆整为 $X = [125 \ 516 \ 27 \ 42 \ 22.5^\circ \ 2.5]^T$ ，此时护板重量为 628.6g，优化效率达到 13.9%。

根据尺寸参数在 UG 中建立的模型如图所示。在护板模型周围设置安装点和卡扣以固定在座椅上。设置加强筋时需要避免造型面，优先采用十字形加强筋，并且以长方形排布，效率最高、刚度最好。最终的汽车后座椅下围中护板模型图如 2-4 和图 2-5 所示，二维模型图如图 2-6 所示。

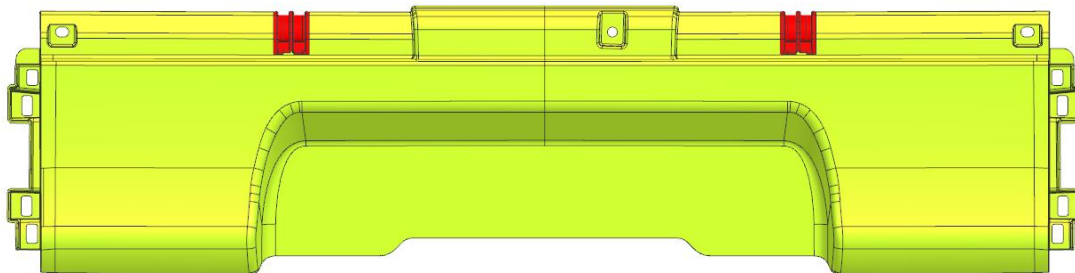


图 2-4 汽车后座椅下围中护板模型正面图

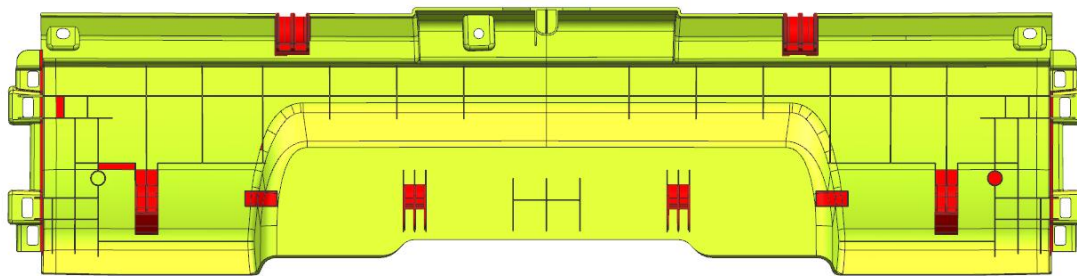


图 2-5 汽车后座椅下围中护板模型背面图

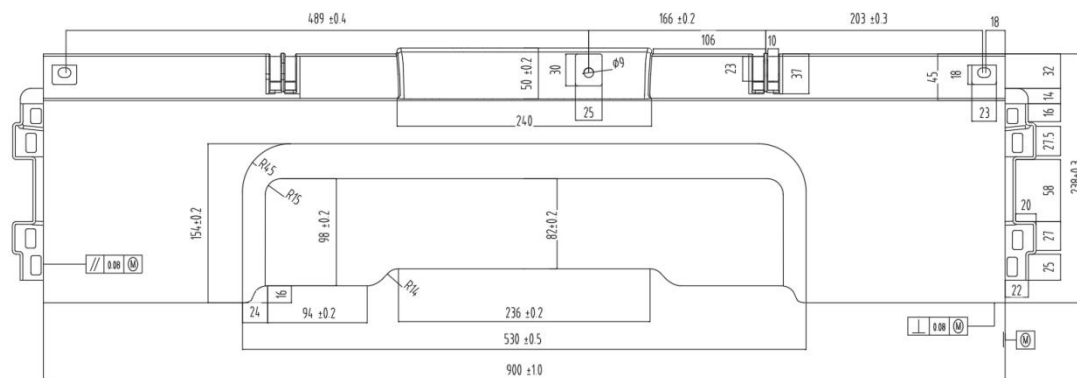


图 2-6 汽车后座椅下围中护板模型二维图

图 2-4 和图 2-5 为汽车后座椅下围中护板模型的三维图, 根据汽车后座椅下围中护板模型绘制的二维图如图 2-6 所示, 并在二维图中标注相应的尺寸和公差以及形位公差。

2.4 汽车后座椅下围中护板静力学分析

针对汽车后座椅下围中护板结构进行结构优化,实现了其重量的减小,为了确保优化后结构的可靠性和安全性,采用 ANSYS 软件对汽车后座椅下围中护板结构进行静力学分析。将汽车后座椅下围中护板模型导入到 ANSYS 中,设置材料为 pp 材料,定义其弹性模量和泊松比,对模型进行网格划分,网格大小设置为 2.5mm。在模型上表面施加 146N 的力,四周固定处和背面卡扣设置固定约束,求解出汽车后座椅下围中护板模型位移云图如图 2-7 所示。

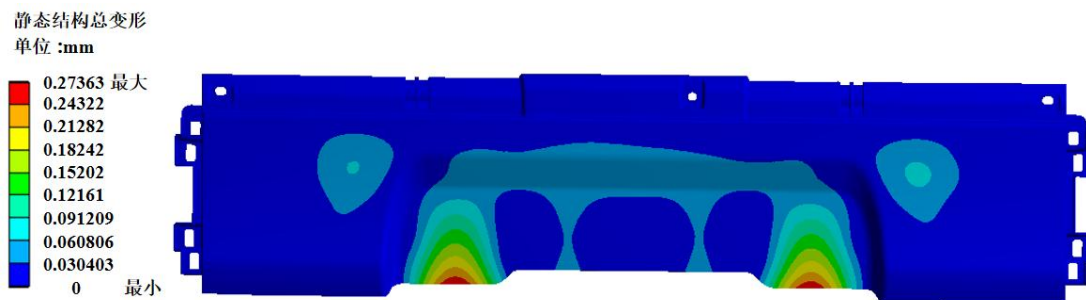


图 2-7 汽车后座椅下围中护板位移云图

图 2-7 所示，静力学分析出的汽车后座椅下围中护板位移云图，变形主要分布在模型的中间，四周变形量较小，最大变形量为 0.27363mm，变形量较小，因此，优化后的汽车后座椅下围中护板结构满足要求。

2.5 本章小结

本章主要对汽车后座椅下围中护板产品结构进行优化设计，提出了汽车后座椅下围中护板优化模型。根据实际装配需求对护板整体结构进行设计，论述护板结构的重要设计变量和优化问题，以汽车后座椅下围中护板重量最小作为目标函数，通过强度约束和尺寸约束建立了尺寸参数和优化问题之间的函数关系。以设计变量的参数范围和护板的强度为约束条件，护板重量最小为目标函数，搭建汽车后座椅下围中护板结构优化的惩罚函数法数学模型，运用 Matlab 软件进行求解，利用优化后的参数对模型进行二次建模，利用静力学对优化后的汽车后座椅下围中护板模型进行分析，得出优化后的模型仍满足强度要求，且质量从 730g 减轻到 628.6g，优化效率达到 13.9%。

第3章 汽车后座椅下围中护板模具结构设计

注塑成型加工技术是热塑性塑料产品成型的主要方式,通过将熔融状态下的原材料注入到成型模具的型腔中,经过冷却固化成所需制件形状。在其注塑成型过程中,模具的设计是影响制件成型质量和成型效率的决定性因素。合理的模具结构、材料和类型能够缩短制件的生产周期,提高制件的成型质量和性能^[56]。为了提高制件注塑成型的质量和效率,需要对汽车后座椅下围中护板的注塑成型模具结构进行设计。

3.1 汽车后座椅下围中护板模具材料选择

汽车后座椅下围中护板属于汽车内饰产品的一种,在注塑生产时要确保产品表面的光洁。模具型腔表面的光洁度对于产品注塑成型后的质量有非常大的影响,而影响模具型腔表面主要存在三种,第一种是对于模具型腔表面粗糙度加工的不够精细,可通过提高表面粗糙度来改善并进行剖光处理从而提高表面光洁度。第二种是模具成型后长时间的闲置,模具型腔表面受到温度和空气湿度的影响而产生锈渍,与模具材料的特性有关。第三种是由于模具不具备足够的硬度,导致在模具使用的过程中发生磨损和变形,通常选择具有较高硬度的钢材作为模具的材料。在注塑成型过程中,模具内不断发生热量的传递,为了确保模具能够快速散热,提高生产效率,选择导热性能好的材料作为模具的材料。根据所使用的环境,选择抗腐蚀性的材料能够提高模具的使用寿命。为了降低模具制造的成本和时间,模具材料要有较好的可加工性^[57-59]。

对于模具材料的选择不仅要考虑材料的硬度、耐腐蚀性、导热性可加工性等特性,也要考虑产品材料的特性。本文采用 PP 材料作为汽车后座椅下围中护板产品的材料,根据 PP 塑料的特性,模具要求具有较高的抗拉性能和一定程度的耐腐蚀性和耐磨性^[60-61]。因此,选择相对应模具钢的材料为 P20,其应用硬度为 28-34HRC^[62],硬度均匀且加工性能较好,韧性好、抗拉性强,抛光等级能够达到 A3,适用于注塑成型模具、吹塑模具、挤压模具等。充分考虑产品材料和模具的使用要求,P20 可用于汽车后座椅下围中护板注塑成型模具制造的材料。

3.2 汽车后座椅下围中护板模具浇注系统

浇注系统是用于将高温的塑料熔体从注塑机输送至模具型腔的流道系统，注塑机通过将塑料熔体从喷嘴中喷出至浇注系统的主流道中，经由分流道进入模具的各个型腔中，通过一定时间和压力的充填，在模具型腔中形成制件。浇注系统对制件的注塑成型质量有着重要的影响，对浇注系统的设计首先要确定流道的类型、浇口的位置、数量和类型，其次对浇口的尺寸进行计算，最后对分流道进行设计^[63-66]。浇注系统的设计原则^[67-71]：

- (1) 简化浇注系统的结构，减少流道长度，提高生产效率；
- (2) 保证塑料熔体的流动性，以减少气孔的产生；
- (3) 能够实现均匀填充型腔，避免因充填不均匀导致汽车后座椅下围中护板注塑成型出现缺陷。

3.2.1 浇口位置及数量设计

浇口作为浇注系统中的最后一段流道，连接着模具型腔和分流道，浇口的设计直接影响制件成型的质量。在注塑成型过程中，浇口利用其紧缩流动面使进料达到加速的效果，提高塑料熔体的流动性，当塑料熔体充满型腔后，浇口迅速冷却固化，避免模具型腔中的塑料熔体回到流道系统。浇口的形状、尺寸、位置和数量对产品注塑成型的质量有很大的影响。浇口位置通过影响塑料熔体在模具型腔内的流动方向和流动阻力，从而影响到塑料熔体的填充性能，使制件注塑成型质量受到严重的影响^[72-75]。由于塑料熔体在填充型腔的过程中，其流动压力不断减小。为了减小流动阻力，提高塑料熔体的填充性能，浇口位置尽量选择在最厚部位和易于型腔填充的部位。制件在注塑成型后，由于浇口和型腔中固化的塑料熔体会在浇口处拉断，形成浇口痕迹，从而影响制件的外观质量。因此，将浇口设计在制件的侧部和底部等非外观面上。合理的设计浇口能够减少缩孔、缺料、熔接痕、翘曲、体积收缩等缺陷，提高注塑成型的质量^[76-78]。

(1) 浇口形状

在注塑成型中，浇口的形状直接影响着塑料熔体的充填情况、制件的外观质量以及生产效率。浇口的形状需要结合制件的结构特点和模具型腔填充需求进行

选择，合适的浇口形状有利于塑料熔体在模具型腔中均匀且快速的充填，避免塑料熔体在充填过程中产生过多的压力或速度差异，减少气泡和短射的产生，提高制件注塑成型的质量^[79-82]。汽车后座椅下围中护板注塑成型浇注系统采用点浇口进胶的形式。

（2）浇口位置研究

运用 Moldflow 寻找制件注塑时的最佳浇口位置，选择浇口位置作为分析序列，分别将浇口个数设置为 1、2 和 3 个。浇口位置分析结果如图 3-1，三种浇口位置的流动阻力分布情况，蓝色部分为流动阻力最低的地方，即最佳浇口设置部位。图中 1 浇口的流动阻力主要集中在护板下方最远出，2 浇口和 3 浇口的流动阻力主要集中在护板中间，这两种浇口容易在中间部位产生熔接痕，对成型质量影响较大。

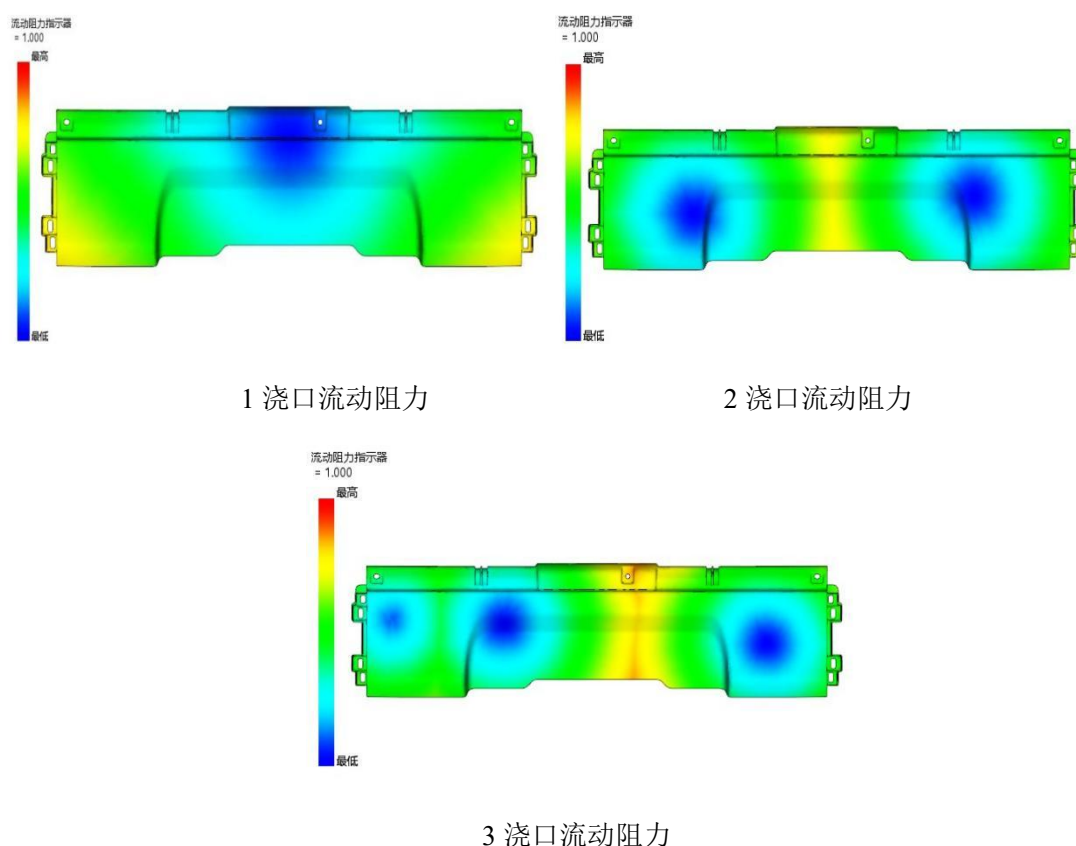


图 3-1 最佳浇口位置分析结果图

在得出三种方案的最佳浇口位置后，采用填充+保压+翘曲分析序列进行注塑成型模拟，得到如图 3-2、3-3 和 3-4，三种不同浇口数量下制件的翘曲量和体积收缩率云图。

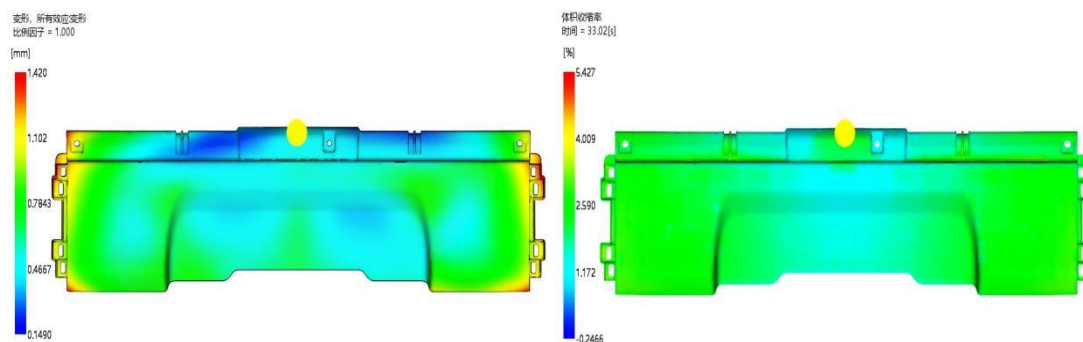


图 3-2 1 浇口翘曲变形量和体积收缩率云图

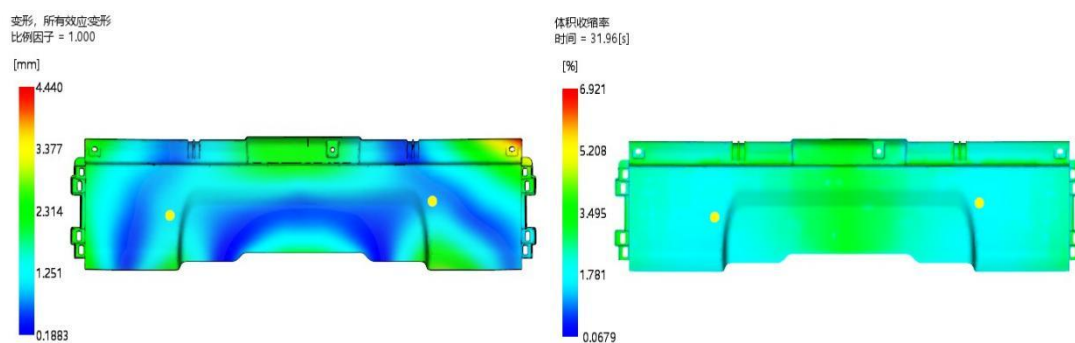


图 3-3 2 浇口翘曲变形量和体积收缩率云图

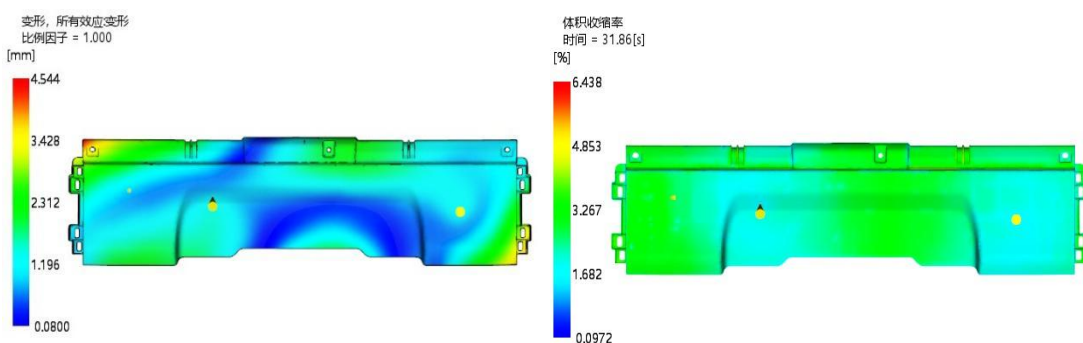


图 3-4 3 浇口翘曲变形量和体积收缩率云图

由图 3-2、3-3、3-4 可知，1 浇口位置下的翘曲变形量和体积收缩率分别为 1.420mm 和 5.427%，2 浇口位置下的翘曲变形量和体积收缩率分别为 4.440mm 和 6.921%，3 浇口位置下的翘曲变形量和体积收缩率分别为 4.544mm 和 6.438%，综合考虑，选择 1 浇口位置作为汽车后座椅下围中护板注塑成型模拟的浇口方案。

3.2.2 主流道分流道设计

主流道和分流道是浇注系统的主要组成部分，其结构的合理性直接影响浇注系统的好坏，通过影响塑料熔体的流动来影响制件的注塑成型质量。流道对制件

成型质量和生产效率十分重要,对流动设计时不仅要考虑熔体的压力损失和温度损失,也要保证熔体的流动速度^[83-85]。流道的横截面形状有圆形、矩形、梯形和U形等,通常采用流动压力损失最小和流动速度较好的圆形截面。

流道基本尺寸通常取决于塑料的种类、产品的质量 and 壁厚以及注塑机喷嘴的几何参数,对于流动性差的塑料、质量和壁厚较大的产品,流道尺寸适当大一些才能满足产品成型工艺的需要^[86]。熔体的流动速度可由流过浇口的熔体体积和注射时间进行计算^[87],如式(3-1)。

$$q = \frac{V}{t} \quad (3-1)$$

式中, q —熔体的流动速度(cm^3/s);

V —浇口流过的熔体体积(cm^3);

t —注射时间(s)。

非牛顿流体在圆管道中的流量计算为式(3-2)。

$$q = \frac{n\pi}{3n+1} \left(\frac{\Delta p}{2KL} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{3n+1}{n}} \quad (3-2)$$

式中, Δp —半径 r 的圆管在长 L 时的压力降;

K —塑料熔体的稠度($\text{N} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$),

n —流动指数,也称非牛顿流动指数。

在圆管道中,管壁的剪切速率为式(3-3)。

$$\gamma = \frac{\Delta p r^{\frac{1}{n}}}{2KL} \quad (3-3)$$

将式(3-3)代入式(3-2)中,整理得式(3-4)。

$$q = \frac{n\pi}{3n+1} \frac{\Delta p r^{\frac{1}{n}}}{2KL} r^3 = \gamma \frac{n\pi}{3n+1} r^3 \quad (3-4)$$

由喷嘴直径 $d=2r$, 可得喷嘴直径的计算式为式(3-5)。

$$d = \sqrt[3]{\frac{8}{\pi\gamma} \sqrt{\frac{q(3n+1)}{n}}} \quad (3-5)$$

利用 UG 软件的测量体指令测量汽车后座椅下围中护板塑件总体积为 685333.0903mm^3 , pp 材料的许用剪切应力为 $1200(\text{/s})$, 流动指数为 0.3458 , 通过式(3-5)计算出主流道喷嘴内径为 14mm , 主流道内径为 16mm , 分流道内径为

12mm，浇口直径 $D=4\text{ mm}$ 。

将汽车后座椅下围中护板模型导入到 Moldflow 中划分和修复网格，对模型复制、旋转、平移得到一模两腔的汽车后座椅下围中护板模型。创建浇注系统的路径，将其设置改成冷流道后划分网格，即可生成如图 3-5 所示的汽车后座椅下围中护板浇注系统。

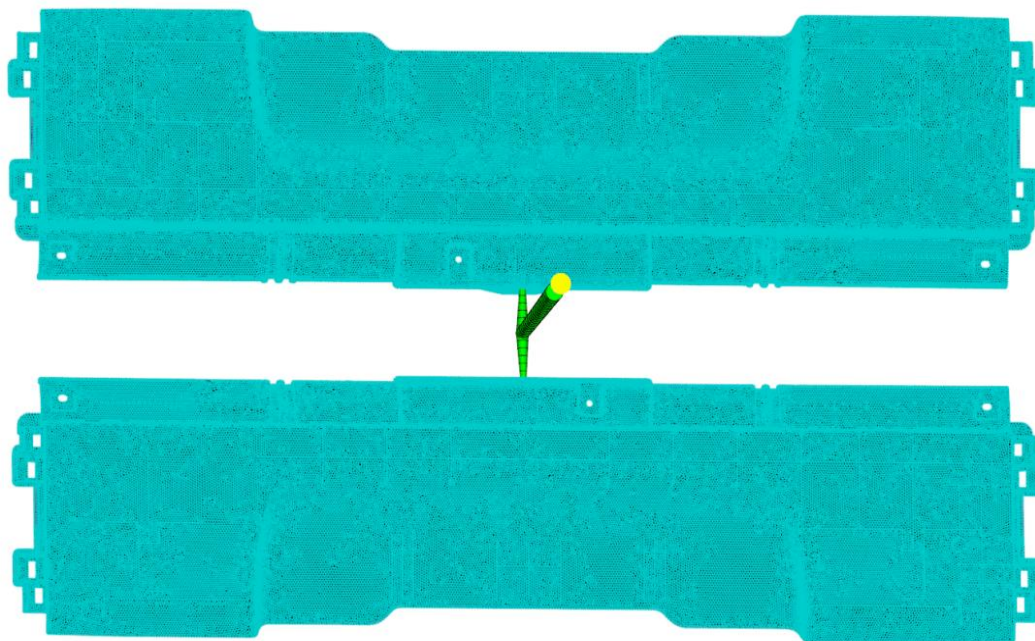


图 3-5 汽车后座椅下围中护板浇注系统图

图 3-5 所示，汽车后座椅下围中护板模具一模两腔的浇注系统图，主流道采用圆形流道，其内径设置为 16mm，分流道采用圆锥形流道，大段内径设置为 12mm，小段内径设置为 4mm。

3.3 汽车后座椅下围中护板模具成型系统

注塑模具的成型系统由凹模和凸模两部分组成。凹模与成型制件的内表面相接合，用来形成产品的内部形状，凸模则与成型产品的外表面相接合，用来形成制件的外部形状，模具成型系统直接影响汽车后座椅下围中护板的成型质量。模具闭合后，凹模和凸模会互相嵌合，形成制件的整体形状，即模具型腔^[88-91]。在注塑成型过程中，塑料熔体进入到模具的空腔中，填充整个凹模和凸模的空间，型腔中的熔体经过冷却固化形成汽车后座椅下围中护板。根据汽车后座椅下围中

护板三维模型对凹凸模进行设计,汽车后座椅下围中护板凹模和凸模的三维图如图 3-6 和图 3-7 所示。汽车后座椅下围中护板凹凸模闭合形成的模具型腔如图 3-8 所示。

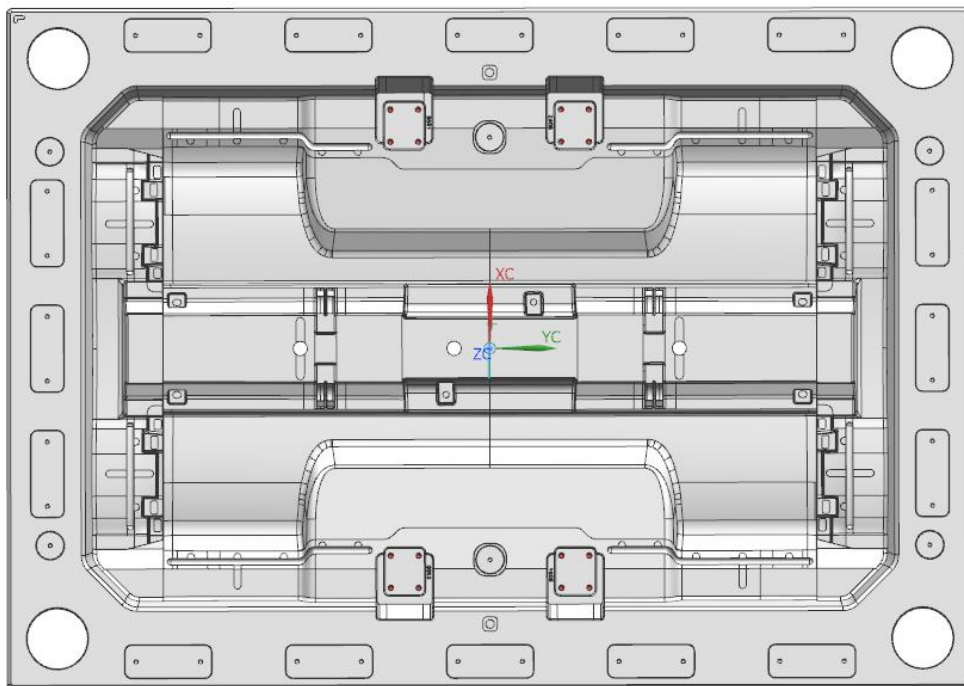


图 3-6 汽车后座椅下围中护板模具凹模三维图

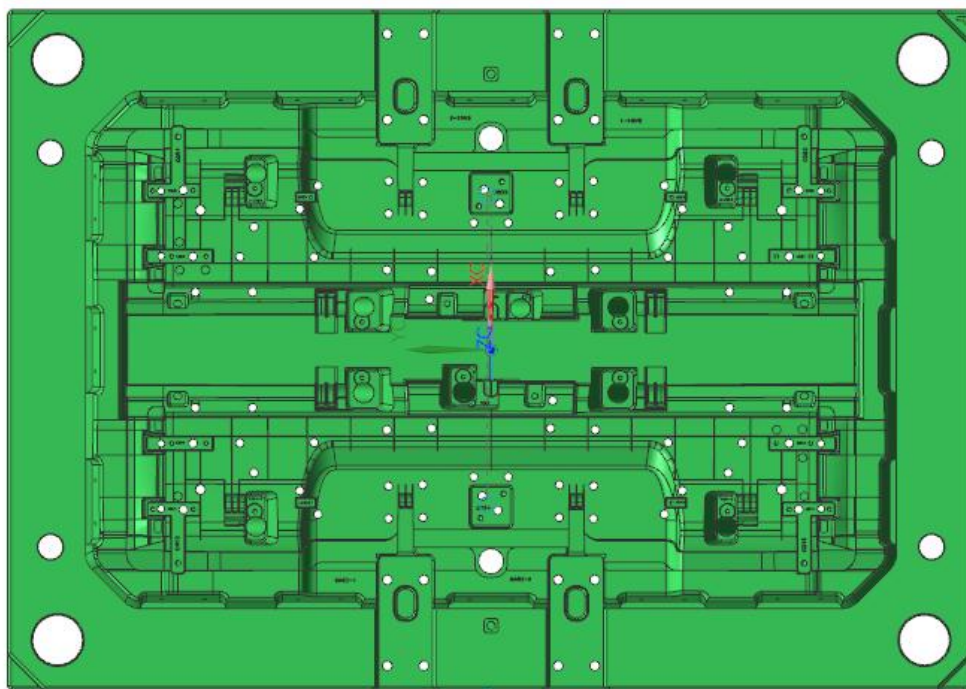


图 3-7 汽车后座椅下围中护板模具凸模三维图

图 3-6 和 3-7 为汽车后座椅下围中护板注塑成型模具的凹模和凸模,模具装

配后，凹凸模之间的间隙为制件的成型空间。在模具型腔中需要设置侧向抽芯机构和顶出机构，以便汽车后座椅下围中护板注塑成型后顺利脱离模具的型腔。

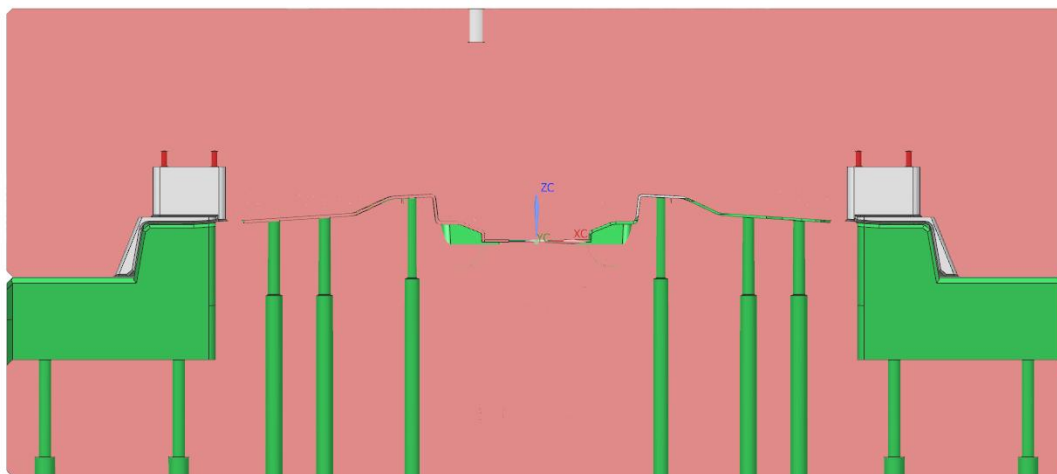
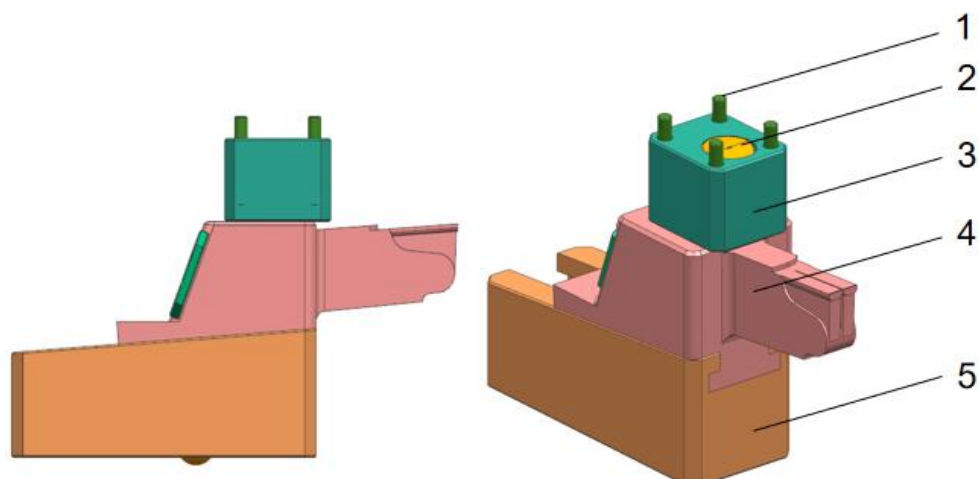


图 3-8 汽车后座椅下围中护板注塑成型模具型腔

如图 3-8 所示，汽车后座椅下围中护板凹凸模具在闭合状态下形成的模具型腔，通过塑料熔体的充填固化成汽车后座椅下围中护板制件，图中两侧为抽芯机构，模具型腔下方的圆柱为顶出机构的推杆。

3.4 汽车后座椅下围中护板模具抽芯机构

在注塑成型过程中，由于塑件的形状较为复杂，其侧壁带有通孔、凹槽或凸台时，导致模具开模方向不一致，塑件不能直接从模具中脱出。因此，需要设置侧向抽芯机构，以保证塑件安全顺利脱离模具。侧向抽芯机构是通过改变模具的运动方向，从而将注塑成型后的制件顺利从模具的型腔脱离，提高注塑成型制件的质量和生产效率^[92]。侧向抽芯机构需要满足将垂直运动转变为侧向运动功能，在模具设计中，主要采用斜导柱、斜向 T 型槽和 T 型块来实现运动的转变^[93]。侧向抽芯机构主要由滑块和斜导柱、T 形块、斜滑块等组合而成，根据机构动力来源不同，分为机动抽芯、液压抽芯和手动抽芯^[94]。采用滑块和斜导柱配合作为汽车后座椅下围中护板的侧向抽芯机构。在注塑成型过程中，制件达到顶出温度后，该机构通过凹凸模具的开合动作产生相对滑动，制件在斜导柱的作用下不仅沿着开模的垂直运动，也产生了侧向运动，使制件顺利安全的脱离，侧向抽芯机构三维图如图 3-9 所示。侧向抽芯机构与模具配合的示意图如图 3-10 所示。



1—螺栓 2—斜导柱 3—定位块 4—滑块 5—滑块导轨

图 3-9 滑块+斜导柱的侧向抽芯机构三维图

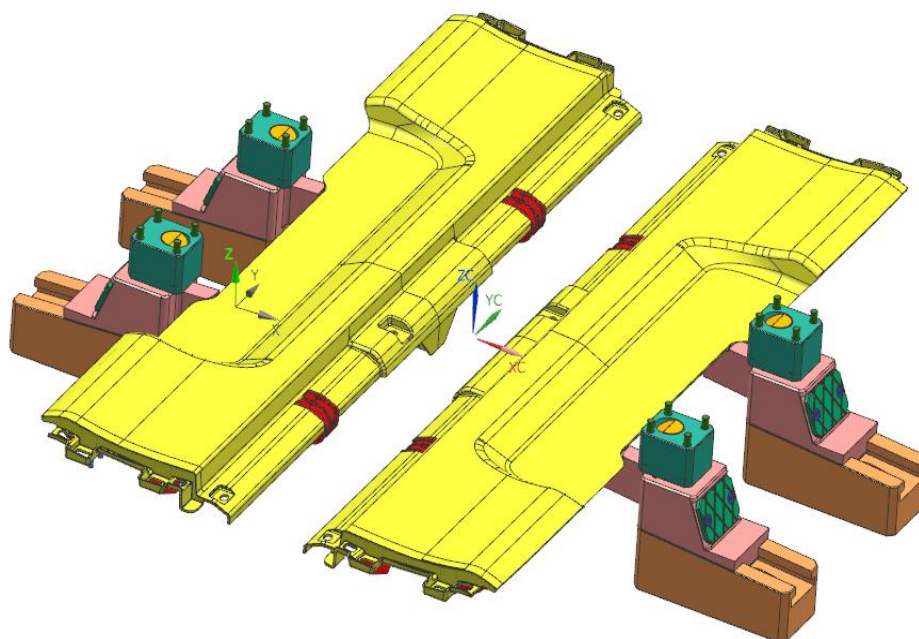


图 3-10 侧向抽芯机构与制件配合图

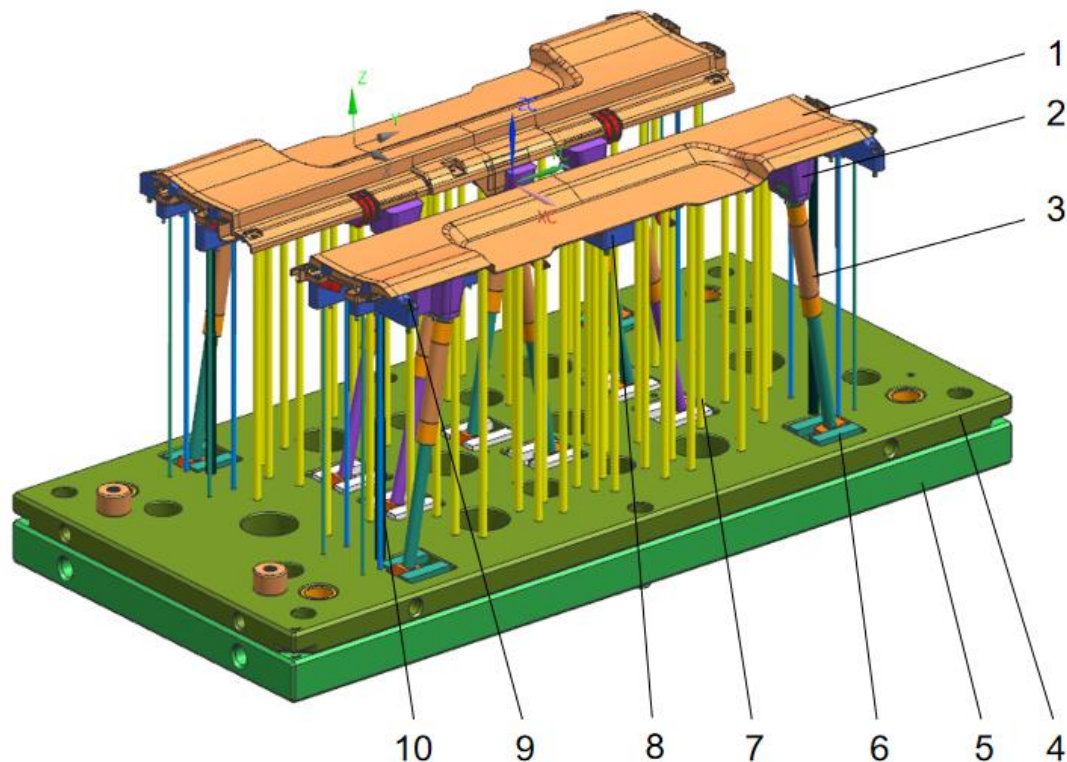
图 3-9 和图 3-10 所示，汽车后座椅下围中护板注塑成型模具的侧向抽芯机构，该机构由滑块、斜导柱、滑块导轨组成，在抽芯过程中，汽车后座椅下围中护板制件随着滑块 4 运动，滑块 4 沿着滑块导轨 5 和斜导柱 2 运动。

3.5 汽车后座椅下围中护板模具顶出机构

为了确保汽车后座椅下围中护板能够顺利脱模，不仅需要对侧向抽芯机构进

行设计，还要对模具的顶出机构进行设计，从而保证成型品的质量和生产效率。

注塑模具的顶出机构是指在注塑成型过程中，用于顶出或弹出注塑件的机构。顶出机构由推件和推件固定板组成，通常采用圆推杆、推板和推块。塑件被顶出机构顶出脱模是注塑成型的最后一个阶段，顶出机构的设计对塑件质量的好坏起着至关重要的作用。为了确保塑件不发生形变，顶出机构中的推杆要均匀布置且作用面要尽可能大，推力点要避免作用在薄壁位置，尽量靠近塑件难以脱模的部位和包紧力大、塑件强度大的部位^[95-97]。为了避免塑件外观受到损坏，推杆位置应设在塑件的非外观面上，也要遵循安全可靠原则和方便加工原则。汽车后座椅下围中护板注塑模具的顶出机构三维图如 3-11 所示。



1—护板 2—推块 3—斜推杆 4—推杆固定板 5—推杆底板 6—支撑块 7—直推杆
8—推块 9—推块 10—推杆

图 3-11 汽车后座椅下围中护板模具顶出机构三维图

图 3-11 为汽车后座椅下围中护板注塑模具顶出机构三维图，该机构由推杆固定板、推杆底板、推杆、推块组成。在推杆固定板 4 的作用下，斜推杆 3、直推杆 7 和 10 将作用力传递到推块 2、8 和 9，推块与汽车后座椅下围中护板制件接触，推动制件沿着开模方向运动。

3.6 汽车后座椅下围中护板模具模架

汽车后座椅下围中护板模具模架是整套模具的骨架，以固定凹凸模、导向机构等结构的基体。模架的支撑结构包括上模板、下模板、四柱、活动板等部分，为了确保模具的稳定性和操作性，不仅要合理对模架的支撑结构进行合理的设计和布置，还要合理的选择模架的支撑方式^[98]。模架的支撑方式有多种选择，如四柱式、悬臂式、翼板式等。汽车后座椅下围中护板模具采用悬臂式的支撑方式，以确保模具在注塑过程中具有稳定的支撑和定位，提高注塑成型产品的质量和生产效率。汽车后座椅下围中护板模具结构三维图如图 3-12 所示。

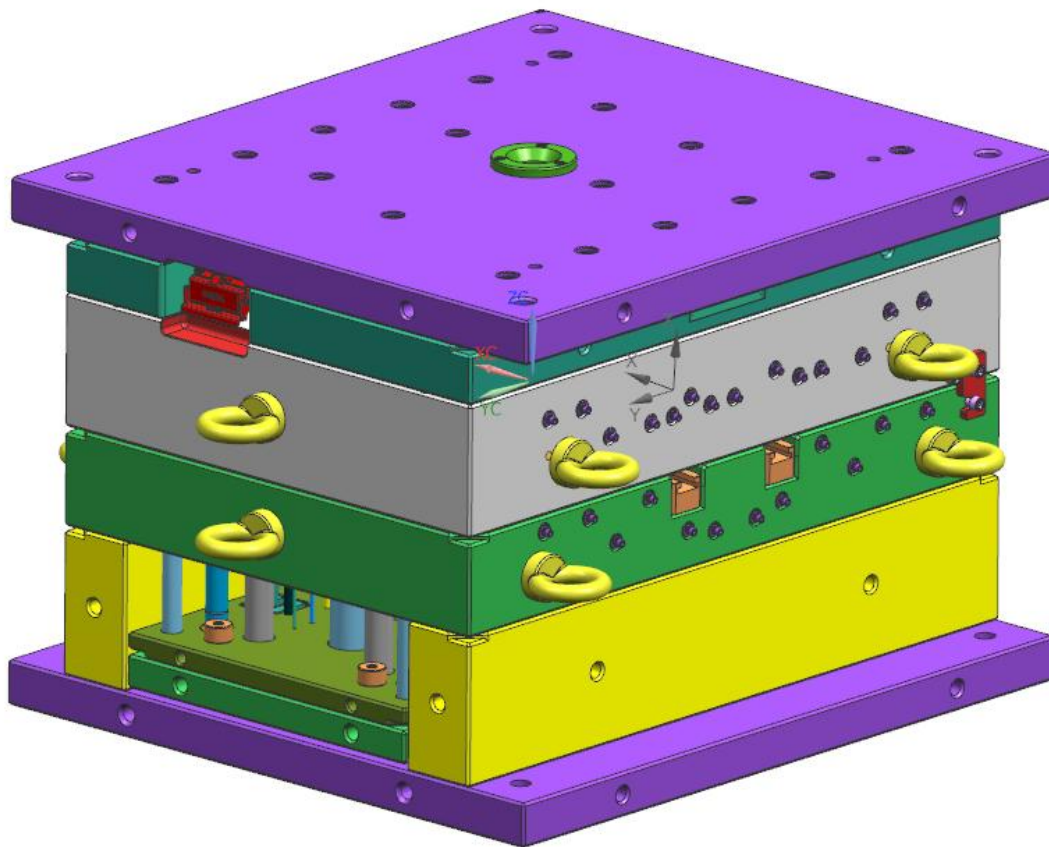
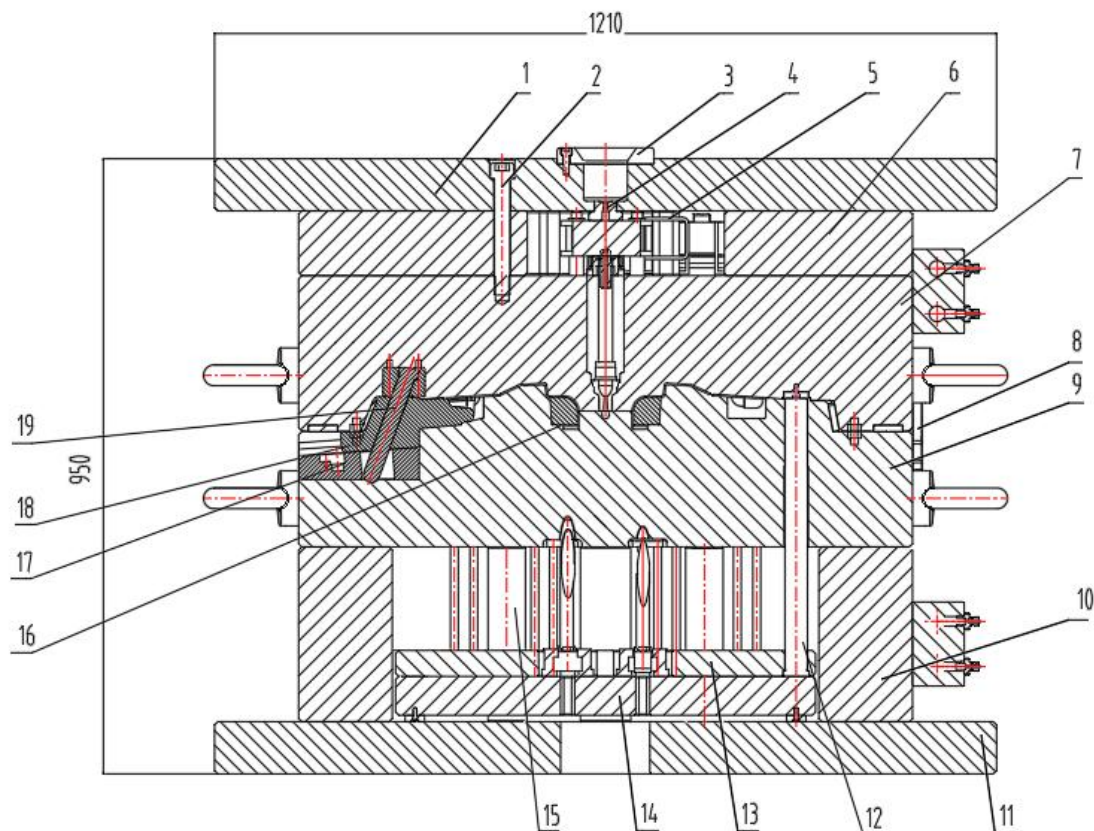


图 3-12 汽车后座椅下围中护板模具三维图

图 3-12 为汽车后座椅下围中护板注塑成型模具的三维图，该模具由定模、动模、上下模板和方体等组成，将绘制好的部件导入到 UG 中进行汽车后座椅下围中护板模具的装配，通过接触和对齐进行约束。绘制汽车后座椅下围中护板注塑成型模具的二维图并注明图中的各零件名称，对模具的尺寸和形位公差进行标注。汽车后座椅下围中护板模具的二维图如图 3-13 所示。



1—面板 2—限位螺钉 3—浇口套 4—热射嘴 5—流道固定架 6—流道推板 7—定模板
8—锁模块 9—动模板 10—方铁 11—底板 12—导柱 13—推杆固定板 14—推杆底板
15—推杆板导柱 16—推块 17—滑块导轨 18—滑块 19—斜导柱

图 3-13 汽车后座椅下围中护板注塑成型模具二维图

图 3-13 为汽车后座椅下围中护板模具二维剖面图，塑料熔体从注塑机经过浇口套进入到热射嘴中，由主流道、分流道和浇口注入到汽车后座椅下围中护板模具型腔中，将模具型腔填充完整后，经过一段时间的保压，同时冷却系统对模具和塑料熔体进行冷却，当塑料熔体冷却固化后，锁模块打开，定模和动模逐渐分离。顶出机构通过推杆底板的运动推动导柱使制件分离模具型腔，同时随着制件的分离和模具的运动，侧向抽芯机构的滑块沿着滑块导轨和斜导柱进行运动，将制件抽离出，模具的定动模合模进行下一次注塑成型。

3.7 本章小结

本章主要对汽车后座椅下围中护板注塑成型的模具进行设计，主要包括模具结构和材料的选择、模具浇注系统、抽芯机构、凹凸模和顶出机构的设计，并绘

制了模具装配图。

(1)根据制件采用的 PP 材料特性，模具需要有较高的抗拉性能和一定程度的耐腐蚀性和耐磨性，因此，选择相对应模具钢的材料为 P20，其应用硬度为 28-34HRC，硬度均匀且加工性能较好。

(2)运用 Moldflow 对汽车后座椅下围中护板产品注塑成型的浇口位置、数量和形状进行仿真，通过分析护板的流动阻力和成型的体积收缩率、翘曲量，得出最佳的浇口形状为点浇口，位于护板侧面中心处，通过护板总体积和注塑时间计算得出主流道内径为 16mm，分流道内径为 12mm，点浇口直径 D 为 4mm。

(3)根据注塑成型的工作原理和汽车后座椅下围中护板形状设计相对应的凹模和凸模，侧向抽芯机构由滑块和斜导柱组成，在非外观面上和塑件强度大的部位均匀布置顶出机构的推杆，采用推块和制件接触以增大接触面积。

第 4 章 汽车后座椅下围中护板模具传热研究

针对汽车后座椅下围中护板模具的热传递过程进行研究,分析模具在注塑过程中的传热性能以及对温度变化的响应能力,通过建立热力学模型,推导模具热平衡方程和汽车后座椅下围中护板塑件冷却时间理论公式,从而优化冷却系统结构,提高模具的传热效率和注塑成型效率。

4.1 汽车后座椅下围中护板注塑模具的传热分析

对于模具热交换的研究分为实验法、理论法、数值模拟法三种,实验法是通过相似理论搭建传热问题的实验平台进行实验以获得相关公式,理论法可通过简化传热问题并进行一些合理的假设,建立相关数学模型的理论方程,数值模拟法则是相关软件模拟求解传热微分方程。目前,搭建传热实验平台较为困难,针对模具热交换问题的分析采用理论分析和数值模拟相结合的方法,研究汽车后座椅下围中护板模具在注塑过程中的热交换。

4.1.1 理论分析过程

注塑成型过程中,注塑机将塑料加热到一定程度成为熔融状态后,将其注入模具型腔内,型腔中的熔体经过冷却固化后定形,利用抽芯机构和顶出机构将成型后的制件抽离出模具型腔^[99]。整个注塑成型过程中不断进行着热量的交换,高温熔体将热量传入型腔。模具的热量通过冷却系统将 90% 的热量吸收带走,剩余的热量通过模架和开模后的型腔散发至外界环境。图 4-1 为注塑模具热传递图。

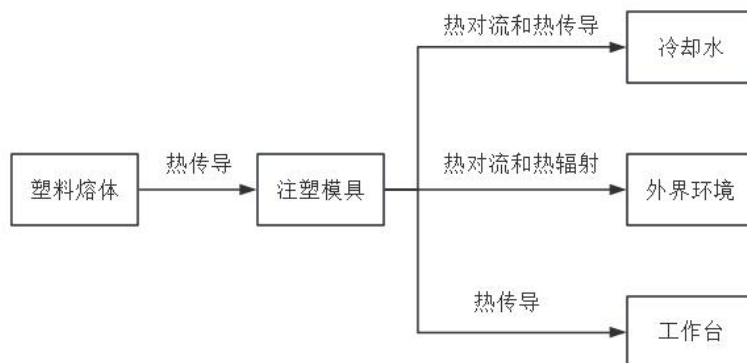


图 4-1 注塑模具热传递图

注塑成型过程热量的传递是一个复杂的三维瞬态过程,塑料熔体与型腔壁面之间存在接触热阻,塑料熔体的流动也具有不确定性,模具材料和熔体的传热系数并非恒定不变,这对于传热模型的建立带来了巨大的困难,在理论分析时需要^[100]对注塑过程进行一些必要的假设和简化:

(1)在熔体进入型腔前,模具内的各处温度均匀统一,进入型腔后,熔体与型腔壁面接触良好,不存在接触热阻;

(2)塑料熔体和模具导热系数、比热容等参数保持恒定;

(3)塑料熔体的热量只传递给模具和冷却液,且模具平均温度保持恒定;

(4)塑料熔体的传热简化成一维瞬态传热;

(5)在冷却阶段,不考虑塑料熔体所产生的热效应。

4.1.2 模具温度对成型周期的影响

汽车后座椅下围中护板的注塑成型过程不断重复进行,从模具闭合后,熔体进入型腔充填,经过一段时间的保压和冷却后开启模具,制件被顶出模具型腔。注塑成型过程中,制件被顶出模具前的温度高于设定的模具温度,汽车后座椅下围中护板模具中积攒了大量的热量,导致下一次注塑成型的模具温度过高。

注塑模具温度对汽车后座椅下围中护板的成型周期有着重要的影响,通过影响熔融塑料的流动性和凝固速度,从而影响注塑成型的周期时间。模具温度的升高不仅可以提高熔融塑料的流动性,使得塑料更容易填充模具腔体,从而缩短了充模时间,也可以加快塑料的冷却速度,减少凝固时间。但模具温度过高又会导致模具变形,从而影响成型的精度。模具温度过高或过低都会对制件成型质量产生不良影响,因此需要根据具体的材料和产品要求来确定最合适的模具温度^[101]。

4.1.3 模具温度对成型材料的影响

模具温度在影响成型周期的同时还会直接影响结晶型材料的结晶行为和晶体的形态。模具温度通过控制结晶型材料的结晶速率,从而影响材料的结构和性能,较高的模具温度会增加结晶速率,使得晶体形成更快,而模具温度较低则会减慢结晶速率。此外,模具温度还会影响结晶型材料的晶体形态。较高的模具温度会促使晶体生长更快,晶粒尺寸更大,不仅提高了制件的硬度、强度等性能,

也改善了制件成型后表面的光洁度。模具温度过低会导致塑料熔体冷却时结晶速率过小、结晶难度大，从而影响汽车后座椅下围中护板制件注塑成型的效率和精度。晶粒尺寸的大小会直接影响材料的热性能、力学性能和光学性能^[102]。因此，为了获得理想的结晶性能和材料性能，需要对模具温度进行合理的控制和调节。这可以通过调整模具的加热或冷却方式来实现，在实际生产中，通常将模具温度控制在 20-80℃ 范围内。

4.2 汽车后座椅下围中护板注塑模具的传热方式

汽车后座椅下围中护板注塑成型过程中，由于塑料熔体的温度过高，在模具型腔中产生大量的热量，热量在模具内不断传入和传出。模具中的热量是通过高温的塑料熔体传入的，在传出过程中，模具主要通过冷却液冷却和自然冷却将热量吸收，热量主要通过热传导、热对流、热辐射三种方式进行传递。

4.2.1 热传导理论

热传导是指物体和物体相互接触间出现温度差，且物体各部分间无位移，只依靠分子等微小粒子所引发的热运动导致的热量传递过程。在注塑生产过程中，模具受到高温塑料熔体的影响，热量从高温区域的塑料熔体传递到低温区域的模具型腔^[103]，这一过程符合傅里叶定律，式(4-1)为热传导理论计算式。

$$Q = -\lambda A(dt/dn) \quad (4-1)$$

式中， Q —热流量(KJ)；

dt/dn —温度梯度；

A —导热面积(mm²)；

λ —导热系数。

4.2.2 热对流理论

热对流过程是指热量在流体介质中由于密度的差异而产生的对流现象。热对流是一种不稳定的运动形式，易出现湍流现象，使得流体混合更加充分，热对流可以有效地促进热量的传递和均匀分布，提高系统的热交换效率^[104]。本文的汽

车后座椅下围中护板模具和低温的冷却水之间的热量传递属于强迫对流。对流传热过程的热流计算为式(4-2)。

$$Q = Ah(t_2 - t_1) \quad (4-2)$$

式中, Q —在单位温差内通过单位面积 A 时的热流(KJ);

t_1 、 t_2 —两不同点的温度($^{\circ}\text{C}$);

h —对流换热系数, h 越大, 热传导越剧烈。

4.2.3 热辐射理论

热辐射过程指的是物体因温度而产生的辐射现象, 是一种特殊的热能传播方式。汽车后座椅下围中护板注塑成型过程中, 模具和空气之间发生的辐射换热主要包含了相互辐射和吸收热量两种形式。当模具辐射到空气的能量和吸收的能量相等时, 模具的温度达到了动平衡状态^[105], 热辐射过程遵循 Stefan-Boltzmann 定律, 辐射热量的计算如式(4-3)。

$$Q = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (4-3)$$

式中, Q —辐射的热流量(KJ);

ε —物体发射率;

A —辐射面积(mm^2);

σ —Stefan-Boltzmann 常数;

T —当吸收率为 1 时的温度($^{\circ}\text{C}$)。

4.3 汽车后座椅下围中护板模具传热研究

汽车后座椅下围中护板模具在注塑过程中的热量来源于高温的塑料熔体, 在熔体充填过程中, 塑料熔体的热量不断传递给模具的同时, 又通过模架和冷却系统进行散热, 汽车后座椅下围中护板模具热交换的平衡方程为式(4-4)。

$$Q_P = Q_M = Q_C + Q_E + Q_N \quad (4-4)$$

式中, Q_P —高温塑料熔体的总热量(KJ);

Q_C —冷却液带走的热量(KJ);

Q_E —模具传递给注塑机的热量(KJ);

Q_N —模具辐射到外界空气的热量(KJ);

Q_M —塑料熔体传递给模具的总热量(KJ);

4.3.1 塑料熔体与模具的热传导

在注塑过程中, 高温的塑料熔体注入汽车后座椅下围中护板模具型腔内, 将热量从塑料熔体传导至模具型腔, 熔融状态下的塑料在完全充填模具的型腔后, 经由冷却系统进行冷却后逐渐凝固成型, 然后制件开始脱模被顶出。高温塑料熔体的总热量通过热传导传递给模具。其总热量计算公式为式(4-5)。

$$Q_P = 10^{-3} C_P \frac{\delta}{2} \rho L (T_M - T_E) \quad (4-5)$$

式中, C_P —pp 材料的比热容(KJ/kg·°C);

ρ —注塑制件的密度(g/m³);

T_M —注入模具型腔的熔融塑料温度(°C);

T_E —冷却结束时塑料制件的温度(°C);

δ —制件平均壁厚(mm);

L —冷却管道间距(mm)。

4.3.2 模具与冷却系统的对流换热

在充填阶段结束后, 熔融状态下的塑料和模具与冷却介质之间存在温度差, 热量由温度较高点传导至温度低点, 因此, 模具与冷却介质通过对流换热的方式进行热交换。随着冷却介质持续的流动, 传递进来的热量被冷却介质不断吸收、扩散, 使得模具内的温度快速降低, 模具与冷却系统之间的对流换热能够吸收塑料熔体传导热量的 85%-95%。

以水为冷却介质, 在 t_c 时, 冷却水吸收的热量为式(4-6)。

$$Q_C = 10^{-3} t_c (T_w - T_C) \left[\frac{1}{10^{-3} \alpha \pi D} + \frac{1}{\lambda_{st} S_e} \right]^{-1} \quad (4-6)$$

式中, T_w —型腔模具表面温度(°C)

T_C —冷却液流动温度(°C);

α —冷却水的传热系数;

D —冷却管道的内径(mm);

λ_{st} —模具材料的导热系数;

S_e —形状因子。

冷却水路布置的形状因子 S_e 为式(4-7)。

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln \frac{2l \sinh(2\pi s/l)}{\pi D}} \quad (4-7)$$

冷却水的传热系数 α 为式(4-8)。

$$\alpha = \frac{31.395}{D} Re^{0.8} \quad (4-8)$$

4.3.3 模具与周围环境的热交换

在注塑过程中,为了确保塑料熔体能够充分填充到模具型腔中,减少模具的流动阻力,提高塑料熔体的流动性,需要提前对模具进行预热。模具不仅受到高温塑料熔体和模具温度的影响,周围环境也会对模具产生一定的影响。由于模具表面的温度高于周围环境,模具会以辐射的方式将热量传递给到空气中,辐射换热取决于模具表面的温度和表面的发射率。据研究,模具与周围环境之间的热交换仅占注塑过程总热量的 5%,因此可将汽车后座椅下围中护板模具的传热简化为高温塑料熔体和模具之间的热传导与模具和冷却液之间的热交换两种形式。则整个模具的热交换平衡方程为式(4-9)。

$$\sum Q = Q_p + Q_c = 0 \quad (4-9)$$

4.4 汽车后座椅下围中护板模具传热模型

根据式(4-9)推导出汽车后座椅下围中护板达到顶出温度时所需要的冷却时间 t_c 为式(4-10)。

$$t_c = \frac{C_p \rho \frac{\delta}{2} l (T_M - T_E)}{T_W - T_C} \left[\frac{1}{2\pi \lambda_{st}} \ln \frac{2l \sinh(2\pi s/l)}{\pi D} + \frac{1}{0.031395 Re^{0.8}} \right] \quad (4-10)$$

由式(4-10)可知,在塑件材料、壁厚等参数确定后,冷却时间与冷却管道直径 D 、管道间距 l 和冷却管道中心线至型腔的距离 s 三个因素有关。冷却系统是影

响制件成型质量的重要因素之一，同时也影响着注塑的成形周期。塑件的冷却不均匀和模具温度过高都会进一步造成制件的翘曲变形和体积收缩，翘曲变形和体积收缩率是影响成型质量的两个关键指标，提高成型质量的关键在于降低这两个指标的数值，为了提高冷却系统的散热效率，需要对冷却水路直径、冷却水路间距以及冷却水路到型腔中心距离这三个参数进行设计。

4.4.1 注塑成型模具冷却时间计算

针对汽车后座椅下围中护板冷却系统的参数设置，冷却水路直径设置为 15mm，冷却水路间距设置为 35mm，冷却水路到型腔中心距离设置为 60mm。式(4-10)中参数与塑件所选用材料的特性相关，本文采用 PP 材料的密度为 0.97137g/cm^3 ，顶出温度 T_E 为 93°C ，比热容为 $1970\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ，熔体温度 T_M 为 245°C 。冷却水温度 T_c 为 25°C ，采用的 P20 模具钢的导热系数为 $31.5\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。计算出汽车后座椅下围中护板注塑成型时的冷却时间为 8.434s。

4.4.2 注塑成型模具热分析

利用 ANSYS 软件对汽车后座椅下围中护板注塑成型模具进行热分析，以验证冷却时间。在稳态热分析中设置模具的材料为 P20 模具钢，模具温度为 50°C ，熔体温度为 245°C ，冷却水对流系数为 $5866\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，温度为 22°C ，忽略空气的对流换热，稳态分析时间为 1.8s，求解得到模具稳态热分析云图如图 4-2 所示。

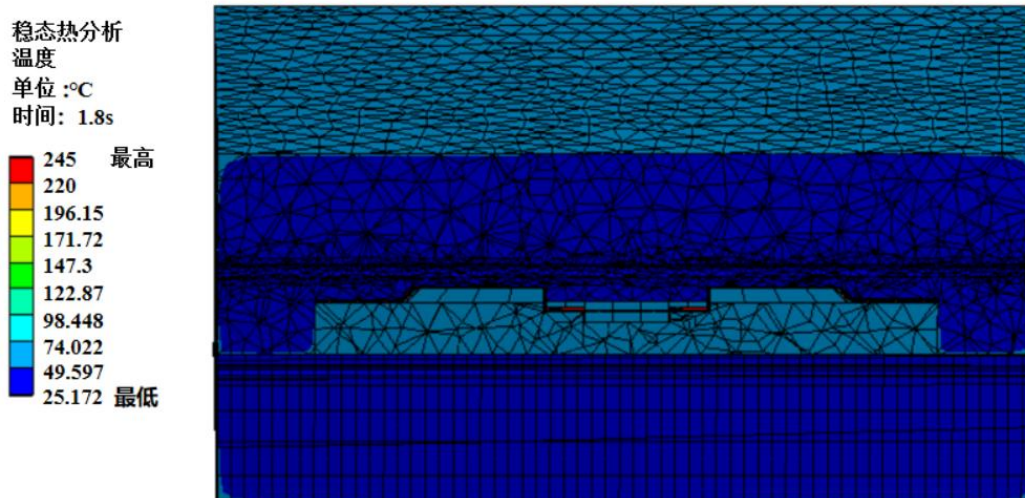


图 4-2 模具稳态热分析云图

如图 4-2 为熔体在注射到模具型腔热量传递的云图，图中只有型腔部分的温度最高，最高温度达到 245°C ，模具其余部分在冷却水的对流换热和模具温度的作用下，温度维持在 25°C 至 50°C 之间。

以稳态热分析的结果作为汽车后座椅下围中护板的瞬态分析初始环境，设置冷却水对流进行稳态热分析，得到如图 4-3 所示的模具瞬态热分析云图。

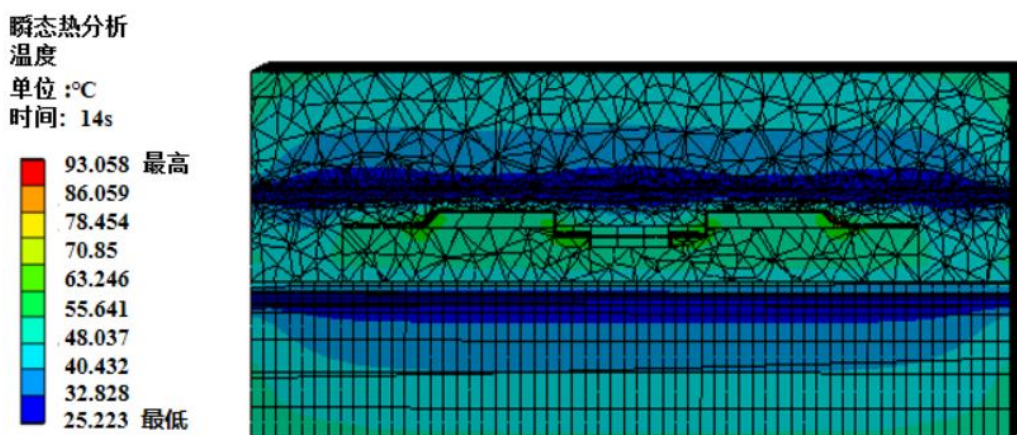


图 4-3 模具瞬态热分析云图

图 4-3 为汽车后座椅下围中护板模具瞬态热分析云图，模具的最高温度在经过冷却水的冷却后达到 93°C ，所用冷却时间为 14s 。

4.4.3 注塑成型冷却时间对比分析

通过冷却时间理论计算式(4-10)得出的汽车后座椅下围中护板模具的冷却时间为 8.434s ，利用 ANSYS 软件对模具热分析得出的冷却时间为 14s ，由于冷却时间计算式是在理想状态下的一维瞬态传热推导得出，而实际的传热过程是在三维状态下进行，导致冷却时间理论计算与仿真结果出现偏差，两者有所偏差，但汽车后座椅下围中护板模型的冷却效果良好。

4.5 本章小结

本章主要针对汽车后座椅下围中护板注塑成型模具的传热性能进行研究，通过理论分析模具的传热过程，探究了模具温度对与注塑成型的材料和周期的影响。在注塑成型过程中，传热方式主要包括塑料熔体与模具之间的热传导、模具与冷却系统之间的对流换热和模具与外界环境之间的热辐射，通过对三种传热方式的

研究，建立出汽车后座椅下围中护板的传热模型，推导出制件达到顶出温度时的冷却时间函数模型，并计算出汽车后座椅下围中护板模具的冷却时间，通过对模具进行热分析以验证理论计算的结果。

第 5 章 基于 OLHD 的汽车后座椅下围中护板注塑成型主次因子分析

在注塑成型的过程中，产品的注塑质量受到很多因素的影响，主要有产品自身的结构、模具的制造以及成型工艺参数等。为获得优质的制件，不仅需要对浇口、浇口位置数量和冷却系统进行设计，还需要确定成型工艺的参数条件^[106]。成型工艺参数通过影响熔体在模腔内的流动状态，从而影响制件成型时体积的收缩率和翘曲变形量。本文通过拉丁超立方试验对汽车后座椅下围中护板进行试验设计，利用方差分析、Pareto 图分析对注塑成型工艺参数的影响程度进行分析。

5.1 最优拉丁超立方

拉丁超立方设计是一种为减少实验顺序对实验的影响，而采取的一种平衡实验顺序的技术，采用拉丁方格作为辅助，将自变量随机分配到任意行和列中，且只出现一次。拉丁超立方虽然能够将样本点均匀散布在试验因子的参数设计空间中，但仍存在空间均匀性较差的情况，而最优拉丁超立方则改进这一缺点，提高了其在填充空间时的稳定性，保证了样本点的均匀性，减少试验误差，提高拟合模型的精确度^[107]。

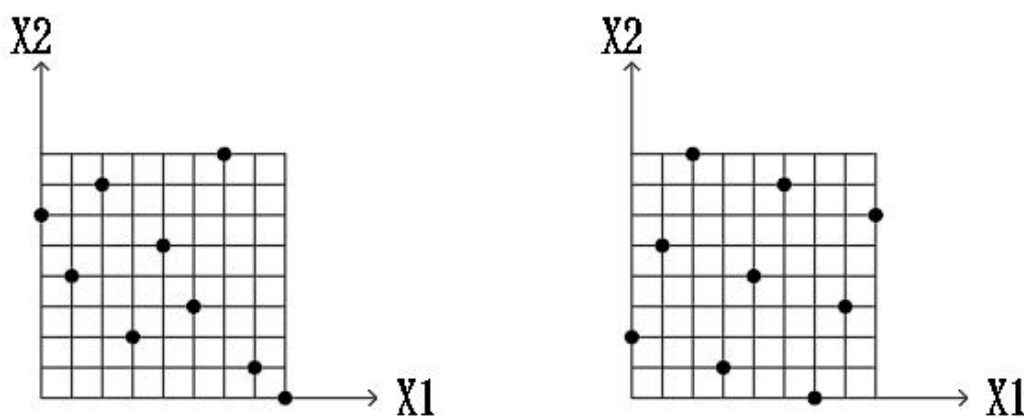


图 5-1 随机拉丁超立方和最优拉丁超立方对比图

5.2 汽车后座椅下围中护板注塑成型试验因素和评价指标

汽车后座椅下围中护板属于薄壁大尺寸零件,制件四周在成型时易产生体积收缩和翘曲现象。注塑成型过程中,参数设置和结构设计的不合理导致制件产生体积收缩率、熔接痕、翘曲的现象^[108]。以体积收缩率和翘曲量作为衡量制件成型质量的评价指标,分别用 Y1、Y2 代表。

影响汽车后座椅下围中护板成型质量的因素有很多,其中注塑工艺参数是对制件体积收缩率和翘曲量最有影响的因素。模具温度和熔体温度影响着塑料熔体的流动性,减缓熔体在充填模具型腔的速度,不仅影响熔体的充型能力,也对制件成型的质量有一定的影响,模具温度过高也会导致塑料熔体出现粘模现象,冷却阶段时间过长,制件的成型光洁度不高。保压压力是指在注塑成型过程中,注塑机将塑料熔体注射到模具型腔后继续保持一定的压力直至熔体充满整个型腔,避免出现模具型腔充填不完整影响制件的成型质量。保压时间则是指在保压压力的作用下持续的时间,保压压力和保压时间共同影响着制件注塑成型的过程^[109]。冷却时间是指在注塑成型过程中模具型腔被塑料熔体充满起到制件被顶出模具的这段时间,冷却时间的大小不仅影响着制件注塑成型的效率,冷却效果不好导致制件出现成型缺陷,制件成型时出现翘曲变形的现象也是受到冷却时间的影响^[110]。合理的选择工艺参数可以有效防止制件的收缩、翘曲变形和凹陷等现象。

注塑工艺参数的取值需要根据 PP 材料的特性确定,为了便于寻找最佳的工艺参数组合,扩大参数取值范围。采用 Moldflow 软件中 PP 材料在注塑成型时推荐的工艺参数范围作为汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺试验因素的范围,试验因素及其取值范围如表 5-1 所示。

表 5-1 各因素试验因素和取值范围

试验因素	取值范围
模具温度 A(°C)	20-80
熔体温度 B(°C)	200-280
保压压力 C(MPa)	20-100
保压时间 D(s)	3-20
冷却时间 E(s)	5-20

5.3 汽车后座椅下围中护板注塑成型拉丁超立方试验设计与结果

利用 Isight 软件进行拉丁超立方试验设计，依据表 5-1 各因素试验范围采集 81 组样本，运用 Moldflow 软件对采集到的 81 组样本进行仿真。根据仿真结果可以获得汽车后座椅下围中护板的翘曲量和体积收缩率结果如表 5-2 所示。完整的 OLHD 试验设计表及仿真数据见附录I。

表 5-2 OLHD 试验设计表及仿真数据

	A(°C)	B(°C)	C(MPa)	D(s)	E(s)	Y1(mm)	Y2(%)
1	75.5	239	40	12.78	19.62	1.753	6.270
2	62.75	217	20	15.11	14.38	1.860	5.456
3	35	246	80	15.75	5	0.9377	6.302
4	77	212	82	17.24	10.62	1.148	5.342
5	53	200	42	11.08	9.31	1.845	5.174
6	51.5	274	91	18.51	17	0.9533	7.676
7	24.5	256	26	4.91	15.69	2.423	6.912
8	71	242	63	4.28	11.56	2.502	6.699
9	67.25	211	41	19.15	8.38	1.522	5.072
10	68.75	218	45	4.7	5.94	2.496	6.225
11	74	216	29	6.61	16.06	2.667	6.124
12	61.25	254	49	9.8	5.38	2.136	6.635
13	68	252	100	8.74	12.69	2.153	6.608
14	25.25	266	73	13.41	18.12	1.223	5.992
15	40.25	215	98	12.14	7.81	0.8667	5.263
				⋮			
77	21.5	271	38	12.56	12.88	1.382	7.217
78	73.25	250	27	16.39	8.19	1.683	6.581
79	53.75	219	54	8.31	19.81	1.943	5.775
80	42.5	204	25	7.68	15.31	2.493	5.470
81	70.25	269	72	6.19	17.56	2.386	7.572

5.4 汽车后座椅下围中护板注塑成型主次因子分析

为了更好的优化汽车后座椅下围中护板注塑成型的工艺参数,需要确定工艺参数对制件成型质量的影响。制件出现体积收缩和翘曲等缺陷不仅仅是各工艺参数单独作用下的结果,工艺参数之间存在复杂的交互作用。为了确定各个工艺参数对汽车后座椅下围中护板注塑成型质量的影响程度以及参数之间的交互作用,本节利用 Isight 软件对模拟出的体积收缩率和翘曲量进行方差分析和 Pareto 图分析、交互效应图和主效应图分析。

5.4.1 评价指标的方差分析

方差分析是用于多个样本均数差别的显著性检验,能够分析出各个因素对注塑成型质量显著影响的因素,同时也可以分析因素之间的交互作用。方差分析的拟合精度越接近 1,多项式模型也就越精确,拟合精度 R^2 要求高于 0.9,才能认为多项式模型拟合精确,可用于进行主次因子分析。运用 Isight 软件对汽车后座椅下围中护板的翘曲量和体积收缩率进行方差分析,方差分析结果如表 5.3 所示。

表 5-3 翘曲量和体积收缩率方差分析结果

评价指标	SS _{Model}	SS _{Error}	SS _{Total}	R^2
翘曲量(mm)	26.659	3.011	29.670	0.9136
体积收缩率(%)	53.332	1.951	55.283	0.9647

由表 5-3 可知,翘曲量和体积收缩率的拟合精度 R^2 分别为 0.9136 和 0.9647,均大于 0.9,表明该多项式的拟合精度较为准确。

5.4.2 评价指标的 Pareto 图分析

合理的设置工艺参数能够提高产品的成型质量,传统的设计方法通常是依靠经验、反复试模,不仅增加了生产周期和成本,而且产品质量也没有保障。为了找出合理的工艺参数,需要确定试验因素对评价指标的影响程度,从而有针对性的调整相关工艺参数的大小,提高产品的成型质量。因此,本节采用 Pareto 图分析各工艺参数对评价指标的影响程度。

Pareto 图是反映各试验因素对评价指标的贡献程度百分比,通过贡献度的大

小能够看出各工艺参数对评价指标的影响程度。各试验因素对评价指标的 Pareto 图如图 5-2 所示, (a)为翘曲变形的 Pareto 图, (b)为体积收缩率的 Pareto 图。在图 5-2 中, 不同的颜色显示着工艺参数的影响趋势, 蓝色显示的为正效应, 橙色显示的为负效应。

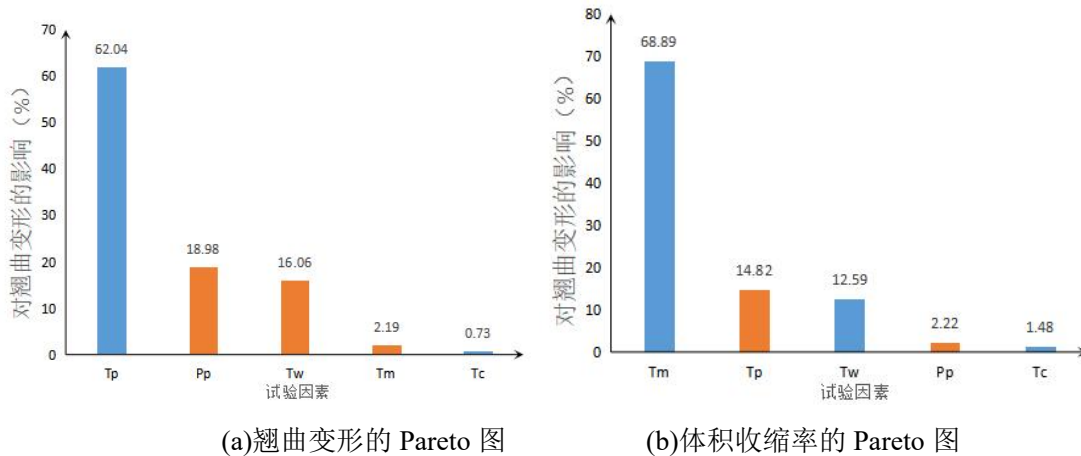


图 5-2 各试验因素对评价指标的贡献度

从图 5-2 可知, 对翘曲变形贡献度较大的试验因素为保压时间 T_p (62.04%)、保压压力 P_p (18.98%)、模具温度 T_w (16.06%), 而熔体温度 T_m (2.19%)、冷却时间 T_c (0.73%) 对翘曲变形贡献度较小, 其中熔体温度 T_m 、保压压力 P_p 、保压时间 T_p 对翘曲变形的影响呈现负效应, 模具温度 T_w 、冷却时间 T_c 对翘曲变形产生正向的影响作用。对体积收缩率贡献度较大的试验因素为熔体温度 T_m (68.89%)、保压时间 T_p (14.82%)、模具温度 T_w (12.59%), 而保压压力 P_p (2.22%)、冷却时间 T_c (1.48%) 对体积收缩率贡献度较小, 其中模具温度 T_w 、熔体温度 T_m 、冷却时间 T_c 对翘曲变形的影响呈现正效应, 保压压力 P_p 、保压时间 T_p 对对翘曲变形的影响呈现负效应。因此, 对评价指标影响最大的因素为熔体温度、保压时间, 影响最小的因素为冷却时间。

5.4.3 注塑工艺参数对评价指标的交互效应图与主效应图分析

通过对翘曲量和体积收缩率进行了 Pareto 图分析, 得出各工艺参数对评价指标影响的影响程度, 而工艺参数对评价指标的影响不仅仅限于单一因素对结果的影响, 因素之间也存在相互耦合的现象。为了更好的研究工艺参数对评价指标的影响, 本节将对各工艺参数之间交互效应和主效应进行分析。主效应图可以清晰的表现出各工艺参数对评价指标的贡献程度。交互效应是指两个或多个因素同时

对结果变量产生的影响。交互效应图能够直截了当的展现不同因素之间是否存在相互作用，也能够反映出因素的组合效应是否超过了各自的主效应之和。

(1) 注塑成型工艺参数的交互效应研究

根据对体积收缩率和翘曲量的 Pareto 图分析，得出对体积收缩率影响较大的因素有熔体温度、保压时间和模具温度，对翘曲量影响较大的因素有保压时间、保压压力和模具温度。因此，本节分别研究影响最大的三个工艺参数之间的交互作用对评价指标的影响。各因素的交互作用对体积收缩率的影响如图 5-3 所示。

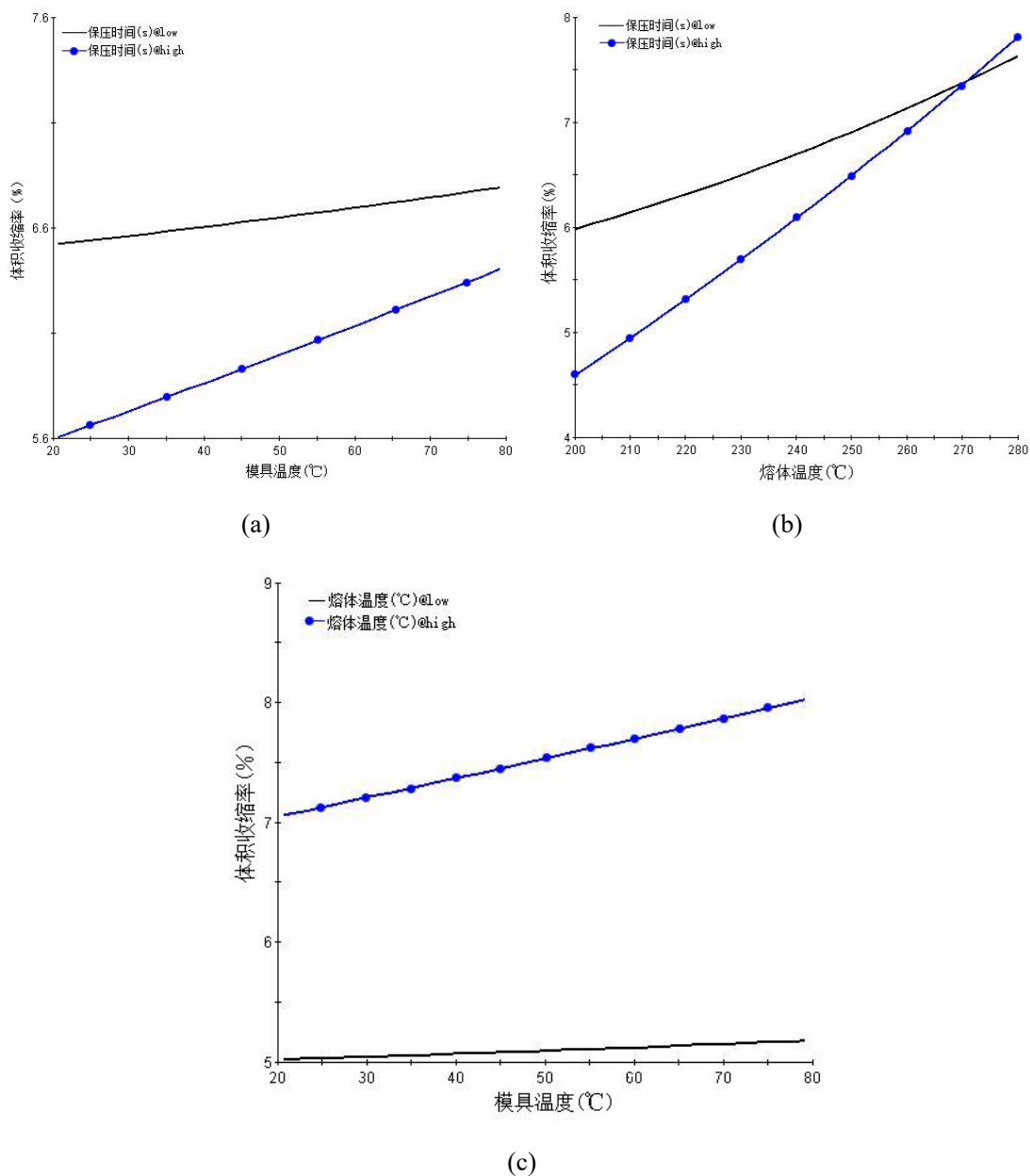


图 5-3 体积收缩率的交互效应

图 5-3 所示，(a)图表示制件成型的体积收缩率随着保压时间增大呈现减小的

趋势，随着模具温度的升高呈现增大的趋势，保压时间和模具温度无交互效应。(b)图表示随着熔体温度的升高，保压时间对于体积收缩率的影响受到熔体温度的影响，熔体温度与保压时间之间存在交互效应。(c)图表示制件成型的体积收缩率随着熔体温度的升高呈现增大的趋势，模具温度和熔体温度制件无交互效应。

各因素的交互作用对翘曲量的影响如图 5-4 所示：e)为模具温度与保压时间的交互效应图，f)为保压压力与保压时间的交互效应图，g)为模具温度与保压压力的交互效应图。

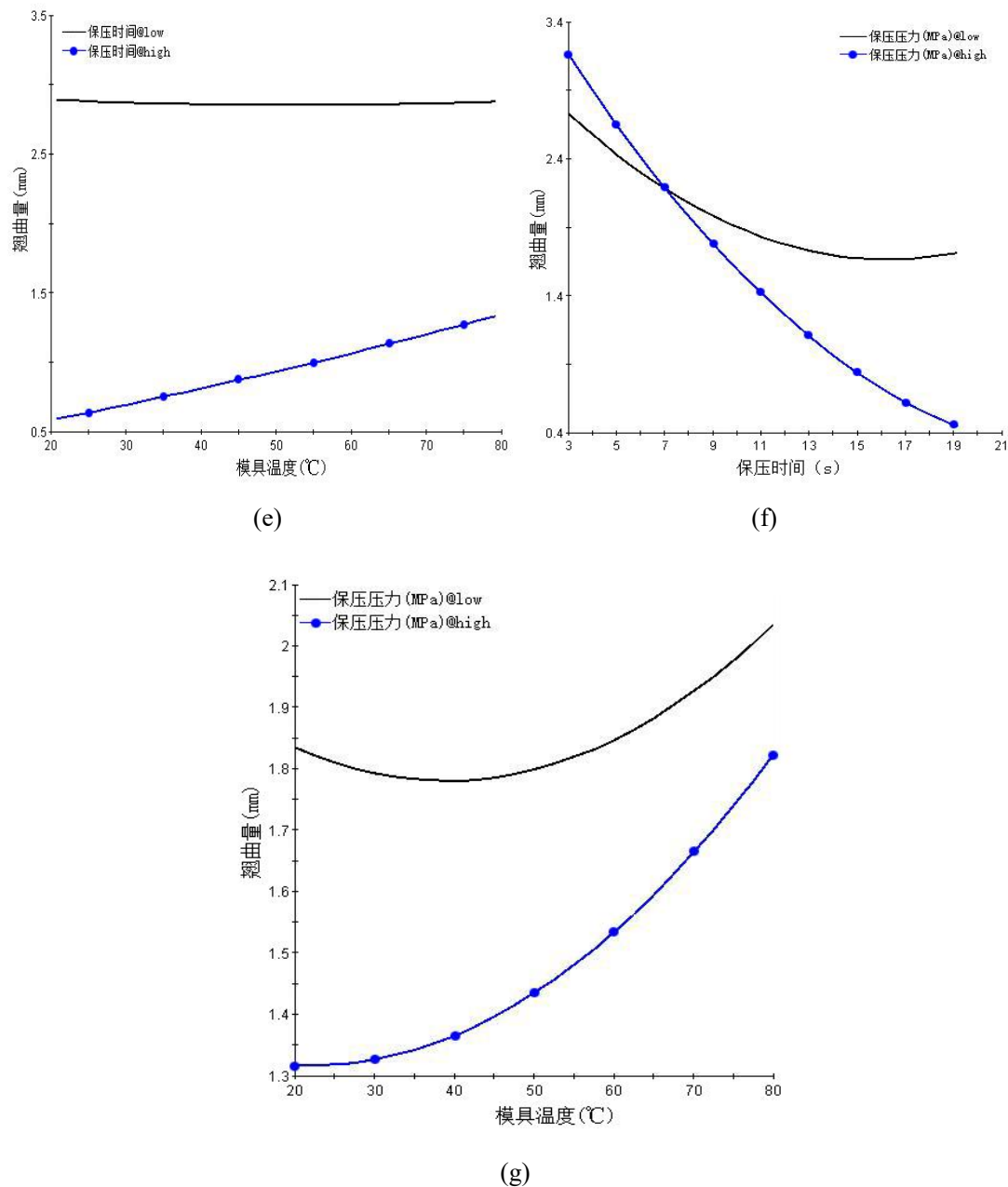


图 5-4 翘曲量的交互作用

图 5-4 所示，(e)图表示制件成型的翘曲量随着保压时间的增大呈现减小的趋

势。(f)图表示制件成型的翘曲量随着保压时间的增大呈现减小的趋势,保压时间与保压压力之间存在交互作用。(g)图表示制件成型的翘曲量随着保压压力的增大呈现减小的趋势,模具温度和保压压力之间不存在交互作用。

(2)注塑工艺参数的主效应研究

工艺参数之间的交互效应图难以判断各因素对评价指标的影响程度,为了更好的确定工艺参数的主次因素并对 Pareto 图进一步验证,针对体积收缩率和翘曲量的主效应图进行分析。翘曲量的主效应如图 5-5 所示,体积收缩率的主效应如图 5-6 所示。

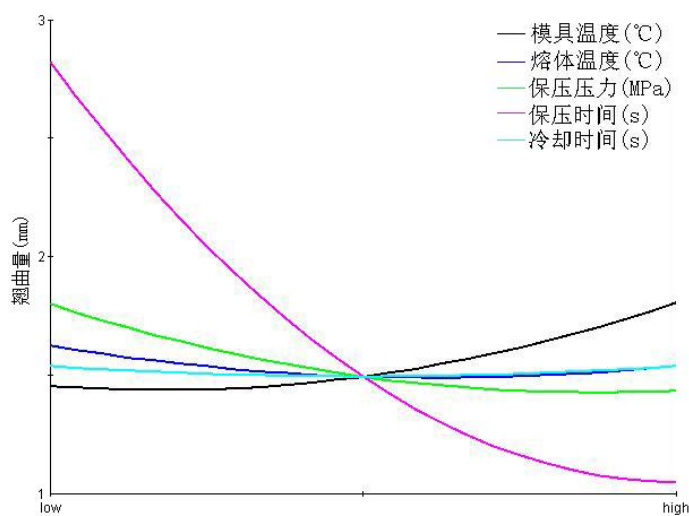


图 5-5 翘曲量的主效应

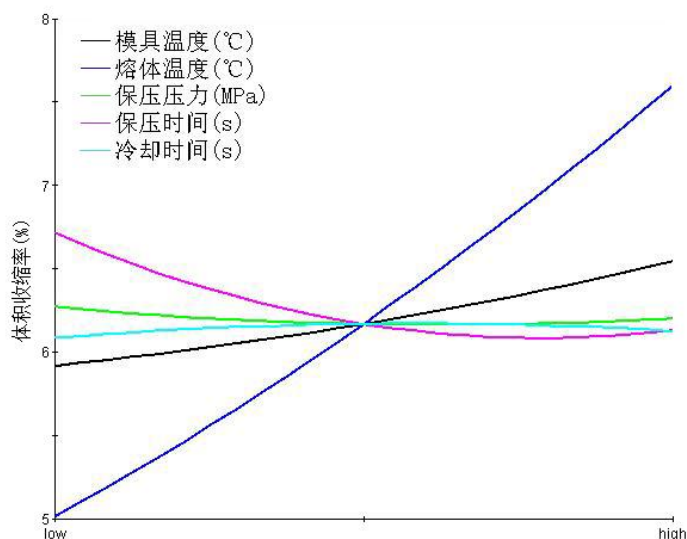


图 5-6 体积收缩率的主效应

在翘曲量的主效应图中,保压时间的大小对翘曲量的曲线变化较大,而熔体温度、保压压力、模具温度、冷却时间随着数值的变化,影响翘曲变形的曲线变

化相对比较平缓。因此，保压时间对翘曲变形的影响最大。由图 5-6 可知，熔体温度对体积收缩率的影响曲线变化较大，其他因素对体积收缩率的影响曲线相对平缓，体积收缩率的变化在 5.5%到 6.5%之间。因此，熔体温度对体积收缩率的影响最大。

综上对于试验指标的主效应分析，熔体温度和保压时间对评价指标的影响最大，与 Pareto 图分析结果保持高度的一致性。

5.5 本章小结

本章主要设计了汽车后座椅下围中护板注塑成型拉丁超立方试验，运用 Moldflow 软件对试验进行注塑成型仿真得出试验数据结果，运用方差分析得出翘曲量和体积收缩率的拟合精度 R^2 分别为 0.9136 和 0.9647，均大于 0.9, 表明该多项式的拟合精度较为准确。通过 Pareto 图分析各工艺参数对评价指标的影响，得出评价指标影响最大的因素为熔体温度、保压时间，冷却时间对评价指标的影响最小。对评价指标的交互效应图分析得出熔体温度、保压压力与保压时间之间存在交互作用的影响。对于评价指标的主效应分析，得出熔体温度和保压时间对评价指标的影响最大，与 Pareto 图分析结果相符合。

第6章 基于鲸鱼算法的BP神经网络汽车后座椅下围中护板

注塑工艺参数优化

第5章研究了各试验因素的交互效应和主效应,得出对体积收缩率影响最大的因素为熔体温度,对翘曲量影响最大的因素为保压时间,保压压力、熔体温度与保压时间之间存在交互效应。由于翘曲量和体积收缩率同时达到最优时的次要试验因素不一致,需要对所选的五个工艺参数进行优化。汽车后座椅下围中护板注塑成型过程中,工艺参数随着时间的推移会展现出非线性的变化特性,并且这些参数之间存在相互的耦合作用,由于这种复杂的相互作用关系,使用特定的函数来明确描述工艺参数与评价指标间的联系变得极其困难。通过大量的数据构建数学模型能够近似地映射工艺参数与评价指标之间的关系,但这些方法大多仅能寻找出局部最优解的工艺参数,并且只能进行单目标的优化,优化的结果无法使多个评价指标同时达到最优的状态。人工神经网络模型能够通过对自身的训练和学习来预测期望的输出值,因此,本章搭建BP神经网络模型并结合鲸鱼算法预测汽车后座椅下围中护板的翘曲量和体积收缩率同时最优时的工艺参数。

6.1 BP神经网络的研究

为了提高注塑件的成型质量,需要对选取的两个评价指标进行多目标优化。本节将五个注塑成型工艺参数作为输入,两个评价指标作为输出,利用MATLAB软件建立BP神经网络优化模型。

6.1.1 BP神经网络概述

BP神经网络算法由正向传播和反向传播两部分组成,通过误差逆向传播算法来训练多层前馈神经网络,是一种误差修正型学习算法^[11]。该算法在运行时通过网络中的输入层神经元、输出层神经元和隐含层神经元来传递信息,每个神经元之间都存在相应的作用函数,输入信号经过输入层的作用函数后,逐层传递至隐藏层和输出层^[12]。当输出层的输出与期望输出不一致时,误差逆向传播至隐藏层的神经元,通过调整各层神经元的权重和阈值,以最小化输出误差信号。

本文以选取的五个工艺参数作为输入层矢量,翘曲量和体积收缩率作为输出矢量,搭建一个用于多目标优化的 BP 神经网络模型。利用拉丁超立方试验的数据对网络模型进行学习、训练,以建立评价指标和工艺参数之间的函数关系。

6.1.2 BP 神经网络的建立

本文所采用的神经网络结构由输入层、隐含层和输出层组成。根据汽车后坐下围中护板注塑成型工艺参数和评价指标确定输入层和输出层的节点个数,隐含层节点数量的确定一般通过试算法和经验公式法两种方法,隐含层节点数量的设置对于神经网络模型非常关键,节点的数量会显著影响神经网络的适应能力和容错性。本节采用经验公式(6-1)初步确定隐含层的中间节点数。

$$h = \sqrt{a+b} + (1 \sim 10) \quad (6-1)$$

式中, h —隐含层节点个数;

a —输入层节点个数;

b —输出层节点个数。

在本文中输入层为工艺参数即为 5,输出层为评价指标即为 2,通过式(6-1)计算得出的隐含层节点 3 至 13 个,为了提高神经网络的准确性和映射能力,需要增加隐含层节点。通过多次测试,最终确定隐含层节点数为 12 时效果最佳。本文搭建的护板注塑成型参数神经网络模型结构如图 6-1 所示。

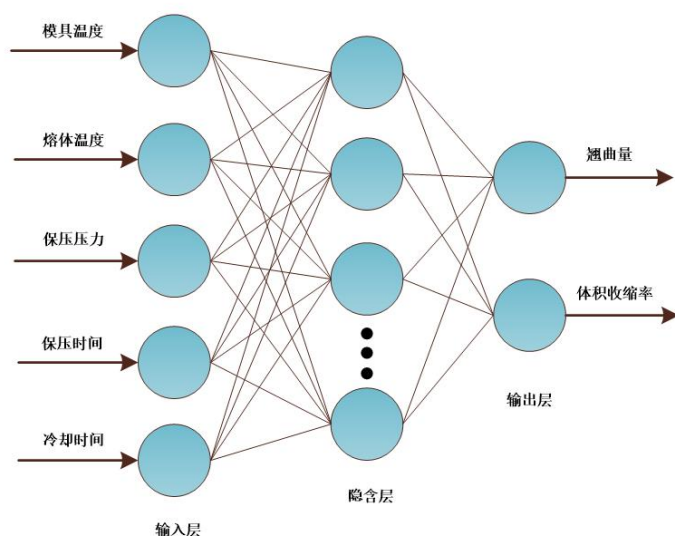


图 6-1 搭建的汽车后座椅下围中护板注塑成型 BP 神经网络模型结构

将输入层工艺参数设置为 $X=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]$ ，输出层为两个评价指标设置为 $Y=[y_1 \ y_2]$ ，在输入信号传递的过程中，输入层、隐含层、输出层之间相应的权值分别为 W_{ij} 、 W_{jk} ($i=1,2,3,4,5; j=1,2,\dots,12; k=1,2$)， w_0 为偏置值，隐含层阈值为 a_j ，输出层阈值为 b_k ， Y_k 为输出层的真实值。

隐含层的输出值 H_j 为式(6-3)。

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{ij}x_i + a_j\right) \quad (6-3)$$

输出层的输出值 O_k 为式(6-4)。

$$O_k = \sum_{j=1}^{12} H_j W_{jk} + b_k \quad (6-4)$$

网络预测误差 e_k 为式(6-5)。

$$e_k = O_k - Y_k \quad (6-5)$$

权值和阈值是通过误差反向传播进行调整的，以预测误差的平方和作为目标函数，即代价函数 E 。代价函数对各神经元权值的偏导数构成目标函数对权值向量的梯度，加入训练因子 μ 以减少权重引起的误差，代价函数为式(6-6)。

$$E = \frac{1}{2} \times (O_k - Y_k)^2 \quad (6-6)$$

代价函数对隐含层阈值 a_j 的偏导数为式(6-7)。

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = \frac{\partial \left[\frac{1}{2} (O_k - Y_k)^2 \right]}{\partial a_j} = (O_k - Y_k) \frac{\partial O_k}{\partial a_j} = e_k \sum_{j=1}^{12} W_{jk} \quad (6-7)$$

对输出层阈值 b_k 的偏导数为式(6-8)。

$$\frac{\partial E}{\partial b_k} = \frac{\partial \left[\frac{1}{2} \times (O_k - Y_k)^2 \right]}{\partial b_k} = (O_k - Y_k) \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{12} H_j W_{jk} + b_k \right)}{\partial b_k} = e_k \quad (6-8)$$

代价函数对连接权值 W_{ij} 的偏导数为式(6-9)。

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = \frac{\partial \left[\frac{1}{2} \times (O_k - Y_k)^2 \right]}{\partial W_{ij}} = (O_k - Y_k) \frac{\partial O_k}{\partial W_{ij}} = e_k x_i \sum_{j=1}^{15} W_{jk} \quad (6-9)$$

代价函数对连接权值 W_{jk} 的偏导数为式(6-10)。

$$\frac{\partial E}{\partial W_{jk}} = \frac{\partial \left[\frac{1}{2} \times (O_k - Y_k)^2 \right]}{\partial W_{jk}} = (O_k - Y_k) \frac{\partial O_k}{\partial W_{jk}} = e_k H_j \quad (6-10)$$

修正后的阈值为式(6-11)和式(6-12)。

$$a_j = a_j + \mu \frac{\partial E}{\partial a_j} = a_j + \mu e_k \sum_{j=1}^{12} W_{jk} \quad (6-11)$$

$$b_k = b_k + \mu \frac{\partial E}{\partial b_k} = b_k + \mu e_k \quad (6-12)$$

修正后的权值为式(6-13)和式(6-14)。

$$W_{ij} = W_{ij} + \mu \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = W_{ij} + \mu e_k x_i \sum_{j=1}^{12} W_{jk} \quad (6-13)$$

$$W_{jk} = W_{jk} + \mu \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} = W_{jk} + \mu e_k H_j \quad (6-14)$$

将表 5-2 中 81 组仿真数据导入到 MATLAB 中，利用 MATLAB 自带的 BP 神经网络工具箱搭建神经网络，以工艺参数设置为输入量，评价指标设置为目标量，将训练因子设置为 0.01，训练次数设置为 1000 次，误差设置为 10^{-6} 。在训练前，为了消除量纲影响，对数据归一化处理，以提高模型的精度，利用预测值和样本的平均值的误差与真实值和平均值的比值 R^2 来判断模型的拟合程度，若比值越接近 1，说明预测和输出数据越接近。 R^2 的计算如式(6-15)所示。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (O_k - \bar{Y}_k)}{\sum_{i=1}^k (Y_k - \bar{Y}_k)} \quad (6-15)$$

式中， O_k —样本预测值；

Y_k —样本真实值；

$\bar{Y}_k$ —所有样本平均值。

6.1.3 BP 神经网络模型的验证

将试验数据拆分成训练组和测试组，训练组设置为 56 组，剩余 25 组作为测试组对模型进行测试。利用训练组对网络模型进行训练，提高模型的精确度，测试组则是在对汽车后座椅下围中护板 BP 神经网络模型训练过后，对其训练的结果进行测试。翘曲量预测结果如图 6-3，体积收缩率预测结果如图 6-4，二者预测误差如图 6-5 和图 6-6。

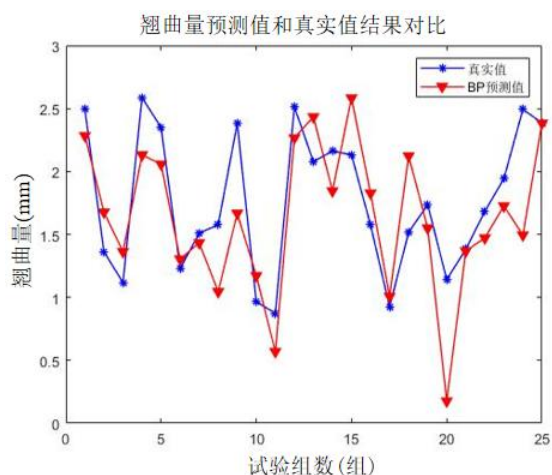


图 6-3 翘曲量预测结果

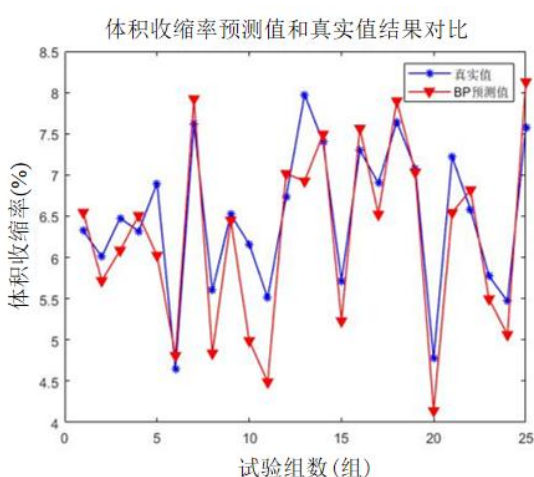


图 6-4 体积收缩率预测结果

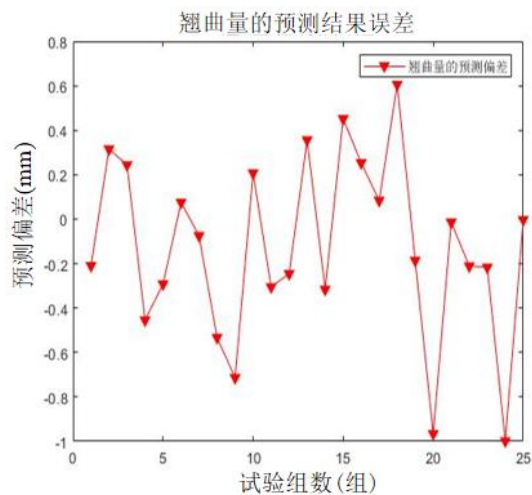


图 6-5 翘曲量预测误差

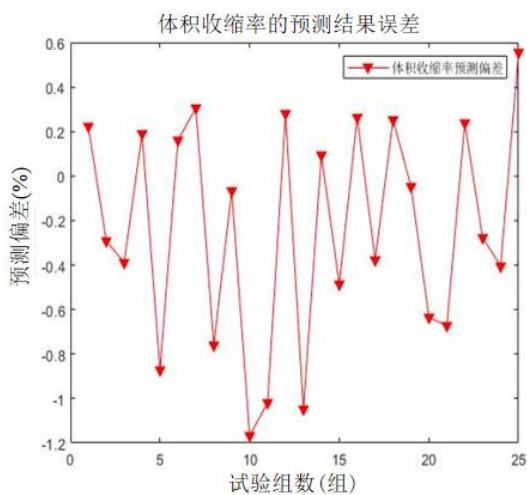


图 6-6 体积收缩率预测误差

通过图 6-3 和图 6-4 可以得出，搭建的 bp 神经网络模型预测的翘曲量和体积收缩率数值和真实值比较接近，只有个别组数据出现较大偏差。由图 6-5 和图 6-6 可知，BP 神经网络预测的翘曲量误差在 $[-1, 0.6]$ 区间，预测出体积收缩率的误差在 $[-1.2, 0.6]$ 区间，预测误差总体较小，但仍需要进一步改进。

因此，为了提高 BP 神经网络模型对体积收缩率和翘曲量预测的精准度，通过鲸鱼算法对搭建的 BP 神经网络模型中的权值和阈值进行优化。

6.2 WOA-BP 神经网络的搭建及工艺参数优化

在 6.1 节中搭建了汽车后座椅下围中护板 bp 神经网络优化工艺参数模型，将试验数据拆分为训练组和测试组对模型进行训练和测试，得出搭建的 bp 神经网络模型能够大致预测出翘曲量和体积收缩率，由于神经网络模型的精准度受到权值和阈值的影响，需要合理的设置权值和阈值。本节利用鲸鱼算法优化模型的权值和阈值，提高模型的预测精度，通过优化后的模型预测最优的工艺参数。

6.2.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)是 Mirjalili 等受座头鲸社会行为启发，模拟鲸鱼群狩猎行为的一种元启发式优化算法，主要思想是通过模拟鲸鱼个体的迁徙、觅食和社交行为，以求解优化问题。每个个体代表一个鲸鱼，个体在搜索空间中随机分布，并根据适应度函数评估其解的质量。传统的优化算法容易出现陷入局部优化和难以收敛的问题，而鲸鱼算法能够改善这一弊端，提高模型的优化能力^[113]。

6.2.2 WOA-BP 神经网络的建立

本节利用鲸鱼算法对已搭建好的 BP 神经网络的权值和阈值进行优化，该算法的寻优机制主要分为围捕猎物、气泡网捕食、搜索猎物。在寻优的第一阶段通过随机选取可行解作为中心进行搜索，在搜索过程中，可行解不断逼近最优解，其位置更新如式(6-16)。

$$\begin{cases} D_k = |CX_k^* - X_k^j| \\ X_k^{j+1} = X_k^* - AD_k \\ A = 2ar - a \\ C = 2r \end{cases} \quad (6-16)$$

式中， D_k —当前种群需要移动的距离；

X_k^j —当前最优解；

X_k^* —第 j 代随机选择的可行解;

X_k^{j+1} —第 $j+1$ 次迭代位置;

r —0 与 1 之间的随机数;

a —从 2 到 0 逐渐下降。

在寻优的第二阶段采用发泡网捕食的机制,在围捕猎物收缩包围圈的同时可行解又以螺旋的方式向最优解逼近,其数学模型如式(6-17)。

$$X_k^{j+1} = f(x) = \begin{cases} X_k^j - AD_k, & p < 0.5 \\ X_k^j + D_k e^{bl} \cos(2\pi l), & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (6-17)$$

式中, A 的取值范围由原来的 $[-a, a]$ 调整为 $[-1, 1]$;

b —对数螺旋形状常数;

l — $[-1, 1]$ 之间的随机数。

寻优的第三阶段通过扩大搜索范围,以更好的获得最优解,搜索的中心点变为当前迭代的最优解,其数学模型和第一阶段一致。鲸鱼算法优化参数的流程如图 6-7 所示。

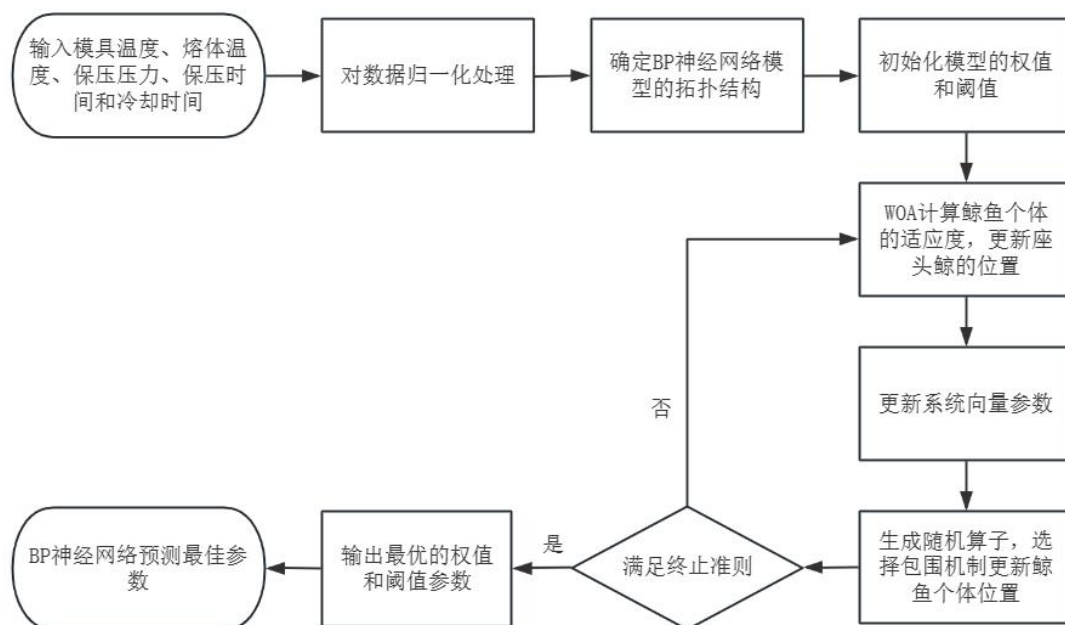


图 6-7 鲸鱼算法参数优化流程

模型搭建完成后,初始种群设置为 30,最大进化代数设置为 100,利用 Matlab 仿真求解,得到鲸鱼算法适应度函数迭代如图 6-8。

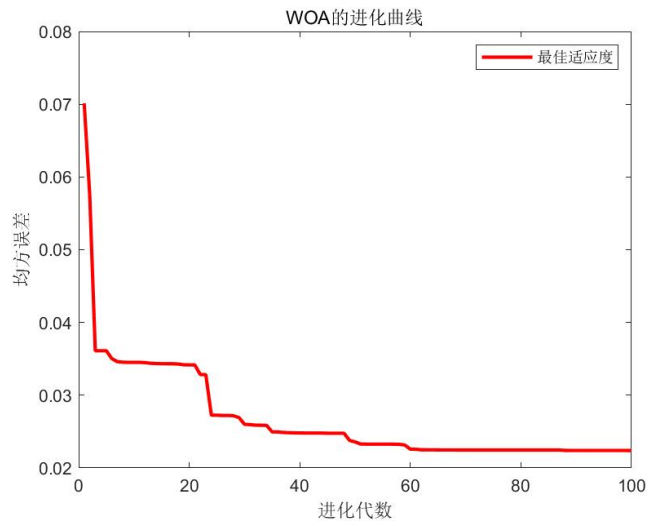


图 6-8 适应度迭代曲线

图 6-8 为鲸鱼算法适应度迭代曲线，由图可以看出，模型在迭代到 60 次时均方误差达到稳定状态，即模型达到收敛状态。模型优化前后均方差如表 6-3。

表 6-3 两次神经网络模型对比

	体积收缩率均方差	翘曲量均方差
BP 神经网络	0.1558	0.1821
鲸鱼算法优化 BP 神经网络	0.0282	0.0158

由表 6-3 可知，通过鲸鱼算法优化 bp 神经网络后体积收缩率和翘曲量的均方差分别降低了 0.1276、0.1663，优化效果分别达到 81.9 和 91%，模型优化的结果良好，可进一步对 woa-bp 神经网络模型的进行测试。模型优化后预测的翘曲量结果如图 6-9，预测的体积收缩率结果如图 6-10。优化前后模型的预测误差如图 6-10 和图 6-11。

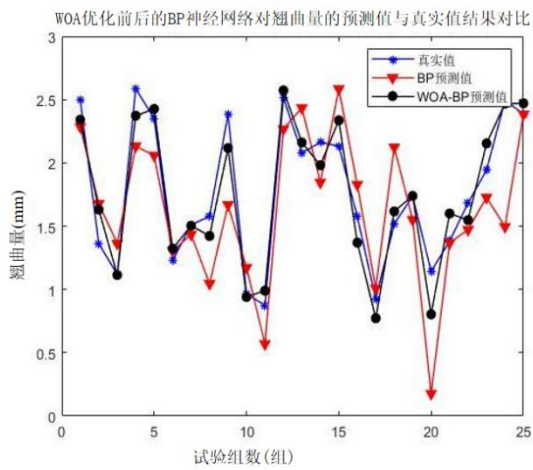


图 6-9 优化后翘曲量预测结果

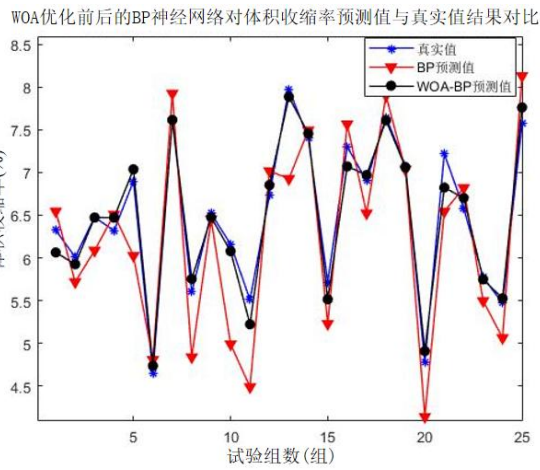


图 6-10 优化后体积收缩率预测结果

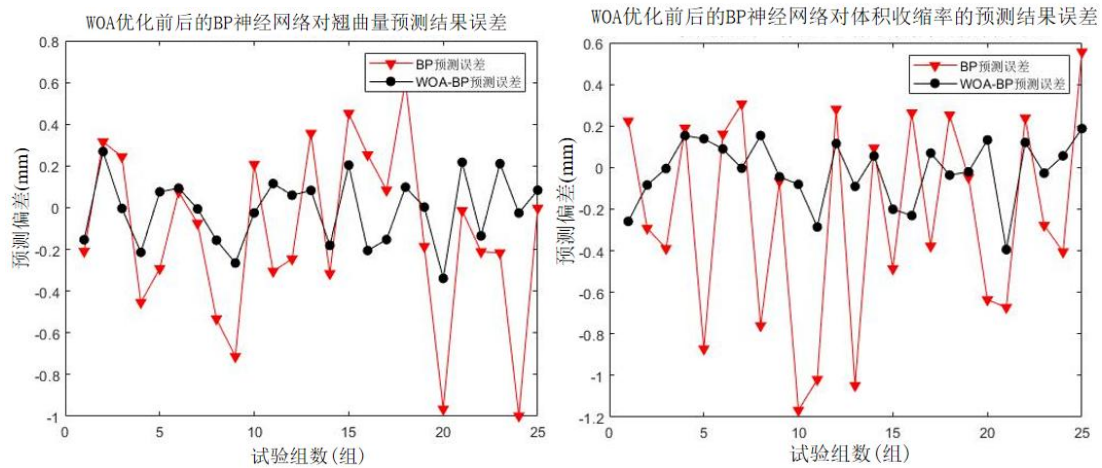


图 6-11 优化前后翘曲量预测误差

图 6-12 优化前后体积收缩率预测误差

图 6-9 和 6-10 中, 蓝色曲线为试验仿真的真实值, 红色曲线为 BP 神经网络模型预测出的翘曲量和体积收缩率, 黑色曲线则为鲸鱼算法优化 BP 神经网络模型的权值和阈值后预测出的数值。图 6-11 和 6-12 中, 红色曲线为 BP 神经网络模型的预测误差, 黑色曲线为 WOA-BP 神经网络模型的预测误差。

由图 6-9 和 6-10 可知, 黑色曲线的 WOA-BP 模型相对于红色曲线的 BP 模型更贴近蓝色曲线的真实值。由图 6-11 和 6-12 可知, WOA-BP 神经网络模型对翘曲量的预测误差范围在 $[-0.3387, 0.2691]$ 区间内, 对体积收缩率的预测误差范围在 $[-0.3945, 0.1875]$ 区间内, 且各组误差点分布总体贴近 0 偏差, 相对于 BP 神经网络模型 woa-bp 模型的预测误差极大程度的降低。

综上所述, WOA-BP 神经网络模型拟合误差小和预测精度高, 可以通过 WOA-BP 神经网络模型预测汽车后座椅下围中护板注塑成型最佳工艺参数组合。

6.3 基于 WOA-BP 的汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数优化

WOA-BP 神经网络模型建立后, 通过 WOA-BP 模型预测出翘曲量的最小值为 0.6019mm, 体积收缩率为 4.434%, 对应的最佳工艺参数组合为表 6-4 所示。

表 6-4 优化后的工艺参数

模具温度(°C)	熔体温度(°C)	保压压力(Mpa)	保压时间(s)	冷却时间(s)
20	200.5	99.5	19.8	9.34

将表 6-4 中的注塑工艺参数输入到 Moldflow 中进行模拟仿真, 得到的翘曲量和体积收缩率如图 6-13 和图 6-14。

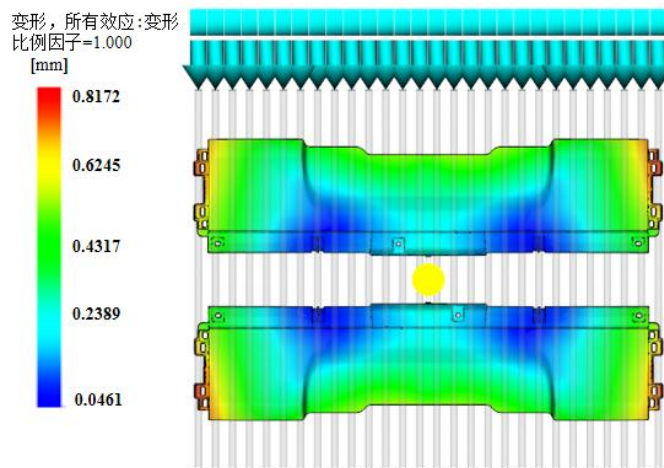


图 6-13 优化后翘曲变形

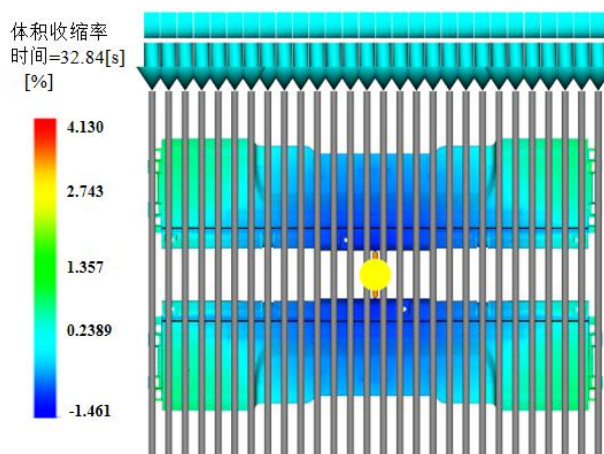


图 6-14 优化后体积收缩率

通过对汽车后座椅下围中护板注塑成型模拟，验证出对应的翘曲量为 0.8172mm，体积收缩率为 4.130%，woa-bp 神经网络模型虽有误差，但优化效果良好。优化前翘曲量为 1.420mm，体积收缩率为 5.427%，优化后较优化前翘曲量降低了 42.45%，体积收缩率降低了 23.90%。预测得到的工艺参数可使体积收缩率和翘曲量同时达到最优状态，但无法同时达到最小。

6.4 本章小结

本章主要对汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数进行优化，搭建 BP 神经网络模型，利用拉丁超立方试验仿真数据训练并验证模型的准确性。运用鲸鱼算法优化模型的权值和阈值，建立了预测精度更高的 WOA-BP 神经网络，并预测出最佳工艺参数组合，通过 Moldflow 验证得到了该组参数对应的翘曲量为

0.8172mm，体积收缩率为 4.130%，优化后的翘曲量降低了 42.45%，体积收缩率降低了 23.90%。

第 7 章 总结与展望

结论

为了提高汽车的动力性、减少燃料消耗、减轻汽车尾气排放造成的污染，汽车主机厂和零部件厂开始致力于减轻整车重量的研究，结构轻量化和材料轻量化等汽车轻量化技术得到了广泛的应用。本文以汽车后座椅下围中护板为研究对象，利用惩罚函数法完成了护板的结构轻量化设计，基于 Moldflow 软件对护板进行了注塑成型模拟，在 UG 软件中设计了汽车后座椅下围中护板注塑成型模具并运用传热学原理对模具的传热进行了分析，利用多种优化方法对注塑成型工艺参数完成了优化，得到最佳注塑成型工艺参数。

本文主要的研究工作及取得的成果如下：

(1)设计了汽车后座椅下围中护板结构。在满足护板强度的条件下，以护板重量最小为目标函数，尺寸范围和强度最为约束条件，利用惩罚函数法建立出数学模型对汽车后座椅下围中护板进行优化，优化后的制件减重达到了 13.9%左右，实现了护板的轻量化。

(2)完成了对汽车后座椅下围中护板注塑成型模具的设计。基于 Moldflow 软件对浇口位置进行分析，确定了在护板侧面的 1 浇口为最佳浇口方案，设计了汽车后座椅下围中护板注塑过程中的浇注系统，经过注塑模拟验证了浇注系统设计的可行性。对汽车后座椅下围中护板产品的结构及材料特性进行分析，设计其注塑成型模具的凹模、凸模、抽芯机构、顶出机构等，绘制了汽车后座椅下围中护板注塑成型模具装配图。

(3)建立出汽车后座椅下围中护板注塑模具冷却系统数学模型。运用传热学相关理论对汽车后座椅下围中护板注塑成型模具进行传热分析，确定模具型芯、型腔内部的传热形式主要为热传导，模具与冷却系统、周围空气的传热形式主要为对流换热，并推导出注塑成型冷却时间的数学模型。

(4)研究出工艺参数对汽车后座椅下围中护板注塑成型质量的影响。通过对拉丁超立方试验进行设计并在 Moldflow 软件中模拟注塑成型过程，结合方差分析、pareto 图分析、主效应图和交互效应图分析得到了各个因素之间的交互效应

和各个因素对评价指标的影响程度。

(5)建立汽车后座椅下围中护板注塑成型工艺参数优化模型并预测出最佳工艺参数组合。搭建了以工艺参数为输入、评价指标为输出的 BP 神经网络模型，通过鲸鱼算法优化模型的权值和阈值，运用优化后的模型预测得到最优工艺参数组合，通过 Moldflow 验证得到了该组参数对应的翘曲量为 0.8172mm，体积收缩率为 4.130%，优化后的翘曲量降低了 42.45%，体积收缩率降低了 23.90%，提高了制件注塑成型的质量。

本文主要创新点如下：

(1)提出了汽车后座椅下围中护板结构轻量化优化方法。确定设计变量、目标函数和约束条件，采用惩罚函数法搭建了汽车后座椅下围中护板结构优化数学模型，结合 matlab 软件对模型进行求解。

(2)建立出汽车后座椅下围中护板注塑模具冷却系统数学模型。通过对注塑成型模具系统进行传热分析，确定注塑成型时模具内的传热形式，推导塑件注塑成型冷却时间理论计算式。

(3)提出了汽车后座椅下围中护板注塑成形工艺参数鲸鱼神经网络优化方法，建立了工艺参数与体积收缩率和翘曲量的 BP 神经网络，利用鲸鱼算法对模型权重和阈值进行优化得到 WOA-BP 神经网络模型，利用该模型得到最优工艺参数组合。

展望

本文虽然对汽车后座椅下围中护板的结构轻量化和注塑成型工艺参数优化进行了研究，由于本人能力和精力有限，本文的研究仍有许多改进。现提出以下不足之处：

(1)在进行汽车后座椅下围中护板进行试验的时候，只考虑了注塑工艺参数中的模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间和冷却时间对体积收缩率和翘曲量的影响，因此后续还可以考虑更多因素和多指标之间的关系继续研究。

(2)受实际条件的限制，本文的分析仅停留在模拟仿真阶段，并没有利用实物进行实验，应在后续的研究中搭建实物模型试验台，利用实验数据对优化后的仿真数据进行验证。

参考文献

- [1] 廖颖慧,胡璐.2023 年我国专用汽车行业发展现状及市场分析[J].专用汽车,2024(02):10-14.
- [2] 陈爱贞,沙子璇,温世杰.产业链支撑与中国新能源汽车行业发展[J]. 福建论坛(人文社会科学版), 2023(12):54-72.
- [3] 陈思宇.新能源汽车行业智能化发展战略分析——以华为公司为例[J].江苏商论, 2023(12):123-125.
- [4] 王新华,马东民,李振兴.汽车轻量化技术研究[J].时代汽车,2024,(02):106-108.
- [5] 戴晓红.新能源汽车节能技术问题及优化研究[J].汽车测试报告,2023(14):4-6.
- [6] 喻革.汽车发动机连杆制造现状和发展趋势研究[J].内燃机与配件,2019(02):101-102.
- [7] 徐金贵.汽车尾气排放的危害及治理措施分析[J].内燃机与配件,2021(21):225-226.
- [8] 杨宝奎,张亮亮.新能源汽车内饰轻量化设计研究[J].汽车测试报告,2023(21):76-78.
- [9] 陈敬玉,胡志刚,辛庆锋等.轻量化材料在底盘结构件设计中的应用研究[J].时代汽车,2022(18):124-126.
- [10] 周宝友.中国模具制造业现状及发展趋势[J].模具制造,2019,19(04):1-6.
- [11] 高善旺,高炜,杨保健.中国模具制造业现状及发展趋势[J].机电工程技术,2022,51(06):6-10.
- [12] 李毅,赵洁.精密模具的发展与专业人才培养[J].模具制造,2024,24(02):65-67.
- [13] 刘斌,谭景焕.现代模具设计技术的现状及发展趋势[J].塑料工业,2017,45(02):1-6、43.
- [14] Moayyed M, Abhary K, Marian R. Optimization of injection molding process based on fuzzy quality evaluation and Taguchi experimental design[J]. CIRP journal of manufacturing Science and technology, 2018, 21: 150-160.
- [15] 王善凯.汽车仪表盘配件下盖注塑成型及模具结构 CAE 分析与优化[D].西安:西安工程大学,2016.

-
- [16] Bensingh R J, Machavaram R, Boopathy S R, et al. Injection molding process optimization of a bi-aspheric lens using hybrid artificial neural networks (ANNs) and particle swarm optimization (PSO)[J]. *Measurement*, 2019, 134: 359-374.
 - [17] Hentati F, Hadriche I, Masmoudi N, et al. Optimization of the injection molding process for the PC/ABS parts by integrating Taguchi approach and CAE simulation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9): 4353-4363.
 - [18] 娄元豪,王优强,邢照斌.汽车轻量化研究进展[J].*汽车工艺与材料*,2023(09):1-7.
 - [19] 成艾国,王超,陆日进等.复合材料尾门结构拓扑-参数一体化轻量化设计[J].*中国机械工程*:1-11.
 - [20] 陈云,程飞,周澳华等.基于拓扑优化的挤压铸造转向节轻量化研究[J].*特种铸造及有色合金*,2024,44(01):26-30.
 - [21] 刘继鹏. 多材料组合结构拓扑优化方法研究[D].武汉: 武汉理工大学,2019.
 - [22] 张步峰,赵宇翔,牛瑞坤.汽车轮毂的轻量化设计研究[J].*现代制造技术与装备*,2023,59(10):16-18、23.
 - [23] 孙莹,邱阳.某重型卡车驱动桥主减速器壳体逆向设计与轻量化研究[J].*机电产品开发与创新*,2023,36(05):30-33.
 - [24] 王超.汽车机械式变速器变速传动机构优化设计与实现[J].*微型电脑应用*,2023,39(07):38-41.
 - [25] 单喜乐. 某重型汽车车架结构抗疲劳轻量化设计[D].长沙: 湖南大学,2018.
 - [26] 司敬庭. 汽车门锁的轻量化设计研究[D].无锡: 江南大学,2022.
 - [27] Heggemann T, Homberg W. Deep drawing of fiber metal laminates for automotive lightweight structures[J]. *Composite Structures*, 2019, 216: 53-57.
 - [28] Kim K J, Lee J W. Light-weight design and structure analysis of automotive wheel carrier by using finite element analysis[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2022, 23(1): 79-85.
 - [29] Wang P, Bai Y, Fu C, et al. Lightweight design of an electric bus body structure with analytical target cascading[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, 18(1): 2.

- [30] Dengfeng Wang, and Shenhua Li. Lightweight design of a body-in-white structure using a hybrid optimisation approach. *International Journal of Vehicle Design* 88.2-3-4(2022):121-147.
- [31] Hu X, Liu Q, Liu B, et al. Introducing lightweight design early in the suspension design process: A design framework[J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 279: 123707.
- [32] 刘成娟,刘成刚,李延平.高分子材料注塑成型技术应用及发展趋势[J].*塑料工业*,2019,47(10):7-10、45.
- [33] 周典航.基于 CAE 技术的医用芯片手柄注塑成型关键技术研究[D].合肥:安徽建筑大学,2023.
- [34] 陈林,钱进明,张宗豪.PBT 基材玻纤增强高韧高拉拔力纳米注塑材料开发[J].*广东化工*,2022,49(18):25-27.
- [35] 周纪委,翟剑敏,王明伟等.汽车中控后端盖板气辅注塑模具设计[J].*工程塑料应用*,2023,51(07):103-109.
- [36] 李海丰,谢逸,杨红旗等.玻璃纤维增强塑料底座注塑成型研究及模具设计[J].*塑料工业*,2023,51(01):92-96.
- [37] 杨洁,杨扬,王先衬等.注塑成型树脂基复合材料螺栓纤维配向验证[J].*塑料工业*,2022,50(09):82-88、159.
- [38] 张贤宝,生物可降解材料专用注塑生产系统.浙江省,西诺控股集团有限公司,2022-01-21.
- [39] 郑方莉. 注塑成型工艺参数智能设置及优化[D].北京:北京化工大学,2023.
- [40] 刘欣,范希营,郭永环等.注塑工艺参数优化研究现状及发展趋势[J].*塑料科技*,2021,49(02):106-110.
- [41] 王志伟.基于 CAE 技术的纺织线夹器注塑成型工艺分析[J].*现代制造技术与装备*,2019(08):164-165、171.
- [42] 关德君,王伟,高波.CAE 技术在塑料设计优化领域的应用[J].*塑料科技*,2021,49(07):97-99.
- [43] 谭安平,谭平,尹小燕.基于 Moldflow 的模具 CAE 技术在本科实训教学改革中的应用[J].*模具技术*,2021(03):72-78.
- [44] Kitayama S, Yokoyama M, Takano M, et al. Multi-objective optimization

- of variable packing pressure profile and process parameters in plastic injection molding for minimizing warpage and cycle time[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 3991-3999.
- [45] Mukras S M S, Omar H M, al-Mufadi F A. Experimental-based multi-objective optimization of injection molding process parameters[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44: 7653-7665.
- [46] Chauhan V, Kärki T, Varis J. Optimization of compression molding process parameters for NFPC manufacturing using taguchi design of experiment and Moldflow analysis[J]. Processes, 2021, 9(10): 1853.
- [47] Lin P C, Lee C K. Process Parameters Optimization for an Injection-Molded Plastic Wheel by Uniform Design of experiment and Kkriging interpolation[J]. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017, 2(3).
- [48] Silva H M, Novera J T, Fernandes L, et al. Design, simulation and optimization of conformal cooling channels in injection molds: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022: 1-15.
- [49] 郭富城.汽车前端翼子板注塑成型工艺参数优化[D].芜湖: 安徽工程大学,2019.
- [50] 李姝,周纪委,王明伟等.基于熵权法的汽车左侧前保险杠注塑成型工艺参数优化[J].塑料科技,2023,51(07):80-84.
- [51] 孙政,李俊,王卓成等.高分子注塑成型产品质量关键工艺参数的多目标优化设计[J].高校化学工程学报,2023,37(03):483-491.
- [52] 颜志勇.PLC 控制器塑料端子接口注塑成型工艺参数优化[J].塑料科技,2023,51(05):100-103.
- [53] 王常晶,范希营,刘欣等.基于 DNN_NSGA- II 策略的注塑结构及工艺参数多目标优化[J].塑料,2023,52(02):181-186.
- [54] 胡漂,陈顺,杨啟梁,等.某乘用车后排座椅静强度及碰撞仿真分析[J].机械设计与制造,2022(04):110-113、117.
- [55] 周淑娟.基于罚函数法的汽车动力传动系统参数优化匹配研究[J].汽车维

- 修,2023(01):27-30.
- [56] 蒋秦帅.汽车行李箱装饰板模压成型模具结构设计及其成型工艺参数优化研究[D].芜湖: 安徽工程大学,2019.
- [57] 严泽,包永平,徐伟.包装盒底座精密注塑模具改进研究[J].塑料科技,2017,45(03):81-84.
- [58] 郭容,刘咸超.A12O3 基金属陶瓷材料在进气歧管注塑模具的应用研究[J].南方农机,2019,50(20):161-162.
- [59] 冯克富.典型注塑模具型腔的机械加工工艺分析[J].造纸装备及材料,2023,52(06):54-56.
- [60] 汪涛.大长宽比注塑支架灯采用 PP 材料的研究[J].中国照明电器,2022(07):29-32.
- [61] 陈杨.连续纤维增强复合材料模内包覆注塑成型的研究[D].北京:北京化工大学,2022.
- [62] 阮树荣, P20+Ni 模具钢. 浙江省,浙江三门太和大型锻造有限公司,2020-12-23.
- [63] 方明月,张宇,王彻等.汽车仪表内饰件注塑成型工艺的多目标优化[J].工程塑料应用,2023,51(09):83-89.
- [64] 黄清民,周玉辉.淋浴器花洒夹座注塑件浇注系统的 CAE 分析[J].塑料,2021,50(04):76-80、86.
- [65] 王长颖,秦刚,丁征等.基于 Moldflow 的喇叭罩注塑模具优化分析[J].山东化工,2021,50(13):181-184.
- [66] 郭旭,邢飞,王慧儒等.基于 Moldflow 的分离罐浇口位置方案分析[J].塑料科技,2023,51(12):70-75.
- [67] 窦鹿研,王全先.医用护目镜镜片注塑模设计及模流分析[J].机械研究与应用,2021,34(02):105-108、112.
- [68] 黄清民,周玉辉.淋浴器花洒夹座注塑件浇注系统的 CAE 分析[J].塑料,2021,50(04):76-80、86.
- [69] Zhanjun Liu. The Research on Injection Mould Design of Shell Shaped Pieces[C]//2016 Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference. Atlantis Press, 2016: 363-366.

- [70] 封旭,黄力,罗永有.基于 CAE 技术的前壳注塑模浇注系统优化设计[J].塑料科技,2019,47(03):83-87.
- [71] 赵利平,温煌英,罗哲等.汽车灯饰面盖零件热流道双色注塑模具设计[J].工程塑料应用,2022,50(03):96-100.
- [72] 陶桂东,邓凤意,许兵等.浇口对轨道交通圆形绝缘体翘曲的影响浅析[J].新技术新工艺,2023,(04):48-56.
- [73] 朱腾.玻纤增强 PBT 材料的注塑成型工艺优化与应用[D].江苏:淮阴工学院,2022.
- [74] 郭旭,邢飞,王慧儒等.基于 Moldflow 的分离罐浇口位置方案分析[J].塑料科技,2023,51(12):70-75.
- [75] 王星星,施允洋,张杰.基于响应曲面的卡盖双浇口工艺参数优化与模具设计[J].塑料工业,2024,52(01):67-75.
- [76] 王国清.轿车门内板注塑成型的过程模拟及参数优化研究[D].芜湖:安徽工程大学,2023.
- [77] 汪健,叶星,李兵兵等.基于综合加权评分的后防擦条内板注塑参数多目标优化[J].塑料,2024,53(01):172-177.
- [78] 孙庆东,汪五二,池根才等.汽车车窗装饰板浇口分析及注塑工艺优化[J].工程塑料应用,2023,51(07):79-84.
- [79] 刘子佳.试析注塑模具设计中浇口位置和结构形式的选用[J].科技风,2018(32):21.
- [80] 龙家钊,郭雪媚,李嫣.基于 Moldflow 的机箱下盖注射模优化设计[J].模具工业,2024,50(01):11-17.
- [81] 陶永亮,邱峰,黄登懿等.聚碳酸酯塑件注射模浇口选择的要求[J].模具制造,2021,21(10):39-43.
- [82] 廖铃钢.基于 Moldflow 注射成型及模具优化设计[D].武汉:武汉轻工大学,2015.
- [83] 徐昌煜.注塑成型过程中热流道、模内自动切除大浇口和随形水路冷却的应用和效益[J].日用电器,2017(S1):19-23.
- [84] 余钰洋.基于 CAE 的某生化仪内支架注塑成型过程模拟及工艺参数优化研

- 究[D].合肥：安徽建筑大学,2023.
- [85] 李志恒. 汽车散热器水箱上盖注塑成型及翘曲优化[D].青岛：山东科技大学,2020.
- [86] 陈剑玲.狭小型腔的延伸式热喷嘴结构设计与注塑优化[J].现代塑料加工应用,2019,31(03):56-59.
- [87] 刘帮禹. 汽车双色尾灯固定侧灯罩注射成型工艺参数多目标优化[D].江苏大学,2023.
- [88] 黎德桂. PE 瓶盖多腔注塑模具热流道系统的研究与应用[D].广州：华南理工大学,2019.
- [89] 张振铎.从动螺旋锥齿轮双锥辊辗压成形工艺优化及模具型腔精确设计方法研究[D].赣州：江西理工大学,2016.
- [90] 汪志雷. 汽车变速箱顶盖铸造模具设计及数值模拟研究[D].哈尔滨：哈尔滨商业大学,2022.
- [91] 吴乐甫. 汽车后备箱紧急逃生盖注塑工艺仿真与模具设计研究[D].扬州：扬州大学,2021.
- [92] 吴桂勇.注塑模具数字化设计与智能制造技术分析[J].中国设备工程,2023,(10):45-47.
- [93] 费强,张维合.汽车空调鼓风机左右盖复杂抽芯注塑模设计[J].中国塑料,2024,38(01):112-116.
- [94] 金鹏.模具设计中 CAD/CAE/CAM 综合应用的研究[D].北京：华北电力大学,2013.
- [95] 王启香.红酒盒塑件注射模结构的改进[J].模具制造,2013,13(01):48-51.
- [96] 丁立刚,李玉兰,程国飞等.带二级顶出机构的电器面框注射模具设计[J].塑料工业,2023,51(S1):72-77.
- [97] 戴宗豫,马蒙.空调出风口支架复合抽芯机构注塑模具设计[J].工程塑料应用,2024,52(02):109-115.
- [98] 温成卓,张荧.基于 Creo-Plastic Advisor 的注塑模具模流分析与模具设计[J].新技术新工艺,2022(08):54-59.
- [99] 叶廷璧.新型二板式塑料注射成型机的研究与开发[D].广州：华南理工大学

学,2009.

- [100] 蔡义强.注塑模具随形冷却系统优化设计与应用研究[D].上海: 上海应用技术大学,2022.
- [101] 徐光.注射成型参数对塑件双色注射成型的影响[J].模具制造,2022,22(02):39-42.
- [102] 李云龙.碳纳米/高分子复合材料机械与摩擦性能分子动力学研究[D].沈阳: 沈阳工业大学,2018.
- [103] 马一恒.基于3D打印的注塑模随形冷却水路优化设计及应用研究[D].青岛: 青岛科技大学,2020.
- [104] 戴凤雪.螺旋式废塑料连续裂解技术及装置的研究[D].青岛: 青岛科技大学,2018.
- [105] 窦晓霜.中央通道超高强钢热成型工艺参数及回弹控制研究[D].长沙: 湖南大学,2018.
- [106] 吴虎.汽车前端框架上支架结构轻量化及其注塑成型工艺参数优化研究[D].芜湖: 安徽工程大学,2023.
- [107] 刘飞.汽车前罩注塑工艺参数多目标优化及其刚度分析[D].长沙: 中南林业科技大学,2019.
- [108] 吴鹏.汽车全塑前端框架结构及注塑过程工艺参数优化研究[D].芜湖: 安徽工程大学,2020.
- [109] 杨超.一种用于遥感影像地表覆盖的语义分割算法[D].昆明: 昆明理工大学,2022.
- [110] 张鲁滨.基于CAE的注塑件成型工艺参数优化研究[D].贵阳: 贵州大学,2019.
- [111] 苏磊,柯海山.基于深度学习的电池SOC分阶段估算[J].信息技术与信息化,2023,(08):199-203.
- [112] 张瑞,宫子明,陈辰等.离网型微电网短期负荷及发电功率预测[J].大众用电,2017,(S1):61-64.
- [113] 刘青云.压缩机故障检测算法的研究[D].赣州: 江西理工大学,2020.

附录I OLHD 试验设计表及仿真数据

	A(°C)	B(°C)	C(MPa)	D(s)	E(s)	Y1(mm)	Y2(%)
1	75.5	239	40	12.78	19.62	1.753	6.270
2	62.75	217	20	15.11	14.38	1.860	5.456
3	35	246	80	15.75	5	0.9377	6.302
4	77	212	82	17.24	10.62	1.148	5.342
5	53	200	42	11.08	9.31	1.845	5.174
6	51.5	274	91	18.51	17	0.9533	7.676
7	24.5	256	26	4.91	15.69	2.423	6.912
8	71	242	63	4.28	11.56	2.502	6.699
9	67.25	211	41	19.15	8.38	1.522	5.072
10	68.75	218	45	4.7	5.94	2.496	6.225
11	74	216	29	6.61	16.06	2.667	6.124
12	61.25	254	49	9.8	5.38	2.136	6.635
13	68	252	100	8.74	12.69	2.153	6.608
14	25.25	266	73	13.41	18.12	1.223	5.992
15	40.25	215	98	12.14	7.81	0.8667	5.263
16	63.5	253	34	4.06	17.75	2.175	7.023
17	54.5	210	94	10.65	14.94	1.091	5.382
18	39.5	227	92	4.49	11.19	3.012	6.203
19	29.75	263	44	18.3	6.88	1.189	6.273
20	71.75	238	55	18.72	14.19	1.285	6.236
21	44.75	264	70	3	9.69	2.685	7.192
22	30.5	206	66	9.16	12.5	1.342	5.276
23	35.75	276	61	10.44	7.06	1.775	7.356
24	72.5	278	71	7.46	9.12	2.294	7.987
25	23	248	37	17.03	18.5	1.227	6.330
26	41	272	51	18.94	14.75	1.149	7.208

27	69.5	201	56	13.84	16.25	1.561	5.157
28	66.5	222	88	18.09	17.94	1.028	5.661
29	50	241	58	11.71	12.31	1.352	6.234
30	52.25	245	84	11.93	19.06	1.411	6.374
31	45.5	247	24	11.29	17.19	1.915	6.421
32	48.5	203	74	5.98	6.12	2.555	5.568
33	26	233	96	12.35	14.56	0.9192	5.859
34	37.25	214	36	3.85	7.25	3.008	6.117
35	60.5	231	86	3.21	17.38	2.958	6.477
36	32.75	259	99	8.95	8.56	1.777	6.685
37	32	220	83	5.76	18.69	2.629	5.846
38	47.75	209	68	17.66	12.12	1.235	4.579
39	29	235	65	8.1	6.5	1.726	5.937
40	50.75	226	47	17.45	19.44	1.356	5.749
41	55.25	243	95	16.6	11.38	0.8875	6.334
42	79.25	251	77	14.05	8	1.548	7.070
43	56	275	90	14.48	6.69	1.395	7.610
44	38.75	257	57	6.4	20	2.310	6.741
45	78.5	224	48	11.5	10.25	1.797	5.849
46	44	230	30	14.26	5.56	1.616	5.804
47	65	280	53	15.96	10.06	1.365	7.860
48	62	202	64	5.13	13.44	3.146	5.797
49	31.25	205	35	16.18	15.12	1.452	4.713
50	23.75	228	28	10.01	10.81	1.897	5.746
51	20.75	237	59	15.54	11.75	1.087	5.979
52	59.75	221	69	13.63	5.19	1.200	5.588
53	49.25	279	81	10.86	13.62	1.657	7.812
54	59	244	87	6.83	5.75	2.435	6.355
55	41.75	232	50	3.42	14	2.550	6.545

56	46.25	277	43	7.25	13.81	2.156	7.352
57	80	229	76	9.59	16.81	2.494	6.323
58	43.25	236	33	19.36	11.94	1.362	6.010
59	56.75	249	62	20	7.44	1.118	6.477
60	57.5	234	21	7.89	10.44	2.586	6.318
61	33.5	258	31	5.34	7.62	2.350	6.898
62	28.25	208	60	15.33	6.31	1.229	4.649
63	77.75	265	79	14.9	15.5	1.509	7.617
64	22.25	225	46	9.38	18.31	1.578	5.601
65	20	255	67	7.04	13.06	2.382	6.519
66	36.5	240	78	19.79	16.44	0.9651	6.159
67	26.75	223	93	19.57	9.88	0.8742	5.510
68	38	260	97	5.55	16.62	2.513	6.736
69	65.75	268	32	3.64	8.75	2.078	7.974
70	76.25	262	39	10.23	13.25	2.162	7.399
71	74.75	213	89	8.53	8.94	2.132	5.717
72	64.25	261	23	17.88	15.88	1.575	7.301
73	27.5	270	85	16.81	11	0.9249	6.900
74	58.25	273	52	13.2	19.25	1.518	7.645
75	47	267	22	12.99	9.5	1.736	7.081
76	34.25	207	75	14.69	18.88	1.142	4.778
77	21.5	271	38	12.56	12.88	1.382	7.217
78	73.25	250	27	16.39	8.19	1.683	6.581
79	53.75	219	54	8.31	19.81	1.943	5.775
80	42.5	204	25	7.68	15.31	2.493	5.470
81	70.25	269	72	6.19	17.56	2.386	7.572

攻读硕士学位期间获得的成果

1. 学术论文

[1]Yang Kai,Tang Lingfeng,Wu Peng. Research on Optimization of Injection Molding Process Parameters of Automobile Plastic Front-End Frame[J]. Advances in Materials Science and Engineering,2022,2022.(SCI,DOI:10.1155/2022/5955725)

致 谢

行文至此，思绪万千，求学十九载，即将告别学生时代。回首在安徽工程大学读研的这段时光，身处其中时不以为然，总觉得来日方长，却匆匆到了道别时刻，纵有万般不舍，但仍心怀感激。

一朝沐杏雨，一朝念师恩。感谢我的导师唐铃凤教授和王幼民教授三年来对我的指导和帮助。从论文的选题、撰写到最后的修改，两位老师都倾注了大量的心血，帮助我明确论文研究的方向和方法，耐心指导我解决了很多专业知识方面的困惑，并鼓励我克服困难。生活中，唐老师和王老师像长辈一样给予我关心和照顾，两位老师严谨的治学态度和处理问题认真求是的作风对我的学习和工作产生巨大的影响。

山水相逢，三生有幸。感谢杨克帆和吴虎师兄对我论文上的帮助和指导；感谢同门宫国庆、方旭、卢娜、王鲁、柯启迪、张丽丽对我学习上帮助，感谢室友陶文博、卞仕磊、邹阿威在生活中对我的照顾。同时感谢中鼎恒盛气体股份有限公司技术部王菲和潘云龙，谢谢你们在我实习的时候给予我莫大的关怀，为我提供技术指导。

树高千尺不忘根深沃土。感谢父母的养育之恩，他们这么多年辛苦的培养和教育、默默支持和无私奉献，才能让我走到了这里。年少不知父母心，而今终于懂得了那些唠叨和严肃里藏着的深深爱意，愿你们岁岁年年皆平安。

追风赶月莫停留，平芜尽处是春山。感谢自己的努力和坚持，希望未来的自己在经历过生活的坎坷后，依然保持着对生活的热爱。

风有起止，人有聚散，认真生活，不负遇见。

尚德敏学 唯实惟新

