

分类号: U463

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110153



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 金属嵌件式汽车前端模块轻量化
 设计及注塑成型工艺优化

论 文 作 者 胡家乐
校 内 导 师 王建彬 教授
校 外 导 师 周超群 高级工程师
专业学位类别 机 械
研究方向(领域) 汽车轻量化

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：U463

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110153

金属嵌件式汽车前端模块轻量化设计
及注塑成型工艺优化

LIGHTWEIGHT DESIGN OF AUTOMOTIVE FRONT END MODULE
WITH METAL INSERTS AND OPTIMIZATION OF INJECTION
MOLDING PROCESS PARAMETERS

学生姓名： 胡家乐

指导教师： 王建彬 教授

校外导师： 周超群 高级工程师

专 业： 机械

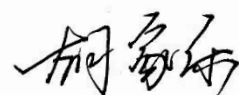
研究方向： 汽车轻量化

论文答辩日期： 2025 年 5 月 9 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：



日期：2025 年 5 月 20 日

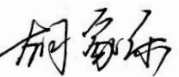
安徽工程大学学位论文版权使用授权书

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。

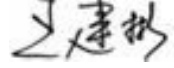
保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

日期：2025 年 5 月 20 日

指导教师签名：

日期：2025 年 5 月 20 日

金属嵌件式汽车前端模块轻量化设计及注塑成型工艺优化

摘 要

随着汽车产业的快速发展，人类生活的舒适性和便利性大大提高，但随之产生的能源消耗和污染物排放给环境造成了沉重压力。采用电动汽车代替传统燃油车辆虽然减少了对化石能源的依赖，但电动汽车所需电池使用寿命有限，维护成本相对较高，且电池中所含重金属废弃时处理不当的危害严重。在保证安全的前提下，通过优化材料与结构设计降低整车重量，实现汽车轻量化，可有效提高能源利用率，实现节能减排目的，为“双碳”目标的达成提供有力支撑。

前端模块作为汽车前端的关键零件，其轻量化设计对整车减重具有重要意义。本文以某汽车前端模块为研究对象，围绕轻量化材料选择、结构优化完成金属嵌件式汽车前端模块的轻量化设计并进行注塑成型工艺优化获得较好产品质量，文章主要开展以下研究工作：

(1) 为选择合适的前端模块材料，研究了常用的(PA6GF、PPLGF类)玻璃纤维增强材料在不同温度、不同应变率及其耦合作用下的拉伸性能，对比不同试验条件下的拉伸强度，结果表明玻璃纤维含量的增多会使拉伸强度增加，随着温度升高或应变率减小，材料的拉伸强度均有降低，特别是低应变率与高温耦合作用下的降低程度更加明显，但PA6GF系列材料强度明显优于PPLGF系列，结合成本考虑，选取PA6GF30作为前端模块材料。

(2) 为实现前端模块的轻量化设计，根据前端模块布置要求和边界约束条件，利用CATIA软件创建前端模块初始优化空间模型，对不同载荷工况

分别进行单工况拓扑优化，得到了各个工况的柔顺度值，然后基于Critic评判准则计算出各个工况的权重比，对汽车前端模块进行多工况拓扑优化，并通过有限元分析验证全塑及带有金属嵌件前端模块的力学性能，对比发现全塑料结构产品性能无法满足性能要求，金属嵌件结构产品性能都满足设计要求，经厚度优化后，在保证性能的同时实现6.8%减重比，前端模块总重量3.66kg，达到企业轻量化需求。

（3）为提高金属嵌件式前端模块产品注塑成型质量，基于Moldflow软件进行了注塑成型性工艺参数的优化研究。设计三种不同注塑成型方案，对比不同方案熔接线、锁模力、翘曲变形等分析结果，结合企业设备实际情况，选择六个浇口成型方案作为最终方案。设计六因素五水平正交实验，结合模流分析确定了最优工艺参数组合A4B3C5D3E5F2，进一步调整保压曲线，翘曲变形量比初始下降约38.5%，有效提高了产品成型质量。

（4）为验证设计方案和注塑成型工艺参数的合理性，用优化后的注塑工艺参数对设计的汽车前端模块进行实物注塑，试模得到的制件质量较好，能满足检具检测。然后利用试模得到的产品对关键工况进行力学性能试验，结果表明各个工况下的试验结果均满足产品设计要求。

关键词：汽车前端模块；玻璃纤维增强材料；拓扑优化；注塑成型

LIGHTWEIGHT DESIGN OF AUTOMOTIVE FRONT END MODULE WITH METAL INSERTS AND OPTIMIZATION OF INJECTION MOLDING PROCESS PARAMETERS

ABSTRACT

With the rapid development of the automotive industry, automobiles have brought convenience to human life while also becoming one of the primary sources of energy consumption and pollutant emissions. The adoption of electric vehicles (EVs) as a replacement for traditional internal combustion engine vehicles reduces dependence on fossil fuels, but the curb weight of EVs significantly impacts their driving range. Therefore, vehicle lightweighting has become a crucial approach to achieving energy savings, emission reductions, and improved energy efficiency. As a key component of the vehicle front-end, the lightweight design of the front-end module is of great significance to the overall weight reduction of the vehicle. This thesis takes a certain automotive front-end module as the research object, focusing on material selection for lightweighting and structural optimization to achieve a lightweight design of a metal-insert front-end module. Additionally, the injection molding process is optimized to obtain high-quality products. The main research work conducted in this thesis is as follows:

(1) To select suitable materials for the front-end module, the tensile properties of commonly used glass fiber-reinforced materials under different

temperatures, strain rates, and their coupled effects were studied. The tensile test results indicate that higher glass fiber content increases tensile strength, while elevated temperatures or reduced strain rates weaken the material's tensile strength. This weakening effect is particularly pronounced under the coupled conditions of low strain rate and high temperature. However, the PA6GF series materials exhibit significantly better strength than the PPLGF series. Considering cost factors, PA6GF30 was selected as the material for the front-end module.

(2) To achieve the lightweight design of the front-end module, an initial optimization space model was created using CATIA software based on the layout requirements and boundary constraints of the front-end module. Single-objective topology optimization was performed by defining load cases, and the compliance values for each load case were obtained. The weight ratios of each load case were calculated based on the Critic evaluation criterion, and multi-objective topology optimization was conducted for the automotive front-end module. The mechanical performance of both all-plastic and metal-insert front-end modules was verified through finite element analysis. The results show that the all-plastic structure cannot meet the performance requirements, while the metal-insert structure satisfies the design requirements. After thickness optimization, a weight reduction ratio of 6.8% was achieved while maintaining performance, resulting in a total weight of 3.66 kg, which meets the lightweighting requirements of the enterprise.

(3) To improve the injection molding quality of the metal-insert front-end module, optimization of injection molding process parameters was conducted

using Moldflow. Three different injection molding schemes were designed, and the results of weld lines, clamping force, and warpage deformation were compared. After comprehensive consideration, a six-gate molding scheme was selected as the final solution. A six-factor, five-level orthogonal experimental design combined with mold flow analysis was used to determine the optimal process parameter combination: A4B3C5D3E5F2. Further adjustments to the pressure-holding curve reduced warpage deformation by approximately 38.5%, effectively improving the product molding quality.

(4) To verify the rationality of the design and injection molding process parameters, the optimized injection molding parameters were used to produce the designed automotive front-end module. The trial-molded parts exhibited good quality and met the inspection tool requirements. Mechanical performance tests under key load cases were conducted on the trial-molded products, and the results showed that the test outcomes met the product design requirements. The experiments validated the feasibility and effectiveness of the proposed injection molding process parameter optimization scheme.

KEYWORDS: Automotive Front-End Module; Glass Fiber Reinforced Materials; Topology Optimization; Injection Molding

目录

摘要	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 汽车轻量化技术研究现状.....	1
1.2.1 轻量化材料研究现状.....	2
1.2.2 结构轻量化技术研究现状.....	5
1.2.3 先进制造工艺的研究现状.....	5
1.2.4 汽车前端模块研究进展.....	7
1.3 研究的主要内容及方法.....	8
第 2 章 玻璃纤维增强材料拉伸性能试验研究	9
2.1 引言.....	9
2.2 玻璃纤维增强材料拉伸试验方案设计.....	9
2.2.1 试样材料与样件制备.....	9
2.2.2 拉伸试验设备.....	10
2.2.3 试验设计.....	10
2.3 不同材料的拉伸力学性能分析.....	12
2.3.1 不同应变率下拉伸力学性能分析.....	12
2.3.2 不同温度下拉伸力学性能分析.....	13
2.3.3 温度和应变率耦合作用对力学性能影响分析.....	14
2.4 本章小结.....	15
第 3 章 金属嵌件式汽车前端模块的轻量化设计	16
3.1 汽车前端模块的性能要求.....	16
3.2 汽车前端模块轻量化设计思路.....	18
3.3 拓扑优化理论基础.....	19
3.3.1 拓扑优化基本概念.....	19
3.3.2 基于变密度法的拓扑优化数学模型.....	19

3.3.3 基于 Critic 评价准则的多工况优化方法	20
3.4 汽车前端模块单工况拓扑优化.....	22
3.4.1 汽车前端模块设计空间确定.....	22
3.4.2 有限元网格创建.....	23
3.4.3 材料属性添加.....	24
3.4.4 拓扑优化工况设置.....	24
3.4.5 单工况拓扑优化结果.....	25
3.5 汽车前端模块多工况拓扑优化.....	28
3.5.1 各子工况权重比计算.....	28
3.5.2 多工况拓扑优化结果.....	30
3.5.3 汽车前端模块结构模型重构.....	31
3.6 全塑汽车前端模块性能分析.....	31
3.6.1 有限元模型创建.....	31
3.6.2 力学性能分析.....	32
3.7 金属嵌件式汽车前端模块轻量化设计.....	36
3.7.1 金属嵌件式汽车前端模块结构设计.....	36
3.7.2 金属嵌件式汽车前端模块仿真分析.....	36
3.7.3 金属嵌件式汽车前端模块尺寸优化.....	40
3.8 不同类型前端模块性能对比.....	41
3.9 本章小结.....	42
第 4 章 金属嵌件式汽车前端模块注塑成型性工艺参数优化	43
4.1 注塑成型 CAE 技术及理论基础.....	43
4.1.1 注塑成型 CAE 技术.....	43
4.1.2 注塑成型理论基础.....	43
4.2 模流分析有限元模型创建.....	44
4.2.1 几何模型处理.....	44
4.2.2 网格划分.....	45
4.2.3 材料设置.....	46
4.3 浇注系统方案设计.....	47

4.3.1 浇口位置选择.....	47
4.3.2 流道系统设计.....	48
4.3.3 浇注方案的确定.....	49
4.4 金属嵌件式汽车前端模块注塑成型工艺参数优化.....	53
4.4.1 正交实验设计.....	53
4.4.2 正交实验模流分析结果.....	54
4.4.3 翘曲变形结果分析.....	55
4.4.4 保压曲线优化.....	57
4.5 本章小结.....	58
第 5 章 金属嵌件式汽车前端模块的实验验证	59
5.1 注塑成型工艺参数优化结果验证.....	59
5.1.1 注塑成型设备.....	59
5.1.2 注塑成型准备工作.....	59
5.1.3 注塑成型实物验证.....	60
5.2 金属嵌件式汽车前端模块力学性能验证.....	61
5.2.1 力学性能试验设备.....	61
5.2.2 关键安装点力学性能实验.....	62
5.3 本章小结.....	66
第 6 章 结论与展望	67
6.1 研究总结.....	67
6.2 研究展望.....	68
参考文献	69
致谢	75

插图清单

图 1-1 汽车轻量化的意义	1
图 1-2 中国单车铝合金用量测算 (kg/辆) (数据来源国际铝业协会)	3
图 1-3 中国及全球碳纤维需求增长情况 (数据来源碳纤维行业报告)	4
图 2-1 哑铃状玻璃纤维增强塑料拉伸试样	10
图 2-2 拉伸过程示意图	10
图 2-3 不同材料拉伸强度随拉伸速率变化情况及变化率	12
图 3-1 技术路线图	18
图 3-2 汽车前端模块不同设计区域划分	23
图 3-3 汽车前端模块有限元网格	23
图 3-4 网格质量要求	24
图 3-5 不同工况载荷添加情况	25
图 3-6 锁扣安装点极限拉力拓扑优化结果	25
图 3-7 大灯安装点 1 刚度拓扑优化结果	26
图 3-8 大灯安装点 2 拓扑优化结果	26
图 3-9 大灯安装点 3 拓扑优化结果	27
图 3-10 缓冲垫安装点拓扑优化	27
图 3-11 散热器安装点拓扑优化结果	27
图 3-12 掌压拓扑优化结果	28
图 3-13 前保支架安装点拓扑优化	28
图 3-14 汽车前端模块多工况拓扑优化结果	30
图 3-15 汽车前端模块几何模型	31
图 3-16 汽车前端模块中面模型	31
图 3-17 汽车前端模块有限元网格模型	32
图 3-18 刚度分析载荷施加位置	32
图 3-19 全塑汽车前端模块性能分析结果云图	35
图 3-20 带金属嵌件汽车前端模块	36
图 3-21 带金属嵌件汽车前端模块性能分析结果云图	39

图 3-22 汽车前端模块厚度分组	40
图 4-1 简化后的汽车前端模块模型	45
图 4-2 模流分析有限元模型	46
图 4-3 PA6GF30 材料的 PVT 曲线和黏度曲线	46
图 4-4 三种不同浇口方案的位置云图	48
图 4-5 不同方案流道系统布置	49
图 4-6 不同浇注方案对应的翘曲变形量	49
图 4-7 翘曲变形量记录位置	50
图 4-8 不同浇口数量对产品翘曲变形的影响	50
图 4-9 不同浇口方案的锁模力结果	51
图 4-10 不同浇口方案的熔接线分析结果	52
图 4-11 冷却水路布置	52
图 4-12 六个浇口方案翘曲变形结果	53
图 4-13 正交效应图	56
图 4-14 优化工艺参数后的翘曲变形	57
图 4-15 最佳保压曲线	57
图 4-16 优化保压曲线后的翘曲变形结果	58
图 5-1 (a)震雄 SM2200-TP-SVP/2 注塑机和(b)PA6GF30 塑料粒子	59
图 5-2 汽车前端模块试模产品	60
图 5-3 汽车前端模块检具	61
图 5-4 龙门式伺服电脑式万能材料试验机	61
图 5-5 力学性能试验工装	62
图 5-6 固定到实验工装的汽车前端模块产品	62
图 5-7 锁扣安装区域极限拉力测试	63
图 5-8 大灯安装点 1 刚度实验	64
图 5-9 大灯安装点 2 刚度实验	64
图 5-10 掌压刚度测试实验	65
图 5-11 前保支架安装点刚度试验	65

插表清单

表 1-1 不同材料用于汽车轻量化对比	2
表 2-1 材料参数	9
表 2-2 试验设计方案	11
表 2-2 各材料在不同温度下的拉伸强度（单位：MPa）	13
表 2-3 温度应变率耦合作用下拉伸强度（单位：MPa）	14
表 3-1 汽车前端模块性能要求	17
表 3-2 各子目标优化结果柔度值	29
表 3-3 各工况权重比	30
表 3-4 全塑汽车前端模块性能分析结果	35
表 3-5 金属嵌件式汽车前端模块性能分析结果	39
表 3-6 厚度优化结果	41
表 3-7 汽车前端模块不同方案的性能分析对比	41
表 4-1 材料推荐工艺参数	46
表 4-2 正交实验因素水平表	54
表 4-3 正交实验结果表	54
表 4-4 翘曲变形极差分析结果	55
表 5-1 TH-8405S 龙门试验机关键参数	62
表 5-2 力学性能实验结果	66

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

近年来，随着汽车产业的快速发展，我国汽车保有量从2015年的1.72亿辆已猛涨到2024年的3.53亿辆，汽车在给人类的生活带来便利的同时也悄然成为污染物排放和能源消耗的主要来源之一^[1,2]，给“双碳”目标的达成带来较大压力。采用电动汽车代替传统燃油车辆减少了对化石能源的依赖，虽然在一定程度上缓解了能耗压力，但电动汽车的整备质量严重影响了其续航里程。此外，电池的使用和维护成本相对较高，且电池中的重金属在废弃时对环境危害不容忽视，地球仍然面临能源危机和环境污染问题。

汽车轻量化是在保证安全的前提下，通过优化材料与结构设计降低整车质量，减少能源消耗和尾气排放，从而降低环境压力。相关研究表明^[1-3]：车辆重量每降低100kg，百公里燃油消耗可减少0.3至0.5升，同时二氧化碳排放量可下降8至11克。此外，车身重量的减轻还能够降低对动力系统和底盘的性能需求，从而可能引发进一步的减重效应。图1-1详细展示了轻量化技术在节能减排及提升行驶安全性方面的多重优势。

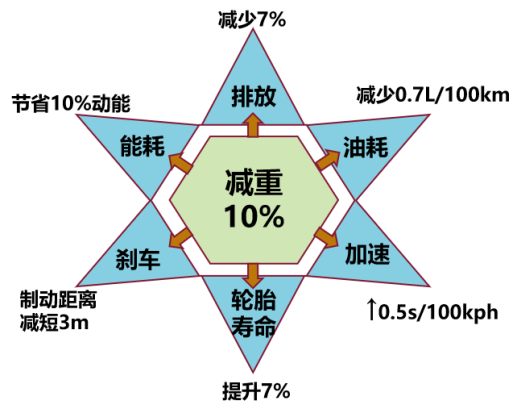


图1-1汽车轻量化的意义

汽车轻量化是由汽车车身及其零部件的轻量化组成，其中关键零部件的轻量化对整车的轻量化至关重要。前端模块作为汽车的关键部件，是汽车外观造型和驾驶安全性的重要保证。同时，由于该部件组成零件多达100多种，又是支撑汽车控制系统的重要组成部分。因此，有效降低汽车前端模块重量对于实现整车轻量化具有重要意义。

1.2 汽车轻量化技术研究现状

汽车轻量化技术是汽车工业应对能源危机与环境问题的关键技术。自 20 世纪 20 年

代德国工程师首次采用铝合金制造发动机活塞以来，经过数十年发展，轻量化技术从单一材料替换发展到多学科协同发展趋势。当前，汽车轻量化研究已形成材料创新、结构优化与先进制造工艺三大技术支柱，共同推动着汽车轻量化技术发展。

1.2.1 轻量化材料研究现状

轻量化材料的应用是最直接且轻量化效果最好的方法，目前汽车上常用的轻量化材料包括高强度钢、超高强度钢、铝合金、碳纤维材料、塑料等^[4-6]。表1-1给出了几种不同材料在汽车零部件上的应用及减重效果，可见合理应用轻量化材料可以带来非常可观的轻量化效果。

表 1-1 不同材料用于汽车轻量化对比

材料 类型	强度 /MPa	优点	缺点	优化方向	减重 比例/%
铝合金	220-650	延展性好、比强度高、轻质，材料成型性高	产量比传统钢材低，价格高	发动机缸体、缸盖、活塞、进气管、各种壳体、横梁、发动机罩、换挡拨叉、踏板、方向盘、车厢底板及饰件等	30-60
镁合金	250-343	减重效果优于高强度钢/铝合金；比强度更高；吸振能力强；切削性好	耐热性、耐蚀性、铸造性差；材料制备、加工工艺复杂、价格高于铝合金	变速器壳体、转向支撑、座椅骨架、罩盖、油底壳、刹车、车门内板等	30-70
碳纤维	1000 以上	力学性能优异、减重程度高、强度大、抗冲击、吸能高、抗震性好、耐腐蚀	脆性大、成本高、制造工艺复杂	车身、车架、前端、发动机罩、罩盖、保险杠、车轮、车门等	50-70
塑料	100 以下	成本低，轻质，易加工，有一定的吸震、隔音、隔热、可回收	普通塑料强度低，有异味，处理不好容易造成污染	绝大部分内外饰件，仪表盘、座椅、尾门、把手、侧围	10-30

铝合金材料因其优异的性能，在汽车工业中得到了广泛应用。根据不同的应用需求，通过添加特定合金元素，铝合金可分为1至8系列，其中2系、5系和6系合金在汽车领域的应用尤为突出。这些合金具有高比强度、优异的冲击能量吸收能力以及良好的可回收性，使其成为汽车轻量化设计的理想材料，广泛应用于汽车的发动机、底盘、传动系统及热

交换系统等。Bildirici^[7]设计了铝合金发动机支架，采用实验响应面设计法在不改变失效区域的应力集中的情况下实现了质量减少约4.31%。Joo^[8]将6061铝合金材料替换铸铁应用到转向节上，对主要薄弱部位进行改进，达到了50%减重效果，在性能测试上也具有良好的刚度和疲劳特性。图1-2中数据可以看出，铝合金作为汽车轻量化中的重要材料，不管是传统燃油车还是新能源电动汽车，单车用量仍在逐年上涨中。

此外，研究者对铝合金的改性研究也在扩大，Zhang等^[9]研究发现加入0.13%的Zr元素加入能让铝合金强度从307MPa提高到342MPa，伸长率也提高到17%。中南大学李翔^[10]研究发现6061铝合金变形加工最适宜温度为230℃，此条件下成形后的铝合金经烤漆后，硬度值最高可达到114HV。Yan等^[11]通过添加1%Mg调整析出物成功提高铝合金材料的化学性能，在120℃时效处理16h后其抗拉强度高达701MPa，伸长率也只有6.7%。这些研究都将加大铝合金在汽车中发挥的作用，扩大应用范围。

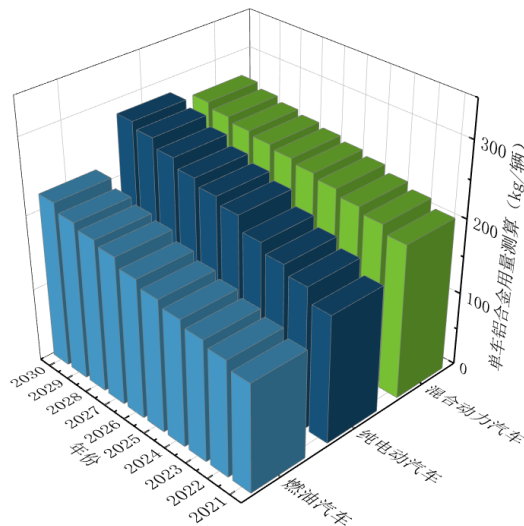


图1-2中国单车铝合金用量测算（kg/辆）（数据来源国际铝业协会）

镁合金是比铝合金更具潜力的汽车轻量化材料，具有质轻、比强度高等优点，阻尼减振、电磁屏蔽性能优异、储能特性好等优点^[12]，能在铝合金的基础上减重15%-20%^[13]，从产品的全生命周期上看，镁也是比铝更为环保的材料，镁合金轮毂对比铝合金轮毂在整个生命周期中可使温室效应降低39.6%，对人体健康的损害程度降低24.0%^[14]。在座椅骨架、方向盘横梁等内饰系统、发动机外壳等零部件均有应用。张龙等^[15]设计一体压铸式重卡仪表盘管梁，较钢制材料成功减重50%以上。重庆大学联合相关团队成功采用半固态注射成形技术，首次成功制备了16寸重量仅7kg的普通乘用车车轮，比传统铝合金车轮轻了约30%^[16]。目前对镁合金的研究主要集中在耐蚀防护上，以提高镁合金在汽车上的应用范围。

碳纤维以其超高比强度成为极佳的以塑代钢材料，通用汽车曾用碳纤维制造一台概念车身，重量仅190kg^[17]，可见碳纤维在轻量化中的强大魅力。Bambach^[18]提出了一种将碳纤维粘合到钢表面来加固车顶结构的技术，碳纤维与乘用车车顶结构的结合后将车顶强度重量比提高了两倍。吉林大学陈静等^[19]将某电动汽车电池箱下箱体用碳纤维材料替换铝合金材料，取得良好效益，优化后电池箱质量比原铝合金箱体减轻29.8%，一阶模态频率提高49%，纵向挤压位移也减小了55%。卢强等^[20]利用碳纤维铝蜂窝复合材料，替换传统铝合金做出汽车保险杠横梁减重达50%。图1-3中可以看出其市场需求在逐年猛增，中国市场的碳纤维需求量在全球市场占比较大且在逐年增长，增速高于全球市场增速，未来碳纤维将在汽车轻量化中起到更加重要的作用。

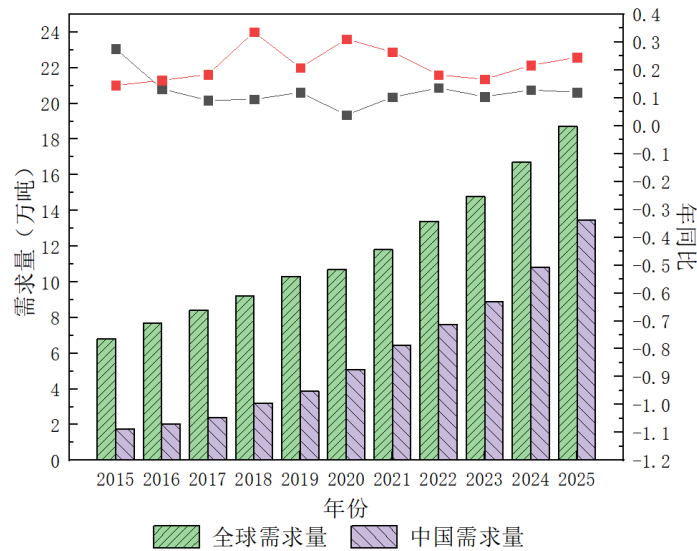


图1-3中国及全球碳纤维需求增长情况（数据来源碳纤维行业报告）

玻璃纤维增强材料是除碳纤维材料以外另一理想的轻量化材料，已从汽车内外饰件上的应用扩展到部分结构件的应用。佛吉亚集团使用玻璃纤维增强聚酰胺66复合材料研发了一种将前后排乘客地板以及车尾的行李箱地板复合成一体式的汽车地板，与传统钢制地板相比减轻约33%的重量^[21]。Xue^[22]用40%含量长玻璃纤维增强聚丙烯材料制成汽车前保险杠，优化后质量降低了约17.4%，比能量吸收提高了6%，成本降低了69%。周志明^[23]采用30%含量长玻纤增强聚丙烯复合材料替换钢材设计汽车翼子板，在满足使用条件下，达到52%减重效果。Danshi Li^[24]设计了一种塑料-金属复合结构多材料汽车车门，主体部分选用40%含量长玻璃纤维增强聚丙烯材料，主要承重部分使用钢材加强，与参考车性能相当的同时，达到了20%的减重效果。玻璃纤维增强材料弥补了碳纤维材料价格昂贵的缺点，虽然性能不如碳纤维，但和普通塑料相比具有超高强度、刚度，耐蠕变、

耐腐蚀及较好的尺寸稳定性^[25]，塑料材料还具备良好的可回收性，在未来的汽车市场中必将发挥巨大作用。

1.2.2 结构轻量化技术研究现状

结构设计的优化是实现轻量化的另一重要途径。当前的结构优化设计主要运用拓扑优化技术精确计算材料最优分布，去除冗余部分。早期的拓扑优化是在汽车概念设计阶段，产品没有成形，根据汽车使用性能，结合约束条件合理分布材料，获得零部件结构形式，极大简化了在汽车设计初期问题，同时也给设计者提供设计思路。

随着CAE技术的发展，拓扑优化技术已应用到了汽车零部件详细设计阶段。翟洪飞等^[26]对某电动汽车轮毂电机壳体结构在进行模态分析和静力学分析的基础上，拓扑优化削减质量达5.5%。Waqas Shaikh等^[27]提出一种减小差速器壳体质量、延长差速器寿命的设计方法，在对壳体结构系统进行模态分析与静力学分析的基础上，对壳体结构的非承载区域进行拓扑优化改善壳体结构，利用SIMP方法优化设计比原设计轻25%。Vishrut Shah等^[28]利用多材料拓扑优化（MMTO）技术，采用钛、铝和碳纤维薄板制作成型复合材料全地形电动汽车底盘，比原底盘轻32%，刚度增加了64%，还大大缩短设计周期。李仕生等^[29]对发动机曲柄连杆系统优化进行研究，以结构最小应变能为目标，通过拓扑优化移除连杆杆柄四周的部分多余材料，可使连杆系统的应变能降低为868.9J，结构质量也由初始的0.793kg降低为0.585kg，实现减重26.2%的最终效果。Nandanwar等^[30]对汽车曲柄和踏板进行拓扑优化，使得曲柄的重量减轻到140克，比现有设计减轻了约24%，优化后的制动踏板重量从363克减轻到211克。

拓扑优化的应用领域也随着计算机技术的发展变得更加广泛，邢广鹏等^[31]根据汽车设计中多工况拓扑优化设计对航空发动机外部支撑结构拓扑优化设计，最终模型质量仅为初始模型质量的7.3%。王志鹏等^[32]利用拓扑优化以无人机机架结构最大应力和一阶固有频率为约束，在满足使用要求条件下，质量最小化为目标将机架模型质量减少了42.5%，有效提高了四旋翼无人机的载重续航能力。

拓扑优化的应用是汽车领域不可或缺的设计方法，对结构优化、降本增效起着至关重要的作用，随着应用的增多，理论原理也不断增多，应用更加广泛，但需要同机械制造过程相结合的地方仍需要完善，以缩短设计周期，提高产品优化成型效率。

1.2.3 先进制造工艺的研究现状

注塑成型CAE技术作为汽车轻量化制造工艺的重要组成部分，其发展历程可追溯至

上世纪70年代。经过数十年的理论创新与技术积累，该技术已形成完整的理论体系，并在汽车、电子、医疗等领域获得广泛应用，特别是在复杂形状塑料制品的成型工艺优化中发挥着关键作用。

注塑成型CAE技术通过数值模拟方法，可有效预测熔接线、翘曲变形、飞边等成型缺陷，显著降低传统试模方法带来的研发成本与周期延长问题。当前，该技术已形成以Moldflow为代表的成熟软件体系，预测注塑成型过程可能存在的质量问题，优化成型工艺^[33-35]。印磊^[36]在对汽车B柱外饰件成型质量研究时，为解决翘曲变形问题，采用最优拉丁超立方试验采样，并结合Kringing代理模型创建出B柱外饰件近似模型，通过NCGA算法对体积收缩率和翘曲变形量进行优化，最终使得翘曲变形量和体积收缩率降低了18.56%和50.94%。刘青宜^[37]对电机外壳的成型过程进行模流分析，并以制件的翘曲变形量为响应目标建立响应面模型，通过回归方程以及方差分析优化产品成型工艺参数，使电机外壳的最大翘曲变形量降低到2.386mm，下降比例达42%。此外，注塑成型CAE技术也在电子器件上制造应用发挥重要作用，Lo^[38]利用Moldflow软件对电脑散热风扇的叶轮进行注塑过程模拟，采用田口法与灰色关联度相结合的方法确定最佳工艺参数，为解决翘曲问题，达到以减少试模成本，提高产品质量目的。Wang^[39]以笔记本电池盖为例，对注塑模具设计和注塑工艺参数进行了优化，使变形减少了约69%。

随着轻量化技术的推广，塑包钢技术得到各大行业的青睐，部分学者对嵌件注塑成型技术进行研究。王金荣^[40]对含有金属嵌件的安全带卡扣注塑成型过程进行分析，成功优化了浇口方案，提升卡扣成型质量。Wang^[41]对短玻璃纤维增强聚酰胺6（SGF-PA6）与8%单向连续玻璃纤维增强聚酰胺6（CGF-PA6）嵌件注塑成型的界面强度和尺寸稳定性进行研究，通过正交实验将式样的翘曲减少到0.1mm以下。Liu^[42, 43]研究了浇口数量、尺寸和位置等对带金属嵌件打印机板成型质量的影响，并研究了不同工艺参数对金属嵌件制品翘曲变形量的影响，最终选择单浇口设计方案，结果表明，较大的保压时间和更长的保压压力有利于注塑件的成型，并进行实际生产验证，其实验结果与模拟结果一致。谢茂青^[44]用Moldflow软件对含有塑料材质薄膜片镶件的空调面盖进行模流分析，优化出能防止膜片重熔的工艺参数，将塑件最大翘曲变形控制在2.609 mm以下。

然而，目前关于金属嵌件注塑成型制品的质量优化研究多集中于电子元器件、装饰件类的小型薄壁零件，而对大型金属嵌件厚壁制品的成型质量分析较为有限，且缺乏对成型工艺参数的系统性优化研究。

1.2.4 汽车前端模块研究进展

汽车前端模块是位于汽车前舱内，连接翼子板并安装在纵梁上的重要零件，集成散热器、缓冲块、翼子板、冷凝器、传感器、前大灯、保险杠、管线等零件^[45, 46]，是汽车前端零部件的主要载体零件。从历史发展来看，汽车前端结构经历了从低集成度到高集成度的演变过程。早期车型如雷诺LAGUNA和福特FOCUS采用多个金属冲压件焊接而成的单一支架形式，这种结构存在重量大、复杂度高等问题。随着集成化概念的引入，汽车前端集成度得到显著提升，如大众Golf VI、途观、甲壳虫以及标志407等车型实现了冷却空调系统的集成，但整体集成水平仍显不足。

近年来，随着制造技术的不断进步，汽车前端模块的集成度得到进一步提升。以奥迪Q7、途锐、迈腾等车型为代表的新一代前端模块还集成了防撞零件、水壶、行人小腿保护梁和前大灯等部件，显著提高了生产线的装配效率^[47]。当前，汽车前端模块的集成化趋势更加明显，如宝马X5、mini和奔驰的Vito/Viano等车型已将进气格栅、保险杠和翼子板等外观部件纳入集成范围，实现了更高程度模块化设计。

在材料选择方面，汽车前端模块已从最早期的钢板冲压材料过渡到压铸镁合金材料，而后有金属塑料复合型，随着轻量化技术的快速发展，玻璃纤维增强塑料应用得到推广，目前最多的是玻璃纤维增强塑料，但这几种材质各有特点，所以各种车型开发时的选用方案也有所差异。钢板冲压前端框架虽然具有成本低、可靠性高的优点，但其集成度较差且不利于轻量化^[48]。压铸镁合金框架虽能显著减轻重量并提升操纵性，但高昂的成本限制了其应用范围，主要局限于高端品牌车型。相比之下，玻璃纤维增强塑料凭借其优异的轻量化效果和高集成度得到广泛应用，但在高强度区域仍需额外加强，导致工艺复杂度增加，且往往需要增设中部支撑结构以满足力学性能要求，这在一定程度上限制了其空间利用率。

而塑料金属复合结构前端模块可以很好平衡重量与强度的问题，在较小空间占比可以使结构具备较高强度。塑料金属组合式前端模块主要分为模后重组和嵌件注塑两种形式。模后重组工艺通过铆钉或螺栓将塑料与钣金部件连接，虽然具有较好的强度和刚度，但在后续组装过程的人工成本高、减重空间也相对有限。相比之下，嵌件注塑成型技术采用塑料作为主体结构材料，在关键部位嵌入金属钣金进行增强，这种创新性设计不仅实现了显著的轻量化效果，还提高了结构设计的自由度，能够集成更多安装点和卡扣孔，在保证关键部位强度的同时，有效提升了整体结构的集成度和功能性。

但目前对前端模块这种较大金属嵌件制品的成型质量分析较少，缺乏对成型工艺参数的系统性优化研究。在一定程度上限制了此类结构在汽车零部件领域的应用，对其结构优化设计、注塑成型工艺优化系统分析对今后的应用具有重要意义。

1.3 研究的主要内容及方法

本文以某汽车前端模块为研究对象，从选材到轻量化设计以及其注塑成型工艺参数优化进行相关研究。首先研究了玻璃纤维增强聚丙烯材料和玻璃纤维增强聚酰胺6材料在不同温度、不同应变率和温度-应变率耦合作用下的拉伸力学性能，选取30%含量玻璃纤维增强聚酰胺6材料作为汽车前端模块材料；然后根据边界条件创建前端模块的设计空间，完成单目标优化、多目标优化，以此为基础设计金属嵌件式汽车前端模块；随后基于Mold flow软件完成前端模块注塑成型过程模拟，设计仿真实验组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；最后进行实验验证注塑成型优化结果及设计方案的可行性。本论文的工作主要从下面几个部分开展：

第1章：介绍了汽车轻量化技术的总体发展背景及研究意义；阐述了汽车轻量化在材料、结构、成型工艺的研究方向及的研究进展，揭示出汽车前端模块发展趋势及当前研究中存在不足之处，为本文研究指明方向。

第2章：研究了玻璃纤维增强材料（PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50、PPLGF30、PPLGF40）材料的拉伸力学性能，对比不同系列材料及不同含量玻璃纤维材料的拉伸强度，综合成本及性能考虑，选择PA6GF30作为前端模块用料。

第3章：创建汽车前端模块设计空间，对其进行单目标拓扑优化并基于Critic评判准则确定权重进行多目标拓扑优化计算出最佳传力结构，根据优化结果设计出全塑料结构产品和带有金属嵌件结构产品，通过有限元计算分析不同方案产品性能，确定选择金属嵌件式前端模块方案的合理性。

第4章：设计金属嵌件式前端模块不同注塑成型方案，进行仿真分析，确定最佳浇注方案，设计正交实验优化注塑成型工艺参数，分析不同注塑成型工艺参数对带有金属嵌件汽车前端模块翘曲度的影响情况，优化出较为合理注塑成型工艺参数。

第5章：对前端模块进行试模验证，通过检具检验产品尺寸是否符合要求；利用万用龙门试验机模拟实际工况对产品的刚度、强度进行实验验证，证实设计方案的合理性。

第6章：概括并总结了全文开展的主要工作内容，同时对后续研究工作进行展望。

第2章 玻璃纤维增强材料拉伸性能试验研究

2.1 引言

为实现汽车前端模块的轻量化，用玻璃纤维增强塑料替代传统钢结构占据了汽车前端模块的主要市场。材料的力学性能与后续产品开发密切相关，为综合考虑玻璃纤维增强材料的性能与经济性，本章将使用电子万能试验机对不同玻璃纤维含量的长玻纤增强聚丙烯复合材料（PPLGF）和短玻璃纤维增强聚酰胺6复合材料（PA6GF）进行拉伸力学性能试验，综合考虑汽车行驶过程中不同工况条件和环境因素，拉伸试验将选取合适的应变率和环境温度设计拉伸试验方案，根据玻纤增强聚丙烯材料和聚酰胺6材料的拉伸试验数据进行分析，得到对应环境因素下材料的拉伸强度。

2.2 玻璃纤维增强材料拉伸试验方案设计

2.2.1 试样材料与样件制备

本试验所采用的玻璃纤维增强复合材料包含聚丙烯（PP）和聚酰胺6（PA6）两种基体材料，以聚丙烯为基体的复合材料中长玻璃纤维含量占比分别为30%和40%两种，以聚酰胺6为基体材料的复合材料中短玻璃纤维含量占比分别为30%、40%、50%三种，试验样件均由芜湖恒信汽车轻量化部件制造有限公司提供。

不同材料的具体参数见表2-1，所有拉伸试验样件均通过注塑成型工艺制备，形状为哑铃状，标准拉伸样件的具体尺寸如图2-1所示。试样拉伸部分的有效宽度 w 和有效厚度 h 分别为4mm和10mm。

表 2-1 材料参数

材料种类	纤维种类	玻璃纤维占比	基体材料占比	密度(g·cm ⁻³)
PPLGF30	长纤	30	70	1.12
PPLGF40		40	60	1.22
PA6GF30	短纤	30	70	1.35
PA6GF40		40	60	1.45
PA6GF50		50	50	1.55

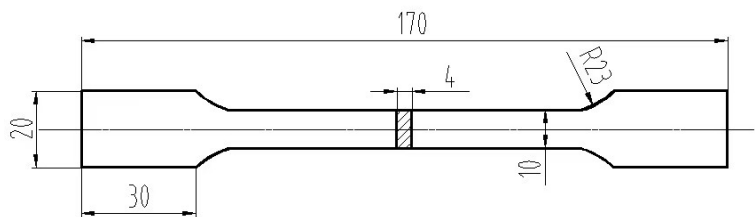


图2-1哑铃状玻璃纤维增强塑料拉伸试样

2.2.2 拉伸试验设备

本实验中的拉伸测试实验均为单轴静载荷拉伸实验，拉伸实验均使用电子万能试验机和恒温试验箱完成，实验设备如图2-2(a)所示，设备均生产于深圳三思纵横科技股份有限公司。电子万能试验机的型号为UTM4104，试验机最大载荷为10kN。不同温度实验配备的高低温恒温实验箱型号为WGDY-4150S，拉伸试验夹具采用楔形夹具进行夹持，从而保证试样在拉伸过程中能被牢固地夹紧不发生滑移，拉伸实验过程示意图如图2-2(b)所示。

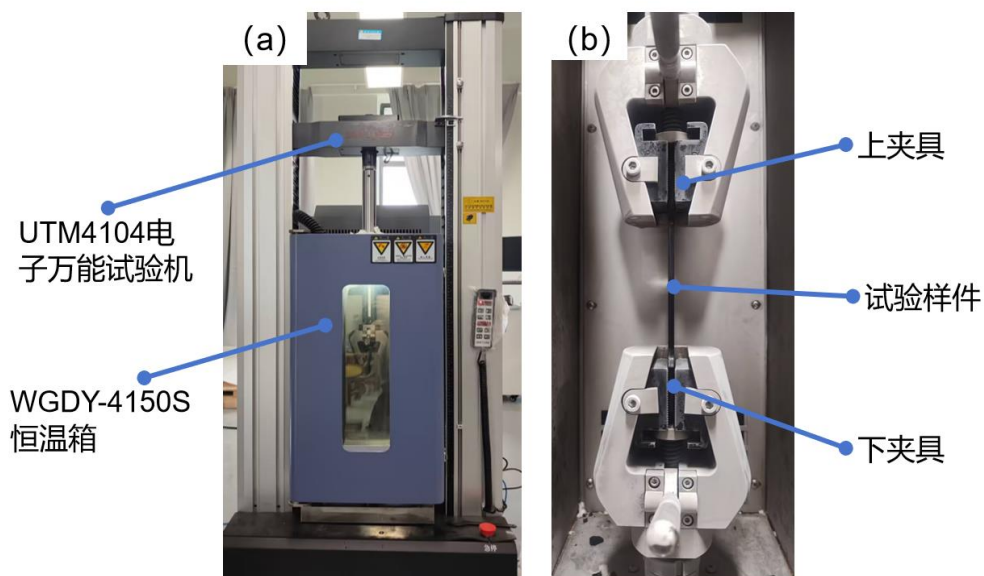


图2-2拉伸过程示意图

2.2.3 试验设计

本实验的主要目的在于系统评估一系列不同种类的玻璃纤维增强复合材料（包括PPLGF30、PPLGF40、PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50）在多种测试条件下的拉伸性能表现。这些测试条件涵盖了不同的应变率和温度设置，旨在全面了解上述因素对材料力学性能的具体影响，具体实验方案见表2-2。

表 2-2 试验设计方案

试验组	拉伸速率 (mm/min)	实验温度(°C)
1	0.05、0.5、5、50、500	25
2	5	-25/0/25/50/75/90
3	0.05/500	-25/25/90

实验一：应变率对材料力学性能的影响实验

为了准确研究出不同材料对应变率的敏感性，通常需要设置三组以上成倍数的应变率进行比较，实验设计中考虑了五个应变率水平，根据实验机的参数条件，拉伸速率分别设置为0.05mm/min、0.5mm/min、5mm/min、50mm/min、500mm/min，对应的应变率分别为 1.7×10^{-5} 、 1.7×10^{-4} 、 1.7×10^{-3} 、 1.7×10^{-2} 、 1.7×10^{-1} ，这有助于探究快速加载和慢速加载条件下材料强度的变化。实验温度控制在恒温25℃，通过比较相同温度的不同应变率下各种材料的拉伸强度，揭示出材料在不同应变率下的力学行为差异。

实验二：温度效应对材料力学性能的影响实验

除了应变率外，实验还将考察温度变化对材料性能的影响。汽车前端模块应用环境温度通常为-25℃到90℃之间，通过高低温恒温试验箱完成环境温度设置。在一系列设定温度点进行测试，温度点设置为-25、0、25、50、75、90℃，实验过程控制拉伸速率恒为5mm/min。实验时先将样件在楔形夹具上加紧，然后放到恒温试验箱内，启动恒温试验箱，试验箱内配有风扇可使箱体内受温均匀，待温度在设定值的 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 范围内稳定后，保证样件与环境温度一致，开始拉伸试验。可以观察到材料随温度升高或降低时其力学性能的变化趋势。这对于预测材料在实际使用环境中的表现至关重要。

实验三：温度和应变率耦合作用对材料力学性能的影响实验

为了更全面测试材料力学性能，还需要研究温度和应变率之间的耦合作用。在此部分，选择了两个极端温度点（-25℃、90℃），并在每个温度点下分别采用两种极端应变率（ 1.7×10^{-5} 和 1.7×10^{-1} ）进行测试。这种设置允许我们探索在不同温度条件下，材料对应变率变化的敏感性。通过对这些条件下材料的拉伸强度的测量和分析，可以识别出温度与应变率交互作用下材料的最佳性能区间，并为工程应用准确提供指导。

在拉伸试验过程中，精确测量材料的瞬时横截面积具有一定的难度，试验材料均为脆性材料，为简化实验难度，可以忽略拉伸过程截面形状变化，因此拉伸强度通过公式2-1计算

$$\sigma_t = P_{\max} / (w \times h) \quad (2-1)$$

式中 $P_{\max}$ 为试样断裂前所受的最大载荷 w 和 h 分别为试样的有效宽度和有效厚度。

2.3 不同材料的拉伸力学性能分析

2.3.1 不同应变率下拉伸力学性能分析

环境温度控制在25℃时，长玻璃纤维增强聚丙烯（PPLGF）和玻璃纤维增强聚酰胺6（PA6GF）分别在选定的五种不同应变率进行拉伸试验。图2-3展示了不同材料拉伸强度随拉伸速率的变化情况及变化率，具体数据如下：在0.05mm/min的拉伸速率下，PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50、PPLGF30、PPLGF40的拉伸强度分别为163.9 MPa、175.4 MPa、195.6 MPa、83.2 MPa、96.1 MPa。而在500mm/min的拉伸速率下，这些材料的拉伸强度分别提高了52.3MPa、55.1 MPa、49.7 MPa、49.5 MPa、51.8MPa，增长比例分别为31.9%、31.4%、25.41%、59.4%、53.9%。实验结果表明，随着玻璃纤维含量的增加，两种类型材料的拉伸强度均有所提升。这主要是因为玻璃纤维在复合材料中交织作用随纤维含量增加更加明显，样件的抗拉强度得到提升。

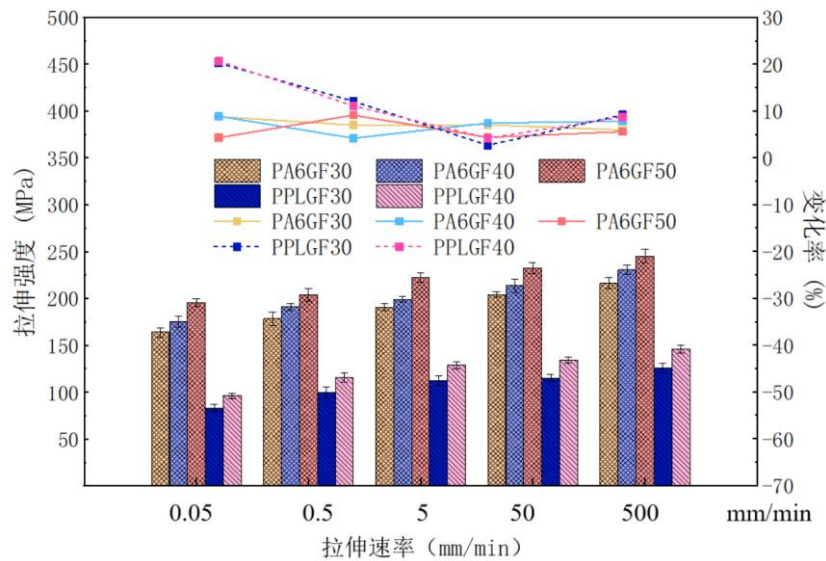


图2-3不同材料拉伸强度随拉伸速率变化情况及变化率

所有材料在500mm/min的拉伸速率下，其拉伸强度都有显著增加。这表明随着拉伸速率的提高（即应变率增大），材料抵抗变形能力明显大幅提升。较快的拉伸速率使应力没有足够的时间在材料内部结构发生充分的变形和能量耗散，因此拉伸强度较大。而较慢的拉伸速率下，应力有足够的时间在材料内均匀分布，因此有缺陷的位置优先断裂，最终测得的拉伸强度较低^[49]。

此外，PPLGF系列材料在高拉伸速率下的拉伸强度增长比例明显高于PA6GF系列。虽然PA6GF和PPLGF都是玻璃纤维增强热塑性塑料，但它们的基础树脂、纤维含量以及两者之间的界面结合等特性存在差异。PPLGF材料在高速拉伸时，拉伸强度表现出更高的增长率，可能与纤维长度有关。相比短纤维，长纤维能够在更大的范围内分布应力，减少局部应力集中。虽然短纤维也能提供一定的增强效果，但由于其长度较短，在承受拉伸应力时，纤维拔出的可能性较大，因此其增强效果相对有限。另外，聚丙烯与玻璃纤维的相互作用也可能使其在高应变速率条件下更能抵抗断裂。

2.3.2 不同温度下拉伸力学性能分析

设置拉伸速率为5mm/min，PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50、PPLGF30、PPLGF40材料在选定的六种不同温度下分别进行拉伸试验（实验温度分别为-25℃、0℃、25℃、50℃、75℃、90℃）。实验结果见表2-2，在恒定5mm/min的拉伸速率下，随着温度的升高，不同材料的拉伸强度均有不同程度降低。

对比25℃下的拉伸强度，在90℃时PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50、PPLGF30、PPLGF40拉伸试样的拉伸强度分别降低了93.1MPa、91.1 MPa、98.6 MPa、43.8 MPa、59.1 MPa，变化比例分别为48.8%、45.7%、44.3%、39.07%、44.1%；在-25℃时，PA6GF30、PA6GF40、PPLGF30、PPLGF40的拉伸强度比25℃时分别提高了36.5MPa、49.9MPa、20.1MPa、28.5MPa，上升比例分别为19.1%、25.1%、15.9%、19.8%。

表 2-2 各材料在不同温度下的拉伸强度（单位：MPa）

温度	PA6GF30	PA6GF40	PA6GF50	PPLGF30	PPLGF40
-25	227.2	248.9	>250	146.7	172.6
0	211.9	225.4	241.8	126.6	144.1
25	190.7	199.0	222.5	112.1	134.8
50	135.6	150.6	172.2	96.9	112.2
75	105.9	118.2	135.1	78.2	89.1
90	97.6	107.9	123.9	68.3	75.3

所有材料在90℃高温下的拉伸强度均大幅下降，这是因为基体材料PA6和PP都是热塑性材料，分子运动随着温度的升高而加剧，导致基体材料软化，从而降低了材料的刚性和强度^[50, 51]。低温下玻璃纤维在横向收缩程度比树脂基体在横向的收缩程度小，玻璃纤维与基体材料接触界面摩擦力变大，低温下玻璃纤维增强复合材料的拉伸强度提高^[52]。

表2-2中的数据还显示出PA6GF系列材料在温度升高后的拉伸强度降低幅度大于PPLGF系列，但拉伸强度值仍远高于PPLGF系列。这可能是因为PA6具有较高的玻璃化转变温度 T_g ，当温度接近或略高于 T_g 时，材料会经历从坚硬脆性状态向柔软高弹态的转变，导致拉伸强度大幅度下降。相比之下，PPLGF系列材料即使在较高温度下也表现出相对较好的稳定性，其拉伸强度的降低比例较低。这可能是由于长玻璃纤维间相互搭接起到的增强作用比短纤维的好，使其在高温下的性能退化较小。然而，从整体性能来看，PPLGF材料的高温力学性能明显与PA6GF材料存在较大差距。

2.3.3 温度和应变率耦合作用对力学性能影响分析

PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50、PPLGF30、PPLGF40材料分别在-25℃、25℃、90℃下做0.05mm/min、5mm/min、500mm/min拉伸速率下的三组不同实验。实验结果见表2-3，在-25℃时，所有材料的拉伸强度都较高，且随着拉伸速率的增加，拉伸强度也有所增加。在25℃时，拉伸强度普遍低于-25℃，但仍然保持在较高的水平。在90℃时，拉伸强度明显下降，尤其是在低拉伸速率下，拉伸强度最低。对于所有温度条件，高拉伸速率下的拉伸强度通常高于低拉伸速率下的拉伸强度。例如，在-25℃时，PA6GF30的拉伸强度从低拉伸速率的219.1 MPa增加到高拉伸速率的244.3 MPa。

表 2-3 温度应变率耦合作用下拉伸强度（单位：MPa）

	PA6GF30	PA6GF40	PA6GF50	PPLGF30	PPLGF40
-25℃ 0.05mm/min	219.1	235.0	245.5	127.7	156.7
-25℃5mm/min	227.2	243.9	>250	146.7	188.6
-25℃ 500 mm/min	244.3	248.1	>250	154.4	202.5
25℃ 0.05mm/min	163.9	175.4	195.6	83.2	96.1
25℃5mm/min	190.7	199.0	222.5	112.1	134.8
25℃ 500mm/min	216.2	230.5	245.3	115.6	127.9
90℃ 0.05mm/min	90.5	102.7	116.7	55.6	49.1
90℃5mm/min	97.6	107.9	123.9	68.3	75.3
90℃ 500mm/min	109.9	118.4	135.3	85.3	88.6

PA6GF系列材料（PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50）在所有温度和拉伸速率条件下，拉伸强度均高于PPLGF系列材料（PPLGF30、PPLGF40）。温度和拉伸速率的耦合作用对拉伸强度有显著影响。材料在低温和高拉伸速率下表现出更高的拉伸强度。随着温度

的升高，拉伸强度逐渐下降，尤其是在高温环境低拉伸速率下，拉伸强度最低。

综上所述，可以看出在各种环境下PA6GF材料性能远高于PPLGF的材料性能，且纤维含量越高拉伸强度越大，但随着纤维含量的增加，复合材料在成型时流动性较差会导致成型困难^[53]，成本也会提高，其中PA6GF30与PA6GF40、PA6GF50料的性能差距不大，但远高于PPLGF30和PPLGF40的拉伸强度，因此优先选用30%玻璃纤维含量的PA6GF30材料作为前端模块用料，可以很好满足汽车发动机舱使用条件。

2.4 本章小结

本章节通过一系列拉伸试验，系统评估了不同种类玻璃纤维增强复合材料（包括PPLGF30、PPLGF40、PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50）在多种测试条件下的拉伸强度变化情况。最后确定PA6GF30材料作为前端模块用料。

应变率的影响：随着拉伸速率的增加，所有材料的拉伸强度均有显著提升。这说明大应变率能够提高材料的抗变形能力，特别是在高拉伸速率下，材料表现出更高的强度。此外，PPLGF系列材料在高速拉伸时显示出更高的拉伸强度增长率，但拉伸强度与PA6GF材料存在较大差距。

温度的影响：随着环境温度的升高，所有材料的拉伸强度均呈现明显的下降趋势。这是因为高温加剧分子运动导致基体材料软化，从而降低了材料的刚性和强度。其中，PA6GF系列材料由于具有较高的玻璃化转变温度，在较高温度下拉伸强度下降较大，而PPLGF系列材料即使在高温下也表现出相对较好的稳定性，但在高温下PA6GF材料的拉伸强度仍远高于PPLGF材料。

温度和应变率耦合作用的影响：试验结果表明，温度和拉伸速率的耦合作用对材料的拉伸强度有显著影响。在低温和高拉伸速率下，材料表现出最高的拉伸强度；而在高温和低拉伸速率下，拉伸强度最低。

第3章 金属嵌件式汽车前端模块的轻量化设计

上述章节确定了低成本高性能的PA6GF30材料作为前端模块主要用料，本章将以某汽车前端模块为研究对象，详细探讨其性能要求及轻量化的设计方法，重点引入拓扑优化理论作为实现结构高效设计的核心技术，对比按照优化结果设计的全塑前端模块和金属嵌件式前端模块的性能差异。

3.1 汽车前端模块的性能要求

本课题研究的前端模块直接装配的零件包括发动机机舱锁、散热器、冷凝器、中冷器、防撞梁、缓冲块、传感器、前大灯、保险杠、翼子板等零件。由于汽车行驶路况复杂，会受到各种碰撞、弯曲、扭转及冲击载荷作用，为使这些零部件装配到前端模块上正常发挥其各自功能，汽车制造厂家会对产品安装点提出设计要求。

1.锁扣安装区域刚度：锁扣是发动机机罩正常开关的重要保障，汽车在复杂路况上行驶时，机罩会随着气流冲击、颠簸冲击作用产生开启或关闭的趋势，使得机罩锁扣安装点必须具备一定的刚度抵消这种冲击作用，以保证发动机罩关闭位置正确。一般要求机罩锁扣安装区域中心点+X方向静刚度 $\geq 300\text{N/mm}$ 的力，引擎锁扣安装区域中心点-Z方向静刚度 $\geq 600\text{N/mm}$ 。

2.锁扣安装区域极限拉力工况：汽车在高速行驶过程中，气流会对发动机罩产生较大压力，导致机罩与锁扣间产生极限拉力，锁扣安装区域具备一定强度才能保证前端模块正常工作，一般要求在机罩锁扣安装区域中心点-Z向施加力(单锁4000N，双锁按单侧3000N，要求最大应力小于材料屈服应力，即前端模块无裂痕、破损等现象。

3.前大灯安装点刚度：前大灯除了正常照明也是汽车外饰件的重要组成部分，如果刚度不足可能会导致大灯在车辆行驶过程中出现晃动或者移位，影响照明效果和行车安全。此外，大灯的稳定性对于确保其正常工作和避免过早磨损也是非常重要的，如果造成抖动过大，甚至会与翼子板、前罩和前保险杠之间发生刮擦和异响等。一般要求前大灯安装点-Z方向静刚度 $\geq 300\text{N/mm}$ 。

4.缓冲垫安装点刚度：缓冲垫的作用是在发动机机罩与车身之间提供缓冲，以减少振动和噪声，同时也在发生碰撞时也在一定程度上起到保护行人作用。如果安装点刚度不足，缓冲块可能无法有效地发挥其作用，导致发动机机罩在行驶过程中产生异响或抖

动，影响驾驶舒适性及车辆的NVH（噪声、振动和粗糙度）性能；也可能导致发动机罩在受到外力冲击时的变形增加，这不仅影响车辆的外观，还可能影响到发动机罩下的部件，如发动机和其他机械部件的安全性。在碰撞时也可能导致发动机罩变形过大，增加行人受伤的风险。一般要求缓冲垫安装点静刚度 $\geq 400\text{N/mm}$ 。

5.散热器安装点刚度：散热器是汽车冷却模块重要组成部分，散热器安装点刚度不足可能会导致电子风扇的振动更容易传递到车身，影响汽车的NVH性能，同时振动可能导致散热器的冷却效率下降，影响发动机和空调系统的正常工作。此外，如果散热器长期振动可能导致散热器及前端模块本体结构的疲劳，缩短部件的使用寿命。一般要求散热器安装点的法向刚度 $\geq 200\text{N/mm}$ 。

6.前保支架安装点刚度：前保支架主要用来固定保险杠，足够的刚度确保了保险杠支架能够在碰撞过程中有效地传递和分散冲击力，减少对车身结构的损害，并有助于维持车辆整体的安全性能。此外，刚度高的安装点还可以保证保险杠与车身之间的稳定连接，避免由于行驶过程中的震动或者轻微碰撞导致的松动、移位等问题，从而保持车辆外观的一致性和完整性。一般要求安装点的法向刚度大于等于 200N/mm 。

7.掌压刚度：掌压刚度是衡量前端模块在受到压力时的抵抗变形能力，是汽车设计中的一个重要考量因素。通常情况下，掌压刚度较高的前端框架能够提供更好的结构稳定性，能减少在碰撞中可能发生的变形，确保车辆在发生碰撞时能够有效吸收和分散冲击力、保护乘客安全及前端内部结构。一般情况下在前端框架上横梁最弱区域（60-100）mm圆形面积上施加集中载荷，掌压刚度不低于 150N/mm 。

8.前端模块一阶模态：一阶模态是结构在自由振动时，最低频率下的振动模式。前端模块需要具备与整车相匹配的模态，避免因路面颠簸等因素发生共振，导致机械结构严重变形，一般要求汽车前端模块一阶频率大于等于 50HZ 。

表 3-1 汽车前端模块性能要求

序号	实验项目	载荷	目标要求
1	+X 方向锁扣区域刚度	300N	$\geq 300\text{N/mm}$
	-Z 方向锁扣区域刚度	600N	$\geq 600\text{N/mm}$
2	-Z 方向锁扣区域极限拉力	3000N/4000N	前端模块没有裂纹、破损等现象
3	-Z 前大灯安装点刚度	300N	$\geq 300\text{N/mm}$
4	-Z 方向机罩缓冲垫区域刚度	400N	$\geq 400\text{N/mm}$

续表 3-1 汽车前端模块性能要求

序号	实验项目	载荷	目标要求
5	-Z 方向散热器安装点刚度	200N	$\geq 200\text{N/mm}$
6	-Z 方向掌压刚度	150N	$\geq 150\text{N/mm}$
7	-Z 方向前保支架安装点刚度	200N	$\geq 200\text{N/mm}$
8	模态	一阶模态	$\geq 50\text{Hz}$

3.2 汽车前端模块轻量化设计思路

按传统方式进行前端模块设计时，往往是有经验的产品设计工程师根据主机厂提供的边界数据，包括大灯、大灯支架、冷却模块、前保险杠支架、前脸装饰板、进气格栅、传感器的安装布局，匹配好安装点，根据不同安装位置要求留出预留空间，先设计出大致的框架壳体，然后在壳体内部增加加强筋结构，根据设计经验在刚度要求严格位置或关键传力位置的加强筋布置密集一些，反之加强筋适当减少，得到初版三维模型，然后将三维模型发送到CAE工程师手中，对模型处理，进行抽中面处理、有限元网格划分，然后进行刚度分析校核，对不满足性能要求的结构进行加强处理，或者改变主体结构，然后在分析、校核直至满足要求。这种方法往往受设计师主观意识影响较大，实际产品强度与主观判断可能存在较大偏差，增加模型修改次数，延长产品开发周期。

本文采用直接拓扑优化方法，技术路线如图3-1所示，在产品边界数据确定后，先创建出产品最大设计空间，对设计空间直接拓扑优化，得到最优载荷传递结构，根据拓扑优化结果布置加强筋，进行产品详细结构设计然后进行仿真分析，对各工况进行校核，满足性能要求情况下进一步进行厚度优化处理，从而减轻产品质量，缩短产品开发周期。

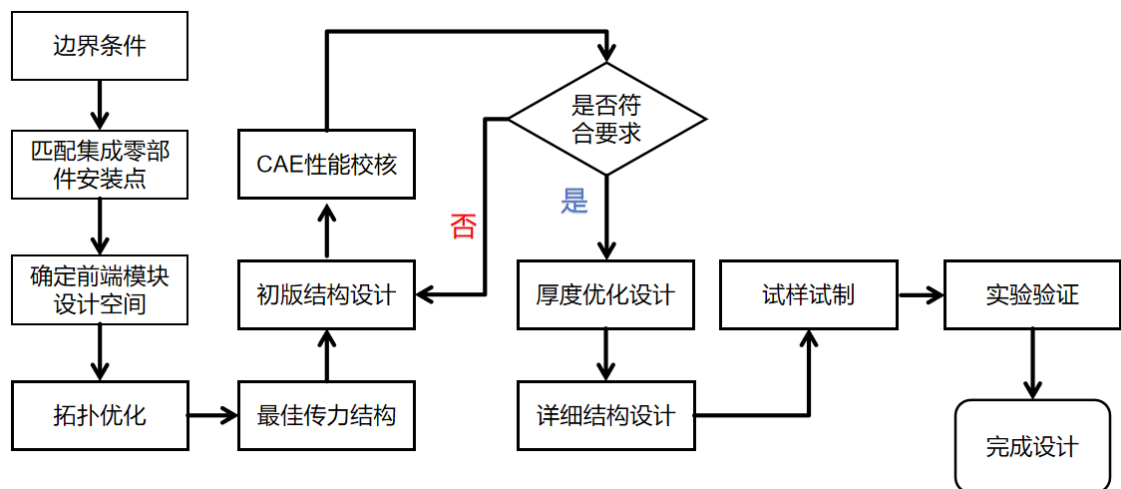


图3-1技术路线图

3.3 拓扑优化理论基础

3.3.1 拓扑优化基本概念

拓扑优化技术是通过优化算法科学计算出材料的最佳分布结果，设计难度较大，较为灵活，与有限元法结合可以有效解决很多复杂结构的工程实际问题^[54]。优化过程主要是将连续体离散成有限个单元，拓扑优化主要包括以下几个部分：

1.设计变量：拓扑优化的设计变量就是设计区域的单元密度，将密度与刚度关联起来，通过密度的变化反映出刚度变化，拓扑优化的求解结果和设计变量有很大关联，Optistruct支持创建多个拓扑优化设计变量，每个变量的设置相互独立。

2.约束条件：工程上的优化问题基本都是带有约束的优化，拓扑优化可以根据实际情况对设计变量添加约束条件，主要有结构几何约束（形状、尺寸）和性能约束（刚度、应力）等。

3.优化目标：是拓扑优化的求解目标，通常有刚度、柔度、应力、质量、尺寸、体积等，指定合适约束条件及合适优化目标是得到较好优化结果的基本要求。

3.3.2 基于变密度法的拓扑优化数学模型

目前主流的拓扑优化求解器Optistruct主要采用的是单元变密度法进行优化设计，在该方法中，有限元模型中各单元的相对密度被设定为优化变量，并通过构造的单元密度与材料弹性模量等参数之间的函数关系将单元密度与材料弹性模量等参数关联起来。变密度法应用最广的材料数学模型主要包括固体各向同性惩罚微结构模型（Solid Isotropic Microstructures with Penalization, SIMP）和材料属性的有理近似模型（Rational Approximation of Properties, RAMP）^[55-57]。这里主要介绍本文求解过程应用的固体各向同性惩罚微结构模型（SIMP）方法。

在SIMP方法中，单元的弹性模量表达式为：

$$E_e = \rho_e^p E_0 \quad (3-1)$$

其中 E_0 表示原始单元所对应材料的弹性模量； E_e 表示插值后单元材料的弹性模量； ρ_e 表示设计变量，取值范围为(0,1]； p 表示降低中间单元密度的惩罚因子。通过引入惩罚因子对中间密度值进行惩罚，将处于中间的密度值转化为向0和1两端聚集的数值，即连续变量的拓扑优化模型能很好地逼近0或1离散变量的优化模型，从而有效地减少中间密度单元数目。但是当设计变量 ρ_e 为0时，此时有限元模型的刚度矩阵奇异，因此引入极

小设计变量代替0，对应弹性模量为 $E_{\min}$ ，可以避免有限元分析的数值奇异性，改进后的数学表达式为

$$E_e(\rho_e) = E_{\min} + \rho_e^p (E_0 - E_{\min}), \rho_e \in [0, 1] \quad (3-2)$$

$E_{\min}$ 为单元弹性模量下限值通常可取 $E_0/10^9$ ； ρ_e 表示设计变量，当其等于1时，表示该单元实际存在，当其等于0时，表示该单元为去除材料部分。

从数学角度来看，拓扑优化问题通常被定义为最小柔度的求解问题。其核心思想是通过有限元方法，将更新后的单元参数迭代代入原始结构，逐步调整结构的整体刚度矩阵，从而构建出式3-3中连续体结构的拓扑优化数学模型。

$$\begin{cases} \min C(\rho) = FU \\ \text{st. } KU = F \\ \frac{V}{V_0} - f_0 = \sum_i^n (\rho_i v_i) / V_0 - f_0 \leq 0 \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho_i \leq 1 \end{cases} \quad (3-3)$$

式中， C 表示模型结构的柔度； ρ 表示为单元的相对密度； F 表示载荷向量； U 表示优化过程中结构的位移向量； K 表示模型结构的总体刚度矩阵； V_0 表示模型结构的初始体积； V 表示优化后的模型结构体积； v_i 表示单元体积； f_0 表示模型的体积分数； $\rho_{\min}$ 表示设计变量的最小值； n 表示设计区域内的离散单元总数。

3.3.3 基于 Critic 评价准则的多工况优化方法

汽车前端模块在汽车行驶过程中所承受的实际工况较为复杂，因此在设计时涉及多目标优化问题。多目标优化的实际意义在于“最大化效益，最小化成本”原则^[58]。在进行拓扑优化时，各个工况的目标结果在多数情况下是相互排斥的，一个工况性能的提高往往会导致其他工况性能变差，每个子工况完全意义上取得最优解是不可能的，所以在进行实际优化时需要对多个子工况进行协调，从而多目标优化问题转化为子目标的权重分配问题。多目标优化的数学模型如式3-4所示。

$$\begin{cases} \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s.t. } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\ x = [x_1, x_2, \dots, x_d], x_{d\min} \leq x_d \leq x_{d\max} \end{cases} \quad (3-4)$$

式中的 x 为决策向量； n 为优化目标的个数， $g_i(x)$ 为第 i 个不等式约束条件； $h_j(x)=0$ 是第 j 个等式约束条件； $f_n(x)$ 为第 n 个优化目标。

多目标优化问题中子目标的权重分配问题通常有主观赋权法和客观赋权法两种^[59], 主观赋权法受人的主观意识影响较大, 往往存与实际情况存在较大的偏差^[60]。Critic评价准则 (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) 是一种用于多目标优化问题的客观评价方法, 主要用于确定各评价指标的权重。该方法通过评估指标之间的对比强度和冲突性来综合衡量指标的重要性, Critic法完全基于数据本身, 不依赖于主观判断, 具有较高的客观性。同时考虑了指标的对比强度和冲突性, 能够更全面地反映各指标的重要性。适用于多种多指标评价体系, 特别是在指标之间存在相关性和冲突性的情况下, 效果尤为显著。汽车前端模块多种工况下的拓扑结果存在相互冲突的问题, 此方法可以很好解决上述问题。

使用Critic评判准则计算权重的过程如下:

(1) 首先准备原始数据矩阵, 当有 n 个评价对象, m 个评价指标时, 评价结果对应为 $n \times m$ 的评价矩阵 X 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

(2) 标准化数据: 标准化数据是为了便于比较各组数据之间差异, 通常需要将评价结果进行无量纲化处理。根据不同指标要求, 将无量纲化的方法分为成本型 (评价指标越小越好)、效益性 (评价指标越大越好) 和适度型 (评价指标越接近给定范围越好) 三种, 可根据具体工况需求选择何时方法进行计算。

1) 成本型指标无量纲化:
$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (3-5)$$

2) 效益型指标无量纲化:
$$z_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (3-6)$$

3) 适度型指标无量纲化:

$$\begin{cases} 1 - \frac{a - x_{ij}}{\max(a - x_j^{\min}, x_j^{\max} - b)} & , \quad x_{ij} < a \\ 1 & , \quad a \leq x_{ij} \leq b \\ 1 - \frac{x_{ij} - b}{\max(a - x_j^{\min}, x_j^{\max} - b)} & , \quad x_{ij} > b \end{cases} \quad (3-7)$$

其中 a 和 b 不相等时可以叫做范围型指标, a 和 b 相等时可以叫做中间型指标。

(3) 计算各指标的对比强度：首先计算出每项指标的均值：

$$\bar{z}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{ij} \quad (3-8)$$

然后根据均值计算出各项指标的变异性：

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - \bar{z}_j)^2}{n-1}} \quad (3-9)$$

(4) 计算出各指标的冲突性：首先计算各指标之间的皮尔逊相关系数矩阵，其中第 i 和第 j 个指标之间的相关系数为：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{h=1}^n (z_{hi} - \bar{z}_i)(z_{hj} - \bar{z}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n (z_{hi} - \bar{z}_i)^2 \sum_{h=1}^n (z_{hj} - \bar{z}_j)^2}} \quad (3-10)$$

其中， z_{hi} 和 z_{hj} 为第 h 个评价对象的第 i 个指标和第 j 个指标的值， $\bar{z}_i$ 和 $\bar{z}_j$ 为第 i 个指标和第 j 个指标的均值。

然后计算第 j 个指标与其他指标的冲突性量化指标值为：

$$R_j = \sum_{k=1}^m (1 - r_{kj}) \quad (3-11)$$

(5) 计算指标信息量：

$$C_j = S_j R_j \quad (3-12)$$

对比强度与冲突性共同决定了各指标的信息量，进而影响权重的分配。对比强度越高，说明该指标在综合评价中的重要性越大，因此应赋予更高的权重。

(6) 计算各指标权重：

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^m c_k} \quad (3-13)$$

3.4 汽车前端模块单工况拓扑优化

3.4.1 汽车前端模块设计空间确定

为了计算最有效、最合理的前端模块载荷传递路径，基于整车总布置要求匹配好汽车前端模块各安装位置，创建出汽车前端模块最大设计空间。在本前端模块所占据的三

维空间中，主体部分去除了冷却模块、前保险杠吸能盒、发动机罩锁体等部件所占据的空间，剩余部分主要包括前端模块上梁、下梁、两侧锁安装区域三部分，整体呈对称结构的半框结构。与边界位置匹配的安装点区域单独划分出去作为拓扑优化的非设计区域，剩余部分全部作为拓扑优化设计空间，整体划分如图3-2所示。图中红色部分是安装位置区域，作为非设计区，其余不同颜色代表三个主要设计区域。从图中可以看出，锁体布置在结构的两侧，距离固定安装点的位置较近，这样的布置比一般布置在中间的单锁结构具有较好的刚度。大灯安装点两组布置在上梁部分，一组布置在下梁部分，给大灯提供较为稳定的安装位置。散热器安装点布置在上梁，保证其具有较大的安装空间，前保险杠支架安装点设计在下梁位置，缓冲块安装点布置在上梁。

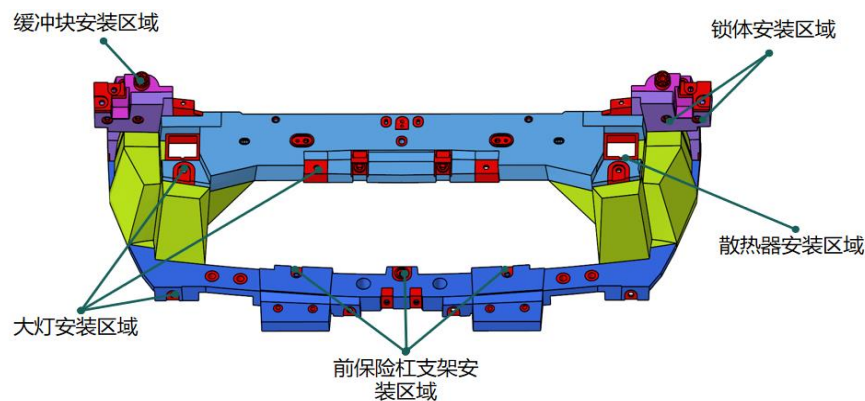


图3-2汽车前端模块不同设计区域划分

3.4.2 有限元网格创建

有限元网格的创建质量对仿真结果有很大的影响，根据划分好的设计区域用Altair公司开发的Hyperworks软件进行网格划分操作，Hyperworks软件的Hypermesh模块具备非常强大的前处理功能，可以很好的保证网格质量，从而提高求解精度。初始模型的所有区域有限元网格采用四面体网格，网格的平均尺寸为3mm，不同设计区域间网格均采用共节点方式连接。创建好的汽车前端模块有限元模型如下图3-3所示，网格质量要求满足见图3-4所示的系统默认要求。

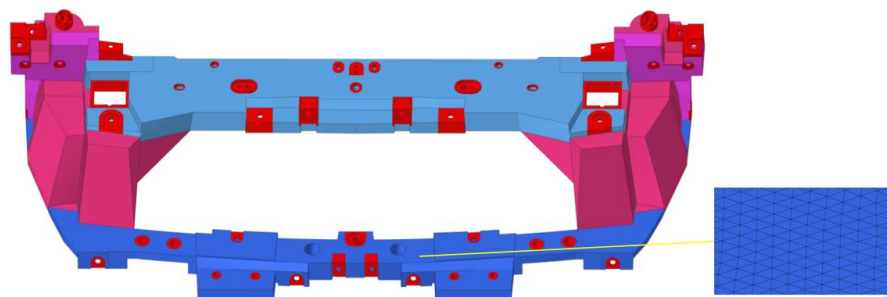


图3-3汽车前端模块有限元网格

warpage	>	5.000	length	<	3.750	min angle	<	20.000
aspect	>	5.000	length	>	10.000	max angle	>	120.000
skew	>	60.000	jacobian	<	0.700	quad faces:		
tet collapse	<	0.100	equia skew	>	0.900	min angle	<	45.000
cell squish	>	0.900	vol skew	>	0.950	max angle	>	135.000
orthogonality	<	0.200	vol AR	>	5.000	neighbor size ratio	<	0.100

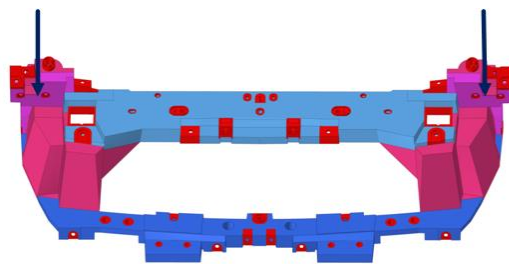
图3-4网格质量要求

3.4.3 材料属性添加

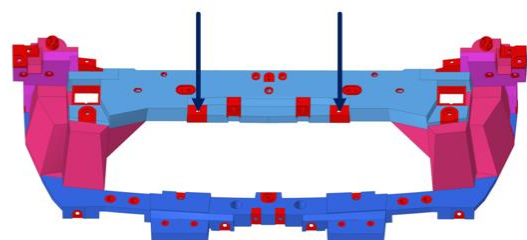
在Hyperworks软件中创建材料卡片materials，优化计算时采用弹性材料模型进行计算，材料属性选择为mat1，按照企业经验值输入PA6GF30材料的基本参数，其中材料的密度 $\rho=1.35\text{e}3\text{kg/cm}^3$ ，弹性模量 $E=5040\text{MPa}$ ，泊松比 $\mu=0.35$ 。然后添加属性卡片property，选择刚刚创建好的材料，网格类型选择为实体网格类型，其中不同的设计区域和非设计区域需要分别创建不同的属性卡片，最后将属性一一对应添加到不同的设计区域。

3.4.4 拓扑优化工况设置

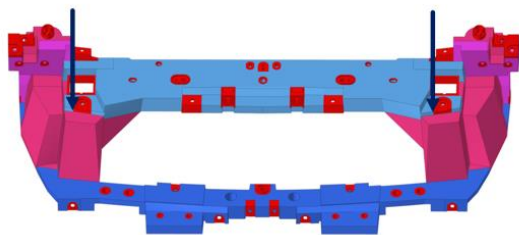
根据汽车实际行驶过程的工况，在汽车前端模块上添加对应的约束条件和载荷。本结构在考虑拓扑优化工况时，为简化计算，仅考虑锁扣安装区域极限拉力和上下横梁位置载荷工况，根据表格3-1的工况条件设置对应的刚度大小设置载荷，其中大灯安装点1的位置承载较小，刚度要求 200N/mm ，载荷设置为 200N ，载荷设置好如下图3-5所示：即锁扣极限载荷（ 3000N ）、大灯安装点1（ 200N ）、大灯安装点2（ 300N ）、大灯安装点3（ 300N ）、缓冲垫安装点（ 400N ）、散热器安装点（ 200N ）、掌压（ 150N ）、前保支架安装点（ 200N ）。



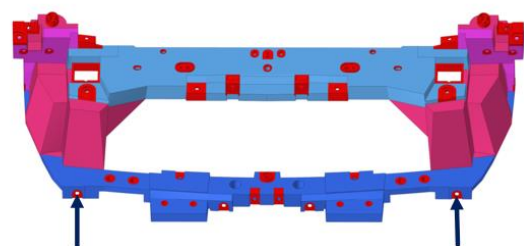
(a)锁扣极限载荷加载位置



(b)大灯安装点 1 加载位置



(c)大灯安装点 2 加载位置



(d)大灯安装点 3 加载位置

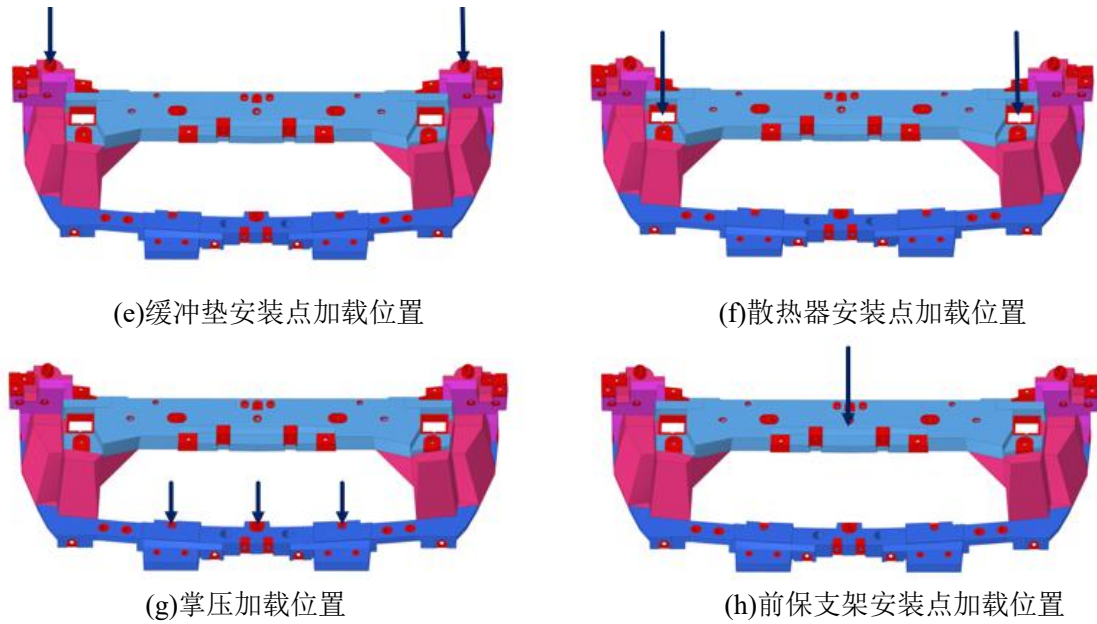


图3-5不同工况载荷添加情况

3.4.5 单工况拓扑优化结果

添加好载荷工况后，创建体积分数响应和柔度响应，柔度响应的载荷为各工况对应的载荷，然后设置约束条件，体积分数上限值为原体积的30%，优化求解目标为结构的最小柔度。由于上梁载荷与下梁载荷位置差异较大，在提交计算时易出现柔度值较大导致无法计算问题，因此将上下梁分开进行计算，即计算上梁载荷工况时将下梁保留为非设计区域，计算下梁载荷工况时，将上梁保留为非设计区域。将每个工况分别按照上述要求设置后提交给optistruct求解模块计算，分别得到单个工况的拓扑优化结果如下：

1. 锁扣安装区域极限拉力拓扑优化结果

从图3-6可以看出承载位置主要在锁扣区域的固定安装点附近，该部分区域呈现较高材料密度。两侧支撑和上梁中间位置对结构刚度的影响很小，材料密度保留较小或被去除，呈现浅色和深蓝色，下梁没有被设置参与计算，因此拓扑结果表现为红色。

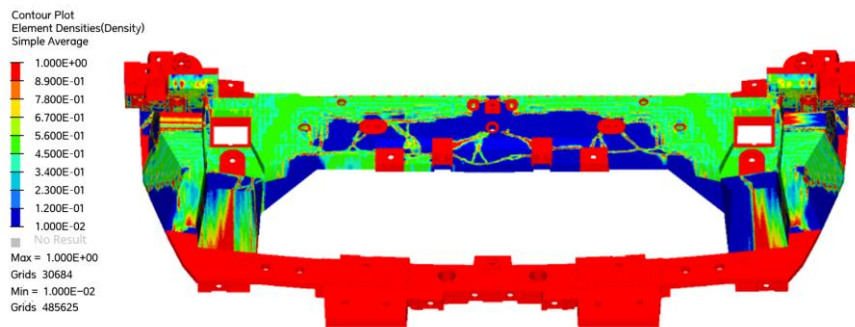


图3-6锁扣安装点极限拉力拓扑优化结果

2.大灯安装点1优化结果

从图3-7可以看出承载位置主要在锁扣区域的固定安装点附近和上梁靠近中间的位置，该部分区域呈现红色较为密集的加强筋结构。两侧支撑和上梁X方向外侧对结构刚度的影响很小，材料几乎被全部去除，呈现蓝色区域，下梁没有被设置参与计算，因此拓扑结果表现为红色。

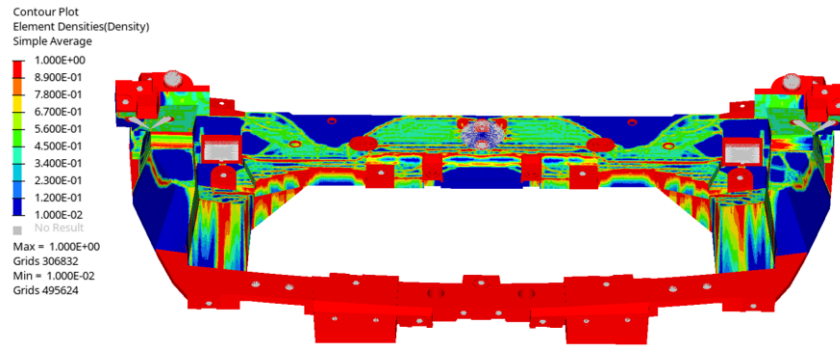


图3-7大灯安装点1刚度拓扑优化结果

3.大灯安装点2优化结果

从图3-8可以看出承载位置主要在锁扣区域的固定安装点附近和靠近该安装点附近的侧面支撑位置，该部分区域呈现大面积密集红色加强筋结构。下梁没有被设置参与计算，因此拓扑结果表现为红色。两侧支撑和上梁X方向外侧对结构刚度的影响很小，材料几乎被全部去除，呈现蓝色区域，上梁的中间部分对本安装点贡献度较小，即保留较少的材料，呈现浅绿色。

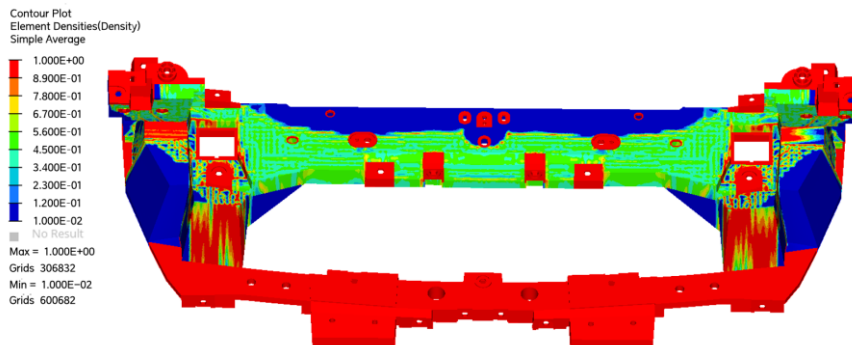


图3-8大灯安装点2拓扑优化结果

4. 大灯安装点3拓扑优化结果

从图3-9中可以看出大灯安装点3的承载位置主要在锁扣区域的固定安装点附近和下梁两侧区域，该部分区域呈现较高材料密度。下梁中间区域对结构刚度几乎没有影响，材料几乎被全部去除呈现深蓝色，上梁没有被设置参与计算，因此拓扑结果表现为红色。

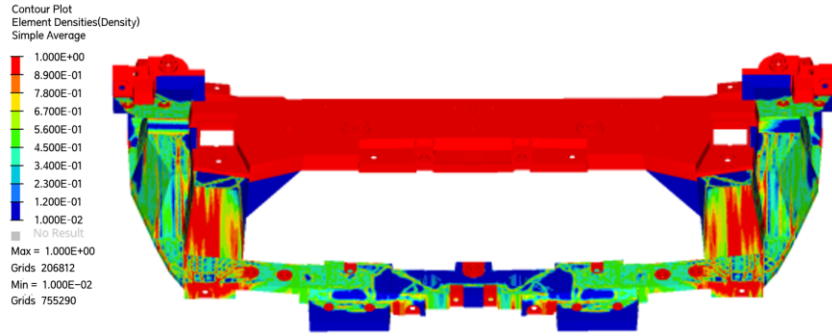


图3-9大灯安装点3拓扑优化结果

5.缓冲块安装点拓扑优化结果

从图3-10可以看出缓冲块的承载位置主要在锁扣区域的固定安装点附近，该部分区域呈现较高材料密度。绿色区域的两侧支撑和上梁上部位置对结构刚度的影响很小，材料密度保留较小，上梁下部分材料被全部去除呈现深蓝色，下梁没有被设置参与计算，因此拓扑结果表现为红色。

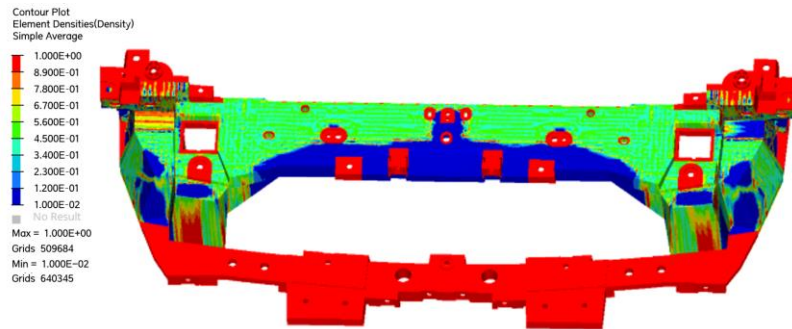


图3-10缓冲垫安装点拓扑优化

6.散热器安装点优化结果

从图3-11中可以看出承载位置主要在锁扣区域的固定安装点附近和靠近散热器安装点附近的侧面支撑位置的局部区域，该部分区域呈现大面积密集红色加强筋结构。两侧支撑和上梁X方向外侧对结构刚度的影响很小，材料几乎被全部去除，呈现蓝色区域，下梁没有被设置参与计算，因此拓扑结果表现为红色。

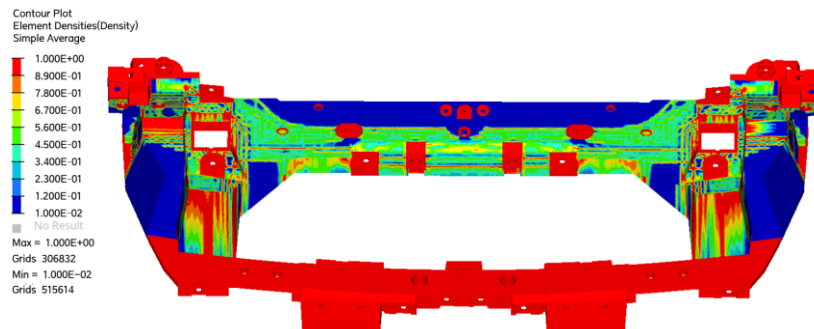


图3-11散热器安装点拓扑优化结果

7. 掌压工况拓扑优化结果

从图3-12中可以看出掌压是小区域面积受载，优化结果在上梁的分布比较均匀，可以看出在上梁大面积范围均匀出现了红色的细长条加强筋结构向两侧延伸，并逐渐转变为绿色，两侧支撑对结构强度的影响很小，除靠近安装点区域保留了一定的材料外，其余大面积材料被去除，呈现深蓝色。

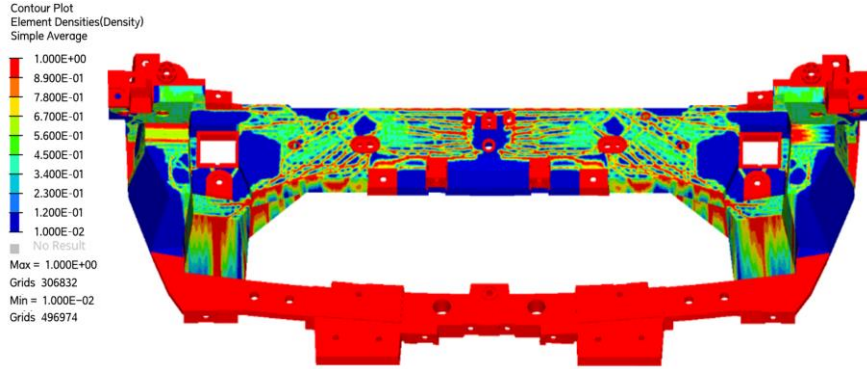


图3-12掌压拓扑优化结果

8. 前保险杠支架安装点拓扑优化结果

从图3-13中可以看出保险杠支架的承载结构在下梁的分布较为均匀，主要在下梁的区域的固定安装点附近和保险杠安装点附近区域，这些区域呈现较为规整的红色加强筋。下梁中间区域对结构刚度几乎没有影响，材料几乎被全部去除呈现深蓝色。

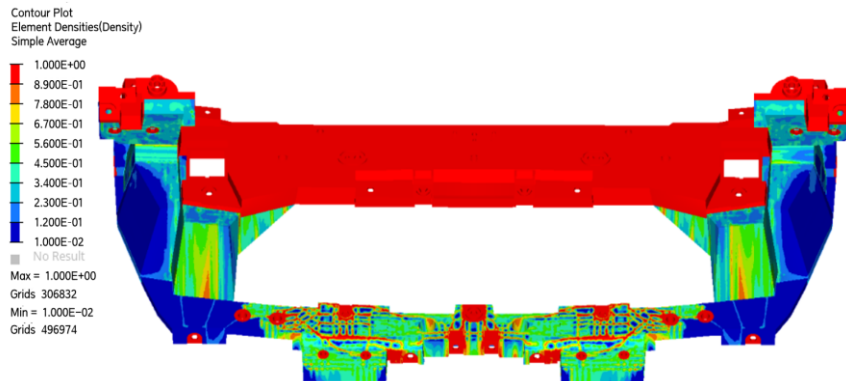


图3-13前保支架安装点拓扑优化

3.5 汽车前端模块多工况拓扑优化

3.5.1 各子工况权重比计算

多工况拓扑优化中最重要的问题是确定各个子工况的权重比，每个子工况优化结果各不相同，对应的各个载荷点的单工况优化柔度结果数值会有所差异，根据上节中单个工况拓扑优化的结果，记录各工况所对应的柔度值，具体数值见表3-2。

表 3-2 各子目标优化结果柔度值

	锁扣极 限拉力	大灯安 装点 1	大灯安 装点 2	大灯安 装点 3	缓冲块 安装点	散热 器安 装点	掌压	前保支架 安装点
锁扣极限拉力	5379.39	8348.04	123.04	40.21	244.89	43.55	4249.47	88.97
大灯安装点 1	48148.2	274.90	83.45	39.11	260.26	31.03	543.11	88.98
大灯安装点 2	32729.25	6294.51	26.13	34.72	334.89	16.01	4154.66	88.97
大灯安装点 3	28824.72	288.02	75.09	54.95	486.63	33.28	125.75	53731.57
缓冲块安装点	7352.07	9987.52	53.96	33.09	130.85	16.18	1197.68	88.98
散热器安装点	13629.8	1745.15	37.02	35.60	260.58	8.35	2150.20	88.98
掌压	31674.42	427.39	152.57	40.51	362.1	53.34	217.37	88.98
前保支架安装点	477.83	624.64	396.45	900.01	338.79	119.14	203.36	228.35

文章采用3.4.3节介绍的Critic评判准则进行计算,其中单独一个工况作为一个评价对象,不同安装点的柔度值结果作为评价指标,即生成了 8×8 的评价矩阵 X_{ij} 。

$$X = \begin{pmatrix} 5379.39 & 8348.04 & 123.04 & 40.21 & 244.89 & 43.55 & 4249.47 & 88.97 \\ 48148.2 & 274.90 & 83.45 & 39.11 & 260.26 & 31.03 & 543.11 & 88.98 \\ 32729.25 & 6294.51 & 26.13 & 34.72 & 334.89 & 16.01 & 4154.66 & 88.97 \\ 28824.72 & 288.02 & 75.09 & 54.95 & 486.63 & 33.28 & 125.75 & 53731.57 \\ 7352.07 & 9987.52 & 53.96 & 33.09 & 130.85 & 16.18 & 1197.68 & 88.98 \\ 13629.8 & 1745.15 & 37.02 & 35.60 & 260.58 & 8.35 & 2150.20 & 88.98 \\ 31674.42 & 427.39 & 152.57 & 40.51 & 362.1 & 53.34 & 217.37 & 88.98 \\ 477.83 & 624.64 & 396.45 & 900.01 & 338.79 & 119.14 & 203.36 & 228.35 \end{pmatrix}$$

然后将各指标数据进行标准化处理,使其无量纲化以便于比较,在本拓扑优化问题中,优化目的是结构具有最大刚度值,对应到各个工况柔顺度的目标值希望越小越好,因此采用公式3-5中的成本型无量纲化公式进行计算,得到标准化矩阵 P_{ij} :

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 0.897 & 0.169 & 0.738 & 0.992 & 0.679 & 0.682 & 0.000 & 1.000 \\ 0.000 & 1.000 & 0.845 & 0.993 & 0.636 & 0.795 & 0.899 & 1.000 \\ 0.323 & 0.380 & 1.000 & 0.998 & 0.427 & 0.931 & 0.023 & 1.000 \\ 0.405 & 0.999 & 0.868 & 0.975 & 0.000 & 0.775 & 1.000 & 0.000 \\ 0.856 & 0.000 & 0.925 & 1.000 & 1.000 & 0.929 & 0.740 & 1.000 \\ 0.724 & 0.849 & 0.971 & 0.997 & 0.635 & 1.000 & 0.509 & 1.000 \\ 0.346 & 0.984 & 0.659 & 0.991 & 0.350 & 0.594 & 0.978 & 1.000 \\ 1.000 & 0.964 & 0.000 & 0.000 & 0.416 & 0.000 & 0.981 & 0.997 \end{pmatrix}$$

代入标准化矩阵中数据到公式3-10计算各指标之间的皮尔逊相关系数矩阵，其中第 ii 和第 jj 个指标之间的相关系数为：

$$X = \begin{pmatrix} 1.000 & -0.433 & -0.449 & -0.492 & 0.337 & -0.377 & -0.179 & 0.187 \\ -0.433 & 1.000 & -0.342 & -0.298 & -0.666 & -0.366 & 0.665 & -0.321 \\ -0.449 & -0.342 & 1.000 & 0.938 & 0.192 & 0.991 & -0.395 & -0.144 \\ -0.492 & -0.298 & 0.938 & 1.000 & 0.159 & 0.909 & -0.335 & -0.120 \\ 0.337 & -0.666 & 0.192 & 0.159 & 1.000 & 0.281 & -0.302 & 0.714 \\ -0.377 & -0.366 & 0.991 & 0.909 & 0.281 & 1.000 & -0.394 & -0.076 \\ -0.179 & 0.665 & -0.395 & -0.335 & -0.302 & -0.394 & 1.000 & -0.345 \\ 0.187 & -0.321 & -0.144 & -0.120 & 0.714 & -0.076 & -0.345 & 1.000 \end{pmatrix}$$

最后计算得各子工况的权重比见下表，可见大灯安装点1和掌压工况的权重大幅提高，缓冲块和散热器的权重明显降低。

表 3-3 各工况权重比

工况	锁扣极限拉力	大灯安装点 1	大灯安装点 2	大灯安装点 3	缓冲块安装点	散热器安装点	掌压	前保支架安装点
权重	0.14	0.18	0.10	0.11	0.09	0.09	0.17	0.12

3.5.2 多工况拓扑优化结果

根据计算得到的权重比，输入到柔度值响应中各子工况所对应的比重栏，然后重新提交计算，得到多工况拓扑优化结果见图3-14。图中可以看出加权后的优化结果比单个工况分别拓扑优化的结果拓扑结构更加清晰，红色为优化过后的最终保留部分，即汽车前端模块的最佳传力结构，蓝色为去除材料部分。其中上梁部分的整体刚度较弱，因此红色部分较为集中，大部份材料都保留了下来，而下梁部分的离散效果较好，能够清晰看见加强筋的位置，作为重建模型时参考。

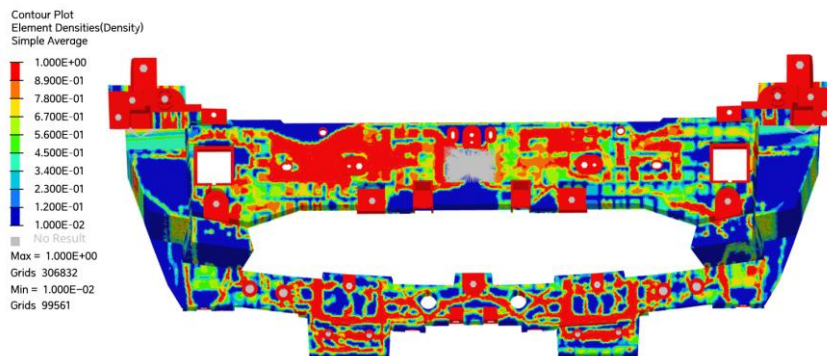


图3-14汽车前端模块多工况拓扑优化结果

3.5.3 汽车前端模块结构模型重构

汽车前端模块的主体部分采用壳体结构覆盖，内部适当布置加强筋对薄弱结构进行加强，保证整体结构稳定，加强筋的布置参考上节中拓扑优化的结果，在不影响结构安装要求的情况下尽可能地将红色部分加强筋保留下来，上梁部分的红色区域较为密集，因此均匀布置较为密集加强筋，壳体部分主体用4mm厚度，加强筋尺寸为2.5mm，拔模角度为 5° ，设计好的前端模块总重量3.36kg，具体结构见下图3-15。

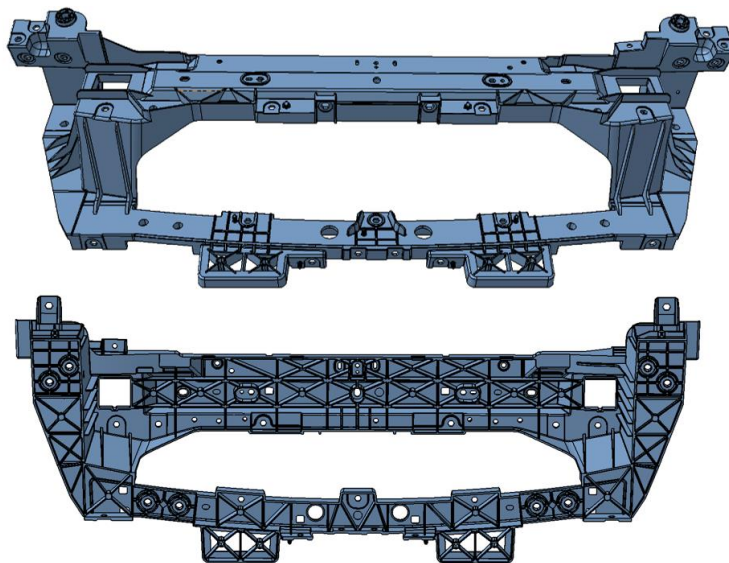


图3-15汽车前端模块几何模型

3.6 全塑汽车前端模块性能分析

3.6.1 有限元模型创建

汽车前端模块是复杂的壳体结构，这类结构适用于中面网格进行有限元分析。首先需要对模型进行中面抽取，为了简化模型处理过程，有必要对其结构进行简化，去除不必要的圆角、凸台，在抽取中面时，在螺栓连接处需要创建washer孔，以便于创建螺栓连接，简化完成后抽取的中面如下图3-16，然后将中面按照厚度分到不同的component中，进行网格划分，网格主体尺寸为3mm，画好的网格见下图3-17。

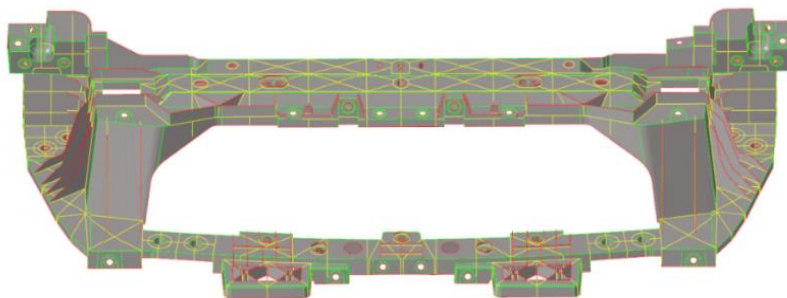


图3-16汽车前端模块中面模型

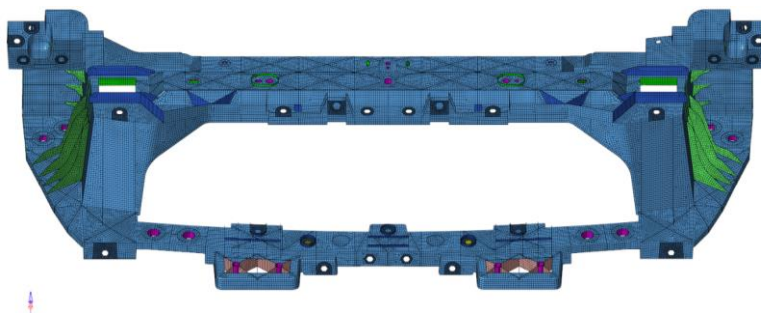


图3-17汽车前端模块有限元网格模型

3.6.2 力学性能分析

根据3.2中汽车前端模块的性能要求，模拟实际工况创建载荷，如下图3-18所示，不同的工况载荷对应放到不同的Load Collector，然后创建对应的load step，定义约束位置（图3-18中蓝色三角形位置），选择对应载荷工况，所有设置完成后即可提交计算。计算完成后打开Hyperview软件，将计算结果的H3d文件导入，分别查看不同工况所对应的结果云图，所有的计算结果如下图3-19所示，对应的刚度通过公式3-13计算，结果见下表3-4。

$$k = \frac{P}{\delta} \quad (3-13)$$

其中的k表示刚度， P 表示静载荷， δ 表示载荷方向位移量。

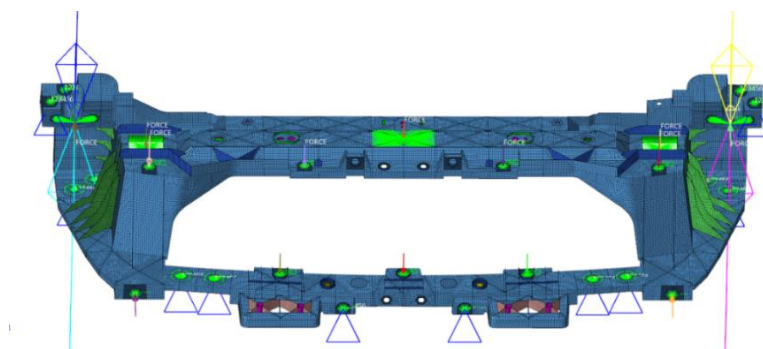
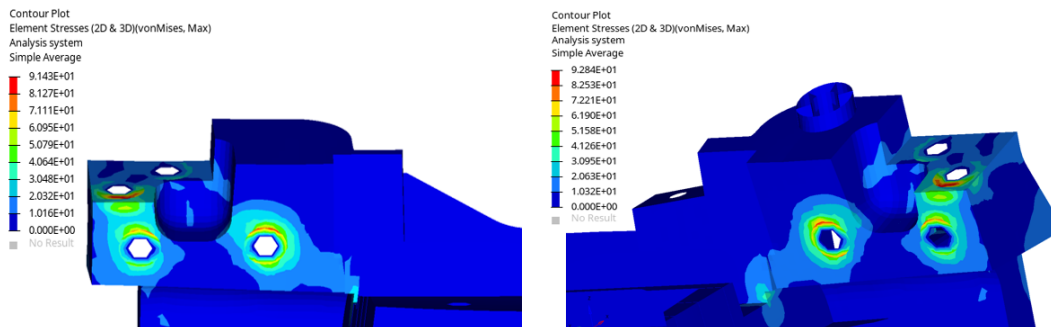
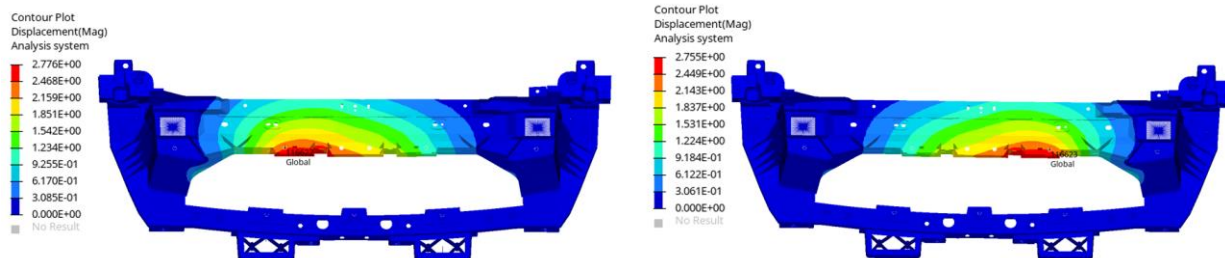


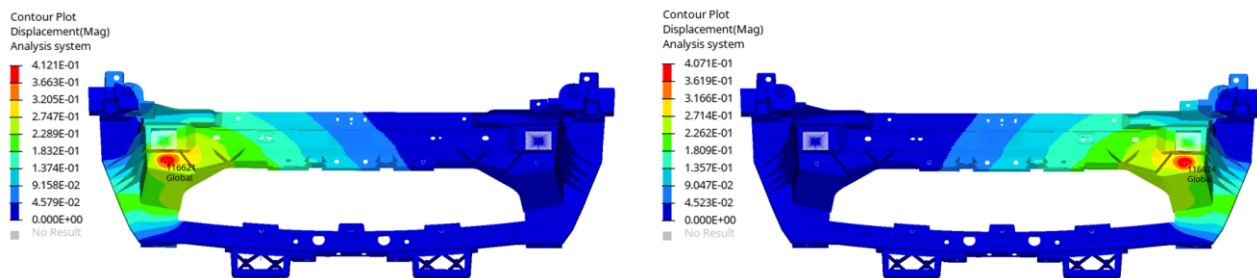
图3-18刚度分析载荷施加位置



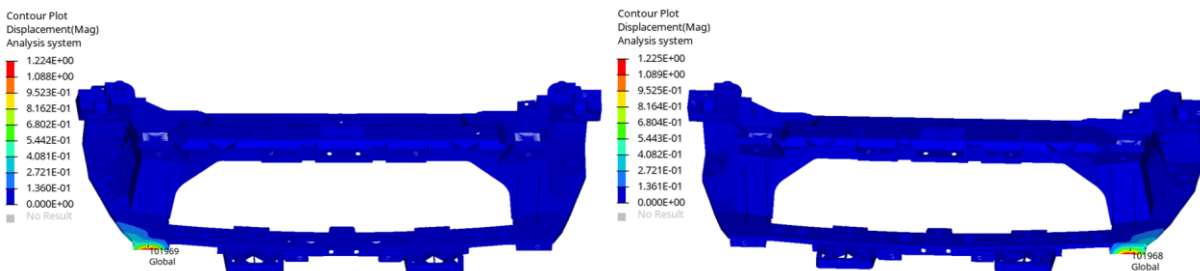
(a)锁扣极限拉力分析结果云图



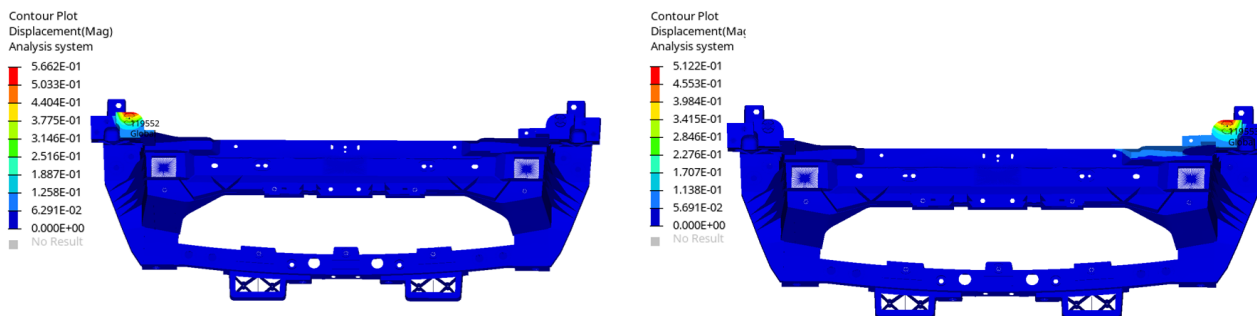
(b)大灯安装点 1 刚度分析结果云图



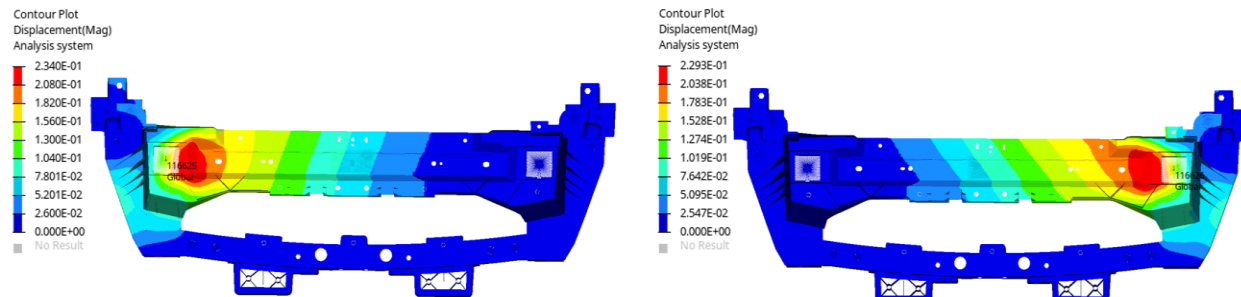
(c)大灯安装点 2 刚度分析结果云图



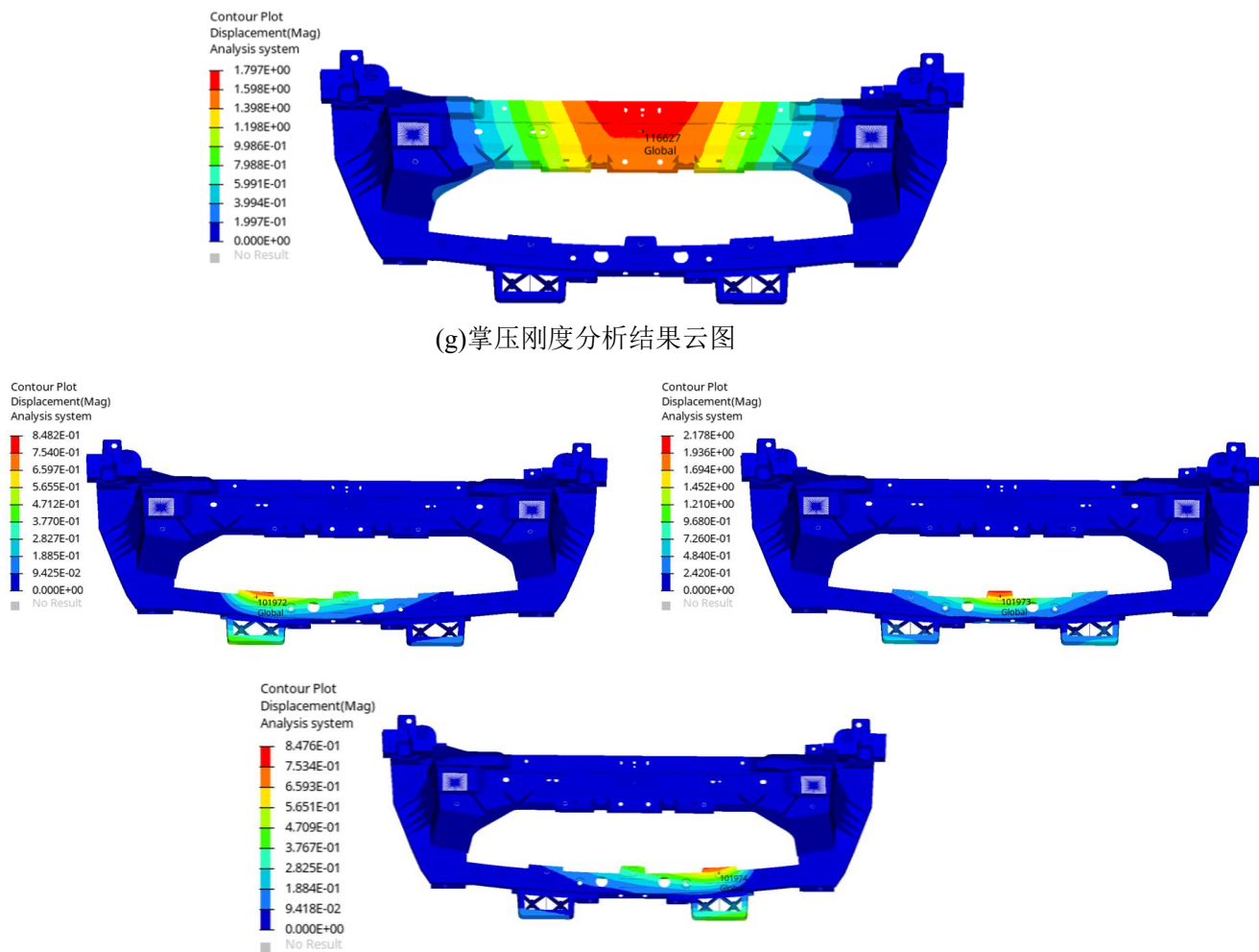
(d)大灯安装点 3 刚度分析结果云图



(e)缓冲块安装点刚度分析结果云图

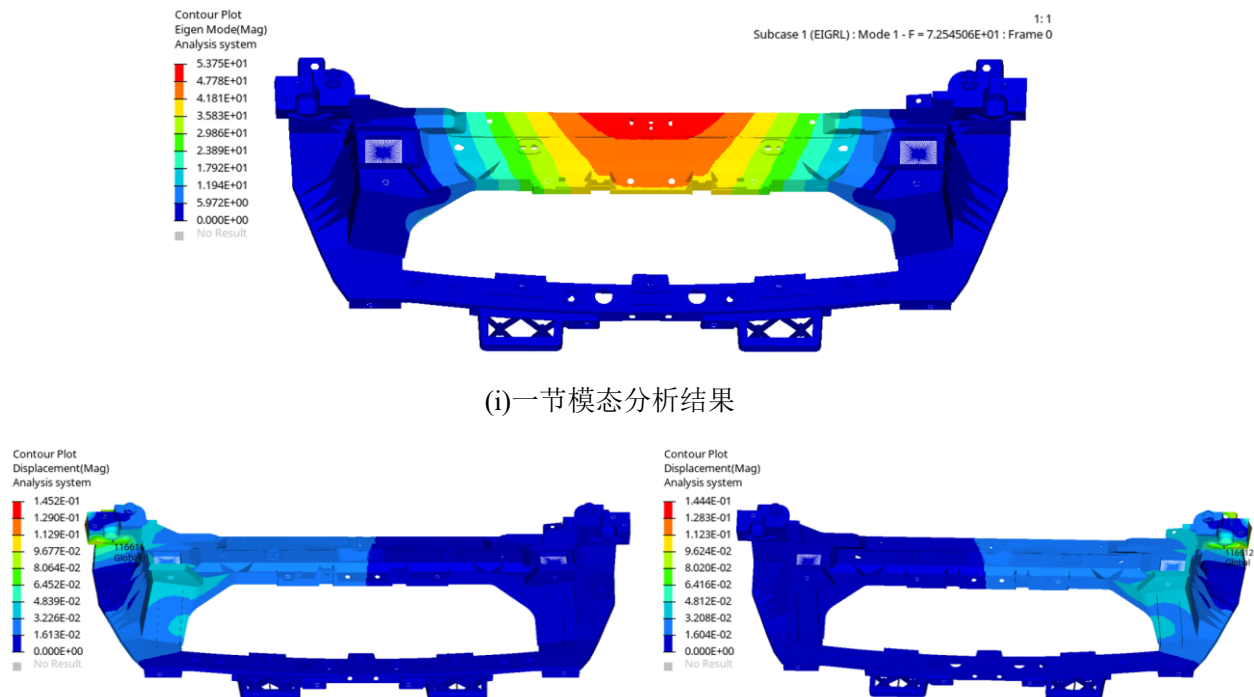


(f)散热器安装点刚度分析结果云图



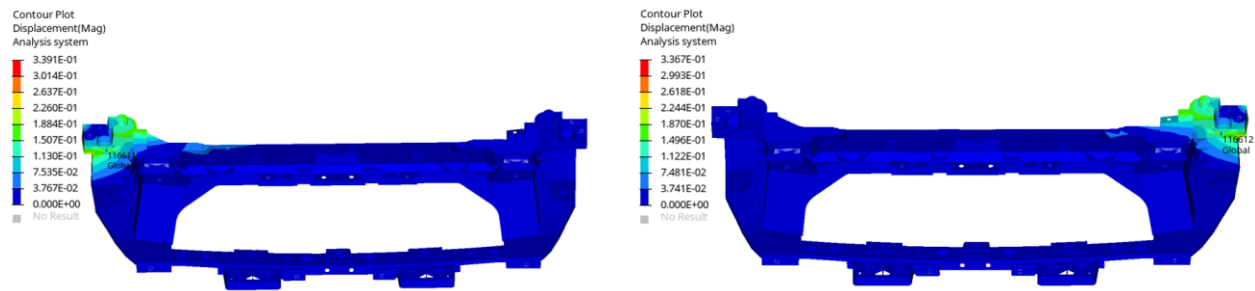
(g)掌压刚度分析结果云图

(h)前保支架安装点刚度分析结果云图



(i)一节模态分析结果

(j)锁扣安装点横向刚度安装点分析结果云图



(k)锁扣安装点纵向刚度安装点分析结果云图

图3-19全塑汽车前端模块性能分析结果云图

表 3-4 全塑汽车前端模块性能分析结果

序号	实验项目	载荷方向	载荷大小	位移量/mm	目标要求	分析最低值
1	锁扣极限拉力	-Z	3000N	\	$\leq 112\text{MPa}$	92.93MPa
2	前大灯安装点 1 刚度	-Z	200N	2.390	$\geq 200\text{N/mm}$	83.6N/mm
3	前大灯安装点 2 刚度	-Z	300N	0.363	$\geq 300\text{N/mm}$	826.4 N/mm
4	前大灯安装点 3 刚度	+X	300N	0.732	$\geq 300\text{N/mm}$	409.8 N/mm
5	缓冲块安装点刚度	-Z	400N	0.309	$\geq 400\text{N/mm}$	1294.5 N/mm
6	散热器安装点刚度	-Z	200	0.141	$\geq 200\text{N/mm}$	1418.4 N/mm
7	掌压刚度	-Z	150N	1.618	$\geq 150\text{N/mm}$	92.7 N/mm
8	前保支架安装点刚度	-Z	200N	1.653	$\geq 200\text{N/mm}$	120.9 N/mm
9	一阶模态	\	\	\	$\geq 50\text{Hz}$	72.3HZ
10	锁扣安装点横向刚度	+X	300N	0.071	$\geq 300\text{N/mm}$	4225.4 N/mm
12	锁扣安装点纵向刚度	-Z	600N	0.177	$\geq 600\text{N/mm}$	3389.8 N/mm

从表3-4的分析结果可以直观看出，锁扣部分的刚度最好，因为该区域有多个固定安装点，可以对结构起到充分支撑，但是上下梁中间安装点由于距离安装点较远，结构Z向空间有限，无法提供较好支撑，刚度比较差，其中工况2（大灯安装点1）加载点的最大位移量达到了2.390mm，对应的刚度值仅有83.6N/mm，这可能会导致大灯在车辆行驶过程中出现较大晃动或者移位，严重影响照明效果和行车安全。工况7（掌压刚度）加载点的最大位移量达1.618mm，对应的刚度值为92.7 N/mm，说明此前端框架的结构稳定性不足，在发生碰撞时不能够有效吸收和分散冲击力、对乘客存在一定安全隐患。工况8（前保支架安装点刚度）加载点的位移量为1.653mm，对应的刚度值为120.9 N/mm，与目标要求存在很大差异，难以保证保险杠支架能够在碰撞过程中有效地传递和分散冲击力，减少对车身结构的损害。由于与实际要求的差值较大，更改厚度仍难以满足要求，

因此，本方案设计的汽车前端模块存在诸多难以克服问题，考虑更改设计方案。

3.7 金属嵌件式汽车前端模块轻量化设计

3.7.1 金属嵌件式汽车前端模块结构设计

通过分析结果可以直观看出大灯上安装点2的刚度、掌压刚度和前保支架安装点刚度不满足产品设计要求，进行了多次拓扑优化和厚度优化后仍无法得到符合条件的设计方案，在主机厂边界调节无法做出让步的情况下，中间梁部分的Z向空间十分有限，为满足设计条件，在不改变外观情况的下采用内嵌金属钣金的方式加强Z向刚度成为最合适的方案。

在原方案的拓扑优化基础上保留材料，在横梁嵌入如图3-20所示金属嵌件，嵌件选用DC01钢板，该材料具有较好的刚度和耐腐蚀性，材料参数选用企业经验值，即弹性模量为210000MPa，泊松比为0.3，密度7.85g/cm³，金属嵌件的厚度为1.1mm，上下梁分别布置两组定位孔，以便注塑成型是保证良好精度。为保证产品具有良好的性能，嵌件上均匀布置8mm的工艺孔，使得注塑成型时，熔融塑料可以贯穿工艺孔，使得塑料与金属嵌件形成机械互锁结构，以保证良好的连接性能，金属嵌件的上表面由塑料全包裹，下表面由交叉加强筋和纵横排列的加强筋固定，使嵌件整体保持良好连接性。塑料壳体的基本厚度是3mm，加强筋厚度均用2.2mm，拔模角度5°，创建好的新产品总重量约3.93kg。

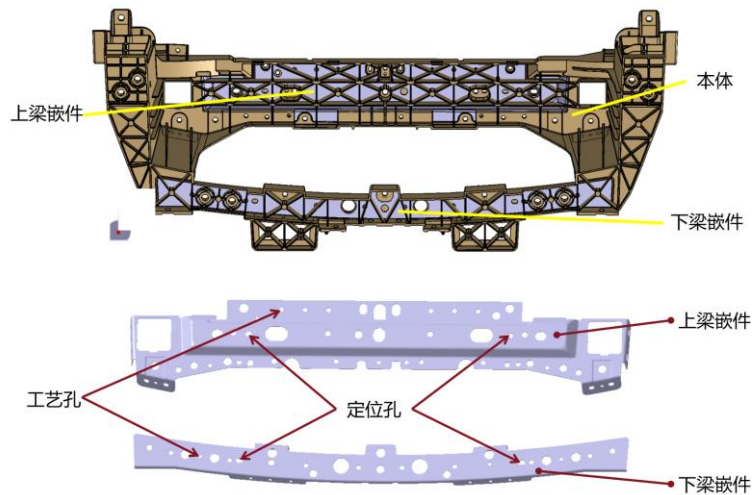
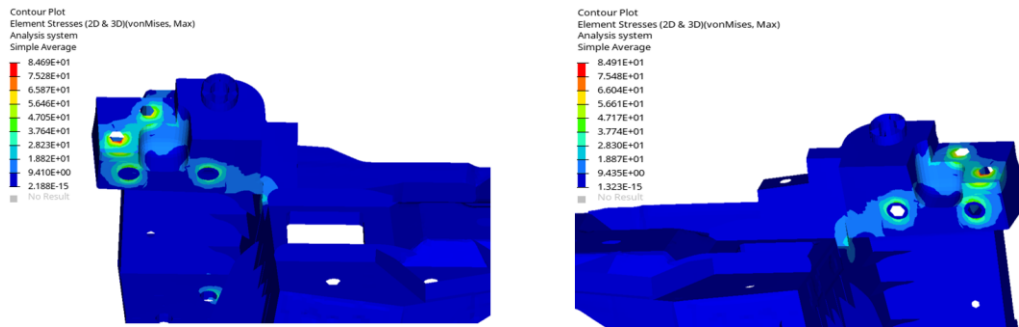


图3-20带金属嵌件汽车前端模块

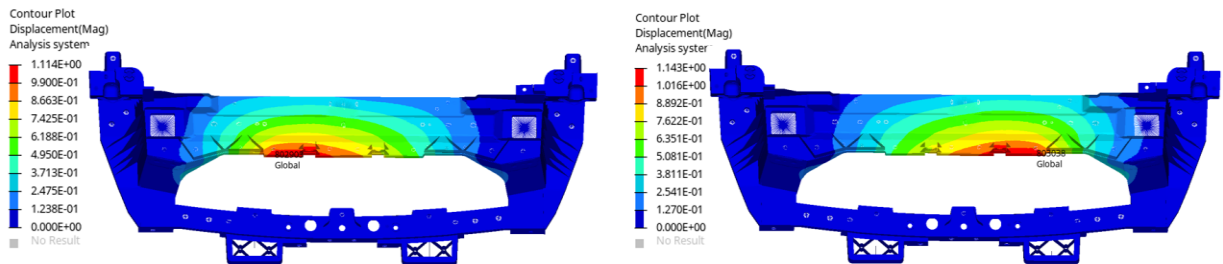
3.7.2 金属嵌件式汽车前端模块仿真分析

为验证金属嵌件式汽车前端模块是否符合设计要求，通过仿真计算新方案汽车前端模块的静力学性能等。根据前文有限元模型建立方法建立有限元模型，与之不同的是需

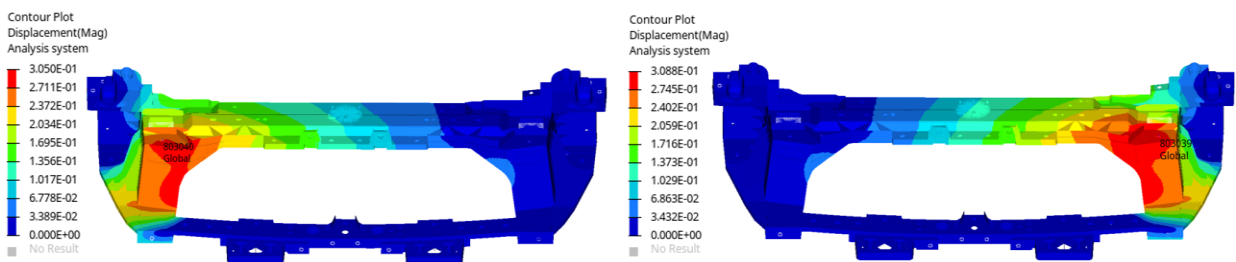
要创建金属嵌件表面和塑料表面的接触关系，金属嵌件产品接触类型设置为绑定关系（TIE），选择金属嵌件作为主接触面，塑料作为副接触面，钣金的工艺孔边缘以rbe2方式连接。按照3.6.2中的方式创建载荷工况，提交计算，得到的计算结果云图见下图3-21，力学性能分析结果见表3-5。金属嵌件的存在虽然总重量较全塑料结构重量多了0.6kg，但其性能远远高于全塑料结构。表中数据可以明显看出加了金属嵌件之后，所有性能较之前均有提升，其中大灯安装点1刚度提高到219.1N/mm，前保支架安装点刚度提高到了238.6N/mm，掌压刚度提升到了168.5N/mm，均能较好地满足产品性能要求。



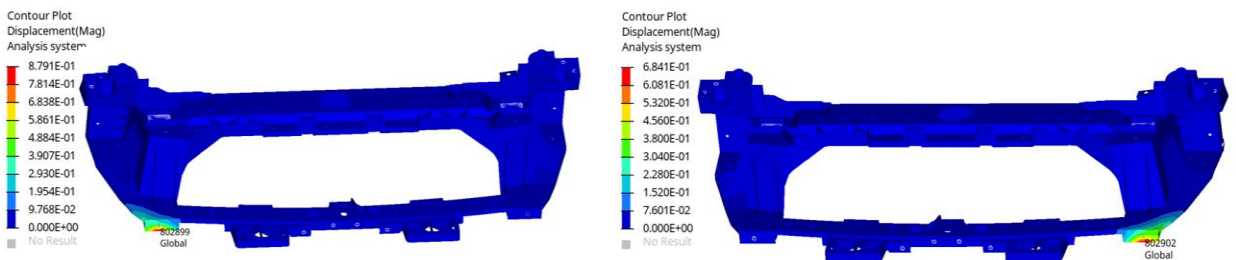
(a)锁扣极限拉力分析结果云图



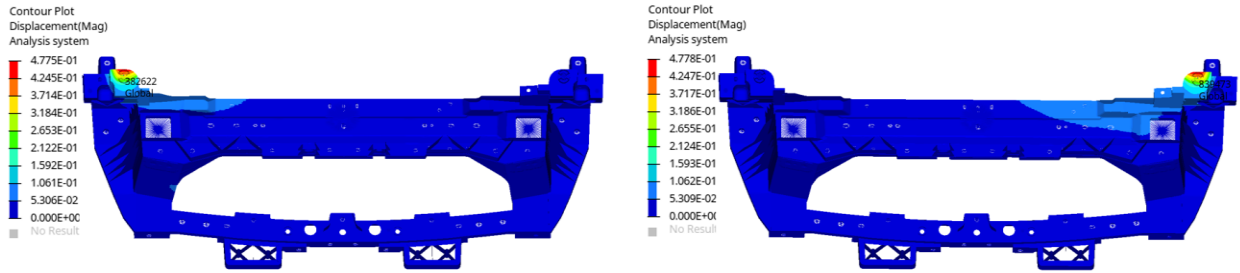
(b)大灯安装点 1 刚度分析结果云图



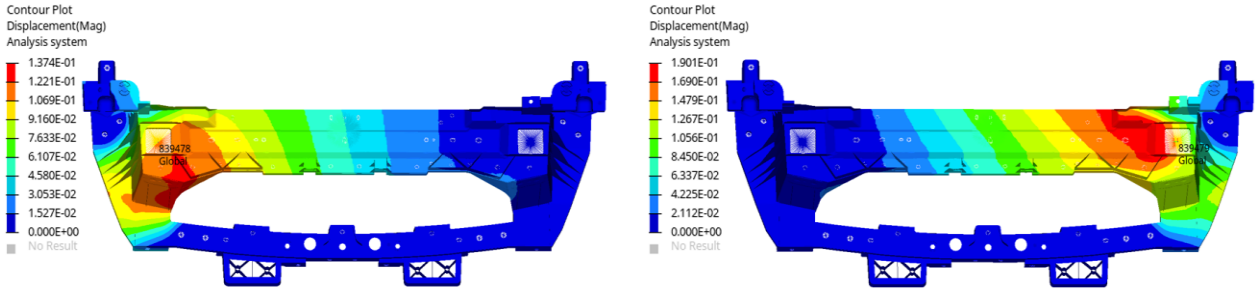
(c)大灯安装点 2 刚度分析结果云图



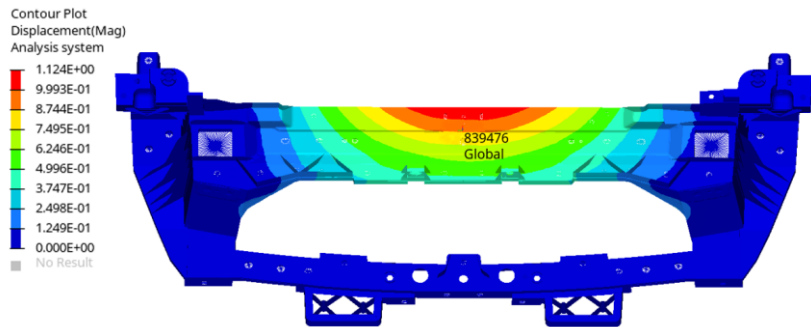
(d)大灯安装点 3 刚度分析结果云图



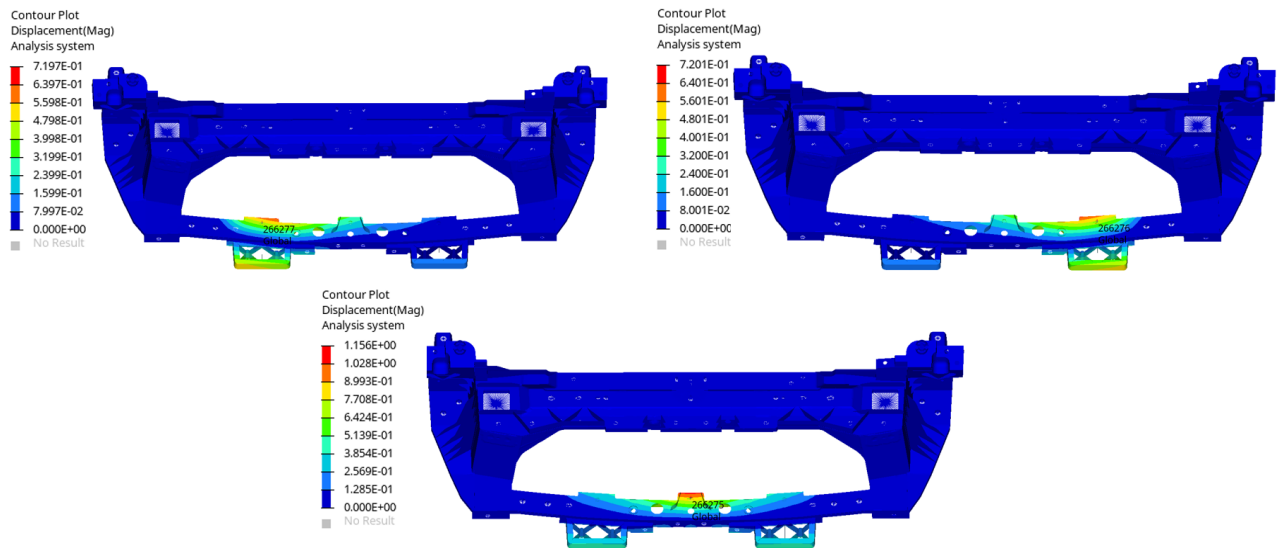
(e)缓冲块安装点刚度分析结果云图



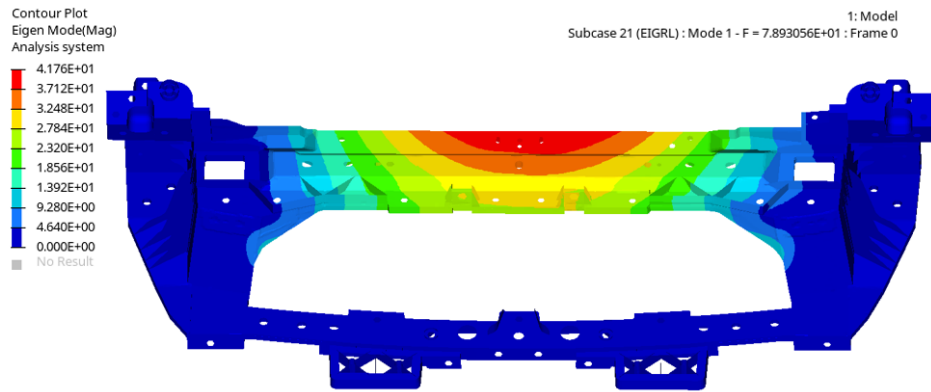
(f)散热器安装点刚度分析结果云图



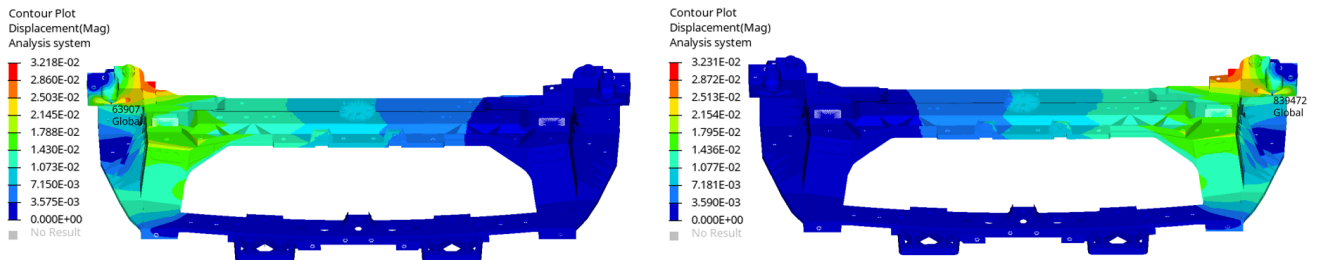
(g)掌压刚度分析结果云图



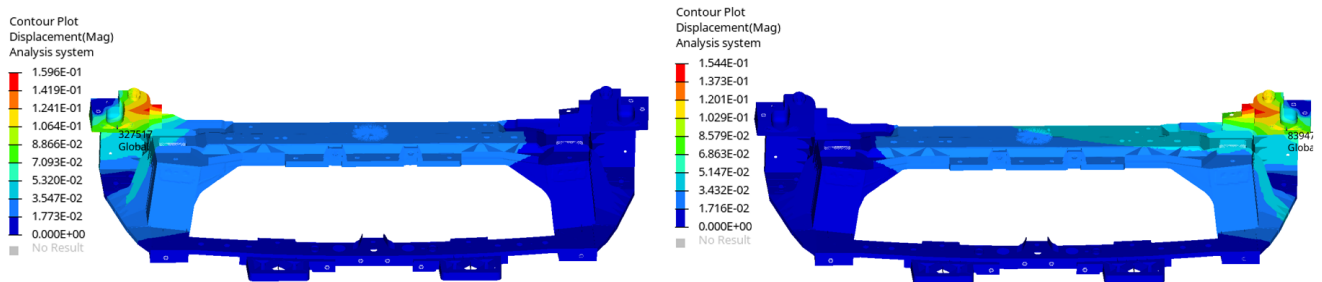
(h)前保支架安装点刚度分析结果云图



(i)一节模态分析结果云图



(j)锁扣安装点横向刚度分析结果云图



(k)锁扣安装点纵向刚度分析结果云图

图3-21带金属嵌件汽车前端模块性能分析结果云图

表 3-5 金属嵌件式汽车前端模块性能分析结果

序号	实验项目	载荷方向	载荷大小	位移量/mm	目标要求	分析最低值
1	锁扣极限拉力	-Z	3000N	\	$\leq 112\text{MPa}$	84.9MPa
2	前大灯安装点 1 刚度	-Z	200N	0.913	$\geq 200\text{N/mm}$	219.1N/mm
3	前大灯安装点 2 刚度	-Z	300N	0.266	$\geq 300\text{N/mm}$	1127.8N/mm
4	前大灯安装点 3 刚度	+X	300N	0.445	$\geq 300\text{N/mm}$	674.2N/mm
5	缓冲块安装点刚度	-Z	400N	0.264	$\geq 400\text{N/mm}$	1515.2N/mm
6	散热器安装点刚度	-Z	200	0.133	$\geq 200\text{N/mm}$	1503.7N/mm
7	掌压刚度	-Z	150N	0.890	$\geq 150\text{N/mm}$	168.5N/mm

续表 3-5 金属嵌件式汽车前端模块新能分析结果

序号	实验项目	载荷方向	载荷大小	位移量/mm	目标要求	分析最低值
8	前保支架安装点刚度	-Z	200N	0.838	$\geq 200\text{N/mm}$	238.6N/mm
9	一阶模态	\	\	\	$\geq 50\text{Hz}$	78.9HZ
10	锁扣安装点横向刚度	+X	300N	0.022	$\geq 300\text{N/mm}$	13636.3N/mm
12	锁扣安装点纵向刚度	-Z	600N	0.115	$\geq 600\text{N/mm}$	5217.4N/mm

3.7.3 金属嵌件式汽车前端模块尺寸优化

对汽车前端模块而言，产品壁厚是影响其结构强度的重要因素，也是影响产品重量的主要原因，壁厚较薄在前端模块主体结构确定以后，可以对其厚度进行优化计算，即以厚度为设计变量，减小不必要结构的厚度，对重要承载位置厚度适当加厚，从而在产品重量和结构强度达到较好的平衡。合理确定壁厚，在满足产品功能需求的同时，实现最佳的机械性能、重量、成本、材料特性、成型性能以及手感和外观质量。

在进行厚度优化前，去除安装点处已确定厚度的面，根据不同的厚度要求将其余可设计部分进行厚度分组，如图3-22所示，汽车前端模块被分成上壳体、下壳体、侧壳体、上梁钣金嵌件、下梁钣金嵌件、上梁加强筋1、上梁加强筋2、下梁加强筋3、侧梁加强筋4、侧梁加强筋5等十个部分。

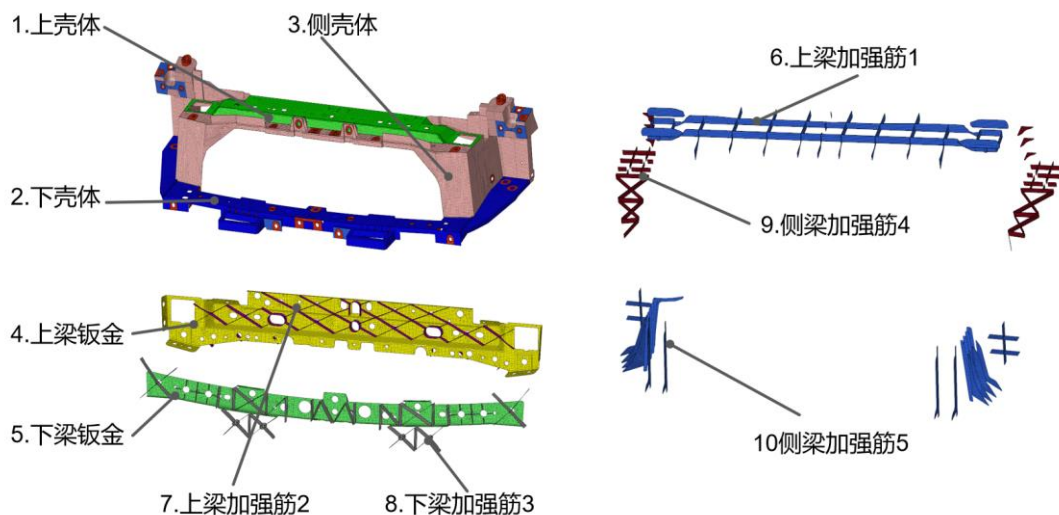


图3-22汽车前端模块厚度分组

然后在hyperworks软件中创建厚度优化设计变量，关联其厚度属性，厚度变化梯度值取0.1mm。按照表3-6中的数据设置各部分的上下限值和起始厚度值；然后创建响应，根据各个工况类型创建出质量、位移响应、应力响应和一阶频率响应；位移工况下的位

移最大约束设置为1mm，锁扣极限拉力的塑料部分应力约束设置为100MPa以内，一阶频率响应值大于50HZ；目标函数设置为最小质量，然后提交计算。计算结果见下表3-6。

表 3-6 厚度优化结果

序号	优化部分	上限值/mm	下限值/mm	初始值/mm	结果值/mm
1	上壳体厚度	4.0	2.0	3.0	2.5
2	下壳体厚度	4.0	2.0	3.0	2.0
3	侧壳体厚度	4.0	2.0	3.0	2.6
4	上梁钣金厚度	1.4	0.8	1.1	1.2
5	下梁钣金厚度	1.4	0.8	1.1	1.2
6	上梁加强筋 1 厚度	3.0	1.5	2.2	2.1
7	上梁加强筋 2 厚度	3.0	1.5	2.2	2.0
8	下梁加强筋 3 厚度	3.0	1.5	2.2	2.3
9	侧加强筋 4 厚度	3.0	1.5	2.2	1.5
10	侧加强筋 5 厚度	3.0	1.5	2.2	2.5

通过前后数据对比可以看出金属嵌件厚度有所加厚，其对刚度的良性影响较大，加厚0.1mm使得上下壳体厚度明显减薄，上梁壳体减薄了约16.7%，下梁壳体减薄了约33.3%，加强筋的厚度大体变化不大，其中侧加强筋4处于产品底部，对结构刚度影响较小，厚度减少0.7mm，约31.8%，优化后的产品总重量约3.66kg。

3.8 不同类型前端模块性能对比

根据优化后的结果改变对应壳体的厚度，按照3.7.2中的过程重新进行仿真分析，将分析结果与优化前分析结果以及全塑方案分析结果汇入下表3-7。

表 3-7 汽车前端模块不同方案的性能分析对比

序号	实验项目	目标要求	分析结果		
			全塑方案	金属嵌件式 优化前	金属嵌件式 优化后
1	锁扣极限拉力	$\leq 112\text{MPa}$	92.93MPa	84.9MPa	91.8 MPa
2	前大灯安装点 1 刚度	$\geq 200\text{N/mm}$	83.6N/mm	219.1N/mm	212.7 N/mm
3	前大灯安装点 2 刚度	$\geq 300\text{N/mm}$	826.4 N/mm	1127.8N/mm	958.45 N/mm
4	前大灯安装点 3 刚度	$\geq 300\text{N/mm}$	409.8 N/mm	674.2N/mm	458.71 N/mm
5	缓冲块安装点刚度	$\geq 400\text{N/mm}$	1294.5 N/mm	1515.2N/mm	1261.8 N/mm
6	散热器安装点刚度	$\geq 200\text{N/mm}$	1418.4 N/mm	1503.7N/mm	1282.1 N/mm
7	掌压刚度	$\geq 150\text{N/mm}$	92.7 N/mm	168.5N/mm	158.2 N/mm

续表 3-7 汽车前端模块不同方案的性能分析对比

序号	实验项目	目标要求	分析结果		
			全塑方案	金属嵌件式 优化前	金属嵌件式 优化后
8	前保支架安装点刚度	$\geq 200\text{N/mm}$	120.9 N/mm	238.6N/mm	217.4 N/mm
9	一阶模态	$\geq 50\text{Hz}$	72.3HZ	78.9HZ	76.5HZ
10	锁扣安装点横向刚度	$\geq 300\text{N/mm}$	4225.4 N/mm	13636.3N/mm	13043.5 N/mm
12	锁扣安装点纵向刚度	$\geq 600\text{N/mm}$	3389.8 N/mm	5217.4N/mm	4687.5 N/mm
13	重量	\	3.36kg	3.93kg	3.66kg

从表3-7中的数据可以看出带有金属嵌件的汽车前端模块在优化前的性能明显优于全塑料产品，特别是大灯安装点1刚度、掌压刚度和前保支架安装点刚度有了大幅提升，分别提高了135.5N/mm、75.8N/mm，性能很好地满足目标要求。金属嵌件式汽车前端模块在尺寸优化后的产品性能较优化前有所下降，但整体上除缓冲块安装点刚度、散热器安装点刚度由于厚度减薄性能下降较大，与全塑产品相近，其余性能指标均远高于全塑产品方案，优化后的产品总重量约3.66kg，虽然比全塑产品在重量上有所增加，但其关键性能要求均满足设计要求，且总重量比优化前减重了0.27kg，约6.87%，具备一定轻量化效果。

3.9 本章小结

本章节详细论述了汽车前端模块的轻量化设计与优化过程，确定了金属嵌件产品的设计方案，大幅提高了前端模块的性能，体现出金属嵌件式前端模块在小空间高刚度要求下的性能优势。

首先确定了汽车前端模块的多种工况要求，详细阐述其对车辆安全、功能性方面的影响；然后介绍了基于变密度法的拓扑优化数学模型；将锁扣极限拉力、三个大灯安装点、散热器安装点等八个重要工况分别作为子目标，以求解结构最小柔顺度为目标进行单工况拓扑优化；引入Critic客观评判准则，根据单工况拓扑优化的各载荷下柔顺度值计算出各工况权重比，根据权重比分配权重进行多工况拓扑优化；按照多工况优化结果创建全塑汽车前端模块模型，进行强度分析发现产品在大灯安装点1刚度、掌压刚度和前保支架安装点刚度存在不足，在设计空间极为有限情况下，根据全塑产品结构基础，增加金属嵌件显著提高了产品性能，满足设计条件；在此基础对产品进行尺寸优化，优化后的金属嵌件式前端模块仍可以很好满足性能要求，质量比优化前减重约6.87%。

第4章 金属嵌件式汽车前端模块注塑成型工艺参数优化

带有金属嵌件的汽车前端模块结构复杂，注塑成型工艺相较于传统塑料注塑成型更为繁琐。其工艺设计中的塑料熔体的流动行为、冷却收缩变形等传统问题更加难以把控。这些问题会直接影响了产品的装配精度和使用寿命。本章将以金属嵌件式汽车前端模块为研究对象，通过正交实验等方法优化其注塑成型的工艺，减小产品翘曲变形缺陷。

4.1 注塑成型 CAE 技术及理论基础

4.1.1 注塑成型 CAE 技术

注塑成型CAE技术主要是基于有限元分析（FEA）和计算流体动力学（CFD）方法。通过将复杂的物理问题离散化，注塑成型CAE软件可以模拟塑料熔体在模具中的流动路径、压力分布、温度变化和固化过程。这些模拟结果可以帮助工程师预测和解决可能出现的如短射、气泡、翘曲和应力集中、熔接线等问题。目前主要使用的CAE技术根据网格划分方式主要分为中面流技术、双面流技术和实体流技术。

（1）中面流技术是通过提取模型厚度方向的中间层面创建网格，主要用于模拟宽厚比较大的板壳类零部件，由于这类产品厚度方向尺寸远远小于熔体流动方向尺寸，鉴于塑料熔体具有较高的黏度特性，所以忽略了厚度方向的速度分量及压力变化。这种方法具有计算量小，耗时短等特点，宽厚比越大的模型计算结果越准确。

（2）双面流技术是根据模型的上下表面创建网格，技术原理与中面流类似，将沿中面流动的单股流变为沿上下表面同时且协调的双股流。要求上下表面的网格尽可能保持一致。此种方法的计算效率较高，比中面网格模型厚度方向的温度、流动前沿温度、剪切速率等分析结果更加准确。

（3）实体流技术是直接基于三维实体模型进行分析的方法，用3d网格将原模型填充出来，这种方法能够提供结构最具体的细节部分，更精确地模拟塑料熔体在模具中的流动情况，包括对温度场、压力场及应力场的全面分析。这对于保证厚壁部件或者设计复杂的塑料制品的质量非常关键。

4.1.2 注塑成型理论基础

注塑成型过程是复杂的非牛顿流体、非等温、非稳态的流动传热过程，满足粘性流体力学基本方程，充填过程主要遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒三大定律^[61-63]。

1) 质量守恒定律, 注塑成型充填过程的质量守恒是指熔融聚物流体视为连续介质, 在型腔内的流动过程中始终保持总质量不变, 数学表达形式为连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (4-1)$$

其中 ρ 为熔体密度, t 为时间。

在直角坐标系中速度 $\mathbf{V}$ 分解到 x 、 y 、 z 三个方向上, 可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4-2)$$

其中 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 项为单位时间内单位体积的质量增加, $\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$ 三项分别为单

位时间内单位体积内质量的净流出量。

2) 动量守恒定律, 注塑过程中熔融流体动量的时间变化率等于作用到熔融流体上的外力之和, 数学表达形式为运动方程:

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \rho \mathbf{F} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (4-3)$$

其中 $\mathbf{F}$ 为单位体积流体的质量力。

3) 能量方程, 体积不变, 则总能量的变化率等于所作功的功率之和。通过能量方程可以描述流体运动过程中的能量守恒原理

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = -p \nabla \cdot \mathbf{V} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho q + \Phi \quad (4-4)$$

其中 C_v 为比热容, T 为流体温度, q 为单位质量流体的热源强度, k 为流体热传导系数, Φ 为粘性耗散功。

4.2 模流分析有限元模型创建

4.2.1 几何模型处理

本汽车前端模块的最终模型是使用CATIA 2018软件创建的, 需要将文件转换为STL格式以便导入Moldflow软件, 单个前端模块产品长度尺寸为1085mm, 宽度为392mm, 高度为240mm, 金属嵌件厚度1.2mm, 加强筋部分的平均塑料壁厚约2.0-2.5mm之间, 产品嵌件底部结构复杂, 具有多个加强筋和工艺孔。小圆角和小倒角等细微结构的存在不仅会大大增加网格数量, 还会导致网格最大纵横比过大等网格质量问题, 而且这些结构

对分析结果影响很小，为简化分析过程，提高分析计算效率，利用Moldflow自带的几何处理软件CAD Doctor将2mm以内圆角、倒角及凸台等特征简化，几何特征去除后，如果有面缺失破损再进行修复，修复后几何模型如图4-1所示。

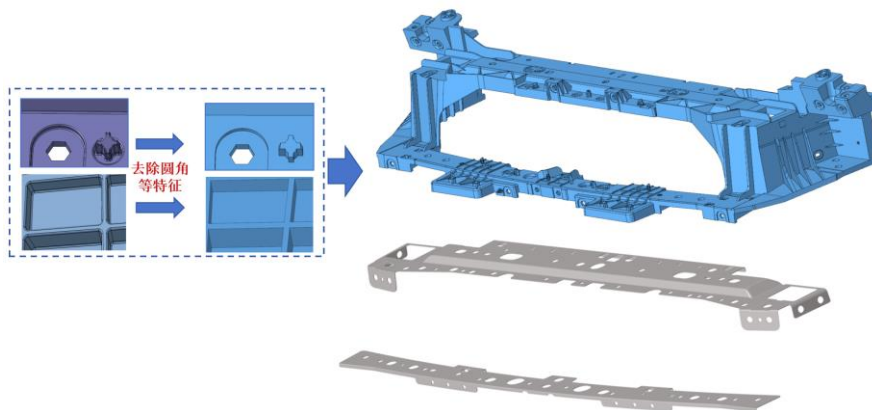


图4-1简化后的汽车前端模块模型

4.2.2 网格划分

网格划分是模流分析的关键步骤之一^[64]。Moldflow软件支持中面网格、双层面网格和3D网格三种类型。为确保分析结果的准确性，本研究采用3D网格进行分析。由于3D网格划分时网格分层较多且网格总数庞大，导致不符合质量要求的网格修复工作量较大。因此，本研究采用了一种分步优化策略：首先进行双层面网格划分，生成的双层面网格数量较少，修复工作量相对较小；然后基于划分好的双层面网格重新生成3D网格。

在双层面网格划分阶段，首先利用Autodesk Moldflow Insight自带的自动网格划分功能，将全局边长设置为4mm。网格生成后，需确保网格的纵横比、自由边、取向、交叉和重叠等参数满足质量要求。首先使用“网格诊断及修复功能”中的“网格修复向导”指令进行自动批量修复；对于未修复的网格，则采用手动修复方式。经过修复后的网格最大纵横比为13.7，无自由边、配向不正确单元、交叉单元和重叠单元，网格匹配度为92.5%。

在完成带金属嵌件的汽车前端模块塑料部分的双层面网格划分及所有网格缺陷修复后，重新进入网格划分指令，将网格类型设置为3D实体网格。为保持一致性，全局边长仍设置为4mm。考虑到分析精度要求，将厚度方向最小层数设置为6层，其他参数采用默认设置。网格生成后，使用3D网格修复向导进行网格质量诊断和修复。对于金属嵌件部分，采用相同的处理方式。最终得到的模流分析有限元模型如图4-2所示。这种分步网格划分方法不仅提高了网格质量，还显著减少了网格修复的工作量，为后续的模流分析奠定了可靠的基础。

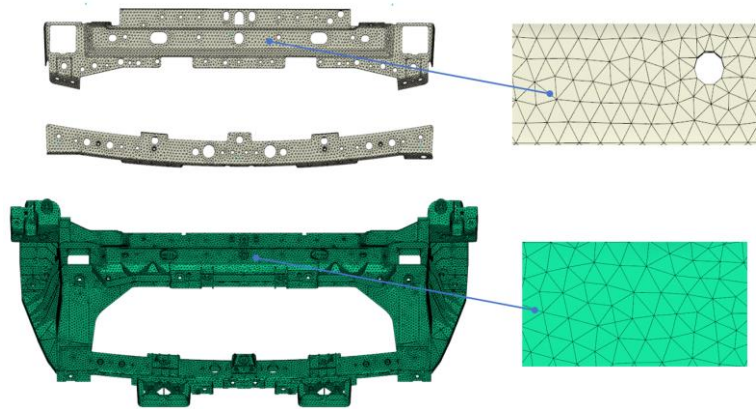


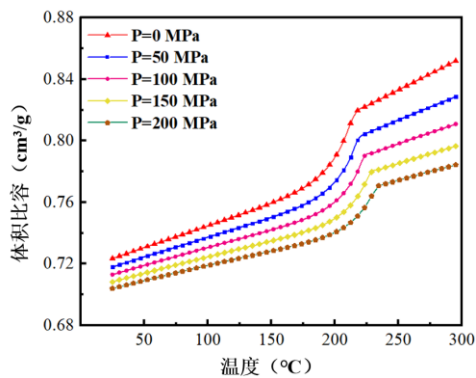
图4-2模流分析有限元模型

4.2.3 材料设置

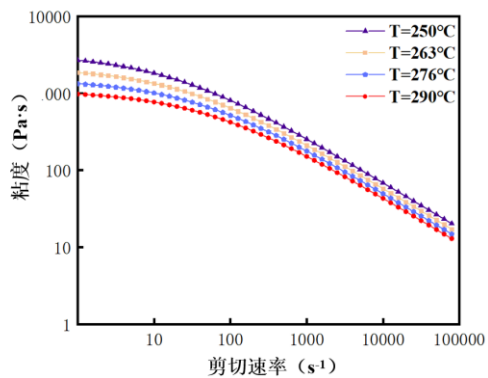
注塑材料选用上述确定的PA6+GF30，即聚酰胺6填充30%玻璃纤维，材料选自杭州本松新材料有限公司，牌号为A180G6 NF，耐热性、抗老化性和尺寸稳定性优异。材料推荐工艺参数见表4-1，PVT特性曲线和黏度曲线如图4-3所示。图4-3(a)可以看出：在相同温度下，该材料的体积比容随着压力的增大而逐渐降低；在相同的压力下，材料从液相凝固到固相的体积比容随温度的升高而增大，在压力等于200MPa时最低。图4-3(b)可以看出，在同一水平温度的情况下材料的粘度随着温度的升高单调降低，说明温度越高，该熔体材料的流动性越好；在相同温度的情况下其剪切速率越高粘度越小。

表 4-1 材料推荐工艺参数

	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
推荐值	80	270	40	30	30



(a)PVT 曲线



(b)黏度曲线

图4-3 PA6GF30材料的PVT曲线和黏度曲线

4.3 浇注系统方案设计

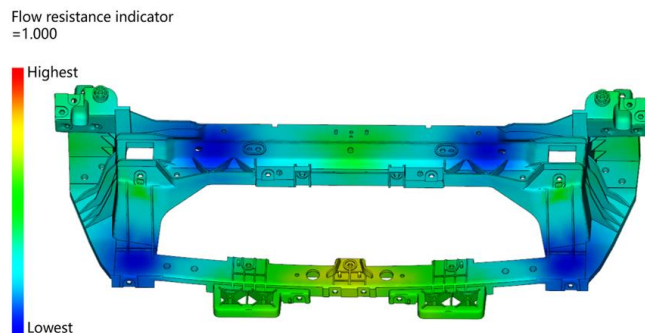
浇注系统是指将熔融塑料从注塑机的喷嘴到达产品型腔的流动通道，包括浇口和流道等^[65]。浇注系统的布置应该保证产品各型腔能够同时等压填充。浇注系统正确合理的布置不仅可以使零件能够填充完整、纤维取向合适、熔接痕减少、翘曲变形小，同时也能够使注塑成型周期缩短，从而提高生产效率^[38, 66, 67]。浇注系统的设计主要遵循以下几方面要求^[65]：

(1) 浇口设计：浇口设计包括浇口类型的选择，浇口数量及尺寸的确定，浇口位置应尽可能设置在塑料件壁厚最大位置，可以缩短熔体在型腔中填充的流动距离，尽可能减少熔接线产生，保证较好的外观质量，考虑型腔中气体排出等。

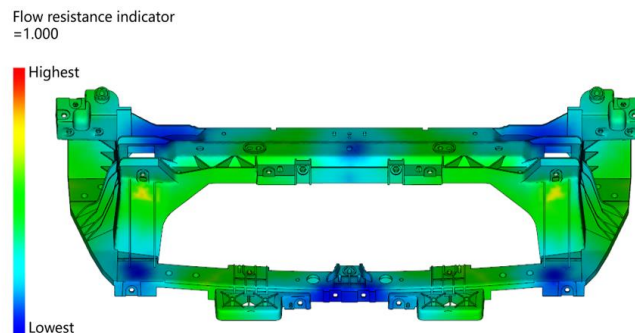
(2) 流道设计：主流道应尽可能设置在模具的对称中心位置，垂直于分型面；分流道设计有平衡式和非平衡式两类，主要起均衡送料和改变熔体流向作用。平衡式流道从主流道到每个型腔的分流道和浇口的形状、截面、长度都相同，这样可以保证各个型腔均衡进料、均衡地补料。非平衡热流道从主流道到分流道再到各个型腔的长度各不相同，这种设计可以缩短流道的长度，从而降低热量和压力损失^[68]。

4.3.1 浇口位置选择

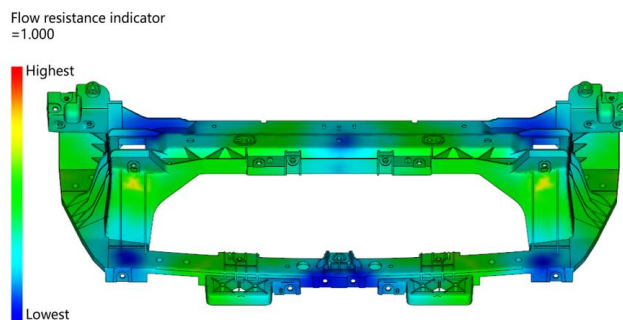
浇口作为注塑成型过程中的关键要素，其位置的合理确定直接影响制件的成型质量^[69]。本研究采用Moldflow软件自带的浇口位置分析功能确定浇口位置大致位置。在有限元网格处理好之后，将分析序列设置为“浇口位置”分析模块，在工艺参数设置中选择“高级浇口定位器”选项。浇口数量设置为4个，然后开始分析，软件会自动计算最佳浇口位置，分析结果见下图4-4(a)，图中的蓝色区域表示流动阻力最小位置，即最佳浇口位置参考点。然后按照上述设置将浇口数量分别设置为5个、6个，重新运行分析，分析结果见下图4-4(b)和4-4(c)所示。浇口数量不同，对应的分析结果中蓝色区域数量不同。



(a) 四浇口方案位置云图



(b) 五浇口方案位置云图；



(c)六浇口方案位置云图

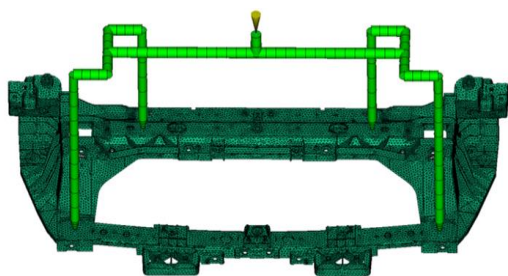
图4-4三种不同浇口方案的位置云图

4.3.2 流道系统设计

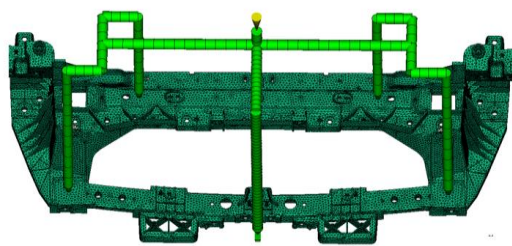
汽车前端模块属于汽车内部结构件，对外观质量的要求不高，但对结构强度要求较高。结合汽车前端模块产品特点，保证产品在注塑过程中具有较好的填充效果，同时节省原材料、减少热量和压力的损失，并简化模具设计，本方案采用了热流道系统。热流道系统能够有效维持熔融塑料从注塑机到浇口的温度一致性，从而补偿平衡式流道在传输过程中可能产生的热量损失，确保塑料流动的稳定性和均匀性。

由于汽车前端模块的尺寸较大，若采用潜伏式浇口，可能会导致塑料流动路径过长，压力损失大，从而影响产品的填充效果，甚至产生填充不足或应力集中等问题^[70]。因此，在综合考虑产品分型面的位置、型腔布局以及模具结构的简单性和可靠性后，优先选择点浇口作为主要的进胶方式。点浇口具有压力损失小、填充均匀等优点，特别适合大型注塑件的生产。然而，在某些特殊位置，由于结构限制或模具设计的复杂性，难以布置点浇口，在这些区域采用了侧浇口进胶方式，以确保塑料能够顺利填充到每一个角落。

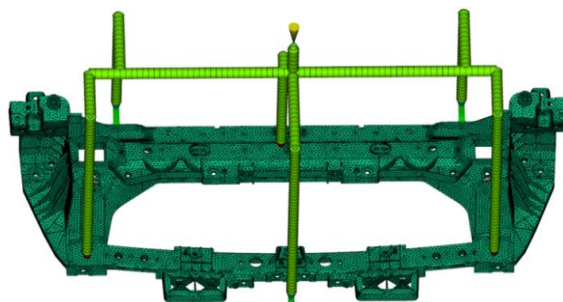
如图4-5所示，浇注系统设计了三种不同的进胶方案：其中，四浇口方案全部采用点浇口；五浇口方案和六浇口方案则结合了点浇口和侧浇口的优点，分别在合理位置采用不同的进胶方式，以满足这种复杂结构的填充需求。这种浇口设计不仅能够有效提升产品的填充效果，还能减少注塑过程中的热量和压力的损失，从而在保证产品质量的同时，降低生产成本并提高生产效率。



(a)四浇口方案



(b)五浇口方案；



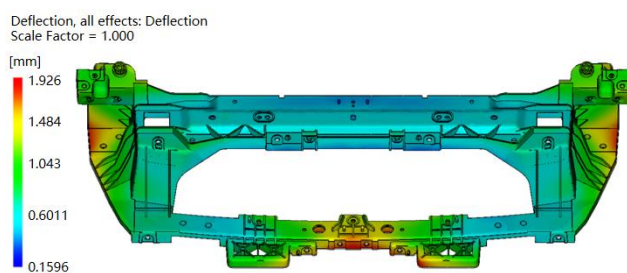
(c)六浇口方案

图4-5不同方案流道系统布置

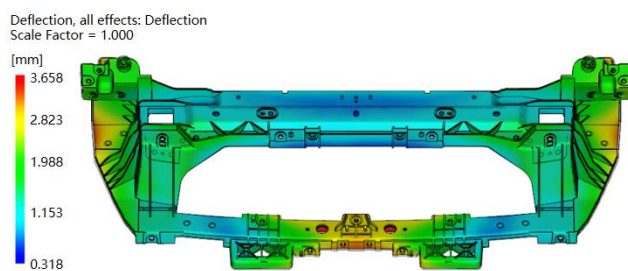
4.3.3 浇注方案的确定

为评估不同浇注方案的成型质量，本研究对三种浇注方案（四浇口、五浇口和六浇口）进行了“填充+保压+翘曲”模拟分析。分析过程中，模具表面温度、保压压力、保压时间等关键工艺参数均参照表4-2中材料的推荐值进行设置。考虑到金属嵌件具有均匀壁厚、结构较薄且导热性良好的特点，将嵌件表面温度设置为与模具表面温度一致，其余参数采用软件默认值。

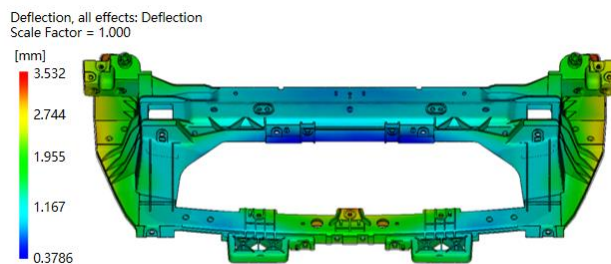
通过模拟分析获得了三种浇注方案的翘曲变形结果，如图4-6所示。分析结果表明，方案1(四浇口)、方案2(五浇口)和方案3(六浇口)的最大翘曲变形量分别为1.926mm、3.658mm和3.532mm。其中方案1的翘曲变形量最小，较方案2和方案3分别降低了47.4%和45.6%。方案2与方案3的翘曲变形量较为接近，仅相差3.4%。



(a)四浇口方案翘曲变形云图



(b)五浇口方案翘曲变形云图



(c)六浇口方案翘曲变形云图

图4-6不同浇注方案对应的翘曲变形量

为了便于衡量上述不同浇注系统方案的优缺点，选择最优浇口数量，确定最佳注塑成型方案，在汽车前端模块产品表面的不同区域选择了21个翘曲变形测量位置（如图4-7所示）进行评判，其中位置1-10处为产品上梁测量点位置，位置11-21是产品下梁测量点位置，仿真计算完毕记录测量结果。

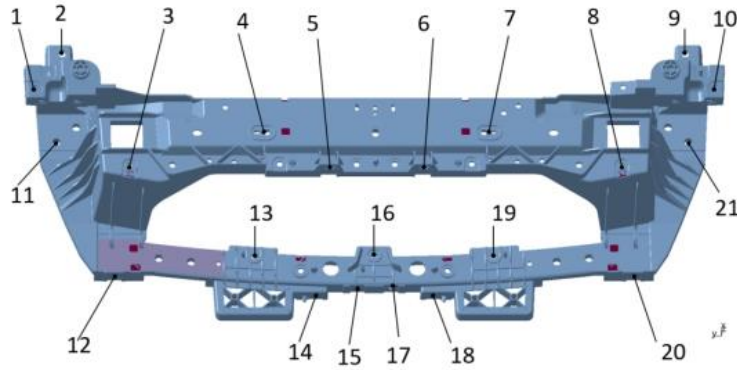


图4-7翘曲变形量记录位置

不同浇注方案对产品整体尺寸的影响趋势见下图4-8，可以直观看出不同浇注方案下产品由于冷却散热不均匀，冷却过程均有不同程度的收缩，且不同方案的翘曲变形趋势整体一致，其中上梁部位分（图4-8（a））两端翘曲严重，而下梁部分（图4-8(b)）的中间位置翘曲严重。产品上梁的翘曲变形小，主要是因为上梁的中间位置含有嵌件，对熔融材料冷却过程的收缩变形起到一定的阻碍作用，因此变形量较小，而左右两侧的端部没有嵌件存在，且在产品边缘位置，冷却过程收缩较为严重，从而导致翘曲变形量比较大；下梁中嵌件存在对翘曲变形也有一定改善，但由于嵌件宽度较窄，刚度小，中间位置距离定位夹具较远，注塑时在高温高压条件下发生了变形导致产品下梁的中间位置变形较大。

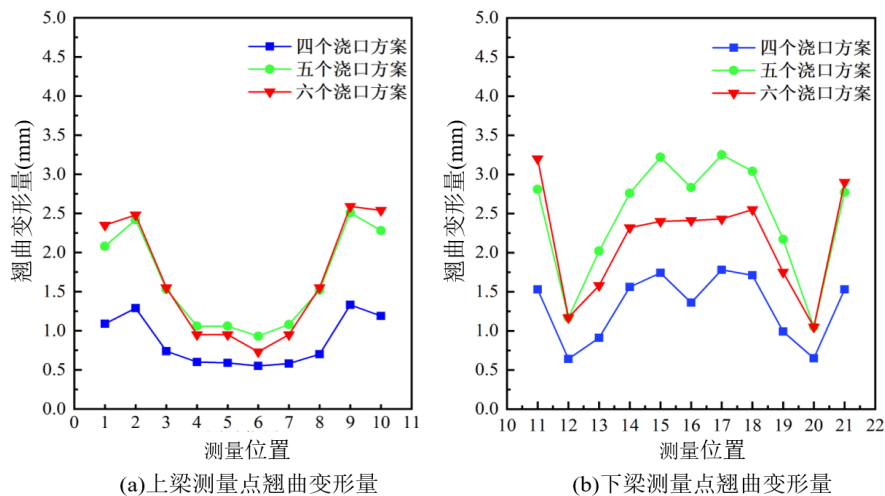


图4-8不同浇口数量对产品翘曲变形的影响

不同浇注方案的锁模力分析结果如图4-9所示，随着熔融材料填充到型腔内，锁模力先增大后减小，所需最大锁模力随着浇口数量增多逐渐减小。四浇口方案的最大锁模力最大，超过4000吨，六浇口方案的最大锁模力最小，不到1500吨。

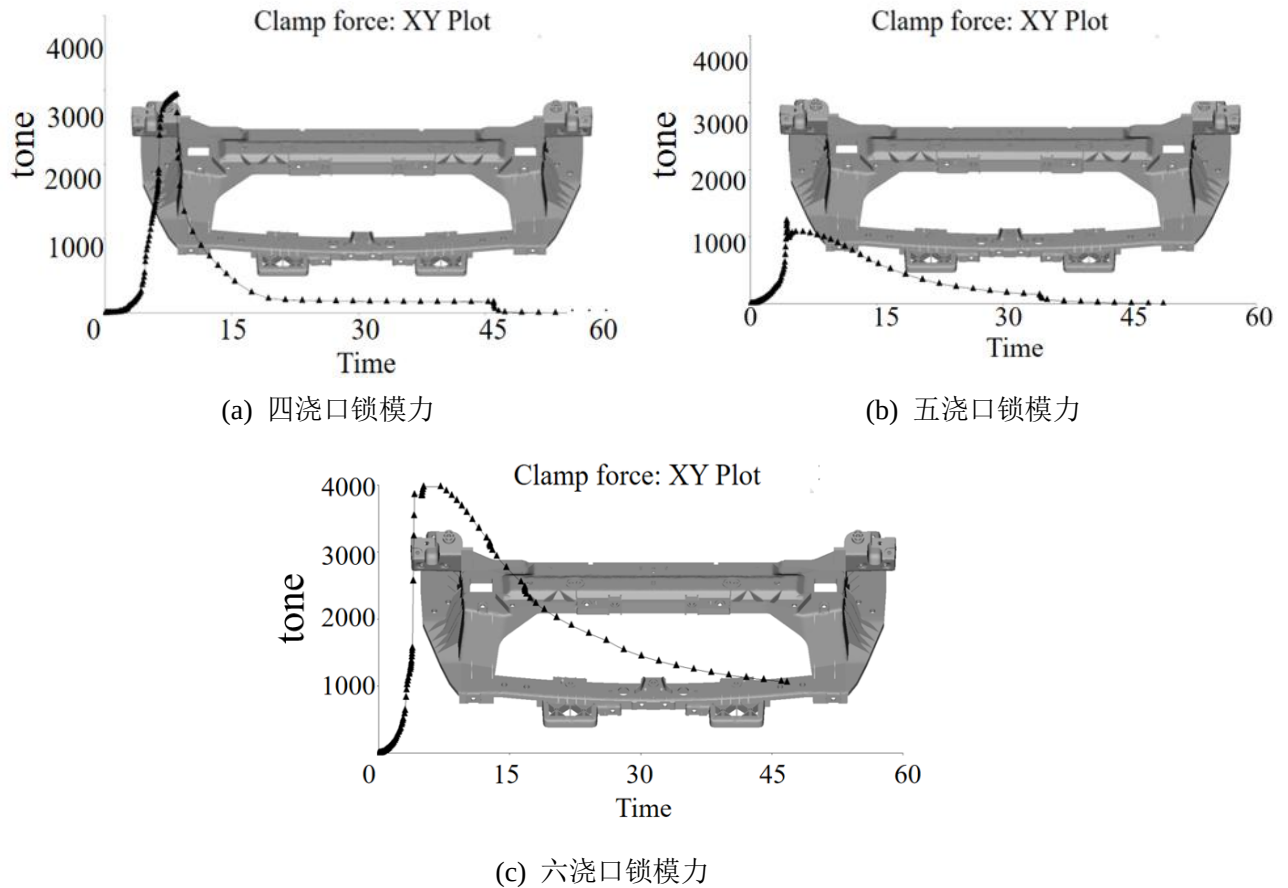
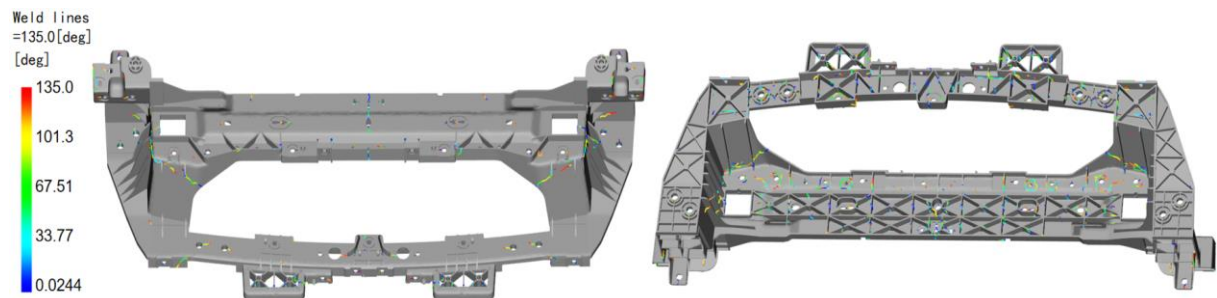
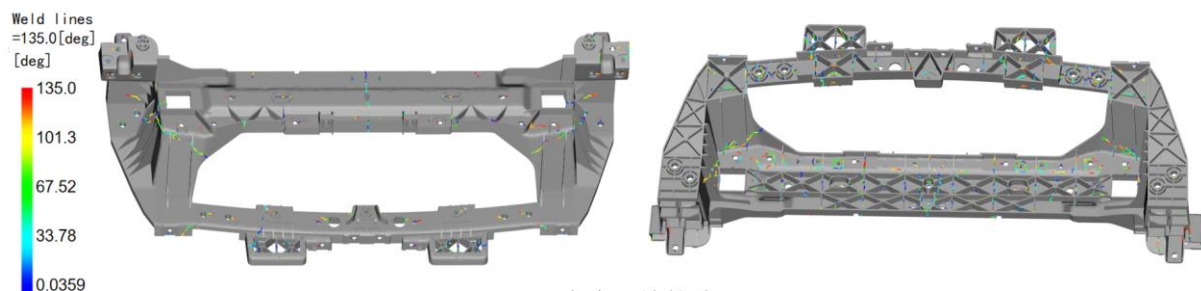


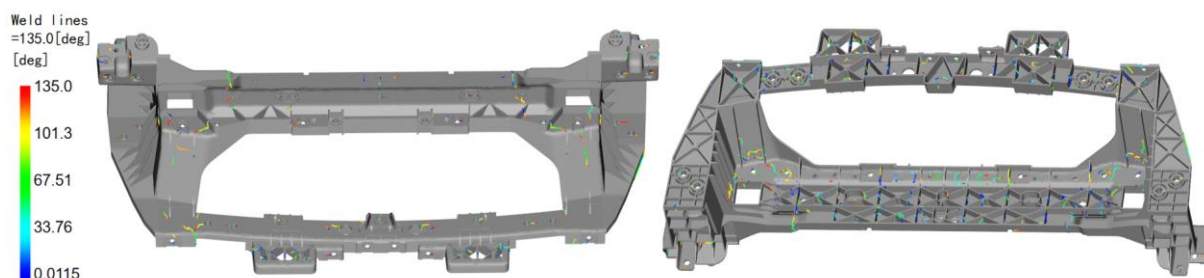
图4-9不同浇口方案的锁模力结果

不同浇注方案的产品熔接线如图4-10所示，从图中可以直观看出熔接线主要分布在产品加强筋上，浇口越少熔接线越少，但熔接线会变长，四浇口方案和五浇口方案在产品的大面上分布有较长熔接线，这可能会导致产品结构质量出现缺陷，六浇口方案在大面上的熔接线较短，且数量相对较少。





(b) 五个浇口方案熔接线分析结果



(c) 六个浇口方案熔接线分析结果

图4-10不同浇口方案的熔接线分析结果

综合对比，选择6个浇口浇注系统作为最终方案具有较好的填充效果，熔接线较短且大都分布在加强筋上，同时所需最大锁模力较小也有较高的成型效率。但此方案的最大翘曲变形量较大，需要进行改进。

冷却水路整体的直径为15mm，为避免出现冷却不均现象，在底部加强筋位置布置直径8mm冷却管路，在上下梁中间位置和部分加强筋处等冷却较慢位置的冷却管路位置布置为挡水板冷却管路，整体设计如下图4-11所示。

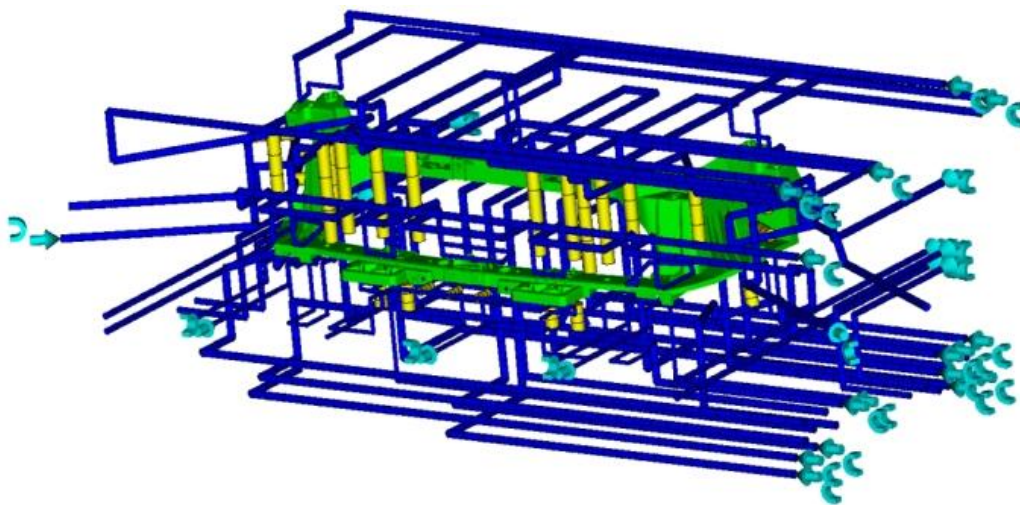


图4-11冷却水路布置

根据材料推荐的工艺参数进行“冷却+填充+保压+翘曲”分析，结果如图4-12所示，最

大翘曲变形量为3.442mm，两侧安装点位置的翘曲变形量过大，无法满足前端模块自身与车身的安装要求，同时也会影响保险杠支架、大灯支架等汽车前端零部件与前端本体的装配要求，故需要对产品进行注塑工艺优化，以改善产品注塑成型时翘曲变形量，达到产品安装设计指标要求。

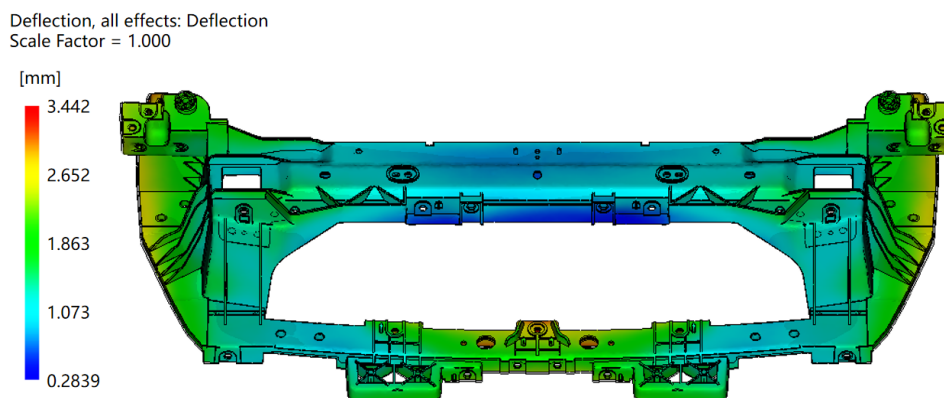


图4-12六个浇口方案翘曲变形结果

4.4 金属嵌件式汽车前端模块注塑成型工艺参数优化

4.4.1 正交实验设计

科学研究中往往需要通过设计试验寻找研究对象的变化规律，而试验因素和各个因素的水平数往往有多个，如果对每个因素水平互相搭配进行试验，试验次数太多，正交试验是利用正交表科学的安排和分析多因素实验的方法^[71,72]，本文在研究汽车前端模块注塑成型过程不同工艺参数导致制件翘曲变形的影响情况时，需设计多因素试验得到最佳工艺参数组合，采用正交实验的方法可以有效减少试验次数。在进行试验设计前，需要明确试验目的以及实验因素。

(1) 明确试验目的：

汽车前端模块是车辆的重要组成部分，由于它集成了冷却模块、前大灯、保险杠以及各种传感器等多种功能组件，保证前端模块的加工精度对于确保整车性能、安全性和用户体验至关重要。为了实现减重设计，产品不同位置的壁厚有所差异，在实际生产中难免会产生收缩变形，为保证产品的翘曲变形较小（即产品成型后的外形尺寸与型腔的偏离情况），因此本节以金属嵌件式前端模块的翘曲变形量作为试验指标，通过研究该产品在注塑成型过程中不同注塑成型工艺参数对翘曲变形量的影响，并结合该制件的实际要求，尽可能地将制件的翘曲变形量降至最低。

(2) 试验因素及水平

影响注塑成型产品翘曲变形量的因素有很多,查阅文献^[73-77]确定本次试验选择模具温度(A)、熔体温度(B)、保压压力(C)、保压时间(D)、冷却时间(E)、注射时间(F)六个对注塑成型产品质量影响显著因素为设计变量,分别用大写字母字母A、B、C、D、E、F表示,根据材料的推荐工艺参数,每种试验因素选取5种水平,按工艺参数推荐值将其均分后得到,试验因素和试验水平汇总表见4-2,根据表中数据设计L₂₅(5⁶)正交试验。

表 4-2 正交实验因素水平表

	模具温度 A /°C	熔体温度 B /°C	保压压力 C / MPa	保压时间 D/s	冷却时间 E/s	注射时间 F/s
水平 1	70	250	30	15	15	2
水平 2	80	260	35	22.5	20	3
水平 3	90	270	40	30	25	4
水平 4	100	280	45	37.5	30	5
水平 5	110	290	50	45	35	6

4.4.2 正交实验模流分析结果

利用Moldflow进行模流分析,在软件参数设置中将表中对应参数值依次输入软件中,共进行了25组模拟试验,开模时间固定为5s,注射过程中的速度压力切换点设置为99%,其他辅助参数均保持软件初始默认状态。通过系统的数值计算,获得了各组实验条件下的制品变形量数据,详细的模拟结果记录在表4-3中。

表 4-3 正交实验结果表

实验 序号	A /°C	B /°C	C/ MPa	D/s	E/s	F/s	W/mm
1	70	250	30	15	15	2	3.901
2	70	260	40	37.5	20	6	3.707
3	70	270	50	22.5	25	5	3.268
4	70	280	35	45	30	4	3.509
5	70	290	45	30	35	3	3.259
6	80	250	50	37.5	35	4	3.216
7	80	260	35	22.5	15	3	3.526
8	80	270	45	45	20	2	3.300
9	80	280	30	30	25	6	3.655
10	80	290	40	15	30	5	3.483

续表 4-3 正交实验结果表

实验 序号	A /°C	B /°C	C/ MPa	D/s	E/s	F/s	W/mm
11	90	250	45	22.5	30	6	3.588
12	90	260	30	45	35	5	3.589
13	90	270	40	30	15	4	3.379
14	90	280	50	15	20	3	3.269
15	90	290	35	37.5	25	2	3.474
16	100	250	40	45	25	3	3.364
17	100	260	50	30	30	2	3.209
18	100	270	35	15	35	6	3.572
19	100	280	45	37.5	15	5	3.341
20	100	290	30	22.5	20	4	3.605
21	110	250	35	30	20	5	3.441
22	110	260	45	15	25	4	3.405
23	110	270	30	37.5	30	3	3.531
24	110	280	40	22.5	35	2	3.447
25	110	290	50	45	15	6	3.338

4.4.3 翘曲变形结果分析

极差分析法是正交实验设计中一种常用的简单直观的数据分析方法。它主要用于评估各个因素对响应变量影响的大小，从而确定最优参数组合或了解哪些因素是最主要的影响因素。极差表示为 R ，由下式求得：

$$R = \max \{ \overline{K_1}, \overline{K_2}, \dots, \overline{K_n} \} - \min \{ \overline{K_1}, \overline{K_2}, \dots, \overline{K_n} \} \quad (4-5)$$

其中 K_i 表示本因素下 n 个水平实验结果的平均值。

采集各试验结果各试验最大翘曲变形量，极差分析的结果见下表4-4。表中 $R_C > R_F > R_D > R_A > R_B > R_E$ ，可知不同工艺参数对金属嵌件制品翘曲变形量的因素主次顺序为：保压压力>注射时间>保压时间>模具温度>熔体温度>冷却时间。

表 4-4 翘曲变形极差分析结果

	A	B	C	D	E	F
K_1	3.5288	3.5020	3.6562	3.5260	3.4970	3.4662
K_2	3.4360	3.4872	3.5044	3.4868	3.4644	3.3898
K_3	3.4598	3.4100	3.4760	3.3886	3.4332	3.4228
K_4	3.4182	3.4442	3.3786	3.4538	3.4640	3.4244
K_5	3.4324	3.4318	3.2600	3.4200	3.4166	3.5720
R	0.1106	0.092	0.3962	0.1374	0.0804	0.1822

为方便对不同工艺参数在各试验水平下的实验结果进行系统分析，根据上表数据，可以得出各工艺因素对制品翘曲变形量的影响趋势，如图4-13所示。

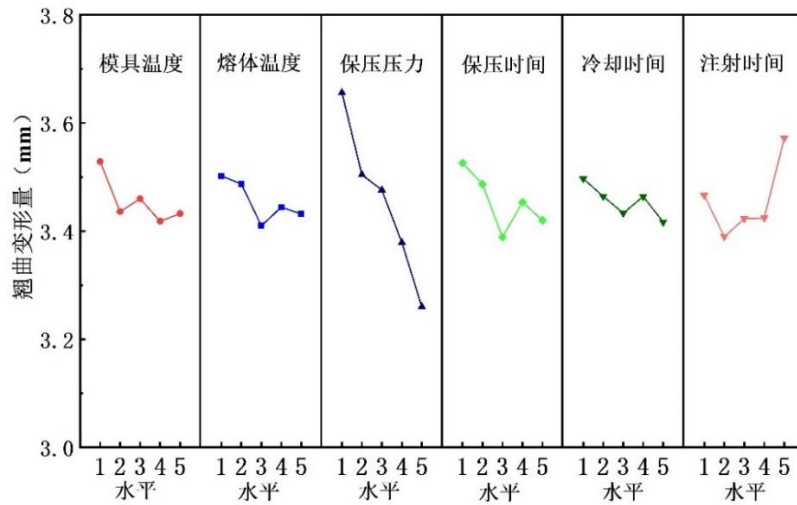


图4-13正交效应图

从图4-13可以看出，随着模具温度的升高，产品的最大翘曲变形量整体呈下降趋势，在100℃时的最大翘曲变形量最小，主要因为高温有利于熔体在模具内保持熔融状态进行填充，从而减少收缩率^[78,79]，同时较高的模具温度会削弱了嵌件两侧熔体温度场不平衡对翘曲变形的影响。

随熔体温度的升高，最大翘曲变形量整体呈下降趋势，在270℃时翘曲变形达到最小值，因为塑料熔体随温度升高黏度降低，充填腔体时流动性更好，从而减小制品变形^[80]，但当熔体温度较高时，纤维更容易沿流动方向排列，这可能会导致不同区域纤维取向的不同从而导致翘曲变形变大。

随保压压力升高，产品填充得更加致密，收缩率降低，所以最大翘曲变形量逐渐减小^[81]。随着保压时间的延长，产品填充得更严实，收缩率降低，从而最大翘曲变形量整体在减小^[82]。冷却时间对翘曲变形的影响最小，实验范围内随冷却时间延长，变形量整体逐渐减小。当注射时间较长时，熔体冷却不均更加明显，导致翘曲变形变大。通过图4-13还可以直观看出，含有金属嵌件的最优工艺参数组合是A4B3C5D3E5F2，即模具温度100℃、熔体温度270℃，保压压力50MPa，保压时间30s，冷却时间35s，注射时间3s。

根据正交试验结果，在Moldflow软件中将注塑工艺参数更改为为A4B3C5D3E5F2组合，重新运行分析，翘曲变形结果云图如图4-14所示，优化之后的最大翘曲变形量为2.846mm，可见正交试验优化后的产品翘曲变形有所改善，但与实际产品要求还存在一定差距，为减小后期模具调整难度，需进一步调整优化方案。

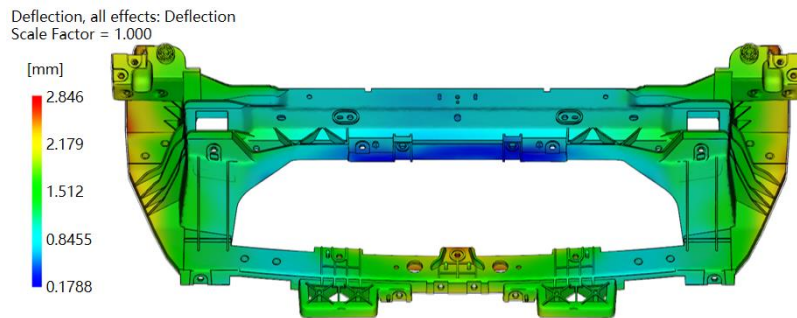


图4-14优化工艺参数后的翘曲变形

4.4.4 保压曲线优化

为提高产品优化效果，选取对翘曲变形影响较大的试验因素进行进一步优化。由上节分析可知保压压力、注射时间和保压时间是注塑成型过程中对产品翘曲变形影响最为显著的工艺参数。由于注射时间的调整可能会显著改变熔体在复杂模具中的流动行为，进而影响熔接线的形成位置，因此选择保压压力和保压时间作为关键优化变量。

在优化过程中，通过增加保压压力，熔体在冷却过程中能够更好地补偿收缩，从而减少因收缩不均导致的翘曲变形。将保压压力从初始的50MPa逐步提高到80MPa。为提高保压优化效果，采用了阶梯型保压曲线，逐渐降低保压压力。阶梯型保压曲线通过分阶段调整保压压力，阶梯型保压曲线在初始阶段采用较高的保压压力，随后逐步降低压力，避免因压力突变导致的应力集中问题，最佳优化曲线如图4-15所示。

经过上述优化，产品的翘曲变形如图4-16所示，制件的最大翘曲变形量从优化前的2.846mm降低至2.171mm，降幅达到23.7%。这一结果表明，通过合理调整保压压力和采用阶梯型保压，能够有效改善金属嵌件式注塑件的成型质量，减少翘曲变形，从而更好地满足产品的装配精度和使用性能要求。可见制件的整体变形趋于均匀，关键区域的变形量显著减小，为后续的实际生产提供了可靠的工艺指导。

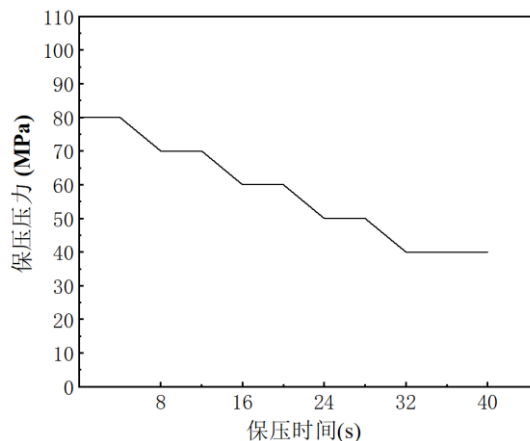


图4-15最佳保压曲线

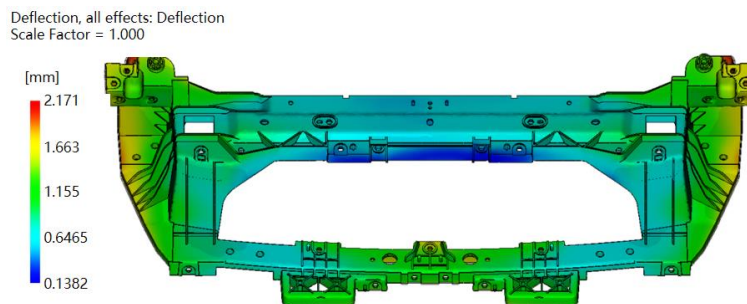


图4-16优化保压曲线后的翘曲变形结果

4.5 本章小结

本章节主要探讨了汽车前端模块这一复杂结构件的注塑成型工艺优化过程。

首先介绍了中面流、双面流和实体流三种主要的网格划分技术，并分析了它们各自的适用场景和优缺点。介绍了基于质量守恒、动量守恒及能量守恒定律的注塑成型理论基础，为后续模流分析提供了理论支持。

然后根据产品的特点设计了三种不同的浇注方案。经过对不同浇口方案的比较分析，发现六浇口方案不仅能够提供较好的填充效果，还能有效减少熔接线长度并降低最大锁模力，根据六浇口方案布置冷却水路来改善翘曲变形。

为了寻找最佳工艺参数组合，设计六因素五水平正交实验，考虑了模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间、冷却时间和注射时间六个因素的不同水平组合对制品翘曲变形的影响。通过极差分析确定了各因素影响程度的主次顺序，并找到了最优参数组合A4B3C5D3E5F2（即模具温度100℃、熔体温度270℃、保压压力50MPa等），使得最大翘曲变形量从初始值显著降低至2.846mm。为进一步减小翘曲变形，还尝试了调整保压曲线为阶梯型保压策略，最终将最大翘曲变形量降至2.171mm，比开始的最大翘曲变形量（3.532mm）降低了38.5%，基本满足了产品安装设计指标要求。

第5章 金属嵌件式汽车前端模块的实验验证

在进行产品设计优化仿真后，需要对产品进行实验验证，验证汽车前端框架产品设计的力学性能是否满足汽车主机厂的要求，包括刚度、强度、扭转性能等，结果验证是检验产品设计是否合理的关键步骤，通过实验验证也可以反馈产品设计的不足之处，从而进一步优化产品，对后续产品成型质量的优化也有着至关重要的作用。

5.1 注塑成型工艺参数优化结果验证

5.1.1 注塑成型设备

本实验由芜湖恒信汽车轻量化部件制造有限公司提供技术及设备支持，所使用的注塑机实验设备为震雄SM2200-TP-SVP/2二板式注塑机，如图5-1(a),设备产自深圳震雄机械有限公司，此设备具有其高速、高精度、高稳定性和高效节能等优点，能够满足各种大型注塑制品的生产需求，设备图片见下；此注塑机的最大锁模力达2200吨，符合本产品的生产要求。成型原材料为30%玻璃纤维含量的聚酰胺6塑料颗粒，材料粒子见图5-1(b)，粒子为直径3mm，长4mm的圆柱形，表面积大、熔融速度快、流动性好，适合填充汽车前端模块这种形状复杂薄壁结构。

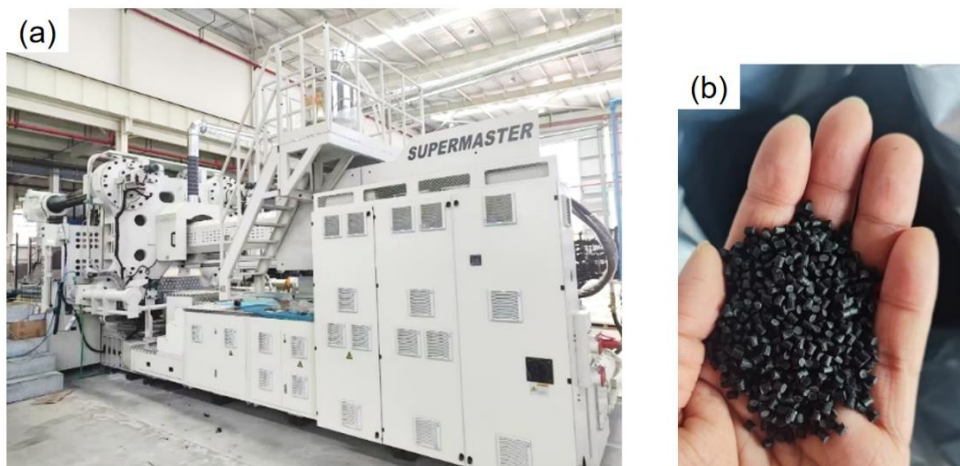


图5-1 (a)震雄SM2200-TP-SVP/2注塑机和(b)PA6GF30塑料粒子

5.1.2 注塑成型准备工作

注塑成型需要先将模具安装到指定型号注塑机上，做好物料准备工作，设置注塑成型工艺参数，具体步骤如下：

- (1) 安装模具，检查模具确保模具表面无异物、无损伤，模具的定位圈、顶针、滑

块等部件完好无损；将模具的定位圈套在震雄SM2200-TP-SVP/2注塑机的定位销上，使模具初步定位；调整模具的位置，使其与注塑机的注射单元和锁模单元对齐，确保模具的中心线与注塑机的中心线一致，然后拧紧固定螺栓，调整好模具间隙。

(2) 干燥原材料，注塑成型前注塑机的运料系统会将塑料粒子吸入干燥机内进行恒温90-100℃干燥4-6小时，去除物料粒子中水分，防止在注塑过程中水分会迅速汽化，形成气泡，导致制品内部出现空洞、表面出现银纹等缺陷；同时也避免水分汽化产生的气体在模具内膨胀，会使制品在冷却过程中产生不均匀的收缩，导致翘曲变形，影响尺寸精度和外观质量。

(3) 设定注塑成型工艺参数，根据前述章节对汽车前端模块成型工艺参数的优化结果，将最优工艺参数优化结果移交注塑工程师输入注塑机上，并设定好其他相关参数，具体关键工艺参数结果为熔体温度是280℃，模具温度为80℃，初始保压压力为80MPa，保压时间为40s，注塑期间采用阶梯型保压方式。

5.1.3 注塑成型实物验证

完成上述准备工作之后，安装好金属嵌件，启动注塑机，进行合模填充，得到的试样品如图所示，仔细观察产品表面，可明显看出产品的可视外观表面质量较好，无缩痕、无出模拉伤、无烧焦压力痕等问题，产品大面等主要承载位置无明显熔接线，表面光顺度较好、无飞边毛刺等明显外观缺陷。

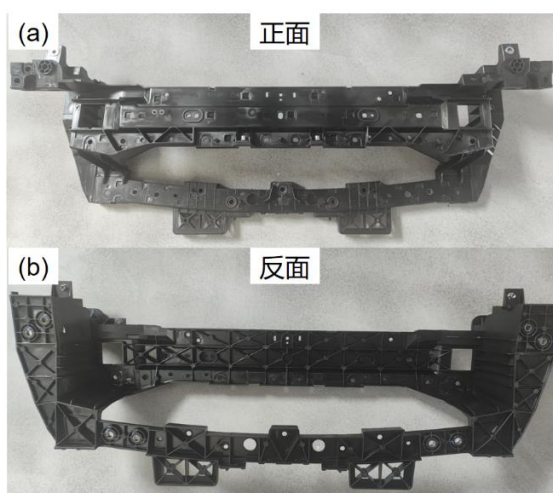


图5- 2汽车前端模块试模产品

为进一步确定产品关键安装位置成型质量，需使用检具进一步确认产品尺寸精度。将待测产品用清洁纱布擦拭干净，打开图5-3中压板1-13和滑移机构1、2，将产品放放到检具上，对正后，插上定位销，拧紧螺纹销，然后压上全部压紧钳，滑入滑移机构并锁

紧，如下图所示，用面差尺测量安装点位置关系，安装点误差范围为 $\pm 0.5\text{mm}$ ，验证了试验方案的可行性和准确性，产品翘曲变形量得到有效控制，零件合格率满足企业要求。

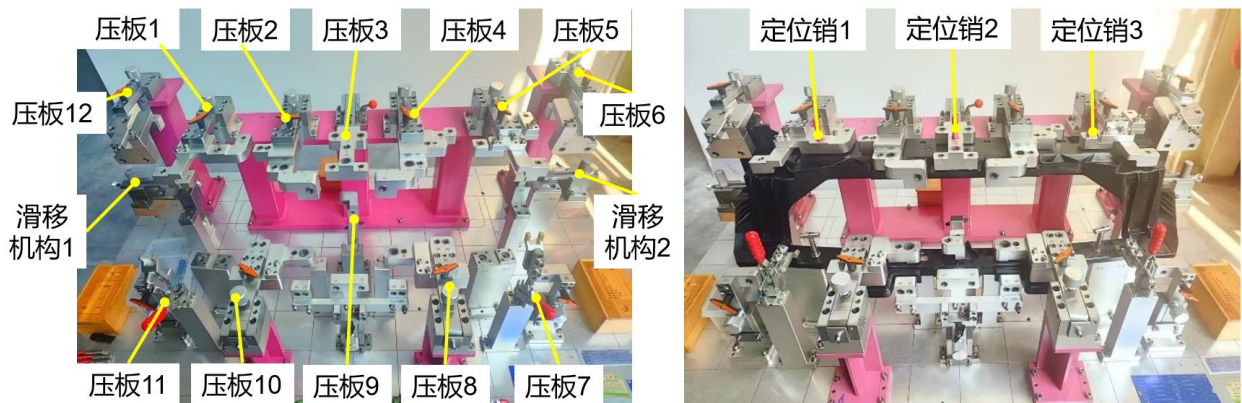


图5-3汽车前端模块检具

5.2 金属嵌件式汽车前端模块力学性能验证

5.2.1 力学性能试验设备

在完成尺寸验证之后，需要进一步完成汽车前端模块的力学性能评估实验，以确保其能够满足实际工况下的性能需求。本次力学性能验证实验由芜湖恒信汽车轻量化部件制造有限公司提供技术支持，在芜湖恒信汽车轻量化部件制造有限公司检测中心完成相关实验内容。试验设备选用苏州拓博机械设备有限公司生产的龙门式伺服电脑式万能材料试验机，型号为TH-8405S，如图5-4所示，试验机的关键实验参数见表5-1所示。



图5-4龙门式伺服电脑式万能材料试验机

表 5-1 TH-8405S 龙门试验机关键参数

名称	规格
实验力	垂直方向：2000kg 水平方向：1000kg
位移速度调节范围	垂直方向：0.01-250mm/min 水平方向：0.01-250mm/min
位移示值误差极限	示值的 $\pm 0.5\%$ 以内
试验力示值允许误差极限	示值的 $\pm 0.5\%$ 以内
位移速率控制精确度	速率 $< 5\text{mm/min}$ 时，设定值的 $\pm 1.0\%$ 速率 $\geq 5\text{mm/min}$ 时，设定值的 $\pm 0.5\%$

5.2.2 关键安装点力学性能实验

力学性能试验需要设计实验工装，为节省原材料，便于移动安装，工装是由空心钢管焊接而成的镂空结构，开有与汽车前端模块本体固定安装点所匹配的通孔，实验时用螺栓与其固定连接，实验工装如图5-5所示。

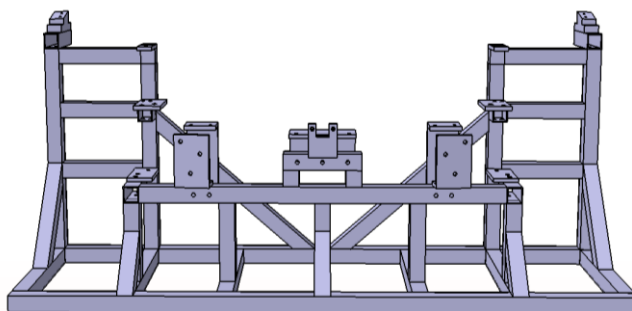


图5-5力学性能试验工装

实验时准备好注塑成型好的汽车前端模块产品，按照上节所述方法检查外观等产品质量合格后，安装好铆螺母，然后按照实际装车条件将其安装到实验工装上，安装后的工装如下图5-6所示，安装完成后将工装整体移至龙门试验机上，准备力学性能验证。

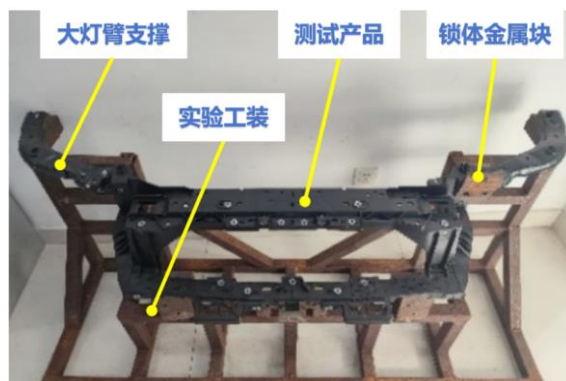


图5-6固定到实验工装的汽车前端模块产品

本实验采用龙门式电子万能试验机进行加载测试，试验机以恒定速率施加载荷，直至达到预定载荷值。为确保实验结果的可靠性，实验中的载荷大小、加载位置等参数均与有限元分析中的设置保持一致。实验共选取有限元静力学分析中的五个仿真刚度较低的关键载荷点进行验证。

1. 锁扣安装区域极限拉力测试

锁扣安装点刚度实验是模拟引擎盖锁扣受载情况，锁体由相同形状的质量相当的金属块代替，实验前锁体已安装到前端模块本体上。用试验机对金属块加载达到模拟效果。实验时移动龙门试验机的移动中联板到金属锁体位置，再移动测试推拉夹具使之与锁体中间位置对齐，固定夹具，设置实验测试速度为20mm/min，最大载荷为3000N，沿垂直向下方向（-Z方向）加载，加载至最大载荷后，保持载荷10分钟。试验前后对比见下图5-7，试验后汽车前端模块本体没有裂纹、破损等现象，结果符合要求。

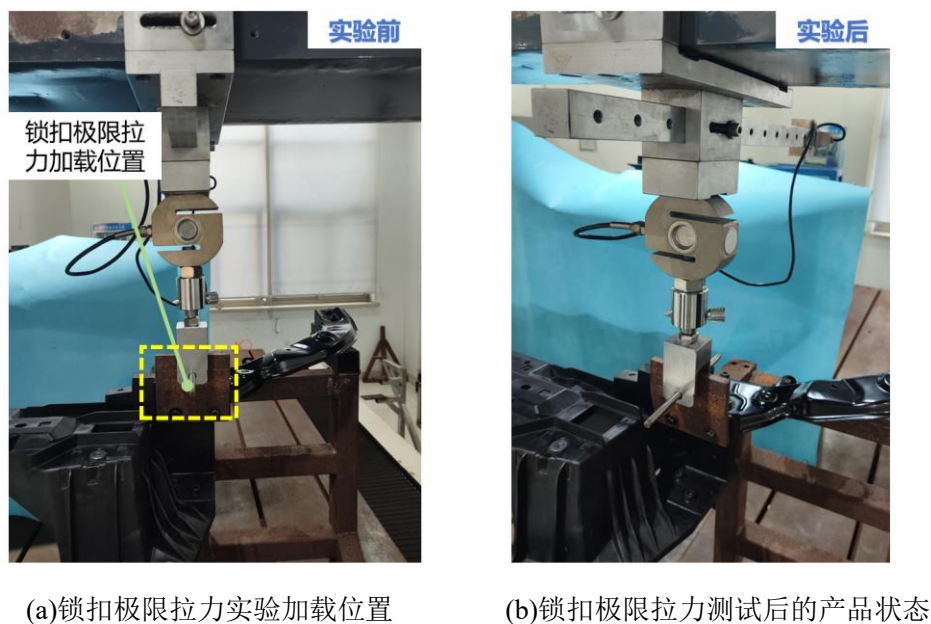
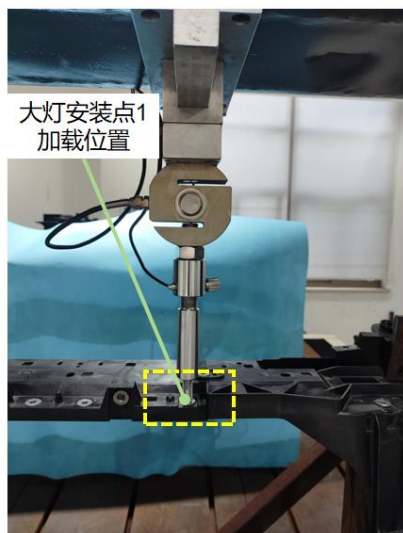


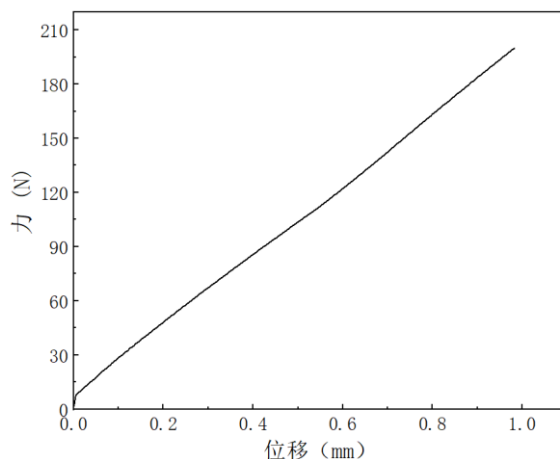
图5-7锁扣安装区域极限拉力测试

2. 大灯安装点1刚度实验

实验时，将龙门试验机的移动中联板移动到大灯安装点1处正上方的适当位置，再移动测试推拉夹具使之与大灯安装点1的中心对齐，固定夹具，设置实验测试速度为恒定值5mm/min，最大载荷为200N，加载方向垂直向下（-Z方向），保持载荷10分钟。试验结束后得到力-位移曲线图5-8(b)，观察产品外观情况发现大灯安装点处完好，无变形、开裂现象。



(a)大灯安装点1 刚度实验加载位置



(b))大灯安装点1 刚度实验的力-位移曲线

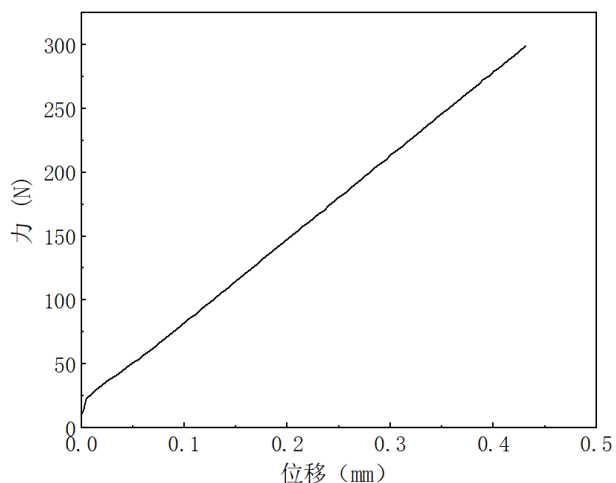
图5-8大灯安装点1刚度实验

3.大灯安装点2刚度试验

将龙门试验机的移动中联板移动到大灯安装点2处的适当位置，再移动测试推拉夹具使之与大灯安装点2中心对齐，固定夹具，设置实验测试速度为5mm/min，最大载荷为300N，加载方向垂直向下（-Z方向），如图5-9(a)所示，加载至最大载荷后，保持载荷10分钟。试验结束后得到力-位移曲线见图5-9(b)所示，观察产品外观情况发现大灯安装点处完好无变形、开裂现象。



(a)大灯安装点2 刚度实验加载位置



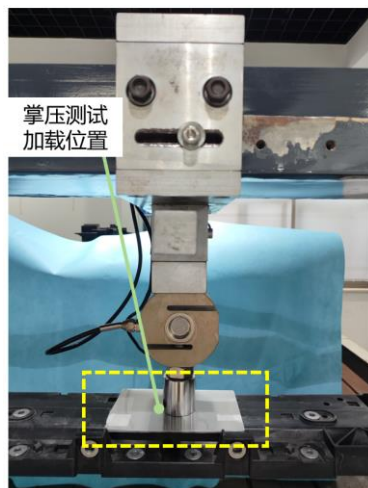
(b))大灯安装点2 刚度实验的力-位移曲线

图5-9大灯安装点2刚度实验

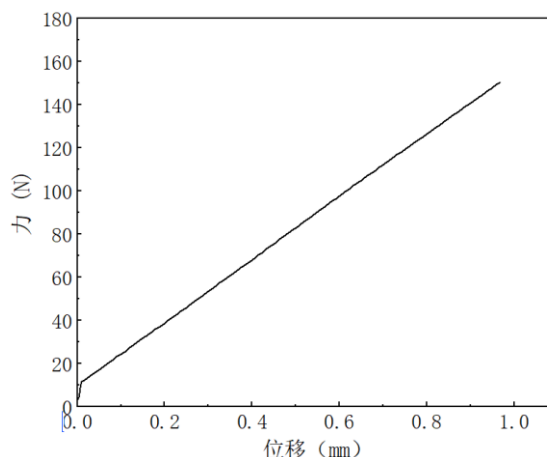
4.掌压掌压刚度测试

掌压刚度测试实验是模拟手掌对前端模块压力作用，根据企业常用要求，使用60mm

×100mm的金属板模拟手掌贴在样件上，用试验机对金属板施压达到模拟效果。实验时移动龙门试验机的移动中联板到前端模块上梁/下梁中间位置，再移动测试推拉夹具使之处于金属板的中心位置，固定夹具，设置实验测试速度为5mm/min，最大载荷为150N，加载方向垂直向下（-Z方向），加载至最大载荷后，保持载荷10分钟。试验结束后得到力-位移曲线见图5-10(b)。



(a) 掌压刚度试验加载位置

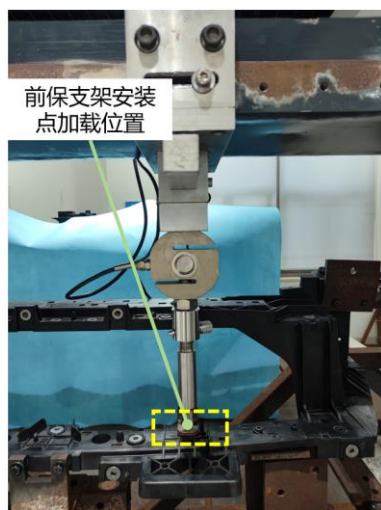


(b) 掌压刚度实验的力-位移曲线

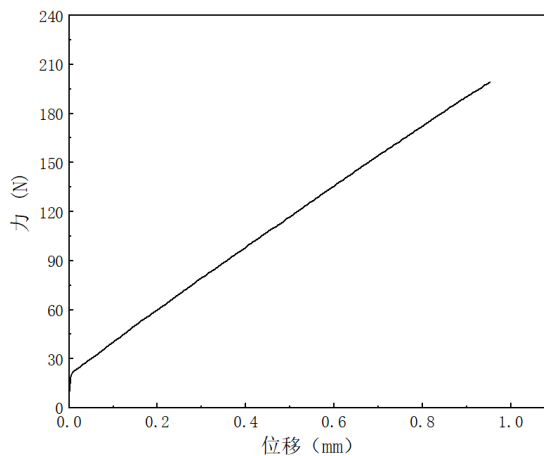
图5-10掌压刚度测试实验

5.前保支架安装点刚度试验

将龙门试验机的移动中联板移动到前保支架安装点的适当位置，再移动测试推拉夹具使之与前保支架安装点中心对齐，固定夹具，设置实验测试速度为5mm/min，最大载荷为200N，保持加载10分钟，加载方向垂直向下（-Z方向），开始实验，结果如图5-11。



(a) 前保支架安装点刚度实验加载位置



(b) 前保支架安装点刚度实验力-位移曲线

图5-11前保支架安装点刚度试验

根据上述实验结果得到相应的实验曲线，最后进行实际刚度计算，结果汇总后见表5-2，表中该数据可以看出，本产品在企业设计要求条件下满足刚度、强度性能要求，均保持良好性能，证明本产品设计具有实际意义。

表 5-2 力学性能实验结果

实验内容	企业要求	实验结果	评判结果
锁扣极限拉力	外观完好无裂纹	外观完好无裂纹	符合要求
前大灯安装点1刚度	≥200N/mm	203.5 N/mm	符合要求
前大灯安装点2刚度	≥300N/mm	705.9 N/mm	符合要求
掌压刚度测试	≥150N/mm	153.1 N/mm	符合要求
前保支架安装点刚度	≥200N/mm	210.5 N/mm	符合要求

5.3 本章小结

本章节详细阐述了汽车前端框架产品设计优化后的实验验证过程，具体介绍了从注塑成型过程、设备、试模样品的制备到力学性能评估的全面验证。

（1）通过精确的模具安装、物料干燥处理和优化的工艺参数设置，保证了注塑过程的高效与稳定。注塑成型试验结果表明，试模样品经检查表明其外观质量优良，无明显缺陷，关键安装点尺寸精度控制在±0.5mm范围内，满足了企业对成型质量的要求。

（2）使用龙门式伺服电脑式万能材料试验机对注塑产品进行力学性能试验，包括锁扣安装区域极限拉力测试、大灯安装点、掌压作用区域及前保支架等关键部位进行刚度实验。实验方案严格遵循实际工况条件下的载荷要求，以确保模拟的真实性与准确性。所有实验结果均显示，设计的产品不仅在刚度和强度方面达到了企业的设计标准，而且在承受极端载荷时表现出色，没有出现裂纹或破损现象。

总结来说，通过对注塑成型工艺验证以及对汽车前端模块产品力学性能的试验，证实了该设计方案不仅能有效满足汽车主机厂尺寸精度要求以及对刚度、强度性能的需求，还展现了良好的可靠性和实用性，证明了该设计方案具有一定的实践意义。

第6章 结论与展望

6.1 研究总结

随着汽车产业的快速发展，汽车给人类带来极大的便捷，同时其尾气排放也对环境造成了越来越严重的污染，当下要解决这一问题，需要发展新的能源替代品，或者开发轻量化技术，提高能源利用效率，而新能源的发展任重道远，相对而言，轻量化技术是现阶段实现节能减排较好的途径。

本文以汽车前端模块为研究对象，从选材到轻量化设计以及其注塑成型工艺参数优化进行相关研究。首先，研究常用的PPLGF各PA6GF轻量化材料在不同温度、不同应变率及其耦合作用下的拉伸性能，选取30%含量PA6GF30材料作为汽车前端模块材料；基于Critic评判准则完成了汽车前端模块多目标优化的本体结构设计，以此为基础设计带金属嵌件汽车前端模块，并完成尺寸优化；基于Mold flow软件完成汽车前端模块注塑成型过程模拟，设计仿真实验组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；最后设计实验验证了优化后成型工艺参数的可行性和前端模块力学性能可靠性。本文的主要研究成果如下：

(1) 探究了PA6GF30、PA6GF40、PA6GF50、PPLGF30、PPLGF40材料在不同温度、不同应变率以及二者耦合作用下的拉伸力学性能，结果表明玻璃含量的增多会使拉伸强度增加。随着温度升高或应变率减小，不同材料的拉伸强度均有降低，特别是低应变率高温度耦合作用下的削弱效果更加明显。综合考虑材料强度及成本，选取PA6GF30为前端模块材料。

(2) 基于CATIA创建的几何模型在HyperMesh软件建立了汽车前端模块的有限元模型，通过定义载荷工况进行单目标拓扑优化，得到了各个工况的柔顺度值，并基于Critic评判准则计算出各个工况的权重比，对汽车前端模块进行多目标拓扑优化，根据优化结果设计出全塑料结构产品和带有金属嵌件结构产品，对比发现全塑料结构产品性能无法满足性能要求，金属嵌件结构产品性能都满足设计要求，厚度优化后，在保证性能的同时实现6.8%减重比，达到企业轻量化需求。

(3) 基于Mold flow软件建立了四浇口、五浇口、六浇口三种不同注塑成型方案，综合对比不同方案分析结果，选择六个浇口方案作为最终方案，有较高的成型效率也保证较好的填充效果，熔接线较短且大都分布在加强筋上，同时所需最大锁模力最小；为

降低产品翘曲变形量，选取模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间、冷却时间和注射时间为试验因素，创建了6因素5水平25组正交试验，并结合极差分析，确定各因素影响程度的主次顺序，并找到了最优工艺参数组合A4B3C5D3E5F2，进一步改变保压方式，翘曲变形量最终降低到2.171mm，比开始的最大翘曲变形量降低了38.5%。

(4) 用优化后的注塑工艺参数对设计的汽车前端模块进行实物注塑，试模得到的制件质量较好，能满足检具检测。然后利用试模得到的产品，对关键工况进行力学性能试验，结果表明各个工况下的试验结果均满足产品设计要求。

6.2 研究展望

本文研究的带金属嵌件的汽车前端模块在轻量化设计研究中取得一定成果，但是由于本人水平、成本、时间和实验条件等限制，还存在一定不足之处，希望在以后的研究中能够进一步改善：

(1) 由于设备和成本的限制,本文只对PA6GF30、PPLGF30等五种复合材料进行不同温度与不同应变率下的基础拉伸力学性能研究，后续在条件允许的情况下可进一步对更多含量种类的纤维增强复合材料进行试验，包括显微镜观察其微观结构变化，此外，还可以结合弯曲试验、冲击试验、耐腐蚀性试验等研究。

(2) 汽车前端模块的实际工况较为复杂，本文在优化过程只考虑了八个难以满足设计条件经典的工况；注塑成型方面，不同的嵌件结构和工艺孔尺寸对结构强度也有影响，后续在时间充足的条件下可进一步研究内容。

(3) 由于实验仪器、时间和成本有限，本文的力学性能实验只对仿真分析中难以满足结果的工况进行验证，为保证前端模块实验的准确性，在条件允许的情况下可以使用整车进行全工况实验。

参考文献

- [1]范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014,5(01):1-16.
- [2]曾荣昌柯伟徐永波韩恩厚朱自勇. Mg合金的最新发展及应用前景[J]. 金属学报, 2001(07):673-685.
- [3]朱平张宇葛龙林忠钦. 基于正面耐撞性仿真的轿车车身材料轻量化研究[J]. 机械工程学报, 2005(09):207-211.
- [4]李光霁, 刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述[J]. 材料科学与工艺, 2020,28(05):47-61.
- [5]李扬, 刘汉武, 杜云慧, 等. 汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向[J]. 材料导报, 2011,25(13):101-104.
- [6]唐远寿, 司宇, 徐正萌, 等. 超高强度钢在汽车轻量化中的应用及研究进展[J]. 金属热处理, 2023,48(10):247-254.
- [7]Bildirici D, Topaç M M, Polat K, et al. Failure analysis-based mass reduction of an aluminium alloy engine mounting bracket using Design of Experiments approach[J]. Engineering Failure Analysis, 2024,166:108927.
- [8]Joo K K. Light-weight design and fatigue characteristics of automotive knuckle by using finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021,35(7):2989-2995.
- [9]Zhang M, Wang C, Zhang S, et al. Enhanced aging precipitation behavior and mechanical properties of 6022 Al - Mg - Si alloy with Zr addition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022,840:142957.
- [10]李翔, 唐建国, 张新明, 等. 温变形对汽车车身用6061铝合金自然时效及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016,26(01):1-6.
- [11]Yang Y, Zhao Y, Kai X, et al. Effects of (TiB₂+ ZrB₂) nanoparticles on microstructure and properties of 7055Al matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2018,34(11):1323-1332.
- [12]潘复生, 蒋斌. 镁合金塑性加工技术发展及应用[J]. 金属学报, 2021,57(11):1362-1379.

- [13]李落星, 周佳, 张辉. 车身用铝、镁合金先进挤压成形技术及应用[J]. 机械工程学报, 2012,48(18):35-43.
- [14]Yi Q, Tang C. Environmental impact assessment of magnesium alloy automobile hub based on life cycle assessment[J]. Journal of Central South University, 2018,25(8):1870-1878.
- [15]张龙, 张开文, 杨怡. 镁合金在商用车仪表板管梁上的应用[J]. 汽车实用技术, 2024,49(11):115-119.
- [16]全球首例镁合金半固态注射成形汽车车轮试制成功[J]. 铸造工程, 2025,49(02):16.
- [17]冶金与材料工程学部中国工程院化工, 中国材料研究学会. 中国新材料技术应用报告[M]. 化学工业出版社.
- [18]Bambach M R. Fibre composite strengthening of thin steel passenger vehicle roof structures[J]. Thin-Walled Structures, 2014,74:1-11.
- [19]陈静, 彭博, 王登峰, 等. 碳纤维增强复合材料电池箱轻量化设计[J]. 汽车工程, 2020,42(02):257-263.
- [20]卢强, 沈琴, 刘钢, 等. 碳纤维铝蜂窝复合材料汽车保险杠横梁轻量化设计[J]. 现代制造工程, 2023(03):77-82.
- [21]魏晓娟. 玻璃纤维增强聚酰胺类热塑性复合材料能使汽车地板减重33%[J]. 现代塑料加工应用, 2015,27(01):21.
- [22]Xue Y, Zhao H, Zhang Y, et al. Design and multi - objective optimization of the bumper beams prepared in long glass fiber - reinforced polypropylene[J]. Polymer Composites, 2021,42(6):2933-2947.
- [23]周志明, 汪学静, 彭曼绮, 等. 玻璃纤维增强塑料翼子板注塑成型研究及模具工艺设计[J]. 塑料工业, 2022,50(02):93-96.
- [24]Danshi L, Xiangfan F. Lightweight design approach of an LFT-metal multi-material vehicle door concept[J]. Automotive and Engine Technology, 2022,7(3-4):385-407.
- [25]方鲲, 张国荣, 吴丝竹, 等. 长纤维增强热塑性复合材料在汽车零配件上的应用进展[J]. 中国塑料, 2009,23(03):13-18.
- [26]翟洪飞, 侯俊剑, 房占鹏, 等. 基于拓扑优化的轮毂电机壳体结构轻量化研究[J]. 机械设计, 2022,39(01):105-110.
- [27]Shaikh W, Wang L, Yang S, et al. Topology Optimization and Fatigue Analysis for Lightweight Design of Vehicle Differential Case[R].SAE Technical Paper, 2017.

-
- [28] Shah V, Pamwar M, Sangha B, et al. All-terrain vehicle chassis design using multi-material topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2023,66(3):45.
- [29] 李仕生, 袁琼. 连杆结构拓扑优化设计及其对发动机系统稳定性的影响[J]. *机械设计与制造*, 2022(03):55-59.
- [30] Nandanwar T, Waghela K, Gupta E, et al. Topology Optimization of the Bell Crank & Brake Pedal: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021[C]. IOP Publishing.
- [31] 邢广鹏, 孙志刚, 崔向敏, 等. 多工况载荷下航空发动机支架拓扑优化设计[J]. *航空动力学报*, 2020,35(11):2248-2262.
- [32] 王志鹏, 刘辉, 操建. 四旋翼无人机机架结构多性能约束拓扑优化设计[J]. *机械设计与研究*, 2022,38(06):173-176.
- [33] 曹伟, 任梦柯, 刘春太, 等. 注塑成型模拟理论与数值算法发展综述[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020,50(06):667-692.
- [34] 王少波, 邓淑桦, 陈安伏, 等. 精密注塑成型方法及数值模拟分析的新进展[J]. *塑料*, 2025,54(01):154-160.
- [35] 宋满仓, 颜克辉. 薄壁注塑成型数值模拟技术的发展现状[J]. *塑料科技*, 2006(01):51-54.
- [36] 印磊, 苏小平, 潘杰. 基于NCGA的汽车外饰件注塑成型工艺参数多目标优化[J]. *塑料工业*, 2024,52(08):95-100.
- [37] 刘青宜, 郭谭娜, 王宁. 基于Moldflow电机外壳注塑成型质量分析[J]. *塑料科技*, 2023,51(11):80-84.
- [38] Lo C. Analysis of injection molding for computer cooling fans by Taguchi method and grey relational analysis[J]. *Filomat*, 2016,30(15):4199-4211.
- [39] Wang B, Cai A. Influence of mold design and injection parameters on warpage deformation of thin-walled plastic parts[J]. *Polimery*, 2021,66(5):283-292.
- [40] 王金荣, 王权, 赵笑梅. 基于Moldflow的带金属嵌件汽车安全带卡扣浇口优化设计[J]. *塑料工业*, 2021,49(S1):103-108.
- [41] Wang J, Li H, Li F, et al. Insert-injection moulding and post-thermal treatment of hybrid continuous and discontinuous glass-fibre-reinforced polyamide composite products[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025,188:108534.

- [42]Liu C J, Huang X K, Wu Q P, et al. Effect of Process Parameters on Warpage of Printer Board with Metal-Insert[J]. Advanced Materials Research, 2014,1004:1141-1146.
- [43]刘成娟, 吴秋平, 何海琴, 等. 注塑浇口对带金属嵌件打印机板翘曲变形的影响[J]. 塑料工业, 2014,42(04):35-38.
- [44]谢茂青, 王雷刚. 空调面盖模内装饰成型注塑CAE优化分析[J]. 塑料工业, 2024,52(10):67-74.
- [45]唐程光. 某MPV车型前端模块结构和性能优化设计研究[D]. 合肥工业大学, 2017.
- [46]庄京彪. 汽车前端模块设计研究[J]. 汽车零部件, 2022(04):47-53.
- [47]赵高明. 前端支架的模块化发展[J]. 汽车与配件, 2010(Z1):35-39.
- [48]田亚梅, 化塑汇. 汽车非金属材料轻量化应用指南[M]. 1. 机械工业出版社.
- [49]Wang Q, Wang J, Wang A, et al. Effect of strain rate and temperature on the tensile properties of long glass fiber-reinforced polypropylene composites[J]. Polymers, 2023,15(15):3260.
- [50]秦唯铭, 杜冰, 朱绍伟, 等. 环境温度对长玻纤增强聚丙烯单向拉伸力学性能的影响[J]. 材料导报, 2023,37(20):241-246.
- [51]李洋舟. 人造岗石废渣/聚丁二酸丁二醇酯复合材料的制备与性能研究[D]. 桂林理工大学, 2022.
- [52]孙宝岗, 刘千, 张东霞, 等. RTM用环氧树脂R605低温性能研究: 第17届全国复合材料学术会议, 中国北京, 2012[C].
- [53]张顶顶, 张福华, 杨吉祥, 等. 聚酰胺胺改性碳纤维/尼龙复合材料制备及性能[J]. 复合材料学报, 2021,38(02):406-413.
- [54]孟飞. 动车组前端承载结构拓扑优化及耐撞性分析[D]. 大连交通大学, 2023.
- [55]Rietz A. Sufficiency of a finite exponent in SIMP (power law) methods[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001,21:159-163.
- [56]Stolpe M, Svanberg K. An alternative interpolation scheme for minimum compliance topology optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001,22:116-124.
- [57]唐程光, 夏仕朝, 李令兵. 混合动力汽车NVH性能分析研究[J]. 科技展望, 2016, 26(30):104-105.
- [58]马小姝, 李宇龙, 严浪. 传统多目标优化方法和多目标遗传算法的比较综述[J]. 电

- 气传动自动化, 2010,32(3):48-50, 53.
- [59]张玉, 魏华波. 基于CRITIC的多属性决策组合赋权方法[J]. 统计与决策, 2012(16):75-77.
- [60]宋冬梅, 刘春晓, 沈晨, 等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015,45(04):1-9.
- [61]吴煜. 微注塑成型中熔体粘度对充模流动影响的实验研究[D]. 大连理工大学, 2010.
- [62]韩先洪. 成型充填过程中非等温非牛顿粘弹性流动数值模拟[D]. 大连理工大学, 2007.
- [63]刘春太, 陈静波, 王利霞, 等. 注射成型过程中非牛顿塑料熔体的粘度模型[J]. 中国塑料, 1997(01):48-52.
- [64]李海丰, 乔鹏程, 任伊锦, 等. 塑料停车楔注塑成型模拟及模具设计[J]. 塑料, 2024,53(03):34-38.
- [65]周大路, 匡唐清. Moldflow注塑模流分析从入门到精通[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [66]Wang J, Simacek P, Advani S G. Use of Centroidal Voronoi Diagram to find optimal gate locations to minimize mold filling time in resin transfer molding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016,87:243-255.
- [67]刘淑芬, 宋晓龙, 杨胜, 等. 基于Moldflow的浇注系统对塑件翘曲的影响研究[J]. 制造业自动化, 2016,38(05):24-26.
- [68]蒋易立. 基于Pro/ENGINEER的注塑模具浇注系统二次开发[D]. 华南理工大学, 2011.
- [69]陶哲, 季宁, 么大锁, 等. 基于CAE的复杂薄壁防爆球冷流道注塑模具优化设计[J]. 工程塑料应用, 2023,51(05):86-92.
- [70]林洁瑜. 手机塑料模具的浇口选择[J]. 机械工程师, 2009(07):117-119.
- [71]胡传荣李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [72]邱轶兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [73]Li C, Fan X, Guo Y, et al. Multi-objective optimization of injection molded parts with insert based on IFOA-GRNN-NSGA-II[J]. Journal of Polymer Engineering, 2022,42(6):563-574.
- [74]Grujicic M. Injection Overmolding of Polymer - Metal Hybrid Structures[J]. Joining of

- Polymer - Metal Hybrid Structures: Principles and Applications, 2018:277-305.
- [75]Dang X. General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2014,41:15-27.
- [76]Kitayama S. Process parameters optimization in plastic injection molding using metamodel-based optimization: a comprehensive review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022,121(11):7117-7145.
- [77]Radhwan H, Nasir S M, Rashidi M M, et al. Optimization Parameters to Reduce the Warpage Defect of Plastic Injection Molding Process for A Thin-Shell Part Using Design of Experiment[J]. IOP conference series. Materials Science and Engineering, 2019,551(1):12027.
- [78]何佳东. 注塑工艺对微结构制品光学性能影响研究[D]. 北京化工大学, 2023.
- [79]李熹平, 刘傅文, 王爽, 等. 金-塑微结构注射成型仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2016,52(22):61-69.
- [80]张晓彬, 刘斌. 注塑工艺参数优化的数值模拟分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013,34(04):361-366.
- [81]Izadi O, Silani M, Mosaddegh P, et al. Warpage and bending behavior of polymer - metal hybrids: experimental and numerical simulations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018,98(1-4):873-885.
- [82]Azaman M D, Sapuan S M, Sulaiman S, et al. Shrinkages and warpage in the processability of wood-filled polypropylene composite thin-walled parts formed by injection molding[J]. Materials & Design (1980-2015), 2013,52:1018-1026.

致谢

惊风飘白日，光景西驰流。转眼间我的硕士研究生涯即将画上句号，回首这段充实而又充满挑战的旅程，心中充满了感激与不舍。这一程，离不开给予我帮助和支持鼓励的老师、同学、亲人，行文至此，谨以最朴实的话语向诸位致以最诚挚的感谢！

首先，我要衷心感谢我的导师王建彬教授和周超群高工。在整个研究生阶段，您不仅是我在学术道路上的引路人，更是我人生路上的灯塔。从课题的选择到方案制定，再到最终论文的撰写与修订，您的每一次悉心指导都让我受益匪浅。您严谨的治学态度、深厚的学术造诣以及对科研工作的热情深深地感染了我，并将激励我在未来的职业生涯中不断追求卓越，在此，谨向恩师致以崇高的敬意和衷心的感谢！教诲如春风，师恩似海深，愿恩师桃李满天下，声名传四方！

其次，我要感谢实验室的兄弟姐妹们。在日常的学习和研究中，我们共同探讨问题、分享经验，是你们的支持和鼓励使我度过了一个又一个难关。特别要感谢课题组王巧玉、张伟、任思源、张红松等同学，感谢有你们相伴同行的日子，让这段求学生涯变得更加丰富多彩。还要感谢在恒信公司开发设计的诸位同事，感谢你们给我提供的帮助，让我快速了解产品知识和专业技能，一年多实习经历是我成长最快的时候，与你们共同进步的时光无比难忘，也感谢贵公司提供的实验平台，助力我完成论文中的关键试验。

此外，感谢学校为我提供了如此优秀的学习环境和资源平台。无论是先进的实验设备，还是丰富的图书馆藏书，都为我的研究工作提供了极大的便利。

最后，我要感谢我的家人。无论是在物质上还是精神上，你们始终是我坚实的后盾。每当我遇到挫折想要放弃时，总是你们用温暖的话语给我力量，让我重新振作起来继续前行。没有你们的理解和支持，就没有今天的我。

在此，谨以这篇论文作为我对所有关心、支持和帮助过我的人的感恩之作。愿我们在未来的日子里都能实现自己的梦想，创造更加美好的明天！

尚德敏学 唯实惟新

