

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.10.013

基于CAE与遗传算法的汽车B柱外饰板轻量化设计

陈毅超¹, 王辉^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070;
3. 湖北隆中实验室, 湖北襄阳 441000)

摘要: 以某品牌汽车B柱外饰板为研究对象, 基于CAE分析技术对B柱外饰板结构进行轻量化设计。首先利用ANSYS软件对原始模型进行仿真, 在此基础上将B柱外饰板受力工况等效为简支梁模型并计算得到壁厚范围为2.67~2.72 mm, 结合实际生产特点最终确定饰板件主要厚度为2.7 mm, 随后在CATIA软件中建立轻量化设计后的模型并再次进行有限元仿真, 得到饰板在设定的受力工况下的形变量为1.485 1 mm, 符合轻量化设计的刚度要求。为了进一步验证设计的合理性, 从实际生产出发, 将翘曲变形量作为成型质量评价指标, 运用正交试验法设计了六因素五水平的工艺组合方案, 并采用Moldflow软件进行模流仿真, 接着基于Matlab平台建立BP神经网络模型, 将其作为适应度函数, 通过遗传算法(NSGA-II)进行全局寻优, 得到最优工艺参数组合下轻量化设计前后两模型的最大翘曲变形量分别为2.568 mm和2.353 mm, 制件质量分别为104.6 g和94.44 g。结果表明, 该轻量化设计减重达9.71%并使翘曲变形量减小了8.37%, 较好地实现了轻量化的目标, 有效提高了制件的成型质量。

关键词: 轻量化; CAE分析; 正交试验; BP神经网络; 遗传算法

中图分类号: TQ320.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)10-0085-07

Lightweight Design of Automotive B-pillar Exterior Panel based on CAE and Genetic Algorithm

Chen Yichao¹, Wang Hui^{1,2,3}

(1. School of Automotive and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441000, China)

Abstract : The B-pillar exterior panel of a certain brand automobile was chosen as the research subject for conducting a lightweight design of its structure using CAE analysis technology. Firstly, ANSYS software was used to simulate the original model, based on which the force condition of the B-pillar exterior panel was equivalently transformed into a simple supported beam model and the range of the wall thickness was calculated to be 2.67-2.72 mm. Taking into account the characteristics of actual production, the final determination for the main thickness of the panel was 2.7 mm. Afterwards, the lightweight design model was created in CATIA software, followed by another round of finite element simulation. The obtained deformation value of the panel under the prescribed loading condition was 1.485 1 mm, which satisfied the stiffness requirements of the lightweight design. To further validate the rationality of the design, starting from actual production, the warping deformation was taken as the evaluation indicator for forming quality. A six-factor and five-level process combination scheme was designed using the orthogonal test method, and Moldflow software was used to carry out the mold flow simulation. Then a BP neural network model was constructed based on the Matlab platform as the fitness function, and global optimization was carried out by the genetic algorithm (NSGA-II). Under the optimum combination of process parameters, the maximum warpage of the two models before and after the lightweight design is 2.568 mm and 2.353 mm, and the weight of the part is 104.6 g and 94.44 g. The results indicate that the lightweight design achieves a weight reduction of 9.71% and results in an 8.37% reduction in warping, effectively realizing the goal of lightweight design and significantly enhancing the molding quality of the parts.

Keywords : lightweight ; CAE analysis ; orthogonal test ; BP neural network ; genetic algorithm

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775398, 52175360), 湖北省重点研发计划项目(2022BAA073), 中国科协青年人才托举工程项目(2021QNRC001), 中国博士后科学基金项目(2022T150278, 2022M710062), 武汉理工大学襄阳技术转移中心科技产业化资金项目(WXCJ-20220005), 襄阳高新区科技计划项目(202203), 湖北省科技人才服务企业项目(2023DJC055)

通信作者: 王辉, 博导, 教授, 主要研究方向为汽车复合材料零部件轻量化技术

收稿日期: 2023-07-25

引用格式: 陈毅超, 王辉. 基于CAE与遗传算法的汽车B柱外饰板轻量化设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(10): 85-91.

Chen Yichao, Wang Hui. Lightweight design of automotive B-pillar exterior panel based on CAE and genetic algorithm[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10): 85-91.

研究表明,汽车质量每减轻10%,油耗可以减少6%~8%,二氧化碳排放可以降低13%^[1],汽车的轻量化势在必行。目前,“以塑代钢”已经成为实现汽车轻量化的重要手段之一,统计数据显示,汽车塑料件占整车质量的比重已超过10%,因此汽车塑料件的“轻量化”备受关注^[2]。B柱外饰板作为汽车外部的重要塑料结构部件,它的轻量化不仅可以减轻整车质量,还可以节省制造材料、节约能源使用。对于B柱外饰板的轻量化,薄壁化技术是可行的重要方案之一,即在满足零件工艺性能的同时对零件的壁厚进行合理的减薄,实现减重和节约制造成本的目的^[3]。

然而,在注塑过程中,零件的减薄会使制件长径比增大,其成型性会降低,同时在其成型过程中出现的翘曲变形等缺陷也会变得难以预测^[4]。而翘曲变形会极大影响制件的装配和使用性能^[5],故在进行零件轻量化设计过程中应以翘曲变形量最小化为约束,综合考虑零件的工艺性能与使用性能。在降低塑料件翘曲的研究中,正交设计试验方法的运用非常广泛,它可以在相对较少的试验次数和条件下获得全面、高质量的试验数据,节省试验成本和时间^[6-10]。

为了实现B柱外饰板的轻量化设计,并遵循翘曲变形量最小化的约束条件,笔者在理论分析的基础上采用了CATIA软件进行B柱外饰板的轻量化结构设计,并运用ANSYS软件对其进行了静力学仿真,以验证其刚度是否符合要求。最后,从成型工艺的角度出发,利用Moldflow软件以饰板件的翘曲变形量作为成型质量的评价指标,对原始模型和经过轻量化设计后的模型进行了正交试验分析,并比较了它们的翘曲变形量,以验证轻量化设计的合理性。这些结果为B柱外饰板件的轻量化设计和生产提供了支持。

1 B柱饰板轻量化设计

1.1 原始模型刚度仿真

图1为某品牌汽车B柱外饰板的设计图,外饰板设计尺寸为91.9 mm×430.7 mm×23.8 mm,厚度主要集中在3 mm。该外饰板的主要结构包括定位筋、翻边和底板3个部分。其中,定位筋部分的作用是限定骨架的安装位置,并提高B柱外饰板的结构强度。翻边部分则具有增加饰板的刚度和强度,减少B柱外饰板在行驶过程中的振动和变形的作用。底

板部分是饰板的底部结构,支撑整个B柱外饰板。该饰板选用的材料为东丽株式会社生产的牌号为TOYOLAC SZA05-003的聚甲基丙烯酸甲酯+丙烯腈-苯乙烯-丙烯酸酯塑料(PMMA+ASA),其拉伸弹性模量为1 850 MPa,泊松比为0.38,剪切弹性模量为670.29 MPa。

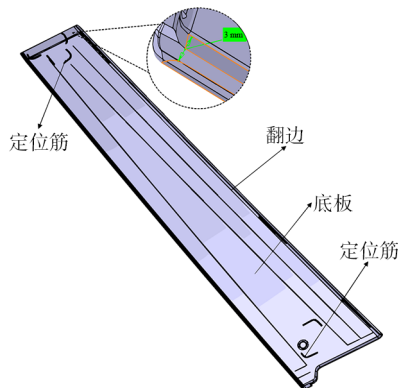


图1 某品牌汽车B柱外饰板的设计图

为了进行后续理论分析,首先对原始模型进行有限元仿真。依据企业提供的仿真准则,利用有限元分析软件,用直径为5 mm的圆盘垂直接触饰板外表面,并施加260 N的力,计算立柱饰板的最大受力变形量。将模型导入ANSYS软件的静力学仿真模块,在工程数据中自定义PMMA+ASA材料,设置其拉伸弹性模量为1 850 MPa,泊松比为0.38。

为了确保仿真的准确性,设置网格单元尺寸为1 mm,划分得到节点数为1 293 908,单元数为854 443。对饰板与两骨架连接处的定位筋分别设置“远程位移”,约束其除“旋转X”外的5个自由度,同时在圆盘表面施加“力”,大小为260 N,方向垂直圆盘向下。设置载荷和约束如图2所示。

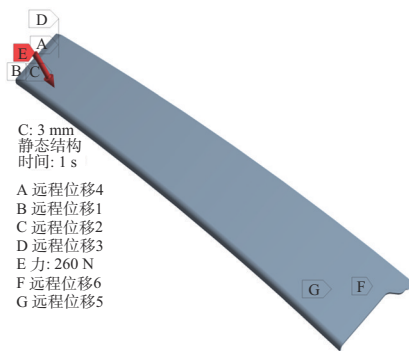


图2 饰板仿真载荷和约束设置

仿真结果如图3所示,可见原始模型的最大受力变形量为1.172 7 mm,这为后续的理论分析提供了参考。

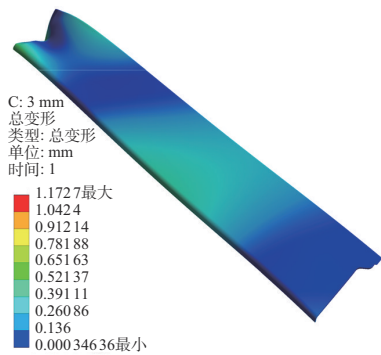


图3 饰板受力变形量

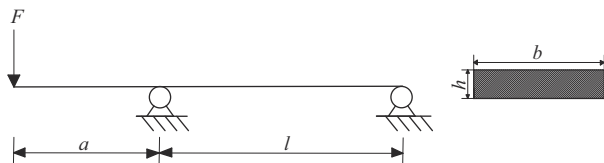
1.2 理论分析

根据用户的日常接触频次大小,立柱饰板可以划分为3个不同区域,即高接触区域、中接触区域和低接触区域,其中B柱外饰板属于中接触区域^[1]。表1提供了在上述载荷作用下有关各区域有限元分析的标准和判断依据。

表1 立柱饰板仿真结果判断依据

区域	受力变形量/mm
高接触区域	≤0.5
中接触区域	≤1.5
低接触区域	≤2.5

在进行刚度的数学计算时,可以使用简化的弹性力学模型来估算刚度与壁厚之间的关系。常用的数学公式是基于梁理论,即使用 Euler-Bernoulli 梁理论或其他适用的梁模型进行计算。根据原始模型仿真变形结果,将B柱外饰板抽象为一简支梁,其具体尺寸及受力如图4所示。



图中, F 为作用力, a 为作用力与左支点间距离, l 为左右支点间距离, h 为零件的壁厚, b 为横截面宽度。

图4 简支梁尺寸及受力

经过分析与计算,零件的最大受力形变量 w 可由公式(1)或公式(2)确定,零件的壁厚 h 可由公式(3)确定,公式(1)至公式(3)中 E 代表零件材料的拉伸弹性模量, I 代表零件的截面惯性矩。由于作用力 F 、作用力与左支点间距离 a 、左右支点间距离 l 及横截面宽度 b 均不变,可见零件的壁厚与受力形变量成一比例关系。上述仿真结果显示,当壁厚 h 为3 mm时受力形变量 w 为1.172 7 mm,由此计算得当受力形变量 w 为1.5 mm时壁厚 h 约为2.76 mm。此外,

由于在实际设计中通过改变底板边缘的翻边可以提升5%~10%的刚度,因此壁厚可以相应再减小一些,故最终确定厚度范围为2.67~2.72 mm。

$$w = \frac{Fal^2}{9\sqrt{3}EI} \quad (1)$$

$$w = -\frac{Fa^2(l+a)}{3EI} \quad (2)$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{12I}{b}} \quad (3)$$

1.3 轻量化模型设计及仿真

根据上述理论分析,结合实际生产特点确定饰板件主要厚度为2.7 mm。将原始模型导入CATIA软件中,利用创成式外形设计模块中的偏移面、提取面、接合等操作,建立了底板主要厚度为2.7 mm的饰板模型。新模型在结构上完全继承了原始模型的外观及整体尺寸大小,同时保持定位筋相对位置及尺寸不变,并适当增加了底板边缘翻边的尺寸及厚度,一定程度上提高了其结构性能。修改后的模型结构如图5所示。

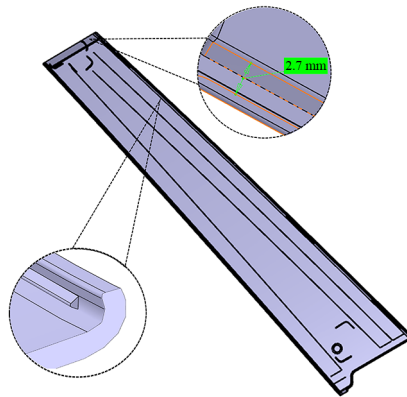


图5 轻量化饰板的模型结构

将新模型导入ANSYS软件,采用相同的方法进行有限元仿真,结果如图6所示。可见新模型的

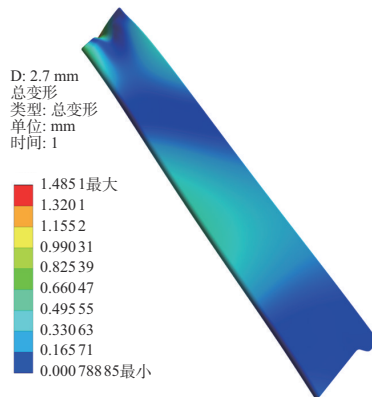


图6 新模型受力形变量

最大受力形变量为 1.485 1 mm,符合 B 柱外饰板刚度要求。

2 建立分析模型

2.1 网格划分及流道建立

为提高模流分析的精度,首先在 CAD doctor 中对原始模型和轻量化设计后的模型的圆角、沟槽进行修复,避免丢失面、自相交环路等缺陷出现。在 Moldflow 中对两模型进行双层面网格划分,网格尺寸为 2,得到三角形单元个数分别为 63 540 个和 63 494 个。创建得到的双层面网格模型如图 7 所示。在网格统计中进行检查,所创建的两个网格模型无自由边等缺陷,匹配率均为 93.1%,网格质量好,可以进行后续分析。检查结果如图 8 所示。

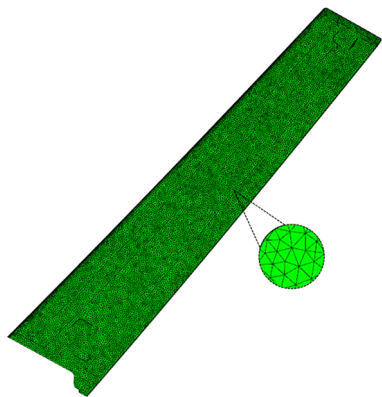


图7 有限元分析模型图示例

边细节:		边细节:	
自由边	0	自由边	0
共用边	95318	共用边	95241
多重边	0	多重边	0
取向细节:		取向细节:	
配向不正确的单元	0	配向不正确的单元	0
交叉点细节:		交叉点细节:	
相交单元	0	相交单元	0
完全重叠单元	0	完全重叠单元	0
匹配百分比:		匹配百分比:	
匹配百分比	93.1%	匹配百分比	93.1%
相互百分比	91.9%	相互百分比	91.3%
适合双层面分析。		适合双层面分析。	

图8 两模型的网格质量检查结果

考虑到本研究中 B 柱外饰板的厚度均在 3 mm 及以下,壁厚较小,成型需要较大的注塑压力,采用一模多腔容易导致腔室之间压力不均衡,从而导致生产出的零件存在缺陷和变形等问题,而单腔可以更好地控制零件的品质和稳定性,故采用一模一腔。根据 B 柱外饰板结构进行流道设计,采用冷流道和侧浇口,为了减少进料口的痕迹和瑕疵,设置侧浇口入口直径为 1 mm,拔模角为 30°。根据流道位置及模具结构,采用带有 14 个入口的冷却回路。

设置完成的浇注系统和冷却系统如图 9 所示。

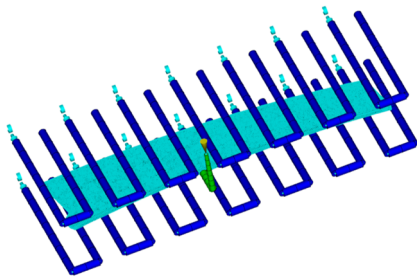


图9 浇注系统与冷却系统

2.2 确定工艺参数

在注塑中,工艺参数及其水平的选取对于减小翘曲变形量有重要作用^[12-13]。根据前期尝试,当零件上冷却水道温度与下冷却水道温度相同时,零件在 Z 轴正方向的翘曲较为严重,而当下冷却水道温度高于上冷却水道温度时,翘曲变形量减小明显,两者的对比如图 10 所示。综合考虑填充、保压、冷却 3 个过程,选取熔体温度(A)、保压压力(B)、保压时间(C)、上冷却水道温度(D)、下冷却水道温度(E)和冷却时间(F) 6 个关键工艺参数为研究对象,其它参数均采用 Moldflow 的推荐值。

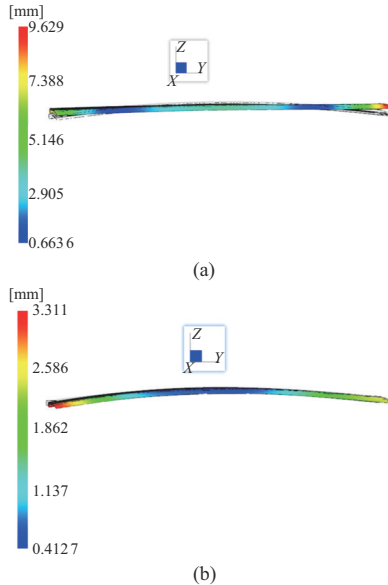


图10 上下冷却水道温度相同与不同时的翘曲变形对比图

3 正交试验与结果分析

3.1 正交试验方案及结果

在试验中,确定了六因素五水平的正交试验方案,结果见表 2。选用 $L_{25}(5^5)$ 正交试验表,设计了 25 组试验在 Moldflow 软件中进行模拟,以原始模型的翘曲变形量(W_1)、轻量化设计后的模型的翘曲变形

量(W_2)为质量指标,试验结果见表3。

表2 正交试验因素水平表

水平	因素					
	A/°C	B/MPa	C/s	D/°C	E/°C	F/s
1	210	60	10	15	75	10
2	220	70	15	20	80	17
3	230	80	20	25	85	24
4	240	90	25	30	90	31
5	250	100	30	35	95	38

表3 正交试验方案及结果

组别	A	B	C	D	E	F	W_1/mm	W_2/mm
1	1	2	3	4	5	1	3.878	4.957
2	2	3	4	5	1	2	4.500	6.254
3	3	4	5	1	2	3	4.440	3.120
4	4	5	1	2	3	4	6.323	4.325
5	5	1	2	3	4	5	3.057	4.410
6	1	3	5	2	4	1	3.817	3.796
7	2	4	1	3	5	2	7.610	5.078
8	3	5	2	4	1	3	3.204	3.553
9	4	1	3	5	2	4	4.999	6.721
10	5	2	4	1	3	5	3.838	3.537
11	1	4	2	5	3	1	3.430	3.910
12	2	5	3	1	4	2	7.826	5.309
13	3	1	4	2	5	3	3.429	4.659
14	4	2	5	3	1	4	3.998	5.811
15	5	3	1	4	2	5	3.148	3.818
16	1	5	4	3	2	1	3.878	3.367
17	2	1	5	4	3	2	5.317	6.778
18	3	2	1	5	4	3	3.231	4.586
19	4	3	2	1	5	4	7.021	4.793
20	5	4	3	2	1	5	3.256	3.284
21	1	3	5	4	2	1	4.173	5.626
22	2	4	1	5	3	2	3.930	3.469
23	3	5	2	1	4	3	8.169	5.822
24	4	1	3	2	5	4	3.502	4.127
25	5	2	4	3	1	5	3.631	5.372

3.2 近似模型的建立与优化

上述选取的6个因素与翘曲变形量之间可能存在高度非线性关系。针对此类非线性问题的优化,许多学者提出了一种解决方法,即通过建立近似模型来进行求解。具体而言,该方法将设计变量在整个变量区间内进行取值,并通过拟合来建立输入变量和目标函数之间的函数模型。最后,通过应用智能优化算法来求解这个近似模型,以找到优化的最佳解^[14-15]。

当遇到难以运用精确的数学方程式进行建模的非线性系统时,BP神经网络是一种被证明有效的方法,可用于建立系统之间的关系并处理未知模型。它通过训练过程,利用输入和输出数据之间的关联来建模和预测未知模型的输出结果^[16]。对于复

杂系统的参数优化问题,遗传算法具有收敛快、通用性强等优点^[17]。因此,笔者采用BP神经网络构建近似模型,并运用遗传算法进行寻优,分别得到轻量化设计前后的两饰板模型的最小翘曲变形量并进行比较,以此来验证轻量化设计的合理性。

(1)构建BP神经网络模型。

使用MATLAB软件工具箱中的神经网络模块对两模型的25组数据分别进行训练。训练数组设置为70%,验证数组为15%,测试数组为15%,隐藏神经元数为10,选择训练算法为Bayesian Regularization,设置完成后进行训练。神经网络的结构如图11所示。训练完成后的回归系数如图12所示,可见通过线性回归分析,两组数据集的预测值与仿真值的相关系数 R 基本大于0.95,模型的建立是成功的。

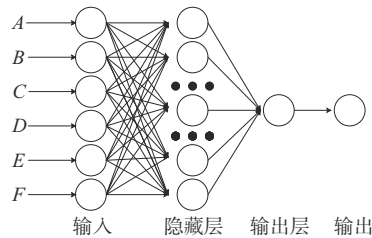


图11 神经网络结构图

(2)遗传算法优化求解。

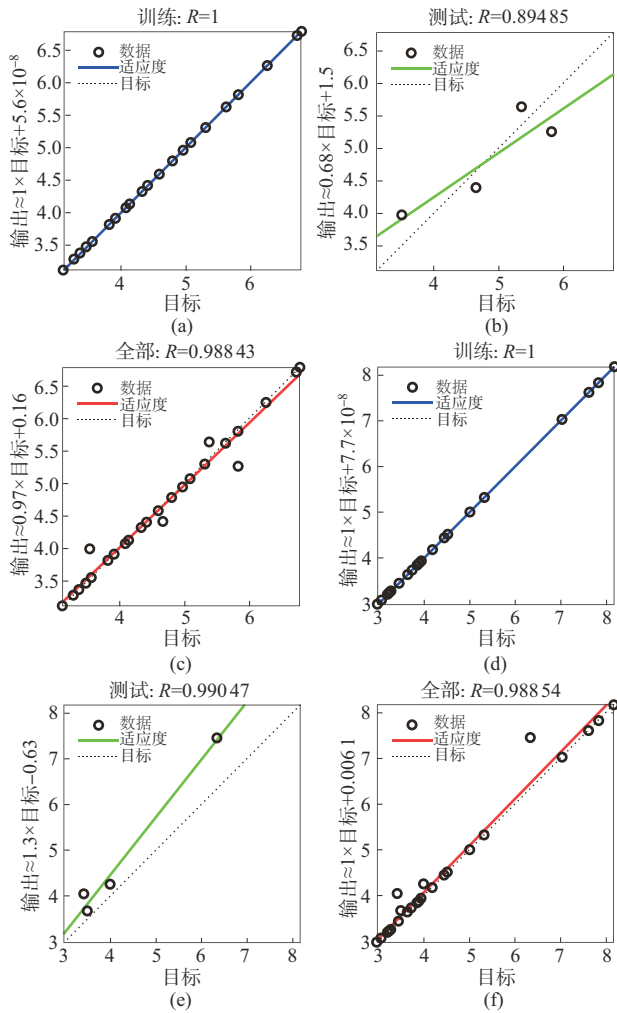
笔者使用BP神经网络训练完成后的预测值作为个体适应度值,并应用多目标遗传算法NSGA-II来优化输入变量组合。算法中的最优前端个体系数设置为0.5,种群规模和最大进化次数分别设置为200和1000,各参数的取值范围设置见表4,经过遗传算法迭代得到的最优工艺参数组合及翘曲变形量见表5。

3.3 翘曲优化结果验证

将通过遗传算法优化得到的参数组合进行Moldflow仿真验证,结果如图13所示。仿真得到的原始模型和轻量化设计后的模型最大翘曲变形量分别为2.568 mm和2.353 mm,与遗传算法优化结果相差均小于1%,这说明优化结果是准确的。在最优参数组合下,轻量化设计后的模型最大翘曲变形量相较于原始模型减小了8.37%,有效改善了制件的装配和使用性能,并满足了翘曲变形量最小化的约束,可见轻量化设计后的模型是合理的。

3.4 轻量化效果验证

通过前述分析可知,优化得到的参数组合成功地实现了翘曲变形量最小化的约束。鉴于轻量化



原始模型:a—训练;b—测试;c—全部
轻量化设计后的模型:d—训练;e—测试;f—全部
图12 训练和预测相关系数

表4 参数范围设置

项目	A/°C	B/MPa	C/s	D/°C	E/°C	F/s
下限	210	60	10	15	75	10
上限	250	100	30	35	95	38

表5 工艺参数最优组合

	A/°C	B/MPa	C/s	D/°C	E/°C	F/s	W/mm
W ₁ 最优组合	250	92.2	30	28	75	30.3	2.556 6
W ₂ 最优组合	250	100	30	35	82	10	2.359 1

注:W为最优组合下的最大翘曲变形量。

的目标,将Moldflow软件分析结果中的制件质量进行对比。最优工艺参数设置下仿真得到的制件质量如图14所示。可见,轻量化设计前后两模型的制件质量分别为104.6 g和94.44 g,制件的质量减轻了9.71%,较好的实现了轻量化的目标。

4 结论

(1)以汽车B柱外饰板轻量化设计为目标,将饰板刚度仿真受力工况抽象为简支梁模型,根据原始

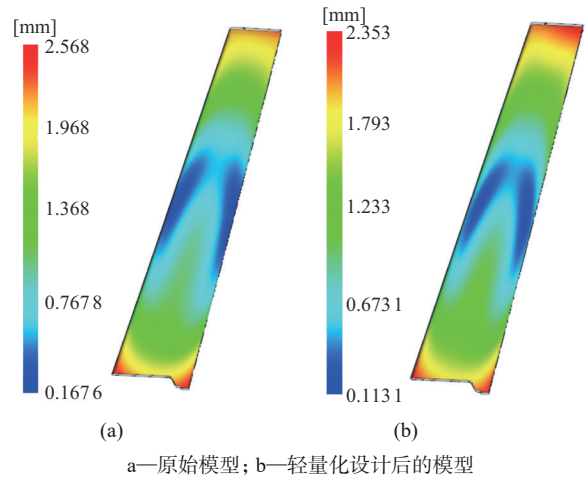


图13 最优工艺参数组合下两模型的翘曲结果

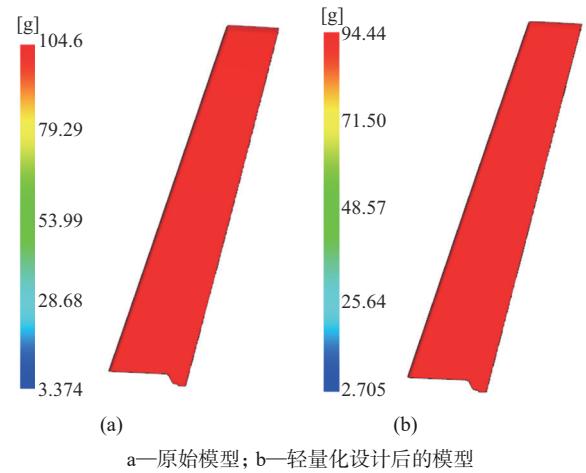


图14 最优工艺参数设置下两模型的制件质量

模型有限元仿真结果计算得到的饰板厚度范围为2.67~2.72 mm,结合实际生产经验确定饰板主要壁厚为2.7 mm。在CATIA软件中建立轻量化设计后的饰板模型,并应用ANSYS软件再次进行静力学仿真,得到新模型的受力变形量为1.485 1 mm,符合刚度要求。

(2)基于BP神经网络对正交试验所得数据进行处理,得到近似模型,并利用多目标遗传算法NSGA-II进行优化求解,得到原始模型与轻量化设计后的模型在最佳工艺参数组合下的最大翘曲变形量分别为2.568 mm和2.353 mm,轻量化设计后的模型的最大翘曲变形量相较于原始模型减小了8.37%,实现了翘曲变形量最小化的约束,保证了制件的工艺性能与成型性能。同时,轻量化设计后的模型减重达9.71%,实现了轻量化的设计目标。

参考文献

- [1] 刘倩,郑小平,张荣华,等.新型汽车用高强度中锰钢研究现状及发展趋势[J].材料导报,2019,33(7):1 215-1 220.

- Liu Qian, Zheng Xiaoping, Zhang Ronghua, et al. Medium manganese high strength steel for automotive application: Status Quo and Prospects[J]. Materials Reports, 2019, 33(7):1 215–1 220.
- [2] 邓峰. 汽车饰件微发泡注塑过程中的能耗分析与工艺优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- Deng Feng. Energy consumption analysis and process optimization in microcellular foaming injection molding of automotive trim[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [3] 王镇江, 何造, 龚世海, 等. 汽车塑料保险杠的薄壁化技术[J]. 汽车实用技术, 2017(4):51–53, 61.
- Wang Zhenjiang, He Zao, Gong Shihai, et al. Thin wall technology of automobile plastic bumper[J]. Automobile Technology, 2017(4): 51–53, 61.
- [4] 李欣欣, 黄瑶, 王雷刚. 薄壁塑件注射成型工艺参数优化[J]. 塑料工业, 2009, 37(11):25–27.
- Li Xinxin, Huang Yao, Wang Leigang. Process parameter optimum of thin-walled plastic parts injection molding[J]. China Plastics Industry, 2009, 37(11):25–27.
- [5] 黄继战, 陈炜, 仇文宁, 等. 汽车音响面板热流道注射成型工艺优化研究[J]. 塑料工业, 2019, 47(10):81–85.
- Huang Jizhan, Chen Wei, Qiu Wenning, et al. Process optimization of hot runner injection molding for automotive audio panel[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(10):81–85.
- [6] 汪红兵. 基于MoldFlow和正交实验的电位器盒盖注射成型工艺参数优化分析[J]. 模具制造, 2022, 22(3):38–42.
- Wang Hongbing. Optimization analysis of injection process parameters for potentiometer cover based on Moldflow and orthogonal experiment[J]. Die & Mould Manufacture, 2022, 22(3):38–42.
- [7] 高奇, 郭光岩, 靳泼. 基于正交试验设计的薄壁壳体零件翘曲优化分析[J]. 塑料工业, 2020, 48(8):78–81.
- Gao Qi, Guo Guangyan, Jin Po. Warpage optimization analysis of thin-walled shell based on Orthogonal experiment[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(8):78–81.
- [8] 郭巍, 李金松, 严岨. 基于正交试验的汽车座椅调角器注射成型质量优化[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):64–69.
- Guo Wei, Li Jinsong, Yan Kui. Optimization of injection molding quality of automotive seat recliner based on orthogonal test[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):64–69.
- [9] 万江勇, 张继祥, 李义兵, 等. 汽车B柱窗框塑料件RHCM注塑翘曲变形分析及工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(3):58–63.
- Wan Jiangyong, Zhang Jixiang, Li Youbing, et al. Analysis and process optimization of RHCM injection warping deformation of automotive B-pillar window frame plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3):58–63.
- [10] 吴俊超, 邵海军, 陈爱霞, 等. 基于CAE分析和熵值法的轿车前保险杠注塑工艺多响应优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2):74–83.
- Wu Junchao, Shao Haijun, Chen Aixia, et al. Multi-response optimization of injection molding process for front bumper of car based on CAE analysis and entropy method[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):74–83.
- [11] 熊小羽. 汽车立柱饰板的设计及其刚度分析[J]. 南方农机, 2023, 54(11):145–148.
- Xiong Xiaoyu. Design and stiffness analysis of automotive pillar trim panel[J]. South Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 145–148.
- [12] 付东明, 曾效舒. 汽车手套箱盖注射成型工艺参数优化[J]. 塑料, 2015, 44(3):51–55.
- Fu Dongming, Zeng Xiaoshu. Optimization of processing parameters of automobile glove compartment cap in injection molding [J]. Plastics, 2015, 44(3):51–55.
- [13] 庄燕, 朱敬花, 毛洪辉, 等. 基于回归分析的汽车扶手箱下盖板注射成型工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2):101–105.
- Zhuang Yan, Zhu Jinghua, Mao Honghui, et al. Optimization of injection molding process for lower cover of automobile armrest box based on regression analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):101–105.
- [14] 纪良波, 陈芳. 基于神经网络和遗传算法的注射成型工艺优化[J]. 塑料, 2010, 39(1):113–115.
- Ji Liangbo, Chen Fang. Processing optimization of plastic injection based on neural network and genetic algorithm[J]. Plastics, 2010, 39(1):113–115.
- [15] 王晓东, 王权, 郑佳玉, 等. 基于GA-BP神经网络的注塑质量与能耗的工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(2):67–73.
- Wang Xiaodong, Wang Quan, Zheng Jiayu, et al. Optimization of injection molding parameters for quality and energy consumption based on genetic algorithm and BP neural network[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):67–73.
- [16] 崔星. C/SiC复合材料制动盘力学实验与仿真优化设计[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- Cui Xing. Mechanical experiment and simulation optimization design of C/SiC composite brake disc[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [17] 李俊杰, 刘永姜, 郭文轩, 等. 基于RBF神经网络和遗传算法的油膜附水滴切削参数优化[J]. 工具技术, 2022, 56(1):56–59.
- Li Junjie, Liu Yongjiang, Guo Wenxuan, et al. Optimization of cutting parameters of oil on water based on RBF neural network and genetic algorithm[J]. Tool Engineering, 2022, 56(1):56–59.