

汽车散热器水室翘曲变形工艺参数优化及验证

刘鑫¹, 郭恒亚¹, 李金良¹, 黄明², 张宇¹

(1. 浙江工业职业技术学院机电工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 郑州大学
橡塑模具国家工程研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对汽车散热器水室翘曲变形引起的密封不足、漏水问题, 应用模流分析软件建立浇注系统和冷却水路, 选取影响水室注塑件翘曲变形的模具温度、熔体温度、注塑时间、保压压力和保压时间为关键因素, 设计正交试验, 根据极差分析评估各因素对翘曲变形量影响的权重。通过BP神经网络和粒子群优化算法结合, 对水室注塑工艺参数进一步优化, 得到的水室翘曲变形量最小的参数组合为: 模具温度85℃、熔体温度285℃、注塑时间1.538 4 s、保压压力75 MPa、保压时间6.351 2 s, 此条件下智能算法模型预估的翘曲变形量为0.970 2 mm。利用Moldflow软件对优化算法确定的水室注塑工艺参数组合进行有限元分析仿真, 结果显示翘曲变形量为0.982 2 mm, 仿真验证值和模型预测结果吻合度高, 仅相差0.012 0 mm, 优化后的工艺参数使塑件翘曲变形量较优化前的1.327 5 mm减少26%。将优化后的参数应用于水室注塑生产, 产品符合要求, 所采用的翘曲变形优化方法有效、可行。

关键词: 翘曲变形; 正交试验; BP神经网络; 粒子群优化算法; 工艺参数优化

中图分类号: TQ320.66

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0169-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.030

Optimization and Verification of Process Parameters of Warpage Deformation in Automotive Radiator Water Chamber

LIU Xin¹, GUO Hengya¹, LI Jinliang¹, HUANG Ming², ZHANG Yu¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China;
2. National Engineering Research Center for Advanced Polymer Processing Technology,
Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To address the issue of insufficient sealing and water leakage caused by warpage deformation in the water chamber of automotive radiators, a gating system and cooling channels were established using mold flow analysis software. The mold temperature, melt temperature, injection time, holding pressure, and holding time, which significantly affect the warpage deformation of the water chamber injection-molded parts, were selected as key factors. An orthogonal test was designed, and the influence of each factor on the warpage deformation was evaluated through range analysis. By combining BP neural network and particle swarm optimization algorithm, the injection molding process parameters of the water chamber were further optimized. The optimal parameter combination that minimized the warpage deformation was determined to be: Mold temperature of 85 °C, melt temperature of 285 °C, injection time of 1.538 4 s, holding pressure of 75 MPa, and holding time of 6.351 2 s. Under these conditions, the warpage deformation predicted by the intelligent algorithm model was 0.970 2 mm. Finite element analysis and simulation were conducted using Moldflow software for the optimized parameter combination of the water chamber injection molding process. The simulation results showed a warpage deformation of 0.982 2 mm, which closely matched the model prediction with a difference of only 0.012 0 mm. The optimized process parameters reduced the warpage deformation by 26%, compared to 1.327 5 mm before optimization. The application of the optimized parameters in the production of the water chamber injection molding resulted in products that met the requirements, demonstrating the effectiveness and feasibility of the warpage deformation optimization method.

Keywords: Warpage deformation; Orthogonal test; BP neural network; PSO algorithm; Process parameters optimization

收稿日期 Submitted date 2025-07-23; 修回日期 Revised date 2025-08-09; 录用日期 Accepted date 2025-09-16

基金项目: 2022年浙江省教育厅一般科研项目(Y202249299); 浙江省高校访问工程师校企合作项目(FG2022204)

联系人, Lxtomorrow@126.com

引用本文: 刘鑫, 郭恒亚, 李金良, 等. 汽车散热器水室翘曲变形工艺参数优化及验证[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 169-174.

Citation: LIU X, GUO H Y, LI J L, et al. Optimization and verification of process parameters of warpage deformation in automotive radiator water chamber[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 169-174.

塑料制品因其质轻、成本低、设计自由度高以及易于成型复杂形状等优势,在汽车、电子、家电、航空航天等行业得到广泛应用,成为现代工业生产的重要组成部分^[1-2]。然而,在注塑件的成型过程中,翘曲变形问题时有发生^[3-4],严重制约产品的品质。翘曲变形不仅会使塑料件的尺寸精度偏离设计要求,影响装配,还会降低其外观品质,例如导致表面平整度下降,进而削弱产品的市场竞争力^[5]。

为改善翘曲变形对产品品质的影响,国内外学者采用智能算法优化注塑工艺。ZHAI等^[6]结合6种优化算法与反变形设计(IDD),以减少体积收缩和翘曲变形,将Box-Behnken设计(BBD)响应面法、BP神经网络(BPNN)训练及NSGA-II遗传算法以不同方式组合,形成4种优化算法,对6个成型参数进行多目标优化,实现箱形薄壁注塑制品的高质量成型。印磊等^[7]利用响应面模型和自适应模拟退火方法(ASA)优化汽车大灯的注塑成型工艺参数,确定了最优工艺参数组合。孟兵等^[8]采用Moldflow分析汽车零部件的翘曲变形,发现拐角效应是前风窗导流板翘曲的主要原因,并调整产品拐角处的材料厚度解决该问题。于佳丽等^[9]以汽车车门塑料件为研究对象,采用田口实验方法分析注塑材料中的纤维含量、浇口形式等对薄壁塑料件翘曲变形的影响,结果表明不均匀收缩是翘曲的主要原因。季宁等^[10]利用Kriging代理模型和多目标粒子群优化(MOPSO)算法,对注塑成型工艺参数进行多目标优化。MOAYYEDIAN等^[11]采用田口实验方法,以熔体温度、浇口设计、填充和冷却时间为变量,通过层次分析法和模糊决策过程评估缺陷严重程度,以最小化缩水、翘曲和短射等常见制造缺陷。熊邦彦等^[12]利用Moldflow模拟分析理论翘曲变形量,得出预变形设计对水室成型精度的影响规律,并通过预变形补偿技术控制汽车水室的翘曲变形。刘锋等^[13]结合田口实验设计、神经网络模型和粒子群优化(PSO)算法,优化薄壁件的翘曲变形,获得了遥控器的最优翘曲变形量。

尽管现有方法在减少注塑件翘曲变形方面取得了一定成效,但仍存在局限性。正交试验虽能减少试验次数并筛选关键因素,但未充分考虑因素间的高阶交互作用,可能导致致复杂注塑工艺系统中重要信息的遗漏。BP神经网络模型可基于正交试验数据构建预测模型,避免正交试验的离散局限,有效捕捉高阶交互作用。PSO算法通过在连续参数空间搜索全局最优解,避免陷入局部最优。因此,本研究以汽车散热器水室为研究对象,结合BP神经网络和PSO算法,对水室注塑工艺参数进行智能优化。通过多方法结合,进一步探索塑料模具注塑件翘曲变形的优化策略,减少翘曲变形量,提升产品的市场竞争力。

1 初始注塑工艺分析

1.1 汽车散热器水室模型分析及材料选用

图1为汽车散热器水室的安装位置。从图1可以看出,其底面需要与散热片边缘装配,以实现密封,对尺寸稳

定性、密封性和装配面平面度要求极高。塑件外形尺寸为483.7 mm×103.1 mm×190.3 mm,平均壁厚3 mm,产品底面为装配面,其平面度形状精度要求在1 mm以内。实际生产中,塑料水室易出现短射、飞边、熔接痕和翘曲变形等缺陷,其中翘曲变形问题尤为严重,远超常规尺寸制品^[14-15]。图2为汽车散热器水室的三维模型。选取尼龙66(PA66)+30%玻璃纤维(GF)作为塑件成型材料,表1为PA66+30%GF材料的性能。

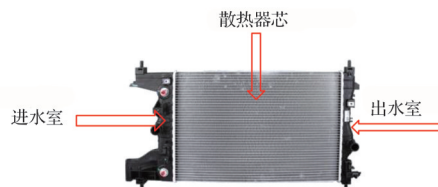


图1 汽车散热器水室的安装位置

Fig.1 Installation position of automobile radiator water chamber

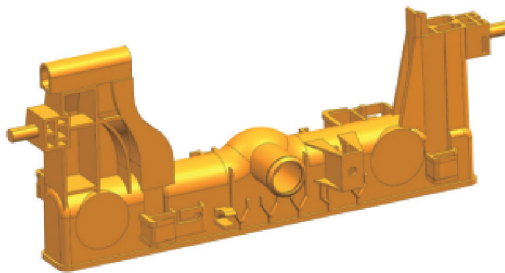


图2 汽车散热器水室的三维模型

Fig.2 Three dimensional model of automobile radiator water chamber

表1 PA66+30% GF材料的性能

Tab.1 Performance of PA66+30% GF material

特性	数值
熔体密度/(g·cm ⁻³)	1.219 3
平行收缩率/%	0.203 9
垂直收缩率/%	0.960 1
弹性模量(E_1)/MPa	9 925.13
弹性模量(E_2)/MPa	6 097.13

1.2 塑件网格划分

采用Moldflow软件中的双层面网格类型对汽车散热器水室三维模型进行有限元划分,图3为网格划分结果。其中三角形网格单元数量为59 640,网格纵横比最小值为1.16,最大值为8.69,网格匹配百分比和互补百分比均为92.3%,各项网格划分参数指标满足有限元分析的网格质量要求。

1.3 浇注系统及冷却水路模流分析模型建立

根据产品结构特点,模具设计采用一模一腔结构,浇口形式采用点浇口与侧浇口结合的进胶方式,采用热流道浇注成型,冷却系统设计确保均匀冷却。图4为浇注系统与冷却水路。

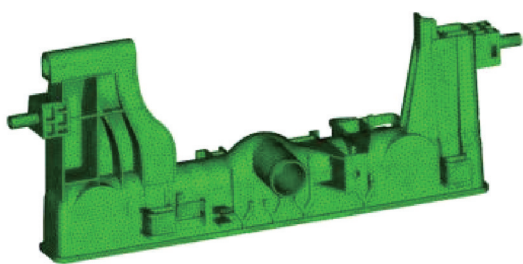


图3 网格划分结果

Fig.3 Meshing division results

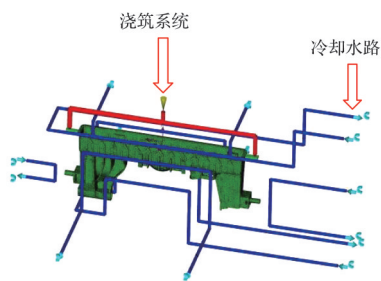


图4 浇注系统与冷却水路

Fig.4 Gating system and cooling channels

1.4 翘曲变形分析

汽车散热器水室主要用于冷却液循环,其塑件因长度长、壁厚不均易翘曲变形。为确保与散热器管道及芯体的精确装配,必须严格控制水室底面平面度和直线度。因此,注塑成型时需要重点关注翘曲变形。通过Moldflow软件进行“填充+保压+冷却+翘曲”分析,表2为初始注塑工艺参数。充填过程中,螺杆速度先升后降,并在充填体积达98%时切换速度压力。

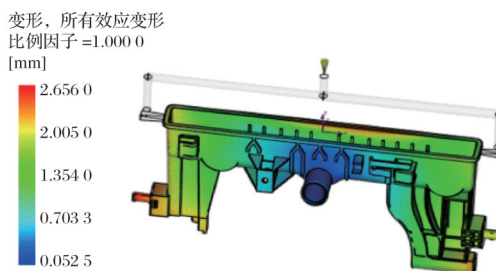
表2 初始注塑工艺参数

Tab.2 Initial injection molding process parameters

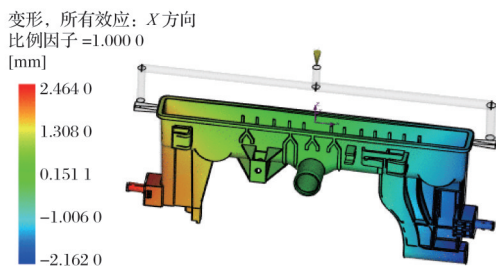
工艺参数	数值
模具温度/°C	80
熔体温度/°C	293
注塑时间/s	1.5
保压压力/MPa	85
保压时间/s	6
冷却时间/s	20

图5为翘曲变形量分析结果。从图5a可以看出,所有因素影响下的最大总变形量为2.656 0 mm。从图5b~图5d可以看出,X、Y、Z方向的最大翘曲变形量分别为2.464 0、2.378 0、1.334 0 mm。产品表面凸起特征拐角区域因热量散失难,产生热应力。另外,模具抑制条件导致塑件厚度方向收缩远大于塑件拐角区域的平面收缩,引发不均匀收缩和较大翘曲变形量。水室底面与散热器芯体装配连接,对平面度和直线度要求高,因此本文重点研究水室塑件的底面翘曲变形量。针对水室底面绘制所有有效应变形的路径,图6为水室底面翘曲变形量。从图6可以看出,最大翘曲变形量为1.327 5 mm,超出实际生产要求的1 mm限值。

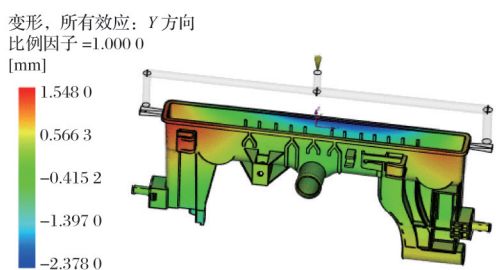
因此,仅通过调节保压曲线难以有效降低翘曲变形量,需要进一步优化注塑工艺参数以改善翘曲变形。



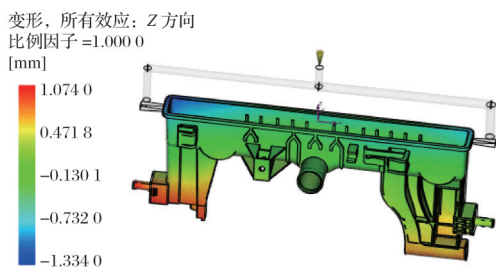
(a) 整体变形



(b) X方向变形



(c) Y方向变形



(d) Z方向变形

图5 翘曲变形量分析结果

Fig.5 Analysis results of warpage deformation

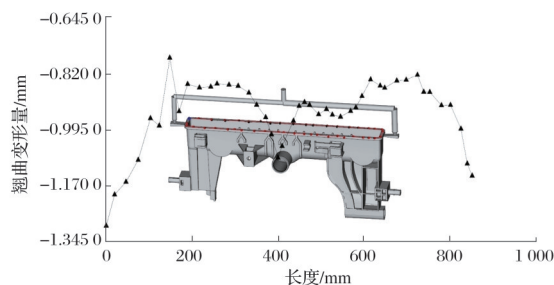


图6 水室底面翘曲变形量

Fig.6 Warpage deformation of water chamber bottom surface

2 正交试验设计

注塑件翘曲变形源于塑件内部的不均匀收缩,主要由模具温度、熔体温度、注塑时间、保压压力、保压时间及材料特性等因素共同作用引起^[16]。模具温度分布不均会导致塑件各部位冷却速率不同,产生应力梯度,使塑件向冷却较慢的一侧翘曲。较高的熔体温度虽能提高流动性,但会延长分子链松弛时间,增加取向程度,冷却时分子链恢复无序状态,导致流动方向与垂直方向收缩差异,引发翘曲。保压压力和保压时间对塑件质量至关重要,保压不足会导致缩痕、空洞等缺陷,周边应力集中诱发翘曲;保压过度会产生过高残余应力,脱模后应力释放导致翘曲^[17-18]。各因素相互影响共同决定塑件收缩行为,任何失衡都可能打破应力与应变的平衡,导致不均匀收缩和翘曲变形。

正交试验设计是一种高效的多因素试验方法^[19]。为优化水室底面Z向翘曲变形量(W),本研究选取模具温度(A)、熔体温度(B)、注塑时间(C)、保压压力(D)和保压时间(E) 5个影响水室翘曲变形的关键工艺参数,采用4水平正交试验设计,表3为L₁₆(4⁵)正交试验因素水平设计。

表3 L₁₆(4⁵)正交试验因素水平设计

Tab.3 Factor and level design of L₁₆(4⁵) orthogonal test

水平	A/°C	B/°C	C/s	D/MPa	E/s
1	60	275	1.00	70	5
2	70	285	1.25	75	6
3	80	295	1.50	80	7
4	90	305	1.75	85	8

将这5个因素及4个水平依次代入L₁₆(4⁵)正交表中,得到16组试验方案。分别对每一组方案的各因素水平在Moldflow软件中进行模流仿真分析,表4为L₁₆(4⁵)正交试验结果。从表4可以看出,最小翘曲变形量为1.047 6 mm,对应的最优工艺参数为:模具温度85 °C、熔体温度285 °C、注塑时间1.75 s、保压压力80 MPa、保压时间5 s。

极差分析通过计算各因素在不同水平下翘曲变形量的极差,直观判断因素影响的主次顺序,为确定关键因素提供精准依据。从表4还可以看出,影响汽车散热器水室翘曲变形的因素按显著性排序为:保压压力最大,其次为模具温度、熔体温度、保压时间,注塑时间影响最小。从极差分析中可以得到,理论最优注塑工艺参数组合为A₃B₄C₄D₄E₃。将该注塑工艺参数带入Moldflow软件中进行模流仿真分析,得到最小翘曲变形量为1.102 7 mm。由于假设条件和试验的复杂性,极差分析得出的优组合工艺参数下的翘曲变形量1.102 7 mm大于实际试验得到的翘曲变形量1.047 6 mm。主要由于实际试验中因素交互效应未被极差分析充分捕捉,导致理论组合在实践中并非最优解。正交试验得到的最小翘曲变形量比初始经验工艺参数有改善,但仍需结合实际进行验证和优化,以确保最

终的工艺参数能够有效控制翘曲变形量以达到实际生产要求。

表4 L₁₆(4⁵)正交试验结果

Tab.4 Results of L₁₆(4⁵) orthogonal test

试验序号	A/°C	B/°C	C/s	D/MPa	E/s	W/mm
1	60	275	1.00	70	5	1.465 8
2	60	285	1.25	75	6	1.325 9
3	60	295	1.50	80	7	1.156 4
4	60	305	1.75	85	8	1.107 2
5	70	275	1.25	80	8	1.233 1
6	70	285	1.00	85	7	1.119 2
7	70	295	1.75	70	6	1.363 5
8	70	305	1.50	75	5	1.232 6
9	80	275	1.50	85	6	1.171 6
10	80	285	1.75	80	5	1.047 6
11	80	295	1.00	75	8	1.131 2
12	80	305	1.25	70	7	1.204 5
13	90	275	1.75	75	7	1.255 3
14	90	285	1.50	70	8	1.266 4
15	90	295	1.25	85	5	1.106 7
16	90	305	1.00	80	6	1.098 0
K ₁	1.263 8	1.281 5	1.203 6	1.325 1	1.213 2	
K ₂	1.237 1	1.189 8	1.217 6	1.236 3	1.239 8	
K ₃	1.138 7	1.189 5	1.206 8	1.133 8	1.183 9	
K ₄	1.181 6	1.160 6	1.193 4	1.126 2	1.184 5	
R	0.125 1	0.120 9	0.024 2	0.198 9	0.055 9	

3 翘曲变形工艺参数优化

传统正交试验通过分析试验结果推断因素影响规律,确定最优工艺参数和翘曲变形量,但未充分捕捉高阶交互效应。正交试验通过离散水平采样,其最优组合仅为试验点中的局部最优值,而非连续空间全局最优解。为减小水室底面翘曲变形量,本文采用神经网络与粒子群优化(BPNN-PSO)算法优化注塑工艺参数。BP神经网络基于误差反向传播算法,可预测未知参数组合下的翘曲变形量^[20],能够基于正交试验数据构建预测模型,有效捕捉高阶交互作用。PSO通过粒子群迭代可以高效探索边界约束内连续参数空间的最优解。BPNN-PSO结合了正交试验的数据基础、神经网络的预测能力及PSO的优化效率,可以高效求解复杂工艺的注塑件翘曲变形问题。图7为BPNN-PSO算法流程。

3.1 BP神经网络模型的建立

神经网络在处理复杂非线性问题方面具有卓越能力,为注塑件翘曲变形预测与优化提供了新途径^[21]。BP神经网络由输入层、隐含层和输出层构成。本研究采用3层结构,输入层接收5个工艺参数(模具温度、熔体温度、保压压力、保压时间、注塑时间),隐含层通过非线性变换提取深层特征,输出层预测汽车散热器水室底面翘曲变形量。

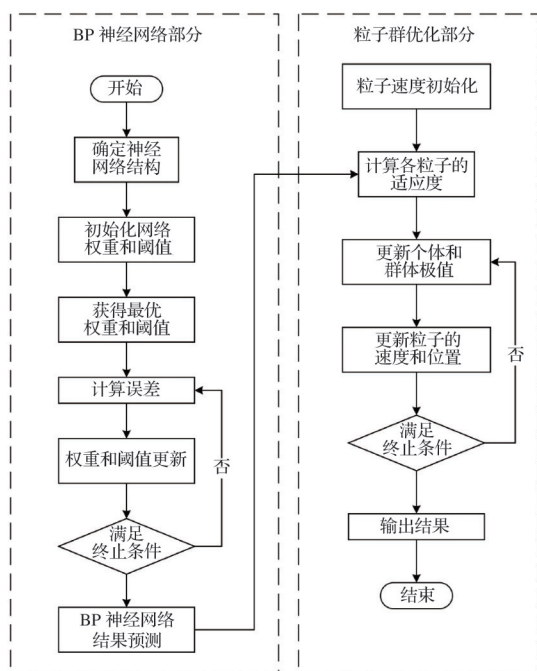


图7 BPNN-PSO 算法流程
Fig.7 Flowchart of BPNN-PSO algorithm

模型采用全链接架构,输入层至隐藏层使用S型传递函数,隐藏层至输出层采用线性传递函数,并以L-M优化算法进行训练。图8为BP神经网络模型。

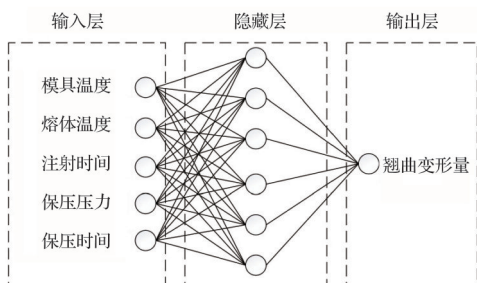


图8 BP神经网络模型
Fig.8 BP neural network model

采用Matlab编程,以表4正交试验数据为训练集,建立BPNN神经网络预测模型。随机选取5个正交试验的工艺参数组合验证模型,图9为测试样本结果。从图9可以看出,预测结果与模流分析值一致性较高,验证了模型的可靠性,可用于注塑工艺参数优化设计。

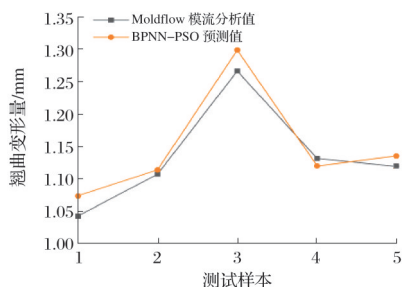


图9 测试样本结果
Fig.9 Results of test sample

3.2 PSO全局优化

基于建立的BP神经网络预测模型,为获得最优的翘曲变形量,以正交试验采用的5个因素作为输入,采用PSO算法建立优化模型。基于PSO算法首先初始化一群随机粒子,将待优化的工艺参数视为粒子在多维空间中的位置向量,每个粒子都代表着一组可能的解,然后让随机粒子通过跟踪两个极值来更新自己。采用Matlab软件进行程序编写,求解模型的非线性约束优化问题,PSO参数设置为:初始种群100,惯性权重0.8,学习因子0.7和0.4,最大迭代100次,边界条件与模型约束一致。图10为收敛过程。

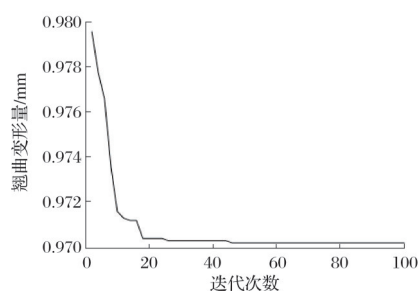


图10 收敛过程
Fig.10 Convergence process

经PSO算法优化,求解得到的水室塑件最佳注塑工艺参数为:模具温度85℃、熔体温度285℃、注塑时间1.5384s、保压压力75MPa、保压时间6.3512s,此条件下智能算法模型预估的水室翘曲变形量为0.9702mm。

3.3 优化结果分析

通过Moldflow进行模流仿真验证BPNN-PSO算法优化的注塑工艺参数。图11为优化后水室底面翘曲变形量。从图11可以看出,翘曲变形量由1.3275mm降至0.9822mm,降低26%,与预测值0.9702mm误差仅为0.0120mm。

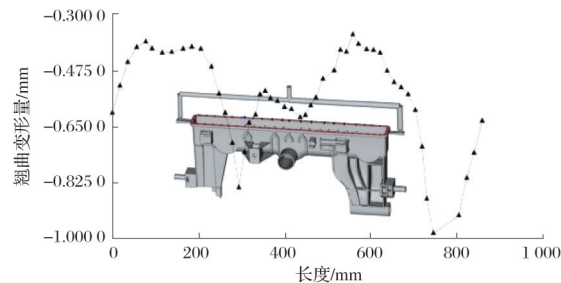
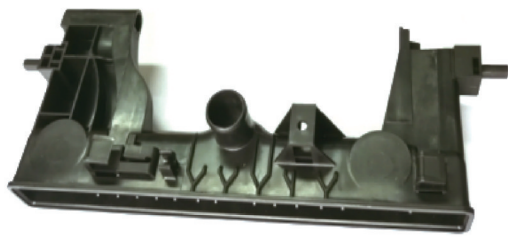


图11 优化后水室底面翘曲变形量
Fig.11 Warpage deformation of water chamber bottom surface after optimization

将优化后的注塑工艺参数应用于水室塑件实际生产,进而使用激光三维扫描仪对注塑完成的汽车散热器水室产品进行质量检测。图12为水室实验验证结果。从图12a可以看出,注塑完成的汽车散热器水室,整体结构完整无明显翘曲变形。从图12c可以看出,三维扫描检测结

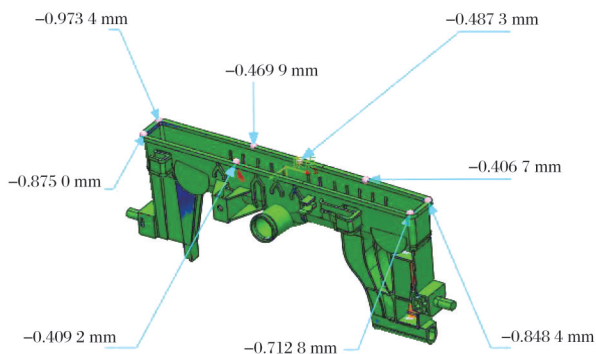
果显示水室底面的最大翘曲变形量0.973 4 mm,符合生产要求,与预测值基本一致,验证了模型的可靠性。



(a) 注塑产品



(b) 三维扫描检测



(c) 翘曲变形量检测报告

图12 水室实验验证结果

Fig.12 Experimental verification results of water chamber

4 结论

以汽车散热器水室为例,应用模流分析软件研究解决水室翘曲变形引起的密封不足、漏水等装配问题,设计了正交试验通过极差分析推断各因素影响规律,确定最优工艺参数和翘曲变形量。通过正交试验与极差分析对比,发现二者存在差异,其主要原因是实际试验中因素交互效应未被极差分析充分捕捉,导致理论组合在实践中并非最优解;进而引入BPNN-PSO算法,克服正交试验的离散局限,在连续空间实现全局寻优,在连续空间实现全局寻优,生成最优参数组合(模具温度85℃、熔体温度285℃、注塑时间1.538 4 s、保压压力75 MPa、保压时间6.351 2 s),预测变形量降至0.970 2 mm,较正交试验最优翘曲变形量1.047 6 mm降低7.4%,说明该方法可以高效求解复杂工艺的注塑件翘曲变形问题。

基于BPNN-PSO算法的优化结果,经Moldflow验证,翘曲变形量实测为0.982 2 mm,与算法预测值误差仅

1.2%。使用三维扫描仪检测注塑产品,结果显示水室底面的最大翘曲变形量为0.973 4 mm,证明算法模型可靠性。相较于初始工艺(翘曲变形量1.327 5 mm),翘曲变形量减少26.0%。实际生产中产品装配密封性达标,合格率得到提升。本研究大幅降低对操作人员经验的依赖,为注塑件翘曲变形优化提供了实际工程解决方案。

参考文献

- [1] 樊玲, 谢治军. 基于CAE辅助成型技术的车用刹车仪表灯罩成型工艺优化[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 152-157.
- [2] 刘鑫, 郭恒亚, 黄明. 汽车挡风玻璃装饰条对射式双色注塑模具设计[J]. 中国塑料, 2019, 33(10): 100-104.
- [3] 黄建军. 汽车中控台框架注塑成型的翘曲变形成因及其控制[D]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
- [4] 林家湘. 侧出地漏塑件的注塑成型工艺优化研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2024.
- [5] 刘喜梅, 苑春苗. 基于CAE仿真技术的连接器端子注塑成型优化[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 143-148.
- [6] ZHAI H R, LI X D, XIONG X, et al. A method combining optimization algorithm and inverse-deformation design for improving the injection quality of box-shaped parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130(3): 1969-1985.
- [7] 印磊, 苏小平, 潘杰, 等. 基于响应面模型和ASA算法的汽车车灯灯体注塑成型工艺参数优化[J]. 塑料工业, 2021, 49(9): 82-85.
- [8] 孟兵, 徐静, 苏艳红, 等. “角落效应”对塑料件翘曲变形的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(7): 67-69.
- [9] 于佳丽, 张继祥, 李又兵, 等. 车门内饰塑件翘曲变形分析及成型工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11): 78-83.
- [10] 季宁, 张卫星, 于洋洋, 等. 基于Kriging代理模型和MOPSO算法的注塑成型质量多目标优化[J]. 塑料工业, 2020, 48(5): 67-71.
- [11] MOAYYEDIAN M, MAMEDOV A. Multi-objective optimization of injection molding process for determination of feasible moldability index[J]. Procedia CIRP, 2019, 84: 769-773.
- [12] 熊邦彦, 欧阳八生, 吴家雄. 基于预变形的汽车水室翘曲变形控制[J]. 模具工业, 2021, 47(1): 6-10.
- [13] 刘锋, 庞建军, 陈宇轩, 等. 基于Taguchi与BPNN-PSO的薄壁注塑件翘曲变形优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2): 74-79.
- [14] 刘炜涛. 汽车散热器水室成型的数值分析及优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [15] 廉成林. 风机外壳塑件成型质量双目标优化及联合仿真分析[D]. 大庆: 东北石油大学, 2025.
- [16] 黄关山, 朱金婷. 基于响应面代理模型及遗传算法的汽车引擎盖注塑成型工艺优化[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 125-128.
- [17] 马强, 富露祥, 李金明. 基于Moldex3D软件在PP薄板注塑件中冷却水路布置对冷却时间的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(9): 121-125.
- [18] 王新超. 基于3D打印的注塑模具设计与工艺参数优化[D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
- [19] 郭恒亚, 黄明, 刘鑫. 基于CAE技术的注塑工艺分析优化及产品试制[J]. 塑料工业, 2020, 48(2): 88-91.
- [20] 邱琳芝. 模内电子注塑成型缺陷分析及工艺参数优化研究[D]. 东莞: 东莞理工学院, 2025.
- [21] SONG Z Y, LIU S M, WANG X X, et al. Optimization and prediction of volume shrinkage and warpage of injection-molded thin-walled parts based on neural network[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(3): 755-769.