

PA/PPE 电力接插件设备的注塑成型工艺优化

徐 洋, 张 赛, 李莲英

(许昌电气职业学院电气工程学院, 河南 许昌 461000)

摘 要: 针对电力接插件对尺寸稳定性及电气绝缘性能的双重要求, 以聚酰胺/聚苯醚(PA/PPE)复合材料为对象, 研究其注塑工艺参数对成型质量及电气安全性的影响规律。采用 Moldflow 软件进行流动-冷却-翘曲多物理场耦合仿真, 结合 Box-Behnken 响应面法建立以翘曲变形量为目标的工艺优化模型, 系统考察顶出温度、熔体温度、保压压力及冷却时间的交互影响。研究发现, 初始条件下制件最大翘曲变形量为 0.920 1 mm, 且存在气穴、熔接线和缩痕指数超标等缺陷。通过线性回归拟合得到响应面模型, 发现熔体温度对翘曲变形量影响最大, 其次为保压压力、顶出温度和冷却时间。优化后的最佳工艺参数组合为: 顶出温度 112 °C、熔体温度 284 °C、保压压力 23 MPa、冷却时间 51 s。在此条件下, 模翘曲变形量降低至 0.194 5 mm, 较优化前减少了约 78.86%。实际注塑试验验证了优化工艺的有效性, 成型后的样品外观良好, 未发现明显缺陷, 缩痕指数从 3.926 0% 降至 1.252 0%。研究表明, 结合响应面法与模拟仿真技术可显著提升 PA/PPE 复合材料电力接插件的注塑成型质量, 为高精度电力接插件制造提供参考。

关键词: 聚酰胺/聚苯醚复合材料; 注塑成型; 响应面法; 翘曲变形控制

中图分类号: TQ320.66

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)07-0175-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.07.032

Optimization of Injection Molding Process for PA/PPE Power Connector Devices

XU Yang, ZHANG Sai, LI Lianying

(School of Electrical Engineering, Xuchang Electrical Vocational College, Xuchang 461000, China)

Abstract: In response to the dual requirements of dimensional stability and electrical insulation performance for electrical connectors, a study was conducted on polyamide/polyphenylene ether (PA/PPE) composites to investigate the influence of injection molding process parameters on molding quality and electrical safety. Multi-physics coupled simulations of flow, cooling, and warpage were performed using Moldflow software. A process optimization model targeting warpage deformation was established using the Box-Behnken response surface methodology, and the interactive effects of ejection temperature, melt temperature, packing pressure, and cooling time were systematically investigated. The study found that under the initial conditions, the maximum warpage deformation of the molded part was 0.920 1 mm, and defects including air cavity, weld lines, and excessive sink mark index were observed. A response surface model was obtained through linear regression fitting. The analysis revealed that melt temperature had the greatest influence on warpage deformation, followed by holding pressure, ejection temperature, and cooling time. The optimized process parameter combination was determined as follows: ejection temperature of 112 °C, melt temperature of 284 °C, holding pressure of 23 MPa, and cooling time of 51 s. Under these conditions, the warpage deformation was reduced to 0.194 5 mm, representing a decrease of approximately 78.86% compared with that before optimization. Actual injection molding trials verified the effectiveness of the optimized process. The molded samples exhibited good appearance with no obvious defects observed, and the sink mark index decreased from 3.926 0% to 1.252 0%. The study demonstrated that the combination of response surface methodology and simulation technology could significantly improve the injection molding quality of PA/PPE composite electrical connectors, providing a reference for the manufacturing of high-precision electrical connectors.

Keywords: PA/PPE composites; Injection molding; Response surface methodology; Warpage deformation control

电力接插件作为电能传输与信号连接的关键部件,其可靠性直接影响系统安全。聚酰胺/聚苯醚(PA/PPE)复合

收稿日期 Submitted date 2025-10-15; 修回日期 Revised date 2025-11-25; 录用日期 Accepted date 2025-12-28

联系人, xuyang96131@163.com

引用本文: 徐洋, 张赛, 李莲英. PA/PPE 电力接插件设备的注塑成型工艺优化[J]. 塑料科技, 2026, 54(7): 175-180.

Citation: XU Y, ZHANG S, LI L Y. Optimization of injection molding process for PA/PPE power connector devices[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(7): 175-180.

材料因兼具优异的力学性能、耐热性和电绝缘性,已成为电力接插件外壳及保护罩的首选材料^[1-3]。然而,该材料在注塑成型过程中易产生翘曲变形、气穴、熔接线及缩痕等缺陷,制约了其在高精度电力接插件中的应用^[4-5]。因此,系统优化 PA/PPE 的注塑成型工艺,对提升产品质量和保障接插件长期可靠服役具有重要意义。注塑成型工艺参数对制品的微观结构与宏观性能具有决定性影响。PA/PPE 复合材料在成型过程中,其熔体黏度、热膨胀系数、结晶行为及冷却速率等特性显著影响成型质量^[6]。传统工艺多依赖经验设定,难以精确控制材料在流动、保压与冷却阶段的响应,易导致内应力分布不均,产生翘曲变形及内部缺陷,进而影响产品的电气绝缘性能和机械强度^[7]。

近年来,计算机辅助工程(CAE)技术为注塑成型工艺优化提供了有效手段^[8-9]。利用 Moldflow 等软件可对流动、冷却及翘曲行为进行多物理场耦合分析,借助双域 Tait 模型和 Cross-WLF 模型可描述材料的热膨胀与流变行为,从而更真实地模拟 PA/PPE 在高温高剪切条件下的响应^[10-12]。通过仿真可提前预测缺陷位置与程度,揭示工艺参数对成型质量的影响规律,为优化熔体温度、保压压力及冷却时间等关键变量提供参考^[13-14]。

本研究立足于 PA/PPE 复合材料在电力接插件中的应用需求,结合 CAE 模拟与试验验证,系统分析不同工艺参数对翘曲、气穴和熔接线等缺陷的影响。这不仅有助于减少试模成本,也为实现高精度、高可靠性的电力接插件制造奠定技术基础。

1 模拟仿真

1.1 构建模型

基于 UG 12.0 三维建模软件平台,本研究构建了电力接插件外壳的高精度几何模型,其外形尺寸为长 43.7 mm、宽 55.3 mm、高 65.5 mm。该模型在几何特征设计上充分还原了实际接插件的结构特点,为后续 CAE 仿真分析提供了可靠的几何基础^[15]。通过精确的模型构建,不仅确保仿真过程中应力场、温度场等关键参数的模拟真实性,同时为注塑成型工艺参数的优化设计提供了必要的结构依据,从而为高精度注塑数值模拟的实现创造了先决条件。

表1 PA/PPE材料参数

Tab.1 Parameters of PA/PPE material

模具温度/℃	注射压力/MPa	注射温度/℃	保压压力/MPa	冷却时间/s	顶出温度/℃	熔体温度/℃	收缩率/%
50~80	30~70	220~300	15~35	20~80	90~130	250~320	0.5~1.6

图3为浇口位置与冷却回路分布。从图3可以看出,浇口布置在制件中心,结合冷却回路的合理分布,确保材料在注射过程中流动性良好且黏度保持在低水平,促进模具的完全充填,避免缺料和气孔的产生。

图4为制件初始模拟结果。从图4可以看出,PA/PPE 制件的最大翘曲变形量为 0.920 1 mm。依据 GB/T 14486—2008 要求^[17],该变形量已超出制件对应尺寸公差允许范围(通常要求不超过尺寸的 1.5%,即小于

图1为制件模型。

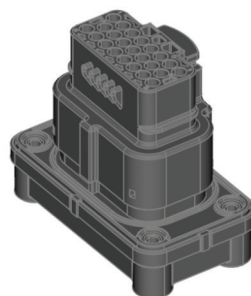


图1 制件模型

Fig.1 Part model

1.2 网格划分

基于三维建模成果,本研究采用 Moldflow 软件对电力接插件外壳实施了高精度的网格划分操作。图2为制件网格分布。经数值处理,系统共生成 158 288 个计算单元,其最大纵横比指标为 14.75,同时实现了 96.48% 的网格匹配率。这种高密度的网格配置不仅显著提升了数值模拟的空间分辨率,还确保了注塑过程中熔体流动、热传导行为及应力分布等关键物理场变量的精确捕捉^[16]。这种优化的网格划分策略在计算资源消耗与模拟精度之间实现了良好平衡。

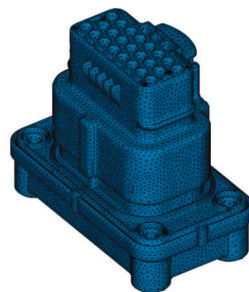


图2 制件网格分布

Fig.2 Part grid distribution

1.3 初始模拟

基于材料的比热容曲线及熔点分析设定初始注塑工艺参数,科学合理地选择注射温度。表1为 PA/PPE 材料参数。其中,保压压力设定为 35 MPa,冷却时间设定为 80 s,顶出温度设定为 130 ℃,熔体温度设定为 320 ℃。

0.655 5 mm),不符合工艺规范。变形问题主要集中在制件侧出口区域,这与几何结构、浇注位置及材料的热力学特性密切相关。

制件正面区域存在显著的气穴缺陷和熔接线分布现象。在高压冲击载荷作用下,这些区域极易形成应力集中效应,进而引发壳体结构失效风险。图5为初始缺陷分析。从图5可以看出,缩痕指数超过 3%,未达到相关工艺标准^[17]。这些质量缺陷不仅会降低产品的外观品质,更会

对材料的力学性能和使用寿命产生显著的负面影响^[18]。针对这一问题,本研究提出通过系统优化成型工艺参数来改善产品质量,具体措施包括:精确调控顶出温度、优化熔体温度参数、调整保压压力设置以及优化冷却时间。通过多参数协同控制有效抑制气穴形成、消除熔接线缺陷、降低缩痕程度,从而显著提升制件的表面质量和整体力学性能。

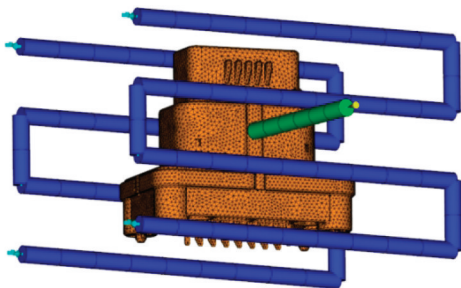


图3 浇口位置与冷却回路分布
Fig.3 Gate position and distribution of cooling circuit

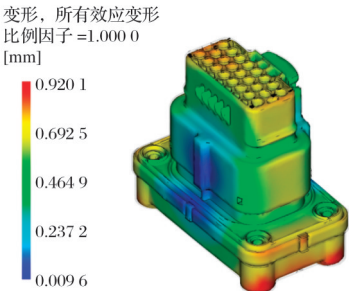


图4 制件初始模拟结果
Fig.4 Initial simulation result of part

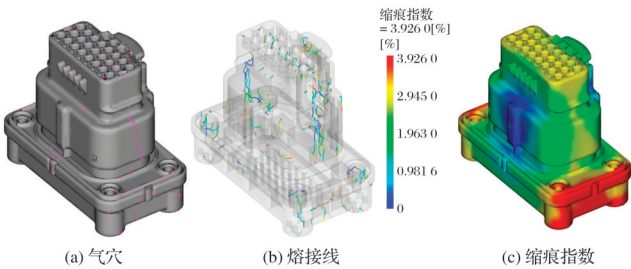


图5 初始缺陷分析
Fig.5 Initial defect analysis

2 响应面成型工艺参数优化

2.1 因素水平的建立

基于PA/PPE复合材料成型质量的系统分析需求,本研究选取顶出温度(A)、熔体温度(B)、保压压力(C)及冷却时间(D) 4项关键工艺参数作为优化变量。表2为关键工艺参数水平。在确定各因素水平时,综合考虑了材料本身的物理特性、注塑设备的工艺参数范围以及前期数值模拟的预测结果,既保证了参数设置能够涵盖实际生产过程中的典型工况,又有效规避了极端参数条件下可能产生的数值计算误差或工艺不可行性问题^[19]。上述工艺参数将作为后续响应面法试验设计的基础输入变量,为注塑成型工艺的优化研究提供可靠的数据支持。

表2 关键工艺参数水平
Tab.2 Key process parameter level

因素	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	C/MPa	D/s
下限	90	250	13	20
上限	130	320	35	80

2.2 响应面样本数据

基于 Box-Behnken 试验设计方法,本研究选取 A 、 B 、 C 、 D 作为关键工艺参数,以注塑成型件的翘曲变形量(R)为响应变量。构建包含 29 组试验样本的响应面设计方案,实现了各因素在其水平范围内的全因子组合测试。表3为 DOE 试验样本。从表3可以看出,不同工艺参数组合对成型翘曲变形量呈现出显著差异性影响。值得注意的是,在相同参数设置条件下,部分试验样本的翘曲变形量存在微小波动。这一现象可能是因为系统的非线性响应特性或局部交互效应,需借助后续的数学模型构建与方差分析来深入揭示关键影响因素及其交互作用规律^[20]。

表3 DOE 试验样本
Tab.3 DOE test samples

编号	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	C/MPa	D/s	R/mm
1	110	285	24	50	0.550 3
2	110	285	35	20	0.623 4
3	90	250	24	50	0.412 7
4	130	320	24	50	0.789 2
5	110	285	13	80	0.478 1
6	110	320	35	50	0.812 5
7	130	285	24	20	0.509 8
8	90	285	35	50	0.582 1
9	90	285	13	50	0.398 5
10	110	285	24	50	0.547 8
11	130	250	24	50	0.498 6
12	110	320	24	80	0.734 2
13	110	250	24	80	0.421 9
14	130	285	35	50	0.701 3
15	90	320	24	50	0.712 4
16	90	285	24	20	0.456 2
17	130	285	24	80	0.612 7
18	110	285	24	50	0.552 1
19	110	285	35	80	0.689 5
20	110	285	13	20	0.365 4
21	110	250	13	50	0.334 7
22	110	285	24	50	0.549 6
23	110	285	24	50	0.548 9
24	110	250	24	20	0.378 2
25	110	250	35	50	0.567 8
26	110	320	13	50	0.654 3
27	110	320	24	20	0.623 7
28	130	285	13	50	0.498 7
29	90	285	24	80	0.512 4

2.3 响应面拟合

根据试验数据,采用线性回归方法得到了以下响应面模型方程:

$$R=0.550+0.045\times A+0.140\times B+0.100\times C+0.041\times D-2.275\times 10^{-3}\times AB+4.750\times 10^{-3}\times AC+0.012\times AD-0.019\times BC+0.017\times BD-0.012\times CD+3.693\times 10^{-3}\times A^2+0.036\times B^2+6.405\times 10^{-3}\times C^2-0.031\times D^2$$
(1)

从一阶线性项来看,熔体温度(B)的系数最大(+0.140),表明熔体温度的提升对R的增加贡献最为显著。其次是保压压力(C)(+0.100)、顶出温度(A)(+0.045)和冷却时间(D)(+0.041)。这4个工艺参数均正向促进翘曲变形,但影响程度存在明显差异。从交互作用项来看,AB、BC和CD的系数均为负,表明顶出温度与熔体温度、熔体温度与保压压力、保压压力与冷却时间之间的交互作用能够部分抵消翘曲变形的增加。尤其是AB项的负系数(-2.275×10⁻³),虽数值较小,但体现了工艺参数间复杂的耦合效应。相反,AC、AD和BD的正系数则暗示顶出温度与保压压力、顶出温度与冷却时间、熔体温度与冷却时间的交互作用会进一步加剧翘曲变形。二次项反映了非线性效应,熔体温度的二次项(B²)系数最大(+0.036),说明在高温区间翘曲变形量的变化趋势加剧。而冷却时间的二次项(D²)系数为负(-0.031),揭示延长冷却时间在一定范围内有助于减少翘曲变形量,表现出抑制翘曲的潜力^[21-22]。顶出温度和保压压力的二次项(A²和C²)虽系数较小,但仍不可忽视,反映其非线性对翘曲变形量的微调作用。图6为拟合曲线

与正态概率分布。

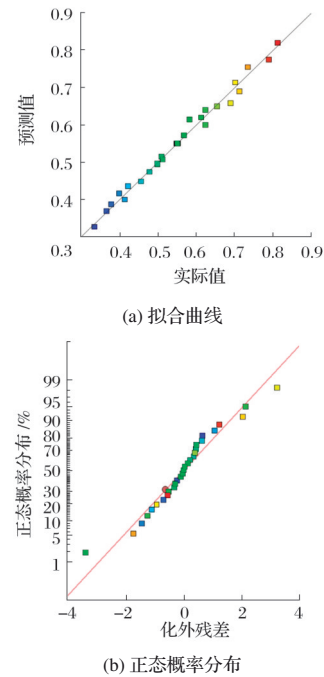


图6 拟合曲线与正态概率分布

Fig.6 Fitted curves and normal probability distribution

2.4 数据分析与模型建立

表4为方差分析结果。从表4可以看出,响应面模型极显著(F值为83.130,P<0.000 1),说明模型能够有效解释翘曲变形量的变化。

表4 方差分析结果

Tab.4 Results of analysis of variance

因素	偏差平方和	自由度	方差	F值	P值	显著性
模型	0.440	14	0.031	83.130	<0.000 1	极显著
A	0.024	1	0.024	63.340	<0.000 1	极显著
B	0.240	1	0.240	646.440	<0.000 1	极显著
C	0.130	1	0.130	342.750	<0.000 1	极显著
D	0.020	1	0.020	53.390	<0.000 1	极显著
AB	2.070×10 ⁻⁵	1	2.070×10 ⁻⁵	0.055	0.818 4	不显著
AC	9.030×10 ⁻⁵	1	9.030×10 ⁻⁵	0.240	0.632 7	不显著
AD	5.450×10 ⁻⁴	1	5.450×10 ⁻⁴	1.440	0.249 7	不显著
BC	1.400×10 ⁻³	1	1.400×10 ⁻³	13.710	0.014 6	显著
BD	1.120×10 ⁻³	1	1.120×10 ⁻³	12.950	0.047 8	显著
CD	5.430×10 ⁻⁴	1	5.430×10 ⁻⁴	1.440	0.250 7	不显著
A ²	8.840×10 ⁻⁵	1	8.840×10 ⁻⁵	0.230	0.636 1	不显著
B ²	8.240×10 ⁻³	1	8.240×10 ⁻³	21.800	0.000 4	极显著
C ²	2.660×10 ⁻⁴	1	2.660×10 ⁻⁴	0.700	0.415 6	不显著
D ²	6.310×10 ⁻³	1	6.310×10 ⁻³	16.700	0.001 1	极显著
残差	0.620	15	0.041			
失拟	0.620	10	0.062	1.231 6	1.623 9	不显著
纯误差	5.200×10 ⁻⁶	5	4.940×10 ⁻⁶			
校正合计	15.504	29				
相关系数R ²	0.963 9	校正系数R ² _{Adj}	0.983 1	信噪比	15.935	

4个主效应因素中,熔体温度(B)对翘曲变形量影响最大,其偏差平方和为0.240, F 值达到646.440, P 值远小于0.000 1,表明其具有极显著影响。其次是保压压力(C),偏差平方和为0.13, F 值为342.750, $P<0.000$ 1,也表现出极显著影响。顶出温度(A)和冷却时间(D)同样显著影响翘曲变形量,偏差平方和分别为0.024和0.020, F 值分别为63.340和53.390, P 值均小于0.000 1,表明这两者对翘曲变形量的影响虽然较 B 和 C 小,但仍具有极显著性。

交互作用方面,熔体温度与保压压力(BC)及熔体温度与冷却时间(BD)的交互作用显著(P 值分别为0.014 6和0.047 8),说明这两组因素的联合作用对翘曲变形有一定的影响;而其他交互作用如 AB 、 AC 、 AD 、 CD 均不显著,表明这些因素间的相互影响较弱。

二次项中,熔体温度的二次项(B^2)和冷却时间的二次项(D^2)均显著(P 值分别为0.000 4和0.001 1),说明这两个因素对翘曲变形量的非线性影响较为明显;而顶出温度和保压压力的二次项(A^2 和 C^2)对翘曲变形量的影响不显著。根据偏差平方和,可以将影响因素排序为:熔体温度>保压压力>顶出温度>冷却时间。其中,熔体温度和保压压力对翘曲变形量的贡献远大于其他因素。模型的 R^2 为0.963 9,校正后的 R^2_{Adj} 为0.983 1,表明模型拟合优良。同时,信噪比为15.935,远高于4,说明信噪比充足,模型预测能力强^[23]。失拟检验不显著($P=1.623$ 9),进一步验证模型的合理性和稳定性。

图7为3D等高线交互作用。从图7可以看出,熔体温度与保压压力之间的交互作用特别突出,同时,熔体温度与冷却时间之间的交互作用也相当明显。

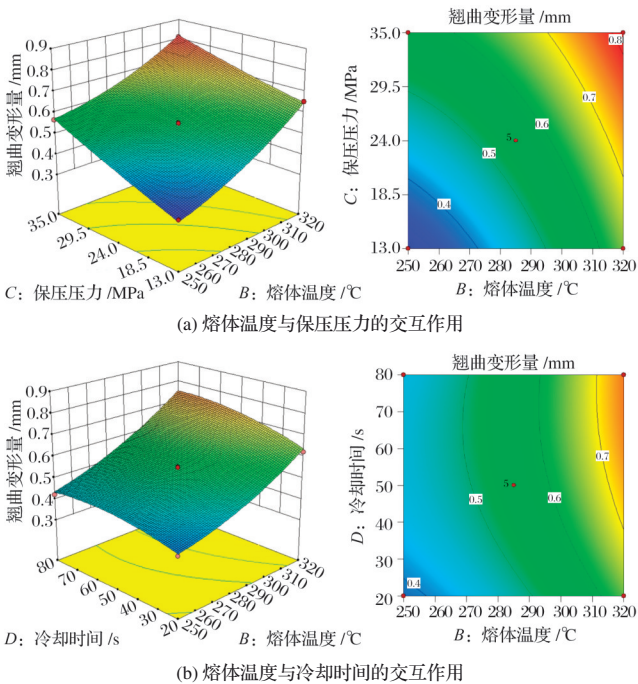


图7 3D等高线交互作用
Fig.7 3D contour interaction

3 模拟验证

在模拟分析阶段,使用响应面拟合获得的各项参数输入Moldflow软件进行模拟计算,以翘曲变形量最小化为主要目标。经过模拟验证,最终确定了优化后的最佳工艺参数组合,如表5所示。

表5 优化后的最佳工艺参数组合

Tab.5 Optimized optimal combination of process parameters				
$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	C/MPa	D/s	R/mm
112	284	23	51	0.196 1

对优化后各组样品的气穴、熔接线和缩痕指数进行分析。图8为优化后缺陷分析。从图8可以看出,优化后的样品在气穴方面明显减少,熔接线分布均匀且仅集中在侧面,整体外观得到了显著改善。同时,缩痕指数也显著降低,PA/PPE材料的缩痕指数从3.926 0%降至1.252 0%,模拟出的反应参数有效地促进了成型质量的提升,验证了优化方案的实际效果。

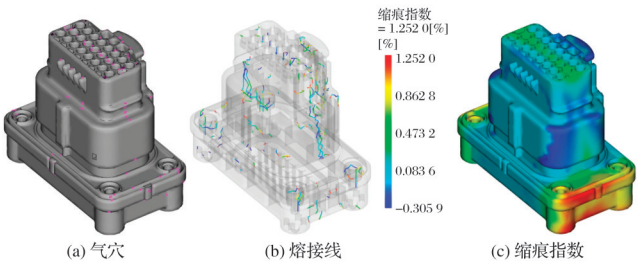


图8 优化后缺陷分析
Fig.8 Defect analysis after optimization

图9为优化模拟结果。从图9可以看出,PA/PPE制件根据设置的优化参数,其最终模拟翘曲变形量为0.194 5 mm,较优化前的初始值0.920 1 mm减少了约78.86%。以上结果表明,通过响应面模型拟合所得的反应参数,不仅有效预测了翘曲变形量,还在很大程度上改善了制件的整体质量。

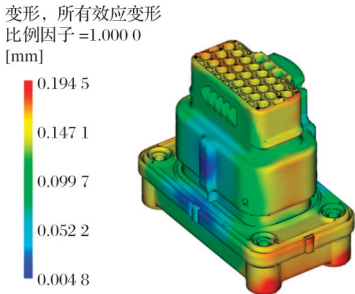


图9 优化模拟结果
Fig.9 Optimized simulation results

为验证工艺优化方案的可行性,本研究采用MD-2303-16型标准模具(长45 mm、宽55 mm、厚65 mm)开展注塑成型试验。在试验过程中,将PA/PPE原料颗粒置于100℃恒温干燥箱中处理4 h,以消除材料内部残余水分,从而有效预防成型过程中可能产生的缺陷。在模具安装

阶段,通过精密调整注塑机射嘴与模具进料口的相对位置,确保两者实现精准对中,以避免熔体泄漏或注塑偏移现象的发生。基于前期工艺研究结果,试验设定注塑参数为顶出温度 112 °C、熔体温度 284 °C、保压压力 23 MPa、冷却时间 51 s。在完成原料干燥处理后,将预处理颗粒投入注塑机料斗,待料筒温度达到预设值后启动注塑程序,全程监控设备运行状态及成型过程。同时,优化合模系统参数,将合模力设定为 1 300 kN,顶出机构参数调整为行程 70 mm、顶出力 50 kN。图 10 为实际生产实物。从图 10 可以看出,其外观质量与尺寸精度均符合要求,未观察到缺胶、气泡及熔接线等典型缺陷。这表明优化后的工艺参数具有显著的实用价值^[24-25],在考虑经济成本后认为 PA/PPE 制件可以兼顾较小的翘曲变形量与较低的成本。

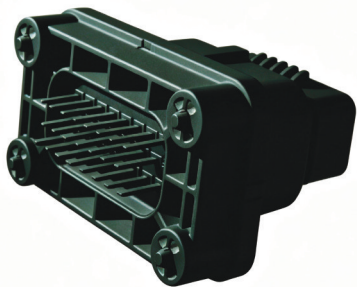


图 10 实际生产实物

Fig.10 Actual production product

4 结论

通过响应面法优化注塑工艺参数,将 PA/PPE 复合材料电力接插件的最大翘曲变形量从初始的 0.920 1 mm 降低至 0.194 5 mm,减少约 78.86%。优化后的参数组合为顶出温度 112 °C、熔体温度 284 °C、保压压力 23 MPa、冷却时间 51 s。该方法能够有效提升制件的尺寸精度和成型质量。优化后的工艺显著减少了气穴和熔接线的生成,缩痕指数从 3.926 0%降至 1.252 0%,满足电力接插件对表面质量和结构强度的要求。实际注塑试验验证了优化方案的可行性,成型后的样品外观良好,未发现明显缺陷,进一步证明了响应面法结合模拟仿真的有效性。优化后的工艺参数不仅显著改善了制件质量,还兼顾了生产成本,使 PA/PPE 复合材料在电力接插件制造中更具经济性和实用性。研究为高精度电力接插件的生产提供参考,推动了 PA/PPE 复合材料在复杂环境下的应用。

参考文献

- [1] 周堪培. 电源连接器注塑成型圆柱度优化研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(12): 90-94.
- [2] 李保定, 崔静, 刘进伟. 低压抽屉式开关柜主回路接插件的可靠性[J]. 电工文摘, 2011(3): 66-72.
- [3] 杨昆晓. 基于三螺杆挤出机的聚苯醚/聚酰胺 66 合金共混改性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [4] DE-LA-TORRE G E, DIOSES-SALINAS D C, DOBARADARAN S, et al. Physical and chemical degradation of littered personal protective equipment (PPE) under simulated environmental conditions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 178: 113587.
- [5] 汤正成, 施郁虎. 基于 RSM-OED 的注塑模具冷却系统的优化分析[J]. 塑料科技, 2025, 53(10): 162-166.
- [6] 翟盼盼. PBT 车载智能连接器注塑成型工艺优化研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 182-187.
- [7] 陈显, 李爱华. 基于 Moldflow 的 ABS 智能传输器外壳成型质量分析[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 175-181.
- [8] LIN C Y, GIM J, SHOTWELL D, et al. Explainable artificial intelligence and multi-stage transfer learning for injection molding quality prediction[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2025, 36(5): 3587-3606.
- [9] 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.
- [10] CHAUHAN V, KÄRKI T, VARIS J. Optimization of compression molding process parameters for NFPC manufacturing using taguchi design of experiment and moldflow analysis[J]. Processes, 2021, 9(10): 1853.
- [11] 康成林. 风机面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.
- [12] 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.
- [13] 任艳梅. 基于 CAE 技术的油箱保护罩注塑成型优化研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(4): 171-176.
- [14] 李晨. 塔磨机工作状态的响应曲面法调优研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2025.
- [15] 游赞, 颜黎, 程晓明, 等. Aspen HYSYS 联合 Box-Behnken 响应面法优化 L-BOG 深冷提氮工艺研究[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(2): 40-50.
- [16] 李晓微, 金燕, 董锐, 等. 基于 Moldflow 的汽车薄壁塑件成型工艺参数优化[J]. 南方农机, 2025, 56(23): 123-127.
- [17] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料模塑件尺寸公差: GB/T 14486—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [18] MUHAMAD A, HASHIM M Y. Injection moulding design, simulation and analysis using solidworks and moldflow[J]. Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering, 2025, 6(1): 121-130.
- [19] 林娜, 康淑贤, 吴海勇, 等. 基于 Moldflow 对湿巾盖翘曲变形分析及工艺参数优化[J]. 塑料科技, 2025, 53(11): 178-182.
- [20] 熊邦彦. 汽车散热器水室产品注塑翘曲变形及修正研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021.
- [21] TADI S P, KOPPISETTI D, PALISETTI V K T, et al. Polymer based binder materials for various metal injection molding processes: Salient aspects and recent trends[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133: 322-353.
- [22] 姜若琳, 常杰, 崔永生, 等. 基于 Moldflow 的玻璃纤维增强 PA66 绝缘轨距块翘曲变形预测及材料加工参数优化[J]. 广东化工, 2025, 52(21): 15-20.
- [23] 宋志远. 汽车线束保护器成型工艺参数优化研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
- [24] 陈学翔, 李华雄, 王晖, 等. 基于响应面法的 ABS-FDM 多轴增减材工艺优化[J]. 塑料科技, 2025, 53(9): 134-140.
- [25] KIM J Y, KIM H, NAM K, et al. Development of an injection molding production condition inference system based on diffusion model[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2025, 79: 162-178.