

# 高性能塑料成型工艺参数优化与制品质量提升研究

孙仲恒

1 金达科技股份有限公司, 河北省沧州市, 061001;

2 河北省塑料包装材料工程技术创新中心, 河北省沧州市, 061001;

**摘要:** 本文以汽车轻量化领域常用的 PA66/GF30 玻璃纤维增强复合材料为研究对象, 针对注塑成型过程中工艺参数对制品质量的耦合影响问题, 探究了各项工艺参数, 结合方差分析验证模型显著性, 并基于多目标优化算法求解最优工艺参数。研究可为高性能塑料注塑制品的质量控制与工艺优化提供量化依据, 对降低生产报废率具有实际意义。

**关键词:** 高性能; 塑料成型工艺; 参数优化; 制品质量提升

**DOI:** 10. 69979/3029-2727. 25. 12. 074

## 1 研究背景

高性能塑料因兼具轻量化, 密度较金属低 40%-60%、高力学性能, (拉伸强度可达 80-120MPa、耐环境老化等优势, 已广泛替代金属材料应用于汽车、电子电器、航空航天等领域。其中, 注塑成型是高性能塑料最主要的成型方式, 其工艺参数熔体温度、注射压力、保压时间等直接决定制品的质量稳定性。据行业调研数据显示, 因工艺参数不合理导致的制品报废率高达 15%-20%, 仅汽车行业每年因此产生的经济损失超 50 亿元。然而, 高性能塑料尤其是纤维增强类的成型过程存在显著的参数耦合效应。例如, 熔体温度过高会导致基体降解, 过低则会导致熔体流动性不足、充型不完整。注射压力过大虽能提升充型效率, 但会增加制品内应力, 导致翘曲变形。保压时间过长会延长生产周期, 每增加 1s, 生产效率下降约 2%, 过短则会导致制品收缩率超标。当前多数研究仍聚焦于单一参数的单目标优化, 忽略了参数间的交互作用, 导致优化结果在实际生产中适用性有限。因此, 开展多参数耦合下的高性能塑料成型工艺优化研究, 对提升制品质量稳定性、降低生产成本具有重要工程价值。

## 2 实验部分

### 2.1 实验材料与预处理

本实验选用汽车底盘部件常用的 PA66/GF30 复合材料, 其基本性能参数如表 1 所示。由于 PA66 具有强吸湿性, 23℃、相对湿度 50% 下平衡吸水率达 2.5%, 水分会导致成型过程中熔体水解降解, 降低制品力学性能,

因此实验前需对材料进行预处理。在 80℃ 真空干燥箱中干燥 4h, 至材料含水率 $\leq 0.1\%$ , 采用卡尔费休水分仪。

表 1 PA66/GF30 复合材料基本性能参数

性能指标	测试标准	数值
熔点 ( $T_m$ )	GB/T 19466.3-2004	255℃
密度 ( $\rho$ )	GB/T 1033.1-2008	1.32g/cm <sup>3</sup>
拉伸强度 ( $\sigma_b$ )	GB/T 1040.2-2006	85MPa (未优化)
断裂伸长率 ( $\epsilon$ )	GB/T 1040.2-2006	3.2%
玻纤含量 ( $\omega$ )	GB/T 9345.1-2008	30% (质量分数)

### 2.2 实验设备与制品设计

#### 2.2.1 实验设备

实验所用主要设备如表 2 所示, 其中注塑机为闭环控制式, 可精确调控熔体温度控温精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 、注射压力控压精度 $\pm 0.5\text{MPa}$  等参数, 拉力试验机与三坐标测量仪均满足国家标准精度要求, 确保质量指标测试的准确性。

表 2 主要实验设备清单

设备名称	主要参数精度
卧式注塑机	熔体温度 $\pm 1^\circ\text{C}$ , 注射压力 $\pm 0.5\text{MPa}$
电子拉力试验机	力值精度 $\pm 0.5\%$
三坐标测量仪	尺寸精度 $\pm 0.001\text{mm}$
真空干燥箱	温度精度 $\pm 1^\circ\text{C}$

#### 2.2.2 制品设计

实验制品采用标准拉伸试样试样尺寸为总长 170mm、有效平行段长度 80mm、宽度 10mm、厚度 4mm。模具为单型腔结构, 浇口类型为侧浇口, 尺寸宽度 5mm、厚度 2mm、长度 8mm, 避免熔体充型时产生过大剪切力导致玻纤断裂。

## 2.3 实验设计与数据采集

### 2.3.1 关键工艺参数筛选与水平确定

通过单因素变量法，筛选出对 PA66/GF30 制品拉伸强度（ $\sigma$ ）和翘曲度（W）影响最显著的 4 个关键工艺参数。

（1）熔体温度（T）。影响熔体流动性与基体降解程度，基于 PA66 熔点（255℃），设定水平为 260℃低、270℃中、280℃高。

（2）注射压力（P）。影响充型完整性与内应力，基于注塑机额定压力（160MPa），设定水平为 80MPa 低、100MPa 中、120MPa 高。

（3）保压时间（t）。影响制品收缩率，设定水平为 10s 低、15s 中、20s 高。

（4）模具温度（T<sub>m</sub>）。影响结晶度与冷却应力，设定水平为 75℃低、85℃中、95℃高<sup>[1]</sup>。

参数水平编码如表 3 所示，以中心点为基准，编码 -1、0、1 分别代表低、中、高水平。

表 3 关键工艺参数与水平编码

工艺参数	符号	编码-1 (低)	编码 0 (中)	编码 1 (高)
熔体温度（℃）	T	260	270	280
注射压力（MPa）	P	80	100	120
保压时间（s）	t	10	15	20
模具温度（℃）	T <sub>m</sub>	75	85	95

### 2.3.2 响应面实验设计

采用 Box-Behnken 设计（BBD）构建 4 因素 3 水平实验方案，该设计无需包含因子水平的所有组合，可有效减少实验次数并避免极端参数组合，T=280℃+P=120MPa 易导致制品过保压。实验次数计算公式为：

$$N=2k(k-1)+c \quad (1)$$

式（1）中，k 为参数个数（k=4），c 为中心点实验次数，为确保数据可靠性，取 c=5。代入得：

$$N=2 \times 4 \times (4-1) + 5 = 29$$

即共需进行 29 组实验，其中 5 组为中心点重复实验，用于验证实验重复性，实验方案由 Design-Expert 13 软件生成。

### 2.3.3 质量指标测试与数据处理

每组实验生产 3 个相同试样，对每个质量指标进行 3 次重复测试，取平均值作为响应值，以减少随机误差。

（1）拉伸强度（ $\sigma$ ）。采用 Instron 5969 拉力试验机，拉伸速度为 5mm/min。

（2）翘曲度（W）。采用 Global S 775 三坐标测量仪，测量试样有效平行段的最大翘曲高度，试样平面与基准面的最大距离<sup>[2]</sup>。

数据处理进行模型拟合与方差分析，展开检验。

## 3 结果与分析

### 3.1 单因素对制品质量的影响规律

（1）熔体温度（T）的影响。固定其他参数为中心点水平（P=100MPa、t=15s、T<sub>m</sub>=85℃），熔体温度对拉伸强度（ $\sigma$ ）与翘曲度（W）的影响如图 1 所示。

由图 1 可知，拉伸强度（ $\sigma$ ）。随 T 从 260℃升至 270℃， $\sigma$  从 85.2MPa 升至 92.1MPa，提升 8.1%。原因是温度升高使熔体粘度降低，PA66 熔体粘度在 270℃时较 260℃降低 30%，玻纤在基体中分散更均匀，界面结合力增强。当 T 超过 270℃后， $\sigma$  随温度升高逐渐下降，280℃时  $\sigma$  降至 88.5MPa，较峰值下降 3.9%，因过高温导致 PA66 分子链断裂，基体力学性能弱化，且玻纤与基体界面出现微裂纹。翘曲度（W）。随 T 从 260℃升至 280℃，W 从 0.32mm 降至 0.21mm，降低 34.4%，原因是温度升高使熔体充型更充分，制品内部应力分布更均匀，冷却收缩差异减小，但 T 超过 270℃后，W 下降趋势放缓。270℃时 W=0.23mm，280℃时 W=0.21mm，因温度对充型完整性的提升已达阈值。

（2）注射压力（P）的影响。固定其他参数为中心点水平（T=270℃、t=15s、T<sub>m</sub>=85℃。注射压力对质量指标的影响如图 2 所示。结果表明，拉伸强度（ $\sigma$ ）。P 从 80MPa 升至 100MPa 时， $\sigma$  从 83.6MPa 升至 91.9MPa，因压力增大使熔体充分填充模具型腔，玻纤与基体界面无空隙，结合更紧密。P 超过 100MPa 后， $\sigma$  增长趋于平缓，120MPa 时  $\sigma$  =92.3MPa，因界面结合已达饱和，且过高压力会导致玻纤取向度增加，横向力学性能略有下降。翘曲度（W），P 从 80MPa 升至 100MPa 时，W 从 0.35mm 降至 0.23mm，因压力提升使充型均匀性增强，内应力减小，P 超过 100MPa 后，W 反而升至 0.28mm，因过高压力导致制品内部产生“过保压应力”，冷却时应力释放引发翘曲。

### 3.2 工艺参数多目标优化与验证

（1）优化目标与约束条件。基于制品在汽车底盘部件中的应用需求，设定多目标优化函数。

最大化拉伸强度： $\sigma \geq 90\text{MPa}$ 。

最小化翘曲度： $W \leq 0.2\text{mm}$ 。

工艺参数约束： $T \in [260, 280]^\circ\text{C}$ ， $P \in [80, 120]\text{MPa}$ ， $t \in [10, 20]\text{s}$ ， $T_m \in [75, 95]^\circ\text{C}$ 。

采用 Design-Expert 13 的多目标优化模块，基于遗传算法，求解得到最优工艺参数组合为：

$T=272^\circ\text{C}$ ， $P=105\text{MPa}$ ， $t=15\text{s}$ ， $T_m=85^\circ\text{C}$

此时模型预测值为： $\sigma=92.1\text{MPa}$ ， $W=0.17\text{mm}$ 。

(2) 验证实验。为验证模型可靠性，按最优参数进行 3 组重复实验，测试结果如表 4 所示。由表 4 可知，拉伸强度平均值为  $91.8\text{MPa}$ ，与预测值  $92.1\text{MPa}$  的相对误差为  $0.33\%$ 。翘曲度平均值为  $0.18\text{mm}$ ，与预测值  $0.17\text{mm}$  的相对误差为  $5.88\%$ 。误差均小于  $10\%$ ，表明所建模型预测精度高，最优参数具有实际可行性<sup>[3]</sup>。

表 4 最优参数验证实验结果

验证次数	熔体温度 ( $^\circ\text{C}$ )	注射压力 ( $\text{MPa}$ )	保压时间 ( $\text{s}$ )	模具温度 ( $^\circ\text{C}$ )	拉伸强度 ( $\text{MPa}$ )	翘曲度 ( $\text{mm}$ )	拉伸强度误差 ( $\%$ )	翘曲度误差 ( $\%$ )
1	272	105	15	85	92.0	0.17	0.11	0.00
2	272	105	15	85	91.6	0.19	0.54	11.76
3	272	105	15	85	91.8	0.18	0.33	5.88
平均值	272	105	15	85	91.8	0.18	0.33	5.88

(3) 优化效果对比。将最优参数下的制品质量与优化前，预实验的初始参数： $T=265^\circ\text{C}$ 、 $P=90\text{MPa}$ 、 $t=12\text{s}$ 、 $T_m=80^\circ\text{C}$  进行对比，结果如图 3 所示。由图 3 可知，拉伸强度从  $85.0\text{MPa}$  提升至  $91.8\text{MPa}$ ，提升幅度为  $8.0\%$ ，翘曲度从  $0.35\text{mm}$  降至  $0.18\text{mm}$ ，降低幅度为  $48.6\%$ 。生产周期无显著变化，保压时间从  $12\text{s}$  增至  $15\text{s}$ ，单模生产时间仅增加  $3\text{s}$ ，对生产效率影响小于  $5\%$ ，实现了“力学性能提升和尺寸精度优化以及效率稳定”的多目标优化。

## 4 讨论

### 4.1 优化机制分析

最优工艺参数  $T=272^\circ\text{C}$ 、 $P=105\text{MPa}$ 、 $t=15\text{s}$ 、 $T_m=85^\circ\text{C}$  的合理性可从以下角度解释。

(1) 熔体温度 ( $272^\circ\text{C}$ )。该温度高于 PA66 熔点 ( $255^\circ\text{C}$ )  $17^\circ\text{C}$ ，既能保证熔体粘度降至  $1200\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，通过旋转流变仪测试，确保玻纤均匀分散，又避免温度超过  $280^\circ\text{C}$  导致的基体降解。红外光谱测试显示， $272^\circ\text{C}$  时 PA66 的酰胺键特征峰， $1640\text{cm}^{-1}$  无明显减弱，而  $280^\circ\text{C}$  时特征峰强度下降  $15\%$ 。

(2) 注射压力 ( $105\text{MPa}$ )。该压力能使熔体在模具型腔内的流动速度达到  $50\text{mm/s}$ ，充型时间控制在  $2\text{s}$  内，避免熔体提前冷却，同时内应力测试采用应力松弛仪显示， $105\text{MPa}$  下制品内应力为  $2.5\text{MPa}$ ，较  $120\text{MPa}$  内应力  $4.8\text{MPa}$  降低  $47.9\%$ ，有效减少翘曲。

(3) 保压时间 ( $15\text{s}$ )。该时间能使制品收缩率从  $2.5\%$  降至  $1.2\%$ ，超过  $15\text{s}$  后收缩率下降幅度小于  $0.3\%$ ，

$20\text{s}$  时收缩率  $1.1\%$ ，实现“收缩控制-效率平衡”。

(4) 模具温度 ( $85^\circ\text{C}$ )。该温度下 PA66 的结晶度达  $45\%$ ，差示扫描量热仪测试，较  $75^\circ\text{C}$  提升  $18.4\%$ ，确保力学性能，同时避免  $95^\circ\text{C}$  导致的冷却时间延长。

### 4.2 与现有研究的对比

现有研究的响应面模型相对误差普遍超  $10\%$ ，本文误差  $\leq 5.88\%$ ，主要因本文通过预实验筛选了关键参数，增加了中心点实验次数，减少了随机误差。

## 5 结语

综上，以 PA66/GF30 玻璃纤维增强复合材料为对象，筛选出影响制品质量的 4 个关键工艺参数，熔体温度 ( $T$ )、注射压力 ( $P$ )、保压时间 ( $t$ )、模具温度 ( $T_m$ )，其中  $T$  与  $P$  对拉伸强度影响最显著， $T$  与  $t$  对翘曲度影响最显著。本研究提出的参数筛选、响应面建模、多目标优化方法，可为其他高性能纤维增强塑料的成型工艺优化提供参考，对推动汽车、电子等领域的轻量化与质量控制具有实际意义。

### 参考文献

- [1] 劳新华. PEEK 材料注塑成型工艺及其性能研究[J]. 模具制造, 2024, 24(12): 146-148.
- [2] 陈建清. 高性能塑料制品的研发之路研究[J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53(11): 25-27.
- [3] 姜艳华, 周建华. 基于正交试验的高性能排水管道注塑成型工艺优化[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 136-139.