

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°C、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°C 真空干燥箱中干燥 4h, 至材料含水率≤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°C
密度 (ρ)	GB/T 1033.1-2008	1.32g/cm ³
拉伸强度 (σ_o)	GB/T 1040.2-2006	85MPa (未优化)
断裂伸长率 (ε)	GB/T 1040.2-2006	3.2%
玻纤含量 (ω)	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±1°C、注射压力控压精度±0.5MPa 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±1°C, 注射压力±0.5MPa
电子拉力试验机	力值精度±0.5%
三坐标测量仪	尺寸精度±0.001mm
真空干燥箱	温度精度±1°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 (σ) 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°C)，设定水平为 260°C 低、270°C 中、280°C 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_m)。影响结晶度与冷却应力，设定水平为 75°C 低、85°C 中、95°C 高^[1]。

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 (°C)	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 (°C)	T_m	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， $T=280^{\circ}\text{C}+P=120\text{MPa}$ 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 (σ)。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^[2]。

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 ($P=100\text{MPa}$ 、 $t=15\text{s}$ 、 $T_m=85^{\circ}\text{C}$)，熔体温度对拉伸强度 (σ) 与翘曲度 (W) 的影响如图 1 所示。

由图 1 可知，拉伸强度 (σ)。随 T 从 260°C 升至 270°C， σ 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°C 时较 260°C 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°C 后， σ 随温度升高逐渐下降，280°C 时 σ 降至 88.5MPa，较峰值下降 3.9%，因过高温度导致 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°C 升至 280°C，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°C 后，W 下降趋势放缓。270°C 时 W=0.23mm，280°C 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 ($T=270^{\circ}\text{C}$ 、 $t=15\text{s}$ 、 $T_m=85^{\circ}\text{C}$)。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 (σ)。P 从 80MPa 升至 100MPa 时， σ 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， σ 增长趋于平缓，120MPa 时 $\sigma=92.3\text{MPa}$ ，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: $T \in [260, 280]\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P \in [80, 120]\text{ MPa}$, $t \in [10, 20]\text{ s}$, $T_m \in [75, 95]\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

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:

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

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91.8MPa, 与预测值92.1MPa的相对误差为0.33%。翘曲度平均值为0.18mm, 与预测值0.17mm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^[3]。

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 (MPa)	保压时间 (s)	模具温度 ($^{\circ}\text{C}$)	拉伸强度 (MPa)	翘曲度 (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: $T = 265\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $P = 90\text{ MPa}$ 、 $t = 12\text{ s}$ 、 $T_m = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行对比, 结果如图3所示。由图3可知, 拉伸强度从85.0MPa提升至91.8MPa, 提升幅度为8.0%, 翘曲度从0.35mm降至0.18mm, 降低幅度为48.6%。生产周期无显著变化, 保压时间从12s增至15s, 单模生产时间仅增加3s, 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 $T = 272\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $P = 105\text{ MPa}$ 、 $t = 15\text{ s}$ 、 $T_m = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的合理性可从以下角度解释。

(1) 熔体温度($272\text{ }^{\circ}\text{C}$)。该温度高于PA66熔点($255\text{ }^{\circ}\text{C}$) $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 导致的基体降解。红外光谱测试显示, $272\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时PA66的酰胺键特征峰, 1640 cm^{-1} 无明显减弱, 而 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时特征峰强度下降15%。

(2) 注射压力(105 MPa)。该压力能使熔体在模具型腔内的流动速度达到 50 mm/s , 充型时间控制在2s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 MPa 下制品内应力为 2.5 MPa , 较 120 MPa 内应力 4.8 MPa 降低47.9%, 有效减少翘曲。

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

20s时收缩率1.1%, 实现“收缩控制-效率平衡”。

(4) 模具温度($85\text{ }^{\circ}\text{C}$)。该温度下PA66的结晶度达45%, 差示扫描量热仪测试, 较 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升18.4%, 确保力学性能, 同时避免 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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] 娄艳华, 周建华. 基于正交试验的高性能排水管注塑成型工艺优化[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 136-139.