

基于正交试验法的聚酰亚胺复合材料 注塑成型工艺优化试验

龚书强 范怡宁 谢秋石

(北京遥感设备研究所, 北京 100854)



摘要: 提出应用注射成型工艺方法, 通过正交试验优化设计开展了工艺参数优化试验, 研究了各注塑工艺参数对于最终成品质量的影响, 找到了最优的工艺参数, 并通过生产试验, 成功减小了零件翘曲变形量, 实现了产品的直接注塑成型, 提高了生产效率和成品率。

关键词: 聚酰亚胺复合材料; 注塑成型; 正交化试验

Orthogonal Design Optimized Experiment of Polyimide Composite Injection Molding Process

Gong Shuqiang Fan Yining Xie Qiushi

(Beijing Remote Sensing Equipment Institute, Beijing 100854)

Abstract: Based on the characteristics of polyimide composite, thermoplastic molding process has been applied. Orthogonal experiment design method has been used to optimize the parameters of injection. In order to reduce the warping of the part, five independent parameters have been studied, and the optimized parameters have been received. With the result of experimentation, a production test has been put on. Finally, the warping deformation amount has been decreased, and other sizes of the part are produced directly by molding injection. The production efficiency and rate of final products have been increased.

Key words: polyimide composite; injection molding; experiment of orthogonal design

1 引言

基座零件作为某型号产品高频头组件和天馈系统间的装配接口, 根据热模拟实验结果, 其工作环境温度在某些条件下最高有可能达到近 200℃, 对零件材料的绝热和耐高温性能提出了较高的要求, 设计选用了玻璃纤维增强聚酰亚胺复合材料, 其中有三处波导腔为直角通腔, 尺寸加工精度要求较高。同时为防止微波泄露, 要求上下底面平整, 平面度不大于 0.1mm。

由于生产周期和加工条件所限, 在零件的试制生产中选用了模压生产板材坯料/机械加工成型的工艺路线, 加工量较大, 材料浪费严重, 生产效率较低,

合格率仅在 50%~60%。本实验应用注塑成型工艺方法, 研究该材料的注射成型加工工艺参数, 实现基座零件的坯料成型。由于玻璃纤维增强聚酰亚胺复合材料价格昂贵, 因此需要通过正交试验优化设计方法, 以对于零件质量影响最大的成品翘曲度为试验指标, 开展工艺参数优化设计试验, 寻找最优的注射工艺参数, 保证零件加工要求。

2 试验设备

试验选用了 HTL90-F7A 型注塑机, 合模力为 900kN, 理论最大注射容量 117cm³。根据产品生产批量特点, 综合考虑产品的结构形式、聚酰亚胺材料相

作者简介: 龚书强 (1977-), 高级工程师, 材料工程专业; 研究方向: 材料精密加工。

收稿日期: 2013-12-28

关特性以及模具设计制造成本，选用一模一腔的模具结构形式。浇口系统采用无流道单浇口，直接对模腔供料固化成型。

3 试验设计及结果

正交试验设计方法是利用规格化的正交表设计试验方案，分析试验结果，提出最优解并进而设计出可能更优秀的试验方案的一种科学方法^[1]。

基座上下底面的平面度是零件的关键技术指标之一，直接关系到微波信号传输的质量，进而影响系统性能指标，需要着重对注塑成型过程中的翘曲变形问题进行研究，所以把制件上下底面的最大翘曲变形量作为试验指标。

结合厂家提供的材料注塑成型参数以及生产实际经验，排除相互影响的工艺因素，最终选出注射温度、模具温度、注射时间、保压时间、冷却时间等五个相对独立的工艺参数作为试验因素，并设定注塑试验工艺参数取值（因素水平），见表 1。

表 1 正交试验设计因素水平表

因素	水平	1	2	3	4	5
A 注射温度/℃		360	370	380	390	400
B 模具温度/℃		135	142	150	158	165
C 注射时间/s		0.6	1.2	1.8	2.4	3
D 保压时间/s		5	10	15	20	25
E 冷却时间/s		40	50	60	70	80

根据试验的因素和水平数量，不考虑因素间的交互作用，选择 L25（6⁵）正交表安排试验，共进行了 25 次试验。正交试验结果见表 2。

表 2 正交试验安排及结果统计

因素 试验 序号	A 注射 温度 /℃	B 模具 温度 /℃	C 注射 时间 /s	D 保压 时间 /s	E 冷却 时间 /s	空白 列	试验结果 (平面度 /mm)
1	1	1	1	1	1	1	0.72
2	1	2	2	2	2	2	0.44
3	1	3	3	3	3	3	0.13
4	1	4	4	4	4	4	0.08
5	1	5	5	5	5	5	0.44
(第 6~25 组试验结果省略)							

采用极差分析法对正交试验结果进行直观分析。结果见表 3。

表 3 正交试验结果极差分析

因素		A 注射温度 /℃	B 模具温度 /℃	C 注射时间 /s	D 保压时间 /s	E 冷却时间 /s
水平 总值	K1	1.81	1.68	2.87	1.71	2.14
	K2	1.3	1.45	2.1	1.81	1.76
	K3	1.36	1.43	1.48	1.4	1.46
	K4	1.84	1.77	0.77	1.45	1.27
	K5	1.95	1.93	1.04	1.89	1.63
水平 均值	k1	0.362	0.336	0.574	0.342	0.428
	k2	0.26	0.29	0.42	0.362	0.352
	k3	0.272	0.286	0.296	0.28	0.292
	k4	0.368	0.354	0.154	0.29	0.254
	k5	0.39	0.386	0.208	0.378	0.326
极差 R		0.55	0.5	2.1	0.49	1.87

极差分析结果为： $R_C>R_E>R_A>R_B>R_D$ ，意味着各因素影响的大小顺序为：注射时间、冷却时间、注射温度、模具温度、保压时间。其中后三项因素的影响程度相近。各因素对于翘曲度的影响趋势见图 1。

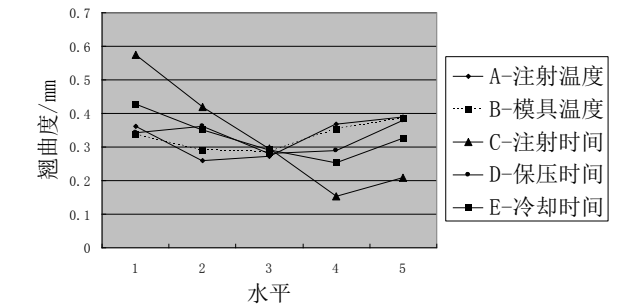


图 1 各因素对于翘曲度的影响趋势图

根据零件加工工艺路线要求，成品制件的翘曲度越小越好。因此直观分析选定方案为：A2B3C4D3E4。对应工艺参数设置见表 4。

表 4 极差分析优化的工艺参数

A 注射温度/℃	B 模具温度/℃	C 注射时间/s	D 保压时间/s	E 冷却时间/s
370	150	2.4	15	70

为确认各个因素对于成品制件翘曲度影响的显著度，应用方差分析方法对表 3 的试验结果进行因素影响显著性的分析。

首先计算各因素及空白列的水平总值，计算结果如表 5 所示。

表 5 各因素及空白列的水平总值

因素 水平 总值	A 注射温度 /℃	B 模具温度 /℃	C 注射时间 /s	D 保压时间 /s	E 冷却时间 /s	空白列
K1	1.81	1.68	2.87	1.71	2.14	1.65
K2	1.3	1.45	2.1	1.81	1.76	1.53
K3	1.36	1.43	1.48	1.4	1.46	1.33
K4	1.84	1.77	0.77	1.45	1.27	1.59
K5	1.95	1.93	1.04	1.89	1.63	2.16

考察各因素对翘曲度指标影响的显著性。

a. 计算统计量

$$P=\frac{1}{n}\left(\sum_{z=1}^n y_z\right)^2=\frac{1}{25}(8.26)^2=2.7291$$

$$R_A=\frac{1}{a_A}\sum_{j=1}^{b_A}K_{Aj}^2=\frac{1}{5}(1.81^2+1.3^2+1.36^2+1.84^2+1.95^2)=2.8001$$

$$R_B=\frac{1}{a_B}\sum_{j=1}^{b_B}K_{Bj}^2=\frac{1}{5}(1.68^2+1.45^2+1.43^2+1.77^2+1.93^2)=2.7655$$

$$R_C=\frac{1}{a_C}\sum_{j=1}^{b_C}K_{Cj}^2=\frac{1}{5}(2.87^2+2.1^2+1.48^2+0.77^2+1.04^2)=3.3024$$

$$R_D=\frac{1}{a_D}\sum_{j=1}^{b_D}K_{Dj}^2=\frac{1}{5}(1.71^2+1.81^2+1.4^2+1.45^2+1.89^2)=2.7670$$

$$R_E=\frac{1}{a_E}\sum_{j=1}^{b_E}K_{Ej}^2=\frac{1}{5}(2.14^2+1.76^2+1.46^2+1.27^2+1.63^2)=2.8157$$

$$R_{\text{空}}=\frac{1}{a_{\text{空}}}\sum_{j=1}^{b_{\text{空}}}K_{\text{空}j}^2=\frac{1}{5}(1.65^2+1.53^2+1.33^2+1.59^2+2.16^2)=2.8052$$

$$W=\sum_{z=1}^n y_z^2=3.611$$

式中： n ——试验总次数； y_z ——第 z 次试验结果；
 a_i ——每列水平的重复次数。则偏差平方和为：

$$Q_T=W-P=3.611-2.7291=0.8819$$
$$Q_A=R_A-P=2.8001-2.7291=0.071$$
$$Q_B=R_B-P=2.7655-2.7291=0.0364$$
$$Q_C=R_C-P=3.3024-2.7291=0.5733$$
$$Q_D=R_D-P=2.7670-2.7291=0.0379$$
$$Q_E=R_E-P=2.8157-2.7291=0.0866$$
$$Q_x=Q_{\text{空}}=R_{\text{空}}-P=2.8052-2.7291=0.0761$$

式中： Q_T ——总偏差平方和； Q_i ——因素 i 的偏差平方和； Q_x ——误差平方和。

b. 将上述计算结果列成方差分析表，见表 6。

表 6 方差分析表

方差来源	偏差平方和	自由度	方差估计值	F 值	F0.01	F0.05	显著性
注射温度/℃	0.071	4	0.01775	0.933	10.97	5.05	不显著
模具温度/℃	0.0364	4	0.0091	0.478	10.97	5.05	不显著
注射时间/s	0.5733	4	0.143325	7.534	10.97	5.05	*
保压时间/s	0.0379	4	0.009475	0.498	10.97	5.05	不显著
冷却时间/s	0.0866	4	0.02165	1.138	10.97	5.05	不显著
误差	0.0761	4	0.019025				
总和	0.8819	24					

由试验结果的方差分析可以得到，注射时间在显著性水平为 0.05 时，对成品制件有显著影响，而其它因素都不显著。所以注射时间是聚酰亚胺复合材料注

塑工艺参数中最重要的一个。

使用极差分析所得到的正交试验工艺参数优化结果（表 5），结合方差分析得到的因素影响显著度指标，继续进行了生产试验。同时根据试验结果，对模具尺寸进行了修整，在保证波导腔和连接孔等关键注塑成型尺寸的基础上，减少了成品零件的变形量，最终确定的生产工艺参数见表 7。

表 7 生产工艺参数

注射温度 /℃	模具温度 /℃	注射时间 /s	保压时间 /s	冷却时间 /s
375	150	2.5	20	75

在此工艺参数下,共进行了 20 余件零件的注射成型加工,成品零件上下面的翘曲度最大值由原来的 0.6~0.7mm 减小到了 0.05~0.06mm 左右,其它尺寸(包括最重要的波导腔和连接孔尺寸在内)均能够满足技术指标要求,合格率达到 95% 以上。

为验证选用的热塑性聚酰亚胺复合材料性能指标,使用表7中的注塑工艺参数注射成标准试片,进行了材料性能检测,测试结果满足设计要求。抽取3件使用改进后工艺路线生产的样件进行结构尺寸数

据检测,结果满足制件尺寸技术指标要求。此外,分别开展了与基座相连接的产品装配后电气指标测试工作,测试结果完全满足设计电气指标的要求。

4 结束语

结合生产需求,对聚酰亚胺复合材料注射成型工艺参数进行了优化设计实验。通过正交试验优化设计方法,以零件成品翘曲度为试验指标,选择了注射温度、模具温度、注射时间、保压时间、冷却时间等五个独立工艺变量,开展了工艺参数优化试验。通过对试验结果的极差分析和方差分析处理,得到了优化的工艺试验参数和各因素对于最终指标影响的显著度。结果表明,注射时间是聚酰亚胺复合材料注塑过程中最重要的工艺参数。结合优化试验结果,开展生产试验,材料性能、制件尺寸和电气指标等全面满足设计要求。

参考文献

- 1 邱秩兵, 试验设计与数据处理, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008

[illegible]

(上接第 40 页)

成像部件的装配涉及光、机、电、热四个专业的交叉协调,其装配精度直接影响空间遥感器的成像质量。本文通过将成像部件的性能指标分解至每个装配环节的精度要求,并按各专业划分出装配子部件,制定了合理的工艺流程及装配方案,保证了产品的性能要求,提高了装配过程的可操作性、质量可靠性。文中所述的方法为其余空间遥感器成像部件的装配提供了一定的借鉴。

参考文献

- 1 王孝义, 张友良, 张帆. 装配序列评价研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(13): 1165~1169
- 2 周开俊, 李东波, 许焕敏. 一种产品装配序列的评价方法[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4): 563~567
- 3 张刚, 温海. 复杂结构产品可装配性评价方法研究[J]. 机械设计与制造, 2008, 4(4): 203~205