

基于多指标综合评价的注塑工艺参数优化^{*}

赵果 辛勇

(南昌大学机电工程学院,南昌 330031)

摘要 针对注射成型过程的复杂性、影响制品质量因素的多样性及制品质量评价标准不统一的问题,应用正交实验法及注塑模拟分析软件 Moldflow 分析了注塑工艺参数(模具温度、注射时间、保压压力、保压时间等)对手机外壳注塑件综合质量(最大变形量、体积收缩率和沉降指数)的影响。在正交实验的基础上,采用模糊加权综合评价法对制品的综合质量进行评判,得出最佳的成型工艺方案并进行了模拟验证。

关键词 注射成型 正交实验 综合质量 参数优化 模糊加权

由于生产效率高,可加工塑料种类多,易于自动化,能一次成型外形复杂、尺寸精确、可带嵌件的塑料制品等特点,注射成型已成为塑料加工的重要方法之一。但注射成型是一个具有非线性的多参数相互作用的复杂过程,塑料熔体在型腔中的流动行为很难直观表征出来;注塑件质量和工艺参数之间存在非线性、强耦合性和时变性的关系,难以获得精确的系统模型。所有这些都使得成型过程中工艺参数的选取变得异常困难,如何优化和确定注塑工艺参数是获得高质量制品的关键。

近年来,许多学者对注射成型工艺参数的优化问题进行了研究^[1-4],并取得了丰硕的成果,但工艺参数的调整多针对单个指标(如翘曲、熔接痕等),或者作定性的研究,缺乏对制品质量的综合评价。为此,笔者提出了多指标综合评价的思想和模型,该方法采用正交实验法^[5]设计实验矩阵,使用商品化的 CAE 软件 Moldflow^[6-7]进行模拟,在正交实验和数值仿真获得样本数据的基础上,将模糊加权综合评价引入到注射成型工艺优化中,得出使注塑件的综合质量指标均达到理想状态的一组工艺参数组合。

1 综合评价模型构建

1.1 评价模型

所谓综合评价是指对以多属性体系结构描述的对象系统做出全局性、整体性的评价,根据所给的条件采用一定的方法给每个评价对象赋予一个评价价值(评价指数),再据此择优或排序^[8]。笔者提出的多指标综合评价模型如下:

(1) 问题设定:假定有 n 个评价对象, m 个评价指标来描述对象的属性,用 x_{ij} 表示第 i 个对象的第 j 个指标值;

(2) 原始数据标准化:将原始数据通过式(1)^[9]

无量纲处理为 V_{ij} , 即:

$$V_{ij} = (M_j - x_{ij}) / (M_j - m_j) \quad (1)$$

式中: $M_j = \max\{x_{ij}\}$, $m_j = \min\{x_{ij}\}$

(3) 确定指标的权重:对不同目标权系数进行赋值,假定权重向量 $W = (w_1, w_2 \cdots w_m)$;

(4) 综合评价:根据综合指标的权重,通过加权线性法和法计算出综合评分 V_i , 据此就可以对方案系统进行排序和择优,见式(2):

$$V_i = V_{i1}w_1 + \cdots V_{im}w_m = \sum_{j=1}^m V_{ij}w_j \quad (2)$$

1.2 评价方法与流程

CAE 技术可用来模拟给定条件下熔体在模具内的流动、传热情况,较为准确地预测成型条件对制品质量的影响。但是,CAE 技术的应用只是在计算机上反复试错,依赖于设计者的经验,费时、费力且难以获得最优的工艺。

实验设计(DOE)法以概率论与数理统计为理论基础,能够合理地安排实验和正确地分析实验数据,以最少的实验次数获得全因子实验中影响性能参数的全部信息。目前应用最多的是正交实验设计方法,该方法借助于简单计算各因素水平对实验结果的影响,通过极差分析、综合比较,快速获得优化方案及实验因素对所考核指标的影响程度,计算在正交表上进行,整个过程简单明了,通过很少的实验来获取足够多的信息,从而节省成本。

正交实验方法为优化问题提供了便捷的工具,但该方法原则上只能优化单指标问题。模糊加权综合评价方法采用主客观结合赋权法,同时体现评价

^{*} 教育部科技研究重点资助项目(03066)、江西省自然科学基金资助项目(0450060)、江西省主要学科跨世纪学术带头人资助项目(z1815)

指标及权重系数间的互补性, 寻找使得每个指标都尽可能好的条件, 是将多指标优化问题转换为单指标的一种理想方法。

将数值模拟、实验设计及模糊加权综合评分结合可较容易地实现注射成型工艺多参数、多指标的优化。据此笔者提出了多指标综合评价的思想和模型。评价流程如图 1 所示。

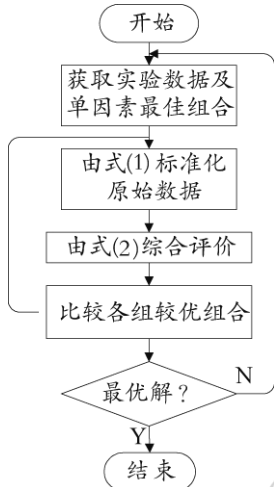


图 1 综合评价流程图

1.3 评价指标

注射成型质量是一个包含较广的综合概念, 大致可分为性能质量和表面质量。性能质量包括制品内部组织结构形态、密度、物理力学性能、熔接痕强度及与塑料收缩特性有关的尺寸和形状精度等; 表面质量包括表面粗糙度及表观缺陷状况等^[10]。

体积收缩率^[11]是成型制品相对原始模型的体积收缩百分比, 是聚合物材料线收缩率的定性表示, 是引起注塑件尺寸误差的直接原因, 非均匀的体积收缩率是引起制品翘曲的主要原因; 翘曲变形是由于注塑件的不均匀收缩, 从而使制品的形状偏离了模具型腔的形状; 沉降斑^[4]是由保压过程中熔体的热收缩引起的, 会直接影响制品的表观质量, 沉降指标用于说明沉降深度受材料、制件几何特征、注射相对位置、充模成型条件影响的严重程度。这些都是衡量塑料制品质量的重要指标, 是整个注射成型过程的综合反映。其中体积收缩率和最大变形量反映制品的性能指标, 沉降指数反映制品的表面质量, 通过对这些指标的量化分析可保证制品综合质量达到规定的要求。

2 实例分析

2.1 模拟实验模型

以一手机外壳为研究对象, 材料为(丙烯腈/丁

二烯/苯乙烯) 共聚物(ABS) 。通过 Moldflow Design Link(MDL) 将 3D 模型导入到 Moldflow 的 MPI 模块中, 选择 Fusion 格式进行网格划分, 修改网格的缺陷后, 如图 2 所示。



图 2 有限元模型图

2.2 确定评价指标

手机外壳属于形状比较复杂的中小型薄壁注塑件, 不能有较大的翘曲变形, 但有较高的外观质量要求, 同时需要满足装配要求。针对需要提高手机外壳综合质量的问题, 以及 CAE 的定量分析条件, 选取体积收缩率(%) Y_1 、最大变形量(mm) Y_2 、沉降指数(%) Y_3 作为手机外壳质量的主要评价指标。

2.3 仿真和正交实验数据分析

本实验的目标是寻求较好的工艺参数组合, 以提高注塑制品的综合质量。影响注塑件综合质量的因素(工艺参数) 主要有: 模具温度($^{\circ}\text{C}$) A、熔体温度($^{\circ}\text{C}$) B、保压时间(s) C、保压压力(MPa) D、 v/p 转换点(%) E、注射时间(s) F 和冷却时间(s) G, 根据 CAE 分析的工艺范围, 每个因素选取 4 个水平, 因素水平如表 1 所示。

表 1 实验因素和水平设置

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
A	50	60	65	70
B	240	245	250	260
C	8	10	15	20
D	70	80	90	100
E	97	98	99	100
F	1.0	1.5	2.0	2.5
G	10	15	20	25

本实验涉及多因素、多水平、多指标, 由于没有 7 因素 4 水平的正交表, 故选用 $L_{32}(4^9)$ 正交表安排实验, 通过 CAE 模拟得到各个指标值。为得到各因素与指标的关系, 找出指标随因素变化的规律和趋势, 寻求各因素水平的最佳搭配, 采用极差分析法计算出每个工艺参数在各个水平下的均值和极差值, 如表 2 所示。

表 2 实验分析结果

指标	实验号 ¹⁾	因素						
		A	B	C	D	E	F	G
Y ₁	K ₁₁	7.034	6.882	7.099	7.482	7.222	7.611	7.109
	K ₂₁	7.192	7.066	7.183	7.168	7.141	7.241	7.093
	K ₃₁	7.104	7.136	7.085	6.991	7.079	6.941	7.111
	K ₄₁	7.144	7.390	7.107	6.834	7.032	6.681	7.161
	R ₁	0.158	0.508	0.098	0.648	0.190	0.930	0.068
Y ₂	K ₁₂	0.536	0.548	0.546	0.572	0.549	0.572	0.545
	K ₂₂	0.543	0.546	0.543	0.553	0.546	0.553	0.545
	K ₃₂	0.548	0.544	0.545	0.534	0.544	0.537	0.545
	K ₄₂	0.553	0.541	0.545	0.519	0.541	0.518	0.544
	R ₂	0.017	0.007	0.003	0.053	0.008	0.054	0.001
Y ₃	K ₁₃	4.591	4.398	4.623	5.002	4.742	5.140	4.632
	K ₂₃	4.715	4.585	4.703	4.691	4.664	4.768	4.617
	K ₃₃	4.617	4.661	4.610	4.516	4.604	4.461	4.634
	K ₄₃	4.643	4.922	4.630	4.358	4.556	4.197	4.683
	R ₃	0.124	0.524	0.093	0.644	0.186	0.943	0.066

注: 1) K_{ij}是在某个工艺参数第*i*个水平下的第*j*个质量指标的均值; *i* = 1,2,3,4,代表4个水平; *j* = 1,2,3,分别代表体积收缩率、最大变形量、沉降指数; R_j代表某个工艺参数影响下第*j*个质量指标的极差。

极差的大小反映了因素对指标的影响程度,极差大表明该因素对指标的影响大,通常为主要因素;反之则为次要因素。由极差分析结果可初选出最优成型条件。在本实验条件范围内,从各项指标的分析结果可得出如下结论:

(1) 从体积收缩率角度看,成型工艺较好的实验组合是 A1B1C3D4E4F4G2,各因素影响权值 F > D > B > E > A > C > G; 最大变形量较好的实验组合是 A1B4C2D4E4F4G4,各因素影响权值 F > D > A > E > B > C > G; 沉降指数较好的实验组合是 A1B1C3D4E4F4G2,各因素影响权值 F > D > B > E > A > C > G。

(2) 注射时间和保压压力对三项质量指标的影响都较大,保压时间和冷却时间的影响都较小。

(3) 体积收缩率和沉降指数的变化趋势大体一致。

由于各因素对指标的影响程度各有侧重,同时各指标的作用趋势并不一致,为兼顾各个指标,有必要建立一个使各个指标都尽可能好的综合评价体系,从而将多指标问题转化为单指标,实现指标对因素的优选过程。

2.4 数据的处理

在本模拟实验中,所选的三个目标的量纲不一致,而且对制品质量的影响程度也各有侧重,无法直接将三项数据进行叠加评价。因此,采用极值处理法(式1)对注塑件的各指标值进行无量纲处理,并

将其映射到[0,1]的数值空间;在模糊处理的基础上,采用主客观结合的线性评价模型(式2),对注塑件的质量进行加权综合评分。根据各指标对注塑件质量影响的不同,体积收缩率、最大变形量和沉降指数的权值分别取 $w_1 = 30$ 、 $w_2 = 40$ 、 $w_3 = 30$ 。通过计算可以得到32组试验的综合质量的评分结果。从模糊综合评分的直接结果看,第29组(A4B1C3D4E2F4G2)试验的分值最高,为90.44。

为了进一步研究各因素与综合指标间的关系,找出各因素对指标影响的规律和趋势,寻求出各因素水平的最佳组合,模拟实验采用直观分析法对数据进行分析。选取上面算得的制品质量的综合评分作为评价指标,利用正交实验设计法得到综合指标的极差值,结果见表3。

表 3 综合评分极差分析结果

项 目	因 素						
	A	B	C	D	E	F	G
1 水平均值	55.409	56.388	50.656	30.924	46.344	27.582	50.756
2 水平均值	49.024	51.740	49.284	46.592	49.602	44.320	51.090
3 水平均值	50.161	50.210	51.468	57.535	51.979	58.376	50.640
4 水平均值	49.520	43.777	50.706	67.063	54.189	71.836	49.627
极差	7.889	12.611	2.184	36.199	7.845	44.254	1.463
排序	4	3	6	2	5	1	7

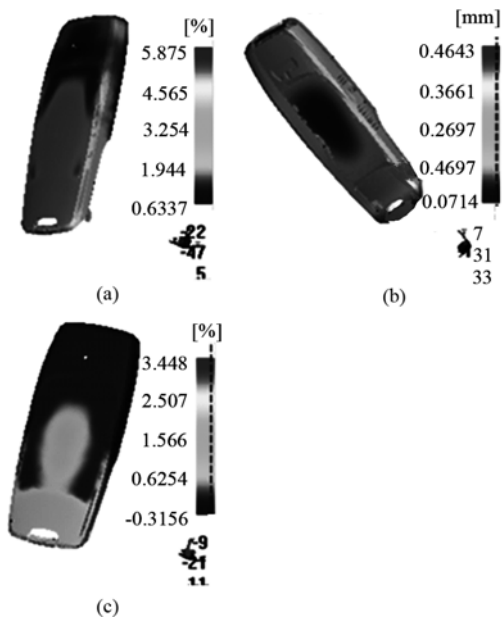
从综合指标的极差分析结果看,各参数对综合指标的权值影响是 F > D > B > A > E > C > G。其中,注射时间和保压压力的影响较大;熔体温度次之;接下来是模具温度和 v/p 转换点的影响,两值比较接近;影响较小的是保压时间和冷却时间。最佳的参数组合是 A1B1C3D4E4F4G2。

至此,共得出了3组不同的优选参数组合方案。为确定制品综合质量最高的那组方案,有必要将这3组的成型条件,通过 Moldflow 分析做对比试验,并给出最优条件下的制品质量状况。优选参数的实验结果对比如表4所示,其中,Y是综合评分值。由表4可知,A1B1C3D4E4F4G2方案的综合评分值最高,该方案最优。该方案正是利用多指标综合评价模型所得的最优参数组合。在所考察的工艺参数水平上,对于本研究中的模型,最优化的工艺参数组合是:模具温度 50℃、熔体温度 240℃、保压时间 15 s、保压压力 100 MPa、v/p 转换点 100%、注射时间 2.5

表 4 优选参数的实验结果对比

试验方案	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y
A1B4C2D4E4F4G4	6.508	0.4956	4.068	89.81
A1B1C3D4E4F4G2	5.875	0.4643	3.448	111.68
A4B1C3D4E2F4G2	6.196	0.5057	3.681	90.44

s 和冷却时间 15 s。模拟实验表明, 该方案为最佳组合方案, 模拟结果如图 3 所示。



a—体积收缩率; b—最大变形量; c—沉降指数
图 3 最佳方案模拟结果

3 结论

- (1) 将 CAE 和正交实验结合, 可得出各因素对制品质量指标的影响。
- (2) 对于不同的实验目标, 各个因素的影响程度不同。

(3) 引入模糊加权综合评价方法实现了制品的综合质量优化, 并为其它多因素、多指标的不确定问题提供了新思路。

参考文献

[1] 董金虎, 董斌斌. 薄壳塑件翘曲变形分析与工艺参数优化[J]. 模具工业, 2004(9) : 30 - 34.

[2] Huang Mingchih, Tai Chingchih. The effective factors in the warp-age problem of an injection-molded part with a thin shell feature [J]. J Mat Pro Tech, 2001(17) : 1 - 9.

[3] 骆志高, 王海涵. 注射工艺参数对薄壳塑件翘曲变形的影响 [J]. 模具工业, 2006, 32(9) : 53 - 57.

[4] 郑晓培, 路书芬, 王利霞, 等. 工艺参数对注塑制品沉降斑的影响分析及优化[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(7) : 32 - 36.

[5] 吴贵生. 实验设计与数据处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.

[6] 王刚, 单岩. Moldflow 模具分析技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[7] 王刚, 单岩. Moldflow 模具分析应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[8] 王宗军. 综合评价的方法、问题及其研究趋势[J]. 管理科学学报, 1998, 1(1) : 73 - 79.

[9] 郭亚军, 于兆吉. 综合评价的合理性问题[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2002, 23(9) : 844 - 849.

[10] 中国机械工程学会, 中国模具设计大典编委会. 中国模具设计大典[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2003.

[11] Chang T C. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the Taguchi method[J]. Polymer Engineering and Science, 2001, 41 : 703 - 710.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS IN INJECTION MOLDING BASED ON
MULTI-TARGET COMPREHENSIVE EVALUATION

Zhao Guo, Xin Yong

(Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT For the complexity of injection molding process, the diversity of factors influencing part quality and the multifor-mity of quality evaluation standards, the influences of the process parameters(mold temperature, injection time, hold pressure, hold time, etc.) on the comprehensive quality(maximal warp, volume shrinkage ratio and surface sink index) of mobile phone cover injec-ted part are studied by using Moldflow analysis software and orthogonal experiment method. The comprehensive quality of injection part is evaluated by using comprehensive valuation equation of fuzzy weight. In this way, the optimized process parameter scheme is ob-tained and validated.

KEYWORDS injection molding, orthogonal experiment, comprehensive quality, process optimization, fuzzy weight

Basell 公司推出注 - 拉 - 吹塑 PP 系列材料

Basell 公司最近推出注 - 拉 - 吹塑专用聚丙烯(PP) 系材料 Strethene。新材料符合食品、家用化学品及热包装应用一般客户的要求, 以前这些应用主要选用传统材料 PET 或玻璃包装。Basell 公司还计划开发和推出医疗和药品包装用注 - 拉 - 吹塑 PP 配混料 Pusell。

目前 Basell 公司仅有两个 Strethene 牌号, 密度均为 0.9

g/cm³, 远低于玻璃, 也小于 PET。其中一个牌号 Strethene RP 1685 的热变形温度达 109℃, 适用于特别强调刚性的制品; 另一个牌号 Strethene RP 1903 的透明性高于标准 PP 牌号, 达到化妆品包装要求的透明度。

Strethene 的水蒸汽透过率远小于 PET, 也不含一般 PET 的微量乙醛, 因而适用于包装奶类食品, 其良好的耐应力开裂性使其也适用于包装家用化学品。(中聚网)