

文章编号:1671-6833(2003)03-0062-05

工艺参数对注塑制品质量的影响研究

王利霞, 王 蓓, 申长雨

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 河南 郑州 450002)

摘 要: 注塑成型工艺过程极其复杂且其对制品质量有重要的影响, 获得优化的工艺参数是改善制品质量的关键. CAE 技术可辅助优化工艺, 但目前的应用是在计算机上的反复试错, 依赖于设计者的经验, 费时、费力且难以获得最优的工艺. 将 CAE 及 Taguchi DOE 技术结合, 可在较少的分析次数下自动获得优化工艺, 从而改善了制品质量. 收缩和沉降斑是衡量注塑制品质量的两个重要指标, 文中基于一个工业产品, 采用 $L_9(3^4)$ 正交矩阵进行实验, 研究工艺参数对注塑制品内最大沉降斑和体收缩率变化的影响, 获得优化工艺参数使体收缩率变化和沉降斑指数达到最小, 分析结果表明了该方法的有效性.

关键词: 注塑成型; 工艺优化; DOE; 体收缩率; 沉降斑

中图分类号: TQ 320.66 **文献标识码:** A

0 引言

注塑成型是重要的塑料制品成型方式, 适于大批量生产形状复杂、尺寸要求精确的塑料制品. 在成型过程中, 材料开始要经历温度和压力增加、严重的剪切变形, 随后在模具型腔中温度和压力急剧下降, 使得制品固化, 同时未来得及松弛的残余应力和取向及其他一些制品性能保留了下来, 决定了制品的质量. 因此, 注塑成型制品的质量受到许多因素的影响. 这些因素有: 与模具设计和冷却管道设计有关的几何参数, 材料性能参数包括聚合物材料的流变性能、热力学性能、物理性能、机械性能及在充填、保压和冷却过程中的工艺参数等. 随着热塑性塑料在生产中的应用越来越广泛, 获得合适的工艺条件越来越显得迫切. 在制品和模具设计中已经广泛采用数值模拟辅助设计^[1], 而在工艺设置和调节方面, 还没有类似的方法辅助工艺工程师. 上个世纪 90 年代, 基于知识的专家系统可帮助提供工艺设计的智能建议和智能决策^[2]. 然而, 因为其自身的定性和定量推理的不完整性, 仅仅靠基于知识的专家系统还难以给出优化解. 近年来, 研究者们采用多种方法对工艺优化进行了研究^[3,4], 如传统优化技术、遗传算

法、神经网络等, 这些方法理论性太强, 工厂的技术人员很难理解, 使得其在实际中的应用存在一定的困难.

注射成型的非线性、多变量特性, 使得其工艺的设置非常困难. 而传统的试错方法虽然可以改善制品质量, 却费时费力耗资. CAE 技术的出现, 使得注塑成型工艺的计算机模拟能帮助工艺工程师迎接这一挑战, 可通过对成型过程的模拟, 及早发现不合理的工艺设置, 修改参数并最终获得无明显缺陷的注塑制品. 而 CAE 技术与 DOE 技术的结合, 可方便实现工艺的自动优化. 本文结合 CAE 技术和 DOE 技术研究工艺参数对制品质量的影响并优化工艺参数.

1 数值模拟与实验设计结合的工艺优化理论

CAE 技术可用来确定合适的工艺参数, 这对于大型、复杂和尺寸要求精确的制品显得尤为重要. 应用 CAE 技术优化工艺参数时, 甚至还可以没有制品和模具原型, 可节省大量的时间和资金. 但目前的应用也仅限于应用 CAE 分析代替反复试模, 这只能使工艺调节到无明显制品缺陷的工艺, 而不能达到最优工艺, 而且对于大型复杂的制

收稿日期: 2003-04-28; **修订日期:** 2003-06-20

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2002AA336120)

作者简介: 王利霞(1969-), 女, 河南省长垣县人, 郑州大学副教授, 博士研究生, 主要从事高聚物成型模拟、工艺优化及制品质量控制方面的研究.

品,由于工艺模型及几何模型的复杂性,CAE 分析时间较长,限制了其在工艺优化方面的应用.因此,合理设计实验,有效利用CAE 分析,以较少的分析次数获得足够的实验信息,并实现工艺参数的自动优化具有重要的意义.

1.1 注塑成型充填/后充填过程的数值模拟

在塑料制品生产中,塑料、模具和加工设备三者密切相关,塑料加工不单纯是物理过程,而是控制制品的结构和性能的中心环节.近年来,随着计算机辅助工程(CAE)技术的发展,该技术在塑料加工行业的应用也越来越广泛.对加工过程进行数值模拟,可研究加工条件的变化规律,预测制品的结构和性能,选择制品和模具设计以及工艺条件的最佳方案,对塑料在加工过程中的流动、传热以及在力场和温度场的作用下所出现的物理变化及化学变化得以深刻的了解,使加工成型从一门实用技术变为一门应用科学.

在注塑成型过程中,由于模腔的复杂性及聚合物熔体流变性质的复杂性,再加上移动边界的存在,问题的求解存在着很大的困难.但由于注塑件通常都是薄壁件,通过引入 Hele-Shaw 近似并给出适当的简化,得到最终的控制方程组压力方程是二维的,而温度场控制方程仍然保持三维.

本文基于非牛顿流体在非等温下的广义 Hele-Shaw 流动的控制方程,建立注塑成型充填/后充填过程统一的数学模型.在注塑成型充填/后充填阶段,熔体在模具中流动的控制方程可表示为^[1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = 0 \tag{3}$$

$$\rho C_p(T) \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \tag{4}$$

式中: P 为压力; T 为温度; ρ 为密度; $C_p(T)$ 是比热; $k(T)$ 是聚合物熔体的热传导率; η 为剪切粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; x, y 为中面的坐标; z 是型腔厚度方向的坐标; S 是流通率.

在充填和后充填阶段,聚合物在模腔中的流动行为强烈地依赖于熔体的流变、物理及热性能,这里剪切粘度采用cross-WLF^[1] 粘度模型, $p-v-T$ 方程采用双域Tait 经验方程^[1], $k(T)$ 和

$C_p(T)$ 均为温度的函数^[1].

基于上述控制方程,结合适当的边界条件,采用混合有限元/有限差分/控制体积法实现充填/后充填一体化模拟.通过充填/后充填模拟,我们可对成型过程中熔体的流动行为、各种场(温度、压力、速度、密度等等)的分布及变化得以深刻的了解,并可预测制品的性能.

采用数值模拟代替真实实验具有以下优势:
①方便改变输入参数值的范围.在真实实验中,一些极端值会受到实际条件的限制.
②独立变量的任意水平组合都是可能的.
③计算机模拟实验结果的重复性较高.
④许多情况下,模拟实验的时间及花费要求较少.
⑤可预测实际实验难以测量的一些质量性能指标.

1.2 Taguchi 实验设计(DOE) 技术

多因子实验布置技术最早由英国 R.A. Fisher 提出,这种方法称为因子实验设计.全因子实验要包含所有因子的所有可能组合,在真实的工业实验中一般包含大量的实验因子,这将导致实验数目巨大.为了降低实验数目,只需由所有可能组合中挑选一小部分因子组合进行实验并可获得充分的实验信息,Taguchi 实验设计技术即是这样一种实验设计技术.Taguchi 实验基于一定的规则设计正交实验矩阵,确保以最小数目的实验获得全因子实验中影响性能参数的全部信息.正交矩阵方法的关键在于每个实验的设计变量水平组合的挑选.

Taguchi 实验设计技术传统的应用是设置各个影响因子的水平组合进行真实的实验并研究实验结果.然而,有许多情况真实实验难以进行且有些质量指标很难测量,随着数值模拟技术在工业中的应用,可用数值方法模拟真实实验.

本文利用注塑成型充填/后充填的数值模拟代替真实实验进行模拟实验预测成型过程及制品性能.注塑制品质量受到很多因素的影响,而且这些变量的变化范围很广,这些因素对制品质量的影响研究即使采用CAE 模拟工作量也非常大.因此,如在实际实验中一样,采用DOE 技术设计实验以减少实验次数而获得足够的信息^[5~8].这里采用TAGUCHI DOE 技术设计实验,并通过一系列数值实验研究各个工艺参数对制品质量的影响而得到优化解,数值模拟与DOE 结合进行工艺优化的具体思路如图1所示.

应用正交矩阵是一种有效的方法同时研究多个工艺参数的影响.在Taguchi DOE 技术中,一旦

参数和水平确定,从许多参考书中即可查到对应的正交矩阵布置.注意在实验中,所选参数必须是相互独立的且在操作窗口内是连续的,否则将导致错误结论^[7].

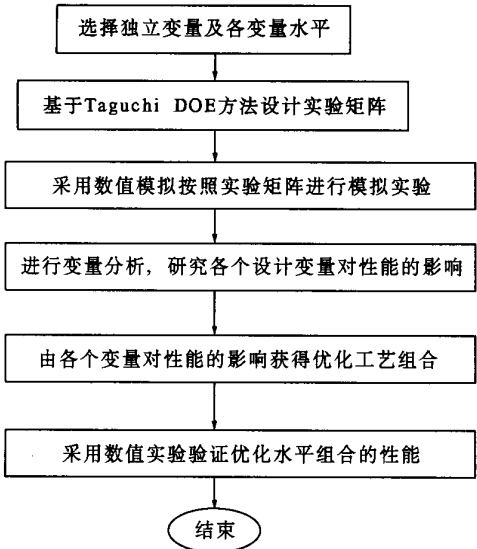


图1 数值模拟与DOE结合的注塑工艺优化实施思路
Fig.1 How chart of the process optimization for plastic injection molding using CAE/DOE combination method

上述工艺优化过程可方便地在计算机上自动实现,避免了人工干预带来的误差.

2 实验和结果

本文选用一个工业产品作为研究算例(图

2),材料为PP,实验参数及参数水平设置见表1.基于4参数3水平的正交矩阵见表2.对于注塑制品,沉降斑^[6~8]和收缩^[5,7]是制品质量的两个重要指标,沉降斑严重影响制品的表面质量,而收缩及收缩不均匀会使得制品产生翘曲,严重影响制品的尺寸和形状,因此本文选用制品内的最大沉降斑深度及体收缩率变化(最大和最小体收缩率的差值)作为质量指标,用CAE分析代替真实实验,数值实验结果见表2.



图2 几何模型

Fig.2 Model geometry

表1 因子和水平设置

Tab.1 Factors and levels

参数	水平1	水平2	水平3
熔体温度 $A/^{\circ}\text{C}$	215	230	245
模具温度 $B/^{\circ}\text{C}$	45	50	55
充填时间 C/s	1.6	2.0	2.4
保压时间 D/s	8	10.0	12

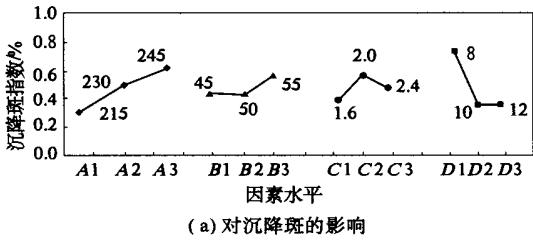
表2 实验正交矩阵及实验结果
Tab.2 Experiments array and the results

实验号	A	B	C	D	沉降斑深度/ $\%$	体收缩率变化/ $\%$
1	1	1	1	1	0.431 665	0.393 760
2	1	2	2	2	0.241 226	0.529 573
3	1	3	3	3	0.270 058	0.639 262
4	2	1	2	3	0.432 745	0.747 449
5	2	2	3	1	0.690 469	0.380 614
6	2	3	1	2	0.376 102	0.339 869
7	3	1	3	2	0.463 570	0.574 878
8	3	2	1	3	0.355 129	0.553 461
9	3	3	2	1	1.038 176	0.283 321
K_1^1	0.314 316	0.442 660	0.387 632	0.720 103		
K_2^1	0.499 772	0.428 941	0.570 715	0.360 299		
K_3^1	0.618 958	0.561 445	0.474 699	0.352 644		
R^1	0.304 642	0.132 504	0.183 083	0.367 459		
K_1^2	0.520 865	0.572 029	0.429 030	0.352 565		
K_2^2	0.489 311	0.487 883	0.520 114	0.481 440		
K_3^2	0.470 553	0.420 817	0.531 585	0.646 724		
R^2	0.050 312	0.151 212	0.102 555	0.294 159		

说明: K_q^i 是在某个工艺参数第*i*个水平下的第*q*个质量指标的平均值; R^q 代表某个工艺参数影响下第*q*个质量指标的极差; $i=1,2,3$ 代表三个水平; $q=1,2$ 分别代表沉降斑和体收缩率.

3 结果分析和讨论

对实验结果进行分析. 参数对沉降斑深度和



体收缩率的影响见图 3. 基于变量分析 (ANOVA), 计算各个变量的主效应, 预测优化的工艺组合并对优化结果进行预测.

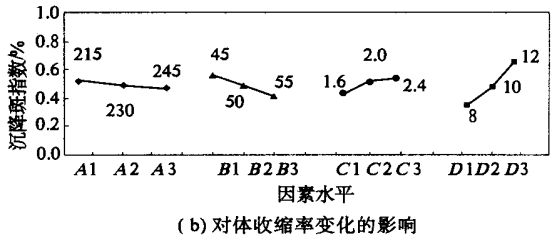


图 3 各个因子对质量指标的影响

Fig. 3 Influence of factors on sinkmarks and volumetric shrinkage

3.1 工艺参数对沉降斑的影响

图 3(a) 给出各因子对沉降斑的影响, 图中的数字表示各个因子的值的变化. 由图 3(a), 对于材料 PP, 在所研究的工艺范围内, 可得出以下结论: ① 熔体温度对沉降斑的影响最强, 熔体温度越高, 沉降斑深度越大. ② 模具温度升高导致沉降斑深度增大. ③ 注射时间越长, 相应的注射速率越低, 导致沉降斑深度增大. ④ 在浇口凝固前保压时间越长则沉降斑深度越小.

3.2 工艺参数对体收缩率变化的影响

由图 3(b) 可得出如下结论, 对于材料 PP, 在所研究的工艺范围内: ① 保压时间对体收缩率变化影响最大, 保压时间越长体收缩率变化越大. ② 模具温度对体收缩率的影响也较强, 模具温度越高, 体收缩率变化越低. ③ 熔体温度和充填时间对体收缩率的影响较弱.

3.3 工艺参数优化

由图 3, 可以得到引起最小制品质量缺陷的工艺组合如下: 基于最小化沉降斑深度, 优化的工艺组合为: A1B2C1D3 即 A = 215 °C, B = 50 °C, C = 1.6s, D = 12s; 而基于最小化体收缩率变化, 优化工艺组合为: A3B3C1D1 即 A = 245 °C, B = 55 °C, C = 1.6s, D = 8s. 可以看到, 预测的优化工艺组合没有包含在正交矩阵中的主实验中, 需要对预测结果进行验证.

采用数值实验验证优化工艺, 在优化工艺组合 A1B2C1D3 下, 沉降斑深度为 0.241 208, 其值小于所有主实验的值; 在优化工艺组合 A3B3C1D1 下, 体收缩率变化为 0.136 725, 小于所有主实验中的结果. 因此, 应用优化因子水平可以改善注塑成型制品的质量, 同时也表明所选因子之间的影响关系较弱.

如果想同时对多个质量指标进行优化, 可根

据各个质量指标的重要性和各个工艺参数对质量指标的影响程度进行综合评判, 得出使得制品总体质量最优的工艺组合.

4 结论

(1) Taguchi DOE 是一种有效的方法研究工艺参数对注塑成型制品的影响, 象在真实实验中一样, 应用该技术可用较少的数值实验获得足够的信息. 采用 CAE 可方便地进行数值实验, 较真实实验节省大量时间和费用. CAE 与实验设计技术结合, 可方便地实现注塑成型工艺的自动优化.

(2) 本研究中, 对于材料 PP, 在所研究的工艺范围内, 降低熔体温度, 降低模具温度, 缩短注射时间及延长保压时间可减小沉降斑深度.

(3) 本研究中, 对于材料 PP, 在所研究的工艺范围内, 升高熔体温度、升高模具温度、缩短注射时间、缩短保压时间可使体收缩率变化减小, 即体收缩率均匀, 从而减小制品产生翘曲的可能性.

参考文献:

[1] CHANG H H, HIEBER C A, WANG K K. A unified simulation of the filling and post-filling stages in injection molding, part I: formulation [J]. Polymer Engineering and Science, 1991, 31(2): 116~139.

[2] KIMS, SUH N. Knowledge-based synthesis system for injection molding [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1987, 3(2): 181~186.

[3] CHOI G H, LEE K D, CHANG N. Optimization of process parameters of injection molding with neural network application in a process simulation environment [J]. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 449~452.

[4] YE Hua, WU Yinghui, WANG K K. An optimization scheme for part quality in injection molding [A]. MD-Vol. 79, CAE and Intelligent Processing of Polymeric Materials, ASME, 1997 [C]. 1997, 139~149.

[5] CHANG Tao C Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by taguchi method[J] . Polymer Engineering and Science , 2001, 41(5) : 703~710.

[6] LIU Shih Jung , CHANG Jer Haur , Application of the taguchi method to optimize the surface quality of gas assist injection molded composites [J] . Journal of Reinforced Plastics and Composites , 2000, 19(17) : 1352~1362.

[7] OTTO Vinen , PENTTI Jrvell , KYSTI Valtanen et al . The effect of processing parameters on the quality of injection molded parts by using the taguchi parameter design method[J] . Plastics , Rubber and Composites Processing and Applications , 1994, 21(4) : 21~217.

[8] LIU Shih Jung . Effects of processing parameters on formation of sinkmarks on injection molded parts[J] . Plastics , Rubber and Composites , 2001, 30(4) : 170~174

Influence of Processing Parameter on Quality of Plastic Injection Molded Parts

WANG Li -xia , WANG Bei , SHEN Chang -yu

(National Engineering Research Center for Advanced Polymer Processing Technology , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002, China)

Abstract : The process complexity of plastic injection molding makes it difficult to set up desired processing conditions and the quality of an injection -molded part is affected by these process factors , so how to get the optimum process conditions is key to improving the part quality . CAE can aid process engineer to optimize the process conditions , but this method is only the trial -and -error on the computer . It also depends on the experience of the operator and only the reasonable not the best process parameters can be obtained . In this paper , CAE and Taguchi DOE (design of experiment) technique are combined to optimize the process conditions and to improve the part quality automatically by using smaller number of experiments . Sink mark and shrinkage are two important quality indexes of injection -molded part . In this paper , An $L_9(3^4)$ orthogonal array is conducted to investigate the significance of each factors on the sink mark indexes and volumetric shrinkage variation , and optimum process conditions are got to minimize the selected quality indexes based on an industry part . The results prove the validity of the method .

Key words : injection molding ; process optimization ; DOE ; volumetric shrinkage ; sink mark ;