

工艺参数对注塑制品翘曲影响的 CAE 分析^{*}

周应国 申长雨 陈静波 董斌斌

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002)

摘要 通过对注塑制品翘曲原因的深入分析, 得出注射成型中制品翘曲模拟的主要方法, 为优化注塑制品的翘曲提供了前提。结合实验设计方法, 通过 CAE 对具体的注塑制品进行翘曲分析, 得出最佳的工艺条件设置, 得知影响翘曲的显著因素有保压压力、冷却时间、保压时间、熔体温度及其与模具温度的交互作用等, 并分析了各单一因素对翘曲的影响趋势及其原因。

关键词 注射成型 CAE 翘曲 实验设计

由于周期短、生产率高、适应性强和易于自动化操作等特点, 注射成型现已成为主要的塑料材料成型方法之一。随着对注塑制品质量要求的不断提高, 翘曲越来越多地受到了关注, 现已成为衡量制品质量的指标之一。塑料材料从熔融态到冷却凝固过程中都会有较大的体积收缩, 在注射成型的充填阶段结束后继续施加压力可减小材料的体积收缩, 但无法完全消除。各向均匀收缩只会使体积变小, 而当制品发生不均匀收缩时就会产生内应力, 当该内应力超过材料的刚度时就会发生翘曲现象。故翘曲主要是由于制品收缩不均造成的, 而长时间翘曲则可能造成制品变形, 甚至产生裂缝等。

通常翘曲变形会受到多种工艺因素的影响, 在对塑料制品进行翘曲分析之前, 必须先进行流动、保压和冷却分析, 这些分析的精确性是翘曲分析的前提。实验设计是以概率论与数理统计为理论基础, 经济、科学地安排试验的一项科学技术, 通过实验设计可知如何合理地安排试验和正确地分析试验数据, 从而尽快获得优化方案。笔者现采用实验设计的方法, 针对具体的实例采用 CAE 技术进行翘曲分析, 以探讨各种注塑工艺条件对制品翘曲的影响情况, 并进一步进行了单因素分析。

1 制品翘曲变形分析的基本理论^[1~3]

目前制品翘曲变形计算所采用的数学模型主要基于残余应变理论和残余应力理论两类。

1.1 残余应变理论

残余应变理论基本上是经验性的, 它主要考虑的是收缩率因素, 表述如下:

$$S^{\parallel} = a_1 M_v + a_2 M_c + a_3 M_o^{\parallel} + a_4 M_r + a_5$$

$$S^{\perp} = a_6 M_v + a_7 M_c + a_8 M_o^{\perp} + a_9 M_r + a_{10}$$

式中: $S^{\parallel}$ ——平行于流动方向的线性收缩率;

$S^{\perp}$ ——垂直于流动方向的线性收缩率;

M_v ——体积收缩率;

M_c ——结晶度;

$M_o^{\parallel}$ ——平行于流动方向的分子定向度;

$M_o^{\perp}$ ——垂直于流动方向的分子定向度;

M_r ——体现模具对翘曲变形约束的量。

这些参数可分别通过流动分析和冷却分析后得到。另外 $a_1 \sim a_{10}$ 是与收缩性有关的材料常数。该模型考虑了模具温差引起的弯曲弹性模量的影响, 故由该理论易知从收缩角度分析翘曲时的影响因素在于体积收缩率、结晶度、取向度及模具约束等, 进一步分析体积收缩率等即可得知制品翘曲情况。

1.2 残余应力理论

残余应力理论一般基于高聚物的粘弹性理论, 它直接进行残余应力的计算, 通过对注塑过程进行模拟, 分析塑料制品在流动、保压及冷却过程中的应力积累, 预测其翘曲变形。现通常认为, 注塑制品的残余应力主要有残余热应力和残余流动应力两个来源。基于残余应力理论的残余应力计算按照是否考虑收缩率因素又分为两种: 一种未考虑收缩率因素; 另一种考虑收缩率因素, 对残余应力计算结果进行修正, 其理论模型描述为:

$$\sigma_{ij} = \int_{-\infty}^t C_{ijkl} [\xi(t) - \xi(t')] \frac{\epsilon_{kl}}{t'} dt' - \int_{-\infty}^t \beta_{ij} [\xi(t) - \xi(t')] dT(t')$$

式中: σ_{ij} ——应力张量;

C_{ijkl} ——表示材料力学性能的张量;

$\xi(t)$ ——材料温度的时间等效值;

ϵ_{kl} ——应变张量;

^{*} 国家自然科学基金重大项目(10590352)、国家杰出青年科学基金项目(10225211)

收稿日期: 2006-09-04

β_i ——表示材料热性能的张量。

考虑收缩率因素的残余应力理论(简称 CRIMS 模型)涉及了一定注塑压力下塑料冷却时的应力变化过程,其中包括冷却时的热应力和收缩引起的应力变化及压应力,故由该模型可知体积收缩率、结晶度、取向度和模具约束等的影响。它的模拟结果将更加接近实际,该模型如图 1 所示。

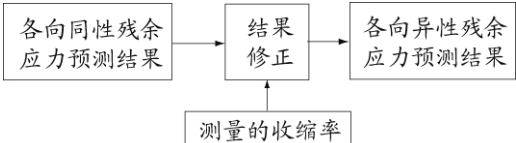


图 1 CRIMS 模型

1.3 影响翘曲的工艺参数因素

几乎注射成型过程中各因素都会影响到制品的翘曲,这些因素可概括为:塑料及模具材料,制品结构,模具结构,模具加工精度及注射成型工艺条件。目前注塑生产中主要的工艺条件如熔体温度、模具温度、注射时间(注射速率)、保压压力、保压时间、冷却时间等均会对制品翘曲有所影响,但影响程度会有所不同。为分析各种工艺条件对制品翘曲的影响,以具体的实例为对象,通过实验来进行分析。在上述两种理论分析的基础上再来分析工艺参数对制品翘曲的影响情况。

2 数值实验^[4-6]

实验选用的注塑制品的有限元模型如图 2 所示,材料为美国 GE 公司生产的 Lexan PC 2730,制品长、宽、高分别为 380、280、190 mm,平均厚度为 2.5 mm。该制品用于计算的三角形单元数目为 12 536 个。

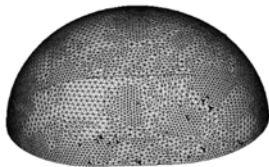


图 2 制品模型及网格划分

将熔体温度(A)、模具温度(B)、注射时间(C)、冷却时间(D)、保压时间(E)、保压压力(F)作为实验因素,同时根据选用的材料、设备、成型工艺等的要求确定出各因素的水平值,见表 1。按照表 1 中各因素的设定值,同时考虑熔体温度与模具温度、模具温度与注射时间的交互作用,按 $L_{27}(3^{13})$ 正交表^[6]在计算机上进行了 27 次模拟,利用数理统计理论对每次模拟的翘曲量结果进行整理。图 3 为各因

表 1 因素水平表

因素	A	B	C	D	E	F
	熔体温度 /℃	模具温度 /℃	注射时间 /s	冷却时间 /s	保压时间 /s	保压压力 /MPa
水平 1	315	75	0.7	15	3.5	95
水平 2	340	100	1.0	20	5.0	110
水平 3	365	125	1.3	25	6.5	125

素在各个水平下均值的分析结果。表 2 为该实验方差的分析结果。在表 2 中 e 表示误差,为提高检验的效果,把影响不显著的因素的方差即 C、BC 并入到误差中,作为修正误差记为 e' ,同时取 e 的自由度与 C、BC 的自由度之和作为 e' 的自由度。在计算贡献率时,也仅计算有影响因素的贡献率,将影响不大的因素并入到误差中,得到修正误差的贡献率。

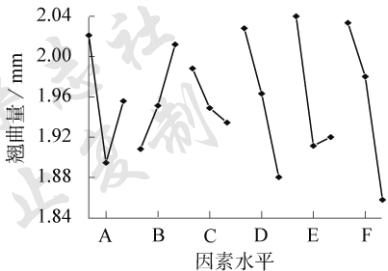


图 3 各因素的平均翘曲量

表 2 方差分析表

方差源	方差	自由度	方差均值	F 值	贡献率 /%
A	0.072 2	2	0.036 1	4.62*	8.60
B	0.049 0	2	0.024 5	3.13#	5.07
C	0.013 9	2	0.006 9	0.89	
D	0.099 1	2	0.049 5	6.33*	12.67
E	0.093 1	2	0.046 5	5.95*	11.77
F	0.146 4	2	0.073 2	9.35**	19.86
AB	0.104 4	4	0.026 1	3.34*	11.12
BC	0.045 5	4	0.011 4	1.45	
e	0.034 5	6	0.005 7		
e'	0.093 9	12	0.007 8		30.91
合计	0.658 1	26			100

注: * ——影响显著; ** ——影响十分显著; # ——有影响。

由于因素 A 与 B 的交互作用显著,需对这两个因素单独进行二元分析,即分别求出因素 A 与 B 在不同水平搭配下的翘曲量均值,再从中选取 A 与 B 的较优搭配。A 与 B 的二元分析结果列于表 3。

表 3 因素 A 与 B 的搭配表(二元表)

因素	B1	B2	B3
A1	2.016	1.962	2.085
A2	1.809	1.861	1.870
A3	1.899	2.004	2.081

3 分析与讨论

3.1 最佳水平值

由图 3 可知各因素的最佳水平值,即达到最小

翘曲量的工艺条件为 A2B1C3D3E2F3。对于因素 A 和 B, 由于它们的交互作用显著, 结合表 3 可知, A2B1 能使制品翘曲量达到最小值, 与均值分析结果相吻合, 故对因素 A 和 B 就按照该水平值进行设定。这样按该选定的水平值再次模拟, 得到的翘曲量为 1.654 mm, 比以上各次实验的结果都小, 表明此正交实验可行。

3.2 影响因素的显著性

由表 2 中的 *F* 值可知, 各因素对制品翘曲的影响程度不尽相同, 其中保压压力的影响最为显著, 冷却时间、保压时间、熔体温度等的影响较为显著, 模具温度也有一定的影响, 同时熔体温度与模具温度交互作用的影响也很显著。而注射时间(注射速率)对制品翘曲的影响不大。

另外由贡献率的概念可知, 各个显著影响因素的贡献率为其纯方差(即方差减去自由度与修正误差方差均值之乘积)与总方差之比, 从表 2 可知各因素对总方差的贡献率也不尽相同, 对产生方差的贡献率大小依次为保压压力、冷却时间、保压时间、熔体温度与模具温度的交互作用、熔体温度、模具温度等。

3.3 对各影响因素的单因素分析

为进一步分析各因素对于注塑制品翘曲的影响程度, 在得到最佳的工艺条件设置后, 对单独某一个因素的变化进行模拟。

表 4 列出作为显著影响因素的熔体温度(其它因素按最优工艺条件设置, 下同)在该材料的允许加工温度范围内变化得到的制品翘曲量。从表 4 可看出, 熔体温度较高与较低时制品翘曲量均较大, 这是由于塑料熔体温度低, 勉强以高速成型时, 残余剪切应力大, 同时没有足够的时间将残余应力释放, 容易翘曲, 而适当提高熔体温度可减小翘曲, 但当温度提高到一定程度后制品的收缩率会随之增大, 也会增加制品翘曲的可能性。

表 4 翘曲量随熔体温度的变化							
熔体温度/℃	320	330	340	350	360	370	380
翘曲量/mm	1.826	1.632	1.654	1.663	1.687	1.721	1.796

表 5 为模具温度在适宜的温度范围内变化得到的制品翘曲量。从表 5 可以看出, 模具温度在 75 ~ 150℃内变化时制品翘曲量随温度升高而变大, 当温度低至 60℃时翘曲量也会有所增大。通常模具温度设定过低, 残余剪切应力大, 若没有足够的时间释放残余应力, 制品则容易翘曲, 适当提高模具温度可

减小翘曲, 但模具温度升高又会造成收缩增加, 引起翘曲量的增大。

表 5 翘曲量随模具温度的变化							
模具温度/℃	60	75	90	105	120	135	150
翘曲量/mm	1.676	1.654	1.693	1.739	1.775	1.782	1.791

表 6 为在合理的注射速率下注射时间变化得到的制品翘曲量。由表 6 可知, 在注射时间为 0.4 ~ 1.4 s 范围内制品的翘曲量随注射时间的增加逐渐减小。注射速率过快, 熔体温度会随着有所增高, 但同时会要求较高的注塑压力, 使剪切应力随之增大, 增加了高残余应力的可能。

表 6 翘曲量随注射时间的变化							
注射时间/s	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
翘曲量/mm	1.753	1.735	1.692	1.677	1.657	1.648	1.667

表 7 为冷却时间在合理的范围内变化得到的制品翘曲量。由表 7 可以看出, 翘曲量明显地随着冷却时间的增加而减小, 不过减小的势头有所减缓。通常冷却时间短, 循环时间也相对较短, 此时塑料尚软, 若被顶出, 在没有约束状况下不均匀收缩变形会比较严重, 冷却时间一般需延长到塑料固化到足够的刚度为止, 但随着冷却时间的增加, 生产周期会明显延长, 生产率将下降。

表 7 翘曲量随冷却时间的变化							
冷却时间/s	8	12	16	20	24	28	32
翘曲量/mm	2.047	1.912	1.805	1.728	1.669	1.639	1.605

表 8 为保压时间在合理范围内变化得到的制品翘曲量。由表 8 可以看出, 翘曲量随着保压时间的延长而趋于减小, 但当保压时间为 4、5 s 时, 这一趋势有些异常。于是又另外在保压时间为 4.5、5.5 s 时进行了二次模拟, 发现制品翘曲量在一定范围内呈现出不规则变动。通常保压时间短, 螺杆回退时浇口附近会发生回流, 易形成流动残余应力, 保压时间一般要延长至浇口凝固为止。

表 8 翘曲量随保压时间的变化									
保压时间/s	2	3	4	5	6	7	8	4.5	5.5
翘曲量/mm	2.197	1.765	1.680	1.694	1.630	1.617	1.605	1.707	1.640

表 9 为保压压力在一定范围内变化得到的制品翘曲量。由表 9 可以看出, 当保压压力从 60 MPa 逐渐升高时, 制品翘曲量在逐渐减小, 但当保压压力达到 150 MPa 时, 翘曲量特别大, 超过了各实验值, 这说明此时由于保压压力过高, 制品翘曲分析已经不满足小变形的假设条件。通常保压压力过高, 因补

料而固化的流动残余应力高,同时塑料的压应力也高,应力不易于释放,致使制品翘曲变形;而保压压力太低,浇口附近会发生回流,不仅形成流动残余剪切应力,而且会形成大的体积收缩率差异而产生高的残余拉、压应力,使制品翘曲变形。

表 9 翘曲量随保压压力的变化

保压压力 / MPa	60	75	90	105	120	135	150
翘曲量 / mm	2.522	2.265	1.933	1.803	1.686	1.637	3.256

通过上述对单一因素的讨论,一方面得知各因素对制品翘曲的影响趋势及程度均和前面的均值分析与影响显著性分析所得到的结果相同,验证了前面的分析,另一方面使这一趋势更加明朗化,深化了前面所作的分析。同时在某些情况下得到的翘曲结果优于所选择的最优工艺,这是因为在进行正交实验设计时所考虑的工艺设置值范围宽,而仅对该因素讨论时该工艺的设置范围被进一步细化。

4 结论

在注射成型中各工艺条件对制品的翘曲会有所影响,但影响程度不尽相同。同时,翘曲随各工艺条件的变化而变化的情况也不相同,主要原因是各工艺条件对残余应力及收缩率的影响情况较为复杂。

利用正交实验设计可用较少的实验获得最大限度的信息,基于数理统计理论,借助于 CAE 技术可预测最终制品的最优性能指标,同时为分析制品翘曲问题提供一个简便的方法。对各工艺条件的单因素分析可更深入地讨论各工艺条件对制品翘曲的影响趋势,对该趋势的进一步定量分析可作回归分析。

参 考 文 献

1 Jansen K M B, Van Dijk D J, Husselman M H. Effect of process conditions on shrinkage in injection molding. *Polymer Engineer and Science*, 1998, 38: 838

2 Du-Soon Choi, Yong-Teak Im. Prediction of shrinkage and warpage in consideration of residual stress in integrated simulation of injection molding. *Composite Structures*, 1999, 47: 655

3 Lee Y B, Kwon T H, Yoon K. Numerical prediction of residual stresses and birefringence. *Polymer Engineering and Science*, 2002, 42 (11) : 2 246

4 Antony J. Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in manufacturing processes using taguchi's quality loss function. *Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17: 134

5 Chang T C. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the taguchi method. *Polymer Engineering and Science*, 2001, 41(5) : 703

6 梁军. 现代试验设计优化方法. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.

CAE ANALYSIS OF THE EFFECT OF PROCESS PARAMETER
ON WARPAGE OF INJECTION MOLDING PART

Zhou Yingguo, Shen Changyu, Chen Jingbo, Dong Binbin

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

ABSTRACT Through analyzing the cause of the warpage of injection molding part, the method of its simulation was gained; these could be the groundwork to optimize the warpage of injection molding part. On basis of this, integrating the method of design of experiment, the warpage of the indeed part was analyzed by means of CAE technology. The optimized process parameter was gained. The result indicated that the process parameter such as packing pressure, melting temperature, injection time etc. were the remarkable influence factors of the warpage, the influence and reason to the warpage of each factor was analyzed.

KEYWORDS injection molding, CAE, warpage, design of experiment

欢迎 查询 有关 广告

对于在我刊刊登的所有广告,如读者需要查询更详细的资料或了解情况,请填好《读者查询广告资料服务卡》后寄回或来函。本杂志社将为您提供或转请有关单位提供资料,以满足您的要求。如需购买任何广告单位的材料、设备、仪器及配件等产品,我社将帮助您联系,以保证产品质量,争取优惠价格。欢迎各单位在我刊刊登广告。刊登办法函索即寄。

《工程塑料应用》读者查询广告资料服务卡

No _____

读者姓名 _____ 单位 _____

通讯地址 _____ 电话 _____ 邮政编码 _____

欲获得《工程塑料应用》 _____ 年第 _____ 期第 _____ 页 _____

广告中有关 _____ 的详细资料。

如空位不够,请另附纸。填好后请寄回。

山东省济南市 108 信箱杂志社

邮政编码: 250031