

注塑成型充填过程中注射速率的优化设计*

翟明 顾元宪

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024)

申长雨

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心 郑州 450002)

摘要 给出一种塑料注射成型工艺的优化方法,将充填过程数值模拟和优化算法相结合,以获得均匀熔体前沿速度从而减少塑件翘曲变形为目标,对充填过程中的注射速率进行优化.算例表明,本文所提出的工艺优化模型及求解算法是有效的.

关键词 塑料,注射成型,工艺优化,注射速率

注射成型使用注塑机和注射模具把塑料原材料转变成塑料制品,是热塑性塑料和一部分热固性塑料最主要的成型加工方法之一.其基本原理就是利用塑料的可挤压性与可模塑性,首先将松散的粒状或粉状物料从注射机料斗送入高温机筒内加热熔融塑化,使之成为粘流态熔体,然后在柱塞或螺杆高温推动下,以一定流速通过机筒前端喷嘴注射进入温度较低的闭合模具中,经过一段保压冷却定型时间后,开启模具便可从模腔中脱出具有一定形状和尺寸的塑料制品.

注射成型工艺优化对提高制品质量是十分重要的.Pandelidi 和 Zhou^[1]以减少塑件翘曲变形和材料降解为目标,从温差项、过保压项和摩擦热项三个方面描述目标函数,采用共扼梯度法对模具温度、熔体温度和充填时间进行了优化.Ye^[2]等利用注塑成型分析软件,采用模拟退火方法对注射工艺参数如熔体温度、模壁温度、充填时间、保压时间等进行优化.Smith^[3]将数值模拟和灵敏度计算结合,以降低充填时间为设计目标,优化浇口位置和注射压力.

在上述研究中,优化模型均没有考虑熔体前沿速度变化对塑件质量的影响.一般来说,熔体流动速度越高,残余应力、表面应力和分子取向度就越大.熔体流动速度变化造成分子取向不均,往往导致塑件产生翘曲变形.熔体前沿速度与注射速率密切相关.注射速率是注射机将物料注入模具的速度,它控制着熔体在型腔中流动速度,是塑料

注射成型加工的一个重要工艺参数.如果注射速率在熔体充填过程中保持恒定,熔体流动速度必然随熔体前沿面积变化而发生变化,熔体前沿面积增大处熔体流动速度降低,反之熔体流动速度则会增大.因此在成型制品时,常常根据熔体前沿面积变化调整注射速率,以使熔体前沿速度在充填过程中基本保持不变.基于以上原因,本文提出一种注射成型工艺的优化模型,以保持熔体前沿速度均匀、从而使分子取向均匀和减少塑件翘曲变形为目标,对注射速率进行优化设计,将数值模拟和优化算法相结合进行求解.通过两个算例,表明本文所建立的工艺优化模型及求解算法是正确和有效的.

1 充填过程数值模拟

对于薄壁注塑件,型腔可以假设为相距很近的两块平行平板,塑料熔体在其中的流动可以采用广义 Hele-Shaw 模型来描述,垂直于流动方向上的速度分量忽略不计.塑料熔体充模过程的压力场控制方程和能量方程为

$$\nabla \cdot \int_0^h \frac{z^2}{\eta} dz \nabla p = 0 \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中 z 是厚度方向坐标, ρ 、 η 、 $\dot{\gamma}$ 、 C_p 、 k 分别表示密度、粘度、剪切速率、比热和热传导率, T 表示温度, p 表示压力, DT/Dt 是温度 T 的物质导数, h 是型腔半厚度.

* 2002-02-01 收稿, 2002-04-01 修稿; 国家重点基础研究专项经费(G1999032805)、国家高技术研究发展计划专项经费和高等学校骨干教师资助计划资助项目

用有限元/有限差分耦合方法^[4]求解压力场控制方程和能量方程,计算出温度和压力分布,然后采用流动分析网络法^[5],根据结点控制体积的充填状况更新流动前沿,便可以得到熔体在型腔内的流动过程.对多个塑件的成型过程进行分析,结果表明该数值算法是正确的^[6].

2 优化模型

2.1 目标函数和约束条件

翘曲变形是影响塑件质量的一种常见缺陷,塑件内分子取向不均匀引起的收缩差异是造成翘曲变形的重要原因之一.在充填阶段,分子取向在很大程度上受熔体前沿流动影响,熔体前沿流动速度的变化常常导致分子取向不均匀.因此,本文以保持均匀的熔体前沿速度为优化目标,目标函数可以表示为:

$$\min F(\varphi) = \sum_j |v_j - v_{ref}| \quad (3)$$

其中, v_j 是 j 时刻熔体前沿速度, v_{ref} 是期望的熔体前沿速度,通过使两者之差最小,可以使熔体前沿以期望的速度流动.

同时,将最大剪切应力作为约束条件.熔体在充填过程中壁剪切应力,即固液相界面处剪切应力,是该横截面上剪切应力的最大值,应小于相应塑料的最大容许剪切应力.塑料的最大容许剪切应力大约是其剪应力水平的 20 倍.剪应力水平是表征熔体粘度的 Cross 模型中的一个常数.剪切应力对分子或纤维取向也有较大影响,剪切应力越高,分子或纤维取向越大.

2.2 设计变量

在模具结构一定的情况下,注射速率越高,熔体在型腔中流动越快.熔体在型腔中的流动速度基本上由注射速率所决定,可以通过对注射速率曲线进行优化来保持均匀的熔体前沿速度.

注射速率在注射过程中连续变化,因此,只能取某些控制点处的注射速率作为设计变量.控制点的选择可根据区域充填分数、即型腔中熔体已充填体积占总体积的百分数来确定,例如在充填分数为 0, 0.05, 0.10... 处设置控制点;也可以根据充填时间确定,如在充填时间为 0, 0.1 s, 0.2 s... 时设置控制点.但由于注射速率的变化,熔体充满型腔时间事先未知,因此本文根据区域充填分数来设置控制点.控制点的设置不仅应数量合理,而且还应与型腔横截面积的突变相对应.具体实现

时可以先假定注射速率不发生改变,对充填过程进行数值模拟,记录下每一时间步的熔体前沿速度和充填分数,然后对整个过程的前沿速度进行分析,判断熔体前沿速度发生突变时充填分数,此处可以作为控制点.注射速率曲线可由这几个控制点处注射速率参数化表示:

$$R = R_1 + \frac{R_{1+1} - R_1}{\varphi_{1+1} - \varphi_1}(\varphi - \varphi_1) \quad (4)$$

式中, R 是充填分数为 φ 时注射速率, R_1, R_{1+1} 是充填分数为 φ_1, φ_{1+1} 时注射速率.在求出优化的注射速率相对于充填分数变化的曲线后,再根据数值模拟结果,确定不同充填分数所对应的充填时间,便可将优化结果转化为注射速率相对于充填时间的变化曲线,便于对注射机进行控制.

综合以上分析,本文提出的注射成型工艺优化模型为:

$$\begin{aligned} \min F(\varphi) &= \sum_j |v_j - v_{ref}| \\ \text{s.t. } S - S_{\max} &\leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varphi_i^L \leq \varphi_i \leq \varphi_i^U \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, S 为充填过程壁剪切应力, $S_{\max}$ 为塑料材料的许用剪切应力, n 为注射速率控制点的数目, φ_i 为设计变量,定义了注射流率. φ_i^L, φ_i^U 分别是设计变量的下界和上界,将注射速率限制在注射机的注射能力范围内.通过对该模型进行求解,即可得到满足最大剪切应力约束,使塑件的翘曲变形等质量缺陷得到改善的注射速率曲线.

3 优化求解算法

本文采用序列线性规划方法^[7]求解优化问题.在当前设计点计算目标和约束函数值及其梯度值,对目标和约束函数做线性展开,将非线性优化问题(5)式转化为如下的线性规划问题并求解:

$$\min F(x) = F(x^k) + \nabla F^T(x^k)(x - x^k)$$

$$\text{s.t. } g(x) = g(x^k) + \nabla g^T(x^k)(x - x^k) \leq 0 \quad (6)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, i = 1, 2, \dots, n$$

式中, x^k 为当前设计, x^0 是初始解.在新设计点重复上述过程,直到优化迭代过程满足收敛条件.

由于设计变量的个数很少,可以采用差分方法计算目标函数和约束函数的灵敏度,计算公式为:

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} \approx \frac{F(x + \Delta x_i) - F(x)}{\Delta x_i}$$

$$\nabla F^T(x) = \left\{ \frac{\partial F}{\partial x_1}, \frac{\partial F}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial x_n} \right\} \quad (7)$$

在差分法做灵敏度分析时应注意,灵敏度计算精度与扰动量 Δx_i 的大小有关.若 Δx_i 太大,截断误差很明显;但 Δx_i 太小,也会产生舍入误差.因此,适当地选择扰动量很重要.

4 算例

算例 1:中间带空矩形平板.该矩形平板的结构如图 1 所示,浇口位于箭头 A 所指位置.注射时所采用的塑料原料为 PS (Styron 685D, Dow Chemical).在注射速率恒定的情况下,熔体前沿速度随前沿面积的增大而减小,随前沿面积的减小而增大,其变化曲线如图 2 所示.为了得到均匀的前沿速度,根据前沿面积的变化对注射速率进行调整,图 3 是优化后的注射速率曲线,图 4 是优化后的熔体前沿速度曲线.可以看出,经过对注射速率进行优化,熔体以比较均匀的速度在型腔内流动填充.

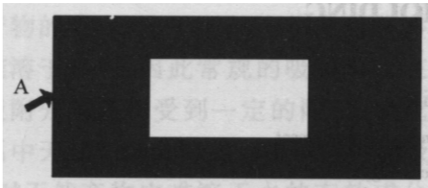


Fig. 1 Schematic diagram of rectangular plate

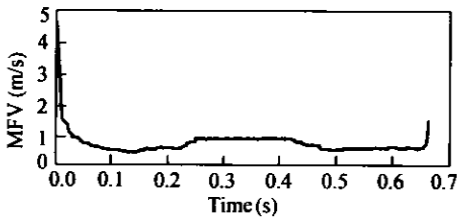


Fig. 2 Curve for velocity of melt advancement(before optimizing)

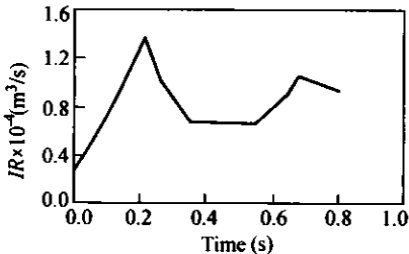


Fig. 3 Curve for optimized injection rate

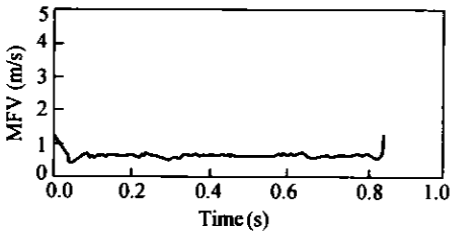


Fig. 4 Curve for optimized velocity of melt advancement

算例 2:正方形平板.对该平板,浇口在其中心,所采用的塑料材料同算例 1.熔体在该平板内流动过程如图 5 所示.在充填过程早期,熔体前沿面积不断增大,达到边界后,前沿面积开始不断减小,因此,如果注射速率不变,则熔体前沿速度在早期逐渐减小,随后又逐渐增大,如图 6 所示.为了得到均匀的熔体前沿速度,对注射速率进行优化,图 7 是优化的注射速率曲线,图 8 是优化后的熔体前沿速度曲线.可以看出,经过对注射速率的优化,熔体在型腔内流动速度基本上保持不变.

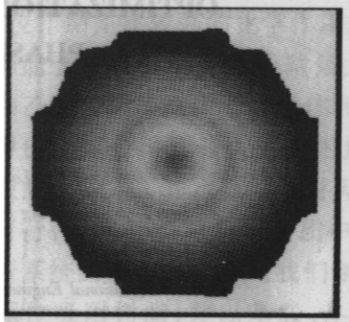


Fig. 5 Schematic diagram of melt advancement

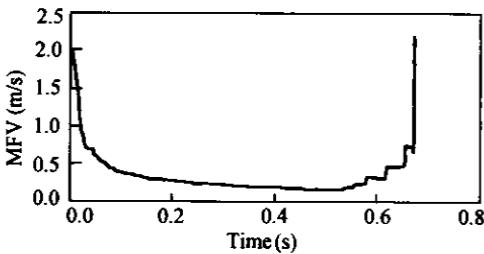


Fig. 6 Curve for velocity of melt advancement(before optimizing)

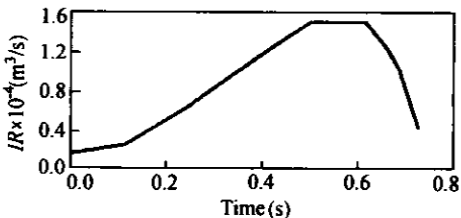


Fig. 7 Curve for optimized injection rate

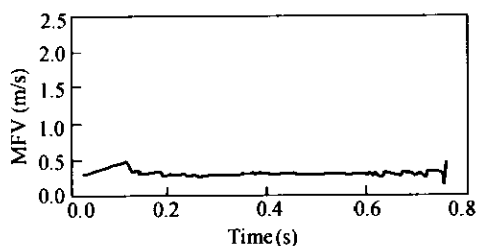


Fig. 8 Curve for optimized velocity of melt advancement

综上所述,本文建立了一种注射成型工艺优化的模型,以保持均匀熔体前沿速度为目的,对注射速率进行优化.将数值模拟和优化算法相结合,采用有限差分法计算设计灵敏度,用序列线性规划算法求解优化问题.数值算例表明所提出的工艺优化模型和算法是有效的.

REFERENCES

- 1 Pandelidis I, Zhou Q. *Polymer Engineering and Science*, 1990, 30(15): 883 ~ 892
- 2 Ye H, Wu Y, Wang K K. *CAE and Intelligent Processing of Polymeric Materials (ASME)*, 1997, 79: 139 ~ 149
- 3 Smith D E. *Optimal Design and Analysis for Polymer Extrusion and Molding*: [dissertation]. Illinois: Univ of Illinois at Urbana-Champaign, 1996. 72 ~ 84
- 4 Hieber C A, Shen S F. *J Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1980, 7(1): 1 ~ 32
- 5 Tadmor Z, Broyer E, Gutfinger C. *Polymer Engineering and Science*, 1974, 14: 660 ~ 665
- 6 Zhai M, Gu Y, Shen C. *J Northeastern University*, 2001, 22(s1): 171 ~ 174
- 7 Vanderplaats G N. *Numerical Optimization Technique for Engineering Design: with Applications*. NY: McGraw-Hill, 1984. 172 ~ 184

OPTIMIZATION ON INJECTION RATE OF FILLING PHASE IN INJECTION MOLDING

ZHAI Ming, GU Yuanxian

(*State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment*,
Dept. of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

SHEN Changyu

(*National Engineering Research Center of Polymer and Rubber Mold & Die*,
Zhengzhou University, Zhengzhou 450002)

Abstract The injection molding is by far the most popular process of the production of plastic parts for all kinds of applications. One of the most significant factors that influences the part quality is the polymer flow pattern. By properly guiding the polymer flow at the filling phase, some advantages could be attained, i. e. over-packing, residual stresses, non-uniform shrinkage, and warpage can be eliminated, and the creation of weld-lines and air-traps could be also minimized. A method has been proposed to improve the injection molding filling process by optimizing the injection rate. The numerical simulation for filling processing is combined with the design optimization method to find the optimum injection rate profile and to achieve a constant melt-front speed satisfying the constraint on maximum allowable shear stress. The objective function that can exhibit the flow unevenness is expressed as the sum of the difference between the melt-front speed and a reference value. Since it has great effect on the melt-front speed, the injection rates at some key points are chosen as the design variables. The constraints may limit the wall shear stress below the maximum allowable shear stress and the injection rate in a specified scope, which the injection machine can provide. The design sensitivities are evaluated with the finite difference method, and the optimization problem is solved with the sequential linear programming algorithm. The proposed method, taking under consideration the existence of a finite number of control points of a specific machine, produces a more realistic optimal solution. Finally, the success of the methodology is demonstrated by two examples.

Key words Plastics, Injection molding, Injection rate, Optimization