

基于遗传算法的注塑成型充模过程优化

刘春太, 肖长江, 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 : 在注塑成型的过程中, 非均匀的熔体前沿充填速度将导致非一致的取向及非均匀收缩和翘曲变形, 理想的充填模式应尽可能使熔体在充填过程中保持 MFV 不变. 控制 MFV 的关键是优化充模过程的注射流率. 针对这一问题, 将遗传算法和数值模拟技术相结合, 用于注塑成型充模过程的优化, 确定螺杆行程中的最佳控制点, 以及控制点处的注射体积流率的最优值, 以获得均匀一致的 MFV. 算例表明, 利用遗传算法得到的优化流率设置, 可以使 MFV 的均匀性提高 70% 左右.

关键词 : 遗传算法 ; 注射成型 ; 数值模拟 ; 速度优化

中图分类号 : TP 391.75 ; TQ 320.66 文献标识码 : A

在注塑成型的过程中, 充填阶段占有非常重要的地位. 聚合物熔体在高压的作用下注入冷的模具型腔并充满模具, 熔体的流动形态将直接影响着产品的最终质量. 熔体流动前沿面的速度 MFV(Melt-Front-Velocity) 和面积 MFA(Melt-Front-Area) 是描述动态充模过程熔体流动模式的两个重要参数. 充填过程中, 熔体流动前沿由于受到剪切和拉伸的共同作用, 使芯层的流动单元流向模壁而产生所谓的“泉涌”现象(Fountain Flow), 从而在型腔表面形成冷凝层并引起分子和纤维取向. 尽管目前人们对“泉涌”现象的认识还不是非常透彻, 但可以证实的是, 动态填充时模具型腔中的熔体前沿速度 MFV 越高, 表面的应力和取向以及由非一致的取向导致的非均匀收缩和翘曲变形就越严重. 理想的充填模式应尽可能使熔体在充填过程中保持 MFV 不变. 而 MFA 和 MFV 的乘积为注塑机的注射体积流率, 在恒定的注射流率条件下, 由于 MFA 的不同, 会造成 MFV 的剧烈变化(见图 1). 因此, 如何控制 MFV, 已经成为精密注射成型研究领域的关键内容.

对于注塑机而言, 注射流率与螺杆的速度成正比, 而模具充填过程的 MFA 与螺杆的行程(Stroke) 直接相关(见图 2), 因此, 控制 MFV 就是控制在不同位置的螺杆速度, 或者说设计一个优化的螺杆速度 - 行程曲线. 在注塑产品的生产过

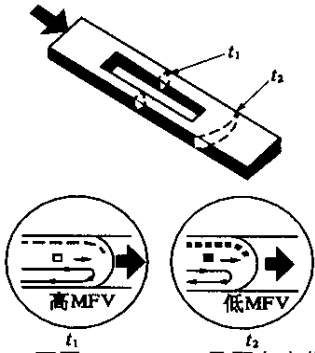


图 1 不同 MFA, MFV 及取向变化图
Fig. 1 MFV, MFA and differential orientations

程中, 数控注射设备允许操作者对充填过程中的注射速度在允许的范围内进行调节, 但实际上, 对于相互影响的工艺参数来说, 仅靠经验往往难以得到最优化的工艺条件. 注塑模流动模拟技术的出现为我们获取这种信息提供了可能. 利用流动分析, 我们可以得到型腔内不同时刻的 MFV 和 MFA, 但这种分析大多是“被动式”的, 即已有设计方案, 通过方案分析, 帮助设计者判断其设计是否合理. 对于简单件, 可以直接根据流动分析结果来设定注射流率曲线, 但对于复杂件, 我们往往无法做到这一点. 因此, 如何直接根据数值模拟结果得到优化螺杆速度 - 行程曲线成为工业界和学术界期待解决的问题.

收稿日期 2002 - 08 - 20 ; 修订日期 2002 - 09 - 30

基金项目 河南省自然科学基金资助项目(004060300)

作者简介 刘春太(1966 -) 男, 河南省浚县人, 郑州大学副教授, 博士研究生, 主要从事注塑模 CAE 技术方面的研究

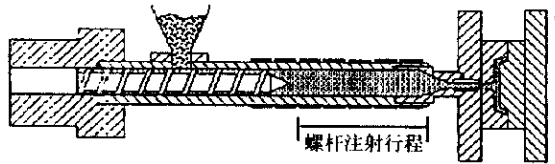


图 2 注射机螺杆注射行程示意图

Fig.2 The ram stroke of injection machine

近年来,将最优化算法与数值分析相结合用于注塑成型工艺得到了普遍的重视^[1~4],基于此,本文将遗传算法和数值模拟技术相结合用于注塑成型注射速度的优化,确定螺杆速度-行程曲线或 MFA-充填百分比曲线中的最佳控制点,以及控制点处的螺杆速度或注射体积流率的最优值。

1 充模过程的数值分析

塑料熔体在三维薄壁型腔内的流动属于带有运动表面的粘性不可压缩流体的流动,可采用广义的 Hele-Shaw 流动模型来描述,它们在三维空间的表达形式为^[5]

$$\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial u}{\partial z}) = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}(\eta \frac{\partial v}{\partial z}) = 0; \tag{2}$$

$$\rho C_p (\frac{\partial T}{\partial x} + u(\frac{\partial T}{\partial x}) + v(\frac{\partial T}{\partial y})) = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2. \tag{3}$$

式中: u, v 为 x, y 方向的速度分量; P, T, ρ, C_p, η 分别为压力、温度、密度、比热和剪切粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率. 考虑到塑料熔体剪切变稀行为,可采用与温度相关的 Cross 粘度模型^[6]

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \eta_0(T) (1 + (\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*})^{-n}), \tag{4}$$

通过对式(1)(2)积分,并利用相应的边界条件,可得到压力场求解的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial x} (s \frac{\partial P}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (s \frac{\partial P}{\partial y}) = 0. \tag{5}$$

式中: $s = \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz$ 为流动率; b 为型腔半厚度。

为了处理任意三维空间中薄壁型腔流动状况,沿用流动分析网络法(FAN)的基本思想,利用控制体积法建立型腔内压力场求解的有限元方程,对时间和沿厚度方向差分建立温度场求解的差分方程,耦合利用有限元/有限差分法求解,并根据节点体积的充填状况更新流动前沿。通过流动模拟,可以得到任意时刻模具型腔中熔体前沿的位置等值线图,它准确而直观地给出了充模期间的整个流型,我们同样可以得到在整个充填过程的 MFA 和 MFV 与充填体积百分比的变化曲线。

图 3 为制品的几何模型,图 4 为其有限元

网格模型(厚度 4 mm, 体积 294.22 cm³, 材料 ABS, 充填时间 5 s), 由于几何尺寸的变化, 在不变的注射流率条件下 (58.84 cm³/s), MFA 的最大值 (11.47 cm²) 与最小值 (2.22 cm²) 相差 80% 左右 (见图 5), 从而导致 MFV 曲线的剧烈变化 (见图 6), 这种变化对于精密注射成型, 特别是对尺寸精度要求很高的制品是不能容忍的。

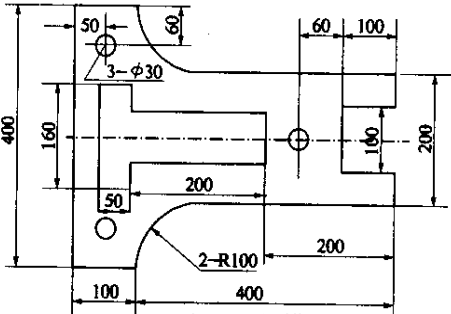


图 3 制品几何模型

Fig.3 Geometry profile

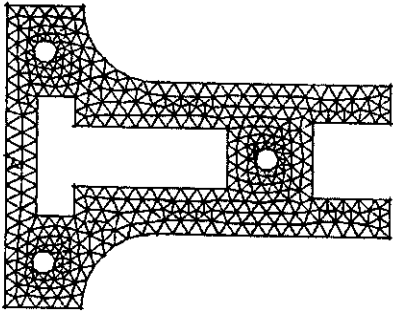


图 4 有限元网格模型

Fig.4 FEM mesh

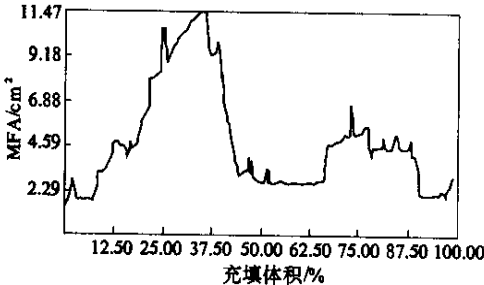


图 5 MFA 随充填体积百分比变化

Fig.5 MFA distribution with respect to percentage of filling volume

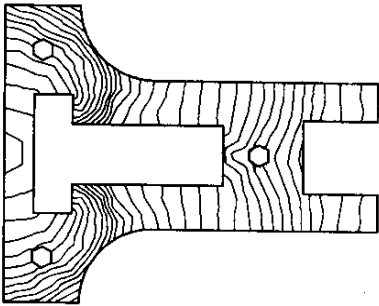


图 6 常流率条件下熔体前沿等值线图

Fig.6 Melt front advancement for constant flow rate

2 优化计算

2.1 遗传算法

遗传算法是一种模拟自然选择和遗传机制的寻优程序,它是由 Michigan 大学 Holland 教授首先提出的^[7],是一种基于进化论优胜劣汰、自然选择、适者生存和物种遗传思想的搜索算法,它通过模拟生物在自然界中遗传变异与生存竞争等遗传行为,使问题的解在竞争中得以改进(或进化),以求得问题的满意解和最优解。

遗传算法是借助于计算机编程,将待求问题表示成染色体,从而构成一个种群,并将它们置于问题的求解环境中,根据适者生存的原则,从中选择适应环境的染色体进行复制,且通过交叉、变异两种基因操作产生新一代更适应环境的种群,经这样一代代地不断变化,最后收敛到一个最适应环境的染色体上,即求得问题的最优解。遗传算法模拟的是种群的集体进化行为,其中种群中的每个染色体表示问题搜索空间中的一个近似解。主要步骤包括:选择编码方式和编码—产生初始种群—计算适应度函数值—复制—交叉—变异。针对一个具体工程问题,需要重点解决的是问题的表征、遗传算子的选择和目标(适应度)函数的定义。

2.2 注射速度优化过程

充填流动过程中,与熔体前沿速度 MFV 直接相关的是注射流率和模具型腔中熔体前沿面积 MFA(Melt - Front Area),对于注塑机而言,注射流率与螺杆的速度(Ram - Speed)成正比,而模具充填过程的 MFA 与模具的几何形状直接相关,因此,控制 MFV 就是控制在不同位置的螺杆速度。

对于我们的具体问题,优化计算的目的是通过对充填数值模拟结果的数学分析,得到优化的控制点位置以控制注射体积流率的变化,最终实现 MFV 在整个充填过程的均匀化。关键的问题是:①控制分段点的位置的确定;②控制点数目;③控制点处对应的体积注射流率的最优值。

对于实际的加工过程,注射流率的变化可以设置成分段线性变化,从理论上讲,分段越多,就越能够满足我们的要求,但在实际情况下,考虑液压响应时间,过多的分段并不是实际需要的,因此,如何合理地选择控制点个数和位置至关重要,我们希望能够在最少的分段条件下尽可能满足要求。分段优化与模具的几何形状和复杂程度紧密相关,优化的基础是 MFA - 充填百分比曲线(见

图 7) 结合实际构造其目标函数:

$$f(t, N) = \frac{1}{(N+1) \cdot M \cdot t_{\text{fill}}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N+1} \Delta t_i^2 \sum_{j=1}^M (MFA_{ij}^t - MFA_{ij}^{\text{avg}})^2}, \quad (6)$$

其中: t_{fill} 为充填时间; N 为一组适当的抽样控制点数,加上开始点和结束点,整个行程被分成了 $N+1$ 段,每段的长度为 Δt_i 。目标函数的目的是保证在每一个控制段内 MFA 线性变化或不变化,从而保证流率的线性变化,因此,以该段两端的 MFA 值生成一条虚拟的注射流率直线,并取 M 个样点,每一个样点处都可以得到一个实际的 MFA_{ij}^t 值和虚拟直线上的值 MFA_{ij}^{avg} 。如图 7 中所示,假设在 a 和 a' 为相邻控制点,在 aa' 段内可选取出 MFA 曲线上的 P_1, P_2, \dots , 同时我们也可以得到 aa' 直线段上相对应的点 P_1', P_2', \dots , 它们的偏离程度就是与优化流率曲线的偏离程度。图 8 为 3 个控制点条件下的优化位置,表 1 给出了详细的控制点优化结果。

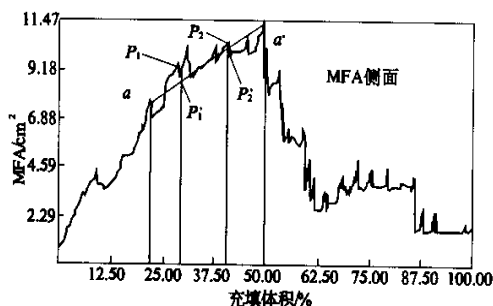


图 7 最优控制点目标函数的构造

Fig. 7 Objective function constructing to obtain optimal points

在得到合理分段后,如何保证在整个充填过程 MFV 一致性的关键在于每个控制点流率 Q_i , 基于这样的考虑,构造流率优化的目标函数:

$$\begin{cases} \min f(Q_i) = \frac{1}{N+1} \sqrt{\sum_{i=1}^{N+1} (\overline{MFV}_i - \overline{MFV}_{\text{avg}})^2}, \\ \text{sub } \sum_{i=1}^{N+1} \frac{2\Delta V_i}{(Q_{i-1} + Q_i)} = t_{\text{fill}}, \\ Q_i \leq Q_{\text{max}} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N+1), \end{cases} \quad (7)$$

式中: N 为已经优化得到的控制点个数; Q_i 为满足约束条件时的随机样点; \overline{MFV}_i 为对应区间的平均前沿速度; $\overline{MFV}_{\text{avg}}$ 由原始资料得到的总体平均前沿速度。目标函数描述了每一段平均前沿速度与整体平均前沿速度的偏离程度,当得到最优解时,整个充填过程前沿速度将趋于一致。图 9 为 3 个控制点条件下的流率优化曲线。

表 1 不同控制节点数下控制点位置优化结果与比较

Tab.1 The optimal location for different numbers of control ponits		
控制点	$\min f(t, N)$	控制点位置(体积百分比/%)
1	75.496	(22.55)
2	15.204	(34.44 42.91)
3	6.790	(34.17 48.38 75.28)
4	4.571	(21.31 32.22 48.29 72.26)
5	3.525	(21.28 33.15 43.05 53.37 74.17)
6	2.764	(20.95 33.32 45.57 63.32 73.85 89.33)
7	1.380	(18.76 25.15 35.46 43.93 62.55 74.29 89.54)
8	1.034	(16.49 25.47 35.73 45.09 61.70 72.28 84.04 92.40)
9	0.903	(10.74 16.72 25.45 35.74 43.70 63.41 73.38 83.46 91.94)

表 2 不同控制节点数流率优化结果与比较

Tab.2 The optimal volumetric flow rate for different numbers of control ponits			
控制点	$\min f(Q_i)$	目标值下降/%	控制点流率/(cm^3/s)
0	52.926		(58.84)
1	29.469	44.3	(19.59 82.75 41.04)
2	17.749	66.5	(21.89 123.53 56.86 43.50)
3	14.752	72.1	(21.91 112.07 40.80 64.91 35.96)
4	14.423	72.7	(20.48 85.45 120.63 37.89 65.20 39.64)
5	14.372	72.8	(20.27 82.06 115.72 41.32 62.30 64.65 31.81)
6	12.292	76.8	(19.382 87.40 106.76 121.50 48.17 42.06 73.38 35.80)
7	10.351	80.4	(21.94 71.30 113.47 122.23 51.14 39.89 89.67 43.25 38.83)
8	9.093	82.8	(21.96 59.37 132.76 125.89 55.67 41.01 85.39 70.59 32.37 45.79)

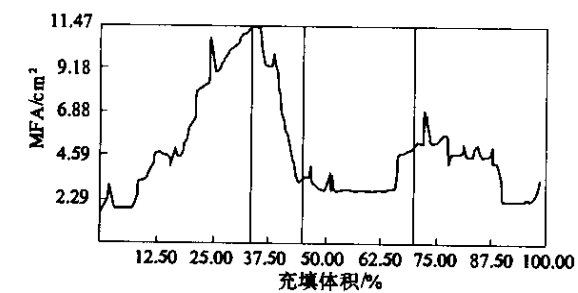


图 8 控制点优化位置(3 个控制点)

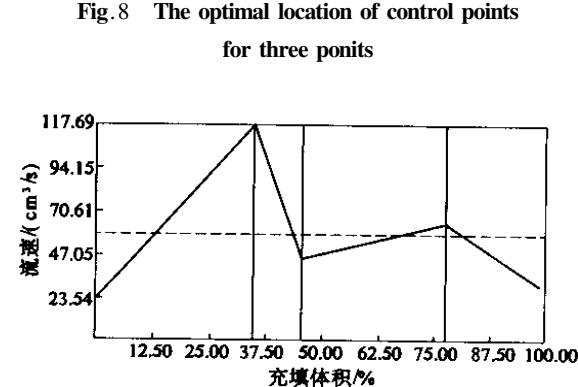


图 9 优化的注射流率曲线

Fig. 9 The optimal injection rate

化计算的结果 ,优化前平均的 $MFV_{\text{avg}} = 15.056$,目标值 $f(Q_i) = 52.926$,优化后 ,对于不同的控制点数目 ,可以看到随着控制点数的增加 ,目标值逐渐下降 .从工程观点出发 ,可以认为 3 个控制点 ,即将注射过程分成 4 段是合理和优化的 .优化的控制点位置对应的充填百分比为 34.17% , 48.38% 75.28%(见图 8) ,优化的注射流率分别为 21.91 ,112.07 40.80 64.91 35.96(见图 9) ,优化后的 $f(Q_i) = 14.752$,整个充填过程基本上保证在一个均匀的 MFV 条件下进行 (见图 10、图 11.).

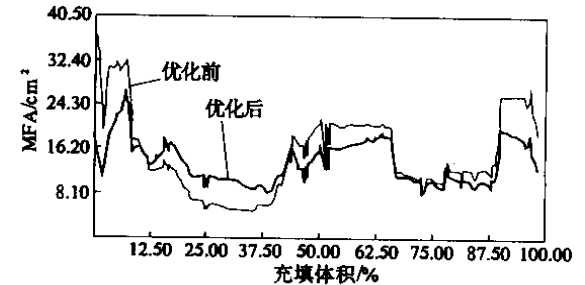


图 10 优化前后 MFV 曲线的比较(3 个控制点)

Fig.10 The comparison of MFV curve with respect to the percentage of filling volume(3 control points)

表 2 给出了在得到不同控制点条件下流率优

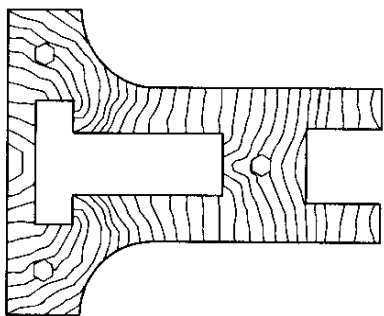


图 11 优化后的熔体前沿等值线图

Fig.11 Melt front advancement for optimal flow rate

3 结束语

通过将遗传算法和数值模拟技术相结合用于注塑成型注射速度的优化,确定了 MFA - 充填百分比曲线中的最佳控制点,以及控制点处注射体积流率的最优值,从 MFV 优化的实例结果来看,对于形状复杂注塑件,优化后其目标值一般都能下降 50% ~ 70% 左右。

遗传算法是一种基于概率搜索的随机优化方法,由于直接作用于参数编码,它只与适应函数有关,而不需要其它辅助信息和先决条件。遗传算法与成型模拟相结合,无疑为解决未知系统的优化问题提供了一个崭新而有效的途径。这一新技术可望在材料加工工艺优化研究中获得更为广泛的应用。

Optimization of Filling Process in Injection Molding Using Genetic Algorithm

LIU Chun - tai , XIAO Chang - jiang , SHEN Chang - yu

(NERC of Plastic and Rubber Mold & Die Zhengzhou University Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : In injection filling processing , varying Melt-Front-Velocity (MFV) induces variable orientation within the part and thus leads to differential shrinkage and part warpage. Therefore it is desirable to maintain a constant velocity at the melt front to generate uniform molecular and fiber orientation throughout the part. To control MFV , the optimal control points in ram-stroke and injection flow rates should be determined. Genetic algorithm and numerical simulation are integrated to optimize injection velocity , and some optimum points and flow rates in ram-stroke were determined. The proposed computational tool is applied to a test ,and a significant improvement of the quality is achieved ,reducing by approximately 70% the flow unevenness.

Key words : genetic algorithm ; injection molding ; numerical simulation ; velocity optimization

参考文献 :

- [1] KIM B Y , NAM G J , RYU H S , et al. Optimization of filling process in RTM using genetic algorithm[J]. Korea-Australia Rheology Journal ,2000 ,12(1) 83.
- [2] YOUNG W B. Gate location optimization in liquid composite molding using genetic algorithms[J]. Journal of Composite Materials , 1994 , 28(12) : 1098 - 1113.
- [3] TSOI H P , GAO F. Control of injection velocity using a fuzzy logic rule-based controller for thermoplastics injection molding[J]. Polymer Engineering and Science , 1999 , 39(1) 3.
- [4] CHOI G H , LEE K D , CHANG N , et al. Optimisation 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.
- [5] 刘春太 , 申长雨 , 陈静波 , 等. 注塑模充模过程动态分析的有限元/控制体积法[J]. 计算物理 , 2002 , 19(4) : 344 - 348.
- [6] HIEBER C A. Melt viscosity characterization and its application to injection molding[M]. New York : Marcel Dekker , 1987.
- [7] GOLDBERG E. Genetic Algorithms in Search , Optimization & Machine Learning[M]. Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Co , 1989.