

研究论文

# 塑料注塑成型浇口位置优化

申长雨 余晓容 王利霞 田 中

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘 要** 塑料注塑成型可以制作大量具有高精度和复杂型腔形状的制件, 其中注塑模浇口位置的设定决定了聚合物流动方向和流动平衡性, 产品质量可以通过浇口位置的优化得到显著提高. 通过对导致制品翘曲和影响材料性能的主要因素进行定量分析构造了浇口位置优化问题, 结合遗传算法和数值模拟技术对优化问题求解, 得到最优浇口位置设计. 算例证明该方法不仅适用于单浇口位置优化, 也适用于多浇口位置优化.

**关键词** 塑料注塑成型 浇口设计 优化 数值分析 遗传算法

中图分类号 TQ 320.66

文献标识码 A

文章编号 0438-1157(2004)03-0445-05

## GATE LOCATION OPTIMIZATION OF PLASTIC INJECTION MOLDING

SHEN Changyu, YU Xiaorong, WANG Lixia and TIAN Zhong

(NERC of Mold and Die, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract** The plastic injection molding is known to be the most effective process for producing discrete plastic parts of complex shape to the highest precision at a low cost. And the placement of a gate in an injection mold is one of the most important variables of the total mold design, because it influences the manner in which the plastic flows into the mold cavity. In the present paper, some detrimental factors that affect the product quality are assessed. Such assessment can be obtained from numerical simulation results, and can construct a gate location optimization problem. A genetic algorithm is used to search the optimum gate design. The examples indicate that the described methodology can be used effectively to obtain the optimum gate design of single-gate and multi-gate mold.

**Keywords** injection molding, gate design, optimization, numerical analysis, genetic algorithm

### 引 言

注塑模模具设计中, 浇口位置是一个关键的设计变量. 制件的质量好坏很大程度上取决于浇口位置, 一个不正确的浇口位置将会导致过压、高剪切率、很差的熔接线性性质和翘曲等一系列缺陷<sup>[1]</sup>. 因此, 围绕浇口位置的优化, 国内外展开了一系列的研究工作. Yao和Kim<sup>[2]</sup>从长度、位置等方面对熔接线性质量进行了定量描述, 并将其作为目标将复形法和数值分析软件相结合, 对成型工艺参数和浇口

位置进行优化, 从而使熔接线的长度最短、位置最佳、力学性能最好. Pandelidis和Zhou<sup>[3]</sup>采用间接法描述塑件质量, 将数值分析和模拟退火-爬山法结合进行浇口位置优化. Smith等<sup>[4]</sup>首次将数值分析、灵敏度分析和数值优化结合起来, 求出了满足锁模力和注射速率约束的使充填时间最短的浇口位置和注射压力曲线. 后来, Smith<sup>[5]</sup>用B-样条曲面表征型腔中面, 用参数化坐标表征浇口位置, 采用序列线性规划法对浇口位置进行了优化. 翟明<sup>[6]</sup>从能量消耗角度给出了判断充填过程是否平衡的方

2002-11-19 收到初稿, 2003-04-07 收到修改稿.

联系人: 余晓容. 第一作者: 申长雨, 男, 41岁, 博士, 教授.

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No. 10225211) 资助项目.

Received date: 2002-11-19.

Corresponding author: Yu Xiaorong, PhD candidate. E-mail: xryu@zzu.edu.cn

法, 并以最小入口压力为优化目标将数值分析和序列线性规划法结合, 对浇口位置进行了优化。

以上这些研究主要集中在利用基于梯度的优化算法对单浇口的位置进行优化。本文通过对导致制品翘曲和影响材料性能的主要因素进行定量分析, 构造了浇口位置优化问题。采用郑州大学橡塑模具国家工程研究中心开发的注塑模数值分析软件 Z-MOLD 对目标函数进行评价。考虑到遗传算法所具有的较强的全局优化能力, 尤其是对于多变量问题, 以及较强的鲁棒性, 采用遗传算法作为优化求解方法。该算法适用于多浇口位置优化。

## 1 影响制件性能因素分析

注塑模优化设计的最终目标是提高制件性能品质, 所以把优化理论应用于工艺设计中首先要对制件性能进行判定。有两种形式的制件质量的评判方法: 直接法和间接法。考虑到直接法比间接法花费多, 本文采取间接法评判制件质量, 即给出一些相关的性能参数值, 而不对质量做直接估计。

本文依据数值分析结果对影响翘曲和材料性能的因素进行定量分析。产生翘曲的主要因素包括充填阶段熔体的流动不平衡、制件的温度分布不均匀和不均匀冷却、制件密度不均匀、热缩的各向异性 and 应力分布的不平衡性。影响材料性能降低的主要因素是过热(烧焦)和高剪切率。本文只分析充填阶段, 同样的方法也适用于保压和冷却阶段。

### 1.1 流动平衡

在充填阶段, 熔体流动不平衡是造成塑件翘曲变形的一个重要原因<sup>[7]</sup>, 理想的充填模式是熔体在充填过程中保持恒定的前锋面速率, 同时到达型腔各个角落。描述充填过程是否平衡的方法有很多, 在加工条件和型腔结构相同情况下往往成型时能量消耗最小的浇口位置设计能够实现熔体的平衡充填, 而能量消耗最小等同于完成充填过程所需的注射压力最小<sup>[6]</sup>。在不考虑流道内的压力损失差异时, 把入口压力放入目标函数, 由于熔体流动不平衡引起的翘曲就可以考虑在内。

### 1.2 温度差异

在充填结束时, 温度的差异体现了温度分布的不一致性。在这里所用的温度是在厚度方向上的平均温度。塑料的收缩度是其温度的函数, 而温度不一致引发的收缩不一致将会引起残余应力, 从而导致翘曲和其他的短期和长期影响, 包括在低温下的

变形和裂缝等。

因此, 定义参数  $T_d$  来衡量温度差异大小

$$T_d = T_{\max} - T_{\min} \quad (1)$$

把  $T_d$  放入目标函数时, 由温度分布不一致引起的不均匀收缩就可以考虑在内。而且根据经验, 温度的差异不应超过  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 这可以作为优化问题的一个约束条件。

### 1.3 过压

另一个引起翘曲的原因是制件密度的不一致(不均匀)。密度不一致的主要原因是所谓的过压现象, 而不一致的压力分布引起过压。制件的各单元具有一致的压力梯度就是最佳的压力分布。但是, 由于流动中压力梯度的变化, 这种最佳的状态是可遇而不可求的。压力梯度的变化是由以下几个因素引起的: 流动平衡性、摩擦力、剪切力和冷却效果。

流体在型腔中的流动存在压力损失, 因此在型腔的高压区域若不存在压力梯度或压力梯度非常小则会被认为是过压区域。过压区域的熔体密度高于存在压力梯度的区域。根据数值分析, 若一个单元  $n$  的 3 个节点的压力都非常高, 且该单元的压力梯度接近于 0, 则认为它是过压单元。因此过压单元应满足

$$p_{n1} \approx p_{n2} \approx p_{n3} \quad (2a)$$

$$p_{n1}, p_{n2}, p_{n3} \geq p_{\max}/2 \quad (2b)$$

用这项准则预测由过压引起的翘曲是经过实验验证的<sup>[8]</sup>。满足条件的区域就是过压区域, 把它放入目标函数将会使由于密度不一致产生的收缩不一致为最小。

### 1.4 摩擦热

通常高剪切率和剪切应力不仅会产生分子取向, 还会降低聚合物性能, 而且由分子取向引发的收缩差异是翘曲的一个最常见的因素, 因此降低注塑过程的剪切率和剪切应力非常重要。由于各种材料所允许的最大剪切率没有给定值, 要做到这一点非常困难。考虑到摩擦热的值与剪切率和剪切应力的乘积成比例<sup>[9]</sup>, 可以通过减少过热单元数目来代替直接减小剪切率和剪切应力。塑料流入制件时, 随着时间的增加, 由于热交换, 在流动方向上熔体的温度降低。而如果存在过量的摩擦热, 温度在流动方向上将会升高, 此时时间增加的方向向量和温度方向向量的点积应小于 0。由此, 定义过热单元应满足的条件为

$$t_n \cdot T_n > 0 \quad (3)$$

## 2 建立目标函数

为了得到一个可接受的注射制品，需要找到一个最佳浇口位置设计。考虑到浇口位置在很大程度上独立于模具和熔体温度，所以在研究中假定成型条件保持不变。

最终制品的性能评价因素在上面已讨论过，它们是浇口位置的函数。浇口位置优化问题可描述如下

$$\text{minimize: } F(X) = \alpha p_{in} + \beta N_{ovp} + \gamma N_{fth} + \lambda T_d \quad (4a)$$

$$\text{subject to: } X \in \Omega \quad (4b)$$

## 3 遗传算法

在有限元几何模型中，每个节点都是浇口位置的候选，因此所有可能浇口位置的集合  $N_p$  是模型进行有限元划分后确定的总节点数  $N$  和将要优化的浇口数  $n$  的函数

$$N_p = \frac{N(N-1)\cdots[N-(n-1)]}{1 \times 2 \times \cdots \times n}$$

如果模型具有 1000 个节点，则单浇口有 1000 个可能的浇口位置，双浇口有 499500 个可能浇口位置组合方案，三浇口有 332334000 个可能方案。考虑到遗传算法所具有的较强的全局优化能力，尤其是对于多变量问题，以及较强的鲁棒性，因此采用它作为优化求解方法。

遗传算法是模拟生物在自然环境中遗传和进化过程的一种自适应随机搜索方法<sup>[10]</sup>。对于本文的浇口优化问题，由于节点编号按一定的规则生成，编号相近的节点并不意味着空间位置的接近，若以节点编号进行编码，会使遗传算法具有非常高的变异性，从而丧失遗传算法具有的一些重要数学特性和搜索能力，使搜索变成随机搜索。因此本文用表征浇口位置的空间坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  作为设计变量，对坐标进行二进制编码，生成一个符号串，将  $x$ 、 $y$ 、 $z$  所对应的符号串首尾相连，得到一个浇口位置的基因型，并根据所读入的制品几何模型信息判断基因的合法性。对于  $n$  浇口位置优化问题，则将  $n$  个浇口位置基因首尾相连，即可得到多浇口位置优化问题的个体基因。进行有限元分析要求浇口位置必须和网格节点重合，但优化过程中所得到的浇口位置并不一定满足这一要求，这时将离浇口位置最近的网格节点作为浇口位置进行有限元计算。

在对个体进行编码后，便可由设定的种群大小  $P$ （本文的初始种群规模为 30）生成  $P$  个二进制样本串组成初始种群，按一定的规则对初始种群中的个体进行选择、交叉和变异运算，创建一组新的群体，如此反复，直至收敛或达到最大进化代数为止。本文设定交叉率为 0.6，变异率为 0.05，最大进化代数为 100 次。

## 4 算例

分别通过一个变厚度单浇口平板和具有一致厚度的双浇口平板验证本文提出的优化模型和优化算法的可靠性与有效性。注射时所采用的相应工艺参数为：熔体入口温度为 240 °C，模温为 37 °C，充填时间为 1 s。塑料材料选用聚丙烯（POLYPRO\_E1200, Asahi Chem.）。

### 4.1 单浇口变厚度平板

变厚度平板的结构如图 1 (a) 所示，I 区厚度为 3 mm，II 区厚度为 2 mm。用于有限元分析的网格模型如图 1 (b) 所示，包含 409 个节点、746 个单元。初始浇口位置设在平板中央，即 A (0.08 m, 0.06 m) 处。利用本文提出的优化模型和算法进行计算，得到优化后的位置在 B (0.085 m, 0.06 m) 处。A 和 B 的网格节点分别为 158 和 277。由于初始种群相对于本算例较大，在第 3 代即收敛得到最优位置，此时一共对 85 个节点进行了评价。

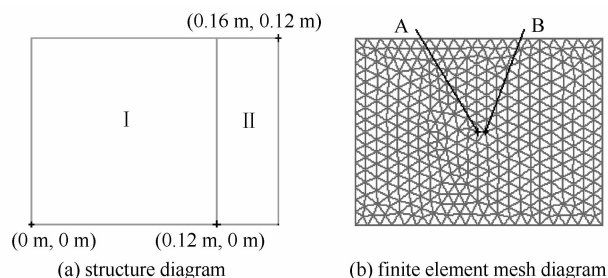


Fig. 1 Plate with different thickness

图 2 (a) 给出了浇口设在 A 处时的熔体前沿等值线示意图，由图可见，由于 I 区厚度大于 II 区厚度，熔体流向 I 区比流向 II 区受到的阻力小，因此熔体最先达到 I 区的各个角落，然后才充满 II 区未充填区域。这一点也可由图 3 (a) 给出的浇口设在 A 处的充填结束时的压力等值线图观察到。当熔体充满 I 区后，由于 II 区未充满，仍需要继续施加压力使之充满，这时 I 区产生过压。阴影部分即为标示出的过压区域。

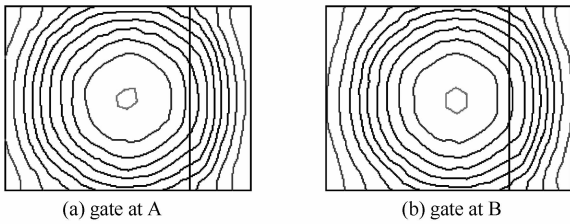


Fig. 2 Melt front contour of gate A and B for example 1

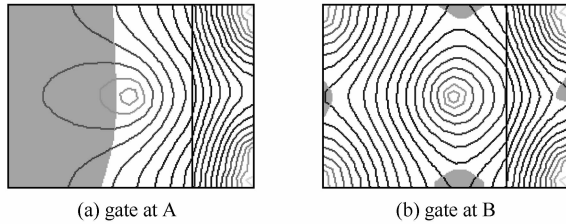


Fig. 3 Pressure contour of gate A and B at end of filling for example 1

图 2 (b) 给出了浇口设在 B 处时的熔体前沿等值线图, 由图可见熔体几乎同时到达平板的末端, 充填基本平衡. 图 3 (b) 给出的压力等值线图也证实了这一点, 由图可见压力梯度比较均匀, 过压区域比例也相当小. 表 1 给出了浇口设在 A、B 两处的有限元分析结果比较. 通过对比看到, 优化后的入口压力仅 7.28 MPa, 是最初设计的 10.11 MPa 的 70%, 温差虽略有提高但非常小, 最大剪切应力也由原来的 0.18 MPa 降为 0.16 MPa, 过压百分比则由原来的 30% 降为 3%. 由此可以看到利用本文提出的优化模型和算法对于单浇口位置优化效果比较理想.

Table 1 Results comparison of gate location at A and B

Gate location	Inlet pressure/MPa	Temperature difference/°C	Over pack percent/%	Maximum shear stress/MPa
A	10.11	8.61	30	0.18
B	7.28	8.75	3	0.16

#### 4.2 具有一致厚度的双浇口平板

图 4 给出了具有一致厚度的平板的有限元分析网格示意图, 该平板长 150 mm、宽 100 mm、厚 2 mm, 包含 215 个节点、377 个单元. 最初设计把浇口位置设在 A (0.0375 m, 0 m) 和 B (0.1125 m, 0 m) 处, 相应的网格节点为 31 和 27. 相应运行本文给出的优化程序, 在第 9 代即收敛, 一共评价了 212 个方案. 优化计算后得到的浇口位置在 C (0.0375 m, 0.05 m) 和 D (0.1125 m, 0.05 m) 处, 相应的网格节点为 51 和 112.

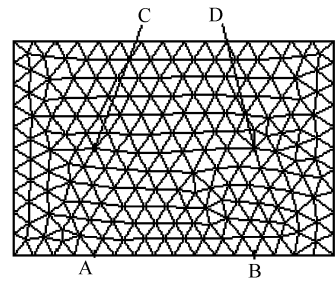


Fig. 4 Finite element mesh of plate with two gate

图 5 给出了最初设计和优化设计的熔体前沿等值线图, 由图可见, 对于两个设计, 熔体均是几乎同时到达主要流动路径的末端. 由图 6 给出的充填结束时的压力等值线图也可以证实这一点. 两个设计的区别主要在于优化设计的熔体流程为 0.0625 m, 比初始设计的 0.1068 m 短 41% 左右; 相应所需的入口压力也由最初的 10.88 MPa 降为 5.43 MPa, 下降率近 50%, 这一点可由表 2 给出的浇口位置在 A、B 处和 C、D 处的有限元分析结果比较中得到; 相应的优化设计的温差和最大剪切应力也比最初设计有所下降. 该算例证明本文提出的模型和算法同样适用于多浇口塑料注塑模的浇口位置优化.

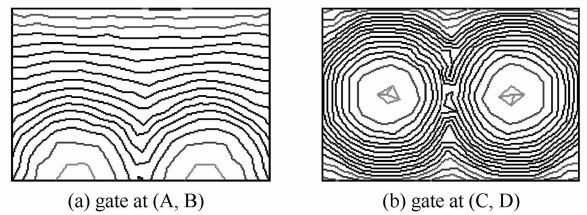


Fig. 5 Melt front contour of gate (A, B) and (C, D) for example 2

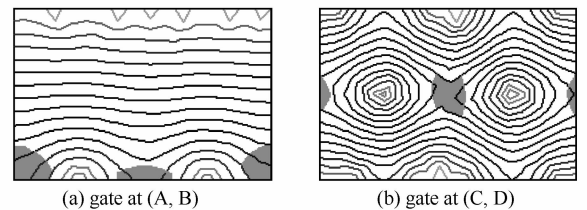


Fig. 6 Pressure contour of gate (A, B) and (C, D) at end of filling for example 2

Table 2 Results comparison of gate location between A, B and C, D

Gate location	Inlet pressure/MPa	Temperature difference/°C	Over pack percent/%	Maximum shear stress/MPa
(A, B)	10.88	9.7	2.5	0.18
(C, D)	5.43	9.5	2	0.16

## 5 结 语

通过对导致制品翘曲和影响材料性能的主要因素进行定量分析构造了浇口位置优化问题, 结合遗传算法和数值模拟技术对优化问题求解得到最优浇口位置设计, 并通过算例证明了该算法对单浇口和多浇口位置优化的可靠性和有效性。

由于进行一次 CAE 分析所需时间相对较长, 约束了该算法在复杂型腔和大型制件中的应用。有时, 该算法可能因为受到种群大小或最大世代数的限制而无法收敛到最佳值, 一般可以通过增大种群数和进化代数得到改善。

### 符 号 说 明

$F(X)$ ——优化问题的目标函数

$N$ ——制件的节点总数

$N_{\text{fth}}$ ——过热单元百分比, %

$N_{\text{ovp}}$ ——过压单元百分比, %

$N_p$ ——可能浇口位置的集合

$n$ ——要优化的浇口数

$p_{\text{in}}$ ——入口压力, MPa

$p_{\text{max}}$ ——充填结束时的最大压力值, MPa

$p_{n1}, p_{n2}, p_{n3}$ ——单元  $n$  的 3 个节点的压力值, MPa

$T_d$ ——温差,  $^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{max}}$ ——温度最高节点的温度值,  $^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{min}}$ ——温度最低节点的温度值,  $^{\circ}\text{C}$

$\mathbf{T}_n$ ——单元  $n$  的温度梯度向量

$\mathbf{t}_n$ ——单元  $n$  充填时间的单位梯度向量

$x, y, z$ ——浇口位置坐标, m

$\alpha$ ——入口压力的权重

$\beta$ ——过压单元百分比的权重

$\gamma$ ——过热单元百分比的权重

$\lambda$ ——温差的权重

$\Omega$ ——浇口位置的可行空间

### References

- 1 Shen Changyu (申长雨). Computer Aided Engineering in Plastic Molds (塑料模具计算机辅助工程). Zhengzhou: Henan Sci. & Tech. Press, 2000
- 2 Yao D, Kim B H. Direct-search-based Automatic Minimization of Weldlines in Injection Molded Parts. *Polym. -Plast. Technol. Eng.*, 1998, **37** (4): 509—525
- 3 Pandelidis I, Zhou Q. Optimization of Injection Molding Design • Part I • Gate Location Optimization. *Polym. Eng. Sci.*, 1990, **30** (15): 873—882
- 4 Smith D E, Tortorelli D A, Tucker G L. Analysis and Sensitivity Analysis for Polymer Injection and Compression Molding. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1998, **167** (3—4): 325—344
- 5 Smith D E. Optimal Design and Analysis for Polymer Extrusion and Molding; [dissertation]. Urbana-champaign; University of Illinois, 1996
- 6 Zhai Ming (翟明). Numerical Simulation, Optimization and Control of Injection Molding Filling; [dissertation] (学位论文). Dalian; Dalian University of Technology, 2001
- 7 Turng L S. C-Mold Design Guide. AC Technology, Ithaca, N. Y., 1994
- 8 Rubin I I. In: Injection Molding: Theory and Practice. New York; John Wiley & Sons Inc., 1972
- 9 Nunn R E. In: Rosato D V, Rosato D V, eds. Injection Molding Handbook. New York; Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986
- 10 Wang Xiaoping (王小平), Cao Liming (曹立明). Genetic Algorithm: Theory, Application and Software Programming (遗传算法——理论、应用与软件实现). Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press, 2002