

文章编号: 1671-6833(2004)02-0011-05

注塑模充填模式的快速预测

余晓容¹, 袁峰², 李银亭¹, 白冉¹

(1. 郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 中国南方航空股份有限公司河南公司, 河南 郑州 450003)

摘要:通过对塑料熔体在型腔中流动行为的分析, 基于合理的假设建立了等温条件下前峰面熔体在给定时间段内流动长度和型腔厚度的函数关系, 并提出了快速预测熔体充填模式的方法, 即等效流长法. 该法将熔体前峰面的追踪问题转换为带权曲面上任意两点间近似最短路径的求解. 短射实验证明, 该算法预测的充填模式与实际产品的充填模式符合较好.

关键词: 注塑模; 充填模式; 等效流长; 近似最短路径

中图分类号: TQ 320.66 **文献标识码:** A

0 引言

通常模具设计人员对于计算机辅助分析软件所提供的各种预测结果中, 最感兴趣的莫过于熔体前峰面等值线图. 因为熔体前峰面等值线图描述了熔体的充填模式, 即在填充过程中的各个阶段, 型腔的不同区域流体前端的状态. 设计人员可以根据它判断浇注系统设计是否合理, 是否存在过压或短射现象, 并且确定熔接线和气穴的位置.

目前确定熔体在型腔内充填模式的方法主要有流动路径法^[1]、流程图法、预测校正法^[1, 2]和控制体积法^[3, 4]. 在这几种方法中, 流动路径法和流程图法所需时间少, 但是需要人工确定流动路径和绘制流程图, 没有实现自动化; 预测校正法虽然能较准确地确定熔体前沿位置, 但在实施过程中必须对时间增量进行特殊处理, 以保证计算出的前沿点不落在型腔的边界之外, 有时甚至需要人工干预; 控制体积法利用流动分析网络法(FAN)^[5]的基本思想, 计算过程中自动确定流前位置, 不需要人工干预, 计算精度高, 是目前大多数商品化流动模拟软件普遍采用的方法, 但该法的计算量较大, 计算时间根据网格模型的大小由几分钟到几个小时不等. 对于一个 6 065 节点 11 700 单元的有限元网格模型, 采用 MOLD

FLOW 公司的数值分析软件 MPI 在 P4/2.4G 机型上进行流动分析需要的计算时间是 1 845 s, 因此限制了它在自动优化设计领域中的应用.

如何快速地预测熔体充填模式, 从而解决自动优化设计的瓶颈问题(计算速度), 在现阶段还没有任何有效的解决方法. 针对这一种情况, 笔者通过对塑料熔体在型腔中的流动行为的研究, 基于合理的假设, 建立了等温条件下前峰面熔体在给定时间段内流动长度和型腔厚度的函数关系, 提出了快速预测熔体充填模式的方法, 即等效流长法. 该法将熔体前峰面追踪问题转换为带权曲面上任意两点间最短路径的求解, 从而解决了快速确定熔体充填模式的问题.

1 型腔内前峰面熔体流动行为研究

1.1 基本假设和简化

(1) 熔体纯粘性不可压缩. 熔体在充模流动过程中, 型腔内的压力不是很高, 且合适的浇口数量和布置可避免局部过压现象, 因此可认为熔体纯粘性不可压缩.

(2) 忽略熔体的弹性效应.

(3) 忽略惯性力和质量力. 由于熔体粘度大, 相对于粘性剪切力而言, 惯性力和质量力都很小(雷诺数 $Re < 10^{-2}$), 可忽略不计.

收稿日期: 2003-10-07; 修订日期: 2003-12-18

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2002AA 336120)

作者简介: 余晓容(1974-), 女, 广东省潮州市人, 郑州大学讲师, 博士研究生, 主要从事塑模成型过程的计算机辅助分析与优化设计方面的研究.

(4) 由于熔体前锋面的温差非常小,因此忽略温度变化对粘度的影响,即只考虑等温流动.

(5) 随熔体前峰所到各处,压力保持一致.这一点当熔体未到达边界且型腔厚度比没有达到 $H_1/H_2 > 5$ 时,这个假设一般均可满足.

1.2 型腔内前峰面熔体流动行为

基于以上假设,熔体在型腔中的流动可用广义的 Hele-Shaw^[4] 流动模型来描述.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right] = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right] = 0 \quad (1c)$$

式中: x, y 为平面坐标; z 为厚度方向上的坐标; u, v 为分别为 x, y 方向上的速度分量; P 为压力.

假定流场关于型腔中心层对称,熔体在模壁处粘附于壁,则有

$$(u, v) = 0, z = h \quad (2a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, z = 0 \quad (2b)$$

式中: h 为型腔半高.

由于压力 P 与 z 无关,将式(1b)和(1c)沿 z 向二次积分,并利用式(2a)和式(2b)可得

$$u = -\frac{\partial P}{\partial x} \int_z^h \frac{\tilde{z}}{\eta} d\tilde{z} \quad (3a)$$

$$v = -\frac{\partial P}{\partial y} \int_z^h \frac{\tilde{z}}{\eta} d\tilde{z} \quad (3b)$$

对式(3a)和式(3b)沿 z 向再次积分,可得到厚度方向的平均速度,即

$$\bar{u} = -\frac{S}{h} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4a)$$

$$\bar{v} = -\frac{S}{h} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (4b)$$

式中: S 为流通率.

$$S = \int_0^h \frac{Z^2}{\eta} dz \quad (5)$$

采用幂率粘度模型描述熔体的粘度性质,即

$$\eta = k \cdot \gamma^{n-1} \quad (6)$$

式中: k 为稠度系数,代表剪切速率 $1/s$ 时的粘性; n 为幂率指数.

将式(6)代入式(5),并利用

$$\gamma = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2},$$

可得到

$$S = \frac{h^{2+1/n}}{k_1} \Lambda^{-1+1/n} \quad (7)$$

其中,

$$\Lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2};$$

$$k_1 = k^{1/n} (2 + 1/n).$$

因此,厚度方向的平均速度式(4a)和式(4b)可重写为

$$\bar{u} = -\frac{h^{1+1/n}}{k_1} \frac{\partial P}{\partial x} \Lambda^{-1+1/n} \quad (8a)$$

$$\bar{v} = -\frac{h^{1+1/n}}{k_1} \frac{\partial P}{\partial y} \Lambda^{-1+1/n} \quad (8b)$$

这样在流动方向上的平均速率为

$$\bar{V} = -\frac{h^{1+1/n}}{k_1} \Lambda^n \quad (9)$$

在这里引入

$$\bar{V} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (10)$$

式中: ΔL 为熔体在 Δt 时间段内,前峰面熔体移动的位置增量.

在相同的时间段观察前峰面熔体的流动,即视 Δt 为常数,将式(10)代入式(9),我们可以得到在某一段时间内熔体流动长度 L 和型腔厚度之间的函数关系,即

$$\Delta L = \frac{h}{k^{1/n+1}} \cdot \Delta P^{1/n+1} \cdot \Delta t^{n/n+1} \quad (11)$$

因此

$$\frac{\Delta L_1}{\Delta L_2} = \frac{h_1}{h_2}.$$

这说明,在相同的时间段内,熔体前端面选定的两点的推进量之比与两点的厚度比值是一致的.即厚度值越大,流动阻力越小,流动长度越大;反过来,厚度值越小,流动阻力越大,同时也就意味着流动长度的减小.

由式(11)我们定义在薄壁型腔内等效流动长度为

$$L_e = k^{1/n+1} \frac{\Delta L}{h} \quad (12)$$

式中: L_e 为等效于熔体流经单位厚度型腔的长度,简称等效流长.

2 熔体前峰面跟踪

由于我们只关心如何快速、合理地预测熔体的充填模式,只要我们能获得熔体前峰面到达各个型腔点的时间信息,则这个问题就可以解决.如前所述,前峰面熔体在给定时间段内的流动长度与型腔厚度成正比关系,且熔体总是朝着阻力最小的方向前进,因此假定熔体总是沿着具有最短

等效流动长度的路径到达型腔各点是成立的. 这样, 问题就转换为求解制件上浇口至型腔各点的最短等效路径问题.

目前有限元网格模型通常用来表示制件的中面模型和表面模型, 而在有限元网格模型上求解两点间最短路径的算法按精度可分为精确的最短路径算法和近似最短路径算法两类^[9]. 精确最短路径算法通常意味着时间和空间上较高的耗费代价, 如 Sharir 等^[7]提出的算法时间复杂度为 $O(|e| \log |e|)$, $|e|$ 为边数. 考虑到在大多数实际应用中并不需要非常高的精确度, 因此本文采用近似算法. 该算法的基本思路是: 首先采用有限元网格生成软件生成制件的有限元网格模型, 并由有限元网格模型上的节点和边构成图, 边所在单元的厚度平均值作为边的厚度, 以边的厚度的倒数作为边的权值, 从而生成一个带权图 G ; 然后采用快速最短路径法 (Fast Shortest Path Algorithm) 动态计算带权图上任意两点之间的最短距离, 得到最初近似最短路径; 通过细分最短路径周围的有限元网格边, 生成新的带权子图 G^1 , 再次调用 FSPA 法计算新的最短路径, 该迭代过程不断反复, 使得近似最短路径最终趋向真实最短路径. 具体实施过程参看文献^[8].

3 实验验证

实验样品见图 1, 为一饭卡机的外壳, 产品最厚处的厚度为 3.5 mm, 最薄处为 1 mm. 采用双浇口设计. 浇口处制品的厚度为 2 mm. 该产品来自于河南郑工橡塑模具国家工程研究中心. 树脂材料为 ABS, 主要工艺参数见表 1. 通过对该产品进行短射实验来考证采用本文提出的算法预测的充填模式的符合程度.

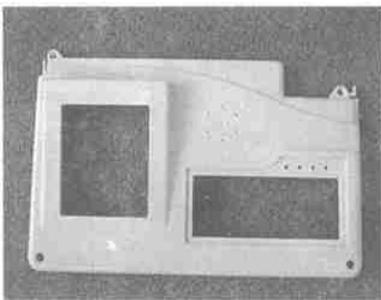


图 1 饭卡机外壳
Fig. 1 The shell of part

分析时采用的有限元网格模型见图 2, 节点数为 6 065, 单元数为 11 700. 对于本产品, 考虑到网格划分已经非常密, 所以边细分参数设为 2, 相应的充填模拟花费时间为 128 s, 而采用 Moldflow 公司的数值分析软件 MFI, 相同机型耗时 1 845 s.

表 1 实验工艺条件

Tab. 1 The processing conditions in experiments

充填时间/s	熔体温度/°C	模具温度/°C
3.5	210	70

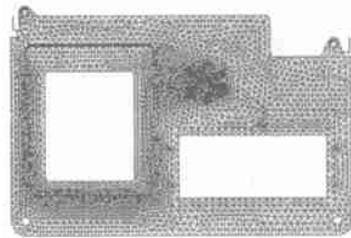


图 2 有限元网格模型

Fig. 2 The finite element model

对实验样品进行短射实验, 图 3 给出了充填时间分别为 2 s, 2.5 s, 3 s, 3.5 s 的实验样品. 在 2 s 之前, 熔体基本在流道内. 考虑到本算法在预测熔体的充填模式时, 是假定熔体前峰面推进速度 (MFV) 为匀速 (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, 从而减小由于 MFV 变化导致的取向的非均匀和收缩不一致^[9]), 所以采用等效流动长度代替时间来描述熔体前峰面. 图 4 为采用本文算法预测的前锋面等值线图. 图中标示的 1, 2, 3 的等效流动长度为 19.154, 28.8, 45.5. 分别对应于充填到 2 s, 2.5 s, 3 s 的前峰面. 由图 4 我们可以看到, 预测得到的熔体前峰面轮廓与实际制品的前峰面轮廓基本一致. 只是在充填时间为 3 s 时, 取出的实验样品与本文预测的前峰面轮廓略有不同, 这是因为本文的算法并没有考虑熔体到达边界后, 由于剪切应力的增加, 对熔体前峰区产生拉伸应力, 从而使靠近边界处的前沿熔体速率增大, 中部熔体减速的效应. 但是这并不影响它确定制品的最后充填区域和熔接线、气穴位置的预测. 图 5 给出了实际样品的熔接线位置和预测的熔接线和气穴位置的对比, 由图 5 可以看到, 预测的熔接线位置它与实际制品的熔接线位置基本一致. 这充分证明了本算法在预测充填模式的可靠性.

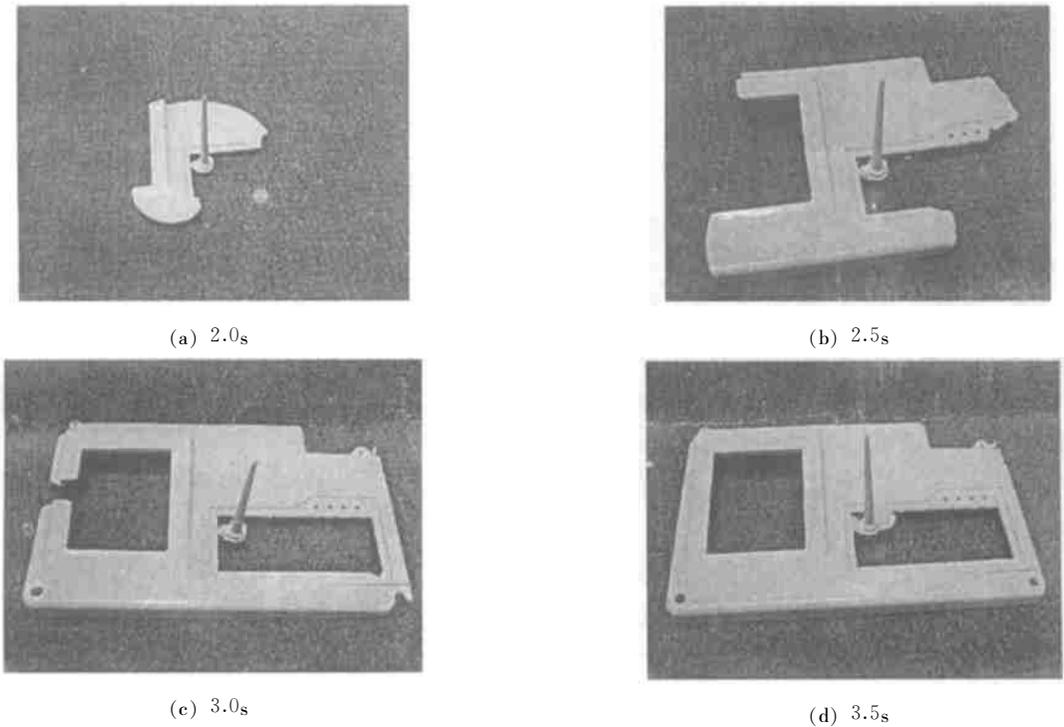


图3 充填时间分别为2s, 2.5s, 3s, 3.5s的实验样品

Fig.3 Experimental results of short shot

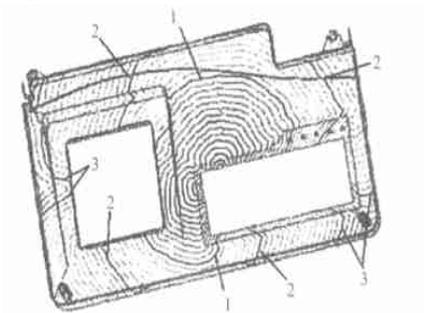
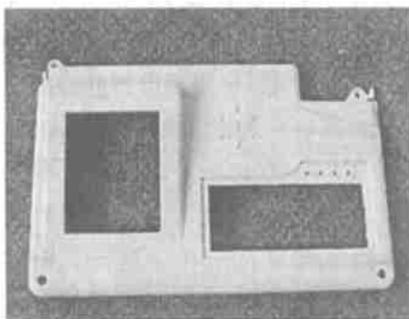
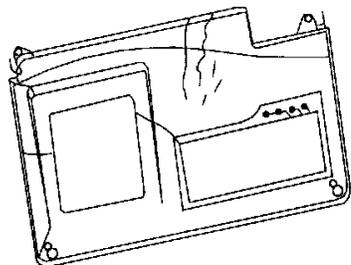


图4 等效流长法预测的前锋面等值线

Fig.4 The predicted equivalent flow length contour



(a) 实际制品熔接线



(b) 预测的熔接线

图5 熔接线位置示意图

Fig.5 The location of weld line

4 结论

本文通过对塑料熔体在型腔中的流动行为的

研究,基于合理的假设,建立了等温条件下前峰面熔体在给定时间段内流动长度和型腔厚度的函数关系,提出了采用等效流长法预测熔体充填模式.

该法将熔体前峰面追踪问题转换为带权曲面上任意两点间最短路径的求解,从而解决了快速确定熔体充填模式的问题.短射实验证明,该法预测的充填模式与实际制品的充填模式基本吻合,预测的熔接线和气穴位置也与实际产品一致.

运用本算法需要注意的是:①算法的计算速度与网格密度和边细分参数有关,网格越密,细分参数越大,则相应的计算时间也增加;②由于算法所基于模型的局限性,它并不适于厚薄差异非常大的制品;③算法没有考虑熔体到达边界后,由于剪切应力的增加,对熔体前峰区产生的拉伸应力,所以熔体到达边界后的实际前峰面轮廓与预测的前锋面轮廓有差异,但这并不影响对熔接线和气穴位置的预测.

参考文献:

- [1] 袁中双,李德群,肖景容.注塑模流动模拟研究综述[J].中国塑料,1993,7(1):4~10.
[2] 鲍家福,郭卫先,邵鹏飞.薄壁件注塑模流动模拟[J].塑料工业,1996,(3):88~89.

- [3] 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.
[4] HEBER C A, SHEN S F. A finite element finite difference simulation of the injection molding filling process[J]. J. Non-Newton Fluid Mech, 1980, 7: 1~32.
[5] TADMOR Z, BROYER E, GUTFINGER C. Flow analysis network(FAN) — a method for solving flow problems in polymer processing[J]. Polym Eng Sci, 1974, 14: 660~665.
[6] KANAI T, SUZUKI H. Approximate shortest path on a polyhedral surface and its applications[J]. Computer Aided Design, 2001, 33(11): 801~811.
[7] SHARIR M, SCHORR A. On shortest path in polyhedral spaces[J]. SIAM Journal on Computing, 1986, 15(1): 193~215.
[8] 余晓容,申长雨,杨晓东,等.塑料制件最大流长比算法研究与应用[J].中国塑料,2004,18(1):88~91.
[9] 刘春太.基于数值模拟的注塑成型工艺优化和制品性能研究[D].郑州:郑州大学,2003.

The Faster Prediction of the Injection Molding Filling Pattern

YU Xiao-rong¹, YUAN Feng², LI Yin-ting¹, BAI Ran¹

(1.NERC of Mold and Die, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2.Henan Branch, China Southern Airlines Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Through the studying of the flow behavior of front melt in the filling phase, the relationship between flow length and thickness under the isothermal condition was constructed. An equivalent flow length method was used to predict the filling pattern and transferred the tracing of melt front to computing weighted approximate shortest flow path on finite element mesh model. A short shot experiment was performed to illustrate the method.

Key words: injection molding; filling pattern; equivalent flow length; approximate shortest path