

教 学

气辅注塑 CAE 模拟技术的理论基础及分析实例

燕立唐¹, 刘法谦², 刘 波²

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072;

2. 青岛化工学院新材料重点实验室, 青岛 266042)

摘要:阐述了 CAE 模拟技术在气体辅助注射成型模具设计过程中的重要意义;介绍了气体辅助注射成型充填流动分析及保压分析中塑料熔体所遵循的数学模型和粘度参数模型,并介绍了在粘性流体力学基础上对数学模型进行了合理的简化和假设的方法;运用 CAE 软件 C-MOLD 对汽车保险杠模具结构设计及成型工艺条件进行了气辅注射成型模拟分析,优化了气体充填成型工艺和充填效果,改善了制品表面质量和力学性能,提高了首试成功率。

关键词:气体辅助注射成型;理论基础;CAE;优化设计;汽车保险杠

作为一种创新的注射成型工艺,气体辅助注射成型突破了传统注射成型的局限性,具有所需注射压力小、材料消耗少、制品翘曲变形小、表面质量好和能用于成型壁厚差异较大的制品等优点,因此被逐步的应用于多种塑料产品。但由于气体的干涉,塑料熔体的流动变得更加复杂,要深入理解气体辅助成型过程需要有高分子物理学、流变学、成型工艺学等多方面的知识,而且传统注射成型的设计和制造经验不再适用,因此对成型过程的计算机模拟有迫切的要求^[1]。本文介绍了气体辅助注射成型 CAE 模拟技术所遵循的理论基础,并运用美国 AC-TECH 公司的 CAE 软件 C-MOLD 对汽车保险杠模具进行了气辅 CAE 模拟分析,取得了很好的效果。

1 气辅注塑成型理论基础^[2~6]

完整的气辅注塑成型过程包括塑料熔体的流动充填和气体保压两个阶段。这两个阶段塑料熔体所处的物理状态和变化过程有很大的差异,因此描述这两个过程的控制方程是不同的。

1.1 气辅注塑型腔充填数学模型

气辅注塑成型充填过程中,塑料熔体的流动,满足连续性方程、动量守恒定律及能量守恒方程、流变本构方程。注塑流动本身是一个粘弹性、非稳态非等温的复杂过程,再加上高压气体的影响和型腔内几何形状的复杂,要对其流动作精确的描述比较困难,故在实际应用中作适当简化和假定。

1.1.1 假设 在工程实际中用气体辅助成型的制件,考虑到气体流动是沿着阻力最小的路径,因而需要设计尺寸相对较大的结构作为气道以引导气体的注入。而且注塑加工的制件多是薄壁件,即厚度方向尺寸远小于其它两个方向的尺寸,因此可假定熔体在扁平型腔中流动。基于此,对气体辅助注射成型充填过程做出如下假设和简化。

(1) 气体作用 型腔中的流动仅以熔体区域内部、熔体-气体边界及熔体前沿界面为研究对象,气体对熔体的作用通过施加在熔体-气体边界上的边界条件来实现;

作者简介:燕立唐(1978—),男,山东东营人。天津大学材料科学与工程学院在读硕士研究生。曾参与过 500 余套各类注塑模具的 CAE 模拟分析及技术攻关工作,现已在各类学术期刊杂志上发表论文 10 余篇。

(2) 传热过程 型腔壁以热传导为主, 忽略沿厚度方向的对流传热, 而型腔内的流动以热对流为主, 忽略沿流动方向的热传导。

(3) 受力 模腔内流动以粘滞力为主, 忽略惯性力的影响, 仅考虑熔体的剪切力, 忽略正应力的影响假定。假定压力沿厚度方向不变, 忽略因冷凝层等作用在厚度方向产生的压力梯度;

(4) 流动特性 假定熔体为不可压缩流体, 即 $\Delta \bar{V} = 0$, 并设熔体前沿位置在厚度方向不变。

1.1.2 气辅注塑充填过程的控制方程

连续性方程:

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

运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right] &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right] &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \left[\left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (3)$$

流变本构方程:

$$\dot{\gamma} = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中 b 为制品壁厚的一半, u, v 和 $\bar{u}, \bar{v}$ 分别为沿 x, y 方向的流速和平均流速, ρ 为密度, C_p 和 k 分别为比热容和热传导率, P 为压力, T 为温度, $\tau, \eta, \dot{\gamma}$ 分别为剪切应力、剪切粘度和剪切速率。

1.1.3 等效圆柱气道和浇注系统充填过程的控制方程 在前面对气体辅助注射成型充填过程的假设和简化基础上, 对一维圆柱管道作进一步简化。对于宽度和厚度比小于 4 的气道, 熔体在其中的流动视为一维圆柱流动, 浇注系统内熔体的流动也视为一维圆柱流动, 由此可得出等效圆柱气道和浇注系统的熔体流动控制方程^[6]。

运动方程:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (5)$$

能量方程:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) = \eta \dot{\gamma}^2 \quad (6)$$

传热方程:

$$q_r = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (7)$$

本构方程:

$$\begin{aligned} \tau &= \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \\ \dot{\gamma} &= \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \end{aligned} \quad (8)$$

式中 r, z 分别表示一维圆柱的径向和轴向坐标。其余符号意义同前。

1.2 气辅注塑保压阶段数学模型^[3]

保压阶段塑料熔体在气体压力的作用下逐步冷却凝固。这个过程中熔体的物理状态发生了很大的变化,连续性方程、能量方程和型腔压力控制方程都与充填阶段有很大的差异。

状态方程:

$$\frac{dV}{V} = \beta dT - k dP \quad (9)$$

式中 β 为热膨胀系数, k 为等温压缩系数。双域 Tait 状态方程由于可以同时描述固相和液相而被广泛使用。

$$V(T, P) = V_0(T) \left\{ 1 - C \ln \left[1 + \frac{P}{B(T)} \right] \right\} + V_t(T, P) \quad (10)$$

如: $T > T_i(P)$ $V_0(T) = b_{1m} + b_{2m}(T - b_5)$

$$B(T) = B_{3m} \exp(-b_{4m}(T - b_5))$$

$$V_t(T, P) = 0$$

如: $T < T_i(P)$ $V_0(T) = b_{1s} + b_{2s}(T - b_5)$

$$B(T) = B_{3s} \exp(-b_{4s}(T - b_5))$$

$$V_t(T, P) = b_7 \exp(b_8(T - b_5) - b_9 P)$$

式中 $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ 为材料常数。下标 m 和 s 分别代表熔体和固体, C 为普适常数, 其值为 0.894, T_i 为转换温度。 V 为比容, $V_t(T, P)$ 用来表征结晶型聚合物在结晶温度附近的密度突变。

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \beta T \left[\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} \right] + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (11)$$

利用量纲分析可以忽略压力对流项, x, y 方向的热传导, 相应的能量方程变为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 + \beta T \frac{\partial P}{\partial t} \quad (12)$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \left[u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right] = 0 \quad (13)$$

型腔压力方程:

考虑到气体保压阶段, 型腔体积已经完全充满, 所施加的保压压力趋于静压, 沿型腔的压力梯度变化很小, 也就是说 $\partial P / \partial x$ 和 $\partial P / \partial y$ 远小于充填阶段, 因此可以忽略压力的对流项, 同时结合动量方程, 可得到如下方程:

$$\begin{aligned} \bar{k} H \frac{\partial P}{\partial t} - (\Delta \cdot S \Delta P) &= b \\ b &= \int_0^H \frac{\beta}{\rho C_p} \left[\eta \dot{\gamma}^2 + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] dz \end{aligned} \quad (14)$$

式中, S 为流通率, $\bar{k}$ 为平均压阻系数。

各种控制方程的解法有有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)、边界单元法(BEM), 通常是有限

元/有限差分混合法。

1.3 熔体流动的粘度参数模型

塑料的粘度参数对气辅注射成型有重要影响,不同的参数将导致完全不同的模拟结果。在气辅注塑流动 CAE 模拟中,粘度的数学模型采用的是 Cross-Arrhenius 模型或 Cross-WLF 模型^[2,7]:

$$\eta = \frac{\eta_0(T, P)}{1 + \left(\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^* \right)^{1-n}} \tag{15}$$

一般采用 Arrhenius 型表达式(式 16)或 WLF 型表达式(式 17)。

$$\eta_0(T, P) = B e^{\beta P} e^{\frac{T_b}{T}} \tag{16}$$

$$\eta_0 = D_1 e^{\left[\frac{-A_1(T - (D_2 + D_3^P))}{A_2 + T - D_2} \right]} \tag{17}$$

式中 τ^* , D_1, D_2, D_3, A_1, A_2 为材料常数, n 为非牛顿指数。(15)式和(16)式构成了五参数(n, τ^*, B, T_b, β)粘度模型,(15)式和(17)式构成了七参数($n, \tau^*, D_1, D_2, D_3, A_1, A_2$)粘度模型。五参数模型仅适用于流动充填模拟分析,七参数模型的适用范围则扩展到了保压、冷却、翘曲变形等模拟分析。

2 气辅注塑 CAE 模拟分析实例

2.1 分析简介

将前述理论推导的结果反映到实际气体辅助注射成型过程中可以看出,影响气体辅助注射成型效果的因素主要是产品结构及模具结构设计、气道设计以及成型工艺条件的设置等。特别是对于汽车保险杠这类尺寸较大,力学性能和表面质量又要求较高的制品来说,如何在运用气体辅助注塑 CAE 技术对设计方案进行模拟的基础上,合理的设计模具结构以及确立气道开设的位置及尺寸,在保证产品质量的基础上又最大限度节省模具制造成本,同时处理好进气时间、射料时间、进气压力的关系,从而获得理想的成型工艺条件是非常重要的。汽车保险杠模具的分析从这些因素出发,先后调整了流道和浇口数目,以及气辅成型工艺的设置等,优化了原始设计方案。

该套汽车保险杠制件属于薄壁狭长型制件,壁厚在 1.2~2mm 之间,总长度约为 1200mm。分析所用的注塑原料为 DSM 公司产 PP/EPDM,牌号为 TP2401/1,分析所用注塑机的最大注射速率为 1200g/s。

2.2 原始方案分析

原始设计模型如图 1 所示,制件采用三点(A、B、C)进料;流道为热流道,直径为 12mm;浇口为侧浇口,宽度为 8mm,长度为 2mm。制件边缘处壁厚尺寸较大,可以将其用作气道,在建模过程中等效成一维圆柱,直径为 7.2mm,形状因子 1.13。D 为进气点。

分析条件如表 1 所示。

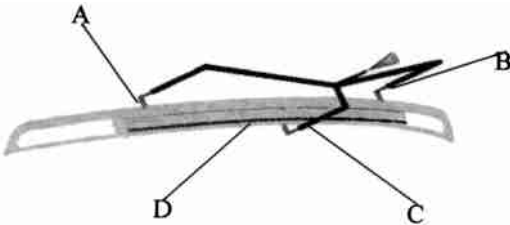


表 1 原始方案分析条件

项目	数值
注射时间/s	4.1
进气时间/s	4.7
气体保压时间/s	30
最大气压/MPa	35
注射温度/℃	225

从图 2 中可以看出,气道附近有气体不均匀渗出,而且部分气体通过浇口 C(箭头所示)进入热流道内,使成型工艺较难调整。



图 2 原始方案分析气体掏空率

造成以上缺陷的原因可能有如下几点:一是三个浇口造成充填不均匀,从而影响气体穿透;二是气压太大,延迟时间太短;三是进气点离浇口太近。

2.3 优化方案分析

根据原始方案分析所发现的问题作如下调整:浇口数目由原来的三个减少为一个;将最大气压减小为 25MPa,并增长延迟时间;将进料点设计到进气点相对的一侧。如图 3 所示,E 为进料点,F 为进气点。

分析条件如表 2 所示。

表 2 优化方案分析条件

项目	数值
注射时间/s	4.1
进气时间/s	5
气体保压时间/s	30
最大气压/MPa	25
注射温度/℃	225

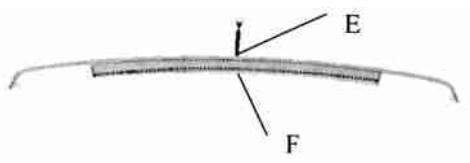


图 3 优化方案设计模型

从图 4 中可以看出,气体均匀穿透气道,渗出面积较小,且没有气体进入热流道。

从图 5 中可以看出主流道入口处最大压力仅为 29.11MPa,制品成型较容易。

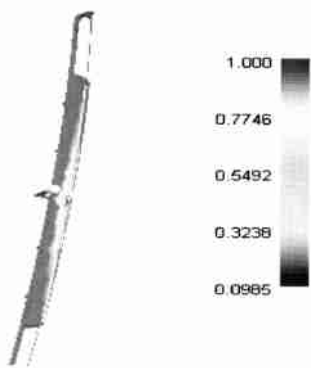


图 4 优化方案分析气体掏空率

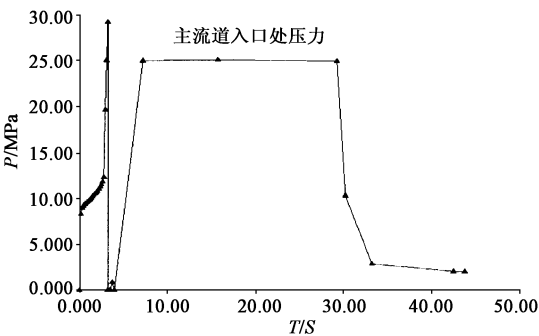


图 5 优化方案分析入口压力随时间变化图

通过对原始方案的优化分析,使气体充填更加均匀,熔接痕数量减少,提高了制作的力学性能,改善了表面质量,降低了模具的成本,优化了成型工艺。

3 结论

本文介绍了气辅 CAE 模拟技术在熔体充填和保压两个阶段所遵循的数学模型和粘度参数模型,并介绍了在粘性流体力学基础上对数学模型进行合理的简化和假设的方法,指出了气体辅助成型技术在塑料模具设计中的重要意义。并以汽车保险杠模具为例指出在模具设计中应用气体辅助注射成型技术,同时在设计过程中辅以气辅 CAE 模拟技术对设计方案进行成型模拟和优化,可以大大提高制品的质量,节省模具设计和制造成本,优化成型工艺条件,因此具有非常重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 燕立唐,刘法谦,李荣勋,等. 橡塑技术与装备, 2002, 28(6): 14~17.
- [2] HIEBER C A. Ch. 1 in Injection and Compression Molding Fundamentals. ISAYEV A I. New York: Marcel Dekker, 1987: 296~298.
- [3] 李倩,刘春太,申长雨,等. 中国塑料, 2001, 15(11): 79~82.
- [4] Hieber C A, Shen S F. Non-Newtonian Fluid Mech, 1980(1): 113~121.
- [5] Turng L S, Wang V W. Simulation of Co-Injection and Gas-Assisted Injection Molding. SPE Technical Papers, 1991(37): 297~300.
- [6] 申长雨. 塑料模具计算机辅助工程. 河南: 河南科学技术出版社, 1998: 94~99.
- [7] 金日光. 高聚物流变学及其在加工中的应用. 北京: 化学工业出版社, 1986: 42~43.

The Basic Theory and Application Example for the Gas-assisted CAE Tecnology

YAN Li-tang¹, LIU Fa-qian², LIU Bo²

(1. Material College, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Lab of New Material in QDICT, Qingdao 266042, China)

Abstract: The CAE technology is very important in the design of the gas-assisted injection mold. The models of the viscous and mathematics when the melt fluids in the mold cavity during filling and pressure was hold during the pack process were described. The way that the mathematics model was reasonable predigested was introduced. The gas-assisted molding for the automobile bumper mold was simulated by C-MOLD which is one of the CAE software. The effect and process of the gas filling were optimized. The appeal quality and the dynamic capacity were improved and the proportion of the first try was increased.

Key words: Gas-assisted injection molding; Basic theory; CAE; Optimization design; Automobile bumper