

基于 Projection VOF 方法的熔模铸造 蜡模充型过程数值模拟

杨 铭¹, 廖敦明¹, 陈宇豪¹, 陈 涛², 顾建华³

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074; 2. 武汉晨曦芸峰科技有限公司, 湖北武汉 430074; 3. 广东鸿图(南通)模具有限公司, 江苏南通 226300)

摘要: 针对熔模铸造蜡模充型过程数值模拟软件自主开发, 建立了流动场和温度场数学模型, 采用Cross-WLF粘度模型描述蜡料的流变性能, 基于Projection VOF方法进行蜡料流动过程速度场、压力场以及自由表面的求解。通过试验测量获取了K512型蜡料的热物理性能和流变性能的相关数据, 拟合得到粘度模型参数。分别在蜡料常粘度和变粘度模型两种条件下对扳机铸件蜡模充型过程进行模拟, 结果表明, 所建立蜡模充型过程数学模型能较好地描述蜡料的动态流变特性和传热行为。

关键词: 熔模铸造; 蜡模充型; 数值模拟; Projection VOF方法

作者简介:

杨铭(1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为蜡模充型过程数值模拟。E-mail: ymhust@qq.com

通讯作者:

廖敦明, 男, 教授, 博士生导师。电话: 027-87558134, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

02-0107-08

基金项目:

国家重点研发计划项目(2020YFB2008300-2); 广东省重点领域研发计划项目(2019B090921001)。

收稿日期:

2022-04-05 收到初稿,

2022-06-22 收到修订稿。

熔模铸造可大批量制造具有复杂外形、高表面质量和尺寸精度的铸件^[1], 但工艺流程复杂, 生产周期长^[2], 各工序阶段均对铸件尺寸偏差存在影响^[3], 其中蜡模质量对铸件的尺寸精度起主要影响作用^[4], 而在蜡模制备的过程中, 蜡料冲填的质量又起到了决定性的作用, 因此需要对蜡模型腔充型过程进行深入探讨研究。

蜡模充型过程十分复杂, 传统的“试错法”研发周期长、成本高^[5], 随着计算机模拟技术的逐渐成熟, 数值模拟已成为铸造研究的重要手段^[6]。部分国内外学者对蜡模充型过程展开了数值模拟研究, Gebelin等^[7]使用常物性参数预测了蜡模的充型过程。韩昌仁等^[8]对端盖件进行了蜡模充型模拟和实验研究, 但忽略了温度场的影响。张齐生等^[9]使用FLUENT软件模拟高温蜡模充型过程, 确定了最佳充型速度和排气结构, 但未建立蜡料本构模型。段伟等^[10]对蜡模充型过程进行了常粘度等温计算, 利用华铸CAE/InteCAST软件对某航空机匣件注蜡速率进行了优化。上述研究未能综合考虑流动场和温度场对蜡料的影响, 无法对蜡料实际的动态流变特性进行准确描述。

本文基于ProjectionVOF求解方法完成了蜡模充型过程数值模拟软件的自主开发, 采用Cross-WLF粘度模型描述蜡料流变性能; 随后通过测量试验获取K512型蜡料的主要性能参数, 并拟合了粘度模型参数; 最后对扳机件蜡模充型过程进行模拟, 验证了数学模型的准确性。

1 蜡模充型过程数学模型

蜡模充型的原理是利用外部压力使具有一定温度的蜡料流入并充满模型腔, 从而形成不同形状的蜡模。蜡料充填流动过程中会受到蜡料性质、模具和工艺参数等多因素影响, 是一种带自由表面的非牛顿粘性流体三维非等温非稳态复杂流动。在数值模拟过程中为简化蜡模充型问题和求解计算, 本文作出如下假设: 蜡料分子结合紧密, 粘度较大, 在充型过程中密度基本不变, 可视为不可压缩流体, 同时惯性力和重力相比粘性力较小, 可忽略不计, 视作层流流动, 此外忽略充型时气相对蜡料流动的影响, 假设蜡料各向同性, 且处于连续状态。

在上述简化与假设的基础上, 可使用质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程来描述蜡模充型过程, 并采用ProjectionVOF方法进行控制方程和蜡料自由表面的求解。

1.1 流动场模型

蜡模充型(糊状蜡料充型)过程流动场数学模型主要包括连续性方程和动量守恒方程以及蜡料粘度模型。

蜡模充型流场的数学模型主要包括描述蜡料流动的连续性方程和动量守恒方程以及描述蜡料粘度的本构模型, 基于质量守恒的连续性方程^[11]如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; u, v, w 为流体速度分量, m/s 。不可压缩流体的 ρ 为常量, 式(1)可进一步简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

流体力学中描述不可压缩流体动量守恒的动量方程又称Navier-Stokes方程^[12], 当 ρ 为常量时, 动量方程可写作:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{f} \quad (3)$$

式中: \mathbf{U} 为流体速度, m/s ; p 为流体压力, Pa ; ν 为流体的运动粘度, m^2/s ; \mathbf{f} 为体积力加速度, m/s^2 。左边第一项是非定常项, 描述流场随时间的变化; 左边第二项是对流项, 用来描述流体中的对流效应, 也就是雷诺数中的惯性力; 右边第一项是压力项, 第二项是粘性项(扩散项), 分别描述压力和粘性力对流体的影响。在蜡模实际充型过程中, 惯性力和重力的影响相对粘性力较小, 可忽略不计, 动量方程简化如下:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} \quad (4)$$

为了准确计算动量方程中的粘性项, 需要确立适用于蜡料流动特性的粘度模型, 在较宽的温度和剪切速率范围内描述蜡料粘度的连续变化规律。

Cross-WLF模型^[13]能精确反映聚合物材料在较宽剪切速率范围内流变行为的变化, 适应温度范围较广, 同时能考虑压力的影响^[14]。本文选取Cross-WLF模型为蜡料粘度本构模型:

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (5)$$

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp\left[-\frac{A_1(T-T^*)}{A_1 + (T-T^*)}\right] \quad (6)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad (7)$$

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (8)$$

式中: η 为动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η_0 为零剪切速率牛顿粘性系数; T 为熔体温度, K ; p 为流体压力, Pa ; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; τ^* 为材料出现“剪切致稀”流变特性的临界应力值, Pa ; n 是体现材料假塑性行为的幂律指数; D_1 和 A_1 为模型常数, \tilde{A}_2 为拟合数据系数; T^* 为材料的玻璃化转变温度, K ; D_2 表示低压下的玻璃化转变温度, K ; D_3 为压力相关的粘度系数, 若不考虑压力影响则设为0。

1.2 温度场模型

温度对蜡料粘度有较大影响。当蜡料流动前沿温度低于转变温度时, 粘度将过大, 可能充不满, 因此需要考虑蜡料温度的分布和变化情况。蜡模充型过程能量守恒方程^[15]如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (9)$$

式中: T 为流体温度, K ; t 为时间, s ; u, v, w 为流体速度分量, m/s ; λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; \dot{Q} 为热源项, 表达式为:

$$\dot{Q} = \rho L \frac{df_s}{dT} \quad (10)$$

式中: L 为熔化潜热, J/kg ; f_s 为固相率。

1.3 自由表面模型

采用VOF方法^[16]进行蜡料流动场的自由表面处理, 其原理是根据各网格单元的体积函数 F 确定流体自由表面的位置和形状, 体积函数方程如下:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

式中: F 为网格单元的体积函数, 表示网格单元中流体体积和单元总体积的比值。

1.4 时间步长

在数值计算过程中, 时间步长对计算稳定性、结果精度以及计算时间都有较大影响, 若时间步长选择不当, 还可能会出现发散。为保持数值计算的稳定性, 在一个时间步长内, 流体流动不允许超过一个网格单元, 由此可得:

$$\Delta t < \min\left\{ \frac{\Delta x}{|u_{\max}|}, \frac{\Delta y}{|v_{\max}|}, \frac{\Delta z}{|w_{\max}|} \right\} \quad (12)$$

1.5 边界条件

蜡料自由表面速度的法向分量与该处流体速度法向分量相等, 蜡料与空气进行热传导和对流换热(空气温度不变), 将自由表面压力设为0。

入口边界条件可根据模拟方案设定为注蜡速度或注蜡压力随时间变化的曲线，入口温度设为定值 T_{wax} 。固壁换热边界条件设定为对流换热，壁面温度设为定值 T_{wall} 。图1为壁面法向与y轴同向情况下的固壁边界条件示意图，固壁速度边界条件采用无滑移边界条件：

$$u_1 = -u, v_b = 0, w_1 = -w \quad (13)$$

对于出口边界条件，将出口压力设为静压以保证排气顺畅，同时设定出口处气体的法向速度梯度为零：

$$\frac{\partial u}{\partial n} + \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial n} = 0 \quad (14)$$

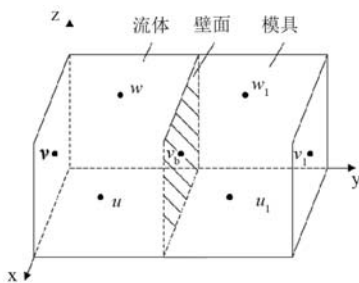


图1 固壁边界条件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solid wall boundary condition

1.6 求解方法与计算流程

本研究采用有限差分交错网格对控制方程进行离散，并使用Projection方法进行蜡料的流动场求解。Projection方法在求解过程中始终满足连续性方程，并且将速度场和压力场分开求解，Projection方法基于Helmholtz矢量分解定理^[17]提出，基本思想为：通过引入中间速度矢量将动量方程拆分为两个方程，分别完成中间速度和压力场的计算后，基于压力场结果将中间速度投影到无散度矢量空间，可直接求得满足连续性方程的真实速度场。使用Projection方法求解速度场和压力场的具体步骤如下：

首先将动量守恒方程式(4)离散：

$$\frac{\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} + \nu \nabla^2 \vec{U}^n \quad (15)$$

式中： \vec{U}^{n+1} 和 \vec{U}^n 分别为 $n+1$ 时刻和 n 时刻的速度； Δt 为时间步长； p^{n+1} 为 $n+1$ 时刻的压力。引入中间速度 \vec{U}^* 将式(15)拆散为两个方程：

$$\frac{\vec{U}^* - \vec{U}^n}{\Delta t} = \nu \nabla^2 \vec{U}^n \quad (16)$$

$$\frac{\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^*}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^{n+1} \quad (17)$$

考虑 $n+1$ 时刻速度满足连续性方程，有 $\nabla \cdot \vec{U}^{n+1} = 0$ ，对式(17)两边同时取散度得到压力Poisson方程：

$$\nabla^2 p^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \vec{U}^* \quad (18)$$

根据求得的中间速度 \vec{U}^* 使用Poisson方程离散求解出压力场后，将中间速度和压力场结果同时代入式(17)，即可得到 $n+1$ 时刻速度场 \vec{U}^{n+1} 。

速度场和压力场求解完成后，进行各网格体积函数的计算和流动域的更新，随后开始温度场的求解。在温度场求解过程中，将遍历所有流动域网格及其相邻网格，通过热交换和热源项的计算得到热流变化量，从而在当前网格温度的基础上计算下一时刻温度，同时根据相邻网格的温度最大值和最小值对当前网格的升温 and 降温幅度进行修正，保证当前网格温度在相邻网格温度的最大值和最小值之间。

基于上述数学模型，开发蜡模充型数值模拟软件的计算流程，如图2所示。完成计算初始化后开始物理场的循环计算，循环过程中将对边界条件不断更新，并确定新的时间步长。流动场求解主要包括中间速度计算、压力Poisson方程求解、真实速度场计算以及自由表面求解。流动域蜡料网格温度场计算完毕后，对存盘和循环终止等操作进行逻辑判断和执行。

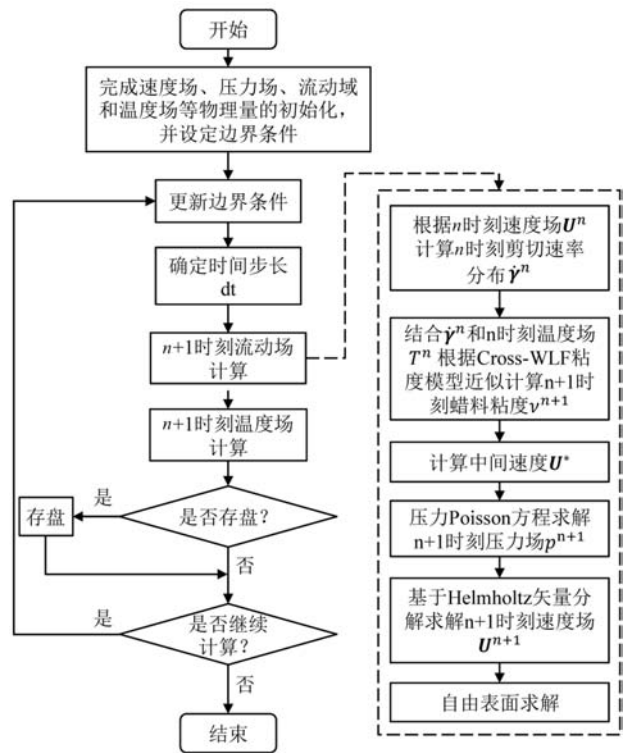


图2 蜡模充型数值模拟计算流程

Fig. 2 Wax model filling numerical simulation calculation process

2 蜡料性能测试

蜡料性能对于蜡模成形质量十分重要。蜡料热物理性能和蜡料流变性能分别影响着蜡料的传热行为和

流动行为。准确的物性参数是获得准确模拟结果的基础,为了在数值模拟中使用准确参数,本文通过测量试验获取K512型蜡料热物理性能和流变性能的相关数据,为后面的数值模拟计算提供准确的蜡料参数。

2.1 蜡料热物理性能测试

蜡料热物理性能包括蜡料的转变温度、比热容和热导率。蜡料温度低于玻璃化转变温度时将发生凝固,蜡料的比热容和热导率会随温度发生变化。

本文采用DSC25仪器对蜡料完成DSC测试,测温范围为30~70℃,升温速率为5℃/min,测试标准为ASTM E1269和ASTM D3418,分别表征比热容和蜡料转变温度。通过DSC测试得到K512型蜡料转变温度为49℃。采用瞬态平面热源法(Hot Disk)进行蜡料的热导率测量,测试标准为ISO22007-2。

2.2 蜡料流变性能测试

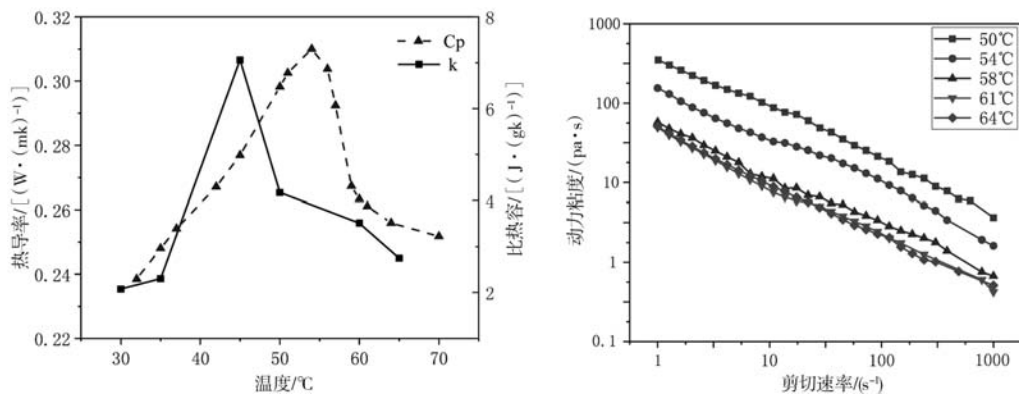
蜡料的流变性能是指不同温度和剪切速率下蜡料

的粘度大小。本文借鉴聚合物材料性能的测试方法,使用赛默飞Mars40型旋转流变仪对蜡料的流变性能进行测试。测试的剪切速率范围为1~1 000 s⁻¹,由于转变温度为49℃,选择的测试温度为50℃、54℃、58℃、61℃、64℃。

2.3 性能测试结果与粘度模型系数拟合

图3为K512型蜡料的热物理性能和流变性能测试结果。热物理性能测试实验获得的K512型蜡料比热容和热导率与温度的关系曲线如图3a所示,可以发现随着温度的升高,蜡料的比热容和热导率均先升高然后降低。图3b为不同温度和剪切速率下蜡料的粘度特性曲线,随着剪切速率的增加,蜡料表现出剪切变稀的行为,且不同温度下蜡料的粘度存在较大差异,温度越高则蜡料粘度越小。

基于图3b中所测得不同温度和剪切速率下K512型蜡料的粘度测试数据,使用最小二乘法对Cross-WLF模型进行拟合,得到该粘度模型的7个参数值如表1所示。



(a) K512型蜡的热导率和比热容随温度变化曲线

(b) 不同温度下K512型蜡的剪切速率和粘度关系

图3 K512型蜡料的热物理性能和流变性能测试结果

Fig. 3 Test results of thermal and rheological properties of K512 wax

表1 K512蜡料的Cross-WLF本构模型拟合参数
Table 1 Cross-WLF constitutive model fitting parameters of K512 wax material

| n | τ^*/Pa | $D_1/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ | D_2/K | $D_3/(\text{K}\cdot\text{Pa}^{-1})$ | A_1 | A_2/K |
|---------|--------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------------|--------|----------------|
| 0.369 1 | 0.427 887 | 2.18e+36 | 263.15 | 0 | 123.92 | 51.6 |

3 蜡模充型过程数值模拟

为验证所建立蜡模充型数学模型的准确性,本文选取参考文献[18]中扳机蜡件进行蜡模充型过程的数值模拟。扳机蜡模是加气机腔体零件,该零件形状扁长,具有凹面、弧面、斜面和分叉等多个复杂特征,使用三维建模软件UG NX 10.0绘制零件以及注蜡浇口

三维模型如图4所示。扳机件轮廓尺寸为270 mm×60 mm×45 mm,注蜡浇口设于扳机件凸起弧面的中心,长15 mm,直径为8 mm。对扳机零件进行有限差分均匀网格剖分,剖分得到的网格最小边长为1.2 mm,网格总数为1 092 000。

扳机件数值模拟计算中入口处蜡料速度设为4.55 m/s,根据流速和浇口直径可计算浇口处的平均剪切速率为1 755 s⁻¹。蜡料的热导率和比热容根据图3a设定,其他物性参数、边界条件和初始条件等模拟参数如表2所示。

为验证K512型蜡料Cross-WLF粘度模型的准确性,设计了两组扳机件蜡模充型过程数值模拟方案,分别在蜡料常粘度和变粘度模型下进行数值模拟。方



(a) 扳机零件模型 (b) 注蜡浇口位置

图4 扳机零件及浇口位置几何模型

Fig. 4 Trigger part and gate location geometry

案I根据浇口平均剪切速率和注蜡温度，将蜡料的粘度设为 $0.42 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 这一常数值，可计算出雷诺数为94.21，满足层流假设，此外求解时采用完整的动量方程，以考虑惯性力和重力的影响；方案 II 则基于蜡料Cross-WLF本构模型，在蜡模充型过程中根据速度场和温度场分布的实时变化计算蜡料真实的粘度分布，并忽略动量方程中的惯性项和重力项，其他数值模拟参数保持一致。

对于方案 I，扳机件蜡模充型过程数值模拟结果如图5所示，其中 P 和 t 分别表示蜡料充型率和充型时间，模拟结果色标为蜡料速度。观察图5可知，当蜡料的粘度设为较小的常数时，蜡料在流动过程中粘性力较小，此时无法忽略惯性力和重力对蜡料流动过程的影响，蜡液流动不平稳，并存在明显的回流现象。关于充填顺序，蜡料先充满型腔的底层网格，然后再逐层向上方网格充填，扳机件的凸起部位为最后充满区域。总体来说，常粘度条件下扳机件蜡模充型过程与铸造工艺金属液的充型过程较为相似。

文献[18]中扳机蜡模充型实验结果和方案 II 蜡模充型模拟结果如图6所示，模拟结果色标为蜡料速度。图

表2 扳机件蜡模充型模拟所设置的计算参数
Table 2 Numerical simulation parameters set for trigger wax mold filling simulation

| 参数 | 数值 |
|---|---------|
| 蜡料密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1 087 |
| 空气密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1.29 |
| 注蜡温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 60 |
| 模具初始温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 20 |
| 空气温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 20 |
| 蜡料潜热/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$ | 0.122 7 |
| 蜡料与空气换热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ | 20 |
| 蜡料与模具换热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ | 500 |

6a1~a8中扳机件的上方是浇注系统的一部分，本文在数值模拟中将浇口简化为圆柱状，因此实验扳机件与模拟扳机件在形状上有一定差异。

观察图6，方案 II 模拟结果中各个时刻的蜡料充型顺序和流动形态与实验结果基本一致：从充型顺序上看，蜡料充满与浇口相连的扳机件的凸起部位之后，蜡液一分为二，分别对两侧的末端分叉进行填充。

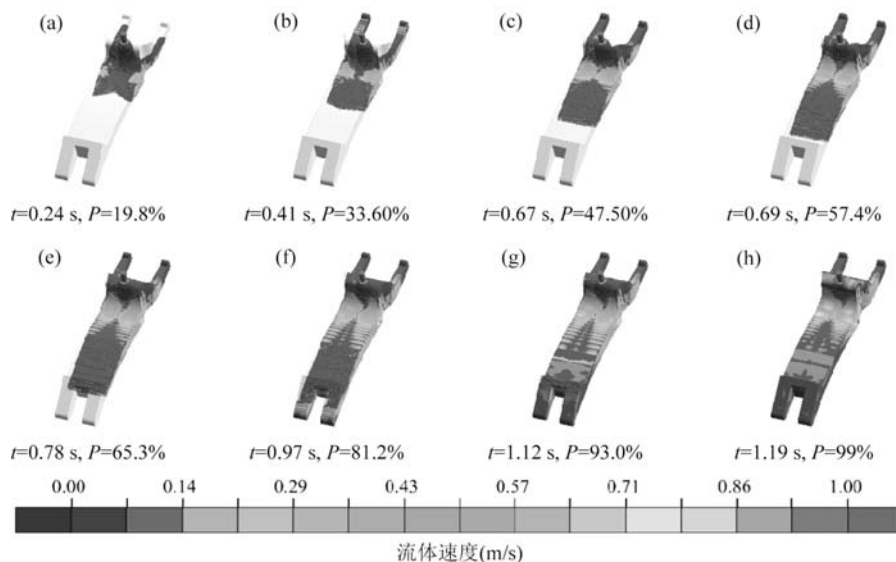


图5 方案 I 扳机件蜡模充型过程模拟结果

Fig. 5 The simulation results of the trigger part wax mold filling process in scheme I

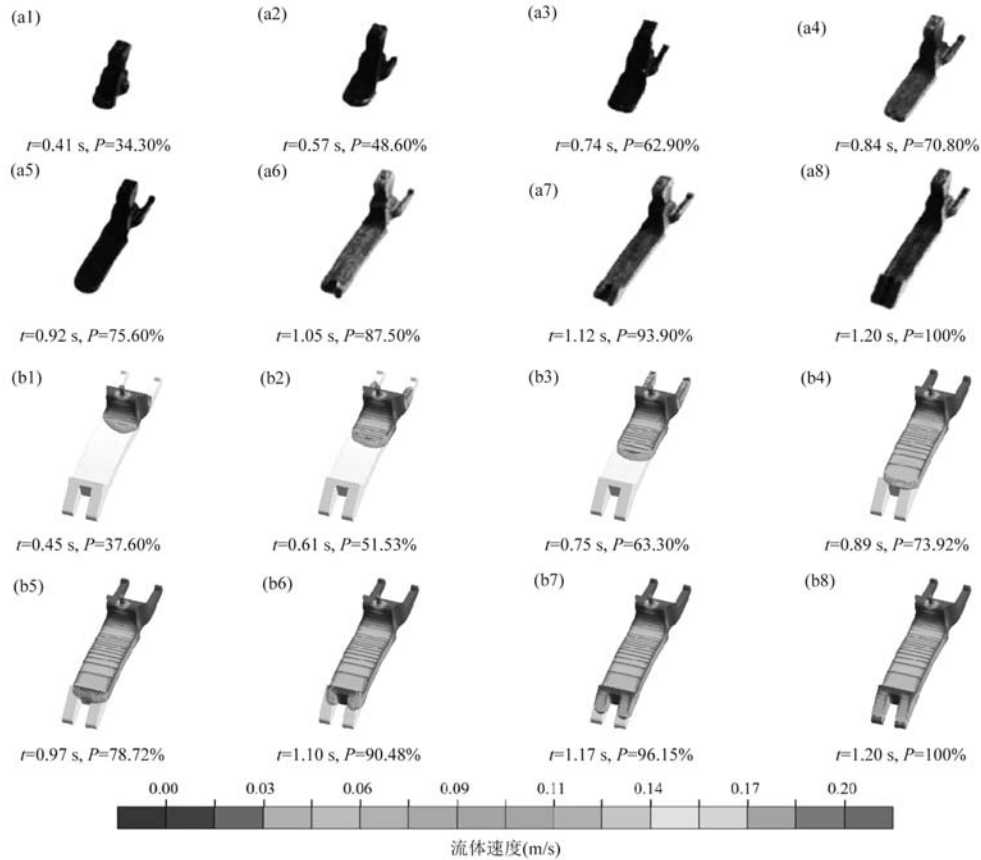


图6 扳机件充型过程方案Ⅱ模拟结果与实验结果^[18]对比: (a1~a8)实验结果; (b1~b8)模拟结果

Fig. 6 Comparison of simulation results inscheme II and experimental results^[18] of the trigger filling process: (a1~a8) experimental results; (b1~b8) simulation results

$t=0.75$ s时刻扳机件浇口侧分叉接近充满状态(图6a3, b3), 充型末端分叉的填充则较慢, $t=1.20$ s时刻才充型完毕, 是蜡模最后充填部位(图6a8, b8)。从蜡料的流动形态上看, 蜡料的流动前沿始终保持一定的曲面沿着流动方向推进, 且充型过程十分平稳, 没有湍流和飞溅。

图7给出了扳机件充型末期对称剖面位置的蜡料粘度分布模拟结果, 色标为流体动力粘度。从图7中可知变粘度模型方案下, 蜡料整体粘度值远大于常粘度方案中所设的粘度常数, 且不同区域的蜡料粘度根据温度和剪切速率的不同存在较大差异, 能反映蜡料的真实粘度分布。

根据上述分析, 相对于常粘度条件下的模拟方案Ⅰ, 变粘度模型模拟方案的计算中虽然略去了惯性项和重力项, 但模拟结果和扳机件充型实验结果符合良好, 证明对于蜡模充型这一粘性流动过程, 只考虑粘性项的简化动量方程的适用性较好, 同时Cross-WLF粘度本构模型能较好地描述蜡模充型过程中蜡料实际的动态流动特性。接下来将对模拟方案Ⅱ的温度场数值计算结果进行分析。



图7 充型末期蜡料粘度分布模拟结果

Fig. 7 Simulation result of wax viscosity distribution at the end of filling

模拟方案Ⅱ结果中扳机蜡模的温度分布情况如图8所示, 由于蜡料热导率较小, 在充型过程中整体温度变化区间较小, 最大温度下降值为 1.13 °C。最小温度区域位于扳机件凸起部位的两侧, 该区域离浇口位置很近因此较早得到充填, 但由于壁面形状凹陷, 在型壁的剪切迟滞作用下, 靠近壁面的边界层蜡液与壁面接触散热, 温度下降较快, 粘度增大而难以滑移, 进一步加快了散热速度。观察各时刻流动前沿区域,

蜡料在型壁剪切作用下以曲面形状推进而与型壁接触较少,再加上蜡料内部导热性很差,因此热量散失较少,整体温度较高,与浇口附近蜡料温度接近。

结合上面扳机件模拟结果与实验结果的对比分析和讨论,所建立蜡模充型数学模型能够实现对接机件

充型过程蜡料的流动和传热行为较为准确的预测,蜡料的流动形态和型腔充型顺序与实验结果一致,温度场分布情况符合热力学理论,验证了所建立蜡模充型过程数学模型的准确性。

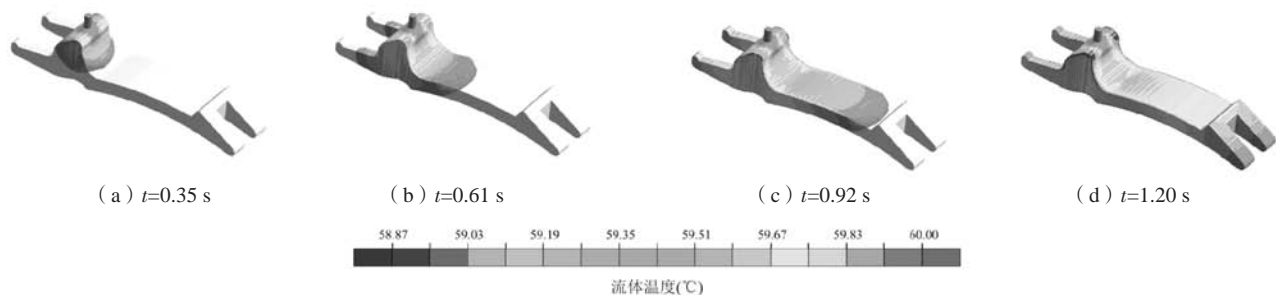


图8 方案Ⅱ中扳机蜡模模拟结果温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of trigger wax model simulation results in scheme II

4 结论

(1) 建立了蜡模充型过程的数学模型,并使用Projection方法对流动场控制方程进行求解,采用Cross-WLF粘度模型精确地描述蜡料在较宽温度范围和剪切速率范围内流变行为的变化。

(2) 通过测量试验获取K512型蜡料的热物理性能和流变性能数据,并拟合了粘度模型参数。K512型蜡料的热导率和比热容随着温度的升高先增大后降低;

蜡料粘度随着剪切速率的增加迅速减小,且温度越高,蜡料粘度越小。

(3) 根据蜡模充型模拟结果,蜡料在较小的常粘度下受粘性力、重力和惯性力综合影响,流态波动较大;只考虑粘性力的变粘度模型下,蜡料流动前沿为曲面且充型平稳,与实验结果吻合良好。蜡料温度场整体变化较小,浇口附近两侧区域温降最大,流动前沿区域温度较高。

参考文献:

- [1] 吕志刚. 铸造技术路线图: 熔模铸造 [J]. 铸造, 2017, 66 (4): 317-321.
- [2] 宋浩, 韩冬, 赵军, 等. 钛合金熔模精密铸造技术的发展现状 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1304-1311.
- [3] 余童, 汪东红, 吴文云, 等. 熔模铸造高温合金圆角尺寸偏差与传递规律 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (6): 786-789.
- [4] BONILLA W, MASOOD S H, IOVENITTI P. An investigation of wax patterns for accuracy improvement in investment cast parts [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18 (5): 348-356.
- [5] 傅骏, 向召伟, 邓珍波, 等. 基于熔融沉积技术的快速熔模铸造工艺实践 [J]. 金属世界, 2015 (1): 38-41.
- [6] 刘东戎, 杨智鹏, 王丽萍, 等. 铸造充型过程数值模拟技术的发展及现状评述 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21 (3): 96-100.
- [7] GEBELIN J, JOLLY M R. Modelling of the investment casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135 (2-3): 291-300.
- [8] 韩昌仁, 周铁涛, 柴增田, 等. 熔模精密铸造蜡模充型过程的数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2001 (3): 38-39.
- [9] 张齐生, 韩李娜, 赵南山, 等. 基于FLUENT高温压蜡机蜡模充型流场的数值计算与分析 [J]. 液压与气动, 2014 (1): 49-52.
- [10] 段伟, 殷亚军, 沈旭, 等. 基于华铸CAE/InteCAST的蜡模充型过程数值模拟与分析 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (23): 86-89.
- [11] PEDLOSKY J, Others. Geophysical fluid dynamics [M]. Springer, 1987.
- [12] TEMAM R. Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis [M]. American Mathematical Society, 2001.
- [13] BORONAT T, SEGUI V J, PEYDRO M A, et al. Influence of temperature and shear rate on the rheology and processability of reprocessed ABS in injection molding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (5): 2735-2745.
- [14] 冒文娟. 基于Moldflow的Cross-WLF粘度模型研究 [J]. 塑料工业, 2020, 48 (07): 47-50.
- [15] ROOS H O R, STYNES M, TOBISKA L. Robust numerical methods for singularly perturbed differential equations: convection-diffusion-reaction and flow problems [M]. Springer Science & Business Media, 2008.

- [16] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39 (1): 201-225.
- [17] 刘淼儿, 任玉新, 张涵信. 求解不可压Navier-Stokes方程的三阶精度投影方法 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45 (2): 285-288.
- [18] 周铁涛, 韩昌仁, 柴增田, 等. 熔模铸造模料本构方程的建立及其应用 [J]. *铸造*, 2001 (2): 20-22.

Numerical Simulation of Mold Filling Process of Investment Casting Wax Pattern Based on Projection VOF Method

YANG Ming¹, LIAO Dun-ming¹, CHEN Yu-hao¹, CHEN Tao², GU Jian-hua³

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Wuhan Chenxi Yunfeng Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Guangdong Hongtu (Nantong) Mould Co., Ltd., Nantong 226300, Jiangsu, China)

Abstract:

Numerical simulation software was independently developed for the filling process of investment casting wax pattern, and mathematical models of flow field and temperature field were established, where the Cross-WLF viscosity model was applied to describe the rheological properties of wax material, based on the Projection VOF method, the velocity field and pressure field and free surface of the flow process of wax are solved. The data of thermal properties and rheological properties of K512 wax were measured by tests, and the parameters of viscosity model were obtained by fitting. The mold filling process of trigger casting wax pattern was simulated under two conditions of constant wax viscosity and variable wax viscosity model respectively. The results show that the established mathematical models of mold filling process of wax pattern can accurately describe the dynamic rheological properties and thermal transmission behavior of wax.

Key words:

investment casting; wax mold filling; numerical simulation; projection VOF method
