

基于 ProCAST 软件的低压铸造充型过程的研究

王超，游龙，王自东，冯建，林国标，刘航

(北京科技大学材料科学与工程学院，北京 100083)

摘要：由于低压铸造充填速度较慢，充型平稳，因而充型计算采用层流模型。论述了低压铸造充型模拟的数学模型，算法上采用目前充型过程数值模拟中应用最为普遍的方法 SOLA-VOF 方法，其中 SOLA 法用于求解流体的速度场和压力场，VOF 法处理自由表面。采用 UG 进行三维造型，用 ProCAST 进行了网格划分并对铸件进行了充型过程的模拟。

关键词：低压铸造；数学模型；ProCAST；充型模拟

Study of Mold Filling Simulation on Low Pressure Die Casting Based on ProCAST Software

Wang Chao, You Long, Wang Zidong, Feng Jian, Lin Guobiao, Liu Hang

(School of Material Science and Engineering, University of Science & Technology Beijing,
Beijing 100083, China)

Abstract: As the low pressure die casting fills slow, smooth filling, so laminar flow model is used in filling calculated. Discusses the low pressure die casting filling simulation of mathematical model, algorithm on the filling process using numerical simulation of the current application of the most common method of SOLA-VOF method, which SOLA method used to solve the fluid velocity and pressure field, VOF solve free treatment surface. UG is used to set three-dimensional modeling, meshing with procast, and use procast to show filling and casting process simulation.

Key words: low pressure die casting; mathematical model; procast; mold filling simulation

由于低压铸造具有铸件尺寸精度较高、充型平稳、充型速度可控等优点，近年来使其在铸造行业中占据着越来越重要的位置。然而和其他的铸造方法一样，低压铸造也会不可避免的产生各种铸造缺陷。随着计算机技术和数值计算技术的飞速发展，利用计算机数值模拟技术对低压铸造的充型过程进行模拟分析已成为提高低压铸造生产质量和效率的重要手段。

低压铸造充型过程数值模拟主要通过有限差分、有限元等数值计算方法来求解流体运动的质量守恒、动量守恒和能量守恒方程，并追踪流体自由表面的变化，得到液态金属充型的流动状态，从而达到优化浇冒口设计、预测铸造缺陷等目的。低压铸造充型过程的主要特点是金属液在低压下充型，压力可控，充型比较平稳，通常可以考虑为层流流动。在进行适当的初始条件及边界条件的修正后，可以用层流模型及 SOLA-VOF 算法进行求解。同时，由于金属型模具传热速度快，低压铸造充型过程缓慢，充型过程必然伴随着大量的能量损耗，造成明显不均匀的初始温度场。因此，低压铸造充型过程数值模拟的一个重要目标就是通过充型过程数值模拟得到铸件准确的初始温度分布，以提高充型后铸件凝固过程的数值模拟的精度。

从20世纪90年代开始,国内外研究人员对低压铸造的充型过程模拟开展了一系列的研究,并取得了一些成果^[1-3]。

1 低压铸造充型模拟数学模型

由于低压铸造充填速度较慢,充型平稳,因而充型计算采用层流模型。算法上采用SOLA-VOF方法,这是目前充型过程数值模拟中应用最为普遍的方法,其中SOLA法用于求解流体的速度场和压力场,VOF法处理自由表面。液态金属充型凝固过程可看作是不可压缩黏性流体的流动,它可以由动量方程(1-3)、连续性方程(4)、能量方程(5)及体积函数方程(6)来描述。铸件的凝固过程,对重力铸造来说,要考虑凝固过程中金属液体在重力作用下的流动补缩。对低压、压铸而言,不仅要考虑重力的作用,而且要考虑凝固过程保压期间入口压力的作用,可以用方程(7—11)来描述^[4,5]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + r \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + r \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial L}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + f_L \rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial L}{\partial t} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\rho_s}{\rho_L} - 1 \right) \frac{\partial f_L}{\partial t} - \frac{\partial (f_L \cdot u)}{\partial x} - \frac{\partial (f_L \cdot v)}{\partial y} - \frac{\partial (f_L \cdot w)}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$u = - \frac{K}{\mu \cdot f_L} \frac{\partial (P - P_{inlet})}{\partial x} \quad (9)$$

$$v = - \frac{K}{\mu \cdot f_L} \frac{\partial (P - P_{inlet})}{\partial y} \quad (10)$$

$$w = - \frac{K}{\mu \cdot f_L} \frac{\partial (P - P_{inlet})}{\partial z} - \frac{K g \rho}{\mu \cdot f_L} \quad (11)$$

2 充型过程数值模拟的SOLA-VOF法

为了克服及方法中因采用粒子跟踪来描述自由表面既费时又费内存的缺点,美国LOS Alamos 科学实验室开发的一种模拟技术SOLA-VOF。SOLA-VOF方法是把速度场、压力场求解与自由表面的处理分开进行,用SOLA求解动量守恒方程和连续性方程,在求解时,先将当前的压力与速度场代入动量守恒方程,求出一个试算速度场,并将试算速度场代入连续性方程,如果没有满足连续性方程,则直接通过压力的调整获得新的试算速度,再代入连续性方程。当试算速度场满足连续性方程时,得到的速度场和压力场就是新时刻的速度场和压力场,可见这种方法也是一个迭代过程,而且可以同时得到了速度场和压力场,因而提高了计算的速度。用VOF来处理自由表面,定义了一个流体体积函数,用这个函数来描述自由表面的变化过程。

现在对流场控制方程的求解有多种数值计算方法。在本文中采用普遍采用的SOLA-VOF 数值计算方法求解。首先,必须对上述控制方程在空间和时间上进行离散,然后求解。详细的求解过程为^[6,7]:

(1) 先用SOLA法求解动量守恒方程和质量守恒方程,得到流场的速度变量和压力变量随时间和空间的值;

(2) 再利用VOF法求解体积函数方程,得到流场自由表面的变化情况,描述整个流场不断变化的流动域。

3 运用ProCAST对铸件进行模拟

ProCAST软件是采用基于有限元(FEM)的数值计算和综合求解的方法,对铸件充型、凝固和冷却过程中的流场、温度场、应力场、电磁场进行模拟分析。ProCAST2008操作主界面如图1所示。

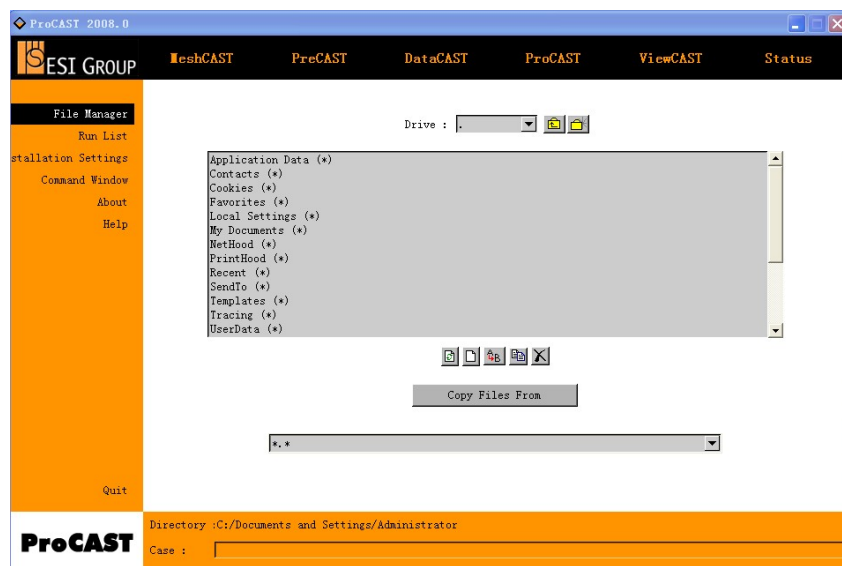


图1 ProCAST2008主界面

ProCAST共有8个模块,其中包括有限元网格划分MeshCAST, 基本模块—传热分析及前后处理Base License, 流动分析Fluid flow, 应力分析Stress, 热辐射分析Radiation, 显微组织分析Micromodel, 电磁感应分析Electromagnetics, 反向求解Inverse。用户可以比较灵活地选择这些模块。对于普通用户,ProCAST应有基本模块,流动分析模块,应力分析模块和网格划分模块。对于铸造模拟有更高要求的用户

则需要有更多功能的其它模块。

3.1 ProCAST进行模拟的步骤

ProCAST软件的模拟主要经历以下几个过程^[8~11]：

(1) 创建模型：可以分别用I-Deas、Pro/E、UG等作为前处理软件创建模型，输出ProCAST可接受的模型或网格文件。

(2) MeshCAST：对输入的模型或网格文件进行剖分，最终产生四面体网格文件，文件中包含节点数量、单元数量、材料数量等信息。

(3) PreCAST：分配材料、设定界面条件、边界条件、初始条件、模拟参数等。

(4) 检查模型、对铸造过程模拟分析计算、显示铸造过程模拟分析结果，并对铸造过程模拟分析结果进行后处理。

3.2 ProCAST模拟充型过程

本文以低压铸造汽车轮毂为研究对象，利用UG进行三维实体造型，模型图如图2所示。本文利用ProCAST对轮毂铸件进行网格划分后有53383个节点，总单元共有1449488个，见图3所示。并利用ProCAST按照上述3.1所示的步骤对汽车轮毂的进行充型过程的模拟。充型过程模拟的示意图如图3所示。在本实验中，铸件材料采用A356，该合金具有良好的铸造性能，不仅能满足轮毂外观、尺寸精度的要求，而且强度高、塑性好，较其他牌号的铸造铝合金更符合轻合金轮毂的要求。其液相线温度为616℃，固相线为556℃。

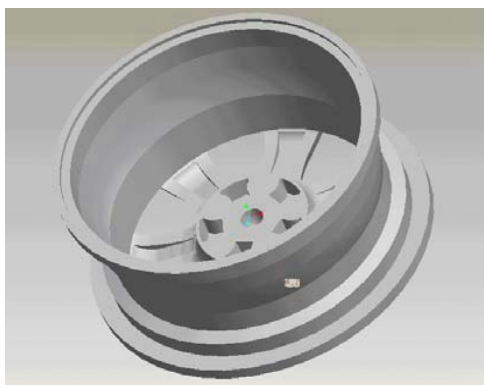
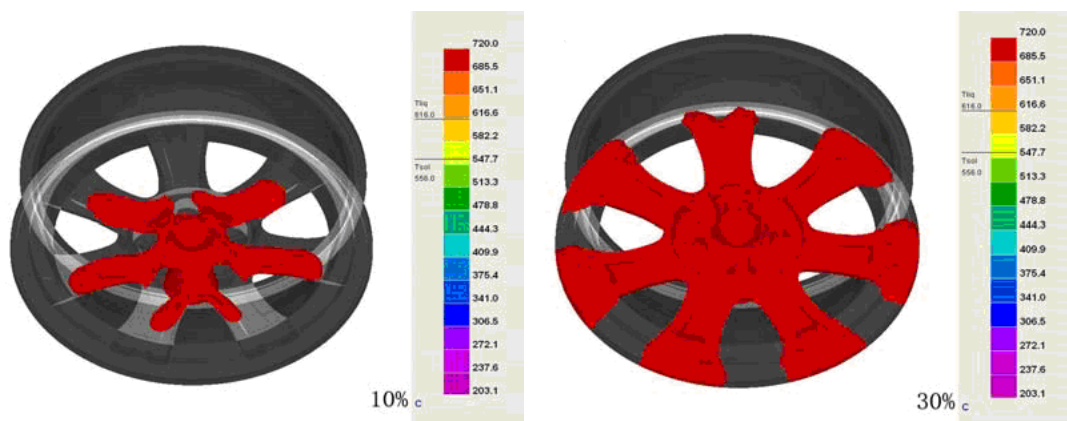


图2 轮毂三维实体模型图



图3 有限元网格模型图



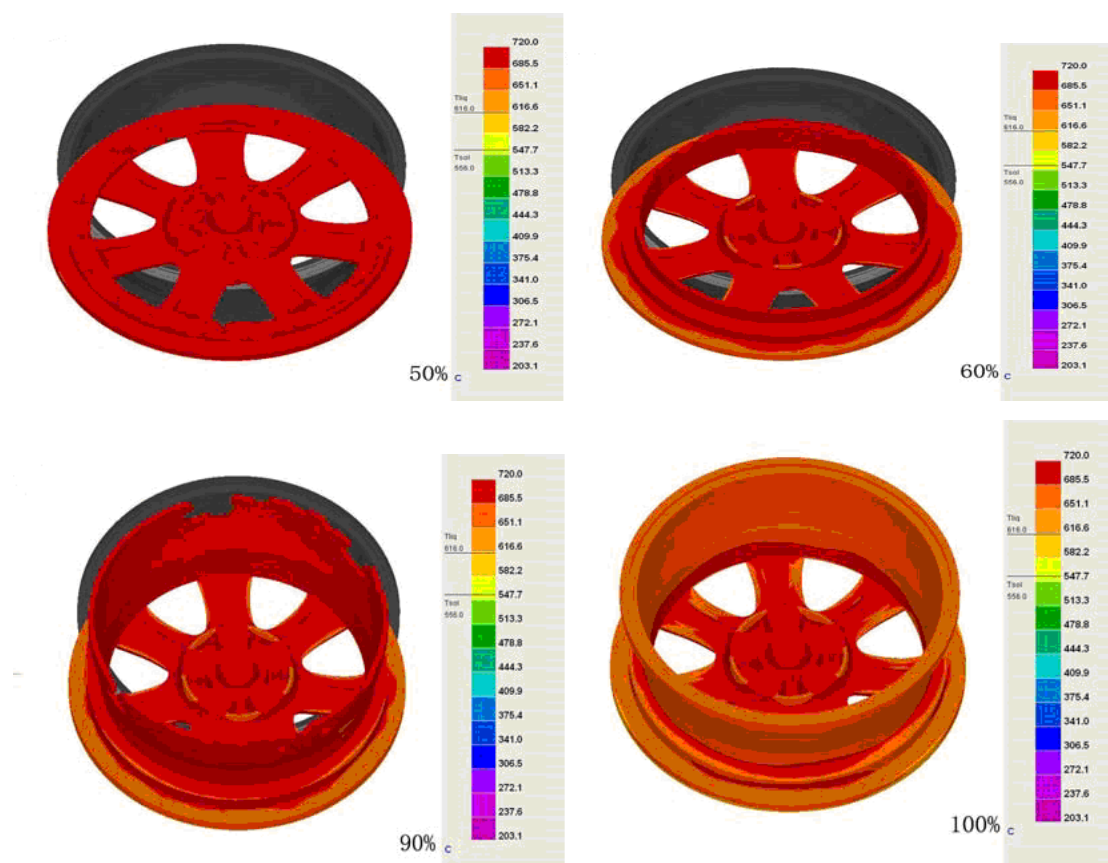


图4 轮毂铸件充型过程示意图

从图4中可以看出在充型的初始阶段, 金属液体在充填7个轮辐时产生不均匀现象, 如图4中充型10%时所示, 在充填达到50%时这一情况才有所好转。在充填到50%~70%之间时, 金属液面平稳上升, 在充填为超过85%时, 发现液面上升出现了不均匀现象, 液面高低不平, 充型开始不平稳, 在充填达90%和100%时可以很明显的观察到这一现象。这种现象会导致卷气和夹渣缺陷, 在充型过程中应该避免这种情况。导致这种现象的原因很可能与充型速度有关, 充型时间为7s左右, 相对较快。

4 结论

(1) 根据低压铸造轮毂的质量要求及其充型平稳缓慢的特点, 知轮毂铸件是逐层充型, 并可以将充型过程加以分解, 一是金属液由浇注系统进入型腔, 沿着轴向上升; 二是金属液沿着径向向四周扩散; 前两步基本完成后, 金属液在轮毂底部铺展, 并逐渐上升, 直到充满型腔。

(2) 在实际生产中对低压铸造轮毂进行了充型模拟验证, 表明该数学模型及算法在保证模拟精度、提高计算效率上是有效可行的, 可以为实际生产提供预测。

(3) ProCAST 采用基于有限元法FEM 的数值计算方法具有较大的灵活性, 特别适用于模拟复杂铸件成型过程中的各种物理现象, 采用ProCAST来模拟模拟铸件充型过程, 可以优化铸造工艺和提高铸件质量。

铸造过程的数值模拟技术的发展为提高传统铸造行业的产品质量和企业竞争力提供了有力的手段, 因此迫切需要运用先进的数值模拟技术使铸造生产由经验走向科学理论的指导。通过ProCAST等铸造工艺软件的应用, 企业可以掌握充型过程中铸造缺陷的形成机理, 优化工艺参数, 保证铸件质量, 缩短试制周期,

降低生产成本。

参考文献:

- [1] Jeong-kil Choi. Application of Mold Filling and Solidification Simulation to Aluminum Wheel Castings [A]. Proceedings of the 61st World Foundry Congress[C]. Beijing: 1995. 13-27.
- [2] Anzai K. A Casting CAE System with Flow and Solidification[A]. Proceedings of Modeling of Casting and Solidification Processes [C]. Hitachi:1995. 279-286.
- [3] 陈立亮, 刘瑞祥. 低压铸造铝合金轮毂计算机三维凝固模拟的研究[J]. 计算机应用研究, 1996, (5): 63-64.
- [4] J.X.ZHOU,L.L.CHEN,D.M.LIAO,R.X.Liu.Numerical simulation of low pressure diecastings solidification process and porsity prediction.proceedings of Asia-Pacific conference of Materials Processing,2008.June,816-821.
- [5] 周建新, 刘瑞祥, 陈立亮, 林汉同. 基于STL的射线穿透法网格剖分的研究. 铸造技术, 2001 (1): 15-17.
- [6] 闻星火. 低压铸造充型过程流场温度场的数值模拟[D]. 北京:清华大学, 1998.
- [7] Xue X, Hansen S F, Hanse P N. N umerical simulation and experimental verification of mold filling process th rough de2pressurized and less-dep ressurized gating system [J]. A FST A nssaction, 1993, 101: 549~558.
- [8] 周玉辉, 吴卫. 压铸过程温度场的数值模拟及其在ProCAST 中的应用[J]. 电加工与模具, 2005 (5): 42~45.
- [9] 刘小刚, 康进武, 黄天佑, 边敦亭, 张良红. 大型轧钢机架凝固过程温度场应力场模拟分析[J]. 铸造, 2009, 55 (9): 922~926.
- [10] 任志峰, 孙斌煜, 孟繁霞. 基于procast 的不锈钢双辊铸轧过程中温度场数值模拟[J]. 山西冶金, 2007, 30 (2): 18~26.
- [11] 王春欢, 胡红军, 罗静. 基于Procast 软件的熔模铸造计算机模拟[J]. 铸造技术, 2007, 28 (10): 1360~1362.