

中注式浇注系统仿真分析

刘 晶 峰

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 在 SOLA-VOF(solution algorithm-volume of fluid)有限差分流体力学计算方法和傅里叶导热定律的基础上,开发液态金属充型过程流动场和温度场的计算程序.并利用该程序,对带有中注式浇注系统的简单形状铸件进行充型过程仿真计算.结果表明:充型过程不平稳,存在两个明显的涡旋区,直浇道压力头作用不充分,涡旋区流体温度分布较均匀,仿真分析特征与实际注式浇注系统较吻合.

**关键词:** 中注; 浇注系统; 充型过程; 数值模拟; 温度场; 流动场

**中图分类号:** TG 244                      **文献标志码:** A

目前,铸造过程数值模拟技术<sup>[1-3]</sup>已进入工程实用阶段.从理论上对液态金属在浇注系统中的流动过程进行数值模拟,可以更好地了解液态金属的流动形态、压力分布等,更好地设计与优化浇注系统.对于不同的浇注系统,只需要在计算机上建立不同的几何模型,不需要制造实物模型,因此具有更广泛的适应性.本文利用三维流动过程数值模拟的方法,对典型的中注式浇注系统进行模拟分析.

1 数理模型

液态金属充型过程的三维运动状态可用质量守恒方程和动量守恒方程来表示.质量守恒方程(连续性方程)和动量守恒方程(Navier-Stokes 方程)分别为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \tag{1}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + \gamma \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + \gamma \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z + \gamma \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式(2)中: $\rho$  为流体的密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\gamma$  为流体的运动粘度( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $P$  为流场中 $(x, y, z)$ 点的压力(Pa);  $u, v, w$  为 $(x, y, z)$ 点的流速在 3 个坐标轴方向的速度分量( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $g_x, g_y, g_z$  为重力加速度在 3 个坐标轴方向的分量( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

2 结果与分析

数值计算采用目前流行的 SOLA-VOF(solution algorithm-volume of fluid)有限差分流体力学计算方法.用 SOLA 法求解压力场和速度场,用 VOF 法确定流动域和自由表面<sup>[2]</sup>,利用傅立叶导热定律计算充型过程金属液流温度场<sup>[3]</sup>.

利用自主开发的金属液态成形工艺分析系统,分析计算底注式浇注系统.为便于计算,铸件设计为

简单长方体,大小为 300 mm×100 mm×50 mm;浇注系统采用等截面,尺寸为 30 mm×30 mm.取网格步长  $\Delta x=3$  mm,对整个铸件/型系统进行均匀网格剖分<sup>[4]</sup>,总网格数为 780 900,铸件(包括浇注系统)网格数为 68 240.剖分后得到的铸件实体,如图 1 所示.

计算为充型过程流动与传热耦合计算,铸件材质选取 ZG230-450,其主要热物性参数选自文献[5],铸件充型时间( $t$ )约 2.19 s.对计算数据进行可视化处理<sup>[6]</sup>,主要通过“体积填充”、“色温填充”、“充型速度”和“压力分布”等 4 种表达方式,观察分析液态金属流经浇注系统充填铸型型腔的细节变化.除可了解液态金属充填型腔的先后次序,更重要的是可获取流体充型过程的速度场、压力场和温度场等物理场信息.

液态金属充填型腔的先后次序,如图 2 所示.从图 2 可以看出:0.30 s 时液流到达直浇道底部,进入内浇道;在 0.50~1.10 s 时,液流喷溅式进入型腔;在 1.50~1.90 s 时,液流漫过内浇口,流股趋于平稳;约在 2.19 s 时,完成充型.

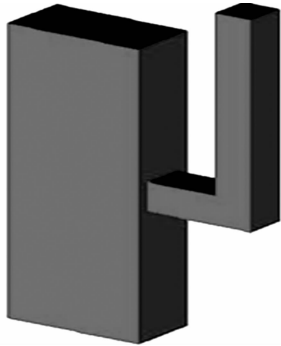


图 1 铸件剖分实体  
Fig.1 Split entity of casting

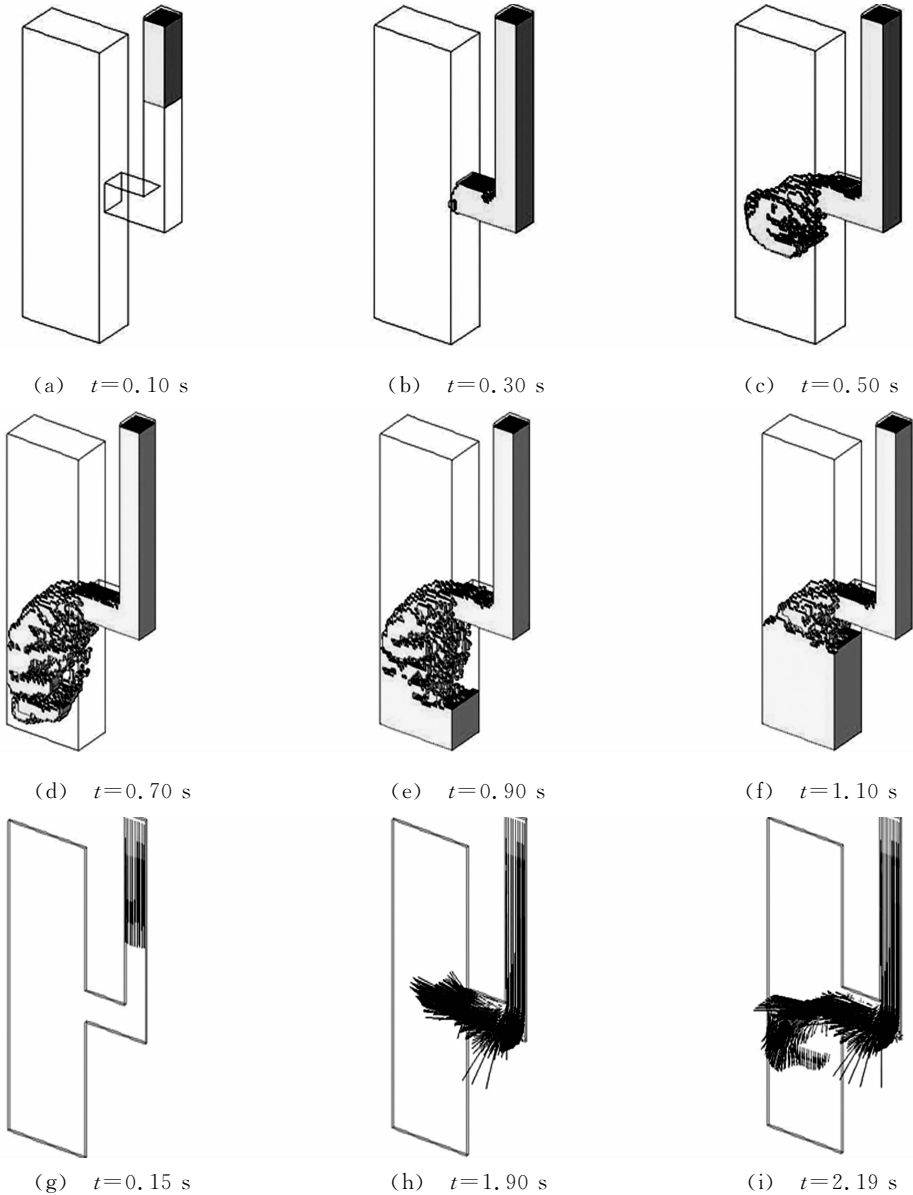


图 2 体积填充效果图  
Fig.2 Diagram of volume filling

液流充型过程中流速的分布及变化情况,如图 3 所示. 从图 3 可以观察到:随着充型时间的持续,液流速度越来越快,到达直浇道底部时流速达到峰值;进入内浇道后,由于流体方向发生转折,动量变化显著;进入型腔后,大动量流体依靠惯性继续前行,但由于直浇道压力头小于底注式,流体动量相对较小,液流无法抵达浇口对面的侧壁,而是呈喷溅状下落;随着充型过程的持续,下落流体漫过型腔底部后形成较剧烈的涡旋,涡旋现象在液流漫过内浇口前一直存在且较剧烈,形成了以内浇口为界的下部涡旋区;当液流漫过内浇口后,该涡旋区逐渐弱化,但随后的液流有相当一部分直接经由内浇口进入型腔上部而形成新的涡旋区,该涡旋区在靠近型腔的内浇口一侧演化发展.

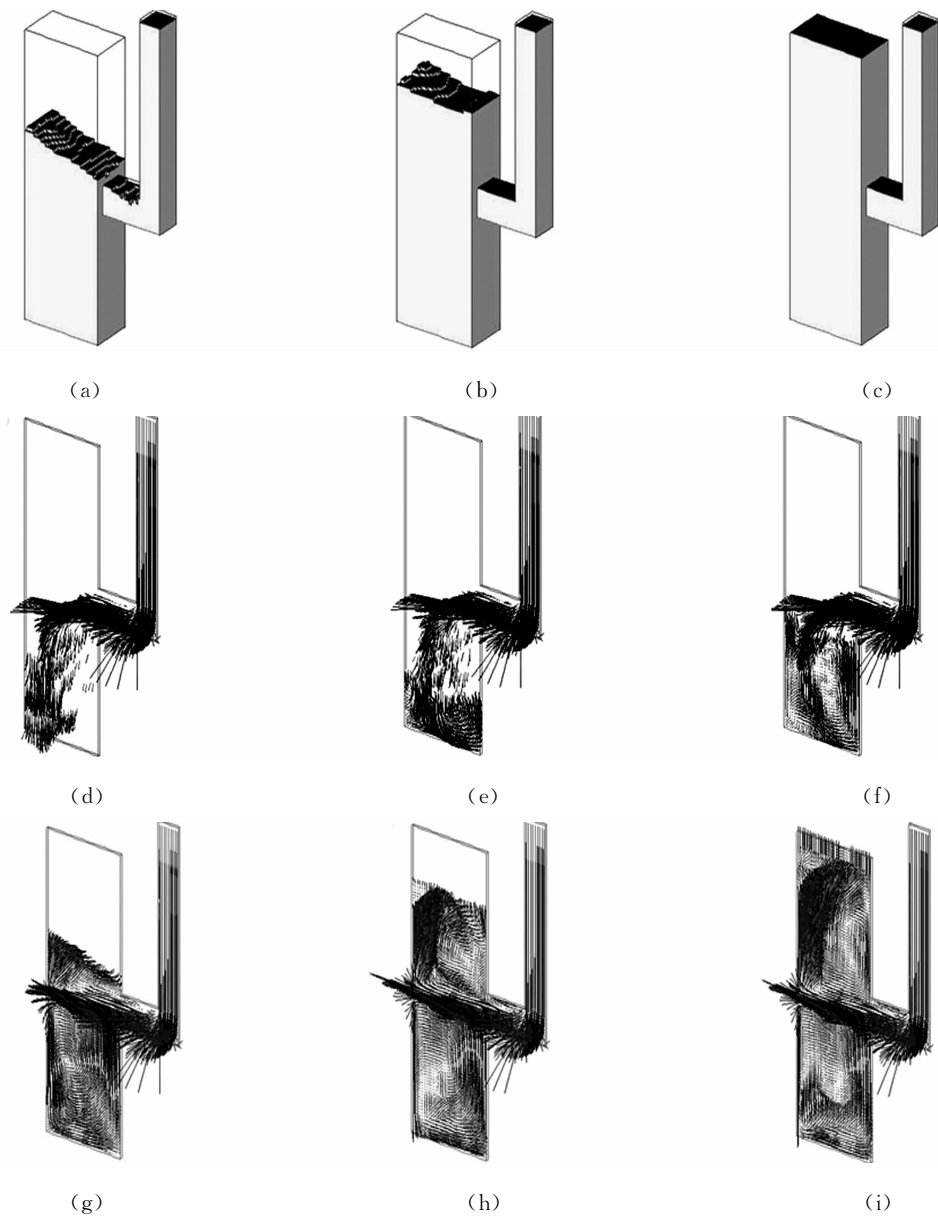


图 3 充型速度效果图

Fig. 3 Diagram of filling velocity

金属液充型过程的压力分布及变化情况,如图 4 所示. 从图 4 可以看出:直浇道充满后,其压力分布呈下大上小的特征,与静压力相仿;型腔内液流漫过内浇口以前,负压区一直存在;金属液漫过内浇口后,直浇道的压力头开始作用于型腔内流体,型腔内液流基本处于正压态,只是下部涡旋区压力值较高,而上部涡旋区压力值较低. 这也说明了下部涡旋区的弱化(流体速度下降)成就了上部涡旋区(流体速度增大).

充型期间金属液的温度分布及变化情况,如图 5 所示. 从图 5 可以看出:直浇道至内浇道部分的金属液温度较高,形成明显的高温区;上下涡旋区的存在使得先后进入该区的液流充分混合,金属液温度

较平均,但低于高温区温度.

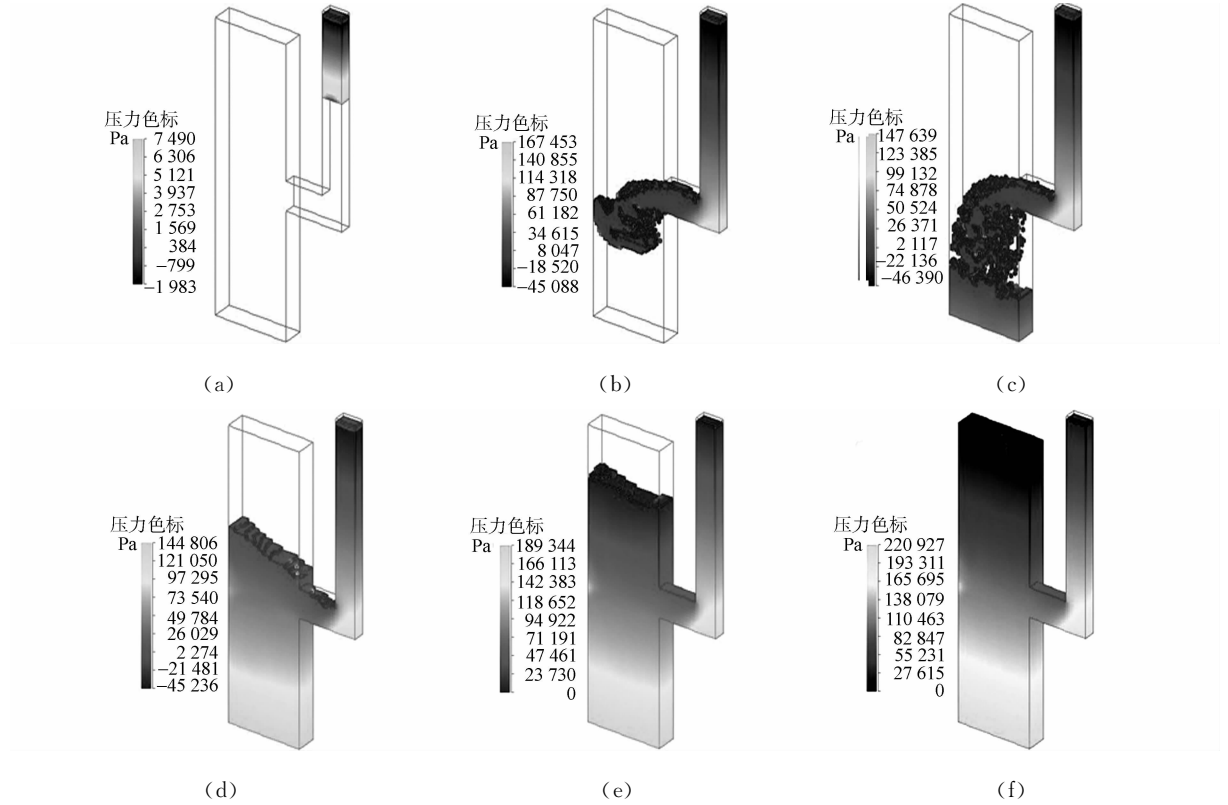


图 4 压力分布效果图

Fig. 4 Diagram of pressure distribution

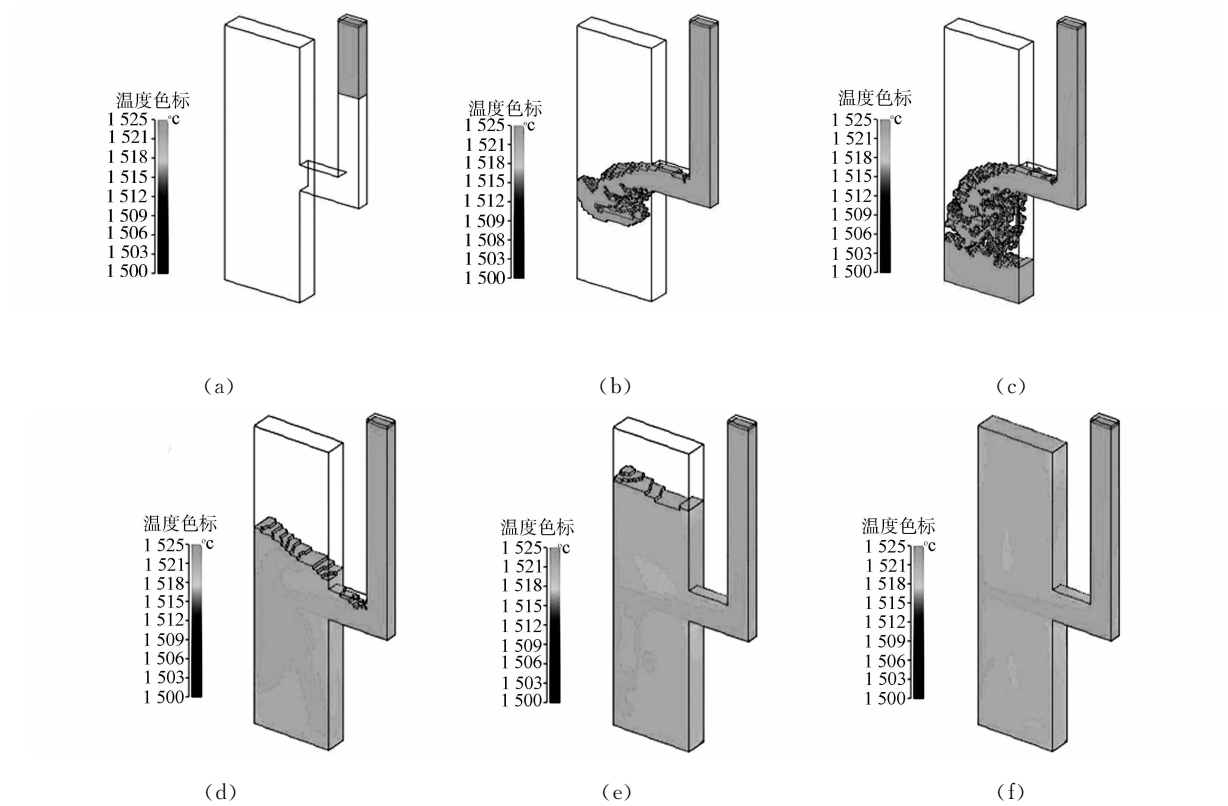


图 5 色温充填效果图

Fig. 5 Diagram of color-temperature filling

中注式浇注系统充型计算的结果是,充型过程不平稳,型腔内存在两个明显的上下涡旋区.液流漫

过内浇口之前,下涡旋区不断演化发展,范围不断扩大;流漫过内浇口之后,下涡旋区尽管一直存在但逐渐弱化,而上涡旋区则不断演化增强. 浇道压力头作用弱于底注式,型腔内液流到达内浇口时直浇道的压力头才作用于型腔内流体. 由于涡旋区的存在,型腔内流体温度分布较均匀,但低于直浇道内的流体温度,分析结果与实际中注式浇注系统特点相仿.

### 3 结论

对液态金属在浇注系统中的流动过程进行数值模拟,可以更好地了解液态金属在浇注系统中的流动形态、压力分布等,从而优化铸件浇注系统. 以 SOLA-VOF 有限差分流体力学计算方法,求解压力场、速度场、流动域和自由表面,以傅里叶导热定律耦合计算金属液流的温度场. 结果表明:仿真分析特征与实际中注式浇注系统较吻合,具有一定的实际应用价值.

#### 参考文献:

[1] 刘晶峰,李洪友,江开勇. 大型铸钢件凝固过程数值模拟[J]. 铸造技术,2011,32(4): 446-448

[2] 刘晶峰,李洪友,江开勇. 液态金属充型过程三维流动场数值模拟[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(5):481-484

[3] 刘晶峰. 液态金属充型过程流动与传热数值模拟[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2012,33(2):121-124

[4] 周建新,刘瑞祥,陈立亮,等. 基于 STL 的射线穿透法网格剖分的研究[J]. 铸造技术,2001(1):15-17

[5] 杨全,张真. 金属凝固过程与铸造过程数值模拟[M]. 杭州: 浙江大学出版社,1996.

[6] 刘瑞祥,杨宠. 凝固过程数值模拟的可视化研究[J]. 中国机械工程,1999,10(4):42-48.

## Numerical Simulation on Middle-Pouring Gating System

LIU Jing-feng

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on SOLA-VOF (solution algorithm-volume of fluid) algorithm and Fourier's heat-transfer theorem, a calculation program for flow field and temperature field of liquid mental filling process was developed. And by the program, the filling process of a simple shape casting with middle-pouring system was simulated. The results show that the filling process is not smooth, there are two obvious vortex zones, the role of sprue pressure head is inadequate and the fluid temperature distribution of vortex zones is uniform. These characteristics, which are obtained using numerical simulation method, agree well with those of real middle-pouring gating system.

**Keywords:** middle-pouring; gating system; filling process; numerical simulation; temperature field; flow field

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 杨建红)