

文章编号: 1000-5013(2012)02-0121-04

# 液态金属充型过程流动与传热数值模拟

刘 晶 峰

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 根据有限差分法原理,对液态金属充型过程中同时发生的流动与传热过程,用在微小时间段内独立的流动与传热过程近似表示. 结合温场数值模拟与流场数值模拟技术,开发铸件成形过程流动场与温度场耦合的数值模拟软件,并利用该软件对标准实验铸件充型过程进行耦合分析. 研究表明:该方法不需要求解用能量平衡法建立的,考虑了流动对传热影响的复杂方程,有利于提高流动与传热耦合数值模拟的计算速度;自主开发的金属液态成形工艺分析系统的“耦合”计算功能是有效的,且计算精度较高.

**关键词:** 充型过程; 液态金属; 流动场; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TG 111.4

**文献标志码:** A

高温液态金属的充型过程总是伴随着热量的散失,而过大的热量散失会导致液态金属温度过低,形成冷隔、欠浇等严重缺陷,使充型过程无法顺利完成. 此外,随着热量的散失,温度的下降,金属液的流动特性会发生明显变化,密度、热容、导热系数及粘度也会因温度的不同有很大差异,这就决定了液态金属在不同温度下有着不同的流动方式和形态. 换句话说,模拟液态金属充型过程仅限于理想化的流动场研究而没有考虑热量的散失是不够的,其计算结果与实际生产必然有一定距离,甚至大相径庭. 因此,从这种意义上来讲,要准确模拟流动场,就必须考虑热量的散失,必须进行流动场与温度场耦合计算的研究. 基于此,本文结合液态金属充型过程流动场数值模拟技术<sup>[1]</sup>及铸件凝固过程温度场数值模拟技术<sup>[2]</sup>,对铸件充型过程流动场与温度场耦合计算进行研究.

## 1 数理模型

铸件充型过程中,液态金属的流动为粘性不可压缩流体带有自由表面的非稳态流动,而且是三维的,它的运动状态可用质量守恒方程和动量守恒方程来表示.

1) 质量守恒方程(连续性方程)为

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

2) 动量守恒方程(Navier-Stokes 方程)为

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

流动域的确定需要求解体积函数方程,即

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0. \tag{3}$$

收稿日期: 2011-09-11

通信作者: 刘晶峰(1964-),男,副教授,主要从事材料成形 CAD/CAE 及计算机图形学的研究. E-mail: liujf0592@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675072)

充型过程温度场控制方程为

$$\rho C_p(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{Q}. \tag{4}$$

式(1)~(4)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 $(x,y,z)$ 点的重力加速度在3个坐标轴方向的分量( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $F$ 为体积函数; $C_p$ 为比热容( $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ); $T$ 为温度(K); $t$ 为时间(s); $\lambda$ 为导热率( $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ); $x,y,z$ 为空间坐标(m).

需要说明的是,式(4)的最右一项为内热源项,其具体表达式为

$$\dot{Q} = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial T}. \tag{5}$$

式(5)中: $L$ 为熔化潜热( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); $f_s$ 为固相率.

2 计算方法

在流动场数值计算方法及温度场数值计算方法的基础上,可以实现液态金属充型过程流动与传热的耦合计算,具体算法流程如图1所示.

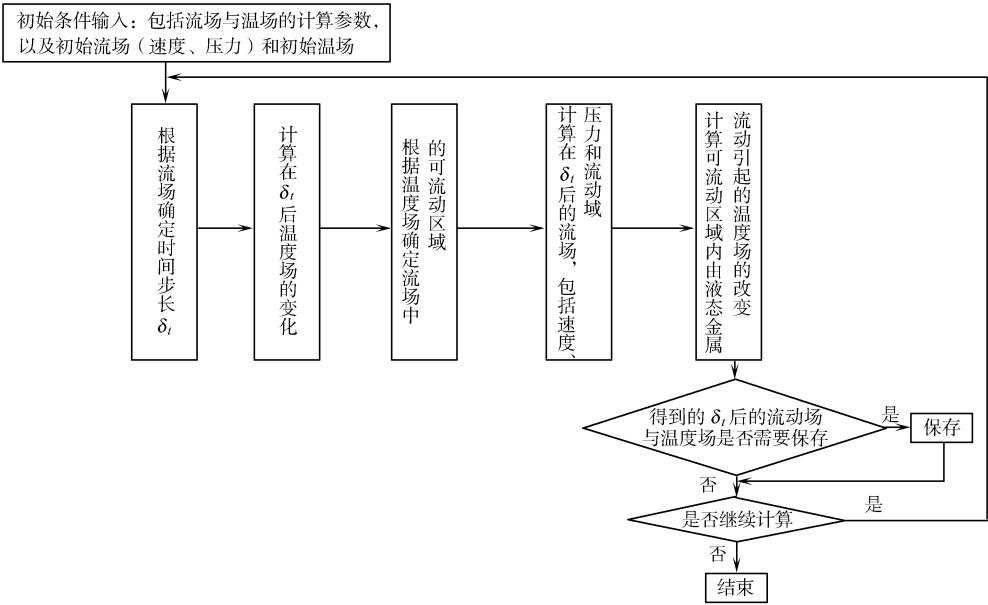


图 1 铸件成形过程流动与传热耦合数值模拟程序结构图

Fig. 1 Architectural diagram of the program of numerical simulation on the coupling of heat transfer and fluid flow about casting forming process

从图1可以看出:耦合计算中流动场与温度场是“独立”计算的.虽然铸件中的流动与传热过程是同时存在并连续变化的,但是根据有限差分法的基本原理,同时存在且连续变化的传热与流动过程可以用微小时间段内同时存在相互独立的传热与流动过程来近似表示.即在时间步长 $\delta t$ 内,先认为液态金属是不流动的,在当前的流动域内靠热传导进行传热,得到了当前流动域内液态金属的温度分布;然后,再认为液态金属中不存在热传导,只进行流场的计算,计算出流动域在当前温度分布下的推进过程.显然,流体是温度的载体,不同温度的液态金属的流动导致了铸件内温度在空间上重新分布,形成了新的温度场,这实际上就是完成了流动传热的过程,从物理意义上讲也更为明确.

从图1还可以注意到:流体流动对流动域内液态金属温度分布的作用是在流场的计算中加以处理的.具体做法是先判断网格的流入速度,然后根据网格中不同温度的流体所占的比例计算出网格新的平均温度.

根据上述分析,耦合计算并不要求解复杂的能量平衡方程,只要在原来研制的单独的温度场和单独的流动场数值模拟程序的基础之上加以改造即可,计算结果也能保持足够的精度.因此,文中就采用

这种原理,将热传导传热过程单独计算,而流体流动传热过程在流场的计算中加以处理,得出铸件形成过程中流动与传热耦合计算的数值模拟程序。

3 结果与分析

利用自主开发的金属液态成形工艺分析系统,对标准试验铸件(图 2)<sup>[3]</sup>的充型过程进行流动与传热的耦合计算。铸件材质为 ZG25,采用均匀网格,大小为 5 mm,利用前处理模块对铸件/铸型系统进行网格划分<sup>[4]</sup>,总网格数 42 768 个,其中铸件网格数为 1 548 个。主要物性参数选自文献[5]。计算结果保存为流动场数据文件(\*.fld)和温度场数据文件(\*.tem)序列,然后利用后处理模块对计算数据进行可视化处理<sup>[6]</sup>,如图 3 所示。其中:模拟效果图中从左至右充型时间为 0.29,0.49,0.77,0.94 s。

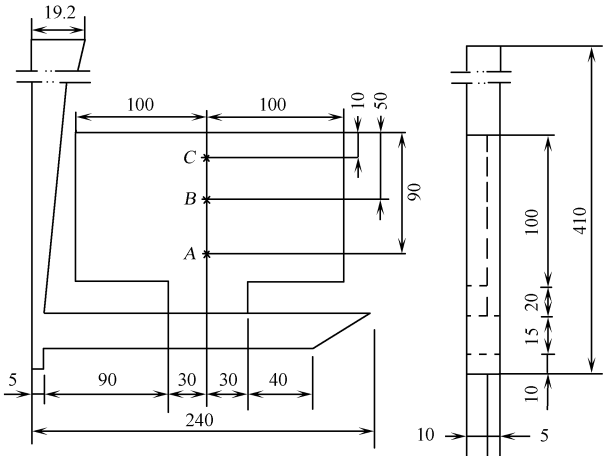
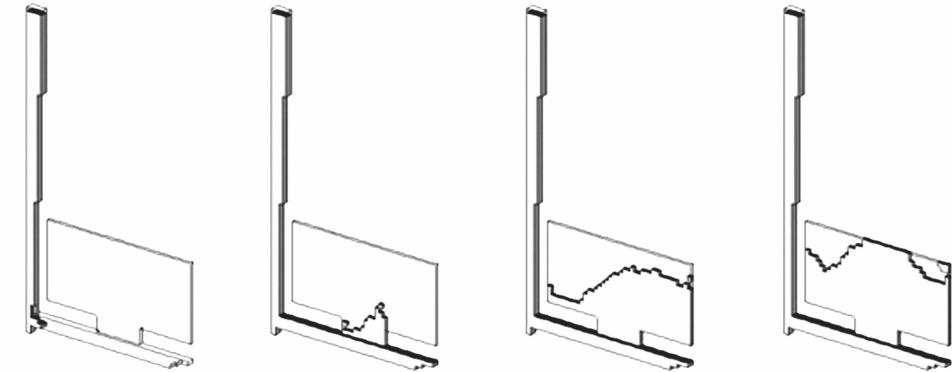


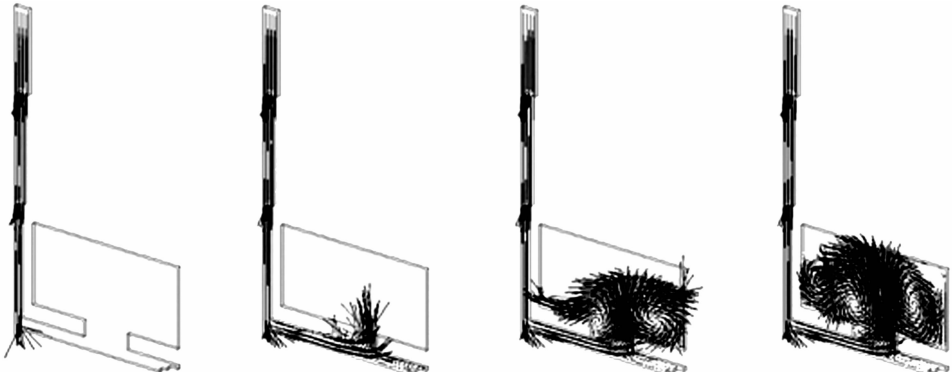
图 2 标准试验铸件形状及尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Shape and dimensions of benchmark test casting (unit:mm)

上述模拟结果与文献[3]中介绍的算例比较相似,表明本系统采用的流场与温场耦合的数值模拟算法是成功的,且计算精度较好。



(a) 充型体积



(b) 充型速度

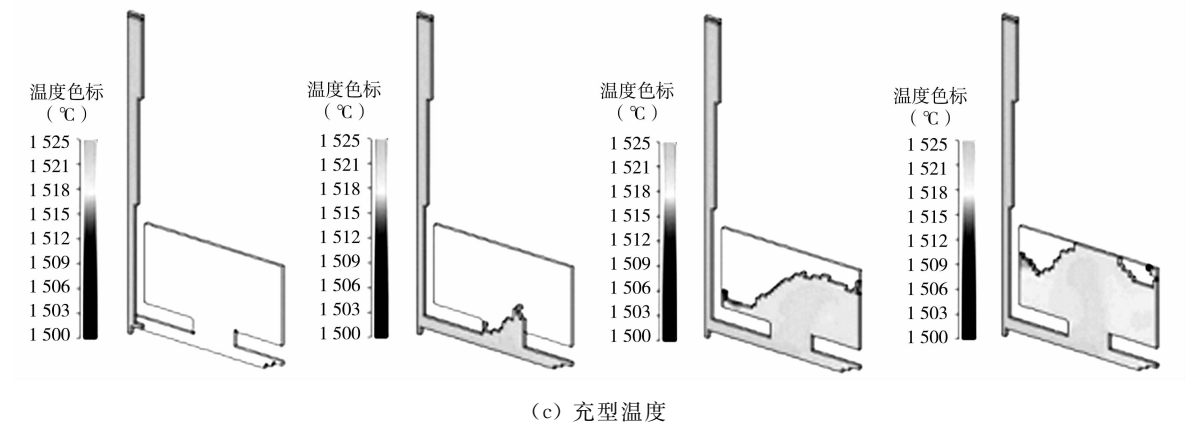


图 3 标准实验铸件的充型模拟结果

Fig. 3 Results of filling simulation of benchmark test casting

4 结束语

根据有限差分法的原理,将液态金属充型过程中同时发生的流动与传热过程用在微小时间段内独立的流动与传热过程近似表示,实现流动场与温度场的耦合数值模拟. 这种方法不要求解用能量平衡法建立的,考虑了流动对传热影响的复杂方程,有利于提高流动与传热耦合数值模拟的计算速度. 研究表明:自主开发的金属液态成形工艺分析系统的“耦合”计算功能是有有效的,且计算精度较高.

参考文献:

[1] 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.

[2] 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,2010,32(4):443-445.

[3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册:铸造工艺[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2003.

[4] 刘晶峰,李洪友,方建成. 铸造 CAE 系统的网格剖分技术[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(3):327-330.

[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 Fluid Flow and Heat Transfer  
during Mold Filling of Liquid Metal

LIU Jing-feng

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

**Abstract:** Based on the theory of finite differential method, during tiny time spacing, concurrent fluid flow process and heat transfer process during mold filling of liquid metal may be approximately represented as independent fluid flow process and independent heat transfer process. A numerical simulation software about the coupling of temperature field and flow field for casting forming process has been developed by combining the temperature simulation and flow simulation, and the coupling analysis of the filling process for benchmark test casting is given using the software. The research results have shown that in this method there is no need to solve the complicated equations by considering the influence of flow on heat transfer and modelled by the law of conservation of energy, which will be beneficial for enhancing the computational speed about the numerical simulation of the coupling of flow and heat transfer.

**Keywords:** filling process; liquid metal; flow field; temperature field; numerical simulation