DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.020

基于 OpenFOAM 的方坯连铸结晶器内多相流场数值模拟研究

姚宾叶[1],温树文[1],张书彦[1],张　鹏[1],张志明[2],林晏民[2],钟寿军[2],胡寿浩[3]

(1. 东莞材料基因高等理工研究院,广东 东莞 523808; 2. 广东韶钢松山股份有限公司,广东 韶关 512123;3. 东莞市万欣金属制品有限公司,广东 东莞 523560)

摘　要:针对方坯连铸结晶器内钢水流场数值模拟分析问题,利用开源软件 OpenFOAM 的灵活性和可扩展性,对其多相流求解器 multiphaseInterFoam 进行代码修改,以适应模拟计算要求。利用所开发的程序计算了方坯连铸结晶器内的钢水流场,探讨了对方坯连铸结晶器内多相流场进行数值模拟计算分析的可行性。计算结果表明:结晶器四水口流场复杂不对称,在保护渣上表面稳定的情况下仍有卷渣可能。

关键词:连铸;方坯结晶器;OpenFOAM;多相流模拟

中图分类号:TP391.7; TF777　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)09-0887-04

Numerical Simulation of Multiphase Flow Field in Square Steel Billet Continuous Casting Mould Based on OpenFOAM

YAO Binye[1], WEN Shuwen[1], ZHANG Shuyan[1], ZHANG Peng[1], ZHANG Zhiming[2], LIN Yanmin[2], ZHONG Shoujun[2], HU Shouhao[3]

(1. Centre of Excellence for Advanced Materials, Dongguan 523808, China; 2. SGIS Songshan Co., Ltd., Shaoguan 512123, China; 4. Dongguan Wanxin Metal Products Co., Ltd., Dongguan 523560, China)

Abstract: Aiming at the numerical simulation analysis of molten steel flow field in square billet continuous casting mold, the flexibility and expansibility of open source software OpenFOAM was utilized to modify the code of its multiphaseInterFoam solver to meet the requirements of simulation calculation. The flow field of molten steel in square billet continuous casting mould was calculated by using the developed program, and the feasibility of numerical simulation and analysis of multiphase flow field in billet continuous casting mould was discussed. The results show that the flow field at the four orifice of the mould is complex and asymmetric, and slag entrapment is possible even if the surface of the slag is stable.

Key words: continuous casting; billet mould; OpenFOAM; multiphase flow simulation

结晶器是连铸机的核心部件,其内有钢液多相流动、保护渣流动、气隙形成与发展等复杂的传热、传质与流体动力学行为,各种行为之间复杂的相互作用是引发铸坯质量缺陷的根源。由于测量技术和现场条件的限制,多数冶金过程所需的重要参数及其发生的重要现象无法通过直接测试获得,因此数值模拟作为研究冶金单元过程现象和机理、开发新工艺和新产品的重要手段,越来越受到广泛的关注和重视。Chaudhary[1]、Genma[2]和 Li[3,4]等对连铸结晶器进行了流场模拟,但未考虑渣相影响。由于结晶器内流动过程十分复杂,目前关于结晶器内多相流的研究较少。OpenFOAM 是计算流体力学(CFD)的 C++ 类程序库,其中包含大量求解器(solvers)与工具(utilities)等内置程序,将诸如矩阵计算、物理方程离散化等运算过程进行代码封装,使得研究人员可以不用过多关注底层代码实现,从而达到针对具体问题花费较少时间进行二次开发的目的。本文试图在这方面开展探索工作,在开源软件平台 OpenFOAM 基础上建立方坯连铸结晶器多相流计算模型,为后续增加多种物理场耦合模拟计算奠定基础。

收稿日期:2020-01-13

基金项目:广东省"珠江人才计划"引进创新创业团队项目(2016ZT06G025)和广东省自然科学杰出青年基金项目(2017B030306014)

作者简介:姚宾叶(1985-),河北保定人,硕士生.研究方向:金属铸造数值模拟.电话:0769-23079125,
E-mail:binye.yao@ceamat.com

通讯作者:张书彦(1982-),女,广东深圳人,博士,教授.研究方向:散裂中子源应用、金属材料加工制造原理、材料组织和性能表征等.电话:0769-23079125,
E-mail:shuyan.zhang@ceamat.com

1 基于 OpenFOAM 的数学模型

1.1 流体控制方程

流体控制方程(N-S 方程)可表示为[5]:

$$\nabla \cdot U=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\nabla \cdot (U\otimes U)=-\nabla \frac{p}{\rho}+\nabla \cdot (\nu \nabla U) \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\nabla \cdot (UT)-\nabla \cdot (\nabla D_T T)=S \tag{3}$$

其中,t 为时间,ρ 为密度,U 为速度,p 为压力,ν 为粘度,T 为温度,D_T 为扩散系数,S 为源项。

N-S 方程是一个非线性很强的方程组,直接耦合求解非常费时。因此,常见的算法都是将速度和压力解耦求解。解耦的途径有两条:一条途径是直接对速度和压力进行解耦,这类数值方法称为原始变量形式的数值方法;另一条途径是通过引入新的变量,消去方程中的压力项,得到一组与压力没有直接联系的方程,这类方程称为非原始变量形式的数值方法[6]。非原始变量形式的数值方法最大的优点是控制方程中消除了压力,避开了速度和压力耦合求解的困难,提高了计算效率。但是非原始变量形式的数值方法面临的一个最大困难就是初、边值条件的提法;此外在三维中,这类方法增加了方程(常常是 Poisson 方程)的数目,这无疑会花费额外的计算时间。而原始变量形式的数值方法的最大优点就是数值计算的结果即为所需要的速度场和压力场,而且边界处理也比较简单[7]。SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations 压力耦合方程半隐式法)就是原始变量形式的数值方法,其最大特点是压力场和速度场同时迭代。PISO(Pressure Implicit with Splitting Operator 拆分运算符隐式压力算法)中对速度预测后需要进行速度校正,PISO 法与 SIMPLE 法的显著区别是:PISO 有相邻校正,即在每个迭代步中,相邻网格的速度值都会采用最新的速度预测值;而 SIMPLE 没有相邻校正,即在迭代过程中相邻网格的速度值为第一次速度预测值。由于采用传统的 PISO 算法求解变化较快的流动的时候,需要的时间步长较小,否则会发散,这样会造成求解耗时过长。OpenFOAM 中的 multiphaseInterFoam 多相流求解器采用 PIMPLE(PISO-SIMPLE)算法,PIMPLE 算法是 SIMPLE 算法和 PISO 算法的结合体,根据代码分析可得 PIMPLE 算法思想是在时间步长内采用低松弛稳定计算以获得大的时间步长(与瞬态 SIMPLE 算法相同),在每个迭代步内使用 PISO 的多次压力修正对速度压力耦合问题进行充分求解。本文未考虑温度场计算,故式(3)求解方法暂不介绍。

1.2 自由界面处理

结晶器内多相流自由界面形状复杂,且处于不断变化之中,是一个非线性的复杂问题,给数学建模和边界条件处理带来了许多问题。针对自由界面问题,研究人员提出了很多数值方法,大体上可以分为移动网格法和固定网格法。由于移动网格增加网格重划分计算时间,并且针对自由界面聚并破碎问题时用移动网格法计算难度太大,故目前以固定网格法处理自由界面居多。这其中流体体积函数法(Volume of Fluid,VOF)由于节省了大量内存空间和 CPU 时间,成为目前较为通用的方法。其基本思想是在整个流场中定义一个函数 C,其值等于流体体积与网格体积的比值,且满足对流方程。VOF 法包括两个部分:利用体积函数对流方程计算出新的体积函数值,利用界面重构算法根据体积函数决定界面。首先是计算体积函数:设空单元中 C 值为 0,满单元中 C 值为 1,C 值介于 0 和 1 之间的单元为界面单元。在任意时刻,通过求解函数满足的输运方程,即可获得全场的流体体积分布[8]。

设计算区域是 Ω,流体 A 所在的区域记为 Ω^1,而流体 B 所在的区域记为 Ω^2,首先定义这样一个函数:

$$\alpha(\vec{x},t)=\begin{cases}1,\vec{x}\in\Omega^1\\0,\vec{x}\in\Omega^2\end{cases} \tag{4}$$

对于两种不相容的流体组成的流场,$\alpha(\vec{x},t)$满足

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t}+u\frac{\partial \alpha}{\partial x}+\nu\frac{\partial \alpha}{\partial y}=0 \tag{5}$$

其中,U=(u,ν)是流体的速度场,现在在每个网格 I_{ij}(以矩形网格为例)上定义 C_{ij} 为 $\alpha(\vec{x},t)$在网格上的积分

$$C_{ij}=\frac{1}{\Delta U_{ij}}\int_{I_{ij}}\alpha(\vec{x},t)dU \tag{6}$$

将 C_{ij} 称为 VOF 函数。它同样满足:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial x}+\nu\frac{\partial C}{\partial y}=0 \tag{7}$$

式 7 称为 VOF 方程。通过求解 VOF 方程,得到每个网格的值,紧接着采用界面重构算法计算自由面的斜率、曲率,给出自由面更精确的描述。VOF 方法以不同的界面重构技术来分类,自 1981 年由美国 Los Almos 国家实验室提出并完善以来,经历了由一阶精度 SLIC(Simple Linear Interface Calculation 简单线性界面计算)到二阶精度的演化,早期的重构界面算法(SLIC)是相对于坐标的垂线和水平线,没有斜度,为一阶精度;后续经过 Youngs[9]改进,采用

PLIC（Piecewise Linear Interface Calculation 分段线性界面计算）使网格内的界面重构直线有了斜率，但该算法并不具有二阶精度。近来 Piliod 和 Puckett[10,11]提出了二阶精度的界面重构算法 LVIRA（Least Squares Volume-of-Fluid Interface Reconstruction Algorithm 最小二乘流体界面重构算法）和 ELVIRA（Efficient Least Squares Volume-of-Fluid Interface Reconstruction Algorithm 增效最小二乘流体界面重构算法），用以更加精确的重构自由界面。

2　算例及分析

以 420 mm×420 mm 方坯连铸进行计算，几何尺寸设置和企业实际连铸结晶器并不完全吻合，但计算方法对后续系列计算仍具有重要指导意义。算例中考虑结晶器中空气、液态保护渣、钢液即气–液–液三相的流动情况。

计算问题描述如下：

(1)抛物线型结晶器高度 1 313.9 mm。

(2)铸坯拉速 0.5 m/min，最大钢水注入速度 1 m/s。

(3)四流水口浸入深度 80 mm，出口倾角向下 15°，具体尺寸见图 1。

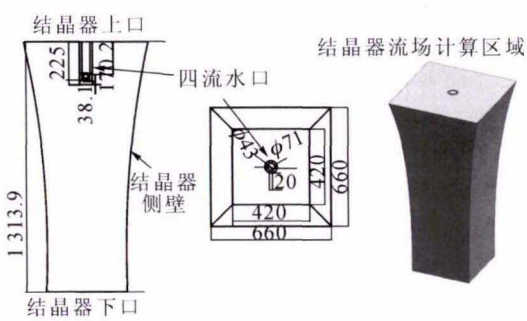


图 1 结晶器几何尺寸

Fig.1 Geometry of the continuous casting mould

(4)液相保护渣厚度 30 mm。

(5)侧壁面设定非滑移边界。采用 OpenFOAM 内置的 setFields 程序设定空气–液态渣相–钢液水相等各相区域，数值模型如图 2 所示。

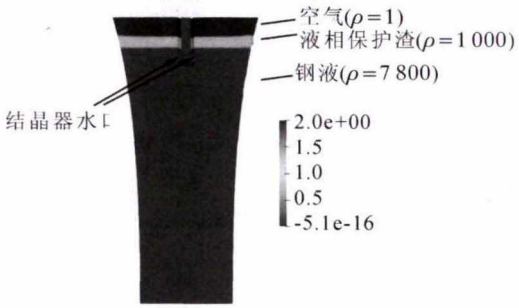


图 2 结晶器计算设置

Fig.2 Calculation settings for the continuous casting mould

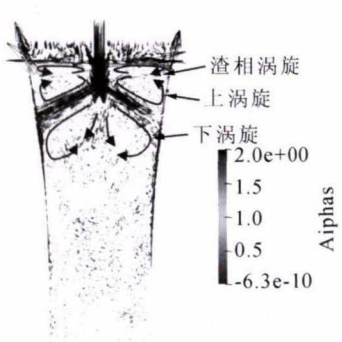
2.1　结晶器内流场

结合上面给出的初始条件和边界条件，结晶器计算区域经划分六面体网格后导入 OpenFOAM 进行前处理设置，对结晶器多相流场进行了数值模拟。结晶器中心剖面流场的数值模拟计算结果如图 3 所示。可以看出钢液从水口进入到结晶器后呈现上、下两个回流区，形成上涡旋和下涡旋。与此同时，在钢液上涡旋的粘性带动下，液相保护渣（渣相）形成与之对应的反向涡旋。渣相上方空气流动速度较大，但因密度原因对渣相流动影响较小。图 3 中左右两侧水口的流动并不对称，提示各水口流动受紊流影响可能会有周期性波动情况。钢液水口下方流动速度不大，普遍在 0.2 m/s 以内，但流场非常复杂，在一定程度上这有助于钢坯均匀化，但将大大减小气泡的上升排出机会。

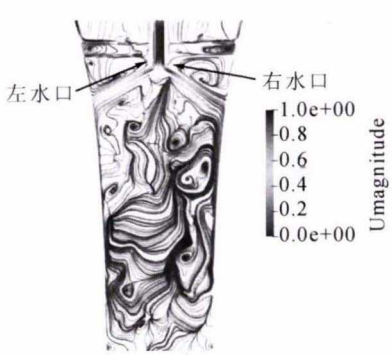
2.2　液相保护渣流动

模拟结果显示方坯连铸过程中液相保护渣层上表面波动很小，基本处于稳定状态；但是由于受钢液带动作用，也可能会发生卷渣现象。图 4 为将气相和钢液相隐藏，只观察渣相的模拟计算结果。

可见，受钢液紊流作用，渣相首先被裹挟到水口附近，之后流入水口正下方区域形成短暂驻留后被水口下方复杂流场冲散进入结晶器下方。目前钢厂一般会



(a)速度矢量图



(b)流动轨迹图

图 3 结晶器中心对称面流场

Fig.3 The calculated flow field through the centre symmetry plane of the mould

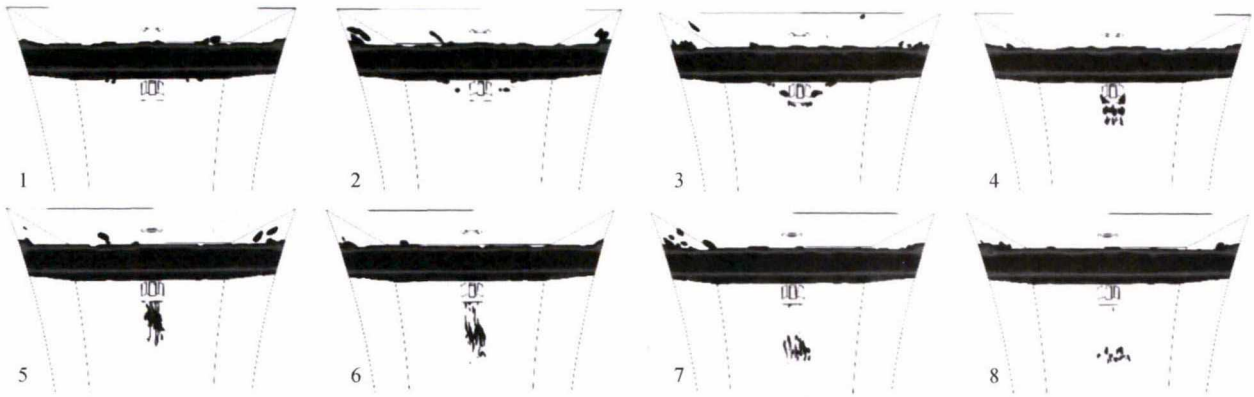


图 4 液相保护渣流动
Fig.4 Liquid slag flow

实时监测结晶器渣相上表面波动情况，并根据波动结果对相应铸坯进行标识。而上述模拟结果表明，渣相上表面稳定并不代表不会发生卷渣现象，后续钢厂应考虑增加渣相下表面监测手段来监控和避免卷渣情况。

3 结论

本文将 OpenFOAM 的 multiphaseInterFoam 求解器经修改和进一步拓展，应用于钢的方坯连铸仿真模拟，分析了结晶器内气-液-液多相流场，通过一个算例探索证明了所开发计算程序的可行性，在此基础上得到以下结论：

(1)方坯连铸结晶器各水口流场并不对称，流场十分复杂，不利于气泡上浮排出。

(2)在液相保护渣上表面稳定的情况下，仍有发生卷渣的可能，应考虑增加渣相下表面监测手段。

(3)OpenFOAM 在流体仿真方面具有很好的扩展性，为将来研究钢坯连铸过程中气-液-固多相流、凝固过程等复杂多场耦合提供了良好的基础。

致谢：本文工作是东莞材料基因高等理工研究院与韶钢联合项目《低碳高硫易切削钢盘条加工开裂分析及改进研究》的一部分，本文的撰写还得到了广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(编号:2016ZT06G025) 和广东省自然科学杰出青年基金项目(编号:2017B030306014)的资助。

参考文献：

[1] Chaudhary R, Thomas B G, Vanka S P. Effect of electromagnetic ruler braking (EMBr) on transient turbulent flow in continuous slab casting using large eddy simulations [J]. Metall. Mater. Trans., 2012, 43B: 532.

[2] Genma N, Soejima T, Saito T, et al. The linear- motor type inmold electromagnetic stirring technique for the slab continuous caster [J]. ISIJ Int., 1989, 29: 1056.

[3] Li B K, Tsukihashi F. Numerical estimation of the effect of the magnetic field application on the motion of inclusion in continuous casting of steel [J]. ISIJ Int., 2003, 43: 923.

[4] Li B K, Tsukihashi F. Effects of electromagnetic brake on vortex flows in thin slab continuous casting mold [J]. ISIJ Int., 2006,46: 1833.

[5] 刘森儿. 数值求解不可压缩流动的投影方法 [D]. 北京：清华大学,2004.

[6] 杨杰. 基于分数步长法的压铸充型过程数值模拟研究[D]. 北京：清华大学,2007.

[7] Ferziger J H, Peric M, Computational methods for fluid dynamics [M]. Springer Science Business Media, 2002.

[8] 林毅. 自由表面流动问题数值方法的理论研究及应用[D]. 天津：天津大学,2010.

[9] Baines M J, Moton K W. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion [M]. Numerical methods for fluid dynamics, Academil Press:1982;273-285.

[10] Puckett E G, Almgren A S, Bell J B, et al. A high-order projection method for tracking fluid interfaces in variable density incompressible flows[J]. J Comput Phys, 1997,130(2):269-282.

[11] Pilliod J E, Puckett E G. Second-order accurate volume-of-fluid algorithms for tracking material interfaces [J]. J Comput Phys, 2004,199(2):465-502.

精铸用
石英砂、石英粉、铝矾土、高铝砂

灵寿县德泰矿产品有限公司是一家专业从事非金属矿物的生产厂家，设备先进，技术力量雄厚。

让客户满意是我们的宗旨

化学成分

石英砂	石英粉	铝矾土	高铝砂
SiO_2≥98.7%	SiO_2≥98.7%	Al_2O_3≥55%	Al_2O_3≥52%

地　址：河北省灵寿县洞里工业区
电　话：0311-82617801(传真)，15175156717
联系人：刘喜亮