

· 工艺技术 ·

连铸中间包内钢液流动、传热及夹杂物行为的研究

詹树华 吴夜明 徐李军

王 坚

(钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心, 北京 100081) (首都钢铁公司第三炼钢厂, 北京 100043)

摘 要 建立基于黏性流体力学的流体流动、传热及夹杂物传输模型, 以首钢第三炼钢厂 2 号连铸中间包为研究对象, 采用数值分析的方法, 进行了连铸中间包内钢液流体流动、停留时间分布及夹杂物传输行为分析。

关键词 连铸, 中间包, 流场, 数值模拟

中图分类号 TF777 **文献标识码** A

Study on fluid flow, heat transfer and inclusion transport in continuous casting tundish

ZHAN Shuhua, WU Yeming, XU Lijun

(National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, CISRI, Beijing 100083)

WANG Jian

(No. 3 Steelmaking Plant, Shougang Group Co., Beijing 100043)

ABSTRACT Based on the fluid dynamics, a mathematical model with coupled fluid flow, heat transfer and inclusion transport has been set up in this paper. With No. 2 caster in No. 3 Steelmaking Plant of Shougang Group as prototype, the fluid flow pattern, residence time distribution and inclusion transport have been successfully modeled. Results show that the current configuration of tundish is fairly good.

KEY WORDS continuous casting, tundish, fluid flow, numerical simulation

1 引言

近二十年来,随着市场对高品质、高纯净钢需求的不断提高,连铸过程中的流体流动、传热及夹杂物行为的研究,一直是冶金科研人员的研究焦点和热点之一^[1-5]。

连铸生产中,中间包担负着分配钢液、净化钢液和去除夹杂物的重要作用,对连铸坯的质量有直接影响。本文以首钢第三炼钢厂 2 号连铸中间包为对象,采用基于黏性流体力学的计算流体力学方法,耦合夹杂物传输模型,研究连铸中间包内钢液流动、传热及夹杂物行为;研究了连铸中间包内流体流动形式、温度分布状态、停留时间分布及夹杂物传输,对理解连铸过程和指导生产具有重要意义。

2 数学模型及研究方法

2.1 中间包内的物理现象

连铸中间包作为连接钢包和连铸机的中间设备,形式较为简单,但伴随有较为复杂的物理现象:

(1) 中间包内流体流速变化较大。注流区,进入中间包内的流体呈现湍流射流特征,速度较高;流过注流区后,速度显著下降,速度相差近百倍。中间

包内存在着短路流和死区等特征,中间包内部的流体流动形式显著地影响生产和产品质量^[6]。

(2) 钢液流动过程伴随着传热现象的发生,由于钢液在中间包内停留时间较长,钢液在中间包内存在不同程度的温降。温降影响钢液的密度变化,进而能够影响钢液在中间包内的流动状态^[4]。

(3) 中间包容积较大,停留时间较长,为夹杂物的去除提供了较好的条件。中间包内夹杂物随钢液流动而不断地上浮,由渣面捕捉、中间包壁面捕捉而得到去除。钢液的流动形式,能够显著地影响夹杂物在中间包内的分布和去除状态。

因此,中间包研究应采用流体流动、传热及夹杂物传输耦合分析的方法进行。

2.2 数值仿真控制方程

湍流 Navier-Stokes 方程组和能量守恒方程,构成了能够分别描述流体流动、传热的统一模型,其中钢液密度和比热定为常数,但考虑到钢液温差导致的自然对流的影响;采用标准的 $k-\varepsilon$ 模型描述钢液的湍流特性;采用标准的标量传输方程来模拟示踪剂传输行为;采用修正的标量传输方程,即在标准标量传输方程的

基础上,耦合由于夹杂物上浮而带来的对流扩散项,描述夹杂物传输行为。相关控制方程如下^[5,7]:

(1) 连续方程为:

$$\nabla g(\rho U) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程为:

$$\nabla g(\rho U \otimes U) - \nabla g(\mu_{\text{eff}} \nabla U) = B - \nabla P' + \nabla g(\mu_{\text{eff}} \nabla U)^T \quad (2)$$

式中, B 为体积力; μ_{eff} 为有效黏度; P' 为修正压力, 由下式给出:

$$P' = P + \frac{2}{3} \rho k \quad (3)$$

(3) 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型

湍动能方程

$$\nabla g(\rho U k) = \nabla g \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍动能耗散率方程

$$\begin{aligned} \nabla g(\rho U \varepsilon) = \nabla g \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k \\ + C_{\varepsilon 3} \max(G_k, 0)) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

标准 $k-\varepsilon$ 模型认为湍流黏度与湍动能及其耗散率相关, 关系式如下:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

动量方程中的有效黏度, 可表示为:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

式中, $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$, 分别为常数。

P_k 为由于黏性力作用而引起的湍流生成项。

通过下式进行建模:

$$\begin{aligned} P_k = \mu_{\text{eff}} \nabla U g(\nabla U + \nabla U^T) \\ - \frac{2}{3} \nabla g U (\mu_{\text{eff}} \nabla g U + \rho k) \end{aligned} \quad (8)$$

G_k 为相内由于浮力作用而引起的湍流生成项, 对于等温不可压缩流体过程, $G_k = 0$ 。

(4) 能量传输方程

$$\rho C_p \nabla g(UT) = \nabla g(K_{\text{eff}} \nabla T) = S_k \quad (9)$$

$$K_{\text{eff}} = \lambda + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \cdot C_p \quad (10)$$

(5) 示踪剂传输方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \nabla g \left(\rho U \Phi - \left(\Gamma + \frac{\mu_t}{\sigma_\Phi} \right) \nabla \Phi \right) = S_\Phi \quad (11)$$

(6) 夹杂物传输方程

$$\nabla g \left(\rho (U + U_{\text{inc}}) \Phi_{\text{inc}} - \left(\Gamma + \frac{\mu_t}{\sigma_{\text{inc}}} \right) \nabla \Phi_{\text{inc}} \right) = S_{\Phi, \text{inc}} \quad (12)$$

2.3 研究方法 & 边界条件

(1) 研究方法

采用以上建立的数学模型, 研究工作可以分为以下几个部分:

A 几何模型的建立, 确定计算区域;

B 数字化几何模型的离散, 即划分网格;

C 对所建立数学模型, 包括传输方程和代数方程, 进行方程离散;

D 在所划分网格的基础上, 对离散化后的方程进行迭代求解。其中需要确定迭代步数、迭代方法、迭代收敛标准等;

E 对求解所得的结果进行处理, 以获取所需的定性图片和定量数据。

以上各部分的工作均以大型商业软件 CFX4.4 为平台, 结合自编子程序进行耦合计算。

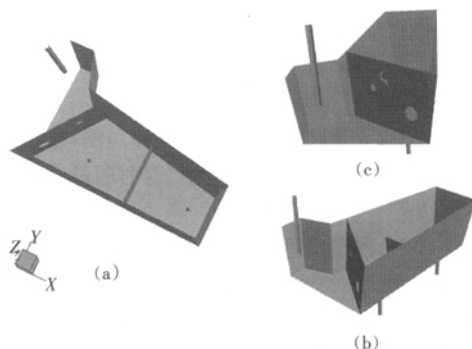


图1 中间包示意图

(a)、(b)、(c) 分别为3个不同的视图方向

图1给出了中间包的示意图。由于几何结构的对称性, 以中间包的中部截面为对称面取一半进行计算, 如图1所示。钢包—中间包保护套管入口内径为60mm, 保护套管插入钢液深度为300mm; 浸入式水口内径为35mm。

方程离散上, 除压力用中心差分格式、体积分数使用上风差分格式外, 其他变量均使用混合差分格式进行离散。速度—压力校正采用SIMPLEC算法。 U_x, U_y, U_z 和体积分数方程迭代求解器采用Block Stone求解器, k, ε 方程采用线性松弛求解器(Line Relaxation Solver)迭代, 压力方程采用ICCG求解器进行迭代。

先对中间包内的流体流动和传热进行稳态数值计算。大多数情况下, 求解器迭代3000步左右即可

获得收敛解。在流体流动和传热计算的基础上,加入示踪剂进行示踪剂传输行为的瞬态计算。最后,在流体流动和传热模拟的基础上进行夹杂物传输行为计算,计算中耦合由于夹杂物上浮而造成的对流扩散项(采用上风差分对上浮对流项进行离散)。

(2) 物性参数及边界条件

计算中所采用的钢液的热物性参数见表 1。夹杂物颗粒认为是球形,密度为 2700kg/m^3 。

表 1 计算采用的钢的热物理性能

符号	参数	值
ρ	钢液密度	7020kg/m^3
μ_l	液态钢的层流黏度	$0.0062\text{kg/m}\cdot\text{s}$
c_p	比热(固态和液态)	$700\text{J/kg}\cdot\text{K}$
β_T	热膨胀系数	$2.0 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$
k_l	液态钢的层流导热系数	$26\text{W/m}\cdot\text{K}$
k_s	固态钢的导热系数	$31\text{W/m}\cdot\text{K}$

湍流壁面边界条件

壁面实际上是中间包内流体与内衬的交界面。壁面上,使用无滑移边界条件(也就是: $U_x = U_y = U_z = 0$)。近壁区采用壁函数的方法进行处理。示踪剂传输行为计算时,壁面上示踪剂通量为零。

上表面边界条件

中间包上表面对液相均认为是自由滑移边界(即 $\tau_x = \tau_y = \tau_z = 0$),示踪剂传输行为计算时通量设为零。

对称面边界条件

计算中,鉴于物理现象和几何结构的对称性,为减少计算量,以对称面为切面,仅取模型的一半进行计算。对称面上,法向速度分量为零,对于其他变量,包括压力,使用零梯度边界条件。

入口边界条件

入口边界上,给出液相法向速度的大小。按拉坯速度为 1.7m/min ,铸坯断面: $200\text{mm} \times 200\text{mm}$,根据体积流量进行换算,公式如下:

$$U_{in} = Q_v / A_{in} \quad (13)$$

式中, A_{in} 为入口的截面积; Q_v 为入口液相的体积流量。

入口的 k, ε 通过混合长度模型来进行计算,关系式如下:

$$k_{in} = 1.5(iU_{in})^2 \quad \varepsilon_{in} = \frac{k_{in}^{1.5}}{0.3D} \quad (14)$$

式中, U_{in} 为入口的平均速度; i 为湍动能强度; D 为混合长度。计算中,取 $i = 0.037$, D 为入口的水力直径。

示踪剂传输行为计算中,除示踪剂条件外,其他条件同上。计算中,示踪剂以脉冲方式从入口加入。第一秒钟,入口加入无量纲浓度为 1 的示踪剂;随后

的时间内,入口示踪剂无量纲浓度为零。

出口边界条件

出口给出压力边界条件,相对静压力为零(参考压力为 1atm)。

传热边界条件

传热计算时,各壁面和上表面采用热流边界条件,中间包散热取值见表 2。入口温度定为 1813K (即 1540°C)。

表 2 中间包散热参数

	环境温度/ $^\circ\text{C}$	包壁温度/ $^\circ\text{C}$	综合传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	热损失 kW/m^2
顶部	40	400	100	36.0
底部	30	60	60	1.8
侧墙	30	80	60	3.0

3 研究结果分析

3.1 流场分析

图 2 给出了数值模拟所得到钢液流线图,钢液流线图表示的是稳态条件下,进入的钢液在中间包内的流动趋势。图 3 给出了两个特征截面上的速度矢量分布,从图中可以看出速度的方向。从整体的流场分布来看,经由入口进入的流体,速度较高,在注流区强湍流的情况下,形成循环流动,速度迅速下降。然后钢液由挡墙开口进入低湍流区,速度较为缓慢,形成较弱的循环流动,一部分流体跨过下挡板后,经由出口流出;另一部分流体返回,然后从靠近中心位置的出口流出。从图中可以看出,中间包内基本不存在死区。另外,中部出口虽然离注入区较近,但是由于内部挡板、挡墙设置得较为合理,在温差引起的浮力流的作用下,形成了较为合理的流场结构,致使中部出口的响应时间与远端出口基本一致。

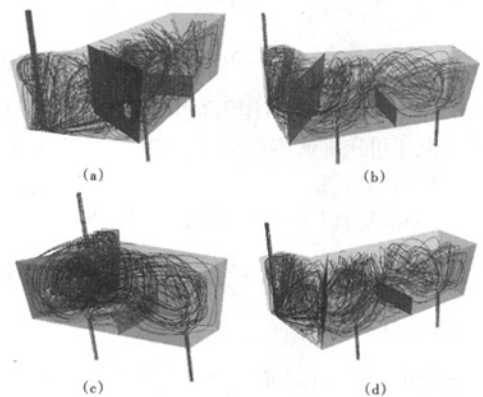


图 2 中间包内钢液流线图

(a)、(b)、(c)、(d)分别为 4 个不同的视图方向

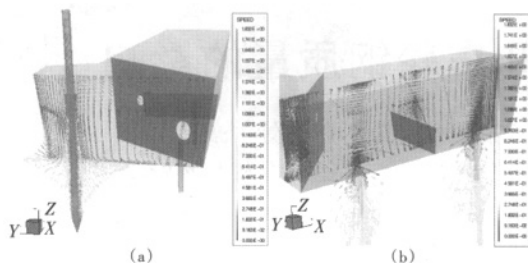


图3 中间包内特征截面上的速度矢量图
(a)通过入口的特征截面;(b)通过出口的特征截面

3.2 混合特性分析

停留时间分布曲线是研究中间包内流动特征和混合特征的一个重要参数,从对停留时间分布曲线的分析中可以得出该中间包的死区、短路流动、平均停留时间等状态,进而可以对中间包设计的好坏进行评价。图4给出了两出口的停留时间分布曲线,从图中可以看出两流的出口的停留时间分布曲线均较为圆滑,不存在明显短路流特征的峰值。从曲线的趋势看,中部出水口(即离注入区更近的水口,出口1)示踪剂响应的更快,但峰值较远端出水口来得慢。这说明主流体先经过远端出水口位置(出口2)然后部分回流通过中部水口流出,这从前面的流场分析可以看出。

3.3 夹杂物分析

研究了2号连铸中间包内不同尺寸($150\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$)夹杂物的分布和去除率的情况。通过钢包的净化作用,除卷渣等情况外,中间包 $75\mu\text{m}$ 以上夹杂物存在的可能性较小。因各粒度夹杂物的分布形式基本相同,图5中仅给出了 $50\mu\text{m}$ 夹杂物颗粒的无量纲分布。图中可以看出从入口进入的夹杂物随钢液一起流动,并在流动过程中不断地上浮、去除。

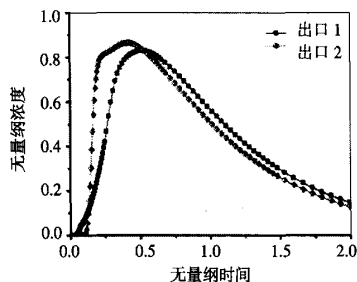


图4 中间包停留时间分布
出口1—中部出水口,出口2—远端出水口

从研究结果来看,在所研究中间包的工况条件

下,中间包内 $100\mu\text{m}$ 以上的夹杂物基本上均可以去除; $50\mu\text{m}$ 夹杂物的去除比率在56%; $25\mu\text{m}$ 夹杂物的去除比率为20%左右。

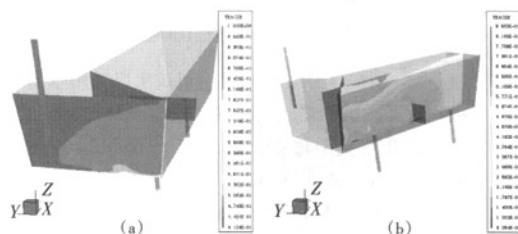


图5 特征面上 $50\mu\text{m}$ 夹杂物的无量纲浓度分布
(a)入口截面;(b)出口截面

4 结束语

建立了中间包内流体流动、传热、示踪剂传输及夹杂物行为模型,采用CFD数值模拟的方法,以首钢第三炼钢厂2号连铸中间包进行了数值模拟分析。结果表明:

(1) 中间包内的流动速度变化较大,且较为复杂。中间包内挡板和挡墙的设置能够显著地改变流动特征。当前的挡板设置较为合理,流动基本不存在死区及短路流。

(2) 中间包停留时间分布具有混合流特征,各流响应时间基本一致,甚至出现远端水口的响应时间更短的现象。

(3) $75\mu\text{m}$ 以上的夹杂物去除比例较高,绝大部分均可以得到去除; $50\mu\text{m}$ 的夹杂物的去除比率为56%; $25\mu\text{m}$ 的夹杂物的去除比率为20%。

参考文献

- 1 王建军,包燕平,曲英著. 中间包冶金学. 北京:冶金工业出版社,2000.
- 2 Sahai Y; Emi T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes [J]. ISIJ International, 1996, 36 (6): 667 ~ 672.
- 3 王建军,周莉,王雪松. 中间包夹杂物运动行为的数模研究. 安徽工业大学学报, 2001, 18(2): 97 ~ 100.
- 4 程乃良,彭世恒,王建军等. 梅钢40t板坯中间包的工业试验与仿真分析 [J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001, 32(1): 36 ~ 40.
- 5 詹树华,萧泽强等. 底吹气中间包内气液两相流的数值模拟. 过程工程学报, 2005, 5(3): 233 ~ 240.
- 6 Stetak S P, Suzuki Y, Bullock R A. Improving Steel Cleanliness Through Baffle Technology. Steelmaking Conference Proceedings, 1991, 74: 495 ~ 499.
- 7 CFX 4. 4 User Documentation [M], AEA Technology Engineering Software Ltd.