

首钢小方坯连铸机中间包数值模拟分析

丁 宁^{1,2} 包燕平¹ 陈京生² 崔京玉² 孙齐松² 王立峰²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 首钢技术研究院, 北京 100043)

摘 要 针对首钢 160 mm × 160 mm 方坯连铸机 14.5 t 中间包建立数学模型, 采用流体力学计算软件 Fluent 对 4 流异型中间包内钢液流动和温度进行了数值计算, 得出中间包钢液流动的速度场、温度场和停留时间分布曲线。计算结果表明, 各流最大温度差为 8 K, 应避免低过热度浇铸; 1 流死区体积分数为 20% 略大于其余各流 (10% ~ 20%) 外, 中间包钢水流动参数可以满足生产的需要。

关键词 160 mm × 160 mm 铸坯 中间包 数值模拟 停留时间分布曲线 温度场

Analysis of Mathematical Simulation on Tundish for Billet Caster at Shougang

Ding Ning^{1,2}, Bao Yanping¹, Chen Jingsheng², Cui Jingyu², Sun Qisong² and Wang Lifeng²

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Research Institute of Technology, Shougang, Beijing 100043)

Abstract A mathematical model for 14.5 t tundish casting 160 mm × 160 mm billet at Shougang is established and the numerical calculation of flow and temperature of liquid in shape tundish for 4-strand is calculated by using fluid dynamic software Fluent to get the flow speed field, temperature field and residence time distribution curves of liquid in tundish. Calculation results show that the maximum temperature difference between each strand is 8 K, therefore the lower overheating extent liquid shall be avoided; besides the percentage of dead volume of No1 strand is 20% little larger than that other strands (10% ~ 12%), the flow parameters of liquid in tundish meet the requirement for casting operation.

Material Index 160 mm × 160 mm Casting Billet, Tundish, Mathematic Simulation, Residence Time Distribution Curves, Temperature Field

中间包是连续型冶金反应器, 其冶金过程包括钢液中夹杂物的去除、温度和成分的均匀化等, 都是在流动的钢液中进行的。包内钢液的流动特征, 决定了其中物质和能量的传输过程。人们对连铸中间包净化钢液的能力提出了越来越高的要求, 通过优化中间包结构, 可改善中间包内钢液的流动特性, 有利于中间包去除钢液中的非金属夹杂物^[1~4]。

首钢二炼钢 5[#] 方坯铸机为 8 机 8 流 (160 mm × 160 mm), 采用两个 4 流中间包进行生产, 本研究以单个 4 流为原型, 采用数学模拟方法对中间包速度场、温度场进行数值计算, 并综合分析流动参数对生产的影响。

1 边界条件

(1) 在中间包钢水表面, 忽略渣层的影响, 垂直于熔池表面的速度分量设置为 0。上表面按自由表面处理, 在固体壁面上, 对速度和压力采用无滑移边界条件。在接近壁面的网格上, 平行于壁面的速度和湍动量采用对数壁面函数, 入口和出口处的速度垂直于自由表面, 并假设其截面上的速度分布是均

匀的, 忽略温度对密度的影响。

(2) 在中间包出口截面上, 设流体在出口处充分发展为压力出口。

(3) 壁面传热条件采用第 2 类边界条件, 即:

$$q = -K(\partial T / \partial x)$$

式中: q —热通量/[kJ · (m² · s)⁻¹]。在浇铸过程中, 中间包壁传热和表面顶渣热辐射视为恒定值, 通过包壁和表面渣层的热通量采用 Chakraborty 和 Shhai 的推荐值, 横向包壁散热量 3.2 kJ/(m² · s); 纵向包壁 3.8 kJ/(m² · s); 底面 1.4 kJ/(m² · s); 表面渣层 15 kJ/(m² · s)^[3]。

(4) 采用原中间包大小计算, 模型与原型的相似比为 1:1, 试验模拟拉速为 1.6 m/min, 中间包容量为 14.5 t。

2 控制方程

通过数值模拟计算中间包内的稳态流场, 采用 k - ε 双方程模型进行。中间包的结构如图 1 所示, 液面高 650 mm, 共划分 78 480 个网格。采用 SIMPLE 压力速度耦合算法, 动量方程采用二阶离散格

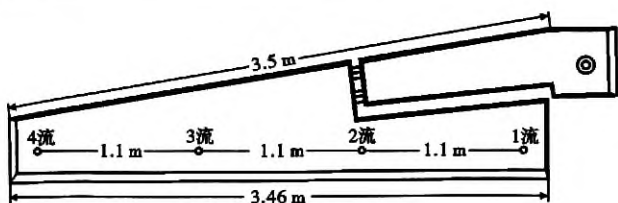


图1 中间包结构

Fig. 1 Schematics of structure of tundish

式,收敛条件为残差少于 10^{-4} 。

采用的控制方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

湍动能方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{(C_1 G \varepsilon - C_2 \rho \varepsilon^2)}{k} \quad (4)$$

传质方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T \quad (6)$$

式中: τ -时间/s; ρ -钢液的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); u_i - i 方向上的速度分量,指 x, y, z 三个方向/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); g_i -重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); P -压力/Pa; μ_{eff} -有效粘度系数/[$\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$]; k, ε -流体的湍动能/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)与湍动能耗散率/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$); $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ -经验常数,目前普遍采用 Launder 和 Spalding 的推荐值^[5], $C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.43, C_{2\varepsilon} = 1.93, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$; C -浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); S_T -源项,无内热源时为0; Γ_{eff} -有效扩散系数,可表示为:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (7)$$

式中: Pr, Pr_t -分别为层流和湍流的普朗特数,分别取1和0.9。

速度场计算的结果如图2所示,挡墙明显改变了钢水的流动路径,把整个中间包分为两部分:靠近中间包冲击区的湍流混合区,和挡墙墙外的夹杂物上浮区。在中间包冲击区的湍流混合区,强的湍流碰撞有利于钢水温度与成分均匀化、夹杂物聚合长大,从而有利于大型夹杂物上浮。钢水通过挡墙的导流孔墙后速度加快,由于两个导流孔距离较近,流出的钢水发生碰撞,距离2流和3流很近,最后钢水流动4流和1流。

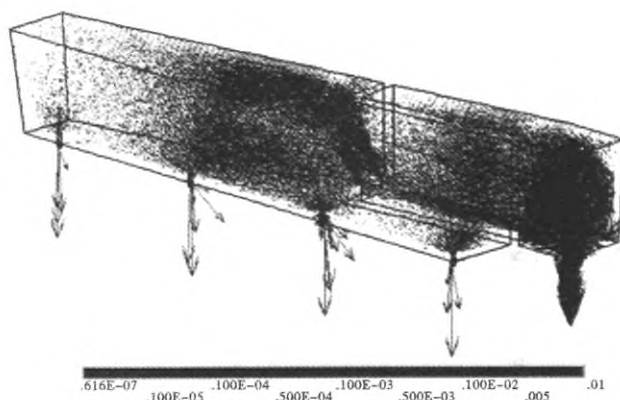


图2 中间包速度场

Fig. 2 Diagram of flow speed vector of liquid in tundish

3 停留时间分布(RTD)曲线数值模拟结果

模拟从中间包入口加入示踪剂,在出口处监测流出的浓度数据。由图3可知,从数值模拟得到的停留时间分布(RTD)曲线来看,2流和3流的最小停留时间短,其次是4流,1流的最小停留时间最长。同样2流和3流的峰值时间最短,其次是4流,1流的峰值时间最长。综合RTD曲线和流场结果可以看出:钢水从导流孔流出后先到达2流、3流,后到达4流,最后到达1流。造成这样流动是由于2流、3流距离挡墙出口的距离近而形成。

流动参数的计算结果如表1所示,2流、3流和4流的参数基本满足浇铸要求,1流的死区略大,说明在1流的区域钢水受到挡墙的作用,使该区域部分钢水与其他钢水交换的速度较慢,其它流的流动参数比较正常。

4 温度场计算

以浇铸低碳钢为例,浇铸温度为1823 K,中间包出口附近温度场分布如图4所示。可以看出中间包内整体温度处于1800~1823 K,各流出口处的温

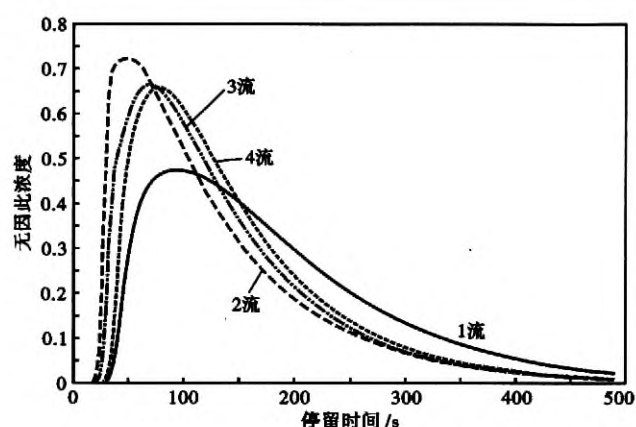


图 3 中间包各流钢停留时间分布 (RTD) 曲线
Fig. 3 Curves of residence time distribution (RTD) of each strand liquid in tundish

表 1 各流流动特性参数

Table 1 Flow characteristics parameters of each strand liquid in tundish

水口	最小停留 时间 t_{\min}/s	峰值浓度 时间 t_{\max}/s	活塞流体积 分率 $V_p/\%$	死区体积 分率 $V_d/\%$	混合流体积 分率 $V_m/\%$
1 流	27	92	37	20	43
2 流	18	51	29	10	61
3 流	20	57	36	11	53
4 流	26	77	38	12	50

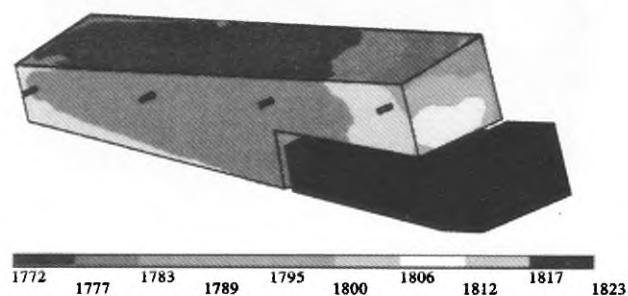


图 4 中间包钢水温度场 /K
Fig. 4 Temperature field of liquid in tundish /K

度分布以 2 流和 3 流最高,分别为 1 814、1 814 K,4 流温度为 1 812 K,1 流温度为 1 806 K。造成 1 流温度低的原因是由于钢水最后流到 1 流,温度损失大。

在浇铸过程中,在钢水温度低的时候,容易造成冻流,在实际生产的时候曾有冻流发生,因此应避免低过热度浇铸。

钢包长水口处钢水注入温度为 1 823 K,中间包内钢水最低温度约为 1 790 K,钢水最低温度的位置在中间包 1 流、4 流的角部。由于该中间包属于异型中间包,想通过控流装置来控制各流停留时间完全一致有一定的难度,各流的流动趋势一致就能满足正常生产的需要。

5 结论

(1)从流场图片和 RTD 曲线来看该钢水先流出的顺序为 2 流、3 流、4 流,最后流到 1 流,流动参数中 1 流死区大,其它各流的流动参数基本可以满足浇铸要求。

(2)从温度场图片来看钢水最后流到 1 流,温度损失大,1 流温度比 2 流和 3 流低 8 K。浇铸过程中,当钢水温度低的时候,容易造成冻流,因此应避免过低过热度浇铸。

(3)数学模型计算得到的速度场、温度场和 RTD 曲线很好描述了该中间包钢液流动状态。

参考文献

- 1 钟良才,张立,黄耀文,等.湍流控制装置的结构对中间包流体流动特性的影响.钢铁研究学报,2002,14(4):629
- 2 王建军,包燕平,曲英.中间包冶金学.北京:冶金工业出版社,2001
- 3 Liu J G, Yan H C, Liu L, et al. Water Modeling of Optimizing Tundish Flow Field. Journal of Iron and Steel Research. International, 2007, 14 (3): 13
- 4 类俊飞,朱苗勇,张清朗,等.六流连铸中间包内流动与传热耦合过程的数值模拟及控流装置优化.金属学报,1999,35(11):1191
- 5 朱苗勇,萧泽强.钢的精炼过程数学物理模拟.北京:冶金工业出版社,1998

丁宁(1979-),男,硕士,工程师,2007 年东北大学毕业,品种钢开发和研究。

收稿日期:2011-04-06

邮发代号:38-183

欢迎订阅 2012 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社