

18 t 三流非对称中间包流场数值模拟

李哲¹ 孙彦辉² 窦炳胜² 王璐² 蔡亦凡²

(1 中国中钢集团有限公司,北京 100080;2 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083)

摘要 针对三流非对称中间包,运用 ANSYS Fluent 软件对其控流方案进行模拟,比较不同方案下钢液的流场、温度分布和停留时间分布 (RTD) 特征。模拟结果显示:原方案中有明显的短路流出现,各个水口钢液的流动一致性差,3 个水口的实际停留时间分别为 459.44 s、519.43 s 和 636.94 s,并且温度最大温差为 7 K,死区比例为 23.9%;最佳优化方案减少了短路流,钢液流动一致性提高,3 个水口的实际停留时间分别为 517.13 s、532.66 s 和 502.12 s,死区比例降低到 19.8%,最大温差降低到 2.5 K,流动一致性良好,钢液流动更合理。工业试验以 316L 钢种为研究对象,中间包 T[O] 由 49×10^{-6} 降至 40×10^{-6} ,降幅为 18.4%,铸坯 T[O] 由 34×10^{-6} 降至 28×10^{-6} ,降幅为 17.7%,洁净度改善较为明显;中间包夹杂物数量密度由 7.2 个/ mm^2 降至 4.7 个/ mm^2 ,铸坯由 5.4 个/ mm^2 降至 3.5 个/ mm^2 ,夹杂物数量降低。

关键词 三流非对称 18 t 中间包 数学模型 流场 温度场 RTD 流动均衡性

Numerical Simulation of Flow Field in 18 t Three-Stream Asymmetric Tundish

Li Zhe¹, Sun Yanhui², Dou Bingsheng², Wang Lu² and Cai Yifan²

(1 SINOSTEEL CORPORATION, Beijing 100080;

2 Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract For the three-flow asymmetric tundish, ANSYS Fluent software was used to simulate its flow control scheme. The flow field, temperature distribution and residence time distribution (RTD) characteristics of molten steel under different scenarios were compared. The simulation results show that there are obvious short-circuit currents in the original scheme, and the consistency of molten steel flow at each nozzle is poor. The actual residence time of the three nozzles is 459.44 s, 519.43 s, and 636.94 s respectively, and the maximum temperature difference is 7 K. The proportion is 23.9%; the optimal optimization scheme reduces the short-circuit flow and improves the consistency of the molten steel flow. The actual residence time of the three nozzles is 517.13 s, 532.66 s, and 502.12 s respectively, the dead zone ratio is reduced to 19.8%, and the maximum temperature difference is reduced to 2.5 K, the flow consistency is good and the flow of molten steel is more reasonable. In the industrial test, the content of T[O] in the tundish was reduced from 49×10^{-6} to 40×10^{-6} , and the decrease was 18.4%. The casting billet T[O] was reduced from 34×10^{-6} to 28×10^{-6} , and the decrease was 17.7%. The purity of the inclusions in the tundish was reduced from $7.2/\text{mm}^2$ to $4.7/\text{mm}^2$, and the cast billet decreased from $5.4/\text{mm}^2$ to $3.5/\text{mm}^2$, and the number of inclusions decreased.

Material Index Three-Stream Asymmetry, 18 t Tundish, Mathematical Model, Flow Field, Temperature Field, RTD, Flow Equilibrium

连铸中间包是钢液进入结晶器之前的最后一个冶金容器,承担起钢液分配、保护浇铸的连续性、提高产品质量的重要作用^[1-3]。为提高生产效率,浙江青山钢铁有限公司炼钢厂把工程容量为 14 t 的两流中间包扩容为 18 t 三流中间包。在原中间包的一侧加长,造成在中间包两侧钢液流动差异性大。距离导流孔近的出水口钢液温度偏高,实际平均停留时间较短、钢液在中间包内流动轨迹短,不利于夹杂物的去除;而远离导流孔实际平均停留时间长、钢液流动轨迹长,存在的问题是钢液温度偏低,易引起结瘤

等问题^[4]。设计合理的控流装置,可以提高钢液流动状态,增加钢液实际平均停留时间,改善产品质量。对于多流中间包,在设计控流装置时还应考虑各水口之间流动的一致性。为了使钢液在三流非对称中间包内的流动更佳,符合方案预想,在中间包内重新设计挡墙及导流孔的参数,结合模拟软件 ANSYS 对原方案和新设计方案进行了数学计算,比较钢液温度分布、流场和平均停留时间曲线,对新设计方案进行评估^[5-6]。

通讯作者:孙彦辉,教授,北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心,北京 100083

E-mail:13683648158@163.com

1 研究方法

1.1 基本方程

在数学上需要一组方程去描述中间包内钢液的流动,包括连续方程、湍流方程、能量方程和动量方程,则各方程表示如下:

控制方程为中间包内的钢液流动行为可以用连续性方程、动量方程(Navier-Stokes 方程)、和标准 κ - ε 双方程描述,具体方程如下所示:

$$(1) \text{ 连续性方程: } \frac{\partial(\rho_l u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程(Navier-Stokes 方程):

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

有效粘度 μ_{eff} 通过下式求解:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_0 + \mu_l = \mu_0 + \rho C_p \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

(3) 标准 κ - ε 双方程: 流体的湍动能 κ 及湍动能耗散率 ε 采用标准的双方程模型求解。

κ 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \kappa - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i}) = G_\kappa - \rho \varepsilon \quad (4)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) = \frac{(C_1 \varepsilon G_\kappa - C_2 \rho \varepsilon^2)}{k} \quad (5)$$

其中: $G = u_i \frac{\partial u_l}{\partial x_i} (\frac{\partial u_i}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_i})$ (6)

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_i \quad (7)$$

$$\mu_l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

1.2 边界条件

(1) 在中间包入口处,钢液的速度方向垂直入口向下,大小通过拉坯速度和铸坯断面以及长水口的尺寸计算确定。同时假设入口截面上的速度分布均匀。

(2) 在固体壁面上,采用无滑移边界; k 和 ε 设为 0。

(3) 不考虑渣层对钢液流动的影响。

(4) 中间包内的能量和动量传递均看做稳态,质量传递为非稳态过程。

(5) 钢液密度为常数。

(6) 壁面及表面的热流量均为常数。

1.3 中间包控流方案及基本参数

试验装置以三流非对称中间包为实验对象,模型示意图如图 1 所示,现把弧形挡墙改良成 U 型挡墙进行优化模拟计算,原方案示意图及重新设计的 U 型挡墙如图 2 所示。其中 U 型挡墙有两种方案,方案 1 为在 U 型挡墙左右各开一个孔,右侧孔径大,左侧孔径小,大孔径 D 约为小孔径 d 的 1.4 倍,来保证整个钢液分配的均匀性;方案 2 为在 U 型挡墙前侧和右侧开孔径大小形状相同的两个孔,如图 3 所示。其中通过改变导流孔的高度、孔径和竖直方向的角度,方案 1 设计 16 组方案模拟,方案 2 设计 9 组方案进行模拟,分别选择最优设计进行比较。

模拟中的钢液物性参数和铸坯生产工艺参数如表 1、表 2 所示。

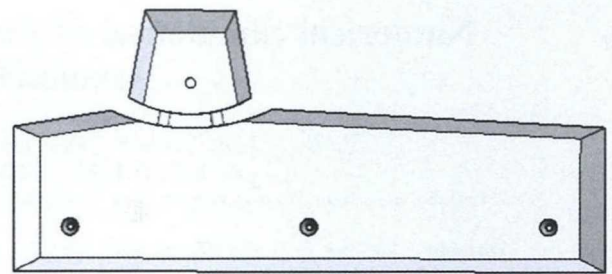


图 1 三流非对称中间包模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a three-flow asymmetric tundish model

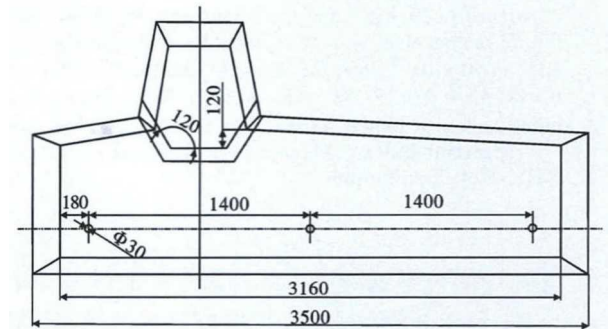


图 2 中间包尺寸及 U 型挡墙

Fig. 2 Tundish size and U-shaped retaining wall

表 1 钢液的物性参数

Table 1 Physical parameters of molten steel for simulation

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	流动粘度/ ($\text{pa} \cdot \text{s}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
7 020	0.006 2	700	28

表 2 中间包数学模拟基本工艺参数

Table 2 Basic parameters of tundish for simulation

工作液 位/mm	溢流液 位/mm	铸坯断面/ $\text{mm} \times \text{mm}$	拉速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	入口温 度/K	长水口 内径/mm	长水口 深度/mm
750	850	200 × 200	1.3	1 773	60	100

2 结果分析

本实验的三流非对称中间包的模型示意图如图1所示,方案1和方案2为通过改变挡墙及导流孔,得到各方案下的速度场和温度分布,其结果如图4,图5所示。

2.1 流场分布

从中间包导流孔的速度流场图可以发现,通过导流孔以后,由于导流孔的倾角斜向上,因此钢液流经导流孔后沿导流孔倾角的方向运动,直至到达钢液面和壁面交界处后,一部分由于受到钢包壁的约束沿包壁向下运动,一部分沿着钢液面逆向运动^[7]。由图4(a)可以看出,通过导流孔流出的钢液流向自由液面然后向下运动,这样容易造成卷渣,钢液运动轨迹短,对应停留时间短,不利于夹杂物上浮去除,这两者都会影响到钢液的纯净度^[8]。并且钢液停留时间短,各流之间的一致性差,对铸坯品质控制有很大影响。在导流孔正上方,流迹线稀疏,说明钢液流经少,该区域容易产生死区。通过图4(b,c)两图可以看出,方案1和方案2中钢液的流线明显加长并且更密集,说明钢液在中间包内的流动轨迹长,并能够说明钢液流动更好。钢液在中间包内停留时间增长,对于钢液成分的混匀,夹杂物的去除都是有很大帮助的。而且方案1和方案2的设计避免了钢液对中间包包壁的直接冲刷,保护包壁的同时增强钢液的混匀能力。在流线长度及密集度上分析,方案1优于方案2。

2.2 温度分布

3种方案下中间包的底面和液面的温度分布云图分别如图5所示。

图5是各方案液面温度云图,左侧为液面的温度分布云图,右侧为底面的温度分布云图。由于液面的热流量较大,所以液面的温度是中间包内温度较低的区域。图5(a)原方案中钢液的人口温度为1773

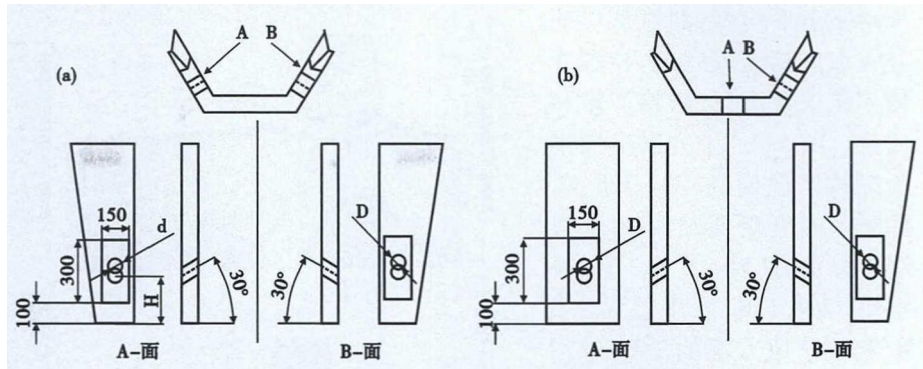


图3 方案1(a)和方案2(b)中导流孔设计
Fig.3 Design of diversion holes in scheme No1 (a) and No2 (b)

K,在注流区的钢液温度较高,约1770 K,钢液通过导流孔进入浇注区后温度进一步降低,尤为严重的是中间包左右温度存在明显差异。中间包左侧温度高,约为1766 K,右侧的温度低,约为1759 K,温度相差7 K。中间包底面的温度分布云图显示,在注流区钢液的温度较高,约为1772 K,通过倾斜挡墙上的导流孔后,钢液温度降低,温度最低处为最右侧,约为1759 K,3个水口的出钢温度都不一样,左侧出水口温度为1766 K,中部出水口温度为1764 K,右侧出水口温度为1759 K,温度最大差7 K,说明3个出水口钢液不一样,这是由于进入中间包的钢液没有和原先钢液充分混合就经出水口流出,钢液进入中间包后没能都混合均匀,导致各水口流钢液

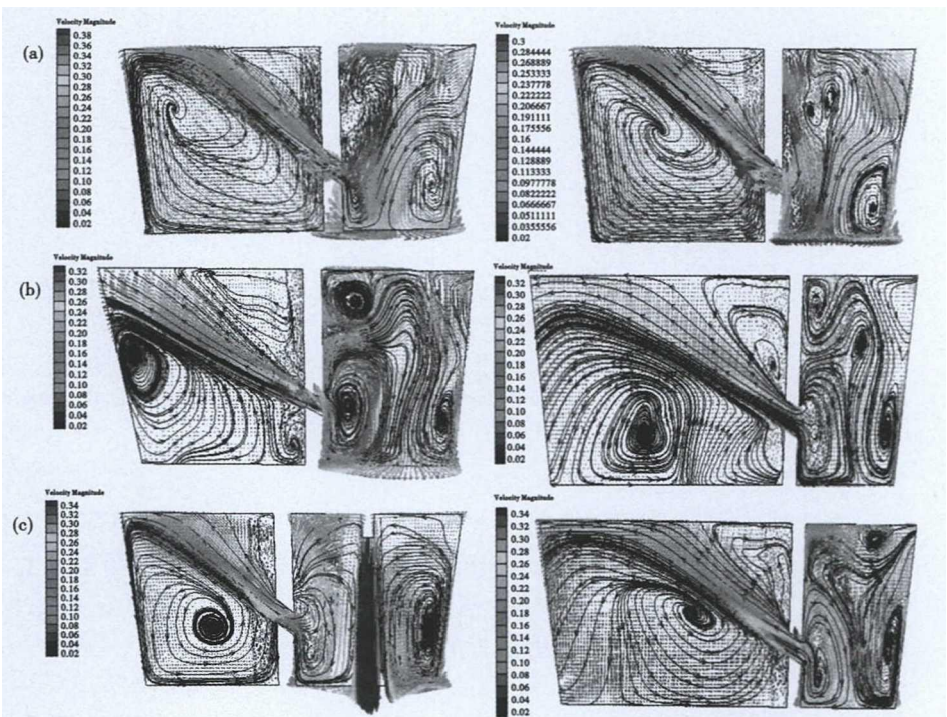


图4 原方案(a),方案1(b)和方案2(c)导流孔纵切面速度场
Fig.4 Vertical section velocity field of diversion hole in original scheme (a), scheme No1 (b) and scheme No2 (c)

流动状态不均衡,温度低可能导致水口结瘤等问题,导致连铸不能正常进行,影响产量和质量。图 5(b)中方案 1 同样为浇铸区温度高,为 1768 K,注流区温度略低,3 个出水口温度分别为 1761.6 K,1761.6 K 和 1764.1 K,温度差为 2.5 K,相比于原方案的 7 K,中间包内的钢液温度均匀良好,说明钢液混合更加均匀,中间包的流场更加合理。图 5(c)中为方案 2 的温度分布云图,方案 2 中整体温度比方案 1 中要高,3 个出水口的温度分别为 1762 K,1764 K 和 1764 K,比方案 1 稍微高 1 K。方案 2 中的温度略好于方案 1,方案 1 和方案 2 的温度分布均优于原方案。

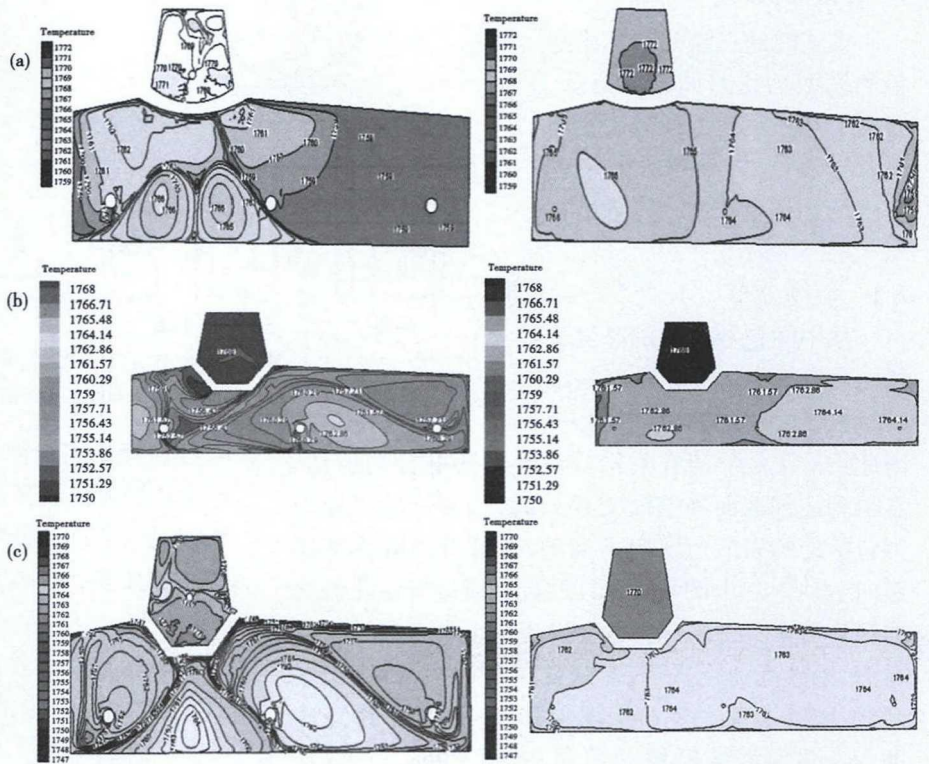


图 5 原方案(a),方案 1(b)和方案 2(c)的液面和底面温度分布云图

Fig. 5 Temperature distribution cloud diagram of liquid surface and bottom surface in original scheme (a), scheme No1 (b) and scheme No2 (c)

2.3 模拟 RTD 数据

通过模拟得到方案 1 和方

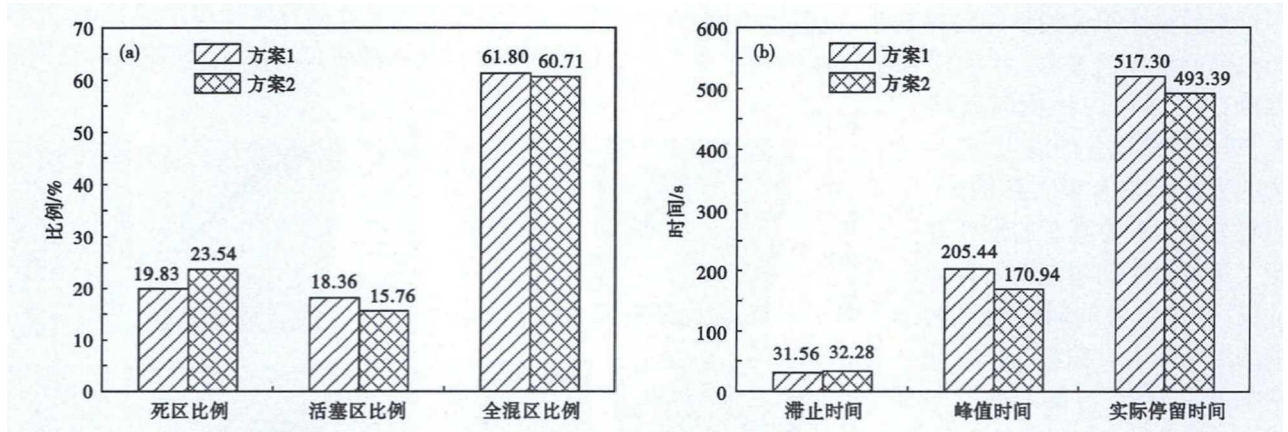


图 6 方案 1 和方案 2 的停留时间分布 (RTD) 曲线数据对比图:(a)各区比例;(b)时间

Fig.6 Comparison of residence time distribution (RTD) curve data between scheme No1 and scheme No2: (a) each zone ratio; (b) time

案 2 的 RTD 数据,整理后如图 6。

通过对比可以知道,方案 1 的死区比例为 19.83%,活塞区比例为 18.4%,停留时间为 517.3 s;方案 2 的死区比例为 23.5%,活塞区比例为 15.7%,停留时间为 493.39 s,方案 1 的各项参数都优于方案 2。

3 工艺优化的冶金效果分析

3.1 优化前后气体含量的变化

由图 7 可知优化前后气体含量的变化:

(1)总氧量方面,中间包总氧量由优化前的 49×10^{-6} 降至优化后的 40×10^{-6} ,降幅为 18.37%;铸坯总氧量由优化前的 34×10^{-6} 降至优化后的 28×10^{-6} ,降幅为 17.65%,中间包和铸坯中的总氧含量明显降低,表明中间包及铸坯的洁净度有所改善。

(2)氮含量方面,优化前中间包到铸坯增氮 31×10^{-6} ,优化后中间包到铸坯增氮为 20×10^{-6} ,降幅为 35.48%,增氮现象改善明显。

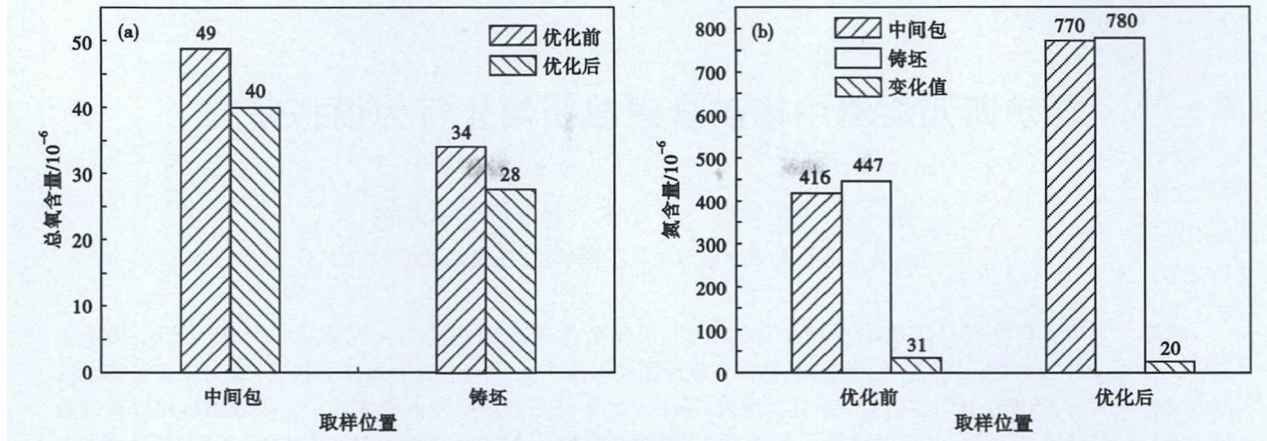


图7 优化前后总氧含量(a)和氮含量(b)的变化

Fig. 7 Changes in total oxygen content (a) and nitrogen content (b) before and after optimization

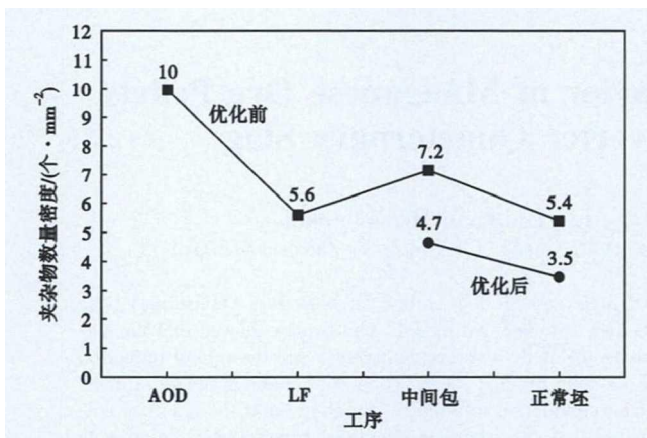


图8 优化前后微观夹杂物数量变化

Fig. 8 Changes in number of micro inclusions before and after the optimization

3.2 工艺优化前后微观夹杂物的变化

优化前后微观夹杂物数量变化如图8所示,由图8可知,中间包微观夹杂物数量由7.2个/mm²降至4.7个/mm²,降幅为34.72%,铸坯夹杂物数量由5.4个/mm²降至3.5个/mm²,降幅为35.19%,中间包及铸坯中的微观夹杂物数量均明显降低,钢液的洁净度水平进一步提高。

4 结论

(1)原方案中,中间包有的短路流,钢液流动不均衡,近流钢液停留时间短,各出水口钢液温度最大相差7 K。

(2)方案2中虽然改善了钢液流动的均衡性,但是对于停留时间并未增加,死区比例并未减小,优化效果不明显。

(3)方案1中,降低了死区比例,从原方案的24%降到19.8%,同时增大停留时间,显著改善了

钢液流动的均衡性,各流钢液的停留时间趋于一致,温度场趋于均匀,各流最大温差为2.5 K,提高连铸坯质量,优化效果明显。

(4)优化后,中间包总氧含量由 49×10^{-6} 降至 40×10^{-6} ,降幅为18.4%,铸坯总氧量由 34×10^{-6} 降至 28×10^{-6} ,降幅为17.7%,洁净度改善较为明显;中间包夹杂物数量密度由7.2个/mm²降至4.7个/mm²,铸坯由5.4个/mm²降至3.5个/mm²,夹杂物数量明显降低,钢液洁净度得到提高。

国家自然科学基金(51574026)资助

参考文献

- [1] 冯璐,解西东,巨建涛,等.八机八流中间包流场温度场数值模拟[J].铸造技术,2017,38(4):881-884.
- [2] 刘文波,郭宗昶.连铸中间罐内流场和温度场数值模拟研究[J].工业加热,2012,41(2):51-54.
- [3] 丁宁,包燕平,陈京生,等.首钢小方坯连铸机中间包数值模拟分析[J].特殊钢,2011,32(5):8-10.
- [4] 陈远清,彭家清,郭愚,等.八流小方坯连铸中间包的数值模拟[J].钢铁钒钛,2014,35(4):83-88.
- [5] 刘艳贺,贺铸,刘双,等.二流T型23t中间包控流装置的数值模拟和结构优化[J].特殊钢,2013,34(5):5-8.
- [6] 孙华,孙彦辉,黄博,等.三流非对称中间包流场水模拟研究[J].钢铁钒钛,2017,38(3):118-123.
- [7] 蒋国璋,孔建益,李公法,等.中间包流场的数值模拟及其优化[J].中国冶金,2008,18(2):46-50.
- [8] 沈巧珍,朱必炼.四流T型中间包控流装置优化的数值模拟[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2007,30(1):10-13.

李哲(1976-),男,硕士(2004年太原理工大学),高级工程师,1998年包头钢铁学院(本科)毕业,材料加工工程研究。E-mail:lizhe@mecc.sinosteel.com

收稿日期:2018-06-20