

三流方坯连铸中间包结构优化的数值模拟和应用

陈洋¹ 刘卫东¹ 赵大同² 李靖宇²

(1 先进不锈钢材料国家重点实验室; 2 山西太钢不锈钢股份有限公司, 太原 030003)

摘要 根据太钢三流 220mm × 220mm 方坯连铸中间包结构和工艺参数, 利用 ANSYS FLUENT 数值模拟软件对该中间包流场和温度场进行模拟研究。结果表明, 原型中间包流场不合理, 第 2 流钢液存在短路流和死区, 各流一致性较差。优化方案通过在浇注区设立挡墙, 形成钢流缓冲区, 钢液重新分配, 流场一致性得到了大幅度改善。最优方案应用于现场后, 相对于原方案第 1、2 流夹杂物数量分别降低了 9.51%、23.52%, 流间夹杂物数量差异降低了 52.72%, 两流夹杂物数量和流间夹杂物数量差异都明显降低。

关键词 中间包 数值模拟 流场 温度场

Mathematical Simulation of Structural Optimization and Application for Three-Strand Square Billet Tundish

Chen Yang¹, Liu Weidong¹, Zhao Datong² and Li Jingyu²

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steels; 2 Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract In light of the structure and technics parameters of the three-strand 220 mm × 220 mm square billet continuous casting tundish in TISCO, fluid flow field and temperature field of the tundish are mathematically simulated with the software ANSYS FLUENT. The results show that the flow of prototype tundish is unreasonable, the short circuit flow and the dead zone exist in the No. 2 strand, and the similarity among the various stands is poor. The optimization schemes have formed weirs in the pouring area to form flow buffer zones. Thus the steel flow is redistributed. The flow field consistency has been greatly improved. After the optimal schema was applied to the site, the number of inclusions in the No. 1 and the No. 2 strand was reduced by 9.51% and 23.52% respectively, and the difference between strands was reduced by 52.72%. The number of inclusions and the difference between strands were significantly reduced.

Material Index Tundish, Mathematical Simulation, Flow Field, Temperature Field

中间包是钢包与结晶器之间的过渡容器。一般中间包内设有挡墙结构, 这种挡墙结构一方面用于隔离冲击区钢液注流对浇注区钢液的扰动, 降低浇注区钢液湍动能; 其次它还常被布置于浇注区, 用于改善钢液流场和温度场, 促进钢液中夹杂物上浮去除, 提高各流流动一致性。中间包合理的结构及流场分布是保障中间包冶金性能发挥的关键性因素^[1]。

太钢炼钢一厂不锈钢三流方坯连铸机投产初期, 铸坯夹杂物含量一直处于较高水平, 之后根据经验增加了中间包挡墙导流孔数量和大小, 虽然夹杂物水平有所改善, 但仍然不稳定, 且各流的一致性较差。为了改善中间包内钢液的流动特性, 对该中间包的挡墙结构进行合理的优化是非常必要的。本文以该方坯中间包为研究对象, 采用数值模拟方法对中间包流场和温度场进行计算, 分析研究挡墙结构对钢液流动特性和温度分布的影响, 并提出挡墙结构改进方向。

1 数学模型

1.1 控制方程

本模型基本假设包括: (1) 中间包液面视为自由滑移边界, 忽略中间包覆盖渣对钢液流动的影响; (2) 中间包内流体流动为三维不可压缩稳态湍流流动, 忽略中间包温度场对钢液流动的影响; (3) 中间包的传热过程是一个稳态传热过程; (4) 示踪剂的传输是一个非稳态传质过程; (5) 钢液的密度、粘度、比热容等物理参数为常数。描述钢液流动和传热的基本方程包括连续性方程、动量方程、能量传输方程、湍动能方程及湍动能耗散率方程, 描述示踪剂扩散的方程为湍流扩散方程, 以上方程的具体形式、边界条件和物性参数见文献[2-4]。

1.2 几何模型的建立

太钢炼钢一厂不锈钢方坯中间包为 T 型结构, 其工作容量为 16 ~ 18 t。正常连铸参数为: 中间包液面高度 850 mm, 长水口插入深度 150 mm, 内径 70 mm, 浸入式水口内径 28 mm, 典型铸坯拉速为 1.0 m/min, 铸坯断面尺寸为 220 mm × 220 mm。中间包原型结构及主要尺寸如图 1 所示。

考虑到该厂不锈钢方坯中间包为对称结构, 为

了减少计算量而取其体积的1/2作为计算区域。利用 ANSYS ICEM 对中间包模型划分六面体网格,总网格数约为 30~40 万,如图 2 所示。然后使用 ANSYS FLUENT 进行流体计算。

1.3 中间包流动特性分析方法

在得到稳定的流场后,从钢液入口处以瞬态加入示踪剂 1 s,然后求解示踪剂在中间包内瞬态的三维湍流传质方程,即计算出各流出口的示踪剂浓度随时间的分布(RTD)曲线。中间包内钢液的流动

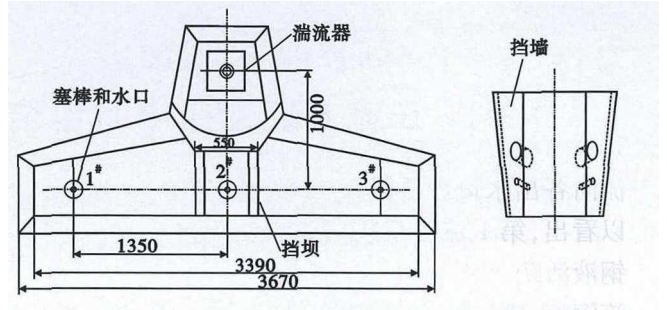


图 1 原型中间包结构及主要尺寸(mm)
Fig.1 Structure and primary scale of original tundish (mm)

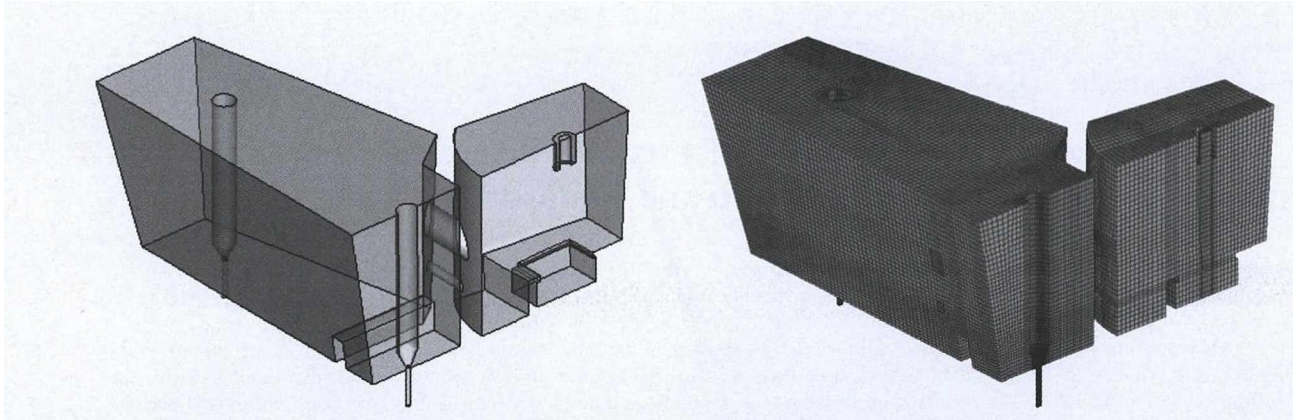


图 2 原型中间包模型和网格划分
Fig.2 Model and grid of original tundish

状态一般可视为活塞流区、全混流区和死区 3 个部分组成,这 3 个区域所占的体积密度可以采用中间包流动特性分析模型对得到各流的 RTD 曲线计算得到。目前对于中间包流体流动特性的分析模型比较多^[5-8],本文选取潘宏伟和程树森^[6]提出的分析方法进行数据分析。在 RTD 曲线中,横坐标表示无因次化时间,纵坐标表示无因次化浓度,其计算公式如下所示:

$$\theta_j = t_j / \tau \tag{1}$$

$$E_i(\theta_j) = \frac{c_i(t_j) \cdot \tau}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{\infty} [C_i(t_j) \cdot \Delta t]} \tag{2}$$

$$\tau = V / Q \tag{3}$$

式中: θ_j - 无因次时间,量纲为 1; $E_i(\theta_j)$ - 第 i 流的无因次浓度,量纲为 1; t_j - 实际时间/s; $C_i(t_j)$ - 第 i 流的实际浓度; τ - 理论平均停留时间/s; V - 中间包体积/ m^3 ; Q - 中间包体积流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$; Δt - 监测时间间隔/s。

1.4 研究方案

在实际生产过程中,发现原型中间包生产的第 2 流铸坯夹杂物含量比第 1 流平均高出近 1/3,说明两流流场一致性较差,第 2 流流场存在短路流。对于多

表 1 挡墙结构的试验方案

Table 1 Tested schemes of barricade wall structure

编号	挡墙结构说明
原型	挡墙(0#挡墙)为 U 型结构,两侧各有上下 2 个圆形导流孔,上孔直径 150 mm,下孔直径 50 mm,4 孔倾角均为上倾 27°;2#水口两侧各有 2 个高为 100 mm 挡坝
1#	在距 1#水口 195 mm 位置新设一挡墙(1#挡墙),挡墙高度高出钢液面,在靠近包壁、距包底 100 mm 位置前后对称各开设 1 个宽 100 mm 方孔;将原挡坝改为挡墙(2#挡墙),挡墙高度高出钢液面,在靠近外侧包壁、距包底 100 mm 位置开设 1 个宽 100 mm 方孔
2#	在方案 1 的基础上将 1#挡墙和 2#挡墙高度降为 350 mm
3#	在方案 2 的基础上将 1#挡墙高度改为 450 mm,2#挡墙不变

流 T 型中间包,挡墙对各流钢液分配有着决定性的作用。本文以现场使用的原型挡墙结构为基础,提出 3 种新型挡墙结构进行模拟研究,如表 1 所示。

2 中间包流场的结果与分析

2.1 原型方案流场的结果与分析

对原型中间包流场进行模拟计算得到流线图、速度矢量图及示踪剂加入后不同时刻浓度分布图分别如图 3~4 所示。由图 3~4 可知,钢液从长水口流入中间包冲击区,受湍流抑制器的作用,钢液的湍动能迅速降低,并流向液面形成表面流;然后钢液从挡墙导流孔进入浇注区,受挡墙导流孔角度的影响,

大部分钢液都能形成表面流,这有利于钢液中夹杂物的上浮去除;钢流受到中间包包壁的折射和出水口压差的作用分别流向各出水口。从图 3~4 可以看出,第 1 流明显比第 2 流钢液活跃,流线密集,说明第 1 流钢液分配充足,更新速度快。分配到第 2 流的钢流中,一部分为表面流撞击包壁形成的返回流;另一部为直接从导流孔过来的短路流。前者钢流行程长,且与液面的渣层较好的接触,对夹杂物去除有利;后者钢流行程过短,基本未与渣层接触,对夹杂物去除不利。

2.2 优化方案流场的结果与分析

优化方案的停留时间分布 (RTD) 曲线和分析结果如图 5 (b,c,d) 和表 2 所示。在 RTD 分析结果中采用各流的示踪剂浓度的总体平均标准差 S_n 来判定各流流动特性的一致性,该指标越低说明各流一致性越好^[8]。

由图 5 的 RTD 曲线可以看出,原方案两流 RTD 曲线重合度较差,峰值时间和峰值浓度差别较大,两流一致性较差。经过增加 1# 挡墙后 (方案 1),1#、2# 挡墙中间形成一个缓冲区,这样一方面增加了钢液中夹杂物的上浮机会;另一方面该

区域的钢液通过 1#、2# 挡墙的导流孔进行重新分配,这样从整体上看,流入 1# 水口和 2# 水口的钢流更加均衡。从方案 1 的 RTD 曲线可以印证这一观点,

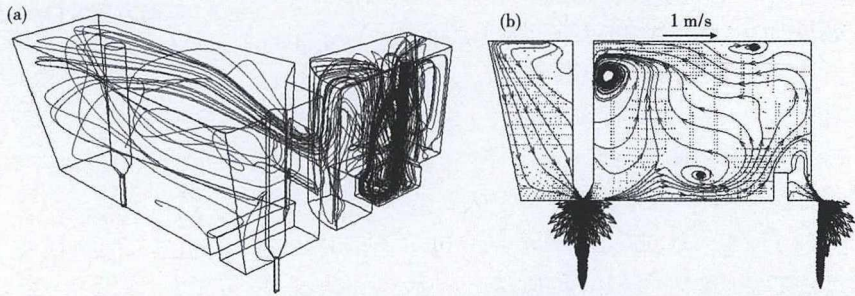


图 3 原型中间包流线图(a)和 $Y = -1$ m 截面速度矢量图和迹线图(b)
Fig. 3 Pathlines of original tundish (a) and vectors and pathlines of original tundish at $Y = -1$ m section (b)

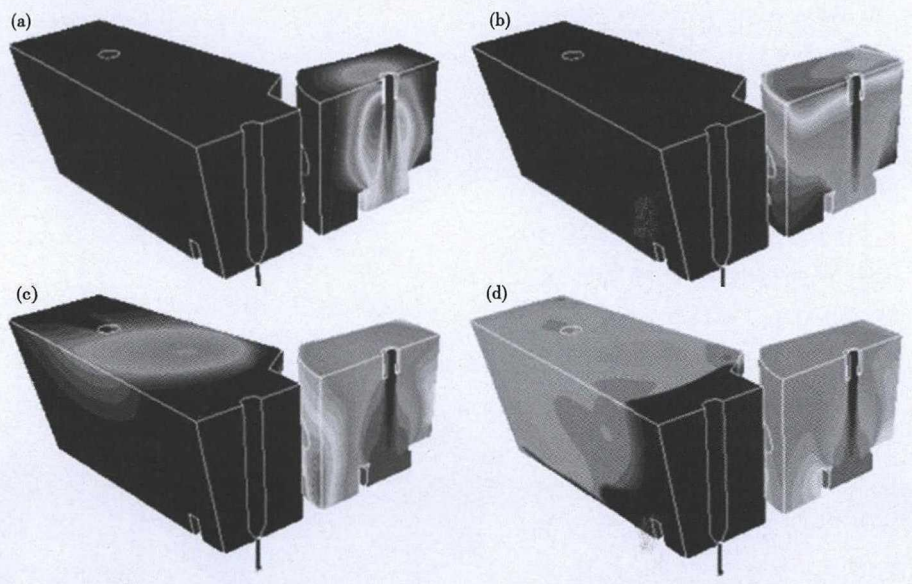


图 4 示踪剂加入后 10 s(a), 20 s(b), 40 s(c) 和 80 s(d) 时浓度分布
Fig. 4 Tracer concentration distribution after tracer added for 10 s (a), 20 s (b), 40 s (c) and 80 s (d)

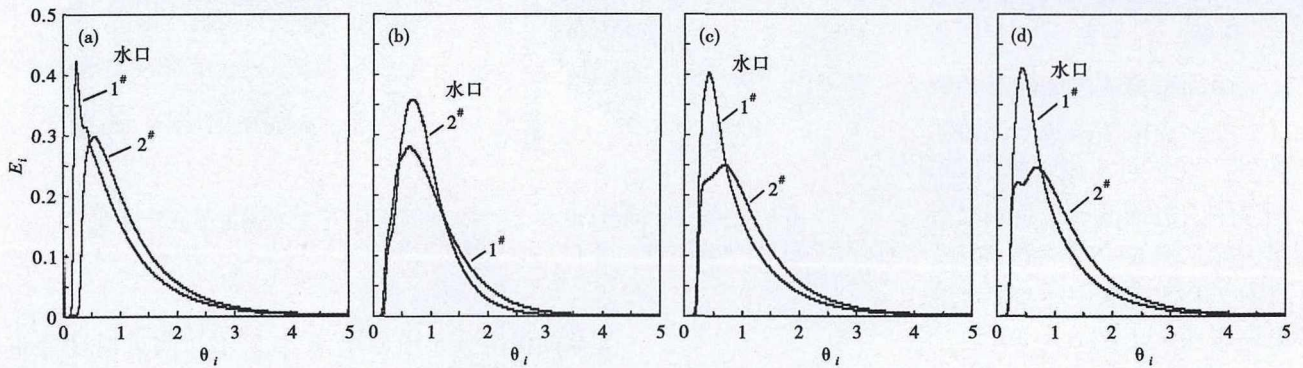


图 5 原方案(a), 方案 1(b), 方案 2(c) 和方案 3(d) 的停留时间分布 (RTD) 曲线
Fig. 5 Residence time distribution (RTD) curves of original scheme(a), scheme No1(b), scheme No2(c) and scheme No3(d)

与原方案相比,两流 RTD 曲线重合度大幅度提高,峰值时间基本一致。从表 2 中各流场指标结果来看,方案 1 相对于原方案,其各流响应时间和峰值时间大幅度增加;死区体积降低了 34.8% (从 10.00% 降为 6.52%);各流一致性大幅度提高 (判别指标从 0.0146 降低为 0.0084);活塞区体积大幅度增加 (从 45.91% 增加至 66.34%),夹杂物的去除能力得到增强。

但由于现场中间包烘烤时浇注区只有 2 个烘烤点,且分别分布在 1[#]、2[#]塞棒中间以及 2[#]、3[#]塞棒中间。如果现场按照方案 1 设计挡墙结构,挡墙将浇注区分隔成 5 个区域,这样中间包烘烤时 2 个烘烤点的热量不能有效的传递到塞棒所在区域,则中间包整体烘烤效果会受到较大影响;且受到挡墙的阻隔,中间包浇注区覆盖剂不能相互流通,不利于进行添加覆盖剂操作。在不考虑改造烘烤装置的情况下提出方案 2 和方案 3。从响应时间、死区体积、活塞流体积来看,方案 2 流场优化效果相对于方案 1 均有所降低,但它相对于原方案仍有较好的改善效果。方案 2 流场各指标与方案 1 相比相差不大。

3 中间包温度场的结果与分析

中间包钢液温度的不均匀性会加剧连铸结晶器中连铸坯壳生长厚度的不稳定性,也不利于中间包钢液中夹杂物的上浮去除。图 6~8 分别为原型、方案 2 和方案 3 中间包温度等值分布图。由图 6 可知,由于第 2 流浇注区存在死区,钢液更新速度慢,2[#]水口上方存在低温区,中间包整体温降达 36 K;由 $Y = -1$ m

表 2 不同方案 RTD 曲线计算及分析结果

Table 2 Calculation and analysis results of RTD curves of different schemes

方案	流数	Tr_i/s	Tp_i/s	Ta_i/s	$Vd_i/\%$	Ta/s	$Vd/\%$	$Vm/\%$	$Vp/\%$	Sn
原型	1 [#]	21	207	926	2.98	997.5	10.00	44.09	45.91	0.0146
	2 [#]	11	534	1 140	4.04					
1 [#]	1 [#]	31	584	976	2.68	942.3	6.52	27.13	66.34	0.0084
	2 [#]	25	595	875	1.17					
2 [#]	1 [#]	43	386	913	2.69	977.5	9.32	40.22	50.45	0.0125
	2 [#]	60	664	1 108	3.95					
3 [#]	1 [#]	50	386	906	2.59	973.7	9.22	39.45	51.33	0.0127
	2 [#]	62	650	1109	4.04					

注: Tr_i - 响应时间, Tp_i - 峰值时间, Ta_i - 每流平均停留时间, Ta - 中间包总体平均停留时间, Vd_i - 死区体积比, Vm - 全混流体积比, Vp - 活塞区体积比, Sn - 各流示踪剂浓度总体平均标准差。

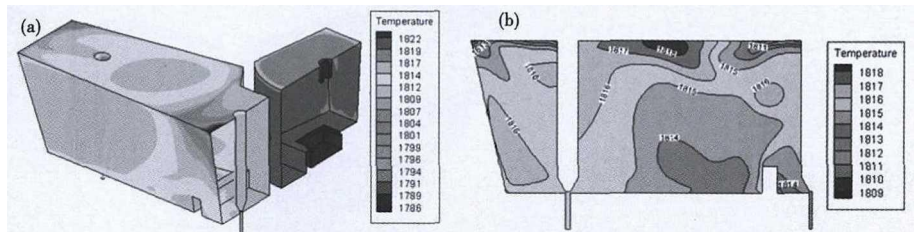


图 6 原型中间包(a)和 $Y = -1$ m 等截面(b)钢水温度等值分布图
Fig. 6 Liquid temperature contour maps of original tundish (a) and $Y = -1$ m equal section (b)

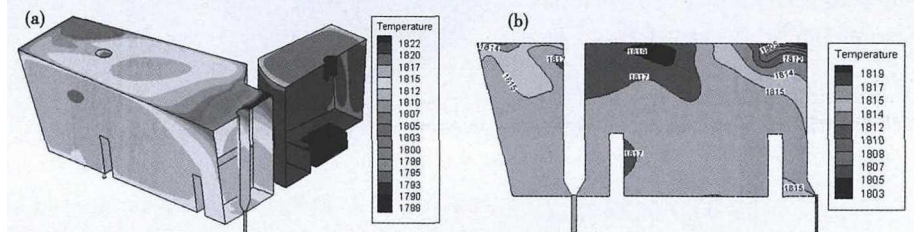


图 7 方案 2 中间包(a)和 $Y = -1$ m 等截面(b)钢水温度等值分布图
Fig. 7 Liquid temperature contour maps of No. 2 scheme tundish (a) and $Y = -1$ m equal section (b)

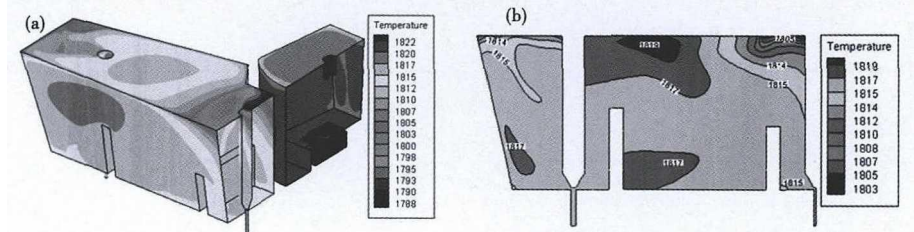


图 8 方案 3 中间包(a)和 $Y = -1$ m 等截面(b)钢水温度等值分布图
Fig. 8 Liquid temperature contour maps of No. 3 scheme tundish (a) and $Y = -1$ m equal section (b)

等截面温度分布图可知,1[#]和 2[#]水口附近温度分布差异大,温降梯度明显,第 1 流钢液温度整体比第 2 流高约 2 K。由图 7 可知,使用方案 2 后,中间包整

表3 现场试验工艺参数
Table 3 Process parameters of test at situ

项目	参数
钢种	304
中间包容量/t	16
铸坯规格/(mm × mm)	220 × 220
铸机类型	3机3流,弧型
拉速/(m · min ⁻¹)	1.0
连浇炉次/炉	6

表4 不同方案夹杂物(粒径大于10 μm)平均数量/(个 · cm⁻²)

Table 4 Inclusion (size > 10 μm) average amounts of different schemes / (amount · cm⁻²)

类型	中间包	第1流铸坯	第2流铸坯	流间差异
原方案	8.14	6.52	9.65	3.13
方案2	8.06	5.90	7.38	1.48
方案3	8.01	6.02	7.74	1.72

体温降与原方案相差不大,但与原方案不同的是,方案2中的1[#]水口和2[#]水口附近温度更为接近,温度差异较小。方案3温度场与方案2基本一致。

4 应用效果

在不考虑改造中间包包盖和烘烤装置的情况下,按照方案2和方案3分别进行现场试验,相关连铸参数如表3所示。在原方案、方案2和方案3的中间包和铸坯上进行取样,取样钢种为304。中间包取样为在一个浇次的第2炉和第4炉中间包液面稳定时,分别取桶样1个,连铸坯取样为在中间包取样结束10 min后分别取第1流和第2流铸坯各1块。对所取试样通过金相显微镜观察20 mm × 20 mm视场内粒径大于10 μm夹杂物数量,然后统计单位面积内夹杂物的平均数量,统计结果如表4所示。

由表4可知,中间包改进后,第1、2流铸坯夹杂物数量大幅度降低,方案2第1、2流夹杂物数量分别降低了9.51%、23.52%,方案3第1、2流夹杂物数量分别降低了7.67%、19.79%;两流间夹杂物数量差异明显缩小,方案2、方案3两流间夹杂物数量差异分别降低了52.72%、45.05%。方案2略优于方案3。改进后中间包夹杂物上浮去除能力增强,

两流一致性大幅度提高。

5 结论

(1)原型中间包第1流钢流分配过于充足,第2流浇注区存在死区和短路流,不利于夹杂物去除,两流一致性较差。

(2)从数值模拟结果看,方案1通过在浇注区设立挡墙形成“钢流缓冲区”,钢流重新分配,流场一致性得到了大幅度改善;方案2和方案3在方案1的基础上降低了挡墙的高度,兼顾了“现场中间包烘烤点数量和布局的限制”,同时也能较好的改善流场。

(3)将方案2和方案3应用于现场,发现方案2略优于方案3。方案2第1、2流夹杂物分别降低了9.51%、23.52%;两流间夹杂物数量差异降低了52.72%。改进后中间包夹杂物上浮去除能力增强,两流一致性大幅度提高。

参考文献

- [1] 刘纲,李士琦,李京社,等.基于中间包冶金工艺优化对钢液温度场的研究[J].连铸,2016,41(6):47.
- [2] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2014:7-10.
- [3] 张华,罗荣华,倪红卫,等.五流大方坯中间包流场优化[J].武汉科技大学学报,2010,33(5):486-487.
- [4] 于清显.两流板坯连铸中间包的结构优化研究[D].沈阳:东北大学,2011.
- [5] 郑淑国,朱苗勇.多流中间包内钢液流动特性的分析模型[J].金属学报,2005,41(10):1073-1076.
- [6] 潘宏伟,程树森.多流中间包流动特征的数学模型[J].北京科技大学学报,2009,31(7):815-820.
- [7] 雷洪,赵岩,鲍家琳,等.多流中间包停留时间分布曲线总体分析方法[J].金属学报,2010,46(9):1109-1114.
- [8] 郑淑国,朱苗勇.多流中间包各流流动特性一致性的判别[J].过程工程学报,2006,6(4):522-525.

陈洋(1986-),男,硕士(2011年东北大学),工程师,2009年武汉大学(本科)毕业,连铸工艺技术和铸坯质量的研究。E-mail:chenyang@tisco.com.cn

收稿日期:2018-09-04