

中间包挡墙的数值模拟与优化

薄风华 崔京玉 唐国志 陈京生 王坚 邵俊宁

(首钢钢铁公司)

摘要:为了改善首钢三炼钢 2 号铸机铸坯夹杂物水平,对中间包挡墙结构进行了优化,并对中包内钢水流动进行了三维数值模拟,分析了钢水流动对去除夹杂物的影响。模拟及生产实绩表明:高挡墙方案均具有改善中包冶金效果,V 形高挡墙方案安装使用过程结构稳定性更好,采用带导流孔的全挡墙钢水流动分布更加合理,有利于夹杂物的去除。

关键词:中间包 挡墙 数值模拟 夹杂物

Optimization and Numerical Simulation on the Wall Design for Tundish

BO Fenghua CUI Jingyu TANG Guozhi CHEN Jingsheng WANG Jian SHAO Junning

(SHOUGANG Iron and Steel Company)

Abstract: With the purpose to bring down the inclusions rating of the steel billets through effective tundish wall design, 3-D numerical simulations have been carried out on the flow dynamic processes in the tundish of 4-stream CC in Shougang 3rd steel plant. Conclusions of simulation and achievement are following: all the high wall can improve the ability of reducing inclusions, V shape wall is more dependable, it has been shown that a full wall with orifices can create a better fluid flow pattern which benefits the removal of inclusions.

Keywords: tundish wall numerical simulation inclusions

1 引言

首钢三炼钢 2 号铸机精品棒材生产的铸坯存在大型夹杂物超标问题,其中:小方坯铸机铸坯夹杂物水平多为 0.5-1.5 级。其工艺流程为:转炉—LF 炉外精炼、底吹氩—4 流 T 型 18 吨中包— DANIELI 四流全自动小方坯/矩形坯连铸,生产各种优质钢、特殊钢。中包容量为 18t,液面高度 700 mm。本文旨在通过中包挡墙结构的优化,利用 CFD 软件平台,模拟不同挡墙结构下中包内流场的分布,得出最优方案,应用于生产中,以改善中包控流结构,降低铸坯夹杂物水平。

2 研究方法 with 优化方案

传统的研究方法只能依靠经验和实验完成设计和研究目的,涉及的环节多,产品开发周期长,费用昂贵,在遇到技术难题时不易找到原因,造成时间和资金的浪费。国内外在中间包应用上有许多研究和改进^[1-3],很多都采用数值模拟的方法。本文利用 CFD 仿真平台 Fluent 构建中包数学模型,通过网格划分等各种离散化方法将控制流动的流体力学基本方程离散化,建立表现为大型代数方程组的各种数值模型,以密集计算的手段来仿真实际的流动现象,得到定量描述流场性质的数值解,实现流体行为的预测。利用 CFD 软件准确给出中包内流体流动的细节,如全流场速度、压力分布,很容易从对流场的分析中发现设计和研究中存在的问题,大大减少了研究过程的中间环节,显著缩短研究及设计周期,降低开发费用;最后根据模拟的优化方案指导生产。

中间包主体框架结构不变,在原有基础上提出了两种优化方案如图 1—3。

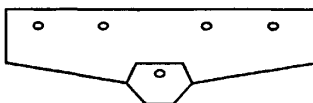


图 1 原方案中包结构示意图

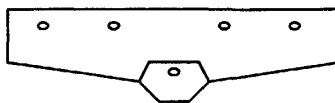


图 2 中间包梯形加高挡墙

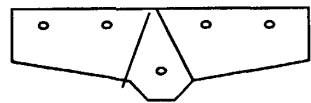


图 3 中间包 V 形挡墙

3 数值模拟与分析

3.1 边界条件

连铸中包中钢水的流动可简化为初始温度均匀, 并考虑墙面和自由表面为绝热(或稳态传热)的不可压缩湍流流动, 不考虑表面覆盖剂对流动的影响, 可以把液面设置为自由表面; 湍流模型一般可选用 $x-\epsilon$ 双方程模型, 则钢水在中包中的流体动力学数学模型包括^[1]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{U}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{U}_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

其中, 常数 C_1 、 C_2 、 C_μ 、 σ_k 按 Launder 和 Spalding 所推荐的数据^[8], 计算中取值如下,

$$C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0$$

靠近壁面的流动区域粘性效应应占优势, 可通过标准壁面函数加以考虑, 标准壁面函数如下:

$$U^+ = \frac{1}{K} \ln(Ey^+ + (1 + \psi_0))$$

$$U^+ = \frac{U_p C_\mu^{1/4} K_p^{1/2}}{\tau_w / \rho}$$

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} K_p^{1/2} y_p}{\mu}$$

3.2 原中间包包内流场

原中间包采用低坝低挡墙结构, 通过构建中包模型并采用定常计算迭代 300 步后, 计算结果稳定, 得到包内流场的分布, 如图 4-7。



图 4 原中间包结构模型 (1/2)

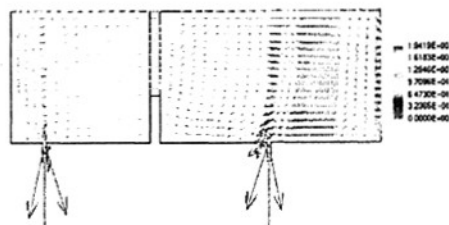


图 5 原中间包 x-z 截面出口速度矢量图

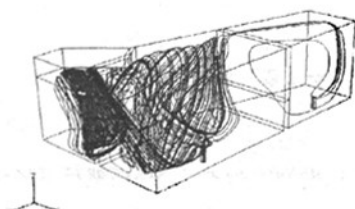


图 6 原中间包包内流线图

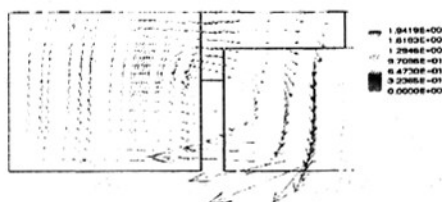


图 7 原中间包 x-z 截面挡墙导流孔速度矢量图

图 5-7 为原中包内流迹线图及不同截面速度矢量图, 可以看出正常浇注过程中, 中包钢水流动基本上都可分为三个典型区域:

1) 入口强湍流区。钢液流入中间包后直冲包底, 在包底散开, 沿壁面及挡墙上升, 形成强烈的循环流动, 这一区域钢液湍流程度较大, 有利于钢液的均匀混合, 但也将造成液面的不稳定, 增加钢水卷渣或表面暴露的机会。

2) 中包包身本体钢水的层流稳定流动区。此阶段钢水的流动路径、停留时间、速度场将决定中包去除夹杂物等的冶金效果。

3) 钢水出口的汇流区。钢水在此区域紊乱度不大, 但流速很快; 若没有合适的坝, 容易形成底部沟流, 对大型夹杂上浮不利。

对于原方案, 由于中间包挡墙低于液面, 在此区域产生的强湍流波及液面区域大, 对出口上方液面稳定性不利, 可能引发卷渣以及夹杂物到表面后重新卷回到钢水里。而且, 由于钢水大部分都从挡墙上方经过, 虽然挡墙下部有一个导流孔, 但下部导流孔太低, 造成钢水在距导流孔较近的出口有底部沟流, 接近为短路流, 不利夹杂上浮去除。可见, 低挡墙和底导流孔对改善中包钢水流动、提高去除夹杂效果不利。

3.3 梯形高挡墙方案

8—10 采用高挡墙后, 限制了进口钢水强湍流的波及面。此外, 钢水只能从导流孔进入出口区。上排钢水流经液面, 盘旋而下再到达出口。下排钢水向上扬起, 避免了出口附近的底部沟流。由于有向上流动的趋势、延长了流动路径, 有利于夹杂物的去除。但流经下排导流孔的钢水流线有向下趋势、到达距导流孔较近的出口路径相对还较短, 不利于夹杂物有足够的条件去除; 下排导流孔使用 10 度上倾角后, 情况有所改善。经过坝的钢水有上升流, 到达窄墙后顺流而下, 进入距导流孔较远的出口。靠近液面或墙面的层流有利于夹杂物被墙面捕捉或被液面渣层吸收。

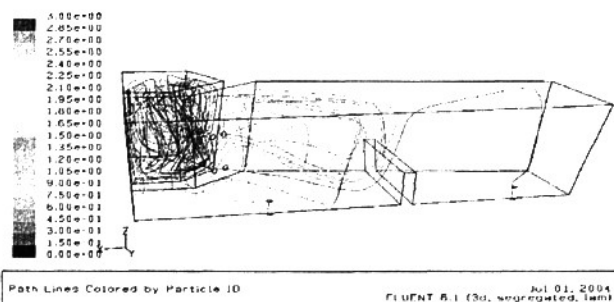


图 8 梯形高挡墙流线图

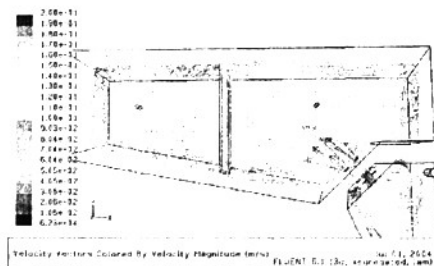


图 9 梯形高挡墙 x-y 截面速度矢量图

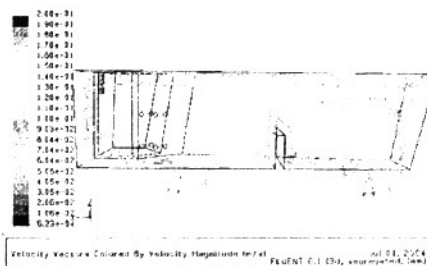


图 10 梯形高挡墙 x-z 截面速度矢量图

3.4 V 形高挡墙方案

采用高挡墙后, 钢水只能从导流孔进入出口区。不同的是上排钢水以抛物线形式流经液面然后下降到出口。下排导流孔向上的倾角, 使钢水有向上流动的趋势, 但仍有部分钢水下行到达距导流孔较近的出口, 路径相对较短。大部分钢水经过坝后顺流而下, 进入距导流孔较远的出口。



图 11 V 形高挡墙方案倒流孔网格模型

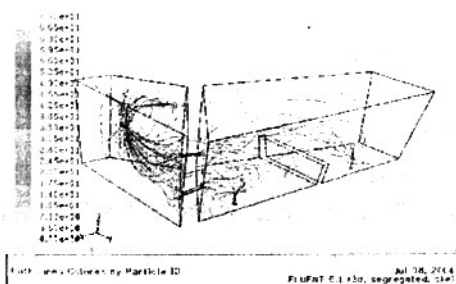


图 12 V 形高挡墙流线图

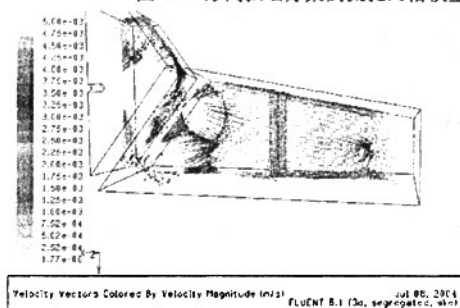


图 13 V 形高挡墙 x-y 下截面速度矢量

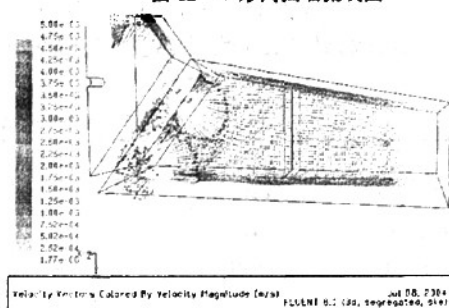


图 14 V 形高挡墙 x-z 上截面速度矢量图

通过对以上三种不同中间包挡墙工艺数值模拟的比较可以看出，V 形高挡墙的效果是最优的。

4 挡墙安装使用效果

通过对中包不同挡墙的数值模拟，确定采用 V 型挡墙进行试验。实验的中间包挡墙两侧各有四个导流孔。上排导流孔距中间包底部 350mm，正好是液面高度 700mm 的一半；下排导流孔距中间包底部 200mm。导流孔直径 40mm。依据有关钢种原工艺下大型夹杂物分析取样、鉴定方法，进行挡墙改进后的分析。

2 号转炉使用原低挡墙中间包时夹杂物水平多为 0.5 级—1 级，甚至达到 1.5 级。改用四孔高挡墙后，以 20CrMo 钢为例，测得的低倍检测结果，非金属夹杂有所下降，均在 0.5 级，如表 1。

表 1 四孔高挡墙中包 20CrMo 钢低倍结果

样号	中心偏析	中心疏松	缩孔	角部裂纹	非金属夹杂
1	0	1.5	1.5	0	0.5
2	0	1.5	0.5	0.5	0.5
3	0	1.5	1.0	0	0.5
4	0	1.5	1.0	0	0.5
5	0	1.5	0.5	1	0.5
6	0	1.5	1.0	1	0.5
7	0	1.5	0.5	2	0.5
8	0	1.0	4.0	0	0.5

表 2 大样电解后大型夹杂物数量

试样名称	规格	样号	大型夹杂 (mg/10kg)
20CrMo	160×245	1	18.77
20CrMo	160×245	2	4.81
20CrMo	160×245	3	2.64
20CrMo	160×245	4	8.64

对铸坯取进行大样电解分析（如表 2），夹杂物数量一般在 8.6mg/10kg 以下，并且中流坯夹杂物数量比边流的少，连铸中期夹杂物数量比两炉连接处的少。

在浇注过程中，中间包钢水夹杂物的主要来源有：二次氧化产物，主要有钢液裸露在大气中引起的二次氧化和中间包内钢液暴露在大气中的二次氧化；炼钢氧化渣带入中间包，也可与钢液作用，成为二次氧化的氧的来源；卷渣包括旋涡卷渣和钢液冲击卷渣；耐火材料损毁，在高温下中间包包衬及各种水口材料被钢液和渣损毁而进入钢液中，残留下来成为夹杂物存在或成为二次氧化的氧源；被浸蚀中间包绝热板被冲刷浸蚀，而蚀掉的绝热板没有充分上浮，随流股进入结晶器，捞渣不及时，造成铸坯夹杂等。生产中出现的铸坯夹杂一方面有钢脱氧产物及浇铸时二次氧化形成的内生夹杂，同时也有中间包被浸蚀后形成的外来夹杂物。对 20CrMo 铸坯夹杂物采样进行了化学成分分析。

表 3 铸坯中夹杂化学成分（%）

	夹杂总量	Al ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	MnO
边流中期	0.0027	0.0016	0.001	<0.0001	<0.0001
边流中间坯	0.0026	0.0018	0.0005	<0.0001	<0.0001
中流中期	0.0028	0.0020	0.0006	<0.0001	<0.0001
中流中间坯	0.0026	0.0017	0.0006	<0.0001	<0.0001

表 4 高挡墙中间包 20CrMo 气样分析结果

	样号	[O]%	[N]%	[H]
边流中期	1	0.0024	0.0044	0.38
边流中间坯	2	0.0024	0.0044	0.42
中流中期	3	0.0021	0.0045	0.42
中流中间坯	4	0.0025	0.0042	0.39
边流中期	5	0.0024	0.0043	0.45
边流中间坯	6	0.0023	0.0043	0.36
中流中期	7	0.0026	0.0046	0.38
中流中间坯	8	0.0032	0.0048	0.39

从表 3 中看出，主要夹杂物为 Al₂O₃，表明钢水二次氧化的程度非常低。Al₂O₃ 含量为 65% 左右，表明连铸浇注过程中可能有 Al 质耐火材料污染或钢水使用 Al 脱氧时有产物残留在钢水中。

表 4 数据表明，T[O]基本上在 20~26ppm 之间波动，相差不大。钢液洁净度可以从两个方面来评价：夹杂物低倍评级反映的是大型夹杂的分布情况；而 T[O]大小则反映钢水的综合洁净度。使用高挡墙中间包铸坯夹杂物评级降低到 0.5 级，T[O]也在 30ppm 以下，因此铸坯的的洁净度是较好的。

5 结论

（1）高挡墙方案均可改善中包冶金效果，流体动力学特征无明显差异；其中下排导流孔 10° 向上倾角有利于钢水上扬流动，增加流动路径，且对液面不会造成扰动，将更加有利夹杂上浮去除。

（2）导流孔的设计已考虑了正常浇注工况下的足够通钢流量以及避免对墙面或塞棒等耐火材料的直接冲刷，V 形高挡墙方案安装使用过程结构稳定性更好，应优先考虑。

（3）采用带导流孔的全挡墙钢水流场分布更加合理，有利于夹杂物的去除，确保中间包的冶金效果。

参 考 文 献

- [1] 赵连钢, 刘坤.鞍钢板坯连铸机中间包挡墙设置优化与改进.炼钢, 2003, 19(2)
- [2] 刘中兴, 贺友多.五流连铸机中间包结构研究.包头钢铁学院学报, 1999, 18(2)
- [3] Chakraborty S, Sahai Y. Mathematical modeling of transport phenomena in continuous casting tundish(J), Ironmaking and Steelmaking, 1992, 19:487
- [4] 刘中兴, 贺友多.板坯连铸机中间包流场研究.化工冶金, 1993, 14(2):102
- [5] 陶文铨.数值传热学.西安: 西安交通大学出版社, 1989