

· 试验研究 ·

## 板坯连铸 38 t 扩容中间包控流装置优化的数值模拟和应用

张利君 刘金刚 宁林新 解家英  
(首钢技术研究院冶金过程研究所, 北京 100043)

**摘要** 通过数值模拟,对钢厂 250 mm × 2 000 mm 板坯连铸原 29 t 扩容至 38 t 中间包进行控流装置优化。研究了挡墙、挡坝的个数和位置对中间包内钢液流场及停留时间分布 (RTD) 曲线的影响,综合考虑了中间包冶金效果及生产成本,为现场提出了稳流器 + 挡墙 + 挡坝控流装置的最优设计方案,该方案使中间包活塞区比例达到 77.1%,死区比例降至 4.2%。现场采用该结构后非稳态浇铸期间生产的管线钢非金属夹杂物合格率由 88% 提高到 95%,明显提高了中间包的冶金功能。

**关键词** 250 mm × 2 000 mm 板坯 38 t 中间包 RTD 曲线 数值模拟 控流装置 管线钢

## Numerical Simulation and Application on Optimization of Flow Control Device in 38 t Expansion Tundish for Casting Slab

Zhang Lijun, Liu Jingang, Ning Linxin and Xie Jiaying  
(Metallurgy Process Research Department, Shougang Technology Institute, Beijing 100043)

**Abstract** The optimization of flow control device in 38 t expansion tundish from original 29 t for casting 250 mm × 2 000 mm slab at steelworks has been carried out by numerical simulation. The effect of number and position of dam and weir on flow field and residual time distribution (RTD) curves of liquid in tundish has been studied. With comprehensive consideration of tundish metallurgical effect and production cost, the optimum design for control flow devices- current regulator + dam + weir is proposed. With the optimum structure the volume fraction of plug flow region in tundish is up to 77.1%, the volume fraction of dead region decreases to 4.2%. With using this structure in situ the qualified ratio of non-metallic inclusions in pipeline steel produced in non-stable casting condition increases to 95% from original 88%, obviously to increase the metallurgical function of tundish.

**Material Index** 250 mm × 2 000 mm Slab, 38 t Tundish, RTD Curves, Numerical Simulation, Control Device, Pipeline Steel

通过改变中间包形状,如扩大中间包容积,在中间包内合理安置挡墙和坝可以有效改善钢液的流场,促进非金属夹杂物上浮<sup>[1-4]</sup>。为提高夹杂物去除率,稳定生产,提高连铸坯质量,钢厂将现用单流板坯中间包进行扩容。本文利用流体软件 FLUENT 对扩容后中间包进行不同的控流装置组合下钢液流场及 RTD (Residual Time Distribution) 曲线计算,优化得出扩容后中间包最佳的控流装置组合及其位置,采用优化方案的扩容中间包非稳态浇铸期间生产的管线钢非金属夹杂物合格率由 88% 提高至 95%。

### 1 数学模型的建立

#### 1.1 研究对象

钢厂为稳定生产、提高夹杂物合格率,将原来 29 t 的单流板坯中间包扩容为 38 t 中间包,扩容前中间包采用的控流装置为稳流器 + 挡坝,物理模型见图 1(a),扩容后中间包物理模型见图 1(b)所示,单位为 mm。其中扩容后工作液位为 950 mm,钢包长水口与浸入式水口中心线之间距离为 3 000 mm,

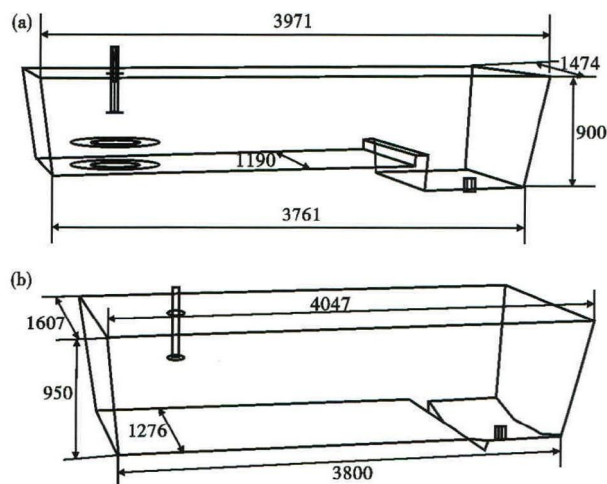


图 1 连铸中间包扩容前(a)和扩容后(b)的结构示意图  
Fig.1 Schematics of structure of casting tundish before (a) and after (b) expansion

钢包容量为 100 t。

#### 1.2 控制方程

假设中间包内钢液的流动为三维稳态、等温、不

可压缩的流动,忽略表面渣层的影响。描述流体在中间包内流动的方程有连续性方程、动量方程(Navier-Stokes 方程)、以及描述湍流的  $k-\varepsilon$  方程组成,方程形式和参数选择参考文献[5]所示。采用 FLUENT 软件中组分传输模型进行钢液停留时间分布(RTD)曲线的计算,所采用的中间包流动特征数学模型见文献[6-7]。

### 1.3 边界条件

(1) 由于单流板坯中间包的对称性,计算时取其一半进行分析。中间包入口速度根据连铸机的拉速和铸坯断面来确定。连铸机设计铸坯  $250\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$ ,拉坯速度  $0.88\text{ m/min}$ ,长水口的内径  $70\text{ mm}$ ,计算得出中间包入口速度为  $1.91\text{ m/s}$ 。

(2) 出口给定压力边界条件,相对静压为  $0$  (参考压力为  $101.325\text{ kPa}$ )。

(3) 中间包固体壁面采用无滑移边界条件。

(4) 中间包内钢液的速度初场设为  $0$ 。

## 2 控流装置设计方案

为得到扩容后中间包的控流装置设计方案见表 1 所示。

## 3 计算结果分析及讨论

### 3.1 稳流器和一个挡坝方案的模拟结果

由图 2 可看出,控流装置采用稳流器和一个挡坝时,钢液从钢包注入中间包后,直接到达稳流器底部,然后以较大的速度向上翻出至自由液面。到达自由液面后,钢液沿着自由液面向四周形成水平流动,直至到达中间包侧壁后沿着侧壁向下流动,在水口两侧形成了循环区域。这种循环区对活跃入口处钢液的流动有着重要的作用,在该区域内钢液的温度和成分充分混匀,夹杂物在这一区域能得到充分的聚合长大。由于该控流方式没有挡墙,因此入口的这种循环流动方式一直延续至出口,活塞流趋势很明显。

表 1 控流装置设计方案

Table 1 Design scheme for control device

方案	控流装置	挡墙/mm		挡坝 1/mm		挡坝 2/mm	
		中心距入口 中心距离	插入 深度	中心距入口 中心距离	高度	中心距入口 中心距离	高度
1	稳流器 + 1 个挡坝			2 150	250		
2	稳流器 +	1 450	600	2 150	250		
3	1 个挡墙 +	1 650	600	2 150	250		
4	1 个挡坝	1 850	600	2 150	250		
5	稳流器 +	1 450	600	2 150	250	865	400
6	1 个挡墙 +	1 650	600	2 150	250	865	400
7	2 个挡坝	850	600	2 150	250	1 450	400

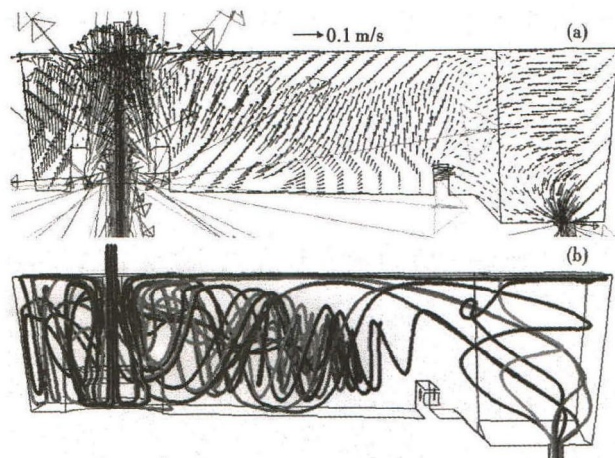


图 2 稳流器 + 1 个挡坝的中间包纵截面流场(a)和流线(b)分布

Fig. 2 Distribution of flow field (a) and streamline (b) at longitudinal section of tundish with current regulator + one weir

### 3.2 稳流器和一个挡坝及一个挡墙方案的模拟结果

由图 3 和图 4 可以看出,上挡墙对中间包内钢液的流动形态及速度场分布影响很明显,上挡墙的加入打乱了左侧的活塞循环流动,钢液经过上挡墙下方后,一部分钢液以一定角度向自由液面流动,这种流动有利于夹杂物被保护渣层吸收;另一部分钢液沿着包底通过挡坝上的开孔向出口流动。流向自由液面的钢液又分为两股流体,一股向挡墙方向形成了回流,这部分钢液整体速度偏小;另一股钢液沿着自由液面向出口流动。

### 3.3 稳流器和两个挡坝及一个挡墙方案的模拟结果

由图 5、图 6 可看出,当上挡墙位于两个挡坝之间时,钢液首先通过高挡坝,高挡坝与挡墙之间钢液仍以对称面向上运动,中间包侧壁钢液向下流动的循环方式流动。遇到挡墙后,钢液从挡墙下方通过,一部分以一定角度向自由液面流动,这种流动有利于夹杂物被保护渣层吸收;另一部分沿着包底通过挡坝上的开孔向出口流动。挡墙与小挡坝之间的距离影响挡墙和挡坝之间钢液的流速分布。

从图 5 看出,方案 6 钢液的整体流动速度分布比较均匀,而方案 5 挡墙与小挡坝之间的返混流明显,不利于夹杂物去除。当上挡墙位于两个挡坝一侧时,钢液以较大流速通过挡墙下方后向自由液面流动,回流至挡墙的钢液速度较小。在两个挡坝之间钢液形成了返混流动,且速度分布很不均匀。

### 3.4 各方案 RTD 曲线分析

计算得出出口示踪剂浓度达到最

大值的时间  $\theta_{max}$ , 平均停留时间  $\bar{t}$ , 返混区  $\nu_m$ , 活塞区  $\nu_p$ , 死区  $\nu_d$ , 见表2所示。

从表2看出, 不使用上挡墙, 仅使用湍流器和出口挡坝进行控流的方案1的控流效果就很好, 其活

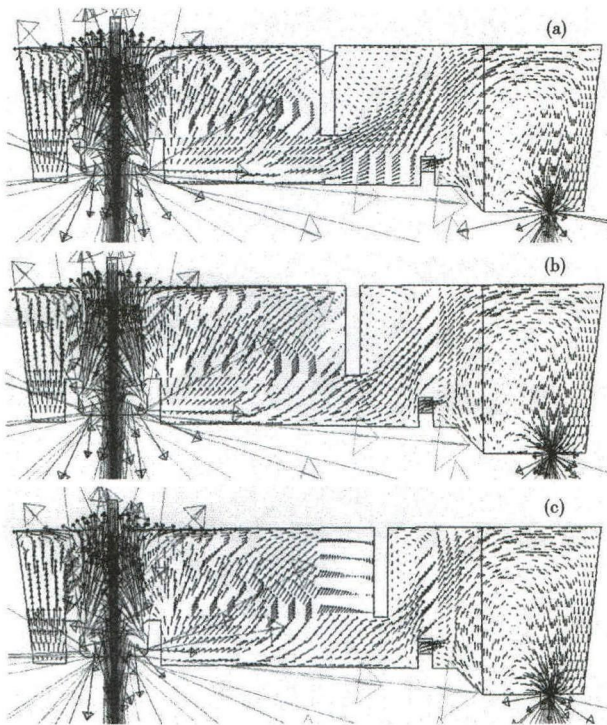


图3 稳流器+1个挡墙+1个挡坝中间包纵截面流场分布, 方案2(a), 3(b)和4(c)

Fig. 3 Distribution of flow field at longitudinal section of tundish with current regulator + one dam + one weir, scheme No2 (a), No3 (b) and No4 (c)

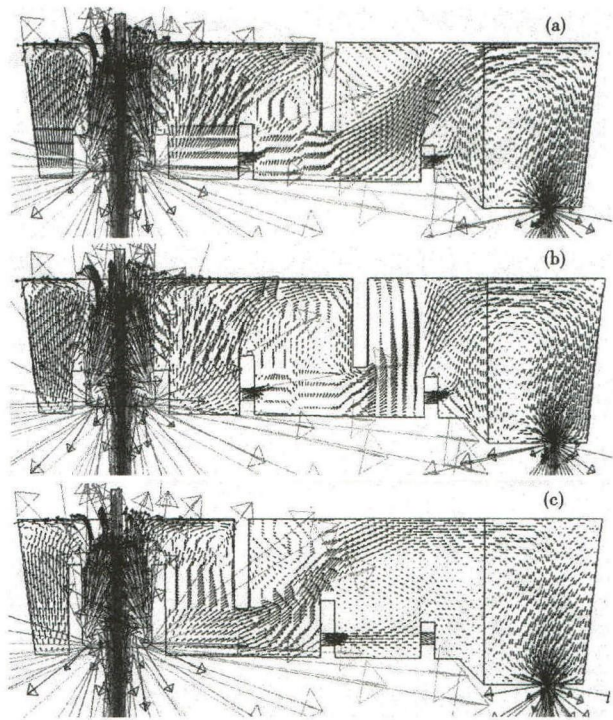


图5 稳流器+1个挡墙+2个挡坝的中间包纵截面流场分布, 方案5(a), 6(b)和7(c)

Fig. 5 Distribution of flow field at longitudinal section of tundish with current regulator + one dam + two weir, scheme No5 (a), No6 (b) and No7 (c)

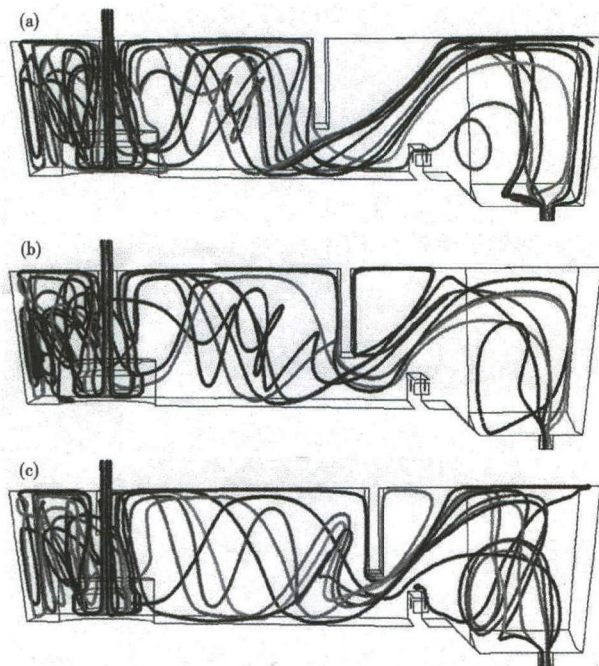


图4 稳流器+1个挡墙+1个挡坝的中间包纵截面流线分布, 方案2(a), 3(b)和4(c)

Fig. 4 Distribution of streamline at longitudinal section of tundish with regulator + one dam + one weir, scheme No2 (a), No3 (b) and No4 (c)

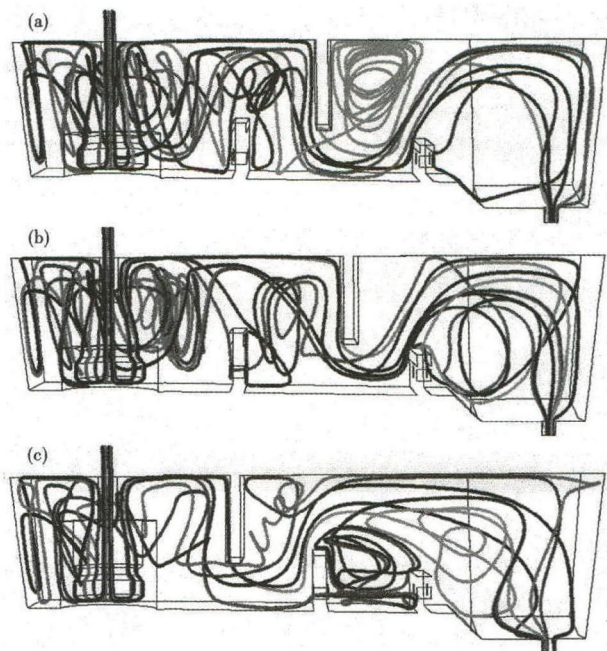


图6 稳流器+1个挡墙+2个挡坝的中间包纵截面流线分布, 方案5(a), 6(b)和7(c)

Fig. 6 Distribution of streamline at longitudinal section of tundish with current regulator + one dam + two weir, scheme No5 (a), No6 (b) and No7 (c)

塞区比例达到 78.2%，死区体积为 3.8%。但考虑到上挡墙能起到控制液面波动及分隔钢包下渣和中间包覆盖剂的作用，仍建议在控流装置中加入挡墙。通过比较方案 2,3,4 的 RTD 计算结果，得出方案 3 和方案 4 的控流效果都较好，但方案 4 中挡墙和挡坝的距离较近为 300 mm，容易导致通过挡墙下方的钢液向自由液面流动速度较大，对自由液面扰动明显。因此建议现场采用方案 3 的控流优化方案。采

表 2 各方案数值计算 RTD 曲线的分析结果

Table 2 Analysis results of residual time distribution curves of numerical computation with each scheme

方案	$t_{\min}/$ s	$t_{\text{peak}}/$ s	$\bar{t}/$ s	$\nu_p/$ %	$\nu_d/$ %	$\nu_m/$ %
1	148	547	739	78.2	3.8	18.0
2	194	427	726	74.6	4.9	20.5
3	184	447	727	77.1	4.2	18.7
4	164	502	727	78.8	3.7	17.5
5	168	388	715	73.1	5.2	21.7
6	165	395	714	76.1	4.4	19.5
7	216	375	707	68.3	6.0	25.7

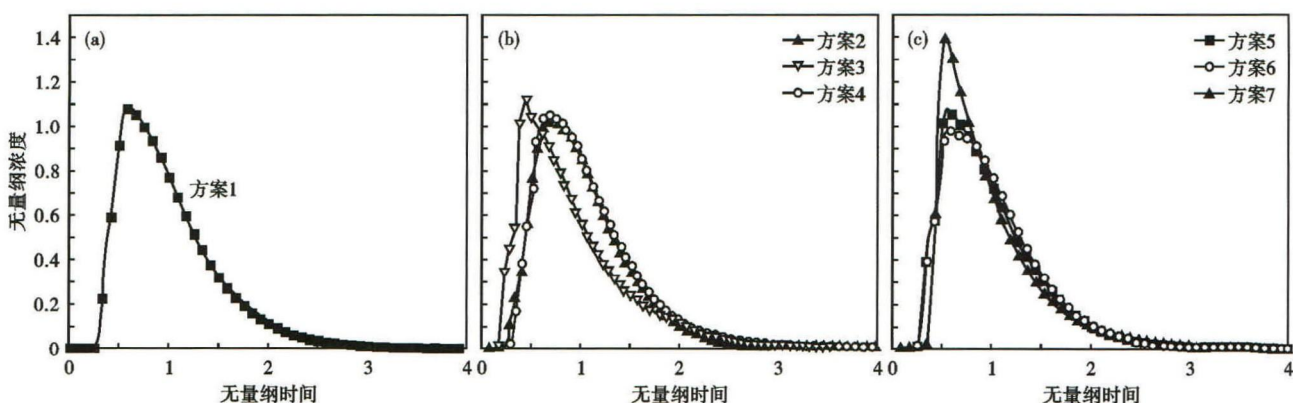


图 7 中间包钢水停留时间分布 (RTD) 曲线, (a) 稳流器 + 挡坝; (b) 稳流器 + 挡墙 + 挡坝; (c) 稳流器 + 挡墙 + 2 个挡坝  
Fig.7 Residual time distribution curves of liquid in tundish with current regulator + one weir (a), current regulator + one dam + one weir (b) and current regulator + one dam + two weir (c)

用一个挡墙和两个挡坝的控流方案中，挡墙位于两个挡坝之间的效果较好，但考虑到耐火材料成本的问题，最终现场还是采用了方案 3。对扩容中间包采用设计方案 3 的控流装置后，非稳态浇铸期间生产的管线钢非金属夹杂物从扩容前的 88% 提高到 95%，中间包冶金效果明显提高。

#### 4 结论

(1) 对扩容后中间包采用稳流器和挡坝的控流装置时，得出中间包活塞区为 78.2%，死区比例为 3.8%，中间包冶金效果较好。

(2) 对扩容中间包采用了稳流器 + 挡墙 + 挡坝的控流方式进行优化，通过计算得出挡墙和挡坝的间距对活塞区及自由液面的影响较大，综合考虑现场实际情况和计算结果，确定了控流装置为优化方案 3，其中间包活塞区为 77.1%，死区比例为 4.2%，中间包流场较理想。

(3) 当采用稳流器 + 挡墙 + 两个挡坝的控流方式时，挡墙位于两个挡坝的中间的流场较好，但出于耐火材料成本考虑，仍选择一个挡坝。

(4) 采用方案 3 的控流装置，扩容后的中间包

非稳态浇注期间生产的管线钢非金属夹杂物合格率从 88% 提高至 95%，去除夹杂物效果明显提高。

#### 参考文献

- [1] 王立涛, 李正邦, 薛正良, 等. 连铸中间包内钢液流动特性及控流技术[J]. 特殊钢, 2004, 25(2): 32-34.
- [2] 曹娜, 朱苗勇. 板坯连铸中间包内控流装置结构的优化[J]. 材料与冶金学报, 2007, 6(2): 109-112.
- [3] 程子建, 成东全, 程树森, 等. 酒钢板坯中间包等温钢液流场的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(2): 60-63.
- [4] 李朝祥, 朱进军, 汪泽, 等. 中间包流场数值模拟[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2011, 28(2): 110-115.
- [5] 窦蓓蓓, 周俐, 郭上型, 等. 连铸中间包钢液流场的数模研究[J]. 宽厚板, 2007, 13(6): 1-3.
- [6] Pan Hongwei, Cheng Shusen, Cheng Zijian. Discussion about Model of Residual Time Distribution for Tundish[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2008, 15(Supplement 1): 431-437.
- [7] 潘宏伟, 程树森. 中间包停留时间分布模型的讨论[C]. 第十五届全国炼钢学术会议论文集, 厦门, 2008: 416-424.

张利君(1981-), 女, 硕士(2006年北京科技大学), 工程师, 冶金过程数值模拟研究。

E-mail: zhanglijun@shougang.com.cn

收稿日期: 2015-12-25