

· 试验研究 ·

## 35 t 三流不对称中间包流场的物理数学模拟和应用

朱守欣<sup>1</sup> 孙彦辉<sup>2</sup> 张西超<sup>2</sup> 徐蕊<sup>2</sup> 汪成义<sup>2</sup> 吴建永<sup>1</sup>

(1 南京钢铁集团有限公司电弧炉炼钢厂, 南京 210035; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要** 以钢厂三流不对称 GCr15 钢 320 mm × 480 mm 方坯连铸 35 t 中间包为研究原型, 采用 1:3 水模型试验和数值模拟相结合的方法研究不同控流装置对中间包内流场的影响, 优化中间包内流场, 并得到最优的导流墙结构。结果表明, 原型中间包各水口滞止时间很小, 死区比例达到 39.68%; 增加优化后的 Y 型导流墙后, 滞止时间增大了 29.51 s, 死区比例减小了 15.54%, 且各水口一致性较好。通过 GCr15 轴承钢现场试验发现, 中间包优化后钢水 T[O] 由优化前的  $19.3 \times 10^{-6} \sim 26.3 \times 10^{-6}$  平均值  $22.7 \times 10^{-6}$  降低至  $9.5 \times 10^{-6} \sim 17.2 \times 10^{-6}$ , 平均  $12.3 \times 10^{-6}$ ; 铸坯中夹杂物由 12.0 ~ 15.3 个/mm<sup>2</sup> 降低到 6.8 ~ 8.4 个/mm<sup>2</sup>, >1.25 μm 夹杂物明显降低。

**关键词** 35 t 三流中间包 数值模拟 物理模拟 流场

## Physical-Mathematical Simulation and Application of Liquid Flow Field in a 35 t Tundish for Three-Strand Unsymmetrical Casting

Zhu Shouxin<sup>1</sup>, Sun Yanhui<sup>2</sup>, Zhang Xichao<sup>2</sup>, Xu Rui<sup>2</sup>, Wang Chengyi<sup>2</sup> and Wu Jianyong<sup>1</sup>

(1 Electric Arc Furnace Steelmaking Works, Nanjing Iron and Steel Group Co Ltd, Nanjing 210035;  
2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** According to the research prototype of a 35 t tundish for casting three-strand unsymmetrical 320 mm × 480 mm bloom of GCr15 bearing steel, with using geometric similarity ratio 1:3 water model combined with mathematical simulation, the effect of different baffle device on liquid flow field in tundish is studied to optimize the tundish flow field and get optimum baffle device. Results show that of original prototype tundish the residence time is smaller and the dead area volume fraction is up to 39.68%; adding optimized Y-type baffle the average residence time of three nozzle increases by 29.51 s, the dead area ratio decreases by 15.54% and each nozzle is more identical. The pilot production of GCr15 bearing steel in situ show that after tundish optimization the T[O] in tundish liquid decreases from original  $19.3 \times 10^{-6} \sim 26.3 \times 10^{-6}$ , average value  $22.7 \times 10^{-6}$  to  $9.5 \times 10^{-6} \sim 17.2 \times 10^{-6}$ , average  $12.3 \times 10^{-6}$ ; number of inclusions in casting bloom decreases from 12.0 ~ 15.3/mm<sup>2</sup> to 6.8 ~ 8.4/mm<sup>2</sup> and the number of >1.25 μm inclusions decreases obviously.

**Material Index** 35 t Three-Strand Tundish, Numerical Simulation, Physical Simulation, Flow Field

三流中间包是一种应用较为广泛的连铸中间包, 但基本上都是以钢包长水口为对称中心的结构对称型<sup>[1-3]</sup>, 目前, 有关三流非对称型中间包的报道较少<sup>[4]</sup>。本文针对钢厂三流不对称中间包, 采用物理模拟(即水模型试验)和数值模拟相结合的方法研究中间包内钢水的流动特性, 并研究不同的控流装置对中间包内流场的影响, 提出一种新型的 Y 型导流墙, 使得钢液流动和各水口一致性得到显著改善。同时通过工业试验验证了新导流墙对降低总氧含量以及夹杂物去除的影响。该研究对相关类型中间包导流墙优化设计具有很好的参考和指导意义。

### 1 研究背景

钢厂浇注钢种为 GCr15 轴承钢, 采用 100 t 转炉 → LF 精炼 → VD 真空脱气装置 → 连铸冶炼而成, 其连铸中三流不对称中间包容量 35 t, 铸坯断面尺寸 320 mm × 480 mm, 拉坯速度为 0.48 m/min。在

生产过程中发现连铸坯质量波动较大, 铸坯中的夹杂物, 特别是大型夹杂物存在超标现象, 铸坯合格率较低, 经过现场调研认为主要原因是中间包内控流装置的不合理使得钢液流场不合理, 重新设计中间包内的控流装置, 采用优化后的 Y 型导流墙后, 中间包和连铸坯内的 T[O] 和夹杂物含量明显降低。

### 2 物理模拟

#### 2.1 试验原理

中间包的物理模拟原理为相似原理<sup>[5-6]</sup>, 为了保证模拟准确性, 需保证原型和模型的几何相似和动力相似。根据实验室条件和中间包尺寸, 首先确定模型和原型的相似比为 1:3, 然后保证 Re 处于第二自模化区的情况下, Fr 准数相等, 就可以保证模拟的准确性。

#### 2.2 试验装置

试验装置如图 1 所示, 主要由有机玻璃中间包、

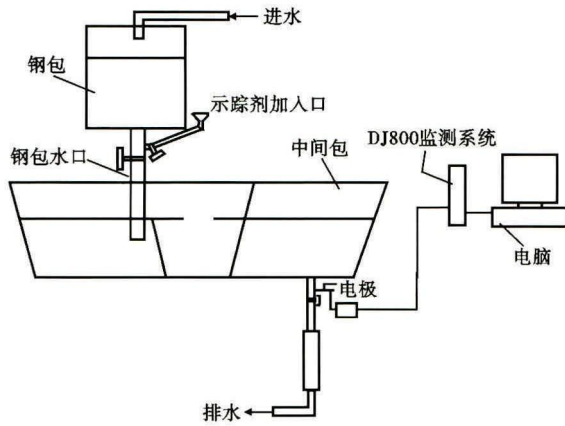


图 1 水模型试验装置示意图  
Fig. 1 Schematics of water model test device

控流装置、示踪剂加入系统、液面控制系统、电导电极、电导率仪、流量计、DJ800 多功能监测系统和计算机组成。

2.3 试验方法

试验采用“刺激-响应”法得到中间包内液体的停留时间分布曲线(RTD 曲线)。中间包液面稳定后,在入口处脉冲式加入 150 mL 饱和 KCl 溶液,同时测量出口处电导率变化,由于中间包为非对称中间包,所以需要同时测量各水口的电导率变化。

根据 RTD 曲线,得到中间包内活塞区体积分数  $\theta_p$ 、死区体积分数  $\theta_d$  以及全混区体积分数  $\theta_m$ ,具体公式如下:

$$\theta_p = \frac{V_p}{V} = \frac{t_{\min} + t_{\text{peak}}}{2t_a} \quad (1)$$

$$\theta_d = \frac{V_d}{V} = 1 - \frac{t_{\text{av}}}{t_a} \quad (2)$$

$$\theta_m = \frac{V_m}{V} = 1 - \theta_p - \theta_d \quad (3)$$

式中:  $t_a$  - 理论停留时间;  $t_{\text{av}}$  - 测量到  $2t_a$  时的平均停留时间;  $t_{\min}$  - 滞止时间;  $t_{\text{peak}}$  - 峰值时间。

2.4 试验方案

研究的对象为三流不对称中间包,钢包注流点在 1#和 2#水口之间,本次试验主要包括以下 3 个阶段:(1)主要研究中间包采用现有控流装置时中间包内的流场,分析其存在的主要问题;(2)改变控流装置的参数,研究对中间包流场的影响;(3)设计一种新型的 Y 型导流墙,并改变导流墙上导流孔的个数、位置、倾角以及孔径,确定最终优化方案。各方案具体说明如表 1 所示。

2.5 物理模拟结果分析

表 2 为各方案中间包 3 个水口的流动参数,可

表 1 试验方案说明  
Table 1 Description of test schemes

方案	说明
原型中间包	内部仅添加湍流抑制器
方案 1	将长水口在原型中间包基础上向 2 流区移动 70 mm
方案 2	内部设置 Y 型导流墙

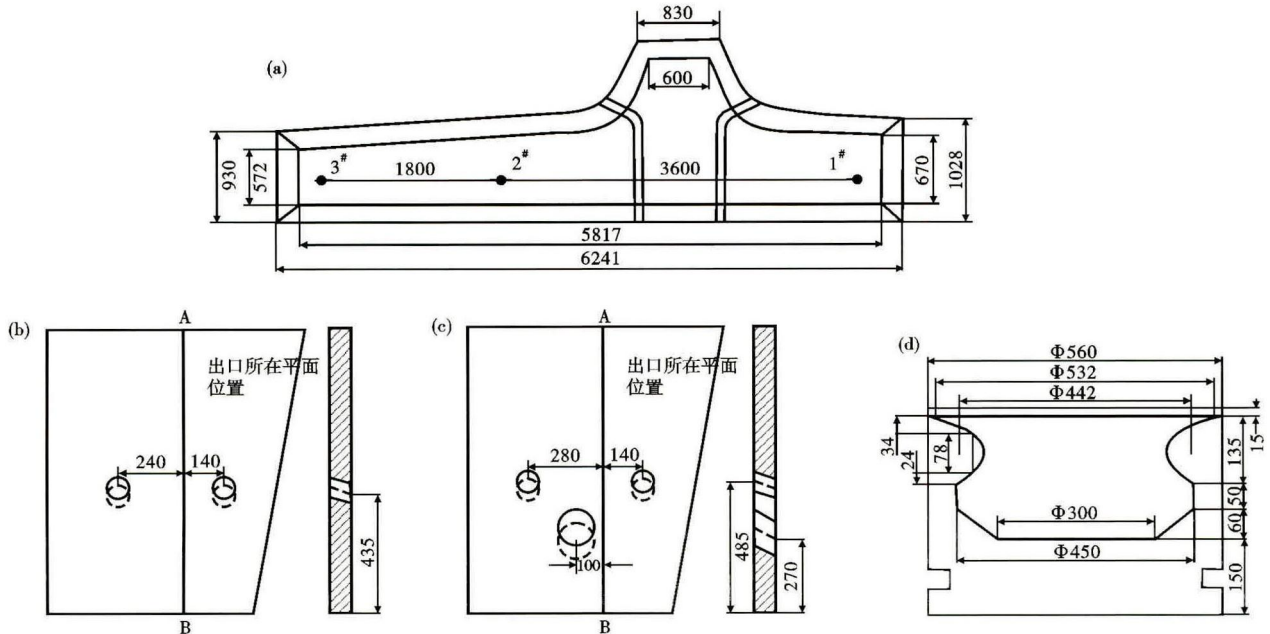


图 2 水模拟中间包结构及控流装置示意图:(a)中间包和 Y 型导流墙;(b)右侧导流墙;(c)左侧导流墙;(d)湍流抑制器  
Fig. 2 Schematics of water simulated tundish structure and flow control devices: (a) tundish and Y-type baffle; (b) right side baffle; (c) left side baffle and (d) turbulent controller

表2 各方案流动参数  
Table 2 Flow parameters of each scheme

方案	水口	$t_{\min}/s$	$t_{\text{peak}}/s$	$t_{\text{av}}/s$	$\theta_p/\%$	$\theta_d/\%$	$\theta_m/\%$
原型 中间包	1 <sup>#</sup>	35.14	80.62	495.14	7.15	38.80	54.05
	2 <sup>#</sup>	30.93	68.05	457.13	6.12	43.49	50.39
	3 <sup>#</sup>	52.21	102.62	511.62	9.57	36.76	53.67
	均值	39.43	83.76	487.96	7.61	39.68	52.70
方案1	1 <sup>#</sup>	44.35	83.15	511.83	7.88	36.73	55.39
	2 <sup>#</sup>	21.12	55.75	442.39	4.75	45.32	49.93
	3 <sup>#</sup>	48.66	94.14	491.38	8.83	39.26	51.91
	均值	38.04	77.68	481.87	7.15	40.44	52.41
方案2	1 <sup>#</sup>	53.32	259.83	626.48	19.35	22.56	58.08
	2 <sup>#</sup>	51.85	80.72	573.56	8.19	29.10	62.70
	3 <sup>#</sup>	101.64	137.87	641.15	14.80	20.75	64.45
	均值	68.94	159.47	613.73	14.12	24.14	61.75

以发现:

(1) 原型中间包内 2<sup>#</sup> 水口的滞止时间为 30.93 s, 说明 2<sup>#</sup> 水口可能存在短路流动, 夹杂物上浮去除的几率很小, 3 个水口的平均停留时间仅有 487.96 s, 死区比例达到 39.68%, 中间包内超过 1/3 的体积处于不活跃状态, 由此得出, 原型中间包内钢液停留时间太短, 不利于夹杂物上浮去除以及钢液成分和温度的均匀, 连铸坯质量控制难度较大;

(2) 方案 1 为将中间包内的湍流抑制器向左移动 50 mm, 从 3 个水口的平均值上看与原型中间包没有太大的变化, 但是 1<sup>#</sup> 水口的停留时间和滞止时间均有所延长, 同时 2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 水口的参数变差, 所以移动抑制器对中间包内的流场没有太大的优化作用;

(3) 方案 2 为添加最终优化得到的 Y 型导流墙, 各水口的参数有了明显的提高, 3 个水口的平均滞止时间从 39.43 s 增加到 68.94 s, 这是由于添加导流墙后, 钢液不能一直沿包底运动, 需经过一定高度的导流孔后再从各水口流出, 延长钢液的流动路径使各水口的停留时间明显延长, 平均停留时间达到 613.73 s, 死区比例从 39.68% 下降到 24.14%, 相较于原型中间包降幅约 15.54%, 添加导流墙可以明显改善中间包的流动状态。

### 3 数值模拟

#### 3.1 数学模型

中间包内钢液流动行为可用连续性方程、动量方程和标准  $\kappa-\varepsilon$  双方程来描述。此外, 需确定边界条件:

(1) 中间包长水口: 长水口速度根据计算给出, 同时假定入口截面速度分布相同;

(2) 对称面、出口及液面: 在中间包对称面上,

各物理量如  $T$ 、 $U$ 、 $V$ 、 $W$  的法向微商都等于 0, 中间包出口的速度定义为质量出口, 液面边界采用自由滑移液面, 并指定热通量;

(3) 中间包壁面: 中间包壁面采用无滑移边界条件。

#### 3.2 数学模拟结果分析

利用 ANSYS CFX 计算了各方案中间包内流场分布, 可以发现:

(1) 原型中间包内, 钢液以一定速度由长水口进入湍流抑制器内, 在抑制器内进行强烈的搅拌, 由于抑制器内壁的约束作用, 流向注流区的自由液面, 而后在保护渣的抑制作用下, 流股沿液面四周方向流动, 到达 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 水口上方后, 在卷吸作用下直接从水口流出, 此后钢液沿底面运动, 从 3<sup>#</sup> 水口流出; 所以钢液在中间包内的运动路径较短, 且 3<sup>#</sup> 水口上方存在死区, 夹杂物上浮几率小;

(2) 方案 1 将长水口移动后, 增加了 2 流浇注区表面活塞流的流动距离, 但相较于现有方案, 钢液在 2 流浇注区的流动距离减小, 所以停留时间减小, 不利于提高铸坯质量;

(3) 方案 2 添加 Y 型导流墙后, 中间包分成了两个流动状态不同的区域: 注流区和分配区; 钢液在 Y 型导流墙内进行搅拌, 形成较大的循环流动, 有利于夹杂物的碰撞长大和钢液的混匀; 而后从导流孔进入浇注区, 在导流孔的导流作用下, 钢液沿液面流动, 有利于保护渣对夹杂物吸收; 所以, 添加导流墙极大地改善了中间包内的流动状态。

### 4 实际生产应用效果研究

为考察改进后中间包的优化效果, 对原型方案

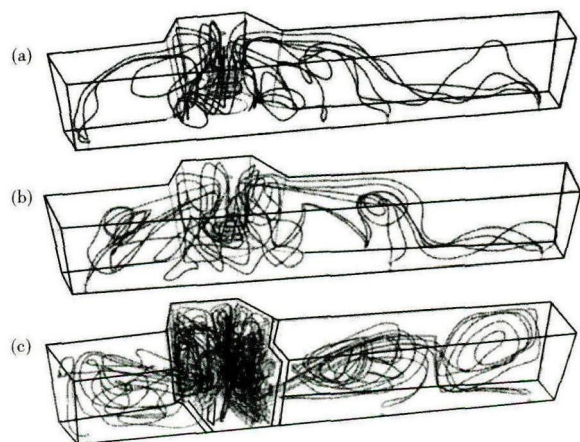


图3 中间包内流线图: (a) 原型中间包; (b) 方案 1; (c) 方案 2  
Fig. 3 Flow lines in tundish: (a) prototype tundish; (b) scheme 1; and (c) scheme 2

(改进前中间包)和方案 2(改进后中间包)分别在中间包和铸坯上进行取样,取样钢种为 GCr15 轴承钢。中间包取样为在一个浇次的第 2 炉和第 3 炉中间包液面稳定时,在 2<sup>#</sup>水口附近距离液面 300 mm 处分别取圆饼样两个,铸坯取样为在中间包取样结束 20 min 后分别取 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>水口铸坯各一块,对所取试样进行如下分析:

(1)分析中间包钢样和铸坯的平均总氧 T[O] 变化;

(2)通过大样电解得到铸坯中大型夹杂物含量;

(3)分别在铸坯内弧 1/4 处取金相样,抛光后在光镜下观察铸坯中非金属夹杂物总数和粒度分布。

#### 4.1 总氧 T[O] 分析结果

表 3 为中间包和铸坯中的 T[O],可以发现,优化前中间包内的 T[O] 在  $19.7 \times 10^{-6} \sim 26.3 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $22.7 \times 10^{-6}$ , 添加优化后的导流墙后,中间包内的 T[O] 在  $9.5 \times 10^{-6} \sim 17.2 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $12.3 \times 10^{-6}$ , 较原型中间包减小 45.81%, 且不同炉次间 T[O] 波动更小;从铸坯 T[O] 结果看,3<sup>#</sup>水口

表 3 各方案 T[O] 分析结果/ $10^{-6}$

Table 3 Analysis results of T[O] of each scheme / $10^{-6}$

方案	炉次	中间包	铸坯		
			1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>
原型 中间包	2	22.9 ~ 26.3	13.4 ~ 16.2	15.7 ~ 20.9	13.5 ~ 14.1
	3	19.7 ~ 22.3	14.2 ~ 18.6	13.9 ~ 18.3	14.2 ~ 14.6
	均值	22.7	15.8	17.3	14.2
优化 中间包	2	9.5 ~ 12.7	8.3 ~ 9.9	8.1 ~ 10.7	8.5 ~ 8.9
	3	10.2 ~ 17.2	8.7 ~ 10.7	9.2 ~ 10.8	8.8 ~ 9.4
	均值	12.3	9.5	9.6	8.8

表 4 原型中间包和优化中间包冶炼铸坯中夹杂物尺寸、数量和分布

Table 4 Size, number and distribution of inclusions in casting bloom melt by prototype tundish and optimized tundish

方案	水口	夹杂物 总数/ 个	I/(个· mm <sup>-2</sup> )	夹杂物粒度分布/(个·mm <sup>-2</sup> )			
				≤1.25 μm	1.25 ~ 2.5 μm	2.5 ~ 5 μm	≥5 μm
原型 中间包	1 <sup>#</sup>	149	14.1	82	52	12	3
	2 <sup>#</sup>	138	15.3	70	50	12	6
	3 <sup>#</sup>	151	12.0	94	47	9	1
优化 中间包	1 <sup>#</sup>	110	8.2	75	27	8	0
	2 <sup>#</sup>	107	8.4	70	29	8	0
	3 <sup>#</sup>	99	6.8	63	32	4	0

由于钢液停留时间较长,所以 T[O] 较低,对比添加导流墙前后铸坯内的 T[O] 也会降低且波动减小,所以添加导流墙可以明显提高铸坯质量和稳定性。

#### 4.2 金相检验结果分析

表 4 为从各流铸坯取样得到的金相样分析结果,可以发现,添加导流墙后,铸坯中的夹杂物(I)从 12.0 ~ 15.3 个/mm<sup>2</sup> 减小到 6.8 ~ 8.4 个/mm<sup>2</sup>, 其中,粒径较小的夹杂物(≤1.25 μm)含量变化不大,而粒径较大的夹杂物(>1.25 μm)含量明显降低,而粒径大于 5 μm 的夹杂物没有发现。

#### 5 结论

(1)原型中间包内活塞区比例仅有 7.61%, 死区比例达到 39.68%, 热量损耗大,滞止时间和平均停留时间小,不利于夹杂物上浮和连铸坯质量控制。

(2)移动水口可以增加 3<sup>#</sup>水口上方钢液活跃程度,但是 2<sup>#</sup>水口死区比例增加。

(3)添加 Y 型导流墙后,钢液停留时间明显增加,活塞区比例达到 14.12%, 死区比例减小到 24.14%。

(4)现场工业试验表明,添加 Y 型导流墙后,中间包和铸坯内的 T[O] 降低 45.81%, 铸坯中的夹杂物,特别是大颗粒夹杂物明显减少。

#### 参考文献

- [1] 景财良,王新华,李林平,等.连铸参数对中间包内控流元件冶金性能的影响[J].特殊钢,2011,32(1):5-8.
- [2] 曹立军,王静松,孙伟,等.三流连铸中间包钢水流场的数学物理模拟[J].连铸,2010(5):1-6.
- [3] 黄永建,刘才,张彩军,等.石钢三流中间包结构优化的数值模拟与工业实验研究[J].过程工程学报,2009,9(增刊1):432-437.
- [4] 王红娜,杨亮,郑保安,等.三流非对称连铸 18 t 中间包流场的物理和数学模拟[J].特殊钢,2014,35(1):7-10.
- [5] 钟良才,张立,黄耀文.湍流控制装置的结构对中间包流体流动特性的影响[J].钢铁研究学报,2002,14(4):6-9.
- [6] Chakraorty S, Sahai Y. Mathematical Modelling of Transport Phenomena in Continuous Casting Tundishes. II. Transient Effects Owing to Varying Ladle Stream Temperature [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1992, 19(6):488-492.

朱守欣(1968-),男,高级工程师,1991年西安科技大学(本科)毕业,电弧炉炼钢连铸工艺技术。

E-mail: Zsx.2877@163.com

收稿日期:2015-02-20