

## 六流方坯中间包内流场的数值模拟及优化

许长军<sup>1</sup> 胡小东<sup>1</sup> 艾新港<sup>1</sup> 胡林<sup>1</sup> 柳洪义<sup>2</sup> 王欣<sup>2</sup> 陈兴伟<sup>2</sup>

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051; 2 唐山钢铁集团有限责任公司, 唐山 063016)

**摘要** 以唐钢 150 mm × 150 mm 铸坯 6 流 T 型中间包为研究对象, 用商业软件 ANSYS 对中间包内钢液流场进行了三维数值模拟与优化, 研究了中间包内钢液的流动特征和设置导流挡墙后中间包内钢液的流动方式。结果表明, 设置合理的挡墙和导流孔可以有效改善中间包冶金效果; 3 个导流孔直径 (mm) 分别为 93、72、36, 位置 (mm) 为 (220, 140)、(350, 280)、(700, 300), 倾斜角度为 (21°, 15°)、(8°, 23°)、(10°, 28°) 时中间包流场最为合理。

**关键词** 中间包 数值模拟 挡墙 导流孔

## Numerical Simulation and Optimization of Fluid Field in Tundish for Six-Strand Billet

Xu Changjun<sup>1</sup>, Hu Xiaodong<sup>1</sup>, Ai Xingang<sup>1</sup>, Hu Lin<sup>1</sup>, Liu Hongyi<sup>2</sup>, Wang Xin<sup>2</sup> and Chen Xingwei<sup>2</sup>

(1 School of Material and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051;

2 Tangshan Iron and Steel Group Co Ltd, Tangshan 063016)

**Abstract** Taking a T-shape tundish for 6-strand 150 mm × 150 mm casting billet at Tangshan Steel as an object of study, 3 dimension numerical simulation and optimization on fluid field of liquid in tundish have been carried out by using commercial software ANSYS. The flow characteristics of liquid in tundish and flow mode of liquid in tundish setting flow control devices are studied. Results show that setting reasonable blocking dams and guide holes are available to improve the metallurgical effect of tundish; three guide holes respective with diameter (mm) - 72, 36 and 93, location (mm) - (220, 140), (350, 280) and (700, 300), and inclined angle - (21°, 15°), (8°, 23°) and (10°, 28°) are most reasonable for fluid field in tundish.

**Material Index** Tundish, Numerical Simulation, Blocking Dam, Guide Hole

中间包内的钢液流动特性对其内部夹杂物的上浮去除、钢液温度的均匀分布具有极其重要的作用, 进而直接影响着铸坯产量与质量。近年来, 国内外很多冶金工作者基于不同工况条件进行了中间包内流场<sup>[1-8]</sup>、温度场<sup>[7-9]</sup>等的数值模拟研究。

### 1 计算方法

计算工作在 ANSYS 商业软件上进行, 仿真过程中假设钢水流动为牛顿不可压缩稳态流动, 不考虑中间包内熔池表面渣层的影响, 假设钢水密度为常数。因体系几何关系和动力条件的对称性, 实际空间体系的 1/2 被用作仿真计算对象, 采用六面体划分网格, 湍流强烈之处适当加密网格。

中间包结构形状及其尺寸见图 1。选用湍流  $k-\epsilon$  双方程, 连续性方程、动量方程等, 具体模型及边界条件描述见文献 [10, 11], 计算时按各节点质量残差之和、进出口质量流量差小于  $10^{-3}$  控制。设置边界条件时, 入口速度通过拉坯速度、铸坯断面和入

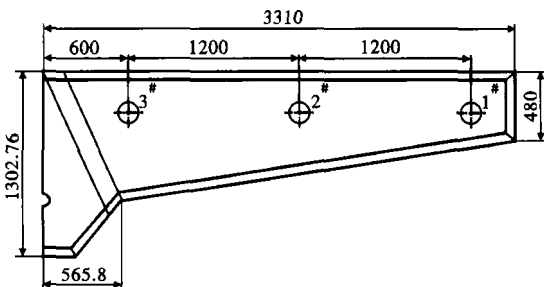


图 1 T-型中间包结构及尺寸示意图

Fig. 1 Schematics of structure and size of T-shape tundish

口截面积按质量守恒关系计算确定。数值计算所涉及的主要参数见表 1。

### 2 研究结果与讨论

#### 2.1 中间包内钢液的流动特征

图 2 示出了未对中间包进行流动控制时钢液流动的基本特征, 由于中间包宽度方向、浸入式水口两侧的对称性, 故给出了中间包半侧分布图。经转炉

表 1 数值模拟计算参数  
Table 1 Calculated parameters of numerical simulation

项目	参数
铸坯断面/mm	150 × 150
长水口内径/mm	100
水口浸深/mm	200
浇铸钢种	70 <sup>#</sup> 、72A、72B 等优质钢
拉坯速度/(m · min <sup>-1</sup> )	2.3
工作液面高度/mm	700 ~ 800
中间包出口直径/mm	20
中间包最大钢水容量/t	30

炼钢、二次精炼后,使用钢包承装钢液运至钢包回转台等待浇铸。

浇铸时,钢液从水口射出后即刻穿透熔池,速度较大的射流将周围钢液卷入其中直到冲击包底,然后很快向四周分离成 3 部分:第 1 部分是由于水口射流对周围钢液的抽引作用使得注流区内部分钢液反向流动,然后在水口两侧形成对称回流,钢液流速很快。部分钢液由于撞击距离此处湍流最近的 3<sup>#</sup>

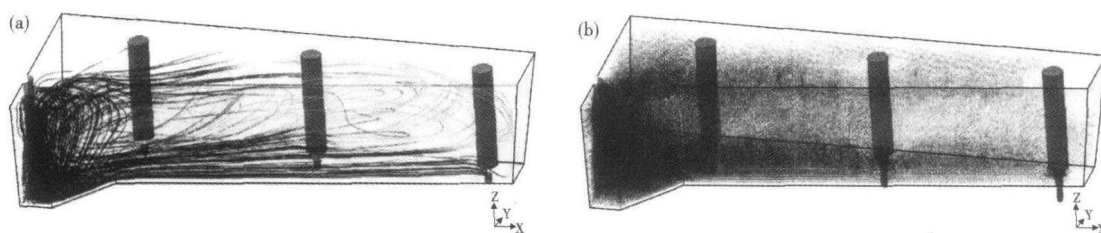


图 2 T-型中间包内无控流装置时的流场分布  
Fig. 2 Distribution of fluid field in T-shape tundish without flow control devices

塞棒而形成回流,所引起的剧烈液面波动不但严重影响塞棒使用寿命,而且卷入了较多保护渣,增加中间包熔渣净化难度;第 2 部分钢液撞击包壁而折向斜上方,钢液流速随着钢液沿包壁的流动逐渐降低,最后流向中间包出水口,其中部分钢液长时间停留在包内转角处形成死区;而另一部分钢液则未经阻碍直接依次流向 3<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、1<sup>#</sup> 出水口形成短路流,显著缩短钢液在中间包内的停留时间,钢液中的夹杂物没有机会碰撞与长大而上浮去除就直接进入结晶器,进而影响铸坯质量。

## 2.2 设置导流挡墙后中间包内钢液流动方式

导流挡墙的布置参见图 1,导流孔倾斜置入挡墙内,每个导流孔位置、直径、倾斜角度各有不同,具体结构可参见图 3。

图 4 示出了设置导流挡墙以后 T 型中间包内流场分布情况。由图 4 可见,导流挡墙将半侧中间包分离成两部分:注入区和右侧浇铸区。由长水口将

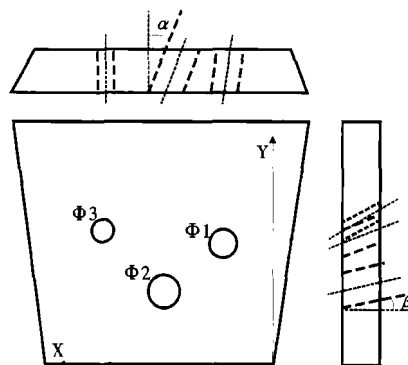


图 3 导流挡墙结构示意图  
Fig. 3 Schematics of structure of guide flow blocking dam

钢包中的钢液引入注入区,经过导流挡墙导流孔重新将其分配到右侧浇铸区当中。但是,浇铸区内的钢液流动轨迹互不协调,导致钢液流动行为紊乱,这使得中间包流场控制更加困难。

实践表明,中间包并非仅设置了挡墙和导流孔就万事大吉,特别是对多流小方坯中间包,如果导流

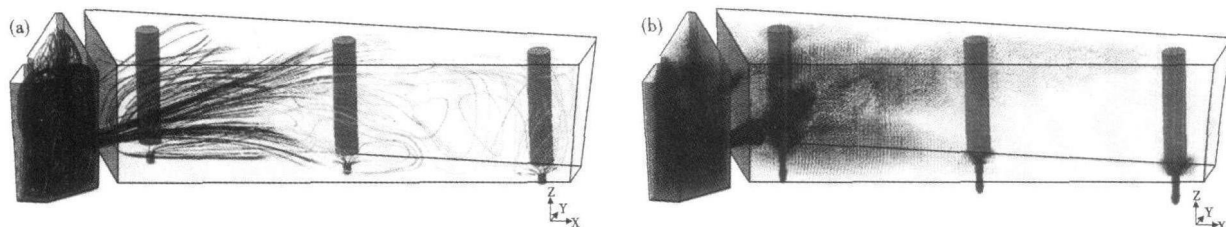


图 4 设置导流挡墙后 T-型中间包内流场分布  
Fig. 4 Distribution of fluid field in T-shape tundish with flow control devices

孔的位置、直径、倾斜角度设置不当仍然会产生死区、短路流或几个流股相互干扰等情况,为此必须进行优化。

### 3 导流挡墙导流孔参数优化

导流挡墙导流孔参数优化考虑到了导流孔的直径( $\Phi/\text{mm}$ )、位置( $X, Y/\text{mm}$ )和倾斜角度( $\alpha, \beta/^\circ$ ),其中倾斜角度包括导流孔轴线与挡墙法线成 $\alpha$ 角、与水平成 $\beta$ 角(见图3)。为此,本研究进行了一系列基于不同参数的中间包内钢液流动行为的数值模拟研究。经过对比分析,在本中间包条件下,导流挡墙导流孔直径( $\text{mm}$ )分别为93、72、36;位置( $\text{mm}$ )为(220,140)、(350,280)、(700,300);倾斜角度( $^\circ$ )为

(21,15)、(8,23)、(10,28)时中间包流场最为合理(如图5)。

图5示出了设置合理导流挡墙以后T型中间包内流场分布情况。由图5可见,由于导流孔倾角上扬,浇铸区的钢液自下而上有序流动,形成3股回流,有利于钢液中夹杂物的上浮去除。调整导流孔角度,可避免流股直接冲击塞棒,3股流动协调一致,使得钢液处于一个大循环中,覆盖整体浇铸区。这种流动方式在较大程度上延长了钢液在中间包内的平均停留时间,进一步增加钢液中夹杂物碰撞、上浮去除的机会,缓解熔池液面波动,避免发生卷渣;并且消除了短路流和减小死区体积,为提高钢液纯

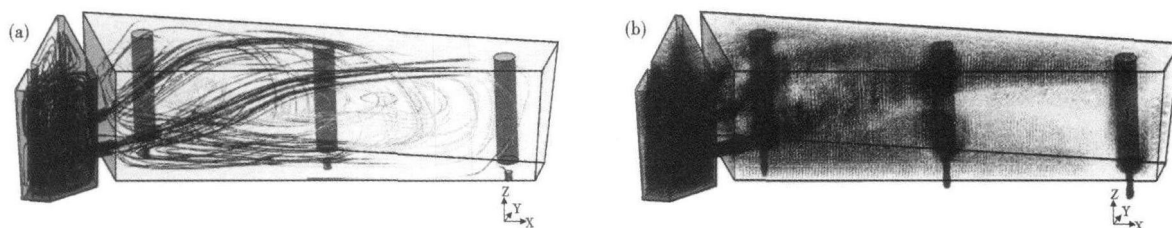


图5 设置合理导流挡墙后T型中间包内流场分布

Fig. 5 Distribution of fluid field in T-shape tundish with setting reasonable guide flow blocking dam

净度、均匀温度分布提供了有利保证。

### 4 结论

(1)无控流装置的6流方坯T型中间包内钢液流场很不合理,存在短路流、死区,流动较乱,不利于夹杂物的聚合上浮和温度场、钢液成分的均匀分布,并且对中间包内耐火材料侵蚀严重,中间包冶金效果不佳。

(2)设置导流挡墙后T型中间包内的钢液得到重新合理的分配,但如果导流孔的位置、直径、倾斜

角度设置不当,仍然会产生死区、短路流或几个流股相互干扰等问题,因此优化导流挡墙导流孔参数是必要的。

(3)经优化设计的T型中间包挡墙导流孔直径( $\Phi/\text{mm}$ )分别为93、72、36;位置( $X, Y/\text{mm}$ )为(220,140)、(350,280)、(700,300);倾斜角度( $\alpha, \beta/^\circ$ )为(21,15)、(8,23)、(10,28)时钢包内钢液流场最为合理。

### 参考文献

- Jha P K, Rao P S, Dewan A. Effect of Height and Position of Dams on Inclusion Removal in a Six Strand Tundish. *ISIJ International*, 2008, 48(2):154
- Zhong Liangcai, Li Baokuan, Zhu Yingxiong, et al. Fluid Flow in A Four-strand Bloom Continuous Casting Tundish with Different Flow Modifiers. *ISIJ International*, 2007, 47(1):88
- Chattopadhyay K, Isac M, Guthrie R I L. Physical and Mathematical Modelling of Steelmaking Tundish Operations: A Review of the Last Decade(1999-2009). *ISIJ International*, 2010, 50(3):331
- 赵连刚,刘坤.连铸中间包内钢水夹杂物运动行为的数值模拟. *钢铁研究学报*, 2002, 14(6):19
- Morales R D, Barreto J de J, Lopez-ramirez S, et al. Melt Flow Control in a Multistrand Tundish Using a Turbulence Inhibitor. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, 31B:1505
- Merder T, Boguslawski A, Warzecha M. Modelling of Flow Behaviour in A Six-strand Continuous Casting Tundish. *Metalurgija*, 2007, 46(4):245
- 张彩军,李建生,程翠花.等.六流中间包钢液流动及传热过程的耦合数值模拟. *钢铁钒钛*, 2008, 29(2):50
- 程乃良,朱苗勇,肖泽强.非等温双流连铸中间包内钢液的流动与传热特征. *钢铁*, 2001, 36(10):23
- 兰岳光,蒋宏,张怀军.六流中间包温度场优化数值模拟研究. *包钢科技*, 2009, 35(6):34
- 陶文铨. *数值传热学(第2版)*.西安:西安交通大学出版社, 2001
- 王建军,包燕平,曲英. *中间包冶金学*.北京:冶金工业出版社, 2001

许长军(1981-),博士研究生,钢铁冶金研究。

收稿日期:2011-01-13