

## 0.8 m/min 拉速 H 异型坯中间包控流装置对传递性能影响的数值模拟

阮飞<sup>1</sup> 张红强<sup>1</sup> 刘智宇<sup>2</sup> 冯帅<sup>3</sup> 白亮<sup>3</sup>

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 天津钢管集团技术中心, 天津 300301;

3 上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 根据长 8 m, 钢水液位 0.8 m 的 3 流 H 型连铸坯中间包, 采用 FLUENT 软件建立三维几何模型模拟研究了弧形挡墙导流孔直径  $D$  (100 ~ 200 mm), 导流孔高度  $H$  (350 ~ 550 mm) 和两导流孔夹角  $\theta$  (20° ~ 50°) 对中间包内钢液的流场和温度场分布、钢液的混合状况及不同粒径夹杂物上浮去除的影响, 结果表明导流孔直径  $D$  100 mm、导流孔高度  $H$  550 mm、导流孔夹角  $\theta$  50° 时, 中间包综合传递性能最优, 各流平均停留时间差和各出口钢水温度差较小, 大颗粒夹杂去除率达 76%。

**关键词** H 异型坯连铸 中间包 控流装置 传递性能 数值仿真

### Numerical Simulation of Influence of Flow Control Device on Transfer Performance in Tundish for H-Beam Bloom Casting with Speed 0.8 m/min

Ruan Fei<sup>1</sup>, Zhang Hongqiang<sup>1</sup>, Liu Zhiyu<sup>2</sup>, Feng Shuai<sup>3</sup> and Bai Liang<sup>3</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2 Technology Center, Tianjin Pipe Group, Tianjin 300301; 3 State Key Laboratory for High Quality Special steel Metallurgy and Manufacture, Shanghai University, Shanghai 200072)

**Abstract** Based on tundish with length 8 m and liquid level 0.8 m for 3-strands H-beam bloom casting, the effect of curved dam flow-guiding hole diameter  $D$  (100 ~ 200 mm) and hole height  $H$  (350 ~ 550 mm) and angle between two flow-guiding hole  $\theta$  (20° ~ 50°) on distribution of tundish liquid flow field and temperature field, liquid mixing status and removal of inclusions with different size has been simulated and studied by using three dimensional geometry model established with FLUENT soft ware. Results show that with flow-guiding hole diameter  $D$  100 mm and height  $H$  550 mm, and angle between two flow-guiding hole  $\theta$  50°, the comprehensive transfer performance in tundish is best, i. e. the difference of average residual time at each strand and the difference of temperature of liquid at each outlet are smaller and the removal rate of large size inclusions is up to 76%.

**Material Index** H-Beam Bloom Casting, Tundish, Flow Control Device, Transfer Performance, Numerical Simulation

中间包作为连铸过程的重要环节, 与连铸过程控制及连铸坯质量关系密切, 合理的布置中间包内的控流装置可以有效改善中间包内的流场、温度场及夹杂物上浮去除率, 进而提高 H 型坯质量。

目前数值仿真的方法已被广泛应用于传统连铸中间包的优化研究<sup>[1-7]</sup>, 而对于结构特殊的 H 型坯连铸中间包的优化研究较少。作者采用数值模拟的方法对钢厂近年投产的 H 型坯连铸中间包开展仿真研究。

#### 1 研究方法及方案

##### 1.1 中间包几何模型

钢厂近年投产的 H 型坯连铸机为三流铸机, 中间包几何模型如图 1 所示, 该中间包长约 8 m, 工作液位约 0.8 m, 中间包内钢包注流区附近设置弧形挡墙, 将中间包分割为两个腔体, 挡墙上开有 2 个对

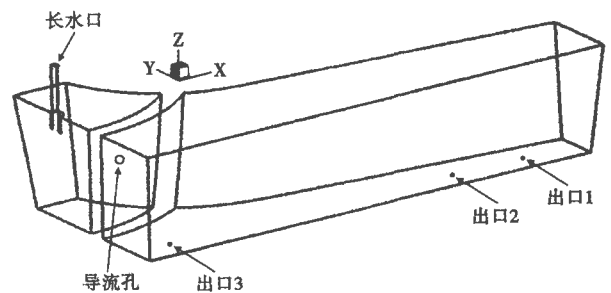


图 1 中间包几何模型示意图

Fig. 1 Schematics of tundish geometric model

称的导流孔, 其中导流孔直径 ( $D$ ), 导流孔高度 ( $H$ ), 两导流孔之间的夹角 ( $\theta$ ) 等参数按照研究方案选取, 该中间包与传统连铸中间包最大的区别在于每一流均采用 2 支直筒型浸入式水口, 共 6 支水口分组均布于中间包底部。由于中间包结构关于 YZ 平面对称, 计算模型取原几何模型的 1/2, 因此计算

模型只包含3支水口,沿X轴负方向依次称为:出口(outlet)1~出口(outlet)3。

### 1.2 主要控制方程

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

N-S 方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$\kappa$ - $\varepsilon$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_i k - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = (C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2) / k \quad (4)$$

式中: $\rho$ -钢液密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ); $x_i, x_j$ - $i$ 和 $j$ 方向的坐标值/m; $u_i, u_j$ - $i$ 和 $j$ 方向的速度分量/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $P$ -压力/Pa; $\mu_i$ -湍流粘度系数; $\mu_{\text{eff}}$ -有效粘度系数; $\mu_l$ -层流粘度系数/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $C_1, C_2, C_\mu, C_k, C_\varepsilon$ -经验常数,计算中采用Launder和Spalding推荐值<sup>[8]</sup>。此外计算温度场及示踪剂扩散还需求解能量方程和离散相传输控制方程<sup>[9-10]</sup>。

### 1.3 实验方案

主要研究低拉速(拉速 $\nu = 0.8 \text{ m/min}$ )时,不同的导流孔直径( $D$ )、导流孔高度( $H$ )、导流孔夹角( $\theta$ )组合条件下,中间包内钢液流场、温度场、混合状况及夹杂物去除状况,重点考察中间包各出口钢液平均停留时间方差( $\sigma_t$ )、各出口钢液温度方差( $\sigma_T$ )、夹杂物上浮去除率( $R$ )等指标,实验方案如表1所示。

### 1.4 模拟步骤及主要参数

利用 Gambiti 软件建立中间包三维几何模型,并划分网格,基本网格尺寸为20 mm,中间包入口和出口为6 mm网格,体网格总量约100万。将生成的

网格文件导入 FLUENT 软件中,激活相应的物理模型,给定边界条件,中间包入口流速 $\nu = 1.14 \text{ m/s}$ ,湍流强度 $I = 3.75\%$ ,中间包出口压力 $P = 10^5 \text{ Pa}$ ,所浇注钢种为 Q235B,钢液密度 $\rho = 7080 \text{ kg/m}^3$ ,粘度 $\mu = 5.5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,示踪剂扩散系数 $D = 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ ,体积力 $g_z = -9.8 \text{ m/s}^2$ 。流场求解采用 SIMPLE 算法,收敛标准为各控制方程残差小于 $10^{-4}$ ,先模拟得到稳态流场,然后利用组分输运模型计算示踪剂非稳态扩散,温度场计算采用耦合算法。

## 2 结果及讨论

### 2.1 中间包内钢液流场分布特点

计算得到的中间包内钢液迹线图如图2所示,可以看出,由长水口注入中间包内的高速钢液流股在注流区内形成一定的冲击深度,然后与注流区包底壁面发生对冲并沿着包底壁面流向注流区不同区域,并形成一定尺寸的漩涡,然后由导流孔流入注流区以外的腔体内。由导流孔流出的钢液冲撞到其正对着的中间包壁面,受到壁面的限制沿着不同轨迹流向其他区域,并在中间包内形成尺寸不等的涡流,一部分钢液经历少数几次循环流动便由各出口排出,而部分钢液在中间包内循环流动多次最终由水口流出。

可见导流孔一方面作用是将湍流最大程度的限制于注流区,以稳定中间包内液面,避免液面剧烈波动而引起钢液的吸气和卷渣;另一方面的作用在于对中间包内的钢液进行二次分配,在此过程中导流孔参数起到至关重要的作用,因此合理的控制导流孔参数能够改善中间包传输性能。

### 2.2 中间包内钢液混合状况

计算得到的不同实验方案下中间包各出口钢液平均停留时间及其方差如图3,可以看出,同一方案下中间包各出口平均停留时间存在较大的差别,其

表1 各实验方案的导流孔直径、高度和夹角

Table 1 Flow-guiding hole diameter, height and angle in each tested scheme

实验方案	导流孔		
	直径( $D$ )/mm	高度( $H$ )/mm	夹角( $\theta$ )/°
1	100	350	20
2	100	450	35
3	100	550	50
4	150	350	35
5	150	450	50
6	150	550	20
7	200	350	50
8	200	450	20
9	200	550	35

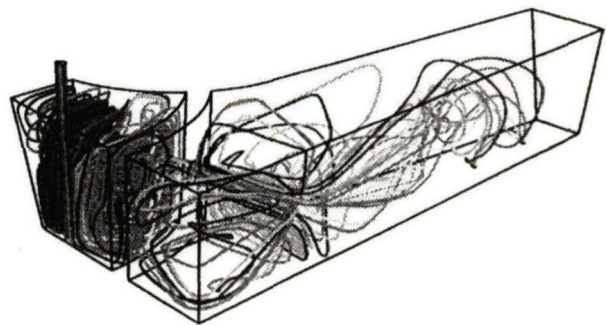


图2 中间包内钢液迹线图

Fig. 2 Streamline chart of liquid in tundish

中各方案下出口 1 平均停留时间较长,数值在 1 041 ~ 1 480 s,出口 2 平均停留时间次之,在 956 ~ 1 119 s,而出口 3 平均停留时间最短,在 497 ~ 892 s,主要是由于各出口与长水口之间的水平距离不同造成的,出口越靠近长水口其平均停留时间越短。

由图 3 中各实验方案方差数据可以看出,不同方案中间包各出口钢液平均停留时间方差变化较大,其中 9# 方案方差数值最大,约为 161 425 s<sup>2</sup>,而 3# 方案方差明显最小,约 10 597 s<sup>2</sup>,其余方案介于二者之间,因此,从降低各出口钢液成分和温度差别的角度讲,3# 方案显然最优。

### 2.3 中间包内钢液温度场分布特点

由图 4(a) 可以看出,中间包内不同区域温度场

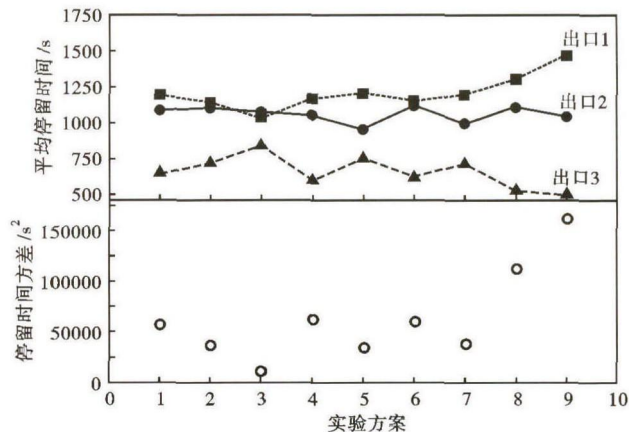
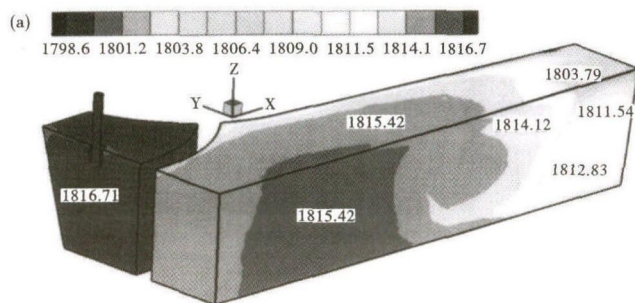


图 3 中间包各出口钢液平均停留时间及方差  
Fig. 3 Average residual time of liquid at tundish each outlet and variance

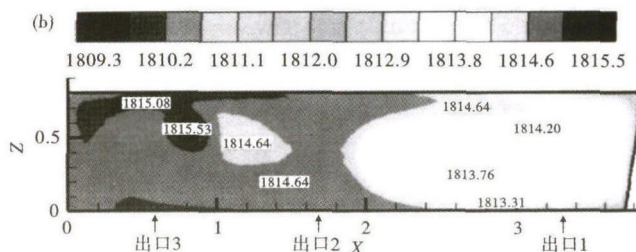


图 4 中间包壁面(a)和各出口中心截面(b)钢液温度场分布  
Fig. 4 Distribution of temperature field of liquid at tundish wall (a) and each outlet center line section (b)

分布存在一定的差异,靠近长水口注流区附近区域内钢液温度较高,钢液温降较小,温降为 2 ~ 3 K,而远离注流区的区域内钢液温降明显,特别是远离注流区的边角部区域属于二维或三维散热,最大温降约 20 K。由于壁面及自由液面的散热和中间包内不同区域钢液更新速率的不同使得中间包内不同区域内钢液温度存在明显的差别,由图 4(b) 可以看出,中间包内出口 1 和出口 2 处钢液温度相当,而远离注流区的出口 1 附近钢液温降明显较大,温度较低。

由图 5 看出,各实验方案下出口 1 处钢液温度在 1 808 ~ 1 812 K,钢液温降为 6 ~ 10 K,出口 2 处钢液温度在 1 811 ~ 1 814 K,温降为 4 ~ 7 K,而出口 3 处钢液温度在 1 814 ~ 1 816 K,温降为 2 ~ 4 K,由此可知,随着出口与长水口距离的增大,钢液温降逐渐增大,同一工况下各出口的温度差为 2 ~ 3 K。

可见,6# 和 8# 实验方案下各出口钢液温度差明显较大,各出口钢液温度均一性较差,其中 8# 方案温差最大,各出口钢液温度均一性最差,不利于连铸过程控制及铸坯质量的提高。而相比之下 3# 和 4#

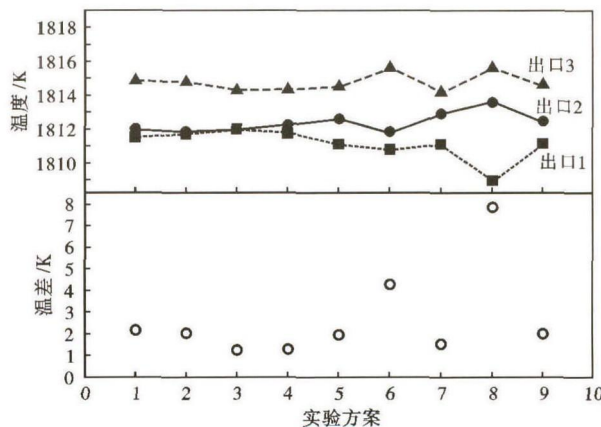


图 5 中间包各出口处钢液温度及温差  
Fig. 5 Temperature of liquid at tundish each outlet and difference of temperature

方案各出口钢液温差较小,特别是 4# 方案温差最小。

### 2.4 中间包内夹杂物去除状况

由图 6 可以发现,各实验方案下 100 μm 夹杂物上浮去除率在 70% ~ 76%,80 μm 夹杂去除率为 50% ~ 60%,60 μm 夹杂去除率为 42% ~ 53%,40 μm 夹杂去除率为 34% ~ 46%,而 20 μm 夹杂去除

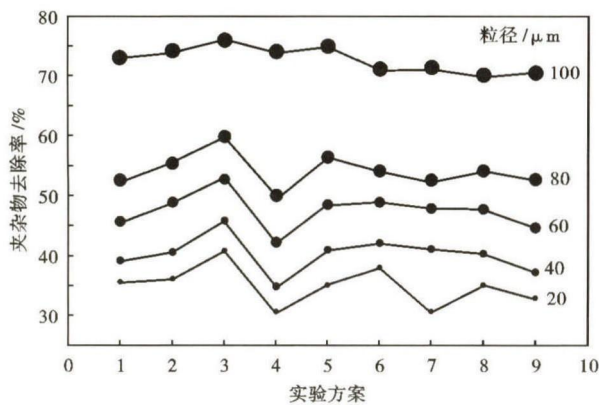


图6 各实验方案中间包钢液各粒径夹杂物上浮去除率

Fig.6 Removal ratio of different size inclusions in liquid of tundish in each tested scheme

表2 实验方案各指标评分及总评分

Table 2 Score of each index and total score for tested schemes

实验方案	$\sigma_t$ 评分/分	$\sigma_T$ 评分/分	R 评分/分	总评分/分
1	69	86	33	62
2	83	88	54	75
3	100	100	100	100
4	66	99	0	55
5	84	89	58	77
6	68	54	53	58
7	82	95	29	69
8	33	0	38	24
9	0	88	17	35

率为30%~41%，由此可见，低拉速下20~100 μm夹杂物上浮去除率为30%~76%。

综合比较各实验方案可知，4#方案下中间包内各粒径夹杂物综合去除率最低，而3#方案下中间包内各粒径夹杂物综合去除率最高，去除效果最好。

## 2.5 中间包内传输特性的综合分析

中间包综合性能评价采用综合评分法，首先将中间包各出口钢液平均停留时间方差、各出口温度

方差、夹杂物去除率3个指标分别按照式(5)和式(6)转化为各自的评分。

$$\text{评分} = \frac{\text{指标值} - \text{指标最小值}}{\text{指标最大值} - \text{指标最小值}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{评分} = \frac{\text{指标最大值} - \text{指标值}}{\text{指标最大值} - \text{指标最小值}} \times 100 \quad (6)$$

其中平均停留时间方差和温度方差按照式(6)计算，夹杂物去除率按照式(5)计算。然后将同一实验方案下各指标的评分取算术平均得到该方案下的总评分，如表2所示。

分析表2中总评分可以发现，8#方案总评分最低，仅为24分，该方案下中间包综合性能最差，而3#方案总评分明显高于其它各方案，评分为100分，该方案下中间包综合性能最优，因此最终确定本模拟条件下3#方案，即导流孔直径 $D=100$  mm、导流孔高度 $H=550$  mm、导流孔夹角 $\theta=50^\circ$ ，中间包综合性能最优。

## 3 结论

(1)中间包各出口处钢液平均停留时间随各出口到长水口之间水平距离的增加而增大，9#方案各出口停留时间差别最大，3#方案差别明显最小。

(2)随着中间包出口到长水口水平距离的增大，出口处钢液温降逐渐增大，8#方案各出口钢液温差最大，3#方案温差最小。

(3)中间包内20~100 μm夹杂物上浮去除率为30%~76%。4#方案各粒径夹杂物综合去除率最低，而3#方案夹杂物综合去除率最高。

(4)8#方案中间包综合性能最差，而3#方案，即导流孔直径 $D=100$  mm、导流孔高度 $H=550$  mm、导流孔夹角 $\theta=50^\circ$ ，为中间包综合性能最优方案。

内蒙古科技大学创新基金资助(2015QDL25)

## 参考文献

- [1] 钟良才,王明安,周小宾,等.5流连铸中间包流场温度场数学模拟[J].过程工程学报,2011,11(1):26-30.
- [2] Moutez B, Ahmed B, Kamel T. Numerical Investigation of the Fluid Flow in Continuous Casting Tundish Using Analysis of RTD Curves [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2009, 16(2): 22-29.
- [3] 陈远清,彭家清,郭愚,等.八流小方坯连铸中间包的数值模拟[J].钢铁钒钛,2014,35(4):83-88.
- [4] 罗辉,王宏杰,赵巍,等.单流中间包温降行为数值模拟[J].辽宁科技大学学报,2014,37(2):153-158.
- [5] 李怡宏,包燕平,赵立华,等.多流中间包导流孔对钢液流动轨迹的影响[J].钢铁,2014,49(6):37-42.
- [6] 刘艳贺,贺铸,刘双,等.二流T型23 t中间包控流装置的数值模拟和结构优化[J].特殊钢,2013,34(5):5-8.
- [7] 王晨辉,马国军,程普红,等.五流L型连铸中间包结构优化的数值模拟[J].铸造技术,2014,35(5):1022-1025.
- [8] Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [9] 贺友多. 传输过程的数值方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991:7-10.
- [10] 贺友多. 传输理论和计算[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991: 194-210.

阮飞(1985-),男,硕士(2012年上海大学),讲师,2009年内蒙古科技大学(本科)毕业,冶金过程模型及仿真研究。E-mail:15201931764@163.com

收稿日期:2016-05-16