

# 基于数值模拟与水模拟的控流装置对大型双流中间包流场的影响

杨泽宇, 杨 健\*, 赵宇航, 李贲通

(上海大学材料科学与工程学院 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444)

**摘 要:**为研究控流装置对某钢厂 78 t 大型双流对称中间包内钢液流场的影响规律, 采用数值模拟计算与水模拟试验相结合的方法研究了不同的控流装置变化的影响。在欧拉-欧拉框架下对原始条件中间包 1 : 1 建模, 研究了有无坝孔、坝与长水口间距、堰与长水口间距、湍流抑制器高度、堰距中间包底部间距和坝高度对双流中间包内钢液流场的影响。结果表明: 随着湍流抑制器高度加大, 堰距中间包底部间距减小, 中间包钢液平均停留时间显著增加, 死区体积分数显著减小。另外, 坝无孔可有效抑制短路流的发展, 延长钢液的流动距离, 增加平均停留时间。增大坝与长水口的间距, 平均停留时间先增大后减小; 增大堰与长水口的间距, 通过坝孔直接流向出钢口的短路流得到发展, 平均停留时间呈减小趋势。

**关键词:**中间包; 数值模拟; 控流装置; 流场示踪剂; 平均停留时间

中图分类号: TF777.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0132-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.019

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Influence of flow control devices on the flow field of a double-strand slab tundish based on numerical simulation and water modeling

YANG Zeyu, YANG Jian\*, ZHAO Yuhang, LI Yuntong

(State Key Laboratory of Advanced Special Steel, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** In order to study the influence of flow control devices on the molten steel flow field in a 78 ton large double strand symmetrical tundish in a certain steel plant, a combined method of numerical simulation and water modeling was adopted to investigate the effects of changes in different flow control devices. The 1:1 modeling of the prototype tundish under the Euler-Euler framework was established to study the influence of the presence or absence of dam holes, the distance between dam and ladle shroud, the distance between weir and ladle shroud, the height of turbulence inhibitor, the distance between weir and bottom of tundish and the height of dam on the molten steel flow field in the double strand tundish. The results show that with increasing the height of turbulence inhibitor, and decreasing the distance between weir and the bottom of tundish, the average residence times of molten steel in tundish increase obviously, and the volume fractions of dead zone decrease significantly. In addition, the dam without holes can effectively inhibit the development of short-circuit flow, extend the flow distance of the molten steel and increase the average residence time. When the distance between the dam and the ladle shroud is increased, the average residence time first increases and then decreases. With in-

收稿日期: 2024-06-20

作者简介: 杨泽宇, 1996 年出生, 男, 满族, 河北保定人, 硕士, 研究方向: 炼钢连铸仿真, E-mail: yangzeyu121@shu.edu.cn;

\* 通讯作者: 杨健, 1965 年出生, 男, 汉族, 湖南株洲人, 博士, 教授; 研究方向: 高品质钢冶炼、冶金人工智能等, E-mail: yang\_jian@t.shu.edu.cn。

creasing the distance between weir and ladle shroud, the short-circuit flow to steel outlet through dam holes is developed, and the average residence time decreases.

**Key words:** tundish, numerical simulation, flow control devices, flow field tracer, average residence time

## 0 引言

在连铸生产中中间包有着缓冲、稳流、净化钢液、实现分流连浇等诸多作用<sup>[1-3]</sup>,是连接钢包和结晶器的最终冶金容器。中间包的内部空间结构因设置不同的控流装置而改变<sup>[4-6]</sup>,进一步影响钢液在中间包内的运动轨迹。钢液在中间包内的停留时间和流动总距离也会因此改变,停留时间长<sup>[7-8]</sup>和流动距离大有利于夹杂物上浮去除、减少钢液对中间包内耐火材料的冲刷侵蚀程度<sup>[9]</sup>。控流装置还可以使中间包更加有效地调节钢水成分和浇铸温度<sup>[10-12]</sup>,优化钢液流场和去除非金属夹杂物,达到提高钢水洁净度的目的<sup>[1,13-14]</sup>。

坝设置于中间包底部并与中间包宽面垂直,可以抬升钢液流向,延长钢液的运动轨迹<sup>[15-16]</sup>,提高非金属夹杂物的上浮去除率<sup>[5,17-19]</sup>。堰通常与坝组合使用,与中间包宽面垂直,设置在中间包上部,且部分浸入钢液内,阻挡钢液沿液面流动,使其改变方向通过堰与中间包底部之间的区域流向坝<sup>[20-22]</sup>,改善钢液的流动性,提高夹杂物的上浮去除率<sup>[23]</sup>。湍流抑制器设置在长水口正下方,保护中间包底部免受钢液冲刷,降低钢液流速折返流向,利于延长平均停留时间,钢液在此处汇聚碰撞会加速夹杂物的上浮去除<sup>[24-28]</sup>。

中间包控流装置的作用在以往研究中已被证实,但是针对不同控流装置独立变化对流场的影响还研究得不够。笔者以某钢铁公司78 t大型双流对称中间包为研究对象,内部设置了坝、堰、湍流抑制器等多种控流装置,依据相似准则搭建了1:4相似比例的水模型,数值模拟结果与水模拟结果相验证,更全面深入地研究了坝孔、坝与长水口的间距、堰与长水口的间距、湍流抑制器高度、堰距中间包底部间距和坝高度等多种不同控流装置独立变化对中间包内钢液流场的影响,阐明了控流装置变化对中间包流场的作用规律,为大型双流中间包流场的优化提供了理论依据。

## 1 数学模型

### 1.1 连续相守恒方程

连续相的质量守恒方程与动量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_1 \vec{u}_{1,i})}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 \vec{u}_{1,i}) + \frac{\partial (\rho_1 \vec{u}_{1,i} \vec{u}_{1,j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_1 + \mu_t) \left( \frac{\partial \vec{u}_{1,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \vec{u}_{1,j}}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_1 \vec{g} + S_i \quad (2)$$

其中,  $\rho_1$ 为连续相的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\vec{u}_1$ 为连续相的速度,  $\text{m/s}$ ;  $p$ 为压力,  $\text{N/m}^2$ ;  $\mu_1$ 为动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_t$ 为湍流黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_1 + \mu_t$ 为连续相的有效黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\vec{g}$ 为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $S_i$ 为动量源项。

### 1.2 湍流方程

湍流方程采用标准  $k-\varepsilon$  模型, 湍动能  $k$  的传输方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_1 k \vec{u}_{1,i}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho_1 \varepsilon \quad (3)$$

湍动能耗散率  $\varepsilon$  的传输方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_1 \varepsilon \vec{u}_{1,i}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - \rho_1 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$G_k$  为湍流动能的产生项, 方程如下:

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial \vec{u}_{1,ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \vec{u}_{1,ji}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \vec{u}_{1,ij}}{\partial x_j} \quad (5)$$

湍流黏度  $\mu_t$  可通过湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\varepsilon$  表示, 其方程如下:

$$\mu_t = C_\mu \rho_1 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

其中,  $k$  为湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$  为湍动能耗散率,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ,  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $C_\mu=0.09$ <sup>[29]</sup>。

### 1.3 组分输运模型

组分输运模型通过第  $i$  种物质的对流扩散方程预估每种物质的质量分数  $Y_i$ , 守恒方程式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{u}_i Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_s \quad (7)$$

其中,  $R_i$  是物质的净生成速率,  $S_s$  是定义源项造成的额外生成速率。

在湍流中, 质量扩散计算方程如下:

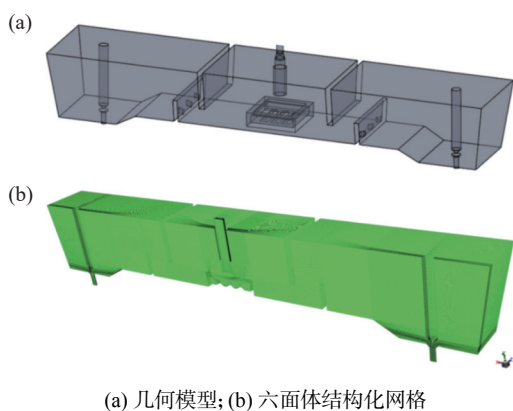
$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{im} + \frac{\mu_i}{S_{c_i}}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (8)$$

其中,  $S_{c_i}$  是湍流施密特数, 默认值为 0.7;  $D_{im}$  是混合物中第  $i$  种物质的扩散系数;  $D_{T,i}$  是混合物中第  $i$  种物质的热扩散系数。

## 2 边界条件与计算方案

### 2.1 边界条件

图 1 为 78 t 双流对称中间包的几何模型和网格划分示意。中间包以其厚度中心截面呈两侧对称, 网格划分采取对半建模方式。整体计算域包含结构化网格单元数约为 190 万, 并对长水口、湍流抑制器和出钢口等区域做局部网格加密处理。网格无关性验证采取三种网格划分进行对比, 计算中监测示踪剂到达坝的时间和示踪剂质量分数在坝处达到最大值的时间, 网格单元数依次为:  $2.4 \times 10^6$ 、 $1.9 \times 10^6$ 、 $1.41 \times 10^6$ 。结果显示示踪剂到达坝的时间依次为: 90、90、92 s, 其质量分数在坝处达到最大值的时间依次为: 169、170、175 s, 网格无关性验证表明课题采用的网格数量可以保证精度, 降低计算成本。



(a) 几何模型; (b) 六面体结构化网格

图 1 双流对称中间包

Fig. 1 Two-strand symmetrical tundish

数值模拟采取以下假设条件: ① 钢液视作不可压缩牛顿流体相; ② 忽略中间包内钢液的传热对内部流场和示踪剂的影响; ③ 示踪剂视为无反应扩散项, 无相互作用; ④ 忽略覆盖剂层和钢液糊状区对钢液流场的影响。

中间包原始条件下的物性参数如表 1 所示。

### 2.2 模拟方案

针对连铸现场生产状况, 为优化中间包流场, 确定各控流装置相关的数值模拟试验方案如表 2 所示, 表 2 中方案 1 为中间包原始条件, 其余方案为对照组。其中方案 2 为无坝孔工况, 方案 3、4、5 为变化

坝与长水口的间距, 方案 6、7 为变化堰与长水口的间距, 方案 8、9、10 分别为改变湍流抑制器高度、堰距中间包底部间距和坝高度。

表 1 中间包的主要物性参数

Table 1 Main parameters of the industrial tundish

| 液相体积/<br>m <sup>3</sup> | 液相流量/<br>(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) | 液相密度/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ) | 平均温度/<br>℃ | 运动黏度×10 <sup>6</sup> /<br>(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) | 示踪剂扩散系数 <sup>[30-31]</sup><br>×10 <sup>9</sup> /(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 11.33                   | 54.464                                      | 7 020                          | 1 520      | 0.912                                                        | 1.1                                                                                |

表 2 中间包数值模拟试验方案

Table 2 Experimental plan of tundish numerical simulation

| 方案 | 坝孔 | 坝与长水口的<br>间距/mm | 堰与长水口的<br>间距/mm | 湍流抑制器高<br>度/mm | 堰距中间包底部间<br>距/mm | 坝高度/<br>mm |
|----|----|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------|
| 1  | 有  | 1 631.5         | 1 131.5         | 250            | 300              | 400        |
| 2  | 无  | 1 631.5         | 1 131.5         | 250            | 300              | 400        |
| 3  | 有  | 1800            | 1 131.5         | 250            | 300              | 400        |
| 4  | 有  | 2000            | 1 131.5         | 250            | 300              | 400        |
| 5  | 有  | 2 200           | 1 131.5         | 250            | 300              | 400        |
| 6  | 有  | 1 631.5         | 900             | 250            | 300              | 400        |
| 7  | 有  | 1 631.5         | 1 400           | 250            | 300              | 400        |
| 8  | 有  | 1 631.5         | 1 131.5         | 300            | 300              | 400        |
| 9  | 有  | 1 631.5         | 1 131.5         | 250            | 400              | 400        |
| 10 | 有  | 1 631.5         | 1 131.5         | 250            | 300              | 300        |

注: 表中斜体字为与中间包原始参数的对比试验数据

## 3 结果与讨论

### 3.1 坝孔对中间包流场的影响

图 2、3 展示的是有孔坝和无孔坝中间包从加入示踪剂开始计时, 40、60、80、120 s 时数值模拟的中间包示踪剂分布形态, 并以水模拟中蓝墨水在中间包内对应时间下的扩散结果做对比验证, 水模型与原型的时间比为 1:2。

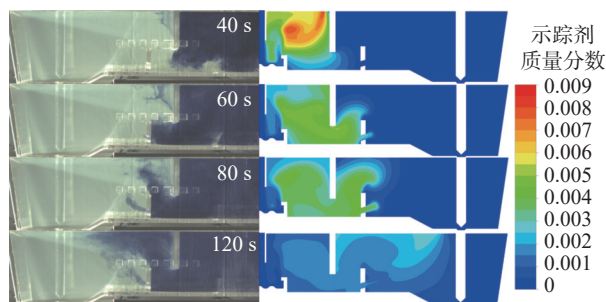


图 2 有孔坝对中间包示踪剂分布的影响

Fig. 2 Effect of dam with holes on the distribution of the tracer in the tundish



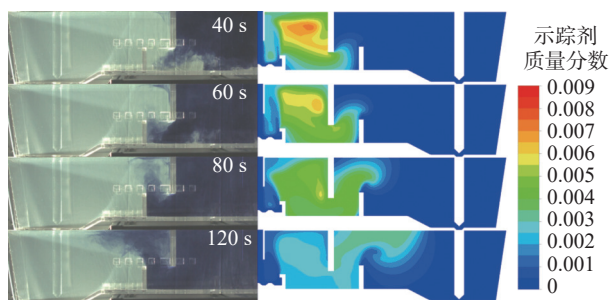
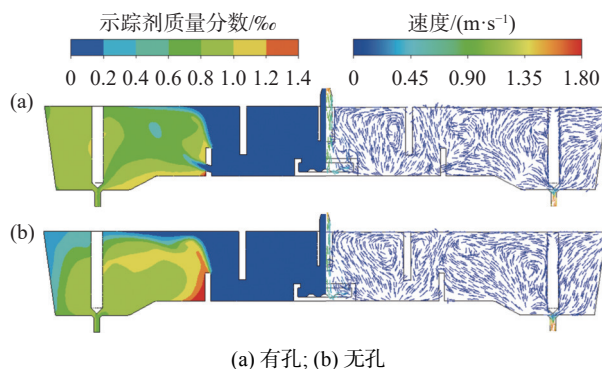


图3 无孔坝对中间包示踪剂分布的影响

Fig. 3 Effect of dam without holes on the distribution of tracer in the tundish

由图2、3可以看出,无孔坝和有孔坝流场变化明显,40 s时有孔坝的示踪剂扩散速度比无孔坝稍慢,但是在60、80、120 s示踪剂穿过坝孔后,其扩散速度增大超过了无孔坝,无孔坝前方被挡住的流体向上流动的角度也比有孔坝的更垂直向上。示踪剂无法通过坝孔直接流向坝后与越过坝上方流动的示踪剂汇合,示踪剂的扩散距离增大,扩散到相同位置需要的时间更长。

图4展示的是数值模拟从加入示踪剂开始计时1 000 s时,中间包厚度中心的示踪剂分布与速度分布情况。图4表明,坝有孔导致坝后存在流向出口方向的钢液,而坝无孔导致中间包内停留的示踪剂增多,表明示踪剂向中间包出口流动的趋势减弱,示踪剂从长水口最终流动到出钢口的平均停留时间变长。



(a) 有孔; (b) 无孔

图4 坝孔对中间包示踪剂分布与速度分布的影响(1 000 s)

Fig. 4 Effect of dam holes on the distribution of tracer and velocity in the tundish at 1 000 s

表3为从数值模拟中间包RTD曲线计算得到的坝孔对中间包流场参数的影响。无孔坝的平均停留时间比有孔坝的平均停留时间长约18 s,而无孔坝的死区体积分数比有孔坝减小了11.86%,这两项主要评价指标均反映无孔坝的优化效果优于有孔坝。数值模拟计算结果与示踪剂流场显示结果相符合。无孔坝完全改变了液体流向,钢液无法穿过坝孔直接流向出钢口方向,抑制了短路流的形成,延长了流股的流动距离,所以平均停留时间增大。

表3 坝孔对中间包流场参数的影响

Table 3 Effect of dam holes on the flow field parameters in the tundish

| 坝孔 | 平均停留时间/s | 混合区体积分数/% | 活塞区体积分数/% | 死区体积分数/% |
|----|----------|-----------|-----------|----------|
| 有  | 694.3    | 27.44     | 54.51     | 18.13    |
| 无  | 712.5    | 31.49     | 52.53     | 15.98    |

### 3.2 坝与长水口的间距对中间包流场的影响

图5、6、7为数值模拟中坝与长水口的间距分别为1 800、2 000、2 200 mm,从加入示踪剂开始计时40、60、80、120 s时的中间包内示踪剂分布情况,并与水模拟流场结果做对比验证。图2、5、6、7对比可以看出,在40 s时图2代表的方案1中间包原始条件中的示踪剂在长水口和堰之间的留存的质量分数最小,表明示踪剂在此处扩散的速度较快,而图5、6、7在同一时间下示踪剂于此处留存较多,质量分数较大,停留时间长,利于增加中间包的平均停留时间,并且坝与长水口的间距从1 800 mm增加到2 000 mm,长水口与堰之间的示踪剂质量分数逐渐减小。120 s时图5中的示踪剂刚越过坝,到达坝的斜上方,其余方案示踪剂的扩散前沿都比此方案3更接近塞棒,方案3示踪剂的质量分数为四个方案中最小,则坝与长水口的间距1 800 mm最有利于延长平均停留时间。分析结果表明,随着坝与长水口的间距逐渐增大,示踪剂的分布情况呈现出流动至坝后方到出水口间的示踪剂浓度先减少后增多,表明示踪剂在中间包内的停留时间先增大后减小。

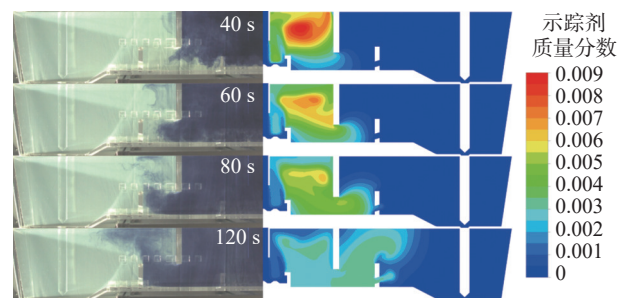


图5 坝与长水口的间距1 800 mm对中间包示踪剂分布的影响

Fig. 5 Effect of the distance between the dam and ladle shroud on the distribution of tracer in the tundish. The distance between the dam and ladle shroud is 1 800 mm

图8为数值模拟中从加入示踪剂开始计时1 000 s时,中间包厚度中心的示踪剂分布与速度分布情况。图8表明,增大坝与长水口间的距离,坝堰间距增大,钢液撞击坝后抬升趋势减弱,流向液面更平缓,冲击减弱,并且中间包内停留的示踪剂先增多后减少,表明示踪剂向中间包出口流动的趋势先减

弱后增强。此外,坝与长水口间距增大,还导致堰后区域的示踪剂增多,表明堰后死区体积增大,不利于流场优化。

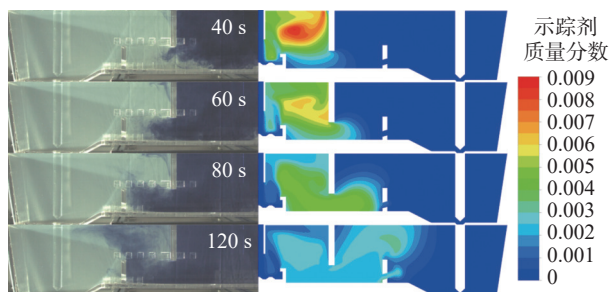


图6 坝与长水口的间距 2 000 mm 对中间包示踪剂分布的影响  
Fig. 6 Effect of the distance between the dam and ladle shroud on the distribution of tracer in the tundish. The distance between the dam and ladle shroud is 2 000 mm

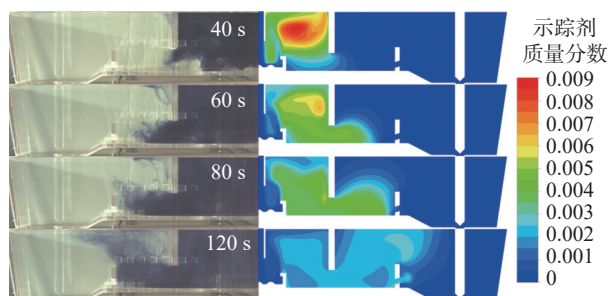


图7 坝与长水口的间距 2 200 mm 对中间包示踪剂分布的影响  
Fig. 7 Effect of the distance between the dam and ladle shroud on the distribution of tracer in the tundish. The distance between the dam and ladle shroud is 2 200 mm

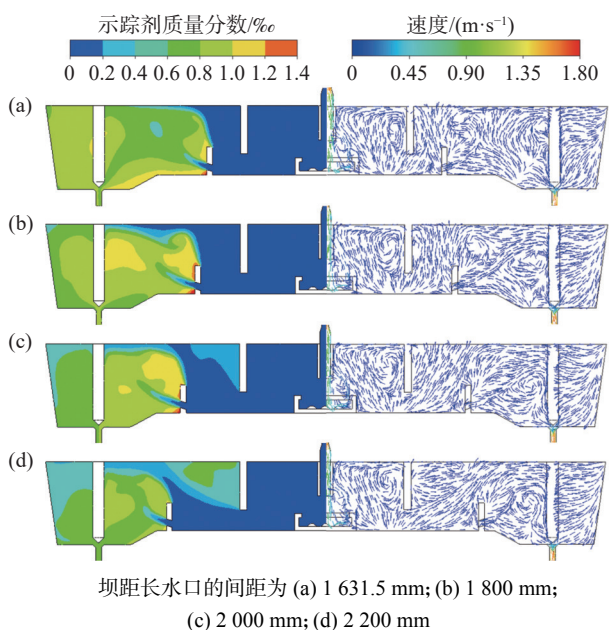


图8 坝与长水口的间距对中间包示踪剂分布与速度分布的影响(1 000 s)  
Fig. 8 Effect of the distance between the dam and ladle shroud on the distribution of tracer and velocity in the tundish at 1 000 s

表4 为从本节数值模拟中间包 RTD 曲线计算得到的坝与长水口间距对中间包流场参数的影响。随着坝和长水口间距的增大,平均停留时间先增大后减小,死区体积分数先减小后增大,其中 1 800 mm 坝间距的平均停留时间最大为 718.6 s,死区体积分数最小;2 200 mm 间距的死区体积分数最大,比最小值增大了 24.3%,所以 1 800 mm 间距为本组模拟最优条件。RTD 计算结果与数值模拟计算的示踪剂显示结果一致,即增大坝与长水口的间距,钢液向中间包出口流动的趋势先减弱后增强,平均停留时间先增大后减小。

表4 坝与长水口的间距对中间包流场参数的影响  
Table 4 Effect of the distance between the dam and ladle shroud on the flow field parameters in the tundish

| 坝与长水口<br>的间距/mm | 平均停留<br>时间/s | 混合区体积<br>分数/% | 活塞区体积<br>分数/% | 死区体积<br>分数/% |
|-----------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| 1 631.5         | 694.3        | 27.44         | 54.51         | 18.13        |
| 1 800           | 718.6        | 31.3          | 53.44         | 15.23        |
| 2000            | 706.7        | 29.68         | 54.13         | 16.66        |
| 2 200           | 687.5        | 27.72         | 53.35         | 18.93        |

### 3.3 堰与长水口间距对中间包流场的影响

图9、10 分别是数值模拟中堰与长水口的间距对应尺寸 900、1 400 mm,从加入示踪剂开始计时 40、60、80、120 s 时的中间包内示踪剂分布情况。

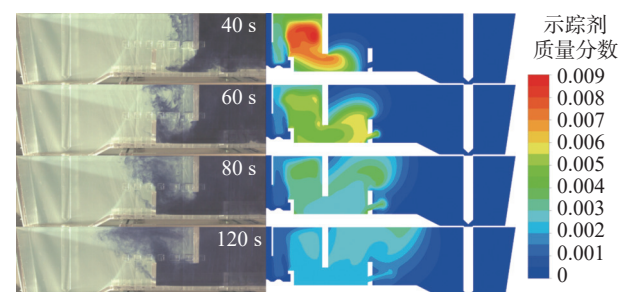


图9 堰与长水口的间距 900 mm 对中间包示踪剂分布的影响  
Fig. 9 Effect of the distance between the weir and ladle shroud on the distribution of tracer in the tundish. The distance between the weir and ladle shroud is 900 mm

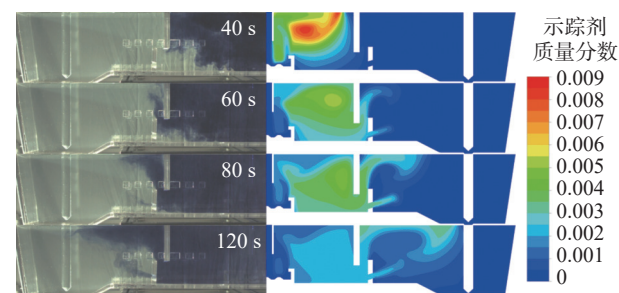
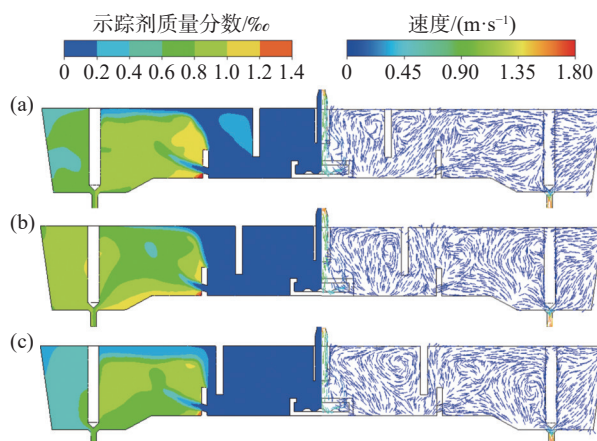


图10 堰与长水口的间距 1 400 mm 对中间包示踪剂分布的影响  
Fig. 10 Effect of the distance between the weir and ladle shroud on the distribution of tracer in the tundish. The distance between the weir and ladle shroud is 1 400 mm



对比观察图2、9、10,在40 s时图9中,长水口与堰之间的区域内的示踪剂质量分数最大,大部分示踪剂在湍流抑制器中折返方向流出后还没充分扩散而聚集于此,扩散前沿越过堰底流向了坝。而120 s时图9中示踪剂的扩散前沿刚到达坝与塞棒中间靠近液面的区域,慢于图2、10中的扩散速度,表明其在中间包内的停留时间比较长,流场的优化效果较好。同时,坝堰间距减小后120 s时图10显示通过坝孔的射流有更长的流动距离,且坝后方示踪剂的扩散不均匀,表明此处区域存在部分流动缓慢的液体,存在死区的可能性增大。

图11是数值模拟中从加入示踪剂开始计时1 000 s时,中间包厚度中心的示踪剂分布与速度分布情况。图11表明,增大堰与长水口间的距离,坝堰间距减小,钢液流过堰后很快撞击坝,速度增大,流股愈发垂直冲向液面,同时中间包内停留的示踪剂减少,表明示踪剂向中间包出口流动的趋势增强。此外,堰与长水口间距增大,还导致堰后区域的示踪剂减少,表明堰后死区体积减小。



堰距长水口的间距为(a) 900 mm;(b) 1 131.5 mm;(c) 1 400 mm  
图11 堰与长水口的间距对中间包示踪剂分布与速度分布的影响(1 000 s)

Fig. 11 Effect of the distance between the weir and ladle shroud on the distribution of tracer and velocity in the tundish at 1 000 s

表5为从本节数值模拟中间包RTD曲线计算得到的堰与长水口的间距对中间包流场参数的影响。随着堰与长水口间距的增大,即坝堰间距的减小,平均停留时间逐渐减小,死区体积分数逐渐增大,其中900 mm间距的平均停留时间为737.9 s,该时间最长,优于1 131.5 mm间距的原始条件,死区体积分数也比原始条件减小了28.41%。而1 400 mm间距有最小的堰坝距离,其平均停留时间最短,效果最差。增大堰与长水口的间距,通过坝孔的流股增多,

坝后短路流得到发展,液体越过坝后向中间包出水口流动的趋势加强,所以平均停留时间减小。

表5 堰与长水口的间距对中间包流场参数的影响

Table 5 Effect of the distance between the weir and ladle shroud on the flow field parameters in the tundish

| 堰与长水口的间距/mm | 平均停留时间/s | 混合区体积分数/% | 活塞区体积分数/% | 死区体积分数/% |
|-------------|----------|-----------|-----------|----------|
| 900         | 737.9    | 33.36     | 53.65     | 12.98    |
| 1 131.5     | 694.3    | 27.44     | 54.51     | 18.13    |
| 1 400       | 686.0    | 20.9      | 59.75     | 19.1     |

### 3.4 湍流抑制器高度、堰距中间包底部间距和坝高度对中间包流场的影响

图12为数值模拟中从加入示踪剂开始计时40、60、80、120 s时的中间包内示踪剂分布情况,以水模拟流场结果做对比验证。图12中湍流抑制器的高度从250 mm加高到了300 mm。

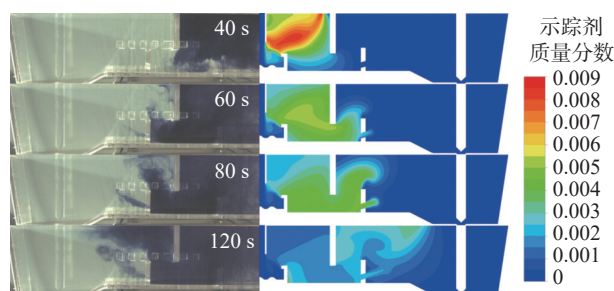


图12 湍流抑制器高度对中间包示踪剂分布的影响

Fig. 12 Effect of the height of the turbulence inhibitor on the distribution of tracer in the tundish

从图2和图12对比后看出,40 s和60 s时刻下,在湍流抑制器高度加高后,示踪剂流出湍流抑制器并沿液面继续流动至挡堰附近的扩散速度减小,大部分示踪剂还聚集在长水口出口附近,有继续向斜上方液面扩散的趋势,此处区域示踪剂浓度比原始条件大,表明流体运动速度减小,示踪剂的扩散速度也随着减小,受到了加高湍流抑制器的影响。湍流抑制器可以大量消耗高速流动的钢液湍动能,折返其流向,当湍流抑制器的高度加高后强化了这部分作用,更加有利于降低钢液流速。

图13为数值模拟从加入示踪剂开始计时1 000 s时,中间包厚度中心的示踪剂分布和速度分布情况。图13表明,增大湍流抑制器高度或减小坝高度,中间包内停留的示踪剂增多,表明示踪剂向中间包出口流动的趋势减弱,同时湍流抑制器高度加高后,折返的钢液对液面的冲击减弱,速度减小,涡心下移。增大堰与中间包底部的距离,中间包内停留的示踪剂减少,表明示踪剂向中间包出口流动的趋势增强。并且堰与中间包底部距离增大后,堰底和坝顶的高

度差减小,则被堰坝结构导流的钢液在此处区域流动的距离减小,随流体流动的示踪剂在中间包内流动的距离也减小,停留时间相应缩短。

从本节数值模拟中间包 RTD 曲线计算得到的湍流抑制器高度 300 mm、堰距中间包底部间距 400 mm 和坝高度 300 mm 对中间包流场参数的影响,对应的试验方案为方案 8、9、10,并与原始条件(方案 1)进行了对比,结果见表 6。由表 6 可知,增大湍流抑制器高度或适当减小坝高度,平均停留时间均表现出增大的趋势,而其中湍流抑制器高度的加高对平均停留时间的涨幅影响最大,达到了 723.5 s,比原始条件的平均停留时间延长了 4.21%,死区体积分数相比减小了 19.03%。由表 6 可知,增大堰距中间包底部间距后,平均停留时间变小,死区体积分数增大,且在本节模拟中死区体积分数增幅最大,变化率为 20.9%。堰距中间包底部间距增大后,堰底与坝顶间的高度差减小,导致液体向中间包出水口流动的趋势增强,形成短路流的可能性增大,所以平均停留时间减小。数值模拟中间包示踪剂的分布中展现出的不同控流装置对钢液流场的影响与表 6 的结果一致。

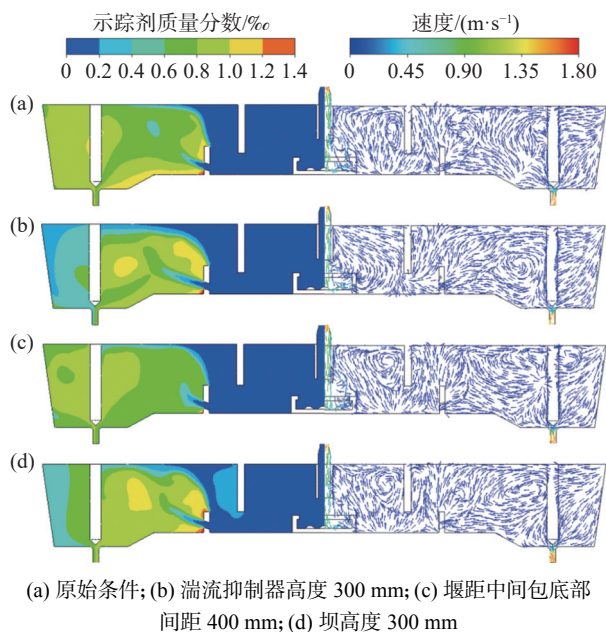


图 13 湍流抑制器高度、堰距中间包底部间距和坝高度对中间包示踪剂分布和速度分布的影响(1 000 s)

Fig. 13 Effect of the height of the turbulence inhibitor, the distance between the weir and the tundish bottom, and the height of the dam on the distribution of tracer and velocity in the tundish at 1 000 s

表 6 湍流抑制器高度、堰距中间包底部间距和坝高度对中间包流场参数的影响

Table 6 Effect of the height of the turbulence inhibitor, the distance between the weir and the tundish bottom, and the height of the dam on the RTD curves in the tundish

| 方案 | 平均停留时间/s | 混合区体积分数/% | 活塞区体积分数/% | 死区体积分数/% |
|----|----------|-----------|-----------|----------|
| 1  | 694.3    | 27.44     | 54.51     | 18.13    |
| 8  | 723.5    | 30.88     | 54.44     | 14.68    |
| 9  | 662.1    | 21.24     | 56.84     | 21.92    |
| 10 | 717.8    | 31.38     | 53.27     | 15.35    |

## 4 结论

采用数值模拟计算结合水模型试验的方法研究了坝孔、坝与长水口的间距、堰与长水口的间距、湍流抑制器高度、堰距中间包底部间距和坝高度等多个控流装置的不同结构尺寸和设置位置对中间包钢液流场的影响,结论如下:

1) 坝无孔条件下,钢液无法穿过坝孔快速流向出钢口方向,有利于抑制短路流的发展,促进非金属夹杂物上浮去除。对比有孔条件,平均停留时间延长了 18 s,死区体积分数减小了 11.86%。但无孔坝的使用也会使中间包终浇包内残钢量较大,所以坝有孔或无孔的选择还需要综合考虑对铸坯质量和残钢量的要求。

2) 增大坝与长水口的间距,堰坝间距增大,示踪剂分布呈现出流动至坝与出水口间的浓度先减少后增多的规律。随着该间距增大,示踪剂在中间包内的平均停留时间先增大后减小。坝与长水口的间距为 1 800 mm 时,平均停留时间最大,为 718.6 s,死区体积分数最小。

3) 增大堰与长水口的间距,堰坝间距减小,示踪剂的扩散速度呈现逐渐增大的趋势,并且平均停留时间逐渐减小。堰与长水口的间距为 900 mm 时,堰坝间距最大,平均停留时间最大,为 737.9 s,死区体积分数比原始条件减小了 28.41%。

4) 增大湍流抑制器高度,加速长水口附近钢液的湍动能的耗散,钢液流速减小,示踪剂扩散变慢。增大堰距中间包底部间距,死区体积分数逐渐增大,且与其他工况相比增幅最大,变化率为 20.9%。湍流抑制器高度的加高增加了平均停留时间,其涨幅影响最大,达到 723.5 s,比原始条件的平均停留时间延长了 4.21%,死区体积分数相比减小了 19.03%。

## 参考文献

- [1] BAO Y P, WANG M. Development trend of tundish metallurgical technology[J]. Continuous Casting, 2021, 40(5): 2-11.  
(包燕平, 王敏. 中间包冶金技术发展趋势[J]. 连铸, 2021, 40(5): 2-11.)
- [2] SAHAI Y. Tundish technology for casting clean steel: A review[J]. Metall Mater Trans B, 2016, 47(4): 2095-2106.
- [3] BRAUN A, WARZECHA M, PFEIFER H. Numerical and physical modeling of steel flow in a two-strand tundish for different casting conditions[J]. Metall Mater Trans B, 2010, 41(3): 549-559.
- [4] LIU Y B, YANG J. Progress in tundish flow field control technology[J]. Continuous Casting, 2021(5): 12-33.  
(刘逸波, 杨健. 中间包流场控制技术的进展[J]. 连铸, 2021(5): 12-33.)
- [5] JHA P K, RAO P S, DEWAN A. Effect of height and position of dams on inclusion removal in a six strand tundish[J]. ISIJ Int, 2008, 48(2): 154-160.
- [6] LING H T, ZHANG L F. Numerical simulation of the growth and removal of inclusions in the molten steel of a two-strand tundish[J]. Jom, 2013, 65(9): 1155-1163.
- [7] MAZUMDAR D, GUTHRIE R I L. The physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems[J]. ISIJ Int, 1999, 39(6): 524-547.
- [8] SAHAI Y, EMI T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes[J]. ISIJ Int, 1996, 36(6): 667-672.
- [9] LEI H. New insight into combined model and revised model for RTD curves in a multi-strand tundish[J]. Metall Mater Trans B, 2015, 46(6): 2408-2413.
- [10] LING H T, XU R, WANG H J, *et al.* Multiphase flow behavior in a single-strand continuous casting tundish during ladle change[J]. ISIJ Int, 2020, 60(3): 499-508.
- [11] ZHANG J J, GAO W F, CAO T Y, *et al.* Experiment on hydraulic model of optimization of flow field in 60 t two-strand tundish[J]. Steel Making, 2013, 29(5): 61-64.  
(张剑君, 高文芳, 曹同友, 等. 武钢 60 t 双流连铸中间包流场优化试验研究[J]. 炼钢, 2013, 29(5): 61-64.)
- [12] ZHANG H, WANG J H, FANG Q, *et al.* Research progress on numerical simulation of transient tundish casting[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2021, 44(6): 401-412.  
(张华, 王家辉, 方庆, 等. 中间包非稳态浇注过程数值模拟研究进展[J]. 辽宁科技大学学报, 2021, 44(6): 401-412.)
- [13] LIU C, XIAO A D, HE Z, *et al.* Numerical investigation on motion and removal of inclusions in continuous casting tundish with multiorifice filter [J]. Steel Res Int, 2022, 93(12).
- [14] QU T P, JIANG M F, WANG D Y. Physical and numerical simulation on characteristic of fluid flow in four-strand tundish[J]. China Metallurgy, 2009, 19(1): 6-11.  
(屈天鹏, 姜茂发, 王德永. 四流中间包钢液流动行为的数学物理模拟[J]. 中国冶金, 2009, 19(1): 6-11.)
- [15] SINGH R K, PAUL A, RAY A K. Modelling of flow behaviour in continuous casting tundish[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2003, 32(3): 137-146.
- [16] SONG L N, TIE Z P. Metallurgical effects of commonly used flow control devices in asymmetric tundish[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(6): 692-703.  
(宋丽娜, 铁占鹏. 非对称中间包常用控流装置冶金效果的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(6): 692-703.)
- [17] LIU D X, GONG W, ZHU J J, *et al.* Numerical simulation optimization of flow field in slab tundish using flow control device[J]. Continuous Casting, 2023(2): 10-18.  
(刘东旭, 龚伟, 朱江江, 等. 控流装置对板坯中间包流场的数值模拟优化[J]. 连铸, 2023(2): 10-18.)
- [18] TACKE K-H, LUDWIG J C. Steel flow and inclusion separation in continuous casting tundishes[J]. Steel Research, 1987, 58(6): 262-270.
- [19] LI M W, LI Y H, DONG C. Numerical simulation of the effect of flow holes on the behavior of fluid in tundish[J]. China Metallurgy, 2020, 30(6): 55-62.  
(李茂旺, 李怡宏, 董超. 流钢孔对中间包流体行为影响的数值模拟[J]. 中国冶金, 2020, 30(6): 55-62.)
- [20] ZHANG S J, ZHU M Y. Water model study of removal mechanism of inclusion in continuous casting tundish[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(9): 1004-1008.  
(张胜军, 朱苗勇. 连铸中间包夹杂物去除机理的水模型研究[J]. 金属学报, 2007, 43(9): 1004-1008.)
- [21] LI N, BAO Y P, LIN L, *et al.* Study on the influence of slag retaining wall on flow field in slab continuous casting tundish[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2014, 35(3): 83-87.  
(李宁, 包燕平, 林路, 等. 挡渣墙对板坯连铸中间包流场的影响研究[J]. 钢铁钒钛, 2014, 35(3): 83-87.)
- [22] PATIL S P, VISWANATHAN N N. Numerical investigation of single-strand slab casting tundish flow with heat transfer and inclusion transport[J]. Trans Indian Inst Met, 2021, 74(2): 369-379.
- [23] SAHAI Y, AHUJA R. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes[J]. Ironmak Steelmak, 1986, 13(5): 241-247.

(下转第 148 页)



- [18] YAO Y K, ZHU M W, WANG D Y, *et al.* Investigation of nozzle blockage mechanism during feeding RE into tundish[J]. Chinese Rare Earth, 2004, 25(5): 17.  
(姚永宽, 朱明伟, 王德永, 等. 中间包喂稀土水口结瘤机理的研究[J]. 稀土, 2004, 25(5): 17.)
- [19] GUO H H, SONG B, HOU L S, *et al.* Effect of RE on solute redistribution of weather resisting steel[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2010, 28(3): 360.  
(郭宏海, 宋波, 侯立松, 等. RE 对耐候钢溶质再分配的影响[J]. 稀土研究学报, 2010, 28(3): 360.)
- [20] HUI C H, LI T J, JIN W Z. Effect of RE on cleanliness, undercooling, structure and properties of steel 4137[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(4): 8.  
(回春华, 李廷举, 金文中. 稀土对 4137H 钢纯净度、过冷度、组织及性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(4): 8.)
- [21] YANG F, ZHANG Y S. Research on smelting process control of rare earth steel and mechanism of nozzle clogging[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2019, 45(6): 27.  
(杨峰, 张玉双. 稀土钢冶炼工艺控制及水口堵塞机理的研究[J]. 包钢科技, 2019, 45(6): 27.)
- [22] FRUEHAN R J. The free energy of formation of  $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{S}$  and the nonstoichiometry of cerium oxides[J]. Metallurgical Transactions B, 1979, 10: 143.
- [23] KALAKOTA V R. Sulphur removal using regenerable sorbents of rare earth/transition metal oxides[M]. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 2008.
- [24] LI X, JIANG Z, GENG X, *et al.* Evolution mechanism of inclusions in H13 steel with rare earth magnesium alloy addition[J]. ISIJ International, 2019, 59(9): 1152.
- [25] WANG L M. Application of rare earth in low-alloy and alloyed steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016, 70.  
(王龙妹. 稀土在低合金及合金钢中的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016, 70.)
- [26] CHEN S, YANG F, ZHANG J H, *et al.* Applications of rare earth Ce in smelting and continuous casting processes of microalloyed steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2019, 45(6): 71.  
(陈胜, 杨峰, 张嘉华, 等. 稀土 Ce 在微合金钢冶炼连铸过程的应用[J]. 包钢科技, 2019, 45(6): 71.)
- [27] WAUDBY P E. Rare earth additions to steel[J]. International Metals Reviews, 1978, 23(1): 74.
- [28] KINGERY W D, BERG M. Study of the initial stages of sintering solids by viscous flow, evaporation - condensation, and self - diffusion[J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(10): 1205.
- [29] LIU Z, LI B. Transient motion of inclusion cluster in vertical-bending continuous casting caster considering heat transfer and solidification[J]. Powder Technology, 2016, 287: 315.

编辑 张维娜

(上接第 139 页)

- [24] ZHU H H, WANG M, YAO C, *et al.* Numerical simulation of inclusion removal behavior in six strand T-type tundish[J]. China Metallurgy, 2022, 32(8): 89-97.  
(祝航航, 王敏, 姚骋, 等. 六流 T 型中间包夹杂物去除行为的数值模拟[J]. 中国冶金, 2022, 32(8): 89-97.)
- [25] MADIAS J, MARTIN D, FERREYRA M, *et al.* Design and plant experience using an advanced pouring box to receive and distribute the steel in a six strand tundish[J]. ISIJ Int, 1999, 39(8): 787-794.
- [26] MORALES R, LOPEZ S, PALAFOX J, *et al.* Numerical and modeling analysis of fluid flow and heat transfer of liquid steel in a tundish with different flow control devices[J]. ISIJ Int, 1999, 39(5): 455-462.
- [27] ZHANG L, HUANG Y W, YANG S B, *et al.* Water model experimental study on turbulence controller of continuous casting tundish[J]. Iron & Steel, 2002(12): 17-18.  
(张立, 黄耀文, 杨时标, 等. 连铸中间包湍流控制器水模实验研究[J]. 钢铁, 2002(12): 17-18.)
- [28] MERDER T, PIEPRZYCA J. Optimization of two-strand industrial tundish work with use of turbulence inhibitors: physical and numerical modeling[J]. Steel Research International, 2012, 83(11): 1029-1038.
- [29] WANG L, YANG J, LIU Y B. Numerical investigation for effects of polydisperse argon bubbles on molten steel flow and liquid slag entrapment in a slab continuous casting mold[J]. Metall Mater Trans B, 2022, 53(6): 3707-3721.
- [30] WANG G, YUN M, ZHANG C, *et al.* Flow mechanism of molten steel in a single-strand slab caster tundish based on the residence time distribution curve and data[J]. ISIJ Int, 2015, 55(5): 984-992.
- [31] FANG Q, ZHANG H, WANG J, *et al.* Effect of electromagnetic stirrer position on mold metallurgical behavior in a continuously cast bloom[J]. Metall Mater Trans B, 2020, 51(4): 1705-1717.

编辑 邓淑惠