

# 中间包汇流旋涡的形成机理及旋转塞棒抑旋研究

王家辉, 张华\*, 方庆, 赵鹏

武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081

## The Mechanisms of Free-surface Vortex Formation and Vortex

### Suppression by Rotating Stopper-rod in Tundish

Wang Jiahui, Zhang Hua\*, Fang Qing, Zhao Peng

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, 430081, China

## 1. 前言

在中间包浇注末期, 当中间包内钢液液位过低时, 浸入式水口上方会形成汇流旋涡, 液面逐渐下凹, 最终贯通水口, 使得覆盖渣、空气及团聚的夹杂物随着汇流旋涡卷入水口。同时由汇流旋涡引起的夹渣易导致钢液外来夹杂物变多、钢液的二次氧化、中间包内残余钢量大及浸入式水口堵塞等问题<sup>[1-3]</sup>。目前常用的预防措施是在液面达到形成自由液面旋涡的临界高度前停止浇注, 但会造成大量的残余钢, 经济效益较低。Ruan<sup>[4]</sup>、赵鹏<sup>[5]</sup>和 Wang<sup>[6]</sup>等提出了通过优化挡墙和挡坝位置、优化水口结构、降低拉速和底部吹氩等方法抑制汇流旋涡的产生, 但这些方法不仅成本较大, 同时会影响中间包内的稳态流场。因此本文提出一种旋转型塞棒抑制中间包汇流旋涡的新技术, 其原理是在保留原塞棒系统的基础上, 优化塞棒头部结构, 加装一个变频电机或气动马达带动塞棒旋转, 当钢液处于低液面时, 塞棒沿与旋涡方向相反的方向旋转, 扰动水口上方自由表面旋涡的形成。该技术较之于其他的旋涡抑制措施具有不改动包体结构、安装和操作简便的优点。

## 2. 数理模型的建立

### 2.1. 数学模型

在中间包浇注末期过程中, 由于中间包中流体流动复杂, 对中间包内流体流动的数值模拟作以下假设:

- (1) 忽略温度对流体流动的影响;
- (2) 流体流动考虑粘性, 且模型内流体视为不可压缩流体;
- (3) 流体的密度、粘度、比热容等物理性质不变;
- (4) 整个排水过程不考虑出口速度变化, 出水口流体速度保持恒定;
- (5) 模型内流体的初始状态为稳态浇注时的状态, 油层和空气初始为静止状态。

在计算稳态流场获得初始条件后, 进行非稳态计算。使用 Fluent 的 patch 功能定义钢液、钢渣和空气三相。通过追踪钢渣界面来获取中间包浇注末期汇流旋涡的形态, 采用 LES (Large eddy simulation) -VOF (Volume of Fluid) 耦合模型来计算整个中间包浇注末期。浇注末期计算过程的数值模拟的边界条件为:

- (1) 入口和上表面: 非稳态过程空气从入口和上表面进入模型中, 入口边界类型压力入口, 空气体积分数为 1;
- (2) 出口: 出口类型设为速度出口;
- (3) 固体壁面设为无滑移壁面。

## 2.2. 物理模型

中间包内钢液温度高，由于现有的测量手段很难直接测量出中间包内钢液的流场，且测量成本极高。因此，冶金学者通常使用相似原理进行水力学实验，通过水在模型中的流动来模拟钢液在中间包内的流动。使用相似原理的基本条件是几何相似与动力相似。

为了验证数学模型里的多相流模型，本次实验使用空气-油-水三相进行实验。由于水本身就是无色透明的，纯品煤油也是无色透明的。因此，本次实验选择使用黄色透明的 100 号真空泵油。图 1 为本实验所采用的实验装置示意图及实物图。

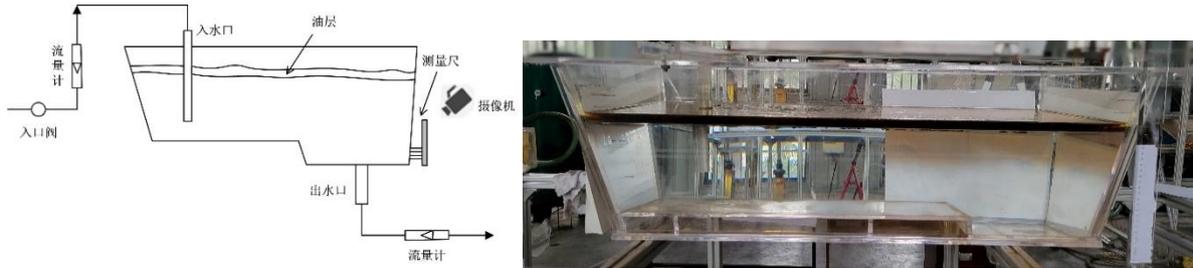


图 1 水力学实验装置示意图及实物图

Fig. 1 Schematic diagram and physical views of water model experiment devices

## 3. 结果与分析

以稳态浇注结束最后一刻为浇注末期的开始时间 ( $t=0\text{s}$ )，揭示了中间包浇注末期汇流旋涡从液面下凹到贯穿水口的整个发展过程。通过研究发现，汇流旋涡的形成经历了涡核形成、不断下凹、贯通水口，最终汇流旋涡移动到浸入式水口正上方。其中钢液自身的重力为汇流旋涡的形成和发展提供了能量。由于中间包挡坝上的导流孔和浸入式水口不在同一水平线上。当钢液从大坝上的导流孔流向浸入式水口时，钢液相对于浸入式水口中心具有一定切向速度。汇流旋涡形成的过程遵循角动量守恒，这使得从导流孔流向浸入式水口钢液的切向速度越来越大，钢液旋转得越来越快。由于钢液流动的连续性，浸入式水口附近的钢液的旋转会驱使上方的钢液旋转，汇流旋涡的涡核开始在渣-钢界面处形成。

由于塞棒的存在，涡核最初不是在浸入式水口正上方形成的，而是在塞棒附近形成。随着汇流旋涡的发展，旋涡的中心流速越来越快，根据伯努利定理，液体表面的中心将逐渐降低，汇流旋涡的旋转轴是倾斜的。随着钢-渣界面的不断降低，汇流旋涡继续发展，最终汇流旋涡的旋转轴移动到浸入式水口正上方。

图 2 为中间包稳态浇注时浸入式水口中心纵截面的速度云图，从图 2 中可以看出，中间包左右两部分流场对称性很高，但通过对浇注末期第一流和第二流钢液流动的研究发现，其流动状态是不对称的，说明浇注末期的不对称性不是由稳态流场的不对称性引起的，而是由于中间包浇注末期，钢液流速快，湍流度高，且 LES 模型考虑了速度的各向异性。

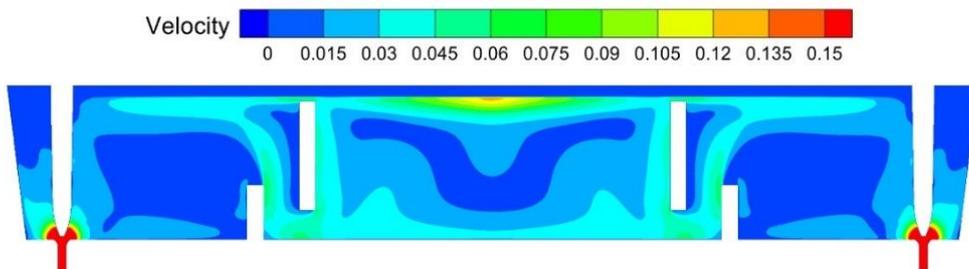


图 2 中间包稳态浇注时浸入式水口中心纵截面速度云图

Fig.2 Velocity contour in vertical section of SEN at steady casting of tundish

图 3 为第一流和第二流上方汇流旋涡贯通水口时的钢-渣界面，从图 3 中可以看出中间包浇注末期第一流和第二流钢液流动出现了不对称现象。第二流上方汇流旋涡贯通水口的时间为 316 s，而此时第一流上方汇流旋涡仅处于下凹状态，最终第一流上方汇流旋涡贯通水口的时间为 328 s。在 316 s 至 328 s 期间，第一流上方的汇流旋涡一直处于下凹状态，却没有贯通水口。此时中间包内的残余钢的质量为 5323 kg，第一股和第二股自由表面涡流的临界高度分别为 9.7 cm 和 13.8 cm。

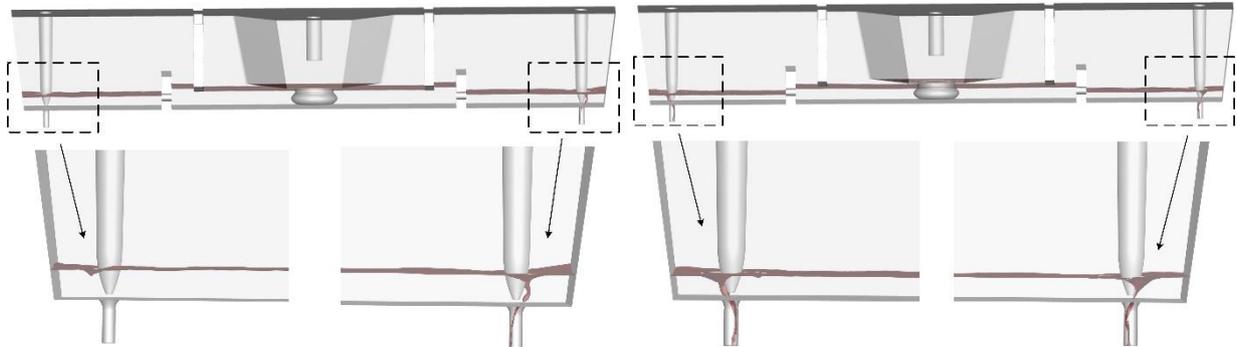


图 3 中间包浇注末期不同时间的钢-渣界面：(a) 316 s；(b) 328 s

Fig. 3 Steel-slag interface at different time at the end of tundish casting: (a) 316 s, (b) 328 s

通过研究原型塞棒不旋转可知双流中间包浇注末期汇流旋涡形成时间为 316 s，塞棒开始旋转的时间必须早于 316 s，因此研究了开始旋转时间分别为 270 s、280 s、290 s、300 s、310 s 时中间包浇注末期汇流旋涡形成的临界高度。同时塞棒过快的转速会导致钢液和钢渣加快对塞棒的侵蚀，使得钢液夹杂物数量变多。因此，研究了旋转塞棒的转速分别为 30 rpm、60 rpm、90 rpm、120 rpm 时中间包浇注末期汇流旋涡形成的临界高度。

通过对双流中间包浇注末期塞棒不同开始旋转时间和转速的模拟计算，结果表明在中间包浇注末期汇流旋涡开始形成之前使塞棒旋转，可以有效延后浇注末期汇流旋涡的形成时间，降低汇流旋涡形成的临界高度，减少残钢量。当开始旋转时间为 270 s、280 s 和 290 s 时，随着塞棒旋转速度的提高，汇流旋涡形成的临界高度先呈下降趋势，后呈上升趋势。对于开始旋转时间为 280 s 和 290 s，最佳转速为 60 rpm，此时残钢量最少。由于塞棒是一直旋转的，当转速过快时，旋转塞棒的抑制作用减弱，反而会促进汇流旋涡的形成，使得中间包内的残钢量增加。当开始旋转时间为 300 s 和 310 s 时，开始旋转时间离汇流旋涡形成时间过近，需要更快的转速来抑制汇流旋涡的形成。随着旋转塞棒的转速增加，第二流上方汇流旋涡形成的临界高度不断降低，而第一流上方汇流旋涡形成的临界高度却又先减少后增加，但是中间包总体的残钢量一直减少。在所有方案中，旋转塞棒在钢包停止浇注 290 s 后开始旋转，塞棒转速为 60 rpm 时，中间包的残钢量最少，为 3241 kg，相比于塞棒不旋转情况下，减少的残钢量为 2082 kg。

## 4. 结论

(1) 当钢液从大坝上的导流孔流向浸入式水口时，钢液的流动遵循角动量守恒，原本具有的切向速度越来越大，根据伯努利定理，液体表面的中心将逐渐降低。汇流旋涡的旋转轴最初是倾斜的，随着汇流旋涡继续发展，最终汇流旋涡的旋转轴移动到浸入式水口正上方。

(2) 由于湍流的不确定性，双流中间包的左右两水口上方汇流旋涡的形成时间并非完全相同。第二流上方汇流旋涡贯通水口的时间为 316 s，而此时第一流上方汇流旋涡仅处于下凹状态，最终第一流上方汇流旋涡贯通水口的时间为 328 s。

(3) 使用旋转塞棒技术可以有效抑制中间包浇注末期汇流旋涡的形成, 对于原型塞棒, 最佳旋转条件为在 290 s 以 60 rpm 一直旋转至汇流旋涡贯通水口。此时中间包内残钢为 3241 kg, 相比于塞棒不旋转情况下, 减少的残钢量为 2082 kg。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：52004191）和中国博士后科学基金项目（项目号：2022M711120）以及武汉科技大学高性能计算中心的支持。

## 参考文献

- [1] 李海峰. 自由表面旋涡的机理研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [2] Gupta A, Kumar R, Singh R K. Assessment of critical vortexing height to prevent slag entrapment during tundish teeming[J]. *Metals and Materials International*, 2022, 28: 1246-1256.
- [3] 郭卓. 多流连铸中间包内涡流特性的数理模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [4] Ruan Y, Yao Y, Shen S, et al. Physical and mathematical simulation of surface-free vortex formation and vortex prevention design during the end of casting in tundish[J]. *Steel Research International*, 2020, 91(6): 1900616.
- [5] 赵鹏. 连铸中间包最低停浇液位的研究与分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [6] WANG Q, WANG L, LI H, et al. Suppression mechanism and method of vortex during steel teeming process in ladle[J]. *Acta Metall Sin*, 2017, 54(7): 959-968..