

## 中间包内衬冲蚀及夹杂物生成和演化的研究

王强<sup>1, 2\*</sup>, 谭憧<sup>1, 2</sup>, 贺铸<sup>1, 2</sup>, 李光强<sup>1, 2</sup>, 李亚伟<sup>1, 2</sup>, 王强<sup>3</sup>

1 武汉科技大学耐火材料与冶金省部共建国家重点实验室, 湖北武汉, 430081;

2 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北武汉, 430081;

3 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁沈阳, 110819

### Numerical Simulation on Refractory Flow-Induced Erosion and Inclusion

#### Formation in Continuous Casting Tundish

Wang Qiang<sup>1, 2, \*</sup>, Tan Chong<sup>1, 2</sup>, He Zhu<sup>1, 2</sup>, Li Guangqiang<sup>1, 2</sup>, Li Yawei<sup>1, 2</sup>, Wang Qiang<sup>3</sup>

1 The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Hubei Wuhan China, 430081;

2 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Hubei Wuhan China, 430081;

3 Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Liaoning Shenyang China, 110819

## 1. 前言

连铸中间包作为连接钢包和结晶器重要的冶金容器, 将钢液以设计的流量和温度平稳地运输给结晶器。在钢液流经中间包时, 内衬受到高温钢液的持续冲刷, 引起耐火材料的开裂和剥落, 形成非金属夹杂物进入钢液, 降低了钢液洁净度。此外, 随着连铸拉速的提高, 中间包内钢液的运动越来越剧烈, 增加了钢液与中间包内衬之间的剪切应力, 促进了耐火材料的冲蚀及夹杂物的生成, 严重恶化了钢液的洁净度。

为了探究因高温钢液流动而引起的中间包内衬耐火材料剥落形成夹杂物的现象, 本文拟建立三维非稳态流固耦合数学模型, 解析钢液在中间包内的流动和传热。利用壁面切应力和总压分布计算夹杂物的生成位置、粒径和质量流量, 然后采用欧拉—拉格朗日方法追踪夹杂物在中间包内的运动轨迹。不同于以往采用的夹杂物理想吸附边界条件, 本文利用夹杂物的雷诺数作为其在钢渣界面是否被吸附的判据。

## 2. 数学模型

模型假设: (1) 计算区域取中间包内流体区域的一半; (2) 考虑流体和固体两个区域, 其中流体区域只考虑钢液; (3) 钢液为不可压缩牛顿流体, 考虑密度、导热系数和粘度随温度的变化, 其余物性参数为常数<sup>[1]</sup>; (4) 夹杂物看作非球形绝热惰性粒子; (5) 流入中间包的钢液不含夹杂物<sup>[2]</sup>; (6) 忽略化学反应。

本模型中包括耐火材料固体区域和钢液流体区域。描述钢液流动和传热的基本方程包括连续性方程、动量方程和能量方程。至于钢液的湍流运动, 则采用大涡模拟的方法求解<sup>[3]</sup>, 配合使用 WALE 亚格子模型解析其中的小尺度脉动<sup>[4]</sup>。使用导热方程描述耐火材料的温度分布。在流固界面使用耦合边界条件完成动量和热量的传递。

当钢液冲击至耐火材料壁面时, 会导致固体区域产生形变, 其形变位移可用如下动量方程求解<sup>[5]</sup>:

$$-\rho_r \underline{a} + \frac{E}{1+\nu} \nabla \cdot \left[ \frac{\nu}{1-2\nu} \text{tr}(\underline{\nabla u}) \underline{I} + \frac{1}{2} (\underline{\nabla u} + (\underline{\nabla u})^T) \right] = 0 \quad (12)$$

式中,  $\rho_r$  为耐火材料密度,  $\underline{a}$  为钢液加速度,  $E$  为耐火材料杨氏模量,  $\nu$  为耐火材料泊松比,  $\underline{u}$  为耐火材料位移矢量。

依据壁面切应力和总压分布, 可以得到由耐火材料剥落产生的外来夹杂物的形成速率:

$$w_{wss} = k_{wss} \left( \frac{\tau}{\tau_{ref}} \right)^{1/3} \quad (13)$$

$$w_{tp} = g(\theta) W_{90} \quad (14)$$

$$g(\theta) = (\sin \theta)^{n1} [1 + \text{Hv}(1 - \sin \theta)]^{n2} \quad (15)$$

$$W_{90} = k_p (\text{Hv})^{-0.12} \left( \frac{P_t}{P_{iref}} \right)^{k1} \quad (16)$$

$$n1 = 0.71(\text{Hv})^{0.14}, n2 = 2.4(\text{Hv})^{-0.94}, k1 = 2.3(\text{Hv})^{0.038} \quad (17)$$

式中,  $w_{wss}$  为由壁面切应力决定的夹杂物形成速率<sup>[6]</sup>,  $k_{wss}$  为与温度相关的系数,  $\tau$  为壁面切应力,  $w_{tp}$  为由总压决定的夹杂物形成速率<sup>[7]</sup>,  $\theta$  为钢液与耐火材料壁面的碰撞角度,  $\text{Hv}$  为耐火材料的维氏硬度,  $P_t$  为总压。夹杂物的质量流量  $\dot{m}_p$  和粒径  $d_p$  分布则为<sup>[8]</sup>:

$$\dot{m}_p = \rho_r A (w_{wss} + w_{tp}) \quad (18)$$

$$d_p = d_{pref} \frac{w_{wss} + w_{tp}}{w_{ref}} \quad (19)$$

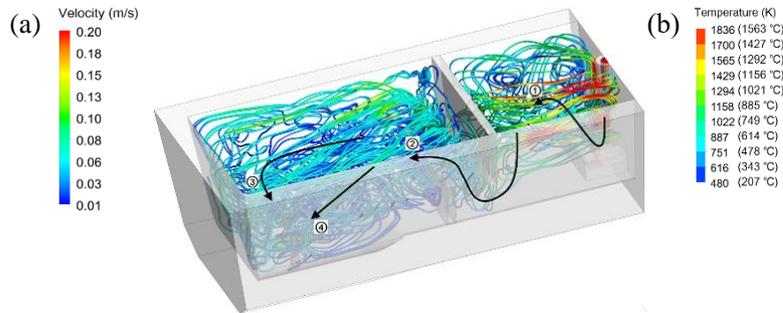
根据牛顿第二定律, 夹杂物在钢液中的运动行为可用如下方程描述:

$$\rho_p \frac{\pi}{6} d_p^3 \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_b + \vec{F}_d + \vec{F}_v + \vec{F}_l \quad (20)$$

式中,  $\rho_p$  为夹杂物密度,  $\vec{v}_p$  为夹杂物速度。上式右边的 5 个力依次为: 重力、浮力、曳力、虚拟质量力和升力。此外, 模型还采用了随机游走模型考虑湍流脉动对夹杂物速度的影响, 以及夹杂物之间的碰撞合并。以上方程的具体形式和边界条件详见参考文献<sup>[9]</sup>。

### 3. 结果与讨论

图 1(a)显示的是 500 s 时中间包内钢液流线分布。钢液经长水口流入湍流抑制器内, 然后向上运动至第一个内腔, 流经堰和坝到第二个内腔, 之后的钢液分为两个流股, 其中一个流股从下部直接流向出口, 形成明显的短路流, 另一个流股则是先流经表面再向下运动至出口处。图 1(b)为同一时刻竖直面上的温度分布。耐火材料外围壁面的平均温度为 207 °C, 实际测量温度为 216 °C, 两者吻合的较好。



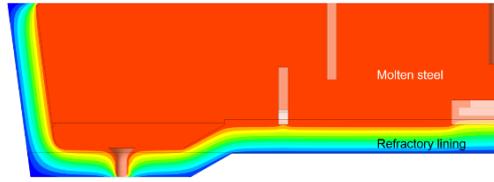


图 1. 500 s 时中间包内钢液流动和传热: (a)流线; (b)中心竖直面上温度分布

Figure 1. Flow and heat transfer in tundish at 500 s (a) 3D flow streamlines (b) temperature on the middle longitudinal section

图 2 分别表示 500 s 时中间包内壁由壁面切应力决定的磨损速率分布和由总压决定的磨损速率分布。可以看到，由总压决定的磨损速率的最大值为  $8.74 \times 10^{-2}$  mm/h，而由壁面切应力决定的磨损速率最大值仅为  $6.67 \times 10^{-2}$  mm/h，而且由总压决定的磨损速率普遍要大于由壁面切应力决定的磨损速率。这就说明对于中间包内衬耐火材料来说，由钢液冲击造成的磨损要比由钢液流动摩擦造成的磨损更为严重。

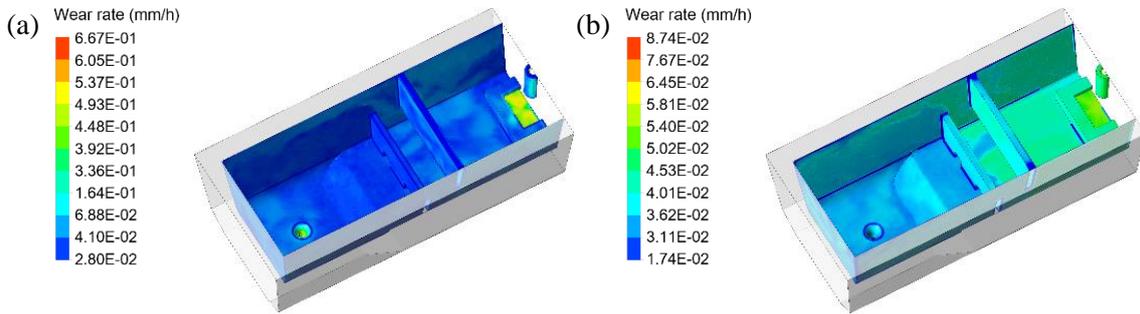


图 2. 500 s 时的磨损速率分布: (a) 壁面切应力引起; (b) 总压引起

Figure 2. Distribution of the wear rate on the entire internal refractory wall at 500 s: (a) caused by the wall shear stress; (b) caused by the total pressure

图 3 展示的是由于耐火材料剥落而形成的夹杂物的初始位置及粒径分布。可以看到，夹杂物主要在长水口内壁和湍流抑制器底部形成，初始粒径在  $13 \sim 35 \mu\text{m}$  范围内。夹杂物形成后随即跟随着钢液一起运动，从长水口内壁脱落，进入到湍流抑制器，与湍流抑制器内的新生夹杂物发生碰撞聚并，夹杂物粒径增长至  $82 \mu\text{m}$ ，然后随着钢液一起上涌，进入到第一个内腔。

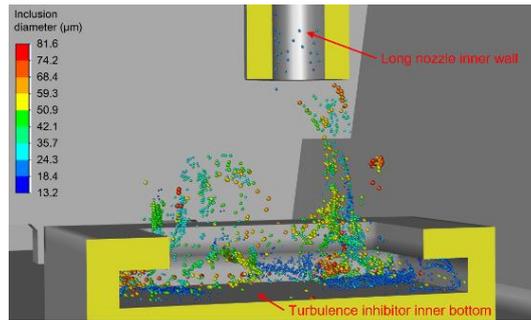


图 3. 由耐火材料剥落形成的夹杂物的位置和粒径分布

Figure 3. Inclusion formation and distribution in the long nozzle and turbulent inhibitor

图 4 为中间包内壁不同部位新生成夹杂物的质量流量随时间的变化。由于湍流的作用，且计算中使用了大涡模拟，新生成夹杂物的质量流量一直是在波动的，但时均值还是比较稳定。生成夹杂物最多的地方是在湍流抑制器底部，然后是长水口内壁，其余部位形成的夹杂物数量很少。夹杂物形成之后在浮力作用下向钢液顶面运动，在 100 s 左右，到达第一个内腔中的钢液顶面的夹杂物数量迅速增加，然后在 350 s 左右，达到第二个内腔中的钢液顶面的夹杂物数量开始逐渐增加。

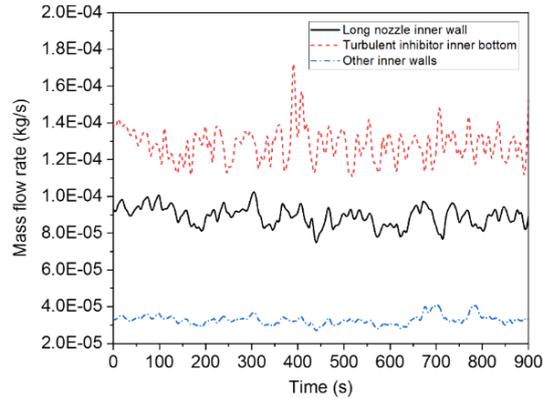


图 4. 中间包内壁不同部位新生夹杂物的质量流量

Figure 4. Evolution of mass flow rates of the newly formed inclusions at the long nozzle inner wall, turbulent inhibitor inner bottom, and other inner walls of the tundish

当夹杂物与钢液顶面接触后，如果雷诺数小于判断阈值，则认为夹杂物被吸附去除。从图 5 中可以看到，在由耐火材料剥落而形成的夹杂物当中，在长水口内壁产生的夹杂物数量占比 38%，在湍流抑制器底部产生的夹杂物数量占比 49%，而其余部位只产生了 13% 的夹杂物。从夹杂物去除方面来看，新生夹杂物总体去除率为 80%，这其中 78% 的新生夹杂物去除是发生在第一个内腔中的钢液顶面，22% 的新生夹杂物去除是发生在第二个内腔中的钢液顶面。

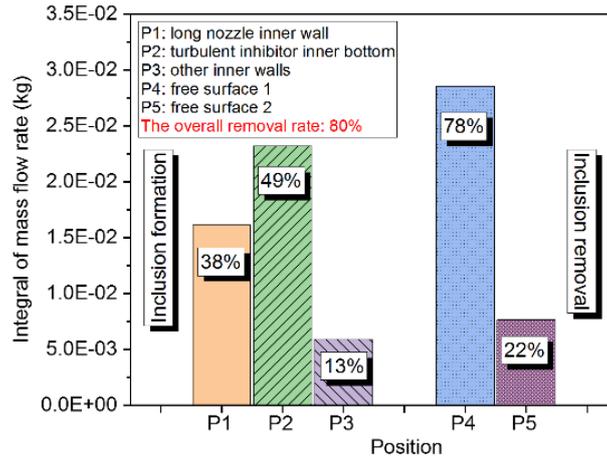


图 5. 中间包内夹杂物生成与去除情况

Figure 5. Mass distribution of newly generated and trapped inclusions

## 4. 结论

为了探究高温钢液对中间包内衬耐火材料的冲刷及夹杂物的生成与去除规律，本文建立了三维非稳态流固耦合数学模型，解析钢液在中间包内的流动和传热。利用壁面切应力和总压分布计算夹杂物的生成位置、粒径和质量流量，然后采用欧拉—拉格朗日方法追踪夹杂物在中间包内的运动轨迹。主要结论如下：

(1) 钢液对中间包内衬耐火材料的物理损毁可以分为冲击和摩擦两种来源，其中冲击作用可用总压来表征，摩擦作用可用壁面切应力来衡量。对于中间包而言，由于钢液冲击作用造成的耐火材料损毁要比由于钢液摩擦作用造成的耐火材料损毁更为严重。

(2) 在长水口内壁产生的新生夹杂物数量占比 38%，在湍流抑制器底部产生的新生夹杂物数量占比 49%，而其余部位只产生了 13% 的新生夹杂物。

(3) 当拉速为 1.2 m/min 时，新生夹杂物总体去除率为 80%，其中 78% 的新生夹杂物去除是发生在第一个内腔中的钢液顶面，22% 的新生夹杂物去除是发生在第二个内腔中的钢液顶面。

## 致谢

感谢国家自然科学基金委钢铁联合基金重点项目（项目号：U1860205）的支持。

## 参考文献

- [1]. Harmuth H, Xia G M, Interaction Steel/Slag/Submerged Entry Nozzle and its Impact on Refractory Wear - Thermochemical Process Simulation[J]. ISIJ International, 2015, 55(4): 775-780.
- [2]. Wang Q, Liu Y, Huang A, Yan W, Gu H Z, Li G Q, CFD Investigation of Effect of Multi-hole Ceramic Filter on Inclusion Removal in a Two-Strand Tundish[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51B(1): 276-292.
- [3]. Liu Z Q, Vakhrushev A, Wu M, Kharicha A, Ludwig A, Li B K, Scale-Adaptive Simulation of Transient Two-Phase Flow in Continuous-Casting Mold[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50B(1): 543-554.
- [4]. Liu Z Q, Wu Y D, Li B K, An assessment on the performance of sub-grid scale models of large eddy simulation in modeling bubbly flows[J]. Powder Technology, 2020, 374: 470-481.
- [5]. López A, Stickland M T, Dempster W M, CFD study of fluid flow changes with erosion[J]. Computer Physics Communications, 2018, 227: 27-41.
- [6]. Xie D S, Garlick C, Tran T, The wear of tundish stopper refractories by inclusion slags[J]. ISIJ International, 2005, 45(2): 175-182.
- [7]. Iwamasa P K, Caffery G A, Warnica W D, Alias S R, Modelling of Iron Flow, Heat Transfer, and Refractory Wear in the Hearth of an Iron Blast Furnace[C], International Conference on CFD in Mineral & Metal Processing and Powder Generation, CSIRO, 1997, 285-296.
- [8]. Luz A P, Leite F C, Brito M A M, Pandolfelli V C, Slag conditioning effects on MgO-C refractory corrosion performance[J]. Ceramics International, 2013, 39(7): 7507-7515.
- [9]. Wang Q, Tan C, Huang A, Yan W, Gu H Z, He Z, Li G Q, Numerical simulation on refractory wear and inclusion formation in continuous casting tundish[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52B(3): 1344-1356.