

旋流浸入式水口内气泡去除夹杂物的数值模拟研究

张霖，谭敏，李涛*，高爱民

华北理工大学冶金与能源学院，唐山 063210

Numerical Simulation on Inclusion Removal by Bubbles in the Submerged Entry Nozzle with Swirling Flow

Zhang Lin, Tan Min, Li Tao*, Gao Aimin

College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, 063210,
China

1. 前言

我国是世界钢铁大国，但我国高端钢产品质量不稳定。在“碳达峰、碳中和”的战略目标背景下，我国钢产品由量到质的转型迫在眉睫，钢中夹杂物的控制是提升我国钢产品质量稳定性的关键问题。随着对钢材洁净度要求的提高，夹杂物控制已成为洁净钢生产的关键技术。

钢液在中间包和结晶器中的流动行为对钢液中夹杂物的去除有重要影响。中间包是钢液进入结晶器凝固成铸坯之前的关键冶金环节，是钢中夹杂物去除的重要设备。因此，充分发挥中间包的冶金功能，高效去除夹杂物是中间包冶金的重要任务。在连铸过程中，可以通过优化中间包结构^[1-2]、使用合理的湍流控制器^[3-4]和控流装置^[5-6]来改善钢液流动行为，以达到延长钢液平均停留时间并提高活塞流体积积分数的目的，有利于夹杂物的上浮去除。此外，中间包吹氩技术^[7-8]也被广泛应用于夹杂物的去除，不仅可以优化钢液的流动路径，且弥散的气泡与夹杂物发生碰撞并粘附其上浮，提高了夹杂物的去除率。

本论文设计了一种新的旋流发生器，安装在中间包浸入式水口入口附近，利用钢液重力势能驱动钢液在浸入式水口内产生旋流。本论文采用 ANSYS Fluent 软件中流体体积法模型与离散相模型对旋流场中气泡对夹杂物的捕获去除行为进行了数值模拟。旋流场内夹杂物与气泡受到压力梯度力与质量力的综合影响，压力梯度力有利于气泡和夹杂物向中心移动，有利于钢液中夹杂物的去除。然而，目前很少有模型探究旋流场中气泡去除夹杂物的机理。因此，分析旋流场中夹杂物与气泡的相互作用，对于建立夹杂物去除模型和探究夹杂物去除规律有重要意义。本文研究了带有旋流发生器中间包的浸入式水口中夹杂物颗粒与气泡之间的相互作用，并利用 UDF 来模拟夹杂物与气泡之间的碰撞过程。研究了不同尺寸夹杂物和气泡在浸入式水口内的运动趋势和分布，调控夹杂物和气泡同步向心运动，探索不同尺寸的夹杂物去除率，提升气泡附着夹杂物的几率，实现旋流场高效去除钢中夹杂物。

2. 数值模型

2.1. 几何模型

图 1 所示为 ANSYS SpaceClaim 构建的中间包几何模型，中间包的结构和部件完全按照工业中间包进行设计，包括一个湍流抑制器、两个挡坝和四个堰。旋流发生器是一个圆柱形涡轮，安装在浸入式水口上方和塞棒下方，在图 1 中以粉色显示。本文中装有旋流发生器的中间包被命名为旋流中间包，且所有模型中坐标系原点位置均在浸入式水口出口的中心位置。

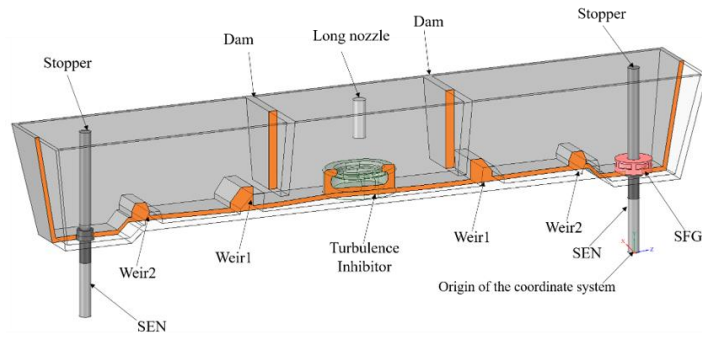


图 1 旋流中间包几何模型结构

Fig. 1 Structure of tundish with SFG geometric model

2.2. 模型网格

采用 ANSYS Mesh 软件划分模型网格。为了提高模型的计算精度，对气泡所在的浸入式水口区域进行尺寸控制，确保能够准确捕捉氩气泡的生成和分布。同时，对模型边界处的网格进行加密，避免数值模拟的残差过大，造成计算失准。中间包整体模型的网格数约为 550 万。

2.3. 边界条件设置

该中间包由入口、出口及壁面组成，中间包中所有的固体壁面均设为壁面边界条件。为了观察中间包顶面的流场，中间包内钢液顶面设置为无剪切力的自由液面。表 1 总结了当前模型中 DPM 所使用的边界条件。

表 1 当前模型中边界条件

Table 1 Boundary Conditions in the current model

边界	边界条件	DPM 边界条件
入口	速度进口	反射
中间包顶面	剪切力为 0 的壁面边界	逃逸
中间包侧壁	固定壁面	反射
中间包底面	固定壁面	反射
水口侧壁	固定壁面	反射
出口	压力出口	逃逸

2.4. 夹杂物去除模型

基于 UDF 二次开发技术，模拟了气泡和夹杂物在浸入式水口内的运动和相互作用。在自定义 UDF 程序中，利用 UDF 中的 DPM_SCALAR_UPDATE 宏更新与存储粒子信息，同时利用 THREAD_SUB_THREAD 宏确定混合域中需要的相（氩气），对浸入式水口每个网格内氩气的体积分数进行判定。当体积分数大于等于 0.5 时，认为在该网格内的夹杂物与气泡之间形成了稳定的附着，夹杂物均被气泡捕捉并去除。整个去除过程的模拟时间是从夹杂物注入开始至夹杂物随钢液由浸入式水口底面出口流出。

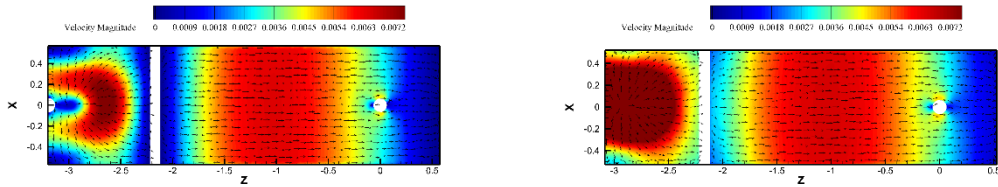
2.5. 夹杂物分布的统计方法

将浸入式水口沿横向与纵向共划分为 20 个区域，统计各个区域内夹杂物的数量，分析浸入式水口内夹杂物的运动及去除情况。利用 UDF 程序统计流口水口的夹杂物数量，进而实现对所有夹杂物的追踪，减少因遗漏造成的对去除率计算的影响，大大提升了气泡捕获夹杂物去除过程模拟的准确性。

3. 结果与分析

3.1. 中间包的流动模式

图 2 为旋流中间包顶面的速度云图，可以发现旋流发生器的应用对中间包顶部的流场影响不大，但对中间包下部的流场有显著影响。通过中间包内水平面的速度分布，可以推测：引入旋流发生器后，不会引起中间包液面较大波动，产生夹渣的可能性较小。这对旋流发生器在传统中间包的应用有重要意义。下图中 $y=2196$ 平面为中间包的顶面， $y=1800$ 平面为中间包长水口底面所在平面。



(a)中间包 $y=2196$ 平面速度云图

(b)中间包 $y=1800$ 平面速度云图

图 2 中间包的速度分布

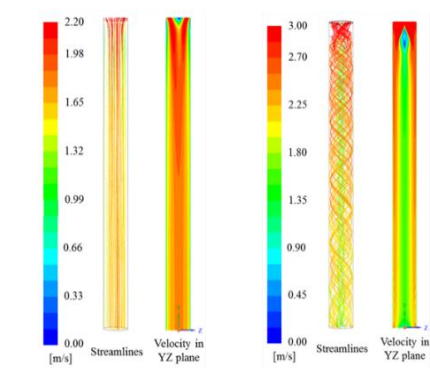
Fig. 2 Velocity distribution in the tundish

3.2. 钢水在浸入式水口中的流动特性

图 3 为浸入式水口中钢水的流动特性，可以看出传统中间包中钢水直接流出水口，旋流发生器的存在使钢水在浸入式水口中呈螺旋状流动，这表明旋流发生器在浸入式水口中可以产生强烈的旋转流动。通过速度云图可得：在传统中间包中，浸入式水口中心区域出现了较高的速度，而在旋流中间包中，高速区域位于浸入式水口壁面附近，且随着距中间包底部距离的增大，速度逐渐减小。旋流中间包中钢液的速度高于传统中间包中钢液速度，可以有效避免浸入式水口的堵塞。

3.3. 浸入式水口中夹杂物的分布

图 4 显示了浸入式水口中不同尺寸夹杂物的分布。由图可知，夹杂物随钢液进入浸入式水口后会随钢水一起流动，其运动路径呈螺旋状。从顶视图可以看出，随着夹杂物尺寸增大，浸入式水口中心区域夹杂物数量较少，夹杂物逐渐向壁面附近移动。旋流中夹杂物向心/离心运动趋势取决于压力梯度产生的向心力与离心力的平衡，其运动趋势取决于旋流场中的压力梯度分布、流体密度、速度以及夹杂物的形态、尺寸、密度等特性。由此可以推测，旋流发生器可以使小的夹杂物颗粒向中心移动，此时压力梯度产生的向心力可抵抗离心力，有助于夹杂物之间的碰撞、长大和气泡粘附。



(a)传统中间包

(b)旋流中间包

图 3 浸入式水口内钢液流动特性

Fig. 3 Flow characteristics in the SEN

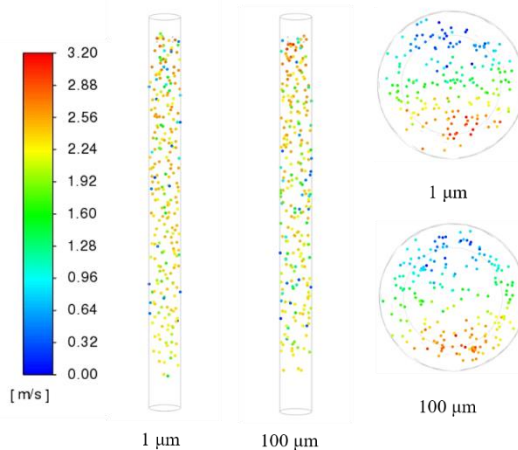


图 4 夹杂物粒子的分布

Fig. 4 Trajectories of inclusion particles in SEN

3.4. 浸入式水口中夹杂物的去除

在旋流中间包中测试不同尺寸夹杂物的去除率，从图 5(a)中发现，夹杂物尺寸越小，夹杂物去除率越高，但不同尺寸去除率差值并不大；图 5(b)中黑色、红色线条分别表示各个时间点下不同尺寸夹杂物的去除率，蓝色线条表示夹杂物去除率的差值。可以发现随着时间的增加，小尺寸与大尺寸夹杂物的去除率差值逐渐增大。

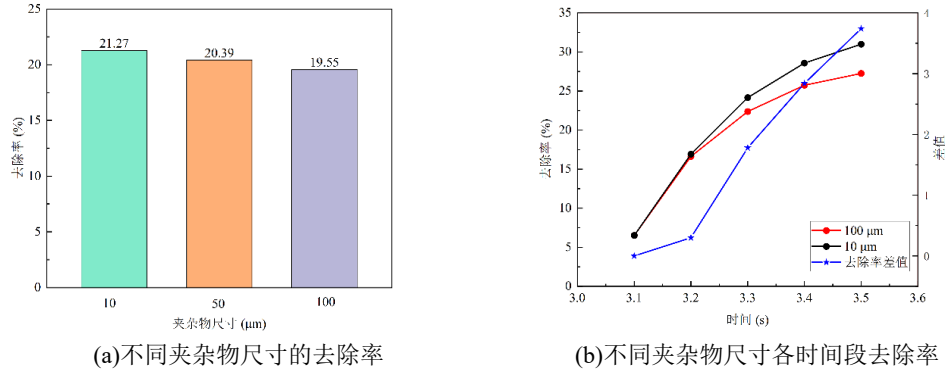


图5 夹杂物去除率

Fig. 5 Inclusion removal rate

4. 结论

在本研究中，在双流中间包基础上设计了一种新型旋流发生器，该装置包括六个叶片引导钢水产生旋转流动，在浸入式水口中将钢液的重力势能转化为旋转动能，利用 VOF 与 DPM 模型和自行开发的 UDF 程序研究了旋流场中氩气泡对夹杂物颗粒的去除行为：

(4) 旋流发生器的应用不会引起中间包中钢水流动模式的显著变化，不会导致中间包顶面产生较大的波动，不易产生液面剧烈波动卷入渣滴或钢液裸露进而钢水二次氧化的现象；

(5) 旋流发生器的应用，会在浸入式水口中产生强烈的、稳定的旋流，可有效地降低浸入式水口结瘤程度。且有旋流发生器中间包的浸入式水口中钢液速度高于传统中间包；

(6) 旋流发生器中产生的旋流可使钢水中夹杂物向中心移动，且小尺寸夹杂物更为明显，有利于夹杂物的生长和气泡粘附，通过对比各个时间段下夹杂物去除率发现，小尺寸夹杂物去除率更高。

参考文献

- [1] 刘崇林, 崔衡, 李源源, 等. 双流板坯中间包结构优化的数理模拟研究[J]. 冶金设备, 2019, 253(4): 12-16.
- [2] Khan M F, Hussian A, Usmani A Y, et al. Multiphase Flow Modeling of Molten Steel and Slag Flow for Different Tundish Configurations[J]. Materials Today-Proceedings, 2018, 5(11): 24915-24923.
- [3] Fang Q, Zhang H, Luo R H, et al. Optimization of Flow, Heat Transfer and Inclusion Removal Behaviors in an Odd Multistrand Bloom Casting Tundish[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(1): 347-363.
- [4] Cwudzinski A. Numerical and Physical Modeling of Liquid Steel Active Flow in Tundish with Subflux Turbulence Controller and Dam[J]. Steel Research International, 2014, 85(5): 902-917.
- [5] Kumar A, Mazumdar D, Korla S C. Modeling of Fluid Flow and Residence Time Distribution in Four-Strand Tundish for Enhancing Inclusion Removal[J]. ISIJ International, 2008, 48(1): 38-47.
- [6] 邹涛, 康旭, 屈乐欣, 等. 单流中间包控流装置优化的水模型试验与应用[J]. 炼钢, 2019, 35(5): 43-49.
- [7] Holzinger G, Thumfat M. Flow Interaction in Continuous Casting Tundish due to Bubble Curtain Operation[J]. Steel Research International, 2019, 90(6): 1800642.
- [8] Chang S, Zhong L C, Zou Z S. Simulation of Flow and Heat Fields in a Seven-Strand Tundish with Gas Curtain for Molten Steel Continuous-Casting[J]. ISIJ International, 2015, 55(4): 837-844.