

旋流钢包长水口对夹杂物去除的数值模拟研究

王宏婧, 唐国章, 张霖, 谭敏, 谷少鹏, 李涛*

华北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063210

Numerical Simulation of Inclusion Removal at Long Nozzle of Swirl Ladle

Wang Hong Jing, Zhang Lin, Li Tao *

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

1. 前言

钢铁在社会经济发展中具有至关重要的作用。然而,我国高端钢产品质量不稳定,大量钢材依赖进口,夹杂物控制是提升我国钢产品质量稳定性的关键问题。因此,目前冶金工作者提出众多方法与技术促进非金属夹杂物的去除并提高夹杂物去除率,为生产高品质洁净钢提供有效途径。

连铸过程中钢液在容器内的流动行为对提高钢液中夹杂物的去除率有至关重要的作用。钢包长水口作为连接钢包与中间包的重要设备,钢液在长水口的流动行为很大程度上影响着钢中夹杂物的去除率。连铸过程中优化水口结构^[1]有利于结晶器或中间包内钢液流动状态的改善,钢液的合理流动可获得最佳的冶金效果。例如在钢包长水口内安装螺旋状导轨^[2]或旋流沟槽^[3]有利于促进夹杂物的碰撞长大和上浮去除。Yan通过在钢包长水口的下部^[4]或浸入式水口的上部^[5]安装带有螺旋沟槽的圆柱形旋流发生装置来实现钢液的旋转流动,以改善钢液流动状态并提高铸坯质量,旋流装置的应用有利于钢液旋转使夹杂物向中心聚集,促进夹杂物聚合长大,提高夹杂物去除率。

本论文设计了一种新型钢包旋流发生装置,将钢包长水口分为两段,即旋流发生段和竖直段。钢液经旋流发生段产生旋流并在竖直段内继续旋转向下流动。在实际的连铸过程中,长水口进入中间包的钢液冲击力很大,容易造成液面波动产生卷流,导致钢液被二次氧化。同时钢液中有夹杂物的存在,流经钢包长水口时,夹杂物容易在长水口的耐火材料表面发生沉积从而产生水口结瘤,影响长水口使用寿命。目前,在钢包长水口中产生旋流是一种有效的维持中间包内液面稳定,并改善夹杂物运动状态的方法。本论文采用 ANSYS Fluent 软件中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。利用钢液在旋流装置内的重力势能转化为湍流动能,促进夹杂物聚合长大和上浮去除。目前有多种方法可在长水口中产生旋流,如在长水口中添加导流叶片、设置电磁感应装置等。但导流叶片容易发生破损,叶片寿命较短;电磁装置则需要消耗电能,设备成本会大幅增加。本论文针对现有技术存在的上述问题,提供更利于在长水口中产生旋转流动的钢包旋流发生装置,通过控制旋流槽尺寸、个数和旋转周数来比较长水口中的旋流强度,并利用 ANSYS Fluent 软件探究旋流发生装置下钢液流动状态及夹杂物去除率,进一步提升钢中夹杂物的去除效率。

2. 数值模型

2.1. 几何模型

图 1 所示为 ANSYS SpaceClaim 构建的钢包长水口几何模型,模型主要由上、中、下三个部分组成。模型上方为钢包、中间为钢包长水口(包含旋流发生装置)、下方为中间包冲击区,在图 1 中,旋流发生装置以粉色显示,该旋流装置高度为 223.5 mm,倾斜角度为 15°。旋流槽个数为 4 个,旋流槽尺寸为 20*15 mm。

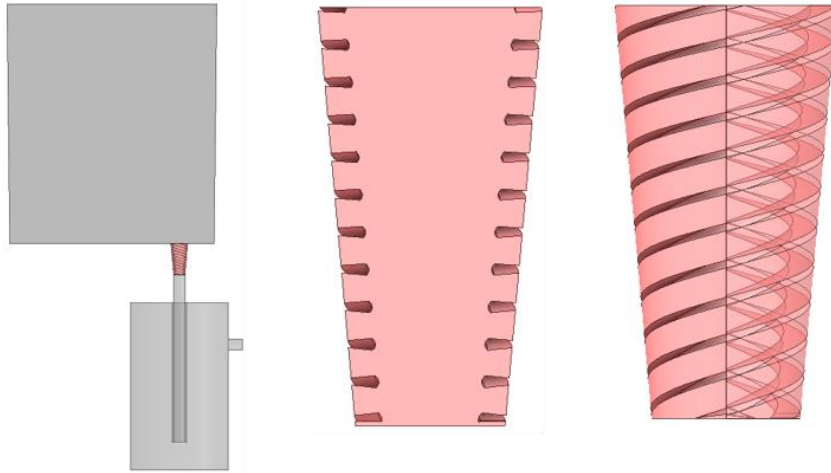


图 1 旋流长水口几何模型结构

- Fig. 1 Structure of Ladle cyclone generator with geometric model

2.2. 模型网格

采用 Fluent-Meshing 软件划分模型网格。为了提高模型的计算精度，对旋流发生装置进行局部加密，避免因网格过大造成的模拟数值失真。该模型网格总数约为 330 万。

2.3. 边界条件设置

该模型由钢包、长水口及中间包冲击区三部分组成，模型中所有固体壁面均设为壁面边界条件。中间包冲击区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 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	速度入口	反射
钢包壁面	固定壁面	反射
旋流水口壁面	固定壁面	反射
中间包冲击区顶面	固定壁剪切力为 0 的壁面边界面	反射
中间包冲击区壁面	固定壁面	反射
中间包冲击区底面	固定壁面	反射
出口	压力出口	捕获

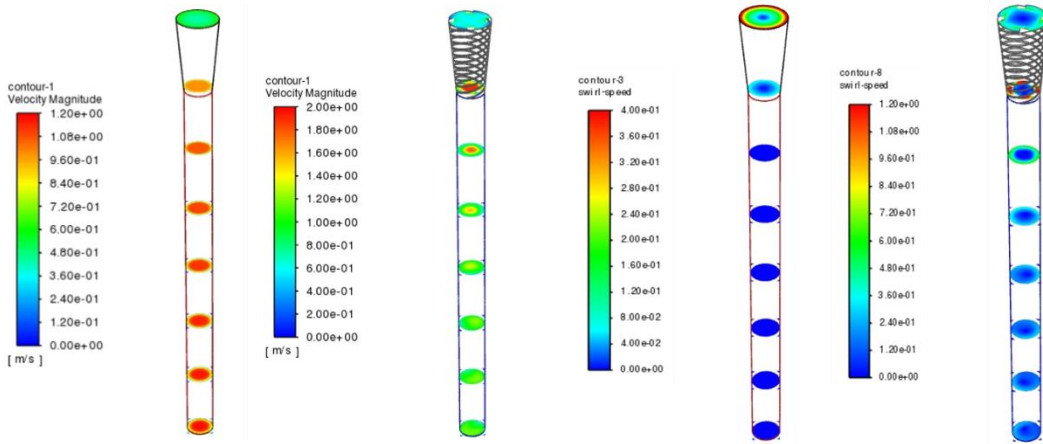
2.4. 夹杂物分布的统计方法

将钢包长水口沿纵向与横向共划分为 24 个区域，利用自定义 UDF 程序了解夹杂物的运动状态并统计各区域夹杂物数量，通过对比各区域夹杂物数量进而计算夹杂物去除率，实现气泡捕获夹杂物全过程追踪。

3. 结果与分析：

3.1. 钢液在旋流长水口内流动特征

图 2(a) 为有无旋流装置时钢液速度云图，(b) 为有无旋流装置时自定义速度云图，通过图(a)可以发现，有旋流装置时钢液速度明显大于无旋流装置，由此可以推测，旋流装置可将钢液重力势能转换为旋转动能，长水口内钢液速度增大，可促进夹杂物向水口中心聚集，进而促进夹杂物聚合长大，从而达到更好去除钢中夹杂物的目的。



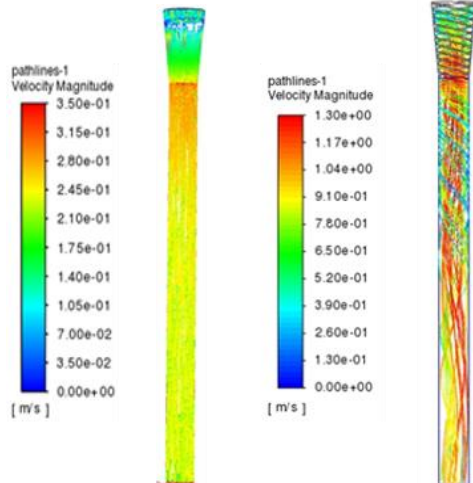
(a)有无旋流装置长水口内速度云图 (b)有无旋流装置长水口内自定义速度云图

图 2 钢液在长水口中速度分布

Fig. 2 Velocity distribution of liquid steel in long nozzle

3.2. 钢包长水口中夹杂物的分布

图 3 为钢液在长水口中的流动特性,观察钢液速度流线图可知钢液在传统长水口中是竖直向下运动的,而在旋发生装置中,长水口中钢液呈螺旋状向下流动。通过对结果分析可知,钢液在长水口顶部速度最大,且随着距长水口底部距离的增加,速度逐渐衰减;但有旋流发生装置的钢液在长水口同一位置处速度明显高于无旋流装置,这表明:旋流发生装置可以使重力势能转化为旋转动能,钢液湍动能耗散率较高,为夹杂物的有效去除提供了优越的条件。



(a)传统长水口 (b)旋流长水口

图 3 钢包长水口内钢液流动特性

Fig. 3 Flow characteristics in the SEN

3.3. 旋流钢包水口中夹杂物的去除

图 4 为有无旋流发生装置时不同高度的图,在 Fluent 中选取四条不同高度的线进行 xy-plot 图的绘制,结果表明,没有旋流装置时钢液速度小而均匀,有旋流装置时钢液在旋流装置中速度最大,且钢液速度随着距长水口底部距离的增加而减小。

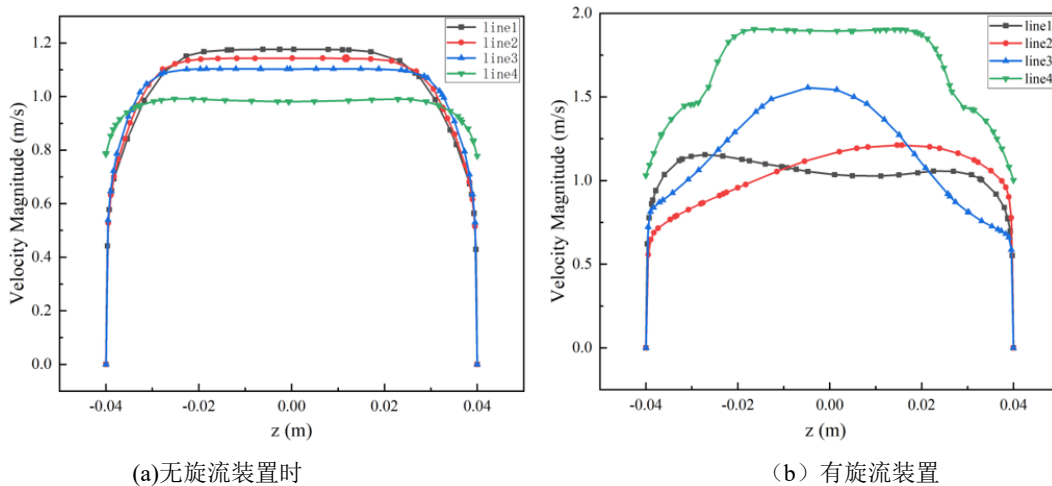


图 4 xy-plot 图中钢液运动速度变化

- Fig. 4 Variation of liquid steel motion velocity in xy-plot

4. 结论

本论文设计了一种新型旋流发生装置，该装置在内壁上分布有多条导流槽，多条导流槽引导钢液在长水口内产生顺时针或逆时针的旋转流动，并继续流入钢包长水口，该旋流发生装置无需额外添加任何设备，即可利用钢液自身流动的动能产生旋流。同时利用离散相模型和自行开发的 UDF 程序研究了旋流场中氩气泡对夹杂物颗粒的去除行为：

(1) 通过观察钢液的速度云图可知，钢液在有旋流装置的长水口中速度明显高于在无旋流装置的长水口在同一位置中速度，由此可知，旋流装置可以促进钢中夹杂物向水口中心旋转流动，促使夹杂物向聚合长大，从而达到更好去除钢中夹杂物的目的；

(2) 通过对比有无旋流发生装置时钢液在长水口中的流动特性可知，旋流发生装置可以实现钢液的旋转流动，钢液湍动能耗散率较高，为夹杂物的有效去除提供了优越的条件。

参考文献

- [1] 邹涛, 战东平, 张慧书, 李大亮, 韩建林, 刘西峰. 板坯连铸结晶器水口优化数理试验研究[J]. 钢铁研究学报, 2020, 第 32 卷 (4): 304-310
- [2] 李德伟, 王强, 朱晓伟, 吴春雷, 丸川雄净, 赫冀成. 一种连铸用自旋流长水口[P]. 中国专利: CN208322097U, 2019.01.04
- [3] 程常桂, 张春明, 李阳, 秦绪锋, 位士发, 张金磊, 金焱. 一种连铸中间包用旋流上水口[P]. 中国专利: CN108247033A, 2018.07.06
- [4] Jianchuan Yan; Tao Li; Jun Liu. Numerical Simulation of Inclusion Removal in a Novel Tundish with Swirl Flow[J]. 10th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, 2019: 39-50
- [5] Yan, Jianchuan; Li, Tao; Yang, Shufeng; Shang, Zhiqiang; Tan, Min. Numerical Study on the Effect of a Novel Swirling Flow Generator for Submerged Entry Nozzle in Tundish. [J]. Steel Research International, 2020, 91(6): 1-9
- [6] Kumar A, Mazumdar D, Koria 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.